

تكبير أثر القوى الكهرطيسية في المحولات الكهربية

د . محمد صالح الأيوبي⁽¹⁾

ملخص

تولد التيارات الكهربية العالية بمرورها في ملفات المحولة قوى كبيرة ذات أهمية خاصة في حالات التشغيل أوعند التصميم . يركز هذا البحث على توزيع الحقل المغناطيسي في مختلف أجزاء المحولة ودراسة القوى الكهرومغناطيسية وتقنية حساباتها في ملفات المحولات الكهربية وإمكانية الاستفادة القصوى من ذلك . استخدمت طريقة العناصر المنتهية (FEM) بمساعدة البيئة البرمجية ANSYS لمتابعة وحساب توزيع الحقل المغناطيسي والقوى الكهرومغناطيسية . تم تحليل توزيع الحقل والقوى الكهرومغناطيسية بمركباتها القطرية والمحورية واثبتت النتائج أن توزيع الحقل والقوى تعتمد بدرجة عالية على الحالة العابرة ووضعيات مكونات المحولة بالنسبة لاتجاه مرور التيار الكهربي .

الكلمات المفتاحية: المحولات الكهربية، القوى الكهرومغناطيسية، تحليل توزيع الحقل والقوى الكهرومغناطيسية في المحولات، طريقة العناصر المنتهية.

⁽¹⁾ استاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربية في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربية- جامعة دمشق

Maximizing the effect of Electromagnetic Forces in Transformers

Dr. M. Saleh Al-Ayoubi

Abstract

High current in transformer windings induces excessive electromagnetic forces. These forces are important in the design and operation.

This paper is focused on the distributing of electromagnetic forces on windings of transformer at high current condition.

Three dimensional finite element method –ANSYS – Software is used to calculate the magnetic flux and forces.

The impact of winding arrangement on the axial and radial forces are analyzed.

The results of research proved that these forces are very depended on transient state and position regarding of the electric current direction.

Key words: EM-force, EM analysis in transformer, Finite element method.

المقدمة

تعد المحولات الكهربائية من أهم الأجهزة وأكثرها استخداماً، تتكون من ملفين أو أكثر ونواة مغناطيسية ويمرور التيار في الملف الابتدائي يتحرض حقل مغناطيسي الذي يتشابك مع الملف الثانوي محرضاً التيار الكهربائي في الحمل وبالتالي فإن الحقل الكهربائي يلعب دوراً أساسياً في نظام عمل المحولة.

يولد الحقل المغناطيسي قوى كهرومغناطيسية على تيارات ملف المحولة، وتكون هذه القوى صغيرة أثناء التشغيل الطبيعي للمحولة وعليه فإن تصميم المحولة يتوقف على خيارات المادة العازلة والاعتبارات الحرارية ومفايد جول وغيرها.

يمكن أن تتعرض المحولات أثناء التشغيل الطبيعي لحالات طارئة مثل القصر والحالات العابرة وتغيرات مفاجئة للأحمال عندئذ فإن التيارات المتحرضة حسب قانون فارادي ولنز ستزداد بشكل ملحوظ، وعند القصر يصل التيار إلى (8-10) مرات من قيم تياره الاسمي مولداً قوى مغناطيسية تؤثر على تيارات الملفات داخل المحولة وينعكس ذلك على الخلل في الأداء الكهروميكانيكي للمحولات.

تشكل دراسة القوى الكهرومغناطيسية داخل المحولات أهمية خاصة في الأبحاث الجديدة لمدى تأثيرها في المجالات التصميمية والاستثمارية عند التشغيل الطبيعي لفترات طويلة أو في حالات القصر والعابرة. [1,7,8]

يركز البحث على حسابات القوى الكهرومغناطيسية داخل المحولات الكهربائية انطلاقاً من التقنيات العددية لحسابات الحقول الكهرومغناطيسية في جميع حالات تشغيل المحولة.

1- القوى الكهرومغناطيسية Electromagnetic Forces:

تتعرض النواقل التي تمر فيها التيارات الكهربائية للقوى

الكهرومغناطيسية بسبب الحقول المغناطيسية المقترنة

وخاصة التسريبيه منها وتعطى هذه القوى بالعلاقة الآتية:

حيث:

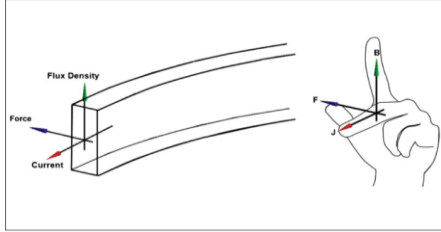
$$\vec{F} = \vec{J} \times \vec{B} \dots \dots \dots (1)$$

\vec{F} - القوة الكهرومغناطيسية - N

\vec{J} - كثافة التيار الكهربائي - m^2

\vec{B} - كثافة الفيض المغناطيسي - T

يتم تعيين اتجاه تأثير القوة وفقاً لقاعدة اليد اليمنى كما في الشكل (1).



الشكل (1) قاعدة اليد اليمنى لتحديد اتجاه القوة الكهرومغناطيسية

تكون القوة المغناطيسية عمودياً على المستوى المشكل من شعاعي كثافة التيار وكثافة الفيض المغناطيسي وتؤثر باتجاه تخفيض كثافة الطاقة المغناطيسية إلى حدودها الدنيا في الحجم المعبر. لتحقيق ذلك سنتجه نحو تصغير نصف القطر الداخلي لملفات المحولة وزيادة نصف القطر الخارجي للملفات وكذلك ارتفاعها كما هو مبين في الشكل (2).

يمكن تحليل القوى الكهرومغناطيسية في المحولة إلى مركبات عمودية وقطرية حيث تكون القوى العمودية موازية لمحور النواة فيما القطرية تؤثر باتجاه نصف قطر الملف (B_r, B_a) [1]. يبين الشكل (2) القوى القطرية والعمودية داخل المحولة الكهربائية.

D_m - متوسط قطر الملف الذي عنده يتم حساب القوة r .

تسبب هذه القوة اجهادات نابذة على الملف الخارجي وضاغطة على الملف الداخلي.

لدراسة القوة العمودية الموازية لمحور الملف من الضروري تحديد طول المسار الفعال للفيض المغناطيسي القطري (h_{eff}) ومتوسط كثافة الفيض B_r و $\frac{1}{2} a (ni)$ (حيث a - طول الجزء الذي يتسبب في اللاتناظر) مثلاً عند حالة القصر يمثل مجموعة اللفات المقصورة عندئذ تعطى بالعلاقة:

$$B_r = \frac{4\pi a(ni)}{10^7 2h_{eff}} T \dots \dots \dots (4)$$

والقوة (F_a) ستساوي للمحولة:

$$F_a = \frac{2\pi a(ni)^2}{10^7} * \frac{\pi D_m}{h_{eff}} , N \dots \dots \dots (5)$$

توفر هذه العلاقات امكانية حساب القوى الكهرومغناطيسية وخاصة في حالات التشغيل غير الطبيعية [2].

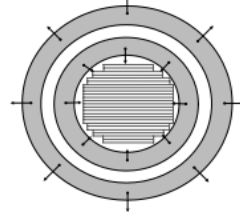
2- حسابات الحقل المغناطيسي بطريقة العناصر المنتهية:

Finite Element Method (FEM)

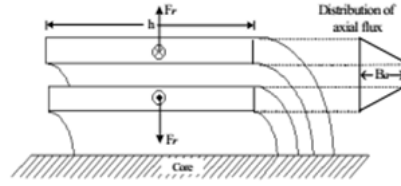
تعتمد طريقة العناصر المنتهية على حل معادلات ماكسويل والمعادلات الموجية المستنتجة منها في دراسة المواضيع الكهرومغناطيسية ، وموائمتها للمسألة المدروسة بمراعاة الشروط الحدية. تمتاز هذه الطريقة بمرونة عالية للنمذجة ومحاكاة الأشكال الهندسية المعقدة، من خلال إنشاء شبكة الحل المناسبة، وتتصف باستقرارية ودقة حل عالية. تتيح طريقة العناصر المنتهية حساب الحقول ومتابعة مختلف محددتها ومعاملاتها في كل جزء عنصري في الفراغ موضع الاهتمام.

تتمثل أهم إجراءات طريقة العناصر المنتهية بما يأتي:

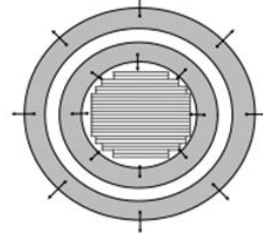
1- تقسيم الحيز الفراغي للمسألة المدروسة الى مجموعة من المجالات الجزئية تدعى العناصر المنتهية.



الشكل (2) القوى القطرية والعمودية داخل المحولة الكهربائية



الشكل (2-أ) تأثيرالقوى الكهرومغناطيسية ضمن طبقات المحولة في اتجاه المحور



الشكل (2-ب) تأثيرالقوى الكهرومغناطيسية القطرية ضمن المحولة

يتضح أن القوة القطرية الشكل (2-أ) المؤثرة في الطبقات الخارجية والداخلية لملفات المحولة تبقى ثابتة تقريباً ويفرض أن الرمز للمركبة العمودية بـ B_a فإنها

ستعطى بالعلاقة الآتية: [3,4]

$$B_a = \frac{4\pi(ni)}{10^7} T \dots \dots \dots (2)$$

عندئذ ستظهر القوى القطرية بتفاعل هذا الحقل مع تيار الملف وفقاً للعلاقة الآتية:

$$F_r = \frac{2\pi(ni)^2 D_m}{h} * 10^{-7} , N \dots \dots \dots (3)$$

حيث:

h, n, i - التيار الكهربائي المار في الملف وعدد اللفات وارتفاع الملف على التوالي.

توجد المعاملات a,b,c,d بالعلاقة

$$A_e = \sum_{i=1}^4 a_i(x, y) A_{ei}$$

وتحسب نوابغ الشكل a_i من العلاقات :

$$a_1 = \frac{1}{6v} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix}, a_2 = \frac{1}{6v} \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix}$$

يتم الحصول بطريقة مشابهة على a_3, a_4 عندما

يشكل شعاع الكمون المغناطيسي تابعاً $A(x,y)$ يمكن

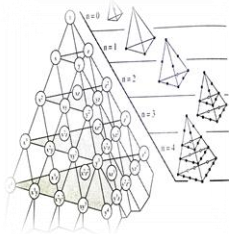
تقريبه باستخدام المنشور من المرتبة n وفق الآتي:

$$m = \frac{1}{6}(n+1)(n+2)(n+3): \text{حيث}$$

عدد العقد في العنصر المختار أو عدد حدود المنشور

يمكن ترتيب الحدود في المنشور ثلاثي الأبعاد كما في

الشكل(3)



الشكل (3) العنصر المختار أو عدد حدود المنشور

يمكن ترتيب الحدود في المنشور ثلاثي الأبعاد

تبرز الحاجة الى بيئة برمجية مناسبة لتحقيق درجة الدقة والتميز العاليتين من خلال تكرار الحسابات النقطية في عناصر الحل واهمية مهارة انشاء النموذج الذي يحاكي الظاهرة المدروسة وفق المعطيات التصميمية.

تم اختيار دراسة توزيع الحقل المغناطيسي بهدف حساب القوى داخل المحولة في البيئة البرمجية ANSYS للأسباب الآتية:

- امكانية تحليل وتحقيق حسابات دقيقة في حالات التشغيل الطبيعي والعبارة والطارئة في مجال ترددي واسع.
- تعطي النتائج في الفراغ ثلاثي الأبعاد.

2-ربط التوزيع الكموني في كل عنصر بواسطة كثير حدوده او تابعه التجريبي.

3- تجميع العناصر في منطقة الحل.

4- حل جملة معادلات الكمون الخطية الناتجة.

يمكننا استخدام اشكال متعددة للعناصر المنتهية المستوية كمثلث ومربع والأشكال المنحنية، يتم اختيارها على ضوء البنية الهندسية للمسألة المدروسة في المحولة الكهربائية او بعض اجزائها تؤخذ العناصر المذكورة عند دراسة حقول كيفية الابعاد الشكل الفراغي المخروطي والهرمي.

تمثل المواضيع العملية الهندسية في اغلب الاحيان مسائل معقدة، من الصعب ايجاد حلولها التحليلية الرياضية، وعليه يتم البحث عن الحلول التقريبية المعتمدة على التقنيات الكهروضوئية الحاسوبية، حيث تعد طريقة العناصر المنتهية احدى الطرق الهندسية المناسبة والتي تمتاز بدقة عالية كما تمت الاشارة اليها سابقا.

تحسب الكمونات الكهربائية في العنصر المثلثي لشبكة الحل، كوجه من وجوه العنصر الهرمي حيث يتغير الكمون في هذا العنصر خطيا وفق العلاقة الآتية:

$$A_e = \sum_{i=1}^m a_i(x, y) A_{ei}$$

ويأخذ في العنصر الرباعي صيغة لا خطية كما يلي:

$$A_e = a + bx + cy + dz$$

يجب ان تتحقق هذه المعادلة في العقد الأربعة للعناصر

الرباعية ويمكن اعادة كتابتها بالصورة الآتية:

$$A_{ei} = a + bx_i + cy_i + dz_i : i=1$$

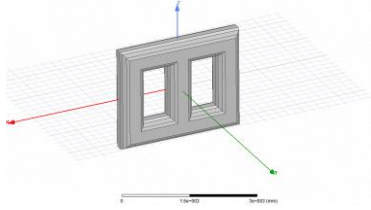
يمكن الحصول بنفس الأسلوب على أربعة معادلات

متشابهة تخص المعاملات a, b, c, d

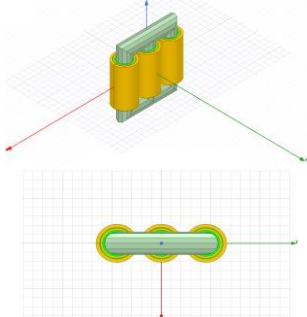
ويتم ايجادها وفق المصفوفة الآتية:

$$\text{Det} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 & z_1 \\ 1 & x_2 & y_2 & z_2 \\ 1 & x_3 & y_3 & z_3 \\ 1 & x_4 & y_4 & z_4 \end{bmatrix} = 6v$$

حيث:

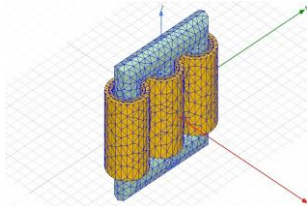


الشكل (5) تصميم النواة المغناطيسية للمحول المدروس
تكون المادة المغناطيسية للنواة مناسبة تبعاً لخصائصها (النفاذية الكهربائية، النفاذية المغناطيسية، الناقلية الكهربائية النوعية) ويجب أن تمتاز بمنحني ابطاء مغناطيسي مماثل للمنحني المغناطيسي الحقيقي ومكافئ لعملية التصفیح في النواة والضیاعات الحديدية فيها. صممت ملفات المحولة والعازل من خلال مقطع الناقل وعدد طبقات الملف كما هو مبين في الشكل (6).



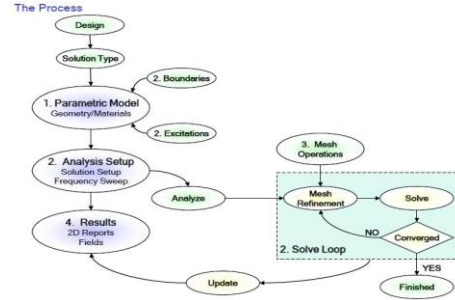
الشكل (6) التصميم النهائي للمحولة مع الطرف الابتدائي والثانوي

تم اختيار مقطع النواة بحيث يكون من النوع المتدرج المتوافق مع محولات القدرة الكهربائية ذات الاستطاعات الكبيرة. تمثلت الخطوة الآتية في بناء شبكة الحل وفق طريقة العناصر المنتهية كما في الشكل (7)



الشكل (7) تشكيل شبكة الحل

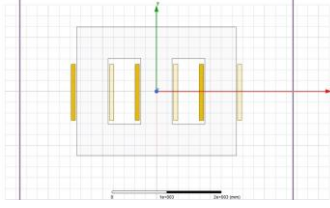
- تسمح ببناء نموذج دقيق للمسألة الهندسية موضع الاهتمام.
 - يعتمد على تقنية العناصر المنتهية القادرة على مسح الحدود الفاصلة بدقة عالية جداً.
- تتمثل عملية المحاكاة في نمذجة محددات الدارة الخارجية ومعاملات البنية الهندسية لتصميم النموذج الهندسي للمحولة واعتماد المعطيات المتمثلة بخصائص الاوساط والمواد والعناصر المستخدمة ومن ثم انشاء شبكة الحل بمرعاة الشروط الحدية. ويبين الشكل (4) خطوات النمذجة باستخدام برنامج ANSYS.



الشكل (4) خطوات النمذجة باستخدام برنامج ANSYS

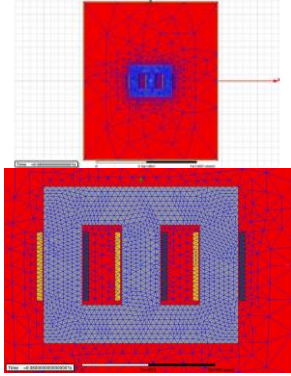
استناداً إلى الخطوات الواردة في الشكل (4) تم نمذجة محولة قدرة ثلاثية الطور بالمعاملات والمحددات الآتية:
استطاعة 30MVA وتعمل عند التردد 50Hz على سوية التوترات المتوسطة في الشبكة العامة
يهدف النموذج لدراسة التفاعلات الكهرومغناطيسية الموجية مع مختلف البنى في المحولة ومتابعة التغيرات الحيزية الدقيقة للحقل والظواهر المرتبطة مثل: الاشباع المغناطيسي للنواة الحديدية والظاهرة القشرية وحقول الحواف المغناطيسية.

- أنشئ النموذج ابتداءً من النواة المغناطيسية من النمط المتدرج للتعبير عن محولات القدرة باستطاعة عالية كما هو واضح في الشكل (5).

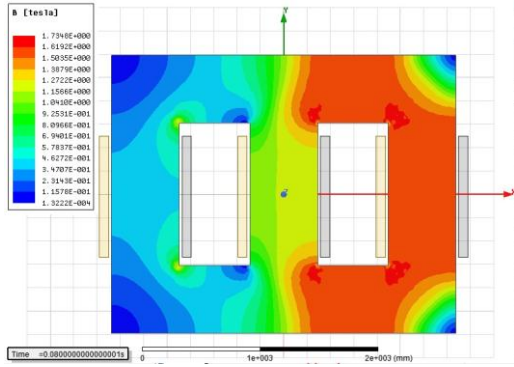


الشكل (10) تصميم المحول بالشكل ثنائي البعد 2D

تبنى شبكة الحل للمحولة ثنائية البعد كما في الشكل (11).



الشكل (11) شبكة الحل للنموذج ثنائي الأبعاد



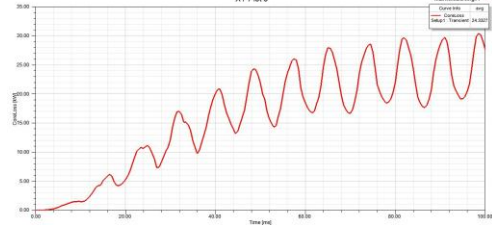
الشكل (12) نتيجة النمذجة ثنائية البعد بكثافة الفيض

المغناطيسي B في النواة

تجدر الإشارة إلى أن التوزيع اللوني لكثافة الفيض يتوافق مع توزيع القوى الكهرومغناطيسية على تيارات ملفات [العلاقة (2) و(3)] الابتدائي والثانوي للمحولة، يتضح أن القوى تأخذ قيمها الأعظمية في النواة.

تبين نتائج النمذجة في البيئة البرمجية ANSYS أن القوة الكهرومغناطيسية المؤثرة على ملفات المحولة من الطرفين الأولي والثانوي بحيث يكون اتجاه القوة الناتجة عن الطرف الأولي لداخل الملف اما اتجاهها على ملف الطرف الثانوي للخارج.

تضبط اعدادات النمذجة للبرنامج بقياس الضياعات المغناطيسية في النواة والذي يستقر بعد فترة 60ms.

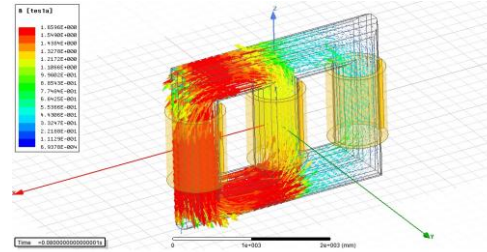


الشكل (8) الضياعات في النواة المغناطيسية اثناء

تشغيل المحول

يبين الشكل (8) تغيرات الضياعات الحرارية في النواة المغناطيسية اثناء تشغيل المحول التي تستقر بعد مضي نحو 60 ms على الرغم من بقاء تأثير التآرجح.

تم متابعة توزيع الحقل المغناطيسي وتغيراته في المحولة والحقل التسريبي بتطبيق التوترات ثلاثية الطور على ملفات المحولة اعتماداً على تقنية التمييز اللوني في اظهار تغيرات كثافة الفيض المغناطيسي كما يتضح من الشكل (9).



الشكل (9) كثافة الفيض المغناطيسي B في النواة

تأخذ كثافة الفيض المغناطيسي (B) قيم أعظمية عند زوايا النواة وبالتالي ستكون القوة المؤثرة على الملفات كبيرة للغاية.

تتبع القوى الكهرومغناطيسية في المحولة لكثافة الفيض المغناطيسي وتكون شديدة على الملفات الابتدائية والثانوية عند حواف النواة العلاقة (1).

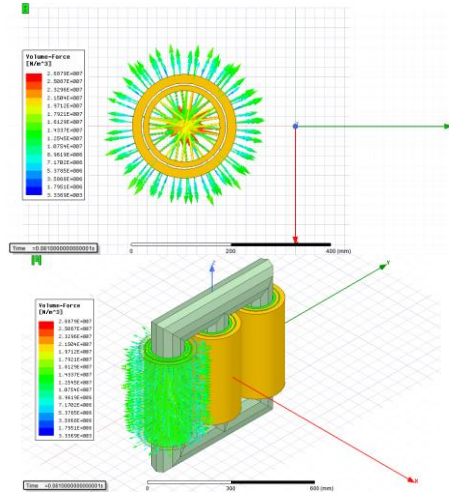
انجزت عملية النمذجة ثنائية البعد وإعادة تصميم المحول 2D كما هو مبين في الشكل (10)

تؤكد النتائج لحسابات القوى الكهرطيسية وفق العلاقة (5) إن هذه القوى تتناسب مع الأبعاد الهندسية. تساهم القوى المؤثرة نحو الداخل تساهم في تقليص أبعاد الملفات وينعكس ذلك على تغير كثافة التيار الكهربائي واختلال التوازن للبنية التصميمية لملفات المحولة الذي يؤدي إلى اختلال التوازن في أداء المحولة.

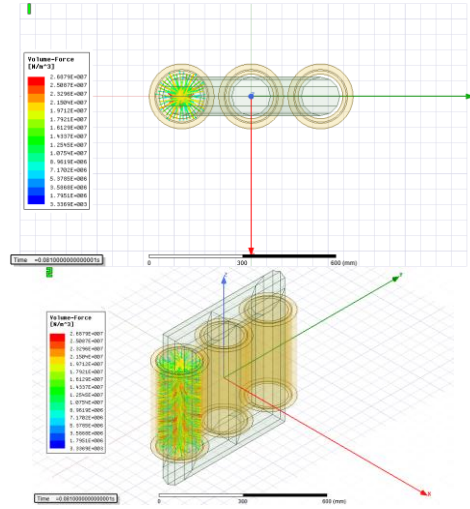
النتائج:

- تبين نتائج البحث أن المحاكاة باستخدام البيئة البرمجية ANSYS تتيح إمكانية متابعة تغيرات القوى الكهرطيسية سواء كانت عالية أو منخفضة إضافة إلى تحليلها .
- يمكن تحليل القوى الكهرطيسية عند حدوث الحالات الطارئة مثل القصر والحالات العابرة والتي أشارت إليها الأبحاث المعتمدة.
- إن ظهور قوى أعظمية عند حواف النواة تساعد المهندس في تحقيق الخيارات المثلى للتصميم حتى في حالات التشغيل الطبيعي.
- تسمح هذه التقنية في نمذجة النظام الهندسي والحقل في الفراغ ثلاثي الأبعاد وبدقة عالية جداً.
- تظهر عادة القوى الكهرطيسية وكأنها ضعيفة في نظام التشغيل الطبيعي ولكنها عند شروط معينة يمكن أن تصبح ذات قيم خطيرة للغاية تؤثر بشكل ملحوظ على نظام تشغيلها الطبيعي وعليه فإنها تصبح فعالة للغاية عند الحواف ذات الزوايا المعينة.
- يمكن أن تؤثر القوى المذكورة على بنى المحولة وتتسبب في حدوث عطب يبدأ من تشوه وقد يصل إلى حد انكسار بعض الاجزاء.

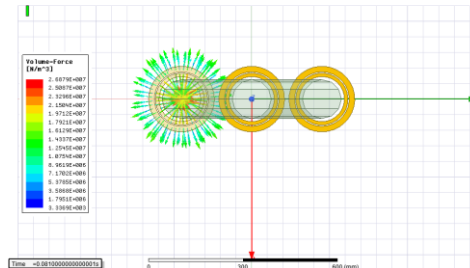
تحسب بمساعدة البيئة البرمجية المستخدمة القوى الكهرطيسية المؤثرة نحو الداخل أو الخارج كما في الأشكال الآتية (13).



الشكل (13) تأثير القوى الخارجة من الملف الأولي



الشكل (14) تأثير القوى الداخلة من الملف الثانوي



الشكل (15) مقطع عرضي للقوى الكهرطيسية الخارجة والداخلة للملفات

المراجع

- 1- Efficient Finite Element Models for Calculation of the No-load Losses of the Transformer; Kamran Dawooda and others; International Journal of Engineering & Applied Sciences (JEAS); Vol.9, Issue 3 (2017) 11-21.
 - 2-Multiphase Transformer Modelling using Finite Element Method; Nor Azizah Mohd Yusoff and others ; International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS); Vol. 6, No. 1, March 2015, pp. 56-64.
 - 3- Finite element analysis of a three phase power transformer; Dorinel Constantin and others ;2017
 - 4- Finite Element Analysis on Piezoelectric Ring Transformer; IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control, vol. 51, no. 10, october 2004.
 - 5- Leakage inductance calculation based on finite element method for power transformer and its application to winding deformation analysis; LI Peng and others ; Xi'an Jiaotong University, China 2007.
 - 6- Finite Elements in Analysis and Design *An International Journal for Innovations in Computational Methodology and Application* Editor-in-Chief: John E. Dolbow; 2008.
 - 7- Electromagnetic Field Theory, Second Edition. Bo Thide; Obsala university; Sweden 2010.
- 8- د. فاروق الدريعي، نظرية الحقول الكهرومغناطيسية ، كتاب جامعي - منشورات جامعة دمشق 2007.

Received	2019/7/15	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2020/1/9	قبول البحث للنشر