



الجمهورية العربية السورية

جامعة دمشق

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

قسم هندسة الطاقة الكهربائية

محطات التوزيع الفرعية الذكية لمواءمة تشكيل الشبكات الميكروية الذكية

رسالة أعدت لنيل درجة الماجستير في هندسة الطاقة الكهربائية

إعداد:

م. باولا ميلانة

إشراف:

د.م فؤاد صالحة

العام الدراسي 2023-2024

شكر

يسرني أن أتوجه بجزيل شكري وامتناني إلى الدكتور فؤاد صالحة الذي تبني هذا العمل وقدم لي الكثير من وقته وزودني بتوجيهاته وإرشاداته وملاحظاته القيّمة التي شكلت الركيزة المتينة التي قام عليها هذا البحث.

كما يسعدني أن أتقدم بالشكر الجزيل لأعضاء الهيئة التدريسية في قسم هندسة الطاقة الكهربائية في جامعة دمشق لدعمهم العلمي الذي أغنى هذا البحث.

أتوجه بالشكر أيضاً إلى الدكاترة أعضاء لجنة الحكم لما قدموه من آراء علمية وتوجيهات قيّمة أغنت هذا البحث.

ختاماً أتقدم بجزيل الشكر والتقدير إلى كل الذين مدوا يد العون والمساعدة لإنجاز هذا العمل.

إهداء

إلى من كانت نوراً يضئ لي الدرب، ويداً حانية تمسح عني التعب، ومن كان صبرها ينبوع قوتي..... أمي الحبيبة

إلى ينبوع العطاء الذي نرعرع في نفسي الطموح والمثابرة، وكان سندي في كل خطوة خطوتها..... والدي العزيز

إلى من شامركوني الدرب بجهد ودعمهم المتواصل، ومن كانوا لي عوناً وسنداً في كل خطوة..... أخوتي الأحباء

إلى من كان نور علمه منارة تهدي خطاي، ومن كان توجيهه دافعاً لي نحو التميز، إلى من لم يخل علي بنصحه وإرشاده..... د. فؤاد صاحبة

إلى كل من علمني حرفاً أصبح سناً برقه يضيء الطريق أمامي..... أساتذتي الأفاضل

إلى من ضاقت السطور في ذكرهم فوسعهم قلبي..... أصدقائي

أهدي هذا العمل

جدول المصطلحات والرموز

الرمز	المصطلح	المعنى
AVR	Automatic Voltage Regulator	منظم الجهد الآلي
CHP	Combine Heat And Power	التوليد المشترك للطاقة الحرارية والكهربائية
DG	Distributed Generation	التوليد الموزع
DNO	Distributed Network Operator	مشغل شبكة التوزيع
HMI	Human Machine Interface	واجهة الإنسان والآلة
IED	Intelligent Electronic Devices	التجهيزات الإلكترونية الذكية
MGCC	Microgrid Control Center	مركز التحكم بالشبكة الميكروية
MU	Merging Unit	وحدة الدمج
OPC	Originally object Linking Embedding Process Control	الربط والتضمين الكائني للتحكم في العمليات
PCC	Point Of Common Coupling	نقطة الربط المشتركة
PLL	Phase Locked Loop	حلقة الطور المقفلة
SRF-PLL	Synchronous Reference Frame Phase Locked Loop	حلقة الطور المقفلة ذات الإطار المرجعي المتزامن
SABP	Substation Area Backup Protection	الحماية الاحتياطية للمحطة الفرعية
SCC	Short Circuit Capacity	سعة القصر
SAGE	SCADA Animation and Graphic Editor	محرك الرسوم المتحركة لنظام تحصيل البيانات والتحكم الإشرافي
THD	Total Harmonic Distortion	التشوه التوافقي الكلي
UP	Unit Protection	وحدة الحماية
VSC	Voltage Source Converter	المعرج كمنبع للتوتر

فهرس المحتويات

I.....	جدول المصطلحات والرموز.....
VI	قائمة الأشكال.....
IX	قائمة الجداول.....
X.....	الملخص
1	الفصل الأول الإطار العام للبحث والدراسات المرجعية.....
2	- مقدمة.....
2	1-1- مشكلة البحث.....
3	1-2- هدف البحث.....
4	1-3- مبررات البحث.....
4	1-4- أهمية البحث.....
4	1-5- تساؤلات البحث.....
4	1-6- فرضيات البحث.....
5	1-7- منهج البحث.....
5	1-8- الدراسات المرجعية.....
5	1-8-1- الدراسة الأولى.....
6	1-8-2- الدراسة الثانية.....
6	1-8-3- الدراسة الثالثة.....
7	1-8-4- الدراسة الرابعة.....
8	1-8-5- الدراسة الخامسة.....
9	1-8-6- الدراسة السادسة.....
10	1-8-7- الدراسة السابعة.....

- خلاصة الدراسات المرجعية 11
- 9-1- أقسام البحث 12
- 10-1- مخطط البحث 13
- الفصل الثاني نظام التوزيع الكهربائي التقليدي والتوليد الموزع 14
- 1-2- المنظومة الكهربائية التقليدية - نظرة عامة 15
- 1-1-2- نظام التوزيع الكهربائي 16
- 1-1-1-2- بنى نظام التوزيع الكهربائي 17
- 2-1-2- المحطات الكهربائية الفرعية في مستوى توتر التوزيع تصنيفها ومكوناتها 19
- 1-2-1-2- تصنيف محطات التوزيع الكهربائية الفرعية 19
- 2-2-1-2- المكونات الرئيسية لمحطات التوزيع الكهربائية الفرعية التقليدية 21
- a- مكونات محطات التوزيع الكهربائية الفرعية الأولية 21
- b- مكونات محطات التوزيع الكهربائية الفرعية الثانوية 22
- 2-2- التوليد في شبكات التوزيع الكهربائية - التوليد الكهربائي الموزع 26
- 1-2-2- مفهوم التوليد الموزع 26
- 2-2-2- دواعي التوليد الموزع 28
- 3-2-2- تأثير التوليد الموزع على نظام القدرة الكهربائية 29
- 1-3-2-2- الحماية 29
- 4-2-2- تقنيات التوليد الموزع 30
- الخاتمة 31
- الفصل الثالث نظام التوزيع الكهربائي الحديث ومفهوم الشبكة الميكروية 32
- مقدمة 33
- 1-3- التحول نحو نظام توزيع أكثر ذكاء 33
- 2-3- الشبكات الذكية 34
- 1-2-3- متطلبات ومزايا الشبكات الذكية 35

- 36 2-2-3-المحطات الفرعية الذكية
- 37 1-2-2-3- التقنيات الرئيسية للمحطات الفرعية الذكية
- 37 1-1-2-2-3- المواصفات القياسية IEC61850
- 39 2-1-2-2-3- تقنيات القياس الجديدة:
- 40 3-1-2-2-3- التجهيزات الأولية الذكية
- 41 4-1-2-2-3- تجهيزات المراقبة الذكية لحالة المعدات الأولية
- 42 5-1-2-2-3- منصة المعلومات المتكاملة والتطبيقات المتقدمة
- 44 2-2-2-3- حماية المحطات الفرعية الذكية
- 45 1-2-2-2-3- مفهوم ووظائف الحماية الاحتياطية للمحطة الفرعية (SABP) وخوارزمية عملها
- 49 2-2-2-2-3- مقارنة بين نظم الحماية الاحتياطية التقليدية ونظام الحماية (SABP) المقترح
- 51 3-3- الشبكات الميكروية
- 52 1-3-3- تصنيف الشبكات الميكروية
- 55 2-3-3- فوائد الشبكات الميكروية على شبكات التوزيع الكهربائية
- 55 3-3-3- آليات التحكم في مصادر التوليد الموزع للشبكات الميكروية
- 56 - التحكم بسرعة المولدات الموزعة التقليدية
- 57 - التحكم في المولدات الموزعة ذات الطاقة المتجددة
- 58 4-3-3- نظم المزامنة للشبكات الميكروية
- 59 - تقنيات كشف الطور
- 60 - خوارزمية التحكم في التزامن
- 61 5-3-3- مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية
- 62 1-5-3-3- وظائف مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية
- 63 2-5-3-3- دمج وظائف المحطة الفرعية الذكية مع (MGCC)
- 64 3-5-3-3- دمج نظام (Web SCADA) مع مركز التحكم المركزي للشبكة الميكروية
- 66 1-3-5-3-3- استخدام برنامج (Ecava IntegraXor) للتحكم بالشبكة الميكروية
- 67 - مزايا برنامج Ecava IntegraXor

69	الفصل الرابع التطبيق العملي
70	- مقدمة
70	4-1- نمذجة الشبكة الميكروية باستخدام برنامج MATLAB
75	4-2- تطبيق نظام من أجل إعادة وصل الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية
77	4-2-1- نتائج اختبار عملية إعادة وصل الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية
86	4-3- نمذجة نظام الحماية للمحطة الفرعية المدروسة
87	4-3-1- نمذجة نظام الحماية الأساسية للمحطة الفرعية المدروسة
88	4-3-1-1- نمذجة الحماية من العطل الأرضي باستخدام برنامج الماتلاب
89	4-3-1-2- نمذجة الحماية من زيادة التيار الزمنية العكسية باستخدام برنامج الماتلاب
91	4-3-2- تطبيق نظام الحماية الاحتياطية (SABP) في المحطة الفرعية المدروسة
93	4-3-2-1- اختبار نظام الحماية الاحتياطية (SABP) ونظام الحماية الأساسية في المحطة الفرعية المدروسة
98	4-4- تشكيل واجهة رسومية لعرض الوظائف في مركز التحكم
99	4-4-1- مراحل تطوير الواجهة الرسومية الخاصة بنظام القياس ونظام المزامنة
107	4-4-2- مراحل تطوير الواجهة الرسومية الخاصة بنظام حماية المحطة الفرعية المدروسة
112	4-4-3- نتائج الاختبار عبر الواجهة الرسومية
112	4-4-3-1- نتائج اختبار نظام الحماية الاحتياطية (SABP) عبر الواجهة الرسومية
115	4-4-3-2- مراقبة تغيرات بارامترات المحطة المدروسة مع الزمن
120	الفصل الخامس النتائج والتوصيات
121	- مقدمة
121	5-1- النتائج
122	5-2- التوصيات
127	Abstract

قائمة الأشكال

- الشكل (1-1): مخطط التحكم المركزي بالشبكة الميكروية ((D'SILVA,2020)..... 8
- الشكل (2-1): مخطط نظام الحماية الاحتياطية المقترح (Liu,2020)..... 9
- الشكل (3-1): تبادل المعلومات وتنسيق عمل نظام الحماية (Wang,2017)..... 10
- الشكل (1-2): بنية نظام القدرة الكهربائي التقليدي..... 15
- الشكل (2-2): مخطط الخط الواحد لنظام التوزيع الكهربائي (حمزة،2010)..... 17
- الشكل (3-2): نظام التوزيع الشعاعي..... 18
- الشكل (4-2): نظام التوزيع الحلقي..... 19
- الشكل (5-2): مقطع من خلية محولة (66/20 KV)..... 21
- الشكل (6-2): مخطط الخط الواحد لمحطة توزيع فرعية ثانوية (11/0.4 KV)..... 23
- الشكل (7-2): الخصائص الزمنية لحاكمة الحماية من زيادة التيار..... 25
- الشكل (8-2): مبدأ عمل الحماية التفاضلية..... 26
- الشكل (9-2): تقنيات التوليد الموزع..... 30
- الشكل (1-3): مقارنة بين الشبكات التقليدية الحالية والشبكات المستقبلية (Stockmar,2016)..... 34
- الشكل (2-3): بنية نظام الأتمتة للمحطات الفرعية الذكية استناداً إلى المواصفات القياسية IEC 61850 (McGhee,2010)..... 39
- الشكل (3-3): التشكيلات المختلفة لمحاولات قياس التيار في المحطات الفرعية الذكية (Yuan et al,2019)..... 40
- الشكل (4-3): توصيل وحدة إدارة عمل القاطع الآلي (Yuan et al,2019)..... 41
- الشكل (5-3): نظام المراقبة الذكي لمحولة القدرة الكهربائية (Yuan et al,2019):..... 42
- الشكل (6-3): المنصة البرمجية لتكامل معلومات المحطة الفرعية الذكية (Yuan et al,2019)..... 43
- الشكل (7-3): بنية نظام الحماية للشبكة الذكية (Wang et al,2017)..... 45
- الشكل (8-3): خصائص الحماية التفاضلية النسبية (Wang et al,2017)..... 47
- الشكل (9-3): خوارزمية عمل SABP في حالة العطل (Wang et al,2017)..... 49
- الشكل (10-3): بنية الشبكة الميكروية (Pavon et al,2021)..... 52
- الشكل (11-3): تصنيف الشبكات الميكروية..... 54
- الشكل (12-3): مخطط نظام التحكم في السرعة التزامنية للنفثة الغازية (Bevrani et al,2017)..... 56
- الشكل (13-3): التحكم بالمعرج للمولد الكهروضوئي في وضعية (Grid-Following) (Bevrani et al,2017)..... 58
- الشكل (14-3): بنية الحلقة المقفلة طورياً (PLL)..... 59
- الشكل (15-3): بنية (SRF-PLL)..... 60
- الشكل (16-3): تقنية (Droop Control) للتحكم في المولدات الموزعة (Uten el al,2019)..... 61
- الشكل (17-3): بنية نظام المراقبة والتحكم الإشرافي وتحصيل البيانات (SCADA) في الشبكات الميكروية..... 65
- الشكل (18-3): المكونات الرئيسية في برنامج (Ecava IntegraXor SCADA)..... 67
- الشكل (1-4): مخطط الخط الواحد للمحطة الفرعية التقليدية (Palizban,2011)..... 71
- الشكل (2-4): مخطط الخط الواحد للمحطة الفرعية بعد تطويرها حسب المواصفات القياسية IEC 61850..... 72

- الشكل (4-3): نموذج الشبكة الميكروية المدروسة في الماتلاب 74
- الشكل (4-4): نمذجة حلقة التحكم بالاستطاعة الميكانيكية للمولد التزامني 74
- الشكل (4-5): نمذجة حلقة التحكم بتوتر التهيج للمولد التزامني 75
- الشكل (4-6): نمذجة (SRF-PLL) باستخدام الماتلاب 76
- الشكل (4-7): تغيرات السرعة الميكانيكية للمولد عند فصل الشبكة الميكروية عن الشبكة الرئيسية وعند إعادة الوصل 77
- الشكل (4-8): تيار المولد لحظة إعادة وصل الشبكة الميكروية إلى الشبكة الرئيسية 79
- الشكل (4-9): الجهد على أطراف المولد التزامني لحظة إعادة وصل الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية 79
- الشكل (4-10): توتر أحد أطوار الشبكة الميكروية والشبكة الرئيسية لحظة إعادة الوصل 80
- الشكل (4-11): فرق الصفحة بين توتر الشبكة الميكروية والرئيسية لحظة إعادة الوصل 80
- الشكل (4-12): تيارات الأطوار الثلاثة للشبكة الميكروية عند نقطة الربط المشتركة (PCC) لحظة إعادة الوصل 81
- الشكل (4-13): توترات الأطوار الثلاثة للشبكة الميكروية عند نقطة الربط المشتركة (PCC) لحظة إعادة الوصل 81
- الشكل (4-14): توتر الطور الأول للشبكة الميكروية وتوتر الطور الأول للشبكة الرئيسية في لحظة إعادة الوصل عند تردد (49 HZ) 82
- الشكل (4-15): تيارات وتوترات الأطوار الثلاثة للمولد التزامني لحظة إعادة الوصل عند تردد (49 HZ) 83
- الشكل (4-16): توترات الأطوار الثلاثة للمعرج عند أوضاع التشغيل المختلفة للشبكة الميكروية 84
- الشكل (4-17): تيارات الأطوار الثلاثة للمعرج عند أوضاع التشغيل المختلفة للشبكة الميكروية 84
- الشكل (4-18): تغيرات التردد عند فصل الشبكة الميكروية وعند إعادة وصلها مع الشبكة الرئيسية 85
- الشكل (4-19): تغيرات القيمة الفعالة لجهد كل من الشبكة الرئيسية والميكروية والمولد عند أوضاع التشغيل المختلفة للشبكة الميكروية 85
- الشكل (4-20): مخطط الخط الواحد للشبكة الميكروية المقترحة بعد تطبيق نظام الحماية الاحتياطية ضمن المحطة الفرعية المدروسة 87
- الشكل (4-21): نمذجة نظام الحماية الأساسية للمحطة المدروسة ضمن برنامج الماتلاب 88
- الشكل (4-22): مبدأ عمل الحماية من العطل الأرضي 88
- الشكل (4-23): تابع الماتلاب المعبر عن عمل الحماية من العطل الأرضي 89
- الشكل (4-24): تابع الماتلاب المعبر عن عمل الحماية من زيادة التيار الزمنية العكسية 90
- الشكل (4-25): مخطط الطور الواحد للمحطة الفرعية المدروسة موضعاً عليه مناطق الحماية 91
- الشكل (4-26): نمذجة معادلات حساب تيار العمل وتيار الكبح للمنطقة التفاضلية (Zone1) 92
- الشكل (4-27): نمذجة شروط عمل المنطقة التفاضلية (Zone1) 92
- الشكل (4-28): نمذجة عملية إرسال أوامر الفصل للقواطع الآلية 93
- الشكل (4-29): حدوث عطل على الباسبار الأول 93
- الشكل (4-30): استجابة نظام الحماية الأساسية عند حدوث عطل على الباسبار الأول 94
- الشكل (4-31): استجابة نظام الحماية الاحتياطية عند حدوث عطل على الباسبار الأول 94
- الشكل (4-32): حدوث عطل ضمن المحولة 95
- الشكل (4-33): استجابة نظام الحماية الأساسية عند حدوث عطل ضمن المحولة 95
- الشكل (4-34): استجابة نظام الحماية الاحتياطية عند حدوث عطل ضمن المحولة 96
- الشكل (4-35): حدوث عطل ضمن الشبكة الميكروية 96

- الشكل (4-36): استجابة نظام الحماية الأساسية عند حدوث عطل ضمن الشبكة الميكروية 97
- الشكل (4-37): استجابة نظام الحماية الاحتياطية عند حدوث عطل ضمن الشبكة الميكروية 97
- الشكل (4-38): الربط بين الواجهة الرسومية وبرنامج الماتلاب عبر بروتوكول الاتصال (OPC) 98
- الشكل (4-39): الواجهة الرسومية الخاصة بنظام القياس ونظام المزامنة التي تم إنشاؤها في برنامج ECava 99
- الشكل (4-40): متغيرات وحدات القياس المنشأة ضمن برنامج (Ecava IntegraXor Editor) 100
- الشكل (4-41): نقل قيم متغيرات وحدة القياس من الماتلاب إلى (Ecava Server) 101
- الشكل (4-42): خطوات إنشاء وظيفة القياس لوحدة المراقبة والتحكم بالأحمال 102
- الشكل (4-43): تحديد وظيفة أزرار (ON-OFF) الموجودة ضمن وحدة المراقبة والتحكم بالأحمال 103
- الشكل (4-44): آلية العمل عند الضغط على أحد القواطع الموجودة ضمن وحدة المراقبة والتحكم بالأحمال 103
- الشكل (4-45): آلية عمل وحدة التحكم بالمولد التزامني 104
- الشكل (4-46): آلية عمل وحدة المزامنة 105
- الشكل (4-47): وظيفة مقاييس الجهد والتردد الموجودة ضمن وحدة المزامنة 106
- الشكل (4-48): وحدة مراقبة المولد الكهروضوئي الشمسي عبر برنامج Ecava 106
- الشكل (4-49): وظيفة وحدة الإشعارات 107
- الشكل (4-50): الواجهة الرسومية الخاصة بنظام الحماية للمحطة الفرعية المدروسة 108
- الشكل (4-51): وظائف الجزء الخاص بنظام الحماية الاحتياطية للمحطة (SABP) 109
- الشكل (4-52): وظائف الجزء الخاص بنظام الحماية الأساسية 110
- الشكل (4-53): وظيفة الجزء الخاص باختبار نظام الحماية 111
- الشكل (4-54): وظيفة وحدة الإنذارات 111
- الشكل (4-55): استجابة نظام الحماية عبر الواجهة الرسومية عند حدوث عطل على الباسبار الأول 113
- الشكل (4-56): استجابة نظام الحماية عبر الواجهة الرسومية عند حدوث عطل ضمن المحولة 114
- الشكل (4-57): استجابة نظام الحماية عبر الواجهة الرسومية عند حدوث عطل ضمن الشبكة الميكروية 115
- الشكل (4-58): إنشاء صفحة ويب مكتوبة بلغة (JavaScript) ضمن برنامج (Ecava) 116
- الشكل (4-59): تغييرات الإشعاع الشمسي عبر برنامج (Ecava) 116
- الشكل (4-60): تغييرات تيار المولد الكهروضوئي الشمسي عبر برنامج ECava 117
- الشكل (4-61): تغييرات تردد الشبكة الميكروية عند فصلها عن الشبكة الرئيسية وإعادة وصلها عبر (Ecava) 117
- الشكل (4-62): تغييرات السرعة الميكانيكية للمولد عند أوضاع التشغيل المختلفة للشبكة الميكروية عبر (Ecava) 118
- الشكل (4-63): تغييرات القيمة الفعالة لجهد كل من الشبكة الرئيسية والميكروية والمولد عبر (Ecava) 118
- الشكل (4-64): تغييرات الاستطاعة الحقيقية عبر (Ecava) 119

قائمة الجداول

الجدول (1-4): مواصفات المولد الكهروضوئي الشمسي.....	73
الجدول (2-4): متطلبات إعادة الاتصال للشبكة الميكروية IEEE 1547.....	76
الجدول (3-4): تيار العمل وتيار الكبح للمناطق التفاضلية.....	91

الملخص

إن تطوير النظام الكهربائي إلى نظام أكثر ذكاءً يفرض تحديث مكونات هذا النظام حتى تتماشى مع متطلبات التشغيل المتقدمة للنظم الذكية. تلعب المحطات الفرعية الذكية والشبكات الميكروية دوراً حيوياً في تعزيز كفاءة نظم الطاقة الحديثة. تعتبر المحطات الفرعية الذكية قلب نظام الطاقة الذكي والحجر الأساس لإنشاء شبكات ذكية إذ تتيح تحسينات كبيرة في مجال المراقبة والتحكم وذلك عبر مجموعة من التجهيزات الالكترونية الذكية وتقنيات الاتصال. يؤسس ذلك لإنشاء الشبكات الميكروية التي تساهم في تعزيز مرونة وكفاءة توزيع الطاقة الكهربائية من خلال الاستخدام الأمثل لمصادر الطاقة المتجددة وإدارة الطلب على الطاقة عبر مركز التحكم المركزي (Microgrid Control Center).

يستعرض هذا البحث بنية المحطات الكهربائية الفرعية ومكوناتها في مستوى توتر التوزيع وأنظمة الحماية لها والتجهيزات الواجب تحديثها حتى تستطيع مواءمة عمل الشبكات الميكروية الذكية. بالإضافة إلى ذلك يتم عرض نظام الأتمتة للمحطات الفرعية الذكية المستند إلى المواصفات القياسية (IEC61850) وتكامل ودمج وظائف هذا النظام مع وظائف (MGCC) لتحسين كفاءة التشغيل والموثوقية لكل من الشبكات الميكروية ولكافة عناصر نظام القدرة الكهربائي.

كما أُجري في هذا البحث دراسة لشبكة ميكروية مرجعية ونمذجتها باستخدام برنامج الماتلاب وتطبيق نظام من أجل تأمين عملية إعادة الاتصال المتزامن لها مع الشبكة الرئيسية. إضافةً إلى تشكيل مركز للتحكم بالشبكة الميكروية ملحق بالمحطة الفرعية المدروسة وتشكيل واجهة رسومية ضمنه باستخدام برنامج (ECAVA). تم من خلال هذه الواجهة عرض معلومات المحطة والشبكة الميكروية والتعامل مع نظام المزامنة ونظام الحماية الاحتياطية (SABP) والمراقبة والتحكم بالمحطة الفرعية وبالشبكة الميكروية في الزمن الحقيقي.

- الكلمات المفتاحية: المحطات الفرعية الذكية - التوليد الموزع - الشبكات الميكروية - Web SCADA

.ECAVA

الفصل الأول

الإطار العام للبحث والدراسات المرجعية

- مقدمة :

تعد محطات التوزيع الكهربائية الفرعية من العناصر الأساسية في النظام الكهربائي المترابط. إن تطور النظام الكهربائي بعد دخول مفهوم الشبكات الذكية أثر بشكل عميق على تصميم وهيكلية وتشغيل المحطات الكهربائية الفرعية التي تعد نقطة وصول نظام التوزيع إلى مختلف عناصر نظم القدرة المترابطة كخطوط النقل والمحولات والمولدات متضمنة المصادر ذات الطاقة المتجددة. لذلك يمكن أن تكون المحطات الفرعية ذات أهمية استراتيجية في كونها مكان نموذجي لتمكين وظائف المراقبة والتحكم والتشغيل الآمن لنظام التوزيع الكهربائي. لا تستطيع المحطات الفرعية التقليدية تلبية متطلبات شبكات الطاقة الحديثة المعقدة، والتي تتميز بالحجم الكبير، وزيادة استخدام الطاقة المتجددة وظروف التشغيل المعقدة (Jing et al,2013).

يجب أن يأخذ التصميم الحديث للمحطات الفرعية في الاعتبار المتطلبات العالية للموثوقية والأمان وقابلية التشغيل البيئي وإعادة التكوين وإمكانية التحكم وقابلية الصيانة والمرونة والكلفة المنخفضة والتأثير البيئي. إن متطلبات إنتاج الطاقة الكهربائية منخفضة الانبعاثات الكربونية والصديقة للبيئة، والتحكم التفاعلي والموثوقية العالية، تقود إلى ضرورة رقمنة المعلومات (Digitalization) واعتماد المعايير المفتوحة (open standards) في المحطات الفرعية. بعد البدء بتطبيق مفهوم الشبكات الذكية في النظام الكهربائي التقليدي تم الانتقال من عمليات التحكم والمراقبة المركزية للنظام الكهربائي إلى نظم تحكم ومراقبة فرعية وذلك عبر تطبيق مفهوم المحطات الفرعية الذكية (Smart Substations).

1-1 - مشكلة البحث:

يتطلب النظام الكهربائي التقليدي تحديثاً في بعض بنائه بحيث يتلاءم مع إدماج التوليد الموزع في سويات جهد التوزيع. شكلت الشبكات الميكروية إحدى أهم تطبيقات الشبكات الذكية في مستوى جهد التوزيع المنخفض. تتطلب الشبكات الميكروية آليات للمراقبة وإدارة الطاقة وعمليات إدارة الوصل والفصل عن الشبكة الرئيسية، بالإضافة إلى

وجود واجهات للتحكم الإشرافي. يتم إنجاز ذلك عبر إنشاء مركز للتحكم المركزي بالشبكة الميكروية (MGCC) يتواجد عادةً عند نقطة الربط مع شبكة التوزيع. تشكل محطة التوزيع الفرعية الثانوية (يقابل ذلك مركز التحويل في الشبكة السورية) نقطة الربط بين الشبكة الميكروية المقترحة مع شبكة التوزيع الرئيسية ذات الجهد المتوسط. عندئذٍ لا بُدَّ من تطوير محطة التوزيع الفرعية الثانوية لتتلاءم مع وجود الشبكة الميكروية من حيث نوعية تجهيزات القياس وآلية ربطها مع واجهات التحكم الإشرافي.

تتم عملية فصل الشبكة الميكروية عن الشبكة الرئيسية بناءً على منظومة الحماية للشبكة الميكروية وللمحطة الفرعية الثانوية على حد سواء. إن نظام الحماية التقليدي للمحطة الفرعية الثانوية قائم على بعض الحماية التقليدية التي لا يمكن أن تستجيب بالشكل الدقيق لحالة عكس جهة التيار عند وجود الشبكة الميكروية. لذا لا بُدَّ من تطوير نظام الحماية لهذه المحطة بحيث يأخذ بعين الاعتبار حدوث الأعطال داخل الشبكة الميكروية أو على المحطة بحد ذاتها. بناءً على ذلك يشكل نظام الحماية الاحتياطية (SABP) المعتمد في المحطات الفرعية الرئيسية نظاماً ملائماً لتطبيقه في المحطات الفرعية الثانوية عند دمج الشبكات الميكروية.

1-2- هدف البحث:

يهدف البحث إلى تطوير مركز التحويل لنظام توزيع كهربائي بالاعتماد على بعض وظائف محطة توزيع فرعية رئيسية كالحماية الاحتياطية وبعض تقنيات القياس الحديثة ونظم نقل المعلومات باستخدام التجهيزات الالكترونية الذكية، لنلائم تشكيل مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية في مركز التحويل.

كما يهدف البحث إلى دمج برمجيات الحماية الاحتياطية وتجهيزات القياس الذكية مع برمجيات مركز التحكم المركزي (MGCC) كمرقبة التردد والاستطاعات وإدارة عمليات إعادة الوصل للشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية.

3-1- مبررات البحث:

يتطلب تطوير النظام الكهربائي التقليدي إلى نظام أكثر ذكاءً تحديث مكونات هذا النظام لتتماشى مع متطلبات التشغيل المتقدمة للحصول على ميزات اقتصادية وبيئية وموثوقية متقدمة عما هو موجود في النظام التقليدي. تلعب محطات التوزيع الفرعية الثانوية للجهد المنخفض (مراكز التحويل) دوراً كبيراً في هذا التحديث للنظام الكهربائي باعتبار أن الشبكات الميكروية الذكية غالباً ما تقام في مستوى هذا الجهد. تتطلب الشبكات الميكروية معلومات وتجهيزات خاصة بطبيعة عملها غير موجودة في المحطات الفرعية التقليدية وعلى اعتبار أن مركز التحكم بالشبكة الميكروية يقام عند هذه المحطات.

4-1- أهمية البحث:

تكمن أهمية هذا البحث في تحقيق التشغيل الآلي الأمثل لنظام القدرة الكهربائية فنياً واقتصادياً في ضوء دخول مصادر التوليد الموزع والحاجة إلى بناء محطات فرعية ذكية توائم تشكيل الشبكات الميكروية بالاعتماد على أحدث تقنيات الأتمتة من أجل الحصول على موثوقية وكفاءة أعلى، وتأمين عمليات المراقبة والتحكم والحماية، وتأمين استجابة أسرع للأعطال وتشغيل المحطة بشكل آمن.

5-1- تساؤلات البحث: سيتم في هذا البحث الإجابة على التساؤلات التالية:

- 1- هل يمكن للمحطات التقليدية أن تواكب تطور واندماج التوليد الموزع ضمن شبكات التوزيع؟
- 2- ما هي المتطلبات والمعايير اللازمة لتطوير المحطات الفرعية الثانوية الحالية إلى محطات ذكية؟

6-1- فرضيات البحث:

- يساهم نظام الوصل المتزامن للشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية في التقليل من الحالات العابرة للتردد.
- نظام الحماية الاحتياطية المقترح سيساهم في تحسين أداء وموثوقية المحطة.

7-1- منهج البحث:

سيتم إجراء هذا البحث وفق المنهج التحليلي والتجريبي بالاعتماد على البرمجيات المناسبة.

8-1- الدراسات المرجعية:

يستعرض هذا الجزء بعضاً من الدراسات السابقة ذات الصلة بموضوع البحث إضافةً إلى عرض الطرائق المتبعة في هذه الدراسات والنتائج التي تم التوصل إليها ونقاط الاستفادة منها.

1-8-1- الدراسة الأولى:

IEC 61850- Based Smart Substation (Principles, Testing, Operation and Maintenance) (Yuan, 2019)

المحطة الفرعية الذكية استناداً إلى المواصفة القياسية IEC 61850 (المبادئ والاختبار والتشغيل والصيانة)

تناولت هذه الدراسة مفهوم المحطات الفرعية الذكية وخصائصها المميزة إضافةً إلى التقنيات والبرمجيات الرئيسية المستخدمة في المحطات الذكية. تم بدايةً عرض الأسباب للتوجه نحو بناء محطات فرعية ذكية، فظهر مفهوم الشبكات الذكية التي تمتاز بالاستخدام الموسع لمصادر الطاقة المتجددة وظروف التشغيل المعقدة، والتطور الكبير الذي شهدته تكنولوجيا الاتصالات. كل هذا دفع إلى إنشاء محطات فرعية ذكية قادرة على التشغيل البيئي والتحكم وتبادل وتشارك المعلومات في الزمن الحقيقي.

أكدت هذه الدراسة على أن استخدام التجهيزات الالكترونية الذكية وإنشاء منصة رقمية ضمن المحطة يمكن من خلالها جمع البيانات من كافة تجهيزات المحطة ومعالجتها وتبادل وتشارك المعلومات مع مراكز التحكم والتنسيق، سيدعم التشغيل الآمن والمستقر للشبكة الكهربائية ولكافة عناصرها وسيسهم في إنشاء شبكات ذكية قوية.

1-8-2- الدراسة الثانية:**Effectiveness and Comparison of Digital Substations Over Conventional Substations (Waleed, 2019)****فعالية المحطات الرقمية ومقارنتها مع المحطات التقليدية**

تمثل الهدف من هذه الدراسة في إجراء مقارنة بين المحطات الفرعية التقليدية والرقمية وإظهار أهمية ودور المحطات الرقمية في دعم وظائف الشبكة الذكية.

استعرض الباحث التحديات التي تواجه نظام القدرة الحالي، ومفهوم الشبكات الذكية والشبكات الميكروية، والجوانب التقنية الواجب التوجه إليها لتحقيق جميع وظائف ومتطلبات الشبكات الذكية.

كما أجريت مقارنة من حيث كمية النحاس المستخدم وتكاليف النقل والتركيب والتشغيل لكل من المحطات الفرعية الرقمية والتقليدية، وأظهرت نتائج المقارنة أن استبدال كابلات التحكم النحاسية بكابلات الألياف البصرية ومحولات القياس التقليدية بمحولات القياس الالكترونية واستخدام أجهزة الحماية والتحكم القائمة على المعالجات الدقيقة في المحطات الرقمية سيسهم في تقليل التكاليف والمساحة وتحسين عمليات المراقبة والتحكم وتشخيص الأعطال.

1-8-3- الدراسة الثالثة:**IEC 61850 based substation automation system: A survey (Aftab,2020)****نظام أتمتة المحطات الفرعية المستند إلى المواصفة القياسية IEC 61850**

تضمنت المقالة دراسة شاملة للتغيرات التي طرأت على نظام الأتمتة للمحطات الفرعية من خلال المواصفات القياسية IEC 61850 والمزايا الممكن الحصول عليها من استخدام هذه المواصفات.

تم التأكيد على أن استخدام هذه المواصفة سيوفر لغة برمجية معيارية لتوصيف مكونات وتجهيزات المحطة ووظائف نظام الأتمتة ولعرض المعلومات الأساسية. يقود ذلك إلى تكامل جميع وظائف الحماية والمراقبة والتحكم والقياس داخل المحطة، وضمان قابلية التشغيل البيني بين تجهيزات المحطة والنظم ذات الصلة.

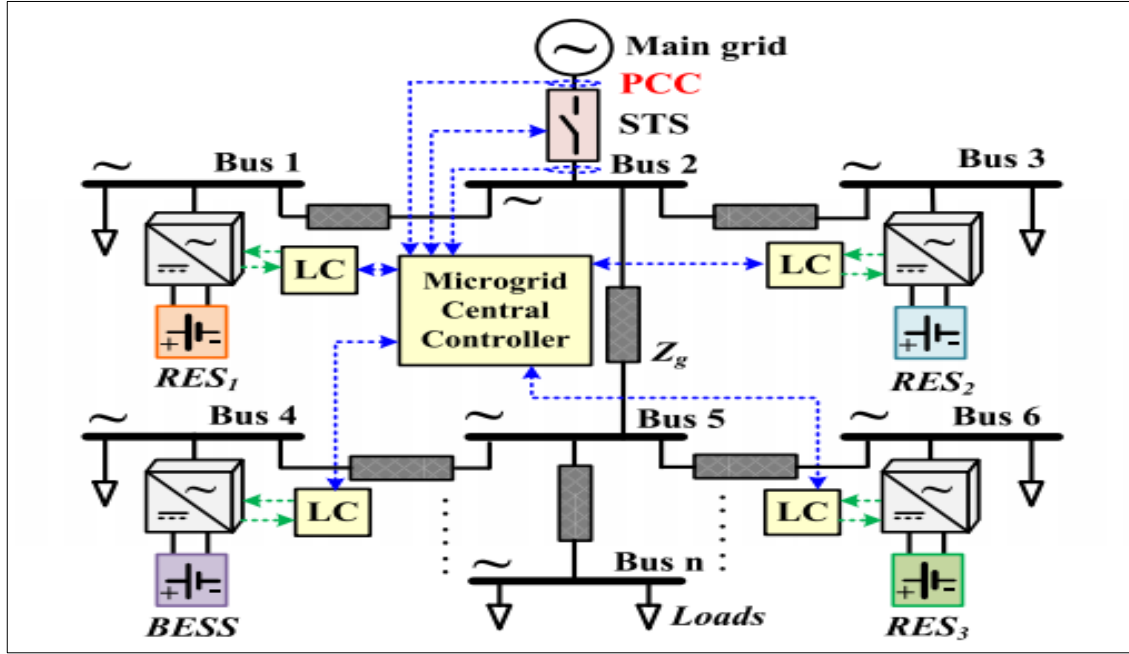
1-8-4- الدراسة الرابعة:**Towards Grid of Microgrids: Seamless Transition between Grid-Connected and Islanded Modes of Operation (D'SILVA, 2020)**

نحو شبكة من الشبكات الميكروية الانتقال السلس بين أوضاع التشغيل المتصلة بالشبكة والمعزولة عنها
 قدم البحث عرضاً عاماً على نظم التحكم بالشبكة الميكروية التي تتيح الانتقال بشكل سلس بين أنماط التشغيل،
 والتقنيات المستخدمة للتخفيف من اضطرابات الجهد والتردد عند نقطة الربط المشتركة (PCC).

تطرقت هذه الدراسة في البداية إلى ظهور الشبكات الميكروية بوصفها حلاً وإعداداً للتقليل من انقطاعات التغذية
 عن الأحمال الناجمة عن الأعطال والكوارث الطبيعية في أنظمة التوزيع الكهربائية. من ثم عُرضت بنية الشبكات
 الميكروية ووظائف مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية (MGCC) الذي يلعب دوراً هاماً في التحكم الآلي
 بالشبكة الميكروية عند أوضاع التشغيل المختلفة (الشكل 1-1).

استعرضت الدراسة أيضاً مخططات التحكم المختلفة للتحكم بكامل الشبكة الميكروية للانتقال بشكل سلس بين
 النمط المتصل بالشبكة (Grid Connected Mode) وبين النمط المعزول (Island Mode) .

تم التوصل في خلاصة البحث إلى أن : لكل طريقة من طرائق التحكم بالشبكة الميكروية إيجابياتها وسلبياتها
 وبالتالي يتوقف اختيار الطريقة المناسبة للتحكم على طبيعة الشبكة الميكروية المدروسة وطبيعة مصادر التوليد
 الموجودة فيها.



الشكل (1-1): مخطط التحكم المركزي بالشبكة الميكروية ((D'SILVA,2020))

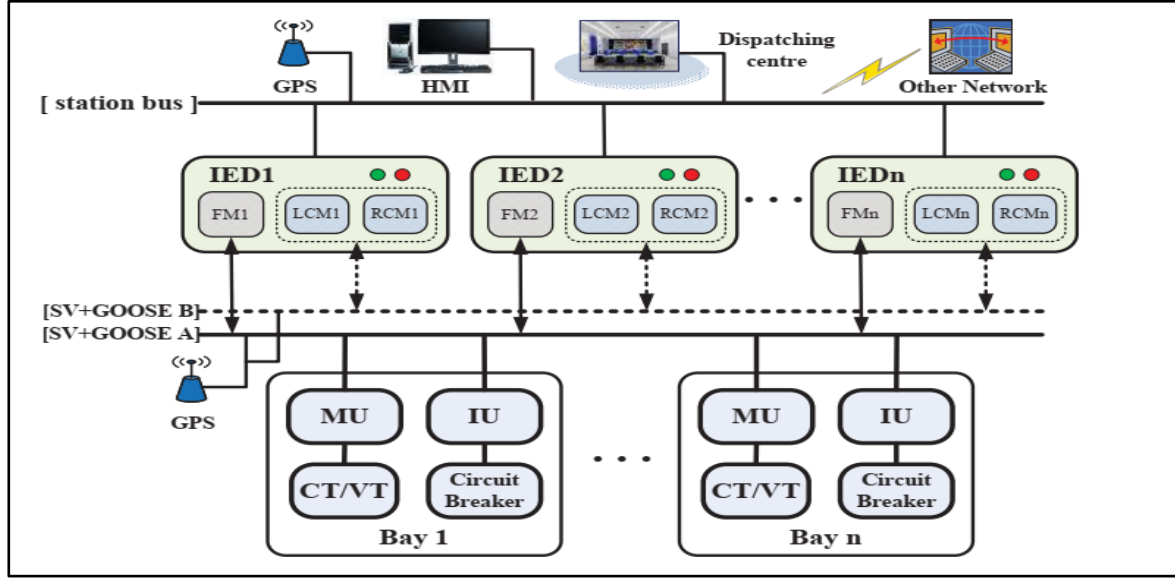
1-8-5 - الدراسة الخامسة:

Coordinated Backup Protection Scheme for Smart Substation (Liu, 2014)

مخطط الحماية الاحتياطية المنسق لمحطة فرعية ذكية

قدمت الدراسة مخططاً للحماية الاحتياطية بالاستناد إلى هيكلية المحطات الفرعية الذكية وخصائصها التقنية (الشكل 1-2). يعتمد نظام الحماية المقترح على استخدام شبكة الاتصال للمحطة الذكية، واستخدام تجهيزات الكترونية ذكية (IEDs) المتواجدة ضمن طبقة (Bay Level) من نظام أتمتة المحطة المبين بالشكل، تضم كل وحدة من هذه التجهيزات في داخلها على عدة أجزاء منها (FM: Function Module) وهو الجزء الخاص بخوارزمية الحماية يتم فيه تحليل البيانات وإرسال أوامر الفصل للقواطع. (LCM: Local Coordination Module) الوحدة المسؤولة عن مراقبة البيانات الخاصة بعملية فصل ووصل القواطع. (RCM: Remote Coordination Module) تستقبل الأوامر المرسل من الوحدات الأخرى. وجد كنتيجة لهذه الدراسة أن تطبيق نظام الحماية الاحتياطية المقترح يجب أن يأخذ بالحسبان عملية التنسيق مع الحماية الأساسية ونظام الحماية

الهرمي للشبكة الذكية وبالتالي الاعتماد على التقنيات الرقمية المتقدمة للتغلب على التأخير الزمني الناجم عن عملية نقل البيانات ومعالجتها.



الشكل (2-1): مخطط نظام الحماية الاحتياطية المقترح (Liu, 2020)

1-8-6- الدراسة السادسة:

An optimized design of substation-area protection in smart substation

(Wang, 2017)

تصميم مُحسّن للحماية الاحتياطية في المحطة الذكية

قدمت المقالة نموذجاً لحماية المحطة الفرعية الذكية بهدف التغلب على مشاكل نظام الحماية الاحتياطية التقليدي. كما استعرضت بنية نظام الحماية للشبكات الذكية، ومفهوم نظام الحماية الاحتياطية للمحطة (SABP) وآلية عملها، والمعلومات المتبادلة عبر شبكة الاتصال (Process Bus Network) ضمن المحطة والمتمثلة بالتيار المقاس وبجالة الحماية الأساسية والقواطع الآلية (الشكل 1-3). أجرى الباحث اختبار للنموذج المقترح في الزمن الحقيقي باستخدام برنامج (RSCAD) لبناء نموذج النظام الأساسي ونموذج التحكم بالعطل وأكدت نتائج الاختبار أن النظام المقترح يشكل وسيلة جيدة لتحسين نظام الحماية الاحتياطية للمحطات الفرعية.

- خلاصة الدراسات المرجعية:

ركزت الدراسات المرجعية الحديثة في إطار البحث المطروح على المحاور التالية:

❖ الدراسات الثلاثة الأولى التي تناولت مفهوم المحطات الفرعية الذكية ومبادئ تشغيلها واختبارها، ومفهوم الشبكات الذكية، وبنية نظام الأتمتة للمحطات الذكية استناداً إلى المواصفة القياسية IEC61850 ، أكدت على:

- 1- دور التجهيزات والبرمجيات المستخدمة في المحطات الفرعية الذكية في تعزيز وظائف الشبكة الذكية.
- 2- أهمية تبادل البيانات بين مكونات المحطات الفرعية الرقمية في تحسين عمليات المراقبة والحماية وتشخيص الأعطال.

3- استخدام المواصفة القياسية IEC 61850 ودورها في تحقيق التكامل لجميع وظائف الحماية والتحكم ووظائف القياس والمراقبة داخل المحطة الفرعية، إضافة إلى توفير اتصال فعال بين الأنظمة والتجهيزات.

❖ ركزت الدراسة الرابعة على التقنيات المستخدمة للتخفيف من اضطرابات الجهد والتردد عند نقطة الربط المشتركة (PCC)، وأبرزت أهمية نظم المزامنة في تأمين الانتقال السلس بين أنماط التشغيل المختلفة للشبكة الميكروية.

❖ استعرضت الدراسة الخامسة والسادسة مفهوم الحماية الاحتياطية (SABP) في المحطات الذكية وآلية عملها، وتوصلت هذه الدراسات إلى أن استخدام (SABP) يساهم في تحسين نظام الحماية للمحطات الفرعية والتخلص من مشاكل الحساسية والانتقائية الموجودة في نظم الحماية التقليدية.

❖ الدراسة السابعة تم من خلالها التعرف على إحدى الطرائق المتبعة للربط بين نظام SCADA وبين Matlab-Simulink ، وكيفية تشكيل واجهة رسومية تتيح عملية المراقبة والتحكم بنظام القدرة بالزمن الحقيقي.

1-9- أقسام البحث:

يتوزع البحث في خمسة فصول بما فيها إطار البحث والدراسات المرجعية والنتائج والتوصيات.

الفصل الأول: يقدم الإطار العام للبحث، وعرض مشكلة البحث ومبررات الدراسة وأهدافها إضافةً إلى عرض

بعض الدراسات المرجعية ذات الصلة بموضوع البحث.

الفصل الثاني: يشمل هذا الفصل على الدراسة النظرية الخاصة بالمحطات الفرعية التقليدية ومكوناتها في مستوى

جهد التوزيع ونظم حمايتها، بالإضافة إلى عرض مفهوم التوليد الكهربائي الموزع ودمجه في شبكات التوزيع

وأنواعه وتقنياته المختلفة وآثاره على نظام القدرة الكهربائي.

الفصل الثالث: يستعرض مفهوم الشبكات الذكية ومزاياها ودور المحطات الفرعية الذكية في تحقيق وظائف

ومتطلبات الشبكات الذكية. كما يتم عرض مفهوم الشبكات الميكروية ودور مركز التحكم المركزي في التحكم

والمراقبة بالشبكة الميكروية وإدارتها في الزمن الحقيقي وتحقيق عملية إعادة الربط المتزامن للشبكة الميكروية مع

الشبكة الرئيسية.

الفصل الرابع: الجانب العملي للبحث وخطواته ومراحله بدءاً من نمذجة الشبكة الميكروية ومن ثم نظام المزامنة

لها لتفادي حدوث حالات عابرة، وصولاً إلى تطوير الواجهة الرسومية للتعامل مع نظام الحماية الاحتياطية للمحطة

المدروسة ونظام المزامنة.

الفصل الخامس: يتناول الفصل الأخير نتائج البحث التي تم التوصل إليها وفقاً لمراحله المختلفة والآفاق المستقبلية

للبحث.

1-10 - مخطط البحث:

أولاً: الدراسة المرجعية.

ثانياً: الدراسة نظرية وتشمل:

1. المحطات الكهربائية الفرعية substation ومكوناتها في مستوى توتر التوزيع.
2. الشبكات الكهربائية الذكية والشبكات الميكروية.
3. المواصفات القياسية IEC61850.
4. المحطات الفرعية الذكية smart substation.
5. الحماية الكهربائية الاحتياطية في المحطات الفرعية Substation area backup protection.
6. مقارنة بين طرق الحماية التقليدية والطريقة المقترحة.
7. أنظمة المزامنة للشبكات الميكروية.
8. تحديد وتوصيف خوارزمية حماية المحطة بطريقة Substation area backup protection.

ثالثاً: الدراسة العملية:

1. نمذجة شبكة ميكروية بالاعتماد على هيكلية المحطة الفرعية التقليدية ذات التوتر المنخفض باستخدام بيئة الماتلاب البرمجية.
2. تطبيق نظام حماية احتياطية للمحولة في المحطة الفرعية الذكية بالاعتماد على المعلومات المتاحة من التجهيزات الطرفية.
3. تطبيق نظام من أجل إعادة وصل الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية لتفادي حدوث الحالات العابرة.
4. تشكيل واجهة رسومية لعرض بعض وظائف المحطة باستخدام بيئة برمجية مناسبة.

رابعاً: النتائج والتوصيات.

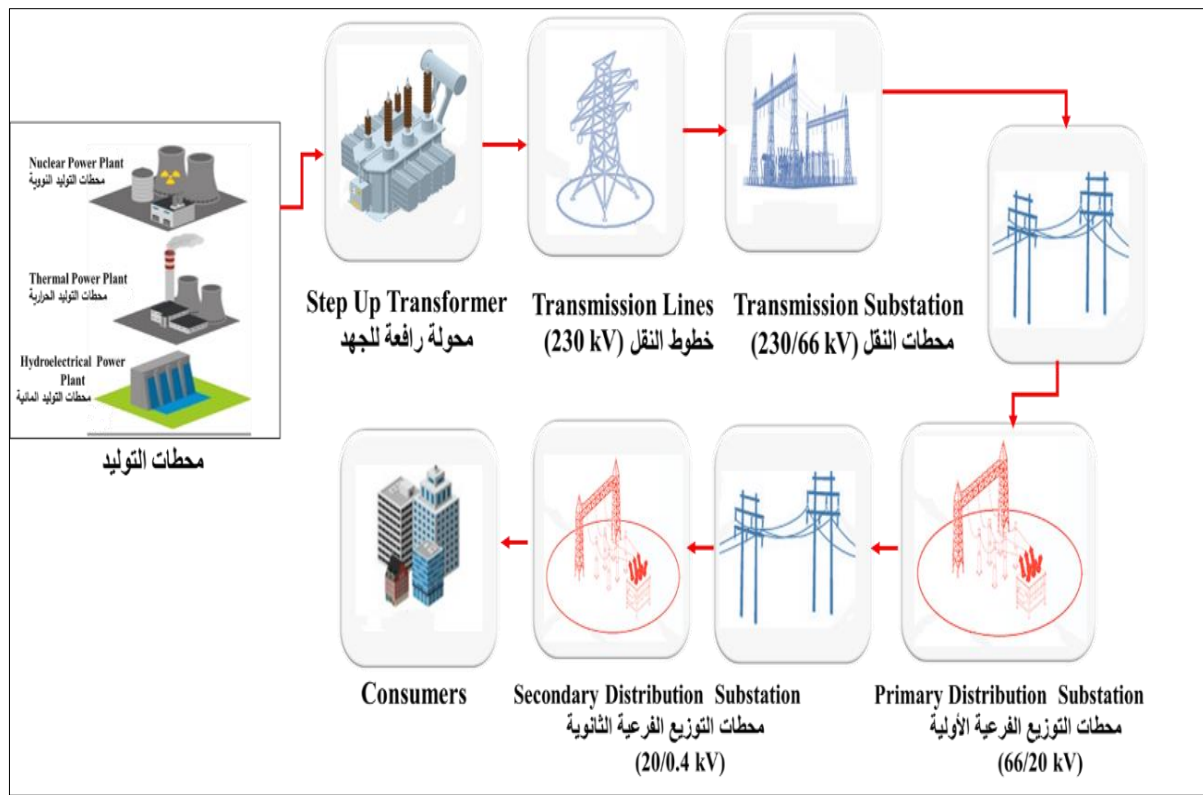
الفصل الثاني

نظام التوزيع الكهربائي التقليدي والتوليد الموزع

2-1- المنظومة الكهربائية التقليدية - نظرة عامة:

تعد الطاقة الكهربائية واحدة من أكثر أشكال الطاقة استخداماً في العالم، فعملية توليد ونقل وتوزيع الطاقة الكهربائية وإيصالها إلى المستهلك بشكل آمن وموثوق تتم عبر نظام القدرة الكهربائي.

يتألف نظام القدرة الكهربائي من ثلاثة أجزاء أساسية وهي: محطات التوليد ونظام النقل ونظام التوزيع الكهربائي سنعرضها تباعاً (الشكل 2-1).



الشكل (2-1): بنية نظام القدرة الكهربائي التقليدي

نبدأ بمحطات التوليد التي تحول الطاقة بمختلف أشكالها إلى طاقة كهربائية، وتصنف تبعاً لمصادر الطاقة الأولية إلى: محطات حرارية تستخدم الطاقة الكيميائية المخزنة في الوقود الأحفوري (الفحم - النفط - الغاز) بعد تحويلها إلى طاقة حرارية، محطات نووية تستخدم الطاقة الناجمة عن المفاعلات الذرية، محطات مائية تعتمد على طاقة سقوط مياه السدود والشلالات الطبيعية لتدوير العنفات المائية ومن ثم تحويلها إلى طاقة كهربائية.

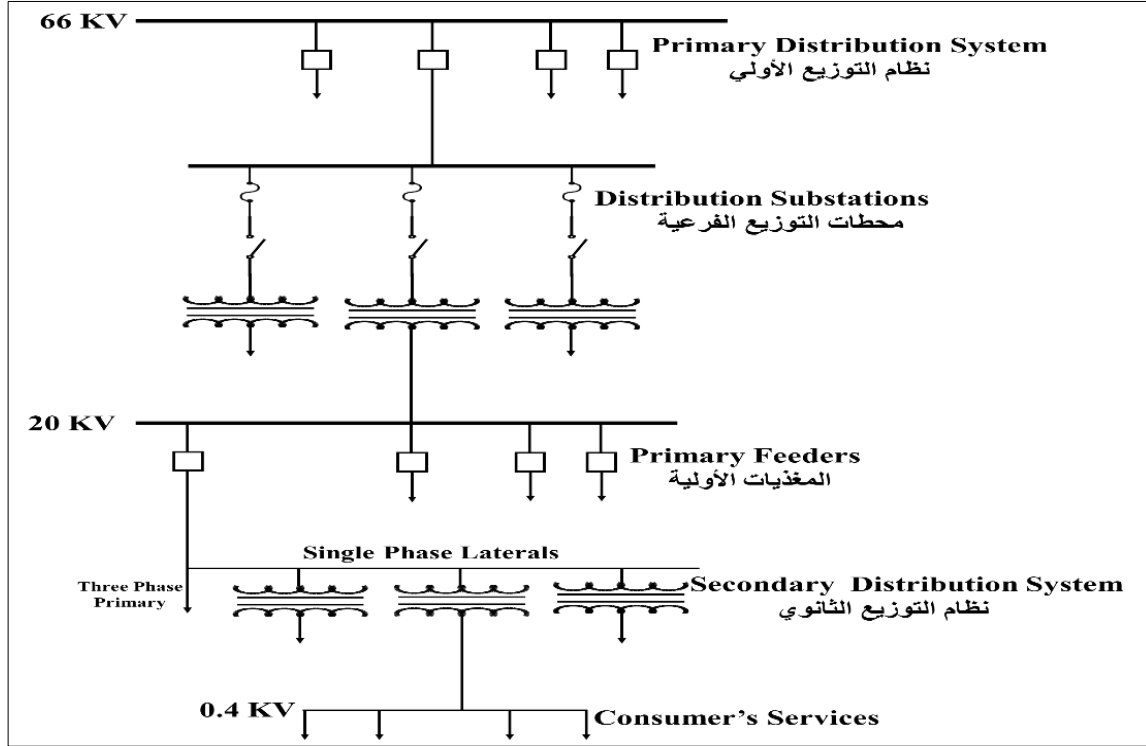
يتم الربط بين محطات التوليد ونظام النقل عبر محطات تحويل رافعة للجهد تقوم برفع توتر التوليد إلى (230 KV أو 400 KV في سوريا) بهدف التقليل من هبوطات الجهد والضياعات نتيجة نقل الطاقة الكهربائية لمسافات شاسعة. يتم بعد ذلك نقل الطاقة الكهربائية عبر شبكة من خطوط الجهد العالي إلى محطات التوزيع التي تقوم بدورها بتخفيض الجهد إلى سويات مناسبة لتوزيعه عبر شبكات الجهد المتوسط والمنخفض إلى المستهلكين (Sanchez, 2016).

بعد المقدمة العامة لبنية نظام القدرة الكهربائي سيتم التركيز في هذا الفصل على نظام التوزيع الكهربائي، والمحطات الكهربائية الفرعية التقليدية ومكوناتها في مستوى توتر التوزيع، وإدماج التوليد الموزع مع نظام التوزيع الكهربائي.

2-1-1- نظام التوزيع الكهربائي:

يمثل نظام التوزيع الكهربائي الجزء الأخير من نظام القدرة المسؤول عن عملية إيصال الطاقة الكهربائية إلى الأحمال. يتألف هذا النظام من مجموعة من المعدات والتقنيات المصممة لتوفير الكهرباء بكفاءة وموثوقية عالية. يشمل هذا النظام على المحطات الفرعية (Substation) التي تلعب دوراً حيوياً في تحويل وتوزيع الطاقة الكهربائية، والمحولات التي تستخدم لتخفيض الجهد من سويات النقل إلى سويات التوزيع، والخطوط الكهربائية لنقل الطاقة من المحطات الفرعية إلى المستهلكين وغالباً ما تكون هذه الخطوط هوائية في المناطق الريفية وكابلات أرضية في المدن، إضافة إلى أجهزة الحماية والتحكم للحماية من الأعطال ومراقبة الأداء والتحكم في عملية نقل الطاقة الكهربائية.

يقسم نظام التوزيع الكهربائي إلى: نظام توزيع أولي (Primary Distribution System) - و نظام توزيع ثانوي (Secondary Distribution System). (الشكل 2-2).



الشكل (2-2): مخطط الخط الواحد لنظام التوزيع الكهربائي (حمزة، 2010)

تشكل محطات التوزيع الفرعية الأولية العنصر الأول من نظام التوزيع حيث يقوم المحول الخافض للجهد فيها بتخفيض سوية جهد النقل إلى قيمة مناسبة لخطوط التوزيع الأولية.

تنتشر المغذيات الأولية (Primary Feeders) عبر منطقة الاستهلاك المغذاة بواسطة المحطة الفرعية، تتفرع واحدة أو أكثر من الخطوط المغذية وتمتد حتى تصل إلى محطات التوزيع الفرعية الثانوية (مراكز التحويل) الخافضة للجهد (MV/LV)، والتي تكون مسؤولة عن إجراء التخفيض النهائي للجهد للحصول على مستوى جهد مناسب (مثل 400 V(3Φ) أو 230V(1Φ) (حمزة، 2010).

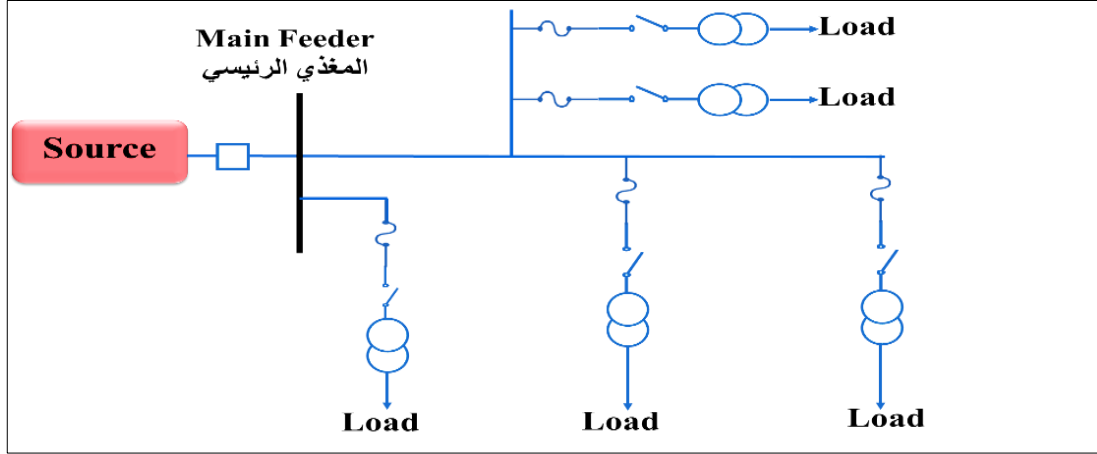
2-1-1-1-2 بنى نظام التوزيع الكهربائي:

يتم تغذية الأحمال الكهربائية وفق نظام توزيع حلقي أو شعاعي تبعاً لأهمية الأحمال وطبيعتها.

1- نظام التوزيع الشعاعي (Radial Distribution System):

يعتبر هذا النظام الأبسط والأكثر شيوعاً إذ تتفرع الخطوط المغذية من نقطة مركزية مثل المحطة الفرعية وتنتشر منها مثل فروع الشجرة لتغذية المستهلكين.

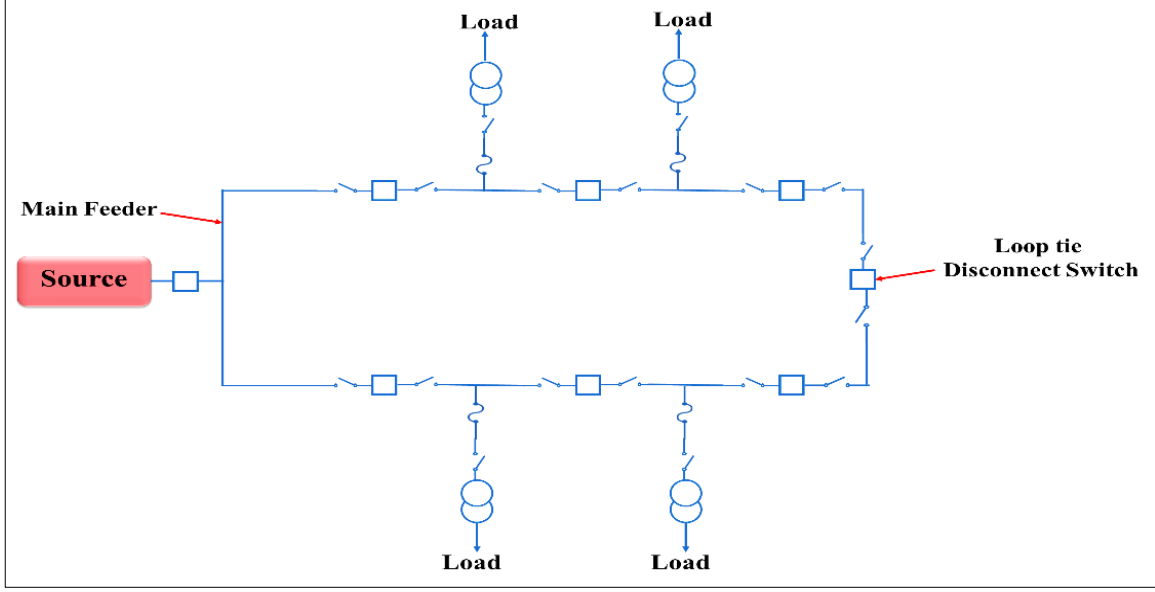
وعلى الرغم من أن هذا النظام يمتاز ببساطة التصميم وتكلفة الإنشاء المنخفضة مقارنةً بالنظم الأخرى إلا أنه يعاني من بعض العيوب مثلاً حدوث أي خلل في الخط المغذي الرئيسي سيؤدي إلى انقطاع التغذية عن جميع المستهلكين المتصلين بهذا الخط (Mokryani,2022). (الشكل 2-3).



الشكل (2-3): نظام التوزيع الشعاعي

2- نظام التوزيع الحلقي (Ring Distribution System): يستخدم هذا النوع من النظم لتحسين الموثوقية واستمرار التغذية الكهربائية للمناطق ذات الكثافة السكانية العالية أو المناطق المتضمنة أحمال حرجية مثل المستشفيات والمناطق التجارية. يتم تصميمها بحيث تتم تغذية شبكة الجهد المنخفض عبر محولين أو أكثر، يتغذى كل منها عبر خط مغذي مختلف، فتتشكل بذلك حلقة مغلقة تبدأ من قضبان تجميع المحطة الفرعية وتمتد عبر المنطقة المغذاة من نظام التوزيع لتعود إلى المحطة الفرعية.

تمتاز نظم التغذية الحلقية بالمقارنة مع أنظمة التوزيع الشعاعية بتحسين جودة الطاقة وبموثوقيتها العالية إضافةً إلى إمكانية التوسع لإضافة محطات فرعية أو محولات جديدة لتلبية الطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية، لكن كلفة إنشائها أعلى (Mokryani,2022). (الشكل 2-4).



الشكل (2-4): نظام التوزيع الحلقي

2-1-2- المحطات الكهربائية الفرعية في مستوى توتر التوزيع تصنيفها ومكوناتها:

تلعب محطات التوزيع الكهربائية دوراً حيوياً في نظام القدرة الكهربائي، حيث تعتبر الحلقة الرئيسية التي تربط بين نظام النقل الكهربائي عالي الجهد والمستهلكين النهائيين. تتمثل الوظيفة الأساسية لهذه المحطات في تحويل الجهد الكهربائي من مستويات عالية إلى مستويات منخفضة تناسب الاستخدام المحلي والصناعي والتجاري. تضم محطات التوزيع الفرعية تجهيزات كهربائية تعمل بالتوترات العالية والمتوسطة، مثل القواطع، والمحولات الكهربائية، ومحولات القياس، وتجهيزات المراقبة والحماية والتحكم، وذلك لضمان التشغيل الآمن والفعال للشبكة الكهربائية.

2-1-2-1- تصنيف محطات التوزيع الكهربائية الفرعية:

تصنف محطات التوزيع الكهربائية بناءً على عدة معايير تشمل مستوى الجهد والموقع، وطريقة العزل، يُعد هذا التصنيف ضرورياً للمساعدة في عملية تصميم وتشغيل وصيانة المحطات بكفاءة وفعالية. وفيما يلي تصنيف

محطات التوزيع الكهربائية بناءً على المعايير المذكورة (الجابي، زيدان، 2016):

1- تصنيف محطات التوزيع الكهربائية بناءً على مستوى الجهد:

تقسم محطات التوزيع تبعاً لمستوى الجهد إلى أولية وثانوية، حيث تعمل محطات التوزيع الأولية عند التوترات (230/66/20 KV أو 66/20 KV أو 66/11 KV) وتستخدم هذه المحطات عادةً لتغذية محطات التوزيع الثانوية أو لتغذية الأحمال الكبيرة مثل المجمعات الصناعية الكبيرة. تقوم بالمقابل محطات التوزيع الثانوية بتحويل جهد شبكة التوزيع الرئيسية من جهد متوسط إلى جهد منخفض مناسب لتوزيع الكهرباء إلى المستهلكين النهائيين مثل المنازل والمؤسسات التجارية والصناعات الصغيرة.

2- تصنيف محطات التوزيع الكهربائية بناءً على الموقع:

- **المحطات الفرعية للمناطق الحضرية:** توجد هذه المحطات في المناطق الحضرية ذات الكثافة السكانية العالية، وغالباً ما تكون داخل مباني مغلقة لتقليل الضوضاء والتأثير البصري. تستخدم هذه المحطات عادةً الكابلات الأرضية لتوزيع الطاقة الكهربائية.

- **المحطات الفرعية للمناطق الريفية:** تكون عادةً أكثر بساطة في التصميم مقارنةً بالمحطات الحضرية. تستخدم هذه المحطات خطوط نقل هوائية لتوزيع الكهرباء عبر مسافات طويلة.

3- تصنيف محطات التوزيع الكهربائية بناءً على نوع العزل الكهربائي المستخدم بين تجهيزات المحطة:

- **المحطات الفرعية الخارجية:** تكون هذه المحطات مكشوفة ويستخدم فيها الهواء كوسط عازل بين التجهيزات. تتواجد مثل هذه المحطات عادةً في المناطق التي تتوفر فيها مساحة كبيرة .

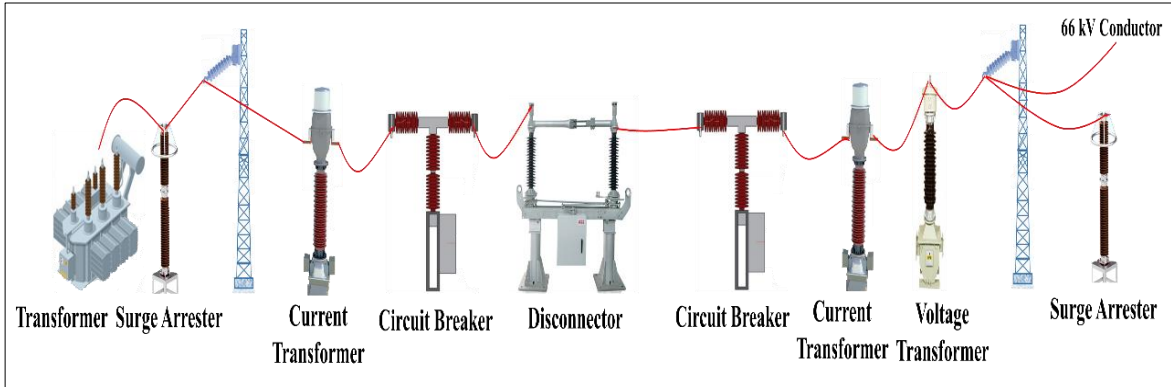
- **المحطات الفرعية الداخلية:** تكون هذه المحطات داخل مباني خاصة وتستخدم العزل الغازي أو الصلب. تُستخدم في المناطق التي تتطلب مستوى عالٍ من الحماية من الظروف البيئية أو في الأماكن ذات الكثافة العمرانية العالية أو في حال عدم توفر مساحات كبيرة لها.

2-2-1-2- المكونات الرئيسية لمحطات التوزيع الكهربائية الفرعية التقليدية:

a- مكونات محطات التوزيع الكهربائية الفرعية الأولية:

تقسم محطات التوزيع الكهربائية إلى عدة أجزاء منها جزء خاص بتجهيزات التوتر العالي، وجزء خاص بتجهيزات التوتر المتوسط، وآخر خاص بتجهيزات القيادة والتحكم والحماية والقياس. توضع التجهيزات المختلفة للمحطة ضمن مساحات خاصة تسمى كل منها بالخلية (Bay)، يخصص لكل عنصر من عناصر نقل وتحويل الطاقة في المحطة خلية خاصة. وتكون الخلايا الأساسية في أي محطة كما يلي:

- خلية الوصول: تدخل عبرها الخطوط الكهربائية إلى المحطة.
 - خلية المحولة: الخاصة بمحولة الاستطاعة.
 - خلية الخروج: تخرج منها الخطوط الكهربائية من المحطة.
 - خلية الربط (كوبلاج): يتم فيها ربط خلايا المحطة مع بعضها.
 - خلية القياس: يجري فيها قياس الجهد والتيار والتردد والطاقة الكهربائية الصادرة عن كل خلية من خلايا المحطة.
- يوضح الشكل التالي مقطعاً من خلية المحولة لمحطة توزيع (66/20 KV) بدءاً من الخط المغذي للمحطة ثم مفرغة الصواعق ومحولات القياس والقواطع الآلية وقاطع السكين وصولاً إلى المحولة.



الشكل (2-5): مقطع من خلية محولة (66/20 KV)

تحتوي كل خلية تبعاً لوظيفتها على تجهيزات كهربائية تستخدم لتأمين عمليات الوصل والفصل واستقبال الطاقة وتحمل التيار والجهد الذي يمر عبر المحطة.

b- مكونات محطات التوزيع الكهربائية الفرعية الثانوية:

تشكل محطات التوزيع الكهربائية الفرعية الثانوية آخر مرحلة من مراحل تحويل الجهد، إذ تقوم بتحويل جهد شبكة التوزيع الرئيسية المتوسط إلى جهد منخفض لتغذية التجمعات السكنية والمنشآت الصناعية الصغيرة والقرى وغيرها. تكون هذه المحطات إما محطات داخلية يمكن تركيبها ضمن حاويات معدنية مجمعة ومجهزة لتوصيل الخطوط الكهربائية لها (مراكز تحويل مسبقة الصنع)، أو يمكن تركيبها وتصميمها داخل مباني مخصصة، أو محطات خارجية هوائية تتركب على الأبراج المعدنية.

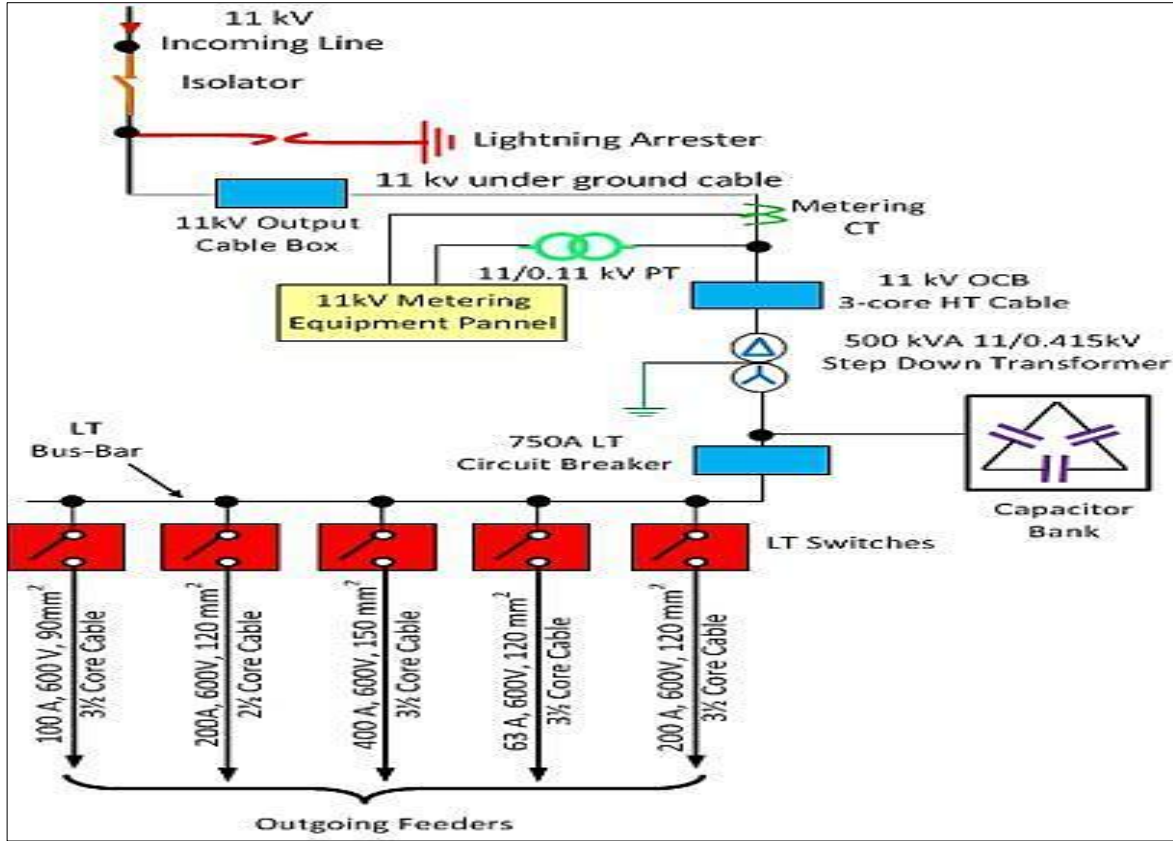
تتكون هذه المحطات من عدة خلايا أساسية وهي:

- 1- خلية الوصول:** تصل إليها الخطوط المغذية ذات الجهد المتوسط القادمة من محطات التوزيع الفرعية الأولية. تحتوي هذه الخلية على وحدة التغذية الحلقية (Ring Main Unit(RMU)) التي تستخدم لضمان استمرارية التغذية الكهربائية وتسهيل عمليات الصيانة وعزل الأعطال. تحوي هذه الوحدات على مدخل واحد للجهد وعدة مخارج وقاطع للمحولة وقواطع للدخول والخروج يتم تأريضها لضمان سلامة الأشخاص أثناء عمليات الصيانة.
- 2- خلية المحولة:** تحوي على محولة الاستطاعة الخافضة للجهد والأقسام المتممة لها المتمثلة بخزان المحولة وحماية بوخولز الغازية وعوازل العبور ومبدل الوضعيات (Tap Changer).

- 3- خلية الجهد المنخفض:** تتضمن هذه الخلية لوحة توزيع الجهد المنخفض والتي تحوي على القواطع الآلية والمنصهرات وأجهزة قياس التيار والجهد والتردد وعدادات القدرة الكهربائية.

- 4- لوحة المعوضات السعوية:** تستخدم لتحسين عامل الاستطاعة وذلك عبر مجموعة من المكثفات الموصولة على التسلسل أو على التفرع. يتم التحكم بدخول المكثفات وخروجها عبر مجموعة من الكونتاكتورات (Aliyari, 2018).

يوضح الشكل (2-6) مخطط الخط الواحد لمحطة توزيع فرعية ثانوية (11/0.4 KV).



الشكل (2-6): مخطط الخط الواحد لمحطة توزيع فرعية ثانوية (11/0.4 KV)

2-1-3- نظم الحماية لمحطات التوزيع الكهربائية الفرعية:

تعد نظم حماية محطات التوزيع الكهربائية الفرعية من الركائز الأساسية لضمان استقرار وسلامة الشبكة الكهربائية، حيث تلعب هذه النظم دوراً هاماً في كشف الأعطال وعزلها بسرعة ودقة لمنع الأضرار الجسيمة التي قد تلحق بالتجهيزات ولتقليل فترة انقطاع التغذية عن المستهلكين.

يجب أن تتوفر مجموعة من الشروط لكي تحقق أنظمة الحماية الأهداف الموضوعة لها التي تتمثل بسرعة الاستجابة أي تقليل التأخير الزمني اللازم لفصل العطل، الانتقائية المتمثلة بتحديد العنصر المعطل بدقة وعزله

دون التأثير على بقية عناصر النظام الكهربائي، الموثوقية العالية لضمان عمل نظام الحماية بشكل صحيح دوماً، والحساسية أي أن تكون قادرة على العمل عند ظهور أي تغيرات بسيطة للكمية الكهربائية موضع المراقبة.

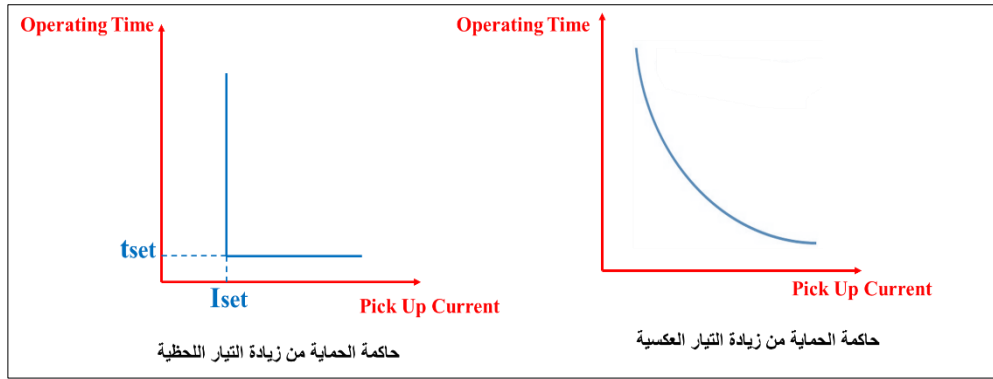
يتم حماية محطات التوزيع الكهربائية الفرعية بمجموعة كبيرة من الحماية المختلفة الوظائف، ويتم تغذيتها بالتيار أو التوتر أو التيار والتوتر معاً عن طريق محولات القياس، ونذكر منها:

1- المنصهرات (Fuses): تستخدم لحماية النواقل والكابلات من التيارات الزائدة الناتجة عن زيادة التحميل أو عن حالات قصر الدارة. تتألف المنصهرات من سلك معدني مصنوع من النحاس أو الألمنيوم أو الفضة ينصهر عند تجاوز التيار للحد المسموح به، ويتم حمايته بغلاف عازل مقاوم للحرارة مصنوع من السيراميك أو الزجاج. تمتاز المنصهرات بسرعة استجابتها وكلفتها المنخفضة وتوفرها باستطاعات قصر كبيرة مقارنة بالقواطع الآلية.

2- الحماية من زيادة التيار (Overcurrent Protection): تستخدم للحماية من زيادة التيار الناجمة عن حالات القصر أو عن حالات زيادة الحمولة. تتألف هذه الحماية من مجموعة من حواكم التيار تعمل عندما تزداد قيمة التيار في الدارة المحمية عن القيمة الحدية المعيرة عليها الحاكمة. تمتاز الحماية من زيادة التيار بالبساطة إذا احتاج إلى كمية كهربائية واحدة لكي تعمل لكنها غير انتقائية بمعنى أي زيادة بالتيار ناتجة عن قصر الدارة خارج المنطقة المحمية يؤدي إلى تشغيلها في الوقت الذي يجب ألا تعمل فيه لذلك يضاف إلى الحماية عناصر أخرى تؤمن الانتقائية مثل الحاكمت الزمنية. يمكن تصنيف حاكمت الحماية من زيادة التيار تبعاً لزمان تشغيلها إلى:

- حاكمت الحماية من زيادة التيار اللحظية (Instantaneous Overcurrent Relay): يتم تصميمها للحماية من التيارات العالية جداً الناجمة عن حالات القصر بحيث عند ازدياد التيار عن القيمة المعيرة عليها الحاكمة سيتم إعطاء أمر لفصل القاطع بصورة لحظية أي بتأخير زمني صغير جداً. تستخدم مثل هذه الحاكمت لحماية المحولات والباسبارات والخطوط المغذية.

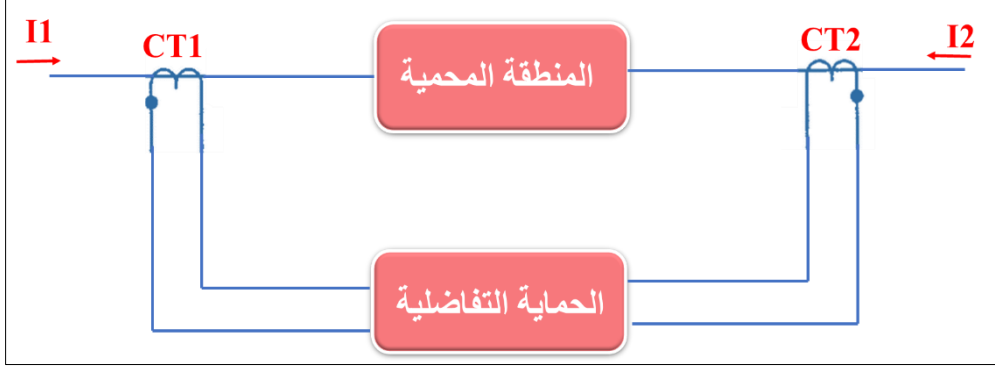
■ حاكمات الحماية من زيادة التيار الزمنية العكسية (Inverse Time Overcurrent Relay): النوع الثاني من حاكمات الحماية من زيادة التيار هي الحاكمات الزمنية العكسية. في هذا النوع زمن التشغيل يتناسب عكساً مع قيمة التيار بمعنى آخر كلما كانت قيمة تيار العطل أعلى فإن زمن الفصل أقل. يستخدم هذا النوع من الحاكمات في شبكات التوزيع الكهربائية (الجابي، زيدان، 2016).



الشكل (2-7): الخصائص الزمنية لحكمة الحماية من زيادة التيار

2- الحماية التفاضلية (Differential Protection):

تعدّ الحماية التفاضلية إحدى أكثر تقنيات الحماية كفاءة وفعالية المستخدمة في محطات التوزيع الكهربائية. تتميز هذه الحماية بقدرتها العالية على اكتشاف الأعطال في منطقة محددة من النظام الكهربائي، مثل المحولات أو الخطوط أو المولدات، وعزلها بسرعة لمنع انتشار العطل إلى الأجزاء الأخرى. يعتمد مبدأ عملها على مقارنة التيارات الكهربائية الداخلة والخارجة من المنطقة المحمية (الشكل 2-8). في الظروف الطبيعية، تكون هذه التيارات متساوية حسب قانون كيرشوف للتيارات، وتختلف عند حدوث عطل داخل المنطقة المحمية، مما يؤدي إلى تفعيل نظام الحماية. بناءً على ذلك تعدّ الحماية التفاضلية حماية انتقائية قادرة على التمييز بين الأعطال داخل المنطقة المحمية وخارجها (الجابي، زيدان، 2016).



الشكل (2-8): مبدأ عمل الحماية التفاضلية

- تشكل أنظمة الحماية مثل الحماية التفاضلية، الحماية المسافية، بالإضافة إلى نظم الحماية الاحتياطية التي تزيد من موثوقية النظام جزءاً حيوياً وأساسياً من البنية التحتية للشبكات الكهربائية، حيث تلعب دوراً محورياً في ضمان سلامة المعدات واستمرارية التغذية الكهربائية وحماية الأرواح. بالتالي، فإن الاستثمار في تطوير وتحسين نظم الحماية يعزز من كفاءة واستقرار الشبكات الكهربائية، مما يضمن تلبية احتياجات المستهلكين بفعالية وأمان.

2-2- التوليد في شبكات التوزيع الكهربائية - التوليد الكهربائي الموزع:

شهدت نظم القدرة الكهربائية تطوراً كبيراً منذ بداياتها الأولى، مع تغييرات جذرية في كيفية إنتاج ونقل وتوزيع الكهرباء. بدأ هذا التطور من محطات توليد مركزية ضخمة تعتمد على الوقود الأحفوري، مثل الفحم والنفط والغاز الطبيعي، ليصل حالياً إلى نظم أكثر تنوعاً تشمل مصادر الطاقة المتجددة وتكنولوجيا التوليد الموزع.

2-2-1- مفهوم التوليد الموزع:

يشير التوليد الموزع (Distributed Generation) إلى توليد الكهرباء من مصادر طاقة صغيرة ومتفرقة تقع بالقرب من مناطق الاستهلاك بدلاً من الاعتماد على محطات توليد مركزية ضخمة. يعتمد التوليد الموزع بشكل رئيسي على مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية، وطاقة الرياح، والكتلة الحيوية، إلى جانب بعض التقنيات الأخرى مثل محركات الديزل و التوربينات الغازية الصغيرة. على الرغم من عدم وجود تعريف قياسي

معتمد للتوليد الموزع حتى الآن، إلا أنَّ العديد من المنظمات الدولية قدمت تعريفات متعددة بناءً على موقع التوليد الموزع، وتصنيفاته، وأغراضه، ونمط تشغيله. فيما يلي بعض من هذه التعريفات:

❖ يعتبر معهد أبحاث الطاقة الأمريكي (Electric Power Research Institute (EPRI)) وحدات التوليد الصغيرة ذات الاستطاعة من بضعة KW إلى 50 MW ، أو أجهزة تخزين الطاقة التي يتم وضعها عادةً بالقرب من الأحمال أو قرب محطات التحويل لشبكة التوزيع و شبكة النقل الثانوي كمصادر للطاقة الموزعة.

❖ يعرف المجلس الدولي للنظم الكهربائية (International Council on Large Electric System (CIGRE)) التوليد الموزع بأنه يشمل وحدات التوليد ذات الاستطاعة (50-100 MW) التي ترتبط عادةً بشبكة التوزيع والتي لا يجري التخطيط لها أو التحكم بها مركزياً.

❖ يعتبر معهد مهندسي الكهرباء والإلكترونيات (Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)) بدوره التوليد الموزع أنه التوليد الكهربائي من قبل وحدات هي أصغر بشكل كافٍ من محطات التوليد المركزية بحيث يمكن وصلها بأية نقطة في منظومة القدرة.

❖ تعرف الوكالة الدولية للطاقة (International Energy Agency (IEA)) على أنه نوع من محطات التوليد المرتبطة بالشبكة عند مستوى جهد التوزيع لخدمة العميل في الموقع وفي نفس الوقت لتقديم الدعم لشبكة التوزيع الكهربائية. وتشمل التقنيات محركات الاحتراق الداخلي والتوربينات وخلايا الوقود والنظم الكهروضوئية.

❖ أما وزارة الطاقة الأمريكية (US Department of Energy (DOE)) فتعرف التوليد الموزع (DG) كمايلي: هو توليد أو تخزين كهربائي متوضع قرب المستهلكين. تتضمن النظم الموزعة المولدات المعتمدة على الكتلة الحيوية، محركات الاحتراق، النظم الكهروضوئية الحرارية والضوئية، خلايا الوقود، العنفات الريحية، العنفات الميكروية الغازية، مجموعات محرك/مولد، بالإضافة إلى تقنيات التخزين.

عادةً ما تكون المصادر الموزعة إما مستقلة أو مرتبطة بالشبكة العامة. توصل المولدات المرتبطة بالشبكة عادةً بشبكة التوزيع (Adefarati,2016 & حمزة،2010).

2-2-2-دواعي التوليد الموزع:

أصبح دمج التوليد الموزع في الشبكات الكهربائية ضرورة ملحة في ظل التحديات البيئية والتكنولوجية والاقتصادية التي يواجهها قطاع الطاقة. يعتمد هذا النهج على توليد الكهرباء من مصادر صغيرة وقريبة من نقاط الاستهلاك، مما يوفر العديد من الفوائد مقارنة بالنظم التقليدية المعتمدة على التوليد المركزي. سنشير إلى بعض الأسباب الرئيسية التي تدفع لإدخال التوليد الموزع إلى الشبكات الكهربائية:

- 1- تحسين كفاءة الطاقة وتقليل الفاقد الكهربائي الناتج عن نقل الطاقة لمسافات طويلة والذي يعد من أكبر التحديات التي تواجه الشبكات التقليدية ذات التوليد المركزي.
- 2- تعزيز الاستدامة البيئية من خلال استخدام مصادر الطاقة المتجددة وبالتالي التقليل من انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون وغازات الاحتباس الحراري الناجمة عن استخدام الوقود الأحفوري.
- 3- زيادة موثوقية الشبكة واستقرارها حيث يوفر التوليد الموزع مصادر طاقة احتياطية محلية تدعم الشبكة الرئيسية في حالات الطوارئ وفي أوقات الذروة، مما يزيد من مرونة واستقرار الشبكة الكهربائية وقدرتها على التكيف مع تغيرات الطلب على الطاقة.
- 4- يؤدي إشراك المستهلكين والمجتمعات المحلية في عملية إنتاج الطاقة إلى خلق نظام تفاعلي يشجع على المشاركة الفعالة في إدارة الطاقة كما يساهم في دعم الاقتصاد المحلي للمجتمعات.
- 5- تقليل التكاليف على المدى الطويل من خلال تخفيض تكاليف نقل وتوزيع الطاقة وتقليل الحاجة لبناء بنية تحتية لنقل وتوزيع الطاقة لمسافات طويلة.

2-2-3- تأثير التوليد الموزع على نظام القدرة الكهربائية:

ينتج عن إدخال التوليد الموزع في نظام التوزيع تأثيرات فنية على الشبكة الكهربائية متعددة الجوانب ومتغيرة تبعاً للظروف المحلية وخصائص النظام الكهربائي ومن هذه التأثيرات:

2-2-3-1- التأثير على نظام الحماية:

ينتج عن إدخال التوليد الموزع العديد من التأثيرات على نظام الحماية للشبكة الكهربائية، مما يتطلب إعادة تصميم نظم الحماية حتى تكون قادرة على التعامل معه وضمان فصل النظام في حال حدوث الأعطال فيما يلي بعض من هذه الآثار:

■ تغيير اتجاه جريان الاستطاعة مع وجود التوليد الموزع يتطلب تعديل إعدادات تجهيزات الحماية التقليدية، كما أن زيادة سعة القصر للشبكة مع وجود التوليد الموزع تتطلب استبدال القواطع الآلية حتى تكون قادرة على تحمل تيارات قصر أعلى.

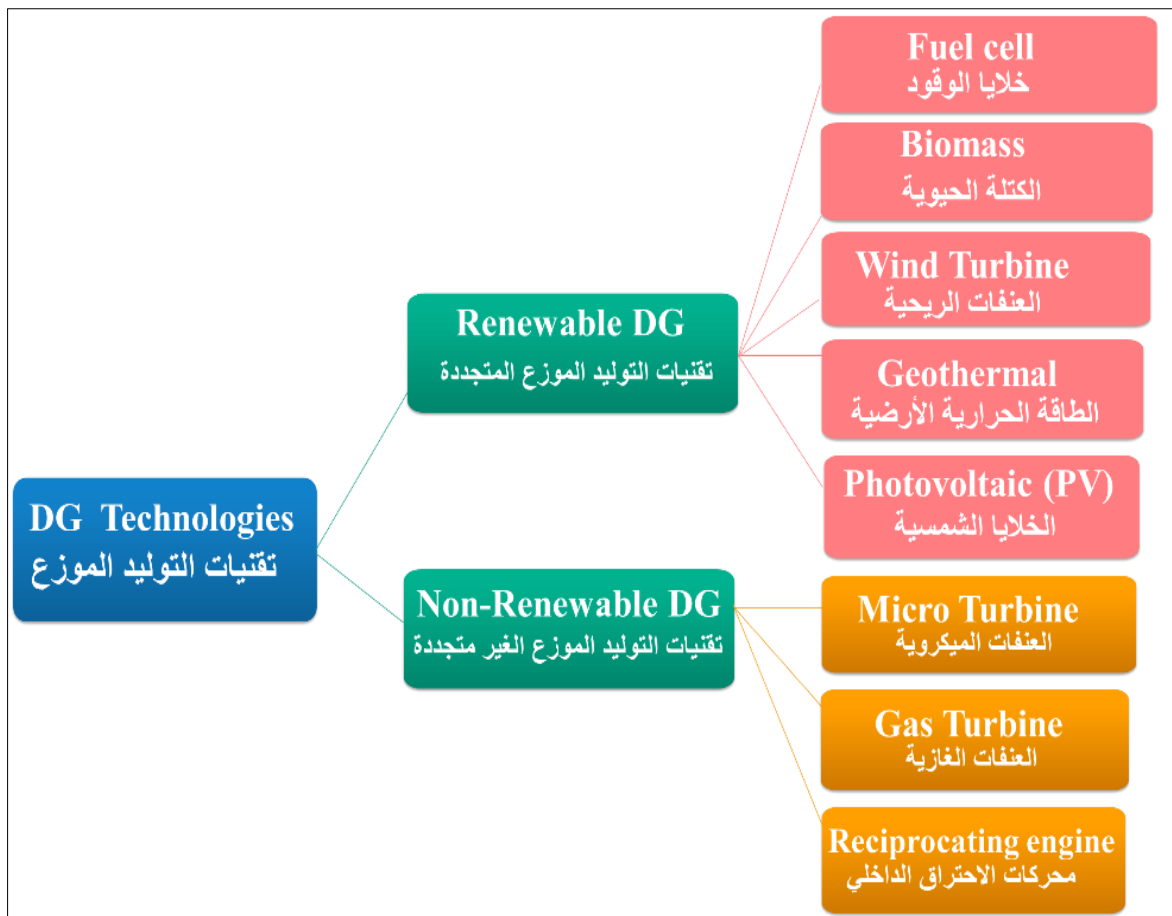
■ تصبح عملية إعادة الإغلاق الآلي (auto-reclosing) عند وجود التوليد الموزع أكثر تعقيداً بحيث يؤدي استمرار التوليد الموزع في العمل بعد حدوث العطل إلى عدم استقرار في النظام عند محاولة إعادة الإغلاق.

■ يمكن أن يكون هناك صعوبة في اكتشاف فقدان مصدر التغذية الرئيسي مما يتسبب فيما يعرف بالجزيرة (Islanding)، حيث تستمر أجزاء من الشبكة بالعمل بشكل معزول عن الشبكة الرئيسية لذلك نحتاج إلى حاكمة مهمتها اكتشاف فيما إذا أصبح المولد الموزع المصدر الوحيد لتغذية الشبكة وتفعيل إخراجها من الخدمة.

يتطلب التغلب على هذه التحديات تحسينات في تصميم نظم الحماية، بما في ذلك استخدام تقنيات الحماية الرقمية الذكية (smart digital protection) والتنسيق الأفضل بين الأجهزة، وتطوير بروتوكولات حماية خاصة بالتوليد الموزع (Dulu et al,2013).

2-2-4- تقنيات التوليد الموزع:

تصنف تقنيات التوليد الموزع إلى تقنيات متجددة وتقنيات غير متجددة وتقنيات هجينة (الشكل 2-9). تشمل تقنيات التوليد الموزع التقليدية أو الغير متجددة العنفات الميكروية، والعنفات الغازية، ومحركات الاحتراق الداخلي. أما التقنيات المتجددة فتضم النظم الكهروضوئية، العنفات الريحية، طاقة باطن الأرض الحرارية، الكتلة الحيوية، بالإضافة إلى أجهزة تخزين الطاقة مثل خلايا الوقود (L'Abbate,2007).



الشكل (2-9): تقنيات التوليد الموزع

- الخاتمة:

نستخلص بعد استعراض بنية نظام القدرة الكهربائي التقليدي ومحطات التوزيع الفرعية التقليدية ومكوناتها ونظم حمايتها، ومفهوم التوليد في شبكات التوزيع والأسباب التي دعت إليه وتقنياته المختلفة، أن نظام القدرة التقليدي والتوليد الموزع يمثلان نهجين مختلفين في توفير الطاقة الكهربائية، كل منهما له مزاياه وتحدياته الخاصة. يتميز النظام التقليدي بالتوليد المركزي في محطات كبيرة تنقل الطاقة عبر شبكات توزيع واسعة النطاق، مما يتيح توفير كميات كبيرة من الطاقة بكفاءة عالية. هذا النهج يناسب البنية التحتية الكبيرة والمناطق ذات الكثافة السكانية العالية، لكنه يواجه تحديات في النقل على مسافات طويلة.

يعتمد التوليد الموزع بالمقابل على توليد الطاقة بالقرب من نقاط الاستهلاك، يتيح هذا النهج تعزيز الاستدامة البيئية بتقليل الانبعاثات الضارة وتحسين كفاءة استخدام الموارد الطبيعية.

الفصل الثالث

نظام التوزيع الكهربائي الحديث ومفهوم الشبكة الميكروية

- مقدمة:

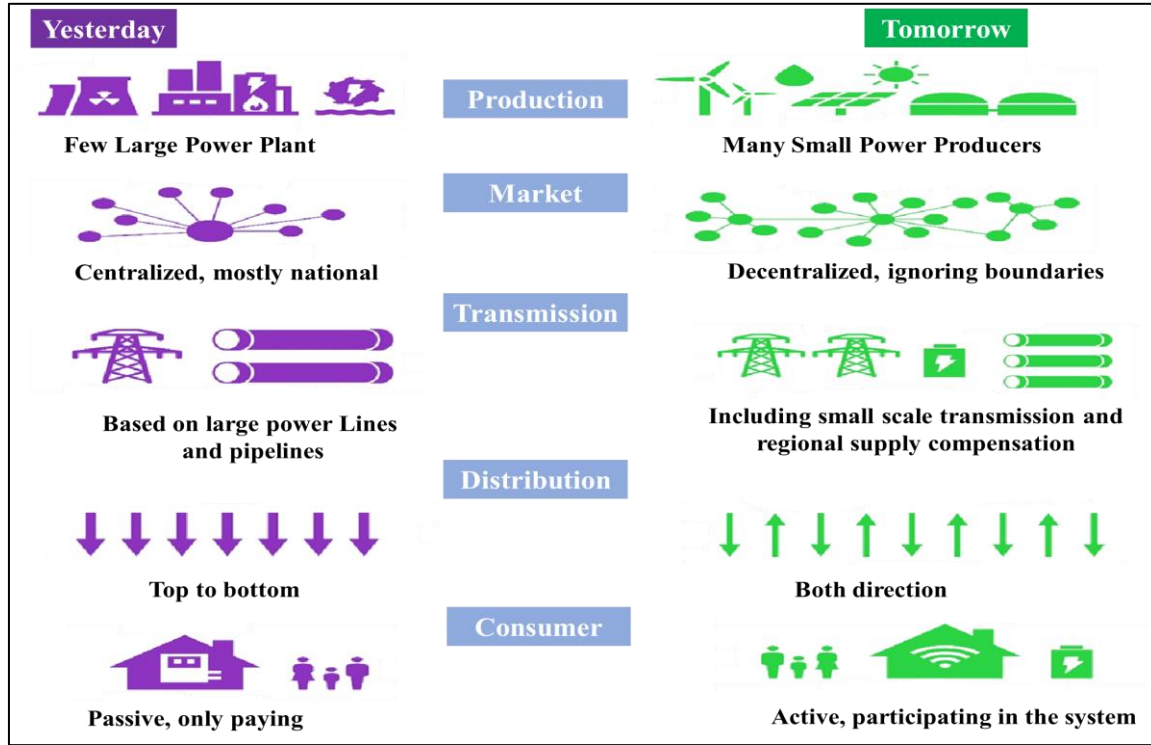
يستعرض هذا الفصل بدايةً عملية تطوير نظام التوزيع التقليدي إلى نظام أكثر ذكاءً، من ثم عرض مفهوم الشبكات الذكية ومزاياها، والتطور الذي طرأ على محطات التوزيع الفرعية ونظم حمايتها، إضافةً إلى عرض المواصفات القياسية IEC 61850 المستخدمة لبناء نظام الأتمتة للمحطات الفرعية الذكية، وأخيراً الحديث عن الشبكات الميكروية وأنظمة المزامنة لها ووظائف مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية.

3-1- التحول نحو نظام توزيع أكثر ذكاءً:

تم تصميم شبكات التوزيع الكهربائية التقليدية بحيث يكون تدفق القدرة فيها باتجاه واحد من محطات التوليد الكبيرة التي يتم فيها إنتاج الطاقة ثم نقلها عبر خطوط النقل و مراكز التوزيع إلى المستهلكين النهائيين. هذه الشبكات كانت تعتمد على البنية التحتية الثابتة والتقنيات القديمة، مما جعلها محدودة في القدرة على الاستجابة للتغيرات الديناميكية في الطلب على الطاقة.

شهدت نظم التوزيع في السنوات الأخيرة ومع التقدم التكنولوجي الكبير تطوراً كبيراً وخاصة في ظل الاستخدام الموسع لمصادر الطاقة المتجددة فتحول بعض المستخدمين من مستهلكين للطاقة (Consumers) إلى منتجين لها (Prosumers) حيث يمكنهم إنتاج الطاقة واستهلاكها وبيع الفائض منها إلى الشبكة، وبالتالي أصبح هناك توليد للطاقة عند مستويات الجهد المتوسط والمنخفض وتدفق للقدرة ثنائي الاتجاه فأصبح من الصعب على النظم التقليدية في ظل هذه التطورات إدارة الشبكة بسبب افتقارها للحساسات والعدادات الذكية والتجهيزات الرقمية ووسائل الاتصال (الشكل 3-1).

يتبين استناداً إلى هذه الأسباب ضرورة تطوير شبكات التوزيع التقليدية غير الفعالة إلى شبكات توزيع ذكية فعالة، من خلال الاعتماد على التجهيزات الرقمية الذكية وتطبيقات الذكاء الصناعي وتكنولوجيا الاتصالات والمعلومات لتحسين استقرار وموثوقية وكفاءة الشبكة الكهربائية (Aleo,2021).



الشكل (1-3): مقارنة بين الشبكات التقليدية الحالية والشبكات المستقبلية (Stockmar, 2016)

3-2- الشبكات الذكية:

برزت الشبكات الذكية في عصر التحول الرقمي والتقدم التقني، كحل مبتكر ومتكامل لإدارة وتوزيع الطاقة الكهربائية بفعالية وكفاءة أكبر. تمثل الشبكات الذكية الجيل الجديد من الشبكات الكهربائية التي تعمل على الإدارة الذكية للطاقة الكهربائية من خلال دمج البنية التحتية الحالية لشبكات النقل والتوزيع مع أحدث تقنيات الاتصالات والمعلومات. كما تهدف إلى تحقيق التوازن بين توفير طاقة كهربائية موثوقة واقتصادية وصديقة للبيئة، مع الحفاظ على مستويات عالية من الأمان والجودة. ولتحقيق ذلك، تحتاج الشبكات الذكية إلى التنسيق الفعال بين مختلف مكونات النظام الكهربائي، بما في ذلك عناصر توليد الطاقة، ونقلها، وتوزيعها، وصولاً إلى المستهلكين النهائيين

(Waleed et al, 2019).

3-2-1- متطلبات ومزايا الشبكات الذكية:

تتصف الشبكات الذكية بالعديد من الإيجابيات والمزايا سنعرض أبرزها:

- **التكيف والمعالجة الذاتية:** تمتاز الشبكات الذكية بقدرتها على الاستجابة السريعة للتغيرات الحاصلة أثناء التشغيل، إضافةً إلى قدرتها على تحديد الأعطال ومعالجتها بصورة ذاتية من خلال عزل المعدات التي حصل عليها العطل وإعادة تكوين النظام للحفاظ على استمرارية التغذية.
- **توفير الطاقة بجودة عالية:** من خلال الاعتماد على مصادرة طاقة متنوعة تلبى متطلبات التطبيقات المختلفة.
- **تقليل الضرر البيئي:** يؤدي الاستخدام الموسع لمصادر الطاقة المتجددة إلى تقليل انبعاثات غاز ثاني أكسيد الكربون وغازات الاحتباس الحراري الناجمة عن استخدام الوقود الأحفوري.
- **تفاعل المستخدمين:** زيادة مشاركة المستهلكين في عملية التوليد المحلي، وفي إدارة استهلاكهم للطاقة من خلال الحصول على بيانات فورية ومعلومات دقيقة عن كمية الطاقة المولدة والمستهلكة وأسعار الطاقة.
- **تحقيق التشغيل الأمثل وتحسين الكفاءة:** بالاعتماد على نظام أتمتة ذكي قادر على الربط بين مختلف عناصر النظام الكهربائي والتحكم بها في الزمن الحقيقي.
- يتطلب تحقيق هذه المزايا للشبكات الذكية مجموعة من العناصر والتقنيات لضمان تحقيق الأداء الأمثل والكفاءة والموثوقية. تتضمن المتطلبات الرئيسية للشبكات الذكية ما يلي:
- **البنية التحتية لشبكة الاتصالات:** ضرورة توفر حساسات ذكية لتتبع حالة الشبكة باستمرار، وشبكة اتصالات متقدمة لتمكين الاتصال في الزمن الحقيقي بين جميع عناصر الشبكة.
- **العدادات الذكية:** لتمكين المستهلكين من مراقبة استهلاكهم للطاقة والتحكم فيه وحقن الطاقة الزائدة المولدة في الشبكة بسعر معين.

■ **إدارة الأحمال:** تساعد البيانات التي توفرها العدادات الذكية في الإدارة الفعالة للأحمال، حيث يشكل الاستهلاك الساعي للطاقة الذي توفره العدادات العامل الرئيسي في تحديد عملية فصل أو وصل مصادر التوليد والأحمال ويمكن أن تتم هذه العملية بشكل آلي من خلال المتحكمات الذكية.

■ **الأمن السيبراني (Cyber Security):** ضرورة توافر بروتوكولات ونظم لحمايات البيانات المتبادلة بين مكونات الشبكة من الاختراق والهجمات السيبرانية.

■ **المحطات الفرعية الذكية:** تعد المحطات الفرعية الذكية من بين التوجهات الجديدة للشبكات الذكية بما تحتويه من تجهيزات متقدمة وتقنيات جديدة للاتصال والمراقبة والتحكم لإدارة كل عنصر من عناصر الشبكة بذكاء مما يساهم في تعزيز وتحسين استقرار الشبكة الكهربائية، وتحسين الاتصال بين المناطق التي تتواجد فيها مصادر التوليد ومناطق تواجد المستهلك، والمساهمة في تطوير سوق الطاقة (Waleed et al,2019).

3-2-2-المحطات الفرعية الذكية:

تلعب المحطات الفرعية دوراً حيوياً في شبكات الطاقة الكهربائية، حيث تعمل كنقاط ربط بين مستويات الجهد المختلفة وتنظم تدفق الطاقة الكهربائية من محطات التوليد إلى مناطق الاستهلاك. أصبح من الضروري مع تطور الشبكات الذكية تحديث وتطوير المحطات الفرعية لتلبية متطلبات الشبكات الكهربائية الحديثة والمعقدة.

تعد المحطات الفرعية الذكية الحجر الأساس لإنشاء شبكات ذكية قوية، حيث اقترح مفهوم المحطة الفرعية الذكية بالتزامن مع ظهور مفهوم الشبكة الذكية، وشهدت المحطات الفرعية الذكية تطوراً مستمراً يهدف إلى تحسين كفاءة وأمان شبكات الطاقة الكهربائية. إذ بدأت هذه المحطات كتحسينات على المحطات التقليدية ثم مع تطبيق المعيار IEC 61850 وتطوير تقنيات جديدة في أجهزة الاتصالات والمعلومات والتحكم والقياس، أصبحت المحطات الفرعية الذكية تركز على مشاركة المعلومات، والتشغيل البيئي، ودمج التطبيقات المختلفة في منصة رقمية موحدة، والاعتماد على أجهزة ذكية متقدمة وموثوقة ومدمجة وصديقة للبيئة ومنخفضة الانبعاث الكربوني.

تشمل التحسينات الرئيسية في المحطات الفرعية الذكية تطوير المعدات الأساسية، تطوير أنظمة الحماية والتحكم على مستوى المحطة، التشخيص الذاتي للمعدات، ونظم التشغيل والصيانة الذكية. تساهم هذه التحسينات في تطوير وتحسين كفاءة الشبكات الذكية، مما يساهم في تحسين موثوقية وأمان النظام الكهربائي بشكل عام.

تقوم المحطات الفرعية الذكية بالإضافة إلى الوظائف الأساسية المتمثلة بجمع المعلومات والقياس والتحكم والحماية والمراقبة، بالعديد من الوظائف المتقدمة مثل التحكم الآلي بالشبكة الكهربائية في الوقت الحقيقي، والتنظيم الذاتي، واتخاذ القرارات للتفاعل مع المحطات الفرعية المجاورة ومراكز التحكم والتنسيق (Yuan et al,2019).

3-2-2-1- التقنيات الرئيسية للمحطات الفرعية الذكية:

3-2-2-1-1- المواصفات القياسية IEC61850:

تعززت إمكانيات التواصل بين الأجهزة الذكية في السنوات الأخيرة نتيجة لتطور تقنيات النظم المدمجة وتقنيات الاتصال، مما أدى إلى دمج وظائف الحماية، والتحكم، والقياس، وجمع البيانات، والتخزين تدريجياً. كان لكل مصنع في الماضي بروتوكولات الاتصال الخاصة به، وعادةً ما تحتوي المحطة الفرعية التقليدية على بروتوكولات من مصانع مختلفة، وتتبنى مئات البروتوكولات المختلفة في نظام الطاقة. ولأسباب تجارية كانت بروتوكولات المصانع سرية مما يعيق تكامل النظم ويحد من البدائل المتاحة للعملاء، ويزيد من تكلفة النظم، ويستدعي أيضاً استخدام محولات بروتوكولات ضمن المحطة الفرعية عند اعتماد بروتوكولات مختلفة مما يعيق سلامة واستقرار الشبكة الكهربائية.

ولحل هذه المشكلات ظهر بروتوكول الاتصالات الموحد الدولي للمحطات الفرعية IEC 61850 الذي يهدف إلى تحقيق التوافق والتكامل والتشغيل البيئي وتبادل وتشارك المعلومات بين مختلف عناصر المحطة الفرعية (Yuan et al,2019).

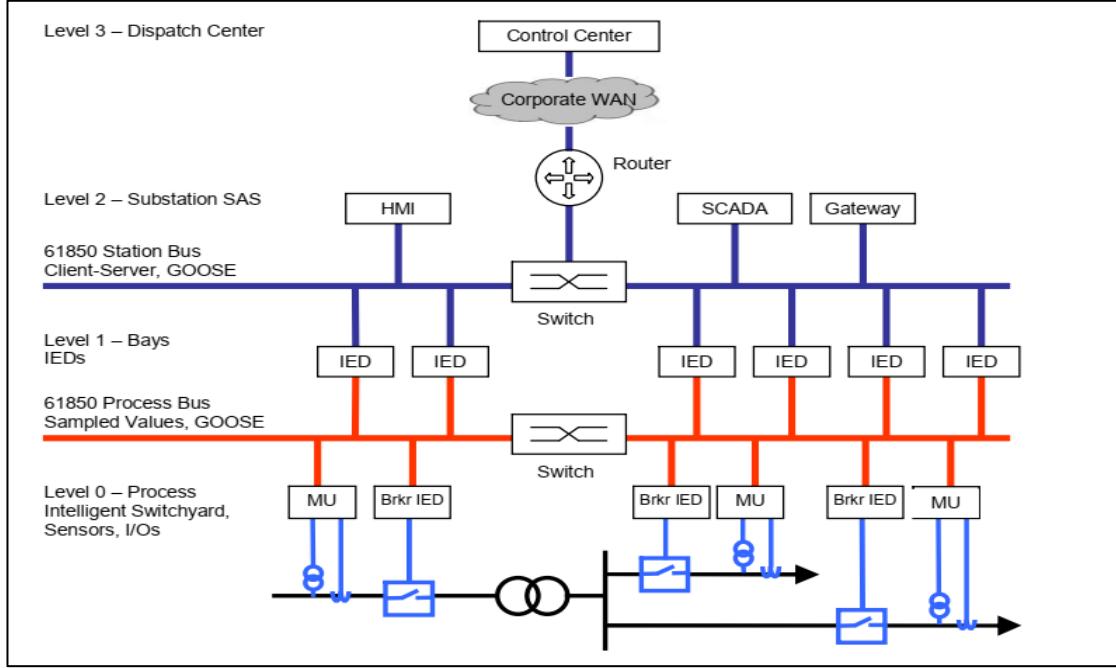
تقدم المواصفات القياسية IEC61850 عدة مزايا تجعلها مؤثرة ومهمة في مجال الأتمتة الكهربائية، من بين هذه المزايا:

1- توفير لغة لتوصيف تجهيزات المحطة مبنية على النمذجة غرضية التوجه (Object-Oriented Modeling) تتيح نمذجة وظائف نظام الأتمتة للمحطة، وتوفر واجهات واضحة للتعامل مع الأجهزة والبيانات داخل المحطة مما يسهل عمليات الإدارة والصيانة.

2- نمذجة المعلومات (Information Modeling): توفير جملة معايير ودلالات وظيفية للبيانات التي يتم تبادلها بين الأجهزة والنظم المختلفة لتحقيق قابلية التشغيل البيئي.

3- التفاعل بين التجهيزات الموجودة ضمن المحطة وإرسال وتبادل المعلومات مع الأخذ بالاعتبار زمن الإرسال والموثوقية والأمان.

واستناداً إلى هذه المواصفة القياسية سيتم توصيف وظائف نظام الأتمتة للمحطات الفرعية الذكية المتمثلة بوظائف القياس والتحكم والمراقبة والحماية لكامل المحطة وللخطوط المغذية لها، وإدارة البرمجيات ونظام الاتصال وتقسيمها منطقياً إلى ثلاثة مستويات وظيفية. المستوى الأول هو مستوى التشغيل (Process Level) يحتوي على التجهيزات الحقلية مثل القواطع ومحولات القياس. المستوى الثاني هو مستوى الخلية (Bay Level) يحوي على تجهيزات إلكترونية ذكية (IEDs) تستخدم للحماية والتحكم. المستوى الثالث هو مستوى المحطة (Station Level) المستوى الخاص بعمليات المراقبة والتحكم عن بعد (الشكل 3-2).



الشكل (2-3): بنية نظام الأتمتة للمحطات الفرعية الذكية

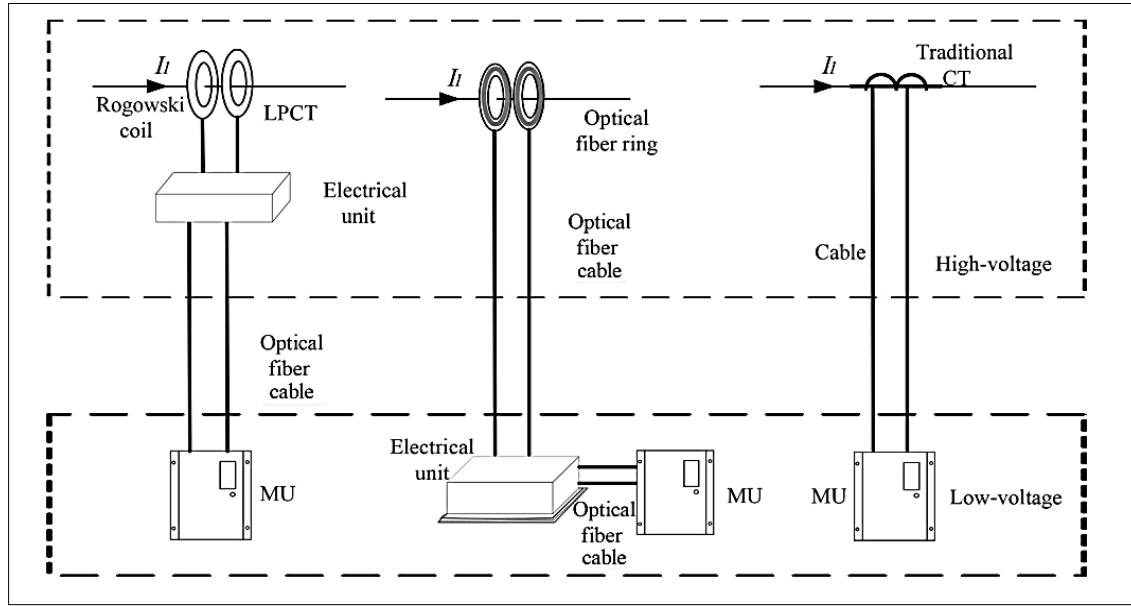
استناداً إلى المواصفات القياسية IEC 61850 (McGhee,2010)

تقوم وحدات الدمج (MU) وفقاً للمخطط السابق بالربط بين التجهيزات الحلقية (محولات توتر وتيار ...) مع شبكة قضيب تجميع التشغيل (Process Bus) حيث تقوم هذه الوحدات بتحويل أوامر القياسات وحالات التشغيل وإشارات التحكم والأوامر إلى شكل مناسب للإشارات ضرورية ومتوافقة مع عمل التجهيزات الحلقية. تتعامل (IED) مع المعلومات المستقبلية من (MU) وقضيب تجميع المحطة (Station Bus) وتولد الأوامر وإشارات التحكم. تعمل (Human Machine Interface HMI) كوسيلة إظهار وإعطاء بعض الأوامر بالنسبة لمشغل المحطة. يمكن للمعلومات في المحطة أن ترسل عبر جهاز الاتصال عن بعد إلى وحدة المراقبة والتحكم عن بعد كمثال على هذا مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية (MGCC) (Palizban & Farhangi,2011).

3-2-2-2-1-2- تقنيات القياس الجديدة:

تعد محولات القياس من العناصر الأساسية المستخدمة في المحطات الفرعية إذ تعمل على قياس الجهد والتيار وإعطاء هذه الإشارات إلى تجهيزات التحكم وحماكات الحماية. سيتم في المحطات الفرعية الذكية إما وصل محولات القياس الكهرومغناطيسية التقليدية مع وحدات الدمج (MU) حتى تتمكن من التفاعل مع باقي تجهيزات

المحطة الرقمية، أو استبدالها بمحولات قياس الكترونية أو المحولات التي تستخدم الحساسات البصرية للتخلص من مشاكل العزل والإشباع المغناطيسي الموجودة في المحولات التقليدية وبالتالي زيادة موثوقية ودقة نظم القياس (الشكل 3-3).

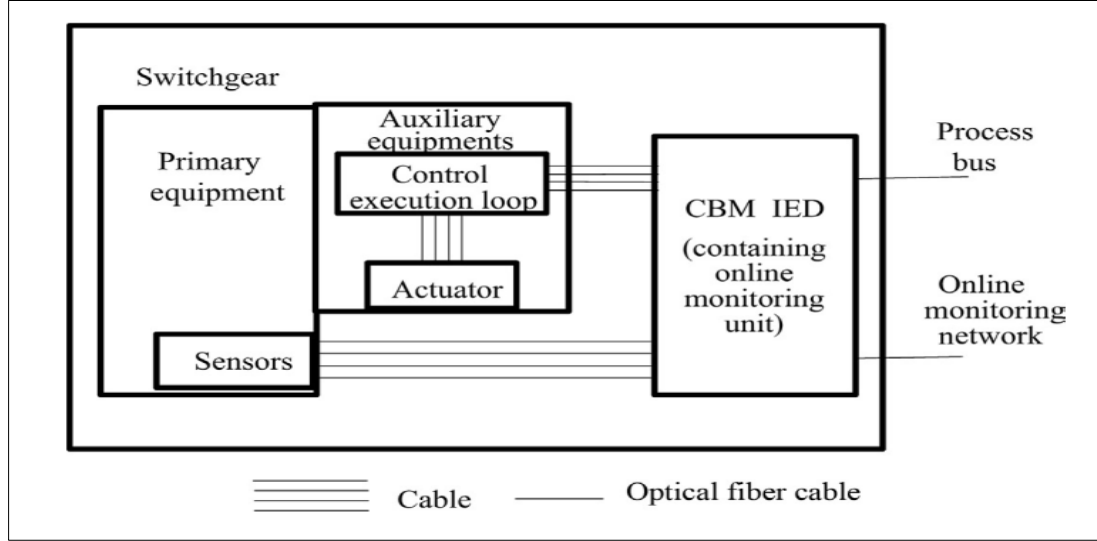


الشكل (3-3): التشكيلات المختلفة لمحولات قياس التيار في المحطات الفرعية الذكية (Yuan et al, 2019)

3-1-2-2-3- التحديدات الأولية الذكية:

تعد مجموعة القواطع الكهربائية (Switchgear) من الأجهزة الأساسية في نظم النقل والتوزيع الكهربائية. تقسم إلى تجهيزات أولية مثل محولة القدرة ومحولات القياس والقواطع الآلية وقواطع السكين، وتجهيزات ثانوية للقيام بعمليات المراقبة والتحكم. رافق تطور التجهيزات الالكترونية وزيادة متطلبات الأتمتة والوثوقية الانتقال من مجموعة القواطع الكهربائية التقليدية إلى مجموعة القواطع الكهربائية الذكية (Intelligent Switchgear) التي تقوم بنفس وظائف التشغيل التقليدية مضافاً لها وظائف المراقبة ومعالجة الأعطال وذلك من خلال إضافة تجهيزات التحكم ذات الأداء العالي والمجهزة بحساسات ومعدات الكترونية ذكية.

من الأمثلة على عملية تطوير الأجهزة الأولية تطوير القاطع الآلي من خلال إضافة تجهيزة إلكترونية ذكية لإدارة عمل القاطع الآلي (Circuit Breaker Management IED) تستخدم لتحصيل المعلومات الخاصة بالقاطع الآلي والتحكم به في الزمن الحقيقي (الشكل 3-4).



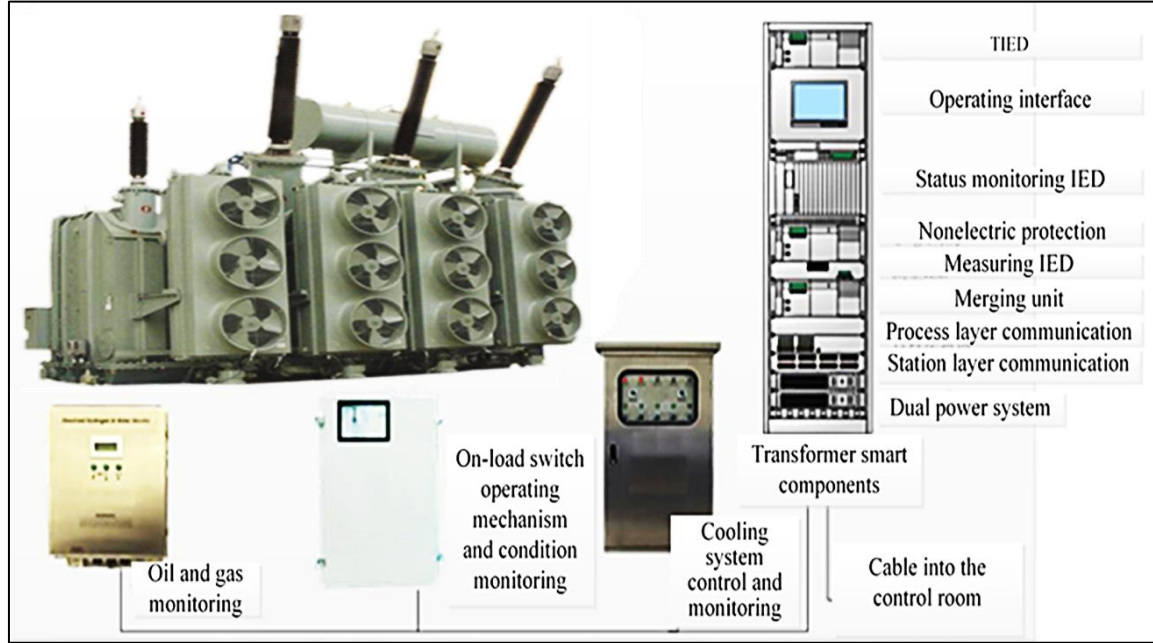
الشكل (3-4): توصيل وحدة إدارة عمل القاطع الآلي (Yuan et al,2019)

3-2-2-4-1-2-3- تجهيزات المراقبة الذكية لحالة المعدات الأولية:

يترافق تقادم التجهيزات والمعدات الكهربائية للمحطة وظهور عيوب فيها غالباً بعلامات مميزة تظهر على شكل تغيرات فيزيائية وكيميائية أو تغير في قيم البارامترات الكهربائية. في المحطات التقليدية كانت تتم عمليات صيانة دورية منتظمة للمحولات والقواطع وغيرها من التجهيزات وإجراء اختبارات للحصول على المعلومات اللازمة لتحديد فيما إذا كانت المعدات ستستمر بالعمل أم لا. هذا النهج الوقائي على الرغم من فعاليته إلا أنه يتطلب قطع التيار الكهربائي لفترات طويلة.

لذا مع تقدم التكنولوجيا واستخدام الحساسات الذكية ونظم الاتصالات والحوسبة يمكن مراقبة حالة المعدات بشكل مستمر ومعالجتها وتحليلها بواسطة نظام خبير قادر على اكتشاف الفشل المحتمل في وقت مبكر، وتحديد العمر المتبقي للتجهيزات مما يساهم في تحسين وثوقية المحطة. من الأمثلة على أنظمة المراقبة الذكية نظام مراقبة

محولات القدرة كونها من أهم تجهيزات المحطة وأغلاها ثمناً إذ يشمل هذا النظام على نظام مراقبة العزل، ومراقبة درجة حرارة الملفات، مراقبة الانفراغات الجزئية، وغيرها (الشكل 3-5).

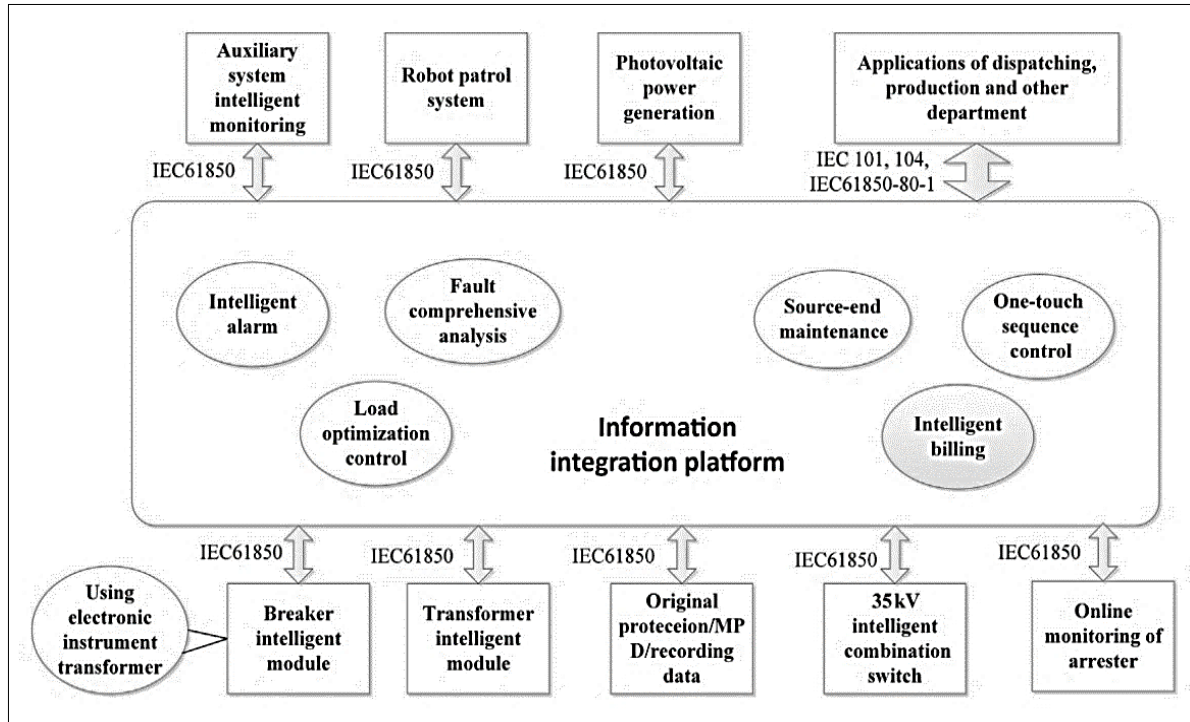


الشكل (3-5) نظام المراقبة الذكي لمحولة القدرة الكهربائية (Yuan et al, 2019):

3-2-2-1-5- منصة المعلومات المتكاملة والتطبيقات المتقدمة:

توفر منصة تكامل المعلومات البرمجية الرقمية ضمن المحطة واجهات وصول موحدة للمعلومات للتطبيقات الذكية والنظم البعيدة من خلال جمع بيانات نظام التحكم والمراقبة الإشرافية (SCADA) للمحطة الفرعية بأكملها، وبيانات القياس، وبيانات المراقبة عبر الإنترنت. تحل المنصة مشاكل تعدد نظم التحكم في المحطات وواجهات الاتصال، وضعف مشاركة البيانات وتطبيقها بشكل شامل، وتلبي متطلبات المحطات الذكية في رقمنة المعلومات، و تكامل الوظائف، و تصوير الحالة (الشكل 3-6).

يمكن تطوير وظائف متقدمة بناءً على منصة تكامل المعلومات مثل التحكم التتابعي بلمسة واحدة، والتنبيه الذكي والتحليل الشامل للأعطال، والفوترة الذكية، والتحكم الأمثل في الحمل، كما يلي:



الشكل (3-6): المنصة البرمجية لتكامل معلومات المحطة الفرعية الذكية (Yuan et al, 2019)

■ **التحكم التتابعي بلمسة واحدة:** يجمع نظام التحكم التتابعي بين التحكم المتسلسل بلمسة واحدة ونظام الفيديو عبر روبوت ذكي. إذ عندما يتم تشغيل أي جهاز من تجهيزات المحطة يتم توجيه الكاميرا نحو الجهاز ويتم تحديد حالته باستخدام تقنية التعرف على الصور ونقلها إلى نظام التحكم المتسلسل. يقوم النظام بتقييم حالة المعدات بشكل تكاملي استناداً إلى المعلومات التي تم جمعها من القياسات والمعلومات المسترجعة من نظام الفيديو لضمان التشغيل الموثوق.

■ **الإنذار الذكي والتحليل الشامل للأعطال:** يقوم هذا النظام بجمع المعلومات لحالات الإنذار السابقة وتشكيل قاعدة معرفية لنظام خبير يستطيع تشخيص الأعطال وتحديد موقعها ومعالجة الأعطال، بالإضافة إلى عرض أشكال الأمواج ونسبة التشوه التوافقي (THD) على واجهة مشغل المحطة (HMI).

■ **التحكم الأمثل في الأحمال:** يتم تضمين وحدة التحكم في جودة الجهد (Voltage Quality Control(VQC)) في برنامج نظام جهاز التحكم بالمحطة الفرعية عن بعد (Remote Devices). تستند البيانات في الزمن الحقيقي

وبارمترات التشغيل لخوارزمية (VQC) إلى منصة المعلومات المتكاملة للمحطة الفرعية إذ أن تشغيل هذه الخوارزمية يتم عن طريق نظام التحكم الأساسي للمحطة وذلك بعد تلقي قيمة جهد التشغيل والأوامر الأخرى من مراكز التحكم مثل مركز التحكم بالشبكة الميكروية.

3-2-2-2- حماية المحطات الفرعية الذكية:

تلعب المحطات الفرعية الكهربائية دوراً حيوياً في بناء شبكة كهربائية ذكية قوية وموثوقة وتوفير الطاقة بشكل مستدام، لذلك هناك حاجة متزايدة للتحكم في مختلف عناصر المحطات الفرعية الكهربائية وحمايتها ومراقبتها. ولتحقيق هذا الغرض تم إدخال بعض التطويرات التقنية في مجال الاتصالات ومعالجة البيانات خلال السنوات الأخيرة مما أتاح تضمين التقنيات الرقمية في أنظمة التحكم والحماية وتعزيز كفاءة وفعالية عمليات المحطات الفرعية.

كانت أنظمة الحماية في المحطات الفرعية التقليدية مبنية على أجهزة حماية كهروميكانيكية أو رقمية تعمل بشكل مستقل عن أنظمة التحكم والمراقبة. كان هذا يؤدي إلى تعقيدات في التنسيق بين أجهزة الحماية وصعوبة في عمليات الصيانة وفي ضمان دقة الإعدادات وتقصير زمن الاستجابة. بالإضافة إلى ذلك، كانت أجهزة الحماية تتلقى معلوماتها من مصادر محدودة مما يقيد قدرتها على توفير حماية شاملة وفعالة.

مع ظهور المحطات الفرعية الذكية أصبح من الممكن تحقيق تكامل بين أنظمة الحماية والتحكم من خلال استخدام أجهزة إلكترونية ذكية (IEDs) وبروتوكولات اتصالات متقدمة مثل (IEC61850)، لكن أصبح من الصعب للغاية على وسائل الحماية الاحتياطية التقليدية التي تستخدم الحمايات المسافية والحماية من زيادة التيار تنسيق الانتقائية والحساسية في وقت واحد. لذلك يجب أن تستخدم الشبكة الذكية بنية جديدة لنظام الحماية لتجنب هذه المشاكل (Huang et al,2016).

تتكون البنية الجديدة لنظام الحماية للشبكات الذكية من ثلاثة أجزاء: (الشكل 7-3)

1- Unit Protection: تعمل كحماية أولية مستقلة تماماً كما تعمل في المحطات التقليدية.

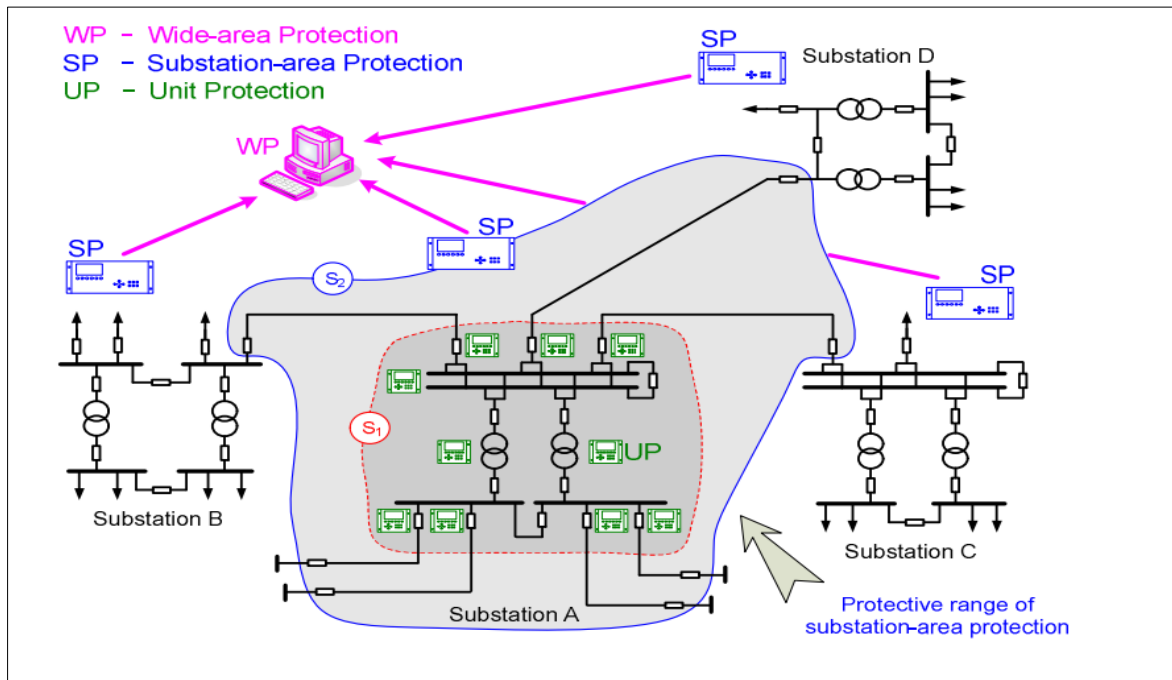
2- Substation Area Backup Protection: تعمل كحماية احتياطية مركزية وتعد بديلاً للحمايات

الاحتياطية التي يتم تكوينها لكل عنصر على حدة في المحطات التقليدية. نركز في البحث على آلية الحماية من

هذا النوع.

3- Wide Area Backup Protection: تعمل كنظام حماية احتياطية بين المحطات وتعتمد على نظام

القياس الموسع (Wide Area Measurement).



الشكل (7-3): بنية نظام الحماية للشبكة الذكية (Wang et al, 2017)

3-2-2-2-1- مفهوم ووظائف الحماية الاحتياطية للمحطة الفرعية (SABP) وخوارزمية عملها:

يمكن تعريف الحماية الاحتياطية للمحطات الفرعية (SABP) على أنها نظام حماية يقوم بتحديد موقع المكان

المصاب بالعطل هل هو داخل المحطة الفرعية أو هو خط النقل المتصل بالمحطة وذلك باستخدام المعلومات

المشتركة عبر المحطة الفرعية الذكية بالكامل والمحطات الفرعية المجاورة لها وتعمل أيضا على عزل الجزء المعطل عن باقي أجزاء الشبكة وذلك في حال فشل الحماية الأساسية أو القاطع الآلي في العمل.

حتى تحل SABP محل الحماية الاحتياطية التقليدية وتحسن من أدائها فيجب أن تمتلك الوظائف التالية:

1- **حماية رئيسية إضافية:** يمكن أن تعمل SABP كحماية رئيسية مؤقتة عندما يكون جهاز الحماية الأساسي خارج الخدمة.

2- **حماية احتياطية محسنة:** يمكن لنظام SABP القائم على مبدأ التيار التفاضلي أن يحل محل جميع أجهزة الحماية الاحتياطية اللامركزية التي تستخدم عادةً الحماية المسافية أو الحماية من التيار الزائد.

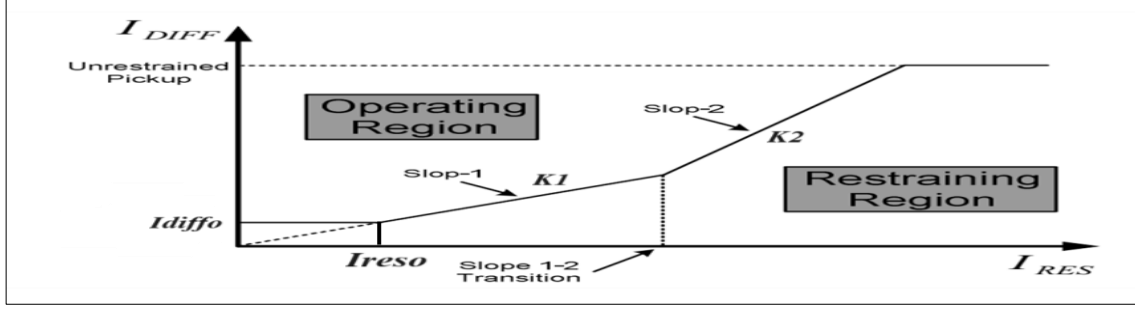
3- **التحكم الآلي المتكامل:** يمكن ل SABP دمج وظائف التحكم الآلي للمحطة الفرعية بأكملها، مثل فصل الأحمال التلقائي عند انخفاض التردد والتبديل التلقائي لمصدر التغذية في الحالات الطارئة.

❖ خوارزمية تحديد العنصر المعطل :

تحدد SABP المكون المعطل بناءً على مبدأ التيار التفاضلي. يتم تقسيم نطاق الحماية ل SABP إلى مناطق تفاضلية متعددة ومتداخلة. وفقاً لحالة كل منطقة تفاضلية (حالة كبح أو حالة تشغيل)، يمكن ل SABP تحديد مكان حدوث العطل. يعتمد هذا القرار فقط على قيم التيارات التي تحصل عليها SABP مباشرة وليس له علاقة بنظام الحماية الأساسي. تستخدم SABP معايير تفاضلية مزدوجة الميل مع معاملات كبح ذاتية التكيف لتنسيق حساسية المنطقة التفاضلية الحدودية وموثوقية المناطق التفاضلية الأخرى (الشكل 3-8). تتحدد المعايير التفاضلية وفق التالي:

$$I_{Diff.\varphi} = |I_{1.\varphi} + I_{2.\varphi} + \dots + I_{n.\varphi}| \quad (1)$$

$$I_{Res.\varphi} = (|I_{1.\varphi} + I_{2.\varphi} + \dots + I_{n.\varphi}|)/2 \quad (2)$$



الشكل (8-3): خصائص الحماية التفاضلية النسبية (Wang et al,2017)

حيث: I_{Diff} : يمثل التيار التفاضلي (تيار العمل).

φ : تمثل الطور A,B,C.

I_{Res} : يمثل تيار الكبح.

I_1 : يمثل التيار لكل عنصر من عناصر المنطقة التفاضلية.

❖ شروط عمل الحماية:

$$Idiff > Idiffo \& Ires < Iresto \quad (3)$$

$$Ires < Iresto \& Idiff > K1 * Ires \quad (4)$$

$$Ires > Iresto \& Idiff > (K2 * Ires + Ireso * (k1 - k2)) \quad (5)$$

$$Idiffo = Cx * Iset, \quad Iset = 0.3 * I_N \quad (6)$$

$$Iresto = Idiffo / K1 \quad (7)$$

حيث: I_N التيار الاسمي.

I_{set} قيمة التيار التفاضلي الحدية.

$Cx \in [1.0, 1.5]$ معامل لضبط حدود عمل المناطق التفاضلية وقيمتها في حال المنطقة تحوي محولة

أما في حال المنطقة لا تحوي محولة $Cx \in [1.2, 1.4]$.

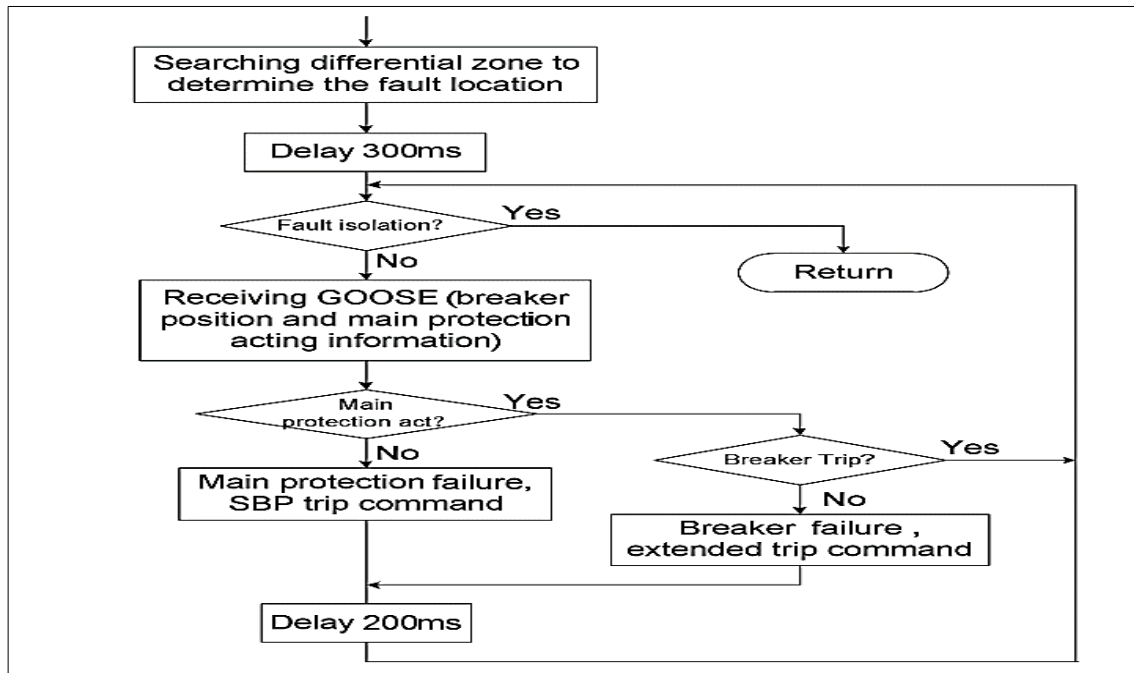
K1, K2 ثوابت تمثل ميل منحني خصائص الحماية التفاضلية (Liu et al, 2016).

❖ استراتيجية عمل الحماية الاحتياطية:

يمكن وصف استراتيجية عمل SABP بثلاث خطوات: اكتشاف العطل، تحديد العنصر المعطل، والتشغيل بالتعاون مع حمايات الأساسية والقواطع الآلية (الشكل 3-9).

على الرغم من أن SABP تعمل بالتوازي مع الحماية الأساسية، إلا أنها تكتشف العطل بشكل مستقل باستخدام المعايير التفاضلية للمنطقة التفاضلية الحدودية. بمجرد اكتشاف العطل، تبدأ SABP في تسجيل وقت حدوث العطل وتحديد المكون المعطل باستخدام الخوارزمية المذكورة.

ثم تدخل SABP في إجراء معالجة العطل، حيث تنفذ استراتيجية التشغيل بالتعاون مع الحماية الأساسية والقواطع الآلية. إذا لم تتلق SABP أي رسائل تشغيل من الحماية الأساسية خلال فترة زمنية معينة (500 مللي ثانية)، ستقوم بإرسال أمر لعزل المكون المعطل (Liu et al, 2016).



الشكل (3-9): خوارزمية عمل SABP في حالة العطل (Wang et al,2017)

3-2-2-2-2-2 مقارنة بين نظم الحماية الاحتياطية التقليدية ونظام الحماية (SABP) المقترح:

تتطلب أنظمة الحماية الاحتياطية دوراً حيوياً في ضمان استمرارية وأمان شبكات التوزيع الكهربائية. في المحطات الفرعية ذات الجهد المتوسط والمنخفض، تُستخدم عادةً الحماية من التيار الزائد كحماية احتياطية، بينما تعتمد الحماية الاحتياطية للمكونات ذات الجهد العالي على الحماية المسافية. تركز نظم الحماية هذه على مبدأ الحماية المرحلية الذي يتضمن ضبط مستويات الحماية بشكل تدريجي لضمان التنسيق بين مختلف أجزاء الشبكة. مع ذلك تواجه هذه النظم تحديات عدة منها صعوبة ضبط الإعدادات وضمان التوافق والتنسيق فيما بينها، بالإضافة إلى بطء زمن الاستجابة الذي قد يصل إلى عدة ثوانٍ، مما يزيد من خطر الانقطاعات المتسلسلة للطاقة الكهربائية. كما أن الحماية التقليدية تقتصر على جمع المعلومات المحلية في مكان واحد مما يعيق من قدرتها على تحقيق التوازن بين الانتقائية والسرعة والحساسية في نفس الوقت. ومع تطور التقنيات وزيادة تعقيد الشبكات الكهربائية، ظهرت الحاجة إلى تحسين أداء أنظمة الحماية الاحتياطية التقليدية والاعتماد على أنظمة متطورة وتجهيزات ذكية

تضمن كفاءة وموثوقية أعلى في عمل المحطات الفرعية مثل نظام الحماية الاحتياطية على مستوى المحطة (SABP).

نجد من خلال إجراء مقارنة بين نظم الحماية الاحتياطية التقليدية وأنظمة الحماية الاحتياطية الذكية (SABP):

- من حيث آلية العمل وجمع المعلومات: تعتمد نظم الحماية الاحتياطية التقليدية بشكل كبير على المعلومات المحلية في نقطة واحدة، مما يحد من قدرتها على التكيف مع التغيرات الديناميكية في الشبكة بينما نظم الحماية الاحتياطية الذكية (SABP) تعتمد على مبدأ الحماية التفاضلية القائمة على جمع وتحليل البيانات من مواقع متعددة في الشبكة واستخدام خوارزميات ذكية لتحليل البيانات وتحديد الأعطال بسرعة ودقة.

- من حيث السرعة والكفاءة والمرونة: تواجه أنظمة الحماية الاحتياطية التقليدية صعوبة في تحقيق التوازن بين الانتقائية والسرعة والحساسية بينما (SABP) توفر استجابة سريعة، حيث يتم تقليل زمن التشغيل بشكل كبير بفضل جمع المعلومات في الزمن الحقيقي ومعالجتها وتحليلها.

بالتالي يمثل تطوير SABP خطوة مهمة نحو تحسين أداء نظم الحماية وضمان استدامة وموثوقية شبكات الطاقة الحديثة. هذا التكامل بين التكنولوجيا الرقمية والنظم الذكية يعزز من قدرة المحطات الفرعية على الاستجابة بشكل سريع وفعال لأي طارئ، مما يساهم في تقليل فترات الانقطاع وتحسين جودة الطاقة الكهربائية بشكل عام.

سيتم في بحثنا تطبيق مفهوم (SABP) المستخدم في المحطات الفرعية الذكية لتكوين برمجيات مركز التوزيع الفرعي الخاص بإنشاء مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية. لا بدّ قبل ذلك من توضيح مفهوم الشبكات الميكروية.

3-3- الشبكات الميكروية:

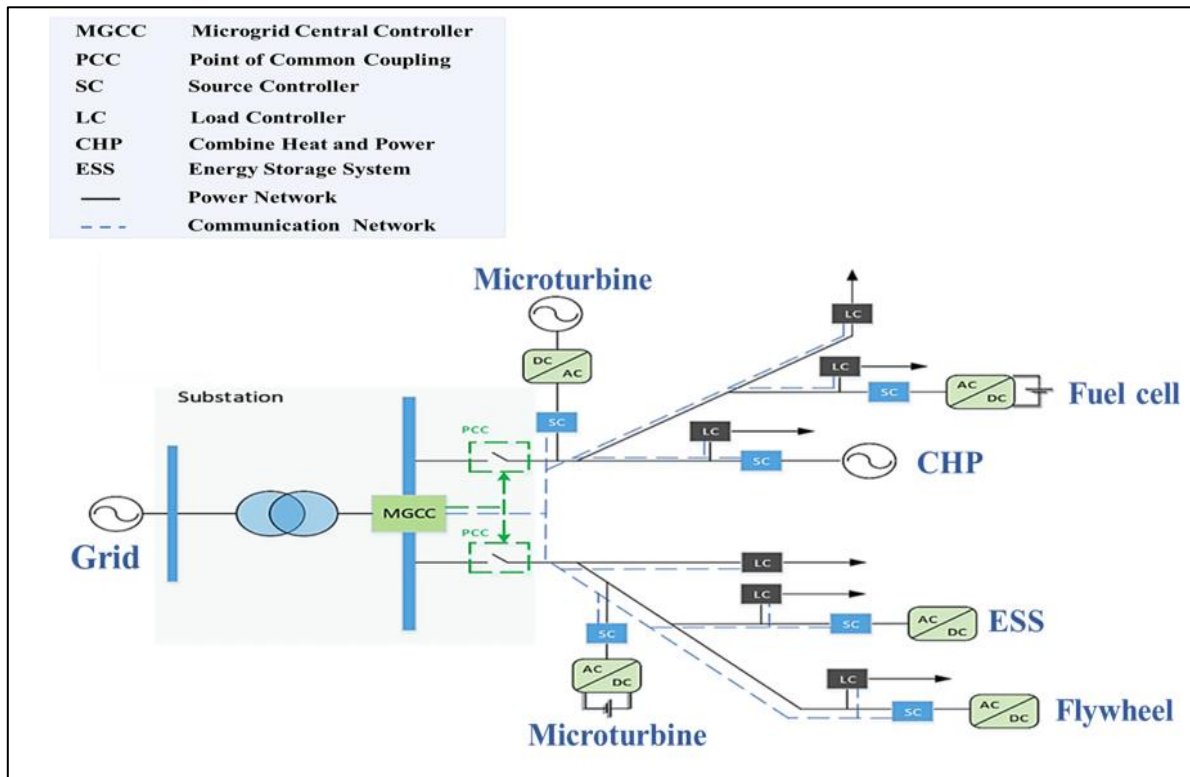
شهدت معظم دول العالم في السنوات الأخيرة أزمة في تأمين الطلب المتزايد على الطاقة وخاصةً في ظل التطور الصناعي الكبير والزيادة السكانية الكبيرة، إلى جانب المشاكل الناجمة عن انقطاع التغذية الكهربائية لفترات طويلة وحالات التعتيم الكامل المتكررة الناجمة عن الأعطال أو الكوارث الطبيعية في أنظمة التوزيع وما ينجم عنها من آثار سلبية على الاقتصاد وعلى الحياة الاجتماعية للمجتمعات. ولحل هذه المشكلات كلها ظهرت الشبكات الميكروية بوصفها حلاً واعداً نحو شبكة كهربائية عالية المرونة وفعالة وموثوقة.

يمكن تعريف الشبكة الميكروية على أنها شبكة كهربائية تحوي مجموعة من المولدات الموزعة وأجهزة تخزين الطاقة ومجموعة من الأحمال التي يمكن التحكم فيها والتي تقسم إلى أحمال حساسة (حرجة) وأحمال غير حرجة. يجب تزويد الأحمال الحرجة دائماً بواسطة مصدر طاقة واحد أو أكثر، في حين يمكن فصل الأحمال غير الحرجة في حالة الطوارئ أو عند حدوث اضطراب شديد. يحتوي كل حمل وكل مولد على قاطع آلي ووحدة تحكم تتلقى أوامرها إما من مركز التحكم المركزي (MGCC) أو نظام إدارة الطاقة (EMS).

من أهم صفات الشبكة الميكروية قدرتها على العمل على التوازي مع الشبكة الكهربائية (On-Grid) أو مفصولة عنها (Off-Grid)، ترتبط الشبكة الميكروية بنظام التوزيع عبر نقطة الربط المشتركة (PCC) من خلال (Static Switch) بواسطته يمكن قطع الاتصال بشبكة التوزيع الرئيسية في حالة حدوث أعطال في الشبكة أو انخفاض جودة الطاقة وبالتالي ستزيد الشبكات الميكروية من موثوقية إمدادات الطاقة (Singh, 2020).

يبين (الشكل 3-10) نموذج لشبكة توزيع كهربائية ذات توتر منخفض تم تحويلها إلى شبكة ميكروية تضم مجموعة من وحدات التوليد ذات الحجم الصغيرة ومجموعة من عناصر التخزين الكهربائي. تتصل الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية عبر محطة توزيع فرعية أو عبر مركز تحويل، وتوضع مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية (MGCC) ضمن المحطة الفرعية (Substation). يتم الاتصال بين (MGCC) ومتحكمات الأحمال (LC) وكذلك الأمر مع متحكمات منابع الطاقة (SC) عبر أنظمة الاتصالات.

تشكل المحطة الفرعية المبنية على الشكل (3-10) نطاق عملنا في هذه الأطروحة حيث يتم تطوير المحطة التقليدية ذات التجهيزات الكهروميكانيكية بتجهيزات إلكترونية ذكية. كما سيشمل نطاق عملنا في هذا البحث استخدام آلية العمل في المحطات الفرعية الرئيسية وتطبيقها على المحطة الفرعية المبنية في الشكل (3-10) ودمج البرمجيات مع بعض برمجيات وبرامج المراقبة لمركز التحكم (MGCC) بحيث نحصل على مركز للتحكم والمراقبة بالشبكة الميكروية والمحطة الفرعية الثانوية.



الشكل (3-10): بنية الشبكة الميكروية (Pavon et al,2021)

3-3-1- تصنيف الشبكات الميكروية:

لتسهيل فهم تطبيقات الشبكات الميكروية المختلفة واستخداماتها المتنوعة تصنف الشبكات الميكروية بناءً على عدة معايير تشمل (الشكل 3-11):

❖ **نمط التشغيل:** تصنف الشبكات الميكروية تبعاً لنمط تشغيلها إلى:

1- **النمط المتصل بالشبكة الرئيسية:** حيث تكون الشبكة الميكروية متصلة بالشبكة الكهربائية الرئيسية وتستطيع تبادل الطاقة معها.

2- **النمط المعزول:** حيث تعمل الشبكة الميكروية بشكل مستقل عن الشبكة الرئيسية وتوفر الطاقة للمستخدمين المحليين فقط.

❖ **نوع الحمل:**

1- **الشبكات الميكروية التجارية والصناعية:** تخدم المؤسسات التجارية والصناعية.

2- **الشبكات الميكروية العسكرية:** تخدم القواعد العسكرية وتمتاز بقدرتها على العمل بشكل مستقل لضمان استمرارية الطاقة في حالات الطوارئ.

3- **الشبكات الميكروية المجتمعية:** تخدم المناطق السكنية أو المجتمعات المحلية الصغيرة وتدعم توزيع الطاقة بين سكان المجتمع.

4- **شبكات الحرم الجامعي أو المؤسسية:** تخدم الجامعات أو المؤسسات الكبيرة وتتميز بقدرتها على تلبية احتياجات الطاقة لمرافق متعددة.

❖ **الحجم (الاستطاعة المولدة):**

1- **الشبكات الميكروية الصغيرة:** أقل من (10 KW) تخدم الاحتياجات المنزلية الصغيرة أو التطبيقات الخاصة.

2- **الشبكات الميكروية المتوسطة:** تتراوح استطاعتها بين (10 KW) حتى (1 MW) .

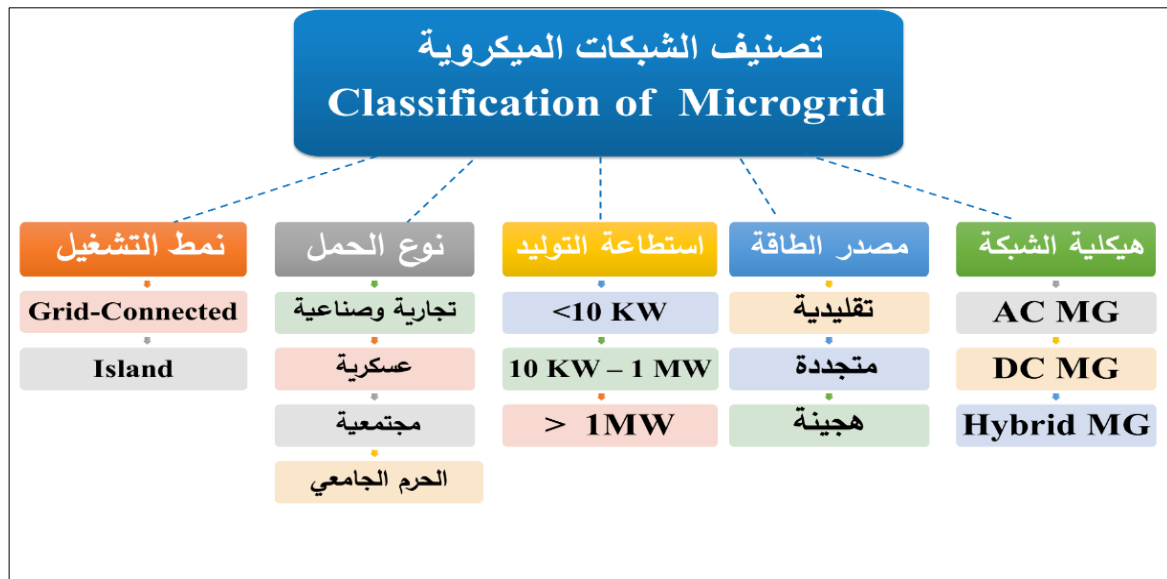
3- **الشبكات الميكروية الكبيرة:** استطاعتها أكبر من (1 MW) تخدم المجتمعات الكبيرة.

❖ مصدر الطاقة المستخدم:

- 1- شبكات ميكروية تستخدم مصادر الطاقة التقليدية مثل مولدات الديزل.
- 2- شبكات تستخدم مصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح والكتلة الحيوية.
- 3- شبكات ميكروية هجينة تجمع بين مصادر الطاقة المتجددة والتقليدية لضمان استمرارية واستقرار التغذية الكهربائية.

❖ هيكلية الشبكة:

- 1- AC Microgrid: تستخدم أنظمة التيار المتردد ومناسبة لتغذية الأحمال في المناطق النائية.
- 2- DC Microgrid: تستخدم أنظمة التيار المستمر وتفضل في التطبيقات التي تتطلب كفاءة عالية.
- 3- Hybrid Microgrid: تجمع الشبكات الميكروية الهجينة بين مزايا التيار المتردد والمستمر لتحسين الكفاءة والمرونة في توزيع الطاقة (Meje et al, 2020).



الشكل (3-11): تصنيف الشبكات الميكروية

3-3-2- فوائد الشبكات الميكروية على شبكات التوزيع الكهربائية:

تطوير الشبكات الميكروية ودمجها مع الشبكة الكهربائية العامة له العديد من الفوائد منها:

- **الفوائد البيئية:** مقارنةً بتوليد الطاقة التقليدي القائم على الوقود الأحفوري، فإن الشبكة الميكروية المعتمدة على مصادر الطاقة المتجددة لها تأثير أقل ضرراً على البيئة. إذ تسهم الطاقة المستمدة من المصادر المتجددة في تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة، تقليل التلوث، وتحسين جودة الهواء. سيساعد الانتشار الواسع للشبكات الميكروية في تقليل درجات الحرارة العالمية ومع التكنولوجيا المتاحة حالياً يمكن نشر الشبكات الميكروية لحماية البيئة للأجيال القادمة.

- **الفوائد التشغيلية:** تُثَبَّت الشبكات الميكروية بالقرب من الأحمال، مما يقلل من فقدان الطاقة في شبكات النقل والتوزيع ويحافظ على الطاقة من الهدر، ويقلل من الاستثمارات في توسيع شبكات النقل والتوزيع، كما تُحسِّن من موثوقية تزويد الأحمال الحرجة وتساهم في استمرار التغذية. وتساهم في تحسين استقرار نظام القدرة الكهربائي من خلال تزويد الفائض من الطاقة للشبكة العامة.

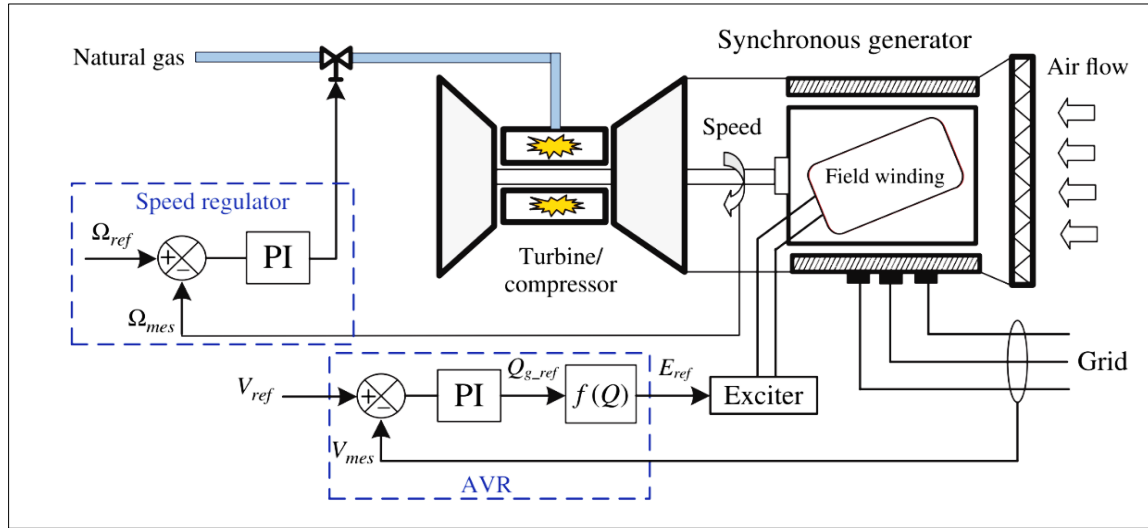
- كما تساهم الشبكات الميكروية في تحقيق أهداف التنمية البشرية ودعم الاقتصاد في الدول النامية (Singh, 2020).

3-3-3- آليات التحكم في مصادر التوليد الموزع للشبكات الميكروية:

تتطلب إدارة وتشغيل المولدات الموزعة في الشبكة الميكروية استخدام آليات تحكم متقدمة لضمان التكامل السلس والفعال لهذه المكونات. توفر هذه الآليات القدرة على تنظيم تدفق الطاقة، والتحكم في الجهد والتردد، وضمان استقرار النظام بشكل عام. وفيما يلي سيتم تسليط الضوء على أهم آليات وتقنيات التحكم المستخدمة والتحديات المرتبطة بها.

- التحكم بسرعة المولدات الموزعة التقليدية:

تعتبر الشبكات الميكروية الصناعية أنظمة طاقة صغيرة نسبياً يمكن تشغيلها بواسطة مولد واحد يعمل بالتيار المتناوب يتم تشغيله بواسطة عنفة غازية أو محرك ديزل. يتناسب تردد المولدات التزامنية طردياً مع سرعة الحقل المغناطيسي الدوار الخاص بها. وبالتالي إدارة الطاقة تعتمد على نظام التحكم في السرعة التزامنية الذي يحافظ على دوران العنفة عند سرعة ثابتة. يتم تنظيم الطاقة المدخلة إلى المحرك الأساسي استجابةً لتغيرات الحمل التي قد تتسبب في تغيرات في السرعة (الشكل 3-12).



الشكل (3-12): مخطط نظام التحكم في السرعة التزامنية للعنفة الغازية (Bevrani et al, 2017)

ستسبب أي تغيرات في الحمولة تغيرات في سرعة الدوران (Ω)، إذ أن زيادة الحمولة ستؤدي إلى نقصان السرعة وبالتالي يجب زيادة كمية الطاقة المقدمة للمحرك الأساسي، أما في حال نقصان الحمولة ستزداد سرعة الدوران ولابد من إنقاص كمية الطاقة المقدمة للعنفة. وللحفاظ على سرعة دوران ثابتة للمحرك الأساسي تساوي (Ω_{ref}) يتم استخدام متحكم تناسبي تكاملي (PI).

يستخدم أيضاً منظم آلي للتحكم بالجهد (AVR) وظيفته التحكم بالقيمة الفعالة للجهد على خرج الآلة (V_{mes}) وذلك من خلال تنظيم الجهد عبر ملف التهييج (V_{ref}) (Bevrani et al, 2017).

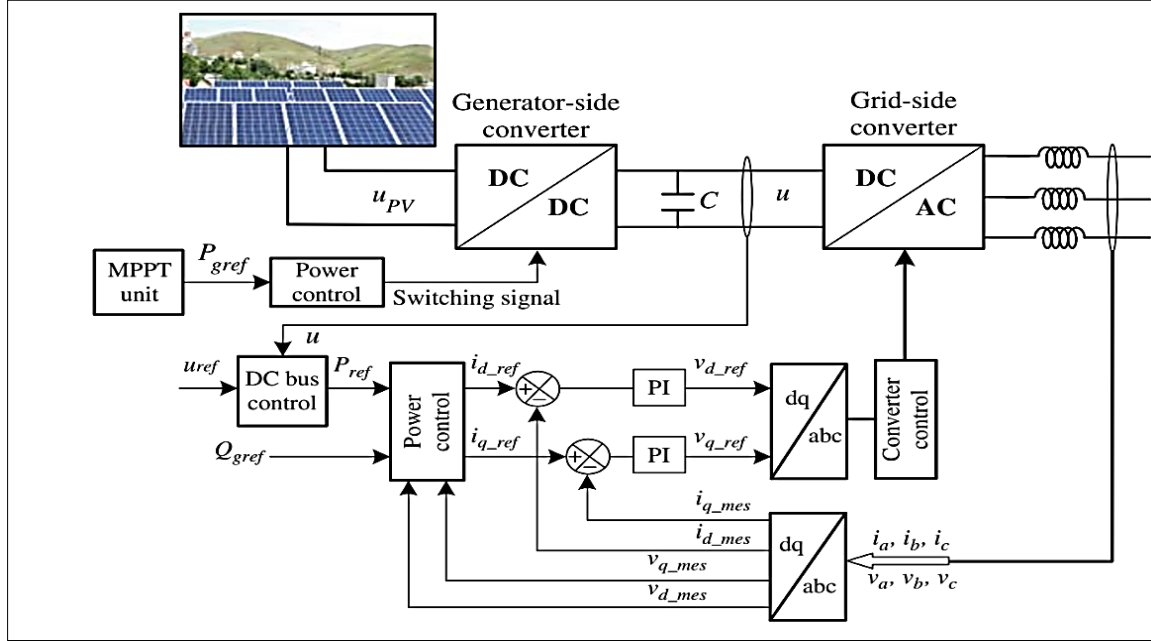
- التحكم في المولدات الموزعة ذات الطاقة المتجددة :

نظراً لكون المولدات ذات الطاقة المتجددة هي ذات طبيعة متقطعة وتتأثر بالعوامل الجوية مثل سرعة الرياح ودرجة الحرارة والإشعاع الشمسي فهي غير مناسبة للاتصال المباشر مع الشبكة الكهربائية لذلك لابد من استخدام تجهيزات الكترونيات القدرة. وأكثر أشكالها استخداماً هي الهيكل المتتالي (Back-to-Back) حيث يستخدم معرج توتر (VSC) من جهة المولد وآخر من جهة الشبكة. يتم بالنسبة للمولدات الكهروضوئية والعنفات الريحية التحكم بالمعرج من جهة المولد لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT).

تتحدد وظائف نظام التحكم بالمعرج تبعاً لنمط تشغيل الشبكة الميكروية. فبالنسبة للنمط المتصل بالشبكة يتم توفير الجهد والتردد بواسطة الشبكة لذلك يجب التحكم في جميع المبدلات الالكترونية للمولدات الموزعة في وضعية (P/Q) للتحكم بالاستطاعة الفعلية والردية المحقونة في الشبكة. أما في النمط المعزول عن الشبكة يجب أن يتحكم المعرج بالقيمة الفعالة للجهد والتردد أي يعمل في وضعية (V/F).

- يوضح الشكل (3-13) آلية التحكم في المولد الكهروضوئي بالاعتماد على استراتيجية (Grid-Following) إذ أنه من خلال هذه الاستراتيجية يقوم المبدل من جهة الشبكة بالتحكم بجهد حلقة التوتر المستمر (DC Link) والتحكم بالاستطاعة الردية المحقونة في الشبكة. تعد هذه الاستراتيجية مفيدة للمولدات الموزعة غير القابلة للتحكم (مثل مولدات الرياح والطاقة الشمسية) التي لا يمكنها بسبب عدم اليقين في مصدر الطاقة الأولية تمكين التحكم الصحيح في جهد حلقة التوتر المستمر. يتم حساب المركبة المباشرة (d) والعمودية (q) لتيار الشبكة ثلاثي الطور باستخدام تحويل بارك والاستفادة من هذه المركبات في حساب الاستطاعة الردية والحقيقية. تنتسب التقلبات في الاستطاعة الحقيقية المولدة من المولد الموزع في حدوث خطأ في حلقة التوتر المستمر (DC Link)، والذي يتم تصحيحه من خلال التحكم في الجهد عن طريق ضبط القيمة المرجعية للاستطاعة الحقيقية (Pref) المحقونة في الشبكة. يتم أيضاً التحكم بالاستطاعة الردية باستخدام متحكم (PI) يقوم بضبط مركبة تيار المعرج . يمكن

لهذا المبدل أن يعمل بعامل استطاعة يساوي الواحد أو يمكنه تلقي قيمة مرجعية للاستطاعة الردية من مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية (MGCC) (Bevrani et al,2017).



الشكل (3-13): التحكم بالمعرج للمولد الكهروضوئي في وضعية (Grid-Following) (Bevrani et al,2017)

3-3-4- نظم المزامنة للشبكات الميكروية:

تعد مسألة مزامنة الشبكات الميكروية مع الشبكة الرئيسية غاية في الأهمية إذ يجب مزامنة هذه الشبكات في التردد، وزاوية الطور، والجهد قبل أن يتم ربطها معاً. وهذا يعني أن الانحرافات في هذه القيم بين الشبكات يجب أن تكون ضمن الحدود المسموح بها. إذا لم تكن الشبكات المترابطة متزامنة ضمن هذه الحدود المسموح بها عند الاتصال، فقد تحدث ارتفاعات كبيرة في التيار وفي الجهد تؤدي إلى نشوء إجهادات ميكانيكية على التجهيزات الكهربائية وتتسبب في تلفها، أو تتسبب في التشغيل الخاطئ لتجهيزات الحماية وتؤثر على الاستقرار. يتطلب ذلك أن تخضع الشبكات الميكروية لعملية مزامنة قبل أن يتم ربطها مع الشبكة العامة.

يتألف نظام المزامنة بشكل عام من جزأين رئيسيين هما تقنية اكتشاف الطور (تتبع فرق الصفحة) وخوارزمية التحكم في المزامنة.

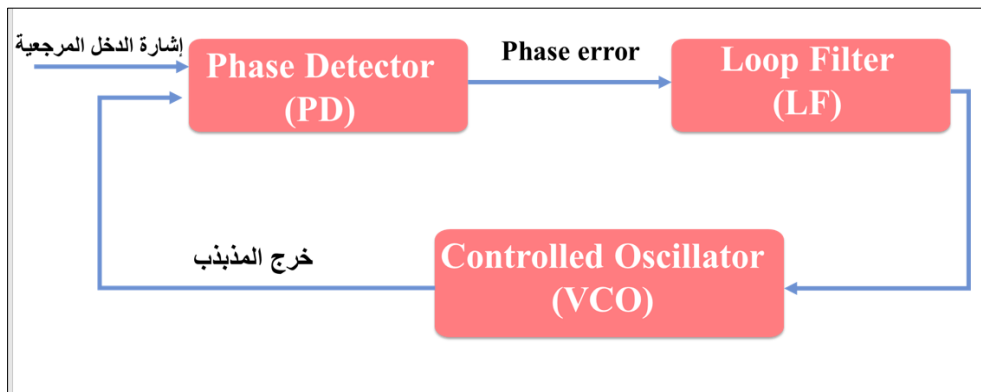
- تقنيات كشف الطور:

تعتبر أجهزة الكشف عن الطور من الأجهزة الهامة التي تُستخدم لقياس الجهد والتردد وزاوية الطور للشبكة الميكروية والشبكة العامة. ومع ذلك، فإن الجهد والتيار أو التردد المستخدم في المزامنة قد لا يكون خالياً من التوافقيات أو قد يتأثر بظروف التشغيل غير المتوازنة لذلك من أجل العثور على كاشف طور مناسب، يجب أن تكون عملية تتبع وكشف فرق الصفحة سريعة قدر الإمكان، عالية الدقة، وأيضاً لا تتأثر بظروف التشغيل إضافةً إلى أخذ زمن الاستجابة لكل كاشف طور بعين الاعتبار.

تُعتبر تقنية الحلقة المقفلة الطورية (Phase-Locked Loop, PLL) من التقنيات المستخدمة على نطاق واسع لاكتشاف زاوية الطور للإشارة. يتكون هيكل (PLL) التقليدي من كاشف الطور (PD)، مرشح (LF)، ومذبذب محكوم بالجهد (VCO) (الشكل 3-14).

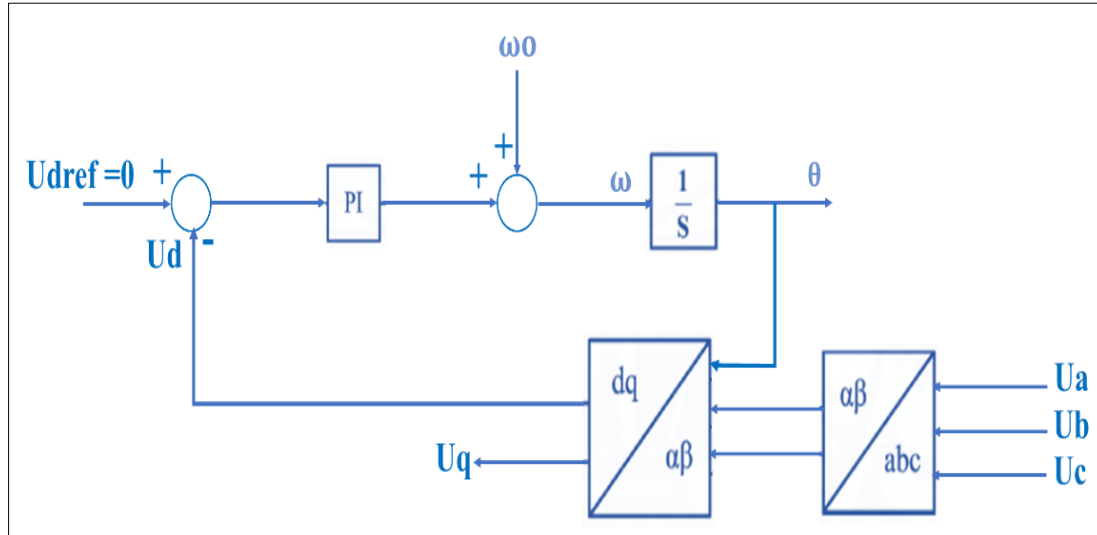
يمكن تعريف (PLL) بأنه جهاز يستخدم للحفاظ على إشارة الخرج متزامنة في التردد، وكذلك في الطور، مع إشارة الدخل المرجعية. بشكل أكثر دقة، يتحكم (PLL) في طور إشارة الخرج الخاصة به لتقليل الخطأ بين الطور الناتج والطور المرجعي.

تُعد تقنية الحلقة المقفلة الطورية ذات الإطار المرجعي المتزامن (Synchronous Reference Frame PLL) في حالة النظام ثلاثي الطور واحدة من التقنيات المستخدمة لتتبع فرق الصفحة.



الشكل (3-14): بنية الحلقة المقفلة طورياً (PLL)

يبين الشكل (3-15) آلية عمل هذه التقنية التي تعتمد على تحويل إشارة جهد الشبكة ثلاثية الطور (U_a, U_b, U_c) إلى مركبتين متعامدتين (U_d, U_q) باستخدام تحويل بارك وذلك في إطار مرجعي متزامن مع تردد الشبكة. يتم الحصول على الزاوية θ عن طريق تكامل السرعة ω عند خرج المتحكم التناسبي - التكاملي (PI) الذي يستخدم إشارة الخطأ الناتجة عن ضبط مركبة الجهد على المحور المباشر (U_d) على الصفر. تُعد تقنية (SRF-PLL) غير معقدة وتتيح الحصول على نتائج سريعة ودقيقة عندما تكون إشارة الدخل غير مشوهة (Uten, 2019). وسنعمد في البحث على هذه التقنية لمزامنة الشبكة الميكروية المدروسة مع الشبكة العامة.



الشكل (3-15): بنية (SRF-PLL)

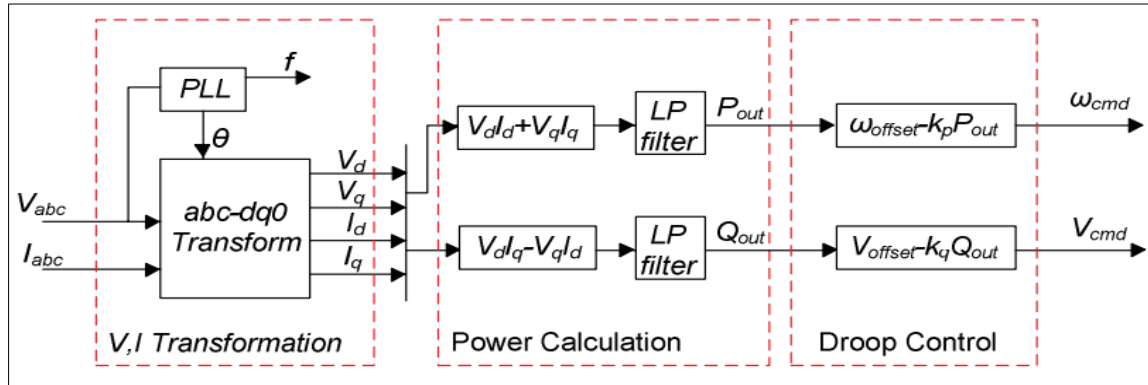
- خوارزمية التحكم في التزامن:

يجب أن يكون جهد الشبكة الميكروية متزامناً في التردد، والطور، والمطال مع الشبكة العامة لضمان الانتقال بشكل سلس من وضعيية (Island-Mode) إلى وضعيية (Grid Connected-Mode). لذلك تعتبر خوارزمية التحكم في التزامن ضرورية.

تستخدم خوارزمية (Droop Control) في عملية التزامن حيث تستخدم للتحكم في المولدات الموزعة الموجودة في نفس الشبكة لإنتاج استطاعة فعالة وردية بنسب مناسبة حسب استطاعة كل مولد. وعند توصيل المولدات

الموزعة إلى نفس الشبكة الكهربائية، ستتبع الجهود والترددات الخاصة بالمولدات الموزعة القيمة المرجعية للجهود والتردد الخاصة بالشبكة كما يبين الشكل (3-16).

تقسم طرائق المزامنة المعتمدة على (Droop Control) إلى ثلاثة أنماط : النمط الأول يتم فيه تحقيق التزامن من خلال تقاسم الاستطاعة الفعالة والردية بين جميع المولدات المتصلة بالشبكة الميكروية. النمط الثاني يتم فيه اختيار أحد المولدات الموجودة ضمن الشبكة الميكروية لتكون مسؤولة عن عملية التزامن شرط أن يكون لهذا المولد القدرة الكافية للتعامل مع عملية التزامن وتغذية الأحمال المحلية في الوقت نفسه. النمط الثالث يتم فيه إضافة مولد جديد أو وحدة تخزين للشبكة الميكروية تكون مسؤولة عن تزامن الجهد والتردد وزاوية الطور أثناء عملية الانتقال بين أوضاع التشغيل (Uten,2019).



الشكل (3-16): تقنية (Droop Control) للتحكم في المولدات الموزعة (Uten el al,2019)

3-3-5- مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية:

التحكم في الشبكات الميكروية وإدارتها مركزياً يتم بواسطة مركز التحكم المركزي (MGCC) المثبت ضمن المحطة الفرعية ذات الجهد المتوسط/ المنخفض (MV/LV) والذي يلعب دوراً محورياً في التشغيل الفعال والموثوق للشبكة الميكروية، كما يعد مسؤولاً عن تنسيق العمليات بين مختلف المولدات الموزعة في الشبكة لضمان الاستقرار والكفاءة في توزيع الطاقة.

3-3-5-1- وظائف مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية:

يشرف مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية على جوانب مختلفة مثل الجدولة الاقتصادية، جودة الطاقة، الحماية، الاستقرار، وتكامل مصادر الطاقة المتجددة وتشمل وظائفه مايلي:

1- إدارة الطاقة والتحكم بالأحمال: لضمان تلبية الطلب على الطاقة يتم تنظيم توزيع الطاقة بين المولدات الموزعة المختلفة الموجودة ضمن الشبكة الميكروية. إذ يتم مراقبة الطاقة الإجمالية المولدة في الشبكة مع الحمولة وفي حال أصبحت كمية الطاقة المستهلكة من الأحمال أكبر من الطاقة المولدة يعمل مركز التحكم على تطبيق استراتيجية (Load Shedding) بحيث يتم قطع التغذية عن الأحمال غير الحرجة ريثما يتم إعادة التوازن بين الطلب على الطاقة وبين التوليد.

2- مراقبة أداء الشبكة الميكروية: يقوم مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية بمراقبة أدائها بشكل مستمر وتنظيم الجهد والتردد للحفاظ على الاستقرار.

3- مراقبة جودة الطاقة: يعد مركز التحكم المركزي (MGCC) مسؤولاً عن مراقبة جودة الطاقة عند نقطة الربط المشتركة (PCC) ليقرر فيما إذا كان يجب فصل الشبكة الميكروية عن الشبكة الرئيسية والانتقال إلى وضعية الجزيرة (Island Mode).

4- إعادة التزامن: ضمان عملية إعادة الاتصال السلس بين الشبكة الميكروية والشبكة الرئيسية بعد التحقق من شروط المزامنة.

5- الاتصال والتنسيق: الاتصال مع المحطات الفرعية ومراكز التحكم الأخرى لتنسيق عمليات التشغيل والصيانة.

6- الجدولة الاقتصادية: إدارة انتاج واستهلاك الطاقة داخل الشبكة الميكروية واستخدام أدوات التنبؤ بالحمولة للتنبؤ بالطلب على الطاقة وأسعار السوق مما يسمح باتخاذ قرارات فعالة من حيث التكلفة.

7- الحماية: تعتبر الحماية من الأمور الحيوية خصوصاً في حالات الأعطال يلعب مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية دوراً حيوياً وذلك من خلال اكتشاف وعزل الأعطال بسرعة لحماية كل من الشبكة الميكروية والشبكة الرئيسية. إضافةً إلى تطبيق أنظمة الحماية التكيفية لتعديل إعدادات حاكمات الحماية في الزمن الحقيقي للتكيف مع الظروف المتغيرة داخل الشبكة الميكروية (Kaur et al,2016).

3-3-5-2- دمج وظائف المحطة الفرعية الذكية مع (MGCC):

يساهم دمج وظائف المحطة الفرعية الذكية مع مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية في تحسين كفاءة التشغيل والموثوقية لكل من الشبكات الميكروية ولنظام توزيع القدرة الكهربائي ككل. يمكن للمحطات الفرعية الذكية المجهزة بتقنيات التحكم والاتصالات أن تتكامل مع (MGCC) لتحسين مختلف جوانب أداء الشبكة الميكروية. وفيما يلي نظرة على بعض جوانب هذا التكامل:

1- تبادل البيانات والمراقبة في الزمن الحقيقي: كون المحطات الفرعية الذكية تحوي على حساسات وتجهيزات إلكترونية ذكية (IED) وتقنيات اتصالات متقدمة، كما تحوي على أنظمة تحصيل بيانات عالية السرعة تؤمن قيم الجهد والتيار والتردد في الزمن الحقيقي مما يمكنها تبادل هذه البيانات مع مركز التحكم بالشبكة الميكروية حتى يتسنى له اتخاذ القرارات بدقة وفي الوقت المناسب.

2- الحماية وإدارة الأعطال: يمكن لمركز التحكم للشبكة الميكروية التعاون مع المحطة الفرعية الذكية لتنفيذ استراتيجيات الحماية لضمان العزل السريع للأعطال وتقليل التأثير على الشبكة الميكروية والرئيسية. كما يمكن استخدام البيانات التي يتم جمعها في المحطة الفرعية الذكية في الزمن الحقيقي لضبط إعدادات حاكمات الحماية للحفاظ على استقرار النظام وموثوقيته.

3- التحكم المنسق وتحسين جودة الطاقة: من خلال خوارزمات التحكم المحلية المطبقة ضمن المحطات الفرعية الذكية للحفاظ على التشغيل المستقر تحت ظروف الحمل والتوليد المتغيرة مثل تعويض الاستطاعة الردية ومبدل

الوضعيات تحت الحمل للمحولة (On-Load Tap changer) يمكن لمركز التحكم بالشبكة الميكروية التنسيق معها للتخفيف من مشاكل اضطرابات الجهد والتشوه التوافقي.

4- الاستجابة لتغيرات الطلب على الطاقة وإدارة الأحمال: تحتوي المحطات الفرعية الذكية على بنية تحتية متقدمة للقياس للحصول على معلومات مفصلة عن كمية الطاقة المستهلكة. يمكن لمركز التحكم بالشبكة الميكروية الاستفادة من هذه المعلومات لتطبيق برامج وخوارزميات إدارة الطلب على الطاقة وإدارة الأحمال.

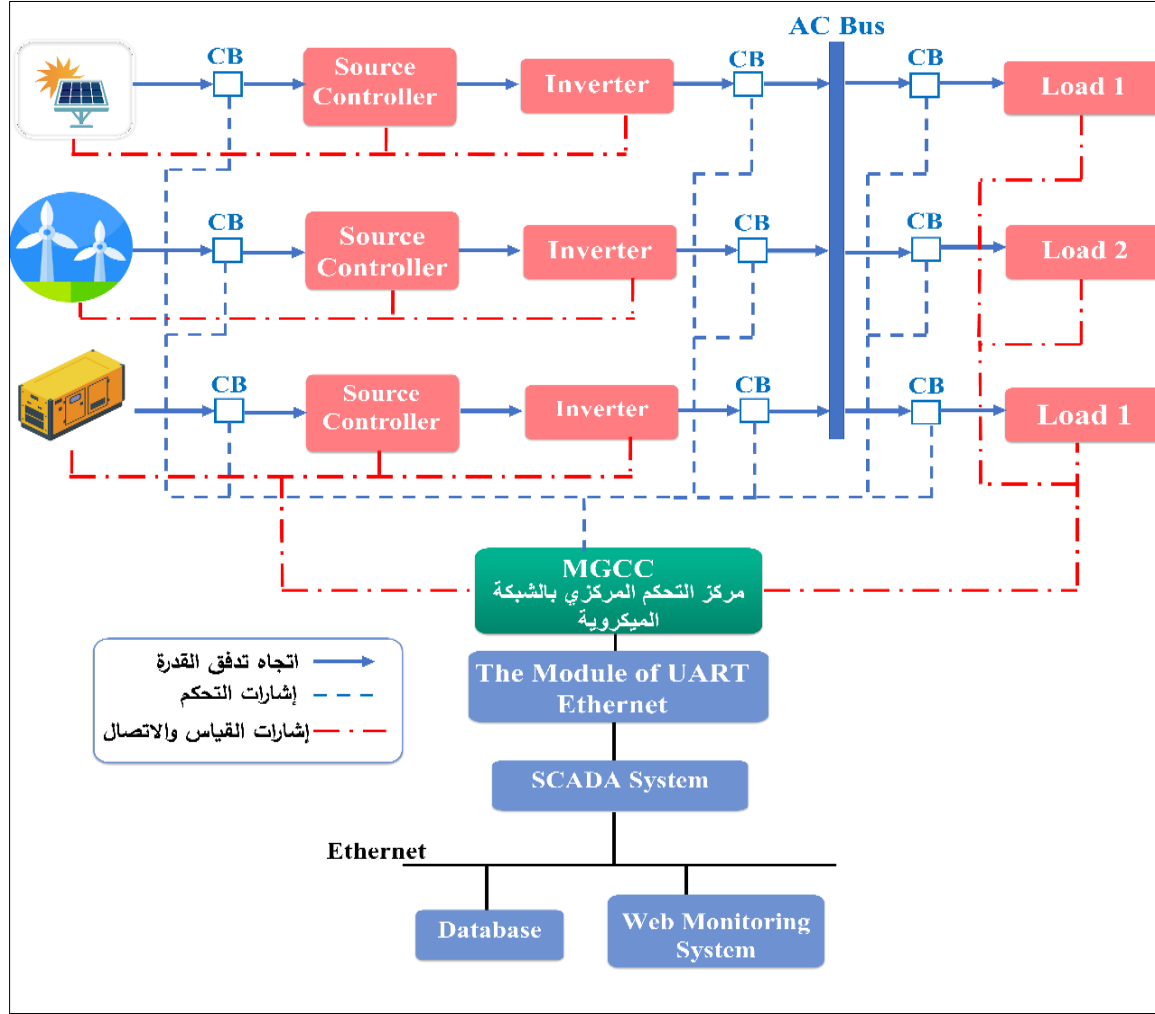
5- نظام الاتصالات والأمن السيبراني: تمتلك المحطات الذكية بنية تحتية متقدمة بما في ذلك الألياف البصرية والتقنيات اللاسلكية والتقنيات المتقدمة للحماية من التهديدات السيبرانية وبالتالي تؤمن هذه المحطات رابط اتصالات آمن بين مركز التحكم المركزي وبين مكونات الشبكة الميكروية الأخرى مما يضمن نقل المعلومات وتنفيذ الأوامر بشكل آمن وموثوق.

6- الصيانة التنبؤية: يمكن استخدام البيانات المأخوذة من أنظمة مراقبة حالة المعدات الموجودة في المحطات الفرعية الذكية مثل أنظمة مراقبة المحولات والقواطع من قبل مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية لتنفيذ عمليات الصيانة التنبؤية وبالتالي تقليل فترات انقطاع التغذية وإطالة عمر التجهيزات (Yuan et al,2019 & Magi et al,2012).

3-3-5-3- دمج نظام (Web SCADA) مع مركز التحكم المركزي للشبكة الميكروية:

يعتمد نجاح تشغيل الشبكة الميكروية والتحكم فيها وإدارتها كشبكة توزيع نشطة على نظام الاتصالات الفعال، ويعتبر نظام المراقبة والتحكم الإشرافي وتحصيل البيانات (SCADA) إلى جانب مشغل شبكة التوزيع (DNO) الأمثل لتحقيق وظائف الشبكة الميكروية.

يتكون نظام المراقبة والتحكم الإشرافي وتحصيل البيانات (SCADA) من مجموعة من التجهيزات والبرمجيات ويستخدم في الشبكات الميكروية لتنفيذ العديد من المهام مثل جمع البيانات ومراقبة مصادر التوليد الموزع وإطلاق أنواع مختلفة من الإنذارات مما يساهم في تحقيق عملية أتمتة حديثة وفعالة لتوزيع الطاقة (الشكل 3-17).



الشكل (3-17): بنية نظام المراقبة والتحكم الإشرافي وتحصيل البيانات (SCADA) في الشبكات الميكروية

سيعزز التقدم التكنولوجي وتطور نظم الاتصالات وتقنيات الويب واستخدام هذه التقنيات في أنظمة (SCADA) ودمجها مع مركز التحكم المركزي للشبكة الميكروية من قدرات المراقبة والتحكم والإدارة للشبكات الميكروية في الزمن الحقيقي.

يحقق استخدام تقنيات (Web SCADA) ودمجها في إطار عمل مركز التحكم المركزي للشبكة الميكروية العديد من الفوائد منها:

- **المراقبة والتحكم في الزمن الحقيقي:** يمكن لـ (Web SCADA) تمكين المراقبة والتحكم في مكونات الشبكة الميكروية في الزمن الحقيقي من أي موقع يتوفر فيه اتصال بالإنترنت. بالإضافة إلى السماح لمشغل الشبكة بالتحكم بالقواطع والتجهيزات الأخرى عن بعد مما يعزز من مرونة واستجابة الشبكة الميكروية.

- **تحسين نظام الاتصال:** تعتمد أنظمة (Web SCADA) على تقنيات الاتصال الحديثة، مثل الألياف الضوئية والشبكات اللاسلكية والتكامل مع انترنت الأشياء مما يحسن من نقل البيانات وتنفيذ الأوامر ويمكن من التكامل والتواصل السلس بين مكونات الشبكة الميكروية المختلفة.

- **القابلية للتوسع والمرونة:** تعتبر أنظمة (Web SCADA) قابلة للتوسع إذ تسمح بدمج الأجهزة والنظم الفرعية الجديدة والشبكات الميكروية الأخرى دون الحاجة إلى عمليات إعادة تكوين كبيرة.

- **تحسين تدابير الاتصال الآمن:** تدمج أنظمة (Web SCADA) الحديثة تدابير أمنية متقدمة لحماية النظام من التهديدات الإلكترونية مما يعزز من موثوقية الشبكات الميكروية. (Li et al,2017).

سنعتمد في هذا البحث على برنامج (Ecava IntegraXor) وهو أحد برامج (Web SCADA) للقيام بعمليات المراقبة والتحكم بالشبكة الميكروية المدروسة.

3-3-5-1- استخدام برنامج (Ecava IntegraXor) للتحكم بالشبكة الميكروية:

يعد برنامج (Ecava IntegraXor) من البرامج المستخدمة لتصميم أنظمة المراقبة والتحكم الإشرافي (SCADA) ولتصميم واجهات المستخدم الرسومية (HMI) تم إنشاؤه بالاعتماد على تقنيات الويب بهدف تشكيل أداة متكاملة لبناء أنظمة مراقبة متطورة وذكية في الزمن الحقيقي.

يتكون هذا البرنامج من أربعة أجزاء رئيسية كما يبين (الشكل 3-18):

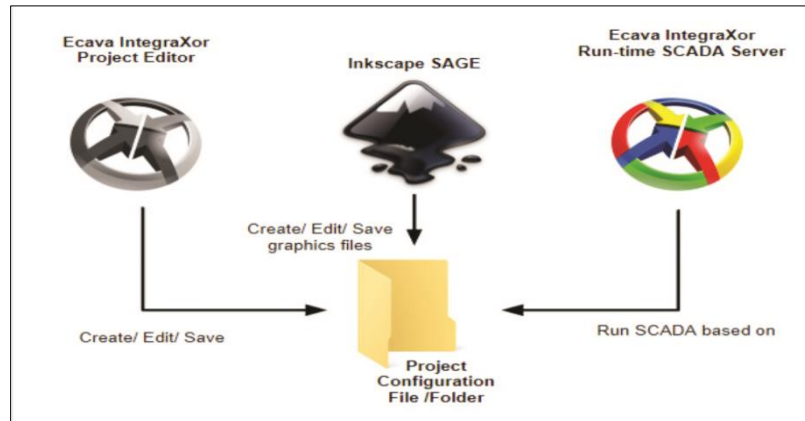
1- IntegraXor Project Configuration File /Folder: وهو عبارة عن المجلد الذي يحوي كافة العناصر

المتعلقة ببرنامج (SCADA) الذي تم إنشاؤه.

2- IntegraXor Project Editor: يستخدم لإنشاء وتحرير وحفظ جميع بارامترات برنامج (SCADA).

3- Inkscape SAGE: Inkscape) هو برنامج لتحرير الصور تم فيه إضافة المكون (SAGE) من قبل الشركة المصممة لبرنامج (Ecava IntegraXor) وذلك للسماح للمستخدم بتكوين وإضافة الرسوم المتحركة إلى واجهة المحاكاة (HMI).

4- IntegraXor SCADA Server: وهو الجزء المسؤول عن تشغيل برنامج (SCADA) يحتوي على واجهات تتيح مراقبة المهام ومدخلات ومخرجات البرنامج وزمن التشغيل.



الشكل (3-18): المكونات الرئيسية في برنامج (Ecava IntegraXor SCADA)

- مزايا برنامج Ecava IntegraXor :

يتصف برنامج (Ecava IntegraXor) بالعديد من المزايا منها:

1- إدارة قواعد البيانات: يؤمن برنامج (Ecava IntegraXor) تخزين البيانات في قواعد بيانات مختلفة وهذا يضمن التوافق مع مجموعة واسعة من قواعد البيانات بدءاً من قواعد البيانات مفتوحة المصدر وصولاً إلى قواعد البيانات التجارية مثل (Microsoft SQL , Oracle).

2- Process Trending: يتيح برنامج (Ecava IntegraXor) إنشاء صفحات ويب مكتوبة بلغة

(Java Script) يمكن من خلالها تتبع تغيرات نظام (SCADA) مع الزمن.

3- إدارة الإنذارات: يمكن إنشاء قائمة بالإنذارات ضمن برنامج (Ecava Editor) بحيث إذا تجاوزت القيم الحدود التصميمية يتم إعطاء إنذار لتنبيه المستخدم.

4- الحماية: يضمن برنامج (Ecava IntegraXor) الحماية لنظام (SCADA) من خلال تحديد البيانات الممكنة الوصول إليها.

5- Device Configuration: أي تعريف جهاز التحكم ونوعه وتعريف مدخلاته ومخرجاته وربطها بعناوين ضمن برنامج (Ecava Editor) وتحديد طريقة اتصال جهاز التحكم مع الحاسب إذا كان عن طريق منفذ الاتصال التسلسلي (Serial Port) أو عن طريق بروتوكول الاتصال (Modbus أو Ethernet).

- سيتم في الفصل اللاحق تصميم واجهة رسومية لتطبيقها في (MGCC) بالاعتماد على برنامج (ECAVA) تتضمن أيقونات مراقبة لكافة بارامترات الشبكة الميكروية والمحطة الفرعية. سيتم ربط الواجهة الرسومية إلى دائرة الاستطاعة لكل من الشبكة الميكروية و المحطة الفرعية المنجزة عبر برنامج الماتلاب.

الفصل الرابع

التطبيق العملي

- مقدمة:

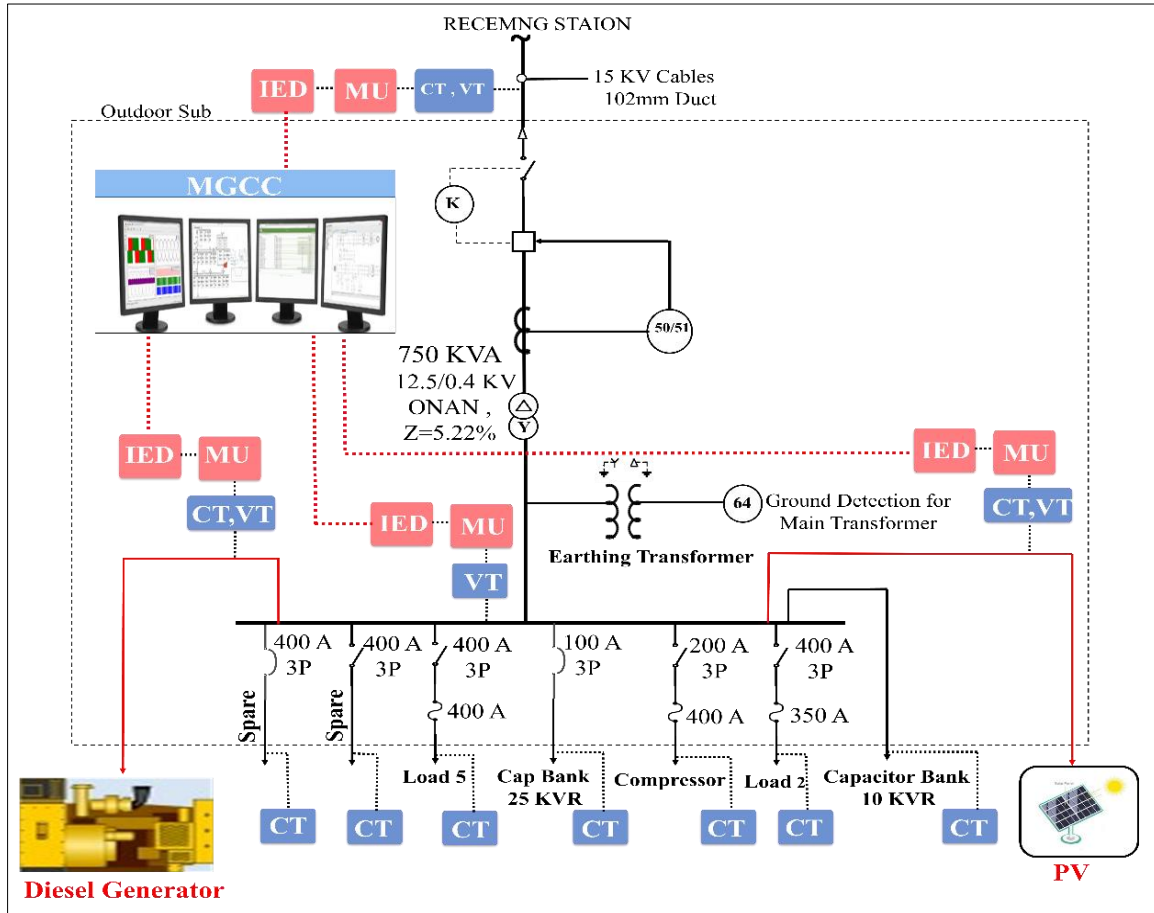
يقسم هذا الفصل إلى عدة نقاط رئيسية. يتم بدايةً الاعتماد على شبكة توزيع تقليدية مرجعية تم استخلاصها من الدراسات المرجعية. تتألف هذه الشبكة من محطة توزيع فرعية ثانوية ومجموعة من الأحمال بالإضافة إلى آليات الحماية التقليدية. في القسم الأول من هذا الفصل سيتم نمذجة هذه الشبكة عبر برنامج الماتلاب. يتم في القسم تشكيل واختبار إدماج التوليد الموزع إلى الشبكة التقليدية المدروسة وتشكيل الشبكة الميكروية. يتمثل التوليد الموزع المضاف بالتوليد التقليدي المعتمد على الآلة التزامنية المقادة بمحرك ديزل عبر نظام تحكم بالسرعة والجهد. يضاف إلى النوع التقليدي من التوليد مولد كهروضوئي شمسي. يتم اختبار الشبكة الميكروية من حيث تدفق القدرة واختبار توترات العقد للتأكد من مطابقة شروط عمل الأحمال الكهربائية للشروط الاسمية. في القسم الثالث من هذا الفصل يتم تقديم تصميم لنظام المزامنة المستخدم من أجل التخلص من الحالات العابرة عند إعادة وصل الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية. في القسم ماقبل الأخير من هذا الفصل يتم نمذجة وتصميم أنظمة الحماية الأساسية التقليدية ونظام الحماية الاحتياطية SABP واختباره على الشبكة الميكروية. في القسم الأخير من هذا الفصل يتم تصميم الواجهة الرسومية لنظام التحكم الإشرافي عبر برنامج (Web SCADA Ecava) وإظهار عمليات المراقبة وبارامترات النظام الكهربائي المدروس. سيتم عرض نتائج الدراسة المشار إليها آنفاً بعد كل قسم منها.

4-1- نمذجة الشبكة الميكروية باستخدام برنامج MATLAB:

للقيام بعملية النمذجة في البداية تم اختيار شبكة توزيع حقيقية مأخوذة من إحدى الدراسات المرجعية (Palizban et al, 2011). مكونة من محطة تحويل فرعية ثانوية استطاعتها (750 KVA)، بالإضافة إلى قضبان تجميع على مدخل ومخرج المحطة ومجموعة من الأحمال وأنظمة الحماية اللازمة وفق المواصفات القياسية المعتمدة بالإضافة إلى القواطع الآلية (الشكل 4-1).

لذلك حتى تستطيع هذه المحطة مواءمة عمل الشبكات الميكروية الذكية لابد من استخدام مجموعة من التجهيزات مثل وحدات الدمج (MU) لتحويل الإشارات التماثلية المأخوذة من محولات القياس التقليدية إلى إشارات رقمية يستطيع مركز التحكم المركزي بالشبكة الميكروية التعامل معها، واستخدام تجهيزات الكترونية ذكية (IEDs) تستطيع القيام بوظائف المراقبة والتحكم والحماية.

يبين الشكل (2-4) مخططاً للشبكة السابقة بعد أن قمنا بتشكيل مركز للتحكم (MGCC)، وبعد إدماج وحدتي التوليد (DG و PV) إلى قضبان التوتر المنخفض. كما تم إضافة وحدات الدمج (MU) التي تستخلص المعلومات من محولات الجهد والتيار (CT/VT) وتقوم بنقل المعلومات إلى أجهزة القياس الذكية (IED) التي تقوم بدورها بإيصال المعلومات الرقمية إلى مركز التحكم.



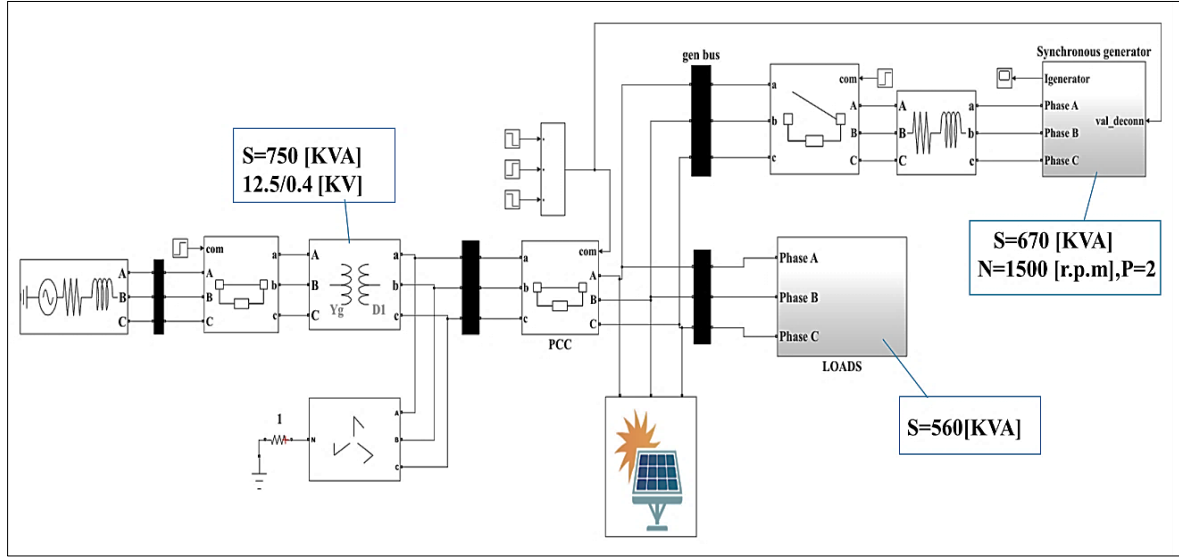
الشكل (2-4): مخطط الخط الواحد للمحطة الفرعية بعد تطويرها حسب المواصفات القياسية IEC 61850

- تمت نمذجة الشبكة المدروسة في بيئة الماتلاب البرمجية كما يوضح الشكل (4-3). يتم تغذية المحطة بتوتر (12.5 KV)، المحولة المستخدمة موصلة (مثلثي - نجمي) تبلغ استطاعتها (750 KVA) نسبة تحويلها (12.5/0.4 KV) وممانعتها التسريبية ($Z=5.2\%$). تبلغ استطاعة الأحمال التي تغذيها المحطة (560 KVA)، تم اختيار مولد تزامني باستطاعة (670 KVA) وسرعة دورانه (1500 r.p.m) لتأمين تغذية المحولة. كما تم اختيار مولد كهروضوئي شمسي بالمواصفات التالية:

الجدول (4-1): مواصفات المولد الكهروضوئي الشمسي

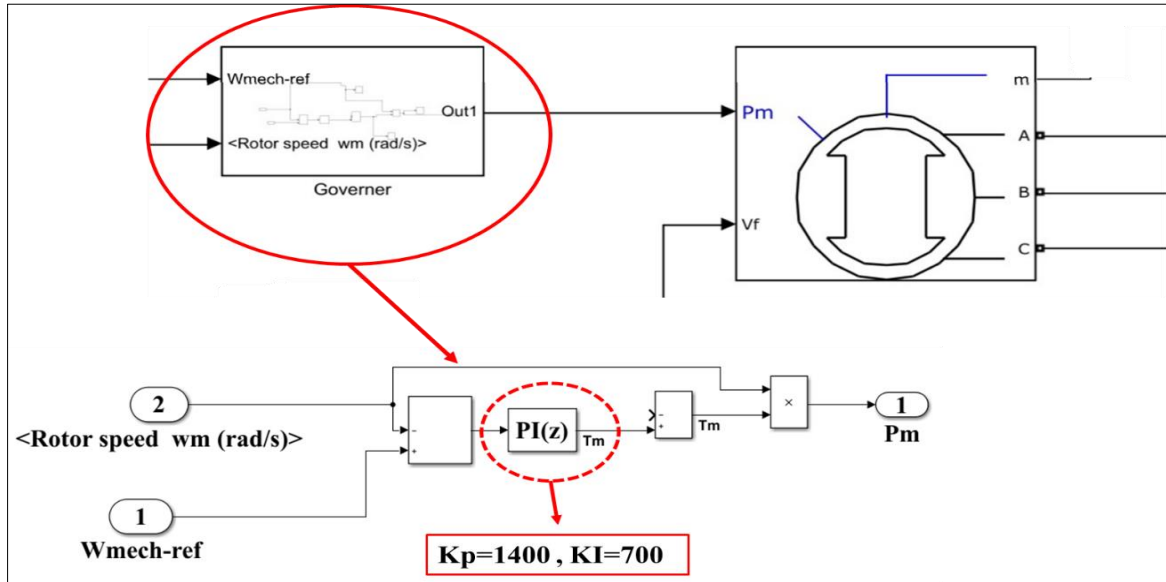
مواصفات المولد الكهروضوئي الشمسي (LONGI LR-4-72 HP)	
Pmax= 435 [Watt]	استطاعة اللوح الشمسي العظمى
Voc= 48 [V]	جهد الدارة المفتوحة
Isc= 11.39 [A]	تيار القصر
Vmp= 40.9 [V]	الجهد عند الاستطاعة العظمى
Imp= 10.64 [A]	التيار عند الاستطاعة العظمى
2	عدد الألواح الموصولة على التفرع
9	عدد الألواح الموصولة على التسلسل

تم ربط خرج المولد الكهروضوئي مع مقطع رافع للجهد (Boost Converter) لرفع الجهد على خرج المولد إلى (1200 [Volt])، ومن ثم استخدام معرج ثلاثي الطور لربط المولد الكهروضوئي مع الشبكة الميكروية وتمت عملية المزامنة لهذا المعرج مع الشبكة عن طريق استخدام (SRF-PLL).

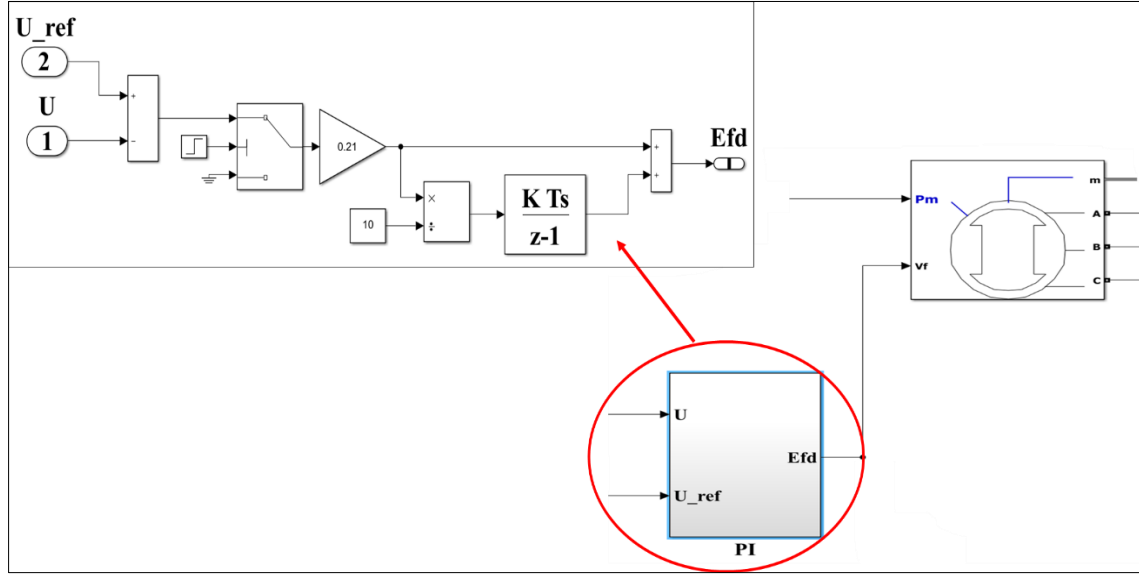


الشكل (3-4): نموذج الشبكة الميكروية المدروسة في الماتلاب

- يتطلب نموذج المولد التزامني المدرج في مكتبة برنامج الماتلاب إدخال الاستطاعة الميكانيكية وتوتر التهيج لذلك تم تصميم حلقة للتحكم بالاستطاعة الميكانيكية من خلال التحكم بالسرعة (الشكل 4-4)، وحلقة للتحكم بتوتر التهيج (الشكل 4-5).



الشكل (4-4): نمذجة حلقة التحكم بالاستطاعة الميكانيكية للمولد التزامني



الشكل (4-5): نمذجة حلقة التحكم بتوتر التهييج للمولد التزامني

نلاحظ من حلقة التحكم بالسرعة أننا بحاجة إلى سرعة دوران مرجعية دائماً، يتم تقدير سرعة الدوران بالاعتماد على تردد الشبكة الكهربائية. حيث يتم تقدير التردد بشكل لحظي وعبر نظام (PLL). يؤمن ذلك فرق صفحة صغير عند عملية إعادة الوصل وبالتالي تقليل الحالة العابرة للتردد.

4-2- تطبيق نظام من أجل إعادة وصل الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية:

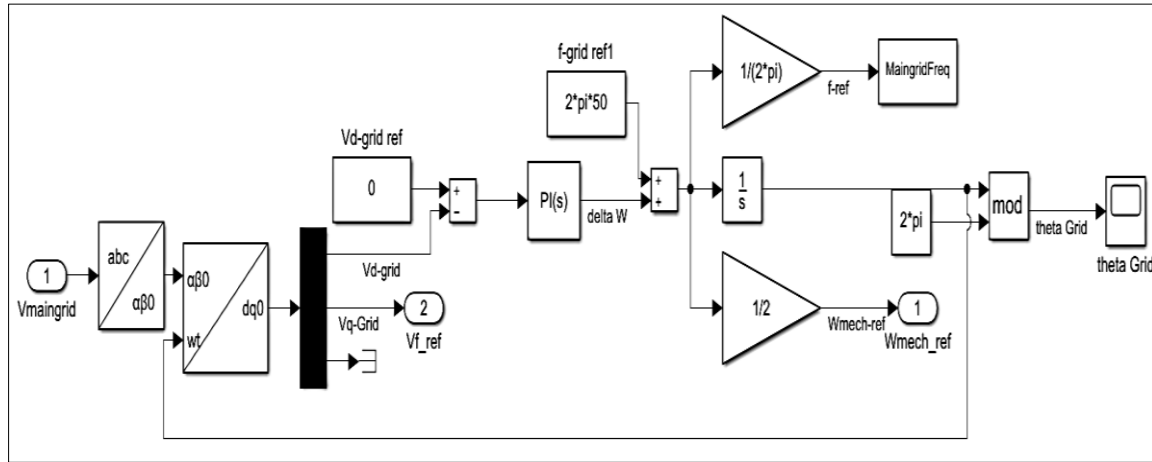
يتطلب القيام بعملية ربط الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية التحقق أولاً من شروط التزامن قبل إجراء عملية الوصل وذلك لتفادي حدوث حالات عابرة تتسبب بارتفاع التيار والجهد وبالتالي التأثير على التجهيزات الموجودة في الشبكة. تم تحديد متطلبات عملية التزامن تبعاً للمواصفات القياسية (IEEE 1547) والتي تنص على أن عملية إعادة الاتصال يجب أن تتم عندما يكون فرق التردد وفرق الجهد وفرق زاوية الطور بين الشبكة الميكروية والشبكة الرئيسية على جانبي القاطع عند نقطة الربط المشتركة (PCC) ضمن الحدود الواردة في الجدول

التالي (Shi et al, 2014):

الجدول (4-2): متطلبات إعادة الاتصال للشبكة الميكروية IEEE 1547

القيمة المتوسطة لاستطاعة المولدات الموزعة (KVA)	فرق التردد (HZ)	فرق الجهد (%)	فرق زاوية الطور (degree)
0-500	0.3	10	20
>500-1500	0.2	5	15
>1500-10000	0.1	3	10

لذا سيتم استخدام نظام الحلقة المقفلة طورياً ذات الإطار المرجعي المتزامن (SRF-PLL) لضمان عملية إعادة الاتصال السلس للشبكة الميكروية المدروسة مع الشبكة الرئيسية ونمذجة هذا النظام باستخدام برنامج الماتلاب (الشكل 4-6).



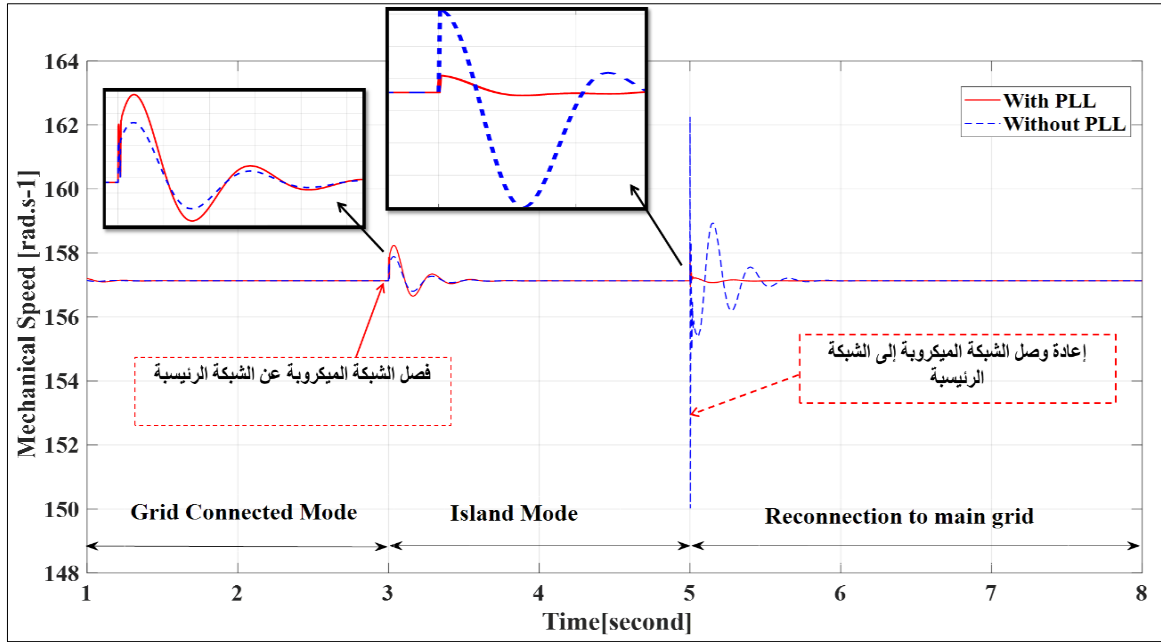
الشكل (4-6): نمذجة (SRF-PLL) باستخدام الماتلاب

نورد فيما يلي نتائج عملية إعادة وصل الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية وفق عدة سيناريوهات تتلخص بثلاث اختبارات.

4-2-1- نتائج اختبار عملية إعادة وصل الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية:

الاختبار الأول: نفرض بدايةً أن المولد الكهروضوئي الشمسي مفصول. إن ذلك يتيح معرفة وتحليل عملية المزامنة على التردد بشكل واضح. يقارن الاختبار بين حالتين مختلفتين، الحالة الأولى عند أخذ القيمة المرجعية لسرعة الدوران من (PLL) ومقارنتها عند أخذ قيمة مرجعية ثابتة تساوي السرعة الاسمية. وكذلك الأمر بالنسبة للتوتر.

يوضح الشكل (4-7) تغيرات السرعة الميكانيكية للمولد التزامني الموجود ضمن الشبكة الميكروية وذلك في حالة فصل الشبكة الميكروية عن الشبكة الرئيسية وفي حالة إعادة الوصل. يمكن الملاحظة من الشكل أنه عند أخذ إشارة التزامن من (PLL) تمت عملية إعادة وصل الشبكة الميكروية إلى الشبكة الرئيسية بشكل سلس ودون حدوث تغيرات كبيرة في السرعة وبالتالي التردد. أما في حال عدم وجود نظام (PLL) تحدث حالة عابرة أثناء عملية إعادة الوصل وتغير سرعة المولد من سرعة التزامن المساوية (157 [rad/sec]) إلى (162 [rad/sec]) أي ارتفاع التردد إلى (52 [Hz]).



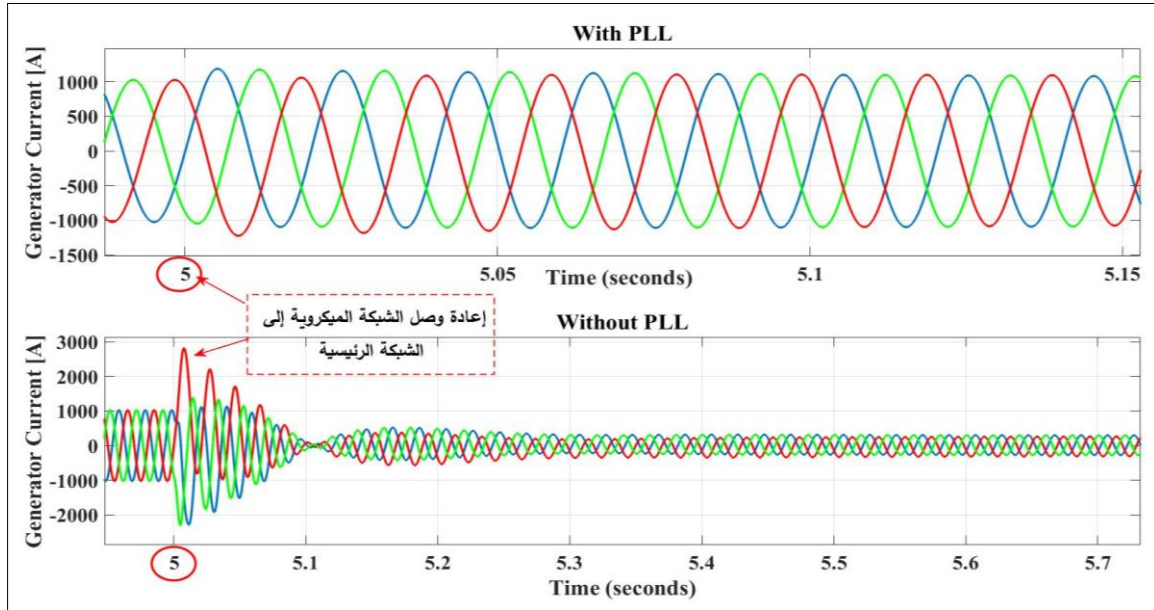
الشكل (4-7): تغيرات السرعة الميكانيكية للمولد عند فصل الشبكة الميكروية عن الشبكة الرئيسية وعند إعادة الوصل

في الواقع تنتج الحالة العابرة الحاصلة عند اللحظة (3 ثانية) والتي تمثل حالة فصل الشبكة الميكروية عن الشبكة الرئيسية، بسبب سلوك حلقة التحكم بالسرعة للآلة التزامنية، حيث طبقنا المتحكم التناسبي التكاملي وبزمن استقرار قريب من (200 msec).

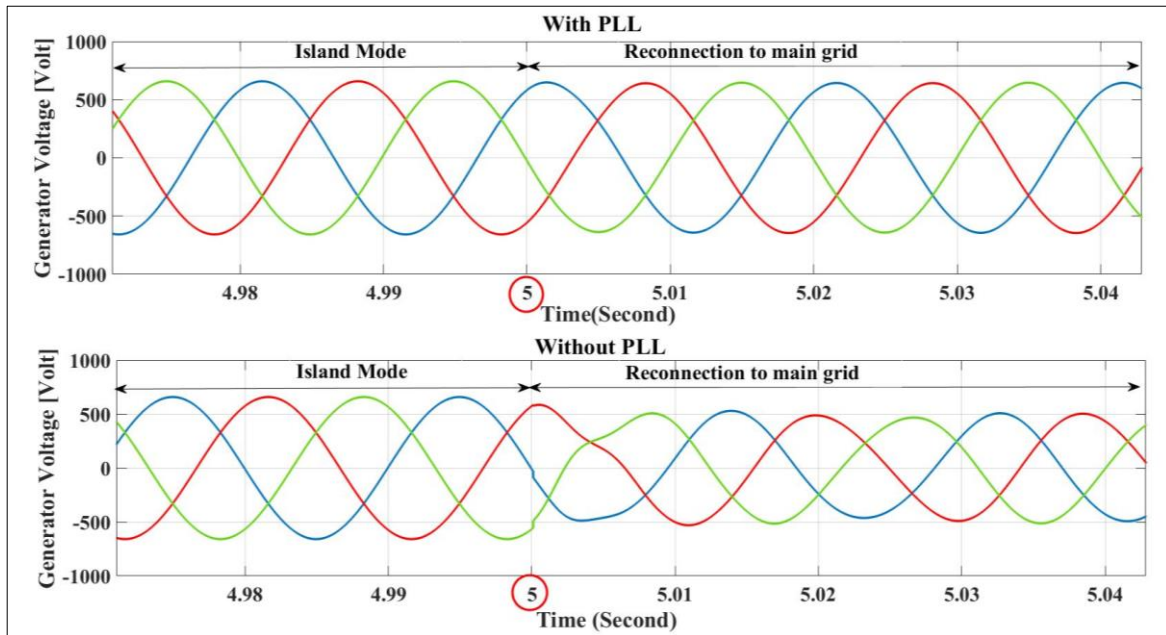
نلاحظ سلوك متشابه للآلة التزامنية بحال وجود (PLL) أو بدونها وذلك طالما أنَّ الآلة التزامنية انتقلت من حالة عمل بتردد ثابت قبل عملية الفصل إلى حالة تردد مشابه ثابت في حالة الفصل عن الشبكة. إنَّ الحالة الحرجة للسرعة تظهر في عملية إعادة الوصل مع الشبكة الرئيسية. عند إعادة وصل الآلة التزامنية إلى الشبكة يقوم عزم التزامن الداخلي للآلة التزامنية بالمحافظة على تزامن الآلة مع توتر الشبكة. عند عدم وجود نظام مزامنة مع توتر الشبكة، تعمل الآلة التزامنية عند زاوية استطاعة محددة وفق حالة التحميل. بالتالي عند إعادة الوصل مع الشبكة يحدث تغير فجائي على زاوية الاستطاعة للآلة التزامنية ويحاول عزم التزامن الداخلي إعادتها إلى قيمة محددة محافظاً على استقرار الآلة بعد عدة اهتزازات. وهذا ما نشاهده من الشكل (4-7) حيث تظهر حالة عابرة ذات مطال كبير بسبب كون السرعة الميكانيكية المفروضة ذات قيمة ثابتة. إن وجود آلية التزامن لحظة إعادة الوصل من شأنه أن يخفف من مجال تغيرات زاوية الاستطاعة للآلة التزامنية وبالتالي تقليل مطال الحالة العابرة. حيث لحظة إعادة الوصل وبوجود نظام التزامن يطرأ بدايةً تغيير على زاوية الاستطاعة للآلة التزامنية ويحاول عزم التزامن الداخلي إعادتها إلى قيمتها الأولية لكن يساهم تغيير القيمة المرجعية لسرعة الدوران لحظة إعادة الوصل والمقدرة من توتر الشبكة في التقليل من مطال تغيرات زاوية الاستطاعة وبالتالي سرعة الدوران.

نلاحظ من الاشكال (4-8) و (4-9) على التوالي بعد عملية إعادة الوصل باستخدام (PLL) عدم حدوث ارتفاعات كبيرة في قيم تيار وجهد المولد إنما حدوث اضطراب بسيط يستمر لمدة (5 msec). يقابل ذلك عند القيام بعملية إعادة الوصل من دون (PLL) فنلاحظ تغيرات السرعة الميكانيكية وبالتالي تغيرات التردد ستؤدي إلى حدوث ارتفاع في قيمة تيار المولد بلحظة إعادة الوصل وحدث اضطراب في موجة التيار يستمر لحوالي

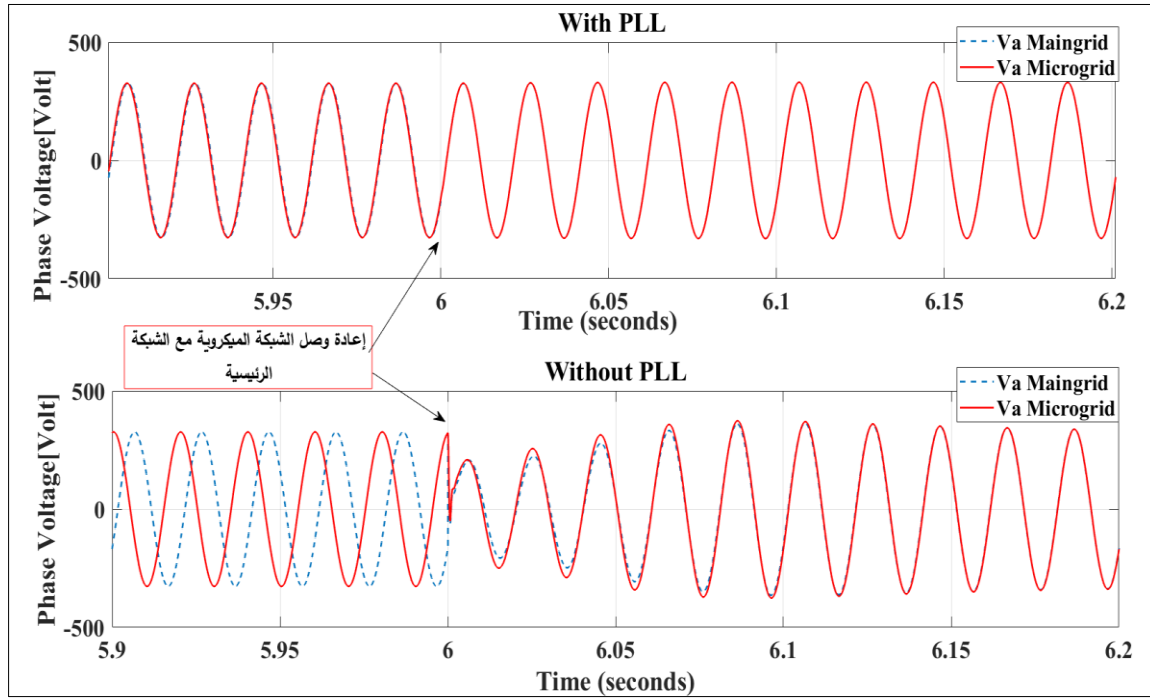
(0.6 [sec]). يعزى السبب في تغيير قيمة التيار عند عدم وجود (PLL) إلى الحالة العابرة في سرعة الدوران وسلوك الآلة عند تلك الحالة. حيث تعمل الشبكة الميكروية بتوتر ذو فرق صفحة مختلف عن توتر الشبكة الميكروية قبل إعادة الوصل وعند العمل بدون وجود (PLL) يوضح ذلك الأشكال (4-10) و(4-11).



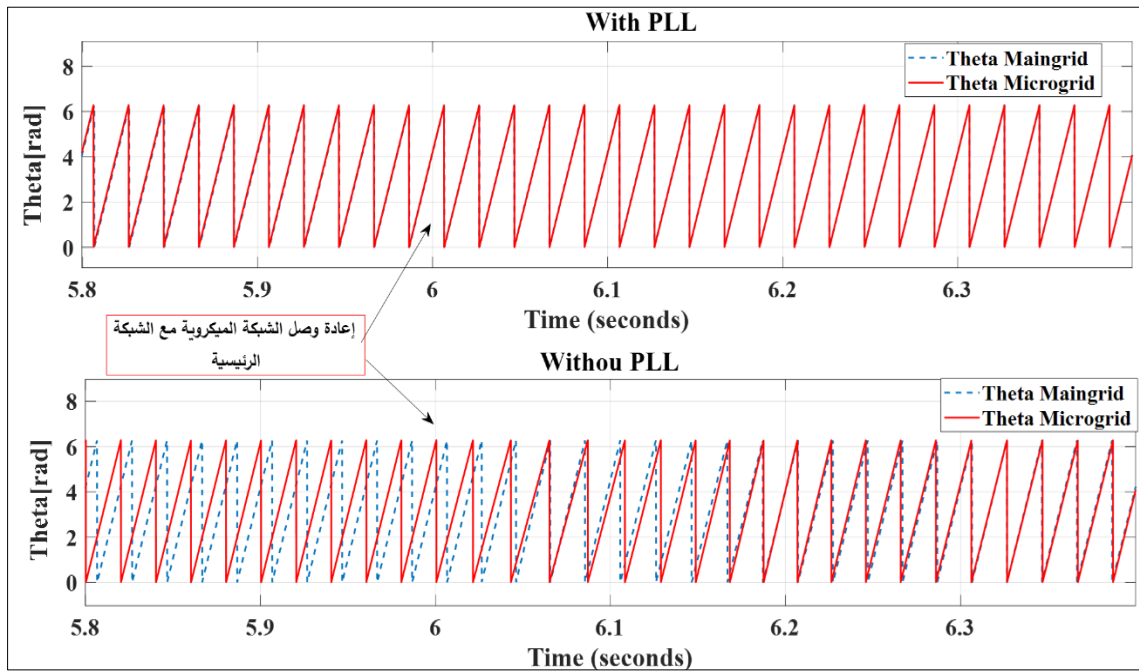
الشكل (4-8): تيار المولد لحظة إعادة وصل الشبكة الميكروية إلى الشبكة الرئيسية



الشكل (4-9): الجهد على أطراف المولد التزامني لحظة إعادة وصل الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية



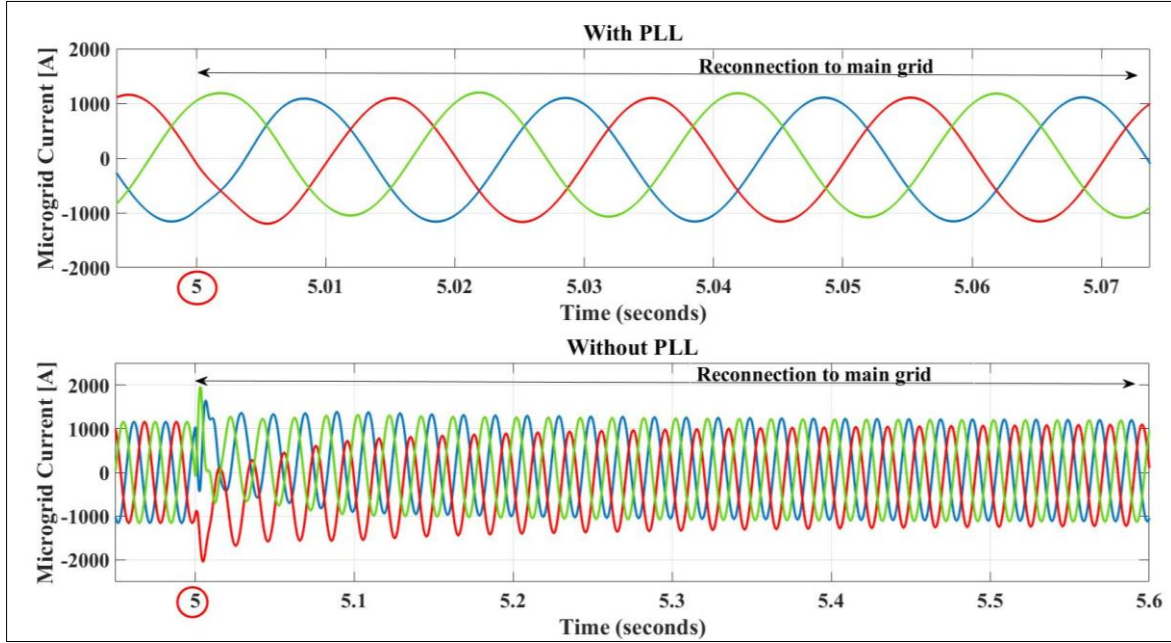
الشكل (4-10): توتر أحد أطوار الشبكة الميكروية والشبكة الرئيسية لحظة إعادة الوصل



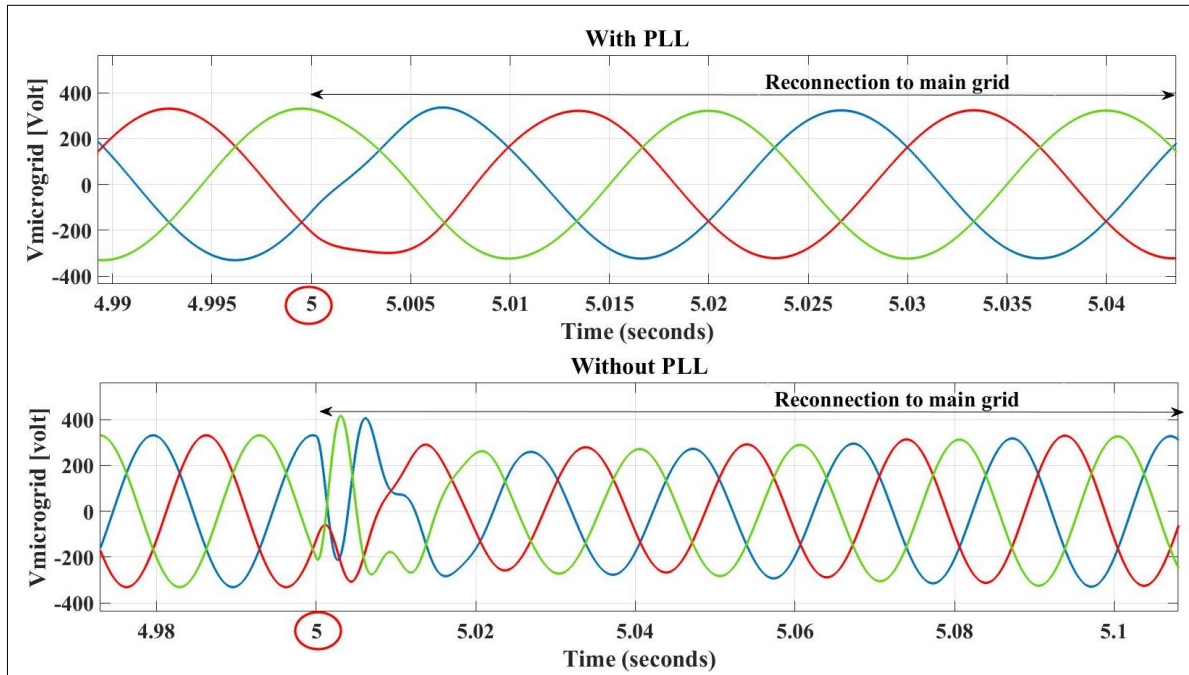
الشكل (4-11): فرق الصفحة بين توتر الشبكة الميكروية والرئيسية لحظة إعادة الوصل

نلاحظ نفس الأمر بالنسبة لتغيرات تيار وجهد الشبكة الميكروية عند نقطة الربط المشتركة (PCC) لحظة إعادة

الوصل والموضحة بالأشكال (4-12) و (4-13) على الترتيب.



الشكل (4-12): تيارات الأطوار الثلاثة للشبكة الميكروية عند نقطة الربط المشتركة (PCC) لحظة إعادة الوصل

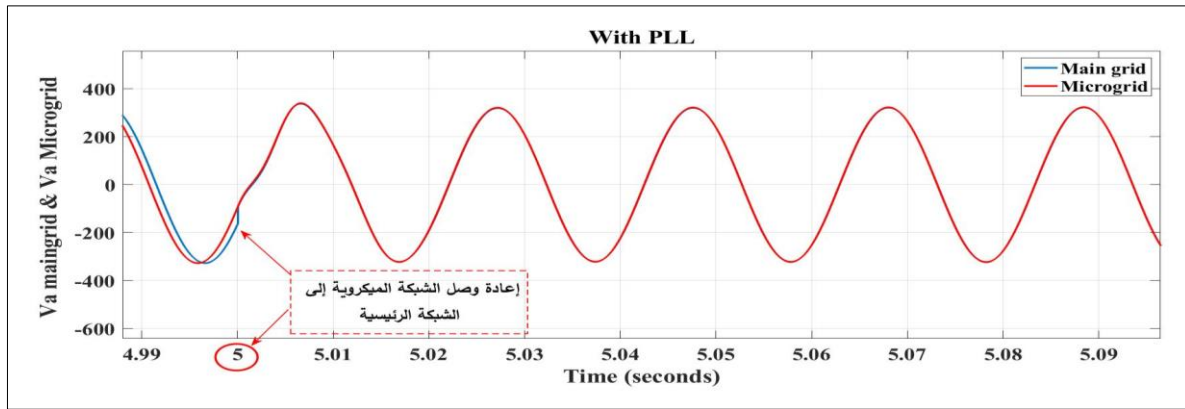


الشكل (4-13): توترات الأطوار الثلاثة للشبكة الميكروية عند نقطة الربط المشتركة (PCC) لحظة إعادة الوصل

- الاختبار الثاني:

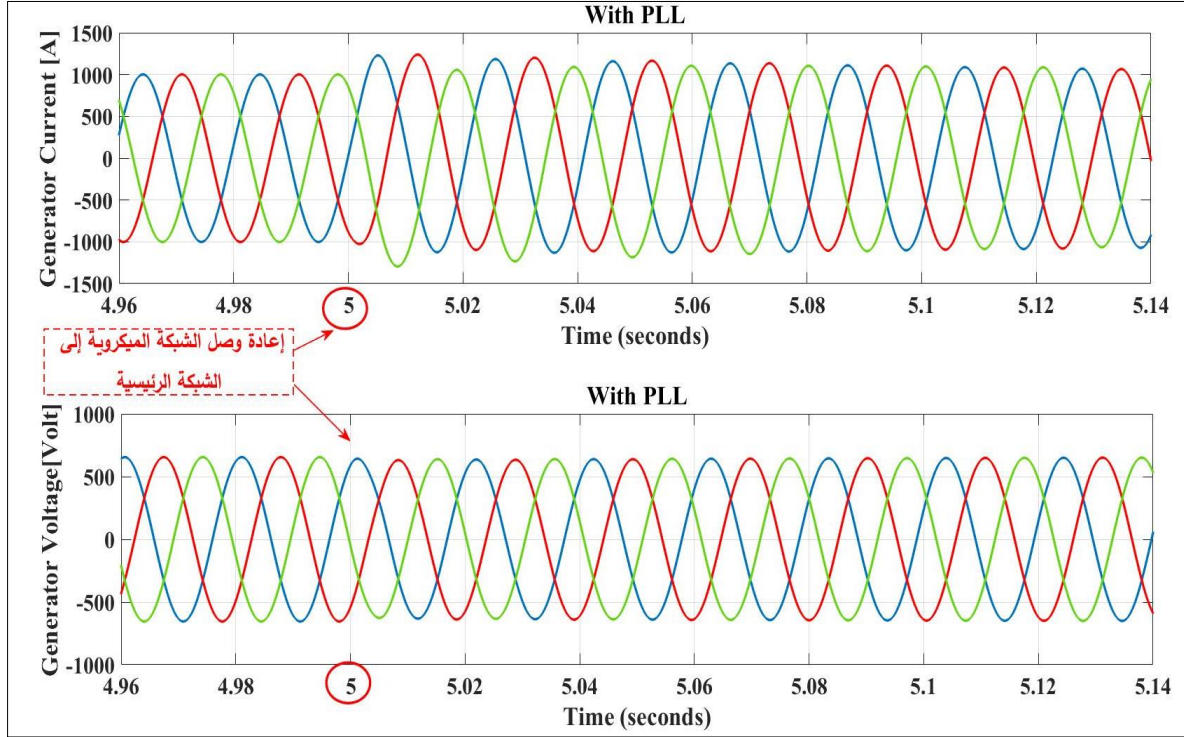
سيتم في هذا الاختبار تغيير تردد الشبكة الرئيسية إلى القيمة (49 [Hz]) واختبار عملية إعادة الوصل باستخدام نظام (PLL) وباعتبار أن المولد الكهروضوئي الشمسي مفصول عن الشبكة الميكروية.

يوضح الشكل (4-14) جهد أحد أطوار الشبكة الميكروية وجهد طور من أطوار الشبكة الرئيسية عند نقطة الربط المشتركة (PCC) لحظة إعادة الوصل ويلاحظ أن عملية إعادة الاتصال بين الشبكتين تمت دون حدوث ارتفاع بالجهد.



الشكل (4-14): توتر الطور الأول للشبكة الميكروية وتوتر الطور الأول للشبكة الرئيسية عند نقطة الربط المشتركة (PCC) وفي لحظة إعادة الوصل عند تردد (49 HZ)

يبين الشكل (4-15) تغيرات تيار وجهد المولد التزامني عند لحظة إعادة الوصل، حيث يلاحظ أن عملية إعادة وصل الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية تمت بشكل سلس ودون حدوث ارتفاع بقيمة التيار والجهد.



الشكل (4-15): تيارات وتوترات الأطوار الثلاثة للمولد التزامني لحظة إعادة الوصل عند تردد (49 HZ)

نجد من خلال مناقشة النتائج السابقة أن نظام (SRF-PLL) المطبق يعمل على تتبع فرق الصفحة لإشارة الدخل المرجعية (المتتمثلة بالإشارة المأخوذة من الشبكة الرئيسية) وبالتالي تقدير قيمة التردد وذلك لضمان عملية إعادة وصل للشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية ودون حدوث حالات عابرة.

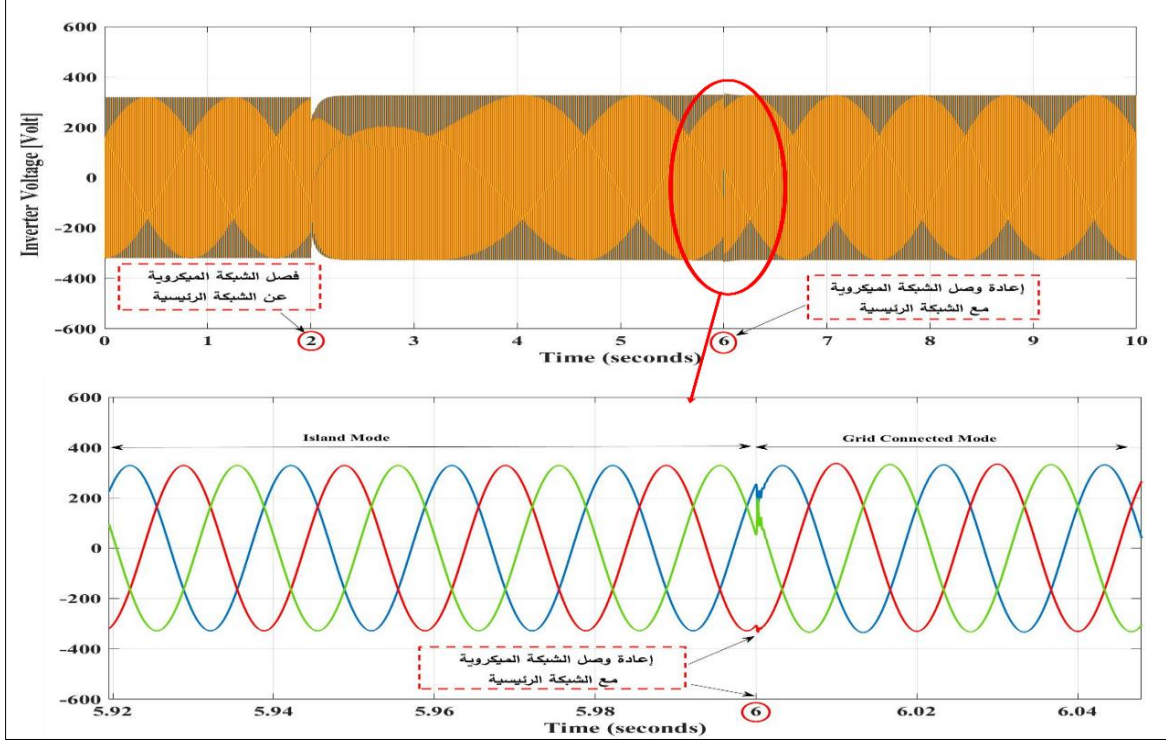
- الاختبار الثالث:

سيتم فيه التحقق من عملية إعادة وصل الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية وذلك في حالة وصل مولد كهروضوئي شمسي إلى الشبكة الميكروية.

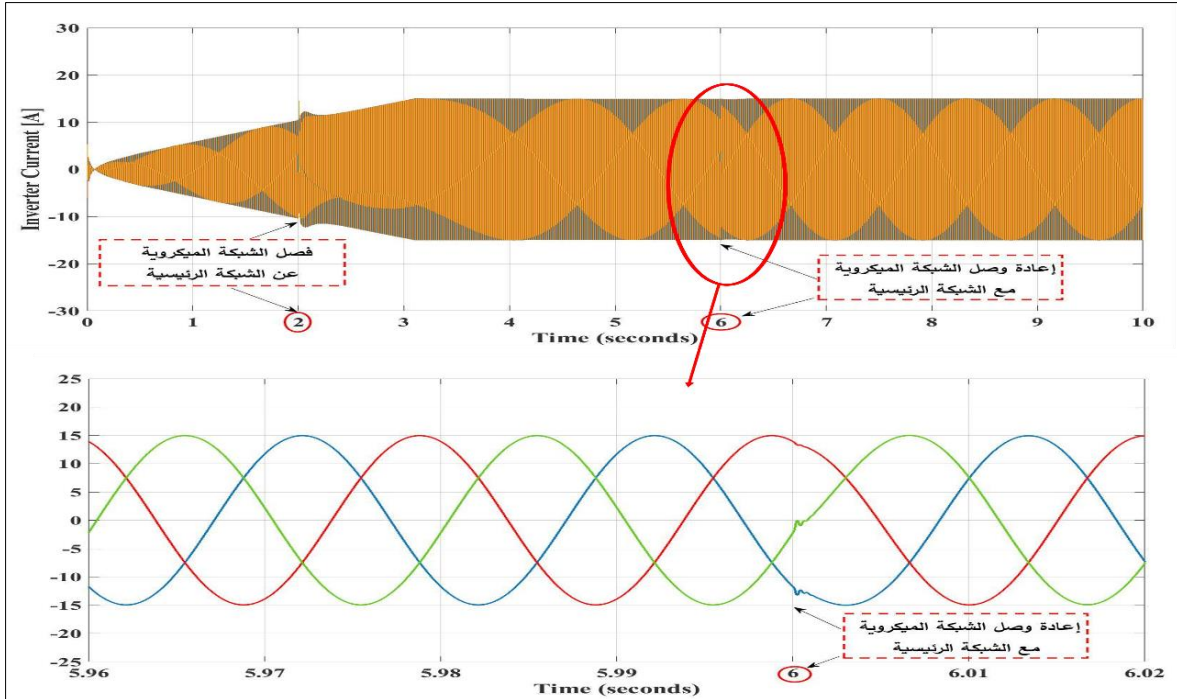
توضح الأشكال التالية تأثير الانتقال بين وضعيات التشغيل المختلفة للشبكة الميكروية على المولد الكهروضوئي الشمسي ، مع الأخذ بالاعتبار وجود نظام المزامنة للمولد التزامني.

نلاحظ من الشكل (4-16) التأثير البسيط لتوتر خرج المولد الكهروضوئي والحالة العابرة ذات المطال الصغير

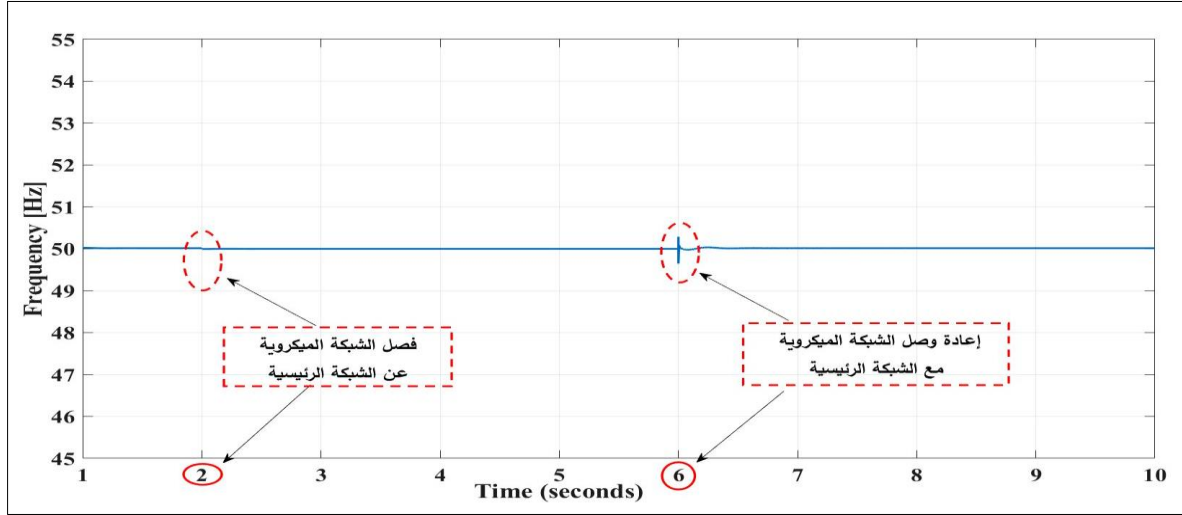
نسبياً للتردد المقدر من قبل حلقة (PLL) الخاصة بالمولد الكهروضوئي الشمسي كما في الشكل (4-18).



الشكل (4-16): توترات الأطوار الثلاثة للمعرج عند أوضاع التشغيل المختلفة للشبكة الميكروية



الشكل (4-17): تيارات الأطوار الثلاثة للمعرج عند أوضاع التشغيل المختلفة للشبكة الميكروية

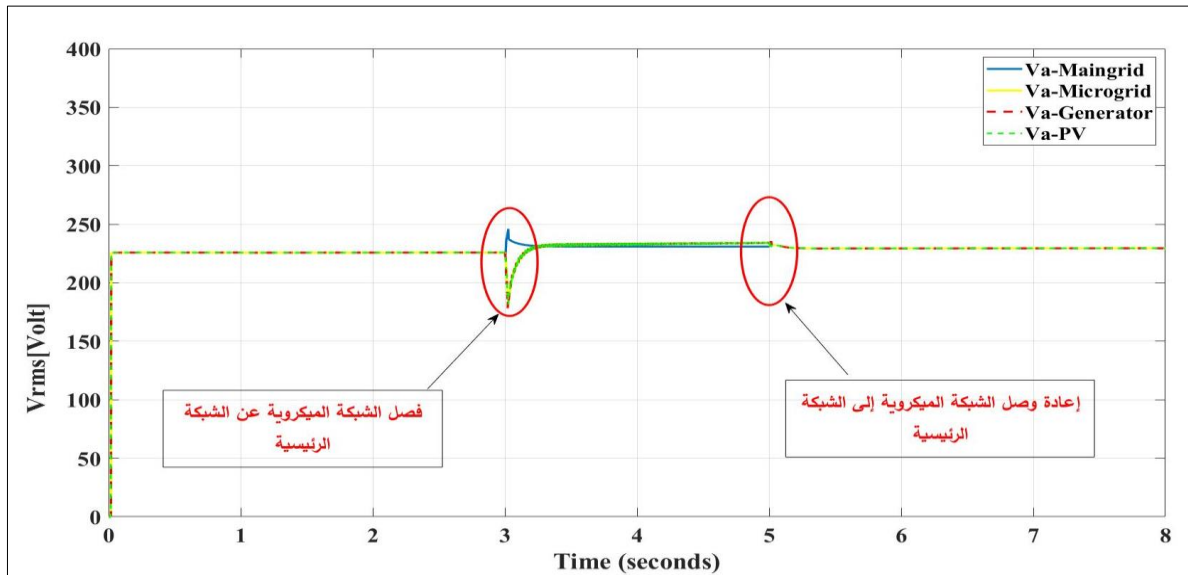


الشكل (4-18): تغيرات التردد عند فصل الشبكة الميكروية وعند إعادة وصلها مع الشبكة الرئيسية

يوضح الشكل (4-19) تغيرات القيمة الفعالة لجهد كل من الشبكة الميكروية والشبكة الرئيسية والمولد الكهروضوئي

عند فصل الشبكة الميكروية عن الشبكة الرئيسية وعند إعادة الوصل. نلاحظ أيضاً عدم حدوث تغير في القيم

الفعالة للجهود لحظة إعادة الوصل.



الشكل (4-19): تغيرات القيمة الفعالة لجهد كل من الشبكة الرئيسية والميكروية والمولد

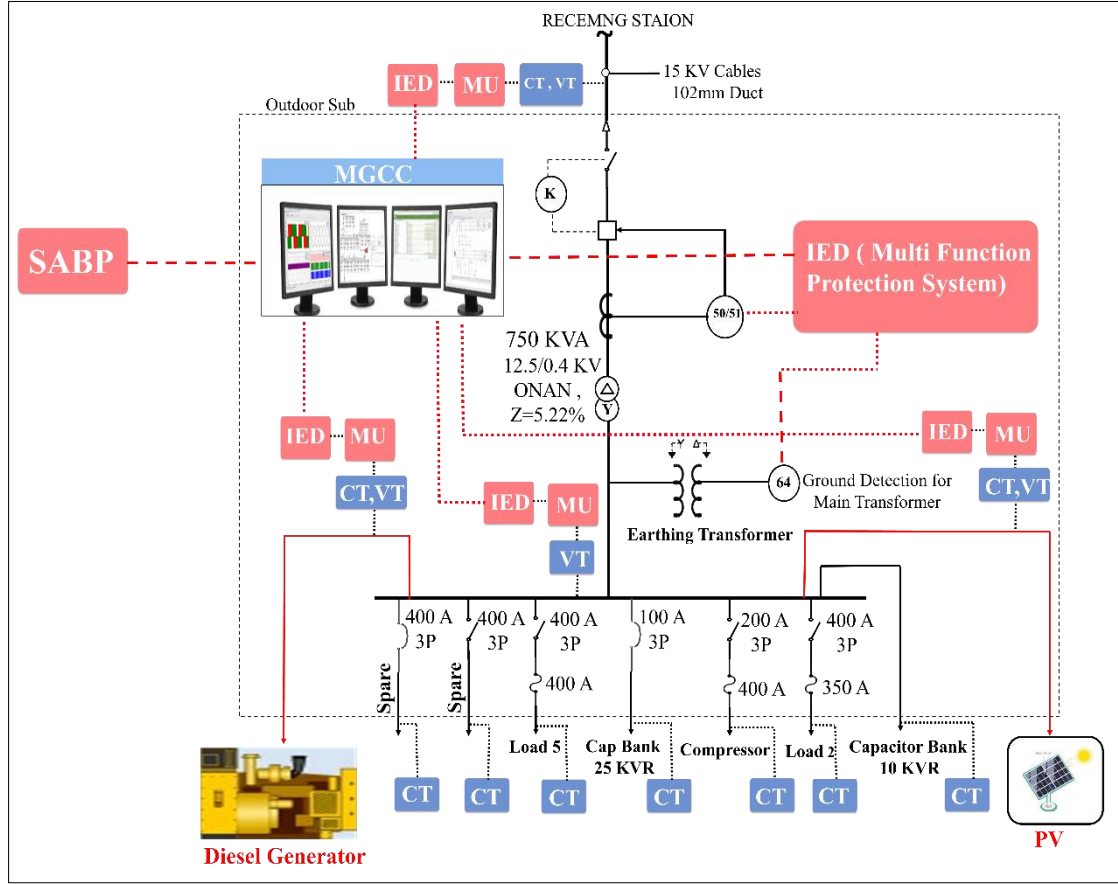
عند أوضاع التشغيل المختلفة للشبكة الميكروية

بعد استعراض نتائج اختبار نظام المزامنة (SRF-PLL) بعد إضافة المولد الكهروضوئي إلى الشبكة الميكروية يمكن الملاحظة أن عملية إعادة اتصال الشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية تمت دون حدوث حالات عابرة في التيار والجهد والتردد الأمر الذي يضمن سلامة المولدات الموزعة والأحمال الموجودة ضمن الشبكة الميكروية إضافةً إلى تجنب التشغيل الخاطئ لتجهيزات الحماية .

4-3- نمذجة نظام الحماية للمحطة الفرعية المدروسة:

يتكون نظام الحماية للمحطة الفرعية التي تم أخذها من إحدى الدراسات المرجعية من نظام حماية أساسي يحوي نوعين من الحماية هي الحماية من زيادة التيار والحماية من العطل الأرضي. سيجري تطوير لنظام الحماية للمحطة من خلال تطبيق خوارزمية الحماية الاحتياطية (SABP) فيها لضمان حماية المحولة وباقي التجهيزات الموجودة ضمن المحطة وضمن الشبكة الميكروية (الشكل 4-20).

وسيتم إجراء عملية النمذجة للحمايات الأساسية وللحماية الاحتياطية (Substation Area Backup Protection) باستخدام برنامج الماتلاب.



الشكل (4-20): مخطط الخط الواحد للشبكة الميكروية المقترحة بعد تطبيق نظام الحماية الاحتياطية

ضمن المحطة الفرعية المدروسة

4-3-1- نمذجة نظام الحماية الأساسية للمحطة الفرعية المدروسة:

كما ذكرنا أن نظام الحماية الأساسية يحتوي على حماية من زيادة التيار والحماية من العطل الأرضي سيتم دمج

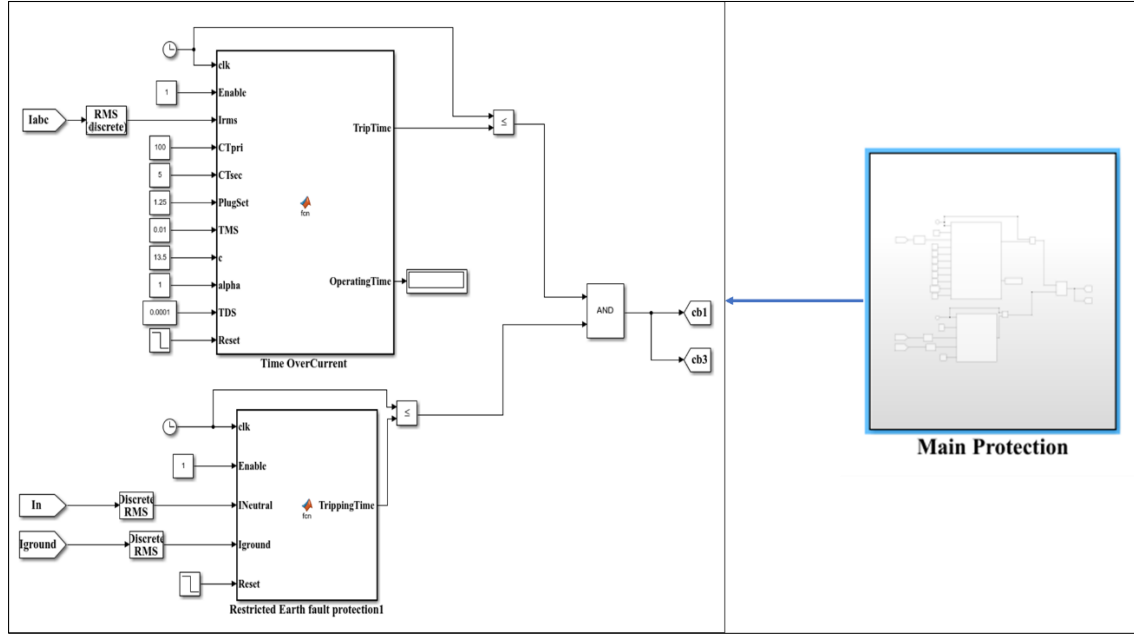
وظائف عمل كل من الحمايتين ضمن تجهيزة الكترونية ذكية (IED: Multi Function Protection System)

حيث ستعمل هذه التجهيزة في حال تحقق شرط عمل أي من الحمايتين بإرسال الأمر لفصل القواطع.

يوضح الشكل (4-21) عملية نمذجة نظام الحماية الأساسي ضمن الماتلاب. حيث يتألف النموذج من قسمين

الحماية من العطل الأرضي بالإضافة إلى الحماية من زيادة التيار ذو المميزية الزمنية العكسية. سنقوم بتقديم كلا

نوعي الحماية في الفقرات اللاحقة.

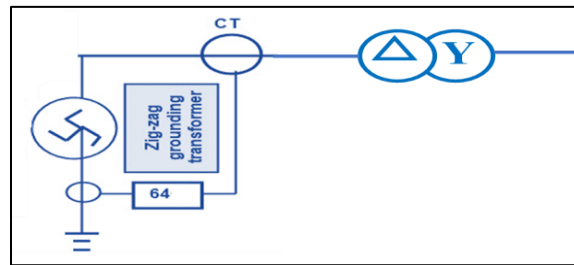


الشكل (4-21): نمذجة نظام الحماية الأساسية للمحطة المدروسة ضمن برنامج الماتلاب

4-1-3-1- نموذج الحماية من العطل الأرضي باستخدام برنامج الماتلاب:

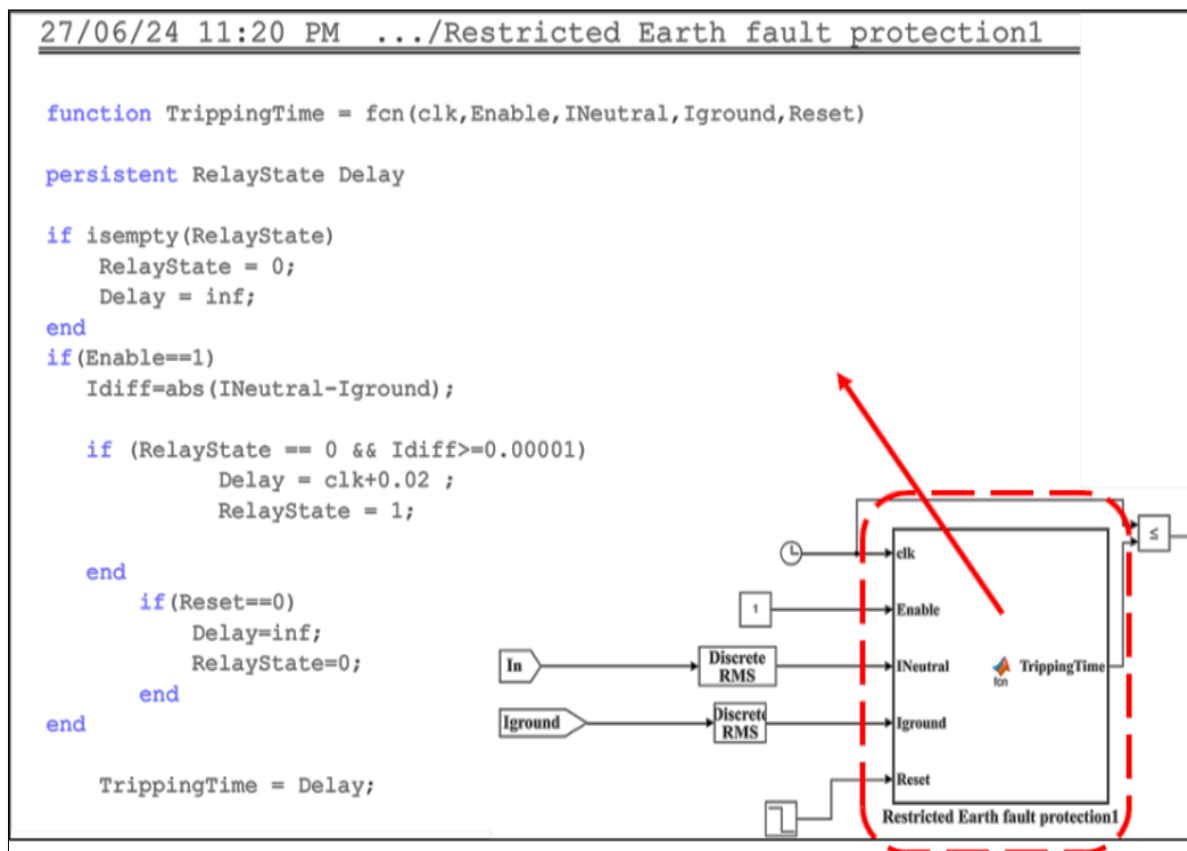
استخدمت الحماية من العطل الأرضي في المحطة المدروسة لتأمين حماية المحولة من تيارات التسريب الأرضية. يعتمد مبدأ عمل هذه الحماية على مقارنة مجموع تيارات الأطوار الثلاثة للمحولة مع تيار الناقل الأرضي الشكل (4-22).

في حالة العمل الطبيعية أو حالة حدوث عطل خارج المنطقة المحمية سيكون الفرق بين هذه التيارات مساوياً للصفر أما في حال حدوث عطل داخل المنطقة المحمية (المحولة) سينشأ فرق بين هذه التيارات وستستجيب الحماية لهذا الفرق وتعطي الأمر بفصل القواطع وعزل العطل.



الشكل (4-22): مبدأ عمل الحماية من العطل الأرضي

يوضح الشكل (4-23) نمذجة آلية عمل هذه الحماية ضمن برنامج الماتلاب بالاعتماد على (Matlab Function). يحوي التابع الذي تم إنشاؤه على عدة مداخل تتمثل بمجموع تيارات الأطوار الثلاثة (INeutral) والتيار الناقل الأرضي (Iground) ومدخل (Enable) لتفعيل أو إلغاء تفعيل عمل الحماية ومدخل (Reset) لإعادة ضبط الحماية. أما خرج التابع فهو إشارة الفصل التي سيتم إرسالها للقواطع. كما يبين الشكل الكود البرمجي لإنجاز الحماية المدروسة.



الشكل (4-23): تابع الماتلاب المعبر عن عمل الحماية من العطل الأرضي

4-3-1-2- نموذج الحماية من زيادة التيار الزمنية العكسية باستخدام برنامج الماتلاب:

أجريت عملية النمذجة لهذه الحماية من خلال إنشاء تابع ضمن برنامج الماتلاب يتم فيه مقارنة تيار دخل الحماية مع قيمة تيار عمل الحاكمة التي يتم ضبطها (Ipickup). عند قيمة تيار أكبر من القيمة المحددة ستعمل الحماية

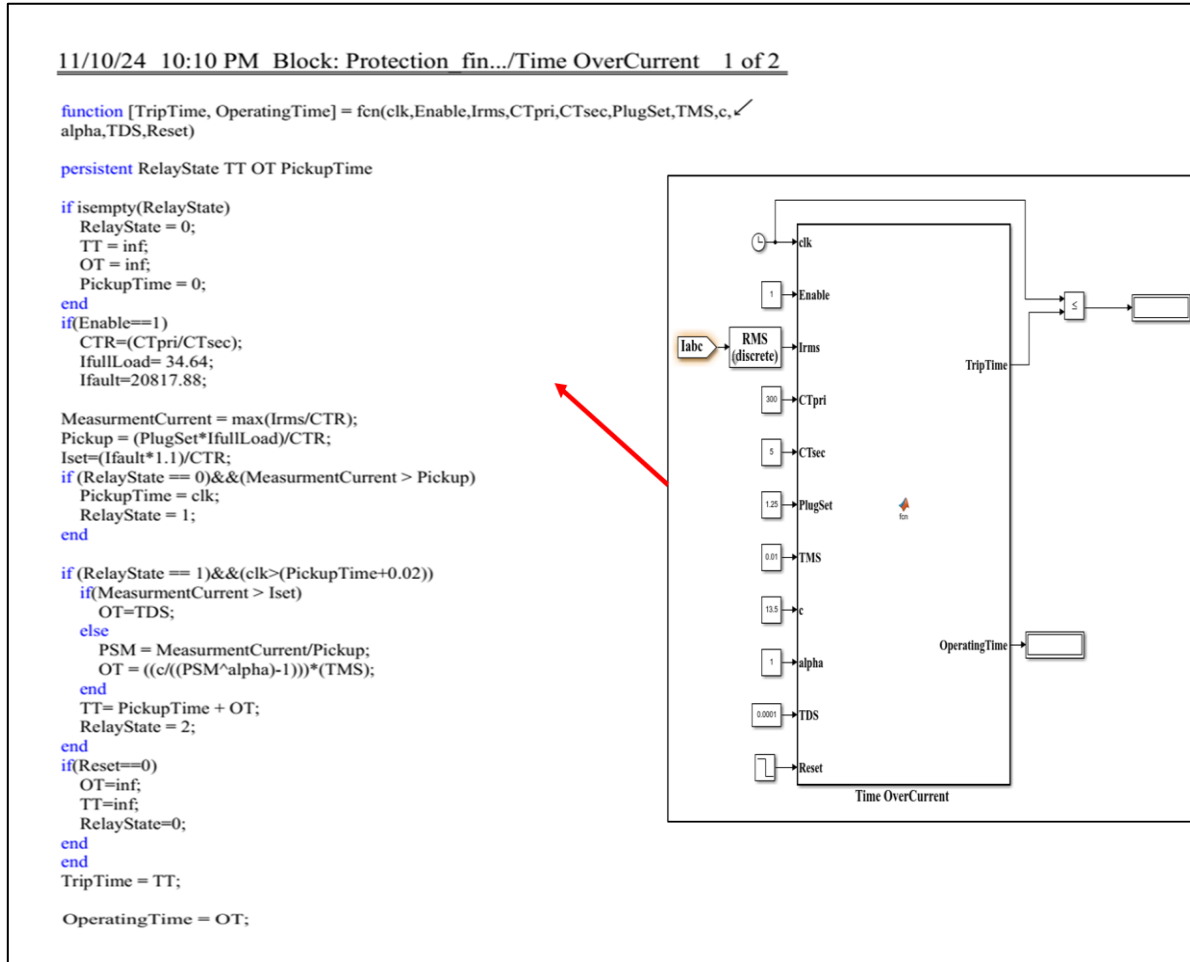
على إرسال الأمر لفصل العطل بعد تأخير زمني متناسب عكساً مع قيمة التيار والذي يحسب من المعادلة التالية (Almas,2012):

$$T = \frac{C}{\left(\frac{I}{I_{pickup}}\right)^\alpha - 1} * TMS$$

حيث: C, α ثوابت تتعلق بمنحني خصائص حاكمة الحماية.

TMS للتحكم بزمان فصل الحماية.

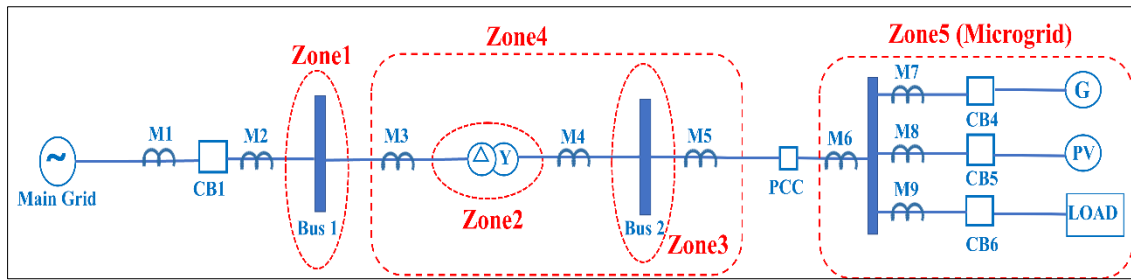
يوضح الشكل (4-24) التابع الذي تم إنشاؤه ضمن الماتلاب لنمذجة عمل الحماية من زيادة التيار.



الشكل (4-24): تابع الماتلاب المعبر عن عمل الحماية من زيادة التيار الزمنية العكسية

4-3-2- تطبيق نظام الحماية الاحتياطية (SABP) في المحطة الفرعية المدروسة:

كما ذكرنا في الفصل السابق من هذا البحث أن مبدأ عمل نظام الحماية الاحتياطية (SABP) يعتمد على تقسيم المحطة إلى مناطق تفاضلية متداخلة وحساب التيار التفاضلي وتيار العمل لكل منطقة من المناطق. لذا إن تطبيق هذا النظام في المحطة المدروسة وتبعاً لمخطط الطور الواحد لها يتطلب تقسيم المحطة إلى خمس مناطق تفاضلية كما يبين الشكل (4-25).



الشكل (4-25): مخطط الطور الواحد للمحطة الفرعية المدروسة موضحاً عليه مناطق الحماية

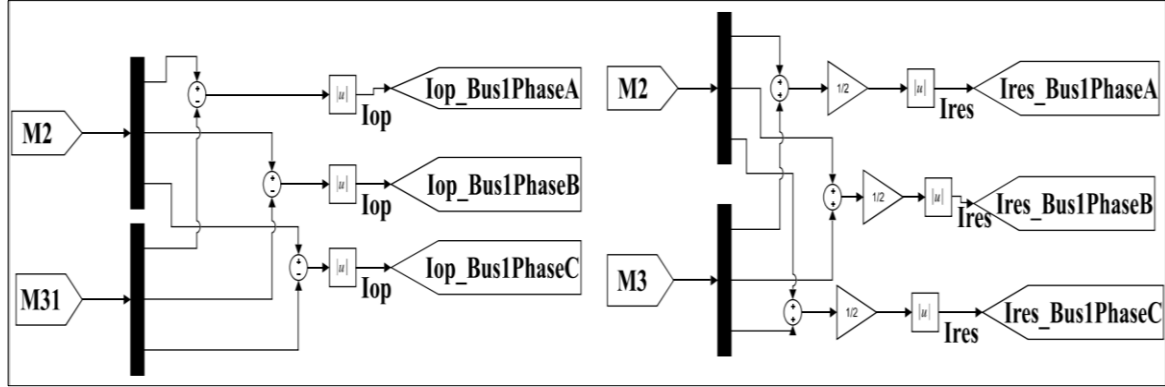
قبل البدء بعملية النمذجة تم حساب التيار التفاضلي وتيار الكبح لكل منطقة من المناطق ونتائج الحساب موضحة بالجدول (4-3):

الجدول (4-3): تيار العمل وتيار الكبح للمناطق التفاضلية

Zone 1	Zone 2	Zone 3	Zone 4	Zone 5
Idiffo= 21.042	Idiffo=900	Idiffo=400	Idiffo=600	Idiffo= 120
Ireso= 48.084	Ireso=600	Ireso=1300	Ireso= 3000	Ireso=600
Cx = 1.4	Cx = 1.5	Cx = 1.4	Cx = 1.5	Cx = 1.4
K1=0.5 , K2=2				

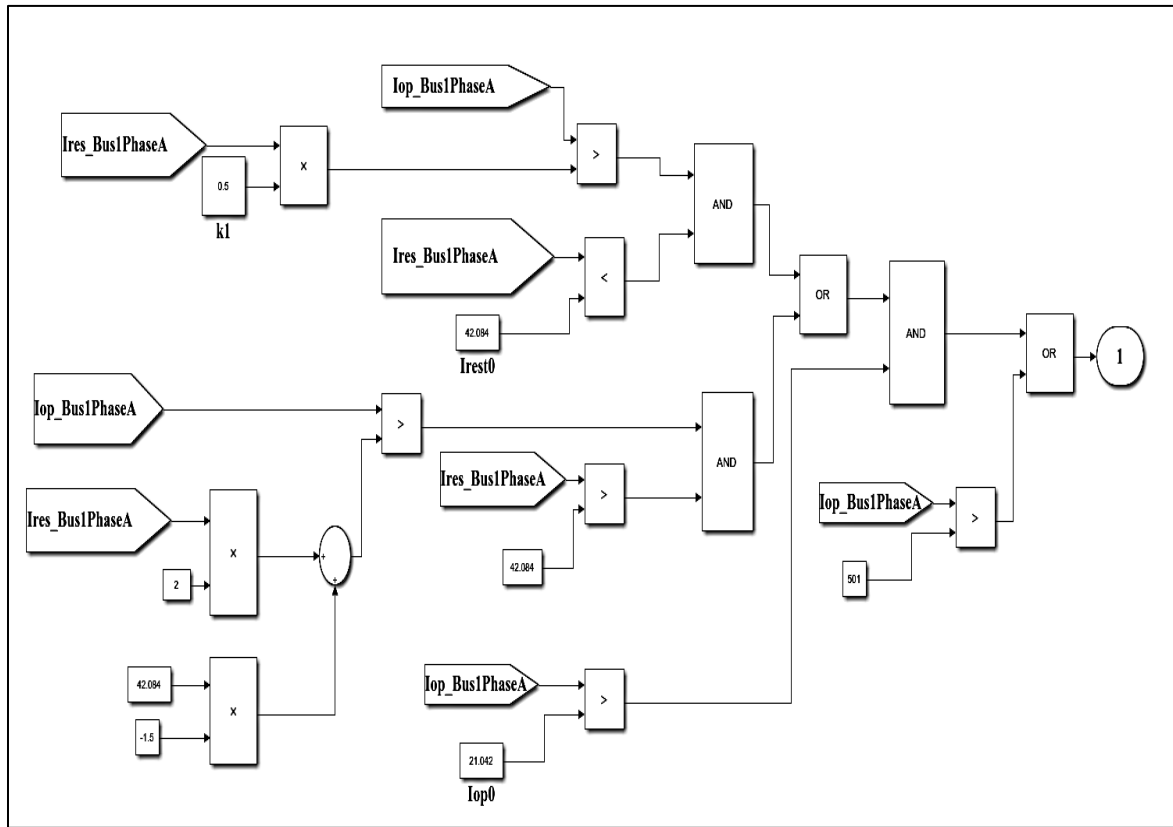
يقسم النموذج المنجز لكل منطقة من المناطق التفاضلية من الأقسام التالية:

1- نمذجة معادلات حساب تيار العمل وتيار الكبح لكل منطقة من المناطق (الشكل 4-26).



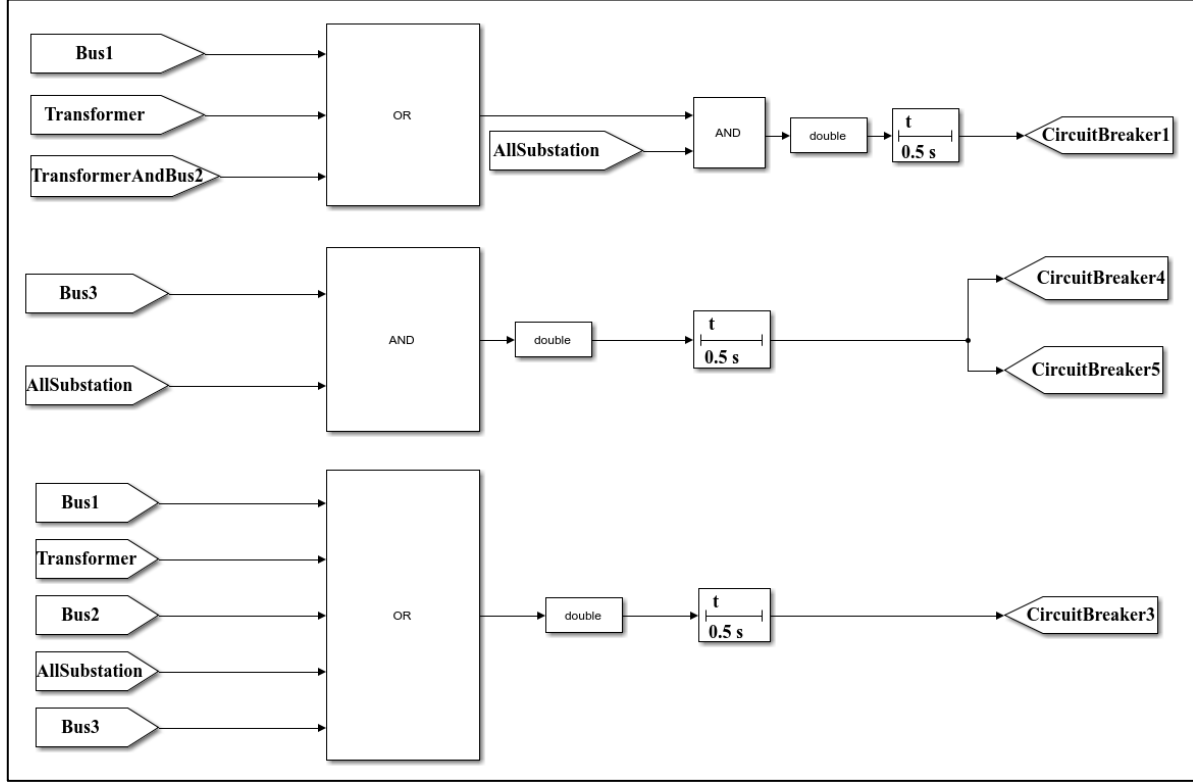
الشكل (4-26): نمذجة معادلات حساب تيار العمل وتيار الكبح للمنطقة التفاضلية (Zone1)

2- نمذجة شروط عمل الحماية (الشكل 4-27).



الشكل (4-27): نمذجة شروط عمل المنطقة التفاضلية (Zone1)

3- إرسال الأمر للقواطع الآلية (الشكل 4-28). ستقوم الحماية الاحتياطية بإرسال زمن الفصل بعد تأخير زمني مقداره (0.5 sec) بعد حدوث العطل.

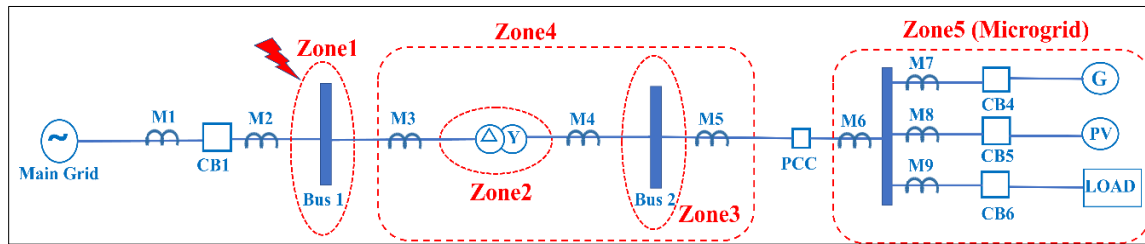


الشكل (4-28): نمذجة عملية إرسال أوامر الفصل للقواطع الآلية

4-3-2-1 اختبار نظام الحماية الاحتياطية (SABP) ونظام الحماية الأساسية في المحطة الفرعية المدروسة:

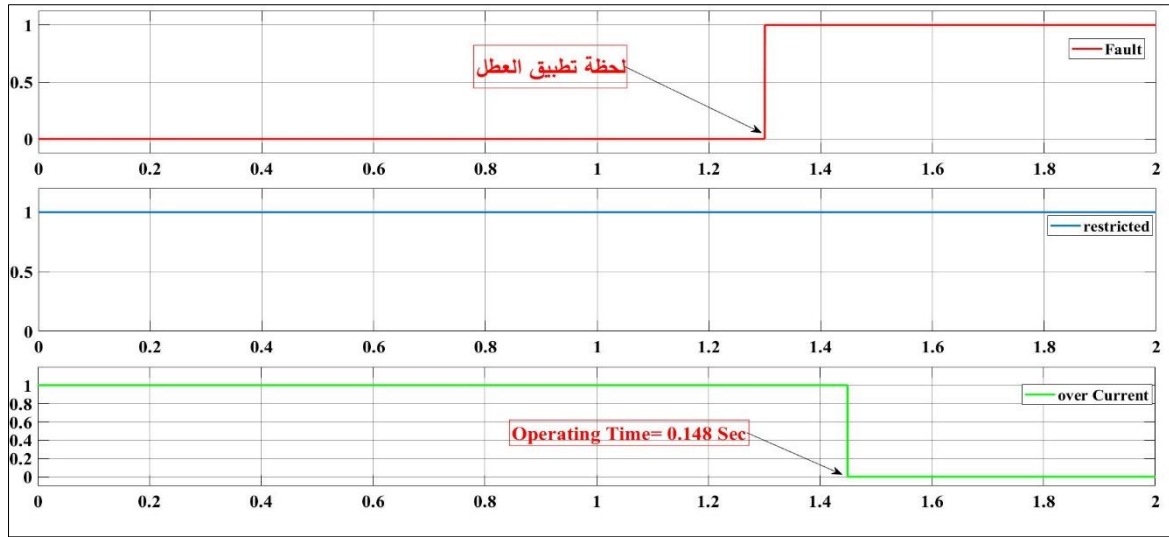
أجريت عملية الاختبار لنظام الحماية الأساسية والاحتياطية عند حدوث أعطال في مناطق مختلفة من المحطة.

1- حدوث عطل على الباسبار الأول:

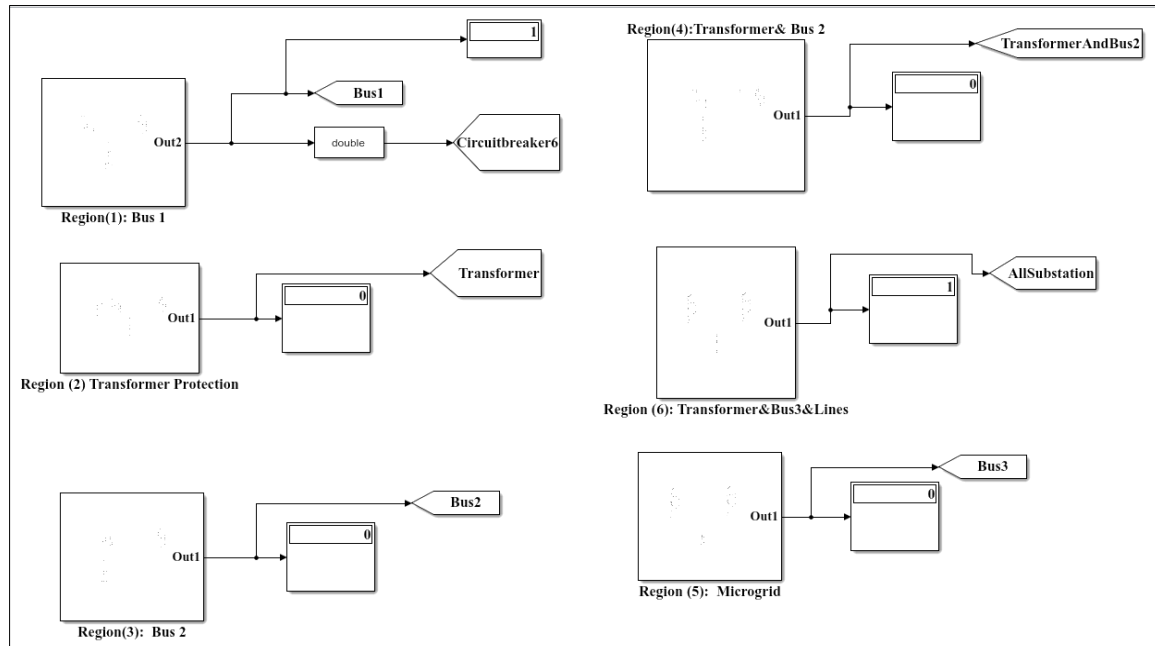


الشكل (4-29): حدوث عطل على الباسبار الأول

تم تطبيق عطل على الباسبار الأول عند الزمن (1.3 sec) وأظهرت نتائج الاختبار أن الحماية من زيادة التيار ستستجيب لهذا العطل وستقوم بفصل العطل بعد تأخير زمني (0.148 sec) بينما الحماية من العطل الأرضي لن تستجيب كون العطل خارج منطقة العمل لها (الشكل 4-30). وكذلك الحماية الاحتياطية ستستجيب لهذا العطل من خلال تفعيل (Zone1) (الشكل 4-31).

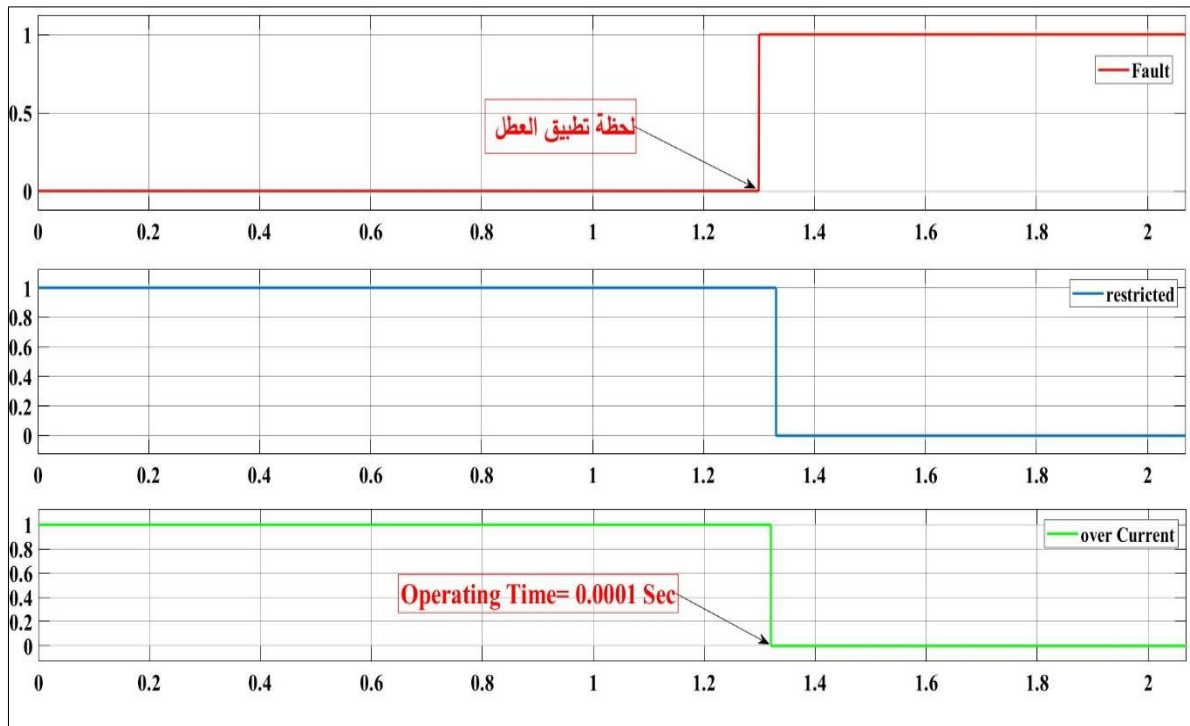


الشكل (4-30): استجابة نظام الحماية الأساسية عند حدوث عطل على الباسبار الأول

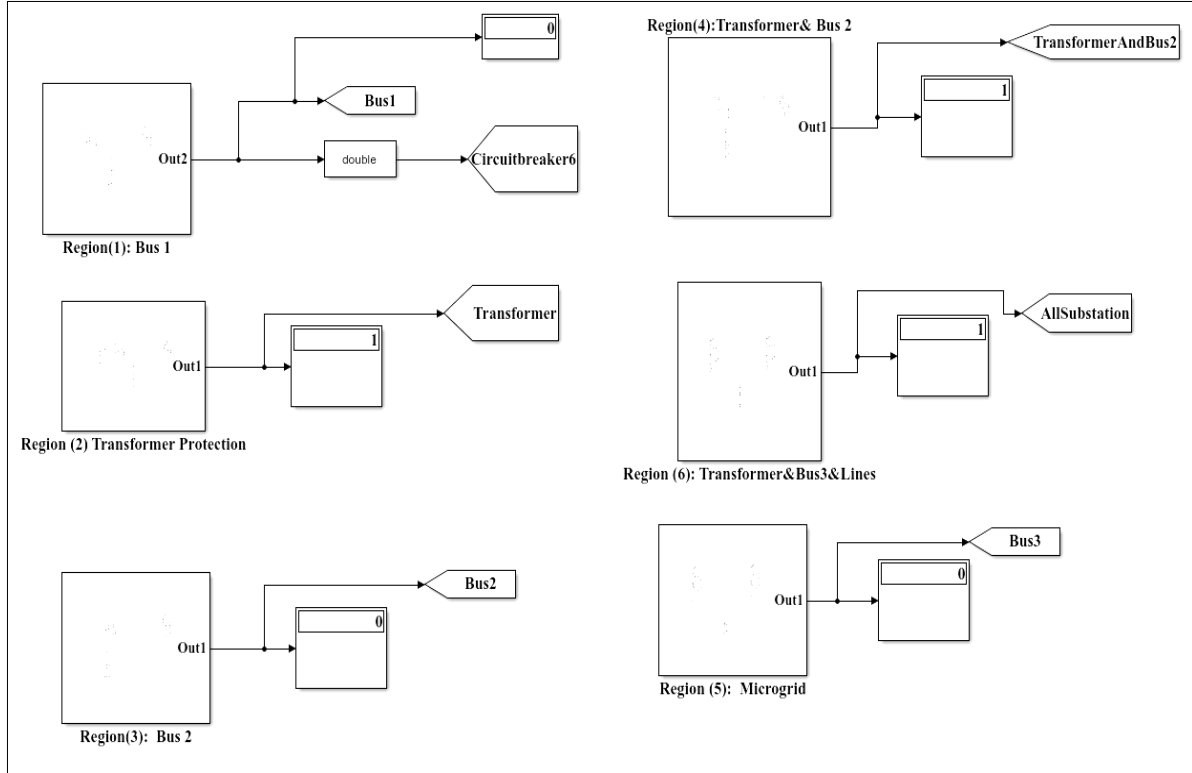


الشكل (4-31): استجابة نظام الحماية الاحتياطية عند حدوث عطل على الباسبار الأول

توضح الأشكال ((4-33)، (4-34)) استجابة نظام الحماية الأساسية والاحتياطية على الترتيب في حال حدوث عطل ضمن المحولة. ويمكن الملاحظة أن الحماية من زيادة التيار ستستجيب للعطل وزمن الفصل لها بهذه الحالة (0.0001 sec) والحماية من العطل الأرضي ستستجيب أيضاً للعطل كون العطل حدث ضمن منطقة عملها. أيضاً نظام الحماية الاحتياطية سيتجيب لهذا العطل من خلال تفعيل (Zone2 و Zone4).

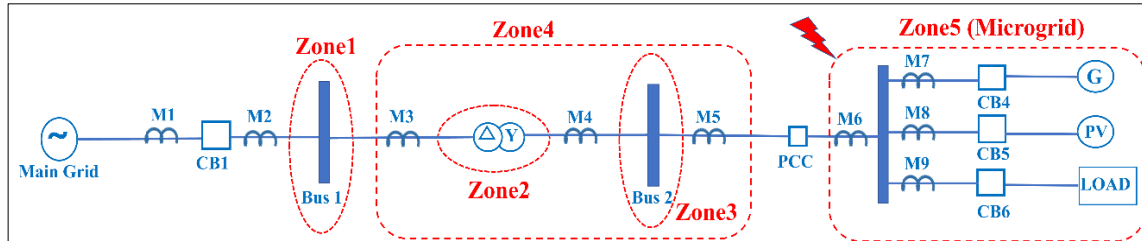


الشكل (4-33): استجابة نظام الحماية الأساسية عند حدوث عطل ضمن المحولة



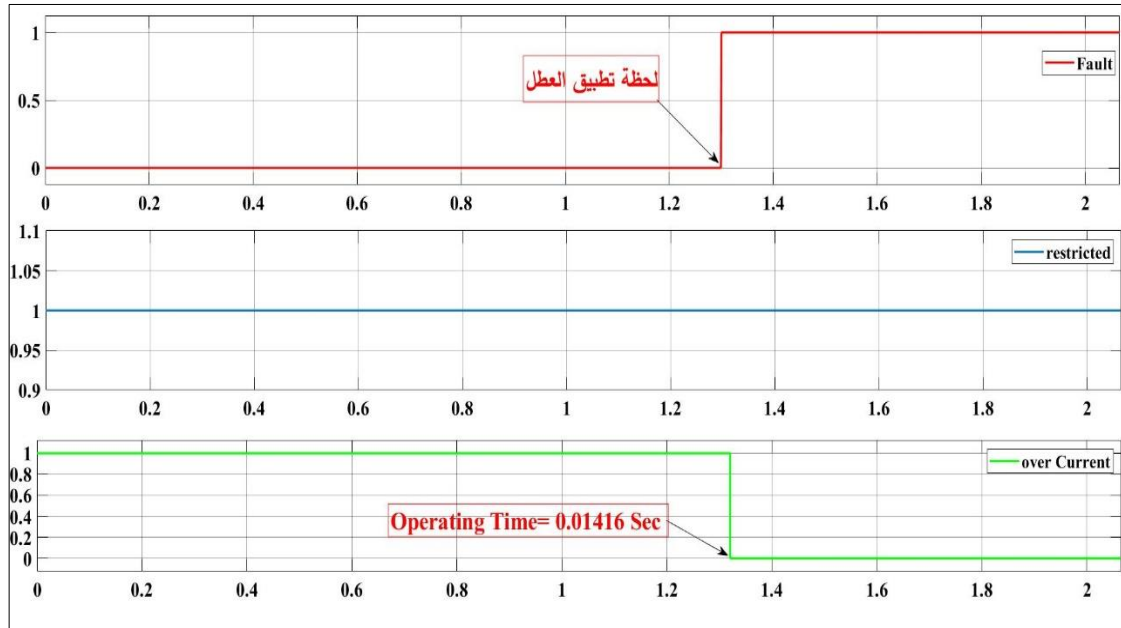
الشكل (4-34): استجابة نظام الحماية الاحتياطية عند حدوث عطل ضمن المحولة

3- حدوث عطل ضمن الشبكة الميكروية:

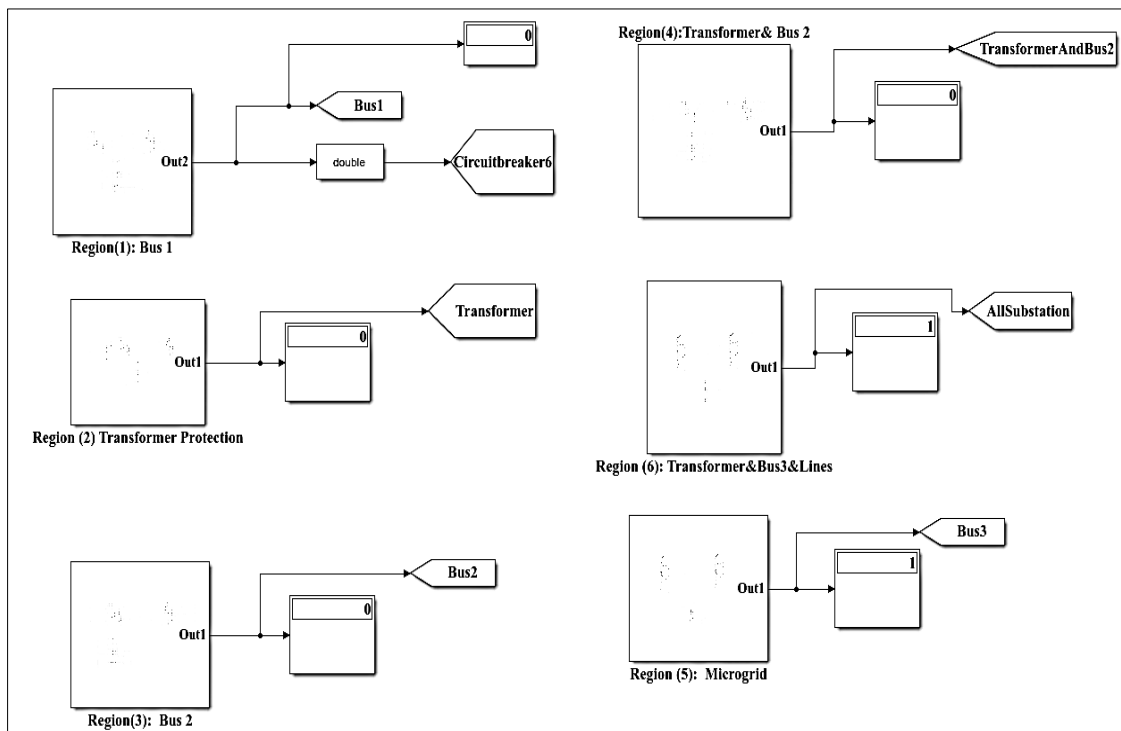


الشكل (4-35): حدوث عطل ضمن الشبكة الميكروية

أجري اختبار نظام الحماية للمحطة الفرعية عند حدوث عطل ضمن الشبكة الميكروية وأظهرت النتائج أن الحماية من زيادة التيار ستستجيب لهذا العطل وستقوم بفصل العطل بعد تأخير زمني (0.01416 sec) بينما الحماية من العطل الأرضي لن تستجيب لهذا العطل. وكذلك الحماية الاحتياطية ستستجيب لهذا العطل من خلال تفعيل (Zone5) (الأشكال (4-36)، (4-37)).



الشكل (4-36): استجابة نظام الحماية الأساسية عند حدوث عطل ضمن الشبكة الميكروية



الشكل (4-37): استجابة نظام الحماية الاحتياطية عند حدوث عطل ضمن الشبكة الميكروية

4-4- تشكيل واجهة رسومية لعرض الوظائف في مركز التحكم:

يتم استخدام البرامج التالية (Ecava IntegraXor Editor & Server – Inkscape - Matlab) في عملية تصميم واجهة رسومية تسهل على العنصر البشري العامل في مركز التحكم (MGCC) عملية المراقبة والإدارة للشبكة الميكروية. حتى يتسنى لنا اختبار الواجهة الرسومية بالشكل الصحيح قمنا بنمذجة الشبكة الميكروية مع محطة التوزيع الفرعية الثانوية باستخدام برنامج الماتلاب (Matlab). وباستخدام برنامج (Inkscape) تم تصميم العناصر الرسومية والرسومات المتحركة. كما تم تخزين قيم المتغيرات التي سيتم مراقبتها والتحكم بها في الزمن الحقيقي باستخدام برنامج (Ecava IntegraXor Editor). أخيراً استخدم (Ecava IntegraXor Server) من أجل تشغيل الواجهة بالتزامن مع عمل الشبكة الميكروية في برنامج الماتلاب.

قمنا باستخدام مكتبة بروتوكول الاتصال (OPC) في برنامج الماتلاب من أجل الربط بين دارة الاستطاعة الممثلة بالشبكة الميكروية وبين الواجهة الرسومية كما يبين الشكل (4-38).



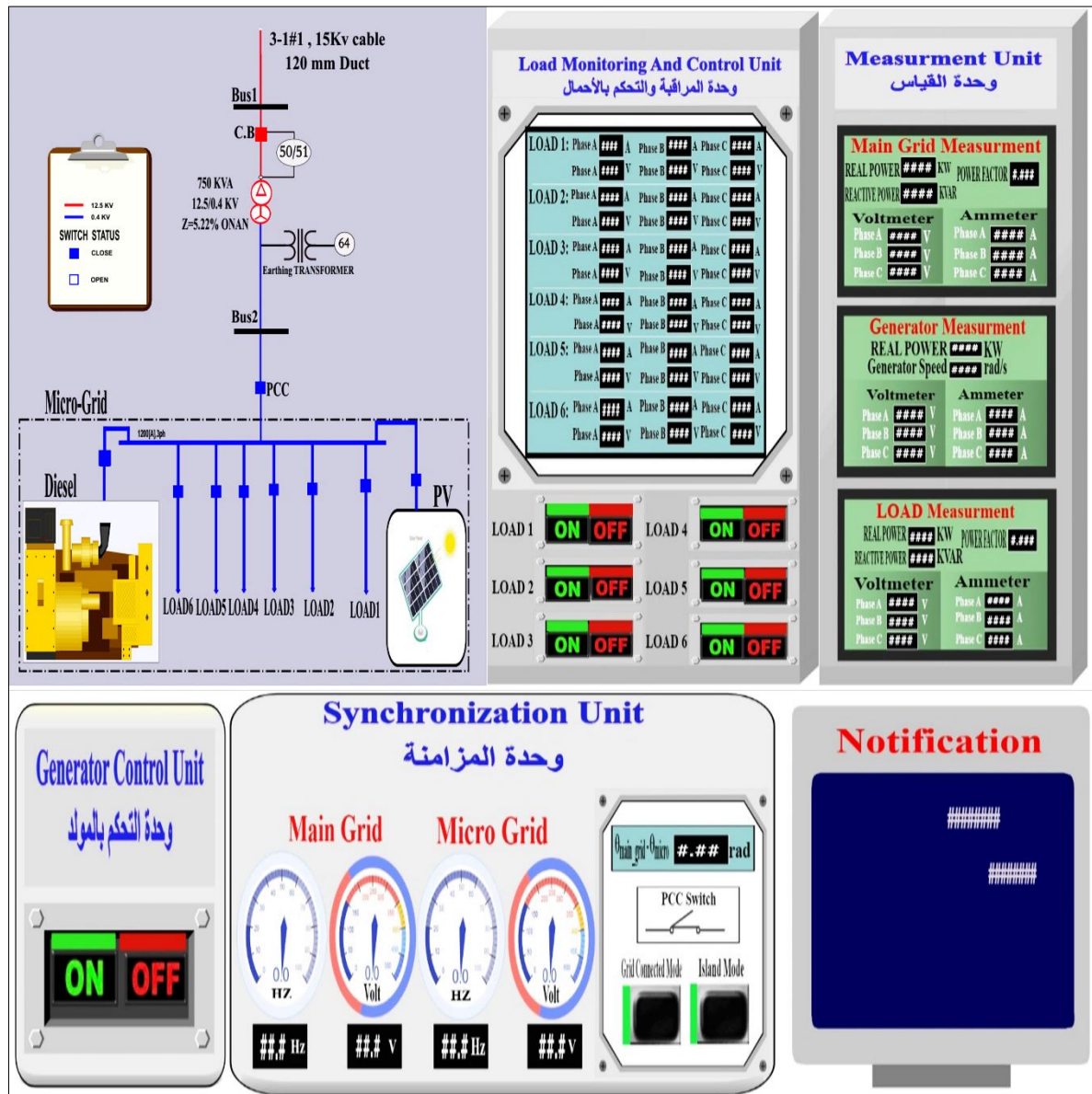
الشكل (4-38): الربط بين الواجهة الرسومية وبرنامج الماتلاب عبر بروتوكول الاتصال (OPC)

حيث OPC: هو عبارة عن معيار صناعي تم إنشاؤه بالتعاون بين عدد من موردي أجهزة وبرامج التشغيل الآلي الرائدة في جميع أنحاء العالم، مع شركة Microsoft. يستخدم هذا المعيار على نطاق واسع في الأتمتة الصناعية لتسهيل التشغيل البيئي لأجهزة التحكم من مختلف الشركات المصنعة. تتألف الواجهة الرسومية التي تم تطويرها من جزأين أساسيين، جزء خاص بنظام الحماية للمحطة الفرعية المدروسة وجزء خاص بوحدة القياس والتحكم ونظام المزامنة وفيما يلي شرح مفصل عن كيفية تطوير الأجزاء المختلفة للواجهة الرسومية.

4-4-1- مراحل تطوير الواجهة الرسومية الخاصة بنظام القياس ونظام المزامنة:

قُسمت هذه الواجهة إلى عدة أجزاء تتمثل بوحدة القياس - وحدة المراقبة والتحكم بالأحمال - وحدة المزامنة - وحدة التحكم بالمولد التزامني - وحدة لمراقبة المولد الكهروضوئي الشمسي - وحدة إظهار الإشعارات والتنبيهات.

كل جزء من الأجزاء السابقة تم تخصيصه بوظيفة معينة وسنستعرض مراحل إنشاء كل جزء من الأجزاء السابقة بالتفصيل وصولاً إلى الواجهة بالشكل النهائي المبينة بالشكل (4-39).

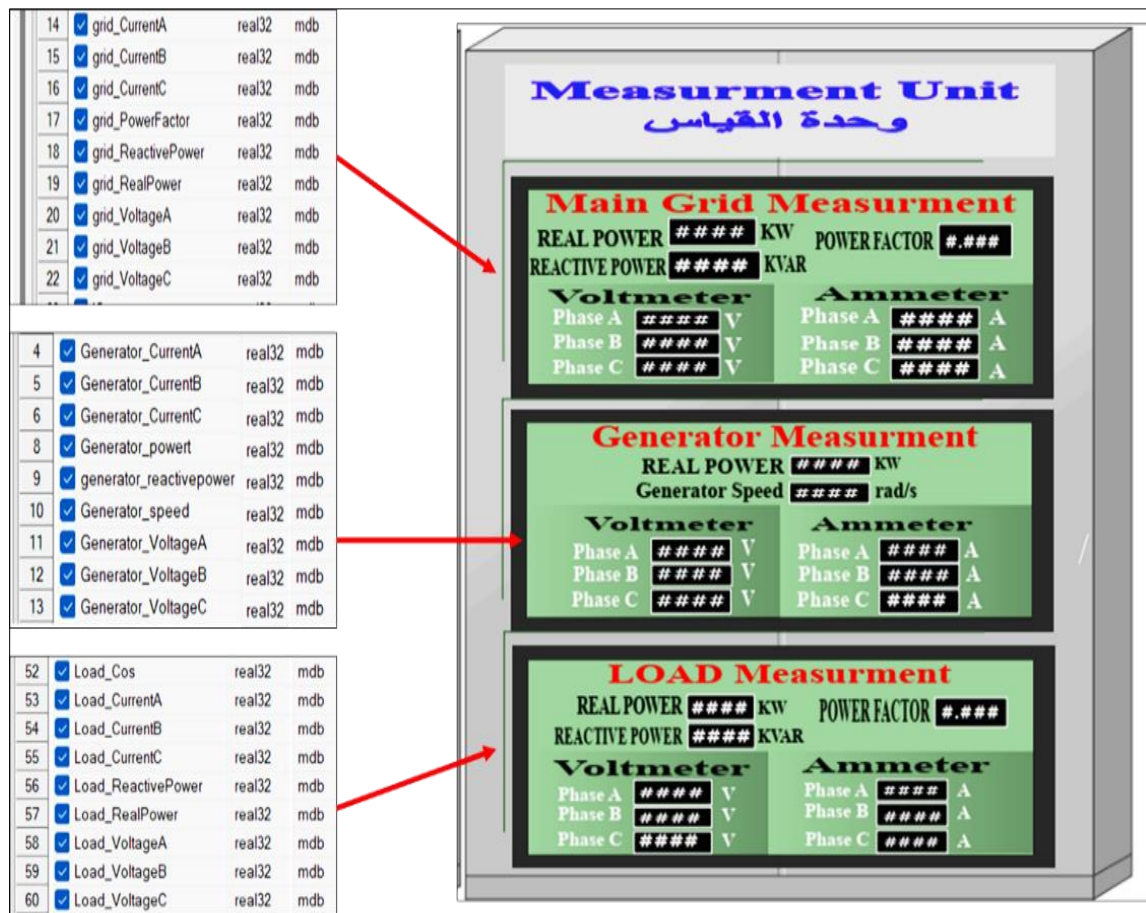


الشكل (4-39): الواجهة الرسومية الخاصة بنظام القياس ونظام المزامنة التي تم إنشاؤها في برنامج ECADA

1- وحدة القياس:

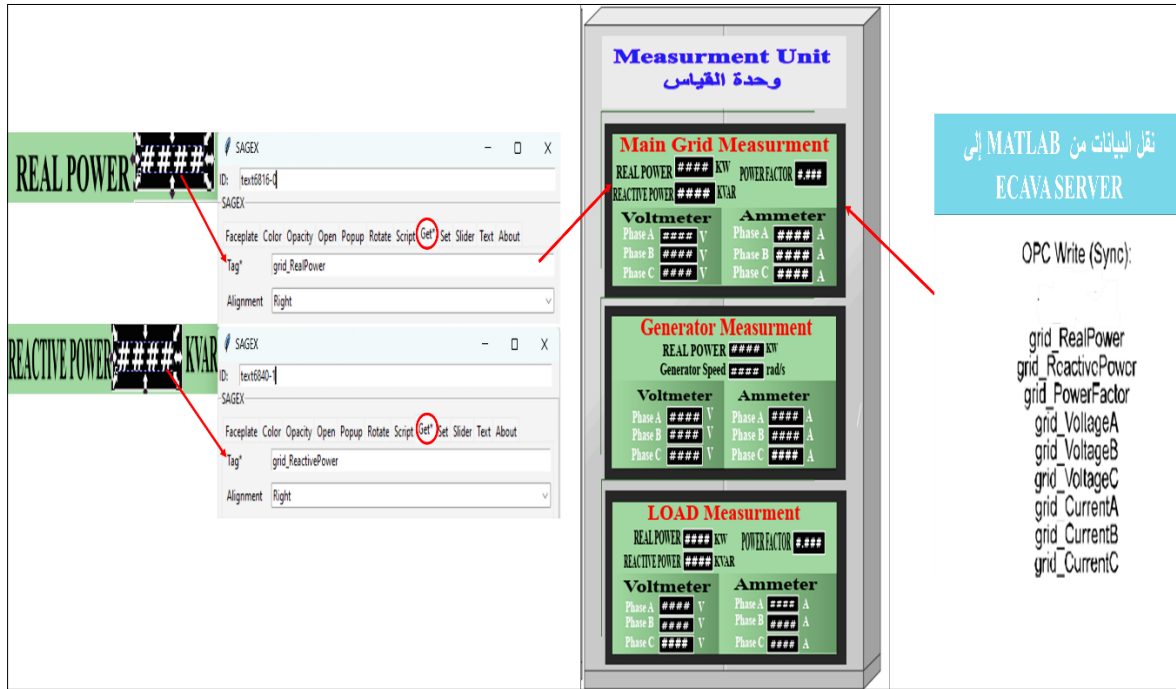
إن وظيفة هذه الوحدة هي قياس التيارات والجهود والاستطاعة الحقيقية والردية وعامل الاستطاعة لكل من الشبكة الرئيسية والشبكة الميكروية والمولد التزامني وعرضها على الواجهة.

تتمثل الخطوة الأولى لتطوير هذه الوحدة بإنشاء متغيرات ضمن برنامج (Ecava IntegraXor Editor) تعبر عن تيارات الأطوار الثلاثة وتوترات الأطوار الثلاثة والاستطاعات وتخزينها ضمن قاعدة بيانات (الشكل 4-40).



الشكل (4-40): متغيرات وحدات القياس المنشأة ضمن برنامج (Ecava IntegraXor Editor)

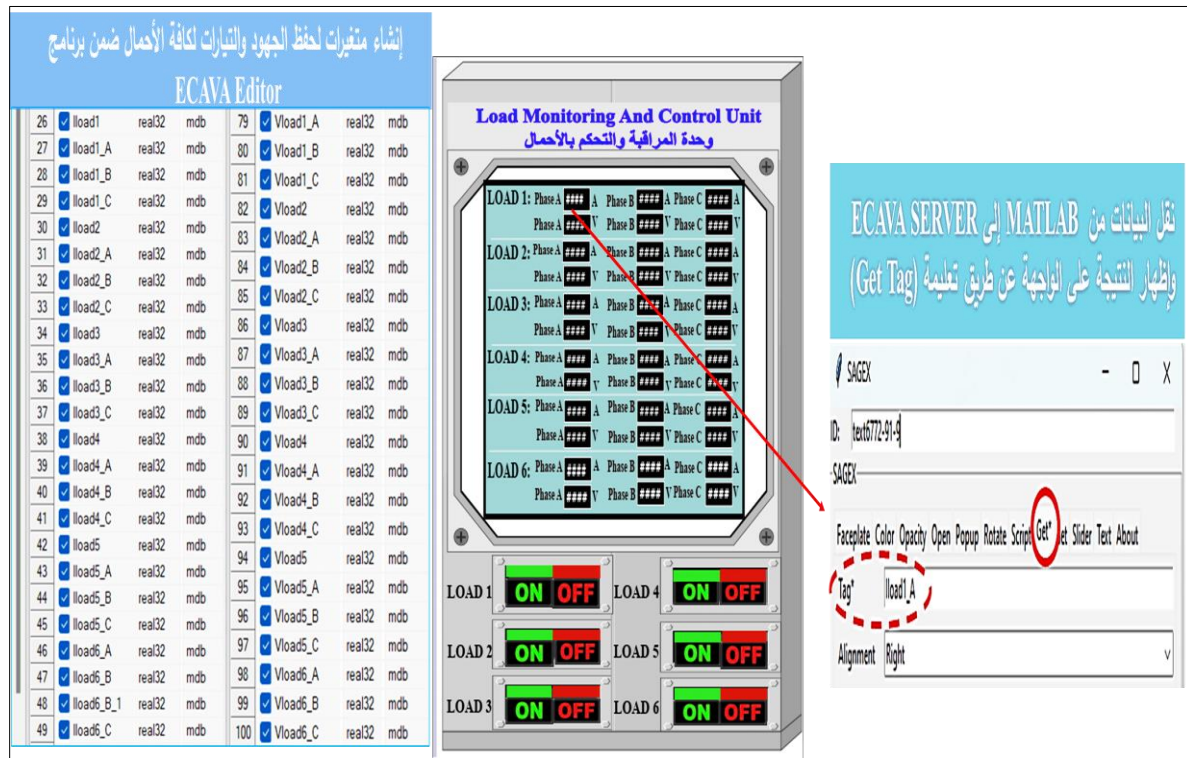
الخطوة الثانية: ربط كل عنصر من عناصر الواجهة بالتعليمة (Get Tag) من خلالها سيتم جلب قيمة المتغيرات ونقلها من برنامج الماتلاب عبر (OPC Write) إلى (Ecava Server) وإظهارها على الواجهة بالمكان المخصص لها (الشكل 4-41).



الشكل (4-41): نقل قيم متغيرات وحدة القياس من الماتلاب إلى (Ecava Server)

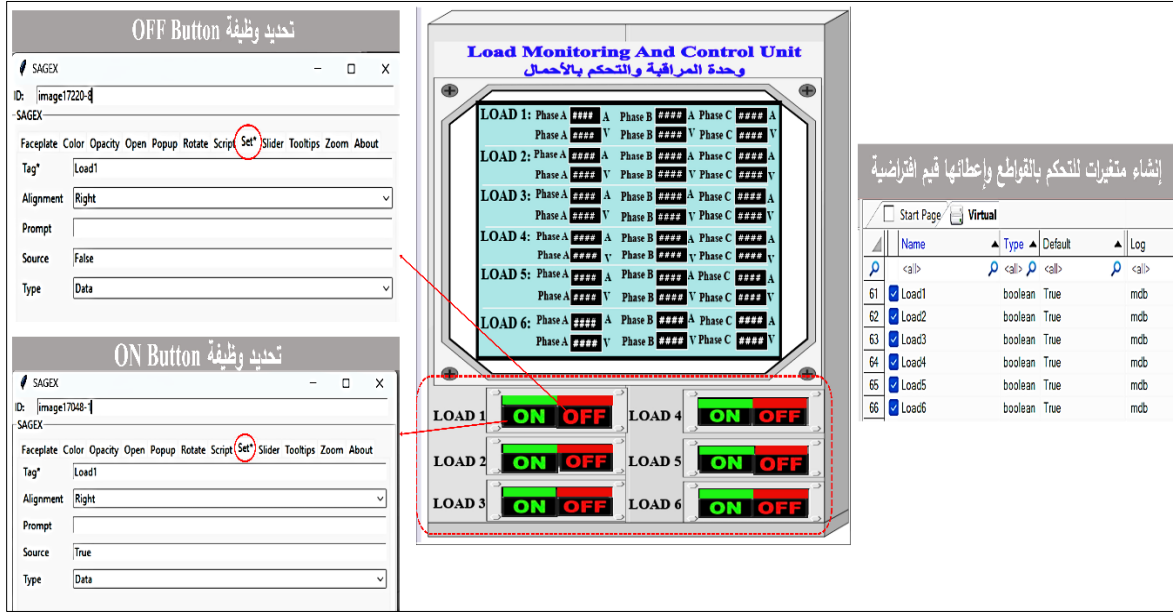
2- وحدة المراقبة والتحكم بالأحمال:

من خلال هذه الوحدة يمكن مراقبة وقياس تيارات وتوترات الأطوار للأحمال المغذاة من المحطة المدروسة بالإضافة إلى التحكم بعملية وصل وفصل التغذية عن الأحمال. بالنسبة للجزء الأول من هذه الوحدة الخاص بالقياس في البداية تم إنشاء متغيرات تعبر عن تيارات وتوترات كل حمل من الأحمال وتخزينها ضمن برنامج (Ecava IntegraXor Editor) من ثم سيتم ربط كل عنصر ضمن هذه الوحدة بالتعليمة (Get Tag) لجلب قيم هذه المتغيرات من الماتلاب وإظهارها ضمن الواجهة عبر برنامج (Inkscape) (الشكل 4-42).



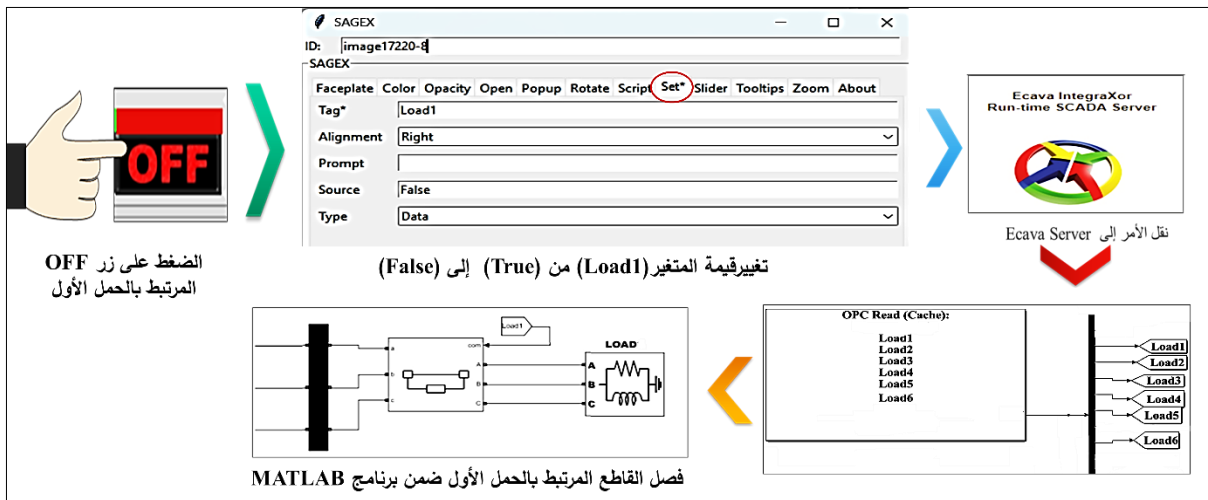
الشكل (4-42): خطوات إنشاء وظيفة القياس لوحدة المراقبة والتحكم بالأحمال

أما الجزء الثاني من هذه الوحدة الخاص بالتحكم بفصل ووصل التغذية عن الأحمال تم ربط أزرار (ON-OFF) لكل حمل من الأحمال بمتغير وتحديد نوعه كمتغير منطقي (boolean) وإعطائها قيمة افتراضية تساوي الواحد أي أثناء عملية التشغيل الأولى ستكون جميع الأحمال موصولة مع الشبكة وتخزين هذه المتغيرات ضمن قاعدة بيانات برنامج (Ecava editor). من ثم عن طريق تعليمة (Set Tag) سيتم تغيير قيمة المتغيرات عند الضغط على الأزرار الموجودة ضمن هذه الوحدة فالضغط على زر (OFF) سيجعل قيمة المتغير تساوي صفر (False) والضغط على زر (ON) سيجعل قيمة المتغير تساوي الواحد (True) (الشكل 4-43).



الشكل (4-43): تحديد وظيفة أزرار (ON-OFF) الموجودة ضمن وحدة المراقبة والتحكم بالأحمال

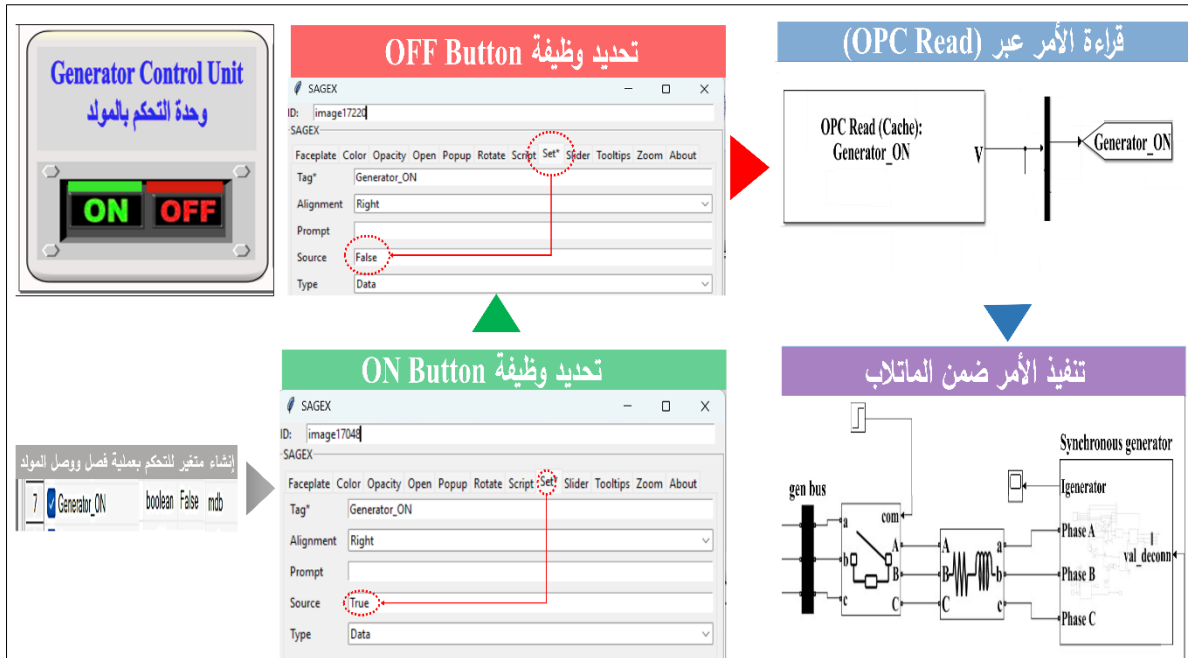
ولتوضيح آلية العمل عند الضغط على أحد الأزرار الموجودة ضمن الواجهة الرسومية سيتم عرض مثال عن الضغط على زر (OFF) المرتبط بالحمل الأول. فعند الضغط عليه سيتم تغيير قيمة المتغير (Load1) من (True) إلى (False) يتم نقل هذه العملية عبر (Ecava Server) إلى الماتلاب الذي بدوره يقوم بقراءة أمر الفصل عبر الوحدة (OPC Read) ونقل الأمر إلى القاطع المرتبط بالحمل الأول ضمن نموذج الماتلاب وفصل التغذية عن هذا الحمل. يوضح الشكل (4-44) تسلسل سير العملية السابقة.



الشكل (4-44): آلية العمل عند الضغط على أحد القواطع الموجودة ضمن وحدة المراقبة والتحكم بالأحمال

3- وحدة التحكم بالمولد التزامني:

سيتم وصل المولد التزامني مع الشبكة أو فصله عنها من خلال وحدة التحكم بالمولد التزامني. بدايةً سيتم إنشاء متغير باسم (Generator_ON) وتعريفه كمتغير منطقي (boolean) وإعطائه قيمة افتراضية تساوي الصفر (False) أي في حالة التشغيل الابتدائية سيكون المولد غير متصل بالشبكة من ثم تم ربط أزرار هذه الوحدة بالتعليمة (Set Tag) لتغيير قيمة المتغير (Generator_ON) إلى الواحد عند الضغط على زر (ON) أو إلى الصفر عند الضغط على زر (OFF) (الشكل 4-45).

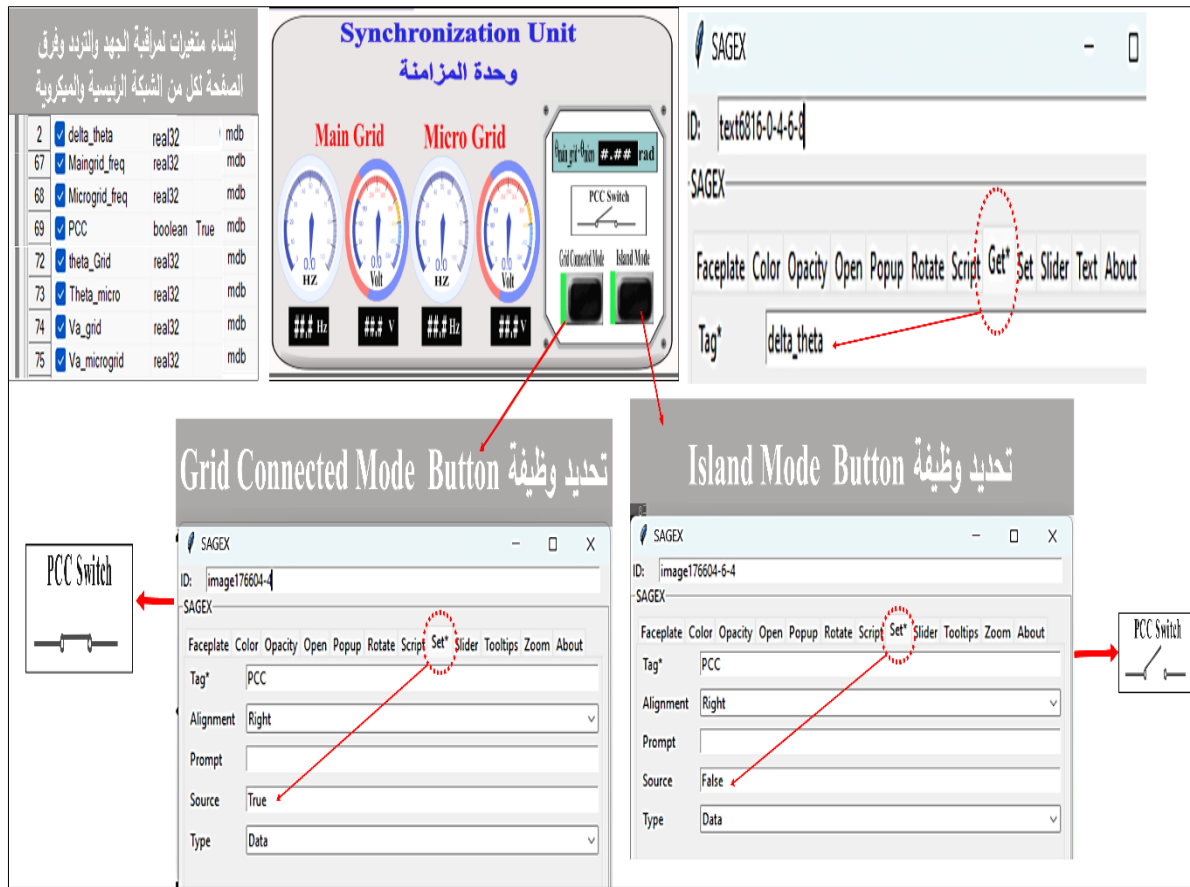


الشكل (4-45): آلية عمل وحدة التحكم بالمولد التزامني

4- وحدة المزامنة:

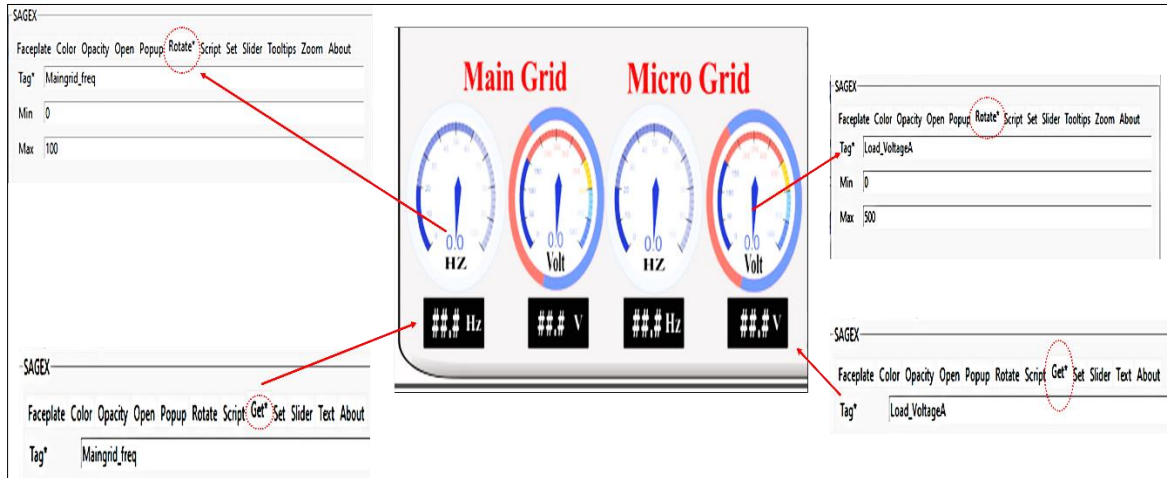
وظيفة هذه الوحدة مراقبة تغيرات التردد والجهد وفرق الصفحة لكل من الشبكة الرئيسية والميكروية بالإضافة إلى التحكم بعملية فصل الشبكة الميكروية عن الشبكة الرئيسية وإعادة وصلها وذلك بعد التحقق من شروط المزامنة. تم تعريف متغيرات تعبر عن التردد والجهد وفرق الصفحة لكل من الشبكة الميكروية والرئيسية وتحديد نوعها كمتغيرات حقيقية (real32) وتخزينها ضمن قاعدة بيانات برنامج (Ecava) وتعريف متغير منطقي (PCC)

للتحكم بالقواطع الموجود عند نقطة الربط المشتركة وإعطائه قيمة افتراضية (True) أي في بداية التشغيل ستكون الشبكة الميكروية متصلة بالشبكة الرئيسية. من أجل التحكم بأوضاع التشغيل المختلفة للشبكة الميكروية تم إضافة أزرار لنقل الشبكة إما إلى وضعية (Island-Mode) أو إلى وضعية (Grid-Connected Mode) عند الضغط عليها ستتغير قيمة المتغير (PCC) (الشكل 4-46).



الشكل (4-46): آلية عمل وحدة المزامنة

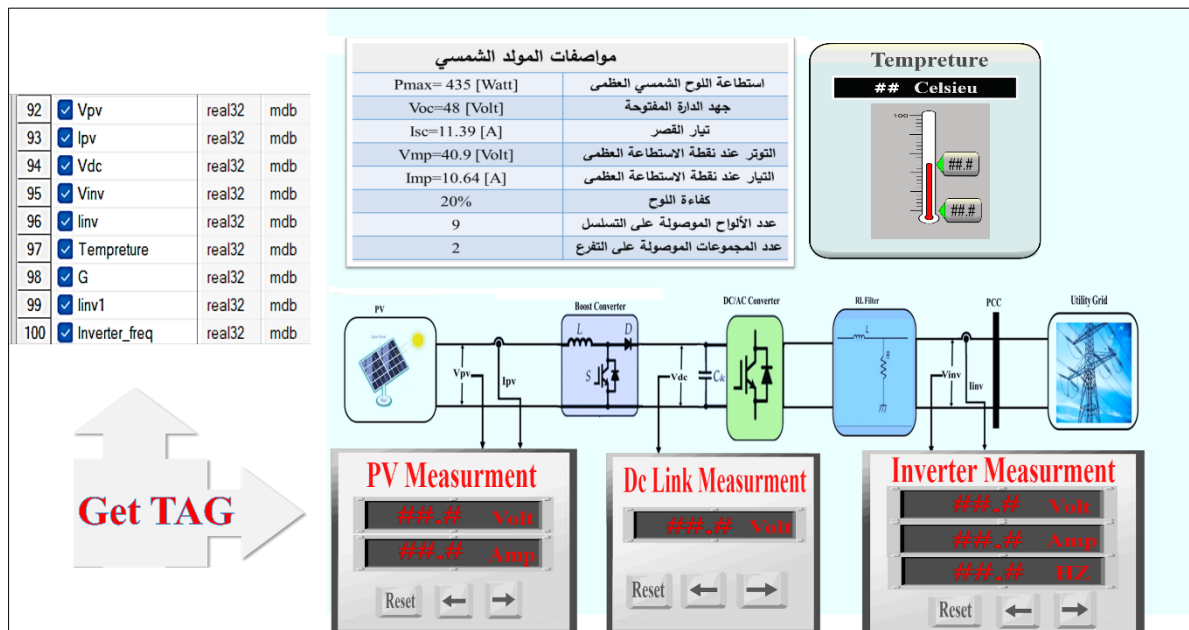
بالنسبة لمقاييس الجهد والتردد الموجودة ضمن هذه الوحدة تم ربط مؤشرات المقاييس بالتعليمة (Rotate) من خلالها سيتم جلب قيمة التردد والجهد المخزنة عن طريق تعليمة (get Tag) و جعل مؤشر المقياس ينحرف بزاوية متناسبة مع قيم هذه المتغيرات (الشكل 4-47).



الشكل (4-47): وظيفة مقاييس الجهد والتردد الموجودة ضمن وحدة المزامنة

5- وحدة مراقبة المولد الكهروضوئي الشمسي:

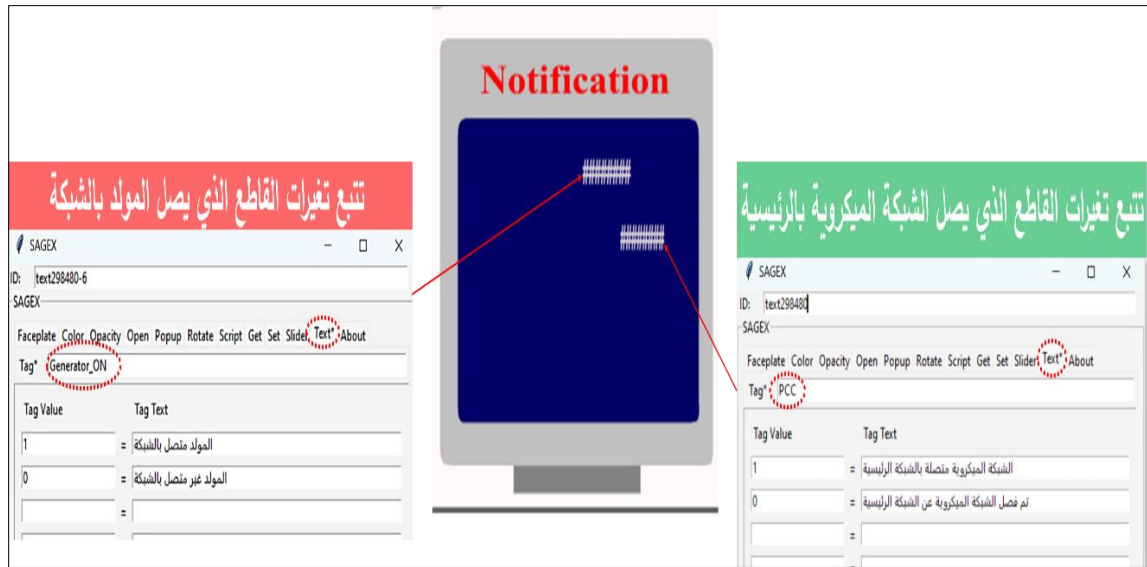
وهي الجزء من الواجهة الرسومية الخاص بمراقبة بارامترات المولد الكهروضوئي الشمسي الموجود ضمن الشبكة الميكروية من درجة الحرارة والتيار والجهد على خرج المولد الكهروضوئي، جهد الحلقة المستمرة، وجهد وتيار المعرج كما يبين الشكل (4-48).



الشكل (4-48): وحدة مراقبة المولد الكهروضوئي الشمسي عبر برنامج Ecava

5-وحدة الإشعارات:

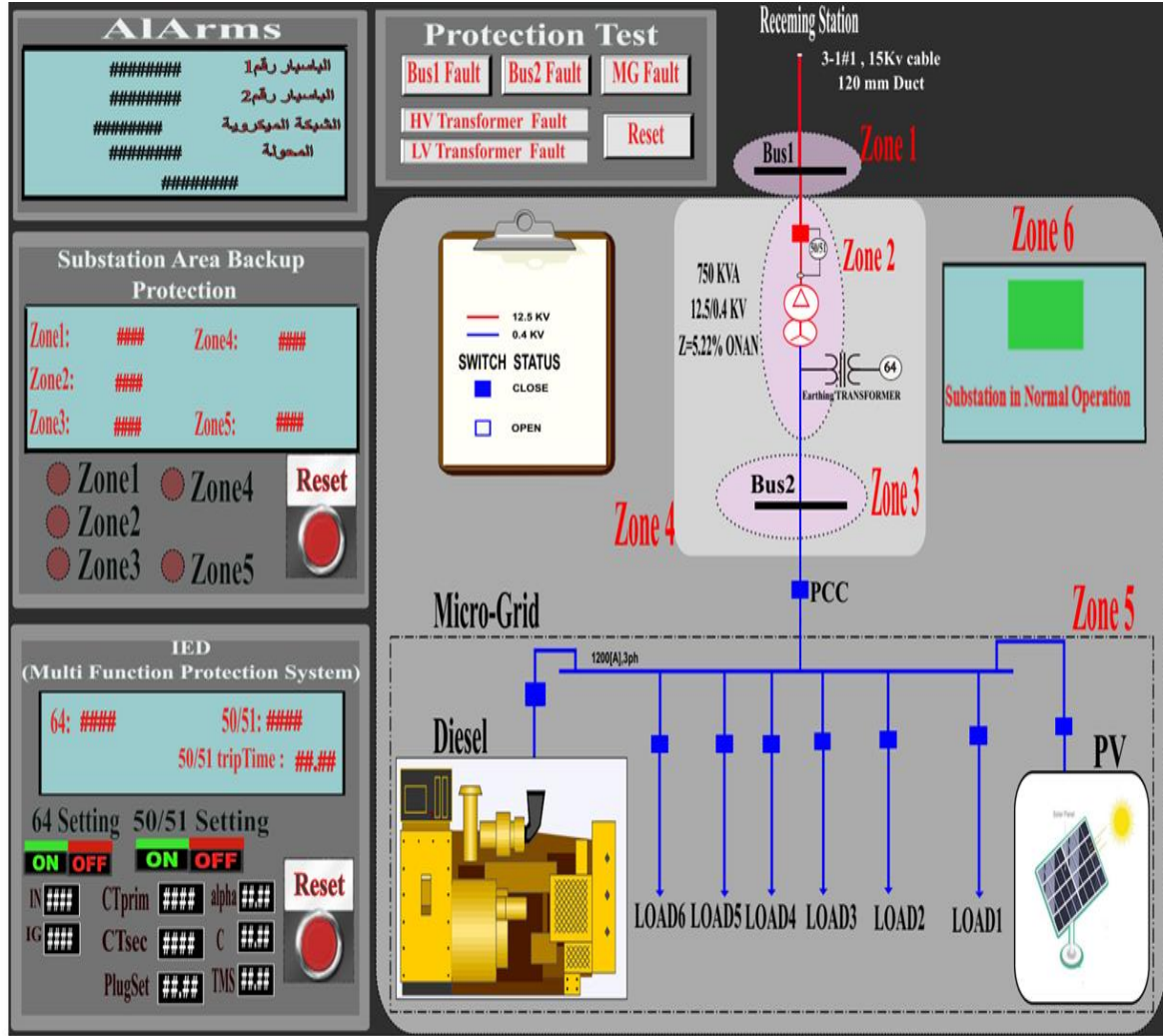
الغاية من هذه الوحدة إظهار أي تغييرات تحدث ضمن المحطة على شكل إشعارات نصية على واجهة مشغل المحطة. من الإشعارات التي ستظهر مثلاً حالة الشبكة الميكروية فيما إذا كانت متصلة مع الشبكة الرئيسية أو مفصولة عنها وكذلك حالة المولد التزامني إذا كان متصل مع الشبكة أم لا (الشكل 4-49).



الشكل (4-49): وظيفة وحدة الإشعارات

4-4-2- مراحل تطوير الواجهة الرسومية الخاصة بنظام حماية المحطة الفرعية المدروسة:

تتألف هذه الواجهة من أربعة أجزاء رئيسية جزء خاص بنظام الحماية الأساسية (Multi Function Protection System)، جزء خاص بنظام الحماية الاحتياطية (Substation Area Backup Protection)، جزء لاختبار الحماية (Protection Test) ، وآخر خاص بالإنذارات (Alarms). يوضح الشكل (4-50) الأقسام الأربعة السابقة. سيتم في ما يلي شرح آلية إنشاء كل جزء من أجزاء نظام الحماية.



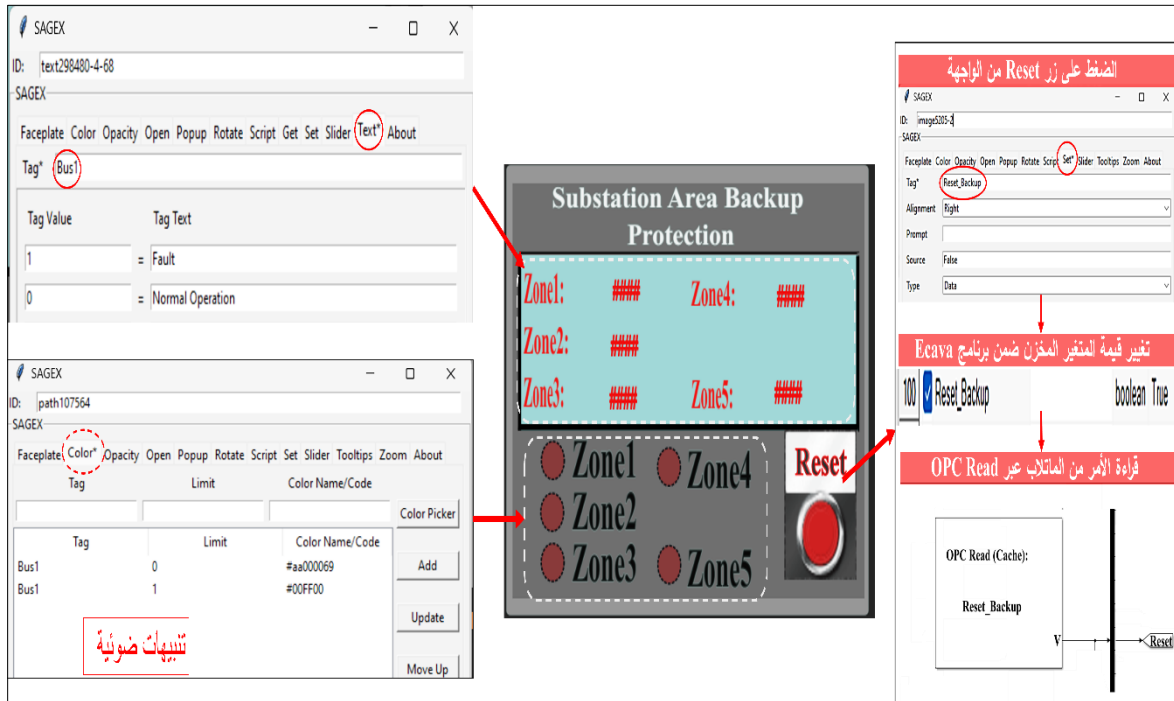
الشكل (4-50): الواجهة الرسومية الخاصة بنظام الحماية للمحطة الفرعية المدروسة

1- إنشاء الواجهة الرسومية الخاصة بنظام الحماية الاحتياطية للمحطة (SABP):

وظيفة هذا الجزء هي إظهار آلية عمل نظام الحماية الاحتياطية للمحطة الفرعية المدروسة عند حدوث أعطال. إظهار حالة العمل إما سيتم على شكل عبارات نصية أو على شكل تنبيهات ضوئية (الشكل 4-51). بالبداية تم إنشاء متغيرات منطقية كل منها يعبر عن منطقة تفاضلية معينة وأعطيت قيمة افتراضية تساوي الصفر وحُزنت ضمن برنامج (Ecava editor) وستظهر رسالة على الواجهة ضمن هذا الجزء بأن المناطق بحالة عمل طبيعية ("Normal Operation"). عند حدوث عطل وتحقق شرط عمل أي منطقة من مناطق الحماية الاحتياطية

ستتغير قيم هذه المتغيرات من (False) إلى (True) وتظهر رسالة بأن المنطقة انتقلت إلى حالة العطل ("Fault") وتضيء المنطقة التي حدث فيها العطل وتحققت فيها شروط العمل باللون الأخضر.

إن وظيفة الزر (Reset) الموجود ضمن هذا الجزء هو إجراء إعادة ضبط للحماية الاحتياطية وذلك من خلال ربطه بتعليمة (Set Tag) التي تحول قيم المتغير (Reset_Backup) المربوط بهذا الزر من (True) إلى (False) ونقل الأمر إلى برنامج الماتلاب عبر (OPC Read).

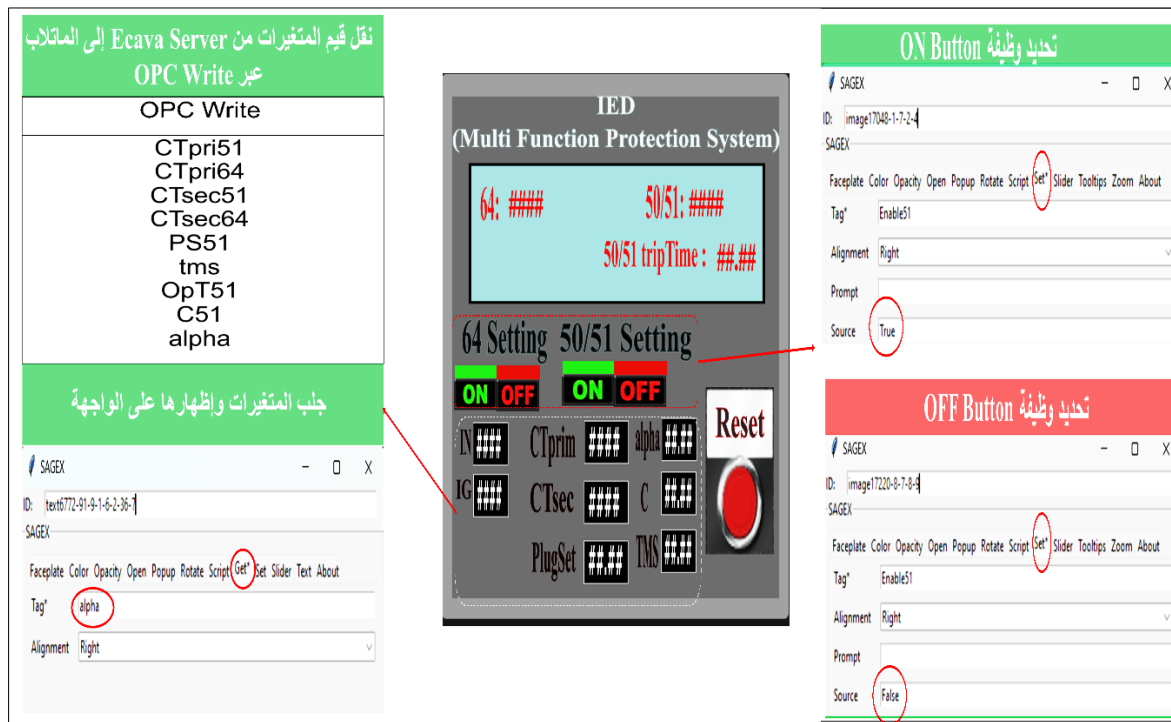


الشكل (4-51): وظائف الجزء الخاص بنظام الحماية الاحتياطية للمحطة (SABP)

2- الجزء الخاص بنظام الحماية الأساسية:

من خلال هذا الجزء سيتم التحكم بنظام الحماية الأساسية وعرض آلية عمله (الشكل 4-52). تم التعبير عن بارمترات نظام الحماية من زيادة التيار والحماية من العطل الأرضي بمتغيرات وتخزينها ضمن (Ecava editor) ومن ثم عن طريق تعليمة (Get Tag) سيتم نقل قيم هذه البارمترات من الماتلاب عبر (OPC Write) وإظهارها على الواجهة في المكان المخصص لها. تشابه وظيفة زر (Reset) الموجود ضمن هذا الجزء لوظيفة زر

(Reset) الموجود ضمن الجزء الخاص بنظام الحماية الاحتياطية. أما وظيفة أزرار (ON-OFF) هي تفعيل أو إلغاء تفعيل كل من الحماية من زيادة التيار والحماية من العطل الأرضي. مثلاً أزرار (ON-OFF) للحماية من زيادة التيار تم ربطها بمتغير منطقي (Enable51) ومن خلال تعليمة (Set Tag) عند الضغط على زر (OFF) يتم جعل قيمة هذا المتغير صفر أما عند الضغط على زر (ON) يتم جعل قيمته تساوي الواحد وتظهر رسالة نصية ضمن هذا الجزء بأن الحماية من زيادة التيار إما مفعلة (Enable) أو غير مفعلة (Disable).

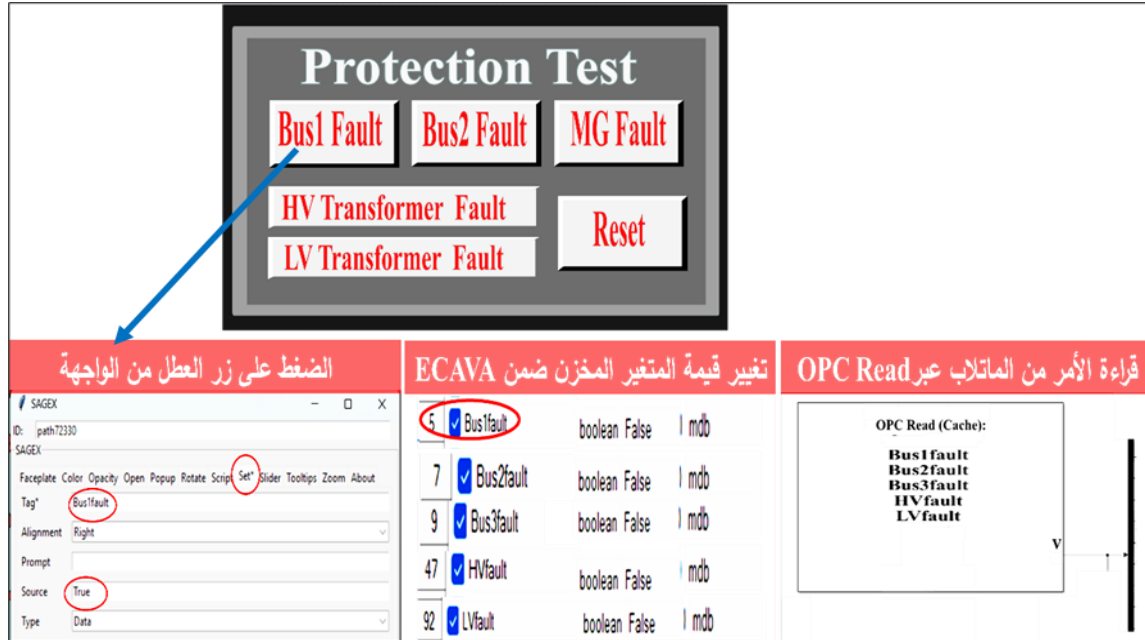


الشكل (4-52): وظائف الجزء الخاص بنظام الحماية الأساسية

3- الجزء الخاص باختبار الحماية:

إنَّ الغاية من تصميم هذا الجزء هي اختبار نظام الحماية الأساسية والاحتياطية للمحطة عن طريق الضغط على زر موجود ضمن الواجهة. تحتوي هذه الوحدة على مجموعة من الأزرار كل زر يقوم بتفعيل العطل بموقع محدد إما ضمن المحطة أو ضمن الشبكة الميكروية. تم ربط هذه الأزرار بمتغيرات منطقية أُعطيت قيم افتراضية مساوية للصفر أي في الحالة الابتدائية لن يكون هناك أي عطل مفعّل، عند الضغط على أحد الأزرار وعن طريق تعليمة

(Set Tag) سيتم جعل قيمة المتغير تساوي الواحد يتم قراءة هذا التغير ضمن برنامج الماتلاب عبر (OPC Read) لتفعيل العطل في المكان المحدد(الشكل 4-53).

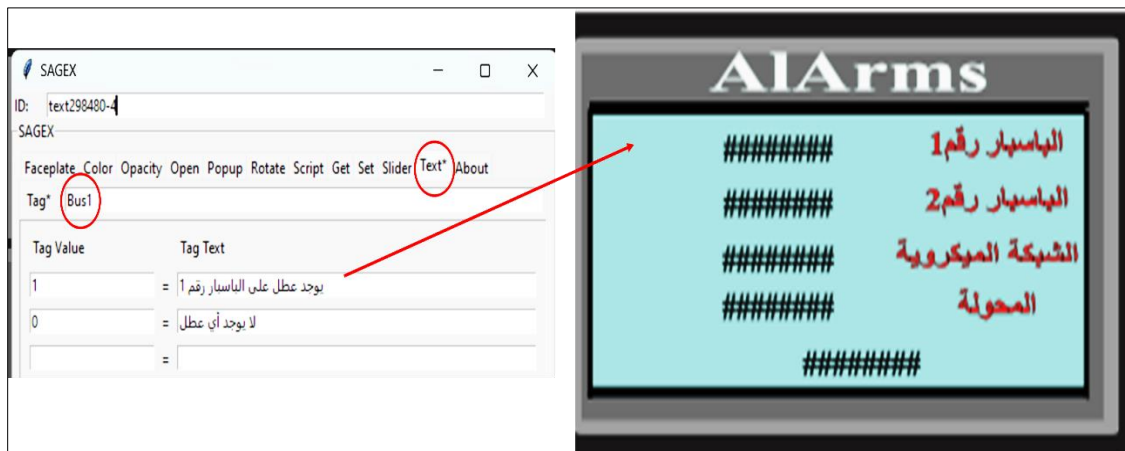


الشكل (4-53): وظيفة الجزء الخاص باختبار نظام الحماية

4- الجزء الخاص بالإنذارات:

ينبيه هذا الجزء مشغل المحطة بمكان حدوث العطل وإظهار رسالة نصية بمكانه وذلك عن طريق التعليمة (Text)

ضمن برنامج (Inkscape)(الشكل 4-54).



الشكل (4-54): وظيفة وحدة الإنذارات

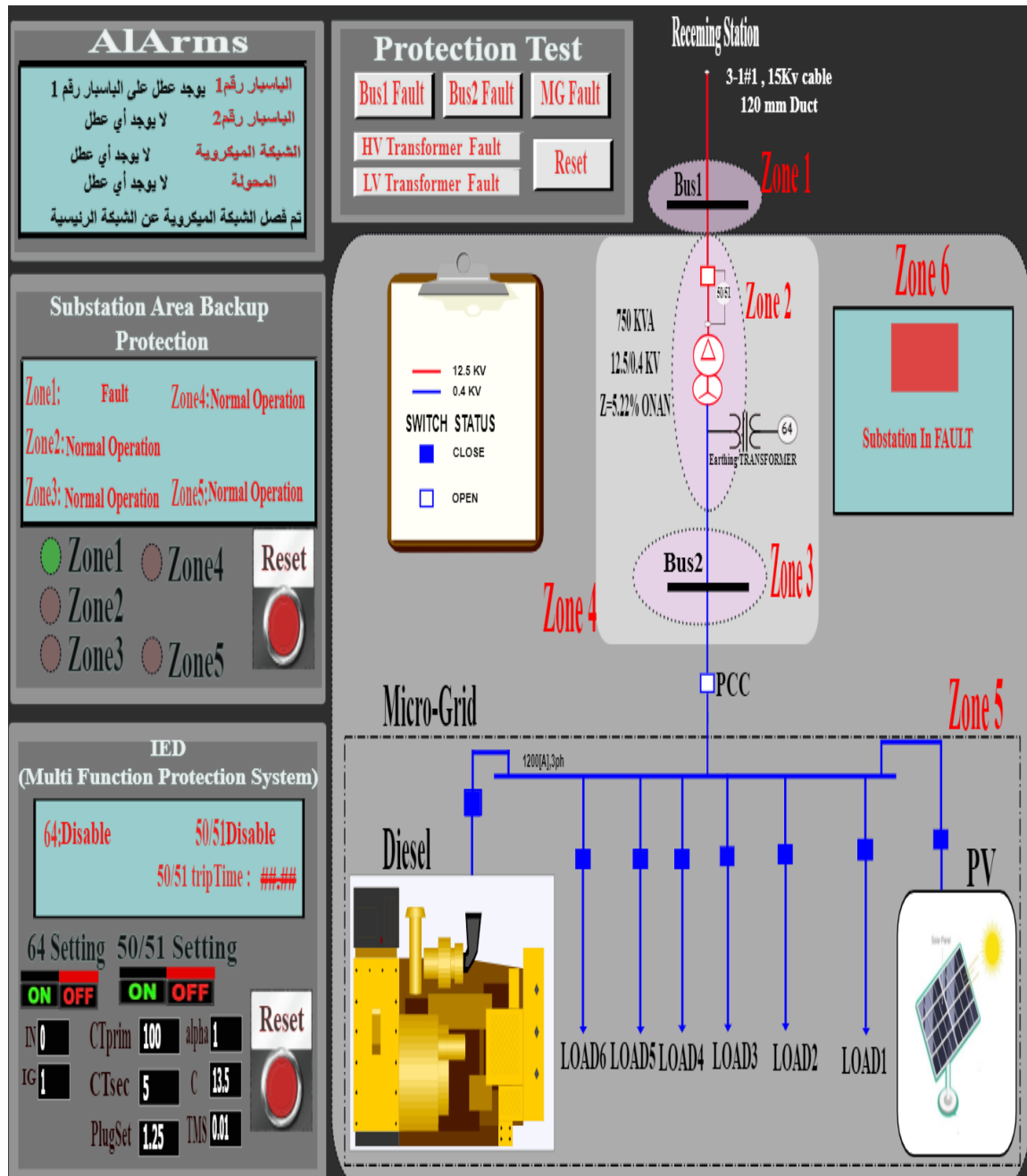
4-4-3- نتائج الاختبار عبر الواجهة الرسومية:

سيتم فيما يلي عرض نتائج تطبيق الواجهة الرسومية عند تشغيل الشبكة الميكروية في برنامج الماتلاب. بدايةً يتم اختبار الحماية الاحتياطية ثم مراقبة تغيرات بارامترات الشبكة.

4-4-3-1- نتائج اختبار نظام الحماية الاحتياطية (SABP) عبر الواجهة الرسومية:

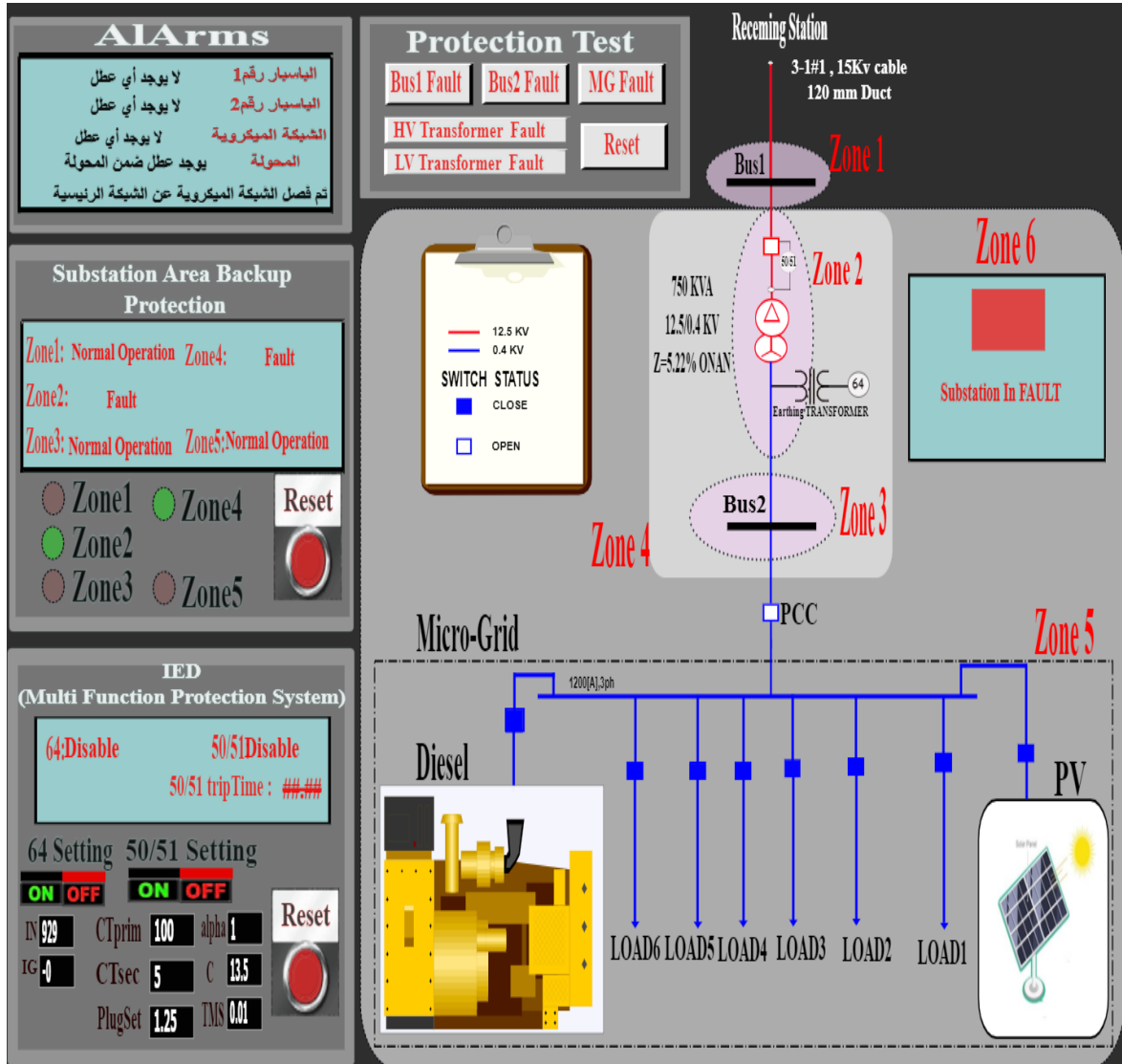
أُجري اختبار لنظام الحماية الاحتياطية من خلال تفعيل الأعطال في مواقع مختلفة من المحطة والشبكة الميكروية وذلك عبر وحدة اختبار نظام الحماية (Protection Test) الموجودة ضمن الواجهة الرسومية. وبعض نتائج الاختبار موضحة بالأشكال التالية.

يوضح الشكل (4-55) نتيجة اختبار نظام الحماية الاحتياطية للمحطة عند حدوث عطل على الباسبار الأول ومن الشكل يمكن الملاحظة أن (Zone1) من (SABP) الموجودة ضمن الواجهة قد تحولت إلى اللون الأخضر كون العطل حدث ضمنها إضافةً إلى إعطاء تنبيه على شكل رسالة بأن العطل حدث على الباسبار الأول وبعد انقضاء التأخير الزمني المحدد تم فصل القواطع.



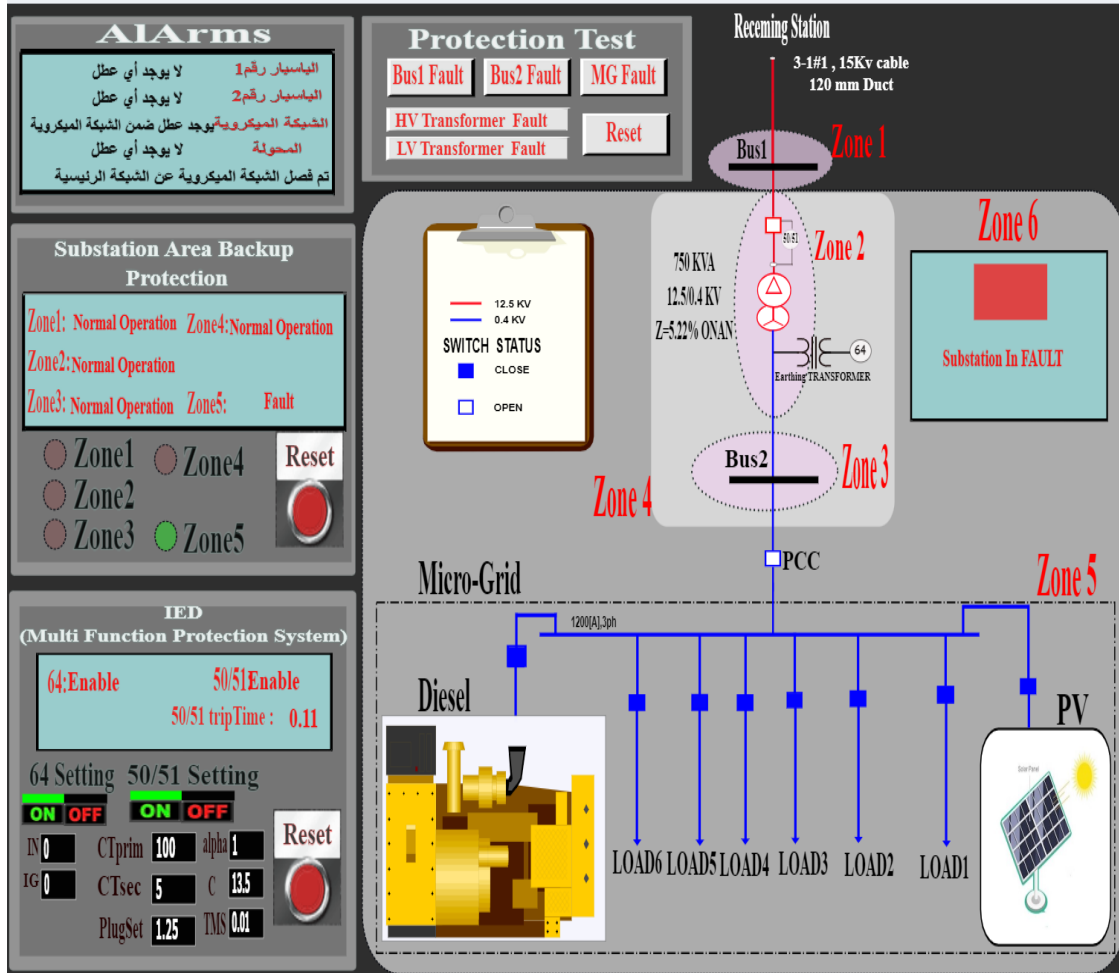
الشكل (4-55): استجابة نظام الحماية عبر الواجهة الرسومية عند حدوث عطل على الباسبار الأول

يبين الشكل (4-56) نتائج الاختبار عند تطبيق عطل على المحولة ونلاحظ استجابة نظام الحماية الاحتياطية ضمن الواجهة الرسومية لهذا العطل من خلال إضاءة التنبيه الخاص بالمنطقة رقم (2) والمنطقة رقم (4).



الشكل (4-56): استجابة نظام الحماية عبر الواجهة الرسومية عند حدوث عطل ضمن المحولة

كما يبين الشكل (4-57) استجابة نظام الحماية الاحتياطية عبر الواجهة الرسومية عند تطبيق عطل ضمن الشبكة الميكروية وذلك من خلال تفعيل التنبيه الضوئي للمنطقة رقم (5).



الشكل (4-57): استجابة نظام الحماية عبر الواجهة الرسومية عند حدوث عطل ضمن الشبكة الميكروية

4-4-3-2- مراقبة تغيرات بارامترات المحطة المدروسة مع الزمن:

يمتاز برنامج (Ecava) بتوفير إمكانية تتبع تغيرات بارامترات النظام المدروس مع الزمن وإظهار هذه التغيرات على شكل منحنيات ضمن صفحات ويب مكتوبة بلغة البرمجة (JavaScript) (الشكل 4-58). لذا أنشئت عدة صفحات ويب تم من خلالها تتبع تغيرات المولد الكهروضوئي الشمسي الموجود ضمن الشبكة الميكروية المدروسة، تغيرات السرعة الميكانيكية للمولد التزامني وغيرها وذلك عند أوضاع التشغيل المختلفة للشبكة الميكروية .

```

<!DOCTYPE HTML>
<html>
<head>
<title>Plot</title>
<meta http-equiv="content-type" content="text/html; charset=utf-8"/>
<link rel="stylesheet" type="text/css" href="system/styles/igrX.css" />
<!--[if lte IE 7]>
<link rel="stylesheet" media="screen, print" href="system/styles/plot.compat.css" />
<![endif]>
</head>
<body>
<div class='trend' data-
trend='{
"pen": [{"enabled": true, "max": 56.000000, "min": 40.000000, "name": "Maingrid",
"pens": [{"enabled": true, "format": "##.##", "name": "Frequency", "tag": "Maingrid_freq"}],
"showMarker": false, "unit": "HZ"}],
"opt": {"axisColor": "#555555", "background": "white", "borderColor": "#333333", "borderWidth": 0, "disableNavigation": 0, "hideParameter": 0, "legendPosition": "nw", "length": 1500, "limit": 0, "lineWidth": 2, "lograte": 5000, "maxPen": 100, "minZoom": 20000, "refLineColor": "black", "showLegend": 1, "showMarker": 0, "title": "Monitoring System", "x-tickColor": "#dddddd", "y-tickColor": "#dddddd"}'>
</div>
<div class='trend' data-
trend='{
"pen": [{"enabled": true, "max": 168.000000, "min": 130.000000, "name": "Generator Speed", "pens": [{"enabled": true, "format": "##.##", "name": "Mechanical Speed", "tag": "Generator_speed"}],
"showMarker": false, "unit": "rad/s"}],
"opt": {"axisColor": "#555555", "background": "white", "borderColor": "#333333", "borderWidth": 0, "disableNavigation": 0, "hideParameter": 0, "legendPosition": "nw", "length": 1500, "limit": 0, "lineWidth": 2, "lograte": 5000, "maxPen": 100, "minZoom": 20000, "refLineColor": "black", "showLegend": 1, "showMarker": 0, "title": "Monitoring System", "x-tickColor": "#dddddd", "y-tickColor": "#dddddd"}'>
</div>
</body>
<script type="text/javascript" src="system/scripts/igrX2.js"></script>
<script src="https://www.gstatic.com/charts/loader.js"></script>
</html>

```

التعليمات الخاصة بإنشاء صفحة الويب

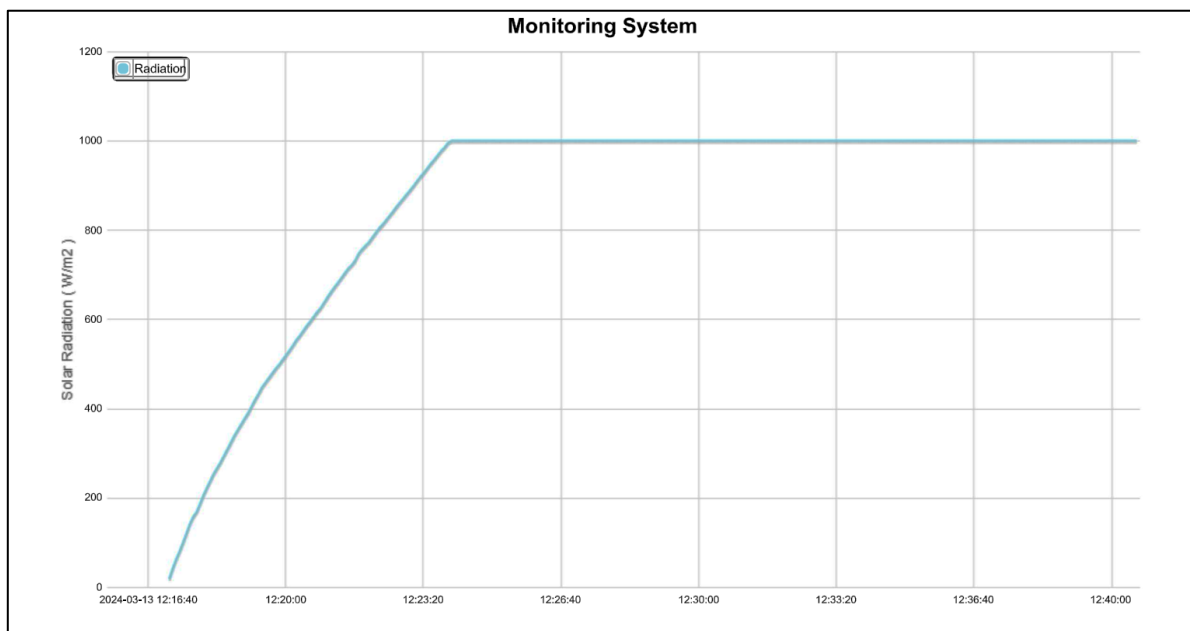
تحديد محتوى الصفحة

تحديد المتغيرات المراد إظهارها وتحديد نوع المتغير ولون الخط وحجمه

الشكل (4-58): إنشاء صفحة ويب مكتوبة بلغة (JavaScript) ضمن برنامج (Ecava)

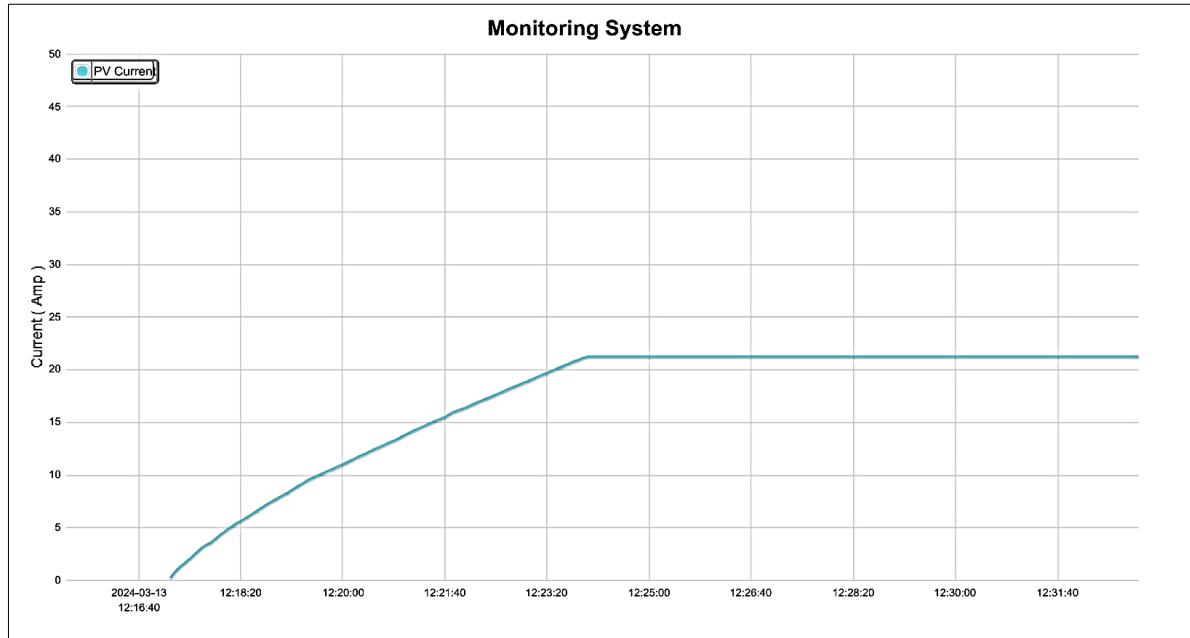
يوضح الشكل (4-59) تغيرات الإشعاع الشمسي وتيار خرج المولد الكهروضوئي كما تظهره الواجهة الرسومية

باستخدام برنامج ECAVA.



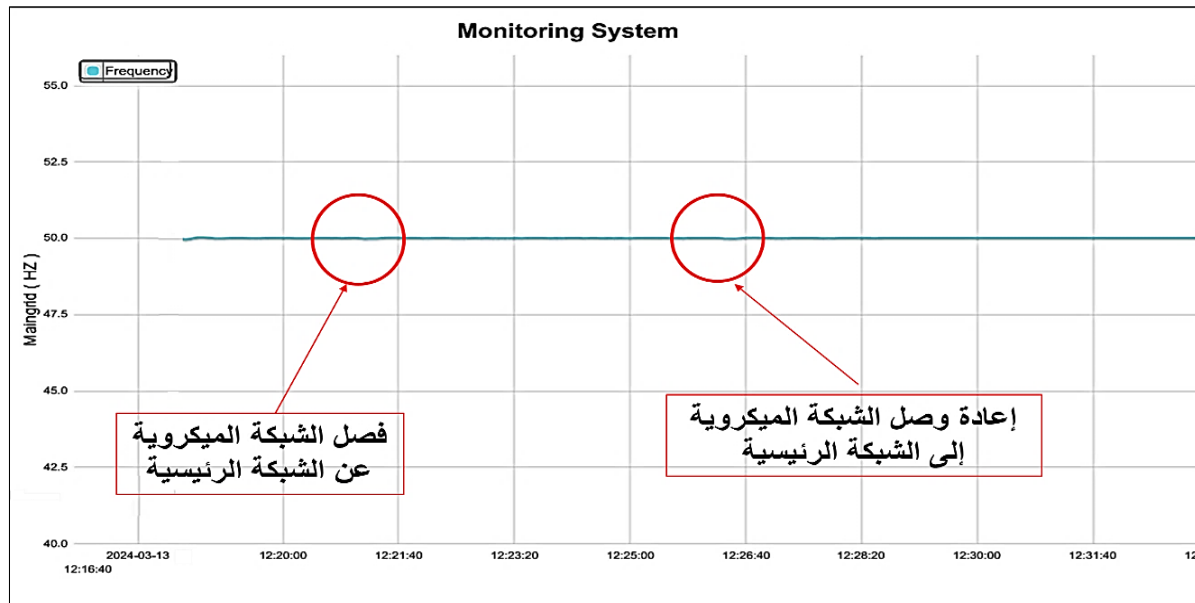
الشكل (4-59): تغيرات الإشعاع الشمسي عبر برنامج (Ecava)

كما يوضح الشكل التالي تغيرات تيار المولد الكهروضوئي الشمسي، ونلاحظ التغيرات في قيمة تيار المولد الكهروضوئي الشمسي ناتجة عن التغيرات في الإشعاع الشمسي.



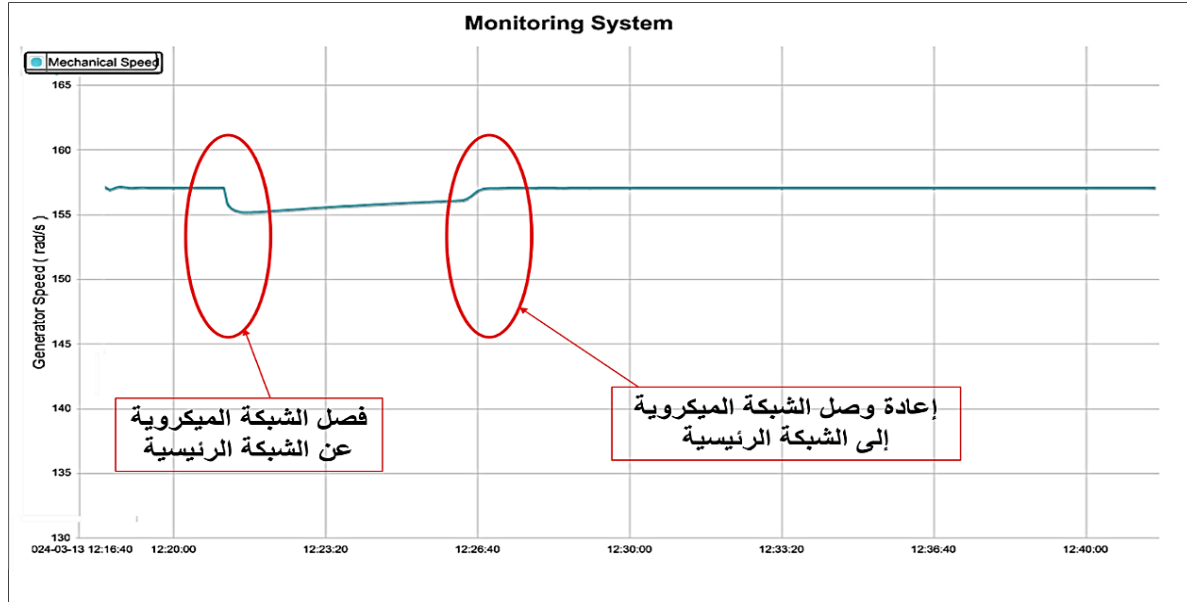
الشكل (4-60): تغيرات تيار المولد الكهروضوئي الشمسي عبر برنامج ECVA

يبين الشكل (4-61) تغيرات تردد الشبكة الميكروية كما يظهره برنامج ECVA عند اختبار فصل وإعادة وصل الشبكة الميكروية إلى الشبكة الرئيسية.



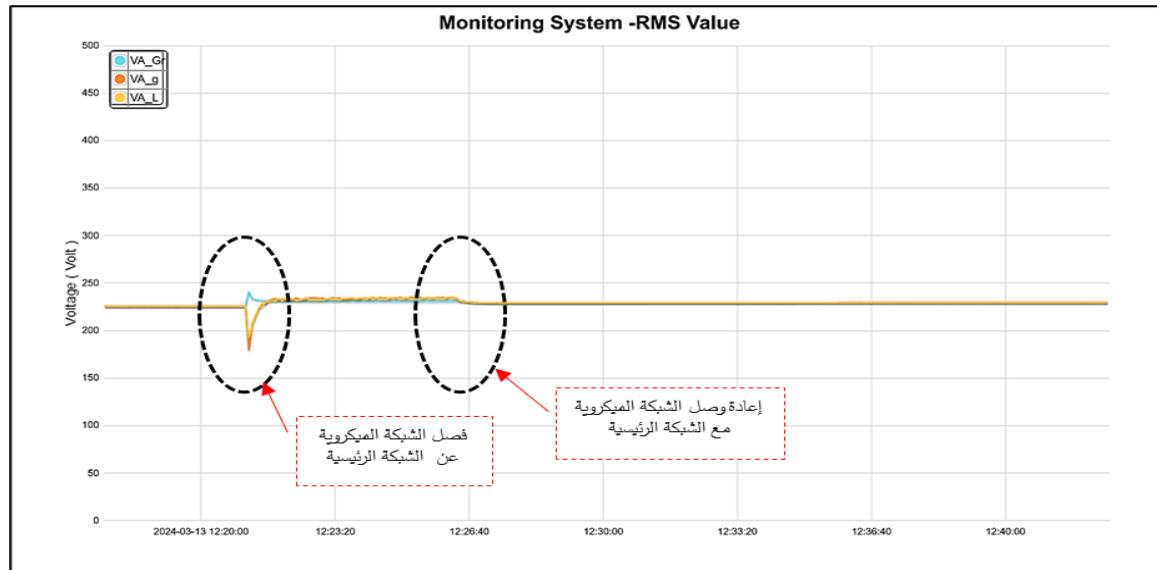
الشكل (4-61): تغيرات تردد الشبكة الميكروية عند فصلها عن الشبكة الرئيسية وإعادة وصلها عبر (Ecava)

يبين الشكل التالي التغيرات الطارئة على سرعة المولد التزامني عند الفصل وإعادة الوصل للشبكة الميكروية عن الشبكة الرئيسية كما يظهره برنامج ECAVA.



الشكل (4-62): تغيرات السرعة الميكانيكية للمولد عند أوضاع التشغيل المختلفة للشبكة الميكروية عبر (Ecava)

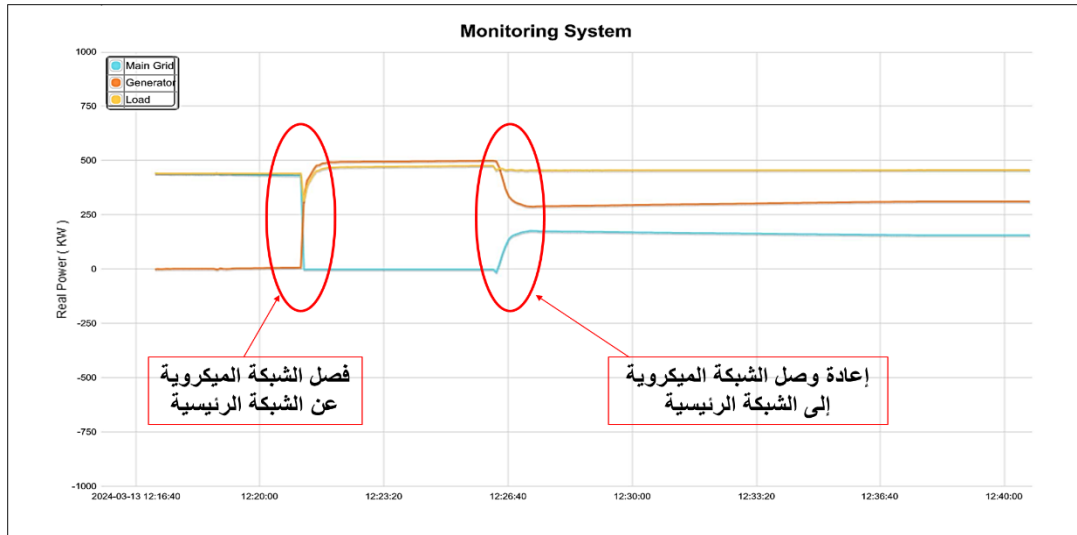
يبين الشكل (4-63) تغيرات القيمة الفعالة لجهد كل من الشبكة الرئيسية والميكروية والمولد كما يظهره برنامج ECAVA.



الشكل (4-63): تغيرات القيمة الفعالة لجهد كل من الشبكة الرئيسية والميكروية والمولد عبر (Ecava)

من خلال الأشكال السابقة نلاحظ أن عملية إعادة وصل الشبكة الميكروية إلى الشبكة الرئيسية تمت دون حدوث تغيرات في التردد والجهد.

يبين الشكل (4-64) تغيرات الاستطاعة الحقيقية لكل من الشبكة الرئيسية والحمولة والمولد التزامني عبر برنامج ECAVA وذلك عند فصل الشبكة الميكروية عن الشبكة الرئيسية وعند إعادة الوصل. نلاحظ من الشكل أنه عند فصل الشبكة الميكروية عن الشبكة الرئيسية سيقوم المولد بتأمين الاستطاعة اللازمة لتغذية الحمل، أما عند إعادة الوصل سيقوم المولد التزامني بالتشارك مع الشبكة الرئيسية بتأمين التغذية للحمولة.



الشكل (4-64): تغيرات الاستطاعة الحقيقية عبر (Ecava)

الفصل الخامس

النتائج والتوصيات

- مقدمة:

يتضمن هذا الفصل خلاصة النتائج التي تم التوصل إليها خلال مراحل البحث المختلفة إضافةً إلى التوصيات للأعمال المستقبلية.

5-1- النتائج:

- 1- تطوير شبكة توزيع مرجعية وهيكلتها على شكل شبكة ميكروية.
- 2- تضمين تجهيزات المحطات الفرعية الذكية ضمن آلية إنشاء مركز التحكم بالشبكة الميكروية (MGCC).
- 3- إنجاز آلية المزامنة للشبكة الميكروية مع الشبكة الرئيسية باستخدام حلقة الطور المقفلة (PLL) و اختبارها ضمن برنامج (Matlab).
- 4- نمذجة الحماية الأساسية للشبكة الميكروية واختبارها عند أعطال مختلفة.
- 5- استخدام طريقة الحماية الاحتياطية المستخدمة في المحطات الفرعية الذكية في عملية حماية محطة التوزيع الفرعية الثانوية المستخدمة لإنشاء الشبكة الميكروية.
- 6- دمج وظائف مركز التحكم (MGCC) مع وظائف الحماية للمحطة الفرعية لتشكيل مركز تحكم شامل بالشبكة الميكروية ومحطة التحويل.
- 7- تشكيل واجهة رسومية تقوم بأعمال المراقبة والتحكم للنظام الكهربائي المكون من الشبكة الميكروية مع محطة التوزيع الفرعية المغذية لهذه الشبكة.

5-2- التوصيات:

- 1- تطبيق نظام المراقبة في مخبر الشبكات الذكية.
- 2- تطبيق الواجهة الرسومية باستخدام Ecava لمراقبة النظام الكهروضوئي الشمسي في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية.
- 3- توسيع تطبيق برنامج Ecava ليشمل بقية وظائف MGCC وخاصة نظام التسعير وإدارة الطلب على الطاقة.

المراجع

- المراجع العربية:

1- حمزة، علي. (2011). **تكامل التوليد الموزع في أنظمة التوزيع الكهربائية**. دمشق: منشورات جامعة دمشق.

2- زيدان، خالد، والجابي، سميح. (2016). **حماية نظم القدرة الكهربائية**. دمشق: منشورات جامعة دمشق.

- المراجع الأجنبية:

[1] Abusara, M. A., Guerrero, J. M., & Sharkh, S. M. (2014, March). **Line-Interactive UPS for Microgrids**. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 61, NO. 3, pp.1292-1300.

[2] Adefarati, T., & Bansal, R. C. (2016). **Integration of renewable distributed generators into the distribution system: a review**. IET Renewable Power Generation, 10(7), 873-884.

[3] Aftab, M. A., Hussain, S. S., Ali, I., & Ustun, T. S. (2020, September). **“IEC 61850 based substation automation system: A survey”**. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Vol.120, pp.1-16.

[4] Almas, M. S., Leelaraji, R., & Vanfretti, L. (2012, October). Over-current relay model implementation for real time simulation & Hardware-in-the-Loop (HIL) validation. In IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society (pp. 4789-4796). IEEE.

[5] Bevrani, H., Watanabe, M., & Mitani, Y. (2014). **Power system monitoring and control**. John Wiley & Sons.

[6] D'silva, S., Shadmand, M., Bayhan, S., & Abu-Rub, H. (2020, April 20). **“Towards Grid of Microgrids: Seamless Transition between Grid-Connected and Islanded Modes of Operation”**. IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, vol.1, pp.66-81.

[7] Dulău, L. I., Abrudean, M., & Bică, D. (2014, November). **Impact of distributed generation on Medium Voltage line**. In 2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE) (pp. 1-5). IEEE.

- [8] Guerra Sánchez, L. G. (2016). **Analysis of power distribution systems using a multicore environment**.
- [9] Gupta, S., Ali, I., Thomas, M. S., Hussain, S. (2017, 23 February). “**Recent advancements in substation automation systems based on information and communication technologies**”. Taylor & Francis.
- [10] Huang, Q., Jing, S., Li, J., Cai, D., Wu, J., & Zhen, W. (2016). **Smart substation: State of the art and future development**. IEEE Transactions on Power Delivery, 32(2), 1098-1105.
- [11] J. H. Moon et al. (2021, July). **Fast and Stable Synchronization Between the Grid and Generator by Virtual Coordinates and Feed-Forward Compensation in Grid-Tied Uninterruptible Power Supply System**. IEEE ACCESS, VOL.9, pp. 99374 – 99387.
- [12] Jia, Y., Liu, D., & Liu, J. (2012). “**A novel seamless transfer method for a microgrid based on droop characteristic adjustment**”. in Proceedings of The 7th International Power Electronics and Motion Control Conference (pp. 362-367). IEEE.
- [13] Julie, F. G. (2014). **Development of an IEC 61850 standard-based automation system for a distribution power network**. (Doctoral dissertation, Cape Peninsula University of Technology).
- [14] Kaur, A., Kaushal, J., & Basak, P. (2016). **A review on microgrid central controller**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 55, 338-345.
- [15] K.N. Bagal; C.B. Kadu; B.J. Parvat; P.S. Vikhe. (2019, April).” **PLC Based Real Time Process Control using SCADA and MATLAB**”. 2018 Fourth International Conference on Computing Communication Control and Automation (ICCUBE).
- [16] L’Abbate, A., Fulli, G., Starr, F., & Peteves, S. D. (2007). **Distributed Power Generation in Europe: technical issues for further integration**. JRC European Commission Scientific and Technical Report. EUR, 23234.
- [17] Li, S., Jiang, B., Wang, X., & Dong, L. (2017). **Research and Application of a SCADA System for a Microgrid**. Technologies, 5(2), 12.

- [18] Liu, Y., Gao, H., Gao, W., & Peng, F. (2016). **Development of a substation-area backup protective relay for smart substation**. IEEE Transactions on Smart Grid, 8(6), 2544-2553.
- [19] Liu, L., He, J., & Yip, T. (2014). **“Coordinated backup protection scheme for smart substation”**. 12th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014) (pp. 1-5). IET.
- [20] Mägi, M., Peterson, K., & Pettai, E. (2012, June). **Analysis of protection and control functions of low voltage part of substation for smart grid applications**. In 2012 Electric Power Quality and Supply Reliability (pp. 1-8). IEEE.
- [21] Ma, J., & Wang, Z. (2019). **Hierarchical Protection for Smart Grid**. Wiley.
- [22] Meje, K. C., Bokopane, L., & Kusakana, K. (2020, October). **Microgrids control strategies: A survey of available literature**. In 2020 International Conference on Smart Grid and Clean Energy Technologies (ICSGCE) (pp. 167-173). IEEE.
- [23] Mokryani, G. (2022). **Future Distribution Networks**. New York, USA: AIP Publishing.
- [24] Nirmal, S. (2021). **Control and Grid Synchronization Techniques of a Microgrid for Improved Power Sharing and Power Quality**. Doctoral dissertation, APJ ABDUL KALAM TECHNOLOGICAL UNIVERSITY.
- [25] Pehlivanoglu Gürbüz, K. (2019). **Smart grid applications and technologies in distribution systems** (Master's thesis, Middle East Technical University).
- [26] Rahman, M. G., Chowdhury, M. F. B. R., Al Mamun, M. A., Hasan, M. R., & Mahfuz, S. (2013). **Summary of smart grid: Benefits and issues**. Int. J. Sci. Eng. Res, 4(3), 1-5.
- [27] Shi, D., Luo, Y., & Sharma, R. K. (2014, October). **Active synchronization control for microgrid reconnection after islanding**. In IEEE PES innovative smart grid technologies, Europe (pp. 1-6). IEEE.
- [28] Skeie, O. (2021). **A Control Strategy for Seamless Interconnection of Microgrids in a Multigrid Configuration** (Master's thesis, NTNU).

- [29] Soetedjo,A, Lomi.A, Nakhoda,Y & others.(2013). **Combining Web SCADA Software and Matlab-Simulink for Studying Wind-PV-Battery Power Systems**. IJCSI.
- [30] Tran, T. V., Chun, T. W., Lee, H. H., Kim, H. G., & Nho, E. C. (2014, October). **PLL-Based Seamless Transfer Control Between Grid-Connected and Islanding Modes in Grid-Connected Inverters**. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL.29,NO.10,pp.5218-5227.
- [31] Uten, T., Charoenlarnopparut, C., & Suksompong, P. (2019, October). **Synchronization control for microgrid seamless reconnection**. In 2019 14th International Joint Symposium on Artificial Intelligence and Natural Language Processing (iSAI-NLP) (pp. 1-6). IEEE.
- [32] Waleed, A., Virk, U. S., Riaz, M. T., Mehmood, S. B., Ahmad, S., Javed, M. R., & Raza, A. (2019). **Effectiveness and Comparison of Digital Substations Over Conventional Substations**. Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal, Vol. 4, No. 4,pp. 431-439.
- [33] Wang, J., Huang, B., Li, Y., & Zhang, W. (2017). “**An optimized design of substation-area protection in smart substation**”. 2017 IEEE 3rd Information Technology and Mechatronics Engineering Conference (ITOEC) (pp. 167-171). IET.
- [34] Yuan.Y,& Yang.Y.(2019). **IEC 61850-Based Smart Substations(Principles, Testing, Operation and Maintenance)**. Elsevier.
- [35] <https://www.integraxor.com/doc/ug.pdf>. Retrieved December 8,2023.
- [36] <https://www.circuitglobe.com>. Retrieved July 20,2024.

Abstract

The development of the electrical system into a more intelligent system necessitates updating its components to align with the advanced operational requirements of smart systems. Smart substations and microgrids play a vital role in enhancing the efficiency of modern energy systems. Smart substations are considered the heart of the smart energy system and the cornerstone for creating smart networks, as they allow significant improvements in the field of monitoring and control through a set of smart electronic equipment and communication technologies. This establishes the foundation for creating microgrids that contribute to enhancing the flexibility and efficiency of electric power distribution through the optimal use of renewable energy sources and energy demand management via the Microgrid Control Center (MGCC).

This research presents the architecture of electrical substations, their components at the distribution voltage level, and their protection systems, as well as the necessary updates to accommodate the operation of smart microgrids. It also covers the automation system of smart substations based on IEC 61850 standards and the integration of this system's functions with the MGCC to improve operational efficiency and reliability for both microgrids and all elements of the power system.

Furthermore, this research includes a study and modeling of a reference microgrid using MATLAB software, and the implementation of a system to ensure its synchronized reconnection with the main grid. Additionally, a microgrid control center was established, attached to the studied substation, with a graphical interface formed using ECAVA software. This interface displays the information of the substation and microgrid, handles the synchronization system and the backup protection system (SABP), and facilitates real-time monitoring and control of the substation and microgrid.

Key Word: Smart Substation – Distributed Generation – Microgrid- Web SCADA- ECAVA.

Syrian Arab Republic

Damascus University

Faculty of Mechanical and Electrical Engineering

Department of electrical power engineer



Smart distributed substations used to convenient forming of smart microgrids

By:

Eng.Paula Milaneh

Supervised By:

Dr.Fouad Salha

Academic year
2023/2024