مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية – سلسلة العلوم الهندسية المجلد (19) العدد (5) 1997
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Engineering Science Series Vol. (19) No (5) 1997

تأثير التواقيات العالية للحقل المغناطيسي على المميزة الميكانيكية للآلات التحريضية

الـــــدكتور عـــــزت حســـــن*

(قبل للنشر في 1997/12/16)

☐ الملخّص ☐

يمكن إيجاز موضوع البحث لإعطاء فكرة معينة حول التواقيات العالية، ومقارنتها مع التواقية الأساسية، حيث يتطرق البحث إلى الأسباب المؤدية لظهور التواقيات العالية للساحة المغناطيسية، والتي يعود منشؤها إلى أسباب تصميمية تتعلق بالمحرك نفسه، كالتواقيات الناشئة عن وجود الأسنان والمجاري على الجزأين الثابت والدائر للمحرك، والتواقيات الناشئة عن نوعية اللف وشكل المجاري، أو أسباب منشؤها في الدارات الإلكترونية (مبدلات ثايرستورية) المستخدمة لتنظيم سرعة دوران المحركات الكهربائية.

كما أن البحث يتطرق إلى القوى المحركة الكهربائية للملف الناشئة عن التواقيات العالية للساحة، والعزوم الطفيلية المختلفة (عزوم تحريضية، عزوم متواقتة، عزوم ردّ فعلية، ...الخ)، وتأثير هذه القوى والعزوم على أداء العمل، وعلى المميزة الميكانيكية للآلة التحريضية، ثم إيجاد الحلول المختلفة للتخلص من هذه التواقيات، أو لإضعاف تأثيراتها على المميزة الميكانيكية للآلة.

* كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية – جامعة تشرين – اللاذقية – سورية.

مجلة جامعة تشرين للدراسات والبحوث العلمية - سلسلة العلوم الهندسية المجلد (19) العدد (5) 1997
Tishreen University Journal for Studies and Scientific Research –Engineering Science Series Vol. (19) No (5) 1997

Effect of the High Harmonics of the Magnetic Field on the mechanical Characteristic of Induction Machines

Dr. Izat Hassan*

(Accepted at 16/12/1997)

❐ ABSTRACT ❐

The present work could be summarized to give a special idea about high harmonics in comparison with the main harmonic. This work shows the reasons that cause high harmonics of the magnetic field, which occurred due to designing factors related to the motor itself, such as harmonics that occurred due to teeth and slots that exist in the stator and rotor of the motor, and harmonics that occurred due to the type of winding and slots forms, or due to other resonant such as thresher's invertors used for controlling the speed of Electric motors.

Also the present work deals with the "EME" of the winding produced by the high harmonics of the field, and the additional difference in momentum (induction momentum, synchronous momentum and reactional momentum...Etc.), it deals also with the effect of the mechanical characteristics of the induction machine, then finding the different solutions to get – rid – of these harmonics or to weaken their effects on the mechanical characteristics of the machine.

Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

1-الأسباب المؤدية لظهور التوافقيات العالية للحقل المغناطيسي:

يكون الحقل المغناطيسي في الثغرة الهوائية للآلة التحريضية لا جيبياً، ويحوي إضافة إلى التوافقية الأساسية عدداً كبيراً من التوافقيات العالية للحقل، والتي تقسم عادة إلى توافقيات فراغية وتوافقيات زمنية.

تظهر التوافقيات الفراغية نتيجة التوزع اللاجيبي للقوة المحركة المغناطيسية في الثغرة الهوائية، هذا التوزع الناشئ عن وجود الأسنان والمجاري على السطح الداخلي للثابت والخارجي للدائر، ونتيجة جملة من العوامل الفنية الأخرى (لامركزية الثابت والدائر، مخروطية الدائر، أهليلجية الثغرة الهوائية...الخ). وتختلف التوافقيات الفراغية العالية للحقل المغناطيسي عن التوافقية الأساسية بكون التوافقيات الفراغية العالية تملك عادة مطالاً أصغر بشكل واضح، وسرعات دوران أخرى.

تخلق التوافقيات الفراغية العالية مجموعة عزوم إضافية تؤثر على الدائر، ويبدأ تأثيرها على المميزة الميكانيكية للمحرك. تقسم هذه العزوم إلى تحريضية، وتزامنية وردّ فعلية واهتزازية.

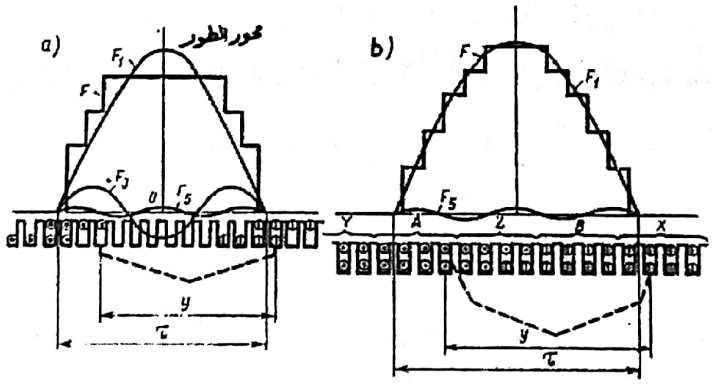
أما التوافقيات الزمنية للحقل المغناطيسي فتظهر نتيجة تغذية المحرك بتوتر لاجيبي وغير متناظر (متزن). وكمثال على ذلك عند تغذية المحرك عن طريق مبدلات ترددية ستاتيكية، حيث يغذّى ملف الثابت بتوتر له نبضات مستطيلة، أو عند وصل عناصر لاخطية مع دارة الثابت (مفاعلات لاخطية، مقوّمات وغيرها). في هذه الحالة تحتوي الأطوار على مجموعة من التوافقيات العالية إلى جانب التوافقية الأساسية، والتي كل منها يملك تردداً مساوياً $(f_v = v, f_1)$ ويشكل هذا أيضاً مجموعة توافقيات فراغية مشابهة للتوافقيات الأساسية، لكن تدور بسرعة أكبر من سرعة دوران التوافقية الأساسية بمقدار v مرة.

إن التوافقيات التي تنشأ عند تغذية المحرك بتوتر لاجيبي تحدث عزوماً تحريضية واهتزازية إضافية. تؤدي كافة أنواع التوافقيات العالية (الفراغية والزمنية) إلى حدوث ضياعات إضافية للاستطاعة في الملفات وفي الدارة المغناطيسية للآلة. وسندرس الآن بإسهاب بعض الأسباب المؤدية إلى نشوء التوافقيات العالية الفراغية الحاصلة نتيجة لاجيبية توزع القوة المحركة المغناطيسية في الثغرة الهوائية.

يعتبر توزع القوة المحركة المغناطيسية للملف في الآلة المتناظرة دورياً، ويتغير بمنحني يمكن نشره إلى سلسلة توافقية تنعدم فيها التوافقيات الزوجية. ويمكن أن نحسّن شكل منحني توزيع القوة المحركة المغناطيسية باستخدام اللف بخطوة مختصرة، لكن هذه الطريقة لا تمكننا من الحصول على شكل موجة جيبية مثالية لمنحني القوة المحركة المغناطيسية. يوضح الشكل (1-a) منحني القوة المحركة المغناطيسية لطور من أطوار ملف محرك ثلاثي الطور

فيه $\beta = {}^{y}/_{\tau} = 0.835, q = 4$. ويوضح الشكل (1-b) منحني القـوة المحركـة المغناطيسـية للملف ككل والنتائج بطريقة جمع القوى المحركة المغناطيسية للأطوار الثلاثة. وبمقارنة هذه المنحنيات يمكن أن نثبت أن شكل موجة القوة المحركة المغناطيسية للملف ككل يتحسن بشكل ملحوظ. عند ذلك تظهر التوافقية الثالثة بشكل واضح على المنحني المرسوم على الشكل (1-a) وتتلاشى على الشكل (1-b).

في الحالة العامة تظهر التوافقيات من المرتبة $v = 2m.k \pm 1$ وحيـث $k = 0,1,2,3...$. وفي حال الملف ثلاثي الطور (m=3) تكون $v = 1,5,7,11...$ ، عند ذلك تتلاشى التوافقيات ذات الأرقام التي هي من مضاعفات 3. وهكذا فإن الخطوة القطبية للتوافقية v والمرموز لهـا τ_v أقل بمقدار v مرى من الخطوة القطبية للتوافقية الأساسية (τ1)، ويكون ترددهـا $f_v = v.f_1$. والتوافقيات الفراغية العالية للقوة المحركة المغناطيسية لها سرعة دوران nv أقل بمقـدار v مرة من سرعة دوران التوافقية الأساسية n1. إن التوافقيات مـن المرتبـة (6k+1)، يعنـي 7،13،19،... تدور بنفس اتجاه دوران التوافقية الأساسية وتشكّل عزوماً Tv اتجاهها أيضـاً بنفس اتجاه العزم الناشئ عن التوافقية الأساسية T1، أما التوافقيات من المرتبة (6k-1)، يعني 5،11،17،... فإنها تدور باتجاه معاكس لدوران التوافقية الأساسـية وينشـأ عنهـا عـزوم فرملة[5,6].



الشكل (1): توزع القوة المحركة المغناطيسية الناشئ عن طور واحد (a) وثلاثة أطوار (b) لملف ثلاثي الطور.

في الحالة العامة تعطى القيمة المطالية للتوافقية v للقوة المحركة المغناطيسية لطـور الملـف بالمعادلة:

$$F_{\Phi v} = \frac{2.\sqrt{2}}{\pi}.\frac{w.K_{wv}}{v.P}.I = 0.6w.K_{w.v}.I/(v.p) \quad (1)$$

باعتبار أن K_{wv} هو عامل اللف للتوافقية v ويساوي:

$$K_{wv} = K_{pv}.K_{yv} \quad (2)$$

إذ أن $K_{yv} = \sin\left(\frac{v.y.\pi}{\tau.2}\right)$: معامل اختصار خطوة اللف الموافق للتوافقية v.

$K_{pv} = \frac{\sin\frac{v\alpha}{2}}{q\sin\frac{v\alpha}{2q}}$: معامل التوزيع للملف الموافق للتوافقية v.

أما القيمة المطالية للتوافقية v للقوة المحركة المغناطيسية لأجل m طور للملف:

$$F_v = mF_{\Phi v}/2 = \sqrt{2}mw_{\Phi}.K_{wv}.I/(\pi.v.p) \quad (3)$$

إذ أن $F_{\Phi v} = 2.\sqrt{2}.w_{\Phi}.K_{wv}.I$: القوة المحركة المغناطيسية للطور للتوافقية v.

I: تيار الطور. P: عدد أزواج الأقطاب. $w_{\Phi} = w/(v.\pi.p)$: عدد اللفات التسلسلية للطور.

لأجل بعض التوافقيات، وعند q> يكون معامل التوزيع لهذه التوافقيات مساوياً إلى معامل التوزيع للتوافقية الأساسية ($K_{pv} = \pm K_{p_1}$) أي ان إضعاف القوة المحركة الكهربائية لا يحصل في هذه التوافقيات، وتدعى هذه التوافقيات ($v=v_z$) من المرتبة السنية، وتحدد درجتها كما يلي:

$$v_z = 2mqk \pm 1 = k\frac{z}{p} \pm 1 \quad (4)$$

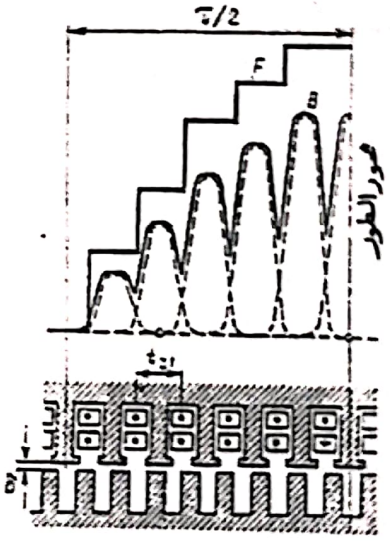
إذ أن k=1,2,3,... عندما يكون k=1 فإن هذا الترتيب قريب من قيمة الأسنان المقابلة لزوج من الأقطاب Z/P، ومن هنا جاءت تسميتها بالسنية. من أجل الملفات ثلاثية الطور تكون: $v_z=6qk\pm1$ فمثلاً: عندما يكون q=1 فإن: $v_z=5,7,11,13,$.

وعندما يكون q=2 فإن $v_z=11,13,23,25,...$ ستعتبر مدروجات ذات مرتبة سنية[2،3].

إن التوافقيات الأولى من المرتبة السنية $v_{z_1} = Z/P \pm 1$ تملك المطال الأكبر، حيث [illegible] افقيات تتزايد بشدة، وليس هذا بسبب كون معاملات اللف [illegible]ات الموافقة قريبة من الواحد فحسب (كذلك الأمر [illegible]، ولكن بسبب التأثير الواضح لتسنن الثابت كذلك. إذا تم [illegible]وة السنية للثابت $(t_{z_1} = 2\pi/_1 = 2p\tau/Z_1)$، فإن القوة [illegible]ركة الكهربائية في كافة توافقيات المرتبة السنية تضغطان

2- التوافقيات الناشئة عن وجود الأسنان والمجاري على الثابت والدائر:

يمكن تفسير ظهور مثل هذه التوافقيات بسبب الناقلية المغناطيسية المختلفة للثغرة الهوائية. وبالتالي يتحدد منحني الحقل (المجال) المغناطيسي كتوزيع للقوة المحركة المغناطيسية، وكتوزيع للناقليات المغناطيسية لهذه الثغرة. وفي النتيجة يكتسب منحني التحريض المغناطيسي (B) المتولد عن الملف، وبسبب التوزيع المتدرج للقوة المحركة المغناطيسية شكلاً معقداً (الشكل 2)، ويمكن أن يمثل كمجموع لمنحنيات التحريض (B_z) المؤثرة في حدود كل خطوة سنية t_z. يمكن أن تحدد المركبات التوافقية لتحريض الحقل المحصّل للملف بطريقة جمع المركبات التوافقية لتحريض الحقل (B_z) لكل خطوة سنية (شكل 3,a). وتتشكل مركبة مستمرة ومجموعة توافقيات B_{zv} على شكل منحني متناظر B_z بالنسبة لمنتصف الخطوة السنية عند تحليلها إلى سلسلة توافقية.



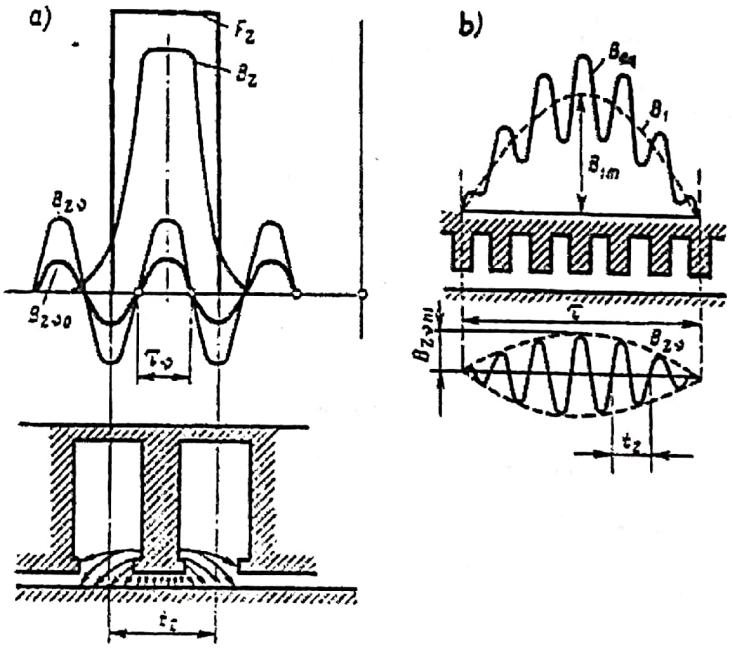
الشكل (2):

توزيع القوة المحركة المغناطيسية والتحريض على حدود خطوة قطبية. عند وجود أسنان على الثابت والدائر.

تتوضع التوافقيات B_{zv} على الحقل المغناطيسي للتوافقية الأساسية B_1، شكل (3,b)، ونتيجة لذلك يتشوّه التحريض المغناطيسي المحصّل B_{eq} في الثغرة الهوائية، ويظهر هذا التشوّه بوضوح كامل. إذا كان الجزء الثابت أو الدائر أملس فإن الخطوة القطبية للتوافقية السنية تتحدد بدلالة القطر D وعدد الأسنان Z للثابت أو الدائر:

$$\tau_z = \pi.D/Z$$

إن مطال التوافقية يتعلق بالعلاقة بين الأبعاد الهندسية للمنطقة السنية، عدد الأسنان وقيمة الثغرة الهوائية. تحسب علاقة مطال توافقيات التحرض $B_{z\nu_0}, B_{z\nu}$ مع الأخذ بالاعتبار التسنن مرة ومع إهمال هذا التسنن مرة أخرى للثابت وللدائر (شكل 3,a). ويدعى بمعامل تأثير المجاري للتوافقية ν ويرمز له C_ν. تعتبر التوافقيات الأولى للمرتبة السنية $\nu_{z_1} z / p + 1$ هي الأكثر شدة وخطراً. إن مطال التحريض المغناطيسي لهذه التوافقيات $B_{1\nu m} = \mu_0 . F_{1\nu m} . C_\nu / (\delta . k \delta_2)$ يأخذ قيمة كبيرة ولا يعود هذا إلى كون معاملات اللف الداخلة في العلاقة (2) و(3) قريبة من الواحد وتتطابق مع معاملات اللف للتوافقية الأساسية $(k_{P_\nu} = k_{P_1}, k_{y_\nu} = k_{y_1})$، وإنما بسبب تأثير تسنن الثابت. يمكن أن يضل معامل تأثير الأسنان C_ν،عندما تكون مجاري الثابت من النوع المفتوح، إلى 4÷3.



الشكل (3): توزع التحريض ضمن حدود خطوة سنية (*a*)
وظهور التوافقيات العالية للمرتبة السنية (*b*)

إن الخطوة القطبية للتوافقيات السنية تكون أصغر بمقدار ν مرة من الخطوة القطبية للتوافقية الأساسية $(\tau_z = \tau_1 / \nu_z)$. ولهذا فإن سرعة دوران التوافقيات السنية $n_{\nu z}$ أصغر بمقدار ν مرة من سرعة دوران التوافقية الأساسية n_1[6،8].

في حال وجود أسنان على الثابت والدائر يمكن اعتبار ظهور مجموعتين من التوافقيات السنية في الثغرة الهوائية:

1- ν_{vs}: التوافقيات التي تظهر نتيجة وجود أسنان على الثابت، لكن الدائر يكون أملس.

2- v_{zR}: التوافقيات التي تظهر نتيجة وجود أسنان على الدائر، لكن الثابت أملس.

إذا كان الحقل الناشئ عن التوافقيات السنية ($v_{zs} = z_1 \pm p$) يحرّض قوة محركة كهربائية في الملفات المغلقة للدائر الذي يملك Z_2 قضيباً، فإن القوة المحركة المغناطيسية الردّية للدائر تضم التوافقيات السنية ($v_{zR} = z_2 - (z_1 \pm p)$.

يؤثر على مطال التوافقيات السنية العلاقة بين عدد أسنان الثابت z_1 والدائر z_2، واختيار العلاقة اللازمة ما بين z_2،z_1 (كمثال $z_2 < z_1$)، وباستخدام خطوة لف مختصرة للمجاري يمكن أن يُخفّض مطال التوافقيات الفراغية.

3- القوة المحركة الكهربائية لملف بسبب التوافقيات العالية للساحة (الحقل):

عند دوران الساحة المغناطيسية بالنسبة لنواقل الملفات في الآلة، يتحرّض في هذه الآلة قوة محركة كهربائية. طالما أن النواقل بصورة عامة تعبر الأقطاب ذات القطبية وبشكل دوري، فإن القوة المحركة الكهربائية المتحرضة ستغير اتجاهها. إن زمن تغير القوة المحركة الكهربائية يتناسب مع انتقال قطبين متجاورين بالنسبة للناقل.

تحرّض التوافقيات العالية للساحة المغناطيسية في الملف قوة محركة كهربائية E_v. وإن الخطوة القطبية τ_v للتوافقية v أصغر بمقدار v مرات من الخطوة القطبية τ للتوافقية الأساسية.

بسبب الشكل الدوري للقوة المحركة الكهربائية تظهر التوافقيات العالية للقوة المحركة الكهربائية وللتيار، وإن لهذا تأثيرات سلبية على عمل الآلة وعلى المستقبلات، حيث تؤدي إلى ضياعات إضافية فيها. عدا عن ذلك تساهم التوافقيات العالية لمركبات التيار السارية في خطوط النقل في ظهور توترات زائدة على أقسام مختلفة منها، وتظهر تأثيرات تحريضية على مقربة من خطوط الاتصال[1].

إن شكل منحني القوة المحركة الكهربائية يتعلق إلى درجة كبيرة، بشكل منحني توزيع السيالة المغناطيسية على خطوة قطبية. ولكن الحصول على توزيع جيبي لهذه السيالة غير ممكن عملياً. يمكن أن يتحقق أن يحصل تحسّن متتابع على منحني القوة المحركة الكهربائية على حساب الملف، ولأجل ذلك يجب، وكما لوحظ سابقاً، أن يتم اللف بخطوة مختصرة ($k_{yv} \neq 1$)، وأن يكون الانزياح بالطور للقوى المحركة الكهربائية المتولدة في وشائع متجاورة لمجموعة واحدة أكبر بمقدار v مرة، ويحسب معامل التوزيع استناداً للعلاقة (2). بنفس الطريقة نجد أن زاوية ميل المجاري بالنسبة لساحة التوافقية v ستكون أكبر بـv مرات من زاوية ميل المجاري للتوافقية الأساسية، وبالتالي نحصل:

$$K_{cv} = \frac{\sin\frac{\gamma_{cv}}{2}}{q\sin\frac{\gamma_{cv}}{2q}} = \frac{\sin\left(\frac{v.b_c}{\tau}.\frac{\pi}{2}\right)}{\frac{v.b_c}{\tau}.\frac{\pi}{2}} \quad (5)$$

إذ أن: $\gamma_{cv} = \frac{v.b_c}{\tau}.\pi$: زاوية ميل المجاري للتوافقية v، b_c: قيمة ميل المجرى[1،3].

هذا مع العلم أنه يمكن أن يملك العاملان k_{cv} , k_{wv} وجداؤهما قيماً سالبة. وهذا يعني أن طور E_v قد دار بزاوية 180° بالنسبة لوضعه عندما يكون جداؤهما موجباً. وتحسب القوة المحركة الكهربائية للطور الناتجة عن التوافقيات العالية بالعلاقة:

$$E_v = \pi\sqrt{2}.f_v.w.k_{wv}k_{cv}.\phi_{\delta v} = 4.44f_v.w.k_{wv}.k_{cv}.\phi_{\delta v} \quad (6)$$

وعند ذلك يحدد الفيض المغناطيسي للتوافقية v بالعلاقة:

$$\phi_{\delta v} = \frac{2}{\pi}.B_{\delta v}.l_\delta.\tau_v = \frac{2}{\pi v}.B_{\delta v}.l_\delta.\tau \quad (7)$$

إذ أن: $B_{\delta v}$: سعة التوافقية v للتحريض المغناطيسي في الثغرة الهوائية.

$f_v = w_v/(2\pi)$: تردد القوة المحركة الكهربائية للتوافقية v.

w_v: السرعة الزاوية للتوافقية v للساحة Rad/sec.

لذلك يمكن القضاء على التوافقيات العالية بتغير طريقة إنشاء الملفات (اختصار خطوة اللف،توزع الملف في المجاري بحيث يكون عدد الوشائع في مجموعة الوشائع q>1،ميل المجاري).

إن إمكانية التخلص من كل التوافقيات العالية باختصار خطوة اللف غير ممكن. ولذا يجب السعي لإضعاف التوافقيات القوية (التوافقيات ذات المرتبة المنخفضة) كمثال v=5, v=3، ولهذا الغرض يتم اختصار خطوة اللف بمقدار 1/6 أي $\beta = 5/6 = \frac{y}{\tau}$. وعند ذلك تصغر القوة المحركة الكهربائية لهذه التوافقيات بمقدار أربع مرات بالمقارنة مع الحالة التي فيها β=1، وبنفس الوقت فإن اختيار β=5/6 لا يؤثر بشكل ملحوظ على التوافقية الأساسية للقوة المحركة الكهربائية.

كما يتضح عند توزيع الملفات بالمجاري أن لا تكون q=1، لأن ذلك يجعل $k_{pv}=\pm1$ من أجل كافة التوافقيات، وبالتالي فإن إضعاف التوافقيات العالية للقوة المحركة الكهربائية في الملف، بطريقة توزيع الملفات في المجاري، يكون معدوماً. ولذا ينصح أن تكون q>1 دائماً، وهذا يجعل $|k_{pv}|<K_{p1}$ وبنفس الوقت يكون تأثير التوزيع على التوافقية الأساسية للقوة المحركة الكهربائية شبه معدوم.

4- العزوم التحريضية الإضافية:

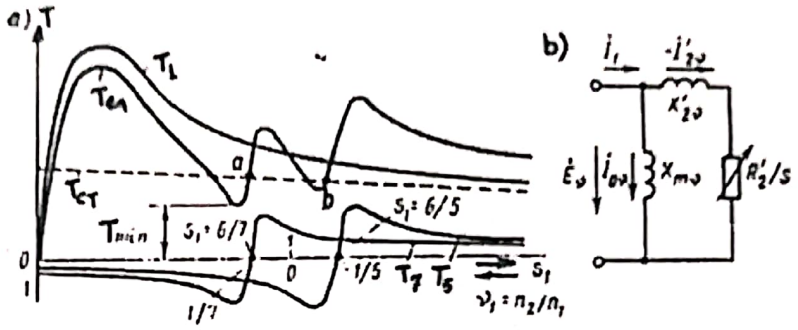
تنشأ العزوم التحريضية نتيجة التأثير المتبادل للتوافقيات الفراغية (v) لساحة الثابت مع التيارات التي تحرضها في ملف الدائر. فتبعاً لاتجاه دوران الساحة الموافقة للتوافقية التي ينشأ عنها هذا العزم التحريضي T_v يمكن أن يتطابق اتجاهه مع اتجاه دوران العزم الأساسي T_1. هذا يعني مع اتجاه دوران الدائر، أو يمكن أن يكون معاكساً لاتجاهه. وبما أنه يوجد في الثغرة الهوائية للآلة التوافقيات الفردية فقط (تستثنى التوافقية 3 ومضاعفاتها) يكون العزم التحريضي المحصّل معطى:

$$T_{eq} = T_1 + T_5 + T_7 + T_{11} + T_{13} + \ldots \quad (8)$$

إن التوافقيات التي تملك مطالاً أعظمياً، عدا عن التوافقية الأساسية، هي التوافقية الخامسة والسابعة للساحة (للحقل). لذا سندرس تأثير هاتين التوافقيتين على المميزة الميكانيكية للمحرك.

إن دارت التوافقية الأولى للساحة المغناطيسية للثابت بسرعة دوران n_1 فإن التوافقية v للساحة ستدور بسرعة ($n_{1v} = \pm n_1/v$)، حيث الإشارة (+) للساحة المغناطيسية التي تدور بنفس اتجاه دوران الساحة الأساسية، والإشارة (-) للتوافقية التي تدور بشكل معاكس، للاختصار نسمي التوافقية ذات الإشارة (+) بالتوافقية المباشرة ونسمي الأخرى بالتوافقية العكسية.

تدور التوافقية السابعة للساحة بنفس اتجاه دوران التوافقية الأولى. وبسرعة مقدارها (m/7). في لحظة الإقلاع (S=1)، يكون العزم $T_7>0$، يعني أن هذا العزم يؤثر بالتوافق مع العزم الكهرومغناطيسي الأساسي T_1. عندما تبدأ الآلة بالدوران (S<1) فإن سرعة دوران الساحة للتوافقية السابعة تنخفض بالنسبة للدائر، ولمّا ($n_2=n_1/7$)، يعني عندما S=6/7=0.857 تصبح سرعة ساحة هذه التوافقية صفراً (شكل 4,a). عند ذلك تبدو التوافقية السابعة v_7 ساكنة بالنسبة للدائر ولا تحرّض تياراً في ملفاته، وبالتالي يكون ($T_7=0$). وعند التزايد المستمر لسرعة دوران الدائر إلى أن تصبح سرعته أكبر من سرعة التوافقية السابعة v_7. فإن العزم (T_7) يغير اتجاهه ويصبح عزماً كابحاً.



الشكل (4): المميزة الميكانيكية للآلة التحريضية مع الأخذ بالاعتبار تأثير العزوم التحريضية الإضافية (*a*) والدارة المكافئة للآلة لأجل التوافقية v للساحة المغناطيسية (*b*).

وتدور التوافقية الخامسة للساحة المغناطيسية (ν_5) بالاتجاه المعاكس لدوران ساحة التوافقية الأولى. وعلاقة العزم T_5 مع سرعة دوران الدائر تملك أيضاً نفسها الصفة التي تأخذها التوافقية السابعة (T_7). لكن الدوران التزامني للدائر بالنسبة لهذه التوافقية (شرط $T_5=0$) يحصل عند $n_2=-n_1/5$.

هذا يحصل بنظام الفرملة عند S1=6/5=1.2. يلاحظ على الشكل (4,a) العزوم التحريضية الإضافية T_7, T_5 وتشوهها لمنحني العزم المحصل T_{eq} والتي يظهر بها انحدار (هبوط). وهكذا تؤثر أيضاً عزوم تحريضية إضافية أخرى T_{11}، T_{13}،... ولكن تأثيرها أضعف[4،7،8].

يحصل التشوه الكبير للمميزة الميكانيكية في منطقة الانزلاق القريبة من (S=1)، ففي حالة إقلاع المحرك (النقطة a على الشكل 4,a) أو عند كبحه (النقطة b على نفس الشكل) حيث العزوم التحريضية الإضافية تكون أعظمية يمكن أن يحصل في هاتين النقطتين نظام

عمل مستقر عند سرعة الدوران الصغيرة للدائر، وذلك عندما يكون العزم الستاتيكي كبير بما فيه الكفاية T_{CT}. فمثلاً عند إقلاع المحرك يمكن أن يكتسب سرعة وتبدأ هذه السرعة بالتزايد وفقط حتى سرعة دوران موافقة (مناسبة) للنقطة (a)، ويتابع دوراته بسرعة ثابتة أقل من السرعة الاسمية. يعتبر تأثير التوافقيات المباشرة للساحة خطيراً عند الإقلاع، بينما التوافقيات العكسية يكون خطرها كبيراً عند الكبح الكهرومغناطيسي. يجب أن لا تقل نسبة العزم الأصغري إلى الاسمي (T_{min}/T_n) عند إقلاع المحركات ذات الاستطاعة (0.6÷100kw) عن 0.8.

يتم حساب العزوم التحريضية للتوافقيات العالية v بشكل مشابه لحساب العزوم للتوافقية الأساسية:

$$T_v = C_m.\phi_{vm} I_2.\cos\psi_{2v} \quad (9)$$

أو يمكن حسابه إذا كانت الاستطاعة الكهرومغناطيسية للتوافقية v معروفة بالعلاقة:

$$T_v = P_{emv} / w_{1v} = \Delta P_{cu2v} / (S_v.w_{1v}) = m_1.\overset{\backslash 2}{I}_{2v}.R'_{2v} / (S_v.w_{1v}) \quad (10)$$

إذ أن: P_{emv}: الاستطاعة الكهرومغناطيسية للتوافقية v.

ΔP_{eu2v}: الضياع النحاسي في الدائر والناشئ عن التوافقية v.

S_v: الانزلاق الموافق للتوافقية v ومعطى بالعلاقة:

$$S_v = \frac{\pm n_1 - n_2}{\pm n_{1v}} = 1 \pm \frac{n_1(n_1 - n_2)}{n_1 / v} = 1 \pm (1 - S)v \quad (11)$$

حيث S: انزلاق الدائر بالنسبة للتوافقية الأساسية (الانزلاق الأساسي)، n_2: سرعة دوران الدائر الأساسي.

يحدد تردد التيار الذي تحرّضه في الدوّار سيالة التوافقية v للقوة المحركة المغناطيسية للثابت بالعلاقة:

$$f_2 = f_1.S_v = f_1[1 \pm (1 - s)v] \quad (12)$$

أما التوافقية v للقوة المحركة المغناطيسية للدوّار تدور بالنسبة للدائر بسرعة:

$$n_{2v} = n_{1v} - n_2 = \pm\frac{n_1}{v} - n_2 \quad (13)$$

وسرعة التوافقية v للقوة المحركة المغناطيسية للدائر بالنسبة للثابت:

$$n_{2v} + n_2 = \pm\frac{n_1}{v} - n_2 + n_2 = \pm\frac{n_1}{v} = n_{1v} \quad (14)$$

إن الدارة المكافئة للتوافقية v، شكل (4,b) تشابه الدارة المكافئة من الشكل Γ للتوافقية الأولى. لكن عند ذلك يمكن إهمال المقاومات الفعلية R_m و R_1 في دارة التمغنط ودارة الثابت.

يمكن اعتبار التيار I_1 في ملف الثابت معطى، لأن هـذا التيـار يتحـدد بالعمليـات الكهرومغناطيسية المتعلقة بالتوافقية الأساسية للساحة المغناطيسية والمحسوب بالعلاقة:

$$I_1 = \frac{U_1}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_m.\underline{Z}'_{2S}\Big/\left(\underline{Z}_m.\underline{Z}'_{2S}\right)} = \frac{U_1\left(\underline{Z}_m.\underline{Z}'_{2S}\right)}{\underline{Z}_1.\underline{Z}_m + \underline{Z}_1.\underline{Z}'_{2S} + \underline{Z}_m.\underline{Z}'_{2S}} \quad (15)$$

إذ أن: $\underline{Z}_1 = R_1 + jX_1 \;;\; \underline{Z}_m = R_m + jX_m \;;\; \underline{Z}'_{2S} = R'_2/S + jX'_2$

عند هذه الشروط يعتبر التيار I'_{2v} كجزء من التيار I_1 ومتعلق بـالانزلاق لأجـل التوافقيـة المعطاة، ومقاومة الدارة المكافئة. ويمكن أن نحدد I'_{2v} بالعلاقة:

$$-I'_{2v} = I_1\{jX_{mv}/[R'_{2v}/S_v + j(X_{mv} + X'_{2v})]\} \quad (16)$$

عندما يكون الانزلاق $S_v=0$ لا يتولد تيار I'_{2v} في ملف الدائر، ويتطابق تيار المغنطة I_{mv}، المتولد عن التوافقية v للساحة المغناطيسية، مع تيار الثابت I_1. وعنـدما $S_v\neq 0$ يظهر تيار في الدائر I'_{2v}، وبالتالي يقـل تيـار المغنطـة $I_{mv} = I_1 - (-I'_{2v})$، يعنـي أن السـاحة المغناطيسية للثابت تضعف بعض الشيء.

يلاحظ من المعادلة (16) والمعادلة (10) بأنه عند قيم معطاة للانزلاق S_v يتزايد كل من التيار I'_{2v} والعزم T_v، في حين تتناقص الممانعة التحريضية للـدائر X'_{2v}. إن الممانعـة التحريضية التسربية لدارة المحرك التحريضي الملفـوف X'_{2v} كبيـرة مـن أجـل تيـارات التوافقيات العالية، لأن التيار I'_{2v} عدا ساحة التوافقية (v) ساحة كبيرة جداً للتوافقية الأولـى للدائر، والتي تعتبر ساحة تسربية بالنسبة للتوافقية v المتحرضة. إن القوة المحركة الكهربائية المتحرضة في ملف الدائر الملفوف بسبب التوافقيات العالية للساحة صغيرة، وذلك بسبب القيم الصغيرة لمعاملات اللف لهذا الملف عند هذه التوافقيات، وبالتالي فـإن العـزم التحريضـي الإضافي المتولد عن التوافقيات الفراغية العالية له قيمة صغيرة، كما يمكن إهمال التشوّه الناتج عن العزم.

أما الممانعة التحريضية X'_{2v} للمحركات التحريضية ذات الدائر المقصور، فإن قيمتها تكون صغيرة، وبالتالي التيار I'_{2v} والعزوم التحريضية الإضافية المتولـدة عـن التوافقيـات العالية تكون كبيرة جداً. وذلك لأن ملف الدائر المقصور يشكّل مجموعـة دوائـر كهربائيـة بسيطة، مؤلفة من قضيبين متجاورين ومقصورين من الطرفين فيما بينهما بجزء من حلقتـي الوصل، مشكّلة مقاومة تسرّبية صغيرة جداً بالنسبة للتوافقية العالية للساحة. إن زيادة عـدد مجاري الدائر تعني زيادة عدد القضبان،وهذه تؤدي إلى زيادة العزم التحريضـي الإضـافي المتعلق بالتوافقيات السنية للثابت.

من أجل تقليل التأثير الضار للعزوم التحريضية الإضافية الناشئة عن التوافقيات السنية للساحة على المميزة الميكانيكية ينصح باختيار $Z_2 \geq 1.25Z_1$. كما يمكن أن نقلل بشكل ملحوظ التوافقيات العالية للقوة المحركة المغناطيسية (تستثنى التوافقيات السنية) إذا استخدما ملفاً ثنائي الطبقة وبخطوة لف مختصرة قيمتها $\beta=0.8$.

إذا كان المحرك التحريضي ذا دائر مقصور، وفيه قضبان الدائر معزولة، فإنه ينصح بتصميم ميل للمجاري على طول خطوة سنية واحدة. لانه إذا كانت قضبان الدائر غير معزولة ومع ميل للمجاري، فإن الضياعات الإضافية تزداد بسبب التيارات العرضية، التي تسري بين قضيبين متجاورين من خلال السن والنواة المغناطيسية للدائر. لذا في هذه الآلات وكحل وسطي يستخدم ميل للمجاري وعلى طول نصف خطوة سنية[6].

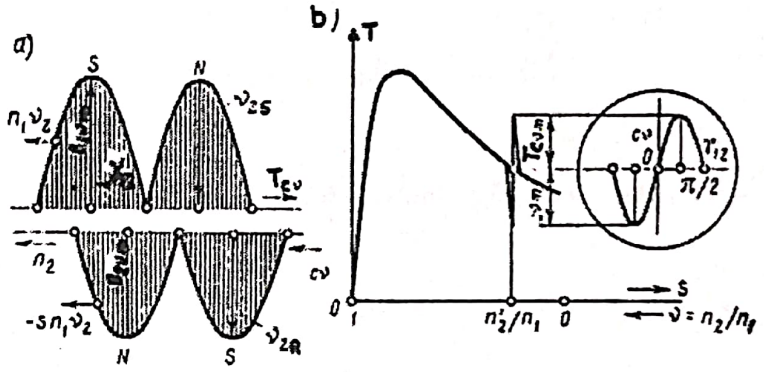
5- العزوم المتواقتة:

تظهر العزوم المتواقتة عند سرعة دوران محددة للدائر نتيجة التأثير المتبادل لتوافقيات الساحة للثابت والدائر، التي تملك مرتبة سنية واحدة $v_{z2}=v_{z1}$ (التي تملك خطوة قطبية واحدة $\tau_{v2}=\tau_{v1}$)، فواحدة منهما تتشكل بواسطة تيار الثابت I_1 والتردد f_1، والأخرى بواسطة تيار الدائر I_2 والتردد $f_2=S.f_1$، عند سرعة دوران معينة للدائر. وتدعى هذه التوافقيات بالتوافقيات المستقلة، لأنه يمكن اعتبار أي واحدة منها ناتجة عن التأثير الحثّي (التحرض) للأخرى.

في الحالة العامة تدور توافقيات الساحة للثابت والدائر $(v_{zs} = v_{zR} = v_z)$ بشكل غير متزامن مع بعضها البعض، وتولد عزماً متغير الإشارة T_{Cv}، قيمته الوسطية تساوي صفراً. لكن عند سرعات معينة لدوران الدائر n_2 تدور هذه التوافقيات بشكل متزامن. في هذه الحالة يبدي ظهور العزم الكهرومغناطيسي تأثيراً على حركة الدائر، وتظهر العزوم المتواقتة القوية جداً عند التأثير المتبادل للتوافقيات الأولى للمرتبة السنية.

لنفرض أن التوافقيات السنية للثابت والدائر ذات مرتبة واحدة وتدور باتجاهين متعاكسين، شكل (5,a). إن التوافقية المباشرة للثابت ذات المطال B_{1vm} تدور بالنسبة للثابت بسرعة n_1/v_z. بينما التوافقية العكسية للدائر ذات المطال B_{2vm} تدور بالنسبة للدائر بسرعة $-s_1n_1/v_2 = -(n_1-n_2)/v_z$ وتدور بالنسبة للثابت بسرعة $n_2-(n_1-n_2)/v_z$، وبالتالي تدور التوافقيتان v_{zs}, v_{zR} بالنسبة لبعضهما البعض بسرعة:

$$n_{12} = n_1/v_z - [n_2 - (n_1-n_2)/v_z] \quad (17)$$



الشكل (5): مخطط ظهور العزم المتواقت الإضافي عند التأثير المتبادل لتوافقيات الساحة المغناطيسية للثابت والدائر (*a*) وتأثير هذا العزم على المميزة الميكانيكية (b).

في الحالة العامة عندما $S\neq1$ تدور توافقيتا الثابت والدائر بشكل غير متزامن، ويتحدد ترتيبهما المتبادل بالزاوية γ_{12}، المتغيرة بشكل مستمر بالتوافق مع تغير سرعة الدوران n_{12}. يتحدد العزم الكهرومغناطيسي T_{ev} المتولد نتيجة التأثير المتبادل للحقول المغناطيسية لتوافقيات الثابت والدائر بالترتيب التبادلي لهذه الحقول، وبشكل متناسب γ_{12}. يكون هذا العزم مساوياً للصفر عندما $\gamma_{12}=0$ أو $\gamma_{12}=\pi$، ويكون أعظمياً ويدور باتجاه معاكس لاتجاه دوران الدائر عندما $\gamma_{12}=\pm\pi/2$.

يظهر تأثير هذا العزم على الدائر وفقط في الحالة التي تكون فيها الساحات (الحقول) المغناطيسية لتوافقيات الثابت والدائر غير متحركة بالتبادل ($n_{12}=0$). وهذا يعني عندما $n_1/v_z = n_2-(n_1-n_2)/v_z$.

ويحصل هذا النظام في الحالة المدروسة عند سرعة دوران للدائر تساوي:

$$n_2' = 2n_1/(v_z+1) \quad (18)$$

وتنشأ العزوم المتواقتة عن التوافقيات السنية ذات المرتبة الواحدة، والتي تظهر عند الاختيار غير الصحيح للعلاقة بين أسنان الثابت والدائر.

إذا أخذنا بعين الاعتبار أن k في العلاقة (4) تساوي 1، فإننا نحصل:

$$v_{z1} \equiv v_{z2} \Rightarrow Z_1/P\pm1 = Z_2/P\pm1 \quad (19)$$

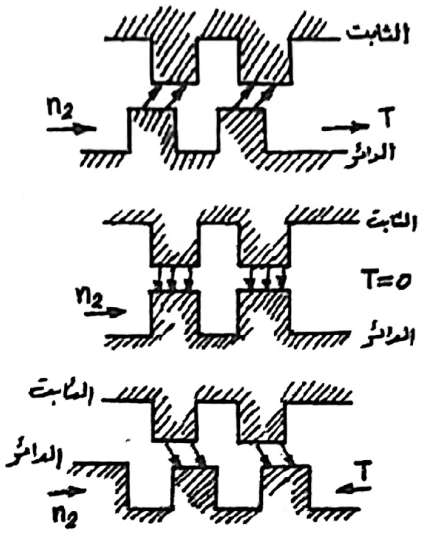
من هنا تظهر العزوم المتواقتة في حال $Z_1=Z_2$ وفي حال $Z_1-Z_2=2P$.

يمكن أن نفسّر إنتاج العزوم المتواقتة بأنه، عند سرعة دوران محددة للدائر (n_2) تبدو توافقيات الساحة للثابت والدائر واقف بالنسبة لبعضها البعض، وبعلاقة التوضّع المتبادل لهما (شكل 6) يتشكل عزماً سالباً أو موجباً. وقد رسمت التوافقيات المذكورة على الشكل (6) اصطلاحاً كأقطاب (قطب شمالي N وجنوبي S).

عندما تكون $Z_1=Z_2$ تتطابق التوافقيات $v_{zs}=v_{zR}$ لحقلي الثابت والدائر، وتدور باتجاه واحد. عند ذلك يظهر العزم التزامني عند توقف الدائر (عندما يكون الدائر واقفاً). ولا يملك الدوّار في هذه الحالة أي مخزون للطاقة الحركية، وإذا كان هذا العزم أكبر من عزم الإقلاع الرئيسي للمحرك، لا يستطيع الدائر أن يتحرك، ويبقى واقفاً. وعندما $Z_1-Z_2=\pm2P$ تتطابق توافقيات ساحتي الثابت والدائر، وتدور هاتان الساحتان باتجاهين متعاكسين، فيتشكل العزم المتواقت عند سرعة دوران للدائر n_2' معطاة بالعلاقة (18)[1،4،5،8].

من علاقة التوضّع التبادلي للتوافقيات السنية لحقلي الثابت والدائر يتشكل عزم تحريكي (عندما تتقدم توافقية ساحة الثابت على توافقية ساحة الدائر) وعزم كبح أو فرملة (عندما تتأخر توافقية ساحة الثابت عن توافقية ساحة الدائر).

يمثل هذا العزم على المميزة الميكانيكية، شكل (5,b) على شكل نقطة محددة على القطعة الشاقولية بين المجالين $\pm T_{cvm}$ والموافقة لزاوية $\gamma_{12}=\pm\pi/2$.



الشكل (6): اتجاه تأثير العزوم المتواقتة في الآلة التحريضية.

إن العزوم المتواقتة يمكن أن تكون صغيرة بشكل واضح، وذلك في حال تصميم المحرك بميل للمجاري، واختيار النسبة بين عدد مجاري الثابت والدائر بشكل سليم.

فمثلاً: عندما $2P = 4$; $m_1 = 3$; $Z_1 = 24$; $Z_2 = 28$ سوف تشكل على الثابت التوافقية السنية المباشرة (24/2+1=13) وعلى الدائر التوافقية السنية العكسية (28/2-1=13).

إذا كانت سرعة دوران المركبة التوافقية الأولى للساحة n_1، وسرعة الدائر n_2، فإن سرعة دوران التوافقية السنية المباشرة لساحة الثابت بالفراغ تساوي $(+n_1/13)$، وأن سرعة دوران التوافقية السنية العكسية لساحة الدائر بالنسبة للدائر تساوي $[-(n_1-n_2)/13]$ وسرعتها بالنسبة للفراغ أو للثابت تساوي $[n_2-(n_1-n_2)/13]$.

إذا كانت التوافقيات السنية المباشرة لساحة الثابت والتوافقية السنية العكسية لساحة الدائر واقفتين بالنسبة لبعضهما البعض، فإن سرعة الدائر تتحدد من العلاقة: $[n1/7=n2-(n_1-n_2)/13]$ منها $n_2=n_1/7$.

وبالتالي في الآلة المدروسة يظهر العزم المتواقت عند سرعة دوران للدائر مقدارها $n_1/7$ أو عند انزلاق S=6/7.

6- العزوم والقوى الاهتزازية:

تظهر هذه العزوم والقوى في الآلة التحريضية عند التأثير المتبادل للتوافقيات الفراغية العالية للثابت والدائر والمولدة للحقول المغناطيسية بعدد أقطاب مختلفة. ولا تحصل تأثيراتها المتبادلة عند سرعة الدوران التزامنية لهذه الحقول فحسب (عندما تولد عزوماً متواقعة)، بل وعند سرعات دوران أخرى. ويشكّل في هذه الحالة دوران الحقول (الساحات) عزوماً اهتزازية متغيرة دورياً، ويكون اتجاهها خلال نصف الدور الأول موافقاً لاتجاه دوران الدائر، وخلال نصف الدور الآخر معاكساً لاتجاه دوران الدائر[1،6،5].

ينشأ أيضاً عن التأثير المتبادل للحقول المغناطيسية، بالإضافة إلى العزوم الاهتزازية قوة شعاعية، تسبب تجاذباً (جذب) وحيد الطرف للدائر إلى الثابت، ولا مركزية الدائر. وهذا يحدث عند تطابق محاور أسنان الثابت والدائر. فعند دوران الدائر تدور هذه القوى في الثغرة الهوائية بسرعة محددة، وتؤدي إلى توليد الاهتزازات في الدائر. حيث عند سرعة دوران محددة للدائر تحدث هذه الاهتزازات طنيناً عندما تتفق مع الاهتزاز الطبيعي للدائر. وفيما إذا سمح لهذه الحادثة بالتطور، فإنها يمكن أن تصل إلى حد تجعل فيه عمل المحرك غير ممكن.

لقد أظهرت الأبحاث والدراسات أن العزوم والقوى الاهتزازية تظهر عندما يكون:

$$Z_1 - Z_2 = \pm 1 \pm 2P \quad (20)$$

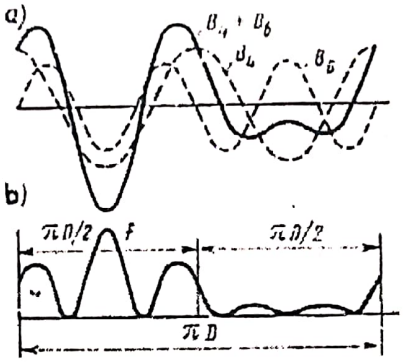
كما أثبتت الأبحاث والدراسات أنه من غير المحبّذ استعمال العلاقات التالية بين عدد مجاري الثابت والدائرك

$$(Z_1 - Z_2)/2 = \pm 1 \pm 2P$$

أو

$$Z_1 - Z_2 = \pm 2 \pm 4P \quad (21)$$

على سبيل المثال، عند وجود حقلين مغناطيسيين مع عدد أقطاب 2P=4 و2P=6 وبتحريض B_4 وB_6، شكل (7,a) تتشكل قوة شعاعية جاذبة (F) قيمها المغناطيسية شكل (7,b) تتناسب طرداً مع المقدار $(B_4+B_6)^2$. عند ذلك مجموعة القوى $\sum F$ على أحد نصفي محيط الدائر ($\pi D/$) (المساحة التي يحصرها المنحني F على طول القوس $\pi D/2$) أكبر بكثير من المساحة التي يحصرها المنحني F على النصف الآخر. وهذا يؤدي إلى عدم توازن القوى المؤثرة على الدائر. عندما تدور الحقول المغناطيسية المدروسة، فإن القوة المحصّلة $\sum F$ تدور مسببة اهتزاز الثابت والدائر عندما تكون الجساءة للدائر أو الثابت ضعيفة، أو عند التثبيت الضعيف على كراسي التحميل أو مع الهيكل. هذا الاهتزاز يولد ظواهر صوتية مثل الصفير والطنين...الخ. ويسبب عدم تجانس الثغرة الهوائية على طول محيط الآلة.



الشكل (7): مخطط نشوء القوى الاهتزازية عن التوافقيات العالية للساحة المغناطيسية.

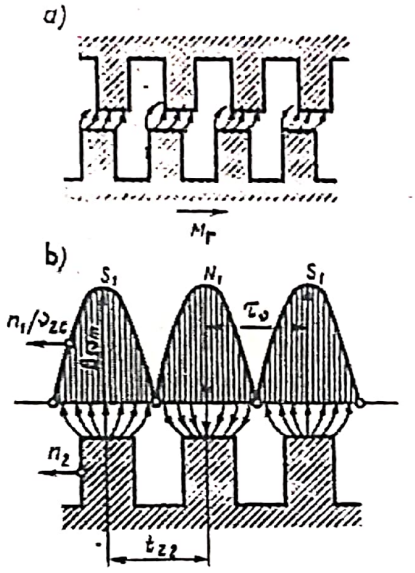
عند تغير سرعة دوران الدائر n_2 في مرحلة الإقلاع تتغير سرعة دوران القوى ΣF_{eq} وتردد اهتزاز الدائر. وعند سرعات معينة لدوران الدائر n_2 تنشأ ظاهرة الطنين، التي تؤدي إلى زيادة اهتزاز الدائر وارتفاع مستوى الضجيج للآلة. إن مطال العزوم الاهتزازية لا يتعلق بقيمة الحمولة على الآلة، وبالتالي فإن مطالات هذه العزوم عند الحمولات الصغيرة، وفي نظام يشبه نظام العمل على فراغ، أو قريب منه، يمكن أن تتجاوز قيمة العزم الكهرومغناطيسي الرئيسي للمحرك. ويمكن أن تؤدي هذه الظاهرة إلى دوران غير منتظم للدائر، وهذا يلاحظ بشكل خاص عند السرعات الصغيرة، حيث فترات تغير العزم الاهتزازي كبيرة بما فيه الكفاية. تتخفض القوى والعزوم الاهتزازية بشكل واضح عند ميل مجاري الدائر.

7- العزوم الردّقطبية:

تظهر العزوم الردّية بسبب الناقلية المغناطيسية المختلفة، والمتعلقة بوجود الأسنان على ثابت ودائر الآلة. تسعى الأجسام ذات النفوذية المغناطيسية العالية في الحقل المغناطيسي كي تشغل الموقع (المنطقة) ذا المقاومة المغناطيسية الضعيفة. ولقد سمي هذا العزم بالردّي، بسبب تأثيره الفعّال على الجسم ذي النفوذية المغناطيسية العالية في الحقل المغناطيسي، والسعي لتدويره في وضع متوافق مع الناقلية المغناطيسية الكبيرة للدارة المغناطيسية. تصل العزوم الردّية إلى القيمة الأعظمية في الحالات التي فيها $Z_1=Z_2$، أو عندما عدد أقطاب التوافقية الأولى للمرتبة السنية لحقل الثابت يتطابق مع عدد أسنان الدائر. هذا يعني عندما:

$$2P.v_{z1} = 2(Z_1 \pm P) = Z_2$$

في الحالة الأولى تسعى أسنان الثابت والدائر تحت تأثير الساحة المغناطيسية للتحريض المتبادل أن تتوضع مقابل بعضها البعض أي في الوضعية الموافقة للناقلية المغناطيسية الأكبر للثغرة الهوائية. في هذه الوضعية يكون العزم الردّي مساوياً للصفر $T_r=0$. وعند انزياح أسنان الدائر بالنسبة لأسنان الثابت، شكل (8,a) يؤثر على الدائر عزم ردي موجّه بجهة موضع (موقع) الناقلية المغناطيسية الأكبر. وبسبب تأثير هذه العزوم الردية على دائر المحرك التحريضي عند الإقلاع، ومن أجل $Z_1=Z_2$ لا يستطيع الدائر أن يدور أو يتحرك عن وضعيته (تسمى هذه الحالة بالالتصاق)[6].



الشكل (8):

مخطط ظهور الردية لما $Z_1=Z_2$ ($\dot{a}$ وعندما تكون هذه العزوم متعلقة بالتوافقية السنية للحقل المغناطيسي.

في الحالة الثانية، شكل (8,b) تبدو الخطوة القطبية τ_{vz} للتوافقية الأولى للمرتبة السنية للثابت مساوية طول الخطوة السنية للدائر t_{z_2}، وعند سرعة معينة لدوران الدائر $n_2=n_v$ تتوضع أسنان الدائر، وأقطاب الثابت مقابل بعضها البعض ويكون $T_r=0$. ولذا يظهر عند تبادل إزاحتهما عزم ردي T_r، يؤثر على المميزة الميكانيكية للمحرك عند $n_2=n_v$، كما هو الحال أيضاً للعزم التزامني للتوافقيات العالية للساحة. على سبيل المثال: لما $Z_1 = 18$; $q = 1$; $2P = 4$; $m_1 = 3$ يظهر العزم الردي عند $Z_2 = 2(Z_1 \pm P)=2(18\pm3)$ يعني عند $Z_2=30$ و $Z_2=42$.

يمكن أن تظهر في الآلات التحريضية، بالإضافة إلى العزوم المشار إليها أعلاه عزوماً أخرى، كعزوم التعويق المغناطيسي، وعزوم ناشئة عن التيارات الإعصارية، والتي تؤدي إلى حدوث ضياعات مختلفة في الدائر.

إن كل أنواع العزوم المذكورة أعلاه تتعلق بالعلاقة بين عدد مجاري الثابت والدائر. فلأجل الآلات ثلاثية الطور لا يحبّذ توافق هذه الأعداد، والتي عندها تظهر عزوم إضافية كبيرة واهتزاز وضجيج للآلة، وهي:

$$Z_1 - Z_2 = 0,1,2,3,4$$
$$Z_1 - Z_2 = P; P = \pm 1$$
$$Z_1 - Z_2 = 2P; 2P = \pm 2; 2P = \pm 3; 2P = \pm 4$$

إن الوسيلة الفعالة لإزالة التأثير الضار للتوافقيات العالية على عمل الآلات التحريضية هي استخدام ميل في مجاري الثابت والدائر.

نستخلص مما سبق النتائج التالية:

1- إن استخدام المبدلات الترددية الستاتيكية للتحكم بسرعة المحركات التحريضية أو وصل عناصر لاخطية مع دارة الثابت تؤدي إلى تشويه موجة الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية، وبالتالي إلى ظهور التوافقيات العالية، والتي تخلق عزوماً إضافية تؤثر على أداء المحرك وتشوّه مميزته الميكانيكية. كما أن وجود الأسنان والمجاري على الثابت والدائر تؤدي إلى اختلاف الناقلية المغناطيسية في الثغرة الهوائية، وبالتالي إلى ظهور ما يسمى بالتوافقيات السنية.

2- إن استخدام اللف بخطوة مختصرة $\left(\beta = \frac{y}{\tau}\right)\langle 1$ يحسن شكل موجة الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية وتقريبها نوعاً ما إلى الشكل الجيبي، لأنه في حال استخدام اللف بخطوة كاملة ($\beta=1$) يجعل معامل اختصار الخطوة للتوافقية الأساسية وللتوافقيات العالية متساوية وتساوي الواحد ($K_{y1}=K_{yv}=1$) وبالتالي تظهر كل منحنيات القوى المحركة الكهربائية E_v التي تولدها التوافقيات العالية ضمن المنحني الأساسي للقوة المحركة الكهربائية E_1.

3- إن الاستخدام المناسب لتوزيع الملفات في المجاري، بحيث يكون عدد وشائع المجموعة الوشائية أكبر من الواحد ($q>1$)، يحسّن أيضاً شكل موجة الساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية،لأن القوى المحركة الكهربائية الناتجة عن التوافقيات العالية تضعف بشكل كبير، وذلك لأن عامل توزيع الملف لهذه التوافقيات ينقص.

4- يمكن القضاء على التوافقيات السنية في الآلة التحريضية بتصميم ميـــل للمجـــاري على طول خطوة سنية واحدة.

5- يمكن إضعاف العزوم الإضافية المتولدة عن التوافقيات العالية، وكـــذلك الضـــجيج والاهتزاز باختيار مناسب لعدد مجاري الثابت والدائر.

REFERENCES المراجع

[1]- الآلات الكهربائية – 2 – د. محمد مضيف برّي – جامعة حلب، 1979.

[2]- الآلات الكهربائية–3 – "الآلات التحريضية" – د.الياس جبور – جامعة دمشق،1982.

[3]- الآلات الكهربائية والميكروية – ترجمة: د.عبد المطلب أبو سيف – المركز العربي للتعريب والترجمة والتأليف والنشر، 1995.

[4]- Inanov – Smolensky A.V. – Electrical Machines Moscow: energia, 1980.

[5]- Voldek A.I. – Electrical Machines – Leningrad, Energia, 1974.

[6]- Zakharovich A.E. Broskin d.E. – Electrical Machines. Moscow, 1998.

[7]- Katsman M.M. – Electrical Machines. Moscow, 1990.

[8]- Kapelov E.P. – Electrical Machines. Moscow, 1986.