



منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

طاقة الرياح (2)

الدكتور

غيث هاشم ورقوزق

أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الدكتور

هاشم صدقي ورقوزق

أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

1444-1445 هـ

2022-2023 م

جامعة دمشق



طاقة رياح (2)

لطلاب السنة الخامسة (هندسة الطاقة المتجددة)





منشورات جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

طاقة الرياح (2)

الدكتور

غيث هاشم ورقوزق

أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

الدكتور

هاشم صدقي ورقوزق

أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

هـ 1445-1444

م 2023-2022

جامعة دمشق



Contents

9	مقدمة الكتاب
13	Wind Energy الفصل الأول طاقة الرياح
15	1-1 مقدمة
16	Origin of wind: 2-1 مصدر الرياح
16	3-1 الميزات العامة لطاقة الرياح (المحاسن والمساوئ)
17	Turbine Construction 4-1 مكونات العنفة الريحية
20	Power in the wind 5-1 الطاقة الكامنة في الرياح
20	1-5-1 القوى الإيروديناميكية المطبقة على الشفرات
23	2-5-1 حساب الاستطاعة المتوفرة في الرياح
24	3-5-1 العوامل المؤثرة على الاستطاعة المولدة من العنفة الريحية
28	CP Rotor efficiency 4-5-1 مردود الدائر
31	مثال محلول (1-1)
32	Impact of tower height 5-5-1 تأثير ارتفاع البرج على سرعة الرياح
35	6-5-1 أمثلة محلولة
39	Wind turbine setting 8-5-1 الموقع المناسب لإنشاء العنفة الريحية
40	6-1 منحي الاستطاعة المثالي للعنفة الريحية
41	7-1 التوزع الإحصائي لسرعة الرياح تابع احتمال الكثافة
42	1-7-1 تابع احتمال الكثافة لسرعة الرياح
45	(CF)Capacity Factor 2-7-1 معامل السعة
46	3-7-1 التحليل الاحصائي لبيانات الرياح
62	خاتمة الفصل
65	الفصل الثاني التحكم الميكانيكي والإلكتروني بسرعة العنفات الريحية
67	1-2 التحكم الميكانيكي بسرعة العنفات الريحية
67	Speed Control 1-1-2 طرق تشغيل العنفات الريحية (التحكم بسرعة الدوران)
68	2-1-2 ميزات العمل عند سرعة دوران ثابتة
68	3-1-2 موجبات التحكم بالعنفات الريحية

73	4-1-2 وسائل التحكم الميكانيكي بسرعة العنفات الريحية.....
74	5-1-2 استخدام التحكم بزاوية الشفرات Pitch control
76	6-1-2 استخدام التحكم الثابت: stall control.....
77	7-1-2 التحكم الثابت غير الفعال بالشفرة: (PSC) Passive Stall Control
78	8-1-2 التحكم الثابت الفعال Active stall control
79	2-2 التحكم الإلكتروني بالعنفات الريحية
81	1-2-2 أنظمة تغيير السرعة الإلكترونية في العنفات الريحية
82	2-2-2 العنفات الريحية ذات السرعة الثابتة النموذج (A)
83	3-2-2 العنفات الريحية ذات تغيير السرعة الجزئي باستخدام مقاومة الدائر (نموذج B).....
84	4-2-2 المولدات الريحية ذات السرعة المتغيرة باستخدام مبدل تردد (نموذج C)
85	5-2-2 العنفات الريحية ذات السرعة المتغيرة بمبدلات الكترونية في الثابت (نموذج D)
86	6-2-2 مقارنة بين مختلف طرق القيادة
87	3-2 أثر تغيير السرعة المفاجئ على العزم والاستطاعة في العنفات الريحية
89	4-2 التحكم الأفضل بالعنفات الريحية
90	1-4-2 معدل تغيير التردد (RCF) Rate of Change of Frequency
91	2-4-2 معادلة الاهتزاز Swing Equation
95	الفصل الثالث
95	أنظمة تشغيل العنفات الريحية باستخدام الكترونيات القدرة الكهربائية.....
97	1-3 مقدمة الفصل
97	1-2-3 المبدلات الإلكترونية والعنفات الريحية.....
97	1-2-3 دواعي استخدام أنظمة الكترونيات القدرة الكهربائية في العنفات الريحية.....
100	2-2-3 الاستراتيجيات المعتمدة لاستخدام الكترونيات القدرة الكهربائية في العنفات الريحية
103	3-3 الاستراتيجيات المتداولة للمبدلات المضاعفة الكاملة للتحكم في المولدات التزامنية الريحية
104	1-3-3 المبدلات ذات الجسر غير المقاد كمبدل متناوب – مستمر
106	2-3-3 المبدلات المضاعفة ذات منبع التوتر ذات سويتين.....
107	3-3-3 المبدلات المضاعفة بثلاث سويات (المبدلات ذات ديود التثبيث) ومبدلات متعددة السويات.....
108	4-3-3 استخدام مبدلات مضاعفة بخمس سويات مع جسور تقويم نوع H
109	5-3-3 المبدلات متعددة الخلايا منخفضة التوتر
110	6-3-3 الاستراتيجيات الأخرى للمبدلات ذات التوتر المتوسط.....
112	7-3-3 ربط جسور نوع H على التسلسل مع محول ذو تردد متوسط

113	8-3-3 المبدل متعددة السويات ذو الخلايا
114	4-3 التحكم الاساسي للمبدلات المضاعفة المستخدمة في العنفات الريحية
117	5-3 التحكم بالمبدل المرتبط بالمنوبة
120	5-3 التحكم بالمبدل المرتبط بالشبكة
123	الفصل الرابع
123	المولدات الكهربائية المستخدمة في العنفات الريحية
125	1-4 مقدمة الفصل
126	2-4 دراسة عامة ومقارنة بين المولدات الريحية Comparative Study
126	1-2-4 المولد التحريضي ذو القفص السنجابي
128	2-2-4 الدارة المكافئة للآلة التحريضية
133	3-2-4 العلاقات الناطمة للاستطاعة
136	3-4 منحنى العزم – السرعة Torque – Speed Characteristic
138	4-4 العمل كمولد مستقل
139	1-3-4 التحريض الذاتي للمولد التحريضي
143	2-3-4 تغير التردد وسعة المكثفات وسرعة الدوران
146	4-4 المولد التحريضي ذو الدائر الملفوف مضاعف التغذية
152	5-4 تفصيل آلية عمل المولد التحريضي ذو الدائر الملفوف (مضاعف التغذية)
152	1-5-4 كيف تسري الاستطاعة في الآلة مضاعفة التغذية
153	2-5-4 تشغيل المحرك التحريضي ذي الدائر الملفوف بسرعة تحت التزامن
154	3-5-4 عمل المحرك التحريضي ذي الدائر الملفوف بسرعة فوق التزامن
155	4-5-4 آلية عمل المولد التحريضي ذي الدائر الملفوف
163	6-4 مولد التيار المستمر Direct Current Generator
164	7-4 المولدات التزامنية Synchronous Generator (SG)
164	1-7-4 آلية عمل المولد التزامني والدارة المكافئة
168	2-7-4 سلوك المولدات التزامنية تحت الحمل
176	8-4 المولدات التزامنية ذات المغناطيس الدائمة
177	9-4 المولد ذو الممانعة المتغيرة
181	الفصل الخامس
181	ربط العنفات الريحية على الشبكة العامة وتبادل الاستطاعة
183	1-5 مقدمة

2-5	ربط المزارع الريحية عبر خط نقل بالتيار المتناوب	184
1-2-5	متطلبات الربط على الشبكة العامة Inter face Requirements	189
2-2-5	العمل عند التزامن Synchronous Operation	190
3-2-5	حالات العمل العابرة Load Transient	192
4-2-5	حدود التشغيل Operation Limit	192
5-2-5	تنظيم التوتر Voltage Regulation	193
6-2-5	حد الاستقرار Stability Limit	194
3-5	تبادل الاستطاعة بين منبعين متناوبين	196
4-5	تبادل القدرة عبر شبكات نقل بالتوتر المستمر	205
1-4-5	النقل بالتيار المستمر عالي التوتر	205
2-4-5	مبدأ عمل المبدلات ذات منبع التيار	211
3-4-5	آلية نقل القدرة الكهربائية في خطوط النقل بالتيار المستمر	213
4-4-5	مبدلات منبع التوتر (VSC) Voltage Source Converters	220
5-5	تبادل القدرة باستخدام توتر متناوب منخفض التردد 16.6-25 Hz (مبدل الطور)	224
1-5-5	مقدمة	224
2-5-5	بنية نظام النقل بالتيار المتناوب ضعيف التردد	225
3-5-5	مميزات استخدام التردد المنخفض في نقل الطاقة الكهربائية	228
4-5-5	خواص مبدل التردد الثيرستوري Cycloconverter Characteristics	229
الفصل السادس	تجارب تمثيل العنفات الريحية	237
1-6	مقدمة	239
2-6	التجربة الأولى منحنى الاستطاعة للعنفة	240
3-6	التجربة الثانية تمثيل المولد الريحي (مولد تزامني مغناطيس دائم) وربطه على العنفة	248
3-6	التجربة الثالثة دراسة أثر تغير سرعة الرياح والتحكم بزاوية الشفرات على توتر خرج المولد الريحي	252
4-6	التجربة الرابعة استخدام جسر تقويم على خرج المولد الريحي ودراسة أثر تغير سرعة الرياح على توتر وتيار الحمل	256
5-6	التجربة الخامسة آلية نمذجة عناصر النظام الريحي ومتحولات التحكم (العنفة الريحية – المعرج ونظام القدح – الحمل المختلط)	261

تعتبر الطاقة الكهربائية المستجدة من العنفات الريحية ومن الخلايا الشمسية من الطاقات المتجددة الصديقة للبيئة ، وذات مردود اقتصادي جيد. لذا ازدادت نسبة تركيب العنفات الريحية عالمياً وتم اعتبارها والطاقة الشمسية من الطاقات الوطنية الاستراتيجية، ذلك أنها لا تعتمد على المشتقات النفطية المستوردة. لذا تسعى الدول الأوروبية للوصول إلى تغطية 40% من الحمل من الطاقات المتجددة، وتسعى دول أخرى لتغطية كامل الطلب على الطاقة (اسبانيا).

بعد مرور عشر سنوات على تأليف الكتاب الأول في طاقة الرياح عام 2011، كان لا بد من العودة لتطوير هذا المؤلف وطباعته اعتماداً على المستجدات التي حصلت في السنوات الأخيرة والخبرة المكتسبة في تدريس المقرر. بناءً عليه تم وضع هذا الكتاب لمساعدة المهندسين الكهربائيين في تفهم أساسيات ومتطلبات توليد الطاقة الكهربائية من العنفات الريحية. تم الاعتماد على أن القارئ يملك قاعدة علمية جيدة في نظم القدرة الكهربائية (الشبكات الكهربائية، المحولات ،المولدات، الكترونيوات القدرة الكهربائية والتحكم الآلي). كما أنه يسعى بالتوازي إلى تعليم المهندسين غير المختصين مبادئ وأسس استخلاص الطاقة الكهربائية من الرياح.

تعتبر الطاقة الناتجة عن الرياح والشمس من المصادر المتجددة المتوفرة في أغلب المناطق عالمياً ، ويمكن توليد هذه الطاقة بإنشاء عدد كبير من العنفات الريحية لتصبح بحجم مزرعة ريحية، كما أنه يمكن تركيب مجموعات مستقلة ومعزولة لتغذية أحمال خاصة بعيدة عن مسار شبكات التوزيع الكهربائية. هذه الطاقة الكبيرة المستخلصة من الرياح يمكن حقنها بالشبكات العامة مباشرة أو عبر مبدلات الكترونية متطورة. خلال السنوات الأخيرة حدثت قفزات كبيرة في تقانة القواطع الإلكترونية المقادة (ترانزستور، أو ثيرستور) وأصبحت هذه العناصر قادرة على تحمل توترات وتيارات كبيرة وتأمين سرعات عالية في الوصل والفصل . مع وجود الحواسيب التي تعمل في الزمن الحقيقي للتحكم، انعكس ذلك على زيادة استثمار المبدلات الإلكترونية في المزارع الريحية والشمسية. تم ربط المبدلات من جهة المولد الريحي ومن جهة الشبكة العامة. وبذلك يتم تأمين تحويل التوتر المستمر إلى متناوب أو العكس، كما يتم التحكم

الديناميكي بالقدرة الكهربائية الفعالة والرديّة الواجب تداولها بين العنفات الريحية والشبكات العامة.

في الفصل الأول من الكتاب تم تقديم العلاقات الرياضية الناضجة لحساب قيمة الاستطاعة الممكن استجراها من العنفة الريحية ، وبيان العوامل المؤثرة على قيمة هذه الاستطاعة . كما تم شرح كيفية حساب القدرة السنوية الممكن توليدها استناداً للتوزيع الإحصائي لسرعة الريح واعتماد توزيع رالي وويل لحل المسائل . الأمثلة المحولة وضعت لتفسير وتسهيل إجراء الحسابات وزيادة عمق تفهم الأفكار النظرية .

بينما تطرق الفصل الثاني للتحكم الميكانيكي بسرعة العنفات الريحية، سواء التحكم بزواوية الشفرات أو التحكم الثابت والفعال ، كما بينا التحكم الإلكتروني بالعنفات الريحية.

تم في الفصل الثالث استعراض أساليب استخدام المبدلات الإلكترونية في العنفات الريحية. لذا تم عرض باختصار المبدلات المستخدمة وميزاتها، وتم الاعتماد على أن الطالب لديه قاعدة علمية جيدة في الكترنيات القدرة الكهربائية، ويستطيع تفهم آلية عمل هذه المبدلات.

ناقش الفصل الرابع المولدات الكهربائية المستخدمة في العنفات الريحية، باعتبار أن الطالب يلم بأسس وقواعد تشغيل هذه الآلات لذا لم نتعرض للأسس النظرية في التشغيل، تم الاهتمام بالدارات المكافئة لهذه المولدات وكيف نستطيع من خلالها تقدير الاستطاعة الفعالة والرديّة اللازمة لحسن تشغيلها. تم التركيز على ثلاثة آلات وهي المولد التزامني والمولد التحريضي ذي القفص السنجابي والمولد التحريضي ذي الدائر الملفوف. وتم حل العديد من الأمثلة في كل نظام. بالنسبة للمولد التزامني تم بيان كيفية ربط هذا المولد على حمل مستقل، ثم ربط المولد على الشبكة العامة أو قضبان توزيع لانهائية.

خُصص الفصل الخامس للتوسع في دراسة مفهوم ربط العنفات الريحية على الشبكات العامة. ومسألة تبادل القدرة الكهربائية بالتيار المتناوب عند التردد 50 هرتز، بين منبعين متناوبين. كما تم شرح آلية عمل أنظمة النقل المرنة والتعويض الردي والتحكم بجريان القدرة. تم أيضاً طرح النقل بالتيار المستمر عالي التوتر ونوعية المبدلات الإلكترونية المستخدمة، مع وضع

بعض المسائل المحلولة. تم في ختام هذا الفصل بيان آلية تبادل القدرة باستخدام توتر متناوب ضعيف التردد 16.66 هرتز. مع شرح ميزات هذا الأسلوب من نقل القدرة وخواص مبدلات التردد الممكن استخدامها.

تم في الفصل السادس والأخير وضع التجارب المخبرية الممكن إجراؤها في مخابرنا وتشمل خمسة تجارب: الأولى حول استخدام العلاقات الرياضية النازمة لحساب الاستطاعة -العزم الناتج عن العنفة الريحية وحساب معامل الدائر. التجربة الثانية حول تمثيل المولد الريحي (مولد تزامني مغناطيس دائم) وربطه على العنفة. تغطي التجربة الثالثة دراسة أثر تغير سرعة الريح والتحكم بزاوية الشفرات على توتر خرج المولد الريحي. تم في التجربة الخامسة تصميم مسألة تركيب جسر تقويم على خرج المولد الريحي ودراسة أثر تغير سرعة الريح على توتر وتيار الحمل. تم في التجربة الخامسة تصميم آلية نمذجة عناصر النظام الريحي ومتحولات التحكم (العنفة الريحية - المعرج ونظام القذح - الحمل المختلط).





الفصل الأول طاقة الرياح Wind Energy



1-1 مقدمة

قال سبحانه وتعالى في القرآن الكريم:
{وَمِنْ آيَاتِهِ أَنْ يُرْسِلَ الرِّيحَ مُبَشِّرَاتٍ وَلِيَذِيقَكُمْ مِنْ رَحْمَتِهِ وَلِتَجْرِيَ الْفُلُكُ بِأَمْرِهِ وَلِتَبْتَغُوا مِنْ فَضْلِهِ وَلَعَلَّكُمْ تَشْكُرُونَ} (الروم: 46).
{وَفِي عَادٍ إِذْ أَرْسَلْنَا عَلَيْهِمُ الرِّيحَ الْعَقِيمَ، مَا تَذَرُ مِنْ شَيْءٍ أَنْتَ عَلَيْهِ إِلَّا جَعَلْنَاهُ كَالرَّمِيمِ وَأَرْسَلْنَا الرِّيحَ لَوَاقِحَ} {وَهُوَ الَّذِي أَرْسَلَ الرِّيحَ بُشْرًا بَيْنَ يَدَيْ رَحْمَتِهِ وَأَنْزَلْنَا مِنَ السَّمَاءِ مَاءً طَهُورًا} (الفرقان: 48)

اعتمد الإنسان على الظواهر الطبيعية منذ الأزل وحاول تسخيرها لتحسين ظروف حياته، وفي مجال طاقة الرياح، تطور استخدام هذه الطاقة وتم إنشاء الطواحين الهوائية، والزوارق الشراعية وبني شارل بروش Charles Brush عام 1888 أول عنفة هوائية كبيرة الحجم باستطاعة 12 كيلووات بارتفاع 17 متر. كما بدأت شركة لويس الكهربائية في نيويورك عام 1890 ببيع المولدات الريحية في الفترة 1920-1950. انتشرت العنفات ذات المحور الأفقي بشفرتين وثلاث شفرات من قبل شركة Wind electricity conversion system، ومن ثم بعد العام 1990، بدأ انتشار العنفات الريحية في المناطق النائية في أمريكا وأوروبا (الدانمارك، ألمانيا، إسبانيا..)، الصين. أخذت استطاعة المولدات المركبة بالازدياد مع تزايد ارتفاع هذه الأبراج، حتى وصلت استطاعة العنفات الريحية ذات المحور الأفقي إلى 6 ميغا وات وارتفاع البرج إلى 131 متر (Enercon e-126). وقد تجاوزت هذه القيمة 11 ميغا وات عند ارتفاع يصل إلى 160 متر.

1-2 مصدر الرياح: Origin of wind

نتيجة الإشعاع الشمسي والذي يتم امتصاصه بشكل متفاوت على سطح الأرض، يتم تحريك الهواء من خلال عملية الحمل الحراري، وذلك باتجاهات مختلفة على سطح الكرة الأرضية، هذه التيارات الهوائية تنقل السحاب والغبار، وتنشئ الغيوم، ويتم استغلالها لتوليد الطاقة الكهربائية الريحية.

1-3 الميزات العامة لطاقة الرياح (المحاسن والمساوئ)

طاقة الرياح هي أحد مصادر الطاقات المتجددة Resource Renewable energy، التي تطورت وانتشرت بشكل واسع في السنوات الأخيرة. تمتاز طاقة الرياح بأنها طاقة نظيفة، لا تصدر أي نوع من أنواع الغازات الضارة للبيئة، وذات كلفة إنشاء مقبولة غير مرتفعة، حيث أن كلفة الكيلو وات ساعي المولد فيها لا يتجاوز 80 دولار للميغاوات، عند متوسط سرعة رياح 7-10 متر بالثانية، وهي أرخص من الطاقة المولدة من العنفات التي تستخدم الغاز الطبيعي أو الفحم كوقود أو الطاقة الذرية. كما أن عمرها الاستثماري طويل الأمد. يبين الجدول (1-1) كلفة الإنشاء لكل نوع من مصادر الطاقة وكلفة الوقود العالمي وكلفة الإنتاج لكل كيلو وات مركب.

الجدول (1-1) تكاليف الإنشاء والوقود والإنتاج لكل كيلو وات مركب

Technology	Installed Cost, €/kW	Fuel Price, €/MWh	O&M Cost, €/kW
Gas-fired	635-875	US: 16 EU: 27	19-30
Coal-fired	1300-2325	US: 12 EU: 18	30-60
Nuclear	1950-3400	3.6-5.5	80-96
Onshore wind	1300-1500	N/A	33-50
Offshore wind	3000	N/A	70

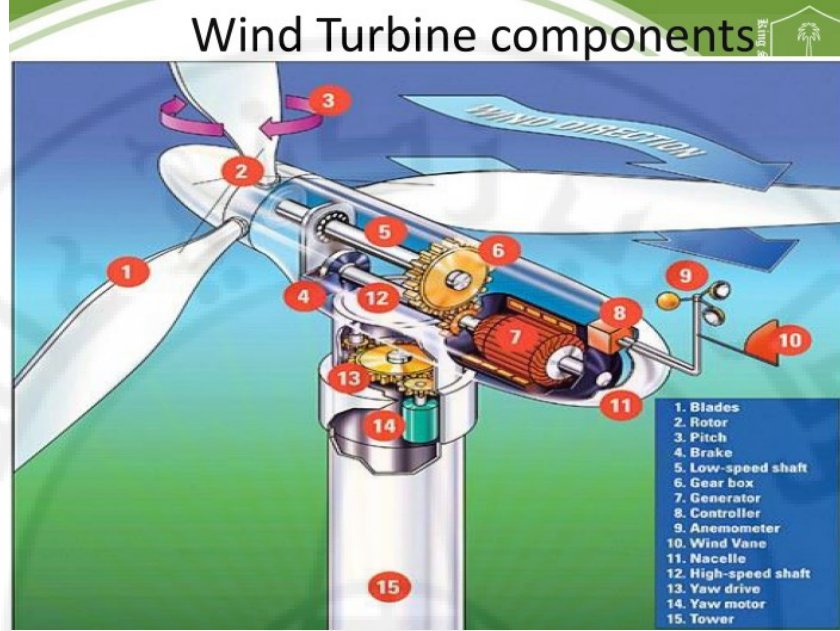
من مساوئ العنفات الريحية، أنها تعتمد بشكل مباشر على توفر الرياح في كافة ساعات النهار، وفي المواقع ذات الاستهلاك الكبير للطاقة -عموماً لا تتوفر رياح كافية في هذه المناطق- يؤدي هذا إلى ضرورة نقل الطاقة الكهربائية لمسافات بعيدة وحدوث مفاويز وضياعات وزيادة التكاليف الإنسانية. هذا وإن زيادة ارتفاع الشفرات ودورانها يسبب في قتل بعض الطيور

المهاجرة، كما أنه لا بد هنا من الإشارة إلى أن المساحات اللازمة لإنشاء مزرعة ريحية باستطاعة متوسطة، أكبر بكثير من المساحة اللازمة لإنشاء محطة حرارية. لذا تم الاعتماد على المزارع الريحية البحرية off-shore. يمكن القول أيضاً أن الطاقة المتوفرة من المزارع الريحية عموماً تتغير تبعاً للفصول الأربعة. وتزداد تكلفة إنشاء العنفات الريحية كلما صغرت استطاعتها، وخاصة العنفات ذات القيم الأقل من 100 كيلو وات. تنفذ وتصمم العنفات الريحية الحديثة بتكنولوجيا متقدمة جداً، سواء من جهة تصميم الأبراج أو الشفرات، وأيضاً أنظمة التحكم بالشفرات وآلية حقن القدرة بالشبكة العامة.

1-4 مكونات العنفة الريحية Turbine Construction

تتكون العنفات الريحية المحمولة على البرج بشكل رئيسي من الأجزاء التالية المبينة بالشكل (1-3):

- 1- الشفرات، 2- الدائر، 3- تغيير زاوية الشفرات، 4- نظام الفرملة، 5- محور السرعات البطيئة، 6- علبة السرعة، 7- المولد، 8- نظام التحكم والقيادة، 9- مقياس السرعة، 10- مؤشر اتجاه الرياح، 11- القمرة، 12- محور السرعة العالية، 13- مسننات تدوير القمرة، 14- محرك تدوير القمرة، 15- البرج الحامل للعنفة.
- يتم وضع محولات الاستطاعة للربط على الشبكة وأنظمة الكترونيايات القدرة المستخدمة، وجميع أجهزة القياس أسفل البرج .

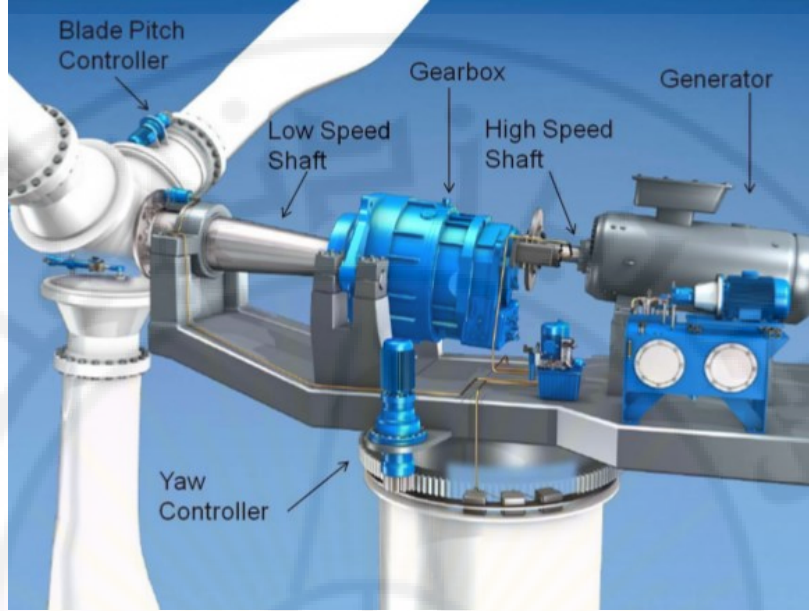


الشكل (1-1) مكونات العنفة الريحية المحمولة على البرج

يمكن أن نرى بوضوح أنظمة تدوير القمرة yaw controller في الشكل (2-1) ، حيث أن القمرة بكاملها تدور حسب اتجاه هبوب الريح، وهذا النظام يعمل حتى يضع القمرة باتجاه الريح المناسب، ثم يتم إيقافه، والمحركات في الشكل (3-1) تدور المسنن الرئيسي الحامل للقمرة حتى يقابل اتجاه الريح المطلوب.

كما نرى نظام تغيير زاوية الشفرات Blade pitch controller، كما في الشكل (3-1) وهو غالباً يعمل عند زيادة سرعة الريح، وزاوية دوران الشفرات تكون بحدود $26 \pm$ درجة كهربائية.

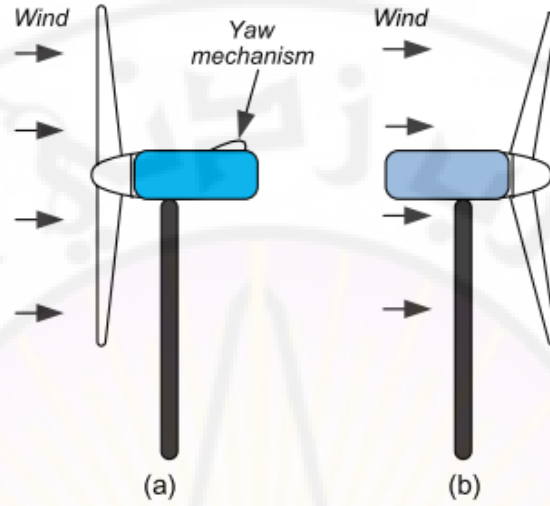
يلاحظ أيضاً في الشكل (2-1) علبة السرعة box Gear، ومحاور الدوران البطيئة Low speed shaft ، والمحاور السريعة High speed shaft ، والمولد الكهربائي Generator.



الشكل (2-1) المكونات الرئيسية للقمرة



الشكل (3-1) نظام تغيير زاوية الشفرات الهيدروليكي المركب في قاعدة الشفرات يمكن للعنفة الريحية أن تقابل الرياح مباشرة، الشكل (4-1)، ولدى مواجهة الشفرات للرياح بشكل مباشر أمامي، نقول أن النظام ذو رياح أمامية Up wind، وعندما تأتي الرياح من خلف العنفة نقول أن النظام ذو رياح خلفية Dawn wind، ويبدو أن معظم العنفات ذات النظام الأمامي



الشكل (4-1) طريقة استقبال العنفات للرياح بشكل أمامي Up wind وبشكل خلفي [28] Dawn wind

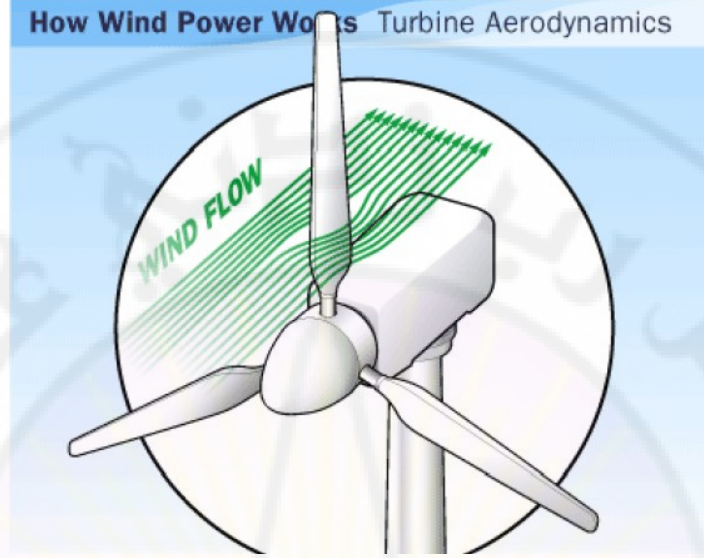
5-1 الطاقة الكامنة في الرياح Power in the wind

1-5-1 القوى الإيروديناميكية المطبقة على الشفرات

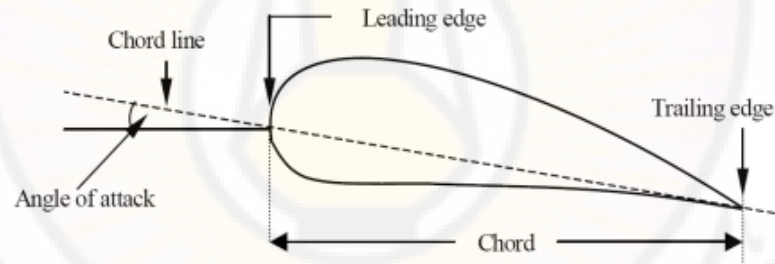
Aerodynamics principle of wind turbine

يتم تصميم الشفرات بحيث يولد الهواء المار على هذه الشفرات قوتين: قوة رفع Lift Force، وقوة دفع أو جر Drag Force، التصميم الجيد لهذه الريش يسعى لجعل قوة الرفع هي المسيطرة وقوة الدفع صغيرة وغير مؤثرة على النظام. لذا يتم توجيه القمرة باتجاه الرياح، ويتم تحديد زاوية الهجوم للرياح α حتى نحصل على أكبر قوة رفع.

توضح الأشكال (5-1) و (6-1) حركة الرياح، وتبين مرورها من فوق وتحت الشفرات، وتبين كيف أن تغيير الزاوية α ، زاوية الهجوم angle of attack أو تنقص من قوى الرفع والدفع. مرور الهواء من فوق الشفرات بسرعة عالية يؤدي لخفض الضغط وبنفس الوقت مروره بسرعة بطيئة من أسفل الشفرات يزيد من الضغط، وهذا يسبب رفع الشفرات للأعلى وتدويرها.

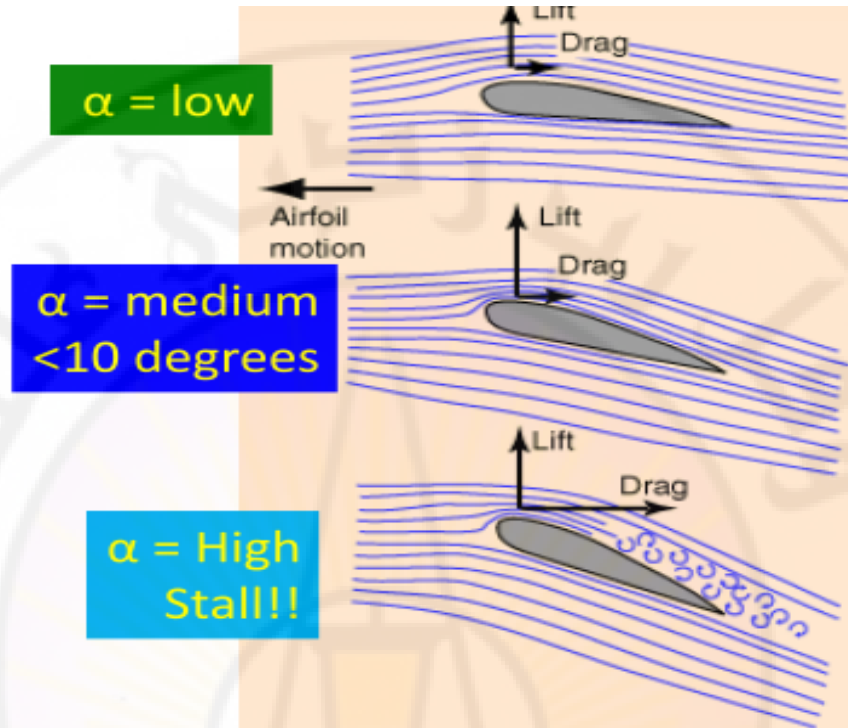


الشكل (5-1) اتجاه تدفق الريح واختراقه مستوى الشفرات



الشكل (6-1) زاوية الهجوم α ومقطع من الشفرة. [3]

قوة الرفع تتعتمد مع اتجاه الدوران أو حركة الشفرات. نسعى دائماً أن تكون كبيرة، وهي تتناسب مع قيمة زاوية الهجوم α ، وتساوي عادة 10 درجات. قوة الدفع هي باتجاه الدوران أو الحركة ونسعى دائماً لإنقاصها. عليه لدى زيادة الزاوية α زاوية الهجوم نصل لوضعية السكون أو التوقف Stall.



الشكل (7-1) تغير قوة الرفع والدفع تبعاً لزاوية ورود الريح α
 يبين الجدول (2-1) تسميات الريح وسرعتها بالمتري/ثانية أو بالميل لكل ساعة، وكثافة
 الاستطاعة للريح التي سنتكلم عنها لاحقاً.

نلاحظ من الجدول (2-1) أنه عند سرعة رياح جيدة (7.5 - 8.1) متر/ثانية، فإن متوسط
 الاستطاعة الممكن توليدها من العنفة للمتر المربع الواحد تعادل (400-500) وات، وهي قريبة
 من الاستطاعة التي يمكن توليدها من الخلايا الشمسية حتى تاريخه.

الجدول (2-1) يبين تسميات الريح وسرعتها بالمتري/ثانية أو بالميل لكل ساعة

Wind Power Classification				
Wind Power Class	Resource Potential	Wind Power Density at 50 m W/m ²	Wind Speed ^a at 50 m m/s	Wind Speed ^a at 50 m mph
1	Poor	0 - 200	0.0 - 6.0	0.0 - 13.4
2	Marginal	200 - 300	6.0 - 6.8	13.4 - 15.2
3	Fair	300 - 400	6.8 - 7.5	15.2 - 16.8
4	Good	400 - 500	7.5 - 8.1	16.8 - 18.1
5	Excellent	500 - 600	8.1 - 8.6	18.1 - 19.3
6	Outstanding	600 - 800	8.6 - 9.5	19.3 - 21.3
7	Superb	> 800	> 9.5	> 21.3

^a Wind speeds are based on a Weibull k of 2.4 at 500 m elevation.

1-5-2 حساب الاستطاعة المتوفرة في الرياح

Power available in the wind

القدرة الحركية المحتواة في الرياح Kinetic energy تعطى عادة بالعلاقة :

$$E = \frac{1}{2} m v^2 \quad \dots\dots (1-1)$$

حيث m كتلة اسطوانة الهواء التي ستعبر المساحة A التي تمسحها الريش، v سرعة الرياح. تعطى هذه القدرة ب (Joule) $\text{Kg.m}^2/\text{s}^2$ والموضحة بالشكل (1-8).

بالنسبة لجريان الهواء، من المناسب النظر في كتلة الهواء المارة في اسطوانة ذات نصف قطر r ، وعند سرعة رياح v (m/sec) وعليه فإن كتلة الهواء في هذه الاسطوانة، ذات الطول v متر، ونصف قطر r ، وكثافة هواء ذات الوزن النوعي ρ ($\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$)، سيعطى بالعلاقة (1-2)، وهي تعبير للكتلة المارة في العنفة خلال ثانية.

$$\dots\dots (1-2) m = \rho . A . v$$

E هي القدرة خلال ثانية، وهي نفس الاستطاعة P ، وعليه يمكن القول أن:

$$E = P = \frac{1}{2} \rho . A . v . v^2 = \frac{1}{2} \rho . A . v^3 \dots\dots (1-3)$$

المساحة A التي تمسحها الشفرات تحسب بالعلاقة المعروفة $A = \pi r^2$ ، بالتعويض بالعلاقة (1-3)

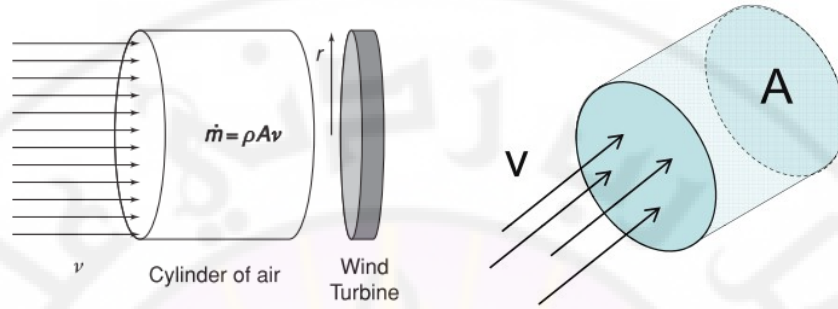
أعلاه يمكن حساب الاستطاعة الناتجة عن تدفق الرياح ضمن العنفة بالعلاقة :

$$P = \frac{1}{2} \rho . r^2 \pi . v^3 \dots\dots\dots (1-4)$$

واحدة الاستطاعة: $\text{kg/m}^3 . \text{m}^2 . \text{m}^3 / \text{s}^3 = \text{J/s} = \text{watts}$

كما تعطى الاستطاعة بوحدات أخرى أكبر مثل الكيلو وات (KW) أو الميغا وات (MW)، أو جيغا وات (GW)، أو الحصان (HP).

وحدات القدرة هي وات -ثانية (Watt-second = 1 joule) أو وات ساعي أو كيلو وات ساعي (KWH)، أو ميغا وات ساعي (MWH).



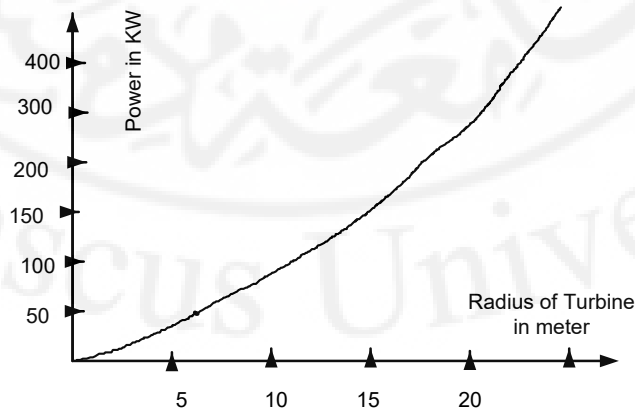
الشكل (8-1) كتلة اسطوانة الهواء التي ستعبر السطح A الممسوح من قبل الشفرات

3-5-1 العوامل المؤثرة على الاستطاعة المولدة من العنفة الريحية

من العلاقة (4-1)، نرى أن تغيير نصف قطر العنفة بمقدار Δr ، مع المحافظة على باقي العوامل ثابتة يمكن التعبير عنها بالشكل :

$$\Delta P/P = 2\Delta r/r \dots (1-5)$$

هذا يعني أن تزايد أو تناقص نصف القطر بمقدار 1%، سوف يؤدي إلى تزايد أو تناقص الاستطاعة المولدة بمقدار 2%، من أجل قيم أكبر، نلاحظ أن زيادة نصف القطر بمقدار 10% سوف يؤدي لزيادة الاستطاعة بمقدار 21% وزيادة 20% ستؤدي لزيادة مقدارها 44% .
الشكل (9-1) أدناه يوضح تزايد الاستطاعة المولدة كتابع لنصف القطر، باعتبار أن نصف قطر العنفة ذات المحور الأفقي معطى بالمتر.



الشكل (9-1) تزايد الاستطاعة مع تزايد نصف القطر [4]

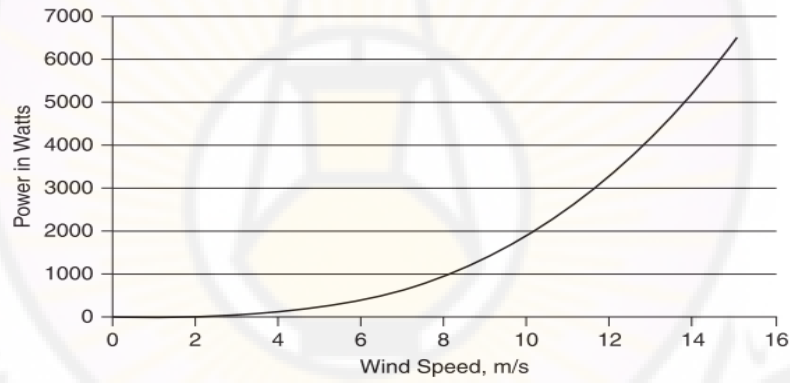
من العلاقة (4) نرى أيضاً، أن حدوث أي تغيير في سرعة الرياح، مع المحافظة على باقي المتغيرات ثابت، يمكننا من كتابة العلاقة (4-1) بالشكل:

$$\Delta P/P = 3 \Delta v/v \quad \dots\dots (1-6)$$

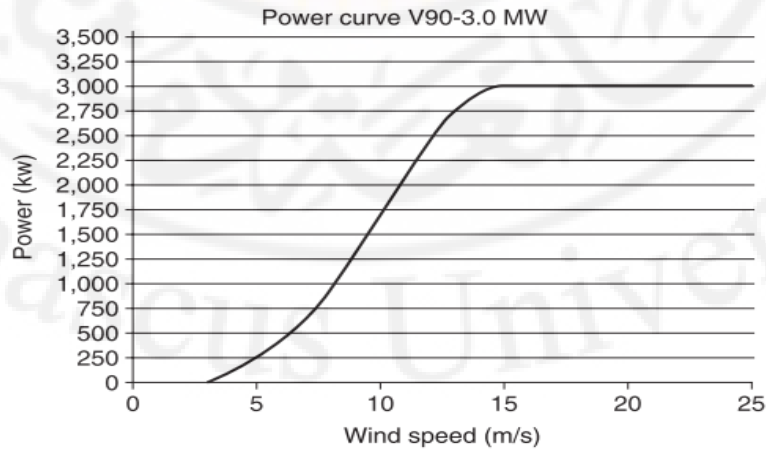
هذا يعني أن تزايد أو تناقص سرعة الرياح بمقدار 1% سوف يسبب زيادة الاستطاعة الممكن توليدها أو تناقصها بمقدار 3%. على أية حال إذا تزايدت سرعة الرياح بمقدار 20%، فإن الاستطاعة المولدة سوف تزداد بمقدار 72.8% تبعاً للعلاقة التالية:

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{v_1^3}{v_2^3} = (1.2)^3 = 1.728 \quad \dots\dots (1-7)$$

توضح الأشكال (10-1) و(11-1) أدناه، تزايد الاستطاعة مع تزايد سرعة الرياح، سواء كان التزايد بشكل نظري، تبعاً للعلاقة النازمة، الشكل (10-1)، أو كان التزايد كما هو في العنفة الحقيقية الشكل (11-1) [4]

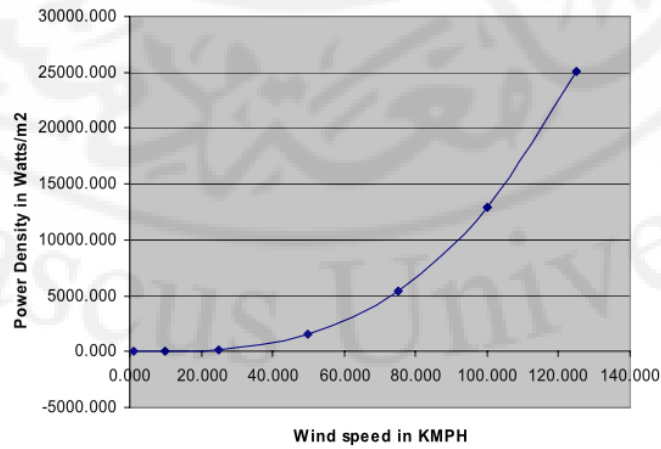
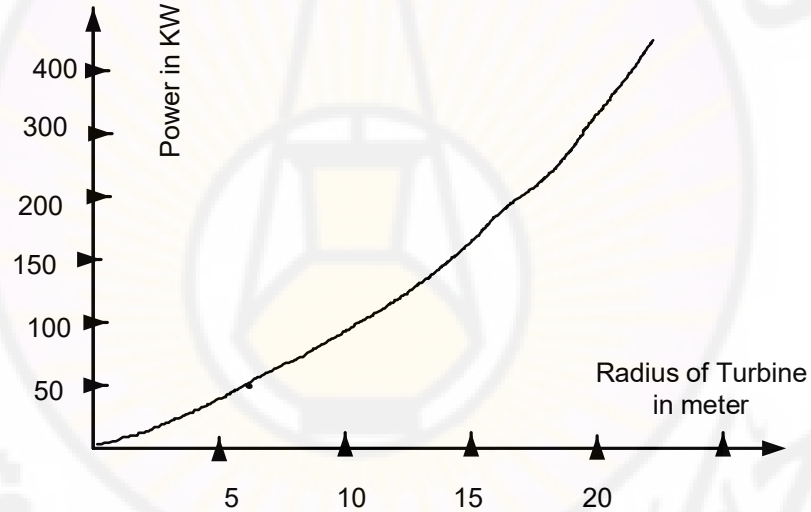


الشكل (10-1) تزايد الاستطاعة المولدة كتابع لسرعة الرياح (الحالة النظرية)



الشكل (11-1) تزايد الاستطاعة المولدة كتابع لسرعة الرياح (الحالة العملية)

بما أن الاستطاعة المولدة من العنفة الريحية هي تابع خطي للمساحة التي تمسحها الشفرات A، وباعتبار أننا أخذنا متر مربع واحد من المساحة الممسوحة بالشفرات، وقمنا بحساب الاستطاعة الممكن توليدها تبعاً لسرعة الرياح، نحصل بذلك على ما يطلق عليه wind power density كثافة الاستطاعة للرياح في الموقع، وغالباً تحسب كثافة الاستطاعة، عند السرعة المتوسطة للرياح وعند ارتفاع محدد للبرج. والشكل (1-12) يوضح ذلك باعتبار السرعة بالكيلومتر بالساعة، والاستطاعة بالوات. والجدول (1-3) يعطي كثافة الاستطاعة كتابع لسرعة الرياح، ويصنف الرياح ودرجاتها، بدءاً من الرياح الخفيفة (النسمات) وصولاً للرياح العاتية أو العاصفة.



الشكل (1-12) يبين قيمة كثافة الاستطاعة كنسبة لسرعة الريح [5]

الجدول (1-3) يبين تصنيف الرياح، وتسميتها، وكثافة الاستطاعة [5]

تصنيف استطاعة الريح Wind Power Classification

Wind Power Class	Resource Potetial	Wind Power Density W/m2	Wind Speed m/sec
1	Poor	0 --200	0.0-5.9
2	Marginal	200 - 300	5.9 – 6.7
3	Fair	300 - 400	6.7 – 7.4
4	Good	500 – 600	7.4 – 7.9
5	Excellent	500 - 600	7.9 – 8.4
6	Outstanding	600 -800	8.4 – 9.3
7	Superb	> 800	> 9.3

من العلاقة (1-4) بفرض أن سرعة الريح في مدخل العنفة Inlet wind speed هي V_1 ، وأن سرعة الهواء الخارجة من العنفة output wind speed هي V_o ، عندئذ السرعة المتوسطة ضمن العنفة average speed تساوي [2] :

$$V = (V_1 + V_o) / 2 \dots (1-8)$$

وعليه يمكن حساب الاستطاعة المولدة بدلالة السرعة المتوسطة وتكتب عندئذ العلاقة (1-4) بالشكل :

$$P = \frac{1}{2} \rho A \frac{V_1^3 - V_o^3}{3} = \left(\rho * \frac{A}{4} \right) * (V_1 + V_o) * (V_1^2 - V_o^2) \dots (1-9)$$

بفرض أن $x = \frac{V_o}{V_1}$ ، وبالتعويض في العلاقة أعلاه وحلها يمكن إعادة كتابة المعادلة بالشكل :

$$P_{out} = (p/2) (1 + x - x^2 - x^3) \dots (1-10)$$

باشتقاق العلاقة (10) أعلاه، بالنسبة للمتحول x ووضع المشتق مساوي للصفر نجد :

$$d(P_{out})/dx = 0 = (1 - 2x - 3x^2) \dots (1-11)$$

ومنه نحصل على $X_{max} = 1/3$ ، بتعويض هذه القيمة بالعلاقة (10-1)، فإن الاستطاعة العظمى الممكن الحصول عليها تعطى بالعلاقة :

$$P_{out max} = (16/27)P = 0.593 P \dots (1-12)$$

نرى مما سبق أن الاستطاعة العظمى الحقيقية الممكن استجراؤها من الاستطاعة الكامنة في الريح لا تتجاوز 59.3% من كامل الاستطاعة الكلية للريح، وهذا العامل يطلق عليه معامل

الاستطاعة C_p ، power coefficient، أو مردود الدائر Rotor efficiency وكما يسمى Efficiency . Coefficient of performance

للحصول على الاستطاعة الكهربائية من العنفة، يجب الأخذ بالاعتبار المردود الميكانيكي، وهو الفعل الناتج عن تحويل الهواء إلى استطاعة ميكانيكية η_m ويسمى مردود النقل الميكانيكي، ومردود النقل الكهربائي η_g ، والقيم المثالية لهذه العوامل تساوي تقريباً ما يلي:

$\eta_g = 0.9$, $\eta_m = 0.95$, $C_p = 0.45$. هذا يعطينا المردود الإجمالي للنظام والذي لا يتجاوز 38%.

نرى أيضاً عامل آخر CF ، يطلق عليه عامل الملء Capacity factor، وهو يدل على نسبة القدرة الفعلية المولدة مقسوماً على القدرة الكلية التي كان بالإمكان توليدها في الحالة المثالية، وهنا يدخل عامل الوقت في حساب القدرة، ويمكن التعبير عنه لعنفة مفردة بأنه يساوي الاستطاعة المتوسطة على الاستطاعة الاسمية العظمى للعنفة. وهو تابع لمنحني خواص الاستطاعة المولدة كتابع لسرعة الرياح، وخواص الرياح في الموقع أو ما يسمى wind frequency distribution تكرر توزيع الرياح (سوف نتعرض له لاحقاً).

وعليه: عامل الملء = الاستطاعة المتوسطة / الاستطاعة العظمى = 30% .

تتأثر الاستطاعة الناتجة بشكل عام بتغيرات سرعة الرياح الفصلية واليومية، وهي تتغير كل ثانية، كما تتأثر الاستطاعة المولدة بعامل الحمل وخاصة إذا كان حمل العنفات مضخات مائية ذات محركات تحريضية، والتي لا يتجاوز عامل الاستطاعة فيها لا يتجاوز 25-30% . [28].

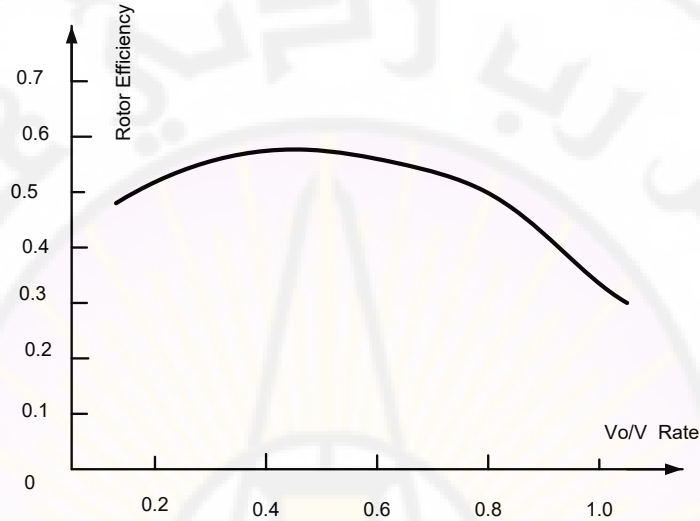
4-5-1 مردود الدائر CP Rotor efficiency

من أجل سرعة رياح معطاة مسبقاً، فإن مردود الدائر CP تابع إلى معدل سرعة دوران الشفرات أو دوران الدائر [28]. في حالة السرعة البطيئة ينخفض المردود، لأن الشفرات تسمح لجزء كبير من الهواء للعبور دون الاستفادة منه، وعند سرعة الدوران المرتفعة، أيضاً ينخفض المردود نظراً لنشوء زوايا هوائية بين الشفرات. لذا فإن معدل سرعة نهاية الشفرات Tip-speed-ratio (TSR)، هو التابع الذي يوضح ويلخص مردود الدائر ويعرف كما يلي : معدل سرعة نهاية الشفرات = سرعة نهاية الشفرات / سرعة الرياح

$$TSR = \text{ROTOR TIP SPEED} / \text{WIND SPEED} = \pi \cdot D \cdot N / 60 \cdot V \dots (1-13)$$

حيث N (rpm) عدد دورات الدائر (دورة في الدقيقة)، D قطر الدائر بالمتر، V (m/s) سرعة الرياح في مدخل العنفة (متر/ثانية). الشكل (1-13) يوضح منحني مردود الدائر كتابع لسرعة

الرياح النسبية (V_0/V_1)، وهي نسبة سرعة الهواء الخارج من العنفة بالنسبة للهواء الداخل للعنفة .

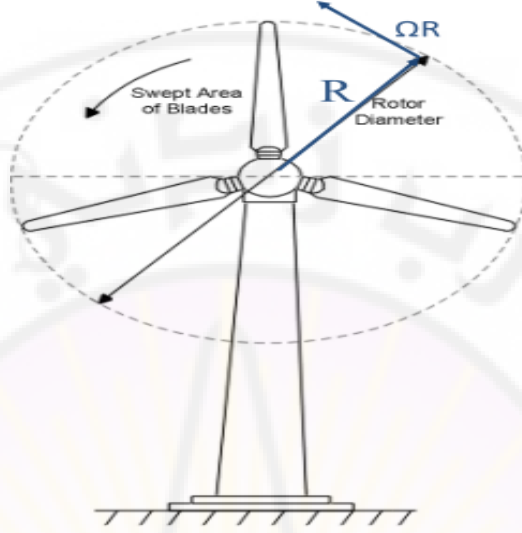


V_0/V_1 نسبة سرعة الهواء الخارج من العنفة / سرعة الهواء الداخل

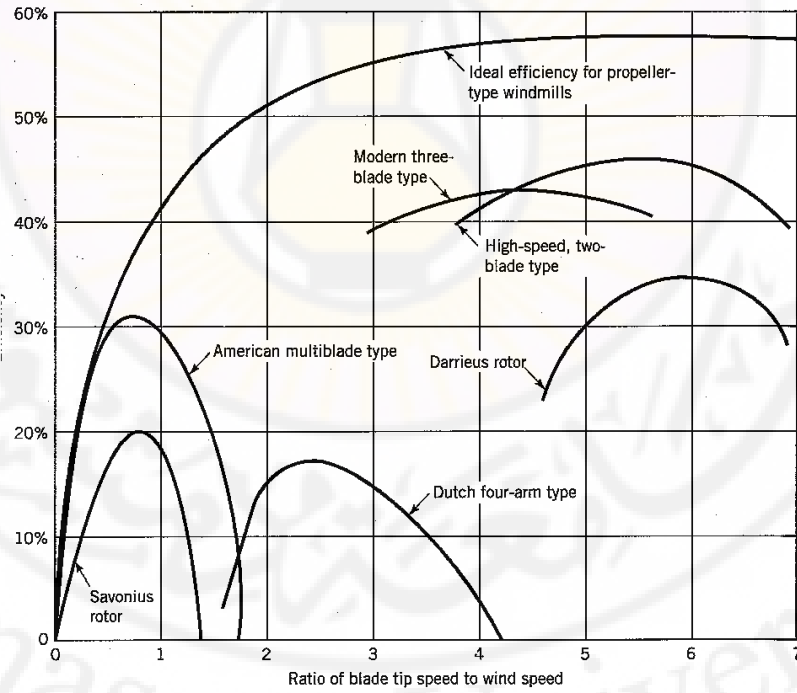
الشكل (13-1) منحنى مردود الدائر CP كتابع للسرعة النسبية بين الهواء الخارج من العنفة (V_0/V_1)، إلى الهواء الداخل للعنفة. [4]

يتم تحديد زاوية الهجوم للهواء الداخل إلى العنفة α تبعاً لسرعة الرياح، وذلك حتى يتمكن من تنظيم السرعة واستقرار أكبر عزم من الرياح، لذا فهناك قيمة مثالية لمعدل سرعة نهاية الشفرات، ويمكن التعبير عنها بشكل آخر: $TSR = \frac{\Omega R}{V}$ ، حيث $\Omega = 2\pi n$ السرعة الزاوية بالراديان لكل ثانية، n عدد الدورات في الثانية. و R نصف قطر الدائر Radius، و v سرعة الرياح (متر / ثانية). يوضح الشكل (14-1) البارامترات المعتمدة .

معدل سرعة نهاية الشفرات TSR، ومردود الدائر Rotor efficiency، يؤثران ببعضهما البعض وذلك تبعاً لعدد الشفرات، ثلاث شفرات أو أكثر، وسرعة الدوران، وهل العنفة ذات محور أفقي أو شاقولي (عنفة داريوس)، والشكل (15-1) أدناه يعطي بعض القيم العالمية لمردود الدائر CP كتابع لمعدل سرعة نهاية الشفرات .



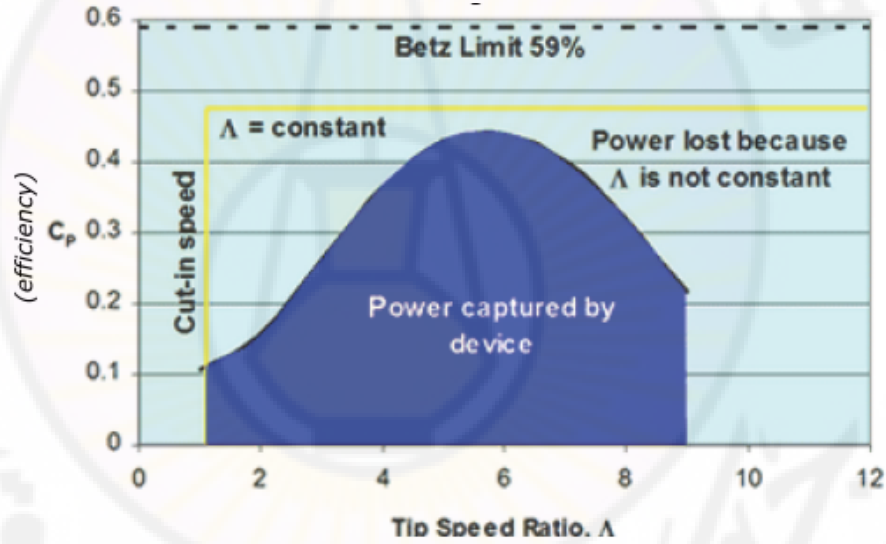
الشكل (14-1) مفهوم معدل سرعة نهاية الشفرات



الشكل (15-1) يبين القيم العالمية لمردود الدائر كتابع لمعدل سرعة نهاية الشفرات

مما سبق نلاحظ أن الاستطاعة المولدة تتناسب مع مكعب السرعة ومع المساحة الممسوحة للشفرات، ولكن هنالك سرعات منخفضة للرياح لا يسمح فيها بتشغيل العنفة (سرعة القطع الدنيا Cut-in Speed) وسرعات كبيرة لا يمكن العمل عندها لأنها سوف تعمل على تدوير الدائر

عند سرعات خطيرة على أجزاء العنفة وقد تحطمها ،ولا يمكن إنقاص السرعة بتغيير زوايا الشفرات أو مجموع أدوات التحكم المتوفرة في العنفة، ويتم تحديد هذه السرعات بسرعة القطع العليا Cut-out Speed، ويطلق أحياناً على هذه الحدود بحد Betz limit. وكما رأينا أن معدل سرعة نهاية الشفرات TSR تابع لعدد الدورات ونصف القطر ولمتوسط سرعة الرياح، ومن الخبرة العملية تم تحديد قيم حدية لهذا المعدل يجب عدم تجاوزها وتصل للقيمة $8/$ ، وعموماً تعمل العنفات عند معدل نهاية ريش يقع بين (6-8) ، والمنحني الوارد بالشكل (1-18) يوضح منحنى تغير الاستطاعة المولدة كتابع لمعدل نهاية الشفرات ،ومعامل الدائر CP، وهو الشكل العام للاستطاعة المولدة من العنفة الريحية.



الشكل (1-16) منحنى الاستطاعة كتابع لمردود الدائر CP ، ومعدل سرعة نهاية الشفرات TSR

مثال محلول (1-1)

لدينا عنفة ريفية باستطاعة 400kW ، ذات 3 شفرات ، مصممة لتعطي الاستطاعة الكاملة عند سرعة هواء (15m/s). طول الشفرة 14m (نصف القطر) ، السرعة الاسمية للعنفة 48 r/min . احسب :

- المساحة المسوحة (Swept) بشفرات العنفة.
- الاستطاعة الممكن توفيرها من الرياح لتدوير العنفة.
- ما هي النسبة بين استطاعة الخرج 400kW بالنسبة للاستطاعة المتوفرة من الرياح.

d- ما هي سرعة نهاية الشفرات.

e- ما هي النسبة بين سرعة نهاية الشفرات وسرعة الهواء.

الحل:

a- المساحة الممسوحة بالشفرات:

$$A = \pi r^2 = \pi \cdot 14^2 = 616m^2$$

- b

$$P_a = 0.6V^3 = 0.6 \times 15^3 = 2025W / m^3$$

الاستطاعة المتوفرة في الرياح لتدوير العنفة :

$$P = P_a \cdot A = 2025 \times 616 = 1247400W = 1247kW$$

c- النسبة:

$$32\% = 0.3208 \frac{\text{استطاعة الخرج للمولد}}{\text{استطاعة الرياح المتوفرة}} : \frac{400kW}{1247}$$

d- محيط الدائرة التي تمسحها الشفرات:

$$C = 2\pi r = 22\pi \times 14m$$

$$C = 88m$$

$$\text{Tip Speed} = C \times r / \text{min} = 88 \times 48 = 4224m / \text{min}$$

$$= 70.4m / \text{sec} = 253Km / h$$

e - النسبة بين سرعة نهاية الشفرات وسرعة الهواء:

$$4.7 = \frac{70.4}{15} = \frac{\text{Tip Speed}}{\text{Wind Speed}} \text{ مرة}$$

5-5-1 تأثير ارتفاع البرج على سرعة الرياح Impact of tower height

تزداد سرعة الرياح مع ازدياد الارتفاع، ذلك لأن الاحتكاك بالقرب من سطح الأرض كبير.

معدل تزايد سرعة الرياح يتأثر بمعامل الخشونة أو الاحتكاك α وذلك تبعاً للعلاقة أدناه:

$$\frac{v_2}{v_1} = \left[\frac{h_2}{h_1} \right]^\alpha \dots (1-14)$$

$$\left\{ \frac{v}{v_0} \right\} = \left\{ \frac{H}{H_0} \right\} \dots (1-15)$$

حيث أن v سرعة الرياح عند الارتفاع H ، و v_0 سرعة الرياح عند الارتفاع H_0 . تغير معامل

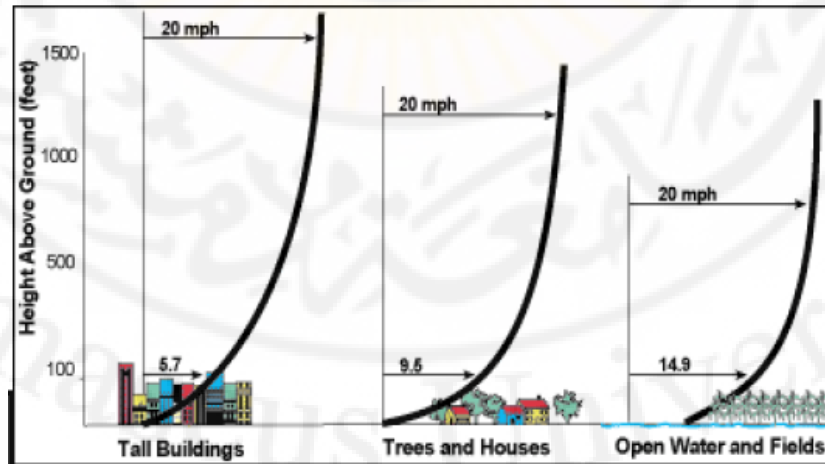
الاحتكاك يمثل تزايداً كبيراً بالاستطاعة عند المرتفعات العالية. والجدول (1-4) يعطي قيم

المعامل α لمختلف أصناف الأراضي .

الجدول (4-1) معامل الاحتكاك α أو الخشونة لمختلف أنواع الأراضي

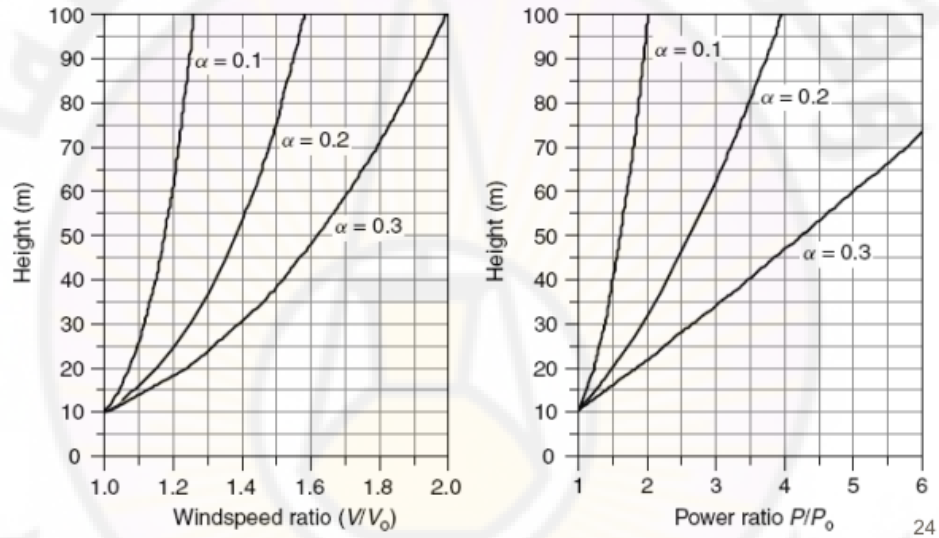
Terrain characteristics	Friction coefficient α
Smooth hard ground, calm water	0.10
Tall grass on ground	0.15
High crops and hedges	0.20
Wooded countryside, many trees	0.25
Small town with trees	0.30
Large city with tall buildings	0.40

بما أن الاستطاعة المولدة تتناسب مع مكعب سرعة الرياح فإن تغير بسيط في سرعة الرياح يؤدي إلى تزايد كبير في الاستطاعة، وسرعة الرياح تتأثر كثيراً بطبيعة الأرض القريبة من العنفة، من الشكل (17-1) نرى كيف أنه في الأراضي الخشنة، حيث توجد أبنية مرتفعة، أن سرعة الرياح على ارتفاع 100 متر قد تكون، 9.2 متر/ساعة أو ما يعادل 5.7 ميل/ساعة، وعند ارتفاع (460 متر) يصل إلى 20 ميل بالساعة أو 32.2 متر/ساعة، وبالنسبة لأرض أقل خشونة، أشجار وبيوت عادية، يمكن لسرعة الرياح أن تصل لنفس السرعة عند ارتفاع 1300 قدم أو ما يعادل 400 متر، وتصل بالنسبة لأرض عادية أو سطح البحر إلى نفس السرعة عند ارتفاع 1000 قدم أو ما يعادل 308 متر، أيضاً نلاحظ فرق السرعة عند ارتفاع 100 قدم أو ما يعادل 30.5 متر .



الشكل (17-1) تأثير عامل الخشونة (الأبنية، الأشجار) على تغير سرعة الرياح حسب الارتفاع

في الشكل (18-1) ، نود الإشارة إلى أن الاستطاعة الممكن توليدها على ارتفاع 100 متر، بموقع ذي عامل خشونة $\alpha = 0.1$ ، تساوي ضعف الاستطاعة المولدة عند ارتفاع 10 متر، وبالمقابل نسبة تزايد سرعة الرياح لا تتجاوز 1.25 مرة. وعند عامل خشونة $\alpha = 0.2$ ، تصل الاستطاعة الممكن توليدها إلى أربعة أمثال الاستطاعة المولدة عند ارتفاع 10 متر بينما نسبة تزايد الرياح لا تتجاوز 1.58 مرة، وهكذا نرى أن الاستطاعة المولدة تزداد مع عامل الخشونة للموقع. ولا يقابله نفس نسبة التزايد في سرعة الرياح.



الشكل (18-1) تغيير سرعة الرياح مع تغيير عامل الخشونة وتغير الاستطاعة الممكن توليدها تستخدم بعض المراجع العلمية علاقة أخرى كما هو مبين ادناه لتحديد سرعة الرياح كتابع للارتفاع وذلك بالعودة للعلاقات اللوغاريتمية، ويعطى طول عامل الخشونة z_0 كما في الجدول رقم (5-1).

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\ln(h_2/z_0)}{\ln(h_1/z_0)} \dots\dots\dots (1-16)$$

الجدول (5-1) طول عامل الخشونة لمختلف الأراضي

مواصفات الأرض	طول عامل الخشونة z_0
أرض ناعمة ، ثلج أو طين	0.01
بحر هادئ	0.2

بحر عاصف	0.5
سطح ثلجي	3
أعشاب	8
مراعي	10
أراضي غير مزروعة	30
حقول حبوب أو خضراوات	50
أشجار متفرقة	100
أشجار متعددة وبناء متفرق	250
غابة وأحراج	500
أطراف المدينة، الريف	1500
مركز مدينة وأبنية شاهقة	3000

6-5-1 أمثلة محلولة

مثال محلول (2-1):

A- حدد سرعة الرياح عند ارتفاع 40 متر من سطح الأرض والتي فيها بعض الأشجار المزروعة، إذا كانت سرعة الرياح عند ارتفاع 10 متر، تساوي 5m/s. لتقدير ذلك استخدم طريقتين مختلفتين لحساب سرعة الرياح .

B باستخدام نفس الأسلوب السابق، حدد سرعة الرياح عند ارتفاع 40 متر إذا تمت إزالة الأشجار.

الحل :

a- الطريقة الأولى: باستخدام العلاقة اللوغاريتمية رقم (1-16) أعلاه لدينا:

$$\frac{v_2}{v_1} = \frac{\ln(h_2 / z_o)}{\ln(h_1 / z_o)}$$

من الجدول (1-5) الذي يحدد طول الخشونة z_o عند الارتفاع 40 متر ، نجد أن:

$$z_o = 100\text{mm} = 0.1\text{m}$$

$$\frac{v_2}{5} = \frac{\ln(40/0.1)}{\ln(10/0.1)} \Rightarrow v_2 = 5 \frac{\ln(40/0.1)}{\ln(10/0.1)} = 6.51 [m/s]$$

الطريقة الثانية: في هذه الحالة نستخدم العلاقة (17-1) لحساب سرعة الرياح عند ارتفاع 40 متر، سوف نفرض أن العامل $\alpha = 1/7 = 0.142$ ، وعليه بتطبيق العلاقة (17-1) :

$$\frac{U(z)}{U(z_r)} = \left(\frac{z}{z_r} \right)^\alpha$$

$$\alpha = -1/7 = 0.142 :$$

$$U(40) = 5 \left(\frac{40}{10} \right)^{0.142} = 6.09 [m/s]$$

b- لدى إعادة حل المسألة بعد قطع الأشجار وفرض أن الأرض أصبحت مراعي خشنة بعض الشيء Rough Pasture ، وبإعادة النظر في الجدول الذي يحدد طول الخشونة نجد عندئذ أن:

$$Z_o = 10mm = 0.01m \text{ ، وعليه بتطبيق العلاقة (16-1) نجد:}$$

$$U(40) = 5 \frac{\ln(40/0.01)}{\ln(10/0.01)} = 6 [m/s]$$

في الطريقة الثانية، باعتبار طول الخشونة $\alpha = 1/7 = 0.142$ ، فإن سرعة الرياح تبقى كما هي.

مثال محلول (3-1)

عنفه ريحية ذات ثلاث شفرات بقطر 30 متر، نصبت على برج بارتفاع 50 متر، الأرض المجاورة ذات معامل خشونة $\alpha = 0.2$. أوجد نسبة الاستطاعة المتوفرة في الرياح عند أعلى نقطة بالنسبة للاستطاعة المتوفرة في أدنى نقطة.

الحل:

القطر 30 متر، وارتفاع مركز الشفرات 50 متر، طول الخشونة $\alpha = 0.2$

$$Z_{low} = 50 - 15 = 35 \text{ m}$$

$$Z_{high} = 50 + 15 = 65 \text{ m}$$

نسبة التغير بسرعة الرياح تعطى بالعلاقة (18-1):

$$\frac{U(Z_{high})}{U(Z_{low})} = \left(\frac{Z_{high}}{Z_{low}} \right)^\alpha = 1.13$$

نسبة التغير بالاستطاعة تساوي مكعب نسبة التغير بسرعة الرياح وبالعلاقة (19-1):

$$\frac{P(Z_{high})}{P(Z_{low})} = \left(\frac{U(Z_{high})}{U(Z_{low})} \right)^3 = 1.13^3 = 1.44$$

مثال (4-1)

أوجد طول قطر الشفرات اللازم لعنفة ريشية تولد 100 كيلو واط، في الحالة المستقرة عند سرعة رياح 7.5 متر/ثانية، بفرض أن كثافة الهواء $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$ ، وأن $C_p = 16/27$ ، وأن المردود $\eta = 1$

$$\text{a) } P = 100[kW]; U = 7.5[m/s]; \rho = 1.225[kg/m^3]; C_p = 16/27; \eta = 1$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p \eta U^3 \Rightarrow D = 2 \sqrt{\frac{P}{\frac{1}{2} \rho \pi C_p \eta U^3}} = 28.8[m]$$

7-5-1 تأثير كثافة الهواء وتغيرها تبعاً للارتفاع

Density of Air as a Function of Elevation

العلاقة بين الاستطاعة المولدة وكثافة الرياح خطية، وكثافة الرياح تابع للضغط الجوي، درجة الحرارة، الرطوبة وكلما ازداد الارتفاع سوف تنقص درجة الحرارة وينخفض الضغط وبالعودة للترموديناميك يمكن كتابة العلاقة الناعمة بين هذه المتغيرات وهي:

$$\rho = \rho_0 \left(1 - \frac{Lh}{T_0}\right)^{\frac{gM}{RL}} \frac{M}{R(T_0 - Lh)1000} \dots\dots\dots (1-19)$$

لدينا :

$$T_0 = 288.15 \text{ K}, \quad L = \text{Temperature lapse rate equal} = \frac{6.5K}{km},$$

and $h = \text{elevation in kilometer}, p_0 = 101,325 \text{ Pa},$

$g = \text{gravitational constant} = 9.80665 \text{ m/s}^2$

$R = \text{gas constant} = 287.059 \text{ (J/(kg.k))}$

and T is temperature in Kelvin ($K = C^\circ + 273.15$)

باعتدال العلاقة (1-19) أعلاه يمكن تشكيل الجدول (1-6) والذي يعطي الكثافة كتابع للارتفاع وذلك للهواء الجاف.

وزن الهواء الجاف يعادل 28.9644g/mole، لدى إضافة الرطوبة للهواء فإن ذرة الماء ذات الوزن النوعي 18، سوف تعمل على استبدال ذرة الهواء ذات الثقل النوعي الأكبر. لذا فإن الهواء الرطب سيكون أخف من الهواء الجاف لذا فإن الاستطاعة التي سيتم توليدها ستتخفض

الجدول (6-1) كثافة الهواء الجاف كتابع للارتفاع.

الارتفاع بالمتري Height/m	الكثافة Density ,kg/m ³
0	1.22499
5	1.224411
10	1.223824
50	1.21913
100	1.213282
150	1.207456
200	1.201651
250	1.195867
500	1.167268
1000	1.111642
1500	1.058067
2000	1.00649

الجدول التالي (7-1) يعطي كثافة الهواء الرطب حسب نسبة الرطوبة، عند ضغط جوي يساوي 101.325 باسكال، ودرجة حرارة 15 مئوية .

الجدول (7-1) كثافة الهواء الرطب حسب نسبة الرطوبة النسبية

Relative Humidity, %	Density, kg/m ³
0	1.225012
10	1.224233
20	1.223454
30	1.222674
40	1.221895
50	1.221116
60	1.220337
70	1.219557
80	1.218778
90	1.217999
100	1.217219

والجدول (8-1) يعطي كثافة الهواء كتابع لدرجة الحرارة عند ضغط جوي 1atmosphere

الجدول (8-1) كثافة الهواء كتابع لدرجة الحرارة عند ضغط جوي 1atm

Density of dry Air at a Pressure of 1 Atmosphere			
Temperature (°C)	Temperature (°F)	Density (Kg/m ³)	Density Ratio (K _T)
-15	5	1.368	1.12
-10	14	1.342	1.10
-5	23	1.317	1.07
0	32	1.293	1.05
5	41	1.269	1.04
10	50	1.247	1.02
15	59	1.225	1.00
20	68	1.204	0.98
25	77	1.184	0.97
30	86	1.165	0.95
35	95	1.146	0.94
-40	104	1.127	0.92
□The density ratio K _T is the ratio at T to the density at the standard (boldfaced) 15°C			

8-5-1 الموقع المناسب لإنشاء العنفة الريحية Wind turbine setting

تحديد موقع المزرعة الريحية يعتمد على عدة عوامل نذكر منها العوامل التالية:

- 1- توفر المساحة الكافية للمزرعة الريحية
- 2- توفر شبكة كهربائية 20-66 kV قريبة للربط عليها وباستطاعة استيعاب مناسبة لاستطاعة المزرعة الريحية المراد تركيبها، وذلك حتى يمكن حقن كامل الاستطاعة المولدة في الشبكة عند مختلف ساعات النهار.
- 3- إمكانية الوصول للمزرعة الريحية (طرقا ومنايب ..)
- 4- نوعية التربة للمنطقة.
- 5- تكرار الصواعق والبرق في المنطقة.
- 6- وردة الرياح في المنطقة.
- 7- الزلازل في المنطقة.

1-6 منحي الاستطاعة المثالي للعنفة الريحية

منحني الاستطاعة للعنفة الريحية، هو بند هام في دراسة الطاقة الممكن توليدها من العنفة الريحية، حيث يبين خواص العنفة، ويوضح العلاقة بين كمية الاستطاعة المولدة وسرعة الرياح كما في الشكل (1-20). وهو يتكون من ثلاث مناطق رئيسية:

- منطقة القطع الدنيا (أدنى سرعة للرياح تستطيع العنفة العمل عندها) VC Cut-in wind speed.
- منطقة التشغيل عند أفضل معامل للدائر CP وصولاً للعمل عند السرعة الاسمية Rated wind speed VR.
- منطقة التشغيل عند الاستطاعة الاسمية وصولاً لسرعة القطع العظمى Furling or Cut-Out speed VF.

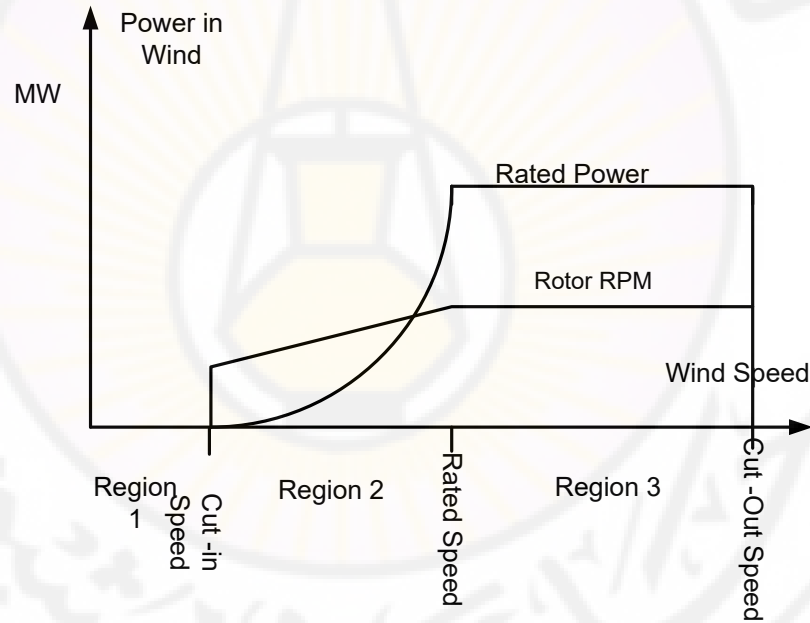
إذا كانت سرعة الرياح أقل من سرعة القطع الدنيا لا يمكن للعنفة الريحية أن تبدأ العمل، عزم الرياح يكون أقل من عزم الاحتكاك المطبق على العنفة، والمولد الريحي غير قادر على توليد استطاعة مفيدة عند مثل هذه السرعة.

من الشكل (1-20) نرى أنه كلما زادت سرعة الرياح ازدادت الاستطاعة المولدة، وذلك بمنحني أسّي تابع لمكعب سرعة الرياح، وهنا نعمل عند أفضل معامل دائر CP، لاستخلاص أفضل كمية من الطاقة مهما تغيرت سرعة الرياح بين سرعة القطع والسرعة الاسمية للعنفة، عن الوصول لسرعة الرياح الاسمية تولد العنفة كامل الاستطاعة الاسمية المصممة لها. في حال البدء لدى تجاوز السرعة الاسمية سوف تزداد استطاعة التوليد نظرياً، لكن حفاظاً على المولدة وعناصرها المختلفة من زيادة سرعة الدوران، يبدأ نظام التحكم والقيادة بتغيير زوايا الشفرات للحد من تزايد الاستطاعة والمحافظة على استطاعة توليد اسمية عظمى. بالنسبة للعنفات ذات الاستطاعة الكبيرة، هنالك كما سنرى لاحقاً ثلاث وسائل للتحكم بالعنفة الريحية وهي: التحكم الفعال بزوايا الشفرات Active pitch- control، التحكم السلبي بالقمرة Passive stall control، وعملية الدمج بين كلتا الطريقتين.

تصل أحياناً سرعة الرياح إلى قيم أكبر من السرعة العظمى التي تتحملها العنفة، ولا يمكن التحكم بهذه السرعة، نسعى عندئذ لفصل العنفة بحيث تصبح استطاعة الخرج مساوية للصفر. يمكن إيقاف الدائر، باستخدام التحكم بالزاوية والتحكم غير الفعال بالقمرة وذلك بتدوير الشفرات حول محورها الطولاني لخلق حالة السكون أو التوقف stall. عند الضرورة النظام الهيدروليكي

سوف يشد النوابض ويعمل على تدوير نهايات الشفرات بمقدار 90 درجة بعيداً عن اتجاه الرياح وبالتالي تتوقف العنفة .

في الشكل (18-1) المنحني اليساري الذي يدل على الاستطاعة المتوفرة في الرياح Power in Wind، هو دائماً أعلى من الاستطاعة الفعلية الممكن توليدها. كما نرى أن سرعة دوران الدائر تتزايد بدءاً من حالة الإقلاع وصولاً للسرعة الاسمية للعنفة، حيث يمكننا توليد الاستطاعة الاسمية. ونسعى بعدئذ بكل وسائل القيادة للمحافظة على سرعة دوران ثابتة مع تزايد سرعة الرياح وأيضاً الحفاظ على استطاعة خرج ثابتة.



الشكل (18-1) منحني الاستطاعة المثالي للعنفة كتابع لسرعة الرياح [4]

7-1 التوزيع الإحصائي لسرعة الرياح تابع احتمال الكثافة

[5]Probability Density Function, Probability distribution of wind speed

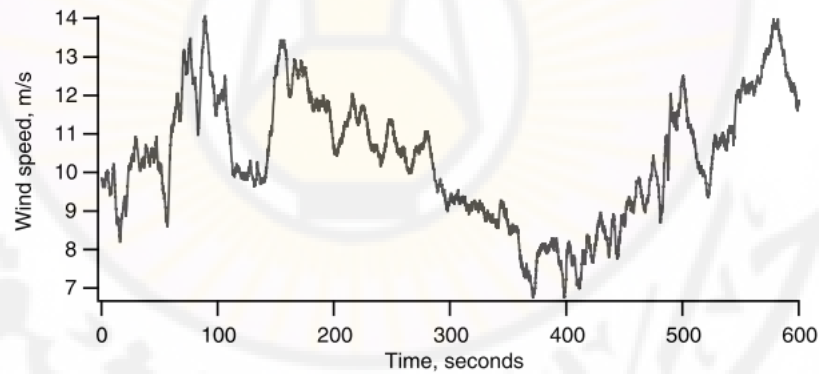
لدى القيام بدراسة إنشاء مزارع ريحية، والبحث عن المصادر الريحية، من الضروري معرفة خواص الرياح في أي موقع وهذا ينعكس عموماً على البنود التالية:

- تصميم النظام: تصميم النظام في أية مزرعة ريحية، يتطلب معرفة السرعة المتوسطة للرياح في الموقع. ومعرفة طبيعة العواصف والرياح القوية التي قد تهب.
- جودة الموقع: هذا يتطلب معرفة القدرة الممكن توليدها وتكاليفها.
- طبيعة الموقع وعدد العنفات الريحية الممكن تركيبها.
- التشغيل يحتاج لمعرفة المعلومات الكافية عن استمرارية هبوب الرياح وكيفية معالجة متطلبات الحمل.

1-7-1 تابع احتمال الكثافة ل سرعة الرياح

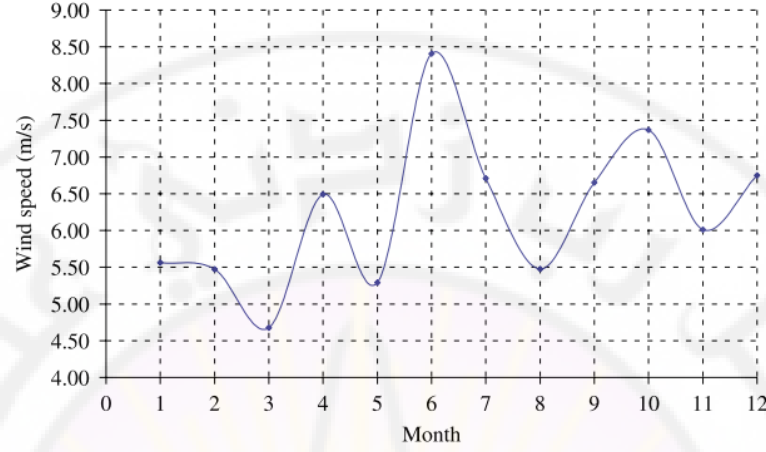
Wind speed probability density function

القياسات الميدانية ل سرعة هبوب الرياح وتغيرها مع الزمن تسجل عادة حسب الشكل (1-21)، ونرى كيف تتغير سرعة الرياح بشكل دائم وغير مستقر في كل ثانية. هذا بالمقابل ينعكس على قيمة الاستطاعة المولدة من العنفة الريحية .



الشكل (1-19) تغير سرعة الرياح مع الزمن (بالثواني)

ولدى تسجيل تغيرات سرعة الرياح لفترات زمنية طويلة تقدر بالأشهر، كما في الشكل (1-20) نرى كيف أن سرعة الرياح تتغير تبعاً للفصول وأشهر السنة وكل موقع له منحنى خاص به.



الشكل (1-20) تغير سرعة الرياح مع الزمن (بالأشهر)

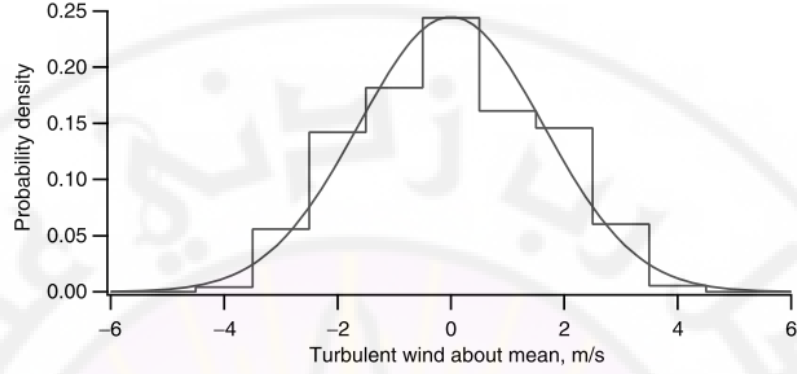
يمكن توصيف تابع احتمال الكثافة العادي $P(u)$ لهذا النموذج من الرياح يمكن توصيفه بالعلاقة التالية:

$$P(u) = \frac{1}{\sigma_u \sqrt{2\pi}} \exp \left[-\frac{(u-U)^2}{2\sigma_u^2} \right] \dots\dots\dots (1-21)$$

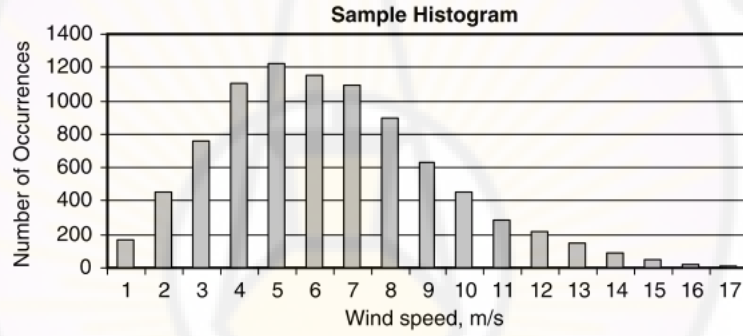
حيث : σ_u انحراف سرعة الرياح (وستعطى لاحقاً) ، u السرعة المتوسطة ،

من القيم التي تم قياسها ميدانياً يمكن رسم الشكل (1-21) ، الذي يبين منحنى تابع الكثافة لسرعة الرياح وتغيرها حول القيمة المتوسطة للنموذج المقاس أعلاه ويعطي ما يسمى بالهستوغرام للموقع Histogram ، ويرسم تابع خواص لاحتمال الكثافة الشكل (1-21) ، انطلاقاً من الهستوغرام والذي يمثل البيانات التي وردت في الشكل (1-19) .

الشكل (1-22) يوضح الهستوغرام النموذجي لعدد مرات تكرار هبوب الرياح كتابع لسرعة الرياح. من منحنى استمرار هبوب الرياح يمكن حساب فترة استمرار الاستطاعة المولدة، لأن قيمة الاستطاعة هي جداء مكعب السرعة بالمساحة الممسوحة من قبل الشفرات وكثافة الهواء المعروفة.



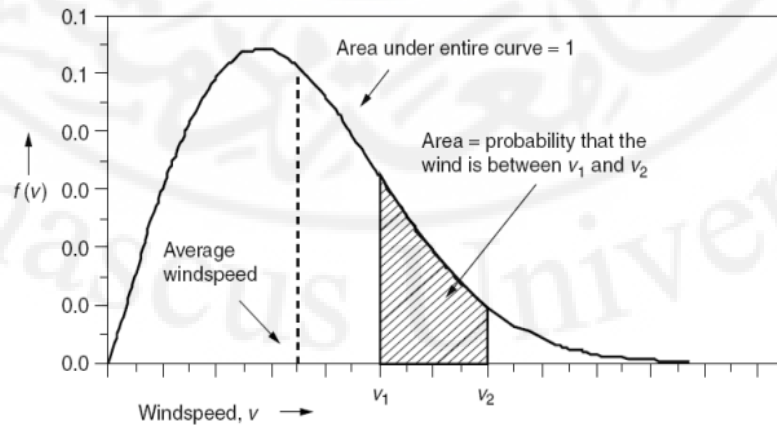
الشكل (21-1) تابع غواص لاحتمال الكثافة والهستوغرام لبيانات الموقع



الشكل (22-1) هستوغرام مبسط لموقع ريحي يوضح تردد تكرار سرعة الرياح

انطلاقاً من الهستوغرام شكل (22-1)، يمكن رسم منحنى تابع احتمال الكثافة المستمر المبين بالشكل (23-1). المساحة تحت هذا المنحنى تساوي الواحد الصحيح.

$f(v)$ = windspeed probability density function



الشكل (23-1) يوضح تابع احتمال الكثافة المستمر المشتق من الشكل (22-1)

2-7-1 معامل السعة (CF) Capacity Factor

عندما تعمل العنفة الريحية، بشكل عام، لا تعمل عند استطاعتها الاسمية، وذلك تبعاً لسرعة الرياح، لذا فإن معامل السعة يبين نسبة القدرة الحقيقية التي تولدها العنفة الريحية بالنسبة للقدرة فيما لو عملت العنفة الريحية كامل السنة عند استطاعتها الاسمية [1].

معامل السعة (CF):

= متوسط القدرة المولدة في الخرج (كيلو وات ساعي) / الاستطاعة الاسمية مضروبة بعدد ساعات السنة.

$$CF = \frac{P_{ave}}{P_{rated}} \dots (1-22)$$

يوضح الشكل (1-23) قيمة معامل السعة للعنفة الريحية كتابع لسرعة الرياح ، عندما تصل سرعة الرياح للسرعة الاسمية المصمم لها المولد ، يتحسن عامل السعة ، لكن عند سرعات رياح منخفضة ، يبقى هذا العامل ضعيفاً وهو بالتالي يعطي دلالة عن القدرة الفعلية الممكن توليدها من العنفة أو المزرعة الريحية .

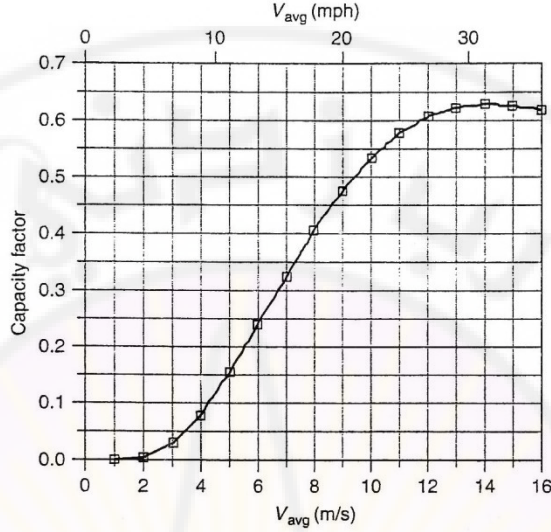
وباعتماد الطريقة الأولى، يمكن التعبير عن عامل السعة السنوي بالشكل:

$$CF = \frac{E_a}{P_{rated} \times 8760} \dots (1-23)$$

E_a : القدرة المولدة من قبل العنفة الريحية. وتحسب هذه القدرة بضرب استطاعة الخرج للعنفة الريحية عند سرعة ما بعامل يمثل احتمال الحصول على تلك السرعة خلال السنة كما توضحه العلاقة:

$$E_a = 8760 \times \sum_{v_1}^{v_2} F(v)P(v) \dots (1-24)$$

هذا المعامل لا يتجاوز عادة 0.3، وفي بعض المواقع قد يزيد عن ذلك. الشكل (1-24) يوضح تغير عامل السعة كتابع لمتوسط سرعة الرياح، وهو يتزايد مع تزايد السرعة المتوسطة للرياح.



الشكل (1-24) عامل السعة CF كتابع لسرعة الريح باعتماد إحصائيات ريلاند

3-7-1 التحليل الاحصائي لبيانات الريح

Statistical Analyze of Wind Data [5]

يستخدم التحليل الاحصائي بقصد تحديد وحساب القدرة الكهربائية الممكن استجراها من العنفة الريحية في موقع معين. هذه التقانة تمت دراستها من قبل العديد من الباحثين منذ عام 1978 ولغاية 1994. في حال توفر مجموعة قياسات في موقع ما لسرعة الريح في فترة زمنية معينة، عند ارتفاع محدد، تقريباً 40 متر، يمكن تحليل القراءات باعتماد التقانات الاحصائية واحتمالية التوزيع Probability Distribution، للاستفادة من هذه البيانات ومعرفة فترات هبوب الريح، ومتوسط سرعتها خلال السنة. هذا وإن احتمالية التوزيع يتم توصيفها بشكل جيد عبر معامل نطلق عليه تابع احتمال الكثافة Probability Density Function

(PDF)، أو تابع الكثافة الاجمالي Cumulative Density Function (CDF).

1-3-7-1 العلاقة النازمة لتابع احتمال الكثافة

Probability Density Function equation (PDF)

تردد هبوب الريح عند سرعة معينة، يمكن توصيفه باسم تابع احتمال الكثافة لسرعة الريح $P(U)$ ، وهذا التابع يمكن استخدامه للتعبير عن احتمالية حدوث هبوب للريح ضمن مجال للسرعة يقع بين U_a و U_b ، ويعطى بالعلاقة:

$$(P(U_a \leq U \leq U_b)) = \int_{U_a}^{U_b} P(U) dU \dots\dots\dots (1-25)$$

أيضاً، نبين أن المساحة الإجمالية الواقعة تحت منحنى احتمال الكثافة يساوي الواحد الصحيح. وتحسب المساحة بالعلاقة:

$$\int_0^{\infty} P(U) dU = 1 \dots\dots\dots (1-26)$$

المساحة المقاسة تحت هذا المنحنى [13]، بين أي سرعتين (V_1 و V_2)، تساوي احتمال أن الريح تهب بين هاتين سرعتين لفترة تساوي قيمة المساحة مضروباً بعدد ساعات السنة، وتحسب من العلاقة:

$$(Probability(v_1 \leq v \leq v_2)) = \int_{v_1}^{v_2} f(v) dv \dots\dots\dots (1-27)$$

وعليه فإن عدد الساعات التي ستهب فيها الريح بين هاتين سرعتين يساوي:

$$hours / yr(v_1 \leq v \leq v_2) = 8760 \int_{v_1}^{v_2} f(v) dv. \dots\dots\dots (1-28)$$

القيمة المتوسطة:

$$v_{avg} = \int_0^{\infty} v \cdot f(v) dv \dots\dots\dots .. (1-29)$$

$$(v^3)_{avg} = \int_0^{\infty} v^3 \cdot f(v) dv.$$

إذا كان تابع احتمال الكثافة معروف $P(U)$ ، يمكن عندئذ حساب البارامترات التالية:

متوسط سرعة الريح $\bar{U}$:

$$\bar{U} = \int_0^{\infty} U \cdot P(U) dU \dots\dots\dots (1-30)$$

انحراف سرعة الريح الاسمي σ_U STANDARD:

$$\sigma_U = \sqrt{\int_0^{\infty} (U - \bar{U})^2 P(U) dU} \dots\dots\dots (1-31)$$

متوسط كثافة الاستطاعة المتوفرة بالريح في الموقع

$$\bar{P} / A = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} U^3 P(U) dU = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^3 \dots\dots\dots (1-32)$$

U^3 تعبر عن مكعب سرعة الرياح

1-7-3-2 العلاقة النازمة لتابع التوزيع التراكمي

Cumulative Distribution Function

تابع التوزيع التراكمي (U) يمثل الجزء من الزمن أو الاحتمالية بأن سرعة الرياح أقل أو تساوي لقيمة سرعة ربح معطاة U .
هذا يعني أن:

$$F(U) = \int_0^U P(U) dU \dots\dots\dots (1-33)$$

$$F(U) = \int_0^U P(U') dU' \dots\dots\dots$$

أيضاً مشتق تابع التوزيع التراكمي، يساوي لتابع احتمال الكثافة:

$$P(U) = \frac{dF(U)}{dU} \dots\dots\dots (1-34)$$

يمكن ملاحظة أن منحنى استمرار السرعة يشابه أو يتعلق مباشرة بتابع التوزيع التراكمي. في الحقيقة منحنى استمرار السرعة: $(1 - F(u)) \times 8760 = \text{velocity duration curve}$ لكن بمحاور X&Y معكوسة.

1-7-3-3 احتمال التوزيع الأكثر تداولاً

Commonly Used Probability Distribution

يستخدم عموماً تابعين للتوزيع لدى تحليل البيانات المسجلة عن سرعة الرياح وهما [5]:

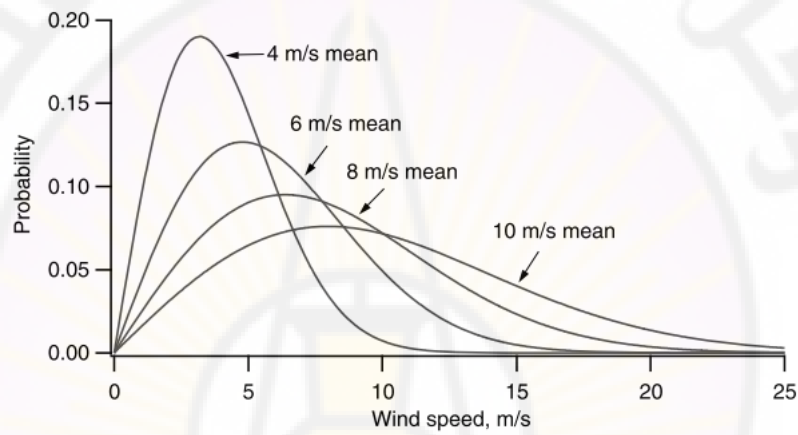
1- تابع توزيع رايلي Rayleigh

توزيع رايلي يعتمد عامل وحيد هو متوسط سرعة الرياح $\bar{U}$ كعامل أساسي لتمثيل مصادر طاقة الرياح. تابع احتمال الكثافة وتابع التوزيع التراكمي يعطيان بالعلاقات التالية:

$$P(U) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right) \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (1-35)$$

$$F(U) = 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \dots\dots\dots (1-36)$$

الشكل (25-1) يبين تابع احتمال الكثافة لرايلي لمختلف متوسط سرعات الرياح. كما نرى من الشكل (25-1) أن القيم الكبرى لسرعة الرياح تكون ذات احتمالية أكبر عند سرعات متوسطة كبيرة.



الشكل (25-1) تابع احتمال الكثافة لرايلي عند مختلف قيم السرعات المتوسطة للرياح

2- تابع توزيع ويبل Weibull :

تابع احتمال الكثافة لويبل مبني على عاملين أساسيين، مما يسمح بدراسة طيف أوسع من مجال تغيرات سرعة الرياح. العامل الأول هو عامل الشكل K Shape factor، والعامل الثاني هو C عامل القياس أو المقياس Scale factor، وكلا هذين العاملين تابع لمتوسط سرعة الرياح ولعامل انحراف سرعة الرياح الاسمي σ_U .

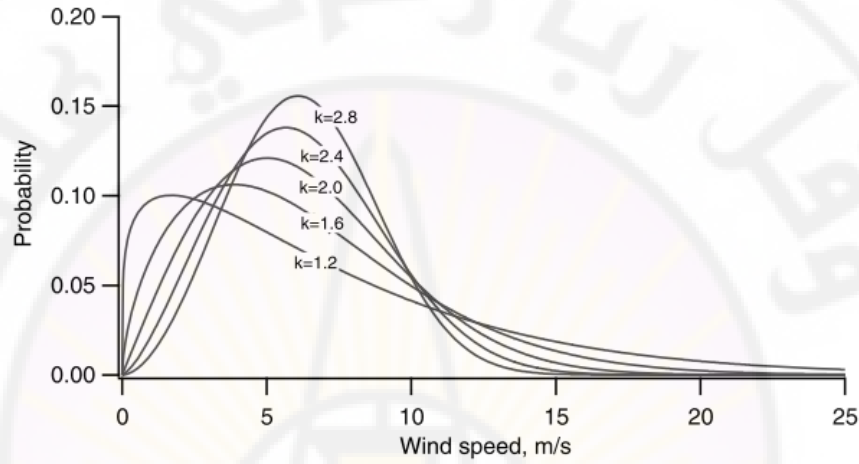
تابع احتمال الكثافة لويبل $P(U)$ يعطى بالعلاقة:

$$P(U) = \left(\frac{k}{c} \right) \left(\frac{U}{c} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{U}{c} \right)^k \right] \dots \dots \dots (1-37)$$

تابع التوزيع التراكمي $F(U)$ يعطى بالعلاقة التالية:

$$F(U) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{U}{c} \right)^k \right] \dots \dots \dots (1-37-1)$$

المنحنيات الواردة في الشكل (1-26) تبين تابع احتمال الكثافة لويبل من أجل عدة قيم لعامل الشكل k ، نرى أنه كلما زادت قيمة عامل الشكل k يأخذ المنحني قمماً حادة، مشيراً لتغيير طفيف في سرعة الرياح، ولدى انخفاض عامل الشكل ينسطح المنحني.



الشكل (1-26) يبين تابع احتمال الكثافة لويبل عند قيم مختلفة لعامل الشكل، من أجل سرعة رياح متوسطة تساوي 6 متر لكل ثانية [2]

1-7-3-4 ملاحظات عامة

- عامل القياس C والعلاقة مع السرعة وعامل الشكل K
عامل القياس [9] (C) لويبل يمكن تقديره من العلاقات التالية، وله قيمة قريبة من قيمة السرعة، ويتعلق بالسرعة الوسطية ومعامل الانحراف:
والعلاقة أدناه تبين هذه العلاقة:

$$k = \left(\frac{\sigma}{x} \right)^{-1.086} \quad \text{and} \quad \frac{C}{x} = \left(0.568 + \frac{0.433}{k} \right)^{-\frac{1}{k}} \quad (1-38)$$

حيث σ_U انحراف الرياح النظامي ، $x = \bar{U}$ متوسط سرعة الرياح

مثال (1-5) [28] :

إذا فرضنا موقع له سرعة رياح سنوية متوسطة تساوي 7m/s وانحراف معياري standard deviation قدره 2.5m/s، أوجد القيمة التقديرية لعامل الشكل k ولعامل القياس c لهذا الموقع.

الحل:

$$k = \left(\frac{\sigma}{x} \right)^{-1.086} = \left(\frac{2.5}{7} \right)^{-1.086} = 2.70$$

$$\frac{c}{x} = \left(0.568 + \frac{0.433}{k} \right)^{\frac{-1}{k}}$$

$$\frac{c}{7} = \left(0.568 + \frac{0.433}{2.70} \right)^{\frac{-1}{2.70}}$$

$$c = 7.87 \text{ m/s}$$

عامل القياس C يعبر عنه في بعض الأبحاث بالشكل التالي:

$$\bar{U} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} c$$

$$c = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \bar{U} = 1.12 \bar{U}$$

ملاحظة:

بارامترات ويبل (C&K) يمكن حسابها باستخدام العلاقات التالية:

$$k = \left(\frac{\sigma}{v_{avg}} \right)^{-1.086} \quad (1 \leq k \leq 10) \quad \dots (1-39)$$

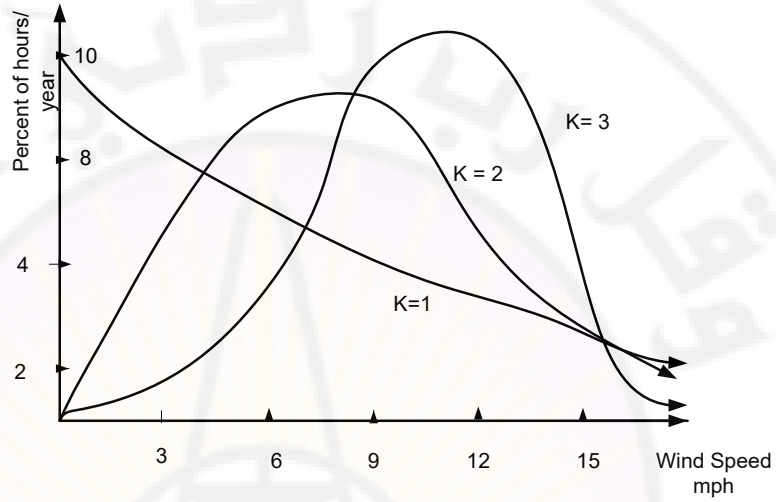
$$c = \frac{v_{avg}}{\Gamma\left(1 - \frac{1}{k}\right)} \quad \dots (1-40)$$

حيث Γ تمثل تابع غاما [6]:

$$\Gamma(x) = \int_0^{\infty} e^{-u} u^{x-1} du \quad \dots (1-41)$$

نرى في الشكل (1-27) تابع توزيع ويبل، أي عدد الساعات اليومية كتابع لسرعة الريح من أجل عدة قيم لعامل الشكل K، من أجل K=1، ومن أجل عامل قياس يساوي 10، يأخذ تابع ويبل الشكل الأسّي، BIAS حيث تكون فيه معظم الأيام بدون هواء، سرعة الريح تساوي الصفر. المنحني المرسوم من أجل K=3، يشبه التوزيع الطبيعي وهو التوزيع الجيد للريح. حيث في بعض الأيام تهب فيها رياح بسرعات عالية، وأيام أخرى تهب فيها رياح بسرعة منخفضة. المنحني المرسوم في الوسط عند K=2، هو الشكل النموذجي لتوزيع الريح الذي نصادفه في أغلب المواقع. في هذا التوزيع نرى وجود أيام عديدة تكون سرعة الريح فيها أقل

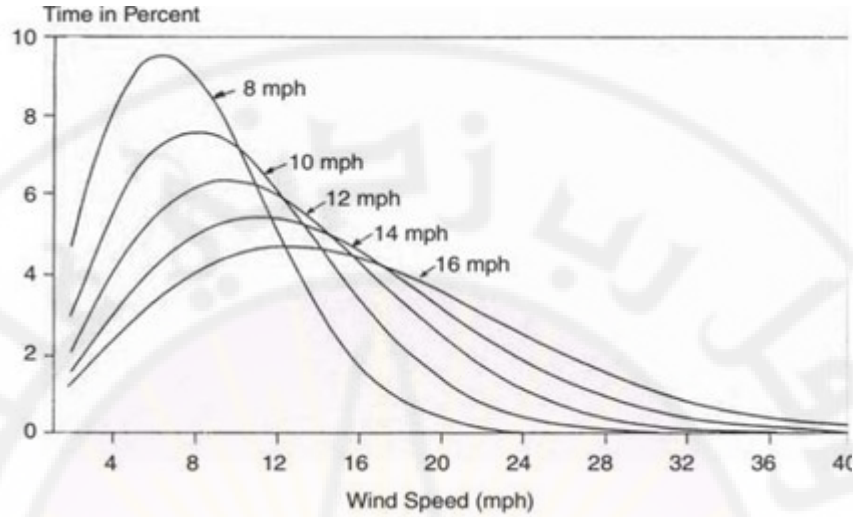
من سرعة الريح الوسطى. هذا يعني أن العامل K يحدد شكل المنحني لذا أطلق عليه عامل الشكل [4].



الشكل (1-27) تابع توزيع ويبيل من أجل عامل مقياس يساوي $C=10$ وعوامل شكل متعددة $K=1, K=2, K=3$

يبين الشكل (1-28) تابع توزيع ويبيل عند عامل شكل ثابت $K=2$ ، ولعدة قيم لعامل القياس C والتي تتراوح بين 8 والـ 18 ، (عوامل القياس معطاة بوحدة mph ميل بالساعة وهي تقابل $(\text{mph} = 0.446\text{m/sec})$).

من أجل قيم أكبر لعامل القياس تتزاح المنحنيات نحو اليمين للتعبير عن قيم أعلى لسرعة الريح. في الواقع، كلما ارتفعت قيمة عامل القياس C ، يرتفع عدد الأيام التي ستهب فيها رياح قوية ، لأن ذلك يزيح توزيع الساعات لمقياس سرعة مرتفع، لذا سمي بعامل القياس scale parameter . في معظم المواقع، يحسب توزيع ويبيل من أجل $k=2$ ، وهو يماثل توزيع رايلي. القياسات الميدانية الفعلية المسجلة لمعظم المواقع تقارن أو تشابه توزيع رايلي، وهو توزيع بسيط يعتمد على متحول واحد وهو السرعة المتوسطة للريح أو معامل القياس.



الشكل (1-28) بين احتمال توزيع ويبيل عند عامل شكل $K=2$ وعوامل قياس مختلفة تتراوح من 8 ولغاية 16

5-3-7-1 طبيعة ومتوسط سرعات الريح Mode and Mean Speeds

سوف نعرف بعض التعابير المتداولة والمطبقة لسرعة الريح :

- السرعة الطبيعية Mode Speed وهي السرعة المتواجدة على مستوى محور الريش HUB، وهي السرعة التي تهب في معظم الأوقات.

- السرعة المتوسطة Mean Speed، خلال الفترة هي حاصل قسمة المساحة الإجمالية الواقعة تحت منحنى الزمن-السرعة التي تم إجراء التكامل لها من السرعة المساوية للصفر $v=0$ إلى اللانهاية، مقسوماً على عدد الساعات السنوية 8760 ساعة، وهي يمكن توصيفها بالعلاقة التالية:

$$V_{mean} = \frac{1}{8760} \int_0^{\infty} h.v.dv \dots \dots \dots$$

$$V_{mean} = c \sqrt{\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \dots \dots \dots (1-42)$$

6-3-7-1 العلاقة بين عامل القياس وعامل الشكل :

يمكن تقريب العلاقة بين عامل القياس C وعامل الشكل K، في معظم المواقع لتصبح حسب تابع غاما Gamma function ، من أجل عامل شكل $k=2$ تابع غاما يتم تقريبه للقيمة:

$$V_{mean} = 0.90c \dots \dots \dots (1-43)$$

وهذه أبسط علاقة بين عامل القياس والسرعة المتوسطة للرياح V_{mean} ، ويمكن استخدامه بدقة معقولة. مثلاً، تعرف معظم المواقع بسرعتها المتوسطة، والعامل C في تابع رايلي سيكون $c = V_{mean} / 0.9$ ، عامل الشكل $K=2$ بالتأكيد لتابع رايلي.

1-7-3-6 مكعب متوسط السرعة (r.m.c) Root Mean Cube Speed

نعلم أن الاستطاعة الممكن توليدها من العنفة الريحية تتناسب مع مكعب السرعة V_{rmc} ، وعليه فإن القدرة الممكن تحصيلها خلال السنة سيكون تكامل المقدار: $h.v^3.dv$ (عدد الساعات h) لذا سنحدد مكعب متوسط السرعة (rmc) بطريقة ماثلة لحساب القيمة الفعالة للتيار المتناوب المعروفة

: Root Mean Square (rms)

$$V_{rmc} = \sqrt[3]{\frac{1}{8760} \int_0^{\infty} h.v^3.dv} \dots \dots \dots (1-44)$$

مكعب متوسط السرعة V_{rms} ، مفيد لتقدير القدرة السنوية الممكن الحصول عليها في أي موقع وذلك باستخدام العلاقة النازمة لحساب استطاعة التوليد المعروفة.

$$P_{rmc} = \frac{1}{4} \rho . V_{rmc}^3 [W / m^2] \dots \dots (1-45)$$

ولدى ضرب هذه الاستطاعة P_{rmc} بعدد الساعات السنوية نحصل على القدرة الممكن تأمينها من الموقع. في حال كون مكعب متوسط السرعة متساوي لعدة مواقع، فإن عامل الشكل للموقع هو الذي سيغير في قيمة كثافة الاستطاعة للموقع ($watts/m^2$).

1-7-3-7 مقارنة السرعة المتكررة (الأكثر هبوباً) الطبيعية المتوسطة مكعب متوسط

السرعة

Mode, Mean, and r. m.c speed compared

الفرق الهام بين السرعة المتكررة بالموقع (الطبيعية) mode، والمتوسطة mean، ومكعب متوسط السرعة r.m.c موضح بالجدول (1-5). قيم السرعات الثلاث اعتمدت من أجل أربع عوامل شكل مختلفة

(K=1.5,2.0,2.5, and 3.0) ،ومن أجل ثلاث عوامل قياس (c=10,15,and20 mph) .من هذه

القيم تم حساب كثافة الاستطاعة Watts/m² في كل حالة باستخدام العلاقة:

$$P = \frac{1}{2} \rho V^3 [W / m^2] , \text{ واعتماد كثافة الهواء } 1.225 kg / m^3 , \text{ واعتبار أن مردود الدائر}$$

:C_p=0.5

الجدول (5-1) يبين أثر عوامل الشكل والقياس على طبيعة ومتوسط ومكعب سرعة الرياح وعلى كثافة القدرة [27]

c	k	Mode Speed	Mean Speed	RMC Speed	Pmode W/m ²	Pmean W/m ²	Prmc W/m ²	Ermc KWh/yr
10	1.5	4.81	9.03	12.60	68	451	1225	5366
	2.0	7.07	8.86	11.00	216	426	814	3565
	2.5	8.15	8.87	10.33	331	428	675	2957
	3.0	8.74	8.93	10.00	409	436	613	2685
15	1.5	7.21	13.54	18.90	230	1521	4134	18107
	2.0	10.61	13.29	16.49	731	1439	2748	12036
	2.5	12.23	13.31	15.49	1120	1444	2278	9978
	3.0	13.10	13.39	15.00	1377	1472	2067	9053
20	1.5	9.61	18.05	25.19	544	3604	9790	42880
	2.0	14.14	17.72	22.00	1731	3410	6514	28531
	2.5	16.30	17.75	20.66	2652	3423	5399	23648
	3.0	17.47	17.86	20.00	3266	3489	4900	21462

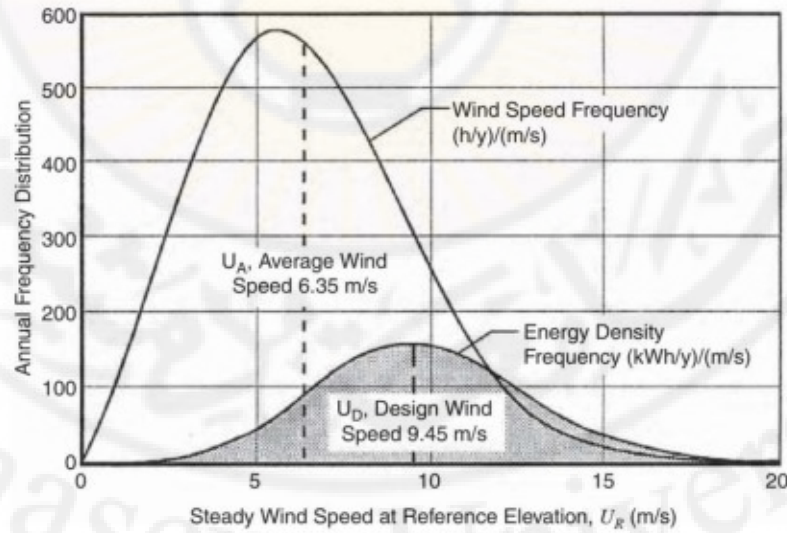
P = wind power density in watts per square meter of the blade swept area = 0.5 ρ V³
where ρ = 1.225 kg/m³

The last column is the energy potential of the site in kWh per year per m² of the blade area, assuming the rotor efficiency C_p of 50 percent (i.e., the maximum power that can be converted into electrical power is 0.25 ρ V³).

بالنظر للجدول أعلاه ومن أجل عامل قياس c=15 نجد ما يلي:

1. من أجل k=1.5 كثافة الاستطاعة Watts/m² باستخدام السرعة المتكررة mode speed تساوي 230 مقابل القيمة الصحيحة المساوية 4134 وات لكل متر مربع والناجمة عن استخدام مكعب متوسط السرعة r.m.c. نسبة الخطأ في حساب كثافة الاستطاعة تقارب 18 مرة فرق.
2. من أجل k=2، كثافة الاستطاعة المحسوبة Watts/m² باعتماد السرعة المتكررة للموقع mode speed، ومكعب متوسط السرعة هي 731 و 2748 Watts/m². بالتتابع، أي بنسبة 1 إلى 3.76 مرة. كثافة الاستطاعة للمتر المربع بالنسبة للسرعة المتوسطة ومكعب السرعة r.m.c تساوي 1439 و 2748 Watts/m² أي بنسبة 1 إلى 1.91.

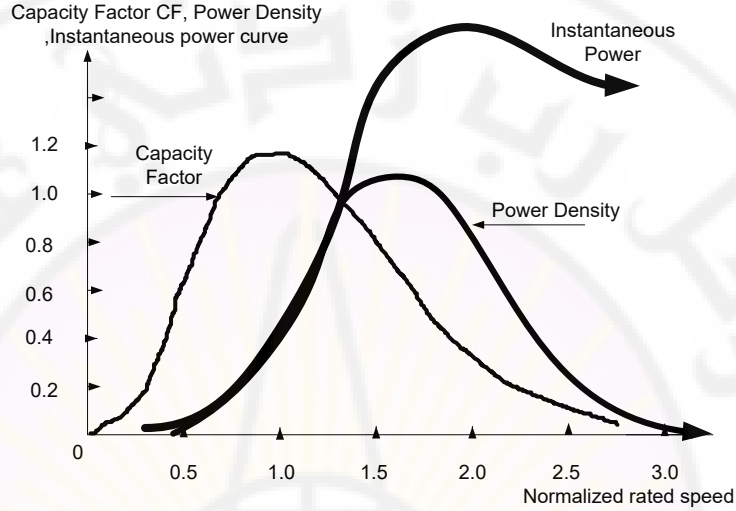
هذا يعني أنه بدون النظر لعامل الشكل k وعامل القياس c ، فإن استخدام قيمة السرعة المتكررة للموقع أو القيمة المتوسطة للسرعة mean speed ، في علاقة كثافة الاستطاعة سوف تعطينا خطأ كبير في تقدير القدرة السنوية ويجب الانتباه لآلية حساب تلك القدرة أو الاستطاعة. 3. يمكن وضع منحنى الاستطاعة المولدة فوق منحنى احتمال الكثافة ليصبح الشكل كما هو مبين بالشكل (1-30)، هذا الشكل من أجل توزيع رايلي. منحنى تغير السرعة ذو سرعة متكررة mode تساوي 5.5 m/s ، وسرعة متوسطة mean تساوي 6.35 m/s ، على كل حال، بسبب أن الاستطاعة تابعة لمكعب السرعة فإن الاستطاعة العظمى سنحصل عليها عند سرعة رياح تساوي 9.45 m/s . بالطبع من أجل سرعات رياح أكبر من تلك القيمة، تستمر الاستطاعة بالتزايد، لكن بالنسبة للقدرة الناتجة سوف لن تتزايد بنفس المعدل بل سوف تتناقص لأن عدد الساعات التي تهب فيها الرياح بسرعات عالية سيكون أكبر من مكعب سرعة الرياح. ومن الأفضل تصميم العنفات للعمل عند سرعات متغيرة لتحصيل أكبر قدرة سنوية، كون استمرار فترة هبوب تلك الرياح المتغيرة السرعة أكبر.



الشكل (1-30) منحنى كثافة الاستطاعة المولدة، معامل السعة CF [4]

هذا ويمكن وضع منحنى معامل السعة CF ، ومنحنى كثافة القدرة KWH الممكن توليدها في هذا الموقع، ومنحنى الاستطاعة اللحظية المولدة كتابع لسرعة الرياح كما في الشكل

(31-1) أدناه.



الشكل (31-1) منحنى معامل السعة CF، ومنحنى كثافة القدرة KWH، ومنحنى الاستطاعة اللحظية [28]

مثال محلول (6-1):

من أجل عنفة ريحية بريش ذات قطر 54m واستطاعة 1000kW ذات سرعة بدء $V_C = 4[m/s]$ (Cut-in)، وأن معدل سرعة الرياح $V_R = 14[m/s]$ وأن سرعة الفصل Furling (Cut-out) للمولد $V_F = 25[m/s]$ وأن المولد مركب بموقع ذي عامل توزيع للرياح حسب Ray leigh وأن متوسط سرعة الرياح هي 10m/s. عندئذ :

1- عدد الساعات السنوية (hrs/year) التي تكون سرعة الرياح فيها أخفض من سرعة البدء Cut-in يمكن إيجادها بحساب احتمال أن تكون سرعات الرياح اللحظية أقل من سرعة البدء للهواء:

$$F(4m/s) = \text{prob}(v \leq 4m/s) = 1 - \exp\left[-\frac{\pi}{4}\left(\frac{4}{10}\right)^2\right] = 0.1181$$

وعليه فإن الساعات التي يكون فيها سرعة الرياح أخفض من سرعة الفصل هو:

$$\text{Hours}(V \leq 4m/s) = 8760 \times 0.1181 = 1034 \text{ hrs / year}$$

2 - عدد الساعات التي يتوقف التوربين عن العمل لأن سرعة الرياح عالية:

$$prob(v \geq 25m/s) = 1 - \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{25}{10} \right)^2 \right] \right\} = \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{25}{10} \right)^2 \right] = 0.0074$$

$$Hours(V \geq 25m/s) = 8760 \times 0.0074 = 65hrs/year$$

3- عدد الساعات التي يكون سرعة الرياح فيها أكبر من 14m/s هي:

$$prob(v \geq 14m/s) = 1 - \left\{ 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{14}{10} \right)^2 \right] \right\} = 0.2145$$

$$Hours(V \geq 14m/s) = 8760 \times 0.2145 = 1879hrs/year$$

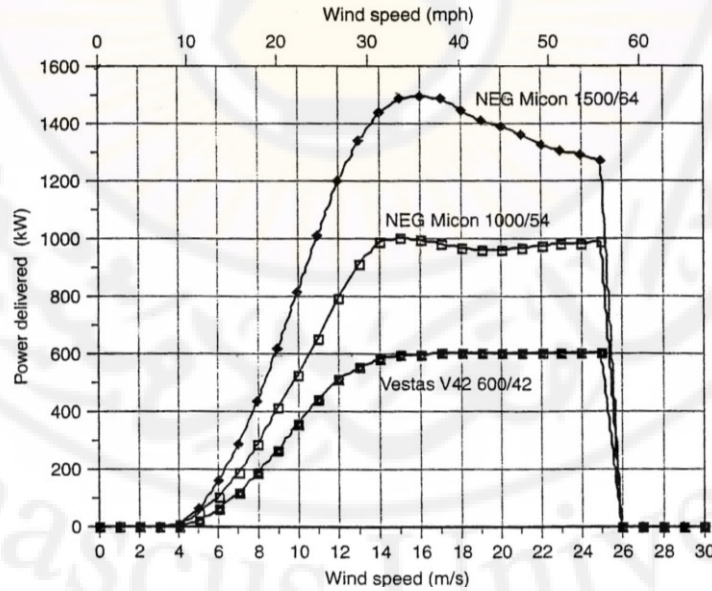
وعليه فإن عدد الساعات التي يكون سرعة الرياح تتراوح بين 14m/s و 25m/s ويقدم المولد استطاعته الاسمية هي:

$$Hours(14m/s \leq V \leq 25m/s) = 1879 - 65 = 1814hrs/year$$

القدرة المولدة عندئذ هي:

$$1814 \times 1000 = 1814GWh/year$$

الشكل (1-32) يوضح منحنى الاستطاعة التي يمكن أن تقدمها بعض العنفات الريحية تبعاً لسرعة الرياح.



الشكل (1-32) منحنيات الاستطاعة لثلاث عنفات ريفية كبيرة الاستطاعة

مثال محلول (7-1):

- عنفة ريحية ذات ثلاث شفرات، قطر الشفرة الواحد 40 متر، سرعة الرياح 14 متر/ثانية، عند مستوى محور العنفة، (Hub height)، كثافة الهواء $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$. أوجد:
- سرعة الدوران، دورة في الدقيقة، للدائر إذا كان معدل سرعة نهاية الشفرات يساوي 5.
 - ما هي سرعة نهاية الشفرات.
 - إذا كانت سرعة دوران المولد 1800 (r.p.m)، ما هي نسبة تغيير السرعة في علبة السرعة اللازم وضعها للموائمة بين سرعة دوران المحور المرتبط بالشفرات ومحور دوران المولد.
 - ما هو مردود العنفة الكلي، (متضمناً الشفرات، النقل، المحور، المولد).

الحل:

$$\lambda = 5$$

$$\lambda = \frac{\Omega R}{U}$$

$$\Omega = \frac{\lambda U}{R} = \frac{5.0 * 14 (m/s)}{20m} = 3.5 [rad/s]$$

$$N_{rotor} = \frac{(\Omega rad/s)(60S/min)}{2\pi rad/rev} = 33.42 [rpm]$$

$$U_{tip} = \Omega R = (20m)(3.5 rad/s) = 70 [m/s]$$

$$N_{gen} = 1800 rpm; N_{rotor} = 33.42 rpm$$

$$gearbox \text{ ratio} = \frac{N_{gen}}{N_{rotor}} = 53.86$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p \eta U^3; \quad C_p = \frac{16}{27}$$

$$\eta = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p U^3} = 0.56$$

مثال محلول (8-1):

- تم تحديد بارامترات ويبل Weibull من التحليل السنوي لبيانات سرعة الرياح (لكل ساعة، لمدة سنة) وكانت: $C = 6 \text{ m/s}$ ، $K = 1.8$. بين السرعة المتوسطة لهذا الموقع average velocity . قدر عدد الساعات خلال السنة والتي تكون فيها سرعة الرياح ما بين

m/s (6.5- 7.5) . ثم قدر عدد الساعات خلال السنة والتي تكون فيها سرعة الريح فوق 16
m/s

الحل:

$$\bar{U} = \int_0^{\infty} U_p(U) dU = c \Gamma \left(1 = \frac{1}{k} \right) \quad \text{من المعادلة:}$$

لذلك:

$$\bar{U} = c \Gamma \left(1 = \frac{1}{k} \right) = (6) \Gamma \left(1 = \frac{1}{1.8} \right) = 6 * 0.8893 = 5.34 \text{ m/s}$$

(ب) عدد الساعات التي تكون فيها سرعة الرياح بين 6.5m/s و 7.5m/s خلال السنة يساوي إلى جداء احتمال سرعة رياح بين 6.5m/s و 7.5m/s و عدد ساعات السنة. من الملائم إيجادها باستخدام تابع التوزيع التراكمي كما في المعادلة:

$$P(6.5 < U < 7.5) = F(7.5) - F(6.5) = \exp \left(- \left(\frac{6.5}{c} \right)^k \right) - \exp \left(- \left(\frac{7.5}{c} \right)^k \right) = 0.9198$$

$$0.09198 \times 8760 = 806 \text{ hr} = \quad \text{منه عدد الساعات خلال العام}$$

(ج) بشكل مشابه احتمال سرعة رياح تساوي أو أكبر من 16m/s يعطى بالعلاقة:

$$P(U \geq 16) = \int_{16}^{\infty} p(U) dU = 1 - F(16) = \exp \left(- \left(\frac{16}{6} \right)^{1.8} \right) = 0.002896$$

ومنه عدد الساعات خلال العام

$$0.002896 \times 8760 = 25 \text{ hr}$$

مثال محلول (9-1) :

تحليل البيانات لموقع بينت أن سرعة الرياح المتوسطة هي 6 m/s . وحيث أن عامل توزيع رايللي يعطي دفعة جيدة لمعرفة بيانات الرياح. باعتماد توزيع رايللي، قدر عدد الساعات التي تكون سرعة الرياح فيها ما بين (9.5- 10.5) m/s خلال السنة. أيضاً باعتماد توزيع رايللي، قدر عدد الساعات السنوية التي تكون فيها سرعة الرياح مساوية وأكبر من 16m/s الحل :

- الجزء الأول والثاني من الطلبات يمكن حلها كما في المسألة السابقة بفرض عامل توزيع ويبل كان K=2 . والذي يوافق لعامل رايللي، لكن الطريقة المباشرة هي استخدام معادلة توزيع رايللي الأساسية لذا من أجل الطلب الأول نكتب:

$$P(9.5 < U < 10.5) = \int_{10-0.5}^{10+0.5} P(U) dU = F(10.5) - F(9.5)$$

$$= \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{6.5}{6}\right)^2\right) - \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{10.5}{6}\right)^2\right) = 0.0494$$

ومنه عدد الساعات خلال العام: $0.0494 \times 8760 = 433 \text{ hr}$
 بـ) باستخدام المعادلة:

$$P(U \geq 16) = 1 - F(16) = \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{16}{6}\right)^2\right) = 0.00375$$

ومنه عدد الساعات خلال العام $0.00375 \times 8760 = 33 \text{ hr}$

مثال محلول (10-1) :

احسب الإنتاج السنوي بال KWH، لعنفة ريشية ذات محور أفقي ، قطر الشفرات 12 متر، تعمل ضمن الشروط النظامية، كثافة الهواء $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$ ، سرعة الرياح المتوسطة 8 متر/ثانية . استخدم عامل الكثافة للموقع والذي يتم إعطاؤه تبعاً لعامل الكثافة لتوزيع رايللي. يمكن إيجاد الاستطاعة المتوسطة لهذه الآلة من المعادلة:

$$\bar{P} = \rho \left(\frac{2}{3} D\right)^2 \bar{U}^3$$

$$\bar{P} = 1.225 \left(\frac{2}{3} * 12\right)^2 8^3 = 40.2 \text{ kW}$$

ومنه

$$40.2 * 8760 = 352,000 \text{ kWh}$$

الطاقة المنتجة سنوياً:

مثال (11-1) [8]

عنفة ريشية بدائر ذي قطر 55 متر، باستطاعة واحد ميغا وات، سرعة الرياح عند محور العنفة يساوي 14 متر/ثانية، سرعة الرياح عند القطع Cut-in 4m/s، وسرعة الرياح عند الفصل Cut-out = 25m/s، بفرض أن هذه العنفة مركبة ضمن موقع السرعة المتوسطة للرياح فيه تساوي 10 m/s. استخدم عامل توزيع رايللي، احسب:

- عدد الساعات السنوية التي تهب فيها الرياح عند قيم أدنى من سرعة القطع الدنيا.
- عدد الساعات السنوية التي تهب فيها الرياح عند قيم أعلى من سرعة القطع العليا.
- القدرة الكهربائية الممكن توليدها kwh/year عند تشغيل العنفة عند الاستطاعة الاسمية للعنفة.

(a) احتمال سرعة رياح أقل أو تساوي سرعة معينة تعطى بالعلاقة أدناه، باستخدام تابع رايلي لاحتمالية كثافة الرياح. الذي يعطي:

$$F(U_{cut-in}) = 1 - \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{U_{cut-in}}{U}\right)^2\right) = 0.1181$$

ومنه، عدد الساعات سنوياً: $0.1181 * 8760 = 1035h / yr$

(b) عدد الساعات التي تكون فيها سرعة الرياح أكبر من سرعة القطع تعطى بالعلاقة:

$$[1 - F(U_{cut-out})](8760) = \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{U_{cut-out}}{U}\right)^2\right)(8760) = 0.0074 * 8760 = 64.7hr / yr$$

(c) عدد الساعات التي يحدث بها ذلك هو عدد الساعات التي تكون فيها سرعة الرياح أكبر من السرعة الاسمية مطروحاً منه عدد الساعات التي يتم بها إيقاف الآلة (الطلب b).

عدد الساعات التي تكون فيها سرعة الرياح أكبر من 14m/s يحدد بالعلاقة:

$$[1 - F(U_{rated})](8760) = \exp\left(-\frac{\pi}{4}\left(\frac{U_{rated}}{U}\right)^2\right)(8760) = 0.2145 * 8760 = 1879hr / yr$$

ومنه، عدد الساعات السنوي عند السرعة الاسمية:

$$1879 - 64.7 = 1814.3hr / yr$$

والاستطاعة المقدمة: $1000 * 1814kWh / yr = 1.814 * 10^6 kWh / yr$

خاتمة الفصل

مما سبق نرى أن العنفة الريحية تعمل على تحويل أو تبديل حركة الرياح الأفقية إلى قوة رفع (Lift Force) وقوة دفع drag، وغالباً قوة الرفع هي المحصلة المفيدة لتدوير المحور الرئيسي وتوليد القدرة الدوارة (Rotational Energy).

وإن كثافة الهواء وقطر الريش، وسرعة الرياح و CP مردود للدوائر أو عمل الاستطاعة (Power Coefficient) وسرعة نهاية الريش TSR، وزاوية ميل الريش تعمل جميعها وتؤثر على سرعة دوران العنفة الريحية. وكما رأينا سابقاً فإن الحفاظ على P_{max} يستدعي الحفاظ على TSR بالحدود المطلوبة والتي تم تصميم العنفة عليها وإن تغيير العمل C_p يؤثر على الاستطاعة العظمى وهذا العامل يمكن تعديله أو تغييره عن طريق:

- دوران القمر (Wake) خلف الدائر.
 - عدد الريش النهائي وعمر الريش ومفايد نهاية الريش.
 - عدم وجود قوى دافعة drag.
- إن سرعة نهاية الريش يجب أن تكون عادةً أقل من نصف سرعة الصوت، من أجل بعض العنفات باستطاعة ميغاوات، سرعة الدوران تكون بحدود (10-15) دورة في الدقيقة.
- وإن استخدام علب السرعة (Gear box) له أثر على سرعة الدوران وتحديد عدد أقطاب المولد الكهربائي المستخدم. التطور الحاصل في العنفات الريحية عبر السنوات الأخيرة شبه ثابت والتكنولوجيا أضحت معروفة بشكل عام. من المفيد التحكم وتحديد الاستطاعة المولدة عند السرعات العالية للرياح ، طالما أن الاستطاعة الناتجة عن الرياح تتناسب مع مكعب سرعة الرياح.



الفصل الثاني التحكم الميكانيكي والإلكتروني بسرعة العنفات الريحية

Electronic and Mechanical control of Wind Turbine



2-1 التحكم الميكانيكي بسرعة العنفات الريحية

يتطلب توليد أكبر قدر من الطاقة الكهربائية من العنفات الريحية، التحكم بسرعة هذه العنفات الريحية، وذلك نظراً للتغيرات الدائمة لسرعة الرياح واتجاهها. يتم التحكم عادة بامتداد طريقتين رئيسيتين: التحكم الميكانيكي أو التحكم الإلكتروني، باستخدام الكترونييات القدرة الكهربائية. سنعرض في هذا الفصل مفهوم هذه الأنظمة وطريقة عملها.

2-1-1 طرق تشغيل العنفات الريحية (التحكم بسرعة الدوران) Speed Control

تطورت تقانة تشغيل العنفات الريحية كثيراً في السنوات الأخيرة، حيث أن العنفات ذات الاستطاعات الكبيرة، تكون ذات تصميم قادر أن يعمل عند سرعات دوران متغيرة Variable speed Design، لذا تزود بنظام تغيير زوايا الشفرات Pitch Control، وأنظمة الكترونييات القدرة الكهربائية Power Electronics، بينما في العنفات الصغيرة الاستطاعة، يكون لها نظام تحكم بسيط، ذي تكلفة متواضعة، وأنظمة تحكم بسيطة بالسرعة. هذا وإن طرق التحكم بالسرعة وتنظيمها يقع ضمن القواعد العامة التالية:

1- العمل عند سرعة دوران ثابتة مع تغيير في زوايا الشفرات

Fixed speed Variable pitch

2- العمل عند سرعة دوران متغيرة مع زوايا شفرات ثابتة

Variable speed, Fixed pitch

3- العمل عند سرعة دوران متغيرة مع زوايا شفرات متغيرة

Variable speed Variable pitch

4- العمل عند سرعة دوران ثابتة مع زوايا شفرات ثابتة

Fixed pitch & Fixed speed

ولتحقيق هذه القواعد، يتم تصميم العنفة والمولد، بحيث تكون هذه التجهيزات قادرة على تحمل العواصف وسرعات الرياح العالية جداً.

يمكننا لدى إضافة نظام التوجيه للقمرة Yaw and Tilt Control، تتبع اتجاه الرياح، لكن ذلك، وبسبب ارتفاع عطالة الشفرات للعنفات الكبيرة، سيؤدي لنشوء عزم جيروسكوبي كبير Gyroscopic Torque، ونشوء ضجيج مرتفع. مع ذلك، لا بد من وجود نظام التحكم بتوجيه القمر، خاصة عند السعي للخروج من الرياح عند سرعات الهواء العالية.

نظام التحكم بزوايا الشفرات Pitch، يستخدم عند تغير سرعة الرياح لتنظيم سرعة الدائر، وخاصة عند زيادة سرعة الرياح [4].

لا يمكن توليد أية استطاعة من العنف عند سرعة ربح منخفضة Cut-in، لذا يعمل على ترك الدائر يدور بشكل حر. في التصاميم الحديثة نقوم بتشغيل الآلة كمحرك للمساهمة في الانتقال لحالة التوليد والتزامن مع سرعة الرياح.

تؤخذ الاستطاعة العظمى من العنف عند السرعة النظامية وذلك عند قيم محددة لمعدل سرعة نهاية الشفرات TSR، وللوصول لذلك يتم تغيير سرعة الدوران بشكل دائم.

تحدد سرعة دوران الدائر حسب التصميم الميكانيكي لها عند سرعات عالية للريح. عندئذ عامل الدائر C_p سيكون في أخفض قيمة، والاستطاعة الناتجة أقل أو لا تساوي مكعب سرعة الرياح. مع تزايد سرعة الرياح نحاول المحافظة على استطاعة خرج ثابتة عظمى، وذلك باستخدام المبدلات الإلكترونية، والتحكم بزوايا الشفرات Pitch Control.

2-1-2 ميزات العمل عند سرعة دوران ثابتة

- يكون النظام بسيط وغير مكلف كهربائياً
- مكونات أقل، وثقوية أكبر
- احتمال حدوث اهتزاز ميكانيكي لكتلة النظام أقل.
- لا يوجد نظام تغيير في التردد، لذا التوافقيات ستكون أقل في الخرج
- تكلفة النظام أقل بشكل عام.

2-3 ميزات العمل عند سرعة دوران غير ثابتة

- مردود الدائر كبير، استخلاص أكبر قدر من الاستطاعة في السنة
- انخفاض العزوم العابرة
- انخفاض مراحل التبديل في السرعة ضمن علبة السرعة، وهذا يعني انخفاض تكاليف علبة السرعة
- لا يحتاج لنظام تخميد ميكانيكي، يستطيع النظام الكهربائي تحقيق التخميد.
- لا توجد مشاكل التزامن مع الشبكة
- التحكم الإلكتروني يخفض من ظهور فجوات في التوتر

2-3-1 موجبات التحكم بالعنفات الريحية

يتم التحكم بالعنفات الريحية عادة لتحقيق النتائج التالية:

- ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى
- العمل عند معامل دائر ثابت
- العمل عند الاستطاعة الاسمية
- العمل عند عامل استطاعة واحد
- تنظيم عامل الاستطاعة
- تنظيم توتر الخرج

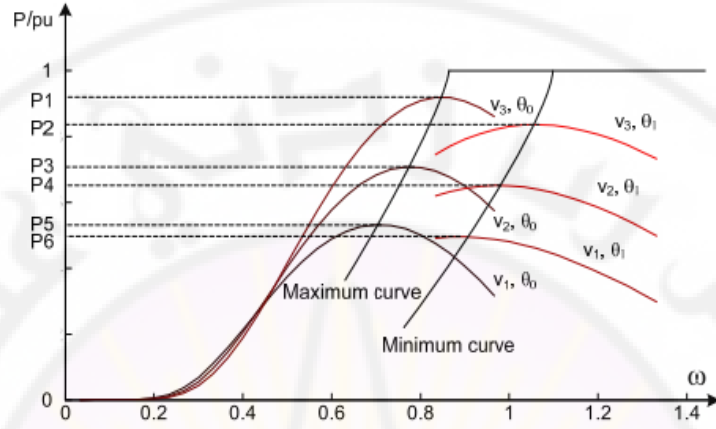
سنستعرض فيما يلي توضيح للنقاط السابقة:

• ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى Peak Power Tracking scheme

يحتاج توليد الاستطاعة العظمى من العنفة الريحية، مهما اختلفت وتباينت سرعة الرياح ، إلى تنظيم سرعة الدوران لهذه العنفة ، والعمل عند سرعات مختلفة، ويتم ذلك إما بالعمل عند معامل دائر ثابت (Tip Speed Ratio(TSR) ، أو ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى ، ومثل هذه العمليات توفر ما يقارب 20-30% من القدرة سنوياً [4]

الكثرونيًا، يتم عادة ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى، لدى استخدام المبدلات الإلكترونية AC-DC Converters ، وذلك بعد المبدل المركب على خرج المولد الريحي، وللاذي يتم قيادته بحيث يؤمن أكبر استطاعة خرج مهما تغيرت ظروف تشغيل العنفة الريحية. في بعض الحالات (بالنسبة لمبدل غير مقاد مركب على المولد) فإن المقطع التفرعي (Boost Converter) يقوم بهذه المهمة في جهة حلقة التيار المستمر (DC – DC Link)، والشكل (2-1) لاحقاً يوضح بعض مكونات نظام التحكم المركب على بعض العنفات الريحية الحديثة.

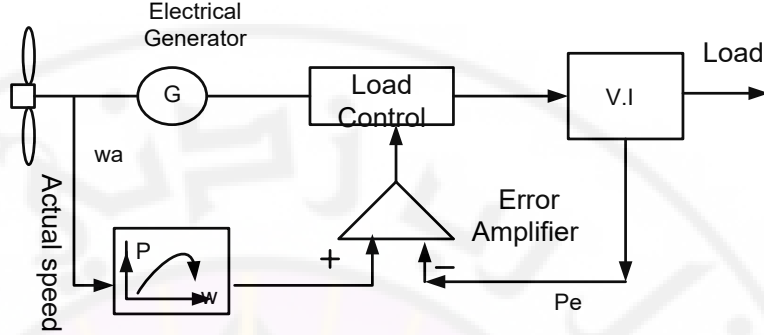
ميكانيكياً، لدى النظر إلى منحنيات الاستطاعة للمولد الريحي، كتابع لسرعة الدوران ، كما في الشكل (2-1) نلاحظ أنه يمكن العمل عند الاستطاعة العظمى للعنفة، ثم مع تزايد سرعة الرياح نلاحظ تناقص قيمة الاستطاعة المولدة . وأن منحنى تغير قيمة الاستطاعة كتابع لسرعة الرياح ، يتغير تبعاً للسرعة المتوسطة للرياح $v_1, v_2, \dots$ ، لذا نرى عدة منحنيات فوق بعضها وكل منحنى من هذه المنحنيات ، يعطي قيمة الاستطاعة الممكن توليدها ، عند تلك السرعة التي تم اعتمادها كسرعة متوسطة . يتم الانزلاق على المنحنى بتغيير زاوية الشفرات وتوجيه القمره وبالتالي تحديد زاوية الهجوم للرياح .



الشكل (1-2) قيمة الاستطاعة المولدة كتابع لسرعة الدوران

عند مختلف سرعات الريح v_1, v_2, v_3

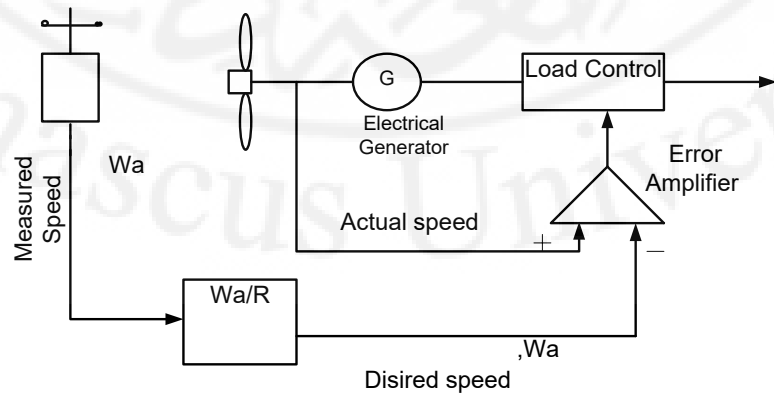
عندما نتمكن من العمل عند قمة الاستطاعة Peak Point ، فإن أي تغيير بسيط بالزيادة أو النقصان لسرعة العنفة سوف لن يغير كثيراً في قيمة الاستطاعة الممكن توليدها. لأن هذه القيمة تقع على منطقة مسطحة من منحنى الاستطاعة - السرعة، كما في الشكل (1-2) أعلاه مبدأ العمل عند نقطة الاستطاعة العظمى في هذه الحالة ، يعتمد على قياس الاستطاعة اللحظية المولدة وتحديد قيمة معدل تغير الاستطاعة المولدة بالنسبة للسرعة الزاوية : $\Delta P / \Delta \omega$ ، والشكل (2-2) يوضح المعالم الرئيسية لنظام التحكم .إذا كانت هذه القيمة موجبة ، هذا يعني أنه يمكن تحصيل استطاعة أكبر بالعمل على رفع سرعة الدوران ، بالمقابل ، إذا كانت هذه القيمة سالبة ، فإن الاستطاعة الممكن توليدها سوف تنخفض إذا استمرينا في تغيير أكبر للسرعة . نحافظ على السرعة بحيث يكون المقدار $\Delta P / \Delta \omega = 0$ ، قريب من الصفر. هذه الطريقة من التحكم غير حساسة لأي خطأ يتم من خلال القياس المباشر لسرعة الريح المحلية. أو لتصميم العنفة ذاتها، لذا فهي الطريقة المثلى والمفضلة للتحكم بالاستطاعة. يتم التحكم في المزرعة الريحية بكل عنفة بشكل مستقل عن العنفة الأخرى، ويكون لها عناصر التحكم اللازمة لتحقيق ذلك.



الشكل (2-2) العمل عند الاستطاعة العظمى باعتماد منحنى الاستطاعة للعنفة

• العمل عند معامل دائر ثابت: Constant Tip Speed- Ratio (TSR)

تعمل المولدة في هذا النظام، عند معامل دائر C_p مثالي Optimum، كما في الشكل (2-3)، وهو تابع لخواص المنوبة المستخدمة. القيمة المثلى لمعامل للدائر C_p تخزن كقيمة مرجعية Reference value في حاسب التحكم control computer، وتقاس سرعة الرياح باستمرار وتُقارن مع سرعة نهاية الشفرات blade tip speed، إشارة الخطأ error signal تحقق في نظام التحكم، وتعمل على تغيير سرعة العنفة، بالتالي إنقاص قيمة الخطأ. خلال هذه الفترة على الدائر العمل عند القيمة المرجعية لمعامل سرعة نهاية الشفرات TSR، ويتم توليد الاستطاعة العظمى المناسبة لتلك السرعة. سيئة هذه الطريقة أنها تحتاج قياس مباشر ومستمر لسرعة الرياح المحلية، والتي قد يكون فيها بعض الخطأ، وخاصة في المزارع الريحية الكبيرة التي يحدث فيها بعض التظليل أو الحواجز. كما أن المعامل TSR للعنفة يتغير مع مرور الزمن، ويلزم تغييره أو معالجته من فترة لأخرى. كما أن تحديد هذا العمل ليس بالأمر السهل والدقيق.



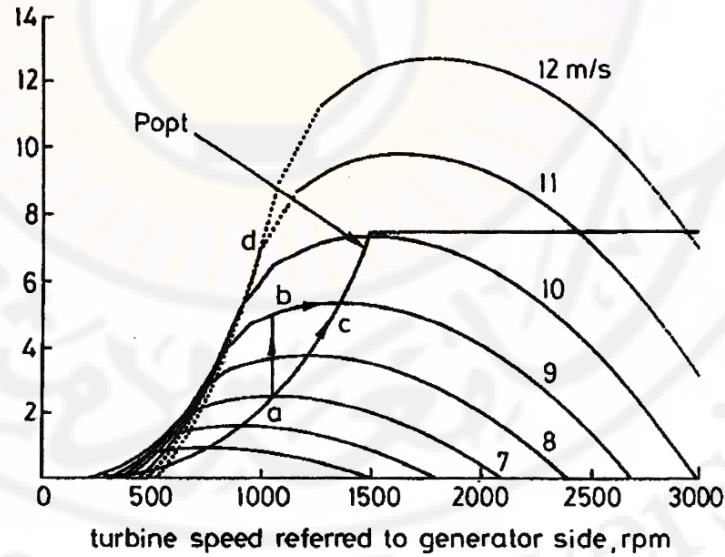
الشكل (3-2) العمل عند الاستطاعة العظمى باستخدام نظام التحكم

بمعامل سرعة نهاية الشفرات TSR

• العمل عند الاستطاعة الاسمية Rated Power Operation

ترتبط هذه المهمة بالعنفات التي تعمل عند سرعات متغيرة (Variable Speed)، عندما تتزايد سرعة الرياح بشكل لحظي (Incident)، وتتجاوز القيم الموافقة للاستطاعة الاسمية للمولد، يتم تشغيل متحكم زاوية الشفرات (Pitch angle). هذا المتحكم يرفع من قيمة زاوية شفرات العنفة مع تزايد سرعة الرياح المفاجي، وذلك لتخفيض وإنقاص استطاعة الرياح الممكن التقاطها والاستفادة منها.

كما هو مبين بالشكل (4-2) أدناه، عندما تميل سرعة الرياح لتتجاوز القيمة 10m/s (وهي القيمة الحدية لسرع الرياح التي تقدم المنوبة استطاعتها الاسمية عندها)، يتم عندها تفعيل نظام تشغيل زاوية الريش للعمل على الحد من الاستطاعة المولدة والاستمرار بالعمل عند الاستطاعة الاسمية وإعطاء هذه القيمة.



الشكل (4-2) العمل عند الاستطاعة الاسمية مع تزايد سرعة الرياح وتغيير زاوية الريش

• العمل عند عامل الاستطاعة واحد **Unity Power Factor Operation**

الغاية من نوع التحكم هذا، هو منع حدوث أي تبادل للاستطاعة الردية بين المولدة الريحية والشبكة المرتبطة معها. ويتم تحقيق ذلك بالتحكم بما يلي:

- التحكم بالمبدل الإلكتروني القريب من المولد وذلك كما في المولدات التحريضية مضاعفة التغذية (DFIG) Double Fed Induction Generator، أو التحكم بالاستطاعة الردية عن طريق قيادة المبدل المرتبط مباشرة بالشبكة.

- قيادة المعرج والمبدلات المتواجدة في حلقة الربط بين الشبكة والعنفة الريحية.
- عن طريق التجهيزات المتواجدة في العنفة الريحية والتي تعمل بالتوازي مع التجهيزات اللازمة للربط المباشر للعنفات على الشبكة

على كل حال، عند حدوث اضطراب في التوتر، هذه الأنظمة قد تعمل على فصل نظام الحماية وعزل المزرعة الريحية عن الشبكة بسبب قيم الاستطاعة الردية المحددة الممكن حقنها في هذه الأنظمة.

• تعديل أو تنظيم عامل الاستطاعة **Power Factor Regulation**

الغاية من هذا النظام تشغيل النظام الريحي عند عامل الاستطاعة ثابت. عندئذ تكون الاستطاعة الردية المولدة أو المستهلكة منظمة تبعاً للاستطاعة الفعلية المولدة، وبحيث يبقى عامل الاستطاعة ثابتاً عند مختلف ظروف التشغيل للنظام. هنا يتم عادة بالتحكم بـ:

- التحكم بالمبدل القريب من المولد في المولدات التحريضية مضاعفة التغذية خلال ذلك يتم تعيير الاستطاعة الردية من قبل المبدل القريب من الشبكة والذي ينظم عامل الاستطاعة إلى القيمة المحددة له مسبقاً.
- قيادة المعرج المتوضع بين العنفات الريحية والشبكة العامة.
- قيادة الأنظمة المرتبطة بالثابت للعنفة الريحية والتي تعمل بالتوازي مع التجهيزات اللازمة لربط المولدات الريحية مباشرة على الشبكة.

4-1-2 وسائل التحكم الميكانيكي بسرعة العنفات الريحية

يستخدم التحكم الميكانيكي بسرعة العنفات الريحية، باعتماد تجهيزات ميكانيكية، الغاية منها توجيه القمرة أو الشفرات باتجاه الريح، لاسترجار أكبر قدر من الطاقة الريحية عند كون سرعة الريح أقل من السرعة الاسمية المصممة لها العنفة. بالمقابل، نسعى بواسطة

التجهيزات الميكانيكية لخفض سرعة دوران العنفة عند هبوب ريح قوية أو عاصفة. بحيث تعمل على الاستفادة من زيادة سرعة هبوب الريح للعمل عند استطاعة عظمى شبه ثابتة، وذلك باستخدام نظام توجيه الشفرات ، ولدى هبوب رياح جداً قوية نسعى لتوجيه الشفرات بعيداً عن اتجاه الريح وتوقيف العنفة . لذا نجد الوسائل التالية التي سنعرضها، للتحكم الميكانيكي بسرعة العنفات الريحية.

5-1-2 استخدام التحكم بزواوية الشفرات Pitch control

يعتبر التحكم بزوايا الشفرات من أكثر الطرق فعالية للتحكم بالاستطاعة المنتجة من العنفات الريحية، ويتم بذلك بتغيير القوة الإيروديناميكية المطبقة على الشفرات عند سرعات الرياح العالية والمنخفضة. يمكن في هذا النظام إدخال الشفرات وإخراجها من الهواء مما يساهم في سهولة الإقلاع للعنفة وبالمقابل سهولة التوقف الطارئ . كما أن التحكم بالشفرات يؤمن بطريقة غير مباشرة تحقيق التحكم الثابت stalle control ، ويسهل فصل العنفة عند سرعات الريح العاتية furling بجعل طارف end الشفرات بمواجهة الريح .

يتم زيادة أو نقصان زاوية الهجوم α ، وذلك عبر زيادة أو نقصان زاوية الإزاحة β Pitch Angle ، والتي تتراوح قيمتها بين 20 - 30 درجة . كما تصل الزاوية β للقيمة 90° عند الوقوف التام للعنفة . تخفيض الزاوية α المتتابع يعمل على إنقاص القوى الإيروديناميكية المطبقة على الشفرات مما يخفض من مفعول قوة الريح الشديدة على العنفات ، ويخفض قوة الدفع المحورية كما أن العزوم على البرج سوف تنخفض .

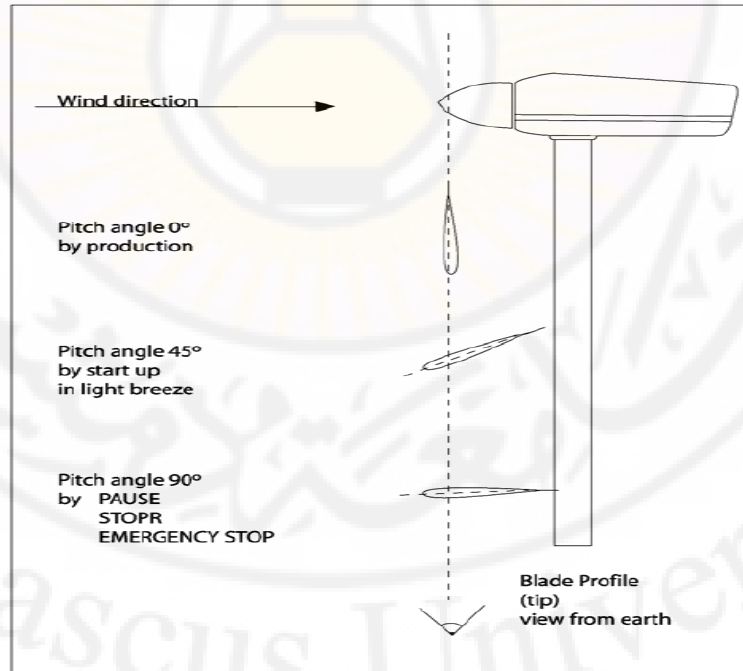
تزداد أهمية هذه الميزة عند السرعات المتغيرة للريح، ذلك لأن القدرة الإضافية المتولدة خلال الحالات الطارئة Rafael (حيث أن التغيرات جداً مفاجئة ولا يمكن لنظام التوجيه تعويض أو متابعة هذه التغيرات) يمكن أن تخزن في عطلة للدائر وذلك عن طريق تغيير سرعة دورانه (إذا تقبل المولد ذلك) ، حيث أن الاستطاعة المنقولة تبقى ثابتة ، والفرملة الميكانيكية لا تتعدى عن الفرملة عند الوقوف .

- يتم توليد الاستطاعة الثابتة في هذا النظام بعد تجاوز السرعة الاسمية، ويتم التحكم بالشفرات للمحافظة على سرعة دائر قريبة من السرعة الاسمية. تؤخذ الاستطاعة العظمى عند زاوية شفرات تساوي الصفر وعند $TSR = 6$ تقريباً . للمحافظة على C_p عند القيمة العظمى ضمن مجال كبير من تغيرات السرعة . سرعة الدوران للدائر

تتناسب مع سرعة الرياح بين سرعة القطع CUT-IN والسرعة الاسمية للرياح التي يعطي المولد عندها الاستطاعة الاسمية .خلال تلك الفترة يعمل المولد عند زاوية شفرات ثابتة ودائر ذي سرعة متغيرة للحفاظ على TSR مثالية .عند الوصول للسرعة الاسمية للرياح ،عزم المولد سوف يتحكم بالاستطاعة الاسمية للخروج ،ونعتمد على تغيير زاوية الشفرات لبقاء سرعة الدائر ضمن المجال المقبول .

خلال حدوث عاصفة Gust نحافظ على استطاعة المولد عند قيمة محددة، بينما تزداد سرعة الدائر. تزايد القدرة في الرياح ويتم تخزينه كقدرة حركية في الدائر .إذا تناقصت سرعة الرياح ،يتناقص العزم الأيروديناميكي مما يسبب تخامد سرعة الشفرات وتبقى استطاعة المولد ثابتة .إذا استمرت سرعة الرياح عالية ،يمكن تغيير زاوية الشفرات لخفض المردود الأيروديناميكي والعزم ،ومرة أخرى يتم خفض سرعة الدائر .

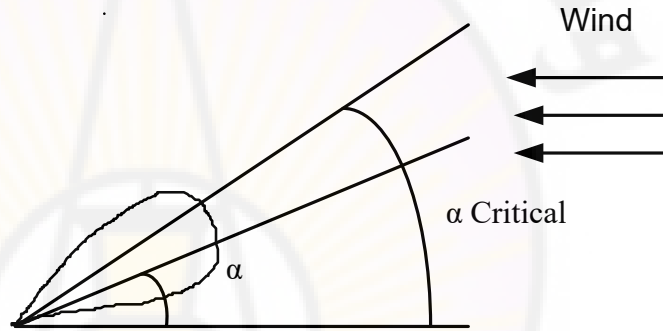
التجهيزات اللازمة لتحقيق تغيير في الزاوية يجب أن تكون ذات استطاعة كبيرة والقدرة اللازمة لتغذية هذه التجهيزات تؤخذ من العنفة ذاتها، وهي بحاجة لصيانة وقطع تبديل.



الشكل (5-2) وضعية التوقف أو الإيقاف عند مختلف حالات التشغيل

6-1-2 استخدام التحكم الثابت: stall control

التحكم تحت اسم Yaw control، يعني تدوير كامل العنفة الريحية حول محور أفقي. ووضع العنفة بمواجهة الرياح، مما يعمل على زيادة المساحة الفعالة للدوائر. بما ان اتجاه الرياح قد يتغير بسرعة، فإن إمكانية فقد جزء من الاستطاعة الممكن توليدها سيحدث. ويمكن تقدير الاستطاعة الضائعة بدلالة زاوية الهجوم α وزاوية الخطأ. عند إجراء التحكم الثابت بالعنفة stalling فإننا نعمل على زيادة زاوية الهجوم للرياح، مما يسبب عند زاوية معينة وصول الجانب المسطح من الشفرات لمواجهة الرياح.



الشكل (6-2) الزاوية الحرجة لهجوم الرياح

العنفات التي تعمل بنظام Down Wind لها ميزة مواجهة هبوب الرياح لأن القوة للدافعة Thrust Force، تدفع العنفة بشكل آلي باتجاه الرياح. هذه الطريقة تستخدم أيضاً للتحكم بتغيير اتجاه الدائر بالنسبة لاتجاه قدوم الرياح وتعمل على تخفيض الاستطاعة الميكانيكية، لا تستخدم هذه الطريقة بوجود التحكم بزوايا الشفرات بسبب الإجهاد العالي الذي سيطبق على الشفرات وهي تسبب حدوث ضجيج مرتفع لذا تطبق على العنفات المركبة في عرض البحر off-shore



الشكل (7-2) التحكم بطريقة Yaw control تدوير كامل العنفة الريحية حول محور أفقي

2-1-7 التحكم الثابت غير الفعال بالشفرات: (PSC) Passive Stall Control

في هذا النوع من التحكم يتم تثبيت الشفرات على للقاعدة (Hub) عند زاوية محددة ،ويتم معايرتها بحيث عند حدوث تزايد في سرعة الرياح عن قيمة محددة ،تبدأ عملية تثبيت الشفرات Stalling takes place أي يتم العمل على تصغير زاوية الرفع ،وذلك حتى تستقر وتحافظ على وضعها عند سرعة الرياح القائمة .بهذا الشكل يتم حماية العنفة من زيادة الرياح ولكن ستعمل العنفة عند مردود اقل .الزاوية β ثابتة ،الزاوية α سوف تزداد بشكل طبيعي مع زيادة سرعة الرياح .إذا كانت سرعة الدوران عملياً ثابتة ،هذه الزيادة سوف تسبب زيادة عامل الرفع Lifting factor وبالتالي الوصول لفصل العنفة cut-out . كما ان التصميم الهندسي للشفرات يؤمن عند لحظة ارتفاع سرعة الرياح ،توليد زوبعة Turbulence على الجانب الثاني من الشفرات غير المواجه للرياح. هذا التصميم الثابت stall يمنع قوة رفع الشفرات من أن تطبق أو تؤثر على للدوائر .وبنظرة فاحصة لشفرات للدوائر للعنفات ذات التحكم للثابت stall ،نلاحظ أن الشفرات مفتولة قليلاً Twisted على طول محور الشفرة ،وهذا تم تنفيذه جزئياً لتأمين توقف متدرج welly Stall grad عوضاً عن التوقف بشكل مفاجئ عندما تصل سرعة الرياح للقيم الحدية .

هنا ، يحافظ على العزم شبه ثابت ضمن المجال $\alpha_1 \leq \alpha \leq \alpha_2$ حتى حدوث فصل الشفرات ويحدث عندئذ هبوط مفاجئ في عزم الرفع وارتفاع كبير في عزم الدفع ،والاستطاعة المولدة تكون جداً محدودة .وعليه فإن هذا النظام نظراً لبساطته وغياب أي نظام تحكم كهربائي أو ميكانيكي ،فإنه يبدي عدم كفاية ،ذلك لأن الاستطاعة المستجرة من العنفة هي فقط تابع لسرعة الرياح ولسرعة دوران العنفة ،ولا يوجد اية إمكانية للتدخل والتأقلم مع تغيرات الرياح .في حال حدوث عطل في الشبكة ،وإذا لم نتمكن من نقل الاستطاعة المولدة لا بد من توفر فرملة ميكانيكية كبيرة لامتصاص القدرة الديناميكية للعنفة وكذلك للقدرة المحجوزة خلال الفرملة .يعمل مصنعي العنفات على استخدام نهاية الريش كفرملة هوائية وذلك بجعلها تدور 90 درجة في الحالات الطارئة .في هذه الحالة نظام الفرملة الميكانيكي يمكن تركيبه خلف مضاعف السرعة (علبة السرعة) . حيث أن العزم في تلك المنطقة يكون أضعف ما يمكن ، ولا يستخدم إلا في حالة الوقوف للدائم Parking هذا وإن الفرملة للحالات الطارئة يمكن توفيرها أو تأمينها بواسطة المولد ذاته ،شرط توفر دارة كهربائية بمقاومة قادرة على امتصاص القدرة الموجودة في المولد .عدا ذلك في حالة العمل العادي على المولد أن يكون

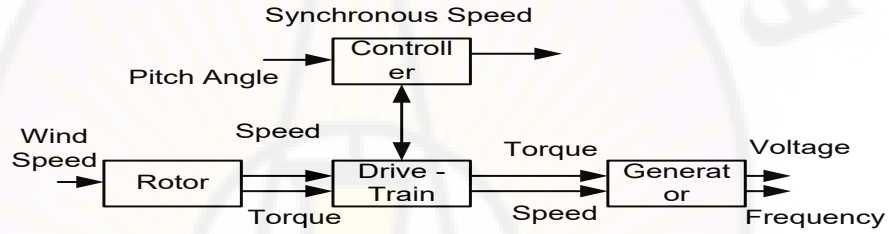
قادراً على فرملة العنفة وفرض حالة الفصل مع تزايد سرعة الريح مما يستلزم حجوم تجهيزات أكبر من حجم التجهيزات اللازم في حالة التشغيل العادي. كما إن التصميم المعقد للشفرات له تكاليفه وللعلم فإن 60% من العنفات المركبة في العالم تعتمد نظام Stall control. الاستطاعة الايروديناميكية وعزم العنفة الريحية تكون محددة في هذا النظام وذلك بإنقاص سرعة الدائر لدى هبوب رياح أكبر من السرعة التي يتولد عندها الاستطاعة الاسمية. سرعة الدائر يتم التحكم بها عن طريق تنظيم عزم المولد علذا تعمل العنفة عند اي قيمة ل TSR تبعاً للقيم التصميمية للمولد والشفرات. يتسارع الدائر لدى إنقاص عزم المولد بالنسبة للعزم الايروديناميكي، تتخادم سرعة الدائر بزيادة عزم المولد فوق العزم الايروديناميكي. على كل حال، سيئة هذا النظام أنه يجب إنقاص سرعة الدائر حتى ولو تزايدت سرعة الريح وذلك لإجبار شفرات الدائر للذهاب نحو التوقف Stall. هذا يعني ان العزم الأعظمي للمولد يجب ان يكون أكبر من العزم الممكن توليده عند الاستطاعة الاسمية .

8-1-2 التحكم الثابت الفعال Active stall control

هذا النوع من التحكم هو تحسين للتحكم الثابت بالشفرات غير الفعال Passive Stall Control (PSC)، عوضاً عن التثبيت الطبيعي للشفرات ،هذا النظام يستخدم التحكم الزاوي Pitching أو زاوية الشفرات لتفعيل التحكم وتثبيت الشفرات .لذا عند السرعات المنخفضة ،يصل المردود للقيم العظمى نظراً لتغيير زاوية الشفرات Pitching the blades كما في العنفات ذات الشفرات المتحكم بها .من ناحية أخرى، عند السرعات العالية للريح ،تغير زاوية الشفرات بالاتجاه المعاكس للحالة السابقة وذلك للوصول إلى تثبيت عميق وأكد Deeper Stall .هنا من السهل على النظام الانتقال لحالة الوقوف الطارئ Emergency stops .

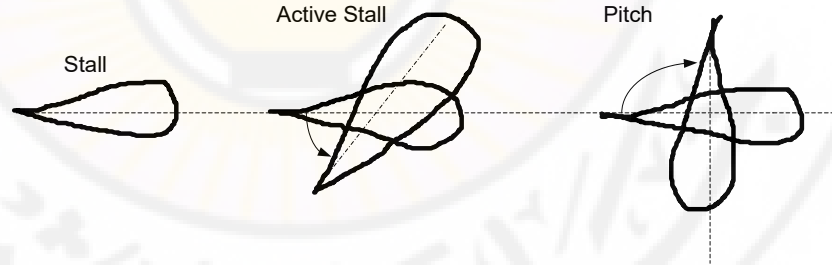
الزاوية α يمكن أن تزداد أو تتناقص بشكل خفيف 3 إلى 5 درجات ،وذلك بإنقاص أو زيادة الزاوية β زاوية الانزياح Calage. يتم المحافظة على العزم ثابتاً حتى يحدث الفصل الكامل أو الهبوط السريع ،والاستطاعة يمكن أن يتم تحديدها عند قيمتها الاسمية .وعندما تعمل المولدة عند الاستطاعة الاسمية ،نلاحظ الفرق الكبير بين هذا النظام ونظام التحكم بالشفرات ، Variable pitch control — ذلك انه عند تحميل المولد فإن الآلة ستدور الشفرات باتجاه معاكس للاتجاه المعتمد عند التحكم بالزوايا Variable pitch ،بكلمات أخرى ،سوف نزيد من زاوية الهجوم لشفرات الدائر لكي تسعى الشفرات نحو التوقف العميق Deeper Stall ونفقد بذلك الطاقة الإضافية للريح .

أحد ميزات التحكم الثابت الفعال هو أنه يمكن التحكم باستطاعة الخرج بدقة أكبر من التحكم غير الفعال passive. كي نتجنب تجاوز الاستطاعة الاسمية للآلة عند سرعات الريح المرتفعة، التحكم غير الفعال يجبر العنفة على خفض الاستطاعة عند هبوب ربح عاتية. الخطوات التنفيذية الآلية للنظام تعمل بنظام هيدروليكي أو محرك خطوي وهي عموماً مسألة اقتصادية، وفي حال توفر التحكم بزوايا الشفرات pitch control لا يلزم إضافة التحكم الثابت الفعال. في الشكل (8-2) أدناه نلاحظ أن عمليات التحكم تدور حول الأساسيات التالية: قياس سرعة الريح، قياس سرعة دوران الدائر للعنفة، قياس زاوية الشفرات، بمقارنة هذه القيم يتم التحكم بالعنفة وتحديد توتر وتردد الخرج.



الشكل

(8-2) ترابط إشارات التحكم بالسرعة والعزم وسرعة



الشكل (9-2) وضعية الشفرات بالنسبة لاتجاه الريح تبعاً لنوعية

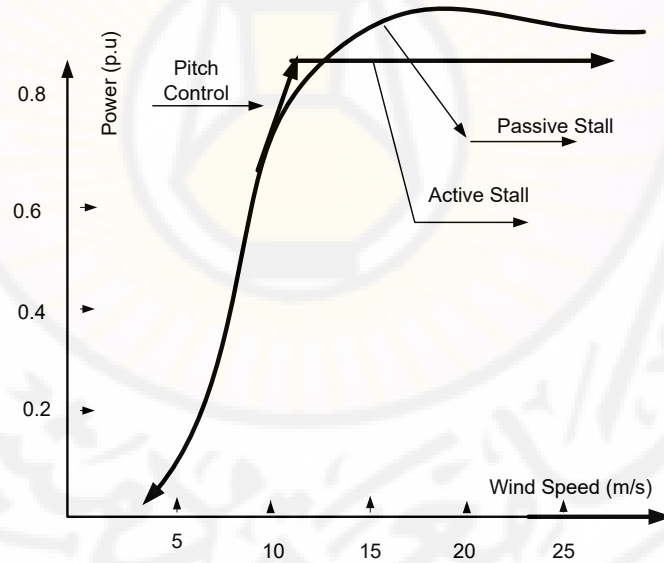
التحكم الميكانيكي المطبق

2-2 التحكم الإلكتروني بالعنفات الريحية

درسنا فيما سبق من هذا الفصل، كيف يمكن الحد من قيمة الاستطاعة المولدة ميكانيكياً، وذلك لتجنب زيادة التحميل للمولد الريحي. وكيف أننا نستخدم التحكم الثابت Stall Control، حيث الشفرات تكون ثابتة بمكان تثبيتها ولكن نلمس توقف حركة الهواء خلف الشفرات. وكيف أنه في النظام للثابت الفعال Active Stall Control، نعمل على تغيير جزئي لزوليا

الشفرات وذلك لخلق توقف على طول الشفرات . أيضاً ، تعرضنا للتحكم بزوايا الشفرات ، Pitch Control وكيف نعمل على إخراج الشفرات من الريح بقصد تخفيض السرعة والتوقف . الشكل (2-10) يوضح أثر الأنظمة الثلاث في عملية التحكم ، ونلاحظ كيف أن التحكم بزوايا الشفرات هو الأكثر سيطرة في السنوات الأخيرة للعنفات الريحية .

لدينا متغير آخر في العنفات الريحية، وهو سرعة الدوران للشفرات. في السابق، كانت سرعة الدوران للشفرات ثابتة، ولا تتغير خلال كامل مجال التشغيل لسرعات الريح. أيضاً العنفات الريحية ذات السرعة الثابتة، كانت تمتاز ببساطتها، وقوتها، متانتها وقلة تكلفتها. لكن بالمقابل كانت هذه العنفات تتعرض لإجهادات ميكانيكية كبيرة عند حدوث الزوابع، وان الاستطاعة المستجرة كانت تظل محددة وقليلة.



الشكل (2-10) تحديد استطاعة الخرج باستخدام الطرق الثلاث للتحكم الميكانيكي

اتسعت رقعة استخدام العنفات الريحية ذات السرعة المتغيرة، وذلك للحصول على مردود إيروديناميكي أفضل وخواص تحكم أحدث. بهذه الأنظمة يمكن متابعة تغيير سرعة الدوران كتابع لتغيير سرعة هبوب الريح، وذلك مع المحافظة على معدل سرعة نهاية الشفرات ثابت دائماً $TSR = Constant$ ، وبالتالي استجرار أكبر كمية من الاستطاعة من الريح . تغيرات

الاستطاعة المتوفرة في الريح، يتم امتصاصها بتغيير سرعة الدوران، وهكذا، يتم تخفيض الإجهادات الميكانيكية، والضجيج الناتج عنها. كما أن المبدلات الإلكترونية التي ستضاف للنظام ستعمل على تغيير السرعة وتوليد أكبر قدر من الطاقة الكهربائية.

رأينا أعلاه إذاً كيف أن التحكم الميكانيكي يعمل على تغيير سرعة الدوران ويسعى للحصول على أكبر قدر من استطاعة الخرج مهما تغيرت سرعة الريح، وتغيير السرعة الميكانيكي بطيء، وزوايا التغيير محدودة، 5-26 درجة ويتم خلال زمن بطيء نسبياً لا يؤثر على تغير عزوم العطالة أو استطاعة الخرج. وإن استخدام التحكم الإلكتروني وخاصة المبدلات الإلكترونية، يعمل على جهتين، ذلك إما بالعمل على المبدلات المركبة بالقرب من المولد الريحي، أو العمل على المبدل المركب بالقرب من الشبكة. كلا المبدلين سيعملان على تنظيم توتر الخرج للمولد الريحي، وتنظيم تردد الخرج المحقون بالشبكة. وكذلك التحكم بالاستطاعة الممكن حقنها بالشبكة. إضافة إلى أن مهمة هذه المبدلات العمل على توليد أكبر قدر من الاستطاعة عند تغيير سرعة العنفات، أي لدى عمل العنفات عند سرعات متغيرة وسرعات ثابتة. في الفقرات التالية سنوضح مكونات هذه المبدلات وآلية عملها مع العنفات الريحية.

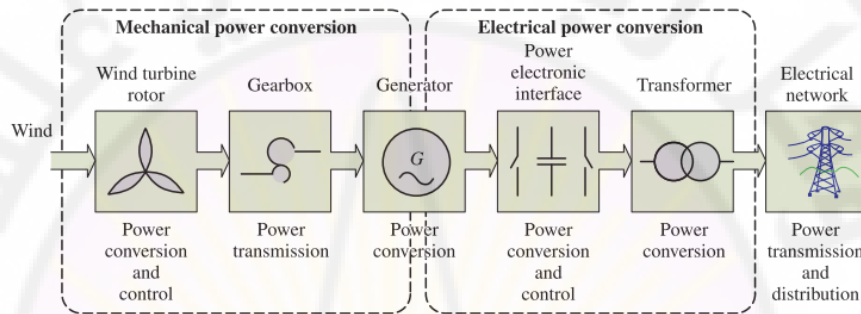
2-2-1 أنظمة تغيير السرعة الإلكترونية في العنفات الريحية

Wind Turbine Concepts

تزود العنفات الريحية المركبة بعد العام 1990 بمبدلات الكترونية متعددة النماذج وهي تتطور وتساهم بشكل فعال في تغيير سرعة دوران الدائر والسماح للعنفات الريحية بالعمل عند سرعة دوران متغيرة، كما ساهمت بشكل فعال في تنظيم توتر الخرج للمولدات الريحية وتنظيم التردد وتقديم دور كبير في تحسين عامل الاستطاعة للمولدات الريحية، (سندرس هذه النقاط بالتفصيل في فقرات لاحقة من الفصل الثالث). تتركب المبدلات الإلكترونية بين المولد الريحي والشبكة الكهربائية، ويتم تركيب المبدلات الإلكترونية بسويات متعددة، سنعرض فيما يلي المجالات التي تستخدم فيها الكترونيات القدرة الكهربائية. تطورت أنظمة القيادة والتحكم المستخدمة في العنفات الريحية كثيراً في السنوات 35 سنة الأخيرة، وهناك أربعة إلى خمسة أجيال. عموماً التشكيلات القائمة للعنفات الريحية يمكن تصنيفها بأربعة مفاهيم والاختلافات الأساسية بين هذه المفاهيم والأنظمة هو:

- نوع المولد الريحي المستخدم
- الكترونيات القدرة المتوفرة

- طريقة تنظيم السرعة
 - الحد من زيادة الاستطاعة الإيروديناميكية في الريح.
- بشكل عام التجهيزات الإلكترونية المطلوب استخدامها في تنظيم السرعة إلكترونياً مبنية بالشكل (2-11) أدناه .



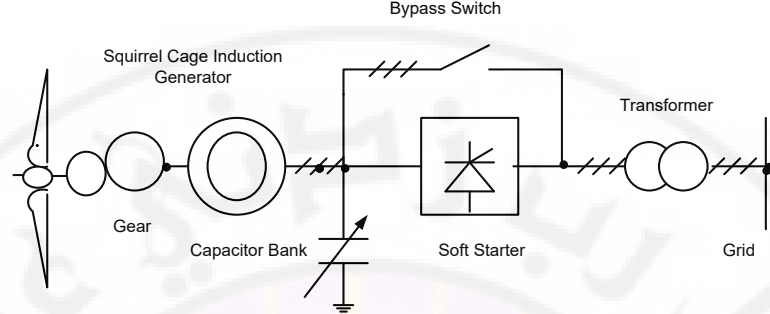
الشكل (2-11) تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية والربط على الشبكة العامة [9]

2-2-2 العنفة الريحية ذات السرعة الثابتة النموذج (A)

A Fixed Speed Wind Turbine

في هذا النظام تربط العنفة الريحية مباشرة على الشبكة العامة، لكن عند الإقلاع يستخدم مقلع متدرج Soft Starter شكل (2-12)، لتخفيف الحالات العابرة عند الإقلاع، ويتم فصله بعدئذ عند بدء توليد الطاقة الكهربائية، باستخدام قاطع عبور Bypass Switch . اعتمد هذا المبدأ (الأسلوب الدانماركي) في الثمانيات 1980، المولد المستخدم عموماً مولد تحريضي قفص سنجابي Asynchronous Generator, Induction Generator [9].

سيئات هذا النظام الأولي، أنه يحتاج دائماً لمجموعة تعويض عامل الاستطاعة (Capacitor Bank)، لتعويض الاستطاعة الردية المطلوبة للمولد التحريضي ذي القفص السنجابي (AG) . بما أن سرعة الدوران مثبتة بدون أي نظام تحكم إضافي، هذا يتطلب أن تكون التجهيزات قوية وقادرة على تحمل الاجهادات الميكانيكية، وتغيرات سرعة الريح سوف تنعكس مباشرة على استطاعة الخرج الكهربائية، مما يؤدي إلى حدوث عدم استقرار في الشبكات الضعيفة . Weak Grid



الشكل (2-12) عنفة ريحية ذات سرعة دوران ثابتة ،باتصال مباشر مع الشبكة تستخدم

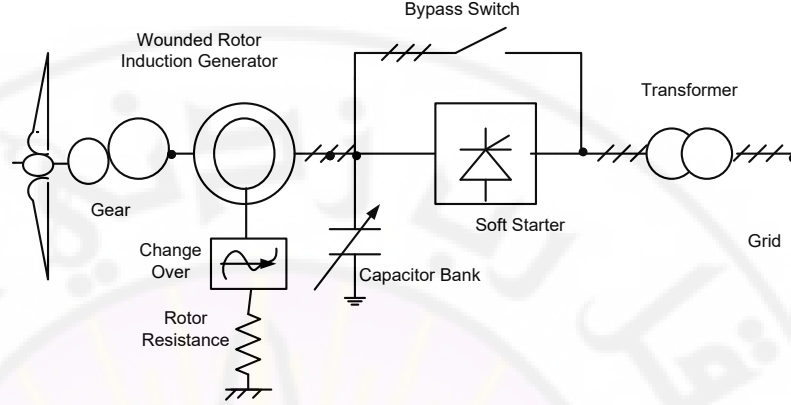
مقلع ناعم Soft Starter

3-2-2 العنفات الريحية ذات تغيير السرعة الجزئي باستخدام مقاومة الدائر (نموذج B)

Partial Variable Speed Wind Turbine with variable rotor resistance

عرف هذا النظام باسم Opti- Slip (Vestas)، ودرج استخدامه في الفترة 1990 ، حيث أنه كان بالإمكان في الفترة الأولى من تطور قيادة المحركات التحريضية ذات الدائر الملفوف ، تنظيم سرعة دوران المحرك التحريضي ذي الدائر الملفوف ، عن طريق تغيير مقاومة للدائر ، حيث يتم حقن مقاومة خارجية في ملفات الدائر الثلاث ، ويتم تغيير قيمة المقاومة تبعاً لسرعة الدوران المطلوبة كما في الشكل (2-13) ، يحتاج النظام أيضاً إلى مكتفات تحسين عامل الاستطاعة ، وتربط ملفات الثابت إلى الشبكة مباشرة .

هذه الطريقة أضحت قديمة نظراً لزيادة المفايد التي يسببها حقن المقاومة في الدائر ، والإجهادات الميكانيكية التي ستحصل. تطورت هذه التقنية وتم استبدال المقاومات بمبدل الكتروني مضاعف (DFIG) Double fed Induction Generator كما سنده في الفقرة اللاحقة، يتم عندئذ استرداد القدرة من الدائر بنظام المبدل المضاعف وهو الحل المثالي لقيادة المحركات والمولدات التحريضية ذات الدائر الملفوف ، والعمل على تنظيم سرعتها وتوتر وتردد خرجها وقديده بمثل هذه الأبحاث في الفترة 1974 بمخابر أكاديمية مونيبييه للعلوم والتكنولوجيا Pr. R.jouty.



الشكل (2-13) عنفة ريحية ذات دائر ملفوف تغيير سرعة جزئي بمجال محدد ضمن الدائر

4-2-2 المولدات الريحية ذات السرعة المتغيرة باستخدام مبدل تردد (نموذج C)

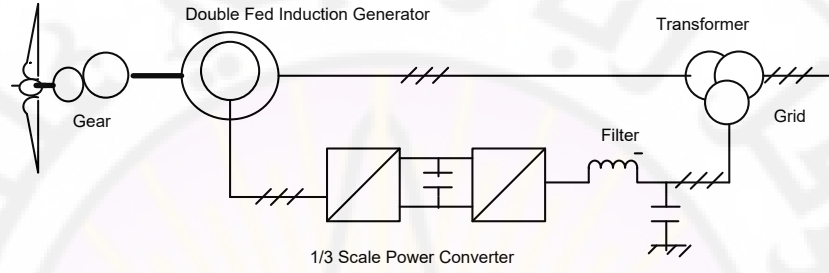
Variable Speed WT with partial-scale Frequency Converter

حالياً، هذا النظام هو أكثر الحلول تداولاً، وقد استخدم بشكل كبير في العالم. كما نرى في الشكل (2-14)، تم استخدام مبدل لاستطاعة الكتروني مضاعف ثيرستوري Back-to-Back power converter، مع مولد تحريضي ذي دائر ملفوف، وسمي النظام بالمولد التحريضي مضاعف التغذية، Double Fed Induction Generator (DFIG)، ملفات الثابت موصلة مباشرة إلى الشبكة العامة، بينما نرى أن ملفات الدائر مغذاة عن طريق مبدل الكتروني مضاعف (مقوم -معرج) ثنائي اتجاه حقن القدرة، مرتبط إلى الشبكة عبر محول توافق، وعادة استطاعة هذا المحول والمبدل لا تتجاوز 30% من استطاعة العنفة الريحية.

باستخدام هذا المبدل يمكن حقن استطاعة في الدائر بتردد وتوتر يتناسب وسرعة الرياح أو سرعة الدوران التي تولدها الرياح، أي يمكن تغيير تردد توتر الحقن ليصبح سرعة دوران الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية للمولد من سرعة تردد الشبكة العامة، ويصبح توتر الثابت من تردد الشبكة، وذلك سواء انخفضت سرعة الرياح أو ارتفعت ضمن مجال $\pm 30\%$. ويعمل النظام بما نطلق عليه العمل فوق التزامن أو تحت التزامن & Sub-Synchronous Super-Synchronous

بناءً عليه فإن مجال تغيير سرعة الدوران والعمل عند هذه السرعات سوف يكبر، كما أن هذا النظام الإلكتروني سيعمل على تنظيم توتر الخرج وتحسين جودة توتر الخرج، صغر استطاعة المبدل الإلكتروني مقارنة باستطاعة المولد التحريضي ساهم في زيادة مردود واستخدام هذا

النظام. مع ذلك، نضطر في هذا النظام لاستخدام حلقات انزلاق وفحمت، كما أن حدوث أي طارئ على الشبكة سيؤثر على عمل المبدل ويقلل من فرص التحكم خلال حالة حدوث العطل. هذا ينعكس على الوثوقية ومتطلبات الشبكات الحديثة.



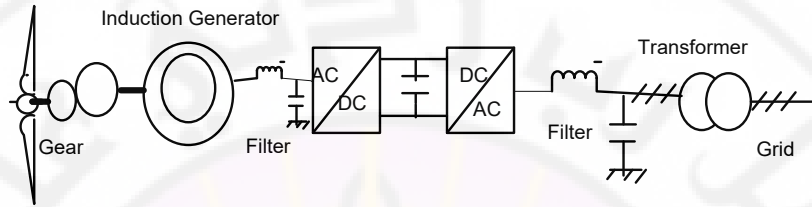
الشكل (2-14) عنفة ريفية ذات دائر ملفوف وإمكانية تغيير سرعة جزئي باستخدام مبدل مضاعف

5-2-2 العنفات الريفية ذات السرعة المتغيرة بمبدلات الكترونية في الثابت (نموذج D)

Variable Speed wind Turbine (WT) with Full-scale Power Converter

التطور الجديد والواعد، والذي يزداد تداولاً في السنوات الأخيرة هو استخدام المبدلات الإلكترونية المقادة بشكل كامل Fully Controlled Converters، بين ثابت المولد الريفي والشبكة العامة [9]. يمكن هنا أن نستخدم أي مولد ريحي، قفص سنجابي I.G، أو مولد تزامني بملف تحريض ملفوف Wounded Rotor Synchronous Generator (WRSBG) أو مولد تزامني بأقطاب مغناطيسية دائمة Permanent Magnetic Synchronous Generator (PMSG). كما نرى في الشكل (2-15)، لدينا مبدل بالقرب من المولد الريحي، ومبدل آخر بالقرب من الشبكة ولكل منهما مهمته الخاصة، سواء لتنظيم خرج المولد أو تنظيم توتر وتردد الحقل بالشبكة العامة. حلقة التيار المستمر بين الجسرين Dc-Link تعمل على تحسين عامل الاستطاعة للمولد الريفي والشبكة العامة. (يمكن تفهم ذلك في الفصل القادم من الكتاب). هذا النظام لا يتطلب حلقات انزلاق Slip Rings، كما قد يمكن الاستغناء عن علبة السرعة، ويمكن العمل عند مختلف السرعات ضمن مجال $\pm 30\%$ ، ويتم تأمين ربط سالم على الشبكة ومتابعة توتر وتردد الشبكة. ونظراً لاستخدام مبدلين يمكن مستقبلاً العمل عند توتر خرج نهائي مرتفع قد يسمح لنا

بالاستغناء عن المحول. لهذا النظام تكاليف أكبر وتجهيزات مغناطيسية أعلى للمولدات دائمة المغناطيسية.



الشكل (2-15) العنفات الريحية متغيرة السرعة مع مبدلات الكترونية في الثابت

6-2-2 مقارنة بين مختلف طرق القيادة

Wind Turbine Concepts Comparison

تستند مقارنة مختلف الطرق المعتمدة لربط العنفات الريحية على الشبكة، وأنظمة تغيير السرعة المعتمدة إلى شقين رئيسيين وهما التكلفة الإضافية وتحسين الخواص، في الجدول المرفق رقم (2-1) يوضح بالنسبة لجهة الربط على الشبكة، التكلفة، الصيانة، الخواص الداخلية للمولدات الريحية الأربعة الأكثر استخداماً. نرى أنه نظراً لاستخدام الكترونيات القدرة الكهربائية، أن النماذج نوع C&D، يمكنها أن تحقق أفضل عمليات تحكم بالاستطاعة المولدة كتابع لدرجة الدوران، وأفضل عمليات ربط على الشبكة العامة. كما أنها تسمح بالتحكم بالاستطاعة الفعالة والردية مقارنة مع النماذج نوع A&B، وبانخفاض تكلفة عناصر الكترونيات القدرة يزداد مردود هذه الأنظمة. النماذج C&D أقل تكلفة من النماذج الأخرى.

الجدول (2-1) مقارنة مختلف النماذج الريحية

System	Type A	Type B	Type C	Type D
Variable speed	No	No	Yes	Yes
Control active power	Limited	Limited	Yes	Yes
Control reactive power	No	No	Yes	Yes
Short circuit (fault-active)	No	No	No/yes	Yes
Short circuit power	Contribute	Contribute	Contribute	Limit
Control bandwidth	1 – 10 s	100 ms	1 ms	0.5 – 1 ms
Standby function	No	No	Yes +	Yes ++
Flicker (sensitive)	Yes	Yes	No	No
Soft starter needed	Yes	Yes	No	No
Rolling capacity on grid	Yes, partly	Yes, partly	Yes	Yes
Reactive compensator (C)	Yes	Yes	No	No
Island operation	No	No	Yes/no	Yes
Investment	++	++	+	0
Maintenance	++	++	0	+

2-3 أثر تغيير السرعة المفاجئ على العزم والاستطاعة في العنفات الريحية

مسألة التسارع والتباطؤ للعنفة الريحية، يجب التحكم بها وذلك للحد من الإجهادات الديناميكية على الريش وعجلة الريش أو قاعدة الريش (Hub)، وكذلك الحمل الكهربائي وعناصر إلكترونيات القدرة نظراً لكبر العطالة للتجهيزات الدوارة [27]. الفرق اللحظي بين الاستطاعة الميكانيكية الناتجة عن الريش والاستطاعة الكهربائية المقدمة من المولد سوف تعمل على تغيير سرعة الدائر تبعاً للعلاقة المعروفة بين عزم العطالة والسرعة الزاوية للدائر [7]:

$$J \frac{d\omega}{dt} = \frac{P_m - P_e}{\omega} \quad \dots (1-2)$$

حيث:

J : العزم القطبي (Polar moment) للدائر .

P_m : الاستطاعة الميكانيكية الناتجة عن الريش .

w : السرعة الزاوية للدائر .

P_e : الاستطاعة الكهربائية المولدة من المولد .

بتكامل العلاقة أعلاه نحصل على:

$$\frac{1}{2} J (\omega_2^2 - \omega_1^2) = \int_{t_1}^{t_2} (P_m - P_e) dt \quad \dots (2-2)$$

لندرس حالة مبسطة ونأخذ عزم العطالة $J = 7500 \text{ Kg.m}^2$. ولنغير سرعة الدائر من 100 إلى 95 دورة في الدقيقة خلال 5 ثانية وهذا يتطلب $\Delta P = 800 \text{ kW}$. العزم المحصل 80Nm سوف يطبق عزم نقل (Tensional Stress) على الدائر وقاعدة الريش (Hub). إذا ما تغيرت السرعة حصل خلال 1sec، الاستطاعة المطلوبة ستكون 4000kW، والعزم 400Nm. مثل هذا العزم الكبير الناشئ، سيكون مجهداً وقادراً على تحطيم الدائر أو إنقاص عمره التقديري، لذا فإن التسارع والتباطؤ يجب أن يتوافق مع تصميم العنفة وضمن مجال دقيق. والمثال التالي يوضح هذه الظاهرة (يمكن العودة للملحق A ، لتفهم عزم العطالة).

مثال محلول (1-2)

دولاب صلب ذي كتلة 5 Kg و نصف قطر خارجي 200 mm . احسب العزم اللازم لتسريع الدولاب من السكون حتى السرعة 1500 r.p.m خلال 10 S .

الحل: السرعة الزاوية الأولية $\omega_1=0$ ، السرعة الزاوية النهائية يمكن إيجادها من سرعة

الدوران المطلوبة 1500 دورة في الدقيقة حيث:

$$W = \frac{2\pi n}{60}$$

$$W2 = 2\pi 1500/60 = 2\pi n/60 = 157.1 \text{ rad/sec}$$

التسارع يحسب بالعلاقة

$$= \frac{157.1-0}{10} = 15.71 \text{ Rad/sec}^2 \alpha = \frac{W2-W1}{t}$$

عزم العطالة للدولاب الصلب ذي الكتلة 5 كيلو غرام ، ونصف قطر 0.2 متر ، يحسب من العلاقة :

$$I = M \cdot R^2/2 = \frac{59KG \cdot (0.2)^2}{2}$$

$$I = 0.1 \text{ Kg.m}^2$$

علاقة العزم بالعطالة والتسارع تعطى بالعلاقة : $T = \alpha \cdot I$

وبتعويض القيم السابقة نجد :

$$T = 0.1(\text{Kg.m}^2) \cdot 15.71 \text{ 9Rad/sec}^2 = 1.571 \text{ N.M}$$

بفرض أن سرعة هذا الدولاب تغيرت من القيمة 1500 دورة في الدقيقة إلى 1300 دورة في الدقيقة . وذلك خلال زمن قدره 5 ثانية، أو خلال 1 ثانية. في هاتين الحالتين أعد حساب العزم الناشئ.

بناءً عليه سنعود لحساب السرعة الزاوية عند كل سرعة دوران من العلاقة:

$$W1=136.066 \text{ Rad/sec}$$

$$W2 = 157.1 \text{ Rad/sec}$$

، وبالتعويض بالقيم العددية نجد أن التسارع عند تناقص السرعة خلال 5 ثانية

$$\alpha = \frac{w1-w2}{t} \text{ يساوي: } \alpha1 = 4.1868 \text{ Rad/ sec}^2$$

كما أن تغير العزم المقابل ذلك يساوي

$$T = 0.1 \cdot 4.1868 = 0.41868 \text{ N.M}$$

لدى حدوث نفس تغيير السرعة ولكن خلال 1 ثانية ، نجد أن التسارع يتزايد ليصبح :

$$\alpha2 = 20.934 \text{ Rad/ sec}^2$$

بالمقابل سيتغير العزم بقيمة كبيرة ويصل إلى $T = 0.1 \cdot 20.934 = 2.934 \text{ N.M}$

بفرض أن عزم العطالة كان لعنفه ريحية حيث $I = 7500 \text{ Kg.m}^2$ إذا كان تغيرت سرعة العنفة الريحية من 100 إلى 95 دورة في الدقيقة و إذا كان عزم العطالة $I = 7500 \text{ Kg.m}^2$ وحصل هذا التغير خلال 5 sec أو 1 sec ما هو مقدار تغير الاستطاعة في كل حالة ؟

الحل:

السرعة الزاوية للعنفة عند سرعة دوران 100 دورة في الدقيقة تساوي:
 $w_1 = 10.467 \text{ Rad/sec}$ ، والسرعة الزاوية عند سرعة دوران 95 دورة في الدقيقة تساوي
 $w_2 = 9.9443 \text{ Rad/sec}$

وبالاعتماد على العلاقة : $T = \alpha * I = (P_2 - P_1) / W$

بأخذ السرعة الزاوية $W = 10$ كقيمة متوسطة في هذه الحالة نجد ان الاستطاعة المتولدة تتغير بين القيمة 78.6 كيلو وات عند حدوث تغيير السرعة خلال 5 ثانية. والقيمة 393 كيلو وات عند حدوث التغيير خلال ثانية واحدة . بالمقابل سيغير العزم المطبق على محور الآلة في الحالة الأولى سيتغير بمقدار 75 نيوتن متر . وفي الحالة الثانية سيتغير بمقدار 375 نيوتن متر . وهذه القيم كبيرة وخطيرة على محور العنفة الريحية .

ملاحظة: من أجل عنفة باستطاعة 2 ميغا وات [40] ، وزن الدائر 40 طن عزم العطالة للدوار يصل للقيمة $10^6 \text{ Kg.m}^2 * 6.25$ ، والقدرة المخزنة في كتلة الدائر والتي تعطى بالعلاقة : $E = 0.5 * J * W_m^2$.

وثابت عزم العطالة H ، والمعروف انه القدرة الحركية المخزنة في الدائر عند السرعة الاسمية مقسوماً على الاستطاعة الاسمية للمولد ب $V.A$ والذي يعطى بالعلاقة:

$$H = E/S = 4.79 \text{ sec} , H = 0.5 J * W_m^2 / S$$

وبالنسبة لعنفة باستطاعة 1.5 ميغا وات. عزم العطالة المكافئ $10^6 * 3$ كيلو غرام متر مربع (Kg.m^2) ، نصف قطر السفرات 35 متر ، عدد أزواج الأقطاب 5.

4-2 التحكم الأفضل بالعنفات الريحية

Optimum wind power control

العنفات الريحية ذات السرعة المتغيرة قادرة على العمل عند سرعة دوران مثالية وذلك كتابع لسرعة الريح ، مبدل القدرة الإلكتروني يمكنه التحكم بسرعة دوران العنفة وذلك من أجل

الحصول على أقصى استطاعة ممكنة ، وذلك كما أوضحنا باستخدام مبدأ ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى MPPT . [10]

نتجنب في هذا النظام توليد استطاعة أكبر من الاستطاعة الاسمية عند ارتفاع سرعة الريح. يبقى توتر المكثف في حلقة التوتر المستمر ثابتاً . ويمكن الوصول لحالة الفصل Decoupling بين المبدل الموصل جهة العنفة والمبدل الموصل جهة الشبكة . المدل الموصل جهة الشبكة يعمل كمعرج ، مولداً توتاً مقادراً بنظام PWM مركبته الأساسية ذات تردد الشبكة العامة . ويكون قادراً على حقن القدرة الفعالة بالشبكة .

يوجد العديد من الطرق للتحكم سنحاول تسميتها فقط :

- Tip –Speed Ratio Control
- Optimal Torque Control
- Power Signal Feed Back Control
- Perturbation and observation control
- Artificial Intelligence Control
- Fuzzy Logic Control
- Neural Network Technique

1-4-2 معدل تغيير التردد (RCF) Rate of Change of Frequency

القدرة الميكانيكية والكهربائية المستجرة من المولد الريحي متوازنة في الحالة المستقرة. عندما يزيد الحمل الكهربائي عن القدرة الميكانيكية المطبقة على المولد سوف يبدأ التردد بالانخفاض. هبوط معدل تغيير التردد يعتمد على الاستطاعة الأولية التي يتم فصلها عن الشبكة Power Mismatch وعلى عطالة النظام . تغيير السرعة يستمر حتى تصبح الاستطاعة الميكانيكية المقدمة من الريح مساوية للاستطاعة المطلوبة من الحمل .

العطلة والتي تعرف بأنها القدرة المخزنة في الأجزاء الدوارة من النظام بناءً عليه فإنه كلما ارتفعت عطلة النظام ، كلما أخذ النظام وقتاً أطول للخروج System Loss ، وايضاً وقتاً أطول للوصول للحالة المستقرة الجديدة .

يوجد عادة ثلاث حالات تسبب تغيير التردد وهي:

فقدان التوليد، فقدان الحمل، حدوث تغيير في قيمة الحمل أو الاستطاعة المولدة هذا وإن مشتق تردد النظام df/dt يعرف باسم معدل تغيير التردد .في الأنظمة التقليدية معدل تغيير التردد (RCF) لا يؤخذ بالاعتبار بسبب طبيعة الشبكة كونها لا تحتوي أنظمة طاقات متجددة ، Renewable Energy Systems ، ولا تحتوي مولدات صغيرة موزعة .قيمة معدل تغيير التردد

ليست ضرورية في الأنظمة التقليدية ، لكن مع تزايد دخول الطاقات الريحية في أنظمة الطاقة التقليدية فإن معدل تغيير التردد سوف يلعب دوراً هاماً في التحكم بتردد الشبكة . كما انه سوف يستخدم لمعرفة التوليد غير المناسب واستهلاك الحمل — Miss Match Power Generation .

زيادة قيمة معدل تغيير التردد (RCF) يمكن ملاحظته، نتيجة انخفاض العطالة الناتج عن دخول الأنظمة الريحية وربطها على الشبكة. يحسب معدل تغيير التردد من العلاقة:

$$dF/dt = \Delta p * f / 2H * S \dots (3-2)$$

dF/dt تمثل (HZ/SEC) ، وهو معدل تغير التردد ، H عطالة النظام وتعطى بالشكل:

$H = MWS/MVA$ ، و Δp هي مفايد المولد وتقدر بالميغا وات. S استطاعة المولد MVA . [23]

كما يمكن التعبير عن معدل تغير التردد بالشكل

$$\Delta p / 2H \partial F / \partial t \dots (4-2)$$

2-4-2 معادلة الاهتزاز Swing Equation

في الفقرات السابقة ورد عزم العطالة أو ثابت العطالة كما وردت علاقة عزم العطالة القطبية والاستطاعة أو عزم الدخل والخرج [10]، وعليه سنورد هذه المعلومات للتذكير .

تربط العنفات الريحية متغيرة السرعة إلى الشبكة العامة عبر مبدل الكتروني . هذا المبدل يعمل على عزل isolate ، عطالة العنفة الريحية عن الحالات العابرة التي تطرأ على الشبكة . بناءً عليه فإن العطالة الكلية Total Inertia لكل من النظام الكهربائي والذي يحتوي مولدات تزامنية كبيرة وعنفات ريحية ، سوف تتناقص مع تزايد ربط العنفات الريحية على الشبكة العامة . يبين بعض الباحثين أن الشبكة البريطانية سوف ينخفض عطالة شبكتها بمقدار 30% خلال العشر سنوات القادمة نتيجة تركيب عنفات ريحية جديدة على الشبكة. انخفاض ثابت العطالة قد يسبب التعطيم الكامل للشبكة، Network Blackout، خلال الحالات العابرة الطارئة . Contingency .

بفرض لدينا مولد تزامني ثلاثي الطور، يدار بواسطة محرك ثانوي (تيار مستمر أو عنفة ريحية ..) معادلة حركة الدوران للمولد تعطى بالعلاقة:

$$J * d^2\theta / dt^2 = T_m - T_e = T_a \dots (5-2)$$

حيث J (Kg.m²) هي العطالة الكلية للأجزاء الدوارة.

T_m (Nm) العزم الميكانيكي للمحرك الثانوي (محرك الجر). T_e (Nm) العزم الكهربائي في خرج المولد التزامني. T_a (Nm) العزم المسرع ، Accelerating Torque بعد إهمال جميع المفايد.

في الحالة المستقرة، العزم الميكانيكي يساوي العزم الكهربائي ، وعليه فإن التسارع في الاستطاعة سيكون مساوي الصفر . في هذه الحالة سيدور الدائر عند السرعة التزامنية W_s (Rad/sec) يقاس الوضع الزاوي θ ، بالنسبة لمجموعة محاور ثابتة ، والتعبير θ ، بالنسبة للمحاور الدوارة تعطى بالعلاقة

$$W_s . t + \delta = \theta \quad (6-2)$$

δ هي الوضع الزاوي وتعطى بالراديان Angular Position .
بأخذ مشتق العلاقة أعلاه بالنسبة للزمن، مع مراعاة المحاور التزامنية المرجعية ، يمكن كتابة ما يلي :

$$\frac{d\theta}{dt} = W_s + \frac{d\delta}{dt} \quad (7-2)$$

وتعطى السرعة الزاوية للدائر في العنفة الريحية:

$$W_t = \frac{d\delta}{dt} \quad (8-2)$$

بناءً عليه نستنتج أن:

$$W_t = W_s = \frac{d\delta}{dt} \quad (9-2)$$

وعليه فإن السرعة الزاوية للدائر ستساوي السرعة التزامنية عندما يكون المقدار:
 $d\delta / dt = 0$

بأخذ مشتق العلاقة (7-2) وتعويضه في العلاقة (5-2) يمكن إعادة كتابة علاقة العزم بالشكل:

$$J * d^2\delta / dt^2 = T_m - T_e = T_a \quad \dots (10-2)$$

بضرب طرفي العلاقة (10-2) ب W_r نجد أن:

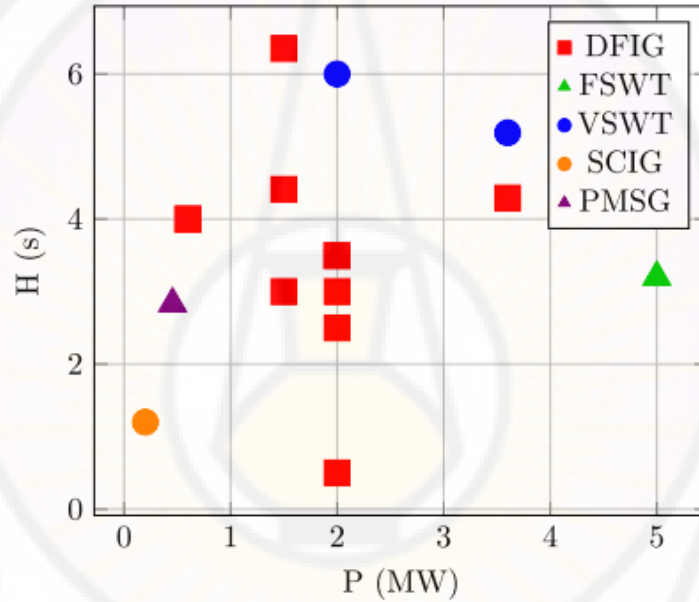
$$J * W_r * d^2\delta / dt^2 = P_m - P_e = P_a \quad \dots (11-2)$$

P_m الاستطاعة الميكانيكية ، P_e الاستطاعة الكهربائية ، P_a استطاعة التسارع.

ثابت العطالة Inertia Constant (H) الوارد في بعض العلاقات يعرف بأنه للقدرة الحركية المخزنة في محور آلة مستقلة مفردة ويتناسب مع استطاعة الآلة ويعرف بأنه يماثل مقاومة تمنع تغيير التردد بشكل سريع عند حدوث طارئ على المنوبة . يقاس ثابت العطالة بالثانية

ويقع في معظم الآلات ضمن القيم 2-9 ثانية. من أجل المحطات الكبيرة ثابت العطالة يتناسب عكساً مع معدل الاستطاعة Power Rating. هذا يعني أنه عند ارتفاع استطاعة المولد سوف يتناقص ثابت العطالة كما هو مبين بالشكل (2-16).

هنالك عاملين يؤثران على عطالة النظام، الأول هو عطالة كل مولد مرتبط بالنظام والثاني هو عدد المولدات المرتبطة والتي تعمل ضمن النظام. في المحطات التق المولد التزامني يستطيع أن يقدم العطالة للنظام ويؤدي إلى ترابط قوي بين التردد الكهربائي وسرعة الدوران.



الشكل (2-16) تغير ثابت العطالة تبعاً لاستطاعة المولد

معادلة الحركة لدائر الآلة تعطى بالعلاقة أدناه، وهي تأخذ ثابت العطالة بالاعتبار.

$$H = \frac{\text{Stored energy at rated speed in MW}}{\text{Generator MVA rating}} \dots (12-2)$$

$$K.E. = \frac{1}{2} J \cdot \omega^2 \dots (13-2)$$

من العلاقات (12-2) و (13-2) أعلاه يمكن كتابة ثابت العطالة بالشكل:

$$H = \frac{(0.5 J \cdot \omega^2)}{M.V.A} \cdot 10^{-6} \dots (14-2)$$

أي أن ثابت العطالة H يساوي $\frac{M.W.s}{M.V.A}$ w. السرعة الزاوية للدوران J . Rad/sec عزم العطالة للكتل الدوارة Kg.m² و MVA هي معدل الاستطاعة للمنوبة .

العطالة الكلية للنظام تحسب بالشكل :

$$H_i . S_i = H_{system} \dots (15-2)$$

حيث أن H_i ثابت العطالة للمولد الواحد بالثواني، وأن S_i استطاعة المولد الواحد بـ MVA



The logo of Damascus University is a large, faint watermark in the background. It is a circular emblem with a central shield-like shape containing a stylized sun or star. The text "وقل رب زدني علما" is written in Arabic script along the top inner edge, and "جامعة دمشق" is written along the bottom inner edge. The English name "Damascus University" is written in a large, serif font along the bottom outer edge.

**الفصل الثالث أنظمة تشغيل العنفات الريحية باستخدام الكترونيات القدرة
الكهربائية**

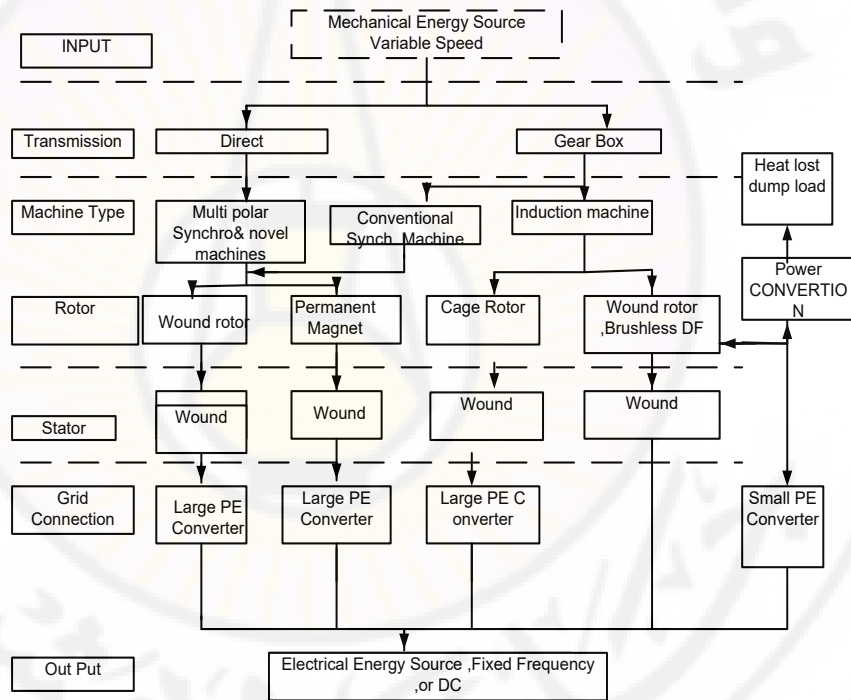
Power electronic in the operating systems of wind turbine



1-3 مقدمة الفصل

بدءاً من القوى الميكانيكية الناجمة عن هبوب الريح، تعمل أنظمة العنفات الريحية على تحويلها بأفضل مردود إلى طاقة كهربائية، من خلال التفاصيل المبينة في المخطط أدناه سنلاحظ مراحل العمل والمكونات الأساسية اللازم استخدامها ودور الإلكترونيات القدرة بشكل عام في عملية التحويل.

خريطة الطريق لعملية تحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية باستخدام المبدلات الإلكترونية



1-2-3 المبدلات الإلكترونية والعنفات الريحية

Power Converters and Wind Turbine

3-2-1 دواعي استخدام أنظمة الكهرونيات القدرة الكهربائية في العنفات الريحية

نتيجة التطور السريع في تقانة العنفات الريحية، واستطاعة التوليد المتزايدة، أضحت الكترونياات القدرة الكهربائيية من أهم مكونات هذه الأنظمة وأكثرها فعالية.

في الشكل (3-1) نرى المعالم الرئيسية لمحاور تطبيقات الكترونيات القدرة الكهربائية في المزارع الريحية. حيث أن نظام الربط بين المولد الريحي والشبكة العامة يتكون بشكل رئيسي من المبدلات الإلكترونية (جسور التقويم والتعريض)، فهي تعمل من جهة المولد الريحي على التحكم بالتيار المار في دوائر أو ثلثات المولد، وذلك لتعويض العزم والتحكم به، وبالتالي التحكم بسرعة دوران المولد. كما ينعكس ذلك على توازن الاستطاعة الفعالة في حالة التشغيل النظامي، وفي الحالات العابرة. كونه في الحالة العابرة يقوم النظام الإلكتروني بتخفيض الاستطاعة المولدة بسرعة فائقة. كما تقوم المبدلات جهة المولد بالعمل على تنظيم مطال توتر الخرج وتحديد قيمة التردد المناسب.

تعمل المبدلات من جهة الشبكة على تأمين متطلبات الشبكة دون العودة لمعرفة سرعة الرياح، هذا يعني أنها يجب أن تكون قادرة على تسريع الاستجابة لتبادل الاستطاعة الفعالة P ، والمحافظة على استطاعة حقن شبه ثابتة، كما تعمل على التحكم بالاستطاعة الردية Q ، وتقديم التوتر والتردد المناسبين والمتزامنين مع توتر الشبكة، كما أنها تعمل على التخفيف من نسبة تشوه الكلي بالتيار $THD\%$ ، وجعله ضمن القيم العالمية المسموحة.

تمتاز تجهيزات الكترونيات القدرة الكهربائية بكونها قادرة على تخزين جزء من استطاعة التوليد، وقادرة على رفع توتر المولد ليتناسب مع توتر الشبكة العامة المحلية، وهي يجب أن تتصف بمرونتها وتحملها لكثافة تيار عالية، سهولة صيانتها، كما أن عمرها التشغيلي يتجاوز 20-25 سنة، وتكلفة هذه التجهيزات الإلكترونية بتناقص مستمر مع تطور هذا العلم.

طبيعة هبوب الرياح، وتقطعها لفترات ثم عودة الرياح يؤدي إلى تقلص عامل السعة Capacity Factor للمزارع الريحية وعدم تجاوز النسبة 20%، التقانات الحديثة في تصميم مبدلات الكترونيات القدرة الكهربائية، ومع تصاعد استطاعة المولدات الريحية زاد من عامل السعة للمزارع الريحية وبلغ أخيراً ما يقارب 50%. مع دخول نظام التخزين للطاقة الريحية سوف يرتفع هذا العامل مستقبلاً. وحالياً تقوم المزارع الريحية الضخمة Giganitic wind power plants، بالمشاركة بتنظيم توتر وتردد الشبكات الكهربائية، وليس إضعافها، وستكون الطاقة الريحية مستقبل الطاقات المتجددة.

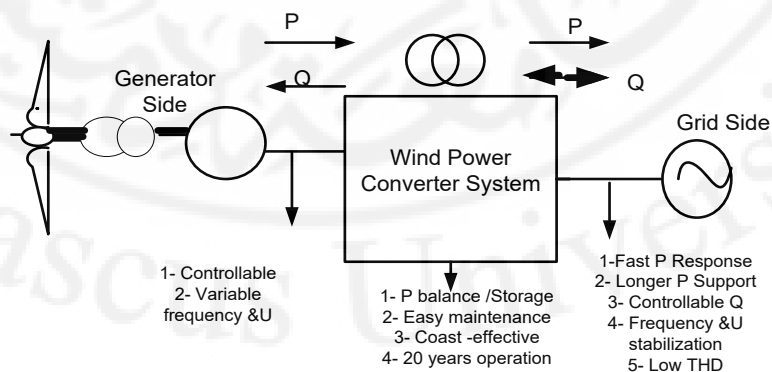
تسعى الشركات الصناعية والفنيين للعمل على خفض تكاليف توليد الطاقة الريحية عن طريق زيادة استطاعة المولدات الريحية. وحديثاً العمل على الاستخدام الكامل للمبدلات الإلكترونية

من جهة المولد ومن جهة الشبكة، وهذا سيسمح بتحقيق تحويل مثالي للطاقة الريحية إلى طاقة كهربائية.

سوف نتعرض لاحقاً لبيان مختلف أنواع التركيبات الإلكترونية المتداولة في العنفات الريحية، للوصول إلى الأنظمة المثالية الممكن استخدامها في العنفات الريحية. في الشكل (1-3) أدناه، تم اختصار عمليات التحكم ومهمة كل مبدل سواء كان من جهة الشبكة أو من جهة المولد الريحي، وذلك للتحكم بتيار المولد الريحي وتنظيم توتر خرجة وتردده، ومن جهة الشبكة العمل على تسريع الاستجابة لتغيرات الاستطاعة الفعلية والرديّة، والتحكم بتوتر وتردد الحقل بالشبكة. أيضاً المحافظة على أقل تشوه في التوافقيات.

في أنظمة العنفات الريحية، كما شرحنا سابقاً، يتم استرجار الطاقة الريحية وتوليدها، ثم حقنها بالشبكة العامة بثلاث مراحل رئيسية:

يتم في المرحلة الأولى تحويل القدرة الديناميكية المتوفرة في الرياح إلى قوة ميكانيكية، تعمل على تدوير المولد الريحي الكهربائي، ويقوم المولد بحقل القدرة الكهربائية في الشبكة العامة. يبدو أن هنالك ثلاث مناطق نحتاج التحكم بها للحصول على أكبر قدر من الطاقة الكهربائية. في المرحلة الأولى، النظام الميكانيكي في العنفة الريحية يتحكم باتجاه القمرة ويتابع محور هبوب الرياح (Yaw Angle). كما أنه تبعاً لسرعة هبوب الرياح نحتاج لتنظيم معدل سرعة نهاية الشفرات (Tip Speed Ratio)، لرفع معامل الاستطاعة في الدائر C_p (Power Co-efficient) الذي يعبر عن نسبة الاستطاعة الحقيقية المستخلصة من الرياح إلى الاستطاعة الكامنة في الرياح



الشكل (1-3)

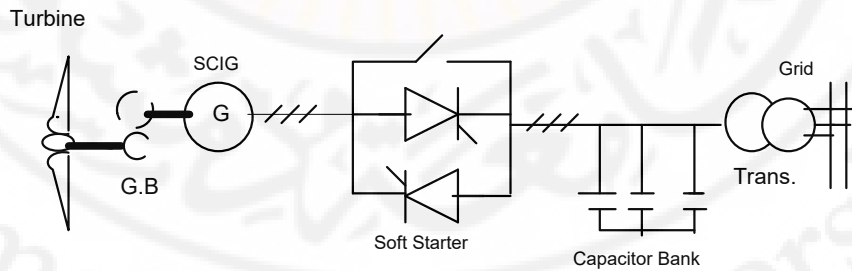
المعالم الرئيسية لمحاور تطبيقات الإلكترونيات القدرة الكهربائية في المزارع الريحية

من أجل بعض التصميمات الخاصة للعنفات الريحية، تدور الشفرات ببطء شديد، عندئذ معظم الهواء سيمر عبر الدائر دون أخذ طاقته الكامنة. لدى دوران الدائر بسرعة أكبر، ستنقبى الشفرات دائرة ضمن زوايا محلية، لذا يجب إبقاء زمن تطابق Time Lapses كاف بين كل شفرتين حتى يتسنى لكل شفرة اصطياذ الطاقة الواردة من الريح وألا تتأثر بالريح المنعكسة عن الشفرة الأخرى. هذا يفسر التحديد الأمثل لقيمة معدل سرعة نهاية الشفرات لكل عنفة λ ، وما يقابله من معامل استطاعة الدائر [11] Cp.

2-2-3 الاستراتيجيات المعتمدة لاستخدام الكترونيات القدرة الكهربائية في العنفات الريحية

Topologies of using Power Electronics in Wind Turbines

هنالك استراتيجيات وأساليب متعددة للتحكم بالمرحلتين الثانية والثالثة من مراحل توليد الطاقة الكهربائية في العنفات الريحية. الجيل الأول من العنفات الريحية المركبة عام 1980 والمرتبطة على الشبكة، هذا النظام بسيط، يدور المولد الريحي بسرعة دوران ثابتة، وغالباً تستخدم محركات تحريضية قفص سنجابي كمولد ريحي والشكل (3-2) يوضح ذلك. في هذا النظام المولد مرتبط مباشرة على الشبكة عبر قواطع كهرومغناطيسية Circuit Breakers، ولا يوجد أي نوع من التحكم بالطاقة المحقونة بالشبكة. لكن مع ذلك تزود هذه الأنظمة بنظام الإقلاع اللين Soft Starting، للتحكم بالإقلاع والتوقف. يدور للدائر، في هذا النظام، عند سرعة ثابتة وتطبق على الشبكة كل التغيرات التي تطرأ على التوتر والاستطاعة المولدة من العنف.



الشكل (3-2) مولد تحريضي قفص سنجابي ذي سرعة دوران ثابتة مرتبط على الشبكة

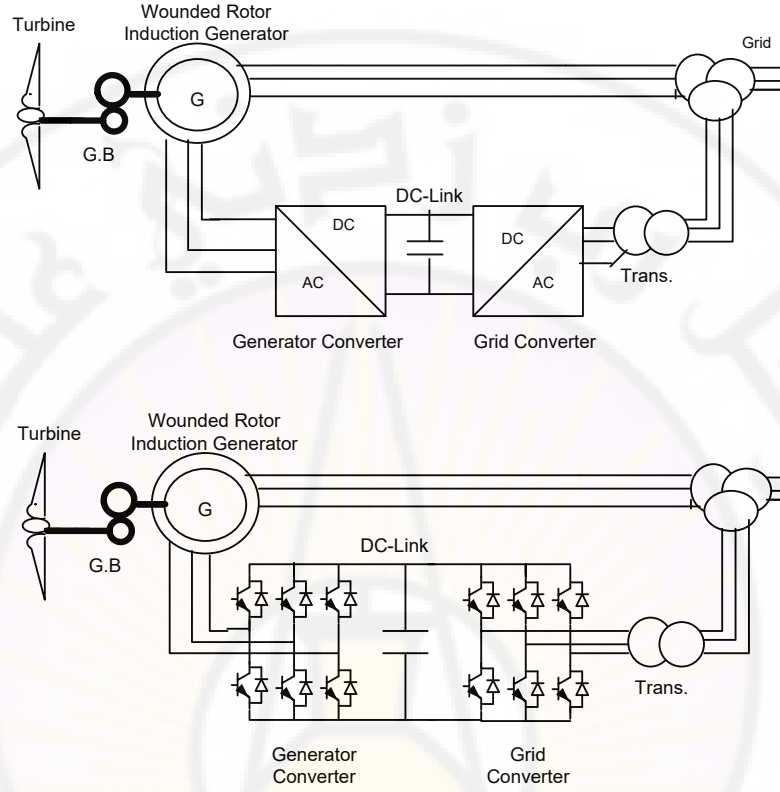
استخدم المولد التحريضي ذو الدائر الملفوف (المولد التحريضي مضاعف التغذية) Double Fed Induction Generator (DFIG) في تسعينات القرن الماضي الشكل

(3-3). مما سمح بزيادة فرص التحكم بالقدرة المحقونة بالشبكة، وكانت خطوة رائعة في مجال تصميم المولد التحريضي، الذي يسمح باستخدام الكترونييات القدرة لتسهيل التحكم بالمولد وبسرعة دورانه. (علماً أن استخدام المبدلات الإلكترونية في المحركات التحريضية ذات الدوائر الملفوف بدأ بدراساتها وتجربتها في الفترة 1974 وما بعد). في هذا التركيب نستخدم مبدل الكتروني مضاعف باستطاعة لا تتجاوز 30% من استطاعة المولد الريحي. التركيب المقترح (كما سندرسه بالتفصيل في فقرة لاحقة)، يعمل على تأمين تحكم جزئي بالاستطاعة الردية والفعالة المحقونة بالشبكة، مع التحكم بالحقل الدوار في الدائر، وهو يعمل على استرجار القدرة من المولد التحريضي عند ارتفاع السرعة وانخفاضها لذا يسمح بالعمل عند سرعات متغيرة ضمن المجال $\pm 30\%$ من السرعة الاسمية. التطبيقات العملية لهذا النظام نفذت على مولدات باستطاعة 5 ميغا وات. نرى أن المبدل المستخدم هو مبدل مضاعف Back-to-Back Converter، يربط بين الشبكة العامة والمولد الريحي.

يتم ربط الدائر على الشبكة العامة، عن طريق محول تزامن وخافض لتوتر الشبكة ليصبح توتر خرج الجسر مقارباً من أقصى توتر مقوم قد ينشأ من الجسر الثاني المرتبط بملفات الدائر، ويربط الجسر الثاني للمبدل، إلى ملفات الدائر بين الجسرين توجد حلقة توتر مستمر ومكثف DC-Link.

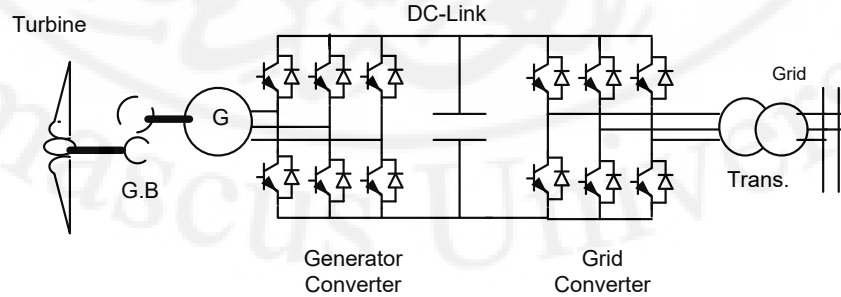
المبدل المضاعف Dual-Converter، هو نظام عكوس يعمل باتجاهين. يستطيع أخذ التوتر المتناوب، ذو التردد المنخفض ($S \cdot F$ الذي يساوي جداء تردد الشبكة بالانزلاق) من الدائر وتحويله لتوتر مستمر يحقق في حلقة التوتر المستمر، ثم يقوم الجسر الآخر المرتبط بالشبكة عن طريق المحول، بتحويل التوتر المستمر إلى توتر متناوب من رتبة وقيمة تردد وتوتر الشبكة.

عند انخفاض سرعة الرياح، يعمل المبدل القريب من الشبكة على أخذ القدرة من الشبكة وتحويلها لتوتر مستمر ثم يقوم المبدل المرتبط بالمولد بحقق القدرة في ملفات الدائر عند تردد معين يجعل سرعة دوران الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية مساوية لسرعة دوران توتر الشبكة العامة، أي أنه يعوض النقص في سرعة دوران الفيض الناتج عن انخفاض سرعة دوران الدائر.



الشكل (3-3) المولد التحريضي ذو الدوائر الملفوف، مضاعف التغذية والمبدل المضاعف المرتبط بالدوائر

- في بداية العام 2000 ، قدمت شركتي Enercon و Siemens الألمانية، مفهوم المبدل الكامل Full Scal Converter(FSC)، بحيث يتم ترحيل كامل الاستطاعة المولدة من العنف الريحية للشبكة العامة عن طريق نظام تبديل مضاعف، مكون من مقوم ومعرج AC-DC-AC Converters، كما في الشكل (4-3) .



الشكل (4-3) المبدل الكامل (FSC) باستخدام مبدلات مضاعفة راس - عقب

يسمح هذا النظام المكون من مبدلين مربوطين بشكل متعاكس (مبدل مضاعف) Back-to-Back Converter أو Dual-Converter بنقل كامل استطاعة التوليد وحققها بالشبكة، وهو يؤمن تحكم كامل بالاستطاعة، ويجعل النظام يعمل عند مجال واسع من السرعات المتغيرة للرياح. حيث يخفف بشكل واضح من الاهتزاز الميكانيكي وتكاليف الصيانة. في هذه الحالة، يمكن أن تكون علبة السرعة التقليدية خياراً، لأن المبدل يسمح للمولد الريحي بالعمل عند سرعات جداً منخفضة، وخاصة لدى كون المولد من النوع التزامني Synchronous Generator.

كما نعلم، في المولد التزامني مهما نقصت سرعة الدوران يستمر المولد التزامني بإعطاء الاستطاعة بتوتر منخفض وتردد منخفض، عندئذ يعمل المبدل المرتبط بالعنفة بتقويم هذا التوتر (Rectifier) ولا يتأثر العمل بتغيير التردد، ويضاف على خرج المقوم في حلقة التوتر المستمر، نظام المقطعات الرافعة للتوتر المستمر Boost Converter، وذلك حتى يصبح التوتر المطبق على المعرج مناسب لتوتر الشبكة العامة، المعرج القريب من الشبكة ينظم التوتر بنظام PWM، ويؤمن التوتر والتردد المناسبين للشبكة العامة. قد يكون المبدل القريب من الشبكة ترانزستوري أو ثيرستوري، وسنعالج ذلك لاحقاً. يمكن القول أيضاً، أن هذا النظام يطبق على المولدات التزامنية ذات الدائر الملفوف، وعلى المولدات التزامنية ذات المغناط الدائمة [36] PMSG.

3-3 الاستراتيجيات المتداولة للمبدلات المضاعفة الكاملة للتحكم في

المولدات التزامنية الريحية

Wind Generator Design Topologies of Full Scall Converter in Synchronous يبين الشكل (3-4) أعلاه مخطط صندوق نموذجي لنظام المبدلات المضاعفة ذات التحكم الكامل Full Scall Converter(FSC)، البنية الداخلية لهذا النظام تعتمد على متطلبات عديدة، وعلى مصمم النظام اختيار العناصر المناسبة لتركيبها ضمن بنية المبدلات، وذلك استناداً إلى نوعية التطبيق، هل سيكون التوتر فيها مرتفعاً؟ أو هل الاستطاعة عالية؟ هل نرغب بالحصول على وثوقية عالية؟ ما درجة المرونة في نقل الطاقة الريحية البحرية، Off- Shore

Wind Turbines . بينما ينظر البعض لعدم رفع التكاليف الإنشائية، أو يكون التطبيق لشبكات ميكروية في مناطق سكنية ريفي.

كما نعلم المبدلات المضاعفة Dual Converter تستخدم مبدلين موصلين رأس إلى عقب، ولذا نطلق عليها أحياناً المبدلات المتعكسة رأس-عقب، حسب التعبير الفرنسي Tete-Peche Converter ، والاستراتيجيات المتداولة حديثاً في العنفات الريحية هي كالتالي:

- المبدلات ذات السويتين Two Level Converters
- المبدلات متعددة السويات Multilevel Converters
- المبدلات المتتابة Tandem Converters
- المبدلات المتريسية Matrix Converters
- المبدلات المهتزة Resonant Converters

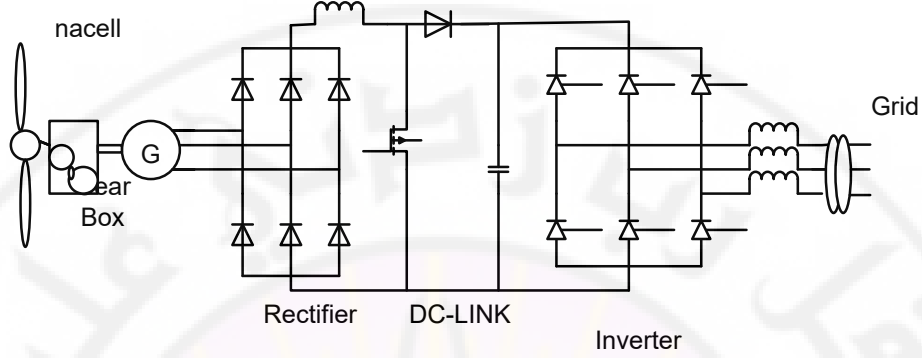
في هذا المجال، نحن لسنا بصدد الدخول في شرح آلية عمل كل نوع من هذه المبدلات، لكون ذلك من اختصاص الكترونيايات القدرة الكهربائية. لكن سوف نتعرض بشرح مبسط لبعض الاستراتيجيات الأكثر تداولاً وبيان ميزاتهما ومساوئها.

سوف نتطرق للمبدلات ذات منبع التوتر Voltage Source Converter (VSC) ، والمبدلات زد-Z (ZSC) Source Converter . هذه المبدلات واعدة في التطبيقات الريحية ذات الاستطاعات الكبيرة والتوتر المتوسط . يحتاج وضع هذه النماذج في الصناعة التجارية بعض الوقت. حتى الآن المبدلات ذات منبع التوتر هي المسيطرة تجارياً.

3-3-1 المبدلات ذات الجسر غير المقاد كمبدل متناوب – مستمر

Converters using Diode Bridge as AC/DC Converter

أبسط أنواع المبدلات المضاعفة هي المبدلات التي تستخدم بالقرب من المولد التزامني الريحي جسر تقويم من الديود (أي غير مقاد) كما في الشكل (3-5). هذا الجسر قد يكون ثلاثي الطور (جسر كريتز) ذي توتر خرج بستة نبضات في الخرج Six pulses، وكنا في الكترونيايات القدرة نقول أنه من الرتبة السادسة $n = 6$ ، وقد نستخدم جسور غير مقادة تعطي توتر مستمر من الرتبة $n = 12$ أو $n = 18$. كلما زادت رتبة التوتر المستمر انخفضت نسبة التوافقيات في دخل الجسر. بعد هذه المرحلة يتم رفع قيمة التوتر المستمر بواسطة مقطع رافع للتوتر Boost Converter (DC-DC Converter) .



الشكل (3-5) المبدل المضاعف المركب على المولد التزامني

الريحي مع جسر غير مقاد

من أجل الاستطاعات الكبيرة، نستخدم في حلقة التيار المستمر، عادة عدة مقطعات رافعة للتوتر، تربط على التفرع، أو نضع مقطعين الأول على القطب الموجب والآخر على القطب السالب، أو نستخدم مجموعة مكونة من معرج تردد عالي High Frequency Inverter يتبعه محول تردد عالي لرفع التوتر High Frequency Transformer، ثم يتبعه مقوم للتوتر ذي التردد العالي، وبذلك نكون قد حصلنا على مبدل مستمر - مستمر DC-DC Converter. الغاية الرئيسية من استخدام المقطع الرافع هي رفع قيمة التوتر المقوم الناتج عن العنفة الريحية ليتوافق مع توتر الشبكة العامة المرتبط إليها المعرج. أيضاً يعمل المقطع الرافع على إبقاء التوتر المستمر مستقراً عند قيمة ثابتة. إضافة لإمكانية ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى (Maximum Power Point Tracking(MPPT. الجسر القريب من الشبكة يبدو في الشكل (3-5) أنه من الترانزستور، وهنا نتحكم بتردد خرج هذا الجسر وتوتره، وقد يمكن استخدام جسر من الثيرستور، في هذه الحالة يعمل الجسر الثيرستوري حسب تردد الشبكة ولسنا بحاجة لتنظيم التردد، لأن التبديل سيكون عن طريق الحمل ويسمى مثل ذلك بالجسور المقادة عن طريق الحمل أو المنبع

LineCommutated Converter(LCC) أو Load Commutated Converter(LCC)

عموماً، عندما يكون المبدل المركب من جهة الشبكة، هو مبدل مستمر - متناوب DC-AC Converter أو معرج Inverter، يحول التوتر المستمر إلى توتر متناوب متزامن مع توتر وتردد الشبكة العامة .

العائق الأساسي في هذا النظام هو قفزات العزم الكبيرة التي قد تنشأ نتيجة بعض مركبات التوافقيات للناجمة عن جسر التقويم غير المقاد. هذا العزم ضار جداً ويؤثر على النظام الميكانيكي وخاصة إذا كانت العنفة الريحية كبيرة الاستطاعة. لكنه يمتاز بتكلفته المنخفضة وسهولة التحكم به. مثل هذا التصميم مناسب للعنفات الريحية ذات الاستطاعات المنخفضة والمتوسطة، بدءاً من 1 كيلو وات وصولاً لاستطاعة 1 ميغا وات.

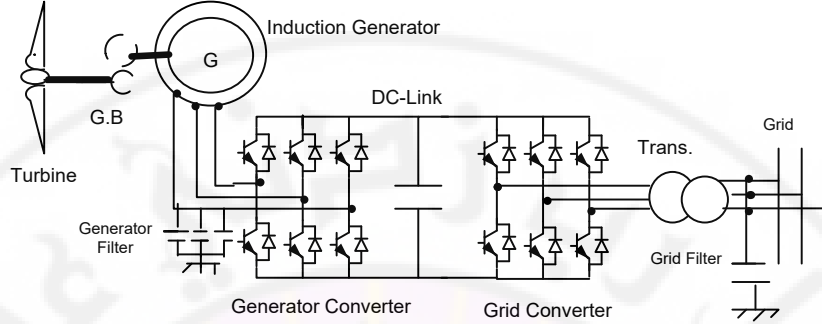
3-3-2 المبدلات المضاعفة ذات منبع التوتر وذات سويتين

Tow Level Back-to-Back Voltage Source Converter

هذه البنية هي الأكثر تداولاً في أنظمة المبدلات المضاعفة، وهي مكونة من معرجين توتر Voltge Source Inverter (VSI) مربوطين لبعضهما البعض بشكل متعاكس، مهابط الجسر الأول القريب منالمنوبة موصلة لمصاعد الجسر الثاني القريب من الشبكة، وبينهما حلقة التوتر المستمر بمكثف ذي سعة كبيرة DC-Link . الشكل (3-6) بين مكونات هذا المبدل المضاعف.

كل جسر أو مبدل يحتوي سعة قواطع الكترونية قد تكون من الموسفت MOSFET أو الترانزستور ذي البوابة المعزولة IGB، أو من الترانزستور السيلكوني IGCT . جريان القدرة في كل مبدل Converter ذي اتجاه مزدوج، يستطيع أخذ القدرة أو حقنها في كلا الجهتين. المبدل المركب جهة المولد الريحي يهتم بالتحكم بجريان للقدرة الفعلية ومتابعة العمل عند نقطة الاستطاعة العظمى. بينما المبدل المركب جهة الشبكة فهو يهتم بالاستطاعة الردية المحقونة بالشبكة والمحافظة على ثبات توتر حلقة التوتر المستمر. وجود الترشيح (الفلتر) في جهة التوتر المتناوب لكلا المبدلين ضروري للتحكم الديناميكي للمبدل ذي منبع التوتر يعتمد على ثابت الزمن للمرشح المركب في خرجه. وإن اختيار المرشح وتصميمه هو مقارنة بين القيام بعملية ترشيح كبيرة (الحصول على أدنى نسبة توافقيات) وبين سرعة الاستجابة الديناميكية.

العائق أمام هذا النوع من المبدلات هو ارتفاع المفايد خلال التبديل ووجود مبدلين بتردد تقطيع مرتفع يزيد من هذه المفايد. السيئة الأخرى هي الحاجة إلى مكثفات بسعة كبيرة في حلقة التوتر المستمر. أيضاً كبر رتبة التوافقيات ومطالها، وكما أن معدل تغير التوتر على القواطع مرتفع، مما يتطلب قواطع بجودة عالية وإمكانية تحمل التغيرات العابرة في التوتر والتيار. يستخدم في العنفات الريحية حتى استطاعة 2 ميغا وات.



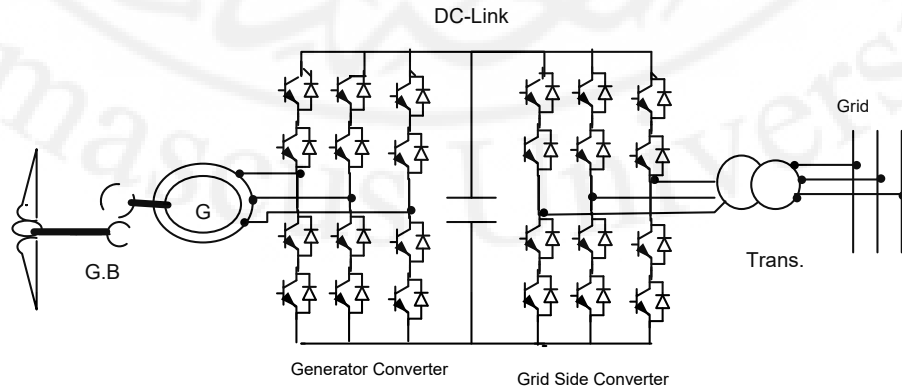
الشكل (6-3) المبدلات المضاعفة ذات السويتين

3-3-3 المبدلات المضاعفة بثلاث سويتات (المبدلات ذات ديود التثبيت) ومبدلات متعددة

السويتات

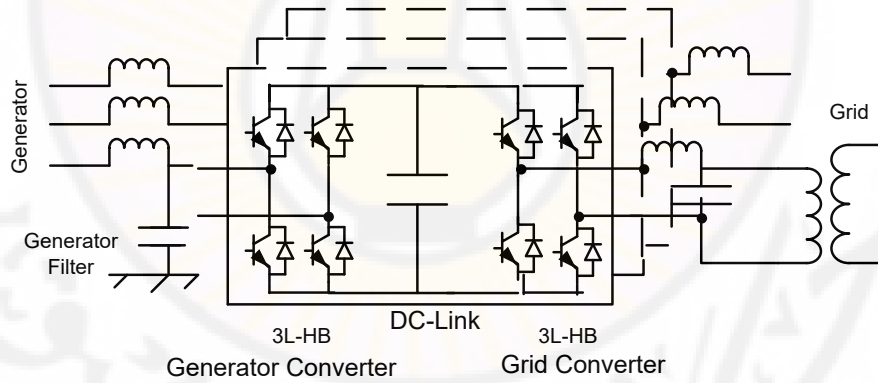
Three-Level Back-to-Back Neutral Point Clamped and Multi-Level Converters

عندما تزداد استطاعة التوليد لأكثر من 2 ميغا وات، فإن استخدام المبدلات متعددة السويتات سيكون أكثر نفعاً، وترجع الأسباب التقنية عندئذ بالنسبة لغيرها من المبدلات. الشكل (7-3) أدناه يوضح ببساطة دارة مبدل مضاعف ثلاثي السويتات باستخدام مبدل ذو ديود التثبيت Neutral Point Clamped(NPC). هذا التشكيل يماثل التشكيل السابق ماعدا أننا استبدلنا المبدل ذي منبع التوتر بسويتين بمبدلات ذات ثلاث سويتات نوع Neutral Point Clamped(NPC). الفكرة الرئيسية من ذلك هي إمكانية الحصول على توتر خرج متناوب شبه جيبي مكون من عدة سويتات للتوتر. في هذه الحالة تتعرض القواطع الإلكترونية لمعدل تغيير في التوتر أخفض dv/dt ، وتتعرض لتوتر حيز أقل، وبالتالي لمفايد أقل خلال التبدي، وأقل نسبة توافقيات في الخرج. كما أن تيارات التسريب ستخفض والتشويش الكهرومغناطيسي سيتدنى. بالمقابل هذا النظام يتطلب استخدام عدد اكبر من القواطع الإلكترونية، مما يعني زيادة التكاليف والتعقيد في التصميم والتحكم وارتفاع مفايد التبديل.



الشكل (3-7) المبدلات المضاعفة ذات ديود التثبيت بثلاث سويات

يمكن أيضاً استخدام مبدلات مضاعفة بثلاث سويات مع جسور تقويم نوع H[9],Three- Level H- Bridge Back-To- Back Topology(3L-HB BTB)، وذلك كما في الشكل (3-8) أدناه. يتكون النظام من جسرين ثلاثيي الطور، على شكل H، متعاكسين بالتوصيل لتشكيل الجسر المضاعف. يعطي ميزات مشابهة للجسر ذي ديود التثبيت. لكن يمكن في هذه الحالة تجنب عدم توزيع المفاتيح في الجسر ذي ديود التثبيت. ويمكن بواسطته الحصول على مردود أفضل وتحميل القواطع بشكل أمثل. كما أننا نحتاج إلى نصف قيمة توتر الحلقة المستمرة، ونخفض بالتالي عدد المكثفات التسلسلية اللازمة في النظام ذي ديود التثبيت 3L-NPC BTB. بالمقابل نظام 3L-HB BTB، يحتاج إلى ملفات مفتوحة في المولد Open Winding Structure لتأمين العزل بين كل طور والآخر. هذا يتطلب زيادة في طول الأمراس بين المولد والمبدل.

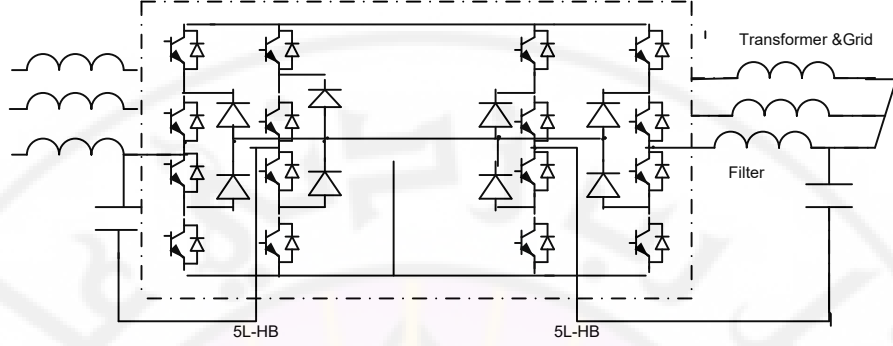


الشكل (3-8) مبدل مضاعف ثلاث سويات مكون من جسور على شكل H (3L-HB BTB)

3-4 استخدام مبدلات مضاعفة بخمس سويات مع جسور تقويم نوع H

Five-Level H- Bridge Back-To- Back Topology(5L-HB BTB)

المبدلات ذات الخمس سويات نوع (5L-HB BTB)، تتكون من جسرين ثلاثيي الطور نوع H تستخدم أذرع 3L-NPC ثلاث سويات ذات ديود التثبيت [25]. كما في الشكل (3-9) أدناه. هو يشارك النظام ذي السويات الثلاث بالمميزات والخواص، لكنه يضاعف مطال توتر الخرج، لكنه يحتاج لعدد أكبر من القواطع مما يخفض الوثوقية للنظام.

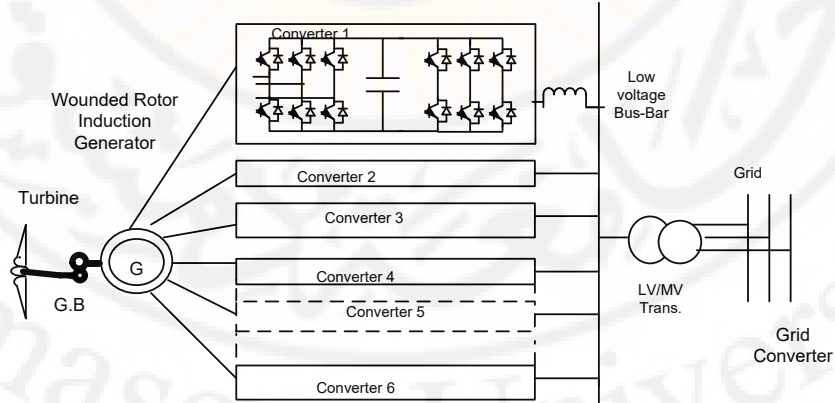


الشكل (3-9) مبدل مضاعف خمس سويات نوع (5L-HB BTB) [25]

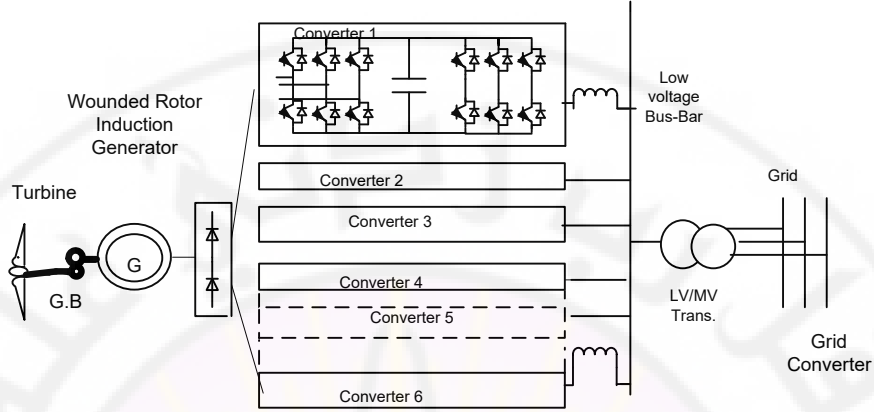
5-3-3 المبدلات متعددة الخلايا منخفضة التوتر

Multi- Cell Low Voltage Converters

المبدلات متعددة الخلايا منخفضة التوتر تتكون من مبدلات ذات منبع توتر VSI، تعمل هذه المبدلات حسب مبدأ توليد توتر متناوب بسويتين أو متعدد السويات، وذلك للوصول إلى تأمين تيارات كبيرة في خرج المبدل، كما أنه يتم تطبيق مبدأ الإزاحة بين توترات المبدلات التفرعية المركبة في المبدل الرئيسي جهة الشبكة لتأمين أقل قدر من التوافقيات في التوتر المتناوب المحقون في الشبكة. الشكلين (3-11 و 3-10) يعطيان نموذجين من المبدلات متعددة السويات ضعيفة التوتر تعمل عند توتر أقل من 1000 فولت



الشكل (3-10) المبدل المضاعف مغذى من مولد ريحي ذو ستة أطوار توصل المبدلات بالمولد الريحي على التفرع ويتم تأمين الإزاحة بالطور للمبدلات المركبة جهة الشبكة



الشكل (3-11) استخدام عدة جسور غير مقادة من جهة المولد مرتبطة على التسلسل والتوتر المستمر الناتج مطبق على عدة مبدلات مربوطة على التسلسل من جهة توتر الدخل المستمر وموصلة على التسلسل مع انزياح بالطور جهة الشبكة

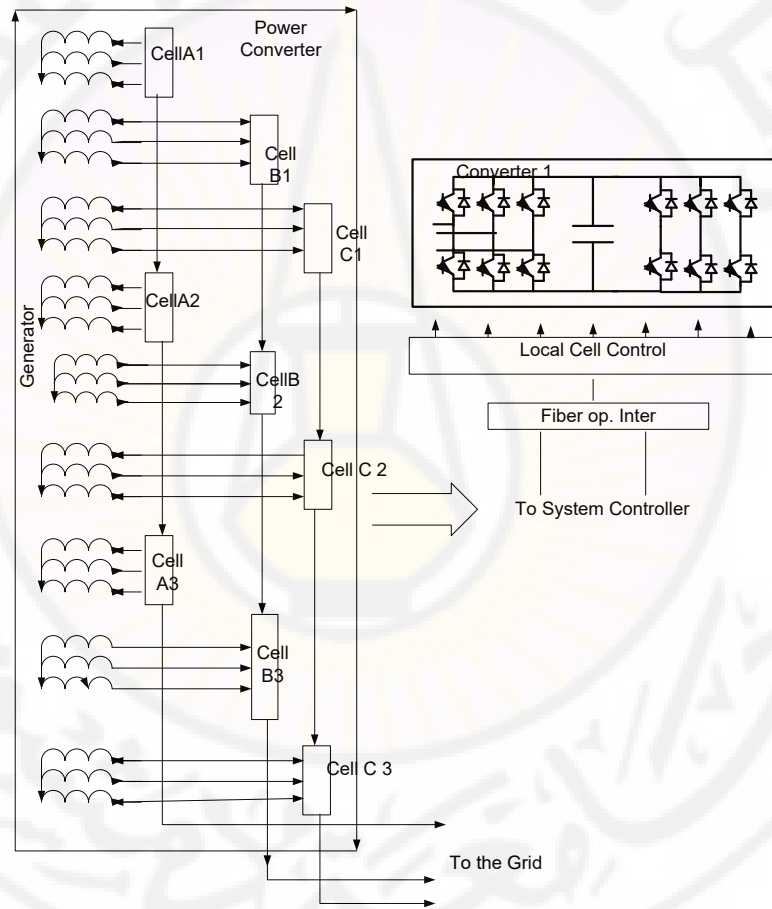
3-3-6 الاستراتيجيات الأخرى للمبدلات ذات التوتر المتوسط

Other topologies for Medium Voltage (MV) Converters

لدى العمل عند توتر منخفض لعنفات ريحية باستطاعة كبيرة بحدود، 690 V/2 MW، حيث يبلغ تيار الطور الواحد ما يقارب 1700 Amp وحيث أن هذه الاستطاعة يتم توليدها في القمر، ويلزم نقلها لأسفل البرج، وقد يتجاوز ارتفاع البرج 100 متر، ولحمل هذا التيار يلزم استخدام عدة نواقل تربط على التفرع للطور الواحد، وسوف يحدث نتيجة ذلك هبوط جهد كبير على النواقل وفاق في القدرة. هذه المشكلة يمكن حلها بوضع محول رفع توتر في القمر لرفع توتر خرج المولد. لكن ذلك ينعكس على زيادة وزن القمر وحجمها وتكاليفها. اعتماداً على براءة الاختراع رقم 81209853، التي بينت استراتيجية تعتمد على إمكانية استخدام مبدل بدون محول، يتوافق مع المولد وذلك للحصول على توتر عالي مناسب، يخفف من مفايد النقل. الشكل (3-12) يبين تركيب وبنية مثل هذه الأنظمة.

تعتمد الفكرة على توصيل تسلسلي لعدة منابع استطاعة بغية رفع التوتر، هذه الاستطاعة مقدمة عن منابع استطاعة منخفضة التوتر معزولة. مثل هذا التوصيل يحتاج حكماً لمرحلة معزولة قادمة من العنفة الريحية مباشرة وتغذي كل مجموعة مبدل بشكل مستقل، ولا يمكن تغذية هذه المجموعة من مصدر آخر. كل مرحلة استطاعة يبدو أنها عبارة عن مبدل أحادي

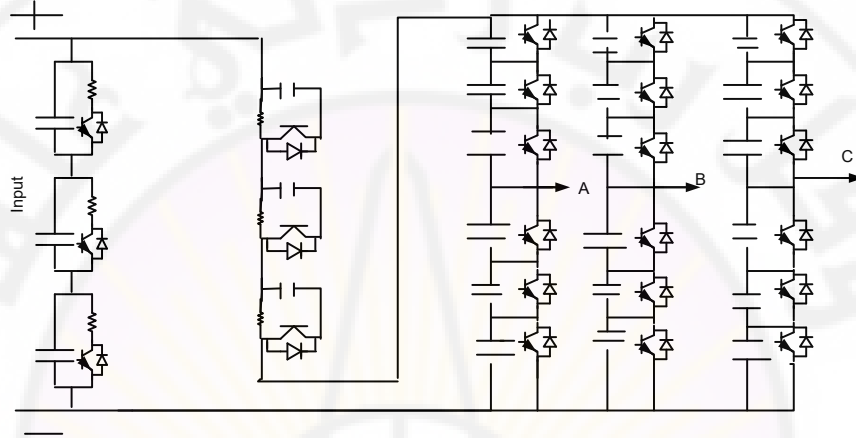
الطور جسري ،بالتوصيل التسلسلي لمجموعات الاستطاعة، نستطيع بناء مبدل ذي توتر مرتفع انطلاقاً من عناصر نصف ناقلية. وهذه حالة تشابه المبدلات متعددة السويات. الميزة الأساسية لهذا النظام، هو أن التصميم يكون على شكل وحدات تعطي مرونة واستجابة. كما أن هذا النظام، يخفض من التوافقيات ومفايد التوصيل، كما أن تيارات التسريب تنخفض. بالتالي يصبح النظام أقل إصداراً للامواج الكهرومغناطيسية المشوشة.



الشكل (3-12) استخدام معرج توتر عالي يتضمن مقاطعات موصلة على التسلسل في حلقة التوتر المستمر

الاستراتيجية الأخرى الحديثة، الصادرة في أمريكا برقم 20130181532 ، تسعى للعمل على رفع التوتر دون استخدام محول رفع. وهي تعتمد على ربط القواطع الإلكترونية، ذات التوتر المنخفض، على التسلسل حتى تتمكن من العمل سوية عند توتر أعلى، كما في الشكل (

(3-13). من المعروف أن ربط القواطع الإلكترونية على التسلسل فيه مشاكل فنية من ناحية اللقدح، وحدث عدم توازن في لحظات اللقدح بين العناصر، مما قد يسبب ارتفاع توتر عابر على بعض العناصر وبالتالي إتلافها.

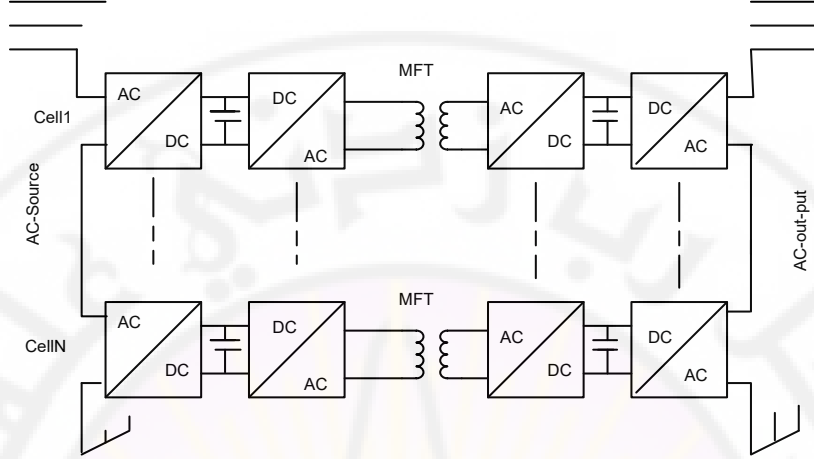


الشكل (3-13) يبين معرج توتر مرتفع يتضمن قطاعات موصلة على التسلسل ودائرة حمل

7-3-3 ربط جسور نوع H على التسلسل مع محول ذو تردد متوسط

Cascade H-Bridge Converter with Medium-Frequency Transformers (CHB-MFT)

اقترح هذا النموذج من المبدلات من قبل مشروع النظام الأوروبي European UNIFLEX-PM [25] كما في الشكل (3-14)، وهو يتكون من مبدلات نوع H تسلسلية موصلة على شكل مبدل مضاعف مع مبدلات توتر مستمر - مستمر معزولة كواجهة As An Interface ، المبدلات من كل طرف موصلة من جهة التوتر المتناوب عبر محول ذي تردد متوسط يعمل عند ترددات تساوي عشرات الكيلو هرتز. مما يخفض من حجم المحول. نظراً للبنية التسلسلية يمكن الربط مباشرة على الشبكة بتوترات تتراوح بين 10-20 كيلو فولت وكلما تطورت صناعة المحولات ارتفع التردد المتوسط وأصبح بالإمكان تركيب هذه التجهيزات بالقمرة .

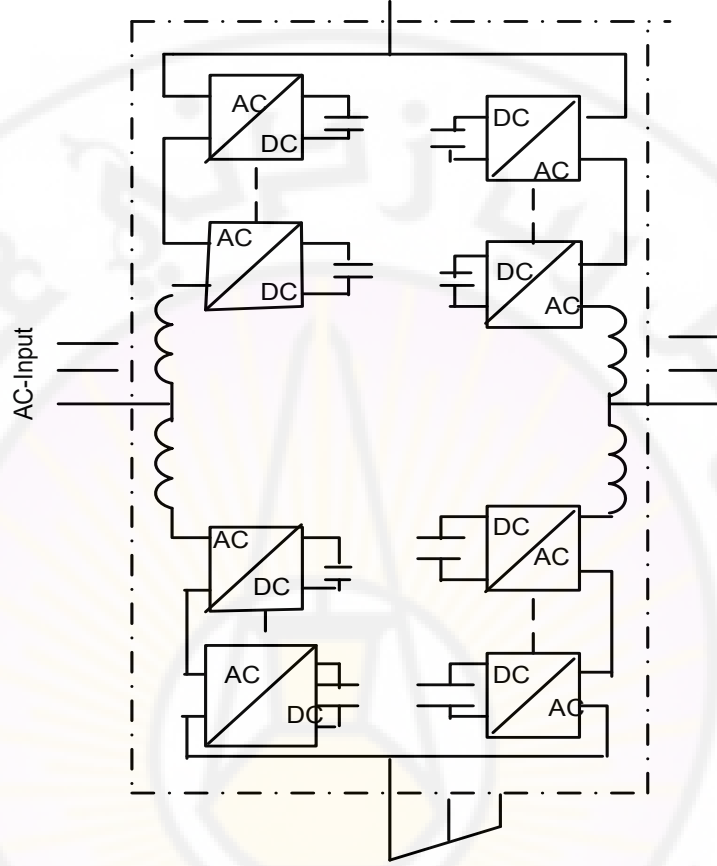


الشكل (3-14) ربط جسور نوع H على التسلسل مع محول ذو تردد متوسط [25]

8-3-3 المبدل متعددة السويات ذو الخلايا

Modular Multilevel Converter (MMC)

المبدأ المعتمد لهذا المبدل يشابه مبدأ العمل في أنظمة نقل الطاقة الكهربائية بالتيار المستمر عالي التوتر (HVDC)، وكما هو مبين بالشكل (3-15)، مبني أيضاً على أساس المبدلات المضاعفة بخلايا تسلسلية ذات مبدلات DC/AC Converter، ويستطيع تبديل استطاعات كبيرة عند توترات متوسطة، بوثوقية ومرونة عالية. يمكن أيضاً حذف مرشح الخرج نظراً للعمل عند توتر عال. على كل حال، معدل التوتر محدد بسوية العزل للمولد الريحي. ونظراً لكون تردد العمل في مثل هذه المنوبات منخفض فإن تغيرات التوتر المستمر ستكون عالية وتستدعي استخدام مكثفات بسعات كبيرة، قد لا تكون مرغوبة في الأنظمة الريحية.



الشكل (3-15) المبدلات متعددة السويات ذو الخلايا [9]

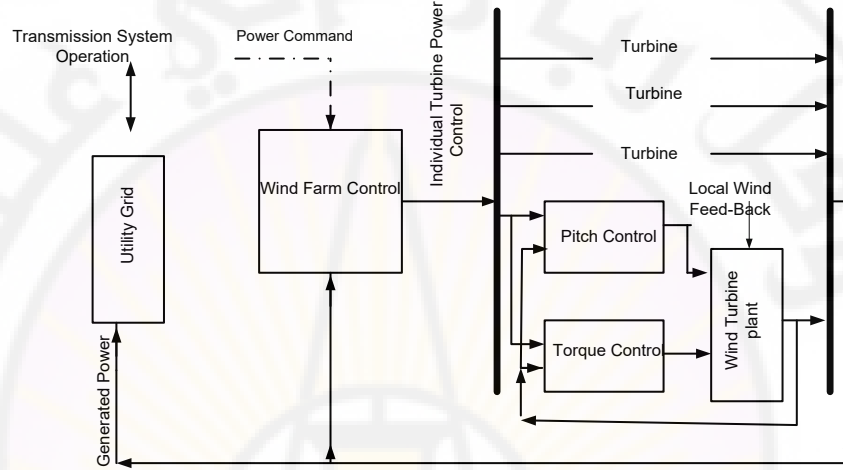
4-3 التحكم الاساسي للمبدلات المضاعفة المستخدمة في العنفات

الريحية

Full Scall Converter Based Wind Turbine Control

تتضمن أنظمة التحكم الحديثة بالعنفات الريحية مشكلة التحكم الديناميكي السريع والبطيء. التجهيزات التابعة للتحكم الديناميكي البطيء، هي المسؤولة عن قيادة وتوجيه القمرة باتجاه تدفق الريح. عملية تغيير زاوية الشفرات تستخدم لدى هبوب الرياح القوية، ووصول العنفة لاستطاعتها الاسمية. بينما التجهيزات الكهربائية، هي المسؤولة عن تحقيق التحكم الديناميكي السريع، وهي التي تتحكم بالاستطاعة الحقيقية والردية المحقونة في الشبكة، وتتلقى الأوامر من منسق الشبكات Wind farm supervisor، أيضاً تتلقى الأوامر من مشغل نظام النقل

Transmission System Operator(TSO). تقوم التجهيزات الكهربائية أيضاً بالعمل عند نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT) والحماية من زيادة التحميل. الشكل (3-16) يوضح هذه الأوامر.



الشكل (3-16) الربط بين الشبكة العامة ومشغل الشبكة TSO

ومنسق الشبكة والعنفة ذاتها

كما هو وارد في تعليمات الشبكات Grid Codes (GCs)، يتطلب من العنفات الريحية الكبيرة المساهمة في دعم استقرار الشبكة العامة كما هو الحال بالنسبة للمولدات التقليدية. هذه المتطلبات هي:

الاستجابة للعطالة، للتحكم الأولي أو ما يسمى الاستجابة للترددية frequency response، أو هبوط المنظم Governor droop، التحكم الثانوي أو التحكم الآلي بالتوليد Automatic Generation Control، وأنظمة الحماية من الخطأ واستبعاده Fault Ride – Through (FRT).

الاستجابة للعطالة، هي من النوع الآني للمولدات التزامنية التقليدية والتي تمتلك عطالة كبيرة عند السرعات العالية. لدى ربط الحمل، المولد الأولي، بادئ الحركة Prime Mover، سوف يستجيب أنياً وذلك بالعمل على رفع التيار المولد فيه. ولكن ليس بالسهل خفض السرعة، نظراً لكبر عطالة الدائر. لكن مع ذلك لن يطول الأمر وسوف تبدأ السرعة بالتناقص مما يؤدي لخفض التردد المحقون. سيحدث العكس لدى فصل الحمل المفاجئ، وسيرتفع التردد وسيختل التوازن بين الحمل والمنبع. عندما يحدث تناقص في التردد سيستجيب المولد

التزامني التقليدي بما يطلق عليه التحكم الأولي Primery Control ، أي سنعمل على زيادة الوقود لنقل التردد لقيمتة الأولى المحددة. هذا النوع من التحكم الأولي تتم الاستجابة له خلال 12-14 ثانية، بواسطة التغذية العكسية الآلية. بينما التحكم الثانوي يتطلب التنسيق عبر عدة وحدات تحكم متباعدة وبزمن بطيء حتى نتأكد من عودة التردد وتبادل القدرة بين المناطق المختلفة.

منابع الطاقات المتجددة يقال أنها ضعيفة العطالة الذاتية "Lack natural inertia" . الطاقة الريحية والشمسية لا يمكن التحكم بها بزيادة الفيول، الوقود لإعادة التردد، وحتى تتمكن المولدات الريحية من القيام بمثل سلوك المولدات التقليدية، يلزم بذل الكثير من البحث الجامعي حتى لا تفقد المولدات الريحية جزء من الاستطاعة المولدة وتقدير التكاليف الإضافية من مدخرات وغيرها من تجهيزات. إضافة لذلك فإن التحكم بالمبدل عند حدوث خطأ في الشبكة يعتبر مشكلة كبيرة وصعبة ، يستخدم حالياً نظام التحكم بالحقل الموجه Field Oriented Control(FOC) للمولدات التزامنية .

الشكل (3-17) أدناه يوضح بشكل عام وعلى شكل مخطط صندوقي مجموعات التحكم التي تزود بها العنفات الريحية لكافة أنواع المولدات ويبين الأوامر الواجب تطبيقها على هذه الأنظمة بشكل عام .



Control of Generator side converter

$$Te = \frac{3p}{2} [\psi pm * iq + idiq (LD - LQ)]..(1-3)$$

117

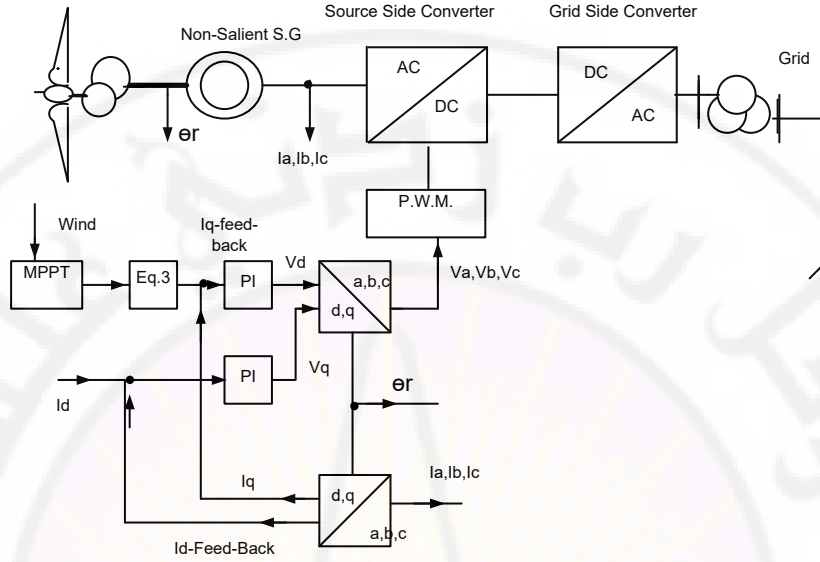
المحور i_q ، ويسمى العزم المغناطيسي magnet torque . أما المركبة الثانية وتحتوي كل من مركبة التيار الطولانية والعرضانية تسمى بالعزم الممانع reluctance torque .

من أجل المولدات التزامنية ذات الأقطاب الاسطوانية Non salient generator ، بما أن $L_d=L_q$ ، فإن مركبة تيار الثابت i_d الطولانية سوف لن تساهم في عزم الخرج T_e ، فقط المركبة في المحور العرضاني i_q هي التي تؤثر في عزم الخرج T_e . لذا نسعى لجعل المركبة الطولانية للتيار i_d مساوية للصفر لتخفيض المفاقيد، ومحاولة التحكم بقيمة المركبة العرضانية i_q ، للتحكم بالعزم المطلوب الحصول عليه ، حيث : $T_e = T_{mppt}$. كما في العلاقة 3 أدناه

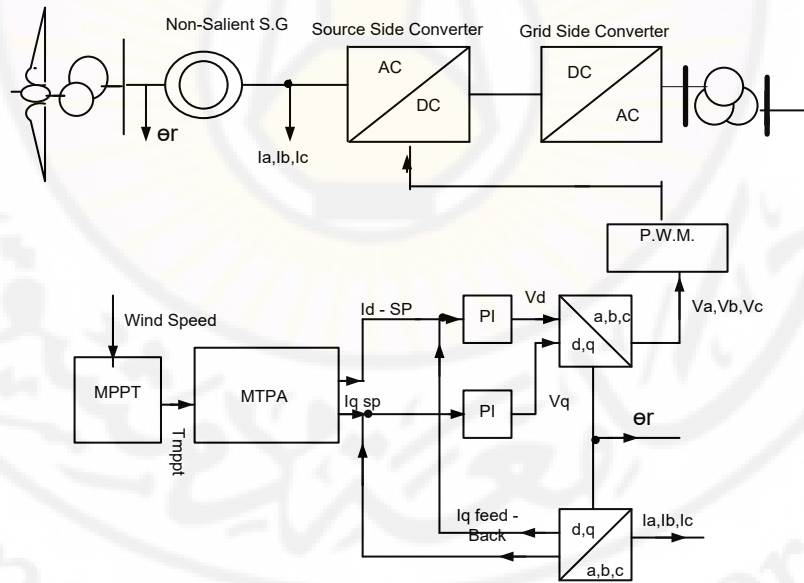
$$i_q = \frac{2T_e}{3p\psi_{pm}} = \frac{2T_{mppt}}{3p\psi_{pm}} \dots\dots(2-3)$$

هذه التقنية من التحكم تسمى (ZDC) Zero d-Axis Current ، تيار صفري للمحور المباشر (الطولاني) والشكل (3-18) يوضح ذلك. والإجراء الذي نجره لتحقيق ذلك هو جعل فيض الثابت دائماً عمودي على فيض الدوائر. وبما أن المركبات العرضانية للثابت هي فقط التي تولد العزم، فإن المركبات المباشرة الطولانية تولد فقط الحرارة.

من أجل المولدات التزامنية ذات الأقطاب البارزة $L_d > L_q$ ، يمكن أيضاً تطبيق تقنية التحكم (ZDC) ، وهنا المركبة $i_d=0$ والمركبة i_q هي الفعالة. هذه التقنية لا تصل لحد عال من السرعة الديناميكية للاستجابة، نظراً لوجود بعض الأخطاء في قراءة الحساسات، واستجابة حلقة المنظم PI ليست لحظية. لذا هنالك بعض اللحظات حيث أن التيار المباشر يأخذ بعض القيم غير الصفريّة. هذه الطريقة تلغي اعتبار العزم الممانع reluctance torque في حساب العزم الكلي. لذا يعتمد عوضاً عنه طريقة التحكم المسماة العزم الأعظمي لكل أمبير Maximum Torque Per Ampere (MTPA) ، والشكل (3-19) يوضح ذلك. الفرق بين الطريقتين هو كيف سيتم الحصول على القيم المرجعية setpoint للتيارات i_d, i_q . في الطريقة السابقة ZDC يتم وضع التيار المرجعي i_d مساوياً للصفر. يتم حساب قيم التيار i_q من العزم المثالي T_{mppt} . في الطريقة MTPA ، توجد وسائل وسبل عديدة لوضع القيم المرجعية لتيارات الثابت منها Fuzzy -logic . بإجراء التحكم بتيارات الثابت نستطيع التحكم بعزم الخرج للمولد وذلك لمتابعة العزم الأمثل، وبذلك نستخلص أكبر عزم من الريح .



الشكل (3-19) المخطط الصندوقي لنظام التحكم للمبدلات المضاعفة حسب التحكم ZDC



الشكل (3-20) مخطط صندوقي للتحكم بالمبدلات المضاعفة بنظام MPTA

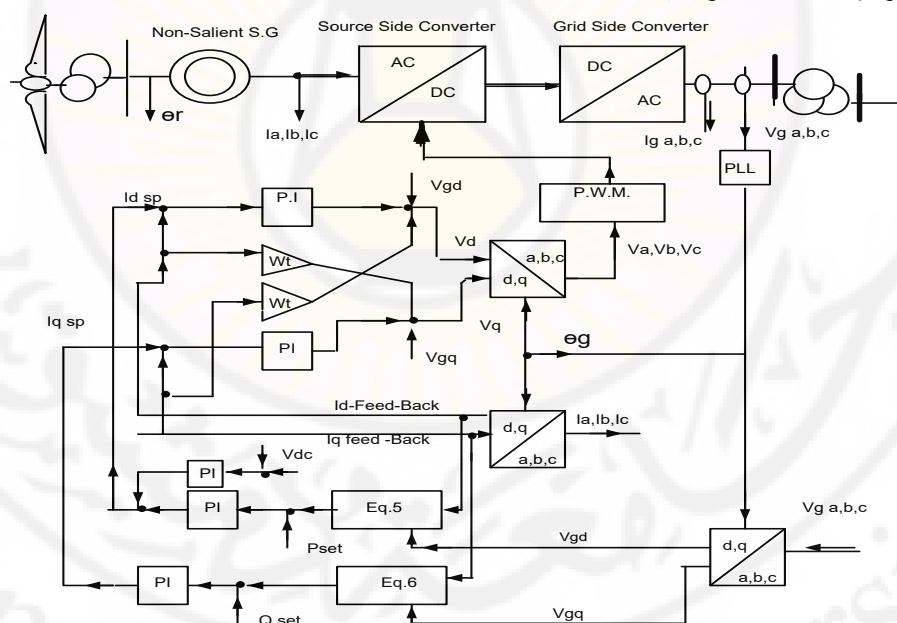
3-5 التحكم بالمبادل المرتبط بالشبكة

التحكم بالمبدل المرتبط بالشبكة مبني على نظرية الاستطاعة الثلاثية اللحظية لنظام ثلاثي الطور. والذي يوصف الاستطاعة الفعالة P والاستطاعة الردية Q في المحاور المتعامدة الطولانية و العرضانية d, q .

$$P = \frac{3}{2}(Vd id + Vqiq) \dots\dots(3-3)$$

$$Q = \frac{3}{2}(Vq \text{ id} - Vdiq) \quad \dots(4-3)$$

بالنظر للعلاقات أعلاه، يمكن التحكم بالاستطاعة الفعالة عن طريق التحكم بالمركمة الطولانية للتيار id، والتحكم بالاستطاعة الردية عن طريق المركمة العرضانية iq. عموماً المركبات الطولانية والعرضانية هي أهداف ثابتة يمكن التحكم بها عن طريق حلقة المنظم التكاملي PI. الشكل (3-21) يوضح مخطط صندوقي للتحكم بالاستطاعة الفعالة والردية مبني على اساس المحاور D,Q للآلة التزمانية .

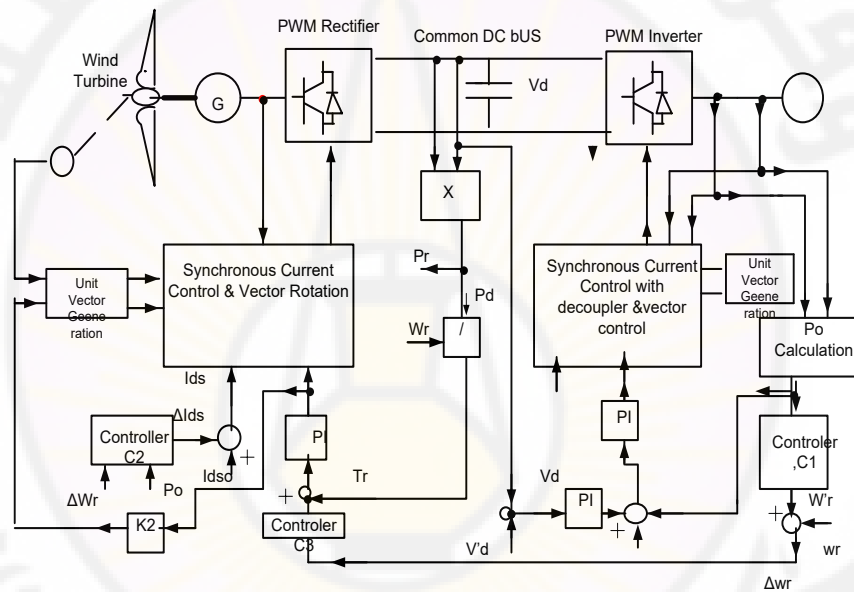


الشكل (3-21) التحكم الشعاعي الموجه لحلقة التوتر في المحاور P,Q لمولد تزامني [11]

1- يتم عموماً التحكم بالاستطاعة الفعالة بناءً على تردد الشبكة العامة، حيث أنه لدى تتناقص قيمة الاستطاعة المحقونة بالشبكة لدى ارتفاع تردد الشبكة للقيمة 50.1 هرتز. كما أن مشغل الشبكة لدى التحكم بالاستطاعة الردية يراقب توتر الشبكة

العامة وعلى هذا الأساس يتم حقن الاستطاعة الردية في الشبكة وذلك ضمن مراحل
زمنية مقدرة بالدقائق [9]

2- المخطط الصندوقي المبين بالشكل (22-3) يوضح آلية التحكم بالمولدات التحريضية
ذات القفص السنجابي



الشكل (22-3) المخطط الصندوقي لنظام التحكم بالمولد التحريضي ذو القفص السنجابي
ونظام المبدلات المضاعفة

- العنفات الريحية التي تستخدم المولدات التحريضية ذات القفص السنجابي، تربط مباشرة على الشبكة العامة. وهذا النظام هو أبسط أنواع المولدات الريحية المستخدمة دون الحاجة لكثير من عمليات التحكم والتنظيم.
- لدى استخدام مولد تحريضي ذو دوائر ملفوف، نستخدم دارات الحقن الإلكتروني في حلقة الدوائر، والتي تعمل على تشغيل المولد الريحي فوق التزامن وتحت التزامن.
- يتم تشغيل المولد التزامني مع استخدام مبدلات الكترونية في الثابت، ويتم استخدام حلقة التوتر المستمر لتغذية ملف التحريض، عبر حلقات الانزلاق.



The logo of Damascus University is a large, faint watermark in the background. It is a circular emblem with a central torch and the university's name in Arabic and English.

الفصل الرابع المولدات الكهربائية المستخدمة في العنفات الريحية

Electrical Generators used in Wind Turbine



4-1 مقدمة الفصل

أبدت الطاقة الريحية تزايداً كبيراً في السنوات الأخيرة، فاق باقي مصادر توليد الطاقة الكهربائية. تم تطوير العديد من المفاهيم واستخدام مختلف المولدات الكهربائية لتوليد الطاقة من الرياح [12]. اختيار نوعية المولد الريحي Aero-generator تبدو صعبة، يعتمد في الواقع العملي اختيار المولد الكهربائي على مجموعة ميزات أساسية أهمها: البنية، نوع المبدل الإلكتروني المستخدم، المنطقة الجغرافية، الخواص المتوفرة في الريح والتكلفة. إن اختيار المولد المناسب هو التحدي الكبير لدى إنشاء المزرعة الريحية. من الناحية التكنولوجية الصناعية، أكثر أنواع المولدات الريحية التي تم تداولها كان المحرك التحريضي ذو القفص السنجابي (Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)، مع علبة سرعة Gear Box متعددة المراحل، يوصل المولد مباشرة على الشبكة العامة، ثم المولد التحريضي (ذو الدائر الملفوف) التغذية مضاعف

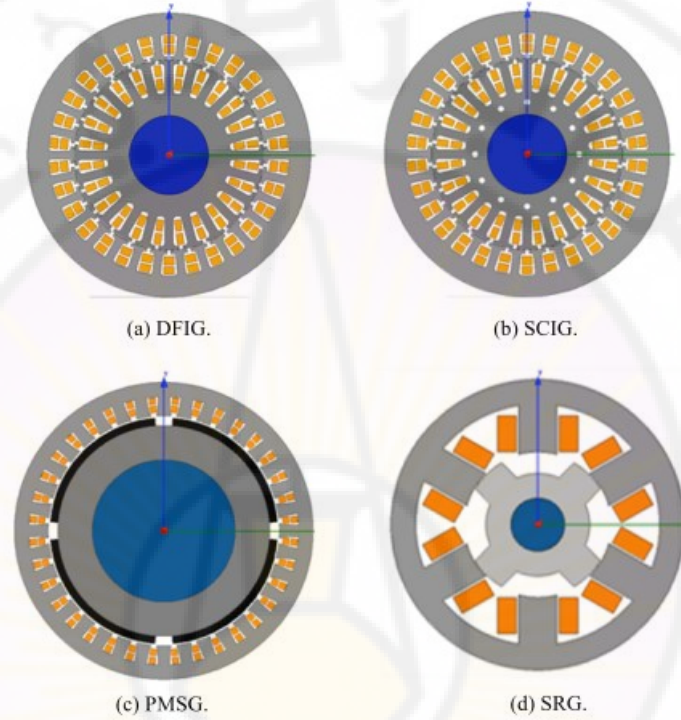
Double Fed Induction Generator (DFIG). والمولد التزامني Synchronous Generator (SG) ذو الدائر الملفوف، والمولد التزامني ذو المغناطيس الدائمة Permanent Magnetic Synchronous Generator (PMSG) والمولد ذو الممانعة المغناطيسية المتغيرة Switched Reluctance Generator (SRG).

يعرض الشكل (4-1) مقطع عرضي لبعض من هذه المولدات الأربعة. تبعاً للدراسات العالمية ولبيان مدى استمرارية استخدام كل نوع من هذه الأنواع من المولدات الريحية ونموه، يمكن القول أن العالم يتجه حالياً نحو الزيادة في استخدام المولدات التحريضية مضاعفة التغذية، في حين أنها تقلل من استخدام المحركات التحريضية ذات القفص السنجابي. كما أن العالم يسعى لتركيب المولدات ذات المغناطيس الدائمة في العنفات صغيرة الاستطاعة، ويعمل على تركيب المولدات التزامنية في المناطق غير المستقرة ريحياً، بينما استخدام المولدات ذات الممانعة المتغيرة بدأ بالتزايد نسبياً.

يمكن تلخيص المتطلبات الرئيسية من المولدات الريحية بالبنود التالية :

- تحمل عزم كبير وكثافة استطاعة عالية
- التقليل من أجزاء النظام
- المردود العالي
- حدوث أقل ما يمكن من حالات الصيانة

- وثوقية عالية، متانة، وقدرة على العمل عند مختلف الظروف الجوية
- تكاليف إنشاء معقولة



الشكل (1-4) مقاطع عرضية من المولدات الريحية [12]

2-4 دراسة عامة ومقارنة بين المولدات الريحية Comparative Study

1-2-4 المولد التحريضي ذو القفص السنجابي

Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)

تم استخدام الآلة التحريضية ذات القفص السنجابي للمرة الأولى في العام 1951 وهو النوع من المولدات الذي يتطلب العمل عند سرعة دوران ثابتة، سواء كان مرتبطاً على الشبكة أو يعمل بشكل مستقل عن الشبكة. كما أن بنية وتركيب المولد ضخمة، ويحتاج النظام الريحي لمكثفات تحسين عامل الاستطاعة، وهو ذو مردود منخفض، وقليل الوثوقية Reliability ويحتاج للصيانة

نظراً لوجود ثلاث مراحل من التكبير في علبة السرعة. حالياً ينخفض استخدامه بشكل كبير في العنفات الريحية. في حال تشغيل الآلة كمحرك فإنه سيعمل عند سرعة دوران أدنى من السرعة التزامنية، ويعطى الانزلاق بالعلاقة

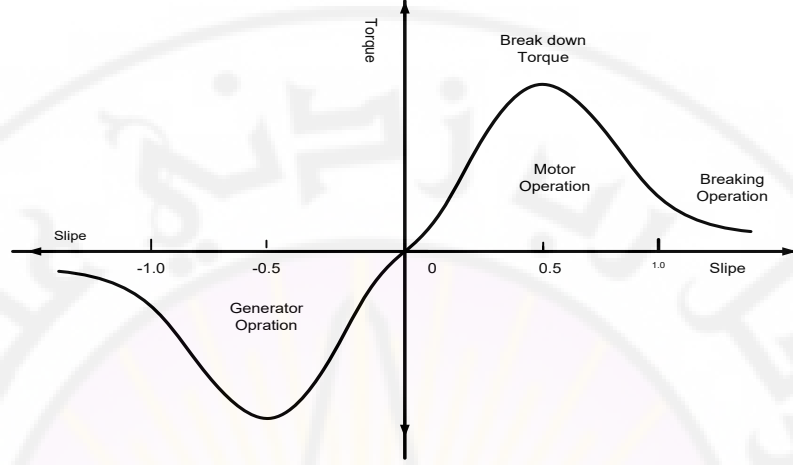
$$S = \frac{N_s - N_r}{N_s} \dots (1-4)$$

السرعة التزامنية للآلة التحريضية تعطى بالعلاقة :

$$N_s = \frac{120f}{p} \dots (2-4)$$

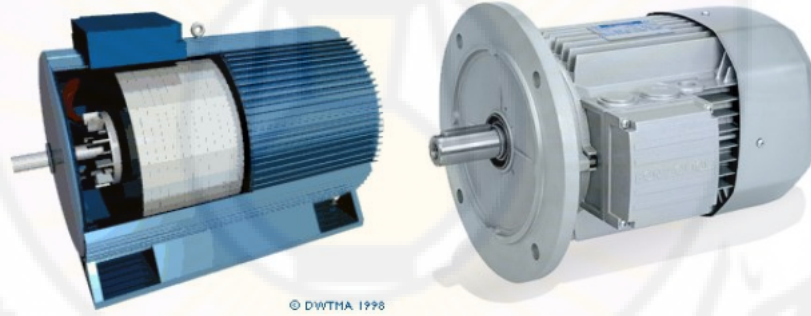
حيث f هو التردد و p هو عدد الأقطاب Number of poles

عندما نربط هذه الآلة على الشبكة العامة، سوف تستجر هذه الآلة القدرة من الشبكة العامة، وتطور كمحرك ومع تزايد السرعة وضغط الريح سوف تتجاوز سرعة الدوران السرعة الاسمية N_s وستعمل الآلة كمولد. سرعة الدائر ستصبح أسرع من سرعة الحقل المغناطيسي الدوار في الثغرة الهوائية، الذي يدور بالسرعة التزامنية N_s ، يصبح العزم سالباً، ويمكن ملاحظة ذلك في الشكل (4-2)، الذي يعطي منحنى العزم السرعة، نرى كيف تعمل الآلة لدى ربطها على الشبكة العامة، في ربعين من الاحداثيات، محرك ومولد تبعاً لقيمة الانزلاق، إذا كانت سرعة الدوران N_r أقل من السرعة التزامنية N_s تعمل الآلة كمحرك في الربع الأول، ويكون الانزلاق بحدود 0.03، لدى تزايد سرعة الدائر يصبح الانزلاق سالباً وننتقل للعمل في الربع الثالث كمولد وعند سرعة أكبر بقليل من السرعة التزامنية N_s . عليه سيمر تيار بالاتجاه المعاكس من العنفة باتجاه الشبكة وتصبح الآلة التحريضية مولد تحريضي.



الشكل (2-4) منحنى العزم السرعة للآلة التحريضية

الشكل (3-4) أدناه يوضح الشكل العام للآلة التحريضية ذات القفص السنجاني



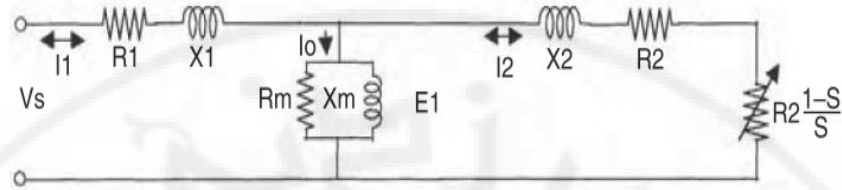
الشكل (3-4) البنية العامة للآلة التحريضية ذات القفص السنجاني

2-2-4 الدارة المكافئة للآلة التحريضية

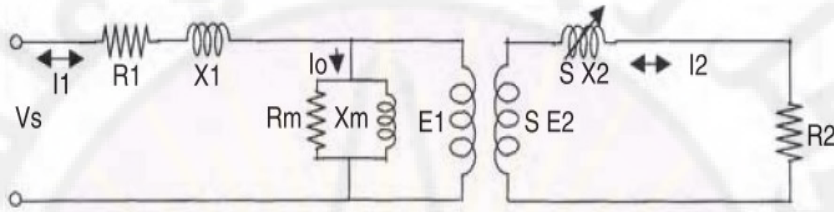
Equivalent Circuit of Induction Motor

ننطلق في تحديد الدارة المكافئة للمحركات التحريضية من خواص المحرك التحريضي ذو الدائر الملفوف، لأنه يشبه في بنيته المحول الثلاثي الطور، لكن دائرة الثانوي في المحركات تكون دوائر.

سوف نعتمد الدارة الأحادية الطور للابتدائي (الثابت) one phase diagram والثانوي (الدائر) وذلك في تحليل سلوك المحرك التحريضي. عند السكون يعمل المحرك كمحول، وعليه يمكن أخذ الدارة المكافئة للمحول واعتبار أن ملفات المحرك موصلة بشكل نجمي في الثابت والدائر. بأخذ نسبة التحويل 1:1 يمكن وضع الدارة المكافئة كما في الشكل (4-4) أدناه والذي يوضح مكونات الدارة المكافئة مع اعتبار الانزلاق:



(b) Equivalent circuit of the induction machine referred to the stator



(a) Equivalent circuit of the stator and rotor through air-gap

الشكل (4-4) الدارة المكافئة للمحرك التحريضي منسوبة للثابت

V_s توتر الطور للمنبع المغذي للمحرك (خط-حيادي)

R_1 و X_1 : مقاومة وممانعة ملفات الثابت (Resistance, Stator leakage reactance)

R_2 و X_2 : مقاومة وممانعة الدائر (Resistance, Rotor leakage reactance)

R_m و X_m : مقاومة المفايد الحديدية والاحتكاك والملفات، والممانعة المغناطيسية للآلة magnetizing reactance and Losses resistance (heyst & eddy)

T نسبة التحويل للمحول 1:1 في الدارة المكافئة أو نسبة التحويل بين الثابت والدائر (عادة تساوي 1:3)

E_1, I_1 القوة المحركة الكهربائية والتيار في ملفات الابتدائي، E_2, I_2 القوة المحركة الكهربائية والتيار في ملفات الثانوي.

R_x مقاومة خارجية external resistance في دارة الدائر يمكن أحياناً إضافتها موصلة بين إحدى حلقات الانزلاق والحيادي في المحركات التحريضية ذات الدائر الملفوف.

يمكن حذف ممانعة المغنطة X_m في المحولات، لأن تيار اللاحمل صغير، بينما في المحركات التحريضية تيار اللاحمل قد يصل إلى 40% من التيار الاسمي نظراً لكبر طول الثغرة الهوائية بين الثابت والدائر. عليه يمكن فقط وضع أو نقل ثوابت المغنطة في الدارة المكافئة، بالقرب من توتر الدخل.

ماذا سيحدث لدى بدء دوران المحرك ؟ بفرض أن المحرك يدور عند انزلاق قدره S أي أن سرعة الدوران N_r تعطى بالعلاقة : $N_r = N_s(1-s)$ ، N_s هي السرعة التزامنية. هذه الحالة سوف تعمل على تعديل البارامترات E_1, I_1, E_2, I_2 ، كما أن التردد في ملفات الدائر سيصبح مساوي $S.F$ حيث F تردد توتر المنبع V_s . بإدخال الإنزلاق في البارامترات نحصل على :

$$F_2 = SF_1 \text{ ، } E_2 = SE_1 \text{(3-4)}$$

وممانعة التسريب للثانوي SX_2 ، بجمع المقاومات في الطرف الثانوي وكتابة:

$$R_2 = R_2 + R_x$$

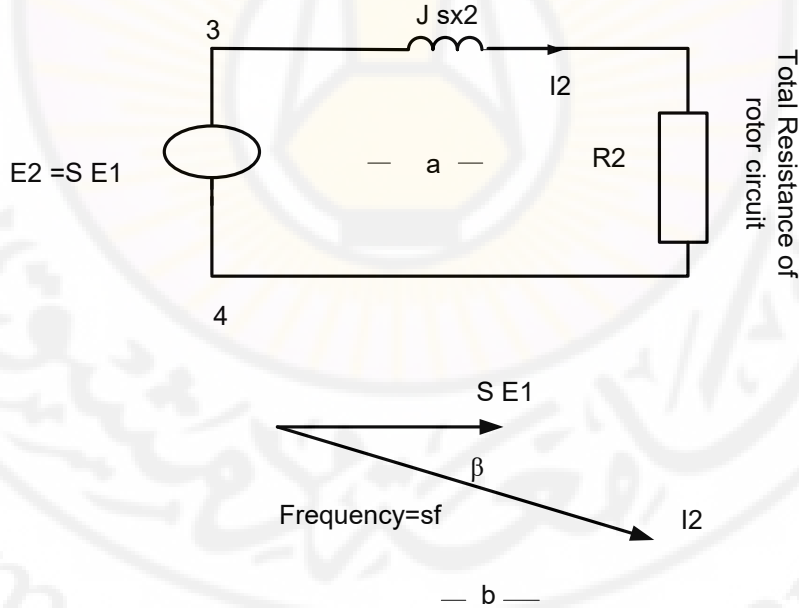
وعليه فإن تيار الثانوي I_2 ، يصبح بالشكل:

$$I_2 = \frac{SE_1}{R_2 + jSX_2} = SE_1 \angle -\beta \text{(4-4)}$$

حيث أن الزاوية β تعطى بالشكل :

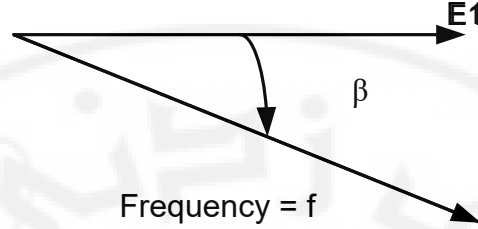
$$B = \arctan \frac{SX_2}{R_2}$$

الشكل (4-5) يوضح الدارة المكافئة والمخطط الشعاعي .



الشكل (4-5) الدارة المكافئة للدائر والثابت.

دارة الثانوي ذات تيار I_2 بتردد $F_2 = SF_1$ ، ودارة الابتدائي بتيار I_1 بتردد F ، ومع ذلك تيار الثابت يساوي تيار الدائر بالقيمة المطلقة . زاوية الطور B ، بين توتر وتيار الثابت E_1, I_1 هي نفسها زاوية الطور بين توتر وتيار الدائر E_2, I_2 . هذا يسمح برسم المخطط الشعاعي شكل (4-6) لكل من توتر وتيار الدخل.



الشكل (6-4) المخطط الشعاعي للتيار والتوتر في الدخول E_1, I_1

بما أن تيار الثابت يساوي تيار الدائر، يمكن كتابة العلاقة التالية :

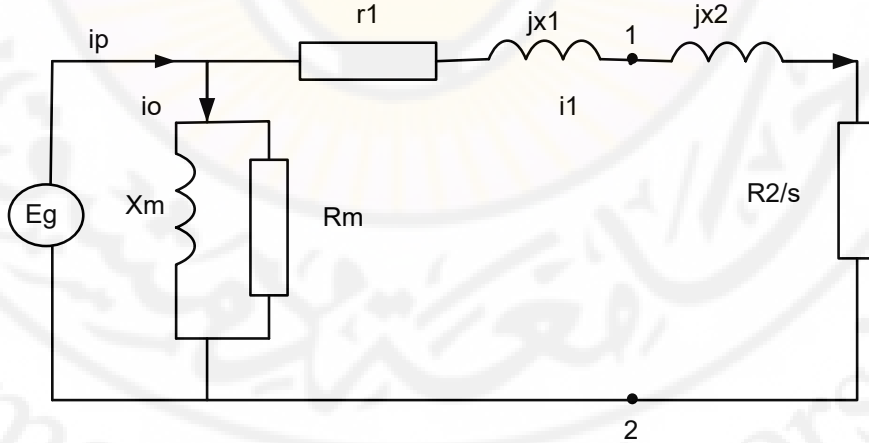
$$I_1 = I_2 = \frac{SE_1}{R_2 + jSX_2} \quad \dots\dots (5-4)$$

$$I_1 = \frac{E_1}{\frac{R_2}{s} + jX_2} = \frac{E_1}{Z_2}$$

حيث Z_2 هي المعاوقة Impedance المرئية من أطراف الثابت النقاط 1 و 2 للمحول المثالي وعليه:

$$Z_2 = \frac{E_1}{I_1} = \frac{R_2}{s} + jX_2. \quad \dots\dots (6-4)$$

يمكن تبسيط المخطط المكافئ في الشكل (7-4) ، وذلك بجمع $jX_1 + jX_2 = jX$ ، والتي تساوي ممانعة التسريب للمحول منسوبة إلى جهة الثابت كما في الشكل (7-4) .



الشكل (7-4) المخطط المكافئ المبسط للمحرك التحريضي

في هذه الدارة المكافئة للمحرك التحريضي ذي الدائر الملفوف، نرى أن جميع البارامترات ثابتة ما عدا القيمة R_2/s ، التي تتغير قيمتها مع الانزلاق وهي تتغير من اللانهاية عند الإقلاع وصولاً للصفر عند السرعة التزامنية. الدارة المكافئة للمحرك التحريضي ذو القفص السنجابي

هي نفسها للمحرك ذي الدائر الملفوف، ما عدا أن R_2 سوف تساوي مقاومة الدائر فقط r_2 والمنسوبة للثابت حيث لا توجد مقاومة خارجية عندئذ.

ملاحظة: يمكن أيضاً استنتاج الدارة المكافئة للمحرك، باستخدام العامل $R_2 (1-S)/S$ عوضاً عن R_2/S ، كما في الشكل (4-8-أ) من العلاقات التالية:

الاستطاعة في الثغرة الهوائية = الاستطاعة المحولة من ميكانيكية إلى كهربائية - مفايد الدائر

$$P_{gap} = P_{converted} (Pr) - P_{joule rotor}$$

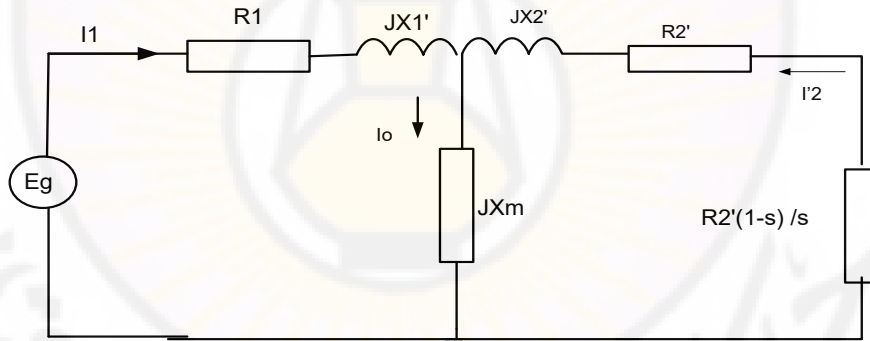
$$3I_2^2 R_2 / S = P_{converted} (Pr) - 3I_2^2 R_2$$

$$P_{converted} (Pr) = 3I_2^2 R_2 / S - 3I_2^2 R_2 \quad \dots\dots (7-4)$$

$$P_{converted} (Pr) = (Pr) = 3I_2^2 R_2 (1-S)/S$$

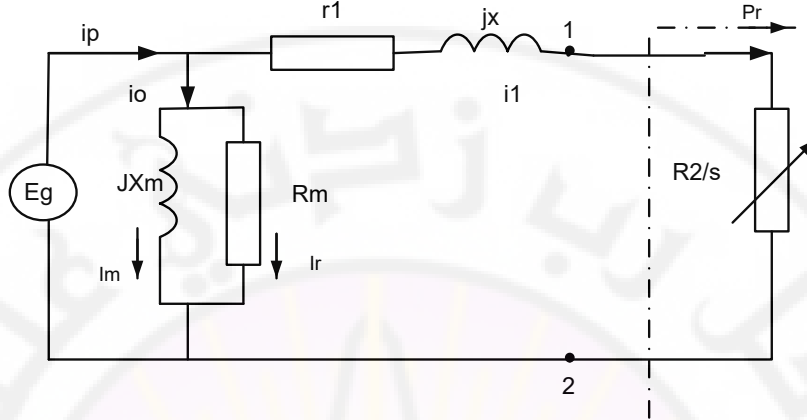
وكان المقاومة في دارة الثانوي المنسوبة للإبتدائي هي : $R_2 (1-S)/S$ ، لذا نرى أحياناً الدارة المكافئة بالشكل المبين الشكل (4-8-أ) أدناه دون إهمال R_2 .

$R_2 \frac{(1-s)}{s}$: المقاومة الكهربائية للدائر بدلالة الانزلاق، تمثل المقاومة الميكانيكية للمحور



الشكل (4-8-أ) الدارة المكافئة

يمكن أيضاً، رسم الدارة المكافئة كما في الشكل (4-8-ب) أدناه. ممانعة التسريب للإبتدائي والثانوي x_1 & x_2 ، جمعت بالممانعة x والتي تمثل الممانعة التسريبية الكلية المكافئة.



الشكل (b- 8-4) الدارة المكافئة للآلة التحريضية منسوبة للثابت

ببساطة القيمة الواردة في المخطط (b -8-4)

$$+ R_2 \dots\dots\dots (8-4) \frac{R_2}{S} = \frac{R_2(1-S)}{S}$$

أي لدى استخدام الشكل (a-8-4) ، يلزم إضافة مقاومة الدائر في هذه الحلقة والتي تمثل مفايد جول في الدائر .

3-2-4 العلاقات النازمة للاستطاعة Power Equations

من المخططات أعلاه يمكن صياغة العلاقات التالية:

- الاستطاعة الكلية المحولة من الثابت للدائر تعطى بالعلاقة التالية:

$$SP_r = P_{gap} = 3 I^2 R_2, \dots\dots (9-4)$$

- تحسب الاستطاعة المحولة إلى المحور الميكانيكي، نتيجة طرح مفايد جول في الدائر

وذلك من كامل الاستطاعة المحولة للدائر، بالشكل التالي:

$$P_{em} = P_r - P_{joul} \\ P_{em} = 3 I^2 R_2 / S - 3 I^2 R_2 = 3 I^2 R_2 (1-S) / S \dots\dots (10-4)$$

- الاستطاعة في الثغرة الهوائية، أو الاستطاعة الداخلة للدائر:

$$P_r = 3 I^2 R_2 / S = P_{gap} \dots\dots\dots (11-4)$$

- الاستطاعة المفقودة في المقاومة النحاسية لملفات الدائر:

$$P_{joul} = P_{jr} = 3 I^2 R_2 \dots\dots (12-4)$$

- الاستطاعة الميكانيكية المحولة للدائر (converted) :

$$P_{em} = P_r (1-s) \dots\dots (13-4)$$

وعليه يمكن اعتماد أي من المخططات السابقة ووضع العلاقات النازمة لتبادل الاستطاعة والعزم.

لذا فإن الاستطاعة الكهرومغناطيسية المحولة لكل طور من أطوار الآلة يمكن أن تعطى بالعلاقة:

$$I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \dots (14-4)$$

ومن أجل أطوار الآلة الثلاث، تضرب العلاقة أعلاه بـ (3) .

$$P_{em} = 3I_2^2 R_2 \frac{(1-s)}{s} \quad (Watt) \dots (15-4)$$

في حال عدم تحميل الآلة وكون الاحتكاك صفر . وتدوير الآلة عند السرعة التزامنية، الانزلاق $S = 0$ عندئذ قيمة $R_2 \frac{(1-s)}{s}$ تساوي اللانهاية. إذاً تيار الدائر يساوي الصفر و P_{em} تساوي الصفر أيضاً .

بالمقابل عند كون الآلة ساكنة : $S = 1$ والمقدار $R_2 \frac{(1-s)}{s}$ سيساوي الصفر .

تيار الدائر لا يساوي الصفر لكن $P_{em} = 0$ مرة ثانية، لأن الاستطاعة الميكانيكية المقدمة عند السكون تساوي الصفر. نقطتي العمل المتطرفتين محقتين. عند أية سرعة دوران أخرى أو أي انزلاق هنالك استطاعة كهروميكانيكية محولة.

الاستطاعة الاسمية للآلة (Machines Capacity) هي الاستطاعة المقدمة عند الشروط النظامية وعليه:

$$\begin{aligned} \text{Machine Rating} &= \frac{P_{em \text{ rated}}}{1000} (kW) \\ &= \frac{P_{em \text{ rated}}}{746} (HP) \end{aligned} \dots (16-4)$$

• المعنى الفيزيائي للعزم الناشئ في الأجسام الدوارة، هو قوة التدوير المطبقة عبر نصف قطر الدائر وتعطى بالنيوتن -متر ، ونسميه العزم الميكانيكي، ويحسب من الاستطاعة بعد قسمتها على السرعة الزاوية :

$$T_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} \quad (N.m) \dots (17-4)$$

ω : السرعة الزاوية للدائر

$$\begin{aligned} \omega &= 2\pi N_s \frac{(1-s)}{60} \quad (rad/s) \\ \omega &= 2\pi \frac{N_r}{60} \quad (rad/s) \end{aligned} \dots (18-4)$$

ويمكن حساب العزم بالعلاقة : $T_m = 9.55 P_{em} / n_r \dots (19-4)$

وعليه فإن العزم المقدم عند أي انزلاق يعطى بالعلاقة:

$$T_{em} = \left(\frac{180}{2\pi N_s} \right) I_2^2 R_2 / s \quad \dots (20-4)$$

- تعطى الاستطاعة الفعالة المستجرة من قبل المحرك بالشكل :

$$P_{in} = E_g^2 / R_m + I_1^2 r_1 + I_2^2 R_2 / S \quad \dots (21-4)$$

E_g توتر المنبع ، R_2 مقاومة الدائر المكافئة (مجموع مقاومة الدائر ومقاومة الحمل)

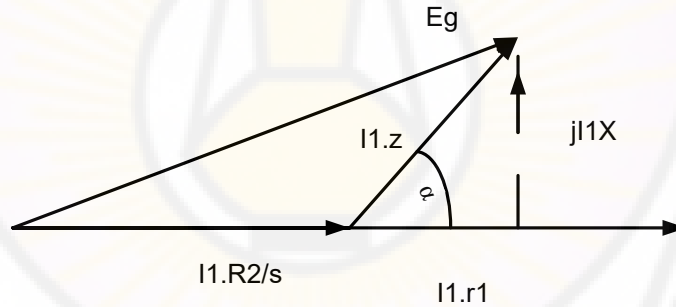
- تعطى الاستطاعة الردية المستجرة من قبل المحرك بالشكل :

$$Q = E_g^2 / X + I_1^2 X \quad \dots (22-4)$$

- من الدارة المكافئة يمكن حساب قيمة التيار I_2 ، بدلالة العلاقة التالية :

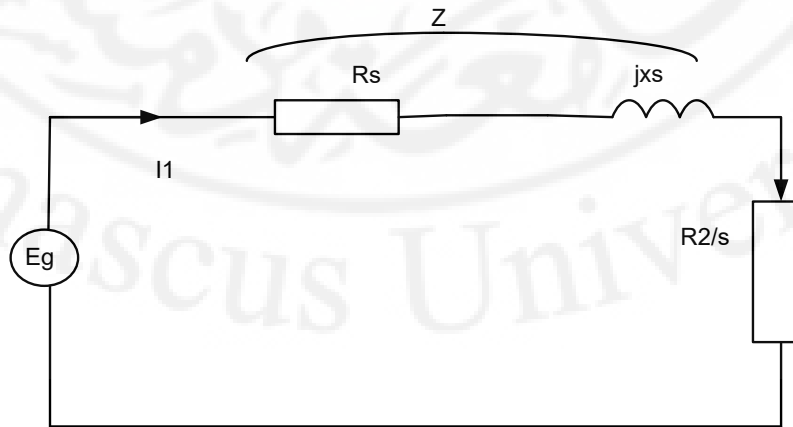
$$I_2 = \frac{V}{Z} = \frac{V}{\sqrt{(R_1 + \frac{R_2}{S})^2 + (X_1 + X_2)^2}} \quad \dots (23-4)$$

- حساب الاستطاعة الميكانيكية والعزم والسرعة، يعتمد على r_1 ، R_2/s ، X_1 وعليه فإن الجزء المتعلق بمقاومة وممانعة المغطنة لا يدخل في الحساب، ونتيجة لذلك يمكن اختصار الدارة المكافئة حسب الشكل (9-4) أدناه والمخطط الشعاعي المبين بجواره .



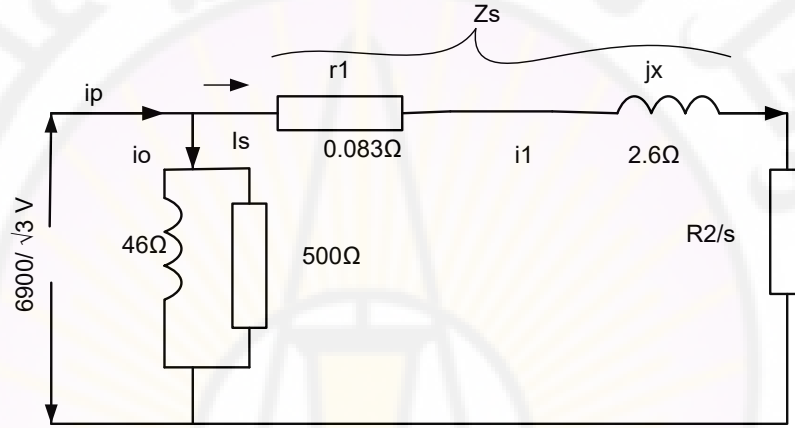
الشكل (9-4) المخطط الشعاعي المختصر للمحرك التحريضي ذو الدائر الملفوف نلاحظ

أن الشعاع $I_1 Z_1$ دائماً متقدماً بالزاوية α عن التيار I_1



الشكل (4-10) الدارة المكافئة المبسطة طالما نبحث عن الاستطاعة الميكانيكية العزم والسرعة، يمكن إهمال الجزء المتعلق بالمغنطة R_m, X_m ، وهذا يعطي دارة مبسطة كما في هذا الشكل

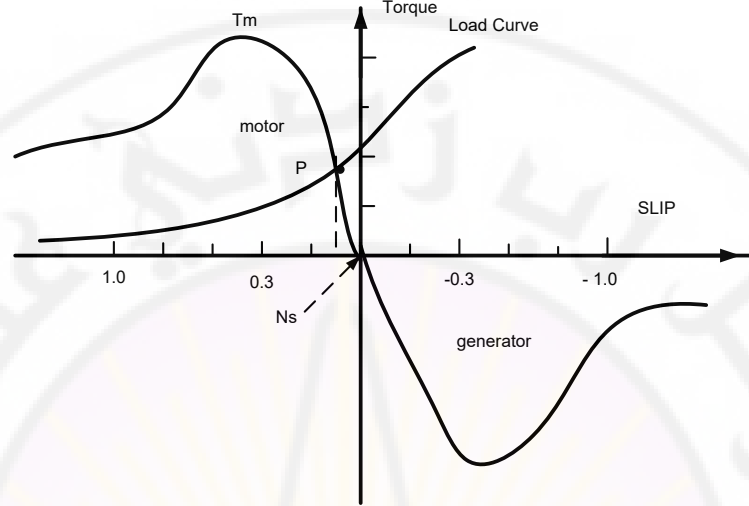
من الناحية العملية للإستئناس بالقيم العملية، نقدم الشكل (4-11) الذي يعطي الدارة المكافئة بالقيم الحقيقية لمحرك تحريضي قفص سنجابي باستطاعة 5000 حصان .



الشكل (4-11) القيم العملية لمحرك تحريضي باستطاعة 5000 حصان ، 600 دورة في الدقيقة تيار الحمل 358 أمبير ، تيار الفرملة 1616 أمبير

3-4 منحنى العزم - السرعة Torque –Speed Characteristic

نحصل على علاقة العزم كتابع للانزلاق إذا تم تغيير الانزلاق في الدارة المكافئة، والشكل أدناه (4-12):

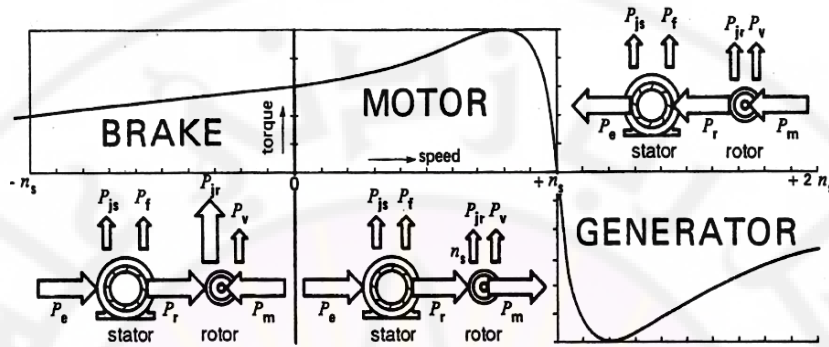


الشكل (4-12) علاقة العزم كتابع للانزلاق

عند العمل في منطقة الانزلاق السالب، تعمل الآلة كمولد مقدمة الاستطاعة الكهربائية للشبكة. وفي منطقة الانزلاق الموجب تعمل الآلة كمحرك وتدير الحمل الموصل على محورها. وهناك منطقة ثالثة وهي (Braking mode) حالة العمل كفرملة عندما يكون الانزلاق أكبر من (1)، وذلك لدى تدوير الآلة بعكس الاتجاه (Back ward). الاستطاعة في هذه الحالة تحول إلى فاقد جول ($I^2 R$) في نواقل الدائر. إن الفرملة بالتيارات الإعصارية التي تستخدم لفرملة العنفات الريحية تعتمد على هذا المبدأ.

في حالة الطوارئ، المولد التحريضي المرتبط على الشبكة ذاتها، يمكن تشغيله كفرملة بالتيارات الإعصارية (eddy Current brake) وذلك فقط لدى قلب تتابع التوتر المطبق على الثابت. هذا يسبب انعكاس التدفق المغناطيسي لحقل الثابت بالنسبة للدائر. الإجهادات والقوى التي قد تنشأ على الريش وحامل الريش يجب أخذها بالاعتبار، لذا لا نستخدم هذه الطريقة سوى عند الحالات الطارئة

الشكل (4-13) يعطي منحنى خواص العزم - السرعة لحالة العمل كمولد ومحرك وفرملة



الشكل (13-4) منحنى العزم - السرعة الكامل لآلة تحريضية ثلاثية الطور

P_{js} : مفاقد جول في الثابت.

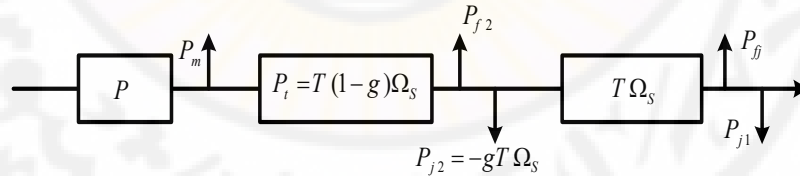
P_F : المفاقد الحديدية في الثابت .

P_r : الاستطاعة المنقولة من الثابت للدائر .

P_m الاستطاعة الميكانيكية المقدمة على محور الدائر .

P_{jr} : مفاقد جول في الدائر .

والشكل (14-4) أدناه يوضح المفاقد في حالات التشغيل الثلاث محرك ،مولد فرملة .



الشكل (14-4) حالات التشغيل الثلاث والمفاقد في كل حالة

4-4 العمل كمولد مستقل Working as self-Generator

يمكن الطالب من المحرك التحريضي ذو القفص السنجابي العمل كمولد تحريضي يغذي حمل منفصل عن الشبكة، وذلك بإضافة مجموعة مكثفات ذات سعة مناسبة تتوافق مع عامل الاستطاعة $\cos \phi$ للمحرك، عند الاستطاعة الاسمية. هذا ولا يمكن تحويله لمولد بدون إضافة مكثفات خارجية. يوجد هنا فرق أساسي بين هذا المولد التحريضي، والمولد التزامني العادي،

ذلك أن المولد التزامني يستطيع تقديم الاستطاعة الردية (عندما يكون محرضاً بشكل زائد Sur excite) بينما المولد التحريضي فوق التزامن هذا لا يمكنه تقديم أية استطاعة ردية، بالعكس، هو مستهلك للاستطاعة الردية. كما يجب أن يكون هنالك مغناطيسية متبقية لبدء الإقلاع كمولد، كما في حالة جميع المولدات ذاتية التحريض.

تردد التيار الثلاثي الطور الناتج عن هذا المولد يمكن معرفته إذا تم تحميل المولد بحمل أومي، عندئذ تأخذ القيمة ω والتي تعطى من العلاقة:

$$Q = 3U^2.C.\omega \cos \varphi = 1 \quad \dots (24-4)$$

1-3-4 التحريض الذاتي للمولد التحريضي

لدى ربط مكثفات تحسين عامل الاستطاعة مباشرة بدون قاطع على أطراف (نهايات) الثابت لمحرك تحريضي، ولدى كون استطاعة مكثفات تحسين عامل الاستطاعة بحدود 25-30% من استطاعة المحرك، تحدث ظاهرة يطلق عليها التحريض الذاتي للمحرك، أو عمل المحرك كمولد.

ذلك أنه لدى فصل المحرك في هذه الحالة عن الشبكة (بقصد إيقافه) تكون المكثفات مشحونة لذا فإنها سوف تحقق تيار في المحرك التحريضي وسوف تسعى لإعادة تدويره، وهذا قد يسبب مشاكل فنية عديدة لسنا بصدد ذكرها. لكن ما يراود استنتاجه من هذه الظاهرة (الإقلاع الذاتي للمحركات التحريضية) هو أن إضافة المكثفات على ثابت المحرك قد تسبب إضافة لتدوير المحرك وإعادة إقلاعه، سوف تسعى إذا ما تم تأمين سرعة دوران خارجية للمحرك (ولتكن عنفة ريحية) من أن يتحول إلى مولد تحريضي عند سرعات أقل بكثير من السرعة التزامنية. تبين الجداول المرفقة سعة المكثفات وسرعة الدوران لمحرك تحريضي مخبري تم تجربته في المخابر على محرك تحريضي مخبري باستطاعة 2 حصان، تم تدوير المحرك التحريضي بمحرك تيار مستمر يمكن التحكم بسرعه، كما تحميل المولد التحريضي بمجموعة لمبات باستطاعة 300 وات .

جدول 1 المولد التحريضي - وسعات المكثفات المرتبطة - وسرعة الدوران

A: عند سعة مكثف $F = 60 \mu$:

تردد التوتر الناتج بالهرتز	توتر خرج المولد التحريضي بالفولت	سرعة الدوران RPM دورة في الدقيقة
----------------------------	----------------------------------	-------------------------------------

1300	70	40
1375	142	42
1500	184	46
1625	208	49

B: عند سعة مكثف $F = 48 \mu$:

تردد التوتر الناتج بالهرتز	توتر خرج المولد التحريضي بالفولت	سرعة الدوران RPM في الدقيقة
44.6	52	1500
46.8	164	1550
48.3	182	1600
49.8	196	1650
50.9	206	1700
52	234	1725

مما سبق نرى أن المحرك التحريضي، حتى ينتقل ليصبح مولداً تحريضياً يحتاج إلى استطاعة ردية (بقصد توليد السيالة المغناطيسية في الثغرة الهوائية). يمكن استرجار التيار اللازم لتوليد هذه السيالة سواء من الشبكة العامة مباشرة أو عبر مبدلات إلكترونية أو من مكثفات ثابتة ساكنة.

في حالتنا هذه سوف نوضح آلية عمل المولد التحريضي ذي التحريض الذاتي بإضافة مكثفات على أطراف الثابت. سوف نتعرض لتحديد سعة المكثفات اللازمة لتوليد السيالة المغناطيسية، وإن سعة المكثفات المحسوب ليس له علاقة بقيمة عامل الاستطاعة للحمل الذي يمكن ربطه على خرج المولد التحريضي.

عملية التحريض الذاتي للمولد التحريضي تشابه عملية توليد القوة المحركة الكهربائية في آلة التيار المستمر ذات التحريض الذاتي. ذلك أن المغناطيسية المتبقية في المتحرض، بسبب كون مكونات الدارة تحتوي مواد فيرو مغناطيسية، وهي ذات قيمة صغيرة ستولد تياراً صغيراً هذا التيار الصغير بدوره سيولد تحريضاً، مما يؤدي لرفع قيمة القوة المحركة الكهربائية المتولدة، لأن الآلة تدور بمصدر خارجي، وبالمقابل سوف يزداد تيار التحريض وهكذا إلى أن نصل للقوة المحركة الكهربائية الاسمية عند سرعة الدوران القائمة.

في حالة المولد التحريضي توجد المكثفات على أطراف الآلة، لذا كلما زادت القوة المحركة الكهربائية كلما زاد أيضاً توتر المكثف التفرعي الخارجي، علماً أن ازدياد توتر المكثف U_C هو تزايد خطي يعطى بالعلاقة:

$$U_C = I_C X_C \quad \dots (25-4)$$

بينما تزايد القوة المحركة الكهربائية للمولدة غير خطي وسيصل لحالة الإشباع عند تزايد تيار التحريض والوصول لقيم اسمية القوة المحركة الكهربائية .

الشكل (4-15) يوضح آلية تزايد توتر المكثف والتيارات المارة والقوة المحركة الكهربائية المتولدة. القوة المحركة الكهربائية E_0 تولد تياراً سعوباً قدره:

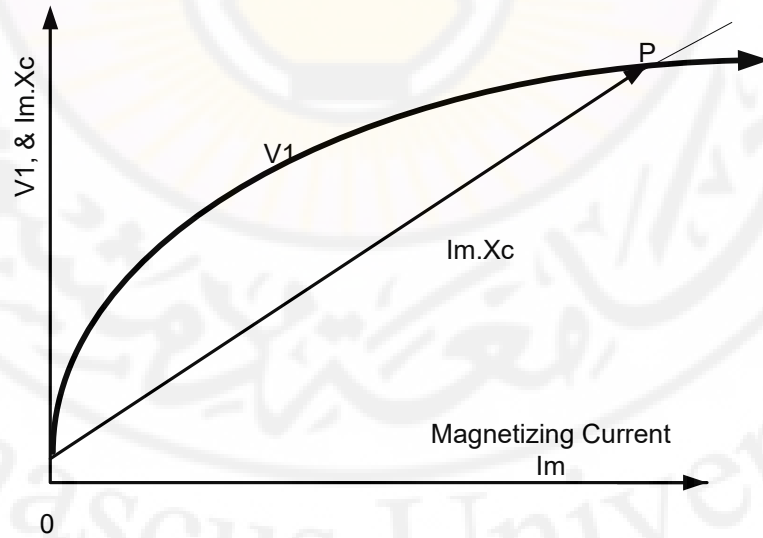
$$I'_C = \frac{E_0}{X_C} = \omega_1 C E_0 \quad \dots (26-4)$$

هذا التيار سوف يمر في المكثفات وفي ملفات الثابت للآلة ، وتتناسب شدته تبعاً للممانعة المفاعلات التسريبية والذاتية للآلة :

$$I'_C = \frac{E_0}{X + X_{01}} \approx \frac{E_0}{X_m} \quad \dots (27-4)$$

وكلما زاد التيار زادت القوة المحركة الكهربائية المتولدة .

القيمة الاسمية E_1 يتم تحديدها بنقطة التقاطع بين منحنى المغنطة $E = f(I_o)$ ومميزة الفولت أمبير للمكثف $U_C = I_C X_C$ (النقطة P) .



الشكل (4-15) التحريض الذاتي للمولد التحريضي

حيث أن:

$$U_C = E_1 \quad \dots (28-4)$$

$$X_C I'_C = (X_m) I'_C \Rightarrow X_C = X_m$$

عند التردد أو السرعة الزاوية : $\omega = 2\pi f$ وبالتعويض ($f = 50$)

$$(X_C) = \frac{1}{\omega_C} = (L_m)\omega \quad \dots (29-4)$$

$$L_m \cdot C = \frac{1}{\omega^2} = 10^{-5}$$

قيمة السيادة الناتجة للمكثفات هي السيادة الحرجة للتحريض الذاتي، ويتم التحريض الذاتي عند سعة مكثفات أقل من هذه القيمة، وعند سرعة أقل من السرعة الاسمية. هذا وإن تردد التوتر المتولد ليس بالضرورة أن يكون منطبقاً على تردد الشبكة 50Hz هنالك عوامل عديدة تؤثر على قيمة التردد (سعة المكثفات، سعة الدوران).
كما رأينا أعلاه نقطة العمل ثابتة عند:

$$\frac{V_1}{X_C} = \frac{V_1}{X_m} \quad \dots (30-4)$$

أي:

$$X_C = X_m \quad \dots (31-4)$$

$X_C = \frac{1}{\omega C}$. وهذا يحدد أو يضع قيمة تردد العمل تبعاً لقيمة المكثف C، لذا فإن تردد الخرج للمولد ذي التحريض الذاتي (Self-excited) يمكن أن يعطى بالعلاقة:

$$f = \frac{1}{2\pi C X_m} \quad \dots (32-4)$$

أو

$$\omega = \frac{1}{2\pi \sqrt{C L_m}} \quad \dots (33-4)$$

عند حالات التحميل، الاستطاعة المتولدة $V_1 I_2 \cos \phi_2$ تغذي الاستطاعة لمقاومة الحمل R والمفاقيد في R_m ، والتيارات الردية سيكون مجموعها مساوي للصفر. أي :

$$\frac{V_1}{X} = \frac{V_1}{X_m} + I_2 \sin \phi_2 = \frac{V_1}{X_C} \quad \dots (34-4)$$

العلاقة الأخيرة أعلاه تحدد قيمة توتر الخرج عند التحميل، والعلاقتين الأخيرتين تحددان تردد توتر الخرج والتوتر عند قيمة محددة للمكثف C. وبالعكس يمكن الاستفادة منها لتحديد سعة المكثفات المطلوبة عند تردد وتوتر مطلوبين.

2-3-4 تغير التردد وسعة المكثفات وسرعة الدوران

انطلاقاً من قيمة الاستطاعة الردية Q_C اللازمة للتحريض الذاتي يتم حساب سعة المكثفات اللازمة عند اللاحمل.

تعطى الاستطاعة الردية بالعلاقة:

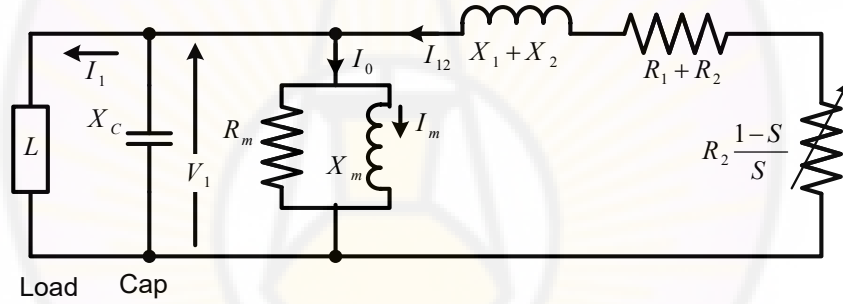
$$Q_C = 3U_C I_C \sin \varphi \quad \dots (35-4)$$

حيث:

U_C : توتر الطور.

I_C : تيار الطور.

الشكل (16-4) التالي يبين الدارة المكافئة للمولد التحريضي ذي التحريض الذاتي:



الشكل (16-4) الدارة المكافئة لمولد تحريضي ذاتي التحريض مع مكثف خارجي

بالمقابل للمكثف لدينا:

$$Q_C = 3U_C I_C = 3.U_C . \omega . C . U_C$$

$$Q_C = 3 . \omega . C . U_C^2 = 6 \pi f . C . U_C^2 \quad \dots (36-4)$$

$$Q_C = 6 \pi f . C . U_C^2$$

عند التحميل للمولد التحريضي، تحتاج المولدة إلى استطاعة ردية إضافية لتغطية عامل الاستطاعة الردي للعمل إضافة للحاجة للتحريض الذاتي وعليه يمكن القول أن الاستطاعة الردية الإجمالية اللازمة للمولد التحريضي تصبح:

$$Q_C = Q_g + Q_L \quad \dots (37-4)$$

حيث:

Q_g : الاستطاعة الردية للمولد التحريضي.

Q_L : الاستطاعة الردية للحمل الخارجي.

إذا فرضنا أن عامل الاستطاعة للحمل $\cos \varphi_L$ وعامل الاستطاعة للمولدة ذاتها $\cos \varphi_g$ وبالنسبة لمولدة باستطاعة P يمكن كتابة ما يلي:

$$Q_C = P.tg \varphi_g + P.tg \varphi_L \quad \dots (38-4)$$

$$6 \pi f . C . U_C^2 = P(tg \varphi_g + tg \varphi_L)$$

$$C = \frac{P(tg \varphi_g + tg \varphi_L)}{6 \pi f . C . U_C^2} \quad \dots (39-4)$$

وعليه فإن هذه السعة هي السعة الإجمالية اللازمة للتخريض وللتنشغيل كمولدة (عامل استطاعة حمل مفروض مسبقاً).

إن حجم المكثف C اللازم يتناسب طردياً مع استطاعة المولدة وعكساً مع التوتر والتردد. وإن عامل الاستطاعة المنخفض يتطلب ساعات أكبر .

مثال محلول (1-4)

نرغب باستخدام محرك قفص سنجابي تحريضي كمولد تحريضي بالمواصفات التالية:
 , 40HP , 1760 r/min , 440V , 3ph . التيار الاسمي للمولد 41A وعامل الاستطاعة الكلي للحمل 0.84 .

a- احسب سعة المكثف اللازم لكل طور إذا تم ربط المكثفات على شكل دلتا.

b- عند أية سرعة يجب أن يدور النظام لتوليد توتر بتردد 60Hz.

الحل :

a- الاستطاعة المستجرة من قبل المحرك عندما تعمل الآلة كمحرك:

$$S = \sqrt{3} . V . I$$

$$S = 1.73 \times 440 \times 41 = 31.2 kVA$$

الاستطاعة الفعالة المستجرة :

$$P = S \cos \varphi$$

$$P = 31.2 \times 0.84 = 26.2 kW$$

الاستطاعة الردية المستجرة تعطى بالشكل :

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

$$Q = \sqrt{(31.2)^2 - (26.2)^2} = 17 KVAR$$

عندما تعمل الآلة كمولد تحريضي، بلوك المكثفات يجب أن يقدم استطاعة ردية للطور الواحد تعادل $5.7 KVAR = 17 \div 3$. وتوتر الخط للمكثفات 440 فولت لأنها موصولة دلتا. عليه فإن تيار المكثف لكل طور:

$$I_c = \frac{Q_c}{V} = \frac{5700}{440} = 13A$$

ممانعة المكثفات لكل طور تساوي:

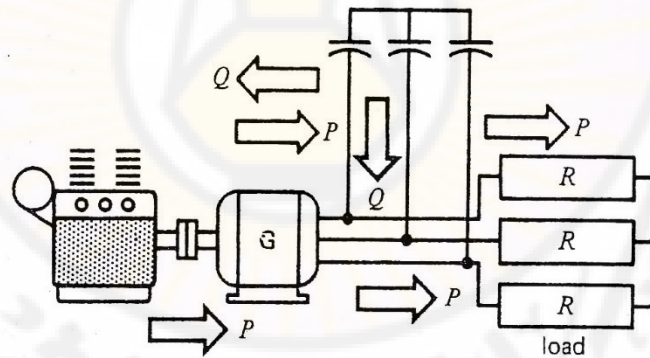
$$X_c = \frac{V}{I} = \frac{440}{13} = 34\Omega$$

سعة المكثفات لكل طور يجب ألا تقل عن:

$$C = \frac{1}{2\pi f X_c}$$

$$C = \frac{1}{2\pi \times 60 \times 34} = 78\mu F$$

الشكل (4-17) أدناه يوضح نظام التوليد وكيف يتم تحقيقه.



الشكل (4-17) مستلزمات توليد الاستطاعة في المحرك التحريضي

هنا لابد من الإشارة أنه إذا استجر الحمل استطاعة ردية، عندئذ يجب إعادة النظر في سعة المكثفات كي تستطيع أن تغطي الاستطاعة الردية المطلوبة من الحمل ومن الآلة.

b- النظام حكماً يجب أن يدور بسرعة أكبر قليلاً من السرعة التزامنية، الانزلاق يجب أن يساوي الانزلاق عند الحمل الكامل والآلة تعمل كمحرك. وعليه فإن السرعة الإضافية ستكون

$$S \text{ تقريباً : } S = 1800 - 1760 = 40 r/min$$

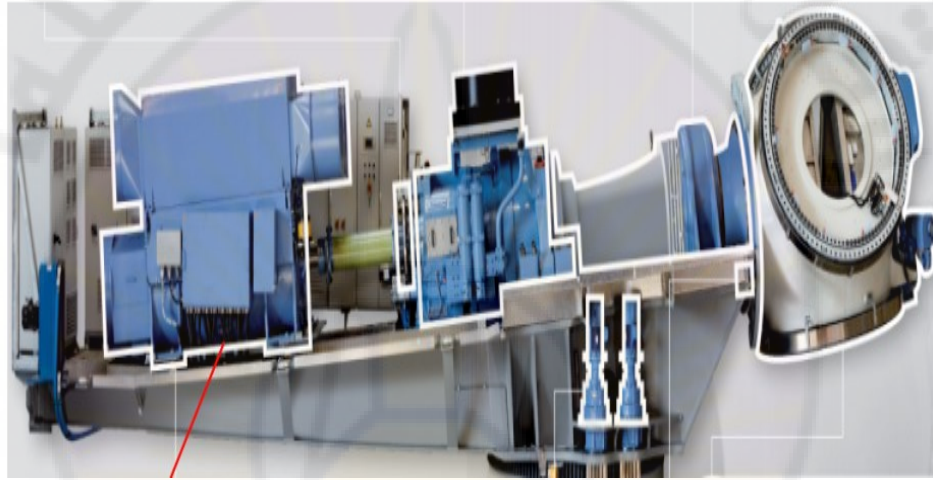
وعلى النظام أن يدور للعمل كمولد عند سرعة لا تقل عن:

$$n = 1800 + 40 = 1840 r/min$$

4-4 المولد التحريضي ذو الدائر الملفوف مضاعف التغذية

Double Fed Induction Generator (DFIG)

بلغت نسبة تركيب المولدات التحريضية مضاعفة التغذية، في هذه الأيام، في العنفات الريحية ما يقارب 70% من العنفات المركبة عالمياً. (Vestas ,Gamesa, GE& Repower)، وهي تعتمد المفهوم الموضح بالشكل (4-20) الوارد لاحقاً .

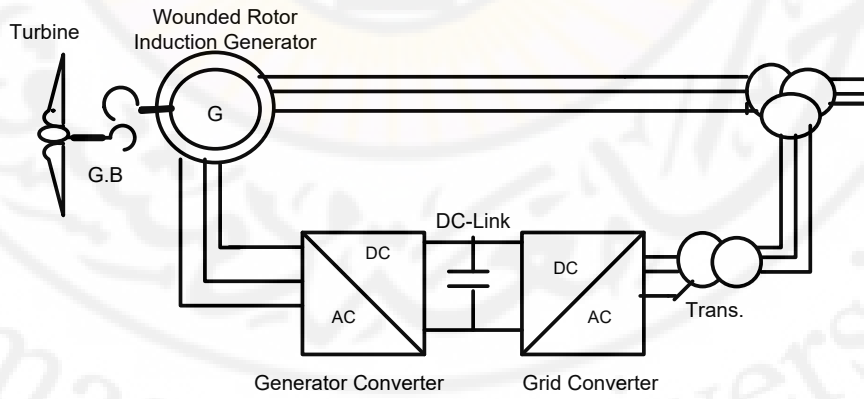


الشكل (4-18) المكونات الرئيسية في العنفات مضاعفة التغذية

في هذا النظام، توصل ملفات الثابت مباشرة إلى الشبكة العامة، بينما توصل ملفات الدائر عبر حلقات انزلاق إلى المبدل الإلكتروني الذي سيعمل على تغيير وحقق توتر وتردد متغير في ملفات الدائر. لذا يمكن أيضاً لهذه الآلة أن تعمل كمحرك وكمولد. في الأنظمة الحديثة تم حذف العديد من الأجزاء الميكانيكية، والتي تعتبر مسببة لهذه الأنظمة، مثل: المسافر Brushes، وحلقات الانزلاق Slip Ring، وعلبة السرعة. وهذا يخفف الأوزان والتكاليف ويزيد من وثوقية العمل، وتستخدم في العنفات البحرية لاستطاعات تزيد عن 1.5 ميغا وات المحرك التحريضي ذي الدائر الملفوف. كما نعلم سابقاً في المقررات الأخرى، يحتوي المولد على ملفات ثلاثية الطور في الدائر. نهاية هذه الملفات توصل عادةً إلى حلقات انزلاق تدور مع الدائر بواسطة عجلة فحمت خاصة. يمكن عند الإقلاع إدخال مقاومات خارجية، تحقق على التسلسل مع أطوار الدائر، وتعمل بالتالي على تحديد تيار الدائر والتحكم بسرعة إقلاع المحرك. بعد أن يصل المحرك عادة إلى السرعة الاسمية يتم إلغاء هذه المقاومات وقصر الدائر على نفسه، ويصبح الدائر مشابهاً للمحرك التحريضي ذي القفص السنجابي. في السنوات 1970 تم التفكير

بعدم السماح بضياح القدرة في الدائر كفاقد جول، ومحاولة استرداد القدرة المصروفة في الدائر وإعادة حقنها في الشبكة، وكما رأينا في منهاج إلكترونيات القدرة للسنة الرابعة - فصل ثاني -هندسة الطاقة الكهربائية. أنه بالإمكان وضع جسر تقويم (غير مقاد) مباشرة على نهايات ملفات الدائر، عن طريق الفحمت وحلقات الانزلاق، بحيث يقوم هذا الجسر بالعمل على تقويم أي توتر متناوب قد يتواجد في الدائر، مهما كانت قيمة التوتر والتردد. (ذلك لأن التوتر في الدائر يساوي $S.V_1$ وكذلك التردد $F_2 = sF_1$). يطبق التوتر المقوم الناتج عن جسر التقويم، عادةً على جسر تقويم ثيرستوري مقاد يعمل كعاكس (زاوية الإزاحة بالطور أكبر من 90 درجة). عندئذ يقوم جسر التقويم الثيرستوري بالعمل كعاكس ويستجر الاستطاعة (الفعالة) من الحمل الذي هو هنا خرج الجسر غير المقاد، ويحقن الاستطاعة في الشبكة عن طريق محول متزامن مع توتر وتردد الشبكة. كما في الشكل (4-19). الاستطاعة المحقونة في الشبكة هي الاستطاعة المتواجدة في الدائر (SP_1) ، P_1 استطاعة الدخل. بهذه الطريقة يمكن إضافة لاسترداد القدرة من الدائر Recuperation of rotor energy، يمكن تنظيم سرعة الدائر عن طريق تنظيم زاوية الإزاحة بالطور للجسر الثيرستوري المقاد. والانزلاق S يصبح تابع مباشر لزاوية الإزاحة:

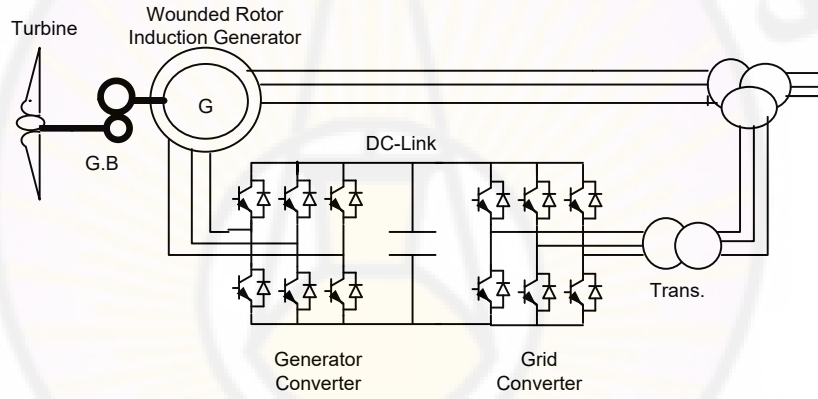
$$S = \frac{k}{K} \cos \psi \quad \dots (40-4)$$



الشكل (4-19) استخدام جسرين في حلقة الدائر لتنظيم سرعة المحرك
التحريضي ذو الدائر الملفوف

قيمة التيار المار بين الجسرين تابع لفرق التوتر بينهما. توتر الجسر غير المقاد تابع لقيمة توتر الدائر، والذي يتأثر بالانزلاق ونسبة التحويل بين الثابت والدائر للمحرك (K)

توتر الجسر المقاد (العاكس) تابع لزاوية الإزاحة بالطور ونسبة التحويل في محول التزامن (K). بناءً عليه يتم تحديد سرعة دوران المحرك التريضي وتنظيم سرعته حسب المطلوب. هذا النظام المطبق في الدائر غير عكسي، أي لا يمكن حقن أي توتر متناوب من الجسر غير المقاد في دائر المحرك، لأن الجسر لا يمكنه العمل سوى في ربع واحد من إحداثيات التوتر والتيار، كما أنه لا يمكن أن يحول توتر الخرج المستمر إلى توتر متناوب، كي يمكن تطبيقه على دائر المحرك التريضي الملفوف. لذا لابد من الاستعاضة عن هذين الجسرين (المقاد وغير المقاد) بنظام Converter AC-DC-AC، كل منهما مقاد يعمل في ربعين من إحداثيات التوتر والتيار. كما في الشكل (4-20).



الشكل (4-20) استخدام جسرين بشكل مضاعف بقواطع مقادة عكوسة

يتم وضع جسرين، وغالباً من ترانزستورات الاستطاعة، الجسر الأول المرتبط مع ملفات المحرك في الدائر يعمل عند تشغيل الآلة كمولد، يأخذ التوتر المتناوب من الدائر (SV₁) و (SF₁)، يقوم به ثم أن التوتر المقوم الناتج يطبق على الجسر الثاني (المرتبط بالشبكة) والمكون من عناصر من الترانزستور أيضاً، ومربوط باتجاه معاكس للجسر الأول، هذا الجسر يمكن تشغيله هنا كمعرج مستقل (أي أن يعمل على تحويل التوتر المستمر القادم من الجسر الأول إلى توتر متناوب يحقن في محول التزامن المرتبط بالشبكة). هذا المعرج إذا سيأخذ الاستطاعة أو القدرة من الحمل (ملفات الدائر للمولد التريضي) ويعيدها للشبكة عند تردد الشبكة المطلوب (60 أو 50 هرتز).

بالمقابل يمكن أيضاً بواسطة هذين الجسرين، أخذ الاستطاعة المتناوبة من الشبكة وتحويلها إلى توتر مستمر (عن طريق الديودات العكسية المرتبطة مع ترانزستورات القطع في الجسر المرتبط بالشبكة) التوتر المستمر الناتج يطبق على الجسر الأول الذي سيعمل كمعرج والمرتبط بملفات

الدائر. هذا الجسر يمكن التحكم بتوتره وتردده، وبالتالي يمكن الآن تطبيق أي قيمة توتر نشاء وأي تردد $(5-10-14)$ Hz هرتز على ملفات الدائر. أي أن ملفات الدائر أصبحت مماثلة لملفات التحريض للمولد التزامني. هذا النظام هو المستخدم حديثاً في الآلات التحريضية ذات الدائر الملفوف. المستخدمة في العنفات الريحية، وهو يعمل كما سنرى لاحقاً في كلا حالتي التشغيل تحت التزامن وفوق التزامن، وبما أن المعرجات المستخدمة عكسية، يمكن في أية لحظة أخذ الاستطاعة من الدائر وحقنها في الشبكة أو بالعكس أخذ الاستطاعة من الشبكة وحقنها في الدائر. كما يمكن إضافة مكثفات تحسين عامل الاستطاعة في حلقة الدائر في منطقة التيار المستمر (DC-Link). يتم التحكم بعمل هذه المعرجات بنظام تعديل عرض النبضة Pulse Width Modulation (P.W.M) والذي يحاول أن يقدم عدة ميزات منها:

- 1- حذف أكبر قدر من التوافقيات في موجة التوتر المحقونة في الشبكة.
- 2- إمكانية تغيير القيمة الفعالة للتوتر المحقون في ملفات الدائر ضمن مجال واسع.
- 3- إمكانية تغيير قيمة التردد المحقون في الدائر (من صفر حتى 50 هرتز).
- 4- السماح للعنفات الريحية بالعمل عند مجال سرعات متغير كبير مقارنة مع المولدات التحريضية ذات القفص السنجابي $(1,2 - 0,6)$.

التغذية المضاعفة للمولدات التحريضية جاءت من أن الدائر والثابت لهذه الأنظمة مرتبط بالشبكة وهنا لابد من الإشارة إلى أن عملية تغذية الدائر بتوتر متناوب ذي تردد منخفض $(14 - 24)$ 10 هرتز، يعني أن الحقل الكهربائي الناشئ من هذه التوترات، ستشكل أقطاب دوارة وسيدور الحقل في الثغرة الهوائية بسرعة أكبر من سرعة الدائر القادمة من العزم ميكانيكي (عنفة ريحية).

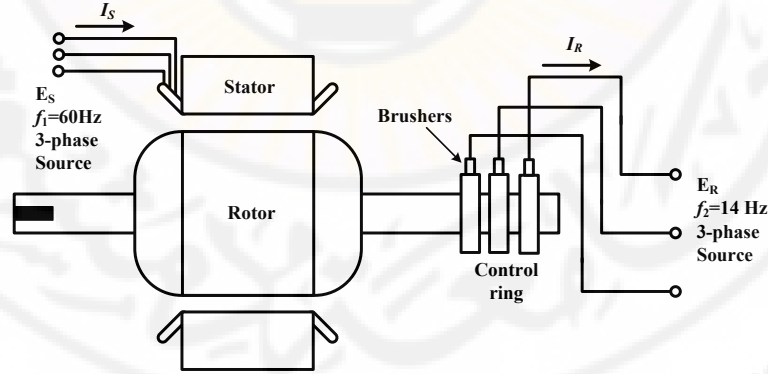
في الآلات التزامنية نغذي المحرض بتيار مستمر، وأقطاب الدائر تدور بالتزامن مع أقطاب الثابت عند نفس السرعة التزامنية. هنا بما أن الدائر سيغذى بتوتر ذي تردد لا يساوي الصفر، أي أن الحقل الناتج عن الدائر سيدور بسرعة أكبر من السرعة الزاوية الميكانيكية. غالباً هذا يساعد في التحكم بتشغيل المولد التحريضي ذي الدائر الملفوف فوق التزامن أو تحت التزامن. أيضاً للعلم، إذا تم تغذية ملف التحريض للآلة التزامنية بتوتر متناوب ذي تردد 50 Hz عوضاً عن التيار المستمر، فإن تردد توتر الثابت سيصبح 100 Hz. وذلك إذا دار المولد عند السرعة التزامنية أي أن تغذية المتحرض بتوتر متناوب، وللحصول على توتر في الثابت ذي تردد 50

Hz، يكفي أن نخفض سرعة دوران النظام إلى النصف (هنا) للحصول على التردد 50 Hz. أو أن نجعل اتجاه دوران الحقل الناتج عن الثابت معاكس لاتجاه الدوران بتعبير آخر، يمكن أن يكون اتجاه دوران حقل الثابت في الآلة التحريضية القادم من الشبكة (كون الثابت مرتبط مع الشبكة) يدور في اتجاه دوران الدائر، أو باتجاه معاكس لاتجاه دوران الدائر.

عندئذ الحقل المتولد في الدائر (والقادم من المبدلات الإلكترونية التي تم تركيبها في حلقة الدائر) يمكن أن يدور في الثغرة الهوائية ليتربط مع حقل الثابت، وذلك إما بسرعة كبيرة كي يستطيع اللحاق بحقل الثابت (هذه الحالة نعتمدها عند سرعات الرياح العالية (Super synchronous)، أو أن نجعل السرعتين متكاملتين في الثغرة الهوائية وعندئذ لا داعي ليدور الدائر عند سرعة ميكانيكية عالية، نعمل عند حالة تشغيل نطلق عليها (Sub synchronous) تحت التزامن. في كلا الحالتين يمكن تغيير اتجاه حقل الثابت عن طريق (قلب تتابع الأطوار) توتر الثابت وسنشرح ذلك لاحقاً.

مثال محلول (2-4)

بفرض لدينا محرك تحريضي ذي دائر ملفوف كما في الشكل (4-21)، تم تغذية الدائر بنظام إلكتروني (AC-DC-AC) يغذي الدائر بتردد 14Hz ماذا سيحدث عند هذه الظروف



الشكل (4-21) محرك ذي دائر ملفوف مضاعف التغذية

بفرض أن المنبع ثلاثي الطور 4 أقطاب تردد الثابت 60Hz. تدفق الثابت سيدور عند السرعة التزامنية الثابتة:

$$n_2 = 120 \frac{F}{P} = 1800 \text{ r/min}$$

وبفرض أن هذا التدفق يدور باتجاه عقارب الساعة.

بما أن الدائر مغذى من منبع بتردد 14Hz ، تدفق الدائر سيدور عند السرعة :

$$n_2 = 120 \frac{14}{4}$$

أي $n_2 = 420 \text{ r/min}$ وذلك بالنسبة للدائر. بفرض أن هذا الحقل يدور باتجاه عقارب الساعة بالنسبة للدائر.

في الحقيقة كي تتطابق الأقطاب نوع N في الثابت مع الأقطاب نوع S في الدائر، من الواضح أنها يجب أن تدور بنفس السرعة. هذا يعني أنه بالنسبة لمراقب خارجي، على تدفق الدائر أن يدور باتجاه عقارب الساعة عند سرعة 1800 r/min . الطريقة الوحيدة لحدوث ذلك هو أن يدور الدائر نفسه باتجاه عقارب الساعة وبسرعة

$$1800 - 420 = 1380 \text{ r/min} .$$

إذا دار الدائر عند أية سرعة أخرى مخالفة لذلك فإن أقطاب الدائر ستكون منزلة عن أقطاب الثابت والعزم المتوسط سيكون مساوي للصفر والمحرك سينتقل للتوقف.

يبدو إذاً أن الآلة يمكنها العمل كمحرك فقط وبالضبط عند سرعة 1380 r/min . ويقال عندئذ أن المحرك يدور عند نظام تحت التزامن (Sub synchronous) .

إذا تم تبديل أي ناقلين موصولين لحلقات الانزلاق (Slip-rings)، تتابع الأطوار في الدائر، عندئذ تدفق الدائر سيبدأ بالدوران عكس اتجاه عقارب الساعة، وذلك بالنسبة للدائر. في هذه الشروط، الأقطاب نوع N للثابت يمكنها أن تتعشق مع الأقطاب نوع S للدائر إذا ما دار الدائر باتجاه عقارب الساعة وبسرعة $n_r = 1800 + 420 = 2220 \text{ r/min}$. عند هذه الحالة نقول أن المحرك يدور بنظام فوق التزامن (Super synchronous) . بناءً على هذا المثال، وكي نعمم الظاهرة، نستطيع أن نوضح أن المحرك يمكنه الدوران عند أي من سرعتين باعتبار:

a- حالة تحت التزامن:

$$n = \frac{120}{P} (F - F_2) \quad \dots (41-4)$$

b- حالة فوق التزامن:

$$n = \frac{120}{P} (F + F_2) \quad \dots (42-4)$$

حيث:

n: سرعة دوران الدائر (r/min) .

F: تردد التوتر المطبق على الثابت (Hz).

F_2 : تردد التوتر المطبق على الدائر (Hz).

P: عدد الأقطاب.

من أجل تردد F_2 معطى، سرعة دوران الدائر n تعتمد على تتابع الأطوار للمنبع الثلاثي الطور المطبق على الدائر. التتابع السالب يحقق السرعة فوق التزامن، بينما التتابع الموجب يولد السرعة تحت التزامن.

4-5 تفصيل آلية عمل المولد التحريضي ذو الدائر الملفوف (مضاعف التغذية)

4-5-1 كيف تسري الاستطاعة في الآلة مضاعفة التغذية

لنتفحص مبدئياً جريان الاستطاعة الفعالة في محرك تحريضي ذي دائر ملفوف، ربط إلى دائره مقاومة خارجية R يوضح الشكل (4-22)، جريان الاستطاعة في مختلف مكونات النظام:

- 1- المنبع الثلاثي الطور E_s يقدم الاستطاعة P_s إلى ثابت الآلة .
- 2- بعد حذف مفايد جول P_{js} والمفايد الحديدية P_F ، الاستطاعة الفعالة المتبقية P_r تنتقل إلى الدائر.
- 3- استناداً إلى الانزلاق s ، جزء من الاستطاعة P_r يذهب كمفايد في الدائر SP_r ، هذه المفايد تساوي مجموع $I^2 R$ في دارة الدائر نفسه P_{jr} والمفايد P_{jR} في المقاومة الخارجية R المرتبطة بحلقات انزلاق الدائر.

4- الفرق بين P_r و SP_r يتم تحويله إلى استطاعة ميكانيكية P_m تقدم للمحور وعليه:

$$P_m = (1-s)P_r \quad \dots (43-4)$$

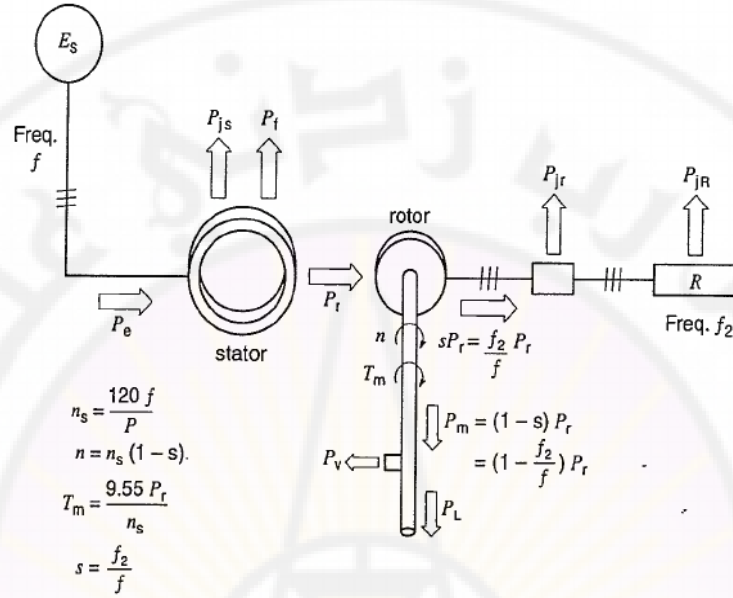
5- مفايد اللف (Wend age) ومفايد الاحتكاك P_o تطرح من P_m لنحصل على الاستطاعة P_L التي تخرج الحمل.

6- تردد الدائر:

$$F_2 = SF \quad \text{أو} \quad S = f_2/f \quad \dots (44-4)$$

7- الاستطاعة الميكانيكية يمكن التعبير عنها كتابع لتردد الثابت F وتردد الدائر F_2 و P_m لذا :

$$P_m = \left(1 - \frac{F_2}{F}\right) P_r \quad \dots (45-4)$$



شكل (4-22) جريان الاستطاعة في محرك تحريضي ذي دائر ملفوف

محمل بمقاومة خارجية R

كما أن الاستطاعة الكهربائية الفعالة المقدمة من ملفات الدائر تتبدد على شكل حرارة P_{jr} و P_{JR} ويساوي دائماً $P_r \left(\frac{F_2}{F} \right)$.

8-العزم T_m المولد بواسطة المحرك يعطى بالعلاقة:

$$T_m = 9.55 P_r / n_s \dots (46-4)$$

بواسطة هذه القيم والمعلومات يمكن دراسة جريان الاستطاعة للمحرك مضاعف التغذية عندما يعمل في حالة عمل تحت التزامن (Sub synchronous) أو فوق التزامن (Super synchronous)

4-5-2 تشغيل المحرك التحريضي ذي الدائر الملفوف بسرعة تحت التزامن

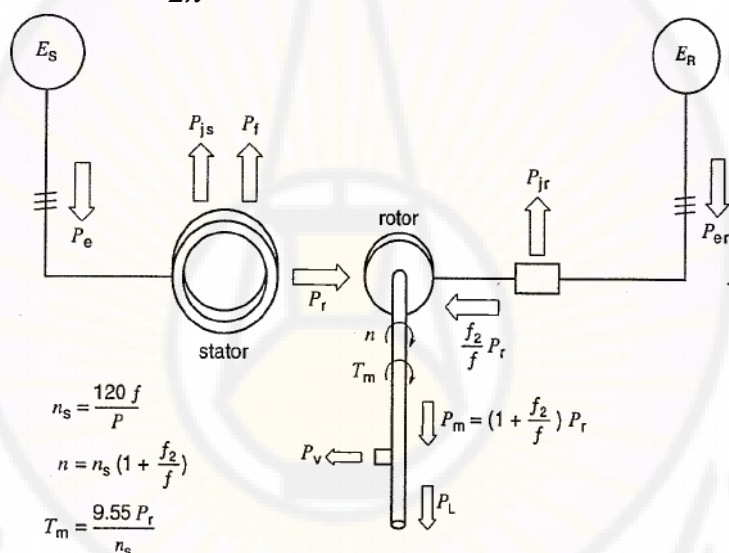
Doubly fed wound rotor motor (Power equations at Sub synchronous speed)

عند ربط دائر المحرك ذي الدائر الملفوف إلى منبع E_R ذي تردد F_2 ، عندئذ يثبت الانزلاق عند القيمة $S = \frac{F_2}{F}$. وعليه تثبت سرعة المحرك وقيم الاستطاعات وعلاقاتها الواردة في الدراسة أعلاه يمكن الاستمرار بتطبيقها . وبالنظر للشكل اللاحق (4-23)، نرى أن الاستطاعة P_m المقدمة للمحور تظل معطاة بالعلاقة:

إضافة لذلك، الاستطاعة الكهربائية المقدمة من الدوائر تساوي أيضاً $\left(\frac{F_2}{F} P_r\right)$ ، جزء منها P_{jr}

من المفيد أن نبين أن العزم المولد من قبل المحرك T_m ما زال يعطى بالعلاقة:

n_s : السرعة التزامنية لتدفق الثابت. حيث أن الثابت ناتج عن: $9.55 = \frac{60}{2\pi}$



عند السرعة تحت التوازن

4-5-3 عمل المحرك التحريضي ذى الدائر الملفوف بسرعة فوق التزامن

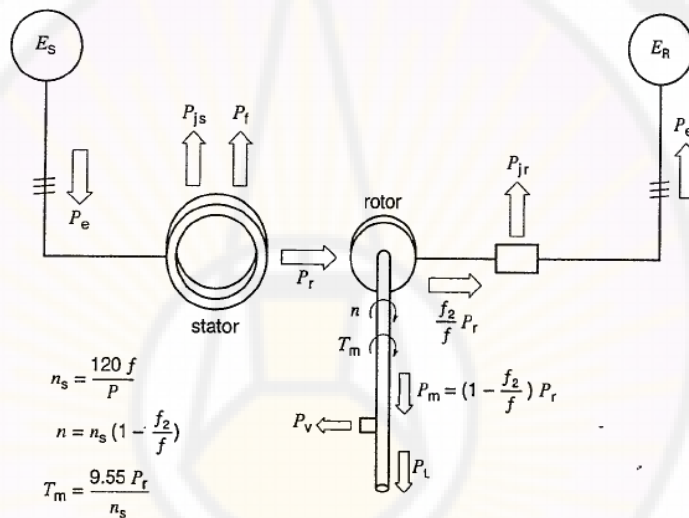
إذا عكسنا تتابع الأطوار للمنبع E_R ، يعمل المحرك عند سرعة فوق التزامن، أو بتعبير أدق إذا هبت الرياح بقوة ودار المولد عند سرعة دوران ميكانيكية أكبر من السرعة التزامنية. في هذه الشروط، جريان الاستطاعة في دارة الدائر تنعكس، لكن يمكن تطبيق نفس العلاقات الناطمة للاستطاعة شكل (4-24).

الاستطاعة الفعلية $\left(\frac{F_2}{F}\right)P_r$ (active power) المقدمة من الم منبع E_R ، تحقق الآن في الدائر والاستطاعة الميكانيكية P_m هنا :

$$P_m = \left(1 + \frac{F_2}{F}\right) P_r \quad \dots (48-4)$$

لاحظ أن العزم T_m يعطى ثانية بالعلاقة:

$$T_m = 9.55 \ P_r / n_s \quad \dots (49-4)$$



الشكل (4-24) جريان الاستطاعة لمحرك تحريضي مضاعف التغذية يعمل عند السرعة فوق التزامن

4-5-4 آلية عمل المولد التحريضي ذي الدائر الملفوف

Operation of Doubly – Fed wound – rotor Generator

نفس المحرك التحريضي مضاعف التغذية الذي ذكرناه أعلاه، يستخدم كمولد تحريضي مضاعف التغذية وهو من المولدات المستخدمة في العنفات الريحية ذات الاستطاعة العالية، 3.5 MW 6ميغاوات أو أكبر من ذلك.

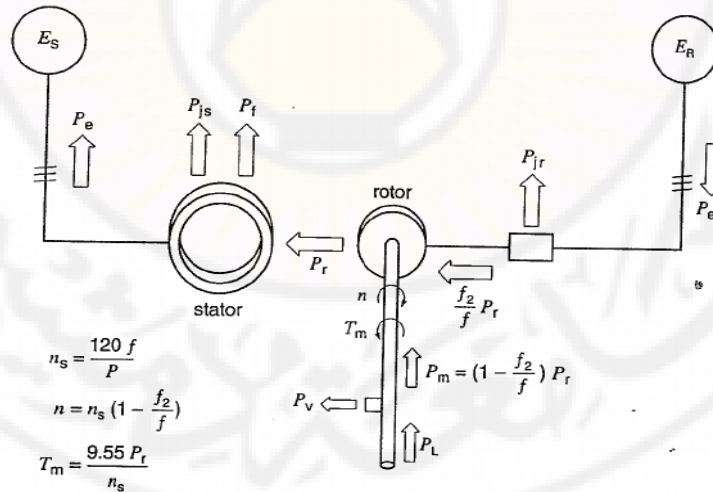
في هذا النظام كما سنرى، يتم ربط الثابت مباشرة إلى الشبكة العامة ويتم ربط ملفات الدوائر إلى الشبكة ذاتها عبر محول ومبدل إلكتروني للتردد عموماً مبدل Converter(AC-DC-AC)، يستطيع العمل كما ذكرنا في اتجاهين، ويمكن التحكم بتوتر وتردد التوتر المحقون في الدوائر.

حتى يستطيع النظام العمل كمولد، يكفي عندئذ أن نطبق عزم خارجي على المحور كي يدور الدائر سواء عند السرعة تحت التزامن أو السرعة فوق التزامن. هذا العزم يجبر أقطاب الدائر للدوران أمام أقطاب الثابت (ahead of the stator poles) . بدون توليد أي تغيير في السرعة. ضمن هذه الشروط، اتجاه جريان الاستطاعة يتبدل كما هو موضح في الشكل (4-25) والشكل (4-26).

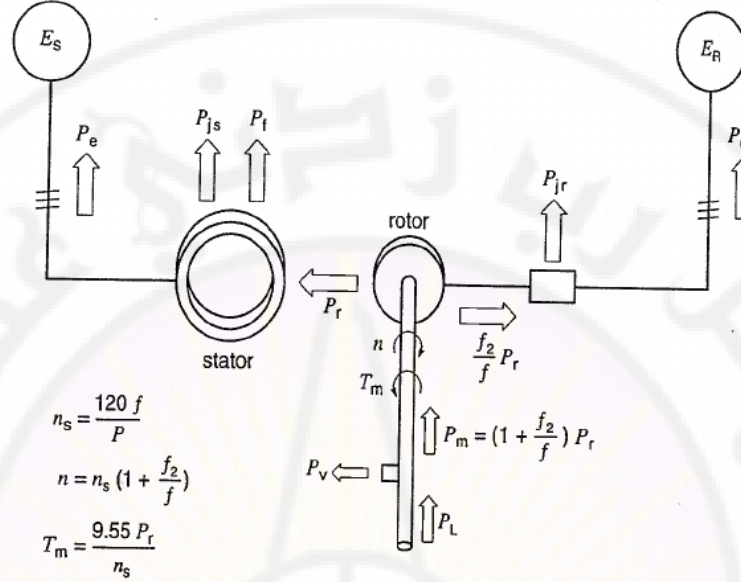
يطبق الشكل (4-25) عندما يعمل المولد بنظام تحت التزامن والشكل (4-26) لنظام فوق التزامن. الانتقال من حالة تحت التزامن إلى حالة فوق التزامن يتأثر بتردد الدائر F_2 وتتابع أطوار المنبع E_R .

في المثال التالي سيتم توضيح عمل المولد التحريضي مضاعف التغذية عندما يعمل بنظام تحت التزامن وهذا ينطبق على أية حالة من حالات التشغيل.

الاستطاعة P_e المقدمة إلى خط النقل أو الشبكة يمكن أن تكون عند عامل استطاعة واحد وذلك عن طريق تعبير قيمة ومطال التوتر القادم من المنبع E_R .



الشكل (4-25) جريان الاستطاعة لمولد تحريضي مضاعف التغذية يعمل تحت التزامن



الشكل (26-4) جريان الاستطاعة لمولد تحريضي مضاعف التغذية يعمل فوق التزامن

مثال محلول (3-4)

مولد تحريضي مضاعف التغذية، ثلاثي الطور، 6 أقطاب باستطاعة اسمية 800kW ربط الثابت إلى شبكة ذات التردد 60Hz . كما ربطت ملفات الدائر إلى مبدل تردد إلكتروني (Variable Frequency Converter) يحقن توتر بتردد 24Hz . تعمل الآلة بحالة تحت التزامن، تقدم العنفة الريحية استطاعة 500HP . العنفة الريحية موصولة إلى دائر المولد عبر علبة سرعة رافعة للسرعة (Speed raising gear box) المعلومات الإضافية اللازمة للحل مبينة أدناه إضافة للشكل (26-4) الذي يوضح قيم الاستطاعات في مواقعها الحقيقية

- مفايد علبة السرعة والاحتكاك $P_0 = 11kW$.
- مفايد جول في الدائر $P_{jr} = 3kW$ $I^2 R$.
- مفايد جول في الثابت $P_{js} = 12kW$ $I^2 R$.
- مفايد حديد الثابت $P_F = 7kW$.
- مفايد المبدل الإلكتروني $P_e = 2kW$.

المطلوب حساب ما يلي :

- (a) سرعة الدائر (r/min) عند العمل تحت التزامن .
 (b) الاستطاعة الميكانيكية P_m المقدمة للدائر (kW).
 (c) الاستطاعة الكهرومغناطيسية P_r المحولة من الدائر إلى الثابت (kW).
 (d) العزم الميكانيكي T_m عند دخل الدائر [KN-m].
 (e) الاستطاعة الكهربائية P_{er} المقدمة لمفات الدائر (kW) .
 (f) الاستطاعة الكهربائية P2 المستجرة من قبل المبدل الإلكتروني من الشبكة ذات التردد 60Hz .
 (g) الاستطاعة الكهربائية P_e المقدمة من الثابت إلى الشبكة العامة (kW) .

$$(h) \text{ مردود النظام } \eta = \frac{P_l}{P_L}$$

الحل:

(a) السرعة تحت التزامن تعطى بالعلاقة المعروفة:

$$n = \frac{120}{P} (F - F_2)$$

$$n = \frac{120}{6} (60 - 24) = 720 \text{ r/min}$$

(b) الاستطاعة الميكانيكية المقدمة من العنفة الريحية إلى علبة السرعة :

$$P_L = 500 \text{ hp} = 500 \times \frac{746}{1000} = 373 \text{ kW}$$

بما أن مفايد علبة السرعة $P_0 = 11 \text{ kW}$ ، فإن الاستطاعة الميكانيكية الداخلة للدائر P_m تعطى:

$$P_m = P_L - P_0 = 373 - 11 = 362 \text{ kW}$$

(c) الاستطاعة الكهرومغناطيسية P_r المحولة من الدائر إلى الثابت يمكن إيجادها من العلاقات

التالية :

$$P_m = \left(1 + \frac{F_2}{F}\right) P_r$$

$$362 = \left(1 - \frac{24}{60}\right) P_r \Rightarrow P_r = \frac{362}{0.6} = 603 \text{ kW}$$

نلاحظ أن هذه القيمة أكبر من الاستطاعة القادمة من العنفة الريحية (P_m) .

(d) السرعة التزامنية:

$$n_s = 120 \times \frac{60}{6} = 1200 \text{ r/min} \Leftrightarrow n_s = 120 \times \frac{F}{P}$$

$$T_m = \frac{9.55 P_r}{n_s} = 9.55 \frac{603000}{1200} = 4.8 \text{ kN.m}$$

e) الاستطاعة الكهربائية الداخلة للدائر تعطى بالعلاقة $\frac{F_2}{F} \cdot P_r$

$$\frac{24}{60} \times 603 \text{ (kW)} = 241 \text{ kW}$$

f) مفايد الدائر (جول) $P_{jr} = 3 \text{ kW}$ لذا فإن الاستطاعة الكهربائية الداخلة للدائر P_{er} تساوي:

$$P_{er} = 241 + 3 \text{ kW} = 244 \text{ kW}$$

وعليه فإن الاستطاعة الكهربائية P2 المستجرة بواسطة المبدل الإلكتروني:

$$P_2 = P_{er} + P_c = 244 + 2 = 246 \text{ kW}$$

g) الاستطاعة الكهربائية المقدمة من ثابت المولد والمحقونة في الشبكة العامة:

$$P_e = P_r - P_{js} - P_F = 603 - 12 - 7 = 584 \text{ kW}$$

نلاحظ هنا الاستطاعة الكهربائية P_e المقدمة للشبكة العامة تتجاوز الاستطاعة القادمة من العنف الريحية PL والمطبقة على محور الدوران. السبب في ذلك هو أنه عند العمل بنظام تحت التزامن، يستجر الدائر ذي التردد 24Hz استطاعة من الشبكة ويحقنها في الثابت إضافة للوزم المطبق على محور الآلة.

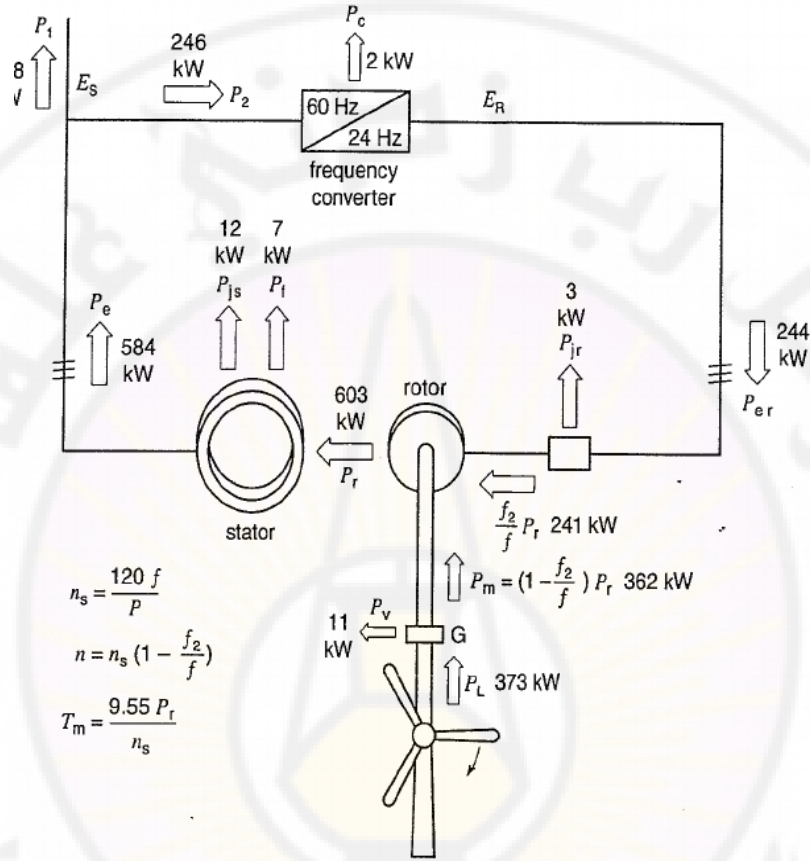
h) الاستطاعة الصافية P1 المقدمة مثلاً للشبكة:

$$P_1 = P_e - P_2 = 584 - 246 = 338 \text{ kW}$$

الاستطاعة المقدمة من العنف $P_L = 373 \text{ kW}$.

مردود مجموعة العنف الريحية:

$$\eta = \frac{P_1}{P_L} = \frac{338}{373} = 90.6\%$$



الشكل (4-27) توزيع الاستطاعات المحولة والمنقولة والفاقد

مثال محلول (4-4)

بفرض أننا ربطنا محرك تحريضي قفص سنجابي ثلاثي الطور إلى منبع توتر 440 فولت. الشكل (4-28). تم تدويره عند السرعة 1845 r/min أي فوق السرعة التزامنية بمقدار 45 r/min. الانزلاق عندئذ سيكون :

$$S = \frac{(n_s - n)}{n_s}$$

$$S = \frac{(1800 - 1845)}{1800} = -0.025$$

وعليه إذا نظرنا للدائرة المكافئة لهذا المحرك ذي الاستطاعة 5HP والذي يعمل كمولد نجد:

$$jx = (jx_1 + jx_2)(total\ leagcagereac\ tan\ ce) = 6\Omega$$

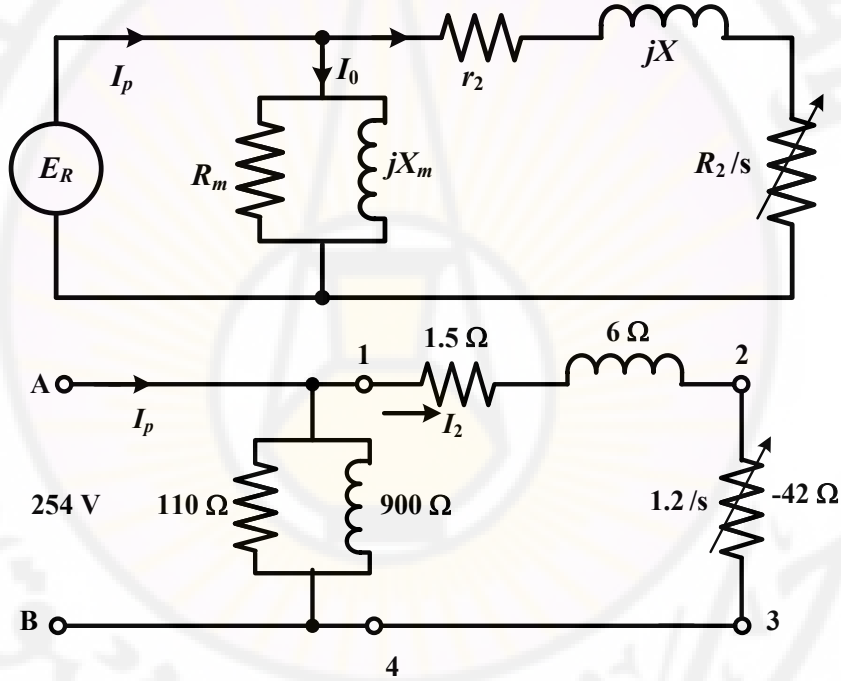
$$r_1 = stator\ resis\ tan\ ce = 1.5\Omega$$

$$r_2 = rator\ resis\ tan\ ce = 1.2\Omega$$

$$R_m = no - load\ resis\ tan\ ce = 900\Omega$$

قيمة المقدار $\frac{R_2}{s}$ في الدارة المكافئة عند هذا الانزلاق:

$$\frac{R_2}{s} = 1.2(-0.025) = -48\Omega$$



الشكل (28-4) الدارة المكافئة للمحرك التحريضي

المقاومة السالبة تشير أن الاستطاعة تمر من الدائر إلى الثابت، بدلاً من الوضع عند العمل كمحرك من الثابت إلى الدائر. بالعودة للشكل أعلاه يمكن حساب القيم التالية:

1- المقاومة الصافية (Net) للجزء من الدارة المكافئة (4-3-2-1) .

$$R_n = -48 + 1.5 = -46.5\Omega$$

2- ممانعة الجزء (1-2-3-4) :

$$Z = \sqrt{R_n^2 + x^2} = \sqrt{(-46.5)^2 + 6^2} = 46.88\Omega$$

3- التيار المار في الفرعة (1-2-3-4) هو:

$$I_1 = \frac{E}{Z} = \frac{254}{46.88} = 5.42 A$$

-4 الاستطاعة الفعالة المقدمة للدائر :

$$P_r = I_1^2 \frac{R_2}{s} = (5.42)^2 (-48) = -1410 Watt$$

هذه الاستطاعة السالبة تعني أنها قادمة من الدائر باتجاه الثابت .

-5 المفايد في الدائر $I^2 R$:

$$P_{jr} = I_1^2 \sqrt{2} = (5.42)^2 \times 1.2 = 35.2 Watt$$

-6 الاستطاعة الميكانيكية المقدمة للمحور تساوي P_r مضافاً إليها P_{jr} (مفايد الدائر):

$$P_m = P_r + P_{jr}$$

$$P_m = 1410 + 35.2 = 1445 W$$

-7 مفايد جول في الثابت $I^2 R$ هي :

$$P_{js} = I_1^2 r_1 = (5.42)^2 \times 1.5 = 44.1 W$$

-8 المفايد الحديدية ومفايد الاحتكاك هي :

$$P_F = P_0 = \frac{E^2}{R_m} = \frac{(254)^2}{900} = 71.7 W$$

-9 الاستطاعة الفعالة المقدمة للخط المرتبط عليه المحرك:

P_e الاستطاعة المقدمة من الدائر إلى الثابت مطروحاً منها المفايد:

$$P_e = P_r - P_{js} - P_F - P_0$$

$$P_e = 1410 - 44.1 - 71.7 = 1294 W$$

وعليه فإن الاستطاعة P_e للأطوار الثلاث تساوي:

$$3 \times 1294 = 3882 W$$

-10 الاستطاعة الردية المستجرة (المستهلكة) بالممانعة التسريبيه :

$$Q_1 = I_1^2 X = (5.42)^2 \times 6 = 176 Vars$$

-11 الاستطاعة الردية المستهلكة بممانعة المغنطة هي:

$$Q_2 = \frac{E^2}{X_m} = \frac{(254)^2}{110} = 586 Var$$

-12 الاستطاعة الردية الإجمالية المستجرة من قبل المحرك:

$$Q = Q_1 + Q_2$$

$$Q = 176 + 586 = 762 Vars$$

13- الاستطاعة الظاهرية على طرفي المولد التحريضي (A-B) :

$$S = \sqrt{P_e^2 + Q^2} = \sqrt{(1294)^2 + (762)^2} = 1502VA$$

14- تيار الخط الرئيسي I_p :

$$I_p = \frac{S}{E} = \frac{1502}{254} = 5.91A$$

15- عامل الاستطاعة على طرفي المولد التحريضي:

$$\cos \varphi = \frac{P_e}{S} = \frac{1294}{1502} = 86.1\%$$

16- مردود المولد التحريضي:

$$\eta = \frac{\text{useful electric power}}{\text{mechanical input}} = \frac{P_e}{P_m}$$

$$\eta = \frac{1294}{1445} = 0.895 = 89.5\%$$

17- الاستطاعة المطلوبة لجر المولد التحريضي بالحصان:

$$P_m = 3 \frac{P_m}{746} = 3 \times \frac{1445}{746} = 5.81HP$$

18- العزم المستخلص (Exerted) من محرك الجر:

$$T = \frac{9.55P}{n} = \frac{9.55 \times 1445}{1854} = 22.3N.m$$

4-6 مولد التيار المستمر Direct Current Generator

من المعروف أن القوى المحركة الكهربائية المتولدة ضمن ملفات الآلات عموماً هي توترات متناوبة، تعمل جميع الآلات داخلياً كآلة ذات تيار متناوب، لأن النواقل تدور ضمن حقل مغناطيسي متناوب شمالي أو جنوبي. آلة التيار المستمر تعمل على تبديل التيارات المتناوبة في الملفات إلى تيار مستمر بواسطة المجمع الميكانيكي وينجز هذا المجمع عمله عن طريق زلق فحمت متوضعة في محور معين للآلة على نواقل نحاسية يمر فيها التوتر المتناوب إحدى الفحمت ترى فقط القطبية الموجبة للتوترات في الملفات، والفحمة المقابلة (المسفرة) ترى أيضاً القطبية السالبة للتوترات.

فرق الكمون أو التوتر بين الفحمتين هو التوتر المستمر (ذي القطبيتين السالبة والموجبة). تسبب عملية الانزلاق لهذه الفحمت على النصلات في المجمع ظهور الشرر الكهربائي وبالتالي المفاقد الكهربائية، والحاجة لإجراء صيانة دائمة للفحمت والمجمع وبالتالي زيادة التكلفة. عادةً كان هذا النوع من الآلات يستخدم كمحرك، نظراً للإمكانيات الدقيقة لتنظيم سرعة دوران هذا النوع من المحركات. قد بدأ باستخدامها في العنفات الريحية بعد عام 1980 وذلك ضمن مجال محدود لاستطاعات محدودة وصغيرة. وخاصة في المواقع المعزولة والمستقلة للعنفات. آلة التيار المستمر التقليدية إما أن تكون ذات تحريض مستقل بملفات تسلسلية أو تفرعية لتوليد الحقل المغناطيسي.

آلات التيار المستمر الحديثة تصمم حالياً بمغناط دائمة للحد من متطلبات نظام التحريض. في هذه الحالة الدائر يحمل الأقطاب الدائمة والثابت يشكل المتحرض الملفوف. هنا يولد الثابت تيارات متناوبة ، يتم من بعد تقويمها بجسور التقويم المعروفة. مثل هذه الآلات لا تحتاج للمبدل والفحمت، وهذا يزيد الوثوقية والمتانة. أقصى استطاعة لمثل هذه الآلات لا يزيد عن 100kW تبعاً لاستطاعة المغناط الدائمة.

4-7 المولدات التزامنية (SG) Synchronous Generator

4-7-1 آلية عمل المولد التزامني والدائرة المكافئة

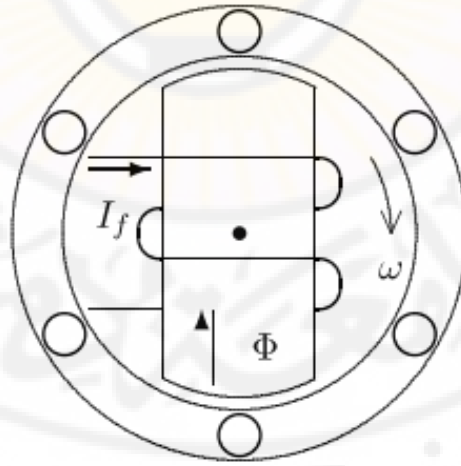
المولدات التزامنية هي التي تولد معظم الطاقة الكهربائية التقليدية المولدة في العالم، ويتم تركيبها أيضاً في مصادر الطاقة التقليدية وذلك في العنفات الريحية. تعمل الآلة عند سرعة دوران ثابتة لتعطي توتر بتردد ثابت، وهي غير مؤهلة للعمل في العنفات الريحية ذات السرعات المتغيرة إذا لم تزود بدارات أو جسور إلكترونيات القدرة الكهربائية. كما أن الآلة التزامنية التقليدية تحتاج لمنبع تيار مستمر لدائرة التحريض. يستخدم فيها حلقات انزلاق وفحمت وهذا يضعف الوثوقية للآلة.

الآلة التزامنية مثالية لدى استخدامها في الأنظمة ذات سرعة دوران ثابتة مثل المحطات الشمسية الحرارية. الآلة التزامنية، عند استخدامها في الأنظمة المرتبطة على الشبكة، تمتاز عن الآلة التحريضية، ذلك أنها لا تحتاج لاستطاعة ردية من الشبكة كما في حالة المولد التحريضي، وهذا يسبب جودة في التغذية للطاقة، وهذه الخاصة تظهر بوضوح أكثر في المزارع الريحية

المرتبطة بشبكة عامة ذات سعة صغيرة وذات توتر منخفض. لهذا السبب بعض الشبكات العالمية في السنوات 1980 استخدمت المولدات التزامنية. حالياً المحطات الريحية تربط لشبكات قوية، وخطوط ربط قصيرة وغالباً ما تستخدم المولد التحريضية.

الشكل (4-29) أدناه يوضح البنية العامة للمولد التزامني، لدينا دائر ملفوف يغذى من منبع توتر مستمر عبر حلقات انزلاق، يولد هذا التيار المستمر الفيض المغناطيسي Φ ، يتشابك هذا الفيض المغناطيسي مع ثلاث ملفات متماثلة ومتناظرة، بينها فرق طور قدره 120 درجة كهربائية وينتج عند دوران الآلة ثلاث توترات متناوبة متساوية مزاحة عن بعضها البعض بمقدار 120 درجة كهربائية.

نادراً ما يستخدم المولد التزامني بالأنظمة الريحية المزودة بعلبة سرعة. على كل حال، تصميم المولدات التزامنية ذات السرعات البطيئة غالباً ما يشكل ميزات في العنفات الريحية ذات القيادة المباشرة Direct-drive، وذات السرعات المتغيرة Variable Speed. يتم في هذه الأنظمة غالباً ربط المولد إلى الشبكة عبر جسور من المبدلات الإلكترونية، ويحرض أو يهيج الدائر من منبع مستقل أو مغناطيس دائم .



الشكل (4-29) تبسيط للبنية العامة للمولد التزامني

سرعة الدوران التزامنية تعطى بالعلاقة:

$$n_s = 60 \frac{f_1}{P} \quad \dots (50-4)$$

حيث:

f1: تردد التيار الثلاثي الطور.

P: عدد أزواج الأقطاب للثابت.

سرعة الدوران عند تردد 50Hz وقطبين (P=2) تكون 3000r.p.m ومن أجل تردد 60Hz تصبح 3600r.p.m .

دائر الآلة التزامنية له نفس سرعة حقل الثابت. القطب الشمالي للدائر دائماً يتبع القطب الجنوبي للثابت. إذا ما عملت الآلة كمولد في العنفات الريحية، السرعة التزامنية للحقل الدوار في الثابت توصف سرعة الدائر على كل حال، هناك أيضاً انزياح بين الأقطاب للدائر والثابت. الآن أقطاب الدائر تتحرك أمام (Ahead) أقطاب الثابت. زاوية الحمل تغير إشارتها من سالب إلى موجب. تزداد قيمة زاوية الحمل θ كلما زادت القوة التي تجر الدائر. سرعة الدوران تبقى ثابتة، أي أن الدائر يدور بالتزامن مع تردد الثابت. سرعة الدوران ns للدائر تتغير فقط مع التردد f للحقل الدوار أو عدد أزواج الأقطاب P2.

الحقل الدوار الناتج عن الدائر يولد أو يحرض توتر في الثابت، نطلق عليه التوتر الداخلي التزامني V_p أو f.e.m القوة المحركة الكهربائية الداخلية (Synchronous internal Voltage). القيمة الفعالة لهذا التوتر المتحرض تتناسب كما نعلم مع تيار التحريض I_E في الدائر $V_p \sim I_E$ حسب منحنى اللاحمل للمولد التزامني المعروف. وهذا التوتر يمكن تغييره عند سرعة ثابتة بتغير تيار التحريض، ويتغير أيضاً مع سرعة الدوران عند تيار تحريض ثابت.

المعادلة النازمة للدائرة المكافئة الموصفة لتيار الثابت I_1 وتوتر الثابت V_1 لأحد الأطوار تعطى بالشكل:

$$\underline{V}_1 = E_p + \underline{I}_1.R_1 + \underline{I}_1.j(X_h + X_\sigma) \quad \dots (51-4)$$

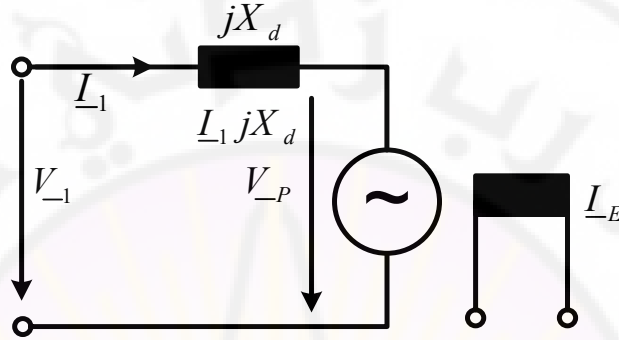
أثر مقاومة الثابت R_1 يمكن إهماله في الآلات الكبيرة، الممانعة المفيدة (Useful reactance) X_h و ممانعة التسريب (Leakage reactance) X_σ يمكن توحيدهما في ما نطلق عليه الممانعة التزامنية X_d (Synchronous reactance).

$$X_d = X_h + X_\sigma \quad \dots (52-4)$$

وعليه فإن معادلة الدائرة المكافئة حسب الشكل (4-30) تصبح :

$$\underline{V}_1 = \underline{V}_p + \underline{I}_1.jX_d \quad \dots (53-4)$$

تستطيع الآلة التزامنية توليد الاستطاعة الردية إذا لزم ذلك، وهذه أهم ميزة للآلات التزامنية مقارنة مع الآلات التحريضية التي تطرقنا لها.



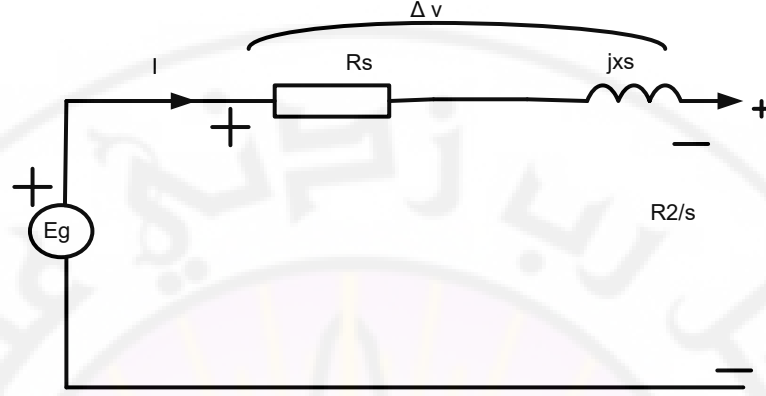
الشكل (4-30) الدارة المكافئة المبسطة لأحد الأطوار لمولد تزامني ذو دوائر اسطوانية كلما انخفضت سرعة الدوران n كلما احتجنا لزيادة عدد الأقطاب P للحفاظ على تردد الشبكة العامة، وفي العنفات الريحية يمكن الاستغناء عن علبة السرعة بزيادة عدد الأقطاب. مما يزيد من كلفة التصنيع، وعليه فإن تكلفة المولد بدون علبة سرعة، وسرعة دوران منخفضة تزداد مقارنة مع العمل بمولدات ذات سرعات عالية ووجود علبة سرعة. لدى ربط المولد التزامني على الشبكة، سوف يتم تثبيت التوتر V والتردد F . لذا فإن القوة المحركة المغناطيسية EMF سوف تختلف عن التوتر V بالمطال والزاوية وينتج فرق توتر:

$$\Delta V = E - V \quad V/\text{phase} \quad \dots (54-4)$$

فرق التوتر يسبب نشوء تيار يكون موجباً إذا خرج من المولد ويساوي :

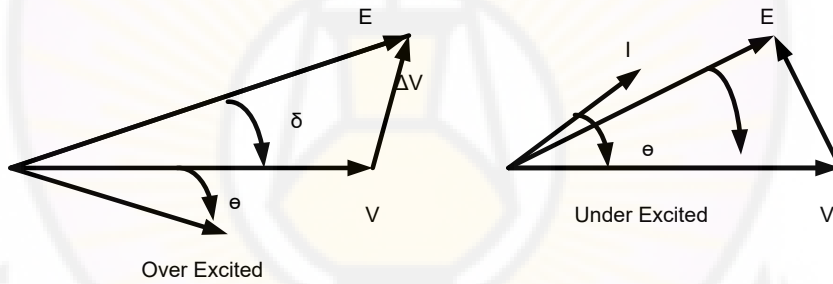
$$I = \frac{\Delta V}{Z_s} \quad A \quad \dots (55-4)$$

العلاقة بين E, V, I نوضحها بشكل عام بالشكل (4-31)، E تتناسب مع تدفق الدائر، وبدوره تتناسب مع تيار الحقل المار بالدائر، إذا كان الحقل نسبياً صغيراً، E ستكون أصغر من V وهذا نسميه العمل تحت التحريض Underexcitation



الشكل (4-31) الدارة المكافئة لأحد الطوار للمولد التزامني الثلاثي الطور

ولدى كون E أكبر من V تعمل الآلة فوق التحريض Overexcitation و E تتقدم عن V بالزاوية δ ، بينما سيتأخر التيار أو يتقدم بالزاوية θ .



الشكل (4-32) المخطط الشعاعي لأحد الأطوار لآلة تزامنية ثلاثية الطور ، - العمل تحت

التزامن والعمل فوق التزامن

وسنوضح فيما يلي سلوك الآلة التزامنية التي تعمل كمولد تحت الحمل في حالتين، حالة حمل مستقل، وحالة ربط المولد على قضبان توزيع كبيرة وبيان كيف تعمل الآلة التزامنية على حقن الاستطاعة الردية في الشبكة أو العمل عند عامل استطاعة متقدم.

2-7-4 سلوك المولدات التزامنية تحت الحمل

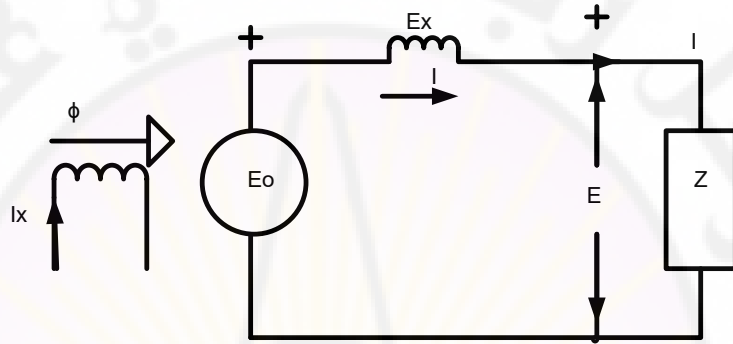
Behavior of synchronous generator under load

يعتمد سلوك المولد التزامني على طبيعة الحمل المطبق عليه، والأحمال إما أن تكون أحمال مستقلة (Isolated) تغذى من مولد وحيد أو مجموعة مولدات مربوطة على النفرع. أو أن يربط المولد على قضبان توزيع لانتهائية (Infinite Bus-Bar). سوف نوضح ذلك في الفقرات التالية.

4-8-2-1 ربط المولد التزامني على حمل مستقل

connecting synchronous Generator on Isolated load

نفرض وجود مولد تزامني ثلاثي الطور، يغذي حمل مستقل ذو عامل استطاعة متأخر، كما في الشكل (4-33) ، نرى في الشكل الدارة المكافئة للنظام .

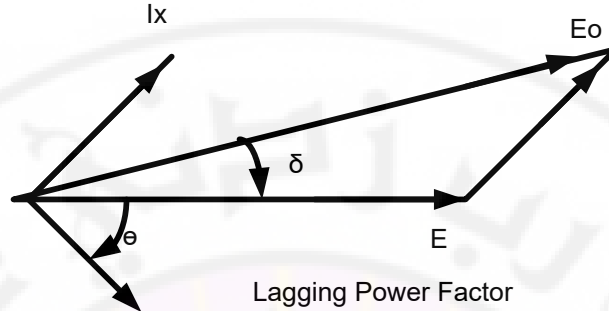


الشكل (4-33) الدارة المكافئة للمولد التزامني والحمل

كي نرسم المخطط الشعاعي لهذه الدارة سوف نتبع الحقائق التالية :

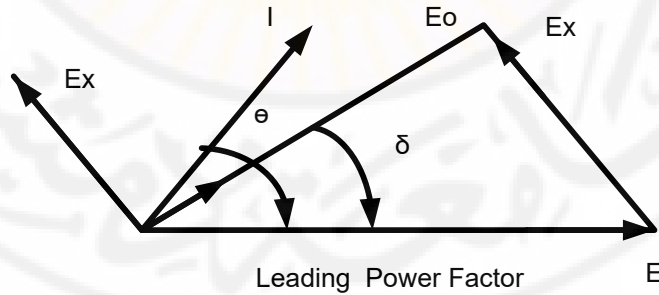
- 1- التيار المار بالحمل I متأخر عن توتر خرج المولد E ، بمقدار الزاوية θ .
 - 2- عامل الاستطاعة للحمل $\cos\theta$.
 - 3- يتقدم التوتر E_x الواقع على ممانعة المولد التزامنية (Synchronous Reactance) عن التيار I ، بالزاوية 90° درجة كهربائي،

$$E_x = j I X_s \dots\dots (4-56)$$
 - 4- التوتر E_o الناتج عن الفيض المغناطيسي للدائر، أو التدفق المغناطيسي Φ ، يساوي المجموع الشعاعي لتوتر الخرج $E_x + E$
 - 5- التوترات E_o و E_x هي توترات تنشأ داخل الآلة التزامنية ولا يمكن قياسها بشكل مباشر
 - 6- التدفق المغناطيسي Φ ناتج عن تيار التحريض I_x
- الشكل (4-34) بين المخطط الشعاعي لحمل ذو عامل استطاعة متأخر ، التوتر المولد من الفيض المغناطيسي E_o أكبر من التوتر على خرج الآلة E .



شكل (4-34) المخطط الشعاعي لحمل ذو عامل استطاعة متأخر

- عندما يكون الحمل سعوي، يسبق التيار I عندئذ أو يتقدم عن التوتر E بالزاوية θ شكل (4-35). التوتر E_x المتواجد عبر ممانعة المولد E_x ما زال متقدماً ب 90° درجة عن التيار I . والتوتر E_0 يساوي دائماً مجموع $E_x + E$. عندئذ توتر خرج المولد E سيكون أكبر من E_0 . هذا يعني أن الممانعة التزامنية X_s تدخل باهتزاز طنين) مع الممانعة السعوية للحمل. إن زيادة توتر المرباط في خرج المولد لا تعني زيادة الاستطاعة في الخرج. إذا كان الحمل سعوياً بشكل كامل، عندئذ سوف يرتفع توتر الخرج بشكل كبير، وذلك عند تيار تحريض صغير. هذا ما نطلق عليه، الحالة تحت التحريض Under-Excitation وهي ظاهرة غير مرغوب فيها.



شكل (4-35) المخطط الشعاعي لحمل ذو عامل استطاعة متقدم

2-2-8-4 ربط المولد التزامني على قضبان توزيع لانهائية

Connecting synchronous Generator on Infinite Bus-Bar

يعتبر ربط المولد التزامني على قضبان الشبكة العامة أكثر شيوعاً من حالة ربط المولدات على أحمال معزولة. القضبان اللانهائية هي عبارة عن نظام قوي، يفرض على المولد التوتر والتردد،

ولدى تحقيق التزامن والربط على الشبكة يصبح المولد جزء من الشبكة، ويصبح من المستحيل تحديد نوعية الحمل (كبيراً كان أو صغيراً) هل هو ذو صفة أومية أو تحريضية أو سعوية [13].

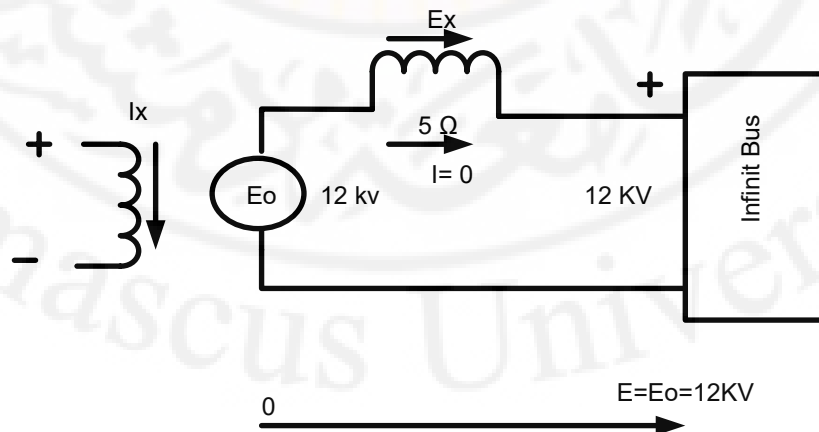
إذا ما هو الشيء الذي يحدد قيمة الاستطاعة المحقونة من المولد الحديث الربط مع الشبكة العامة التي قد تضم مئات المولدات؟ كي نعرف ذلك، يجب ألا ننسى أن التوتر والتردد على طرفي المولد سيبقى ثابتاً وليس أمامنا سوى تغيير بارامترين من بارامترات المولد وهما:

1. تيار التحريض I_x
 2. قيمة العزم الميكانيكي المطبق على محور المولد والقادم من العنف البخارية أو الغازية أو الريحية.
- سوف نناقش الحالتين

3-2-8-4 تأثير تغيير تيار التحريض - قضبان لانهاية

Effect of varying the excitation current, Infinite Bus-Bar

لحظة ربط المولد التزامني على الشبكة العامة، التوتر المتولد ضمن الآلة E_o سيصبح مساوي لتوتر مرابط الخرج E ، وهو بالتالي توتر بارات الشبكة العامة، وسيكون من نفس الطور (هذا من شروط التزامن والربط على الشبكة) والشكل (4-36) يبين ذلك. نلاحظ عدم وجود فرق كمون عبر الممانعة التزامنية، وبالنتيجة فإن تيار الحمل I سيكون مساوي للصفر. المولد الذي ربط على الشبكة سوف لن يضح أية استطاعة في الشبكة، وهو في حالة طفو على القضبان Floating.



الشكل (4-36) المخطط الشعاعي لحظة ربط المولد على الشبكة العامة المولد طاف على الشبكة

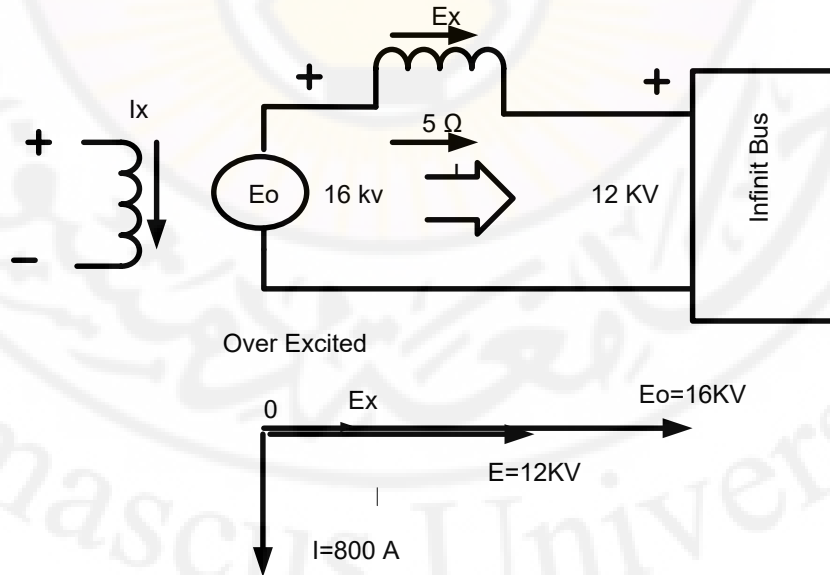
الآن إذا عملنا على زيادة تيار التحريض، سوف يزداد التوتر المتولد ضمن الآلة E_o ، وسوف ينشأ فرق كمون على الممانعة التزامنية X_s بقيمة تساوي E_x وتعطى بالعلاقة:

$$E_x = E_o - E \quad \dots (57-4)$$

وعليه سوف يمر تيار I في الدارة، يعطى بالعلاقة :

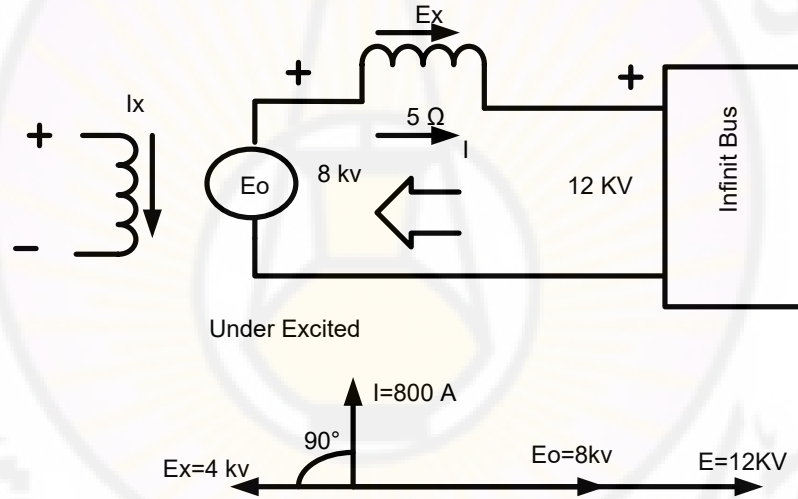
$$I = (E_o - E) / X_s \quad \dots (58-4)$$

بما أن الممانعة التزامنية، عبارة عن حثية صرفة، فإن التيار I سوف يتأخر عن التوتر E_x بمقدار 90° درجة، والشكل (4-37) يوضح ذلك. أي أن التيار I خلف التوتر E بمقدار 90° درجة، هذا يعني أن المولد التزامني يرى النظام (الشبكة العامة) كممانعة تحريضية، Inductive reactance ، بالنتيجة عندما نزيد التحريض over excite ، المولد التزامني سوف يقدم استطاعة ردية للشبكة، تزداد الاستطاعة الردية مع زيادة تيار التحريض المستمر في دارة التحريض، وهذا بعكس ما كنا نتوقع، من أن زيادة تيار التحريض قد تزيد من الاستطاعة الفعالة المحقونة بالشبكة.



الشكل (4 - 37) عمل المولد التزامني فوق التحريض over excite

إذا عملنا الآن على تخفيض تيار التحريض I_x . عندئذ التوتر E_o ستصغر قيمته ويصبح أصغر من التوتر E . نتيجة لذلك فإن شعاع التوتر الذي يساوي $(E_o - E)$ سيصبح سالباً، وسيتجه نحو اليسار كما في الشكل (4-38). وحيث أن التيار I دائماً يساوي $I = E_x/X_s$ ، فإنه سيتأخر ب 90 درجة خلف E_x ، هذا يضع التيار I متقدماً بمقدار 90 درجة عن التوتر E . مما يعني أن المولد يرى النظام (الشبكة العامة) كمكثف. بالنتيجة عندما نخفض التحريض Under Excited للمولد سوف يستجر استطاعة ردية من الشبكة العامة. هذه الاستطاعة الردية المستجرة تولد جزءاً من الحقل المغناطيسي اللازم للآلة، والجزء الباقي من الحقل يغذى من تيار التحريض I_x .



الشكل (4-38) المولد التزامني تحت التحريض Under Excited

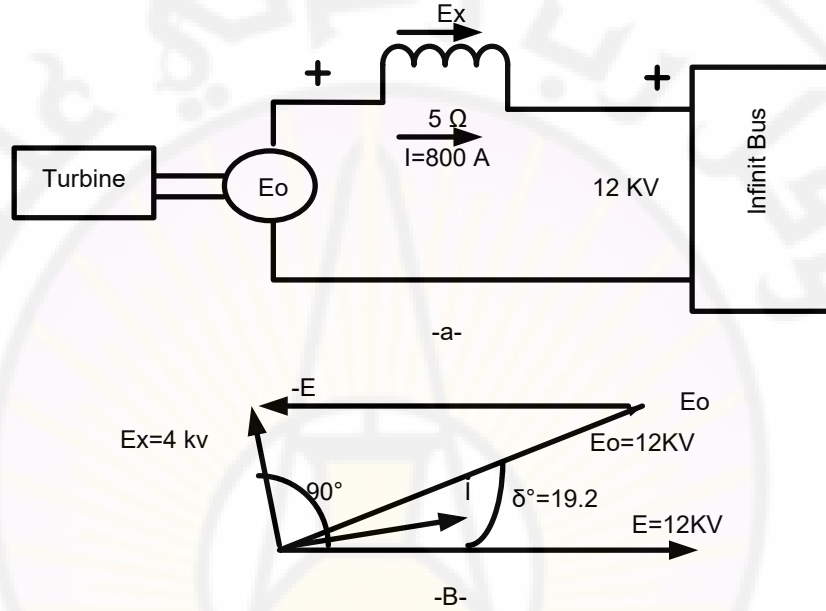
3-3-8-4 تأثير تغيير العزم الميكانيكي - قضبان لانهائية

Effect of varying the mechanical torque, Infinite Bus-Bar

لنعود إلى لحظة ربط المولد التزامني على الشبكة العامة، وهو في حالة الطفو على الخط، حيث أن E_o ، E ، توترات متساوية ومن نفس الطور. إذا فتحنا البخار للعنفة البخارية أو الغازية أو زيادة في سرعة الرياح، مما يعني زيادة العزم المطبق على محور العنفة أو المولد، عندئذ سوف يبدأ الدائر بالتسارع، التوتر الداخلي للمنبوبة التزامنية E_o ، سوف يزداد ليصل لقيمته العظمى، شعاع التوتر E_o سوف يتقدم عن شعاع التوتر E ، وذلك بمقدار الزاوية δ . انظر

الشكل (39-4). في هذه الحالة، حتى ولو كانت التوترات E, E_0 ، متساوية بالقيمة المطلقة، فإن سوف ينشأ بينهما فرق كمون بحيث :

$E_x = E_0 - E$ كما هو مبين بالشكل (39-4).



الشكل (39-4) يبين العنفة التي تجر المولد ، ثم المخطط الشعاعي وزاوية العزم δ

التيار I ، سيعود للمرور عند زاوية متأخرة 90° درجة خلف E_x ، لكن هذه المرة سيكون من نفس طور التوتر E ، مما يسبب بحقق استطاعة فعالة في الشبكة. نتيجة العزم المطبق على المحور الدائر سوف يستمر الدائر بالدوران والتسارع، وسوف تستمر الزاوية δ بالانفراج diverge، وسوف تزداد الاستطاعة المحقونة بالشبكة. الاستطاعة المحقونة بالشبكة العامة تكافئ الاستطاعة الميكانيكية المطبقة على محور الدوران للعنفة وسوف يتوقف تسارع الدائر. كما سيكسب المولد العمل عند السرعة التزامنية، وستبقى زاوية العزم δ ثابتة بين التوترين E_0 ، E . وهنا نذكر بأنه تم توليد فرق كمون بين توترين متساويين بينهما فرق طور .

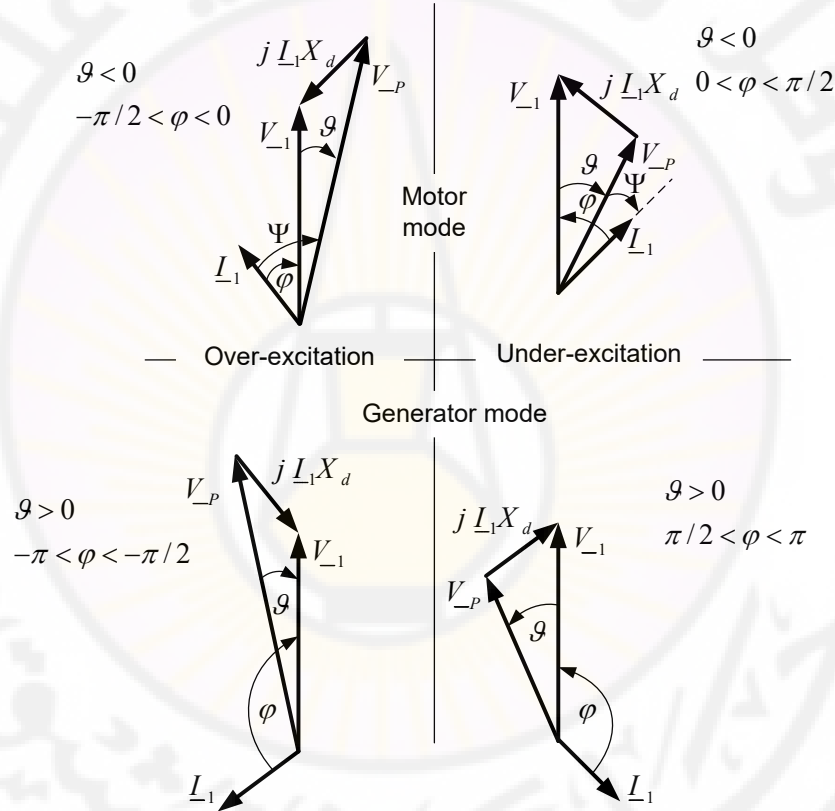
(في الشكل فرق الكمون الحاصل $E_x = 4$ كيلو فولت ، وقيمة توتر كل من E_0 ، E يساوي 12 كيلو فولت).

مما سبق أعلاه نلاحظ أن تيار الثابت لآلة التزامنية يستطيع المرور عند مختلف زوايا الطور (all phase angles). وهذا ما كنا نطلق عليه العمل في الإحداثيات الأربعة (Four-quadrant)

Operation) . الشكل (4-40) أدناه يبين شعاعياً إمكانية عمل الآلة ذات الدائر الاسطواناني في الإحداثيات الأربعة أو حالات التشغيل الأربعة وهي:

1- العمل كمحرك إما حالة فوق التحريض Over excitation أو تحت التحريض Under .excitation

2- العمل كمولد أيضاً نفس الحالتين ، فوق التحريض أو تحت التحريض.



الشكل (4-40) المخطط الشعاعي للآلة التزامنية ذات الدائر الاسطواناني في الإحداثيات الأربعة

إن العلاقات النازمة للاستطاعة الفعلية P والردية Q المقدمة من كل طور من المولد، مبينة أدناه وهي تابعة لكل من التوتر V والقوة المحركة الكهربائية E والزاوية δ بينهما.

$$P = \frac{|E||V|}{X_s} \sin \delta \quad \text{W/phase}$$

$$Q = \frac{|E||V| \cos \delta - |V|^2}{X_s} \quad \text{var/phase} \quad \dots\dots (59-4)$$

4-8 المولدات التزامنية ذات المغناطيس الدائمة

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG),

يتكون هذا المولد كما في المولد التزامني ذو الدائر الملفوف، والمولد التحريضي، من ثلاث ملفات في الثابت، ومجموعة مغناطيس دائمة في الدائر، وهي عموماً تستخدم للمولدات الريحية متوسطة الاستطاعة، وتمتاز ببساطتها وفعاليتها، كما أن وزنها الاجمالي وحجمها ينخفض، وذات مردود مرتفع، وذاتية التحريض. كثافة التحريض في الثغرة الهوائية يمكن رفعها وذلك بزيادة سماكة قوة المغناطيس. هذا ويمكن تنظيم كثافة الفيض المغناطيسي بالعلاقة التالية [6]:

$$B_m = B_r \frac{k_{leak}}{1 + \frac{\mu_r * g * k_{carter}}{h_m}} \dots (60-4)$$

حيث أن :

H_m سماكة المغناطيس

B_r : كثافة الفيض المغناطيسي المتبقي في المغناطيس والذي يقارب 1.23 T .

G : طول الثغرة الهوائية الأصغري

μ_r : السماحية النسبية للمغناطيس relative Permeability، ومن أجل مغناطيس نوع NdFe35 تبلغ 1.09981

$K_{leakage}$ عامل التسريب وهو عادة بحدود 0.9 إلى 1

K_{carter} عامل كارتير ، ويتراوح بين 1.0 و 1.1

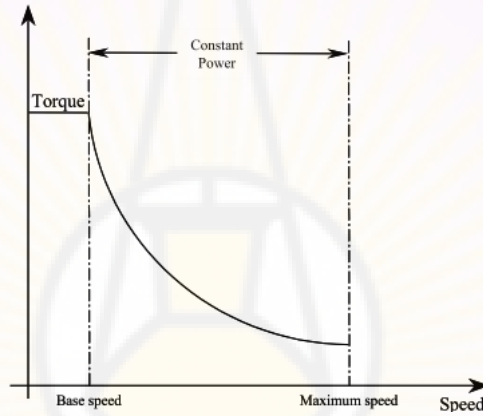
يبلغ مردود هذه الآلة 97% وهو أفضل من مردود المولد التحريضي الذي يبلغ 85% . وفي السنوات الأخيرة نظراً لمتانته وصلابته ازدادت الاستطاعات المركبة وبلغت في بعض الشركات للقيم 4.25 ميغا وات .

4-9 المولد ذو الممانعة المتغيرة

Switched Reluctance Generator (SRG)

بدأ هذا المولد الجديد بأخذ حيز من تطبيقات المولدات الريحية، وخاصة المولد ذو التركيب 6/4 بالنسبة لعدد أقطاب الثابت والدائر. الشكل (4-41) يبين خواص العزم السرعة لمثل هذا النوع من الآلات.

يتكون الدائر من هيكل صلب، بدون ملفات، ينشأ الحقل المغناطيسي في الدائر من تيار الثابت، كما في المحرك التحريضي ذو القفص السنجابي. يبين الشكل (4-42) الشكل العام لهذا المولد.



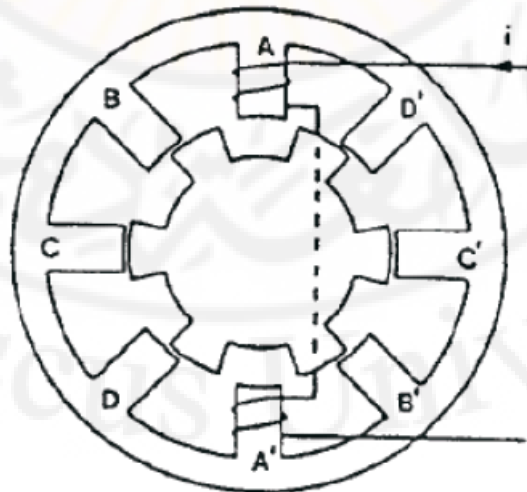
الشكل (4-41) خواص العزم السرعة للمولد ذو الممانعة المغناطيسية

تمتاز هذه المولدات بصلابتها وبساطتها، وتحملها لحالات القصر، وسهولة التحكم بها وخواص العزم السرعة التي تتمتع بها، حيث يمكنها العمل عند استطاعة ثابتة ضمن مجال كبير من تغيير السرعة. بالمقابل لها العديد من المساوئ وأهما وزنها الزائد، والضجيج المرتفع الصادر عنها، وقفزات العزم العابرة، والتداخل الكهرومغناطيسي EMI الناشئ. لكن يمكن القول انها ستكون احد الحلول مستقبلاً [12].



الشكل (4-42) شكل الثابت والدائر للمولد ذو المغناطيسية المتغيرة

المولد ذو المغناطيسية المتغيرة SRG ، ذو أقطاب بارزة في الدائر والثابت، ملفات الأطوار تلف على أقطاب الثابت، كل ملف يلف على أحد الأقطاب، كما في الشكل (4-43) [14] مبدأ العمل بسيط ويمكن فهمه في حالة العمل كمحرك، فرضاً تم تحريض الملف $D-D'$ سوف يتم سحب أو جر الدائر باتجاه عقارب الساعة حتى تقابل محور الفيض المغناطيسي الناشئ الآن إذا تم فصل التغذية عن الملف السابق وغذي الملف الذي يليه، سوف يتابع الدائر دورانه باتجاه محور الفيض الجديد ، $A-A'$ ، ونرى أن الآلة تعمل كمحرك. لدى تدوير الدائر بعزم ميكانيكي خارجي ، العزم المتولد سوف يقلل من ممانعة الملفات Inductance ونحصل على وضعية التوليد نتيجة تغيير الزاوية بين الدائر وملفات الثابت.

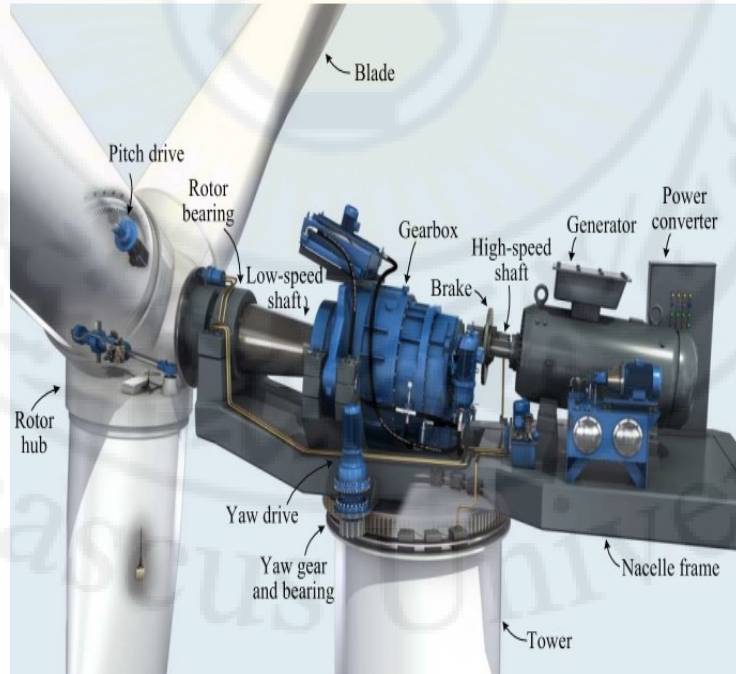


شكل (4-43) مقطع عرضي لآلة ذات مغناطيسية متغيرة [14]

- الجدول التالي يبين المولدات المعتمدة من قبل أكبر الشركات العالمية للعنفات الريحية

	Name of company	MW	Generation system
Vestas	Vestas Denmark	3	PMSG
SINOVEL	Sinovel China	3	DFIG
GOLDWIND	Gold wind China	2.5	PMSG
Gamesa	Gamesa Spain	2	DFIG
ENERCON	Enercon Germany	2	PMSG
GE Energy	GE energy United States	3.6	DFIG
SUZLON	Suzlon India	2.1	DFIG
SIEMENS	Siemens Germany	3.3	PMSG
MINGYANG WIND POWER	Ming yang wind power/China	2.5-3	PMSG
THE SWITCH	Theswitch China	3.8	PMSG

والشكل (44-4) يوضح البنية العامة للعنفة الريحية ومكوناتها الأساسية



الشكل (44-4) البنية العامة للعنفة الريحية ومكوناتها الأساسية



الفصل الخامس ربط العنفات الريحية على الشبكة الشبكة العامة وتبادل
الاستطاعة

Connecting wind farm to network & Power Transfer



5-1 مقدمة

تصنف مصادر توليد الطاقة الكهربائية إلى نوعين، النوع الأول وهو النوع التقليدي الناتج عن محطات التوليد البخارية ، النووية أو المائية. حيث تستخدم عموماً المولدات التزامنية لتوليد الطاقة الكهربائية وتعطي توتراً متناوباً بتردد 50 أو 60 هرتز. كما نشأت حديثاً مصادر الطاقات المتجددة (الشمسية ، والريحية ، والعضوية ، وطاقة الأمواج ، وخلايا الوقود ...) هذه المصادر منها ما يعطي توتراً مستمراً في الخرج (خلايا الوقود، والخلايا الشمسية) ومنها ما يعطي توتراً متناوباً ناتجاً عن استخدام مولدات متناوبة، تزامنية أو تحريضية. تقدم توتر خرج منخفض القيمة نسبياً يتراوح قيمته (490-3000) فولت. كما تعطي توتر بترددات متنوعة تتراوح بين 11 هرتز وصولاً لـ 50 هرتز، تبعاً لعدد الأقطاب وسرعة دوران الدائر [13].

لربط هذه المصادر على الأحمال الصناعية أو الشبكات المحلية أو العالمية يلزم تفهم آليات الربط وطريقة تبادل القدرة. وعموماً يمكن عرض ثلاثة أساليب لتبادل القدرة بين محطات التوليد والتوزيع عبر خطوط النقل وهي:

- تبادل القدرة عبر شبكات التوتر المتناوب 50-60 هرتز HVAC
- تبادل القدرة عبر شبكات التوتر المستمر HVDC
- تبادل القدرة باستخدام توتر متناوب منخفض التردد 25-16.66 هرتز (مبدل الطور

LFAC)

بداية سنعالج الفقرة الأولى الخاصة بتبادل القدرة عبر شبكات التوتر المتناوب، وعليه سوف نقدم بعض الأسس العامة والمعروفة لنقل الطاقة بالتيار المتناوب ومستلزماته، ثم سوف نعرض سلوك المولدات التزامنية، وشرح آلية حقن الطاقة المولدة من المولدات التزامنية في الحمل أو الشبكة العامة. ثم سوف نعرض على مناقشة مسألة تبادل الاستطاعة بين منبعين متناوبين. سنعرض أخيراً المتطلبات الحديثة المستخدمة لربط منابع الطاقات المتجددة على الشبكات العامة. والتجهيزات الممكن استخدامها لتحسين شروط نقل الطاقة الكهربائية. ثم سوف ندرس النقل بالتيار المستمر عالي التوتر، والنقل بالتيار المتناوب منخفض التردد.

5-2 ربط المزارع الريحية عبر خط نقل بالتيار المتناوب

Grid –Connecting wind farms by alternating voltage

شكلت طاقة الرياح والطاقة الشمسية نقلة نوعية في السنوات الأخيرة، وانتقلت من كونها أنظمة مستقلة صغيرة الاستطاعة إلى أنظمة كبيرة يمكن ربطها على الشبكة العامة، ويمكن أن تساهم بشكل فعال في تغطية جزء من حمل الشبكة، ودعم الشبكة في الحالات العابرة.

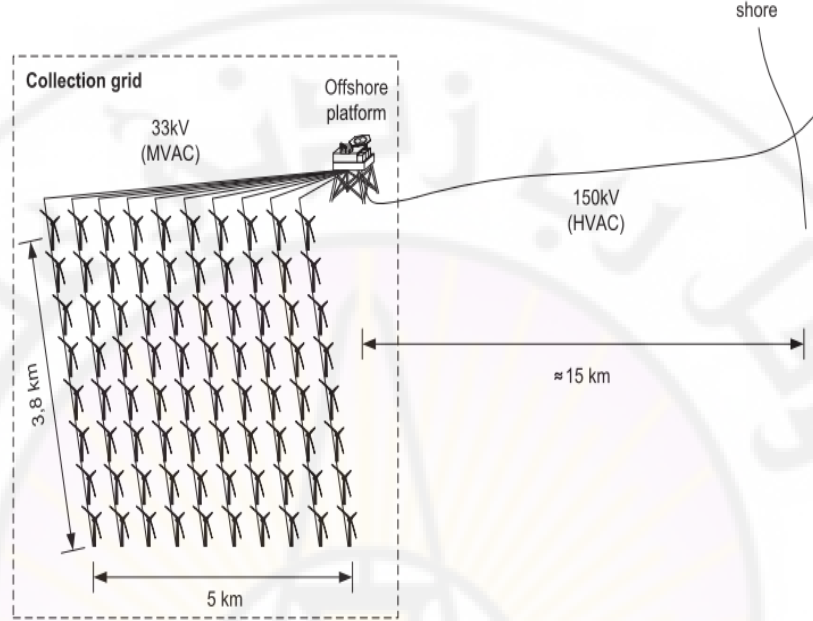
البنية الأساسية لنظام ريحي مرتبط بالشبكة العامة [7] مبين في الشكل (5-1) أدناه، حيث يتم ربط العنفات الريحية بشكل مجموعات، بطريقة مشابهة لعملية ربط مراكز التحويل في المناطق السكنية ضمن المدن، وذلك إلى محطة رئيسية ضمن المزرعة الريحية. غالباً توتر المولدات الريحية المتناوب منخفض ويتراوح 480-690، لكن حديثاً بلغ توتر المولدات الريحية ما يقارب 3000 فولت. يتم رفع توتر المولد، بمحول خاص مركب ضمن برج العنفة Pad-mounted Transformer إلى القيمة 10-20-33 كيلو فولت. يوصل من ثم عبر خط نقل هوائي أو كابل إلى محطة التحويل، حيث يتم ربط العديد من العنفات الريحية على قضبان تجميع تمهيداً لربطها على محولة رفع توتر كبيرة الاستطاعة، يتناسب توترها وتوترات الشبكات العامة، ومراكز الأحمال التي ستربط إليها.

تربط العنفات مع بعضها البعض بطرق مختلفة نعرض فيما يلي بعض هذه الطرق:

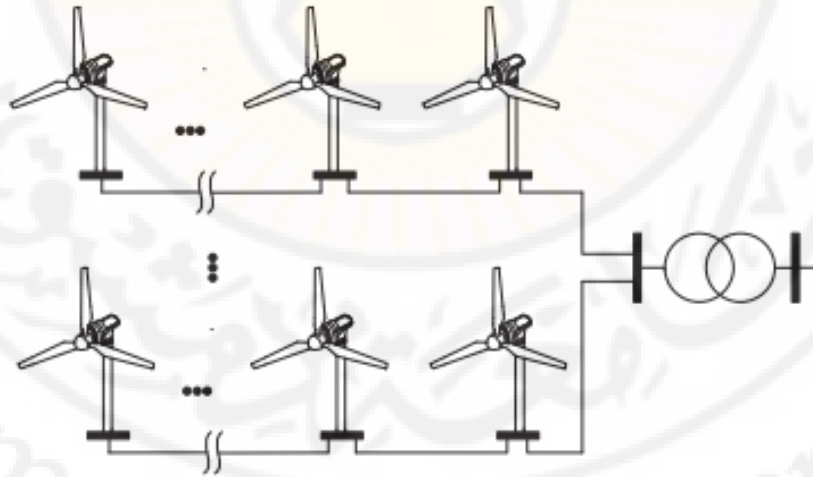
- الربط الشعاعي .
- الربط النجمي للعنفات
- الربط الحلقي المفرد والمضاعف

توضح الأشكال التالية آلية الربط في كل حالة :

أولاً: الربط الشعاعي

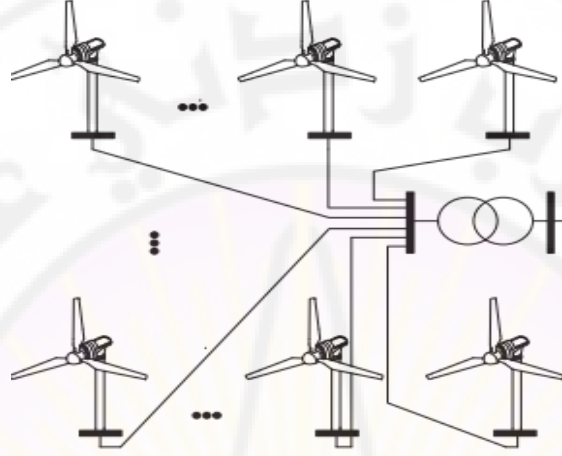


الشكل (1-5) ربط العنقات الريحية على التسلسل إلى محطة رئيسية ضمن البحر و بالقرب من الموقع، ثم يتم نقل الطاقة عبر خطوط نقل بالتيار المتناوب إلى الشاطئ .



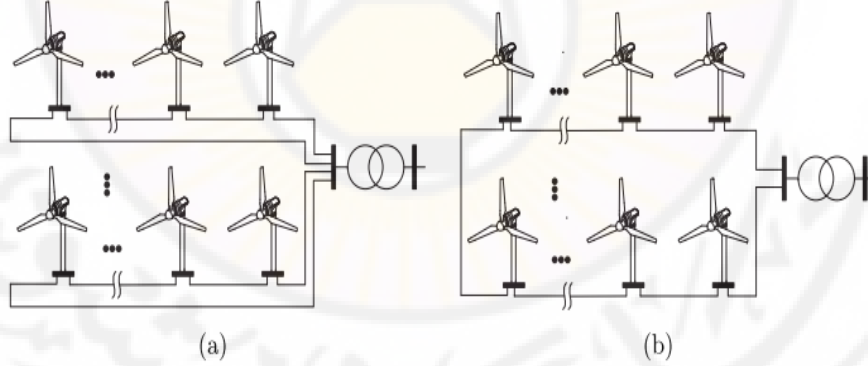
الشكل (2-5) الربط الشعاعي للعنقات

ثانياً : الربط النجمي للعنفات :



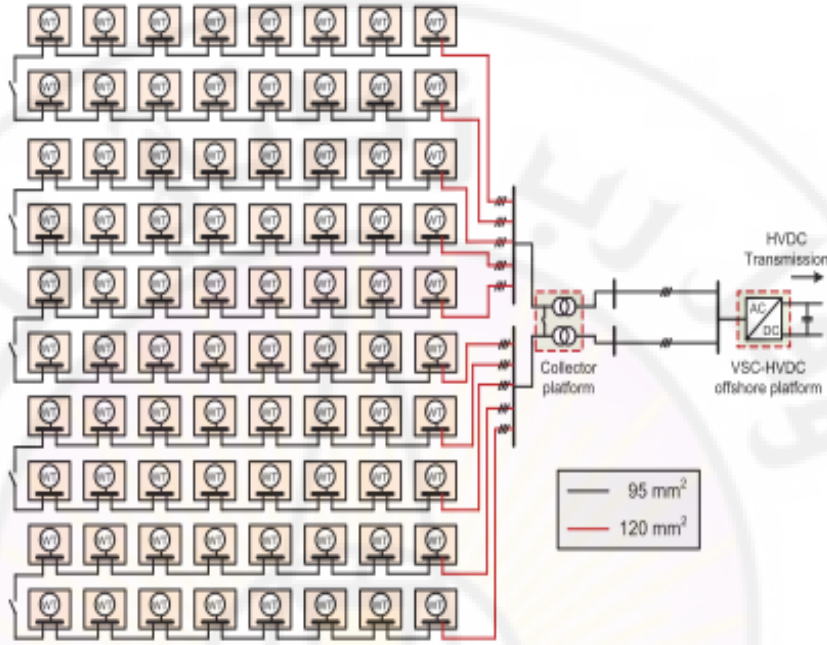
الشكل (3-5) الربط النجمي للعنفات

ثالثاً : الربط الحلقي المفرد والمضاعف



الشكل (4-5) الربط الحلقي المفرد ، والمضاعف

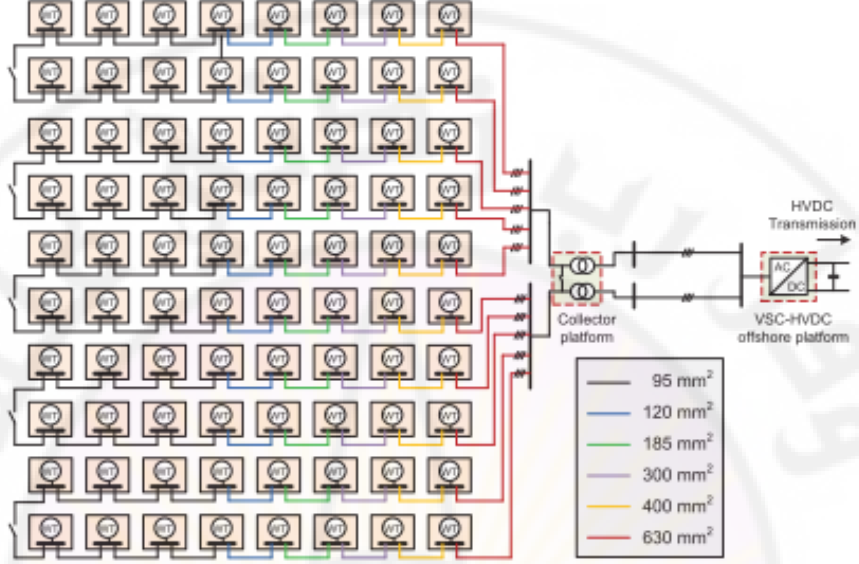
تختلف مقاطع الكابلات الفرعية والرئيسية تبعاً لاستطاعة العنفة الريحية الواحدة ولعدد العنفات المرتبطة بشكل شعاعي على كل كابل، والأشكال التالية توضح بعض النماذج العملية لربط العنفات الريحية ومقاطع الكابلات .



(a) Rated power of each wind turbine = 2.5 MW

الشكل (5-5) استطاعة كل عنفة 2.5 ميغا وات البار الرئيسي 95 ملم² والبارات الواصلة لقضبان التوزيع 120 ملم².

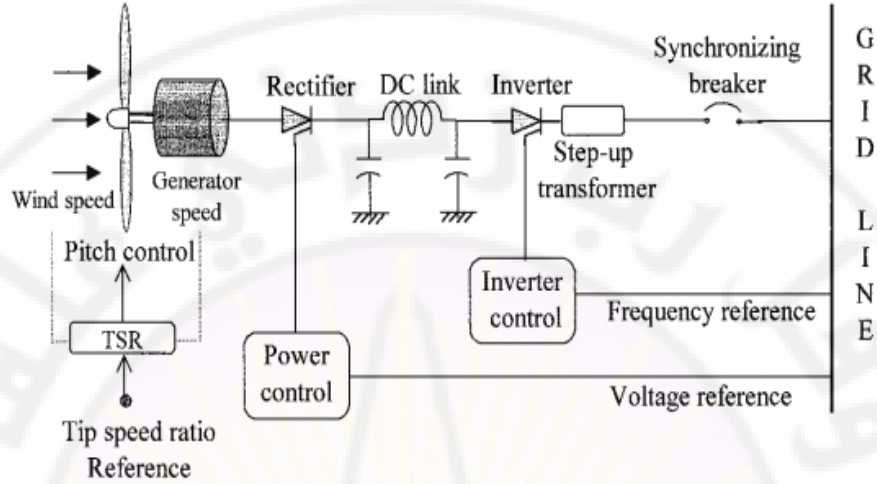
يمكن أيضاً استخدام نظام خاص بكل عنفة ريحية، وخاصة للعنفات ذات الاستطاعة الكبيرة والسرعة المتغيرة. الشكل (5-7) يبين المكونات الرئيسية للنظام. نرى كيف أن خرج المولد الريحي يطبق مباشرة على جسر تقويم مقاد (يحول التوتر المتناوب إلى توتر مستمر) يرشح التوتر المستمر في حلقة التوتر المستمر DC-Link عبر سعات وحثيات، ثم يطبق على معرج (مستقل أو غير مستقل أو بتعبير آخر معرج توتر) Voltage Source Inverter (VSC) أو معرج تيار ذي إمكانية التبديل عبر توتر الشبكة (LCC) Line Comutated Converter.



(b) Rated power of each wind turbine = 5 MW

الشكل (5-6) استطاعة العنفة الواحدة 5 ميغا وات ، والربط حلقي مفتوح

يتزامن المعرج مع توتر وتردد الشبكة، وهما يعتبران إشارات مرجعية لأنظمة القيادة والتحكم، لدى الربط على الشبكة. كما يمكن تغيير زاوية الإزاحة بالطور للجسر المقاد للتحكم بتوتر دخل المعرج، وبالتالي تنظيم التوتر المحقون بالشبكة. القيمة المثالية لسرعة نهاية الشفرات Tip-Speed-Ratio ، يتم تخزينها واعتمادها للمقارنة بشكل دائم مع القيم المحسوبة والمقاسة لحظياً لسرعة الرياح وسرعة الدوران الفعلية. يتم بذلك تغيير سرعة العنفة والحصول على أقصى استطاعة توليد ممكنة.



الشكل (5-7) مخطط توضيحي لمكونات نظام ربط عتفة ريحية ذات سرعة متغيرة على الشبكة العامة

1-2-5 متطلبات الربط على الشبكة العامة Inter face Requirements

تربط الأنظمة الريحية (والشمسية أيضاً) على الشبكة العامة عبر قاطع ربط رئيسي، يوضع على خرج المعرج، بعد ربط القاطع، يمكن للقدرة الجريان بكلا الاتجاهين، وذلك تبعاً لقيمة توتر الشبكة وتوتر المعرج والزاوية بينهما.

عادة يتم التحكم بتوتر خرج المزرعة الريحية بعدة وسائل، أحد هذه الوسائل منظم التوتر المركب في محول الاستطاعة Tap-Changer، ويمكن أيضاً التحكم بزوايا التأخير بالطور لجسور التقويم الثيرستورية، أو بمعامل التعديل Modulation Index، m_a في المعرج المستخدم ضمن دوائر تغذية عكسية، لنظام تعديل عرض النبضة Pulse Width Modulation (PWM). تردد خرج النظام الريحي يجب ان يكون مساوياً وبشكل دقيق لتردد الشبكة، وإلا فإن النظام لن يمكنه العمل، والحل السليم والأفضل هو استخدام تردد الشبكة كتردد مرجعي وأساس لتنظيم تردد خرج المعرج.

رغم وجود تشابه كبير بين أنظمة المزارع الشمسية وأنظمة المزارع الريحية، إلا أنه يوجد إختلاف أساسي بينهما. ذلك أنه في المزارع الريحية تنشأ الطاقة الكهربائية من مولدات كهربائية دوارة ذات عزم عطالة كبير، بينما تنشأ الطاقة في الأنظمة الشمسية من خلايا الكترونية نصف ناقلة ساكنة، إضافة إلا أن الطاقة المولدة من العتفات الريحية أكبر بكثير من الطاقة المولدة من

الخلايا الشمسية لذا فإنه لدى ربط المزارع الريحية يجب الانتباه لموضوع التزامن مع الشبكة العامة، بناءً عليه تزود القواطع الرئيسية بحساسات لقياس التوترات الداخلية وزاوية الطور وتحديد لحظة الربط الممكنة لهذه القواطع. ذلك أنه لا يمكن ربط هذه القواطع عشوائياً وشروط الربط العامة معروفة وهي:

- تساوي تردد الشبكة العامة مع تردد توتر المزرعة الريحية و أن لا يتجاوز الفرق بينهما ثلث الدور.
- تساوي توتر المزرعة الريحية مع توتر الشبكة ويفضل أن يكون توتر المزرعة أكبر بقليل.
- تتابع الأطوار، وأن تكون زاوية الطور Phase Angle بين توترات الأطوار بحدود 5 درجات .

يتم اتباع عادة المراحل التالية لدى الربط :

بداية يكون قاطع الربط مفتوحاً، ويتم تجهيز المولد الريحي حتى يصل إلى سرعة التوليد، ومطابقة توتر المولد مع توتر الشبكة، واستخدام ما يسمى نظام متابعة التزامن Synchronoscope، أو لمبات التزامن الثلاث المعروفة. يمكن تحديد لحظة الربط للقواطع الرئيسي عندما تكون جميع اللمبات مطفئة وأن يستمر الإطفاء لأكثر من نصف ثانية. أي خطأ لدى الربط سوف يسبب نشوء تيار صدمي Inrush Current ، قيمة هذا التيار تعطى بالعلاقة :

$$I_{inrush} = \frac{\Delta V}{X''d} \dots (1 - 5)$$

ΔV هي فرق التوتر اللحظي بين توتر الشبكة وتوتر المولد الريحي

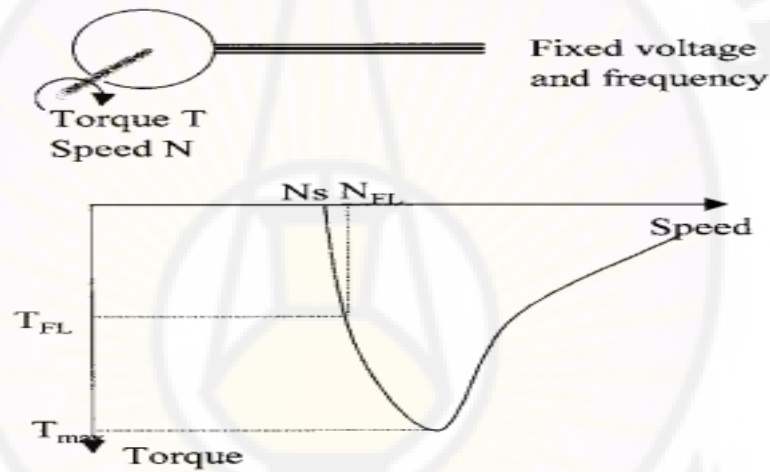
$X''d$ الممانعة فوق العابرة للمولد الريحي

هذا التيار تحريضي عموماً، وسوف يتخامد بعد ثواني ويستمر المولد مرتبطاً على الشبكة العامة.

2-2-5 العمل عند التزامن Synchronous Operation

بعد تحقيق التزامن وربط العنفة الريحية على الشبكة، من المفروض البدء بالتحكم بقيمة التوتر والتردد للمولد الريحي، مثلاً لدى ربط المولد التحريضي Induction Geenerator مباشرة على الشبكة، تكون الشبكة أساس ومرجع لتردد المولد الريحي، كما تعمل الشبكة كمنبع تهييج لتحريض المولد التحريضي وتقدم ما يحتاجه من استطاعة ردية.

يمتاز منحنى العزم السرعة للمولد التحريضي، بميل كبير بالقرب من السرعة التزامنية -Steep slope، حيث تبقى سرعة المولد التحريضي ثابتة بنسب مئوية صغيرة، وتقابل في كل وضعية زيادة في العزم المطبق مع ازدياد الانزلاق. تستمر هذه الحالة حتى نصل للعزم الأعظمي حيث من بعدها يصبح المولد غير مستقر. لكن إذا انخفض عزم الحمل بشكل آني، سيعود المولد التحريضي للإستقرار، وهذا يبرهن نعومة وسلاسة استخدام الآلة التحريضية كعنفة ريحية، هذه الحالة معاكسة لحالة المولد التزامني، والذي يعمل دائماً عند سرعة دوران ثابتة. وأية تغيرات عابرة سوف تخرجه عن التزامن أو الاستقرار . Falls out of stability



الشكل (5-8) منحنى العزم السرعة للمولد التحريضي ، ونقطة العمل النظامية للمولد

يتم في المولد التزامني التحكم بتوتر الخرج عبر التحكم بتيار التحريض، عموماً لا نحتاج للتحكم بالتردد وخاصة في حالات العمل المستمرة والمستقرة، لأن المولد التزامني متزامن مع تردد الشبكة وهو مرتبط بالشبكة ويبقى تردده ثابتاً. ولا يفقد التزامن إلا في الحالات العطل الكبير أو الحالات العابرة.

في المولدات التحريضية ذات السرعة المتغيرة والتي تستخدم المعرجات في نقطة الربط المشتركة مع الشبكة العامة، تؤخذ إشارة القيادة للبوابات والقواطع الإلكترونية من توتر الشبكة، وهي بذلك تتزامن مع الشبكة ذاتها. يعتمد استقرار عمل المبدل المستخدم على طريقة تصميمه (كونه معرج توتر أو عاكس) في الأنظمة ذات التبديل عن طريق توتر الشبكة (العواكس) Line Commutated Inverter ، لا يوجد حدود للاستقرار والنظام دائماً مستقر، بينما نجد أن

حدود الاستقرار في المبدلات ذات منبع التوتر Voltage Source Inverter ، سيكون تابعاً لطبيعة الخطا الحاصل في النظام .

3-2-5 حالات العمل العابرة Load Transient

خلال عملية التشغيل المستقرة، إذا تم حذف جزء كبير من الحمل، أو كامل الحمل للعنفة الريحية، ستقوم الشبكة العامة بتغطية هذا الجزء من الحمل وسوف ينعكس ذلك على الشبكة بطريقتين:

- ستتخفض سرعة دوران مولدات الشبكة العامة، وذلك بسبب زيادة قيمة الاستطاعة المطلوب توليدها، وبالتالي سوف تزداد زاوية الدائر أو زاوية الاستطاعة Power Angle، وهذا سيعمل بالتالي على خفض التردد.

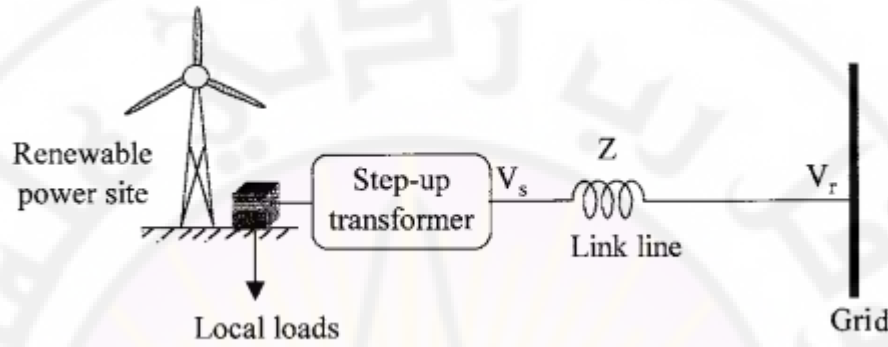
- سيحدث هبوط توتر على توتر الشبكة، وإن عمليات الفصل والوصل للمولدات في المزرعة الريحية قد تسبب مثل هذه الحالات. لذا تزود المولدات التحريضية بأنظمة إقلاع ناعمة Soft Starting .

- من الضروري فصل قاطع المزرعة الريحية عن الشبكة العامة لتأمين الأمان للعاملين، وذلك عند حدوث فصل عام للشبكة العامة ، أو لدى هبوب ريح قوية وفصل العنفات.
- في الأنظمة حيث يكون لدينا مكثفات تحسين عامل الاستطاعة بقيم معقولة أو كبيرة، يجب الانتباه لعدم حدوث تحريض ذاتي للمولدات التحريضية Self Excitation ، عندئذ سوف يعاد توليد توتر على مخرجها، وعلى أنظمة الحماية تدارك هذه الظواهر.
- في حال فصل الشبكة العامة لأي سبب، سوف تفقد المولدات الريحية تنظيم ترددها، لأن التردد المرجعي المأخوذ من الشبكة قد تم فقده. لدى التحسس لأي تغيير في التردد (بحدود معينة) يمكن لنظام التحكم الآلي فصل كل منابع التحريض عن المولدات الريحية

4-2-5 حدود التشغيل Operation Limit

يدخل خط النقل الرابط بين موقع المزرعة الريحية أو الشمسية والشبكة العامة ضمن مفهوم حدود التشغيل وذلك بطريقتين وهما، تنظيم التوتر Voltage Regulation وحدود الاستقرار Stability Limit، يمكن اعتبار خط النقل هذا بخط نقل قصير، لذا يمكن إهمال السعة الأرضية ومقاومة التسريب الأرضي، والدارة المكافئة يمكن اختصارها بمقاومة تسلسلية R والمفاعلة

(Z(Reactance) ، كما في الشكل (5-9)، هذا الإجراء مسموح به لخطوط بطول 60-70 كيلو متر .



شكل (5-9) الدارة المكافئة لمزرعة ريحية مرتبطة على الشبكة العامة [7]

تقوم معاوقة الخط Impedance ، بدورين رئيسيين في عملية تبادل الاستطاعة بين المزرعة الريحية والشبكة. الأول دورها في تنظيم التوتر، والثاني في تحديد الاستطاعة العظمى الممكن نقلها بهذا الخط.

5-2-5 تنظيم التوتر Voltage Regulation

بين الشكل (5-10) المخطط الشعاعي للتوتر والتيار عند الإرسال، المعاوقة التسلسلية Shunt Impedance كانت مهمة، تيار الإرسال I_s والتيار الاستقبال I_r ، وهما متساويين $I_s = I_r = I$. التوتر عند طرف الاستقبال هو المجموع الشعاعي لتوتر الإرسال مع إضافة هبوط التوتر على المعاوقة $I \cdot Z$ ، أي أن :

$$V_s = V_r + I(R + jX) \quad \dots (2-5)$$

يعرف أو يوصف تنظيم التوتر بأنه ارتفاع توتر الاستقبال كنسبة مئوية من توتر الحمل الكامل Full Load Voltage ، وذلك إذا أزلنا الحمل بشكل كامل عند عامل استطاعة معين، مع المحافظة على توتر إرسال ثابت، ويمكن التعبير عن نسبة تنظيم التوتر بالعلاقة:

$$\text{Percent Voltage Regulation} = \frac{V_{nl} - V_{fl}}{V_{fl}} \quad \dots (3-5)$$

V_{nl} = قيمة توتر الاستقبال عند اللاحمل وتساوي V_s

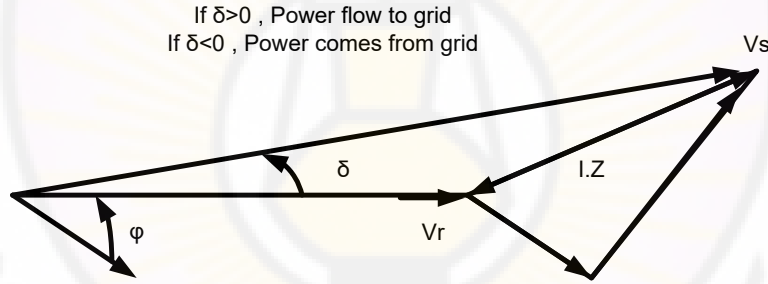
V_{fl} = قيمة توتر الاستقبال عند الحمل الكامل وتساوي V_r

بالعودة للمخطط الشعاعي $V_s = V_{nl}$ ، و $V_r = V_{fl}$ ، نرى أن تنظيم التوتر يتعلق بشكل كبير لعامل الاستطاعة. من أجل نفس تيار الحمل، وعند عدة قيم لعامل الاستطاعة نجد أن هبوط

التوتر على خط النقل يكون واحداً، لكنه سيضاف لتوتر الإرسال عند زوايا طور مختلفة، لهذا السبب فإن تنظيم التوتر سيكون كبيراً عند عامل استطاعة متأخر وسيكون معدوماً أو سالباً عند عامل استطاعة متقدم.

في الشكل (5-10) بفرض أن V_r و I ، كانتا عند قيم ثابتة، وأن عامل الاستطاعة في الحمل تغير من القيمة صفر باتجاه عامل الاستطاعة المتأخر، إلى القيمة صفر، باتجاه عامل الاستطاعة المتقدم، فإن شعاع التوتر في الإرسال سوف يرسم نصف دائرة. ذلك لأن المقدار $I^*(R+JX)$ ثابت. مثل هذا المخطط يكون مفيداً لرسم توتر الإرسال كتابع لعامل الاستطاعة من أجل توتر حمل وعند استطاعة معروفة ومعطاة مسبقاً.

إذا حافظنا على توتر الإرسال مساوي بالمطال لتوتر الاستقبال، فإن الاستطاعة الفعالة



شكل (5-10) المخطط الشعاعي لخط النقل بين المزرعة الريحية والشبكة العامة [7]

والردية في طرف الاستقبال، من أجل عدة أحمال، سوف ترسم دائرة يطلق عليها المخطط الدائري للاستطاعة.

5-2-6 حد الاستقرار Stability Limit

يعتمد اتجاه الاستطاعة المنقولة على قيم توتر الإرسال والاستقبال، وزاوية الطور بينهما Phase Angle، الاستطاعة العظمى التي يمكن لخط النقل حملها أو نقلها مع الحفاظ على الاستقرار سيكون دائماً له قيم محددة. نحسب حدود الاستقرار بفرض أن الاستطاعة تجري من المزرعة الريحية باتجاه الشبكة العامة أو العكس. في هذه الحالة المقاومة التسلسلية لخط النقل تحذف والاستطاعة المنقولة Transferred، عبر خط النقل تعطى كما هو معروف بالعلاقة :

$$P = V_r * I * \cos \phi \quad \dots\dots(4-5)$$

بالعودة للمخططات الشعاعية (5-10) يمكن التعبير عن الجزء الحقيقي لهذا التيار بالشكل:

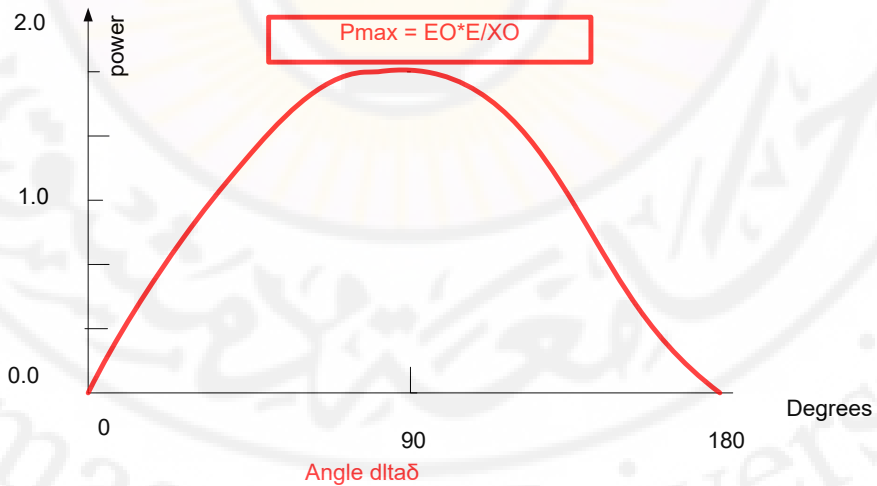
$$I_{real} = \frac{V_s * \sin \delta}{X} \quad \dots \dots (5 - 5)$$

ولدى ضرب التيار بتوتر الاستقبال V_r ، نحصل على الاستطاعة بالشكل :

$$P = \frac{V_s * V_r * \sin \delta}{X} \quad \dots\dots\dots(6-5)$$

أي أن قيمة الاستطاعة المنقولة على خط النقل تعتمد على زاوية فرق الطور بين الإرسال والاستقبال δ . إذا كانت $\delta < 0$ ، فإن الاستطاعة الفعالة تجري من المزرعة الريحية باتجاه الشبكة العامة، وإذا كانت $\delta > 0$ ، فإن المزرعة الريحية سوف تستجر استطاعة فعالة من الشبكة العامة .

الاستطاعة الردية تعتمد على فرق التوتر $(V_s - V_r)$ ، إذا كان توتر الإرسال أكبر من توتر الاستقبال فإن الاستطاعة الردية تعبر من الموقع إلى الشبكة، وبالعكس إذا كانت توتر الإرسال أصغر من توتر الإستقبال فإن الاستطاعة الردية سوف تأتي من الشبكة العامة باتجاه المزرعة الريحية.



الشكل (5-11) منحنى الاستطاعة المنقولة كدالة لزاوية الطور

في الشكل (5-11) من الواضح أن الاستطاعة العظمى المنقولة تتم عند زاوية طور تساوي 90 درجة. بعد هذه الزاوية سيكون العمل غير مستقر وستفقد المولدات الاستقرار والتزامن. العمل في المنطقة التي تكون فيها $\delta > 90$ ، يسمى حد الاستقرار الساكن. وعادة يتم العمل عند

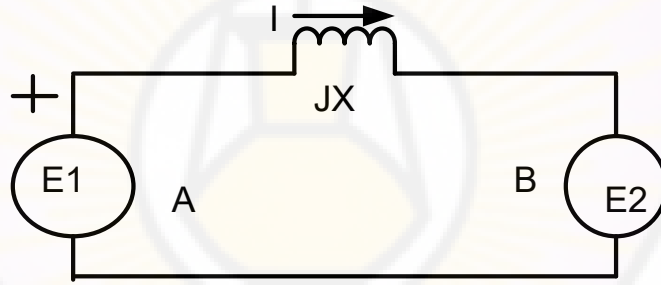
زاوية طور أصغر بكثير من 90. ما يسمى بحد الاستقرار الديناميكي، هي قيمة الاستطاعة العظمى التي ينقلها الخط دون أن يفقد تزامنه عند حدوث حالات عابرة. في الحالات النموذجية تكون زاوية الطور بين 10-20 درجة وذلك كي تؤمن الاستقرار الديناميكي [7].

3-5 تبادل الاستطاعة بين منبعين متناوبين

Power Transfer Between two Alternative Sources

نفرض وجود منبعين A, B كما في الشكل (5-19)، آلتين تزامنتين وخط نقل، سنهتم بالقدرة الفعالة المنقولة أو المتبادلة بين المنبعين، قيمة توتر المنبعين هي E_1 ، E_2 وزاوية الطور phase angle بينهما هي δ . بتطبيق قانون كيروشوف للتوتر Kirchoff's Law على هذه الدارة نحصل على العلاقة التالية :

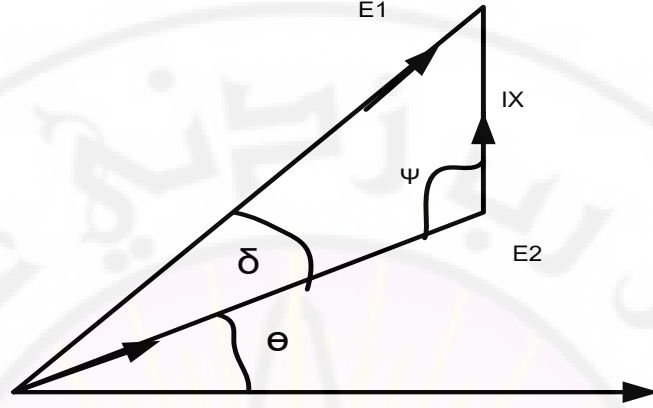
$$E_1 = E_2 - jI.X \dots\dots\dots(7-5)$$



الشكل (5-19) ربط منبعين مع خط نقل حيث أن X ممانعة الربط بين المنبعين

إذا فرضنا أن التيار I يتأخر عن التوتر E_2 بزاوية θ ، وأن التوتر E_1 يتقدم عن التوتر E_2 بزاوية δ ، سوف نتمكن من رسم المخطط الشعاعي المبين بالشكل (5-20). الشعاع I.X يتقدم عن I بالزاوية 90 درجة كهربائية ، الاستطاعة الفعالة المستجدة P من المنبع B هي :

$$P = E_2.I. \cos\theta \dots\dots\dots(8-5)$$



الشكل (5-20) المخطط الشعاعي

من قانون الجيب (sine law) للمثلث المرسوم يمكن كتابة :

$$\frac{IX}{\sin \delta} = \frac{E1}{\sin \psi} \quad \dots\dots(9-5)$$

$$\frac{E1}{\sin(90 + \theta)} = \frac{E1}{\cos \theta}$$

$$I. \cos \theta = \frac{E1 \cdot \sin \delta}{X} \quad \dots\dots\dots(10-5) ,$$

بالتعويض من العلاقة 4 في العلاقة 2 نجد :

$$P = \frac{E1 \cdot E2 \cdot \sin \delta}{X} \quad \dots\dots\dots(11 - 5)$$

الاستطاعة التي يستقبلها المنبع B تساوي الاستطاعة المقدمة من المنبع A ، لأن الممانعة لا تستهلك استطاعة فعالة. قيمة الاستطاعة P يتم تحديدها بدلالة زاوية الطور δ. الزاوية θ التي تقع بين التوتر E2 والتيار I لا يلزم توصيفها أو تحديد قيمتها مسبقاً. الاستطاعة الفعالة تجري من التوتر المتقدم نحو التوتر المتأخر، حيث كما في الشكل التوتر E1 يتقدم عن التوتر E2 لذا فالاستطاعة تجري من اليسار نحو اليمين بالشكل(5-19) أعلاه .

مثال محلول (5-1)

إذا كان توتر منبع التوتر A يساوي $E1 = 20 \text{ kv} \leq 5$ والمنبع B يولد توتراً $E2 = 42 \text{ kv}$. ممانعة خط النقل الواصل بينهما له ممانعة 14Ω . احسب الاستطاعة الفعالة التي تمر عبر خط النقل، وحدد أي المنابع هو الحمل.

الحل :

زاوية الطور بين المنبعين تساوي $37^\circ = 5^\circ - 42^\circ$ ، توتر المنبع B يتقدم عن توتر المنبع A لأن زاويته أكثر إيجابية . عليه فإن الاستطاعة ستجري من المنبع B باتجاه المنبع A ، وعليه A هو الحمل .

تحسب قيمة الاستطاعة المتبادلة من العلاقة :

$$P = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \sin \delta}{X}$$

وبالتعويض نجد أنها تساوي 12.9 ميغا وات . نلاحظ كيف أن الاستطاعة تتدفق من المنبع ذو التوتر المنخفض باتجاه المنبع ذو التوتر الأعلى . [61][13]

نحتاج في بعض الأحيان لإنشاء خط نقل إضافي بين منطقتين، يوجد فيها مسبقاً خط نقل يربط هاتين المنطقتين وذلك لزيادة استطاعة النقل نتيجة إنشاء أحمال صناعية جديدة، أو قد يكون نتيجة ربط مزرعة ريحية مجاورة لإحدى المناطق، ونرغب بزيادة استقرار توزيع الطاقة في المنطقة. في مثل هذه الحالات نستخدم طرق خاصة حتى يتمكن الخط الإضافي المراد أنشاؤه من نقل الاستطاعة المطلوبة منه.

لنأخذ حالة مركزين كبيرين للتوليد والتوزيع A,B مرتبطتين بشبكة خطوط نقل غير مرئية. التوترات القائمة في كل مركز E_a, E_b ، وهي متساوية في القيمة المطلقة، لكن التوتر E_a ، يتقدم عن التوتر E_b ، بالزاوية δ . إذا قررنا ربط المركزين بخط نقل جديد إضافي ذو ممانعة X (Reactance)، سوف تجري الاستطاعة الفعلية مباشرة وبشكل آلي من المحطة A ، إلى المحطة B . لأن التوتر E_a متقدم عن التوتر E_b . وبدقة أكبر قيمة الاستطاعة التي ستجري في الخط تقدر تبعاً لقيمة الزاوية δ والممانعة X حسب العلاقة المعروفة :

$$P = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \sin \delta}{X} \dots \dots (12 - 5)$$

بكل الأحوال قيمة هذه الاستطاعة المنقولة قد لا تناسب الغاية من إنشاء الخط. وإذا أردنا عكس اتجاه نقل القدرة ليكون من B باتجاه A . فإن إنشاء خط جديد بمفرده لا يمكنه تحقيق ذلك طالما أن التوتر في A متقدم عن التوتر في B . يمكننا إجبار نقل القدرة بالاتجاه المعاكس بطرق صناعية وهي تغيير قيم زوايا الطور بين المحطتين ولذلك نستخدم المحولات الذاتية كمزيح للطور Phase- Shift Autotransformer ، ويركب في أحد النهايات ولدى تغيير زاوية الطور للمحول يمكن بشكل كامل التحكم بالاستطاعة الفعلية الممكن سريانها بين المركزين أو المحطتين

مثال محلول (2-5)

لدينا محطتين A,B مربوطين بشبكة خطوط نقل غير مرئية في الشكل (5-21) ، التوتر E_b متقدم عن التوتر E_a ، بمقدار 11 درجة. توتر كلا المحطتين متساوي ويساوي 100 كيلو فولت، تم إنشاء خط جديد يربط بين المحطتين بممانعة $X = 20 \Omega$. احسب ما يلي:

1. قيمة الاستطاعة المنقولة بالخط الجديد واتجاهها بحالة عدم وجود مزيج طور
2. قيمة الزاوية الواجب حقنها بمحول الطور لنقل استطاعة 70 ميغا وات من المحطة A إلى المحطة B .

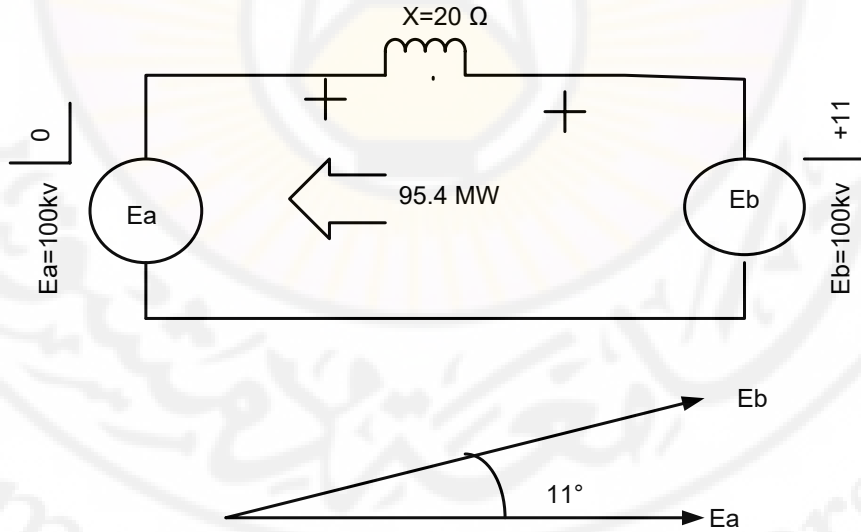
الحل :

- الاستطاعة المنقولة بين المحطتين بالشكل (5-21) أعلاه تحسب من العلاقة:

$$\sin P = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \sin \delta}{X} \dots \dots (12 - 5)$$

وعليه فإن :

$$11^\circ = 95.4 \text{ Mw} \quad P = \frac{100^2}{20}$$



الشكل (21-5) خط النقل الواصل بين محطتين قائمتين وزاوية الطور الحالية

بما أن التوتر E_b متقدم عن التوتر E_a فإن الاستطاعة 95.4 MW سوف تجري من B إلى A.

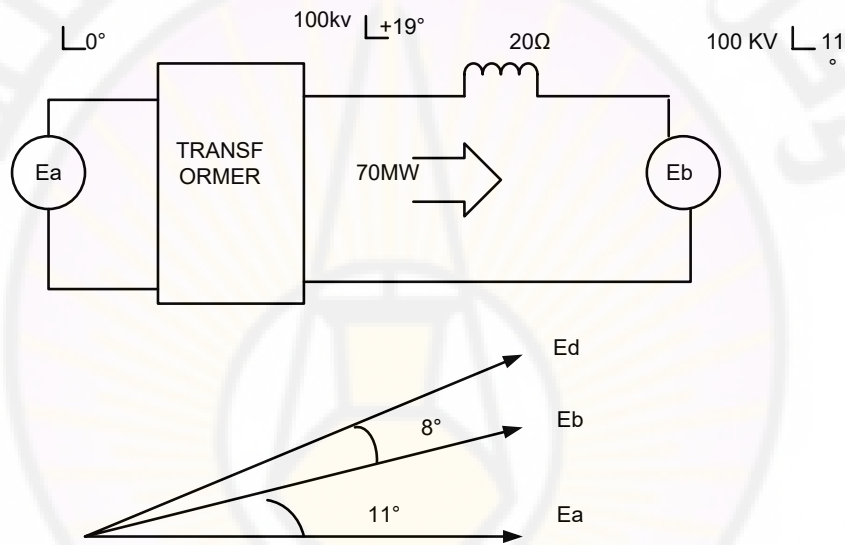
2- بالعودة للشكل (5-22) ، دعونا نحسب أولاً قيمة زاوية بطور δ_1 ، المطلوبة بين الطرفين المتقابلين أو المتعاكسين لكي نتمكن من نقل 70 ميغا وات .

$$P = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \sin \delta}{X} \dots \dots (12 - 5)$$

$$* \sin \delta_1^\circ \quad 70 = \frac{100^2}{20}$$

$$\sin \delta_1^\circ = 0.14$$

أي أن الزاوية تساوي $\delta_1 = 8$ درجات



الشكل (5-22) محول الإزاحة بالطور الموضوع في إحدى النهايات يجبر الاستطاعة بالسريان حسب المطلوب

التوتر الجديد Ed بعد محول الإزاحة يجب أن يتقدم عن توتر الاستقبال بالزاوية 8 درجات وذلك لتمرير 70 ميغا وات من A إلى B . وحيث أن التوتر Eb كان بالأصل متقدماً عن التوتر Ea بمقدار 11 درجة ، فإن التوتر الجديد Ed ، ستكون زاوية طوره $19 = 8 + 11$ درجة متقدم عن التوتر Ea . أي أن محول الإزاحة بالطور عليه تقديم إزاحة قدرها 19 درجة بين ملفاته الابتدائية وملفاته الثانوية وبذلك يصبح توتر خرج المحول متقدم عن توتر الإرسال في Ea ، بمقدار 19 درجة . يمكن وضع المحول في أي طرف ، حتى يمكن وضعه في المنتصف . [15]

ملاحظة:

المتطلبات الأساسية المطلوبة من أنظمة النقل بالتيار المتناوب

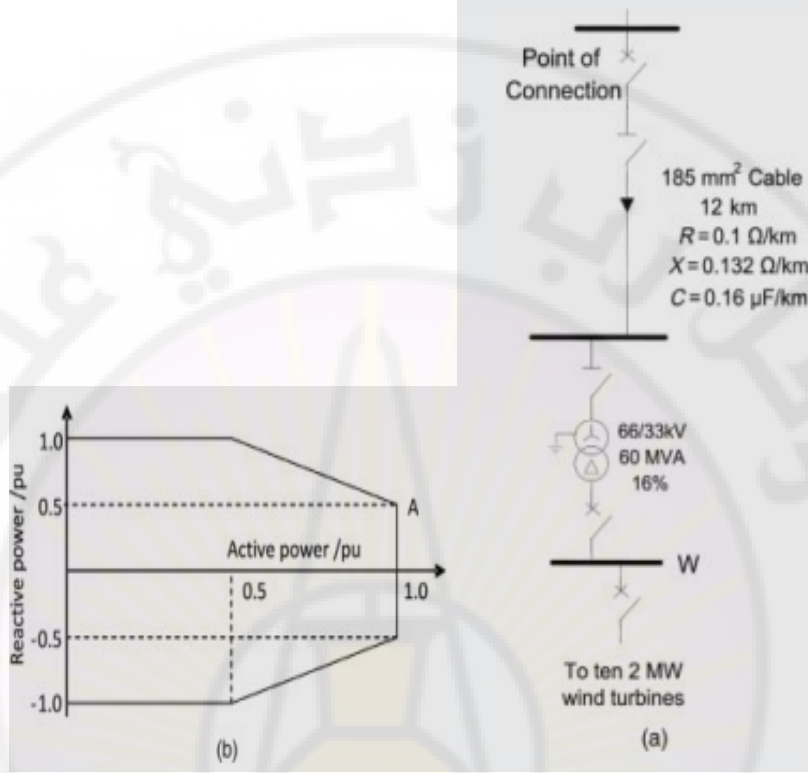
Fundamental objective of AC transmission System

تتطلب عملية ربط محطات الطاقة الحديثة الشمسية والريحية، إعادة النظر بتشكيلة الخطوط القائمة، والانتقال لتوتر نقل متناوب مناسب لإستطاعة المزرعة الريحية المراد إنشاؤها [15]. أحياناً تعمل الظروف القائمة على منع إنشاء شبكات جديدة. لذا فإن استخدام أنظمة النقل المرنة Flexible AC Transmission System (FACTS)، يمكننا من زيادة سعة الدارات المتناوبة المستخدمة. يساهم استخدام أنظمة النقل بالتيار المستمر عال التوتر High Voltage Direct Current (HVDC)، وخاصة في المزارع البحرية البعيدة عن اليابسة، في زيادة استطاعة النقل والاستجابة لمتطلبات توليد الطاقة من المزارع الريحية.

كما يساهم إضافة مكثفات سعوية على التسلسل، بما نطلق عليه التعويض التسلسلي Series Capacitor Compensation في زيادة كفاءة النقل بالتيار المتناوب .

مثال محلول (3-5)

تم ربط عشرة عنفات ريحية كل منها باستطاعة 2 ميغا وات على الشبكة العامة، شكل (27-5) كل عنفة قادرة على تحقيق مخطط الاستطاعة المبين في الشكل (27-5- b)، وتعمل عند النقطة A، والقيم مقاسة عند التوتر 33 KV. المطلوب حساب الاستطاعة الردية الواجب استهلاكها أو توليدها من نظام STATCOM والذي تم وضعه عند نقطة الوصل المشتركة، وذلك للمحافظة على عامل استطاعة يساوي 0.95. أهمل مفايد الاستطاعة الردية والفعالة في المزرعة الريحية وافرض أن التوتر عند قضبان العنفة W يساوي $0 \leq 1.05$ (قيم واحدة) .



الشكل (5- 27) ربط عشرة عتفات ريفية - مخطط الاستطاعة لعنفة ريفية

الحل :

استطاعة القصر المعتمدة كأساس = 100MVA

- الاستطاعة الفعالة المولدة من العتفات الريفية بالقيم الواحدة :

$$10 \times 2 \text{ MVA} / 100 \text{ MVA} = 0.2 \text{ p.u}$$

- ممانعة الأساس عند التوتر 66 كيلو فولت تحسب من العلاقة :

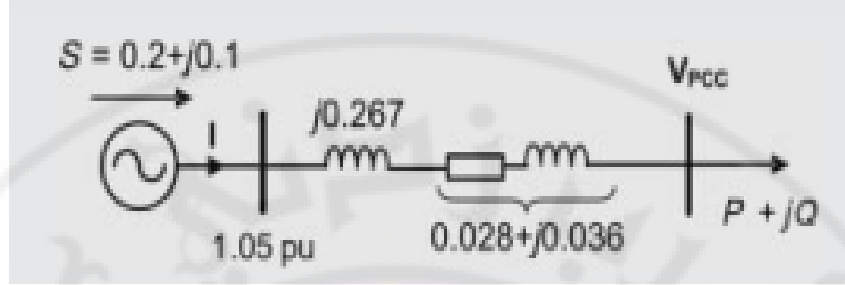
$$Z_{\text{base on } 100 \text{ mva}, 66 \text{ kv}} = \frac{(66 \times 10^3)^2}{100 \times 10^6} = 43.56 \Omega$$

- ممانعة خط النقل : $\text{Line Impedance} = \frac{(0.1 + j0.132) \times 12}{43.56} = 0.028 + j 0.036 \text{ pu}$

- ممانعة المحول عند 100mva base :

$$\frac{0.16 \times 100(\text{mva})}{60(\text{mva})} = 0.267 \text{ p.u}$$

يمكن رسم مخطط الدارة المكافئة بالقيم الواحدة حسب الشكل (5- 28)



الشكل (5-28) الدارة المكافئة للشبكة بالقيم الواحدية

$$V.I^* = 0.2 + j0.1 \text{ (input power)}$$

$$I = \frac{0.2 + j0.1}{1.05} = 0.19 + j0.095$$

التوتر على قضبان التوزيع :

$$V_{pcc} = 1.05 - (0.19 - j0.095)(0.028 + j0.303)$$

$$V_{pcc} = 1.016 - j0.055 = 1.017 \angle -3.1^\circ$$

بناءً عليه يمكن حساب الاستطاعة الظاهرية :

$$P + jQ = V_{pcc}.I = 1.017 \angle -3.1^\circ * (0.19 + j0.095) =$$

$$1.017 \angle -3.1^\circ * 0.212 \angle 26.6^\circ = 0.216 \angle 23.5^\circ = 0.198 + j0.086$$

وعليه فإن عامل الاستطاعة :

$$= 0.086/0.198 = 23.5^\circ \tan^{-1}$$

زاوية عامل الاستطاعة لعامل استطاعة قدره 0.95 تساوي $18.2^\circ = \cos^{-1}(0.95)$

الاستطاعة الردية الممكن استهلاكها من قبل نظام STATCOM للحصول على عامل استطاعة

بقية 0.95 ، تحسب من العلاقة :

$$0.198 * [\tan 23.5^\circ - \tan 18.2^\circ] = 0.021 \text{ p.u} = 2.1 \text{ MVAR}$$

مثال محلول (5-4) :

مزرعة ريحية باستطاعة 500 ميغا وات، موصلة إلى منطقتين مركزيتين للأحمال الكهربائية،

كما في الشكل (5-33). عند لحظة معطاة تزود المزرعة الريحية استطاعة قدرها 200 ميغا

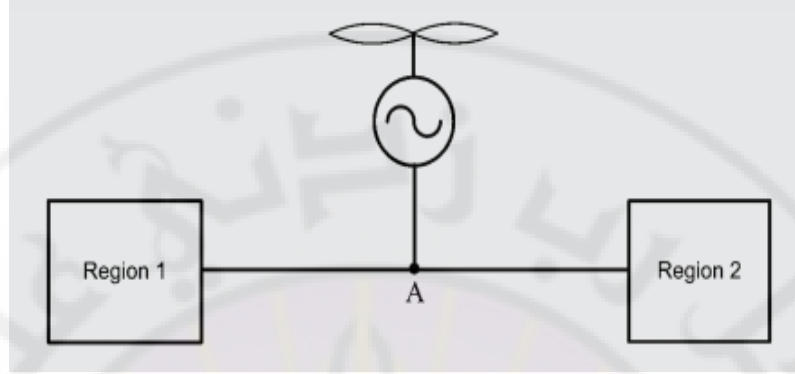
وات لكل منطقة استهلاك. لدى تزايد استطاعة التوليد لهذه المزرعة بحيث أصبحت تساوي

450 ميغا وات. من الضروري إرسال 250 ميغا وات للمنطقة 1 و 200 ميغا وات للمنطقة 2

بين وناقش كيف يمكن لنظام IPFC الذي تحدثنا عنه التحكم بجريان الاستطاعة بين الخطوط

أن يؤمن هذه العمليات. أفرض أن قيمة التوتر والزاوية لقضبان التوزيع في المنطقتين لم تتغير

خلال تغير الاستطاعة .

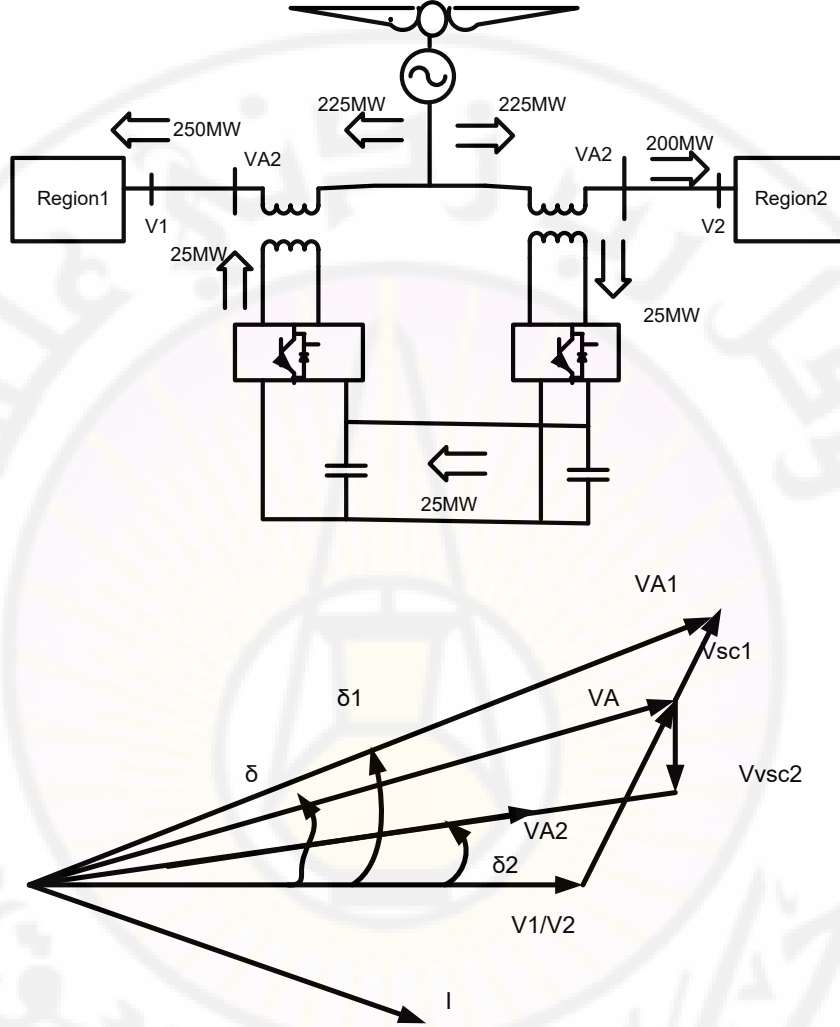


الشكل (5-33) منطقتين أحمال وربط المزرعة الريحية بينهما

الحل :

لدى ازدياد استطاعة التوليد في المزرعة الريحية للقيمة 450 ميغا وات، إذا لم يزود الخط القائم بمعوض استطاعة Uncompensated، فإن 225 ميغا وات سوف تجري لكل منطقة من مناطق الحمل. لكن إذا ربطنا نظام (IPFC) عند النقطة A، المبينة بالشكل (5-34- a) هذا النظام سيقوم بأخذ 25 ميغا وات من الخط الثاني Line 2، وحقنها في الخط الأول Line 1، كما هو موضح في الرسم التفصيلي لتوزيع الاستطاعة الشكل (5-34- b) . طريقة النقل والحقن للنظام موضحة بالمخططات الشعاعية.

للتوضيح : نفرض أن كلا الخطين لهما نفس الممانعة (X) Reactance، المبدل الأول ذو منبع التوتر VSC1، سوف يعمل على حقن توتر على التسلسل مع الخط وذلك لرفع قيمة زاوية الحمل δ Load Angle، حتى تصل فرضاً للقيمة δ_1 ، وعليه يزداد جريان الاستطاعة في الخط الأول 1. من ناحية أخرى، يقوم المبدل الثاني ذو منبع التوتر أيضاً VSC2، بحقن توتر على التسلسل مع الخط الثاني Line 2 δ وذلك لخفض قيمة زاوية الحمل δ إلى القيمة δ_2 . هذه العملية تسبب انخفاض جريان الاستطاعة في الخط الثاني بمقدار 25 ميغا وات .



الشكل (5-34) مخطط جريان الاستطاعة والمخطط الشعاعي للتوترات والتيارات الناتجة

4-5 تبادل القدرة عبر شبكات نقل بالتوتر المستمر

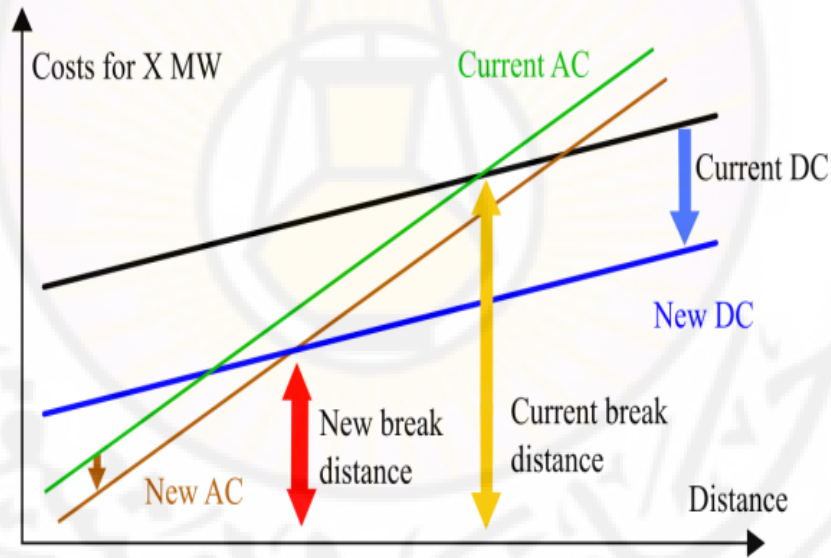
High Voltage Direct Current (HVDC) Transmission by

1-4-5 النقل بالتيار المستمر عالي التوتر

Transmission by High Voltage Direct Current (HVDC)

في هذا الجزء من الفصل سوف نتحدث بشكل مختصر عن نقل الطاقة الكهربائية بالتيار المستمر عالي التوتر، وذلك لضيق المكان، ومثل هذه الأبحاث يمكن تصنيفها ضمن أبحاث الكرونيات

القدرة الكهربائية. يستخدم نظام النقل للطاقة الكهربائية باستخدام التيار المستمر، وذلك لربط مناطق التوليد بمراكز الأحمال، سواء على مستوى القطر الواحد أو بين الدول العالمية المتجاورة، وهو معروف منذ أكثر من 60 سنة. قد برهنت الشبكات القائمة على أن النقل بالتيار المستمر خيار ممتاز. فهي تؤمن إمكانية نقل استطاعات كبيرة ولمسافات بعيدة. كما أثبتت إمكانية استخدامها أيضاً في المسافات المتوسطة والقريبة. الشكل (5-35) يبين المسافة الاقتصادية للنقل سواء بالتوتر المتناوب أو المستمر، وذلك تبعاً للتكاليف. هذه المسافة Break-even Distance، قد تكون بحدود 500-800 كيلو متر، لكنها تتناقص تبعاً لطبيعة المنطقة وخاصة لدى استخدام النظام في المزارع البحرية. حيث أضحت المسافة 50-100 كيلو متر مسافة اقتصادية.

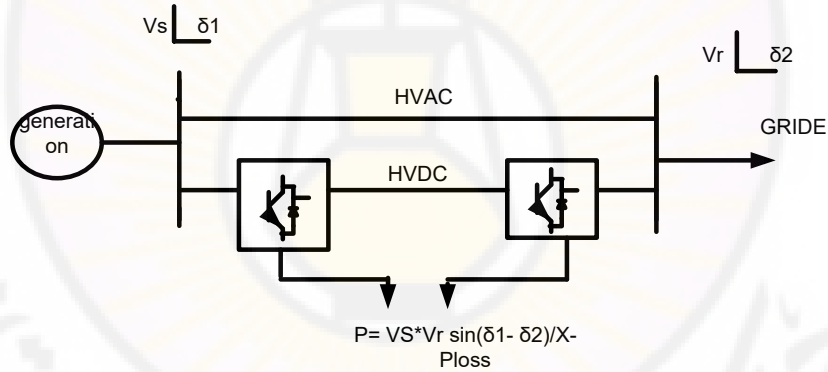


الشكل (5-35) يبين المسافة الاقتصادية للنقل سواء بالتوتر المتناوب أو المستمر

يمكن لأنظمة النقل بالتيار المستمر عالي التوتر HVDC أن تربط على التفرع مع شبكات التوتر المتناوب القائمة وذلك لتوفير المرونة FLEXIBILITY لهذه الشبكات. في الشكل (5-36) نرى إمكانية ربط خط نقل بالتيار المستمر على التوازي مع شبكة نقل بالتيار المتناوب. لتأمين نقل طاقة حقيقي من طرف الإرسال إلى طرف الاستقبال، يقوم المبدلان المركبان في كل طرف بالتحكم بالاستطاعة الردية، وذلك للتحكم بقيمة التوتر عند الإرسال والاستقبال. هذا بالمقابل ينعكس على كمية القدرة التي تسري في شبكات التوتر المتناوب القائمة.

لا بد من التنويه بداية أن المبدلات الممكن استخدامها حديثاً أو المستخدمة منذ فترة تنقسم بشكل عام إلى قسمين:

- الأول وهو الأقدم والأكثر تداولاً في شبكات النقل بالتيار المستمر هو أن يكون المبدل في طرف الإرسال عبارة عن مقوم مقاد (جسر تقويم ثيرستوري (AC- Rectifier (DC Converter) يعمل عند زاوية إزاحة بالطور أصغر بكثير من 90 درجة كهربائية. والمبدل في طرف الاستقبال هو عاكس Line Commutated Conveters(LCC) ، أي جسر تقويم ثيرستوري ثاني، مرتبط بالشبكة جهة الاستقبال يعمل عند زوايا إزاحة بالطور أكبر من 90 وأقل من 180، أي أنه يعمل على عكس اتجاه الاستطاعة يأخذ الاستطاعة من خط النقل بالتيار المستمر ويحقنها في الشبكة العامة عند نفس توتر وتردد هذه الشبكة.

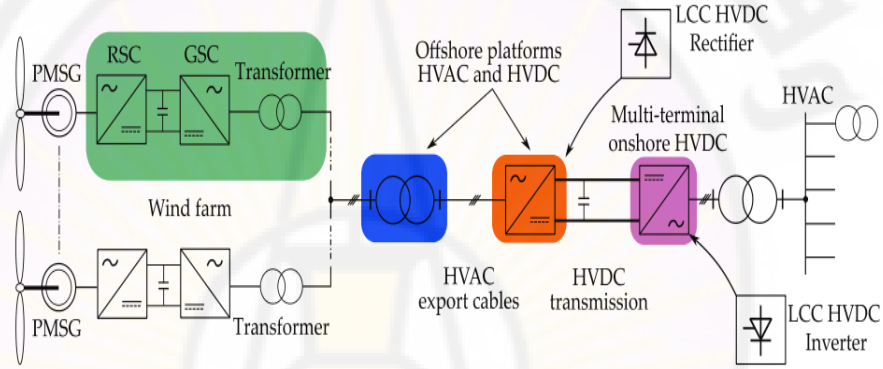


الشكل (5-36) الربط التفرعي للشبكتين وتأثيرها المتبادل

- النوع الثاني الحديث من أنظمة النقل بالتيار المستمر، هو الاعتماد على معرجات توتر في الإرسال والاستقبال، مكونة من جسور ترانزستورية بقواطع سريعة، الجسر المرتبط بشبكة الإرسال يعمل كمقوم، والجسر المرتبط بشبكة الاستقبال يعمل كمعرج حقيقي أي يحول التوتر المستمر إلى توتر متناوب بتردد متزامن مع تردد الشبكة العامة وبنفس تتابع أطوار الشبكة العامة.

انتشر هذا العلم بقوة في السنوات الأخيرة وذلك بقصد ربط المزارع الريحية البحرية بالبر Off Shore Wind Farms. ولنفهم أسس هذا العلم سوف نبين المكونات الأساسية لشبكات النقل بالتيار المستمر والتي تستخدم الجسور الثيرستورية ومن ثم الترانزستورية.

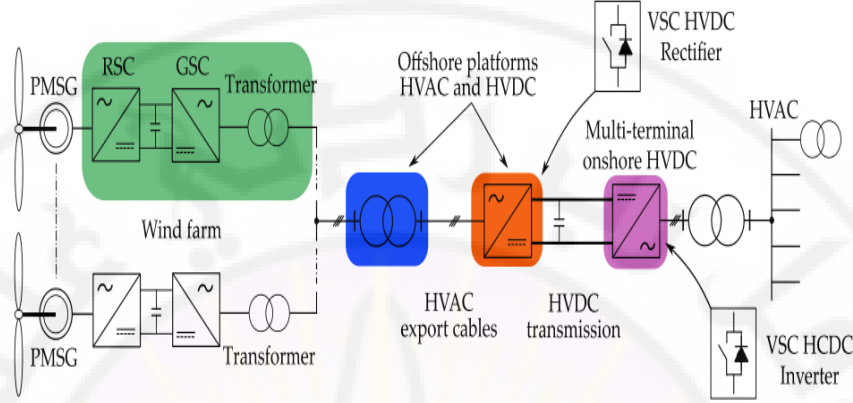
في الشكل (5-37) نرى إحدى الطرق المعتمدة لربط المولدات الريحية (سواء كانت مولدات تحريضية ، أو تزامنية بملف دائر أو مغناط دائمة)، توضح الأشكال الواردة فيما يلي حالة مولد تزامني بمغناط دائمة. المبدل الأول جهة العنفة الريحية RSC يربط على الآلة مباشرة، والمبدل الثاني نوع GSC يربط إلى محول رفع ضمن المزرعة البحرية، تربط العنفات في المزرعة الريحية على التفرع، على قضبان محلية للتوتر المتناوب ثم تربط إلى محول رفع، يغذي الجسر الأولي من نظام HVDC، المبدل يربط إلى الشبكة المتواجدة في اليابسة.



الشكل (5-37) استخدام مولد تزامني ذو مغناط دائمة

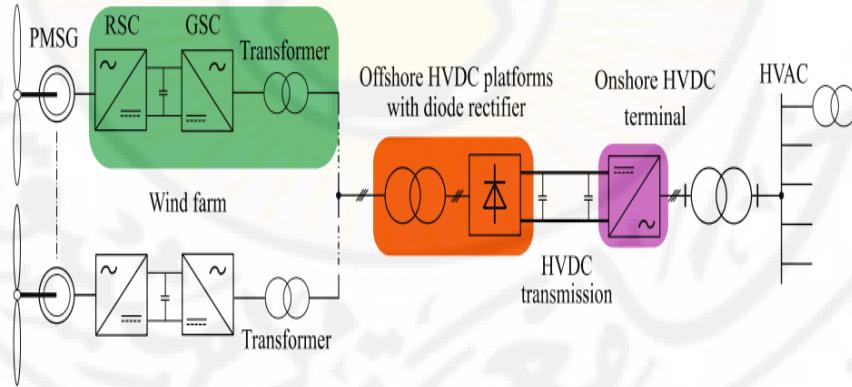
المبدل RSC يربط على الآلة والمبدل GSC يربط إلى محول رفع ضمن المزرعة البحرية، تربط العنفات على التفرع على قضبان محلية ثم تربط إلى محول رفع يغذي الجسر الأولي من نظام HVDC، المبدل الثاني يربط إلى الشبكة المتواجدة في اليابسة [22].

يمثل الشكل (5-38) أحد الخيارات المتاحة استخدام معرج توتر VSC في طرف الإرسال والاستقبال لخط النقل بالتيار المستمر. الديودات التفرعية في جسر الإرسال تقوم بالتوتر المتناوب، وترسله على خط النقل والترانزستورات في جسر الاستقبال تحول التوتر المستمر إلى توتر متناوب من نفس تردد الشبكة العامة.



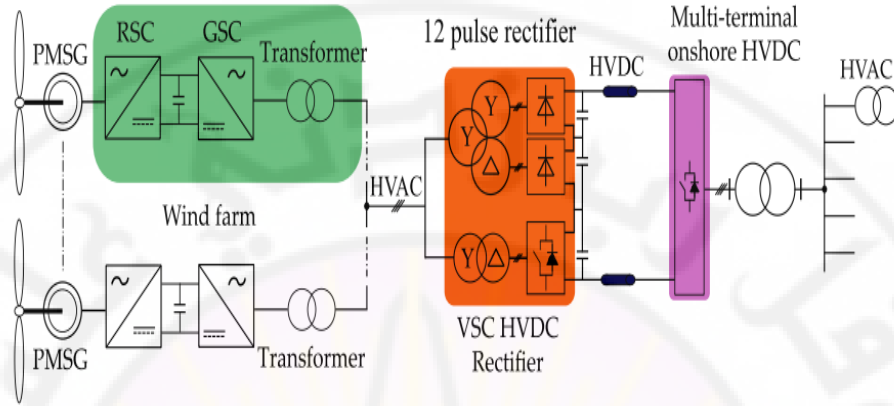
الشكل (5-38) استخدام معرج توتر VSC في طرف الإرسال والاستقبال لخط النقل بالتيار المستمر

إضافةً لما سبق، من ضمن الخيارات المتاحة الشكل (5-39)، يمكن استخدام جسر تقويم غير مقاد من الديود في طرف الإرسال وجسر ثيرستوري في طرف الاستقبال. وهنا لا يمكن التحكم بتوتر الإرسال، كما أنه لا يمكن عكس اتجاه نقل القدرة في خط النقل .

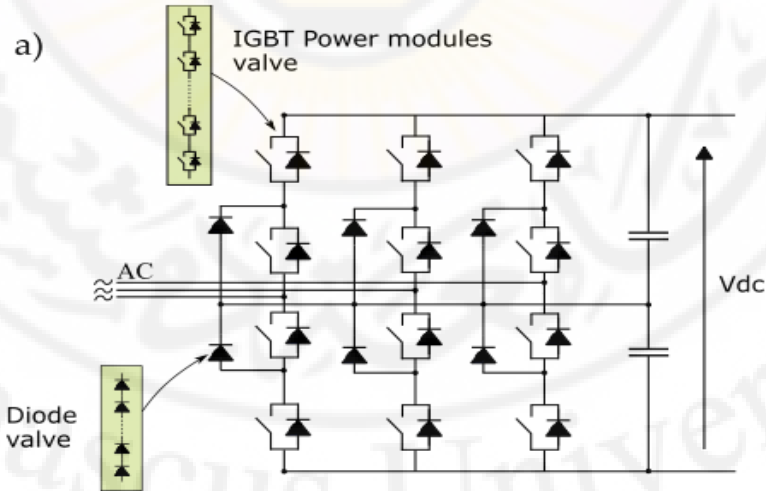


الشكل (5-39) استخدام جسر تقويم في طرف الإرسال وجسر ثيرستوري في طرف الاستقبال [22].

يبين الشكل (5-40) نظام هجين، حيث تم استخدام جسور تقويم غير مقادة ومقادة في الإرسال وجسور مقادة ثيرستورية في الاستقبال. كما أنه تم ربط عدة جسور على التسلسل لرفع توتر الإرسال.



الشكل (5-40) نظام هجين في جسور الإرسال ، مكونة من جسور تقويم غير مقادة ومقادة وجسور ثيرستورية مقادة في الاستقبال وربط عدة جسور على التسلسل لرفع توتر الإرسال وبنية الجسور في الإرسال والاستقبال كما رأينا متنوعة التركيب، وبعد تطور المبدلات متعددة السويات أصبح بالإمكان تشكيل هذه الجسور باعتماد أي نوع من الأنواع الثلاث المعروفة للمبدلات متعددة السويات، ذات ديود الربط Clamped Diode أو المبدلات ذات المكثفات Floting Capacitor الطافية أو المبدلات ذات الجسور نوع H. Bridge. الشكل (5-41) يبين حالة استخدام المعرجات ذات ديود الربط المركبة في طرف الإرسال.



الشكل (5-41) يمكن استخدام المعرجات متعددة السويات في طرف الإرسال [22]

2-4-5 مبدأ عمل المبدلات ذات منبع التيار

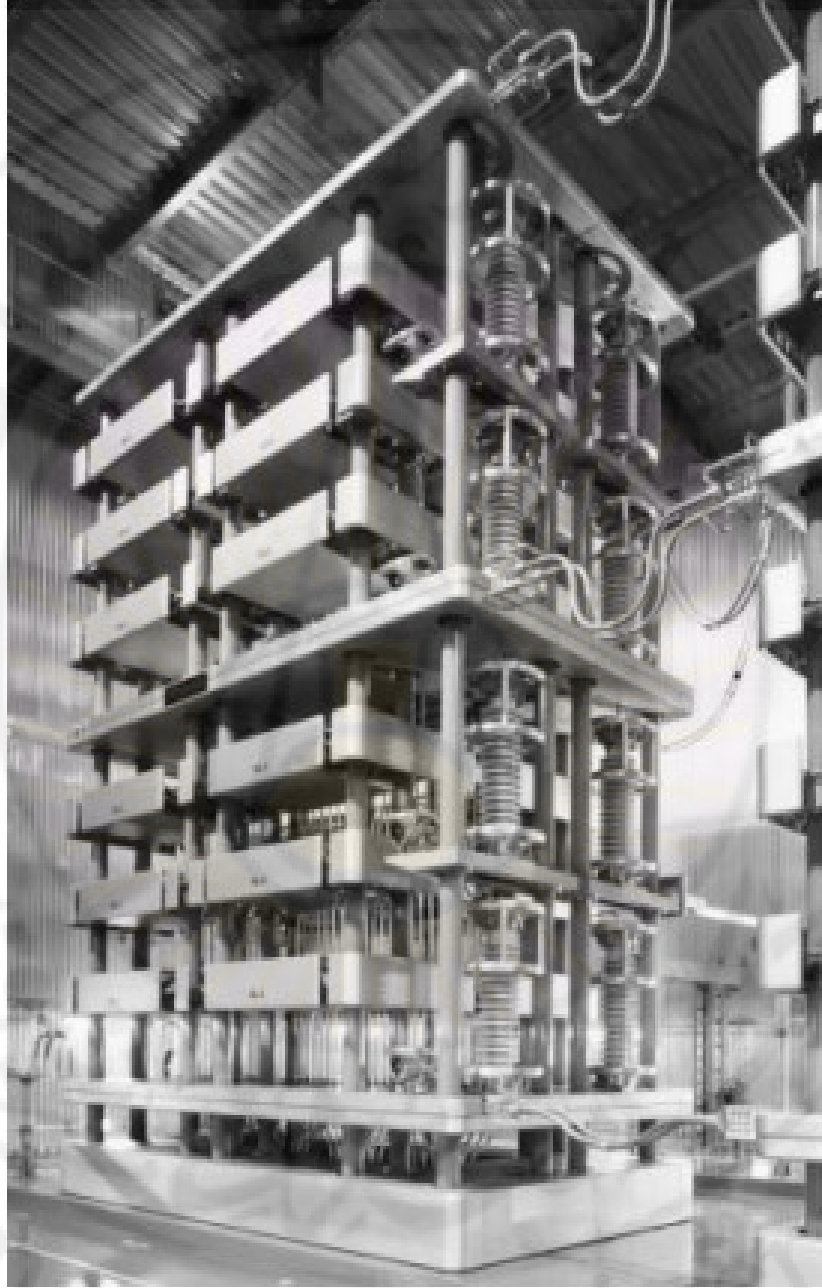
Current Source Converters(CSC)

وتسمى أيضاً المبدلات ذات التبديل عن طريق توتر الشبكة

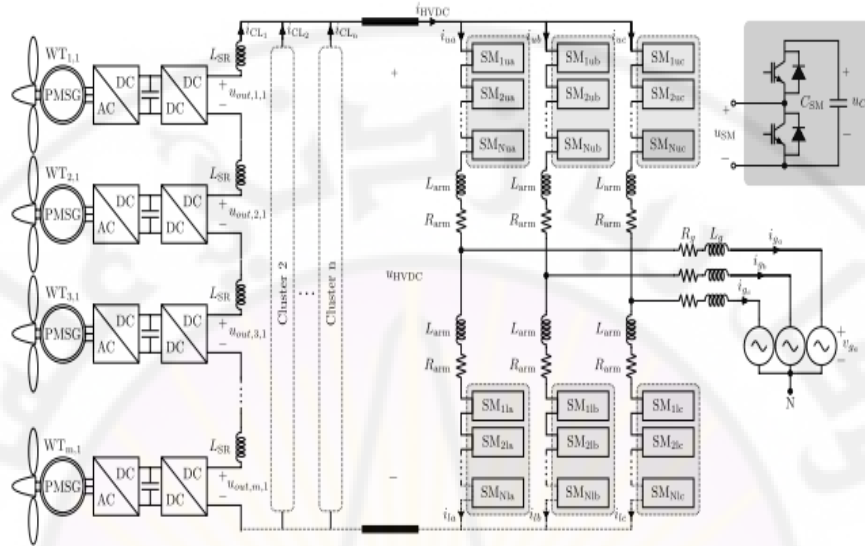
Line Commutated Conveters(LCC)

بداية هذه المبدلات ليست معرجات مستقلة تعمل على تحويل التوتر المستمر إلى توتر متناوب DC-AC Converter. بل هي أنظمة تعمل على نقل القدرة وتحويلها من الحمل الذي هو خط النقل وحققها بالشبكة العامة. تعمل على تمرير التيار الموجب عند توتر جسر سالب وجداء التوتر السالب بالتيار الموجب هو استطاعة سالبة. لا يوجد ما يسمى بالاستطاعة السالبة، ولا تعني هذه الجملة سوى أن اتجاه الاستطاعة سينعكس وتنتقل الاستطاعة من الحمل الذي هو خط النقل إلى الشبكة العامة المرتبط إليها المبدل، وسيعمل الجسر المرتبط بالشبكة كعكس عند توتر وتردد الشبكة العامة ولا يتدخل في تغيير توتر الشبكة ولا ترددها.

هذه المبدلات تعتبر خيار جيد لنقل كمية كبيرة من الطاقة من مراكز التوليد إلى مراكز الأحمال. كلا المبدلين المستخدمين في طرف الإرسال (المقوم) أو طرف الاستقبال (العكس) هي مبدلات تيار (CSC) Current Source Converter. قد تم اختيارها منذ البدايات، كونها أنظمة قوية robust، قوامها مجموعة ثيرستورات استطاعة موصلة على التسلسل (40-100) ثيرستور، في كل فرعة من فرعات الجسر الثلاثي الطور. حيث أن قيمة توتر النقل المطلوب العمل عنده هو الذي يحدد قيمة التوتر العكسي الذي قد يتشكل على الفرعة الواحدة. نظراً لأن التوتر العكسي للثيرستورات الحديثة لا يتجاوز 3000-5000 فولت، فإننا بحاجة لربط عدد كبير من الثيرستورات على التسلسل لتغطية التوتر العكسي الذي سيتشكل على كل فرعة من الجسر. وصل توتر النقل في الشبكات الحديثة إلى سويات عالية 400-1500-3000 كيلو فولت مستمر. الشكل (5-42) يوضح المخطط العام للنظام. نرى الأحجام الكبيرة اللازمة لربط الثيرستورات على التسلسل وتشكيل الجسور، والحاجة لمسافات الأمان والعزل والتبريد. الشكل (5-43) يبين أن كيف يتم ربط العنفات الريحية على التسلسل لرفع توتر الإرسال، واستخدام جسور متعددة السويات في الاستقبال، هذا النوع من الجسور يعتبر حديثاً جداً والشبكات القائمة تستخدم الجسور الثيرستورية التفرعية المضاعفة التي سنتحدث عنها في الفقرات اللاحقة.



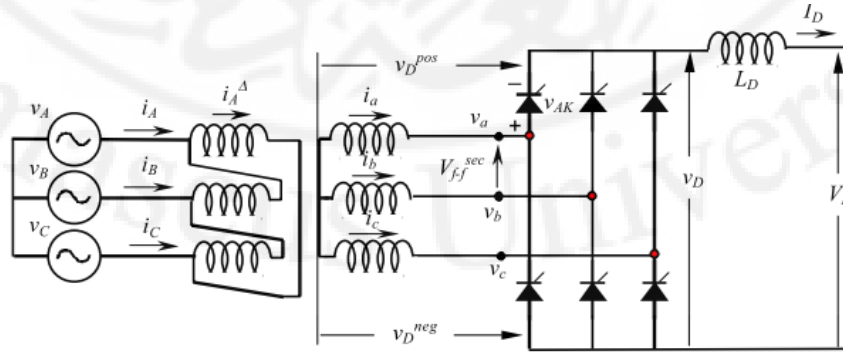
الشكل (5-42) كتلة النظام بشكل عام [17]



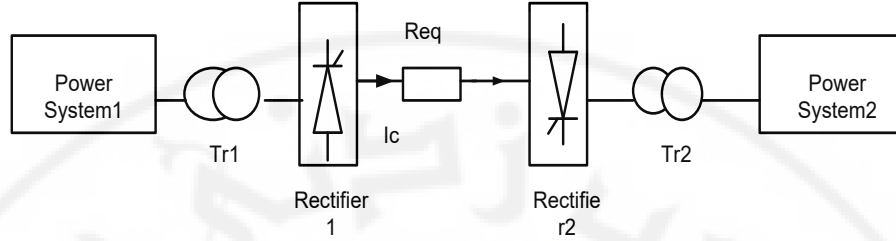
الشكل (5-43) ربط العنفات الريحية على التسلسل لرفع توتر الإرسال ، واستخدام جسور متعددة السويات في الاستقبال [22].

3-4-5 آلية نقل القدرة الكهربائية في خطوط النقل بالتيار المستمر

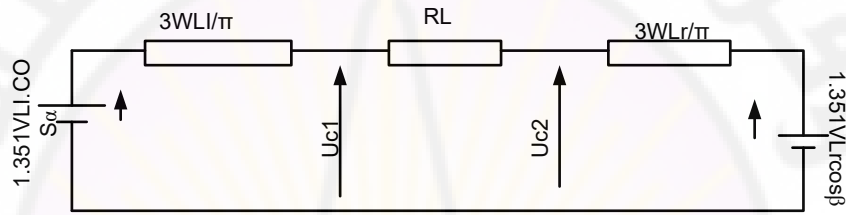
يتكون جسر التقويم أو العاكس من عناصر ثيرستورية، تشكل مجموعها جسر تقويم ثلاثي الطور مقاد. يمكن ربط أكثر من جسر على التسلسل لرفع توتر الإرسال الأشكال (5-44) أدناه تبين المكونات الأساسية لهذا النظام [17] ، يتكون النظام عموماً من مرشحات في الإرسال والاستقبال، ومحولات رفع توتر في الإرسال ومحولات تزامن مع الشبكة العامة في الاستقبال. إضافة للجسور الرئيسية الثلاثية الطور المضاعفة. كل جسر من الجسور يمكن تمثيله بمدخرة وديود لتحديد اتجاه التيار. قيمة توتر المدخرة تعبر عن توتر خط النقل، تتغير تبعاً لزاوية الإزاحة بالطور المطبقة على ثيراستورات الجسور في الإرسال والاستقبال .



1-بنية جسر التقويم المستخدم في الإرسال والاستقبال



2- يمكن ربط عدة جسور على التسلسل في الإرسال والاستقبال



3- الدارة المكافئة لخط النقل عالي التوتر باستخدام جسور ثيرستورية مقادة .

الأشكال (44-5) 1- بنية جسر التقويم والعاكس . 2- ربط عدة جسور على التسلسل .

3- الدارة المكافئة للجسور

تستجر هذه المبدلات دائماً استطاعة ردية، وترتبط على طرف شبكة الإرسال ذات التوتر المتناوب وعلى طرف الاستقبال. تعمل على تبادل الاستطاعة بين الطرفين. هذا يعني أنه إذا تم تشغيل أحد الجسور كمقوم فإنه سيحول التوتر المتناوب إلى توتر مستمر ويحقق هذا التوتر في خط النقل بالتيار المستمر، الجسر الثاني في الطرف الآخر (الموصل بشكل مقلوب، عاكس للجسر الأول) يجب أن يعمل كعاكس عند زوايا إزاحة بالطور أكبر من 90 درجة حتى يستطيع عكس قطبية توتره وبما أن التيار له اتجاه مرور وحيد فإن جداء تيار موجب بتوتر سالب يعني استطاعة سالبة ولا يوجد مفهوم للاستطاعة السالبة سوى أن هذه الاستطاعة ستؤخذ من خط النقل وستحقق في الشبكة المتناوبة الثانية. (دارات القيادة وشكل توتر الخرج وتفصيل آلية العمل تحدثنا عنها في منهاج الكترولنيات القدرة الكهربائية، مطبوعات جامعة دمشق. لا يوجد مجال للاستفاضة هنا).

زاوية القدح أو الإزاحة بالطور للمقوم تسمى α وهي عملياً تتراوح بين 5-25 درجة كهربائية. زاوية التأخير بالطور للعاكس تسمى β (وأحياناً نطلق عليها زاوية التقدم Advance angle) وهي يجب أن تكون أكبر من 90° (وعملياً تكون بحدود 160-170°)، أو هي الزاوية المكملية لزاوية الجسر المقوم أي أن: $\alpha + \beta = 180$.

ملاحظة :

لا يمكن الوصول لـ $\alpha = 0$ ، ولا لـ $\beta = 180$ ، نظراً لوجود زاوية التطابق δ وزاوية الأمان γ لحماية الجسور. ولدينا عموماً $(\alpha + \delta + \gamma = 180)$. وبفرض أن

$$(180 - \beta = \gamma + \delta) \dots (13-5)$$

هذه الزاوية β تسمى زاوية التقدم للجسر الذي يراد تشغيله كعاكس .
توتر خرج جسر التقويم يحسب بالعلاقة :

$$U_{c1} = \frac{2q}{\pi} V_m \sin \frac{\pi}{q} \cos \alpha \dots (14-5)$$

باعتبار أن عدد الأطوار $q = 3$ ، وأن $V_m = \frac{V_L \sqrt{2}}{\sqrt{3}}$ (VII توتر الخط) ، وبالتعويض أعلاه نجد أن التوتر المقوم سيعطى بدلالة توتر الخط وزاوية الإزاحة بالطور حسب العلاقة:

$$U_{c1} = 1.35 V_{LL} \cos \alpha \dots (15-5)$$

كما أن توتر الاستقبال سيعطى بعلاقة مماثلة باستخدام زاوية التأخير β لهذا الجسر وهي بالشكل:

$$U_{c2} = 1.35 V_{LL} \cos \beta \dots (16-5)$$

تيار خط النقل يعطى بالعلاقة :

$$I_d = \frac{U_{c1} + U_{c2}}{R_{eq}} \dots (17-5)$$

R_{eq} هي المقاومة المكافئة لدارة الجسور وخط النقل .

مجموعة القواطع الموصلة على التسلسل الخاصة لكل فرعة من الطور يجب أن تتحمل التوتر العكسي الذي سينشأ عليها من توتر الدخل ، يعطى التوتر العكسي بالعلاقة:

$$V_i = 2 V_m \cos \frac{\pi}{2q} \dots (18-5)$$

$V_i = 1.66 V_i$ وبالتعويض تساوي :

V_i توتر الخط للشبكة المتناوبة. كمثال مبسط إذا كان توتر الشبكة المتناوبة تساوي 220 KV ، فإن التوتر العكسي المتشكل سيصل للقيمة 359.3 KV ، لا توجد عناصر قادرة على تحمل هذه القيمة من التوتر ، لذا سنضطر لوصل 120 قاطع على التسلسل لكل فرعة طور والجسر الكامل سيحتاج إلى $6 \times 120 = 720$ قاطع. ومن هنا تبرز أهمية نقل الإشارات بالألياف الضوئية وأي تأخير في التشغيل سيعمل على زيادة التوتر العكسي على باقي العناصر .

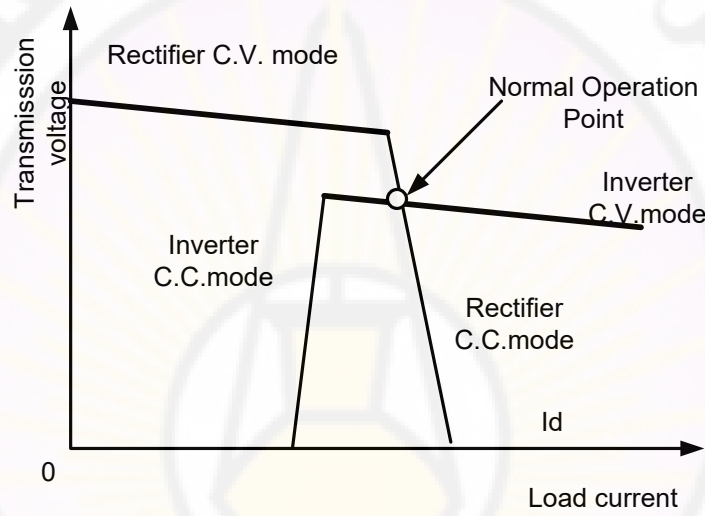
من الدارة المكافئة أعلاه، نبين أن $R_{eq} = R_L$ ، وأن L_i, L_r هي الحثية المكافئة لشبكة جسر التقويم والعاكس. وأن $w = 2\pi f$ ، حيث f تردد الشبكة العامة بالهرتز.

بالتعويض في علاقة حساب التيار المار بالخط يمكن الوصول للعلاقة :

$$I_d = \frac{1.35 V_{ll} \cos \alpha - 1.35 V_{ll} \cos \beta}{\frac{3wlr}{\pi} + \frac{3wli}{\pi} + RL} \dots (19-5)$$

هذه القيم تعبر عن المقاومة المكافئة لكل جسر ، وكنا نعبر عنها بهبوط التوتر الناتج عن التتابع (Over Lapping Period δ)

العلاقة بين توتر الجسور وتيار الحمل المار بخط النقل مبينة بالشكل (45-5) .



الشكل (45-5) علاقة توتر الجسور وتيار خط النقل أو تيار الحمل

بفرض أن الجسر الأول عند الإرسال يعمل كمقوم عند زاوية تأخير α ، وأن الجسر الثاني بالقرب من الشبكة الثانية يعمل عند زاوية تأخير β . وهما كما ذكرنا شبه متكاملتين $\beta = \alpha + 180$. نرى أن القدرة الكهربائية سوف تأتي من جهة الإرسال عبر الجسر الذي سيعمل كمقوم، ميل العلاقة بين التوتر وتيار الحمل يحدده هبوطات التوتر المعروفة في خطوط النقل بالتيار المستمر ويعطي الخط التيار والتوتر. الجسر الثاني القريب من الاستقبال، يعمل كعاكس ولكن بما أنه موصل بشكل معاكس نرى توتره وكأنه موجب أيضاً، لكن يجب أن يكون دائماً أقل بالقيمة المطلقة من توتر الإرسال، حتى يستطيع تيار الشبكة المستمر من المرور بخط النقل. وبيننا سابقاً آلية حسابه. نقطة التقاطع بين المنحنيين هي نقطة العمل Normal Operating Point ، هذا يعني بتعبير آخر أن الجسر الأول (المقوم) سيعمل عند تيار حمل ثابت (C.C) Constant Current ، ومنظم زاوية التأخير بالقدح للزاوية α سيعمل على تغيير هذه الزاوية باستمرار لتثبيت تيار الخط . لمتابعة تغيرات تيار الحمل المطلوب نقله. الجسر الثاني العاكس،

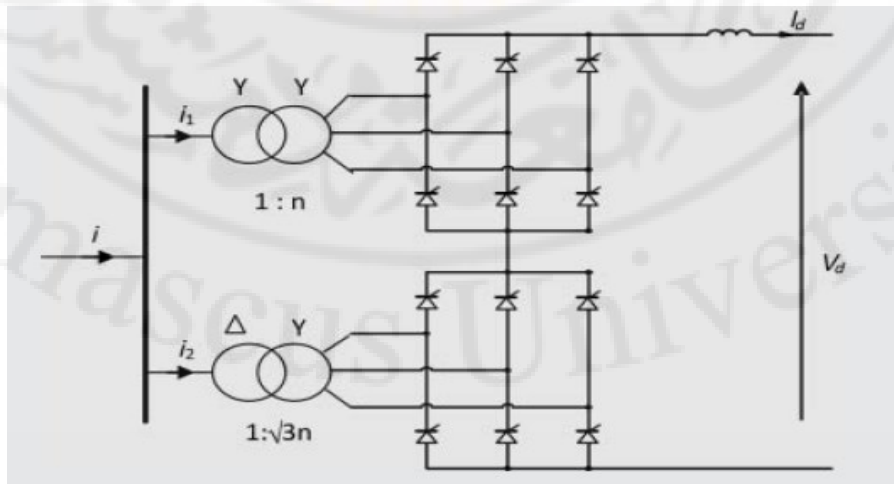
والذي يرتبط بالشبكة الثانية، مهمته استرجار القدرة من خط النقل وحققها في الشبكة الثانية. على هذا المبدل أن يعمل عند توتر خرج ثابت Constant Voltage (C.V) ، حيث تبقى زاوية التأخير التابعة له β ثابتة. بالعودة للنظر في علاقة حساب تيار الحمل، نرى أن المقام ذي قيمة صغيرة جداً تقدر بالأوم (2-3) بينما البسط ذي قيمة كبيرة جداً بالكيلو فولت. لذا فإن أي تغيير طفيف في زاوية التأخير بالطور α سوف تسبب تغيراً كبيراً في تيار الخط المستمر. كلما صغرت α ، كلما عملنا على رفع التيار وزيادة استطاعة النقل ويمكن تخفيض هذه الزاوية حتى الـ 5 درجات كهربائية ولكن يجب عدم تجاوزها.

مثال محلول (5-5):

ربطت مزرعة ريحية بخط نقل بالتيار المستمر عالي التوتر HVDC ، المبدل المستخدم مكون من جسرين ثلاثي الطور موصلين على التسلسل، أي مكون من 12 نبضة في الدور. يوضح الشكل (5-46) بنية الجسور. نسبة التحويل للمحول المستخدم $n = 0.4$ ، إذا كان توتر الشبكة الابتدائي 220kv ، ويعمل الجسر عند زاوية تأخير $\alpha = 15^\circ$ ، وكان تيار الخط المستمر يساوي 1000 أمبير . احسب ما يلي :

- 1- توتر الحلقة المستمرة (توتر خط النقل)
- 2- القيمة الفعالة لتيار المزرعة الريحية المتناوب
- 3- الاستطاعة الردية المستجرة أو التي يستهلكها جسر التقويم
- 4- الاستطاعة الظاهرية والفعالة المقدمة من المزرعة الريحية

الحل :



الشكل (5-46) جسور التقويم في جهة الإرسال

1- كل جسر تقويم من الجسور المستخدمة سيعطي توتر مستمر تبعاً للعلاقة :

$$U_c = 1.35 V_{ll} \cos \alpha$$

بالتعويض نجد :

$$U_c = 1.35 \cdot 220 \cdot 0.4 \cdot \cos 15 = 114.75 \text{ kv}$$

أي ان توتر خط النقل وبالتالي حلقة التوتر المستمر تساوي ضعف القيمة أي

$$V_d = 2 \cdot 114.75 = 229.5 \text{ kv}$$

ملاحظة:

حتى تتشكل لدينا 12 نبضة توتر في الخرج وتتنخفض التوافقيات، نعمل على ربط أحد الجسور في ثانوي المحول الموصل بشكل نجمي، ونربط الجسر الثاني إلى نفس المحول ولكن بعد جعل التوصيل مثلثي وهذا تم توضيحه في الشكل (5-44) أعلاه. توتر الجسرين سيكون متساوي ويجب أن يكون كذلك .

العلاقة النازمة لحالة التوصيل النجمي في الدخل هي التي عرضت سابقاً :

$$U_c = \frac{2q}{\pi} V_m \sin \frac{\pi}{q} \cos \alpha$$

حيث أن قيمة التوتر V_m هي توتر الطور الأعظمي. في حال توصيل ثانوي المحول بشكل مثلثي وربط الجسر سيعطي توتر الخرج بالعلاقة :

$$U_c = \frac{q}{\pi} V'_m \cos \alpha$$

V'_m هو توتر الخط الأعظمي للملفات الموصلة مثلثي. عندئذ يتساوى توتر الجسرين الموصلين نجمي أو مثلثي.

2- يعطى التيار المتناوب القادم من المحول الرئيسي المغذي لجسور التقويم بدلالة تيار

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot I_d \quad \text{الخرج المستمر بالعلاقة :}$$

بما أن نسبة التحويل للمحول $n = 0.4$ فإن تيار المنبع القادم من المزرعة الريحية للمقوم الأول

$$I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} : \text{سيساوي} \quad 0.4 \cdot 1000 = 311.88 \text{ A}$$

التيار للجسر الموصل نجمي يساوي هذا التيار وبالتالي تيار المزرعة الريحية سيصل للقيمة :

$$I = 2 \cdot 311.88 = 623.76 \text{ A}$$

3- يمكن للتسهيل اعتبار أن زاوية عامل الاستطاعة تساوي زاوية التأخير، (علماً أنها

ليست بالضبط كذلك في الجسور الموصلة بشكل نجمي ويوجد فرق 30 درجة انزياح) وهي

للجسور الموصل بشكل نجمي تعطى بالعلاقة : $\psi + (T/4 - T/2q)$ ، T هي الدور و q عدد

الأطوار. تساوي زاوية عامل الاستطاعة زاوية التأخير في حال الوصل المثلثي $\alpha = \psi$

وعليه نحسب الاستطاعة الردية بالعلاقة :

$$P_{reactive} = \sqrt{3} V * I * \sin \psi$$

بالتعويض نجد أن $P_{reactive} = 61.5 \text{ MVar}$

4- استطاعة المزرعة الريحية الظاهرية تساوي :

$$P_{app} = \sqrt{3} V * I = \sqrt{3} * 220 * 10^3 * 623.76 = 237.685 \text{ MVA}$$

الاستطاعة الفعلية تساوي :

$$P_{active} = \sqrt{3} V * I * \cos \psi = 229.6 \text{ MW}$$

مثال محلول (5-6):

خط نقل بالتيار المستمر عالي التوتر HVDC ، ينقل استطاعة قدرها 1000 MW ،توتر الحلقة المستمرة، توتر النقل 500 كيلو فولت. مقاومة خط النقل المستمر $2\Omega/\text{line}$ ومقاومة التبديل المكافئة التي يظهرها كل مبدل تساوي : $2\Omega = \frac{3wlr}{\pi}$. يعمل النظام عند تيار ثابت Constant Current(C.C)، حيث زاوية التأخير بالطور للجسر المقوم كانت $\alpha = 15^\circ$. يعمل الجسر العاكس عند الزاوية $\beta = 20^\circ$ (زاوية تقدم Advanced Angle) احسب ما يلي:

1. القيمة الفعالة لتوتر الخط المتناوب للشبكة العامة

2. الاستطاعة الردية المستجرة من قبل الجسر العاكس .

الحل :

1- تيار الخط المستمر يمكن حسابه من العلاقة :

$$I_d = \frac{P_{active}}{V_{dc}} = \frac{1000 * 10^6}{500 * 10^3} = 2000 \text{ A}$$

من العلاقة النازمة اتيار خط النقل يمكن استنتاج توتر الخط .

$$I_d = \frac{1.35 V_{ll} \cos \alpha - 1.35 V_{ll} \cos \beta}{\frac{3wlr}{\pi} + \frac{3wli}{\pi} + R_L}$$

$$I_d = \frac{1.35 V_{ll} \cos 15 - 1.35 V_{ll} \cos 20}{2+2+2*2} = 2000 \text{ A}$$

$$V_{ll} = 451.8 \text{ KV}$$

2- بفرض أن زاوية عامل الاستطاعة قريبة من زاوية التأخير بالطور

$$15^\circ = \psi = \alpha$$

نحسب التيار المتناوب للمبدل الواحد يساوي :

$$* I_d = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * 2000 = 1559.4 \text{ A} \quad I_1 = \frac{\sqrt{6}}{\pi}$$

عليه فإن الاستطاعة الردية المستجرة سواء من قبل المقوم أو العاكس تحسب تبعاً لقيمة زاوية

التأخير التي يعمل عندها الجسر . بالنسبة لجسر التقويم تساوي :

$$P_{reactive} = \sqrt{3} V * I * \sin \psi$$

$$P_{reactive} = \sqrt{3} \cdot 451.8 \cdot 1.5594 \cdot \sin 15 = 315.8 \text{ MVar}$$

4-4-5 مبدلات منبع التوتر (VSC) Voltage Source Converters

اتجه الباحثين بعد حدوث التطور الهائل في القواطع الإلكترونية الحديثة نوع IGBT & GTO، نحو استخدام جسور تبديل تعمل انطلاقاً من منبع توتر، نطلق عليها المعرجات المستقلة-DC AC Converters، أو معرجات التوتر Voltage Source Converters (VSC) يتم تشكيل جسور التقويم والتعريض الثلاثية الطور المضاعفة كما في الجسور الثيرستورية (جسر كريتز) من ستة قواطع لكل فرعة قاطع، في التوترات العالية كما سنتحدث بعد قليل سنعمل على ربط عدد كبير من القواطع على التسلسل في كل فرعة من الجسر الثلاثي الطور. يتم قيادة الوصل والفصل لهذه القواطع باستخدام الألياف الضوئية Viber Optic، حرصاً على تأمين التوصيل الفوري لجميع القواطع بأن واحد. تولد نبضات القذح بعيداً عن الجسور وتنقل الإشارة للقرب من البوابات حيث يعاد تحويل الإشارة الضوئية إلى كهربائية وقذح القاطع.

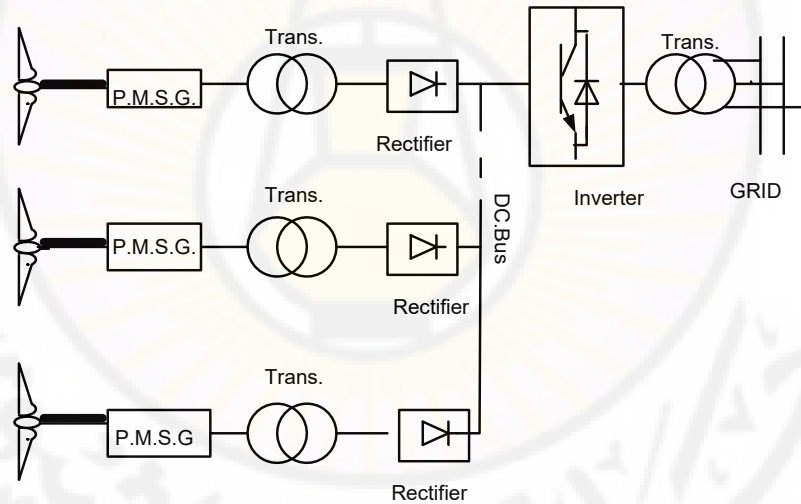
مجموعة القواطع الموصلة على التسلسل الخاصة لكل فرعة من الطور يجب أن تتحمل التوتر العكسي الذي سينشأ عليها من توتر الدخل (كما بينا أعلاه المبدلات الثيرستورية السابقة التي تعرضنا لها).

تتكون المبدلات من جسور ترانزستورية بقواطع سريعة، الجسر المرتبط بشبكة الإرسال يعمل كمقوم والجسر المرتبط بشبكة الاستقبال يعمل كمعرج حقيقي. أي يحول التوتر المستمر إلى توتر متناوب بتردد متزامن مع تردد الشبكة العامة وبنفس تتابع أطوار الشبكة العامة. هذه المبدلات هي معرجات منبع توتر (VSC) (Voltage Source Converters) قادرة على عكس جريان القدرة وتأمين انعكاس سريع للقدرة بشكل فائق وتعتبر أسرع من المبدلات ذات منبع التيار التي عرضناها منذ قليل CSC.

هذه المبدلات VSC قادرة على استهلاك وتوليد الاستطاعة الفعالة والردية وبشكل مستقل كل مبدل عن الآخر. نسبة التوافقيات الناشئة ستكون أقل ومطامها أصغر، مما يخفض من حجم المرشحات الواجب توظيفها للترشيح. هذه المبدلات قادرة على الإقلاع من حالة الظلام لشبكة التوتر المتناوب Black Start، مما يعني إمكانية حقن القدرة في شبكة غير مغذاة بأي منبع توتر آخر. عملية فصل ووصل القواطع في الجسور المستخدمة تتم بشكل ذاتي، تعتمد على نبضات الوصل والفصل المطبقة على البوابات من دائرة القيادة للجسور. بالمقابل المبدلات ذات منبع التيار السابقة، لا يمكنها حقن قدرة في شبكة غير فعالة، أي شبكة ليس فيها منبع توتر

متناوب يطبق توتراً متناوباً على قضبان التوزيع في محطة الاستقبال. المبدل الموصول جهة الاستقبال والذي يعمل كعاكس، سيتم تبديل التيار فيه اعتماداً على توتر الشبكة المستقبلية وسيعمل تبعاً لتوترها وترددها. لهذا كنا قد أطلقنا على عملية التبديل للجسر العاكس التبديل عن طريق الحمل أو الشبكة Load Commutated Converter ، هذا الجسر كالجسر الأول يقدر أو يتم تشغيلهما عن طريق نبضات القدر الخاصة بالجسور لكن عملية الفصل تتم عن طريق توترات الأطوار، مما نسميه التبديل عن طريق توتر الطور [18]

في الشكل (5-47) بين كيف يمكن استخدام المبدلات ذات منبع التوتر، وهي جسور ترانزستورية تعمل كمعرج مستقل تحول التوتر المستمر إلى توتر متناوب، من نفس تردد وتوتر الشبكة العامة جهة الاستقبال.



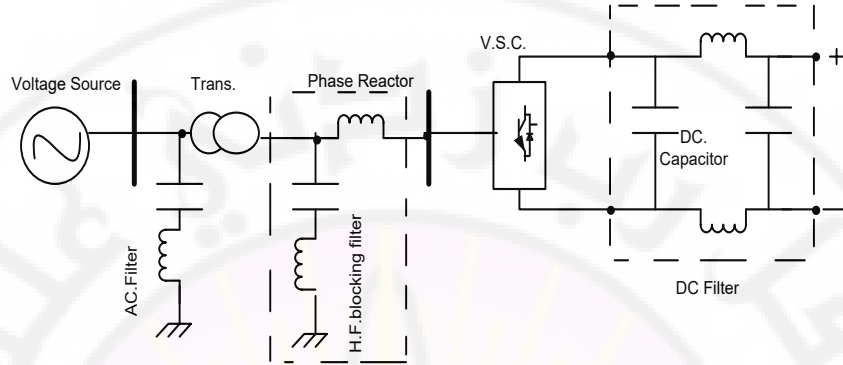
الشكل (5-47) استخدام معرجات توتر في طرف الاستقبال وجسور تقويم غير مقادة في طرف الإرسال

المكونات الأساسية لمبدل منبع التوتر:

يبين الشكل (5-48) مكونات مبدل منبع التوتر وهي :

- 1- وحدة القواطع Valve Units
- 2- مكثفات التوتر المستمر Dc-Capacitors
- 3- محولات التوتر المتناوبة الثلاثية الطور Ac-Transformers
- 4- مفاعلات الطور Phase Reactors

5- المرشحات Filters (مرشحات التردد العالي ومرشحات التوتر المستمر)



الشكل (5-48) المكونات الرئيسية لمعرج التوتر أو مبدل منبع التوتر

من الشكل (5-48) إذا أهملنا مركبات التوتر التوافقية الناتجة عن مبدل التوتر VSC، فإن تيار الخط يمكن حسابه من العلاقة :

$$I = \frac{V_{VSC} - V_{AC}}{jX} \quad \dots (20-5)$$

X : هي الممانعة الكلية للمحول ومفاعلات الطور . لذا فإن الاستطاعة العابرة ، التي تعبر من مبدل التوتر في نهاية خط النقل للشبكة العامة يمكن حسابها من العلاقة :

$$P + Q = V_{ac} * I = V_{ac} \left[\frac{V_{VSC} - V_{AC}}{jX} \right] \quad \dots (21-5)$$

بفرض أن التوتر المتولد من مبدل التوتر هو من الشكل $V_{VSC} \angle \delta$ ، (وعليه فإن هذا التوتر يمكن كتابته بالشكل :

$$V_{VSC} = V_{VSC} (\cos \delta + j \sin \delta) \quad \dots (22-5)$$

ومنه يمكن حساب الاستطاعة الفعالة P والردية Q من العلاقات :

$$P = \frac{V_{ac} \cdot V_{VSC} \cdot \sin \delta}{X} \quad \dots (23-5)$$

$$Q = \frac{V_{ac} \cdot (V_{VSC} \cdot \cos \delta - V_{ac})}{X} \quad \dots (24-5)$$

مثال محلول (5-7)

مزرعة ريحية باستطاعة 500 ميغا وات، تم استخدام مبدل توتر (معرج توتر) VSC، ربط المبدل على شبكة توتر متناوب توترها 400 كيلو فولت. عبر محول استطاعة باستطاعة 600 ميغا وات، بتوترات 250 / 400 كيلو فولت. للمحول ممانعة تسريبية $X=20\%$. علماً أن ممانعة ملف الطور المستخدم عند الاستطاعة 500 ميغا وات وتوتر 250 كيلو فولت كانت (P.U) 0.2.

أوجد التوتر الواجب توليده من قبل مبدل التوتر كي يستطيع إعطاء استطاعة قدرها 300 ميغا وات للشبكة العامة، عند عامل استطاعة واحد. إذا كان توتر النقل 500 كيلو فولت، ما هي قيمة عامل التعديل للمبدل ma (في نظام تعديل عرض النبضة P.W.M).
تعطى العلاقة بين توتر الخط في الشبكة وتوتر المبدل بالشكل : $V_{DC} = 0.612 \cdot ma \cdot V_{II}$.

الحل :

بأخذ 500 ميغا فولت أمبير كأساس لاستطاعة القصر، فإن ممانعة المحول بالقيم الواحدية يمكن حسابها بالشكل التالي:

$$= 0.167 \text{ p.u} \cdot 0.2 \cdot 500 \text{ (MVAR)} / 600 \text{ (MVAR)}$$

الاستطاعة الفعالة الواجب تقديمها من المبدل للشبكة تعادل بالقيم الواحدية :

$$300 \text{ (mvar)} / 600 \text{ (mvar)} = 0.6 \text{ p.u}$$

من العلاقة النازمة لحساب الاستطاعة الفعالة :

$$P = \frac{V_{ac} \cdot V_{VSC} \cdot \sin \delta}{X}$$

بالتعويض نجد :

$$P = \frac{1 \cdot V_{VSC} \cdot \sin \delta}{(0.167 + 0.2)} = 0.6$$

ومنه فإن :

$$V_{VSC} \cdot \sin \delta = 0.22$$

حيث أن الاستطاعة سوف تحقق عند عامل استطاعة واحد فإننا يمكن من علاقة الاستطاعة الردية استنتاج :

$$Q = \frac{V_{ac} \cdot (V_{VSC} \cdot \cos \delta - V_{ac})}{X} = 0$$

وعليه فإن :

$$(V_{VSC} \cdot \cos \delta - V_{ac}) = 0$$

$$V_{VSC} \cdot \cos \delta = 1$$

بالتعويض بين العلاقات والاختصار نكتب :

$$V_{VSC} = \sqrt{1 + 0.22^2}$$

وتساوي 1.024 واحد أي ما يعادل 256 كيلو فولت توتر خط-خط . الزاوية δ ، تعطى

$$\delta = \cos^{-1} (0.22) = 12.4^\circ$$

معامل التعديل يمكن حسابه من العلاقة :

$$V_{II} = 0.612 \cdot Ma \cdot V_{DC}$$

وبالتعويض نجد :

$$256 = 0.612 * Ma * 500 = 0.84$$

5-5 تبادل القدرة باستخدام توتر متناوب منخفض التردد 16.6-25 Hz (مبدل الطور)

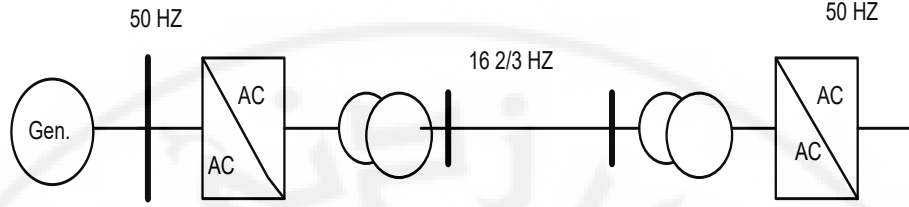
Transmission by Low Frequency AC Voltage (CYCLOCONVERTER)

5-5-1 مقدمة

انتشرت المزارع الريحية البحرية على مسافات تجاوزت الـ 100 كلم في عرض البحر بعيداً عن الشاطئ. وقد صلت استطاعة البعض منها إلى ما يقارب 30 GW، هذا يتطلب المزيد من شبكات النقل، والمزيد من عمليات التوفير وخفض المفاوئد. إن نظام النقل بالتيار المتناوب HVAC 50-60 هرتز، يقدم عادة أرخص الحلول، لكن أيضاً لمسافات محددة، وقد تبدو صغيرة مقارنة مع شبكات التوتر المستمر HVDC. طول كابلات التوتر المتناوب يتعلق بسعة الكابل، كلما زاد الطول زادت الممانعة Reactance ، وهذا يسبب زيادة قيم تيار الشحن في الكابل ووصوله لقيم مرتفعة، ولا يمكن بعدها نقل أية استطاعة فعالة. تبين أن طول المسافات الفعالة في حالة النقل بالتيار المتناوب لا يتجاوز 150 كيلو متر وإن نصف هذه المسافة كاف لنقل طاقة فعالة بشكل مثالي.

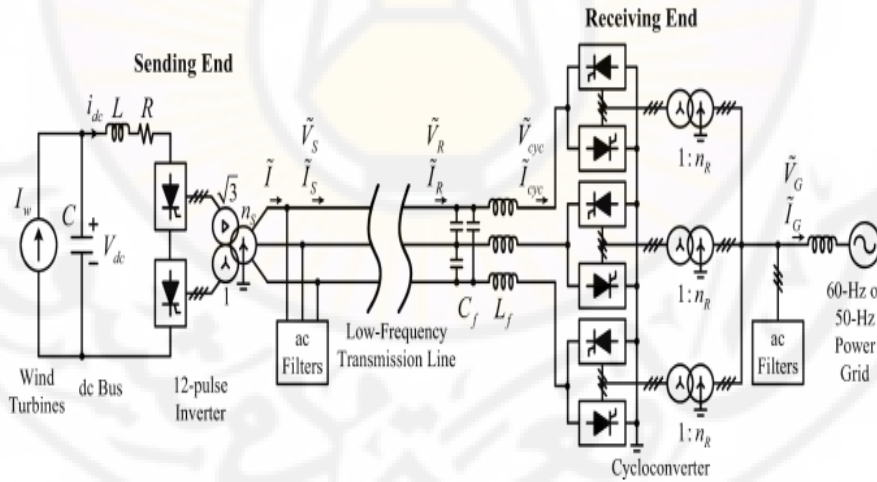
كما أن كابلات التوتر المستمر المستخدمة في أنظمة النقل بالتيار المستمر، تتلافى متطلبات التيار الردي، وكلا النظامين المعتمدين في شبكات النقل بالتيار المستمر (VSC-LCC) يمتازان بعدم حاجتهما لمرشحات كبيرة للمساهمة في التبدل أو تحسين التوافقيات ، ويمكنهما التحكم بالاستطاعة الفعالة والردية بشكل مستقل.

يساهم التوجه نحو النظام الجديد للنقل بالتيار المتناوب ضعيف التردد Low Frequency Alternating Current (LFAC)، في رفع قيم التيار الممكن تمريره بالكابلات. وذلك لأن ممانعة الخط سوف تنخفض وبالتالي تنخفض تيارات الشحن أو الحمل. وقد يصبح طول الكابلات الممكن استخدامها مقارب لطول الكابلات في شبكات التوتر المستمر. يبين الشكل (5-49) بين مخطط رمزي للنقل بالتردد المنخفض حيث يوجد مبدل الكتروني عند الإرسال ومبدل آخر عند الاستقبال .



الشكل (5-49) البنية العامة لنظام نقل بالتردد المنخفض

أما الشكل (5-50) فيبين البنية الكاملة لمثل هذه الأنظمة، حيث نجد مبدل أولي Cycloconverter مرتبط بالعمفة الريحية يعمل على تحويل تردد خرج العمفة إلى تردد منخفض، ثم يطبق هذا التوتر على محول رفع التوتر حسب سوية التوتر المناسبة للنقل، وذلك لخط نقل نقل بالتردد المنخفض. في طرف الاستقبال نضع مبدل تردد ثاني (قد يكون من نفس التركيب أو مبدل من نوع آخر يقوم بنفس الغاية) مهمته تحويل تردد خط النقل القادم من المزرعة الريحية إلى تردد الشبكة العامة، يطبق خرج المبدل على محول استطاعة للربط على الشبكة العامة الموجودة في البر.



الشكل (5-50) البنية الكاملة لنظام نقل بالتردد المنخفض [21]

5-5-2 بنية نظام النقل بالتيار المتناوب ضعيف التردد

إن تردد العمل المعتمد عالمياً يتراوح بين القيمتين (16.67 هرتز أو 25 هرتز) حيث في النظام الأوروبي يعتمد التردد المنخفض 16.67 هرتز، وهو متداول منذ فترة بعيدة لتغذية القطارات في المدن وفي أنظمة الجر الكهربائي عند استطاعات عالية جداً. إذ أن تخفيض

التردد في خطوط النقل الكهربائية يساهم في خفض تيار الشحن في الكابلات والذي يعطى بالعلاقة :

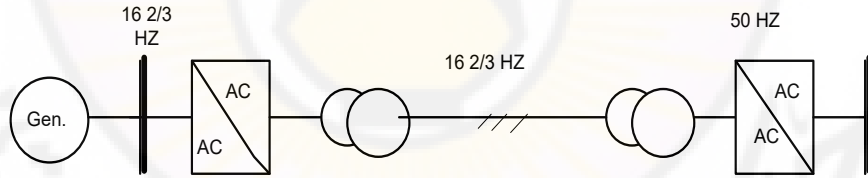
$$I_C = V_{LL} / \sqrt{3} * 2\pi F C l$$

V_{LL} توتر الخط ، F تردد الخط ، C السعة لوحدة الطول ، l طول الكابل .

يسبب تيار الشحن توليد كمية كبيرة من الاستطاعة الردية . يمكن التعبير عنها بالعلاقة:

$$Q_C = 3 I_C * V_{LL} / \sqrt{3} = 2\pi F C l V_{LL}^2$$

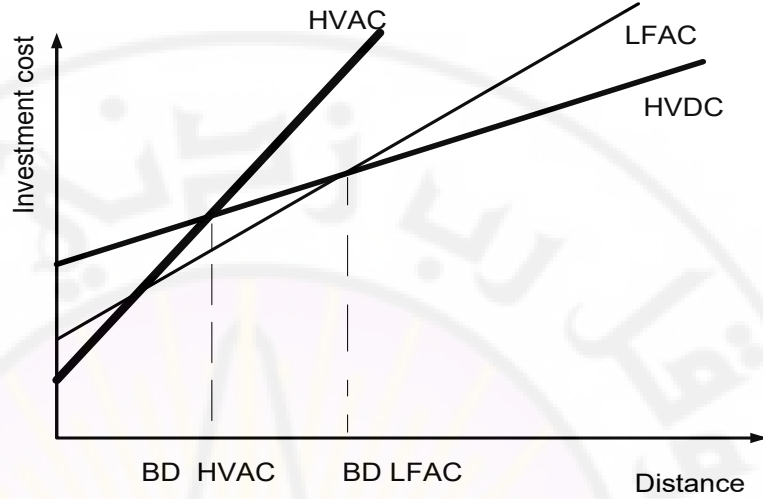
كما أن زيادة قيمة الاستطاعة الردية في خط النقل تخفض من قيمة الاستطاعة الفعالة الممكن نقلها. هذا وإن مسافة النقل عموماً تعتمد على مقدار تعويض الاستطاعة الردية. الذي غالباً ما يتم بوضع معوضات تفرعية في بداية ونهاية خط النقل وأحياناً في منتصفه. بما أن النقل بالتيار المتناوب ضعيف التردد يعتمد بالأساس على بنية الشبكات المتناوبة النظامية، فإنه أحياناً نتجنب وضع مبدلات الكترونية في طرف الإرسال (ضمن البحر) والاكتفاء بجعل تردد هذه المولدات الريحية ضعيف التردد. لكن بالتأكيد لا بد من مبدلات الكترونية في جهة الاستقبال لتحويل التردد المنخفض إلى تردد الشبكة العامة 50-60 هرتز. الشكل (5-51) يوضح البنية العامة للنظام بدون وجود مبدلات ضمن البحر .



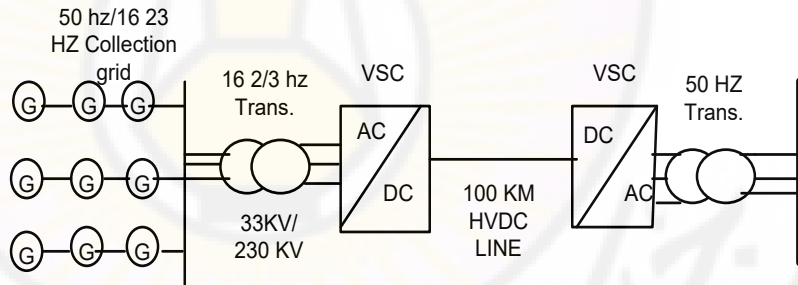
الشكل (51-5) [19] النقل بالتردد المنخفض دون استخدام مبدل تردد في جهة الإرسال

(ضمن البحر) [19]

هذه العملية تسبب تأمين كسب مادي مقارنة مع شبكات التوتر المستمر HVDC ، وعليه فإن مسافة النقل الاقتصادية سوف تنخفض كما في الشكل (5-52) الذي يعطي التكاليف الإجمالية كتابع لمسافة النقل، وذلك لأنظمة النقل الثلاث HVAC, HVDC, LFAC.



الشكل (5-52) انخفاض مسافة النقل الاقتصادية كتابع للتكاليف لأنظمة النقل الثلاث [19]
الأسلوب الثاني في النقل ، هو تركيب مبدلات تردد في طرف الإرسال وفي طرف الاستقبال
، كما وضحنا ذلك الشكل (5-53).



الشكل (5-53) البنية العامة لنظام نقل بتردد منخفض مع مبدلات في طرفي الخط [20]
عدد مبدلات التوتر الواجب تركيبها، يعتمد على استطاعة النقل واستطاعة المزرعة الريحية.
تقوم المبدلات الإلكترونية المركبة في جهة الإرسال بتحويل التوتر المتناوب بتردد 50 هرتز
إلى توتر متناوب بتردد 16.67 هرتز، ويطبق هذا التوتر ذو التردد المنخفض على محولات
استطاعة تردد منخفض لرفع توتر الإرسال. من جهة الاستقبال توضع المحولات والمبدلات
بطريقة مماثلة، لكن هذه المرة ستعمل المبدلات على تحويل تردد التوتر الضعيف إلى تردد
الشبكة العامة وحقق القدرة في هذه الشبكة .
يمكن أحياناً تركيب مبدلات مضاعفة Back-to-Back Converters ، في قمرة العنفة ذاتها، وتقديم
التوتر بالتردد المنخفض وعندئذ نستغني عن مبدلات طرف الإرسال.

لتحقيق عمليات التبديل بالتردد نستخدم عادة مبدل التردد Cycloconverter، وهو مبدل الكتروني مكون غالباً من قواطع ثيرستورية، لا يمكنه التحكم بالاستطاعة الردية ولا بالتوتر، عامل الاستطاعة له دائماً متأخر بحاجة لمعوضات سعوية. كما أنه منبع للتوافقيات ذات الرتب المنخفضة ولذا هو بحاجة لمرشحات كبيرة أو المبدل الماتريسي الحديث Matrix Converter، وهو مكون من قواطع الكترونية ترانزستورية غالباً. وسنعمل على عرض مكونات هذه الأنظمة لاحقاً.

5-3-5 ميزات استخدام التردد المنخفض في نقل الطاقة الكهربائية

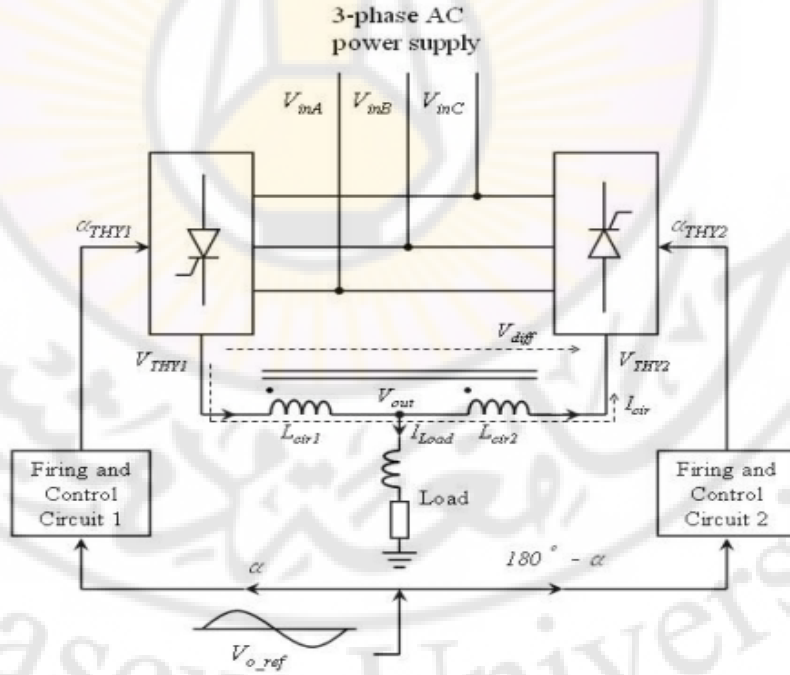
Benifts of and Challenge of LFAC Transmission

- 1- **حد الاستقرار العابر ، Transient Stability Limit** ، هو الحد الهام في تحديد استطاعة النقل العظمى. يأخذ أهمية كبيرة في خطوط النقل الطويلة التي قد ينهار فيها التوتر Voltage Collapse. وحيث أن الاستطاعة العظمى التي تسري بين نهايتين، يعتمد على توترات الإرسال والاستقبال وممانعة الخط بينهما، وفرق الزاوية، فإن انخفاض التردد سيساهم بشكل كبير في تغيير قيمة الممانعة الاجمالية ويسعى لنقصانها وعليه تزداد استطاعة النقل.
- 2- **ازدياد سعة النقل على حساب الاجهادات الحرارية** Increased Capacity on Thermally Constrained Cables تتصف خطوط النقل الهوائية والكابلات الأرضية بحدود ارتفاع حرارة محدد، تتمثل بقيمة التيار الأعظمي المسموح مروره بالكابل. تيارات الشحن الناتجة عن السعة التفرعية الكبيرة Sascptance والسماحية ، تخفض من قيمة الاستطاعة الفعالة الممكن نقلها عند حد الحرارة المسموح به. السماحية B_{ij} ، لكابل بسعة C_{ij} ، هي $C_{ij} B_{ij} = w$ ، تخفيض التردد سوف يخفض السماحية وبالتالي تخفيض تيار الشحن والعمل على زيادة استطاعة النقل .
- 3- **تحسين النقل بفضل استخدام مبدلات التردد وهي بذلك تقدم مميزات مماثلة لحالة استخدام النقل بالتيار المتناوب المرن ، Flexible AC Transmission (FACTS)** ، والنقل بالتيار المستمر عالي التوتر HVDC .
- 4- **يمتاز هذا النظام بأنه يستفيد من التجهيزات القائمة لشبكات التوتر المتناوب ذات التردد 50 هرتز (يتم استبدال المحولات)**
- 5- **تشكل هذه الأنظمة دعم في استقرار الشبكات ذات التوتر المستمر متعددة النهايات ، والأبحاث تجري حول طبيعة أنظمة الحماية الواجب اعتمادها.**

4-5-5 مبدل التردد الثيرستوري Cycloconverter Characteristics

1-4-5-5 مبدل التردد الثيرستوري

مبدل التردد حسب الشكل (5-54) يتكون من جسرين متقابلين، حسب نظام المبدلات المضاعفة Dual Converters، الموصلة رأس عقب، أي أن تيار الحمل المتناوب يستطيع المرور كيفما شاء، الجسر الموجب يمرر التيار الموجب والجسر السالب يمرر التيار السالب، تعمل الثيرستورات على أجزاء من توترات الدخل لتشكل توتر الخرج، وهي تعمل عند زوايا إزاحة بالطور غير متساوية ولفترات زمنية من الدور غير متساوية. هذه المبدلات تحول التوتر الثلاثي الطور إلى توتر أحادي الطور، وقد تكون المبدلات تفرعية بسيطة أو تفرعية مضاعفة أو أحادية الطور. تربط ملفات الطور على خرج كل جسر للتخفيف من التوافقيات وتنعيم التوتر.



الشكل (5-54) الشكل العام لمبدل التوتر الثيرستوري وطريقة ربط الجسور على التضاد

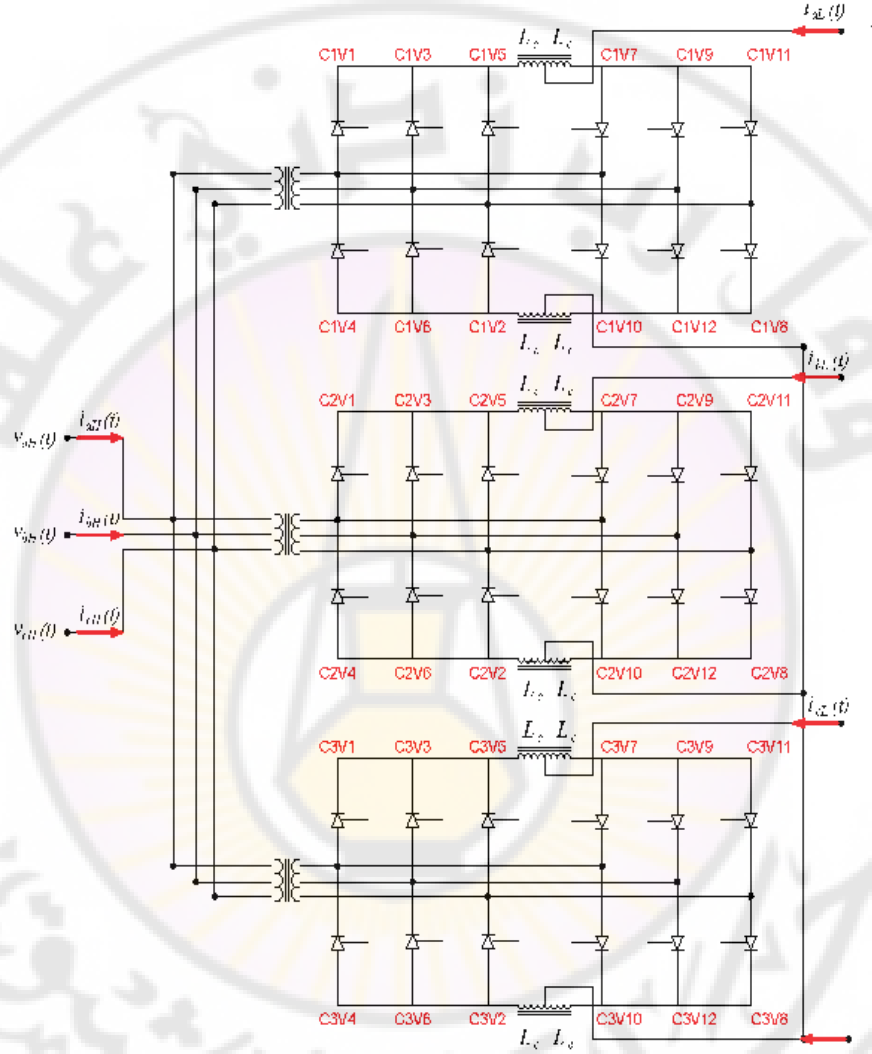
الشكل (5-55) يوضح طريقة ربط الجسور التفصيلية وذلك لمبدل التردد الثلاثي الطور ذو ست نبضات. كل مجموعة تبديل مكونة من 12 ثيرستور، لأنها عبارة عن جسرين ثلاثي الطور مضاعفين. تغذى الجسور من محولات ثلاثية الطور، وهي بدورها مرتبطة على العنقات

الريحية. توتر الخرج من كل مجموعة هو توتر أحادي الطور متناوب بتردد منخفض. يؤخذ من حلقة الوصل بين الجسرين. يمكن بالتالي ربط هذه التوترات الأحادية الطور بشكل نجمي وتغذية محول ثلاثي الطور للربط على الشبكة.

تعمل مبدلات التردد هذه على خفض التردد، وعموماً تردد الدخل يكون 50 هرتز وتردد الخرج 16.7 هرتز. التطبيقات العملية المتداولة لهذا المبدل كانت في مجال الجر الكهربائي للقطارات في أوروبا، وفي تدوير المحركات بطيئة السرعة مثل المطاحن ومعامل الاسمنت. لكن في مجال العنفات الريحية البحرية بدء باستخدام هذه المبدلات لنقل الطاقة الكهربائية الناتجة عن المزارع الريحية البحرية إلى اليابسة وتطلب الأمر استخدام مبدلات خافضة للتردد ومبدلات رافعة للتردد .

تمتاز المبدلات الخافضة للتردد والتي تستخدم الثيرستور كعنصر قطع وتبديل، بأنها تعمل بشكل طبيعي أي تبديل طبيعي Natural Commutation ، وتعتمد على توتر الشبكة لتحقيق التبديل. عليه فإنها لا تحتاج إلى دوائر حيز قسرية إضافية. كما بينا تردد الخرج في هذه المبدلات لن يتجاوز 2/3 من تردد الدخل. وموجة التوتر الناتجة والتي تم تشكيلها من أقواس أمواج توتر الدخل، ستكون مليئة بالتوافقيات. التوافقيات هذه إما أن تكون من مضاعفات ترد الدخل Subharmonics أو من توافقيات بينية، تقع بين رتبتين من التردد، أي التوافقية ذات الرتبة 23 وهي المتوسط الحسابي للتوافقية 25 والتوافقية 24. كمثال نجد أن طيف التوافقيات الناتج عن مبدل مكون من 12 نبضة Pulse ، يمكن أن يحسب بالعلاقة :

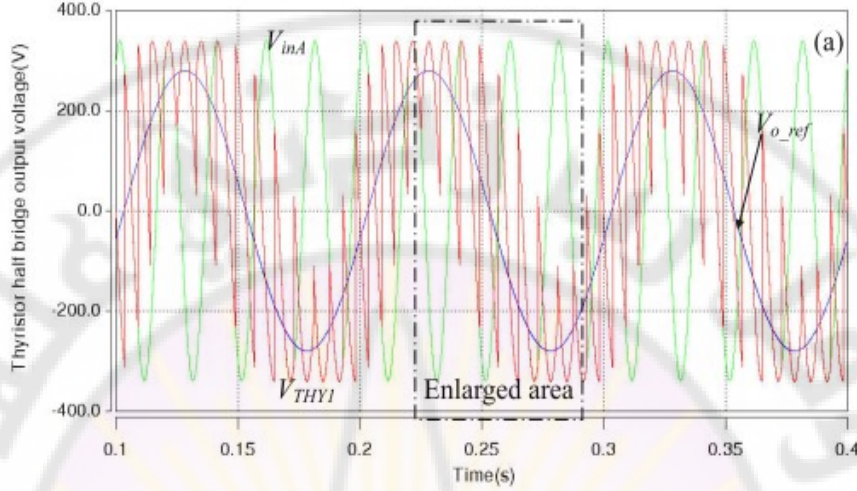
$$F_{oh} = 6 f_i \mp (2n + 1) f_o$$



الشكل (5-55) مكونات مبدل التردد الثلاثي الطور ذو ست نبضات

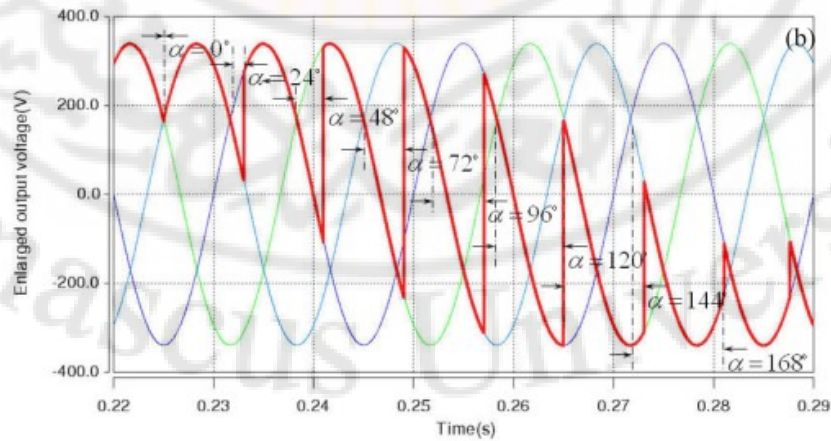
حيث أن : F_{oh} تردد التوافقيات في الخرج ، f_i تردد توتر الدخل ، f_o تردد توتر الخرج ، i_n عدد يتغير من الصفر للانهاية .

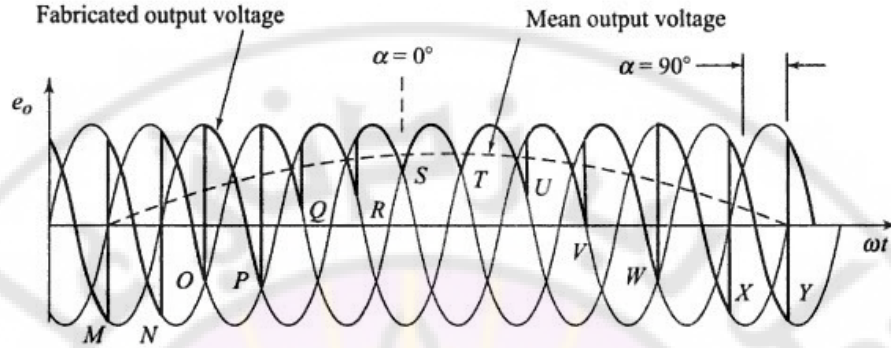
عندما نرغب الحصول على توتر خرج من المبدل بتردد أعلى من تردد الدخل ، فإن عتبة رتبة التوافقيات سوف ترتفع وستكون من مضارب تردد الدخل ، وسنحصل أيضاً على توافقيات من مضاعفات تردد الدخل وتوافقيات بينية ، عموماً في هذه الحالة حذف هذه التوافقيات أصعب ويحتاج إلى مرشحات كبيرة. الشكل (5-54) أدناه يوضح شكل موجة الخرج وكيف أنها مكونة من أقواس أمواج موجة توتر الدخل.



الشكل (5-56) شكل موجة الخرج وكيف أنها مكونة من أقواس أمواج من موجة توتر الدخل

يوضح الشكل (5-57) أكثر تفاصيل موجة توتر الخرج لمبدل التردد [71]. حيث نرى أن كل ثيرستور يعمل لفترة زمنية مختلفة عن فترة عمل الثيرستور الآخر، كما أن فترة التوصيل لكل ثيرستور مختلفة. موجة توتر الخرج هي مغلف أقواس الأمواج المحصلة من توتر الدخل. تردد الخرج تابع لتردد موجة الأساس التي تم اعتمادها لدى قيادة المبدل ويمكن تغييرها أيضاً. نسبة التشوه الكلي بالتوافقيات للتوتر Total Harmonic Distortion (THD%) للمبدلات ذات التبديل الطبيعي تصل إلى $THD\% = 15.24\%$. بالمقابل بالنسبة للمبدلات الرافعة للتردد ذات التبديل الطبيعي تصل نسبة التشوه بالتوافقيات إلى 32.57% .



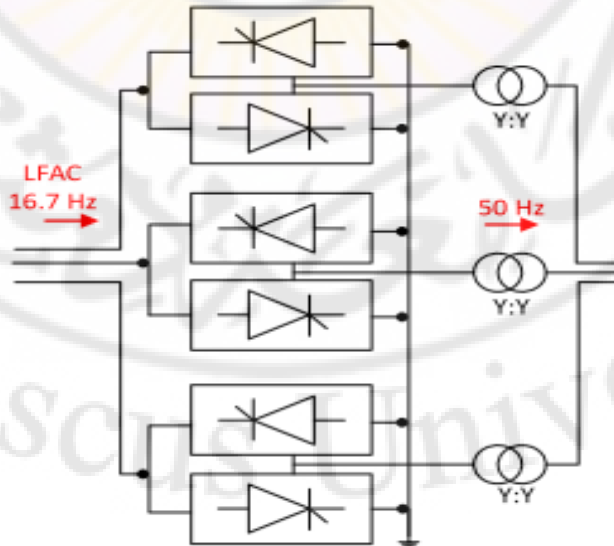


الشكل (5-57) طريقة الحصول على موجة الخرج من أقواس توترات الدخل

5-4-2 مبدل التردد الترانزستوري الرفع للتردد ،المبدلات المصفوفية

Matrix Converter

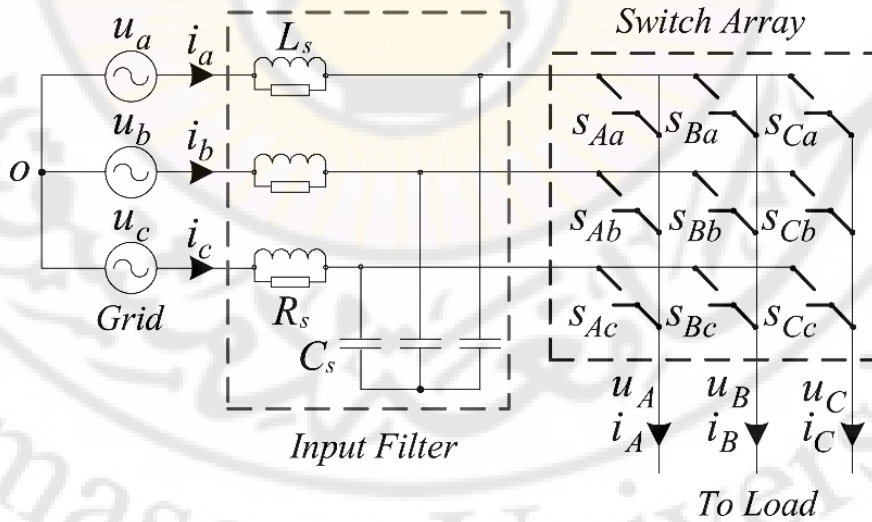
يمكن استبدال القواطع الثيرستورية بقواطع ثيرستورية مقادة عند الوصل والفصل تسمى GTO ، أو بعناصر قطع من الترانزستورات ذات البوابة المعزولة IGBT ، Gate Turne On thyristors ، أو بعناصر قطع من الترانزستورات ذات البوابة المعزولة IGBT ، بهذه العناصر يمكن العمل على رفع تردد الخرج والوصول لتوتر خرج بتردد يساوي ثلاث أمثال تردد الدخل. الشكل (5-58) يبين الشكل العام لهذه الأنظمة. هذا المبدل يوضع عادة في طرف الاستقبال لخط النقل بالتردد المنخفض، يعمل على تحويل تردد النقل 16.7 هرتز إلى تردد الشبكة العامة 50 هرتز.



الشكل (5-58) مبدل رافع للتردد ثلاثي الطور ذو 36 نبضة [22]

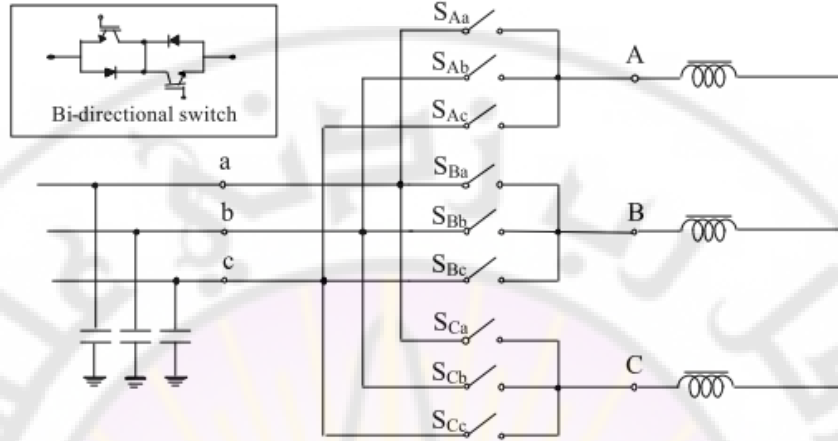
تعرف مبدلات التردد ذات القواطع المقادة عند الوصل والفصل باسم مبدلات التردد القسرية Forced Commutation Converters(FCC) . في هذه الأنظمة نسبة التوافقيات الناتجة في موجة الخرج سواء منها التوافقيات العليا أو البينية أقل بكثير من المبدلات ذات التبديل الطبيعي، وذلك نظراً لتطور علم قيادة هذه القواطع ومكونات دارات القيادة.

تم منذ فترة استخدام نوع جديد من المبدلات المقادة، [22] ذات التبديل القسري لتحويل التوتر ذي التردد المنخفض إلى توتر بتردد أعلى وقد يصل لثلاث أمثال تردد الدخل (50 هرتز) ، وسميت بالمبدلات المصفوفية Matrix Converter . تم اقتراح هذا المبدل في الثمانيات 1980 ، لكن في السنوات الأخيرة تطورت أساليب قيادته و مكونات دارات القيادة التابعة له. حسب الشكل العام (5-59) نرى أن المبدل المصفوفي يتكون من تسعة قواطع، ثلاث قواطع لكل طور من أطوار التوتر المتناوب الثلاثي الطور. حيث أن الطور الأول في الخرج، مثلاً يوصل بقاطع للطور الأول في الدخل، وبقاطع ثاني للطور الثاني بالدخل، وبقاطع ثالث للطور الثالث في الدخل. أي أن الطور الواحد يرى الأطوار الثلاث حسب وضعية القواطع. تتكرر هذه العملية للأطوار الثلاث. الشكل (5-58) يعرض البنية العامة بأسلوب توضيحي آخر [66],[69].



الشكل (5-59) البنية العامة للمبدل المصفوفي

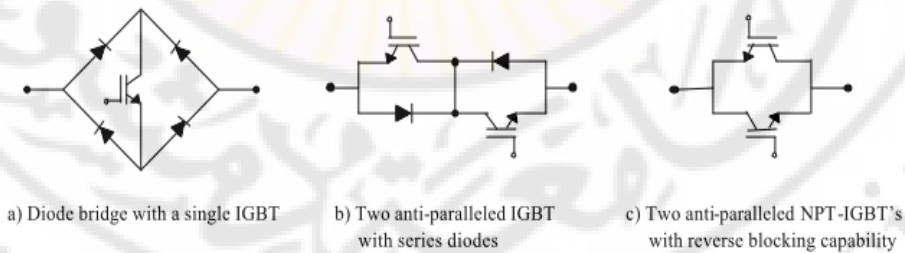
أو حسب الشكل التوضيحي التالي :



الشكل (60-5) البنية العامة للمبدل المصفوفي Matrix Converter

يتكون القاطع الواحد الذي أشرنا إليه في الأشكال أعلاه من قاطعين وديودين، أي أنه قاطع متناوب ثنائي اتجاه التوصيل Bidirectional Ac Switch ، والشكل الجانبي في الشكل (60-5) يوضح ذلك. كما أن الشكل (61-5) يوضح الطرق الثلاث المختلفة لتشكيل القاطع الواحد الثنائي الاتجاه وهي:

- جسر من الديود مع قاطع وحيد نوع IGBT
- قاطعين من نوع IGBT موصلين بالتضاد ، مع ديود تسلسلي لكل منهما .
- قاطعين على التضاد نوع IGBT أو NPT ، مع توفر إمكانية الحجز العكسي



الشكل (61-5) إمكانيات تشكيل القاطع الثنائي الاتجاه



الفصل السادس تجارب تمثيل العنفات الريحية



1-6 مقدمة

يتم في هذا الفصل تدريب الطلاب على استخدام بيئة الماتلاب لتمثيل العنفات الريحية وقد تم وضع خمسة تجارب عملية يمكن تحقيقها في مخبر طاقة الرياح وهي كالتالي:

- التجربة الأولى: استخدام العلاقات الرياضية النازمة لحساب الاستطاعة -العزم الناتج عن العنفة الريحية وحساب معامل الدائر.
- التجربة الثانية: تمثيل المولد الريحي (مولد تزامني مغناطيس دائم) وربطه على العنفة.
- التجربة الثالثة: دراسة أثر تغير سرعة الرياح والتحكم بزاوية الشفرات على توتر خرج المولد الريحي
- التجربة الرابعة: تركيب جسر تقويم على خرج المولد الريحي ودراسة أثر تغير سرعة الرياح على توتر وتيار الحمل
- التجربة الخامسة: آلية نمذجة عناصر النظام الريحي ومحاولات التحكم (العنفة الريحية - المعرج ونظام القدح - الحمل المختلط)

6-2 التجربة الأولى منحني الاستطاعة للعنفة

استخدام العلاقات الرياضية الناعمة لحساب الاستطاعة -العزم الناتج عن العنفة الريحية، وحساب معامل الدائر.

Abstract

In this lecture, students will be introduced to basics of wind energy calculation. In the first example, wind energy using wind speed and air density will be calculated. Power and torque of the wind turbine will be calculated in the second example by using a fixed power coefficient C_p . Finally, Students will use pitch angle β and tip speed ratio λ to calculate power coefficient C_p then use it to calculate power and torque.

First example

Wind power equation

Assume:

- P_{wind} power of wind in [W].
- ρ air density in [Kg/m^3].
- R pitch diameter.
- V wind speed in [m/sec]

Thus the power of wind will be calculated using the following equation:

$$P_{wind} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (1)$$

And the torque can be calculated using the following equation:

$$T_{wind} = \frac{P_{wind}}{W} \quad (2)$$

Where:

- W turbine speed in [rad/sec]
- The suitable MATLAB code are:

```
% First example
% Calculate wind turbine Tourque

% V wind speed in [m/sec]
% roh Air density in [Kg/m^3]
% R Pitch diameter in [m]
% Cp Power factor
% W Turbine speed [rad/sec]

function [Tmech,Pmech] = calcTwind(V,R,Cp,W)

roh = 1.225 ;

Pwind = 0.5*roh*pi*R^2*V^3;

Pmech = Cp*Pwind ;

Tmech = Pmech/W ;

end
```

Figure 6–1 MATLAB code to calculate P_{wind}

Calculate wind power

We will vary wind speed V so turbine speed W will be change also. Assume inn this example that power coefficient is constant at $C_p = 0.52$. Plot the resulting tourque and power generated by the wind. The resulting figures show that power and tourque are correlated to wind speed with third degree level.


```

% apply calcTwind
% Cp is constant
% wind speed is vary from 0 to 15 [m/s]
% rotor speed is vary from 1 tp 48 [rpm]
% V [m/sec]
R = 14; % [m]
% N [rpm]
cp = 0.52; % power coefficient
% w [rad/sec]
i = 1; % index of wind speed variable
j = 1; % index of rotor speed variable

for v = 1:1:15
    for n = 1:6:48
        V(i) = v ;
        W(j) = 2*pi*n/60;
        N(j) = n ;
        [Tmech(i,j),Pmech(i,j)] = calcTwind(V(i),R,cp,W(j));
        j=j+1;
    end
    i=i+1;
    j=1;
end

subplot(1,2,1)
plot(V,Pmech);
xlabel('Wind speed in [m/sec]')
ylabel('Pmech in [W]')
grid on;
subplot(1,2,2)
plot(V,Tmech);
xlabel('Wind speed in [m/sec]')
ylabel('Tmech in [Nm]')
grid on;

```

Figure 6-2 – MATLAB code to calculate P_{wind} with various speeds

Resulting curves are in figure 3 :

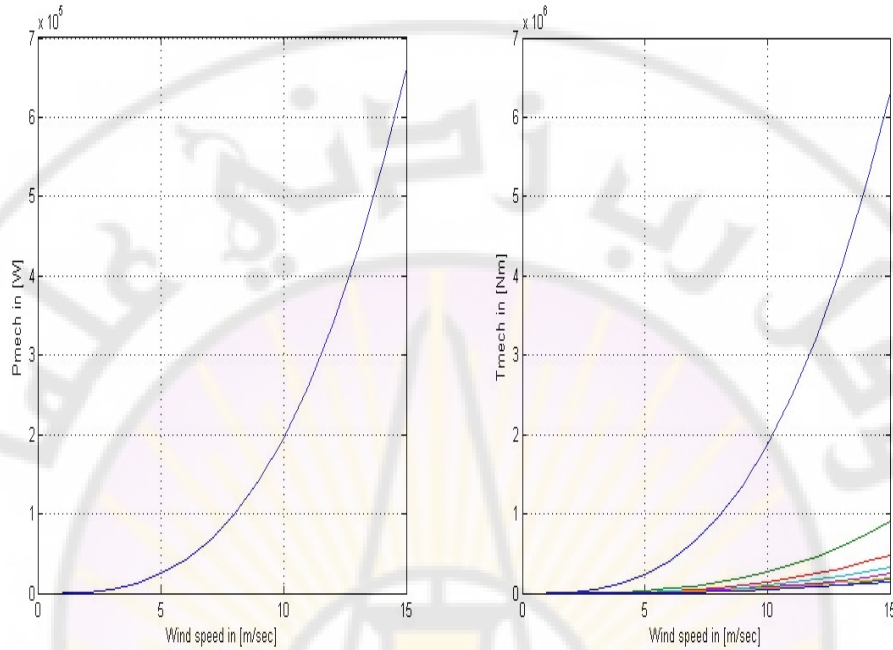


Figure 6-3 P_{wind} with various speeds

Second example

In the last example power coefficient was determined to be constant, while in reality this coefficient should be calculated by using the ratio between wind speed and the speed at the end of the pitch. This ratio is called Tip speed ratio TSR . In the following example we will calculate this ratio then use it to calculate C_p .

Power coefficient calculation

There is different ways to calculate this ratio. We will use the following one

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1(C_2\lambda_i - C_3\beta - C_4)e^{-C_5\lambda_i} + C_6\lambda \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

Write these code and run the example:

```
% Calculate power coefficient Cp

function [Cp] = calcCp(lambda,betta)

c1 = 0.517;
c2 = 116;
c3 = 0.4;
c4 = 5;
c5 = 21;
c6 = 0.0068;

lambda_i = ((lambda+0.008*betta)*(betta^3+1))/(betta^3+1)-0.035*(lambda+0.008*betta);

Cp = c1*(c2/lambda_i-c3*betta-c4)*exp(-c5/lambda_i)+c6*lambda;

end
```

Figure 6-4 MATLAB code to calculate C_p

Verify the code by applying the calculation for different wind speeds and turbine speeds like:

```

% example of calculation of Cp
% See figure 2 page 228 Prof.Warkozek cours book
%

clear all
clc

betta = 0 ;
R = 14;
i=1;j=1;

for v = 1:1:15
    for n = 1:6:48
        V(i) = v ;
        W(j) = 2*pi*n/60;
        N(j) = n ;
        lambda(i,j) = W(j)*R/V(i);
        [Cp(i,j)] = calcCp(lambda(i,j),betta);
        j=j+1;
    end
    i=i+1;
    j=1;
end

```

Figure 6-5 – MATLAB code to calculate C_p for different speeds

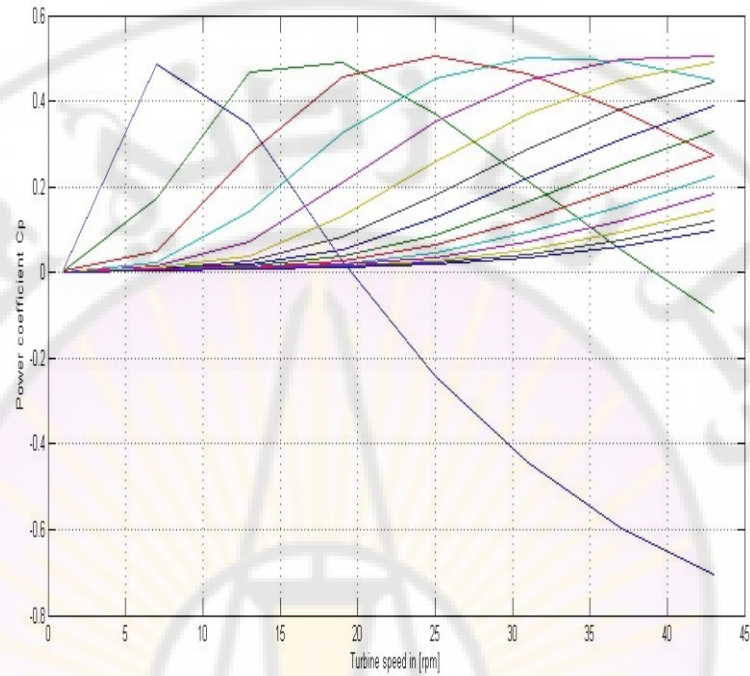


Figure 6-6 – C_p values for different speeds

Calculate turbine Power and torque

```
% apply calcTwind
% Cp is variable
% wind speed is vary from 0 to 15 [m/s]
% rotor speed is vary from 1 to 48 [rpm]
% See figure 3 page 229 Prof.Warkozek cours book
clear all
clc
% V [m/sec]
R = 14; % [m]
% N [rpm]
% Cp power coefficient
% w [rad/sec]
% betta pitch angle
betta = 0 ;
i = 1; % index of wind speed variable
j = 1; % index of rotor speed variable

for v = 1:1:15
    for n = 1:6:48
        V(i) = v ;
        W(j) = 2*pi*n/60;
        N(j) = n ;
        lambda(i,j) = W(j)*R/V(i);
        Cp(i,j) = calcCp(lambda(i,j),betta)
        [Tmech(i,j),Pmech(i,j)] = calcTwind(V(i),R,Cp(i,j),W(j));
        j=j+1;
    end
    i=i+1;
    j=1;
end
```

Figure 6-7 – MATLAB code to calculate P_{wind} for variable C_p

```

subplot(1,2,1)
plot(W,Pmech);
xlabel('Turbine speed in [rpm]')
ylabel('Pmech in [W]')
grid on;
subplot(1,2,2)
plot(W,Tmech);
xlabel('Turbine speed in [rpm]')
ylabel('Tmech in [Nm]')
grid on;

```

Figure 6-8 – MATLAB code to plot P_{wind} for variable C_p

Apply this code to obtain power and torque curves for different speeds

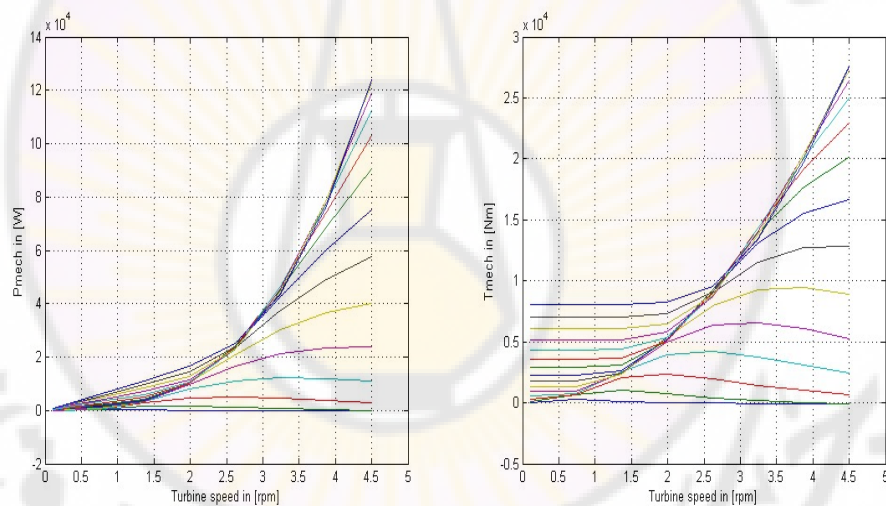


Figure 6-9 – P_{wind} for variable C_p

Homework

1. Introduce impact of air temperature in the calculation of P_{wind} .
2. Introduce impact of Tower height in the calculation of P_{wind} .
3. Draw power and torque

3-6 التجربة الثانية تمثيل المولد الريحي (مولد تزامني مغناطيس دائم) وربطه على العنفة

Abstract

In this lecture, students will simulate the generator part of the wind energy system. A Permanent Magnet Synchronous Machine (PMSM) type will be considered. In the first part of this lecture, introductory example is presented. Students will study briefly the PMSM, then in the second example they will couple the generator to wind turbine example of the last lecture.

Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSM)

Assume :

- L_d, L_q d and q axis inductances.
- R Resistance of the stator windings.
- i_d, i_q d and q axis currents.
- v_d, v_q d and q axis voltages.
- ω_r angular velocity of the rotor [m/sec]
- λ amplitude of the flux induced by the permanent magnets of the rotor in the stator phases. - p pole pairs.
- T_e Electromagnetic torque.

Model equations in the rotor reference are :

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_r i_q \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q + \frac{L_d}{L_q}p\omega_r i_d - \frac{\lambda p\omega_r}{L_q} \quad (2)$$

$$T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (3)$$

SIMULINK model of *PMSM*

These equations are modeled in MATLAB SIMULINK in one block such presented in:

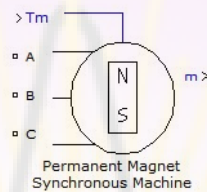


Figure 6-10 – MATLAB block for *PMSM*

Block inputs are :

1. T_m mechanical torque (wind turbine torque).
2. A , B and C are three phase stator windings terminals.

Depending on the operation type of this machine (motor or generator) these terminals can be considered like input voltage in case of motor type, output voltage in case of generator type.

Machine type can be chosen from the sign of T_m : in case of motor type T_m should be positive and negative in case of generator. Block output is:

m measurements port in the machine. It contains all currents, voltages and mechanical signals in the machine.

To explore measurements, we should use element called *Busselector* from SIMULINK element library. The students will try to explore this block using the following circuit :

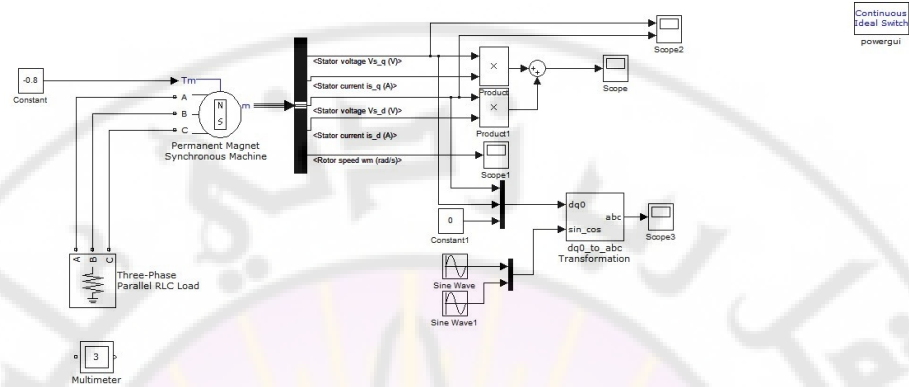


Figure 6-11 – SIMULINK model for *PMSM* test

Run simulation to obtain the following three phase voltage in the stator terminals:

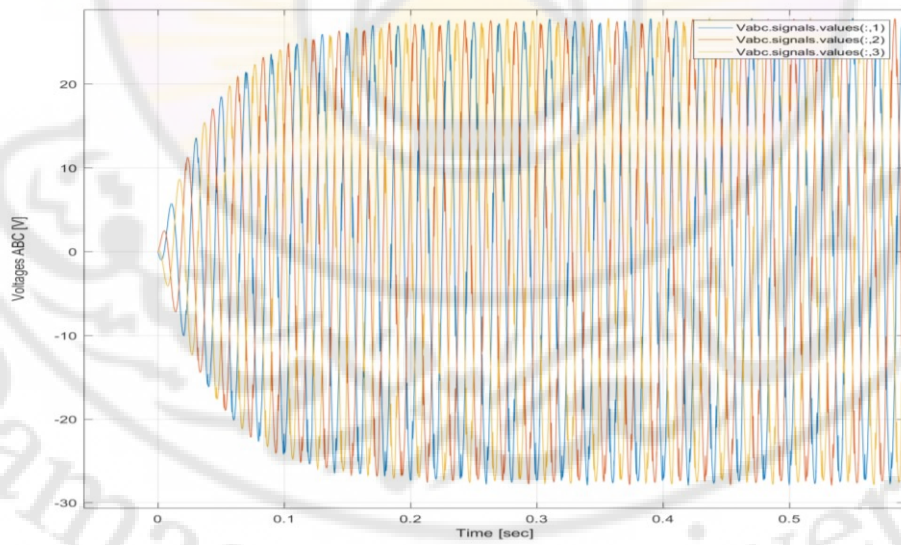


Figure 6-12 – Three phase stator voltages from *PMSM* test

Create subsystem from *PMSM*

From the precedent model, create subsystem to be coupled later with the mechanical output of the wind turbine. This can be done like follow:

1. Delete the constant block of T_m .
2. Delete scope number 3.
3. click on the left bottom of the mouse and chose *Createsubsystem* from option list which will appears.

MATLAB will create subsystem from your model, leaving the unconnected terminals to be used as inputs or outputs of your subsystem. In our case, T_m will be input port of your subsystem because it is input port of the *PMSM*. While the *abc* port of the tree phase voltages will be output of your subsystem because it is output in your original model.

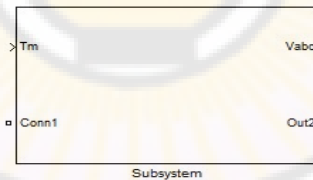


Figure 6-13 – *PMSM* circuit subsystem

Couple the turbine with *PMSM*

In last lecture, students calculated wind turbine torque in *M – file* function. Now they will couple turbine shaft with one of the generator to produce electrical power.

In order to overlap compatability errors between *M-file* and SIMULINK model, students will use block of wind turbine from SIMULINK library directly (in fact, this block use the same equation of the *M – file* programmed by the student last lecture).

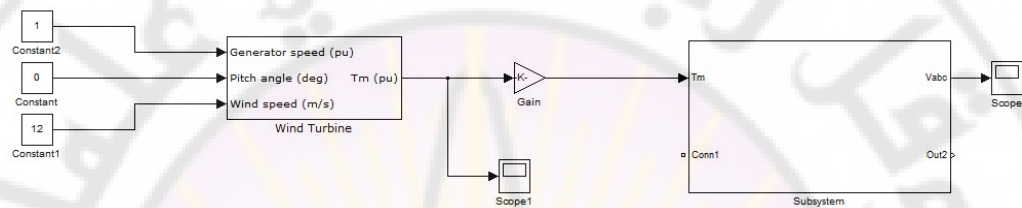


Figure 6-14 – *PMSM* coupled with wind turbine

Coupling is done directly, but with transformation of T_m from *pu* in the output of the wind turbine to *N.m* in the input of the *PMSM*.

Homework

- Calculate generator output P and Q for different wind speed.
- Calculate generator output for for different pitch angle β .

3-6 التجربة الثالثة دراسة أثر تغير سرعة الريح والتحكم بزواوية

الشفرات على توتر خرج المولد الريحي

Abstract

In this lecture, students will study the impact of wind speed variation and pitch angle on output voltage, electrical power of PMSM.

First example

This circuit will be created depending on the fourth example. Generator speed will be obtained directly from wind turbine block (see figure)

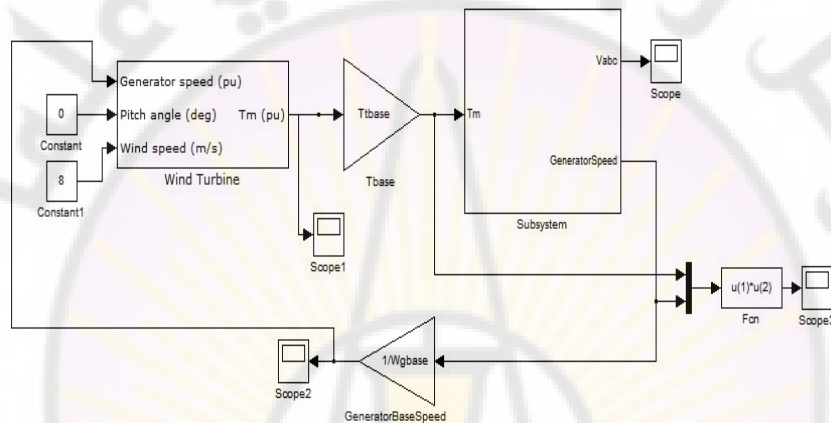


Figure 6-15 – Wind turbine coupled to *PMSM*

Wind turbine block should be parametrized. As the object is to control *PMSM* output voltage and power, the parameter should be changed different times. In order to make the process more dynamic, we will create *M-file* containing wind turbine block parameters. Each time we run the simulation, this *M-file* should be run also first then run example model.

Initialization *M-file* is in figure 16:

```

% initiate model variables
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Generator base speed
Wgbase = 3000*2*pi/60 ;

% Generator base torque
Tgbase = 20;

% Generator base power
Pgbase = Tgbase * Wgbase ;

% turbine base torque
Ttbase = Tgbase ; %[N.m]

% turbine base speed
Wtbase = Wgbase; %[rad/sec]

% turbine base mechanical power
Ptbase = Ttbase*Wtbase ;

% Maximum power at base wind speed cpmax
pmax = 0.8 ;

% Turbine base speed as pu of generator speed
Wtbase = 1.0;

```

Figure 6-16 – *M*– file to initiate wind turbine block

The parameters should be entered just explained in figure 17 :

Function Block Parameters: Wind Turbine

The turbine inertia must be added to the generator inertia.

Parameters

Nominal mechanical output power (W):
Ptbase

Base power of the electrical generator (VA):
Pgbase/0.9

Base wind speed (m/s):
12

Maximum power at base wind speed (pu of nominal mechanical power):
pmax

Base rotational speed (p.u. of base generator speed):
Wtbase

Pitch angle beta to display wind-turbine power characteristics (beta >=0) (deg):
0

☐ Display wind turbine power characteristics

OK Cancel Help Apply

Figure 17-6 – initiate wind turbine block

Results

Applying wind speed of 12 [m/sec] with the parameters value mentioned above, model results will be as seen in the following figures:

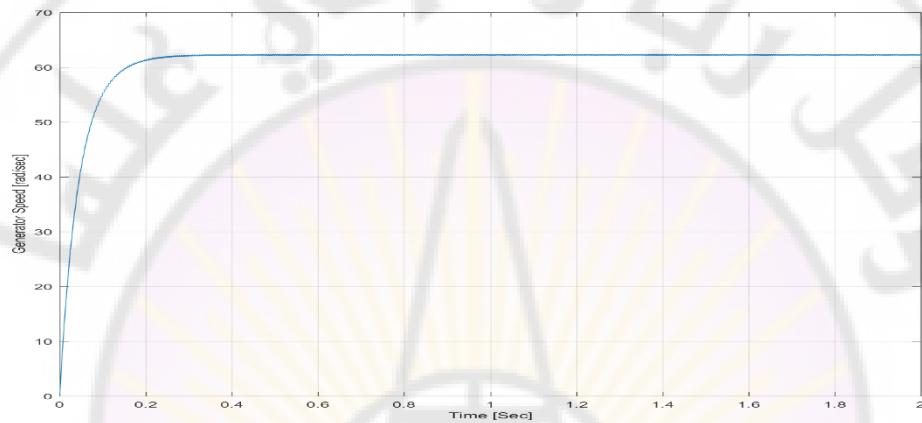


Figure 18-6 – Generator speed in [rad/sec]

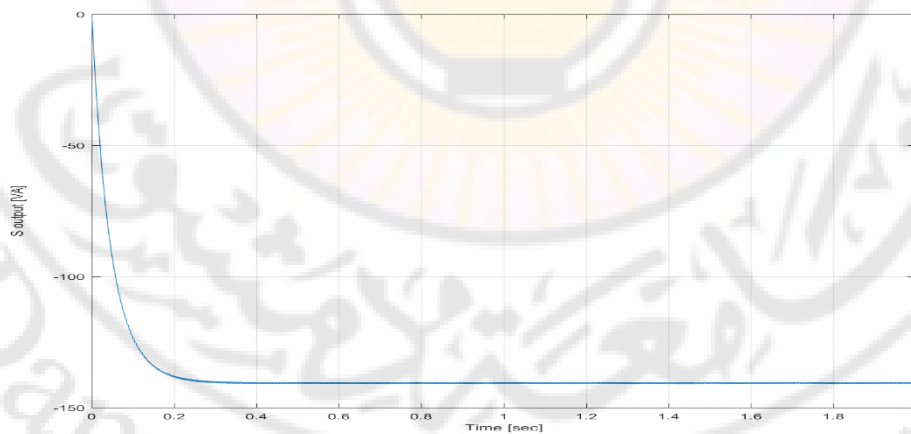


Figure 19-6 – Generator output power S [VA]

Homework

1. Calculate generator output P and Q for different wind speed.

2. Calculate generator output for different pitch angle β .
3. Compare your results with one of the lecture 3.

4-6 التجربة الرابعة استخدام جسر تقويم على خرج المولد الريحي ودراسة أثر تغير سرعة الرياح على توتر وتيار الحمل

Abstract

In this lecture, students will add rectifier to PMSM terminals. Rectified voltage will be applied on a resistive load. The purpose is to observe the rectified voltage and load currents when wind speed varies.

Diode rectifier

This circuit will be created depending on the previous examples. Generator speed will be obtained directly from wind turbine block. The rectifier is a three arm bridge of diodes. This bridge can be obtained from SIMULINK library, Power Electronics one. We can find it under the name of **Universal bridge**. There are different options of power electronics devices to be chosen (Thyristors, diodes, IGBT and GTO).

For the sake of simplicity diodes will be chosen. The parameters to be entered are the forward voltage V_f and the device resistance when it is on R_{on} (see figure 20).

The rectified current supervising the load is in figure 22 :

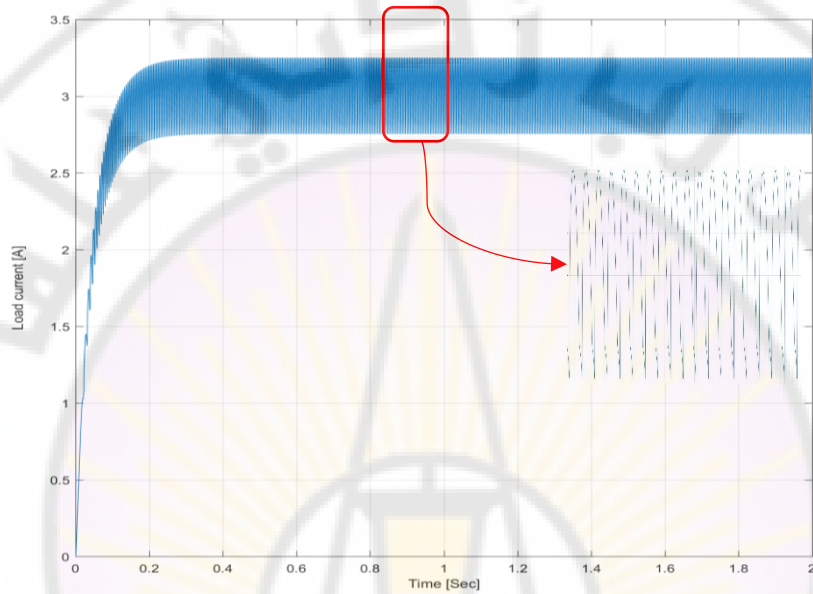
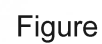


Figure 22 – Load current rectified by the diode bridge

IGBT rectifier

In this example, IGBT devices will be used in place of diodes. To control these devices a PWM signal generator is used. The following Figure shows the suitable model:



The PWM signal generator can be parametrized like following¹ :



¹. See Power electronic (1) (2) book for more details on these signal

The rectified current will be like figure 25:

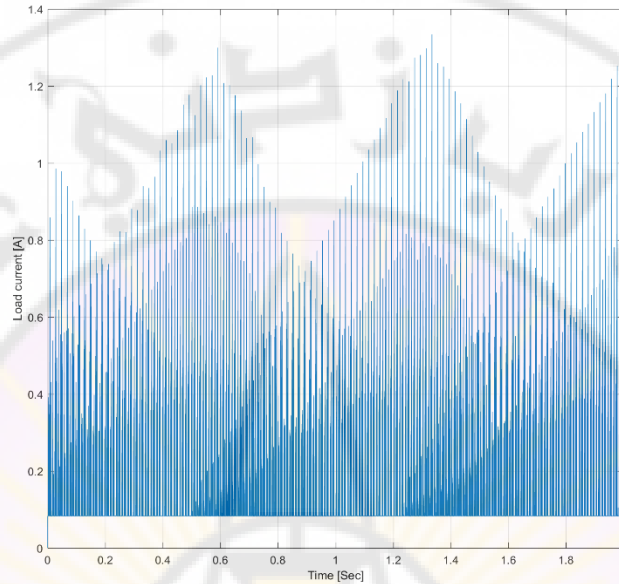


Figure 6-25 – Rectified current of the *PMSM* with IGBT rectifier

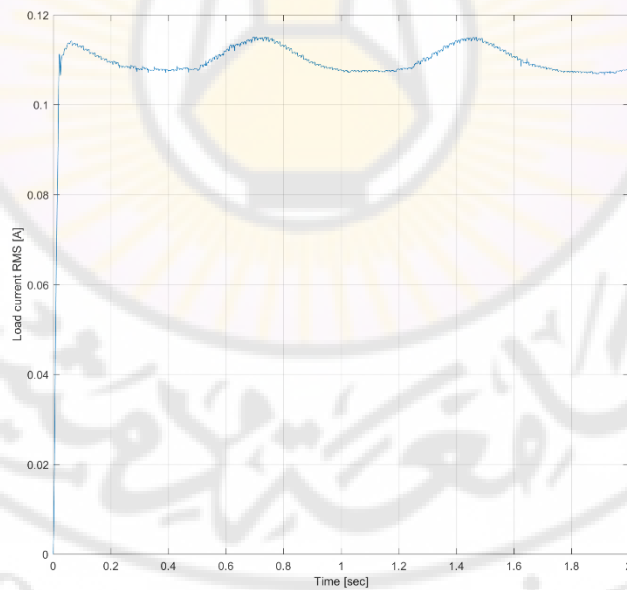


Figure 6-26 – Mean value of rectified current of the *PMSM* with IGBT rectifier

In order to obtain readable value, we use mean value block from *SIMULINK* library. It calculates the mean value of its input signal (figure 26)

Homework

1. Change system parameters to obtain 380 [V] at the machine terminals.
2. Calculate diode bridge output assuming that the machine line-line voltage is 380 [V].
3. Vary wind speed and compare load current in each case.

5-6 التجربة الخامسة آلية نمذجة عناصر النظام الريحي ومتحولات التحكم (العنفة الريحية - المعرج ونظام القذح - الحمل المختلط)

أهداف من التجربة

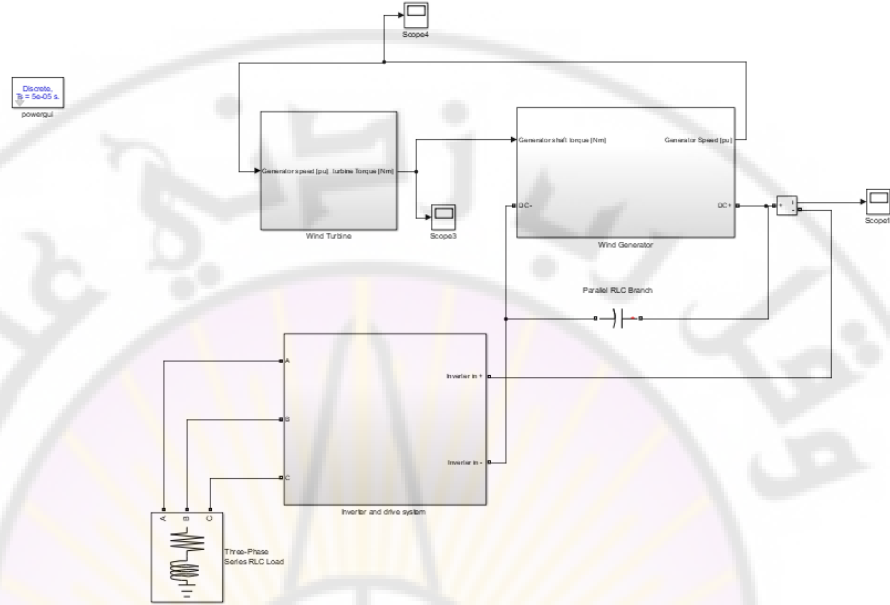
- a. التعرف على نمذجة عناصر نظام توليد كهروريحي يغذي حمل مستقل.
- b. التعرف على تأثير متحولات التحكم في هذا النظام بشكل منفرد وفقاً لحلقة تحكمية مفتوحة.

نمذجة نظام التوليد الكهروريحي

يتكون النموذج من النظم الفرعية التالية:

- نظام فرعي يمثل العنفة الريحية (wind turbine).
- نظام فرعي يمثل المولد الكهروريحي وهو عبارة عن مولد تيار مستمر ذو تهيج تفرعي (wind generator).
- نظام فرعي يمثل المعرج مع دائرة توليد النبضات (Inverter and drive system).
- نظام فرعي يمثل الحمل الكهربائي المختلط.

يبين الشكل (27) المجاور نموذج المحاكاة للنظم الفرعية السابقة ومكوناتها.



الشكل (6-27) نموذج المحاكاة لنظام التوليد الكهروريحي في هذه التجربة

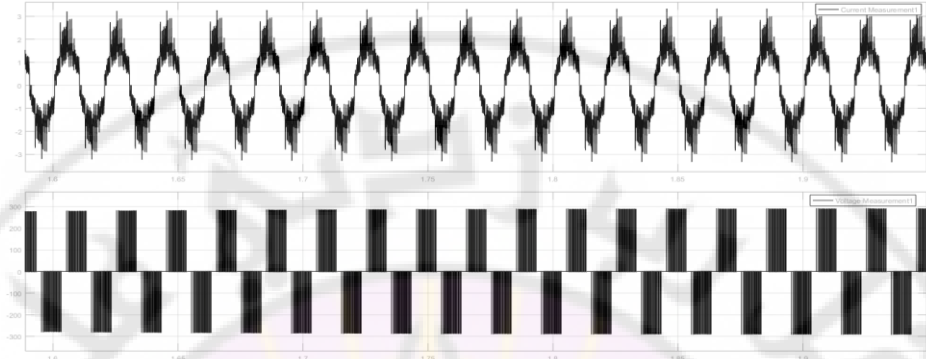
يمكنك تحميل الملف على الرابط التالي:

<https://drive.google.com/file/d/1LgFFSt3CHxSlwvBBtkTayWtYLfdeNoBe/view?usp=sharing>

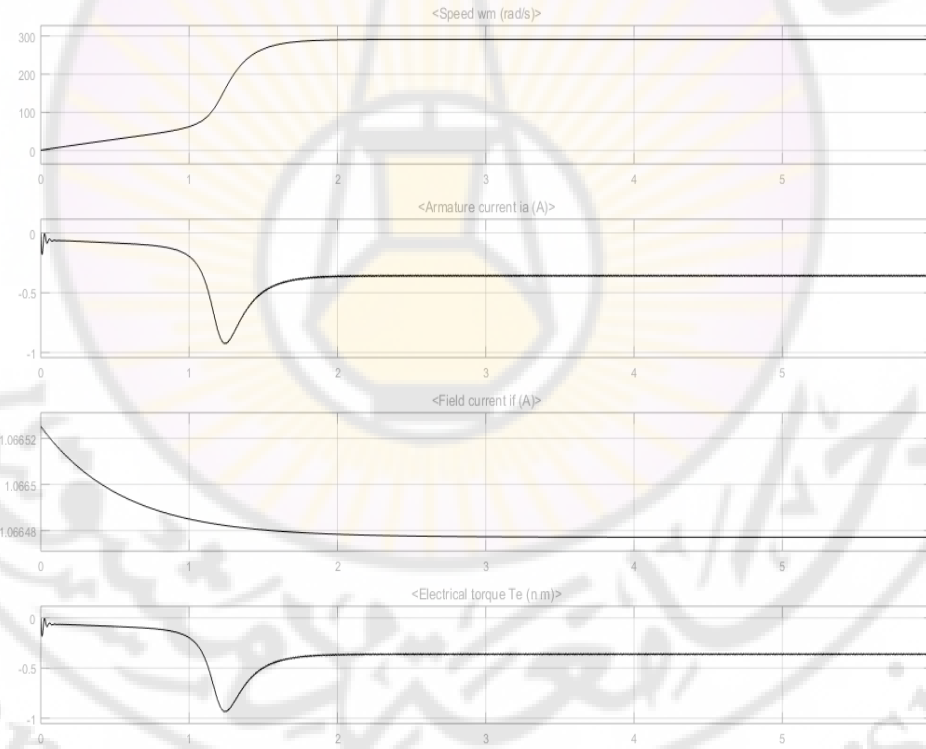
كما يجب تحميل ملف التهيئة المتوفر على الرابط التالي:

<https://drive.google.com/file/d/1wNOhTkzLDBsULd-WgqOjk0cbZwlgnumr/view?usp=sharing>

بدايةً يجب أن تحصل على منحنيات تشبه المنحنيات التالية (قبل الانتقال لتنفيذ المطلوب من التجربة عليك الحصول على هذه المنحنيات):



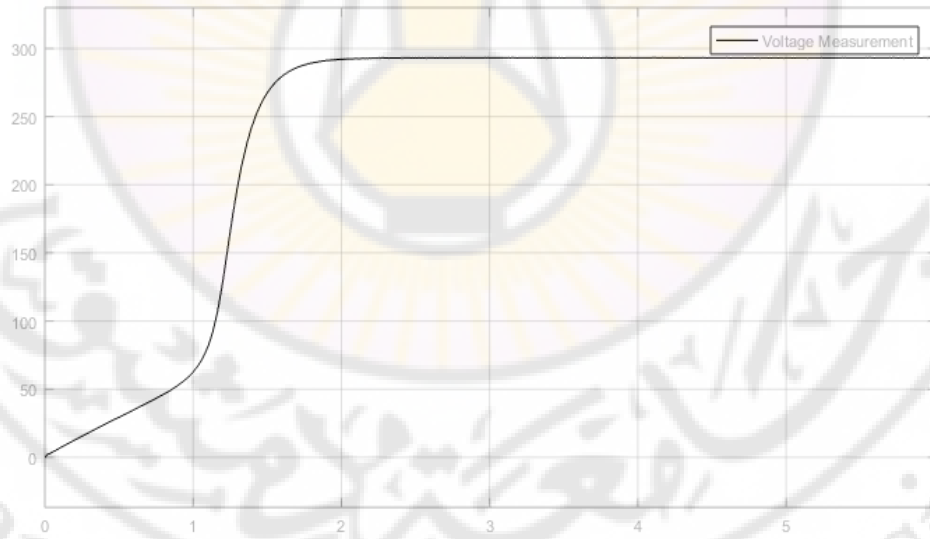
الشكل (6-28) منحنيات الحمل



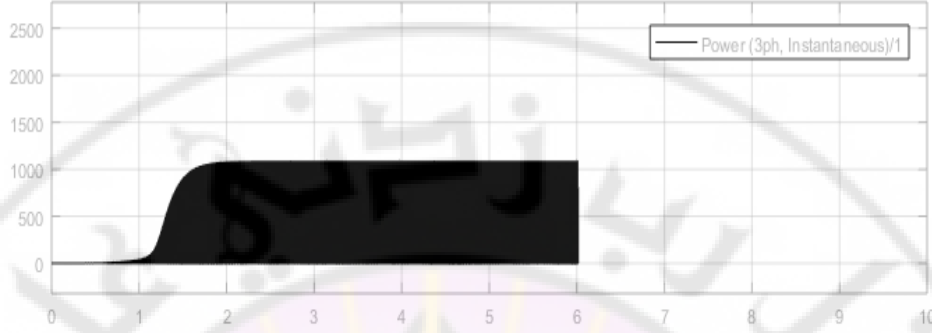
الشكل (6-29) منحنيات المولد الكهربائي



الشكل (30-6) منحنى سرعة المولد الكهربائي



الشكل (31-6) منحنى توتر خرج المولد الكهربائي



الشكل (6-32) توتر الاستطاعة الفعلية المحقونة في الحمل

المطلوب تنفيذه

المرحلة الأولى

شغل النموذج من أجل زوايا الريش (Pitch angle) عند القيم (0 - 0.5 - 1 درجة) ثم راقب كل من المتحولات:

- سرعة دوران العنفة
- التوتر المتولد على طرفي المولد الكهربائي
- توتر خرج الحمل بالقيمة الفعالة RMS

المرحلة الثانية

قم بتعديل نسبة عرض النبضة (modulation index) في دارة توليد النبضات للمعرج وفقاً للتغير التالي (0.2-0.5-0.7-0.9) ثم راقب كل مما يلي:

- تغير توتر خرج المعرج المطبق على الحمل (القيمة اللحظية والفعالة) والاستطاعة المحقونة.
- سرعة دوران المولد، هل تزداد أم تنخفض مع تغير التحميل الكهربائي للمولد؟

المرحلة الثالثة

قم بتعديل طبيعة الحمل الكهربائي (حمل أومي بحت - حمل تحريضي 1000 واط) ثم راقب كل مما يلي:

- شكل موجة توتر الحمل وتياره، هل أصبح شكلها أقرب للجيبى أم لا؟

المرحلة الرابعة

قم بتعديل سعة المكثف المتصل على التفرع بين المولد الكهربائي والحمل وفقاً للتغيرات التالية

$$(C = 1 \text{ } [\mu\text{F}] , C = 1 \text{ } [\text{mF}])$$

- راقب تغير شكل موجة التوتر للحمل وتياره، ماذا تستنتج؟

تم بعون الله تعالى





- [1] Alex Kalmikov, Katherine Dykes ''Wind Power Fundamentals '' MIT Wind Energy Group & Renewable Energy Projection Action.
- [2]Dr. Ali M.Eltamaly, King Saud University ''Introduction to Wind Energy Systems''.
- [4] Lecture notes on Renewable Energy sources ,B.Tech .Electrical Engineering & EEE , India
- [5] J.F.Mnwell, A.L. Rogers, ''WIND ENERGY EXPLAINED '',WILEY 2002
- [6] S.H.Pishgar-Komleh,'' Wind speed and power density analyses based on Weibull and Rayleigh distributions ''.(a case study :Firouzkooh country of iran) 2015.
- [7] Mukund R.Patel , 'Wind and Solar Power Systems ''. CRC Press 2005.
- [8] Leon Freris, Daved Infield, ''Renewable Energy in Power Systems '',WILEY 2020
- [9] Haitham Abu-RUB,Kamal AL-haddad, ''Power Electronics for renewable energy systems ,Transportation and Industrial Applications''. WILEY ,IEEE press 2014.

- [10] Khaldon Ahmad Qqid, Chin Kim Gan, "Effect of Generator Rating on Inertia and Frequency Response in Power Systems". International Scientific Forum 2019.
- [11] Long pham, "A review of Full Scale Converter for Wind Turbines", IEEE
- [12] A.Libsir, A Bentounsi, "Electric Generators Fitted to Wind Turbine Systems: An Up-to-Date comparative Study", Journal of Electrical Systems ESR Groups 2015
- [13] Theodre Wildi, "Electrical Machines, Drives, and Power Systems" Fifth Edition, Prentice Hall 2006.
- [14] Hasan Lars Henrik, "Conceptual survey of generators and power electronics for wind turbines", DUT Library, 2002.
- [15] Lecture notes ummostansiriah university, "The Equivalent Circuit and Torque of Three-Phase Induction Motors". 2020
- [16] Janka Ekayaka, Kithsiri Liyanage, Nick Jenkins, "SMART GRID TECHNOLOGY AND APPLICATIONS". WILEY
- [17] Haibo Zhang, Francois Gruson, Christophe Saudemont, "Over voltage Limitation Method of an Offshore Wind Farm with DC series Parallel Collection Grid". HALL -2019
- [18] Ravi Nanayakkara, University of Wisconsin Milwaukee, "SCR-Based Wind Energy Conversion Circuitry and Controls of DC Distributed Wind Farms", 2012

- [19] Henrik Waje– Andreassen, Norwegian University of Science and Technology ,’’LOW FREQUENCY AC TRANSMISSION’’ ,2016
- [20] JONATHAN Rudy ,Ronan Meere, ‘’Acomparison of VSC–HVDC with Low Frequency AC for Offshore Wind Farm Design and Interconnection’’ , science direct ,2015
- [21] Hao Chen,Michal H . Johnson IEEE,’’Low –Frequency AC Transmission for off shore wind power ‘’ 2013
- [22] Roland Ryndzionek,Lukasz Sienkiewsz, ‘’ Evolution of HVDC Link CONNECTING Offshore Wind FARMS TO Onshore Power Systems’’. Energy 2020
- [23] Burak Ozpineci,Leon M. Tolbert ,’’CYCLOCONVERTERS’’, University of Tennessee–Knoxville.

اللجنة العلمية

الأستاذ الدكتور كمال ناجي

الأستاذ الدكتور عباس صندوق

الأستاذ مصطفى الحزوري

المدقق اللغوي

الدكتورة نادين عبيد

حقوق الطبع والترجمة والنشر محفوظة لمديرية الكتب والمطبوعات