

حساب الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية لآلة متواقتة ذات أقطاب غير بارزة وبنظام تهيج طولاني - عرضاني

الدكتور عزت حسن*

(قبل للنشر في 2005/6/28)

□ الملخص □

تمت دراسة طريقة التهيج الطولاني - العرضاني في الآلات المتواقتة ذات الأقطاب غير البارزة، نظراً لأهميتها في نظام استهلاك الاستطاعة الردية ، والتخلص من حالات التهيج والاهتزاز الذاتيين، وأيضاً في تحسين مؤشرات الطاقة لهذه الآلات $(\eta \cdot \cos\phi)$.
كذلك تمت دراسة الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية لتلك الآلة عند حالة التحميل واللاحمل تحليلياً وبيانياً باستخدام نظام الحاسب الآلي.
تشير الدراسة إلى إمكانية استخدام هذه الطريقة في الآلات ذات الأقطاب البارزة أيضاً وعند حمولات متغيرة، وفي حالات مختلفة لإشباع الدارة المغناطيسية.

* أستاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية.

Magnetic-Field-Calculation in an Air-Gap for Non-Salient-Poles Synchronous Machine (SM) with Direct and Quadrature – Excitation System

Dr. Izzat Hasan*

(Accepted 28/6/2005)

□ ABSTRACT □

This paper studies the Direct and quadrature (d-q)-excitation method in the non-salient poles synchronous machine (SM). This was done due to its importance in terms of reactive power consumption, excitation and auto vibrational case to improve and avoid the power parameters (performance parameters i.e. η and $\cos\phi$).

Studying of the magnetic field was also done in the air-gap for (SM) under load and non-load conditions, graphically and analytically, using computer. Our study suggests using such method in the salient poles, variable loads and at different saturation cases of the magnetic circuit.

* Assistant Prof., Faculty Of Mech. Elect. Eng., -Tishreen University-Latakia , Syria .

مقدمة:

تعتبر مقدره الآلة المتوافقة على التوليد الاقتصادي للطاقة الكهربائية والاستطاعة الردية من المؤشرات الهامة لها. حيث تستخدم الآلات المتوافقة كمولدات للطاقة في محطات التوليد الكهربائية وكمعوضات أيضاً، وتستخدم كمحركات ولكن ضمن مجال ضيق وبحالات خاصة. إن العمليات الكهرومغناطيسية في الآلات المتوافقة معقدة بسبب وجود نظام التهييج، ويزداد التعقيد أكثر عند استخدام ملفي تهيج (ملف طولاني وملف عرضاني)، حيث يعطي هذا النوع من التهييج إمكانية التحسين الواضح في خواص العمل للآلة المتوافقة ويزداد استقرارها وترتفع مؤشرات الطاقة أيضاً.

يمكن باستخدام نظام التهييج الأوتوماتيكي أن نحقق زيادة في استقرار عمل الآلات المتوافقة. تعتبر إمكانية التنظيم الأوتوماتيكي لتهييج الآلة المتوافقة العادية التي تملك ملف تهيج واحد باتجاه المحور الطولاني في أيامنا هذه، وحتى بفعالية عالية، مسألة محلولة لحد كبير، لذا من الضروري البحث عن وسيلة جديدة لزيادة الاستقرار [1, 2].

إن الساحة المغناطيسية لدائر الآلات المتوافقة العادية، التي تملك ملف تهيج واحد مرتبطة بقوة مع الدائر، ويمكن أن يحصل انزياح لهذه الساحة بالنسبة للثابت فقط بفعل دوران الدائر. تفرض هذه الحالة نهايات حدية (مجال محدد) لإمكانية استقرار عمل الآلة عند قوانين مختلفة لنظام التهييج. لذا بدأ البحث في تعميم وتوسيع هذه الإمكانية منذ عشرات السنين وذلك باقتراح فكرة بناء مولدات متوافقة بتهييج طولاني - عرضاني، والتي تملك على الدائر ملفي تهيج مزاحة بالنسبة لبعضها البعض بمقدار نصف خطوة قطبية. إن التغير المستقل لتيارات هذه الملفات يمكن أن يجعل الفيض المغناطيسي الناتج عن مرورها في الملفات يغير ليس فقط بالمطال، بل أيضاً بتغير فراغياً بالنسبة للدائر. تغذى ملفات التهييج في هذا النوع من الآلات من منابع تنظيم للتيار المستمر وهذا يعطي إمكانية تغيير ليس فقط قيمة الساحة المغناطيسية، بل أيضاً تدويرها بزوايا محددة وبتجاه معطى أو محدد. إن هذا الشيء يساعد على التحسين الكبير للمميزات الستاتيكية، ويؤثر بشكل جذري على صفات سريان الحالات العابرة الكهرومغناطيسية والكهروميكانيكية [1,2,3,4].

أهمية استخدام الملف العرضاني للتهييج إلى جانب الملف الطولاني في الآلة المتوافقة ذات الأقطاب غير البارزة:

عند عمل المولدة المتوافقة في نظام التهييج غير التام يتناقص أو يقلل مجال استقرارها الستاتيكي، والذي يمكن زيادته بطريقة إنقاص المفاعلة المتوافقة أو باستخدام التنظيم الأوتوماتيكي للتهييج. يمكن إنقاص المفاعلة المتوافقة للآلة بطريقة تغيير تصميم الآلة وهذا صعب ومكلف جداً، تستخدم الطريقة الثانية (طريقة التنظيم الأوتوماتيكي للتهييج).

تملك المعوضات المتوافقة الحديثة مفاعلة تحريضية متوافقة كبيرة نسبياً ($X_d \geq 2$; $X_q \geq 1$)، سيكون تيار الثابت أقل من (I_A) حتى عند انعدام التهييج، هذا يعني أن استخدام المعوض المتوافق غير مسموح في مثل هذه الحالة. من أجل زيادة أو رفع استخدام المعوض المتوافق في نظام استهلاك الاستطاعة الردية يستخدم التهييج السالب (السليبي) عند تنظيمه الأوتوماتيكي، لكن نظراً لصغر الحمولة الفعلية يكون استخدام التنظيم

الأوتوماتيكي على المحور الطولاني له فعالية غير كافية. من أجل زيادة فعالية التنظيم الأوتوماتيكي للتهيج للمولدات المتواقة أو للمعوضات والتي تعمل في نظام التهيج غير التام يقترح استخدام ملف تهيج عرضاني على الدائر إلى جانب ملف التهيج الطولاني [1,4,5].

إذا كانت المفاعلة المتواقة على المحور الطولاني (X_d) أكبر من الممانعة السعوية للخط (X_c) فإن ذلك سيؤدي إلى إمكانية ظهور تهيج ذاتي. إن هذه الظاهرة عند العمل المستقل للمولدة والانعدام التام للتهيج تترافق بزيادة تلقائية (ذاتية) لتوتر المولدة حتى يصل إلى قيمة تؤثر على عازليته. يسبب التيار السعوي لملف المتحرض عند عمل المولدة على التوازي مع الشبكة إلى ضرورة تقليل تيار التهيج، وهذا يؤدي إلى تناقص استقرار الآلة. عند ذلك هناك إمكانية لشكلين للتهيج الذاتي: تهيج متواقت وتهيج غير متواقت.

يتصف التهيج الذاتي المتواقت بالتزايد البطيء على وتيرة واحدة للتوتر على مرابط ملف الثابت، أما عند التهيج الذاتي اللامتواقت يتزايد التوتر على شكل نبضات، والتي ترددها يمكن أن يختلف عن تردد الشبكة بعدة مرات. إن التهيج الذاتي المتواقت ممكن فقط في الآلات المتواقة ذات الأقطاب البارزة والمرتبطة بوجود العزم البارامتري:

$$M_p = U^2 (1/X_q - 1/X_d) / 2 \quad (1)$$

حيث أن:

X_q ; X_d - المفاعلة المتواقة على المحور الطولاني والعرضاني بالترتيب.

يظهر التهيج الذاتي اللامتواقت في الآلات المتواقة وغير المتواقة ومرتبطة ظهوره بالعزم البارامتري الديناميكي:

$$M'_p = U^2 (1/X'_q - 1/X'_d) / 2 \quad (2)$$

حيث أن (X'_d) تمثل المفاعلة التحريضية العابرة على المحور الطولاني.

يمكن إخماد التهيج الذاتي بوصل مقاومات أومية على التسلسل مع دائرة الثابت، لكن هذه الطريقة غير اقتصادية لا سيما في الآلات الكهربائية الضخمة. عدا عن ذلك تؤدي هذه الطريقة إلى نشوء شكل آخر لعدم الاستقرار يدعى بالتقليل (الاهتزاز) الذاتي. يمكن إخماد التهيج الذاتي المتواقت بالتنظيم الأوتوماتيكي للتهيج على المحور الطولاني، أما التهيج الذاتي اللامتواقت فلا تجدي عملية التنظيم هذه إي نفعاً. تعتبر الوسيلة أو الطريقة الفعالة لإخماد كلا الشكلين للتهيج الذاتي تنظيم التهيج على المحور العرضاني. تغطي الاستطاعة الضائعة في المقاومة الفعالة عند التهيج الذاتي على حساب الاستطاعة المنقولة إلى جهة الدائر، هذا يعني بفضل العزم الكهرومغناطيسي. إن هذا العزم يمكن أن نجعله مساوياً للصفر بتنظيم التهيج على المحور العرضاني، بالتالي يمكن التخلص من التهيج الذاتي نفسه. عند ذلك ونتيجة للثابت الزمني الصغير للملف العرضاني تجرى عملية إخماد التهيج الذاتي بشكل قوي جداً [4,5,6].

يتطلب في بعض التجهيزات الصناعية التنظيم الزاوي بالتوافق مع دوران المحورين الطولاني والعرضاني وفق برنامج معين أو الحفاظ على ثبات زاوية عدم التوافق بين هذين المحورين. يملك المحرك المتواقت العادي على الدائر ملف تهيج واحد يعطي إمكانية تغيير تيار التهيج فيه إلى تنظيم الزاوية بمقدار لا يزيد عن (10) درجات، عند ذلك تتغير مؤشرات الطاقة للآلة بشكل كبير جداً. يمكن أن نسهل مسألة تنظيم الوضع الزاوي للدائر

بوضع ملفي تهييج طولاني وعرضاني على دائر الآلة المتوافقة طالما أن تغيير علاقة التيارات في هذه الملفات يمكن أن يؤدي إلى تدوير الدائر بأي زاوية وفي أي اتجاه نريد [1,2,4].

حتى يتحقق دوران الدائر للآلة المتوافقة ذات الأقطاب غير البارزة في أي اتجاه عند حمولة ثابتة والحفاظ على مؤشرات الطاقة لهذه الآلة من الضروري ثبات القوة المحركة المغناطيسية المحصلة $F_f = \sqrt{F_{fd}^2 + F_{fq}^2}$ ، عند ذلك دوران الساحة المغناطيسية بزاوية $\alpha = \arctg (F_{fq} / F_{fd})$ متعلق بدوران الدائر بنفس الزاوية ولكن بالاتجاه المعاكس لدوران الساحة.

حيث أن: F_{fd} ; F_{fq} هي بالترتيب القوة المحركة المغناطيسية الطولانية والعرضانية لملفي التهييج و F_f هي القوة المحركة المغناطيسية المحصلة أو الكلية.

نستنتج مما سبق بأن استخدام ملفي تهييج طولاني وعرضاني على دائر الآلات المتوافقة يساعد في زيادة استخدام هذه الآلات في نظام استهلاك الاستطاعة الرديئة والتخلص من التهييج الذاتي والاهتزاز الذاتي بالإضافة إلى عملية تنظيم الوضع الزاوي للدائر ولما لذلك من آثار إيجابية.

الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية لآلة متوافقة ذات أقطاب غير بارزة عند العمل على فراغ:

من أجل الحصول على طريقة بسيطة تعطي نتائج دقيقة بما فيه الكفاية عند حساب الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية لهذا النوع من الآلات المتوافقة تقبل الافتراضات الآتية:

- 1- وجود الأسنان والمجاري على السطح الداخلي للثابت والخارجي للدائر يؤثر على قيمة الثغرة الهوائية قليلاً لذا يؤخذ ذلك بعين الاعتبار بإدخال معامل تصحيح لهذه الثغرة (معامل كارتر)؛
 - 2- يهمل تأثير الساحة التسريعية لملفات المتحرض والتهييج على الإشباع المغناطيسي؛
 - 3- يشكل ملف المتحرض وعلى طول خطوة قطبية قوة محرركة مغناطيسية موزعة وفق قانون توافقي.
- يمكن بصورة مبدئية تنفيذ ملفات التهييج للآلة المتوافقة ذات الأقطاب غير البارزة وبنظام تهييج طولاني-عرضاني (SM d-q) بطريقتين، ومزاحة على طول نصف خطوة قطبية [4,5]:

a - يملك الملف الطولاني والملف العرضاني نفس عدد اللفات ويشغل كل منهما نفس عدد المجاري على الدائر (الملفين متماثلين)؛

b - يملك كل من الملف الطولاني والعرضاني عدد لفات مختلف ويشغل كل منهما عدد مجاري مختلف على الدائر (الملفين غير متماثلين).

عند حساب الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية لكلا النوعين المشار إليهما أعلاه يختلف فقط قانون توزيع القوة المحركة المغناطيسية لملفي التهييج. سندرس في هذا المقال الطريقة التحليلية لحساب الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية مع الأخذ بالحسبان إشباع الدارة المغناطيسية للآلة في الحالتين **a** و **b**.

يحدد التحريض المغناطيسي (B_{δ}) في نقطة محددة من الثغرة الهوائية وعلى المحور (X) عند قيم معروفة للثغرة الهوائية (δ) وللقوة المحركة المغناطيسية للثغرة (F_{δ}) بالعلاقة التالية:

$$B_{\delta x} = \mu_0 \cdot F_{\delta x} / (\delta \cdot K_{\delta}) \quad (3)$$

إذ أن: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H/m}$ - معامل النفاذية المغناطيسية للهواء ؛

K_{δ} - معامل كارتر للثغرة الهوائية.

إن منحنيات القوة المحركة المغناطيسية لملفي التهيج الطولاني والعرضاني تأخذ شكل شبة منحرف متساوي الساقين، وبقاعدة مساوية لطول الخطوة القطبية ويمطال يساوي:

$$F_{fd} = w_{fd} \cdot i_{fd} \quad ; \quad F_{fq} = w_{fq} \cdot i_{fq} \quad (4)$$

حيث أن:

w_{fq} ; w_{fd} - عدد لفات الملف الطولاني والملف العرضاني للتهيج بالترتيب؛

i_{fq} ; i_{fd} - تيار التهيج لهذين الملفين وبالترتيب.

إن تغيرات (i_{fd}) في الآلة المتواقة ذات التصميم العادي، التي تملك ملف تهيج واحد على الدائر تؤدي إلى تغير فقط مطال منحنى القوة المحركة المغناطيسية (F_f) أما شكل هذا المنحنى فيبقى نفسه لا يتغير (يبقى له شكل شبة منحرف). إن الافتراضات المختلفة للتيارات (i_{fq} ; i_{fd}) في الآلات المتواقة ذات التهيج الطولاني - العرضاني تؤدي إلى تغيير ليس فقط مطال منحنى القوة المحركة المغناطيسية، بل أيضاً شكل هذا المنحنى، حيث لا يأخذ شكل شبة منحرف. على سبيل المثال يكون شكل منحنى القوة المحركة المغناطيسية للدائر عند ($F_{fq} = F_{fd}$) له شكل مثلث، ويكون مثلث متساوي الساقين في الآلات المتواقة في حال لمفّي التهيج متماثلين. إن التوزيع غير المنتظم للقوة المحركة المغناطيسية متعلق باختلاف درجات الإشباع المغناطيسي لعناصر الدارة المغناطيسية، لأن ذلك يحدث أو يسبب هبوطات مختلفة للجهد المغناطيسي في الأقسام الحديدية للدارة المغناطيسية وعلى طول خطوة قطبية [4,6].

من أجل التحديد الأكثر دقة للتحريض المغناطيسي ($B_{\delta x}$) تعتبر القوى المحركة المغناطيسية ليس فقط للتوافقيات الأساسية، بل عبارة عن مجموع القيم الكلية للقوى المحركة المغناطيسية المؤثرة في نقطة معطاة (X) بالاتجاه الطولاني والعرضاني لمفّي التهيج:

$$F_x = F_{fdx} + F_{fqx} \quad (5)$$

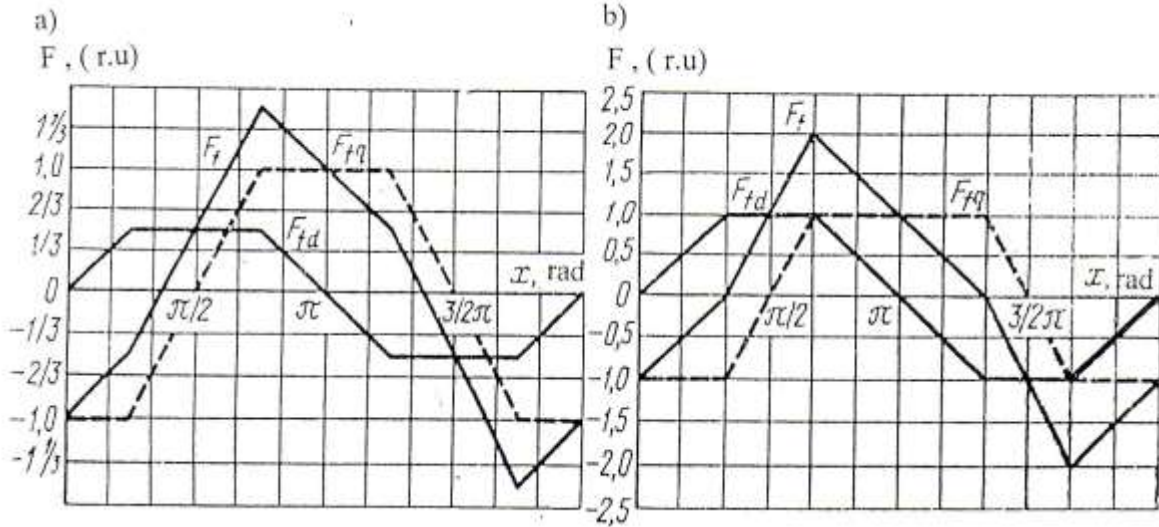
إن كل من لمفّي التهيج في الآلات المتماثلة يشغل نصف مجاري الدائر. يبين الشكل (1,a) توزيع القوى المحركة المغناطيسية على طول خطوتين قطبيتين لهذه الآلة مع ملفات متماثلة ($F_{fq} = 2F_{fd}$). إن منحنيات القوة المحركة المغناطيسية لملفي التهيج العرضاني (F_{fq}) رسمت بخطوط متقطعة. اعتماداً على هذا الشكل تكون المعادلة التحليلية للقوة المحركة المغناطيسية لأجل أقسام مختلفة للدائر لها الشكل:

$$\begin{aligned}
 0 \leq x \leq \frac{4}{\pi} & ; F_{fx} = \frac{4}{\pi} \cdot x \cdot F_{fd} - F_{fq} ; \\
 \frac{\pi}{4} \leq x \leq \frac{3\pi}{4} & ; F_{fx} = F_{fd} - F_{fq} \left[1 - \frac{4}{\pi} \left(x - \frac{\pi}{4} \right) \right] ; \\
 \frac{3\pi}{4} \leq x \leq \frac{5\pi}{4} & ; F_{fx} = F_{fd} \left[1 - \frac{4}{\pi} \left(x - \frac{3}{4}\pi \right) \right] + F_{fq} ; \\
 \frac{5\pi}{4} \leq x \leq \frac{7\pi}{4} & ; F_{fx} = -F_{fd} + F_{fq} \left[1 - \frac{4}{\pi} \left(x - \frac{5}{4}\pi \right) \right] ; \\
 \frac{7\pi}{4} \leq x \leq \frac{8\pi}{4} & ; F_{fx} = -F_{fd} \left[1 - \frac{4}{\pi} \left(x - \frac{7}{4}\pi \right) \right] - F_{fq} .
 \end{aligned} \tag{6}$$

إن معادلات القوة المحركة المغناطيسية في الآلات المتواقتة ذات ملفات التهبيج غير المتماثلة ($F_{fq} \neq F_{fd}$)، وحيث إحدى الملفات (ليكن ملف التهبيج الطولاني) يشغل (2/3) مجاري الدائر أما الملف الآخر (ملف التهبيج العرضاني يشغل (1/3) المجاري كما في الشكل (1,b) تأخذ الشكل:

$$\begin{aligned}
 0 \leq x \leq \frac{\pi}{3} & ; F_{fx} = \frac{3}{\pi} \cdot x \cdot F_{fd} - F_{fq} ; \\
 \frac{\pi}{3} \leq x \leq \frac{2\pi}{3} & ; F_{fx} = F_{fd} - F_{fq} \left[1 - \frac{6}{\pi} \left(x - \frac{\pi}{3} \right) \right] ; \\
 \frac{2\pi}{3} \leq x \leq \frac{4\pi}{3} & ; F_{fx} = F_{fd} \left[1 - \frac{3}{\pi} \left(x - \frac{2}{3}\pi \right) \right] + F_{fq} ; \\
 \frac{4\pi}{3} \leq x \leq \frac{5\pi}{3} & ; F_{fx} = -F_{fd} + F_{fq} \left[1 - \frac{6}{\pi} \left(x - \frac{4}{3}\pi \right) \right] ; \\
 \frac{5\pi}{3} \leq x \leq \frac{6\pi}{3} & ; F_{fx} = -F_{fd} \left[1 - \frac{3}{\pi} \left(x - \frac{5}{3}\pi \right) \right] - F_{fq} .
 \end{aligned} \tag{7}$$

يمكن وضع معادلات القوة المحركة المغناطيسية لملفي التهبيج من أجل أي نسبة للمجاري يشغلها كلٍ منهما وذلك بشكل مماثل للمعادلة (7). بإعطاء قيم مختلفة للقوى المحركة المغناطيسية لملفي التهبيج على المحور الطولاني (F_{fd}) والعرضاني (F_{fq}) يمكن أن تحدد واعتماداً على العلاقتين (6) و (7) القوة المحركة المغناطيسية المحصلة لملفي التهبيج في أي نقطة مختارة.



الشكل (1) - علاقة القوى المحركة المغناطيسية (F) مع x لآلة متوافقة ذات أقطاب بارزة وبتهييج طولاني-عرضاني ($SM d - q$)

إن التحريض المغناطيسي ($B_{\delta x}$) وحسب العلاقة (3) في أي نقطة معطاة (x) من الثغرة الهوائية يتحدد نسبياً بشكل أبسط فقط لأجل الآلات غير المشبعة مغناطيسياً، والتي فيها يمكن إهمال المقاومة المغناطيسية للعناصر الحديدية للآلة. أما في الآلات ذات الدارة المغناطيسية المشبعة تكون القوة المحركة المغناطيسية في الثغرة الهوائية (F_{δ}) تساوي جزءاً ليس كبيراً من القوة المحركة المغناطيسية الكلية في النقطة المعطاة، بالتالي من الضروري الأخذ بالحسبان هبوط الجهد المغناطيسي في العناصر الحديدية للآلة. نتيجة للعلاقة اللاخطية للمقاومات المغناطيسية لهذه الأقسام (العناصر) مع التحريض المغناطيسي يكون صعب جداً التحديد التحليلي لهبوط الجهد المغناطيسي في هذه الأقسام.

من أجل حل هذه المسألة نقسم الخطوة القطبية إلى (n) قسم متساوٍ (تكامل حلقي أو مغلق). تحسب الساحة المغناطيسية في حدود كل حلقة تكامل في منطقة الثغرة الهوائية وأسنان الثابت والدائر بشكل مستقل عن الساحة المغناطيسية الكلية في الأقسام المجاورة. نتيجة لهذه الأسباب تسمى الطريقة المدروسة هذه أحياناً بطريقة المنحنيات الموضعية (المحلية) للمغنته [4,5,6].

يحسب التحريض المغناطيسي لأجل كل حلقة تكاملية اعتماداً على قانون التيار الكلي:

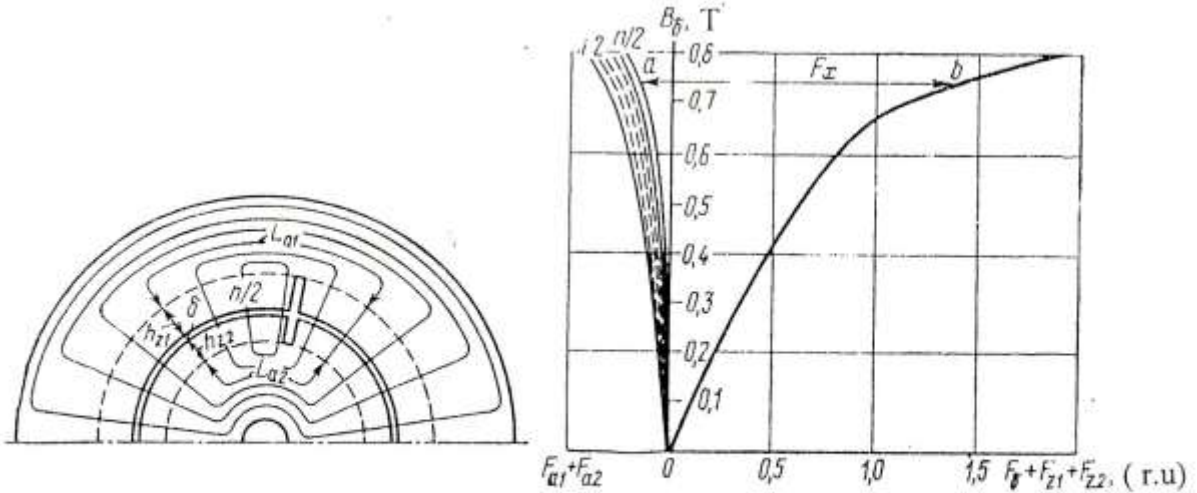
$$F_{fx} = \oint H_x dl \quad (8)$$

حيث: F_{fx} ، H_x القوة المحركة المغناطيسية وشدة الساحة المغناطيسية في نقطة (x) بالترتيب.

يفرق عادة تكامل القسم الأيمن إلى أقسام منفصلة والتي لها طول محدد. وهذه الأقسام هي: الثغرة الهوائية (δ)، المنطقة السنوية للثابت (Z_1)، المنطقة السنوية للدائر (Z_2)، قلب الثابت (a_1) وقلب الدائر (a_2). إن القوة المحركة المغناطيسية المتولدة في نقطة معطاة (x) من طول الخطوة القطبية تساوي إلى حاصل جمع القوى المحركة المغناطيسية بالوحدات النسبية ($R \cdot u$) في الأقسام المذكورة، يعني:

$$F_x = F_{\delta} + F_{z1} + F_{z2} + F_{a1x} + F_{a2x} \quad (9)$$

إن طول المسار المغناطيسي الوسطي في الثغرة الهوائية (δ)، في أسنان الثابت (h_{z1}) وفي أسنان الدائر (h_{z2}) على مسافة كل خطوة قطبية لأجل كل حلقة تكامل تكون واحدة، أما طول المسار المغناطيسي في قلب الثابت والدائر يكون مختلفاً من حلقة (إطار) إلى أخرى (شكل 2). تؤخذ هذه الحالة بالحسبان عند حساب الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية لآلة ذات أقطاب غير بارزة. إن الأرقام 1، 2، 3، n تمثل رقم الحلقة أو إطار التكامل [1,2,4].



الشكل (3) - منحنيات المغنطة الموضعية (المحلية)

الشكل (2) - الدارة المغناطيسية لآلة متوافقة ذات أقطاب غير بارزة

بإعطاء قيم مختلفة للتحريض المغناطيسي في الثغرة الهوائية نحسب بالطريقة العادية (العامة) الدارة المغناطيسية لأجل كل حلقة. عند تحديد التحريض المغناطيسي في أسنان الثابت والدائر يؤخذ بالحسبان الفيض المتسرب في المنطقة السنية للدائر:

$$\Phi_{S2} = \lambda_2 (F_\delta + F_{z1} + F_{z2}) \quad (10)$$

حيث أن:

$$\lambda_2 = \frac{l_2}{Z_2} \left(\frac{h_2 - h_{k2}}{2b_{n2}} + \frac{h_{k2}}{b_{n2}} \right)$$

l_2 - طول الدائر؛ h_2 ، h_{k2} - ارتفاع المجرى وسماكة التود للدائر؛ b_{n2} - عرض مجرى الدائر.

يعبر عن نتائج الحساب بالمنحنيات المبينة على الشكل (2). يبين في الربع الأول (الربع اليميني) منحنى المغنطة المحصل $B_\delta = f(F_\delta + F_{z1} + F_{z2})$ لأجل أقسام الدارة المغناطيسية التي لها طول مسار مغناطيسي ثابت، أما المنحنيات في الربع الثاني (الربع اليساري) فتمثل منحنيات المغنطة لأجل كل قسم مواز لقلب الثابت والدائر. إن عدد المنحنيات في الربع اليساري يساوي إلى نصف عدد الأقسام التي كانت مأخوذة على خطوة قطبية (شكل 2). إن المنحني (1) يخص حلقة التكامل رقم (1) والمنحني الثاني الحلقة الثانية وهكذا....

بمعرفة توزيع القوة المحركة المغناطيسية للتهييج على طول محيط الثغرة الهوائية اعتماداً على العلاقة (6) للآلات المتوافقة ذات ملفات التهييج المتماثلة وعلى العلاقة (7) للآلات المتوافقة ذات ملفات التهييج غير المتماثلة وبوساطة منحنيات المغنطة (شكل 2) يتحدد بسهولة التحريض المغناطيسي في نقطة معطاة (x) على محيط الثغرة

الهوائية. لأجل ذلك نمثل $F_x = ab$ على الشكل (2) بحيث أحد أطرافها يقع على المنحني في الربع الأول (الربع الأيمن) والطرف الأخر على المنحني في الربع الأيسر. إن نقطة تقاطع القطعة المستقيمة (ab) مع محور الترتيب تعطي قيمة التحريض المغناطيسي $(B_{\delta x})$ في النقطة (x) . بالحصول على (n) قيمة للتحريض المغناطيسي في مجال خطوة قطبية نحسب القيمة الأساسية للتحريض المغناطيسي $(B_{\delta 1})$ وقيمهته لأجل التوافقيات العليا إذا لزم الأمر.

إن الثغرة الهوائية بين الثابت والدائر للآلة الكهربائية تحت جميع الأقطاب عملياً يكون لها قيمة واحدة، بالتالي سيكون التحريض المغناطيسي عند قوى محركه مغناطيسية متساوية أيضاً متساوياً، ونتيجة لذلك فإن الحد الثابت عند التحليل وفق سلسلة فورييه ينعدم. عدا عن ذلك فإن أقطاب الآلة تكون متناظرة بالنسبة لمحاورها، ونتيجة ذلك تكون قيم التحريض المغناطيسي في النقاط المزاحة على خطوة قطبية واحدة متساوية بالقيمة ومتعاكسة بالإشارة:

$$B_{\delta}(x) = -B_{\delta}(x + \pi) \quad (11)$$

نسمي عادة المنحنيات التي تقبل عند مثل هذه الشروط بالمنحنيات المتماثلة (المتناظرة) بالنسبة لمحور الفواصل. إن مفكوك هذه المنحنيات يضم فقط التوافقيات الفردية. يكفي عند تحليل هذا المنحني وفق سلسلة فورييه تحديد النصف الأول للدور، يعني المجال الواقع تحت قطب واحد.

إذا كان التحريض المغناطيسي $(B_{\delta x})$ يملك (n) قيمة في حدود خطوة قطبية واحدة وبأخذ مبدأ الإحداثيات على المحور العرضاني يمكن أن نحدد بالتحليل التوافقي مطال التحريض المغناطيسي لأي مركبة توافقية (v) على المحور الطولاني $(B_{\delta v})$ والعرضاني $(B_{\delta v})$:

$$B_{\delta v} = \frac{2}{n} \sum_1^n B_{\delta x} \cdot \sin vx \quad ; \quad B_{\delta v} = \frac{2}{n} \sum_1^n B_{\delta x} \cdot \cos vx \quad (12)$$

حيث أن:

v - درجة التوافقية للتحريض المغناطيسي ؛ n - عدد النقاط المتساوية البعد والتي بها تحددت قيمة $B_{\delta x}$.
يتحدد أيضاً مطال التحريض المغناطيسي وزاويته الطورية والفيض المغناطيسي بالعلاقات:

$$B_{\delta v} = \sqrt{B_{\delta v}^2 + B_{\delta v}^2} \quad ; \quad \theta' = \arctg \frac{B_{\delta v}}{B_{\delta v}} \quad ; \quad \Phi_v = \frac{2}{\pi} B_{\delta v} \cdot l_{\delta} \cdot \frac{\tau}{v} \quad (13)$$

يمكن أن تحل المسألة المعروضة لتحديد الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية لآلة متواقتة ذات أقطاب بارزة وتهييج طولاني-عرضاني بطريقة أخرى. بالإضافة إلى التحديد البياني لقيم $B_{\delta x}$ عند قيم معطاة لـ F_{fdx} و F_{fdx} لأجل كل نقطة (x) من طول خطوة قطبية من المناسب تقريب منحني المغنطة وإيجاد العلاقة التحليلية $B_{\delta} = f(F)$. نبدأ بتحديد قيمة $(F_{\delta x})$ من العلاقة (3)، لأنه في الآلة المشبعة مغناطيسياً تشكل هذه القوة قيمة ليست كبيرة من القوة المحركة المغناطيسية الكلية [4,5].

إن استنتاج القوة المحركة المغناطيسية للثغرة الهوائية $(F_{\delta x})$ من القوة المحركة المغناطيسية (F_x) عند غياب المميزات المختصرة للعمل على فراغ يمكن أن توصلنا إلى الميزة المسماة بالمميزة الطبيعية في حالة العمل على فراغ بالوحدات النسبية:

$$F_{\delta x} = 0.85 \cdot B_{\delta x} \quad (14)$$

يمكن أن يعبر عن علاقة التحريض المغناطيسي في الثغرة الهوائية (B_{δ}) بدلالة القوة المحركة المغناطيسية الكلية (F) بالعلاقة التقريبية التالية:

$$B_{\delta} = A \cdot \arctg (C \cdot F) \quad (15)$$

حيث أن (A , C) عوامل ثابتة مأخوذة من شرط التقريب الأولي لمنحنيات المغنطة الحسابية.

بحل المعادلتين (14) و (15) نحصل على:

$$F_{\delta x} = 0.85 \cdot A \cdot \arctg (C \cdot F_x) \quad (16)$$

بتعويض العلاقة (16) بالعلاقة (3) نحصل على علاقة التحريض المغناطيسي في نقطة معطاة من الثغرة الهوائية بالقوة المحركة المغناطيسية المتولدة في هذه النقطة:

$$B_{\delta x} = 0.85 \cdot A \cdot \mu_0 \cdot \arctg (C \cdot F_x) / (\delta \cdot k_{\delta}) \quad (17)$$

بعد الحصول على قيمة التحريض المغناطيسي ($B_{\delta x}$) واعتماداً على العلاقتين (12) و (13) نحدد قيمة التحريض المغناطيسي للتوافقية الأساسية والثالثة وكذلك قيمة الفيض المغناطيسي في الثغرة الهوائية.

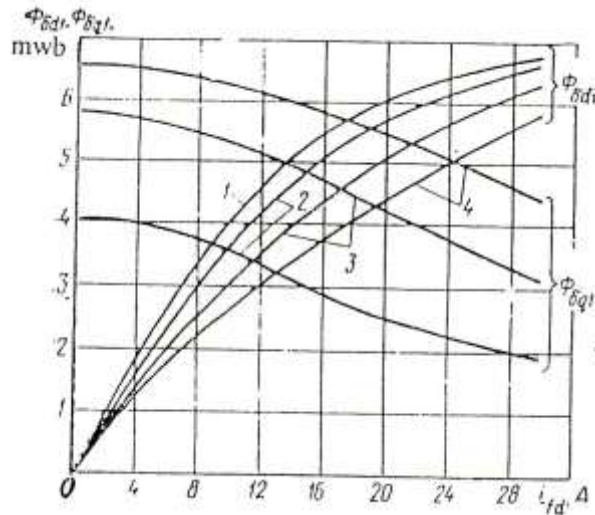
تعطي مركبتي التوافقية الأساسية للساحة المغناطيسية بالمحور الطولاني ($B_{\delta l1}$) والعرضاني ($B_{\delta q1}$) إمكانية إنشاء المميزات المغناطيسية، والتي هي عبارة عن علاقة القيم المشار إليها ($\Phi_{\delta l1}$) و ($\Phi_{\delta q1}$) أو علاقة مركبتي القوة المحركة الكهربائية ($E_{\delta l1}$) و ($E_{\delta q1}$) بتيار التهييج على محور واحد عند قيم مختلفة للتيار وغير متغيرة في الملف الآخر للتهييج.

يوضح الشكل (4) جملة من المميزات المغناطيسية الحسابية (i_{fd}) $\Phi_{\delta l1}$, $\Phi_{\delta q1} = f$ لآلة متوافقة بملفات تهييج متماثلة على الدائر عند عدة قيم ثابتة للتيار على المحور العرضاني.

يلاحظ على هذه المنحنيات التأثير المغناطيسي المتبادل للملف الطولاني والعرضاني بشكل واضح تماماً. على سبيل المثال، عند تغيير تيار التهييج على المحور الطولاني من الصفر وحتى ($28A$) ومن أجل تيار في الملف العرضاني ثابت ويساوي ($i_{fq} = 10A$) يؤدي إلى إنقاص أو تقليل السيالة المغناطيسية بالمحور العرضاني ($\Phi_{\delta q1}$) من (4.1) حتى ($2mwb$)، هذا يعني انخفاض الفيض المغناطيسي بمقدار مرتين.

تتم عملية حساب الساحة المغناطيسية والمميزات المغناطيسية باستخدام الحاسب انطلاقاً من المعادلة (6) لأجل الآلات ذات ملفات التهييج المتماثلة على الدائر والمعادلة (7) لأجل الآلات ذات ملفات التهييج غير المتماثلة على الدائر أيضاً.

لقد أعتبرت قيم تيارات التهييج على المحور الطولاني (i_{fd}) والمحور العرضاني (i_{fq}) والتي تتغير بمجال واسع كقيم للدخل عند إجراء عملية الحساب باستخدام الحاسب. عند قيم مختلفة للقوى المحركة المغناطيسية F_{fd} , F_{fq} واعتماداً على المعادلتين (6) و (7) تم تحديد القوة المحركة المغناطيسية المحصلة (F_x) في نقطة (x) معروفة إحداثياتها.



الشكل (4) - جملة من المميزات المغناطيسية $\Phi_{\delta l1}, \Phi_{\delta q1} = f(i_{fd})$ عند عدة قيم ثابتة لتيار التهيج

العرضاني: 1) - $i_{fq} = 25 A$; 2) - $i_{fq} = 18 A$; 3) - $i_{fq} = 10 A$; 4) - $i_{fq} = 0 A$

لقد استخدمت منحنيات المغنطة للأقسام المنفصلة للدائرة المغناطيسية (شكل 2) والمحسوبة لأجل آلة متواقتة ذات ملفات تهيج متماثلة على الدائر، وأيضاً لآلة ذات ملفات تهيج غير متماثلة من أجل حساب التحريض المغناطيسي في الثغرة الهوائية. تم تحديد القوى المحركة المغناطيسية ($F_{a2}, F_{a1}, F_{Z2}, F_{Z1}, F_{\delta}$) وكذلك القوة المحركة المغناطيسية الكلية (F) من أجل قيم معطاة للتحريض المغناطيسي ($B_{\delta x}$) ضمن المجال (من 0 وحتى 2) بالوحدات النسبية. عند ذلك نختار القيمة الواحدة للتحريض المغناطيسي (B_{δ}) التي عندها تتعرض قوة محرك كهربائية مقدارها ($E = 1$). إن علاقة التحريض المغناطيسي في الثغرة الهوائية بالقوة المحركة المغناطيسية المحصلة لآلة متواقتة ذات ملفات تهيج متماثلة لها الشكل:

$$B_{\delta x} = A \cdot \arctg (C \cdot F_x) \quad (18)$$

تقبل المعادلة (15) لسببين أساسيين هما:

$$1 - \text{التمثيل الدقيق للعلاقة } B_{\delta x} = f(F_x) ;$$

$$2 - \text{التطابق الدقيق بما فيه الكفاية للتفاضل } dB_{\delta x} / dF_x .$$

يتم اختيار قيمة العوامل (A) و (C) في المعادلة (15) بحيث يكون الخطأ الوسطي للحساب أقل ما يمكن. تتحدد هذه المعاملات بحيث المجموع الجبري لجميع الفروقات (الاختلافات) بين الإحداثيات الحقيقية (الأصلية) والمحسوبة وفقاً للعلاقة قريبة جداً من الصفر أو تساويه. تحدد على أساس الطرق التقريبية ووفقاً للعلاقتين (12) و

$$(13) \text{ القيم } (\Phi_{\delta}, \Phi_{\delta q1}, \Phi_{\delta l1}, B_{\delta}, B_{\delta q1}, B_{\delta l1}) .$$

إن طول خطوط القوة (طول المسار المغناطيسي) في الآلات المتواقتة غير الكبيرة ومن أجل حلقات (إطارات) مختلفة ترسمها هذه الخطوط في مقرن لفائف المغنطة لقلب الثابت (L_{a1}) ولقلب الدائر (L_{a2}) تختلف عن بعضها البعض بشكل طفيف جداً، ولذا عند الحساب تؤخذ القيمة الوسطية للمسار المغناطيسي في قلب الثابت والدائر [1,2,4,5].

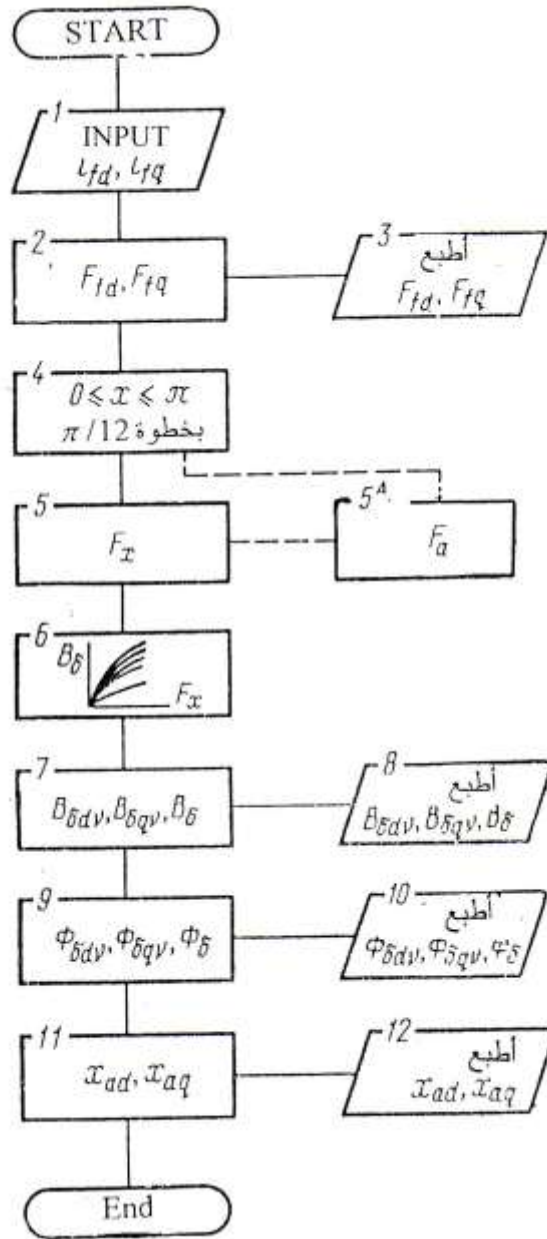
يمكن أن نضع المخطط النهجي التقريبي للآلات المتواقتة ذات ملفات التهيج المتماثلة (شكل 5) مع الأخذ بالحسبان الافتراضات المذكورة في العلاقات السابقة. إن الصندوق رقم (5) في هذا المخطط مخصص لحساب الساحة المغناطيسية للآلة عند الحمولة المتوازنة وهذا ما سنذكره لاحقاً.

بالحصول على قيم $(\Phi_{\delta q1}, \Phi_{\delta d1})$ يمكن أن نحدد القوى المحركة الكهربائية والمفاعلات التحريضية

بالشكل:

$$E_{\delta q1} = 4.44 \cdot w_1 \cdot K_{w1} \cdot \Phi_{\delta d1} ; E_{\delta d1} = 4.44 \cdot w_1 \cdot K_{w1} \cdot \Phi_{\delta q1} \quad (19)$$

$$x_{ad} = E_{\delta q1} / i_{fd1} ; x_{aq} = E_{\delta d1} / i_{fq1}$$



الشكل (5)- المخطط الانسيابي أو النهجي لحساب المميزات أو الخصائص المغناطيسية

بشكل مماثل يمكن أن نحسب البارامترات (x_{ad}) و (x_{aq}) لآلة متواقتة ذات ملفات تهيج غير متماثلة. إن هذه الطريقة المعروضة أخذت بالحسبان تأثير الإشباع للدائرة المغناطيسية والتأثير المتبادل للحلقات (للخطوط المغلقة) السيالة المغناطيسية الطولانية والعرضانية.

الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية لآلة متواقتة ذات أقطاب غير بارزة وتهيج طولاني - عرضاني عند الحمولة المتوازنة:

إن حساب الساحة المغناطيسية للآلة المذكورة عند الحمولة المتوازنة يتم بطريقة منحنيات المغنطة الخاصة (الموضعية)، والتي ذكرت في الفقرة السابقة. إن القوة المحركة المغناطيسية المحصلة (F_x) المؤثرة في نقطة معطاة (x) من الثغرة الهوائية عند نظام الحمولة المتوازنة للآلة عبارة عن مجموع القوتين المحركتين المغناطيسيتين لملفي التهيج الطولاني والعرضاني وأيضاً لملف المتحرض:

$$F_x = F_{fdx} + F_{fqx} + F_{ax} \quad (20)$$

تحدد القوة المحركة المغناطيسية لملف المتحرض بالعلاقة التالية:

$$F_a = \frac{m \cdot \sqrt{2} \cdot w_1 \cdot K_{w1} \cdot I}{P \cdot \pi} \quad (21)$$

حيث أن:

P ، w_1 ، K_{w1} - عدد أزواج الأقطاب، عدد الأطوار، عدداً ومعامل اللف لملف المتحرض بالترتيب؛
 I - تيار ملف المتحرض.

تدور القوة المحركة المغناطيسية لملف المتحرض في نظام العمل المستقر بسرعة متزامنة مع سرعة دوران الدائر، وفيما يتعلق بخاصية أو صفة الحمولة تكون مزاحة بالنسبة للمحور العرضاني بزاوية مقدارها (ψ). يمكن أن تحسب القوة المحركة المغناطيسية للمتعرض في أي نقطة (x) من طول الخطوة القطبية بالعلاقة المعروفة التالية:

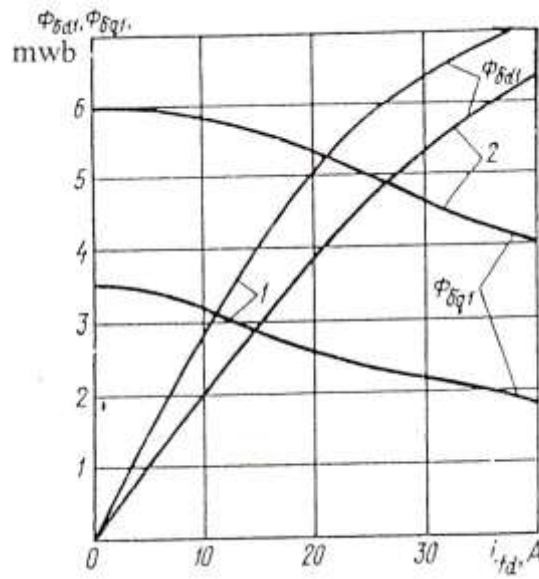
$$F_{ax} = F_a \cdot \cos(x + \psi) \quad (22)$$

إن تغيير التيارات i_{fd} ، i_{fq} ، I_a والزاوية (ψ) في الآلة المتواقتة ذات التهيج الطولاني-العرضاني يؤدي إلى حدوث تشوه واضح بمنحني القوة المحركة المغناطيسية المحصلة وهذا مرتبط بدرجة إشباع عناصر الدائرة المغناطيسية، يعني باختلاف هبوط الإجهاد المغناطيسي على أقسام الدائرة المغناطيسية على طول خطوة قطبية.

يعبر عن القوة المحركة المغناطيسية للتهيج لأجل أجزاء منفصلة للخطوة القطبية لآلة ذات ملفات تهيج متماثلة، كما هو الحال في نظام العمل على فراغ، بالعلاقة (6) ولآلة ذات ملفات تهيج غير متماثلة بالعلاقة (7). تحدد الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية عند قيم معروفة للقوة المحركة المغناطيسية وتوضعاتها المتبادلة. من خلال معطيات اللف للآلة وإعطاء قيم مختلفة للتيارات i_{fd} ، i_{fq} ، I_a وللزاوية (ψ) نستطيع ومن خلال المعادلات (6)، (20) و (22) لآلة بملفات تهيج متماثلة والمعادلات (7)، (20) و (22) لآلة بملفات تهيج غير متماثلة أن نحدد القوة المحركة المغناطيسية (F_x) في أية نقطة من طول الخطوة القطبية [5,6].

بعد ذلك تتابع عملية حساب الساحة المغناطيسية في هذه الحالة بشكل مشابه للحالة السابقة (حالة العمل على فراغ). بنتيجة الحساب ووفق العلاقتين (12) و (13) تحدد القيم $\Phi_{\delta v}, B_{\delta v}, B_{\delta q v}, B_{\delta d v}$ وبشكل تام التي تخص الساحة المغناطيسية.

يبين على الشكل (6) المميزات المغناطيسية $\Phi_{\delta d1}, \Phi_{\delta q1} = f(i_{fd})$ عند $i_{fq} = 10A$, وعند قيم مختلفة وثابتة لتيار ملف المتحرض لآلة متواقتة ذات ملفات تهييج متماثلة على الدائر. يظهر على الشكل (6) أنه في حالة الآلة مشبعة مغناطيسياً لا يمكن إهمال التأثير المتبادل للحلقات (للدوائر) المتعامدة. إن تغيير تيار التهييج على المحور الطولاني من (0) وحتى (40A) في الآلة المدروسة ومن أجل ($i_{fq} = 10A$) و ($I_a = I_n$) يؤدي إلى تناقص الفيض المغناطيسي على المحور العرضاني من (3.5) إلى (1.75 mwb).



الشكل (6) - المميزات المغناطيسية لآلة متواقتة ذات تهييج طولاني - عرضاني في نظام التحميل:

$$2) - I_a = I_n ; 1) - I_a = 0A$$

إن حساب الدارة المغناطيسية لآلة متواقتة ذات أقطاب غير بارزة وبتهييج طولاني - عرضاني بالطريقة الموضحة أعلاه يدوياً يتطلب وقتاً طويلاً جداً، والذي يمكن اختصاره عن طريق الحل باستخدام الحاسب. إن عملية الحساب الآلي في هذه الحالة تشبه عملية الحساب المشروحة في الفقرة (3) من البحث عند استخدام الحاسب. لذا في هذه الحالة يوضع المخطط النهجي للحل وبوساطة الصندوق (5A) نستطيع إيجاد القوة المحركة المغناطيسية لملف المتحرض F_{ax} (لاحظ الشكل 5). إن معطيات الدخل للبرنامج الحسابي هي التيارات I_a, i_{fq}, i_{fd} والزاوية (ψ) وإحداثيات النقطة (x) على طول محيط القطر الداخلي للثابت. عند قيمة معطاة للنقطة (x) نحدد ووفقاً للعلاقة (6) أو (7) القوة المحركة المغناطيسية لملي التهييج (F_{fx}) ووفقاً للعلاقة (22) نحدد القوة المحركة المغناطيسية لملف المتحرض (F_{ax}). تكون القوة المحركة المغناطيسية المحصلة في كل نقطة (x) عبارة عن مجموع القوتين السابقتين:

$$F_x = F_{fx} + F_{ax} \quad (23)$$

تحدد قيمة التحريض المغناطيسي ($B_{\delta x}$) في النقطة (x) بالعلاقة (F_x) وبالعلاقة التقريبية (15) بواسطة البرنامج المستنتج. بالحصول على قيمة ($B_{\delta x}$) على أساس الطرق التقريبية للتحليل التوافقي وحسب المعادلات (12) وحتى (16) تحدد جميع القيم التي تصف الساحة المغناطيسية. اعتماداً على التوافقية الأساسية للفيض المغناطيسي (Φ_1) نحدد قيمة القوة المحركة الكهربائية للطور بالعلاقة:

$$E_{\delta} = 4.44 \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot K_{w1} \cdot \Phi_{\delta 1} \quad (24)$$

عند وجود مميزة العمل على فراغ وبمعرفة قيم الزاوية (ψ) والتيارات بملفات التهيج وبملف المتحرض يمكن وباستخدام الحاسب تحديد البارامترات (x_{aq} , x_{ad}) للنظام المعطى.

النتائج:

- 1- يعطى استخدام ملفي تهيج طولاني وعرضاني على دوائر الآلة المتواقتة ذات الأقطاب غير البارزة إمكانية التحسين الواضح في خواص العمل وزيادة الاستقرار ورفع مؤشرات الطاقة ($\eta \cdot \cos\phi$)؛
- 2- توسع مجال استخدام الآلات المتواقتة ذات ملفي التهيج في نظام استهلاك الاستطاعة الردية؛
- 3- يمكن إخماد التهيج الذاتي الذي يظهر عندما المفاعلة المتواقتة على المحور الطولاني (x_d) أكبر من الممانعة السعوية للخط (x_c) والذي يسبب زيادة في توتر المولدة وحرق عازليتها، وذلك باستخدام ملفي تهيج طولاني - عرضاني والتنظيم الأوتوماتيكي للتهيج على المحور العرضاني؛
- 4- إمكانية تسهيل عملية تنظيم الوضع الزاوي للدوائر باستخدام التهيج الطولاني - العرضاني؛
- 5- تتلقى ملفات التهيج تغذيتها من منابع تنظيم للتيار المستمر وهذا يعطى إمكانية تغيير ليس فقط قيمة الساحة بل أيضاً تدويرها بزوايا محددة وبتجاه معطى وهذا يساعد في تحسين المميزات الميكانيكية للآلة وزيادة مجال استخدامها؛
- 6- إن تغيير قيمة تيار التهيج بالملف الطولاني للآلة المتواقتة العادية يؤدي إلى تغيير مطال منحنى القوة المحركة المغناطيسية أما شكله فيبقى نفسه (شكل شبه منحرف)، أما في حال التهيج الطولاني - العرضاني فإن تغيير قيمة تيار التهيج يؤدي إلى تغيير مطال وشكل منحنى القوة المحركة المغناطيسية؛
- 7- يختلف منحنى مغنطة الثغرة الهوائية وأسنان الثابت والدوائر عن منحنيات المغنطة لقلب الثابت والدوائر وذلك لأن طول المسار المغناطيسي في الأولى ثابت وفي الثانية متغير؛
- 8- حساب التحريض المغناطيسي في نقطة (x) من طول محيط الثغرة الهوائية يساعد في تحديد التحريض المغناطيسي الطولاني والعرضاني للتوافقية الأساسية وللتوافقيات العليا وكذلك الفيض المغناطيسي؛
- 9- إن الطريقة المتبعة في حساب الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية لآلة متواقتة ذات تهيج طولاني - عرضاني يمكن تطبيقها سواء كانت الآلة تعمل على فراغ أو تحت الحمولة وسواء كان ملفا التهيج متماثلين أو غير متماثلين وذلك بإدخال بعد التعديلات في كل حالة.

المراجع:

.....

- 1- A. B. Ivanov Smalenskie - Electrical Machines - Moscow – 1980
- 2- D. Z. Proskine - Electrical Machines and micro Machines - Moscow – 1990
- 3- E. R. Filho ; F. L. Nunes - Synchronous Machine field current calculation taking into account the magnetic saturation - 2002.
- 4- М. Г. Мхматов - Синхронные Машины- Москва- Высш. Шк. 1984
- 5- И. Л. Осин , Ю. Г. Шакарян - Электрические Машины "Синхронные Машины - Москва - Высшая Школа- 1990.
- 6- Ахматов М. Г. - Магнитное поле неявнополюсной насыщенной синхронной машины продольно-поперечного возбуждения- Электротехника-№6 - 1977.