الجمهورية العربية السورية
المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا
قسم النظم الإلكترونية والميكانيكية

HIAST

التحكم بنظام تغذية منزلي يعمل على الطاقة الشمسية ومربوط مع الشبكة الكهربائية

Control of Residential Grid-Connected Photovoltaic System

دراسة أعدت لنيل شهادة الماجستير في نظم التحكم والروبوتيك - اختصاص تحكم

إعداد

م.محمد عطا الشيخ

إشراف

د. علاء معروف **د.محي الدين قبيطري**

تشرين الثاني 2018

الإهداء

أهدي هذا العمل إلى

من أنارا طريقي

أمي وأبي

إلى سندي وعزوتي

أخواتي وأخي

إلى من آنستني في دراستي وشاركتني همومي

زوجتي الحبيبة

إلى بسمتي في حياتي

ابنتي الغالية

إلى رفاق دربي

أصدقائي

كلمة شكر

أتوجه بالشكر الجزيل إلى المشرفين د.علاء معروف ود.محي الدين قبيطري على توجيهاتهم القيمة وأتوجه بعظيم الشكر والامتنان إلى د.ظافر موسى الذي كان داعماً لهذا العمل حتى النهاية. كما أشكر د.ميشيل السبع رئيس قسم النظم الإلكترونية والميكانيكية في المعهد العالي لاهتمامه ورعايته وأشكر زملائي في العمل وزملائي في المعهد العالي جميعاً على مساعداتهم العظيمة.

الملخص

يهتم هذا البحث بمعالجة مسألة هامة وواعدة هي مسألة تحويل الطاقة الكهربائية الناتجة من الألواح الشمسية وحقنها في الشبكة الكهربائية العامة. يحتوي هذا التقرير على دراسة مرجعية لطرائق ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى للألواح الشمسية، كما يتضمن دراسة مرجعية معمقة للمنوبات المربوطة مع الشبكة الكهربائية والتي تعتبر جزءاً هاماً في أنظمة توليد الطاقة الموزعة. بالرغم من فعالية مرشح الاستطاعة LCL في تقليل مطال التوافقيات الناجمة عن التقطيع في المنوب، إلا أن الطنين في هذا المرشح يسبب مشكلة استقرار في النظام. تخميد الطنين بشكلٍ غير فعال بإضافة مقاومة لمكثفة المرشح سينقص مردود المنوب. لذلك فإن التخميد الفعال بإرجاع تيار مكثفة المرشح هو المفضل، لكنه يحتاج إلى حساس تيار إضافي، كما أن التأخير الناجم عن التحكم الرقمي سيؤدي إلى صعوبة تحقيق استقرار النظام. يهتم هذا البحث بالتحكم بالتيار المحقون في الشبكة وتحقيق التخميد الفعال في المرشح LCL دون الحاجة إلى حساس تيار إضافي. وذلك بتقدير تيار المكثفة اعتماداً على راصد في الزمن المقطع يعتمد على قياس التيار المحقون في الشبكة دون وجود تأخير في التقدير. يتضمن هذا البحث أيضاً تصميم مصحح جهد الخط الساكن لتحقيق التوازن بين الاستطاعة الواردة من الألواح الشمسية والمحقونة في الشبكة. تم التحقق من فعالية التحكم المقترح للنظام بالمحاكاة في بيئة MATLAB والتنجيز العملي للمنظومة باستطاعة $1KW$.

<u>الكلمات المفتاحية:</u> المنوبات المربوطة مع الشبكة، التخميد الفعال، ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى، أنظمة توليد الطاقة الكهربائية الموزعة، التحكم بالتيار المحقون في الشبكة.

Abstract

This work aims to study the essential promising issue of harvesting solar energy. The main studied problem is the grid connected solar power plant. This report contains a study of maximum power point tracking algorithms and grid connected inverter which is an important part in distributed power generation system based on renewable energy. Although LCL filter is effective in attenuating the switching frequency harmonics in the inverter, the resonance in this filter causes stability problems. Passive damping of resonance by adding a series resistor with filter capacitor reduces the inverter efficiency. So, active damping is more preferred, but it needs additional sensor to measure filter capacitor current. The delay in active damping control loop will harm system stability. This research presents control scheme for grid connected inverter with LCL filter. The control scheme ensures the control of grid current and also the active damping. Filter capacitor current estimation without delay is performed using discrete time observer based on the measurement of injected current. The research also includes design of DC line controller. Simulation and experimental results verify the proposed control scheme at $1KW$ power rating.

<u>Key words:</u> Grid connected inverter, Active Damping, Maximum power point tracking, Distributed power generation system, Grid current control.

قائمة الجداول والأشكال

الشكل 1-1 المتوسط السنوي للإشعاع الشمسي على المتر المربع خلال يومٍ واحد [18].....5

الشكل1-2 مخطط صندوقي لنموذج نظام كهربائي مستقل عن الشبكة يعتمد على الطاقة الشمسية.....6

الشكل1-3 مخطط صندوقي لنظام توليد الطاقة الكهربائية الشمسية مربوط مع الشبكة.....8

الشكل1-4 مخطط توضيحي لمستويات توليد ونقل الطاقة الكهربائية التقليدي.....8

الشكل1-5 مفهوم توليد الطاقة الموزعة.....9

الشكل1-6 مفهوم توليد الطاقة الشمسية المنزلية المربوطة مع الشبكة.....10

الشكل1-7 مخطط صندوقي لنظام توليد الطاقة الكهربائية الشمسية مربوط مع الشبكة بوجود عناصر تخزين.....10

الشكل1-8 بنية الخلية الشمسية.....11

الشكل1-9 التوزع الطيفي للطاقة ضمن الأشعة الشمسية.....12

الشكل1-10 الدارة المكافئة لخلية شمسية Solar Cell.....13

الشكل1-11 تيار الخلية الشمسية والاستطاعة المستجرة منها بدلالة جهدها.....14

الشكل1-12 المنحني المميز لمجموعة من الخلايا الشمسية المتماثلة.....14

الشكل1-13 طريقة وصل الخلايا للحصول على مواصفات مطلوبة.....15

الشكل1-14 إضافة ديودات Parallel Bypass Diode.....15

الشكل1-15 إضافة ديود إلى كل فرع.....16

الشكل1-16 يوضح طريقة الربط بوجود مبدل مركزي.....17

الشكل1-17 طريقة الربط بوجود مبدل لكل سلسلة.....17

الشكل1-18 يوضح طريقة الربط بوجود مبدل متعدد السلاسل.....18

الشكل2-1 الدارة المكافئة للخلية الشمسية.....20

الجدول2-1 المواصفات الكهربائية والحرارية للوح الشمسي من الشركة المصنعة.....20

الشكل2-2 تغيرات منحني الخواص للوح الشمسي مع تغير شدة الإشعاع الشمسي عند درجة الحرارة المرجعية $T_{cr} = 25^0$.....22

الشكل2-3 تغيرات منحني الخواص للوح الشمسي مع تغير درجة الحرارة عند شدة الإشعاع المرجعية $G_r = 1000w/m^2$.....22

الشكل2-4 المخطط العام للنظام وكتلة المبدل للحصول على نقطة الاستطاعة العظمى ضمن الإطار المنقط.....23

الشكل2-5 بنية المبدل الرافع للجهد.....23

الشكل2-6 تيار ذاتية المبدل الرافع للجهد وإشارة التحكم بقاطعته.....24
الجدول2-2 آلية تغيير عرض النبضة في خوارزمية الاضطراب والملاحظة للوصول إلى نقطة الاستطاعة العظمى.....25
الشكل2-7 آلية عمل خوارزمية الاضطراب والملاحظة على المنحني (P_{pv}, V_{pv}).....26
الشكل2-8 المخطط التدفقي لخوارزمية الاضطراب والملاحظة لملاحقة نقطة الاستطلعة العظمى للوح شمسي...27
الشكل2-9 آلية عمل خوارزمية تدرج الناقلية.....28
الشكل2-10 المخطط التدفقي لخوارزمية تدرج الناقلية في ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى للوح شمسي.....29
الشكل2-11 طريقة التحكم بجهد نقطة العمل الموافق لنقطة الاستطاعة العظمى بالاستعانة بشبكة عصبونية [26].....32
الشكل3-1 المخطط العام لنظام شمسي مربوط بالشبكة.....34
الشكل3-2 الإشارات ثلاثية الطور مكتوبة بالجمل abc، α-β، d-q.....36
الشكل3-3 التحكم بالتيار المحقون بالشبكة باستخدام مرشح L في منوب ثلاثي الطور بالجملة المتزامنة d-q.....37
الشكل3-4 التحكم بالتيار المحقون بالشبكة باستخدام مرشح L في منوب ثلاثي الطور في الجملة α-β.....39
الشكل3-5 التحكم بالتيار المحقون بالشبكة باستخدام مرشح L في منوب ثلاثي الطور في الجملة abc.....39
الشكل3-6 طريقة تعويض التوافقية الخامسة في الجملة المتزامنة d-q [51].....40
الشكل3-7 طريقة تعويض التوافقيات عند استخدام مصحح PR [51]..... 41
الشكل3-8 المصححات PR لتصحيح التوافقيات [51].....41
الشكل3-9 طيف إشارة جيبية بتردد $50Hz$ معدلة بتردد $10kHz$ وذلك من أجل التقطيع بمستويين.....42
الشكل3-10 طيف إشارة جيبية بتردد $50Hz$ معدلة بتردد $10kHz$ وذلك من أجل التقطيع بثلاث مستويات.....42
الشكل3-11 طيف إشارة جيبية بتردد $50Hz$ معدلة بتردد $10kHz$ وذلك من أجل التقطيع بخمس مستويات.....43
الشكل3-12 مخطط لمنوب أحادي الطور مربوط بالشبكة عن طريق مرشح L.....43
الشكل3-13 يظهر إشارة التحكم وإشارة الحامل $V_{carrier}$ لتوليد إشارة PWM.....44
الشكل3-14 المخطط الصندوقي للمرشح L مع المنوب في مستو لابلاس.....44
الشكل3-15 المنوب والمرشح LCL.....45
الشكل3-16 المخطط الصندوقي للمرشح LCL مع المنوب في مستوي لابلاس.....46
الشكل3-17 مخطط بود لهذا لكل من المرشح LCL وL.....47
الشكل3-18 تخميد الطنين في المرشح بإضافة مقاومة تخميد.....48

الشكل3-19 مخطط بود لتابع التحويل عند قيم مختلفة لمقاومة التخميد.....48
الشكل3-20 التخميد الفعال بإضافة حلقة تحكم بتغذية خلفية متناسبة مع تيار المكثفة.....49
الشكل3-21 المخطط الصندوقي للنظام مع تخميد فعال في مستو لابلاس.....49
الشكل3-22 مخطط بود لتابع التحويل G_1 عند تردد طنين $1.65kHz$ وعند قيم تخميد مختلفة.....50
الشكل3-23 المخطط الصندوقي للنظام مع تخميد فعال يُظهر المقاومة المكافئة للتخميد الفعال.....51
الشكل3-24 المقاومة المكافئة للتخميد الفعال.....51
الشكل3-25 التخميد الفعال بوجود مرشح منع حزمة.....52
الشكل3-26 التحكم بالتيار مع التخميد الفعال لنظام أحادي الطور مع تخميد فعال.....53
الشكل3-27 مخطط بود لمصحح PR مثالي $f_g = 50Hz$، $k_r = 500$ ، $k_p = 10$.....53
الشكل3-28 مخطط بود لمصحح تناسبي طنيني من أجل قيم مختلفة للربح الطنيني عند $k_p = 10$.....54
الشكل3-29 مخطط بود لمصحح تناسبي طنيني من أجل قيم مختلفة للربح التناسبي عند $k_r = 500$.....55
الشكل3-30 مخطط لابلاس للحلقة المغلقة للنظام مع حلقة التخميد.....56
الشكل3-31 مخطط لابلاس للحلقة المغلقة للنظام مع حلقة التخميد بدلالة تابعي التحويل G_1 و G_2.....56
الشكل3-32 مخطط بود لتابع الحلقة المفتوحة عند قيم مختلفة للربح التناسبي.....57
الشكل3-33 آلية التقطيع المتزامن.....58
الشكل3-34 تغير أقطاب الحلقة المغلقة مع الربح التناسبي (a) $\omega_{res} > \frac{\omega_s}{6}$، (b) $\omega_{res} = \frac{\omega_s}{6}$، (c) $\omega_{res} < \frac{\omega_s}{6}$
[41].....60
الشكل3-35 تغير أقطاب الحلقة المغلقة مع تغير معامل التخميد K_d : (a) $\omega_{res} = \frac{\omega_s}{6}$، (b) $\omega_{res} < \frac{\omega_s}{6}$ [41]....60
الشكل3-36 المخطط العام للنظام بوجود حلقة التخميد والتأخير.....61
الشكل3-37 تابع تحويل الحلقة المفتوحة مع اعتبار أثر التأخير وبدون أخذ التأخير بعين الاعتبار.....62
الشكل3-38 مخطط لابلاس للنظام مع حلقة تخميد والممانعة العقدية المكافئة.....62
الشكل3-39 الممانعة العقدية المكافئة بوجود حلقة التخميد والتأخير.....63
الشكل3-40 تغييرات قيمة كل من المقاومة المكافئة والمكثفة مع التردد.....63
الشكل3-41 زيادة التخميد عندما $\omega_{res} < \frac{\omega_s}{6}$ إلى أن يصل تردد الطنين إلى $\frac{\omega_s}{6}$.....64
الشكل3-42 زيادة التخميد أعلى من معامل التخميد الحدي K_{dc}.....65

الشكل4-1 المخطط الصندوقي لحلقة التحكم بالتيار المحقون في الشبكة مع وجود الراصد.....70

الشكل4-2 المخطط الصندوقي المصفوفاتي للمرشح والمنوب مع وجود الراصد.....71
الشكل4-3 مخطط بود لنظام الحلقة المفتوحة بزيادة ربح التخميد عند تردد طنين $\omega_{res} = 1.65kHz$ وتردد التقطيع $\omega_s = 10kHz$ أي $\omega_{res} \approx \omega_s/6$.....73
الشكل4-4 المخطط العام لحلقة إقفال الطور لنظام أحادي الطور[79].....74
الشكل4-5 مخطط بود لمرشح تمرير الحزمة في حلقة إقفال الطور عند قيم مختلفة لعرض حزمة التمرير.....75
الشكل4-6 المخطط العام للنظام يظهر فيه مصحح جهد الخط الساكن ضمن إطار منقط.....76
الشكل4-7 المخطط الصندوق للتحكم بالتيار المحقون في الشبكة وآلية التحكم في جهد الخط الساكن.....77
الشكل4-8 مخطط بود للحلقة المفتوحة مع مصحح PI لجهد الخط الساكن.....78
الجدول5-1 معاملات النموذج المستخدمة في المحاكاة.....80
الشكل5-1 المخطط الصندوقي للمنوب مع نظام التحكم بالتيار المحقون بالشبكة.....81
الشكل5-2 نتيجة المحاكاة عند شروط الحمل الكامل.....82
الشكل5-3 نتيجة المحاكاة عند الانتقال من العمل عند الحمل الكامل إلى نصف الحمل الكامل.....83
الشكل5-4 نتيجة المحاكاة عند إلغاء حلقة التخميد الفعال.....83
الشكل5-5 المخطط العام للنظام المنفذ عملياً.....84
الشكل5-6 منظومة الألواح الشمسية المستخدمة.....85
الشكل5-7 الدارات الكهربائية وبطاقات التحكم ودارات تكييف الحساسات المصممة.....85
الشكل5-8 المخطط الصندوقي لدارة اختبار المنوب عملياً.....86
الشكل5-9 جهد الشبكة والتيار المحقون في الشبكة وتيار المنوب عند حقن $1KW$.....87
الشكل5-10 جهد الشبكة التيار المحقون في الشبكة وتيار المنوب عند الانتقال من حقن $1KW$ إلى $0.5KW$.....87
الشكل5-11 جهد الشبكة التيار المحقون في الشبكة وتيار المنوب عند الانتقال من حقن $0.5KW$ إلى $1KW$.....87
الشكل5-12 تنظيم جهد الخط الساكن مع زيادة الطاقة الواردة من الألواح الشمسية.....88
الشكل5-13 التيار المحقون في الشبكة وجهد الشبكة عند زيادة الطاقة المحصلة من الألواح الشمسية.....88
الشكل5-14 تنظيم جهد الخط الساكن مع نقصان الطاقة الواردة من الألواح الشمسية.....89
الشكل5-15 التيار المحقون في الشبكة وجهد الشبكة عند نقصان الطاقة المحصلة من الألواح الشمسية.....89
الشكل5-16 كل من جهد الشبكة والتيار المحقون في الشبكة دون تعويض التوافقيات.....90
الشكل5-17 التحليل الطيفي لإشارة التيار المحقون في الشبكة.....90
الشكل5-18 التحليل الطيفي لإشارة جهد الشبكة.....91
الشكل5-19 مخطط بود لتابع التحويل الحلقة المفتوحة بعد تعويض التوافقيات الثالثة والخامسة.....91

الشكل5-20 التيار المحقون في الشبكة وجهد الشبكة بعد تعويض التوافقية الثالثة فقط.....92
الشكل5-21 التحليل الطيفي لإشارة التيار المحقون في الشبكة بعد تعويض التوافقية الثالثة.....92
الشكل5-22 التيار المحقون في الشبكة وجهد الشبكة بعد تعويض التوافقية الثالثة والخامسة.....93
الشكل5-23 التحليل الطيفي لإشارة التيار المحقون في الشبكة بعد تعويض التوافقية الثالثة والخامسة.....93
الشكل5-24 جهد وتيار الألواح والاستطاعة المستجرة من الألواح للوصول عند نقطة الاستطاعة العظمى.....94
الشكل5-25 ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى بخطوات صغيرة لعرض النبضة.....94

المحتويات

الفصل الأول: مقدمة – نظم توليد الطاقة الكهربائية من الألواح الشمسية.....4
1- التوصيف العام لنظم توليد الطاقة الكهربائية الشمسية المستقلة عن الشبكة.....6
2- التوصيف العام لنظم توليد الطاقة الكهربائية الشمسية المربوطة مع الشبكة.....7
3- الألواح الشمسية وأهم المفاهيم والمصطلحات.....11
3-1- بنية الخلية الشمسية ومبدأ عملها.....11
3-2- الدارة المكافئة للخلية الشمسية ومنحني خواصها.....12
3-3- اللوح الشمسي Solar Panel.....14
4- تصنيف مبدلات الاستطاعة المربوطة بالشبكة وطرق توصيل الألواح الشمسية.....16
4-1- مبدل مركزي Central inverter.....16
4-2- مبدل سلسلة واحدة String inverter.....17
4-3- مبدل متعدد السلاسل Multi-string inverters.....18
الفصل الثاني: دراسة مرجعية لخوارزميات ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى.....19
1- نمذجة اللوح الشمسي وخواصه.....20
2- المبدل الرافع.....23
3- خوارزميات ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى.....25
3-1- خوارزمية الاضطراب والرصد P&O.....25
3-2- خوارزمية تدرج الناقلية Incremental Conductance.....27
3-3- طريقة الجهد المفتوح.....30
3-4- طريقة تيار القصر.....31
3-5- طريقة التحكم الترجيحي.....31
3-6- طريقة الشبكات العصبونية.....31
الفصل الثالث: المنوبات المربوطة بالشبكة الكهربائية.....33
1- المخطط العام لنظام شمسي مربوط بالشبكة.....34
2- الطرق المتبعة في التحكم بنظام ثلاثي الطور مربوط بالشبكة.....35
2-1- التحكم في الجملة المتزامنة Synchronous Reference Frame.....36
2-2- التحكم في الجملة المستقرة Stationary Reference Frame.....38

2-3- التحكم في الجملة الطبيعية Natural Reference Frame.....39
3- تعويض التوافقيات Harmonics Compensation HC.....40
4- المبدل DC/AC وتعديل عرض النبضة PWM.....42
5- المرشح L وLCL.....43
6- تخميد الطنين في المرشح LCL.....47
6-1- التخميد غير الفعال Passive Damping.....48
6-2- التخميد الفعال Active damping.....49
6-3- الترشيح بحزمة ضيقة Notch filter.....51
7- التحكم بنظام أحادي الطور مربوط بالشبكة بمرشح LCL مع تخميد الفعال.....52
8- تصميم معاملات التصحيح.....55
8-1- تحديد تردد القطع.....56
8-2- تحديد هامش الربح وهامش الصفحة.....57
9- التحكم الرقمي.....58
10- الممانعة الوهمية Virtual impedance [40].....61
الفصل الرابع: تصميم قوانين التحكم وتحقيق التخميد الفعال 67
1- المقترحات لحل مشكلة التأخير.....68
2- الطريقة المقترحة.....69
2-1- التقطيع وبناء الراصد Discretization and observation.....69
2-2- تحديد المعاملات دون وجود تأخير حلقة التخميد الفعال.....72
3- حلقة إقفال الطور PLL.....74
4- تصميم مصحح جهد الخط الساكن.....75
الفصل الخامس: نتائج المحاكاة والتنفيذ العملي.....79
1- اختبارات المحاكاة للمنوب.....80
2- الاختبارات العملية.....84
2-1- اختبار المنوب من منبع جهد مستمر.....86
2-2- تنظيم الخط الساكن.....88
2-3- تعويض توافقيات إشارة جهد الشبكة.....89
2-4- ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى.....94

الفصل السادس: الخاتمة والآفاق المستقبلية.....96
1- الخاتمة 97
2- الآفاق المستقبلية.....97
المراجع.....98
الملحقات.....104

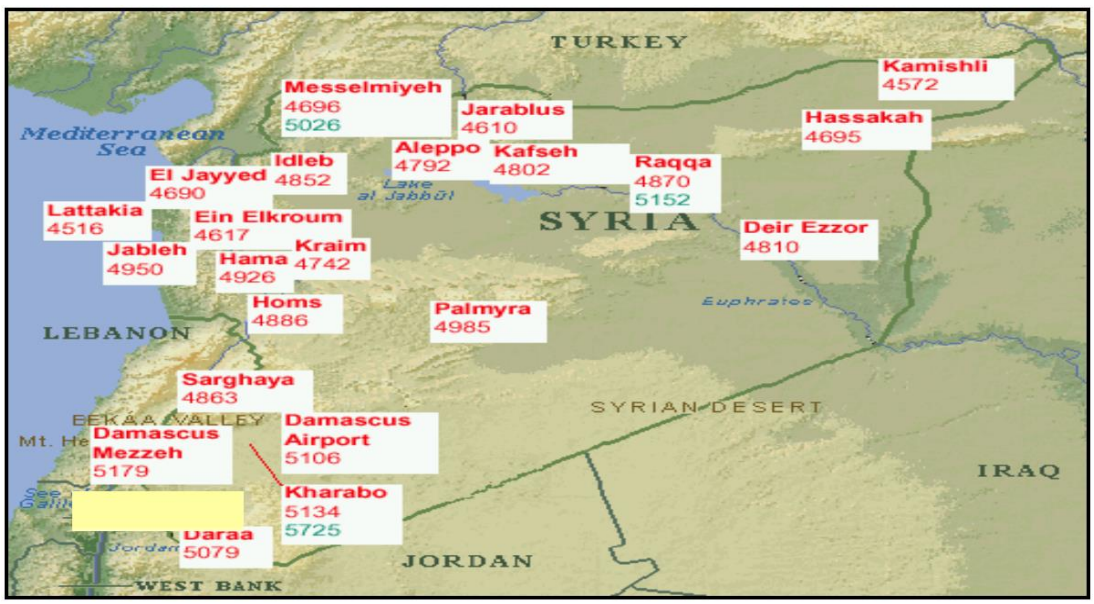
الفصل الأول

مقدمة - نظم توليد الطاقة الكهربائية من الألواح الشمسية

تبين الدراسات المهتمة بمصادر الطاقة أن مصادر الطاقة التقليدية ستنضب خلال فترة قصيرة من الزمن وذلك بسبب التزايد السكاني الكبير في العالم مما يؤدّي إلى تزايد استهلاك الطاقة وبشكل خاص مشتقات النفط بسبب استخدامها في مختلف المجالات (مواصلات- كهرباء- صناعة...) وهذه المصادر غير متجددة وتنتج كميات كبيرة من الغازات الدفيئة التي ترفع مستويات التلوث وتسبب أضرار كبيرة بالبيئة وتساهم بشكل رئيسي في ظاهرة الاحتباس الحراري.

في ظل هذا التلوث الكبير وأزمة الطاقة التي يواجهها العالم في وقتنا الحالي، تبرز أهمية استثمار مصادر الطاقة المتجددة النظيفة Renewable Energy Resources كحل بديل. لذا بدأ الاهتمام بالبحث عن مصادر بديلة للطاقة (طاقة الشمس- طاقة الرياح-طاقة المياه-طاقة الأمواج) كما تم تقديم العديد من الأبحاث حول كيفية استثمارها. يتطلع كل باحثي الطاقة في العالم إلى الشمس والرياح كأهم السبل لتأمين الطاقة اللازمة لاستمرار مقومات الحياة. يُعتبر هذان المصدران أكثر مصادر توليد الطاقة النظيفة فعاليةً، حيث يمتلك هذان المصدران مردوداً جيداً إذا ما قورن بمردود مصادر توليد الطاقة النظيفة الأخرى.

تعتبر الطاقة الشمسية في سوريا جيدة وشاملة حيث تتوفر بشكل جيد في جميع مناطق سوريا. يبلغ متوسط الاشعاع الشمسي على مدار العام بحدود 5 kWh/m2/day حيث يتراوح ما بين 4.4 kWh/m2/day في المناطق الجبلية غرب سوريا إلى 5.2 kWh/m2/day في مناطق البادية. يتراوح وسطي عدد ساعات الإشعاع الشمسي سنوياً من 2820 إلى 3270 ساعة بما يقارب 8 ساعات يومياً بشكل وسطي [18]. يوضح الشكل1-1 توزع الإشعاع الشمسي في مناطق سوريا مقدراً بواحدة Wh/m2/day.



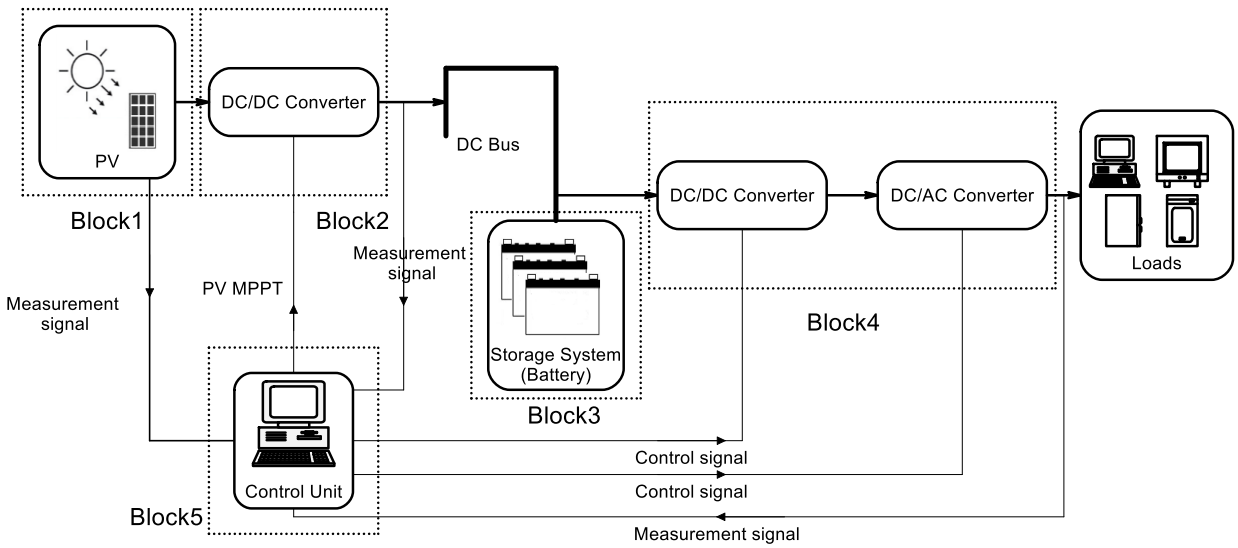
الشكل 1-1 المتوسط السنوي للإشعاع الشمسي على المتر المربع خلال يومٍ واحد [18].

أما بالنسبة لطاقة الرياح فتعتبر طاقة الرياح في سوريا جيدة في مناطق متعددة، حيث تصل السرعة الوسطى للريح على مدار العام إلى 8 m/s في بعض مناطق القطر، لكن طاقة الرياح في سوريا تتركز بشكل أساسي في مناطق محددة فقط وليست موزعة على جميع المناطق.

من خلال ماسبق يتبين لنا أن طاقة الرياح المجدية تقتصر على بعض مناطق القطر وبالتالي فهي غير مناسبة للاستثمار على مستوى الاستطاعات المنخفضة في كل مناطق القطر، إنما تناسب المشاريع كبيرة الحجم التي تهم الحكومة أو الشركات التي تهدف إلى بيع هذه الطاقة لشركة الكهرباء بحيث يتم إنشاء مزارع ريحية في المناطق ذات سرعات الرياح المناسبة والمنتظمة على مدار العام. بينما تتوفر الطاقة الشمسية في جميع مناطق القطر بشكل مجدي وبالتالي فهي مناسبة جدا للمشاريع صغيرة الحجم والتي تهدف إلى توفير الطاقة الكهربائية لأحمال محدودة (المنازل، معامل، مزارع ...) وبيع الفائض للشبكة الكهربائية. لذلك فإننا خلال هذا البحث سنهتم بنظم الاستجرار الكهربائي من الشمس. يمكن تصنيف نظم استجرار الطاقة الكهربائية الشمسية إلى نظم مستقلة عن الشبكة الكهربائية العامة OFF Grid PV Systems ونظم مربوطة بالشبكة ON Grid PV Systems.

1- التوصيف العام لنظم توليد الطاقة الكهربائية الشمسية المستقلة عن الشبكة

غالباً ما تُستخدم نظم توليد الطاقة الكهربائية الشمسية المستقلة عن الشبكة في المناطق البعيدة عن خطوط الشبكة الكهربائية العامة. يتكون نظام توليد الطاقة الكهربائية الشمسية المستقل عن الشبكة الكهربائية من عدة كتلٍ تعمل مجتمعةً لتأمين حاجة الأحمال من الطاقة الكهربائية. يبين الشكل1-2 مخطط صندوقي لنموذج نظام كهربائي مستقل عن الشبكة يعتمد على الطاقة الشمسية.

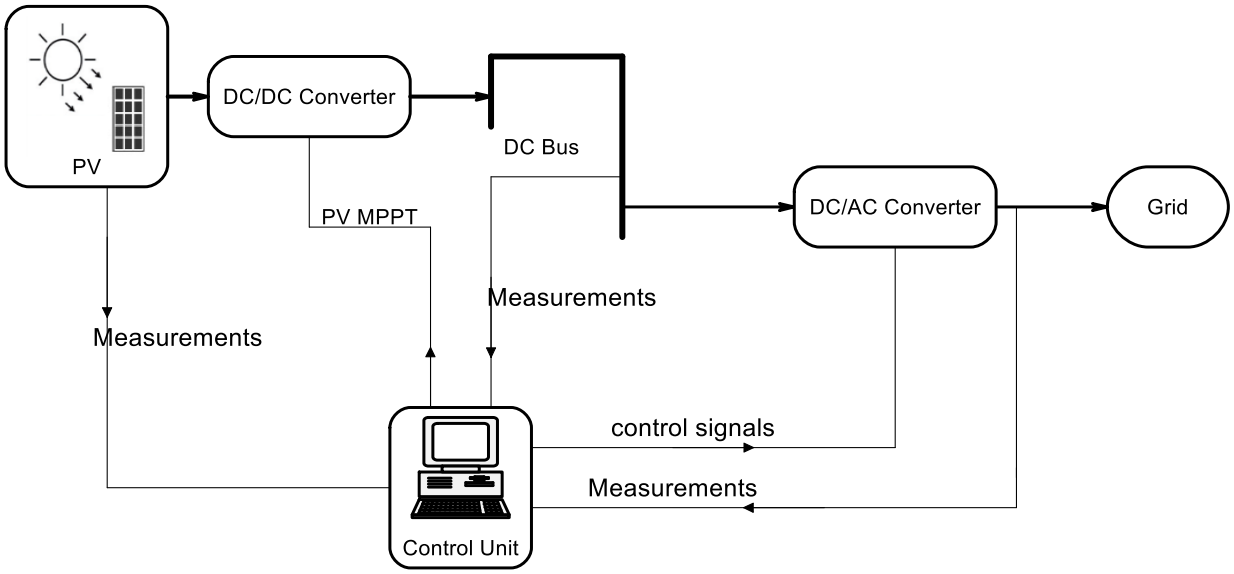


الشكل1-2 مخطط صندوقي لنموذج نظام كهربائي مستقل عن الشبكة يعتمد على الطاقة الشمسية.

تتألف الكتلة الأولى من مجموعةٍ من الألواح الشمسية التي تشكل منابع الطاقة للنظام. يرمز للمنبع الشمسي بـ PV وذلك كون الخلايا الشمسية تعتمد على الأثر الكهرضوئي Photovoltaic effect في تحويل الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية. تتألف الكتلة الثانية من مجموعة مبدلات استطاعة تعمل على تبديل شكل الاستطاعة المُستجرة من المنابع لتصبح مناسبة للتخزين في الكتلة الثالثة. تتألف كتلة التخزين من مجموعة من البطاريّات الموصولة مع بعضها بالشكل المناسب للحصول على المواصفات المطلوبة (جهد، تيار). تعمل الكتلة الرابعة على تأمين حاجة الأحمال للطاقة الكهربائية وتبديل شكل الاستطاعة لتصبح مناسبة للاستخدام. يُستخدم DC/DC Converter مُتحكم به لاستجرار الاستطاعة المناسبة لحاجة الأحمال من الـ DC-Bus وتجهيزها للتنويب. يحول المبدل الأخير DC/AC Converter الجهد من مستمر DC إلى متناوب AC بجهد وتردد مناسب للاستخدام (f=50Hz,Vrms=220V). تستجر الكتلة الرابعة الطاقة من الكتلة الثانية لوحدها أومن الكتلة الثانية وكتلة التخزين وذلك تبعاً لحالة المنابع وحاجة الأحمال. تُستجر الطاقة من الألواح الشمسية لوحدها دون كتلة التخزين في حال كانت الألواح الشمسية قادرة على تأمين حاجة الأحمال وتُخزن الطاقة الفائضة في كتلة التخزين. تُضيف كتلة التخزين للطاقة المُستجرة من الألواح ما يكفي لتأمين حاجة الأحمال في حالة عجز الألواح عن تقديم كامل حاجة الأحمال. يوجد بالإضافة للكتل الأربع السابقة كتلة خامسة تعمل على إدارة عمل باقي الكتل وهي كتلة التحكم. تتحكم هذه الكتلة بمبدل الاستطاعة الموجود في الكتلة الرابعة من أجل تأمين حاجة الأحمال للطاقة وبالشكل المناسب لعمل هذه الأحمال. كما تتحكم بمبدلات الاستطاعة الموجودة في الكتلة الثانية لجعل الطاقة المستجرة من الألواح الشمسية مناسبة للتخزين وأيضاً من أجل استغلال الألواح بشكل أمثلي واستجرار أكبر استطاعة ممكنة منها أو ما يعرف بملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى Maximum Power Point Tracking MPPT. غالباً ماتكون تكاليف تنجيز نظم توليد الطاقة الكهربائية الشمسية المستقلة عن الشبكة OFF Grid PV Systems كما في الشكل السابق مرتفعة، تعتبر تكاليف كتلة التخزين (البطاريات) السبب الرئيسي في ذلك وهذا مايدفع باتجاه نظم توليد الطاقة الكهربائية الشمسية المربوطة مع الشبكة ON Grid PV Systems.

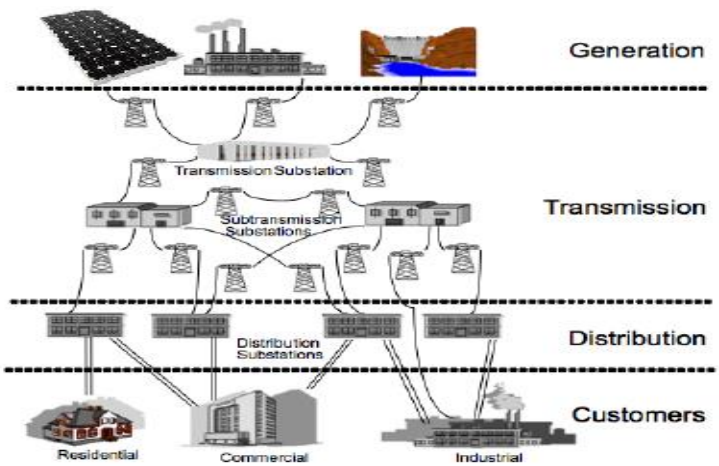
2- التوصيف العام لنظم توليد الطاقة الكهربائية الشمسية المربوطة مع الشبكة PV ON Grid Systems

تلعب الشبكة الكهربائية العامة في المنوبات المربوطة مع الشبكة دوراً تخزينياً للطاقة الكهربائية وبذلك لاحاجة لاستخدام البطاريات لتخزين الطاقة. يمكن بذلك رسم المخطط الصندوقي لنظام توليد الطاقة الكهربائية الشمسية مربوط مع الشبكة كما يبين الشكل1-3.



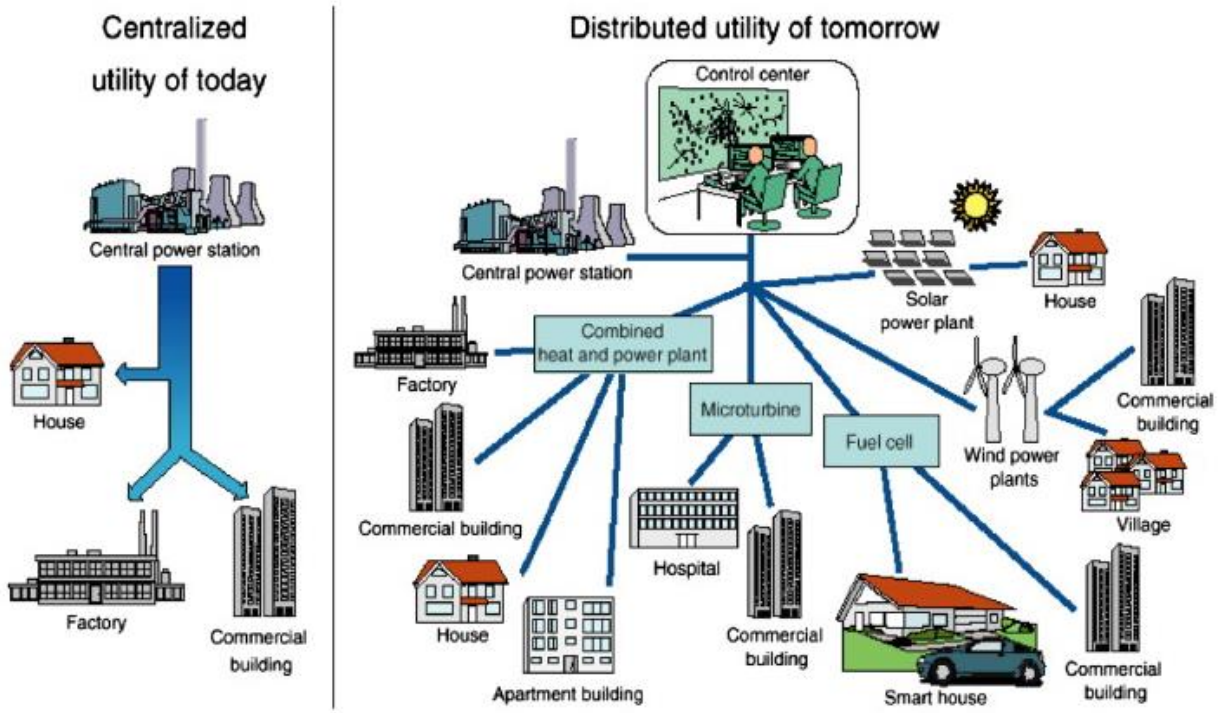
الشكل1-3 مخطط صندوقي لنظام توليد الطاقة الكهربائية الشمسية مربوط مع الشبكة.

تعمل مبدلات الاستطاعة على ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى للألواح الشمسية وتنظيم جهد الخط الساكن DC Bus والتنويب بهدف صب الطاقة الشمسية في خطوط نقل الكهرباء العامة. تعمل كتلة التحكم على مراقبة عمل النظام والتحكم بمختلف البنى الالكترونية فيه لتحقيق التزامن مع الشبكة وتحقيق الاستجرار الأعظمي للاستطاعة من الالواح الشمسية. يمكن استخدام هذه البنية في محطات توليد الطاقة الشمسية ذات الاستطاعات العالية، حيث تكون بعشرات أو مئات الميغا واط والتي غالباً ما تنجز من قبل الحكومة أوشركات تجارية، حيث تكون محطات التوليد الشمسية في مستوى محطات التوليد المركزية .يوضح الشكل1-4 مستويات توليد ونقل الطاقة الكهربائية التقليدي.



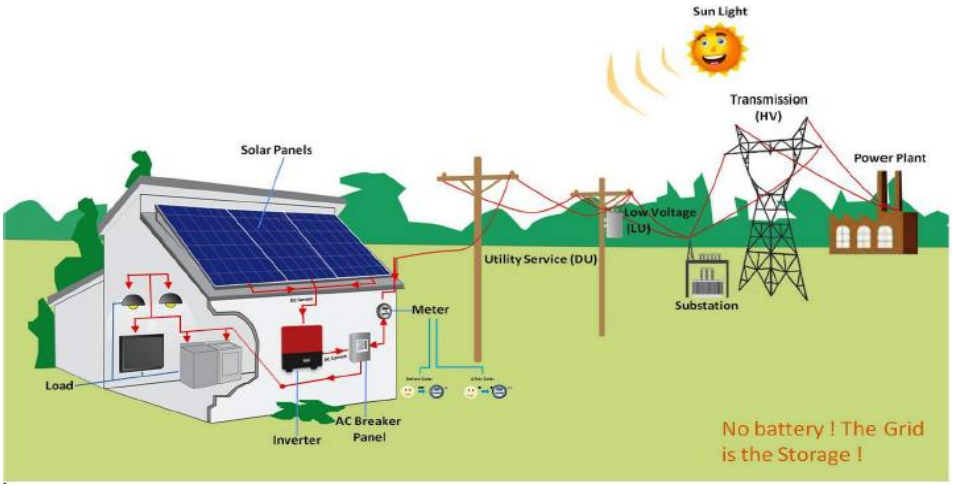
الشكل1-4 مخطط توضيحي لمستويات توليد ونقل الطاقة الكهربائية التقليدي.

مع انتشار أساليب توليد الطاقة الكهربائية بالاعتماد على الطاقة المتجددة برز مفهوم توليد الطاقة الموزعة Distributed Generation (DG) بشكل كبير وبات جزءا أساسيا من شبكات الكهرباء الحديثة. يعتمد توليد الطاقة الموزع على توليد الطاقة في مناطق استهلاكها وبالتالي تتقليل تكاليف توليد ونقل وتوزيع الكهرباء وتقليل الضياعات الناجمة عن النقل والتوزيع بالإضافة لذلك استخدام مصادر الطاقة النظيفة في توليد الطاقة. يوضح الشكل1-5 مفهوم توليد الطاقة الموزعة.



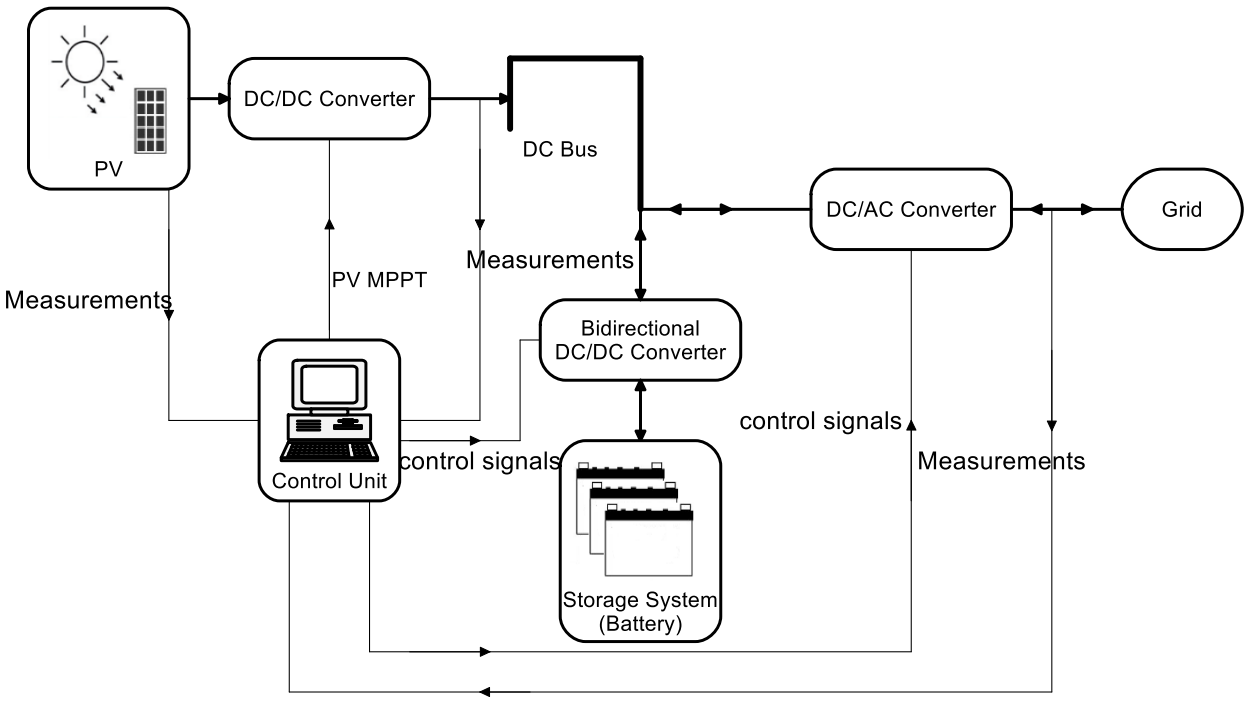
الشكل1-5 مفهوم توليد الطاقة الموزعة.

وبذلك يمكن أن يساهم أي منزل أو معمل أو مزرعة أو مؤسسة في توليد الطاقة الكهربائية التي تحتاجها وأن تستجر ماينقصها فقط من الطاقة من الشبكة وأن تعطي الطاقة للشبكة في حال وجود فائض لديها. لقي هذا الأسلوب في استغلال الطاقة الشمسية رواجاً كبيراً حيث أصبح استخدام الألواح الشمسية لتوليد الكهرباء في المنازل Residential PV Systems يعود بفائدة كبيرة على أصحاب المنازل من حيث التوفير وتخفيف الحمل على الشبكة في المجتمع المحيط بالإضافة لاستخدام طاقة نظيفة. يوضح الشكل1-6 مفهوم توليد الطاقة الشمسية المنزلية المربوطة مع الشبكة.



الشكل1-6 مفهوم توليد الطاقة الشمسية المنزلية المربوطة مع الشبكة.

يمكن لبنية النظام الشمسي المنزلي الموصول بالشبكة أن تكون كما أسلفنا في الشكل1-3. يمكن أيضاً إضافة بطاريات للنظام للحد من مشاكل انقطاع الشبكة كما يوضح الشكل1-7، هذا بدوره يؤدي إلى زيادة تكاليف النظام وتكاليف صيانته ولكن من الضروري إضافة البطاريات في حال وجود أجهزة يجب أن تكون دائماً مغذاة حتى عند انقطاع الطاقة عن الشبكة الكهربائية العامة كما في المشافي مثلاً. تُستجر الطاقة من البطاريات ومن الألواح الشمسية عند انقطاع الطاقة الواردة من الشبكة. تُشحن البطاريات بحيث تكون جاهزة للاستخدام عند الحاجة لذلك.



الشكل1-7 مخطط صندوقي لنظام توليد الطاقة الكهربائية الشمسية مربوط مع الشبكة بوجود عناصر تخزين.

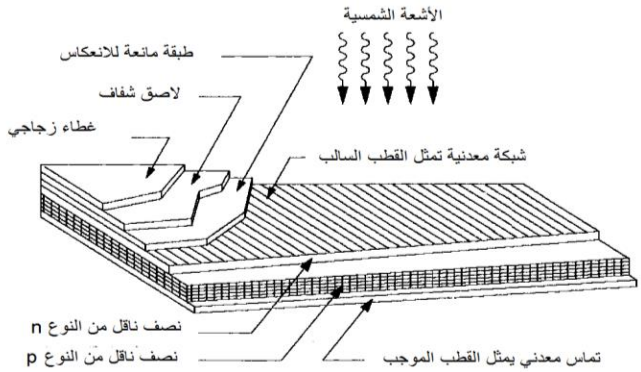
سنهتم في هذا البحث بدراسة أنظمة توليد الطاقة الشمسية المنزلية المربوطة بالشبكة الكهربائية دون وجود عناصر تخزين كما سندرس الطرق المثلى لاستغلال الطاقة الشمسية في هذه الأنظمة. حيث سنعمل على دراسة للبنى الالكترونية المناسبة لهذه الوظيفة ودراسة نظريات التحكم المثلى لتحقيق استقرار النظام وتحسين أداءه سواءاً على صعيد تحقيق الاستجرار الاعظمي للاستطاعة أو على صعيد التزامن مع الشبكة. قبل الخوض في التفاصيل لابد من توضيح بعض المفاهيم والمصطلحات المرتبطة بالألواح الشمسية واستجرار الطاقة منها.

3- الألواح الشمسية وأهم المفاهيم والمصطلحات

3-1- بنية الخلية الشمسية ومبدأ عملها

تعرف الخلية الشمسية Solar Cell أو الخلية الكهرضوئية Photovoltaic Cell بأنها الجهاز الذي يحول الطاقة الضوئية مباشرة إلى طاقة كهربائية بالاعتماد على الأثر الكهرضوئي Photovoltaic Effect. اكتشف الفيزيائي الفرنسي Becquerel الأثر الكهرضوئي في عام 1839 عندما لاحظ أن بعض المواد تنتج تيارات كهربائية صغيرة عند تعرضها للضوء. في عام 1954 اختُرعت أول خلية شمسية عملية في Bell Laboratories وكانت مصنوعة من السيليكون Silicon بمردود 6%. وسرعان ما استخدمت الخلايا الشمسية في مجال الفضاء بعد عام 1960، وهذا ما ساهم في تطوير صناعتها. في الوقت الحالي تنتشر الخلايا الشمسية في جميع أنحاء العالم وبتطبيقات عديدة.

يبين الشكل1-8 بنية الخلية الشمسية وهي عبارة عن وصلة p-n junction من السيليكون. حيث أن الخلايا الشمسية المصنوعة من السيليكون Silicon Solar Cells هي الأكثر انتشاراً في العالم.



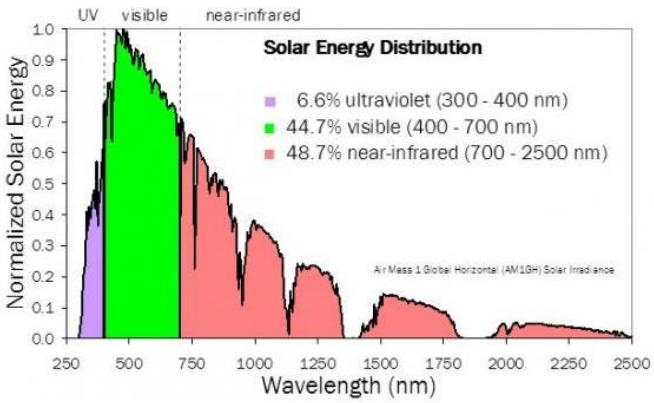
الشكل1-8 بنية الخلية الشمسية

إن حوامل الطاقة الضوئية هي الفوتونات. تعطى طاقة فوتون إشعاع معين بالعلاقة:

$$w = h.\upsilon \qquad (1.1)$$

حيث: w هي طاقة الفوتون، h هوثابت بلانك وقيمته $6.626\times10^{-34} W.s^2$، υ هو تردد الإشعاع.

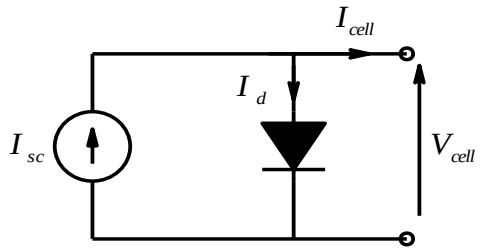
يـوضح الـشـكل 1-9 التوزع الطيفي للطاقة ضمن الأشعة الشمسية. تُمتص الطاقة الضوئية (الفوتونات) الواردة على الخلية الشمسية عن طريق السيليكون مما يؤدي إلى تشكيل أزواج إلكترون- ثقب electron- hole pairs. يعمل الحقل الكهربائي للوصلة على فصل حوامل الشحنة المتشكلة. حيث ينقل حوامل الشحنة الأقلية minority إلى المكان الذي تكون فيه أكثرية majority أي تنتقل الثقوب من نصف الناقل من النوع n إلى نصف الناقل من النوع p والإلكترونات بالاتجاه المعاكس. يؤدي ذلك إلى مرور تيار كهربائي ضوئي المنشأ Light Generated Current عبر الوصلة، تزداد شدة هذا التياربازدياد الطاقة الشمسية التي تصل للخلية. يتشكل جهد على طرفي الوصلة يعاكس أثر التيار الضوئي المنشأ عند عدم وصل الخلية الشمسية إلى دارة خارجية. يمثل الجهد السابق جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية. وعند وصل قطبي الخلية الشمسية ببعضهما يؤدي ذلك إلى مرور التيار الضوئي المنشأ في السلك الواصل بين القطبيين، أي أن التيار الضوئي المنشأ هو نفسه تيار القصر للخلية الشمسية. يتلخص ما سبق بالقول أن التيار الذي سيمر في الدارة الخارجية الموصولة مع الخلية الشمسية هو التيـار الضوئي المنشأ منقوصاً منه تيـاراً ناتجاً عن انحيـازٍ أمامي للوصلة p-n junction المشكلة للخلية الشمسية.



الشكل1-9 التوزع الطيفي للطاقة ضمن الأشعة الشمسية

1-2-3- الدارة المكافئة للخلية الشمسية ومنحني خواصها

استخلصنا مما سبق أن التيار الذي سيمر في الدارة الخارجية الموصولة مع الخلية الشمسية هو التيـار الضوئي المنشأ منقوصاً منه تيـاراً ناتجاً عن انحيـازٍ أمامي للوصلة p-n junction المشكلة للخلية الشمسية. يبين الشكل1-10 الدارة المكافئة لخلية شمسية Solar Cell.



الشكل1-10 الدارة المكافئة لخلية شمسية Solar Cell

I_{sc} تيار القصر للخلية Short circuit current.

نستنتج من الشكل السابق:

$$I_{cell} = I_{sc} - I_d \qquad (1.2)$$

ونعلم أن التيار المار بالديود يعطى بالعلاقة :

$$I_d = I_o \left(e^{qV_d/kT} - 1\right) \qquad (1.3)$$

ومنه نستنتج علاقة تيار الخلية الشمسية بدلالة جهدها:

$$I_{cell} = I_{sc} - I_o \left(e^{qV_{cell}/kT} - 1\right) \qquad (1.4)$$

I_o: هو تيار الإشباع العكسي للديود.

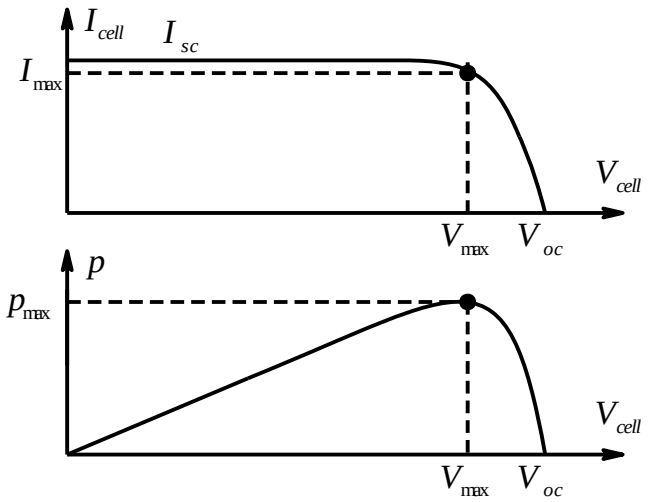
K: ثابت بولتزمان $\left(1.38\times10^{-19}\,\mathrm{J/K}\right)$.

T: درجة حرارة الوصلة n-p للديود.

q: شحنة الإلكترون.

V_d: الجهد الهابط على الديود.

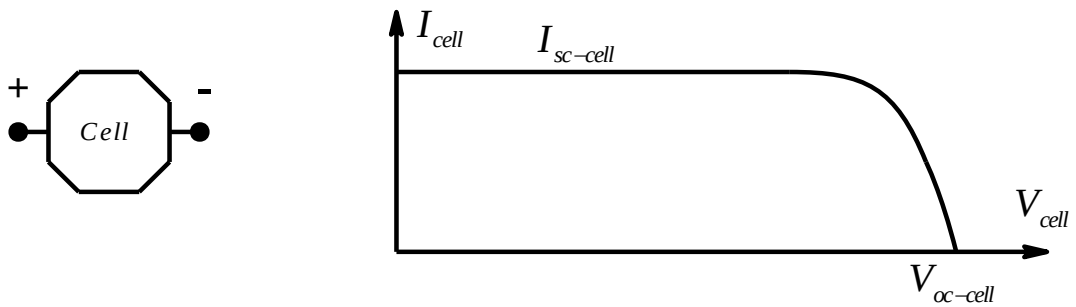
توضح العلاقة السابقة $I_{cell}\left(V_{cell}\right)$ تبعية تيار الخلية الشمسية لجهدها، برسم هذه العلاقة نحصل على المنحني المميز للخلية الشمسية I-V Curve، يوضح المنحني السابق الخواص الكهربائية للخلية الشمسية. يبين الشكل1-11 تيار الخلية الشمسية والاستطاعة المستجرة منها بدلالة جهدها.



الشكل1-11 تيار الخلية الشمسية والاستطاعة المستجرة منها بدلالة جهدها.

3-3- اللوح الشمسي Solar Panel

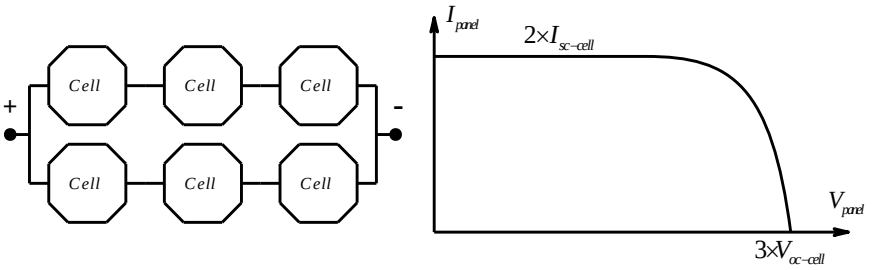
اللوح الشمسي هو مجموعة من الخلايا الشمسية الموصولة مع بعضها البعض بحيث نحصل على مواصفات كهربائية معينة (جهد، تيار). لذلك فإن شكل المنحني المميز للوح الشمسي I-V Curve يكون مماثلاً لشكل المنحني المميز للخلايا المشكلة له ولكن بمواصفات كمية مختلفة. لتوضيح ذلك نورد المثال التالي: يبين الشكل1-12 المنحني المميز لمجموعة من الخلايا الشمسية المتماثلة، نريد أن نستخدم هذه الخلايا في بناء لوح شمسي بحيث يكون جهد الدارة المفتوحة له ثلاثة أضعاف جهد الدارة المفتوحة للخلية الشمسية وبحيث يكون تيار القصر ضعف تيار القصر للخلية الواحدة.



الشكل1-12 المنحني المميز لمجموعة من الخلايا الشمسية المتماثلة

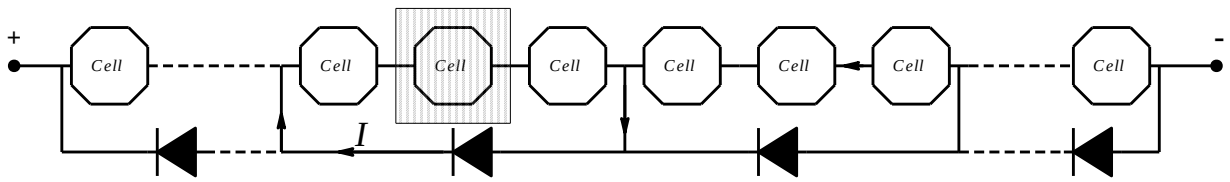
للحصول على جهد الدارة المفتوحة المطلوب نصل ثلاثةً من الخلايا الشمسية على التسلسل، بهذا الشكل نحصل على كتلة لها جهد الدارة المفتوحة المطلوب وتيار قصر يساوي تيار القصر للخلية الواحدة، نصل مع هذه الكتلة كتلة مماثلة

على التفرع معها لنحصل على تيار قصر يساوي ضعف تيار القصر للخلية الواحدة. يبين الشكل1-13 طريقة وصل الخلايا للحصول على المواصفات المطلوبة.



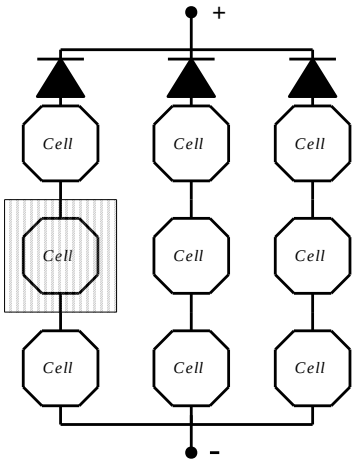
الشكل1-13 طريقة وصل الخلايا للحصول على مواصفات مطلوبة

هنالك نقطة هامة أيضاً في توصيل الخلايا الشمسية، لنفترض أنه يوجد مجموعة من الخلايا الشمسية الموصولة على التسلسل تظللت إحداها لسبب ما، يؤدي هذا إلى قطع التيار في السلسلة كاملة مع أن باقي الخلايا في السلسلة لم تظلل. لحل هذه المشكلة تقسم السلسلة إلى مجموعات تحوي كل منها عدداً معيناً من الخلايا، يضاف ديود على التفرع Parallel Bypass Diode مع كل مجموعة من مجموعات السلسلة. في هذه الحالة إذا تظللت إحدى خلايا السلسلة لن نخسر السلسلة كاملة ولكن فقط المجموعة التي تحوي هذه السلسلة لأن التيار سيمر بالديود. يوضح الشكل1-14 كيف تتم العملية.



الشكل1-14 إضافة ديودات Parallel Bypass Diode

كذلك في حال وصل سلاسل من الخلايا على التفرع، إذا تظللت مجموعة من الخلايا في سلسلة ما، يؤدي ذلك إلى أن يصبح الفرع الذي يحوي هذه الخلايا حملاً لباقي الفروع. لذلك يضاف ديود إلى كل فرع للحماية من مرور التيار فيه بالاتجاه المعاكس كما يبين الشكل1-15.



الشكل1-15 إضافة ديود إلى كل فرع

عرضنا في ما سبق مقدمة موجزة عن بنية الخلية الشمسية وخواصها الكهربائية، تحتوي الفقرات اللاحقة طرائق استغلال الطاقة الشمسية باستخدام الألواح الشمسية.

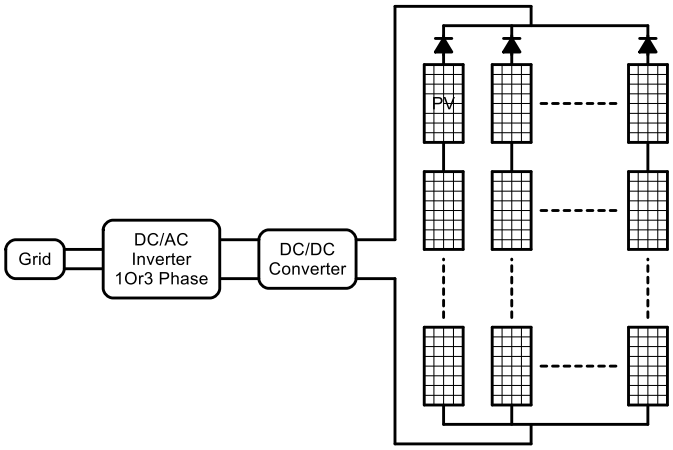
4- تصنيف مبدلات الاستطاعة المربوطة بالشبكة وطرق توصيل الألواح الشمسية

ترتبط طرق وصل الألواح الشمسية مع بعضها في مراكز توليد الطاقة الشمسية بشكل مباشر بالبنية الإلكترونية لمبدلات الاستطاعة المستخدمة وبذلك يمكن تصنيف مبدلات الاستطاعة الموصولة مع الشبكة كما يلي [9]، [71]:

- مبدل مركزي Central inverter.
- مبدل سلسلة واحدة String inverter.
- مبدل متعدد السلاسل Multi-string inverters.

4-1- مبدل مركزي Central inverter.

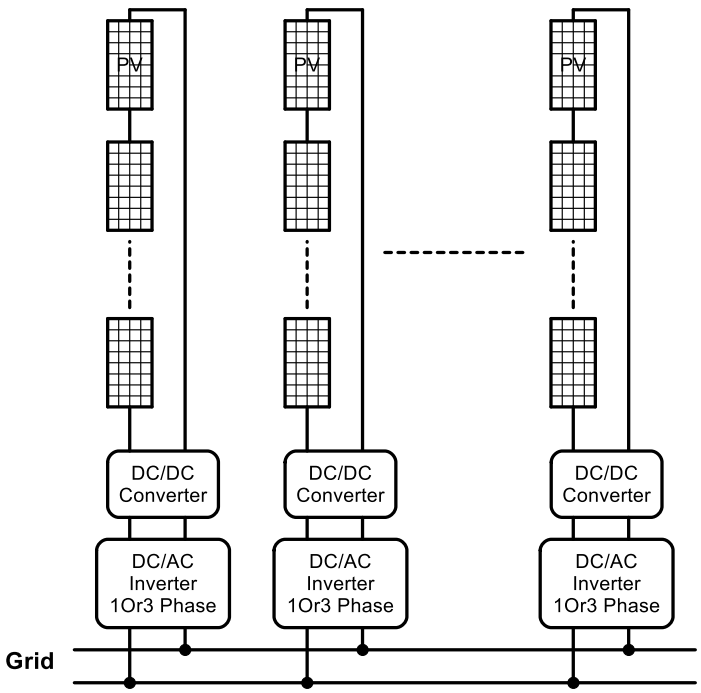
يوضح الشكل1-16 طريقة الربط بوجود مبدل مركزي. يتم في هذه الحالة ربط الألواح مع بعضها البعض بشكل تسلسلي لتشكل سلسلة String بحيث نحصل على الجهد المناسب لعمل المبدلات. تُربط السلاسل مع بعضها على التفرع للوصول إلى الاستطاعة المطلوبة. تُستخدم مبدلات استطاعة مركزية لربط مصفوفة الألواح مع الشبكة. تعتبر هذه الطريقة بالربط بسيطة وسهلة التنجيز ولكن يحفها العديد من النقاط السلبية كوجود ضياعات نتيجة استخدام ملاحقة نقطة استطاعة عظمى مركزية على كل المصفوفة، بالإضافة لضياعات الديودات الموجودة على التسلسل مع كل سلسلة ألواح.



الشكل1-16 يوضح طريقة الربط بوجود مبدل مركزي.

2-4- مبدل سلسلة واحدة String inverter.

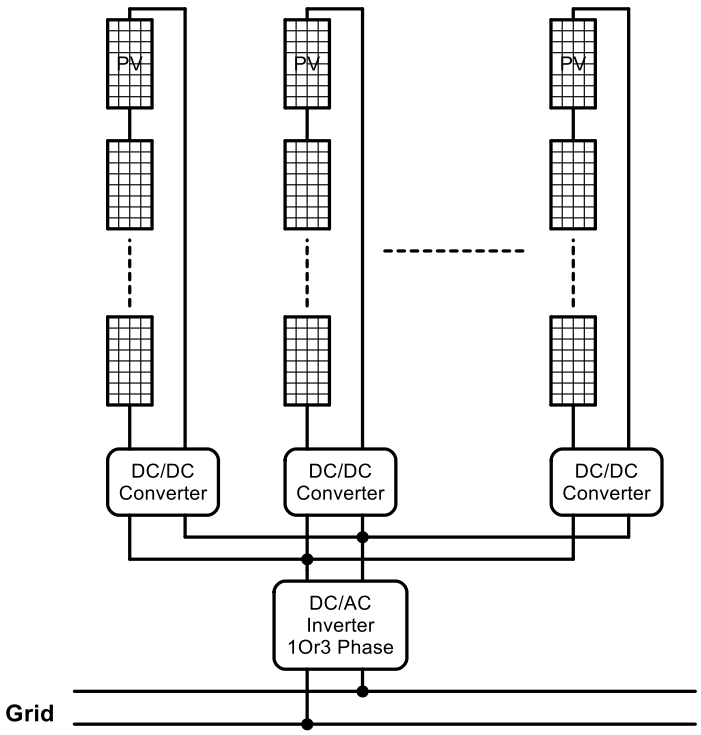
يوضح الشكل1-17 طريقة الربط بوجود مبدل لكل سلسلة. يتم ربط كل سلسلة بالشبكة على حدى وبذلك يمكن تخفيف الضياعات الناجمة عن استخدام ملاحقة نقطة استطاعة عظمى مركزية كما في المبدل المركزي والاستغناء عن الديودات التسلسلية لعدم لحاجة إليها في هذه الحالة ولعل أكثر ميزات طريقة الربط هذه هي المرونة التي تتيحها من حيث توسعة النظام وصيانته.



الشكل1-17 طريقة الربط بوجود مبدل لكل سلسلة.

3-4- مبدل متعدد السلاسل Multi-string inverters.

تربط الألواح في هذه الحالة بشكل سلاسل منفصلة أيضاً وتتم ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى لكل سلسلة على حدى. يتم التنويب بمبدل واحد مركزي وهو الفرق الأساسي عن الحالة السابقة وذلك يخفض تكلفة النظام الكلية ولكنه يحد من مرونته بنفس الوقت حيث أن توسعة النظام محدودة باستطاعة المبدل المركزي المستخدم حيث أن توسعة النظام يتطلب إضافة منوب جديد في حال تجاوز استطاعة المبدل المركزي. يوضح الشكل1-18 طريقة الربط بوجود مبدل متعدد السلاسل.



الشكل1-18 طريقة الربط بوجود مبدل متعدد السلاسل.

قدمنا في هذا الفصل أفكاراً هامة في مجال استغلال الطاقة الشمسية وربطها مع الشبكة الكهربائية، حيث قمنا بتوصيف أجزاء النظام ووظيفة كل جزء منه. وهذا يعتبر تمهيداً نظرياً هاماً للخوض في التفاصيل التصميمية في الفصول اللاحقة. حيث سنعمل على دراسة كل جزء من أجزاء النظام بشكل منفصل وفي الفصل التالي سنعمل على دراسة خوارزميات ملاحقة نقطة الاستطاعة للألواح الشمسية.

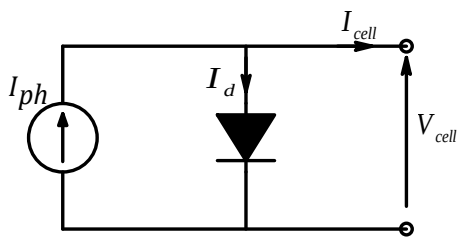
الفصل الثاني

دراسة مرجعية لخوارزميات ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى

سنعمل في هذا الفصل على تقديم أهم مواصفات الألواح الشمسية وتقديم العلاقات المناسبة لبناء نموذج محاكاة مناسب للألواح الشمسية وذلك اعتماداً على المعطيات الكهربائية والحرارية التي ترفق مع الألواح الشمسية من الشركة المصنعة. كما سنوضح دور مبدل الاستطاعة في تغيير نقطة عمل الألواح الشمسية. يقدم هذا الفصل أيضاً دراسة مرجعية لأهم طرائق ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى للألواح الشمسية.

1- نمذجة اللوح الشمسي وخواصه

ذكرنا سابقا أن الخلية الشمسية يمكن نمذجتها بدارة مكافئة كما هو موضح في الشكل2-1. كما أن اللوح الشمسي هو تجميع لهذه الخلايا للحصول عل مواصفات كهربائية معينة.



الشكل2-1 الدارة المكافئة للخلية الشمسية.

حيث أن التيار I_{ph} هو التيار الناجم عن سقوط الأشعة الشمسية على الخلية الشمسية. لدراسة الألواح الشمسية وتغير خواصها بتغير البيئة المحيطة لابد من بناء نموذج يحاكي تصرف الألواح. تعطى المواصفات الكهربائية والحرارية للوح الشمسي من قبل الشركات المصنعة كما في الجدول2-1.

Electrical Data

Maximum Power at STC*	100 W
Optimum Operating Voltage (V_{mp})	18.9 V
Optimum Operating Current (I_{mp})	5.29 A
Open Circuit Voltage (V_{oc})	22.5 V
Short Circuit Voltage (I_{sc})	5.75 A
Module Efficiency	15.47%

Thermal Characteristics

Operating Module Temperature	-40ºC to +80ºC
Nominal Operating Cell Temerature (NOCT)	47±2ºC
Temperature Coefficient of Pmax	-0.44%/ºC
Temperature Coefficient of Voc	-0.30%/ºC
Temperature Coefficient of Isc	0.04%/ºC

الجدول2-1 المواصفات الكهربائية والحرارية للوح الشمسي من الشركة المصنعة.

من نموذج الخلية الشمسية، يمكن أن نكتب عبارة تيار الخلية كمايلي:

$$I_{cell} = I_{ph} - I_0\left(e^{\frac{V_{cell}}{AV_T}} - 1\right) \qquad (2.1)$$

وبما أن اللوح الشمسي هو تجميع لهذه الخلايا مع بعضها البعض للحصول على مواصفات معينة فيمكن أن نكتب عبارة تيار اللوح الشمسي I_{pv} المؤلف من Ns خلية على التسلسل وNp خلية على التفرع كمايلي:

$$I_{pv} = Np * I_{ph} - Np * I_0\left(e^{\frac{V_{pv}}{Ns*A*V_T}} - 1\right) \qquad (2.2)$$

حيث V_T هو الجهد الحراري Thermal voltage ويعطى بـــ $V_T = \frac{kT_c}{q}$ حيث k ثابت بولتزمان T_c درجة الحرارة وq شحنة الإلكترون. و هو معامل الأمثلية Ideality factor للوصلة وقيمته هي 1.2 في تقنية si-mono [2]. أما التيار الضوئي I_{ph} فهو مرتبط مباشرة بتيار القصر للوح الشمسي وهو يختلف تبعا لدرجة الحرارة و شدة الإشعاع الشمسي. I_0 هوتيار الإشباع العكسي للوصلة. تعطى عادة قيم المعاملات الكهربائية للوح الشمسي عند شروط معيارية مخبرية Standard Test Conditions وهي درجة الحرارة $T_{cr} = 25$ وشدة إشعاع شمسي $G_r = 1000watt/m^2$ وبذلك يمكن كتابة التيار الضوئي بدلالة درجة الحرارة وشدة الإشعاع كمايلي:

$$I_{ph} = \frac{G}{G_r}\left(I_{phr} + \mu_{sc}\left(T_c - T_{cref}\right)\right) \qquad (2.3)$$

حيث μ_{sc} هو معامل تغير تيار القصر للوح الشمسي مع درجة الحرارة Short-circuit Current Temperature Coefficient. ومن المعروف أن التيار العكسي للوصلة I_o يعطى بالعلاقة التالية [25]:

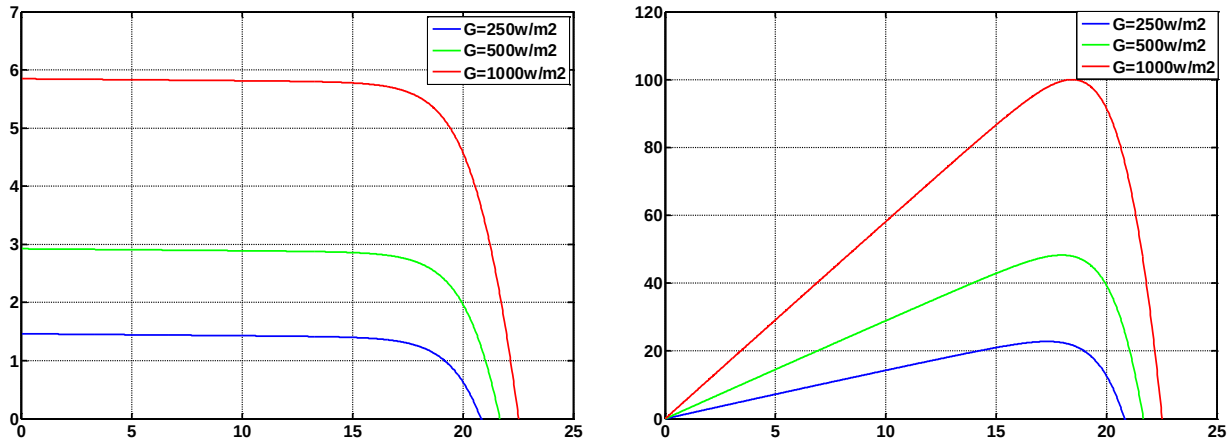
$$I_o = I_{or}\left(\frac{T_c}{T_{cr}}\right)^3 e^{\frac{qE_G}{kA}\left(\frac{1}{T_{cr}} - \frac{1}{T_c}\right)} \qquad (2.4)$$

حيث E_G هي عرض فجوة الطاقة Band Gab لنصف الناقل المستخدم وهي *1.12ev* للسلكون.

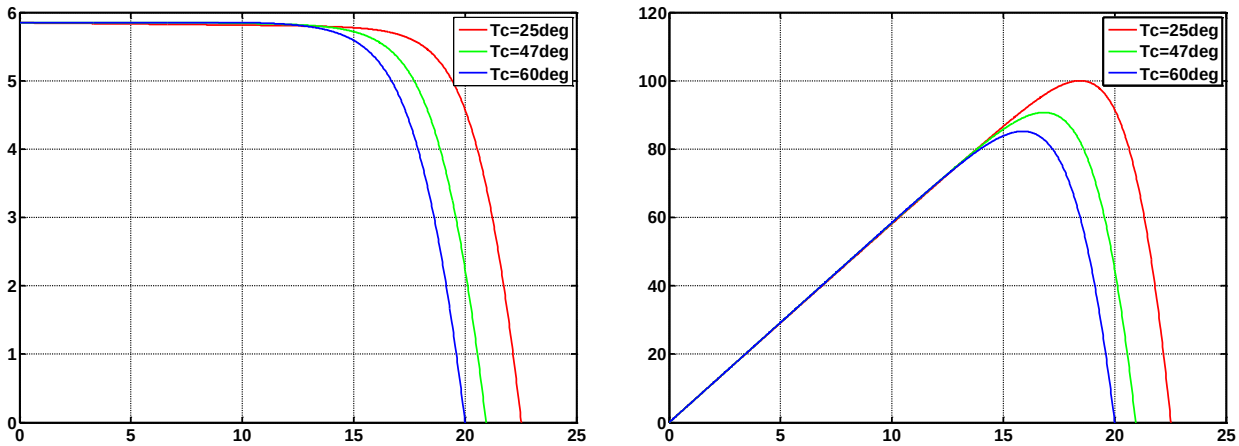
يمكن من خلال العلاقات السابقة (2.2)، (2.3)، (2.4) بناء نموذج للوح الشمسي اعتماداً على المواصفات الكهربائية المعطاة من قبل الشركة المصنعة لاستخدامه في عملية المحاكاة كما وضح ذلك [2].

وبالنتيجة فإن الخواص الكهربائية للوح الشمسي تعتمد على شدة الإشعاع الشمسي الواصل للوح الشمسي ودرجة الحرارة. حيث أن الاستطاعة التي من الممكن استجرارها من اللوح الشمسي تزداد بزيادة شدة الإشعاع الشمسي وتنقص بزيادة درجة حرارة. ببناء نموذج للوح الشمسي في بيئة ماتلاب ورسم منحنيات الخواص للوح الشمسي المعطى بالجدول2-1، نحصل على الشكل2-2 الذي يوضح تغيرات منحني الخواص للوح الشمسي مع تغير شدة

الإشـعاع الشـمسـي عند درجة الحرارة المرجعية $T_{cr} = 25^0$. يوضـح الشـكل2-3 تغير منحني الخواص للوح الشمسي بتغير درجة الحرارة عند شدة الإشعاع المرجعية $G_r = 1000w/m^2$.



الشكل2-2 تغيرات منحني الخواص للوح الشمسي مع تغير شدة الإشعاع الشمسي عند درجة الحرارة المرجعية $T_{cr} = 25^0$.



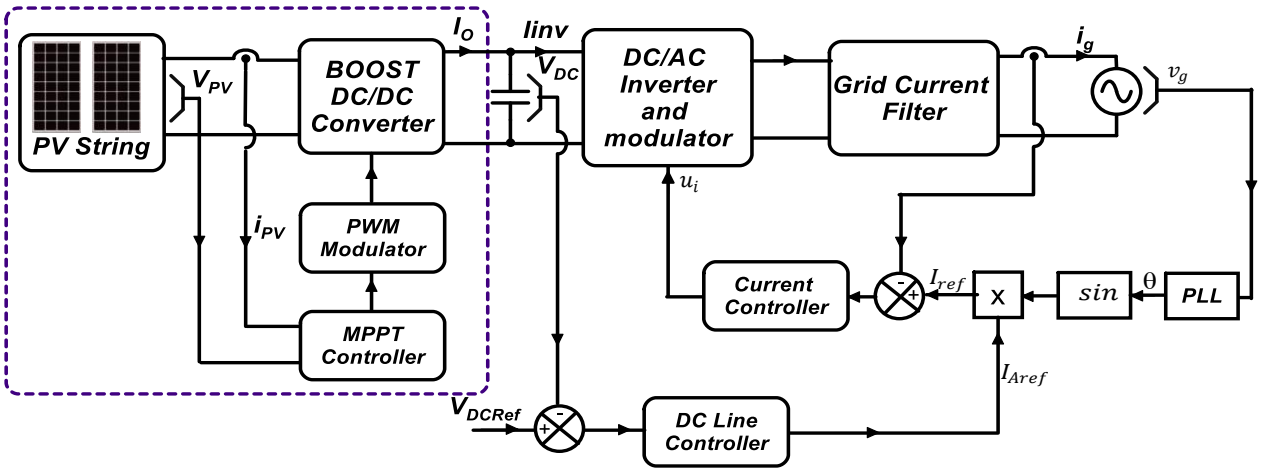
الشكل2-3 تغيرات منحني الخواص للوح الشمسي مع تغير درجة الحرارة عند شدة الإشعاع المرجعية $G_r = 1000w/m^2$.

من المنحنيات السابقة نجد أنه لاستغلال الطاقة من الألواح الشمسية بشكل أمثلي واستجرار أكبر قدر من الاستطاعة الممكنة. يجب أن تكون نقطة عمل اللوح الشـمسـي موافقة لنقطة الاسـتطاعة العظمى Maximum Power Point MPP. لتحقيق ذلك يتم التحكم بالمبدل DC/DC Converter لجعل الألواح الشمسية تعمل دائماً بشكل موافق لنقطة

الاســـتطاعة العظمى وهذا ما يعرف بملاحقة نقطة الاســـتطاعة العظمى Maximum Power Point Tracking .MPPT

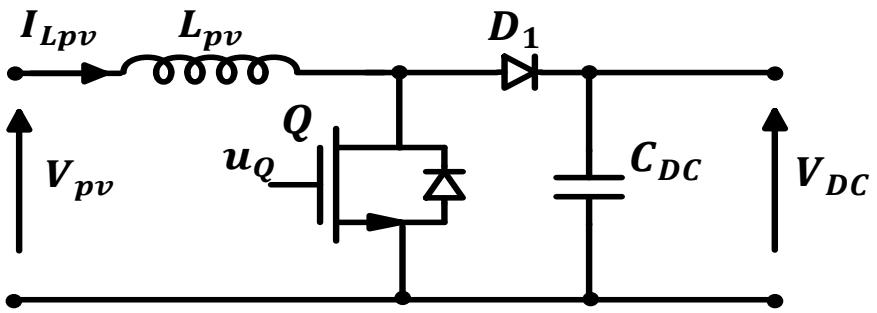
2- المبدل الرافع

لتحقيق نقطة العمل العظمى يتم إضـافة مبدل استطاعة DC/DC converter بعد الألواح الشـمسـية كما هو موضــح في الشــكل2-4 ضــمن الإطار المنقط. يمكن جعل نقطة عمل الألواح الشــمســية موافقة لنقطة الاســتطاعة العظمى من خلال تغيير ربح هذا المبدل والذي يؤدي بدوره إلى تغيير نقطة عمل الألواح الشمسية، أي بعبارة أخرى جعل مقاومة دخل المبدل موافقة لمقاومة خرج الألواح الشـمسـية عند نقطة الاستطاعة العظمى والتي يرمز لها عادة بـ $R_{mPP} = V_{mpp}/I_{mpp}$.



الشكل2-4 المخطط العام للنظام وكتلة المبدل للحصول على نقطة الاستطاعة العظمى ضمن الإطار المنقط.

غالباً ما يُســتخدم مبدل اســتطاعة رافع للجهد لرفع جهد الألواح الشــمســية إلى جهد مناســب للتنويب ولتحقيق نقطة الاســـتطاعة العظمى [5]، [12]، [29]. يوضـــح الشـــكل2-5 بنية المبدل الرافع حيث يتم تغيير عرض النبضـــة $D = t_{on}/T_{PWM}$ لقيادة الترانزستور للحصول على نقطة الاستطاعة العظمى.



الشكل2-5 بنية المبدل الرافع للجهد.

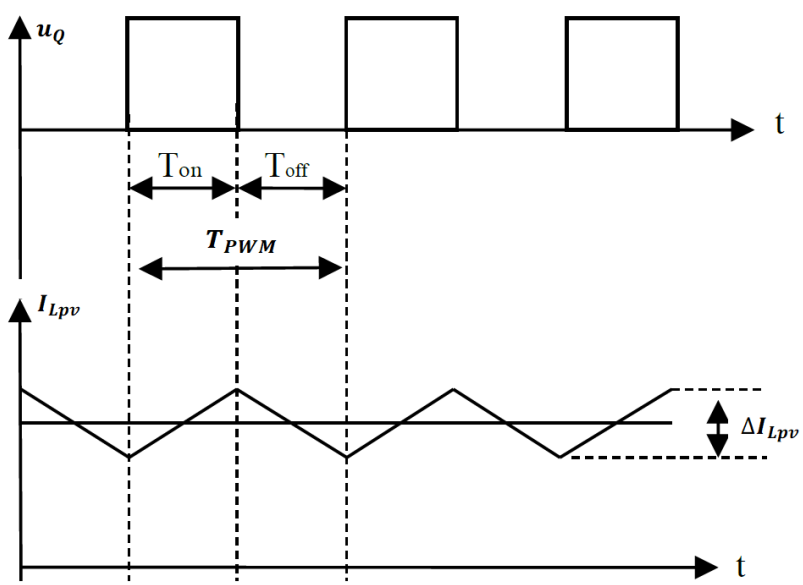
عندما يعمل المبدل في حالة النمط المســتمر للتيار Continuous conduction mode فإن ربح المبدل الرافع في الحالة السكونية يعطى كمايلي:

$$V_o = V_{DC} = \frac{V_{pv}}{1-D} \tag{2.5}$$

من الواضح أن زيادة نسبة التشغيل D ستؤدي إلى زيادة ربح المبدل. يؤدي ذلك إلى إنقاص مقاومة دخل المبدل أي المقاومة المنظورة من الألواح الشمسية للمبدل. هذا بدوره يزيد التيار المسحوب من الألواح الشمسية وينقص جهدها. أما إنقاص نسبة التشغيل D فيؤدي إلى زيادة مقاومة دخل المبدل وبالتالي إنقاص التيار المسحوب من الألواح وزيادة جهد الألواح. وهذا واضح من منحنيات الخواص للألواح الشمسية.

يوضــح الشــكل2-6 تعرجات تيار ذاتية المبدل L_{pv}، لتحديد هذه التعرجات يجب أن تكون الذاتية أكبر من حد معين يتعلق بتردد التقطيع حيث يمكن حدها بـــــ 30% من التيار عند نقطة الاســتطاعة العظمى [29]. وبالتالي يجب أن تحقق ذاتية المبدل الشرط التالي:

$$L_{pv} \geq \frac{V_{pv}\left(V_{DC} - V_{pv}\right)}{\Delta I_{Lpv} \times V_{DC} \times f_{PWM}} \tag{2.6}$$



الشكل2-6 تيار ذاتية المبدل الرافع للجهد وإشارة التحكم بقاطعته.

اعتماداً على أن تغيير نسبة التشغيل في المبدل سيؤدي إلى تغيير نقطة العمل للألواح الشمسية. تعمل خوارزميات ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى على تحديد نسبة التشغيل المناسبة لجعل المبدل يعمل عند نقطة الاستطاعة العظمى [3].

3- خوارزميات ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى

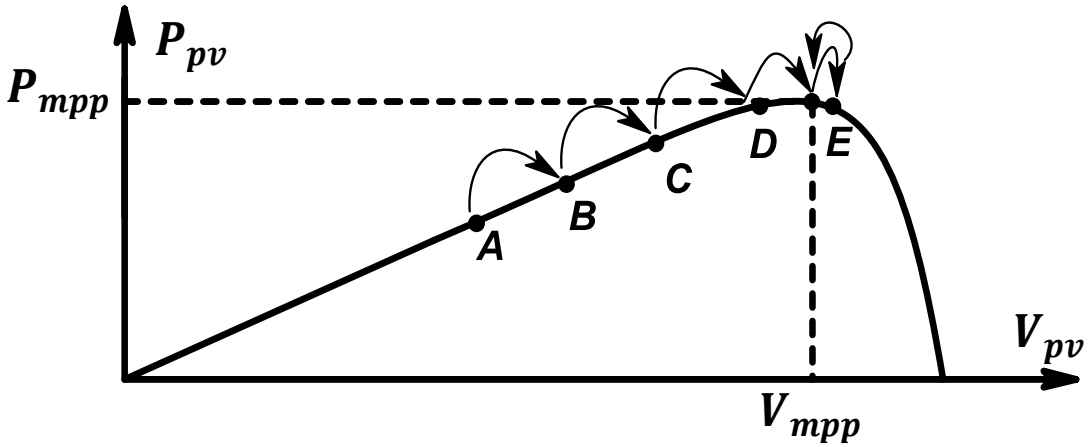
يوجد عدة خوارزميات MPPT مقترحة في المراجع والمنشـــورات العلمية. بعض هذه الخوارزميات تعتمد على ملاحقة القمة مثل خوارزمية P&O و INC-COND وبعضـــها على تنظيم جهد الألواح أو تيار الألواح بالإضـــافة إلى تحكم الترجيحي والشـبكات العصـبونية. سـنعمل في هذه الفقرة على تلخيص هذه الخوارزميات كما وردت في المراجع العلمية.

3-1- خوارزمية الاضطراب والرصد P&O:

تعتمد هذه الطريقة على تغيير جهد نقطة عمل اللوح الشمسي باتجاه معلوم زيادةً أو نقصاناً عن طريق تغيير عرض النبضة بمقدار ΔD، من ثم قياس تغير الاستطاعة المقدمة من اللوح الشمسي إذا زادت الاستطاعة هذا يعني أن تغير جهد نقطة العمل في الاتجاه الصـحيح نحو نقطة الاسـتطاعة العظمى. وبالتالي فإن الخطوة المسـتقبلية لجهد نقطة عمل اللوح الشمسي يجب أن تكون في الاتجاه ذاته. أما إذا نقصت فهذا يعني أن الخطوة المستقبلية لجهد اللوح الشـمســي يجب أن تكون في الاتجاه المعاكس [1]. وبذلك نعمل على نقل نقطة عمل اللوح الشـمســي باتجاه زيادة الاستطاعة حتى تصبح نقطة العمل عند قمة المنحني (V_{pv}, P_{pv}). يوضح الجدول2-2 آلية تغيير عرض النبضة في خوارزمية الاضـطراب والرصـد للوصـول إلى نقطة الاسـتطاعة العظمى. كما يوضـح الشـكل2-7 تغير نقطة عمل الألواح الشمسية على المنحني (V_{pv}, P_{pv}).

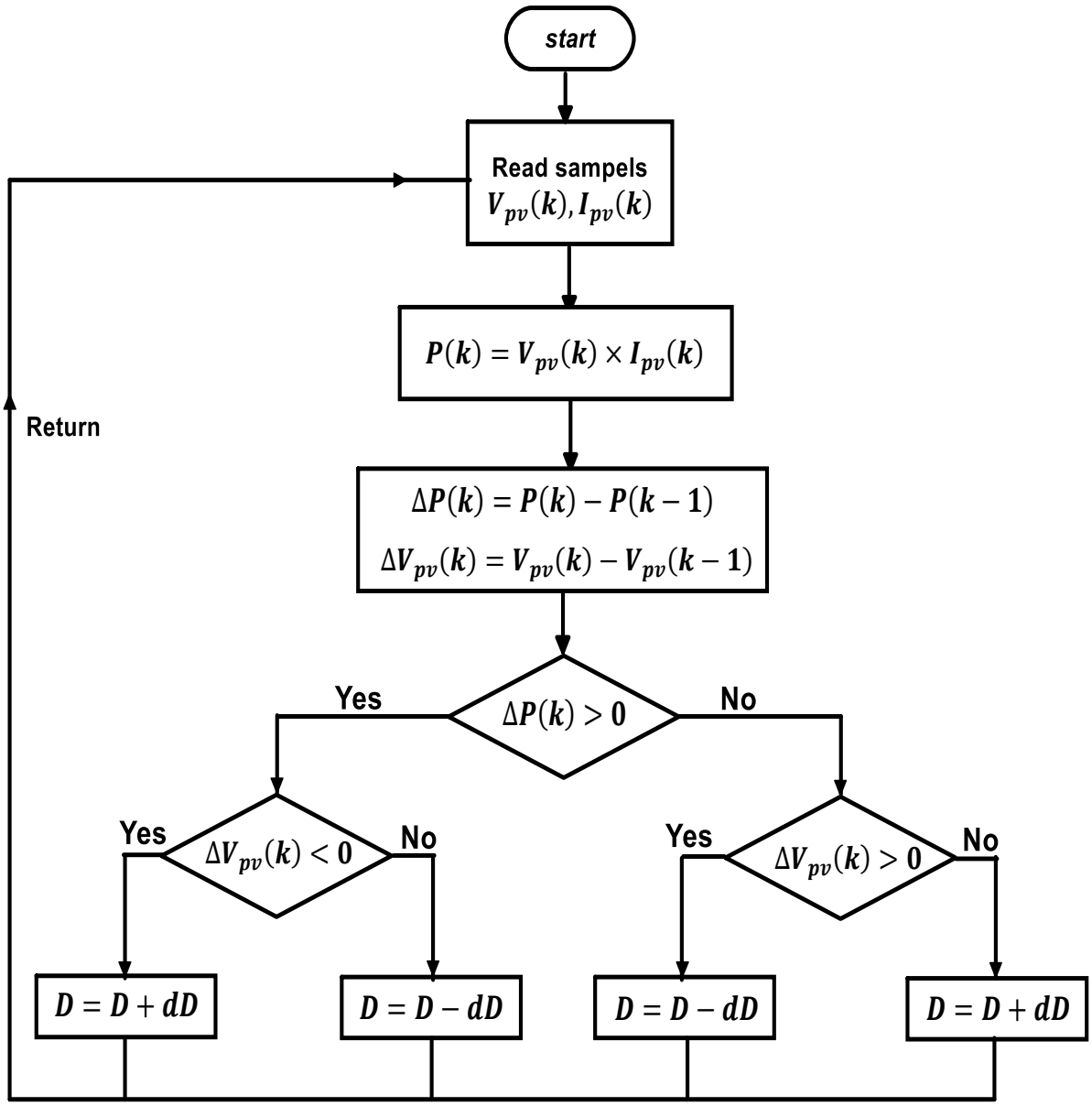
التغير اللاحق لعرض النبضة ΔD	أثر التغير على الاستطاعة	تغير عرض النبضة ΔD
زيادة	زيادة	زيادة
نقصان	نقصان	زيادة
نقصان	زيادة	نقصان
زيادة	نقصان	نقصان

الجدول2-2 آلية تغيير عرض النبضة في خوارزمية الاضطراب والرصد للوصول إلى نقطة الاستطاعة العظمى.



الشكل2-7 آلية عمل خوارزمية الاضطراب والرصد على المنحني (P_{pv}, V_{pv}).

يُظهر الشـــكل2-8 المخطط التدفقي لهذه الخوارزمية. تعتبر هذه الطريقة من أكثر طرائق ملاحقة نقطة الاســتطاعة استخداماً وهي محور اهتمام الباحثيين في مجال الطاقات المتجددة لعدة سنوات ماضية [3]، [4]، [6]، [7]، [8]، [11]، [15]. عند الوصــول لنقطة الاســتطاعة العظمى يهتز جهد الألواح بجوار نقطة الاســتطاعة العظمى. يمكن تخفيف الاهتزاز حول نقطة العمل عن طريق إنقاص خطوة تغير عرض النبضـــة لكن ذلك ســـيجعل الخوارزمية بطيئة [24].



الشكل2-8 المخطط التدفقي لخوارزمية الاضطراب والرصد لملاحقة نقطة الاستطلعة العظمى للوح شمسي.

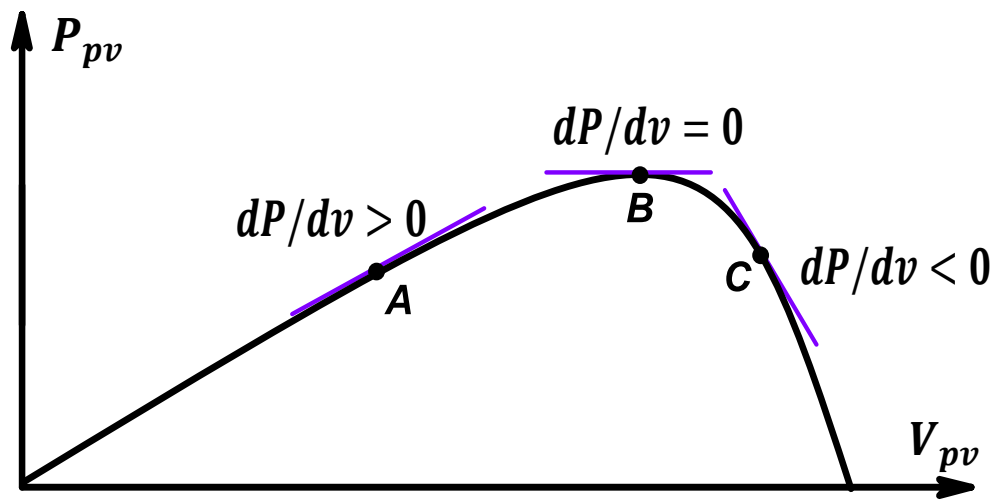
2-3- خوارزمية تدرج الناقلية Incremental Conductance:

تعتمد خوارزمية تدرج الناقلية أيضـــاً على مبدأ ملاحقة القمة. حيث أنها تســتند في آلية عملها على حقيقة أن ميل المماس للمنحني (V_{pv}, P_{pv}) معدوم عند نقطة الاســتطاعة العظمى. كما أن ميل المماس ســيكون موجباً عندما يكون جهد اللوح الشمسي أقل من نقطة الاستطاعة العظمى وسالباً عندما يكون جهد اللوح الشمسي أكبر من نقطة الاستطاعة العظمى [3]، [5]، [6]، [7]. يوضح الشكل2-9 آلية عمل هذه الخوارزمية. يمكن معرفة الجهة المناسبة لنقطة الاستطاعة العظمى عن طريق حساب ميل المماس في كل خطوة للخوارزمية كمايلي:

عند نقطة الاستطاعة العظمى $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0$

على يسار نقطة الاستطاعة العظمى $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} > 0$ (2.7)

على يمين نقطة الاستطاعة العظمى $\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} < 0$



الشكل2-9 آلية عمل خوارزمية تدرج الناقلية.

يمكن حساب $\frac{dP}{dv}$ كمايلي:

$$\frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \Rightarrow \frac{dP_{pv}}{dV_{pv}} = I_{pv} + V_{pv}\frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \Rightarrow \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} = 0 \qquad (2.8)$$

بذلك يمكن تعريف خطأ ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى كمايلي:

$$e = \frac{I_{pv}}{V_{pv}} + \frac{dI_{pv}}{dV_{pv}} \qquad (2.9)$$

وبالتالي يمكن إعادة صياغة المعادلات السابقة (2.7) على الشكل التالي:

عند نقطة الاستطاعة العظمى $e = 0$

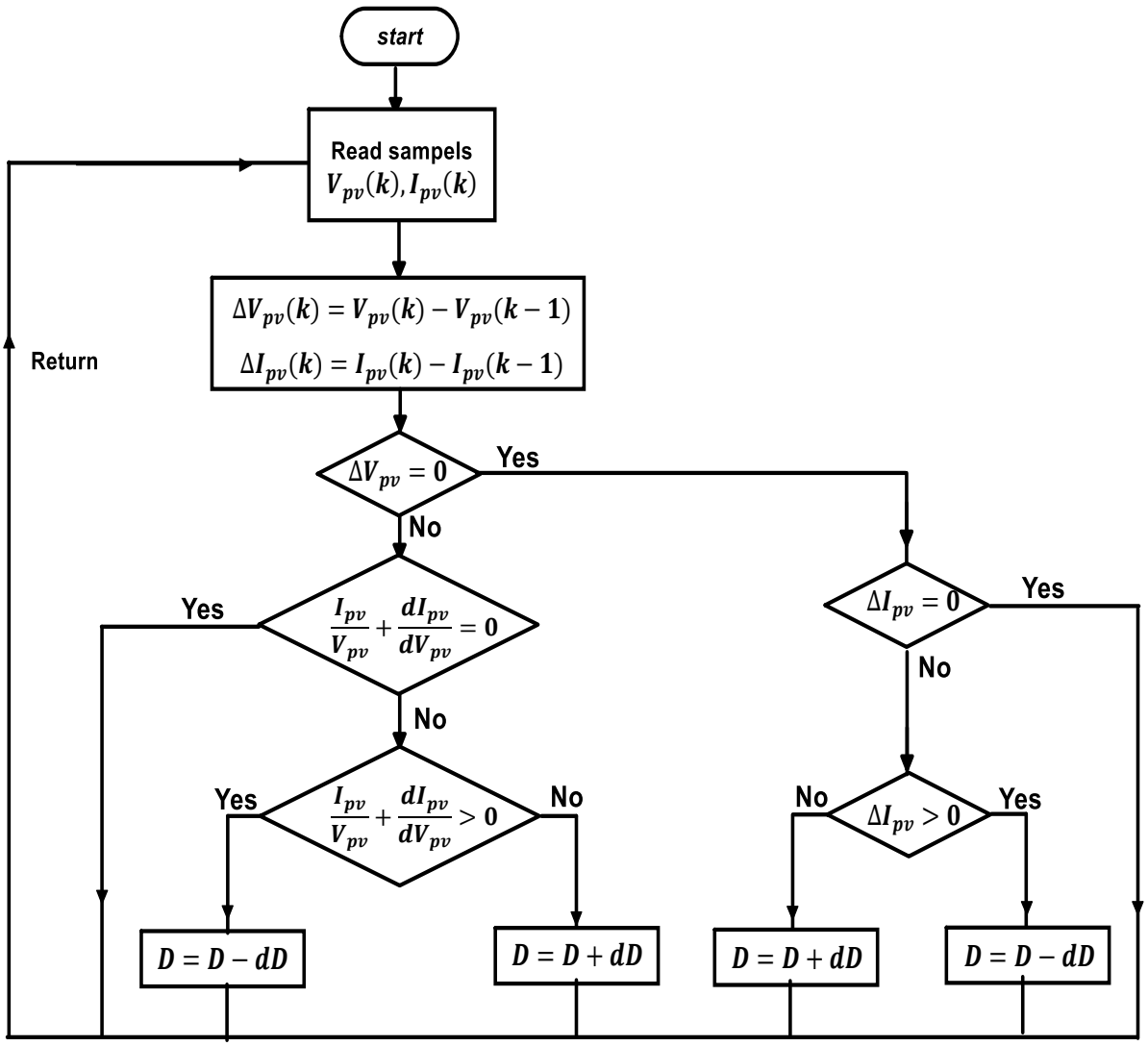
على يسار نقطة الاستطاعة العظمى $e > 0$ (2.10)

على يمين نقطة الاستطاعة العظمى $e < 0$

عمليا من الصـــعب أن يتحقق انعدام خطأ الملاحقة ولذلك يوجد العديد من الأبحاث التي تســتخدم شــرط بديل وذلك بإعطاء هوامش مســموحة للخطأ حول نقطة الاســتطاعة العظمى [6]، [24]، [27]. أي يمكن أن يكون الشــرط كمايلي:

$$|e| < \varepsilon \qquad (2.11)$$

اختيار ε يعتمد على المفارقة بين تخفيف الاهتزاز حول نقطة الاســتطاعة العظمى ودقة الوصــول إليها. يوضــح الشكل2-10 المخطط التدفقي للخوارزمية.



الشكل2-10 المخطط التدفقي لخوارزمية تدرج الناقلية في ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى للوح شمسي.

نلاحظ أن خوارزمية الناقلية المتدرجة قريبة لخوارزمية الاضــطراب والرصــد، لكن خوارزمية الناقلية المتدرجة يمكن أن تحدد مكان نقطة الاستطاعة العظمى $e = 0$، بحيث يمكن نظرياً إيقاف الاضطراب حول نقطة الاستطاعة

العظمى. لكن عمليا تنفيذ خوارزمية الاظطراب والرصـــد أقل تعقيداً عملياً لكن كلا الطريقتين متقاربتين من حيث النتيجة [6] .

كثيراً ما تستخدم خوارزمية تدرج الناقلية مع خطوة متغيرة لعرض النبضــة وذلك اعتماداً على ميل المماس الحالي. هذا يؤدي إلى تسـريع الوصـول لنقطة الاسـتطاعة العظمى [3]، [15]. أي أن تغيير عرض النبضــة يكون بخطوة أكبر عندما تكون الاســتطاعة الحالية بعيدة عن نقطة الاســتطاعة العظمى وتقل هذه الخطوة بالاقتراب من نقطة الاستطاعة العظمى كما توضح ذلك المعادلات التالية:

$$\begin{cases} D(k) = D(k-1) - N \times |e(k)| & e(k) > 0 \\ D(k) = D(k-1) & e(k) = 0 \\ D(k) = D(k-1) + N \times |e(k)| & e(k) < 0 \end{cases} \qquad (2.12)$$

حيث أن المعامل N هو معامل الخطوة المتغيرة. ومن الواضـــح أنه عندما تكون قيمة هذا المعامل كبيرةً يؤدي ذلك إلى خطوات كبيرة في عرض النبضـة، أما إذا كانت قيمة هذا المعامل صـغيرةً فهذا سيؤدي إلى تغيرات صـغيرة في عرض النبضة وبالتالي بطئ في الوصول لنقطة الاستطاعة العظمى. لذلك غالباً مايتم ضبط N عن طريق مصحح ترجيحي للحصول على كلا الميزتين سرعة في الوصول لنقطة الاستطاعة العظمى واضطرابات صغيرة في جهد الألواح بجوارها.

3-3- طريقة الجهد المفتوح:

تعتمد هذه الطريقة على حقيقة أن جهد الدارة المفتوحة للوح الشمسي يمكن أن يتغير مع درجة الحرارة وشدة الإشعاع بشكل يمكن تقريبه بالخطي مع جهد نقطة الاستطاعة العظمى [19]، [10]. أي أن:

$$V_{mpp} = K_{oc} V_{oc} \qquad (2.13)$$

حيث K_{oc} هو معامل الخطية بين جهد الدارة المفتوحة وجهد نقطة الاستطاعة العظمى، وتعتمد قيمته على مواصفات الألواح الشمسية المستخدمة وغالباً يتم تحديده بشكل عملي برسم العلاقة بين V_{mpp} و V_{oc}. بشكل عام فإن المجال الذي تتغير فيه هذه القيمة يتراوح من 71% إلى 78% [10]. لكن في هذه الطريقة يجب قياس جهد الدارة المفتوحة للألواح الشمسية بشكل دوري، يتم ذلك بفصل المبدل عن الألواح عن طريق قاطعة لفترة قصيرة، وهذا ما يسبب في إنقاص المردود. في المرجع [28] تم استخدام لوحة جانبية Pilot cell لقياس جهد الدارة المفتوحة للألواح. لكن عند اسـتخدام لوحة جانبية يجب أن يراعى التطابق الكبير بين اللوحة الجانبية وألواح النظام. بعد أن يتم قياس جهد الدارة المفتوحة، يتم التحكم بالمبدل لتنظيم جهد الألواح على جهد نقطة الاســتطاعة العظمى. هذه الطريقة تقريبية لنقطة الاستطاعة العظمى ولكنها سهلة التنجيز ولا تحتاج إلا إلى حساس جهد واحد.

3-4- طريقة تيار القصر:

هذه الطريقة مشـــابهة لطريقة الجهد المفتوح حيث تعتمد على إمكانية تقدير تيار نقطة الاســـتطاعة العظمى بشكل خطي مع تيار القصر للوح الشمسي أي:

$$I_{mpp} = K_{sh} I_{sh} \qquad (2.14)$$

حيث K_{sh} معامل تيار القصــر وتتراوح قيمته بين 78% و 92%، أيضــاً في هذه الطريقة يتم إضــافة قاطعة لقصــر الخلية الشـمسـية بشـكل دوري أثناء العمل[20]، [16]، [17]. هذه الطريقة أيضـاً بحاجة إلى قصـر الألواح بشـكل دوري لقياس تيار القصر.

3-5- طريقة التحكم الترجيحي:

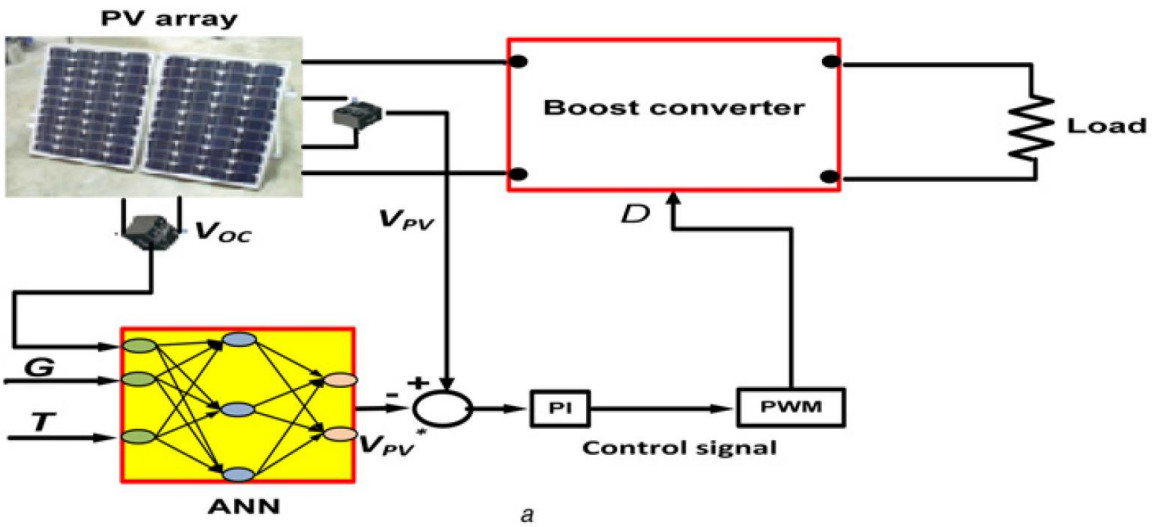
عدة مراجع اســتخدمت التحكم الترجيحي للوصــول إلى نقطة الاســتطاعة العظمى، حيث غالباً ما تُســتخدم إشارة الخطأ بالإضافة إلى تغير الخطأ كدخل للمتحكم الترجيحي ، ويتم تقسيمها في توابع انتماء ترجيحية، أما خرج المتحكم فهو تغير نسبة عرض النبضة التي تقود المبدل [13]، [21]، [22]، [23].

من أهم ميزات اســـتخدام التحكم الترجيحي أنه لايحتاج نموذج دقيق للنظام، لكنه يعتمد على الخبرة في اختيار توابع الانتماء المناسـبة. يمكن للمتحكم الترجيحي في ملاحقة نقطة الاسـتطاعة العظمى أن يعطي أداءاً جيداً في حال توليفه بشكل جيد.

3-6- طريقة الشبكات العصبونية:

تعتمد هذه الطريقة على تدريب شـبكة عصـبونية لتعطي الجهد المناسـب لنقطة الاسـتطاعة العظمى [26]، [25]، [14]. يمكن أن يكون دخل الشبكة العصبونية شدة الإشعاع الشمسي ودرجة الحرارة أو جهد القصر والجهد المفتوح للألواح الشمسية. وفي كثير من الأحيان يتم استخدام التحكم الترجيحي مدموجاً مع الشبكة العصبونية كما في [14].

يمكن أن يكون جهد نقطة العمل الموافقة للاسـتطاعة العظمى هو خرج الشـبكة العصـبونية ويتم إغلاق حلقة التحكم عن طريق مصحح PI كمافي [26]. يوضح الشكل2-11 طريقة التحكم بجهد نقطة العمل الموافق لنقطة الاستطاعة العظمى بالاستعانة بشبكة عصبونية. هذه الطريقة تعطي قيمة مباشرة لجهد نقطة العمل، لكنها تحتاج إلى العديد من القياسات، كما أنه يجب إعادة تدريب الشبكة العصبونية بشكل دوري لأن مواصفات الخلايا تتغير مع الزمن.



الشكل2-11 طريقة التحكم بجهد نقطة العمل الموافق لنقطة الاستطاعة العظمى بالاستعانة بشبكة عصبونية [26].

قمنا في هذا الفصل بعرض أهم الطرق المستخدمة في ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى للألواح الشمسية، كما عرضنا أهم العلاقات المميزة للألواح الشمسية والهامة في بناء نموذج محاكاة للوح الشمسي. ووضحنا دور مبدل الاستطاعة Boost DC/DC Converter في ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى. سنقوم في الفصل اللاحق بدراسة منوبات الاستطاعة المربوطة مع الشبكة الكهربائية والتحكم بالتيار المحقون في الشبكة.

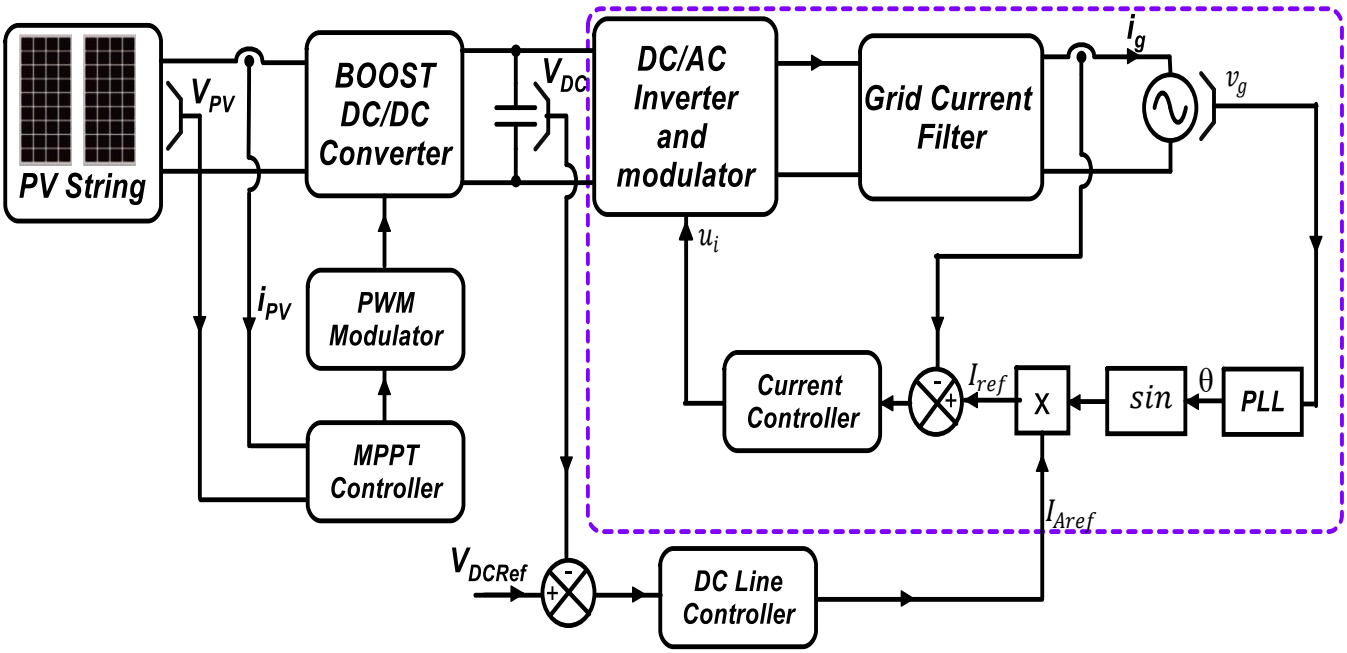
الفصل الثالث

المنوبات المربوطة مع الشبكة الكهربائية

يقدم هذا الفصل دراسة لمنوبات الاستطاعة الكهربائية المربوطة بالشبكة الكهربائية Grid Connected DC/AC inverters. استخدام منوبات الاستطاعة الكهربائية المربوطة مع الشبكة في السابق كان يقتصر على مرشحات الاستطاعة الفعالة سواءاً التفرعية أوالتسلسلية Series and Parallel Active Filters ومع تطور تصنيع الألواح الشمسية وزيادة الاهتمام العالمي بمصادر الطاقة المتجددة، زاد الاهتمام في الأبحاث العلمية بمنوبات الاستطاعة المربوطة مع الشبكة، حيث أن هذه المنوبات تشكل الواجهة الأساسية للنظام الشمسي مع الشبكة، ويعتبر المنوب أحد أهم أجزاء النظام الشمسي المربوط مع الشبكة. سيهتم هذا الفصل بشكل أساسي في حلقة التحكم بالتيار المحقون في الشبكة والطرائق المتبعة في الأبحاث العلمية للتحكم به. كما سيتطرق لتخميد الطنين في مرشح الاستطاعة من النمط LCL كون تخميد الطنين في هذا المرشح جزءاً أساسياً في تحقيق استقرار النظام.

1- المخطط العام لنظام شمسي مربوط بالشبكة

في معظم مصادر الطاقة المتجددة (الشمسية والريحية... إلخ) تكون الجهود والتيارات التي تعطيها هذه المصادر متغيرة، مما يتطلب وجود مبدلات استطاعة تعمل على تبديل شكل الإشارات وتنويبها لتناسب الشبكة الكهربائية. يوضح الشكل3-1 المخطط العام لنظام شمسي مربوط بالشبكة ويظهر فيه المنوب وحلقة التحكم بالتيار بإطار منقط.



الشكل3-1 المخطط العام لنظام شمسي مربوط بالشبكة.

يتكون النظام الشمسي المربوط بالشبكة الكهربائية من مجموعة من مبدلات الاستطاعة المتحكم بها. تعمل هذه المبدلات على استجرار الطاقة من الألواح الشمسية وصبها في الشبكة. يجب على نظام التحكم بالمبدلات تأمين

التزامن مع الشبكة واستجرار الاستطاعة العظمى من الألواح الشمسية. يُستخدم لهذا الغرض مبدلي استطاعة، الأول مبدل الاستطاعة DC/DC وهو من النمط الرافع للجهد Boost Converter. يتم التحكم بهذا المبدل لتوضيع نقطة عمل الألواح الشمسية عند نقطة الاستطاعة العظمى للاستغلال الألواح الشمسية بشكل أمثلي كما رأينا في الفصل السابق. يصب هذا المبدل الاستطاعة الواردة من الألواح الشمسية في الخط الساكن DC Bus. يعمل مبدل الاستطاعة الثاني وهو المنوب DC/AC inverter المربوط مع الشبكة الكهربائية، على صب القدرة الكهربائية المستقبلة من المبدل الأول في الشبكة الكهربائية عن طريق مرشح استطاعة. يعمل المتحكم الخاص بالتيار المحقون في الشبكة والموضح في الشكل3-1 ضمن الإطار المنقط على التحكم بالتيار المحقون في الشبكة، بحيث يحقق التزامن مع الشبكة و يحقق المعايير العالمية الخاصة بالتوافقيات Harmonics غير التوافقية الأساسية للشبكة أشهر هذه المعايير هو IEEE1547 [ملحق1]. يتم ربط المنوب بالشبكة عن طريق مرشح Filter لتخميد التوافقيات في تيار الشبكة الناجمة عن التقطيع في المنوب. هذا المرشح ممكن أن يكون L أو LC أو LCL. يتم تحديد صفحة الإشارة المرجعية للتيار عن جهد الشبكة عن طريق حلقة إقفال طور PLL Phase Locked Loop.

2- الطرق المتبعة في التحكم بنظام ثلاثي الطور مربوط بالشبكة:

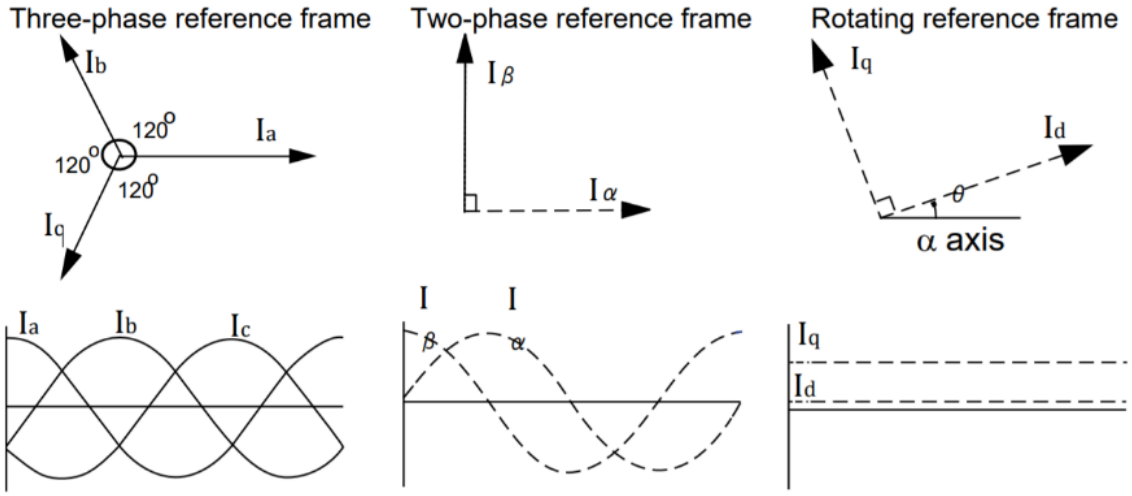
لدراسة الطرق التقليدية للتحكم بتيار المنوب المحقون في الشبكة في نظام ثلاثي الطور، عادة مايتم استخدام بعض التحويلات الرياضية المساعدة لتبسيط المسألة والتعقيد الحسابي للأطوار الثلاثة. يمكن إعادة كتابة الجهود والتيارات بالجملة الطبيعية Natural reference frame abc، بنمط ثنائي الطور بالمستوي α-β والذي يعرف بـ Stationary reference frame. وذلك لتبسيط الحسابات وتقليل عدد الإشارات وذلك يعرف بتحويل Clarke. وهو تحويل خطي ويعطى كمايلي:

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \tag{3.1}$$

كما يمكن إعادة كتابة المقادير المتغيرة مع الزمن في الجملة α-β لتكون متزامنة مع الشبكة وذلك بتدوير الجملة α-β بزاوية الشبكة θ ويعاد كتابتها بالجملة d-q، والتي تعرف بـ Synchronous reference frame وبذلك يتم تحويل المقادير المتغيرة مع الزمن إلى مقادير ثابتة. ويمكن الانتقال من الجملة α-β إلى الجملة d-q كمايلي:

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix}\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \tag{3.2}$$

يوضح الشكل3-2 الإشارات ثلاثية الطور مكتوبة بالجمل abc، α-β، d-q السابقة.

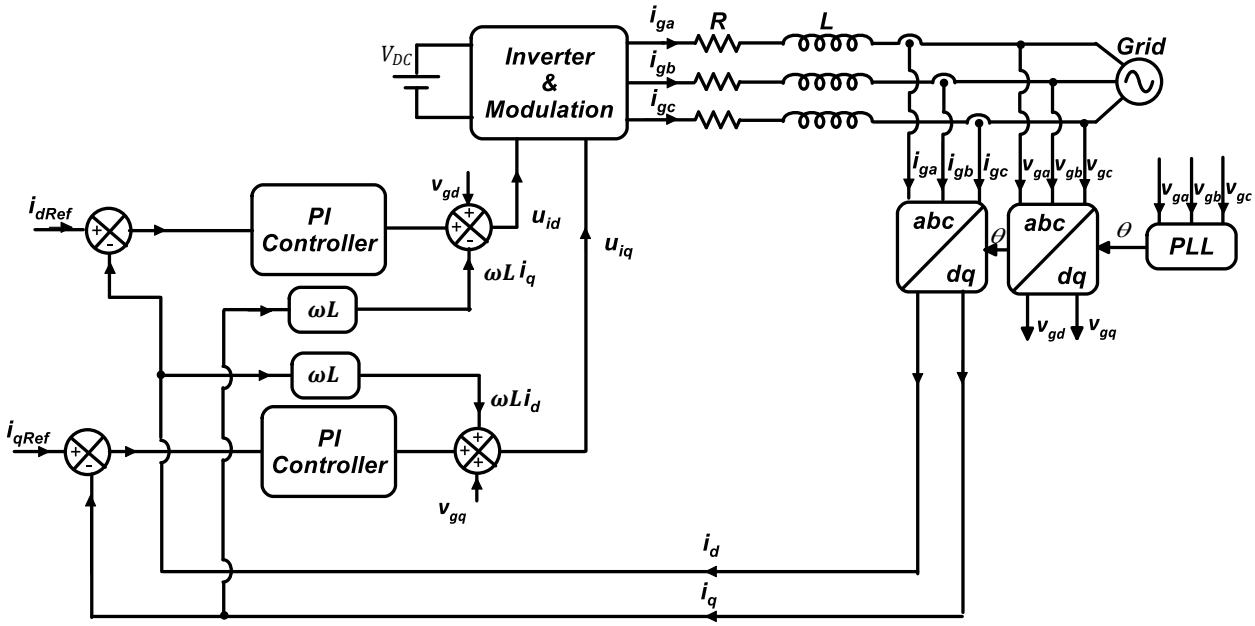


الشكل3-2 الإشارات ثلاثية الطور مكتوبة بالجمل abc، α-β، d-q.

يوجد عدة طرائق تقليدية في الأدبيات العلمية للتحكم بتيار المنوب المحقون في الشبكة في نظام ثلاثي الطور، وذلك حسب الجملة المرجعية المستخدمة للتحكم. فيمكن أن يكون التحكم إما في الجملة المرجعية المتزامنة مع الشبكة، أو الجملة المرجعية المستقرة أوالجملة المرجعية الطبيعية [51].

2-1- التحكم في الجملة المتزامنة Synchronous Reference Frame

إن التحكم بالتيار المحقون في الشبكة في الجملة المتزامنة مع الشبكة d-q من أكثر أساليب التحكم بالتيار المحقون في الشبكة شيوعاً [61]، [62]، [66]. يوضح الشكل3-3 طريقة التحكم بالتيار المحقون في الشبكة باستخدام مرشح L في منوب ثلاثي الطور. يتم تحويل القياسات من الجملة الطبيعية abc الى الجملة المتزامنة مع الشبكة d-q باستخدام تحويل Park، وذلك بالاعتماد على حلقة اقفال الطور PLL لتقدير زاوية المزامنة وبذلك يتم تحويل المقادير المتناوبة إلى مقادير مستمرة مكتوبة في المستوي d-q.



الشكل3-3 التحكم بالتيار المحقون بالشبكة باستخدام مرشح L في منوب ثلاثي الطور بالجملة المتزامنة d-q.

يمكن كتابة نموذج النظام في الجملة abc كمايلي:

$$\begin{bmatrix} v_{ia} \\ v_{ib} \\ v_{ic} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} + L \begin{bmatrix} di_{ga}/dt \\ di_{gb}/dt \\ di_{gc}/dt \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ga} \\ v_{gb} \\ v_{gc} \end{bmatrix} \tag{3.3}$$

بكتابة المعادلة السابقة للنظام بالمستوي d-q حيث أن زاوية المزامنة مع الشبكة تتم باستخدام حلقة إقفال الطور PLL. تعطى معادلتي النظام كمايلي:

$$v_{iq} = v_{gq} + Ri_q + L\frac{di_q}{dt} + \omega L i_d \tag{3.4}$$

$$v_{id} = v_{gd} + Ri_d + L\frac{di_d}{dt} - \omega L i_q \tag{3.5}$$

نلاحظ من المعادلات السابقة وجود ترابط متبادل Cross coupling بين مركبتي التيار في الجملة d-q، وبالتالي لايمكن التحكم بكل مركبة على حدة بشكل مستقل. يتم إلغاء هذا الترابط بين المركبتين عن طريق تعويض الحد $\omega L i_{qd}$ في إشارات التحكم v_{idq}، كما هو موضح في الشكل3-3. وذلك للسماح بإمكانية التحكم بكل مركبة من مركبات التيار بشكل مستقل عن الأخرى. يمكن كتابة الاستطاعة الردية والفعالة المحقونة بالشبكة كمايلي:

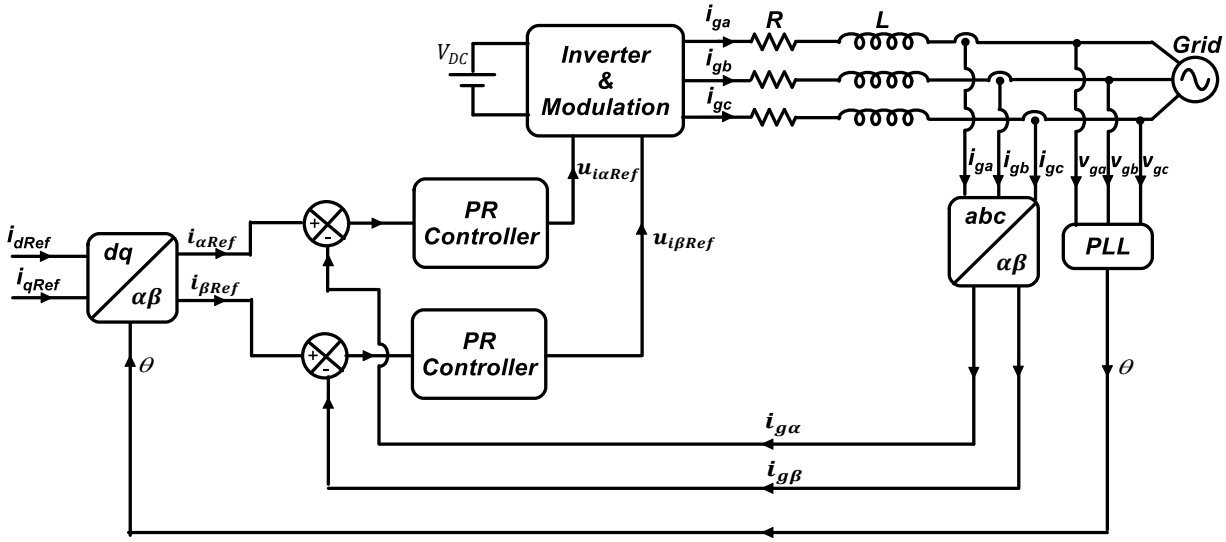
$$P = \frac{3}{2} v_{gd} i_d \tag{3.6}$$

$$Q = \frac{3}{2} v_{gd} i_q \tag{3.7}$$

نلاحظ مما سبق أنه يمكن التحكم بالاستطاعتين الردية والفعالة بشكل مستقل عن طريق التحكم بالمركبة d للتيار المحقون وهي مركبة الاستطاعة الفعالة والمركبة q وهي مركبة الاستطاعة الردية، وللحصول على معامل استطاعة واحدي يتم التحكم بالمركبة q للتيار لتكون معدومة. بعد تحويل المركبات المتناوبة الى مركبات مستمرة وإلغاء الترابط بين المركبتين الردية والفعالة، تصبح مسألة التحكم أكثر سهولة حيث يتم عادة التحكم بالمركبتين عن طريق مصحح تناسبي تكاملي PI ويعطي هذا المصحح نتائج جيدة، خصوصاً كون المقادير المتناوبة أرجعت إلى مستمرة وكون المصحح PI يعطي ربح لانهائي بالنسبة للمركبات المستمرة، فمن السهولة الحصول على خطأ سكوني معدوم في هذه الحالة، وهي أهم خاصية مميزة لهذه الطريقة. أما مساوء هذه الطريقة فتتجلى في التعقيدات الحسابية الكبيرة التي تتضمنها وخاصة التحويلات من الجملة الطبيعية الى الجملة المتزامنة حيث أن هذه التحويلات تحتوي على توابع رياضية من الصعب حسابها بأزمنة صغيرة في المعالجات ذات النقطة الثابتة Fixed Point DSP، بالاضافة أنها تحتاج إلى إلغاء الترابط بين مركبات التيار، كل ذلك يعني الحاجة الماسة لمعالج DSP ذو مواصفات عالية لتحقيق التحكم. كما أن التحويلات الخاصة بالأنظمة ثلاثية الطور من الصعب تنجيزها على الانظمة أحادية الطور فالطريقة السابقة حصرية للأنظمة ثلاثية الأطوار [51].

2-2- التحكم في الجملة المستقرة Stationary Reference Frame

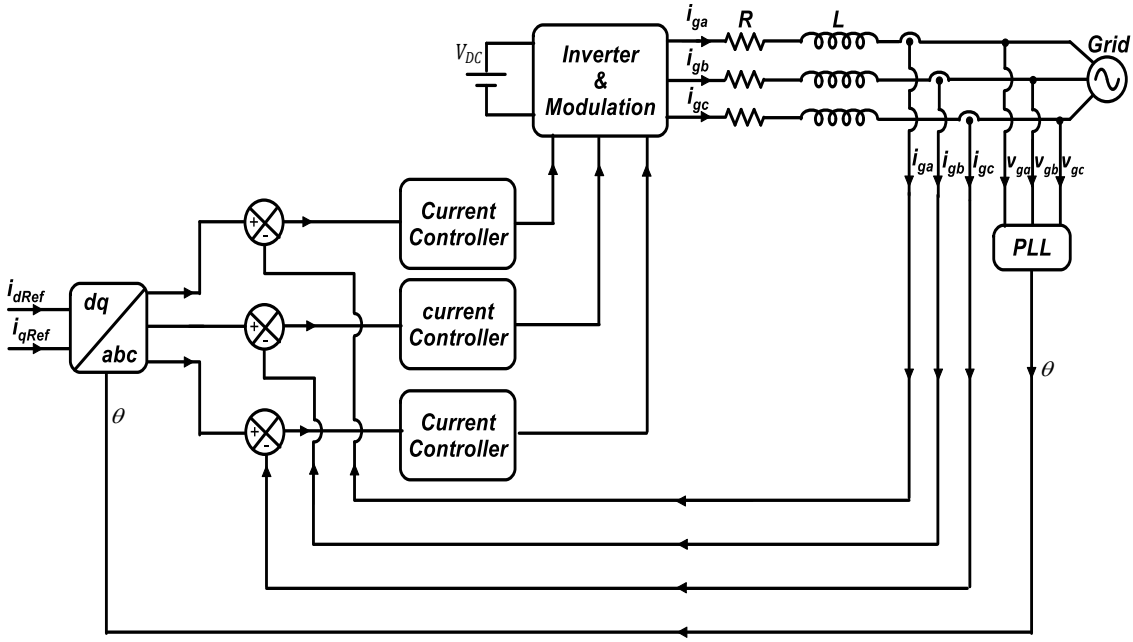
لتخفيف التعقيد الحسابي الذي يوجد في الجملة المتزامنة. يمكن التحكم بالتيار المحقون بالشبكة في الجملة α-β. يوضح الشكل3-4 طريقة التحكم بالتيار المحقون بالشبكة باستخدام مرشح L في منوب ثلاثي الطور في الجملة α-β. من الواضح في هذه الحالة أن استخدام مصحح تقليدي من النمط PI لن يكون فعالاً، وذلك كون الإشارات المرجعية للتيارات ستكون متغيرة مع الزمن، ما يؤدي إلى وجود خطأ في ملاحقة الإشارة المرجعية في كل من المطال والصفحة. لذلك يتم الاستعاضة عن المصحح التكاملي التناسبي بمصحح تناسبي طنيني Proportional Resonant (PR) سنقوم بدراسته بشكل أكثر تفصيلاً لاحقاً. من أهم مزايا هذا المصحح قدرته على ملاحقة إشارة مرجعية دورية، وذلك كونه يعطي ربح لانهائياً عند تردد الطنين الخاص به، حيث يتم تصميمه عند تردد الشبكة ω_g. يسمح ذلك بملاحقة الإشارة المرجعية للتيار دون وجود خطأ سكوني. كما أن المصحح PR يمتلك خواص ديناميكية جيدة وهذا ما عرض في الكثير من الأعمال [68]، [67]، [50]، [51].



الشكل3-4 التحكم بالتيار المحقون بالشبكة باستخدام مرشح L في منوب ثلاثي الطور في الجملة α-β.

3-2- التحكم في الجملة الطبيعية Natural Reference Frame

يمكن التحكم بتيارات الأطوار الثلاثة بشـــكل منفصـــل في الجملة الطبيعية abc. حيث يتم التحكم بكل تيار بمصـحح منفصـل وتوليد المرجع الخاص به كما يوضـح الشـكل3-5. غالباً مايتم اسـتخدام مصـحح من النمط PR في هذه الحالة، كون الإشارات المرجعية متغيرة مع الزمن. كما يمكن استخدام مصححين فقط بدلا من ثلاث مصححات كونه يمكن استنتاج التيار الثالث من تيارين لتكون الحالة شبيهة بالتحكم بالجملة المستقرة. يمكن تطبيق هذه الطريقة في الأنظمة أحادية الطور بالإضافة إلى تقليل عدد التحويلات الرياضية في المعالجة [51].

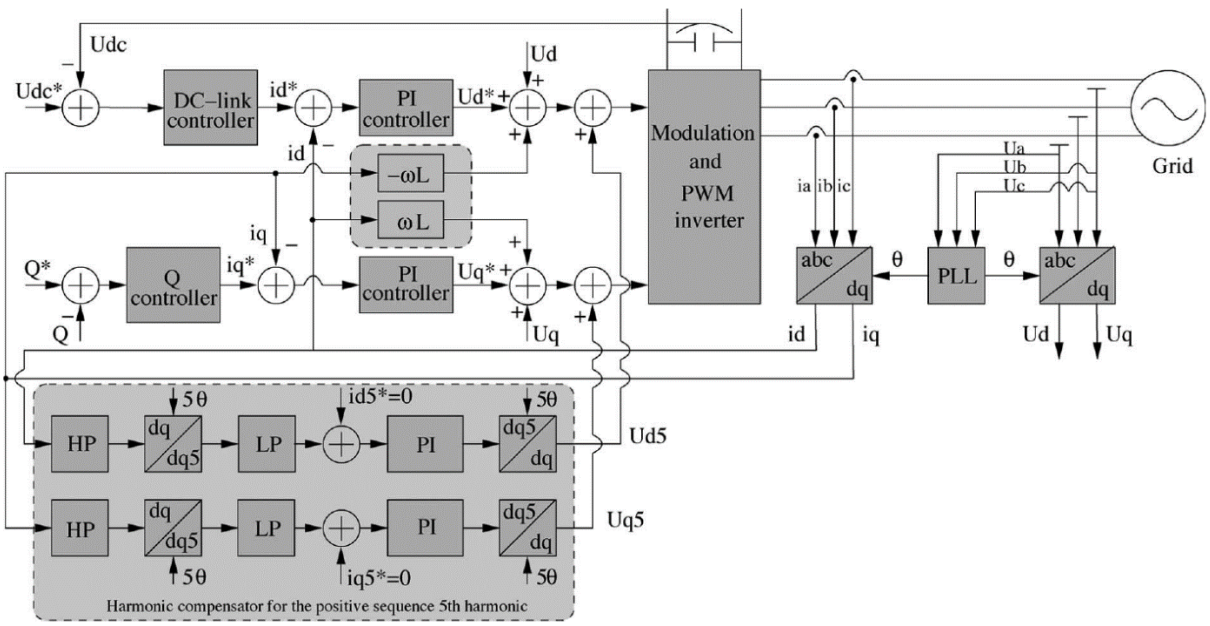


الشكل3-5 التحكم بالتيار المحقون بالشبكة باستخدام مرشح L في منوب ثلاثي الطور في الجملة abc.

3- تعويض التوافقيات Harmonics Compensation HC

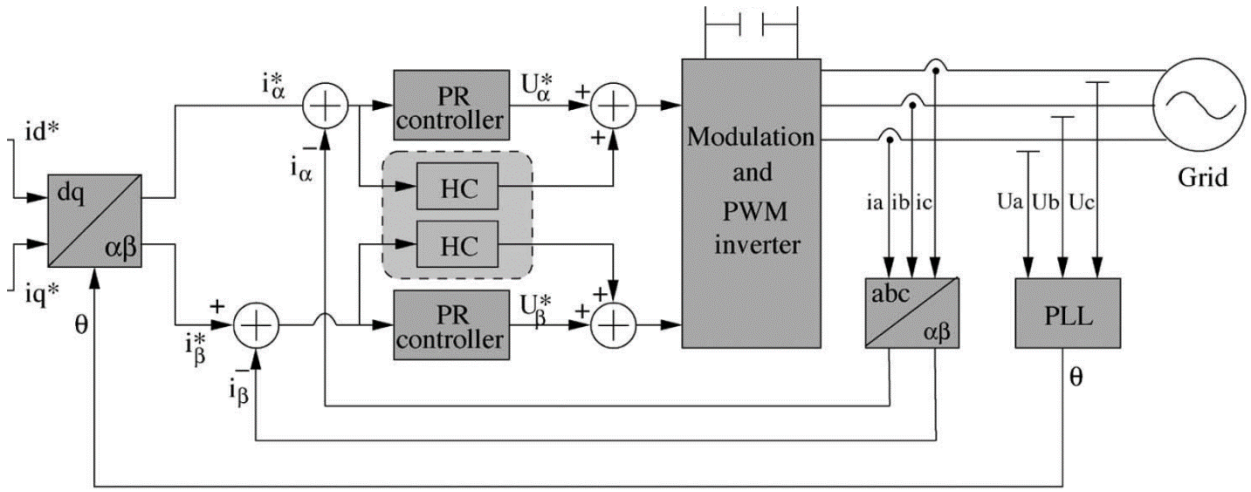
أشرنا سابقاً أنه من الضروري على المصحح المستخدم في التحكم، أن يتوفر فيه القدرة على رفض التوافقيات الغير أساسية في التيار المحقون. تعتبر التوافقيات الموجودة في جهد الشبكة الكهربائية المصدر الأساسي لظهور هذه التوافقيات في التيار المحقون. غالباً ما تحتوي شـــبكات الكهرباء العامة على التوافقيات الفردية للإشـــارة وتختلف مطالاتها تبعا لردائة الشـبكة. السـبب الرئيسـي في وجود هذه التوافقيات في جهد الشـبكة هو جسـور التقويم سـواءاً أحادية الطور أو ثلاثية الطور والتي تستخدم في العديد من الأجهزة حيث أن أجهزة قيادة المحركات متغيرة السرعة Variable Speed Drive من أكثر الأجهزة التي قد تساهم في تشويه جهد الشبكة كونها تستخدم باستطاعاتٍ عاليةٍ في المصانع والمعامل [46].

يوجد عدة طرائق مستخدمة لتعويض أثر التوافقيات ومنع ظهورها في التيار المحقون . يوضح الشكل 3-6 طريقة تعويض التوافقية الخامسة في الجملة المتزامنة d-q. تعتمد هذه الطريقة بشكلٍ أساسيٍ على عزل التوافقيات وإرجاعها إلى الجملة المتزامنة d-q لتعود إلى مقاديرٍ مستمرةٍ [66]، [51]. من ثم تصميم مصحح مستقل لكل مركبة من مركبات التوافقية لجعلها معدومة عن طريق مصحح من النمط PI وإضافة النتيجة إلى دخل المنوب. من الواضح أن تعويض التوافقيات بهذه الطريقة سيكون معقداً وبحاجة إلى كم كبير من العمليات الحسابية وسيعقد خوارزمية التحكم بشكل كبير.

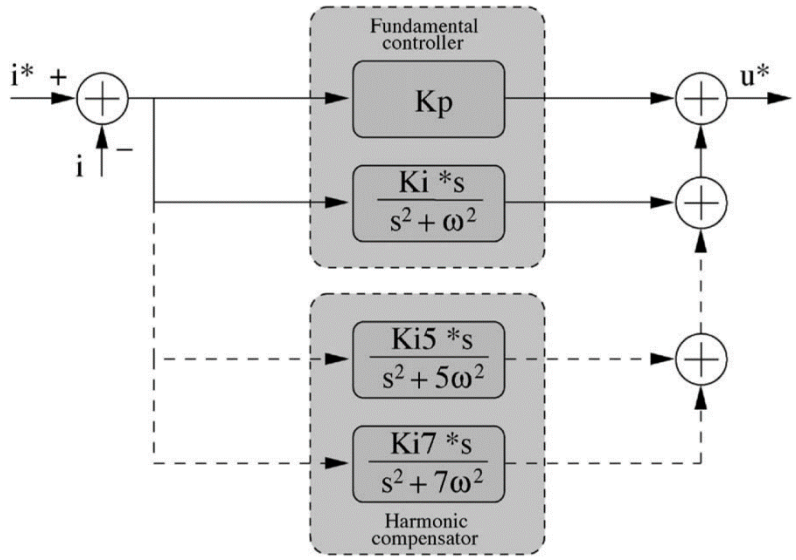


الشكل3-6 طريقة تعويض التوافقية الخامسة في الجملة المتزامنة d-q [51].

أما في حالة التحكم حيث يستخدم مصحح تناسبي طنيني PR، يمكن تعويض أثر التوافقيات بشكلٍ مختلفٍ، حيث يمكن إضافة مصححات طنينية إلى المصحح الرئيسسي [50] كما هو موضح في الشكل3-7. حيث أن إضافة هذه المصححات يؤدي إلى زيادة ربح المصحح عند التوافقيات مما يساهم في رفض أثرها. حيث أن مصحح التوافقيات HC موضح في الشكل3-8.



الشكل3-7 طريقة تعويض التوافقيات عند استخدام مصحح PR [51].



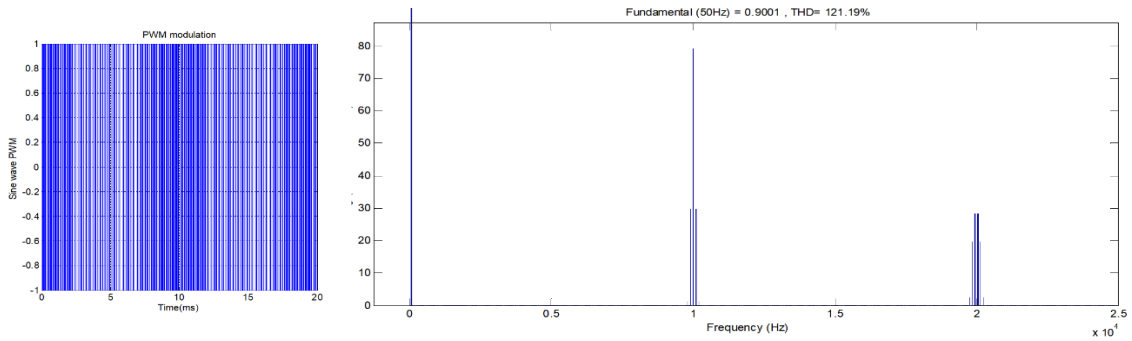
الشكل3-8 المصححات PR لتصحيح التوافقيات [51].

مماسبق نجد أن التخلص من التوافقيات الناتجة عن تشوهات جهد الشبكة، يمكن أن يتم إما بإضافة حلقة تصحيح باستخدام متحكم PI لكل توافقية من أجل التخلص منها في الجملة المتزامنة [66] أو إضافة مصححات طنينية في

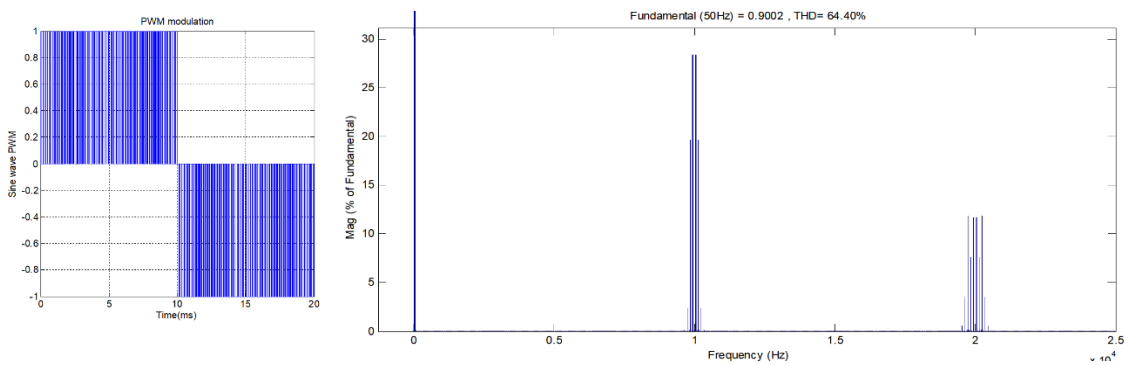
الجمل المتغيرة مع الزمن[50]، [46]. لكن التوافقيات الناجمة عن تردد التقطيع لابد من التخلص منها لتكون ضمن الحدود المقبولة وذلك يتم باستخدام مرشح مناسب لهذا الغرض.

4- المبدل DC/AC وتعديل عرض النبضة PWM

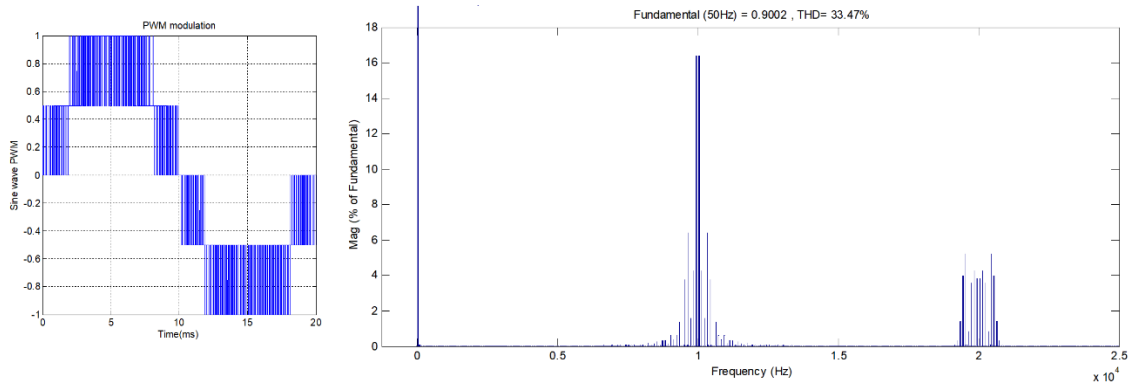
يعد المنوب جزءاً أساسياً من النظام الشمسي المربوط بالشبكة. يتم التحكم بالقواطع الإلكترونية للتحكم بالتيار المحقون في الشبكة. بنية المنوب هي عبارة عن جسر H إما ثلاثي الطور أو أحادي الطور وذلك حسب النظام المنفذ. كثيراً ما يُستخدم تقنية المنوب متعدد المستويات وخاصة في محطات التوليد عالية الجهد لما تتيحه هذه التقنية من توزيع الجهود على القواطع الالكترونية إضافةً إلى تخفيف التوافقيات الناتجة عن التقطيع وتقليل حجم المرشح [69]، [70]، [71]، [72]. يتم التحكم بالقواطع الإلكترونية في المنوب عادةً عن طريق تغيير عرض النبضة Pulse Width Modulation PWM. في حالة الأنظمة ثلاثية الطور فالتحكم الشعاعي بتعديل عرض النبضة Space Vector PWM (SVPWM) هو الأكثر استخداماً، لما تتيحه هذه التقنية من إيجابياتٍ لعل أهمها تخفيض جهد الخط الساكن [63]، [64]. توضح الأشكال: الشكل3-9، الشكل3-10، الشكل3-11، طيف إشارة جيبية بتردد $50Hz$ معدلة بعرض النبضة بتردد $10kHz$ وذلك من أجل التقطيع بمستويين، ثلاث مستويات وخمس مستويات. من الواضح أن تعدد المستويات يؤدي إلى تخفيض مطال التوافقيات الناجمة عن التقطيع في إشارة خرج المنوب.



الشكل3-9 طيف إشارة جيبية بتردد $50Hz$ معدلة بتردد $10kHz$ وذلك من أجل التقطيع بمستويين.



الشكل3-10 طيف إشارة جيبية بتردد $50Hz$ معدلة بتردد $10kHz$ وذلك من أجل التقطيع بثلاث مستويات.

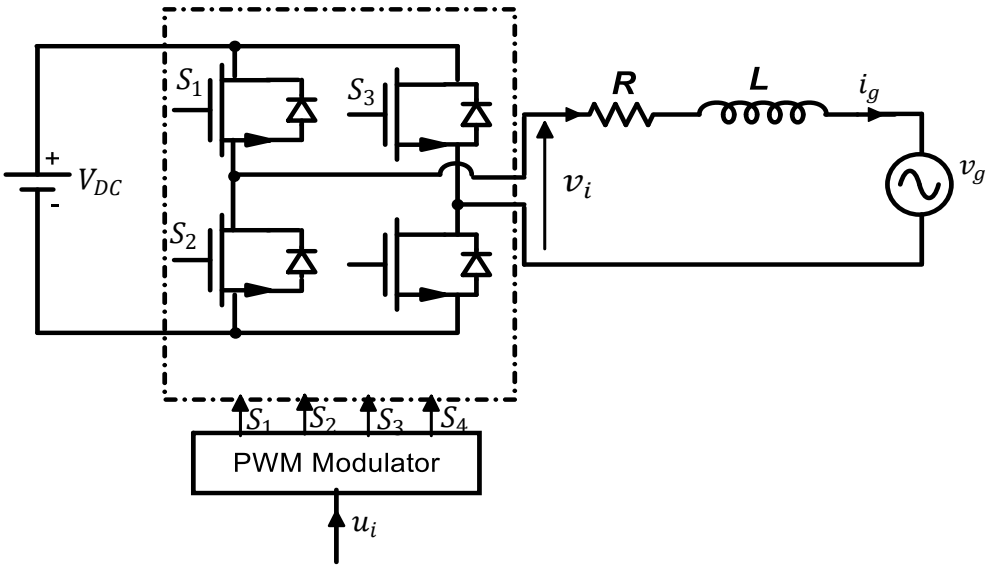


الشكل3-11 طيف إشارة جيبية بتردد $50Hz$ معدلة بتردد $10kHz$ وذلك من أجل التقطيع بخمس مستويات.

يستخدم المرشح لتخميد أثر التوافقيات الناجمة عن التقطيع في التيار المحقون بالشبكة، حيث أن المعايير العالمية لحقن الطاقة بالشبكة تتطلب أن تكون هذه التوافقيات دون مستوى معين.

5- المرشح L وLCL :

يعتبر المرشح جزءاً هاماً من أجزاء النظام المربوط بالشبكة تقليديا الترشيح باستخدام ملف L هو الأكثر استخداما حيث يتم ربط المنوب بالشبكة عن طريق الملف لتخميد أثر التوافقيات الناجمة عن التقطيع في التيار المحقون. يوضح الشكل3-12 مخطط لمنوب أحادي الطور موصول بالشبكة عن طريق مرشح L.



الشكل3-12 مخطط لمنوب أحادي الطور مربوط بالشبكة عن طريق مرشح L.

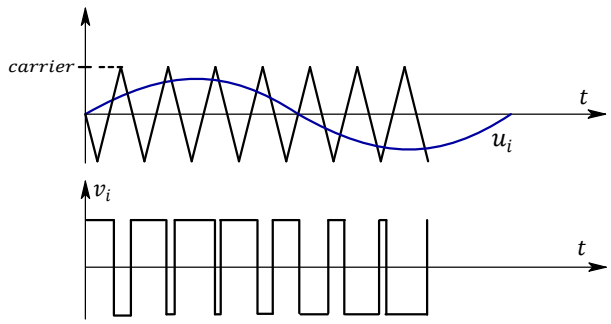
حيث R هي المقاومة الداخلية للملف. يتم تحديد قيمة الذاتية للمرشح بحيث يكون مطال التوافقيات الناجمة عن التقطيع Ripple Current في التيار المحقون في الشبكة أقل من الحدود العليا المسموحة. يوضح الشكل3-13 جهد خرج

المنوب عند التعديل بعرض النبضة ثنائية القطبية Unipolar PWM Modulation. حيث يتم مقارنة إشارة التحكم بإشارة الحامل $V_{carrier}$ لتوليد إشارة التحكم PWM التي تقود المنوب. بأخذ نموذج القيمة الوسطى Average model لنمذجة المنوب نجد:

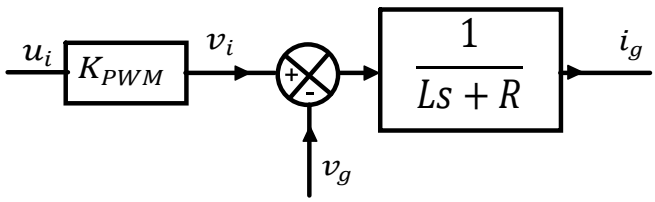
$$v_i = K_{PWM} u_i \tag{3.8}$$

حيث K_{PWM} هو ربح المنوب والتعديل ويمكن تحديده كمايلي:

$$K_{PWM} = \frac{V_{DC}}{V_{carrier}} \tag{3.9}$$



الشكل3-13 يظهر إشارة التحكم وإشارة الحامل $V_{carrier}$ لتوليد إشارة PWM.

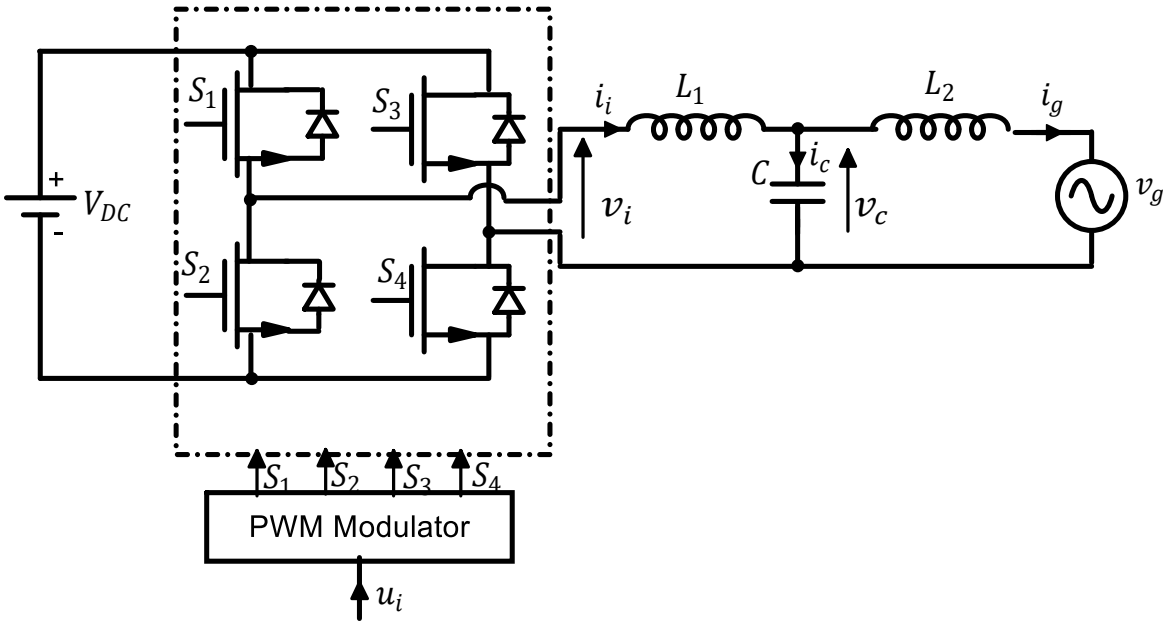


الشكل3-14 المخطط الصندوقي للمرشح L مع المنوب في مستو لابلاس.

من المخطط الصندوقي الموضح في الشكل3-14، يمكن إيجاد تابع تحويل تيار الشبكة بالنسبة لمدخلي الجملة v_g و u_i حيث نجد:

$$i_g = \frac{K_{PWM}}{Ls+R} u_i - \frac{1}{Ls+R} v_g \tag{3.10}$$

بالرغم من بساطة التحكم ونموذج الجملة عند استخدام مرشح L، إلا أنه محدود في تخميد أثر توافقيات التقطيع حيث أن تخميد التوافقيات بشكل جيد يتطلب مرشح بقيمة ذاتية كبيرة، وبالتالي سيكون المرشح كبير الحجم وعالي التكلفة. لذلك عادة ما يُستخدم مرشح بدرجة أعلى لتخميد أثر التوافقيات، أكثر المرشحات انتشاراً هو المرشح LCL [48]، [49].



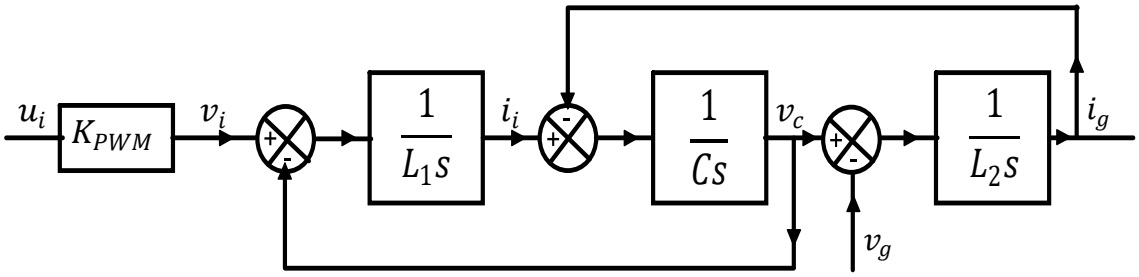
الشكل3-15 المنوب والمرشح LCL

يتكون المرشح من النوع LCL من ملفين ومكثفة. يوضح الشكل 3-15 المرشح LCL وهو مرشح من الدرجة الثالثة مايميزه عن المرشح L. يمتلك هذا المرشح قدرة كبيرة على تخميد التوافقيات عالية التردد الناتجة عن التقطيع. هذا ما يجعل هذا المرشح صغير الحجم مقارنة بالمرشح L [74]. يُعطى نموذج هذا المرشح مع المنوب في فضاء الحالة كما يلي:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} di_g/dt \\ dv_c/dt \\ di_i/dt \end{bmatrix}}_{\dot{X}} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1/L_2 & 0 \\ -1/C & 0 & 1/C \\ 0 & -1/L_1 & 0 \end{bmatrix}}_{A} \underbrace{\begin{bmatrix} i_g \\ v_c \\ i_i \end{bmatrix}}_{X} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ K_{PWM}/L_1 \end{bmatrix}}_{B} u_i + \underbrace{\begin{bmatrix} -1/L_2 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}}_{D} v_g \qquad (3.11)$$

$$y = i_g = \underbrace{[1\ 0\ 0]}_{C} X \qquad (3.12)$$

حيث L_1، L_2، C هي قيم معاملات المرشح و i_g، i_i، v_c، v_i، v_g هي بالترتيب التيار المحقون بالشبكة، تيار المنوب، جهد المكثفة، جهد المنوب وجهد الشبكة. يوضح الشكل3-16 المخطط الصندوقي المكافئ لهذا المرشح مع المنوب في مستوي لابلاس.



الشكل3-16 المخطط الصندوقي للمرشح LCL مع المنوب في مستوي لابلاس.

من المخطط الصندوقي يمكن إيجاد تابع التحويل للتيار المحقون في الشبكة كمايلي:

$$i_g(s) = G_{i_g u_i}(s) v_i(s) + G_{i_g v_g}(s) v_g \tag{3.13}$$

حيث:

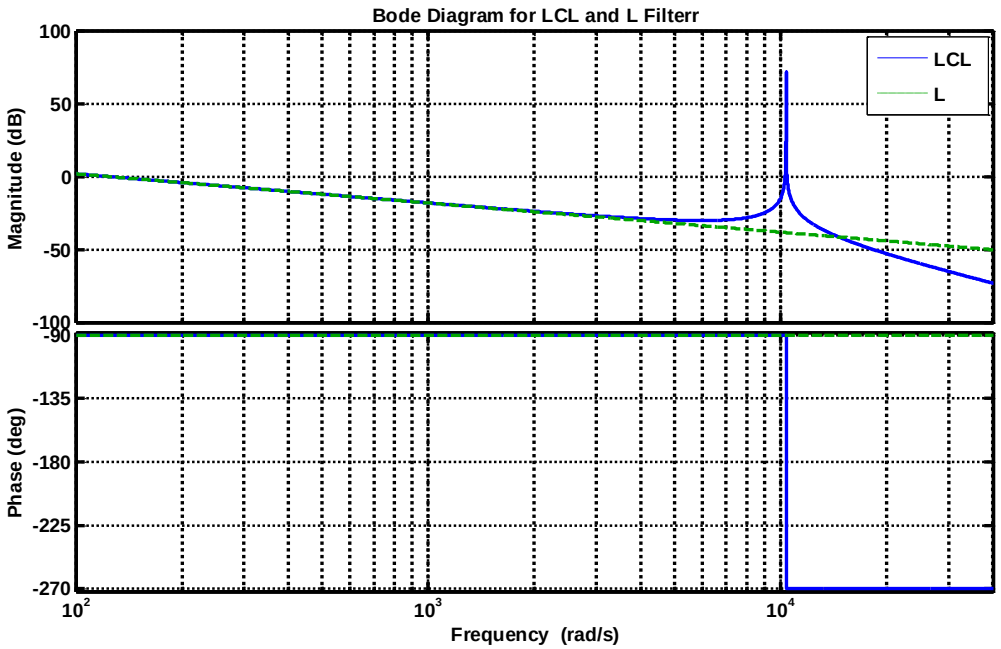
$$G_{i_g u_i}(s) = \frac{i_g(s)}{u_i(s)} = \frac{K_{PWM}}{L_1 L_2 C s(s^2 + \omega_{res}^2)} \tag{3.14}$$

$$G_{i_g v_g}(s) = \frac{i_g(s)}{v_g(s)} = -\frac{1 + L_1 C s^2}{L_1 L_2 C s(s^2 + \omega_{res}^2)} \tag{3.15}$$

حيث أن ω_{res} هو تردد الطنين في المرشح ويعطى بالعلاقة:

$$\omega_{res} = 2\pi f_{res} = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C}} \tag{3.16}$$

يوضح الشكل3-17 مخطط بود لكل من المرشح LCL وL. من الواضح أن المرشح LCL، يمتلك قدرة كبيرة على التخميد في الترددات العالية. لكن المشكلة الأساسية في هذا المرشح هو الطنين الموجود فيه، حيث أنه يحتوي على ربح لانهائياً عند تردد الطنين كما توضح توابع التحويل في (3.14) و(3.15)، مما يؤدي إلى مشكلة في استقرار النظام. حيث أن أي توافقيات في جهد الشبكة أو جهد المنوب قريبةً من تردد الطنين ستؤدي إلى ظهور طنين في التيار المحقون. تُحل هذه المشكلة عادة بإضافة مقاومة تسلسلية لمكثفة المرشح وهذا ما يعرف بالتخميد الغير فعال Passive damping [52]. لكن هذا يؤدي إلى إنقاص مردود المنوب ولذلك فهو غير مرغوب. أما الحل الفعال للتخميد Active damping فلايتم إضافة عناصر غير فعالة، ولكن يتم عن طريق حلقة تحكم إضافية تعتمد على قياس تيار المكثفة [43]. سندرس طرق التخميد بالتفصيل لاحقاً.



الشكل3-17 مخطط بود لهذا لكل من المرشح LCL وL.

6- تخميد الطنين في المرشح LCL

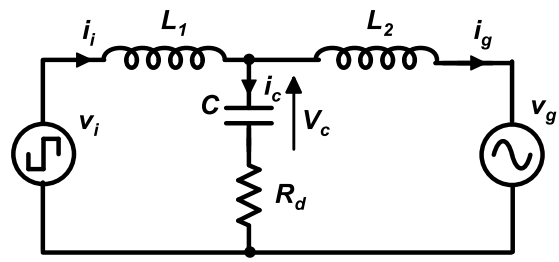
بالرغم من الكفاءة العالية للمرشح LCL مقارنة بالمرشح L في تخميد التوافقيات الناجمة عن التقطيع في المنوب، إلا أن الطنين في هذا المرشح يعتبر أحد أكبر مساوءه. حيث أن تابع تحويل المرشح يعطي ربحاً لانهائياً في المجال الترددي عند تردد الطنين كما وضح ذلك الشكل3-17. كما أن صفحة تابع التحويل تقطع الصفحة 180°- عند تردد الطنين. هذا ما يسبب في تعقيد تحقيق الاستقرار في النظام عند التحكم بالتيار المحقون في الشبكة، حيث أن النظام لن يكون مستقراً أياً كان ربح متحكم التيار المستخدم [40]، [41]، [43]. لذلك لابد من توفر طريقة لتخميد الطنين في تابع التحويل لجعل استقرار النظام ممكناً. يوجد في المنشورات العلمية مجموعة من الطرائق المقترحة لحل مشكلة الطنين في المرشح LCL، ويمكن إدراجها بشكل عام في واحدة من ثلاثة أقسام رئيسية هي:

- التخميد غير الفعال Passive Damping.
- التخميد الفعال Active damping.
- الترشيح بحزمة ضيقة Notch filter.

لكل طريقة من الطرائق السابقة محاسن ومساوئ، سنقوم بدراسة هذه الطرق في الفقرات اللاحقة.

1-6- التخميد غير الفعال Passive Damping

يعتبر التخميد الغير فعال أبسط طرق التخميد حيث يتم إضافة عناصر غير فعالة Passive components إلى دارة المرشح لتخميد الربح اللانهائي للطنين. حيث يتم إضافة مقاومة تخميد R_d على التسلسل مع مكثفة المرشح [76]، [67] كما هو موضح في الشكل3-18.



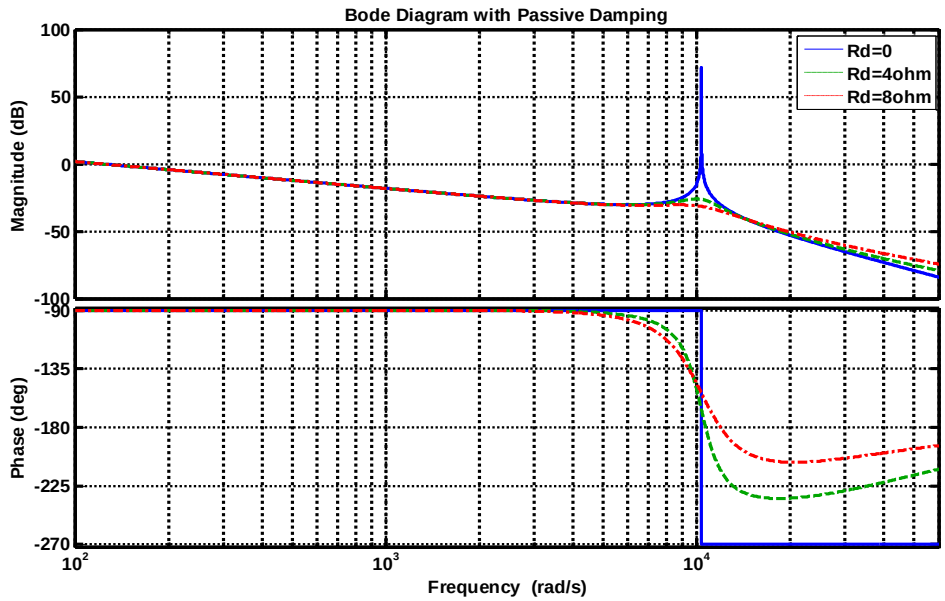
الشكل3-18 تخميد الطنين في المرشح بإضافة مقاومة تخميد.

يمكن أن نجد أن تابع تحويل التيار عند إضافة مقاومة التخميد كما يلي:

$$G_{i_g v_i} = \frac{i_g(s)}{v_i(s)} = \frac{R_d C s + 1}{L_1 L_2 C s^3 + R_d C (L_1 + L_2) s^2 + (L_1 + L_2) s} \qquad (3.17)$$

$$G_{i_g v_g} = \frac{i_g(s)}{v_g(s)} = -\frac{L_1 C s^2 + R_d C s + 1}{L_1 L_2 C s^3 + R_d C (L_1 + L_2) s^2 + (L_1 + L_2) s} \qquad (3.18)$$

من الواضح أن مقاومة التخميد أضافت حد متعلق بـ s^2 إلى مقام تابع التحويل. يساهم هذا الحد في تغيير تموضع أقطاب تابع التحويل لتخميد الطنين. يوضح الشكل3-19 مخطط بود لتابع التحويل عند زيادة قيمة مقاومة التخميد.

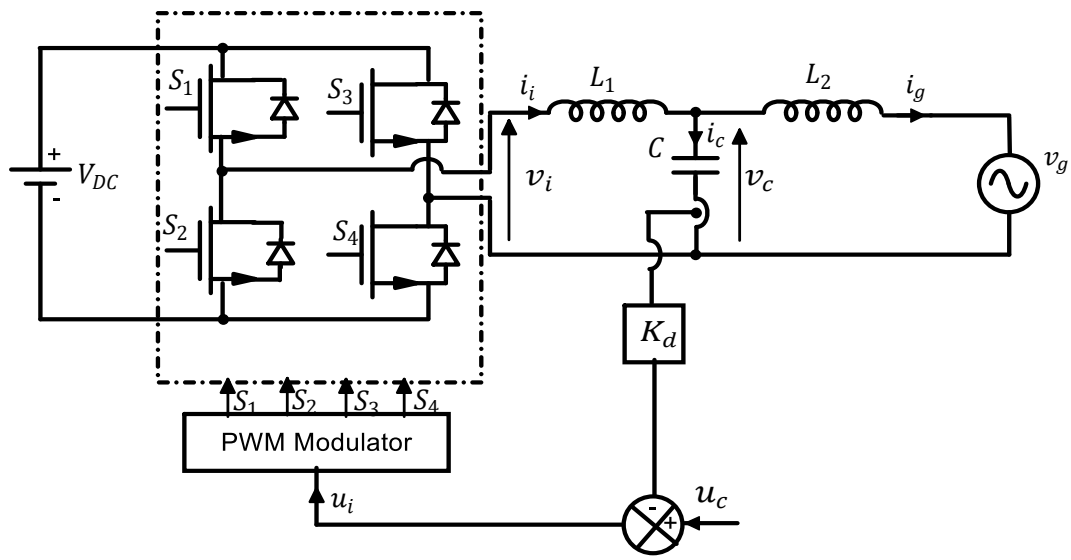


الشكل3-19 مخطط بود لتابع التحويل عند قيم مختلفة لمقاومة التخميد.

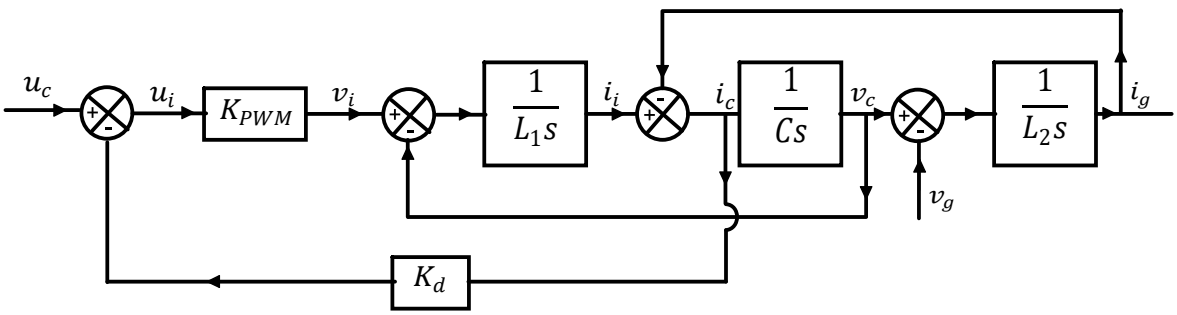
من الواضح من مخطط بود أن إضافة مقاومة تسلسلية مع مكثفة المرشح ستعمل على تخميد قمة الطنين في مخطط بود. ولكن هذه الطريقة ستزيد من الضياعات وبالتالي تنقص مردود المنوب كما أن زيادة قيمتها بشكل كبير يحمل أثر سلبياً على تخميد التوافقيات الناجمة عن التقطيع.

3-2-6 التخميد الفعال Active damping

لتحقيق التخميد في المرشح دون إنقاص مردود المنوب والمحافظة على تخميد جيد للتوافقيات الناتجة عن التقطيع، يتم استخدام طريقة التخميد الفعال. حيث بدلاً من إضافة عناصر غير فعالة يتم إضافة حلقة تحكم إضافية تعتمد على قياس تيار المكثفة في المرشح [43]. حيث يتم إضافة حلقة تحكم بتغذية خلفية متناسبة مع تيار المكثفة وإضافة الناتج إلى إشارة التحكم في المنوب كما هو موضح في الشكل3-20. هنالك العديد من المنشورات العلمية الحديثة التي تنحو باتجاه استخدام التخميد الفعال ودراسته بشكل معمق[40]، [41]، [43]، [77].



الشكل3-20 التخميد الفعال بإضافة حلقة تحكم بتغذية خلفية متناسبة مع تيار المكثفة.



الشكل3-21 المخطط الصندوقي للنظام مع تخميد فعال في مستو لابلاس.

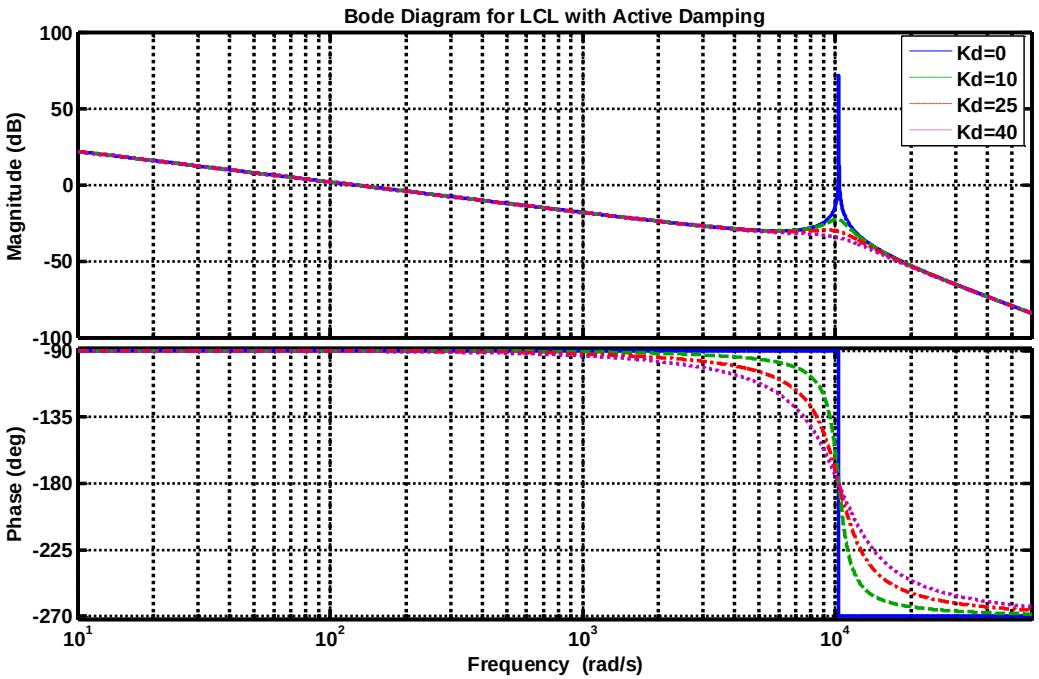
يوضح الشكل3-21 المخطط الصندوقي في مستو لابلاس للمرشح مع المنوب باستخدام طريقة التخميد الفعال. يمكن من الشكل إيجاد تابع التحويل للنظام بتخميد فعال حيث نجد:

$$i_g(s) = G_1(s)u_c(s) + G_2(s)v_g(s) \tag{3.19}$$

$$G_1 = \frac{i_g(s)}{u_c(s)} = \frac{K_{PWM}}{L_1L_2Cs\left(s^2 + \frac{K_dK_{PWM}}{L_1}s + \omega_{res}^2\right)} \tag{3.20}$$

$$G_2 = \frac{i_g(s)}{v_g(s)} = -\frac{CL_1s^2 + CK_dK_{PWM}s + 1}{L_1L_2Cs\left(s^2 + \frac{K_dK_{PWM}}{L_1}s + \omega_{res}^2\right)} \tag{3.21}$$

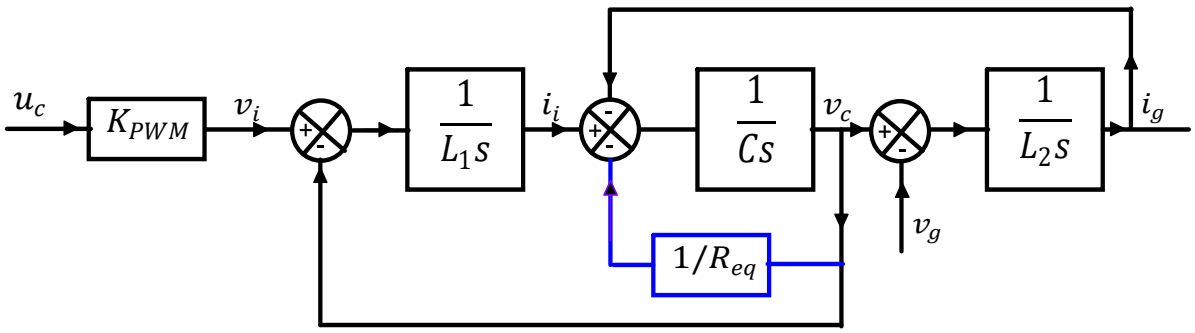
نلاحظ أن حلقة التحكم الداخلية أضافت حدا متناسب مع s^2 متعلقا بمعامل التخميد الفعال K_d إلى مقام تابع التحويل. وهذا سيساهم في تخميد الطنين في تابع التحويل. برسم مخطط بود لتابع التحويل G_1 نحصل على الشكل3-22 نلاحظ أن زيادة معامل التخميد يؤدي إلى إنقاص الربح عند تردد الطنين.



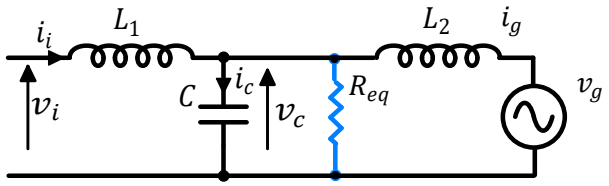
الشكل3-22 مخطط بود لتابع التحويل G_1 عند تردد طنين $1.65kHz$ وعند قيم تخميد مختلفة.

نلاحظ من مخطط بود في الشكل3-22 أن التخميد الفعال يساهم بفعالية كبيرة في تخميد أثر التوافقيات الناجمة عن التقطيع في المنوب. كما أنه لا ينقص من مردود النظام كما في التخميد غير الفعال. لتوضيح أثر حلقة التخميد الفعال على النظام، يمكن إرجاع التغذية الخلفية لحلقة التخميد الفعال في الشكل3-22 لتجمع مع تيار المكثفة وإرجاع التغذية

الخلفية إلى جهد المكثفة كما في الشكل3-23، ومنه نجد أن حلقة التخميد الفعال تكافئ إضافة مقاومة تخميد وهمية على التفرع مع مكثفة المرشح كما في الشكل3-24. ولذلك تدعى هذه الطريقة بالتخميد بالمقاومة الوهمية Virtual Resistor [36]، [37]. إن التخميد الفعال يمتلك مواصفات جيدة للتخميد إلا أنه يحتاج إلى حساس إضافي لقياس تيار المكثفة مما يزيد تكلفة النظام.



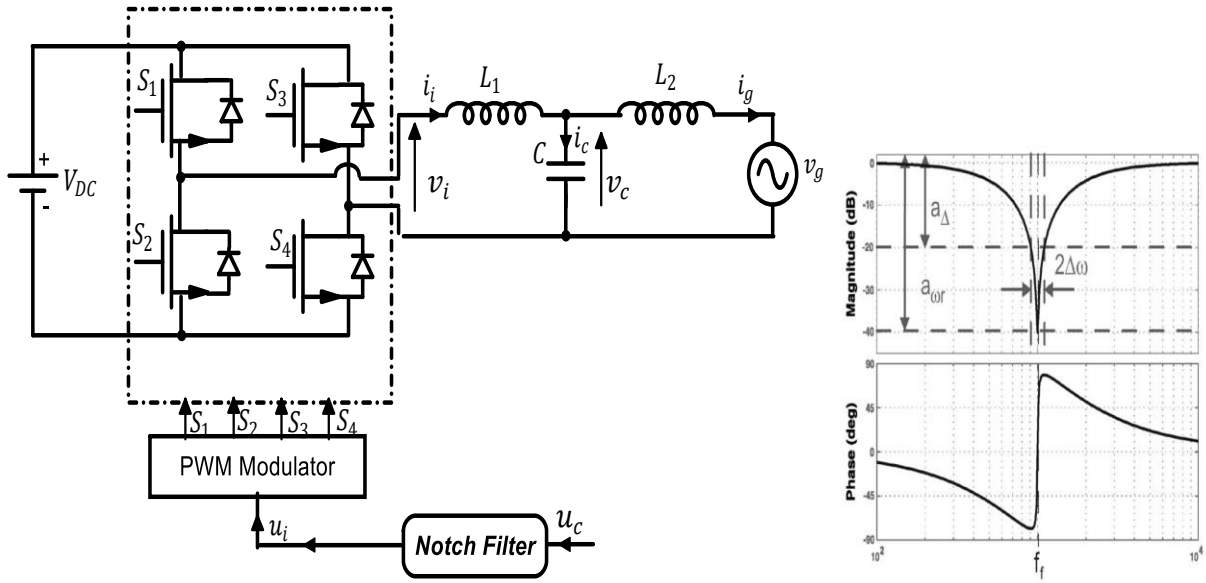
الشكل3-23 المخطط الصندوقي للنظام مع تخميد فعال يُظهر المقاومة المكافئة للتخميد الفعال.



الشكل3-24 المقاومة المكافئة للتخميد الفعال.

3-6- الترشيح بحزمة ضيقة Notch filter

في هذه الحالة للتخلص من الطنين في المنوب، يتم ترشيح إشارة دخل المنوب بمرشح حزمة ضيقة بحيث يلغي التوافقيات الموجودة بجوار تردد الطنين على دخل المنوب [56] كما في الشكل3-25. حيث يتم ضبط تردد الحزمة بما يوافق تردد الطنين، لكن هذه الطريقة للتخلص من الطنين حساسة لتغير بارامترات المرشح. اقترح في [57] استخدام الترشيح بحزمة ضيقة مع تقدير تردد الطنين لإعطاء المتحكم صلادة ضد تغير بارامترات المرشح.



الشكل3-25 التخميد الفعال بوجود مرشح منع حزمة.

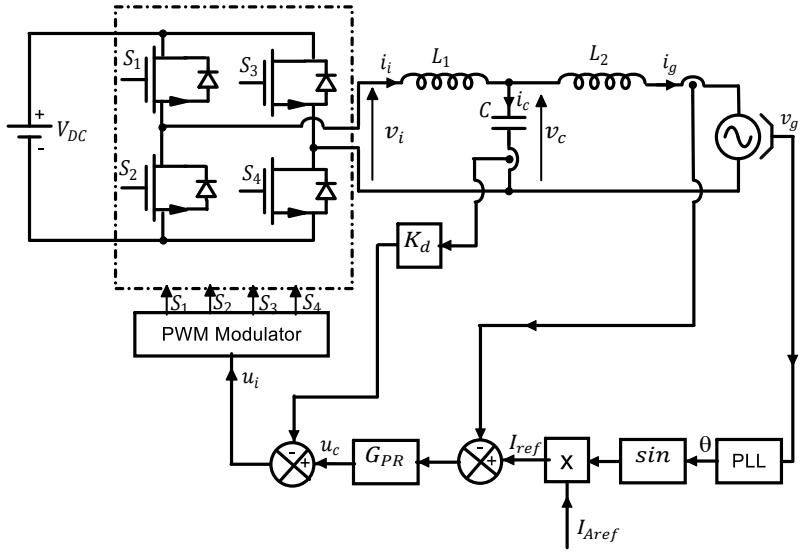
7- التحكم بنظام أحادي الطور مربوط بالشبكة بمرشح LCL مع تخميد الفعال.

يوضح الشكل3-26 الحلقة المغلقة للتحكم في التيار المحقون بالشبكة في نظام أحادي الطور. حلقة التحكم الداخلية المعتمدة على قياس تيار المكثفة هي حلقة التخميد الفعال. تستخدم حلقة إقفال الطور PLL لتقدير زاوية جهد الشبكة θ. الإشارة I_{Aref} هي المطال المرجعي المرغوب للتيار المحقون بالشبكة والذي يجب أن يكون متزامناً مع جهد الشبكة. وبالتالي فإن التيار المرجعي المرغوب للتيار المحقون في الشبكة سيولّد وفق العلاقة التالية:

$$I_{ref} = I_{Aref} sin(\theta) \qquad (3.22)$$

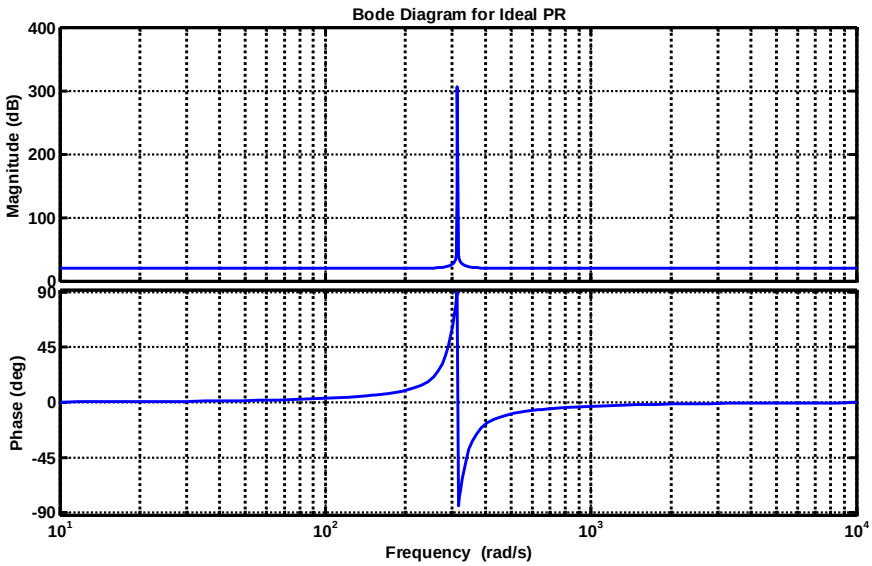
إشارة الخطأ $e_I = I_{ref} - i_g$ ستكون دخلاً لمصحح التيار وهو مصحح تناسبي طنيني PR. اقتُرح هذا المصحح في [35]. يمتلك هذا المصحح مواصفات ديناميكية جيدة تمكنه من ملاحقة إشارة مرجعية متغيرة مع الزمن بخطأ سكوني معدوم، كونه يوفر ربحاً لانهائياً عند تردد الطنين الخاص به. هنالك العديد من المنشورات العلمية عن استخدام المصحح PR ومقارنته بالمصحح التقليدي PI [67]، [68]، [76]. هذه المنشورات تتفق أن المصحح PR هو الأفضل في ملاحقة الإشارة المرجعية بدون خطأ سكوني في الجمل الغير متزامنة والتي تكون فيها الإشارات المرجعية والقياسات غير مستمرة مع الزمن. كما أنه يساهم في رفض التيار الناجم عن الشبكة ورفض التوافقيات الغير أساسية في التيار المحقون والناجمة عن الشبكة. تعطى علاقة المصحح التناسبي الطنيني المثالي G_{PRi} كمايلي:

$$G_{PRi}(s) = k_p + k_r \frac{s}{s^2 + \omega_g^2} \qquad (3.23)$$



الشكل3-26 التحكم بالتيار مع التخميد الفعال لنظام أحادي الطور مع تخميد فعال.

حيث أن k_p ، k_r، ω_g هي بالترتيب الربح التناسبي والربح الطنيني وتردد الشبكة. أهم ما يميز هذا المصحح على المصحح PI هو كونه يعطي ربحاً لانهائياً عند تردد الشبكة. يوضح الشكل3-27 مخطط بود لهذا المصحح.

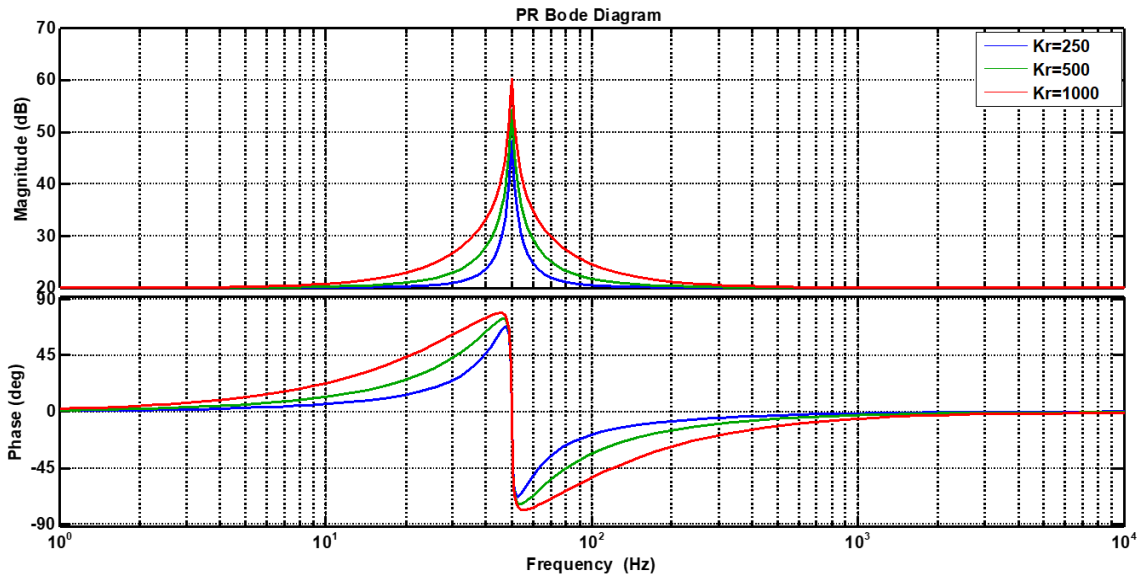


الشكل3-27 مخطط بود لمصحح PR مثالي $f_g = 50Hz$، $k_r = 500$ ، $k_p = 10$.

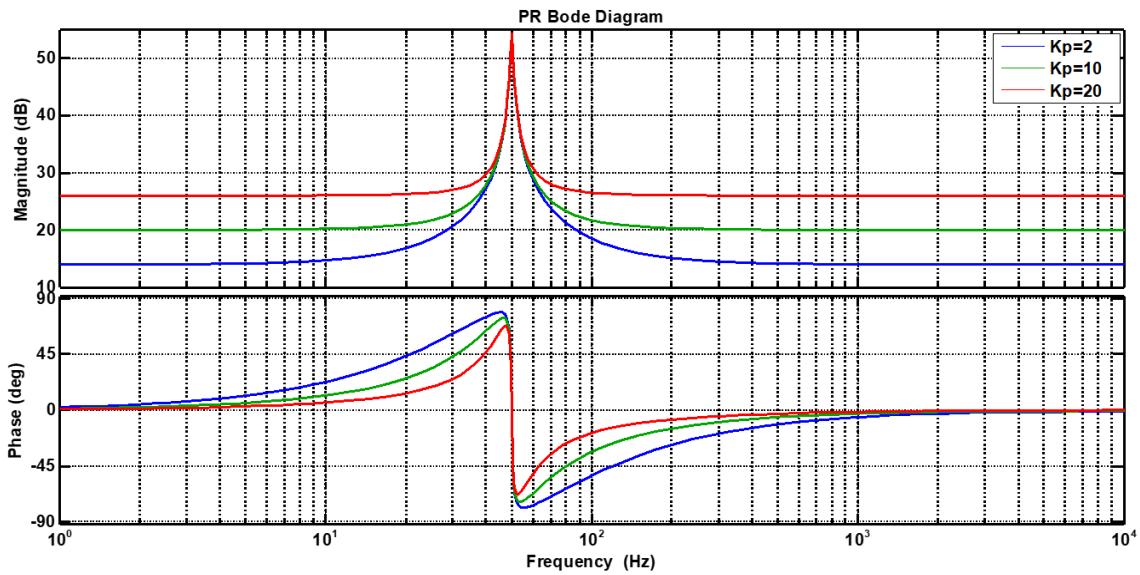
عملياً لايمكن تحقيق ربحاً لانهائياً عند تردد الشبكة وذلك بسبب التغيرات في تردد الشبكة بجوار القيمة الإسمية و بسبب الدقة المحدودة لبطاقات التحكم الرقمي التي تستخدم لتنجيز التحكم [43]، [35]. لذلك عادة ما يستعاض عن الصيغة السابقة (3.23) للمصحح بصيغة أنسب للتنجيز العملي تعطى كمايلي:

$$G_{PR}(s) = k_p + k_r \frac{2\omega_i s}{s^2 + 2\omega_i s + \omega_g^2} \qquad (3.24)$$

نلاحظ أن الربح لم يعد لانهائياً عند تردد الشبكة إنما ربح الجزء الطنيني في المصحح هو k_r عند تردد الشبكة ω_g. كما أن المعامل ω_i يضيف هوامشاً للربح الطنيني حول تردد الشبكة، حيث أن الربح عند الترددات $\omega_g \pm \omega_i$ هو $k_r/\sqrt{2}$. عادة يتم اختيار قيمة ω_i لتكون $1\%\omega_g$ أو وفقاً لهوامش تغير تردد عمل الشبكة. يوضح كل من الشكليين: الشكل3-28 والشكل3-29 مخطط بود للمصحح PR عند قيم مختلفة لكل من k_p و k_r [43].



الشكل3-28 مخطط بود لمصحح تناسبي طنيني من أجل قيم مختلفة للربح الطنيني عند $k_p = 10$.



الشكل3-29 مخطط بود لمصحح تناسبي طنيني من أجل قيم مختلفة للربح التناسبي عند $k_r = 500$.

نلاحظ من مخططات بود السابقة أن المصحح التناسبي الطنيني يكافئ مصحح تناسبي في الترددات البعيدة عن تردد الشبكة، وأن زيادة الربح الطنيني سيزيد الأثر على صفحة مخطط بود للمصحح.

8- تصميم معاملات التصحيح:

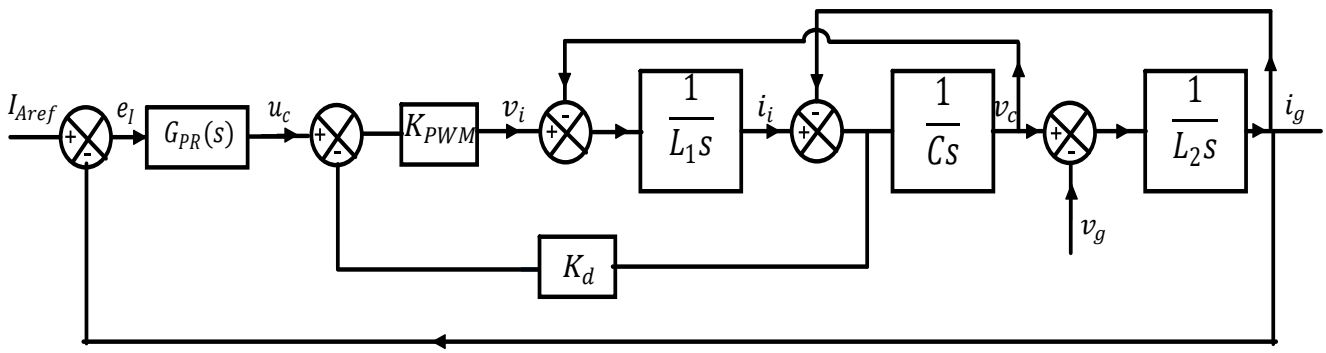
يوضح الشكل3-30 مخطط لابلاس للحلقة المغلقة للنظام مع حلقة التخميد، الذي يكافئ مخطط لابلاس في الشكل3-31 حيث $G_1(s)$، $G_2(s)$ معطاة في المعادلات (3.20) و(3.21) ومنه نجد أن النظام في الحلقة المغلقة يعطى بمايلي:

$$i_g = \frac{G_{ol}(s)}{1+G_{ol}(s)} I_{ref} + \frac{G_2(s)}{1+G_{ol}(s)} v_g(s) \qquad (3.25)$$

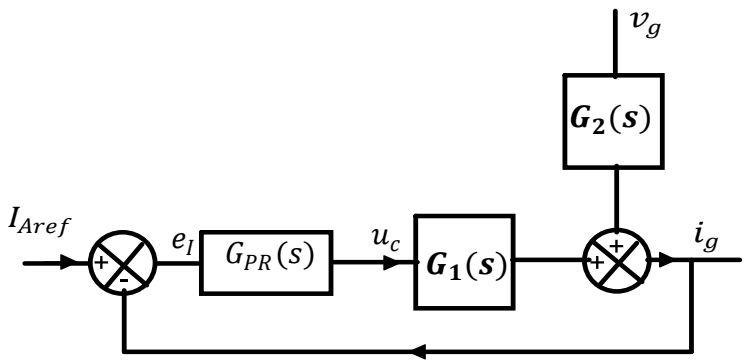
حيث:

$$G_{ol} = G_{PR} G_1 \qquad (3.26)$$

إن استقرار النظام يعتمد على ربح الحلقة المفتوحة $G_{ol}(s)$، كما نلاحظ أن الحد الناجم عن جهد الشبكة سيساهم في الخطأ السكوني للتيار في ملاحقة الإشارة المرجعية، ولكن كون ربح المصحح PR كبيراً عند تردد الشبكة، هذا يساهم في رفض الحد المتعلق بجهد الشبكة وتصغير مقدار الخطأ السكوني في الملاحقة في كل من المطال والصفحة.



الشكل3-30 مخطط لابلاس للحلقة المغلقة للنظام مع حلقة التخميد.



الشكل3-31 مخطط لابلاس للحلقة المغلقة للنظام مع حلقة التخميد بدلالة تابعي التحويل G_1 و G_2.

يجب على المتحكم المصـمم أن يحقق زمن اسـتجابة سـريع. ويحقق الرفض للتيار المسـبب من الشـبكة والتوافقيات الغير أساسية في جهد الشبكة. لذلك لابد من اختيار معاملات التصحيح بعناية لتحقيق هذه المواصفات في المصحح. هنالك العديد من المنشورات التي تبحث في اختيار معاملات التصحيح [43]، [37].

8-1- تحديد تردد القطع:

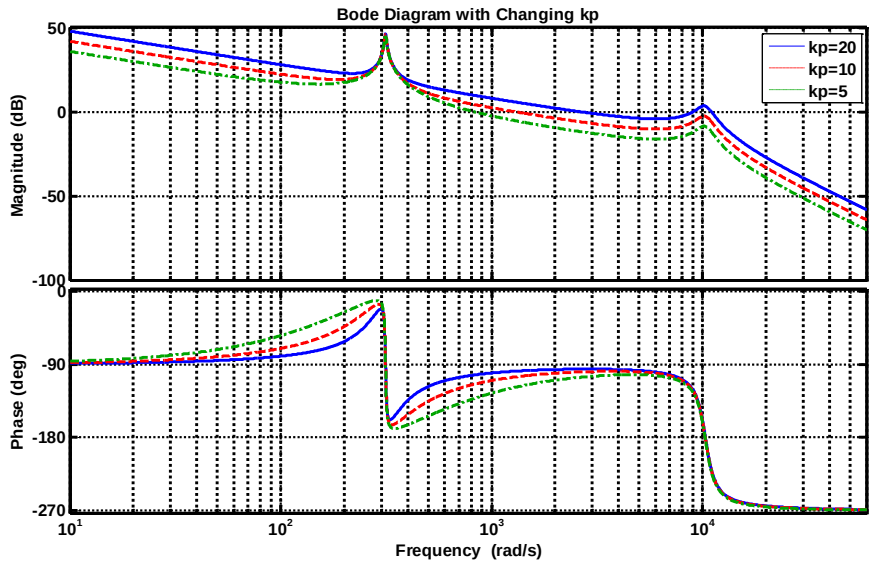
عادة مايتم اختيار تردد القطع لنظام الحلقة المغلقة ω_c بحيث يكون أعلى بكثير من تردد عمل الشبكة وأقل من تردد الطنين في المرشـح، وذلك لإتاحة إمكانية تحقيق هوامش اسـتقرار جيدة للنظام. ذكرنا سـابقا أن المصـحح PR يكافئ مصـــحح تناســـبي عند الترددات البعيدة عن تردد الشـــبكة. كما أن المرشـــح LCL يمكن تقريبه بمرشـــح $L = L_1 + L_2$ عند الترددات الأصـــغر من تردد الطنين أي أنه من الممكن إهمال تيار المكثفة عند هذه الترددات. وبذلك يمكن كتابة تابع تحويل الحلقة المفتوحة كمايلي:

$$G_{ol}(s) \approx \frac{k_p K_{PWM}}{(L_1 + L_2)s} \tag{3.27}$$

نلاحظ أن تردد القطع يعتمد فقط على k_p. عند تردد القطع $|G_{ol}(j\omega_c)| = 1$ بتعويض في العلاقة $s = j\omega_c$ نجد:

$$k_p = \frac{(L_1 + L_2)}{K_{PWM}}\omega_c \tag{3.28}$$

يوضح الشكل3-32 تغيرات تردد القطع اعتمادا على تغيير k_p.



الشكل3-32 مخطط بود لتابع الحلقة المفتوحة عند قيم مختلفة للربح التناسبي.

3-8- تحديد هامش الربح وهامش الصفحة:

يقطع تابع التحويل الصفحة -180° عند تردد الطنين لتحديد هامش ربح مناسب للنظام. يتم عن طريق اختيار مناسب لمعامل التخميد.

$$GM = -20\log(|G_{ol}(j\omega_{res})|) \tag{3.29}$$

$$GM \approx -20\log\left(\frac{k_p}{L_2 C K_d \omega_{res}^2}\right) \tag{3.30}$$

وبالتالي يمكن تحديد قيمة معامل التخميد K_d لتحقيق هامش استقرار مناسب كمايلي:

$$K_d = \frac{k_p}{L_2 C \omega_{res}^2} 10^{\frac{GM}{20}} \tag{3.31}$$

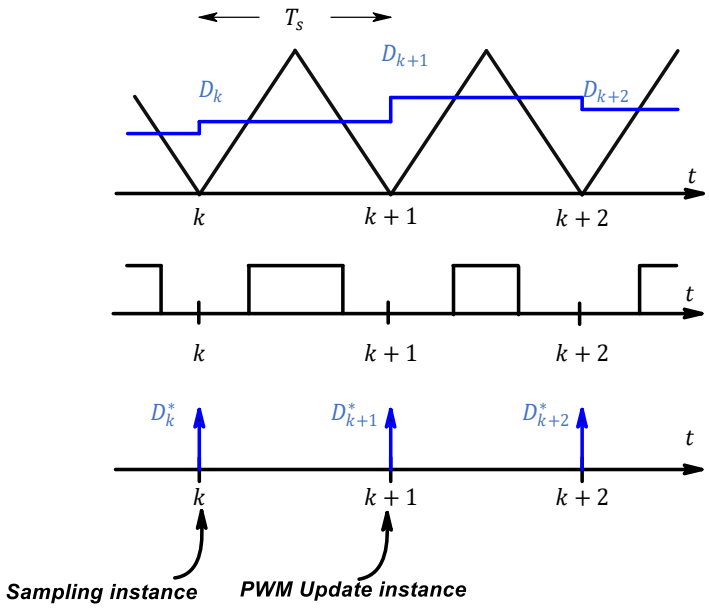
أما هامش الصفحة فيمكن أن يتم اختياره وفقاً لـ k_r كمايلي:

$$PM = \frac{\pi}{2} + \text{atan}\left(\frac{2\omega_i\omega_c(k_r + k_p)}{k_p(\omega_g^2 - \omega_c^2)}\right) - \text{atan}\left(\frac{2\omega_i\omega_c}{(\omega_g^2 - \omega_c^2)}\right) - \text{atan}\left(\frac{K_d K_{PWM}\omega_c}{L_1(\omega_{res}^2 - \omega_c^2)}\right) \tag{3.32}$$

المشكلة في النمذجة السابقة أن النتائج لن تكون دقيقة عند تصميم المتحكم رقمياً، وذلك بسبب وجود بعض التعديلات على نموذج النظام لابد من أخذها بعين الاعتبار [31]، [34].

9- التحكم الرقمي:

عند تصـــميم المتحكم الرقمي يوجد بعض النقاط المهمة والتي يجب مراعاتها في التصـــميم، حيث أن التقطيع المتزامن أمر ضـــروري في عملية التحكم للحصـــول على نتيجة جيدة للمقادير المقاســـة وتجنب التداخل في المجال الترددي Aliasing. يتم تنفيذ التقطيع المتزامن عن طريق أخذ العينات المقاســـة في اللحظات التي يصـــل فيها عداد إشـــارة الحامل في المعالج الصـــغري المســـتخدم DSP إلى أقصـــى مطال أو أدنى مطال أو كليهما. تقنية التقطيع هذه تسمح بقياس القيمة الوسطى للتيار وتجنب تقطيع التوافقيات الناجمة عن التقطيع. كما أنها تسمح بتجنب قياس ضجيج التداخل الكهرطيسي EMI الذي يظهر عند انتقال الترانزيستورات من حالة القطع إلى الوصل وبالعكس في المقادير المقاسة [31]، [33]، [34].



الشكل3-33 آلية التقطيع المتزامن.

يُظهر الشكل3-33 آلية التقطيع المتزامن لقيادة منوب حيث أن الأشارة المثلثية هي قيمة عداد توليد النبضات PWM في المعالج المستخدم للتحكم. يتم مقارنة قيمة سجل مقارنة الـ PWM، PWM comparison register بالإشارة المثلثية لتوليد إشارة الـ PWM. في اللحظة k مقاطعة تعديل عرض النبضة في المعالج ستحدث وسجل مقارنة تعديل عرض النبضة يتم تحديثه ليوافق نسبة التشغيل Duty Ratio D_k، وبشكل متزامن فإن المبدل التماثلي الرقمي ADC سيعمل على أخذ القياسات في هذه اللحظة. بعد ذلك فإن المتحكم سيعمل على حساب قيمة نسبة التشغيل المناسبة D_{k+1}

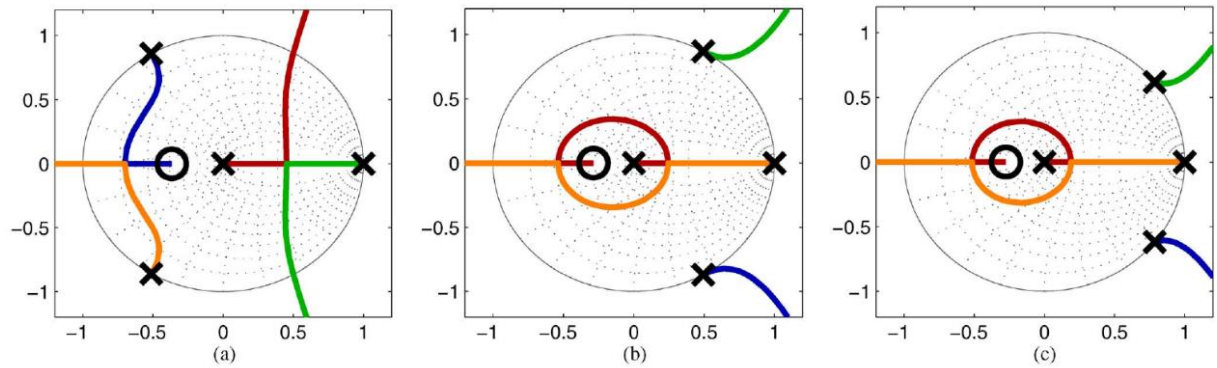
ويجب أن ينتهي الحساب قبل اللحظة $k+1$ حيث سجل مقارنة تعديل عرض النبضة في المعالج سيتحدث من جديد. هذا يعني أنه يوجد تأخير في التحكم زمن تقطيع واحد T_s. يسمى هذا التأخير عادة بتأخير الحساب و الذي يمكن نمذجته بمستوي لابلاس $G_{cd} = e^{-T_s s}$. بعد تعديل سجل قيمة المقارنة سيتم مقارنته بعداد الإشارة المثلثية لتوليد إشارة القيادة المناسبة، هذا السلوك يمكن نمذجته بماسك من الدرجة صفر ZOH. والذي بدوره سيؤدي أيضاً إلى تأخير في التحكم يمكن حسابه كما يلي:

$$G_h(j\omega) = \frac{1-e^{-j\omega T_s}}{j\omega} = \frac{e^{0.5*j\omega T_s} - e^{-0.5*j\omega T_s}}{j\omega} e^{-0.5*j\omega T_s}$$
$$= T_s \frac{\sin(0.5\omega T_s)}{0.5\omega T_s} e^{-0.5*j\omega T_s} \approx T_s e^{-0.5*j\omega T_s} \quad (3.33)$$

وبما أن طيف الإشارة المقطعة يكون مقسوماً على T_s ، يمكن أن نجد أن التأخير الناجم عن التعديل يساوي نصف زمن التقطيع ويمكن نمذجة هذا التأخير في مستو لابلاس $G_{md} = e^{-0.5T_s s}$. بأخذ أثر التأخير الناجم عن التقطيع يكون تابع تحويل الحلقة المفتوحة بالمستو z كمايلي [41]، [40]:

$$G_{ol}(z) = \frac{G_{PR}(z)K_{PWM}}{\omega_{res}(L_1+L_2)} \times$$
$$\frac{\omega_{res}T_s(z^2 - 2\cos(\omega_{res}T_s)\,z + 1) - (z-1)^2\sin(\omega_{res}T_s)}{(z-1)\left[z(z^2 - 2\cos(\omega_{res}T_s)\,z + 1) + \frac{K_d K_{PWM}}{\omega_{res}L_1}(z-1)\sin(\omega_{res}T_s)\right]} \quad (3.34)$$

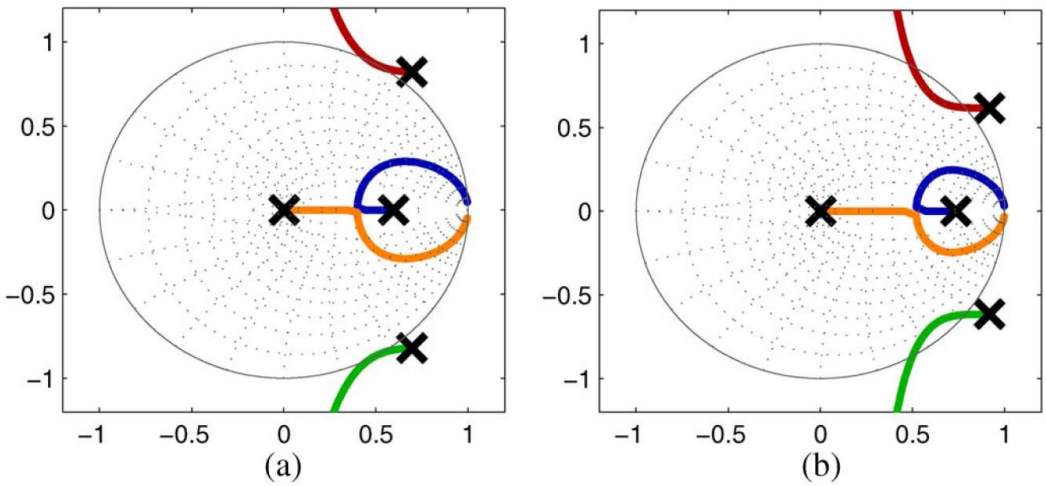
بما أن تردد الطنين أكبر بكثير من تردد الشبكة يمكن تقريب المصحح التناسبي الطنيني بتناسبي k_p لدراسة أثر التخميد الفعال. [41] وجد أن النظام السابق في الحلقة المغلقة لن يكون مستقراً عندما يكون تردد الطنين مساويا لسدس تردد التقطيع أي $\omega_{res} = \frac{\omega_s}{6}$، وذلك أياً كانت قيمة ربح التخميد المستخدم. وأن النظام سيكون مستقراً دون الحاجة لحلقة التخميد عندما $\omega_{res} > \frac{\omega_s}{6}$، وأن حلقة التخميد ضرورية عندما $\omega_{res} < \frac{\omega_s}{6}$، وبين هذه النتيجة من خلال دراسة أقطاب الحلقة المغلقة وتوضعها بالنسبة للدائرة الواحدية. حيث أن الشكل3-34 يوضح تغير تموضع أقطاب الحلقة المغلقة للنظام المقطع في المستوي z وذلك عند تغيير الربح التناسبي فقط للمصحح، مع عدم وجود حلقة التخميد الفعال . وذلك في الحالات $\omega_{res} < \frac{\omega_s}{6}$، $\omega_{res} > \frac{\omega_s}{6}$، $\omega_{res} = \frac{\omega_s}{6}$.



الشكل3-34 تغير أقطاب الحلقة المغلقة مع تغير الربح التناسبي: (a) $\omega_{res} > \frac{\omega_s}{6}$ ، (b) $\omega_{res} = \frac{\omega_s}{6}$ ، (c) $\omega_{res} < \frac{\omega_s}{6}$ [41].

من الواضح أنه من أجل تردد الطنين المرتفع يمكن من خلال تغيير الربح التناسبي تحقيق الاستقرار في النظام كما في الحالة (a). حيث أن تغيير الربح التناسبي يدخل أقطاب النظام داخل الدائرة الواحدية. أما في الحالات الأخرى فإن تغيير الربح التناسبي لن يجعل النظام مستقراً ولن تدخل الأقطاب داخل الدائرة الواحدية بتغيير الربح التناسبي ومن الضروري وجود حلقة تخميد فعال.

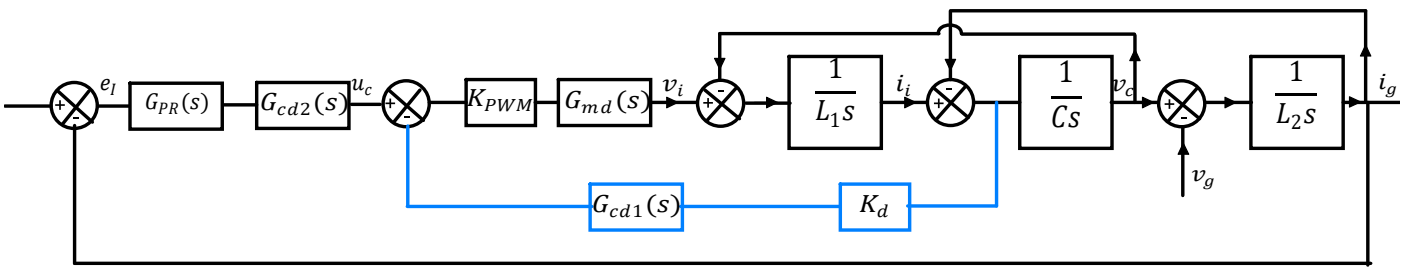
الشكل3-35 يوضح التخميد من أجل الحالات التي تكون فيها حلقة التخميد ضرورية، حيث أن زيادة التخميد في الحالة الحدية $\omega_{res} = \frac{\omega_s}{6}$ ستؤدي إلى أن الأقطاب تمس الدائرة الواحدية ولن تدخل داخلها مهما زاد معامل التخميد، أما في الحالة التي يكون فيها تردد الطنين أقل من سدس تردد التقطيع $\omega_{res} < \frac{\omega_s}{6}$ فمن الممكن للأقطاب أن تصبح مستقرةً بزيادة التخميد.



الشكل3-35 تغير أقطاب الحلقة المغلقة مع تغير معامل التخميد K_d : (a) $\omega_{res} = \frac{\omega_s}{6}$،(b) $\omega_{res} < \frac{\omega_s}{6}$ [41].

10- الممانعة الوهمية Virtual impedance [40]

لتوضيح سبب هذه الظاهرة لعل دراسة المسألة بمستو لابلاس ستكون أكثر وضوحاً، لذلك لابد من أخذ الآثار الناجمة عن تقطيع الجملة والتأخير الناجم عن التحكم الرقمي بعين الاعتبار في عملية التحكم كما وضـح ذلك [40]، [37]. وجدنا أن أثر التعديل سيؤدي إلى تأخير نصف زمن التقطيع وأن التأخير الناجم عن الحساب هو دور تقطيع. بإضافة هذه التأخيرات إلى نموذج الجملة في مستو لابلاس يصبح النموذج كما هو موضح في الشكل3-36. بشكل عام فإن $G_{cd1} = G_{cd2} = e^{-T_s S}$ و $G_{md} = e^{-0.5T_s S}$.



الشكل3-36 المخطط العام للنظام بوجود حلقة التخميد والتأخير.

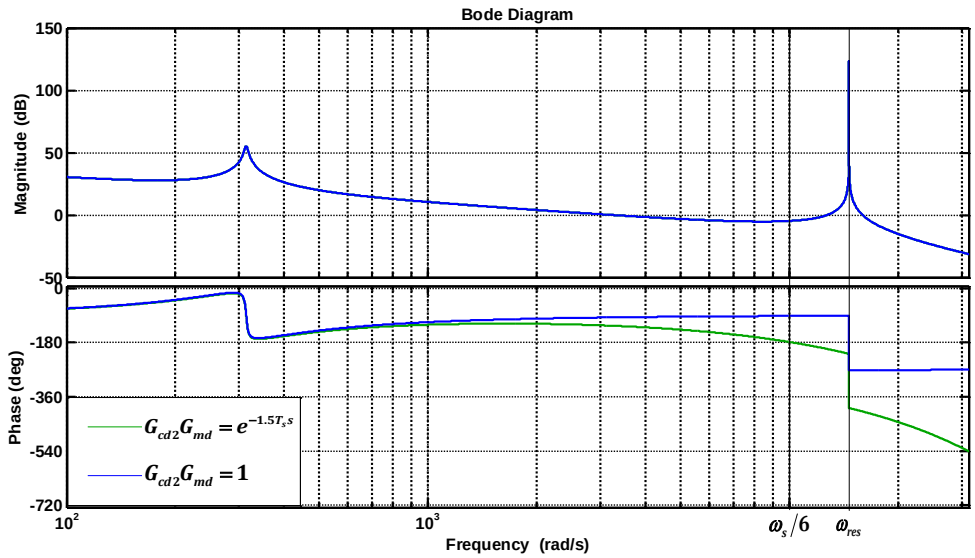
نوجد تابع الحلقة المفتوحة من الشكل3-36 فنجد:

$$G_{ol} = \frac{G_{PR} G_{cd2} G_{md} K_{PWM}}{L_1 L_2 Cs\left(s^2 + \frac{K_d K_{PWM} G_{md} G_{cd1}}{L_1} s + \omega_{res}^2\right)} = \frac{G_{PR} e^{-1.5T_s S} K_{PWM}}{L_1 L_2 Cs\left(s^2 + \frac{K_d K_{PWM} e^{-1.5T_s S}}{L_1} s + \omega_{res}^2\right)} \quad (3.35)$$

إذا فرضنا أن حلقة التخميد الفعال غير موجودة أي أن $K_d = 0$ في تابع تحويل الحلقة المفتوحة. فإن التأخير الناجم عن التعديل وتأخير الحساب في تابع تحويل الحلقة المفتوحة سيساهم في تخفيض صفحة تابع التحويل بمقدار 90º عند التردد $\omega = \frac{\omega_s}{6}$:

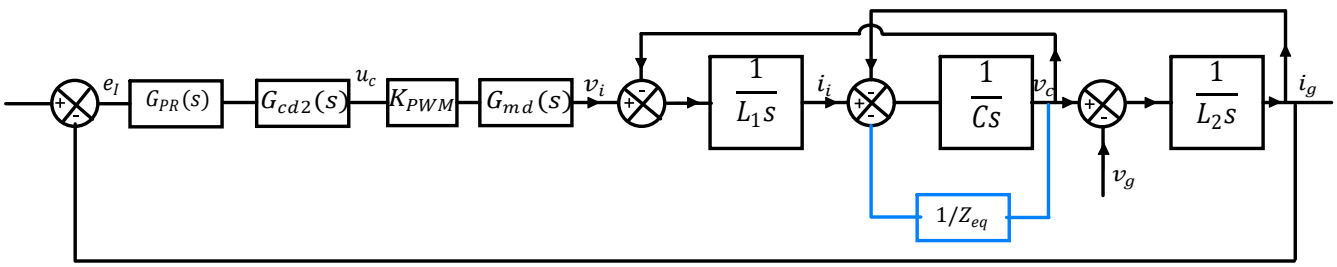
$$\angle G_{cd2} G_{md}\left(j\frac{\omega_s}{6}\right) = -1.5T_s \frac{\omega_s}{6} = -\frac{\pi}{2} \quad (3.36)$$

وهذا يعني أن مخطط بود للصفحة سيقطع الصفحة 180º- عند التردد $\frac{\omega_s}{6}$، وبالتالي عندما يكون تردد الطنين أعلى من هذا التردد، يمكن إيجاد ربح تناسبي مناسب للمصحح بحيث يكون مطال تابع تحويل الحلقة المفتوحة عند $\frac{\omega_s}{6}$ أقل من الواحد لنحصل على هامش ربح يحقق استقرار النظام. يوضح الشكل3-37 تابع تحويل الحلقة المفتوحة مع اعتبار أثر التأخير وبدون أخذ التأخير بعين الاعتبار وهذا ما يفسر النتيجة التي وجدها المرجع [41].

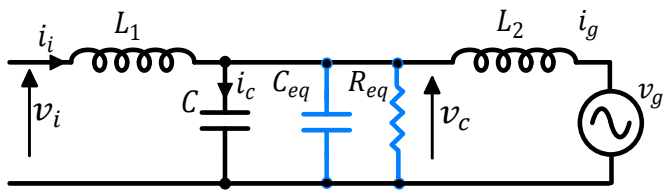


الشكل3-37 تابع تحويل الحلقة المفتوحة مع اعتبار أثر التأخير وبدون أخذ التأخير بعين الاعتبار.

وجدنا سابقاً أن إضافة حلقة التخميد الفعال يكافئ مقاومة وهمية مضافة على التفرع مع مكثفة المرشح. أما عند أخذ التأخير بعين الاعتبار فإن المسألة ستكون أكثر تعقيداً، حيث أن حلقة التخميد الفعال ستكافئ مقاومة عقدية وليست مقاومة حقيقية فقط [40]. كما هو موضح في الشكلين: الشكل3-38 والشكل3-39.



الشكل3-38 مخطط لابلاس للنظام مع حلقة تخميد والممانعة العقدية المكافئة.



الشكل3-39 الممانعة العقدية المكافئة بوجود حلقة التخميد والتأخير.

يمكن إيجاد علاقة الممانعة العقدية المكافئة كمايلي:

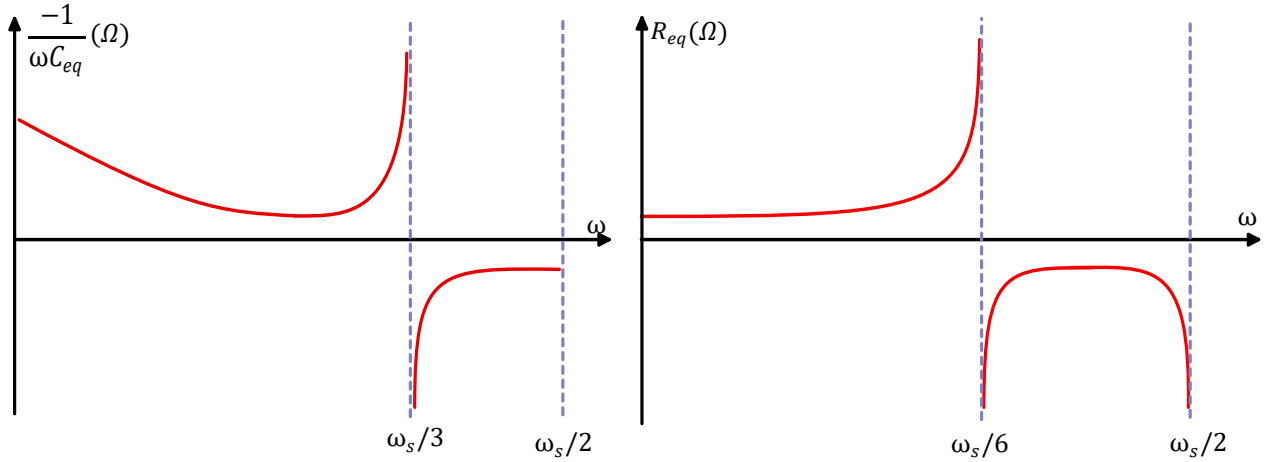
$$Z_{eq} = \frac{L_1}{CK_dK_{PWM}G_{md}G_{cd1}} = \frac{L_1}{CK_dK_{PWM}}e^{1.5T_sS} = R_ve^{1.5T_sS} \qquad (3.37)$$

والتي يمكن عرضــها على شــكل مقاومة على التفرع مع مكثفة على التفرع مع مكثفة المرشــح كما هو موضــح في الشكل3-39. بتعويض $s = j\omega$ يمكن بالمطابقة الحصول على كل من قيمة R_{eq} و C_{eq} كمايلي:

$$R_{eq} = \frac{R_v}{\cos(1.5\omega T_s)} \qquad (3.38)$$

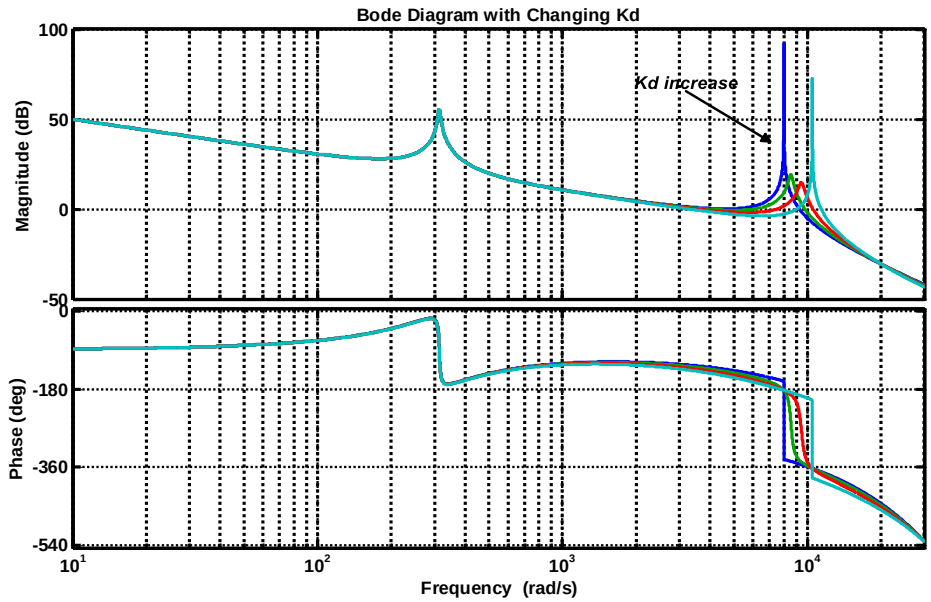
$$j\frac{1}{\omega C_{eq}} = -j\frac{R_v}{\sin(1.5\omega T_s)} \qquad (3.39)$$

تلعب المقاومة R_{eq} دوراً أساسياً في تخميد الطنين في النظام، لكن من الضروري أن نلاحظ أن هذه المقاومة تعتمد على تردد العمل، وأنها سالبة في الترددات $\omega > \omega_s/6$، أما المكثفة فهي سالبة من أجل الترددات الأصغر من ثلث تردد التقطيع. من الواضح أن إضافة هذه المكثفة على التفرع مع مكثفة المرشح ستساهم في تغيير تردد الطنين الفعلي للنظام. يوضح الشكل3-40 تغييرات قيمة كل من المقاومة المكافئة والمكثفة مع التردد.



الشكل3-40 تغييرات قيمة كل من المقاومة المكافئة والمكثفة مع التردد.

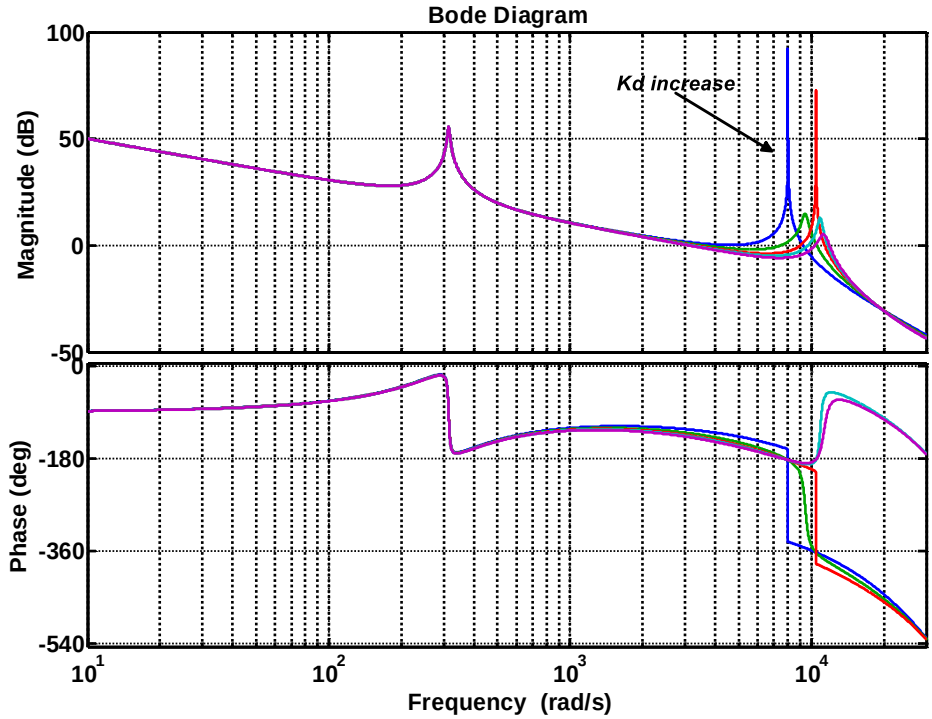
في الحالة التي يكون فيها تردد الطنين أقل من سدس تردد التقطيع $\omega_{res} < \frac{\omega_s}{6}$، من الواضح أن زيادة التخميد ستؤدي إلى إنقاص المكثفة الكلية للمرشح الناجمة عن جمع قيمة المكثفة الفعلية والوهمية وبالتالي فإن تردد الطنين الفعلي للنظام سوف يزداد. حتى يصل إلى التردد $\frac{\omega_s}{6}$ عندها ستصبح قيمة المقاومة الوهمية لانهائية وبالتالي فإن طنيناً جديداً سيحدث في النظام عند هذا التردد كما يوضح ذلك الشكل3-41. كما أن صفحة الحلقة المفتوحة سوف تقطع الـ -180° عند تردد الطنين. من الواضح من الشكل3-41 أن النظام سيكون مستقراً طالما أن ربح الحلقة المفتوحة عند تردد الطنين بالـ dB سالباً في هذه الحالة [40].



الشكل3-41 زيادة التخميد عندما $\omega_{res} < \frac{\omega_s}{6}$ إلى أن يصل تردد الطنين إلى $\frac{\omega_s}{6}$.

عند وصول معامل التخميد إلى معامل التخميد الحدي K_{dc} الموضح بالعلاقة (3.40) والذي يصل عنده تردد الطنين إلى التردد $\frac{\omega_s}{6}$ [40]، فإن زيادة التخميد أكثر من ذلك سيجعل صفحة تابع التحويل تقطع الصفحة -180° مرة جديدة عند التردد $\frac{\omega_s}{6}$ وبصفحة متزايدة كما هو موضح في الشكل3-42.

$$K_{dc} = \frac{\omega_{res} L_1}{K_{PWM}} \frac{2\cos(\omega_{res} T_s) - 1}{\sin(\omega_{res} T_s)} \qquad (3.40)$$



الشكل3-42 زيادة التخميد أعلى من معامل التخميد الحدي K_{dc}.

حيث يتشكل في هذه الحالة $(K_d > K_{dc})$ قطبين غير مستقريين لتابع تحويل الحلقة المفتوحة، وذلك بسبب المقاومة الوهمية السالبة في الترددات الأعلى من سدس تردد التقطيع [40]. وبالتالي ليكون النظام في الحلقة المغلقة مستقراً في هذه الحالة يجب أن يكون الربح بالـــ dB سالباً عند تردد الطنين (قطع الصفحة 180º- بصفحة متناقصة) وأن يكون الربح بالـــ dB موجباً عندما تقطع الصفحة 180º- للمرة الثانية عند التردد $\frac{\omega_s}{6}$ [40]. وهذا ما يفسر صعوبة تحقيق هوامش استقرار كبيرة في حال كان تردد الطنين قريب من التردد $\frac{\omega_s}{6}$.

أما في الحالة الحدية عندما يكون $\omega_{res} = \frac{\omega_s}{6}$ فمن المســـتحيل تحقيق الاســـتقرار في هذه الحالة ولن تدخل أقطاب الحلقة المغلقة داخل الدائرة الواحدية.

نلاحظ من الدراسة السابقة أن وجود التأخير في تابع التحويل سيغير بشكل كبير أداء التخميد وقد يؤدي إلى ظهور المقاومة الوهمية السالبة وعدم استقرار النظام. وأنه من الصعب تحقيق تخميد جيد للنظام وتحقيق هوامش استقرار كافية في حال كان تردد الطنين قريباً من التردد $\frac{\omega_s}{6}$ ومن المستحيل جعل النظام مستقراً عندما $\omega_{res} = \frac{\omega_s}{6}$.

قمنا في هذا الفصـــل بدراســة مرجعية موســعة للمنوبات المربوطة بالشــبكة الكهربائية والطرائق المتبعة في التحكم بالتيار المحقون بالشبكة. كما وضحنا فائدة استخدام المرشح LCL على المرشح L في تخميد أثر التوافقيات الناجمة عن التقطيع. عرض هذا الفصـــل أيضـــاً الطرائق المتبعة في تخميد الطنين في المرشـــح LCL لتجنب عدم استقرار النظام ووضـح فوائد استخدام التخميد الفعال. كما وضـح أهمية استخدام المصـحح التناسـبي الطنيني PR للحصـول على خطأ سـكوني معدوم في التحكم بالتيار المحقون في الشـبكة. وضـحت الدراسـة المرجعية ضـرورة التقطيع المتزامن للقياســـات، كما بينت أن وجود التأخير في النظام ســـيغير بشـــكل كبير أداء التخميد الفعال ومن المستحيل جعل النظام مستقراً عندما يكون تردد الطنين مساوياً سدس تردد التقطيع. كما أنه من الصـعب الحصـول على نظام بهوامش استقرار جيدة عندما يكون تردد الطنين قريباً من سدس تردد التقطيع. سنعمل في الفصل اللاحق على تصميم المتحكم مع حلقة التخميد الفعال وعرض الحل المقترح لتجنب مشكلة التأخير في حلقة التخميد الفعال.

الفصل الرابع

تصميم قوانين التحكم وتحقيق التخميد الفعال

وجدنا من خلال الدراسة المرجعية أن التأخير في حلقة التخميد الفعال له آثار سلبية في استقرار النظام. حيث أنه قد يؤدي إلى ظهور مقاومة وهمية سالبة والتي تؤدي إلى ظهور أقطاب غير مستقرة في تابع تحويل الحلقة المفتوحة [40]، [41]. يوجد عدد من الحلول المقترحة لحل مشكلة التأخير ولتجنب قياس تيار المكثفة سنسردها في هذا الفصل. كما سنعمل على توضيح الطريقة المتبعة في التحكم بالنظام.

1- المقترحات لحل مشكلة التأخير:

وجدنا أن الممانعة الوهمية الناجمة عن وجود التأخير في النظام تعطى كمايلي:

$$Z_{eq} = \frac{L_1}{CK_d K_{PWM} G_{md} G_{cd1}} \tag{4.1}$$

تتعلق الممانعة الوهمية بشكل أساسي بالتأخير الناجم عن حلقة التخميد الفعال المرتبطة بتيار المكثفة وبالتالي في حال تخفيض التأخير G_{cd1}، يمكن أن تظهر الممانعة السالبة عند قيم أعلى للترددات ويمكن بذلك تحسين شروط استقرار النظام. لنفرض أن هذا التأخير قد ألغي أي $G_{cd1} = 1$ فيكون عندها المقاومة والمكثفة الوهميتين المكافئتين كمايلي:

$$R_{eq} = \frac{R_v}{\cos(0.5\omega T_s)} \tag{4.2}$$

$$j\frac{1}{\omega C_{eq}} = -j\frac{R_v}{\sin(0.5\omega T_s)} \tag{4.3}$$

وبالتالي فإن المقاومة الوهمية السالبة لن تظهر إلا عند الترددات $\omega > \frac{\omega_s}{2}$ وبذلك نستطيع في حال تخفيض التأخير الناجم عن الحلقة الداخلية إلغاء ظهور اللأقطاب الغير مستقرة في الحلقة المفتوحة وإمكانية تحقيق استقرار النظام بشروط أفضل بجوار التردد $\frac{\omega_s}{6}$.

اقترح [40] طريقة لتخفيض التأخير في حلقة التخميد الفعال وذلك عن طريق سحب لحظة تقطيع تيار المكثفة لتكون قريبةً إلى لحظة تحديث سجل الـــ PWM، لكن ذلك يعني عدم تحقيق التقطيع المتزامن وبالتالي ستظهر توافقيات مختلفة عن التوافقية الأساسية في قياس تيار المكثفة، أما إذا كانت متزامنة مع القمة فيمكن عندها أن تظهر المقاومة الوهمية السالبة عند $\frac{\omega_s}{4}$ وهو تردد أكبر من سدس تردد التقطيع، وبالتالي يمكن إعطاء هوامش استقرار أفضل للنظام.

كما اقترح [59] طريقة مماثلة ولكن أن تكون العينات المأخوذة قريبةً جداً من لحظة تحديث سجل الـــ PWM وبالتالي الاقتراب من التقطيع المتزامن أي التحديث في الزمن الحقيقي، ولكن ذلك يحتاج إلى معالج بقدرات كبيرة وذو فاصلة عائمة، حيث أنه [59] استخدم معالج بحيث يكون زمن التنجيز الكلي لحلقة التحكم مع التقطيع وقراءة العينات خلال 5 ميكرو ثانية.

يوجد أيضاً بعض المقترحات لتحقيق الاستقرار والتخميد الفعال دون الحاجة لقياس تيار المكثفة [53]، [42] ولكن أغلب هذه الطرق لم تناقش أثر وجود التأخير في التحكم. حيث عمل [53] على بناء مرشح فعال باستخدام مرشح LCL وتخميد الطنين بشكل فعال اعتماداً على تقدير تيار المكثفة مباشرة من النموذج، وذلك اعتماداً على حساب مشتق التيار المقاس حيث أن التيار المقاس كان تيار المنوب. لكن سلبية هذه الطريقة هي أن اشتقاق التيار سيضخم أثر الضجيج. في الواقع حساب تيار المكثفة اعتماداً على قياس التيار المحقون في الشبكة يحتاج إلى معرفة المشتق الثاني للتيار المقاس لحسابه. لكن عملياً تطبيق الاشتقاق مباشرةً على التيار المحقون سيضخم أثر الضجيج [42]. في المرجع [55] تم استخدام راصد موسع Extended State Observer ESO وهو أحد أشكال الرصد للدخل الغير معروف وكثيراً ما تُستخدم لتقدير الاضطرابات في أنظمة التحكم، حيث استُخدام هذا المقدر لتقدير جهد الشبكة وتيار المكثفة وذلك اعتماداً على قياس تيار المنوب. لكن أثر التاخير لم يناقش، كما أن التيار المقاس هو تيار المنوب وبالتالي فإن أخطاء عدم التعيين في بارامترات المرشح ستؤدي إلى خطأ تقدير التيار المحقون وستؤثر على تقدير جهد الشبكة. في المرجع [56]، [57] تم استخدام مرشح بحزمة ضيقة على خرج المتحكم لمنع الترددات القريبة من تردد الطنين من الدخول للمنوب.

2- الطريقة المقترحة:

في هذا البحث سيتم تصميم متحكم بالتيار المحقون في الشبكة. ينقسم التحكم إلى قسمين جزء للتحكم بالتيار باستخدام مصحح تناسبي تكاملي وحلقة تخميد فعال لمنع الطنين في التيار الناجم عن المرشح LCL، حيث أن التخميد سيتم دون الحاجة إلى حساس تيار إضافي، وذلك عن طريق تقدير تيار المكثفة عن طريق راصد بالزمن المقطع وإلغاء التأخير الناجم عن الحلقة الداخلية في التحكم دون الحاجة إلى معالج بقدرات عالية لتحقيق ذلك.

2-1- التقطيع وبناء الراصد Discretization and observation

لتجنب قياس تيار المكثفة وتحقيق التخميد في النظام سنعمل على بناء راصد رقمي لتقدير تيار المكثفة. النظام المعطى بفضاء الحالة بالعلاقة (3.11) يمكن تقطيعه بـ ZOH كمايلي:

$$X(k+1) = A_d X(k) + B_d u_i(k) + D_d v_g(k) \qquad (4.4)$$

حيث:

$$A_d = e^{AT} \ , B_d = A^{-1}(A_d - I_3)B \ , D_d = A^{-1}(A_d - I_3)D$$

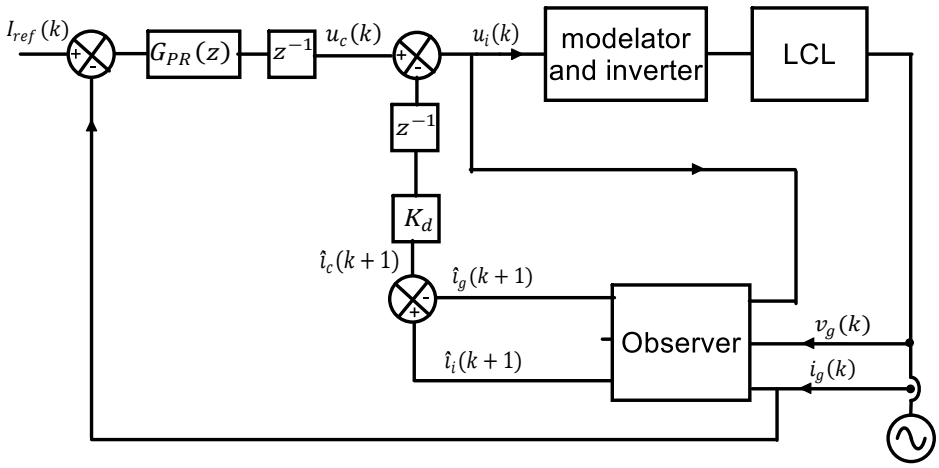
النظام قابل للرصد بقياس التيار المحقون بالشبكة حيث أن $rank(\mathcal{O}) = 3$ حيث $\mathcal{O}$ هي مصفوفة الرصد معطاة كمايلي:

$$\mathcal{O} = \begin{bmatrix} C \\ CA_d \\ CA_d^2 \end{bmatrix} \tag{4.5}$$

لتحقيق التخميد في التحكم دون قياس تيار المكثفة يمكن عن طريق بناء راصد بحالة كاملة كمايلي:

$$\hat{X}(k+1) = A_d\hat{X}(k) + B_d u_i(k) + D_d v_g(k) + LC\big(X(k) - \hat{X}(k)\big) \tag{4.6}$$

حيث $L = [l_1\ l_2\ l_3]^T$ هو شعاع أرباح الراصد. يمكن ملاحظة أن الراصد السابق يوفر فائدةً كبيرةً في تحقيق التخميد للنظام وهو أنه يعطي تقديراً مع خطوة أمامية لتيار المكثفة، حيث أنه يقوم بتقدير العينات بالحظة $k+1$ اعتماداً على القياسات في الحظة k، وبالتالي تجنب التأخير في حلقة التحكم الداخلية كما يوضح الشكل4-1، حيث أن هذا التأخير يلعب دوراً كبيراً في تحقيق استقرار النظام كما وجدنا في الفصل السابق.



الشكل4-1 المخطط الصندوقي لحلقة التحكم بالتيار المحقون في الشبكة مع وجود الراصد.

يوضح الشكل4-2 المخطط الصندوقي المصفوفاتي للمرشح والمنوب مع وجود الراصد، حيث أن تيار المكثفة مأخوذ كتغذية راجعة $K_d\hat{\imath}_c$ إلى دخل المنوب. حيث أن $K_d\hat{\imath}_c = K_d(\hat{\imath}_i - \hat{\imath}_g) = K\hat{X}$ وشعاع الأرباح $K = [-K_d\ 0\ K_d]$.

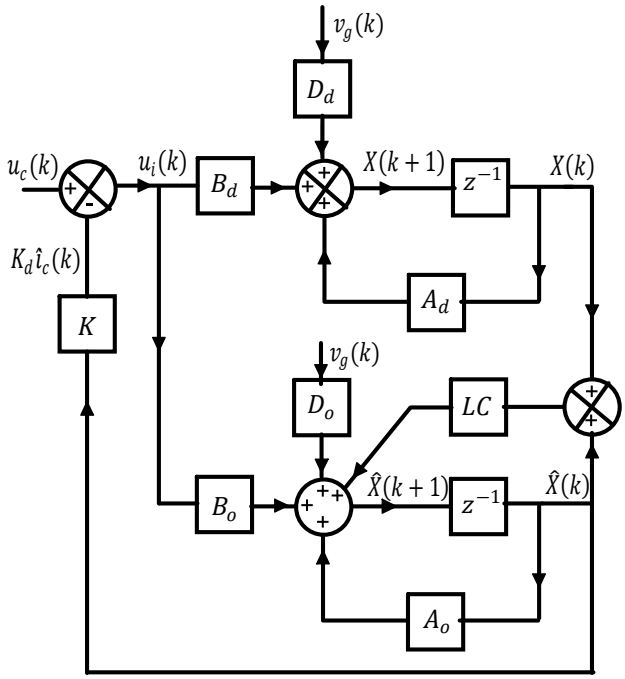
بالتالي من العلاقة (4.4) و(4.6) يمكن إيجاد ديناميك الخطأ بوجود الراصد كمايلي:

$$\tilde{X}(k+1) = X(k+1) - \hat{X}(k+1) = (A_d - L_dC_d)\tilde{X}(k) \tag{4.7}$$

وبالتالي فإن المرشح والمنوب مع الراصد الموضح في الشكل4-2 يعطى بفضاء الحالة كمايلي:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} X(k+1) \\ \tilde{X}(k+1) \end{bmatrix}}_{X_f(k+1)} = \underbrace{\begin{bmatrix} A_d - B_dK & B_dK \\ 0_{3\times3} & A_d - L_dC_d \end{bmatrix}}_{A_f} \underbrace{\begin{bmatrix} X(k) \\ \tilde{X}(k) \end{bmatrix}}_{X_f(k)} + \underbrace{\begin{bmatrix} B_d \\ 0_{3\times1} \end{bmatrix}}_{B_f} u_c(k) + \underbrace{\begin{bmatrix} D_d \\ 0_{3\times1} \end{bmatrix}}_{D_f} v_g(k) \tag{4.8}$$

$$y(k) = i_g(k) = [C\ 0_{1\times3}]X(k) \tag{4.9}$$



الشكل4-2 المخطط الصندوقي المصفوفاتي للمرشح والمنوب مع وجود الراصد.

اعتماداً على مبدأ الفصل separation principle فإن أقطاب النظام (4.8) مع الراصد تتكون من أقطاب ديناميك خطأ الراصد إضافة إلى أقطاب النظام كما لو أن الراصد غير موجود أي (أي أقطاب حلقة التخميد الفعال دون وجود تأخير). أي أن حلقة التخميد الفعال و الراصد يمكن تصميمها بشكل مستقل. وبالتالي فإن شعاع أرباح الراصد يجب أن يصمم بحيث لا يؤثر على تردد قطع النظام Bandwidth. المعادلة المميزة لخطأ الرصد هي كثير حدود من الدرجة الثالثة لها ثلاثة أقطاب، يمكن وضعها بشكل اعتباطي في المستوي z كون النظام قابل للرصد يمكن اختيار هذه الأقطاب كمايلي:

$$\det(zI_3 - A_d - C_dK) = (z - e^{-\omega_{o1}T_s})\left(z - e^{-(\xi - j\sqrt{1-\xi^2})\omega_{o2}T_s}\right)\left(z - e^{-(\xi + j\sqrt{1-\xi^2})\omega_{o2}T_s}\right) \quad (4.10)$$

والتي تتألف من قطب حقيقي وقطبين مترافقين عقديين. أقطاب الراصد يجب أن تُختار بحيث تكون أسرع من ضعف تردد القطع للنظام على الأقل. يمكن اختيار القطب الحقيقي ليكون قطباً مسيطراً والقطبين المترافقين الآخريين بحيث يكونان أسرع من القطب المسيطر، هذين القطبين المترافقين يوافقان نظام من الدرجة الثانية مواصفاته تتحدد بـ (ξ, ω_{o2}). وبالتالي فإن ديناميك الخطأ في الراصد سيتحدد بالقطب المسيطر.

2-2- تحديد المعاملات دون وجود تأخير حلقة التخميد الفعال

سنعمل على تحديد المعاملات المناسبة للمتحكم مع عدم وجود التأخير في حلقة التخميد الفعال لمنع ظهور الأقطاب الغير مستقرة في تابع تحويل الحلقة المفتوحة ولتحقيق الاستقرار بهوامش كافية. عند إلغاء تأخير الحلقة الداخلية أي $G_{cd1} = 1$ يصبح تابع تحويل الحلقة المفتوحة كما يلي:

$$G_{ol} = \frac{G_{PR} K_{PWM} e^{-1.5T_s S}}{L_1 L_2 C s \left(s^2 + \frac{K_d K_{PWM} e^{-0.5T_s S}}{L_1} s + \omega_{res}^2 \right)} \qquad (4.11)$$

1-2-2 تحديد تردد القطع:

كما رأينا سابقا فإن الربح التناسبي يتم اختياره بحيث يكون تردد القطع لنظام الحلقة المغلقة أسرع بكثير من تردد عمل الشبكة لتحقيق استجابة سريعة للنظام، بما أن تردد القطع أقل من تردد الطنين. يمكن تقريب تابع التحويل السابق في الترددات المنخفضة ليكون كمايلي:

$$|G_{ol}(s)| \approx \left| \frac{k_p K_{PWM} e^{-1.5T_s S}}{(L_1 + L_2) s} \right| \qquad (4.12)$$

وبالتالي يمكن تحديد الربح التناسبي المناسب لتحقيق تردد قطع معين ω_c:

$$|G_{ol}(j\omega_c)| = 1 \Longrightarrow k_p = \frac{(L_1 + L_2)}{K_{PWM}} \omega_c \qquad (4.13)$$

2-2-2 هامش الربح:

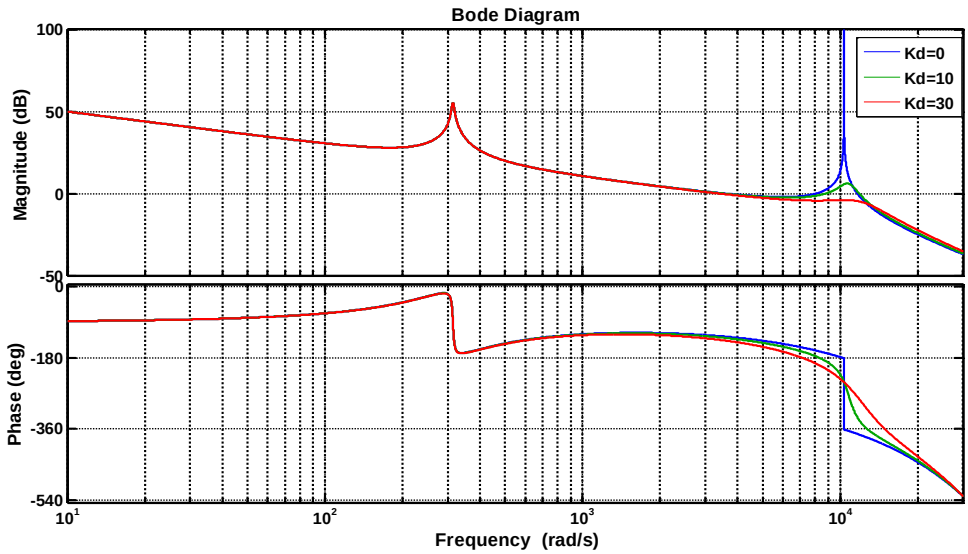
وجدنا سابقاً أن هامش الربح للنظام يمكن تحديده عند تردد الطنين حيث أن صفحة تابع التحويل تقطع الزاوية -180° عنده. أما عند إلغاء التأخير في حلقة التخميد فالأمر مختلف حيث من الممكن تغير التردد ω_0 الذي تقطع عنده صفحة تابع التحويل الزاوية -180° مع ربح التخميد K_d، كما يوضح ذلك الشكل3-4. يمكن تحديد التردد ω_0 كمايلي:

$$\angle G_{ol}(j\omega_0) = -\pi \Rightarrow \frac{\pi}{2} - 1.5T_s\omega_0 - \operatorname{atan}\left(\frac{K_d K_{PWM} \omega_0 \cos(0.5T_s\omega_0)}{L_1(\omega_{res}^2 - \omega_0^2) + K_d K_{PWM} \omega_0 \sin(0.5T_s\omega_0)} \right) = 0 \qquad (4.14)$$

وبالتالي فإن هامش الربح الموافق سيكون:

$$GM = -20 \log\left(\frac{k_p K_{PWM} / L_2 C \omega_0}{\sqrt{(L_1(\omega_{res}^2 - \omega_0^2) + K_d K_{PWM} \omega_0 \sin(0.5T_s\omega_0))^2 + (K_d K_{PWM} \omega_0 \cos(0.5T_s\omega_0))^2}} \right) \qquad (4.15)$$

وبالتالي يمكن تحديد معامل التخميد K_d للحصـــول على هامش ربح مناســب $GM > 3dB$. يمكن من الشــكل3-4 ملاحظة أن التخميد المرتفع سيؤثر على هامش الصفحة بشكلٍ سيءٍ، حيث سينقص صفحة تابع التحويل عند تردد القطع.



الشكل3-4 مخطط بود لنظام الحلقة المفتوحة بزيادة ربح التخميد عند تردد طنين $\omega_{res} = 1.65kHz$ وتردد التقطيع $\omega_s = 10kHz$ أي $\omega_{res} \approx \omega_s/6$.

3-2-2 هامش الصفحة:

بعد اختيار كل من k_p و K_d للحصول على تردد قطع وهامش ربح مناسب. هامش الصفحة يتم تحديده عن طريق اختيار ربح طنيني مناسب k_r. بشكل عام يتم اختيار هامش الصفحة ليكون $PM > 45^o$. يمكن تحديد هامش الصفحة كمايلي:

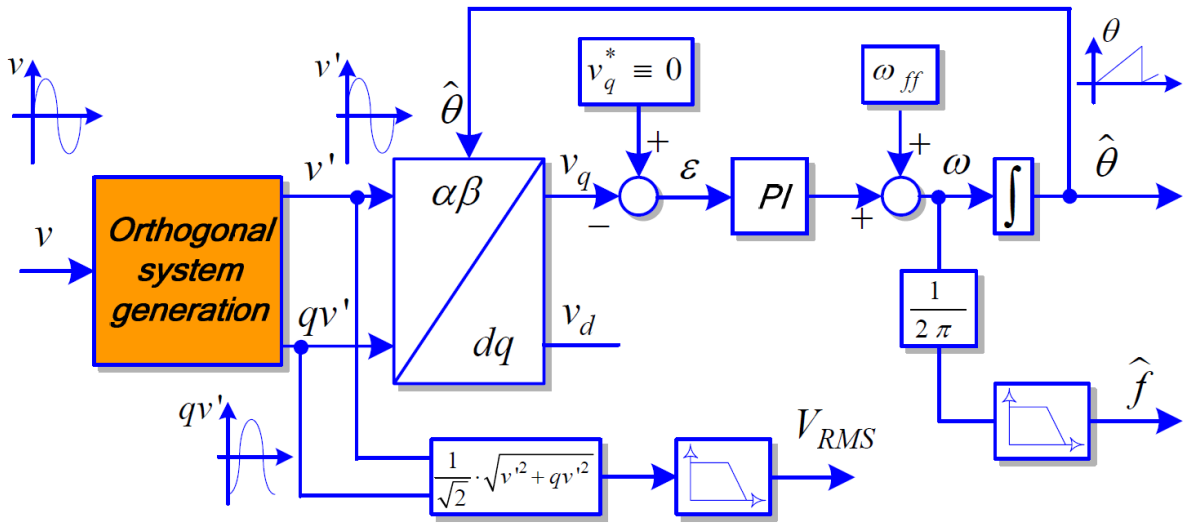
$$PM = \pi + \angle G_{ol}(s) \Longrightarrow$$

$$PM = \frac{\pi}{2} - 1.5T_s\omega_c + \text{atan}\left(\frac{2\omega_i\omega_c(k_r + k_p)}{k_p(\omega_g^2 - \omega_c^2)}\right) - \text{atan}\left(\frac{2\omega_i\omega_c}{(\omega_g^2 - \omega_c^2)}\right) - \text{atan}\left(\frac{K_dK_{PWM}\omega_c\cos(0.5T_s\omega_c)}{L_1(\omega_{res}^2 - \omega_c^2) + K_dK_{PWM}\omega_c\sin(0.5T_s\omega_c)}\right) \quad (4.16)$$

وبذلك يمكن اختيار معاملات التصحيح المناسبة للحصول على سرعة استجابة مناسبة وهوامش استقرار كافية.

3- حلقة إقفال الطور PLL:

تلعب حلقة إقفال الطور دوراً هاماً في التحكم بالتيار المحقون في الشبكة الكهربائية. حيث تعمل على تقدير صفحة الشبكة ومن ثم استخدامها في توليد التيار المرجعي للمنوب. هنالك العديد من الدراسات لحلقة إقفال الطور في المراجع العلمية[78]، [79]، بالنسبة لنظام أحادي الطور فيمكن أن تكون حلقة إقفال الطور كما يوضح الشكل4-4.



الشكل4-4 المخطط العام لحلقة إقفال الطور لنظام أحادي الطور[79].

يمكن توليد إشارتين متعامدتين بالتوافقية الأساسية اعتباراً من إشارة الدخل وهي إشارة جهد الشبكة. يتم ذلك عن طريق مرشح تمرير حزمة بتخميد مناسب لتوليد الإشارة v' كمايلي:

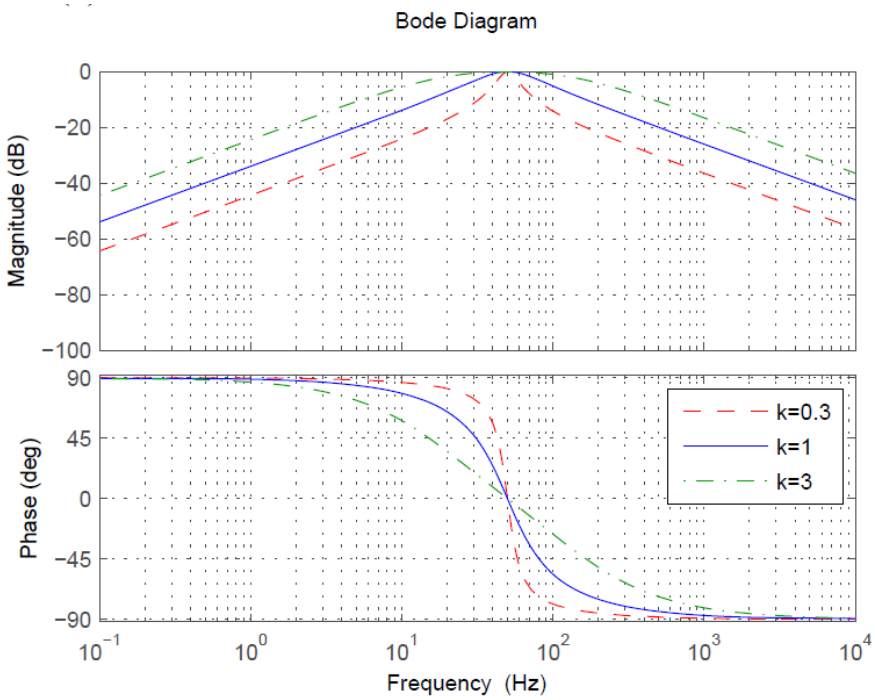
$$\frac{v'}{v}(s) = \frac{k\omega_g s}{s^2 + k\omega_g s + \omega_g^2} \qquad (4.17)$$

حيث أن الثابت k يحدد عرض حزمة التمرير. يوضح الشكل4-5 مخطط بود لتابع التحويل المعطي في العلاقة (4.17) وذلك عند قيم مختلفة للثابت k. يتم توليد إشارة متعامدة مع الإشارة v' هي الإشارة qv' كمايلي:

$$\frac{qv'}{v}(s) = \frac{k\omega_g^2}{s^2 + k\omega_g s + \omega_g^2} \qquad (4.18)$$

وبالتالي فإن مطال جهد الشبكة يكون:

$$V_g = \sqrt{v'^2 + qv^2} \qquad (4.19)$$

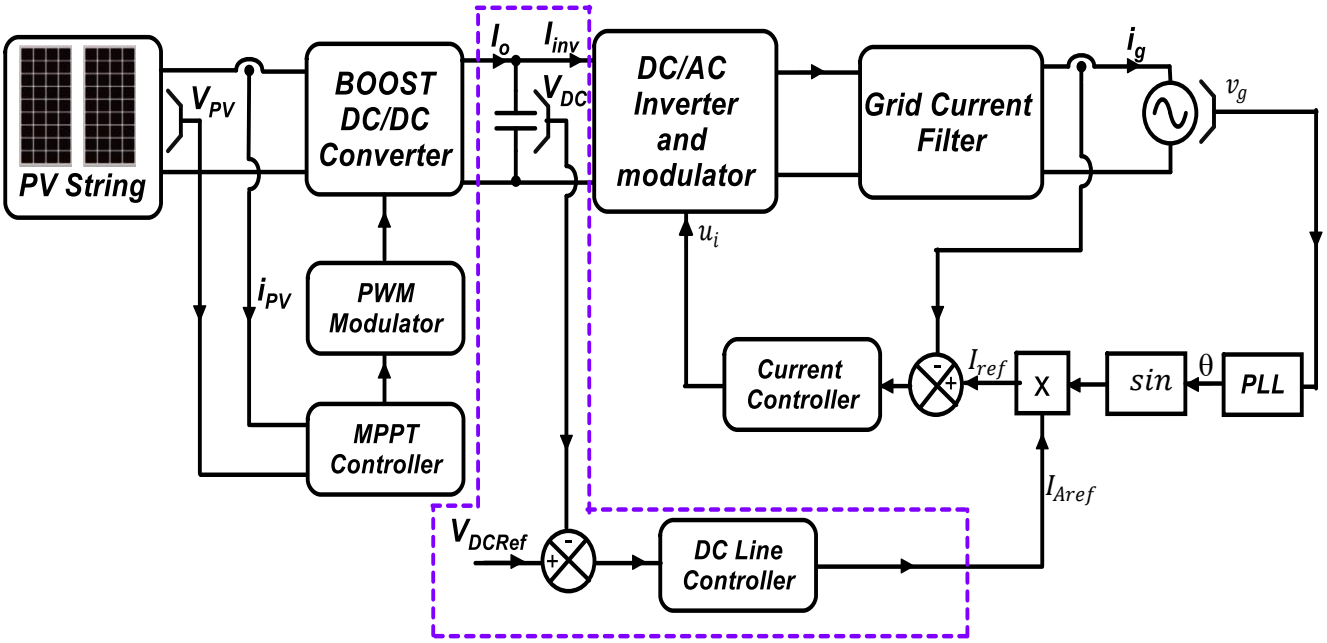


الشكل4-5 مخطط بود لمرشح تمرير الحزمة في حلقة إقفال الطور عند قيم مختلفة لعرض حزمة التمرير.

وبالتالي فإن حلقة إقفال الطور تعطي إشارةً مرجعيةً مقيسةً على توافق مع جهد الشبكة وبالتوافقية الأساسية لجهد الشبكة، بضرب هذه الإشارة بالمطال المرغوب للتيار المحقون في الشبكة، تتولد الإشارة المرجعية الجيبية المطلوبة. سننتقل في الفقرة التالية لتصميم متحكم للخط الساكن وهو متحكم مهم لتحقيق توازن الاستطاعة الواردة من الألواح الشمسية والمحقونة في الشبكة.

4- تصميم مصحح جهد الخط الساكن:

يعمل المبدل الرافع للجهد على ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى للألواح الشمسية وصبها بالخط الساكن. كما يتم التحكم بتيار المنوب لصب هذه الاستطاعة في الشبكة. بالتالي يجب تحقيق التوازن بين الاستطاعة القادمة من الألواح الشمسية والمصبوبة بالشبكة. لتحقيق هذا التوازن يتم تنظيم جهد الخط الساكن عن طريق حلقات متعاقبة Cascade control loops، حلقة تحكم بجهد الخط الساكن مع مصحح يعطي قيمة مرجعية للتيار المحقون في الشبكة، كما هي موضحة في المخطط العام للنظام ضمن إطار منقط في الشكل4-6. في حال كانت الاستطاعة المستقبلة من الألواح الشمسية P_{pv} أعلى من الأستطاعة المحقونة P في الشبكة سيرتفع جهد الخط الساكن، لمنع ذلك سيعمل المصحح في الحلقة الخارجية إلى رفع القيمة المرجعية للتيار المحقون في الشبكة بحيث يعود التوازن بين الاستطاعة المستقبلة والاستطاعة المحقونة في الشبكة. وفي حالة انخفاض الطاقة الواردة من الألواح الشمسية سيعمل المصحح على خفض قيمة التيار المحقون في الشبكة.



الشكل4-6 المخطط العام للنظام يظهر فيه مصحح جهد الخط الساكن ضمن إطار منقط.

بالتالي يمكن أن تكون المعادلة التي تحكم جهد الخط الساكن:

$$\frac{1}{2}C\frac{dV_{DC}^2}{dt} = P_{pv} - P \tag{4.20}$$

وبما أن الاستطاعة الوسطى المقدمة للشبكة هي:

$$P = \frac{1}{2}I_g V_g \tag{4.21}$$

حيث I_g هو مطال التيار المحقون بالشبكة و V_g هو مطال جهد الشبكة، يمكن أن نكتب:

$$C\frac{d(V_{DC}(t))}{dt} = I_o - I_{inv} \tag{4.22}$$

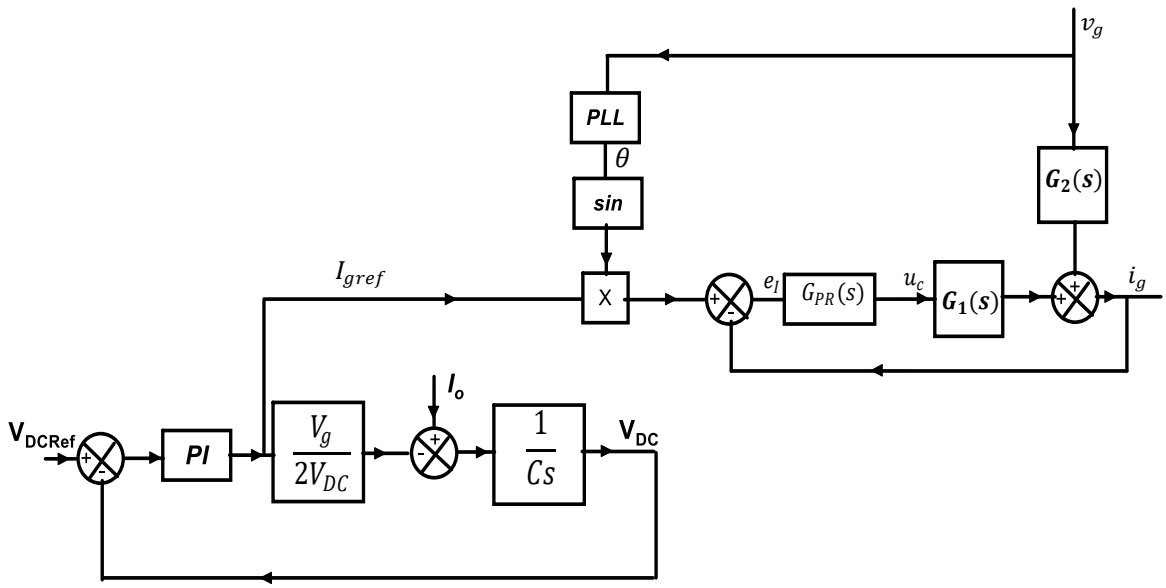
حيث أن I_o هو تيار خرج المبدل الرافع للجهد و I_{inv} تيار دخل المنوب. يمكن إيجاد القيمة الوســـطى لتيار المنوب كمايلي:

$$I_{inv} = \frac{P}{V_{DC}} = \frac{1}{2}\frac{I_g V_g}{V_{DC}} \tag{4.23}$$

وبالتالي نجد أن تغيير مطال التيار المحقون في الشبكة ينعكس على تغير قيمة جهد الخط الساكن:

$$C\frac{d(V_{DC}(t))}{dt} = I_o - \frac{V_g}{2V_{DC}}I_g \tag{4.24}$$

يوضـــح الشـــكل4-7 المخطط الصـــندوق للتحكم بالتيار المحقون في الشـــبكة وآلية التحكم المتبعة لتنظيم جهد الخط الساكن، اعتماداً على أن حلقة التحكم بالتيار المحقون في الشبكة سريعة مقارنة بالتحكم بجهد الخط الساكن.



الشكل4-7 المخطط الصندوق للتحكم بالتيار المحقون في الشبكة وآلية التحكم في جهد الخط الساكن.

وبالتالي يمكن كتابة تابع تحويل جهد الخط الساكن في مستو لابلاس كمايلي:

$$\frac{V_{DC}(s)}{I_g(s)} = \frac{-V_g}{2V_{DC}} \times \frac{1}{Cs} \tag{4.25}$$

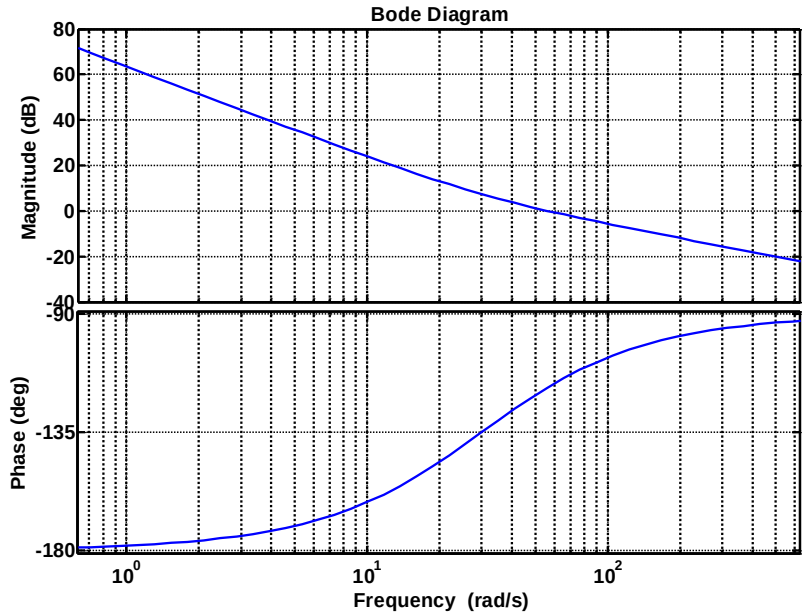
والمصحح:

$$PI(s) = K_{pDC} + \frac{K_i}{s} \tag{4.26}$$

وبالتالي فإن الحلقة المفتوحة لجهد الخط الساكن:

$$G_{olDC} = -PI(s) * \frac{V_g}{2V_{DC}} \times \frac{1}{Cs} \tag{4.27}$$

ومنه يمكن اختيار قيم المصحح التناسبي التكاملي للحصول على هوامش استقرار مناسبة. يوضح الشكل4-8 مخطط بود للحلقة المفتوحة لتابع تحويل الجهد مع المصحح PI.



الشكل4-8 مخطط بود للحلقة المفتوحة مع مصحح PI لجهد الخط الساكن.

عملنا في هذا الفصل على تقديم الطريقة المقترحة لحل مشكلة التأخير في حلقة التخميد الفعال وتجنب استخدام حساس تيار إضافي لقياس تيار مكثفة المرشح، وذلك عن طريق تصميم راصد في الزمن المقطع بحيث يعطي تقديراً بخطوة أمامية لتيار المكثفة. كما عملنا على تصميم المتحكم التناسبي الطنيني وربح التخميد الفعال للحصول على استجابة جيدة وهوامش استقرار كافية لحلقة التحكم بالتيار المحقون في الشبكة. كما عرضنا تصميم حلقة إقفال الطور PLL لتوليد الإشارة المرجعية المرغوبة للتيار المحقون في الشبكة وعلى توافق معها. كما تم تصميم مصحح PI للتحكم بجهد الخط الساكن وتحقيق التوازن بين الاستطاعة المحقونة في الشبكة والاستطاعة الوردة من الألواح الشمسية. في الفصل اللاحق سنعمل على التحقق من التصميم باستخدام المحاكاة والتنفيذ العملي.

الفصل الخامس

نتائج المحاكاة والتنفيذ العملي

للتحقق من النتائج النظرية وطريقة التخميد الفعال المقترحة والتحكم بالتيار المحقون في الشـــبكة. يعرض هذا الفصل بناء نموذج محاكاة للمنوب مع المتحكم ضمن بيئة ماتلاب MATLAB/Simulink. كما يعرض هذا الفصل تنفيذ النظام عملياً للتأكد من فعالية الطريقة المقترحة في التخميد والتحكم بالتيار المحقون في الشـــبكة والتحكم بالخط الســاكن وملاحقة نقطة الاســتطاعة العظمى. وســيتطرق هذا الفصــل أيضــاً لتعويض التوافقيات الموجودة في التيار المحقون في الشبكة وذلك لتحقيق المعايير العالمية للحقن في الشبكة.

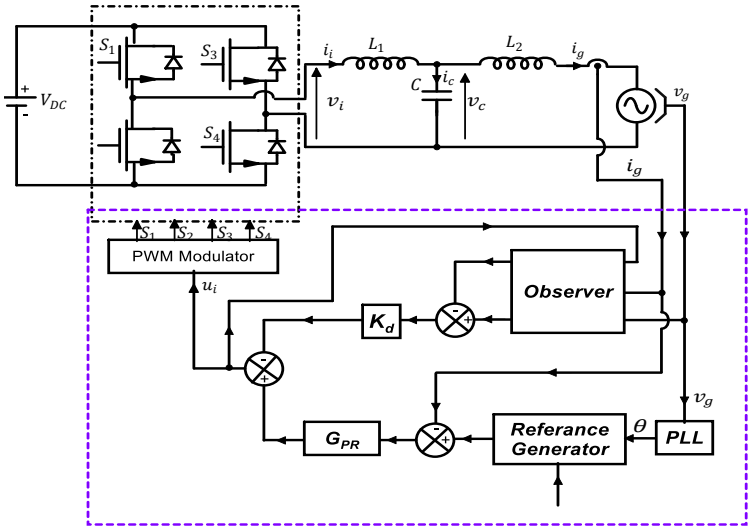
1- اختبارات المحاكاة للمنوب

يوضــح الجدول5-1 معاملات النموذج المســتخدمة في المحاكاة. حيث تم اختبار المنوب المربوط مع الشــبكة باستطاعة $1KW$ على جهد الشبكة $220V$ وتردد $50Hz$ وهي المواصفات الإسمية للشبكة المحلية. كما تم اختيار معاملات مرشــح الاســتطاعة بحيث يكون تردد الطنين عند ســدس تردد التقطيع وذلك لاختبار فعالية طريقة التخميد المقترحة.

Inverter side inductance L_1	*6mH*
Grid side inductance L_2	*2.1mH*
Filter capacitor C	*6μF*
Resonant frequency f_{res}	*1.65kHz*
Sampling frequency f_s	*10kHz*
Grid frequency f_g	*50Hz*
Grid voltage v_g	*220Vrms*
DC line voltage V_{DC}	*370V*
Power P	*1KW*

الجدول5-1 معاملات النموذج المستخدمة في المحاكاة.

يوضح الشكل5-1 المخطط الصندوقي للمنوب مع نظام التحكم بالتيار المحقون في الشبكة وحلقة التخميد الفعال المنجز في بيئة المحاكاة.



الشكل5-1 المخطط الصندوقي للمنوب مع نظام التحكم بالتيار المحقون بالشبكة.

يتم اختيار معاملات التصحيح بشكل مناسب لتحقيق سرعة استجابة مناسبة للتيار المحقون في الشبكة، وتحقيق هوامش استقرار كافية للنظام. يمكن اختيار تردد القطع للنظام ω_c بحيث يكون أعلى بما يكفي من تردد الشبكة $\omega_g = 2\pi 50 rad/s$ لتحقيق سرعة استجابة جيدة للنظام. باختيار تردد القطع بحيث يكون عشر أضعاف تردد عمل الشبكة أي $\omega_c = 10\omega_g$، وبالتالي يمكن تحديد الربح التناسبي من العلاقة (4.13)، ولمراعاة تغير تردد عمل الشبكة 1% بجوار التردد الإسمي $50Hz$ نختار عرض حزمة الجزء الطنيني للمصحح التناسبي الطنيني بحيث تراعي هذا التغير وذلك باختيار $\omega_i = 2\pi 0.5 rad/s$. أما معامل التخميد الفعال K_d والربح الطنيني k_r للمصحح PR، يتم اختيارهما بحيث يحققان $GM > 3dB$ و $PM > 45^o$ وذلك عن طريق حل المعادلات (4.14) و(4.15) و(4.16) رقمياً، حيث يمكن أن نجد أن اختيار $k_r = 1500$ و $K_d = 30$ يحقق $GM \approx 4.2$ و $PM \approx 45^o$.

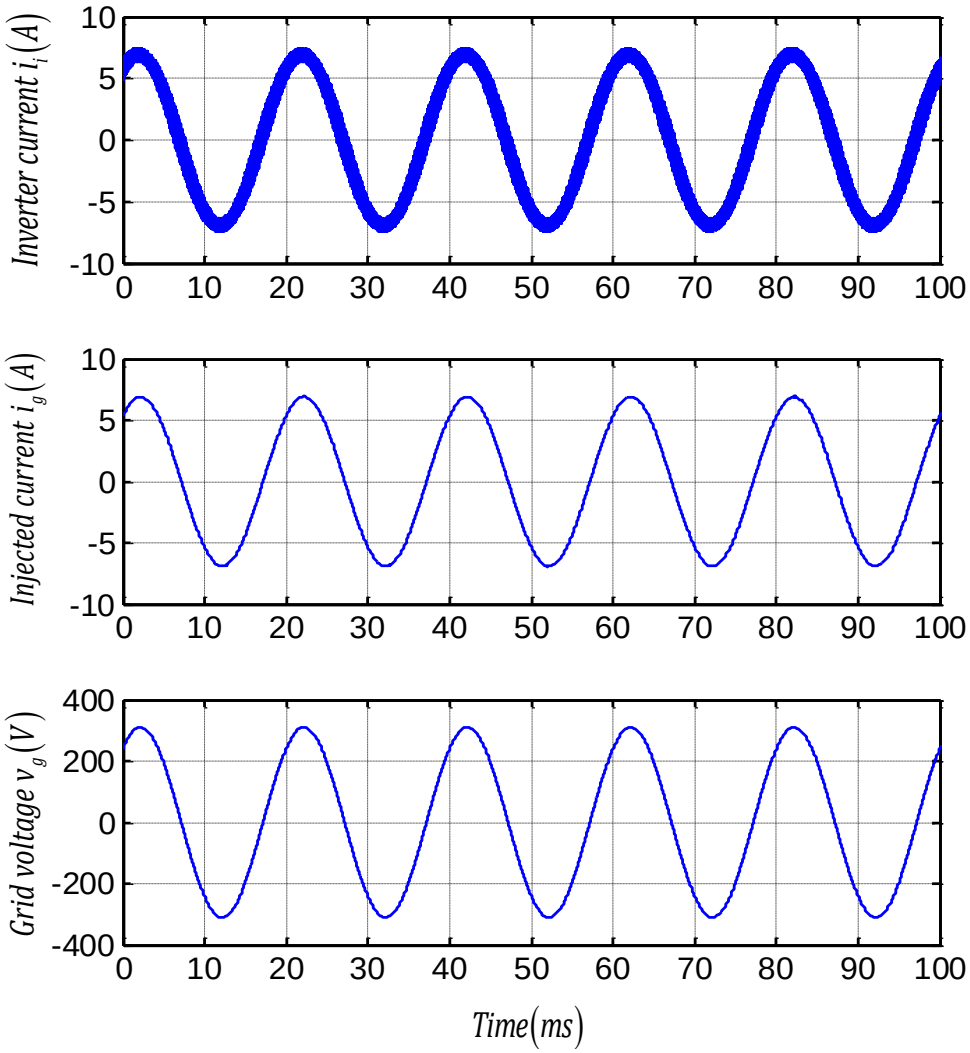
يمكن اختيار القطب المسيطر للراصد في المعادلة المميزة (4.10)، بحيث يكون أسرع بثلاث مرات من تردد القطع للنظام أي $\omega_{o1} = 3\omega_c$، وباختيار (ω_{o2}, ξ) بحيث $\omega_{o2} = 5\omega_c$ و $\xi = 0.7$ بذلك يكون الجزء المكافئ للقطبين المترافقين في المعادلة المميزة أسرع من القطب المسيطر.

أما بالنسبة لحلقة إقفال الطور PLL تم اختيار عرض حزمة التمرير $50Hz$ أي $k = 1$.

الشكل الشائع لتقطيع المصحح التناسبي الطنيني هو عن طريق تحويل Tustin مع تزييف التردد بجوار تردد الطنين with pre-warping [43]، وذلك كون هذا التقطيع يعطي تقريباً جيداً لهذا المصحح بجوار تردد الشبكة، كما وضح ذلك المرجع [45]. وبالتالي يمكن كتابة صيغة المصحح التناسبي الطنيني بالمستو z كما يلي:

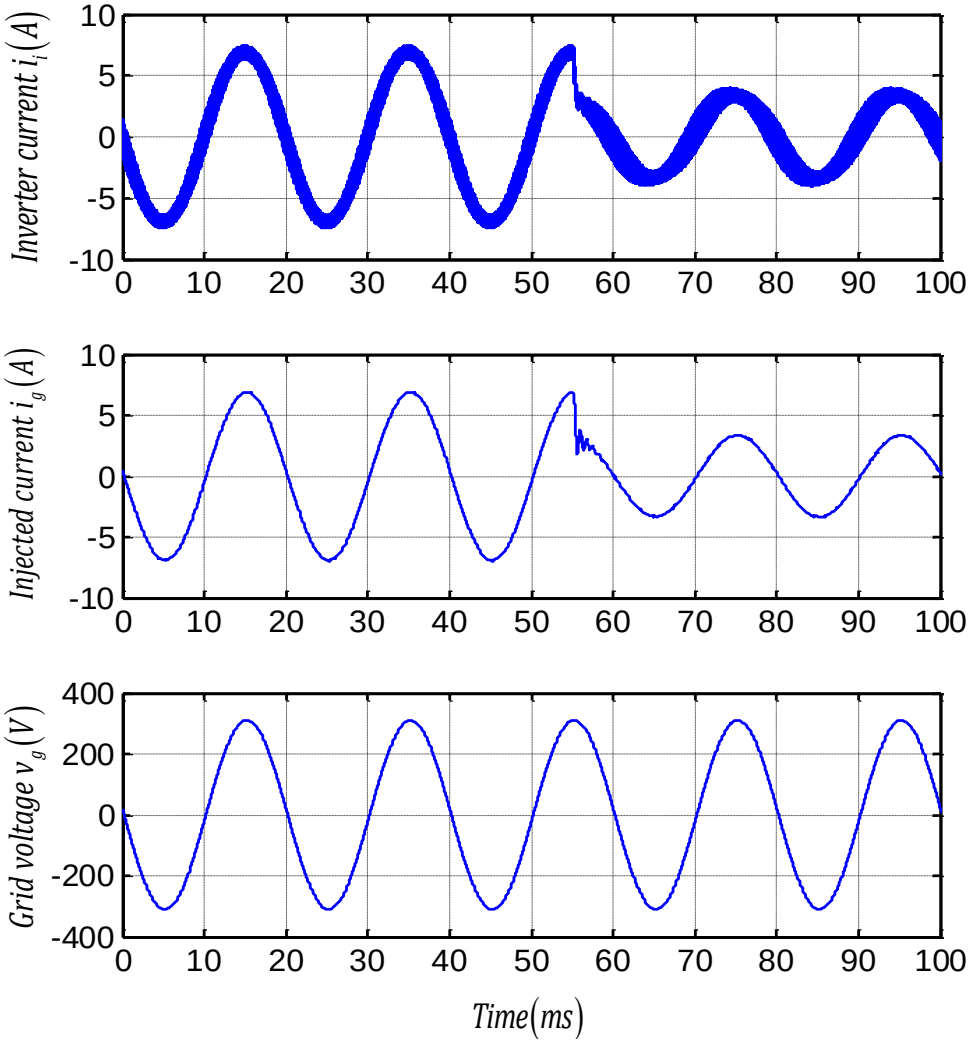
$$G_{PR}(z) = G_{PR}(s)_{s=\frac{\omega_g}{\tan(\frac{\omega_g T_s}{2})}\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}} \qquad (5.1)$$

يظهر الشكل5-2 نتيجة المحاكاة عند شروط الحمل الكامل للحقن في الشبكة $1KW$ ويظهر فيه تيار المنوب والتيار المحقون في الشبكة وجهد الشبكة.



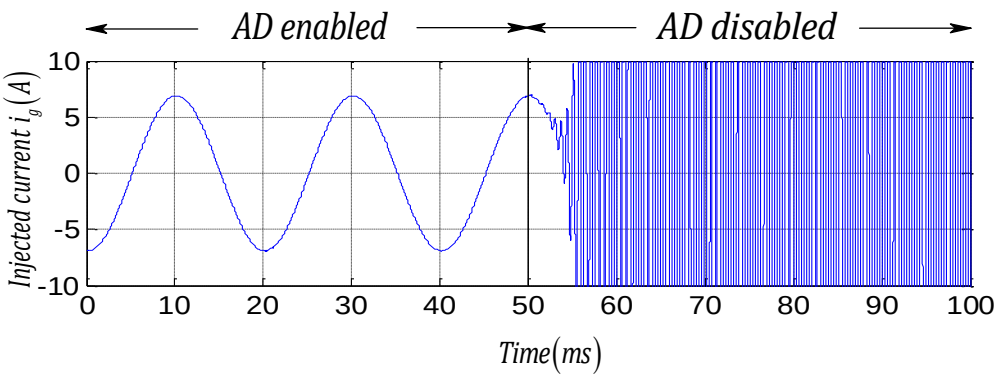
الشكل5-2 نتيجة المحاكاة عند شروط الحمل الكامل

من الواضح أن التزامن محقق وأن التيار المحقون على توافق مع الشبكة وبخطأ سكوني مهمل. لإظهار قدرة التخميد الفعال على تخميد الطنين في النظام سنقوم بتغيير القيمة المرجعية للتيار المحقون في الشبكة بشكل مفاجئ من شروط الحمل الكامل أي $1KW$ إلى شروط نصف الحمل الكامل أي $0.5KW$. يوضح الشكل5-3 نتيجة المحاكاة في هذه الحالة ومن الواضح أن الطنين في النظام يتخمد بفاعلية ونلاحظ أيضاً الاستجابة السريعة لحلقة التحكم في التيار المحقون.



الشكل5-3 نتيجة المحاكاة عند الانتقال من العمل عند الحمل الكامل إلى نصف الحمل الكامل.

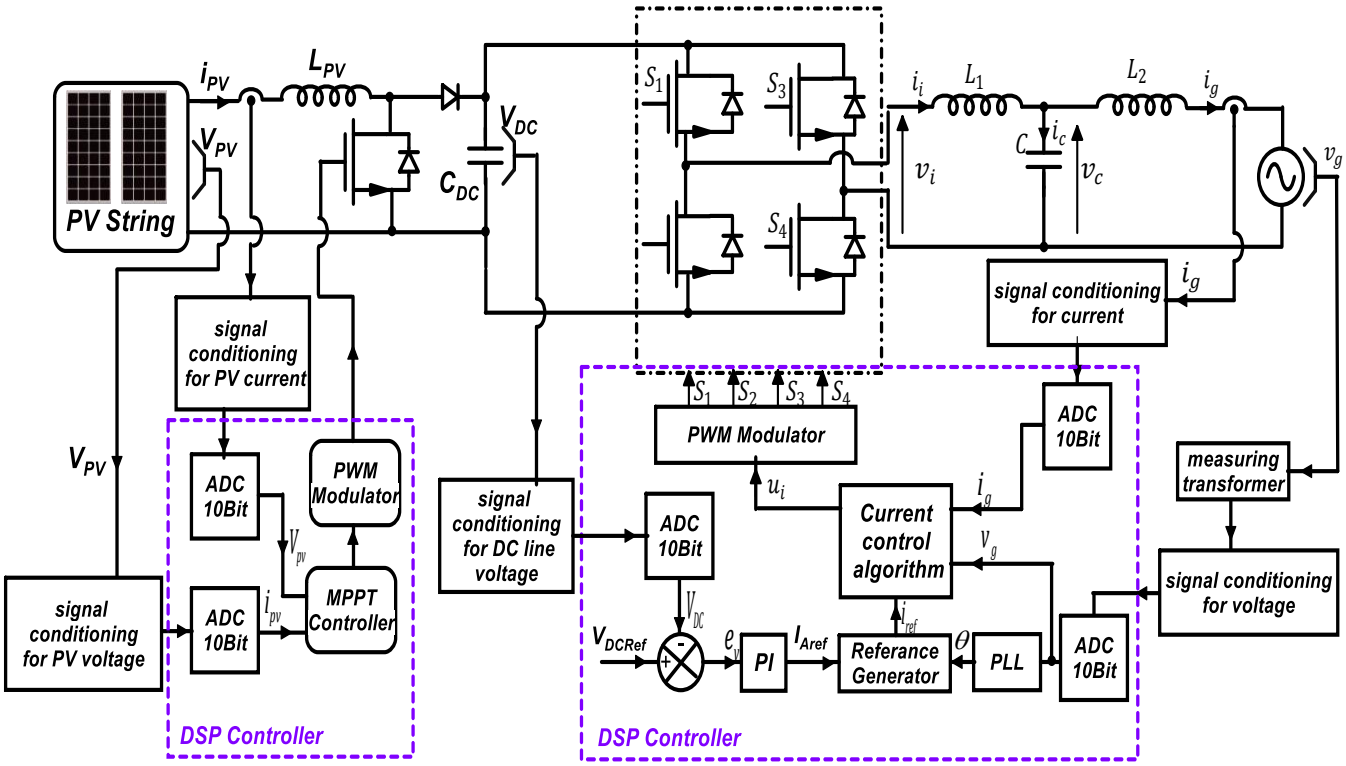
كما يوضح الشكل5-4 حالة إلغاء حلقة التخميد الفعال أثناء العمل، ومن الواضح أن النظام في هذه الحالة سيصبح غير مستقر وأن الطنين سيظهر في التيار المحقون في الشبكة.



الشكل5-4 نتيجة المحاكاة عند إلغاء حلقة التخميد الفعال.

2- الاختبارات العملية

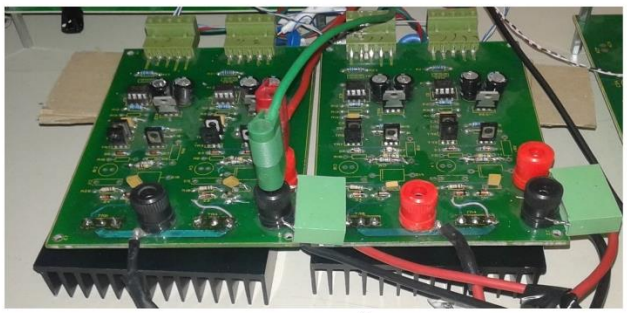
تم تنجيز النظام عملياً حيث تم تصـميم المنوب والمبدل الرافع وبطاقات التحكم. يوضـح الشـكل5-5 المخطط العام للنظام المنفذ عملياً. حيث أن النظام مكون من عشـر ألواح مربوطة على التسلسـل كل منها باسـتطاعة $100W$ لتكون اسـتطاعة المنظومة كاملة $1KW$، وجهد الدارة المفتوحة لمنظومة الألواح $225V$، حيث وضـحنا بناء نموذج اللوح الشمسي في الفصل الثاني والجدول2-1 وضح مواصفات الألواح الشمسية المستخدمة. تم تصميم ذاتية المبدل الرافع بحيـث يكون تعرج تيـار المبـدل الرافع أقـل من 30% عنـد نقطـة الاسـتطـاعـة العظمى، وبـذلـك تكون $L_{PV} = 5mH$ ومكثفـة الخط السـاكن بحيـث يكون تعرجـات جهـد الخط السـاكن أقل من 2% وبـذلـك تكون $C_{DC} = 2000\mu F$. تم توليف متحكم الخط الساكن بحيث نحصل على سرعة استجابة $100ms$ ونحصل على هامش صفحة مناسب $PM \approx 60^0$. حيث يكون $K_{pDC} = 0.1$ و $K_i = 3$.



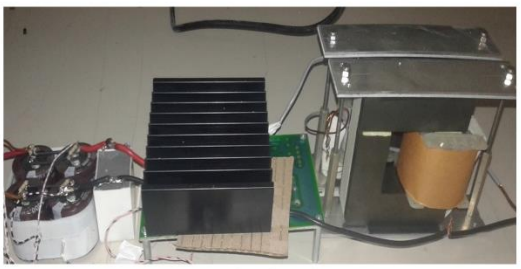
الشكل5-5 المخطط العام للنظام المنفذ عملياً.

حيث تم اسـتخدام الدارة المتكاملة HCPL-7800A لقياس الجهود المسـتمرة V_{DC} و V_{pv}. بينما تم قياس جهد الشـبكة v_g باسـتخدام محول. كما اسـتخدمنا حسـاس التيار CSLD2CD الذي يعتمد على أثر هول في قياس التيار المحقون في الشبكة i_g وتيار الألواح الشمسيةI_{pv}. يبين الشكل5-6 منظومة الألواح الشمسية المستخدمة. كما يبين الشكل5-7 الدارات الكهربائية وبطاقات التحكم ودارات تكييف الحساسات المصممة.

الشكل5-6 منظومة الألواح الشمسية المستخدمة.



المنوب



المبدل الرافع

المرشح

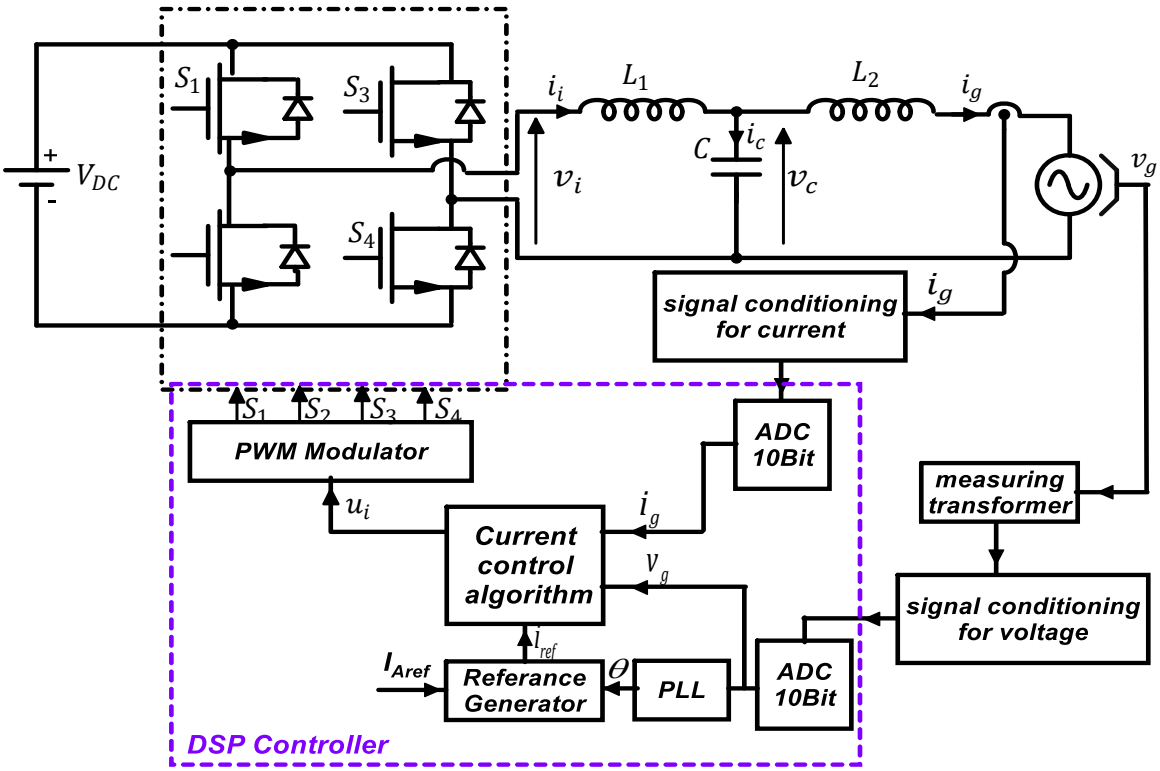
متحكم التيار المحقون في الشبكة ودارات التكييف الخاصة به

متحكم الـ MPPT ودارات تكييف الحساسات الخاصة به

الشكل5-7 الدارات الكهربائية وبطاقات التحكم ودارات تكييف الحساسات المصممة.

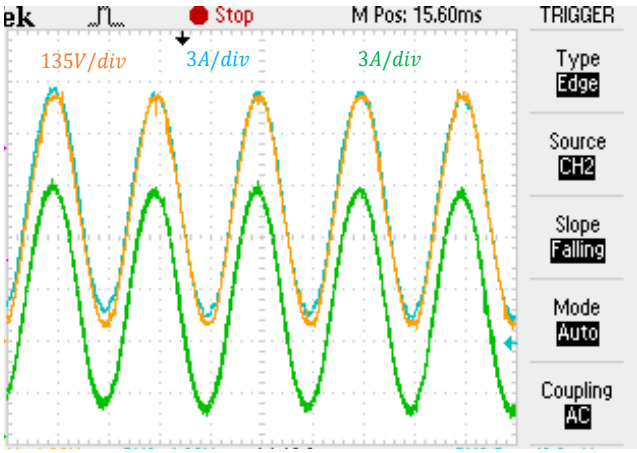
5-2- اختبار المنوب من منبع جهد مستمر

تم بدايةً اختبار المنوب المربوط بالشبكة بشكل منفصل عن باقي النظام عملياً للتأكد من فعالية طريقة التخميد المقترحة والتحكم في التيار المحقون في الشبكة. حيث تم استخدام وحدة تغذية بجهد مرتفع لتأمين جهد الخط الساكن $370V$. تم استخدام الحساس CSLD2CD لقياس التيار المحقون في الشبكة والذي يمتلك عرض حزمة $80kHz$. كما قمنا باستخدام محول لقياس جهد الشبكة. واستخدمت دارات التكييف لكل من جهد الشبكة والتيار المحقون في الشبكة لجعل القياسات تناسب متحكم الـ DSP. يوضح الشكل5-8 المخطط الصندوقي لدارة اختبار المنوب عملياً.

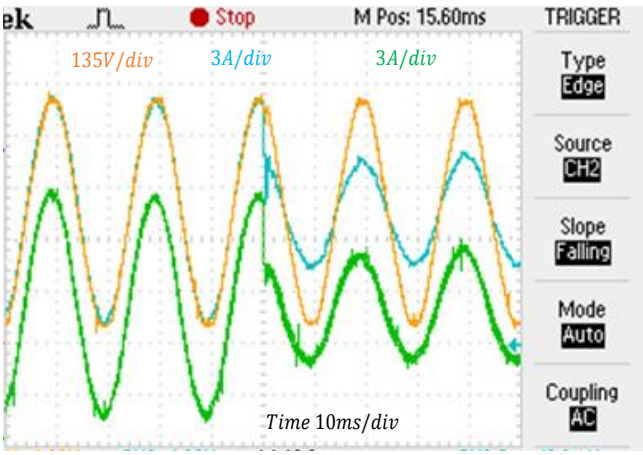


الشكل5-8 المخطط الصندوقي لدارة اختبار المنوب عملياً.

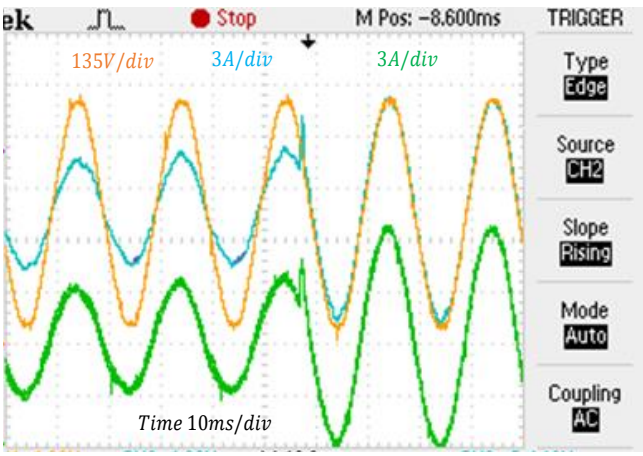
حيث أن معاملات مرشح الاستطاعة ومعاملات التحكم موافقة لحالة المحاكاة. وتم اختبار المنوب وقانون التحكم في حالة الحمل الكامل. يوضح الشكل5-9 كل من جهد الشبكة والتيار المحقون في الشبكة وتيار المنوب عند حقن $1KW$ في الشبكة. كما يوضح الشكل5-10 حالة الانتقال من الحمل الكامل إلى نصف الحمل الكامل ونلاحظ أن الطنين يتخمد بفعالية وأن النتيجة موافقة للمحاكاة. والشكل5-11 يوضح النتيجة العملية للانتقال من نصف الحمل الكامل إلى الحمل الكامل. حيث أن الإشارة ذات اللون الصفر هي إشارة جهد الشبكة و الإشارة ذات اللون الأزرق هي التيار المحقون في الشبكة والإشارة ذات اللون الأخضر هي تيار المنوب.



الشكل5-9 جهد الشبكة والتيار المحقون في الشبكة وتيار المنوب عند حقن $1KW$.



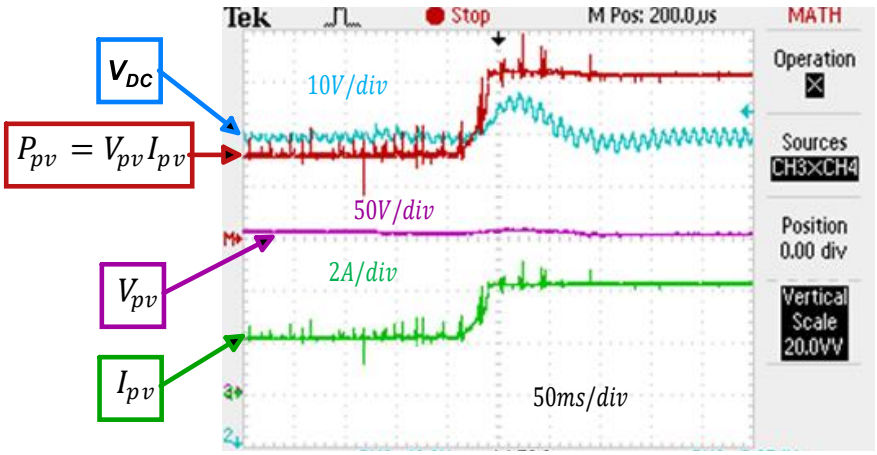
الشكل5-10 جهد الشبكة التيار المحقون في الشبكة وتيار المنوب عند الانتقال من حقن $1KW$ إلى $0.5KW$.



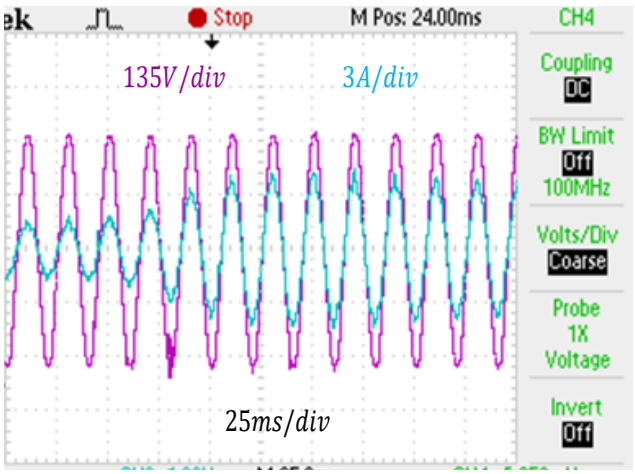
الشكل5-11 جهد الشبكة التيار المحقون في الشبكة وتيار المنوب عند الانتقال من حقن $0.5KW$ إلى $1KW$.

2-2- تنظيم الخط الساكن:

تم تنظيم جهد الخط الساكن عند الجهد $370V$ باستخدام المصحح PI. يُظهر الشكل5-12 أداء هذا المصحح عند تغير الاستطاعة المستجرة من الألواح الشمسية بشكل مفاجئ من $300W$ إلى $600W$.

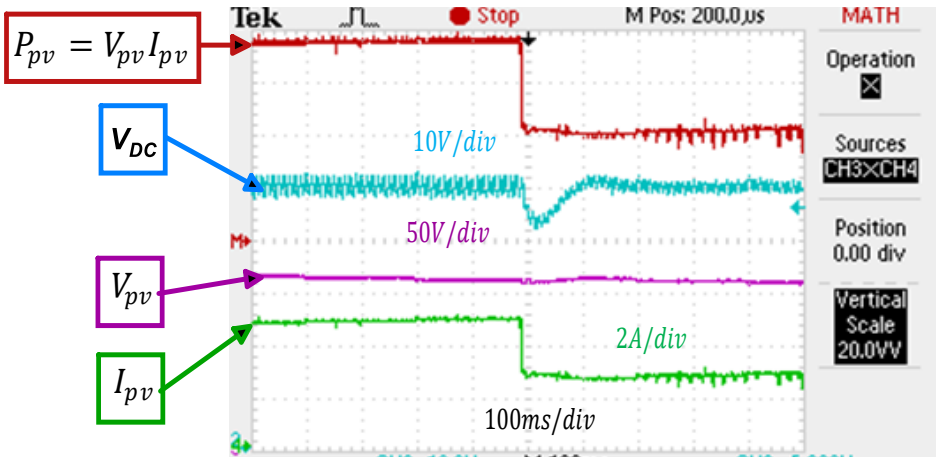


الشكل5-12 تنظيم جهد الخط الساكن مع زيادة الطاقة الواردة من الألواح الشمسية.

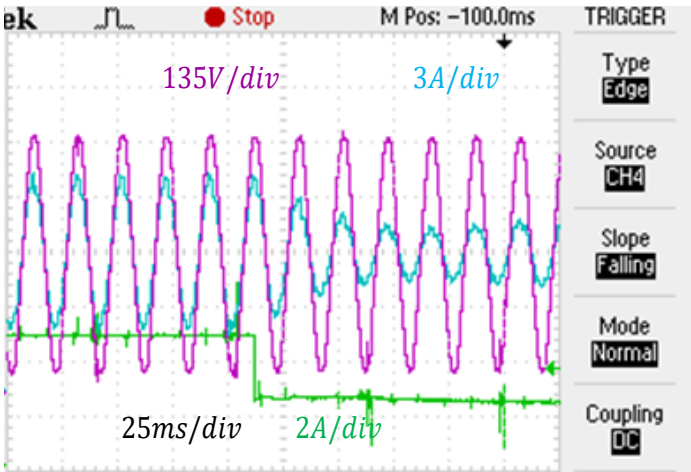


الشكل5-13 التيار المحقون في الشبكة وجهد الشبكة عند زيادة الطاقة المحصلة من الألواح الشمسية.

نلاحظ أن مصحح الخط الساكن استجاب لهذا التغير في الاستطاعة وعمل على تنظيم الخط الساكن من جديد عند القيمة المرجعية $370V$ وبزمن استجابة أقل من $100ms$. وذلك عن طريق زيادة مطال التيار المحقون في الشبكة كما يوضح ذلك الشكل5-13. ليعود توازن الاستطاعة الواردة من الألواح الشمسية والمحقون في الشبكة من جديد. كما يوضح الشكل5-14 والشكل5-15 تنظيم الخط الساكن عند هبوط الاستطاعة الواردة من الشبكة بشكل مفاجئ من $800W$ إلى $400W$. وذلك عن طريق إنقاص مطال التيار المحقون في الشبكة.



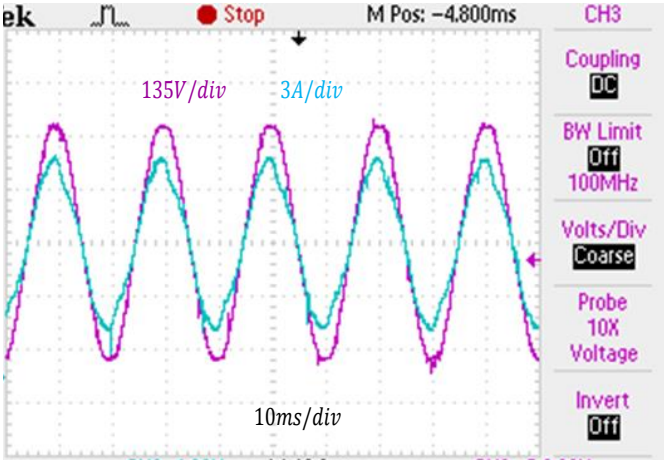
الشكل5-14 تنظيم جهد الخط الساكن مع نقصان الطاقة الواردة من الألواح الشمسية.



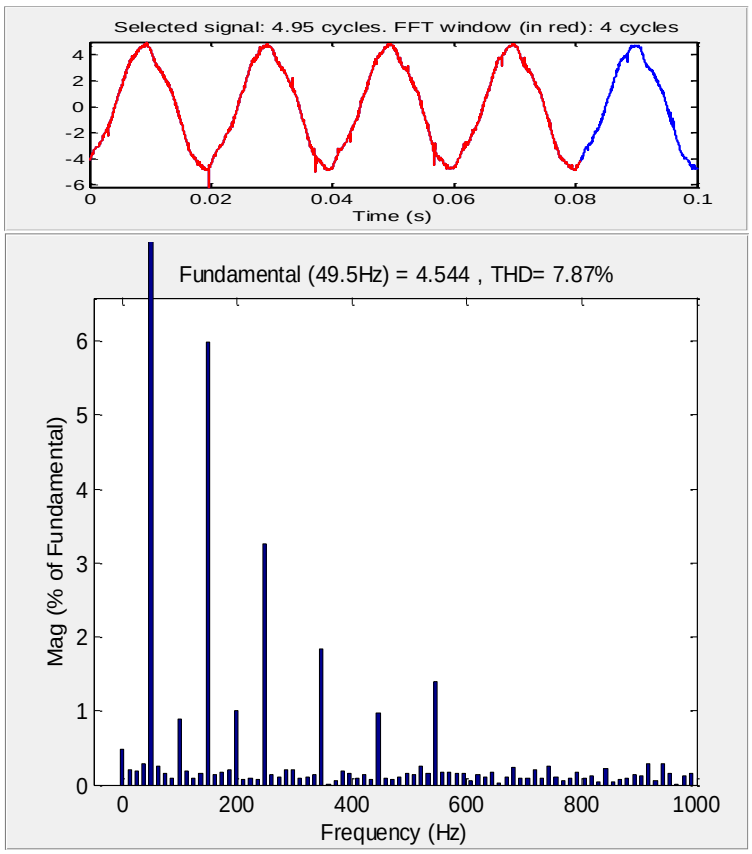
الشكل5-15 التيار المحقون في الشبكة وجهد الشبكة عند نقصان الطاقة المحصلة من الألواح الشمسية.

5-3- تعويض توافقيات إشارة جهد الشبكة

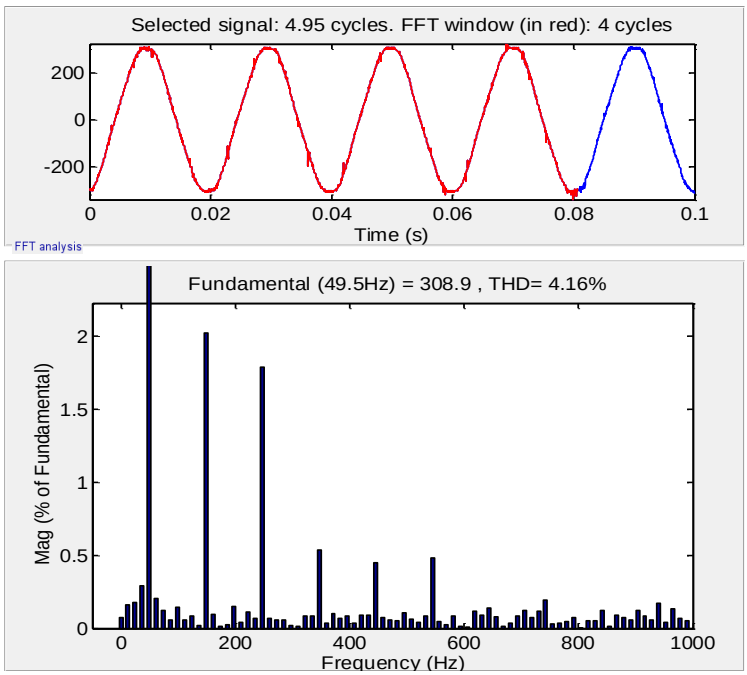
أشـرنا سـابقاً أن التوافقيات الموجودة في جهد الشـبكة سـتؤثر في التيار المحقون في الشـبكة. حيث أن هذه التوافقيات الغير أساسية في جهد الشبكة ستظهر في التيار المحقون في الشبكة. ذلك يؤدي إلى زيادة التشوه التوافقي الكلي للإشارة Total Harmonic Distortion THD. يوضح الشكل5-16 كل من جهد الشبكة والتيار المحقون في الشبكة عند استطاعة محقونة $700W$، بإجراء تحليل طيفي لإشارة التيار المحقون في الشبكة في بيئة MATLAB نحصـل على الشـكل5-17، حيث أنه يُضـهر التوافقيات كنسـبة مئوية من مطال التوافقية الأسـاسـية. نلاحظ وجود التوافقيات الفردية في التيار المحقون في الشـبكة. ومصـدر هذه التوافقيات هو جهد الشـبكة كما يوضـح ذلك التحليل الطيفي لجهد الشبكة في الشكل5-18.



الشكل5-16 كل من جهد الشبكة والتيار المحقون في الشبكة دون تعويض التوافقيات.

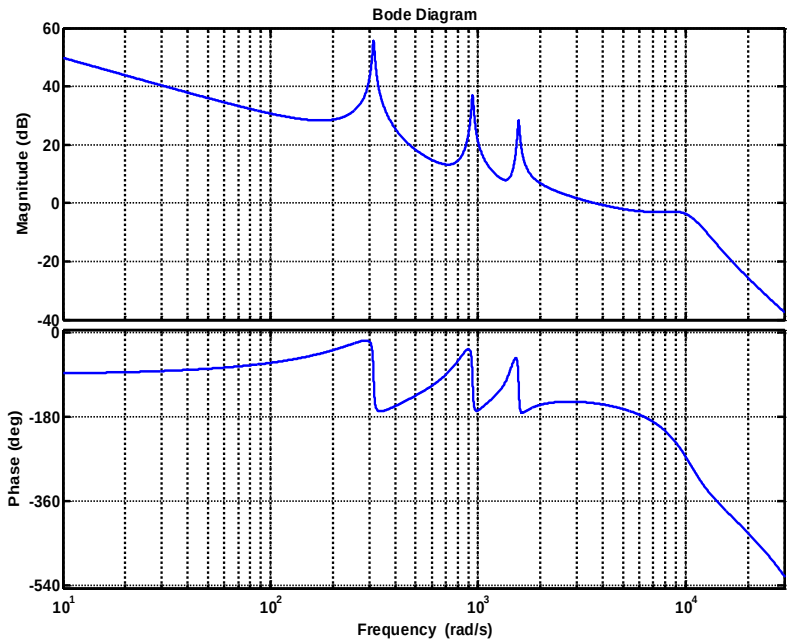


الشكل5-17 التحليل الطيفي لإشارة التيار المحقون في الشبكة.



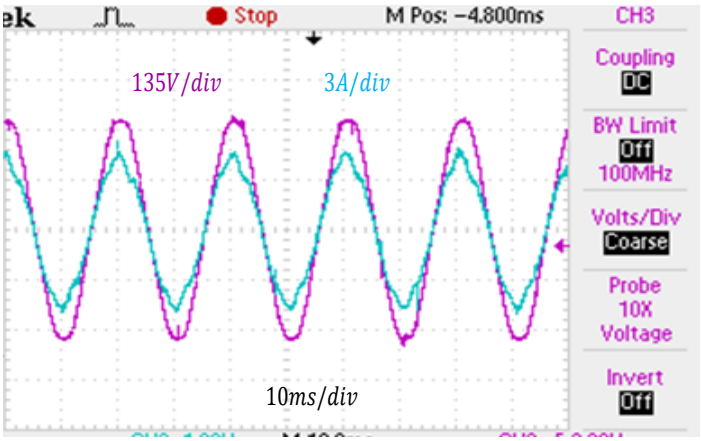
الشكل5-18 التحليل الطيفي لإشارة جهد الشبكة.

لتعويض التوافقيات الغير أساسية في إشارة التيار المحقون في الشبكة، يجب أن يكون ربح المصحح مرتفعاً عند هذه التوافقيات لتعزيز رفضها من قبل المصحح. يتم ذلك عن طريق إضافة مصححات طنينية عند التوافقيات التي نرغب بتعويضها كما وضح ذلك [46]، [51]. يوضح الشكل5-19 مخطط بود لتابع التحويل الحلقة المفتوحة بعد تعويض التوافقيات الثالثة والخامسة .

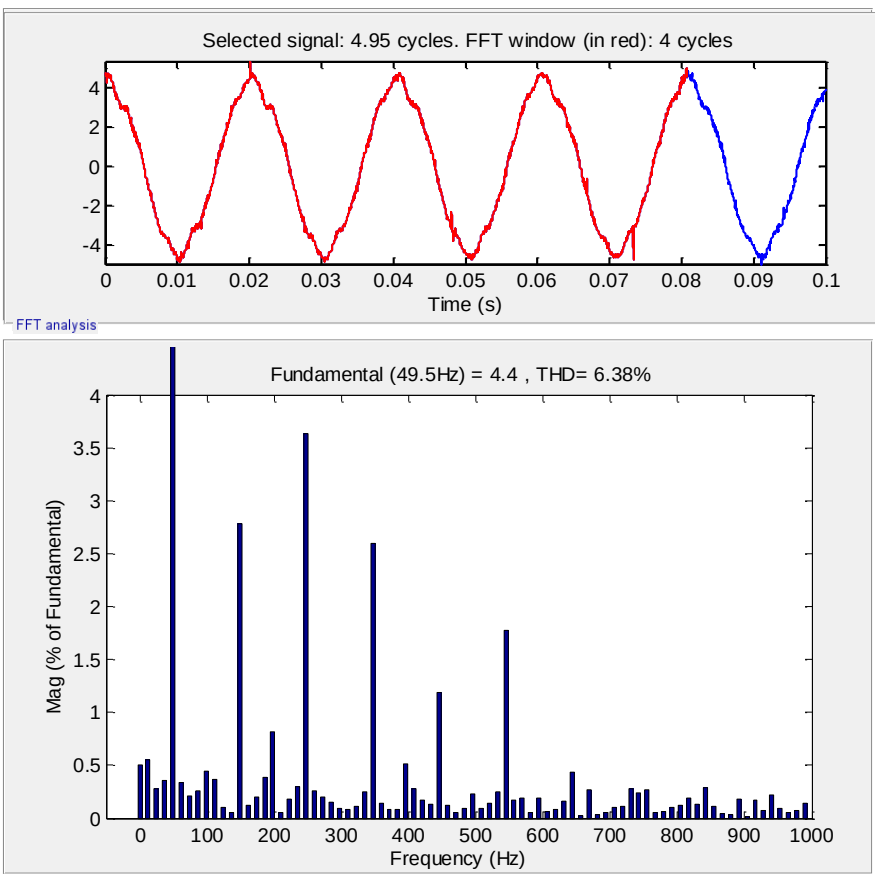


الشكل5-19 مخطط بود لتابع التحويل الحلقة المفتوحة بعد تعويض التوافقيات الثالثة والخامسة .

يوضح الشكل5-20 التيار المحقون في الشبكة وجهد الشبكة بعد تعويض التوافقية الثالثة فقط. وذلك عن طريق إضافة مصحح طنيني عند التردد $150Hz$ ربحه $k_{r3} = 500$. ويوضح الشكل5-21 التحليل الطيفي لإشارة التيار حيث يظهر انخفاض مطال التوافقية الثالثة إلى حوالي 2.7% من مطال التوافقية الأساسية. بعد أن كان مطالها حوالي 6% قبل تعويضها كما يوضح ذلك الشكل5-17.

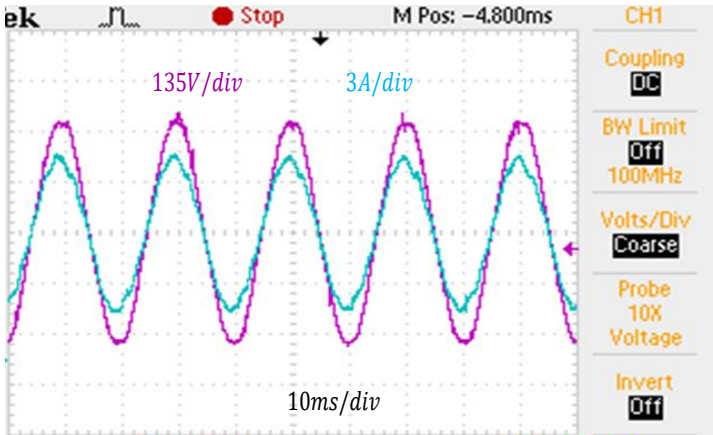


الشكل5-20 التيار المحقون في الشبكة وجهد الشبكة بعد تعويض التوافقية الثالثة فقط.

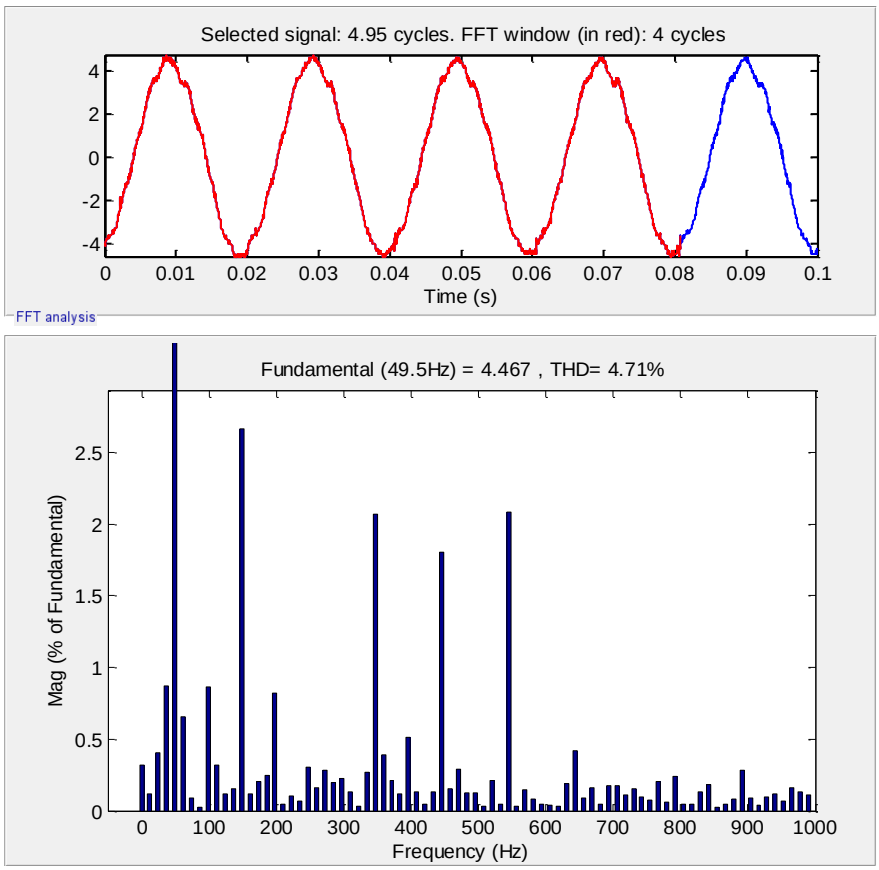


الشكل5-21 التحليل الطيفي لإشارة التيار المحقون في الشبكة بعد تعويض التوافقية الثالثة.

يوضح الشكل5-22 التيار المحقون في الشبكة وجهد الشبكة بعد تعويض التوافقية الخامسة أيضاً وذلك بإضافة مصحح طنيني إضافي عند التردد $250Hz$ بربح $k_{r5} = 325$. كما يوضح الشكل5-23 التحليل الطيفي للتيار المحقون في الشبكة في هذه الحالة، نلاحظ انخفاض مطال التوافقية الخامسة إلى حوالي 0.3% من التوافقية الأساسية بينما كان مطالها دون تعويضها حوالي 3.5% كما في الشكل5-17 والشكل5-21.



الشكل5-22 التيار المحقون في الشبكة وجهد الشبكة بعد تعويض التوافقية الثالثة والخامسة.

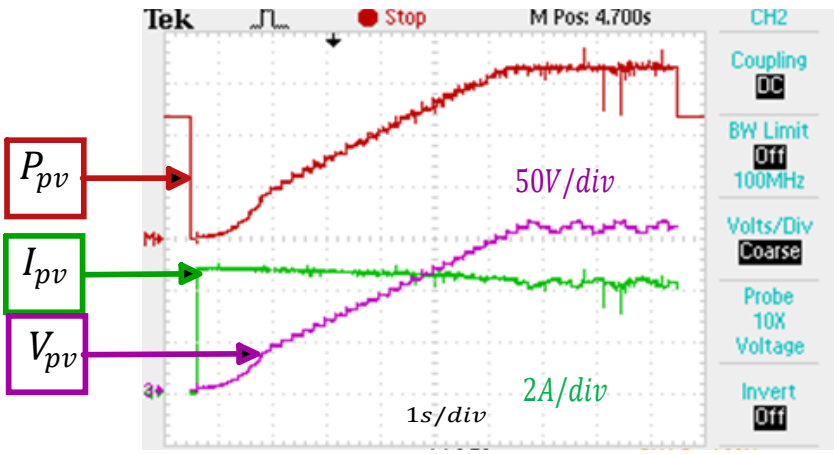


الشكل5-23 التحليل الطيفي لإشارة التيار المحقون في الشبكة بعد تعويض التوافقية الثالثة والخامسة.

نلاحظ أن تعويض التوافقيات الخامسة والثالثة سيحسن التشوه التوافقي الكلي THD لإشارة التيار المحقون في الشبكة حيث أنها بعد التعويض $THD = 4.71\%$ وهي تحقق المعيار العالمي للحقن في الشبكة IEEE1547 [ملحق1].

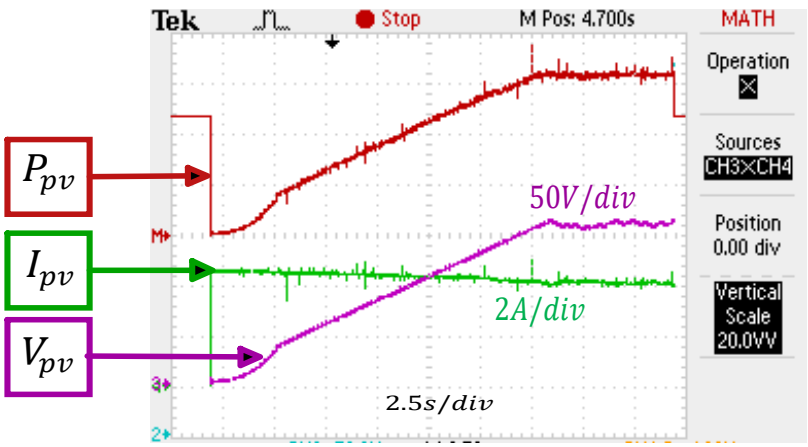
5-4- ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى

قمنا بتنفيذ خوارزمية ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى وهي تدرج الناقلية عملياً. يوضح الشكل5-24 كل من جهد وتيار الألواح ويُظهر تزايد الاستطاعة المستجرة من الألواح للوصول عند نقطة الاستطاعة العظمى. حيث أن خطوة تغيير عرض النبضة هي 1.7%. يتم تكرار الخوارزمية كل $200ms$ وتستغرق حوالي $6s$ للوصول لنقطة الاستطاعة العظمى. نلاحظ أنه عند الوصول لنقطة الاستطاعة العظمى أن جهد الألواح وتيار الألواح سيهتزان بجوار نقطة الاستطاعة العظمى.



الشكل5-24 جهد وتيار الألواح والاستطاعة المستجرة من الألواح للوصول عند نقطة الاستطاعة العظمى

لتخفيف اهتزازات الجهد قمنا بتصغير خطوة تغيير عرض النبضة إلى 0.5% كما يوضح الشكل5-25 لكن نلاحظ أن زمن الوصول لنقطة الاستطاعة العظمى سيزداد كما هو معروف.



الشكل5-25 ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى بخطوات صغيرة لعرض النبضة.

للتحقق من النتائج النظرية وطريقة التخميد المقترحة قمنا في هذا الفصل ببناء نموذج محاكاة للمنوب ولقوانين التحكم في التيار المحقون في الشبكة في بيئة MATLAB، وأظهرت النتائج فعالية طريقة التحكم في حقن التيار في الشبكة بالتزامن معها وفعالية طريقة التخميد المقترحة في ذلك. من ثم وضحنا خطوات التنفيذ العملي للتحقق من خوارزمية التحكم عملياً. وبينت النتائج العملية للمنظومة كاملةً تنظيم الخط الساكن وتحقيق توازن الاستطاعة الواردة من الألواح الشمسية والمحقونة في الشبكة الكهربائية. كما قمنا عملياً بتعويض التوافقيات الغير أساسية في إشارة التيار وذلك بإضافة مصححات طنينية عند هذه التوافقيات وبينت النتائج العملية فعالية هذه الطريقة في تعويض التوافقيات وتحقيق المعايير العالمية للحقن في الشبكة. وتأكدنا عملياً من ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى لتحقيق الاستجرار الأعظمي للاستطاعة من الألواح الشمسية وحقنها في الشبكة الكهربائية.

الفصل السادس

الخاتمة والآفاق المستقبلية

1- الخاتمة

في الختام، كان العمل -على الرغم من الصـــعوبات الكبيرة التي واجهتنا فيه- غنياً جداً وممتعاً ويســـتحق الخوض فيه حتى النهاية. إن موضوع الطاقة الشمسية الذي يعالجه هذا البحث هو موضوع العصر وهو حديث العهد في منطقتنا. تطلب العمل الكثير من المهارات في مجالي الاستطاعة والتحكم. سبقت العمل في هذا الموضوع دراسة مرجعية معمقة لطرائق مكاملة الأنظمة الشمسية مع الشبكة الكهربائية. تضمن البحث دراسةً مرجعيةً لخوارزميات ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى للألواح الشمسية. ودراسة مرجعية موسعة للمنوبات المربوطة بالشبكة الكهربائية بمرشــح LCL وطرائق تخميد الطنين. بينت الدراســة أن التخميد الفعال للطنين يعطي نتائج أفضــل من حيث تخميد توافقيات التقطيع في المنوب ومن حيث المردود، لكن التخميد الفعال بحاجة إلى حساس تيار إضافي، كما أن التأخير الناتج عن التحكم الرقمي في حلقة التخميد الفعال قد يؤدي إلى عدم اســتقرار النظام. تم اقتراح طريقة للتخميد الفعال للطنين مع تجنب التأخير الناجم عن التحكم الرقمي وتجنب استخدام حساس تيار إضافي وذلك عن طريق بناء راصد في الزمن المقطع. تم تصـــميم متحكم التيار المحقون في الشـــبكة من النمط PR وتحقيق تنظيم جهد الخط الســـاكن واستخدام خوارزمية تدرج الناقلية للوصول لنقطة الاستطاعة العظمى للألواح الشمسية. من ثم وضع التصميم وتم اختبار طريقة التخميد والتحكم المصـــمم باســـتخدام MATLAB. تلى المحاكاة التنفيذ العملي والاختبارات العملية والتي تضــمنت تعويض التوافقيات في التيار المحقون في الشــبكة والناجمة عن تشــوه إشــارة جهد الشــبكة وتحقيق المعايير العالمية للحقن في الشبكة.

2- الآفاق المستقبلية

يعتبر هذا العمل نواةً هامةً لأعمال أخرى في مجال الطاقة النظيفة. يمكن تطوير العمل وتحسينه مستقبلاً على عدة أصــعدة. يمكن تطوير خوارزميات التحكم المستخدمة وتعميمها على نظام ثلاثي الطور. يمكن أيضــاً تغيير بنية المنوب لتكون متعددة المستويات وبالتالي تصغير حجم المرشح. قد يضــاف إلى النظام مصــادر طاقة أخرى متممة للطاقة الشمسية كطاقة الرياح ليصبح نظاماً نظيفاً وهجيناً متعدد المصادر ومربوط مع الشبكة الكهربائية.

المراجع

[1] Khalifa, Ahmed Said. "Control and interfacing of three phase grid connected photovoltaic systems." Master's thesis, University of Waterloo, 2011.

[2] Bellia, Habbati, Ramdani Youcef, and Moulay Fatima. "A detailed modeling of photovoltaic module using MATLAB." NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics 3, no. 1 (2014): 53-61.

[3] Liu, F., Duan, S., Liu, F., Liu, B. and Kang, Y., 2008. A variable step size INC MPPT method for PV systems. IEEE Transactions on industrial electronics, 55(7), pp.2622-2628.

[4] Umashankar, S., Punna Srikanth, D. Vijay Kumar, and D. P. Kothari. "Comparative study of maximum power point tracking algorithms with DC-DC converters for solar PV system." International Journal of Electronics and Communication Engineering 3, no. 1 (2011): 11-20.

[5] Sera, Dezso, Tamas Kerekes, Remus Teodorescu, and Frede Blaabjerg. "Improved MPPT algorithms for rapidly changing environmental conditions." In Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. EPE-PEMC 2006. 12th International, pp. 1614-1619. IEEE, 2006.

[6] Ishaque, Kashif, Zainal Salam, and George Lauss. "The performance of perturb and observe and incremental conductance maximum power point tracking method under dynamic weather conditions." Applied Energy 119 (2014): 228-236.

[7] Christopher, I. William, and R. Ramesh. "Comparative study of p&o and inc mppt algorithms." American Journal of Engineering Research 2, no. 12 (2013): 402-408.

[8] Attou, A., A. Massoum, and M. Saidi. "Photovoltaic power control using MPPT and boost converter." Balkan Journal Of Electrical and Computer Engineering 2, no. 1 (2014).

[9] Rakotomananandro, Falinirina F. "Study of photovoltaic system." PhD diss., The Ohio State University, 2011.

[10] Sangwongwanich, Ariya, Yongheng Yang, and Frede Blaabjerg. "Sensorless reserved power control strategy for two-stage grid-connected photovoltaic systems." In Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG), 2016 IEEE 7th International Symposium on, pp. 1-8. IEEE, 2016.

[11] Raphin, C. A., and T. V. George. "HIGH EFFICIENCY PHOTOVOLTAIC POWER CONTROLLER USING MPPT AND BUCK BOOST CONVERTER."

[12] LakshmanRao, S. P., Ciji Pearl Kurian, Dr BK SMIEEE, and V. Athulya Jyothi. "Simulation and control of DC/DC converter for MPPT based hybrid PV/Wind power system." International Journal of Renewable Energy Reasearch 4, no. 3 (2014).

[13] Wu, Tsai-Fu, Chien-Hsuan Chang, and Yu-Hai Chen. "A fuzzy-logic-controlled single-stage converter for PV-powered lighting system applications." IEEE Transactions on Industrial Electronics 47, no. 2 (2000): 287-296.

[14] Veerachary, M., Senjyu, T. and Uezato, K., 2003. Neural-network-based maximum-power-point tracking of coupled-inductor interleaved-boost-converter-supplied PV system using fuzzy controller. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 50(4), pp.749-758.

[15] Pandey, Ashish, Nivedita Dasgupta, and Ashok K. Mukerjee. "Design issues in implementing MPPT for improved tracking and dynamic performance." In IEEE Industrial Electronics, IECON 2006-32nd Annual Conference on, pp. 4387-4391. IEEE, 2006.

[16] Noguchi, Toshihiko, Shigenori Togashi, and Ryo Nakamoto. "Short-current pulse-based maximum-power-point tracking method for multiple photovoltaic-and-converter module system." IEEE Transactions on Industrial Electronics 49, no. 1 (2002): 217-223.

[17] Yuvarajan, S. and Xu, S., 2003, May. Photo-voltaic power converter with a simple maximum-power-point-tracker. In Circuits and Systems, 2003. ISCAS'03. Proceedings of the 2003 International Symposium on (Vol. 3, pp. III-III). IEEE.

[18] Hamzeh, Ing Ali. "Overview of the Syrian energy profile." Renewable energy (2010).

[19] Siddhant, Kumar. "Implementation of fractional open circuit voltage mppt algorithm in a low cost microcontroller." PhD diss., 2014.

[20] Azab, Mohamed. "A new maximum power point tracking for photovoltaic systems." WASET. ORG 34 (2008): 571-574.

[21] Patcharaprakiti, Nopporn, Suttichai Premrudeepreechacharn, and Yosanai Sriuthaisiriwong. "Maximum power point tracking using adaptive fuzzy logic control for grid-connected photovoltaic system." Renewable Energy 30, no. 11 (2005): 1771-1788.

[22] Abbes, Hanen, Kais Loukil, Hafedh Abid, Mohamed Abid, and Ahmad Toumi. "Implementation of Photovoltaic Maximum Power Point Tracking Fuzzy Logic Controller on FPGA." Journal of Information Assurance & Security 11, no. 2 (2016).

[23] Mahmoud, A. M. A., H. M. Mashaly, S. A. Kandil, H. El Khashab, and M. N. F. Nashed. "Fuzzy logic implementation for photovoltaic maximum power tracking." In Robot and Human Interactive Communication, 2000. RO-MAN 2000. Proceedings. 9th IEEE International Workshop on, pp. 155-160. IEEE, 2000.

[24] Wu, Wenkai, N. Pongratananukul, Weihong Qiu, K. Rustom, T. Kasparis, and I. Batarseh. "DSP-based multiple peak power tracking for expandable power system." In Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC'03. Eighteenth Annual IEEE, vol. 1, pp. 525-530. IEEE, 2003.

[25] Zhang, L., Yunfei Bai, and A. Al-Amoudi. "GA-RBF neural network based maximum power point tracking for grid-connected photovoltaic systems." (2002): 18-23.

[26] Elobaid, Lina M., Ahmed K. Abdelsalam, and Ezeldin E. Zakzouk. "Artificial neural network-based photovoltaic maximum power point tracking techniques: a survey." IET Renewable Power Generation 9, no. 8 (2015): 1043-1063.

[27] Roman, Eduardo, Ricardo Alonso, Pedro Ibañez, Sabino Elorduizapatarietxe, and Damián Goitia. "Intelligent PV module for grid-connected PV systems." IEEE Transactions on Industrial electronics 53, no. 4 (2006): 1066-1073.

[28] Carvalho, Carlos, Guilherme Lavareda, and Nuno Paulino. "A DC-DC step-up μ-power converter for energy harvesting applications, using maximum power point tracking, based on fractional open circuit voltage." In Doctoral Conference on Computing, Electrical and Industrial Systems, pp. 510-517. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011.

[29] Massawe, Henry Benedict. "Grid Connected Photovoltaic Systems with SmartGrid functionality." Master's thesis, Institutt for elkraftteknikk, 2013.

[30] Ghanem, Abdelhady, Mohamed Rashed, Mark Sumner, Mohamed Adel Elsayes, and I. I. I. Mansy. "Hybrid active damping of LCL-filtered grid connected converter." In Power Electronics Conference (SPEC), IEEE Annual Southern, pp. 1-6. IEEE, 2016.

[31] Zhang, Xiaotian, Joseph W. Spencer, and Josep M. Guerrero. "Small-signal modeling of digitally controlled grid-connected inverters with LCL filters." IEEE Transactions on industrial electronics 60, no. 9 (2013): 3752-3765.

[32] VandeSype, David M., Koen DeGusseme, Frederik MLL DeBelie, Alex P. VandenBossche, and Jan A. Melkebeek. "Small-signal z-domain analysis of digitally controlled converters." IEEE Transactions on Power Electronics 21, no. 2 (2006): 470-478.

[33] Holmes, D. G., T. A. Lipo, B. P. McGrath, and W. Y. Kong. "Optimized design of stationary frame three phase AC current regulators." IEEE Transactions on Power Electronics 24, no. 11 (2009): 2417-2426.

[34] Hoffmann, Nils, Friedrich W. Fuchs, and Jörg Dannehl. "Models and effects of different updating and sampling concepts to the control of grid-connected PWM converters—A study based on discrete time domain analysis." In Power Electronics and Applications (EPE 2011), Proceedings of the 2011-14th European Conference on, pp. 1-10. IEEE, 2011.

[35] Zmood, Daniel Nahum, and Donald Grahame Holmes. "Stationary frame current regulation of PWM inverters with zero steady-state error." IEEE Transactions on power electronics 18, no. 3 (2003): 814-822.

[36] He, Jinwei, and Yun Wei Li. "Generalized closed-loop control schemes with embedded virtual impedances for voltage source converters with LC or LCL filters." IEEE Transactions on Power Electronics 27, no. 4 (2012): 1850-1861.

[37] Wang, Jianguo, and Jiu Dun Yan. "Using virtual impedance to analyze the stability of LCL-filtered grid-connected inverters." In Industrial Technology (ICIT), 2015 IEEE International Conference on, pp. 1220-1225. IEEE, 2015.

[38] Tang, Yi, Poh Chiang Loh, Peng Wang, Fook Hoong Choo, and Feng Gao. "Exploring inherent damping characteristic of LCL-filters for three-phase grid-connected voltage source inverters." IEEE Transactions on Power Electronics 27, no. 3 (2012): 1433-1443.

[39] Dannehl, Joerg, Christian Wessels, and Friedrich Wilhelm Fuchs. "Limitations of voltage-oriented PI current control of grid-connected PWM rectifiers with LCL filters." IEEE Transactions on Industrial Electronics 56, no. 2 (2009): 380-388.

[40] Pan, Donghua, Xinbo Ruan, Chenlei Bao, Weiwei Li, and Xuehua Wang. "Capacitor-current-feedback active damping with reduced computation delay for improving robustness of LCL-type grid-connected inverter." IEEE Transactions on Power Electronics 29, no. 7 (2014): 3414-3427.

[41] Parker, Stewart Geoffrey, Brendan P. McGrath, and Donald Grahame Holmes. "Regions of active damping control for LCL filters." In Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2012 IEEE, pp. 53-60. IEEE, 2012.

[42] Wang, Xiongfei, Frede Blaabjerg, and Poh Chiang Loh. "Grid-current-feedback active damping for LCL resonance in grid-connected voltage-source converters." IEEE Transactions on Power Electronics 31, no. 1 (2016): 213-223.

[43] Zhang, Ningyun, Houjun Tang, and Chen Yao. "A systematic method for designing a PR controller and active damping of the LCL filter for single-phase grid-connected PV inverters." Energies 7, no. 6 (2014): 3934-3954.

[44] Kukkola, Jarno, and Marko Hinkkanen. "Observer-based state-space current control for a three-phase grid-connected converter equipped with an LCL filter." (2014).

[45] Yepes, Alejandro G., Francisco D. Freijedo, Jesús Doval-Gandoy, Oscar López, Jano Malvar, and Pablo Fernandez-Comesana. "Effects of discretization methods on the performance of resonant controllers." IEEE Transactions on Power Electronics 25, no. 7 (2010): 1692-1712.

[46] Teodorescu, Remus, Frede Blaabjerg, Uffe Borup, and Marco Liserre. "A new control structure for grid-connected LCL PV inverters with zero steady-state error and selective harmonic compensation." In Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2004. APEC'04. Nineteenth Annual IEEE, vol. 1, pp. 580-586. IEEE, 2004.

[47] Dannehl, Jörg, Friedrich Wilhelm Fuchs, Steffan Hansen, and Paul Bach Thogersen. "Investigation of active damping approaches for PI-based current control of grid-connected pulse width modulation converters with LCL filters." IEEE Transactions on Industry Applications 46, no. 4 (2010): 1509-1517.

[48] Sandeep, N., P. S. Kulkarni, and R. Y. Udaykumar. "A single-stage active damped LCL-filter-based grid-connected photovoltaic inverter with maximum power point tracking." In Power Systems Conference (NPSC), 2014 Eighteenth National, pp. 1-6. IEEE, 2014.

[49] Sahoo, Ashish Kumar, Arushi Shahani, Kaushik Basu, and Ned Mohan. "LCL filter design for grid-connected inverters by analytical estimation of PWM ripple voltage." In Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2014 Twenty-Ninth Annual IEEE, pp. 1281-1286. IEEE, 2014.

[50] Armstrong, M., M. A. Elgendy, and F. Mulolani. "Three-phase grid connected PV inverters using the proportional resonance controller." In Environment and Electrical Engineering (EEEIC), 2016 IEEE 16th International Conference on, pp. 1-6. IEEE, 2016.

[51] Blaabjerg, Frede, Remus Teodorescu, Marco Liserre, and Adrian V. Timbus. "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems." IEEE Transactions on industrial electronics 53, no. 5 (2006): 1398-1409.

[52] Zhang, Chi, Tomislav Dragicevic, Juancho C. Vasquez, and Josep M. Guerrero. "Resonance damping techniques for grid-connected voltage source converters with LCL filters—A review." In Energy Conference (ENERGYCON), 2014 IEEE International, pp. 169-176. IEEE, 2014.

[53] Malinowski, Mariusz, and Steffen Bernet. "A simple voltage sensorless active damping scheme for three-phase PWM converters with an LCL filter." IEEE Transactions on Industrial Electronics 55, no. 4 (2008): 1876-1880.

[54] Xu, Jinming, Shaojun Xie, and Ting Tang. "Active damping-based control for grid-connected LCL -filtered inverter with injected grid current feedback only." IEEE Transactions on Industrial Electronics 61, no. 9 (2014): 4746-4758.

[55] Wang, Baochao, Yongxiang Xu, Zhaoyuan Shen, Jibin Zou, Chaoquan Li, and Hong Liu. "Current control of grid-connected inverter with LCL filter based on extended-state observer estimations using single sensor and achieving improved robust observation dynamics." IEEE Transactions on Industrial Electronics 64, no. 7 (2017): 5428-5439.

[56] Dannehl, Joerg, Marco Liserre, and Friedrich Wilhelm Fuchs. "Filter-based active damping of voltage source converters with LCL filter." IEEE Transactions on Industrial Electronics 58, no. 8 (2011): 3623-3633.

[57] Pena-Alzola, Rafael, Marco Liserre, Frede Blaabjerg, Martin Ordonez, and Tamas Kerekes. "A self-commissioning notch filter for active damping in a three-phase LCL-filter-based grid-tie converter." IEEE Trans. Power Electron. 29, no. 12 (2014): 6754-6761.

[58] Tang, Yi, Poh Chiang Loh, Peng Wang, Fook Hoong Choo, Feng Gao, and Frede Blaabjerg. "Generalized design of high performance shunt active power filter with output LCL filter." IEEE Transactions on Industrial Electronics 59, no. 3 (2012): 1443-1452.

[59] Yang, Dongsheng, Xinbo Ruan, and Heng Wu. "A Real-Time Computation Method With Dual Sampling Mode to Improve the Current Control Performance of the LCL-Type Grid-Connected Inverter." IEEE Transactions on Industrial Electronics 62, no. 7 (2015): 4563-4572.

[60] Zammit, Daniel, Cyril Spiteri Staines, and Maurice Apap. "Pr current control with harmonic compensation in grid connected pv inverters." World Academy of Science, Engineering and Technology, International Journal of Electrical, Computer, Energetic, Electronic and Communication Engineering 8, no. 11 (2014): 1773-1779.

[61] Villalva, Marcelo Gradella, Marcos Fernando Espindola, Thais Gama de Siqueira, and Ernesto Ruppert. "Modeling and control of a three-phase isolated grid-connected converter for photovoltaic applications." Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica 22, no. 3 (2011): 215-228.

[62] Gupta, Anita, Harsh Gupta, and Arvind K. Tiwari. "A Comparative Study of Sine-Triangular and Space Vector PWM Inverter Fed Induction Motor Drive."

[63] Jose, Lydia Anu, and K. B. Karthikeyan. "A comparative study of sinusoidal PWM and space vector PWM of a vector controlled BLDC motor." International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering 2, no. 6 (2013): 2662-2668.

[64] Faiz, Jawad, Mehdi Manoochehry, and Ghazanfar Shahgholian. "Comparison of Different Space Vector Modulation Types and Analyzing Their Effects on a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor Load." Journal ELECTROMOTION 18, no. 3 (2011): 202-209.

[65] Agorreta, Juan Luis, Mikel Borrega, Jesus Lopez, and Luis Marroyo. "Modeling and control of N-paralleled grid-connected inverters with LCL filter coupled due to grid impedance in PV plants." IEEE Trans. Power Electron 26, no. 3 (2011): 770-785.

[66] Newman, Michael John, Daniel Nahum Zmood, and Donald Grahame Holmes. "Stationary frame harmonic reference generation for active filter systems." In Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2002. APEC 2002. Seventeenth Annual IEEE, vol. 2, pp. 1054-1060. IEEE, 2002.

[67] Vu, Trung-Kien, and Se-Jin Seong. "Comparison of PI and PR Controller Based Current Control Schemes for Single-Phase Grid-Connected PV Inverter." Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society 11, no. 8 (2010): 2968-2974.

[68] Manoloiu, Alisa, Heverton A. Pereira, Remus Teodorescu, Massimo Bongiorno, Mircea Eremia, and Selênio R. Silva. "Comparison of PI and PR current controllers applied on two-level VSC-HVDC transmission system." In 2015 IEEE Eindhoven PowerTech, pp. 1-5. IEEE, 2015.

[69] Xiao, Bailu, Lijun Hang, Jun Mei, Cameron Riley, Leon M. Tolbert, and Burak Ozpineci. "Modular cascaded H-bridge multilevel PV inverter with distributed MPPT for grid-connected applications." IEEE Transactions on Industry Applications 51, no. 2 (2015): 1722-1731.

[70] Cao, Yue, and Leon M. Tolbert. "11-level cascaded H-bridge grid-tied inverter interface with solar panels." In 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), pp. 968-972. IEEE, 2010.

[71] VIJAYALAXMI, RESU, and GERA VENKATARATNAM. "Modular Cascaded H-Bridge Multilevel PV Inverter with Distributed MPPT for Grid-Connected Applications." (2016).

[72] Xiao, Bailu, Lijun Hang, Cameron Riley, Leon M. Tolbert, and Burak Ozpineci. "Three-phase modular cascaded H-bridge multilevel inverter with individual MPPT for grid-connected photovoltaic systems." In Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2013 Twenty-Eighth Annual IEEE, pp. 468-474. IEEE, 2013.

[73] Kim, Hyosung, and Kyoung-Hwan Kim. "Filter design for grid connected PV inverters." In Sustainable Energy Technologies, 2008. ICSET 2008. IEEE International Conference on, pp. 1070-1075. IEEE, 2008.

[74] Liserre, Marco, Frede Blaabjerg, and Steffan Hansen. "Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier." IEEE Transactions on industry applications 41, no. 5 (2005): 1281-1291.

[75] Reznik, Aleksandr, Marcelo Godoy Simões, Ahmed Al-Durra, and S. M. Muyeen. "$ LCL $ filter design and performance analysis for grid-interconnected systems." IEEE Transactions on Industry Applications 50, no. 2 (2014): 1225-1232.

[76] Zammit, D., C. Spiteri Staines, and M. Apap. "Comparison between PI and PR current controllers in grid connected PV inverters." WASET, International Journal of Electrical, Electronic Science and Engineering 8, no. 2 (2014).

[77] Saïd-Romdhane, Marwa Ben, Mohamed Wissem Naouar, Ilhem Slama-Belkhodja, and Eric Monmasson. "Robust active damping methods for LCL filter-based grid-connected converters." IEEE Transactions on Power Electronics 32, no. 9 (2017): 6739-6750.

[78] Guo, Xiao-Qiang, Wei-Yang Wu, and He-Rong Gu. "Phase locked loop and synchronization methods for grid-interfaced converters: a review." Przeglad Elektrotechniczny 87, no. 4 (2011): 182-187.

[79] Ciobotaru, Mihai, Remus Teodorescu, and Frede Blaabjerg. "A new single-phase PLL structure based on second order generalized integrator." In Power Electronics Specialists Conference, 2006. PESC'06. 37th IEEE, pp. 1-6. IEEE, 2006.

الملحقات

الملحق 1

يوضح الجدول التالي متطلبات المعيار IEEE1547 للحقن في الشبكة الكهربائية. حيث يظهر في الجدول الحد الأعظمي المسموح لكل توافقية من التوافقيات التي تظهر في التيار المحقون في الشبكة كنسبة مئوية من التيار الأعظمي للنظام المربوط بالشبكة Rated current capacity. كما يجب على التشوه التوافقي الكلي THD للتيار المحقون عدم تجاوز الـ 5%.

Individual harmonic order h (odd harmonics)[b]	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 35$	$35 \leq h$
Percent (%)	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3

Table: Maximum harmonic current distortion in percent of rated current capacity.