



الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة لميكانيكية والكهربائية
قسم الطاقة الكهربائية

التحكم بالعنفات الريحية لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى باستخدام الخوارزمية الجينية

Wind Turbine control for Tracking Maximum Power Point Using

Genetic Algorithm

دراسة أعدت لنيل درجة الماجستير في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

إعداد:

طالب الدراسات العليا

م.حسن علي بوشية

بإشراف:

الدكتور المهندس خالد زيدان

العام الدراسي 2019-2020

الفصل الأول

الإطار العام للبحث

1-1- مقدمة:

تعتبر أنظمة طاقة الرياح صناعة حديثة نسبياً ولكن نتيجة تطورها السريع أصبحت واحدة من أهم مصادر الطاقة المتجددة الواعدة. بالرغم من ذلك فهي تحتاج لإمكانيات إضافية من أجل توليد طاقة فعالة ذات جودة وموثوقية عالية بأقل تكلفة ممكنة. بما أن الاستطاعة الكهربائية التي يمكن استخلاصها من العنفات الريحية تتأثر بسرعة الرياح بشكل حاد، لذلك تكمن الصعوبة في استخلاص الحد الأقصى الممكن من طاقة الرياح وتحويلها إلى طاقة كهربائية. من أجل ذلك تطورت التكنولوجيا المتعلقة بصناعة أنظمة طاقة الرياح مما أدى إلى تطوير جيل من توربينات ذات سرعات متغيرة والتي تقدم العديد من المزايا مقارنة مع توربينات سرعة ثابتة. إلا أن الميزات المتقدمة لتوربينات الرياح المتغيرة السرعة تسبب تعقيداً أكثر في التصميم وتتطلب نظام تحكم متطور لاستكمال جميع المهام. يقدم هذا البحث التحكم بالعنفات الريحية لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى باستخدام الخوارزمية الجينية. بحيث تقوم الخوارزمية بعملية بحث عن نقطة الاستطاعة الأعظمية، أي تعتمد هذه الطريقة على موقع نقطة العمل والعلاقة بين تغيرات الاستطاعة والسرعة وتحسب من خلالها إشارة التحكم المناسبة التي تقود النظام إلى نقطة الاستطاعة الأعظمية.

هذا ويعتبر المولد التزامني الأنسب في تطبيقات العنفات المتغيرة السرعة لما له من مرونة في العمل ولا يحتاج إلى وجود علبة السرعة التي تحتاجها معظم المولدات الأخرى، الأمر الذي يخفف من الاجتهادات الميكانيكية ويزيد من موثوقية النظام.

1-2- الدراسات المرجعية:

اعتمدت بعض الخوارزميات على الطرق التقليدية حيث وضع الباحثون خوارزمية لملاحقة نقطة لاستطاعة العظمى بحيث يتم التحكم بطاقة خرج العنفة عن طريق التحكم بنظام ال PWM للانفرتر. وتم ربط العنفة مع الشبكة عبر مولد تزامني مع علبة سرعة عبر مقوم-انفرتر [1]. استخدمت أيضاً خوارزمية تقليدية اعتمدت على منحني الطاقة كتابع لسرعة الدائر. تم ربط العنفة مع الشبكة عبر مولد تزامني تسبقه علبة سرعة ومنظم جهد AC/AC [2]. كما تم استخدام طريقة التحكم Hill-Climb-Search (HCS) حيث يتم التحكم باستطاعة الخرج وضبط العزم الكهربائي، كما تم التحكم أيضاً بسرعة المولد بشكل غير مباشر للحصول على السرعة المناسبة التي تعطينا الاستطاعة العظمى. تم تطبيق إشارة التحكم على المبدلة المستخدمة. أهم ما يميز هذه الطريقة عدم الحاجة لقياس سرعة الرياح [3].

استخدمت أيضاً تقنيات الذكاء الصناعي (الشبكات العصبونية) للحصول على الاستطاعة العظمى ومعامل الاستطاعة الأعظمى، حيث تم تقدير سرعة الرياح من خلال التحكم $(TSR) tip speed ratio$ ، واستخدمت الشبكات العصبونية لتقدير سرعة الرياح بالإضافة لقاعدة بيانات لنسبة السرعة المثالية. تم التحكم بسرعة الدوار عن طريق التحكم بال PWM للمبدلة المستخدمة [4].

كما واستخدم الباحث متحكم PID لإرسال نبضات التحكم إلى الانفرتر بحيث نحصل على أعظم استطاعة ممكنة. تم ربط العنفة الريحية مع الشبكة عبر (مولد تحريضي، مقوم ، انفرتر). المولد التحريضي ذو دوائر ملفوف بتغذية مضاعفة مع علبة سرعة. يربط المولد بدوره مع الشبكة عبر مقوم وانفرتر ووصلة مستمرة بينه [5].

واستخدم متحكم لإرسال النبضات إلى المقطع بالاعتماد على سرعة دوران العنفة وبحيث تتم ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى. ربط العنفة الريحية مع حمل مستقل عبر مقوم ومقطع رافع-خافض للجهد. المولد المستخدم مولد ذو مغناطيس دائم بدون علبة سرعة. وقد تم تسمية هذا النوع من التحكم بالتحكم كامل الحساسات، كونه يعتمد على وجود حساس لقياس سرعة الرياح. كما يعتمد هذا المتحكم على خوارزمية $GA(Gradient Approximation)$ [6].

استخدم الباحث معادلة الاستطاعة للحصول على الاستطاعة المرجعية من أجل تطبيق خوارزمية Power Signal Feedback (PSF)، تم تطبيق إشارة التحكم على المبدلة من جهة الشبكة للحصول على الاستطاعة العظمى [7].

كما وتم ربط العنفة الريحية مع الشبكة عن طريق مولد تزامني ذو مغناطيس دائم، مقوم، مقطع، انفرتر، استخدم الباحث طريقة التحكم بزوايا ريش العنفة (تحكم ميكانيكي، تحكم كهربائي) [8].

وكما توضح هذه المقالة استخدام متحكم (RCS) لملاحقة نقطة الاستطاعة الاعظمية. ربط العنفة مع الشبكة عبر مولد تحريضي مضاعف التغذية -علبة سرعة - مقوم- انفرتر [9].

1-3- مشكلة البحث:

استناداً إلى الدراسة المرجعية التي قمنا بها فإن استخدام الخوارزمية الجينية في ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية يمكن أن يجنبنا قلة المرونة عند استخدام طرق التحكم التقليدية.

ولأن ما يهمنا هو الحصول على أعظم استطاعة ممكنة من العنفة الريحية، قد تظهر لدينا مشكلة بالنسبة لطرق التحكم التقليدية بعدم التفاعل مثلما تقوم به تقنيات الذكاء الصناعي من شبكات عصبونية ومنطق عائم وخوارزمية جينية والتي تظهر المرونة وقابلية التطبيق على أنواع متعددة من التوربينات وعند سرعات رياح مختلفة ويظهر هذا جلياً عند تطبيق خوارزميات البحث التي تتطلب التكيف والمرونة.

هذا وتأتي أهمية البحث انطلاقاً من معاناة توليد الطاقة الكهربائية من الموارد المائية والمشتقات النفطية (غاز، ديزل) والتي تعاني بحد ذاتها من نضوب واحتمالية فقدانها. لذلك تأتي طاقة الرياح كواحدة من الموارد الهامة في الطاقة الكهربائية باعتبار أن طاقة الرياح هي طاقة متجددة وصديقة للبيئة.

1-4-هدف البحث:

- 1- الحصول على أعظم استطاعة ممكنة من العنفات الريحية من خلال ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية.
- 2- القيادة والتحكم بالعنفات الريحية باستخدام الخوارزمية الجينية.

1-5-أهمية البحث:

تأتي أهمية هذا البحث كونه يندرج ضمن محاور بحثية لها أهمية على مستوى العالم تهدف إلى الاستفادة من الطاقات المتجددة بكافة أشكالها. وتتوضح هذه المساهمة من خلال استخدام طرائق الذكاء الصناعي والخوارزمية الجينية.

1-6-منهجية البحث:

- 1- دراسة ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى.
- 2- النموذج الرياضي لمسألة ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى.
- 3- تصميم برنامج حاسوبي بناء على الخوارزمية الجينية .
- 4- مقارنة النتائج التي حصلنا عليها مع الطرق التقليدية المستخدمة في ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى للعنفة الريحية لحالة مدروسة.
- 5- النتائج والتوصيات.

الفصل الثاني

دراسة ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية في العنفات الريحية

2-1- مقدمة:

لدراسة ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية في العنفات الريحية لابدّ أولاً من تقديم شرح مفصل عن أنواع العنفات الريحية ومبدأ عملها والأقسام الرئيسية للعنفات الريحية ذات المحور الأفقي، وشرح العلاقة بين الاستطاعة المستخلصة من الرياح وسرعتها والعوامل المؤثرة على هذه الاستطاعة. بالإضافة إلى التعرف على أنماط عمل أنظمة العنفات الريحية واستراتيجيات بها، وشرح مبدأ الاستطاعة العظمى للعنفات الريحية، ويتم بعدها الانتقال إلى مفهوم التحكم وملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT)، ويذكر في هذا الفصل أيضاً أنواع المولدات المستخدمة في أنظمة طاقة الرياح المختلفة.

2-2- العنفات الريحية

العنفات الريحية هي أجهزة ميكانيكية تستخدم الرياح من أجل توليد الكهرباء حيث يتم تحويل جزء من الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة ميكانيكية مفيدة [10]. منذ بداية الاهتمام بأنظمة طاقة الرياح تم تصميم وتطوير عدد كبير من الآلات بمختلف الأنواع والأشكال والأحجام وذلك في أنحاء مختلفة من العالم. بدأ استخدام طاقة الرياح في توليد الطاقة الكهربائية باستطاعات كبيرة وبشكل جدي منذ ثمانينات القرن الماضي. حيث ازدادت استطاعات العنفات الريحية بشكل كبير وبسرعة بفضل التطور التقني والفني الكبير الذي حصل مؤخراً، وأصبحت المزارع الريحية موزعة في العديد من البلدان وبأعداد كبيرة مع توقعات مستقبلية باستمرار هذا التقدم [11].

يمكن تصنيف العنفات الريحية وفق تصنيفين أساسيين:

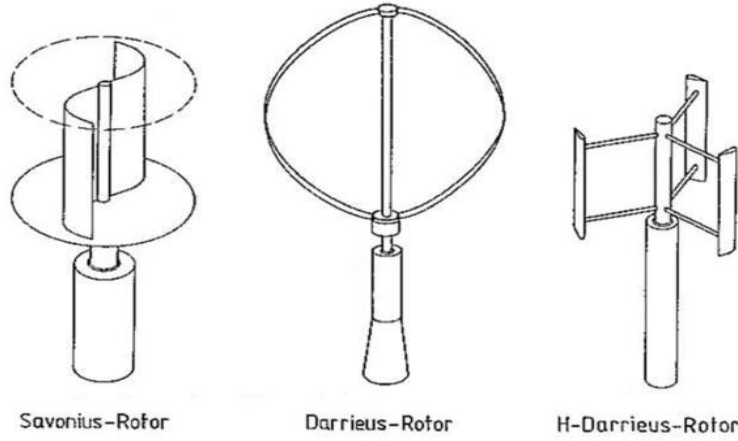
- حسب توضع محور الدوران.
- حسب سرعة الدوران.

2-2-1- أنواع العنفات الريحية حسب توضع المحور:

على الرغم من وجود عدة طرق لتصنيف العنفات الريحية، فإنها بشكل عام تصنف اعتماداً على طريقة توضع محور الدوران الى نوعين سيتم شرحهما بالتفصيل كما يلي:

2-2-1-1-العنفات الريحية ذات المحور الشاقولي (VAWT):

وتعتبر عنفة داربوس (Darrieus Rotor) العنف ذات المحور العمودي الأكثر نجاحاً [11]، كما توجد تصاميم أخرى للاستخدامات التجارية مثل عنفة سافونيوس (Savonius Rotor) وأيضاً عنفة ماسجروف (Musgrove Rotor) والتي تكون شفرات الدائر فيها على شكل حروف H [12] ، يبين الشكل (1-2) العنفات الريحية ذات المحور العمودي.



الشكل (1-2) العنفات الريحية ذات المحور الشاقولي (VAWT)

قل استخدام هذه العنفات جداً وخاصة في السنوات الأخيرة، وذلك يعود للعديد من السلبيات.

سلبيات العنفات الريحية ذات المحور الشاقولي:

- 1) عدم القدرة على الإقلاع ذاتياً: بعض العنفات الريحية ذات المحور الشاقولي أحياناً لا تستطيع الإقلاع ذاتياً وتحتاج الى آليات إضافية من أجل (دفع و اقلاع) العنفة عند توقفها.
- 2) المناطق الايروديناميكية العمياء: عندما يكمل الدائر دورته، سيكون على الشفرات اجتياز المناطق الايروديناميكية العمياء والتي ستؤدي الى انخفاض مردود النظام بشكل اجمالي.
- 3) أسلاك تثبيت لدعم بنية البرج: هذه العنفات تحتاج لاستخدام أسلاك تثبيت وهذه الأسلاك غير عملية مما قد يسبب أيضاً بعض المشاكل [12].
- 4) الارتفاع المنخفض للشفرات: يكون ارتفاع الشفرات منخفض عن سطح الأرض، أي سرعة الرياح ستتخفض عند مستوى هذه الشفرات وبالتالي تنخفض الاستطاعة المستخلصة من الرياح.

5) تشغل مساحات واسعة: تحتاج هذه العنفات أيضاً إلى مساحات واسعة من الأراضي بسبب وجود كافة التجهيزات على مستوى الأرض[10].

6) مردود هذا النوع من التوربينات ليس ممتازاً.

مميزات العنفات الريحية ذات المحور الشاقولي:

1- إمكانية الاستغناء عن أجهزة التحكم المعقدة: هذه العنفات قادرة على تلقي الرياح مهما كان اتجاهها،

وبالتالي ليس هناك ضرورة لتعديل وضعيتها عند تغير اتجاه الرياح، أي يمكن الاستغناء عن أجهزة التحكم المعقدة بزوايا الانحراف.

2- بساطة التصميم: يتوضع المولد وعلبة السرعة وغيرها من الأجهزة في هذا النوع من العنفات على مستوى الأرض مما يجعل تصميم البرج بسيطاً.

3- أكثر اقتصادية: نتيجة بساطة التصميم بالإضافة لأنه يمكن القيام بعمليات الصيانة لهذه العنفات على مستوى الأرض[12].

4- أكثر أماناً للوسط المحيط (الطيور) وأقل ضجيجاً لدورانه بسرعة أخفض من التوربين ذي المحور الأفقي.

2-1-2-2- العنفات الريحية ذات المحور الأفقي (HAWT):

معظم العنفات الريحية المستخدمة في توليد الطاقة الكهربائية هي ذات محور أفقي. يكون محور الدوران لهذه العنفة موازياً لسطح الأرض وتقريباً يوازي اتجاه الرياح [12] لذلك تسمى بالأفقية. نميز هنا أيضاً بين العنفات الأفقية حسب عدد الشفرات كما يلي:

1- العنفات الريحية أفقية المحور أحادية الشفرة:

يوضح الشكل (2-2) عنفة ريحية بشفرة واحدة.

وتتصف بما يلي:

- ذات ضوضاء عالي.
- ذات مردود منخفض.
- سرعة دوران عالية.
- تستخدم في الأماكن البعيدة وعلى نطاق ضيق.



الشكل (2-2) العنفات الريحية أفقية المحور أحادية الشفرة

بالإضافة لما سبق فإن هذا التصميم يحتاج الى الموازن الذي يتوضع على الجانب الآخر لمحور الشفرة وبالتالي موازنة الدوار.

2- العنفات الريحية أفقية المحور ثنائية الشفرة:

يوضح الشكل (2-3) عنفة ريحية بشفرتين.

وتتصف بما يلي :

- ذات ضجيج أقل من النوع السابق.
- ذات سرعة دوران عالية.
- ذات تكلفة منخفضة.
- سهلة الصيانة والتركيب.
- ذات مردود أعلى من عنفات بشفرة واحدة.



الشكل (2-3) العنفات الريحية أفقية المحور ثنائية الشفرة

3- العنفات الريحية أفقية المحور ثلاثية الشفرة:

يوضح الشكل (2-4) عنفة ريحية ذات ثلاث شفرات.

وتتصف بمايلي:

- ذات استطاعات عالية.
- ذات ضجيج منخفض.
- تعمل بسرعات متغيرة.
- الاجهادات المحورية الناتجة عن الدوران منخفضة.
- مردود أعلى من النوعين السابقين.



الشكل (2-4) العنفات الريحية أفقية المحور ثلاثية الشفرة

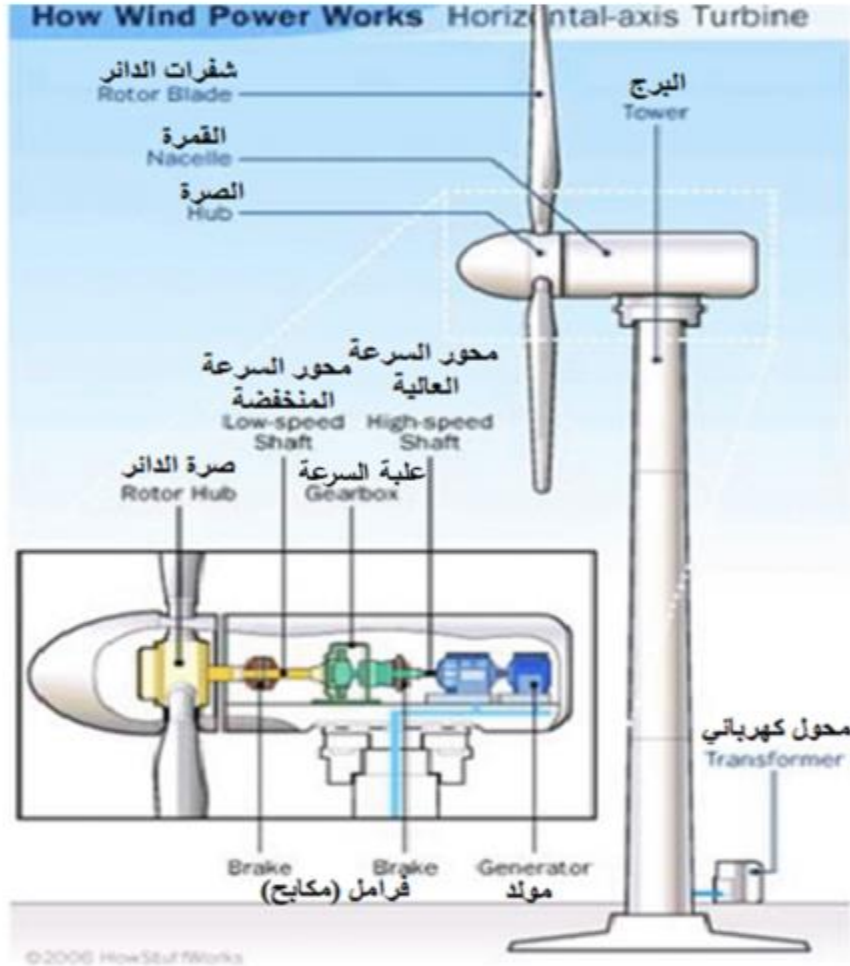
وأغلب العنفات المستخدمة تكون إما ذات شفرتين أو ثلاث شفرات. حيث تملك هذه العنفات معامل استطاعة C_p مرتفع نسبياً.

يتوضع المولد وعلبة السرعة في هذه العنفات فوق البرج مما يجعل تصميمها أكثر تعقيداً وكلفة، لكن هذا التوضع فوق البرج يسمح باستخلاص استطاعة أكبر من الرياح التي تزداد سرعتها مع الارتفاع كما يساهم بتخفيض الاضطرابات التي تتعرض لها العنفة. يحمل البرج أيضاً حاوية الأجزاء الدوارة Nacelle التي تحتوي على علبة السرعة والمولد الكهربائي.

ونظراً لكون العنفة ذات المحور الأفقي بحاجة لتعديل وضعيتها دائماً لتكون باتجاه الرياح، فهي تحتاج الى نظام تعديل الانحراف Yaw Drive الذي يقوم بتحريك الدوار وحماية الأجزاء الدوارة في حالة التشغيل الطبيعي، يتم تحريك الدوار لكي يواجه الرياح بحيث يكون قادراً على استخلاص أكبر قيمة ممكنة للاستطاعة. على الرغم من أن نظام تعديل الانحراف قد يكون بسيطاً جداً من أجل التطبيقات ذات الاستطاعة المنخفضة، فإنه يعد أحد أكثر التجهيزات تعقيداً من أجل العنفات ذات الاستطاعة المرتفعة. تتوضع التجهيزات الالكترونية في هذه العنفات على سطح الأرض.

2-2-1-2-1 المكونات الرئيسية للعنفة الريحية ذات المحور الأفقي:

يبين الشكل (5-2) الأقسام الرئيسية للعنفة الريحية ذات المحور الأفقي



الشكل (5-2) الأقسام الرئيسية للعنفة الريحية ذات المحور الأفقي

تتألف العنفة الريحية ذات المحور الأفقي وحسب الشكل (2-5) من الأجزاء الرئيسية التالية:

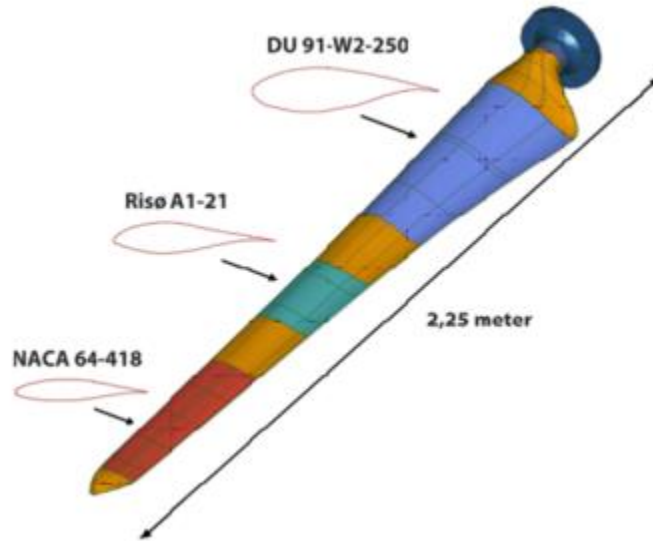
1- الجزء الدوار (The Rotor):

يتألف الجزء الدوار من الشفرات Blades والقمرة Hub. يمكن أن يدور هذا الجزء إما بسرعة ثابتة أو بسرعة متغيرة وذلك اعتماداً على نوع التصميم.

1-1: الشفرات Blades

تتصل الشفرات بالصرة بإحدى الطريقتين: (1) تثبيت الشفرات عند زوايا ثابتة لانحراف هذه الشفرات، أو (2) تثبيت الشفرات بحيث يمكن التحكم بزوايا الانحراف عند قيم مختلفة حسب سرعة الرياح. تصنع معظم الشفرات الحديثة من ألياف الزجاج البلاستيكي المدعوم GRP (أي اليف الزجاج البوليستري أو الEpoxy) كما يمكن استعمال ألياف الكربون أو مادة ال Kevlar كمادة داعمة ولكنها ليست ذات فعالية اقتصادية كافية بالنسبة للتوربينات الكبيرة.

يبين الشكل (2-6) شفرة توربين بطول 2,25m ويوضح الشكل تغير في مساحة المقطع على طول الشفرة.



الشكل (2-6) شفرة توربين بطول 2,25 m

2-1: القمرة The Hub

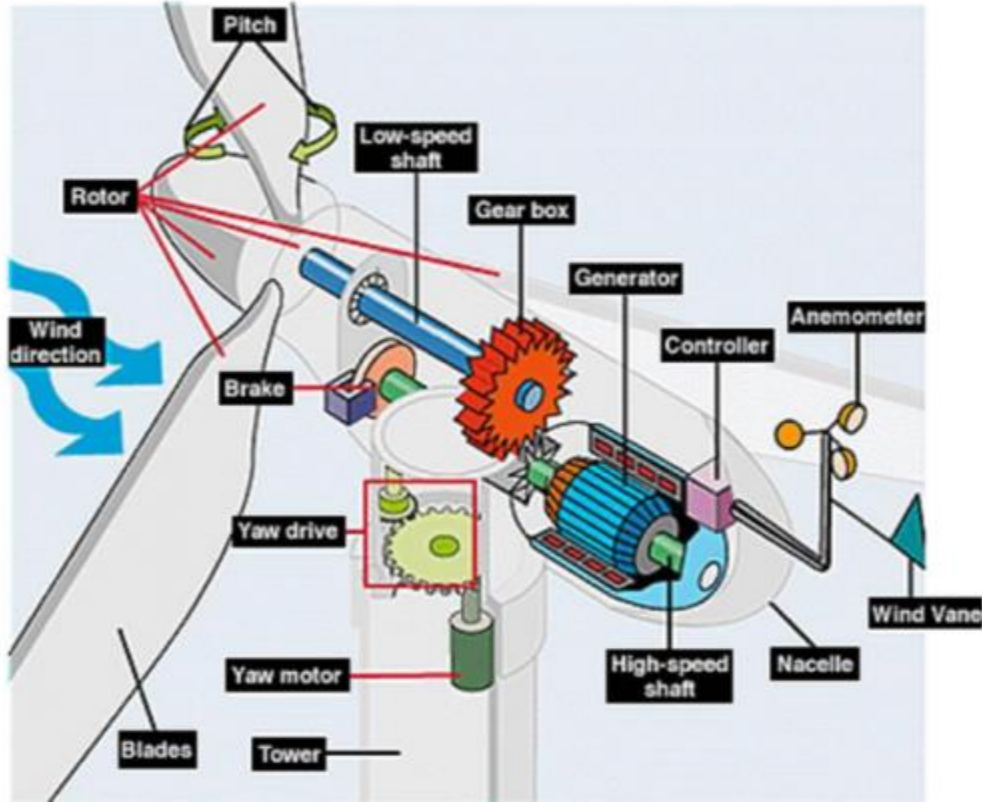
وظيفتها وصل الشفرات بمحور الدوران الرئيسي. يتم عادةً توصيل التجهيزات الهيدروليكية والميكانيكية والكهربائية الى الصرة، هذه التجهيزات هي التي تقوم بالتحكم بزوايا انحراف الشفرات أو بنظام الفرامل لحالات الطوارئ.

2- حاوية الأجزاء الدوارة The Nacelle:

يشبه شكل هذه الحاوية الصندوق وهي تقع خلف شفرات الدوار، وتحتوي على الأجزاء التالية:

محور الدوران ذي السرعة المنخفضة (من جهة الجزء الدوار)، علبه السرعة، محور الدوران ذي السرعة العالية (من جهة المولد) والمولد. كما توجد ضمن هذه الحاوية العديد من الوصلات التي تستخدم للتوصيل بين أجزاء العنفة، ونظام المكابح الميكانيكية (الفرامل Brakes)، بالإضافة الى معدات المراقبة و التحكم المختلفة. يتم وصل حاوية الأجزاء الدوارة الى البرج من خلال نظام التوجيه Yaw System.

يبين الشكل (2-7) المكونات الرئيسية (الميكانيكية والكهربائية) لحاوية الأجزاء الدوارة [13].



الشكل (2-7) المكونات الرئيسية (الميكانيكية والكهربائية) لحاوية الأجزاء الدوارة

2-2: محور الدوران ذي السرعة المنخفضة (Law Speed Shaft): وهو عنصر الدوران الرئيسي والذي ينقل العزم من الجزء الدوار الى بقية المكونات

3-2: علبه السرعة Gearbox: تقوم علبه السرعة بزيادة علبه السرعة المنخفضة لمحور الدوران الرئيسي الى سرعة مناسبة لتشغيل المولد الكهربائي وبالتالي فإن سرعة الدائر والتي تكون عملياً أقل من 100 rpm تزداد الى 1200-1800 rpm وهو مجال السرعة المطلوب من قبل المولد.

4-2: محور الدوران ذي السرعة المرتفعة (High Speed Shaft): وهو المحور الذي يقوم بنقل السرعة وعزم الدوران من علبه السرعة الى المولد.

5-2: المولد Generator

معظم المولدات المستخدمة في المحطات الريحية هي إما مولدات تحريضية أو تزامنية حيث تعمل هذه المولدات على سرعة دوران ثابتة تقريباً وذلك عند وصلها مباشرة إلى الشبكة العامة.

يعد استخدام العنف الريحية ذات السرعة المتغيرة خياراً مهماً في محطات توليد الطاقة الكهربائية باستخدام طاقة الرياح. هناك العديد من الميزات المهمة التي يمكن الحصول عليها مثل زيادة الموثوقية وتقليل اهتلاك العنف و الحاجة الى صيانتها بالإضافة الى إمكانية تشغيل العنف الريحية بالاستطاعة العظمى ضمن مجال واسع لسرعة الرياح وبالتالي زيادة الاستطاعة المستخلصة منها الى أعظم ما يمكن وعلى الرغم من وجود العديد من الصعوبات التي قد تظهر في تشغيل العنفات الريحية على سرعة متغيرة فإن استخدام عناصر الكترونيات القدرة و مبدلات الاستطاعة الالكترونية المناسبة يمكن تشغيل كل من المولدات التزامنية أو التحريضية على سرعة متغيرة.

2-6 نظام التحكم Control System: يقوم المتحكم بإقلاع الآلة عند سرعات رياح محددة Cut-in wind speed وهي عادة ما تكون 4 m/s كما يقوم بإيقاف الآلية عندما تكون سرعات الرياح عالية جداً cut-out wind speed وهي عادة ما تكون 25 m/s لأنه في بعض الحالات قد يسخن المولد بسبب سويات الاحتكاك العالية [14].

ولهذا عادة ما يربط مع نظام الحكم جهاز قياس سرعة الرياح Anemometer وجهاز تحديد اتجاه الرياح Wind Vane وذلك لمعرفة سرعة الرياح و اتجاهها. فمن خلال جهاز سرعة الرياح يمكننا معرفة سرعة الرياح وبالتالي اقلاع أو إيقاف الآلة بينما نحتاج لجهاز تحديد اتجاه الرياح لتوجيه حاوية الأجزاء الدوارة باتجاه مقابل تماماً لاتجاه الرياح.

3- نظام التوجيه Yaw System:

وهو نظام التحكم بانحراف المحور الشاقولي يقوم هذا النظام بتوجيه حاوية الأجزاء الدوارة (القمرة) بحيث يتوجه محور الدوار بشكل دائم وبأعلى دقة ممكنة باتجاه مقابل تماماً لاتجاه الرياح. يتوضع نظام التوجيه تحت حاوية الأجزاء الدوارة ويتم وصل هيكله الخارجي الى البرج عن طريق كرسي تحميل خاص بهذه الوظيفة. يمكن للعنفات الريحية أن توجه إما مع اتجاه الرياح Downwind أو باتجاه مقابل لاتجاه الرياح Upwind تستخدم طريقة التوجيه Downwind من أجل العنفات الريحية ذات الاستطاعات الصغيرة وتستخدم طريقة التحكم Passive Yaw Control أي التوجيه غير الفعال ، حيث يمكنها توجيه نفسها ذاتياً، بشكل مشابه للعنفة المستخدمة في مجال الطقس. أما طريقة التوجيه Upwind فهي تستخدم في العنفات الريحية الحديثة وذات الاستطاعات الكبيرة وهي تحتاج الى طريقة التحكم Active Yaw Control أي التوجيه الفعال، في هذه الطريقة يكون هناك محرك أو أكثر للتوجيه كل واحد من هذه المحركات يتحكم بمسنن معين يقوم بتحريك الحاوية باتجاه محدد وبحيث يتم التحكم بمحركات التوجيه هذه آلياً وفق نظام تحكم وفقاً لسرعة الرياح و اتجاهها باستخدام حساس خاص أو من خلال عنفة ريحية صغيرة متوضعة على قمة حاوية الأجزاء الدوارة. بعض الأحيان يتم استخدام مكابح خاصة لتثبيت الحاوية عند موضع محدد.

4 - البرج Tower:

يتم تصميم البرج عملياً بشكل انبوبي وخاصة من أجل العنفات الكبيرة الاستطاعة. يصنع البرج عادة من الفولاذ أو من الممكن أن يصنع من الاسمنت المسلح. يمكن أيضاً استخدام أبراج الفولاذ المصممة على شكل شبكات من القضبان ولكنها تستخدم فقط من أجل العنفات الريحية ذات الاستطاعات الصغيرة. يجب أن يكون ارتفاع البرج أكبر بـ (1,5-1) مرة من قطر الدائر، الذي تم اختياره لتركيب العنفة

5_ قاعدة البرج (الاساسات) foundations

يتم تثبيت البرج على قاعدة مدعمة الأساسات، وتصمم قاعدة البرج من الاسمنت المسلح.

6_ المحولة الكهربائية Transformer

تقوم المحولة الكهربائية برفع التوتر الكهربائي المنخفض (خرج المولد) ليصبح مساوياً لتوتر الشبكة الكهربائية التي ستربط العنفة الريحية معها. حيث يتم نقل التوتر العالي الناتج عن خرج المحولة عبر كابلات أرضية أو هوائية (على أبراج نقل) الى الشبكة.

2-2-2-أنواع العنفات الريحية بحسب سرعة الدوران:

تصنف أنظمة طاقة الرياح بحسب سرعة دوران العنفة الى:

- الأنظمة الريحية التي تعمل على سرعة ثابتة Fixed-Speed Wind Turbines
- الأنظمة الريحية التي تعمل على سرعة متغيرة Variable-Speed Wind Turbines

2-2-2-1-العنفات الريحية التي تعمل على سرعة ثابتة Fixed-Speed Wind Turbines

تعمل هذه العنفات عند سرعة ثابتة وهذا يعني أنه بغض النظر عن سرعة الرياح، فإن سرعة دوران محور التوربين تبقى ثابتة وهي محددة بتردد الشبكة.

وتستخدم هذه الأنظمة مع المولدات التحريضية ذات الدائر المقصور، حيث يبدأ نظام التحويل الي يعمل مع هذه العنفات بتوليد القدرة عندما تكون سرعة الرياح أكبر من Cut-In Speed أي أكبر من 3-4 m/s وعندما تكون سرعة الدوران أكبر من سرعة الرياح الاسمية 13-15 m/s فإنه يتم تحديد الاستطاعة المستخلصة من التوربين باستخدام التوقف الفعال/غير الفعال Active/Passive Stall أو التحكم بزاوية الانحراف Pitch Control لشفرات التوربين. أما عند سرعات الرياح الأكبر من Cut-Out Speed فإنه يتم توقيف التوربين وذلك لحمايته والمولد من الأعطال المحتملة[15].

إن سرعة الدوران لأنظمة التوربينات ذات السرعة الثابتة هي عادة ضمن المجال 6-15 rpm في حين أن المولد التحريضي يدور بسرعة أعلى من 750-1300 rpm علماً أن سرعة دوران المولد تحدد بعدد الأقطاب وبتردد الشبكة.

إيجابيات أنظمة توربينات الرياح ذات السرعة الثابتة[16]:

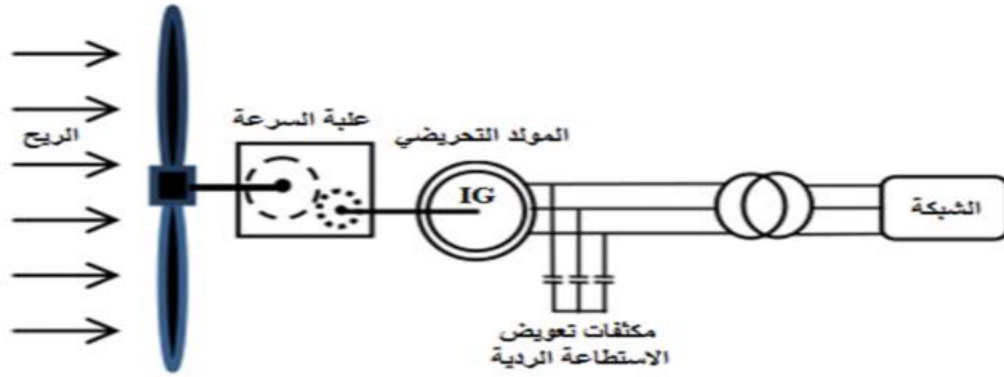
- بساطة الأنظمة الكهربائية.
- موثوقية عالية.
- تكلفة معتدلة.

السلبيات الأساسية لهذه الأنظمة[16]:

- عدم إمكانية تحسين الاستطاعة أو القدرة المستخلصة من التوربين حيث لا توجد إمكانية لتعديل الطاقة المولدة.

- عدم إمكانية التحكم بالاستطاعة الردية وخصوصاً للمولد التحريضي، حيث يتطلب التوصيل المباشر للمولد التحريضي مع الشبكة إضافة مكثفات لتقليل الاستطاعة الردية. حيث وكما هو معروف، فإن المولدات التحريضية تحتاج الى تيار ردي من أجل تأمين المغنطة ويسحب مباشرة من الشبكة. مما قد يسبب حصول انحرافات في الجهد غير مرغوب بها، وخصوصاً في الشبكات الضعيفة. من أجل تجنب هذه المشكلة، يتم ربط مكثفات تعويض الاستطاعة الردية على اطراف ملفات الثابت.

يبين الشكل (2-8) نظام العنفة الريحية ذات السرعة الثابتة مع مولد تحريضي:



الشكل (2-8) نظام العنفة الريحية ذات السرعة الثابتة مع مولد تحريضي

2-2-2-2-2 العنفات الريحية التي تعمل على سرعات متغيرة Variable Speed Wind turbine

تعتبر العنفات الريحية التي تعمل على سرعات متغيرة الأكثر شيوعاً ويمكن تحقيق هذا النظام بفضل المبدلات الالكترونية التي تسمح بالوصول الكامل أو الجزئي مع الشبكة.

عند العمل على سرعات رياح متغيرة من الرياح من المهم جداً الحصول على اعظم استطاعة ممكنة من الرياح ولكن عند هذه الحالة فإن التوصيل المباشر مع الشبكة غير ممكن بسبب تغيرات تردد جهد المولد.

ومن هنا تبرز أهمية المبدلات الالكترونية Power Electronics Converters للوصل بين المولد وشبكة التغذية، حيث تقوم بمعالجة هذا الخرج ليصبح بالإمكان تغذية الشبكة به، كخطوة أولى نعمل على تقويم التيار المتناوب الناتج من المولد التزامني وتحويله الى تيار مستمر ثم بعد ذلك نعمل مرة أخرى على قلبه مجدداً الى متناوب ولكن بالتردد الاسمي للشبكة 50 or 60 Hz ثم بعد ذلك نقوم بتوصيله الى الشبكة.

هذا وتمتلك أنظمة تحويل الطاقة التي تعتمد على التوربينات العاملة عند سرعات مختلفة العديد من الميزات كالحصول على جهد وتردد ثابت للاستطاعة عند تغير سرعة الدوار، والقدرة على التحكم بالاستطاعة الفعلية active power والاستطاعة الردية reactive power بشكل مستقل عن بعضهما.

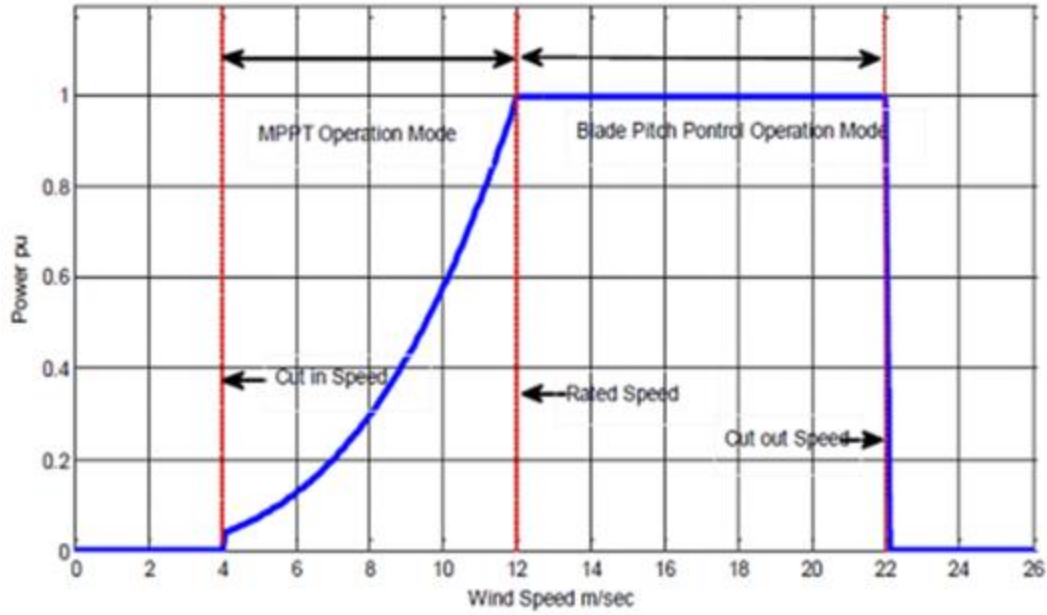
يبين الجدول التالي إيجابيات وسلبيات أنظمة تحويل طاقة الرياح الثابتة والمتغيرة:

الجدول (1-1) إيجابيات وسلبيات أنظمة تحويل طاقة الرياح:

	Fixed Speed	Variable Speed
إيجابيات	1- الكلفة المنخفضة لنظام تحويل طاقة الرياح 2- البنية البسيطة للنظام 3- الصيانة القليلة للنظام	1- التحكم المنفصل بالاستطاعة الفعلية والردية 2- الكفاءة الأعلى
سلبيات	1- عدم القدرة على التحكم بالاستطاعة الفعلية و الردية. 2- الأداء و الكفاءة المنخفضة للنظام. 3- الاجهادات العالية على التوربين. 4- معامل الاستطاعة المنخفض (Power Factor)	1- ارتفاع سعر المبدلات الالكترونية

2-2-3- أنماط عمل أنظمة العنفات الريحية:

يمكن توضيح مناطق عمل العنفات الريحية من خلال مخطط الاستطاعة - السرعة الموضح بالشكل [17] (2-9):



الشكل (2-9) أنماط عمل أنظمة العنفات الريحية

تبعاً لشدة الرياح فإنه يتم التحكم بمولدات العنفات الريحية للعمل في ثلاث مناطق مختلفة كما هو موضح بالشكل السابق :

المنطقة الأولى: وذلك عندما تكون سرعة الرياح أقل من السرعة الدنيا Cut-in أي أقل من 4 m/s حيث لايسمح بتوصيل العنفة الى الشبكة وإلا ستعمل كمحرك.

المنطقة الثانية: عندما تكون سرعة الرياح أكبر من سرعة القطع Cut-in وضمن السرعة الاسمية Rated Speed وفيها يتم التحكم بالسرعة من أجل ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية MPPT لكي نضمن أعظم أداء في استخلاص القدرة.

المنطقة الثالثة: عندما تكون سرعة الرياح أكبر من القيمة الاسمية عندئذ فإن القدرة المتولدة من النظام ستكون اكبر من الاستطاعة الاسمية، الأمر الذي يزيد الإجهاد الكهربائي على المولد وعلى أجهزة معالجة الاستطاعة وقد يؤدي الى إعطابهم، ولهذا يجب التحكم بزاوية ميل الشفرات للتوربين لتقليل الاستطاعة المسحوبة من الريح والحفاظ عليها قريبة من الاستطاعة الاسمية.

2-2-4- مبدأ عمل العنفات الريحية ذات المحور الأفقي:

يشمل نظام تحويل طاقة الرياح النموذجي على عنفة ريحية، مولد، جهاز ربط مع الشبكة ونظام تحكم. وظيفة هذا النظام تحويل الطاقة الحركية للرياح الى طاقة كهربائية لتغذية الشبكة.

تقوم العنفات الريحية بتحويل الطاقة الحركية للرياح الى طاقة الميكانيكية تنتقل عبر محور الدائر للتوربين الى المولد الذي يحول بدوره الطاقة الميكانيكية الى طاقة كهربائية تنتقل الى الشبكة.

2-2-4-1- العلاقة بين الاستطاعة و السرعة في العنفات الريحية:

الطاقة الحركية للرياح Kinetic Energy:

تعطى الطاقة الحركية للرياح كتابع لسرعة الرياح V وكتلته m بالعلاقة التالية:

$$E = f(m, V) = \frac{1}{2} m \cdot V^2 \quad (1-2)$$

حيث m كتلة تدفق الهواء.

الاستطاعة الناتجة هي حاصل نسبة الطاقة الحركية خلال الزمن كما في العلاقة التالية:

$$P = \frac{1}{2} \frac{m}{s} V^2 \quad (2-2)$$

حيث m/s كتلة تدفق الهواء في الثانية mass flow rate per second

P الاستطاعة الميكانيكية لحركة الهواء

كتلة تدفق الهواء:

$$m \cdot \rho \cdot A \cdot V \quad [kg/s] \quad (3-2)$$

حيث:

ρ كثافة الهواء $[kg/m^3]$ وتتعلق بدرجة الحرارة والضغط

A المساحة الممسوحة من الشفرات m^2

V سرعة الهواء m/s

$A.V$ التدفق الحجمي للهواء

ومنه نستنتج الاستطاعة المقدمة الى العنفة الريحية:

$$P = \frac{1}{2}(\rho.A.V).V^2[kg/s] \quad (4-2)$$

$$P = \frac{1}{2}\rho.A.V^3[kg/s] \quad (5-2)$$

حيث يلاحظ تناسب الاستطاعة المقدمة للعنفة الريحية مع مساحة سطح الدوار المكافئ ومكعب سرعة الرياح

2-2-4-1-1-الاستطاعة الفعلية المستخلصة من الرياح:

تعرف الاستطاعة الفعلية المستخلصة من الرياح عن طريق شفرات الدائر بأنها الفرق بين استطاعة الرياح الواردة الى العنفة واستطاعة الرياح الخارجة منها وبالاستفادة من علاقة الاستطاعة (2-4) فإن الاستطاعة الناتجة عن الدائر تعطى بالعلاقة:

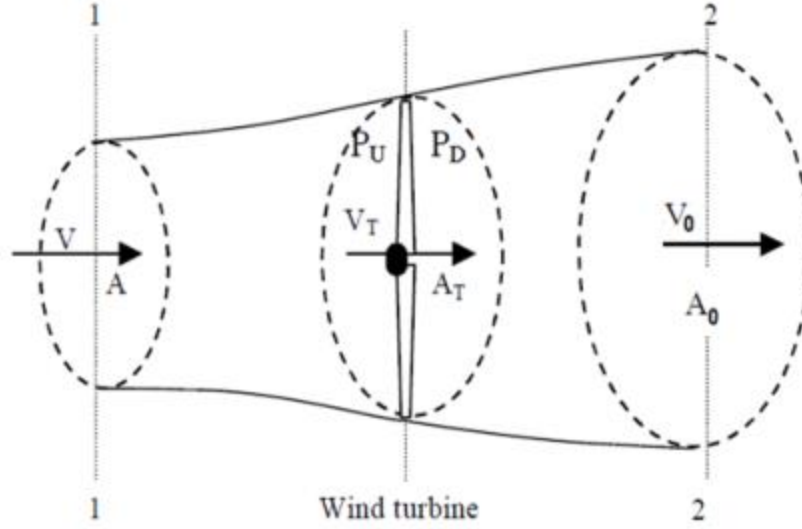
$$P = \frac{1}{2}(Mass Flow Rate per Second).(V^2 - V_0^2) \quad (6-2)$$

حيث:

P_0 الاستطاعة الميكانيكية المستخلصة من الدائر، أي (استطاعة خرج العنفة) W

V سرعة الرياح الواردة عند مدخل شفرات الدائر *Upstream Wind Velocity*

V_0 سرعة الرياح الخارجة عند مخرج شفرات الدائر *Downstream Wind Velocity*



الشكل (10-2) سرعة الرياح الواردة والخارجة

وباعتبار أن سرعة الرياح تتغير من V الى V_0 ، فإننا نحصل على نسبة تدفق كتلة الهواء عبر الشفرات الدوارة في هذه الحالة عن طريق جداء كثافة الهواء بالمساحة التي تغطيها الشفرات بالسرعة الوسطية. وبالتالي نحصل على العلاقة التالية:

$$\text{Mass Flow Rate} = \rho . A . \frac{V+V_0}{2} [kg/s] \quad (7-2)$$

طبعاً هي السرعة الوسطية للرياح $\frac{V+V_0}{2}$

عندئذ تصبح الاستطاعة الميكانيكية المستخلصة من الدائر والتي تقود المولد الكهربائي:

$$P_0 = \frac{1}{2} \left[\rho . A . \frac{(V+V_0)}{2} \right] . [V^2 - V_0^2] \quad (8-2)$$

وبإعادة ترتيب العلاقة السابقة جبرياً نحصل على العلاقة التالية:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho . A . V^3 \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right]}{2} \quad W \quad (9-2)$$

يعبر عادة عن الاستطاعة المستخلصة من شفرات الدائر (أي استطاعة خرج العنف) كجزء من استطاعة الرياح الواردة الى العنف كما يلي:

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p \quad (10-2)$$

حيث:

$$C_p = \frac{\left(1 + \frac{V_0}{V}\right) \left[1 - \left(\frac{V_0}{V}\right)^2\right]}{2} \quad (11-2)$$

يمكن تعريف المعامل C_p بأنه جزء من استطاعة الرياح الواردة الى العنفة والتي يتم التقاطها من قبل شفرات الدائر في حين أن الاستطاعة المتبقية يتم صرفها ضمن الرياح الخارجة من العنفة.

يدعى C_p معامل استطاعة دوائر العنفة Power Coefficient Of The Rotor أو مردود الدائر (معامل أداء العنفة (Rotor Efficiency)

بمقارنة العلاقتين (10-2) (4-2) نستطيع بسهولة أن نجد:

$$P_0 = \rho \cdot C_p \Rightarrow C_p = \frac{P_0}{\rho} \quad (12-2)$$

وبالتالي يمكن القول أن C_p هو معامل استطاعة الرياح الواردة التي تتحول عن طريق شفرات العنفة الى استطاعة ميكانيكية مقدمة للمولد الكهربائي.

2-2-4-1-2-العوامل المؤثرة على الاستطاعة المستخلصة من الرياح:

انطلاقاً من علاقة الاستطاعة المستخلصة من الرياح التي ذكرناها سابقاً وهي:

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot C_p [w] \quad (13-2)$$

يمكن ان نلاحظ بسهولة العوامل التي تؤثر على هذه الاستطاعة.

1- كثافة الهواء $\rho \text{ kg/m}^3$

من المعلوم بأن الطاقة الحركية لأي جسم متحرك تعتمد على كتلته ، لذلك فإن الطاقة الحركية للرياح تعتمد على كثافة الهواء، فكلما كان الهواء أثقل كانت الطاقة المقدمة للعنفة أكبر عند الضغط الجوي الطبيعي

مئوية تكون كثافة الهواء حوالي 15° ودرجة الحرارة

$$\rho = \frac{P}{r.T} = \frac{1,013 \times 10^5}{287 \times 288} \approx 1,225 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right] \quad (14-2)$$

وهذه الكثافة تزداد بشكل بسيط مع زيادة الرطوبة ، وبما أن الهواء يكون أكثر كثافة عندما يكون بارداً ، فإن ضغط الهواء عند الارتفاعات العالية يكون قليلاً وكثافة الهواء أصغر .

إن التغيير في كثافة الهواء المنسوبة للشروط النظامية عند مستوى سطح البحر يمكن أن يغير في إنتاجية الطاقة بنسبة تتراوح بين 10% و 20% وأحياناً أكثر من ذلك وكمثال على ذلك في يوم صيفي عل ارتفاع 1500m في إحدى جبال الكامبيرون تصل درجة الحرارة الى حوالي 35°C وتصل كثافة الهواء حتى 80% منها لو كانت على الساحل عند درجة حرارة 20°C

2- مساحة الدوار (m²) A

إن مساحة الدوار هي التي تحدد طاقة العنفة التي يمكن أن تجنى من الرياح ،حيث أن مساحة الدوار تتناسب طردياً مع مربع قطر الدوار ، فإذا ازداد القطر مرتين تضاعفت الطاقة الناتجة أربع مرات حيث:

$$A = \pi \cdot R^2 \quad (15 - 2)$$

حيث R هو نصف قطر الدوار (أو تقريباً طول الشفرة).

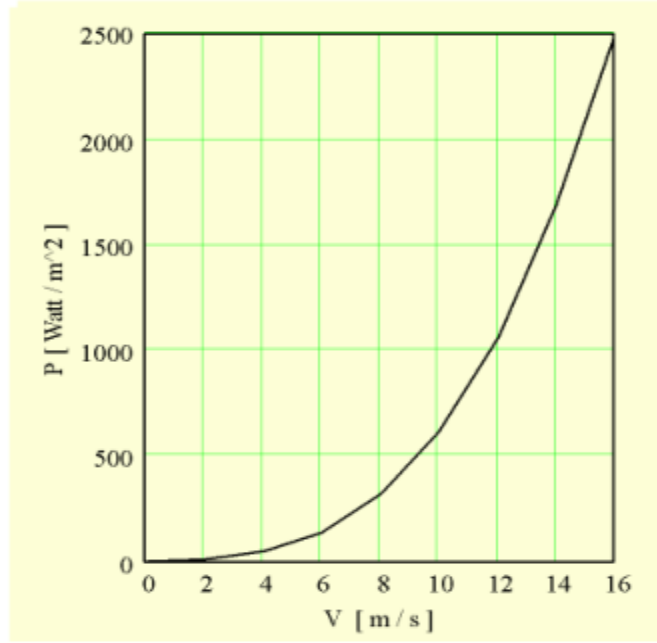
نجد 11 m فإذا ازداد هذا القطر الى 10 m وكمثال بسيط عن تأثير القطر نفترض أنه لدينا دوار بقطر ما يلي:

$$A_2 = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \cdot A_1 = \left(\frac{11}{10}\right)^2 \cdot A_1 = 1,21 \cdot A_1 \quad (16-2)$$

21% سيزيد من المساحة المفيدة بمقدار 10% أي أن زيادة نصف قطر الدوار (طول الشفرة) بمقدار إن هذه العلاقة بين المساحة المفيدة و الطاقة المتوفرة توضح حقيقة جليلة لطاقة الرياح وهي أن العنفة بقطر كبير للدوار تنتج كهرباء أكثر من العنفة ذات القطر الصغير .

3- سرعة الرياح (m/sec) V:

يتم عادة تحديد المكان المراد استثمار طاقة الرياح فيه حسب معدل سرعة الرياح فيه وبشكل نموذجي يؤخذ عادة معدل سرعة الرياح السنوي (وأحياناً الشهري) وتتناسب طاقة الرياح الناتجة عن العنفة مع مكعب سرعة الرياح مع ملاحظة أن معدل مكعب سرعات الرياح أكبر من مكعب معدل السرعات. وكما يوضح الشكل (2-9) فإنه عند سرعة رياح 8 m/sec نحصل على طاقة بمقدار 314 watt/m² (بشرط أن تكون الرياح تتجه بشكل عمودي على مساحة الدوار المفيدة) وعند السرعة 16 m/Sec نحصل على طاقة أكبر بثمانى مرات و تساوي 2509 Watt/m²



الشكل (11-2) علاقة الطاقة النوعية P بسرعة الرياح V

كذلك نرى أنه إذا زادت سرعة الرياح بمقدار 10% فإن الطاقة الناتجة الجديدة تصبح:

$$P_2 = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^3 \cdot P_1 = \left(\frac{110}{100}\right)^3 \cdot P_1 = 1,33 \cdot P_1 \quad (17-2)$$

أي أن الطاقة ستزداد بمقدار 33%.

وبالنظر الى هذه العوامل نجد أن الطاقة الناتجة عن حركة الرياح و الساقطة على الدوار بشكل عمودي

تعطى بالعلاقة:

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (18-2)$$

وعند سطح البحر يكون:

$$P = 0,6125 \cdot A \cdot V^3 \quad (19-2)$$

حيث V تقاس بـ m/sec والمساحة m^2

$$P = \frac{1}{2} m \cdot V^2 \quad (20-2)$$

حيث $m = \rho \cdot A \cdot V$ [kg/sec] كتلة الهواء المار خلال واحدة الزمن.

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V \cdot V^2 \quad (21-2)$$

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (22-2)$$

4-معامل الاستطاعة C_p :

ويدعى أحياناً (عامل بيتز) ويمكن الكتابة: C_p بمعامل الاستطاعة P والاستطاعة P_0 تدعى النسبة بين الاستطاعة

$$C_p = \frac{\frac{1}{2} \rho F (v_1^2 - v_2^2) (v_1^2 + v_2^2)}{\frac{1}{2} \rho F v_1^2} \quad (23-2)$$

نعرف البسط بالاستطاعة الميكانيكية ونرمز لها بالرمز P_k وبالتالي يصبح هذا العامل بالشكل:

$$C_p = \frac{P_k}{\frac{1}{2} \rho F v_1^2} \quad (24-2)$$

من العوامل المؤثرة على C_p العامل λ والذي يمثل السرعة النسبية للشفرة و سرعة الريح ويعطى بالعلاقة :

$$\lambda = \frac{u}{v_1} = \frac{\omega R}{v_1} \quad (25-2)$$

حيث u سرعة مقدمة الشفرة، و ω السرعة الزاوية للشفرة، و R نصف قطر الدوران.

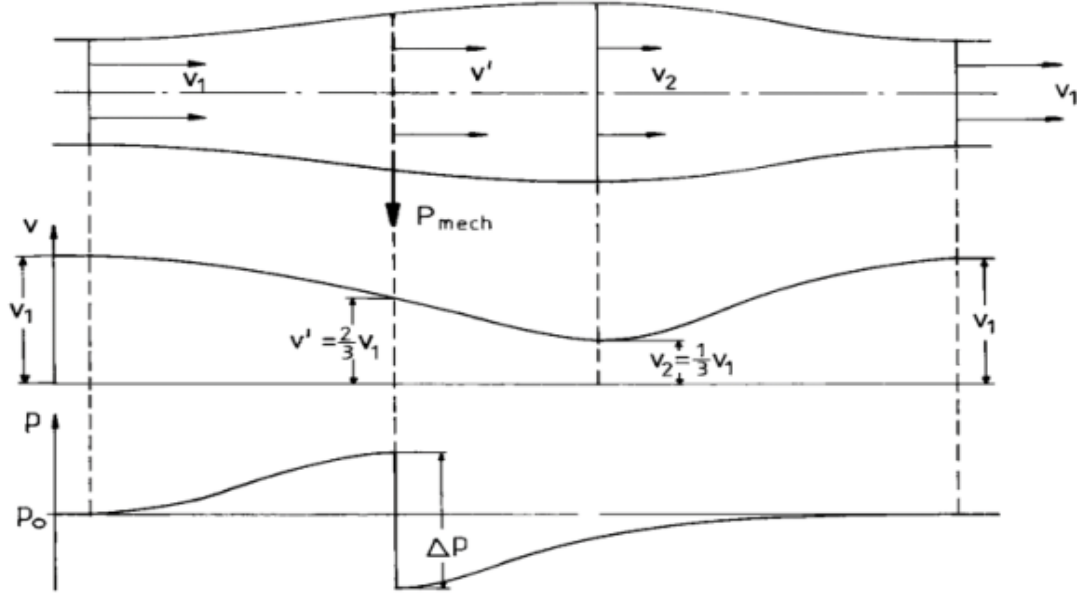
كما هو معلوم فإن العامل المثالي هو $\frac{v_2}{v_1} = \frac{1}{3}$ و بالتالي فإن السرعة المتدفقة v' تساوي :

$$v' = \frac{2}{3} v_1 \quad (26-2)$$

والسرعة المخفضة خلف التوربين يمكن حسابها بالعلاقة:

$$v_2 = \frac{1}{3} v_1 \quad (27-2)$$

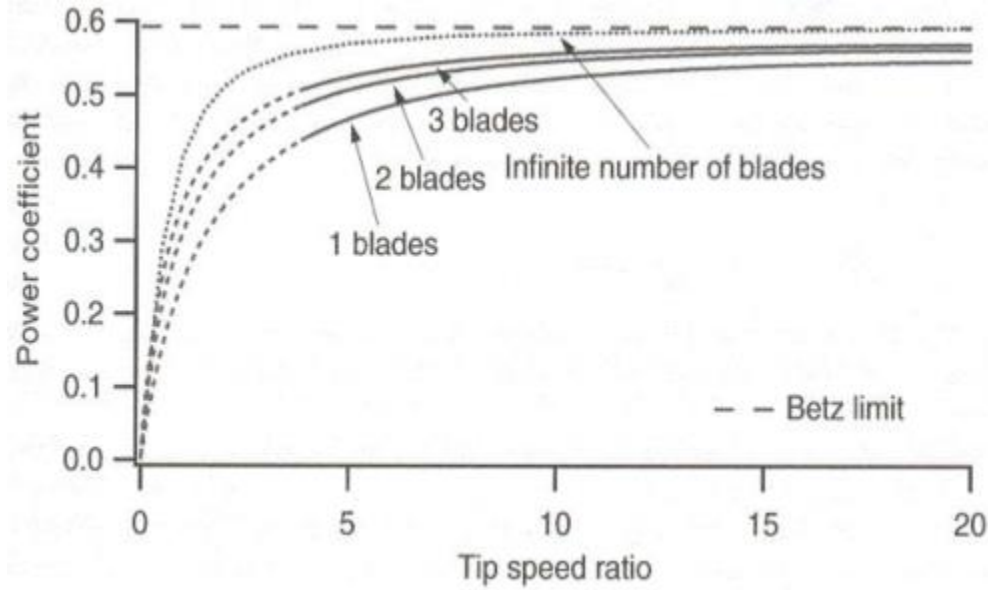
يظهر الشكل التالي شروط التدفق ضمن محول التوربين بتفاصيل دقيقة، ويبين اختلافات سرعة التدفق والضغط الساكن بالإضافة لخطوط التدفق.



الشكل (12-2) شروط التدفق ضمن محول التوربين

عند الاقتراب من مستوي الشفرات يتباطأ الهواء ويتدفق ضمن التوربين ثم يتباطأ أكثر لقيمة صغرى خلف التوربين، وتظهر خطوط التدفق توسع أنبوب الجريان الى أعظم قيمة عند النقطة المقابلة لأخفض سرعة، يمكن بعد ذلك لسرعة التدفق الازدياد ثانية بعيداً وراء التوربين وبعد ذلك يختفي توسع أنبوب الجريان.

يبين الشكل (2-13) تغير العامل C_p تبعاً لعدد شفرات الدوار:



الشكل (2-13) تغير العامل C_p تبعاً لعدد شفرات الدوار

وكما هو واضح فإن الحالة الأقرب الى المثالية (حد بيتز) تكون متاحة عندما يكون عدد الشفرات 3 حيث يكون عامل الاستطاعة C_p باشتقاق العلاقة (2-11) ومساواة المشتق بالصفر، عندئذ نحصل على العلاقة التالية:

$$C_{p \max} = \frac{16}{27} = 0,593 \quad (28-2)$$

تعرف القيمة العظمى التي يمكن الحصول عليها لمعامل الاستطاعة بحد بيتز، نسبة الى العالم الألماني Albert Betz عام 1919 ، ومنذ ذلك الوقت حتى يومنا هذا لم يتم تصميم عنفة ريحية قادرة على تجاوز هذا الحد [28]، حيث أنه من أجل سرعة محددة للرياح الواردة ، فإن معامل الاستطاعة يعتمد على النسبة $\frac{v_0}{v}$. يظهر الشكل (2-13) القيمة العظمى للمعامل C_p وهي عند القيمة 0,59 حيث نحصل عليها من أجل النسبة $\frac{v_0}{v} = \frac{1}{3}$ أي عندما تكون السرعة بعد العنفة الريحية (الخارجة) V_0 هي ثلث السرعة قبل العنفة الريحية (الواردة) V ، عندها نستخلص أعظم قدرة ممكنة من الرياح.

أي يمكن القول أن 59% فقط من الطاقة الحركية للرياح يمكن أن تتحول الى طاقة ميكانيكية تنتقل الى المولد الريحي. ويمكن تفسير ذلك بوضوح من العلاقة (2-11) لأنه كي نتمكن من الاستفادة من الطاقة الحركية الكلية الموجودة في الرياح يجب أن تكون سرعة الرياح الخارجة من العنفة مساوية للصفر، وبالتالي فإن الحصول على

كامل هذه الاستطاعة مستحيل عملياً حيث يتم الحصول كما قلنا على 59% منها كحد أعظمي (أي هي القيمة العظمى النظرية لها). ولكنها عملياً ذات قيمة أقل. ويتعويض القيمة العظمى النظرية لمعامل الاستطاعة في العلاقة (2-10) تصبح علاقة الاستطاعة الأعظمية المستخلصة من الرياح هي:

$$P_0 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot 0,59 \quad (29-2)$$

في التصميمات العملية تكون قيمة C_p أقل من 0.5 من أجل العنفات الريحية ذات السرعات العالية وذات الشفرتين. ومن أجل العنفات الريحية ذات السرعات الأقل وعدد الشفرات الأكثر تتراوح قيمته بين (0.2-0.4).
2-2-4-3-العوامل المؤثرة على قيمة معامل استطاعة العنفة الريحية $C_p(\lambda, B)$:

1- السرعة النسبية لرأس الشفرة (Tip Speed Ratio): λ

تعتمد الاستطاعة المنتجة من قبل دائرة العنفة عند سرعة محددة للرياح بشكل كبير على النسبة بين سرعة الرياح الواردة الى العنفة و سرعة رأس الشفرة (طرف الشفرة) . تسمى النسبة بين السرعة الخطية لرأس الشفرة وسرعة الرياح بالسرعة النسبية لرأس الشفرة λ وهي تعطى بالعلاقة التالية:

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{V_{wind}} = \frac{2\pi \cdot N \cdot R}{V_{wind}} \quad (30-2)$$

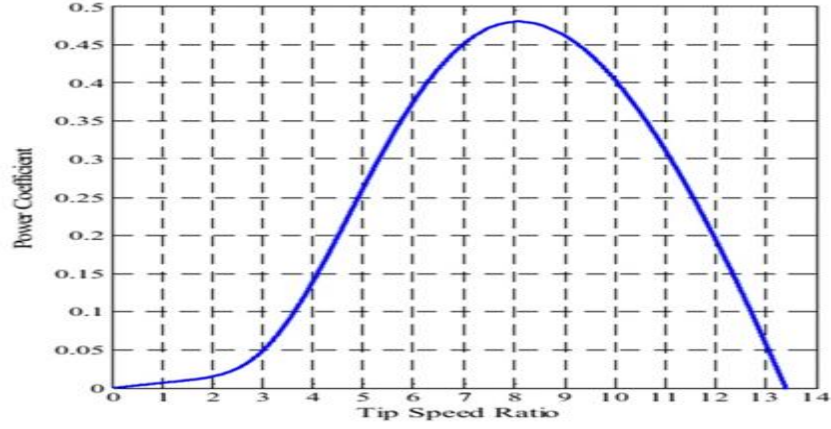
حيث ω : هي السرعة الزاوية للدوائر (من جهة محور الدوران ذات السرعات المنخفضة) $[rad/sec]$

R : نصف قطر دوار العنفة $[m]$

V_{wind} : سرعة الرياح $[m/sec]$

N : السرعة الدورانية للدوائر $[rpm]$

يبين الشكل (2-14) العلاقة بين معامل استطاعة العنفة والسرعة النسبية لرأس الشفرة. يبدو واضحاً أن هناك قيمة مثلى لـ λ يتم عندها الحصول على أعلى قيمة للاستطاعة المستخلصة من الرياح وبالتالي هي تقابل القيمة العظمى لمعامل الاستطاعة $C_{p \max}$.

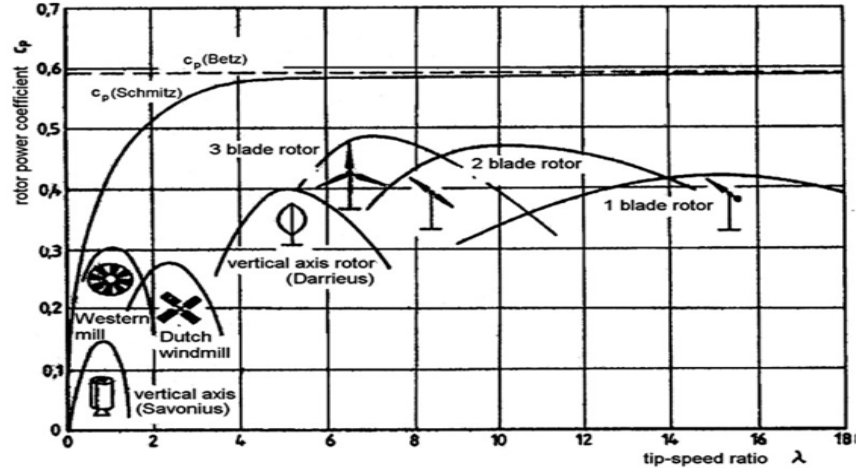


الشكل (2-14) العلاقة بين C_p و λ

يجب أن يكون تصميم نظام الطاقة الريحية أقرب ما يكون إلى المثالي، أي يحقق قيمة الطاقة السنوية المتوقع الحصول عليها وذلك من أجل أي موقع للمحطة الريحية. إن طريقة التشغيل الوحيدة من أجل الحصول على الاستطاعة الأعظمية هي تغيير سرعة العنفة مع تغير سرعة الرياح بحيث تبقى λ دائماً مساوية للقيمة الأعظمية لمعامل الاستطاعة ($C_{p \max}$).

2- تأثير نوع العنفة وشكلها على معامل الاستطاعة C_p :

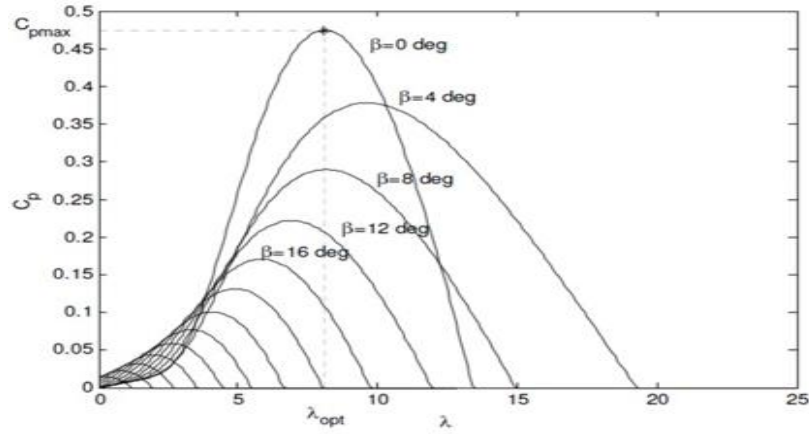
يوضح الشكل (2-15) مميزات العلاقة ($C_p(\lambda)$) لعدة أنواع مختلفة من العنفات الريحية [11]. حيث يظهر أن هذا المعامل أكبر في العنفات ذات المحور الأفقي وذات السرعات العالية وهو منخفض في العنفات ذات المحور العمودي، كما أن العنفات ذات ثلاث شفرات هي الأفضل من ناحية المعامل C_p بالمقارنة مع العنفات ذات شفرتين أو بشفرة واحدة.



الشكل (2-15) العلاقة $C_p(\lambda)$ لعدة أنواع من العنفات الريحية [18]

3-زاوية ميل الشفرات (β):

يبين الشكل (2-16) منحنيات العلاقة $C_p(\lambda, \beta)$ لعنفه ريحية عند زوايا مختلفة β [19].



الشكل (2-16) منحنيات العلاقة $C_p(\lambda, \beta)$ لعنفه ريحية عند زوايا انحراف مختلفة للشفرات

ونلاحظ من الشكل أن قيمة C_p تزداد كلما قلت قيمة β أي أننا نحصل على القيمة $C_{p \max}$ من أجل الزاوية $\beta = 0$ [19].

2-2-5- المولدات المستخدمة في أنظمة طاقة الرياح:

تقوم المولدات بتحويل الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية، يمكن تصميم العنفات الريحية مع مولدات تزامنية أو لاتزامنية (تحريرية) وبأشكال مختلفة من الوصل المباشر أو غير المباشر.

2-2-5-1- المولدات اللاتزامنية (التحريرية):

تستعمل معظم التوربينات الريحية ما يسمى بالمولد اللاتزامني ثلاثي الطور والذي يسمى أيضاً بالمولد التحريضي، وإن هذا النوع من المولدات غير واسع الانتشار خارج صناعة التوربينات الريحية وفي وحدات التوليد الكهرومائية بالرغم من التجربة الواسعة في استعمال هذا النوع من المولدات.

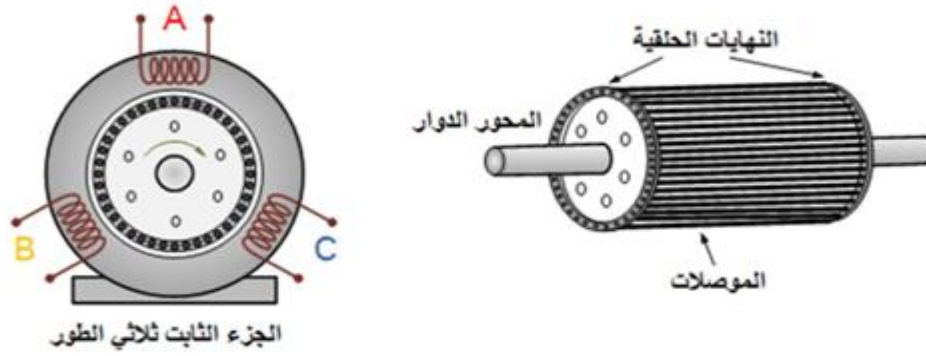
جدير بالذكر أن هذه الآلات قد صممت بالأصل كمحركات كهربائية، وفي الحقيقة فإن ثلث استهلاك الكهرباء العالمي يذهب لتشغيل المحركات التحريضية التي تعمل في المصانع والمضخات والمراوح والضواغط والمصاعد وتطبيقات أخرى تحتاج لتحويل الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية.

ويوجد للمولدات التحريضية نوعان أساسيان هما:

- مولد تحريضي ذو القفص السنجابي.
- مولد تحريضي ذو الدائر الملفوف.

2-2-5-1-1- المولد التحريضي القفص السنجابي:

يبين الشكل (2-17) البنية الداخلية لمولد تحريضي ذو القفص السنجابي. يعتبر المولد التحريضي ذو القفص السنجابي حتى الآن هو الخيار السائد في العنفات الريحية ذات السرعة الثابتة، لدرجة أصبح بالإمكان اعتبار المولد التحريضي هو المولد المعتمد القياسي والفعلي في أنظمة العنفات الريحية التي تعمل عند سرعة ثابتة. وتعود أسباب انتشار هذا المولد بشكل أساسي إلى بساطة التصميم، والمردود العالي من 85-95% ، ومتطلبات صيانة منخفضة، والتي قد تقتصر عادةً فقط على تشحيم أجزائه الدورانية.

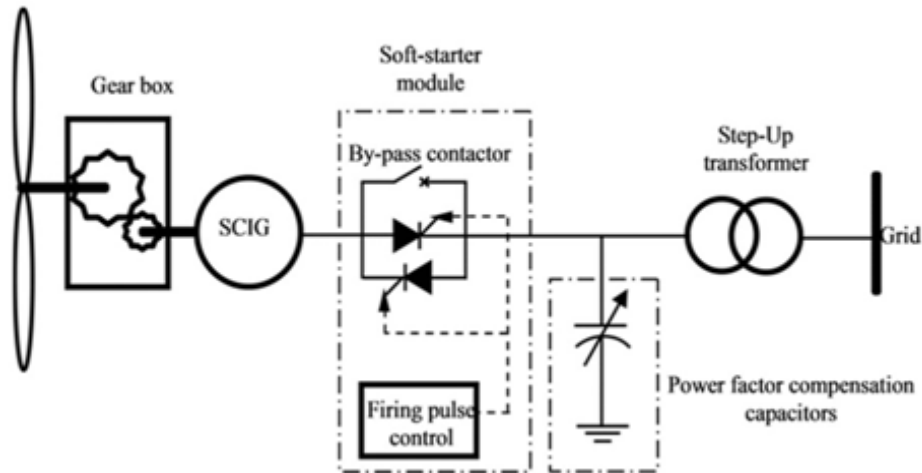


الشكل (17-2) البنية الداخلية لمولد تحريضي ذو القفص السنجابي

في الحالة التي يكون فيها المولد التحريضي موصول مباشرة مع الشبكة الكهربائية، تشكل العنفة الريحية عبئاً عليها بسبب الحاجة للحصول على تيار التهيج الذي يستجده المولد من هذه الشبكة لكي يعمل. أيضاً، وبسبب مميزة (العزم-السرعة) الحادة للمولد التحريضي، فإن التقلبات في طاقة الرياح سوف تنتقل بشكل أو بآخر مباشرة إلى الشبكة. هذه الحالات العابرة تصبح حرجة خصوصاً خلال عملية ربط العنفة مع الشبكة [20].

للتخلص من هاتين المشكلتين، يتم عادةً تزويد المولد التحريضي ذو القفص السنجابي المستخدم في العنفات الريحية بآلية المقطع الناعم (Soft Starter) ومعوّضات للاستطاعة الردية كما في الشكل (18-2).

يتألف المقطع بشكل رئيسي من عنصري الكترونيات قدرة مقادين عن طريق دائرة تحكم بنبضات القذح بحيث تؤمن إقلاع سلس.

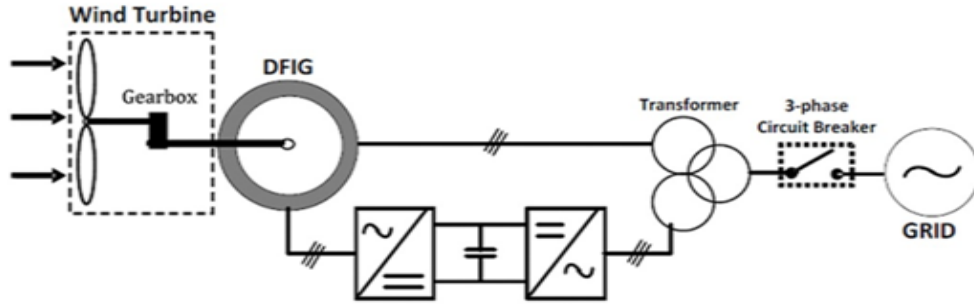


الشكل (18-2) المولد التحريضي ذو القفص السنجابي مزود بآلية المقطع الناعم (Soft Starter)

2-2-5-1-2-المولد التحريضي ذات دوائر ملفوف:

في هذا النوع من المولدات يكون الدوائر عبارة عن ثلاثة ملفات يمكن أن تكون مقصورة وبالتالي يكون المولد تحريضي ذو الدوائر المقصور أو يمكن أن تكون مرتبطة مع منبع تغذية متناوب ويسمى مولد تحريضي مضاعف التغذية (Double-Fed Induction Generator)، هذا النوع من المولد المضاعف التغذية شائع الاستخدام في مجال العنفات الريحية متغيرة السرعة خاصة أن الاستطاعة المارة عبر المبدلات الترددية وهي استطاعة الانزلاق وهي أقل بكثير من الاستطاعة المارة في الثابت. هذه الميزة تجعل التكلفة الاقتصادية أقل لهذا النوع من المولدات إلا أنها تحتاج إلى صيانة أكثر بسبب حلقات الانزلاق والمسفرات. وبسبب الحاجة إلى علبة سرعة لمزامنة سرعة دوران العنفة الريحية مع سرعة المولد، الأمر الذي يزيد من وزن العنفة ومن ضجيج المولد ومن الصيانة المستمرة علماً أن الصيانة في المولدات التي تكون مربوطة مع علبة سرعة هي صعبة ومعقدة.

يبين الشكل (2-19) مولد تحريضي مضاعف التغذية (DFIG) موصول مع علبة السرعة



الشكل (2-19) مولد تحريضي مضاعف التغذية (DFIG) موصول مع علبة السرعة

2-2-5-1-3-المولدات التزامنية:

يوجد نوعان للآلة التزامنية هما:

- 1- الآلة التزامنية ذات ملف التهيج.
- 2- الآلة التزامنية ذات مغناطيس دائمة.

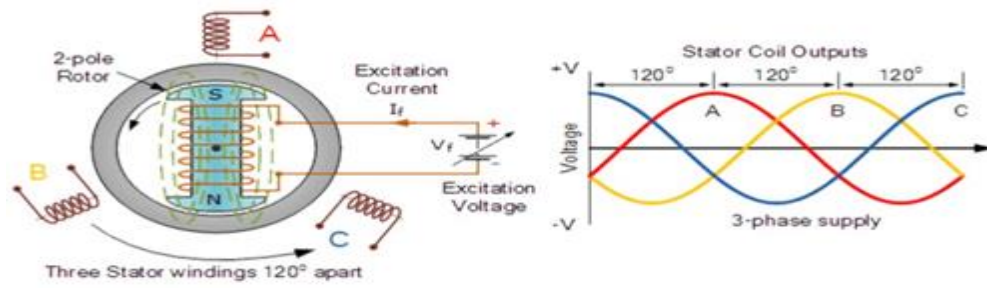
2-2-5-1-3-1-المولدات التزامنية ذات ملف التهيج:

يحمل الجزء الدوائر ملفاً يغذى بجهد مستمر يؤمن الحقل المغناطيسي الأساسي وتزود به الآلات التزامنية ذات الاستطاعات العالية نسبياً.

يتم وصل ملفات الثابت للمولد التزامني مباشرة إلى الشبكة وبالتالي تتحدد السرعة الدورانية للمولد بشكل دقيق من خلال تردد الشبكة من العلاقة $\omega = 2 * \pi * f$ و $n = 60 * \frac{f}{p}$. يقوم ملف الدائر بتوليد الحقل المغناطيسي ويحصل الدائر على تغذيته من منبع مستمر (DC).

تعتبر المولدات ذات الدائر الملفوف قليلة الاستخدام في العنفات الريحية ذات السرعة الثابتة بسبب مشكلة الاستقرار في الآلة التزامنية وعلاقتها مع تغير الاستطاعة الميكانيكية.

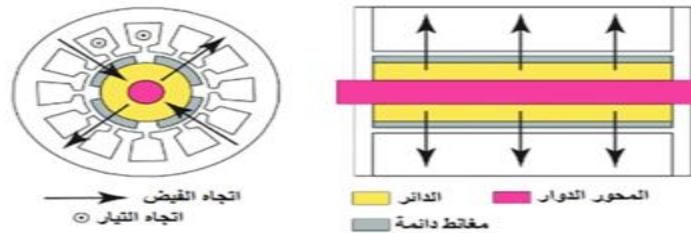
يوضح الشكل (20-2) مولد تزامني ثلاثي الطور ذات ملف تهيج بالإضافة لخرج المولد ثلاثي الطور حيث يبين انزياح الطور بزاوية 120 درجة.



الشكل (20-2) مولد تزامني ثلاثي الطور ذو ملف تهيج

2-2-1-3-1-5-2-2- المولدات التزامنية ذات مغناط دائمة (Permanent Magnet Synchronouns Generaor):

يبين الشكل (21-2) البنية الداخلية للجزء الدائر في المولد التزامني ذات مغناط دائمة في هذا النوع من المولدات تم استبدال ملفات التهيج التي تستخدم التيار المستمر بمغناط دائمة وبالتالي يتم التخلص من مشاكل المسفرت وحلقات الانزلاق التي كانت موجودة في المولد التزامني ذي الدائر الملفوف، بالإضافة إلى امتلاكه ميزات المولد التزامني نفسها من حيث إمكانية التحكم بالاستطاعتين الفعلية والردية بوجود المبدلة الترددية. ويعتبر مناسباً للعمل ضمن أنظمة العنفات الريحية التي تعمل عند سرعات متغيرة وبدون الحاجة لاستخدام علبة السرعة، ويمكن أن يكون المولد متعدد الأقطاب.



الشكل (21-2) البنية الداخلية للجزء الدائر في المولد التزامني ذات مغناط دائمة

ولكنها تملك بعض السلبيات كصعوبة التركيب في المصنع والكلفة العالية للمغانط.

هذا ويصنف هذا النوع من المولدات بحسب القوة المحركة العكسية (EMF) إلى:

- شبه المنحرفة
- الجيبية

في شبه المنحرفة تتحرّض قوة محرّكة عكسية شبه منحرفة في ملفات الطور للجزء الثابت، بينما في الجيبية فإنه تتحرّض قوة محرّكة عكسية جيبية في ملفات الطور للثابت [21].

وبحسب شكل الجزء الدوار فإن المولدات التزامنية تقسم إلى:

- مولدات تزامنية بدوار داخلي (Inner Rotor).
- مولدات تزامنية بدوار خارجي (Outer Rotor).

في نمط الدوار الخارجي فإن الجزء الدوار يحيط بالجزء الثابت، وتتوضع المغانط على المحيط الداخلي من الجزء الدوار، ولهذا فإن للجزء الدوار نصف قطر أكبر من الجزء الثابت ويملك عدد أكبر من الأقطاب مقارنة بالجزء الثابت.

ميزة أخرى لهذا النوع هو أنه المغانط تكون متوضعة بشكل جيد على الرغم من قوة الطرد المركزي الناتجة عن دوران المحور، بالإضافة إلى التبريد الجيد لها.

يستخدم هذا النوع من المولدات في العنفات الريحية الصغيرة التي يتم فيها وصل الشفرات مباشرة مع الجزء الدوار.

بينما في نمط الدوار الداخلي يكون الجزء الثابت محيطاً بالجزء الدوار وفي هذه الحالة نستفيد من خصائص التبريد الجيدة الأمر الذي يؤدي إلى درجة حرارة أقل عند نفس قيمة الضياعات.

يبين الشكل (2-22) نوعي المولدات التزامنية بدوار داخلي وخارجي:



الشكل (2-22) الجزء الدوار الداخلي على اليسار، الجزء الدوار الخارجي على اليمين للمولد التزامني

ويحسب مكان توضع المغناط الدائمة الدائمة في الجزء الدوار فإن المولدات التزامنية تصنف إلى نوعين:

- المولدات التزامنية ذات المغناط المسطحة (Surface Mounted Magnet): وفي هذا النوع فإن المغناط الدائمة تتوضع على سطح الجزء الدوار، المهم هنا أن الحثية المعبر عنها في نمط المحاور $d-q$ تكون متساوية أي $L_d = L_q$.

هذا النوع من المولدات هو الأكثر استخداماً في العنفات الريحية نظراً لسهولة تصميمه.

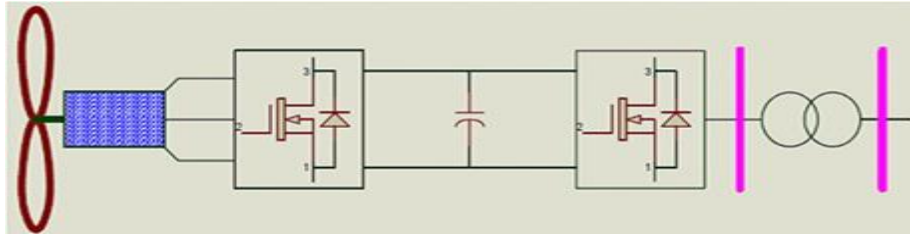
- المولدات التزامنية ذات المغناط الداخلية (Interior Magnet): وهنا تتوضع المغناط الدائمة داخل الجزء الدوار، وتكون $L_d \neq L_q$.

سننتقل في دراستنا إلى المولدات التزامنية ذات الأقطاب الدائمة (PMSG) نظراً للميزات التي تقدمها في أنظمة تحويل الطاقة الريحية متغيرة السرعة (Variable-Speed Wind Energy Conversion Systems) وهي:

- ✓ العمل عند السرعات المختلفة للرياح الأمر الذي يسمح باستخلاص أعظم استطاعة ممكنة بين السرعة الدنيا للرياح (Cut-in Wind Speed) والسرعة الاسمية (Rated Wind Speed).
- ✓ إمكانية تنظيم سرعة المولد التزامني بشكل كامل.
- ✓ العمل دون الحاجة لوجود علبة سرعة وبالتالي غياب الاجهادات الميكانيكية المرافقة لتغيرات سرعة الرياح.
- ✓ إمكانية التحكم الكامل بالاستطاعة الفعلية والردية.
- ✓ لا تحتاج المولدات التزامنية ذات الأقطاب الدائمة إلى حلقات الانزلاق، أي صيانة أقل ومردود أعلى، الأمر الذي يجعل العنفات الريحية العاملة بالPMSG أكثر استقراراً من أنظمة طاقة الرياح العاملة بالDFIG.

للتحكم في PMSG فإننا نحتاج للمبدلات (Converter)، وهناك عدة استراتيجيات لمبدلات القدرة (Power Converter) من أجل العنفات الريحية العاملة بالPMSG.

نظام التحكم الأكثر شيوعاً هو مبدلة Back-to-Back والشكل (23-2) يوضح هذا النمط [22].



الشكل (23-2) عنفة ريحية مع PMSG ومبدلة Back-to-Back

وكما نلاحظ فإن العنفة الريحية التي تعمل على سرعة متغيرة تفصل بشكل عام عن الشبكة وذلك لأن سرعة التشغيل تتغير باستمرار مع تغيرات سرعة الرياح وبالتالي فإن جهد وتوتر الخرج سيتغيران أيضاً. لا يمكن تغذية الشبكة بهذا الخرج ذي الجهد والتردد المتغيرين نظراً لانخفاض جودة الاستطاعة له، لذلك نقوم بإضافة مبدلات الكترونية مناسبة تقوم بمعالجة هذا الخرج بحيث يصبح بالإمكان تغذية الشبكة به. حيث كخطوة أولى نعمل مرة أخرى على قلبه مجدداً إلى متناوب ولكن بالتردد الاسمي للشبكة (50 أو 60) هرتز، ثم بعد ذلك نقوم بتوصيله إلى الشبكة.

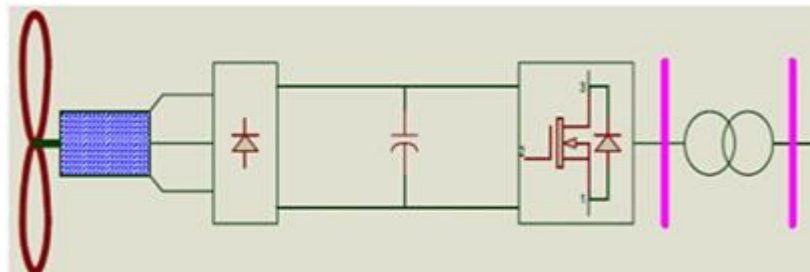
من خصائص Back-to-Back Converter هي أنها تستخدم عناصر فعالة سواء في دائرة التحويل (Rectifier) من جهة المولد أو في دائرة الانفرتر (Inverter) من جهة الشبكة.

من إيجابيات Back-to-Back Converter [22]:

- 1- دائرة التحويل متحكم بها.
- 2- يستخدم كلاً من المقوم والمبدلة عناصر فعالة مثل IGBT ، أي أن التيار قادر على المرور من المولد إلى الشبكة ومن الشبكة إلى المولد.

السلبية الأساسية لهذا النوع من المبدلات هو أن التحكم هنا مكلف ومعقد بسبب الحاجة إلى 12 إشارة تعديل (PWM) من أجل المقوم والمبدلة، وفي التطبيقات العملية فإننا نحتاج إلى وحدتي تحكم صغيرة (Micro Controller Units)، ومعالج إشارة رقمية (Digital Signal Processor) [22].

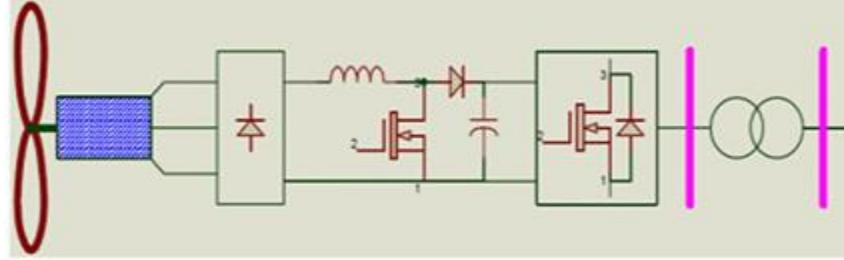
تم دراسة طريقة أخرى للتحكم بالعنفات الريحية ذات PMSG تتضمن دائرة تقويم وحلقة تيار مستمر ومبدلة التيار المتناوب (Inverter)، والشكل (2-24) يوضح هذه الطريقة [22].



الشكل (2-24) عنفة ريحية مع PMSG ودائرة تقويم ومبدلة التيار المتناوب

على الرغم من أن هذا النوع من المبدلات بسيط وعملي إلا أن عامل الاستطاعة للمولد يكون صغيراً [22]، وهناك مشكلة أخرى أنه عندما جهد خرج المقوم أصغر من جهد الشبكة فإنه لا يمكن حقن القدرة في الشبكة.

لحل هذه المشكلة فإننا نضع مقطع رافع للجهد بين دائرة التقويم ومبدلة التيار المتتاب، والذي يرفع جهد خرج المقوم ليتناسب وجهد الشبكة، هذا وتأتي أهمية وجود هذا المقطع في إمكانية العمل عند السرعات المنخفضة للرياح لأنه يحافظ على جهد ثابت على دخل مبدلة التيار المتناوب [22].



الشكل (2-25) عنفة ربحية ودائرة تقويم ومبدلة التيار المتناوب يتخللهما المقطع الرافع للجهد

2-2-6- استراتيجيات التحكم بالعنفات الريحية:

بالرجوع للشكل (2-9) الذي يوضح أنماط عمل أنظمة العنفات الريحية، هناك طريقتين أساسيتين للتحكم بالعنفات الريحية متغيرة السرعة:

- التحكم بزاوية انحراف الشفرات.
- التحكم بالاستطاعة العظمى المستخلصة من العنفة.

2-2-6-1- التحكم بزاوية انحراف الشفرات (Pitch Angle Control):

الهدف من التحكم بزاوية انحراف الشفرات في العنفات الريحية ضبط قيمة معامل الاستطاعة C_p ، وذلك بتدوير شفرات دوار العنفة حول محورها الطولاني كما هو موضح بالشكل (2-16).

وتعتمد هذه الطريقة في التحكم على المتحكمات الالكترونية التي تقوم بفحص ومراقبة استطاعة الخرج للعنفة الريحية عدة مرات في الثانية، وعندما تصبح هذه الاستطاعة كبيرة نسبياً تقوم المتحكمات بإعطاء أمر لتحريك شفرات العنفة وبالتالي تغيير زاوية انحرافها، مما يؤدي إلى إنقاص استطاعة الرياح إلى الحد المطلوب وتجنب الضرر الممكن على العنفة. وبشكل معاكس، يتم إعادة الشفرات إلى زواياها السابقة مجدداً عند عودة الرياح إلى سرعتها الطبيعية وبالتالي عودة الاستطاعة إلى قيمتها الطبيعية.

وعلى الرغم من أن آلية التحكم هذه تبدو بسيطة، إلا أن إدراكها العملي يتطلب بعض الجهود الهندسية لضمان أن تحريك الشفرات يتم وفق الزوايا المناسبة وأن هناك تزامن صحيح ومحقق بين جميع شفرات العنفة.

يمكن تنفيذ آلية التحكم بزاوية انحراف الشفرات إما باستخدام محركات كهربائية أو أخرى هيدروليكية، وتعتبر المحركات الهيدروليكية حالياً الأكثر انتشاراً واستخداماً.

2-6-2-2- التحكم بالاستطاعة العظمى (Maximum Power Point Tracking):

تصنف طرق التحكم بالاستطاعة العظمى ضمن نمطين أساسيين هما:

2-6-2-2-1- نمط التحكم التقليدي:

من أكثر الطرق المستخدمة هنا هي:

1- طريقة التحكم بالتيار

2- طريقة التحكم بسرعة دوران العنفة الريحية

واللتين تعتمدان على وجود قيمة مرجعية لمتحول التحكم، ففي نمط التحكم بالتيار فإن القيمة المرجعية هي الاستطاعة الفعلية والعزم الكهروميكانيكي للمولد، بينما في نمط التحكم بالسرعة تعتبر القيمة المرجعية هي سرعة الدوران التي تتضمن أفضل استطاعة ممكنة.

كلتا الطريقتان تعتمدان على مجال تحكم ثابت (Fixed Step Size) بحيث أن:

- مجال كبير (عريض) يعني استجابة سريعة وتذبذبات أكثر حول النقطة العظمى وبالتالي فعالية قليلة.
 - مجال صغير يحسن من الفعالية والأداء لكنه يخفض من سرعة الوصول للهدف.
- ومن هنا تأتي أهمية نمط التحكم الذكي.

2-6-2-3- نمط التحكم الذكي (Intelligent Control):

من أهم تقنيات التحكم المستخدمة في هذا النمط هو تقنية التحكم عن طريق الخوارزميات الجينية (Genetic Algorithm) لما تبديه من مرونة عالية وخصوصاً عند تغير سرعة الرياح وتذبذبات العزم على محور العنفة، وبالتالي أداء ديناميكي وعال في الوصول للاستقرار بأفضل ما يمكن.

وسيتطرق لهذا النمط في الفصل الرابع من بحثنا.

2-6-2-4- مبدأ الاستطاعة العظمى للعنفة الريحية:

تعطى علاقة الاستطاعة الميكانيكية المستخلصة من العنفة الريحية بالمعادلة التالية:

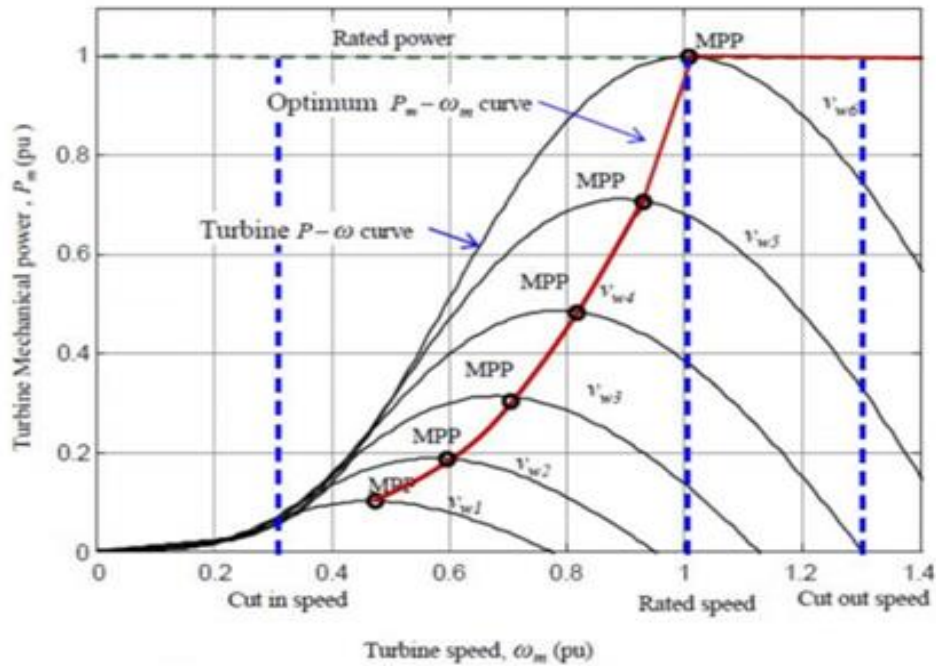
$$P_m = 0.5\rho\pi R^2 C_p V^3$$

تكون الاستطاعة عظمى عندما تكون C_p أعظم ما يمكن أي عندما تكون $C_{p,max}$ ، ولهذا لاستخلاص أعظم استطاعة من سرعات الرياح المختلفة يجب العمل دوماً عند قيم مثالية لـ λ تدعى λ_{opt} الأمر الذي يتطلب التحكم بسرعة دوران العنفة لتصبح مساوية لسرعة الدوران المثالية. وبالتالي عند التحكم بسرعة دوران العنفة فإننا نتحكم باستطاعة الخرج، ولأن استعمال حساسات سرعة الرياح أمر يقلل من فعالية ومردود النظام ويزيد من تعقيد الأجزاء الميكانيكية، فإنه يمكن كتابة الاستطاعة العظمى للعنفة الريحية بالعلاقة التالية:

$$P_{m,opt} = 0.5 \rho \pi R^2 C_{p_{max}} V^3$$

$$k_{opt} = 0.5 \rho \pi R^5 C_{p_{max}} / \lambda_{opt}^3$$

$$P_{m,opt} = k_{opt} W^3$$



الشكل (2-26) مميزات استطاعة العنفة عند نقاط الاستطاعة العظمى [23]

الفصل الثالث

النموذج الرياضي لمسألة ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية

مقدمة:

سنقوم في هذا الفصل ببناء نموذج لنظام تحويل طاقة الرياح والمتمثل بالعنفة الريحية والمولد والمقطع الرافع-الخافض للجهد والانفرتر والحمل والمتحكم التقليدي في بيئة الماتلاب .ولكن قبل البدء ببناء النموذج سنستعرض أهم دارات الكترونيات القدرة المستخدمة في الأنظمة الريحية وأهم المتحكمات المستخدمة معها. إن وجود المقوم لتحويل التيار المتناوب المولد ذي المطال والتردد المتغيرين مع تغير سرعة الرياح إلى تيار مستمر، ومن ثم نعود لقلبه إلى تيار متناوب. لذلك سنبدأ بدراستنا بدارة التقويم.

3-1- نموذج المقوم (Rectifier):

تقوم دارة التقويم بتحويل جهد خرج المولد المتناوب ذو المطال والتردد المتغيرين إلى جهد مستمر، يغذى به دارة المقطع، لكي نحصل في النهاية على الجهد المرغوب به على دخل الانفرتر لنحصل على جهد خرج متناوب بمطال وتردد ثابتين.

ويوجد نوعين من دارات التقويم:

1- دارات التقويم ذات النقطة المشتركة.

2- دارات التقويم الجسرية.

3-1-1- دارات التقويم ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة:

تمتاز دارات التقويم ثلاثية الطور عن دارات التقويم أحادية الطور بالنقاط الأساسية التالية:

✓ انخفاض عامل التمدج لإشارة جهد الخرج.

✓ المردود العالي.

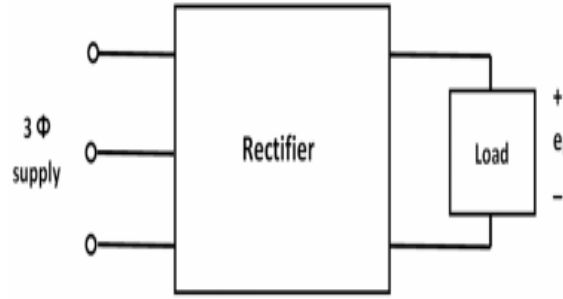
✓ توفر إمكانية الحصول على دارات تقويم متعددة الأطوار (polyphase circuits) باستخدام عدد من

المحولات ثلاثية الأطوار، والتي تمتاز بعدم الحاجة إلى مرشحات على خرج دارات التقويم، مما يجعلها

أفضل من دارات التقويم أحادية الطور من الناحية الفنية والاقتصادية.

✓ تستخدم لتغذية أحمال التيار المستمر ذات الاستطاعات العالية.

يبين الشكل (2-3) المخطط العام لدارات التقويم ثلاثية الطور.

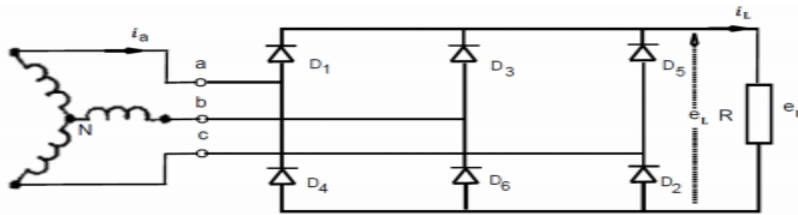


الشكل (3-1) المخطط العام لدارات التقويم ثلاثية الطور

يتشكل جهد الخرج اللحظي (e_L) من أجزاء محددة لجهود أطوار منبع التغذية ثلاثي الأطوار وبقطبية وحيدة. يكون تيار الحمل (i_L) باتجاه واحد وفق قطبية جهد الخرج وقد يكون متقطعاً في بعض الحالات. يطلب عادة من دارات التقويم المثالية التي تشكل على خرجها منابع جهود مستمرة توليد تيار حمل ثابت غير متقطع. تعتبر دارات التقويم ثلاثية الأطوار أساساً لفهم عمل دارات التقويم متعددة الأطوار ودراستها وتحليلها. يمكن تمثيل الديودات المستخدمة في دارات التقويم في أثناء تحليلها بعناصر مثالية.

3-1-2- دارات التقويم الجسرية ثلاثية الطور:

يبين الشكل (3-4) مخطط دائرة تقويم جسرية ثلاثية الأطوار والتي تتشكل من دارتي تقويم بنقطة مشتركة، حيث تشكل مجموعة الديودات (D_1, D_3, D_5) (المجموعة المهبطية الفردية) دائرة تقويم موجبة بنقطة مشتركة، كما تشكل مجموعة الديودات (D_2, D_4, D_6) (المجموعة المصعدية الزوجية) دائرة تقويم سالبة بنقطة مشتركة. يتم ترقيم الديودات وفق ما هو مبين على الشكل (3-4) بالنسبة لجميع دارات التقويم والمبدلات والعواكس الجسرية الثلاثية الأطوار نظراً لإتباعها تسلسل توصيل العناصر الالكترونية، مما يسهل تحليل هذه الدارات. تشكل نقطة المهابط المشتركة الموجبة للحمل والتي تتحدد من أعلى الجهود الموجبة بين الأطوار الثلاثة في كل لحظة، وذلك عن طريق التبديل الطبيعي لمجموعة الديودات (D_1, D_3, D_5)، بينما تشكل نقطة المصاعد المشتركة القطبية السالبة للحمل والتي تتحدد من أعلى الجهود السالبة بين الأطوار الثلاثة في كل لحظة، وذلك عن طريق التبديل الطبيعي لمجموعة الديودات (D_2, D_4, D_6).



الشكل (3-2) مخطط دائرة تقويم جسرية ثلاثية الأطوار

يكون شكل إشارة تيار الحمل (i_L) أحادي الاتجاه، حيث يسري تيار الحمل عبر أحد ديودات المجموعة المهبطية الفردية ليغلق مساره عبر أحد ديودات المجموعة المصعدية الزوجية على أن لا يكون الديودان واقعين على ذراع واحد من الجسر، فعلى سبيل المثال، عندما يتشكل تيار الحمل من مرور التيار في الديود ($D1$) فإن هذا التيار سوف يغلق مساره عبر أحد الديودين ($D2$ أو $D6$).

✓ نستنتج مما سبق أن جهد الحمل سوف يكون معادلاً لجهد الخط على دخل دائرة التقويم، بينما وكما نعلم أن جهد الحمل يعادل جهد الطور في دارات التقويم ذات النقطة المشتركة، هذا يعني أن جهد الخرج الأعظمي في دائرة تقويم جسرية ثلاثية الأطوار يكون أكبر ب ($\sqrt{3}$) مرة منه في دائرة تقويم ذات نقطة مشتركة ثلاثية الأطوار.

3-2- مقطع الجهد المستمر (DC-DC Converter):

إن الوظيفة الأساسية للمقطع هو تنظيم جهد الخرج المستمر لدائرة التقويم، بحيث يتناسب ويتلائم مع جهد الدخل للانفرتر.

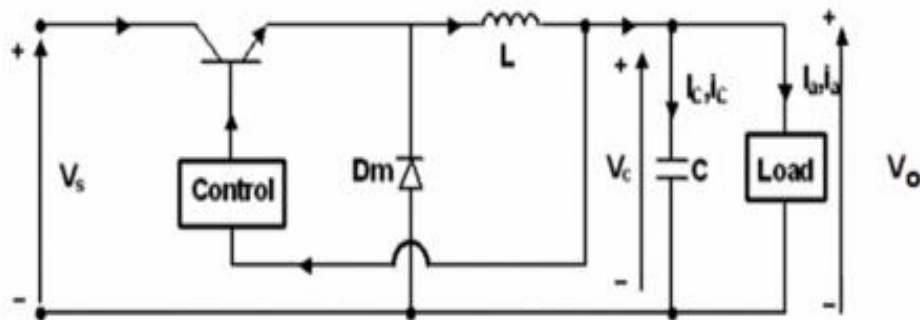
وهناك عدة أنواع من المقطعات:

- ❖ مقطع خافض (Buck Converter).
- ❖ مقطع رافع (Boost Converter).
- ❖ مقطع خافض-رافع (Buck-Boost Converter).

3-2-1- المقطع الخافض (Buck Converter):

يكون الجهد المتوسط على الحمل في مثل هذه المقطعات أقل من جهد الدخل ($V_a < V_s$) لذلك يمكننا اعتبارها مقطعات خفض.

يبين الشكل (3-5) الدارة المكافئة لهذه المقطعات حيث تم استخدام ترانزستور قدرة من نوع BJT كمقطع Q1.



الشكل (3-3) الدارة المكافئة لمقطع الخافض (Buck Converter)

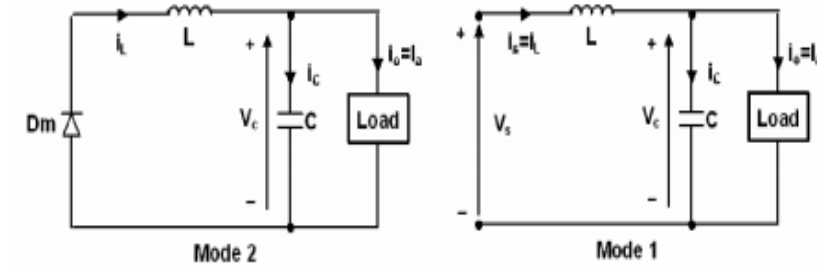
لتحليل عمل دائرة المقطع نقسم نظام العمل إلى مرحلتين:

المرحلة الأولى:

تبدأ هذه المرحلة عند توصيل الترانزستور Q1 في اللحظة $t=0$ بحيث يبدأ تيار الدخل (is) بالتزايد عبر المرشح L-C والحمل R .

المرحلة الثانية:

تبدأ هذه المرحلة عند لحظة فتح الترانزستور Q1 في اللحظة $t=t1$ بحيث يقوم الديود الحر Dm بتأمين الحلقة المغلقة لتيار الحمولة عن طريق المرشح L-C والحمل R .
يتناقص تيار المحارضة (iL) في هذه المرحلة حتى القيمة الابتدائية لتيار الدخل I1 عند $t=T$.
يبين الشكل (3-5) الدارة المكافئة للمقطع في المرحلتين.
قد يكون تيار الحمل متقطعاً عند عمل المرشح على قيم محددة لتردد القطع (f).



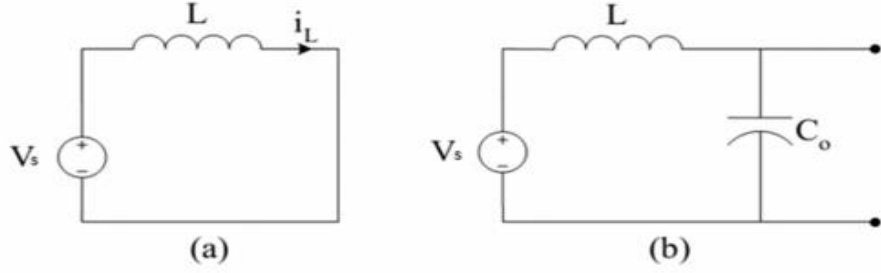
الشكل (3-4) الدارة المكافئة للمقطع في المرحلتين

تمتاز مثل هذه المقطعات بالمزايا التالية:

- 1- تحتاج لترانزستور وحيد.
- 2- تمتاز بالبساطة والمردود العالي الذي يزيد عن 90%.
- 3- تغيرات تيار الحمل مهمة نظراً لوجود المرشح.
- 4- تعمل على اتجاه تيار وجهد الخرج بحيث تكون موجبة دائماً، لذلك لا بد من تأمين دائرة حماية في حال حدوث قصر عبر الديود Dm .

3-2-2- المقطع الرفع (Boost Converter):

يتم توضيح مبدأ عمل العمل لهذه المقطعات من خلال الشكل (3-6) التالي:



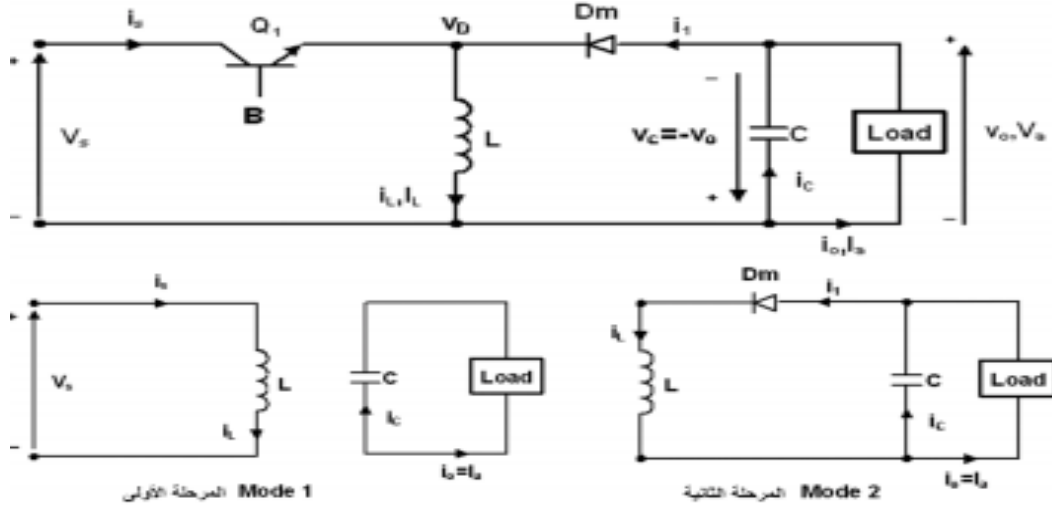
الشكل (3-5) مراحل عمل المقطع الراجع للجهد Boost Converter

تمتاز هذه المقطعات بالمزايا التالية:

- 1- الحصول بواسطة هذه المقطعات على جهد خرج أكبر من جهد الدخل دون استخدام محول.
- 2- يحتاج هذا المقطع لترانزستور وحيد.
- 3- يمتاز بمردود عالي.
- 4- إشارة تيار الدخل تكون غير متقطعة خلافاً لما ذكر في مقطعات الخفض.
- 5- التيار الأعظمي المار في الترانزستور يمثل القيمة العظمى لتيار الدخل.
- 6- جهد الخرج حساس لتغيرات D .
- 7- هناك صعوبة في تحقيق استقرار المقطع عند القيم العالية ل D .
- 8- القيمة المتوسطة لتيار الخرج أصغر من القيمة المتوسطة لتيار الدخل.
- 9- القيمة الفعالة لتيار المكثف سوف تكون عالية لذلك فإن قيم المرشحات C, L سوف تكون أكبر منها في حالة مقطعات الخفض.

3-3- المقطعات الراجعة-الخافضة للجهد:

يمكن أن تكون القيمة المتوسطة للجهد على الحمل في مثل هذه المقطعات أكبر أو أصغر من من جهد الدخل، وتكون قطبية جهد الحمل معاكسة لقطبية جهد الدخل لذلك يمكن اعتباره كمقطع قالب. يبين الشكل (3-6) الدارة المكافئة لهذه المقطعات [25].



الشكل (3-6) الدارة المكافئة لمقاطع التقوية التضعيف

يقسم نظام العمل في هذا المقطع إلى مرحلتين:

المرحلة الأولى: تبدأ عند لحظة وصل الترانزستور Q1 في اللحظة $t=0$ بحيث يبدأ تيار الدخل ($i_s=i_l$) بالتزايد عبر الملف L والترانزستور Q1 ونظراً لأن الديود Dm سوف يكون منحازاً عكسياً.

المرحلة الثانية: تبدأ هذه المرحلة عند لحظة فصل الترانزستور Q1 في اللحظة $t=t_1$ بحيث يصبح الديود Dm في حالة انحياز أمامي، ويبدأ الملف L بتفريغ طاقته المخزنة من المرحلة الأولى في الحمل ويبدأ تيار الملف (i_l) بالتناقص حتى القيمة الابتدائية لتيار الدخل (i_l) عند اللحظة $t=T$.

3-3-1- مميزات المقطعات الرافعة-الخافضة للجهد:

تمتلك المقطعات الرافعة-الخافضة للجهد عدة مميزات أهمها [25]:

- يمكننا الحصول بواسطة هذه المقطعات على جهد خرج أكبر أو أصغر من جهد الدخل وبقطبيات متعكسة.
- يحتاج هذا المقطع إلى ترانزستور وحيد.
- يمتاز بمردود عالي.
- يكون تيار الدخل متقطعاً.

3-4- دارات الانفرتر Inverter:

الانفرتر هي التجهيزات الالكترونية الذي يقوم بتحويل الإشارة المستمرة في الدخل (جهد أو تيار) إلى إشارة متناوبة في الخرج (جهد أو تيار) بمطال وتردد محددين. نستخدم عادةً في تصميم الانفرتر عناصر الكترونية تتمتع بإمكانية التحكم بلحظة وصلها وفصلها مثل:

Bipolar Junction Transistor (BJT).

Metal Oxide Surface Field Effect Transistor (MOSFET).

Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT).

Silicon Controlled Rectifier (SCR).

يكون الانفرتر إما أحادية الطور أو ثلاثية الطور. وتصنف الانفرترات إلى صنفين أساسيين:

- انفرتر الجهد (VSI (Voltage-Source inverter باستخدام حلقة تيار مستمر سعوية لتشكيل إشارات جهد دورية متناوبة تقطعية (switched current waveforms) على خرج هذه الانفرتر.
- انفرتر التيار (CSI (Current-Source inverter باستخدام حلقة تيار مستمر تحريضية لتشكيل إشارات تيار دورية متناوبة تقطعية (switched current waveforms) على خرج هذه الانفرتر.

تعتبر انفرترات التيار محدودة الاستخدام في أنظمة القيادة الحديثة نظراً لتشكيل حالات تبديل قاسية منضمة حالات قصر بالإضافة إلى إنتاج تشويش كهرومغناطيسي في الوسط المحيط بينما نستخدم انفرتر الجهد بشكل شائع في تصميم أنظمة القيادة الحديثة نظراً لإمكانية تحقيق التعديل النبضي العرضاني (Pulse Width Modulation) بحالات تشغيل ناعمة وبأداء عالي، بالإضافة إلى أن مجال التردد (frequency range) في انفرترات الجهد يكون عالي، كما تتميز انفرترات الجهد عن التيار برخص ثمنها.

3-4-1- تنظيم جهد خرج الانفرتر:

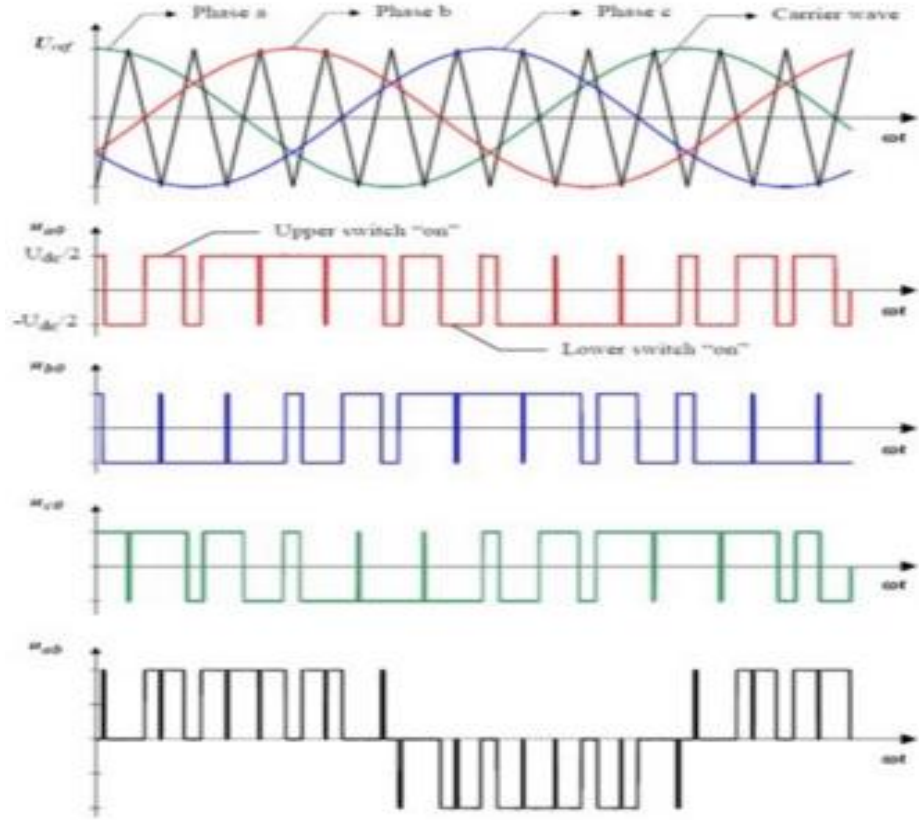
يتم تنظيم جهد خرج الانفرتر بطريقتين:

- التحكم بالجهد المستمر على دخل الانفرتر.
- التحكم بريح الانفرتر (نسبة جهد الخرج إلى جهد الدخل). ومن الطرق المتبعة للتحكم بريح الانفرتر هي طريقة التعديل النبضي العرضاني الجيبي.

3-4-1-1- التعديل النبضي العرضاني الجيبي (Sine pulse Width Modulation):

يتم الحصول على نبضات التحكم بمقارنة الإشارة المرجعية ذات الشكل الجيبي ($V_{control-A}$, $V_{control-B}$),

($V_{control-C}$) مع الإشارة الحاملة ذات الشكل المثلثي (V_{tri}) وذلك كما هو مبين بالشكل (3-7):



الشكل (7-3) الحصول على نبضات (SPWM)

حيث تطبق النبضات المبينة بالشكل (7-3) على الترانزستورات العلوية، ويطبق على الترانزستورات السفلية معكوس هذه النبضات [25], [26].

3-4-1-1-1-الخواص العامة للتعديل النبضي العرضاني الجيبي:

يتميز التعديل النبضي العرضاني الجيبي بعدة ميزات منها [25], [26]:

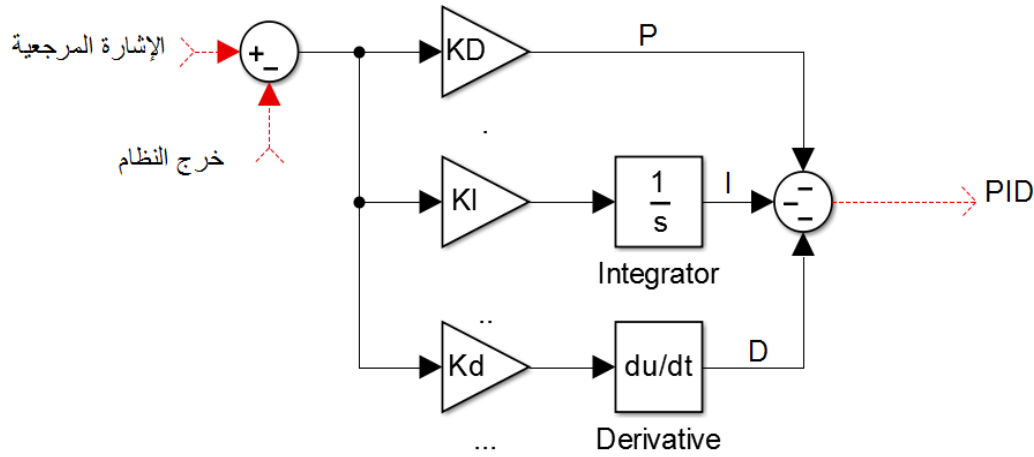
- يتحدد تردد الخرج للانفرتر بتردد الإشارة المرجعية.
- تتعلق قيمة معامل التعديل (M) والقيمة الفعالة لإشارة جهد الخرج بقيمة مطال الإشارة المرجعية.
- يتعلق عدد النبضات خلال نصف الدور بقيمة تردد الإشارة الحاملة.
- المطال الأعظمي لجهد خرج الانفرتر يعادل ($0.5 \cdot V_{dc}$) وذلك من أجل معامل تعديل يساوي الواحد ($M=1$).

3-5- المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية:

متحكمات الـ PID (Proportional Integral Derivative Controllers) هي المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية، إن أكثر من نصف المتحكمات الصناعية المستخدمة في هذه الأيام تستخدم الـ PID ، وهناك قواعد توليف كثيرة لهذه المتحكمات. وتكمن الفائدة الكبيرة لهذه المتحكمات في إنها بشكل عام قابلة للاستخدام في معظم نظم التحكم بالعمليات. كما أنها أثبتت فائدة كبيرة في تأمين تحكم مناسب بالرغم من أنها لا تحقق التحكم الأمثل في كثير من الحالات. وتجدر الإشارة إلى أنه لا يكون مفيداً دائماً استخدام متحكم الـ PID حيث يكون من الأفضل استخدام (PI) أو (PD) فقط وذلك حسب الاستجابة التي يديها النظام.

يتناسب فعل التحكم في المتحكم التناسبي مع عملية الخطأ، ومن مميزاته أنه يدي استجابة سريعة لأي تغير يطرأ على المتحول المقاس. إلا أنه لا يستطيع الوصول إلى النقطة المرجعية المطلوبة عند استخدامه بمفرده ونستطيع حذف الخطأ باستخدام طريقة التصفير اليدوي وذلك من أجل حمل ثابت ومعروف. أما في التحكم التكاملي، فإن الفعل التحكمي له يتناسب مع تكامل الخطأ بالنسبة إلى الزمن، ويستخدم بشكل أساسي من أجل حذف خطأ الحالة الثابتة، إلا أنه يؤثر عكسياً على الاستجابة العابرة حيث إن زمن الاستقرار يزداد عند استخدام فعل التحكم التكاملي. كما أنه يسبب حدوث تجاوز للهدف قد يكون مقبولاً وقد لا يكون مقبولاً بأي شكل من الأشكال.

في المتحكم التفاضلي يتناسب فعل التحكم مع تفاضل الخطأ بالنسبة للزمن، لذلك فإنه يستخدم أساسياً من أجل التخلص من تجاوز الهدف. كما أنه يزيد من استقرار النظام بشرط أن تكون قيمته صغيرة. يبين الشكل (3-8) المخطط الصندوقي للمتحكم PID وتطبيقه في بيئة الماتلاب.



الشكل (3-8) المخطط الصندوقي للمتحكم (PID)

3-6-6- تصميم المقطع:

تصميم المقطع هو اختيار قيم كل من تردد العمل، الملف والمكثفة.

3-6-1- اختيار تردد العمل:

يتم اختيار تردد العمل للترانزستورات بحيث يتحقق لدينا الشرط التالي: يجب أن يكون الدور الأصغري للمذبذب أكبر بحوالي مئة مرة من زمن فتح الترانزستور حسب المرجع [25]. لدينا الترانزستورات القادرة على العمل في هذا النظام ذات أزمنة فتح مقداره (5µs) أي دور العمل الأصغري هو (5.0ms) وبالتالي سيكون تردد العمل الأعظمي هو [2KH] ، من أجل جميع الترانزستورات.

3-6-2- اختيار الملف:

يتم اختيار الملف اعتمادا المعادلة (3-1)، حيث إن القيمة التي نحصل عليها من خلال هذه المعادلة هي على القيمة التي تضمن العمل بنظام التوصيل المستمر (Mode Conduction Continues) [27] .

$$L \geq \frac{-Vo * Ts}{2Io(crit)} * \frac{Vi(max)}{Vo - Vi(max)} \quad (1 - 3)$$

حيث:

VO[v] جهد خرج المقطع.

TS [sec] دور إشارة التحكم المرسلة إلى الترانزستور .

Vi [max] (v) جهد الدخل الأعظمي .

Io(crit)[A] قيمة تيار الخرج الأصغري المطلوب من أجل العمل بنظام التوصيل المستمر وتحسب قيمته باستخدام المعادلة (3-2):

$$Io(crit) = \frac{\Delta I}{2} \quad (2 - 3)$$

حيث تغير التيار هو تأرجح التيار المرغوب للتيار المار في الملف وتأخذ نسبته (10%---30%) وهنا أخذنا (10%).

وبالتالي ينتج لدينا قيمة الملف الأصغرية، التي تضمن العمل بنمط التوصيل المستمر (CCM).

$$L=10[mH]$$

3-6-3- اختيار المكثف:

يتم اختيار قيمة المكثفة اعتماداً على المعادلة (3-3) وهي القيمة التي تضمن العمل بنمط التوصيل المستمر (CCM) [27].

$$C \geq I_o(max) * \frac{Dmax}{f_s * \Delta V_o} \quad (3 - 3)$$

حيث:

$I_o(max)[A]$ تيار الخرج الأعظمي للمقطع.

$Dmax$ نسبة توصيل المقطع الأعظمية وهي موافقة لأصغر قيمة جهد تصل إلى دخل المقطع .

$F_s[Hz]$ تردد عمل المقطع.

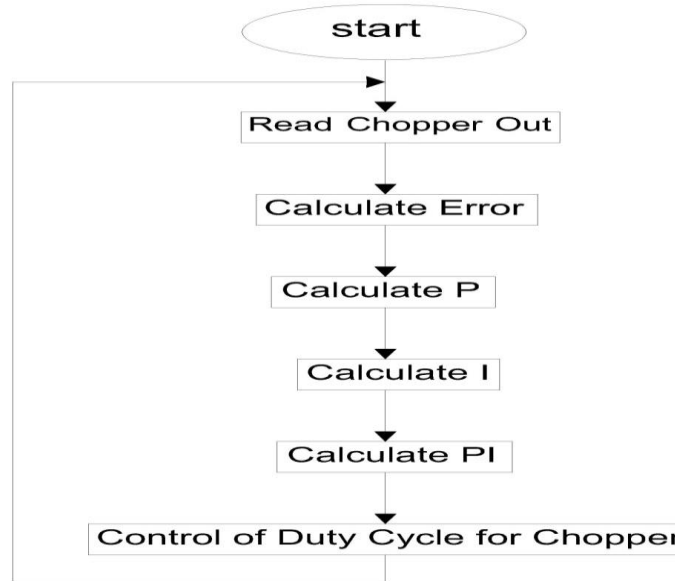
تغير الجهد وهو تأرجح الجهد المرغوب وتؤخذ نسبته (1%).

$$I_o(max) = \frac{1 - D}{D} * I_{in}(max) \quad (4 - 3)$$

$$Dmax = \frac{V_o}{V_o + V_i(min)} \quad (5 - 3)$$

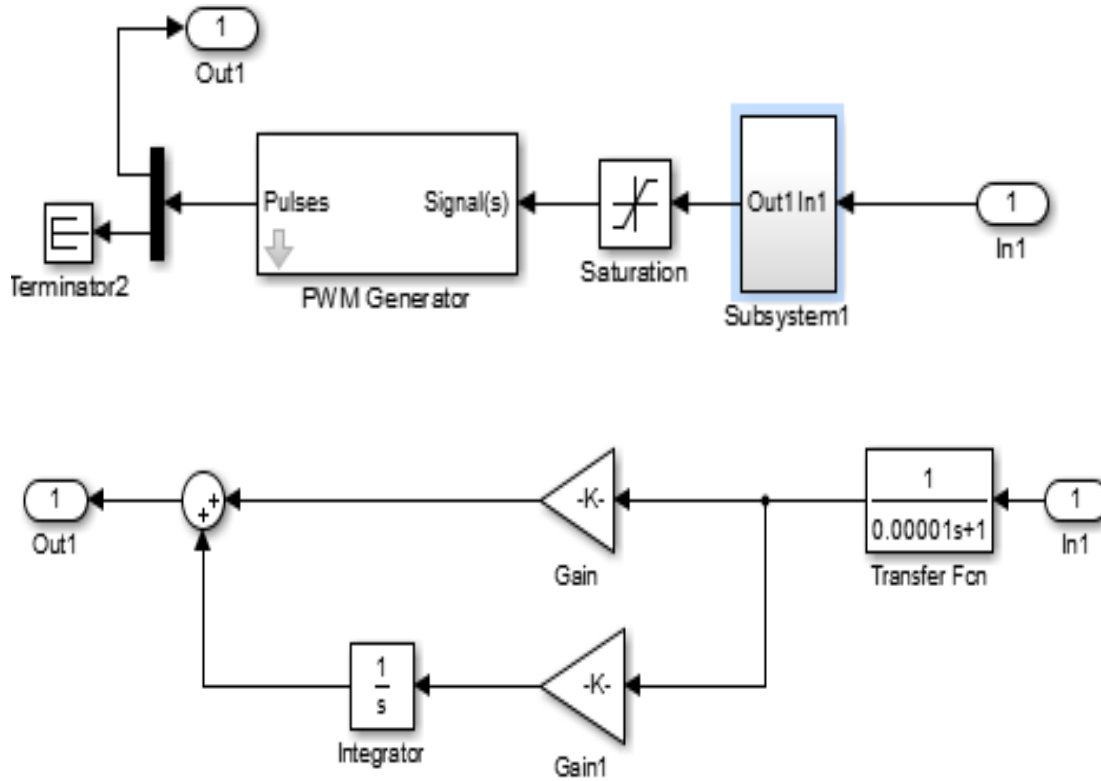
ومن المعادلات السابقة تنتج لدينا القيمة الأصغرية للمكثف وهي $C=81[mf]$.

3-7- خوارزمية برنامج التحكم بالمقطع:



الشكل (3-10) خوارزمية برنامج التحكم بالمقطع

3-8- توصيل المتحكم مع المقطع في بيئة الماتلاب:



الشكل (3-11) نموذج المتحكم في الماتلاب

3-9- تصميم المتحكم (PI) الخاص بتيار المكثف:

i. استخراج تابع النقل $G_i(s) = \frac{I_c(s)}{V_i(s)}$ حيث إن الخرج هو تيار المكثف والدخل هو الجهد

المتناوب [28] و [29].

وذلك بالاعتماد على العلاقات التالية:

$$V1(S) = LfS + RfI(S) + \frac{1}{Cs} * I(S) \quad (6 - 3)$$

$$\frac{1}{Cs} * I(S) = Vo(S) \quad (7 - 3)$$

ينتج لدينا:

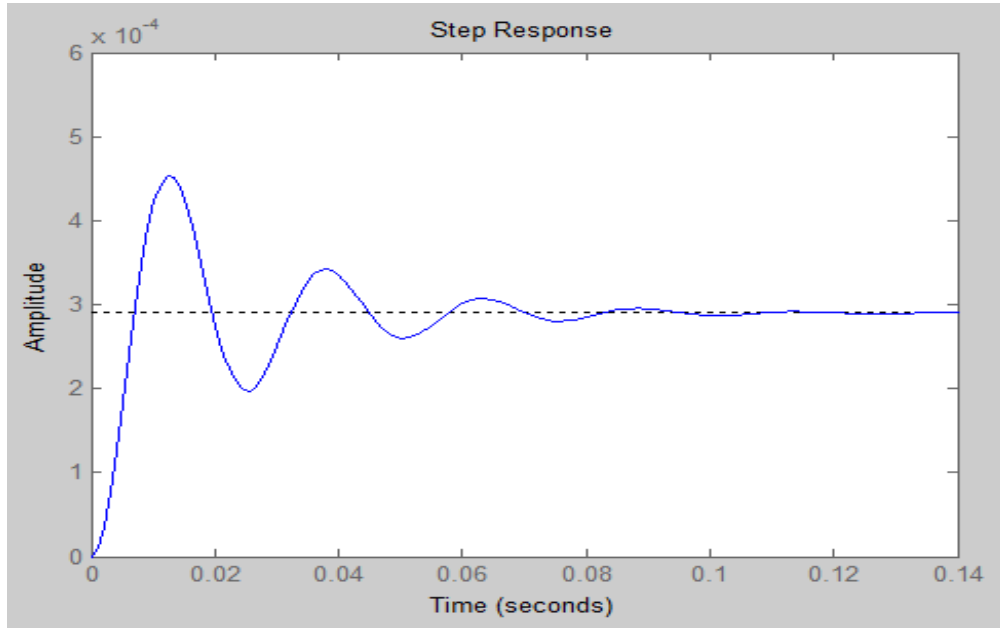
$$G_i(S) = \frac{CfS}{LfCfS^2 + RfCfS + 1} \quad (8 - 3)$$

وبالتعويض ينتج لدينا:

$$GI(S) = 290 * 10^{-6} * \frac{S}{0.1566 * 10^{-4} * S^2 + 14.5 * 10^{-6} * S + 1} \quad (9 - 3)$$

b. تطبيق دالة الخطوة الواحدة [28] و [29].

نقوم بتطبيق دالة الخطوة الواحدة باستخدام (MATLAB) فينتج لدينا منحنى الاستجابة الزمنية المبينة في الشكل (3-12):



الشكل (3-12) منحنى الاستجابة الزمنية لتابع النقل الممثل لتيار المكثف عند تطبيق الخطوة الواحدة

ومن الشكل (3-12) نوجد الثوابت:

$$L=1.5[s], T=6[s]$$

c. حساب ثوابت المتحكم (PI) بالاعتماد على خوارزمية (CHR) لإلغاء التشوه حيث إن ثوابت المتحكم تأخذ قيمتها كما هو مبين في الجدول (3-1) [29].

الجدول (1-3) قيم ثوابت المتحكم بالاعتماد على خوارزمية (CHR) لإلغاء التشوه

نوع المتحكم	Kp	Ti	Td
P	$0.3 \frac{L}{T}$	0	0
PI	$0.6 \frac{L}{T}$	4*L	0
PID	$0.95 \frac{L}{T}$	2.4*L	0.42*L

وبالتالي تكون قيم ثوابت المتحكم:

$$Kp=0.15, \quad Ti=6$$

يذهب خرج المتحكم النهائي إلى مرسل نبضات التحكم للانفرتر وهو عبارة عن مولد نبضات (SPWM).

تردد الإشارة المثلثية يمثل تردد العمل للترانزستورات (2000 Hz).

تردد الإشارة الجيبية (الإشارة المرجعية) هو $(2\pi * f_0)$ حيث f_0 هو تردد الخرج المرغوب.

$$f_r = 2 * \pi * f_0 \quad (10-3)$$

وبالتالي يكون تردد الإشارة المرجعية

$$f_r = 2 * 3.14 * 50 = 314 [\text{Hz}]$$

3-10-بناء النموذج (النمذجة):

سنقوم ببناء النموذج الكلي للنظام المدروس والمتمثل بالعنفة الريحية والمولد والمقطع الرافع-الخافض للجهد والانفرتر والحمل والمتحكم التقليدي في بيئة الماتلاب.

3-10-1-اختيار العنفة الريحية:

تم اختيار العنفة الريحية (DDIS60) وهي تمتلك المواصفات التالية [34] :

Power		الاستطاعة
Rated Power	800[Kw]	الاستطاعة الاسمية
Cut-in Wind Speed	3[m/s]	سرعة الاقلاع
Rated Wind Speed	10.3[m/s]	السرعة الاسمية
Cut-of Wind Speed	20[m/s]	سرعة التوقف
Rotor		الدوار
Diameter	60 m	القطر
Swept Area	2.83[m ²]	المساحة الشاملة
Number of Blades	3	عدد الشفرات
Rotor Speed, max	26.6[rpm]	سرعة الدوار الأعظمية
Tipspeed	83.6[m/s]	سرعة رأس الشفرة
Power Density	282.7[W/m ²]	كثافة الاستطاعة
Gear Box		علبة السرعة
Without-Direct Drive		بدون علبة السرعة-قيادة مباشرة
Generator		المولد
Type	Synchronous Permanent	النموذج
Number	1	العدد
Speed, max	26.6[rpm]	السرعة الأعظمية
Voltage	690[V]	الجهد
Grid frequency	50[Hz]	تردد الشبكة
Model	DDIS	الطراز
Weight		الوزن
Rotor	20[t]	الدوار
Nacelle	25[t]	القمرة
Manufacture		الصناعة

Manufacture	DDIS Direct Drive Systems	المصنع
Country	فرنسا	الدولة
City	أنزين	المدينة
Zip Code	59410	الشفيرة

3-10-2- نموذج العنفة الريحية:

تم استخدام النموذج الرياضي للعنفة الريحية والمبين بالشكل (3-13) والموصول مع راسم إشارة Scope وذلك

لإظهار البارمترات عند عمل النموذج حيث:

مداخل النموذج هي:

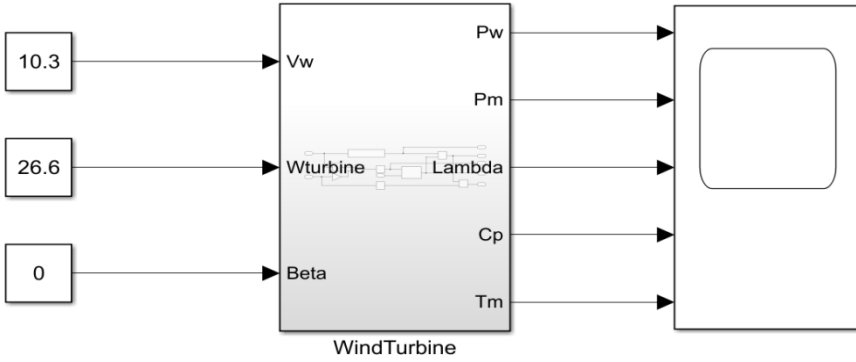
1- سرعة الرياح V_w

2- سرعة الدوران $W_{turbine}$

3- زاوية انحراف الشفرات $Beta$

ومخارج النموذج هي:

1- الاستطاعة المولدة من الرياح P_w



الشكل (3-13) النموذج الرياضي للعنفة الريحية مع راسم إشارة Scop

2- الاستطاعة المولدة P_m

3- النسبة بين سرعة الدوران وسرعة الرياح λ

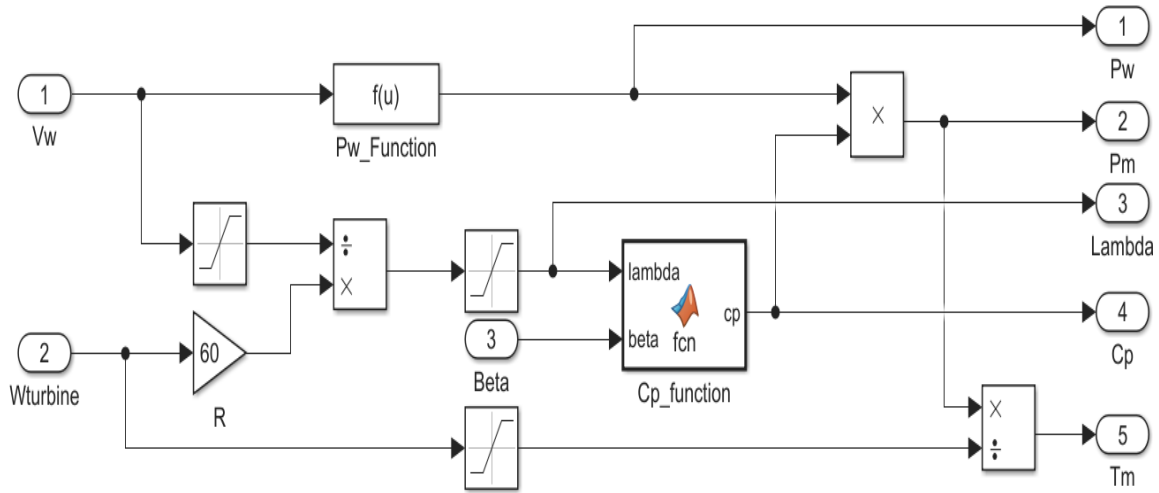
4- معامل مردود الاستطاعة C_p

5- العزم الميكانيكي T_m

يبين الشكل (3-14) النموذج الرياضي التفصيلي لمعادلات العنفة الريحية (استطاعة العنفة الريحية P_w ،

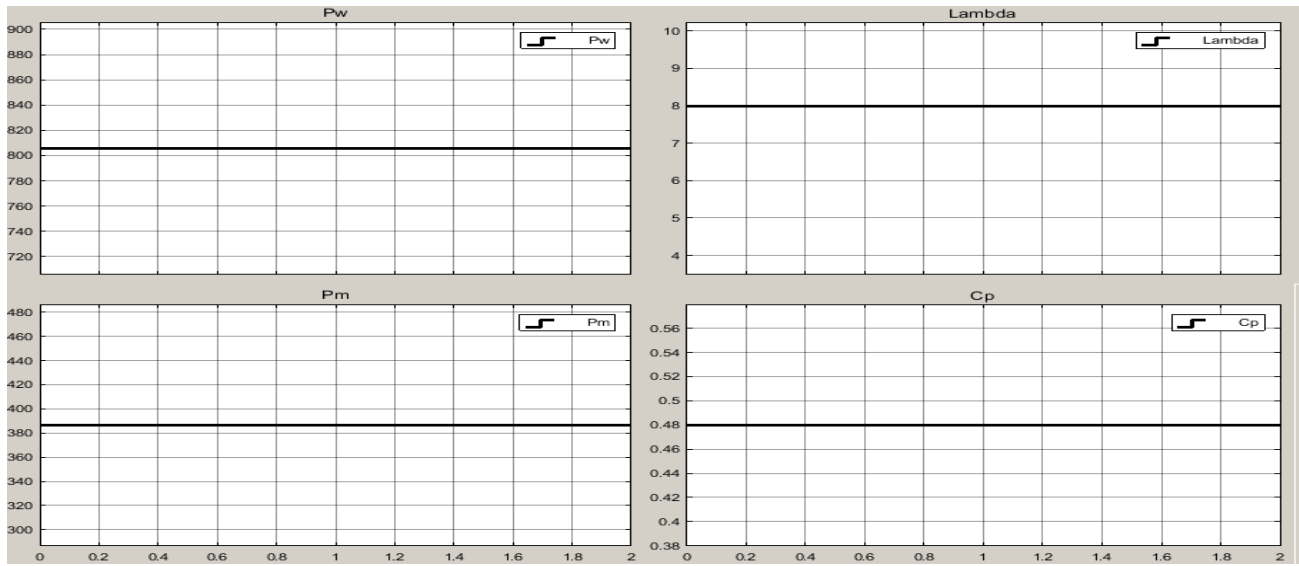
الاستطاعة الميكانيكية للعنفة الريحية P_m ، معادلة سرعة نهاية ريش العنفة λ ، ومعامل مردود العنفة C_p ،

والعزم الميكانيكي المولد من العنفة الريحية).



الشكل (14-3) النموذج الرياضي للعنفة الريحية

ومن خلال تشغيل النموذج الموجود في الشكل (13-3) حصلنا على النتائج التالية:

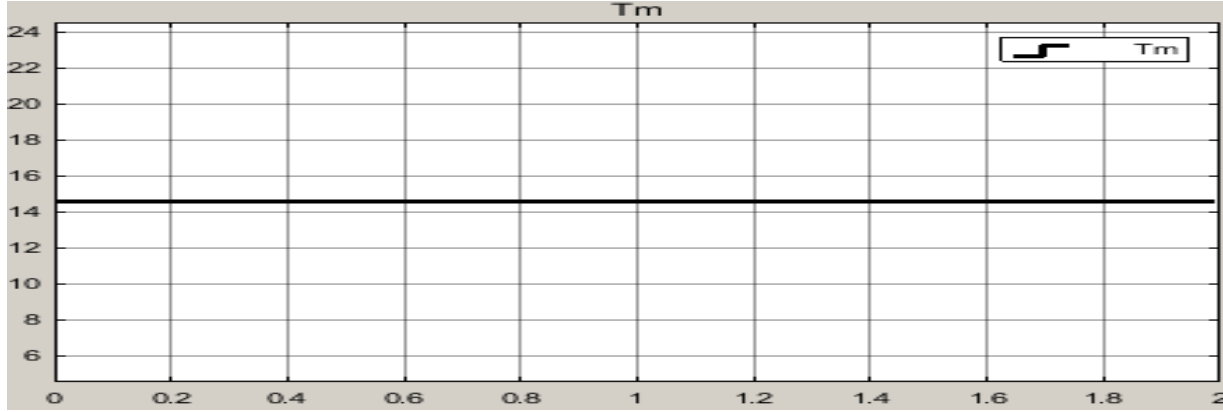


الشكل (15-3) الاستطاعة المولدة PW والاستطاعة الميكانيكية Pm ونسبة سرعة نهاية ريش العنفة λ ومعامل مردود العنفة

Cp

يبين الشكل (15-3) قيمة الاستطاعة المولدة من العنفة الريحية والتي تساوي (800 Kw) وهي الاستطاعة الاسمية للعنفة المدروسة عند السرعة الاسمية للعنفة والتي تكافئ (10.3 m/s)، كما يبين الشكل قيمة الاستطاعة الميكانيكية للعنفة الريحية المدروسة والموضحة قيمتها على الشكل (15-3)، وحصلنا أيضاً من خلال النموذج الرياضي الرياضي للعنفة على قيمة كل من Cp، λ معدل نهاية سرعة ريش العنفة ومعامل مردود العنفة وقيمها موضحة على الشكل (15-3).

كما قمنا بالحصول على قيمة العزم الميكانيكي للعنفة الريحية المدروسة من خلال النموذج الرياضي والذي هو عبارة عن حاصل قسمة الاستطاعة الميكانيكية على سرعة دوران العنفة وقيمتها موضحة على الشكل (3-16):



الشكل (3-16) العزم الميكانيكي للعنفة

3-10-3- اختيار المولد:

من مواصفات العنفة الريحية المذكورة أعلاه، أن المولد الموصول مع العنفة الريحية هو مولد تزامني ذو مغناطيس دائم موصول مباشرة مع محور العنفة بدون علبة سرعة وبالتالي ستكون سرعته هي نفس سرعة العنفة [34]، ومن هنا يتضح أن المولد له عدد أقطاب كبير.

3-10-4- النموذج الرياضي للمولد التزامني (PSMG):

سندرس هنا النموذج الرياضي للمولد التزامني وفق الاحداثيات الطبيعية abc وأيضاً وفق المحاور التزامنية الدوارة dq

3-10-4-1- النموذج الرياضي للمولد التزامني وفق المحاور (abc):

يبين الشكل (3-17) مقطع عرضي في آلة تزامنية ثنائية الأقطاب وثلاثية الطور، حيث أن المحاور الثابتة abc توضح اتجاه القوى المغناطيسية (fa, fb, fc) في الملفات الطورية (a,b,c) والتي تولد تيارات ثلاثية الطور في ملفات الثابت.

3-10-4-2- النموذج الرياضي للمولد التزامني وفق المحاور (d-q):

لتبسيط تحليل نماذج الآلات التزامنية تم استخدام تحويلات بارك والتي ظهرت من العالم R. H. Park [24]، وبما أن المقادير الطورية بما فيها جهود الثابت، تيارات الثابت، الفيض المغناطيسي المتشابك هي مقادير تابعة للزمن، فإنه باستخدام تحويلات بارك تتحول هذه المقادير المتناوبة إلى مقادير مستمرة غير تابعة للزمن، ومن هنا تأتي أهمية تحويلات بارك في التعامل مع الآلات التزامنية في تبسيط الدراسة.

يتم التحويل من نمط المحاور (a, b, c) إلى النمط (dq) وفق:

$$\begin{matrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{matrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_r) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{matrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{matrix} \quad (13-3)$$

بينما يعطى تحويل بارك العكسي بالمعادلة التالية:

$$\begin{matrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{matrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta_r & -\sin \theta_r & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r - \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \\ \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) & \frac{\sqrt{2}}{2} \end{bmatrix} \begin{matrix} u_d \\ u_q \\ u_0 \end{matrix} \quad (14-3)$$

يجب الانتباه إلى أنه عند شروط التوازن فإن $u_0=0$.

هذا وتعطى علاقة الجهود وفق الاحداثيات dq بالمعادلتين التاليتين [24]:

$$V_{sd} = R_{sd} i_{sd} + L_d \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_e L_q i_{sq} \quad (15-3)$$

$$V_{sq} = R_{sq} i_{sq} + L_q \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_e L_d i_{sd} + \omega_e \lambda_r \quad (16-3)$$

حيث (V_{sq}, V_{sd}) الجهود اللحظية للثابت وفق محاور الإحداثيات dq.

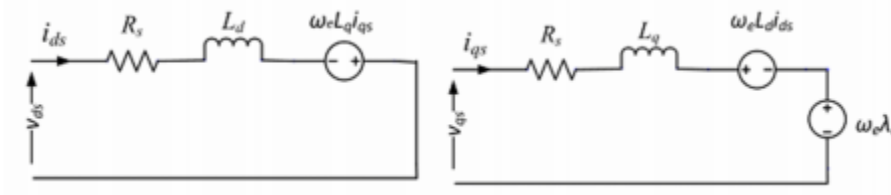
(i_{sq}, i_{sd}) التيارات اللحظية للثابت وفق محاور الإحداثيات dq.

ω_e السرعة الزاوية الكهربائية للجزء الدوار.

λ_r الفيض المغناطيسي الناتج عن المغناط الدائمة على الجزء الدوار.

(L_q, L_d) الحثية وفق الاحداثيات dq.

يمكن سم الدارة المكافئة للآلة التزامنية وفق محاور الاحداثيات dq على الشكل (18-3):



الشكل (18-3) الدارة المكافئة للآلة التزامنية وفق محاور الاحداثيات dq

من أجل أي آلة متزامنة ذات أقطاب دائمة (PMSG) فإن استطاعة الدخل الكهربائية تعطى بالعلاقة:

$$P_{abc} = V_{as} * i_{as} + V_{bs} * i_{bs} + V_{cs} * i_{cs} \quad (17 - 3)$$

وفي نمط الإحداثيات dq بالعلاقة:

$$P_{dq} = \frac{3}{2} (V_{sd} * i_{sd} + V_{sq} * i_{sq}) \quad (18 - 3)$$

في المولد التزامني المستخدم في العنفات الريحية فإنه يتم تقديم استطاعة ميكانيكية للمولد لكي يدور، وفي الحالة المستقرة يجب أن يكون العزم الكهروميكانيكي (Electromechanical) للآلة متوازناً مع العزم الميكانيكي على محور الدوار للعنفة الريحية.

وعلى هذا فإن العزم الكهروميكانيكي للآلة التزامنية ذات الأقطاب المغناطيسية يعطى بالعلاقة [25]:

$$T_e = \frac{3}{2} P [\lambda_r * i_{sq} + (L_d - L_q) i_{sq} * i_{sd}] \quad (19 - 3)$$

حيث P عدد الأقطاب.

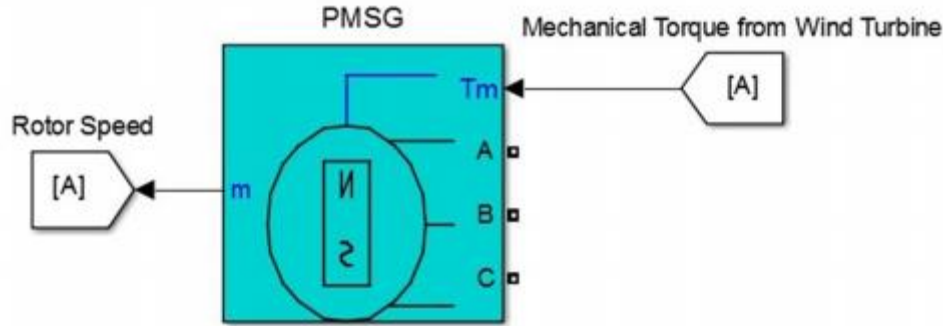
بما أن المولد المستخدم في دراستنا هو المولد التزامني ذو أقطاب دائمة من النوع المسطح (Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Generator) فإن $L_d = L_q$ وبالتالي تصبح علاقة العزم

الكهروميكانيكي على الشكل التالي:

$$T_e = \frac{3}{2} P \lambda_r i_{sq} \quad (20 - 3)$$

3-4-10-3- نمذجة المولد التزامني ذو أقطاب دائمة (PMSG):

سنستخدم في دراستنا نموذج المولد التزامني الموجود في بيئة الماتلاب، والموضح في الشكل (3-19):



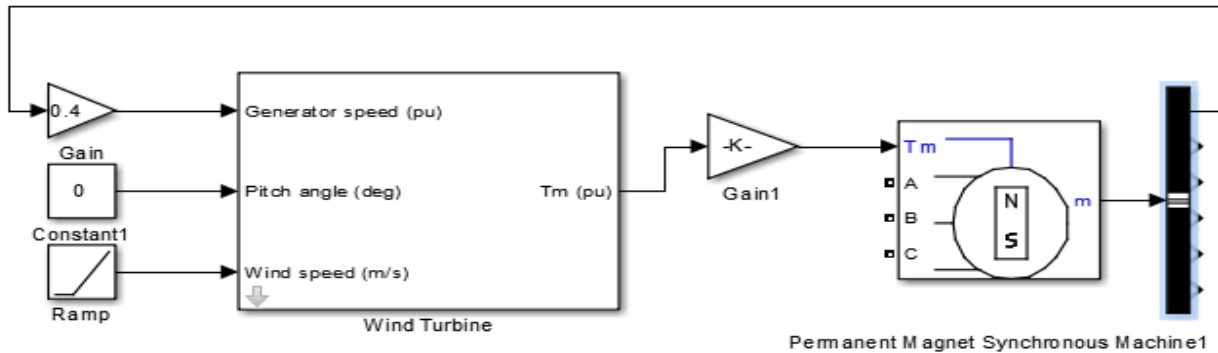
الشكل (3-19) المولد التزامني ذو أقطاب بارزة

هذا النموذج يملك دخل وحيد وهو العزم الميكانيكي على محور العنفة الريحية، وخرج يتحدد بالرمز m الذي من خلاله يمكننا أن نقرأ عدة بارامترات كسرعة دوران محور المولد، العزم الكهروميكانيكي للمولد، تيارات المولد ثلاثية الطور.

تمثل النهايات (A,B,C) نهايات الجزء لثابت للمولد والتي توصل مباشرة مع الحمل ثلاثي الطور.

3-4-10-4- توصيل المولد مع العنفة الريحية في بيئة الماتلاب:

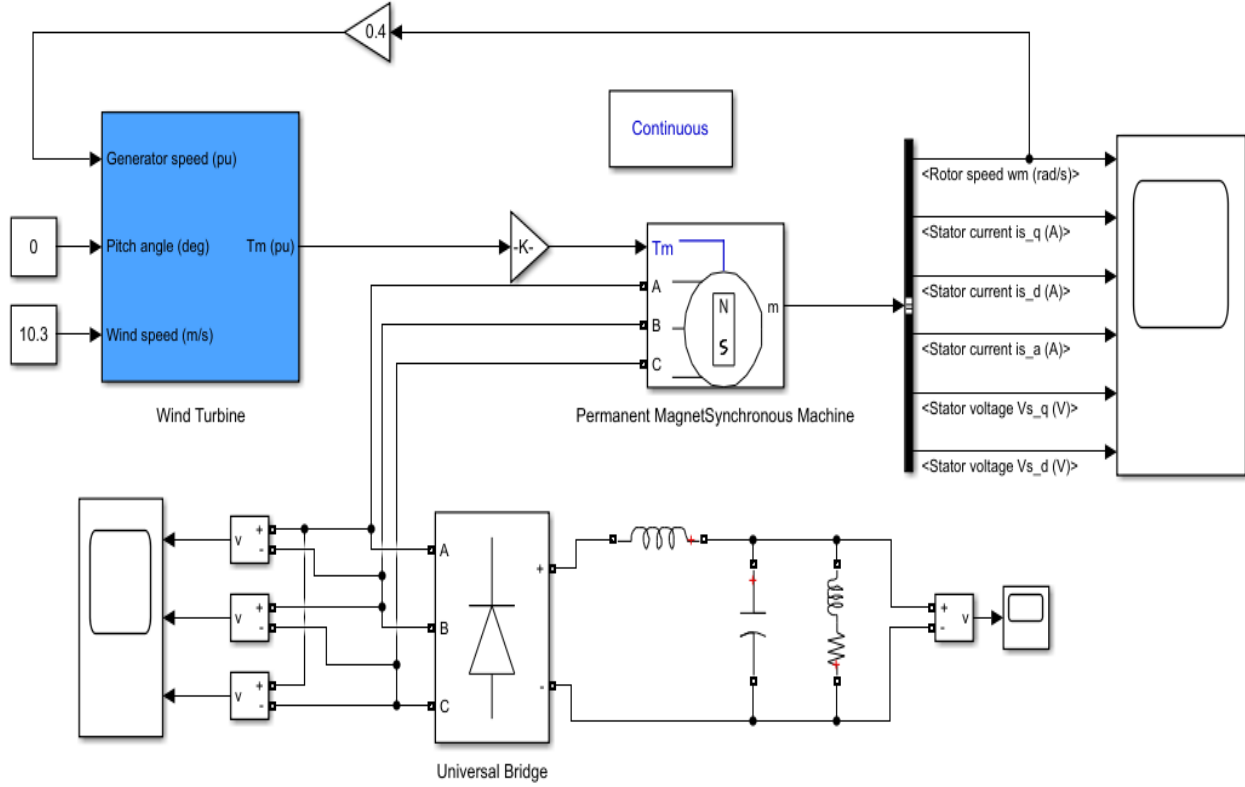
ويكون توصيل المولد مع العنفة في بيئة الماتلاب كما هو موضح بالشكل (3-20):



الشكل (3-20) توصيل العنفة الريحية مع المولد في بيئة الماتلاب

3-10-5- نموذج العنفة الريحية مع المولد والمقوم:

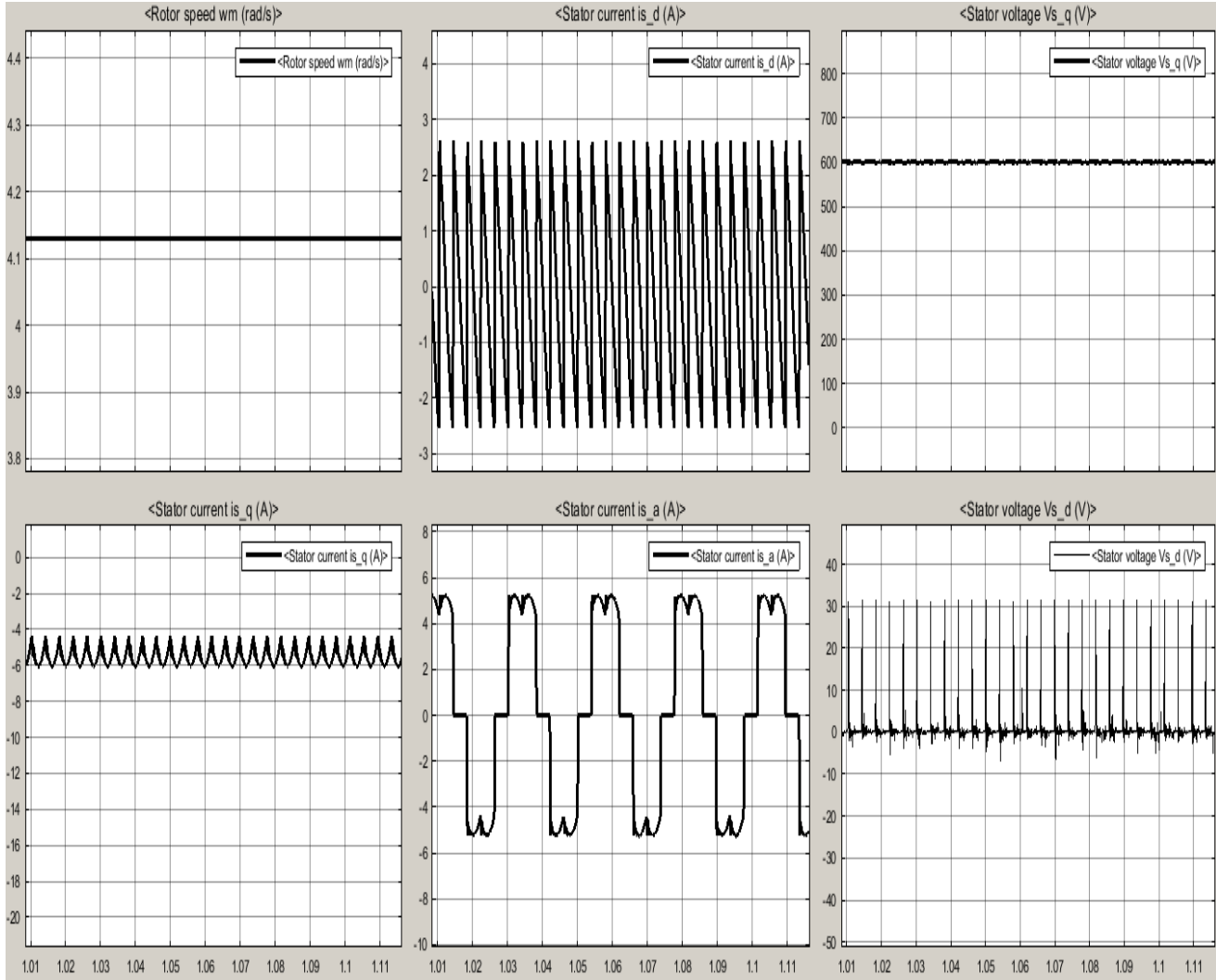
بعد اختيار مواصفات العنفة الريحية والمولد المستخدم، سنقوم بربط العنفة الريحية مع المولد التزامني ذو المغناطيس الدائم (PMSG) مع دائرة تقويم (Universal Bridge) وذلك لتحويل جهد وتيار خرج المولد المتناوب ذو المطال والتردد المتغيرين مع تغير سرعة الرياح إلى تيار مستمر وجهد مستمر، ليتم تغذية دائرة المقطع بهما وذلك وفق الشكل (5-6):



الشكل (3-21) نموذج العنفة الريحية مع المولد التزامني ودائرة التقويم

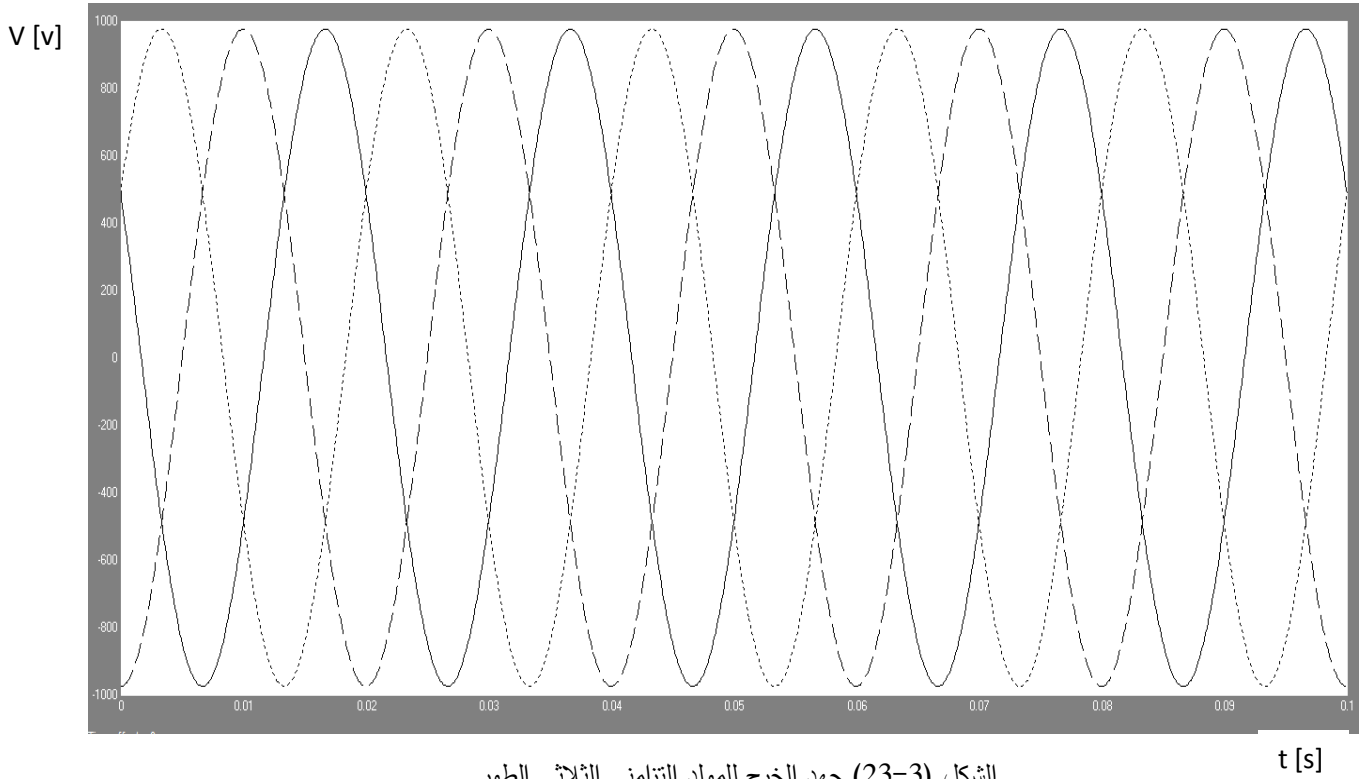
3-10-5-1 نتائج نمذجة العنفة الريحية مع المولد والمقوم:

حصلنا من الشكل (21-3) على إشارات الخرج للمولد التزامني وهي سرعة الدائر ω_m وعلى مركبات الثابت (التيار والجهد) على المحاور التزامنية (d-q) بالإضافة إلى المركبة الفعلية للتيار i_s-a والإشارات موضحة على الشكل (22-3):



الشكل (22-3) سرعة الدائر ω_m ومركبات تيار الثابت على المحاور التزامنية (i_{s-d} و i_{s-q}) والمركبة الفعلية للتيار للثابت i_{s-a} ومركبات جهد الثابت على المحاور التزامنية (V_{s-d} و V_{s-q})

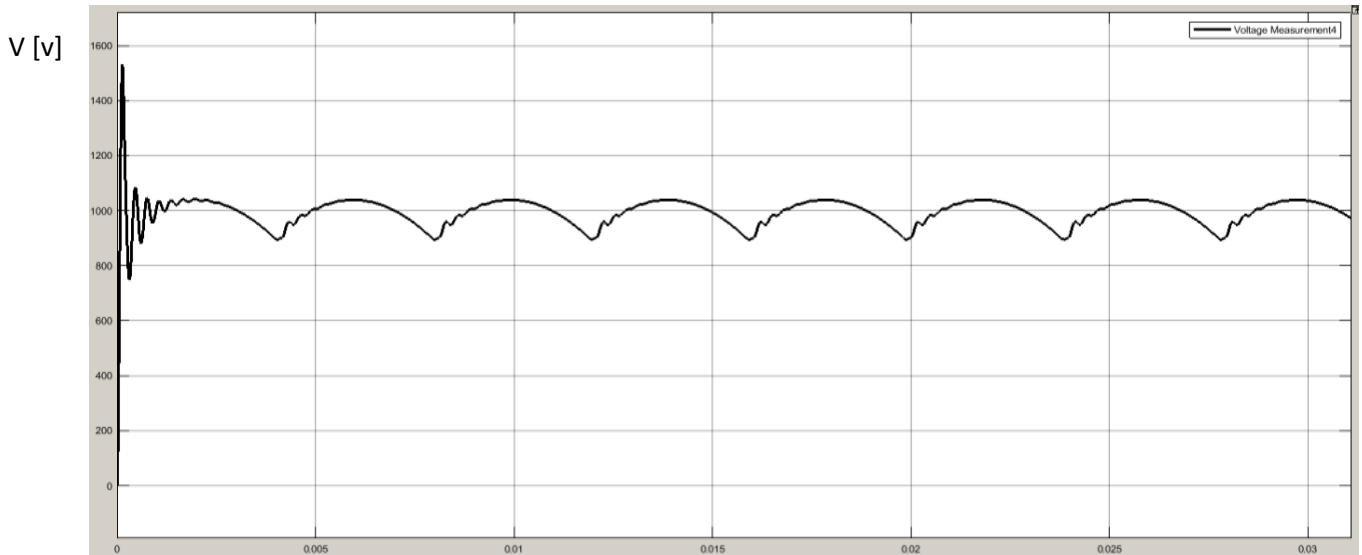
كما تم الحصول من الشكل (20-3) على جهد خرج المولد الثلاثي الطور والموضح بالشكل (23-3):



الشكل (23-3) جهد الخرج للمولد التزامني الثلاثي الطور

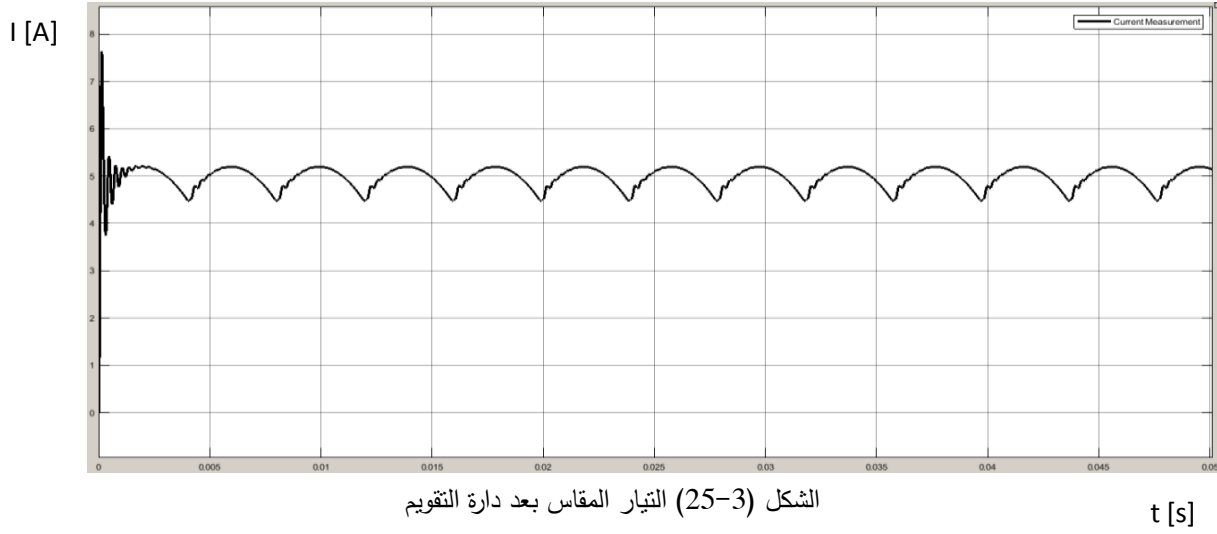
كما تم الحصول من الشكل (20-3) على إشارات الجهد والتيار بعد دائرة التقويم وفق مايلي:

■ يبين الشكل (24-3) الجهد المقاس بعد دائرة التقويم:



الشكل (24-3) الجهد المقاس بعد دائرة التقويم

■ بين الشكل (3-25) التيار المقاس بعد دائرة التقويم:



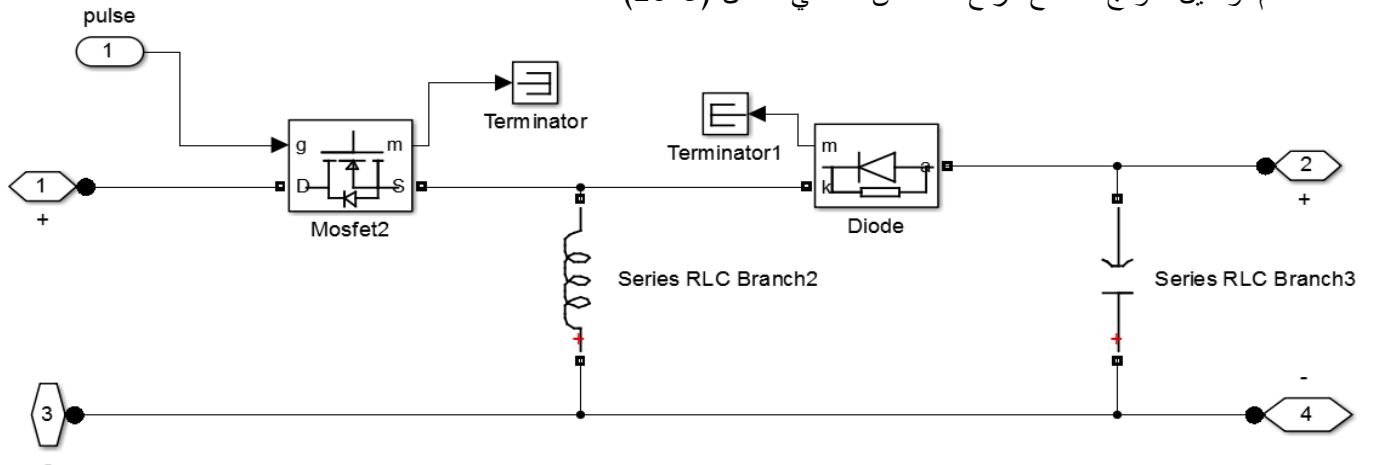
3-10-6- نموذج المقطع الرفع-الخافض Buck-Boost :

بعد أن قمنا بتصميم المقطع وذلك من خلال اختيار تردد العمل والملف والمكثف، حيث اخترنا تردد العمل للترانزستورات بحيث يحقق الشرط التالي: يجب أن يكون الدور الأصغري للمذبذب أكبر بحوالي مئة مرة من زمن فتح الترانزستور. ولدينا الترانزستورات القادرة على العمل في هذا النظام ذات أزمنة فتح مقدارها (5 μ s) أي دور العمل الأصغري هو (0.5ms) وبالتالي سيكون تردد العمل الأعظمي هو (2000 Hz) $(\frac{1}{5 \times 10^{-4}})$ [25].

وكنا قد اخترنا قيمة كل من الملف والمكثف حسب المرجع [27] بحيث وجدنا القيم تساوي:

$$C=81 \text{ [mF]} \text{ و } L=10 \text{ [mH]}$$

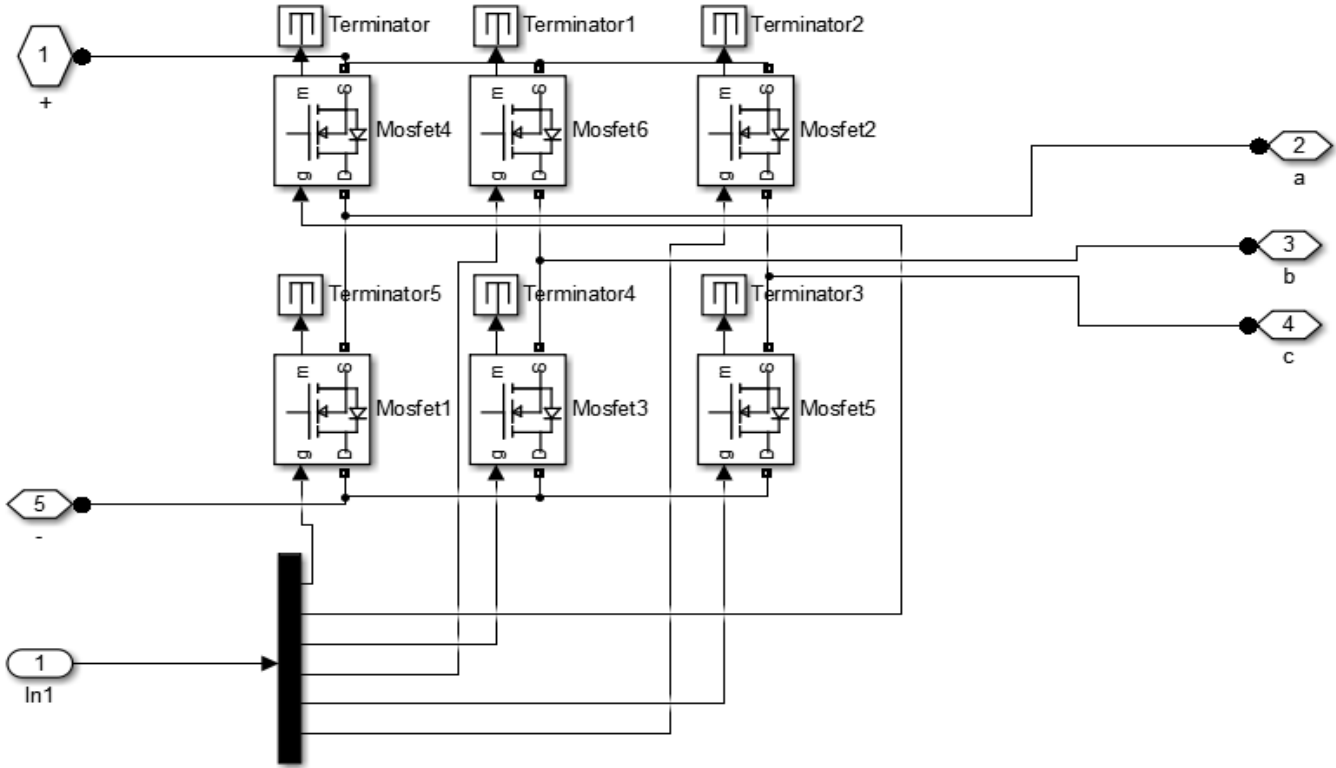
تم توصيل نموذج المقطع الرفع-الخافض كما في الشكل (3-26):



الشكل (3-26) نموذج المقطع الرفع-الخافض

3-10-7- نموذج الانفرتر:

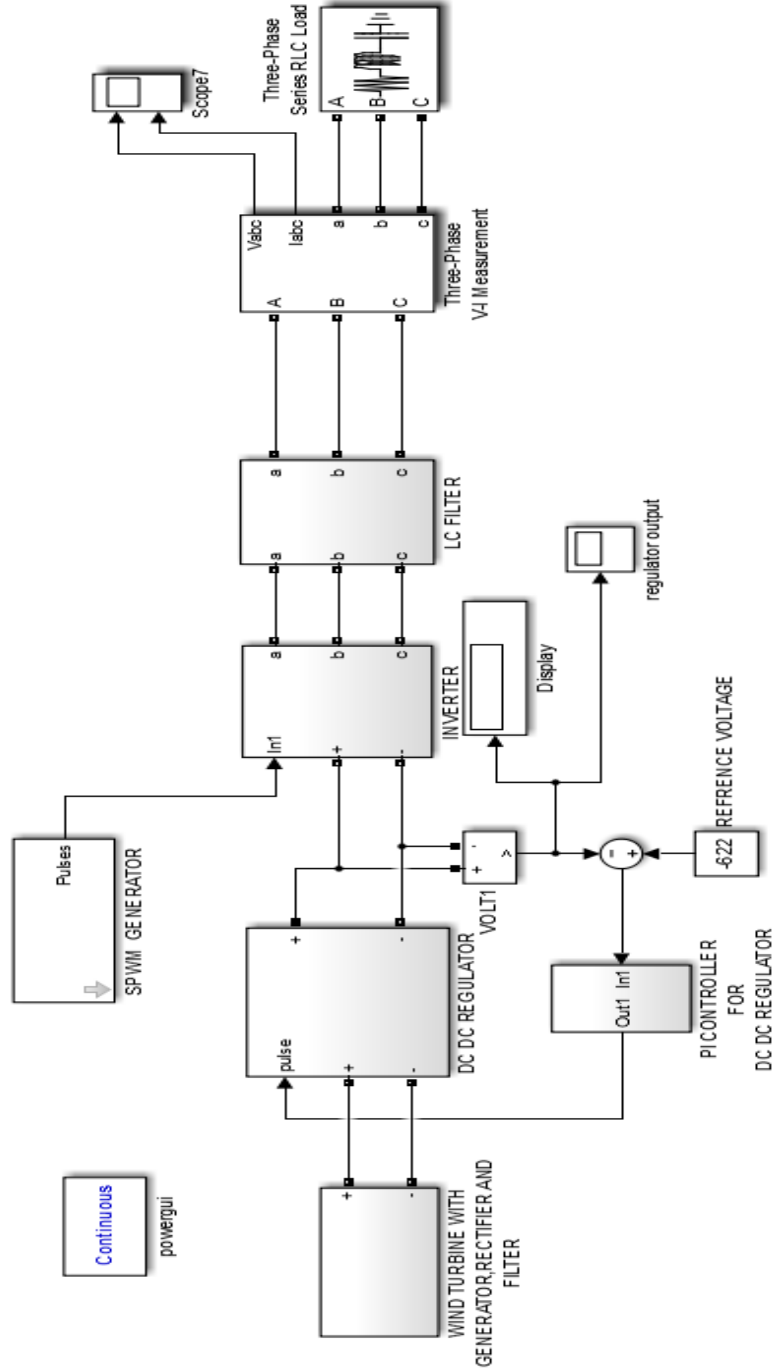
التقنية المستخدمة للتحكم بالانفرتر هي (SPWM)، عندئذ يكون جهد الخرج الأعظمي للانفرتر هو $0.5 * V_{dc}$.
واخترنا تأرجح التيار المرغوب هو (10%) وتأرجح الجهد المرغوب هو (1%).
يبين الشكل (27-3) نموذج الانفرتر.



الشكل (27-3) نموذج الانفرتر

3-10-8-النموذج (عنفة- مولد تزامني PMSG- مقوم- مقطع رافع-خافض- انفرتر- حمل):

يبين الشكل (3-28) طريقة ربط نظام طاقة الرياح المقترح في هذا البحث ضمن بيئة الماتلاب



الشكل (3-28) نموذج العنفة-مولد-مقوم-مقطع-انفرتر-حمل

الفصل الرابع

تصميم برنامج حاسوبي بناءً على الخوارزمية الجينية

خلال العقود الماضية، كان هناك اهتمام متزايد في الخوارزميات التي تعتمد على المبدأ التطوري لحل أنواع مختلفة من مشاكل إيجاد الحل الأمثل. يعرف مجال البحث الذي يتعلق بجميع الخوارزميات التطورية باسم الحوسبة التطورية. تبحث الخوارزمية التطورية عن الحل الأمثل للمشكلة بشكل يعتمد على مجموعة من الأفراد التي تتطور على مدى عدة أجيال حسب مبدأ الداروينية في البقاء للأصلح. والحافز الأساسي الذي يكمن وراء معظم نظريات البحث التي تعتمد على مبدأ مجموعة الحلول هو التطور الذي نشاهده في الطبيعة. هناك ثلاثة نظريات في مجال الحسابات التطورية:

- الخوارزمية الجينية
- البرمجة التطورية (EP) Evolutionary Programming
- الاستراتيجيات التطورية (ESs) Evolutionary Strategies

4-1- ما هي الخوارزمية الجينية؟

الخوارزمية الجينية هي جزء من الحوسبة التطورية، والتي هي منطقة سريعة النمو في علم الذكاء الاصطناعي. إن الخوارزمية الجينية مستوحاة من نظرية داروين في التطور، حيث يمكن القول أن المشاكل تُحل عن طريق عملية تطورية ينتج عنها أفضل (أصلح) حل (ناج) - وبعبارة أخرى، يتطور الحل. وضعت الخوارزمية الجينية من قبل العالم John Holland حيث طورها هو وطلابه وزملاؤه. في عام 1992 استخدم John Koza الخوارزمية الجينية في تطوير برامج لتنفيذ مهام معينة. وقد سُمي هذه الطريقة أسلوب البرمجة الجينية Genetic Programming (GP).

في الطبيعة، تتنافس أفراد السكان مع بعضها البعض على الموارد النادرة أو القليلة. تنتج المنافسة أفراد أكثر ملائمة تسيطر على الأضعف، وهي ظاهرة تسمى "البقاء للأصلح". العامل الأساسي لبقاء الفرد في المنافسة هو القدرة على التكيف مع المحيط المتغير باستمرار، هذه القدرة على البقاء يتم تحديدها بواسطة مجموعة فريدة من الكروموسومات التي تشكل الفرد.

بالتالي تراث الأفراد الأفضل مزيج من الجينات من ذويهم التي ربما تقوي مقدرتهم على البقاء أكثر. الأضعف سوف يموت في آخر الأمر سويًا مع جيناته. من خلال تتالي الانتقاء الطبيعي وإعادة تركيب الجينات التي تحدث خلال التكاثر، يستمر التطور حيث أن معظم السكان يصبح أكثر تكيفًا مع البيئة.

تحاكي الخوارزمية الجينية بيئة اصطناعية لمثل هذه العمليات الجينية. يتم الحفاظ على مجموعة الحلول، كل منها يمثل حلاً ممكنًا لمشكلة محددة. يعطي كل حل معين قيمة أو معيار للملائمة يشير إلى مدى جودة الحل

للمشكلة. تتنافس الحلول بعد ذلك مع الآخرين في مجموعة الحلول لإنتاج جيل جديد. الحلول المناسبة بدرجة عالية هي تلك التي لها قيمة أعلى للملائمة و بالتالي يكون لديها فرصة أكبر لإعادة الإنتاج من خلال عمليات التبادل.

ترث الأجيال اللاحقة جينات الآباء عالية الملاءمة وسوف تصبح أكثر ملائمة وتنتج حلول أفضل للمشكلة المطروحة. أقل الحلول مناسبة لديها فرصة أقل لإعادة الإنتاج و سوف تختفي في آخر الأمر في مجموعة الحلول. بين الجيل المنتج حديثاً و آبائهم يتم اختيار أفضل الحلول لتشكيل حلول الجيل القادم. بتكرار العملية، فإن مجموعة الحلول تتطور إلى الحل الأمثل للمشكلة.

في أنظمة الطاقة، تم مؤخراً تطبيق الخوارزمية الجينية في حل مشاكل مختلفة، مثل إعداد نظام التوزيع، تحسين تخطيط توسع التوليد، التوزيع الاقتصادي، التزام الوحدة، تخطيط الاستطاعة الردية، تحسين الجهد وحساب سريان الحمل.

الخوارزمية الجينية هي خوارزمية بحث قوية تعتمد على آلية الاختيار الطبيعي والوراثة الطبيعية. خصائصها جعلت الخوارزمية الجينية قوية للبحث عن نقطة الحل الأمثل العامة لفئة معينة من المشاكل الهندسية[30].

4-2- مميزات الـ GA والوقت الأفضل لاستخدامها:

- يمكن تلخيص مزايا الـ GA مقارنةً مع غيرها من تقنيات إيجاد الحل الأمثل التقليدية كالتالي:
- تبحث في مجموعة نقاط، وليس نقطة واحدة. يمكن لمجموعة الحلول أن تتحرك فوق التلال (القمم) و نحو الوديان وهكذا فإن تقنية الـ GA يمكن أن تكتشف النقطة الأمثل الشاملة، وذلك لأن الحساب لكل حل من مجموعة الحلول مستقل عن غيره. تملك تقنية الـ GA قدرة الحوسبة المتوازية الملاءمة.
 - تستخدم المعلومات (الملاءمة أو تابع الهدف) مباشرة لتحديد اتجاه البحث، وليس المشتقات أو المعرفة الإضافية الأخرى. لذلك فإن الـ GA يمكن أن تتعامل مع التوابع غير المستمرة وغير القابلة للاشتقاق - التي هي مشاكل إيجاد الحل الأمثل الواقعية. هذه الخاصية أيضاً تحرر الـ GA من الافتراضات التقريبية لكثير من مشاكل إيجاد الحل الأمثل التطبيقية، والتي تكون مطلوبة في الكثير من الأحيان في طرق إيجاد الحل الأمثل التقليدية.
 - تستخدم قوانين الانتقال الاحتمالية لاختيار الأجيال، وليس القوانين القطعية. يمكن أن تبحث في منطقة معقدة للعثور على أفضل حل.
 - تبحث بشكل فعال، لذلك فهي تملك احتمالية أكبر (من تقنيات إيجاد الحل الأمثل المحلية) للوصول إلى الحل الأمثل الشامل الأصغري.
 - لا تتطلب تحويل المشكلة اللاخطية إلى مشكلة خطية.
 - لا تتطلب حساب المشتقات الجزئية.
 - يتم أخذ عينات النماذج الأكثر احتمالاً بشكل أكبر من النماذج الأقل احتمالاً.
 - يمكن أن تعمل الـ GAS مع شيفرة البارامترات بدلاً من البارامترات نفسها[31].

4-3- مساوي الخوارزمية الجينية GA

تتلخص سيئات الخوارزمية الجينية بالشكل التالي:

- ✧ لا تُنتج الـ GA دائماً حل أمثل دقيق وشامل (نقطة تقارب سابقة لأوانها).
- ✧ تتطلب الـ GA وقت حساب طويل وذلك بسبب العدد الكبير من التقييمات المعقدة.
- ✧ حجم مجموعة الحلول، معدل التبادل ومعدل الطفرة هي غير خطية بشكل عالي. بناءً على ذلك، بعض الطرق الأكثر تطوراً تم اقتراحها لتحديد قيم بارامترات الطريقة من أجل تحسين الأداء.

4-4- أساسيات الخوارزمية الجينية GA :

تتنتمي الخوارزمية الجينية إلى فئة من استراتيجيات البحث التي تعتمد على مجموعة الحلول. و تعمل على مجموعة من السلاسل (الكروموسومات) التي تشكل ترميزاً لمجموعة بارامترات مشكلة محدودة يجب حلها. كل ترميز يمثل حل من مجموعة حلول الـ GA. يتم إعطاء مجموعة الحلول قيماً ابتدائية بشكل عشوائي (كروموسومات عشوائية) في بداية عمل الـ GA.

تبحث تقنية الـ GA في فضاء الكروموسومات الممكنة عن أفضل الحلول. ويسترشد البحث أو يوجه عن طريق قيمة الملاءمة للبيئة. وهذا يعطي قياساً عن مدى تكيف كل حل في فترة حل المشكلة وبالتالي يحدد احتمال ظهور الحل في الأجيال القادمة. وعادة ما يُستخدم الترميز الثنائي لبارامترات المشكلة [32].

4-5- خطوات الخوارزمية الجينية

تتضمن الخوارزمية الجينية البسيطة الخطوات التالية:

- 1- البداية: توليد مجموعة حلول عشوائية من n كروموسوم.
- 2- الملاءمة: تقييم الملاءمة $f(x)$ لكل كروموسوم x في مجموعة الحلول.
- 3- مجموعة حلول جديدة: إنشاء مجموعة حلول جديدة بتكرار الخطوات التالية إلى أن تكتمل مجموعة الحلول الجديدة.
- 4- الاختيار: اختيار اثنين من الكروموسومات من مجموعة الحلول وفقاً لدرجة أو مقدار ملائمتهم (كلما كانت درجة الملاءمة أكبر أو أفضل، كانت فرصة اختياره أكبر).
- 5- التقاطع: مع احتمال تقاطع معين يتم تقاطع الآباء لتشكيل سلالة جديدة (الأطفال). إذا لم يتم إجراء أي تقاطع، فإن النسل الجديد هو صورة طبق الأصل من الآباء والأمهات.
- 6- الطفرة: مع احتمال طفرة معين يتم تغيير النسل الجديد في كل موضع.
- 7- قبول: وضع النسل الجديد (السلالة الجديدة) في مجموعة الحلول الجديدة.
- 8- التبديل: استخدام مجموعة الحلول الجديدة التي ولدت لتشكيل مزيد من الأجيال.
- 9- اختبار: إذا تحقق شرط التوقف، نتوقف، ونعيد الحل الأفضل.
- 10- حلقة: الذهاب إلى الخطوة الثانية [33].

4-6-6-آلية عمل الـ GA:

4-6-1-ترميز/ تمثيل الحل:

اختيار طريقة ترميز مناسبة هو الخطوة الأولى لتصميم تطبيق الـ GA، وبشكل عام، هناك نوعان من التمثيل: التمثيل الثنائي وتمثيل النقطة العائمة. التمثيل الثنائي لبارامترات التصميم الحقيقية يُحدث صعوبة فيما يسمى المنحدرات المبالغ، والتي تأتي من التفاوت بين فضاء التمثيل وفضاء المشكلة. على سبيل المثال، نقطتان قريبتان من بعضهما البعض في فضاء التمثيل ربما تكونان بعيدتين في فضاء تمثيل المشكلة الثنائي. ونتيجةً لذلك، فإن الـ GAS التي تستخدم التمثيل الثنائي تكون غير قادرة على تركيز جهود البحث في منطقة قريبة من مجموعة الحلول الحالية. ولا يزال ذلك سؤالاً مطروحاً لتشكيل معاملات وراثية بكفاءة تناسب إلى حد ما تغيير فضاء المشكلة. عيب آخر لنظم الـ GAS ذات الترميز الثنائي المطبقة على بارامترات مشكلة إيجاد الحل الأمثل في المجالات المستمرة يأتي من التناقض بين فضاء التمثيل الثنائي وفضاء المشكلة الفعلية. وهناك حل بسيط لهذه المشاكل هو استخدام تمثيل الفاصلة العائمة للبارامترات. في هذا الترميز الحقيقي للـ GA، يتم ترميز الحل كشعاع من الأرقام الحقيقية الموافقة للمتغيرات[29].

إن الترميز الحقيقي للـ GA يعتبر قوي ودقيق وفعال لأن تمثيل الفاصلة العائمة أقرب من الناحية التطورية لفضاء التصميم الحقيقي و طول السلسلة ينقص إلى عدد متغيرات التصميم. ومع ذلك، فإن الترميز الحقيقي للـ GA يمكن أن يؤدي إلى التقارب المبكر عندما يُطبق مع عدد كبير من المتغيرات.

4-6-1-1-الترميز الثنائي:

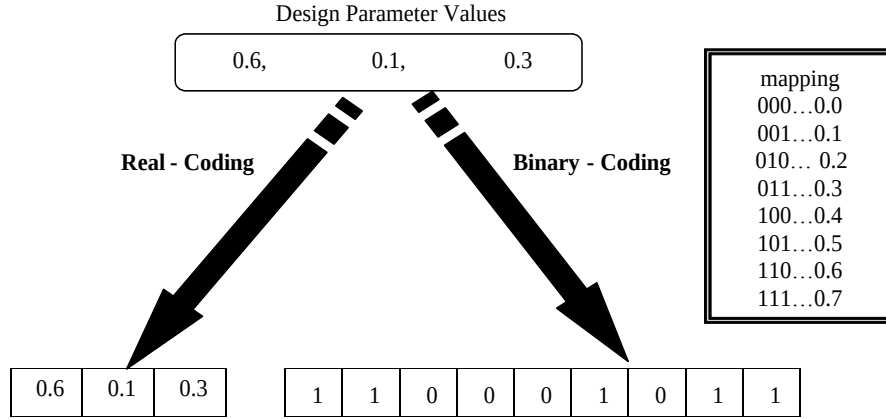
كمثال عن الترميز الثنائي لدينا المثال التالي، حيث يتم التمثيل باستخدام (1,0)
{0101، 10، 0010، 110001، 0110، 1001}

4-6-1-2-ترميز شعاع النقطة العائمة:

في التمثيل باستخدام الفاصلة العائمة، يتم استخدام الأرقام كما هي

{0.002، 1.23، 425، 234-، 1.34، 900، 25}

بدأ استخدام تمثيل النقطة العائمة في الـ EP و الـ ESS. في تمثيل النقطة العائمة، يتم تمثيل الحل بموجه أو شعاع من الأرقام الحقيقية. ومن الطبيعي أكثر استخدام تمثيل النقطة العائمة لمشاكل إيجاد الحل الأمثل ذات البارامترات الحقيقية لأنه المفهوم الأقرب إلى فضاء التصميم الحقيقي ويتم تقليل طول السلسلة إلى عدد متغيرات التصميم. وقد أُفيد أن الترميز الحقيقي للخوارزمية الوراثية تفوق على الترميز الثنائي في العديد من مشاكل التصميم. ويوضح المثال المبين في الشكل (4-1) التمثيل الثنائي وتمثيل الفاصلة العائمة.



الشكل (4-1) مثال يوضح التمثيل الثنائي وتمثيل الفاصلة العائمة

4-6-2-الملائمة:

يعتبر تابع الملائمة واحد من السمات الرئيسية لـ GA. كل حل مرشح يجب أن يزود بتابع ملائمة لقياس مدى صلاحيته كحل أمثل وذلك حسب الهدف الذي يتم إيجاد الحل الأمثل له. وبالتالي، أفضل الحلول (قيم أعلى للملائمة) يجب أن تكون هي التي لديها أقل قيم لتابع الهدف [29].

4-6-3-الاختيار:

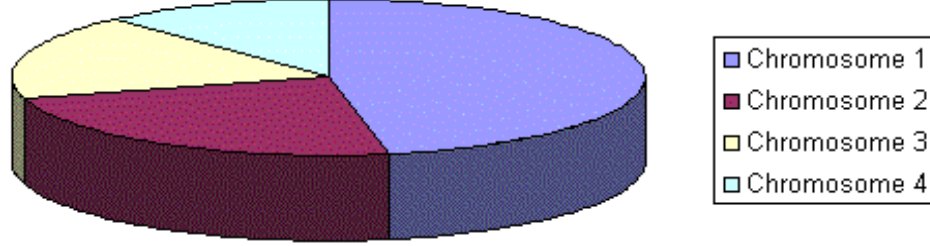
يتم استخدام قوانين الاختيار لتحديد الحلول التي ستكون مُمثلة في الجيل القادم من الـ GA. تستند آلية الاختيار على قياس الملائمة أو قيمة تابع الهدف المُعرفة على كل حل (كروموسوم) في مجموعة الحلول. وهناك طريقة تستخدم على نطاق واسع هي اختيار الملائمة-النسبية. في هذه الطريقة، احتمال اختيار كل حل يُحسب من خلال تقسيم الملائمة على مجموع الملائمة لجميع الحلول.

وتعتمد عادةً ثلاث آليات اختيار رئيسية في بحث الـ GA: اختيار الروليت (القرص الدائري)، واختيار المنافسة واختيار الترتيب [33].

4-6-3-1-اختيار الروليت (القرص الدائري):

يتم اختيار الآباء من قبل اختيار القرص الدائري. يبين الشكل التالي عملية اختيار القرص الدائري التي تحدد جزء من القرص متناسب مع احتمال الاختيار ويبدأ تدوير القرص الدائري: في كل مرة، يتم تحديد حل واحد.

$$P_{selection} = \frac{f(parent_i)}{\sum_i f(parent_i)} = 0 \quad i \in N_p \quad (1-4)$$



الشكل (2-4) مثال لاختيار القرص الدائري

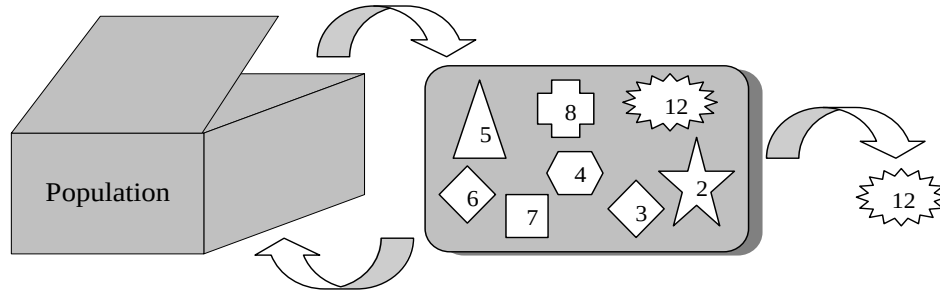
مثال لاختيار القرص الدائري

في اختيار القرص الدائري، احتمال الاختيار يتناسب مع قيمة الملاءمة للحلول. ولذلك، فإن الحلول ذات الملاءمة العالية لديها أعلى احتمال اختيار، وبالتالي من هنا تمثل في الجيل القادم.

4-6-3-2-اختيار المنافسة:

تعمل طريقة اختيار المنافسة عن طريق اختيار بعض الحلول عشوائياً من مجموعة الحلول واختيار الأفضل (أعلى ملائمة) من هذه المجموعة من أجل البقاء في الجيل القادم في حين يتم تجاهل كل الحلول الأخرى كما هو موضح في الشكل (3-4).

المنافسة الثنائية التي تقام بين أزواج من الحلول هي الأكثر شيوعاً. جزء صغير من الحلول في مجموعة الحلول يتم اختيارها عشوائياً إلى مجموعة جزئية من مجموعة الحلول ويتم التنافس لتحديد الحلول الأصلح في كل مجموعة حلول.

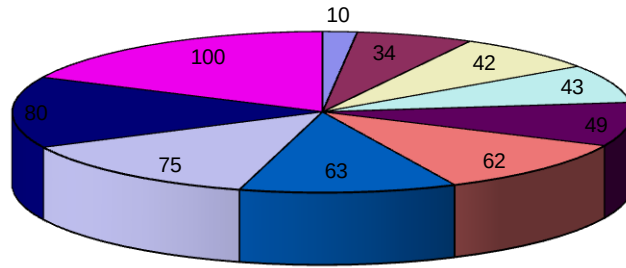


الشكل (3-4) مثال اختبار المنافسة

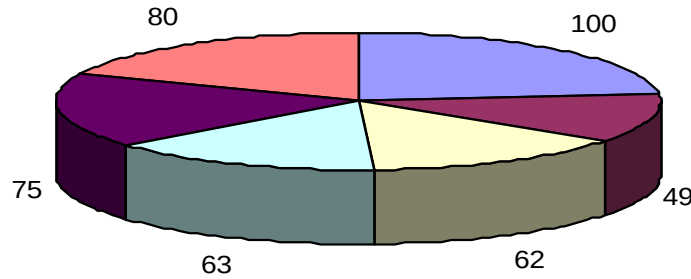
الشكل (4-4)، (5-4) يظهران المقارنة بين اختيار عجلة الروليت والمنافسة لمجموعة حلول مؤلفة من 10 حلول فردية مع ملائمة عشوائية بين 0 و 100. يتم أخذ عينات مجموعة الحلول 1000 مرة في كل جيل ويتم اخذ المتوسط في مجموعة الحلول المقبولة في أكثر من 10 أجيال وتصنيفها كما هو مبين في الجدول (1-4).
الجدول (1-4) تابع الملائمة

Fitness										Total
10	34	42	43	49	62	63	75	80	100	558

لاختيار المنافسة، فإن حجم المجموعة الجزئية يكون نصف حجم مجموعة الحلول الكلية، ويمكن أن يُنظر إليها على أنها نسخة عشوائية لاختيار صنف.



الشكل (4-4) اختيار عجلة الروليت



الشكل (5-4) اختيار المنافسة

يبين الشكل (5-4) أن اختيار القرص الدائري يعطي الحلول الأقل ملائمة من مجموعة الحلول فرصة لتكون ممثلة في الجيل القادم. ومع ذلك، اختيار القرص الدائري يعتبر قوي لصالح الحلول الأعلى ملائمة مع مجموعة فرعية من الحلول الأقل ملائمة المضمونة أن تختفي من مجموعة الحلول في كل جيل.

4-6-3-3-اختيار الترتيب:

يعين اختيار الترتيب احتمالات الاختيار على مرتبة الحل، ويتجاهل القيمة المطلقة للملائمة. في هذه الطريقة تخزن الحلول الفردية في حوض الحلول، ويتم فرز الحلول بشكل مزدوج وفقاً لقيم ملائمتهم. تتم إعادة تعيين احتمال الاختيار وفقاً للترتبة، على سبيل المثال، كمعكوس لقيم الترتبة، اقترح Michalewicz تابع لا خطي لتعيين احتمال الاختيار كما يلي:

$$probability = c.(1 - c)^{(rank-1)} \quad (2-4)$$

حيث C بارامتر مُعرف من قبل المستخدم. ثم، يتم اختيار الوالدين عن طريق أحد الأمرين القرص الدائري أو أخذ العينات العشوائية الشاملة.

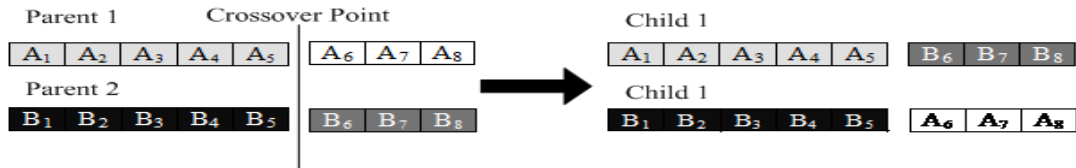
4-6-3-3-1-استراتيجية النخبة:

تعتمد تقنية الـ GA استراتيجية النخبة التي يمكن النظر إليها كتقنية في الحالة الثابتة مع عدد كبير من الأجيال. خلال الجيل القادم من مجموعة الحلول، لا يتم دائماً اختيار أفضل الحلول من الجيل السابق لإعادة التعيين، أو يمكن تدميرها من قبل التقاطع والتغيير. النخبوية تُستخدم بالإضافة إلى طريقة الاختيار للاحتفاظ بعدد من أفضل الحلول من مجموعة الحلول السابقة في كل جيل. وقد وجد العديد من الباحثين أن النخبوية تحسن أداء الـ GA.

4-6-4-التقاطع:

بعد عملية الاختيار، يتم تقديم حل جديد ويوضع في مجموعة الحلول الحالية لخلق جيل جديد اعتماداً على الجيل الحالي. في عملية التركيب عادةً يتم استخدام التقاطع والطفرة. تعمل قوانين التركيب على الحلول التي تم اختيارها سابقاً وفق آلية الاختيار. تحدث عملية إعادة الإنتاج بين الحلول المختارة في الجيل الحالي لإنتاج سلالة تصبح حلول في الجيل القادم. هذا النوع من آلية التقاطع يتضمن نقطة واحدة، نقطتان وعمليات تقاطع منتظمة.

آلية التقاطع ذات النقطة الواحدة هي آلية تقليدية. يتم إنشاء كروموسومات جديدين من استبدال المعلومات في الكروموسومات "الرئيسية" المختارة. بين جميع أشكال التقاطع المختلفة، والأبسط والأكثر أصالة هو تقاطع النقطة الواحدة كما هو موضح في الشكل الآتي. هناك نقطة يتم تحديدها بشكل عشوائي كنقطة عبور حيث يتم تبادل الجينات في الكروموسومات الآباء قبل نقطة التقاطع لتشكيل كروموسومات جديدة. ليس من الضروري أن يشارك كل زوج من الكروموسومات المختارة من مجموعة الحلول في عملية التقاطع.



شكل (4-6) آلية تقاطع النقطة الواحدة

تُستخدم آلية التقاطع ذات النقطتين للحد من تأثير انحياز الموضع ومشكلة نقطة النهاية. ويتم اختيار نقطتين بشكل عشوائي ويتم تقاطع الجينات فيما بينها لإنشاء سلالتين جديدتين. آلية التقاطع ذات النقطتين يمكن أن تدمر schemata مع تحديد أطوال كبيرة وتبادل الجينات لا يتضمن تبادل النهاية بالضرورة. آلية التقاطع الموحد تختلف عن آلية التقاطع ذات النقطة الواحدة أو ذات النقطتين. يتم تقاطع الجينات احتمالياً في كل حل في التقاطع الموحد مع بعض الاحتمالات المثبتة. يكون تبادل جين واحد مستقل عن تبادل الجينات في المواقع الأخرى. التبادل الموحد يمكن أن يؤدي إلى إخلال بشكل عالي للجينات في موقع معين ويقال أنه وزع الانحياز حيث يرتبط بعدد الجينات التي يتبادلها حسب آلية التقاطع.

4-6-5-الطفرة:

تلعب الطفرة دوراً ثانوياً للتقاطع في الخوارزمية الوراثية. وتضيف قدر صغير من العشوائية في عملية البحث للسماح باستكشاف جميع المناطق في فضاء البحث. أحياناً يتم تغيير الجينات في الكروموسوم في عملية الطفرة، مما يزيد من تنوع الحلول.

في الشكل التالي يتم اختيار الحين التاسع عشوائياً للطفرة تحت مخطط الترميز الثنائي، ويتم الطفرة في أي بت واحد عن طريق قلب أو تبديل البت من 0 إلى 1، أو العكس بالعكس. من ناحية أخرى، لا يوجد تعريف دقيق حول كيفية تنفيذ طفرة في ظل برنامج الترميز الحقيقي. بشكل مشابه لآلية التقاطع، عادة ما تكون صغيرة، احتمال طفرة عالي له تأثير عكسي يؤدي إلى تدمير الكروموسومات.



الشكل (4-7) مثال على طفرة الكروموسوم

4-7-تحديد معاملات الـ GA:

إيجاد قيم جيدة لبارامتر العمل عند مشكلة معينة هو أمر هام جداً. إن العوامل الحاسمة في تحديد معاملات الـ GA هي تحديد بارامترات ضبط قوة لحجم الحلول، الترميز، معايير الاختيار، ومعاملات الاحتمالات الوراثية وتطبيق تقنيات (الملاءمة).

إذا كانت مجموعة الحلول صغيرة، فإن الخوارزمية الجينية تقترب بسرعة إلى نقطة الحل الأمثل، وربما لا تجد الحل الأفضل، من ناحية أخرى، إذا كانت مجموعة الحلول كبيرة جداً فإن عملية إيجاد الحل الأمثل تحتاج لوقت طويل، ولكنها تزيد التنوع و تقلل فرصة التقارب السابق لأوانه، قد يكون مفاجئاً، حجم الحلول الكبير جداً عادة لا يحسن أداء الـ GA (بمعنى سرعة إيجاد الحل). حجم الحلول الجيد هو حوالي 20-30، ولكن في بعض الأحيان الأحجام 50-100 تعتبر أفضل. بعض الأبحاث تظهر أيضاً أن حجم مجموعة الحلول الأفضل يعتمد على حجم

السلسلة المرمزة (الكروموسومات). وهذا يعني أنه إذا كان لدينا الكروموسومات بـ 32 بت، يجب أن تكون مجموعة الحلول أعلى من الكروموسومات بـ 16 بت. وزيادة معدل التقاطع سوف يزيد إعادة إنتاج التراكيب في الجيل.

ضبط نسبة التقاطع بشكل مرتفع سوف يدمر التراكيب الجيدة الموجودة بالفعل في الحلول من مجموعة الحلول الحالية. آلية التقاطع ذات النقطتين هي الأسرع للحصول على نفس النتائج وتعيد الحلول بزمان أطول من آلية التقاطع ذات النقطة الواحدة. يجب أن يكون معدل التقاطع عالي عموماً، حوالي 80% - 95%. (ولكن بعض النتائج تُظهر أن لبعض المشاكل معدل تقاطع حوالي 60% هو أفضل). الأفراد الأكثر ملائمة لديها فرصة أكبر لإعادة التوليد والأقل ملائمة يتم استبدالها بالسلالات الجديدة وهكذا في الأجيال المتتالية، الأفراد متوسطو الملاءمة هي حلول للمشكلة.

ومن المعروف أيضاً أن الطفرة العالية تعطي تنوع أكثر وتأخذ وقتاً أطول من الوقت اللازم للحصول على الحل الأمثل. الطفرة المنخفضة جداً تميل إلى فقدان بعض النقاط بالقرب من المستوى الأمثل. نسبة الطفرة يجب أن تكون منخفضة، وأفضل معدلات هي حوالي 0.5% - 1% .

4-8- مراحل تطبيق الخوارزمية الجينية:

تُعد الخوارزمية الجينية (GA) Genetic Algorithm جزءاً من الخوارزميات التطورية Evolution Algorithms . حيث تعتمد في بنيتها على عمليات تطورية لإنتاج حلول مثلى للمسائل المدروسة.

4-8-1- الانطلاق (Initialization):

في البداية، يتم إنتاج أو خلق جيل (مجموعة من الحلول الابتدائية الملائمة للمشكلة المطروحة) بشكل عشوائي. تقوم الخوارزمية الجينية بالبحث عن قيم المتغيرات التي تعطي أفضل حل وفقاً لتابع هدف ما (أي بمعنى أعلى قيمة لتابع الهدف). في حالتنا متغير البحث هو سرعة الرياح، لذلك سوف نحاول الحصول على أمثل قيم والتي توافق قيمة الاستطاعة الأعظمية.

4-8-2- التقييم (Evaluation):

وهي خطوة مهمة في الخوارزمية الجينية لأنها تسمح باختيار الحل الأفضل من بين مجموعة الحلول المتاحة. يتم تقييم الحلول من خلال تابع هدف ما، ويكون الحل أفضل (أمثل) إذا أعطى أعلى قيمة لتابع الهدف. في حالتنا تابع الهدف هو ببساطة استطاعة العنفة الريحية والتي نسعى أن تكون أعظمية حيث يتم اختيار قيم بارامترات العنفة التي تعطي استطاعة أعظمية.

4-8-3-العمليات الجينية:

وهي أساس خوارزمية الـ GA، لا تستبعد النظريات الاحتمالية ولكنها تعطي نتائج مهمة جداً، وهذه العمليات هي :

- **الاختيار:** يتم اختيار مجموعة من الحلول بنسبة ما وفقاً لتابع الهدف الأعظمي لتشارك في تشكيل الجيل الجديد.
 - **التقاطع:** يتم تقاطع أزواج من الحلول المختارة للحصول على حلول جديدة.
 - **الطفرة:** يطبق على الحل الجديد عملية جينية جديدة أخرى وهي الطفرة وذلك لضمان أنه يوجد حل جديد مختلف عن الحلول السابقة حتى تستمر الخوارزمية في العمل.
 - **الادخال (Insertion):** يدمج الحل الجديد مع الحل القديم لاستبدال الحلول ذات تابع الهدف الأقل.
- نهاية البرنامج:** يخلق البرنامج حلولاً أفضل جيلاً بعد جيل ويتوقف البرنامج وفقاً لعدد التكرارات أي عند الحصول على القيمة الأعظمية لتابع الهدف.

4-8-4-تصميم البرنامج الحاسوبي بناءً على الخوارزمية الجينية:

للتأكد من صلاحية وفعالية الخوارزمية الجينية في ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية في العنفات الريحية، سيتم تصميم برنامج الخوارزمية الجينية بلغة الـ (MATLAB)، وذلك لتحديد المحددات التشغيلية للعنفة بشكل أمثل للحصول على أعظم استطاعة ممكنة للعنفة الريحية، ولملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية.

أولاً: اختيار قيم بارامترات الخوارزمية الجينية:

يبين الجدول (5-1) قيم بارامترات الخوارزمية الجينية علماً أن القيم هي قيم اختيارية ولكن ضمن المجال المحدد لكل بارامتر حيث تم اختيار احتمالية العبور (Crossover probability) تساوي 0.85 وهي تنتمي إلى المجال [0.6-0.9]، كذلك اخترنا قيمة احتمالية الطفرة (Mutation probability) تساوي 0.01 وهي تنتمي إلى المجال [0.005-0.01].

الجدول (4-2) قيم بارامترات الخوارزمية الجينية (GA)

بارامترات الخوارزمية الجينية	
حجم الجيل	100
نوع الترميز	ثنائي
اختبار التابع	عشوائي
احتمال الاختيار	عدد الحلول*0.8
احتمال التقاطع	عدد الحلول*0.8
احتمال الطفرة	عدد الحلول*0.01

ثانياً: مفاهيم الخوارزمية الجينية:

1- **الفرد Individual** : الفرد هو حل مفرد و يتم تشفير هذا الحل ب حد طرق التشفير، فعند استخدام التشفير الثنائي نعبر عن كل فرد للمسألة المعطاة بسلسلة من الأرقام الثنائية، يؤدي جمع هذ السالسل مع بعضها إلى تشكيل الصبغي، كل صبغي يمكن تقسيمه إلى الجينات (Genes) المكونة له و التي تعطي الفرد (الحل) سمة محددة، و بالتالي فان كل صبغي يتألف من مجموعة من الجينات genes كل منها يشكل معامل من معاملات التحكم، والصبغي يحوي معلومات عن الحل الذي يمثل بطريقتة ما وبالتالي فكل صبغي يمثل حل، الشكل (4-8) يوضح ذلك.

Chromosome								
1	0	0	1	0	1	1	1	1

الشكل (4-8) تمثيل الصبغي (الحل)

2- **المجتمع Population**: هو مجموعة من الأفراد وما يهم في الخوارزمية الجينية:

أ- مجتمع الجيل الأول ب- حجم المجتمع

Population	Chromosome 1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
	Chromosome 2	1	0	0	1	0	1	1	0	1
	Chromosome 3	1	0	0	1	0	1	0	1	1
	Chromosome 4	1	1	0	1	0	1	0	1	0

الشكل (4-9) مجتمع مكون من أربعة أفراد

يعتمد حجم المجتمع على حسب المشكلة، حجم المجتمع الكبير أكثر فائدة إلا أنه يتطلب حسابات وذاكرة و وقت أكبر، وذلك تبعاً لظروف المشكلة المدروسة وتطور المعالج المستخدم في الحساب.

3- **اللياقة (الملائمة) Fitness** : تقيس جودة الحل وبالتالي فرصته بالنجاة و الانتقال إلى الجيل التالي، وال تعبر اللياقة عن الصبغي (الحل) كم هو جيد بل كم يقترب الصبغي من الحل الأمثل، و لحساب لياقة الفرد يجب فك تشفير أولاً.

4- **التشفير (الترميز) Encoding**: هي عملية تمثيل مورثات الصبغي بالبتات أو الأرقام أو المصفوفات أو أي عناصر آخر لتمكين تقنية الخوارزمية الجيني من العمل عليها.

طرائق التشفير Encoding types : يتم ترميز الطول (الصبغيات) بسلسلة من الخانات التي تدعى الجينات (genes) في كل خانة يوجد رقم أو محرف يمثل قيم معينة أو معاملات لحل المسألة، وعادة ترمز الصبغيات كسلسلة من الأرقام (الثنائية - الحقيقية - الصحيحة - الثمانية - الست عشرية):

- **التثنائي التشفير Binary Encoding:** حيث يمثل الحل بسلسلة من البتات، التي تأخذ القيم (واحد أو صفر) و يعبر كل بت من السلسلة عن خاصية من الحل الشكل (4-10) ويمكن لسلسلة البتات (الجين) أن تمثل رقم صحيح أو عدد حقيقي، لكن هنالك الكثير من المسائل ال يمكن استخدام هذه التقنية في تشفيرها فيتم اللجوء إلى طرائق أخرى.

Chromosome 1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
Chromosome 2	1	0	0	1	0	1	1	0	1

الشكل (4-10) التشفير التثنائي

- **التشفير الثماني Octal Encoding:** كما هو موضح بالشكل (4-11).

Chromosome 1	03467216
Chromosome 2	15723314

الشكل (4-11) التشفير الثماني

- **التشفير الست عشري Hexadecimal Encoding :** كما هو موضح بالشكل (4-12).

Chromosome 1	9CE7
Chromosome 2	3DBA

الشكل (4-12) التشفير الست عشري

- **التشفير باستخدام الأحرف أو المحارف:** تعبر عن اسم ما مثل CNLD أو DNLC للدالة على مدن مثل دمشق-القدس . أكثر الطرائق شيوعا والرياضية هي استخدام الترميز التثنائي للحلول، بحيث في حل المسائل الهندسية ويمثل حاسوبيا بمجموعة من الواحدات و الأصفار و تتبع شهرته يتم تمثيل كل حل من الحلول بصبغي من كونه أول أسلوب تم استخدامه في ترميز الحلول في الخوارزمية الجينية.

ثالثاً: شرط توقف البحث:

إن مقياس التوقف في الخوارزمية الجينية يحدد ما إذا كانت الخوارزمية الجينية ستستمر في البحث أم ستتوقف؟ و يفحص مقياس التوقف للخوارزمية الجينية بعد كل جيل لنر إذا ما كانت الخوارزمية ستتوقف أم لا؟ وهنالك عدة مقاييس لتوقف الخوارزمية الجينية تختلف بحسب المسألة المراد حلها ومن أهم المعايير المستخدمة:

- 1- الوصول إلى الحل الأفضل.
- 2- الوصول إلى عدد الأجيال المطلوب.
- 3- الوصول إلى قيمة معينة مثل حساب (الزمن/الكلفة).
- 4- الوصول إلى القيمة المثلى المحلية (Local optimum).
- 5- انتهاء وقت البحث.
- 6- التخمين.

✧ تمتاز الخوارزمية الجينية بسمتين أساسيتين:

- 1- العشوائية: هي القاعدة الأساسية في الخوارزمية الجينية، حيث أن توليد الجيل الأول و كلاً من عمليتي العبور والطفرة تتم بطرق عشوائية.
- 2- فضاء البحث: تعتمد الخوارزمية الجينية على المجتمع الأولي أو ما يسمى فضاء البحث (مجموعة الحلول)، والذي يحتف عند عملية إعادة الإنتاج وتشكيل مجتمع جديد بالحلول التي تنتج أفضل الصفات، ومن ثم تحسن هذ الصفات بشكل مطرد عن طريق خلق حلول جديدة، و هكذا حتى الوصول إلى الحل الأمثل كما أن هذا المجتمع يخضع لعملية التصنيف عند إعطاء كل فرد في المجتمع قيمة معينة (قيمة اللياقة) حسب التابع الهدف وتابع اللياقة.

لتوضيح تنفيذ خطوات الخوارزمية الجينية سنشرح المثال التالي:

ليكن لدينا التابع التالي: $f(x) = x^2 + 3x + 5$

حيث $0 \leq x \leq 31$

المطلوب هو إيجاد أعظم قيمة لـ x تحقق التابع المفروض باستخدام الخوارزمية الجينية.

يجب تمثيل المشكلة بترميز معين يسهل التعامل معها وإجراء العمليات المختلفة المرتبطة بالخوارزمية الجينية على كل جيل وأكثر الطرق استخداماً الترميز الثنائي وبما أن أعلى قيمة لـ x هي 31 وبالتالي عدد البتات 5

ولإعطاء فكرة عن كيفية تمثيل الأعداد النظام العشري بنظام العد الثنائي، نعلم أن نظام العد الثنائي يتألف من عنصرين فقط هما (0 و 1)، فمثلاً العدد (25) يمثل بنظام العد الثنائي بخمس بتات بالشكل (10010) ويمكن توضيح كيف تم الحصول على التمثيل بالنظام العد الثنائي وفق الآتي:

12=2/25 والباقي 1، ثم 6=2/12، والباقي 0، ثم 3=2/6، والباقي 0، ثم 1=2/3، والباقي 1 ثم 0=2/1 والباقي 1، فيكون تمثيل العدد 25 في النظام الثنائي ب 11001، وهكذا يمكن أن نحصل على تمثيل العدد 0 ب (00000) والعدد 31 ب (11111).

سنقوم الآن باستخدام الخوارزمية الجينية لحل المسألة المطلوبة وسنبين كيف يتم إجراء عمليات الاختيار والعبور و الطفرة، وللبدء بذلك سوف نختار مجتمع أولي مكون من أربعة أفراد (حلول).

الخطوة الأولى: تتمثل بالاختيار العشوائي للجيل الأولي مكون من أربعة حلول، في هذه الحالة التابع الهدف هو تابع هدف أعظمي لذلك تم حساب قيم اللياقة لهذه الحلول وذلك بتعويض قيمة كل حل في التابع الهدف المفروض أن المطلوب هو إيجاد أعظم قيمة ل x تحقق التابع المفروض، ثم تم حساب قيمة احتمال الانتقاء وفق العلاقة: $P_s(x) = \frac{F_{fit}(x)}{\sum_{i=1}^n F_{fit}(x)}$ ، حيث i هو رقم الحل و n هو عدد الحلول.

وتم حساب الحساء المتوقع وفق العلاقة:

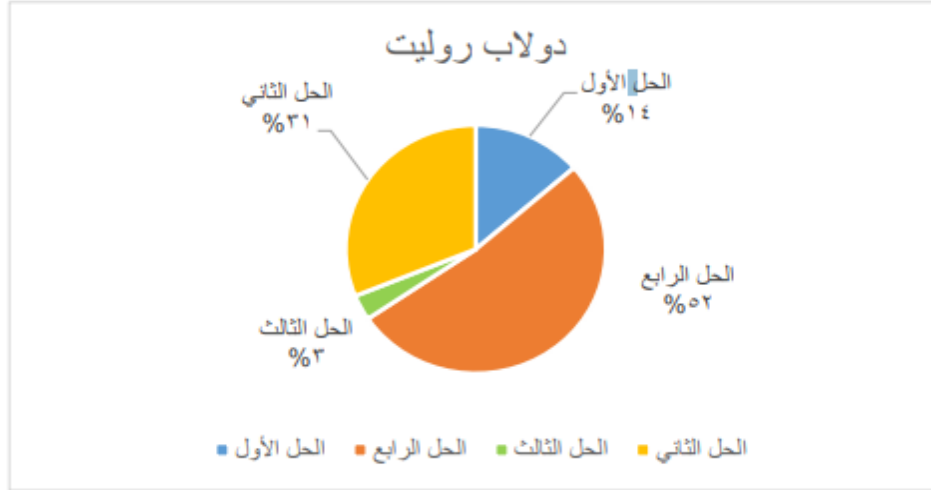
$$Expected\ count = \frac{F_{fit}(x)}{Avg[\frac{F_{fit}(x)}{\sum_{i=1}^n F_{fit}(x)}]}$$

الجدول (4-2) يوضح ذلك.

الجدول (4-3) الجيل الأولي من الحلول

رقم الحل	المجتمع الأولي تم توليده عشوائياً	قيمة x	$f(x)$	$\frac{F_{fit}(x)}{\sum_{i=1}^n F_{fit}(x)}$	الإحصاء المتوقع	الإحصاء الفعلي (دولاب الروليت)
1	01100	12	185	0.136	0.545	1
2	11001	25	705	0.519	2.076	2
3	00101	5	45	0.033	0.132	0
4	10011	19	423	0.311	1.245	1
SUM			1358	1	4	
AVA			339.5	0.25	1	
MAX			705	0.519	2.076	

من الجدول السابق: تم اختيار أربعة حلول بشكل عشوائي لتشكيل الجيل الأولي ثم تم اختيار أربعة حلول لتشكيل الجيل الجديد بطريقة تدوير دولاب روليت، وجدنا بناءً على الإحصاء الفعلي أن الحل (الكروموسوم) الأول والرابع يشاركان مرة واحدة في الجيل الجديد، والحل الثاني يشارك مرتين فيما يستبعد الحل الثالث، بمقارنة العدد الفعلي من النسخ مع العدد المتوقع نستخلص بأن الحلول (الكروموسومات) ذات التقييم الأعلى تأخذ نسخاً أكثر في الجيل التالي، وحتى الحلول ذات التقييم المتوسط تبقى، بينما تستبعد الحلول ذات التقييم السيئ.



الشكل (4-13) دولاب روليت للجيل الأولي

وبناء عليه يكون الحلول المؤهلة للاستمرار للجيل الثاني التي سيطبق عليها عملية العبور موضحة بالجدول التالي (4-3):

الجدول (4-4) عملية العبور على الحلول المؤهلة للاستمرار للجيل الثاني

رقم الحل	الحلول المؤهلة للاستمرار للجيل الثاني	اختيار الحلول التي تطبق عليها العبور	اختيار نقطة العبور بشكل عشوائي	الحلول بعد العبور	قيمة x	$f(x)$
1	01100	1-2	3	01101	13	213
2	11001	1-2	3	11000	24	653
3	11001	3-4	2	11011	27	815
4	10011	3-4	2	10001	17	345
SUM						2026
AVA						506.5
MAX						815

الخطوة الثانية: من الجدول السابق تم الاختيار العشوائي لموقع العبور واختيار موقع نقطة القطع (في هذا المثال تم اختيار طريقة القطع في نقطة واحدة) من الجدول (4-3) نجد أن هناك فرصة عشوائية فرضت تزاوج بين الفردين (1،2)، وذلك في موقع القطع بعد البت الثالث، حيث الفردين (01100) و (11001) أعطيا بعد العبور فردين جديدين، هما (01101) و (11000)، وكذلك الفردين الآخرين (4،3) تم القطع بعد البت الثاني، الفردين هما (11001) و (10011)، أعطيا بعد العبور فردين جديدين هما (11011) و (10001)، نلاحظ أن متوسط تقييم أفراد المجتمع تحسن من 339.5 إلى 506.5 كذلك القيمة العظمى ل $f(x)$ قد زادت من 705 إلى 815 خلال الخطوة ذاتها.

الخطوة الثالثة: العملية الأخيرة هي الطفرة Mutation تتجزئ على مبدأ استبدال بت مكان بت آخر يبين الجدول (4-4) آلية حدوث عملية الطفرة.

الجدول (4-5) عملية الطفرة على الحلول المؤهلة للاستمرار للجيل الثاني

رقم الحل	الحلول بعد العبور	اختيار نقطة الطفرة بشكل عشوائي	الحلول بعد الطفرة (الجيل الثاني)	قيمة x	$f(x)$
1	01101	1	11101	29	933
2	11000	-----	11000	24	653
3	11011	-----	11011	27	815
4	10001	3	10101	21	509
SUM					2910
AVA					727.5
MAX					933

وبذلك تكون نتيجة العمليات المختلفة (الاختيار - العبور - الطفرة) التي تمت على حلول الجيل الأولي لتشكيل الجيل الثاني قد حسن متوسط تقييم أفراد الجيل من 339.5 إلى 757.5 كذلك القيمة العظمى ل $f(x)$ قد زادت من 705 إلى 933 خلال الخطوة ذاتها.

و بإعادة عملية الاختيار و العبور والطفرة على حلول الجيل الثاني نجد:

1- الاختيار: يتم حساب احتمال الاختيار والإحصاء المتوقع والفعلي وفق الجدول (4-5).

الجدول (4-6) الجيل الثاني من الحلول

رقم الحل	المجتمع الثاني	قيمة x	$f(x)$	$\frac{F_{fit}(x)}{\sum_{i=1}^n F_{fit}(x)}$	الإحصاء المتوقع	الإحصاء الفعلي (دولاب الروليت)
1	11101	29	933	0.320	1.282	2
2	11000	24	653	0.224	0.897	1
3	11011	27	815	0.280	1.120	1
4	10101	21	509	0.175	0.699	0
SUM			2910	1	4	4
AVA			727.5	0.25	1	1
MAX			933	0.32	1.282	2

2- العبور:

الجدول (4-7) عملية العبور على الحلول المؤهلة للاستمرار للجيل الثالث

رقم الحل	الحلول المؤهلة للاستمرار للجيل الثالث	اختيار الحلول التي تطبق عليها العبور	اختيار نقطة العبور بشكل عشوائي	الحلول بعد العبور	قيمة x	$f(x)$
1	11101	----	----	11101	29	933
2	11101	----	----	11101	29	933
3	11000	3-4	3	11011	29	815
4	11011	3-4	3	11000	29	653
SUM						3334
AVA						833.5
MAX						933

3- الطفرة:

الجدول (4-8) عملية الطفرة على الحلول المؤهلة للاستمرار للجيل الثالث

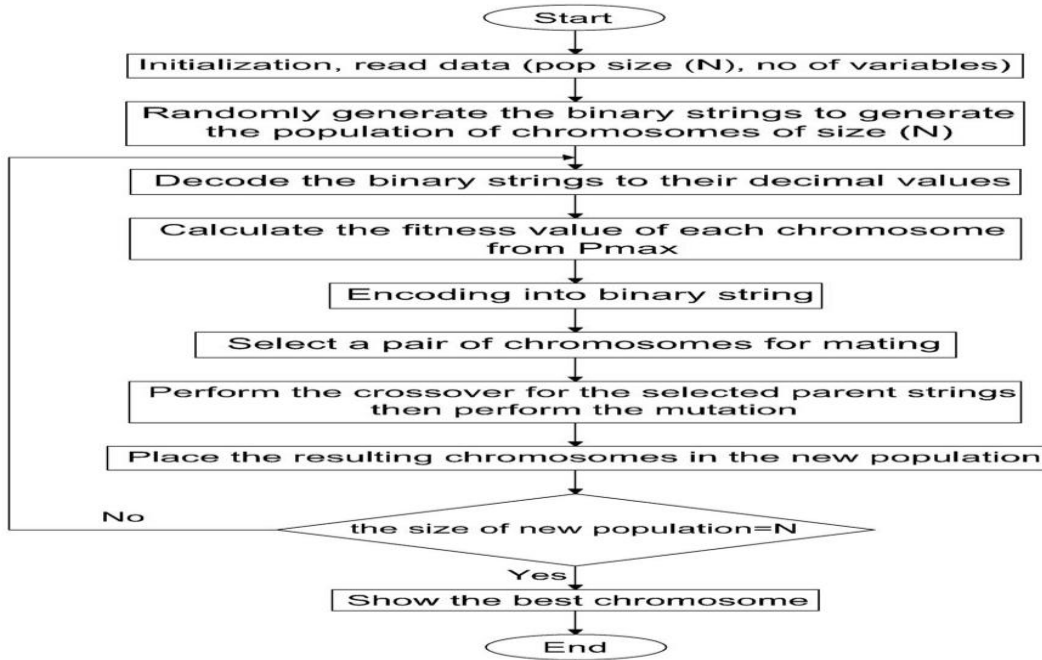
رقم الحل	الحلول بعد العبور	اختيار نقطة لطفرة بشكل عشوائي	الحلول بعد الطفرة	قيمة x	$f(x)$
1	11101	4	11111	31	1059
2	11101	-----	11101	29	933
3	11011	-----	11011	27	815
4	11000	3	11010	26	759
SUM					3566
AVA					891.5
MAX					1059

وبذلك تكون نتيجة العمليات المختلفة (الاختيار - العبور - الطفرة) التي تمت على حلول الجيل الثاني لتشكيل الجيل الثالث قد حسن متوسط تقييم أفراد الجيل تحسن من 757.5 إلى 891.5 كذلك القيمة العظمى ل $f(x)$ قد زادت من 933 إلى 1059 خلال الخطوة ذاتها، وتم الحصول على الجيل الأمثل الذي يحوي الحل (الفرد) الأمثل لقيمة المتغير $x = 31$ والذي يعطي أعلى قيمة للتابع المفروض ضمن المجال المحدد وهو المطلوب.

4-9- استخدام الخوارزمية الجينية في ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية:

- يمكن توضيح استخدام الخوارزمية الجينية في ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية كما يلي:
- تهيئة قيم بارامترات تقنية الحل الأمثل الابتدائية مثل عدد الحلول في الجيل الواحد والعدد الأعظمي للأجيال، بالإضافة إلى قيم بارامترات الخوارزمية الجينية مثل شرط التوقف ونوع التقاطع مع نسبة حدوثه ونوع الطفرة مع نسبة حدوثها وقيم محددات العنفة الريحية.
 - تشكيل جيل ابتدائي من الحلول الصحيحة بشكل عشوائي بحيث يأخذ بالحسبان المتغيرات التي يجب تحديد قيمها الأمثل ضمن المجالات المسموحة لهذه المتغيرات.
 - تقييم كل حل من مجموعة الحلول الابتدائية وفقاً لتابع الهدف المحدد (استطاعة العنفة الريحية).
 - تشكيل جيل جديد من الحلول اعتماداً على العمليات الجينية للخوارزمية الجينية (الاختيار والتقاطع والطفرة)
 - تقييم جميع حلول الجيل الجديد وفقاً لتابع الهدف المحدد.
 - إذا تحقق شرط التوقف يجب إيقاف البرنامج وإخراج أفضل حل وإلا يتم العودة إلى الخطوة (4) من جديد حتى نصل إلى عدد التكرارات الأعظمي.

4-9-1- المخطط التدفقي للخوارزمية الجينية:

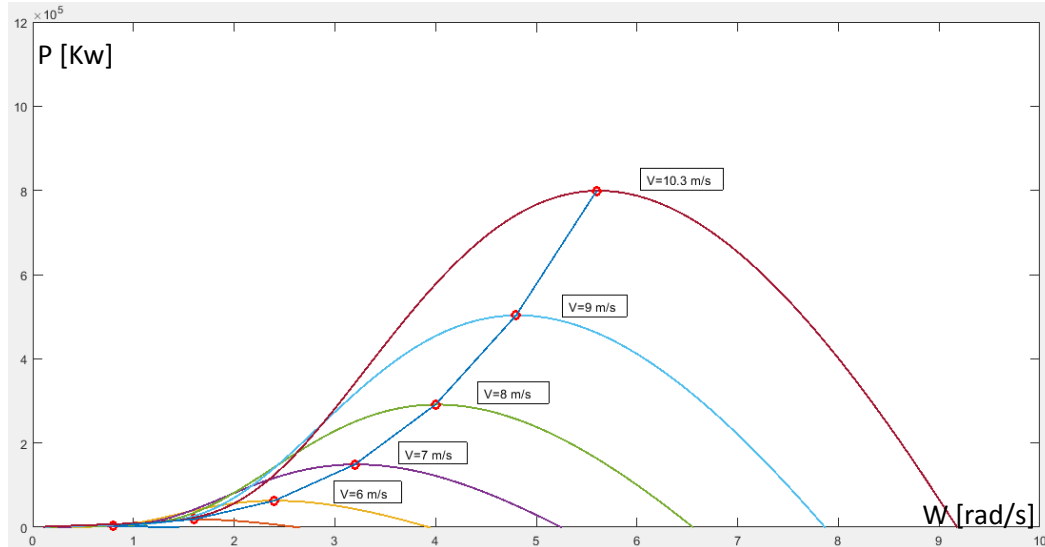


الشكل (4-14) المخطط التدفقي للخوارزمية الجينية

4-9-2- نتائج تنفيذ الخوارزمية الجينية على العنفة المدروسة:

تم تنفيذ برنامج الخوارزمية الجينية على بارامترات العنفة المدروسة، حيث تم اعتبار سرعة الرياح المتغيرة هو المتغير في تابع الهدف والممثل بتابع الاستطاعة للعنفة الريحية.

يبين الشكل (4-15) نتائج تنفيذ الخوارزمية الجينية على العنفة المدروسة.

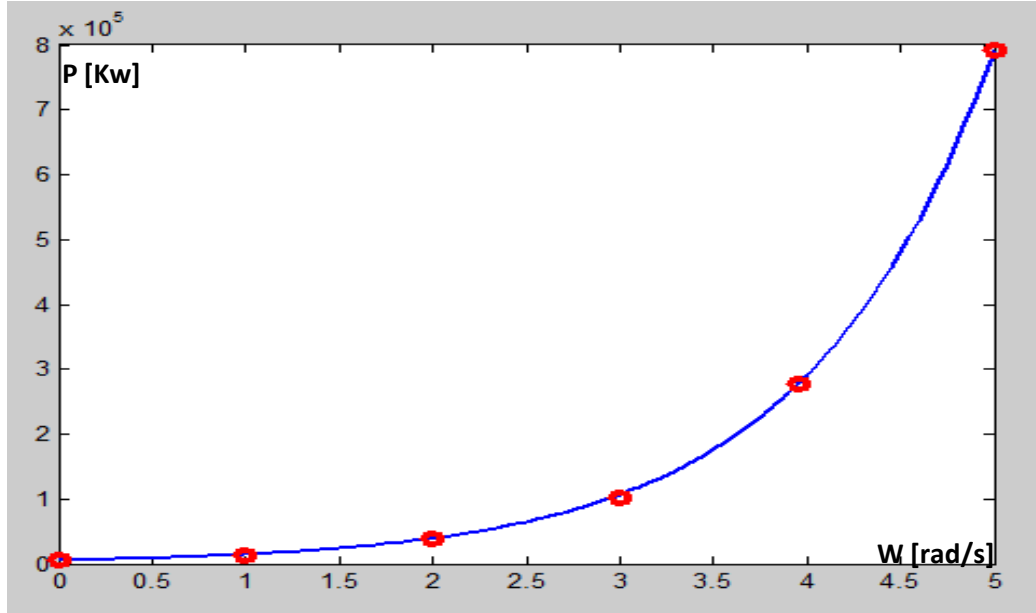


الشكل (4-15) نتيجة تنفيذ الخوارزمية الجينية على العنفة المدروسة

نلاحظ من الشكل (4-15) ما يلي:

- تمت ملاحقة نقاط الاستطاعة الأعظمية وذلك عند سرعات رياح متغيرة.
- حصلنا على الاستطاعة العظمى للعنفة [Kw] 800 عند السرعة الاسمية للرياح [m/s] 10.3، أي استطعنا الاستفادة من كامل استطاعة العنفة عند هذه السرعة.
- تنخفض الاستطاعة المولدة من العنفة بانخفاض سرعة الرياح، مثلاً عند سرعة رياح [m/s] 9 حصلنا على قيمة استطاعة عظمى من العنفة تساوي [Kw] 500، أي أنه عند هذه السرعة للرياح لانستطيع الاستفادة من كامل استطاعة العنفة وبالتالي يمكننا تغذية حمل بقدر هذه الاستطاعة فقط.

يبين الشكل (4-16) سلوك تابع الهدف والمتمثل باستطاعة العنفة الريحية



الشكل (4-16) سلوك تابع الهدف للعنفة المدروسة

نلاحظ من الشكل كيفية ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية عند تغير سرعة الرياح.

4-9-3- تنفيذ الخوارزمية الجينية على عنفة التجريبية:

للتأكد من فعالية برنامج الخوارزمية الجينية الذي قمنا بتنفيذه وإمكانية تطبيق هذا البرنامج على عنفات ريفية أخرى غير المختارة للدراسة في بحثنا هذا، قمنا بتنفيذ البرنامج على عنفة تجريبية أخرى ذات بارامترات مختلفة عن العنفة المدروسة.

يوضح الجدول (4-8) بارامترات العنفة التجريبية.

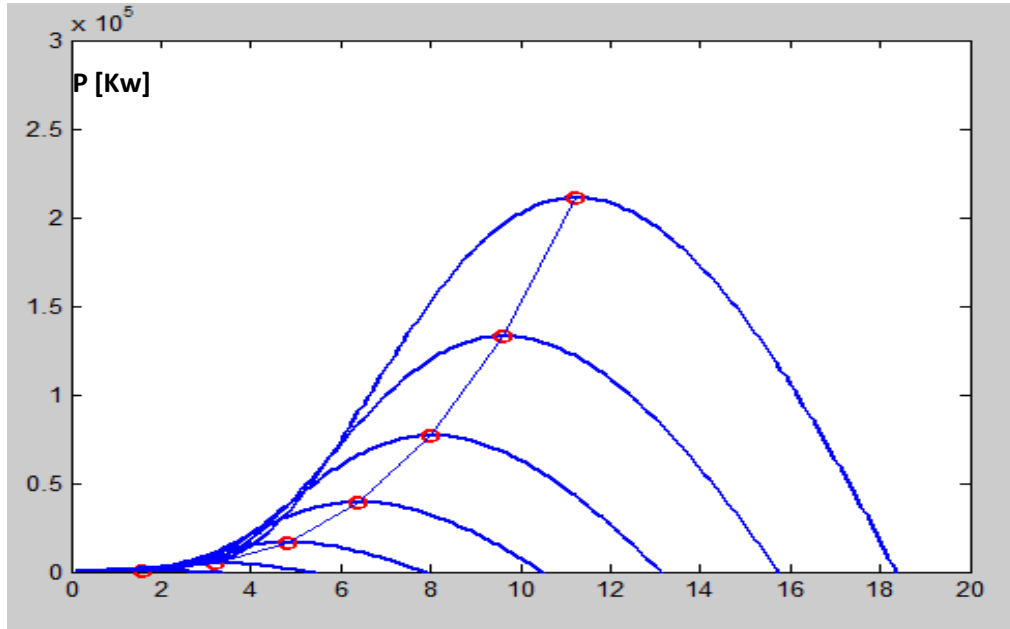
الجدول (4-9) بارامترات العنفة التجريبية

المحددات	القيمة	الواحدة
الاستطاعة الاسمية	220	Kw
السرعة الاسمية	12	m/s
كثافة الهواء	1.08	Kg/m ³
عدد الشفرات	3	

وحصلنا من خلال تنفيذ برنامج الخوارزمية الجينية على العنفة التجريبية على نتائج مماثلة لتلك التي حصلنا عليها خلال تطبيق البرنامج على العنفة المدروسة ألا وهي:

- تمت ملاحقة نقاط الاستطاعة العظمى في العنفة التجريبية
- حصلنا على أعظم استطاعة ممكنة من العنفة التجريبية وهي [Kw] 220 عند السرعة الاسمية للرياح 12[m/s].

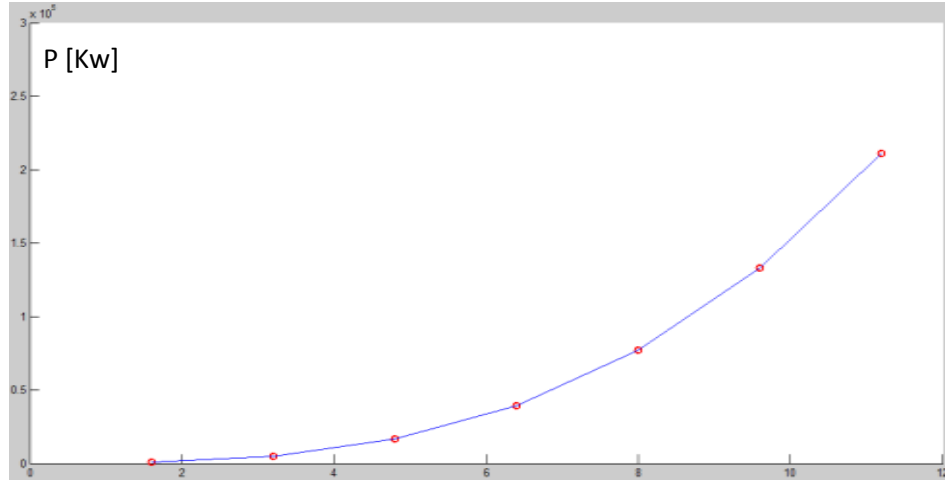
- انخفضت الاستطاعة المولدة من العنفة عند انخفاض سرعة الرياح .
 - تم الحصول على أعظم استطاعة عند سرعات الرياح المتغيرة.
- يبين الشكل (4-17) نتائج تنفيذ الخوارزمية الجينية على العنفة التجريبية.



الشكل (4-17) نتيجة تنفيذ الخوارزمية الجينية على العنفة التجريبية

نلاحظ من الشكل أنه تمت ملاحقة نقاط للاستطاعة الأعظمية وذلك عند سرعات رياح متغيرة.

يبين الشكل (18-4) سلوك تابع الهدف والمتشمل باستطاعة العنفة الريحية.



الشكل (18-4) سلوك تابع الهدف للعنفة التجريبية

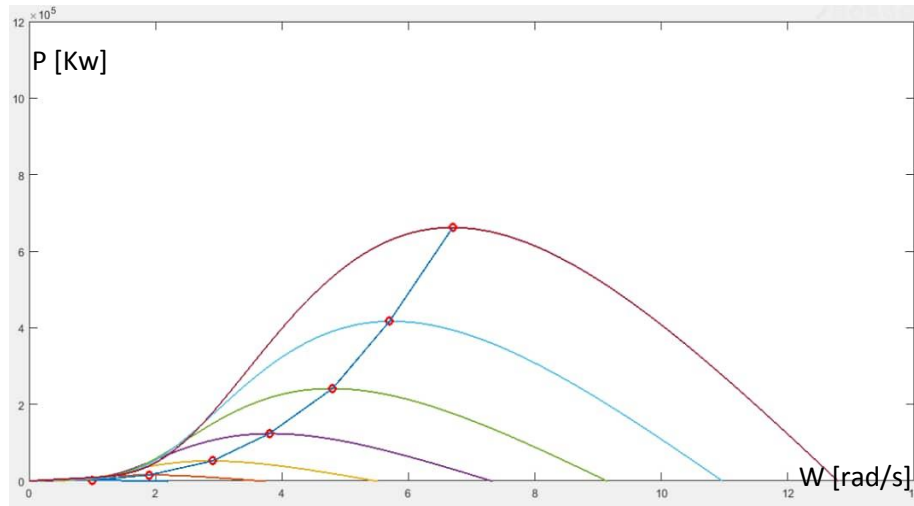
نلاحظ من الشكل كيفية ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية عند تغير سرعة الرياح.

4-9-4- تنفيذ الخوارزمية عند زوايا انحراف لشفرات العنفة $\beta \neq 0$:

قمنا بدراسة تأثير انحراف شفرات العنفة حيث تم اعتبار زوايا الانحراف للشفرات مساوية للصفر، قمنا بتغيير قيمة زاوية انحراف شفرات العنفة من خلال برنامج الخوارزمية الجينية وحصلنا على النتائج التالية:

◆ يبين الشكل (19-4) ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية مع زاوية انحراف تساوي ($B=2$).

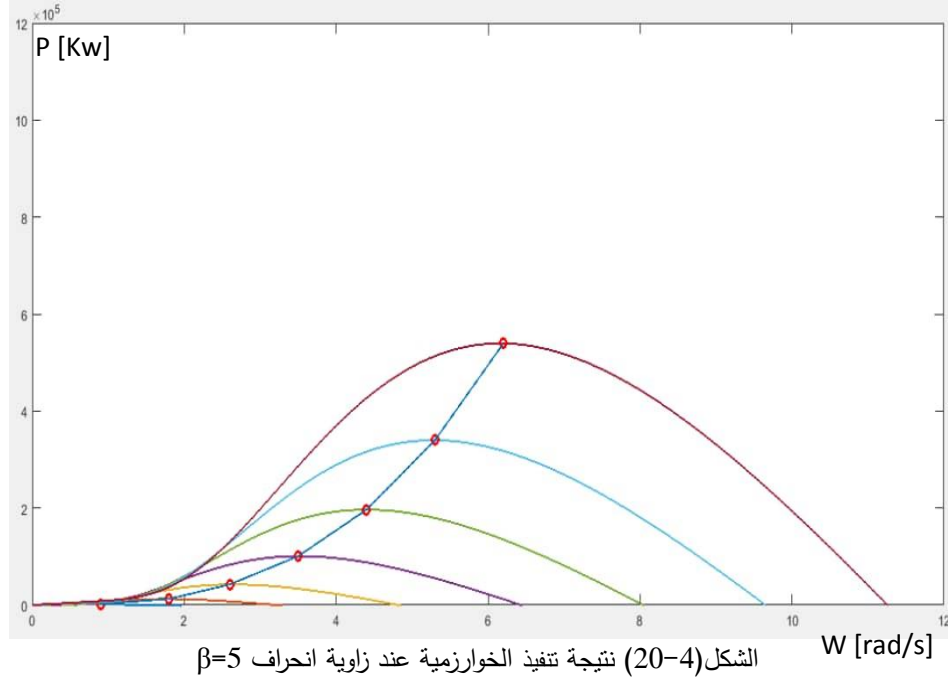
نلاحظ من الشكل انخفاض قيمة الاستطاعة المولدة من العنفة وكذلك زيادة انحراف منحنى الطاقة، أي عند قيمة $B=2$ تتغير سرعة دوران العنفة للحصول على استطاعة أقل من الاستطاعة المولدة عند السرعة الاسمية للرياح $10.3(m/s)$.



الشكل (19-4) نتيجة تنفيذ الخوارزمية عند زاوية انحراف $\beta=2$

◆ يبين الشكل (4-20) ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية مع زاوية انحراف تساوي ($\beta=5$).

نلاحظ من الشكل انخفاض قيمة الاستطاعة المولدة من العنف وكذلك زيادة انحراف منحنى الطاقة، أي عند قيمة $B=5$ تتغير سرعة دوران العنف للحصول على استطاعة أقل من الاستطاعة المولدة عند السرعة الاسمية للرياح $10.3(m/s)$.



✓ نلاحظ مما سبق أنه عند العمل عند زوايا مختلفة لانحراف لشفرات العنف $\beta \neq 0$ نلاحظ انخفاض الاستطاعة المستخلصة من العنف الريحية عند زيادة زاوية انحراف الشفرات، بالإضافة لزيادة انحراف منحنى الطاقة.

10-4-دراسة تأثير زاوية انحراف شفرات العنف الريحية على الاستطاعة العظمى المولدة:

بعد الحصول على نقاط الاستطاعة العظمى قمنا بتغيير زاوية انحراف ريش العنف ودرسنا تأثير قيمة هذه الزاوية على الاستطاعة العظمى المولدة من العنف الريحية عن طريق معامل الارتباط الخطي لبيرسون.

10-4-1-معامل الارتباط لبيرسون (Pearson Linear Correlation coefficient):

معامل الارتباط الخطي لبيرسون ويرمز له ب R وهو عبارة عن مقياس لقوة العلاقة الخطية بين متغيرين، وهو يعكس مدى تماسك التأثير الناتج عن التغير في قيم المتغير X على التغير في قيم المتغير Y وقيمة معامل الارتباط الخطي تكون بين -1 و $+1$ فقيمتها الموجبة دلالة على أن العلاقة الخطية بين X و Y طردية أي تزايد قيم الأول يؤدي

لتزايد قيم الثاني (إذا كانت قيمة R قريبة من الواحد: فالعلاقة قوية، وإذا قريبة من 1/2 فتكون متوسطة، وإذا كانت قريبة من الصفر فهي ضعيفة).

أما إذا كانت قيمته سالبة $R < 0$ فإن العلاقة بين المتغيرين تكون سالبة أو عكسية.

تعطى صيغة معامل ارتباط بيرسون بالعلاقة التالية:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}$$

حيث $\bar{x}, \bar{y}$ متوسطات المشاهدات.

بعد الحصول على منحنيات الاستطاعة الميكانيكية وتحديد قيمة الاستطاعة العظمى عند كل سرعة للرياح قمنا بدراسة الارتباط بين الاستطاعة العظمى وزاوية انحراف شفرات العنفة حيث وضعنا النتائج في الجدول (3-5) والذي يضم في العمود الأول قيم مختلفة لزاوية انحراف شفرات العنفة β وقد اخترنا لها خمس قيم عشوائية، بينما تحتوي الأعمدة الباقية على قيم الاستطاعة العظمى $P_{v[m/s]}$ عند كل سرعة للرياح والمقدرة بالواط. كما وضعنا قيم معامل الارتباط R لكل عمود مع قيم β في السطر قبل الأخير بالإضافة إلى قيمة المعنوية الإحصائية **p-value**.

الجدول (10-4) جدول النتائج لدراسة الارتباط بين زاوية انحراف الشفرات والاستطاعة المولدة

β	$P_6 [m/s]$	$P_7 [m/s]$	$P_8 [m/s]$	$P_9 [m/s]$	$P_{10.3} [m/s]$
0	62906.7	149112.2	291234.9	503254.0	799148.7
2	52093.5	123500.2	241226.4	416813.4	661945.5
5	38305.1	90775.1	177309.2	306440.7	486578.7
12	18779.5	44515.7	86886.4	150235.5	238614.8
20	8482.1	20066.1	39228.4	67856.4	107680.7
معامل الارتباط R	-0.96872	-0.96874	-0.96874	-0.96874	-0.96877
p-value	0.007	0.007	0.007	0.007	0.007

نلاحظ من الجدول السابق وجود ارتباط سالب (عكسي) بين زاوية انحراف شفرات العنفة β والاستطاعة العظمى $P_v [m/s]$ المقابلة لكل سرعة رياح، أي عندما تكون الشفرات ثابتة نحصل على أفضل مردود للاستطاعة المولدة. كما أن هذا الارتباط قوي لأن $R < -0.90$ في جميع الحالات بالإضافة إلى معنويته إحصائياً حيث $p\text{-value} < 0.05$.

➤ نتائج استخدام الخوارزمية الجينية:

1. حصلنا على أفضل قيم لبارامترات العنفة الريحية بأقل زمن ممكن.
2. العمل عند Cp, max و λ_{opt} , يزيد من فعالية ومردود النظام.
3. ملاحظة نقطة الاستطاعة الأعظمية بسرعة ودقة كبيرتين.
4. تعتبر الخوارزمية الجينية فعّالة ويمكن تطبيقها على أنظمة تحويل طاقة الرياح مختلفة من دون الحاجة لإجراء تعديلات كبيرة عليها.
5. زمن الوصول للاستقرار صغير وبالتالي نحصل على الاستقرار بأسرع وقت ممكن.
6. عند العمل عند زوايا مختلفة لانحراف لشفرات العنفة $\beta \neq 0$ نلاحظ انخفاض الاستطاعة المستخلصة من العنفة الريحية عند زيادة زاوية انحراف الشفرات، بالإضافة لزيادة انحراف منحنى الطاقة.
7. لاحظنا وجود ارتباط سالب (عكسي) بين زاوية انحراف شفرات العنفة β والاستطاعة العظمى $P_v[m/s]$ المقابلة لكل سرعة رياح، أي عندما تكون الشفرات ثابتة نحصل على أفضل مردود للاستطاعة المولدة. كما أن هذا الارتباط قوي لأن $R < -0.90$ في جميع الحالات بالإضافة إلى معنويته إحصائياً حيث $p\text{-value} < 0.05$.

الفصل الخامس

مقارنة النتائج مع الطرق التقليدية

5-1-1- مقدمة:

سيتم في هذا الفصل اختبار نموذج تحويل طاقة الرياح الذي قمنا بتصميمه مع متحكم تقليدي عند سرعات رياح مختلفة، ثم سنقوم بتصميم خوارزمية تقليدية لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى ومقارنة النتائج مع النتائج التي حصلنا عليها عند تطبيق الخوارزمية الجينية.

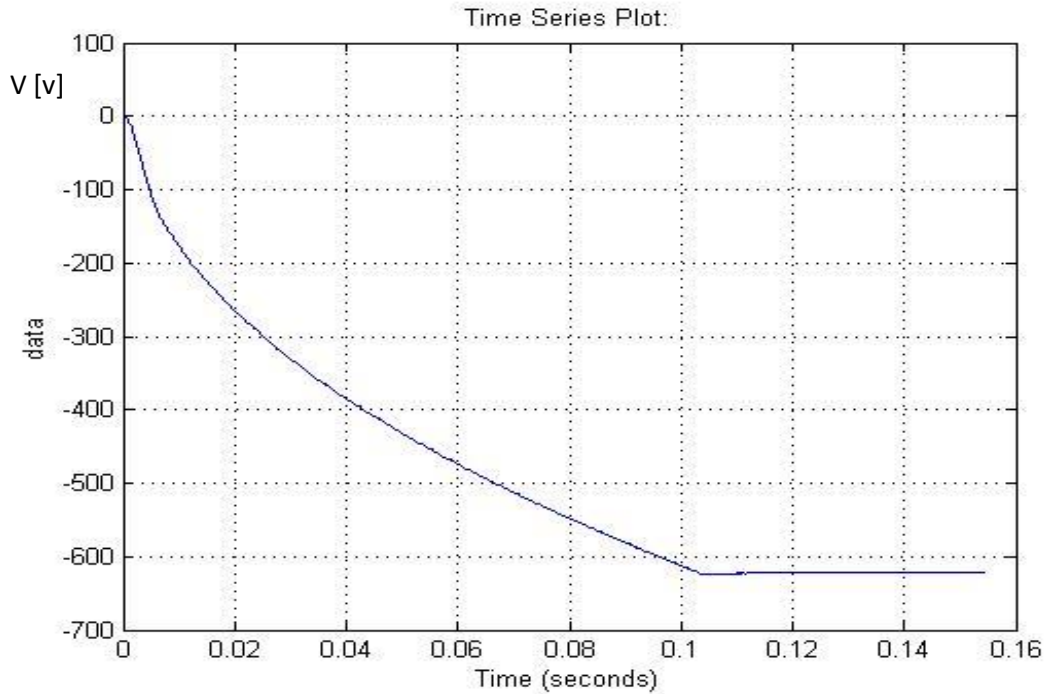
5-2- تشغيل النموذج مع متحكم تقليدي PI عند سرعات رياح مختلفة:

عند تشغيل النموذج في بيئة (MATLAB)، تبدأ العنفة بالدوران بسرعة متناسبة مع سرعة الرياح، فيدور المولد بنفس السرعة معطياً على خرجة جهوداً متناسبة في ترددها ومطالها مع سرعة الرياح.

5-1-2- تشغيل النظام المدروس عند سرعة رياح أقل من السرعة الاسمية ولتكن 5(m/s):

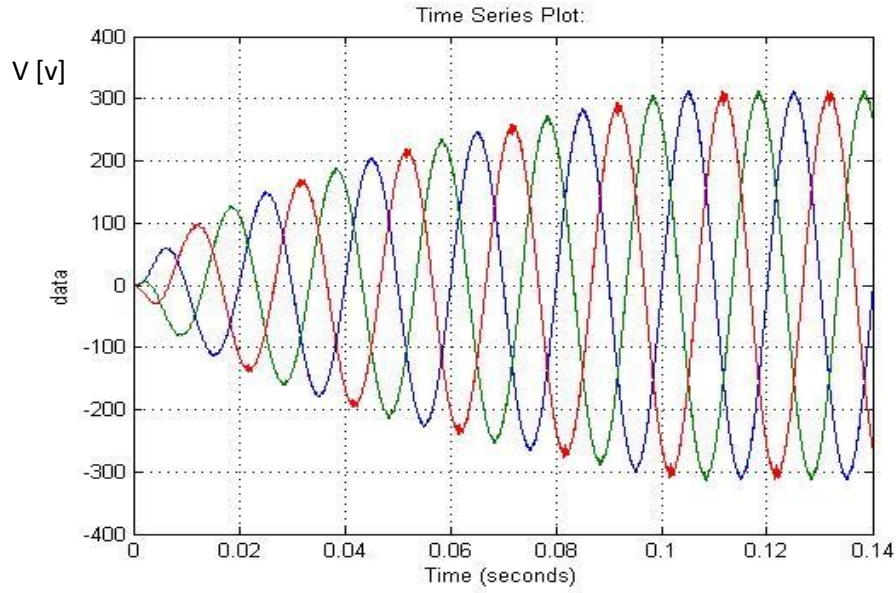
5-1-1-2- جهد المقطع والانفرتر عند سرعة رياح 5(m/s):

يبين الشكل (1-5) جهد المقطع عند سرعة رياح 5(m/s) ونلاحظ من الشكل: استقرار جهد الخرج للمقطع عند زمن وقدره 0.1(s) عند قيمة الجهد المرغوب وهي (-622) فولط.



الشكل (1-5) جهد المقطع عند سرعة رياح 5(m/s)

يبين الشكل (2-5) جهد الانفرتر عند سرعة رياح 5(m/s) ونلاحظ من الشكل:
استقرار جهد الخرج للانفرتر عند زمن وقدره 0.1(s) عند قيمة الجهد المرغوب وهي (311) فولت.

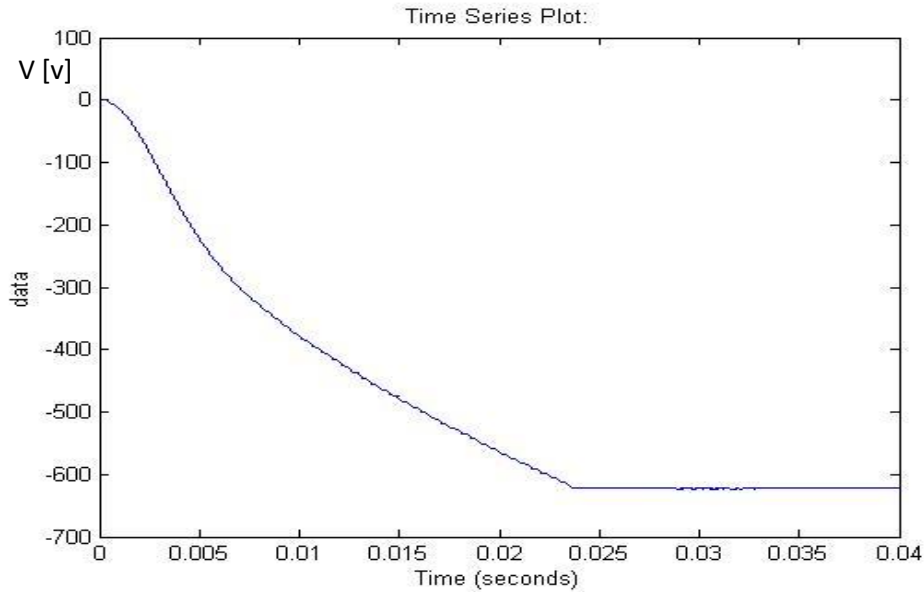


الشكل (2-5) جهد الانفرتر عند سرعة رياح 5(m/s)

2-2-5- تشغيل النظام المدروس عند السرعة الاسمية 10.3(m/s):

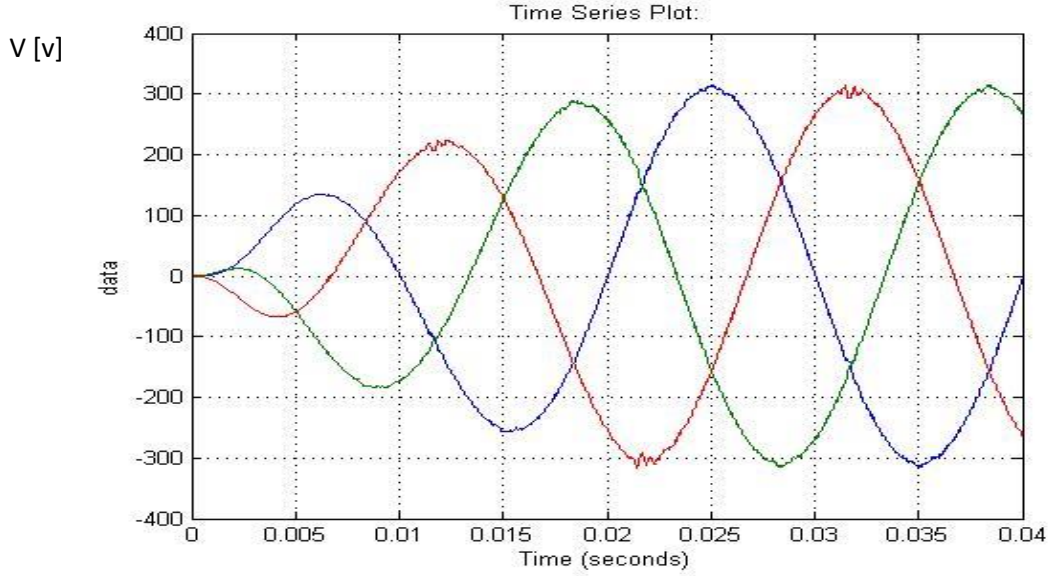
5-2-2-1- جهد المقطع والانفرتر عند سرعة رياح 10.3(m/s):

يبين الشكل (3-5) جهد المقطع عند السرعة الاسمية 10.3(m/s) ونلاحظ من الشكل:
استقرار جهد الخرج للمقطع عند زمن أقل من 0.025(s) عند قيمة الجهد المرغوب وهي (-622) فولت.



الشكل (3-5) جهد المقطع عند سرعة رياح 10.3(m/s)

يبين الشكل (4-5) جهد الانفرتر عند السرعة الاسمية 10.3(m/s) ونلاحظ من الشكل:
استقرار جهد الخرج للانفرتر عند زمن أقل 0.025(s) عند قيمة الجهد المرغوب وهي (311) فولط.

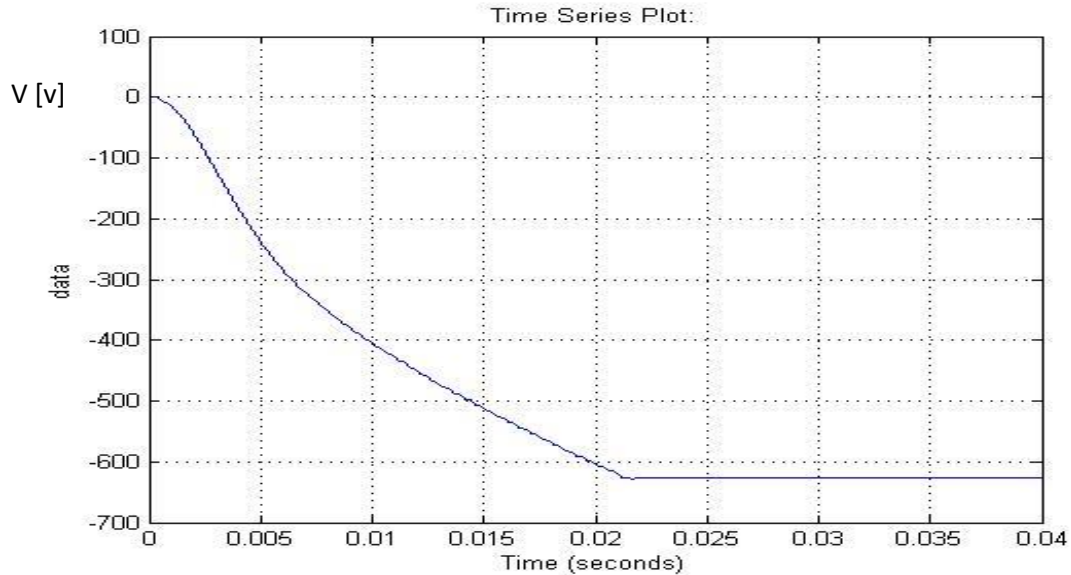


الشكل (4-5) جهد الانفرتر عند السرعة الاسمية 10.3(m/s)

5-2-3- تشغيل النظام المدروس عند سرعة رياح أكبر من السرعة الاسمية ولتكن 12(m/s):

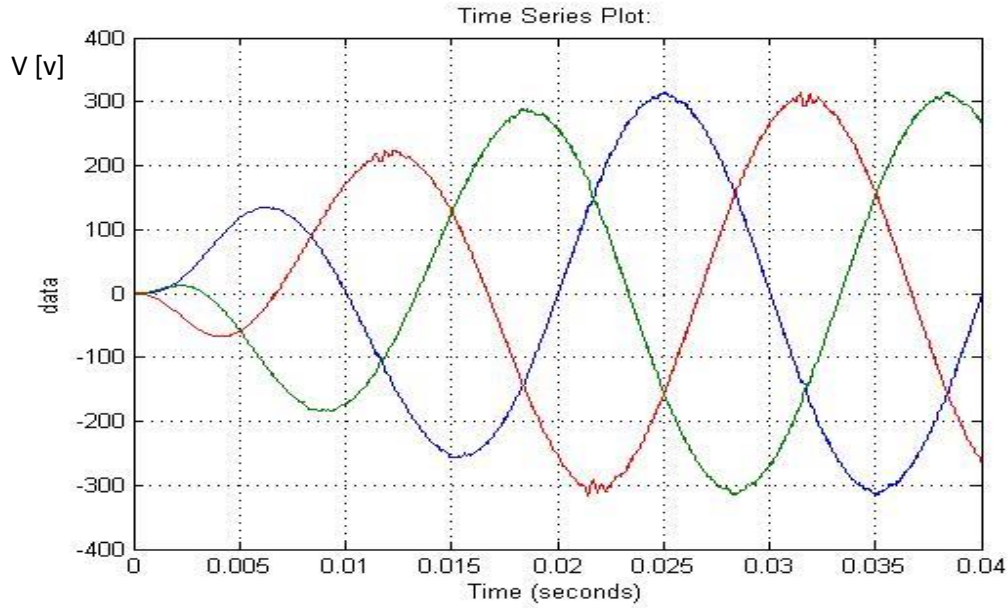
5-2-3-1- جهد المقطع والانفرتر عند سرعة رياح 12(m/s):

يبين الشكل (5-5) جهد المقطع عند سرعة رياح 12(m/s) ونلاحظ من الشكل استقرار جهد الخرج للمقطع عند زمن وقدره 0.025(s) عند قيمة الجهد المرغوب وهي (-622) فولط.



الشكل (5-5) جهد المقطع عند سرعة رياح 12(m/s)

يبين الشكل (6-5) جهد الانفرتر عند سرعة رياح 12(m/s) ونلاحظ من الشكل استقرار جهد الخرج للانفرتر عند زمن وقدره 0.025(s) عند قيمة الجهد المرغوب وهي (311) فولط.

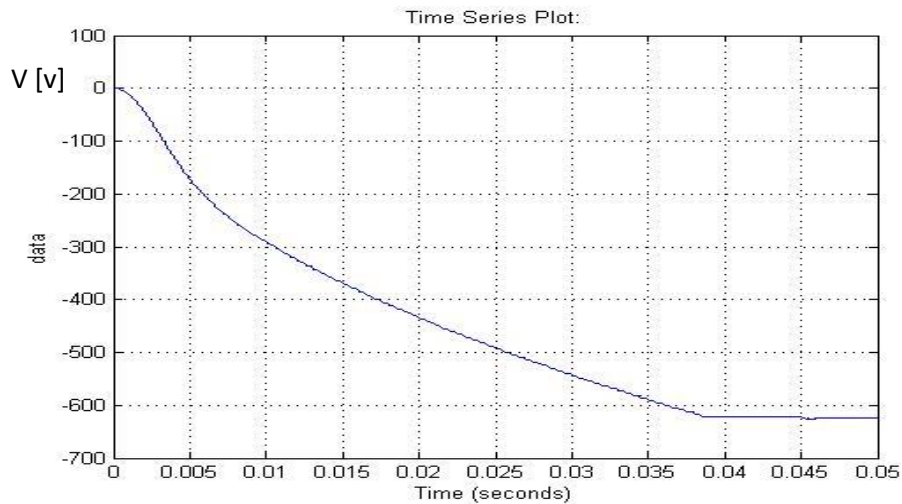


الشكل (6-5) جهد الانفرتر عند سرعة رياح 12(m/s)

4-2-5- تشغيل النظام المدروس عند سرعة رياح متغيرة باستمرار:

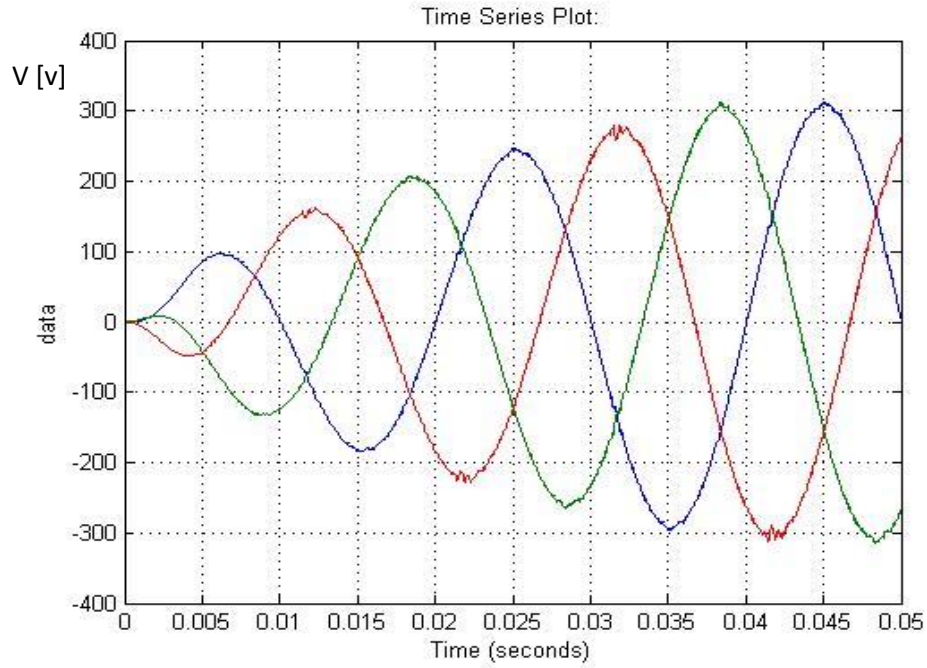
5-4-2-1- جهد المقطع والانفرتر عند سرعة رياح متغيرة:

يبين الشكل (7-5) جهد المقطع عند سرعة رياح متغيرة ونلاحظ من الشكل استقرار جهد الخرج للمقطع عند زمن وقدره 0.04(s) عند قيمة الجهد المرغوب وهي (-622) فولط.



الشكل (7-5) جهد الانفرتر عند سرعة رياح متغيرة

يبين الشكل (8-5) جهد الانفرتر عند سرعة رياح متغيرة ونلاحظ من الشكل استقرار جهد الخرج للانفرتر عند زمن وقدره 40.0 (s) عند قيمة الجهد المرغوب وهي (311) فولط.



الشكل (8-5) جهد الانفرتر عند سرعة رياح متغيرة

✓ نستنتج مما سبق استقرار خرج المقطع والانفرتر على القيمة المرجعية المرغوبة رغم تغير سرعة الرياح بشكل دائم خلال زمن قصير.

➤ نتائج اختبار النظام باستخدام المتحكم التقليدي PI:

-تتعلق ثوابت المتحكم (التناسبي والتكاملي) بالDuty Cycle للمقطع والذي يتعلق بدوره بجهد الدخل V_i حسب العلاقات التالية:

$Kp = 0.8 \times Tv$	قيمة الثابت التناسبي
$Ki = 0.4 \times Kv$	قيمة الثابت التكاملي
$Kv = \frac{D'}{D}$	قيمة الريح الحرج النهائية
$Tv = \frac{0.014}{D' \sqrt{1 + \frac{622}{D^2}}}$	قيمة الدور الحرج
$D = \frac{622}{622 + Vi}$	فترة توصيل المقطع
$D' = 1 - D$	فترة فصل المقطع

❖ بتغير سرعة الرياح يتغير جهد الدخل للمقطع والذي يؤدي بدوره إلى تغير الDuty Cycle وبالتالي تغير ثوابت المتحكم.

وبالتالي حصلنا من خلال استخدام المتحكم التقليدي PI على:

1. الحفاظ على خرج المقطع ثابت على القيمة المرجعية مع اختلاف سرعة الرياح وبالتالي الحفاظ على خرج الانفرتر ثابتاً.

2. الحصول على جهد جيبي متناوب ذو مطال وتردد ثابتين من أجل أي سرعة رياح.

إلا أن هذه الحسابات تتطلب زمن كبير للوصول إلى البارامترات المطلوبة وبالتالي يحتاج المتحكم إلى زمن كبير لعمل النظام عند نقاط الاستطاعة الأعظمية.

5-3- استخدام الخوارزمية التقليدية في ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية:

سنقوم باستخدام الطرق التقليدية في ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية، وذلك من خلال تصميم خوارزمية تقليدية لملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية، ومقارنتها مع النتائج التي حصلنا عليها من خلال تطبيق الخوارزمية الجينية.

5-3-1- تصميم الخوارزمية التقليدية:

يتم تصميم الخوارزمية التقليدية من خلال تطبيق مايلي:

1- التهيئة أو البداية

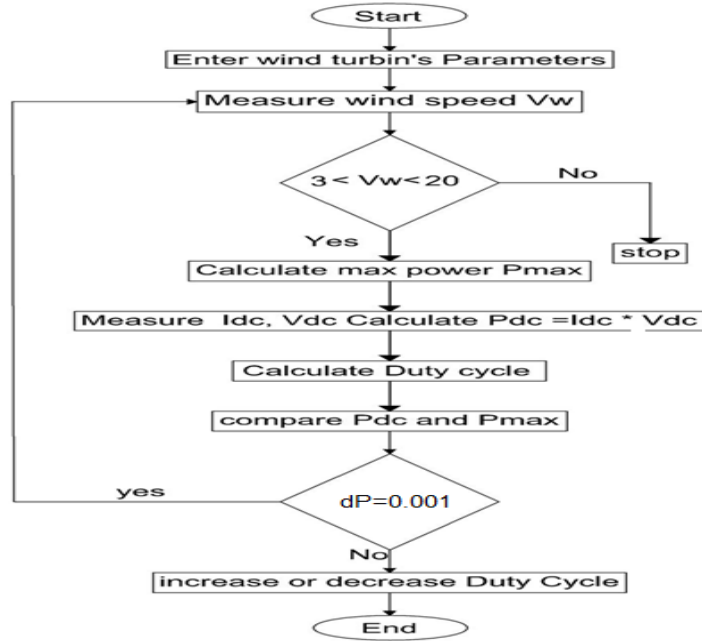
2- قياس سرعة الرياح (إذا تحقق الشرط $3 < Vw < 20$) انتقل إلى الخطوة 3 إذا لم يتحقق الشرط توقف.

3- حساب الاستطاعة الأعظمية P_{max} .

4- قياس (I_{dc}, V_{dc}) وحساب الDuty Cycle.

5- حساب الاستطاعة الحقيقية P_{dc} .

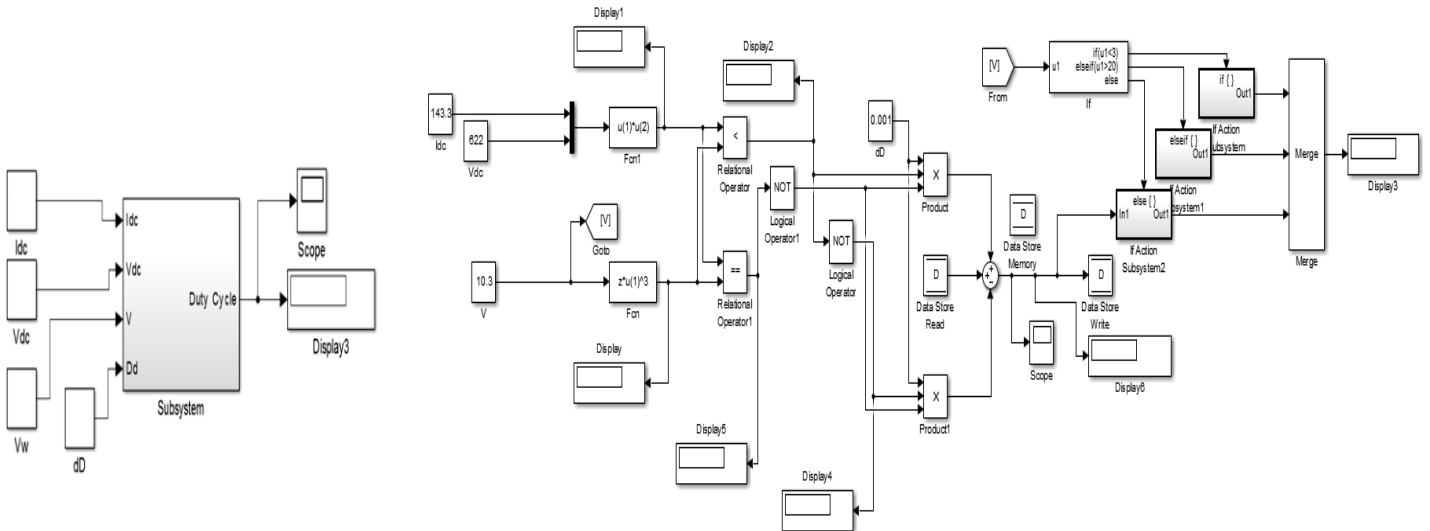
6-المقارنة بين الاستطاعة الحقيقية والاستطاعة العظمى ($dp = 0.001$) إذا تحقق الشرط انتقل إلى الخطوة (2)
إذا لم يتحقق الشرط تغيير قيم الDuty Cycle.
5-3-2-المخطط التدفقي للخوارزمية التقليدية:



الشكل (5-9) المخطط التدفقي للخوارزمية التقليدية

5-3-3-تنفيذ الخوارزمية التقليدية في بيئة الماتلاب:

بعد القيام بتصميم الخوارزمية التقليدية قمنا بتنفيذها في بيئة الماتلاب (Simulink).



الشكل (5-10) تنفيذ الخوارزمية التقليدية في بيئة الماتلاب

نستنتج من الشكل (5-10) والممثل لعملية تنفيذ الخوارزمية التقليدية في بيئة الماتلاب كيفية الحصول على النبضات المقدمة للمقطع المستخدم من خلال مقارنة قيمة الاستطاعة العظمى مع قيمة الاستطاعة الحقيقية، وكيفية ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى من خلال التحكم بقيمة توصيل المقطع D (Duty cycle).

➤ نتائج استخدام الخوارزمية التقليدية:

1. تتطلب زمن أقل من المتحكم التقليدي في حساب ال Duty Cycle .
2. العمل عند عدة نقاط على منحنى الطاقة قبل الوصول إلى نقطة الاستطاعة العظمى.
3. صعوبة القيادة والتحكم عند الأخذ بعين الاعتبار حساب المحددات التشغيلية للعنفة.

5-4- مقارنة النتائج

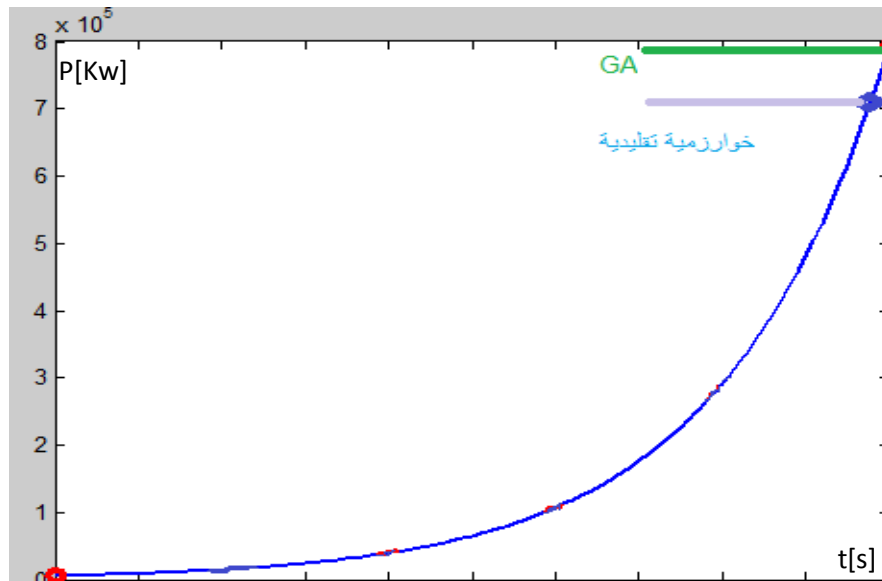
أولاً: قمنا بمقارنة بين تطبيق الخوارزمية الجينية والخوارزمية التقليدية. على العنفة المدروسة وذلك عند سرعة الرياح الاسمية (10.3 m/s) وحصلنا على النتائج الموضحة بالجدول (5-1):

الجدول (5-1) جدول مقارنة النتائج GA و الخوارزمية التقليدية

سرعة الرياح الاسمية (10.3 m/s)	الخوارزمية التقليدية	GA
الاستطاعة العظمى المستخلصة من العنفة [Kw]	702.39	799.14

نستنتج من الجدول (5-1) أنه عند تطبيق الخوارزمية الجينية حصلنا على أعظم قيمة للاستطاعة مقارنة مع الخوارزمية التقليدية وذلك عند نفس السرعة للرياح.

كما يبين الشكل (5-11) منحنى تابع الاستطاعة للعنفة الريحية المدروسة موضحاً عليه قيمة الاستطاعة العظمى الناتجة عن تطبيق الخوارزمية الجينية والخوارزمية التقليدية عند سرعة الرياح الاسمية.



الشكل (5-11) قيم الاستطاعة الناتجة من تطبيق الخوارزمية التقليدية وال GA عند سرعة رياح 10.3(m/s)

يتضمن الجدول التالي مقارنة ميزات استخدام الخوارزمية التقليدية والخوارزمية الجينية كما يلي:

الجدول (2-5) المقارنة بين الخوارزمية التقليدية والخوارزمية الجينية

الخوارزمية الجينية GA	الخوارزمية التقليدية
✓ العمل عند Cp_{max} و λ_{opt} يزيد من فعالية ومردود النظام.	✓ إن العمل عند أي قيمة Cp و λ ضمن المجال المسموح لتغير هذه القيم يقلل من فعالية ومردود النظام.
✓ مرونة في القيادة والتحكم.	✓ صعوبة في القيادة والتحكم.
✓ ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى بسرعة ودقة كبيرتين.	✓ يتم العمل عند عدة نقاط قبل الوصول للاستطاعة العظمى أثناء ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى.
✓ العمل عند أفضل قيم للمحددات التشغيلية للنفقة الريحية.	✓ الخصوصية في التصميم (لكل تصميم محددات خاصة به).
✓ فعالية وإمكانية التطبيق على العنفات الريحية دون الحاجة لإجراء تعديلات كبيرة عليها.	

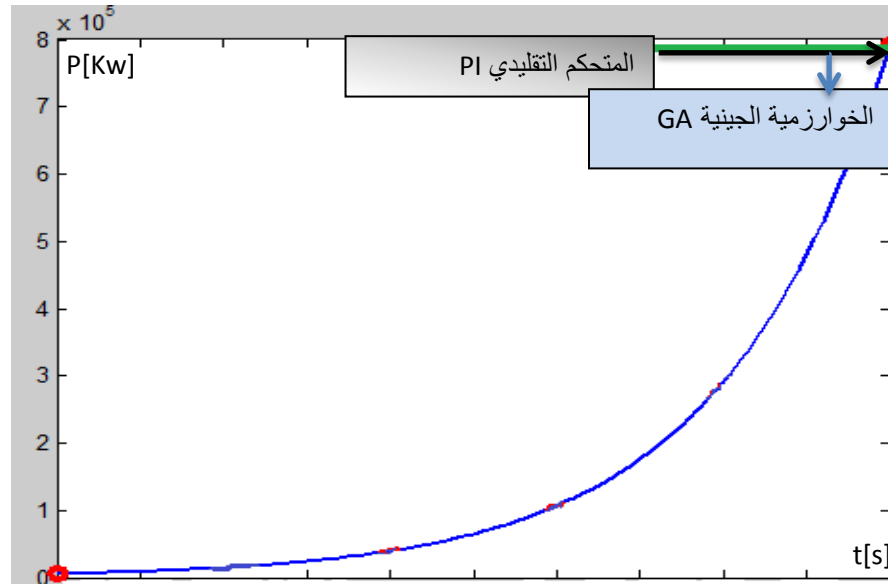
ثانياً: قمنا بمقارنة بين تطبيق الخوارزمية الجينية والمتحكم التقليدي PI. على النفقة المدروسة وذلك عند سرعة الرياح الاسمية 10.3 (m/s) وحصلنا على النتائج الموضحة بالجدول (3-5):

الجدول (3-5) جدول مقارنة النتائج بين GA و PI

GA	المتحكم التقليدي PI	سرعة الرياح الاسمية 10.3 (m/s)
799.14	799.89	الاستطاعة العظمى المستخلصة من النفقة [Kw]

نستنتج من الجدول (3-5) أن قيمة الاستطاعة المستخلصة من النفقة الريحية بوجود المتحكم التقليدي هي العظمى ولكن بوجود زمن للوصول للاستقرار عند هذه القيمة (0.025 s)، الأمر الذي تتغلب عليه الخوارزمية الجينية والخوارزمية التقليدية.

يبين الشكل (5-12) تابع الاستطاعة للنفقة الريحية المدروسة موضحاً عليه قيمة الاستطاعة العظمى الناتجة عن تطبيق الخوارزمية الجينية وعند استخدام المتحكم التقليدي عند سرعة الرياح الاسمية.



الشكل (5-12) قيم الاستطاعة الناتجة من تطبيق الخوارزمية GA والمتحكم التقليدي PI عند سرعة رياح 10.3(m/s)

ومن هنا تبرز أفضلية الخوارزمية الجينية عن الطرق التقليدية من حيث الدقة والسرعة في الملاحظة والحصول على أعظم استطاعة.

يتضمن الجدول التالي مقارنة ميزات استخدام المتحكم التقليدي والخوارزمية الجينية كما يلي:

الجدول (5-4) المقارنة بين المتحكم التقليدي PI والخوارزمية الجينية

الخوارزمية الجينية GA	المتحكم التقليدي PI
✓ المرونة في التعامل مع المحددات التشغيلية للعتبة الريحية	✓ لا يأخذ بعين الاعتبار المحددات التشغيلية للعتبة الريحية
✓ لا يوجد تأخير زمني يذكر	✓ يوجد تأخير زمني للوصول إلى الاستقرار وقدره 0.025(s)
✓ زمن تنفيذ برنامج الخوارزمية الجينية ضمن بيئة الماتلاب 0.17 (s)	✓ يوجد تأخير زمني في تنفيذ تشغيل نموذج طاقة الرياح ضمن بيئة الماتلاب إضافة إلى زمن تأخير الوصول إلى الاستقرار
✓ تعمل بشكل جيد عند مختلف بارامترات النظام.	✓ اختيار قيمة مناسبة لثوابت المتحكم Kp و Ki وذلك عند تغيير بارامترات النظام

الفصل السادس

الاستنتاجات والتوصيات

6-1- مقدمة:

قمنا في هذا البحث بتطبيق إحدى تقنيات الذكاء الصناعي والمتمثلة بالخوارزمية الجينية، وذلك لحل المشكلة المطروحة وهي ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى في العنفات الريحية، وتم بعد ذلك مقارنة النتائج التي حصلنا عليها مع الطرق التقليدية المستخدمة في الملاحقة.

كما استفدنا من تطبيق الخوارزمية الجينية في دراسة تأثير زاوية انحراف شفرات العنف على الطاقة المولدة من العنف الريحية.

6-2- الاستنتاجات:

من خلال النتائج التي حصلنا عليها نستنتج ما يلي:

- 1- يعتبر هذا البحث مساهمة فعالة في عملية ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى.
- 2- فعالية الخوارزمية الجينية في ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية بدقة وسرعة كبيرتين.
- 3- تم باستخدام الخوارزمية الجينية العمل عند Cp_{max} و λ_{opt} مما يزيد من مردود وفعالية النظام.
- 4- وجدنا من خلال البحث المرونة في القيادة والتحكم باستخدام الخوارزمية الجينية وخصوصاً عند الأخذ بعين الاعتبار المحددات التشغيلية للعنف الريحية.
- 5- تم الوصول إلى هدف البحث وهو ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى باستخدام الخوارزمية الجينية.

6-3- التوصيات:

- 1- متابعة البحث وتطبيق الخوارزمية الجينية في ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى على نموذج عملي (Hardware).
- 2- دراسة تأثير تغير بارامترات الخوارزمية الجينية (حجم الجيل، نوع الترميز، احتمال الطفرة، شرط توقف الخوارزمية) على أداء النظام واستقراره.

المراجع

- [1] M, Kesraoui.; N.Korichi.; A.BelKadi. "Maximum Power Point Tracker of Wind energy conversion System(2010) " .
- [2] Shriant.; Kushare. "Mppt Algorithms: Extracking Maximum power from wind tutbines(2013) " .
- [3] Wai, Lin.; chang. "Novel Maximum power extraction algorithm for PMSG wind generation system(2007) " .
- [4] shi.; McLaren. "Neural-network based sensorless Maximum wind energy capture with compensated power coefficient (2005) " .
- [5] Baroudi.;Knight. Areview of Power converter Topologies for wind generators(2006) .
- [6] Hong.;Chiou . Mppt for PM wind generator using gradient Approximation(2009).
- [7] Raju.;Fernandos & chalterse .A (UPF) Power condition with maximum power point tracker for grid connected variable speed with energy conversion(2004)
- [8] Satyam.;Sudhanshu.;Neernj&Ganrau .Optimization and control of variable speed wind turbine with a permenet magnet synchronous generator (2013) .
- [9] PHan Dinh Chung. Maximum Power Point Tracking of a DFIG Wind Turbine System.
- [10] J. M. Kwwon, J. H. Kim, S. H. Kwak, and H. H. Lee, Optimal Power extraction algorithm for DTC in wind power generation system" in Proc.2008.
- [11] J. M. Kwwon, J. H. Kim, S. H. Kwak, and H. H. Lee, Optimal Power extraction algorithm for DTC in wind power generation system" in Proc.2008.
- [12] Bianchi F. D.; De Battista H.; Mantz R. J. (2007). Wind Turbine Control system : Principles, Modeling and Gain Scheduling Design.
- [13] Stiebler, Manfred (2008). Wind Energy System for Electric Power Generation.
- [14] Mathew, Sathyajith(2006). Wind Energy: Fundamentals, Resource Analysis and Economics.
- [15] Cardenas R.; Pena R.; Proboste J.; Asher G.and Clare J(2005). MARAS Observer for sensorless control of standalone doubly fed induction generators. IEEE Transactions on Energy Conversion.
- [16] Datta R. and Ranganthan V.T. (Aug. 2001) (A simple position-sensorless algorithm for rotorside field-oriented control of wound-rotor induction machine), IEEE Trans. Ind Electron.
- [17] Hopfensperger B.; Atkinson D.J. and Lakin R.A. (July 2000)(Stator-flux-oriented control of a double-fed induction machine with and without position encoder), IEEE Proc. Electr. Power App.
- [18] M. Chinchilla, S. Arnaltes, J.C. Burgos, "Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid", IEEE Transactions on Energy Conversion (2006).
- [19] L. Wheri-Min and H. Chih-Ming, "Intelligent approach to maximum power point tracking control strategy for variable-speed wind turbine generation system"(2010) .
- [20] Burton T.; Sharpe D.; Jenkins N.; Bossanyi E. (2000). Wind Energy Handbook. England: John Wiley & Sons, Ltd.
- [21] Carrasco J.M.; Galvan E.; Portillo R. (2007). Wind Turbine Application. Department of Electronic Engineering, Engineering School, Seville University:Spain.

- [22] Petersson, Andreas. (2005). Analysis, Modeling and Control of Doubly-fed Induction Generators for Wind Turbines. Thesis for The Degree of Doctor of Philosophy. Division of Electric Power Engineering, Department of Energy and Environment, Chalmers University of Technology, Goteborg: Sweden.
- [23] Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motor Drives, Chandana Perera, PHD Thesis, December 2008, Aalborg University.
- [24] F. Iov, M. Ciobotaru and F. Blaabjerg, "Power Electronics Control of Wind Energy in Distributed Power Systems", 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronics Equipment, Brasov(2008) .
- [25] -عطية، بسام (2010). الكترونييات القدرة الكهربائية 1. سوريا: منشورات جامعة تشرين.
- [26] Jung.; Jin-Woo(2005). Sine PWM Inverter.1. USA: Ohio State University.
- [27] Rogres, Everett(2002). Understanding Buck-Boost Power Stages in Switch Mode Power Supplies. USA: Texas Instruments.
- [28] داود، محسن (2010). التحكم الآلي(1). سوريا: منشورات جامعة تشرين.
- [29] Xue, Dingyu.; Chen, Yangquan.; Atherton, Derek(2007). PID Controller Design.1. USA: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [30] GOLDBERG, D, E. Genetic algorithms in search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley, Reading, MA, U.S.A.1989.
- [31] DAVIS, L. Handbook of Genetic Algorithms. Van Nostrand Reinhold, New York, 1991.
- [32] Coley, D,A. An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers. World Scientific Publishing Co, 1999.
- [33] MICHALEWICH, Z. Genetic Algorithm + Data Structures = Evolutionary Programs. Springer-Verlag, 1992.
- [34] Direct Drive System. DDIS60. France.

ABSTRACT

Wind Turbine control for Tracking Maximum Power Point Using Genetic Algorithm

Wind power conversion systems are a source of great interest, such as renewable energy sources. Because of growing concern about the environment and energy sources such as oil and coal, it was necessary to look for new sources of energy: renewable and environmentally friendly.

The wind power system output capacity is also based on the maximum power points that can be the controller which tracks maximum power points.

Therefore, we will study the controller which is based on the principles and techniques of Genetic Algorithm, which will work to extract the maximum capacity of the system of conversion of wind energy, so that the controller search for the point of maximum capacity, depending on the location of the point if work and the relationship between change in capacity and speed and calculated through which the appropriate control signal that leads the system to the maximum power points.

We have built an integrated system including the wind turbine and the generator. The synchronous alternator was chosen for synchronous poles because of its many advantages in variable speed wind system. A Buck-Boost chopper is used to suit with generated voltage which varying with wind speed.

MatlabR2014a a programs for GA the maximum power points tracking and calculate the proposed system variables.

We had the optimal values accurately by applying the proposed algorithm thus operating the wind power conversion system at the maximum power points.

الفهرس

1	الفصل الأول: الإطار العام للبحث
1	1-1 مقدمة
1	1-2- الدراسات المرجعية
2	1-3- مشكلة البحث
3	1-4- هدف البحث
3	1-5- أهمية البحث
3	1-6- منهجية البحث
4	الفصل الثاني: دراسة ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية في العنفات الريحية
4	1-2- مقدمة
4	1-2-2- العنفات الريحية
4	1-2-2-1- أنواع العنفات الريحية حسب توضع المحور
5	1-2-2-2- العنفات الريحية ذات المحور الشاقولي (VAWT)
6	1-2-2-2- العنفات الريحية ذات المحور الأفقي (HAWT)
9	1-2-2-2-2- المكونات الرئيسية للعنفات الريحية ذات المحور الأفقي
14	1-2-2-2-2- أنواع العنفات الريحية بحسب سرعة الدوران
14	1-2-2-2-2- العنفات الريحية التي تعمل على سرعة ثابتة Fixed-Speed Wind Turbines
15	1-2-2-2-2- الريحية التي تعمل على سرعات متغيرة Variable Speed Wind turbine
16	1-2-2-2-3- أنماط عمل أنظمة العنفات الريحية
18	1-2-2-2-4- مبدأ عمل العنفات الريحية ذات المحور الأفقي
18	1-2-2-2-4-1- العلاقة بين الاستطاعة و السرعة في العنفات الريحية
19	1-2-2-2-4-2- الاستطاعة الفعلية المستخلصة من الرياح
21	1-2-2-2-4-3- العوامل المؤثرة على الاستطاعة المستخلصة من الرياح
26	1-2-2-2-4-4- العوامل المؤثرة على قيمة معامل استطاعة العنفة الريحية $C_p(\lambda, B)$
29	1-2-2-2-5- المولدات المستخدمة في أنظمة طاقة الرياح
29	1-2-2-2-5-1- المولدات اللاتزامنية (التحريضية)
29	1-2-2-2-5-1-1- المولد التحريضي القفص السنجابي
31	1-2-2-2-5-1-2- المولد التحريضي ذات دائر ملفوف
31	1-2-2-2-5-1-3- المولدات التزامنية
32	1-2-2-2-5-1-3-1- المولدات التزامنية ذات مغناط دائمة Permanent Magnet (Synchronous Generator)
36	1-2-2-2-6- استراتيجيات التحكم بالعنفات الريحية

36	2-2-6-1- التحكم بزاوية ميلان الشفرات (Pitch Angle Control)
37	2-2-6-2- التحكم بالاستطاعة العظمى (Maximum Power Point Tracking)
37	2-2-6-1- نمط التحكم التقليدي
37	2-2-6-2- نمط التحكم الذكي (Intelligent Control)
37	2-2-6-3- مبدأ الاستطاعة العظمى للعنفة الريحية
39	الفصل الثالث: النموذج الرياضي لمسألة ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية
39	مقدمة
39	3-1- نموذج المقوم (Rectifier)
39	3-1-1- دارات التقويم ثلاثية الطور ذات النقطة المشتركة
40	3-1-2- دارات التقويم الجسرية ثلاثية الطور
41	3-2- مقطع الجهد المستمر (DC-DC Converter)
41	3-2-1- مقطع الخافض (Buck Converter)
42	3-2-2- مقطع الرافع (Boost Converter)
43	3-3- المقطعات الرافعة-الخافضة للجهد
44	3-3-1- مميزات المقطعات الرافعة-الخافضة للجهد
44	3-4- دارات الانفرتر
45	3-4-1- تنظيم جهد خرج الانفرتر
45	3-4-1-1- التعديل النبضي العرضاني الجيبي (Sine pulse Width Modulation)
46	3-4-1-1-1- الخواص العامة للتعديل النبضي العرضاني الجيبي
47	3-5- المتحكمات التناسبية التكاملية التفاضلية
48	3-6- تصميم المقطع
48	3-6-1- اختيار تردد العمل
48	3-6-2- اختيار الملف
49	3-6-3- اختيار المكثف
49	3-7- خوارزمية برنامج التحكم بالمقطع
50	3-6- توصيل المتحكم مع المقطع في بيئة الماتلاب
50	3-7- تصميم المتحكم (PI) الخاص بتيار المكثف
53	3-10- بناء النموذج (النمذجة)
53	3-10-1- اختيار العنفة الريحية
54	3-10-2- نموذج العنفة الريحية
56	3-10-3- اختيار المولد
56	3-10-4- النموذج الرياضي للمولد التزامني (PSMG)
56	3-10-4-1- النموذج الرياضي للمولد التزامني وفق المحاور (abc)

58	3-10-4-2-النموذج الرياضي للمولد التزامني وفق المحاور (d-q)
60	3-10-4-3-نمذجة المولد التزامني ذو أقطاب دائمة (PMSG)
60	3-10-4-4-توصيل المولد مع العنفة الريحية في بيئة الماتلاب
61	3-10-5-نموذج العنفة الريحية مع المولد والمقوم
62	3-10-5-1-نتائج نموذج العنفة الريحية مع المولد والمقوم
64	3-10-6-نموذج المقطع الرافع - الخافض Buck-Boost
65	3-10-7-نموذج الانفرت
66	3-10-8-النموذج (عنفة-مولد تزامني PMSG-مقوم-مقطع رافع-خافض-حمل)
67	الفصل الرابع: تصميم برنامج حاسوبي بناءً على الخوارزمية الجينية
67	4-1 ما هي الخوارزمية الجينية؟
68	4-2 ميزات الـ GA والوقت الأفضل لاستخدامها
	4-3 مساوي الخوارزمية الجينية GA
69	4-4 أساليب الخوارزمية الجينية GA
69	4-5 خطوات الخوارزمية الجينية
70	4-6 آلية عمل الـ GA
70	4-6-1 ترميز / تمثيل الحل
70	4-6-1-1 الترميز الثنائي
70	4-6-1-2 ترميز شعاع النقطة العائمة
71	4-6-2 الملائمة
71	4-6-3 الاختيار
71	4-6-3-1 اختبار الروليت (القرص الدائري)
72	4-6-3-2 اختيار المنافسة
74	4-6-3-3 اختيار الترتيب
74	4-6-3-3-1 استراتيجية النخبة
74	4-6-4 التقاطع
75	4-6-5 الطفرة
75	4-7 - تحديد معاملات الـ GA
76	4-8-مراحل تطبيق الخوارزمية الجينية
76	4-8-1-الانطلاق (Initialization)
76	4-8-2-التقييم (Evaluation)
77	4-8-3-العمليات الجينية
77	4-8-4-تصميم البرنامج الحاسوبي بناءً على الخوارزمية الجينية
85	4-9-استخدام الخوارزمية الجينية في ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية
86	4-9-1-المخطط التدفقي للخوارزمية الجينية

86	4-9-2- نتائج تنفيذ الخوارزمية الجينية على العنفة المدروسة
87	4-9-3- نتائج تنفيذ الخوارزمية الجينية على عنفة تجريبية
89	4-9-4- تنفيذ الخوارزمية عند زوايا انحراف لشفرات العنفة $\beta \neq 0$
90	4-10- دراسة تأثير زاوية انحراف شفرات العنفة الريحية على الاستطاعة العظمى المولدة
90	4-10-1- معامل الارتباط لبيرسون (Pearson Linear Correlation coefficient)
93	الفصل الخامس: مقارنة النتائج مع الطرق التقليدية
93	5-1- مقدمة
93	5-2- تشغيل النموذج مع متحكم تقليدي PI عند سرعات رياح مختلفة
93	5-2-1- تشغيل النظام المدروس عند سرعة رياح أقل من السرعة الاسمية (m/s) 5
94	5-2-2- تشغيل النظام المدروس عند السرعة الاسمية (m/s) 10.3
95	5-2-3- تشغيل النظام المدروس عند سرعة رياح (m/s) 12
96	5-2-4- تشغيل النظام المدروس عند سرعة رياح متغيرة
98	5-3- استخدام الخوارزمية التقليدية في ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية
98	5-3-1- تصميم الخوارزمية التقليدية
99	5-3-2- المحدد التدفقي للخوارزمية التقليدية
99	5-3-3- تنفيذ الخوارزمية التقليدية في بيئة الماتلاب
100	5-4- مقارنة النتائج
103	الفصل السادس: الاستنتاجات والتوصيات
103	6-1- مقدمة
103	6-2- الاستنتاجات
103	6-3- التوصيات
104	المراجع