

تقييم إمكانية تشغيل مجموعات توليد مستقلة لتشغيل فرن قوس كهربائي عالي الاستطاعة

غيث هاشم ورقوزق^{1*}

^{1*}. أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

(<https://orcid.org/0000-0003-4548-6131>) Ghaith.warkozek@damascusuniversity.edu.sy

الملخص:

تستخدم أفران القوس الكهربائية EAF في معظم دول العالم لصهر خردة الحديد، وتتراوح استطاعة هذه الأفران بين (20-100 MW)، تغذى الأفران الصغيرة غالباً من شبكات (KV) 33-66، بينما تغذى الأفران الأكبر حصراً من شبكات (KV) 150-230. نظراً لنقص مصادر الطاقة في الشبكات الكهربائية، يفكر بعض الباحثون ومشغلو الشبكات الكهربائية، بالبحث في إمكانية استخدام مجموعات توليد مستقلة، تعمل كجزيرة لتغذية أفران القوس الكهربائي. تم في هذا البحث تحليل عمل أفران القوس الكهربائي، بالاعتماد على قيم حقيقية لفرن قوس كهربائي باستطاعة (MVA) 60، كما تم اعتماد مواصفات المحولات والمفاعلات الحقيقية المستخدمة في مثل هذه الأفران.

تم تمثيل النظام لدى تشغيله من الشبكة العامة (KV) 230، ذلك لبيان واقع التشغيل النظامي والتأكد من جميع مكونات النموذج ومقارنتها بمنحنيات تشغيل الفرن الحقيقية. ثم تم استخدام مجموعات عنفة - مولد مستقلة باستطاعات مختلفة (60-90-150) ميغا واط تربط على قضبان الشبكة القائمة. وفي كل حالة تم تحليل نتائج تغذية الفرن بهذه المولدات. بينت النتائج استحالة القيام بتغذية أفران القوس الكهربائي من مجموعات توليد مستقلة وذلك مهما ارتفعت استطاعة هذه المولدات، كما تبين أن قيم التيار والتوتر الناشئ في المولدات كبير جداً وسيؤدي لتطبيق عزوم كهرومغناطيسية كبيرة على محاور الأجزاء الدوارة وبالتالي تلفها وتحطمها. كما أن توترات القضبان سوف ترتفع ويدخل النظام في حالة عدم التشغيل الحقيقي المأمون.

خلفية البحث وهدفه: نظراً للظروف التي تخضع لها الشبكة الكهربائية المحلية، يتساءل مشغلو الشبكة العامة عن إمكانية تغذية أفران الصهر من مولدات مستقلة لتخفيض أثر هذه الأفران على الشبكة العامة والاستفادة من الاستطاعة الكهربائية التي سيتم توفيرها لتغطية أحمال أخرى. لأجل ذلك يجب البحث عن مدى إمكانية الاستعاضة عن الشبكة العامة لمثل هذه الحالات قبل اتخاذ القرار بهذا الخصوص. تم إجراء هذا البحث في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية في جامعة دمشق بالتعاون مع شركة الصناعات الحديدية (حديد).
مواد البحث وطرائقه: تم الاعتماد على البيانات الحقلية المقاسة من مركز تحويل فرن حديد في المنطقة الصناعية بعدرا - ريف دمشق، ثم تم استخدام بيئة النمذجة والمحاكاة لتمثيل الفرن والشبكة الكهربائية المغذية له. تم استخدام النمذجة على البيانات الحقيقية.
الكلمات المفتاحية: أفران القوس الكهربائية - جودة الشبكة الكهربائية - نمذجة ومحاكاة.

تاريخ الايداع: 2022/10/26

تاريخ القبول: 2022/12/20



حقوق النشر: جامعة دمشق -
سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق
النشر بموجب CC BY-NC-SA

Evaluation of of operating High Power Electric Arc Furnace from set of generators

Ghaith H. Warkozek*¹

*¹. Associated Professor in the Department of Electric power systems – Faculty of mechanical and Electrical Engineering.- Damascus University.

Ghaith.warkozek@damascusuniversity.edu.sy (<https://orcid.org/0000-0003-4548-6131>)

Abstract:

Electric arc furnaces (E.A.F) are used in most countries of the world to melt scrap iron. The capacity of these furnaces ranges between 20-100 (MW). Smaller furnaces are mostly fed from 33-66 (KV) networks, while larger furnaces are fed exclusively from 230-150 (KV) networks. Due to the lack of energy sources in the local electric grids, some researchers and electric grid operators are considering the possibility of using independent turbine-generator sets, which act as islands to feed electric arc furnaces. In this paper, the work of electric arc furnaces was analyzed, based on real values of an electric arc furnace with a capacity of 60 (MVA), and the specifications of real transformers and reactors used in such furnaces were also adopted.

In the first step, the system was simulated when operating from the public network 230(KV), in order to show the reality of regular operation and to verify model and compare them with the real EAF operation values. Then, independent turbine-generator sets of different capacities (60-90-150) megawatts were used, connected to the existing furnace network. In each case, the results of feeding the furnace with these generators were analyzed. Results show the impossibility of feeding electric arc furnaces from independent generating sets, no matter how high the power of these generators is, and it was found that the values of current and voltage arising in the generators are very large and will lead to apply a large electromagnetic torque on the axes of the rotating parts and thus damage and break them. The voltage of the coupling point will also rise and the system will enter the non-realistic safe operation.

Key words: Modeling and Simulation, The quality of the electrical network, Electric arc furnaces.

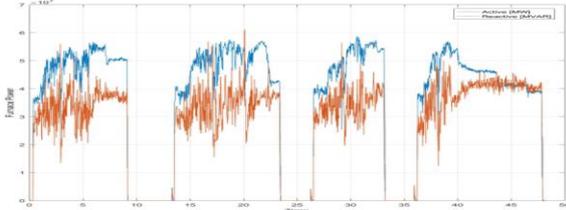
Received: 26/10/2022

Accepted: 20/12/2022



Copyright: Damascus University- Syria, The authors retain the copyright under a CC BY- NC-SA

إشكالية البحث:



الشكل (1) منحنى الاستطاعة الفعلية والردية المقاسة للفرن

إن تيار فرن الصهر بالقوس الكهربائي E.A.F، هو تيار متناوب عشوائي غير خطي نبضي، بالتالي فإن الاستطاعة الفعلية والردية المستجرة من هذه الأفران متغيرة لحظياً بشكل كبير كما يبينه الشكل (1). حيث يتم استجرار هذا التيار بشكل نبضي Pulsating، وبمعدل 5-6 هرتز ويتأرجح الحمل بين قيمة التحميل الكامل (يصل الحمل في مثل هذه الأفران إلى 20-100 MVA). هنا يظهر تساؤل حول تأثير هذا الشكل النبضي للتيار على إمكانية تغذية الفرن من مولدات تزامنية باستطاعات قريبة من استطاعة الفرن أو أكبر. من جهة أخرى، وكما هو المعروف إن أفران صهر الخردة Scrap Melting، تولد العديد من رتب التوافقيات، سواء في التيار أو التوتر وبالتالي تسيء إلى جودة التوتر في الشبكة المغذية [2]، إضافة إلى انخفاض عامل الاستطاعة، ويتم تعويض عامل الاستطاعة غالباً عبر إضافة أنظمة التعويض الساكن Static Var Compensation (S.V.C). [2]

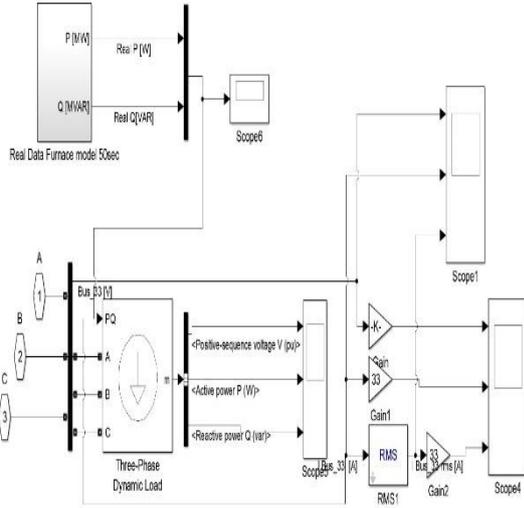
لأجل ذلك يستخدم حديثاً في نظم تشغيل الأفران الكهربائية، نظام مكون من مبدلات إلكترونية (متناوب - مستمر - متناوب) لخلق حلقة تيار مستمر DC-Link، تعمل على عزل التوافقيات الناشئة من تيار وتوتر الفرن عن الشبكة العامة [3]. لكن على الرغم من ذلك، فإنه لا ينصح باستخدام المعوضات

المقدمة:

تعتبر صناعة الحديد من الصناعات التقانية عالية المستوى، حيث أنها تتطلب تقانة عالية في أنظمة التحكم، خواص المواد المراقبة عن البعد وغيرها. يعتمد مفهوم الصهر الكهربائي على إنتاج الطاقة الحرارية الكافية للصهر من مصدر كهربائي عوضاً عن الأحفوري، ذلك سواءً من خلال تمرير تيار قصر عالي القيمة أو من خلال ظاهرة التحريض الكهرومغناطيسية [1]. بشكل عام، يتم صهر خردة الحديد عالمياً بثلاث أنواع من أفران الصهر:

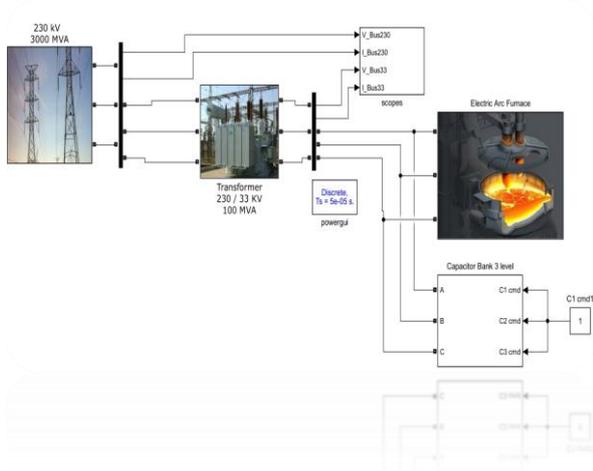
- أفران القوس الكهربائي ذات التيار المتناوب Electrical Arc Furnace (E.A.F)
 - أفران القوس الكهربائي ذات التيار المستمر Electrical direct Current Arc Furnace
 - الأفران التحريضية Induction heating Furnace
- في كل تلك الأنواع، تعد أنظمة الكترونيا القدرة المكون الأهم من بين مكونات أفران صهر الحديد. ذلك لأن توليد الطاقة الحرارية اللازمة لعملية الصهر تتم عبر دارات الكترونية مصممة لهذا الغرض [1]. كما هو معروف لدى المختصين في مجال الكترونيا القدرة، تعد هذه الدارات منبعاً للتوافقيات، التي ستسبب مشاكل عديدة للشبكة التي تغذي هذه الأفران. من هنا، بدأ البحث عن سبل تغذية بعض أنواع الأفران الكهربائية من خلال مجموعات توليد تشكل جزيرة معزولة عن الشبكة العامة، لتخفيف قدر الإمكان من مشاكل التوافقيات وجودة القدرة في شبكة الربط. لأجل ذلك، يهدف هذا البحث لتحليل إمكانية تشغيل فرن قوس كهربائي حقيقي، عبر مجموعات توليد ديزل بدلاً من الشبكة العامة. حيث تم نمذجة النظام الكهربائي من مركز التحويل المغذي للفرن 33/230 (KV) وصولاً لفرن الصهر للمنشأة.

ورقوزق



الشكل (2) نموذج المحاكاة للنظام الكهربائي المدروس.

كما يوضح الشكل (3) والشكل (4) نموذج المحاكاة لفرن القوس الكهربائي بحيث تم تحويل البيانات الفعلية التي تم قياسها من فرن حقيقي باستطاعة 60 ميغا واط خلال دورة تشغيل واحدة. نلاحظ خلال هذه الدورة أن عملية الصهر تتضمن أربعة سلال صهر يتم فيها تحويل خردة الحديد إلى مصهور.



الشكل (3) نموذج المحاكاة لفرن القوس الكهربائي

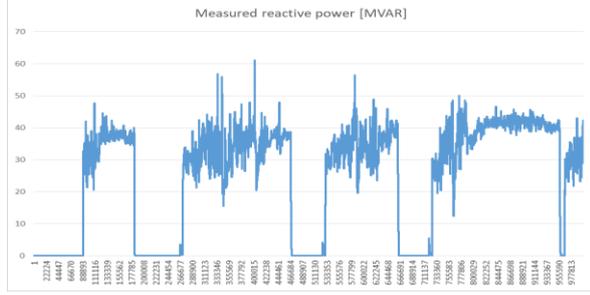
تقييم إمكانية تشغيل مجموعات توليد مستقلة لتشغيل فرن.....
الدورة هنا، لأن هذه التوافقيات لن تخدم بشكل كامل، لذلك ستعمل على زيادة العزوم المطبقة على محاور الآلات الدوارة المتواجدة بالقرب من هذه الأفران [1].

هدف البحث:

يهدف هذا البحث، لبيان إمكانية تغذية فرن قوس كهربائي باستطاعة (60MVA)، عبر مجموعة عنفة - مولد - Turbine- Generator تعمل بشكل مستقل عن الشبكة العامة، واستخدام استطاعات توليد مختلفة أكبر بكثير من استطاعة الفرن. تم اعتماد متغيرات تيار الفرن الحقيقية، كما تم اعتماد جميع القيم والبارامترات للشبكة الحقيقية المغذية لهذا الفرن (بيانات الشبكة العامة، محولات الاستطاعة، المفاعلات، طول الخطوط..). كما سيوضح لاحقاً.

النموذج الحاسوبي لنظام تغذية فرن القوس الكهربائي يبين الشكل (2) المجاور نموذج المحاكاة الذي تم تصميمه لأجل دراسة إمكانية تشغيل نظام الفرن الكهربائي باستطاعة 60 ميغاواط عبر مجموعات توليد مستقلة. تم تمثيل الشبكة العامة ذات التوتر (kv) 230، باستطاعة قصر 3000 (MVA)، نسبة $X/R=7$ ، تردد 50 هرتز. محولة الاستطاعة الرئيسية بتوترات (KV) 230/33، وممانعة قصر $X\% = 12$ ، باستطاعة (MVA) 100. موصلة موصل YNd11. في البداية تم تشغيل النموذج من الشبكة العامة بقصد التأكد من سلامة النموذج ومقارنة نتائج النمذجة مع القياسات الميدانية لفرن القوس الكهربائي الحقيقي.

ورقوزق



الشكل (5) الاستطاعة الردية للفرن

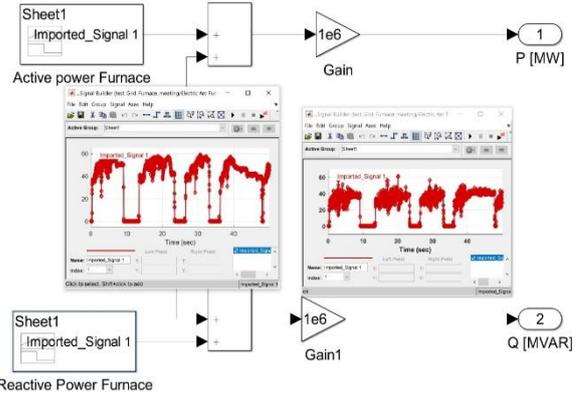
تستعرض الفقرات التالية من هذا البحث تحليل تشغيل الفرن في حالة تغذيته من الشبكة العامة، ثم في حال تغذيته من مجموعات توليد ديزل باستطاعات تساوي استطاعة الفرن وملحقاته (60) ميغاواط ثم 1.5 - 2 مرة أي ما يعادل (90-150) ميغاواط استطاعة الفرن ومناقشة النتائج. في جميع الأحوال، إن نقاط الدراسة من جهة الشبكة العامة (KV) 230 تشمل قراءة أثر تشغيل الفرن على توتر الشبكة العامة، وقيم الاستطاعة الفعلية والردية المستجرة من الشبكة العامة، ونسبة التشوه بالتوافقيات التي تنتشأ على توترات قضبان الشبكة. أما من جهة الفرن فهتم بالاستطاعة الفعلية المطلوبة من الفرن في حالة التشغيل النظامي، ثم سنراقب أثر ذلك على محولة الاستطاعة (KV) 230/33، وقيم التوتورات والتيارات لهذه المحولة عند حالات التشغيل اللحظية للفرن.

بداية وللتأكد من صحة جميع النتائج التي سنحصل عليها، تم تمثيل النظام بكافة مكوناته باعتماد بيئة النمذجة والمحاكاة الماتلاب، وعملنا على ربطه على الشبكة العامة (KV) 230، وذلك لمعرفة سلوك مختلف التجهيزات خلال فترة تشغيل الفرن القوس الكهربائي من الشبكة العامة. أما الخطوة الثانية فهي استخدام مجموعات توليد مستقلة (عنفة - مولد) باستطاعات آنفة الذكر لتغذية الفرن.

تمثيل حالة التشغيل النظامي للفرن لدى تغذيته من الشبكة العامة (KV) 230

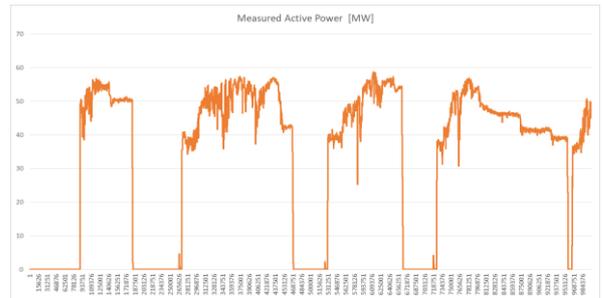
بعد الحصول على منحنى الاستطاعة الفعلية والردية من الفرن كتابع للزمن الشكل (5) والشكل (6)، تم اعتبار أن

تقييم إمكانية تشغيل مجموعات توليد مستقلة لتشغيل فرن.....



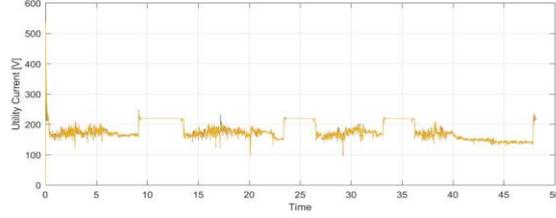
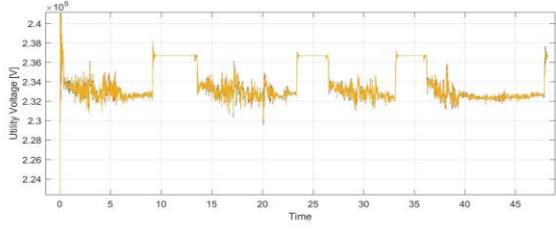
الشكل (3) مرحلة تحويل البيانات الحقيقية إلى منحنى حمولة متغير مع الزمن

قمنا باستخدام القياسات الفعلية الميدانية الرقمية وتحويلها إلى سجلات رقمية قابلة للاستثمار في بيئة المحاكاة الماتلاب. إن هذه القيم المطبقة على محولة الفرن هي بالفعل تمثل تغيرات طلب الاستطاعة مع الزمن، وهي كما يوضحه الشكل (5) والشكل (6). نلاحظ أن التغيرات اللحظية في قيمة الاستطاعة ذات نمط عشوائي وفقاً لتغيرات حالة المصهور الفولاذي خلال مراحل تحميل السلال، باستطاعة وسطية مستجرة من قبل الفرن تصل إلى 42 ميغاواط، كما تصل في بعض اللحظات إلى حدود 58 ميغاواط.

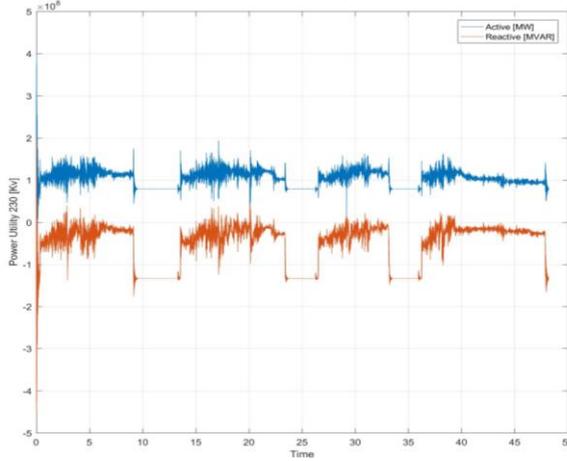


الشكل (4) الاستطاعة الحقيقية للفرن

ورقوزق



الشكل (6) القيمة الفعالة لتيار وتوتر الشبكة العامة



الشكل (8) الاستطاعة الفعلية والردية على قضبان شبكة 230 KV

يوضح الشكل (9) الاستطاعة الفعلية والردية على قضبان شبكة (33 KV)، والتي تتراوح حول 100 MVA نظراً لأن تغيرات التيار السريعة تعمل على استجرار استطاعات ردية وفعالية في المكثفات.

تقييم إمكانية تشغيل مجموعات توليد مستقلة لتشغيل فرن..... هذا البلوك سوف يمثل سلوك مختلف تجهيزات الفرن (مقاومة القوس وممانعته، محولة الفرن الأساسية، الممانعة التسلسلية للفرن) وأصبح هذا البلوك يمثل كامل الفرن بدءاً من قضبان التوتر (KV) 33. نلاحظ أن الاستطاعة الفعلية المستجرة من الفرن في النموذج تصل إلى (MW) 58، والاستطاعة الردية تصل إلى (MVAR) 40-50. أي أن هذه القيم متوافقة مع القيم العملية للفرن المدروس. يوضح الشكل (7) القيمة الفعالة لتوتر الشبكة العامة (KV) 230، وشكل التيار عند مراحل التشغيل المختلفة، نلاحظ أثر تغيير طلب الاستطاعة المتكرر مع الزمن على هذا التوتر، كما نرى ارتفاع توتر الشبكة عند فصل الفرن بين كل فترة من فترات التشغيل. إذ يصل ارتفاع التوتر هذا تقريباً إلى قيمة 237 كيلو فولط. إن نسبة التشوه بالتوافقيات THD% في موجة التوتر على مرابط الشبكة العامة، بعد تحليلها بطريقة فورييه FFT والتي لم تتجاوز 0.89% وهي ضمن القيم العالمية المسموحة في IEEE 1992/2014-519 كما يبين الشكل (8) الاستطاعة الفعلية والردية على قضبان (KV) 230.

تقييم إمكانية تشغيل مجموعات توليد مستقلة لتشغيل فرن.....

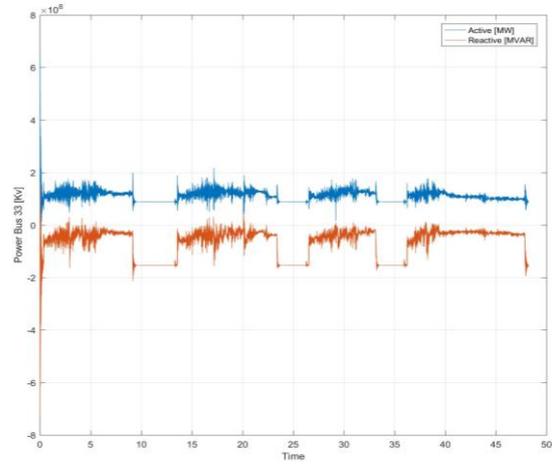
ورقوزق

(230KV)، بمجموعات توليد مستقلة. حيث سنحلل عمل المنظومة أثناء تغذية فرن الصهر بالقوس الكهربائي من مجموعات التوليد فقط وفق الحالات الثلاث التالية:

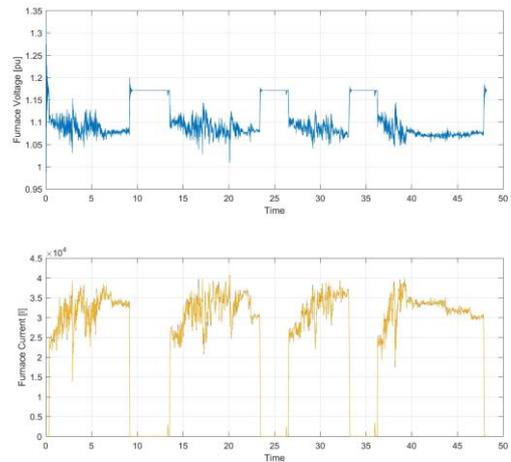
- تغذية الفرن من مجموعات توليد باستطاعة 60 (MW)
- تغذية الفرن من مجموعات توليد باستطاعة 90 (MW)
- تغذية الفرن من مجموعات توليد باستطاعة 150 (MW)

تمثيل تشغيل الفرن من مجموعات توليد

حالة تغذية الفرن من مجموعات توليد باستطاعة مساوية لاحتياج فرن القوس الكهربائي (60 MW) هنا عوضاً عن ربط الفرن بشبكة (KV) 230، فقد تم تغذيته من خرج مجموعتي توليد، يبلغ استطاعتهما الإجمالية 60 (MW) بتوتر خرج (KV) 11,86، أي ستكون توترات محولة مجموعات التوليد (KV) 11.86/33 أما استطاعة المحولة الرئيسية التي تربط مجموعة التوليد بنظام الفرن أصبحت استطاعتها (MVA) 72. تدار مجموعات التوليد عن طريق عنفات ديزل الشكل (11)، مع نظام تحكم كامل بتوتر التهيج، سرعة الدوران، وتوتر الربط مع المحولة. بلوك محولة فرن الصهر، المفاعلة التسلسلية ومنحنيات الاستطاعة اللحظية المستجرة من قبل الفرن، التي تم اعتمادها في المثال السابق، أخذت كما هي دون أي تغيير في هذه الحالة.



الشكل (9) الاستطاعة الفعلية والردية على قضبان شبكة 33 KV
يبين الشكل (10) القيم الفعالة لتيار وتوتر الفرن المتغيرة مع الزمن، وقد تم مقارنتها مع القيم الحقيقية المقاسة في المعمل وكانت قريبة جداً منها.



الشكل (10) القيم الفعالة لتيار وتوتر الفرن.

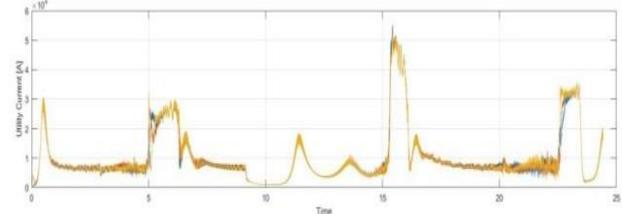
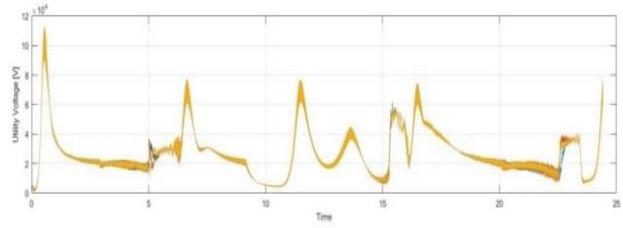
من الأشكال السابقة يمكننا القول، أن نموذج المحاكاة الذي تم وضعه لنظام تشغيل الفرن، قد قام بتوضيح آلية العمل بشكل جيد، وإعطاء قيم التوترات والتيارات خلال لحظات التشغيل المختلفة بشكل متطابق مع القيم العملية التي نقرأها فعلياً لدى القيام بتشغيل الفرن.

تسمح لنا هذه النتيجة باعتماد نفس الآلية لتمثيل الفرن والمحولة الرئيسية، لكن بعد باستبدال الشبكة العامة

تقييم إمكانية تشغيل مجموعات توليد مستقلة لتشغيل فرن.....

ورقوزق

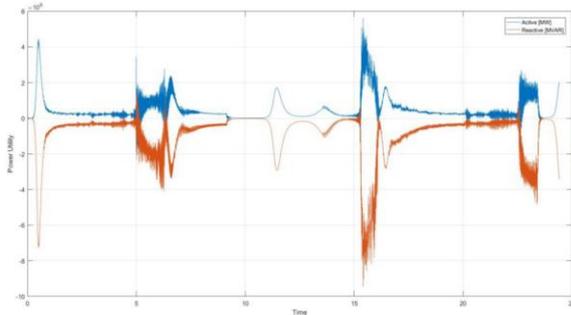
بالنسبة لتوترات والتيارات الدخول القادمة من مجموعات التوليد والمبين في الشكل (12)، نرى كيف أن مجموعات التوليد بدأت بالإقلاع وارتفع التوتر إلى حدود (KV) 110 على قضبان المولدة وبشكل نبضات غير دورية، علماً أن توتر المولد النظامي (KV) (11.86).



الشكل (11) نموذج المحاكاة لتشغيل الفرن من مجموعات توليد

نتائج تمثيل تشغيل الفرن عبر مجموعات توليد باستطاعة 60(MW).

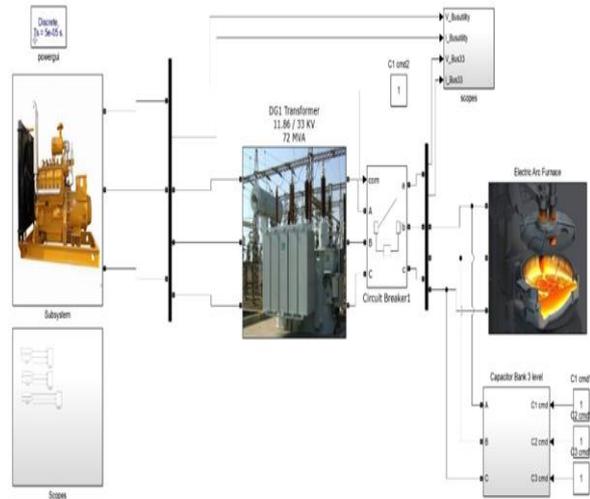
تم في بيئة المحاكاة من تمثيل حالة تشغيل الفرن القوسي لمرحلتين فقط. إن هذه الظاهرة من التشغيل التي لم تستمر أكثر من (24) ثانية أدت إلى توقف البرنامج عن العمل مما يعني وصوله إلى قيم رقمية في حل المعادلات خارج الحدود المسموحة لها في البرمجة. وسنستعرض خلال الأشكال التالية النتائج التي تم التوصل لها خلال تلك المرحلة من تشغيل الفرن.



الشكل (13) ظاهرة ظنين للأستطاعات عند حالة 60 ميغا واط

أما بالنسبة للتيار فقد ارتفعت قيمته الفعالة ليصل إلى حدود 30(KA) كبداية ثم انخفض وعاد ليتأرجح على شكل نبضات غير منتظمة أيضاً تبعاً لحالات الفصل والوصل. سيتسبب ارتفاع التوتر هذا في قضبان المولد إلى ارتفاع مقابل على ثانوي المحول وفقاً لنسبة التحويل (33/11.86) أي لقيم أعلى بكثير من (KV) 33، مما سيؤدي حتماً لتلف عازلية ملفات الثابت في المولدات التزامنية ومحول الاستطاعة وانفجارها، كما أن ارتفاع التيار لمثل هذه القيم سيؤدي حتماً لانفجار المولد والمحول. بالنسبة لقيم الاستطاعة الفعلية والرديية، فنلاحظ من الشكل (13) حدوث ظاهرة تشبه الطنين، إذ ترتفع الاستطاعة الحقيقية لتصل إلى (GW) 4 تعود للانخفاض والتأرجح حول قيمة (MW) 200.

كما نلاحظ أن توتر والتيار الفرن لن يكونا سليمين كما في حالة التشغيل النظامي الموضحة في الشكل (10)، إنما سيتأرجح بحيث يصل قيم التوتر إلى قيم تساوي 6-8 أمثال التوتر الاسمي للفرن، بينما يصل التيار إلى قيم تساوي (KA) 5. إن تلك القيم ليست قيم التشغيل الطبيعية للفرن، كما أن قفزات التوتر تلك ستسبب تلف التجهيزات الكهربائية في الفرن والتوصيلات الموافقة لها (الشكل (14)).

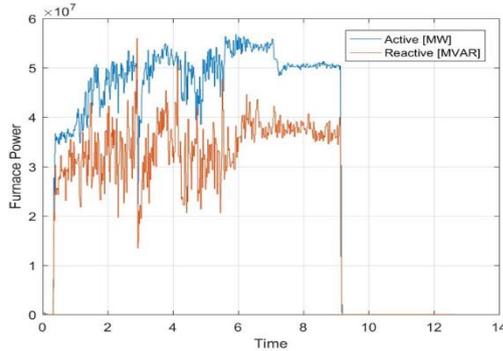


الشكل (12) توتر والتيار المغذي للفرن من مجموعات توليد

ورقوزق

مجموعات التوليد بعنفات ديزل، مع نظام تحكم كامل بتوتر التهييج، سرعة الدوران، توتر الربط مع المحولة. بلوك محولة فرن الصهر، المفاعلة التسلسلية، ومنحنيات الاستطاعة اللحظية المستجرة من قبل الفرن، التي تم اعتمادها في المثال السابق، أخذت كما هي دون أي تغيير في هذه الحالة. نتائج تمثيل تشغيل الفرن عبر مجموعات توليد باستطاعة (MW) 90.

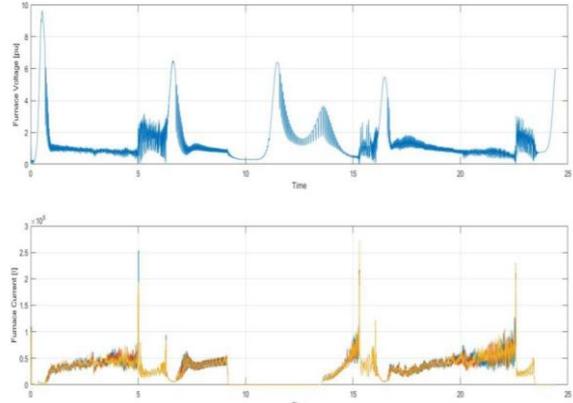
لم نتمكن في بيئة المحاكاة من تمثيل حالة تشغيل الفرن القوسي سوى لمرحلة واحدة فقط الشكل (16)، إن هذه الظاهرة التي لمسناها في المرحلة الأولى من التشغيل (09) ثانية أدت إلى توقف البرنامج عن العمل مما يعني وصوله إلى قيم رقمية في حل المعادلات خارج الحدود المسموحة لها في البرمجة. وسنستعرض خلال الأشكال التالية النتائج التي تم التوصل لها خلال تلك المرحلة الأولى من تشغيل الفرن.



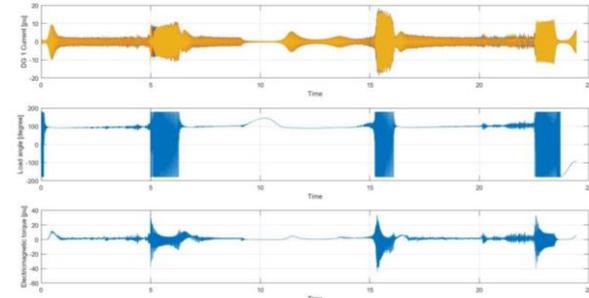
الشكل (16) نتيجة تشغيل النموذج لحالة 90 ميغا واط

بالنسبة لتوترات وتيارات الدخل القادمة من مجموعات التوليد والمبين في الشكل (17)، نرى كيف أن مجموعات التوليد بدأت بالإقلاع وارتفع التوتر إلى حدود (KV) 80 على قضبان المولدة وبشكل نبضات غير دورية، علماً أن توتر المولد النظامي (KV) 11.86. أما بالنسبة للتيار فقد ارتفعت قيمته الفعالة ليصل إلى حدود (KA) 90 بدايةً ثم انخفض وعاد ليتأرجح على شكل نبضات غير منتظمة أيضاً تبعاً لحالات الفصل والوصل.

تقييم إمكانية تشغيل مجموعات توليد مستقلة لتشغيل فرن.....



الشكل (14) تأرجح تيار وتوتر الفرن عند التغذية من مجموعات توليد بالعودة إلى قراءات تشغيل مجموعات التوليد الشكل (15)، فنجد أن تيارات الثابت ستتجاوز القيم المسموحة لها لتصل إلى 10 أمثال التيار الاسمي للمولد، بينما تعمل هذه المولدات عند زاوية دوائر قريبة من 100 درجة وهي بعيدة جداً عن زاوية الاستقرار المعروفة للمولدات التزامنية (بحدود 20 درجة). أما العزم الكهرومغناطيسي فسيخضع لقفزات كبيرة تصل لحدود 10 أمثال قيمته الاسمية، الأمر الذي سيسبب حتماً عزوم قتل كبيرة يتلف عندها محور الدوران وينفجر المولد.

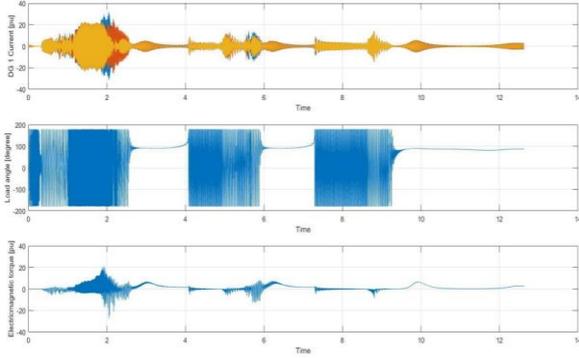


الشكل (15) تيار وزاوية الحمل والعزم للمولدات لحالة 60 ميغا واط

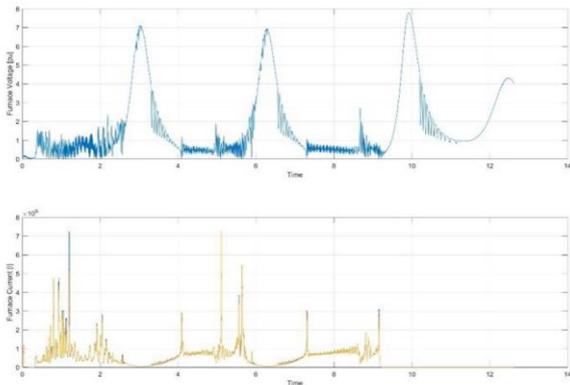
حالة تغذية الفرن من مجموعات توليد باستطاعة مساوية لـ 1.5 مرة استطاعة فرن القوس الكهربائي (90 MW). في هذه الحالة و عوضاً عن ربط الفرن بشبكة (KV) 230، فقد تم تغذيته من خرج ثلاث مجموعات توليد يبلغ استطاعتها الإجمالية (MW) 90، وتوتر خرج (KV) 11.86، أي ستكون توترات محولة مجموعات التوليد (KV) 11.86/33 أما استطاعة المحولة الرئيسية التي كانت موصلة على الشبكة العامة والبالغة (MVA) 100، فلم تتغير وبقيت كما هي في هذه الحالة. تدار

ورقوزق

أما بالنسبة للقراءات المباشرة على المولدات التزامنية الشكل (19)، فقد تم تسجيل قيم لتيار الثابت بحدود 20 مرة التيار الاسمي، وعزم كهرومغناطيسي بحدود 10 أمثال العزم الاسمي، وتأرجحت زاوية الدائر من 10 إلى 180 درجة بشكل شبه جيبي، علماً أن زاوية تشغيل المولدات التزامنية في الحالة المستقرة يجب ألا يتجاوز 20-30 درجة.



الشكل (19) تيار وزاوية الحمل والعزم للمولدات لحالة 90 ميغا واط بالعودة إلى منحنيات تشغيل الفرن في هذه الحالة الشكل (20)، نجد أنها بعيدة جداً عن حالات التشغيل المعروفة لدينا والموضحة في حالة الربط مع الشبكة العامة الشكل (10). مما يؤكد عدم إمكانية تشغيل الفرن واستمرارية عمله عبر مجموعات توليد باستطاعة (MW) 90.

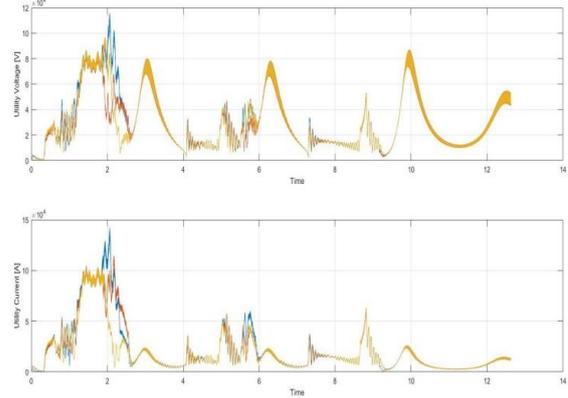


الشكل (20) تيار وتوتر الفرن لحالة 90 ميغا واط

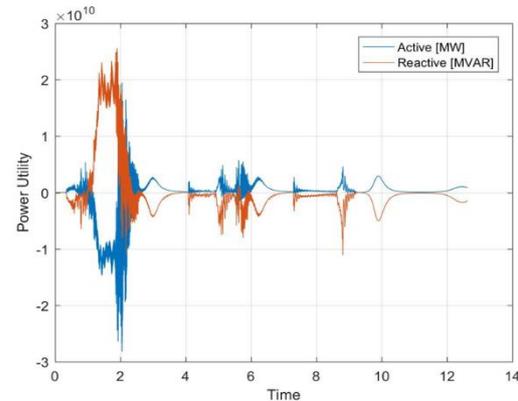
حالة تغذية الفرن من مجموعات توليد باستطاعة مساوية لـ 2.5 مرة احتياج فرن القوس الكهربائي (150 MW)

تقييم إمكانية تشغيل مجموعات توليد مستقلة لتشغيل فرن.....

إن ارتفاع التوتر على قضبان ربط مجموعات التوليد سيتوافق مع ارتفاع توتر على قضبان الـ (KV) 33 لقيمة تعادل نسبة تحويل المحول وبما يعادل 30 ضعف توتره الاسمي، مما سيسبب تلف عازلية ملفات الثابت في المولدات التزامنية ومحول الاستطاعة وانفجارها، كما أن ارتفاع التيار لمثل هذه القيم ويصبح أكبر من 40 مرة التيار الاسمي سيؤدي حتماً لانفجار المولد والمحول. ولتأكيد ما تم تحليله أعلاه، نبين في الشكل (18) تغيرات الاستطاعة الفعلية والردية اللحظية خلال مرحلة التشغيل الأولى، حيث أن الاستطاعتين الفعلية والردية متناظرتين بالنسبة للمحور الصفري وهي عبارة عن حالة ظنين بين ملفات المولدات التزامنية ومكثفات تحسين عامل الاستطاعة. إن مثل هذه الحالات من الاهتزاز تؤدي إلى تشكيل عزم قتل على محور الدوران تؤدي إلى تشوهه وانهاره.

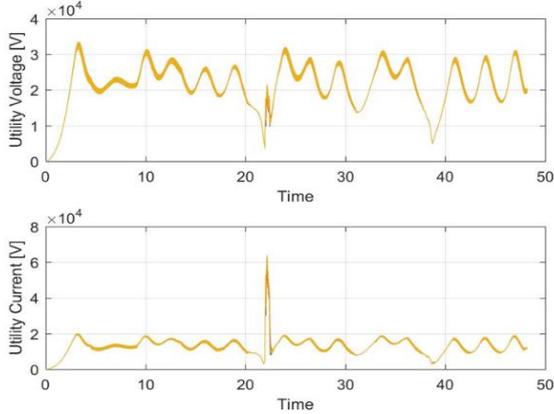


الشكل (17) توتر وتيار مجموعات التوليد لحالة 90 ميغا واط



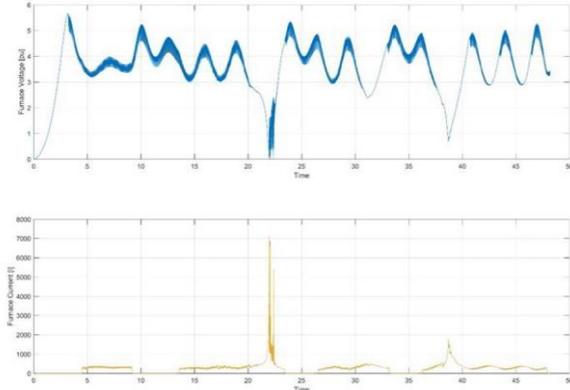
الشكل (18) تغيرات الاستطاعة الفعلية والردية اللحظية لحالة 90 ميغاواط

ورقوزق



الشكل (22) تيار مجموعة التوليد لحالة 150 ميغا واط

كما أنه لدى قياس التوتر والتيار في الفرن خلال فترة التشغيل السابقة الشكل (23)، نلاحظ أيضاً أن توتر الفرن قد ارتفع إلى 4 [pu] من التوتر الاسمي مع اهتزاز غير منتظم أيضاً، بالمقابل انخفض التيار عن قيمته الاسمية بشكل كبير، وهي حالة تشغيل غير منتظمة لأفران الصهر بالقوس الكهربائي.

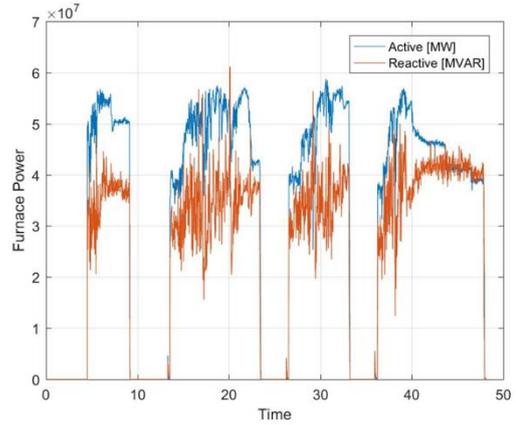


الشكل (23) توتر وتيار الفرن لحالة 150 ميغا واط

كما تبين أنه لدى الوصول لحالة انتهاء المرحلة الأولى من التشغيل أن التيار قد ارتفع بشكل كبير مقابل انخفاض للتوتر وهي حالة غير مقبولة في تشغيل الأفران القوس الكهربائي. بالعودة إلى قراءات مجموعات التوليد الخمس المركبة الشكل (24) لاحظنا أن تيار مجموعات التوليد يبدأ بالتزايد ليصل لحدود 2-3 [pu] التيار الاسمي لهذه المجموعات مع تزايد كبير جداً لدى انتهاء المرحلة الأولى من التشغيل. إن هذه التيارات خطيرة جداً وستؤدي لحرق ملفات مجموعات التوليد.

تقييم إمكانية تشغيل مجموعات توليد مستقلة لتشغيل فرن..... عوضاً عن ربط الفرن بشبكة 230 كيلو فولط، فقد تم تغذيته من خرج خمس مجموعات توليد يبلغ استطاعتها الإجمالية 150 ميغاواط بتوتر خرج (KV) 11,86. كذلك الأمر تدار مجموعات التوليد بعنفات غازية، مع نظام تحكم كامل بتوتر التهبيج، وسرعة الدوران، وتوتر الربط مع المحولة. بلوك محولة فرن الصهر والمفاعلة التسلسلية، ومنحنيات الاستطاعة اللحظية المستجرة من قبل الفرن، التي تم اعتمادها في المثال السابق، أخذت كما هي دون أي تغيير عن حالة الربط مع شبكة 230 كيلو فولط.

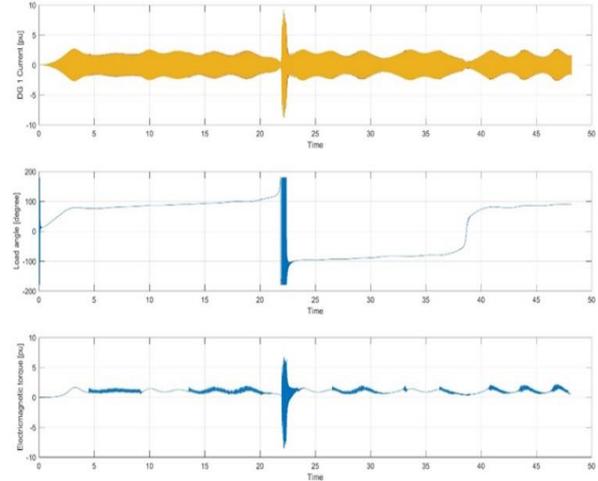
نتائج تمثيل حالة جزيرة ذاتية باستطاعة 150 ميغاواط: تمكننا في بيئة المحاكاة من تمثيل حالة تشغيل الفرن القوسي لمراحله الأربعة النظامية كما هو مبين في الشكل (21).



الشكل (21) نتيجة تشغيل النموذج لحالة 150 ميغا واط

يُلاحظ أن توتر خرج مجموعات التوليد قد ارتفع بعد أن أقلعت ووصل إلى قيم غير منتظمة ومهتزة، تبعاً لتغيرات الحمل في الفرن الشكل (22)، فقد وصل توتر خرج المولدات لأكثر من 25 كيلو فولط أي ما يعادل أكثر من ضعف قيمة توتر المولد الاسمي. كما أن تيار المولدات بدأ بالتزايد والاهتزاز، ولدى انتهاء المرحلة الأولى، انخفض التوتر وارتفع التيار إلى حدود 60 كيلو أمبير، وهذا يعادل عدة أضعاف تيار المولدات الفعالة. إن هذه القيم من التيار والتوتر ستؤدي إلى انهيار عازلية المولدات وانفجارها.

تقييم إمكانية تشغيل مجموعات توليد مستقلة لتشغيل فرن.....



الشكل (24) تيار وزاوية الحمل والعزم للمولدات لحالة 150 ميغا واط

بالنسبة لزاوية الدائر، فقد وجدنا أنها تتزايد مع تزايد تيار المولد أثناء الإقلاع، للتجاوز القيم المعروفة عالمياً لتصل بحدود 90 درجة ومن المعروف أنها زاوية عدم استقرار لمجموعات التوليد ولا يمكن تشغيل مجموعات التوليد على هذه الزاوية. كما لاحظنا أنه عند انتهاء المرحلة الأولى من التشغيل، سوف تخرج جميع مجموعات التوليد عن العمل وتبدأ بالاهتزاز مع مكثفات تحسين عامل الاستطاعة في جهة (KV) 33 كيلو فولط.

بالنسبة للعزم الكهرومغناطيسي الشكل (25)، فإنه أيضاً يبدأ بالتزايد تدريجياً في مرحلة الإقلاع ويتأرجح بعدها حول قيمة 1.5-2 مرة من قيمة العزم الاسمي، لكنه سوف يقفز لقيمة كبيرة جداً عند انتهاء المرحلة الأولى من التشغيل ليصل إلى 6 [pu]. إن هذه القيم من العزم ستؤدي لانهايار دائر المولدات.

مناقشة النتائج:

بينت نتائج التمثيل الواردة أعلاه استحالة استخدام نظام مولد - عنفة لتغذية فرن قوس كهربائي، وذلك مهما ارتفعت استطاعة المولدات المغذية للفرن. ذلك لأن تيار الصهر النبضي Pulsating الكبير المتغير بشكل عشوائي، يعمل على نقل المولد التزامني لحالة عدم الاستقرار [6]، نظراً لأن عطالة المولد - عنفة أكبر بكثير من زمن تغيرات التيار وبالتالي لا يستطيع نظام عنفة مولد ملاحقة هذه التغيرات السريعة للتيار،

ورقوزق

ونظراً لوجود نظام تحكم كامل بتوتر التهييج وسرعة الدوران، فإن هذا النظام كما أوضحت النتائج يحاول زيادة تيار التحريض لتقديم التوتر المطلوب لدخل الفرن، كما أن مرور التيار الكبير بالمولد يعمل على تطبيق عزوم عابرة كبيرة على محور الدوران يصل لأضعاف العزم الاسمي للنظام.

باختصار، يمكن القول إنه بالنسبة لزاوية الدائر للمولدات، فقد لوحظ أنها تتزايد مع تزايد تيار المولد أثناء الإقلاع، للتجاوز القيم المعروفة عالمياً وتصل إلى حدود 90 درجة (حالة MW 150)، كما تتراوح بين 10-180 درجة (حالة MW 90)، مما يسبب خروج نظام التغذية عن الخدمة والتزامن، ولا يمكن تشغيل مجموعات التوليد عند هذه الزاوية. كما تخرج جميع مجموعات التوليد عن العمل وتبدأ بالاهتزاز مع مكثفات تحسين عامل الاستطاعة في جهة 33 كيلو فولط (حالة MW 60).

أما بالنسبة للعزم الكهرومغناطيسي، يبدأ بالتزايد تدريجياً في مرحلة الإقلاع ويتأرجح بعدها حول قيمة 1.5-2 مرة من قيمة العزم الاسمي (حالة MW 150)، لكنه سوف يقفز لقيمة كبيرة جداً عند انتهاء المرحلة الأولى من التشغيل ليصل إلى 6 [pu] (حالة MW 150). كما يصل إلى 10 أمثال العزم الاسمي (حالة MW 90). إن هذه القيم من العزم ستؤدي لانهايار دائر المولدات.

بالنسبة لتوتر الفرن قد يرتفع إلى 4 [pu] (حالة MW 150) من التوتر الاسمي مع اهتزاز غير منتظم ورجفانات نبضية Flicker، بالمقابل ينخفض التيار عن قيمته الاسمية بشكل كبير، وهي حالة تشغيل غير منتظمة لأفران الصهر بالقوس الكهربائي. كما يرتفع توتر خرج المنوبات ليصل إلى 25 كيلو فولت (حالة MW 150). كما يرتفع توتر القضبان على مستوى 33 كيلو فولت ليصل إلى 30 ضعف (حالة MW 90). كما يرتفع تيار مجموعات التوليد ليصل إلى 2-3 التيار الاسمي (حالة MW 150) وقد وصل التيار إلى 20 مرة التيار الاسمي (حالة MW 90).

تقييم إمكانية تشغيل مجموعات توليد مستقلة لتشغيل فرن.....
 إن الاستطاعة الفعلية والرديية، تتأرجحان كما في حالة حدوث
 ظاهرة الطنين، إذ ترتفع الاستطاعة الحقيقية لتصل إلى 4 غيغا
 واط ثم تعود للانخفاض والتأرجح حول قيمة (MW) 200
 (حالة 60 MW). الاستطاعتين الفعلية والرديية متناظرتين
 بالنسبة للمحور الصفري وهي عبارة عن حالة طنين بين ملفات
 المولدات التزامنية ومكثفات تحسين عامل الاستطاعة. إن مثل
 هذه الحالات من الاهتزاز تؤدي إلى تشكيل عزوم قتل على
 محور الدوران وتؤدي إلى تشوّهه وانهيائه.
 إن النتائج التي تم الحصول عليها في هذا البحث تتشابه مع
 تلك التي تم إيجادها في بعض الدراسات العالمية مثل [7] و
 [8]. حيث تؤكد هذه الدراسات ان التوافقيات الناتجة عن الشكل
 النبضي لتيار الصهر في أفران القوس الكهربائي ستعرض
 محاور المنويات الكهربائية في مجموعات التوليد لإجهادات
 ميكانيكية كبيرة على مساند المحاور، مما يؤدي إلى احتمال
 تعطل عمل هذه المولدات [9].

الخلاصة:

تم في هذا البحث تحليل إمكانية تشغيل فرن قوس كهربائي
 حقيقي باستطاعة 60 ميغاواط من مجموعات توليد مستقلة،
 تمت عملية التحليل عن طريقة نمذجة ومحاكاة النظام
 الكهربائي للفرن ولمجموعات التوليد في بيئة النمذجة والمحاكاة
 MATLAB/SIMULINK بالاعتماد على بيانات فعلية لشركة
 صهر حديد. أظهرت النتائج استحالة عملية التشغيل من
 مجموعات توليد مستقلة، حيث أن تأرجحات تيار القصر أثناء
 الصهر تسبب ظهور تأرجحات في موجات التوتر والتيار
 وأيضاً للعزم الكهرومغناطيسي داخل المولدات لمجموعات
 التوليد، الأمر الذي سيسبب حتماً لأعطال ميكانيكية مثل
 انحراف محور الدوران وأعطال كهربائية مثل قصر الملفات.

التمويل: هذا البحث ممول من جامعة دمشق وفق رقم
 التمويل(501100020595).

References:

- [1] V. Rudnev, D. Loveless and R. Cook, Handbook of Induction Heating, CRC Press, 2017.
- [2] P. Narnaware and A. Thosar, "Power Quality Issues in induction furnace," International Journal of advanced Engineering and research development, p. Vol 3, 2016.
- [3] M. Nawaz, "A Power Control Scheme of a Medium Frequency Induction Furnace," Department of Electrical Engineering University of Engineering and Technology Lahore , 2009.
- [4] M. Alvaro, L. h. Hoang and 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.
- [5] S. L. Gbadamosi and M. Adegoke, "EFFECTS OF STEEL PLANTS WITH THREE-PHASE INDUCTION FURNACES On power distribution Quality of the existing 33 Kv network in Nigeria," Advances in Science and Technology Research Journal, vol. 9, no. 27, pp. 1-10, 2015.
- [6] J. D. O Fernández, "Design and Implementation of a 120A Resonant Inverter for Induction Furnace," in IEEE 978-1-4799-2370-0, 2013.
- [7] M. W. Baldwin, "Electric arc furnace impact on generator torque," IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, 2004., 2004, pp. 776-780 vol.2, doi: 10.1109/PSCE.2004.1397666.
- [8] T. Sürgevil and E. Akpınar, "Effects of electric arc furnace loads on synchronous generators and asynchronous motors," 2009 International Conference on Electrical and Electronics Engineering - ELECO 2009, 2009, pp. I-49-I-53, doi: 10.1109/ELECO.2009.5355296.
- [9] T.A. Lipo "Analysis of Synchronous Machines" CRC Press 2012, International Standard Book Number-13: 978-1-4398-8068-5.