

التوافقيات العليا وأثرها على استقرار عمل الآلة التحريضية

سوزي حاج حسين*

(تاريخ الإيداع 14 / 4 / 2015. قُبِلَ للنشر في 9 / 5 / 2016)

□ ملخص □

يقدم البحث فكرة هامة عن التوافقيات العليا (الفراغية والزمنية) وما هو سبب ظهورها وآثارها السلبية على مستهلكات الطاقة الكهربائية. تم حساب العزوم الدوارة المتولدة عن التوافقيات العليا وأثرها على المميّزة الميكانيكية للمحرك التحريضي، وكيف يمكن أن نخفف من هذا الأثر بالطريقة التصميمية للمحرك. ينتج عن التوافقيات العليا مفايد كهربائية ومغناطيسية إضافية في المحرك التحريضي تؤدي إلى زيادة تسخين المحرك وانخفاض المردود ومعامل الاستطاعة. لقد بين البحث كيف يمكن التخفيف من هذه المفايد وبالتالي تحسين شكل المميّزة الميكانيكية للمحرك التحريضي وتحسين أداءه أيضاً.

الكلمات المفتاحية: المحرك التحريضي، التوافقيات العليا، العزم، المميّزة الميكانيكية، الضياعات.

* قائم بالأعمال - قسم هندسة الطاقة - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Higher Harmonics and its effect on the stability of the Induction Machine's work

Sozi Haj Hussein*

(Received 14 / 4 / 2015. Accepted 9 / 5 / 2016)

□ ABSTRACT □

This paper presents an important idea about the higher harmonics (both temporal and spatial) and the reason of their appearance and negative effects they cause on the electrical power consumers. Generated rotating torques from upper harmonics is then calculated, and their effect on the mechanical characteristics of the induction motor, and how to mitigate this effect depending on motor design.

Higher harmonics produce additional electrical and magnetic losses in induction motors which increase the motor's heat and decrease its energy yield and power coefficient. This research shows how to decrease these losses to improve the mechanical characteristics of the induction motor and enhance the performance.

Keywords: Induction Motor, Higher Harmonics, Torque, Mechanical Characteristics, Losses.

* Academic assistant, Department of Power Electrical Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

تتركز طاقة الحقل المغناطيسي للآلة التحريضية بشكل رئيسي في الثغرة الهوائية بين الثابت والدائر وتتعلق بالفيض الأساس، على الرغم من أن هناك قسماً صغيراً من هذه الطاقة متعلق بالفيض المغناطيسي المتسرب. إلا أن التحديد الدقيق لمكان تركز الطاقة والمكان الذي تتم فيه عملية تحويل الطاقة غير ممكن وفي أغلب الحالات تعتبر معرفته غير ضرورية.

يُعبّر عن الحقل المغناطيسي للآلة التحريضية بالفيض أو بالتحريض المغناطيسي، والذي يأخذ شكلاً جيبياً في الآلة المثالية، أما في الآلة الحقيقية يكون هذا التغير لاجيبياً، لأنه بالإضافة للتوافقية الأساسية للحقل هناك توافقيات عليا لانهائية ترددها أكبر من تردد التوافقية الأساسية ومختلفة بعضها عن بعض بالمطال والتردد $(f_v = v \cdot f)$ ، حيث (v) مرتبة أو درجة التوافقية.

تعتبر الأحمال اللاخطية هي المصدر الأساس لظهور التوافقيات العليا في أنظمة الطاقة الكهربائية وكانت هذه الأحمال في الماضي تتركز بشكل أساس في التطبيقات الصناعية الثقيلة: كأفران القوس الكهربائي وقياة المحركات ذات الاستطاعات الكبيرة والمتغيرة الاستطاعة والمقومات الضخمة للتقنية الإلكترونية. أما الآن فقد تغير الوضع وأصبحت مشكلة التوافقيات عامة وشائعة ليس فقط في التطبيقات الصناعية بل في شتى المجالات الأخرى أيضاً. يرجع هذا بشكل أساس إلى تقنيات تحويل الطاقة الجديدة، مثل نمط تزويد الطاقة التبدلي (Switch- Mode Power Supply) الذي يمكن أن يوجد بشكل فعلي في جميع الأجهزة الإلكترونية حواسيب، مخدمات، طابعات، ناسخات ضوئية، نظم اتصالات، أجهزة البث الإذاعي والآلات المصرفية (وغيرها). إن نمط تزويد الطاقة التبدلي (SMPS) هي مخدمات أو مزودات ممتازة للطاقة، لكنها عبارة عن أحمال لاخطية تولد توافقيات تياريه من المرتبة الثالثة والخامسة والسابعة والتاسعة وأعلى. تكون التوافقية الثالثة الأكثر خطراً، وتدعى هذه التوافقية ومضاعفاتها الفردية بالتوافقيات الثلاثية التي تعتبر تيارات تتابع صفرية في الشبكات الرباعية الخطوط تضاف حسابياً إلى الحيادي. أما في شبكات التغذية الثلاثية الطور والمتوازنة أصلاً ينتج عن الحملات اللاخطية بشكل عام توافقيات تيار ثلاثة وتاسعة صغيرة جداً إذا كان منبع التغذية متوازناً وبالتالي يمكن إهمالها. أما التوافقيات $(5, 7, 11, 13)$ فنكون موجودة ولا يمكن أن تنتج تياراً حياً، لأنها غير متصلة بالناقل الحيادي (شبكة التغذية ثلاثية الطور ثلاثية الخطوط).

إن المقومات التي تغذي محركات قيادة متغيرة السرعة ووحدات عدم انقطاع التغذية الكهربائية (UPS) هي أمثلة نموذجية على الأحمال اللاخطية ثلاثية الطور.

يوجد نوعان من التوافقيات العليا: زمنية وفراغية. يعتبر الجهد اللاجبي لشبكة تغذية كهربائية ثلاثية الطور غير متوازنة (غير متناظرة) والمطبق على مرابط الآلة الكهربائية هو المصدر الأساس للتوافقيات العليا الزمنية، كمثال على ذلك تغذية محرك تحريضي عن طريق مبدلة تردد ستاتيكية، أو عند وصل عناصر لاخطية مع دائرة الثابت (عند لاخطية عناصر الآلة التحريضية R, L, M)، ويكون مطالها يساوي $(1/v)$ من مطال التوافقية الأساسية [2,1]. أما المصدر الثاني للتوافقيات العليا الزمنية في الثغرة الهوائية هو الخرج الميكانيكي للآلة، فعند التغير الخطي لعزم الحموله أو تغير سرعة دوران الآلة تظهر التوافقيات العليا ويكون مطال تملكه عند الحمل المفاجئ للآلة (صدمة حملية على شكل مستطيل). أما المصدر الثالث لهذه التوافقيات فهو سبب الطرح الحراري. فعند التغير اللاخطي لدرجة الحرارة للوسط المحيط بالآلة التحريضية تظهر التوافقيات العليا ويتشوه شكل منحني الحقل المغناطيسي في الثغرة الهوائية أيضاً [2,1].

تظهر التوافقيات الفراغية للحقل المغناطيسي في الثغرة الهوائية للآلة نتيجة التوزع اللاجبي للقوة المحركة المغناطيسية في الثغرة الهوائية، والنتاج عن وجود الأحاديث والأسنان على السطح الداخلي للثابت والخارجي للدائر، وجملة من العوامل الفنية الأخرى (لامركزية الثابت والدائر، مخروطية الدائر، إهليلجيه الثغرة، ...). إن اختلاف التوافقيات الزمنية عن التوافقيات الفراغية ليس فقط من حيث مصدرها، بل من ناحية سرعة الدوران أيضاً. حيث أن سرعة دوران التوافقيات الزمنية تساوي إلى سرعة دوران التوافقية الأساسية، لأن المسافة القطبية للتوافقية (v) أقل من المسافة القطبية للتوافقية الأساسية بمقدار (v) مرة $(\tau_v = \tau/v)$ وتردد التوافقية (v) أكبر بمقدار (v) مرة من تردد التوافقية الأساسية $(f_v = v \cdot f_1)$. أما بالنسبة للتوافقيات الفراغية هذا غير محقق، بل تكون سرعة التوافقية الفراغية من المرتبة (v) أكبر من سرعة التوافقية الأساسية بمقدار (v) مرة.

أهمية البحث وأهدافه:

تكمن أهمية البحث في تحديد الأسباب التي تؤدي إلى ظهور التوافقيات العليا في الآلة التحريضية وآثارها السلبية على مميزات المحرك التحريضي، وبشكل خاص على الميزة الميكانيكية $T = f(S)$ وعلى المردود ومعامل الاستطاعة لهذا المحرك، وبالتالي البحث عن الطريقة أو الوسيلة المناسبة من أجل التخفيف من هذه السلبيات وذلك بالتخلص من هذه التوافقيات أو التخفيف من أثرها وما لذلك من أثر إيجابي على عمل المحرك التحريضي.

طرائق البحث ومواده:

تعد المحركات التحريضية العنصر الأساس في تشغيل معظم المنشآت الصناعية وإدارتها ، وبالتالي تعتبر من العناصر الأساسية المساهمة في تطوير وإنماء الاقتصاد الوطني. فمن أجل تحسين طبيعة الإنتاج وتأمين الشروط التكنولوجية المناسبة وتحقيق المتطلبات الموضوعية في جمل القيادة والتحكم يلزم تنظيم سرعة دوران هذه المحركات. وفي العديد من الحالات يتطلب تنظيم واسع لسرعة الدوران عن طريق التحكم بالتردد (التحكم الترددي) وذلك باستخدام المبدلات الترددية الستاتيكية، التي تتغذى بجهد جيببي وتعطي على خرجها للمحرك جهد لاجبيبي.

وبالتالي تعتبر من المصادر المؤثرة والأساسية للتوافقيات العليا. لذا سنوضح بشكل مختصر أهم الآثار السلبية لهذه التوافقيات على المحرك التحريضي.

أهم الآثار السلبية للتوافقيات العليا:

بعد اكتشاف منابع التوافقيات العليا وتحديد مستوياتها أصبح من الضروري توضيح الآثار السلبية لهذه التوافقيات على عمل التجهيزات الكهربائية بشكل عام والآلات الكهربائية التحريضية بشكل خاص. حيث تعتبر المحركات التحريضية الحمولات الأكبر في أنظمة الطاقة الكهربائية وهي شائعة الاستخدام في شتى المجالات الصناعية والتجارية والسكنية والنقل وغيرها. فعندما يعاني نظام قدرة من وجود التوافقيات فإن خصائص عمل المحركات التحريضية تتأثر بشكل كبير، لذا فقد جذب هذا الموضوع أنظار الكثير من العلماء والباحثين [3, 4, 5, 6]. إن معظم أنظمة القدرة الكهربائية يمكنها التكيف بمستوى معين من التيارات التوافقية. لكن هذه التيارات ستسبب المشاكل عندما تصبح مركبات ذات قيمة لا يستهان بها من الحمولة الإجمالية للنظام. هذه التيارات التوافقية ذات الترددات العالية تسري خلال نظام القدرة الكهربائي ويمكن أن تسبب أو تخلق المشاكل الآتية:

- 1- تؤدي إلى تشوه موجة الجهد والتيار للمنبع، ونتيجة لذلك يسوء عمل التجهيزات المغذاة من هذا المنبع.
- 2- ظهور توترات وتيارات زائدة بسبب الطنين الناتج عن التوافقيات، حيث تحدث حالة الطنين بين مكثفات تعويض الاستطاعة الردية والمفاعلات التحريضية للخطوط الكهربائية، يعني عندما $(X_L = X_C)$.
- 3- الانخفاض في فعالية عمل التوليد والنقل للطاقة الكهربائية الذي يؤدي إلى انخفاض فعالية استخدام الطاقة.
- 4- التقادم أو الانهيار في عازلية التجهيزات الكهربائية وإنقاص عمرها وضعف موثوقيتها.
- 5- العمل الكاذب لأجهزة الحماية والقياس والتحكم المستخدمة في الجملة الكهربائية الملوثة بالتوافقيات.
- 6- ظهور ضياعات كهربائية ومغناطيسية في المحركات التحريضية تؤثر على مواصفاتها وعمرها.
- 7- ظهور عزم دوران طفيلية تؤثر على أداء الآلة التحريضية.
- 8- التداخل في أنظمة الاتصالات وحدوث التشويش.
- 9- زيادة تسخين الأجهزة الدوارة مثل المحركات التحريضية.

إن تيارات التوافقيات العليا تؤدي إلى التسخين الزائد في الآلات الكهربائية والمحولات وتسبب هذه التيارات التوافقية ضياعات إضافية في الطاقة بسبب زيادة التيارات الإعصارية المتدفقة في القلوب الصفائحية للآلات والمحولات والتيارات التسريبة الزائدة عبر العازل والأثر السطحي في النواقل (الظاهرة القشرية أو ظاهرة انزياح التيار). سيتطرق هذا البحث العزم الدوارة المتولدة عن التوافقيات العليا وأثرها السلبي على مميزات (مواصفات) الآلة التحريضية.

النتائج والمناقشة:

العزم الدوارة المتولدة عن التوافقيات العليا وأثرها السلبي على مميزات الآلة التحريضية:

يمكن أن يكون الحقل المغناطيسي في الثغرة الهوائية عبارة عن مجموعة من التوافقيات الفراغية العليا المتولدة من جهة أولى عن اللغات المتوضعة في المجاري. ومن جهة ثانية عن عدم انتظام قيمة الثغرة الهوائية على طول محيط الآلة بسبب وجود الأسنان والمجاري على كل من قلب الثابت والدائر. إن كل توافقية من هذه التوافقيات تخلق ليس فقط ضياع إضافي بل أيضاً عزم إضافي يضاف إلى عزم الدوران المتولد عن التوافقية الأساسية للحقل

المغناطيسي مسببة إضعاف أو تقوية هذا العزم. تدعى هذه العزوم الإضافية أحياناً بالعزوم الطفيلية، التي يظهر تأثيرها بشكل واضح على عملية الإقلاع للمحرك عندما تتغير سرعة دوران الدائر. فعند أي سرعة دوران كانت (ω_2) للدائر يكون العزم المحصل يساوي مجموع العزوم المتولدة عن جميع توافقيات الحقل المغناطيسي [1,8].

سيدرس هذا البحث العزوم الدوارة المتعلقة بالتوافقيات العليا للساحة المغناطيسية في الثغرة الهوائية للآلة التحريضية. فإذا تم التعبير عن القوة المماسية المطبقة على الدائر وكأنها مشتقة من الطاقة الكهرومغناطيسية (W_{em}) وفقاً للإحداثيات $(rd\varphi)$ فسيكون عزم الدوران يساوي حاصل جداء القوة بنصف القطر، أي:

$$T = -R \cdot \frac{\partial W_{em}}{\partial \varphi} = -\frac{\ell_0 \cdot \delta}{2\mu_0} \cdot R \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \int_0^{2\pi} [B_\delta(\alpha, t)]^2 \cdot d\alpha \quad (1)$$

حيث أن: W_{em} هي طاقة الحقل المغناطيسي في الثغرة الهوائية وتقاس بـ $w \cdot \text{Sec}$ و φ هي زاوية دوران الدائر بالنسبة للثابت غير المتحرك وتقاس بـ Rad .

يعطى التحريض المغناطيسي في الثغرة الهوائية (B_δ) بالعلاقة الآتية:

$$B_\delta(\alpha, t) = \frac{\mu_0}{\delta \cdot K_\delta} \cdot F(\alpha, t) \quad (2)$$

حيث أن:

$F(\alpha, t) = F_1(\alpha, t) + F_2(\alpha, t)$ - القوة المحركة المغناطيسية المحصلة، المساوية إلى مجموع القوتين المحركتين المغناطيسيتين $F_1(\alpha, t)$ و $F_2(\alpha, t)$ للثابت وللدائر بالترتيب. K_δ - معامل كارتر للثغرة الهوائية. ℓ_0 - الطول الحسابي للآلة التحريضية.

بتعويض $F(\alpha, t)$ بالعلاقة (2) ومن بعدها تعويض العلاقة (2) في العلاقة (1) نحصل على:

$$T = -\frac{\ell_0 \cdot \mu_0}{\delta \cdot K_\delta} \cdot R \cdot \frac{\partial}{\partial \varphi} \int_0^{2\pi} [F_1(\alpha, t) + F_2(\alpha, t)]^2 \cdot d\alpha \quad (3)$$

بما أن الجزء الثابت لا يتحرك فإن القوة المحركة المغناطيسية للدائر تتعلق بوضعية الدائر بالنسبة لجملة الإحداثيات المتعلقة بالثابت، وبالتالي يمكن كتابة المعادلة (3) بالشكل:

$$T = -\frac{\ell_0 \cdot \mu_0}{\delta \cdot K_\delta} \cdot R \cdot \int_0^{2\pi} [F_1(\alpha, t) + F_2(\alpha, t)] \cdot \frac{\partial F_2(\alpha, t)}{\partial \varphi} \cdot d\alpha \quad (4)$$

إذا كان الجزء الثابت يتألف من (m) طور متماثل و (P) زوج من الأقطاب عندها يمكن التعبير عن القوة المحركة المغناطيسية للثابت بالعلاقة العامة التالية:

$$F_1(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} F_{mv} \cdot \text{Sin}(v\alpha \mp \omega t) \quad (5)$$

حيث أن: $v = P(2mk \pm 1)$

عندما تكون الثغرة الهوائية منتظمة وتساوي (δ) ومعامل النفاذية $\mu_r = \infty$ تكون القوة المحركة المغناطيسية للحقل المغناطيسي المتحرض في الثغرة الهوائية وتوزع التحريض المغناطيسي $B_1(\alpha, t)$ الحاصل من المعادلة (5) لها الشكل:

$$B_1(\alpha, t) = \frac{\mu_0}{\delta} \cdot F_1(\alpha, t) = \frac{\mu_0}{\delta} \sum_{v=1}^{\infty} F_{mv} \cdot \text{Sin}(v\alpha \mp \omega t) \quad (6)$$

إن السرعة الزاوية للتوافقية من المرتبة (ν) بالنسبة للتوافقية الأساسية وبالنسبة للثابت تساوي إلى $\omega_\nu = \pm \omega_1 / \nu$. عند ذلك يجب أن يؤخذ بالحسبان إضافة الإشارة لمرتبة التوافقية والتي تحدد إشارة السرعة الزاوية. وطالما أنه عند متحرض أملس يمكن أن تظهر في الحقل فقط التوافقيات من المرتبة المحددة بالعلاقة $\nu = m_1 k + 1$ ، حيث (m_1) عدد الأطوار و (k) عدد زوجي سالب أو موجب فمن أجل $(k \geq 0)$ يكون اتجاه دوران التوافقيات متطابقاً مع اتجاه دوران التوافقية الأساسية وتملك عندها التوافقية إشارة موجبة، وإذا كانت $(k < 0)$ تملك التوافقية إشارة سالبة. إن سرعة التوافقيات بالنسبة للدائر الذي يدور بسرعة (ω_2) تساوي:

$$\omega_{2\nu} = (\omega_1 / \nu) - \omega_2 = \omega_1 [1/\nu - (1 - S_1)] \quad (7)$$

تولد هذه التوافقيات في الدائر قوة محرقة كهربائية ترددها:

$$f_{2\nu} = f_1 \cdot S_\nu = f_1 [1 - (1 - S_1) / \nu]$$

والتي تشكل في الدائر قوة محرقة مغناطيسية:

$$F_{2\nu} = \frac{\delta}{\mu_0} \sum_{\mu=1}^{\infty} B_{\mu\nu} \text{Sin} [\mu \cdot \alpha' \mp (\pm \omega_1 - \nu \cdot \omega_2)t - \varphi_\mu] \quad (8)$$

حيث أن: $B_{\mu\nu}$ التحريض المغناطيسي في الثغرة الهوائية الناتج عن التوافقية من المرتبة (ν) للقوة المحركة

$$\cdot B_{\mu\nu} = \mu_0 / (\delta \cdot K_\delta) \cdot F_{m1,\nu}$$

إذا كانت جملة الإحداثيات مرتبطة بالثابت، وبالتالي $\alpha' = \alpha - \omega_2 t$ وتصبح المعادلة (8) لها الشكل:

$$F_{2\nu} = \frac{\delta}{\mu_0} \sum_{\mu=1}^{\infty} B_{\mu\nu} \text{Sin} [\mu(\alpha - \omega_2 t) \mp (\pm \omega_1 - \nu \cdot \omega_2)t - \varphi_\mu] \quad (9)$$

يمكن التعبير عن القوة المحركة المغناطيسية المحصلة للدائر بمجموع كافة التوافقيات من المرتبة (μ)

مع كافة التوافقيات من المرتبة (ν) :

$$F_2(\alpha, t) = \frac{\delta \cdot K_\delta}{\mu_0} \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} B_{\mu\nu} \text{Sin} [\mu(\alpha - \omega_2 t) \mp (\pm \omega_1 - \nu \omega_2)t - \varphi_\mu] \quad (10)$$

بتعويض العلاقة (9) بالعلاقة (4) نحصل على العلاقة العامة للعزم:

$$T = -\frac{\ell_0 \cdot \mu_0}{\delta \cdot K_\delta} \cdot R \cdot \left\{ \int_0^{2\pi} \sum_{\nu=1}^{\infty} F_{m1,\nu} \text{Sin}(\nu \alpha \mp \omega_1 t) \cdot \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} B'_{\mu\nu} \text{Cos}[\mu(\alpha - \omega_2 t) \mp \mp (\omega_1 - \nu \omega_2)t - \varphi_\mu] d\alpha + \int_0^{2\pi} \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} B_{\mu\nu} \text{Sin}[\mu(\alpha - \omega_2 t) \mp (\pm \omega_1 - \nu \omega_2)t - \varphi_\mu] \cdot \sum_{\nu=1}^{\infty} \sum_{\mu=1}^{\infty} B'_{\mu\nu} \text{Cos}[\mu(\alpha - \omega_2 t) \mp (\pm \omega_1 - \nu \omega_2)t - \varphi] d\alpha \right\} \quad (11)$$

إن الحد الثاني من العلاقة (11) يساوي الصفر لأن $\int_0^{2\pi} \text{Sin} \alpha \cdot \text{Cos} \alpha \cdot d\alpha = 0$ ، كما أن الحد الأول

الذي يضم عبارة من الشكل $\int_0^{2\pi} \text{Sin}(m\alpha) \cdot \text{Cos}(n\alpha - \varphi) \cdot d\alpha$ ومن أجل $(m \neq n)$ يساوي الصفر أيضاً، ومن

أجل $(m = n)$ يساوي هذا التعبير إلى $(\pi \cdot \text{Sin} \alpha)$.

يلاحظ من العلاقة (11) أن عزم الدوران يمكن أن يظهر نتيجة للتأثير المتبادل لتوافقيات الحقل المغناطيسي للثابت والدائر من المرتبة $(\mu = \nu = \rho)$. لكن يجب الأخذ بالحسبان أن توافقيات الدائر من المرتبة (μ) يمكن أن تثار عن توافقيات الثابت من درجة أخرى تماماً. وهذا يعني أن العزم يتشكل فقط بوساطة المركبات التوافقية التي لها نفس العدد من أزواج الأقطاب. ويساوي هذا العزم:

$$T = T_\rho = -\frac{\mu_0 \cdot \ell_0}{\delta \cdot K_\delta} \cdot R \cdot \int_0^{2\pi} F_{m\rho} \cdot \sin(\rho \cdot \alpha \mp \omega_1 t) \sum_{\nu=1}^{\infty} B'_{\rho\nu} \cdot \cos[\rho(\alpha - \omega_2 t) \mp (\pm\omega_1 - \nu\omega_2)t - \varphi_\rho] d\alpha \quad (12)$$

يتم الحصول على العزم المحصل من مجموع العزوم الناتجة عن جميع التوافقيات من المرتبة (ρ) وهذا يعني عن جميع توافقيات حقل الثابت والتي لأجلها تظهر توافقيات الدائر من نفس المرتبة. بمكاملة العلاقة (12) ينتج:

$$T = \sum_P T_\rho \propto \sum_{\rho=1}^{\infty} \sum_{\nu=1}^{\infty} \sin[\rho\omega_2 t \pm (\pm\omega_1 - \nu\omega_2)t + \varphi_\rho \pm \omega_1 t] = \sum_{\rho=1}^{\infty} \sum_{\nu=1}^{\infty} \sin\{\rho\omega_2 \pm [(\omega_1 - \nu\omega_2) \mp \omega_1]t + \varphi_\rho\} \quad (13)$$

إن العزم المحصل والمعطى بالعلاقة (13) يتغير زمنياً بشكل جيبي، وقيمه المتوسطة تساوي الصفر. إن العزم المستقل عن الزمن يظهر فقط عندما يكون الحد الموجود ضمن الأقواس المربعة للتابع الجيبي يساوي الصفر، وهذا يعني:

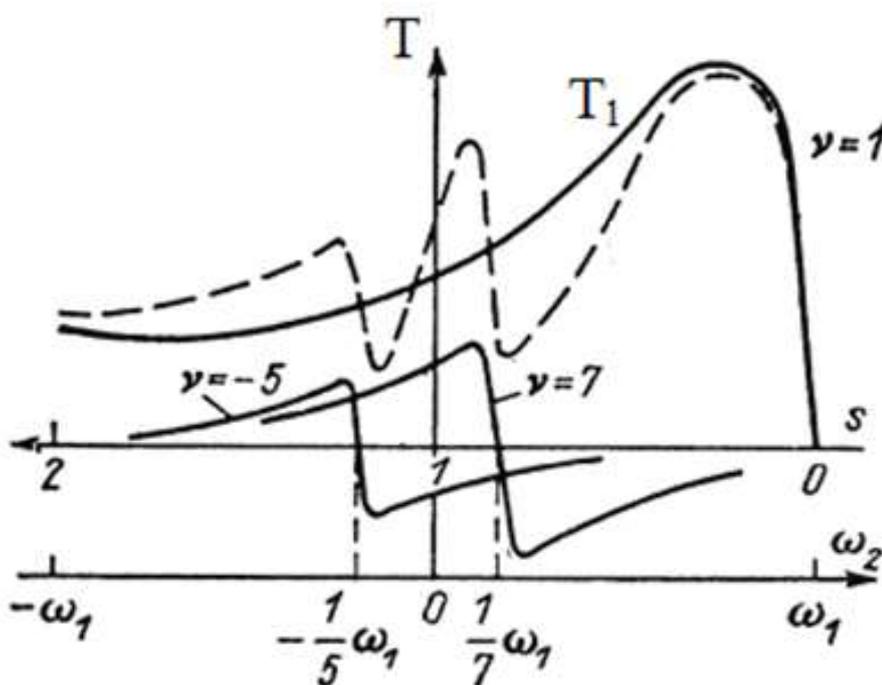
$$\rho \cdot \omega_2 \pm (\pm\omega_1 - \nu\omega_2) \mp \omega_1 = 0 \quad (14)$$

عملياً تكون مناسبة هذه المساواة في حالتين: **الحالة الأولى**، إذا كان $(\rho = \nu)$ أي إذا كانت توافقيات الحقل المغناطيسي للثابت تهيج (تثير) توافقيات الحقل المغناطيسي للدائر ذات الدرجة (المرتبة) نفسها. إن مثل هذه الحالة تحصل إذا كان على الثابت ملف يتألف من عدد أزواج أقطاب مقداره (2ν) فعلى دائر المحرك التحريضي المقصور عدد كبير من المجاري. وبالتالي توافقيات الحقل المغناطيسي للثابت من المرتبة (ν) تطابق نفس توافقيات الحقل المغناطيسي للدائر، والتي تولد عزم دوران كتابع لانزلاق الدائر في الحقل المغناطيسي لتوافقيات الثابت:

$$S_\nu = \frac{(\omega_1 / \nu) - \omega_1(1 - S_1)}{\omega_1 / \nu} = 1 - \nu(1 - S_1) \quad (15)$$

تدعى التوافقيات الموجبة من المرتبة (ν) بتوافقيات الدوران المباشر أو الموجب والتوافقيات ذات الإشارة السالبة بتوافقيات الدوران العكسي أو السالب. يحقق العزم التحريضي عند التوافقيات المباشرة قيمة أعظمية عند انزلاق أقل من الواحد وقريب من قيمة تساوي $(S_1^* = 1 - 1/\nu)$ ، وهذا يعني العمل في نظام التحريك، وعند التوافقيات العكسية يكون هذا الانزلاق أكبر من الواحد فيتحقق بذلك نظام الكبح الكهرومغناطيسي (نظام عكس الحركة أو الدوران). إن العزم الأعظمي للتوافقيات العليا للحقل المغناطيسي عند الانزلاق (S_1^*) سيكون أكبر من العزم الفائض (الزائد)، ويساوي الفرق بين عزم الدوران للتوافقية الأساسية عند هذا الانزلاق أيضاً والعزم المقاوم لآلة التشغيل والعطالة الناتجة

عن كتلة الجزء الدائر عند الإفلاق ستكون صغيرة. وبالتالي فإن الدائر يمكن أن يستقر عند سرعة دوران ω_2 تساوي $\omega_2 = \omega_1(1 - S_1^*) = \omega_1 / \nu$. كما هو موضح في الشكل (1) يكون العزم المقاوم في نظام الكبح مساهماً كعزم عطالة لكن هنا أيضاً يمكن أن يحدث الاستقرار [9, 10].
إن الحالة الثانية ممكنة عندما الحقل المغناطيسي لتوافقية الثابت من مرتبة ما تحرض حقل مغناطيسي لتوافقية الدائر ذات مرتبة مغايرة لمرتبة توافقية حقل الثابت.



الشكل (1) مميزات العزم الدائرة للتوافقيات الفراغية الأساسية والخامسة والسابعة للحقل المغناطيسي.

تكون المعادلة (12) في هذه الحالة صحيحة ولكن ليس عند جميع قيم (ω_2) كما هو في الحالة السابقة، بل عند $\omega_2 = 2\omega_1 / (\rho - \nu)$ فقط. حيث يؤخذ بالحسبان أن إشارة (ρ) و (ν) في المقام تعكس اتجاه دوران هذه التوافقيات بالنسبة للتوافقية الأساسية للحقل المغناطيسي. فطالما أن العزم ينشأ ولكن ليس عند جميع قيم سرعة الدوران للدائر بل عند قيمة واحدة فقط لذا نسمي هذا العزم بالتزامني وهو يختلف عن العزم التحريضي. على اعتبار أن توافقية الحقل المغناطيسي للثابت من المرتبة (ρ) تدور بالنسبة للثابت بسرعة زاوية قدرها (ω_1 / ρ) وتحرض في الحقل المغناطيسي للدائر توافقية من المرتبة $(\nu \neq \rho)$ ، وهذه التوافقية بدورها تدور بالنسبة للدائر بتردد من المرتبة:

$$\frac{1}{\nu} \omega_1 \cdot S_\rho = \frac{\omega_1}{\nu} [1 - \rho(1 - S_1)]$$

والتي تدور بالنسبة للثابت بتردد من المرتبة $\omega_2(1 - \rho/\nu) + \omega_1/\nu$

إذا كان $\omega_2 = 2\omega_1 / (\rho - \nu)$ فإن المعادلة السابقة تتحول إلى (ω_1 / ν) ، يعني أن توافقيات الحقل المغناطيسي للدائر من المرتبة (ν) ستدور بسرعة تزامنية بالنسبة لتوافقيات الحقل المغناطيسي للثابت من المرتبة (ν) . نتيجة للتأثير المتبادل بينهما تتم الحالة الفيزيائية لنشوء العزم التزامني.

مما سبق نجد أن عزم الدوران للمحرك التحريضي يتناسب طردياً مع المطال الناتج للتحريض المغناطيسي ومع مطال القوة المحركة المغناطيسية. وبالتالي كلما كانت مرتبة التوافقيات الفراغية للحقل المغناطيسي أخفض ودورها أكبر كلما زاد احتمال ظهور عزم الدوران الطفيلي المؤثر على هذا النظام أو ذلك. ومن المعروف أن عوامل اللف يمكن اختيارها بحيث يمكن بواسطتها أن نقضي على توافقتين من توافقيات الحقل المغناطيسي للثابت. عدا عن ذلك فإن عدد الأطوار والمنطقة الطورية يمكن أن تنظم التشكيل التوافقي لحقل الثابت. إن الصعوبة في هذه الحالة بما يتعلق أو يخص توافقيات الحقل المغناطيسي هو التأثير المتبادل لتوافقيات الثابت والدائر من المرتبة السنية أي من المرتبة:

$$Z_1 / P \pm \nu \quad ; \quad Z_2 / P \pm \mu \quad ; \quad (Z_1 / P) \pm (Z_2 / P) \pm k$$

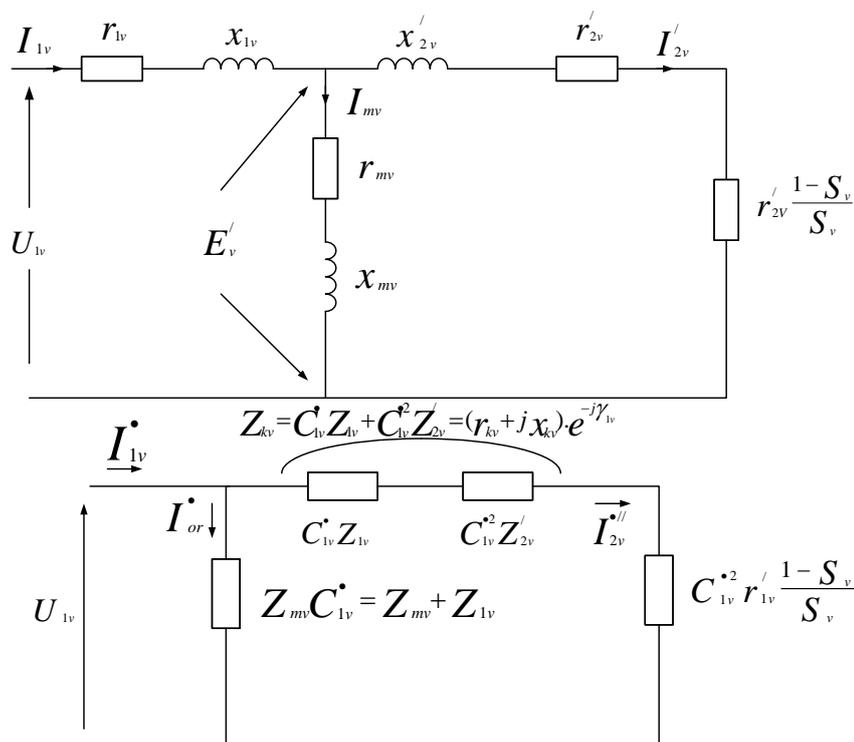
تعتبر التوافقيات الأكثر خطورة من التوافقيات المشار إليها أعلاه هي التوافقيات المعبر عنها بالعلاقة الأخيرة، يعني التوافقيات من المرتبة $(Z_1 / P) \pm (Z_2 / P) \pm k$ حيث (k) عدد صحيح موجب أو سالب. لكي تظهر هذه التوافقيات يجب أن يختلف عدد مجاري الثابت عن عدد مجاري الدائر بعدد صحيح من مضاعفات عدد أزواج الأقطاب أي أنه من غير المرغوب أن يكون $(Z_2 = Z_1 \pm k \cdot P)$. لكن هذا التحديد يكون معقداً ويستدعي في حالات عدة عدم المقدرة على تصنيع الآلة على شكل قوالب والتجميع بالكبس لنواتي الثابت والدائر. وبالتالي يتطلب تحديد عدد مجاري الدائر بالشكل الذي تكون العزوم الطفيلية فيه صغيرة، وهذا الاختيار مقرون بسرعة الدوران وتردد الدائر. إذا كان هذا التردد ضمن المجال الذي يحصل عنده عزوم دوران كبيرة للتوافقيات الأساسية للحقل المغناطيسي وبالتالي الخطر من استقرار الدائر لا يكون أساسياً.

يمكن أيضاً إجراء الحساب للعزوم التحريضية للتوافقيات العليا لحقل الثابت والدائر لمحرك تحريضي باستخدام الدارة المكافئة الموضحة في الشكل (2). يتم حساب بارامترات الدائر كما لو كان الدائر واقعاً داخل الثابت ويملك $(\nu \cdot P)$ زوج من الأقطاب. عندها سيعبر عن القوة المحركة المغناطيسية للتوافقيات من المرتبة (ν) للدائر بالنسبة للقوة المحركة المغناطيسية للتوافقيات من المرتبة (ν) للثابت بالشكل:

$$\frac{F_{2\nu}}{F_{1\nu}} = \frac{j X_{m\nu}}{j X_{m\nu} + j X'_{2\nu} + r'_{2\nu} / S_\nu} \quad (16)$$

فلأجل التوافقيات ذات المرتبة العالية يكون الانزلاق $(S_\nu = S_1 \cdot \nu)$ له قيمة كبيرة، وبالتالي يمكن إهمال النسبة $(r'_{2\nu} / S_\nu)$. أي يمكن، ومع اعتبار قيمة $(X_{m\nu})$ تتناسب مع $(1/\nu)$ و $(X'_{2\nu})$ تتناسب مع (ν) ، الحصول على القوة المحركة المغناطيسية للدائر والتي تعبر عن القوة المحركة المغناطيسية للثابت. تتناسب نسبة مطالبيهما عكساً مع مربع مرتبة التوافقيات. وبالتالي يمكن أن نهمل العزوم التحريضية ذات المرتبة العليا [1,2,9].

تظهر العزوم التزامنية عند سرعة محددة للدائر نتيجة التأثير المتبادل لتوافقيات الحقلين المغناطيسيين للثابت والدائر والتي لها مرتبة سنوية واحدة (تملك خطوة قطبية واحدة $(\tau_{2v} = \tau_{1v})$)، فواحدة منهما تتشكل بوساطة تيار الثابت (I_1) والتردد (f_1) والأخرى بوساطة تيار الدائر (I_2) والتردد $(f_2 = \nu \cdot f_1)$ عند سرعة معينة للدائر، وتدعى هذه التوافقيات بالمستقلة.



الشكل (2) مخطط الدارة المكافئة من الشكل (T) والشكل (Γ) من أجل التوافقية من المرتبة (ν) لساحة الثابت.

من الصعب تقدير قيمة العزوم التزامنية، لذا يمكن اعتبار أن هذه العزوم تتناقص مع زيادة مرتبتها أي مع زيادة عدد أزواج الأقطاب للتوافقيات المولدة لتلك العزوم. وطالما أن التوافقيات من المرتبة $(Z_1 = Z_2 \pm P)$ هي التوافقيات الأكثر خطراً لذا يجب أن نعيدها كل الاهتمام ونركز على دراستها بشكل أساس عند الدراسة التصميمية لآلة التحريضية. لقد تم في العمل المفصل لكل من الباحثين Drehmann A. و Lenningar S. توضيح نتائج الحساب والنتائج التجريبية لعزوم الدوران التزامنية التي تظهر في المحركات التحريضية عندما تختلف عدد مجاري الثابت عن عدد مجاري الدائر بمقدار عدد أزواج الأقطاب أو مضاعفاتها $(Z_2 = Z_1 + k \cdot P)$. وقد قسم الباحثون المشار إليهم أعلاه الهبوطات في منحنى عزم الدوران، الناشئة عن العزوم التزامنية إلى خمس مراتب بالقيمة على أساس عدد أزواج الأقطاب المحصلة عن التوافقيات في الثغرة الهوائية. ويوضح ذلك بالجدول (1).

الجدول (1) يبين توافقيات الحقل المغناطيسي في الثغرة الهوائية ومرتبة مطالات الانحدارات في منحني عزم الدوران عند عدد غير مرغوب به لمجاري الثابت (Z_1) ومجاري الدائر (Z_2)

5	5	4	3	2	1	مرتبة مطال انحدار منحني العزم
$5P$	$5P$	$3P$	$2P$	P	P	عدد أزواج أقطاب التوافقية V
$2P/Z_3$	0	P/Z_2	0	$2P/Z_2$	0	النسبة ω_2/ω_1
$Z_1 - 4P$	$Z_1 \pm 6P$	$Z_1 \pm 4P$ $Z_1 - 2P$	$Z_1 \pm 3P$	$Z_1 \pm 2P$	Z_1	عدد مجاري الدائر Z_2

يبين في الجدول (2) الانحدارات المتوقعة لعزم الدوران، حيث تشير الرموز عند أي نظام عمل للآلة التحريضية يمكن أن يكون هذا الانحدار. فالحرف (S) يعني الدائر واقف (بداية الإقلاع أو نهاية الكبح)، والحرف (M) يعني نظام العمل كمحرك، بينما الحرف (B) يوافق الكبح أو عكس اتجاه الدوران. إن الانحدارات أو الهبوطات الحادة في منحني عزم الدوران يعبر عنها بحروف غامقة أو عريضة.

الجدول (2) يبين الانحدارات أو الهبوطات في منحني عزم الدوران لمحرك تحريضي عند: $Z_2 = Z_1 + k \cdot P$.

عدد أزواج الأقطاب للتوافقيات العليا بالنسبة للتوافقية الأساسية													K
13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	
B	--	B	--	M	--	B	--	B	--	M	--	B	10
--	--	--	S	--	S	--	--	--	S	B	S	--	9
M	--	M	--	B	--	M	--	M	--	--	--	M	8
--	M	--	--	--	--	--	M	--	--	--	--	S	7
S	--	S	--	--	--	S	--	S	--	--	--	--	6
--	B	--	--	--	--	--	B	--	--	--	--	--	5
B	--	B	--	M	--	B	--	B	--	M	--	B	4
--	--	--	S	--	S	--	--	--	S	--	S	--	3
M	--	M	--	B	--	M	--	M	--	B	--	M	2
--	M	--	--	--	--	--	M	--	--	--	--	--	1
S	--	S	--	--	--	S	--	S	--	--	--	S	0
--	B	--	--	--	--	--	B	--	--	--	--	--	-1
B	--	B	--	M	--	B	--	B	--	M	--	B	-2
--	--	--	S	--	S	--	--	--	S	--	S	--	-3
M	--	M	--	B	--	M	--	M	--	B	--	M	-4
--	M	--	--	--	--	--	M	--	--	--	--	--	-5
S	--	S	--	--	--	S	--	S	--	--	--	S	-6
--	B	--	--	--	--	--	B	--	--	--	--	--	-7

B	--	B	--	M	--	B	--	B	--	M	--	B	-8
--	--	--	S	--	S	--	--	--	S	--	S	--	-9
M	--	M	--	B	--	M	--	M	--	B	--	M	-10

وأخيراً في الجدول (3) موضح نسبة سرعة الدوران للدائر إلى السرعة التزامنية، والتي عندها تحصل الانحدارات الأكثر حدة لمنحني العزم في نظام التحريك عند التوافقيات غير المرغوب بها لعدد مجاري الثابت والدائر للآلة التحريضية.

جدول (3) يبين سرعة دوران الدائر كجزء من التردد الأساس ω_2 / ω_1 ، والتي عندها تتحقق خاصية الانحدارات الدارة في منحنى عزم

$$Z_2 = Z_1 + k \cdot P$$

الدوران للمحرك التحريضي عند

0	-10	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	K
+		+			+			+			0
			+			+			+		P/Z_2
							+				$2P/Z_2$
	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	K
		+			+			+			0
	+			+			+			+	P/Z_2
			+						+		$2P/Z_2$

إن استخدام الجداول الثلاثة المبينة أعلاه تسهل عملية اختيار ليس فقط عدد المجاري المناسب، بل نوع القفص السنجابي للمحرك التحريضي المقصور أيضاً. فعلى سبيل المثال عند الهبوط الانحدار الكبير للعزم والدائر واقف يمكن باختيار مناسب لعدد المجاري أو باختيار مناسب لنوع القفص السنجابي للمحرك أن نزيد عزم الإقلاع ونتفادى توقف الدائر عند الإقلاع.

يوضح الجدول (3) درجات التوافقيات وسرعاتها الزاوية منسوبة إلى سرعة دوران التوافقية الأساسية للحقل المغناطيسي لملف الثابت. يلاحظ من المعطيات أنه عندما تتطابق مرتبة التوافقية الفراغية مع مرتبة التوافقية الزمنية تدور هذه التوافقية بالتزامن مع التوافقية الأساسية وبالتالي تشكل عزم دوران نافع. إن وجود هذه التوافقيات يؤدي إلى إشباع إضافي في الدارة المغناطيسية للآلة الكهربائية وإلى انخفاض معامل الاستطاعة بعض الشيء. أما بقية التوافقيات الأخرى هي توافقيات غير تزامنية وعنها يتشكل عزم كبح أو عزم تسارع والتي تعادل الضياعات الإضافية. إن عدد التوافقيات اللاتزامنية يقل مع زيادة عدد الأطوار، ومرتبة التوافقيات المتبقية ترتفع وتخفض مطالاتها. وبالتالي من أجل رفع قيمة المردود من المناسب أن نزيد وبالحدود المعقولة عدد أطوار المحرك، المغذى من مبدلة ترددية [11].

حساب الضياع الإضافي الناتج عن التوافقيات العليا في المحركات التحريضية:

من أجل حساب الضياع الإضافي الناتج عن التوافقيات العليا لتيار ثابت المحرك التحريضي من الضروري بداية أن نحدد مطال توافقيات التيار، لأنه عند حساب المحرك المغذى عن طريق مبدلة للتوتر والتردد تؤخذ عادة

توافقيات جهد التغذية فقط [2,7]. لأجل ذلك تستخدم الدارة المكافئة المبينة على الشكل (2) والتي تحسب بارامتراتهما من أجل كل توافقية زمنية بشكل مستقل مع الأخذ بالحسبان معامل التصحيح الأول (C_{1v}) المساوي إلى:

$$\bar{C}_{1v} = 1 + \bar{Z}_{1v} / \bar{Z}_{mv} = C_{1v} \cdot e^{-j\gamma_{1v}} \quad (17)$$

حيث الزاوية (γ_1) لأجل الآلات ذات الاستطاعة المتوسطة والكبيرة وعند التردد ($f_1 = 50 \text{ Hz}$) تكون صغيرة ولا تتجاوز ($2 \div 3$) درجة، بالتالي يكون (C_1) صغيراً ولا يتجاوز (1.03). أما في الآلات الصغيرة الاستطاعة تكون ($\gamma_1 = 20 \div 30$) درجة، بالتالي يمكن أن يصل المعامل إلى ($C_1 = 1.5$).

تتناسب الممانعات التحريضية لملفي المحرك (X_{1v}, X'_{2v})، والمتعلقة بالسيالة التسريعية طرماً مع التردد وتتؤخذ مضاعف درجة التوافقية:

$$X'_{2v} = v \cdot X'_2 \quad \text{و} \quad X_{1v} = v \cdot X_1 \quad (18)$$

أما المقاومات الأومية للآلات ذات الاستطاعة غير الكبيرة لا تتعلق بالتردد:

$$R'_{2v} = R'_2 \quad \text{و} \quad R_{1v} = R_1 \quad (19)$$

لكن هذا غير صحيح في المحركات ذات الاستطاعة الكبيرة والمتوسطة وعند الترددات العالية، وذلك بسبب نشوء ظاهرة انزياح التيار، والتي تؤدي إلى زيادة المقاومة الفعلية لملفات الآلة مع زيادة التردد. في هذه الحالة يكون:

$$R'_{2v} = R'_2 \cdot v \quad \text{و} \quad R_{1v} = R_1 \cdot v \quad (20)$$

إن هذه الزيادة في قيمة المقاومات تؤدي إلى ظهور ضياعات إضافية كهربائية في المحرك التحريضي وإلى ضياعات مغناطيسية إضافية ناتجة عن التيارات الإعصارية. يمكن إهمال تيار التمغنط بالنسبة للتوافقيات العليا نظراً لمطاله الصغير والتردد العالي للتوافقيات [2,11]. وبالتالي يمكن أن نحسب التيارات بالعلاقة:

$$I_{1v} = U_{1v} / Z_v ; \quad I'_{2v} = I'_v / C_1 = U_{1v} / \sqrt{r_{Kv}^2 + x_{Kv}^2} \quad (21)$$

حيث أن:

$$\begin{aligned} Z_v &= \sqrt{(r_{1v} + r'_{2v})^2 + (x_{1v} + x'_{2v})^2} \\ r_{Kv} &= C_{1v} (r_{1v} \cdot \cos \gamma_{1v} - x_{1v} \cdot \sin \gamma_{1v}) + C_{1v}^2 \cdot r'_{2v} \\ x_{Kv} &= C_{1v} (x_{1v} \cdot \cos \gamma_{1v} + r_{1v} \cdot \sin \gamma_{1v}) + C_{1v}^2 \cdot x'_{2v} \end{aligned} \quad (22)$$

إن العزم المتولد عن التوافقية (v) عند السرعة التزامنية يساوي:

$$T_v = m_1 \cdot I_{2v}''^2 \cdot r_{2v}'' / (\omega_1 \cdot v) \quad (23)$$

حيث أن:

$$\begin{aligned} r_{2v}'' &= r'_{2v} \cdot C_{1v}^2 ; \quad x_{2v}'' = x'_{2v} \cdot C_{1v}^2 ; \quad r'_{1v} = r_{1v} \\ x'_{1v} &= x_{1v} \cdot C_{1v} ; \quad r_{Kv}'' = r'_{1v} + r_{2v}'' ; \quad x_{Kv}'' = x'_{1v} + x_{2v}'' \end{aligned} \quad (24)$$

ويعطى معامل الاستطاعة للتوافقية من المرتبة (v) للتوتر بالعلاقة:

$$\cos \phi_v = r_v / Z_v \quad (25)$$

عند حساب الضياعات المتولدة عن التوافقيات الزمنية العليا (v) للحقل المغناطيسي يجب أن يضرب الضياع الحديدي بنسبة مربع مطال التوافقية (v) إلى التوافقية الأساسية للتوتر، والتقسيم على مربع التوافقية، وبالتجربة أو الحساب نحصل على الضياع النوعي بالحديد عند التردد [11] (f_v):

$$P_{0v} = P_h \frac{f_v}{f_\sigma} + P_e \cdot (\Delta \frac{f_v}{f_\sigma})^2 ; P_{Fe,v} = \frac{P_{0v}}{P_0} (\frac{U_{1v}}{v \cdot U_1})^2 \cdot P_{Fe} \quad (26)$$

حيث أن: P_e, P_h, P_0 هي الضياع النوعي في الحديد عند التردد الأساسي وبسبب التعويق المغناطيسي وبسبب التيارات الإعصارية وبالترتيب، Δ هي سماكة الصفائح الحديدية للألة بـ mm .

تحدد الضياعات الكهربائية الناتجة عن التوافقيات العليا في المحرك التحريضي اعتماداً على الدارة المكافئة للألة التحريضية والمبينة على الشكل (2,a). فلأجل الآلات الكهربائية ذات الاستطاعة المتوسطة والكبيرة:

$$\Delta P_{cu,v} = m_1 I_v^2 \cdot (R_{1v} + R'_{2v}) = \frac{m_1 U_v^2 \cdot (R_{1v} + R'_{2v})}{(R_{1v} + R'_{2v})^2 + (X_{1v} + X'_{2v})^2} =$$

$$= \frac{m_1 U_1^2 \cdot v \cdot (R_1 + R'_2) / v^2}{v^2 [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]} = \frac{m_1 U_1^2 (R_1 + R'_2)}{v^3 [(R_1 + R'_2)^2 + (X_1 + X'_2)^2]}$$

إن الضياعات الكهربائية في ملفات المحرك في نظام الدارة القصيرة (P_{Sc}) أكبر من الضياعات الكهربائية ($P_{cu,n}$) عند نظام العمل الاسمي والتوتر الاسمي الجيبي:

$$P_{Sc} / P_{cu,n} = (I_{St} / I_n)^2 = K_{St}^2 \quad (28)$$

إذ أن: $K_{St} = (I_{St} / I_n)$ - نسبة تيار الإقلاع إلى التيار الاسمي للمحرك. فمن أجل الآلات التي تعمل عند توتر جيبي يكون $K_{St} = 5 \div 7$ ، ومن أجل الآلات التي تعمل عند توتر مستطيل يكون $K_{St} = 3 \div 5$. وبالتالي يكون:

$$P_{cu,v} = K_{St}^2 \cdot \Delta P_{cu,n} / v^3 \quad (29)$$

إن معامل زيادة الضياعات الكهربائية في المحرك التحريضي عند تغذيته بتوتر ذي نبضة مستطيلة:

$$K_{cu} = \frac{P_{cu,n} + \sum_{v=5}^{\infty} P_{cu,v}}{P_{cu,n}} = 1 + K_{St}^2 (\frac{1}{5^3} + \frac{1}{7^3} + \frac{1}{11^3} + \frac{1}{13^3} + \dots) \quad (30)$$

عندما تكون $K_{St} = 3 \div 5$ يصبح هذا المعامل مساوٍ $1.11 \div 1.3$ ، بالتالي فإن زيادة الضياعات الكهربائية في الآلات الضخمة يكون واضحاً بشكل كبير وله تأثير واضح. حيث يمكن أن يؤدي ذلك إلى زيادة تيار الآلة بمقدار $(5 \div 15)\%$.

تأثير التوافقيات العليا على عامل الاستطاعة:

يمكن التعبير عن القيم اللحظية للتيار والتوتر بالشكل الآتي:

$$u = \sum_1^v \sqrt{2} \cdot U_v \cdot \sin(v \cdot \omega t + \alpha_v) + \sum_1^m \sqrt{2} \cdot U_m \sin(m \cdot \omega t + \alpha_m) \quad (31)$$

$$i = \sum_1^v \sqrt{2} \cdot I_v \cdot \sin(v \cdot \omega t + \alpha_v + \phi_v) + \sum_1^p \sqrt{2} \cdot I_p \sin(P \cdot \omega t + \alpha_p) \quad (32)$$

ويعبر عن عامل الاستطاعة بالشكل:

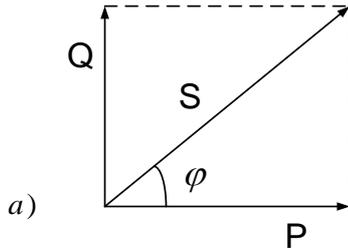
$$Pf = \frac{1/T \int_0^T u \cdot i \cdot dt}{U_{rms} \cdot I_{rms}} = \frac{\sum_1^v U_v \cdot I_v \cdot \cos \phi_v}{\left\{ \left(\sum_1^v U_v^2 + \sum_1^m U_m^2 \right) \left(\sum_1^v I_v^2 + \sum_1^p I_p^2 \right) \right\}^{1/2}} \quad (33)$$

حيث $\cos \phi_v$ هو معامل الاستطاعة المزاح بين المركبتين الأساسيتين للجهد والتيار.

إن معامل الاستطاعة هو قياس لمدى فعالية حمل معين يستهلك الكهرباء لكي ينتج عمل. ويقدر ما يكون معامل الاستطاعة أكبر بقدر ما يكون العمل المنتج أكبر بالنسبة لتوتر أو تيار معين. يبين الشكل (3) علاقات أشعة الاستطاعة لكل من الأحمال الخطية وغير الخطية. يقاس معامل الاستطاعة دائماً كنسبة بين الاستطاعة الفعلية إلى الاستطاعة الكلية أو الظاهرية.

إن الاستطاعة الكلية من أجل الحمولة الخطية هي المجموع الشعاعي للاستطاعة الردية مقدرة بـ KVAR والاستطاعة الفعلية مقدرة بـ KW، ويكون معامل الاستطاعة $(\cos \phi = P/S)$ ، حيث (ϕ) هي الزاوية بين الاستطاعتين الكلية والفعلية وهي مماثلة للانزياح بين التوتر والتيار عند الحمولة الخطية. فمن أجل مقدار معين من التيار زيادة زاوية الانزياح سيؤدي إلى زيادة الاستطاعة الردية ونقصان الاستطاعة الفعلية وبالتالي انخفاض $(\cos \phi)$.

(a) عند الحمولة الخطية:

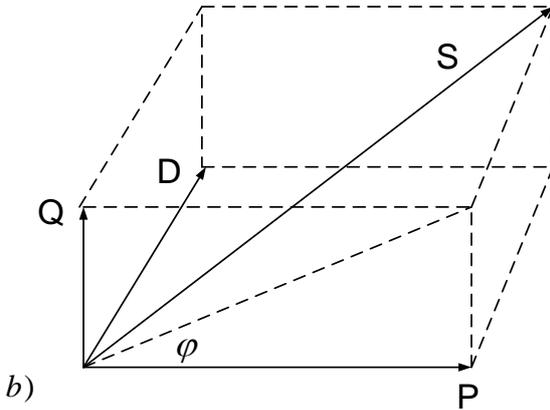


$$Pf = \frac{P}{S} = \frac{Kw}{KVA} = \cos \phi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$KVA = \sqrt{KW^2 + KV.A.R^2}$$

(b) عند الحمولة اللا خطية:



$$Pf = \frac{P}{S} = \frac{Kw}{KVA} \neq \cos \phi$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}$$

$$KVA = \sqrt{KW^2 + KVAR^2 + KVAR_b^2}$$

الشكل (3) علاقة معامل الاستطاعة لأجل: (a) - الحمولات الخطية ، (b) - الحمولات اللاخطية.

يعبر عن معامل الاستطاعة عند موجة جهد جيبيية بالعلاقة:

$$Pf = \cos \phi = \frac{U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1}{U_1 \cdot I_{rms}} = \frac{I_1 \cdot \cos \phi_1}{I_{rms}} = \mu \cdot \cos \phi_1 \quad (34)$$

حيث أن: (ϕ_1) زاوية الازاحة بين المركبتين الأساسيتين للجهد والتيار، (μ) - عامل التشوه لموجة التيار.

إن تعويض الاستطاعة الردية عند الشكل المشوه لمنحنيات التوتر والتيار يلاقي صعوبة. لأن تعويض الاستطاعة الردية يتطلب استخدام معدات لا يحصل فيها ضياعات، وذلك من أجل التخفيف إلى الحد الأدنى للاستطاعة الظاهرية وبالتالي تعويض معامل الاستطاعة وتحسينه إلى أفضل قيمة. فعند إضافة مكثفات لتحسين معامل الاستطاعة لها سعة (C) موصولة على التفرع مع الحمل الذي له الجهد (u) والتيار (i) وفقاً للعلاقات السابقة، فإن معادلة الاستطاعة الظاهرية تأخذ الشكل:

$$S = \left(\sum_1^v U_v^2 + \sum_1^m U_m^2 \right)^{1/2} \quad (35)$$

$$\left\{ \sum_1^v (I_v^2 + U_v^2 \cdot v^2 \cdot \omega^2 \cdot C^2 + 2U_v I_v v \cdot \omega \cdot C \sin \phi_v) + \sum_1^m U_m^2 m^2 \omega^2 C^2 + \sum_1^p I_p^2 \right\}^{1/2}$$

إذا أخذ مشتق العلاقة (35) بالنسبة للسعة (C) ومساواته للصفر نحصل على أفضل سعة خطية:

$$C_{op} = \frac{(1/\omega) \sum_1^v v \cdot U_v \cdot I_v \cdot \cos \phi_v}{\sum_1^v U_v^2 \cdot v^2 + \sum_1^m U_m^2 \cdot m^2} \quad (36)$$

وتعرف الاستطاعة الردية من المعادلة:

$$Q = \sum_1^v U_v \cdot I_v \cdot \sin \phi_v = \frac{1}{2\pi} \sum_1^v \frac{1}{v} \cdot \int_0^T U_v \cdot di_v \quad (37)$$

على الرغم من أن المدلول الفيزيائي لهذه المعادلة لم يكن مناسباً، لكنها مقبولة لاعتبارين أساسيين:

- 1 - تحافظ هذه المعادلة على الأنظمة الجيبية الخطية.
- 2 - إمكانية التعبير عن الاستطاعة الكلية في الأنظمة اللاجيبية بالشكل:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (38)$$

حيث (P) هي الاستطاعة الفعلية و (D) استطاعة التشوه.

إن الهدف من تعويض الاستطاعة الردية باستخدام المكثفات هو تحسين معامل الاستطاعة في الحالة الجيبية للجهد. لكن تحسينه عند وجود التوافقيات العليا (الحالة اللاجيبية) يتم باستخدام مرشحات للتوافقيات العليا. والخلاصة أن معامل الاستطاعة هو النسبة بين الاستطاعة الفعلية والظاهرة ويختلف عن معامل استطاعة زاوية الإزاحة ($\cos \phi_1$) عند وجود تشوهات بالموجات بمقدار العامل (μ). لذا يمكن القول أنه من أجل الأعمال غير الخطية شكل (3,b) تكون التيارات التوافقية التي تستجربها هذه الأحمال لا تنتج عملاً مفيداً لذا تكون ردية بطبيعتها. وبالتالي تصبح علاقة معامل الاستطاعة ذات أبعاد ثلاثية ذات استطاعة ردية مشوهه أو منحرفة (D) مجتمعة مع كل من (P) و (Q) لتنتج الاستطاعة الكلية التي يجب أن يعطيها نظام الطاقة الكهربائي.

الاستنتاجات والتوصيات:

يجب الإشارة إلى النقاط التالية:

- 1- إن تقدير تأثير لاجيبية منحنى الجهد المغذي لمحرك تحريضي على مؤشرات العمل لهذا المحرك تكون مهمة وضرورية جداً عند تصميم آليات القيادة أو التحكم الترددية والتي تعتبر مبدلة التردد عنصرها الأساس.

- 2- عند التنظيم الواسع للتردد يجب أن نتذكر أنه (حتى لأجل الآلات الضخمة جداً) من المناسب إجراء حساب أنظمة العمل على ترددات منخفضة وذلك بوساطة مخطط الدارة المكافئة للمحرك التحريضي.
- 3- إن التيار المسحوب من قبل الأحمال اللاخطية يكون لاجبيي حتى لو كانت هذه الأحمال موصولة على منبع جهد جيبي، وهذه الجهود اللاجيبية وتياراتها تحتوي على تيارات توافقية تسبب تشوه موجة الجهد وهذا يؤثر على كافة تجهيزات نظام توزيع الطاقة وحمولاتها.
- 4- تتأثر التيارات التوافقية بظاهرة انزياح التيار، وبما أنه لها ترددات أعلى من تردد التوافقية الأساسية فإنها تميل لكي تتدفق بشكل أساس على طول الحافة الخارجية للنواقل وهذا يقلل من مساحة مقطع الناقل وزيادة مقاومته الفعلية وبالتالي زيادة الضياعات الكهربائية.
- 5- إن التيارات الإعصارية في الأحمال الخطية هي مركبات صغيرة إلى حد كبير مقارنة مع الضياعات الكلية. أما في الأحمال اللاخطية تصبح مؤثرة جداً لتصل من (15 ÷ 20) ضعفاً مقارنة مع حالة الأحمال الخطية.
- 6- عند الدراسة التصميمية للمحركات التحريضية يجب الأخذ بعين الاعتبار التوافقيات العليا الفراغية والزمنية بحيث تكون التأثيرات السلبية لهذه التوافقيات على مؤشرات العمل أقل ما يمكن.
- 7- لا يمكن القضاء نهائياً على العزوم الطفيلية الناتجة عن التوافقيات العليا، لكن يمكن التخفيف من تأثيراتها السلبية على المحرك التحريضي باختيار أبعاد تصميمية مناسبة كعدد المجاري ونوع الف والميلان للمجاري و.... الخ.

المراجع:

- 1- د.م. كاميليا يوسف محمد ، *التوافقيات في الشبكات الكهربائية* ، شركة توزيع كهرباء الإسكندرية، 1987م، 315-330.
- 2- د.م. عزت حسن ، *الآلات الكهربائية التحريضية*، منشورات جامعة تشرين، 2003-2004م، 211-293.
- 3- د.م. فاتح بسو ، *النظرية العامة للآلات الكهربائية*، منشورات جامعة حلب، 1996-1997م، 206-284.
- 4- HELLER, B. ; HAMATA, V. Harmonic Field in Induction Machines. Prague, 1981, 150-176.
- 5- YIN LEE, C. ; JEN LEE ,W. Effects of no sinusoidal voltage on the operation performance of a three-phase induction motor. IEEE, vol. 14, N .2, 1999, 58-81.
- 6- NETO, L. M. ; SALERNO, C. H. Analysis of the induction machine including the line and spatial harmonic effects . Warsaw, Poland, 1994, 15.
- 7- د.م. محمد مضيف بري ، *الآلات الكهربائية (2)*، منشورات جامعة حلب، 1978-1979م، 400-525.
- 8- DE LA ROSA, C. F. Harmonics and Power Systems, Hazelwood, Missouri, U.S.A.- 2006, 22-61.
- 9- BANIHASCHEMI, A. Determination of the losses in induction machines due to harmonics , October, 1973, 75-110.
- 10- BREAKERS, L.V. Power factor correction and harmonic filtering, Chapter L, Schneider Electric, Electrical installation guide, 2010, 1-26.
- 11- BIRBIR, Y. ; SELCUK NOGAY, H. Voltage and Current Harmonic Variations in Three-phase Induction Motors with Different Stator Coil Pitches, International Journal Of Energy, Issue 4, Vol. 1, 2007, 1-8.