



الجمهورية العربية السورية
جامعة دمشق
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
قسم هندسة الطاقة الكهربائية

تقانات الإدارة الذكية للاستطاعة الردية في الشبكة الكهربائية الميكروية

رسالة مقدمة لنيل درجة الماجستير في هندسة الطاقة الكهربائية

إعداد

المهندس نايف حاتم بكر

إشراف

الدكتور المهندس غيث ورقوزق

أستاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية

العام الدراسي 2025-2026

موافقة لجنة الحكم على طباعة رسالة الماجستير

بالإشارة إلى قرار مجلس كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية رقم /1923 / تاريخ 10/8/2025 وبعد الرجوع إلى اللائحة التنفيذية لقانون تنظيم الجامعات الصادر بالمرسوم الجمهوري رقم /250/ لعام 2006 وقرار مجلس جامعة دمشق رقم /3421/ ص.م تاريخ 14 / 10 / 2021 القاضي بشأن الموافقة على تسجيل رسالة الماجستير لطالب الدراسات العليا المهندس نايف حاتم بكر في هندسة الطاقة الكهربائية بعنوان:

تقانات الإدارة الذكية للاستطاعة الردية في الشبكة الكهربائية الميكروية

واستناداً لأحكام المادتين 163 و164 من اللائحة التنفيذية لقانون تنظيم الجامعات الصادرة بالمرسوم الجمهوري رقم /250/ تاريخ 10/7/2016 وقرار مجلس الجامعة رقم 8/1436 تاريخ 15/2/2012 المتضمن إجراءات القيد في الدراسات العليا وتشكيل لجان الحكم وإجراءات المناقشة العلنية للرسائل والأطروحات والدفاع عنها ومنح الدرجات العلمية، وقرار مجلس البحث والدراسات العليا رقم /3774/ المتخذ في الجلسة رقم /26/ المنعقدة بتاريخ 2025/9/8 القاضي بتشكيل لجنة الحكم على رسالة الماجستير في هندسة الطاقة الكهربائية التي أعدها المهندس نايف حاتم بكر من السادة الأساتذة:

الدكتور غيث ورقوزق: استاذ في قسم هندسة الطاقة الكهربائية - جامعة دمشق عضواً مشرفاً

الدكتور جمال الناصير: أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية - جامعة دمشق عضواً

الدكتور وسيم سعيد: استاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية - جامعة دمشق عضواً

وبعد أن قامت لجنة الحكم بمناقشة رسالة الماجستير التي تقدم بها المهندس نايف حاتم بكر علنياً في تمام الساعة الثانية عشر والنصف من صباح من يوم الأحد الموافق 2025/10/12. فقد قام الباحث بالتعديلات المطلوبة من اللجنة على الرسالة وأصبحت جاهزة للطباعة.

دمشق 28 / 12 / 2025

الدكتور
غيث ورقوزق

الدكتور
جمال الناصير

الدكتور
وسيم سعيد

شكر وتقدير

إلى والديّ الغاليين، اللذين دعماني وشجعاني طوال سنوات الدراسة، لكم مني كل الحب والتقدير، فقد كنتم وستظلون مصدر توفيقني ونجاحي.

إلى روح أمي الطيبة، رحمها الله، التي كانت مصدر إلهام لي رغم رحيلها، ستظل دائماً في قلبي وذاكرتي.
إلى أستاذي الدكتور الكريم، الذي لم يبخل عليّ بوقته وعلمه، لقد كنتم خير مرشد وناصح، شكراً على كل ما قدمتموه لي من دعم وإرشاد.

إلى أمي الثانية الهدية الإلهية الأجل المهندسة رنا تربية دار السند والدعم والعون.

إلى جميع أساتذتي الأفاضل الذين كانوا جزءاً من رحلتي الأكاديمية، شكراً لكم على علمكم وتوجيهكم.

إلى شريكة حياتي، التي كانت دائماً السند والدعم في هذه الرحلة، شكراً لك على التشجيع والدعم المتواصل.

إلى أصدقائي وعائلتي الذين كانوا دائماً بجانبني، سنداً لي، أنتم مصدر قوتي ونجاحي.

إلى من آمن بقدراتي وأعطاني الثقة للمضي قدماً، شكراً لكم على دعمكم وتوجيهكم.

فهرس المحتويات

13.....	الفصل الأول: الاطار العام للبحث
17.....	الفصل الثاني: الدراسات المرجعية
27.....	الفصل الثالث: الدراسة النظرية
27	1.3. استقرار النظام الكهربائي
27	1.1.3. استقرار التوتر
28	2.1.3. علاقة الاستطاعة والتوتر $P-V$ و $Q-V$
31	2.3. مفهوم التوليد الموزع
32.....	1.2.3. مفهوم جديد لأنظمة القدرة
33.....	2.2.3. إيجابيات وسلبيات التوليد الموزع
35.....	3.2.3. أنواع التوليد الموزع المختلفة
35.....	1.3.2.3. العنفات الريحية
36.....	2.3.2.3. المولدات التزامنية والتحريضية
37.....	3.3.2.3. خلايا الوقود
38.....	4.3.2.3. العنفات المكروية
38.....	5.3.2.3. أنظمة الطاقة الكهروشمسية
39.....	4.2.3. علاقة الأنظمة الكهروشمسية مع الشبكة الكهربائية العامة
39.....	1.4.2.3. النظام الكهروشمسي المستقل
39.....	2.4.2.3. النظام الكهروشمسي الهجين
39.....	3.4.2.3. الأنظمة الكهروشمسية المرتبطة مع الشبكة

40.....	5.2.3 تأثير النظم الكهروشمسية على الشبكات الكهربائية
40.....	6.2.3 تأثير النظم الكهروشمسية على شبكات التوزيع
42.....	7.2.3 مشاكل التوتر المرافقة لتركيب الأنظمة الكهروشمسية
42.....	8.2.3 أثر النظم الكهروشمسية على تنظيم التوتر
42.....	9.2.3 تأثير النظم الكهروشمسية على الضياعات
43.....	3.3 استراتيجيات الإدارة الذكية
43.....	1.3.3 نماذج الديناميكية
43.....	2.3.3 تكنولوجيا التحكم الذكي
44.....	3.3.3 نظم التوزيع المتقدم
44.....	4.3.3 استراتيجيات الطلب الديناميكي
44.....	4.3 الاستطاعة الردية
44.....	1.4.3 أجهزة تعويض الاستطاعة الردية
45.....	1.1.4.3 المكثفات
46.....	2.1.4.3 أنظمة تخزين الطاقة ESS
47.....	3.1.4.3 معوض القدرة الثابت SVC
51.....	4.1.4.3 المحولات التحكم في التوتر تحت التحميل OLTC
53.....	5.1.4.3 المعوض المتزامن الثابت
55.....	5.3 طرق تعويض الاستطاعة الردية
56.....	الفصل الرابع: الدراسة العملية
56.....	1.4 نموذج الشبكة المعتمدة كمرجعية للبحث

56.....	1.1.4 نظام الاختبار IEEE 9 Bus Test System
57.....	1.1.1.4 مكونات الشبكة
57.....	2.1.1.4 محددات الشبكة
58.....	3.1.1.4 نموذج الشبكة المعدلة المعتمدة للبحث
58.....	2.4 إدارة الاستطاعة الردية
58.....	STATCOM 1.2.4
59.....	2.2.4 الأنظمة الكهروشمسية
59.....	3.2.4 التكامل بين STATCOM والأنظمة الكهروشمسية
59.....	3.4 استراتيجية الإدارة الذكية
60.....	STATCOM 4.4
60.....	1.4.4 مكونات STATCOM وكيفية عمله والمعادلات الرياضية
65.....	5.4 حلقة التحكم PLL (Phase Locked Loop)
66.....	1.5.4 مبدأ عمل حلقة تثبيت الطور PLL في التحكم بالاستطاعة الردية
66.....	2.5.4 مزايا PLL
67.....	6.4 الجزء العملي
67.....	1.6.4 تطبيق طريقة PLL على STATCOM في دائرة بسيطة
70.....	2.6.4 تطبيق طريقة PLL على دائرة بسيطة مرتبطة مع نظام كهروشمسي
72.....	7.4 خوارزمية التحكم
75.....	8.4 النتائج العملية
75.....	1.8.4 السيناريو الأول: حالة العمل STATCOM فقط
76.....	2.8.4 السيناريو الثاني: حالة العمل PV2 فقط

78.....	3.8.4 السيناريو الثالث: حالة العمل PV1 فقط
79.....	4.8.4 السيناريو الرابع: حالة العمل PV1 + PV2 + STATCOM معاً
81.....	5.8.4 السيناريو الخامس: التحكم عن طريق الخوارزمية وبإدخال الشعاع الشمسي
84.....	9.4 نمذجة جزء من شبكة التوتر 20kV السورية وإيجاد أثر ربط نظم كهروشمسية عليها
84.....	1.9.4 وصف البرنامج المستخدم في عملية النمذجة PSAT:
85.....	2.9.4 الشبكة المدروسة
85.....	1.2.9.4 تطبيق الدراسة على جزء من الشبكة السورية
89.....	2.2.9.4 نتائج جريان الحمولة باستخدام البرنامج PSAT
94.....	3.2.9.4 مناقشة نتائج جريان الحمولة لشبكة دوما المدروسة باستخدام برنامج الـ PAST
94.....	4.2.9.4 دراسة جريان الحمولة باستخدام برنامج مصمم في بيئة MATLAB
96.....	5.2.9.4 مراحل عمل البرنامج ومصفوفات الدخل والعلاقات الرياضية المستخدمة
104.....	6.2.9.4 مناقشة النتائج والمقارنة
110.....	الفصل الخامس: النتائج والتوصيات
112.....	المراجع

فهرس الأشكال

- الشكل (2-1) ربط أنظمة كهروشمسية مع شبكة التوزيع [2] 18
- الشكل (2-2) خوارزمية التحكم المطروحة [2] 19
- الشكل (2-3) التحكم المركزي بالاستطاعة الردية للأنظمة الكهروشمسية وربطها مع الشبكة [2] 20
- الشكل (2-4) توزيع نظام الكهروشمسي والأحمال على الشبكة وربطها مع محولة OLTC [3] 21
- الشكل (2-5) تنسيق الأحمال مع التوليد الموزع والمولدات [4] 24
- الشكل (3-1) نظام دائرة بسيطة [8] 28
- الشكل (3-2) المخطط الشعاعي بإهمال مقاومة الخط [8] 28
- الشكل (3-3) الدارة المكافئة لنظام الاستطاعة [29] 29
- الشكل (3-4) الدارة المكافئة للشبكة [29] 30
- الشكل (3-5) المفهوم الصناعي التقليدي لمنبع التغذية بالطاقة الكهربائية 32
- الشكل (3-6) المفهوم الجديد لمنبع التغذية بالطاقة الكهربائية 33
- الشكل (3-7) طريقة ربط أنظمة التخزين مع الشبكة [32][33] 46
- الشكل (3-8) أنماط معوضات القدرة الثابتة SVC [35][36] 48
- الشكل (3-9) شكل مبسط لطور واحد للمحاضرة المتحكم بها بواسطة الثايرستور TCR [35][36] 49
- الشكل (3-10) أنماط من طرق توصيل OLTC مع الشبكة [3][31][37] 51
- الشكل (3-11) طريقة رفع أو خفض التوتر في نموذج لمحولة OLTC [3][31][37] 52
- الشكل (3-12) طريقة ربط الـ STATCOM مع الشبكة [9][36][38][39] 54
- الشكل (3-13) خصائص (V-I) لـ STATCOM [9][36][38][39] 54
- الشكل (4-1) نظام الاختبار IEEE 9 Bus Test System [40] 56

- الشكل (2-4) نظام اختبار IEEE 9 المعدل المعتمد كشبكة للبحث 58
- الشكل (3-4) المعوض المتزامن الثابت وكيفية ربطه مع المنظومة الكهربائية [29][38][41][42]..... 62
- الشكل (4-4) الاستطاعة الردية المتبادلة بين المبدلة الالكترونية وخط النقل [43] [44] 62
- الشكل (5-4) ميزة التوتر - التيار للمعوض المتزامن الثابت STATCOM [29][35]..... 64
- الشكل (6-4) تصنيف عمل الـ STATCOM [29][35]..... 65
- الشكل (7-4) دائرة التحكم لـ STATCOM [45][46][47]..... 66
- الشكل (8-4) نمذجة نظام اختبار بسيط مرتبط مع الـ STATCOM 67
- الشكل (9-4) نمذجة معرجات الـ STATCOM باستخدام برنامج MATLAB 68
- الشكل (10-4) نمذجة دائرة التحكم بالـ STATCOM باستخدام برنامج MATLAB 69
- الشكل (11-4) نمذجة دائرة التحكم بالتوتر لـ STATCOM باستخدام برنامج MATLAB 69
- الشكل (12-4) نتائج الاختبار البسيط المرتبط مع الـ STATCOM 70
- الشكل (13-4) نمذجة نظام الاختبار مع نظام كهروشمسي باستخدام برنامج MATLAB 70
- الشكل (14-4) خوارزمية النظام الكهروشمسي [48]..... 71
- الشكل (15-4) نتائج الاختبار المرتبط مع النظام الكهروشمسي..... 71
- الشكل (16-4) MATLAB FUNCTION للخوارزمية 72
- الشكل (17-4) المخطط الصندوقي لخوارزمية التحكم المقترحة..... 73
- الشكل (18-4) نمذجة شبكة IEEE9 المعدلة في البحث باستخدام برنامج MATLAB 74
- الشكل (19-4) مخطط بياني للاستطاعة الردية عند محاكاة السيناريو الأول..... 75
- الشكل (20-4) نتائج توترات الباسبارات للسيناريو الأول..... 76
- الشكل (21-4) مخطط بياني للاستطاعة الردية عند محاكاة السيناريو الثاني 77
- الشكل (22-4) توترات الباسبارات السيناريو الثاني 77

- الشكل (4-23) مخطط بياني للاستطاعة الردية عند محاكاة السيناريو الثالث 78
- الشكل (4-24) توترات الباسبارات السيناريو الثالث 79
- الشكل (4-25) مخطط بياني للاستطاعة الردية عند محاكاة السيناريو الرابع 80
- الشكل (4-26) توترات الباسبارات السيناريو الرابع 80
- الشكل (4-27) مخطط بياني للاستطاعة الردية عند محاكاة السيناريو الخامس 81
- الشكل (4-28) الاستطاعة الردية المحقونة من قبل الـ STATCOM في السيناريو الخامس 82
- الشكل (4-29) الاستطاعة الردية المحقونة من قبل الـ PV1 في السيناريو الخامس 83
- الشكل (4-30) الاستطاعة الردية المحقونة من قبل الـ PV2 في السيناريو الخامس 83
- الشكل (4-31) توترات الباسبارات السيناريو الخامس 84
- الشكل (4-32) مخطط مخرج الادارة من شبكة توزيع دوما المراد دراستها 88
- الشكل (4-33) الشبكة دوما بعد إعادة رسمها (20kV) 89
- الشكل (4-34) توترات قضبان التجميع قبل حقن الاستطاعة الردية 90
- الشكل (4-35) توترات قضبان التجميع بعد حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 17 91
- الشكل (4-36) توترات قضبان التجميع بعد حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 9 و 17 92
- الشكل (4-37) توترات قضبان التجميع بعد حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 4 و 14 و 19 93
- الشكل (4-38) خوارزمية البرنامج 95
- الشكل (4-39) توترات الشبكة المدروسة قبل حقن الاستطاعة الردية 105
- الشكل (4-40) توترات الشبكة المدروسة بعد حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 17 107
- الشكل (4-41) توترات الشبكة المدروسة بعد حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 9 و 17 107
- الشكل (4-42) توترات الشبكة المدروسة بعد حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 9 و 14 و 17 108

فهرس الجداول:

الجدول (1-2) مقارنة بين الدراسات المرجعية	26
الجدول (1-3) أجهزة تعويض الاستطاعة الردية [29]	45
الجدول (2-3) مقارنة بين TCR و TSR	49
الجدول (1-4) محددات الشبكة IEEE 9 [40]	57
الجدول (2-4) محددات الأحمال [40]	57
الجدول (3-4) توزيع الأحمال للاستطاعة الردية في الشبكة المدروسة	75
الجدول (4-4) الاستطاعة الردية للمعوضات في السيناريو الخامس	82
الجدول (5-4) محددات التشغيل المقاسة للجزء المدروس من شبكة توزيع دوما	85
الجدول (6-4) الحمولات المقاسة للجزء المدروس من شبكة توزيع دوما	86
الجدول (7-4) نتائج جريان الحمولة بدون حقن الاستطاعة الردية على شبكة دوما المدروسة	89
الجدول (8-4) نتائج جريان الحمولة عند حقن الاستطاعة الردية باستطاعة (5Mvar)	
على قضيب التجميع	91
الجدول (9-4) نتائج جريان الحمولة عند حقن الاستطاعة الردية باستطاعة (5MVAR&2MVAR)	
على قضيب التجميع 9 و 17	92
الجدول (10-4) نتائج جريان الحمولة عند حقن الاستطاعة الردية باستطاعة (2MVAR)	
على قضيب التجميع 9 و 14 و 19	93
الجدول (11-4) مقارنة نتائج جريان الحمولة لشبكة دوما المدروسة عند حقن الاستطاعة الردية	94
الجدول (12-4) مصفوفة معطيات دخل البرنامج	96
الجدول (13-4) مصفوفة الخطوط المستخدمة في البرنامج	97
الجدول (14-4) نتائج جريان الحمولة قبل حقن الاستطاعة الردية	104

الجدول (4-15) نتائج جريان الحمولة عند حقن الاستطاعة الردية باستطاعة (5MVAR)

على قضيب تجميع 17 105.....

الجدول (4-16) نتائج جريان الحمولة للشبكة السورية المدروسة 108.....

الجدول (4-17) المقارنة بين طريقتي الحساب 109.....

الملخص

مع ازدياد الطلب على الطاقة الكهربائية ازداد التوجه العالمي للاعتماد على مصادر الطاقة المتجددة للتوليد الموزع (الألواح الشمسية والعنفات الريحية) التي يتم ربطها مع شبكة التوزيع الكهربائية. تلعب الاستطاعة الردية دوراً مهماً في الحفاظ على التوتر الإسمي في الشبكة الكهربائية وبالتالي على كفاءتها وضمان استقرارها ووثوقيتها. نظراً إلى أن مصادر التوليد هذه تتصف بالنقطع وعدم الاستمرار وفقاً لتقلبات الأحوال الجوية، أصبح من الضروري السعي والبحث عن تقانات مبتكرة للإدارة الذكية والتحكم بالاستطاعة الردية للحفاظ على قيمة التوتر في حدوده المسموحة عند نقطة الربط من خلال تنظيم التوتر وجريان الاستطاعة.

تشكل الشبكات الكهربائية الميكروية جزءاً أساسياً من بنية شبكات التوزيع الكهربائي، يمكن استخدامها كنموذج ديناميكي لتحليل سلوك الاستطاعة الردية. بهدف إدارة الاستطاعة الردية والتحكم بها اعتمد هذا البحث على نموذج لشبكة مرجعية تم تعديله بما يتوافق مع الدراسة وطُبق عليه محاكاة حاسوبية باستخدام برنامج "MATLAB" وفق خوارزمية تحكم تم تصميمها لقيادة نظامين شمسيين إضافة لـ STATCOM وتمت المناورة بين الأنظمة وفقاً لحالات تتغير فيها الشروط سواء تلك المتعلقة بالتشغيل أو بالأحوال الجوية.

كما تم تطبيق الدراسة على الواقع الفعلي من خلال اختيار جزء من شبكة الكهرباء السورية وافترض ربطها مع منظومة كهروشمسية وتمت النمذجة والمحاكاة باستخدام البيئة البرمجية MATLAB والخوارزمية المناسبة ومقارنة النتائج والتحقق من مدى فعالية الإدارة والتحكم بحقن الاستطاعة الردية في تحسين والمحافظة على استقرار الشبكة.

الكلمات الرئيسية:

الشبكات الميكروية الكهربائية، الاستطاعة الردية، STATCOM، أنظمة كهروشمسية.

الفصل الأول

الإطار العام للبحث

المقدمة:

مع تزايد استهلاك الطاقة الكهربائية تصاعدت المخاوف من التأثير المدمر للتغيرات المناخية الذي يسببه بالدرجة الأولى الاستهلاك المفرط للوقود الاحفوري، مما دعا إلى الاستعانة بمصادر الطاقة المتجددة كالألواح الشمسية والعنفات الريحية لتوليد الطاقة الكهربائية، كأنظمة للتوليد الموزع يتم ربطها ودمجها مع شبكة الطاقة الكهربائية. ترافق ذلك مع البحث والسعي لتطوير الشبكات الكهربائية الذكية التي تعمل على تجنب الانقطاعات المفاجئة وإعادة التوصيل بشكل آلي مما يضمن الاستقرار والموثوقية للشبكة.

تعتبر الشبكات الكهربائية الميكروية جزءاً أساسياً من بنية التوزيع الكهربائي الحديثة، حيث تمثل حلاً مبتكراً لتعزيز كفاءة الطاقة واستدامتها، ومع تزايد استخدام مصادر الطاقة المتجددة يصبح من الضروري إدماج استراتيجيات الإدارة الذكية للاستطاعة الردية (Reactive Power)، التي تستخدم للحفاظ على التوتر الاسمي في الشبكة الكهربائية. تعد الاستطاعة الردية ضرورية للحفاظ على توازن الشبكة ضمان استقرارها وموثوقيتها وتجنب خسائر الطاقة، خاصةً في الشبكات المعقدة مثل الشبكات الميكروية.

يتم نقل وتوزيع معظم هذه الطاقة على شكل تيار متناوب، مما جعل من المهم الآن أكثر من السابق تصميم وتشغيل نظم القدرة الكهربائية ليس فقط بأكبر فعالية ولكن بأعلى درجة من الأمان والموثوقية. تحتاج هذه المتطلبات إلى إيجاد تقنيات وأنظمة مرنة في نقل الطاقة الكهربائية تعمل على التحكم ببارامترات خط النقل لتحسين جريان الاستطاعة الفعالة والردية فيه والمحافظة على قيمة التوتر الاسمي على طول الخط.

مشكلة البحث:

عند ربط مصادر الطاقة المتجددة مع الشبكة الكهربائية، ونظراً إلى أن تلك المصادر فيها نسبة من العشوائية ومتقطعة وغير مستمرة مثل الشمس والرياح...، يتم تأمين استقرار الشبكة بواسطة حقن الاستطاعة الردية حتى يبقى التوتر عند نقطة الربط في حدوده المسموحة.

تساؤلات البحث:

- هل هنالك ظهور للاستطاعة الردية في المحطات التوليد المتجددة؟
- هل تؤثر هذه الاستطاعات الناتجة عن محطات التوليد المتجددة في استقرار الشبكة؟

فرضيات البحث:

- فرضية (1): لا تظهر الاستطاعة الردية بشكل عام في نظم الطاقة المتجددة.
- فرضية (2): تظهر الاستطاعة الردية وفق نسب معينة في نظم الطاقة المتجددة.
- فرضية (3): يمكن معالجة هذه الاستطاعة الردية بالطرق الحديثة.

هدف البحث:

مع ازدياد الحاجة إلى استخدام مصادر توليد الطاقة المتجددة وضرورة ربطها ودمجها مع شبكة الطاقة الكهربائية، تبرز أهمية الاستطاعة الردية كأحد المحددات الرئيسية في نظام الطاقة الكهربائية، إذ أنها تساهم في تغيير قيمة التوتر في نقطة الربط من خلال تنظيم التوتر وجريان الاستطاعة، مما ينعكس على حالة الاستقرار في الشبكة. لذلك يجب إدارة الاستطاعة الردية لضمان استقرار ووثوقية الشبكة والتحكم بها. تعد الاستطاعة الردية من أهم المسائل التي تواجهنا أثناء الدراسة الكهربائية حيث أنها تعنى بحساب واختيار وسائل التعويض والتحكم بعملها وتوضعها في الأماكن المناسبة.

أهمية موضوع البحث:

سيساهم هذا البحث في رفد المخزون العلمي للكلية لحل مشكلة الاستطاعة الردية في مصادر الطاقة المتجددة حيث يندرج ضمن إطار ربط الجامعات بمؤسسات الدولة ووزاراتها بغية الاستفادة من الإمكانيات المتاحة بما يخدم البحث العلمي. تم اقتراح موضوع هذه الرسالة بناءً على طرح وزارة الكهرباء عدة مواضيع وأحدها التحكم بالاستطاعة الردية.

مبررات البحث:

نتيجة المشكلة العلمية المذكورة سابقاً ومن خلال اطلاعنا على الدراسات المرجعية وجدنا أنه يمكن استثمار الذكاء الصناعي في تحسين عمل الشبكة الكهربائية ولاسيما عن طريق التحكم بجريان الاستطاعة الردية، وبحسب الفرضيات المقترحة في بحثنا يجب دراسة هذا الموضوع لتأمين استقرار الشبكة الكهربائية وتحسين ادارة نظم الطاقة المتجددة.

منهج البحث وأدواته:

يعتمد البحث على المنهج الوصفي والتحليلي حيث سيتم اجراء نمذجة حاسوبية لشبكة ميكروية باستخدام البرامج المناسبة مع تطبيق أحد طرق التحكم بالاستطاعة الردية وفقاً للدراسة المرجعية.

مخطط البحث:

تم اجراء الدراسة وفق المخطط التالي:

(1) الدراسات المرجعية،

(2) الدراسة النظرية: الشبكات الذكية وأهمية الاستطاعة الردية وتأثيرها، المشاكل التي تفرضها وحساب

المتغيرات والضياعات، أجهزة وطرق التعويض، استراتيجية التحكم بالاستطاعة الردية في الشبكة الميكروية،

(3) الدراسة العملية: اختيار نموذج شبكة ميكروية ونذجتها حاسوبياً، وتصميم خوارزمية التحكم. اختيار

جزء من شبكة الكهرباء السورية وافترض ربطها مع نظام كهروشمسي وإدارة التحكم بحقن الاستطاعة

الردية فيها لضمان استقرارها.

(4) النتائج والتوصيات.

قُسم هذا البحث إلى خمسة فصول. يُبين الفصل الأول الإطار العام للبحث، ويستعرض الفصل الثاني عدداً من الدراسات المرجعية المعنية باستراتيجيات إدارة الاستطاعة الردية والتحكم بها. يهتم الفصل الثالث بالجزء النظري من البحث، حيث يتناول مفاهيم استقرار الشبكة الكهربائية والاستطاعة الردية وأهميتها وتأثيرها والنماذج الرياضية لحسابها، والأجهزة والطرق المتبعة لتعويضها. خُصص الفصل الرابع للدراسة العملية بدءاً من اختيار نموذج لشبكة ميكروية، والأجهزة والطريقة لتعويض الاستطاعة الردية، ومن ثم الاستعانة ببرنامج MATLAB من أجل المحاكاة حاسوبياً وفق خوارزمية تحكم تم اقتراحها بهدف إدارة الاستطاعة الردية والتحكم بها في الدارة المصممة لهذه الغاية. تم اجراء محاكاة لعدد من السيناريوهات وفقاً لحالات تتغير فيها الشروط سواء تلك المتعلقة بالتشغيل أو بالأحوال الجوية. كما تم اجراء محاكاة لجزء من الشبكة الكهربائية السورية بافتراض ربطها مع منظومة كهروشمسية، والتحقق من جدوى الإدارة والتحكم بحقن الاستطاعة الردية في المحافظة على استقرار الشبكة الكهربائية. يعرض الفصل الخامس النتائج المستخلصة من الدراسة العملية وينتهي بعدد من التوصيات لأبحاث مستقبلية تهتم بتطوير تقنيات الإدارة باستخدام الذكاء الصناعي بهدف الوصول إلى الكفاءة والأداء الأمثل للشبكات الكهربائية مع الحفاظ على البيئة.

الفصل الثاني

الدراسات المرجعية Reference Studies

الدراسة المرجعية الأولى:

Reactive Power Management Strategies in Future Smart Grids[1]

Hugo Morais, Tiago Sousa, Pedro Faria, Zita Vale 2013

استراتيجيات إدارة الاستطاعة الردية للشبكات الذكية في المستقبل

الهدف من البحث: هو إيجاد الاستراتيجية الأفضل لنموذج من الشبكة الذكية لتحقيق كفاءة أكبر في الشبكات الموزعة والتغلب على الاختراقات لمصادر الطاقة الموزعة.

المنهجية: اقترح عدد من استراتيجيات التحكم بالاستطاعة الردية مع الأخذ بعين الاعتبار نموذج الشبكات الذكية. تم استخدام خوارزمية بالاعتماد على شبكة (VPP) (Virtual Power Plant) من أجل إدارة مصادر الطاقة الموزعة DG.

VPP هي شبكة افتراضية قادرة على تشغيل مختلف مصادر الطاقة الموزعة حيث يتم جمع سجل من المعلومات السابقة وعلى التنبؤ بالمعلومات اليومية (الاستهلاك - التوليد) لدعم عملية إدارة مصادر الطاقة. الهدف الرئيسي في إدارة الشبكة الموزعة هو ضمان التشغيل ضمن مجال التوتر المسموح والتأكد من حدود الحرارة للخطوط والكابلات.

قدم البحث عدة سيناريوهات لإدارة الاستطاعة الردية لشبكة توزيع تتكون من عدة مصادر للتوليد الموزع. **النتيجة:** إن استخدام الخوارزمية المطروحة في هذا البحث كانت أداة مناسبة لإدارة الاستطاعة الردية حيث تسمح بزيادة مصادر التوليد الموزع واستقرار عملية التشغيل والحد من الضياعات في شبكة التوزيع واستقرار التوتر.

Inverter- Reactive Power Management of MV Distribution Grid with based PV Distributed Generations using PSO Algorithm[2]

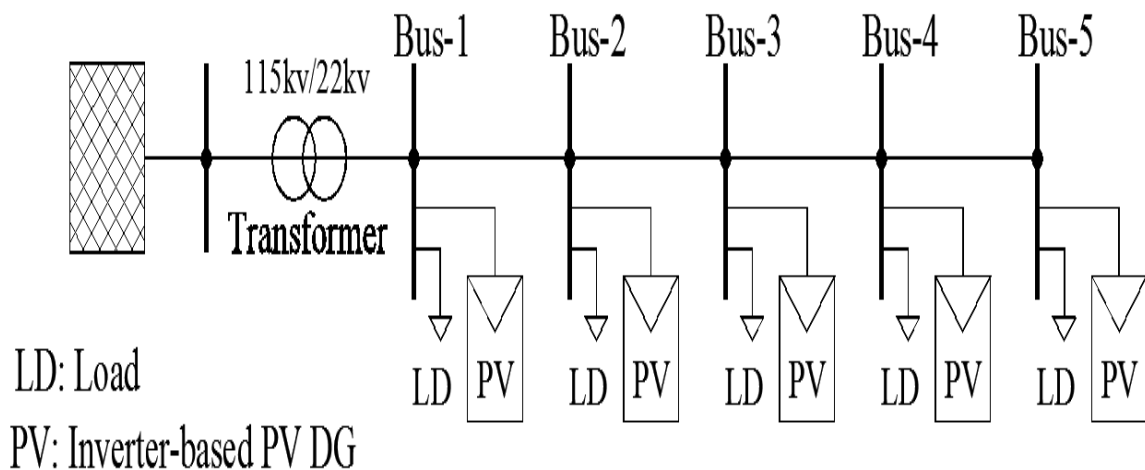
Wittaya Moondee and Watcharin Srirattanawichaikul. 2019

إدارة الاستطاعة الردية لشبكة توزيع التوتر المتوسط المتصلة مع أنظمة كهروضمسية معتمدة على

الانفيرتر باستخدام خوارزمية PSO

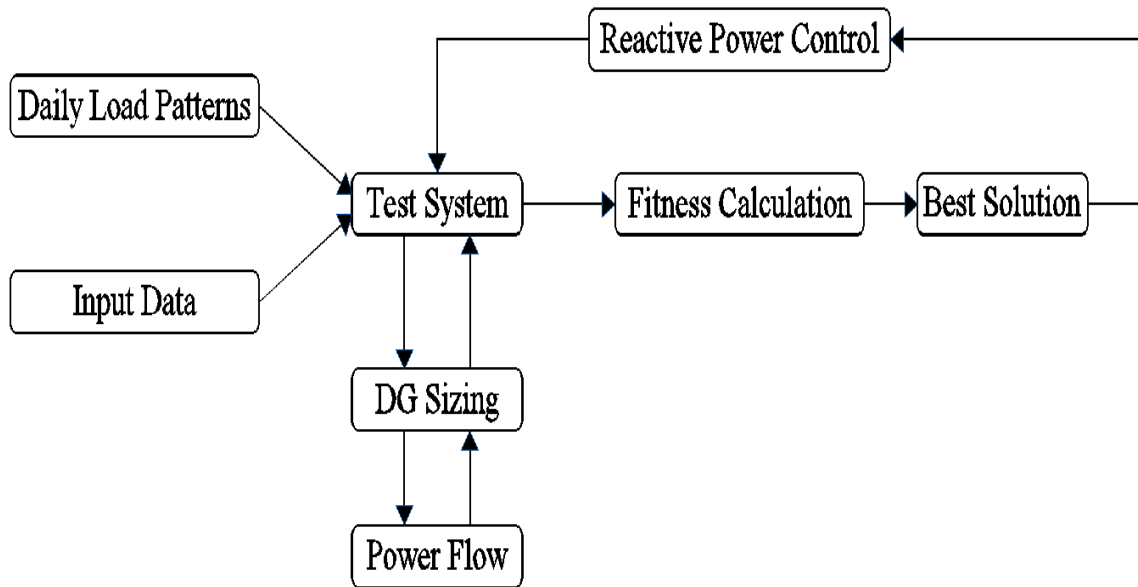
الهدف من البحث: هو التحكم بجريان الاستطاعة الردية لدعم شبكة التوزيع وتنظيم التوتر بالاعتماد على خوارزمية تحكم الإدارة المركزية للاستطاعة الردية في شبكات توزيع التوتر المتوسط بتحديد الموقع الأمثل لكل من أنظمة التوليد الطاقة الشمسية، وتخصيص الاستطاعة الردية المناسبة لكل نظام توليد كهروضمسي.

الحالة المدروسة: هي عبارة عن نظام توليد كهروضمسي مربوط شعاعياً مع خمس من الباسبارات في شبكة التوزيع. إن عدم التطابق بين الاستطاعة المولدة والطلب بسبب تأرجح توليد النظام الكهروضمسي يؤدي إلى ارتفاع التوتر في نقطة الوصل.



الشكل (1-2) ربط أنظمة كهروضمسية مع شبكة التوزيع [2]

المنهجية: قدم هذا البحث منهجاً لإدارة الاستطاعة الردية لشبكة التوتر المتوسط (MV) مع نظم توليد كهروشمسية بالاعتماد على خوارزميه السرب Particle Swarm Optimization PSO التي تعتمد على معلومات الأحمال والاستطاعة الردية لكل نظام كهروشمسي. تستخدم هذه المعلومات كنموذج لتغيرات الاستطاعة في شبكة التوزيع. تمكنت الخوارزمية المطروحة من التحكم بكل قيم التوترات عند الباسبارات بالحدود المسموحة، مما أدى إلى تخفيض ضياعات الاستطاعة الفعالة وتحسين التوتر.

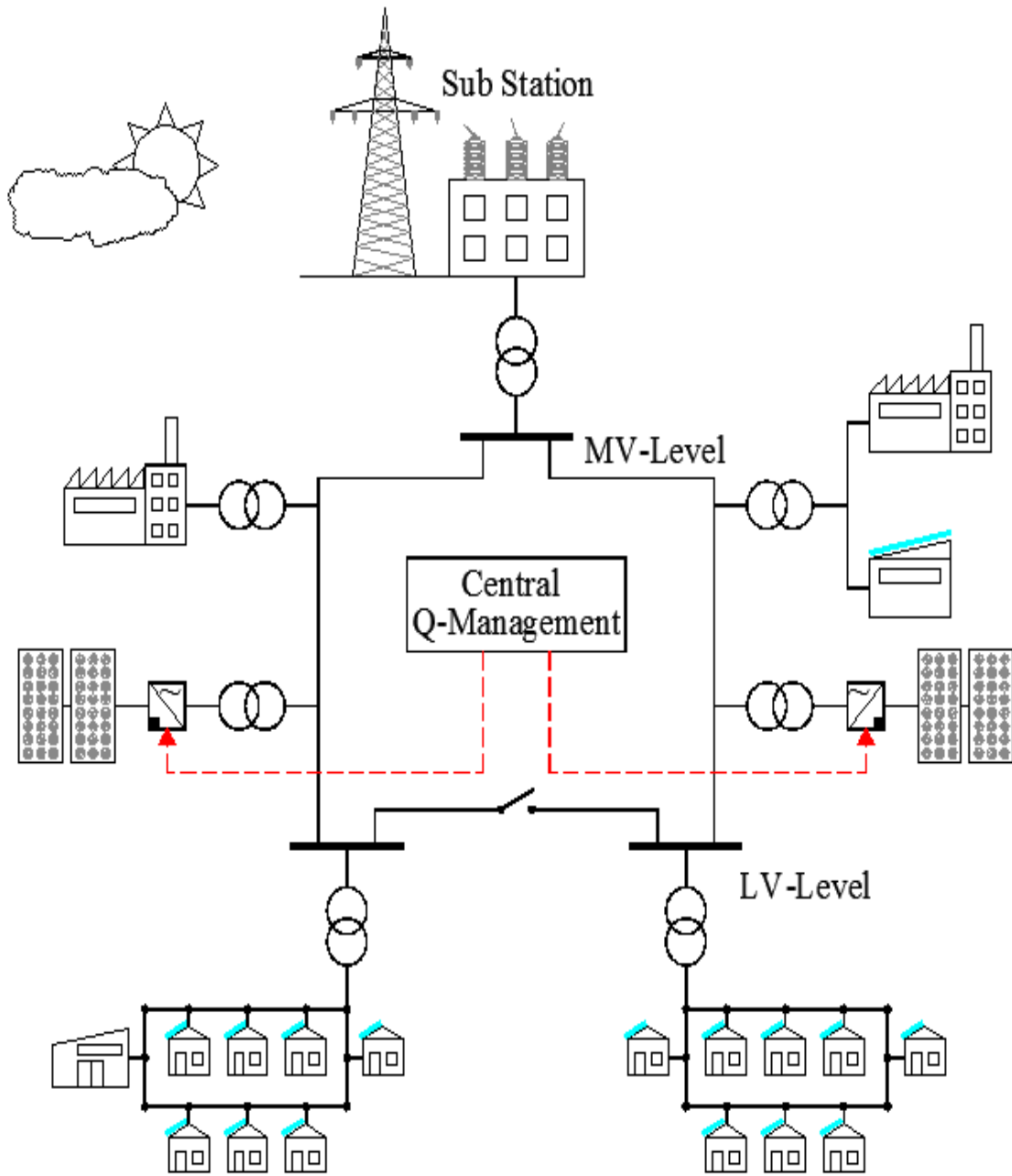


الشكل (2-2) خوارزمية التحكم المطروحة [2]

تم طرح عدة منهجيات للتحكم بنظام التوزيع (مركزية ولا مركزية ومحلية)، ومحاكاة النظام المقترح باستخدام برنامج

DlgSILENTPower Factory، MATLAB

النتيجة: إن استخدام الخوارزمية PSO حقق الوظائف المطلوبة من حقن الاستطاعة الردية المناسبة للحفاظ على التوتر بالحدود المسموحة على الباسبارات.

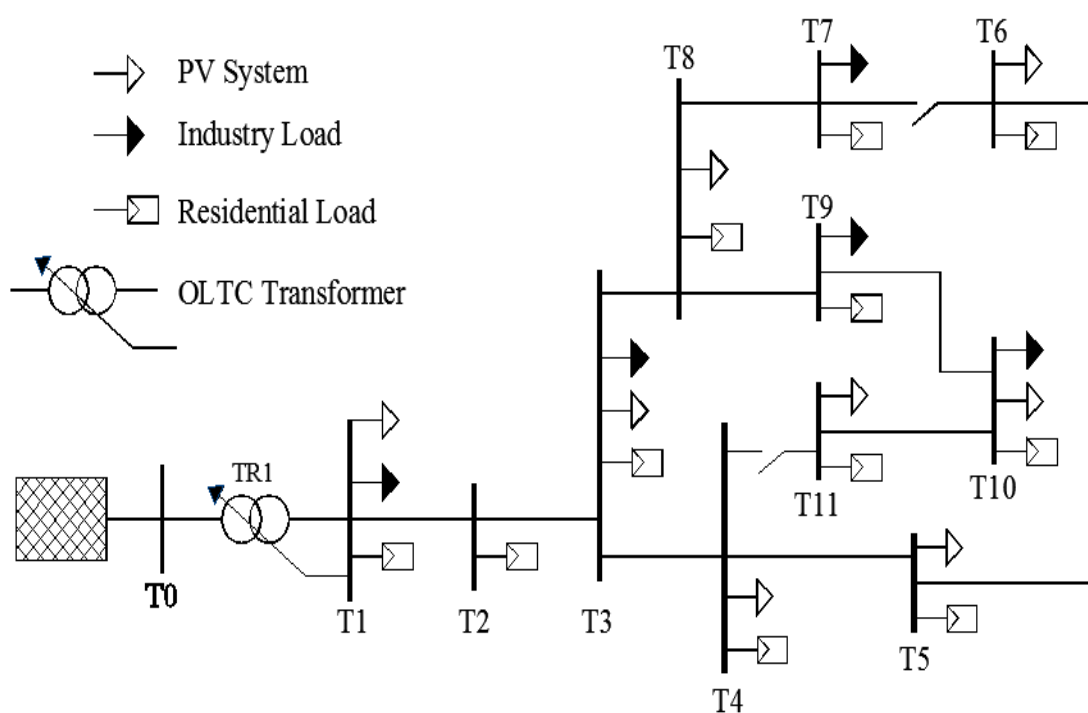


الشكل (3-2) التحكم المركزي بالاستطاعة الردية للأنظمة الكهروشمسية وربطها مع الشبكة [2]

Parallel Operation of Transformers with On Load Tap Changer and Photovoltaic Systems with Reactive Power Control[3]

M. Kraiczy, T. Stetz, M. Braun 2016

التشغيل على التوازي لمحولات مع OLTC والأنظمة الكهروضمسية للتحكم بالاستطاعة الردية



الشكل (2-4) توزيع نظام الكهروضمسي والأحمال على الشبكة وربطها مع محولة OLTC[3]

الهدف من هذا البحث: تسليط الضوء على أن التشغيل المشترك لمحولات OLTC والأنظمة الكهروضمسية من خلال استراتيجيات مختلفة مع التحكم بالاستطاعة الردية لا DG يعطي إمكانية كبيرة لتحسين تنظيم التوتر في شبكات التوزيع مع الاختراقات العالية لا DG (مثال: التحكم بالاستطاعة الفعالة/عامل الاستطاعة، Volt/Var، تحكم بالاستطاعة الردية)، حيث أنه من أهم التحديات الكبيرة في تشغيل أنظمة DGs هي تنظيم التوتر في شبكات التوزيع.

المنهجية: قدم هذا البحث دراسة منهجية لتشغيل المشترك للـ OLTC و PV RPC بهدف التحكم بالاستطاعة الردية (Reactive Power Control).

يمكن بشكل عام وفي بيئة الشبكة الذكية مع وجود منهجية التحكم بالأنظمة الكهروشمسية ومنظمات التوتر أن تحسن من كفاءة التشغيل المشترك لمختلف مواقع التحكم، وتلعب منهجيات التحكم دوراً مهماً بسرعة الاستجابة. **النتيجة:** تم تقييم التشغيل المشترك (على التوازي) للتحكم بمنظمات التوتر لمحولات الـ OLTC والتحكم بالاستطاعة الردية للأنظمة الكهروشمسية.

تبين أن التحكم بالاستطاعة الردية PV RPC يمكن أن يسبب تغيرات في التوتر مما يؤدي إلى زيادة عدد مرات التشغيل الـ OLTC. إن التركيز على التداخلات أعطى إمكانية كبيرة لتحسين تنظيم التوتر في شبكات التوزيع عند نسب الاختراقات العالية للـ DG.

الدراسة المرجعية الرابعة:

A Dynamic Master /Slave Reactive Power-Management Scheme for Smart Grids with Distributed Generation [4]

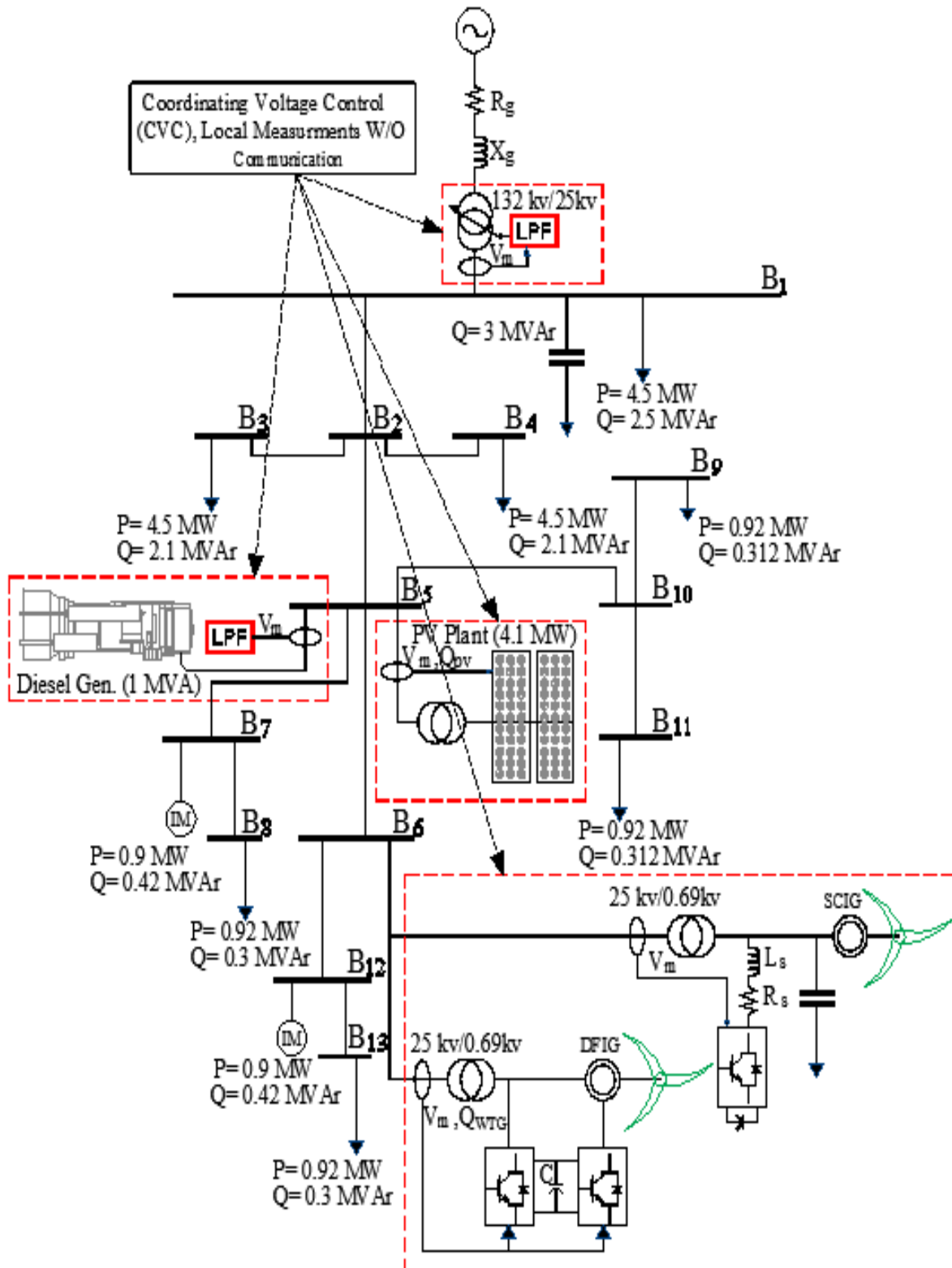
Mohamed Shawky El Moursi, H. H. Zeineldin, James L. Kirtley, Jr, and Khaled Alobeidli 2013

خطة ديناميكية لإدارة الاستطاعة الردية القائد/المقاد لشبكات الذكية مع التوليد الموزع

الهدف من البحث: طرح خطة تنسيق جديدة للتحكم بالتوتر بشبكات التوليد الموزع تعتمد على التكيف مع التغير الديناميكي لتشغيل التجهيزات (نظم كهروشمسية -مولدة- OLTC) ضمن الشبكة الذكية بالاعتماد على شروط النظام: شروط اقتصادية حسب كلفة التشغيل، وشروط فنية حسب نسبة تحميل المنبع وتحميل الخط. حيث أن الخطة المقترحة تفرض استجابة للتحكم بالتجهيزات لتنسيق الاستطاعة الردية ضمن وحدات التوليد الموزع والـ OLTC.

إن نظام التوزيع النمذج يشمل وحدات التوليد الموزع (نظم كهروشمسية- عنفات ريحية) و OLTC. **المنهجية:** اقترح البحث نهج مركزي لتنسيق أجهزة التعويض المختلفة ومنظمات التوتر للتخفيف من تأثير تشغيل ودخول وحدات DG على توتر النظام. استخدمت خوارزمية تقوم بتحديد عدد أجهزة التعويض بحيث تقلل الضياعات وانحراف التوتر الى الحد الأدنى.

النتيجة: قدم هذا البحث خوارزمية تعتمد على التغيرات الديناميكية في خطة التحكم القائد والمقاد لمصادر التوليد الموزع والـ OLTC ضمن الشبكة الذكية بالاعتماد على محددات التوتر والاستطاعة الردية وأثبتت أنها قادرة على تحقيق حدود التنظيم المطلوبة في حالة الذروة للوصول للحالة المستقرة للتشغيل. وأظهر البحث أداءً عالياً لتحسين التوتر وزيادة احتياطي الاستطاعة الردية.



الشكل (2-5) تنسيق الأحمال مع التوليد الموزع والمولدات [4]

الدراسة المرجعية الخامسة:

New Power Management Strategies for a Micro grid with Storage Systems Energy[5]

Kong Xian-guoa, Liu Zong-qia, Zhang Jian-huaa 2012

الاستراتيجيات الجديدة لإدارة الاستطاعة للشبكات الميكروية بوجود أنظمة تخزين الطاقة

الهدف من البحث: تخفيف تأرجح التوتر في الشبكة الميكروية. سمح تطور تقنيات الكترونيات القدرة بربط مصادر الطاقة المتجددة وأنظمة تخزين الطاقة إلى الشبكة حيث تسمح بدخول وحدات التوليد الموزع إلى الشبكة لتشكل شبكة ميكروية، ولكن الاستطاعة المولدة من أغلب مصادر الطاقة المتجددة (نظم كهروشمسية -عنفات الرياح) تتأثر بالعوامل الطبيعية لهذا سيتأثر مطال التوتر وزاوية الاستقرار للنظام بهذه التغييرات.

المنهجية: اقترح البحث استراتيجية لإدارة الاستطاعة لوحدة التوليد الموزع في الشبكة الميكروية مع التحكم بنظام تخزين الطاقة لتعويض مفايد الطاقة بأقل استطاعة وأقل تأثير على الشبكة.

مصادر التوليد الموزع النظم الكهروشمسية - خلايا الوقود - أنظمة تخزين الطاقة مثل البطاريات - المكثفات في شبكة التوزيع.

الطريقة المتبعة بالتحكم في هذا البحث هي التحكم بالتوتر والاستطاعة الردية من خلال إشارات القياس مما يقدم الاستجابة السريعة للاضطرابات والحالات العابرة التي تحدث بسبب تغييرات في النظام حيث تستخدم أنظمة تخزين الطاقة للتعويض أو الحد من اضطرابات الاستطاعة.

النتيجة: من خلال طرق لإدارة الاستطاعة الفعالة والردية وتخزين الطاقة (مكثفات -بطاريات) تم تصميم تحكم مركزي أدى إلى زيادة الوثوقية والاستقرار في الشبكة الميكروية.

مما سبق يمكن تلخيص الدراسات المرجعية وفق الجدول التالي:

عنصر الشبكة	عنصر التحكم	منهجية التحكم	
توليد موزع + أحمال	أنظمة الكترونيات القدرة	VPP	الدراسة الأولى
توليد موزع (PV) + أحمال	أنظمة الكترونيات القدرة الموزعة على كل باسبار في الشبكة	PSO	الدراسة الثانية
توليد موزع + محولات متحكم بخرجها + أحمال	Tap changer + PV	تحكم مشترك بين التوليد الموزع ومحولات الربط	الدراسة الثالثة
توليد موزع (Wind + PV) (Turbine + Diesel Gen. + محولات + أحمال	أنظمة الكترونيات القدرة	Master / Slave	الدراسة الرابعة
توليد موزع + تخزين + أحمال	أنظمة الكترونيات القدرة التي تربط DG والتخزين	تحكم تقليدي	الدراسة الخامسة

الجدول (1-2) مقارنة بين الدراسات المرجعية

الفصل الثالث

الدراسة النظرية

يبدأ هذا الفصل بتعريف مفهوم استقرار الشبكة الكهربائية وكيفية تحقيقه باعتماد أحد استراتيجيات الإدارة الذكية المختلفة والمتبعة بهدف تعويض الاستطاعة الردية. ثم يبين أهمية الاستطاعة الردية وتأثيرها على الشبكة الكهربائية والنماذج الرياضية لحسابها، والأجهزة والطرق المتبعة لتعويضها.

1.3. استقرار النظام الكهربائي:

هو قدرة النظام على البقاء بحالة توازن واستقرار أثناء حالة التشغيل الطبيعية بالتزامن مع الأعطال والاضطرابات التي يمكن أن تحدث عليه أثناء الحالات الطارئة.

يلعب استقرار التوتر الدور الرئيس في استقرار الأنظمة الكهربائية، ومن العوامل المهمة في عدم استقرار التوتر هو عدم قابلية النظام على تلبية تغيرات الاستطاعة الردية عند تحميل النظام لإبقاء التوتر في المستوى المطلوب. فمثلاً عند حدوث اضطرابات على شبكة التوزيع الكهربائية ولا تستطيع وحدات التوليد الموزع (الأنظمة الشمسية أو العنفات الريحية) المدموجة معها حقن استطاعة ردية بنفس قدر المولدات التزامنية فإن ذلك سيؤدي إلى زعزعة استقرار الشبكة، وإذا لم يتم توفير استطاعة ردية كافية ستدخل الشبكة في حالة عدم استقرار وسينهار التوتر ويؤدي إلى انقطاع التيار الكهربائي والتسبب في التعتيم الكامل للنظام وخروجه عن الخدمة. لذلك يلزم الحفاظ على كمية كافية من الاستطاعة الردية لتحسين التوتر والحفاظ على الاستقرار في الشبكة [6][7].

1.1.3. استقرار التوتر:

السبب الرئيس لعدم استقرار التوتر هو عدم إمكانية نقل الاستطاعة الردية لمسافات طويلة كما لا يمكن أن تصل مباشرة بقيمتها المرسله، لذلك تحتاج إلى التعويض. يتوجب إنقاص الاستطاعة الردية المنقولة للأسباب التالية:

- لا يمكن نقل الاستطاعة الردية عبر زوايا استطاعة كبيرة، حيث أن الزوايا الكبيرة تحدث بسبب طول

الخطوط وكبر الاستطاعة المنقولة.

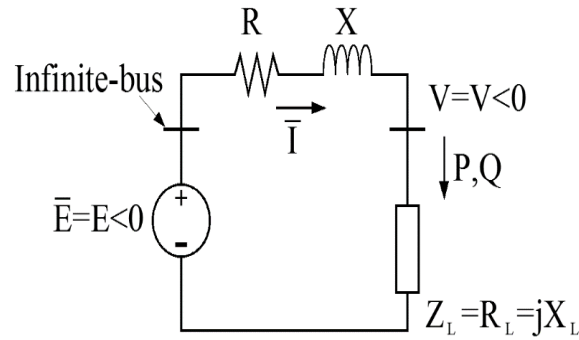
- التقليل من ضياعات الاستطاعة الفعلية والردية، ينبغي تقليل الضياعات الفعلية لأسباب اقتصادية، وكما يجب إنقاص الضياعات الردية من أجل تخفيض كلفة الاستثمارات في أجهزة الاستطاعة الردية.
- تعتمد كلا الضياعات الفعلية P_{loss} والردية Q_{loss} على الاستطاعة المنقولة [8] حيث أن:

$$Q_{loss} = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \times X \quad (1-3)$$

$$P_{loss} = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \times R \quad (2-3)$$

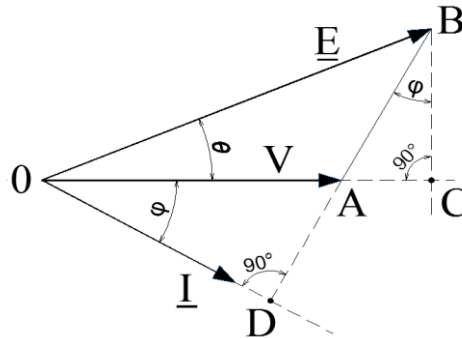
2.1.3. علاقة الاستطاعة والتوتر $P-V$ و $Q-V$:

يبين الشكل (1-3) نظام بسيط مؤلف من حمل وحيد مغذى من باسبار لانهائي عبر خط نقل حيث أن قيمة كلاً من التوتر وتردد الباسبار اللانهائي ثابتة [8].



الشكل (1-3) نظام دائرة بسيطة [8]

في الشكل (2-3) تم اعتبار مقاومة خط النقل مهمة، وتوتر الحمل (V) وزاوية الطور (θ)



الشكل (2-3) المخطط الشعاعي بإهمال مقاومة الخط [8]

يمكن حساب ما يلي:

$$[BC] = XI \cos \varphi = E \sin \theta \Rightarrow I \cos \varphi = \frac{E}{X} \sin \theta \quad (3-3)$$

$$[AC] = XI \sin \varphi = E \cos \theta - V \Rightarrow I \sin \varphi = \frac{E}{X} \cos \theta - \frac{V}{X} \quad (4-3)$$

حيث: XI هيوط الجهد على المفاعلة الحثية، $\cos \varphi$ معامل القدرة (Power Factor).

تعطى P الاستطاعة الفعلية (Active Power) بالعلاقة:

$$P = VI \times \cos \varphi \quad (5-3)$$

وبالتالي يمكن حساب المعادلة الأولى لجريان الحمولة:

$$P = \frac{E \times V}{X} \sin \theta \quad (6-3)$$

تعطى Q الاستطاعة الردية (Reactive Power) بالعلاقة:

$$Q = V \times I \times \sin \theta \quad (7-3)$$

وبالتالي تكون المعادلة الثانية لجريان الحمولة:

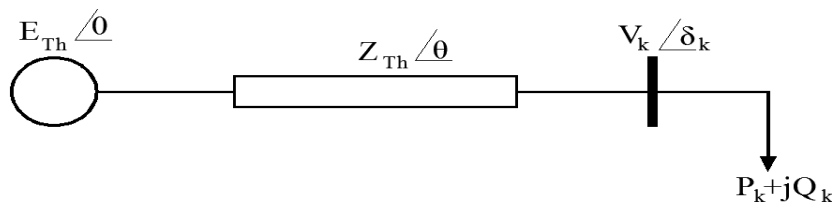
$$Q = \frac{E \times V}{X} \times \cos \theta - \frac{V^2}{X} \quad (8-3)$$

حيث: V جهد الحمل، I تيار الحمل، E الجهد المصدر، X المفاعلة الحثية للحمل ($X-L$).

φ زاوية فرق الطور بين الجهد V والتيار، θ زاوية فرق الطور بين V و E .

تلعب الاستطاعة الردية دوراً مهماً في شبكة التوزيع خاصة بإدارة توتر الشبكة وضمان استقرارها.

بفرض أن الدائرة المكافئة لنظام الاستطاعة [11] كما في الشكل (3-3):



الشكل (3-3) الدائرة المكافئة لنظام الاستطاعة [29]

حيث: الاستطاعة الظاهرية S_k :

$$S_k = V_k I_k = \left(\frac{V_k V_k}{Z_{Th}} \right) \angle \theta - \left(\frac{V_k E_{Th}}{Z_{Th}} \right) \angle (\theta + \delta_k) \quad (13-3)$$

الاستطاعة الفعلية P_k :

$$P_k = \left(\frac{V_k V_k}{Z_{Th}} \right) \cos(\theta) - \left(\frac{V_k E_{Th}}{Z_{Th}} \right) \cos(\theta + \delta_k) \quad (14-3)$$

الاستطاعة الردية Q_k :

$$Q_k = \left(\frac{V_k V_k}{Z_{Th}} \right) \sin(\theta) - \left(\frac{V_k E_{Th}}{Z_{Th}} \right) \sin(\theta + \delta_k) \quad (15-3)$$

حيث: E_{Th} توتر ثفينن المكافئ، Z_{Th} ممانعة ثفيننن المكافئة، V_k توتر العقدة، δ_k زاوية التوتر عند العقدة K تيار المار بالعقدة K .

وعند التغيرات الصغيرة للتوتر الاسمي ∂V_k فإن التغير في الاستطاعة الفعالة والردية يكون حسب التالي:

$$\frac{\partial P_k}{\partial V_k} = \left(\frac{2V_k}{Z_{Th}} \right) \cos(\theta) - \left(\frac{E_{Th}}{Z_{Th}} \right) \cos(\theta + \delta_k) \quad (16-3)$$

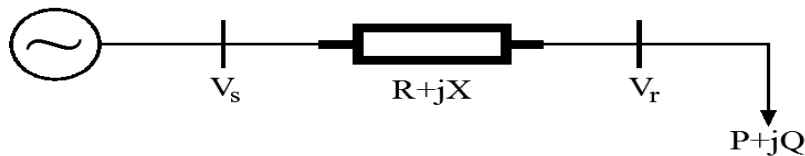
$$\frac{\partial Q_k}{\partial V_k} = \left(\frac{2V_k}{Z_{Th}} \right) \sin(\theta) - \left(\frac{E_{Th}}{Z_{Th}} \right) \sin(\theta + \delta_k) \quad (17-3)$$

وعند التغيرات الصغيرة لزاوية الطور δ_k فإن التغير في الاستطاعة الفعالة والردية يكون حسب التالي:

$$\frac{\partial P_k}{\partial \delta_k} = \left(\frac{V_k E_{Th}}{Z_{Th}} \right) \sin(\theta + \delta_k) \quad (18-3)$$

$$\frac{\partial Q_k}{\partial \delta_k} = - \left(\frac{V_k E_{Th}}{Z_{Th}} \right) \cos(\theta + \delta_k) \quad (19-3)$$

في نظام التوزيع التقليدي ينخفض التوتر من طرف LV، الشكل (4-3)



الشكل (4-3) الدارة المكافئة للشبكة [29]

في شبكات التوزيع يكون تغير زاوية الطور صغير جداً بسبب المفاعلة الصغيرة

$$V_s = V_r + I(R + jX) \quad (20-3)$$

$$I = \frac{P-jQ}{V_r^*} = \left[V_r + \frac{RP+XQ}{V_r} \right] + j \left[\frac{XP-PQ}{V_r} \right] \quad (21-3)$$

$$V_s - V_r = \frac{RP+XQ}{V_r} \quad (22-3)$$

$$V_s = V_r + \frac{RP+XQ}{V_r} \quad (23-3)$$

$$\Delta V = \frac{RP+XQ}{V_r} \quad (24-3)$$

حيث: V_s توتر الارسال، V_r توتر الاستقبال، I تيار الحمل المار في الخط، R مقاومة الخط، X المفاعلة الحثية للخط

يتبين من المعادلات أن هبوط التوتر له علاقة بعامل الاستطاعة المتعلق بالحمل والمقاومة فإن حقن الاستطاعة الردية يُمكن من تخفيض هبوط التوتر وبالتالي يمكن تحديد الضياعات على الخط.

$$I^2 R = \left[\frac{P^2+Q^2}{V_r^2} \right] R \quad (25-3)$$

وفقاً للمعادلة فإن كلاً من الاستطاعة الحقيقية والردية تحد من الضياعات.

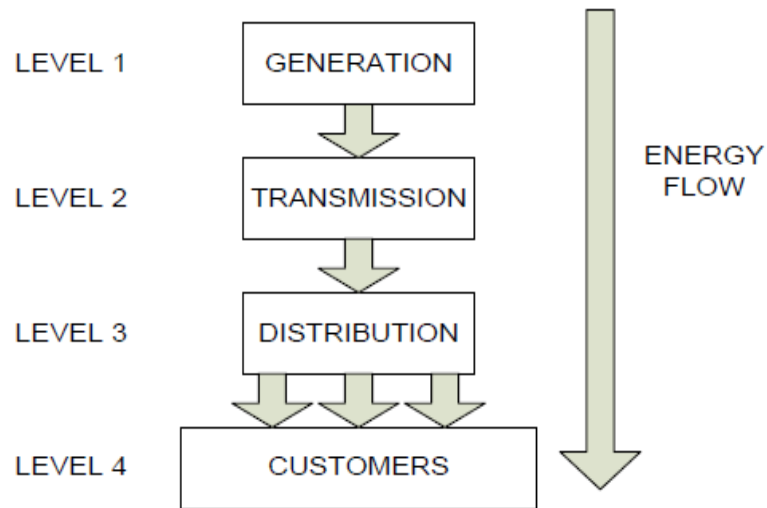
وبتحسين عامل الاستطاعة للحمل فإن الضياعات تنخفض وبالتالي يمكن خفض الاستطاعة الردية المحقونة في الشبكة.

2.3 مفهوم التوليد الموزع:

يتم التوليد والتغذية بالقدرة الكهربائية وفق المراحل التالية كما هو مبين في الشكل (3-5) [10]،[11]:

- المرحلة الأولى: يتم توليد القدرة الكهربائية في محطات التوليد الضخمة، والتي تكون عادة متوضعة في مناطق غير مزدحمة بالسكان وبعيدة عن الأحمال لتتماشى مع قضايا بيئية واقتصادية، حيث تكون عادة بالقرب من مصادر الطاقة وبعيدة عن مراكز الاستهلاك.
- المرحلة الثانية: إيصال الطاقة الكهربائية إلى المستهلكين عن طريق أنظمة التوزيع الضخمة، والتي تتضمن شبكات التوتر بجميع سوياتها العالي والمتوسط والمنخفض ويتم ذلك بدعم من مختلف أنواع التجهيزات مثل المحولات وخطوط نقل القدرة والكابلات.

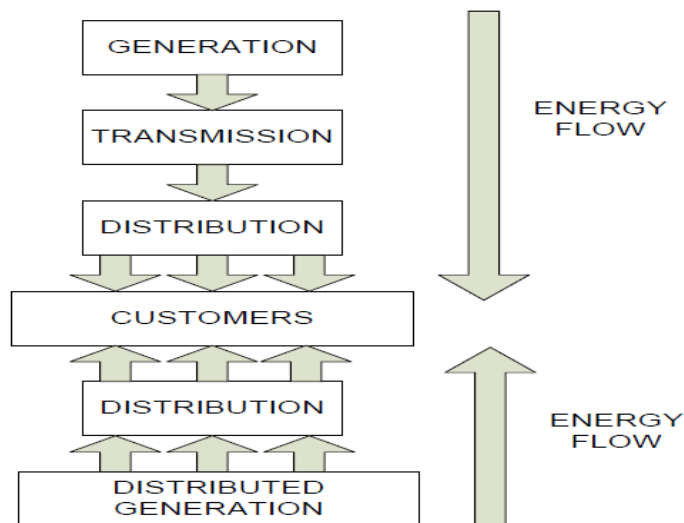
- المرحلة الثالثة والأخيرة: هي مرحلة التوزيع، والتي تربط بين نظام الاستخدام والمستهلكين. وهذه المرحلة هي الأهم في نظام القدرة، حيث تعتمد جودة الطاقة النهائية على موثوقية هذه المرحلة [11]. تصمم شبكات التوزيع لتعمل بشكل شعاعي (أي أن اتجاه جريان الاستطاعة يكون باتجاه واحد) من سويات التوتر العالي إلى المستهلكين المتوزعين على طول المغذيات الشعاعية. إن تزايد الطلب على الطاقة الكهربائية يستدعي زيادة الطاقة المولدة لتلبية متطلبات الطلب على الطاقة، واجهت أنظمة القدرة التقليدية هذه الزيادة بتركيب أنظمة دعم جديدة للسوية الأولى. بينما صارت إضافة خطوط نقل أو توزيع أقل تكراراً.



الشكل (3-5) المفهوم الصناعي التقليدي لمنبع التغذية بالطاقة الكهربائية.

1.2.3 مفهوم جديد لأنظمة القدرة:

يشجع التطور التقني والسياسات البيئية والنمو الاقتصادي على العمل في قطاع التوليد الموزع [11]، حيث تسمح التقنيات الجديدة بتوليد الطاقة الكهربائية في منشآت أصغر حجماً، وزيادة استخدام منابع الطاقات المتجددة بهدف التخفيف من الأثر البيئي لمحطات التوليد. قاد ذلك إلى تطوير واستخدام مخططات منابع تغذية كهربائية جديدة. وفق هذا المفهوم، أصبح التوليد أقل كلفة بالنسبة للسوية الأولى، بما أن جزء من الطلب على الطاقة مغذى من محطات توليد مركزية وجزء آخر ينتج توليد موزع، يبين الشكل (3-6) المفهوم الجديد لأنظمة القدرة.



الشكل (3-6) المفهوم الجديد لمنبع التغذية بالطاقة الكهربائية

2.2.3 إيجابيات وسلبيات التوليد الموزع:

فيما يلي عدد من الإيجابيات والسلبيات التوليد الموزع [12]، [13].

الاييجابيات:

- يزيد ربط التوليد الموزع من موثوقية منبع التغذية للمستهلك باستخدام منابع تغذية محلية، ومن إمكانية التخفيف من الضياعات لأنظمة نقل وتوزيع الطاقة.
- يحسن ربط التوليد الموزع منحنى التوتر لنظام القدرة، وجودة الطاقة ويدعم استقرار التوتر، مما يجعل أداء النظام أكثر ثباتاً عند ظروف التحميل الأعلى.
- يحتاج التوليد الموزع وقت تركيب أقل وفترة تحصيل أقل. تقدم العديد من الدول إعانات مالية لتطوير مشاريع الطاقات المتجددة من خلال حقايب الزامية وشهادات توليد طاقة صديقة للبيئة. يحفز ذلك الاستثمار في منشآت توليد صغيرة.
- تمتلك بعض هذه التقنيات سوياات تلوث منخفضة ومردود كلي جيد، فمثلاً تساهم منابع الطاقات المتجددة المعتمدة على الخلايا الشمسية والعنفات الريحية في التخفيف من الغازات التي ترفع من درجة حرارة الأرض.

السلبيات:

- تربط بعض أنواع هذه المولدات إلى الشبكة عن طريق مبدلات القدرة، والتي تحقق توافقيات في النظام.
- اعتماداً على بنية الشبكة، قد تزيد سوية الاختراق وطبيعة تقنية نظام DG والطاقة المحقونة منه في ضياعات القدرة في نظام التوزيع.

- تتغير سويات القصر عند ربط أنظمة DG إلى الشبكة، وبالتالي سوف يتغير تعيير حاكمات الحماية. في حال تم فصل نظام DG يجب إعادة تعيير حواكم الحماية إلى الإعدادات القديمة.

تحديد المشكلة:

يزداد بشكل متسارع الطلب على القدرة الكهربائية، والمهمة الأساسية لمهندسي الطاقة الكهربائية هي توليد الطاقة الكهربائية من مصادر الطاقة المتجددة للتغلب على هذه الزيادة في استهلاك الطاقة وفي نفس الوقت التخفيف من الأثر البيئي لتوليد الطاقة. يمكن استخدام مصادر الطاقات المتجددة إما في التطبيقات صغيرة الحجم بعيدة عن محطات التوليد الكبيرة الحجم أو في تطبيقات كبيرة الحجم حيث يكون المنبع متوفر وتستخدم أنظمة تحويل كبيرة [14].

تظهر المشاكل عندما يتم وضع محطة توليد جديدة في شبكة توزيع القدرة، بسبب أن أنظمة التوزيع التقليدية مصممة للعمل بشكل شعاعي في الحالة الطبيعية، وبدون الأخذ بعين الاعتبار إدخال أي منبع في المستقبل. في الأنظمة الشعاعية، تجري الاستطاعة من سويات التوترات العالية باتجاه المستهلكين المتوزعين على نهايات المغذيات [13]، [15]. وبناءً عليه، فإن حاكمات حماية التيار الأعظمي الموجودة في الشبكة الشعاعية تعيير بشكل سهل لتعمل عند حدوث عطل ولكن فقط باتجاه واحد. مع زيادة مصادر الطاقة المتجددة الداخلة في شبكات التوليد والنقل يتطلب الأمر تصميم نظام حماية أكثر تعقيداً. وفقاً لهذه البيئة، يجب الأخذ بعين الاعتبار عدة نقاط مثل عدد ومكان توضع أنظمة DG المراد ربطها للشبكة، إضافة إلى تأثير سويات تيار القصر بسبب عدم تنسيق أجهزة الحماية بشكل واضح [16]، [17]، [18].

3.2.3 أنواع التوليد الموزع المختلفة:

يمكن تصنيف التوليد الموزع إلى مجموعتين: مجموعات توليد موزع معتمدة على مبدل وعلى آلات دوار، ومجموعات تستخدم المبدلات فقط بعد عملية التوليد. كما يمكن أن يكون التوتر المتولد مستمر أو متناوب، ولكن يتطلب ذلك تحويله إلى توتر وتردد اسمي نظامي. بناءً على ذلك، يجب تحويله لتوتر مستمر ثم تحويله لتوتر متناوب عند محددات نظامية من خلال التقويم [19].

سوف نعرض بشكل مختصر بعض الأنظمة: العنفات الريحية، والمولدات التزامنية والتحريرية، وخلايا الوقود، والعنفات المكروية، والأنظمة الطاقة الكهروشمسية.

1.3.2.3 العنفات الريحية:

تعتبر طاقة الرياح من المصادر الرخيصة للطاقة في العالم. يطلق تعبير المزرعة الريحية على المنطقة التي تحتوي على مجموعة عنفات ضمن نطاق جغرافي واحد وذلك للاستفادة من خاصية توفر التيارات الهوائية بشكل أفضل هذه المنطقة. وتعتمد الطاقة الكهربائية المولدة في المزارع الريحية على ثلاثة عناصر الآلات والرياح والموقع. وتتعلق تكاليف المزارع الريحية بعوامل عديدة أهمها حجم التوربينات وخصائص موقع البناء التحتي.

تحول العنفات الريحية طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية. إن الرياح مصدر للطاقة متغير بشدة، ولا يمكن تخزينها، وبناءً عليه، يجب التعامل معها وفقاً لهذه الخواص [18]. يتميز مبدأ عمل العنفات الريحية بخطوتي تحويل: الخطوة الأولى، يحدث الدائر الطاقة الكامنة في الرياح ويحولها إلى عزم ميكانيكي في المحور، وفي الخطوة الثانية، يحول نظام التوليد العزم السابق إلى طاقة كهربائية.

يعطى المولد في معظم أنظمة العنفات الريحية، توتر متناوب على خرجة وهو مرتبط بسرعة الرياح، وبما أن سرعة الرياح متغيرة، يتم تحويل التوتر المتولد إلى مستمر ثم يعاد تحويله إلى متناوب بمساعدة المبدلات [18]. توجد عدة طرائق لربط العنفات الريحية مع الشبكة، فمثلاً يمكن ربط المزارع الريحية مع الشبكة الكهربائية عن طريق محولة كهربائية تقوم برفع التوتر الناتج عن المزرعة الريحية إلى توتر مناسب لعملية النقل ومن ثم إلى

الشبكة الكهربائية، وتستخدم هذه الطريقة في حالة العنفات التي تعمل عند سرعة ثابتة تقريباً (عنفة مع علبة سرعة)، كما يمكن ربط العنفات الريحية عند سرعات متغيرة مع الشبكة عن طريق دارات تقويم الكترونية.

مزايا استثمار طاقة الرياح:

- مصدر طاقة متوفر في معظم البلدان.
- تنخفض أسعار الاستطاعة المركبة والقدرة المنتجة مع الزمن.
- تطور تقنيات العنفات الريحية بشكل كبير في العالم.
- مصدر دائم ونظيف بيئياً وبدون تكاليف للوقود.

مساوئ استثمار طاقة الرياح:

- عدم توفر الرياح بشكل دائم على مدار العام في بعض المناطق.
- تغيير مسارات الرياح وبالتالي تتغير القدرة المنتجة.
- صعوبات فنية تواجه مسائل وصل وفصل العنفات مع الشبكة العامة.
- مشكلة الضجيج.
- الكلفة العالية.

2.3.2.3 المولدات التزامنية والتحريضية:

المولدات التزامنية والتحريضية هي آلات كهربائية تحول الطاقة الميكانيكية إلى كهربائية ثم تحقن إلى الشبكة أو ترسل للحمل. تنتج الآلات التحريضية الطاقة الكهربائية عند تدوير محورها بسرعة أكبر من السرعة التزامنية عن طريق محرك رئيسي محدد (عنفة، آلة). يتغير اتجاه الفيض المغناطيسي كما تتغير جهة التيارات الفعالة، ويسمح ذلك للآلة بتأمين الطاقة للحمل أو الشبكة المربوط إليها. إن عامل استطاعة المولد التحريضي مرتبط بالحمل وبنظام التحكم، ويمكن تغير السرعة مع تغيير سرعة العنفة. إن كلفة وأداء هذا النظام جعل منه محط أنظار كبديل عن استخدام المولدات التزامنية [22].

تعمل المولدات التزامنية عند سرعات تزامنية محددة، وعليه يدور المولد عند سرعة ثابتة، وعلى العكس من المولدات التحريضية التي يقتضي تشغيلها عامل استطاعة متقدم، فإن للآلات التزامنية عامل استطاعة متغير، وبناءً على ذلك فهي ملائمة لتطبيقات تصحيح عامل الاستطاعة. يكون المولد مربوط إلى قضيب تجميع لا نهائي (نظام كهربائي ضخم جداً)، وليس له أي تأثير على تردد أو توتر النظام، وأيضاً، سوف يقود أو يتحكم هذا النظام بسرعة الدائر والتوتر على أطراف المولد.

تسبب تغيرات التهيج عادة تغيراً في عامل الاستطاعة، بينما تغير الاستطاعة الميكانيكية المقدمة على الدخل من استطاعة الخرج الكهربائية. وعليه عندما تعمل الآلات التزامنية على قضيب تجميع لا نهائي، سوف يسبب التهيج الزائد تأمين قدرة كهربائية عند عامل استطاعة متقدم [23].

3.3.2.3 خلايا الوقود:

تستخدم خلايا الوقود التي أغلبها يستخدم الغاز الطبيعي لتحويل الوقود إلى طاقة كهربائية، تحت ضغط قريب من الضغط الجوي. وهي تماثل تقنية إنتاج الكهرباء باستخدام المولدات لكن على خلاف المدخرات، التي تنتج الكهرباء من المواد الكيميائية المخزنة، تنتج خلايا الوقود الكهرباء عندما يصل الهيدروجين إلى القطب السالب للخلية والأكسجين الموجود في الهواء إلى القطب الموجب. في خلايا الوقود يكون الهيدروجين والأكسجين منفصلين بالمحلول الكهربائي بهدف توليد كمون كهروكيميائي. هذا الكمون يعطي تيار مستمر بواسطة بروتونات الهيدروجين المتحركة خلال المحلول الكهربائي والالكترونات الجارية في دائرة كهربائية مستقلة.

من مميزات خلايا الوقود أنها لا تستعمل عملية الاحتراق لإنتاج الكهرباء، وخلايا الوقود لا تظهر أي اهتزاز ولا تسبب أي ضجيج، وبالتالي فإن انبعاثات الخلايا الوقودية تكون مهمة بالمقارنة مع الوسائل التقليدية في إنتاج الكهرباء. إلا أن العقبة الرئيسية لخلايا الوقود أن كلفتها أعلى بكثير من تكلفة أرخص أنواع التوليد الموزع.

4.3.2.3 العنفات المكروية:

إن العنفة المكروية هي آلية تستخدم جريان الغاز لتحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية، يمزج عنصر الاشتعال (الغازي العادي) في غرفة الاشتعال مع الهواء، ثم يضخ عن طريق الضاغط يجعل هذا المزيج العنفة تدور، والتي في نفس الوقت، تدفع المولد والضاغط تثبت في معظم التصاميم العنفة والضاغط على نفس المحور مع المولد.

لا يمكن ربط خرج هذه العنفة مباشرة إلى الشبكة الكهربائية أو استخدامه، ويجب تحويله إلى توتر مستمر ثم إعادة تحويله لتوتر متناوب عند التردد والتوتر الاسميين. من أهم ميزات العنفات المكروية أن تشغيلها نظيف ومردودها جيد. من ناحية أخرى من عيوبها أن كلفة الصيانة مرتفعة ونقص الخبرة العملية في هذا المجال ثم تشغيل عنفات مكروية صغيرة الحجم لفترات زمنية كافية لتحقيق معطيات موثوقة لهذا المجال[19].

5.3.2.3 أنظمة الطاقة الكهروشمسية:

تحول الأنظمة الكهروشمسية الضوء المستقبل من الشمس إلى طاقة كهربائية. تستخدم المواد النصف ناقلة في تصنيع الألواح الكهروشمسية، وحين تعرضها لأشعة الشمس تحول الطاقة الذاتية للفوتونات إلى كهرباء. توضع الألواح على شكل صف ثابت أو متحرك للمحافظة على ملاحقة الشمس وذلك لتوليد أكبر استطاعة ممكنة [18]. تعد هذه الأنظمة من الأنظمة الصديقة للبيئة بدون أي نوع من الإشعاع، وهي سهلة الاستخدام، ذات تصاميم بسيطة ولا تطلب أي وقود فيما عدا أشعة الشمس. ومن ناحية أخرى، تحتاج لمساحات كبيرة والكلفة الابتدائية كبيرة جداً.

تعطي الأنظمة الكهروشمسية على خرجها توتر مستمر ثم يحول إلى توتر متناوب بمساعدة المبدلات. يوجد تصميمان من هذه الأنظمة مع مدخرات أو بدون مدخرات.

4.2.3 علاقة الأنظمة الكهروضوئية مع الشبكة الكهربائية العامة:

تتنوع الأنظمة الكهروضوئية تبعاً لطبيعة علاقتها بمعنى ربطها أو عدم ربطها مع الشبكة الكهربائية، حيث يوجد ثلاثة أنظمة رئيسية:

1- نظام مستقل (غير مرتبط مع الشبكة).

2- نظام هجين (مرتبط مع الشبكة).

3- أنظمة كهروضوئية مرتبطة مع الشبكة الكهربائية.

1.4.2.3 النظام الكهروضوئي المستقل:

وهو نظام غير مرتبط مع الشبكة وهذا يعني أنه مصدر الطاقة الوحيد للحمل سواء منزل أو مضخة مياه أو أي حمل آخر. في حال استخدام هذا النظام لتزويد منزل ما بالطاقة الكهربائية فلا بدّ من الاستعانة بالمدخرات من أجل تخزين الطاقة الكهربائية خلال ساعات النهار أثناء توفر ضوء الشمس لاستخدامها في الليل. يُعتبر هذا النظام مُربح وذو كفاءة اقتصادية بالمقارنة مع البدائل الأخرى في حال تم استخدامه لتغذية مناطق بعيدة عن خطوط الشبكة العامة وبالتالي فإن إيصال خطوط التغذية الكهربائية إليها يكون ذو كلفة عالية. يمكن أن نعتمد على هذا النظام لتزويد الكهرباء إلى القرى النائية والبعيدة المتواجدة في مناطق ذات اشعاع شمسي عالي والتي لم تصلها الكهرباء إلى الآن.

2.4.2.3 النظام الكهروضوئي الهجين:

كمثال على هذا النظام حالة المنزل الذي يتواجد على سطحه ألواح كهروضوئية ويحتوي على عداد الكتروني يعمل باتجاهين. مبدأ العمل هو وجود العداد الإلكتروني الذي يعدّ باتجاهين وعند وجود فائض من الطاقة الكهربائية يتم تصديره إلى الشبكة العامة وفي حال عدم إمكانية إنتاج الطاقة من الألواح يتم استرجار الطاقة من الشبكة.

3.4.2.3 الأنظمة الكهروضوئية المرتبطة مع الشبكة:

يوجد نوعان رئيسيان من هذه الأنظمة:

- أنظمة مرتبطة مع الشبكة دون وجود مدخرات للتخزين:

هذا النظام لا يحتوي على مدخرات تعمل على تخزين الطاقة الفائضة عن حاجة المستهلك، حيث يتم فوراً ضخ فائض الطاقة إلى الشبكة العامة عبر نظام يدعى net-metering. التيار الناتج عن الألواح الكهروضوئية هو تيار مستمر DC لذلك نستعين بالمعرج Converter ليحوّله إلى تيار متناوب قبل ضخه للشبكة، يقوم المعرج بتحويل التيار المستمر إلى المتناوب بحيث يكون له نفس تردد وتوتر الشبكة.

- أنظمة مرتبطة مع الشبكة مع وجود مدخرات للتخزين كنظام مساعد Backup system:

طبعاً في حال تم إضافة المدخرات فإن كلفة النظام ستزيد بشكل كبير [27].

5.2.3 تأثير النظم الكهروضوئية على الشبكات الكهربائية

بشكل عام يظهر تأثير النظم الكهروضوئية على الشبكات الكهربائية ايجابياً من حيث تخفيض الضياعات وتحسين سوية التوتر في الشبكة. ولكن لا يحدث ذلك في بعض الأحيان، وقد يكون له آثار سلبية كما ذكرنا سابقاً، وخاصة إذا كانت نسبة مشاركة هذه النظم الكهروضوئية عالية جداً. وقد تتضمن مثل هذه السلبات حدوث أعطال ومشاكل في التوتر وعلى استطاعة النظام، وتشويه توافقي كبير، وحدث أخطاء في عمل تجهيزات الحماية، وخاصة حالات التحميل الزائد أو تحميل صغير على المغذيات.

لذلك كان من الضروري دراسة الآثار الممكنة لهذه الأنظمة على الشبكات الكهربائية، وقد أجريت العديد من الأبحاث حول ذلك وخاصة بعد أن زاد استخدامها بشكل كبير. يجب تقييم هذه الآثار، وإيجاد الحلول الممكنة في حال حدوث مشاكل في التشغيل.

كما ذكرنا سابقاً، فقد استخدمت الأنظمة الكهروضوئية في البداية بشكل مستقل لتأمين الاستطاعة الكهربائية في المناطق الريفية، حيث لا يوجد مصادر للطاقة فيها. ولكن مع ظاهرة الاحتباس الحراري والتقدم العلمي والتشجيع على استخدام هذه الأنظمة ازداد استعمالها وأصبحت ترتبط إلى الشبكات الكهربائية [28].

6.2.3 تأثير النظم الكهروضوئية على شبكات التوزيع:

يعد هذا الأثر للنظم الكهروضوئية على شبكات التوزيع الموضوع الرئيسي في دراسة نظم التوليد، وذلك لأن حجم ومكان تركيب هذه الأنظمة هو المؤثر الرئيسي على أداء هذه الشبكات. إن مشاكل التشغيل المرافقة لهذه الأنظمة

مشابهة لتلك المفروضة من التوليد الموزع الذي يقدم استطاعة توليد ثابتة، مثل مولدات الديزل وخلايا الوقود. تظهر هذه المشاكل عند تركيب هذه المولدات طرف المستهلك على قضبان التجميع والمصممة لجريان استطاعة باتجاه واحد. تشمل هذه المشاكل حدوث أخطاء بعمل حواكم الحماية وفي تنظيم التوتر وانعكاس جريان الاستطاعة وحدث تحميل زائد أو ناقص على بعض قضبان التجميع. كما تظهر مشاكل أخرى بسبب وجود عناصر إلكترونية تؤدي إلى تشويه توافقي وحدث رنين تفرعي أو تسلسلي إذا كان عدد المبدلات المركبة كبير في منطقة محددة. وهناك مشكلة أخرى هي حدوث تشويه في جودة الطاقة في الشبكة. أجريت دراسات على النظم المركبة على سطوح المنازل في السنوات الماضية، ولا سيما بعد أن زادت نسبة تركيبها بسبب تشجيع الحكومات لذلك. تساهم هذه النظم في حدوث تشويه توافقي حسب نوعية وتقنية المبدلات المستخدمة. وقد بينت الدراسات أن نسبة التشويه التوافقي تكون ضمن الحدود المسموح بها في حال كانت هذه المبدلات مصنوعة بتقنية عالية. أيضاً المرشحات السعوية الموجودة في هذه الأنظمة قد تتسبب بحدث رنين إذا كان حجم هذه الوحدات كبير. كما تؤثر الأنظمة الكهروضمسية على منحنى التوتر في شبكات التوزيع.

بينت الدراسات الحديثة، أنه قد تحدث حالة عابرة في توتر قضبان تجميع شبكات توزيع التوتر المتوسط بسبب تغيرات التردد في استطاعة خرج النظم الكهروضمسية الصغيرة المركبة على سطوح المنازل، مما يؤدي إلى إنقاص عمر مبدل وضعيات المحولة بسبب زيادة عدد حالات عمله. أجريت دراسات قليلة العدد على أثر الأنظمة الكهروضمسية كبيرة الحجم على شبكات التوزيع، وبينت النتائج أنه قد يحدث زيادة في التوتر لمستويات غير مقبولة خلال فترات معينة. ولم تتأثر حاكمتا التيار الأعظمي لوجود مثل هذه الأنظمة.

بناء على ما سبق فمن المهم عند دراسة أثر الأنظمة الكهروضمسية المتمركزة على شبكات التوزيع الأخذ بعين الاعتبار تغيرات استطاعة خرج هذه النظم والذي هو من طبيعتها وخواصها. ومن المهم أيضاً اختبار أداء هذه الشبكات خلال فترات طويلة والأخذ بعين الاعتبار نماذج توليد النظم الكهروضمسية وظروف التحميل على قضبان التجميع [28].

7.2.3 مشاكل التوتر المرافقة لتركيب الأنظمة الكهروشمسية:

بالرغم من كل مزايا تركيب هذه الأنظمة، فقد تؤدي عملية التشغيل إلى بعض المشاكل. ومن العوامل الرئيسية التي تؤدي إلى مثل هذه المشاكل هو تقلبات خرج هذه الأنظمة تبعاً لتغير الإشعاع الشمسي والذي تسببه حركة مرور الغيوم فوق صفوف الألواح الكهروشمسية، وتجعل من الصعب التنبؤ بخرج هذه الأنظمة وبالتالي تقود هذه التقلبات إلى عدة مشاكل أثناء التشغيل. قد تتسبب الغيوم في أن يصبح الخرج مساوياً للصفر، وهذا يقود إلى أسوأ سيناريو لحالة تشغيل هذا النظام.

فضلاً عن ذلك، تحد التكاليف العالية لهذه الأنظمة من الحلول الممكنة التي يمكن أن يتبعها منتجي الطاقة للتخفيف من شدة مشاكل التشغيل التي يمكن أن تزداد وفقاً لهذه التقلبات.

8.2.3 أثر النظم الكهروشمسية على تنظيم التوتر:

يتم تنظيم التوتر في شبكات التوزيع الشعاعية عن طريق المحول المبدل الوضعيات في محطات التوزيع، وأيضاً على خطوط التوزيع ومغذيات التوزيع عن طريق مكثفات التعويض السعوي المركبة على الخط أو على المغذيات. قد يتسبب ربط النظم الكهروشمسية في تغير منحنى التوتر على المغذيات وذلك بتغير اتجاه وقيمة الاستطاعة الفعلية والاستطاعة الردية المارة في الخطوط. بالرغم من ذلك فقد يكون تأثير النظم الكهروشمسية على تنظيم التوتر إيجابياً أو سلبياً وذلك اعتماداً على نظام التوزيع وخصائص المولدات الموزعة وموقع تركيب هذه النظم [26].

9.2.3 تأثير النظم الكهروشمسية على الضياعات :

إن أحد الآثار الرئيسية للنظم الكهروشمسية هو التأثير على الضياعات في المغذيات. إن تحديد مكان تركيب هذا النظام معيار ضروري ويجب دراسته وذلك لتحقيق أفضل موثوقية للنظام وإنقاص الضياعات [12]. وفقاً للمرجع [12] فإن أهمية تحديد المكان المناسب للتركيب لجعل الضياعات أصغر ما يمكن، هو أمر مشابه لتحديد مكان توزيع مكثفات التعويض لإنقاص الضياعات.

ومن ناحية أخرى، تساهم مكتثات التعويض فقط باستطاعة ردية Q . وبشكل رئيسي، تعمل المولدات في نظام القدرة عند عامل استطاعة متقدم بحدود بين 0.85 والواحد، ولكن بسبب وجود المبدلات، تؤمن المولدات التزامنية في تعويض الاستطاعة الردية (تيار متقدم) [23].

يوجد برمجيات خاصة لتحديد الموقع الأمثل للنظم الكهروشمسية وذلك بتحليل جريان الحمولة، وهذه البرمجيات قادرة على اختبار الموقع المناسب له ضمن النظام للتخفيف من الضياعات. فعلى سبيل المثال، إذا كانت ضياعات المغذي عالية، سوف يكون تأثير إضافة عدد صغير من وحدات النظم الكهروشمسية هاماً وإيجابياً على الضياعات وله فوائد كبيرة على النظام. ومن جهة أخرى، إذا كانت الوحدات المضافة كبيرة يجب عند تركيبها الأخذ بعين الاعتبار حدود سعة المغذي [23]. وعلى سبيل المثال قد تكون حدود سعة المغذي محدودة في حالة الخطوط الهوائية أو الكابلات ولها تحمل حراري لا يمكن تجاوزه.

تكون معظم وحدات النظم الكهروشمسية بالقرب من المستهلك. وفي الحالة الطبيعية، من المفروض أن تتخفف الضياعات عندما يتم تحديد الموقع بالقرب من مركز الحمل.

3.3. استراتيجيات الإدارة الذكية:

يمكن تحسين استقرار التوتر في الشبكة من خلال التحكم بالاستطاعة الردية وذلك عبر اتخاذ العديد من التدابير لتحسين احتياطات الاستطاعة الردية في الشبكة باعتماد استراتيجيات الإدارة الذكية [1].

1.3.3 نماذج الديناميكية:

تستخدم الشبكات الميكروية نماذج ديناميكية لتحليل سلوك الاستطاعة الردية. يتم استخدام أدوات المحاكاة مثل برامج "MATLAB" لمراقبة الأداء وتحسينه.

2.3.3 تكنولوجيا التحكم الذكي:

تُعتبر تكنولوجيا التحكم الذكي محوراً رئيسياً في الإدارة الحديثة للاستطاعة الردية. يتم استخدام أنظمة التحكم الذكي مثل "PLC" و "SCADA" لمراقبة وتوجيه حقن الاستطاعة. على سبيل المثال، يمكن لنظام التحكم الذكي تحديد متى يجب توليد الاستطاعة الردية من مصادر مثل المولدات أو المكتثات، مما يقلل من الفاقد في الاستطاعة.

3.3.3 نظم التوزيع المتقدم:

تعتبر نظم التوزيع المتقدمة (Advanced Distribution Management Systems) ضرورية لتسهيل الإدارة الذكية للاستطاعة الردية. يتضمن ذلك استخدام أجهزة استشعار متقدمة وتقنيات إنترنت الأشياء (IoT) لجمع البيانات وتحليلها في الوقت الحقيقي. على سبيل المثال، يمكن أن تساعد هذه الأنظمة في تحديد المواقع التي تحتاج إلى تحسين في الاستطاعة الردية، مما يؤدي إلى تقليل الفاقد وزيادة الكفاءة.

4.3.3 استراتيجيات الطلب الديناميكي:

تساهم استراتيجيات الطلب الديناميكي في تحسين إدارة الاستطاعة الردية من خلال تعديل استهلاك الطاقة بناءً على توافرها. يمكن تنفيذ برامج التحفيز على تقليل الطلب خلال أوقات الذروة، مما يساعد في تحقيق توازن أفضل بين الاستطاعة الحقيقية والردية، وبالتالي تحقيق الاستقرار في الشبكة.

4.3 الاستطاعة الردية:

ترداد الحاجة إلى ربط ودمج وحدات التوليد الموزع مع شبكات التوزيع الكهربائية، مما يؤدي في غالب الأحيان إلى مستويات عالية للاختراقات وذلك بسبب الطبيعة المتغيرة والمتقطعة لمصادر التوليد الموزع مثل الاشعاع الشمسي المتغير وسرعة الرياح.

نتيجة هذه الاختراقات أصبحت الاستطاعة الردية من أهم محددات النظام نظراً إلى تأثيرها على التوتر والاستقرار للشبكة، وبات من الضروري الحفاظ على كمية احتياطية من الاستطاعة الردية وهي الاستطاعة التي لا تؤدي إلى إنتاج طاقة مفيدة، بل تتذبذب بين المصدر والحمل. تُعتبر مهمة في أنظمة الطاقة لأنها تؤثر على كفاءة النظام وتضمن استقرار ووثوقية شبكة الطاقة.

1.4.3 أجهزة تعويض الاستطاعة الردية:

تحتاج الشبكات الكهربائية إلى استجابة لاحتياجات الحمل المتغيرة والتغلب على الاضطرابات التي قد تطرأ عليها. من أهم أسباب عدم استقرار التوتر في الشبكة الكهربائية هو عدم إمكانية نقل الاستطاعة الردية لمسافات طويلة، بمعنى أنه لا يمكن أن تصل بقيمتها المرسل، لذلك تحتاج إلى التعويض باستخدام أساليب وأجهزة

فعالة لضمان كفاءة التشغيل واستقرار الشبكة [29]. بين الجدول (1-3) أجهزة تعويض الاستطاعة الردية المعاصرة والتقليدية.

Reactive Power Control Devices	
Conventional Methods	Contemporary Methods
Synchronous Condensers/ Generators	STATCOMs
On Load Tap Changing (OLTC) Transformers	Energy Storage Systems (ESS)
Capacitor Banks	Inverter Based RGs
Static Var Systems/ Compensators	Electronic Tap Changing Transformers
Line Reactors	Solid State Transformers

الجدول (1-3) أجهزة تعويض الاستطاعة الردية [29]

سيتم فيما يلي استعراض بعض أجهزة تعويض الاستطاعة الردية مع التركيز على كيفية عملها ومزاياها:

1.1.4.3 المكثفات:

تعتبر المكثفات أحد الأساليب الشائعة والفعالة لتعويض الاستطاعة الردية في الشبكات الكهربائية حيث تلعب دوراً حيوياً في تحسين استقرار التوتر وتقليل الفاقد في الاستطاعة.

مواصفات المكثفات:

- **سعة المكثف:** غالباً ما تكون المكثفات المستخدمة في تطبيقات الطاقة ذات سعات كبيرة، وتحدد السعة بناء على مقدار الاستطاعة الردية التي يجب تعويضها.
- **جهد التشغيل:** تعتبر قدرة المكثف على تحمل التوتر أحد البارامترات الهامة، حيث يجب أن يكون توتر التشغيل أكبر من التوتر الفعلي للشبكة.
- **نوع المكثف:** هناك أنواع مختلفة من المكثفات المستخدمة في تطبيقات الطاقة، مثل:
 - مكثفات فيلم بولي بروبيلين: وهي مكثفات مشبعة بالزيت ذات فاقد قليل وعمر تشغيل طويل.
 - مكثفات ورقية مشبعة بالزيت: ذات فاقد كبير وتم استبدالها بسابقتها.
 - بنوك مكثفات متدرجة: مكونة من عدة مراحل وتعمل حسب الحمل.

- مكثفات الترشيح التوافقي: وتحتوي على محولات قدرة الكترونية ومبدلات سرعة.

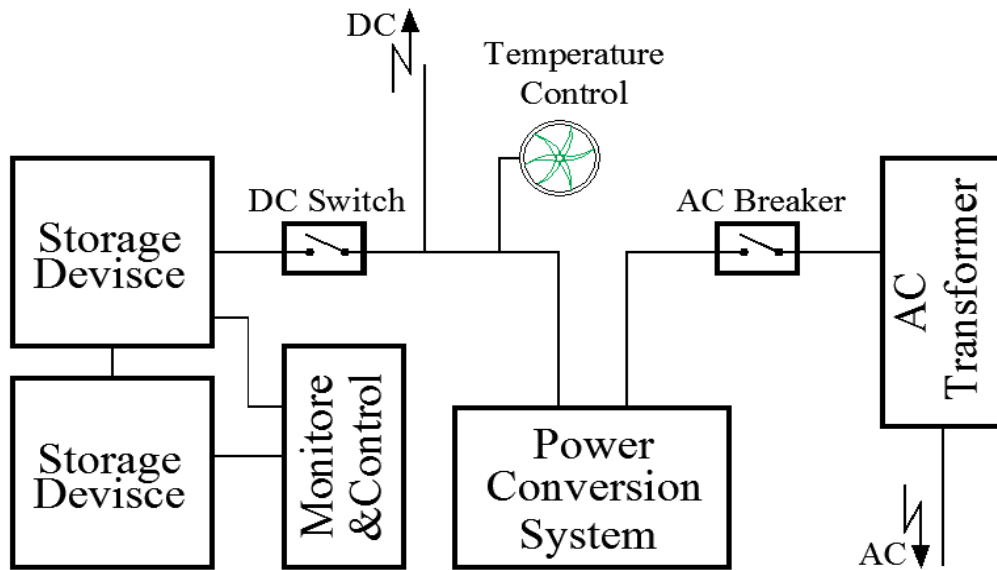
مميزات المكثفات: تساهم المكثفات في تحسين استقرار التوتر في الشبكة من خلال حقن الاستطاعة الردية مما يخفف من التغيرات المفاجئة في التوتر، فضلاً عن تقليل الضياعات الناتجة عن خطوط النقل. تتميز المكثفات بسهولة التركيب والصيانة مما يجعلها خياراً شائعاً في أنظمة الطاقة، ذو تكلفة منخفضة مقارنة مع تقنيات التعويض الأخرى.

مساوئ المكثفات: تتطلب المكثفات ضبطاً دقيقاً في السعة والتوتر مما قد يمثل تحدياً في بعض التطبيقات.

من الممكن أن تتعرض المكثفات لارتفاع درجة الحرارة عند استخدامها في ظروف شديدة مما يؤثر على جودة أدائها وعمرها الافتراضي.

2.1.4.3 أنظمة تخزين الطاقة (ESS) (Energy Storage System):

تعتبر أنظمة تخزين الطاقة (ESS) من الحلول المتطورة التي تستخدم لتعويض الاستطاعة الردية وتحقيق الاستقرار في الشبكة الكهربائية. تلعب هذه الأنظمة دوراً رئيسياً في إدارة الطاقة وتحسين كفاءة الشبكة، مما يساعد على تلبية الطلب المتزايد وتوازن الحمل [32][33][34]. يبين الشكل (7-3) طريقة ربط أنظمة التخزين مع الشبكة.



الشكل (7-3) طريقة ربط أنظمة التخزين مع الشبكة [32][33]

كيفية عمل أنظمة تخزين الطاقة: تعمل هذه الأنظمة على تخزين الطاقة في فترات انخفاض الطلب على الطاقة الكهربائية، أي حين يكون الإنتاج الزائد. وعندما يرتفع الطلب، مثل ساعات الذروة يتم تحرير الطاقة المخزنة لتلبية احتياجات الشبكة.

مواصفات أنظمة تخزين الطاقة:

- **الاستطاعة التخزينية:** تتراوح استطاعة التخزينية لأنظمة التخزين حسب نوع النظام والتطبيق، حيث يمكن أن تتراوح من عدة كيلوواط ساعة في التطبيقات المنزلية إلى عدة ميغاواط ساعة في التطبيقات الصناعية.
- **زمن الاستجابة:** تعتبر السرعة في استجابة النظام عاملاً حاسماً. يمكن أن تتراوح أوقات الاستجابة من ثوانٍ إلى دقائق اعتماداً على نوع النظام. تستخدم أنظمة التخزين الفوري مثل خلايا الوقود لتلبية احتياجات التحميل السريع.

مميزات أنظمة تخزين الطاقة: تساهم أنظمة تخزين الطاقة في استقرار التوتر، من خلال التقليل من تقلبات التوتر وبالتالي تعزيز استقرار الشبكة. كما تساهم في دعم مصادر الطاقة المتجددة عن طريق تخزين الطاقة الفائضة لاستخدامها لاحقاً. فضلاً عن أن استخدامها يمكن أن يؤدي إلى تخفيض تكاليف التشغيل من خلال تقليل الحاجة إلى مولدات الطاقة الإضافية وتوفير الاستطاعة في أوقات الذروة.

مساوئ أنظمة تخزين الطاقة: قد تكون التكلفة الأولية مرتفعة مما قد يكون عائقاً أمام البعض، على الرغم من التكلفة التشغيلية المنخفضة على المدى البعيد. تواجه هذه الأنظمة تحديات تقنية مثل تآكل خلايا الوقود، مما يؤدي إلى تقليل كفاءتها مع مرور الوقت، فهي تحتاج أنظمة التخزين إلى صيانة دورية للحفاظ على الأداء الأمثل.

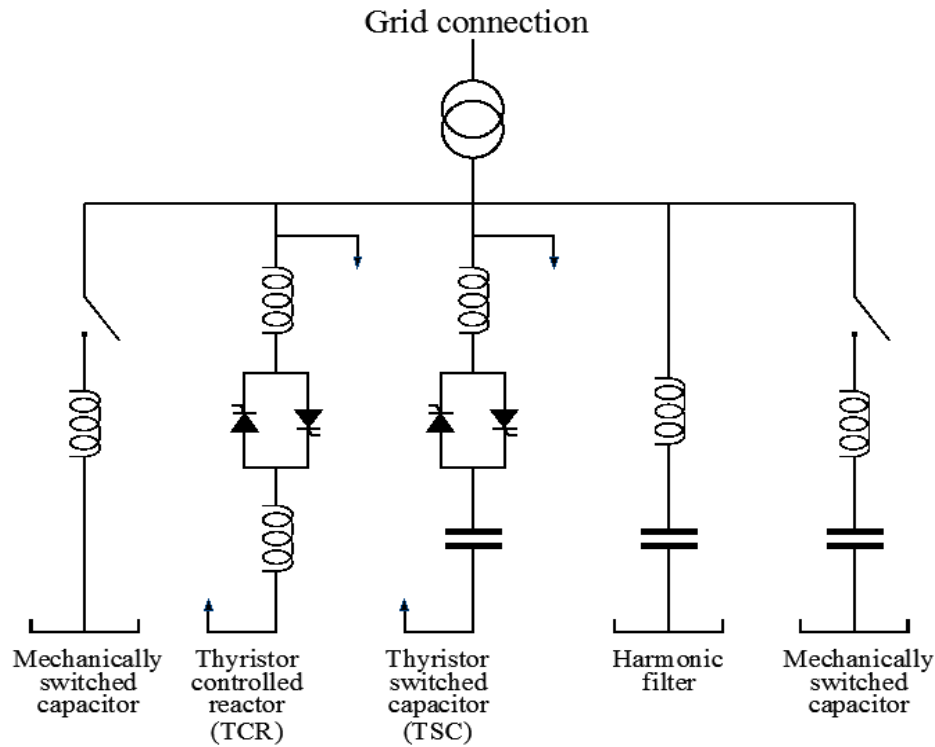
3.1.4.3 معوض القدرة الثابت STATIC VAR COMPENSATOR:

يعتبر معوض القدرة الثابت SVC من الحلول المتقدمة المستخدمة لتعويض الاستطاعة الردية في الشبكات الكهربائية، تهدف هذه الأنظمة إلى تحسين استقرار التوتر وتخفيض الفاقد في الطاقة، مما يساهم في تعزيز كفاءة الشبكة الكهربائية.

تربط هذه التجهيزات على التفرع مع خط النقل وتعمل على حقن أو امتصاص الاستطاعة الردية، ينتج عنها تيار يمكن ضبطه للتحكم بمحددات معينة لنظام القدرة الكهربائية.

يمكن تركيب هذه المعوضات في منتصف خط النقل، حيث يتم التحكم بالتوتر عند هذه النقطة ليكون لها نفس قيمة توتر نهاية الخط وينتج عن ذلك زيادة القيمة العظمى للاستطاعة المنقولة. كما يمكن تركيب المعوض في نهاية الخط على التوازي مع الحمل، من الممكن في هذه الحالة تنظيم التوتر في نهاية هذا الخط ومنع عدم الاستقرار بالتوتر الذي يمكن أن ينتج عن تغيرات الحمل أو انقطاع الخط.

تتدرج ثلاثة أنظمة تحت اسم معوضات القدرة الثابتة الشكل (3-8) وهي:



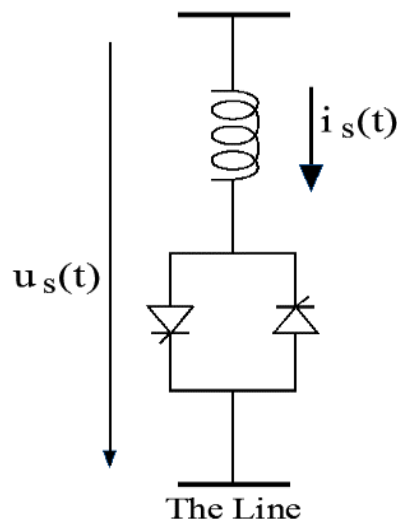
الشكل (3-8) أنماط معوضات القدرة الثابتة SVC [35] [36]

■ المحارز المتحكم به بواسطة (الثيرستور) TCR (Thyristor Controlled Reactor):

يتم يوصل على التفرع مع خط النقل وتتغير مفاعله باستمرار حسب وضع الثيرستور الموصل معه [35][36].

يتم حقن الاستطاعة الردية في (TCR) بطريقة تعتمد على التحكم بزوايا القرح للثيريستورات مما يسمح

بتعديل مقدار التيار المار في المحارضة وبالتالي التحكم بكمية الاستطاعة الردية المحقونة في الشبكة.



الشكل (3-9) شكل مبسط لطور واحد للمحارز المتحكم به بواسطة الثايرستور TCR [35][36] يمكن التحكم بالتيار المار عبر المحارز من قيمته العظمى وحتى الصفر من خلال التحكم בזاوية التأخير لقدح الثايرستور، حيث يمكن تحديد زمن مرور التيار عبر الثايرستور عن طريق التحكم بورود النبضات إلى بوابة الثايرستور مع الأخذ بعين الاعتبار طويلة التوتر لحظة قدح الثايرستور

■ المحارز المحول بواسطة الثايرستور (Thyristor Switched Reactor) TSR:

هذا المعوض له نفس تركيبة المعوض السابق ولكنه يعمل فقط عند زوايا محددة هي $\alpha=90^\circ$ و $\alpha=180^\circ$ ، وعليه إما أن تكون طويلة التيار عند قيمتها العظمى أو أن تكون معدومة، وفي هذه الحالة يكون التيار الردي متناسباً مع التوتر المطبق.

مقارنة بين TCR و TSR

العنصر	TSR	TCR
طريقة التحكم	تحكم منقطع (تشغيل/إيقاف) للثايرستور	تحكم مستمر عبر تعديل زاوية القدح للثايرستور
نوع الثايرستور	يعمل كمفتاح تشغيل/إيقاف	يعمل كمفتاح تحكم زاوي (Phase Control)
التيار المار	إما أن يمر التيار بالكامل أو لا يمر إطلاقاً	يمكن التحكم به تدريجياً من الصفر إلى القيمة القصوى
التطبيقات	أنظمة تحتاج تحكم بسيط أو سريع التشغيل	أنظمة تحتاج تحكم دقيق بالاستطاعة الردية

الجدول (3-2) مقارنة بين TCR و TSR

■ المكثف المحول بواسطة الثايرستور (Thyristor Switched Capacitor) TSC:

هو عبارة عن مكثف موصل عبر ثايرستور على التفرع مع خط النقل، ويمكن تغيير مفاعلة هذا المعوض من القيمة الكاملة للمفاعلة حتى الصفر عن طريق التحكم بنبضات قرح الثايرستور، كما يمكن أن يُطفئ عند مرور التيار بالقيمة صفر وفي هذه الحالة تصل المكثفة إلى قيمتها العظمى، وتبقى عند فصلها مشحونة عند هذه القيمة ويكون التوتر على طرفي الثايرستور المفصول مختلف بالطور عن توتر النظام. **طريقة عمل معوضات القدرة الثابتة:** تعمل SVC على التحكم بالاستطاعة الردية في الشبكة عن طريق استخدام مكثفات وملفات متغيرة. تتضمن العملية عدة خطوات حيث يقوم نظام SVC بمراقبة ظروف الشبكة على مدار الساعة بما في ذلك مستويات التوتر والتيار وعند اكتشاف تغيرات في الحمل أو التوتر، يحدد SVC مدى الحاجة لتعويض الاستطاعة الردية. يتم التحكم بالاستطاعة الردية عن طريق المكثفات والملفات. حيث يمكن حقن أو امتصاص الاستطاعة الردية بناء على معطيات الشبكة.

مواصفات معوضات القدرة الثابتة: تستخدم SVC لتعويض الاستطاعة الردية الديناميكية في الوقت الحقيقي، حيث تتميز بزمان استجابة سريع ويمكن أن تتفاعل في غضون أجزاء من الثانية لتعديل مستوى التوتر في الشبكة. تعتبر هذه السرعة ضرورية في حالات التحميل المتغير. كما تسمح SVC بالحفاظ على مستويات التوتر المطلوبة على مدى واسع من ظروف التحميل المتغير، مما يجعله فعالاً في بيئات الشبكات المتغيرة.

مميزات معوضات القدرة الثابتة: تساهم SVC في تحسين قدرة الشبكة على استيعاب أحمال جديدة دون الحاجة إلى توسيع البنية التحتية. تعتبر أنظمة SVC مرنة التشغيل وسهلة التكامل مع أنظمة الشبكة المختلفة، مما يسمح بتحسين الأداء العام.

مساوئ معوضات القدرة الثابتة: تتطلب أنظمة SVC استثمارات أولية مرتفعة، مما قد يكون عائقاً لبعض الشركات أو مقدمي خدمات الكهرباء. كما يتطلب تصميمها وتركيبها خبرات فنية متقدمة، مما قد يزيد في تعقيد العمليات والصيانة اللازمة. فضلاً عن اعتمادها بشكل كبير على تقنيات التحكم الإلكتروني، مما قد يجعلها عرضة لعيوب أو أعطال في هذه الأنظمة.

على الرغم من التحديات المرتبطة بالتكاليف والتعقيد الفني. يظل استخدام SVC خياراً مثالياً لتحسين أداء الشبكة.

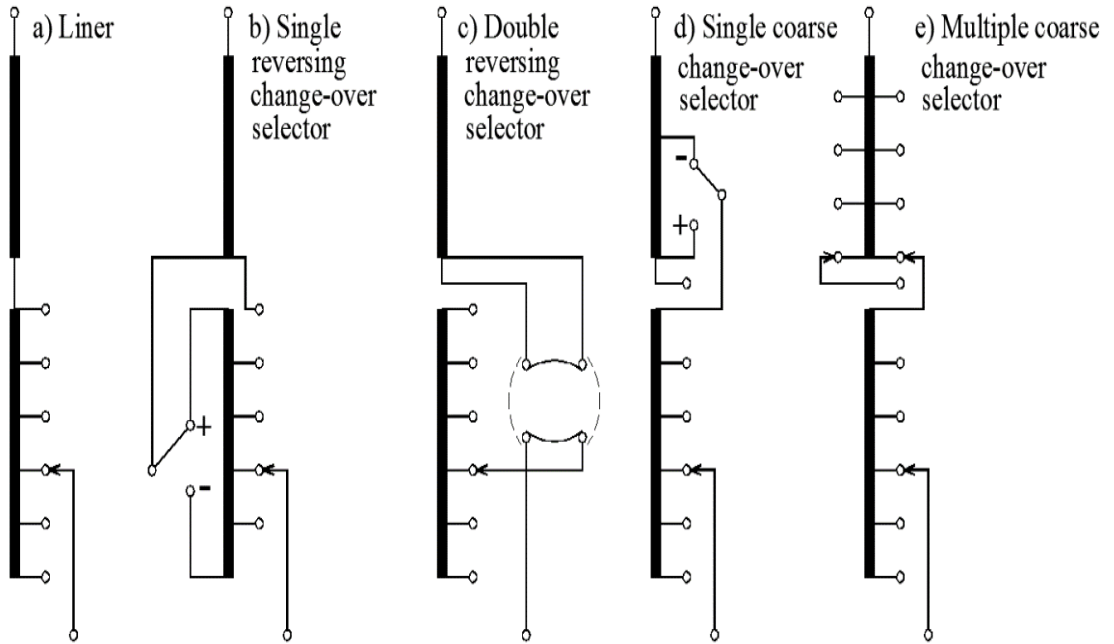
4.1.4.3 المحولات التحكم في التوتر تحت التحميل OLTC (On-Load Tap Changer):

تعد محولات OLTC من العناصر الحيوية في أنظمة الطاقة الكهربائية، حيث تؤدي دوراً مهماً في التحكم في التوتر وتحسين استقرار الشبكة. تكمن أهمية OLTC في قدرتها على التحكم في مستوى التوتر في المحولات أثناء

تحميلها، مما يسهم في تحسين الكفاءة وتقليل الاستطاعة الردية [3][31][37].

تتألف محولة الـ OLTC من:

- مفتاح تبديل يقوم بتغيير موضع اللفات لضبط التوتر.
- محرك القيادة يتحكم بحركة المبدل.
- مبدلات اختيار تحدد الموضع المناسب للتوتر المطلوب.



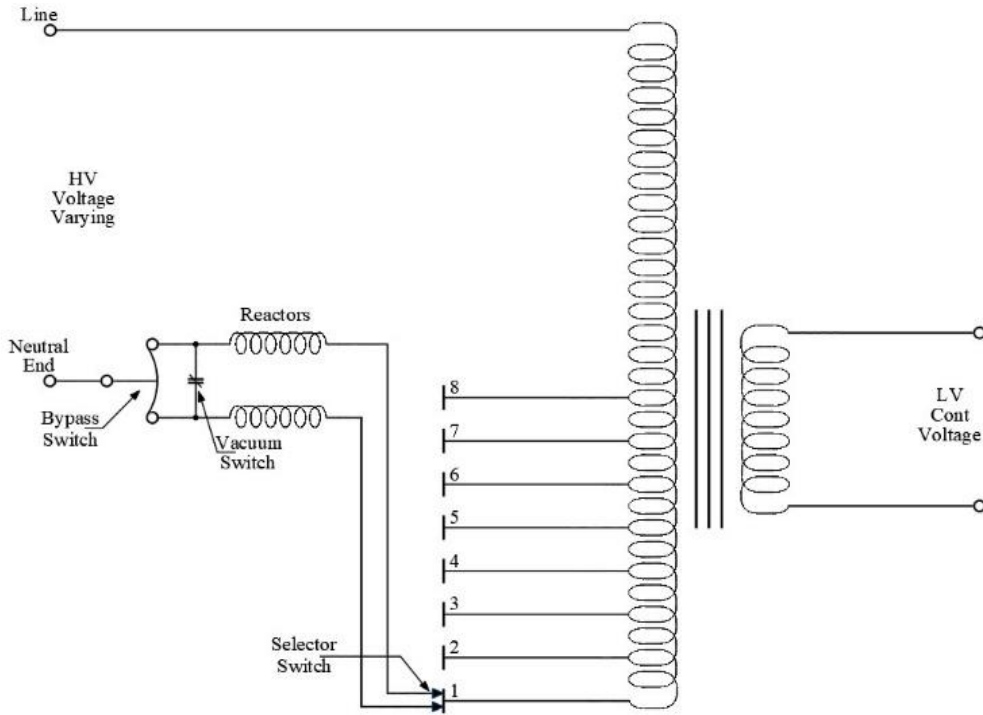
الشكل (3-10) أنماط من طرق توصيل OLTC مع الشبكة [3][31][37].

كيفية عمل محولة OLTC: تعمل محولات OLTC على تعديل نسبة التحويل للتوتر بناءً على متطلبات الحمل.

يتم ذلك باستخدام نظام مبدلات يُتحكم فيها إلكترونياً أو ميكانيكياً تقوم بتغيير التوصيلات بين ملفات المحول.

يعتمد عمل OLTC على المبدأ التالي:

- تغيير النسبة: يتضمن OLTC مجموعة من المفاتيح المتعددة التي يمكنها تغيير الاتصال بين عدد من لفات المحول. عندما يزداد الحمل يتم تغيير الاتصال لزيادة نسبة التحويل مما يؤدي إلى رفع التوتر.
- تكرار العملية: تكرر هذه العملية بشكل دوري لضمان استقرار التوتر في الشبكة. يمكن أن تحدث التغييرات في نسبة التحويل خلال فترات قصيرة مما يجعله مثالياً لأحمال متغيرة.



الشكل (3-11) طريقة رفع أو خفض التوتر في نموذج لمحولة OLTC [3][31][37]

مواصفات OLTC: تتصف بأنها مصممة للعمل على نطاق واسع من مستويات التوتر، غالباً ما تصل إلى 400 كيلو فولت أو أكثر، ويمكن أن تتراوح القدرة من عدة مئات من الكيلوفولت أمبير (KVA) إلى عدة ميغاوات فولت أمبير (MVA). كما تتميز OLTC بقدرة على التحكم الدقيق في التوتر فضلاً عن أن أنظمة التحكم الحديثة تسمح بإمكانية التشغيل الآلي مما يقلل من التدخل البشري.

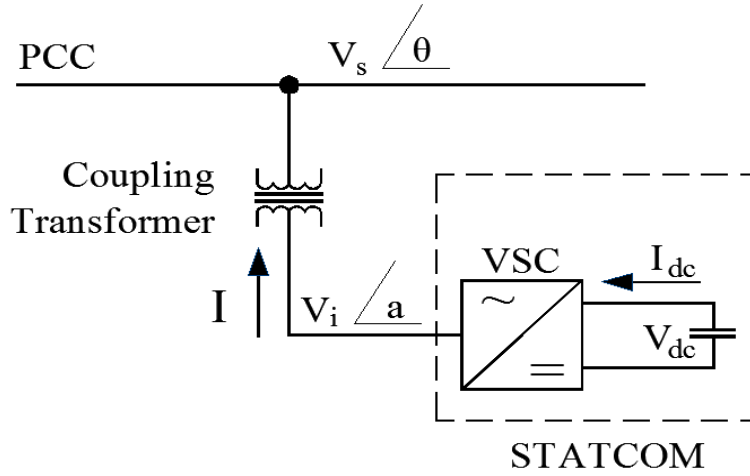
مميزات محولة OLTC: تساعد في الحفاظ على استقرار التوتر خلال تغيرات الحمل مما يقلل خطر الأعطال، كما تعمل على تحسين كفاءة الشبكة الكهربائية من خلال تخفيض ضياعات الطاقة. فضلاً عن قدرتها على التحكم في

التوتر مما يساعد على تقليل الحاجة إلى الاستطاعة الردية. تتمتع بمرونة عالية حيث يمكن استخدام OLTC في مجموعة متنوعة من التطبيقات، بما في ذلك محطات التوليد والتوزيع مما يجعلها جهازاً متعدد الاستخدامات. مساوئ محولة OLTC: بطء الاستجابة بسبب اعتمادها على المحركات الميكانيكية، مما يجعلها غير قادرة على مواكبة التغيرات المتكررة عند ربطها مع شبكة توليد موزع التي تتأثر بالظروف المحيطة مسببة تغيرات في التوتر وتدهور في الشبكة.

5.1.4.3 المعوض المتزامن الثابت (Static Synchronous Compensator):

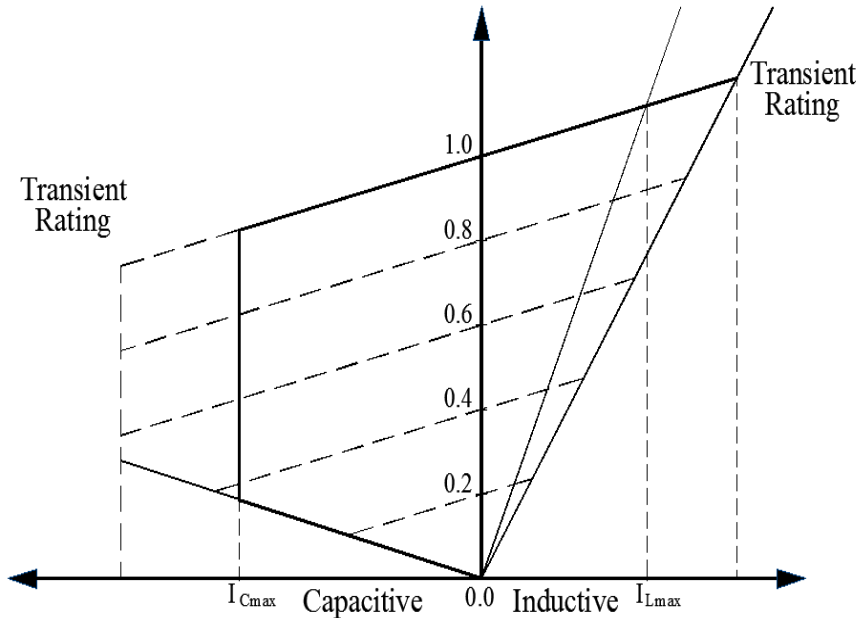
يعتبر أحد الحلول الفعالة لتعويض الاستطاعة الردية والحفاظ على التوتر واستقرار الشبكة، وهو جهاز يستخدم للتحكم في الاستطاعة الردية في الشبكات الكهربائية. يعتمد على تقنية تحويل الطاقة الكهربائية، ويمكنه توفير استطاعة ردية حسب متغيرات الحمل (حقن أو امتصاص)، مما يساعد على تحسين استقرار التوتر في الشبكة. يعتبر STATCOM منتجاً متقدماً من أجهزة FACTS (أنظمة نقل التيار المتناوب المرنة). يعتمد الـ STATCOM في عمله على منبع متزامن مع الشبكة ولا يعتمد على آلات دوارة وتعتمد عملية التحكم على ضبط التوتر [9][36][38][39]. عند تركيب المعوض المتزامن الثابت على خط النقل فإنه يعمل على تحسين عمل نظام القدرة من خلال التحكم بالتوتر في أنظمة النقل والتوزيع، وتخمين الاهتزازات في الاستطاعة لنظام النقل، وتحسين الاستقرار العابر، والتحكم بالاستطاعة الردية وأيضاً الاستطاعة الفعالة على خط النقل.

كيفية عمل STATCOM: يعمل STATCOM بمثابة منبع للاستطاعة الردية، سواء على حقن أو امتصاص الاستطاعة الردية المطلوبة من نظام القدرة (حسب حاجة النظام) وذلك بواسطة التجهيزات الإلكترونية التي تقوم بتنظيم الأمواج الجيبية لكل من التوتر والتيار للمبدلة الإلكترونية التي تعمل كمنبع توتر. عند الحاجة إلى حقن استطاعة ردية، يقوم STATCOM بزيادة التوتر في النظام، بينما في حالات الحاجة إلى امتصاص استطاعة ردية، يتم خفض التوتر.



الشكل (12-3) طريقة ربط الـ STATCOM مع الشبكة [9][36][38][39].

مواصفات الـ STATCOM: يمكن أن تتراوح قدرة STATCOM من كيلو فولت أمبير (KVA) إلى ميغاوات (MW) حسب التطبيق. يتمتع بكفاءة عالية تفوق غيرها من الأجهزة في العديد من الحالات، فضلاً عن المرونة في التشغيل حيث يمكن استخدامه في مجموعة متنوعة من التطبيقات، بما في ذلك شبكات النقل والتوزيع والطاقة المتجددة.



الشكل (13-3) خصائص (V-I) للـ STATCOM [9][36][38][39]

مميزات الـ STATCOM: يمتاز بالقدرة على الاستجابة السريعة للتغيرات المفاجئة في الأحمال، مما يجعله مثالياً لشبكات الطاقة ذات الأحمال المتغيرة. على سبيل المثال، في حالة حدوث عطل في الشبكة، يمكن لـ STATCOM

توفير دعم فوري للحفاظ على استقرار التوتر في الشبكة من خلال توفير الاستطاعة الردية بشكل ديناميكي. هذه الميزة تجعل من الـ STATCOM خياراً مناسباً لأنظمة التوليد الموزع حيث يساعد في تحسين تكامل مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الكهروشمسية وطاقة الرياح، التي يمكن أن تتسبب في تغيرات كبيرة في التوتر. مساوئ الـ STATCOM: الكلفة العالية، فهي تتطلب استثمارات أولية مرتفعة فضلاً عن التعقيد الفني حيث تحتاج أنظمة STATCOM إلى خبرات فنية متقدمة في التصميم والتركيب.

على الرغم من التحديات المرتبطة بالتكاليف والتعقيد الفني، يظل STATCOM خياراً مثالياً لتحسين استقرار الشبكات في ظل الطلب المتزايد على الطاقة.

5.3 طرق تعويض الاستطاعة الردية:

1.5.3 التعويض الثابت: يتضمن التعويض الثابت استخدام المكثفات أو المحاثات بشكل دائم في الشبكة. يتم ذلك من خلال تركيب المكثفات في مواقع محددة لتقديم دعم مستمر للاستطاعة الردية. من مميزاته أنه بسيط وسهل التركيب، مما يساعد في تقليل تكاليف الطاقة.

2.5.3 التعويض الديناميكي: يتضمن التعويض الديناميكي استخدام أجهزة مثل STATCOM أو SVC (أنظمة التحكم في الاستطاعة الردية) التي يمكنها تعديل الاستطاعة في الوقت الحقيقي، حيث تستجيب هذه الأنظمة بسرعة للتغيرات في الأحمال مما يعزز استقرار الشبكة.

أهم مزاياه التكيف بسهولة مع التغيرات في الطلب، مما يساهم بشكل فعال في تحسين استقرار التوتر في الشبكات الكبيرة والمعقدة.

3.5.3 استخدام الحلول الهجينة تجمع حلول التعويض الهجينة بين التعويض الثابت والديناميكي، وذلك من خلال استخدام مجموعة من المكثفات مع STATCOM أو SVC لتحقيق أداء أفضل. يتميز بتوفير استجابة سريعة مع تحسين مستدام، مما يزيد كفاءة الشبكة بشكل عام.

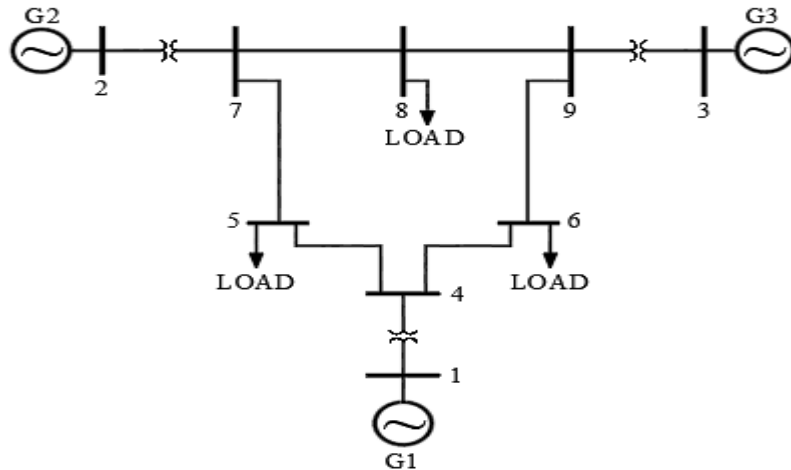
الفصل الرابع

الدراسة العملية

اتبعت الدراسة العملية طريقة التعويض الديناميكي من أجل الإدارة والتحكم بالاستطاعة الردية والحفاظ على استقرار الشبكة، وذلك من خلال استخدام STATCOM وأنظمة كهروشمسية رُبطت مع نموذج لشبكة IEEE9 اختيرت كمرجعية للبحث، تم تعديلها بما يتناسب مع الدراسة. اعتمدت الدراسة العملية على المحاكاة الحاسوبية بالاستعانة ببرنامج MATLAB وفق خوارزمية تحكم تم تصميمها بهدف إدارة الاستطاعة الردية والتحكم بها. أجريت محاكاة لعدد من السيناريوهات وفقاً لحالات تتغير فيها الشروط سواء تلك المتعلقة بالتشغيل أو بالأحوال الجوية. تم التطرق إلى سبب اختيار جهاز STATCOM لتعويض الاستطاعة الردية، وبيان مكوناته ومبدأ وكيفية عمله. تم اختبار طريقة PLL (Phase Locked Loop) على دارة بسيطة قبل اختبارها على الشبكة المرجعية المعدلة، أولاً مع الـ STATCOM، ثم عند ربط الدارة مع نظام كهروشمسي. استكمالاً للبحث وفي محاولة لتطبيق الدراسة على الواقع الميداني تم اجراء محاكاة لجزء من الشبكة الكهربائية السورية بافتراض ربطها مع منظومة كهروشمسية، والتحقق من جدوى الإدارة والتحكم بحقن الاستطاعة الردية في المحافظة على استقرار الشبكة الكهربائية.

1.4. نموذج الشبكة المعتمدة كمرجعية للبحث:

1.1.4 نظام الاختبار IEEE 9 Bus Test System :



الشكل (1-4) نظام الاختبار IEEE 9 Bus Test System [40]

نظام الاختبار **IEEE 9 Bus Test System**: تتكون هذه الشبكة من 9 قضبان (Bus) و ثلاثة مولدات، وتُستخدم بشكل واسع في الأبحاث منها المتعلقة باستقرار الشبكات الكهربائية [40].

1.1.1.4 مكونات الشبكة:

- عقد الشبكة: تتضمن تسع عقد، حيث تكون بعض العقد مرتبطة بمولدات والأخرى بحمولات.
- خطوط النقل: تحتوي الشبكة على عدة خطوط لنقل الطاقة.

2.1.1.4 محددات الشبكة:

يوضح الجدول التالي محددات الشبكة التي تمت الدراسة عليها:

Tr.L	Length	R_1	R_0	L_1	L_0	C_1	C_0
1-4	-	-	-	-	-	-	-
2-7	-	-	-	-	-	-	-
3-9	-	-	-	-	-	-	-
4-5	97.38	0.054	0.162	0.0012	0.0036	9.06×10^{-9}	2.720×10^{-8}
4-6	95.99	0.093	0.281	0.0013	0.0040	8.257×10^{-9}	2.477×10^{-8}
7-5	176.71	0.095	0.287	0.0012	0.0038	8.687×10^{-9}	2.606×10^{-8}
9-8	115.56	0.0054	0.163	0.0012	0.0036	9.073×10^{-9}	2.721×10^{-8}
9-6	196.41	0.105	0.315	0.0012	0.0036	9.144×10^{-9}	2.743×10^{-8}

الجدول (1-4) محددات الشبكة IEEE 9 [40]

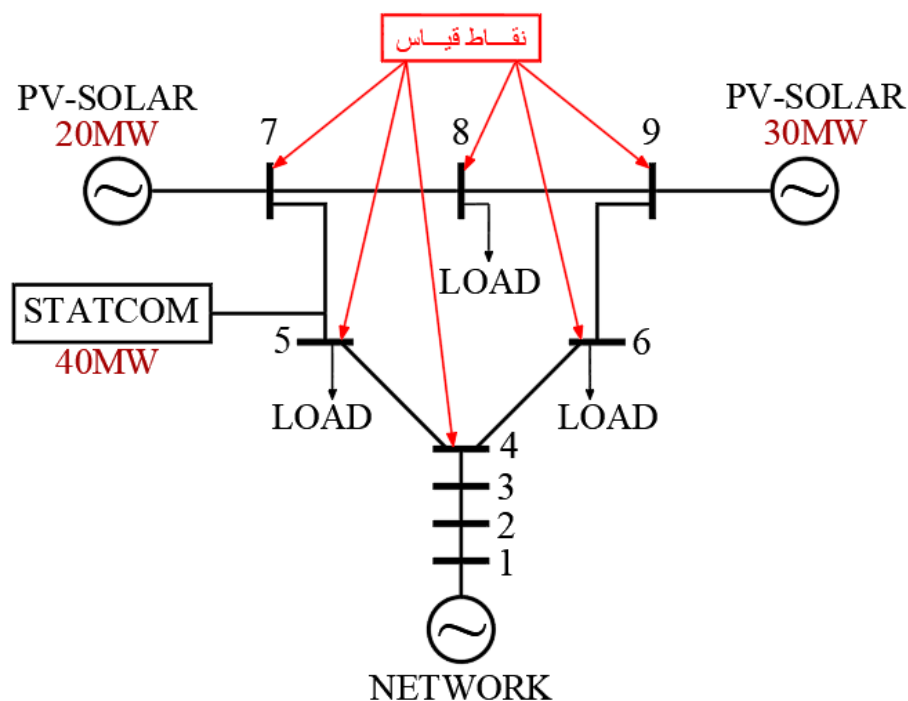
Load Bus	5	6	8
P(MW)	125	90	100
Q(MVAR)	50	30	35

الجدول (2-4) محددات الأحمال [40]

تعتبر هذه الشبكة نموذجاً لدراسة تأثيرات الاستطاعة الردية وكيفية إدارتها باستخدام تقنيات حديثة مثل STATCOM والأنظمة الكهروشمسية.

3.1.1.4 نموذج الشبكة المعدلة المعتمدة للبحث:

تم اختيار شبكة IEEE 9 كنموذج للدراسة بعد ربطها مع STATCOM على القضيب الخامس واستبدال المولدات التزامنية في العقدتين 2 و 3 بمصادر توليد موزع (مزارع ألواح كهروشمسية) كما هو موضح بالشكل (2-4).



الشكل (2-4) نظام اختبار IEEE 9 المعدل المعتمد كشبكة للبحث

2.4 إدارة الاستطاعة الردية:

يُعتمد التعويض الديناميكي كطريقة لتعويض الاستطاعة الردية والحفاظ على استقرار الشبكة، وذلك من خلال ربط STATCOM والأنظمة الكهروشمسية بالشبكة:

1.2.4 STATCOM: سيعمل على تعويض الاستطاعة الردية عن طريق استخدام تقنيات تحكم متقدمة تعتمد

على تحويل الطاقة. تسير العملية عبر عدة خطوات:

1. **مراقبة الشبكة:** تقوم تقنية التحكم المرتبطة مع الـ STATCOM بمراقبة مستويات التوتر والتيار في الشبكة بشكل مستمر.

2. **تحديد الحاجة للتعويض:** عند اكتشاف تغيرات في الحمل أو التوتر، تقوم تقنية التحكم المرتبطة مع الـ STATCOM بتحديد الحاجة لتعويض الاستطاعة الردية.

2.2.4 الأنظمة الكهروشمسية: ستعمل على توليد الطاقة من خلال تحويل الاشعاع الشمسي إلى كهرباء، مما يُعتبر مصدرًا متجددًا للطاقة. يمكن ربط الأنظمة الكهروشمسية في شبكة IEEE 9 لتوفير الاستطاعة الردية المطلوبة للمحافظة على استقرار الشبكة. يجب الأخذ بعين الاعتبار أن فعالية الأنظمة الكهروشمسية تعتمد على الظروف المناخية، مما قد يؤثر على كفاءة التوليد.

3.2.4 التكامل بين STATCOM والأنظمة الكهروشمسية:

يمكن تحقيق إدارة فعالة للاستطاعة الردية عبر ربط STATCOM والأنظمة الكهروشمسية مع شبكة IEEE 9 حيث يتم تحقيق التوازن للاستطاعة الردية بين الأنظمة الكهروشمسية والـ STATCOM بما يتناسب مع تغييرات الحمل والتوتر. عند توفر الشروط المناخية الجيدة والحمل المناسب يمكن للأنظمة الكهروشمسية توفير الاستطاعة الردية المطلوبة للشبكة دون الحاجة إلى تشغيل نظام الـ STATCOM، وبالتالي تحسين استقرار التوتر في الشبكة وتخفيض التكاليف التشغيلية.

3-4 استراتيجية الإدارة الذكية:

يعتمد البحث على النمذجة الديناميكية كاستراتيجية للإدارة الذكية في الشبكة المرجعية المعدلة من خلال استخدام برنامج "MATLAB" كأداة محاكاة للتحكم ومراقبة الأداء وتحسينه. تعتمد هذه الاستراتيجية على:

- التخطيط والتحليل: إجراء دراسات لتحديد نقاط الربط المثلى لـ STATCOM والأنظمة الكهروشمسية.
 - التحكم الذكي: استخدام أنظمة التحكم الذكية (مثل التحكم القائم على الخوارزميات) لإدارة الاستطاعة الردية
- لا STATCOM والأنظمة الكهروشمسية وفق الأحمال التشغيلية للشبكة والظروف المناخية.

تتمثل التحديات في التحكم الديناميكي باستمرار العمل على تطوير استراتيجيات التحكم والإدارة لضمان استجابة فعالة لتغيرات الأحمال واستقرار التوتر.

4-4-STATCOM:

يعتمد الـ STATCOM لتعويض الاستطاعة الردية والحفاظ على استقرار الشبكة، وقد تم اختياره نظراً لمواصفاته التالية:

- التحكم السلس بالتوتر عند ظروف العمل المختلفة، نظراً لقدرته على توفير الاستطاعة الردية المطلوبة، سواء كانت حقن أو امتصاص مما يجعله مرناً للاستخدام في مختلف الشبكات الكهربائية.
- الاستجابة العالية والسريعة، حيث يمكنه تعديل مستوى الاستطاعة الردية في فترة زمنية قصيرة جداً. هذه الاستجابة السريعة ضرورية في حالات الحمل المتغير.
- الكفاءة العالية، حيث يساعد على الحفاظ على استقرار التوتر في الشبكة من خلال توفير الاستطاعة الردية المطلوبة عند الحاجة وبكفاءة عالية مما يساعد على تقليل الضياعات في الشبكة.

4-4-1 مكونات STATCOM ومبدأ عمله والمعادلات الرياضية:

يتكون من منبع جهد VSC (Voltage Source Converter) ووحدة تحكم يستخدم عادة مع العنفات الريحية والأنظمة الكهروضمسية لتعويض الاستطاعة الردية والتحكم بالتوتر من خلال تشغيل VSC، حيث يقوم بتحويل دخل التوتر المستمر إلى خرج توتر متناوب باستخدام IGBT مع توليد النبضات PWM (Pulse Width Modulation) لإنشاء موجة جيبية من دخل التوتر المستمر [29][38][41][42]. وبالتالي يمكن التحكم في تيار الخرج حسب المعادلات:

حيث: P الاستطاعة الفعالة، Q الاستطاعة الردية، V_1 و V_2 قيم التوترات عند طرفي الخط،

V_o توتر خرج الـ STATCOM، V_{pcc} توتر نقطة الربط المشتركة، X المفاعلة الحثية للخط،

δ زاوية فرق الطور بين التوتر V_1 و V_2 ، α زاوية التحكم العاكس، θ زاوية فرق الطور بين التوتر والتيار.

$$I = \frac{V_o - V_{pcc}}{X_s} \quad (1-4)$$

$$P = \frac{V_o V_{pcc}}{X} \sin(\alpha - \theta) \quad (2-4)$$

$$Q = \frac{V_o(V_o - V_{pcc} \cos(\alpha - \theta))}{X} \quad (3-4)$$

$$Q = \left[\frac{V_2}{X}\right][V_1 \cos \delta - V_2] \quad (4-4)$$

عندما تكون $\delta = 0$

$$Q = \left[\frac{V_2}{X}\right][V_1 - V_2] \quad (5-4)$$

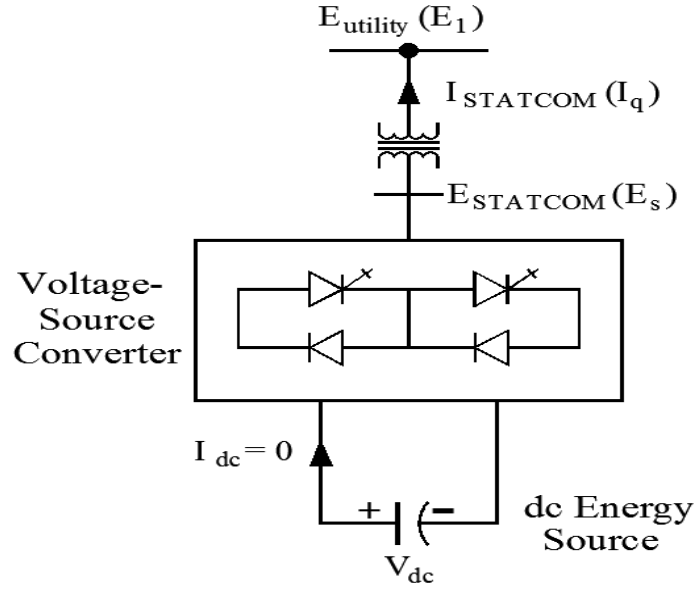
وتكون الاستطاعة الحقيقية

$$P = \frac{V_1 V_2 \sin \delta}{X} = 0 \quad (6-4)$$

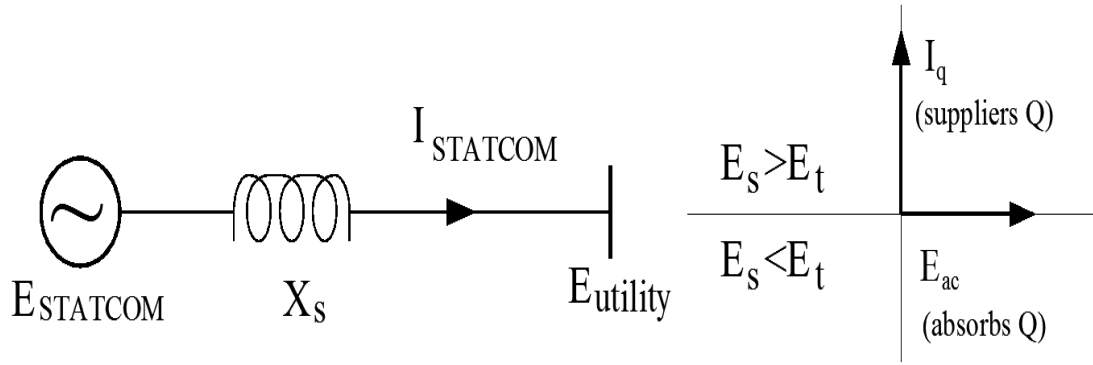
مبدأ العمل:

يعتبر المعوض المتزامن الثابت بمثابة منبع للاستطاعة الردية، فهو يعمل على توليد أو امتصاص الاستطاعة الردية المطلوبة من نظام القدرة (حسب حاجة النظام) وذلك بواسطة التجهيزات الإلكترونية التي تقوم بتنظيم الأمواج الجيبية لكل من التوتر والتيار للمبدلة الإلكترونية التي تعمل كمنبع توتر.

يوضح الشكل (3-4) ربط الـ STATCOM مع الشبكة الكهربائية من خلال محولة يمر عبرها تيار I_q ، في الحالة المثالية تكون الاستطاعة الفعالة تساوي تقريباً الصفر. تفصل المحولة بين توتر الشبكة وتوتر عناصر القدرة الإلكترونية للـ STATCOM مما يحمي هذه الأخيرة من الأعطال والارتفاعات المفاجئة في التوتر. تجعل المحولة توتر الـ STATCOM مناسباً للربط مع الشبكة، حيث ترفع أو تخفض التوتر حسب نسبة اللفات.



الشكل (3-4) المعوض المتزامن الثابت وكيفية ربطه مع المنظومة الكهربائية [29][38][41][42]



الشكل (4-4) الاستطاعة الردية المتبادلة بين المبدلة الالكترونية وخط النقل [43] [44]

يوضح الشكل (4-4) المخطط الرمزي للمعوض المتزامن الساكن، حيث تم تمثيله كمنبع توتر متحكم به مع المفاعلة X_s ، أي ليس هناك أي حاجة للمكثفات أو مفاعلات تفرعية لامتناس أو توليد الاستطاعة الردية المطلوبة، مما يجعل من نظام التعويض هذا تصميمًا سهلاً وبدون أي تأثيرات سلبية وكذلك دون ضجيج أو أي ضرر مغناطيسي على خط النقل [43] [44].

كما يوضح الشكل (4-4) الاستطاعة الردية المتبادلة بين المبدلة الالكترونية وخط النقل والتي يمكن التحكم بقيمتها عن طريق تغيير قيمة طويلة خرج التوتر الثلاثي الطور E_{st} للمبدلة الالكترونية، فإذا كانت طويلة توتر

خرج المبدلة أكبر من طويلة توتر باسبار خط النقل المركب عليه نظام التعويض Et فإن التيار حينئذ يسري عبر الممانعة Xs من المبدلة إلى خط النقل، وتولد المبدلة استطاعة ردية سعوية لحقنها في نظام القدرة الكهربائية. أما إذا كانت طويلة توتر خرج المبدلة أقل من طويلة التوتر في خط النقل فإن التيار يمر عبر الممانعة Xs من خط النقل (نظام القدرة المتناوب) إلى المبدلة الالكترونية والتي تعمل على امتصاص استطاعة ردية تحريضية من النظام.

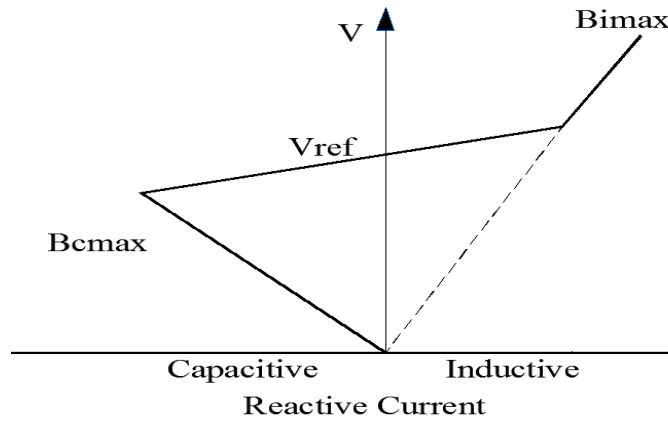
وعندما تتساوى قيمة طويلة توتر الخرج مع طويلة توتر خط النقل فلا يحدث أي تبادل للاستطاعة الردية بين نظام القدرة والمبدلة (المعوض) وعندها يمكن القول إن المعوض في حالة تعويم. كما أنه يمكن التحكم بكمية الاستطاعة الردية المتبادلة بين خط النقل ونظام التعويض من خلال تنظيم قيمة فرق الطور بين توتر خرج المبدلة وتوتر نظام القدرة المتناوب. بمعنى آخر، فإنه يمكن للمبدلة أن تزود نظام القدرة باستطاعة ردية من منبع التوتر المستمر إذا كان توتر خرج المبدلة متقدم بالطور على توتر خط النقل. ومن ناحية أخرى فإن المبدلة تعمل على امتصاص الاستطاعة الحقيقية من النظام إذا كان توتر خرج المبدلة متأخر بالطور عن توتر خط النقل.

يقوم نظام التعويض المتزامن الساكن بتقديم الاستطاعة الردية المطلوبة عن طريق تبادل الاستطاعة اللحظي بين أطوار نظام القدرة المتناوب. ويمكن فهم الآلية التي تقوم المبدلة بتوليد أو امتصاص الاستطاعة الردية داخلياً بالأخذ بعين الاعتبار علاقة استطاعة دخل وخرج المبدلة الالكترونية، حيث أن قواطع (العناصر الالكترونية) المبدلة توصل دارة الدخل المستمرة بشكل مباشر مع دارة الخرج المتناوبة، هكذا فإن الاستطاعة اللحظية عند أطراف الخرج المتناوبة يجب أن تكون دائماً مساوية للاستطاعة اللحظية عند أطراف الدخل المستمرة وذلك بإهمال الضياعات.

بفرض أن المبدلة تعمل، يتم تشغيلها بحيث تقوم بتزويد استطاعة خرج ردية، في هذه الحالة فإن الاستطاعة الفعالة المقدمة من منبع التيار المستمر كدخل للمبدلة يجب أن تكون مساوية للصفر.

فضلاً عن ذلك، ولكون تردد المنبع المستمر معدوم فإن استطاعته الردية معدومة أيضاً لذا فإن منبع التوتر المستمر لا يقدم أي استطاعة ردية كدخل للمبدلة، أي أنه لا يلعب أي دور في توليد الاستطاعة الردية على خرج المبدلة، بمعنى آخر بين أطراف الخرج الثلاثة المتناوبة لذا فإن التيارات الردية للخرج تسري بحرية بين هذه الأطوار، وكذلك يمر تيار دائر بينها. على كل حال، فالاستطاعة الفعالة التي تقوم المبدلة بتمريرها عبر طرفها المتناوب إلى نظام القدرة يجب أن تُزود أو تمتص من منبع التوتر المستمر (المكثف).

على الرغم من أن الاستطاعة الردية تولد داخلياً كنتيجة لعمل القواطع الالكترونية للمبدلة، يجب توصيل مكثف على دخل هذه المبدلة، والحاجة الأساسية لهذا المكثف هي لتأمين مسار للتيار الدائر وكذلك لتعمل كمنبع توتر مستمر، يتم اختيار قيمة هذا المكثف بحيث يبقى التوتر المستمر على طرفيها ثابتاً لمنع التآرجح بقيمة التيار المستمر، ويمكن الاستعاضة عن هذا المكثف ببطارية كمنبع للتيار المستمر وفي هذه الحالة فإن المبدلة يمكنها التحكم بتبادل كلا الاستطاعة الفعالة والردية مع نظام القدرة المتناوب. إن القدرة على التحكم بتبادل الاستطاعة الفعالة والردية باستخدام هذه التقنية يمكن أن يستفاد منها بشكل كبير في التطبيقات التي تتطلب تخميد الاهتزازات وتأمين التغذية الدائمة للأحمال البالغة الأهمية.

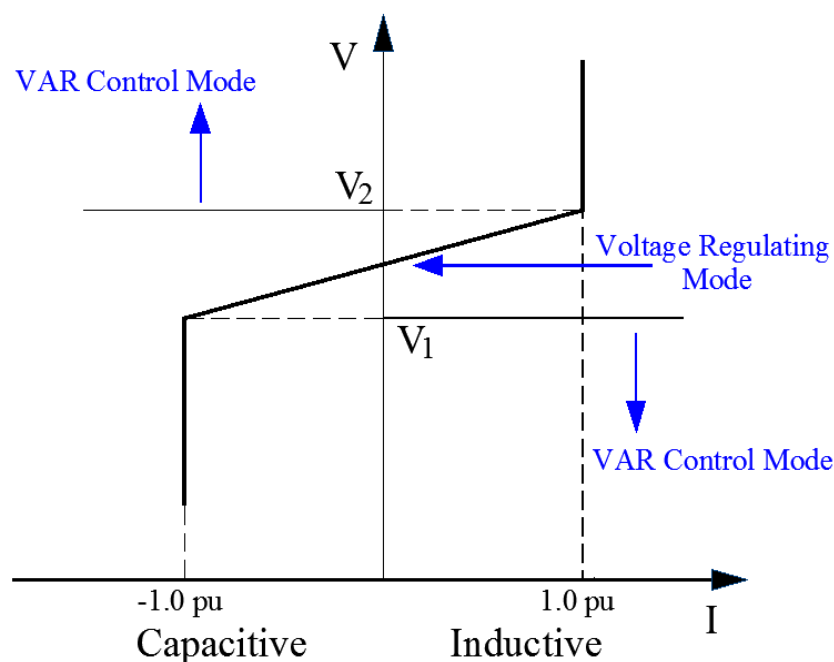


الشكل (4-5) ميزة التوتر - التيار للمعوض المتزامن الثابت STATCOM [29][35]

كما يوضح الشكل (4-5) فإن المعوض يمكن أن يعمل كمعوض ردي تحريضي وسعوي وهو قادر على التحكم بتيار الخرج فوق الحد الأعظمي للمجال السعوي أو التحريضي بشكل مستقل عن توتر النظام.

وهذا على خلاف المعوض الردي الساكن الذي يعمل فقط على تقليل تيار الخرج مع إنقاص توتر النظام المحدد بتصميم مكثفة الدخل المكافئة [29][35].

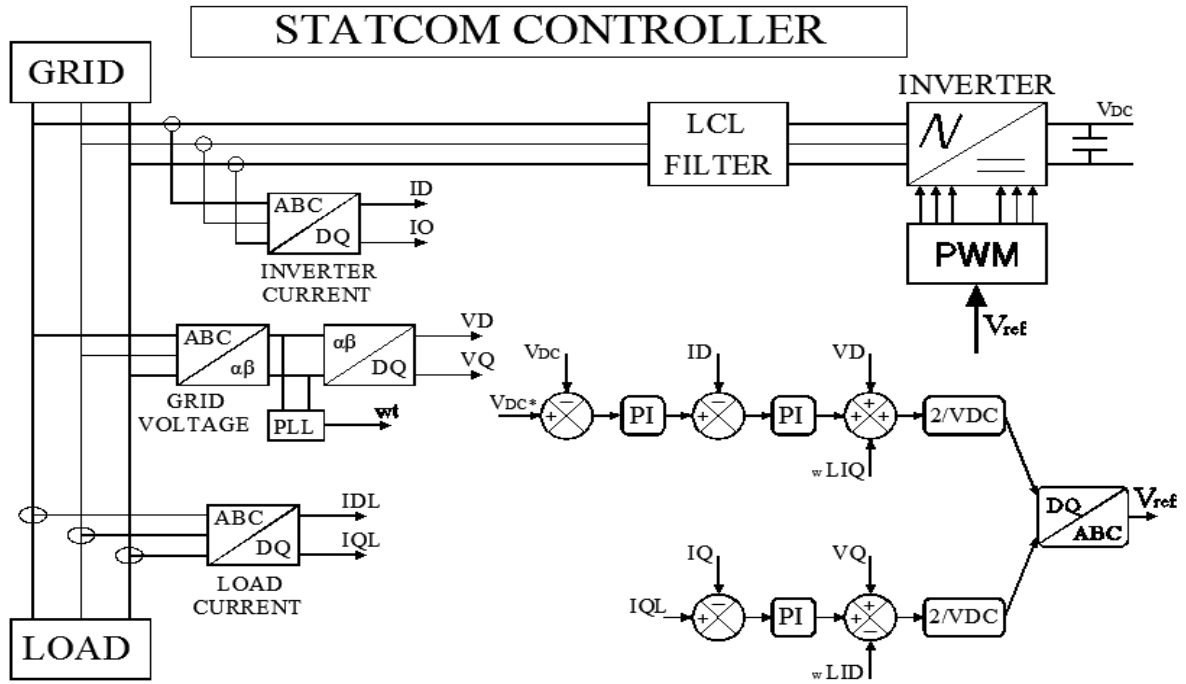
يمكن تصنيف عمل الـ STATCOM الشكل (6-4): 1- وضع تنظيم التوتر 2- وضع التحكم VAR



الشكل (6-4) تصنيف عمل الـ STATCOM [29][35]

5-4 حلقة تثبيت الطور (PLL (Phase Locked Loop):

هي تقنية تُستخدم في العديد من التطبيقات، تساهم في التحكم بالاستطاعة الردية (Reactive Power Control) في شبكات التوزيع، حيث تساعد عند ربطها بالـ STATCOM والأنظمة الكهروشمسية في تحسين استقرار وكفاءة الشبكة، وذلك من خلال مزامنة النبضات لتوتر الشبكة وتحديد الزاوية المرجعية لنظام القياس، مما يؤدي إلى تحقيق أداء أفضل وتقليل الضياعات في الشبكة [45][46][47].



الشكل (7-4) دائرة التحكم للـ STATCOM [45][46][47]

4-5-1 مبدأ عمل حلقة تثبيت الطور (PLL (Phase locked loop) في التحكم بالاستطاعة الردية:

تعمل حلقة تثبيت الطور PLL على مزامنة نبضات بوابات ترانزستور وتحدد الزاوية المرجعية لنظام القياس. يحسب نظام القياس مركبات التتابع الموجب لتوتر و تيار الـ STATCOM أو النظام الكهروضمسي مستخدماً نظام تحويل المحاور DQ. يتم تنظيم التوتر بواسطة منظمي PI من التوتر المقاس V_{meas} وتوتر المرجع V_{ref} ، ووحدة منظم التوتر (حلقة خارجية). تحسب إشارة التيار الردي المرجعي I_{qref} باستخدام بلوك منظم التيار (حلقة داخلية). إن خرج منظم التيار هو الزاوية ω التي هي زاوية إزاحة الطور لتوتر المعرج فيما يتعلق بتوتر الشبكة. تزود دائرة توليد نبضات القذح المعرجات بنبضات من خرج حلقة PLL و خرج منظم التيار (زاوية ω).

4-5-2 المزايا:

- استقرار عالٍ: توفر PLL استجابة دقيقة وسريعة للتغيرات في الحمل أو الشبكة.
- تحسين الكفاءة: تساعد PLL في تقليل الضياعات الناتجة عن عدم التوازن في الاستطاعة الردية.
- مرونة: يمكن تعديل تصميم PLL ليتناسب مع مختلف التطبيقات والاحتياجات الخاصة بأنظمة الطاقة.

6-4 الجزء العملي:

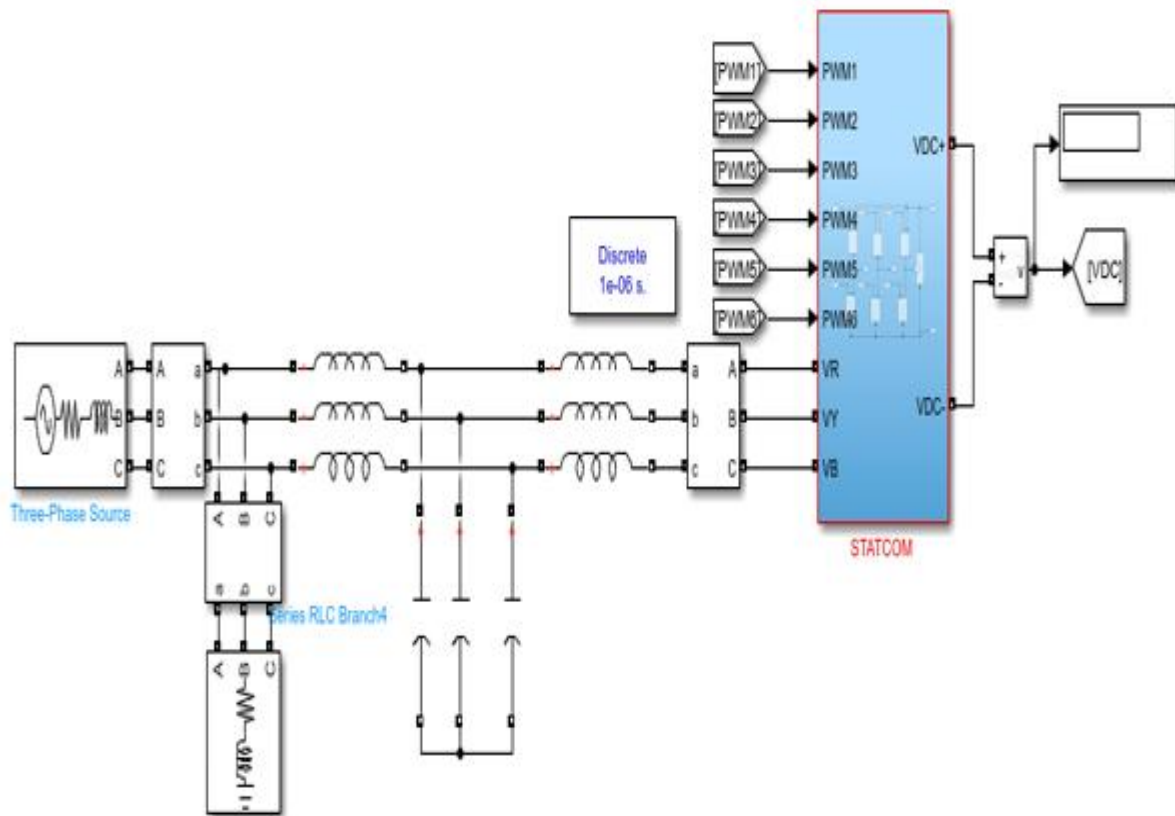
1-6-4 تطبيق طريقة PLL على الـ STATCOM في دارة بسيطة:

سيتم في البداية اختبار طريقة PLL على الـ STATCOM على دارة بسيطة قبل اختبارها على الشبكة المرجعية.

وتتألف هذه الدارة من منبع استطاعته 1.5KW وحمل استطاعته 1.5KW واستطاعة ردية 7.5KVAR

والـ STATCOM استطاعته 7.5KVAR.

تم نمذجة هذه الدارة باستخدام برنامج الـ MATLAB.



الشكل (8-4) نمذجة نظام اختبار بسيط مرتبط مع الـ STATCOM

حيث:

PWM1.....PWM6 إشارات عرض النبضة للتحكم بالترنستورات.

VR, VY, VB توترات الأطوار الثلاثة.

.(DC Link) VDC+,VDC-

يبين الشكل (9-4) نموذج معرجات ثلاثي الطور يتم استخدامه في منظومة الـ STATCOM. حيث:

$\alpha\beta 0 \dots abc$ ترمز إلى تحويل من نظام ثلاثي الطور إلى نظام ثنائي.

$dq 0 \dots \alpha\beta 0$ تحويل إلى نظام دوار مع الشبكة. V_{abc} توتر الشبكة ثلاثي الطور. I_{inv} تيار العاكس.

I_{load} تيار الحمل. V_D, V_Q مركبتي التوتر D محور مباشر، Q محور الترتيبي.

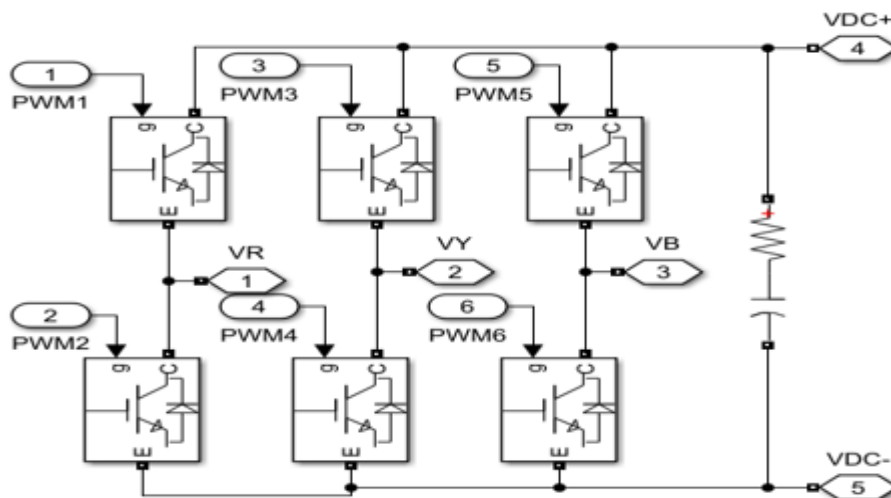
I_D, I_Q مركبتي التيار للعاكس. I_{DL}, I_{QL} مركبتي تيار الحمل. PI متحكم تناسبي تكاملي.

يتكون المبدل من ستة مفاتيح قدرة من نوع IGBT موزعة على ثلاثة أذرع تمثل أطوار الشبكة. يتم تغذية المبدل

من مصدر توتر مستمر مزود بمكثف رابط يهدف إلى تثبيت توتر التيار المستمر وتقليل التموجات. تستخدم إشارات

تعديل عرض النبضة $PWM1 \dots PWM6$ للتحكم في حالات التوصيل والفصل. يستخدم هذا المبدل لحقن أو

امتصاص الاستطاعة الردية من الشبكة الكهربائية.



الشكل (9-4) نمذجة معرجات الـ STATCOM باستخدام برنامج MATLAB

يوضح الشكلين (10-4) و(11-4) البنية العامة لمنظومة التحكم المستخدمة في الـ STATCOM والمطبقة في

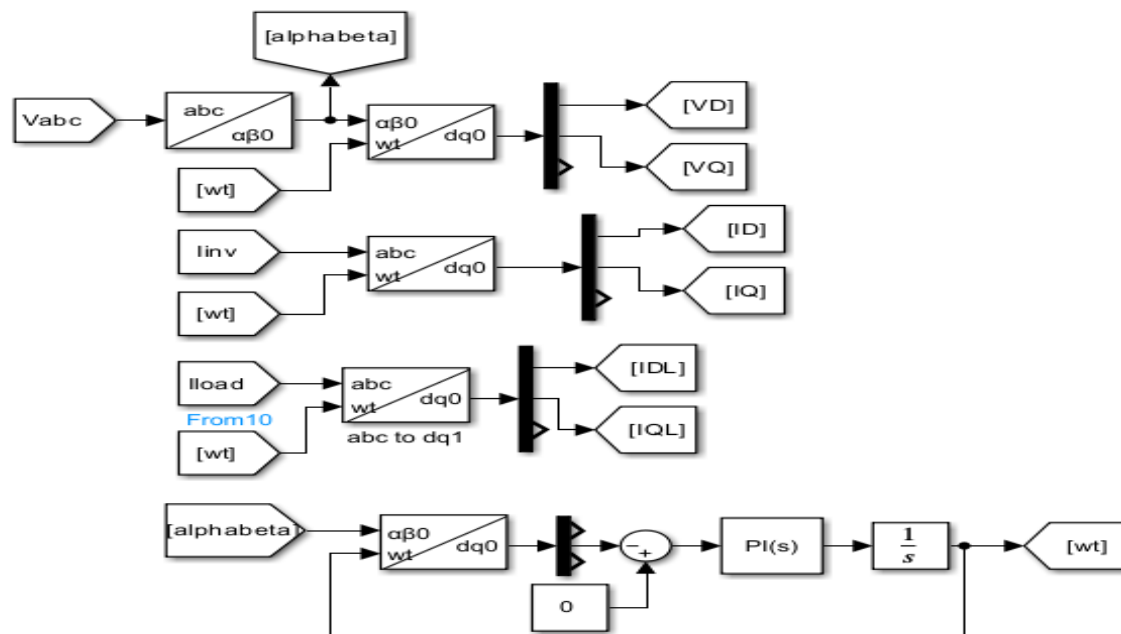
برنامج MATLAB، والتي تعتمد على التحويلات الرياضية بين أنظمة الأحداث المختلفة لتسهيل عملية التحكم.

التحويل من النظام الثلاثي الطور abc إلى النظام الثنائي $\alpha\beta 0$ ومن هذا الأخير إلى النظام الدوار $dq 0$ ، ويتم

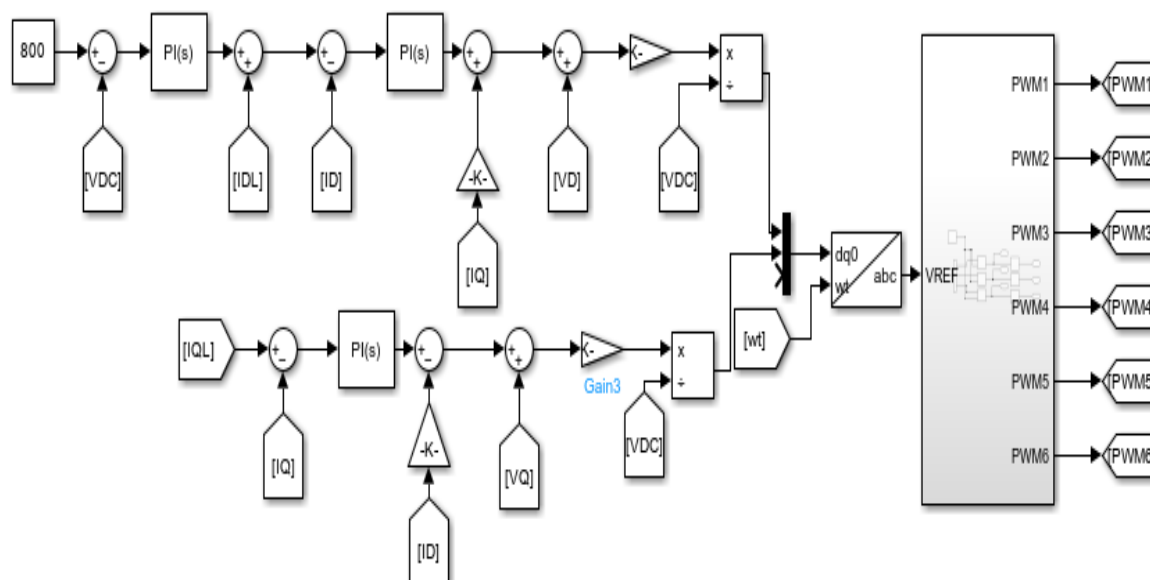
تحويل مركبات التوتر والتيار من توتر الشبكة ثلاثي الطور إلى نظام dq حيث يتم الحصول على مركبة التوتر

على المحور مباشر (D -axis) ومركبة التوتر على المحور المتعامد (Q -axis) وبالمثل يتم تحويل تيارات

والانفرتير وتيارات الحمل إلى النظام dq للحصول على مركبات التيار IQ و ID ومركبات تيارات الحمل IQL وIDL.

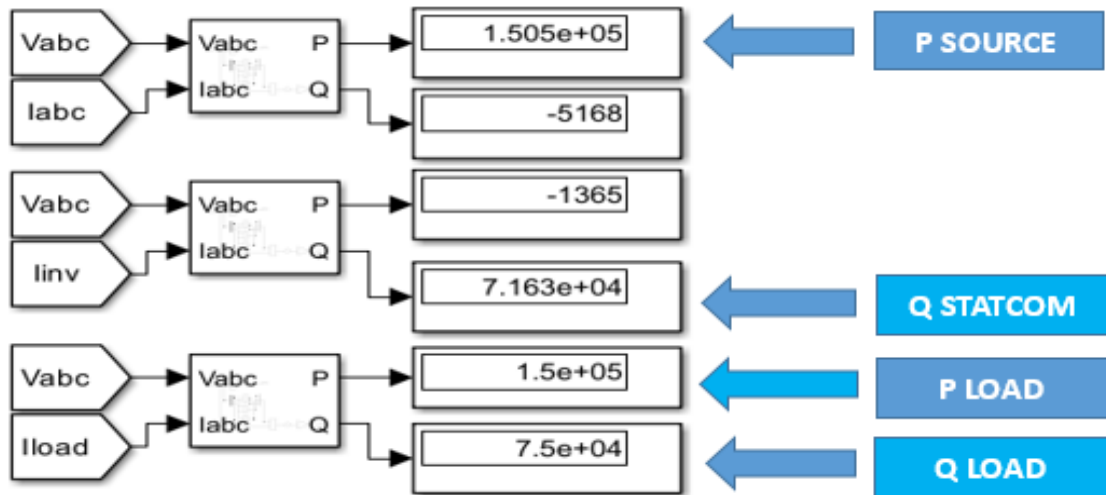


الشكل (4-10) نمذجة دائرة التحكم بالـ STATCOM باستخدام برنامج MATLAB



الشكل (4-11) نمذجة دائرة التحكم بالتوتر للـ STATCOM باستخدام برنامج MATLAB

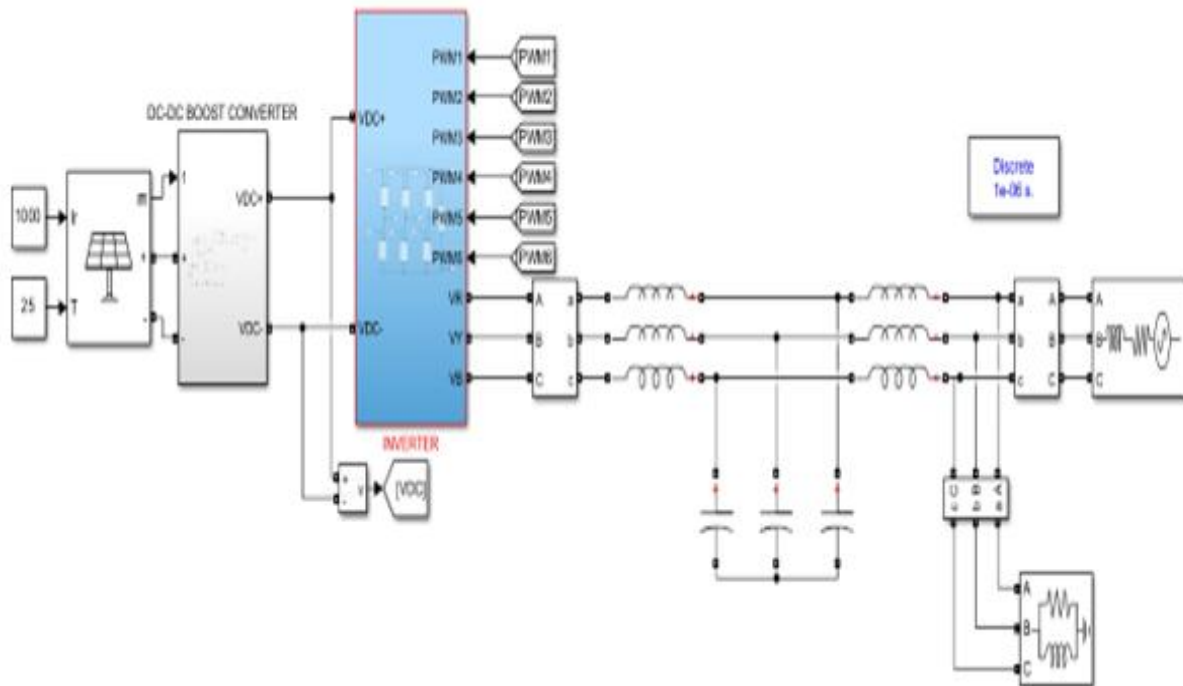
بعد اجراء النمذجة يبين الشكل (4-12) أن الاستطاعة الردية المحقونة من قبل الـ STATCOM تساوي الاستطاعة الردية للحمل Q LOAD، وبالتالي فإن نظام التحكم PLL يعمل بشكل فعال مع الـ STATCOM.



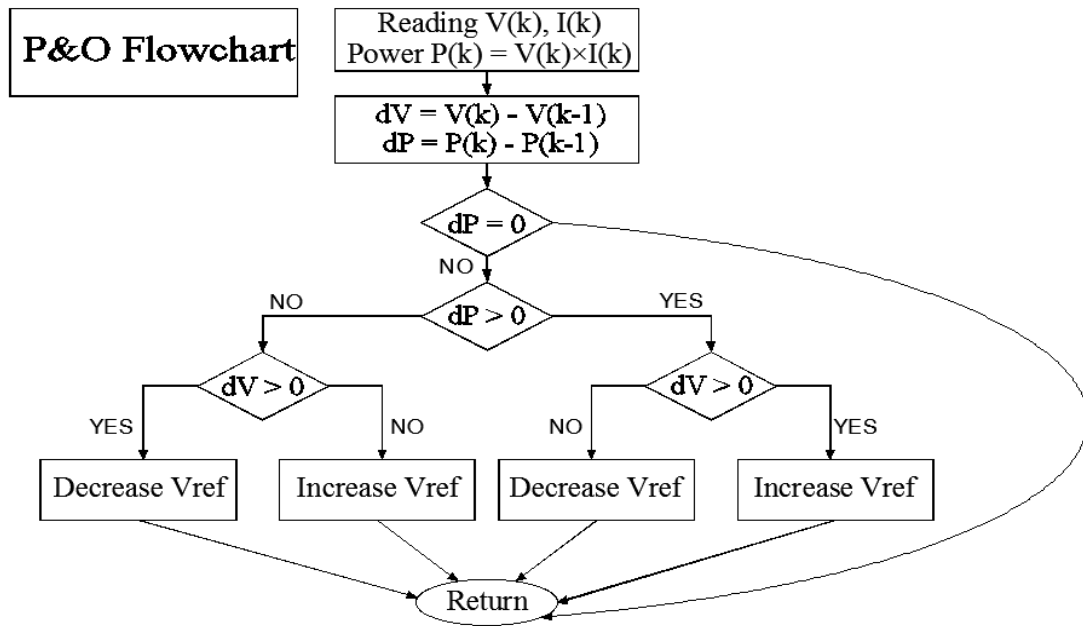
الشكل (4-12) نتائج الاختبار البسيط المرتبط مع الـ STATCOM

4-6-2 تطبيق طريقة PLL على دائرة بسيطة مرتبطة مع نظام كهروضمسي:

يوضح الشكل (4-13) نموذج نظام كهروضمسي مرتبط مع الشبكة الكهربائية تم نمذجته من خلال برنامج MATLAB بهدف اختبار أداء حلقة الـ PLL والتحقق من فعاليتها. إن استطاعة المصدر 1.5KW والحمل استطاعته 7.5KW والنظام الكهروضمسي استطاعته 7.5KVAR .

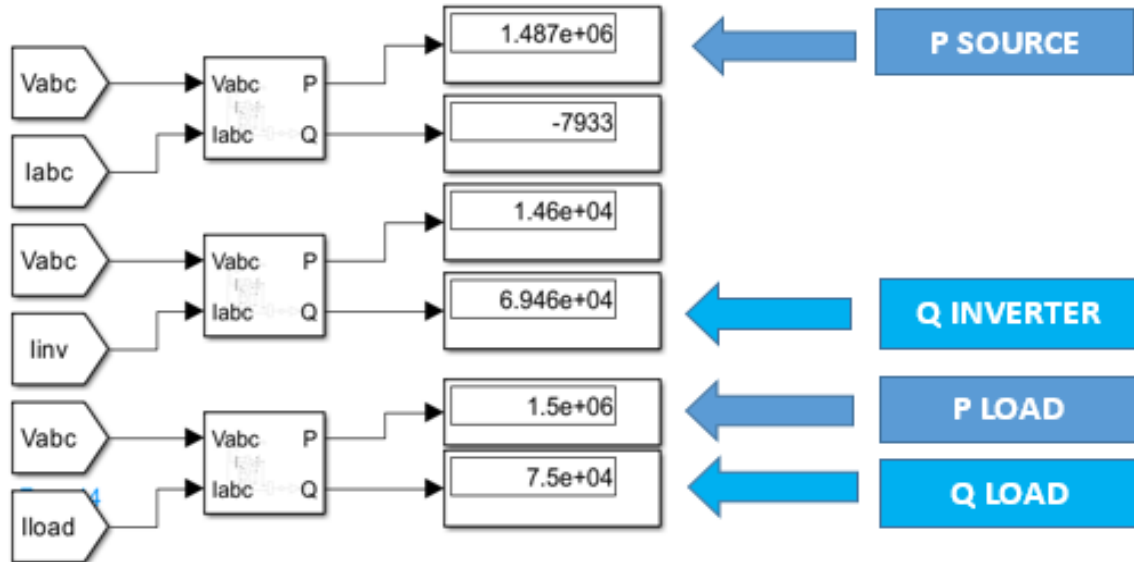


الشكل (4-13) نمذجة نظام الاختبار مع نظام كهروضمسي باستخدام برنامج MATLAB



الشكل (4-14) خوارزمية النظام الكهروضويسي [48]

النتائج:



الشكل (4-15) نتائج الاختبار المرتبط مع النظام الكهروضويسي

بعد اجراء النمذجة الشكل (4-15) تبين أن الاستطاعة الردية المحقونة من قبل النظام الكهروضويسي تساوي تقريباً

الاستطاعة الردية للحمل Q LOAD، مع العلم أن الاستطاعة الكلية للنظام الشمسي تساوي 8KW وبالتالي فإن

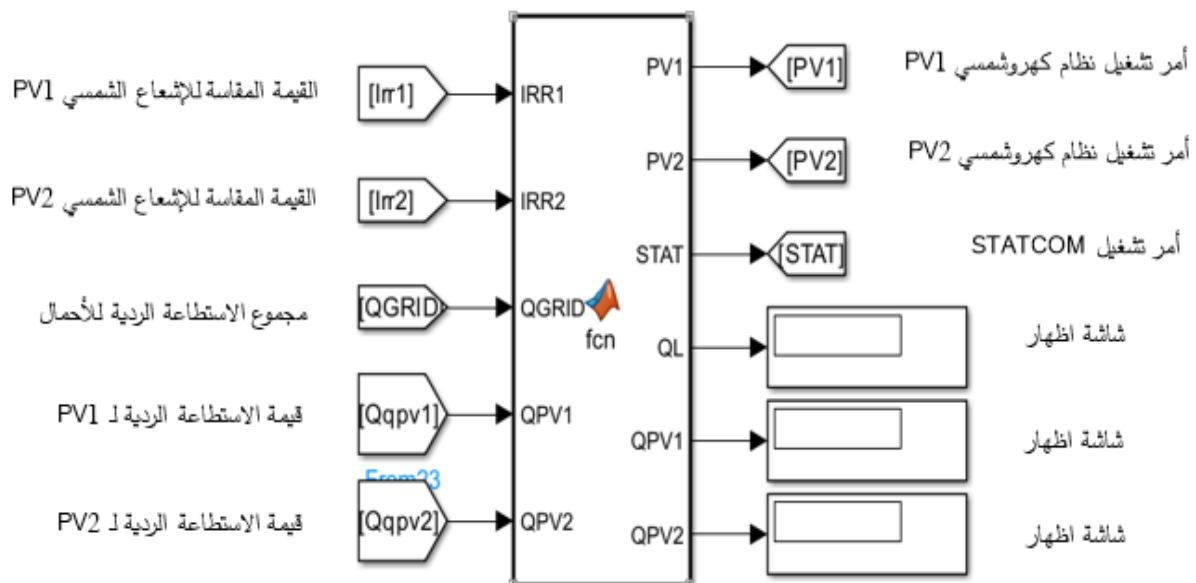
حلقة PLL تعمل بشكل جيد مع النظام الكهروضويسي.

7-4 خوارزمية التحكم:

بُنيت الخوارزمية لتعمل وفق الأسس التالية:

- (1) قراءة بيانات الاستطاعة الردية لكل من الأحمال والأنظمة الكهروشمسية (PV1 و PV2) والـ STATCOM التي تم قياسها من خلال أجهزة القياس الموزعة ضمن الشبكة المعتمدة.
- (2) قراءة الاشعاع الشمسي للأنظمة الكهروشمسية PV1 و PV2 والذي يتغير وفق الظروف المناخية، وبالتالي تتغير كمية الاستطاعة المولدة منها.
- (3) إجراء مقارنة ما بين الاستطاعة الردية المتوفرة من الأنظمة الكهروشمسية PV1 و PV2 والـ STATCOM واستطاعة الأحمال على الشبكة.
- (4) تُعطى الأولوية لحقن الاستطاعة الردية لـ STATCOM ثم للأنظمة الكهروشمسية، فعند توفر ظروف مناخية مناسبة وتوفر استطاعة ردية كافية للحمل يتم تشغيل الأنظمة الكهروشمسية لمساندة الـ STATCOM في حقن الاستطاعة الردية في الشبكة، وذلك لتأمين استقرار النظام والحفاظ على التوتر الإسمي للشبكة.

تم استخدام MATLAB FUNCTION لتشكيل الخوارزمية



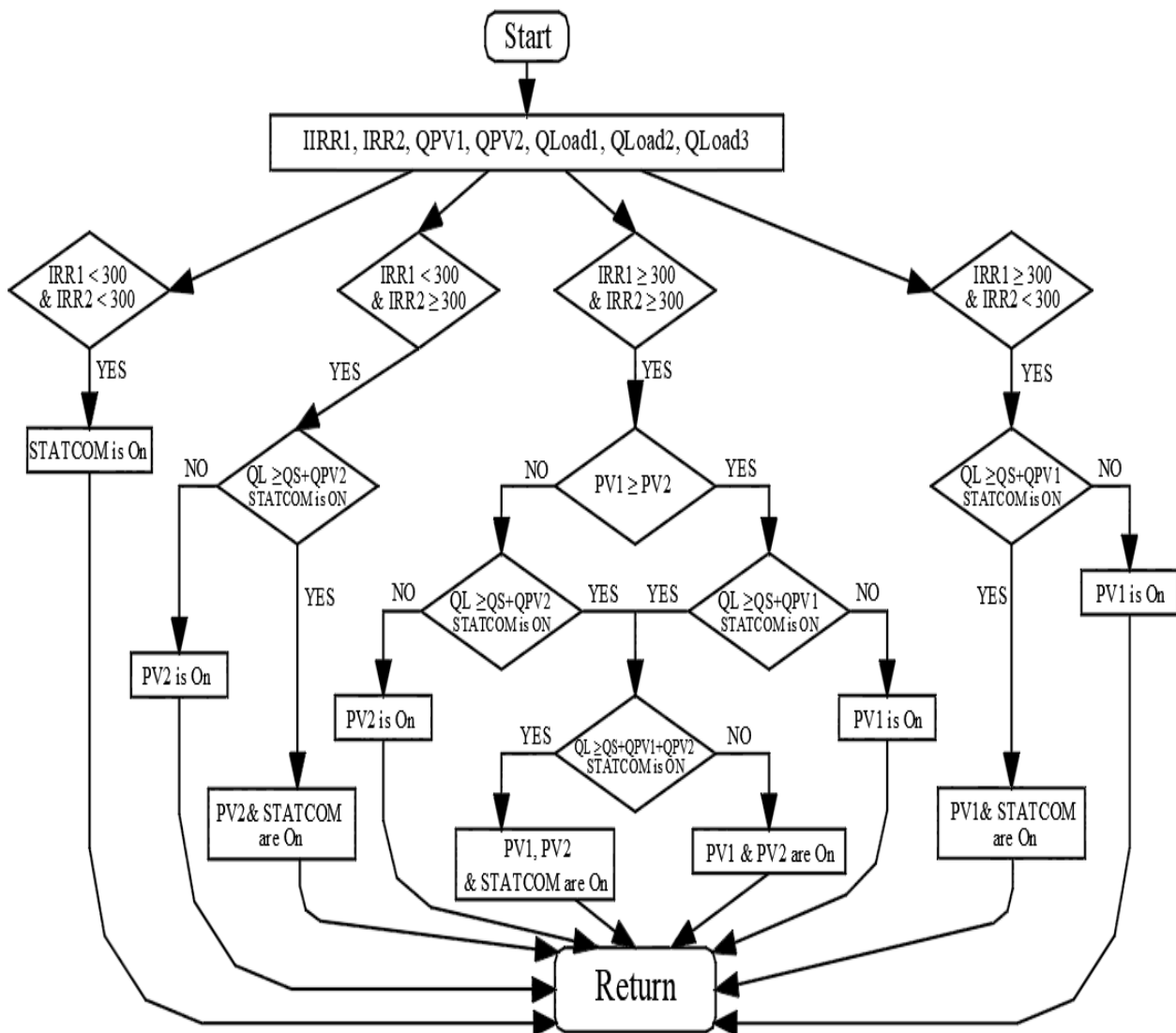
الشكل (4-16) MATLAB FUNCTION للخوارزمية

حيث: IRR1 الاشعاع الشمسي لـ PV1، IRR2 الاشعاع الشمسي لـ PV2

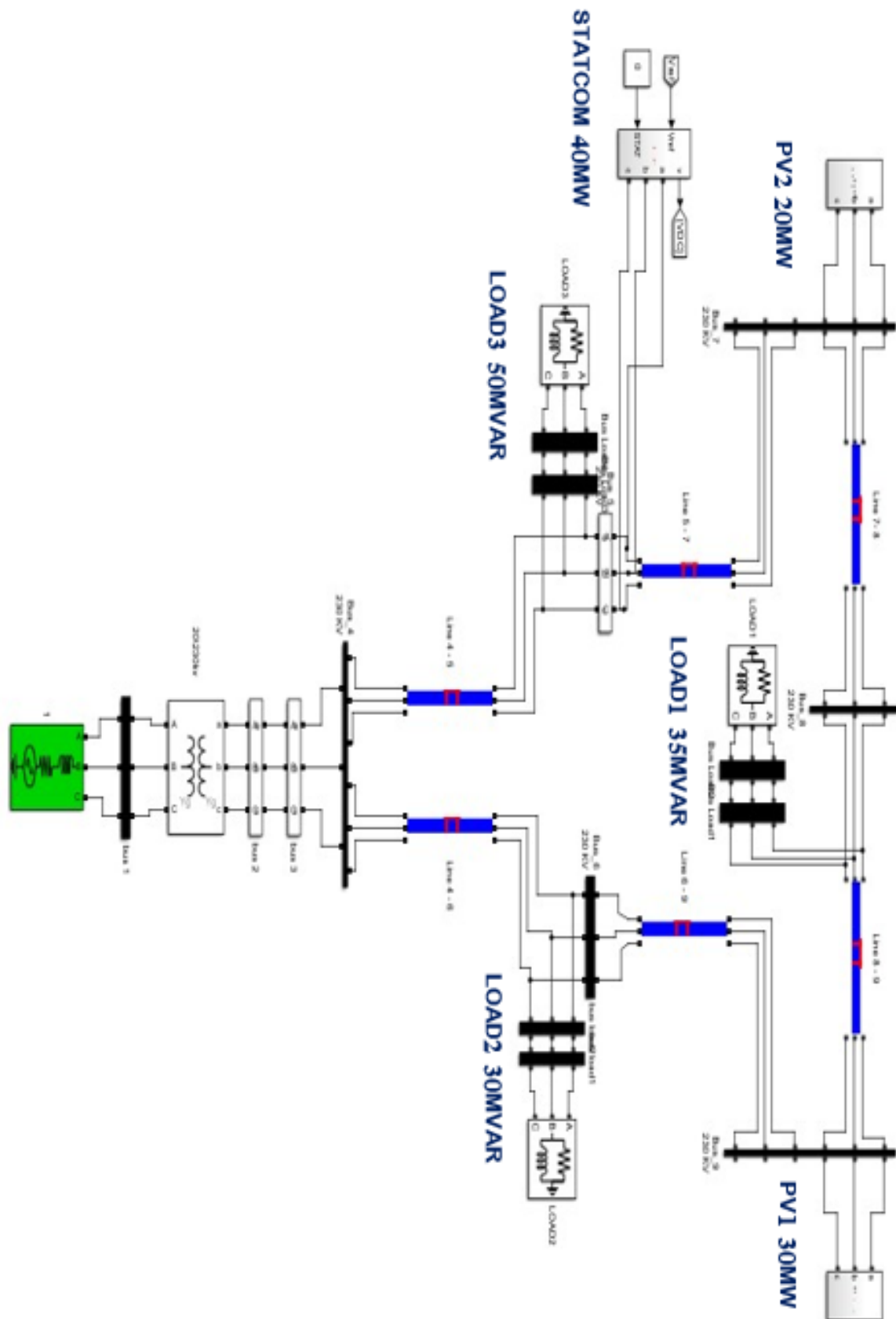
QPV1 الاستطاعة الردية الناتجة عن PV1، QPV2 الاستطاعة الردية الناتجة عن PV2

QL مجموع الاستطاعة الردية للأحمال، QLoad1 الاستطاعة الردية للحمل 1، QLoad2 الاستطاعة الردية للحمل 2، QLoad3 الاستطاعة الردية للحمل 3

QS الاستطاعة الردية لـ STATCOM



الشكل (4-17) المخطط الصندوقي لخوارزمية التحكم المقترحة



الشكل (4-18) نمذجة شبكة IEEE9 المعدلة في البحث باستخدام برنامج MATLAB

8-4 النتائج العملية:

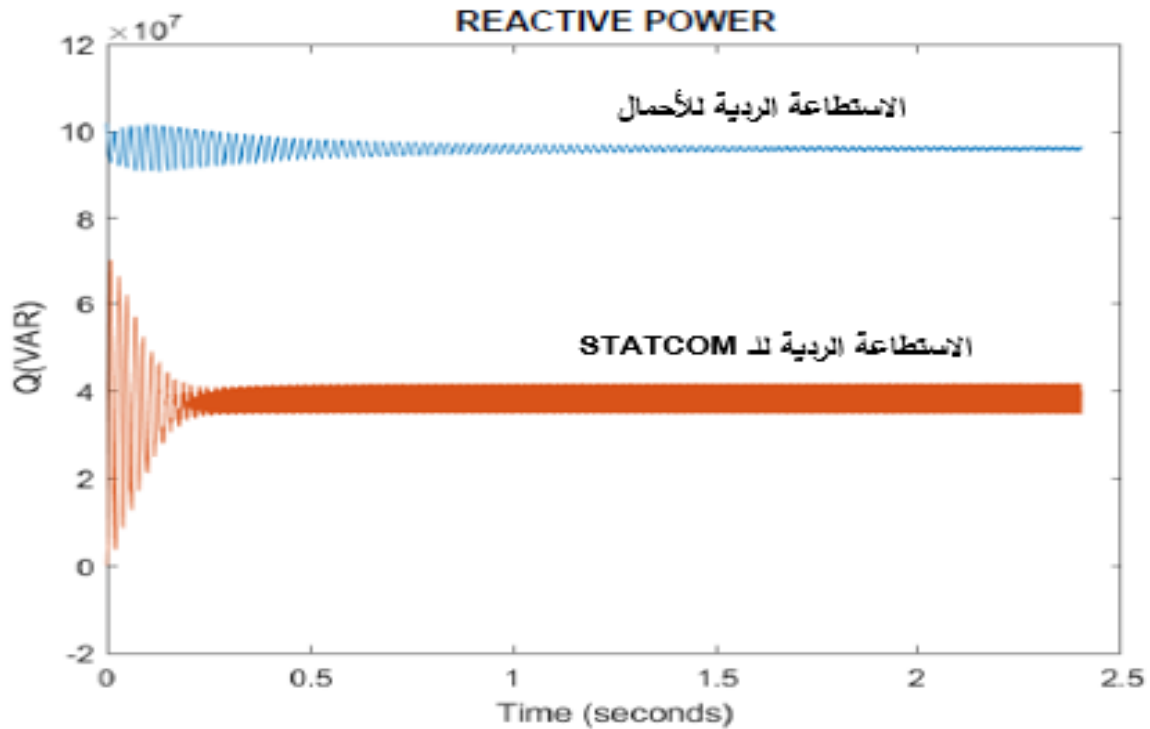
1-8-4 السيناريو الأول: حالة العمل الـ STATCOM فقط

تم في هذا السيناريو محاكاة الوضع الليلي أو في حال غياب الاشعاع الشمسي بسبب وجود غيوم لا تسمح بتوليد الطاقة الكهربائية من الأنظمة الكهروضوئية. قام الـ STATCOM بحقن استطاعة ردية بمقدار 40MVAR، (تتطلب مكثف ذو سعة بحدود $318\mu\text{F}$)، في حين أن استطاعة الأحمال المطلوبة هي 115 MVAR تتوزع كما يلي:

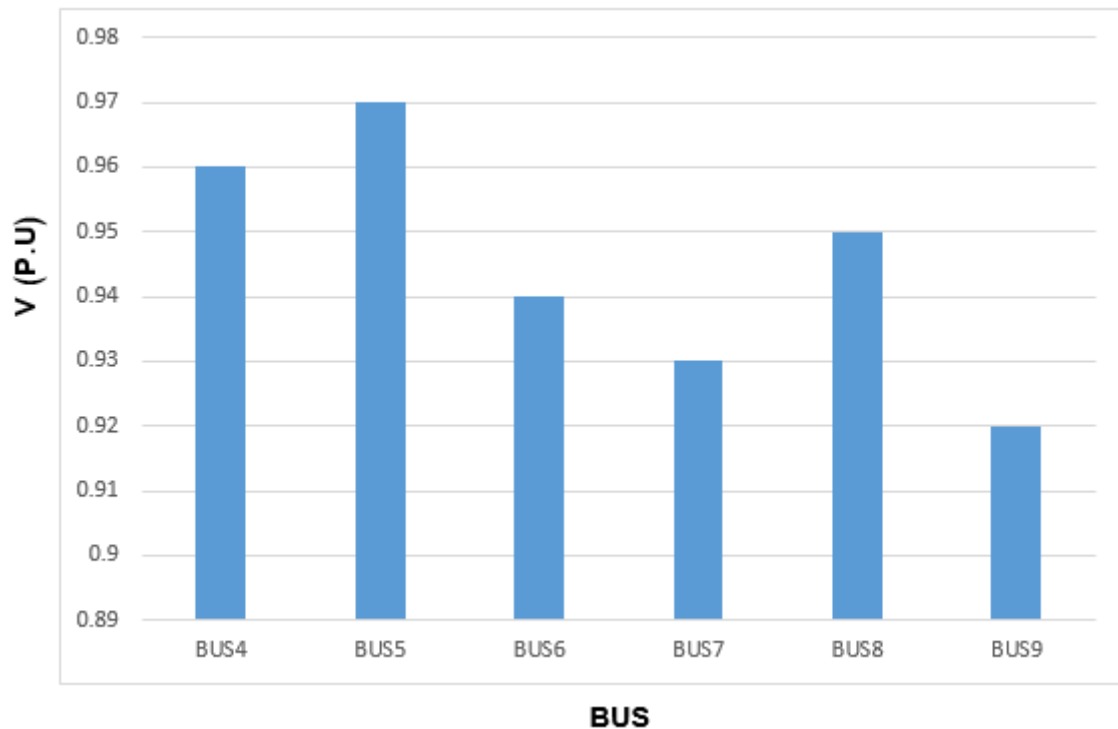
LOAD	Q MVAR
Load 1	35
Load 2	30
Load 3	50

الجدول (3-4) توزع الأحمال للاستطاعة الردية في الشبكة المدروسة

عند محاكاة السيناريو بواسطة برنامج الـ MATLAB أظهر النتائج التالية:



الشكل (4-19) مخطط بياني للاستطاعة الردية عند محاكاة السيناريو الأول



الشكل (4-20) نتائج توترات الباسبارات للسيناريو الأول

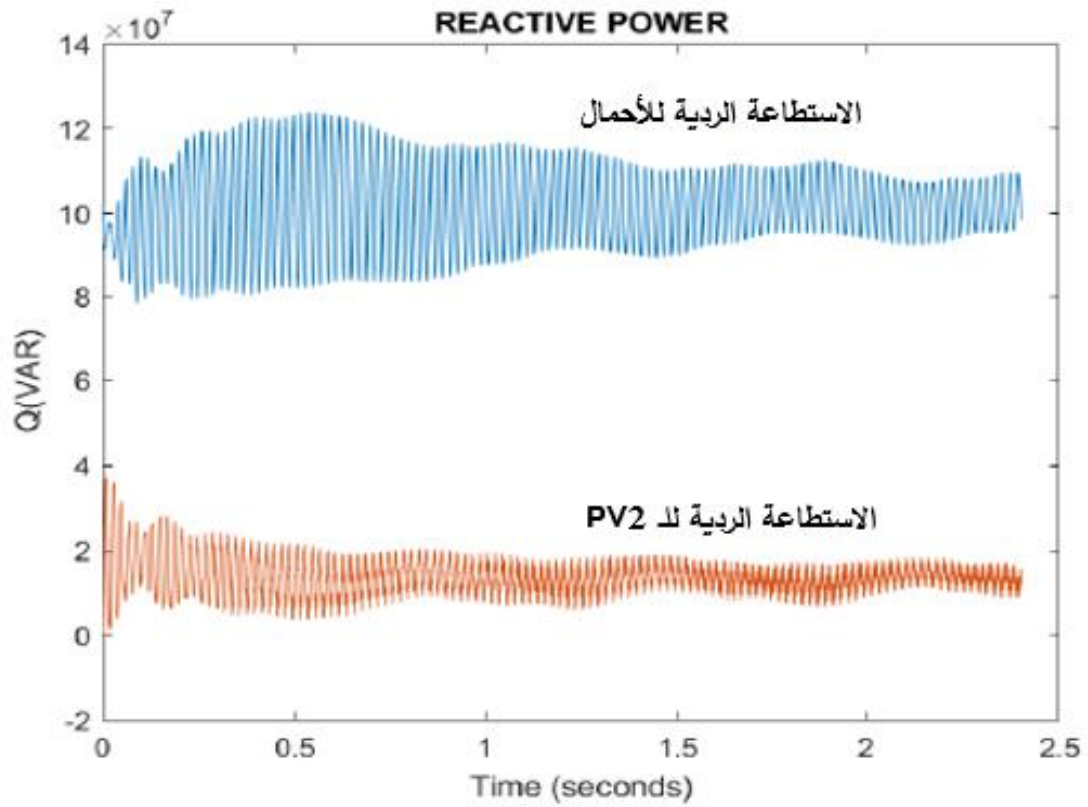
يبين الشكل (4-19) الاستطاعة الردية للشبكة والاستطاعة المحقونة من الـ STATCOM في الشبكة.

يبين الشكل (4-20) قيمة التوترات على باسبارات الشبكة حيث يظهر انخفاض التوتر عند المنبع بسبب انخفاض الاستطاعة الردية المحقونة في الشبكة. يلاحظ انه عند الباسبار رقم (5) يكون التوتر أعلى من الباقي نتيجة لحقن الاستطاعة الردية من الـ STATCOM ولكنه لا يكفي وحده لتعويض الاستطاعة الردية للشبكة المطلوبة عند التحميل.

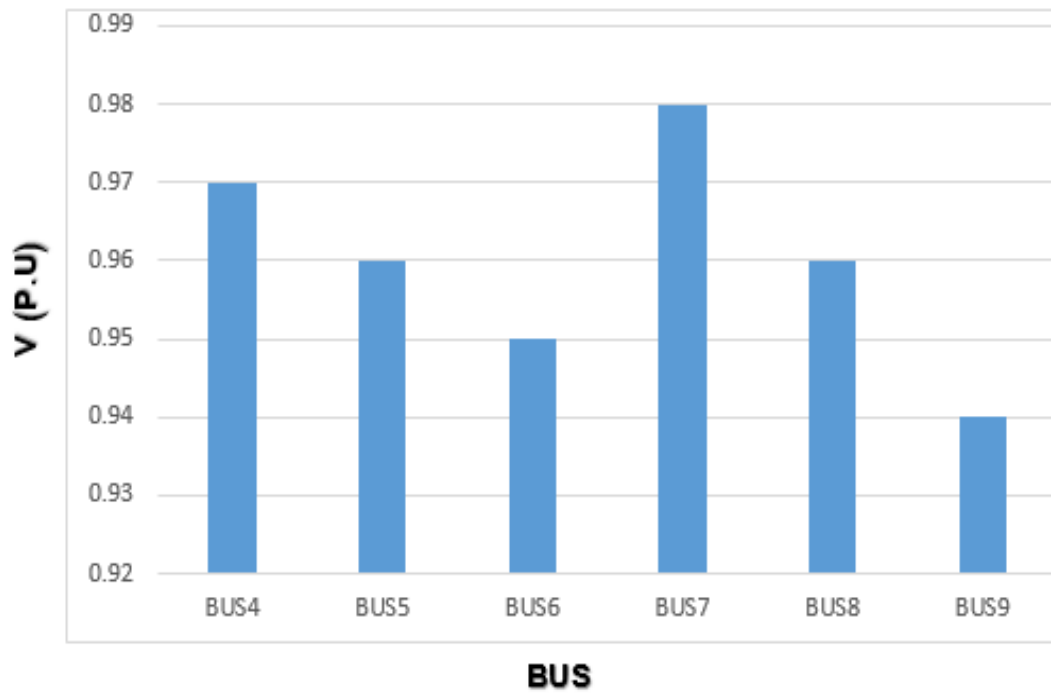
4-8-2 السيناريو الثاني: حالة العمل PV2 فقط

تم في هذا السيناريو محاكاة وجود عطل طرأ على الـ STATCOM ووجود ظروف جوية منعت عمل النظام الكهروضوئي PV1. في حين توفر اشعاع شمسي بمقدار 1000 W/m^2 عند النظام الكهروضوئي PV2 فتم حقن استطاعة ردية في الشبكة بمقدار 20 MVAR، بينما الاستطاعة الردية للشبكة المطلوبة هي 115 MVAR.

عند محاكاة السيناريو بواسطة برنامج الـ MATLAB أظهر النتائج التالية:



الشكل (4-21) مخطط بياني للاستطاعة الردية عند محاكاة السيناريو الثاني



الشكل (4-22) توترات الباسبارات السيناريو الثاني

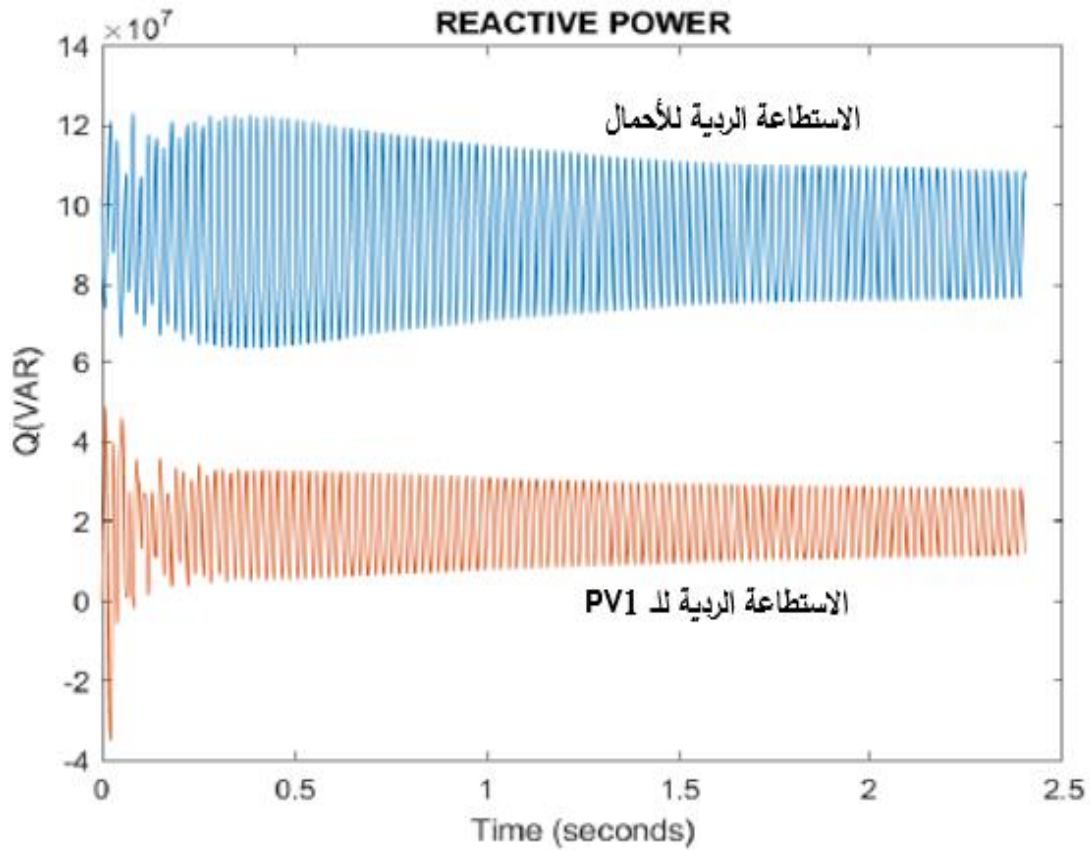
يبين الشكل (4-21) الاستطاعة الردية للشبكة والاستطاعة المحقونة من النظام الكهروضمسي PV2.

يبين الشكل (4-22) قيمة التوترات على باسبارات الشبكة حيث يظهر انخفاض التوتر عند المنبع بسبب انخفاض الاستطاعة الردية المحقونة في الشبكة. يلاحظ انه عند الباسبار رقم (7) يكون التوتر أعلى من الباقي نتيجة لحقن الاستطاعة الردية من الـ PV2 ولكنه لا يكفي وحده لتعويض الاستطاعة الردية للشبكة المطلوبة عند الحمل.

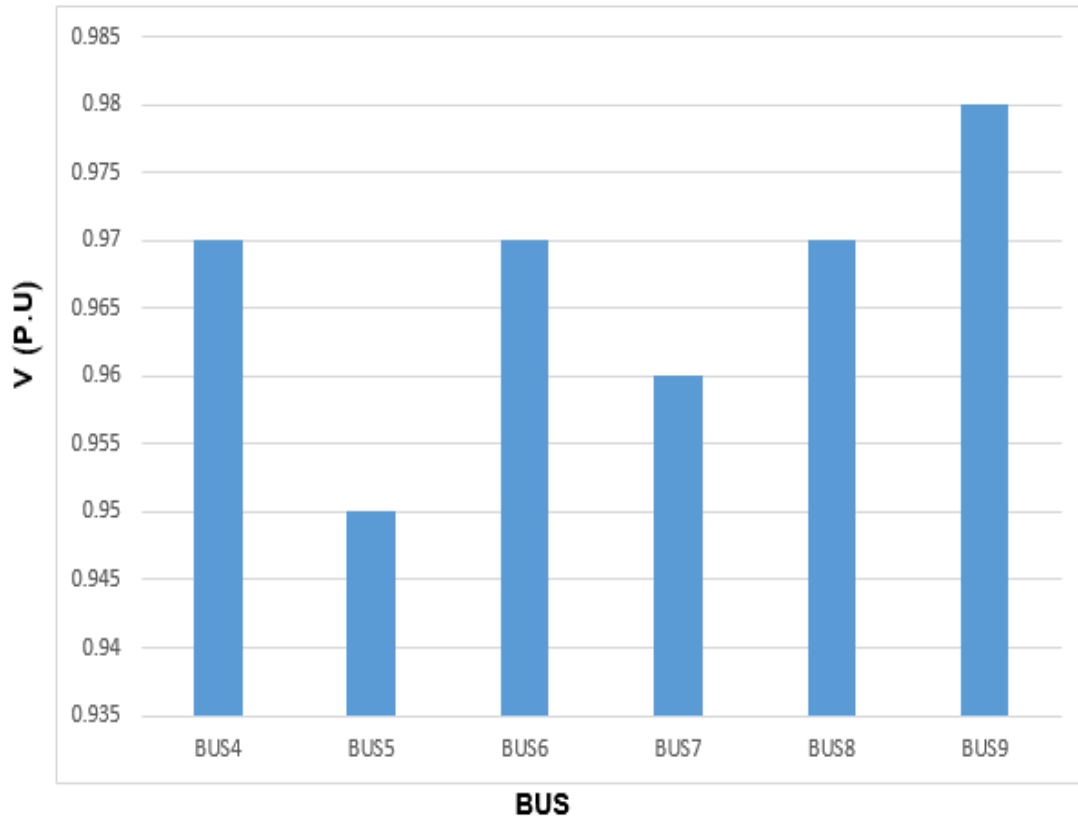
3-8-4 السيناريو الثالث: حالة العمل PV1 فقط

تم في هذا السيناريو محاكاة وجود عطل طرأ على الـ STATCOM ووجود ظروف جوية منعت عمل النظام الكهروضمسي PV2. في حين توفر اشعاع شمسي بمقدار 1000 W/m^2 عند النظام الكهروضمسي PV1 فتم حقن استطاعة ردية في الشبكة بمقدار 30 MVAR بينما الاستطاعة الردية للشبكة المطلوبة هي 115 MVAR.

عند محاكاة السيناريو بواسطة برنامج الـ MATLAB أظهر النتائج التالية:



الشكل (4-23) مخطط بياني للاستطاعة الردية عند محاكاة السيناريو الثالث



الشكل (4-24) توترات الباسبارات السيناريو الثالث

يبين الشكل (4-23) الاستطاعة الردية للشبكة وحقق الاستطاعة من النظام الكهروشمسي PV1.

يبين الشكل (4-24) قيمة التوترات على باسبارات الشبكة حيث يظهر انخفاض التوتر عند المنبع بسبب انخفاض

الاستطاعة الردية المحقونة في الشبكة. يلاحظ انه عند الباسبار رقم (9) يكون التوتر أعلى من الباقي نتيجة لحقن

الاستطاعة الردية من الـ PV1 ولكنه لا يكفي وحده لتعويض الاستطاعة الردية للشبكة المطلوبة عند الحمل.

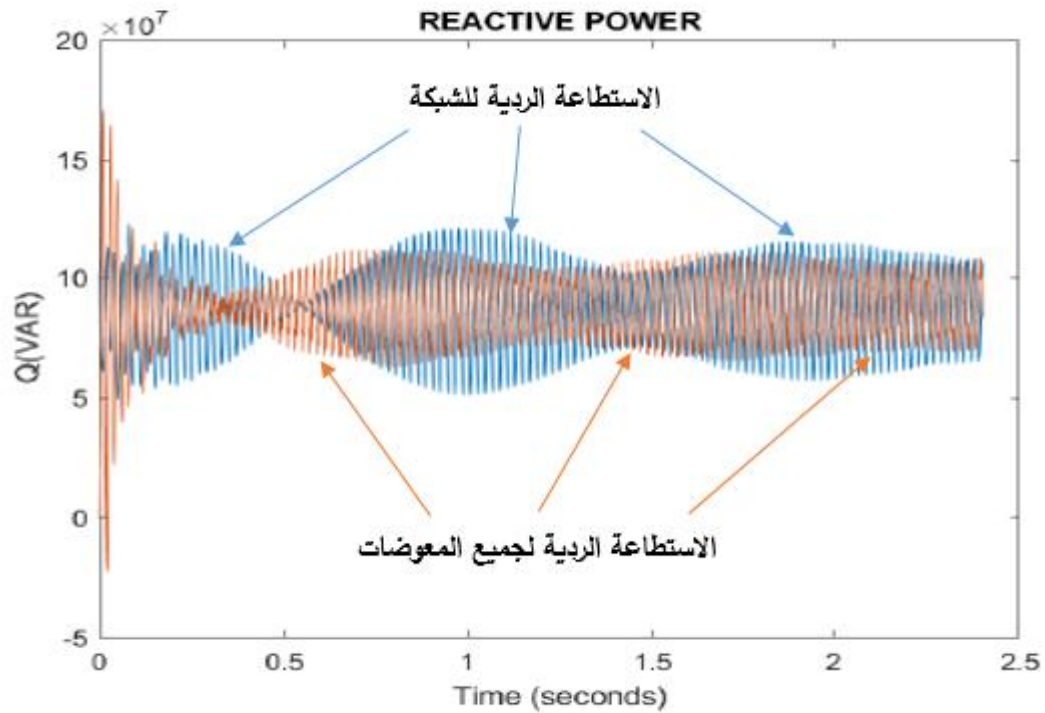
4-8-4 السيناريو الرابع: حالة العمل PV1 + PV2 + STATCOM معاً

تم في هذا السيناريو محاكاة عمل كل من الـ STATCOM والنظامين الكهروشمسيين PV1 و PV2 معاً حيث

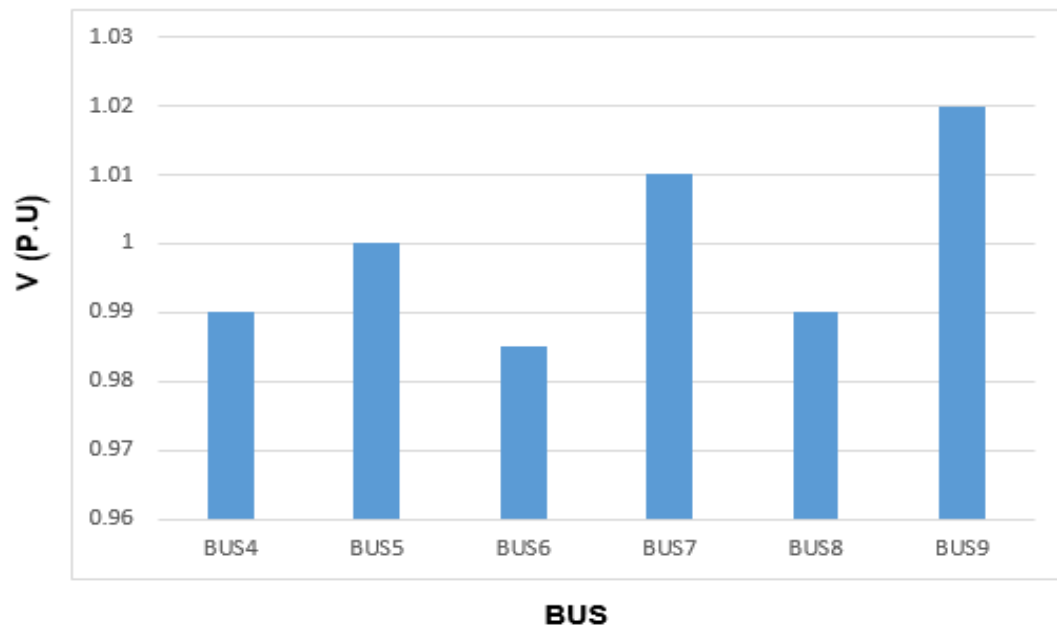
قامت جميعاً بحقق الشبكة باستطاعة ردية بلغت 90 MVAR بينما الاستطاعة الردية للشبكة المطلوبة هي

115MVAR.

عند محاكاة السيناريو بواسطة برنامج الـ MATLAB أظهر النتائج التالية:



الشكل (25-4) مخطط بياني للاستطاعة الردية عند محاكاة السيناريو الرابع



الشكل (26-4) توترات الباسبارات السيناريو الرابع

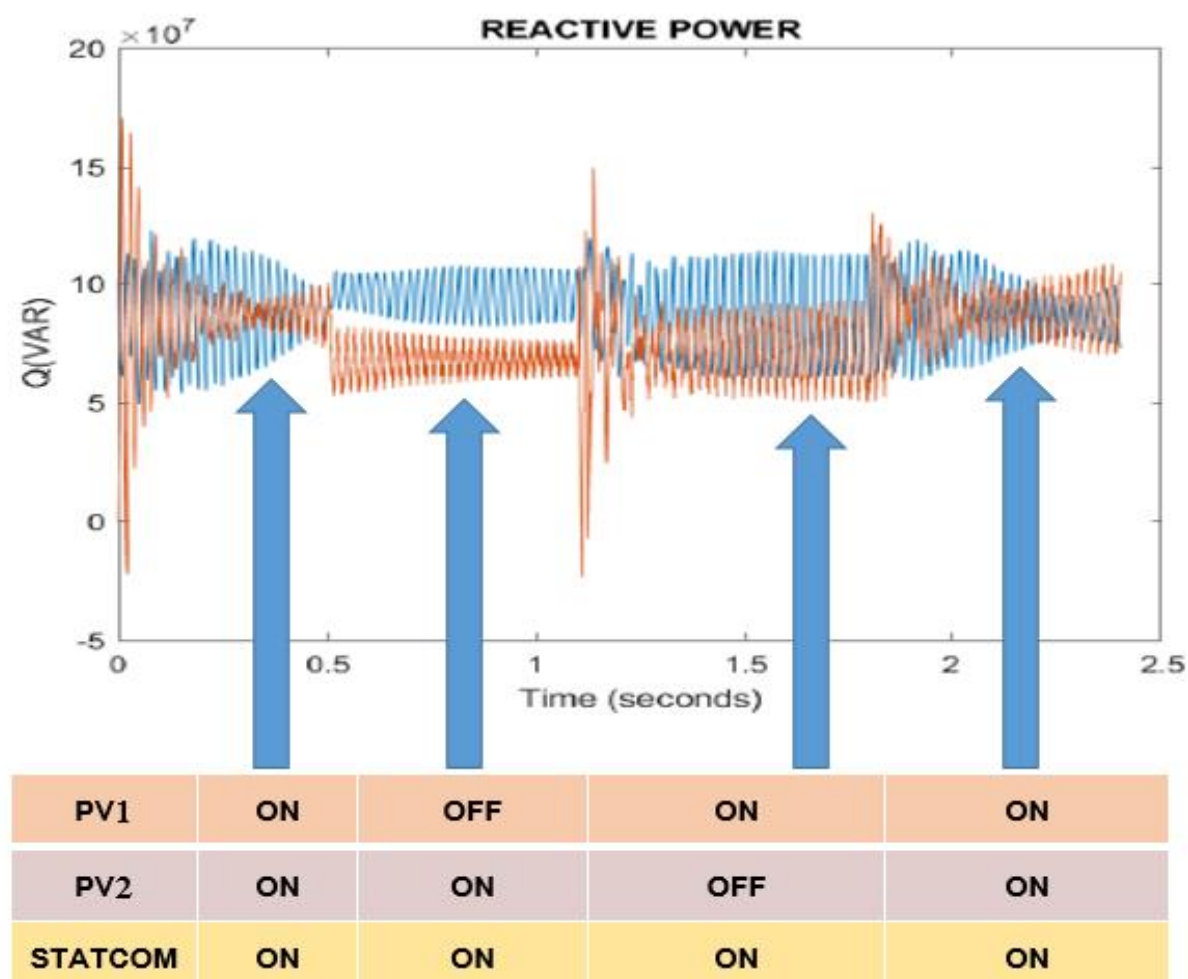
يبين الشكل (25-4) الاستطاعة الردية للشبكة وحقق الاستطاعة من كل من الـ STATCOM والنظامين الكهروضميين PV1 و PV2 معاً. يبين الشكل (26-4) قيمة التوترات على باسبارات الشبكة 5 و 7 و 9 أعلى من

باقي الباسبارات نتيجة لحقن الاستطاعة الردية من PV1 و PV2 و STATCOM. ويظهر انخفاض التوتر عند المنبع بسبب انخفاض الاستطاعة الردية المحقونة في الشبكة وذلك لأن مجموع الاستطاعة الردية المحقونة 90 MVAR ولكنه لا يكفي وحده لتعويض الاستطاعة الردية للشبكة المطلوبة عند الحمل.

4-8-5 السيناريو الخامس: التحكم عن طريق الخوارزمية وبإدخال الاشعاع الشمسي

تم في هذا السيناريو محاكاة عمل كل من الـ STATCOM والنظامين الكهروضميين PV1 و PV2 معاً وإدخال عامل الاشعاع الشمسي والتغيرات التي تطرأ عليه بسبب الأحوال الجوية (غائم، صحو مشمس)، حيث يعمل الـ STATCOM وأحد الأنظمة الكهروضمسية، أو يعمل الجميع معاً.

عند محاكاة السيناريو بواسطة برنامج الـ MATLAB أظهر النتائج التالية:



الشكل (4-27) مخطط بياني للاستطاعة الردية عند محاكاة السيناريو الخامس

قامت المعوضات بحقن الشبكة باستطاعة ردية وفق الجدول التالي:

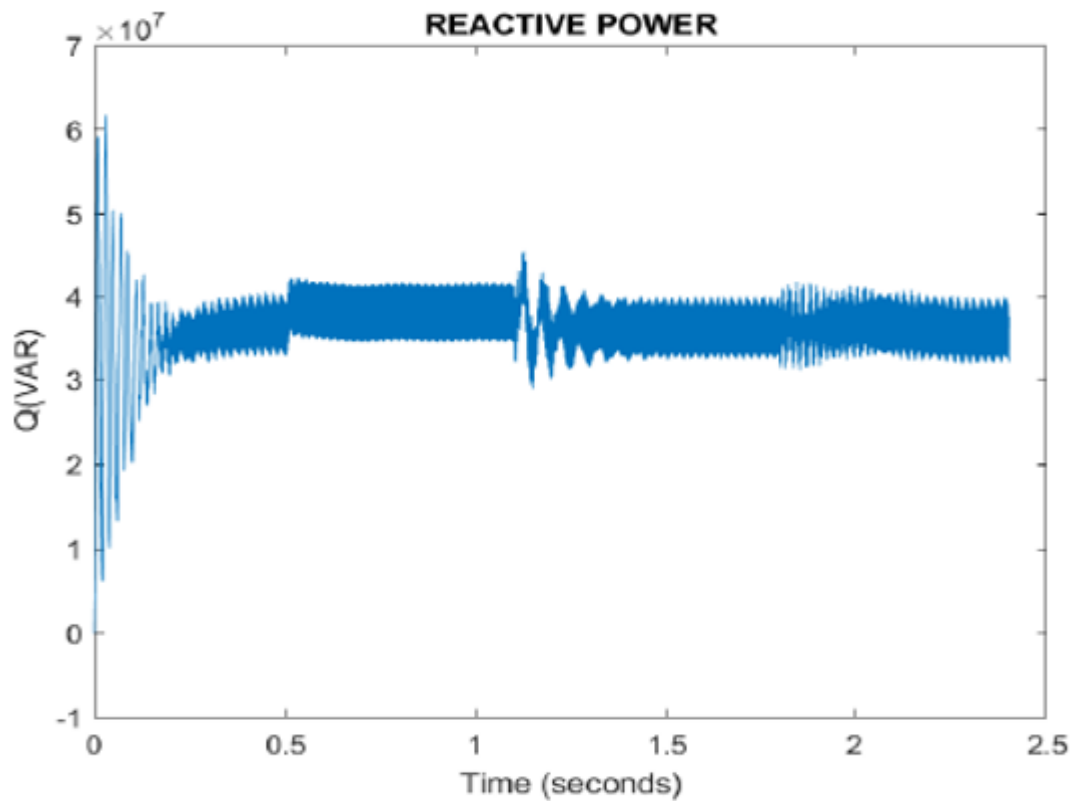
الاستطاعة الردية MVAR	المعوضات
60	STATCOM + PV2
70	STATCOM + PV1
90	STATCOM + PV1 + PV2

الجدول (4-4) الاستطاعة الردية للمعوضات في السيناريو الخامس

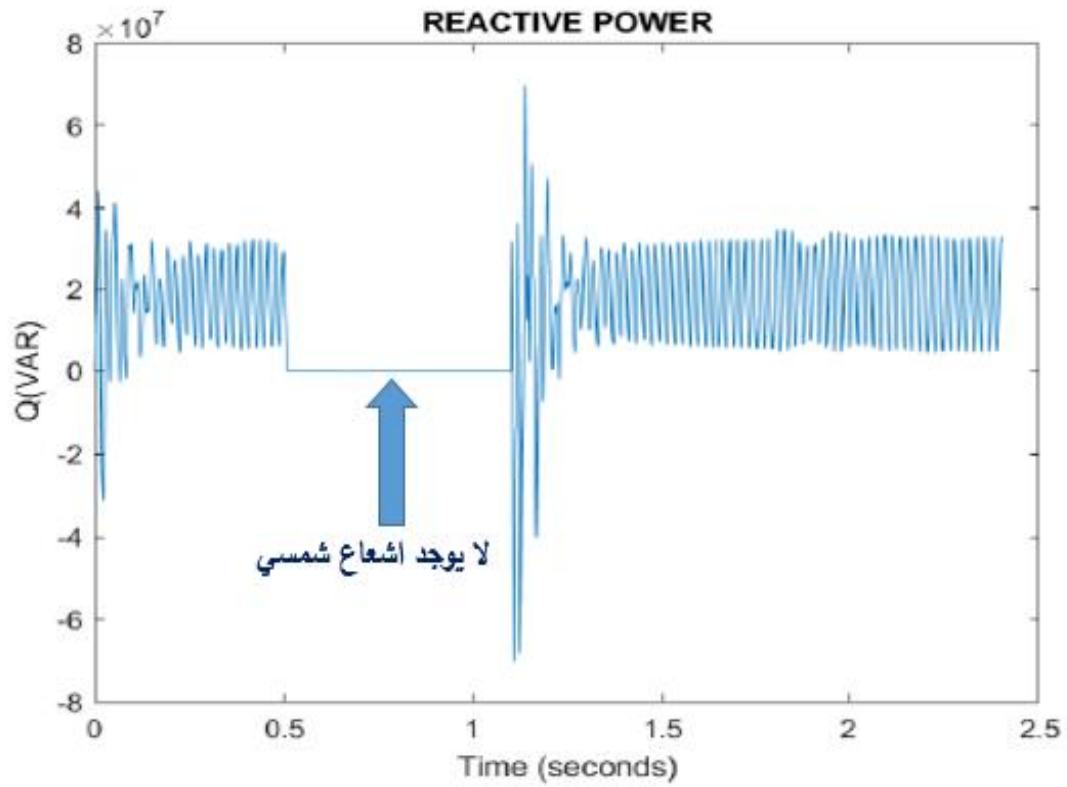
بينما الاستطاعة الردية للشبكة المطلوبة هي 115 MVAR.

تظهر الأشكال التالية (28-4) و(29-4) و(30-4) الاستطاعة الردية المحقونة من قبل كل من المعوضات

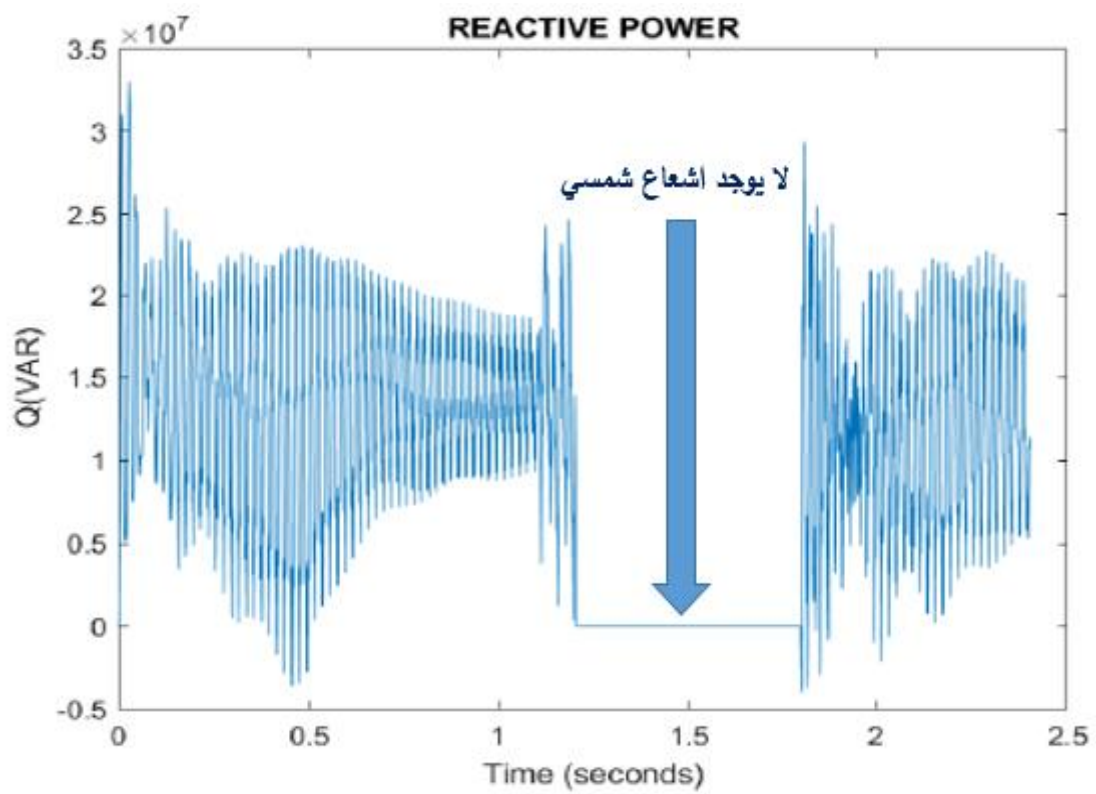
على انفراد.



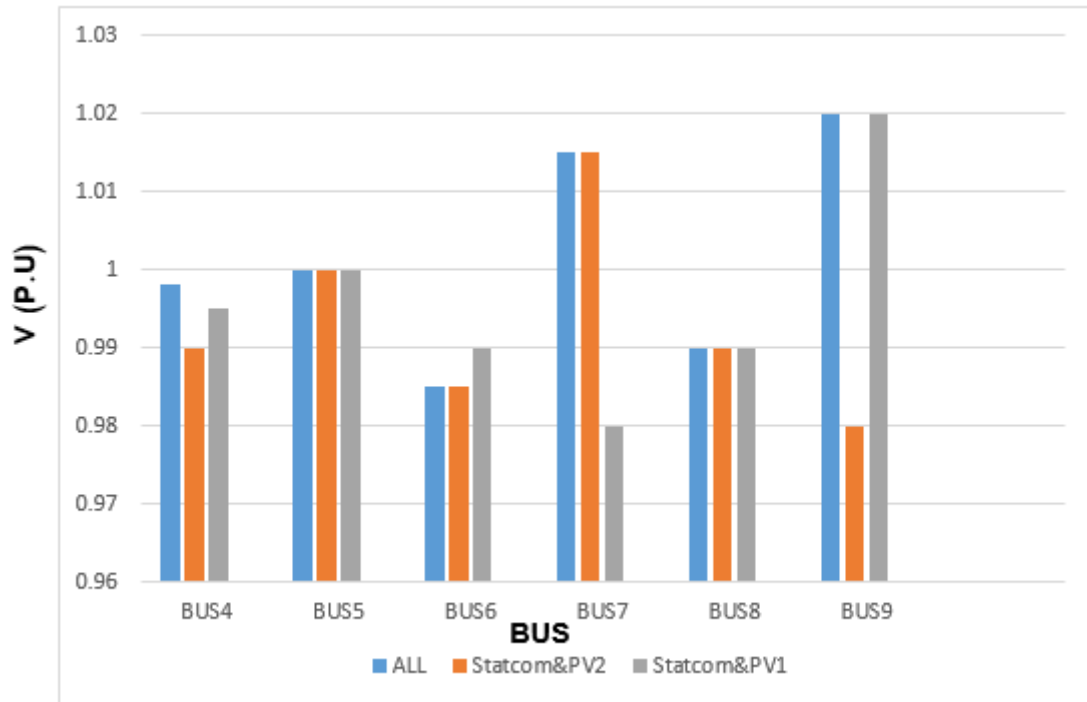
الشكل (28-4) الاستطاعة الردية المحقونة من قبل الـ STATCOM في السيناريو الخامس



الشكل (4-29) الاستطاعة الردية المحقونة من قبل الـ PV1 في السيناريو الخامس



الشكل (4-30) الاستطاعة الردية المحقونة من قبل الـ PV2 في السيناريو الخامس



الشكل (4-31) توترات الباسبارات السيناريو الخامس

يظهر الشكل (4-31) أنه عند حقن الاستطاعة الردية من PV1 و PV2 و STATCOM، فإن قيمة التوتر تقترب من التوتر الإسمي. بينما في حالات العمل الأخرى ونتيجة الأحوال الجوية نجد أن قيمة التوترات على كافة الباسبارات تقل بسبب خروج أحد الأنظمة الكهروشمسية عن العمل.

9.4 نمذجة جزء من شبكة التوتر 20kV السورية وإيجاد أثر ربط نظم كهروشمسية عليها

1.9.4 وصف البرنامج المستخدم في عملية النمذجة PSAT:

Description of used program in simulation PSAT

يوجد العديد من البرمجيات المتاحة التي يمكن من خلالها دراسة أثر ربط أنظمة التوليد الموزع المختلفة على شبكات التوليد والنقل والتوزيع من حيث تحسين جريان الحمولة والاستقرار الديناميكي والعابر لهذه الشبكات، وتم اختيار برنامج (PSAT) Power System Analysis Tool، وهو أحد البرمجيات المتخصصة في الشبكات الكهربائية، ويعمل ضمن البيئة البرمجية MATLAB، ويستخدم لتحليل الاستقرار الساكن والعابر وللتحكم في أنظمة القدرة الكهربائية. يمكن من خلال هذا البرنامج القيام بالعمليات التالية: جريان الحمولة، جريان الحمولة المستمرة،

جريان الحملولة الأمثل، تحليل استقرار الإشارات الصغيرة، ومحاكاة المجال الزمني. يحتوي هذا البرنامج على مكتبات لجميع عناصر الشبكة من مولدات ومحولات وخطوط نقل وأحمال وتجهيزات الـ FACTS ويعتمد البرنامج على عدة طرائق لحل جريان الحملولة

كما يحتوي البرنامج PSAT على نوافذ إدخال معلومات متطابقة تقريباً مع كل عناصر الشبكة المراد دراستها من مولدات ومحولات وخطوط نقل وقضبان تجميع، بما فيها الأنظمة المستخدمة لقياس السرعة ومنظم توتر المولدة.

2.9.4 الشبكات المدروسة:

تم نمذجة الشبكة المدروسة، ثم أجري جريان حملولة قبل وبعد ربطها مع مجموعة أنظمة كهروضوئية تتناسب استطاعتها مع استطاعة هذه الشبكة.

1.2.9.4 تطبيق الدراسة على جزء من الشبكة السورية:

Implementation the study on part of Syrian network

تم اعتماد جزء من شبكة دوما العاملة على التوتر 20kV، وهي عبارة عن مخرج "الإدارة" المنطلق من محطة تحويل دوما، كما هو مبين في الشكل (4-32). يبين الجدولان (4-5) و (4-6) محددات هذه الشبكة، وهي أطوال كافة الخطوط هوائية أو كابلات، والأحمال على كافة قضبان التجميع. أجريت عملية تهذيب لهذه الشبكة وفقاً للبرنامج المستخدم كما اختزلت كما هو موضح في الشكل (4-33)، حيث يبين الشبكة مع الأحمال بعد التعديل. سيتم إجراء جريان الحملولة في الحالة العادية، ثم بوجود أنظمة كهروضوئية متغيرة مكان التركيب، ومتغيرة الاستطاعة. مع العلم أن استطاعة الأساس المأخوذة في الحساب هي 10MVA.

رقم الخط	نوعه	مقطعه (mm ²)	طوله (m)	R (Ω/Km)	X (Ω/Km)
1	هوائي + أرضي		3250	0.192966	0.144
2	ألومنيوم فولاذ	120/21	300	0.2833	0.38
3	ألومنيوم فولاذ	120/21	5	0.2833	0.38
4	كبل	120	208	0.2833	0.12
5	ألومنيوم فولاذ	120/21	1000	0.2833	0.38

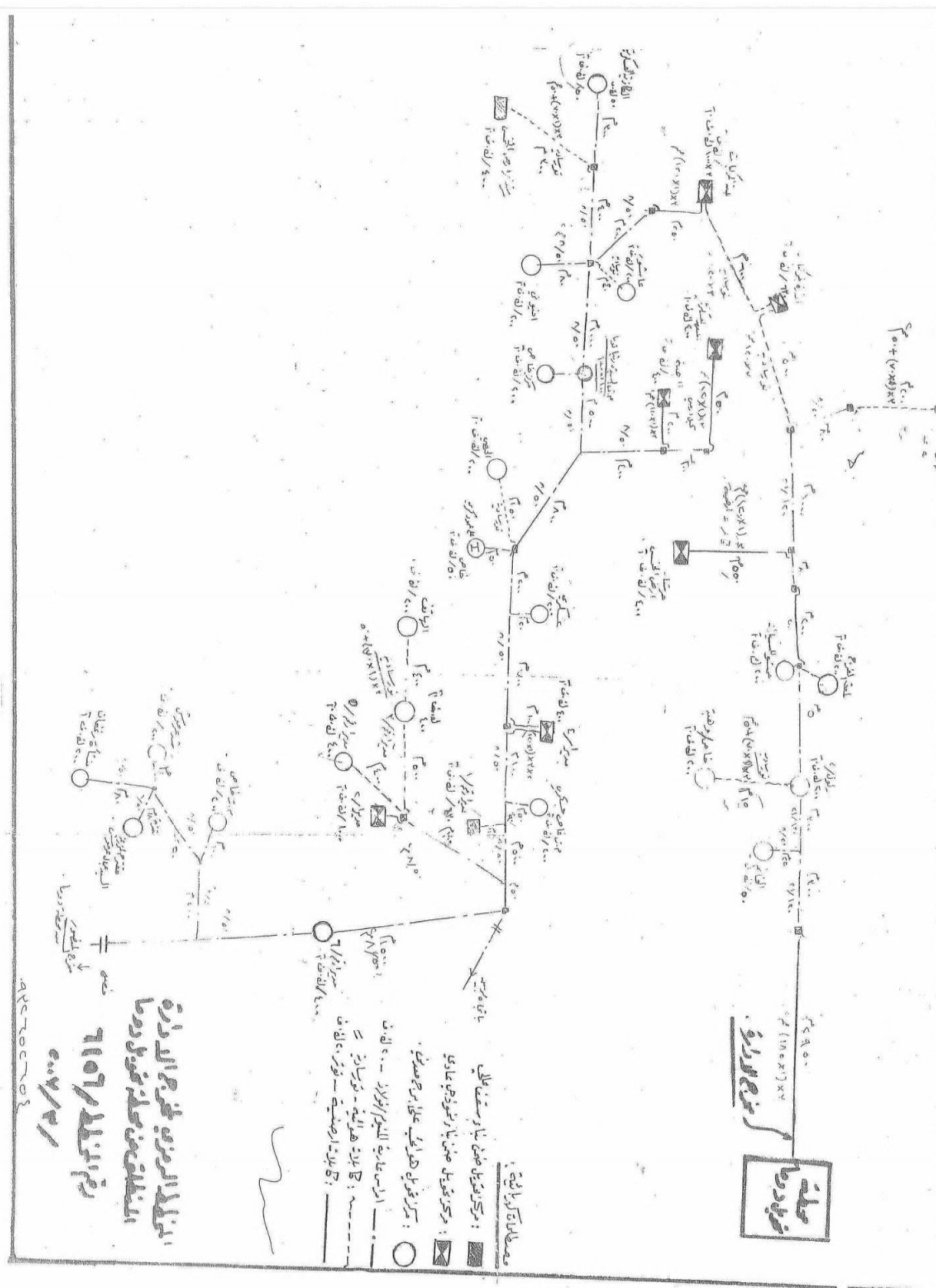
رقم الخط	نوعه	مقطعه (mm ²)	طوله (m)	(Ω/Km) R	(Ω/Km) X
6	كبل	120	500	0.2833	0.12
7	كبل	120	600	0.2833	0.12
8	هوائي + أرضي		450	0.45961	0.23556
9	ألمنيوم فولاذ	50/8	400	0.68	0.38
10	ألمنيوم فولاذ	50/8	1000	0.68	0.38
11	ألمنيوم فولاذ	50/8	500	0.68	0.38
12	ألمنيوم فولاذ	50/8	400	0.68	0.38
13	ألمنيوم فولاذ	50/8	800	0.68	0.38
14	ألمنيوم فولاذ	50/8	200	0.68	0.38
15	ألمنيوم فولاذ	50/8	700	0.68	0.38
16	ألمنيوم فولاذ	50/8	100	0.68	0.38
17	ألمنيوم فولاذ	50/8	90	0.68	0.38
18	ألمنيوم فولاذ	50/8	500	0.68	0.38
19	ألمنيوم فولاذ	50/8	800	0.68	0.38
20	ألمنيوم فولاذ	50/8	950	0.68	0.38
21	ألمنيوم فولاذ	50/8	250	0.68	0.38
22	ألمنيوم فولاذ	50/8	302	0.68	0.38
23	ألمنيوم فولاذ	50/8	500	0.68	0.38

الجدول (4-5) محددات التشغيل المقاسة للجزء المدروس من شبكة توزيع دوما

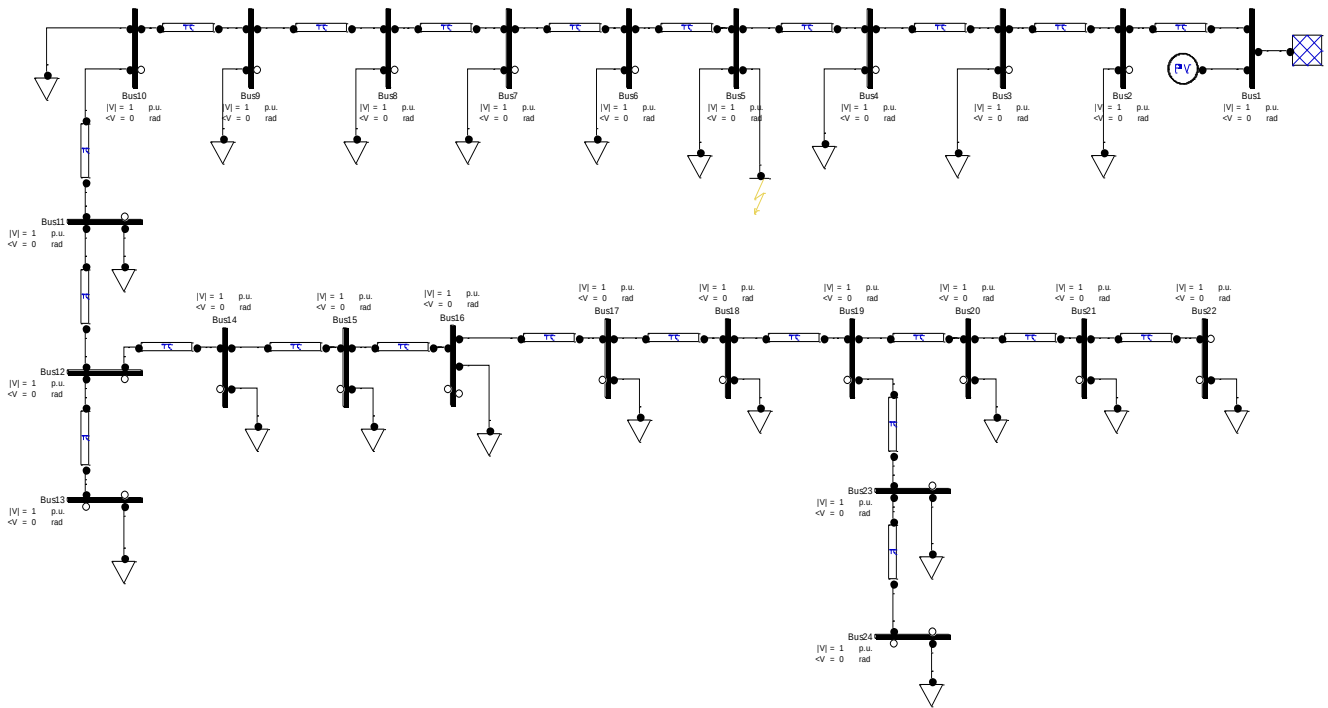
رقم الباسبار	اسم مركز التحويل	استطاعته KVA	نسبة التحميل	عامل الاستطاعة	KW P	KVAR Q
1	الخانم	50	50	0.80	20	15
2	دلول/2	630	62	82	321	224
3	خاص/وهبة	200	60	0.88	106	57
4	الفرج	200	65	0.92	120	51
5	حميشو للسيارات	200	50	0.95	95	32
6	حرسا أرض الخمس	1000	79	0.81	640	464
7	حرسا الهلال	630	103	0.80	520	390
8	إدارة المركبات	630	47	0.85	252	156
9	رحبة المركبات	3000	35	0.85	893	554
10	عاشور	200	75	0.93	140	56
11	أفيوني	200	65	0.95	124	41

رقم الباسبار	اسم مركز التحويل	استطاعته KVA	نسبة التحميل	عامل الاستطاعة	KW P	KVAR Q
12	حرسنا أرض الخس	400	83	0.76	253	216
13	الكازية العسكرية	50	60	0.80	24	18
14	السيدة ريتا توما	100	75	0.96	72	21
15	مركز خاص	200	50	0.85	85	53
16	الرحبة	400	45	0.85	153	95
17	المعهد العسكري	400	50	0.85	170	106
18	الحمصي	200	70	0.95	133	44
19	خاص على عمود	50	50	0.90	23	11
20	عسكري	200	50	0.85	85	53
21	مديرا (4)	630	63	0.81	322	233
22	خاص	200	50	0.85	85	53
23	مديرا (1)	630	118	0.83	618	415
24	مديرا (6)	630	69	0.85	370	229
25	مركز تحويل خاص	200	65	0.94	123	45
26	راشد عرموش	200	70	0.95	133	44
27	منشأة زعفران	200	75	0.96	144	42
28	مديرا (2)	1000	58	0.85	493	306
29	مديرا (5)	630	85	0.82	440	307
30	مديرا (3)	630	67	0.79	334	256
31	الهاتف	200	72	0.83	120	81

الجدول (4-6) الحملات المقاسة للجزء المدروس من شبكة توزيع دوما



الشكل (4-32) مخطط مخرج الادارة من شبكة توزيع دوما المراد دراستها



الشكل (4-33) الشبكة دوما بعد إعادة رسمها (20kV)

2.2.9.4 نتائج جريان الحمولة باستخدام البرنامج PSAT:

Power flow results using PSAT program

أجري جريان الحمولة على الشبكة المدروسة في البداية بدون وجود أنظمة كهروضوئية لحقن الاستطاعة الردية،

ثم عند ربطها مع خلايا شمسية باستطاعات مختلفة، فكانت نتائج هذه الدراسة كما هو مبين في الجدول

والأشكال التالية:

الجدول (4-7) نتائج جريان الحمولة بدون حقن الاستطاعة الردية على شبكة دوما المدروسة

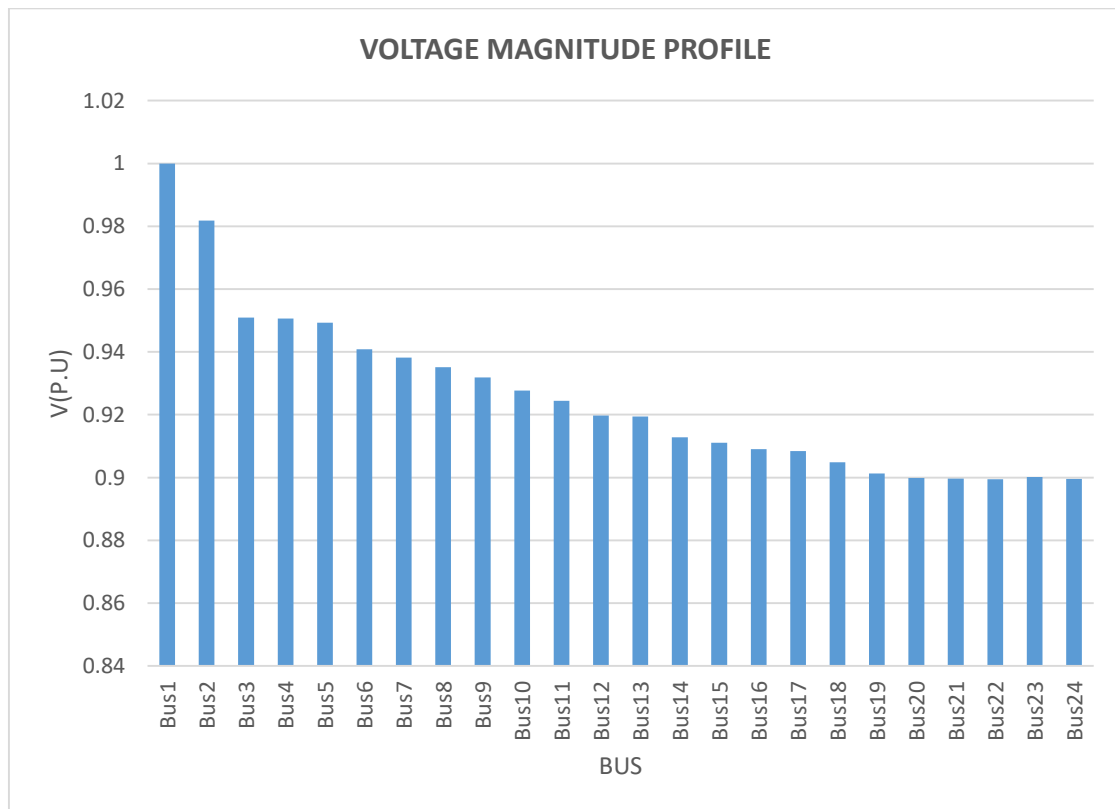
POWER FLOW RESULTS

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus1	1	0	0.79392	0.49953	0	0
Bus10	0.92773	-0.0171	0	0	0.0277	0.00234
Bus11	0.92447	-0.02102	0	0	0.0157	0.0074
Bus12	0.91973	-0.02078	0	0	0	0
Bus13	0.91942	-0.02073	0	0	0.0323	0.0201
Bus14	0.91279	-0.02042	0	0	0.0156	0.0055
Bus15	0.91112	-0.02031	0	0	0.0085	0.0053

Bus16	0.90903	-0.02247	0	0	0.0322	0.0233
Bus17	0.90837	-0.02245	0	0	0.0085	0.0053
Bus18	0.90484	-0.02226	0	0	0.0618	0.0415
Bus19	0.90124	-0.02478	0	0	0	0
Bus2	0.98177	-0.00152	0	0	0.002	0.0015
Bus20	0.89982	-0.02415	0	0	0.037	0.0229
Bus21	0.89963	-0.02409	0	0	0.0123	0.0045
Bus22	0.89944	-0.02413	0	0	0.0277	0.0086
Bus23	0.90015	-0.02466	0	0	0.0933	0.0613
Bus24	0.89955	-0.02457	0	0	0.0454	0.0337
Bus3	0.95089	-0.01421	0	0	0.0424	0.0281
Bus4	0.95066	-0.0146	0	0	0.0215	0.0083
Bus5	0.94931	-0.01437	0	0	0.064	0.0464
Bus6	0.94087	-0.01811	0	0	0.052	0.039
Bus7	0.9382	-0.01776	0	0	0.0252	0.0156
Bus8	0.93514	-0.01736	0	0	0.0893	0.0554
Bus9	0.93188	-0.01719	0	0	0.0264	0.0097

GLOBAL SUMMARY REPORT

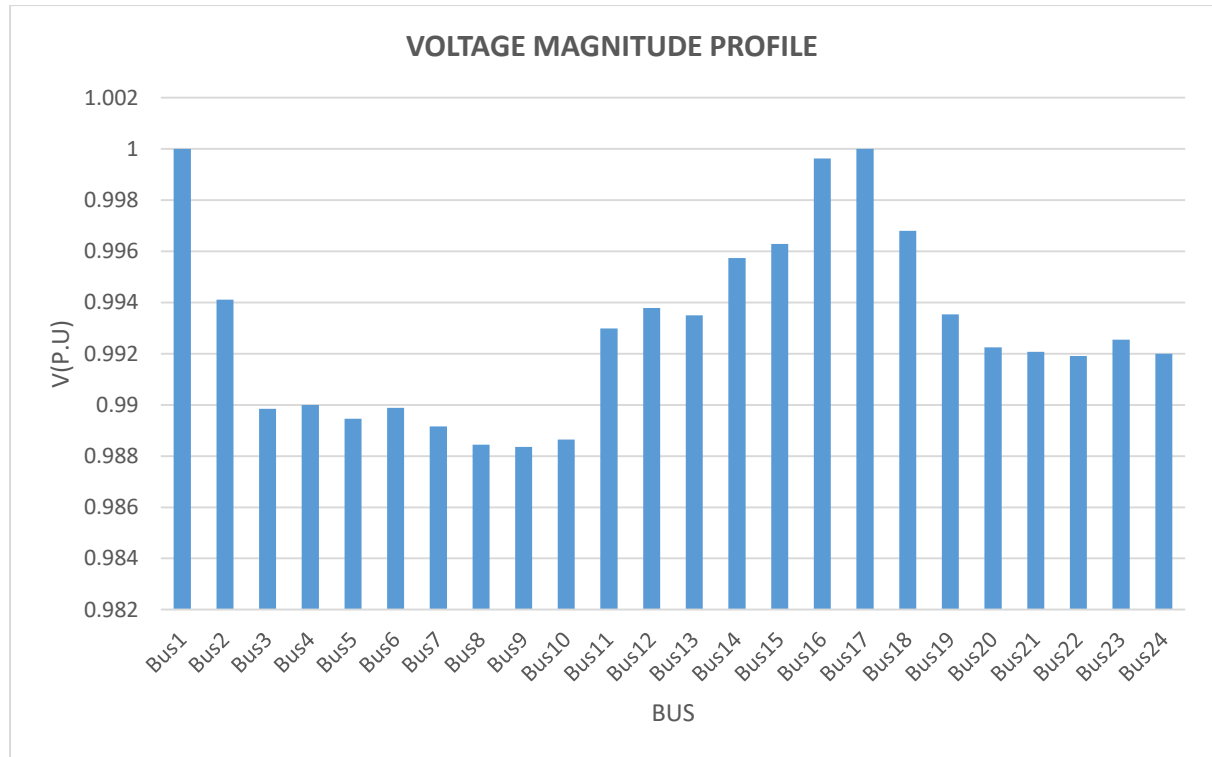
TOTAL GENERATION	
REAL POWER [p.u.]	0.79392
REACTIVE POWER [p.u.]	0.49953
TOTAL LOAD	
REAL POWER [p.u.]	0.7408
TOTAL LOSSES	
REAL POWER [p.u.]	0.05312
REACTIVE POWER [p.u.]	0.05379



الشكل (4-34) توترات قضبان التجميع قبل حقن الاستطاعة الردية

الجدول (4-8) نتائج جريان الحمولة عند حقن الاستطاعة الردية باستطاعة (5Mvar) على قضيب التجميع 17

Bus	V	phase
	[p.u.]	[rad]
Bus1	1	0
Bus10	0.98864	-0.05257
Bus11	0.99298	-0.05536
Bus12	0.99378	-0.06052
Bus13	0.9935	-0.06048
Bus14	0.99573	-0.0688
Bus15	0.99629	-0.07085
Bus16	0.99963	-0.07256
Bus17	1	-0.07349
Bus18	0.9968	-0.07334
Bus19	0.99353	-0.07541
Bus2	0.99411	-0.01081
Bus20	0.99225	-0.07489
Bus21	0.99207	-0.07485
Bus22	0.99191	-0.07488
Bus23	0.99255	-0.07531
Bus24	0.992	-0.07524
Bus3	0.98985	-0.03291
Bus4	0.99	-0.03317
Bus5	0.98946	-0.03394
Bus6	0.98988	-0.04067
Bus7	0.98916	-0.04268
Bus8	0.98844	-0.04511
Bus9	0.98836	-0.04831

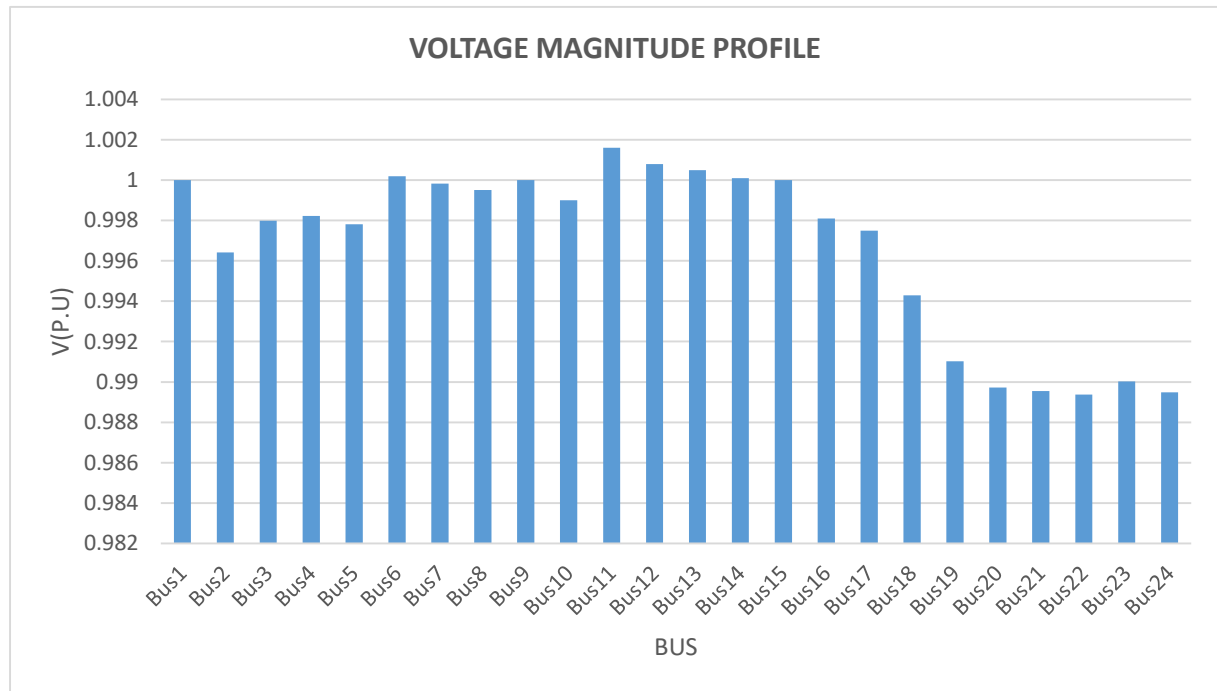


الشكل (4-35) توترات قضبان التجميع بعد حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 17

الجدول (4-9) نتائج جريان الحمولة عند حقن الاستطاعة الردية باستطاعة (5MVAR&2MVAR)

على قضيب التجميع 9 و17

Bus	V [p.u.]	phase [rad]	P gen [p.u.]	Q gen [p.u.]	P load [p.u.]	Q load [p.u.]
Bus1	1	0	0.58052	-0.45887	0	0
Bus10	0.999	-0.06325	0	0	0.0277	0.00234
Bus11	1.0016	-0.06662	0	0	0.0157	0.0074
Bus12	1.0008	-0.07077	0	0	0	0
Bus13	1.0005	-0.07073	0	0	0.0323	0.0201
Bus14	1.0001	-0.07744	0	0	0.0156	0.0055
Bus15	1	-0.0791	0.1	0.5	0.0085	0.0053
Bus16	0.9981	-0.08088	0	0	0.0322	0.0233
Bus17	0.9975	-0.08087	0	0	0.0085	0.0053
Bus18	0.99429	-0.08071	0	0	0.0618	0.0415
Bus19	0.99102	-0.0828	0	0	0	0
Bus2	0.99641	-0.014	0	0	0.002	0.0015
Bus20	0.98973	-0.08227	0	0	0.037	0.0229
Bus21	0.98955	-0.08223	0	0	0.0123	0.0045
Bus22	0.98938	-0.08226	0	0	0.0277	0.0086
Bus23	0.99003	-0.0827	0	0	0.0933	0.0613
Bus24	0.98948	-0.08262	0	0	0.0454	0.0337
Bus3	0.99798	-0.04029	0	0	0.0424	0.0281
Bus4	0.99823	-0.04055	0	0	0.0215	0.0083
Bus5	0.99782	-0.04161	0	0	0.064	0.0464
Bus6	1.0002	-0.04967	0	0	0.052	0.039
Bus7	0.99983	-0.05237	0	0	0.0252	0.0156
Bus8	0.99951	-0.05562	0	0	0.0893	0.0554
Bus9	1	-0.05983	0.1	0.2	0.0264	0.0097

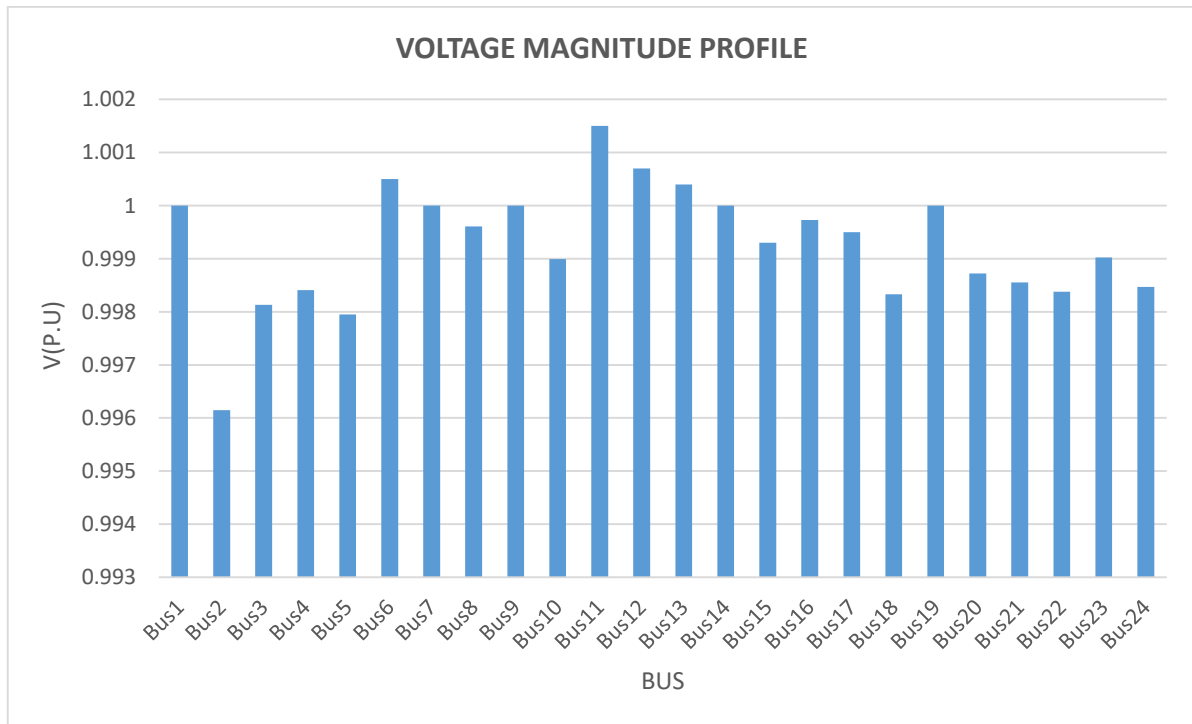


الشكل (4-36) توترات قضبان التجميع بعد حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 9 و17

الجدول (4-10) نتائج جريان الحمولة عند حقن الاستطاعة الردية باستطاعة (2MVAR)

على قضيب التجميع 9 و14 و19

Bus	V	phase	P gen	Q gen	P load	Q load
	[p.u.]	[rad]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]	[p.u.]
Bus1	1	0	0.63643	-0.50937	0	0
Bus10	0.99899	-0.06936	0	0	0.0277	0.00234
Bus11	1.0015	-0.07272	0	0	0.0157	0.0074
Bus12	1.0007	-0.07682	0	0	0	0
Bus13	1.0004	-0.07678	0	0	0.0323	0.0201
Bus14	1	-0.08343	0.05	0.2	0.0156	0.0055
Bus15	0.9993	-0.08439	0	0	0.0085	0.0053
Bus16	0.99973	-0.08642	0	0	0.0322	0.0233
Bus17	0.9995	-0.08687	0	0	0.0085	0.0053
Bus18	0.99833	-0.08935	0	0	0.0618	0.0415
Bus19	1	-0.093	0.05	0.2	0	0
Bus2	0.99615	-0.01545	0	0	0.002	0.0015
Bus20	0.99872	-0.09249	0	0	0.037	0.0229
Bus21	0.99855	-0.09244	0	0	0.0123	0.0045
Bus22	0.99838	-0.09248	0	0	0.0277	0.0086
Bus23	0.99902	-0.0929	0	0	0.0933	0.0613
Bus24	-0.09283	0	0	0	0.0337	0.0425
Bus3	0.99813	-0.0444	0	0	0.0424	0.0281
Bus4	0.99841	-0.04469	0	0	0.0215	0.0083
Bus5	0.99795	-0.04586	0	0	0.064	0.0464
Bus6	1.0005	-0.0548	0	0	0.052	0.039
Bus7	1	-0.05776	0	0	0.0252	0.0156
Bus8	0.99961	-0.06135	0	0	0.0893	0.0554
Bus9	1	-0.06598	0.05	0.2	0.0264	0.0097



الشكل (4-37) توترات قضبان التجميع بعد حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 4 و14 و19

3.2.9.4 مناقشة نتائج جريان الحمولة لشبكة دوما المدروسة باستخدام برنامج ال PSAT

Discussion of power flow results of Douma network using PAST program

يلخص الجدول (4-11) كافة نتائج الحالات السابقة المدروسة، وفيه نلاحظ أنه بحالة عدم حقن الاستطاعة الردية أن أخفض توتر هو لقضيب التجميع 22، والذي يقع في نهاية الشبكة الشعاعية تقريباً. عندما أجريت أول حالة حقن على قضيب التجميع 17، فقد تحسنت توترات قضبان التجميع بالكامل، وأصبح أخفض توتر لقضيب التجميع 9، أما الضياعات: فقد انخفضت الفعلية بمقدار 30% والردية بمقدار 35%. وفي الحالة الثانية عند حقن الاستطاعة الردية على قضبي التجميع 9، و17، فقد أصبحت التوترات حوالي 99 %، والضياعات انخفضت بحوالي 30% تقريباً للفعلية والردية. أما حالة الربط الأخيرة، فقد تم حقن الاستطاعة الردية على 3 قضبان تجميع، وأصبحت التوترات اسمية تقريباً، وانخفضت الضياعات بحوالي 15% للفعلية والردية.

Qlosses [p.u.]	Plosses [p.u.]	أصغر توتر قضيب تجميع		الاستطاعة المضافة MVAR	رقم قضيب التجميع
		kV	[p.u.]		
0.05379	0.05312	17.9926	0.89963 (22)	–	–
0.03287	0.03378	19.7672	0.98836 (9)	5	17
0.03832	0.03972	19.8	0.98938 (22)	2-5	9, 17
0.04563	0.04416	19.92	0.99615 (2)	2 each	9, 14, 19

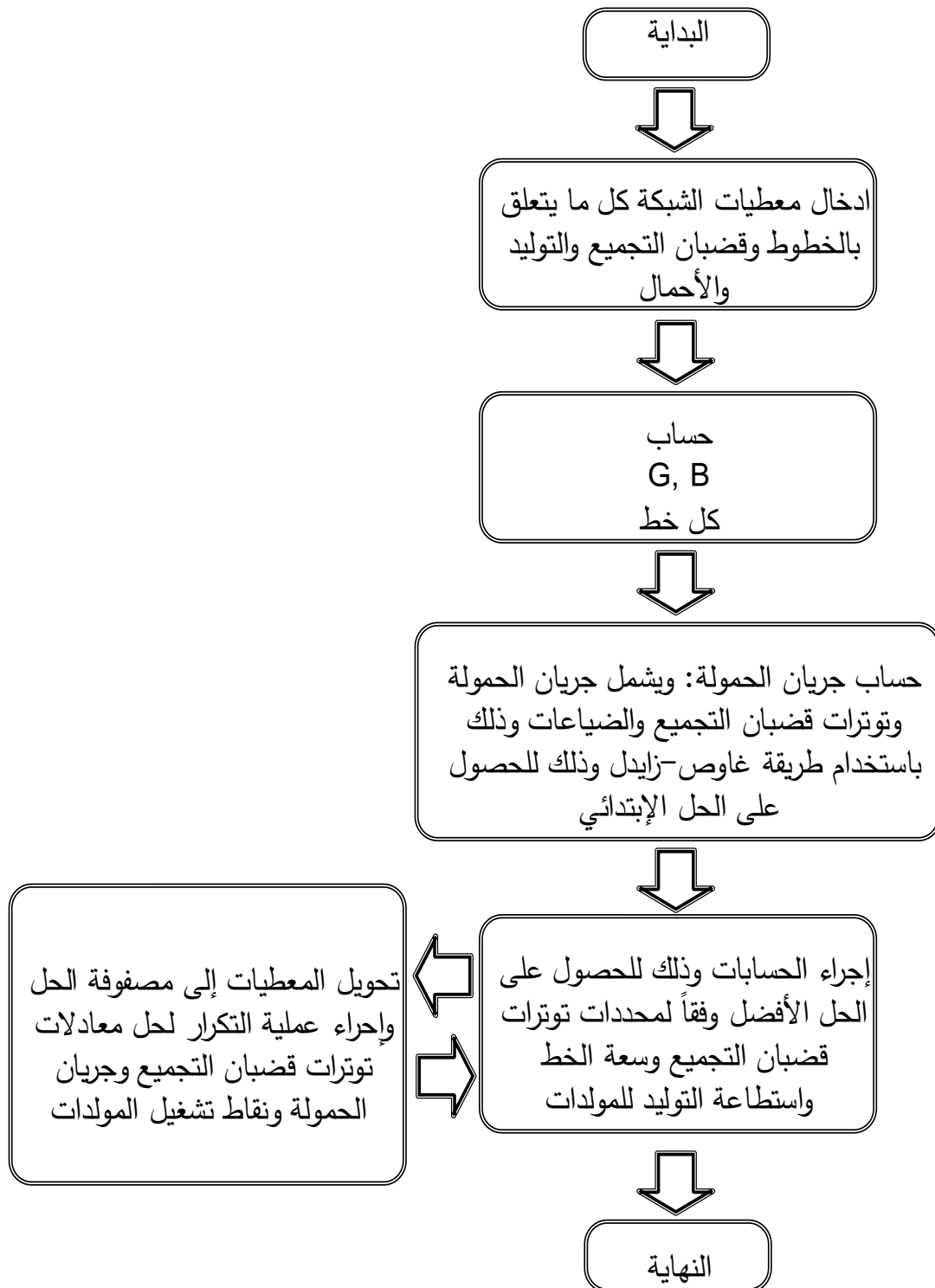
الجدول (4-11) مقارنة نتائج جريان الحمولة لشبكة دوما المدروسة عند حقن الاستطاعة الردية

4.2.9.4 دراسة جريان الحمولة باستخدام برنامج مصمم في بيئة MATLAB

Studying Power flow using designed MATLAB program

تمت كتابة برنامج باستخدام البيئة البرمجية MATLAB، بحيث يقوم هذا البرنامج بإجراء جريان حمولة للشبكة المدروسة باستخدام طريقة غاوص زايدل، وذلك لإجراء مقارنة مع النتائج التي تم الحصول عليها من برنامج PSAT. يعطى لتوتر قضيب التجميع قيمة ابتدائية لمطاله وزاويته. يبين الشكل مخطط خوارزمية هذا البرنامج.

يقوم البرنامج في النهاية برسم توترات قضبان التجميع، وإعطاء هذه القيم على شكل جدول متبوعة بملخص لجريان الحمولة والضياعات. يبين الشكل (4-38) خوارزمية البرنامج المتبعة.



الشكل (4-38) خوارزمية البرنامج

5.2.9.4 مراحل عمل البرنامج ومصفوفات الدخل والعلاقات الرياضية المستخدمة

Program steps, input matrix and used mathematical relationship

الخطوة 1: ادخال مصفوفة قضبان التجميع

وتشمل على العناصر التالية:

- رقم قضيب التجميع.
- الاستطاعة الفعلية المولدة والاستطاعة الردية المولدة.
- الحدود العظمى والصغرى لكل من الاستطاعات السابقة.
- الحمولات على كل قضيب تجميع.
- توتر كل قضيب تجميع وزاويته الابتدائية.
- نوع قضيب التجميع.

يبين الجدول التالي مصفوفة مدخلات قضبان التجميع.

الجدول (4-12) مصفوفة معطيات دخل البرنامج

%	1.BusNo	2.Pg	3.Qg	4.Pmin	5.Pmax	6.Qmin	7.Qmax	8.Pload	9.Qload	10.Vbus	11.Ang	12.Type
Buses=	[											
1	10	7.5	8	12	-10	10	0	0	1	0	1	
2	0	0	0	0	0	0	0.02	0.015	1	0	2	
3	0	0	0	0	0	0	0.424	0.281	0.99	0	2	
4	0	0	0	0	0	0	0.215	0.083	0.98	0	2	
5	0	0	0	0	0	0	0.64	0.464	1	0.97	2	
6	0	0	0	0	0	0	0.52	0.39	0.96	0	2	
7	0	0	0	0	0	0	0.252	0.156	0.96	0	2	
8	0	0	0	0	0	0	0.893	0.554	1	0.96	2	
9	0	0	0	0	0	0	0.264	0.0097	0.96	0	2	
10	0	0	0	0	0	0	0.227	0.0234	0.96	0	2	
11	0	0	0	0	0	0	0.157	0.047	0.96	0	2	
12	0	0	0	0	0	0	0.00	0.00	0.96	0	2	
13	0	0	0	0	0	0	0.323	0.201	1	0	2	
14	0	0	0	0	0	0	0.156	0.055	0.96	0	2	


```

numGen = numGen + 1;
end
end
options = optimset( 'Display','iter','Algorithm','active-
set','MaxFunEvals', 50000, 'MaxIter', 2000);

```

ادخال استطاعة الاساس وتوتر الاساس للشبكة **Vbase,Sbase**

```

baseVA = 10; % in MVA
baseV = 20; % in kV
baseI = baseVA/(sqrt(3)*baseV); % in kA

```

حساب مصفوفة السماحيات للخطوط **Y matrix**

يتم حساب قيم ممانعات وناقليات (G,B) الخطوط للشبكة وذلك من أجل حساب مصفوفة السماحيات للخطوط

وفق العلاقات التالية والبرنامج التالي:

$$G = \frac{r}{r^2 + x^2} \quad B = -\frac{x}{r^2 + x^2} \quad (1-4)$$

$$Y = G + jB \quad (2-4)$$

%% This block is calculate the impedance, conductance and susceptance from the given Resistance and Reactance.

```

for a=1:numLines
R = line(a,3);
X = line(a,4);
line(a,7) = sqrt(R^2+X^2);
line(a,5) = R/(R^2 + X^2); %Conductance Calculation - G
line(a,6) = -(X / (X^2 + R^2)); %Susceptance Calculation - B
end

```

ويحسب هذا الجزء مصفوفة السماحيات **Ymatrix**

```

%% This block is to calculate the admittance matrix
for a=1:numLines
ybus(line(a,1),line(a,2)) = -y(a);
ybus(line(a,2),line(a,1)) = ybus(line(a,1),line(a,2));
end
% Calculate diagonal of admittance matrix
for a=1:numBuses
for b=1:numLines
if line(b,1) == a || line(b,2) == a

```

```

ybus(a,a) = ybus(a,a) + y(b);
end
end
end

```

الخطوة 3: حساب جريان الحمولة للشبكة

تحديد حدود أعلى توتر وأخفض توتر مسموح لقضبان التجميع.

```

%% Determine Limits for Full Function Search
j=1;
for t=1:length(buses(:,1))
% Bus Voltages
if(buses(t,15) == 3 || buses(t,15) == 1)
lb(j) = 0.8;
ub(j) = 1.2;
x0(j) = buses(t,13);
j=j+1;
end
end
% Real Power Min/Max/Avg
for t=2:length(buses(:,1))
if buses(t,15) == 3
lb(j) = buses(t,4);
ub(j) = buses(t,5);
x0(j) = buses(t,2);
j=j+1;
end
end
lb = transpose(lb);
ub = transpose(ub);
x0 = transpose(x0);

[cceq] = Simulation(x0);

```

يتم استخدام التابع التالي لحساب جريان الحمولة وتحديد توترات قضبان التجميع باستخدام طريقة غاوص زايدل:

```

function [c ceq] = Simulation(x0)
%SIMULATION Uses the Gauss-Seidel Iteration Method to determine bus %voltages
global buses line baseVA numLines numBuses losses qLoss numGen ;
c = [];
ceq = [];
ybus = zeros(numBuses, numBuses);
y = line(:,5)+1*1i*line(:,6); % i used here is the complex notation i

```

تبين العلاقات التالية معادلات حساب جريان الحمولة لكل نوع من أنواع الاستطاعات:

حساب الاستطاعة الردية لكل مولد

$$Q_i = -imag \left(V_i^* * \sum_{k=1}^n Y_{ik} V_k \right) \quad (3-4)$$

حساب توتر قضيب التجميع من النوع P-V، أي قضيب تجميع توليد:

$$V_i^{(1)} = \frac{1}{Y_{ii}} \left(\frac{P_{i,inj} - jQ_{i,inj}^1}{V_i^{*(0)}} - \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq i}}^n Y_{ik} V_k \right) \quad (4-4)$$

حيث Y_{ik} معدومة. يستخدم عامل تسريع في الحل وذلك باستخدام العلاقة:

$$V_{i,acc}^1 = V_i^0 + \lambda(V_i^1 - V_i^0) \quad (5-4)$$

يحسب الخطأ بين قيمتي توتر متاليتين وفقاً للعلاقة التالية:

$$err = \sum_{n=1}^{numuses} |V^{k-1} - V^k| \quad (6-4)$$

يتم بعدها حساب جريان الاستطاعة بين قضيبين تجميعيين بالعلاقة التالية (من i إلى j):

$$S_{ij} = P_{ij} + jQ_{ij} = V_i I_{ij}^* = V_i (V_i^* - V_j^*) y_{ij}^* + |V_i|^2 y_{gnd}^* \quad (7-4)$$

يتم بعدها حساب جريان الاستطاعة بين قضيبين تجميعيين بالعلاقة التالية (من j إلى i):

$$S_{ji} = P_{ji} + jQ_{ji} = V_j I_{ji}^* = V_j (V_j^* - V_i^*) y_{ij}^* + |V_j|^2 y_{gnd}^* \quad (8-4)$$

ثم تحسب الضياعات في الخط وفق العلاقة التالية:

$$S_{Losses,ij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (9-4)$$

ثم تحسب الضياعات الفعلية والردية وفق العلاقات التالية:

$$P_{losses} = \sum_{n=1}^{numlines} Real(S_{losses}) \quad (10-4)$$

$$Q_{losses} = \sum_{n=1}^{numlines} Imag(S_{losses}) \quad (11-4)$$

تمكننا العلاقات التالية من حساب الاستطاعات المولدة على قضبان تجميع التوليد.

$$\sum_{n=1}^i P_{i,gen} = \sum_{i \in S_L} P_{i,Load} + P_{losses} \quad (12-4)$$

$$\sum_{n=1}^i Q_{i,gen} = \sum_{i \in S_L} Q_{i,Load} + Q_{losses} \quad (13-4)$$

ثم نحسب الاستطاعة المقدمة من قضيب التجميع اللانهائي:

$$P_{gen,slack} = \sum_{n=1}^i P_{i,gen} - \sum_{n=2}^i P_{i,gen} \quad (14-4)$$

$$Q_{gen,slack} = \sum_{n=1}^i Q_{i,gen} - \sum_{n=2}^i Q_{i,gen} \quad (15-4)$$

وفيما يلي حلقة التكرار لحساب جريان الحمولة وفق العلاقات السابقة:

```
%% This block begins to Calculate the Iterations
p = 1;
for t=1:num Buses
if(buses(t,15) == 3 || buses(t,15) == 1)
V(t) = x0(p);
buses(t,13) = V(t);
p = p + 1;
end
```

```

end
PG = buses(:,2);
for t=2:numBuses
if(buses(t,15)) == 3
PG(t) = x0(p);
buses(t,2) = PG(t);
p = p + 1;
end
end
QG = buses(:,3);
PL = buses(:,11);
QL = buses(:,12);
VV = V;
P = (PG-PL)/100;
Q = (QG-QL)/100;
maxerror = 0.001;
tol = 1;
iter = 0;
while tol > maxerror
iter = iter + 1
for j=2:numBuses
YV = 0;
for k=1:numBuses
if j~=k
YV = YV + ybus(j,k)* V(k); % determine bus current injection
end
end
%Calculation for Q on PV(gen bus) bus
if buses(j,15) == 3
Q(j) = -imag(conj(V(j))*(YV + ybus(j,j)*V(j)));
buses(j,3) = Q(j)*baseVA;
end
%Compute Bus Voltages
V(j) = (((P(j)-1i*Q(j))/conj(V(j))) - YV)/ybus(j,j);
%Calculating Voltage on PV bus
if buses(j,15) == 3
Vc(j)=abs(VV(j))*(V(j)/abs(V(j)));
buses(j,13) = Vc(j);
V(j) = Vc(j);
end
%Calculating Voltage for PQ bus
%Acceleration factor of 1.4 to increase the speed in which convergence occurs
if buses(j,15) == 2
Vacc(j)= VV(j)+1.4*(V(j)-VV(j));
buses(j,13) = Vacc(j);
V(j) = Vacc(j);
end
end
% Check convergence by comparing previous value to current
tol = max(abs(abs(V) - abs(VV)));

```

```

VV=V;
end
%% This calculates the angle of the buses
for t=1:numBuses
    buses(t,14) = angle(buses(t,13))*180/pi;
end
%% This block determines line losses
pLosses = 0;
qLosses = 0;
for t=1:numLines
    Vi = buses(line(t,1),13);
    Vj = buses(line(t,2),13);
    Sij = Vi*(conj(Vi)-conj(Vj))*conj(y(t));
    Sji = Vj*(conj(Vj)-conj(Vi))*conj(y(t));
    sLosses = Sij + Sji;
    pLosses = pLosses + real(sLosses);
    qLosses = qLosses + imag(sLosses);
end
pLosses = pLosses * baseVA;
qLosses = qLosses * baseVA;
losses = pLosses;
qLoss = qLosses;
pSlack = buses(1,2);
qSlack = buses(1,3);
buses(1,2) = sum(buses(:,11)) + pLosses - sum(buses(:,2)) + pSlack;
buses(1,3) = sum(buses(:,12)) + qLosses - sum(buses(:,3)) + qSlack;
it = 1;
c = zeros(numBuses*2+2+numGen,1);
for t=1:numLines
    Vi = buses(line(t,1),13);
    Vj = buses(line(t,2),13);
    Sij = Vi*(conj(Vi)-conj(Vj))*conj(y(t));
    Sji = Vj*(conj(Vj)-conj(Vi))*conj(y(t));
    P = real(Sij + Sji);
    Q = imag(Sij + Sji);
end

```

الخطوة 4: اظهار نتائج خرج البرنامج

```

% All output after this
l1 = ['System Power Base: ', num2str(baseVA) , ' MVA'];
l2 = ['System Voltage: ', num2str(baseV) , ' kV'];
l3 = ['System Current Base: ' , num2str(baseI) , ' kA'];
l4 = ['System Buses: ' , num2str(numBuses)];
l5 = ['System Branches: ', num2str(numLines)];
l8 = ['System Real Power Loss: ', num2str(losses), ' MW'];
l6 = ['System Generated Real Power: ', num2str(sum(buses(:,2))), ' MW'];

```

```

17 = ['System Load Real Power: ', num2str(sum(buses(:,11))), ' MW'];
111 = ['System Reactive Power Loss: ', num2str(qLoss), ' MVAR'];
19 = ['System Generated Reactive Power: ', num2str(sum(buses(:,3))), ' MVAR'];
110 = ['System Load Reactive Power: ', num2str(sum(buses(:,12))), ' MW'];
disp('Bus Voltages')
disp(' BusNo   Real Power   Reactive Power   Voltage   Angle ')
for t=1:numBuses
1   =   ['   ', num2str(int32(buses(t,1))), '
', num2str(int32(buses(t,11))), '   ', num2str(int32(buses(t,12))), '
', num2str(single(abs(buses(t,13))))), '
', num2str(single(buses(t,14)))];
disp(1)
end
figure(1), plot(buses(:,1), buses(:,13), 'linewidth', 2.0) ,
ylabel('Vbus [pu]', 'FontSize', 14)
xlabel('num Bus ', 'FontSize', 14), grid,
set(gca, 'fontsize', 14, 'fontname', 'times')
axis([1 24 0.5 1.1]),
disp(' ');
disp(' ');
disp('Generator Variables');
disp(' BusNo   Real Power   Reactive Power ')
disp('   Min   Max   Act   Min   Max   Act')
% plot(num2str(int32(buses(t,1))), num2str(single(abs(buses(t,13)))))
for t=1:numBuses
if buses(t,15) == 3 || buses(t,15) == 1
1 = [' ', num2str(int32(buses(t,1))), '   ', num2str(int32(buses(t,4))), '
', num2str(int32(buses(t,5))), '   ', num2str(int32(abs(buses(t,2)))), '
', num2str(single(buses(t,6))), '   ', num2str(single(abs(buses(t,7)))), '
', num2str(single(buses(t,3)))];
disp(1)
end
end
end

```

6.2.9.4 مناقشة النتائج والمقارنة Discussion of results and comparison

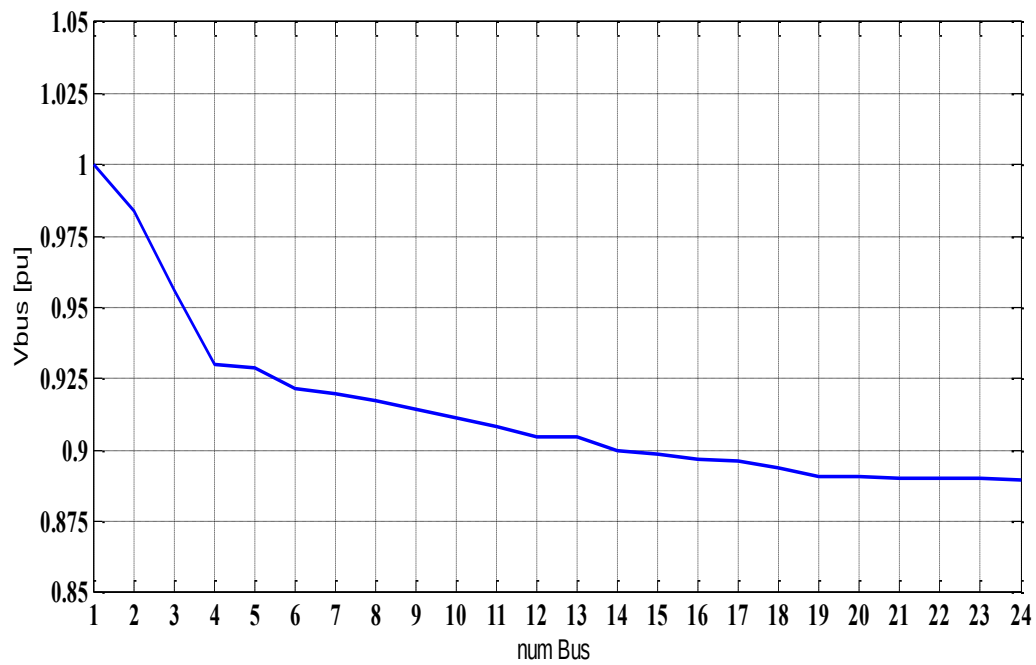
تم استخدام البرنامج المذكور سابقاً لإجراء حالات جريان حمولة على الشبكة المدروسة، ثم مقارنة النتائج النهائية بين البرنامجين.

الجدول (4-14) نتائج جريان الحمولة قبل حقن الاستطاعة الردية

System Power Base: 10 MVA
System Voltage: 20 kV
System Current Base: 0.28868 kA
System Buses: 24
System Branches: 23

Bus Voltages

BusNo	Voltage	Angle
1	1	0
2	0.98407	0.0045904
3	0.95631	-0.47915
4	0.9304	-0.95161
5	0.92926	-0.93354
6	0.92187	-1.0719
7	0.9197	-1.0399
8	0.91724	-1.0028
9	0.91474	-0.97256
10	0.91155	-0.93304
11	0.90851	-1.0797
12	0.90491	-1.0221
13	0.9046	-1.0194
14	0.89981	-0.93159
15	0.8986	-0.90841
16	0.89671	-0.97573
17	0.89622	-0.96796
18	0.89381	-0.915
19	0.89106	-0.94302
20	0.8907	-0.93793
21	0.89051	-0.93469
22	0.89032	-0.93729
23	0.89045	-0.91891
24	0.88983	-0.91397



الشكل (4-39) توترات الشبكة المدروسة قبل حقن الاستطاعة الردية

الجدول (4-15) نتائج جريان الحمولة عند حقن الاستطاعة الردية باستطاعة (5MVAR) على قضيب تجميع 17

System Power Base: 10 MVA

System Voltage: 20 kV

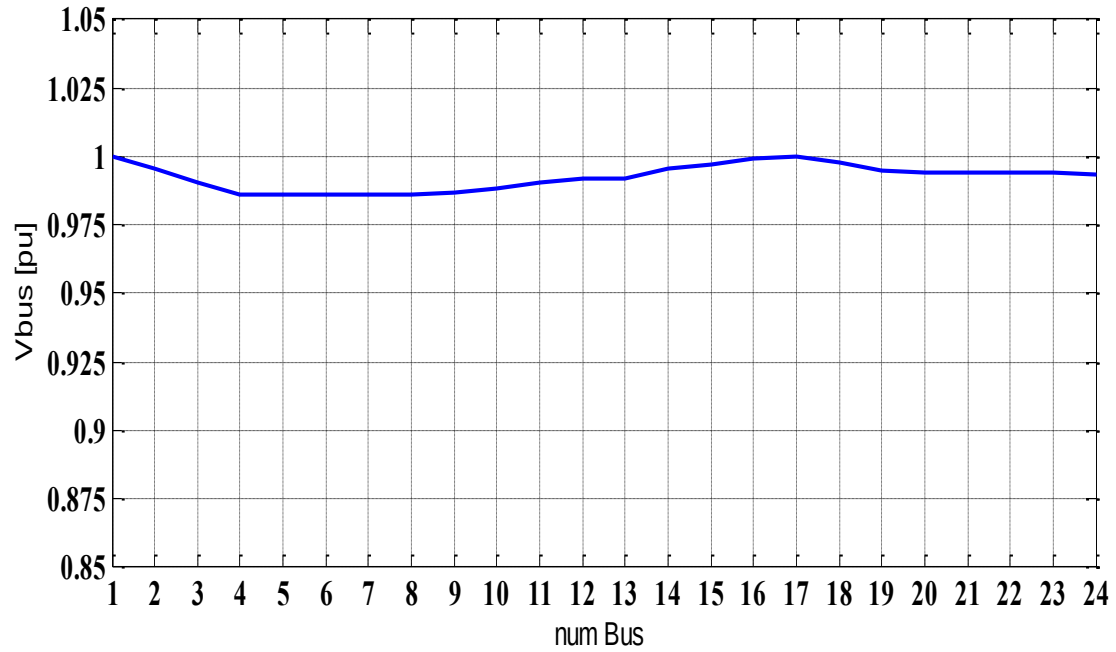
System Current Base: 0.28868 kA

System Buses: 24

System Branches: 23

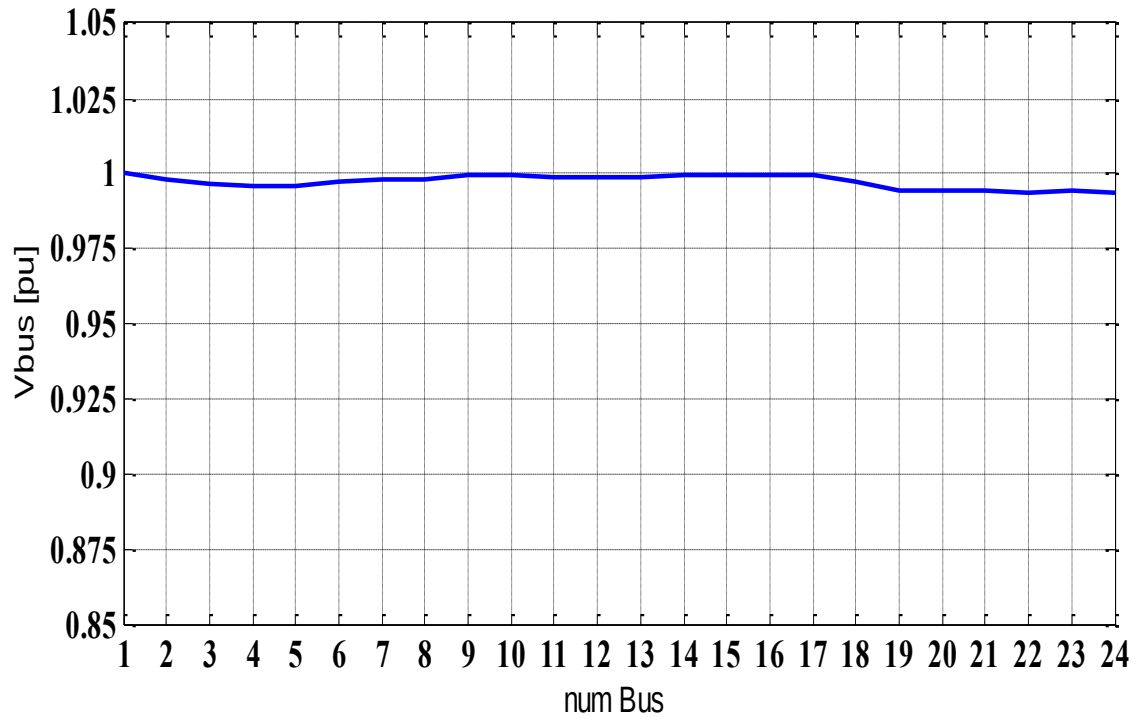
Bus Voltages

BusNo	Voltage	Angle
1	1	0
2	0.99592	-0.14928
3	0.99025	-0.53479
4	0.98635	-0.89055
5	0.9861	-0.90166
6	0.98609	-1.0079
7	0.98605	-1.0437
8	0.98613	-1.0896
9	0.98692	-1.1521
10	0.98822	-1.2297
11	0.99056	-1.209
12	0.99252	-1.3024
13	0.99224	-1.3017
14	0.99626	-1.4593
15	0.99726	-1.5017
16	0.99943	-1.4794
17	1	-1.5018
18	0.99777	-1.4394
19	0.9949	-1.4417
20	0.99454	-1.4338
21	0.99438	-1.4311
22	0.99421	-1.4349
23	0.99435	-1.4226
24	0.9938	-1.4203



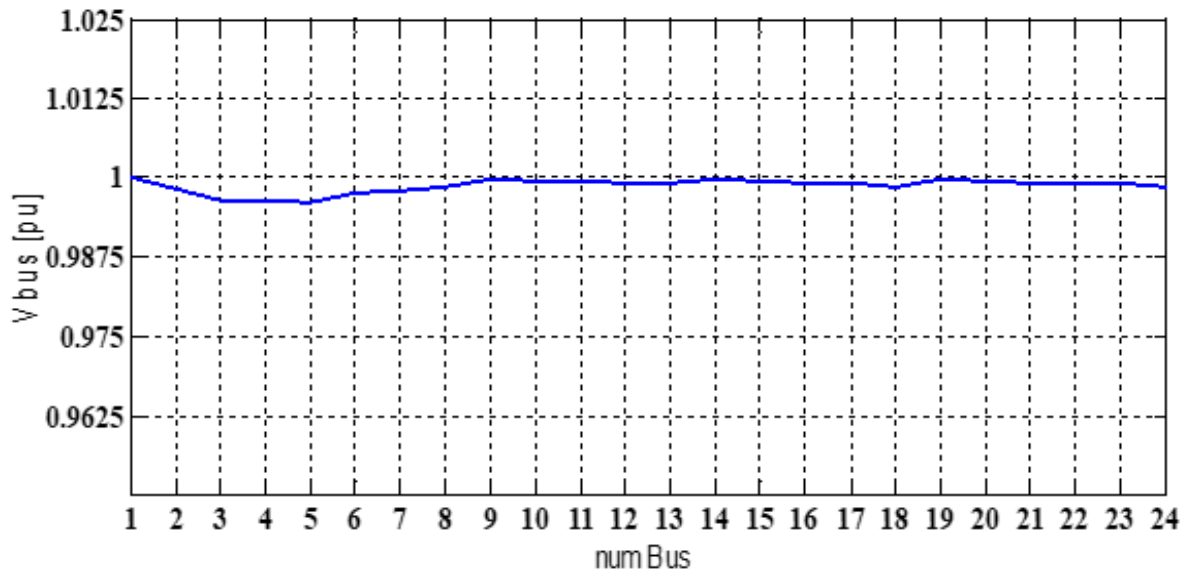
الشكل (4-40) توترات الشبكة المدروسة بعد حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 17

نتائج جريان الحمولة عند حقن الاستطاعة الردية باستطاعة (3-5MVAR) على قضيب تجميع 9 و 17



الشكل (4-41) توترات الشبكة المدروسة بعد حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 9 و 17

نتائج جريان الحملولة عند حقن الاستطاعة الردية باستطاعة (2MVAR) على قضيب تجميع 9 و14 و17



الشكل (4-42) توترات الشبكة المدروسة حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 9 و14 و17

يلخص الجدول (4-16) كافة نتائج الحالات السابقة المدروسة، وفيه نلاحظ أنه بحالة عدم حقن الاستطاعة الردية أن أخفض توتر هو لقضيب التجميع 22، والذي يقع في نهاية الشبكة الشعاعية تقريباً. عندما أجريت عمليات حقن استطاعة ردية فقد تحسنت توترات قضبان التجميع بالكامل عند الربط على قضيب التجميع 17، انخفضت الضياعات الفعلية والردية بشكل كبير و عند حقن الاستطاعة الردية على قضيب التجميع 9 و17، فقد أصبحت التوترات حوالي 99 %، والضياعات انخفضت لأقل من 10 % من قيمتها بدون حقن الاستطاعة الردية. أما في حالة الربط الثالثة، فقد تم حقن الاستطاعة الردية على 3 قضبان تجميع، وأصبحت التوترات اسمية تقريباً، وانخفضت الضياعات

الجدول (4-16) نتائج جريان الحملولة للشبكة السورية المدروسة

Qlosses [p.u.]	Plosses [p.u.]	أصغر توتر قضيب تجميع		الاستطاعة المضافة MVAR	رقم قضيب التجميع
		kV	[p.u.]		
0.054765	0.049942	17.81	0.89032 (22)	–	–
0.0078044	0.0077942	19.721	0.98605 (9)	5	17
0.0027849	0.0031795	19.876	0.99379 (22)	2-5	9,17
0.0034804	0.0037964	19.876	0.9963 (5)	2each	9,14,19

الجدول (4-17) المقارنة بين طريقتي الحساب

تطبيق الخوارزمية		برنامج PSAT		الاستطاعة المضافة MVAR	رقم قضيب التجميع
أصغر توتر قضيب تجميع		أصغر توتر قضيب تجميع			
kV	[p.u.]	kV	[p.u.]		
17.81	0.89032 (22)	17.9926	0.89963 (22)	–	–
19.721	0.98605 (9)	19.7672	0.98836 (9)	5	17
19.876	0.99379 (22)	19.8	0.98938 (22)	2–5	9, 17
19.876	0.9963 (5)	19.92	0.99615 (2)	2 each	9, 14, 19

يبين الجدول (4-17) مقارنة بين نتائج برنامج الـ PSAT ونتائج تطبيق الخوارزمية وذلك عند حالات مختلفة من إضافة استطاعة ردية لشبكة دوما. تظهر النتائج تقارباً بين الطريقتين حيث نجد أن قيم التوترات المحسوبة بواسطة الخوارزمية أقل بقليل من النتائج المحسوبة ببرنامج الـ PSAT وبوجه عام تؤكد النتائج وجود توافق ودقة جيدة بين برنامج الـ PSAT والخوارزمية.

الفصل الخامس

النتائج والتوصيات

1.5 النتائج:

تمكن الباحث من إيجاد آلية للمناورة وتشغيل المحطات الكهروشمسية و STATCOM بطريقة متكيفة وفقاً للحالات التالية:

أ- تغير الظروف الجوية (الشمسية)،

ب- في حال وجود عطل في أحد المحطات الكهروشمسية،

ج- في حال وجود عطل في STATCOM.

حيث تم اختيار المنبع الأفضل من خلال مناورات التشغيل المقترحة في الخوارزمية مما مكن الباحث من الحفاظ على تنسيق الأحمال المطلوبة من المصادر دون التأثير بشكل سلبي على توتر الباسبارت، ولم يتم لحظ انخفاض كبير في توترات الشبكة وهذا يدعم عمليات التنسيق المطلوبة.

تُعتبر إدارة الاستطاعة الردية باستخدام STATCOM والأنظمة الكهروشمسية استراتيجية فعالة لتحسين كفاءة الشبكة واستقرارها. من خلال دمج هذه التقنيات، يمكن تحسين الاستجابة السريعة للتغيرات في الأحمال وتوفير طاقة نظيفة ومستدامة. على الرغم من التحديات المالية والفنية، فإن الفوائد المحتملة تجعل من هذه الحلول خياراً مثالياً لمستقبل الشبكات الكهربائية.

يزيد ربط DG من موثوقية منبع التغذية للمستهلك باستخدام منابع تغذية محلية، مثل الخلايا الشمسية وذلك يحسن من أداء الشبكة

يعمل ربط مثل هذه الخلايا على التخفيف من الضياعات الفعلية والردية في أنظمة نقل وتوزيع الطاقة. يحسن ربط التوليد الموزع بالنسبة لنظام القدرة من منحنى التوتر، وجودة الطاقة ويدعم استقرار التوتر. وبناءً على ذلك، سوف يكون أداء النظام أكثر ثباتاً عند ظروف التحميل الأعلى.

بالرغم من الطبيعة المنقطعة للخلايا الشمسية حقق استخدامها استقرار في توتر التوزيع، كما بينته نتائج النمذجة، وذلك مهما كانت سوية الإشعاع الشمسي وما يرافقها من قيمة استطاعة النظام الكهروضوئي وكذلك خفضت من الضياعات في كل حالات التوليد لكن بنسب متفاوتة.

2.5 التوصيات:

نقترح

- تطوير مجال البحث لاختيار المكان الأمثل لتوضع STATCOM بوجود التوليد الموزع.
- استمرار البحث باستخدام أحد تقانات الذكاء الصناعي بحيث يتم استبدال أنظمة التحكم التقليدية المستخدمة بأنظمة ذكية.
- تطوير تقنية الـ OLTC لتواكب تغيرات الظروف المحيطية لشبكات التوليد الموزع.
- يجب دراسة أثر تغير الحمولة أيضاً على كل من منحنى التوتر وجريان الاستطاعة حيث قد نعاني من مشكلة زيادة التوتر في حال الحمولة منخفضة والتوليد أعظمي.

المراجع الأجنبية:

- [1] H. Morais, T. Sousa, P. Faria, and Z. Vale, "Reactive power management strategies in future smart grids," IEEE Power Energy Soc. Gen. Meet., 2013, doi: .PESMG.2013.6672332/10.1109
- [2] W. Moondee and W. Srirattanawichaikul, "Reactive Power Management of MV Distribution Grid with Inverter-based PV Distributed Generations using PSO Algorithm," IECON 2019 - 45th Annu. Conf. IEEE Ind. Electron. Soc., vol. 1, pp. 2239–2019 ,2244
- [3] M. Kraiczy, T. Stetz, and M. B. S. Member, "Parallel Operation of Transformers with On Load Tap Changer and Photovoltaic Systems with Reactive Power Control," vol. .no. c, 2017, doi: 10.1109/TSG.2017.2712633 ,3053
- [4] M. Shawky, E. Moursi, H. H. Zeineldin, S. Member, J. L. Kirtley, and K. Alobeidli, "A Dynamic Master / Slave Reactive Power- Management Scheme for Smart Grids With .Distributed Generation," pp. 1–11, 2013
- [5] F. H. Gandoman et al., "Review of FACTS technologies and applications for power quality in smart grids with renewable energy systems," Renew. Sustain. Energy Rev., .vol. 82, no. August 2016, pp. 502–514, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2017.09.062
- [6] I. Journal and F. Technological, "IMPROVING POWER SYSTEM TRANSIENT .STABILITY BY USING FACTS DEVICES," vol. 4, no. 9, pp. 1579–1582, 2017
- [7] K. Damor, V. Agrawal, D. M. Patel, and H. G. Patel, "Improving Power System .Transient Stability by," vol. 3, no. 7, pp. 1–5, 2014
- [8] M. E. El-Hawary, "Introduction to Electrical Power Systems," Canada, 2008.
- [9] N. K. Hasanah, U. G. Mada, and U. G. Mada, "Impact of STATCOM Installation on .Power System ' s Voltage Stability Performance," vol. 6, pp. 435–439, 2020
- [10] K Kauhaniemi, L. K. (2004). Impact of Distributed Generation on the Protection of Distribution Networks. „University of Vaasa, Finland, VTT Technical Research Centre of Finland, Finland.
- [11] Mario Vignolo, R. Z. (2002). Transmission Networks or Distributed Generation, Montevideo, Uruguay.
- [12] Philip P. Barker, R. W. (2000). Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems. 12. IEEE. Retrieved 02 16, 2011, from IEEE.

- [13] Vu Van Thong, J. D. (2004, January). Interconnection of Distributed Generators and Their Influences on Power System. Katholieke Univeriteit Leuven, Belgium.
- [14] E. V. Mgaya, Z. M. (2007). The Impact of Connecting Distributed Generation to the Distribution System. Czech Technical University.
- [15] Falcão, C. L. (2003, June). Impact of Distributed Generation Allocation and Sizing on Reliability, Losses and Voltage Profile. Bologna, Italy.
- [16] J. Holmes, J. M. (2004). Protection of Electricity Distribution Networks. United Kingdom: Power and Energy Series 47.
- [17] C. Fortoul, F. G.-L. (2005). Review of Distributed Generation Concept: Attempt of Unification. Proceeding of International Conference on Renewable Energies and Power Quality, España.
- [18] N. Hatziargyriou, M. D. (2000, November). Cigre technical brochure on Modeling New Forms of Generation and Storage.
- [19] Gonzalez-Longatt, F. M. (2008, Junio). Impacto de la Generación Distribuida en el Comportamiento de los Sistemas de Potencia. Universidad Central de Venezuela.
- [20] Ingenieros, A. M. (2011). grupoglobalgreen. Retrieved May 20, 2011, from grupoglobalgreen: www.grupoglobalgreen.es.
- [21] tutorvista. (n.d.). Retrieved February 18, 2011, from tutorvista: <http://www.tutorvista.com/physics/wind-electric-power>.
- [22] Fladerer, T. (2004, March). The Asynchronous Generator in Small Power Plants. Ruhstorf.
- [23] Chan, T.-F. (2003). SYNCHRONOUS MACHINES. Encyclopedia of Life Support Systems, Polytechnic University, HONG KONG.
- [24] Walimir Freitas, J. C. (2006, February). Comparative Analysis Between Synchronous and Induction Machines for Distributed Generation Applications. IEEE Transaction on Power Systems.
- [25] Energy OR Technologies Inc. (n.d.). Retrieved February 15, 2011, from Energy OR Technologies Inc: http://www.energyor.com/energyor/fuel_cell.cfm.
- [26] Khan, U. N. (2008). Impact of Distributed Generation on Distributed Network. Wroclaw, University of Technology, Poland.
- [27] Klaus Preiser, 'Photovoltaic Systems', Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany.
- [28] W. Omran, 'Performance Analysis of Grid-Connected Photovoltaic Systems', Doctor Thesis, Electrical and Computer Engineering, Waterloo, Ontario, Canada, 2010.
- [29] M. N. I. Sarkar, L. G. Meegahapola, and M. Datta, "Reactive power management in

- renewable rich power grids: A review of grid-codes, renewable generators, support devices, control strategies and optimization Algorithms,” *IEEE Access*, vol. 6, no. c, pp. 41458–41489, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2838563
- [30] S. Bisanovic, M. Hajro, and M. Samardzic, “One approach for reactive power control of capacitor banks in distribution and industrial networks,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 60, pp. 67–73, 2014, doi: 10.1016/j.ijepes.2014.02.039
- [31] F. A. Viawan and D. Karlsson, “Voltage and reactive power control in systems with synchronous machine-based distributed generation,” *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 23, no. 2, pp. 1079–1087, 2008, doi: 10.1109/TPWRD.2007.915870
- [32] E. S. Systems, “Energy Procedia New Power Management Strategies for a Microgrid with Energy Storage Systems,” 2012, doi: 10.1016/j.egypro.2012.01.260
- [33] M. Darabian and A. Jalilvand, “A power control strategy to improve power system stability in the presence of wind farms using FACTS devices and predictive control,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 85, pp. 50–66, 2017, doi: .j.ijepes.2016.08.002/10.1016
- [34] M. N. Kabir, Y. Mishra, G. Ledwich, Z. Y. Dong, and K. P. Wong, “Coordinated control of grid-connected photovoltaic reactive power and battery energy storage systems to improve the voltage profile of a residential distribution feeder,” *IEEE Trans. Ind. Informatics*, vol. 10, no. 2, pp. 967–977, 2014, doi: 10.1109/TII.2014.2299336
- [35] .I. N. P. Transmission, FACTS CONTROLLERS IN POWER TRANSMISSION
- [36] O. K. Shinde and V. R. S. V. B. Pulavarthi, “STATCOM converters and control: A review,” 2017 *Int. Conf. Data Manag. Anal. Innov. ICDMAI 2017*, pp. 145–151, 2017, .doi: 10.1109/ICDMAI.2017.8073500
- [37] S. N. Salih and P. Chen, “On Coordinated Control of OLTC and Reactive Power Compensation for Voltage Regulation in Distribution Systems With Wind Power,” pp. .2015 ,10–1
- [38] R. Sadiq, Z. Wang, C. Y. Chung, C. Zhou, and C. Wang, “A review of STATCOM control for stability enhancement of power systems with wind/PV penetration: Existing research and future scope,” *Int. Trans. Electr. Energy Syst.*, vol. 31, no. 11, pp. 1–27, .doi: 10.1002/2050-7038.13079 ,2021
- [39] S. Karare and V. M. Harne, “Modelling and simulation of improved operation of D-STATCOM in distribution system for power quality improvement using MATLAB

- Simulink tool,” Proc. Int. Conf. Electron. Commun. Aerosp. Technol. ICECA 2017, .vol. 2017-Janua, pp. 346–350, 2017, doi: 10.1109/ICECA.2017.8212831
- [40] P. R. Sharma and N. Hooda, “Transient stability analysis of power system using .MATLAB,” Int. J. Eng. Sci. Res. Technol, vol. 1, no. 7, pp. 418–422, 2012
- [41] R. K. Varma and H. Maleki, “PV Solar System Control as STATCOM (PV-STATCOM) for Power Oscillation Damping,” IEEE Trans. Sustain. Energy, vol. 10, .no. 4, pp. 1793–1803, 2019, doi: 10.1109/TSTE.2018.2871074
- [42] Y. Ma, A. Huang, and X. Zhou, “A review of STATCOM on the electric power system,” IEEE Int. Conf. Mechatronics Autom. ICMA 2015, pp. 162–167, 2015, doi: 2015 .ICMA.2015.7237475/10.1109
- [43] C. Davidson and M. Oliveira, Technical Description of Static Compensators .(STATCOM). 2019. doi: 10.1007/978-3-319-71926-9_8-2
- [44] M. Theses, “Scholars ’ Mine Application of STATCOM for improved dynamic .performance of wind farms in a power grid,” 2008
- [45] A. Khan, M. Easley, M. Hosseinzadehtaher, M. B. Shadmand, H. Abu-rub, and P. Fajri, PLL-less Active and Reactive Power Controller for Grid- Following Inverter,” pp. “ .2020 ,4328–4322
- [46] B. Aldbaiat, M. Nour, E. Radwan, and E. Awada, “Grid-Connected PV System with Reactive Power Management and an Optimized SRF-PLL Using Genetic Algorithm,” .pp. 1–21, 2022
- [47] L. Zhou, M. Yang, Q. Liu, and K. Guo, “New control strategy for three-phase grid-connected LCL inverters without a phase-locked loop,” J. Power Electron., vol. 13, no. .pp. 487–496, 2013, doi: 10.6113/JPE.2013.13.3.487 ,3
- [48] R. Imouzzzer, “Untitled Article (2015-06-16T08-05-32Z).pdf,” Untitl. Artic. (2015-06-16T08-05-32Z).pdf, no. 1, pp. 1–6, 2014, [Online]. Available: <http://dx.doi.org/10.1109/IRSEC.2014.7059786%5Cnhttp://ieeexplore.ieee.org/ielx7/7pdf?tp=&arnumber=7059786&isnumber=7059735.07059786/7059735/050734>

Abstract

With the increasing consumption of electrical energy, concerns have escalated regarding the destructive impact of climate change, which is primarily caused by the excessive use of fossil fuels. This has led to the adoption of renewable energy sources such as solar panels and wind turbines for electrical power generation, implemented as distributed generation systems that are connected to and integrated with the electrical power grid. This trend has been accompanied by research and efforts to develop smart electrical grids capable of avoiding sudden outages and performing automatic reconnection, thereby ensuring the stability and reliability of the network.

Microgrids are considered an essential part of the modern electrical distribution infrastructure, as they represent an innovative solution for enhancing energy efficiency and sustainability. With the increasing use of renewable energy sources, it becomes necessary to integrate intelligent strategies for reactive power management, which is used to maintain the nominal voltage of the electrical grid. Reactive power is essential for maintaining network balance, ensuring its stability and reliability, and avoiding energy losses, especially in complex systems such as microgrids.

Most of this energy is transmitted and distributed in the form of alternating current, which makes it more important than ever to design and operate electric power systems not only with maximum efficiency but also with the highest level of safety and reliability. These requirements necessitate the development of flexible techniques and systems for electrical power transmission that control transmission line parameters to improve the flow of active and reactive power while maintaining the nominal voltage level along the line.

Keywords:

Microgrids, Reactive Power, STATCOM, Solar Systems.



Syrian Arab Republic
Damascus university
Faculty of Mechanical & Electrical Engineering
Department of Electrical Power Engineering

Smart Management Technologies for Reactive Power in The Micro-Electric Network

**A dissertation submitted in partial fulfillment of the
requirements for the degree of Master in
electrical power engineering**

By
Eng. Naif Bker

Supervisor
Prof. Eng. Ghaith Warkozek
“Professor in the Department of Electrical
Power Engineering – Damascus University”

Date 2025-2026