

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

المخلص

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 إلكتروني 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 الرديئة (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 تغير ذاتية الفرن خلال مراحل الصهر.

2. جودة توتر الربط مع الشبكة الكهربائية

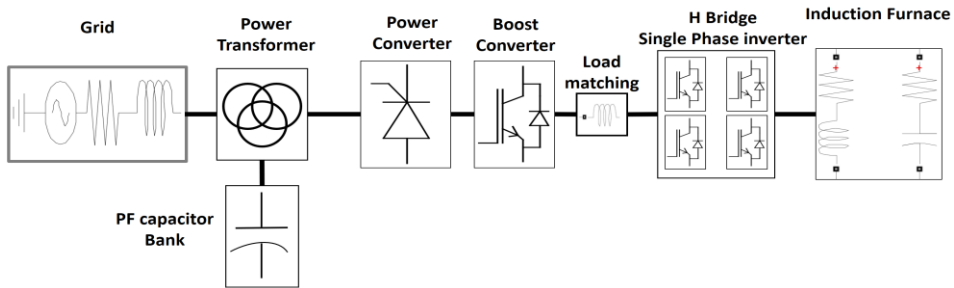
يمكن تصنيف جودة الربط لفرن صهر تحريضي مع الشبكة الكهربائية العامة إلى منحنيين أساسيين هما:

- 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 منسوبة إلى تيار الحمل حسب المواصفة IEEE Std 1992-519

الجدول (2) نسب التوافقيات بحسب رتبها 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

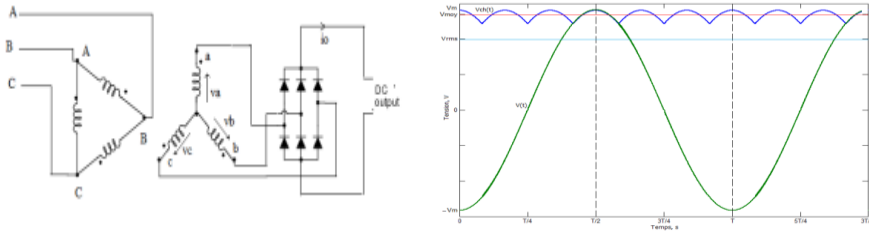
بشكل عام، تعتمد الأفران التحريضية على منبع قوي للتيار المستمر (وحدة تغذية) وذلك حتى يتمكن المعرج من تحويل التوتر المستمر الصافي إلى توتر متناوب بتردد متغير (150-400) هرتز. تستخدم لهذه الغاية المقومات المقادة (الثايرستورية) أو نصف المقادة (ثايرستور + ديود) والمقومات غير المقادة (ديودات). لدى استخدام جسر 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 التقييم 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

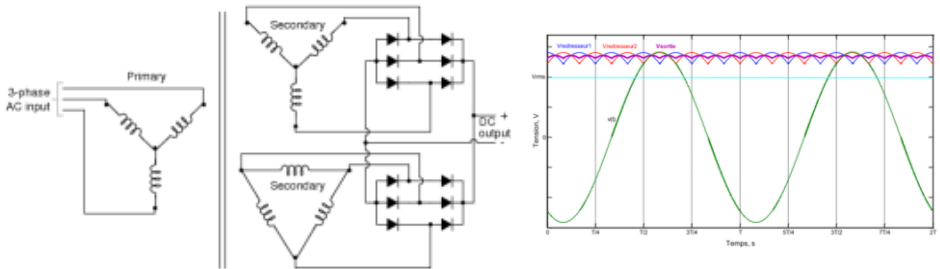
تأخذ المقومات متعددة الأطوار طرق توصيل عديدة لتأمين توترات دخل مزاحة للمقوم الجسري المستخدم. وكما سنرى لاحقاً، أنه لدى استخدام جسر كريتز المكون من ستة قواطع، المغذى من منبع ثلاثي الطور، يوصل المحول فيه بشكل Y/Y أو Y/Δ أو Δ/Y ، توترات الأطوار فيها ستكون مزاحة عن بعضها البعض بمقدار 120° درجة كهربائية، 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 كريتز 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 مثلث عوضاً عن الشكل النجمي ويمكن الحصول على نفس النتائج السابقة (يرجى العودة للملحق الشكل 1)

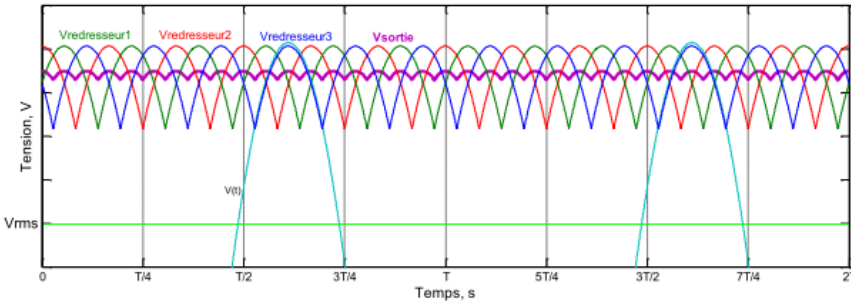


3.1.2. المقومات ذات 18 نبضة

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

الشكل (3) كيفية وصل جسري كريتز للحصول على توتر مقوم ذي 12 نبضة والتوتر المقوم [11] تقويم تفرعية مضاعفة نوع كريتز، 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 التمرجات RIPPLE المحمولة على مركبة التوتر المستمر المتوسطة سوف يزداد تردها لقيم عالية، والتوتر المستمر الناتج سيكون شبه مستمر. وهذا ينعكس على انخفاض قيمة الحثية اللازمة لمفات 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:

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

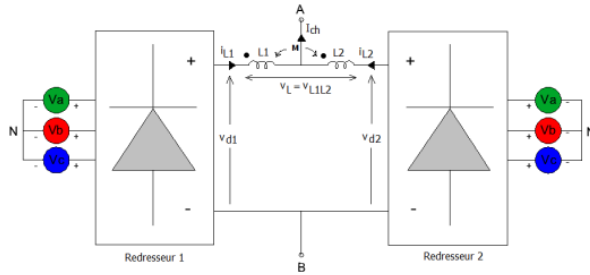
بالمقابل، إن القيمة المتوسطة لتوتر خرج جسر كريتز في حال وصل الملف الثانوي بشكل دلتا يساوي [9]:

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

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 (20/0.75x2 [kV] Yg/D1/Yg).
- 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 (20/0.75): Yg/D1/Yg [KV] x4

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 الاسمية 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

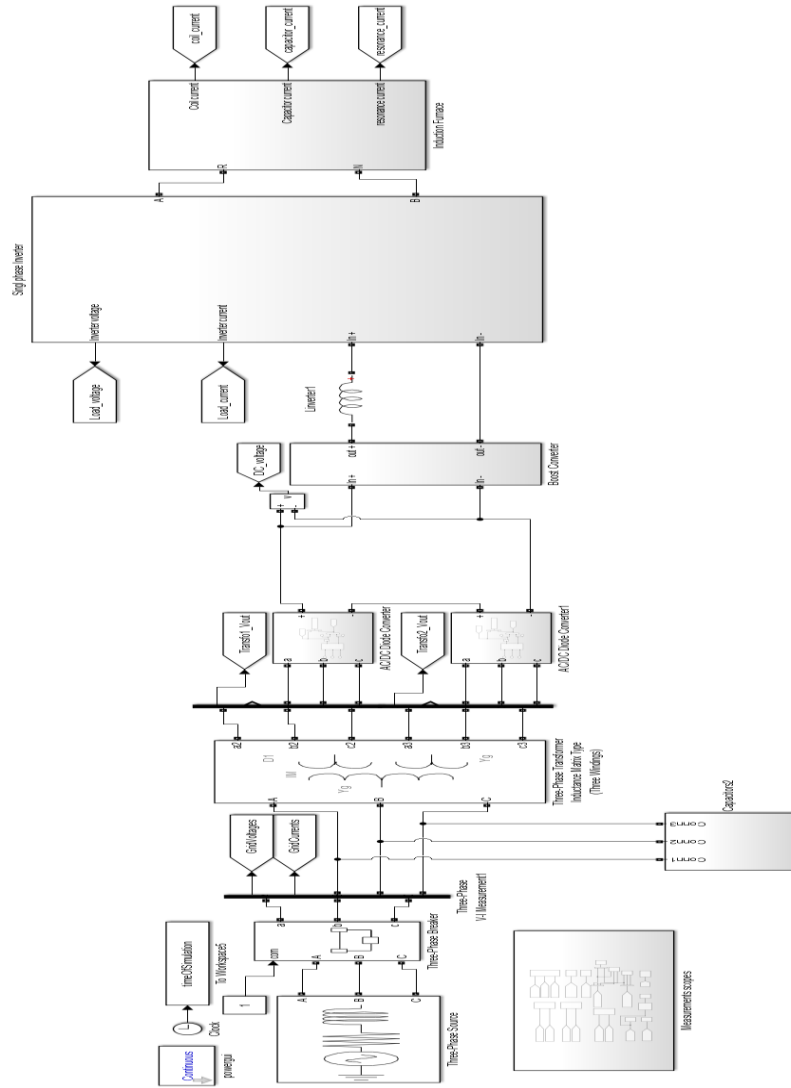
القيمة الاسمية	المتحول		
6 [KV]	توتر الدخل الاسمي		
H - Bridge	مخطط التوصيل		
IGBT ترانزستور	عصر التبديل		
1 [mH]	0.1 [μF]	R_s	C_s

الفرن التحريضي Induction furnace

تم اعتماد النموذج الطيني الفرعي 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 الفرعي 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



الشكل (6) مخطط النمذجة والمحاكاة لنظام التغذية الكهربائية للفرن التحريضي بناءً على ما سبق، يبين الشكل (6) مخطط النمذجة والمحاكاة

خلال هذا الجزء العملي ستم مناقشة النقاط التالية:

- 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)

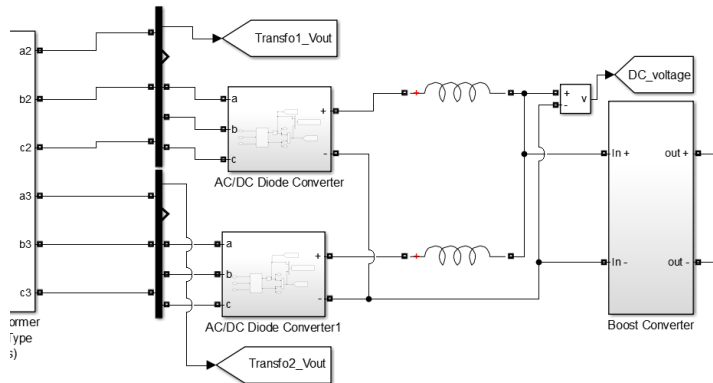
5. تحليل جودة ربط الفرن التحريضي مع الشبكة الكهربائية

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

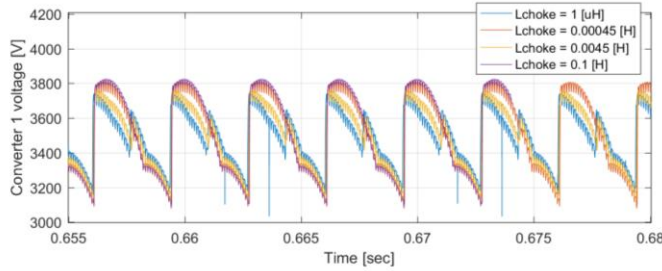
بفرض أن الحمولة كاملة وتردد الطنين الناتج عن هذه الحالة هو 300 [Hz]. يبين الشكل (7) جزءاً من النموذج وفيه توضح طريقة التوصيل التفرعية مع وضع ملفات



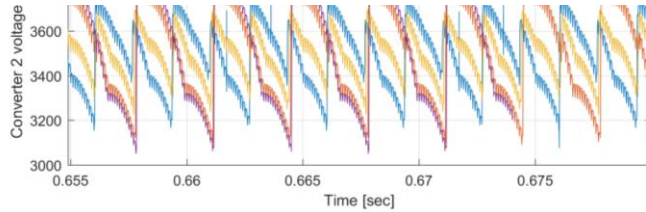
الطور على مخرج كل جسر كما ذكرنا سابقاً. يلعب الملف الموجود على خرج كل جسر

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) $[\mu\text{H}]$.

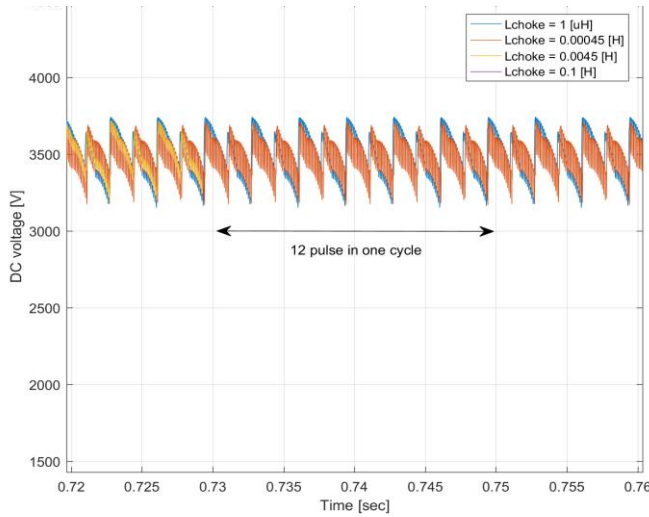
تبين الأشكال (8) و (9) تأثير قيمة ذاتية ملف الطور على تموجات (ripples) موجة



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

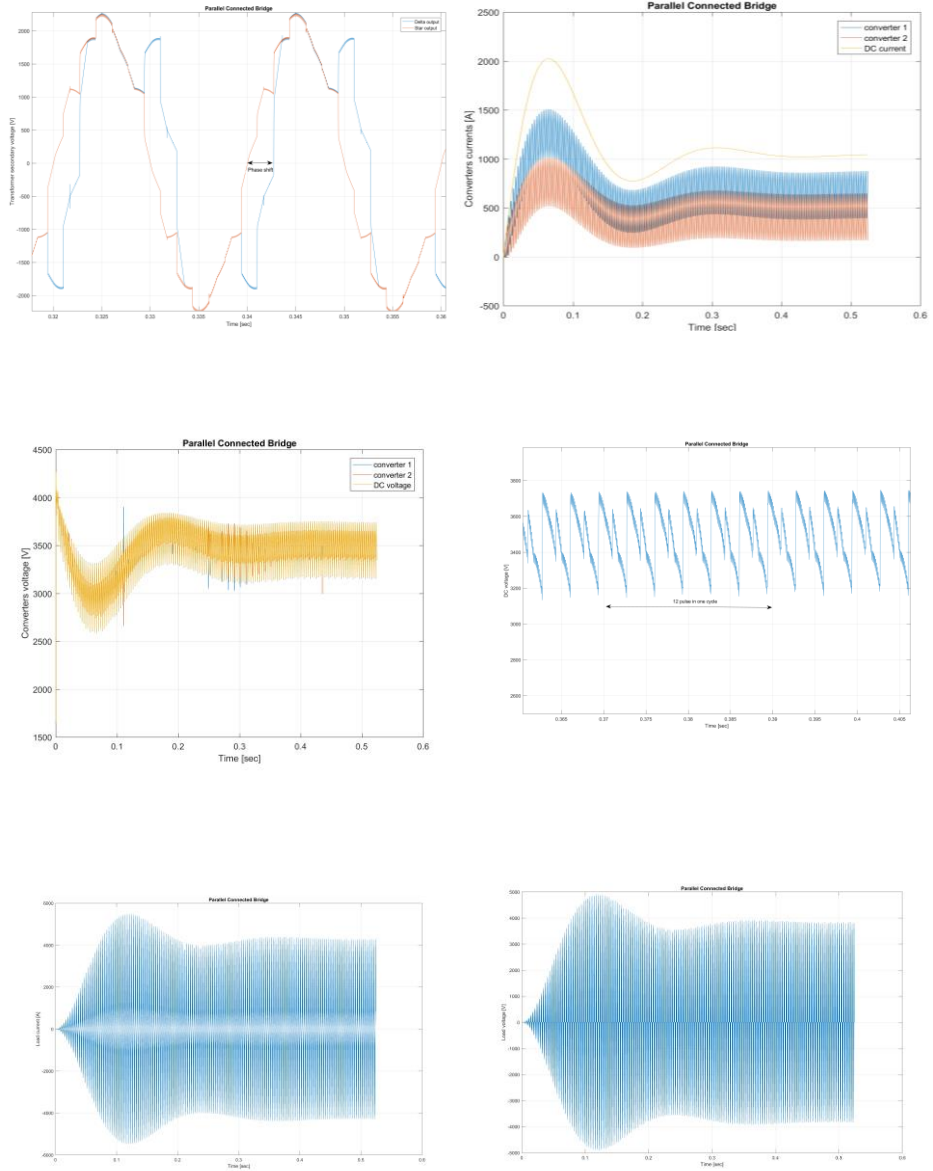


الشكل (8) تأثير قيمة ملف الطور في خرج الجسور التفرعية على توازن توترات جسور التقويم



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:

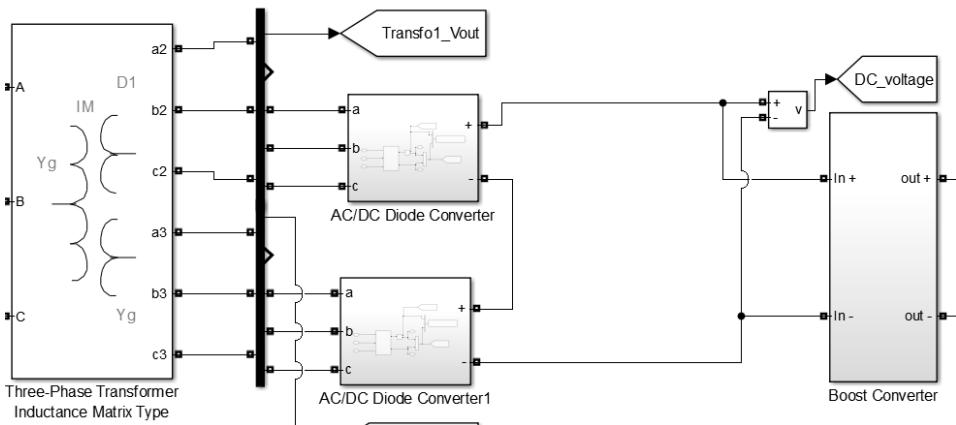


الشكل (10) نتائج تشغيل فرن الصهر من جسري تقويم موصلين على التفرع

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.

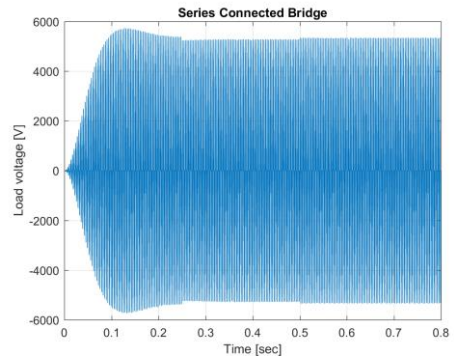
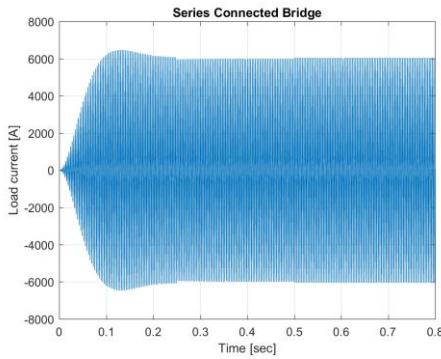
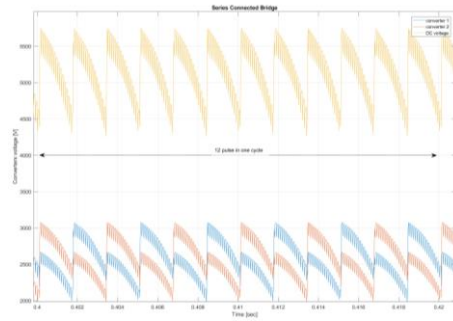
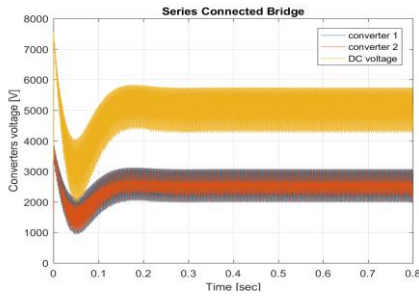
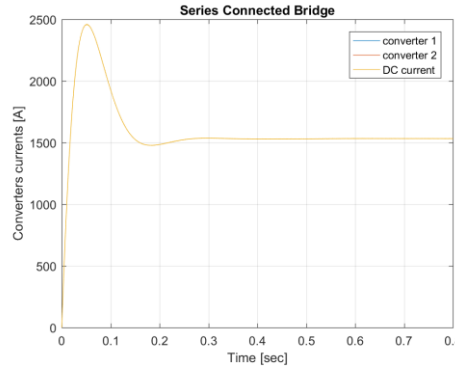
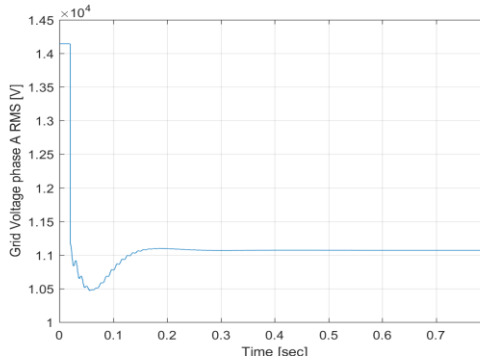
1.5. حالة دخل ثابت ووصل تسلسلي لجسور التقويم (S)

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

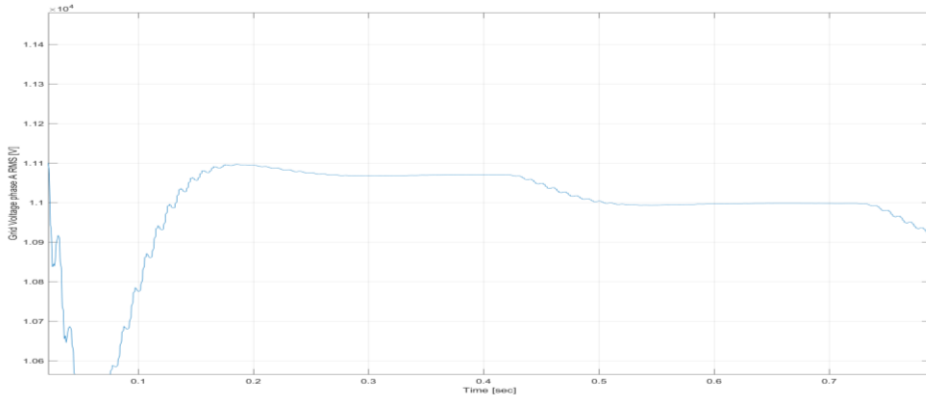
عند تشغيل النموذج على الحمولة الإسمية وتردد تشغيل 300 هرتز، نحصل على النتائج التالية:



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

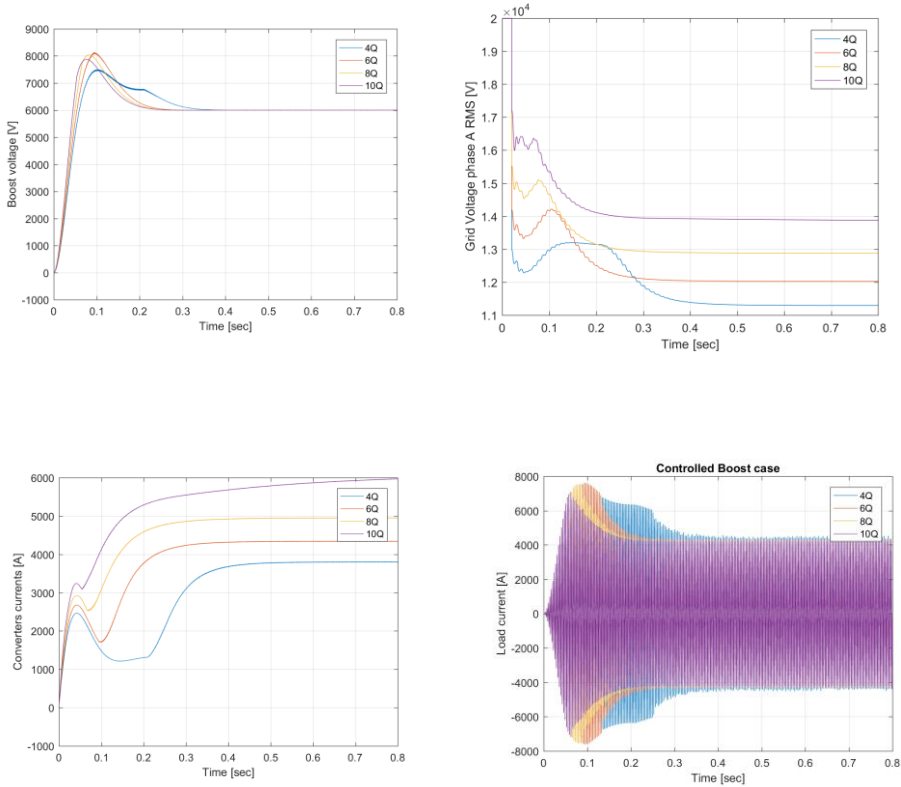
المصهور داخل البوتقة.

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 فولط 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

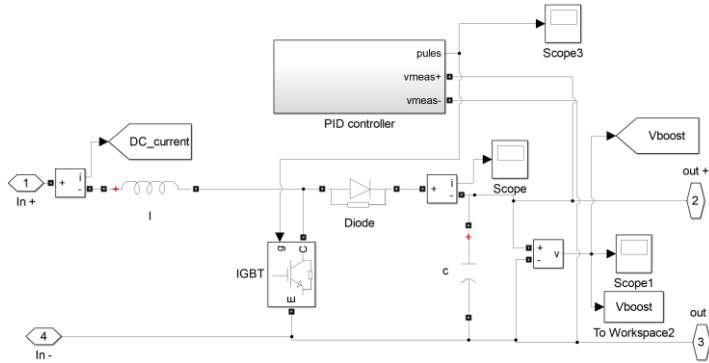
لحساب السعة الطينية المناسبة بشكل دقيق لكل تردد يمكن استخدام العلاقة التالية [5]:

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

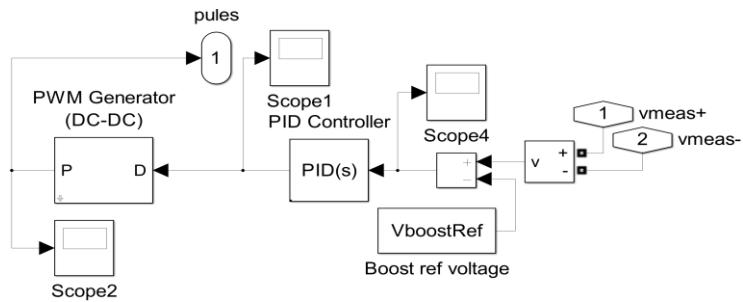
حيث: P_{coil} استطاعة ملف الفرن، f_c تردد التشغيل و V_c توتر الملف. كما يمكن استخدام تيار وتوتر الفرن مباشرةً وتطبيق المعادلة التالية:

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

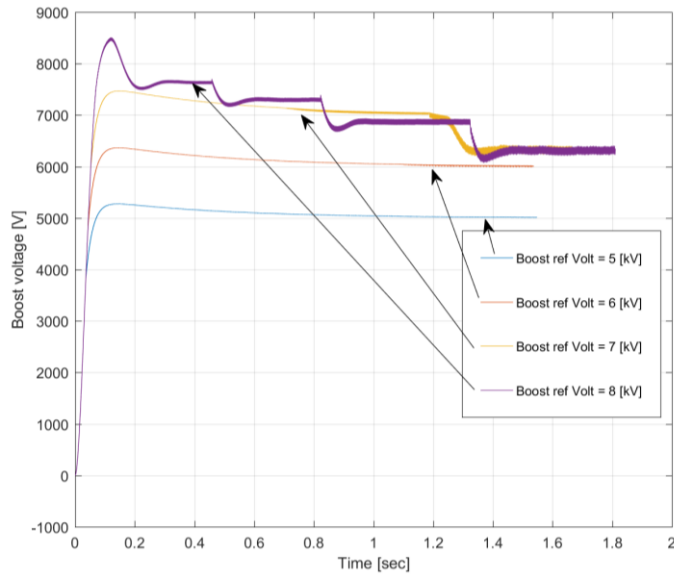
قمنا بتثبيت استطاعة مكثفات الربط على القيمة ($Q2$) أي ضعفي استطاعة الطنين للفرن. سوف نستعرض النتائج التي حصلنا عليها عند تمثيل تغيير كمية الحديد داخل البوتقة ومن أجل توترات مختلفة للمقطع الرافع. كما استخدمنا منظم PID للتحكم بدور التقطيع للمقطع الرافع من أجل تثبيت توتر الخرج على القيمة المطلوبة في كل حالة (5-6-7-8 [KV]) (الشكل (15) والشكل (16)).



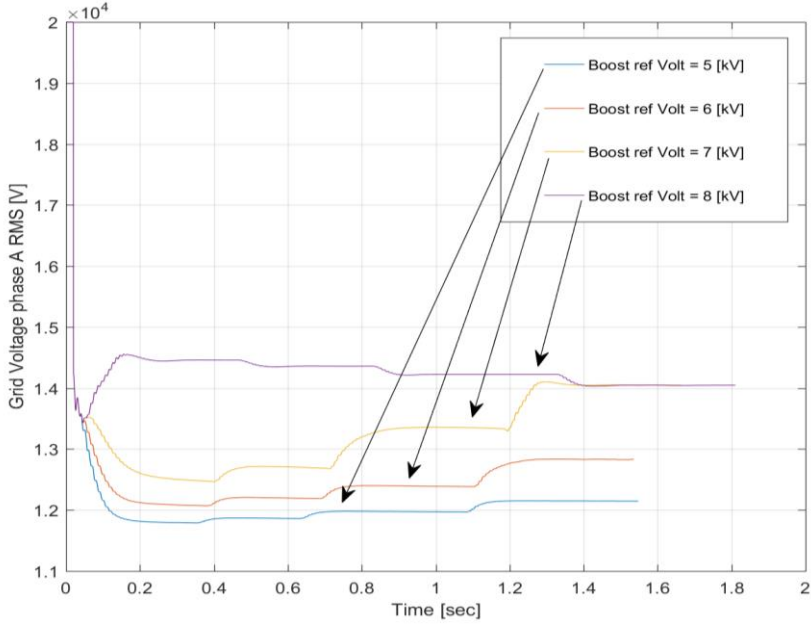
(نموذج المقطع الرافع ودارة التحكم المستخدمة 15 الشكل)



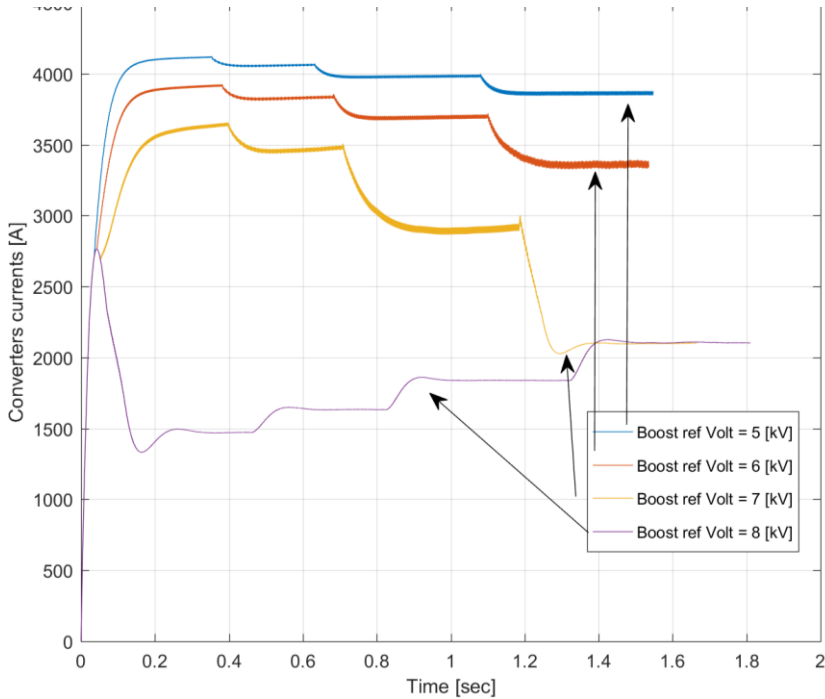
الشكل (16) تفصيل دارة التحكم بالمقطع الرافع



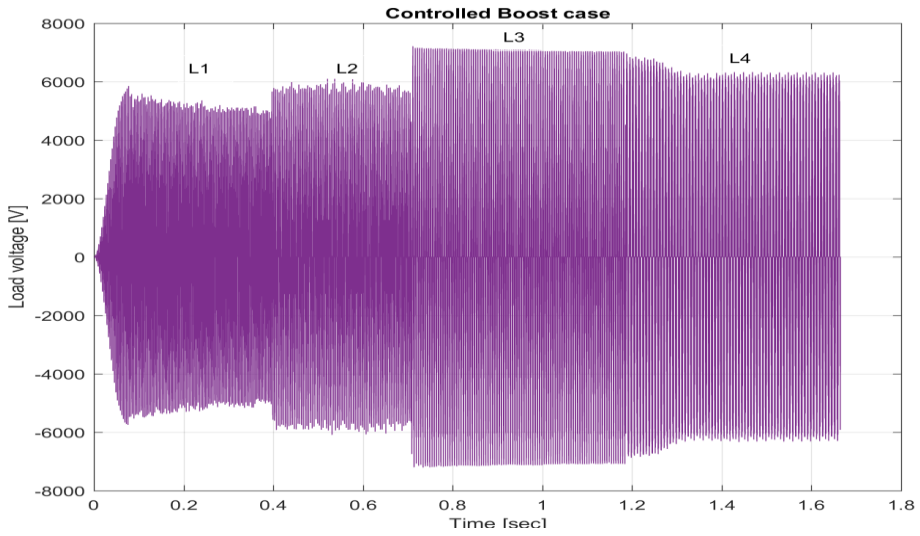
الشكل (17) تثبيت توتر المقطع الرافع على قيمة محددة خلال تشغيل الفرن



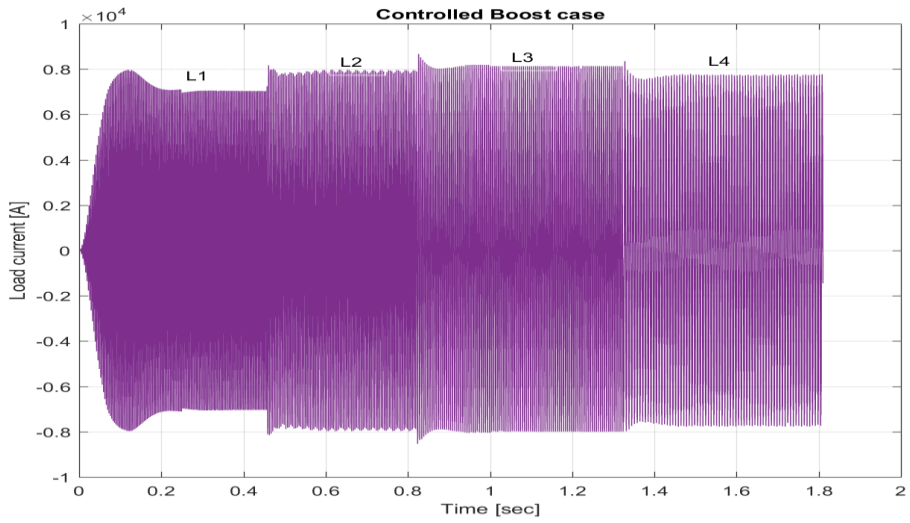
الشكل (18) تأثير تنظيم توتر المقطع الرافع على قيمة محددة خلال تشغيل الفرن على توتر الربط مع الشبكة



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.

