

# نمذجة ومحاكاة اضطرابات جودة التغذية الكهربائية في شبكة التوزيع الكهربائية التي تغذي أحمالاً اضطرابية عالية

م. زينب العلي<sup>1</sup> د.م. سامر ربيع<sup>2</sup> د.م. روزبة مندو<sup>3</sup>

## الملخص

تعتبر أفران الصهر بالقوس الكهربائي من الأحمال الكهربائية الاضطرابية العالية المعقدة، ذات خصائص غير الخطية تسبب اضطرابات في جودة التغذية الكهربائية، مما يؤثر سلباً على أداء الشبكة الكهربائية. يهدف البحث إلى دراسة، وتحليل اضطرابات جودة التغذية الكهربائية الناتجة عن فرن قوس كهربائي 21MVA بسعة 30ton موجود في الشركة العامة للمنتجات الحديدية والفولاذية في مدينة حماة.

تم استخدام جهاز محلل الطاقة المبرمج Chauvin Arnoux C.A 8334B وفقاً للمواصفة القياسية العالمية /EN/IEC 61000-3-3-2013/ لإجراء القياسات العملية في نقطة الربط المشتركة، ثم بناء نموذج لشبكة التوزيع الكهربائية المغذية لهذا الفرن في بيئة برمجية Matlab/Simulink environment. حيث تمت عملية محاكاة النموذج من أجل عدة حالات تشغيل مختلفة للفرن. أظهرت الاختبارات على النموذج كفاءة النموذج وقدرته على محاكاة الاضطرابات الناتجة وبالتالي إمكانية تحديد طريقة العلاج المناسبة لكل اضطراب، كما أظهرت القياسات العملية قيماً مرتفعة للتوافقيات، تجاوزت القيم الحدية المسموحة عالمياً. وهذا يؤكد أن مكثفات التعويض المستخدمة غير كافية ولا تقوم بمعالجة الاضطرابات الحاصلة بالشكل المطلوب، لذلك تم اقتراح حلول مجدية لمعالجة تلك الاضطرابات بغية تحسين جودة التغذية الكهربائية وأداء المعدات.

**الكلمات المفتاحية:** فرن القوس الكهربائي، اضطرابات جودة التغذية، النمذجة والمحاكاة، بيئة الماتلاب.

<sup>1</sup> طالبة دراسات عليا (دكتوراه) في قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث - حمص - سوريا

<sup>2</sup> أستاذ في قسم الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث - حمص - سوريا

<sup>3</sup> مدرس في قسم التحكم والحاسوب - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة البعث - حمص - سوريا

# Modeling and Simulation of Power Quality Disturbances in The Distribution Network That Feeds a Highly non-Linear Loads

Eng Zainab AL Ali , Dr. Eng Samer Rabih , Dr.Eng Rawzbh Mndow

## Abstract

Electric arc smelting furnaces are considered to have complex, highly turbulent electrical loads with non-linear characteristics, which cause disturbances in the quality of the electrical supply, which negatively affects the performance of the electrical network. The research aims to study and analyze the disturbances in the quality of the electrical supply resulting from a 21MVA electric arc furnace with a capacity of 30ton located in the General Company for Iron and Steel Products in the city of Hama. A programmed energy analyzer, Chauvin Arnoux 8334B-C.A., was used. according to international standard /EN/IEC 61000 -3-3-2013/.

In this research, a model of the electrical distribution network feeding this furnace was built using the Matlab/Simulink environment after conducting practical measurements. The simulation process was also carried out for several different operating cases of the furnace, where tests on the model demonstrated the efficiency of the model and its ability to simulate the resulting disturbances so as to determine the appropriate treatment method for each disturbance. Practical measurements also showed high values of harmonics, exceeding the internationally permissible limit values.

This confirms that the compensation capacitors used are insufficient and do not treat the disturbances as required. Therefore, feasible solutions have been proposed to treat disturbances in the quality of the electrical supply.

**Keywords:** electric arc furnace, feed quality disturbances, modeling and simulation, MATLAB environment.

<sup>1</sup>Phd Candidate , Department of Electrical Power- Faculty of mechanical and electrical Engineering, Al-Baath University,Homs,Syria

<sup>2</sup> Professor , Department of Electrical Power- Faculty of mechanical and electrical Engineering, Al-Baath University,Homs,Syria, Homs,Syria

<sup>3</sup> Lecturer, Department of Control and Computing- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Al-Baath University, Homs- Syria.

## 1-المقدمة:

لقد أحدثت أفران القوس الكهربائي ثورة حقيقية في مجال صناعة الحديد، والفولاذ. إذ تعتمد هذه الأفران على الحرارة المتولدة نتيجة مرور تيارات كهربائية كبيرة متغيرة باستمرار عبر الأقطاب والخردة المعدنية والتي تصل حتى  $3500C^0$  [2]، [1]. على الرغم من المميزات العديدة لهذه الأفران إلا أن السلوك العشوائي للقوس الكهربائي المتشكل يسبب اضطرابات مهمة ومؤثرة في خصائص جودة التغذية الكهربائية (انحراف التردد، تغيرات في الجهد والتيار، التوافقيات الفردية، والزوجية، وكذلك الارتعاش، وانخفاض عامل الاستطاعة). لذلك كان من الضرورة بمكان البحث والدراسة في طرق تشخيص ومعالجة هذه الاضطرابات لتحسين جودة التغذية الكهربائية وبالتالي تطوير الإنتاج كما ونوعاً [21]، [19]، [15].

قامت الدراسات التجريبية بوضع المعايير الدولية المسموحة التي تحدد معايير جودة التغذية الكهربائية العالمية [6]، ( IEC 61000-4-30 defines power quality ). في نقاط الربط المشتركة PCC مع الأحمال الاضطرابية العالية كفرن القوس الكهربائي [18]. كما بحثت إحدى الدراسات المرجعية في تأثير معوض الاستطاعة الردية الستاتيكي SVC على التوافقيات الناتجة عن فرن القوس الكهربائي وأظهرت نتائجها أن هذا المعوض لا يخفف من قيم التوافقية الثانية بل يزيد من قيمتها. تم اقتراح ربط مرشح خاص بالتوافقية الثانية [9]. كما توصلت دراسة أخرى إلى ضرورة الدقة في القياسات العملية وأهمية ذلك في تحليل تشوه الجهد الناتج عن فرن القوس الكهربائي، مما يعد أساساً في وضع الخطط للتطوير المستقبلي المتعلق بأفران القوس الكهربائي، وتصميم النماذج الحاسوبية لمحاكاة حالات التشغيل [8].

في هذا البحث تمت دراسة حالة أحد أفران الصهر بالقوس الكهربائي 21MVA موجود في الشركة العامة للمنتجات الحديدية والفولاذية في مدينة حماة من أجل تحليل، ودراسة

اضطرابات جودة التغذية الكهربائية الناتجة عنه، والتحقق من طريقة العلاج المستخدمة وهل هي كافية. ومجدية. واقتراح استخدام طرقاً أخرى في العلاج مثل استخدام STATCOM أو ربط ملفات تحريضية على التفرع مع مكثفات التعويض الموجودة [1]. لهذا الغرض تم ربط جهاز محلل الطاقة المبرمج في نقطة الربط المشتركة وهي خرج المحولة الرئيسية 230/33kV المغذية لهذا الفرن، ومن ثم إجراء القياسات العملية لمعظم الاضطرابات الكهربائية الناتجة، ورسم المخططات التي تبين تغيرات قيم كل اضطراب ناتج ومدى تجاوزها للقيم الحدية المسموحة عالمياً. بما أن سلوك فرن القوس الكهربائي هو سلوك فوضوي عشوائي لذلك تم استخدام طرق المجال الزمني التي تعتمد على المعادلات التفاضلية في تصميم وتطوير نموذج لدارة كهربائية مكافئة في بيئة برمجية MATLAB / Simulink من أجل محاكاة حالات التشغيل المختلفة للفرن. مع الأخذ بعين الاعتبار التغير العشوائي في قيمة الاستطاعة الفعلية التي يسحبها فرن القوس الكهربائي [3]، [20].

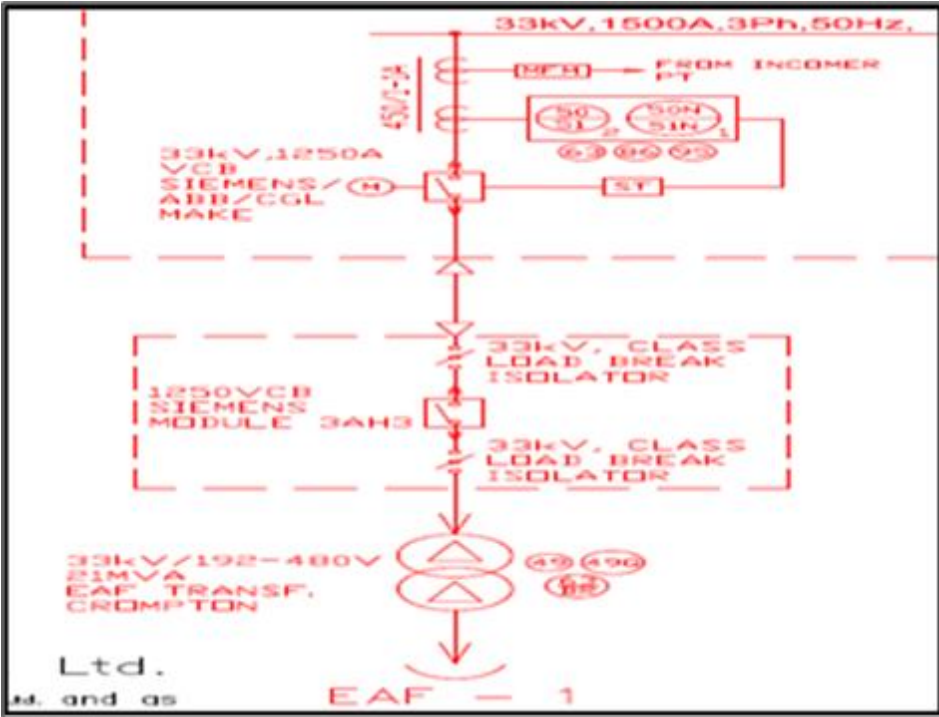
كما تم إجراء مقارنة القياسات العملية مع القياسات في النموذج، وحساب الخطأ النسبي المئوي [14]. حيث أظهرت النتائج كفاءة النموذج المستخدم، وقدرته على محاكاة حالات تشغيل مختلفة للفرن وبالتالي استخدامه كأساس في التخطيط لتطوير أفران القوس الكهربائي مستقبلاً .

## 2- طرق البحث ومواده:

تمت دراسة، وتحليل اضطرابات جودة التغذية الكهربائية الناتجة عن فرن قوس كهربائي 30Ton-21MVA، طاقته الانتاجية 150ton يومياً يتغذى من شبكة التوزيع الكهربائية، والذي تم توصيله كما هو مبين في الشكل (1):

حيث تتألف المنظومة من خط تغذية 230kV يغذي محولة رئيسية ثلاثية الطور خافضة للجهد 230/33KV. تم توصيل ملفات الدارة الأولية بشكل نجمي مؤرض

مباشرة ، أما ملفات الدارة الثانوية، فقد تم توصيلها بطريقة نجمي مؤرّض عبر مقاومة تأريض  $17.3\Omega$  استطاعتها 63MVA ربطت مع محولة ثانية عبر كابل أرضي طوله 150m معزول بالزيت، تسمى المحولة الثانية بمحول الفرن خافضة للجهد (33kV/192-480V)، استطاعتها 21MVA وصلت ملفات دارتها الابتدائية والثانوية بشكل مثلثي، زودت الدارة الثانوية بـ TAP-CHANGER ذو 13 نقطة تفريع للتحكم بالجهد الذي يعمل عليه الفرن. يقوم الفرن بصهر شحنات من الخردة المعدنية المختلفة من حيث نوع المعدن على شكل تسلسلي مستمر .



الشكل (1): مخطط كهربائي يوضح طريقة توصيل فرن القوس الكهربائي إلى شبكة التوزيع الكهربائية السورية في مدينة حماة.

تم إجراء القياسات العملية لاضطرابات جودة التغذية الناتجة عن هذا الفرن بواسطة استخدام جهاز محلل الطاقة ثلاثي الطور من النوع (C.A 8334B)، والذي تم ربطه في خلية القياس من تاريخ 2023/8/27 وحتى 2023/8/31 وهي خرج المحولة

نمذجة ومحاكاة اضطرابات جودة التغذية الكهربائية في شبكة التوزيع الكهربائية التي تغذي أحمالاً اضطرابية عالية

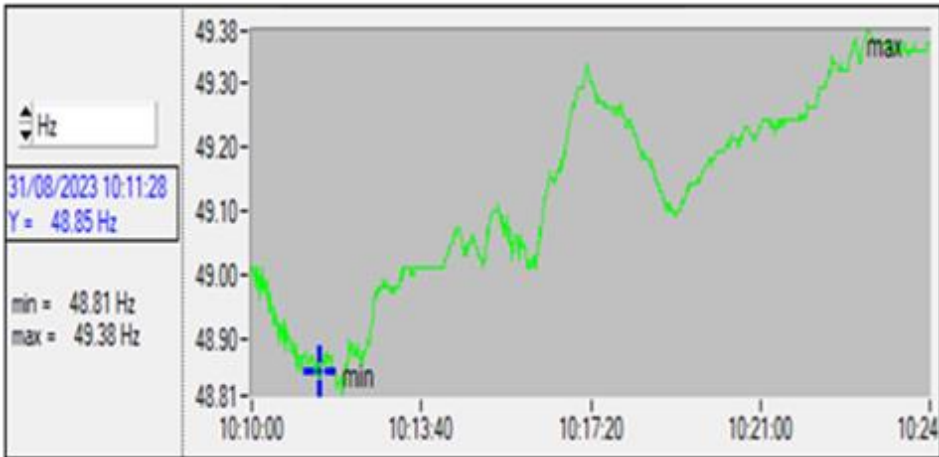
الرئيسية 230/33kV). حيث بينت قيم الاضطرابات المقاسة تجاوزها القيم المعيارية العالمية المسموحة وهذا ما يؤكد عدم كفاية مكثفات التعويض في تعويض الاستطاعة الردية، مما يتطلب استخدام طرق علاج أخرى مثل STATCOM أو ربط ملفات تحريضية على التفرع مع المكثفات الموجودة.

### 3 - قياس وتشخيص اضطرابات جودة التغذية الكهربائية:

يعرف الاضطراب الكهربائي بأنه مفهوم يصف المشاكل والملوثات التي تتعرض لها موجة التغذية في أي نظام كهربائي، وبالتالي فإن مستوى التغذية الكهربائية فيما إذا كان جيداً أو سيئاً يحدده أداء التجهيزات وعملها بالشكل الأمثل. وأهم هذه الاضطرابات (انحراف التردد، تغيرات التيار والجهد، التوافقيات الفردية والزوجية، تقلبات الذروة للجهد والتيار، وانخفاض عامل الاستطاعة).

### 3-1 قياس تغيرات التردد Frequency Changes:

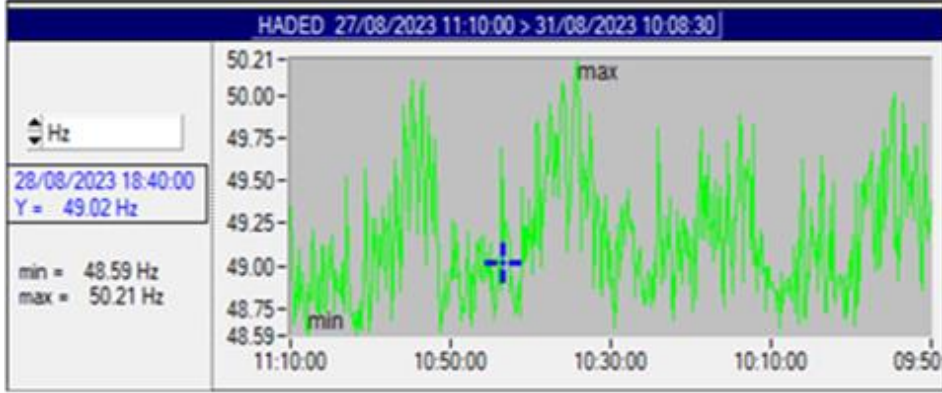
تم تسجيل تغيرات التردد بواسطة جهاز محلل الطاقة في نقطة الربط المشتركة PCC 33kV أثناء تشغيل الفرن مع مكثفات التعويض، حيث تم اختيار زمن القياس 15min وهي المدة اللازمة لصهر شحنة واحدة تبدأ من الحالة الصلبة وحتى السائلة كما هو مبين في الشكل (2).



الشكل (2): تغيرات التردد في نقطة الربط المشتركة PCC 33kV عند تشغيل الفرن مع

مكثفات التعويض في مرحلتي القياس .

ولمعرفة تغيرات التردد بشكل أوضح، تم ربط جهاز محلل الطاقة لمدة 4 أيام من أجل عدة شحنات متكررة مع المحافظة على شروط التشغيل نفسها، وكانت النتائج كما هي مبينة في الشكل (3).



الشكل (3): تغيرات التردد في نقطة الربط المشتركة (PCC 33kV) عند تشغيل الفرن مع

مكثفات التعويض مدة 4 أيام

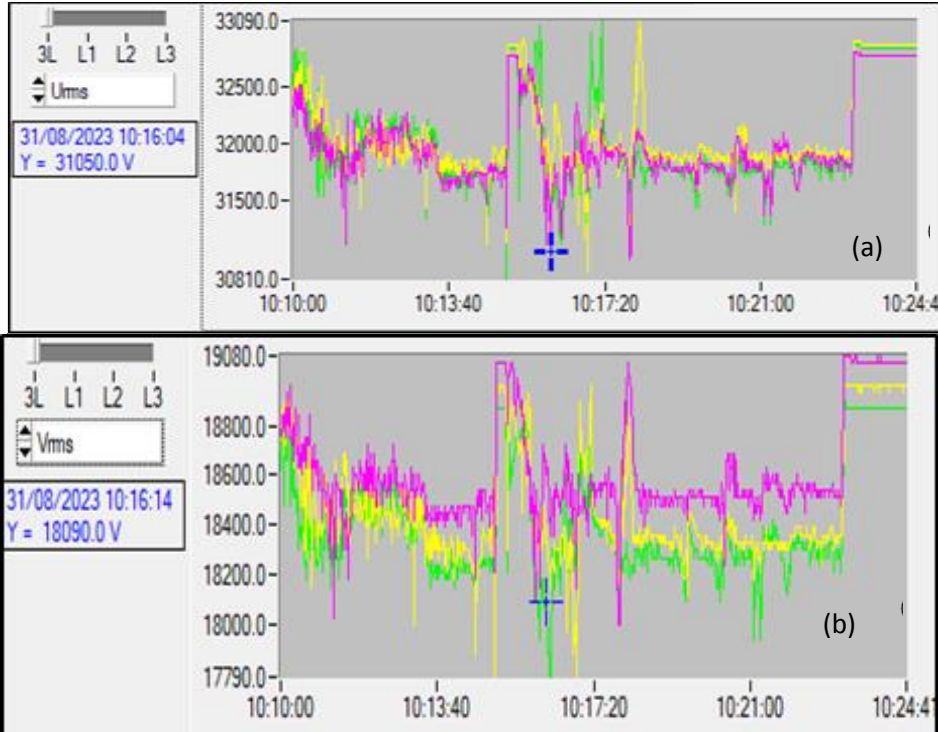
الجدول (1): القيمة العظمى والصغرى للتردد المقاس في نقطة الربط المشتركة

التغير المسموح به	قيمة تغير التردد كنسبة مئوية من التردد الأساسي	القيمة الصغرى للتردد Hz	القيمة العظمى للتردد Hz	حالة التشغيل
± 0.5 % OF 50Hz	1,44 %	48.59	49.31	الحالة الصلبة
	1.94 %	49,24	50.21	الحالة السائلة

نلاحظ من المخطط أن قيم التردد تتغير باستمرار بشكل عشوائي غير ثابت أو مستقر وذلك بسبب السلوك العشوائي للفرس الكهربائي، وأيضاً بسبب عدم استقرار الحمل وتغيره بصورة مستمرة، إذ سجلت أدنى قيمة للتردد 48,59Hz، وأعلى قيمة 50.21Hz. هذا التغير غير المستقر قد تجاوز المجال المسموح به ( $\pm 0.5\%Fn$ ) بالتالي سيؤثر على أداء التجهيزات الإلكترونية.

### 2-3 قياس تغيرات الجهد Voltage Changes

تم قياس القيمة الفعلية للجهود بين كل طورين (Phase-Phase)- Urms (V) وكذلك جهد كل طور (Phase to ground) - Vrms (V) كما هو موضح في الشكل (4) a,b: عند تشغيل الفرن مدة زمنية من الساعة: 10:10 وحتى الساعة 10:24 في نقطة الربط المشتركة (PCC 33K.V).



الشكل (4): تغيرات جهد الخط وجهد الطور في نقطة الربط المشتركة (PCC 33kV) عند تشغيل الفرن مع مكثفات التعويض في مرحلتي الصهر.

تبين من الشكل (4) a : أن أكبر تغير لجهد الخط المقاس في نقطة الربط المشتركة يحدث في المرحلة الصلبة بسبب عدم استقرار القوس الكهربائي المتشكل بين الأقطاب والخردة الصلبة في هذه المرحلة، حيث يلاحظ هبوطاً مهماً في جهد الخط. فقد وصل جهد الخط إلى القيمة 30.8kV عند اللحظة (10:14:20) وذلك بسبب التغير الكبير والعشوائي للتيار في هذه المرحلة إذ أنّ كل تغيير في التيار يقابله تغييراً في الجهد. حددت



المواصفة القياسية العالمي (IEC/ 61000-3-2) أعظم قيمة للتغير بالقيمة  $(3\%U_N)$  بين قيمتين للجهد  $U_A, U_B$  كما في العلاقة (1) :

$$\Delta U = \frac{U_A - U_B}{U_N} 100 \% \quad (1)$$

لوحظ أن تغير جهد الطور الأول قد وصل إلى القيمة  $6.24\%U_N$  متجاوزاً القيمة الحدية المسموح بها عالمياً وهي  $(3\%U_N)$  في المرحلة الصلبة من الصهر، بينما كان أدنى منها في المرحلة السائلة وذلك بسبب التغير السريع في الطلب على الاستطاعة في المرحلة الصلبة التي يحدث فيها تغير عشوائي، وسريع للقوس المتشكل بين الأقطاب والخردة المعدنية.

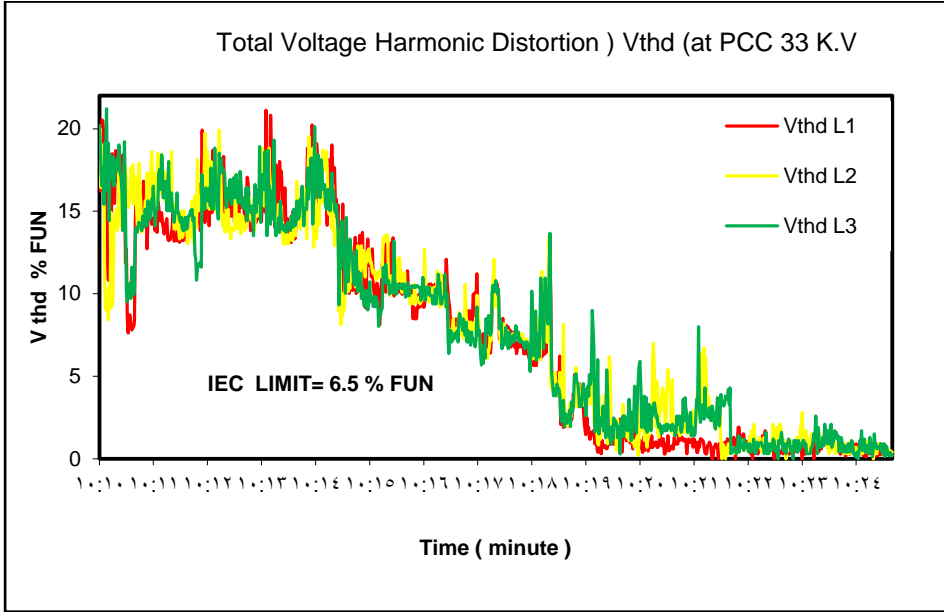
### 3-3 قياس معامل التشوه التوافقي الكلي للجهد ( Vthd )

يعتبر معامل التشوه التوافقي الكلي (Total Harmonic Distortion) ( thd ) من المؤشرات الأساسية التي تحدد مقدار جودة التغذية الكهربائية ومدى انحرافها عن المقاييس العالمية المحددة في النظم الدولية ويعطى كما في العلاقة (2) [9]، [8] .

$$thd\% = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} h_n^2}}{h_1} \times 100 \quad (2)$$

$h_1$  : مطال المركبة الأساسية  $h_n$  : مطال التوافقية ذات الرتبة n

وقد حددت المواصفة القياسية العالمية IEC 61000-3-2 القيمة الحدية المسموح بها على توتر 33K.V بالقيمة 6.5% كنسبة مئوية من قيمة المركبة الأساسية للجهد. وعند قياس معامل التشوه التوافقي الكلي للجهد في نقطة الربط المشتركة كانت النتائج كما هو مبين في الشكل (5) وذلك عند تشغيل الفرن في مرحلتي الصهر ( الصلبة ، السائلة ) من أجل إحدى الشحنات وزمن قدره 15 دقيقة للشحنة الواحدة. لقد أظهرت النتائج قيمة عالية ومتغيرة لمعامل التشوه التوافقي الكلي للجهد Vthd و أعلى من الحد المسموح به في المرحلة الصلبة من الصهر، أما في المرحلة السائلة فقد انخفضت قيمة Vthd وكانت أدنى من الحد المسموح به، وهذا يؤكد عدم كفاية مكثفات التعويض الموجودة على تخفيف أو إلغاء التوافقيات في المرحلة الصلبة من الصهر.



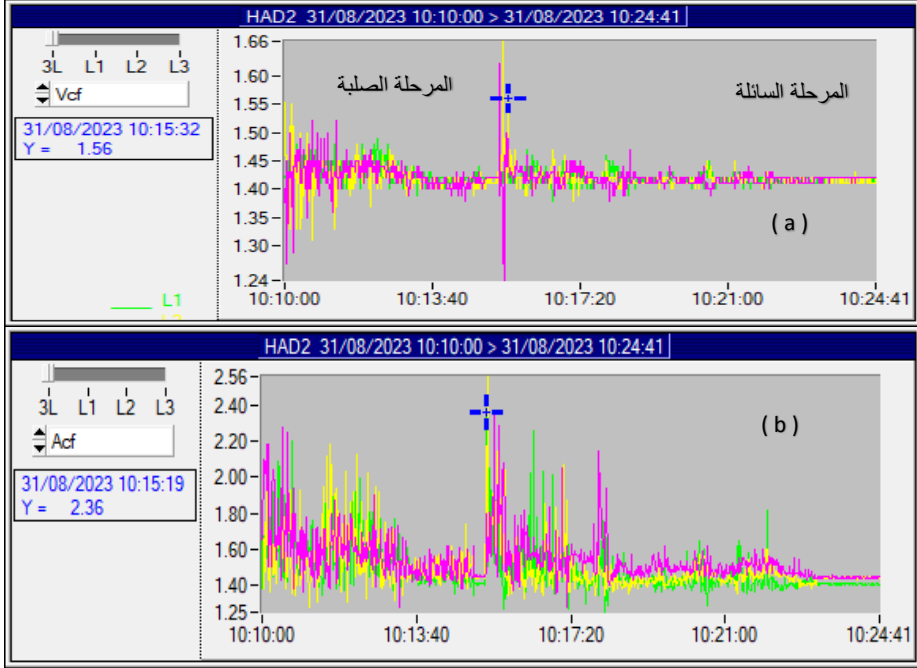
الشكل (5): تغيرات معامل التشوه التوافقي الكلي للجهد في نقطة الربط المشتركة عند تشغيل الفرن مع مكثفات التعويض.

### 3-4 اضطراب الذروة:

يتم تحديده بواسطة معامل الذروة (crest factor) لكل من جهد الطور والتيار الطور، ويعتبر من اضطرابات جودة التغذية الكهربائية المهمة والتي تشير إلى الشكل الغير جيبى لموجة الجهد والتيار. وقد حُدد معامل الذروة في الموجة الجيبية بالقيمة 1.414 وبالتالي أي قيمة انحراف عن هذه القيمة تدل على وجود الاضطراب. إن قيمة  $V_{cf}$  تعطى كما في العلاقة (3) :

$$\text{Voltage crest factor } (V_{cf}) = \text{peak voltage}/V_{rms} = 1.414 \quad (3)$$

يبين الشكل (6) نتائج القياس لكل من عامل الذروة للجهد والتيار ( $V_{cf}$ ,  $A_{cf}$ ) في نقطة الربط المشتركة:



الشكل (6): تغير معامل الذروة للجهد a وللتيار b في نقطة الربط المشتركة عند تشغيل الفرن مع مكثفات التعويض في مرحلتي الصهر .

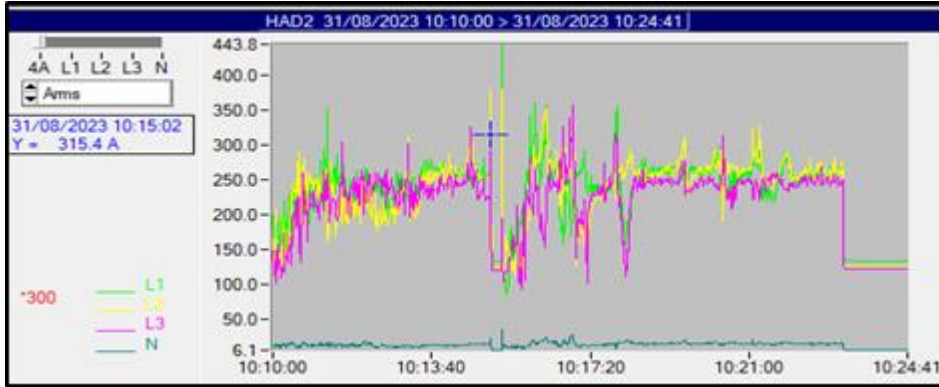
يظهر الشكل قيمة معامل الذروة للتيار أكبر من قيمة معامل الذروة للجهد وهذا يدل على أن التشوه الحاصل في التيار متغير بشكل عشوائي وأكبر منه في الجهد في المرحلة الصلبة من الصهر وقد تجاوز القيمة المعيارية (1.414)، بينما تنخفض قيمة معامل الذروة ومقدار التغير يقل أيضاً في المرحلة السائلة حيث يكون القوس مستقرًا.

### 3-5 قياس تغيرات التيار Current Changes :

تتغير قيمة التيار بشكل سريع في نقطة الربط المشتركة نتيجة للسحب العشوائي للاستطاعة من قبل فرن القوس الكهربائي ذي الطبيعة العشوائية وغير المستقرة [9], [4] ، وتحدد قيمة التغير المسموح به حسب المواصفة القياسية العالمية (IEC61000-3) ضمن المجال  $120\% I_n$  بين قيمتين متتاليتين كما هو مبين في الشكل (7):

يتم حساب تغير التيار بين قيمتين متغيرتين للتيار من العلاقة :

$$\Delta I = \frac{IA - IB}{In} 100 \% \quad (4)$$

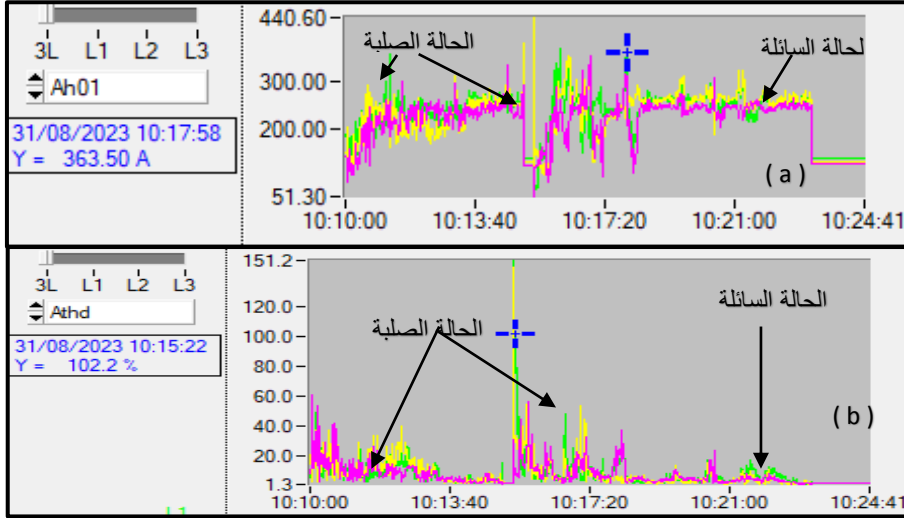


الشكل (7) : تغير القيمة الفعلية لتيار الأطوار الثلاثة في نقطة الربط المشتركة  
يبين الشكل تغير القيمة الفعالة للتيار بشكل كبير، حيث سجلت قيمة التغير بين قيمتين  
على الطور الثالث  $14.29\%In$  خلال مجال الزمن ( 10:15:02 to 10:15:05 )  
متجاوزة القيمة الحدية المسموح بها  $1.2\%In = 1500A$  في المرحلة الصلبة. أما في  
المرحلة السائلة فقد انخفضت قيمة التغير في القيمة الفعالة للتيار إلى  $0.33\%In$  وهي  
ضمن المجال المسموح به ، حيث في هذه المرحلة يكون القوس الكهربائي مستقرًا.

### 3-6 قياس عامل التشوه التوافقي الكلي للتيار ( $A_{thd}$ ) :

تتألف الإشارة المشوهة من المركبة الأساسية للتيار ذات التردد 50HZ ومجموعة من  
التوافقيات ذات تردد من مضاعفات التردد الأساسي، تحسب قيم التوافقيات وعامل  
التشوه التوافقي الكلي كنسبة مئوية من المركبة الأساسية كما هو مبين في الشكل (8) a,b,  
ولتحديد القيم المسموحة حسب المواصفة القياسية العالمية (IEC 61000 -3-15)  
يجب أن نحسب نسبة القصر (  $\frac{I_{SC}}{IL}$  ) ، في الحالة المدروسة كانت قيمة تيار الدارة  
القصيرة الأعظمي في نقطة الربط المشتركة  $ISC = 18539.81 A$  أما تيار الحمل  
الأعظمي  $IL = 1102.2A$  وبالتالي تكون  $\frac{I_{SC}}{IL} = 16.8$  . وأعلى قيمة مسموحة  
لمعامل التشوه التوافقي الكلي للتيار هي  $A_{thd} = 5\%$  من قيمة المركبة الأساسية للتيار  
الطور الواحد. حيث يتبين أن معامل التشوه التوافقي الكلي قد وصل في الدقيقة 10:

15:17 إلى 151 % على الطورين الأول والثاني على الرغم من تشغيل مكثفات التعويض وهذه القيمة أعلى بكثير من الحد المعياري المسموح به عالمياً مما يؤكد على وجود التوافقيات بقيم كبيرة في المرحلة الصلبة وأنّ مكثفات التعويض قد ساهمت بزيادة قيم بعض التوافقيات كالتوافقية الثالثة .



الشكل (8): عامل التشوه التوافقي الكلي للتيار

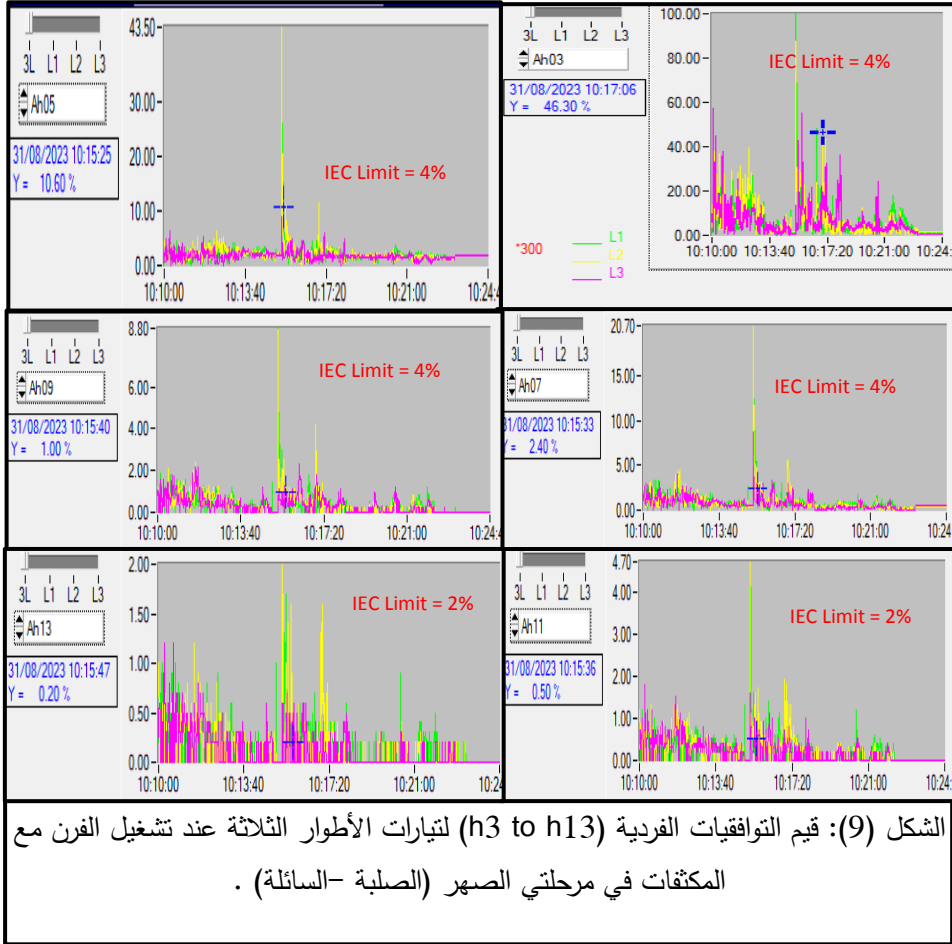
### 3-7 قياس توافقيات التيار ( Current harmonics ):

بسبب طبيعة السلوك العشوائي، وغير المستقر للأفران القوسية فإن ذلك يؤدي إلى نشوء تيارات توافقية، تكون عالية في المرحلة الصلبة والتي يكون فيها طول القوس الكهربائي متغير بشكل سريع وغير مستقر. وعند قياس التوافقيات الفردية للتيار من التوافقية ( Ah<sub>3</sub> to Ah<sub>13</sub> ) كنسبة مئوية من المركبة الأساسية على الأطوار الثلاثة (L<sub>1</sub>، L<sub>2</sub>، L<sub>3</sub>) عند تشغيل الفرن مع مكثفات التعويض في المرحلتين (الصلبة والسائلة) كانت النتائج كما هو مبين في الشكل (9).

إنّ القيمة المعيارية المحددة حسب المواصفة القياسية IEC 61000-3-12 للتوافقيات (Ah<sub>3</sub> to Ah<sub>9</sub>) هي 4%، أما التوافقيات من (Ah<sub>11</sub> to Ah<sub>13</sub>) تكون القيمة المعيارية هي 2%، من الشكل يتبين أن التوافقية الثالثة للتيار قد ظهرت بقيم كبيرة في المرحلة

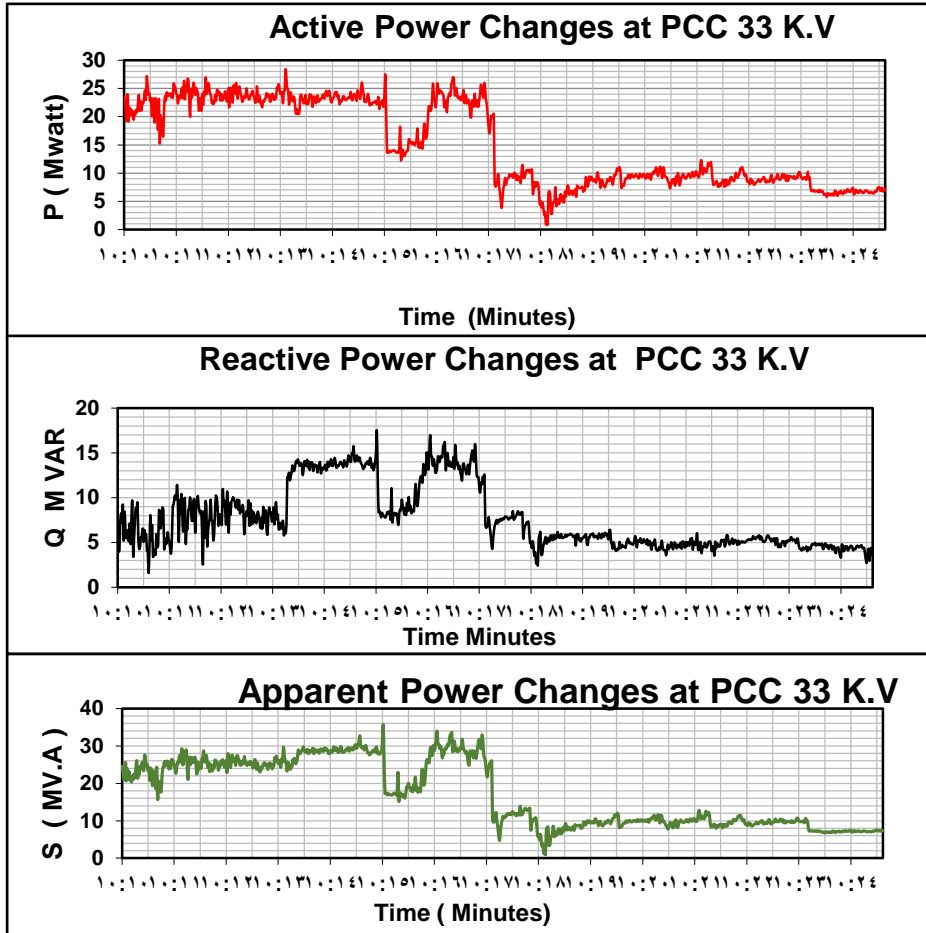
نمذجة ومحاكاة اضطرابات جودة التغذية الكهربائية في شبكة التوزيع الكهربائية التي تغذي أحلاماً  
اضطرابية عالية

الصلبة وانخفضت قيمتها في المرحلة السائلة لكنها بقيت متجاوزة للحد المسموح به عالمياً وكذلك التوافقية الخامسة والسابعة قد ظهرت بقيم كبيرة ومتجاوزة للحد المسموح به مما يؤكد أن مكثفات التعويض لا تساعد في تخفيف قيم التوافقيات أو إزالتها كما أنها تزيد من قيمة التوافقية الثالثة.



### 3-8 قياس تغيرات الاستطاعة : Power Changes

يبين الشكل (10) نتائج قياس الاستطاعة في نقطة الربط المشتركة أثناء دورة تشغيل فرن القوس الكهربائي لصهر شحنة واحدة أن الاستطاعات (P,Q,S) تتغير بشكل كبير في المرحلة الصلبة وذلك بسبب السحب العشوائي للتيار المترافق مع هبوط ملحوظ في الجهد. يبدأ هذا التغير بالتناقص مع تزايد تشكل السائل المعدني.



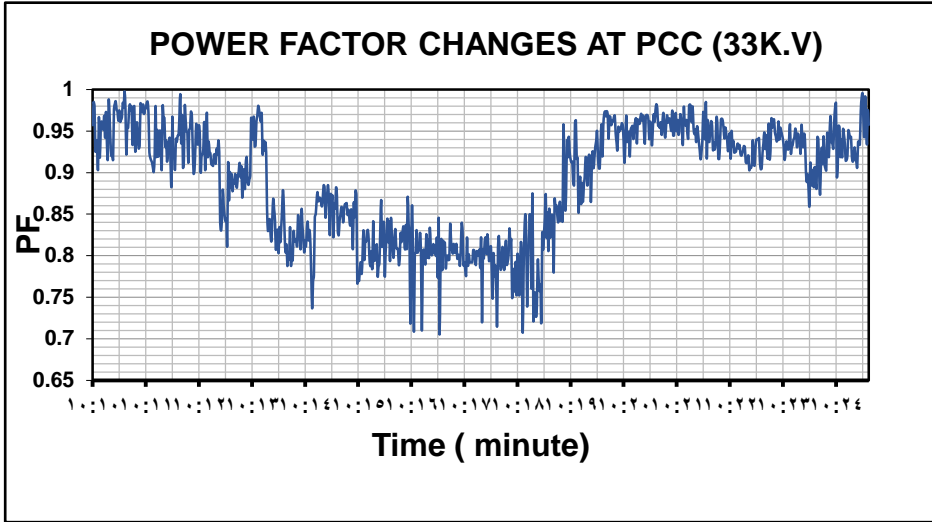
الشكل (10): تغيرات الاستطاعة الفعلية P والرديية Q والظاهرية S في نقطة الربط المشتركة عند تشغيل فرن الصهر في مرحلتي الصهر .

### 3-9 قياس تغيرات عامل الاستطاعة Power Factor Changes :

أظهر المخطط تغيرات معامل استطاعة فرن القوس الكهربائي في المرحلة الصلبة من الصهر، وعلى الرغم من وجود مجموعتين لتعويض الاستطاعة (مكثفات 2.1, 5.4 MVAR) إلا أنه حصل انخفاض في عامل الاستطاعة وصل إلى  $PF = 0.721$  وذلك بسبب الطلب على الاستطاعة الفعالة المتزايدة والمتغيرة بشكل عشوائي من قبل

نمذجة ومحاكاة اضطرابات جودة التغذية الكهربائية في شبكة التوزيع الكهربائية التي تغذي أحمالاً اضطرابية عالية

الحمل في هذه المرحلة بسبب دارات القصر المتشكلة بين الأقطاب والخردة والتي تتبع نوع الخردة المعدنية المعدة للصهر.



الشكل (11) : تغيرات عامل الاستطاعة في نقطة الربط المشتركة عند تشغيل الفرن مع مكثفات  
مكثفات التعويض في مرحلتي الصهر ( الصلبة - السائلة )

#### 4- النمذجة والمحاكاة:

إن أفضل الطرق المستخدمة في نمذجة أفران القوس الكهربائي هي المعادلات التفاضلية ضمن المجال الزمني والتي تعطى كمايلي :

$\frac{dR}{dT} = \frac{R}{\tau} \cdot \left(1 - \frac{v \cdot i}{P_0 \cdot R^{-\alpha}}\right), \quad g = \frac{1}{R}$	(1)
$g + t \cdot \frac{dg}{dt} = g_{min} + \left[1 - \exp\left(-\frac{i^2}{i_0}\right)\right] \cdot \frac{v \cdot i}{E_0^2} + \exp\left(-\frac{i^2}{i_0}\right) \cdot \left(\frac{i^2}{P_0}\right)$	(2)
$\tau = \tau_0 + \tau_1 \cdot \exp(-\alpha \cdot  i )$	(3)
$v = \frac{i}{g}$	(4)

$\frac{dR}{dT}$  : التغير العشوائي في مقاومة القوس الكهربائي .  
 $g$  : ناقلية القوس الكهربائي ،  $i$  : تيار القوس الكهربائي ،  $v$  : توتر القوس الكهربائي .



الجدول (2) : قيم الثوابت والبارامترات المستخدمة في المعادلات .

الشكل (12) : يوضح النموذج الرياضي للمعادلات المنفذ في

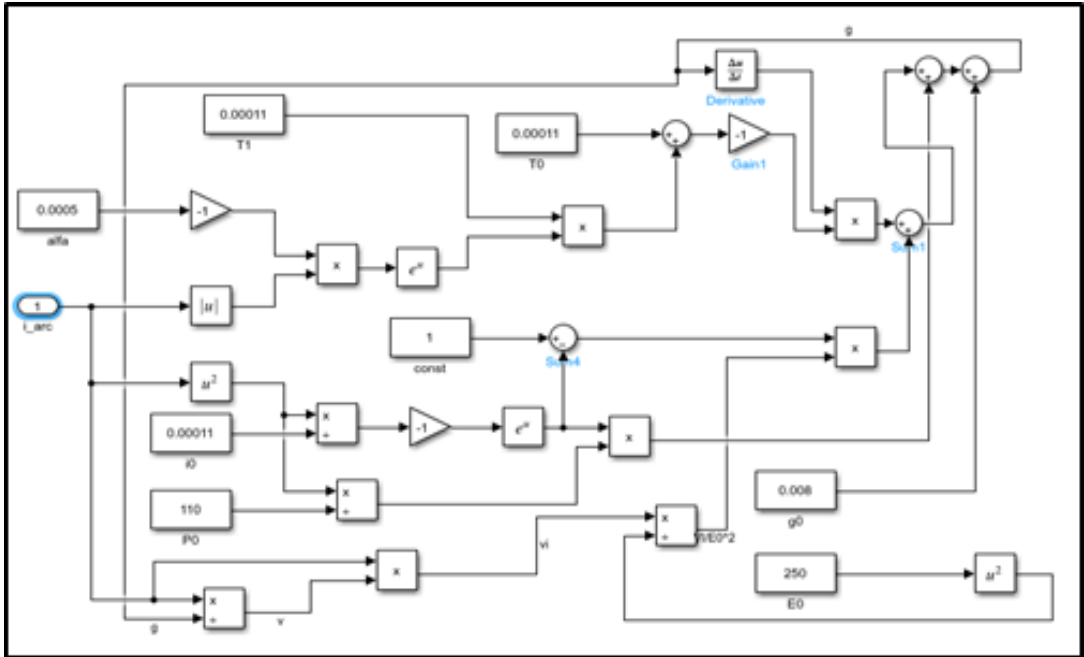
MATLAB/SIMULINK

الشكل (13) : يوضح النموذج الفيزيائي الكهربائي للمعادلات المستخدمة .

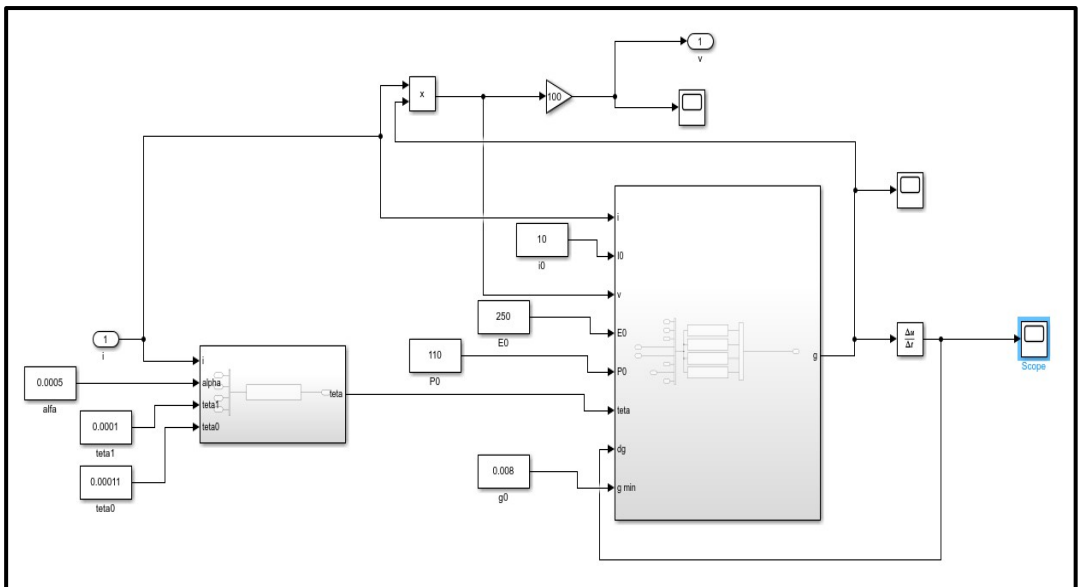
الجدول (2) : قيم الثوابت والبارامترات المستخدمة في معادلات القوس الكهربائي

التعريف	القيمة	البارامترات
أصغر تيار عابر للقوس الكهربائي	10 A	$i_0$
توتر اشتعال القوس	250V	$E_0$
أصغر قيمة لضياعات الاستطاعة	110 wat	$P_0$
ثابت زمني	110 $\mu$ s	$\tau_0$
ثابت زمني	100 $\mu$ s	$\tau_1$
قيمة ثابتة	0.0005	$\alpha$
الناقلية الصغرى للقوس	0.008	$g_{min}$
تابع أسّي	تابع	$\tau$

نمذجة ومحاكاة اضطرابات جودة التغذية الكهربائية في شبكة التوزيع الكهربائية التي تغذي أحمالاً  
اضطرابية عالية



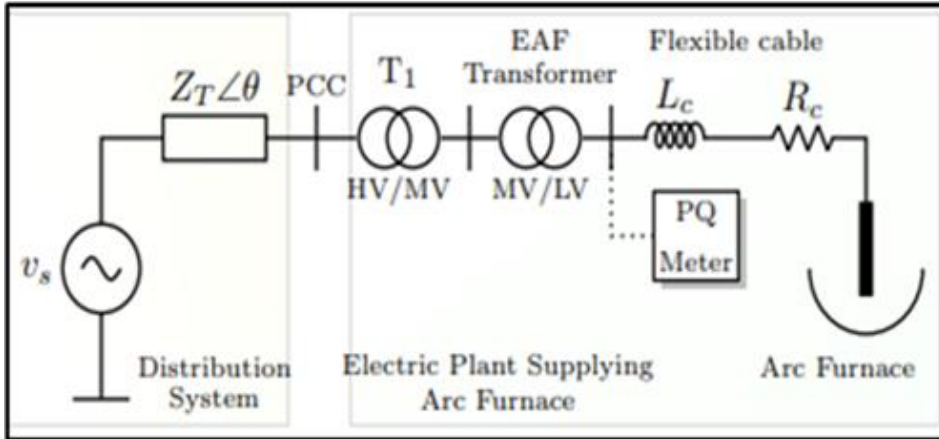
الشكل (12) : النموذج الرياضي / الماتلاب / المستخدم في نمذجة القوس الكهربائي المدرس



الشكل (13) : النموذج الفيزيائي الكهربائي المستخدم في نمذجة القوس الكهربائي المدرس

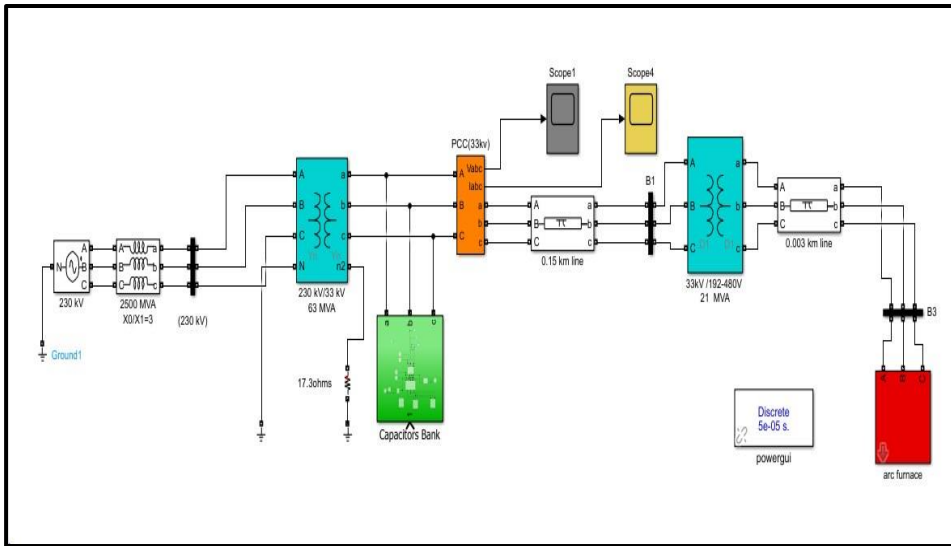
## 4-1: نمذجة الشبكة الكهربائية المغذية لفرن القوس الكهربائي:

تم بناء نموذج لجزء من الشبكة الكهربائية المغذية لفرن القوس الكهربائي المدروس. حيث تتألف هذه الشبكة من خط نقل بتوتر (230kV) الذي يغذي المحولة الكهربائية الرئيسية (Y/Y) خافضة للجهد (230/33kV) باستطاعة (63MVA). ترتبط هذه المحولة مباشرة مع المحول الكهربائي الثاني ( $\Delta/\Delta$ ) والذي يدعى محول الفرن عبر كبل أرضي معزول بالزيت بطول 150m. الملفات الأولية والثانوية موصولة بشكل مثلثي، خافضة للجهد أيضاً (33KV/192-480V)، باستطاعة (21MVA). ثانوي المحول يحوي على 13 فرع للتحكم بجهد الخرج للمحولة بواسطة TAP CHANGER وتستخدم في المعمل محطتين لتعويض الاستطاعة الردية وتتألف من مكثفتين (2.1MVAR, 5.4MVAR) توصل على التفرع إلى قضيب التجميع 33kV. يبين الشكل (14)، والشكل (15) طريقة توصيل نموذج فرن القوس الكهربائي إلى شبكة التوزيع الكهربائية في بيئة الماتلاب.



الشكل (14): مخطط بسيط لطريقة توصيل فرن القوس الكهربائي في بيئة الماتلاب

نمذجة ومحاكاة اضطرابات جودة التغذية الكهربائية في شبكة التوزيع الكهربائية التي تغذي أحمالاً اضطرابية عالية



الشكل (15): نموذج لشبكة التوزيع الكهربائية التي تغذي فرن القوس الكهربائي

2-4 قياس تغيرات التردد:

تم قياس التردد في نقطة الربط المشتركة بواسطة دائرة لقياس التردد مصممة في ماتلاب ومن ثم حساب الخطأ النسبي المئوي بالاعتماد على العلاقة الرياضية :

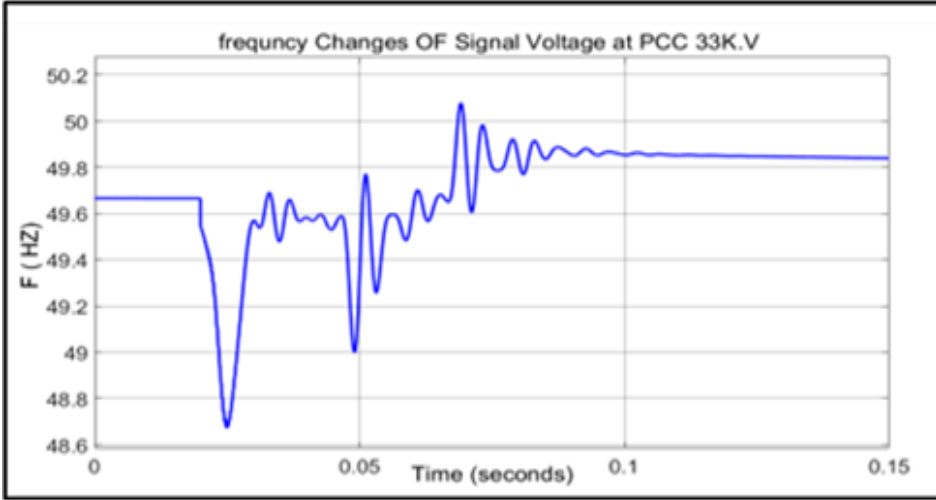
$$X_E = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|X_{i,model} - X_{i,real}|}{X_{i,real}} \cdot 100 \% \quad (5)$$

$X_i$  : قيمة الاضطراب ،  $N$  : هو عدد دورات مجال القياس الزمني.

الجدول (3): مقارنة قياس التردد في النموذج مع قياس التردد الحقيقي وحساب الخطأ

النسبي المئوي

المرحلة السائلة			المرحلة الصلبة				البارامترات
مقدار الانحراف عن القيمة المعيارية %0.5±	الخطأ النسبي المئوي % 10 ≥	القياس في النموذج	مقدار الانحراف عن القيمة الاسمية %0.5±	الخطأ النسبي المئوي % 10 ≥	القياس في النموذج	القياس الحقيقي	
≥0.1 %0.5±	1.03%	49.87	%2.82 ≥%0.5	2.064%	50.134	49.12	القيمة العظمى للتردد
	1.3%	49.82		49.18 %	0.178%	48.723	48.81



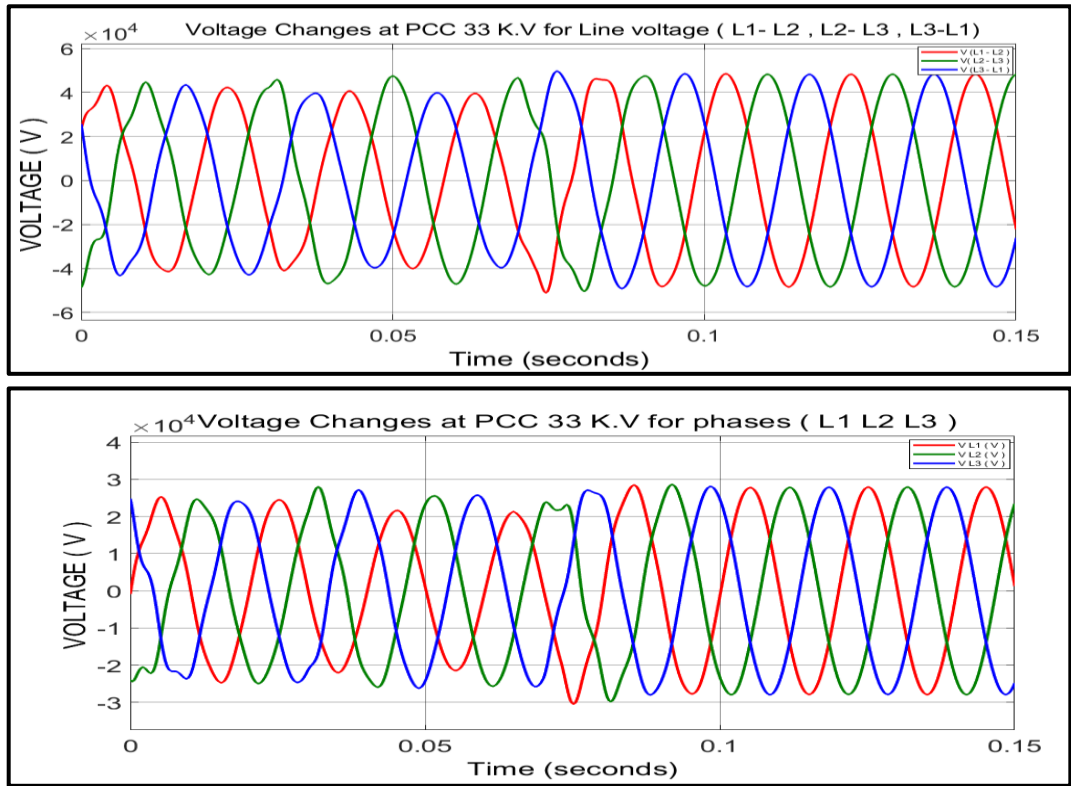
الشكل (16): تغيرات التردد في نقطة الربط المشتركة عند تشغيل الفرن مع مكثفات التعويض في مرحلتي الصهر (الصلبة، السائلة)

نلاحظ أن الخطأ النسبي المئوي أقل من 10% مما يؤكد قدرة النموذج على قياس التردد ومقدار تغيره في نقطة الربط المشتركة نتيجة توصيل أحمال غير خطية.

#### 4-3: قياس تغيرات الجهد:

من أجل قياس تغيرات جهد الخط وجهد كل طور في نقطة الربط المشتركة، تم أخذ زمن تشغيل النمذجة 0.15sec والتي تقابل على الواقع 15min.

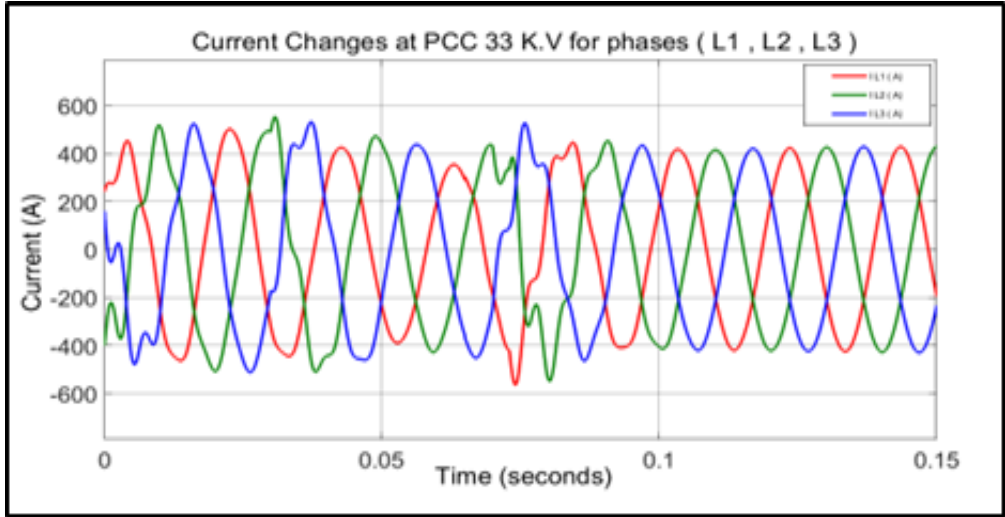
يظهر الشكل (17): تغيرات القيمة الفعلية لجهد الخط وجهد الطور المقاس في نقطة الربط المشتركة، حيث تظهر قيم التغير الكبيرة في المرحلة الصلبة من الصهر. أما في المرحلة السائلة فإن الشكل الموجي لكل من جهد الخط وجهد الطور يصبح جيبياً ومستقراً.



الشكل (17): تغيرات جهد الخط وجهد الطور في نقطة الربط المشتركة عند تشغيل الفرن مع مكثفات التعويض في مرحلتي الصهر

#### 4-4 قياس تغيرات التيار:

يبين الشكل (18) التغير في قيم التيارات المقاسة في نقطة الربط المشتركة في المرحلة الصلبة من الصهر. أما في المرحلة السائلة تظهر موجة التيار جيبية مستقرة ولا تحوي تشوهات بسبب ثبات قيم التيار المسحوب من قبل فرن القوس الكهربائي إذ أن أي تغير في التيار يقابله تغيراً في الجهد.

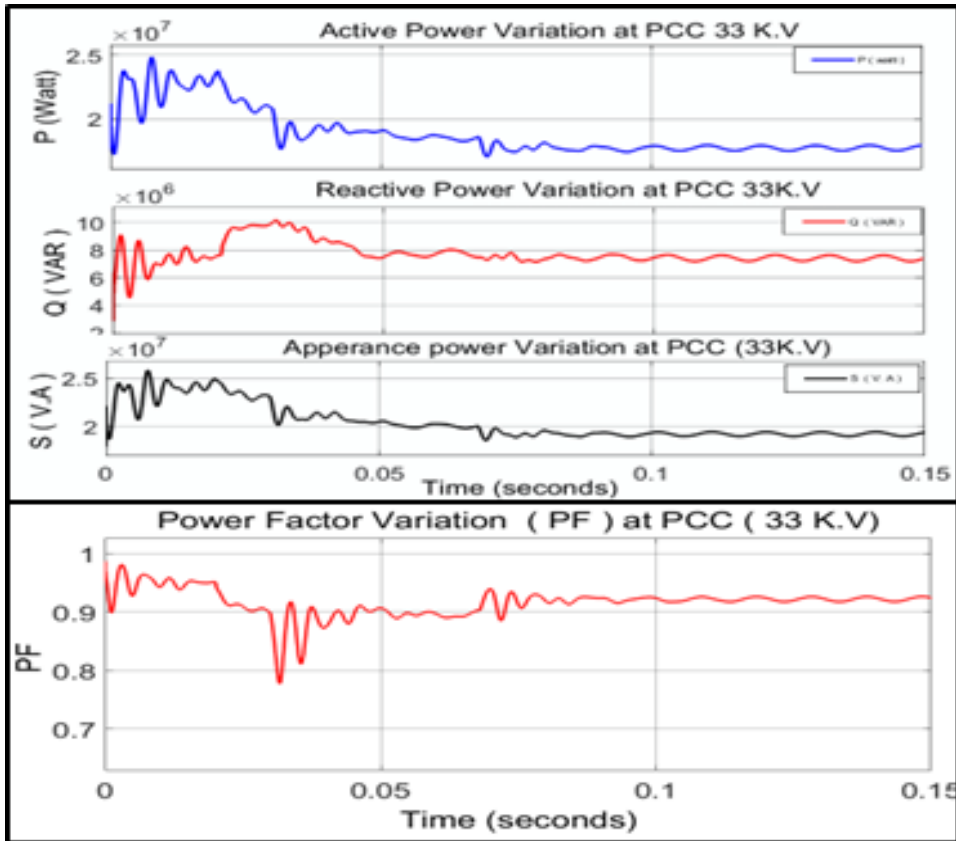


الشكل (18): تغيرات القيمة الفعلية لتيار الأطوار الثلاثة في نقطة الربط المشتركة عند تشغيل الفرن في مرحلتي الصهر

#### 4-5 قياس تغيرات الاستطاعة:

يبين الشكل (19)، وباستخدام دارة قياس الاستطاعة المصممة في بيئة ماتلاب نتائج قياس كل من الاستطاعة الفعلية، والرديية، والظاهرية، وعامل الاستطاعة في نقطة الربط المشتركة عند تشغيل الفرن مع مكثفات التعويض .

حيث لوحظ تغيراً كبيراً وعشوائياً في قيم الاستطاعات وفي قيم عامل الاستطاعة في المرحلة الصلبة وذلك بسبب التغير العشوائي في طلب الاستطاعة الرديية. وكانت أدنى قيمة لمعامل الاستطاعة في هذه المرحلة 0.78. أما في المرحلة السائلة، فقد ظهر عامل الاستطاعة مستقراً وثابتاً عند القيمة 0.94. مما يؤكد عدم كفاية مكثفات التعويض المستخدمة لتلبية التغير في الاستطاعة الرديية في المرحلة الصلبة من الصهر.

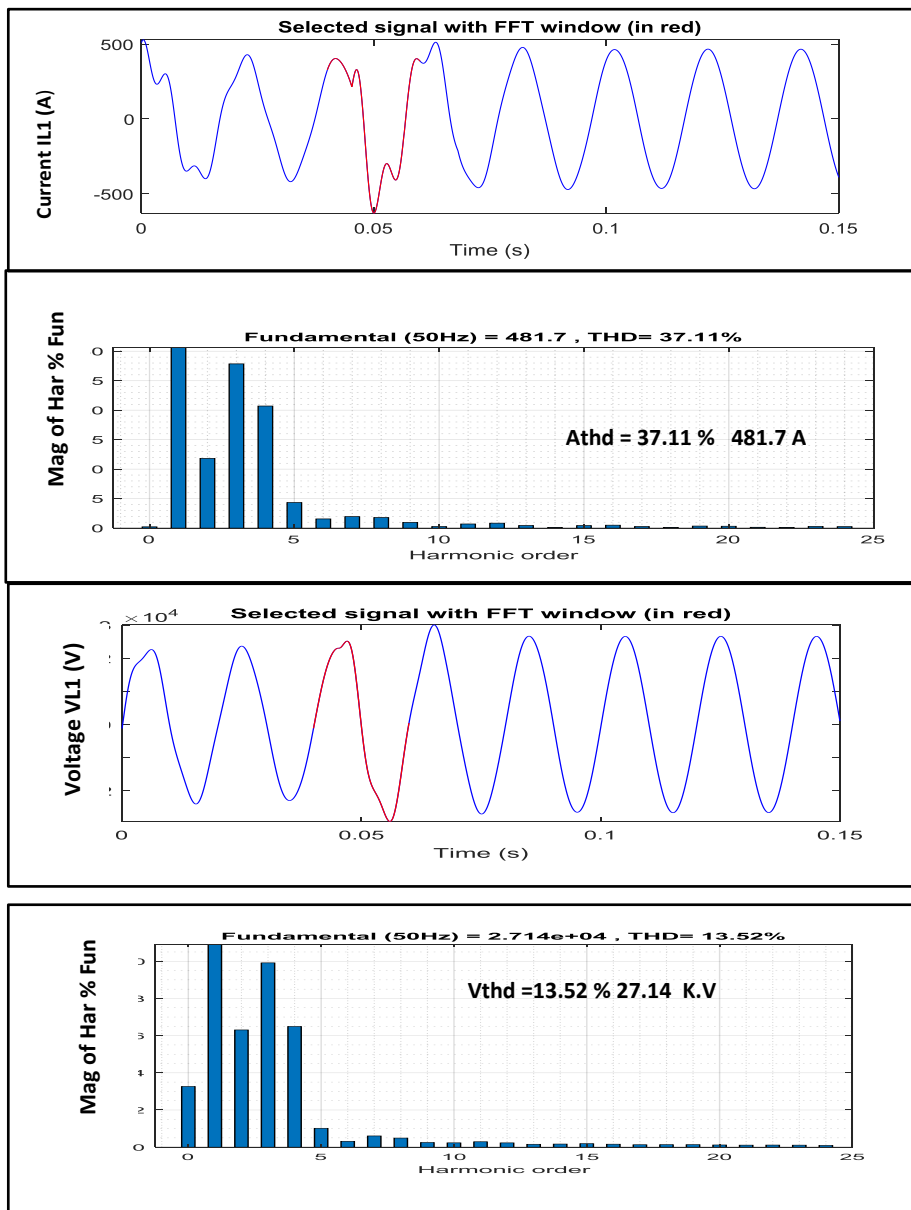


الشكل(19): تغيرات الاستطاعات ( S, Q ,P ) وعامل الاستطاعة في نقطة الربط المشتركة

#### 4-6 قياس معامل التشوه التوافقي الكلي للجهد والتيار (Athd Vthd):

يُلاحظ من الشكل (20) وجود قيم مرتفعة لتوافقية التيار الثالثة حيث وصلت قيمتها في المرحلة الصلبة إلى 28.14% من المركبة الأساسية متجاوزة الحد المسموح به 4% على الرغم من تشغيل مكثفات التعويض وهذا يؤكد عدم قيام مكثفات التعويض بتخفيف قيم التوافقيات وخاصة التوافقية الثالثة. كما أنّ معامل التشوه التوافقي للجهد والتيار ظهر بقيمة مرتفعة ومتجاوزة للحد المسموح به في المرحلة الصلبة.





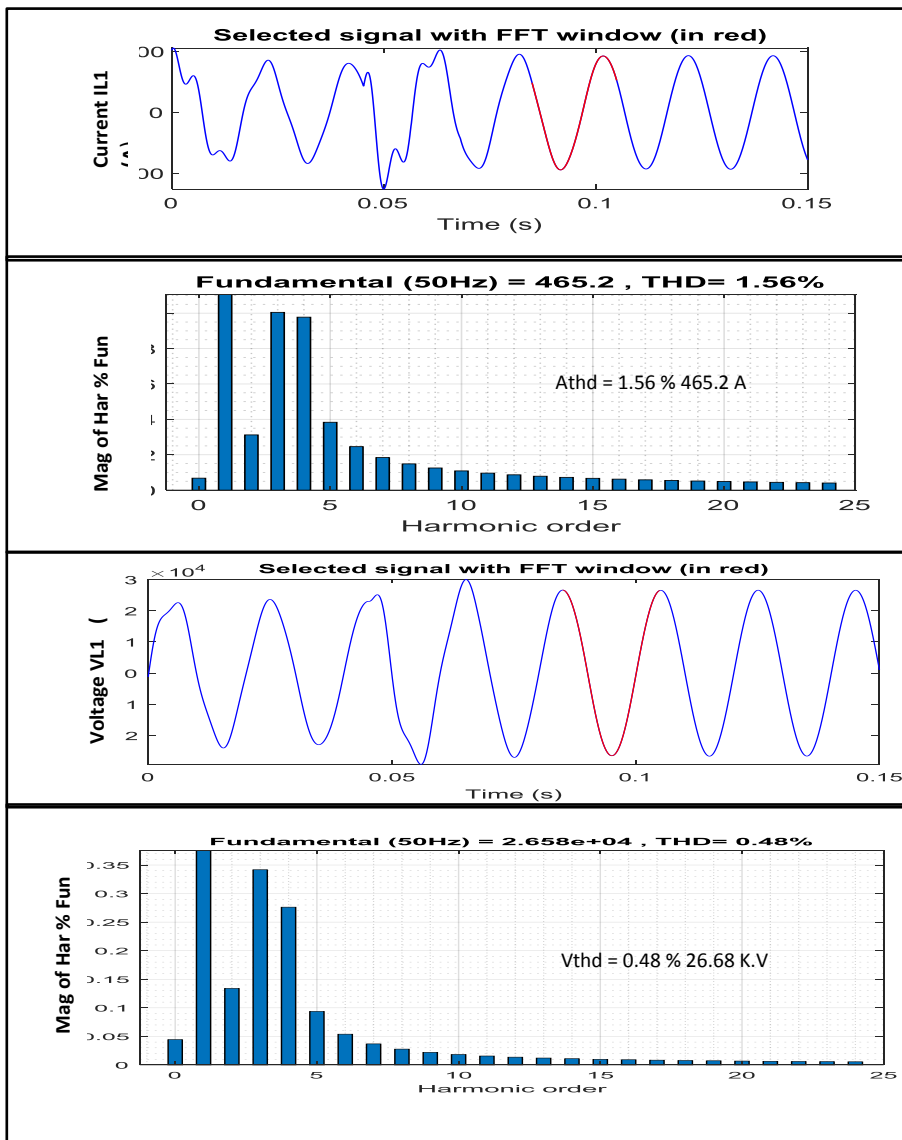
الشكل (20): تحليل فورييه لعامل التشوه التوافقي الكلي ومطال التوافقيات لتيار وجهد الطور الأول في نقطة الربط المشتركة في المرحلة الصلبة.

(b): القياس عند تشغيل الفرن في المرحلة السائلة:

عند قياس معامل التشوه التوافقي الكلي لكل من الجهد والتيار في نقطة الربط المشتركة عند تشغيل الفرن في المرحلة السائلة تبين ظهور قيم منخفضة لكل من  $A_{thd}$ ,  $V_{thd}$  وذلك بسبب استقرار القوس في هذه المرحلة، وثبات قيمة الاستطاعة الفعلية، والردية المستجرة من قبل فرن القوس الكهربائي كما هو مبين في الشكل (21). عند مقارنة القياس الحقيقي لمعامل التشوه التوافقي الكلي لكل من الجهد، والتيار مع القياس في النموذج في مرحلتي الصهر كانت قيمة الخطأ النسبي المئوي المحسوب أقل من 10% كما يبين الجدول (4).

الجدول (4): مقارنة قيم عامل التشوه التوافقي الكلي للتيار وللجهد المقاس

المرحلة السائلة في اللحظة 10:21:32			المرحلة الصلبة في اللحظة 10:15:12			البارامترات
الخطأ النسبي المئوي	القياس في النموذج	القياس الحقيقي	الخطأ النسبي المئوي	القياس في النموذج	القياس الحقيقي	
$\geq 10\%$	% fun	% fun	$\geq 10\%$	% fun	% fun	
0.2%	1.56 %	1.3%	3.7%	37.11%	35.78	$A_{thd}$
5.88%	0.48%	0.51%	2.3%	13.52%	13.84	$V_{thd}$



الشكل (21): تحليل فورييه لعامل التشوه التوافقي الكلي ومطال التوافقيات لتيار وجهد  
الطور الأول نقطة الربط المشتركة في المرحلة السائلة.

#### 4-4: النتائج والمناقشة:

✓ أظهرت نتائج القياسات الحقيقية المنقّدة في نقطة الربط المشتركة أثناء تشغيل فرن قوس كهربائي (21MVA) أنّ اضطرابات جودة التغذية الكهربائية تظهر بقيم كبيرة في المرحلة الصلبة من الصهر على الرغم من تشغيل مكثفات التعويض.

✓ كما أظهرت النتائج قيمةً مرتفعةً لمعامل الذروة لكل من الجهد والتيار وهي قيم كبيرة تدل على التشوه في شكل الموجة متجاوزة القيمة الحدية المسموحة  $(1.414) (Vcf = 1.66, Acf = 2.56)$ .

✓ لقد ظهر انخفاض في عامل الاستطاعة، إذ سجل قيمة تساوي  $PF = 0.721$  في نقطة الربط المشتركة، كما ظهرت قيمةً مرتفعةً لمعامل التشوه التوافقي للتيار، وكذلك قيمة مرتفعة للتوافقية الثالثة متجاوزة للحد المسموح به. مما يؤكد أن تعويض الاستطاعة الردية باستخدام المكثفات غير كافي في حالة شبكات التوزيع المغذية لأفران القوس الكهربائي.

✓ أظهرت نتائج المحاكاة ومقارنة القياسات في النموذج المطور في بيئة MATLAB/SIMULINK مع القياسات الحقيقية أنّ الخطأ النسبي المئوي كان أقل من 10% مما يؤكد كفاءة النموذج في محاكاة حالات تشغيل مختلفة، وبالتالي إمكانية استخدامه لوضع الخطط من أجل تطوير فرن القوس الكهربائي مستقبلاً.

## 4-5 المقترحات والتوصيات:

- للتخفيف من تيارات الفرن العالية يمكن ربط ملفات تحريضية على التسلسل مع المكثفات الموجودة بحيث يحدث طنين تفرعي مما يؤدي إلى تخفيف قيم التوافقية الثانية، والرابعة، أما للتخفيف من قيم التوافقية الثالثة يقترح استخدام مرشح خاص بالتوافقية أو استبدال نظام التعويض المستخدم (المكثفات الستاتيكية) بالمعوض الستاتيكي (STATCOM).
- عند وضع الخطط من أجل تطوير أفران القوس الكهربائي (زيادة سعة الفرن وتطوير نظام التعويض). يمكن استخدام النموذج المطور كأساس للتخطيط المستقبلي.

المراجع العلمية

]1[	TAVAKKOLI, M. EHSAN, E., M.,2008 - “A SIMULINK Study of Electric Arc Furnace Power Quality Improvement by Using STATCOM”, IEEE International Conference on Industrial Technology 2008, ICIT 2008, 21-24 April 2008, pp. 1-6.
]2[	Golkar, M., Meschi, S.2008 - “MATLAB modeling of arc furnace for flicker study”, IEEE International Conference on Industrial Technology, 2008. ICIT 2008, 21-24 April 2008, pp. 1-6
]3[	MUNI, A., ANURADHA, B,2009 - “Modeling of Electric Arc Furnace & Control Algorithms for voltage flicker mitigation using DSTATCOM”, IPEMC, 1123-1129, 2009.
]4[	BANEJAD, M. HOOSHM, R.,2009 - “Exponential-Hyperbolic Model for Actual Operating conditions of Three Phase Arc Furnaces”, American Journal of Applied Sciences 6, pp.1539-1547.
]5[	BANEJAD, M. HOOSHM, R.,2009 - “Exponential-Hyperbolic Model for Actual Operating conditions of Three Phase Arc Furnaces”, American Journal of Applied Sciences 6, pp.1539-1547.
]6[	MOKHTARI, H., HEIRI, M.,2002 - “A New Three Phase Time-Domain Model for Electric Arc Furnace Using MATLAB”, Transmission and Distribution Conference and Exhibition 6-10 October 2002: Asia Pacific, IEEE/PES, Vol. 3, pp. 20787-283
]7[	BANEJAD, M., HOOSHM, R.,2008- HOOSHAM, BANEGAD, R. H. 2008 “A New Time Domain Model for Electric Arc Furnace”, Journal of Electrical Engineering, Vol. 59, No. 4, 195-202, 2008.

]8[	ZHENG, MAKRAM, GIRGIS, T., E., B. 1998 - "Effect of different arc furnace models on voltage distortion". IEEE Transactions, International Conference on Harmonics and Quality of Power, 14-18 October 1998, Volume 2, pp. 1079-1085
]9[	HARUNI, MUTTAQI, NEGNEVITSKY, A., M., O.2007 -" Analysis of harmonics and voltage fluctuation using different models of Arc furnace", IEEE Transactions, Power Engineering Conference, 9-12 December 2007, AUPEC 2007, Australasian Universities, pp. 1-6.
]10[	CANO PLATA, TACCA, E. A. 2005 -, "Arc Furnace Modeling in ATPEMPT", International Conference on Power Systems Transients (IPST'05), Montreal, Canada, 19-23 June 2005, Paper No. IPST05-067.
]11[	MENDIS, BISHOP, WITTE, R.M.T. 1996 - "Investigations of Voltage Flicker in Electric Arc Furnace Power Systems", IEEE Industry Applications Magazine, January/February 1996, pp. 28-34.
]12[	ZHANG, FAHMI, NORRIS, Z., N., T. 2001 -, "Flicker Analysis Methods for Electric Arc Furnace Flicker (EAF) Mitigation (A Survey)", IEEE Porto Power Tech Conference (PPT 2001), 10 <sup>th</sup> -13 <sup>th</sup> September 2001, Porto, Portugal
]13[	WALKER, M. 1997 - "Electric Utility Flicker Limitations", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 1A-15, No. 6, November/December 1997. DOI:10.3390/en12010174. /6/January.
]14[	DURUNGO, ECOLLA, M.J.,2021"A support Vector Machine-Based Method for Parameter Estimation of an Electric Arc Furnace Model ". Escolar – Mejia Electric Power Systems Research, 6.107228.2021

نمذجة ومحاكاة اضطرابات جودة التغذية الكهربائية في شبكة التوزيع الكهربائية التي تغذي أحمالاً  
اضطرابية عالية

]15[	VIGAN,K.2019-“Modeling and Simulation Power quality of Disturbances”Using MATLAB/SIMULINK / UCSI University, Kuala Lumpur, Malaysia /2019/ <a href="http://dx.doi.org/10.5772/61209">http://dx.doi.org/10.5772/61209</a>
]16[	REDDY, C.,2020- “Power Quality Improvement of Radial Distribution System by Optimal Location and Size of Distributed Generator Using Fuzzy Genetic Algorithm. / JOURNAL OF ARCHITECTURE / T.S.-506167/ Issue No:1006-7930.
]17[	RAWAT, VADHERA, M., S. 2018 – “Impact of Photovoltaic Penetration on Static Voltage Stability of Distribution Network / A Probabilistic Approach/” National Institute of Technology/ Kurukshetra-India.
]18[	CAMPUS, S. 2018” Impact of Renewable Energy Generation on Voltage Flicker with Dynamic Load Connected to Distribution Network” / Department of Electrical and power Engineering. Durban University of Technology/P O Box 1334, Block S7 Level 3 Durban, South Africa.
]19[	BATHINDA, G. 2021-," Electric Power Quality- Issues, Effects and Mitigation" /International Journal of Engineering Research& Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181/2021.
]20[	CHANG, W., 2016 – “An Advanced EAF Model for Voltage Fluctuation Propagation Study “. in IEEE Transaction on power Delivery, vol. pp, no.99, pp.1-1, doi : 10.1109/TPWRD.
]21[	BHONSLE, D., KELKA, R.,2011 – “Simulation of Electric Arc Furnace Characteristics for Voltage Flicker Study using MATLAB “. International conference on Recent Advancements in Electrical, Electronics and Control Engineering, Sivakasi, India.
]22[	CANO – PLATA, FARFAN, SOTO – MARIN, E. J. O.J. 2015 “Electric arc furnace model in Distribution systems. IEEE Trans. On Industry Applications, vol. 51, no.5, pp. 4313 – 4320, Se. /Oct. 2015.



[23]	TOMASOVIC, BOZIDAR, A.F. 2017 – “Modeling of three – phase electric arc furnace for Estimation of voltage flicker in power transmission network “Electric power Systems Research, Volume 146, Pages /218 – 227, ISSN 0378 – 7796
[24]	ESFAHANI, M., VAHIDI, B.,2012 - “A New Stochastic Model of Electric Arc Furnace Based on Hidden Markov Model: A Study of Its Effects on the Power System”, IEEE Transations on Power Delivery, Vol. 27, Issue-4, pp. 1893-1901, October .2012.
[25]	RAMESH, B., DEEPAK, C.,2014 – “New Time Domain Electric Arc Furnace Model for Power Quality Study” Electrical Engineering Department Maharaja Sayajirao University of Baroda Vadodara, INDIA / DOI: 10.1109/ IICP ;2014.
[26]	Nazir M, Wu Q, Li M. Symmetrical short-circuit parameters comparison of DFIG–WT. International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems. 2017; 8: 77-83.
[27]	Subramanian Ch, Casadei D, Tani A, Rossi C. Modeling and Simulation of Grid Connected Wind Energy Conversion System Based on a Doubly Fed Induction Generator (DFIG). International Journal of Electrical Energy. 2014; 2: 161-166.
[28]	Jerin R, Prabakaran N, Palanistry K, Umashankar S. FRT Capability in DFIG based wind turbines using DVR with Combined Feed-Forward and Feed-Back Control. Energy Procedia. 2017; 138: 1184-1189.
[29]	Mohod S, Aware M. A STATCOM Control Scheme for Grid Connected Wind Energy System for Power Quality Improvement. IEEE Systems Journal. 2010; 4: 346-352.
[30]	Valentine S. Understanding the variability of wind power costs. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2011; 15: 3632– 3639.

نمذجة ومحاكاة اضطرابات جودة التغذية الكهربائية في شبكة التوزيع الكهربائية التي تغذي أحمالاً  
اضطرابية عالية

[31]	Shazly A. Mohamed, N. Luo, J.R. González, T. Pujol and L. Pacheco, "FACTS Family for Voltage Sag Alleviation: Performance Study and Analysis", Renewable Energies and Power Quality Journal (RE&PQJ), Vol. (1), No. (17), pp. 561-566, July 2019.
[32]	Ceyhun Y, et al. Power Quality Measurement and Evaluation of a Wind Farm Connected to Distribution Grid. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2015; 195: 2370 – 2375.
[33]	Gaona D, Goytia E, Lara O." Fault Ride-Through Improvement of DFIG-WT by Integrating a Two-Degrees-of-Freedom Internal Model Control". IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013; 60 (3): 1133-1145.
[34]	Khajeh A, Ghazi R, Abardeh M. "Implementation of the Maximum Power Point Tracking Algorithm on Indirect Matrix Converter Controlled DFIG wind Turbine". The 4th International Conference on Renewable Energy and Distributed Generation, Iran, Mashhad; 2016: 11-15.
[35]	Safaei, A., Hosseinian, S., Abyaneh, H.: "Investigation and enhancement of SFCL impacts on DFIG- based wind turbine during fault and post- fault", Int. Trans. Electr. Energ. Syst., Wiley. 2016: 1-13.
[36]	Pfister P, Perriard Y. Torque Measurement Methods for Very High Speed Synchronous Motors. Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines; 2008: 1-5.
[37]	Whitby B, Ugalde-Loo C. Performance of Pitch and Stall Regulated Tidal Stream Turbines. IEEE Transactions on Sustainable Energy. 2014; 5 (1): 64-72.
[38]	Kadandani N, Maiwada Y. Impact of Voltage Sag and Swell on the Power Quality of Grid Connected Wind Power Plant. the International Journal of Engineering and Science (IJES). 2015; 4 (7): 56-64.

[39]	Zhong Q, Ma Z, Ming W, George C. Grid-friendly wind power systems based on the synchronverter technology. Energy Conversion and Management journal. 2015; 89: 719–726.
[40]	Mohammed S, Abdel-Moamen M., Hasanin B. Analysis, Modeling and Simulation of Dynamic Voltage Restorer for Compensation of Voltage Quality Disturbances. International Journal of Control, Automation and System. 2013; 1 (2): 23-29.
[41]	Mohammed S, Abdel-Moamen M., Hasanin B. Analysis, Modeling and Simulation of Dynamic Voltage Restorer for Compensation of Voltage Quality Disturbances. International Journal of Control, Automation and System. 2013; 1 (2): 23-29.
[42]	Thirupathaiah M, Prasad P. “ Analysis of Various Compensation Devices for Power Quality Improvement in Wind Energy System”. International Journal of Electrical Engineering & Technology (IJEET). 2016; 7 (3): 25–39.

نمذجة ومحاكاة اضطرابات جودة التغذية الكهربائية في شبكة التوزيع الكهربائية التي تغذي أحمالاً  
اضطرابية عالية

- [1] Nazir M, Wu Q, Li M. Symmetrical short-circuit parameters comparison of DFIG–WT. *International Journal of Electrical and Computer Engineering Systems*. 2017; 8: 77-83.
- [2] Subramanian Ch, Casadei D, Tani A, Rossi C. Modeling and Simulation of Grid Connected Wind Energy Conversion System Based on a Doubly Fed Induction Generator (DFIG). *International Journal of Electrical Energy*. 2014; 2: 161-166.
- [3] Jerin R, Prabakaran N, Palanisamy K, Umashankar S. FRT Capability in DFIG based wind turbines using DVR with Combined Feed-Forward and Feed-Back Control. *Energy Procedia*. 2017; 138: 1184-1189.
- [4] Mohod S, Aware M. A STATCOM Control Scheme for Grid Connected Wind Energy System for Power Quality Improvement. *IEEE Systems Journal*. 2010; 4: 346-352.
- [5] Valentine S. Understanding the variability of wind power costs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2011; 15: 3632–3639.
- [6] Shazly A, Mohamed, N, Luo, J.R, González, T, Pujol and L. Pacheco, “FACTS Family for Voltage Sag Alleviation: Performance Study and Analysis”, *Renewable Energies and Power Quality Journal (RE&PQJ)*, Vol. (1), No. (17), pp. 561- 566, July 2019.
- [7] Ceyhun Y, *et al.* Power Quality Measurement and Evaluation of a Wind Farm Connected to Distribution Grid. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2015; 195: 2370 – 2375.
- [8] Gaona D, Goytia E, Lara O. Fault Ride-Through Improvement of DFIG-WT by Integrating a Two-Degrees-of-Freedom Internal Model Control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2013; 60 (3): 1133-1145.
- [9] Khajeh A, Ghazi R, Abardeh M. Implementation of the Maximum Power Point Tracking Algorithm on Indirect Matrix Converter Controlled DFIG wind Turbine. *The 4<sup>th</sup> International Conference on Renewable Energy and Distributed Generation*, Iran, Mashhad; 2016: 11-15.
- [10] Safaei, A., Hosseinian, S., Abyaneh, H.: “Investigation and enhancement of SFCL impacts on DFIG-based wind turbine during fault and post-fault”, *Int. Trans. Electr. Energ. Syst.*, Wiley. 2016: 1-13.
- [11] Pfister P, Perriard Y. Torque Measurement Methods for Very High Speed Synchronous Motors. *Proceedings of the 2008 International Conference on Electrical Machines*; 2008: 1-5.
- [12] Whitby B, Ugalde-Loo C. Performance of Pitch and Stall Regulated Tidal Stream Turbines. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*. 2014; 5 (1): 64-72.
- [13] Kadandani N, Maiwada Y. Impact of Voltage Sag and Swell on the Power Quality of Grid Connected Wind Power Plant. *the International Journal of Engineering and Science (IJES)*. 2015; 4 (7): 56-64.
- [14] Zhong Q, Ma Z, Ming W, George C. Grid-friendly wind power systems based on the synchronverter technology. *Energy Conversion and Management journal*. 2015; 89: 719–726.
- [15] Mohammed S, Abdel-Moamen M., Hasanin B. Analysis, Modeling and Simulation of Dynamic Voltage Restorer for Compensation of Voltage Quality Disturbances. *International Journal of Control, Automation and System*. 2013; 1 (2): 23-29.
- [16] Thirupathiah M, Prasad P. Analysis of Various Compensation Devices for Power Quality Improvement in Wind Energy System. *International Journal of Electrical Engineering & Technology (IJEET)*. 2016; 7 (3): 25–39.