

مجلة جامعة البعث

سلسلة العلوم الهندسية الميكانيكية
والكهربائية والمعلوماتية



مجلة علمية محكمة دورية

المجلد 44 . العدد 2

1443 هـ - 2022 م

الأستاذ الدكتور عبد الباسط الخطيب

رئيس جامعة البعث

المدير المسؤول عن المجلة

| | |
|-------------------|----------------------|
| رئيس هيئة التحرير | أ. د. ناصر سعد الدين |
| رئيس التحرير | أ. د. درغام سلوم |

مديرة مكتب مجلة جامعة البعث

بشرى مصطفى

| | |
|------------------|----------------|
| عضو هيئة التحرير | د. محمد هلال |
| عضو هيئة التحرير | د. فهد شريباتي |
| عضو هيئة التحرير | د. معن سلامة |
| عضو هيئة التحرير | د. جمال العلي |
| عضو هيئة التحرير | د. عباد كاسوحة |
| عضو هيئة التحرير | د. محمود عامر |
| عضو هيئة التحرير | د. أحمد الحسن |
| عضو هيئة التحرير | د. سونيا عطية |
| عضو هيئة التحرير | د. ريم ديب |
| عضو هيئة التحرير | د. حسن مشرقي |
| عضو هيئة التحرير | د. هيثم حسن |
| عضو هيئة التحرير | د. نزار عبشي |

تهدف المجلة إلى نشر البحوث العلمية الأصيلة، ويمكن للراغبين في طلبها

الاتصال بالعنوان التالي:

رئيس تحرير مجلة جامعة البعث

سورية . حمص . جامعة البعث . الإدارة المركزية . ص . ب (77)

. هاتف / فاكس : 963 31 2138071 ++

. موقع الإنترنت : www.albaath-univ.edu.sy

. البريد الإلكتروني : [magazine@ albaath-univ.edu.sy](mailto:magazine@albaath-univ.edu.sy)

ISSN: 1022-467X

قيمة العدد الواحد : 100 ل.س داخل القطر العربي السوري

25 دولاراً أمريكياً خارج القطر العربي السوري

قيمة الاشتراك السنوي : 1000 ل.س للعموم

500 ل.س لأعضاء الهيئة التدريسية والطلاب

250 دولاراً أمريكياً خارج القطر العربي السوري

توجه الطلبات الخاصة بالاشتراك في المجلة إلى العنوان المبين أعلاه.
يرسل المبلغ المطلوب من خارج القطر بالدولارات الأمريكية بموجب شيكات

باسم جامعة البعث.

تضاف نسبة 50% إذا كان الاشتراك أكثر من نسخة.

شروط النشر في مجلة جامعة البعث

الأوراق المطلوبة:

- 2 نسخة ورقية من البحث بدون اسم الباحث / الكلية / الجامعة) + CD / word من البحث منسق حسب شروط المجلة.
 - طابع بحث علمي + طابع نقابة معلمين.
 - إذا كان الباحث طالب دراسات عليا:
يجب إرفاق قرار تسجيل الدكتوراه / ماجستير + كتاب من الدكتور المشرف بموافقة على النشر في المجلة.
 - إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية:
يجب إرفاق قرار المجلس المختص بإنجاز البحث أو قرار قسم بالموافقة على اعتماده حسب الحال.
 - إذا كان الباحث عضو هيئة تدريسية من خارج جامعة البعث :
يجب إحضار كتاب من عمادة كليته تثبت أنه عضو بالهيئة التدريسية و على رأس عمله حتى تاريخه.
 - إذا كان الباحث عضواً في الهيئة الفنية :
يجب إرفاق كتاب يحدد فيه مكان و زمان إجراء البحث ، وما يثبت صفته وأنه على رأس عمله.
 - يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (العلوم الطبية والهندسية والأساسية والتطبيقية):
عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).
- 1- مقدمة
 - 2- هدف البحث
 - 3- مواد وطرق البحث
 - 4- النتائج ومناقشتها .
 - 5- الاستنتاجات والتوصيات .
 - 6- المراجع.

- يتم ترتيب البحث على النحو الآتي بالنسبة لكليات (الآداب - الاقتصاد - التربية - الحقوق - السياحة - التربية الموسيقية وجميع العلوم الإنسانية):
- عنوان البحث .. ملخص عربي و إنكليزي (كلمات مفتاحية في نهاية الملخصين).
- 1. مقدمة.
- 2. مشكلة البحث وأهميته والجديد فيه.
- 3. أهداف البحث و أسئلته.
- 4. فرضيات البحث و حدوده.
- 5. مصطلحات البحث و تعريفاته الإجرائية.
- 6. الإطار النظري و الدراسات السابقة.
- 7. منهج البحث و إجراءاته.
- 8. عرض البحث و المناقشة والتحليل
- 9. نتائج البحث.
- 10. مقترحات البحث إن وجدت.
- 11. قائمة المصادر والمراجع.
- 7- يجب اعتماد الإعدادات الآتية أثناء طباعة البحث على الكمبيوتر:
 - أ- قياس الورق 25×17.5 B5.
 - ب- هوامش الصفحة: أعلى 2.54- أسفل 2.54 - يمين 2.5- يسار 2.5 سم
 - ت- رأس الصفحة 1.6 / تذييل الصفحة 1.8
 - ث- نوع الخط وقياسه: العنوان . Monotype Koufi قياس 20
- . كتابة النص Simplified Arabic قياس 13 عادي . العناوين الفرعية Simplified Arabic قياس 13 عريض.
- ج . يجب مراعاة أن يكون قياس الصور والجداول المدرجة في البحث لا يتعدى 12سم.
- 8- في حال عدم إجراء البحث وفقاً لما ورد أعلاه من إشارات فإن البحث سيهمل ولا يرد البحث إلى صاحبه.
- 9- تقديم أي بحث للنشر في المجلة يدل ضمناً على عدم نشره في أي مكان آخر، وفي حال قبول البحث للنشر في مجلة جامعة البعث يجب عدم نشره في أي مجلة أخرى.
- 10- الناشر غير مسؤول عن محتوى ما ينشر من مادة الموضوعات التي تنشر في المجلة

11- تكتب المراجع ضمن النص على الشكل التالي: [1] ثم رقم الصفحة ويفضل استخدام التهميش الإلكتروني المعمول به في نظام وورد WORD حيث يشير الرقم إلى رقم المرجع الوارد في قائمة المراجع.

تكتب جميع المراجع باللغة الانكليزية (الأحرف الرومانية) وفق التالي:

آ . إذا كان المرجع أجنبياً:

الكنية بالأحرف الكبيرة . الحرف الأول من الاسم تتبعه فاصلة . سنة النشر . وتتبعها معترضة (-) عنوان الكتاب ويوضع تحته خط وتتبعه نقطة . دار النشر وتتبعها فاصلة . الطبعة (ثانية . ثالثة) . بلد النشر وتتبعها فاصلة . عدد صفحات الكتاب وتتبعها نقطة . وفيما يلي مثال على ذلك:

-MAVRODEANUS, R1986- Flame Spectroscopy. Willy, New York, 373p.

ب . إذا كان المرجع بحثاً منشوراً في مجلة باللغة الأجنبية:

. بعد الكنية والاسم وسنة النشر يضاف عنوان البحث وتتبعه فاصلة، اسم المجلد ويوضع تحته خط وتتبعه فاصلة . المجلد والعدد (كتابة مختزلة) وبعدها فاصلة . أرقام الصفحات الخاصة بالبحث ضمن المجلة . مثال على ذلك:

BUSSE,E 1980 Organic Brain Diseases Clinical Psychiatry News , Vol. 4. 20 – 60

ج . إذا كان المرجع أو البحث منشوراً باللغة العربية فيجب تحويله إلى اللغة الإنكليزية و التقيد

بالبنود (أ و ب) ويكتب في نهاية المراجع العربية: (المراجع In Arabic)

رسوم النشر في مجلة جامعة البعث

1. دفع رسم نشر (20000) ل.س عشرون ألف ليرة سورية عن كل بحث لكل باحث يريد نشره في مجلة جامعة البعث.
2. دفع رسم نشر (50000) ل.س خمسون ألف ليرة سورية عن كل بحث للباحثين من الجامعة الخاصة والافتراضية .
3. دفع رسم نشر (200) مئتا دولار أمريكي فقط للباحثين من خارج القطر العربي السوري .
4. دفع مبلغ (3000) ل.س ثلاثة آلاف ليرة سورية رسم موافقة على النشر من كافة الباحثين.

المحتوى

| الصفحة | اسم الباحث | اسم البحث |
|--------|--|---|
| 30-11 | هزار النجم د. يسر السيد سليمان الأتاسي | التعرف على الكلمات العربية باستخدام الشبكات العصبونية التلافيفية التكرارية |
| 52- 31 | م. نادين يزبك أ.د.م محمد علي سلامة أ.د.م أحمد الرصيص | البنية البلورية والقساوة الماكروية لمناطق مختلفة من الوصلات اللحامية الفولاذية متباينة التركيب الكيميائي والشخانة |
| 64-53 | داني ابراهيم أحمد اسكندر كلودا ابراهيم | تطوير نظام قيادة لمضخات المياه الكهروضوئية باستخدام عاكس تسلسلي ذو سبع مستويات |
| 98-65 | الدكتور المهندس غيث هاشم ورقوزق | استخدام المبدلات الالكترونية متعددة النبضات لتحسين جودة ربط الأفران التحريضية بالشبكة الكهربائية العامة |
| 130-99 | م. معلا إبراهيم د. م. حسام شاهين | استخدام خوارزمية الحوت للأمتلة في تحسين تقييم موثوقية نظام طاقة مركب – حالة دراسية: نظام الطاقة الكهربائية في محافظة اللاذقية |

التعرف على الكلمات العربية باستخدام الشبكات العصبونية

التلافيفية التكرارية

طالبة الدكتوراه هزارة النجم

كلية الهندسة المعلوماتية - جامعة البعث

إشراف الدكتورة يسر السيد سليمان الأتاسي

الملخص

إن التعرف على الكلمات العربية في الصور من المسائل المهمة في مجال رؤية الحاسوب لمنفعتها في تطبيقات الأتمتة وتحليل الصور وهي من المسائل الصعبة وذلك بسبب اختلاف الخطوط العربية وطول الكلمة وتنوع أشكال الحرف وفقاً لموقعه في الكلمة، سنقدم في هذه المقالة بنية شبكة عصبونية لحل هذه المسألة وسنفصل كل جزء من هذه البنية ودوره في عملية التعرف وسنعرض بعض الأمثلة عن تطبيق هذه البنية على عدد من الصور والتي تحوي على كلمات عربية

الكلمات مفتاحية: رؤية الحاسوب - التعرف على الكلمة العربية - التعلم العميق - الشبكات العصبونية

التلافيفية - الشبكات التكرارية - التصنيف الزمني الموصل

Recognition of the Arabic Words using recurrent convolutional neural networks

Abstract

Recognition of the Arabic words in the image is one of the important issues in computer vision for its usefulness in automation applications and image analysis, and it is one of the difficult issues due to the difference in Arabic fonts, word length and the variety of letter shapes according to their position in the word, in this article we will present a neural network architecture to solve this issue and we will separate each part of this architecture and its role in the recognition process, and we will present some examples of applying this architecture to a number of images that contain Arabic words

Keywords:

Computer Vision–Arabic Word Recognition–Deep Learning–Convolutional Neural Network – Recurrent Neural Network – Temporal Classification Connectionist

مقدمة

أصبحت نماذج الشبكات العصبونية العميقة محط اهتمام مؤخراً في مسائل تصنيف الأغراض والتعرف على النصوص ومنها الشبكات العصبونية التلافيفية التكرارية (Recurrent Convolutional Neural Network)

والتي لها ميزات الشبكات العصبونية والشبكات التكرارية وتعامل الكلمة على اعتبارها سلسلة من البيانات ومهمتها عنونة كل عنصر من هذه السلسلة على حدى لذا تعد مسألة التعرف على الكلمة مسألة عنونة سلسلة (sequence labelling problem).

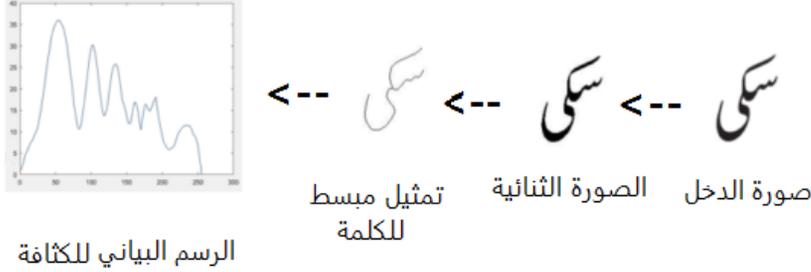
1- الهدف من البحث

إن الهدف من البحث هو حل مشكلة تقسيم الكلمة إلى أحرف حيث كان يتطلب التعرف على الكلمة في صورة تقسيم الصورة إلى أبعاد متساوية (صور أصغر) ومحاولة التعرف على كل حرف في هذه الصورة والذي يعد صعباً في اللغة العربية بسبب اختلاف أبعاد الحرف وأشكاله وموقعه.

3 - الدراسات السابقة للتعرف على الكلمة

اقتُرحت إحدى الدراسات التعرف على كلمات اللغة الأردنية [3] تطبيق معالجة مسبقة للصورة كتحويلها إلى صورة ثنائية ومن ثم تحويل الكلمة إلى تمثيل مبسط عنها وهو ما يسمى (Topological skeleton) ويعدها يتم استخراج الرسم البياني للكثافة (thickness graph) للكلمة وهو عدد البكسلات في كل عمود في

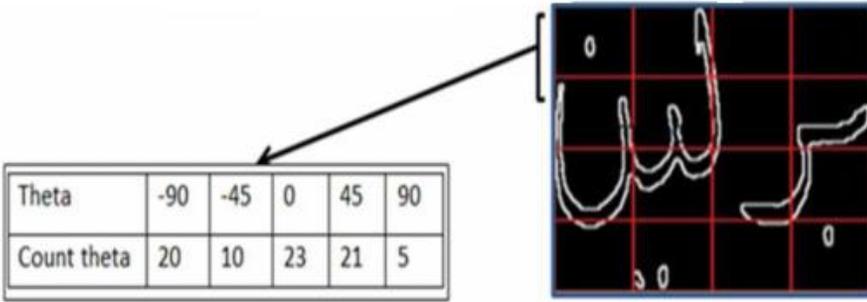
الصورة، ومن ثم ندخل الرسم البياني للشبكة العصبونية عوضاً عن أن يكون الدخل هو الصورة بوضعها الطبيعي (raw image) كما يوضح الشكل 3-1:



الشكل 3-1 معالجة مسبقة لصورة لاستخراج الرسم البياني للكثافة

من مساوئ هذه الطريقة أنها تتطلب استخدام كل الكلمات في اللغة لتحليلها وتصنيفها وبذلك تكون طريقة غير عملية بسبب عدد الكلمات في اللغة العربية ويقدر بـ 12.3 مليون كلمة.

هناك دراسة أخرى [1] اقترحت استخراج شعاع ميزات لكل كلمة فيها يتم تقسيم الصورة إلى 4*4 أجزاء، وتستخرج ميزات اتجاه الميل (gradient direction feature) لكل جزء على حدى على اعتبار أن الزوايا مقسمة لـ 5 زوايا رئيسية وهي [-90, -45, 0, 45, 90] كما يوضح الشكل 3-2:



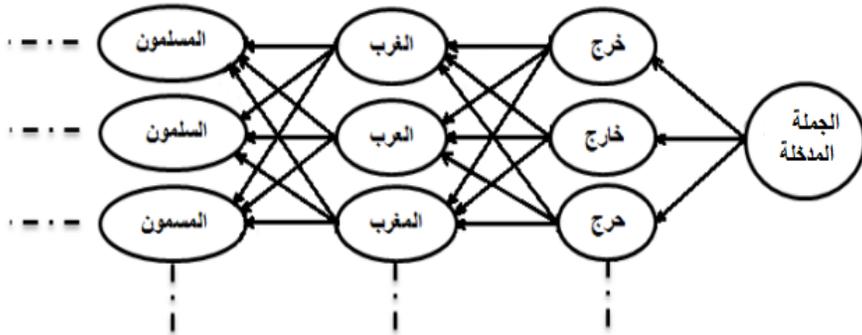
الشكل 2-3 استخراج ميزات اتجاه الميل لصورة

ويكون طول الشعاع الناتج (80)، كذلك يستخرج شعاع ميزات آخر بطول (128) ناتج عن تطبيق تحويل الموجة المنفصلة (Discrete Wavelet Transform) على الصورة عند المستوى (LL3) واستخراج الميزات البنوية وقيم الانحراف المعياري للصورة الناتجة وتمثيلها على شكل شعاع بطول (128) يضاف هذا الشعاع إلى الشعاع السابق ليصبح الطول الكلي للشعاع هو (208) يدخل إلى مرحلة التصنيف باستخدام خوارزمية الجار الأقرب (k-nearest neighbors)، من مساوي هذه الطريقة المعالجة المسبقة والتي تتطلب وقت وجهد.

أما في الدراسة [4] فتم استخدام عدد كبير من الكلمات العربية للتدريب واستخرجت ميزات تحويلات الجيب المنفصلة (Discrete Cosine Transform) لهذه الصور لتجميع الكلمات المتشابهة ضمن حزم (clusters) وفقاً لميزاتها، في مرحلة الاختبار يدخل السطر الذي يحوي نصاً وليكن (L) وفيه (n) كلمة على نظام التعرف ومن ثم يقسم لصور كلمات (X_1, X_2, \dots, X_n) تقارن ميزات كل صورة دخل (X_i) مع ميزات الحزم

التعرف على الكلمات العربية باستخدام الشبكات العصبونية التلافيفية التكرارية

وتسند الصورة للحزمة التي تحقق تشابهاً معها أي تحقق أقل مسافة اقليدية (Euclidean Distance) ممكنة معها، نستخدم كلمات الحزم التي تقابل كل صورة (X_i) في السطر (L) لتشكل سلسلة من الخيارات المتاحة وباستخدام نموذج لغة (n -gram language) يمكن اختيار النص الصحيح كما في الشكل 3-3 الذي يعرض مجموع من كلمات كل حزمة مثل (خرج - خارج - حرج...)



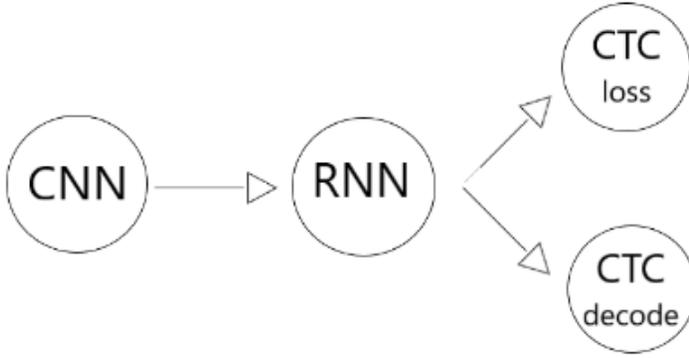
الشكل 3-3 مجموعة من الخيارات الممكنة والتي تقابل كلمات السطر (L)

4 - البنية المقترحة للشبكة العصبونية التلافيفية التكرارية:

تتألف هذه البنية من ثلاثة مكونات [5] وهي الطبقات التلافيفية (convolutional Layers) والطبقات

التكرارية (Recurrent Layers) وطبقة التصنيف الزمني الموصل (Temporal Classification)

(Connectionist Layer) كما يوضح الشكل 1-4

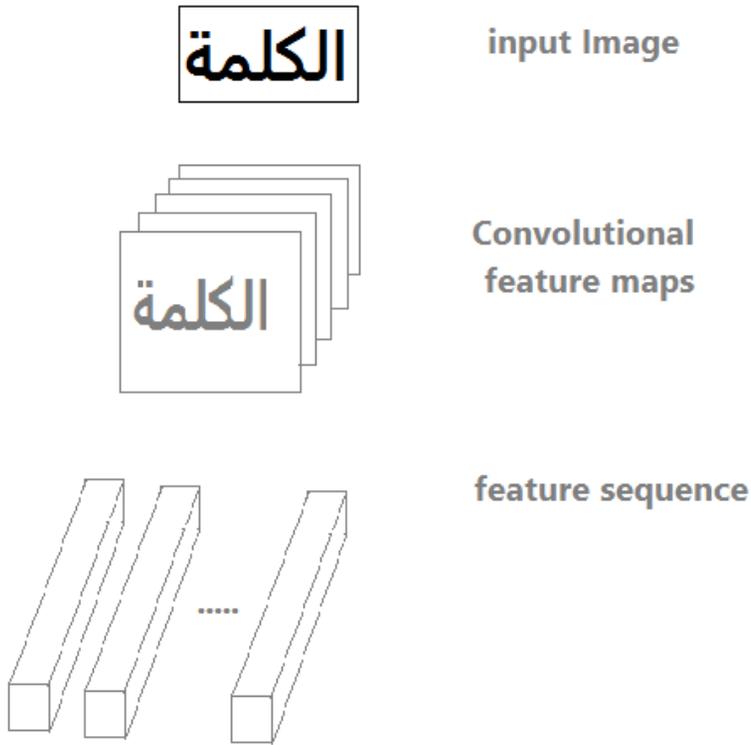


الشكل 1-4 شكل مبسط للبنية المقترحة

دخل هذه الشبكة هو صورة لكلمة ما أما خرجها فيكون سلسلة من العناوين (label sequence) أي سلسلة من الأحرف (العناوين) التي تشكل كلمة، سنفصل فيما يلي كل مكون فيها ودوره في عملية التعرف.

1-1-4 الطبقات التلافيفية (convolutional Layers)

تحتوي على طبقات تلافيفية وطبقات تجميع (max-pooling) مشابهة لنموذج الشبكة العصبونية التلافيفية القياسي ويستخدم لاستخراج ميزات صورة الدخل على شكل خريطة ميزات (Feature Map) ثم تحول هذه الخريطة لسلسلة من أشعة الميزات (sequence feature) وذلك باستخدام العمود i من كل عنصر من عناصر الخريطة ليشكل شعاع الميزة i أي أنه كل عنصر من سلسلة الميزات يقابل منطقة مستطيلة من الصورة الأصلية ويعد وصف لهذه المنطقة يوضح الشكل 2-4 آلية عمل الطبقات التلافيفية



الشكل 2-4 آلية عمل الطبقات التلافيفية

2-1-4 الطبقات التكرارية (Recurrent Layers):

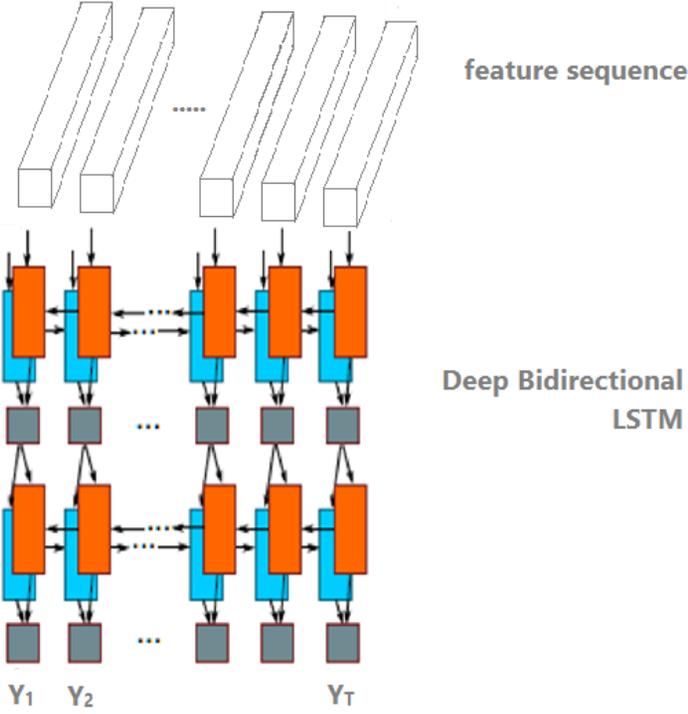
تحتوي على شبكة عصبونية تكرارية ثنائية الاتجاه (Bidirectional Recurrent Neural Network)

دخها هو خرج المرحلة السابقة (سلسلة الميزات) وخرجها هو مصفوفة تسمى (character score) تعبر عن احتمالية وجود كل عنوان (label) في كل شعاع ميزة من سلسلة الميزات.

تتألف الشبكات العصبونية التكرارية من وحدات عصبونية تحوي الوحدة التقليدية (i) على طبقة مخفية وطبقة دخل وخرج، عندما تتلقى الوحدة قيمة x_i تتغير قيمة h_t (والتي تعبر عن حالة الوحدة الحالية) بتابع غير خطي باستخدام الدخل والحالة السابقة للوحدة h_{t-1} وفق المعادلة التالية [6]:

$$h_t = G(x_i, h_{t-1})$$

ويكون خرج الوحدة Y_i بالاعتماد على h_t تعاني الشبكات التكرارية من مشكلة التدرج المتلاشي (vanishing gradient problem) مما يؤثر سلباً على عملية التدريب لذا تم حل هذه المشكلة باستخدام شبكات الذاكرة طويلة المدى وهي نوع من الشبكات التكرارية والتي تجيد التعامل مع البيانات المتسلسلة لذا نستخدم شبكات الذاكرة طويلة المدى عوضاً عن الشبكات التكرارية التقليدية، يوضح الشكل 3-4 الطبقات التكرارية ثنائية الاتجاه المستخدمة وتحوي على شبكة ذاكرة طويلة المدى من اليسار إلى اليمين (forward) وشبكة أخرى من اليمين إلى اليسار (backward) والسبب في استخدام شبكة ثنائية الاتجاه لأن ذلك يمكنها من التعرف على شكل الحرف من اليمين إلى اليسار ومن اليسار إلى اليمين.



الشكل 3-4 شبكة عصبونية تكرارية ثنائية الاتجاه

1-2-1-4 شبكات الذاكرة طويلة المدى (Long Short Term Memory networks) [3]

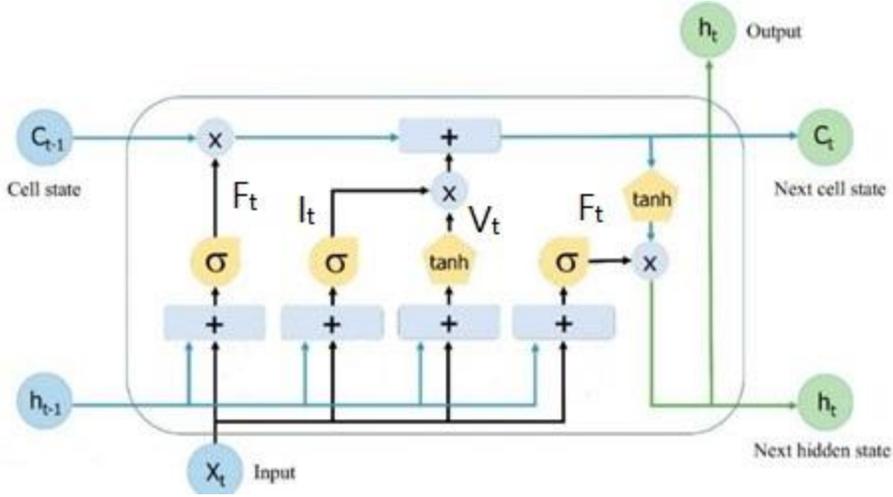
هي نوع خاص من الشبكات تحتوي على سلسلة من وحدات الشبكة العصبية المتكررة، في كل منها تم

استخدام بوابات (gates) تقسم البوابات إلى ثلاثة أنواع:

- بوابة الدخل (input gate)
- بوابة النسيان (forget gate)
- بوابة الخرج (output gate)

بالإضافة لما يسمى حالة الخلية (cell state) وهو عبارة عن ناقل للبيانات عبر السلسلة

يوضح الشكل 4-4 نموذجاً من هذه الوحدات



الشكل 4-4 شبكات الذاكرة طويلة المدى

أول خطوة في شبكات الذاكرة طويلة الأمد هو اختيار أي من المعلومات ستهمل في حالة الخلية C_t ، يعود هذا الخيار لبوابة النسيان حيث يتم تمرير الدخل X_t وخرج الخلية السابقة h_{t-1} لتابع sigmoid ويكون الخرج F_t هو شعاع قيمها بين 0 و 1 بالنسبة لـ C_{t-1} القيم الأقرب (0) في F_t تهمل والقيم الأقرب لـ (1) تحفظ .

الخطوة التالية هي اختيار أي من المعلومات سيتم حفظها باستخدام بوابة الدخل فيها يتم تمرير الدخل X_t والحالة المخفية h_{t-1} لتابع sigmoid لتقرير أي من المعلومات سيتم تحديثها لتولد I_t ، ثم تدخل نفس البيانات

(x_t, h_{t-1}) لتابع \tanh لتشكل شعاع من القيم المرشحة الجديدة V_t والتي تكون بين -1 و 1 والتي يمكن أن

تضاف لحالة الخلية، تستخدم القيم (F_t, V_t, I_t) لتحديث معلومات حالة الخلية وفقاً للمعادلة التالية [7]

$$C_t = F_t \times C_{t-1} + I_t \times V_t$$

الخطوة الأخيرة هي اختيار الخرج (ويسمى أحياناً Hidden State يحوي معلومات عن الإدخالات السابقة X

و يستخدم للتوقع) بالاعتماد على حالة الخلية حيث نقرر أي جزء من حالة الخلية سيتم تمريره كخرج عن

طريق تابع \tanh وفقاً للمعادلة التالية [7]

$$H_i = \tanh(C_i) \times F_i$$

بالتعرف على بنية شبكات الذاكرة الطويلة الأمد نلاحظ كيف أنها تحل مشكلة التعلم البطيء والذاكرة القصيرة

الأمد للشبكات التكرارية بتخزين معلومات الإدخال السابقة وتعديل حالة الخلية بشكل مستمر، في الشبكات

العصبونية التلافيفية التكرارية يكون دخل كل وحدة هو شعاع مميزة يحوي معلومات عن جزء من الصورة والخرج

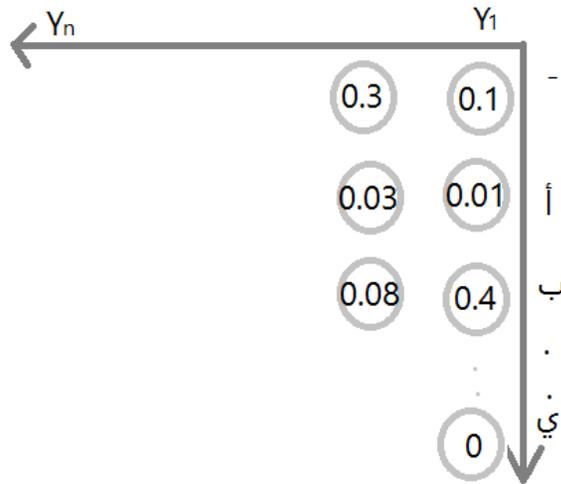
هو مصفوفة أحادية البعد تحوي توزع احتمالات وجود حرف ما ضمن شعاع الميزات المدخل لها وتشكل

مجموعة هذه المصفوفات (character -score).

4-1-3 طبقة التصنيف الزمني الموصل (Temporal Classification Connectionist Layer):

دخل هذه الطبقة هو خرج المصفوفة السابقة character-score وخرجها هو الكلمة المتوقعة في الصورة ولها مهمتان أولاً حساب قيمة الخسارة لتدريب الشبكة العصبونية ثانياً فك ترميز (decoding) المصفوفة وذلك باختيار الحرف الذي له احتمالية أكبر من كل عمود ضمن المصفوفة لتشكيل مجموعة هذه الأحرف الكلمة المناسبة.

بدراسة اللغة العربية كمثال فإن عدد العناوين (الأحرف) هو (28) ويضاف له ما يسمى بالعنوان الفارغ (blank) ويرمز ب(-) ويمثل أي خرج ليس ضمن الأحرف العربية وبذلك يكون عدد العناوين المحتملة مقابل كل عمود من character-score هو (29)، في الشكل 4-5 مثال عن character-score فيه كل شعاع Y_i يعبر عن احتمالات وجود الأحرف العربية والعنوان الفارغ ضمن عمود في الصورة



الشكل 4-5 مثال عن character-score

يتضمن فك التشفير البحث عن عدد من الخيارات الممكنة بالاعتماد على احتمالية وجودها في الصورة وبما أن حجم المفردات غالباً ما يكون مئات ومئات من الكلمات لذا تعد مسألة البحث من المسائل الصعبة الحل، هناك طرق عديدة لفك التشفير منها طريقة البحث الشره (Greedy Search Decoder) وطريقة البحث عن سلاسل الكلمة (Word Beam Search)

1-3-1-4 طريقة البحث الشره Greedy Search

تقوم هذه الطريقة على مبدأ اختيار الحرف الذي له الاحتمالية الأكبر في كل خطوة كمثال من الشكل 4-5 من الشعاع Y_1 نختار المحرف (ب) الذي يقابل القيمة (0.4) وهي أكبر قيمة ضمن الشعاع ثم نختار (-) أي محرف فارغ لأن له الاحتمالية الأكبر وهكذا حتى تنتهي من المصفوفة ونحصل على نص مقابل، من منافع هذه الطريقة أنها سريعة جداً وفعالة لكن الخرج قد لا يكون مثالياً.

2-3-1-4 بحث عن سلاسل الكلمة [2] Word Beam Search

مبدأ هذه الطريقة هي اختيار أعلى قيمة بين جداءات الاحتمالات الممكنة من العلاقة التالية:

$$p(s) = p(0) * p(1) * \dots * p(T)$$

S : السلسلة

T : طول السلسلة

P(i) : احتمال محرف ما في السلسلة i

تقدم عدد من الاحتمالات الممكنة كلما زاد هذا العدد كلما تحسن خرج النموذج .

باستخدام إحدى طرق فك التشفير السابقة يكون الخرج لإحدى الصور على الشكل:

ا---ل-ككك-ل-ل-مم-ة----

بحيث يكون كل محرف مقابل لعمود (1 بكسل) من الصورة، بحذف الأحرف المتكررة ضمن كل مجموعة

يصبح الخرج:

ا---ل-ك-ل-م-ة----

ثم حذف المحرف الفارغ (-) ويصبح الخرج (ا ل ك ل م ة) --> الكلمة.

من ميزات الشبكات العصبونية التلافيفية التكرارية أولاً أن لها القدرة على استخراج المعلومات من الأغراض

(النصوص) التي لها بنية محددة في السلسلة، ويساعد هذا في التعامل مع كل محرف وفقاً لطوله مثلاً حرفي

الـ"ك" و"ب" يمكن التمييز بينها وفقاً للطول، ثانياً يمكن لهذه البنية استخدام خاصية التغذية الرجعية (-back

propagation) لتعديل الأوزان و تقليل الأخطاء مما يسمح له بتدريب الطبقات التكرارية والتلافيفية، ثالثاً

تستطيع هذه الشبكة العمل على سلاسل (نصوص) مختلفة الطول.

5- النتائج العملية:

بتطبيق البنية السابقة باستخدام لغة البايثون على قاعدة بيانات أعددناها سابقاً يدوياً وتم تشكيلها من توليد

صور عدد من كلمات اللغة العربية وتحوي على 1700 صورة عربية

التعرف على الكلمات العربية باستخدام الشبكات العصبونية التلافيفية التكرارية

وباستخدام بيئة Google Colab تم تدريب الشبكة واختبارها وكانت النتائج كما في الشكل 5-1 كل صورة من الصور تحوي محتواها النصي أعلاها.

| | | |
|--------|--------|-------|
| أخذ | فقد | حولك |
| أخذ | فقد | حولك |
| جميعنا | عليهما | أجل |
| جميعنا | عليهما | أجل |
| تلك | بعد | فأكثر |
| تلك | بعد | فأكثر |

الشكل 5-1 النتائج العملية

WRR Word Recognition Rate معدل التعرف على الكلمة

يوضح الجدول 5-1 مقارنة بين نتائج دقة التعرف على الكلمة (Word Recognition Rate)

حيث يعرف WRR وفق المعادلة:

عدد الكلمات تم التعرف عليها بشكل صحيح

عدد الكلمات الكلي

في الدراسات السابقة المذكورة في الفصل الثالث ونتائج دراساتنا

| | |
|---|-------------------|
| 8 | دقة الدراسة الساء |
| 5 | دقة الدراسة الساء |

| | |
|---|-------------------|
| 6 | دقة الدراسة الساة |
| 9 | دقة دراستنا |

الجدول 1-5

كانت نتائج الدقة في الدراسة الأولى ممتازة لأنها تدرب الشبكة العصبونية على تمثيل بياني مبسط للكلمة أما الدراسة الثانية فكانت نتائجها أقل من سابقتها لأنها تستخدم مصنف الجار الأقرب عوضاً عن الشبكة العصبونية، نتائج الدراسة الثالثة هي الأقل بسبب عدد التجمعات (cluster) الكبير حيث يحوي كل تجمع الكلمات العربية المتشابهة في اللغة العربية أما في دراستنا فقد كانت الدقة ممتازة بسبب الشبكة الهجينة المستخدمة التي تولد ميزات الصورة وتعالجها بالشبكات العصبونية التكرارية ثنائية الاتجاه لتولد احتمالات وجود كل حرف في موقع ما ضمن الصورة.

تطلب تدريب الشبكة السابقة (56 دقيقة و 43 ثانية) وزمن الاختبار (28.2 ثانية).

6 - الأعمال المستقبلية:

يمكن توسيع هذه الدراسة لتشمل كشف والتعرف على الكلمات العربية في الصورة باستخدام شبكات أعقد من بنية الشبكات العصبونية التلافيفية التكرارية مثل الشبكة العصبونية التلافيفية التي تعتمد على القناع Mask R-CNN وتقوم بمهام التعرف وكشف الأغراض في الصورة باستخدام مجموعة من النوافذ الممكنة.

7 - الخاتمة:

إن التعرف على الكلمات العربية باستخدام الشبكات العصبونية التلافيفية التكرارية هو مجال بحث نشط يحتاج دائماً إلى تحسين في الدقة، في القسم العملي أظهرنا أن دقة التصنيف كانت واعدة بمعدل 98.9% على صور الاختبار، نأمل في المستقبل أن يتحسن معدل الدقة ليشمل الكلمات العربية مهما كان شكلها ونوع الخط في الصورة.

8- المراجع:

- [1] عبدالكريم ع. ، عباس م.ع [1] Proposed Multi Feature Extraction Method For Off-line Arabic Handwriting Word Recognition, مجلة المنصور, Vol. 2018, No. 30, P.P. 17
- [2] H. Scheidl, S. Fiel and R. Sablatnig, "Word Beam Search: A Connectionist Temporal Classification Decoding Algorithm," 2018 16th International Conference on Frontiers in Handwriting Recognition (ICFHR), 2018, pp. 253-258, doi: 10.1109/ICFHR-2018.2018.00052.
- [3] Naseer A. , Zafar K., 2018, Comparative analysis of raw images and meta feature based Urdu OCR using CNN and LSTM, International Journal of Advanced Computer Science and Applications, Vol. 9, No. 1, P.P. 419-424
- [4] Nashwan F.M.A. , Rashwan M.A.A. , Al-Barhamtoshy H.M. , Abdou S.M. , 2018, A holistic technique for an Arabic OCR

system, Journal of Imaging, Vol. 4, No. 1, P.P. 1–11

- [5] Safarzadeh V.M. , Jafarzadeh P., 2020, Offline Persian Handwriting Recognition with CNN and RNN–CTC, 2020 25th International Computer Conference, Computer Society of Iran, CSICC 2020, No. February, P.P. 1–13
- [6] Shi B. , Bai X., 2017, An End-to-End Trainable Neural Network for Image-Based Sequence Recognition and Its Application to Scene Text Recognition, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 39, No. 11, P.P. 2298–2304
- [7] Vinet L. , Zhedanov A., 2011, A “missing” family of classical orthogonal polynomials, Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical, Vol. 44, No. 8, P.P. 156–157

البنية البلورية والقساوة الماكروية لمناطق مختلفة من الوصلات اللحامية الفولاذية متباينة التركيب الكيميائي والثخانة

م. نادين يزبك* أ.د.م محمد علي سلامة** أ.د.م أحمد الرصيص***

*طالبة دراسات عليا- قسم هندسة التصميم الميكانيكي- جامعة دمشق

** أستاذ- قسم هندسة التصميم الميكانيكي- جامعة دمشق

*** مدير بحوث- المعهد العالي للعلوم التطبيقية والتكنولوجيا- دمشق

ملخص

أجريت دراسة تجريبية مكثفة بهدف بيان تأثير بارامترات نظام لحام الصهر بالقوس الكهربائي في البنية البلورية والقساوة الماكروية للوصلات الفولاذية متباينة التركيب الكيميائي والثخانة. استُخدم في هذه الدراسة صفائح من الفولاذ الكربوني ومثيله المقاوم للصدأ كمعادن متباينة التركيب الكيميائي. جرت دراسة البنية البلورية للوصلات الملحومة باستخدام المجهر الضوئي. لوحظ تواجد البنية الفريتية- البرليتية في مناطق مختلفة من الوصلات اللحامية للفولاذ الكربوني (منطقة اللحام وخط الصهر ومنطقة التأثر الحراري والمعدن الأم)، بينما كانت البنية أوستنيتية في منطقة اللحام للوصلات اللحامية من الفولاذ المقاوم للصدأ والوصلات من (الفولاذ الكربوني- الفولاذ المقاوم للصدأ). جرى استخدام إلكترودات من الفولاذ منخفض الكربون (E6013) و(E7018-1) للحام صفائح الفولاذ الكربوني، وإلكترودات من الفولاذ المقاوم للصدأ (E316L-16) للحام صفائح

البنية البلورية والقساوة الماكروية لمناطق مختلفة من الوصلات اللحامية الفولاذية متباينة التركيب الكيميائي والثخانة

الفولاذ المقاوم للصدأ وصفائح من (الفولاذ الكربوني- الفولاذ المقاوم للصدأ). أظهر اختبار القساوة الماكروية عدم وجود أطوار قاسية في المناطق المختلفة من الوصلات اللحامية.

الكلمات المفتاحية: لحام الصهر بالقوس الكهربائي- فولاذ كربوني- فولاذ مقاوم للصدأ- الثخانة- التركيب الكيميائي.

Micro- Structure and Macro- Hardness of various zones of steel joints, varied in chemical composition and thickness

*Eng Nadine Yazbek **Prof.Dr.Eng Mohamad Ali Salameh ***
Prof.Dr.Eng Ahmed Al Rassis

*Postgraduate student- Department of Mechanical Design
Engineering- Damascus University

**Professor- Department of Mechanical Design Engineering-
Damascus University

***Professor- Higher Institute of Applied Sciences and Technology

Abstract

Intensity experimental study has been performed to show the effect of arc welding parameters on the micro- structure and macro-hardness of steel joints, varied in chemical composition and thickness. Carbon steel and stainless steel plates were the welded dissimilar metals, which used in this study. Light microscope was used to examine the microstructure of welded joints. Ferrite- Pearlite structure was seen in various zones of the carbon steel joints (WM, FL, HAZ & PM), but austenitic structure was seen in the weld metal zone of stainless steel and (carbon steel- stainless steel) joints. Low carbon steel electrodes (E6013) & (E7018-1) were used to join carbon steel plates, and stainless steel electrodes (E316L-16) were used to join stainless steel and (carbon steel- stainless steel) plates. The macro- hardness test has showed that hard phases were not formed in the various zones of welded joints.

Key Words: Arc welding process- Carbon steel- Stainless steel- Thickness- Chemical composition.

مقدمة:

يعد لحام الصهر بالقوس الكهربائي لأنواع الفولاذ متباينة التركيب الكيميائي والثخانة ذا أهمية كبيرة في نطاق الصناعة، إذ يستخدم هذا اللحام بشكل واسع في كل من خطوط نقل النفط الخام والغاز ومحطات توليد الطاقة والمفاعلات النووية والصناعات البتروكيميائية. يواجه هذا اللحام العديد من المشاكل والصعوبات مثل انخفاض الخواص الميكانيكية لمناطق مختلفة من الوصلات للحامية (منطقة اللحام وخط الصهر ومنطقة التأثر الحراري والمعدن الأم) وحدث بعض العيوب، وذلك بسبب الاختلاف في الخواص الكيميائية والفيزيائية (الحرارية) والميكانيكية للمعادن الملحومة معاً. [2]

تبرز أهمية لحام المعادن متباينة التركيب الكيميائي في إمكانية التعويض عن الوصلات للحامية ذات الثخانات الكبيرة بمثلاتها من الثخانات الأقل والمتمتعة بخواص ميكانيكية أعلى وأكثر مقاومة لظروف استثمار هذه الوصلات. ولكن ذلك يتطلب اختيار البارامترات المثلى لنظام لحام الصهر والتي تحقق بنى بلورية خالية من العيوب الميكروية لمناطق مختلفة من الوصلة للحامية وتتمتع بأفضل الخواص الميكانيكية لهذه الوصلات. من أمثلة هذا النوع من اللحام متباين التركيب الكيميائي والثخانة: لحام الفولاذ الكربوني مع مثيله السبائكي ولحام أنواع مختلفة من الفولاذ المقاوم للصدأ متباينة التركيب الكيميائي والثخانة.

هدف البحث:

- التوصل إلى بارامترات اللحام المتناسبة مع ثخانة الوصلات للحامية المدروسة متباينة التركيب الكيميائي.

- الحصول على أفضل خواص ميكانيكية ممكن الوصول إليها لمناطق مختلفة من الوصلة للحامية، وذلك من خلال التحكم ببارامترات نظام اللحام.
- تعزيز عمليات لحام الخلائط المعدنية (أو السبائك) متباينة التركيب الكيميائي في سوريا ومحاولة إيضاح منهجيات لحام الخلائط المعدنية متباينة التركيب الكيميائي والثخانة لتسهيل استخدامها في سوق العمل.

مواد وطرائق البحث:

تم في هذا البحث لحام صفائح من الفولاذ الكربوني St52-3 و St37-2 والفولاذ المقاوم للصدأ AISI 316L و AISI 304 ذات الثخانات المختلفة.

تبيين الجداول (1)، (2)، (3)، (4) التركيب الكيميائي لأنواع الفولاذ المستخدمة في البحث.

الجدول (1) التركيب الكيميائي لعينات الفولاذ الكربوني St52-3

| نوع الفولاذ | C | Si | Mn | P | S |
|-------------|------|------|-----|------|------|
| St 52-3 | 0.22 | 0.55 | 1.6 | 0.04 | 0.04 |

الجدول (2) التركيب الكيميائي لعينات الفولاذ الكربوني St37-2

| نوع الفولاذ | C | Si | Mn | P | S |
|-------------|------|------|------|-------|-------|
| St37-2 | 0.11 | 0.12 | 0.37 | 0.008 | 0.004 |

الجدول (3) التركيب الكيميائي لعينات الفولاذ المقاوم للصدأ 304

| نوع الفولاذ | Cr% | Ni% | Mn% | Si% | C% |
|-------------|------|-----|-----|-----|------|
| S.S 304 | 17.5 | 8 | 2 | 1 | 0.07 |

الجدول (4) التركيب الكيميائي لعينات الفولاذ المقاوم للصدأ 316L

| نوع الفولاذ | Cr% | Ni% | Mn% | Si% | C% | Mo% | N% | P% | S% |
|-------------|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|------|------|
| S.S 316L | 16 | 10 | 2 | 1 | 0.08 | 2 | 0.1 | 0.05 | 0.03 |

ويوضح الجدول (5) الثخانات المستخدمة في البحث والملحومة معاً. تم لحام الصفائح وفق وضعيتي لحام، حيث تم لحام العينتين D2,D3 لحاماً تراكيبياً بينما تم لحام باقي العينات تتاكيباً. اختلفت زوايا الشنفرة للصفائح الملحومة معاً وفقاً لثخانة كل منها.

الجدول (5) ثخانات الصفائح الفولاذية والملحومة معاً ووضعيات لحامها

| اسم العينة | وضعية اللحام | معدن الأساس الأول | ثخانته (mm) | زاوية الشنفرة | معدن الأساس الثاني | ثخانته (mm) | زاوية الشنفرة |
|------------|--------------|-------------------|-------------|---------------|--------------------|-------------|---------------|
| A | تتاكبي | St37-2 | 5 | 45° | St52-3 | 7 | 45° |
| B | تتاكبي | St37-2 | 10 | 60° | St52-3 | 6 | 45° |
| C | تتاكبي | St37-2 | 6 | 45° | St52-3 | 9 | 45° |
| D1 | تتاكبي | S.S 304 | 4 | دون | S.S 316L | 3 | دون |
| D2 | تراكبي | S.S 304 | 2 | دون | S.S 316L | 4 | دون |
| D3 | تراكبي | S.S 304 | 8 | دون | S.S 316L | 4 | دون |
| E1 | تتاكبي | S.S 304 | 6 | 45° | St52-3 | 4 | 45° |
| E2 | تتاكبي | S.S 304 | 6 | 45° | St37-2 | 4.6 | 45° |

تم لحام الصفائح على مجموعتين:

المجموعة الأولى (العينات A,B,C) : صفائح من الفولاذ الكربوني والتي تم لحامها باستخدام آلة اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي، وباستخدام إلكتروود اللحام من الفولاذ منخفض الكربون، حيث تم لحام المسار الأول للوصلة للحامية (جذر الدرزة للحامية)

باستخدام إلكترونيات من النوع E6013 ، بينما جرى لحام باقي المسارات باستخدام إلكترونيات من النوع E7018-1.

المجموعة الثانية (العينات D1, D2, D3, E1, E2) والتي هي صفائح الفولاذ المقاوم للصدأ التي تم لحامها معاً وأخرى تم لحامها مع صفائح من الفولاذ الكربوني باستخدام آلة اللحام بالقوس الكهربائي اليدوي وإلكترونيات اللحام من الفولاذ المقاوم للصدأ E316L-16. يوضح الجدول (6) بارامترات اللحام المستخدمة في كل حالة، إذ استخدم التيار المستمر للحام الصفائح الفولاذية المدروسة في البحث، وذلك لأن التيار المستمر يحقق ثبات بشدة تيار اللحام واستقرار لقوس اللحام. وتم تحديد شدة التيار الابتدائية تبعاً لنوع الفولاذ المراد لحامه في كل حالة، واختيرت القطبية المباشرة لأن المعدن الملحوم هو الفولاذ والذي يحتاج إلى درجات حرارة عالية ليتم صهره. [6] [p.94, p.110]

الجدول(6) يبين بارامترات اللحام المستخدمة

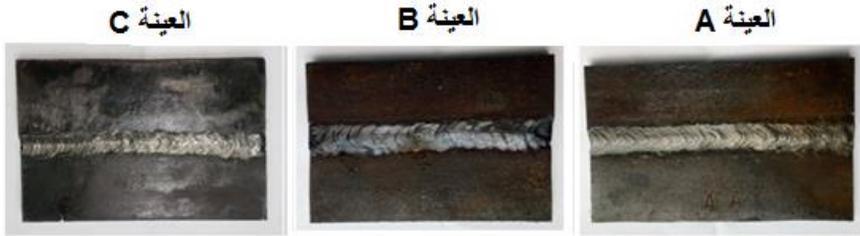
| العينة | إلكترونيات اللحام | تيار اللحام (A) وقطبيته | توتر القوس (V) | زمن اللحام (Sec) | سرعة اللحام (Cm/Sec) |
|--------|-------------------|-------------------------|----------------|------------------|----------------------|
| A | E6013, E7018-1 | (100-120) - مباشرة | 25 | 68 | 0,36 |
| B | E6013, E7018-1 | (100-120) - مباشرة | 25 | 107 | 0.36 |
| C | E6013, E7018-1 | (100-120) - مباشرة | 25 | 100 | 0.36 |
| D1 | E316L-16 | (100-120) - مباشرة | 24 | 74 | 0.24 |
| D2 | E316L-16 | (100-120) - مباشرة | 24 | 199 | 0.089 |
| D3 | E316L-16 | (100-120) - مباشرة | 25 | 117 | 0.11 |
| E1 | E316L-16 | (100-120) - مباشرة | 25 | 155 | 0.11 |
| E2 | E316L-16 | (100-120) - مباشرة | 25 | 127 | 0.11 |

البنية البلورية والقساوة الماكروية لمناطق مختلفة من الوصلات للحامية الفولاذية متباينة التركيب
الكيميائي والثخانة

لتجنب حدوث عيوب اللحام يجب أن يتم التحكم بالطاقة الطولية (طاقة الدخول) أثناء عملية اللحام على طول الوصلة للحامية، ويمكن تحقيق ذلك عن طريق التحكم بطول عمود القوس، حيث كان في بداية اللحام حوالي 3mm وتم تقليل طوله تدريجياً حتى بلغ في نهاية خط اللحام حوالي 0,5mm .

نظراً لاختلاف الثخانة بين المعدنين الملحومين معاً، يتم توجيه الإلكترود نحو المعدن الأكثر ثخانة وذلك بغاية تحقيق توازن في صهر المعدنين معاً.

وتوضح الأشكال (1)، (2)، (3) العينات بعد اللحام:



الشكل (1) العينات A,B,C بعد اللحام



الشكل (2) العينات D1, D2, D3 بعد اللحام



الشكل (3) العينتين E1, E2 بعد اللحام

ويغرض دراسة البنية البلورية والقساوة، تم اقتطاع عينات بعرض 20mm من الصفائح الملحومة. [6] [P:50]

شُحذت سطوح العينات باستخدام أوراق الشحذ التي تتدرج نعومتها من 150 وحتى 1200. ومن ثم صُقلت سطوحها باستخدام قرص دوّار مغطى باللباد ومادة حاكّة من أكسيد الألمنيوم. تلى ذلك عملية التتميش والتي تقسم العينات إلى مجموعتين، الأولى يتم فيها استخدام حمض الأزوت المخفف بنسبة 4% لتتميش وصلات لحام الفولاذ الكربوني، حيث يتم غمسها في المحلول لمدة 20 Sec ثم غسلها بالماء وتجفيفها. بينما يتم تتميش عينات الفولاذ المقاوم للصدأ باستخدام مزيج من حمض كلور الماء (بنسبة 45%) وحمض الأزوت (بنسبة 10%) وماء مقطر (بنسبة 45%)، حيث يتم غمس العينات في المحلول لمدة لا تقل عن 10 Min، وقد استغرق تتميش الفولاذ المقاوم للصدأ لمدة تزيد على 10 Min. [3] [P.P:45-48]

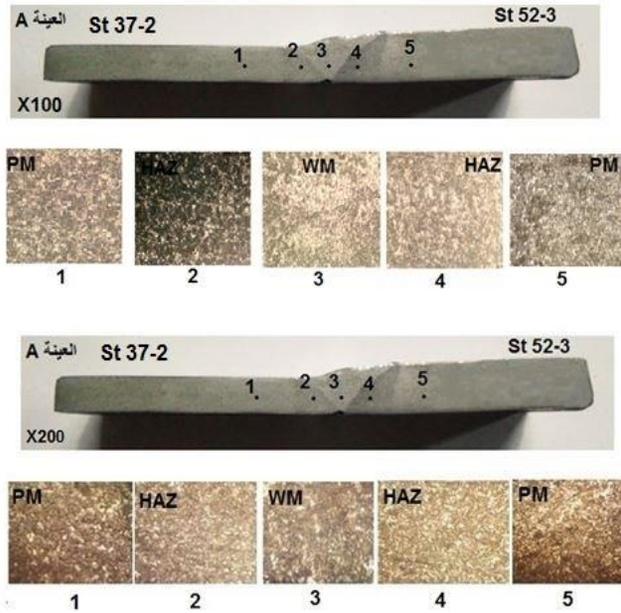
النتائج والمناقشة:

تمت دراسة البنية البلورية عند نسبتي تكبير X100, X200، حيث أظهرت دراسة البنية البلورية ما يلي:

- البنية البلورية للعينات A, B, C هي فريت وبرليت. يظهر حجم الحبيبات في حوض اللحام صغير وناعم، بينما يلاحظ ازدياد حجمها في المناطق المتأثرة بالحرارة.
- البنية البلورية في العينات D1, D2, D3 كانت أوستنيتية بالكامل.
- البنية البلورية لمنطقة التأثير الحراري في العينات E1, E2 كانت أوستنيتية بالكامل في طرف صفيحة الفولاذ المقاوم للصدأ، وبنية فريتية-برليتية في طرف صفيحة الفولاذ الكربوني. ولكن يلاحظ في هذه المنطقة ازدياد في نسبة الفريت عن باقي مناطق الفولاذ الكربوني، يمكن تعليل ذلك باحتمالية حدوث هجرة لبعض ذرات الكربون إلى منطقة حوض اللحام، ولكنها لم تؤثر في بنيته والتي بقيت أوستنيتية والدليل على ذلك تجانس قيم القساوة فيها.
- يلاحظ أن شكل حبيبات الأوستنيت طولي في منطقة التأثير الحراري للفولاذ المقاوم للصدأ، بينما شكل حبيبات البرليت والفريت حبيبي في منطقة التأثير الحراري للفولاذ الكربوني.
- يلاحظ ازدياد حجم الحبيبات في منطقة التأثير الحراري للفولاذ الكربوني.
- وُجد الأوستنيت بتوزع شجري (دندريتي) في الفولاذ المقاوم للصدأ، حيث يلاحظ نمو الأوستنيت بهذا الشكل في منطقة خط الصهر مع المعدن الأكثر ثخانة لعينات الفولاذ المقاوم للصدأ D1, D2, D3. نجد أن هذه البنية في العينة D3 كانت واضحة في خط الصهر مع المعدن الأساس 304 ذي الثخانة الأكبر، وفي العينة D2 مع المعدن 316L ذي الثخانة الأكبر، كما يمكن أن يلاحظ في هذه العينة أن منطقة التأثير الحراري المجاورة لخط الصهر هذا ذات بلورات أكبر من باقي المناطق.

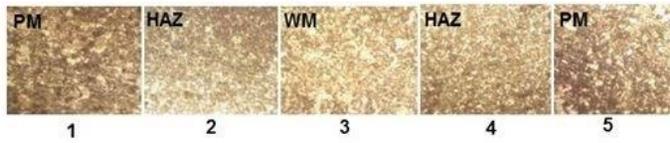
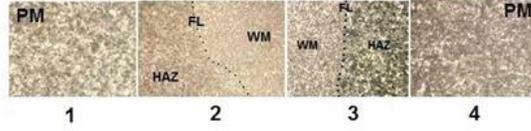
يمكن تفسير ذلك بأن اتجاه انتقال الحرارة أثناء تجمد معدن اللحام يكون من حوض اللحام باتجاه معدن الأساس البارد مما يؤدي لتشكل هذه البلورات الشجرية الطولية بزوايا قائمة على خط اللحام.

توضح الأشكال التالية (4)، (5)، (6)، (7)، (8)، (9)، (10)، (11) البنى البلورية التي تم الحصول عليها:

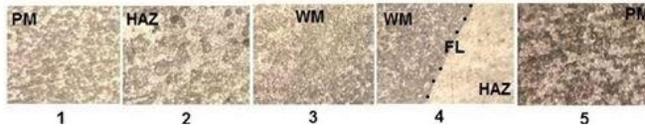


الشكل (4) البنية البلورية للعينة A بتكبير X100, X200

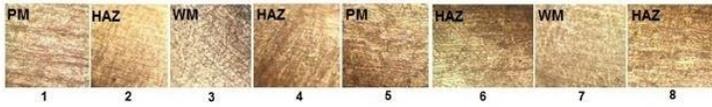
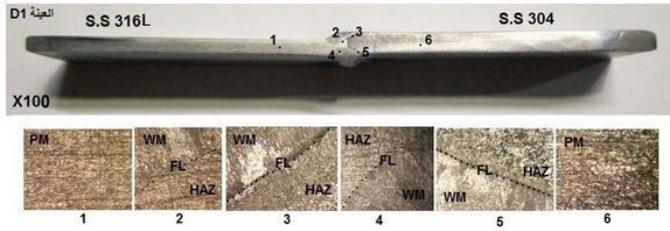
البنية البلورية والقساوة الماكروية لمناطق مختلفة من الوصلات اللحامية الفولاذية متباينة التركيب الكيميائي والثخانة



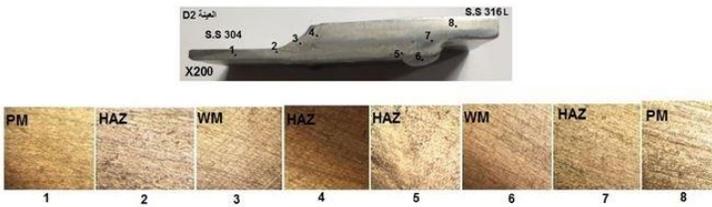
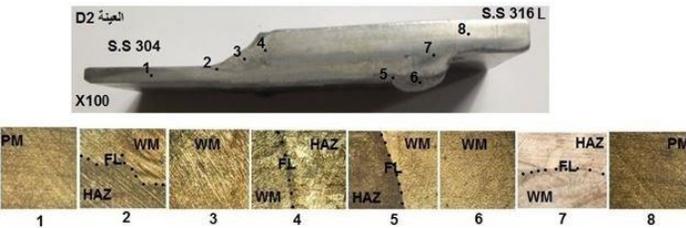
الشكل (5) البنية البلورية للعينة B بتكبير X100, X200



الشكل (6) البنية البلورية للعينة C بتكبير X100, X200

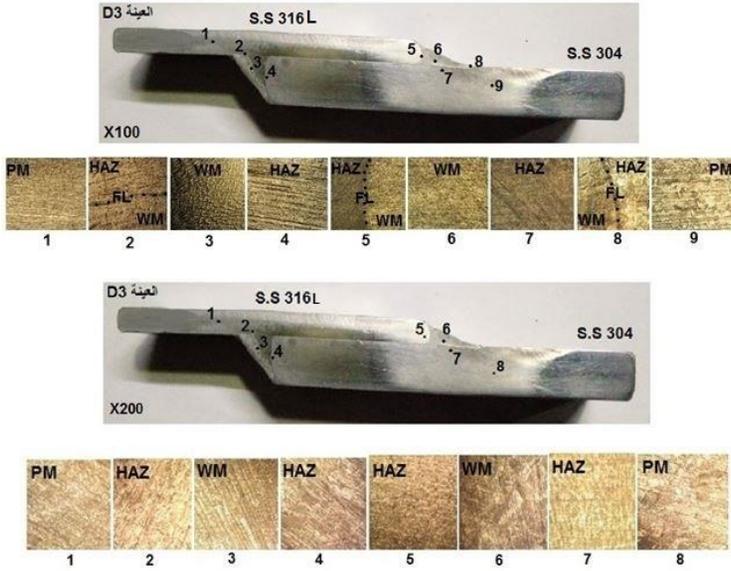


الشكل (7) البنية البلورية للعينة D1 بتكبير X100, X200

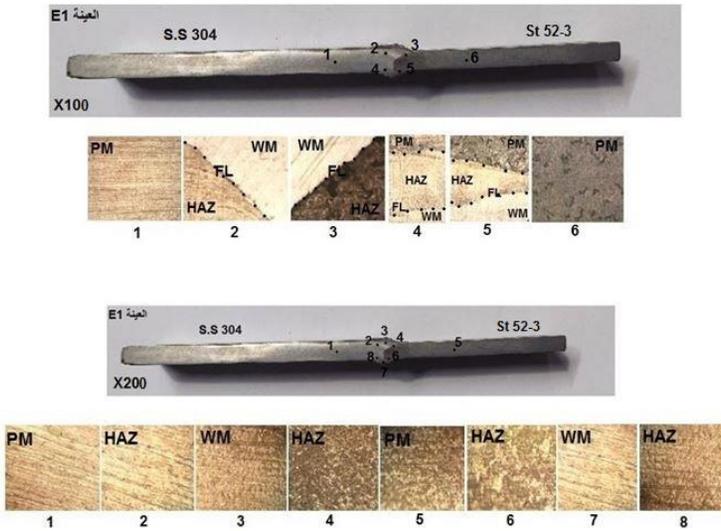


الشكل (8) البنية البلورية للعينة D2 بتكبير X100, X200

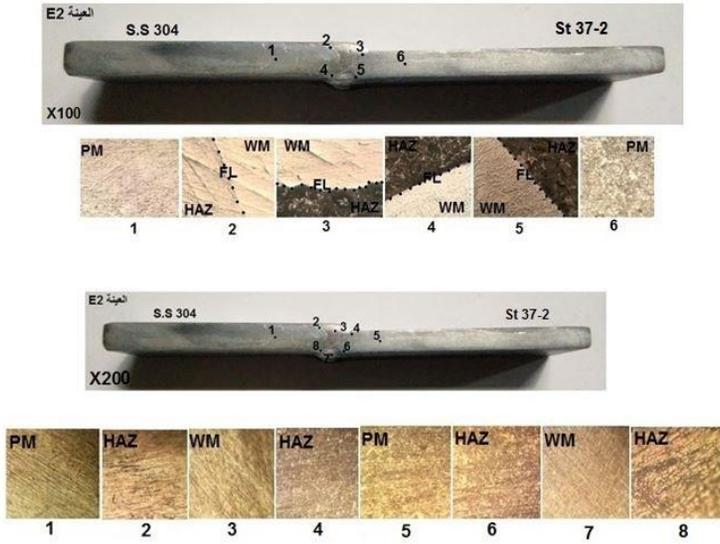
البنية البلورية والقساوة الماكروية لمناطق مختلفة من الوصلات للحامية الفولاذية متباينة التركيب الكيميائي والثخانة



الشكل (9) البنية البلورية للعينة D3 بتكبير X100, X200



الشكل (10) البنية البلورية للعينة E1 بتكبير X100, X200



الشكل (11) البنية البلورية للعيينة E2 بنكبير X100, X200

تم قياس القساوة الماكروية لكل عينة باستخدام طريقة روكويل HRA، ومن ثم تحويلها إلى ما يقابلها من قساوة فيكرز (HV) أو برينل (HB). [P.P:374-376] [3].

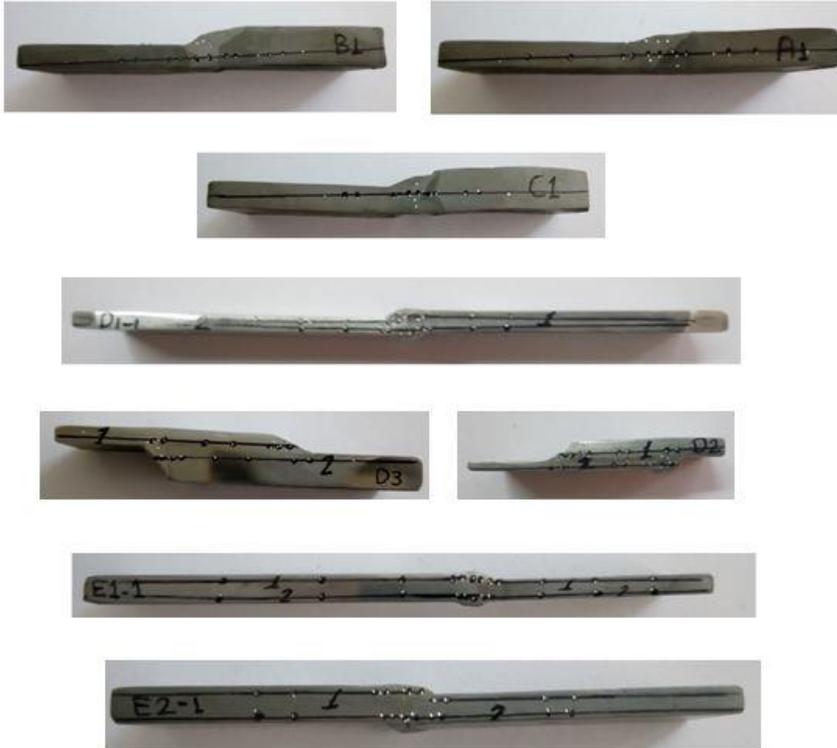
لقياس قساوة جميع مناطق الوصلة اللحامية تم أخذ خط أفقي يمر من هذه المناطق وتحديد نقطتين في كل منطقة لأخذ قراءتها، كما هو موضح بالشكل (12). ويوضح الجدول (7) القيم التي تم الحصول عليها:

الجدول (7) قيم القساوة للعينات الملحومة

| رمز العينة | القساوة رقم الخط | PM | | HAZ | | WM | | HAZ | | PM | |
|------------|------------------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|------|-------|
| | | HRA | HB/HV |
| A | | 49.8 | 152 | 53.3 | 171 | 44.6 | 126 | 45.8 | 132 | 43.4 | 121 |
| B | | 46.1 | 134 | 50.2 | 154 | 47.5 | 140 | 51.3 | 160 | 52.2 | 164 |
| C | | 47.7 | 140 | 58 | 209 | 49.2 | 149 | 46.2 | 135 | 42.5 | 118 |

البنية البلورية والقساوة الماكروية لمناطق مختلفة من الوصلات اللحامية الفولاذية متباينة التركيب الكيميائي والثخانة

| | | | | | | | | | | | |
|----|---|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|------|-----|
| D1 | 1 | 44.8 | 127 | 48.7 | 146 | 44.1 | 124 | 44.6 | 126 | 40.5 | 110 |
| | 2 | 45.2 | 130 | 44.2 | 124 | 44.9 | 127 | 44.2 | 124 | 43.4 | 121 |
| D2 | 1 | 46.1 | 134 | 49.8 | 152 | 40 | 108 | 43.4 | 121 | | |
| | 2 | | | 51.1 | 159 | 52.5 | 167 | 49.9 | 152 | 46.2 | 134 |
| D3 | 1 | 47.9 | 141 | 51.1 | 159 | 49.1 | 148 | 49 | 148 | | |
| | 2 | | | 47.7 | 140 | 45.8 | 132 | 47.2 | 138 | 46.8 | 137 |
| E1 | 1 | 48 | 141 | 44.7 | 126 | 43.8 | 123 | 47 | 137 | 46.2 | 134 |
| | 2 | 44.8 | 127 | 44.5 | 126 | 44.7 | 127 | 45.4 | 130 | 45.1 | 129 |
| E2 | 1 | 47.4 | 139 | 40 | 108 | 42.7 | 118 | 48 | 141 | 47.7 | 140 |
| | 2 | 47.2 | 138 | 42.7 | 118 | 45.9 | 132 | 45.1 | 129 | 45.4 | 130 |



الشكل (12) نقاط القساوة المأخوذة على العينات الملحومة

تبيّن قيم القساوة لمختلف مناطق الوصلات للحامية المدروسة عدم تشكل أطوار قاسية في البنى الناتجة، حيث لم تتجاوز قيم هذه القساوة المقدار HB 210.

الاستنتاجات:

- يتم لحام أنواع الفولاذ متباينة التركيب الكيميائي والثخانة باستخدام تقنية لحام الصهر بالقوس الكهربائي بجودة عالية عند اختيار بارامترات اللحام المثلى والمناسبة لكل حالة مدروسة.
- عند لحام الفولاذ متباين التركيب الكيميائي والثخانة لابد من الأخذ بالحسبان تغيرات قيم بارامترات نظام لحام الصهر بالقوس الكهربائي، وتأثير ذلك في كل من نوع البنى البلورية الناتجة لمناطق مختلفة من الوصلات للحامية والقساوة الماكروية لهذه المناطق، وهي: نوع الإلكترون المستخدم وقطره، شدة تيار اللحام، توتر القوس، سرعة اللحام، الطاقة الطولية (طاقة الدخل)، عمق الصهر، شكل حواف الوصلة للحامية.
- إن لحام صفائح الفولاذ الكربوني متباينة التركيب الكيميائي والثخانة مع بعضها البعض باستخدام إلكترون من الفولاذ الكربوني لم يغير من نوع البنية في منطقة حوض اللحام (الدرزة للحامية) وبقيت فريتية-برليتية. وبالمثل فإن لحام صفائح الفولاذ المقاوم للصدأ مع بعضها البعض باستخدام إلكترون من الفولاذ المقاوم للصدأ لا يغير من طبيعة البنية الأوستنيتية للوصلة للحامية.
- لحام صفائح الفولاذ الكربوني مع صفائح الفولاذ المقاوم للصدأ باستخدام إلكترون من الفولاذ المقاوم للصدأ أعطى بنية أوستنيتية للدرزة للحامية مع احتمالية حدوث انتشار بسيط لبعض ذرات الكربون من الفولاذ الكربوني باتجاه الدرزة للحامية.
- تجانس قيم القساوة في منطقة الدرزة للحامية للوصلات فولاذ كربوني-مقاوم للصدأ يدل على أن انتشار ذرات الكربون لم يؤثر على البنية الأوستنيتية لهذه المنطقة.

- تبين قيم القساوة للعينات المدروسة عدم تشكل أطوار قاسية في الوصلات اللحامية.

التوصيات:

- استخدام نطاق أوسع من فرق الثخانات للصفائح الفولاذية الملحومة معاً.
- استخدام تقنيات أخرى للحام الصفائح الفولاذية ذات الثخانات المختلفة.
- لحام الخلط الفولاذية مع أنواع أخرى من المعادن والمستخدم في مجالات الصناعة المختلفة.

References:

- 1- AVERY. R,1991- Pay Attention to Dissimilar- Metal Welds, **American Institute of Chemical Engineers**, 1-6.
- 2- ISLAM. T, 2014- **Analysis of Dissimilar Metal Welding of 1020 Mild Steel and 304 Stainless Steel**, Master Thesis. Production Engineering. Department of Mechanical Engineering. National Institute of Technology. India. 51.
- 3- SALAMEH, M., 2018- **Metals Science and their Alloys**. ACATAP, Syria, 432. (المراجع).
- 4- SALAMEH. M, & Mousa. E, 2005- **Manufacturing Methods (3) (Welding Metals)**. Damascus University, Syria, 544. (المراجع).
- 5- SHARAF. K, HADLAH. H, 2012- **Metallic Alloys and their Casting**. Damascus University, Syria, 597. (المراجع).
- 6- API. 2013- **Welding of Pipelines and Related Facilities**. API Publishing Service, (21st ed.). United States of America, 131.
- 7- AL-SABBAGH. A, 1998- **Welding of Metals**. Dar Al-Shorouk, (2th ed.). Lebanon, 482. (المراجع).
- 8- WANG. G, WANG. H, XUAN. F, & TU. S, (2013, 16-21 June). **Local fracture behavior and integrity assessment of a dissimilar metal welded joint in nuclear power systems**, 13th International Conference of Fracture, Beijing, China.
- 9- FLENNER ENGINEERING SERVICE, LLC. 2007- **Carbon Steel Handbook**. Electric Power Research Institute. The United States of America, 172.
- 10-PEREZ-QUIROZ. J, ALONSO-GUZMAN. E, MARTINEZ-MOLINA. W, CHAVEZ-GARCIA. H, RENDON-BELMONTE. M, MARTINEZ-MADRID. M, 2014- Electrochemical Behavior of the Welded Joint Between

- Carbon Steel and Stainless Steel by Means of Electrochemical Noise, **International Journal of Electrochemical Science**, Vol. 9, 6734-6750.
- 11-UL-HAMID. A, TAWANCY. H, ABBAS. N, 2004- Failure of weld joints between carbon steel pipe and 304 stainless steel elbows, **Engineering Failure Analysis**, Vol. 12. 181-191.
- 12-KRISHNAPRASAD. K, PRAKASH. R, 2009- Fatigue Crack Growth Behavior in Dissimilar Metal Weldment of Stainless Steel and Carbon Steel, **World Academy of Science, Engineering and Technology**, Vol. 56. 873-879.
- 13-RAJKUMAR. R, HAMIMI. F, CHARDE. N, 2012- Investigating the Dissimilar Weld Joints of AISI 302 Austenitic Stainless Steel and Low Carbon Steel, **International Journal of Scientific and Research Publications**, Vol. 2. No.11. 2250-3153.
- 14-MAEKAWA. A, KAWAHARA. A, SERIZAWA. H, MURAKAWA. H, 2016- Prediction of Weld Residual Stress in a Pressurized Water Reactor Pressurizer Surge Nozzle, **Journal of Pressure Vessel Technology**, Vol. 138. 1-11.
- 15-SAINI. M, ARORA. N, PANDEY. C, MEHDI. H, 2014- Mechanical Properties of Bimetallic Weld Joint Between SA 516 Grade 65 Carbon Steel and SS 304L for Steam Generator Application, **International Journal of Research in Engineering and Technology**, Vol. 3. No.7. 39-42.
- 16-EL-SHENNAWY. M, MASOUD. M, (2008, 8-10 January). **Similar and Dissimilar Welding in Special Application**, The ninth Cairo University International Conference on Mechanical Design and Production, Cairo, Egypt.
- 17-OZLATI. A, MOVAHEDI. M, & MOHAMMADKAMAL. H, 2016- Upset Resistance Welding of Carbon Steel to

- Austenitic Stainless Steel Narrow Rods, **Journal of Materials Engineering and Performance**.
- 18-LIPPOLD. J, 2015- **Welding Metallurgy and Weldability**.. John Wiley & Sons, Inc., The United States of America, 421.
- 19-POURALIAKBAR. H, HAMEDI. M, KOKABI. A, H, NAZARI. A, 2014- Designing of CK45 Carbon Steel and AISI304 Stainless Steel Dissimilar Welds, **Materials Research**, Vol. 17. No. 1. 106-114.
- 20-GUIRALDENQ. P, DUPARC. O, 2017- The genesis of the Schaeffler diagram in the history of stainless steel, **Metallurgical Research Technology**, Vol. 114. No. 613. 1-9.
- 21-UNITED STATES DEPARTMENT OF ENERGY. 2011- **Surge Nozzle NDE Specimen Mechanical Stress Improvement Analysis**. Pacific NorthWest National Laboratory, The United States of America, 52.

تطوير نظام قيادة لمضخات المياه الكهروضوئية باستخدام عاكس تسلسلي ذو سبع مستويات

م. داني ابراهيم* م. أحمد اسكندر** م. كلودا ابراهيم***

ملخص

تم في هذا البحث تطوير نظام قيادة لمضخات المياه الكهروضوئية يعتمد على العواكس متعددة المستويات، حيث تمت دراسة العاكس التسلسلي متعدد المستويات-Cascaded H- Bridge-MLI لتحسين كفاءة التحويل، وذلك من خلال اختبار ثلاث استراتيجيات مختلفة لتوليد نبضات القدر للعناصر الإلكترونية لتحديد الاستراتيجية الأفضل بينها، ومن ثم مقارنتها مع دائرة العاكس التقليدي 2-LEVEL.

أظهرت النتائج تفوق استراتيجية (PD-PWM) Phase Disposition، حيث كان معدل التشوه التوافقي THD لموجة الجهد والتيار أقل ما يمكن مقارنةً مع الاستراتيجيات الأخرى، وذلك عند ترددات موجة حامل مختلفة بالإضافة إلى دراسة تأثير عدد مستويات الجهد على معدل التشوه التوافقي THD، فعند نمذجة دائرة إنفرتير تسلسلي ثلاثي الطور ذو سبع مستويات يعتمد على استراتيجية (PD-PWM) عند تردد موجة حامل 3000 Hz لم يتجاوز معدل التشوه التوافقي THD لموجة الجهد قيمة 11%، في حين أنه في العاكس التقليدي 2-LEVEL كان معدل التشوه التوافقي THD لموجة الجهد حوالي 66%، وهذا يوضح أهمية MLI لتحسين كفاءة التحويل.

نظام القيادة المقترح يعمل وفق نظام v/f control للتحكم بسرعة المضخة بما يتناسب مع شدة الإشعاع الشمسي مع الحفاظ على العزم ثابت كما يعمل على ملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى MPPT وفق خوارزمية P&O، تمت محاكاة النظام وفق برنامج MATLAB/SIMULINK، حيث أظهرت النتائج فعالية النظام المقترح وموثوقيته.

الكلمات الرئيسية - العاكس متعدد المستويات، العاكس الجسري التسلسلي، ملاحقة نقطة الإستطاعة العظمى MPPT، معدل التشوه التوافقي THD.

*ماجستير هندسة الأتمتة الصناعية. كلية الهندسة التقنية. جامعة طرطوس. سوريا danyvbrahim2@gmail.com.

**ماجستير هندسة الطاقة الشمسية والطاقات المتجددة. كلية الهندسة التقنية. جامعة طرطوس. سوريا.

***ماجستير هندسة تكنولوجيا المعلومات. كلية هندسة تكنولوجيا المعلومات والاتصالات. جامعة طرطوس. سوريا.

Development of a driving system for PV water pumps using a seven-level Cascaded H-Bridge inverter

Eng. Danny Ibrahim* Eng. Ahmad Iskandar** Eng. Kloda Ibrahim***

Abstract

In this research, we have developed a system for driving PV water pumps based on multi-level inverters, where cascaded H-Bridge-MLI was studied to improve conversion efficiency, by testing three different strategies to generate pulses for electronic elements and determining the best strategy between them, then compare it with the traditional 2-LEVEL inverter circuit.

The results showed the superiority of Phase Disposition (PD-PWM) strategy, where the THD ratio of the voltage and current wave was minimal compared to the other strategies at different carrier wave frequencies in addition to studying the effect of the number of voltage levels on THD ratio, and when we simulated a three phase (Cascaded H-Bridge 7 level) inverter circuit based on PD-PWM strategy at 3000 Hz carrier wave frequency, the THD ratio of voltage wave has not exceed 11%, While in the traditional 2-LEVEL inverter, the THD ratio of voltage wave is about 66%, which shows the importance of MLI to improve conversion efficiency.

The proposed driving system operates according to the v / f control system to control the pump speed in proportion to the intensity of the solar radiation while maintaining a constant torque, and also works to track the maximum power point MPPT according to P&O algorithm, and when the system was simulated by MATLAB / SIMULINK the results showed the effectiveness and reliability of the proposed system.

Keywords — Multilevel inverters, Cascaded H-Bridge, Maximum Power Point Tracking, Total harmonic distortion.

**Master of Industrial Automation, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria, danyibrahim2@gmail.com.*

***Master of Engineering Solar Energy and Renewable energies, Faculty of Technical Engineering, Tartous University, Syria.*

****Master of Information Technology, Faculty of Information and Communication Technology Engineering, Tartous University, Syria.*

1. المقدمة:

تعتبر الطاقة والمياه العصبان الأساسيان لأي تقدم وتطور مجتمعي. في حين أن العالم يتجه نحو أزمة حادة في الطاقة والمياه، كان اتباع طرق مستدامة لضمان الأمن المائي والطاقي أحد أسباب تطور أنظمة ضخ المياه بالطاقة الكهروضوئية التي تعد بديلاً واعداً عن أنظمة الضخ التقليدية، وتطبيقاً فعالاً من حيث التكلفة وخاصة في المناطق النائية البعيدة عن الشبكة العامة وفي البلدان النامية التي تواجه مشاكل تتعلق بتأمين الطاقة الكهربائية المستدامة.

ولأن العطل المفاجئ بمحطات التوليد لأسباب مختلفة سيهدد الأمن المائي بشكل مباشر، كانت الحاجة للاتجاه نحو محطات ضخ تعتمد على الطاقة المتجددة أمراً ضرورياً.

الجدير بالذكر أن المحركات التحريضية ثلاثية الطور هي أكثر أنواع المحركات الكهربائية استخداماً في محطات ضخ المياه لأنها الأبسط والأكثر اقتصادية بالمقارنة مع بقية أنواع المحركات الأخرى، لذلك تركزت الأبحاث على تطوير أنظمة قيادة هذه المحركات بالاعتماد على أنواع مختلفة من المبدلات الإلكترونية، ومنه تبرز الحاجة الملحة لتطوير أنظمة قيادة انطلاقاً من مصادر طاقات متجددة مجانية وصديقة للبيئة [7].

أدى التطور الكبير في مجال إلكترونيات القدرة الكهربائية، إلى تحسين كبير في الأنظمة الإلكترونية للطاقة، حيث أصبحت الدارات المختلفة وبالتحديد التي لم يكن من الممكن تطبيقها نظراً للتعقيد الكبير في التحكم بها، محط اهتمام الكثير من الباحثين ومنها تقنية العاكس متعدد المستويات عند ترددات تبديل منخفضة مع معدل تشوه توافقي (THD) منخفض، حيث برزت أهمية هذا النوع من المحولات في التطبيقات التي تتطلب

طاقة متوسطة وعالية لتحسين كفاءة تحويل هذه الطاقة من شكلها المستمر إلى المتناوب [2].

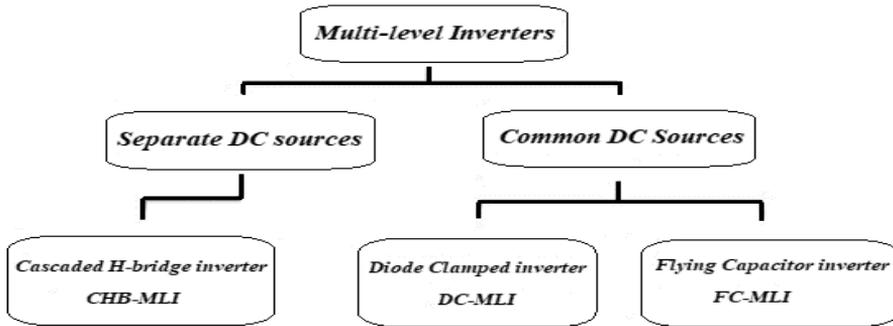
تم إدخال مفهوم العاكس متعدد المستويات منذ عام 1975، من خلال وضع مجموعة من خلايا DC بشكل متسلسل لتوليد جهد متناوب AC ومعه بدأ مصطلح Multilevel [4]، ومنذ ذلك الوقت تم تطوير العديد من طبولوجيا العاكس المتعدد المستويات، فعلى الرغم من ظهور هذه التكنولوجيا باكراً، إلا أن التعقيد الكبير في قيادتها جعل من غير الممكن استخدامها دون الاعتماد على تقنيات التحكم الرقمية.

1.1 مميزات العاكس متعدد المستويات

تشمل المزايا الأساسية للعاكس متعددة المستويات على قدرة تحمل للجهود العالية مع ضياعات تبديل منخفضة جداً، انخفاض معدل dv/dt ، ومعدل التشوه التوافقي THD المنخفض، والتداخل الكهرومغناطيسي المنخفض. وعليه نستنتج من المميزات السابقة أن هذا النوع من العواكس يتمتع بكفاءة تحويل عالية جداً مقارنة مع العاكس التقليدي كما أنه مناسب لتطبيقات توليد الطاقة انطلاقاً من المنظومات الكهروضوئية [2,8].

1.2 أشهر أنواع العواكس متعددة المستويات

يوضح الشكل (1) أشهر أنواع العواكس متعددة المستويات، وفيما يلي ميزات وسيئات كل منها [6]:



الشكل 1: أشهر أنواع العواكس متعددة المستويات

1-Diode Clamped Multilevel Inverter (DC-MLI)-1

المميزات:

- تقنية التحكم أقل تعقيد.
- كلما ازداد عدد مستويات الجهد قل معدل التشوه التوافقي مع تجنب وجود دائرة مرشح.

المساوى:

- كلما ازداد عدد مستويات الجهد، يزداد عدد الديوت المستخدمة في الدارة.
- جهد الخرج له مطال يساوي نصف قيمة منبع DC.

2-Flying Capacitor Multilevel Inverter (FC-MLI)-2

المميزات:

- كلما ازداد عدد مستويات الجهد يتم تقليل معدل التشوه مع تجنب دارات المرشحات.

- كمية كبيرة من القدرة المخزنة ضمن المكثفات.

المساوى:

- تكنولوجيا التحكم يمكن أن تكون معقدة.
- ضياعات التبديل كبيرة جداً.

3-Cascaded H-bridge Multilevel Inverter (CHB-MLI)-3

المميزات:

- معدل التشوه منخفض جداً.
- يحتاج إلى عناصر أقل لكل مستوى مقارنة بالأنواع الأخرى.

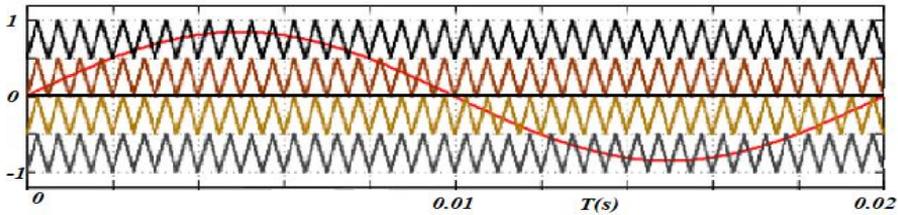
المساوى:

- يحتاج لمصدر جهد مستمر DC منفصل لكل مستوى.

1.3 استراتيجية التعديل لتوليد نبضات القذح لـ MLI

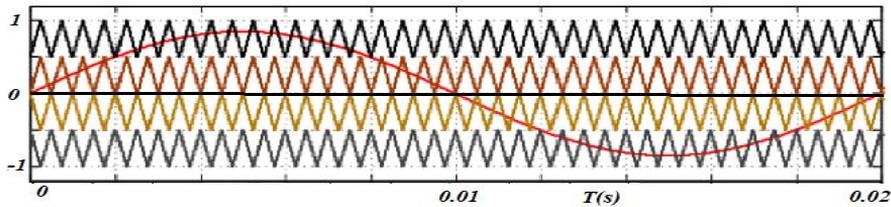
سنعتمد في هذا البحث على طريقة SPWM (Sinusoidal Pulse Width Modulation) لتوليد نبضات القذح للعناصر الإلكترونية وفقاً لثلاث استراتيجيات مختلفة لتوليد نبضات إشارة الحامل المثلثية [2]، وهي:

1. Phase Disposition (PD-PWM): جميع إشارات الحامل المثلثية لها نفس الطور كما هو موضح بالشكل (2).



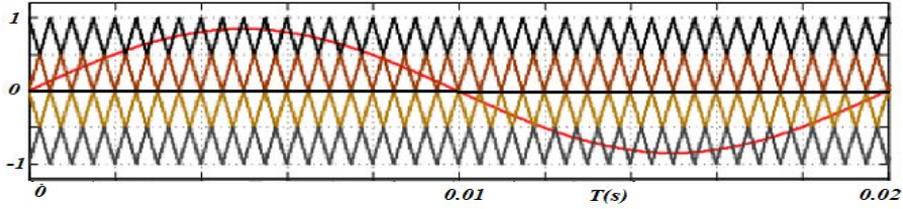
الشكل 2: استراتيجية (PD-PWM)

2. Phase Opposition Disposition (POD-PWM): جميع إشارات الحامل المثلثية التي تقع فوق خط الصفر لها ذات الطور وتكون مختلفة بالطور عن تلك التي تقع تحت خط الصفر بمقدار 180 درجة، كما هو موضح بالشكل (3).



الشكل 3: استراتيجية (POD-PWM)

3. Alternative Phase opposition Disposition (APOD-PWM): جميع إشارات الحامل المثلثية مزاحة بالطور عن بعضها البعض بمقدار 180 درجة، كما هو موضح بالشكل (4).



الشكل 4: استراتيجية (APOD-PWM)

2. الدراسات المرجعية

[1]. قام الباحث (sharma) وآخرون عام 2019 بدراسة كيفية استخدام الإنفرتير متعدد المستويات ذو النقطة المشتركة (NPC) انطلاقاً من مصادر الطاقة المتجددة، حيث بين الباحث أهمية استخدام الإنفرتيرات متعددة المستويات لقيادة المحركات التحريضية نظراً لانخفاض معدل (dv/dt) بالإضافة لمعدل التشوه التوافقي THD المنخفض لموجة الجهد.

تم تحليل أداء عاكس ثلاثي الطور ذو ثلاث مستويات باستخدام برنامج Matlab/Simulink حيث تم توليد نبضات القدح باستخدام استراتيجية (SVPWM) وقام بتوضيح أداء المحرك من حيث العزم والسرعة والتحليل التوافقي للإشارة الناتجة، كما أوصى الباحث باستخدام هذا البحث في تطبيقات ضخ المياه بالطاقة الشمسية [9].

[2]. قام الباحث (Billel) وآخرون عام 2018 بتطوير نظام ضخ كهربائي منخفض التكلفة انطلاقاً من منظومة ألواح كهروضوئية PV بالاعتماد على المحركات التحريضية (IM).

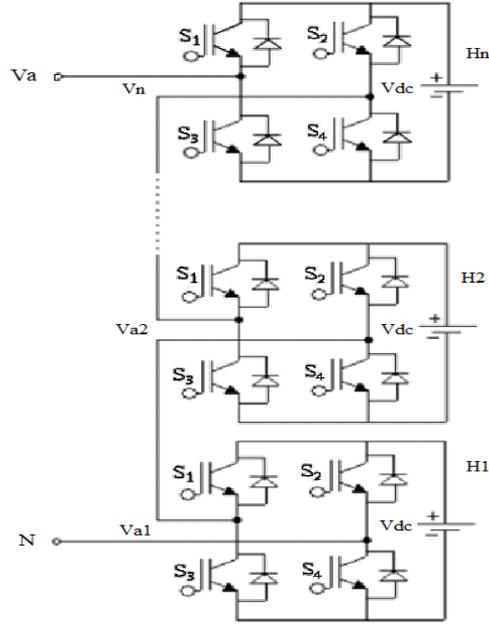
يقوم هذا النظام بملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى باستخدام خوارزمية (P&O) لتسريع تتبع نقطة الاستطاعة في ظل التغيرات الإشعاعية المفاجئة بالإضافة إلى استخدام تقنية التحكم المباشر بالعزم (DTC) لقيادة المحرك التحريضي، كما قاموا بوضع نموذج Matlab للنظام المقترح لتقييم أداءه، حيث أشارت النتائج إلى الأداء المميز للنظام المقترح [11].

[3]. قام الباحث (Singh) وآخرون في عام 2018 بتقديم نظام لضخ المياه بالطاقة الكهروضوئية بسيط وفعال يتكون من مرحلتين: بالمرحلة الأولى يتم استخراج الطاقة العظمى من مصفوفة الألواح الكهروضوئية عن طريق التحكم بنسبة التشغيل Duty Cycle لمحول رافع للجهد من نوع Boost باستخدام استراتيجية (INC) لملاحقة نقطة الاستطاعة العظمى.

أما المرحلة الثانية فهي تتكون من دائرة الإنفرتتر ثلاثي الطور يعمل على تحويل الطاقة الكهربائية المستمرة على خرج دائرة المقطع من DC إلى AC، حيث أن الإنفرتتر مجهز للعمل وفق نظام V/F للتحكم بسرعة مضخة المياه تبعاً لتغير شدة الإشعاع الشمسي، وقد بينت النتائج فعالية النظام المقترح [10].

3. أهداف البحث

يهدف هذا البحث لدراسة استخدام العاكس متعدد المستويات التسلسلي (-CHB MLI) الموضح بالشكل (5) لقيادة مضخات المياه الكهروضوئية وفق نظام V/F بحيث يتم التحكم بكمية المياه المتدفقة تبعاً لشدة الإشعاع الشمسي، حيث سنعمد في البداية إلى تحديد الاستراتيجية الأنسب لتوليد نبضات القرح لتحقيق أقل معدل تشوه توافقي THD لموجة جهد وتيار الحمل، والذي بدوره يعبر عن مدى كفاءة هذا النوع في تحويل الطاقة المستمرة إلى متناوبة.



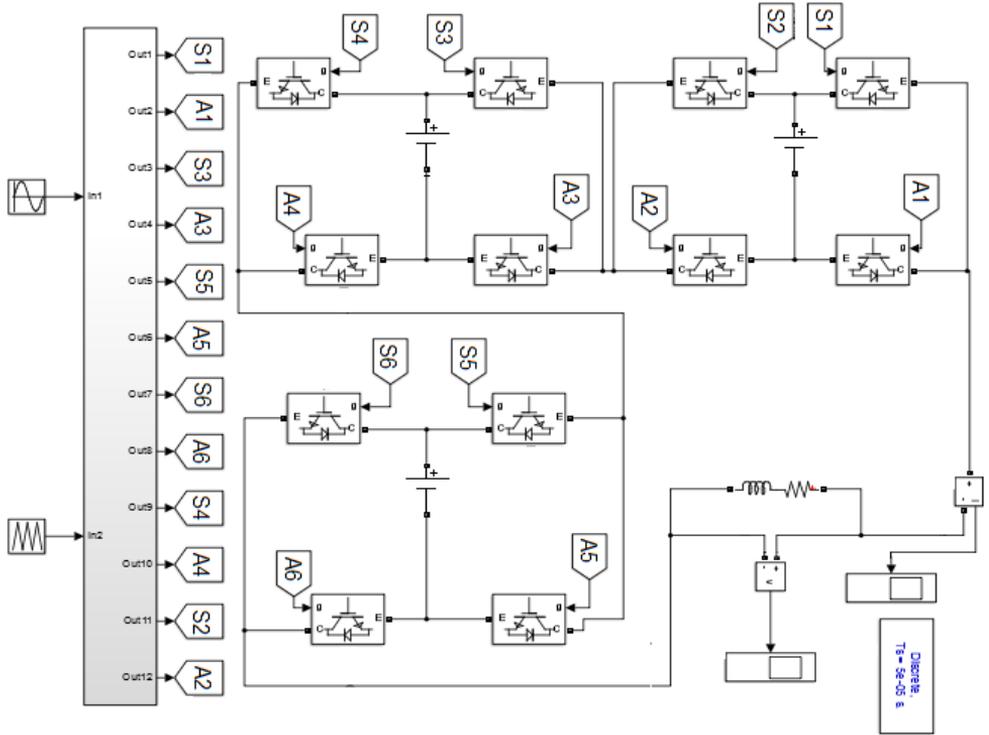
الشكل 5: بنية العاكس (CHB-MLI)

4. منهجية البحث

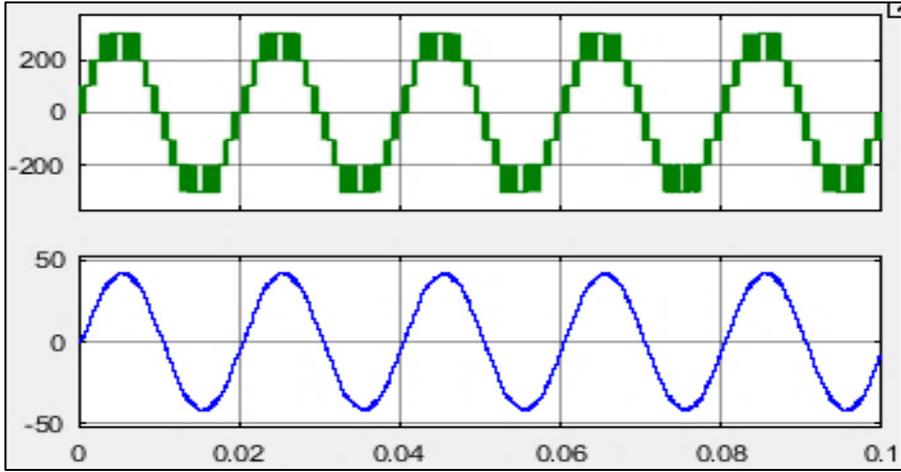
تم استخدام برنامج Matlab Simulink لمحاكاة دائرة العاكس متعدد المستويات (CHB-MLI) ذو 5 و 7 و 9 مستويات عند استراتيجيات مختلفة لتوليد نبضات الفتح، ومن ثم تم إجراء تحليل فورييه باستخدام الأداة FFT Analysis للحصول على معدل التشوه التوافقي THD لكل من موجة الجهد والتيار الناتج عند ترددات مختلفة.

يوضح الشكل (6) نموذج MATLAB / Simulink للعاكس التسلسلي (CHB) ذو سبع مستويات أحادي الطور، باستخدام استراتيجية التعديل (APOD-PWM) وعند تردد موجة حامل 3000 Hz ، خرج العاكس متصل بحمولة تحريضية قيمتها $Z_L = 0.7 + 0.003j$.

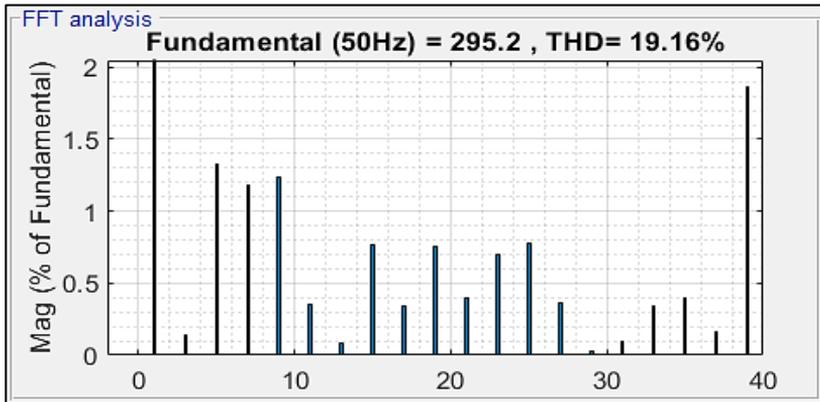
إشارة موجة جهد وتيار الحمل للعاكس موضحة بالشكل (7)، عند قياس قيمة التشوه التوافقي THD لموجة الجهد كان بقيمة 19.16% كما هو موضح بالشكل (8)، في حين أن معدل التشوه التوافقي لموجة التيار الناتجة 2.69%، كما هو موضح بالشكل (9).



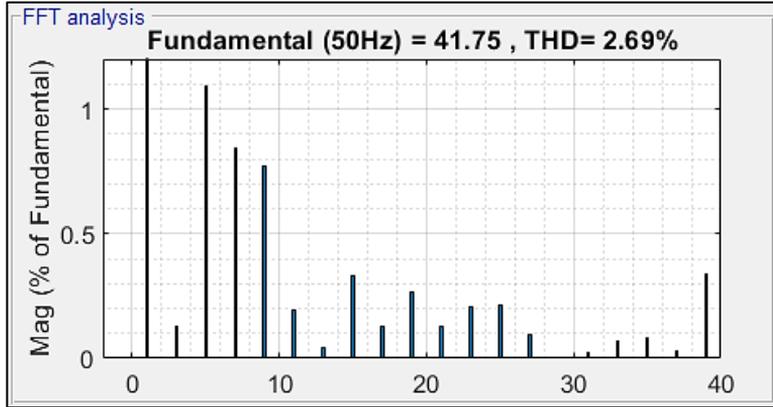
الشكل 6: نموذج MATLAB للعاكس (CHB-7 L)



الشكل 7: إشارة موجة جهد وتيار الحمل للعاكس (CHB-7 L)



الشكل 8: التحليل التوافقي لموجة جهد الخرج للعاكس (CHB-7 L)



الشكل 9: التحليل التوافقي لموجة تيار الحمل للعاكس (CHB-7 L)

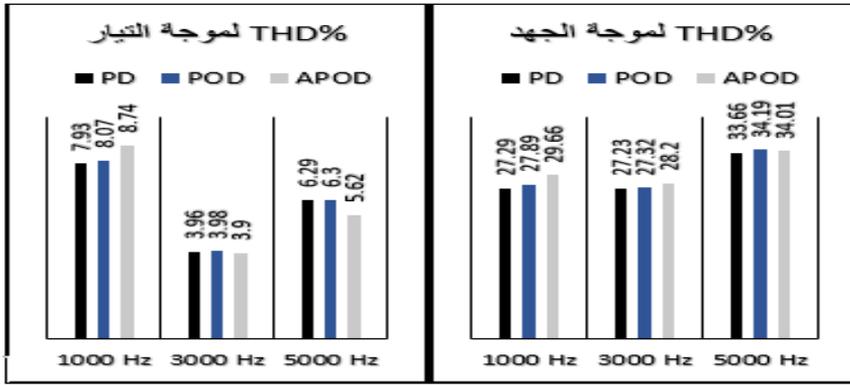
3.1 مقارنة بين أشهر استراتيجيات التعديل (PD-POD-APOD)

تمت محاكاة أشهر استراتيجيات التعديل PD-POD-APOD لتوليد نبضات القرح لثلاث نماذج من العواكس متعددة المستويات التسلسلية (CHB-5, CHB-7, CHB-9) عند ترددات تبديل مختلفة (تردد إشارة الموجة الحاملة)، وبحمولة تحريضية ثابتة لجميع النماذج $Z_L = 7 + 0.003j$ ، فكان معدل التشوه التوافقي THD لكل طريقة على حدى موضحة بالمخططات البيانية الموجودة بالأشكال (10) و (11) و (12) و (13)، حيث نلاحظ العلاقة بين ترددات التبديل المختلفة واستراتيجية التعديل المتبعة لتوليد نبضات القرح لعناصر إلكترونيات القدرة، وكذلك تأثير زيادة عدد مستويات موجة الجهد على قيمة معدل التشوه التوافقي للموجة الناتجة، حيث أن:

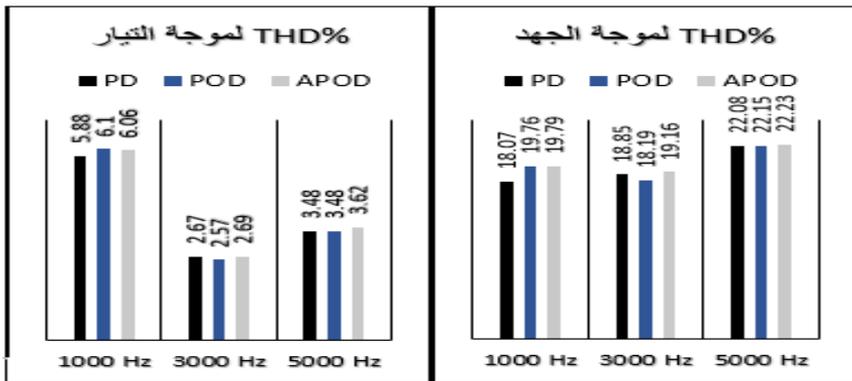
- أقل معدل تشوه توافقي عند تردد تبديل $3000 H_z$ ، عند استراتيجيات التعديل المختلفة، وكذلك عند عدد مستويات جهد مختلفة، كما هو موضح بالشكل (10)، الشكل (11) والشكل (12).
- معدل التشوه التوافقي THD يتناسب عكساً مع عدد مستويات الجهد، كما هو موضح في الشكل (13)، حيث أنه عند استراتيجية تعديل PD-PWM كانت

موجة الجهد ذات تسع مستويات تملك أقل معدل تشوه توافقي مقارنة بالمستويات الأخرى وعند ترددات تبديل مختلفة.

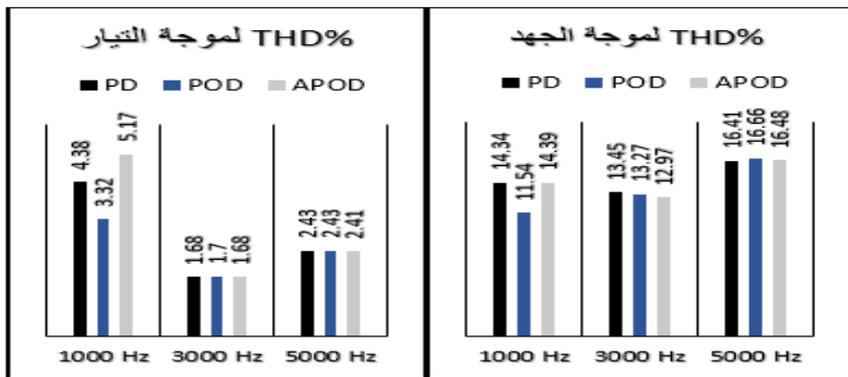
- عند تردد تبديل $1000 H_z$ كان معدل التشوه التوافقي لموجة جهد وتيار الحمل الأعلى مقارنة بالترددات الأخرى.
- معدل التشوه التوافقي عند تردد $5000 H_z$ أعلى منه عند تردد $3000 H_z$ ، وعليه فإنه عند ترددات التبديل المرتفعة نسبياً يزداد معدل التشوه التوافقي طردياً مع ازدياد التردد.
- أفضل معدل تشوه توافقي كان عند استراتيجيتي التعديل (POD) و (PD) حيث تتقارب معدلات التشوه التوافقي بينهما في حالة العاكس أحادي الطور، ولتحديد الأفضل بينهما ندرس حالة العاكس ثلاثي الطور.



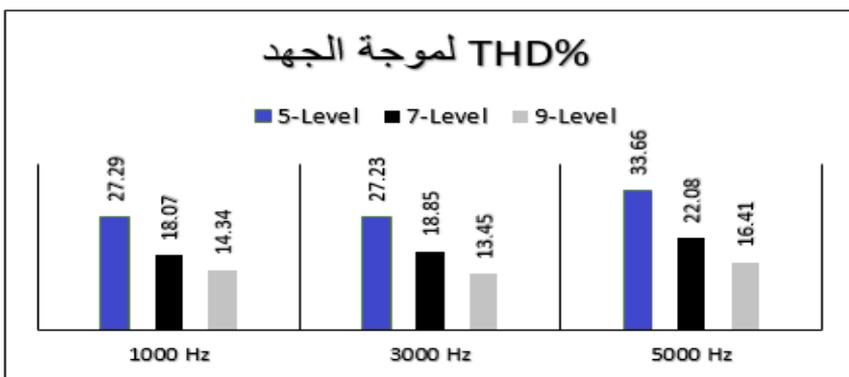
الشكل 10: معدل التشوه التوافقي للعاكس التسلسلي CHB-5



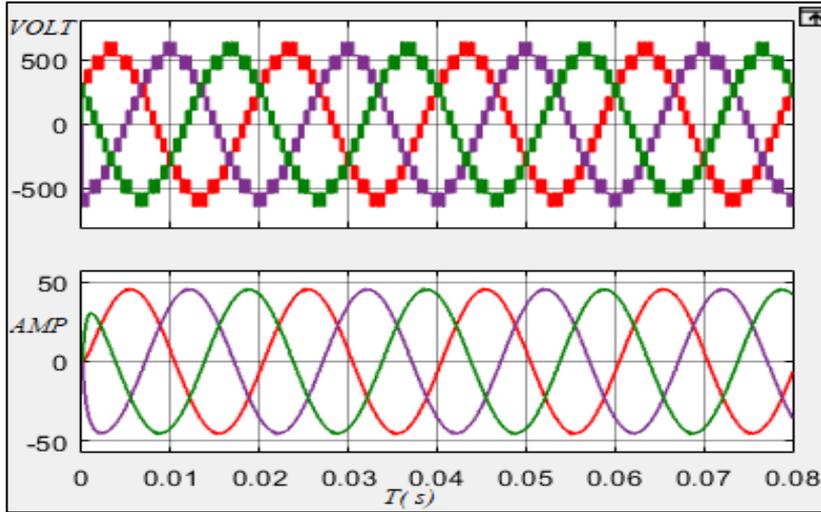
الشكل 11: معدل التشوه التوافقي للعاكس التسلسلي CHB-7



الشكل 12: معدل التشوه التوافقي للعاكس التسلسلي CHB-9



الشكل 13: معدل التشوه التوافقي عند استراتيجية PD-PWM



الشكل 15: موجة الجهد والتيار الحمل للعاكس (CHB-7) ثلاثي الطور

إشارة موجة جهد الخرج والتيار الحمل للعاكس (CHB-7) ثلاثي الطور موضحة بالشكل (15)، عند قياس قيمة التشوه التوافقي THD لموجة جهد الخط كانت بقيمة 10.70%، بينما معدل التشوه التوافقي لموجة تيار الخط الناتجة كانت 0.85%.

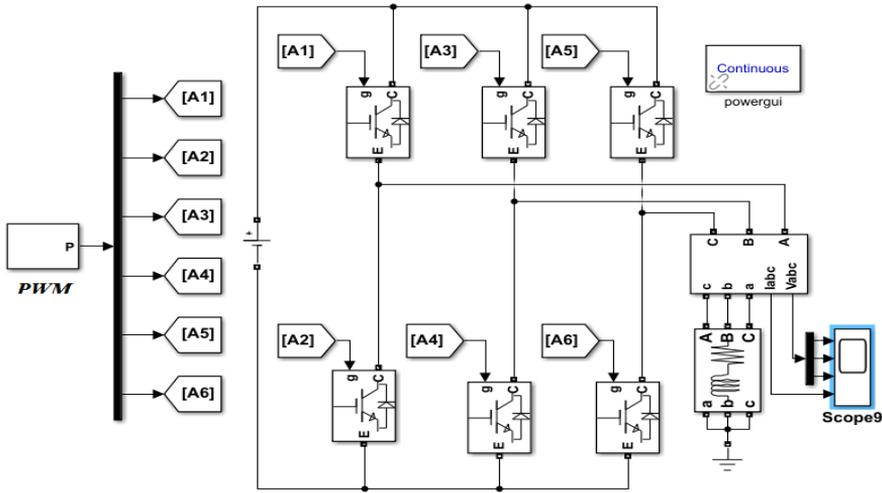
تمت محاكاة استراتيجيات التعديل المختلفة لتوليد نبضات القرح على نموذج العاكس متعدد المستويات (CHB-7 LEVEL) ثلاثي الطور عند تردد تبديل 3000 Hz فكان معدل التشوه التوافقي THD الناتج لكل طريقة على حدى موضحاً بالجدول (1) التالي.

الجدول 1: معدل التشوه التوافقي للعاكس (CHB-7 L) ثلاثي الطور

| تردد التبديل 3000 Hz | | | | | |
|----------------------|--------|---------|--------|----------|--------|
| PD-PWM | | P0D-PWM | | APOD-PWM | |
| V line | I line | V line | I line | V line | I line |
| 10.71% | 0.86% | 15.52% | 1.58% | 15.68% | 1.60% |

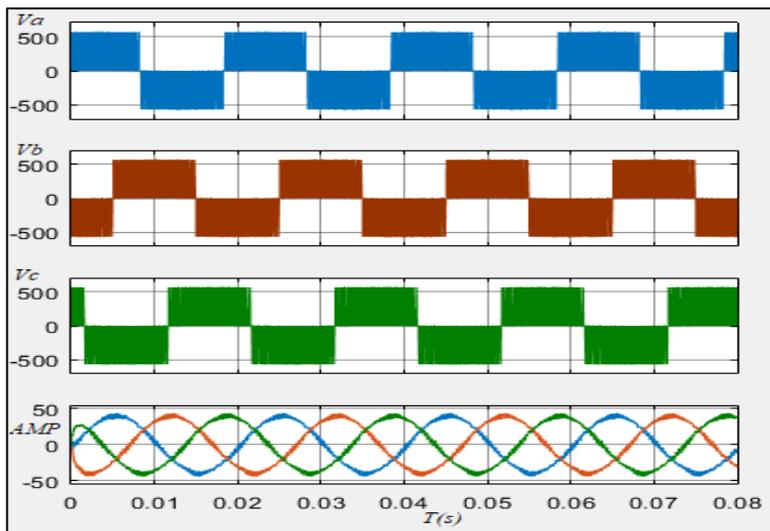
بناء عليه نلاحظ أن تقنية (PD-PWM) هي الأفضل من ناحية التشوه التوافقي THD مقارنة مع الطرق الأخرى، وعليه سنقوم بإجراء مقارنة مع دائرة العاكس التقليدية ثلاثية الطور.

يوضح الشكل (16) نموذج MATLAB / Simulink للعاكس ثلاثي الطور التقليدي ذو مستويين وعند تردد موجة حامل 3000 Hz ، خرج العاكس متصل بحمولة تحريضية قيمتها $Z_L = 7 + 0.003j$.

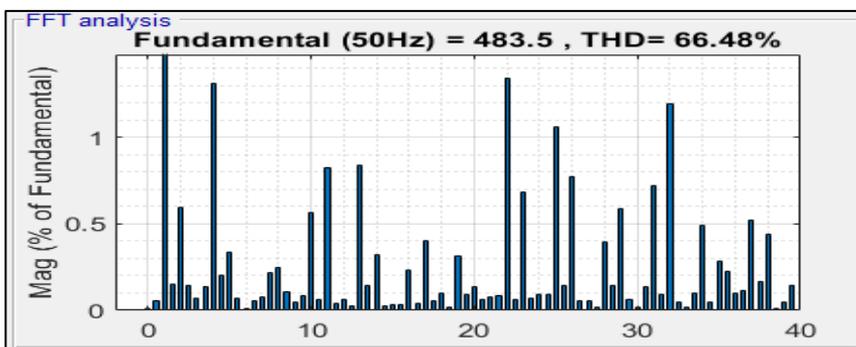


الشكل 16: نموذج MATLAB للعاكس التقليدي ثلاثي الطور

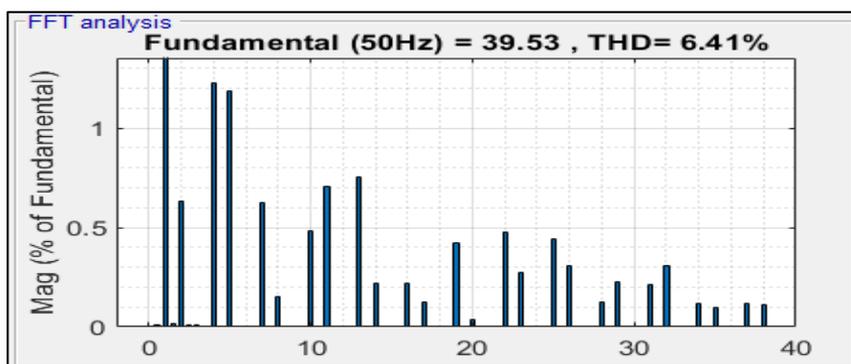
إشارة موجة جهد الخرج وتيار الحمل للعاكس التقليدي ثلاثي الطور بدون استخدام مرشحات موضحة بالشكل (17)، عند قياس قيمة التشوه التوافقي THD لموجة جهد الخط كانت بقيمة 66.48% كما هو موضح بالشكل (18)، في حين أن معدل التشوه التوافقي لموجة تيار الخط الناتجة 6.41% كما هو موضح بالشكل (19).



الشكل 17: إشارة موجة جهد و تيار الحمل للعاكس التقليدي ثلاثي الطور

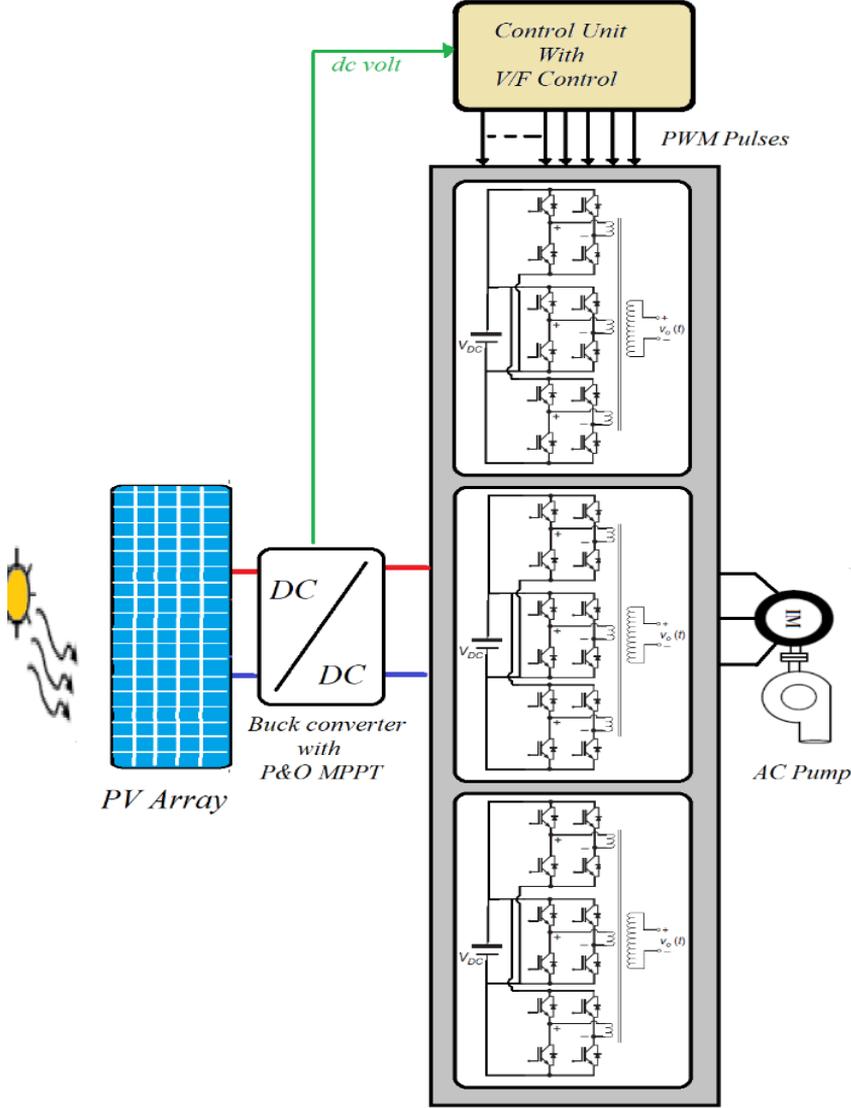


الشكل 18: THD لموجة جهد الخط للعاكس التقليدي ثلاثي الطور



الشكل 19: THD لموجة تيار الحمل للعكس التقليدي ثلاثي الطور

3.3 مخطط النظام المقترح



الشكل 20: النظام المقترح لقيادة المضخة الكهروضوئية

يهدف المخطط المقترح الموضح في الشكل (20) إلى تطوير نظام قيادة لمضخة المياه يعتمد على تقنية العاكس متعدد المستويات، ودراسة الخصائص السابقة لهذا النوع،

تم اعتماد تقنية العاكس (CHB-MLI) ثلاثي الطور ذو سبع مستويات وفق استراتيجية التعديل PD-PWM، وفقاً لهذا المخطط سنحتاج لمنبع تغذية DC واحد متمثل بالمصفوفة الكهروضوئية وذلك بسبب استخدام محولات عزل ضمن البنية الداخلية للعاكس لتجنب استخدام منابع dc منفصلة لكل مستوى على حدى وبالتالي الحصول على أقصى مردود، يوجد على خرج المصفوفة الكهروضوئية مقطع تخفيض يعمل على ملاحقة نقطة الإستطاعة العظمى وتحويل التغير الحاصل في الإشعاع الشمسي إلى تغير في جهد الخرج للمصفوفة الكهروضوئية.

نظام التحكم العام بالعاكس المقترح مجهز للعمل وفق نظام التحكم السلمي، v/f لتشغيل محرك المضخة التحريضي والتحكم بسرعه.

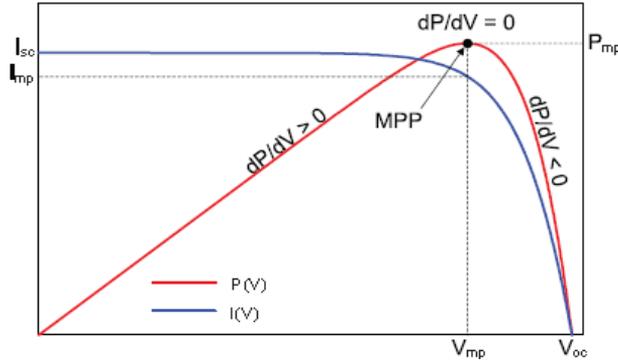
3.3.1 ملاحقة نقطة الإستطاعة العظمى

إن تيار وجهد المصفوفة الكهروضوئية يتعلق بدرجة الحرارة وبشدة الإشعاع الساقط على الخلية، وبما أن هذين البارامترين متغيران بصورة مستمرة خلال النهار إذاً ستتغير خصائص المصفوفة الكهروضوئية بشكل مستمر خلال النهار.

بما أن فعالية تحويل الإشعاع الشمسي إلى طاقة كهربائية في الخلايا الكهروضوئية منخفضة بشكل عام (حوالي 15 % ويمكن أن تصل إلى 30 % في أحسن الأحوال)، لا تزال تكلفة الطاقة الكهروضوئية عالية (بالمقارنة مع كلفة الطاقة الكهربائية المتاحة من المصادر التقليدية)، ولذلك فإنه من المهم والضروري الحصول على الحد الأقصى المُتاح من الطاقة الكهربائية انطلاقاً من الخلايا الكهروضوئية، عن طريق ضمان عمل مبدلة DC/DC بالشكل الأمثل، مما يتيح الحصول على الطاقة الأعظمية عند العمل بالتوتر والتيار المقابلين لنقطة المنحني الموافقة لنقطة الاستطاعة الأعظمية، ولكن هذه النقطة غير ثابتة و تتعلق بالإشعاع الشمسي، لذلك يجب ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية (MPPT) Maximum Power Point Tracking.

من أشهر الطرق المتبعة في ملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية هي طريقة الارتياح والملاحظة (Perturbation and Observation) (P&O)، والتي تعتمد على الحقيقة القائلة: أنه في مميزات الجهد/استطاعة (P-V) للمنظومة الكهروضوئية، في الجهة اليسرى من نقطة الاستطاعة الأعظمية MPP يكون تغير الاستطاعة بالنسبة إلى الجهد موجباً أي $dP/dV > 0$ أما في الجهة اليمنى يكون $dP/dV < 0$ ، كما هو موضح في الشكل (21)، [1].

أي أن مشتق الاستطاعة بالنسبة إلى الجهد (التيار) لمنظومة ال PV يساوي الصفر عند ال MPP.



الشكل 21: منحنى (I-V) ومنحنى (P-V) في طريقة P&O.

- عند ال MPP يكون $dV/dP = 0$ ($dI/dP = 0$)
- على اليسار يكون $dV/dP > 0$ ($dI/dP < 0$)
- على اليمين يكون $dV/dP < 0$ ($dI/dP > 0$)

إذا كان جهد نقطة العمل متغيراً في اتجاه معطى وكان $dP/dV > 0$ فإن التغير سيحرك نقطة عمل المنظومة باتجاه ال MPP. وهكذا تستمر خوارزمية ال P&O حتى تجعل جهد المنظومة الكهروضوئية بالاتجاه نفسه.

أما إذا كان $dp/dV < 0$ فإن التغير في نقطة العمل سيبعد المنظومة الكهروضوئية عن الـ MPP . بالتالي تعكس خوارزمية الـ P&O اتجاه التغير لتعيد نقطة العمل باتجاه نقطة الـ MPP .

الميزة الرئيسية لهذه الطريقة أنها سهلة التطبيق وتحتاج إلى متطلبات حسابية منخفضة، قابلة للتطبيق في معظم الأنظمة، ولا تحتاج إلى أية معلومات عن المصفوفة الكهروضوئية سوى قياس الجهد والتيار .

وفقاً للنظام المقترح فإنه على خرج كل مصفوفة يوجد مقطع تخفيض (Buck) سيقوم بملاحظة نقطة الاستطاعة العظمى وفق خوارزمية (P&O) لتحويل التغير الحاصل في الإشعاع الشمسي إلى تغيير في الجهد على خرج دائرة المقطع.

3.3.2 التحكم السلمي V/F scalar control

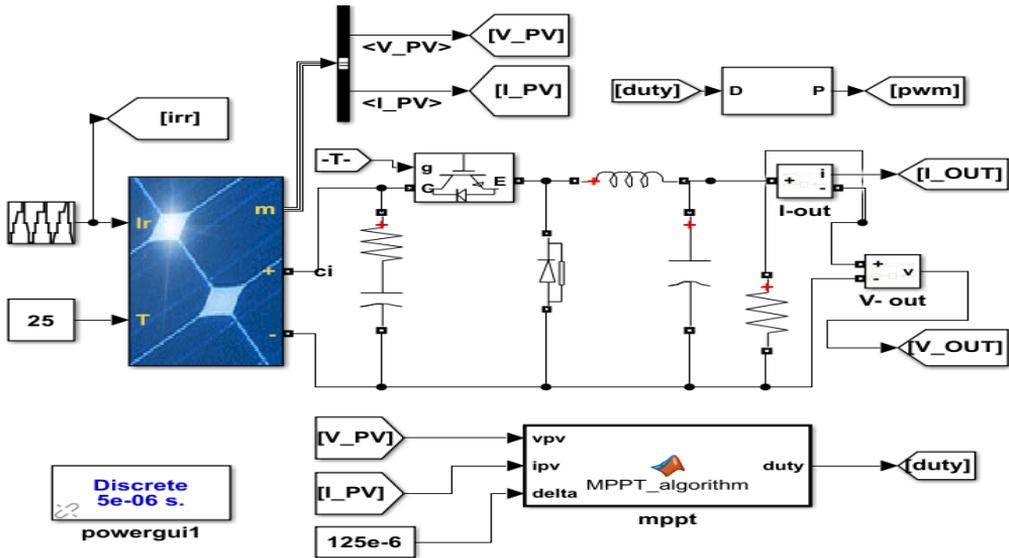
تسمى هذه التقنية بالتحكم السلمي لأن شعاع الحقل غير مستخدم ويكون التردد والجهد هي المتغيرات الرئيسية التي تطبق على ملفات الثابت، ويتم تجاهل حالة الدوار وهذا يعني أنه لا توجد تغذية عكسية لإشارة السرعة والموضع، ولهذا يعتبرها النوع من القيادة حلقة مفتوحة وهو مناسب للمضخات والمراوح والتطبيقات التي لا تتطلب مستويات عالية من الدقة. كانت تعتبر هذه الطريقة من أكثر طرق التحكم شيوعاً، فإذا كان المطلوب تخفيض التردد المحدد عند جهد تغذية معين، فإن فيض الثغرة الهوائية سيميل إلى الإثباع مسبباً زيادة مفرطة في تيار الثابت وتشوهاً في موجة الفيض .

بناءً على ذلك يجب أن يكون التخفيض في التردد مصحوباً بتقليل جهد الثابت من أجل الحفاظ على فيض الثغرة الهوائية ثابتاً للمحرك التحريضي، يمكن استخدام هذه التقنية للحصول على عزوم إقلاع جيدة وحالة مستقرة جيدة، وباختصار هذه الطريقة هي إمداد المحرك بالجهد المطلوب متناسباً مع التردد المكافئ للسرعة المطلوبة بغض النظر عن حمل المحرك الميكانيكي والسرعة الفعلية التي يدور بها المحرك [5].

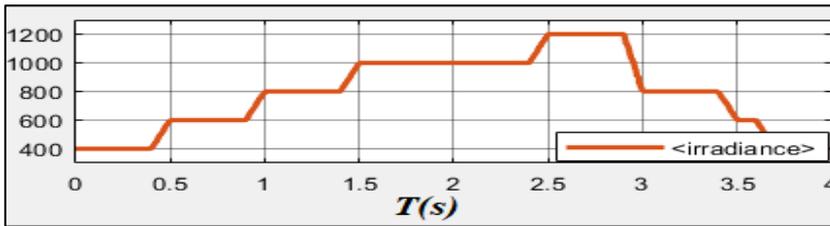
3.4 الاختبارات والنتائج

3.4.1 دائرة مقطع التخفيض Buck converter

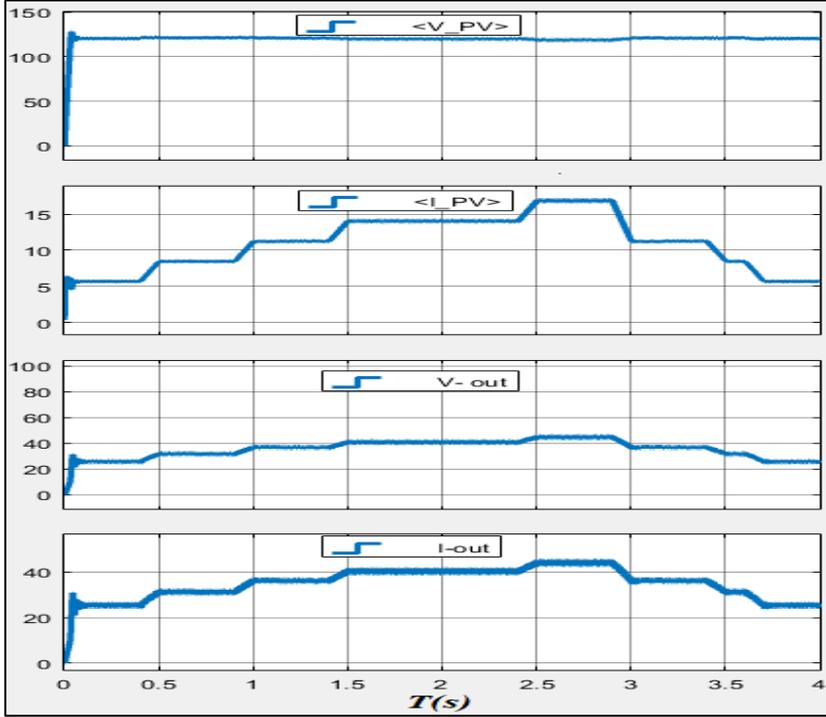
تمت نمذجة دائرة مقطع التخفيض (Buck) الموضحة بالشكل (22) تقوم بملاحظة نقطة الاستطاعة العظمى Mppt وفق خوارزمية P&O، تتوضع هذه الدارة وفقاً للنظام المقترح على خرج المصفوفة الكهروضوئية، بحيث تتعرض وفقاً لنموذج الاختبار لإشعاع شمسي موضح بالشكل (23).



الشكل 22: نموذج MATLAB لمقطع Buck يعمل وفق خوارزمية P&O



الشكل 23: تغيرات الإشعاع الشمسي وفق النموذج التجريبي لمقطع التخفيض

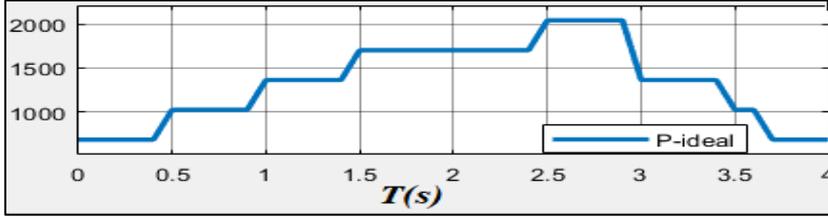


الشكل 24: التيارات والجهود على دخل وخرج دائرة المقطع

جهود الدخل والخرج لدائرة المقطع موضحة بالشكل (24) حيث كان جهد الدخل على دائرة المقطع (خرج المصفوفة الكهروضوئية) ثابت مع تغير التيار على خرج المصفوفة الكهروضوئية بناء على تغير شدة الإشعاع الشمسي.

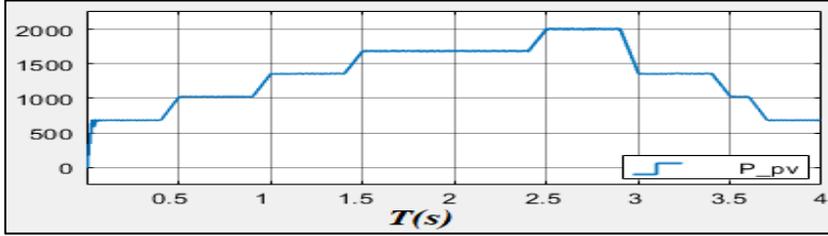
جهد الخرج لدائرة المقطع كان بقيمة متغيرة تتوافق مع قيمة تيار الخرج الذي يرتبط بالحمل على خرج دائرة المقطع.

الاستطاعة النموذجية المقدمة من المصفوفة الكهروضوئية عند نقطة الاستطاعة العظمى موضحة بالشكل (25).



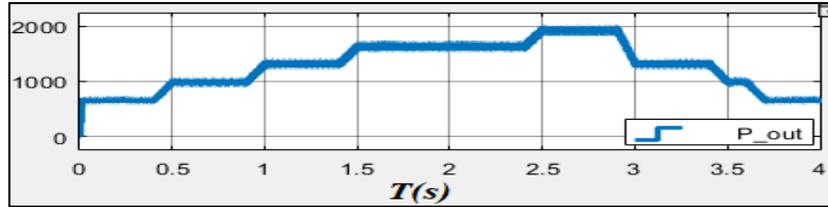
الشكل 25: الاستطاعة الاسمية للمصفوفة الكهروضوئية

الاستطاعة على خرج المصفوفة الكهروضوئية (الاستطاعة المستجرة من المصفوفة الكهروضوئية) موضحة بالشكل (26).



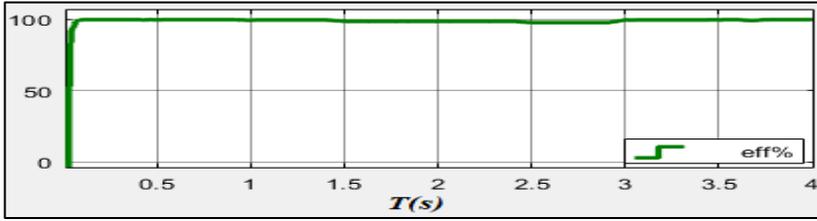
الشكل 26: الاستطاعة المستجرة من المصفوفة الكهروضوئية

الاستطاعة على خرج دائرة المقطع موضحة بالشكل (27).



الشكل 27: الاستطاعة على خرج دائرة المقطع

مردود المصفوفة الكهروضوئية مع دائرة مقطع وفق خوارزمية P&O لملاحقة نقطة الاستطاعة الأعظمية $\eta = 98\%$ ، كما هو موضح بالشكل (28).



الشكل 28: مردود المصفوفة الكهروضوئية

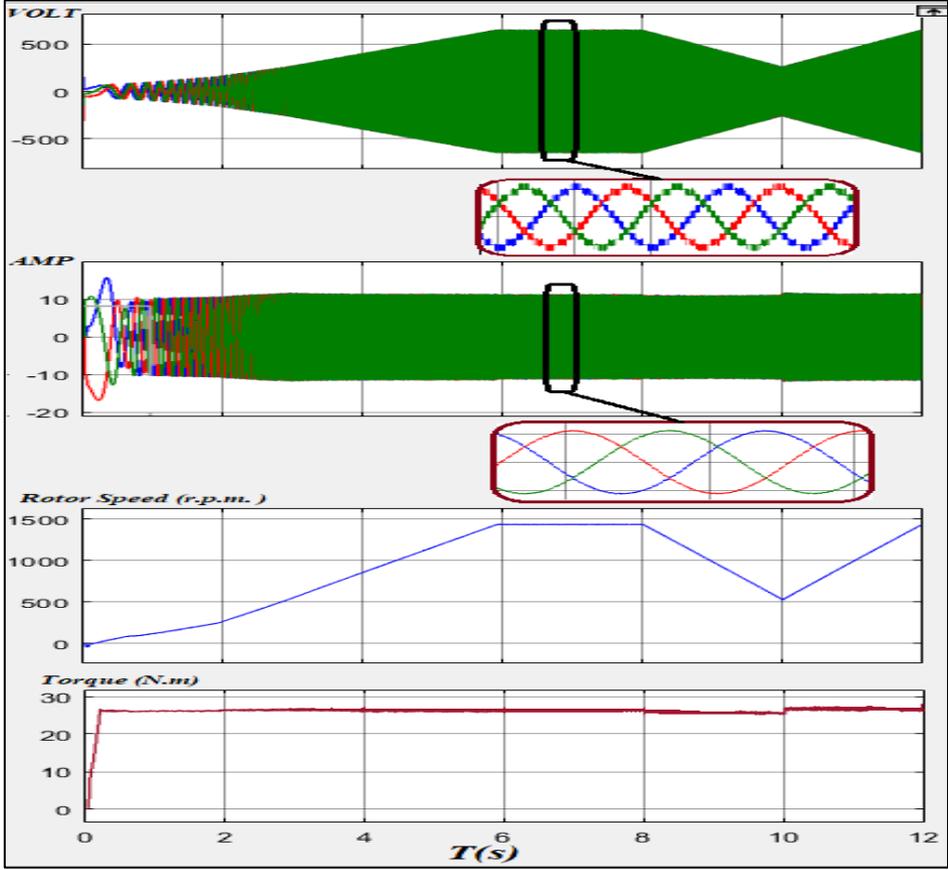
3.4.2 دائرة العاكس (CHB-7L) ثلاثي الطور وفق نظام V/F

تمت نمذجة دائرة العاكس (CHB-7I) ثلاثي الطور وفق نظام V/F، حيث تم وصله مع محرك تحريضي له المواصفات التالية:

5.4 hp (4 KW), 400 V, 50Hz, 1430 RPM

العزم الاسمي للمحرك $T_n = 26.7 \text{ N.M}$ ، في البداية تم إقلاع المحرك وفق نظام V/F للاستقرار على الجهد الاسمي له، حيث نلاحظ تغير السرعة بشكل تدريجي للاستقرار على السرعة الاسمية، فعند حدوث تغير في جهد الدخل للمحرك نلاحظ تغير السرعة مع ثبات تيار المحرك وكذلك ثبات العزم، كما هو موضح بالشكل (29).

وفق النظام المقترح فإن التغير الحاصل في شدة الإشعاع الشمسي الساقط على المصفوفة الكهروضوئية يتم تحويله إلى تغير في جهد الخرج مع الحفاظ على الاستطاعة العظمى على خرج دائرة المقطع والذي بدوره سيؤدي إلى تغير في جهد الدخل لدائرة العاكس (CHB-7I) ثلاثي الطور الذي يعمل وفق نظام V/F فيقوم بتغير سرعة الدوران مع الحفاظ على العزم ثابت أي أنه تم تغيير شدة التدفق لمضخة المياه مع تغير شدة الإشعاع الشمسي، وعند قياس مقدار الطاقة الكهربائية المستجرة من قبل العاكس بلغت 95% من إجمالي الطاقة الكلية التي توفرها مصفوفة الألواح الكهروضوئية.



الشكل 29: تغيير سرعة المحرك مع تغيير جهد الثابت وثبات العزم

4. الاستنتاجات والتوصيات

4.1 الاستنتاجات

مما سبق نستنتج أن العاكس المتعدد المستويات التسلسلي CHB-7Level ثلاثي الطور وفق استراتيجية التعديل PD-PWM يحقق أقل معدل تشوه توافقي لموجة الجهد بمقدار (10.70%) مقارنة بالعاكس التقليدي 2-level ثلاثي الطور ذو معدل تشوه توافقي (66.59%) بدون مرشح، وعليه فإن النظام المقترح لقيادة مضخات المياه الكهروضوئية يتمتع بكفاءة تحويل عالية للقدرة الكهربائية من شكلها المستمر للمتناوب، بالإضافة لموثوقيته العالية كونه مجهز للعمل وفق نظام V/F لقيادة المحركات التحريضة

حيث يعمل على تغيير سرعة المضخة بما يتناسب مع شدة الإشعاع الشمسي وبالتالي ضمان استمرار عملية ضخ المياه بما يتناسب مع كمية الإشعاع الشمسي دون توقف، حيث بلغت نسبة الطاقة المستجرة وفق هذا النظام من إجمالي الطاقة التي توفرها مصفوفة الألواح الكهروضوئية 95%.

4.2 التوصيات

- دراسة استخدام العواكس متعددة المستويات في ربط المنظومات الكهروضوئية مع الشبكة العامة.
- دراسة استخدام العواكس DC-MLI و FC-MLI المتعددة المستويات في قيادة مضخات المياه الكهروضوئية.
- دراسة استخدام العواكس متعددة المستويات في قيادة السيارات والقطارات الكهربائية.

الرموز

| | |
|--|------|
| Alternative Phase opposition Disposition | APOD |
| Cascaded H-bridge | CHB |
| Diode Clamped | DC |
| Flying Capacitor | FC |
| Multilevel Inverter | MLI |
| Maximum Power Point Tracking | MPPT |
| Phase Disposition | PD |
| Phase Opposition Disposition | POD |
| Pulse Width Modulation | PWM |
| Total harmonic distortion | THD |

- [1] Ahmed, J., & Salam, Z. "An improved perturb and observe (P&O) maximum power point tracking (MPPT) algorithm for higher efficiency," *Applied Energy*, 150, 97-108. (2015).
- [2] Debnath, S., Qin, J., Bahrani, B., Saadedifard, M., & Barbosa, P. "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: A review," *IEEE transactions on power electronics*, 30(1), 37-53. (2014).
- [3] Khalili, T., Raihani, A., Bouattan, O., Ouajji, H., & Amri, F. "Analysis study of a cascaded h-bridge multilevel inverter dedicated to power bank usage," *Journal of Theoretical & Applied Information Technology*, 88(3). (2016).
- [4] Lai, J. S., & Peng, F. Z. "Multilevel converters-a new breed of power converters," *IEEE Transactions on industry applications*, 32(3), 509-517. (1996).
- [5] Peña, J. M., & Díaz, E. V. "Implementation of V/f scalar control for speed regulation of a three-phase induction motor," *IEEE andescon* (pp. 1-4). (2016).
- [6] Rodriguez, J., Lai, J. S., & Peng, F. Z. "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," *IEEE Transactions on industrial electronics*, 49(4), 724-738. (2002).
- [7] Singh, B., Sharma, U., & Kumar, S. "Standalone photovoltaic water pumping system using induction motor drive with reduced sensors," *IEEE transactions on industry applications*, 54(4), 3645-3655. (2018).
- [8] Suresh, Y., Venkataramanaiah, J., Panda, A. K., Dhanamjayulu, C., & Venugopal, P. "Investigation on cascade multilevel inverter with symmetric, asymmetric, hybrid and multi-cell configurations," *Ain Shams Engineering Journal*, 8(2), 263-276. (2017).
- [9] Sharma, Ravi Kant. "Performance Analysis of Multilevel inverter based on SVPWM for Renewable Energy Sources." 2019 6th International Conference on Signal Processing and Integrated Networks (SPIN). IEEE, (2019).
- [10] Singh, Bhim, Utkarsh Sharma, and Shailendra Kumar. "Standalone photovoltaic water pumping system using induction motor drive with reduced sensors." *IEEE transactions on industry applications* 54.4 (2018): 3645-3655.
- [11] Talbi, Billel, et al. "A high-performance control scheme for photovoltaic pumping system under sudden irradiance and load changes." *Solar Energy* 159 (2018): 353-368.

استخدام المبدلات الالكترونية متعددة النبضات لتحسين جودة ربط الأفران التحريضية بالشبكة الكهربائية العامة

الدكتور المهندس غيث هاشم ورقوزق

g.warkozek@damasuniversity.edu.sy

قسم هندسة الطاقة الكهربائية

كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية

جامعة دمشق

الملخص

يعالج البحث موضوع استخدام المبدلات الالكترونية (AC-DC-AC) متعددة النبضات لتغذية الأفران التحريضية عالية الاستطاعة (12 ميغا فولت أمبير)، وذلك بهدف تحسين جودة الربط مع الشبكة الكهربائية والعمل على تخفيض نسبة التشوه الكلي بالتوافقيات وخفض تآرجح توتر الربط.

تضمنت الدراسة عرض الأنماط المختلفة لتغذية الفرن التحريضي عبر ربط مجموعات التقويم تسلسلياً أو تفرعياً لتشكيل نظم متعددة النبضات (6،12،18،24) نبضة، وذلك وفقاً للدراسات المرجعية، ثم تم اعتماد نمط محدد ذو (12) نبضة ليكون أساس تحليل جودة الربط مع الشبكة العامة.

تمت الدراسة عبر نموذج منفذ في بيئة النمذجة والمحاكاة MATLAB/Simulink لفرن تحريضي ذي استطاعة (10 MW) متصل مع شبكة توتر (20/66 Kv).

الكلمات المفتاحية: أفران تحريضية، المقومات الالكترونية متعددة النبضات، ربط مجموعات التقويم تسلسلياً وتفرعياً، نمذجة باستخدام MATLAB-SIMULINK

Improving power Quality of Electrical Grid connected to induction furnace using multi pulse power converters

Dr. Eng. Ghaith H Warkozek
g.warkozek@damascusuniversity.edu.sy
Electric Power Department
Faculty of Electrical and mechanical engineering
Damascus University

Abstract

The research deals with the topic of using the multi-pulse converter (AC-DC-AC) to feed a high power induction furnace (10 MVA), with the aim of improving the quality of the connection with the electrical grid and working to reduce the overall Total harmonic distortion THD% and reduce the voltage swing.

The study included displaying the different patterns of induction furnace feeding by connecting converters in series or parallel to form multi-pulse systems (6,12,18,24) pulses. Then a specific pattern with (12) pulses was adopted to be the basis for analyzing the power quality issue in coupling point with the grid.

The study was carried out via a model implemented in the MATLAB / Simulink simulation environment for an induction furnace (10 MW) connected to a grid via (66/20 Kv) power transformer.

Keywords: Induction furnace, Multi pulse Power Converters, series and parallel coupled converters, simulation MATLAB-SIMULINK

المقدمة

تعتبر جودة الطاقة (Power Quality) عن جودة التوتر والتيار المقدم من الشبكة إلى الحمل. إذ أنها تشمل استمرارية التغذية الكهربائية Continuity، ووثوقيتها (Reliability) ومردودها الطاقوي (Energy Efficiency). عليه يمكننا القول إن جودة الطاقة تعرف على أنها مجموعة الإجراءات التي توضع من أجل العمل على تقديم الطاقة الكهربائية بأفضل صورها، بحيث يمكن تطوير واستخدام الطاقة بنجاح دون انقطاع أو حدوث تداخل كهرومغناطيسي [1]. كما عرفت جودة الطاقة على أنها مفهوم تغذية وتأريض أي نظام الكتروني بطريقة مناسبة للعملية الهندسية والغرض المطلوب أداءه من الجهاز الكهربائي، وتناغمها مع باقي التجهيزات والتوصيلات المرتبطة بها وتحقيق كامل الوثوقية لنظام التغذية الكهربائي [2]. بشكل عام، يهدد انخفاض جودة الطاقة الكهربائية المردود العام، واستمرارية التغذية وسلامة التجهيزات الكهربائية. الأمر الذي يزيد من خطورة سوء التشغيل وحدوث الأعطال، كما يرفع من تكاليف أعمال الصيانة ومفايد الطاقة غير المبررة، ويقودنا ذلك إلى حدوث حالات الفصل التام وانخفاض عمر التجهيزات الكهربائية.

إن قيم الاستطاعة الفعالة والاستطاعة الردية (P&Q) هي المحددات الأساسية لجميع مستهلكي الطاقة ولكافة سويات التوتر. تتفاوت استطاعة الأحمال، تبعاً لطبيعتها (منزلية، صناعية، تجارية) وقد تكون هذه الأحمال خطية أو غير خطية، تتأثر بارتفاع وانخفاض التوتر المفاجئ (Surges أو Sags). كما تتأثر بهبوط التوتر وانخفاض التردد، وظهور التوافقيات (harmonics) في الشبكة المغذية، مما قد يسبب الفصل المفاجئ، والتداخل الكهرومغناطيسي وغيره من حالات التشغيل غير النظامية.

لذا تحدد المواصفة العالمية "Environment-Voltage Dips and Interruptions" Short مع المواصفة IEEE مجال انخفاض التوتر المسموح والوثوقية المطلوبة لأنظمة

توزيع الطاقة، كما حددت قيم التوتر العابر Flicker، ووضعت دليل يتعلق بالطاقة وجودتها. كما وضحت مدى استمرارية تأمين الطاقة دون حدوث انقطاع مفاجئ أو ارتفاع وانخفاض في التوتر (بالدقائق)، مع عدم ظهور مركبات توافقية في التيار والتوتر ناتجة عن الأحمال غير الخطية وانعكاس ذلك على الشبكة الكهربائية المغذية [3].

تستخدم الأفران التحريضية (Induction Furnaces) التيار الكهربائي المتناوب ذي التردد 400-150 هرتز لصهر الخرقة الحديدية، ذلك انطلاقاً من منابع التوتر العالي (66- 230 كيلوفولط)، حيث يتم تحويل التوتر العالي لقيم أدنى في ثانوي المحول وتطبيقه على ملف الفرن التحريضي [4]. المشكلة في هذه الأفران أنها تولد طيف واسع من التوافقيات، ناتج عما يلي:

- عمل النظام بتردد متغير عادة أكبر من التردد الصناعي 50 هرتز، يتراوح بين 400-150 هرتز. ذلك لزيادة التيارات الإعصارية في المعدن المراد صهره.
- حمل هذه المبدلات والذي هو الفرن التحريضي، المكون من ملف ذي عدد لفات محدود (10-36 لفة) ملفوف حول البوتقة، يضاف له مكثف على التسلسل أو التفرع لإحداث الطنين والسماح بتمرير أكبر تيار في ملف الفرن.
- عمليات الفصل والوصل المتكرر، والتحميل غير المنتظم تبعاً لطبيعة الخرقة المصهورة.

1. هدف البحث

دراسة أثر استخدام المبدلات الالكترونية متعددة النبضات لتحسين جودة ربط الأفران التحريضية مع الشبكة الكهربائية العامة. إضافة إلى نمذجة وتحليل عمل نظام التغذية الكهربائية لفرن تحريضي عالي الاستطاعة 10 [MW] بتردد 400-150 هرتز، وتمثيل التشغيل الفعلي للفرن عبر تغيير ذاتية الفرن خلال مراحل الصهر.

2. جودة توتر الربط مع الشبكة الكهربائية

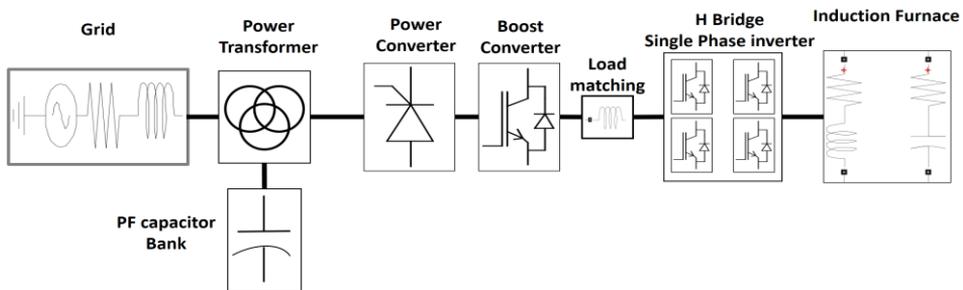
يمكن تصنيف جودة الربط لفرن صهر تحريضي مع الشبكة الكهربائية العامة إلى منحنيين أساسيين هما:

- نسبة التوافقيات المحقونة من المبدلات الإلكترونية المغذية للفرن باتجاه الشبكة العامة.
- سوية التوتر في نقطة الربط وتأرجحها أثناء التشغيل وفقاً لمراحل صهر الحديد وسوية الحديد ضمن بوتقة الفرن.

نبدأ بتوضيح هذه المفاهيم، ثم سننتقل لبيان الحلول المتبعة في الدراسات المرجعية، بعدها سنقترح نموذجاً لدراسة هذه الحلول وعرض النتائج.

1.2. أثر التوافقيات المتولدة من المبدلات الإلكترونية المغذية للفرن

المشكلة في الأفران التحريضية أنها تولد طيفاً واسعاً من التوافقيات، فكما ذكرنا سابقاً، يتكون نظام تغذية الفرن بشكل أساسي من: مقوم التيار المتناوب متعدد الأطوار المستخدم لتحويل التوتر المتناوب إلى مستمر Rectifier، المقطع الترانزستوري الرفع للتوتر Boost Converter، المستخدم لتنظيم التوتر المستمر، المعرج الأحادي الطور Inverter، الذي يقدم التغذية بالتيار المتناوب لملف الفرن التحريضي بتوتر خرج ذي قيمة متغيرة (3000-4000) فولط وبتردد متغير أكبر من التردد الصناعي 50 هرتز، ويتراوح هذا التردد بين 150-400 هرتز بغية زيادة التيارات الإعصارية في المواد الحديدية المراد صهرها. يبين الشكل (1) المخطط الصندوقي لهذا النظام.



المخطط الصندوقي لنظام التغذية الكهربائية لفرن صهر تحريضي متصل مع الشبكة العامة (الشكل 1)

تستعرض الدراسات المرجعية البنية الداخلية للفرن التحريضي [5]. إذ يلف ملف الفرن حول البوتقة. كما تعتبر بعض الدراسات الفرن التحريضي وكأنه محول، ملفه الأولي هو الملف الرئيسي، بينما الملف الثانوي هو المواد الحديدية داخل البوتقة. لذلك يعد فرن الصهر التحريضي حملاً غير خطياً. من جهة أخرى، فإن عمليات الفصل والوصل للقواطع الإلكترونية المكونة للمبدلات السابقة ستشارك في نشوء طيف واسع من التوافقيات التي سوف تحقق في نقطة الربط باتجاه الشبكة.

كما نعلم تؤثر هذه التوافقيات على باقي التجهيزات المرتبطة على الشبكة المغذية. لذا من الضروري إيجاد حلول مقبولة لحذف هذه التوافقيات وتأمين المستلزمات المطلوبة في المواصفات العالمية الموضوعية قدر المستطاع.

تقدر رتبة التوافقيات المتولدة في مثل هذا النظام وفق العلاقة التالية [6]:

$$n = 2K - 1 \quad (1)$$

حيث: n رتبة التوافقية و k عدد نبضات خرج المقوم (رتبة التوتر المقوم).

2.2 تأرجح سوية التوتر أثناء الصهر

عند صهر المواد المعدنية (الخردة) في البوتقة يتغير منسوب هذه المواد بسبب انصهارها في البوتقة بالنسبة لارتفاع البوتقة. عندها يتم إضافة كميات جديدة داخل البوتقة، وتكرر هذه العملية خلال فترات زمنية تتعلق بالمواصفات الإسمية للفرن. لكن من أجل الحفاظ على تيار صهر مناسب خلال هذه المراحل، يتوجب أن يعمل المعرج عند عامل استطاعة واحد، أي أن التيار في خرج المعرج يجب أن يتزامن مع توتر خرج المعرج، عندها تكون قيمة التيار الفعالة أكبر ما تكون والمردود الحراري للفرن أمثلي [7] ولحدوث التزامن بين تياره وتوتره يتم وصل مكثف على التسلسل أو على التفرع، وبقيمة مناسبة لذاتية الملف. تدعى هذه الحالة في الأفران التحريضية بالطينين [5] [1]. حيث تتساوى الممانعة التحريضية لملف الفرن مع الممانعة السعوية للمكثفات المتصلة (Capacitor bank) ويصبح حمل المعرج كأنه أومي بحت، ويصبح معه تيار خرج الفرن أعظماً ويتحقق الصهر المطلوب من الفرن. أي أنه نتيجة لذوبان هذه المواد الصلبة (الخردة) سوف تختلف المقاومة والممانعة لثانوي المحول وتتغير ثوابته. نتيجة لذلك، يجب تغيير

سعة مكثفات الطنين بشكل متناسب مع هذا التغيير، مما قد يسبب هبوطات متفاوتة في توتر الربط في جهة شبكة التغذية، وتغيير في قيمة التيار المستجر منها ما لم يتم تلافي ذلك عبر حلول متنوعة (سنذكرها لاحقاً). لذلك تحدد المواصفات العالمية سوية التآرجح المسموحة لتوتر نقطة الربط أثناء تشغيل الفرن [8].

بشكل عام، إن التشويش التوافقي في التيار والتوتر على الشبكة المغذية للفرن التحريضي، يجب ألا تتجاوز القيم المحددة بالمواصفة العالمية IEC 61000-3-4، يتم قياس سوية التوافقيات للتيار والتوتر عند نقطة الربط الرئيسية مع الشبكة المسماة (PCC) Point of Common Coupling.

لكيلا نشغل البحث بالجدول الواردة في المواصفات العالمية، سنقتبس فقط النقاط الخاصة بسويات التوتر والتيار القريبة من بحثنا. تحدد نسبة التشوه الكلي بالتوتر %THD، قيم تيار التوافقيات ذات الرتب (5-7-11-13) تبعاً لمقاومة القصر R_s التي تعبر عن نسبة استطاعة القصر في نقطة الربط الرئيسية منسوبة إلى الاستطاعة الظاهرية في تلك النقطة $R_{sc} = S_s/S_n$ والجدول (1) يوضح نسبة تيار التوافقيات المسموحة حسب المواصفات العالمية

الجدول (1) نسبة تيار التوافقيات المسموحة حسب المواصفات العالمية [8]

| Min R_{sc} | I_5 | I_7 | I_{11} | I_{13} | Voltage %THD |
|-----------------|-------|-------|----------|----------|-----------------|
| 66 | 12 | 10 | 9 | 6 | 2.36 |
| 120 | 15 | 12 | 12 | 8 | 1.69 |

كما أن الجدول (2) يحدد نسبة التشوه بالتيار المسموحة كتاباً لنسبة تيار القصر في الشبكة منسوباً إلى تيار الحمل حسب المواصفة IEEE Std 519-1992

الجدول (2) نسب التوافقيات بحسب رتبته وحسب نسبة تيار القصر للنظام بالنسبة لتيار الحمل [8]

| $V_n \leq 69 \text{ kV}$ | | | | | | |
|--------------------------|----------|------------------|------------------|------------------|-------------|------|
| I_{sc}/I_n | $h < 11$ | $11 \leq h < 17$ | $17 \leq h < 23$ | $23 \leq h < 35$ | $35 \leq h$ | TDD |
| <20 | 4.0 | 2.0 | 1.5 | 0.6 | 0.3 | 5.0 |
| 20-50 | 7.0 | 3.5 | 2.5 | 1.0 | 0.5 | 8.0 |
| 50-100 | 10.0 | 4.5 | 4.0 | 1.5 | 0.7 | 12.0 |

كما يظهر الجدول (3) نسبة التشوه الكلي بالتوتر المسموحة:

الجدول (3) نسب التشوه بالتوافقيات المسموحة في موجة التوتر عند نقطة الربط [8]

| Bus voltage at PCC, V_n (kV) | Individual voltage harmonic distortion (%) | THD _v (%) |
|--------------------------------|--|----------------------|
| $V_n \leq 69$ | 3.0 | 5.0 |
| $69 < V_n \leq 161$ | 1.5 | 2.5 |

بعد أن تعرفنا على أسس مفاهيم جودة الربط مع الشبكة سنستعرض إحدى طرق تحسين جودة الربط المتبعة.

3. تحسين جودة ربط الفرن التحريضي بالشبكة العامة

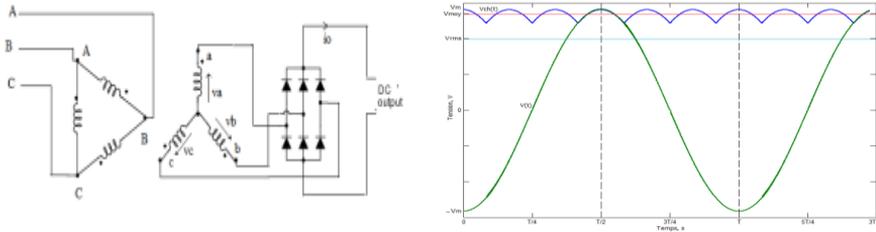
بشكل عام، تعتمد الأفران التحريضية على منبع قوي للتيار المستمر (وحدة تغذية) وذلك حتى يتمكن المعرج من تحويل التوتر المستمر الصافي إلى توتر متناوب بتردد متغير (150-400) هرتز. تستخدم لهذه الغاية المقومات المقادة (الثايرستورية) أو نصف المقادة (ثايرستور + ديود) والمقومات غير المقادة (ديودات). لدى استخدام جسر كريتز الثلاثي الطور، نحصل على توتر مقوم مستمر، مكون من مركبة مستمرة محملة بست نبضات (six pulses) إن هذه المقومات ذات عامل استطاعة سيء وتولد بشكل طبيعي رتب منخفضة من التوافقيات في المنبع (5-7-9....)، ذلك لأن رتبة التوافقيات تتناسب مع عدد القمم خلال الدور (النبضات) [9]. للتخفيف من انعكاس عامل الاستطاعة السيء على الشبكة المغذية وللتقليل من مطال التوافقيات وبالتالي نسبة التشويه الكلي بالتوتر والتيار %THD، يتم رفع رتبة التوتر n أي زيادة عدد القمم في الدور الواحد، يمكن تحقيق ذلك بالمقومات متعددة النبضات [10] Multi pulse Converters، إذ يتم عالمياً الوصول لعدد مرتفع من النبضات [11] 36-24-18-12

[12]. كما يمكن حل مسألة ارتفاع التوافقيات بإضافة مرشحات غير فعالة أو مرشحات فعالة، لكنها تسبب زيادة في الفاقد والتكاليف. إن جسور التقويم المستخدمة قد تكون كما نوهنا مقادة أو غير مقادة، وبالطبع عملية القيادة تزيد من تعقيد الأنظمة الإلكترونية وترفع من تكاليف التصنيع والصيانة، ولدى معالجة عامل الاستطاعة للأحمال غير الخطية، باستخدام مرشحات غير فعالة Passive Filter، قد تظهر حالات اهتزاز (طنين) بين المرشح والحمل [13] مما يسبب برفع توتر التوافقيات وقد يؤدي لانحيار النظام. من أجل كل ما سبق، نجد في بعض التطبيقات الهندسية الخاصة (الطائرات، الغواصات) والأفران التحريضية، يُفضل فيها الاتجاه نحو زيادة رتبة التوتر المقوم حرصاً على عدم استخدام مرشحات كبيرة الاستطاعة [11].

3.1. مفهوم رفع رتبة التوتر المقوم

3.1.1. المقومات ذات 6 نبضات

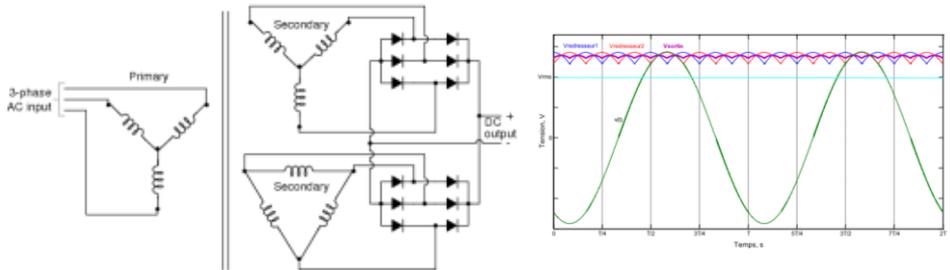
تأخذ المقومات متعددة الأطوار طرق توصيل عديدة لتأمين توترات دخل مزاحة للمقوم الجسري المستخدم. وكما سنرى لاحقاً، أنه لدى استخدام جسر كريتز المكون من ستة قواطع، المغذى من منبع ثلاثي الطور، يوصل المحول فيه بشكل Y/Y أو Y/Δ أو Δ/Y ، توترات الأطوار فيها ستكون مزاحة عن بعضها البعض بمقدار 120° درجة كهربائية، وسوف نحصل على توتر مقوم بستة نبضات في الخرج الشكل (2).



أما إذا اعتبرنا وجود جسرين كل منهما ذو ستة قواطع، ويتغذية أحد الجسور بمنبع موصول نجمي، والجسر الآخر بمنبع موصول بشكل مثلثي، وتم ربط الجسرين على التفرع أو على التسلسل، سوف نحصل على توتر مقوم من الرتبة 12، كما في الشكل (3). إن فرق الزاوي بين توتر أي طور في التوصيل النجمي والتوصيل المثلثي هو 30

[11] الشكل (2) جسر كريبتز ثلاثي الطور موجة التوتر المقوم ذات ست نبضات

درجة لذا فإن استخدام التوصيل $11Y/Y/\Delta$ ، أو التوصيل $1Y/Y/\Delta$ ، سيكون مناسباً لتأمين توتر مقوم من الرتبة 12. يمكن أيضاً أن يكون ملف المحول الابتدائي موصول بشكل مثلثي عوضاً عن الشكل النجمي ويمكن الحصول على نفس النتائج السابقة (يرجى العودة للملحق الشكل 1)

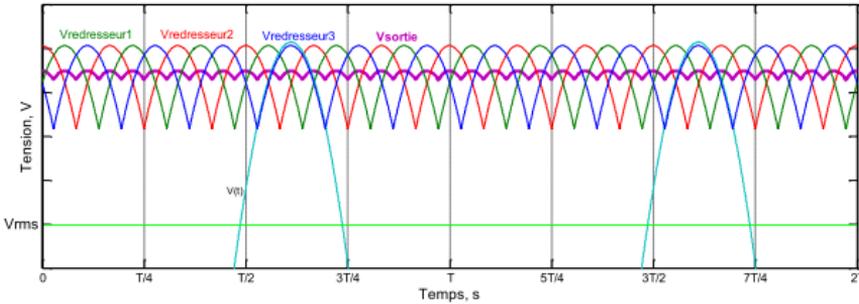


3.1.2. المقومات ذات 18 نبضة

يعتمد بعض الباحثين للحصول على توتر خرج من الرتبة 18، على توصيل ثلاثة جسور

الشكل (3) كيفية وصل جسري كريبتز للحصول على توتر مقوم ذي 12 نبضة والتوتر المقوم [11] تقويم تفرعية مضاعفة نوع كريبتز، تربط أيضاً على التسلسل أو التفرع. كما يوجد استراتيجيات متعددة لتشكيل فرق الطور بين هذه الملفات. حيث يعتمد بعض الباحثين على توصيل ملفات المحول بشكل $1Y/Z$ أو $2Y/Z$ [4] [5]. تم الاعتماد هنا على

تعديل التوصيل المثلي في الثانوي بإضافة نسبة معينة من الملفات تربط على التسلسل مع توترات الخطوط لخلق زاوية إزاحة محددة $20 +$ أو $20 -$ ، أو $15 - 15 +$ حيث يوضح الشكل (2) المخطط الشعاعي للدلتا الإضافية Extended Delta التي يتم تنفيذها). يمكن لملفات المحول الابتدائية أن تكون أيضاً موصلة بشكل نجمي أو مثلي. نرى في الشكل (4) التوتر المقوم ذي الرتبة 18.



الشكل (4) موجة التوتر المقوم الناتجة عن التوصيل المتعرج وذات 18 نبضة [11]

تستخدم أيضاً لبعض الأحمال الصغيرة، محولات ذاتية خاصة، موصلة مع الملفات الثانوية لتحقيق إزاحة بالطور بين الملفات وبالتالي تغذية ثلاث مقومات والحصول على توتر مقوم بالرتبة 18 نبضة. لكن هذه الطريقة لا تستخدم بالأفران التحريضية [14]

3.1.3 المقومات ذات 24 نبضة

بذات الطريقة السابقة، نستخدم للحصول على توتر مستمر ذي 24 نبضة أربعة جسور تقويم تربط على التسلسل أو التفرع، كل منها يغذى من مجموعة ملفات ثلاثية الطور في الطرف الثانوي للمحول الرئيسي. الملفات الأربعة توترات الطور الواحد فيها مزاحة بـ 15 درجة بين بعضها البعض وتشكل أربعة أشعة بينها الزوايا 15-30-45-60. يتم تحقيق ذلك نتيجة ربط ابتدائي المحول بشكل ZIG-ZAG، وربط ملفات الثانوي بشكل نجمي Z/YYYY (الملحق الشكل 3) [11].

يجدر الذكر هنا أن تردد التموجات RIPPLE المحمولة على مركبة التوتر المستمر المتوسطة سوف يزداد ترددها لقيم عالية، والتوتر المستمر الناتج سيكون شبه مستمر. وهذا ينعكس على انخفاض قيمة الحثية اللازمة لملفات الطور Inter phase Inductors المستخدمة في الربط التفرعي. سيتم تحليل دور ملف الطور لاحقاً في هذا البحث.

3.2. ربط جسور التقويم على التسلسل وعلى التفرع

إن القيمة المتوسطة لتوتر خرج جسر كريتز ويفرض تم وصل ثانوي المحول فيه بشكل نجمي يساوي [9]:

$$U_c = \frac{2q}{\pi} V_m \sin\left(\frac{\pi}{q}\right) \quad (2)$$

وبالتعويض عن q بعدد الأطوار الذي يساوي 3، وحساب القيمة العظمى لتوتر الطور بدلالة توتر الخط الفعال نجد:

$$V_m = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_{rms} \quad (3)$$

بالتعويض في المعادلة (2)، نجد:

$$U_{co} = 1.35 V_{rms \text{ line}} \quad (4)$$

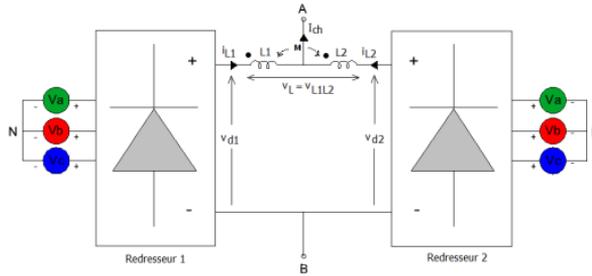
بالمقابل، إن القيمة المتوسطة لتوتر خرج جسر كريتز في حال وصل الملف الثانوي بشكل دلتا يساوي [9]:

$$U_c = \frac{q}{\pi} V'_m \quad (5)$$

وبالتعويض عن q بعدد الأطوار الذي يساوي 3، وحساب $V_m \sqrt{3} = V'_m$ التي تساوي توتر الخط الأعظمي، في هذه الحالة تتساوى القيمة المتوسطة الناتجة عن الجسر لدى ربط ملفات دخله بشكل نجمي أو مثلثي، ويعطي توتراً ذي ست نبضات في الخرج، ونبضات توتر الخرج في كلا الجسرين ستكون مزاحة عن بعضها ب 30 درجة كهربائية.

• حالة الربط التفرعي

لدى ربط جسرين على التفرع، يساوي توتر الخرج توتر أحد الجسرين، وعدد نبضات الخرج يتضاعف ويصل إلى 12 نبضة (وهذا ما ستوضحه نتائج التمثيل لاحقاً). في حال كون توتر أحد الجسرين أكبر من توتر الجسر الثاني، يتوقف الجسر ذي التوتر الأدنى عن العمل حتى ينخفض توتر الجسر الآخر ويصبح مساوياً لتوتر الجسر الأدنى توتراً. في هذه الحالة سوف يمر تياراً بالجسر ذي التوتر الأكبر أكبر من تيار الجسر ذي التوتر الأدنى. حتى ولو كانت مواصفات وخواص الملفات المغذية للجسرين متماثلة. حتى لا يؤثر الجسرين على بعضهما كثيراً، ولإزالة الفروقات اللحظية في التوتر، نعمل على إضافة ملفات خانقة بين الجسرين نطلق عليها ملفات الطور، كما في الشكل (5).



[11] على خرج الجسور التفرعية Reactors الشكل (5) توضع ملفات الطور الخانقة

تعمل هذه الملفات على تحسين شكل توتر الخرج لكل جسر وامتصاص الفروقات اللحظية لنبضات الخرج بين الجسرين. توضح بعض المراجع مثل [11] أن قيمة التوتر المتشكل على ملف الطور يمكن تقديرها بالعلاقة:

$$V_{Lmax} = 0.115 U_{co} \quad (6)$$

ويعطى تيار الملف يعطى بالعلاقة:

$$I_{Lmax} = \frac{V_{Lmax}}{2\pi(6F)(4L)} \quad (7)$$

• حالة الربط التسلسلي

لدى ربط جسور التقويم على التسلسل، يكون توتر الخرج الكلي مساوياً لمجموع توترات الجسور المرتبطة، كما أن رتبة توتر الخرج يساوي مجموع رتب التوترات لكل جسر في حال كانت مزاحة عن بعضها البعض، ولدى تغذية الجسرين كما وضعنا سابقاً عبر ملفات موصلة نجمي مثلثي، سيصل عدد نبضات الخرج إلى 12 نبضة، كما ستتضاعف القيمة المتوسطة للتوتر المقوم (وهذا ما ستوضحه نتائج التمثيل لاحقاً). إن تيار كل جسر يساوي تيار الحمل ويكون متساوياً في جميع الجسور الموصلة تسلسلياً مع بعضها البعض. في هذه الحالة لا يلزمنا ملف طور. سنستعرض في الفقرات القادمة الدراسة العملية للمفاهيم السابقة مع تحليل النتائج.

4. نمذجة ومحاكاة نظام ربط فرن تحريضي متعدد النبضات

يتكون نموذج نظام التغذية الكهربائية للفرن التحريضي من العناصر التالية:

- نموذج الشبكة الكهربائية توتر (20 [kV])
- نموذج محولة استطاعة بمخرجين $20/0.75 \times 2$ [kV] ($Y_g/D_1/Y_g$).
- نموذج للمقوم غير المقاد ثلاثي الطور
- نموذج لمبدل رافع للتوتر المستمر
- نموذج معرج التيار
- نموذج الفرن التحريضي

نموذج الشبكة الكهربائية توتر (20 [KV]):

تم استخدام نموذج لمنبع ثلاثي الطور لتمثيل الشبكة الكهربائية بتوتر قدره (20 [KV])

تردد (50 [Hz]) ونسبة ($X/R = 16$) لتمثيل حالة شبكة متينة

الجدول (4) المواصفات الاسمية لنموذج الشبكة الكهربائية

| القيمة الاسمية | المتحول |
|----------------|---------------|
| 20 [KV] | التوتر الاسمي |
| 50 [Hz] | التردد |
| 16 | X/R |

نموذج محولة استطاعة ($0.75/20$): $Y_g/D_1/Y_g$ [KV] $\times 4$

تم تمثيل محولة الاستطاعة الثلاثية الطور، الخاصة بالفرن التحريضي عالي الاستطاعة (ذات مخرجين بينهما انزياح طوري 30 درجة، بتوصيلات: $(Y_g/D1/Y_g)$). إذ تم استخدام نموذج المحولة المتوفر في مكتبة العناصر، تم استنتاج القيم الرقمية للنموذج استناداً إلى المواصفات الفنية الحقيقية للمحولة [7].

الجدول (5) المواصفات الاسمية لمحول الاستطاعة المغذية للنظام [7]

| القيمة الاسمية | | المتحول | |
|--------------------------------|-------------|------------------------------------|-----------------|
| 12 [MVA] 20 [KV] 50 [Hz] | | الاستطاعة والتوتر الاسميين والتردد | |
| Yg-D1-Yg | | طريقة توصيل الملفات | |
| 20 [KV] - 0.75 [KV] -0.75 [KV] | | توترات الملفات | |
| 0.1337 [Ω] | 0.0166 [pu] | R ₁ | X ₁₂ |
| 0.009 [Ω] | 0.087 [pu] | R ₂ | X ₁₃ |
| 0.009 [Ω] | 0.087 [pu] | R ₃ | X ₂₃ |

حيث يعبر المتحول X₁₂ عن المفاعلة المتبادلة بين مجموعة الملفات (1) مع مجموعة الملفات (2) وبذات الأسلوب للمفاعلتين X₁₃, X₂₃.

المقوم غير المقاد ثلاثي الطور (Current Source Converter CSC):

تغذى جسور التقويم من الملفات الثانوية لمحولة الفرن، إذ يوصل الجسر الأول مع مجموعة الملفات (1) الموصلة بشكل دلتا 1، بينما يوصل الجسر الثاني مع مجموعة الملفات (2) الموصلة بشكل نجمي، وبذلك نحصل على الإزاحة بالطور المطلوبة (30°)، وعلى توتر مقوم ذو اثنتي عشر نبضة في خرجة نبضات.

المبدل الرافع للتوتر المستمر (Boost converter)

استناداً إلى اختباراتنا، وجد أنه كلما ارتفع توتر العمل المطبق على ملف الفرن زاد تيار الفرن. بالعودة لمواصفات الفرن الإسمية نجد أن توتر الدخل يجب أن يكون بحدود 6000 فولت متناوب، ويتردد متوسط 150-300 هرتز [7]، لذا يستخدم عادة على خرج جسور التقويم، مبدل رافع. يتكون هذا المبدل من قاطع ترانزستوري مع حثية كبيرة (L_b) ويضاف مكثف على الخرج (C_b) لتثبيت التوتر. في هذه الحالة، توتر دخل المقطع

المستمر V_{in} يساوي 4000 فولت ويراد رفعه لقيمة أعلى (تصل إلى 7000 فولط). بالطبع يمكن التحكم بالتوتر وفق قيمة عامل الدور K_b (Duty Cycle) الذي يحسب وفق المعادلة التالية [15]:

$$K_b = 1 - \frac{V_{in}}{V_{out}} \quad (8)$$

الجدول (6) المواصفات الإسمية للمبدل الرفع

| القيمة الاسمية | المتحول | | |
|----------------|------------------------|-------|-------|
| 4 [KV] | توتر الدخل الاسمي | | |
| 10 [KHz] | تردد التقطيع للمقطع Fs | | |
| IGBT ترانزستور | عصر التبديل | | |
| 66 [mH] | 13.7 [mF] | L_b | C_b |

بما أن المقوم في دراستنا غير مقاد، لذلك سوف نستخدم المقطع الرفع لتنظيم التوتر (كما ستظهره النتائج لاحقاً) ولتأمين تحسين سوية توتر الربط مع الشبكة وتنعيم تغيرات تيار الحمل مع تغير ذاتية الفرن.

معرج التيار (Current Fed inverter)

نستخدم معرج جسري كامل ترانزستوري (مع ديودات العودة Flywheel Diode) لتحويل التوتر المستمر إلى توتر متناوب، مع إمكانية تغيير تردد وتوتر الخرج المتناوب. تم استخدام دائرة توليد نبضات تعتمد نظام تعديل عرض النبضة Pulse Width Modulation (PWM) بترددات تشغيل الفرن (150-300 هرتز) للتحكم بقيمة توتر الخرج وتردد الخرج [15].

الجدول (7) المواصفات الفنية لنموذج معرج التيار

| القيمة الاسمية | المتحول | | |
|----------------|-------------------|-------|-------|
| 6 [KV] | توتر الدخل الاسمي | | |
| H - Bridge | مخطط التوصيل | | |
| IGBT ترانزستور | عصر التبديل | | |
| 1 [mH] | 0.1 [μF] | R_s | C_s |

الفرن التحريضي Induction furnace

تم اعتماد النموذج الطنيني التفرعي لنمذجة الفرن، يجدر الذكر هنا أن ذاتية الفرن هي قيمة تصميمية خاصة به. عند تشغيل الفرن وملئه بالخردة، سوف تتغير هذه القيمة، فعلياً سيتم تغيير قيمة مكثف الطنين التفرعي لملاحقة هذا التغيير في الذاتية، وإبقاء عمل المعرج عند عامل استطاعة واحدي (كما ذكرنا سابقاً).

الجدول (8) المواصفات الإسمية للفرن التحريضي [7]

| القيمة الاسمية | المتحول |
|----------------|---------------------------------|
| 6000 [V] | التوتر المطبق |
| 10000 [KW] | الاستطاعة الإسمية |
| 10739 [KVA] | الاستطاعة الظاهرية |
| 150-300 [Hz] | مجال تردد التشغيل |
| 0.94-0.98 | عامل الاستطاعة عند الحمل الكامل |

- ربط جسور التقويم على التفرع والتعرف على الظواهر الناتجة عند تشغيل الفرن وفقاً للشروط النظامية لعناصره.
- ربط جسور التقويم على التسلسل والتعرف أيضاً على الظواهر الناتجة عند تشغيل الفرن وفقاً للشروط النظامية.
- تحليل متحولات جودة الربط مع الشبكة الكهربائية عند نقطة التغذية PCC (نسب التشوه بالتوافقيات وتأرجح سوية التوتر)

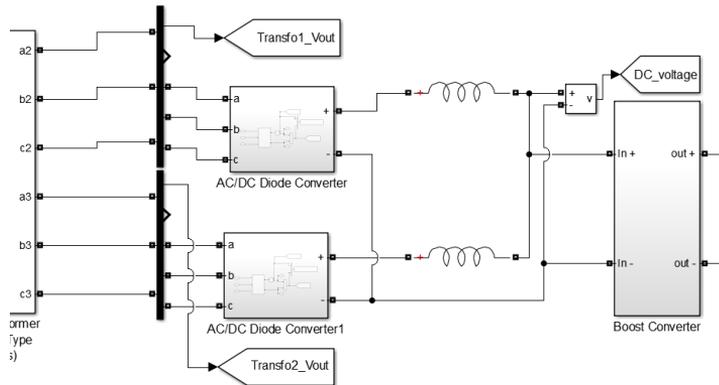
5. تحليل جودة ربط الفرن التحريضي مع الشبكة الكهربائية

بفرض بدايةً أن كمية الحديد ثابتة في البوتقة وتساوي حمولة الفرن الإسمية. قمنا بوضع مجموعة من المعايير لمقارنة حالات التشغيل المختلفة. هذه المعايير هي:

- A. معيار تحقيق نسبة تشوه كلي بالتوافقيات THD% يتناسب مع شروط الربط الواردة سابقاً (5% للتوتر - 6% للتيار).
- B. معيار تحقيق سوية توتر الربط مع الشبكة متوافقة مع شروط الربط السابقة (أقل من 20 [KV]) وعدم تأرجح كبير في سوية التوتر.

5.1. الدخول ثابت وإجراء وصل تفرعي لجسور التقويم

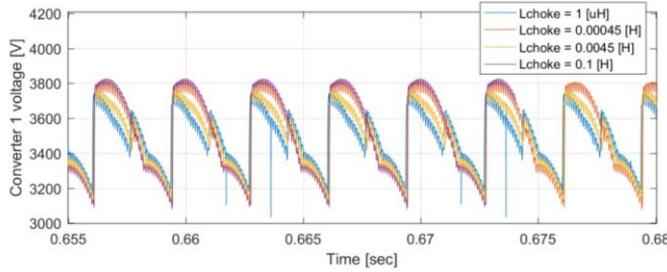
بفرض أن الحمولة كاملة وتردد الطنين الناتج عن هذه الحالة هو 300 [Hz]. يبين الشكل (7) جزءاً من النموذج وفيه توضح طريقة التوصيل التفرعية مع وضع ملفات



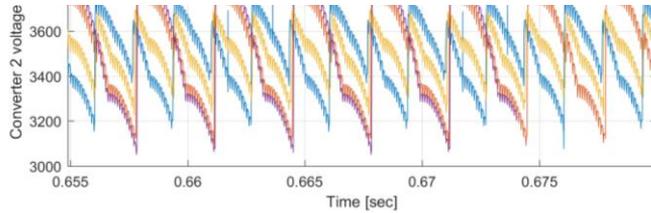
الطور على مخرج كل جسر كما ذكرنا سابقاً. يلعب الملف الموجود على خرج كل جسر

دوراً كبيراً في تحسين استقرار النظام كاملاً، حيث يتم تحقيق توازن توزيع تيار الحمل بين الجسرين عن طريق هذا الملف. تم حساب قيمة ذاتية الملف وفقاً للعلاقة (7) وكانت قيمتها النهائية (5) $[\mu\text{H}]$.

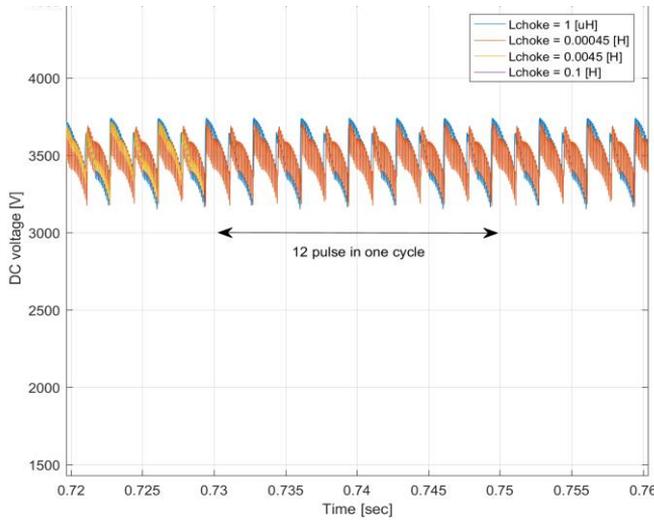
تبين الأشكال (8) و (9) تأثير قيمة ذاتية ملف الطور على تموجات (ripples) موجة



الشكل (7) توضع ملفات الخانقة على خرج الجسور التفرعية في النموذج

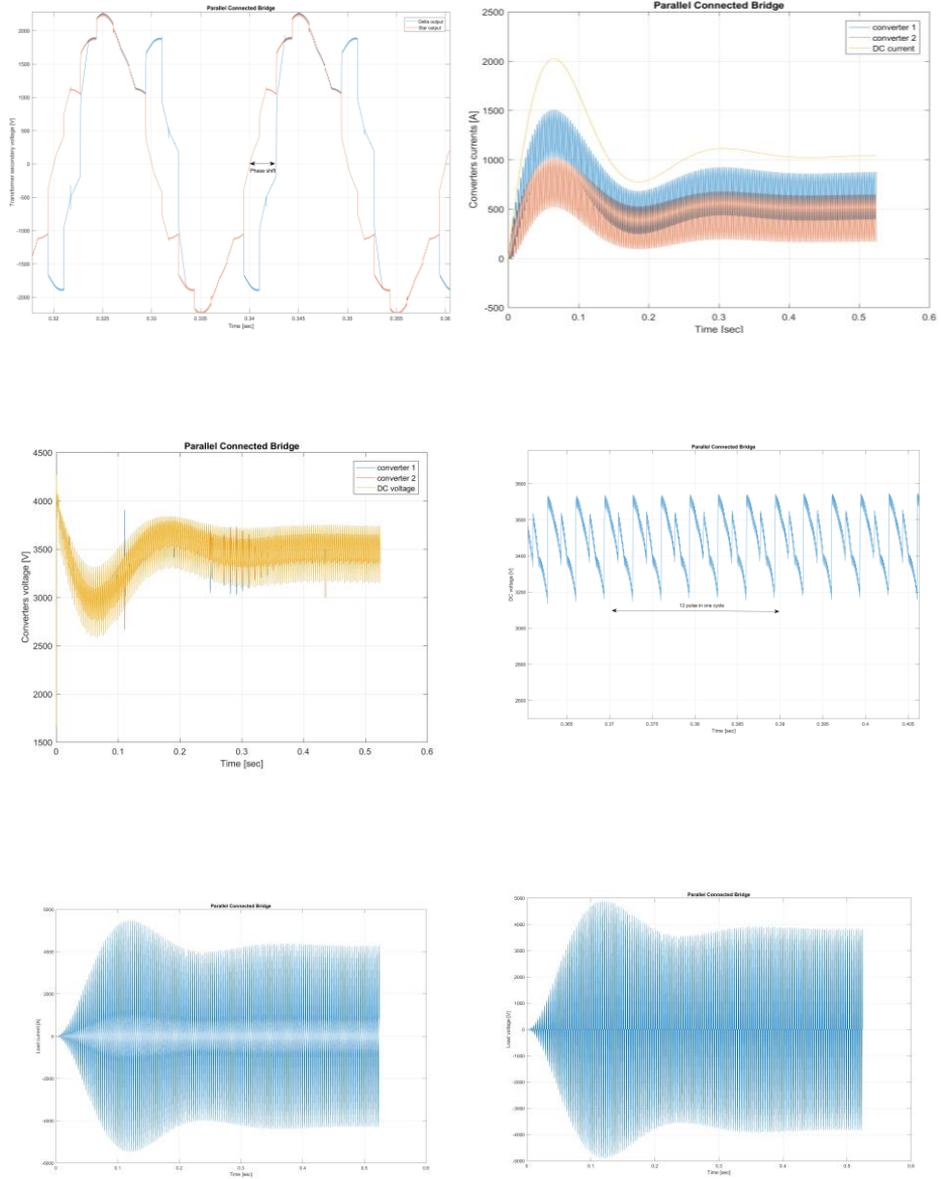


الشكل (8) تأثير قيمة ملف الطور في خرج الجسور التفرعية على توازن توترات جسور التقويم



الشكل (9) تأثير قيمة ملف الطور في خرج الجسور التفرعية على التوتر الكلي الناتج

التوتر المقوم الناتج عن كلا الجسرين. بعد اعتماد قيمة ذاتية الملف السابقة، قمنا بتشغيل النموذج في حالة ربط الملفات على التفرع وتم الحصول على النتائج التالية:

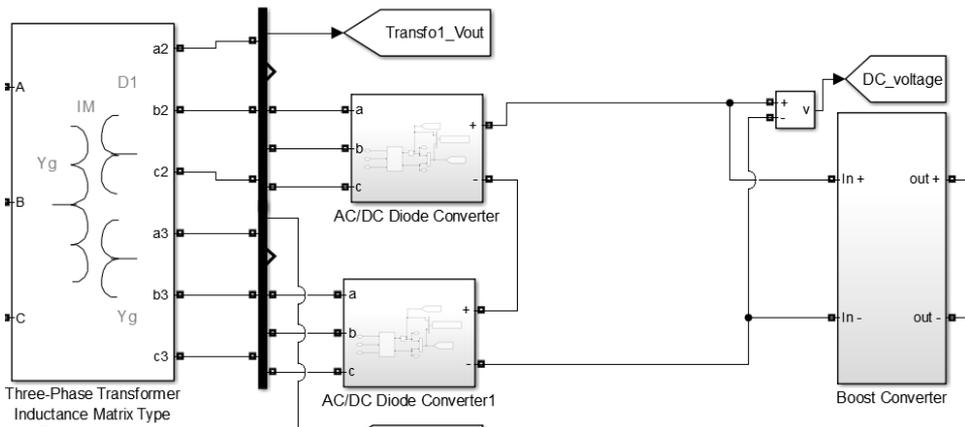


الشكل (10) نتائج تشغيل فرن الصهر من جسري تقويم موصلين على التفرع

تم الحصول على فرق الطور المناسب بين الأطوار، كما يظهر الشكل 10 عدد القمم (12) خلال الدور، ونرى أن تيار وتوتر الحمل مناسبين لعملية الصهر. لكن نلاحظ أيضاً عدم توازن توزيع تيار الحمل بين الجسرين رغم تنظيم التوتر المستمر، وهذا يعد أحد أهم عيوب الوصل التفرعي للجسور. حيث أن أحد الجسرين سيتحمل القسم الأكبر من تيار الحمل مما يسبب ضياعات أكبر فيه وأعطال أكثر أثناء الاستثمار. بلغت نسبة التشوه بالتوافقيات في موجة التوتر بحدود 3.5% بينما في موجة التيار 7%، وهي قيم مقبولة.

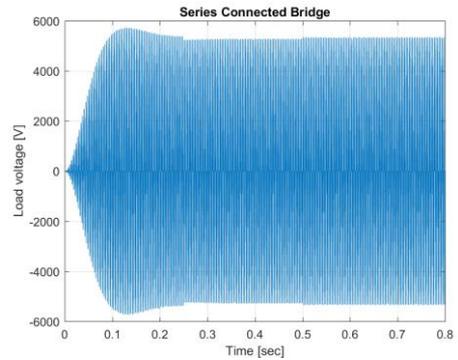
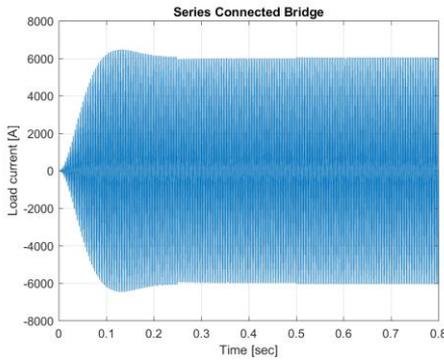
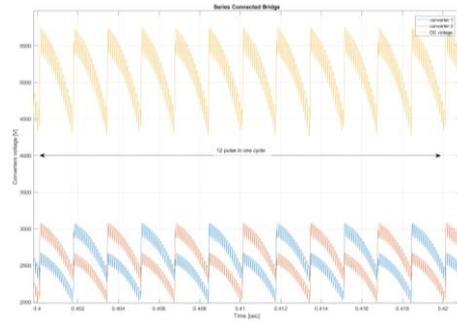
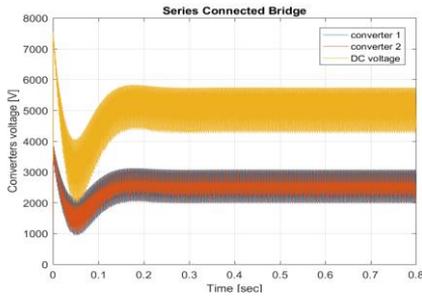
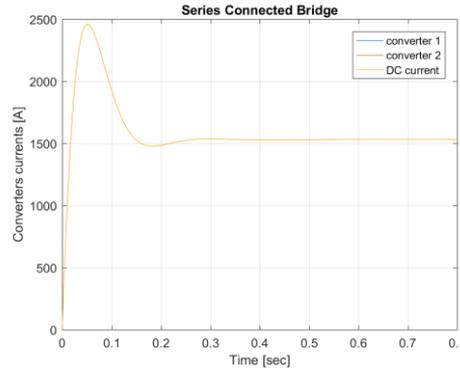
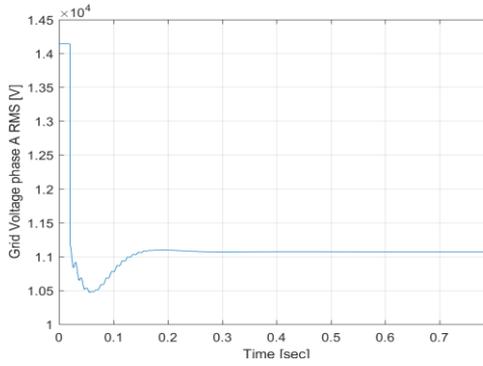
1.5. حالة دخل ثابت ووصل تسلسلي لجسور التقويم (S)

يمكن الوصل التسلسلي للجسور من توزيع تيار الحمل بشكل متناسق فيما بينهما من جهة، وتوزيع التوتر المقوم بالتساوي على الجسرين من جهة أخرى. فعلياً تستخدم معظم التطبيقات الصناعية طريقة الربط التسلسلية [7]. كما أنه لا حاجة لوضع ملفات في خرج الجسور. يبين الشكل (11) دارة النمذجة لحالة الربط التسلسلي:



الشكل (11) طريقة وصل الجسور على التسلسل في النموذج

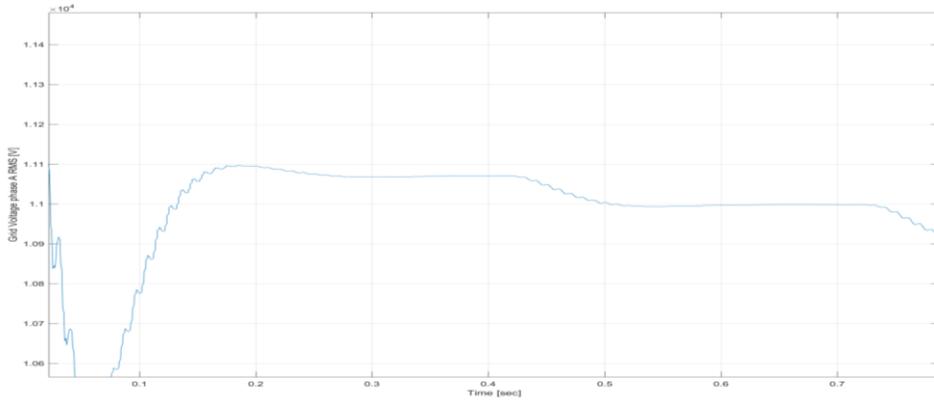
عند تشغيل النموذج على الحمولة الإسمية وتردد تشغيل 300 هرتز، نحصل على النتائج التالية:



الشكل (12) نتائج تشغيل فرن الصهر من جسري تقويم موصلين على التسلسل

نلاحظ من الشكل (12) كيف أن توتر الحمل قد توزع بشكل متوازن على الجسرين وأن كلا الجسرين قد مرر تيار الحمل الكامل، وهي ميزة هذا النوع من الربط. كما أننا حصلنا على 12 نبضة للتوتر المقوم خلال الدور.

كانت نسبة التشوه في التوافقيات للتيار $THD_I = 3.9\%$ وهي أقل من القيمة في حال الوصل التفرعي، بينما نسبة تشوه موجة التوتر بالتوافقيات $THD_V = 4\%$. مما سبق، نلاحظ أن النسب مقبولة في أنظمة الشبكات الكهربائية، لكن تعتبر عالية في بعض التطبيقات الخاصة مثل الطائرات والغواصات [11]. بالنسبة لمعيار الجودة الثاني المتعلق في سوية توتر الربط، نلاحظ في الشكل (12) أن القيمة الفعالة لتوتر الربط هي بحدود 11 كيلوفولط وهي أقل 45% من توتر الربط النظامي. رغم أن التحميل هنا مستقر أي أننا لم نمثل بعد تغيرات كمية الحديد داخل البوتقة، بالتالي فإن هذه القيمة ستتناقص أكثر من ذلك عن تمثيل حالة تغيير قيمة الذاتية كنتيجة لتغيير كمية الحديد في البوتقة، الشكل (13) حيث تم تغيير قيمة الذاتية للتعبير عن مرحلتين فقط من تغير سوية الحديد



الشكل (13) تغيرات سوية توتر الربط مع الشبكة في حالة تغير كمية الحديد داخل بوتقة الفرن

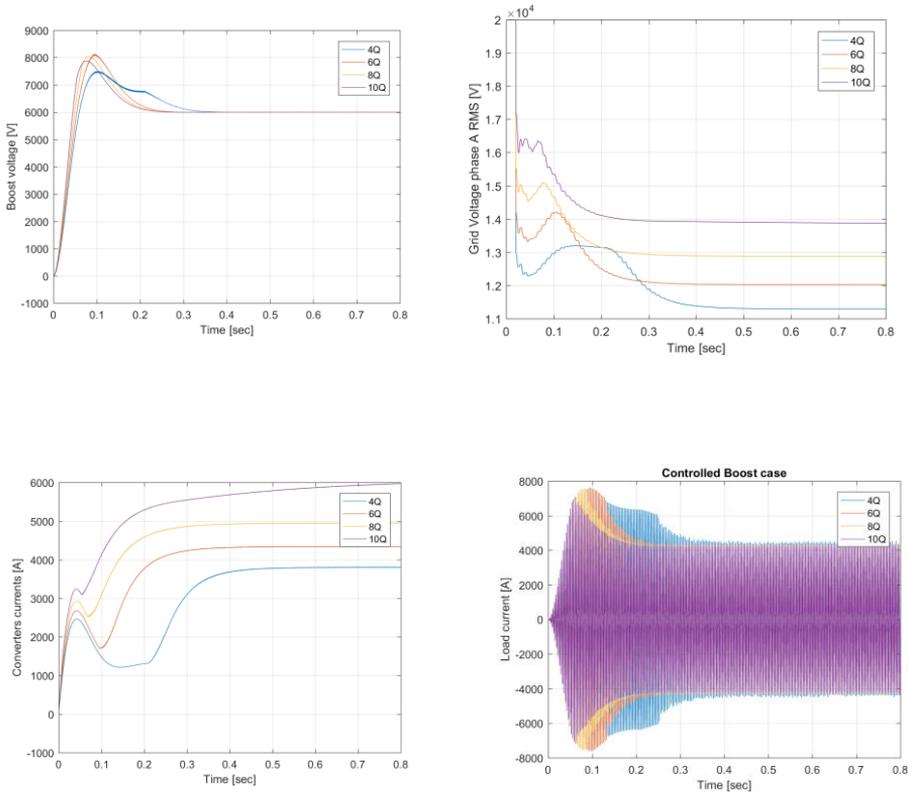
المصهور داخل البوتقة.

من أجل تحسين سوية توتر الربط فإننا نقترح منحنيين وهما:

- وضع مكثفات عند نقطة الربط. الأمر الذي يطبق عملياً بهدف تحسين سوية توتر الربط وتخفيض نسبة تشوه التوتر بالتوافقيات.

- تنظيم ورفع سوية توتر خرج المقطع الرافع مما يحسن من التيار المستجر من الشبكة، الأمر الذي ينعكس على عدم هبوط توتر نقطة الربط عند ازدياد التحميل.

قمنا في هذا العمل بدراسة قيم الاستطاعات المناسبة لمكثفات نقطة الربط مع تغير سويات توتر للمقطع الرافع. حيث لاحظنا أنه من الممكن أن تكون الاستطاعة الكبيرة لمكثفات نقطة الربط غير مجدية (بل مكلفة مادياً) ما لم يتم اختيار توتر خرج مناسب للمقطع الرافع. تم اختيار قيمة توتر 6000 فولت كقيمة مرجعية للمقطع الرافع، وتم تغيير قيم استطاعة مكثفات نقطة الربط ومراقبة النتائج، الشكل (14).



الشكل (14) تأثير تغيير استطاعة مكثفات نقطة الربط على تشغيل فرن الصهر التحريضي

بشكل أولي من المعروف أنه كلما ازدادت سعة مكثفات نقطة الربط، ازداد معها سوية توتر الربط مع بقاء تيار الحمل ثابتاً، كوننا نثبت توتر خرج المقطع الرافع. لكن هذا الأمر في نظام الفرن سوف يجهد جسور التقويم، حيث يرتفع تيار الجسور إلى قيم تصل حتى 6000 أمبير، مما يسبب ضياعات أكبر في المقومات. من أجل ذلك قمنا بإجراء دراسة تحليلية لسوية التوتر المرجعي للمقطع الرافع المناسبة، والتي ستعكس إيجابياً على تيار جسور التقويم ويحسن بذات الوقت سوية توتر الربط. بقصد الاختصار، قمنا بتمثيل تغيير كمية الحديد على أربعة مراحل تمثل الذاتيات التالية:

| رقم المرحلة | 1 | 2 | 3 | 4 |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| قيمة ذاتية الفرن [H] | 0.0034 | 0.0041 | 0.0051 | 0.0068 |
| قيمة سعة المكثف الطيني [μF] | 0.83 | 0.99 | 0.0124 | 0.0166 |
| تردد تشغيل المعرج [Hz] | 300 | 250 | 200 | 150 |

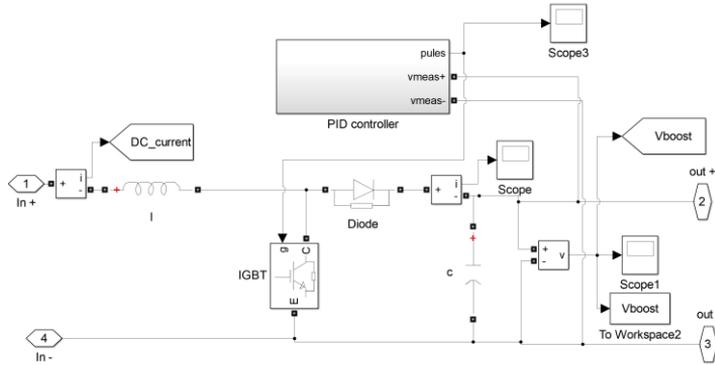
لحساب السعة الطينية المناسبة بشكل دقيق لكل تردد يمكن استخدام العلاقة التالية [5]:

$$C = \frac{10^9 \times P_{coil} \times Q}{2\pi \times f_c \times V_c^2} \quad (9)$$

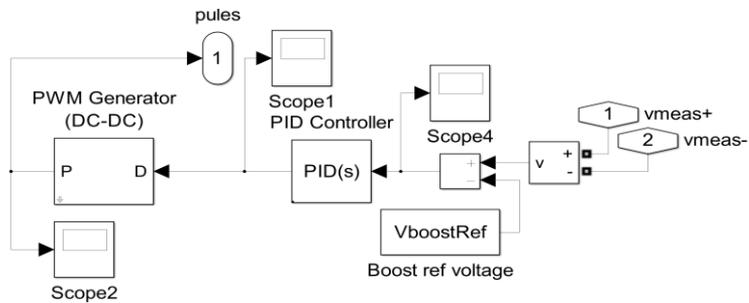
حيث: P_{coil} استطاعة ملف الفرن، f_c تردد التشغيل و V_c توتر الملف. كما يمكن استخدام تيار وتوتر الفرن مباشرةً وتطبيق المعادلة التالية:

$$C = \frac{I}{2\pi \times f_c \times V_c} \quad (10)$$

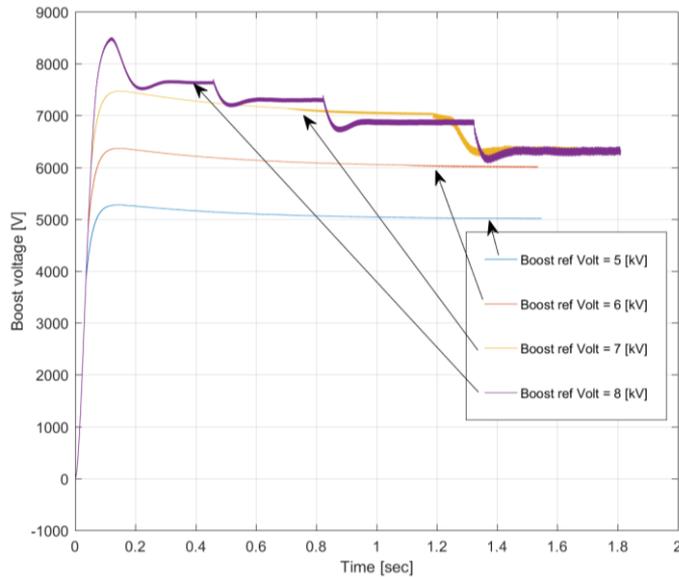
قمنا بتثبيت استطاعة مكثفات الربط على القيمة (Q_2) أي ضعفي استطاعة الطنين للفرن. سوف نستعرض النتائج التي حصلنا عليها عند تمثيل تغيير كمية الحديد داخل البوتقة ومن أجل توترات مختلفة للمقطع الرافع. كما استخدمنا منظم PID للتحكم بدور التقطيع للمقطع الرافع من أجل تثبيت توتر الخرج على القيمة المطلوبة في كل حالة (5-6-7-8 [KV]) (الشكل (15) والشكل (16)).



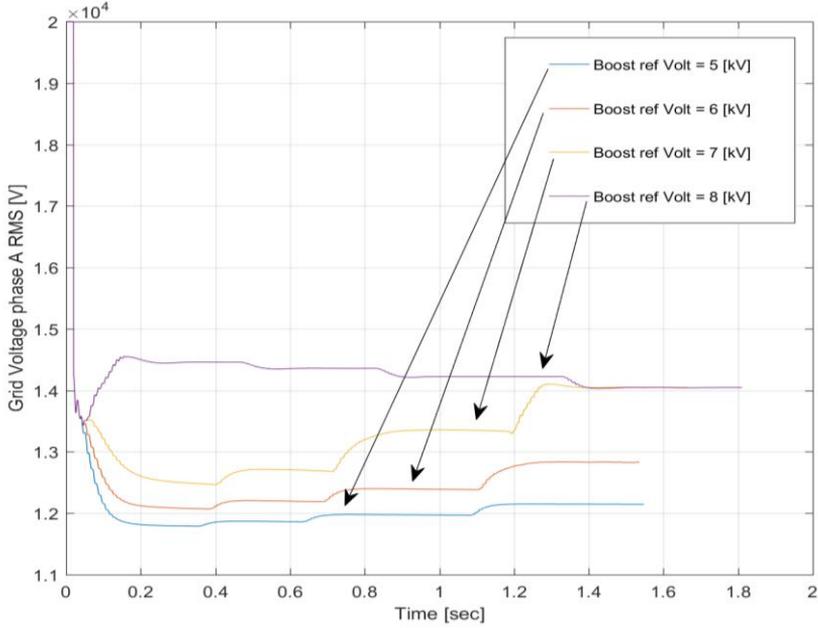
(نموذج المقطع الرافع ودارة التحكم المستخدمة 15 الشكل)



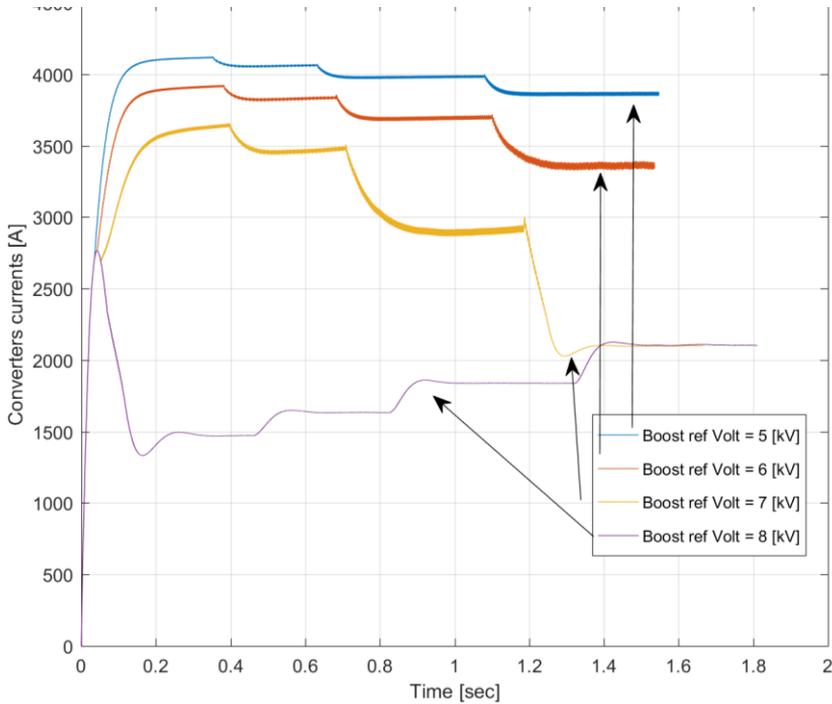
الشكل (16) تفصيل دارة التحكم بالمقطع الرافع



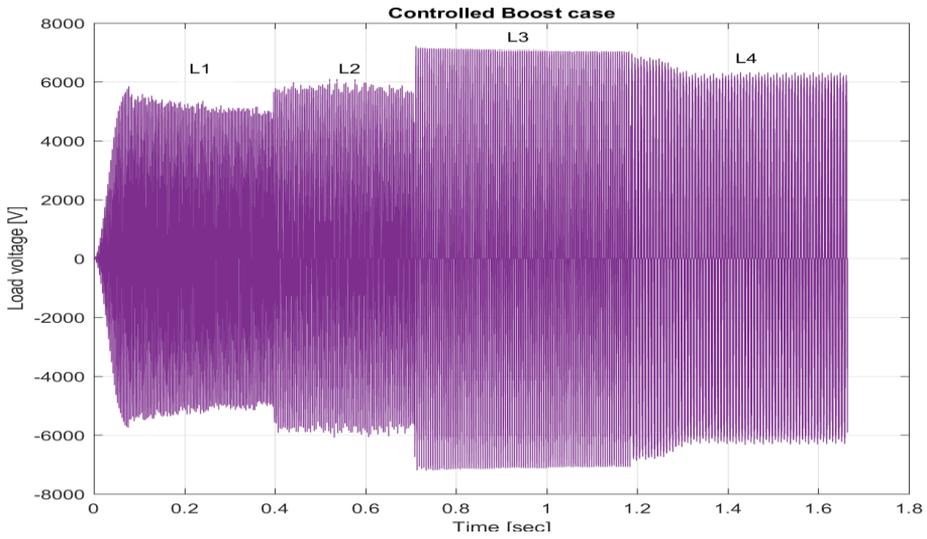
الشكل (17) تثبيت توتر المقطع الرافع على قيمة محددة خلال تشغيل الفرن



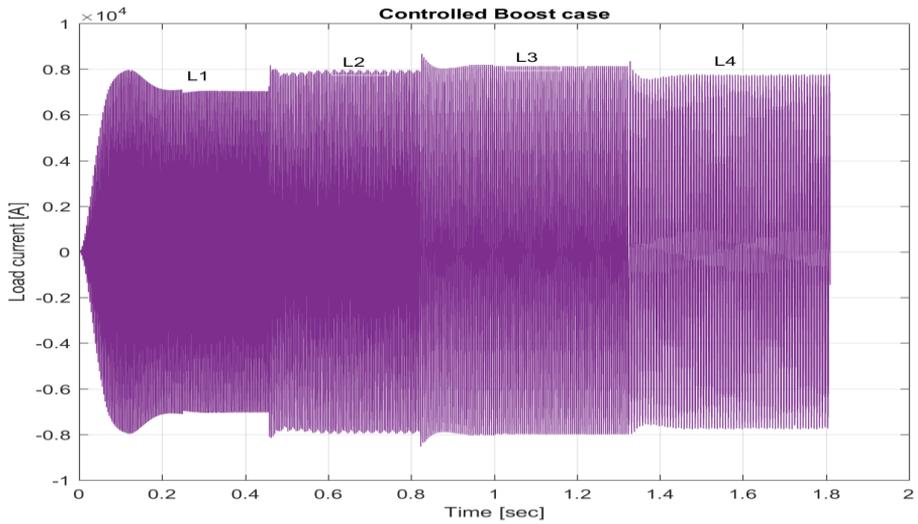
الشكل (18) تأثير تنظيم توتر المقطع الرافع على قيمة محددة خلال تشغيل الفرن على توتر الربط مع الشبكة



الشكل (19) تأثير تنظيم توتر المقطع الرافع على قيمة محددة خلال تشغيل الفرن على تيار المقوم



الشكل (20) تغيير تيار الحمل مع تنظيم توتر المقطع أثناء تشغيل الفرن



الشكل (21) تغيير تيار الحمل مع تنظيم توتر المقطع أثناء تشغيل الفرن

نستنتج من المنحنيات السابقة (الأشكال 17-18-19-20-21) أن أفضل قيمة لاستطاعة مكثفات الربط تساوي ضعفي استطاعة مكثفات الطنين (Q2)، وعند تطبيق توتر 7000 فولط على خرج المقطع الرافع. وتكون سوية توتر نقطة الربط بحدود 13 كيلو فولط قيمة فعالة، يمكن عندها لا Tap changer في محولة الربط من رفع التوتر للقيمة النظامية 14 كيلو فولط فعال. كما كانت نسبة التوافقيات في موجة التيار 0.11% بينما في موجة التوتر 0.20% وهي نسبة منخفضة جداً.

6. الخاتمة

تم في هذا البحث تحليل موضوع تحسين جودة الربط لفرن تحريضي عالي الاستطاعة مع الشبكة الكهربائية العامة. ذلك بهدف تحقيق معيارين، هما نسبة التشوه الكلي بالتوافقيات، وسوية التوتر في نقطة الربط. تم استعراض طريقة استخدام المقومات متعددة النبضات بهدف تخفيض رتبة التوافقيات المتشكلة في النظام، والمحقونة في الشبكة. حيث أن المبدأ الأساسي هو ربط المقومات على التفرع، وعلى التسلسل للحصول على توتر مقوم متعدد القمم (أكبر من 6 قمم). تم نمذجة فرن تحريضي عالي الاستطاعة (10 [MW]) متصل مع الشبكة العامة بمحول موصل $Y_g/D_1/Y_g$. تم تمثيل عمل الفرن مع تغيير الذاتية بسبب عملية صهر الحديد بداخله ومراقبة شروط الربط أثناء ذلك. بينت النتائج ما يلي:

- إن عملية الربط التسلسلي أفضل من الربط التفرعي، حيث يتوزع تيار الحمل بشكل متناسق بين الجسرين، ولا ننصح باستخدام الربط التفرعي لمثل هذه الأحمال. كما أن تكاليف مكونات الجسور التسلسلية سيكون أقل .
- إن تنظيم توتر المقطع الرافع في خرج المقوم يمكنه أن يحسن من سوية توتر الربط مع الشبكة لتحقيق الشروط المطلوبة من جودة الربط، وعدم حدوث هبوط توتر كبير على مجموعات النظام (مقوم، مقطع، معرج، محول).

- تمثيل النظام استناداً للقيم الحقيقية لمكوناته (مقاومة، سعات، حثيات..)، سمح لنا بتحديد قيمة مكثفات تحسين عامل الاستطاعة المطلوبة وسوية توتر خرج المقطع التفرعي الواجب تقديمها.
- تمكنا باستخدام جسرين ثلاثيي الطور مربوطين على التسلسل من تشكيل وحدة تغذية جيدة لفرن تحريضي باستطاعة 10 ميغا وات، وقيمة التوافقيات الناتجة وتشويه توتر الشبكة كانت ضمن القيم العالمية المقبولة.

- [1] A. Bolourian, "Evaluations of Energy Efficiency Improvement (Induction Furnaces) ," Chalmers University of Technology, Sweden, 2010.
- [2] M. Nawaz, "A Power Control Scheme of a Medium Frequency Induction Furnace," Department of Electrical Engineering University of Engineering and Technology Lahore , 2009.
- [3] P. Narnaware, A. Thosar, "Power Quality Issues in induction furnace," *International Journal of advanced Engineering and research development* , p. Vol 3, 2016.
- [4] I. Zamora, I. Albizu, A. Sagatabeitia, E. Fernandez, "Real-time Simulation of Synchronverter Connected to the Main Grid," *IEEE Workshop on Power Electronics and Power Quality Applications (PEPQA)*, 2019.
- [5] V. Rudnev, D. Loveless و R. Cook, Handbook of Induction Heating, CRC Press, 2017.
- [6] G. Sravanthi, D. Kumar و I. Ramesh, "24 PULSE AC-DC CONVERTERS FOR IMPROVED POWER QUALITY," *International Journal of Electrical and Electronics Engineering Research* , 4, pp. 223-228, 2014.
- [7] Electrotherm, "Quick melt DTI," INDIA, 2018.
- [8] P. Syria, "Code of distribution in SYRIA," Misitry of Electricity, 2016.
- [9] H. Warkozek, Power Electronics (1) , Damascus Univeresity press, 2015.
- [10] K. Gamit , K. Chaudhari, "Multi pulse rectifier using different phase shifting trnasformers and its THD comparasion for power quality issues," *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, p. Vol 3 , 2016.
- [11] M. Alvaro, L. h. Hoang, L. Cluade, "Modeling and simulation of a 24-pulse Transformer Rectifier Unit for more electric aircraft power system," *Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS)*, 2012.
- [12] J. D. F. M. J. C. a. M. H. O Fernández, "Design and Implementation of a 120A Resonant Inverter for Induction Furnace," *IEEE 978-1-4799-2370-0*, 2013.
- [13] A. Ziad, w. Hashem , P. Robert, "Modeling of single-phase active

-] filter," *Damascus University Journal for engineering*, 23, 2005.
- [14E. Christian, Analysis and Design of New Harmonic Mitigation
] Approaches, Texas: Texas University, 2013.
- [15 Power Electronics Handbook, USA: Elsavier, 2011.
- [16 MathWorks, "MATLAB," mathworks, 2016.

استخدام خوارزمية الحوت للأمتلة في تحسين تقييم موثوقية نظام طاقة مركب – حالة دراسية: نظام الطاقة الكهربائية في محافظة اللاذقية

- م. معلا إبراهيم، قسم هندسة الطاقة الكهربائية – كلية الهمك – جامعة تشرين
د. م. حسام شاهين، قسم هندسة الطاقة الكهربائية – جامعة تشرين
د. م. غسان حايك، قسم هندسة الطاقة الكهربائية – جامعة تشرين
د. م. مضر صارم، الهيئة العامة للاستشعار عن بعد – فرع المنطقة الساحلية

ملخص

يعتبر تقييم موثوقية نظام الطاقة المركب (التوليد والنقل) من الدراسات الهامة لتقييم مدى كفاية وأمان هذا النظام في توفير طاقة موثوقة وعالية الجودة للمستهلكين. إن من أهم الصعوبات التي تعترض عملية تقييم موثوقية نظام الطاقة المركب هي تعقيد هذا النظام وكبر حجمه وبالتالي العبء الزمني والحسابي اللازم لهذا التقييم. يعرض هذا المقال منهجية مقترحة لتقييم موثوقية نظام الطاقة الكهربائية المركب في محافظة اللاذقية اعتماداً على خوارزميات الذكاء الاصطناعي. ووفقاً للمنهجية المقترحة، تم أولاً حساب أحمال الذروة اليومي والأسبوعي والفصلي. كما تم حساب معدل الخروج القسري لمجموعات التوليد عن الخدمة وكذلك حساب معدل تعطل خطوط النقل في هذا النظام. ثم تم لاحقاً تطبيق خوارزميتين من خوارزميات الذكاء الاصطناعي هما خوارزمية الحوت (Whale Optimization Algorithm – WOA) والخوارزمية الوراثية (Genetic Algorithm – GA) وذلك بهدف تحسين تقييم الموثوقية من ناحية العبء الزمني والحسابي. استخدمت خوارزمية الحوت (WOA) في المرحلة الأولى لتوليد عيّنات من حالات النظام المحتملة المختلفة وذلك بهدف تسهيل تحديد حالات الفشل في عمل النظام. أمّا في المرحلة الثانية، فمن أجل كل حالة فشل في عمل النظام تم تحديدها وفقاً لخوارزمية الـ WOA، تم استدعاء الخوارزمية الوراثية (GA) لتحديد الحد الأدنى الأمثل

لتخفيض الحمل مع المحافظة على شروط عمل النظام (من ناحية التوترات وسعات التحمل القصوى للخطوط). تستند استراتيجية تخفيض الحمولة التي تم اقتراحها في هذا البحث على تخفيض الحمل الأقل أهمية من أحمال النظام بنسبة أكبر مقارنة مع الأحمال الأكثر أهمية. أخيراً، واعتماداً على حالات الفشل، تم حساب مؤشرات الموثوقية السنوية للنظام ككل ولعقد الحمولة أيضاً. وللتحقق من صلاحية وفعالية المنهجية المقترحة. وقد أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أنّ الطريقة المقترحة أكثر فعالية ودقة في حساب مؤشرات موثوقية نظام الطاقة المركب مقارنةً مع طريقة محاكاة مونت كارلو التسلسلية. كما بيّنت النتائج أنّ استراتيجية تخفيض الحمل المتبعة ذات فعالية كبيرة في الحفاظ على شروط عمل النظام.

الكلمات المفتاحية:

الموثوقية، نظام الطاقة المركب، إيجاد الحل الأمثل، خوارزمية الحوت، الخوارزمية الوراثية، خوارزمية عناصر السرب.

Using Whale Optimization Algorithm In Reliability Evaluation Improvement of a Composite Power System – Case study: Composite Power System in Latakia Governorate

*Eng. Mulla Ibrahim, Department of Electrical Power Engineering,
Tishreen University*

*Dr. Eng. Mudar Sarem, General Organization of remote sensing (GORS),
Costal branch*

*Dr. Eng. Husam Shaheen, Department of Electrical Power Engineering,
Tishreen University*

*Dr. Eng. Ghassan Hayek, Department of Electrical Power Engineering,
Tishreen University*

Abstract:

the reliability evaluation of the composite power system (generation and transmission) is very essential to assess the adequacy and security of the system to supply high-quality power to the consumers. The most difficult problems encountered in assessing the reliability of a composite power system are the large scale and complexity of this system and thus the time and computational burden required for such assessment. This article presents a proposed methodology for the reliability evaluation of the composite power system in Latakia governorate based on artificial intelligence algorithms. According to the proposed methodology, firstly, the daily, weekly, and seasonal. Next, the forced outage rate of the generating units and the failure probability of the transmission line in this system. Later on, two artificial intelligence algorithms, namely, Whale Optimization Algorithm (WOA) and the genetic algorithm (GA) are applied to improve the reliability evaluation of the composite power system from the time and computational point of view. WOA algorithm was applied in the first stage, to generate the different possible state samples of the system in order to determine the failure states. In the

second stage, and for each failure state determined by WOA, GA algorithm is called to find the optimal minimum load curtailment without violating system operational conditions (voltage levels and maximum line capacity). The proposed load curtailment strategy in this work is based on curtailing more load form less importance loads compared to less load form high importance loads. Lastly, based on the failure states, the reliability indices for the whole system and for the load buses are calculated. To verify and validate the proposed methodology. The obtained results showed that the proposed method is more accurate and much efficient in calculating the annualized reliability indices of the studied system compared to Monte Carlo simulation method. The results, also, showed that the proposed load curtailment strategy is highly efficient in maintaining the system operational conditions.

Key Words: reliability, composite power system, optimization, Whale Optimization Algorithm (WOA), Genetic Algorithm (GA), particle swarm optimization (PSO)

1- مقدمة:

مع تزايد الطلب يُعد تقييم موثوقية نظام الطاقة المركب (التوليد والنقل) عملية صعبة وتستغرق وقتاً طويلاً بسبب الحجم الكبير لهذا النظام، وزيادة تعقيده، فضلاً عن عدم خطية سلوكه [1-2]. لكن هذا التقييم في الوقت نفسه يعتبر من الدراسات الهامة التي تزود المخطط وصانع القرار (المشغل) بمعلومات مهمة للغاية تتعلق بكفاية وأمن النظام [3]. تشير الدراسة المرجعية إلى أنّ الطرق التحليلية استُخدمت بشكل أساسي لتقييم موثوقية النظام المركب [4-6]. يتم في هذه الطرق تمثيل النظام المركب بنموذج تحليلي ويتم حساب مؤشرات موثوقيته بناءً على المعادلات الرياضية والمعرفة العامة المتعلقة بهذا النموذج. وفقاً لذلك، يتم تحديد احتمالية وتكرار حالات النظام واستخدامها في تقييم موثوقيته. بالإضافة إلى الطرق التحليلية، فقد استُخدمت طرق المحاكاة (محاكاة مونت كارلو التسلسلية وغير التسلسلية) التي تحاكي الحالات الفعلية لفشل النظام ومكوناته في ظل ظروف التشغيل العشوائية [7-13]. اعتماداً على حالات العينات المولدة في هذه الطرق، يتم تحديد حالات الفشل، وبالتالي يتم حساب مؤشرات الموثوقية للنظام المدروس. في طرق محاكاة مونت كارلو التسلسلية، يتم التركيز على الخصائص الزمنية للنظام ومكوناته، ويتم إجراء المحاكاة بالتعاقب (التسلسل). تعد هذه الأساليب أكثر تعقيداً وتتطلب عبئاً حسابياً أكبر. أما في الطرق غير التسلسلية، فلا تؤخذ الخصائص الزمنية في الحسبان. وبدلاً من ذلك، يتم محاكاة حالات التشغيل المحتملة للنظام ومكوناته بشكل عشوائي. وعلى الرغم من أن العبء الحسابي لهذه الطرق أقل، إلا أنها غير مقبولة في الحالات التي تتطلب التركيز على الخصائص الزمنية للنظام. كما تم استخدام الطرق الهجينة بين الطريقتين السابقتين (التحليلية والمحاكاة) في محاولة للاستفادة من مزايا كل منهما معاً [14-15]. إضافة إلى ذلك، تم استخدام خوارزميات إيجاد الحل الأمثل لتوليد عينات الحالات المحتملة المختلفة للنظام المدروس وتحديد حالات الفشل وعزلها عن باقي الحالات، والتي يتم اعتماداً عليها حساب مؤشرات موثوقية النظام. علاوةً على ذلك، تم أيضاً تقييم موثوقية أنظمة الطاقة الهجينة (التي تحوي مصادر طاقات متجددة، مصادر تخزين للطاقة، محطات شحن للسيارات الكهربائية، إلخ) اعتماداً على الطرق التحليلية وطرق محاكاة مونت كارلو السابقة الذكر [16-24]. وكخلاصة لما سبق ذكره،

تم التركيز في الأبحاث المذكورة على ثلاث نقاط رئيسية في عملية تقييم الموثوقية وهي تحسين الكفاءة الحسابية وتحسين الدقة بالإضافة إلى إيجاد الحل الأمثل. لكن ما يلاحظ هو أنّ الطرق المذكورة تعاني بشكل أساسي من العبء الزمني والحسابي الكبير الذي تستغرقه عملية تقييم الموثوقية.

يعرض هذا المقال طريقة مقترحة تعتمد على خوارزميات الذكاء الاصطناعي لتقييم موثوقية نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية ووفقاً لهذه المنهجية تم أولاً، تهيئة البيانات اللازمة لحساب مؤشرات الموثوقية والمتمثلة بالبيانات اللازمة لإجراء سريان الاستطاعة في النظام المدروس. بالإضافة إلى حساب معدلات الخروج القسري عن الخدمة لمجموعات التوليد وأعطال خطوط النقل وذلك اعتماداً على أحمال الذروة اليومية والأسبوعية والفصلية التي تم استخراجها من الحمل الساعي السنوي للنظام وعلى الزمني الواسطي بين الأعطال وكذلك الزمن الواسطي لإصلاح العطل. لاحقاً، تم تطبيق خوارزمية الحوت (WOA)، في المرحلة الأولى، لتوليد عينات من الحالات المحتملة المختلفة للنظام وبناءً على هذه الحالات تم تحديد حالات الفشل للنظام وعزلها. وفي المرحلة الثانية، ومن أجل كل حالة فشل تم تحديدها مسبقاً، تم تطبيق الخوارزمية الوراثية (GA) لتحديد الحد الأدنى الأمثل لمقدار تخفيض الحمل بهدف المحافظة على شروط عمل النظام. ومن أجل تسهيل حساب مؤشرات الموثوقية للنظام المدروس تم تخزين جميع البيانات اللازمة من حالات الفشل المحددة مسبقاً في مصفوفة أُطلق عليها اسم مصفوفة الحالة. وتالياً، تم استخدام هذه البيانات في حساب مؤشرات الموثوقية السنوية للنظام المدروس.

2- أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث إلى تحسين تقييم موثوقية نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية وذلك اعتماداً على خوارزميات الذكاء الاصطناعي. يتمثل التحسين المراد الوصول إليه في تقليل العبء الحسابي والزمني لحساب مؤشرات موثوقية النظام وزيادة دقة الحساب. تأتي أهمية هذا البحث من كون تقييم موثوقية نظام الطاقة المركب يسمح للمخطط والمصمم والمشغل لنظام الطاقة بتحديد قدرته هذا النظام على تلبية متطلبات الحمل

بموثوقية وجودة عالية، واعتماداً على هذا التقييم يمكن اتخاذ إجراءات مختلفة مناسبة لكل حالة لتحسين موثوقية النظام.

3- منهجية البحث المقترح:

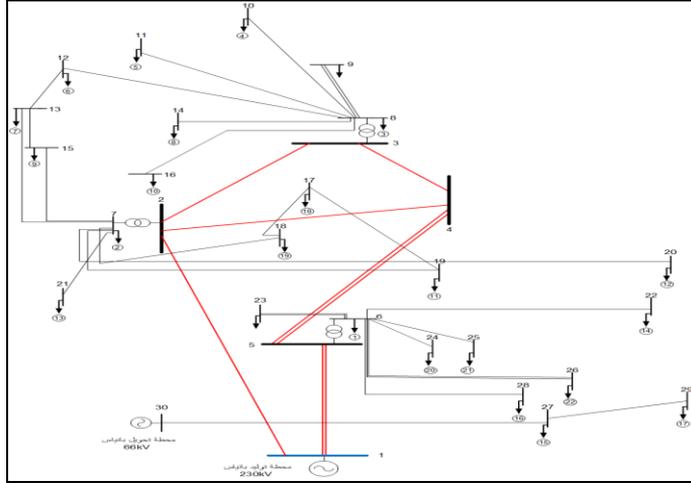
تعتمد منهجية البحث المقترح على شرح وتوضيح:

- 1) وصف نظام الطاقة الكهربائية المركب في محافظة اللاذقية.
- 2) تهيئة البيانات اللازمة لحساب مؤشرات موثوقية نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية.
- 3) مؤشرات موثوقية النظام المركب المراد حسابها.
- 4) تحسين تقييم موثوقية نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية اعتماداً على خوارزمية الحوت لإيجاد الحل الأمثل (WOA) والخوارزمية الوراثة (GA).

4- مواد وطرق والبحث:

1.4 وصف نظام الطاقة الكهربائية المركب في محافظة اللاذقية:

يتكون نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية، كما هو موضح في الشكل (1)، من خمس مجموعات توليد (4 مجموعات متصلة بالعمدة رقم 1 والخامسة متصلة بالعمدة رقم 30). كما يتضمن 24 عمدة حمولة، 7 منها عبارة عن أحمال زراعية وصناعية صغيرة يتم تغذيتها بدارة مزدوجة. بالإضافة إلى ذلك، يتكون النظام من 33 خط نقل (6 خطوط بتوتر 230 كيلو فولط (تظهر على الشكل باللون الأحمر) والباقي 27 خط بتوتر 66 كيلو فولط). كما يوضح الشكل (1).

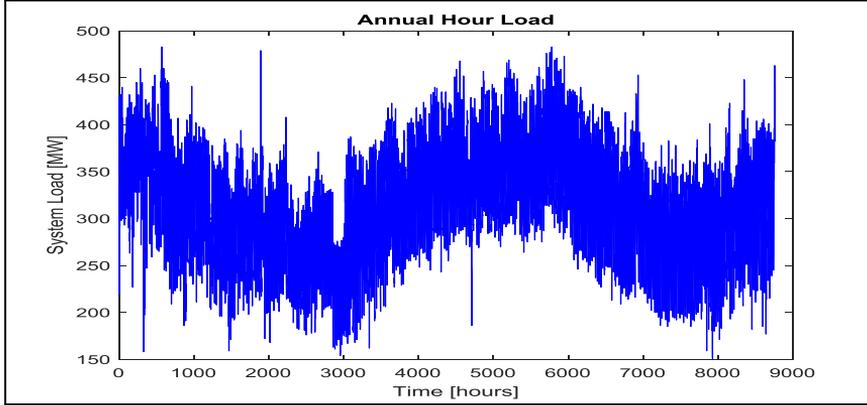


الشكل (1): مخطط نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية

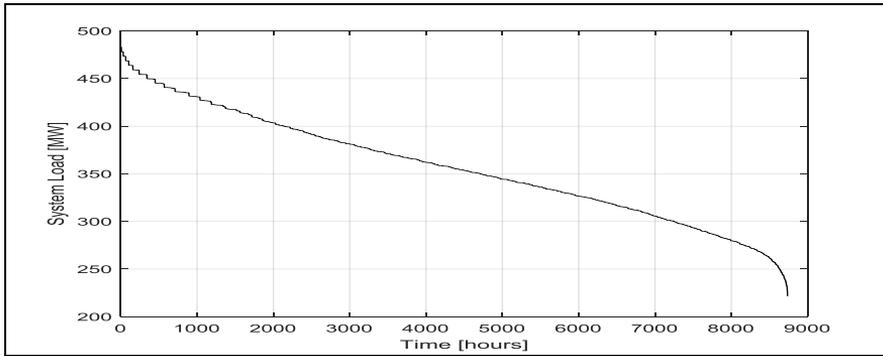
2.4 تهيئة البيانات اللازمة لحساب مؤشرات موثوقية نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية:

1.2.4 حساب قيم الأحمال الوسطية اليومية والأسبوعية والفصلية اعتماداً على قيم الحمولة الساعية السنوية:

لحساب مؤشرات موثوقية نظام الطاقة المركب، تم أولاً حساب الأحمال الوسطية المختلفة للنظام المدروس انطلاقاً من الحمل الساعي السنوي. تم بدايةً، الحصول على الحمل الساعي السنوي للنظام المدروس لعام 2019 من دائرة نقل الطاقة في محافظة اللاذقية. حيث تم الحصول على الحمولة الساعية لكامل العام أي لـ 8760 ساعة في العام كما يظهر في الشكل رقم (2). وبعد ذلك تم رسم منحنى الحمل التراكمي لهذه الأحمال الساعية كما يظهر في الشكل رقم (3). يبلغ حمل الذروة السنوي لهذا النظام $483MW$.

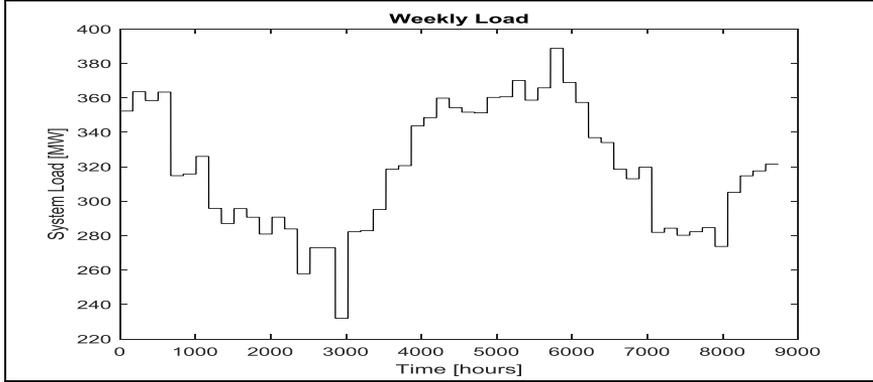


الشكل (2): منحنى الحمل الساعي السنوي لنظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية

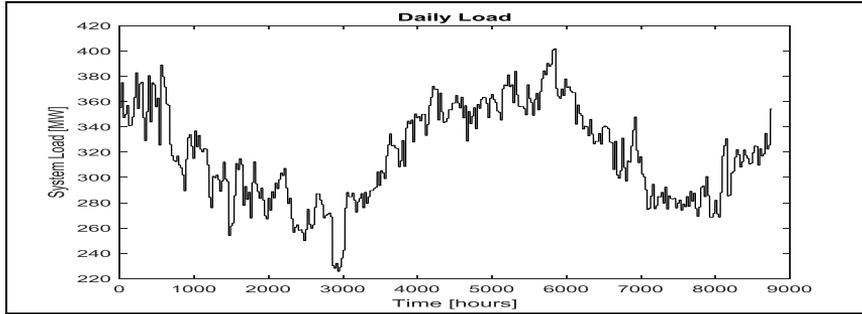


الشكل (3): منحنى الحمل التراكمي لنظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية

ولحساب قيم الأحمال الوسطية اليومية والأسبوعية والفصلية انطلاقاً من الحمل الساعي السنوي، تم تطبيق طريقة تعتمد على تخزين الحمل الساعي السنوي في مصفوفة أبعادها $(52*168)$ ، حيث تمثل عدد أسطر المصفوفة وهي تشير إلى عدد الأسابيع في العام الواحد. في حين أنّ 168 تمثل عدد أعمدة المصفوفة وهي تشير إلى عدد الساعات في الأسبوع الواحد. وبناءً على هذه المصفوفة تم حساب الحمل الأسبوعي الوسطي لكل أسبوع من أسابيع العام ورسم منحنى هذا الحمل كما يظهر في الشكل(4).

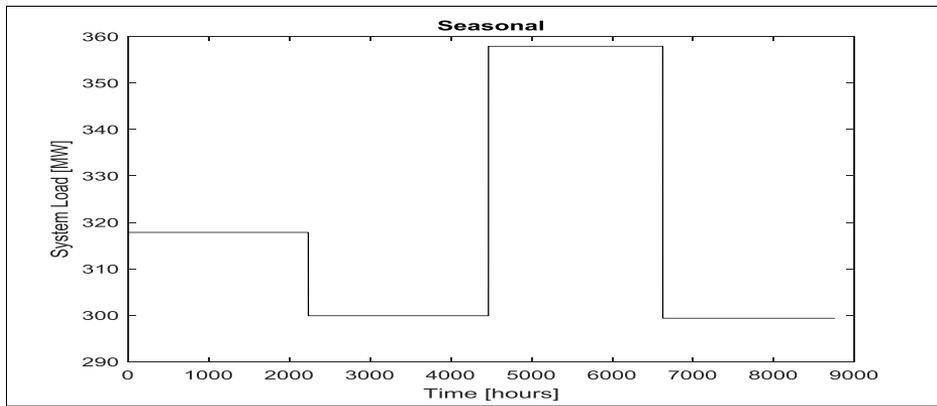


الشكل (4): منحنى الحمل الأسبوعي الوسيط لنظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية لاحقاً تم حساب الحمل اليومي الوسيط من المصفوفة المذكورة أعلاه بتقسيم عدد ساعات الأسبوع على 24 للحصول على الحمل اليومي وتشكيل مصفوفة جديدة أبعادها $(365*24)$ ، حيث تمثل عدد أسطر المصفوفة وهي تشير إلى عدد الأيام في العام الواحد. في حين أنّ 24 تمثل عدد أعمدة المصفوفة وهي تشير إلى عدد الساعات في اليوم الواحد. وبناءً على هذه المصفوفة تم حساب الحمل اليومي الوسيط لكل يوم من أيام العام ورسم منحنى هذا الحمل كما يظهر في الشكل (5).



الشكل (5): منحنى الحمل اليومي الوسيط لنظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية أخيراً تم حساب الحمل الفصلي الوسيط من مصفوفة الحمل الساعي السنوي بتحديد أسابيع فصول السنة كما يلي: أسابيع فصل الشتاء هي الأسابيع من 1 إلى 8، ومن 44 إلى 52، أسابيع فصل الصيف هي الأسابيع من 18 إلى 30، أسابيع فصلي الربيع والخريف هي الأسابيع من 9 إلى 17 ومن 31 إلى 43. وتشكيل مصفوفات بأبعاد $(17*168)$ و $(13*168)$ و $(22*168)$ لكل من فصل الشتاء وفصل الصيف وفصلي الربيع والخريف على التوالي. حيث تمثل 17 و 13 و 22 عدد أسطر هذه

المصفوفات وهي تشير إلى عدد الأسابيع في هذه الفصول على التوالي. في حين أنّ 168 تمثل عدد أعمدة هذه المصفوفات وهي تشير إلى عدد ساعات الأسبوع على 24 للحصول على الحمل اليومي وتشكيل مصفوفة جديدة أبعادها $(24*365)$ ، حيث 365 تمثل عدد أسطر المصفوفة وهي تشير إلى عدد الأيام في العام الواحد. في حين أنّ 24 تمثل عدد أعمدة المصفوفة وهي تشير إلى عدد الساعات في الأسبوع الواحد. وبناءً على هذه المصفوفات تم حساب الحمل الفصلي الوسطي لكل فصل من فصول العام ورسم منحنى هذا الحمل كما يظهر في الشكل (6).



الشكل (6): منحنى الحمل الفصلي الوسطي لنظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية

2.2.4 حساب قيم معدل الخروج القسري عن الخدمة لمجموعات التوليد المدروسة:

يلعب معدل الخروج القسري عن الخدمة لمجموعات التوليد دوراً هاماً في حساب احتمالية الحالة للنظام ككل والتي تستخدم في حساب مؤشرات الموثوقية السنوية. ومن هنا كان لا بد من حساب هذا المعدل لجميع مجموعات التوليد المدروسة في النظام وهي 4 مجموعات بخارية باستطاعة اسمية تعادل $170MW$ لكل مجموعة ومجموعة غازية باستطاعة اسمية تعادل $150MW$. علماً أنّ الاستطاعة المتاحة من هذه المجموعات تعادل $110MW$ لمجموعتين من المجموعات البخارية و $125MW$ للمجموعتين

الباقيتين. في حين أنّ الاستطاعة المتاحة من المجموعة الخامسة الغازية تعادل $50MW$ فقط.

تم حساب معدل الخروج القسري عن الخدمة لمجموعات التوليد اعتماداً على الزمن الوسطي لإصلاح مجموعة التوليد في حال خروجها عن الخدمة (Mean Time To Repair-MTTR) والزمن الوسطي حتى حدوث العطل التالي (Mean Time To Failure-MTTF) وذلك وفقاً للمعادلة التالية [25]:

$$FOR = \frac{MTTR}{MTTR + MTTF} \dots\dots\dots(1)$$

حيث أنّ:

FOR : تمثل معدل الخروج القسري عن الخدمة لمجموعة التوليد.

$MTTR$: تمثل الزمن الوسطي لإصلاح مجموعة التوليد في حال تعطلها ووحدته الساعة.

$MTTF$: تمثل الزمن الوسطي حتى حدوث العطل التالي ووحدته الساعة.

يظهر الجدول (1) الاستطاعة الاسمية لمجموعات التوليد المدروسة في النظام مع معدل خروجها القسري عن الخدمة وكذلك الزمن الوسطي للإصلاح وحدث العطل.

الجدول (1): البيانات معدل الخروج القسري عن الخدمة والزمن الوسطي لحدوث العطل وإصلاحه لمجموعات التوليد المدروسة في نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية

| مجموعات التوليد في نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية | الاستطاعة الاسمية [MW] | الاستطاعة المتاحة [MW] | معدل الخروج القسري عن الخدمة | الزمني الوسطي حتى حدوث العطل التالي (MTTF) بالساعة | الزمني الوسطي لإصلاح العطل (MTTR) بالساعة |
|--|------------------------|------------------------|------------------------------|--|---|
| المجموعة الأولى | 170 | 110 | 0.043 | 2497 | 113.08 |
| المجموعة الثانية | 170 | 110 | 0.043 | 2497 | 113.08 |
| المجموعة الثالثة | 170 | 125 | 0.021 | 4165 | 90.98 |
| المجموعة الرابعة | 170 | 125 | 0.021 | 4165 | 90.98 |
| المجموعة الخامسة | 150 | 50 | 0.01 | 4987 | 50.92 |

3.2.4 حساب قيم معدل تعطل وإصلاح خطوط النقل:

كما هو الحال بالنسبة لمعدل الخروج القسري عن الخدمة لمجموعات التوليد ، فإن احتمال تعطل خط النقل يلعب كذلك دوراً هاماً في حساب احتمالية الحالة المدروسة للنظام ككل وبالتالي يدخل في حساب مؤشرات موثوقية النظام. بالنسبة لخط النقل، ولحساب هذا الاحتمال، لا بد أولاً من حساب معدل تعطل خط النقل ومعدل اصلاح خط النقل. يحسب معدل تعطل خط النقل اعتماداً على الزمن الوسطي بين عطلين (Mean Time Between Failures) وفقاً للمعادلة التالية [25]:

$$\lambda_i = \frac{1}{MTBF} \dots\dots\dots(2)$$

أما معدل إصلاح خط النقل فيحسب اعتماداً على الزمن الوسطي للإصلاح وذلك حسب المعادلة التالية [25]:

$$\mu_i = \frac{1}{MTTR} \dots\dots\dots(3)$$

حيث أن:

λ_i : تمثل معدل تعطل خط النقل.

μ_i : تمثل معدل إصلاح خط النقل.

وبعد حساب كل من λ و μ لجميع خطوط النقل في النظام المدروس يتم حساب احتمال تعطل خط النقل وفقاً للمعادلة التالية [17]:

$$PTF_i = \frac{\lambda_i}{\lambda_i + \mu_i} \dots\dots\dots(4)$$

يُظهر الجدول (2) معدلات تعطل وإصلاح خطوط النقل في نظام الطاقة المركب وذلك اعتماداً على الزمن الوسطي بين الأعطال والزمن الوسطي لإصلاح العطل. كما يظهر الجدول أيضاً احتمالية تعطل خطوط النقل.

الجدول (2): معدلات تعطل وإصلاح خطوط النقل بالإضافة إلى احتمالية تعطلها في نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية

| رقم خط النقل | من العقدة | إلى العقدة | الزمن الوسطي بين الأعطال MTBF [ساعة] | الزمني الوسطي لإصلاح العطل MTRR [ساعة] | معدل العطل λ | معدل الإصلاح μ | احتمالية تعطل الخط PTF |
|--------------|-----------|------------|--------------------------------------|--|----------------------|--------------------|--------------------------|
| 1 | 1 | 2 | 1094.065 | 0.935417 | 0.00091 | 1.069042 | 0.00854 |
| 2 | 2 | 3 | 8759.583 | 0.416667 | 0.00011 | 2.4 | 0.0000476 |
| 3 | 2 | 4 | 2188.563 | 1.4375 | 0.00046 | 0.695652 | 0.000656 |
| 4 | 4 | 3 | 8759.25 | 0.75 | 0.00011 | 1.33333 | 0.0000856 |
| 5 | 5 | 4 | 580.7089 | 3.291111 | 0.00172 | 0.303849 | 0.005635 |
| 6 | 1 | 5 | 671.3526 | 2.49359 | 0.00149 | 0.401028 | 0.003701 |
| 7 | 7 | 18 | 485.7361 | 0.930556 | 0.00206 | 1.074627 | 0.001912 |
| 8 | 7 | 15 | 102.369 | 0.689804 | 0.00977 | 1.449687 | 0.006693 |
| 9 | 8 | 9 | 222.7816 | 1.833761 | 0.00449 | 0.545327 | 0.008164 |
| 10 | 8 | 12 | 240.7139 | 2.619444 | 0.00415 | 0.38176 | 0.010765 |
| 11 | 15 | 13 | 8759.25 | 0.75 | 0.00011 | 1.33333 | 0.0000856 |
| 12 | 12 | 13 | 174.5833 | 0.616667 | 0.00573 | 1.621622 | 0.00352 |
| 13 | 17 | 19 | 2189.463 | 0.5375 | 0.00046 | 1.860465 | 0.000245 |
| 14 | 6 | 24 | 2189.471 | 0.529167 | 0.00046 | 1.889764 | 0.000242 |
| 15 | 6 | 25 | 1751.177 | 0.823333 | 0.00057 | 1.214575 | 0.00047 |
| 16 | 6 | 26 | 970.8796 | 2.453704 | 0.00103 | 0.407547 | 0.002521 |
| 17 | 6 | 28 | 1458.758 | 1.241667 | 0.00069 | 0.805369 | 0.00085 |
| 18 | 6 | 23 | 2189.471 | 0.529167 | 0.00046 | 1.889764 | 0.000242 |
| 19 | 30 | 27 | 181.1132 | 1.386806 | 0.00552 | 0.721082 | 0.007599 |
| 20 | 2 | 7 | 344.4292 | 0.861270 | 0.00440 | 1.16648 | 0.00359 |
| 21 | 3 | 8 | 2118.1316 | 2.344775 | 0.00054 | 1.008996 | 0.001688 |
| 22 | 5 | 6 | 2675.8446 | 0.821759 | 0.00038 | 1.21783 | 0.000314 |
| 23 | 7 | 20 | 364.0729 | 0.927083 | 0.00227 | 1.078652 | 0.00254 |

| | | | | | | | |
|----------|----------|---------|----------|----------|----|----|----|
| 0.004494 | 0.711262 | 0.00321 | 1.405952 | 311.4512 | 19 | 7 | 24 |
| 0.002243 | 1.221374 | 0.00275 | 0.81875 | 364.1813 | 21 | 7 | 25 |
| 0.002401 | 0.998415 | 0.00240 | 1.001587 | 416.1413 | 13 | 7 | 26 |
| 0.008824 | 0.465718 | 0.00415 | 2.147222 | 241.1861 | 14 | 8 | 27 |
| 0.005443 | 0.587207 | 0.00321 | 1.702976 | 311.1542 | 10 | 8 | 28 |
| 0.007555 | 1.284311 | 0.00978 | 0.778627 | 102.2802 | 11 | 8 | 29 |
| 0.002331 | 0.832653 | 0.00195 | 1.20098 | 514.0931 | 16 | 8 | 30 |
| 0.001912 | 1.074627 | 0.00206 | 0.930556 | 485.7361 | 17 | 18 | 31 |
| 0.0039 | 1.492683 | 0.00585 | 0.669935 | 171.0948 | 22 | 6 | 32 |
| 0.002228 | 1.280956 | 0.00286 | 0.780667 | 349.6193 | 29 | 27 | 33 |

3.4 مؤشرات موثوقية النظام المركب المراد حسابها:

عند حساب موثوقية نظام الطاقة المركب، يتم عادةً حساب مجموعة من المؤشرات [26] وهذه المؤشرات هي:

1. مؤشر احتمالية فقدان الحمل (Loss of Load Probability-LOLP) وهو مؤشر لا واحدة له ويحسب هذا المؤشر من العلاقة:

$$LOLP = \sum_{j=1}^{NF} SP_j \dots \dots \dots (5)$$

حيث أن:

NF : يمثل عدد حالات الفشل.

SP_j : تمثل احتمالية الحالة وهي تحسب وفقاً للمعادلة التالية:

$$SP_j = \prod_{j \in G_{down}} (FOR_j) \prod_{j \in G_{up}} (1 - FOR_j) \prod_{j \in E_{down}} (PTF_j) \prod_{j \in E_{up}} (1 - PTF_j) \dots \dots \dots (6)$$

حيث أن:

FOR_i : يمثل معدل الخروج القسري لمجموعة التوليد i عن الخدمة.

PTF_i : تمثل احتمالية تعطل خط النقل i .

G_{down}, G_{up} : مجموعتا الحالات التي تكون فيهما مجموعات التوليد في حالة خروج قسري عن الخدمة وفي حالة العمل الطبيعي على التوالي.

T_{down}, T_{up} : مجموعتا الحالات التي تكون فيهما خطوط النقل في حالة تعطل وفي حالة عمل طبيعي على التوالي.

2. مؤشر تكرار فقدان الحمل (Loss of Load Frequency–LOLF) وواحدة هذا المؤشر هي تكرار في السنة ويحسب هذا المؤشر من العلاقة:

$$LOLF = \sum_{j=1}^{NF} SF_j \dots\dots\dots(7)$$

حيث أن:

SF_j : تمثل تكرار الحالة وتحسب وفقاً للمعادلة التالية [17]:

$$SF_j = \sum_{i=1}^{ng+nt} [(1-b_i) \cdot \mu_i - b_i \cdot \lambda_i] \dots\dots\dots(8)$$

حيث أن:

ng : هو عدد وحدات التوليد.

nt : هو عدد خطوط النقل.

b_i : هي القيمة الثنائية لمتغير كل سلسلة يمثل إما خط نقل أو وحدة توليد.

3. مؤشر توقع فقدان الحمل (Loss of Load Expectation–LOLE) وواحدة

هذا المؤشر هي ساعة في العام ويحسب هذا المؤشر من العلاقة:

$$LOLE = LOLP \times 8760 \dots\dots\dots(9)$$

حيث أن:

8760 : هي عدد ساعات العام الواحد.

4. مؤشر مدة فقدان الحمل (Loss of Load Duration–LOLD)

وواحدة هذا المؤشر هي الساعة، ويحسب من العلاقة:

$$LOLD = LOLE / LOLF \dots\dots\dots(10)$$

5. مؤشر الاستطاعة المتوقعة غير المزودة (Expected Power Not Supplied-EPNS) ووحدة هذه المؤشر هي الميغاواط في العام ($MW / year$) ويحسب هذا المؤشر من العلاقة:

$$EPNS = \sum_{j=1}^{NF} EPNS_j = \sum_{j=1}^{NF} LC_j . SP_j \dots\dots\dots(11)$$

حيث أن:

LC_j : تمثل مقدار تخفيض الحمل المقابل للحالة المدروسة J .

SP_j : تمثل احتمالية الحالة.

6. مؤشر الطاقة المتوقعة غير المزودة (-Expected Energy Not supplied-EENS) ووحدة هذا المؤشر هي الميغا واط ساعي/العام ($MWh / year$) ويحسب هذا المؤشر من العلاقة:

$$EENS = EPNS . 8760 \dots\dots\dots(12)$$

4.4 تحسين تقييم موثوقية نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية اعتماداً على خوارزمية الحوت لإيجاد الحل الأمثل (WOA) والخوارزمية الوراثية (GA)

1.4.4 المخطط الانسيابي للمنهجية المقترحة اعتماداً على خوارزمية الحوت والخوارزمية الوراثية.

يهدف تحسين عملية تقييم موثوقية نظام الطاقة المدروس من حيث تقليل العبء الحسابي والزمني وكذلك زيادة دقة نتائج التقييم، تم اقتراح منهجية تقييم ذات ثلاث مراحل. في المرحلة الأولى من هذه المنهجية، تم تطبيق خوارزمية الحوت لإيجاد الحل الأمثل (WOA) وذلك لتوليد عينات من الحالات المحتملة المختلفة للنظام بشكل عشوائي كما هو موضح في الشكل (7). يمثل الشكل (7) حالة من حالات النظام المحتملة حيث تمثل G_1, G_2, \dots, G_5 مجموعات التوليد في النظام وتمثل T_1, T_2, \dots, T_{33} خطوط النقل

في النظام. لكل مجموعة توليد أو خط نقل حالتين: إما حالة عمل وتمثل بالرقم (1) أو حالة عطل (فشل) وتمثل بالرقم (0). بناءً على العينات (الحالات) التي تولدها خوارزمية الحوت يتم تحديد حالات فشل النظام وعزلها وفقاً لتابع ملائمة محدد. حيث أنّ بيانات حالات فشل النظام هي التي تدخل فقط في حسابات مؤشرات الموثوقية.

| G1 | G2 | G3 | G4 | G5 | T1 | T2 | T3 | T4 | T5 | T6 | T7 | . | . | . | T32 | T33 |
|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|---|---|-----|-----|
| 1 | 1 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0 | 0 | . | . | . | 1 | 0 |

الشكل (7) تمثيل حالة محتملة من حالات النظام (1 العنصر في حالة عمل، 0 العنصر في حالة عطل)

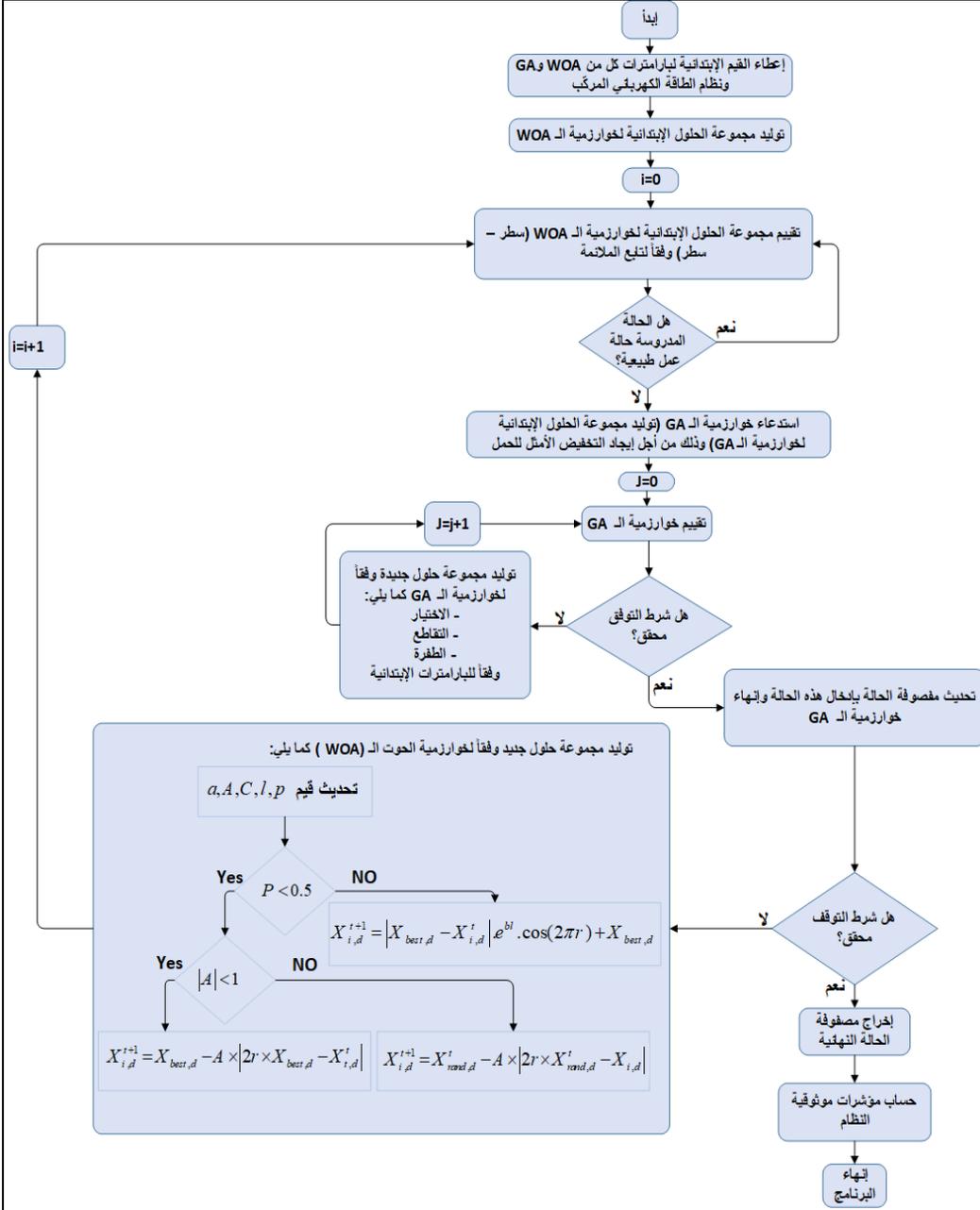
إذا كانت الحالة قيد الدراسة هي حالة نجاح (أي مكونات النظام من مجموعات توليد وخطوط نقل ومحولات تعمل بشكل طبيعي)، يتم حساب احتمالية هذه الحالة وتكون قيمة تابع الملائمة لخوارزمية الحوت هي مقلوب هذه الاحتمالية (خوارزمية الحوت يمكن أن تعمل كخوارزمية إيجاد حل أمثل أصغري أو خوارزمية إيجاد حل أمثل أعظمي. في هذه البحث تم استخدام خوارزمية الحوت كخوارزمية إيجاد حل أمثل أصغري). ووفقاً لذلك يتم استبعاد سيطرة حالات العمل الناجحة وهيمنتها على الأجيال الجديدة في الخوارزمية، إذ أنّ الهدف هو تحديد حالات الفشل التي يتم اعتماداً على معلوماتها فقط حساب مؤشرات الموثوقية.

أما في المرحلة الثانية، وبعد أن يتم تحديد حالة الفشل، يتم استدعاء الخوارزمية الوراثية لإيجاد الحمل الأصغري الأمثل الذي يجب تخفيضه للمحافظة على شروط عمل النظام بدون اختراق عند حالة الفشل المدروسة.

يتم لاحقاً تخزين جميع المعلومات اللازمة عن حالات الفشل المحددة في مصفوفة حالة لاستخدامها في حساب مؤشرات موثوقية النظام.

أما في المرحلة الثالثة والأخيرة، فيتم حساب مؤشرات موثوقية النظام المدروس المذكورة سابقاً اعتماداً على المعلومات التي تم تخزينها في مصفوفة الحالة وتشمل هذه المعلومات جميع البيانات المتعلقة بحالة الفشل المخزنة مثل عدد الخطوط المعطلة، عدد مجموعات التوليد الخارجة عن الخدمة، احتمالية هذه الحالة، احتمالية تكرارها، الخ.

يُظهر الشكل (8) المخطط الانسيابي لخوارزمية الحوت والخوارزمية الوراثية المستخدمة في تحسين تقييم موثوقية نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية.



الشكل (8) المخطط الانسيابي لخوارزمية الحوت والخوارزمية الوراثية المستخدمة في تحسين عملية تقييم موثوقية نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية

2.4.4 خطوات تنفيذ المنهجية المقترحة لحساب مؤشرات موثوقية نظام الطاقة المركب في محافظة اللاذقية:

تم اقتراح خوارزمية الحوت لإيجاد الحل الأمثل في عام 2016 وهي تحاكي سلوك البحث الاجتماعي للحيتان الحدياء المستوحاة من طريقة التغذية الشبكية الفقاعية [27]. تستخدم هذه الخوارزمية آليتين أساسيتين، وهما التطويق والهجوم الحلزوني. وتتميز هذه الخوارزمية بأنها خوارزمية استدلالية عليا لإيجاد حل أمثل أعظمي وأصغري اعتماداً على مجموعة من الحلول الابتدائية التي تستخدم مجموعة من النقاط بدلاً من نقطة واحدة للبحث في فضاء الحالة المستمر.

الخطوة 1: إدخال البارامترات الأساسية المتعلقة بخوارزميات الذكاء الاصطناعي (WOA و GA) ونظام الطاقة المركب.

الخطوة 2: توليد مجموعة (جيل) من الحلول الابتدائية الصحيحة عشوائياً وفقاً لخوارزمية الحوت لإيجاد الحل الأمثل. ووفقاً لهذه الخوارزمية، يمكن لوكيل البحث (الحل) أن يأخذ قيمه ضمن المجال $[1,0]$ ، حيث أن قيمة 0 تشير إلى أن العنصر في حالة فشل وقيمة 1 تشير إلى أن العنصر في حالة عمل.

تستخدم خوارزمية الـ (WOA) البارامترات التالية a, A, C, l, p حيث أن A, C يمثلان معاملين يتم حسابها وفقاً للمعادلتين $A = 2a.r - a$ و $C = 2.r$ وتكون قيمة A ضمن المجال $0 \leq |A| \leq 1$. أما a فهي قيمة متغيرة تتناقص خطياً من 2 حتى القيمة 0 خلال عملية التكرار. و l عبارة عن رقم عشوائي ضمن المجال $[-1,1]$. في حين أن r و P عبارة عن رقمين عشوائيين ضمن المجال $[1,0]$.

الخطوة 3: تقييم تابع الملائمة لكل حل (وكيل بحث) من مجموعة الحلول الابتدائية وفقاً لتابع الملائمة التالي:

$$\text{Fitness_WOA} = \begin{cases} 1/(SP_j + LC_j) & \text{لكل حل (وكيل بحث) } z \text{ يمثل حالة عطل} \\ 1/SP_j & \text{لكل حل (وكيل بحث) } z \text{ يمثل حالة عمل ناجحة} \\ 1/SP_j & \text{لكل حل (وكيل بحث) } z \text{ مع احتمالية حالة أقل من قيمة العتبة} \end{cases}$$

وتحديد قيمة أفضل وكيل بحث في الجيل الحالي X_{best} . تم تصميم تابع الملائمة لتقليل سيطرة أو مشاركة حالات النجاح والحالات ذات الاحتمالية المنخفضة جداً (أقل من 10^{-8}) في الأجيال القادمة وبالتالي في معطيات مصفوفة الحالة ولاحقاً في حساب مؤشرات موثوقية النظام.

الخطوة 4: التحقق مما إذا كان الحل (وكيل البحث) يمثل حالة عمل ناجحة أم لا. إذا كان يمثل حالة عمل ناجحة، يتم حساب تابع الملائمة وفقاً لما سبق، وإلا يتم الانتقال إلى الخطوة 5.

الخطوة 5: استدعاء الخوارزمية الوراثية (GA) لتوليد الجيل الإبتدائي الأول من الحلول في هذه المرحلة، حيث أن المتغيرات في هذه الحالة هي أحمال النظام من 1 إلى 17 فقط ولكل حمل قيمة أصغرية وقيم أعظمية وذلك من أجل تحديد الحد الأدنى الأمثل من تخفيض الحمل بدون انتهاك شروط تشغيل النظام. أما بقية الأحمال من 18 حتى 24 فهي أحمال ري وأحمال صناعية صغيرة تم استثنائها من استراتيجية تخفيض الحمل المقترحة اعتماداً على ما هو متبع في تشغيل النظام الحقيقي في الواقع. يمكن وصف الإستراتيجية المقترحة لتخفيض الأحمال في هذا البحث على النحو التالي: يتم بدايةً تصنيف الأحمال حسب أهميتها (تم تحديد أهمية الأحمال في الشبكة المدروسة من قبل مديرية نقل الطاقة في محافظة اللاذقية). بالنسبة للأحمال الأقل أهمية، يمكن تخفيض الحمل بين 0% و 80%. أما بالنسبة للأحمال ذات الأهمية الأعلى، يمكن تخفيض الحمل بين 0% و 50% فقط. بالتالي فإن مشكلة تخفيض الحمل هي مشكلة إيجاد حل أمثل تستند الى سريان الاستطاعة المستمر على النحو التالي [16]:

$$\min \sum_{i=1}^{nb} LC_i$$

وفقاً للشروط التالية:

$$P_G + \hat{B}\theta + LC = P_D$$

$$P_{G_{\min}} \leq P_G \leq P_{G_{\max}}$$

$$LC_{\min} \leq LC \leq LC_{\max}$$

$$b\hat{A}\theta \leq F_f^{\max}$$

$$-b\hat{A}\theta \leq F_r^{\max}$$

الخطوة 6: تقييم تابع الملائمة لكل حل (سلسلة) في مجموعة الحلول الإبتدائية للخوارزمية الوراثية وفقاً لتابع الملائمة التالي:

$$Fitness_GA = 1 - [w_1(LC) + w_2(P_G + \hat{B}\theta + LC - P_D)]$$

حيث: w_1, w_2 عبارة عن عاملي وزن يتم ضبط قيمهما اختيارياً لتجنّب سيطرة أي من حدي المعادلة السابقة وهيمنتته على تابع الملائمة. تم اختيار القيم 0.4 و 0.6 لهذين العاملين على التوالي.

الخطوة 7: التحقق مما إذا كانت شروط توقّف خوارزمية الـ GA محققة أم لا (هذه الشروط هي إمّا بلوغ العدد الأعظمي للتكرارات أو الوصول إلى قيمة سماحية فرق بين تابع الملائمة لجيلين متلاحقين أقل من 10^{-6}). في حال لم تكن شروط التوقّف محققة، يتم توليد مجموعة جديدة من الحلول عن طريق تنفيذ عمليات الاختيار والتقاطع والطفرة وفقاً لما هو معروف في خوارزمية الـ GA، وإلا يتم الانتقال إلى الخطوة 8.

الخطوة 8: تحديث مصفوفة الحالة عن طريق إضافة حالة الفشل هذه إلى المصفوفة وإنهاء خوارزمية الـ GA.

الخطوة 9: التحقق مما إذا كانت شروط توقّف خوارزمية الـ (WOA) محققة أم لا. إذا لم تكن هذه الشروط محققة، يتم توليد مجموعة جديدة من الحلول كما يلي:
تحديث قيم البارامترات a, A, C, l, p .

إذا كانت قيمة $P < 0.5$ فتميّز بين حالتين:

▪ إذا كانت قيمة $|A| < 1$ يتم تحديث الموقع الحالي لوكيل البحث وفقاً للمعادلة

$$X_{i,d}^{t+1} = X_{best,d} - A \times |2r \times X_{best,d} - X_{i,d}^t|$$

وإلا إذا كانت قيمة $|A| \geq 1$ فيتم تحديث الموقع الحالي لوكيل البحث وفقاً للمعادلة التالية:

$$X_{i,d}^{t+1} = X_{rand,d}^t - A \times |2r \times X_{rand,d}^t - X_{i,d}^t|$$

▪ أما إذا كانت قيمة $P \geq 0.5$: فيتم تحديث الموقع الحالي لوكيل البحث وفقاً للمعادلة

$$X_{i,d}^{t+1} = |X_{best,d} - X_{i,d}^t| e^{bl} \cdot \cos(2\pi r) + X_{best,d}$$

التحقق من تجاوز قيمة أي وكيل بحث لفضاء البحث وتعديل قيمته لتبقى ضمن فضاء البحث. حساب تابع الملائمة لكل وكيل بحث وتحديث قيمة أفضل وكيل X^{best} في حال الحصول على قيمة أفضل من القيمة المخزنة سابقاً. وإلا انتقل إلى الخطوة 10.

الخطوة 10: تحديث مصفوفة الحالة النهائية.

الخطوة 11: استخدم معلومات مصفوفة الحالة النهائية في حساب مؤشرات موثوقية النظام المركّب.

الخطوة 12: طباعة النتائج وإنهاء البرنامج.

5- النتائج والمناقشة:

تم في هذا البحث تطوير عدد من البرامج باستخدام لغة البرمجة ماتلاب (MATLAB). استخدم برنامج MATLAB-R2018 على كمبيوتر شخصي بالموصفات التالية: Core™ i5-4210M - CPU@2.60 GHz مع ذاكرة 8GHz وذلك من أجل عمليات المحاكاة والحسابات.

تشمل البرامج التي تم تطويرها برامج حساب أحمال الذروة اليومية والأسبوعية والفصلية اعتماداً على الحمل الساعي السنوي وبرامج حساب معدلات الخروج القسري عن الخدمة لمجموعات التوليد وكذلك برامج حساب معدلات العطل لخطوط نقل النظام المدروس. يضاف إلي ذلك برامج خوارزميات الذكاء الاصطناعي التالية: WOA و GA و PSO. تم ربط هذه البرامج مع بعضها البعض لتقوم بعملية تقييم موثوقية النظام المركّب في محافظة اللاذقية وفقاً للمنهجية المقترحة في

هذا البحث. يُظهر الجدول (3) قيم البارامترات الإبتدائية لخوارزميات الذكاء الاصطناعي التي تم استخدامها في هذا البحث. تم اعتماد هذه القيم الإبتدائية استناداً لما هو متاح وموثق في المراجع [28].

الجدول (3) البارامترات الإبتدائية لخوارزميات الذكاء الاصطناعي التي تم استخدامها في هذا البحث

| خوارزمية الحوت (WOA) | | الخوارزمية الوراثية (GA) | | خوارزمية عناصر السرب (PSO) | |
|----------------------|---------------------------------|--------------------------|---------------------------------|----------------------------|---------------------------------|
| SAN | 30 | NP | 30 | NP | 30 |
| I_{max} | 900 | G_{max} | 30 | G_{max} | 30 |
| NV | 38 | NV | 17 | NV | 17 |
| LI | 38 | LI | 17 | LI | 17 |
| r | [0,1] | P_S | 0.8 | C_1, C_2 | 1.5 |
| l | [-1,1] | P_C | 0.6 | W_{max} | 0.9 |
| p | [0,1] | P_M | 0.04 | W_{min} | 0.4 |
| شرط التوقف | 1×10^{-6} or I_{max} | شرط التوقف | 1×10^{-6} or G_{max} | شرط التوقف | 1×10^{-6} or G_{max} |
| - | - | - | - | انحراف السرعات الإبتدائية | 10 |

NP: عدد الحلول في الجيل الواحد. G_{max} : عدد التكرارات الأعظمي. NV: عدد المتغيرات المطلوب إيجاد القيم الأمثل لها. LI: طول السلسلة. P_S : احتمال الاختيار بالنسبة لطريقة اختيار العينات المحددة المتبعة في هذا البحث. P_C : احتمال التقاطع بالنسبة لنمط التقاطع البسيط المتبع في هذا البحث. P_M : احتمال حدوث الطفرة بالنسبة لنمط الطفرة غير المنتظم المتبع في هذا البحث. C_1 و C_2 : ثابتان لهما قيمتان موجبتان يعبران عن المعايير المعرفية والاجتماعية المتبعة في خوارزمية عناصر السرب. W_{max} و W_{min} هما الوزن الإبتدائي والوزن النهائي المستخدمان في خوارزمية عناصر السرب.

تم تطبيق المنهجية المقترحة في هذا البحث على نظام الطاقة الكهربائية المركب في محافظة اللاذقية وذلك بهدف تقييم موثوقية هذا النظام وإظهار مدى فعالية وكفاءة الطريقة المقترحة في حساب مؤشرات الموثوقية من حيث العبء الحسابي والزمني ودقة الحسابات وقد حصلنا على النتائج التالية:

تم حساب مؤشرات الموثوقية السنوية للنظام المدروس ومقارنة النتائج مع تلك التي تم الحصول عليها من طريقة محاكاة مونت كارلو (محاكاة مونت كارلو التسلسلية) كما هو موضح في الجدول (4).

الجدول (4) مؤشرات الموثوقية السنوية لنظام القدرة المركب في محافظة اللاذقية (نتائج خوارزمية الـ WOA بالمقارنة مع نتائج محاكاة مونت كارلو)

| مؤشرات الموثوقية | خوارزمية الحوت (WOA) | طريقة محاكاة مونت كارلو |
|----------------------------|----------------------|-------------------------|
| LOLP | 0.008984 | 0.009448 |
| LOLF [تكرار/ العام] | 13.1495 | 13.2841 |
| LOLE [ساعة/ العام] | 78.6998 | 82.76448 |
| LOLD [ساعة] | 5.9850 | 6.23034 |
| EPNS [ميغاواط/ العام] | 0.163428 | 0.18447 |
| EENS [ميغاواط ساعي/ العام] | 1431.629 | 1615.957 |

يلاحظ من الجدول السابق أنّ النتائج التي تم الحصول عليها من خوارزمية الحوت أكثر دقة مقارنةً مع النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام طريقة محاكاة مونت كارلو التسلسلية. يضاف إلى ذلك أنّ عدد حالات الفشل التي تمت دراستها وفقاً للمنهجية المقترحة اعتماداً على خوارزمية التطور التفاضلي هو 4096 حالة من أصل $2^{5+33} = 2^{38} = 2^{ng+nt}$ حالة. ومن بين هذه الـ 4096 حالة، هناك 1900 حالة فقط تتطلب تخفيض حمولة. تظهر النتائج متقاربة في كلتا الطريقتين وذلك كون كلاهما تقريبيتان وتعتمد دقة الطريقة المقترحة على عدد الحلول الإبتدائية وحالات الفشل التي تمت دراستها.

يُظهر الجدول (5) مؤشرات الموثوقية السنوية لعقد الحمولة في النظام المدروس. تم حساب هذه المؤشرات استناداً لاستراتيجية تخفيض الحمل المقترحة في هذا البحث. حيث تم تخفيض الحمل من الأحمال الأقل أهميةً بنسبة أكبر من تخفيضه من الأحمال الأكثر أهمية وذلك بدون انتهاك شروط تشغيل النظام.

الجدول (5) مؤشرات الموثوقية السنوية لعقد الحمولة (تم تصنيف الأحمال حسب أهميتها من الأكثر أهمية إلى الأقل أهمية)

| تسلسل | عقد الحمولة | مؤشرات الموثوقية | | | | |
|-------|-------------|------------------|------|------|------|------|
| | | EENS | LOLD | LOLE | LOLF | LOLP |

| [MWh/year] | [h] | [h/year] | [occ./year] | | | |
|------------|---------|----------|-------------|----------|---------------------------|----|
| 9.9864 | 1.78078 | 4.38 | 2.4596 | 0.0005 | عقدة الحمولة رقم 10 | 1 |
| 10.6872 | 3.88912 | 16.9068 | 4.3472 | 0.00193 | عقدمة الحمولة رقم 7 | 2 |
| 28.8624 | 3.57167 | 17.77404 | 4.9764 | 0.002029 | عقدة الحمولة رقم 17 | 3 |
| 40.4528 | 6.10306 | 31.64988 | 5.1859 | 0.003613 | عقدة الحمولة رقم 9 | 4 |
| 45.8418 | 5.22575 | 32.3244 | 6.185599 | 0.00369 | عقدة الحمولة رقم 1 | 5 |
| 37.5788 | 5.0038 | 33.8136 | 6.75759 | 0.00386 | عقدة الحمولة رقم 14 | 6 |
| 14.454 | 7.52744 | 54.312 | 7.215199 | 0.0062 | عقدة الحمولة رقم 8 | 7 |
| 115.53 | 7.17106 | 54.3996 | 7.58599 | 0.00621 | عقدة الحمولة رقم 12 | 8 |
| 108.396 | 6.92079 | 55.47708 | 8.015999 | 0.006333 | عقدة الحمولة رقم 15 | 9 |
| 18.922 | 7.57381 | 61.1448 | 8.07319 | 0.00698 | عقدة الحمولة رقم 11 | 10 |
| 82.472 | 7.34063 | 61.72296 | 8.4084 | 0.007046 | عقدة الحمولة رقم 6 | 11 |
| 95.46 | 7.68737 | 67.2768 | 8.7516 | 0.00768 | عقدة الحمولة رقم 13 | 12 |
| 178.9228 | 8.55046 | 78.06912 | 9.130399 | 0.008912 | عقدة الحمولة رقم 4 | 13 |
| 136.792 | 7.67082 | 78.58596 | 10.24479 | 0.008971 | عقدة الحمولة رقم 5 | 14 |
| 168.1528 | 7.6886 | 79.20792 | 10.302 | 0.009042 | عقدة الحمولة رقم 2 | 15 |
| 151.196 | 6.73343 | 79.72651 | 11.8404 | 0.009101 | عقدة الحمولة | 16 |

| | | | | | | |
|---------|---------|----------|---------|----------|------------------------|----|
| | | | | | رقم 3 | |
| 284.186 | 6.41376 | 79.79484 | 12.4412 | 0.009109 | عقدة الحمولة رقم 16 | 17 |

أما الجدول رقم (6) فيظهر مقارنة بين نتائج تخفيض الحمولة على عقد الحمولة من 1 حتى 17 وذلك باستخدام الخوارزمية الوراثية (GA) وخوارزمية عناصر السرب (PSO). يلاحظ من هذا الجدول أنّ النتائج التي تم الحصول عليها باستخدام الخوارزمية الوراثية أكثر دقةً من تلك التي تم الحصول عليها باستخدام خوارزمية عناصر السرب. لكن الزمن الذي استغرقته الخوارزمية الوراثية في الحل كان أطول من الزمن اللازم لخوارزمية عناصر السرب.

الجدول (6) مقارنة تخفيض الحمولة بواسطة خوارزميات الـ GA و الـ PSO

| تخفيض الحمل [p.u.] | | عقدة الحمولة | تسلسل |
|---------------------|----------------------|------------------------|-------|
| الخوارزمية الوراثية | خوارزمية عناصر السرب | | |
| 0.0685 | 0.0837 | عقدة الحمولة رقم 10 | 1 |
| 0.1162 | 0.1474 | عقدة الحمولة رقم 7 | 2 |
| 0.0188 | 0.0211 | عقدة الحمولة رقم 17 | 3 |
| 0.0776 | 0.0494 | عقدة الحمولة رقم 9 | 4 |
| 0.0816 | 0.1419 | عقدة الحمولة رقم 1 | 5 |
| 0.0852 | 0.0515 | عقدة الحمولة رقم 14 | 6 |
| 0.0545 | 0.0848 | عقدة الحمولة رقم 8 | 7 |
| 0.0412 | 0.0353 | عقدة الحمولة رقم 12 | 8 |
| 0.0187 | 0.0387 | عقدة الحمولة رقم 15 | 9 |
| 0.0738 | 0.0539 | عقدة الحمولة رقم 11 | 10 |
| 0.0593 | 0.0653 | عقدة الحمولة رقم 6 | 11 |
| 0.0080 | 0.0251 | عقدة الحمولة رقم 13 | 12 |
| 0.0183 | 0.0236 | عقدة الحمولة رقم 4 | 13 |

| | | | |
|--------|--------|------------------------|----|
| 0.0429 | 0.0469 | عقدة الحمولة رقم 5 | 14 |
| 0.0776 | 0.0396 | عقدة الحمولة رقم 2 | 15 |
| 0.0247 | 0.0309 | عقدة الحمولة رقم 3 | 16 |
| 0.0131 | 0.0269 | عقدة الحمولة رقم 16 | 17 |

8- الاستنتاجات والتوصيات:

عرض هذا المقال منهجية محددة لتقييم موثوقية نظام طاقة مركب اعتماداً على خوارزميات الذكاء الاصطناعي ومن خلال النتائج التي حصلنا عليها يمكن أن نخلص إلى الاستنتاجات والتوصيات التالية:

الاستنتاجات:

- تدل النتائج التي تم الحصول عليها على أنّ الخوارزميات المقترحة قد حققت نتائج أكثر دقةً مع انخفاض كبير في العبء الحسابي الزمني مقارنة بالطرق التقليدية (طرق محاكاة مونت كارلو).
- إبت منهجية المقترحة في هذا البحث إلى تسهيل حساب مؤشرات الموثوقية اعتماداً على حساب أحمال الذروة اليومية والأسبوعية والفصلية وكذلك حساب معدلات الخروج القسري وتعطل خطوط النقل وهذا ما انعكس على دقة النتائج وزمن الحساب.
- أثبتت إستراتيجية تخفيض الحمولة المقترحة أنها إستراتيجية فعالة ومناسبة لتخفيض الحمل وذلك بدون انتهاك لشروط التشغيل وبدون فصل كامل للحمل.

التوصيات:

- يمكن تطوير هذه البحث وتوسيعه ليشمل تقييم موثوقية نظام التوزيع أيضاً.

- المراجع:

- [1] BILLINTON, R. Composite System Reliability Evaluation,". IEEE Transactions on Power Apparatus and System. PAS-88, 1969, 276–281
- [2] BILLINTON, R.; ALLAN, R. Reliability Evaluation of Engineering Systems Concepts and Techniques. Springer Science & Business Media: New York, NY, USA, 2013.
- [3] MORI, H.; KAKUTA, H. Modified SPEA2 for Probabilistic Reliability Assessment in Smart Grids. Procedia Comput. Sci. Vol. 6, 2011, 435–440.
- [4] BILLINTON, R.; LI, W. Reliability Assessment of Electric Power Systems Using Monte Carlo Methods. Springer: New York, NY, USA, 1994.
- [5] A KADHEM, A.; WAHAB, N. I. A.; ARIS, I.; JASNI, J.; ABDALLA, A. N. Computational techniques for assessing the reliability and sustainability of electrical power systems: A review. Renew. Sustain. Energy Rev. Vol. 80, 2017, 1175–1186.
- [6] WANG, L. SINGH, C. Population-Based Intelligent Search in Reliability Evaluation of Generation Systems with Wind Power Penetration. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 23, No. 3, 2008, 1336-1345.
- [7] SHU, Z.; JIRUTITIJAROEN, P.; LEITE DA SILVA, A. M.; SINGH, C. Accelerated State Evaluation and Latin Hypercube Sequential Sampling for Composite System Reliability Assessment. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, No. 4, 2014, 1692-1700.
- [8] GREENWOOD, D. M.; TAYLOR, P. C. Investigating the Impact of Real-Time Thermal Ratings on Power Network Reliability. IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 29, No. 5, 2014, 2460-2468.
- [9] AMARAL, T. S.; BORGES, C. L. T.; REI, A. M. Composite system well-being evaluation based on non-sequential Monte Carlo simulation. Electr. Power Syst. Res., Vol. 80, 2010, 37–45.
- [10] BAKKIYARAJ, R. A.; KUMARAPPAN, N. Optimal reliability planning for a composite electric power system based on Monte Carlo simulation using particle swarm optimization. Int. J. Electr. Power Energy Syst. Vol. 47, 2013, 109–116.
- [11] URGUN, D.; SINGHA, C. Multi Label RBF Classification Method for Composite System Reliability Evaluation. IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS), 2018, 1-5.

- [12] ZHAO, Y.; TANG, Y.; LI, W.; YU, J. Composite Power System Reliability Evaluation Based on Enhanced Sequential Cross-Entropy Monte Carlo Simulation. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 34, No. 5, 2019, 3891-3901.
- [13] URGUN, D.; SINGH, C.; VITTAL, V. Importance Sampling Using Multilabel Radial Basis Classification for Composite Power System Reliability Evaluation. *IEEE Systems Journal*, Vol. 14, No. 2, 2020, 2791-2800.
- [14] ZHOU, P.; JIN, R. Y.; FAN, L. W. Reliability and economic evaluation of power system with renewables: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* Vol. 58, 2016, 537-547.
- [15] URGUN, D.; SINGH, C. A Hybrid Monte Carlo Simulation and Multi Label Classification Method for Composite System Reliability Evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 34, No. 2, 2019, 908-917.
- [16] PATRA, S. B.; MITRA, J.; EARLA, R. A New Intelligent Search Method for Composite System Reliability Analysis. *IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition*, 2006, 803-807.
- [17] SAMAN, N.; SINGH, C. A new method for composite system annualized reliability indices based on genetic algorithms. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting Vol.2*, 2002, 850-855.
- [18] MITRA, J.; XUFENG, X. Composite system reliability analysis using particle swarm optimization. *IEEE 11th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 2010, 548-552.
- [19] MIRANDA, V.; DE MAGALHAES CARVALHO, L.; DA ROSA, M. A.; DA SILVA, A. M. L.; Singh, C. Improving Power System Reliability Calculation Efficiency with EPSO Variants. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 24, No. 4, 2009, 1772-1779.
- [20] MITRA, J.; SINGH, C. Incorporating the DC load flow model in the decomposition-simulation method of multi-area reliability evaluation. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 11, No. 3, 1996, 1245-1254.
- [21] SENJYU, T.; YAMASHIRO, H.; UEZATO, K. Optimal configuration of power systems using GA based on reliability and loss of load. *International Conference on Power System Technology. Proceedings*, Vol.1, 2000, 363-368.
- [22] WANG, J.; WEI, J.; ZHU, Y.; WANG, X. The reliability and operational test system of a power grid with large-scale renewable

- integration. CSEE Journal of Power and Energy Systems, Vol. 6, No. 3, 2020, 704-711.
- [23] SHAFIQ, S.; IRSHAD, U. B.; AL-MUHAINI, M.; DJOKIC, S. Z.; AKRAM, U. Reliability Evaluation of Composite Power Systems: Evaluating the Impact of Full and Plug-in Hybrid Electric Vehicles. IEEE Access, Vol. 8, 2020, 114305-114314.
- [24] WANG, Y.; VITTAL, V.; KHORSAND, M.; SINGH, C. Composite System Reliability Evaluation with Essential Reliability Services Assessment of Wind Power Integrated Power Systems. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, Vol. 7, 2020, 403-413.
- [25] https://www.nerc.com/pa/RAPA/Workshops_DL/Probabilistic_Fundamentals_Workshop_Course_Materials_December_2017.pdf
- [26] TUINEMA, B. W.; KANDALEPA, N.; RUEDA-TORRES, J. L. Probabilistic Indicators for the Assessment of Reliability and Security of Future Power Systems. IN Dynamic Vulnerability Assessment and Intelligent Control for Sustainable Power Systems, First Edition, John Wiley & Sons Ltd., 2018
- [27] SEYEDALI, M.; ANDREW, L. The Whale Optimization Algorithm. Advances in Engineering Software, Vol. 59, pp.51-67, 2016
- [28] SHAHEEN, H. I.; RASHED, G. I.; CHENG, S. J. Application and Comparison of Computational Intelligence Techniques for Optimal Location and Parameters Setting of UPFC, Engineering Applications of Artificial Intelligence (EAAI), Elsevier. Vol. 23, No. 2, 20102, 03-216.

