

تحسين خصائص محركات الجر التحريضية العاملة على شبكة التيار المستمر عند تغذيتها عن طريق مبدلة قابلة

الدكتور عزت حسن*

(قبل للنشر في 2005/3/29)

□ الملخص □

يبين المقال الأسباب الفنية والاقتصادية التي تستدعي لإحلال المحركات التحريضية محل محركات التيار المستمر في وسائط النقل الكهربائية بشكل خاص وأغلب المنشآت الصناعية بشكل عام، لذا تم توضيح الطريقة المناسبة لاستخدام المحركات التحريضية في جر وسائط النقل الكهربائية العاملة على شبكة التيار المستمر التي بواسطتها نحصل على شروط مناسبة لإقلاع وتنظيم سرعة هذه المحركات.

تتلخص هذه الطريقة باستخدام المبدلة القابلة المستقلة للتوتر، والتي تعطي دوماً على خرجها توتراً متناوباً بتردد متغير وذلك حسب السرعة اللازمة أو المطلوبة. لكن تطبيق هذه الطريقة يخلق بعض السلبيات، مثل احتواء منحني جهد الخرج للقابلة على التوافقيات العليا، التي تؤثر على أداء المبدلة القابلة وعلى أداء الحمولة المربوطة على خرجها. لذا تم أيضاً عرض الطريقة المناسبة فنياً واقتصادياً للتخلص أو التخفيف من هذه السلبيات وذلك باستخدام المرشحات التوافقية ذات البارامترات المناسبة بحيث نحصل على أداء جيد للمبدلة القابلة وللحمولة الموصولة على خرجها.

تم في المقال أيضاً استنتاج العلاقات الأساسية للمحرك التحريضي عند تغذيته عن طريق مبدلة قابلة مستقلة للتوتر، لأن ذلك يفيد في الاختيار الصحيح للمرشحات التوافقية اللازمة.

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

Improvement of the Induction Motors Characteristics Working on A D.C. Net on Feeding By an Inverter

Dr. Izzat Hasan *

(Accepted 29/3/2005)

□ ABSTRACT □

The aim of the present work, is to find the economical and technical basis required for the induction motors instead of the D.C. motors and other suitable methods using such motors for driving the electrical transportation utilities connected with D.C. network. This could help us to find the suitable conditions for starting-up and regulate the speed of such motors.

By this method, we could use the independence frequency converter, which always gives an out-put A.C. with varying frequency according to the required speed. But the use of our method, initiates some negative problems, such as the converter – out-put voltage with high harmonics, which could affect its work and the load connected with its out-put. Therefore, we used a suitable method to reduce such passivity, economically and technically using a required harmonic filters to idealize the efficiency in the converter and its load.

We also could find the basic formula for such induction motors in these cases.

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

مقدمة:

تطورت قيادة محركات التيار المتناوب (وكذلك محركات التيار المستمر) في الآونة الأخيرة تطوراً واسعاً وهي الآن من أكثر العلوم انتشاراً واستخداماً. ويمكننا أن نؤكد أن ارتفاع إنتاجية المعامل والمنشآت الصناعية يتعلق مباشرة بالتجهيزات الكهربائية والتقنيات الإلكترونية المستخدمة في قيادتها وتشغيلها.

على الرغم عملياً من أن كل الطاقة الكهربائية يتم توليدها ونقلها وتوزيعها على شكل تيار متناوب إلا أن قسماً لا يستهان به من هذه الطاقة يتم استثماره على شكل تيار مستمر من قبل محركات التيار المستمر بمختلف أنواعها واستطاعتها. تتميز محركات التيار المستمر بمميزات تنظيم جيدة وقدرة كبيرة على زيادة التحميل وتسمح بالحصول على مميزات ميكانيكية قاسية ولينة.

تستخدم محركات التيار المستمر في إدارة الآلات المختلفة المستخدمة في التعدين وفي حافلات النقل الكهربائية (عربات الجر الكهربائية والقطارات والبواخر والسيارات الكهربائية) وفي آلات الرفع والحفر وفي معالجة المعادن والصناعات الورقية والنسيجية وغيرها. لذا من أجل تحسين طبيعة الإنتاج، وتأمين الشروط التكنولوجية الملائمة وتحقيق المتطلبات الموضوعية من جمل القيادة والتحكم يلزم تنظيم سرعة الآليات المختلفة. وفي العديد من الحالات التي فيها يراد الحصول على تنظيم واسع ومتدرج للسرعة تستخدم محركات التيار المستمر، وذلك رغبة في تبسيط الآلية الإنتاجية والحصول على مردود عالٍ عند مختلف عزوم الدوران والسرعة. لكن يتطلب التحكم بمحركات التيار المستمر تأمين توتر مستمر متغير (تقويم للتيار المتناوب)، ويمكن الحصول عليه عن طريق دارات التقويم للتيار المستمر والمقومات المقادة (المبدلات الثايرتتورية)، لكن عملية التقويم هذه يرافقها دوماً ضياع في القدرة، كما أن تجهيزات التقويم تزيد من الكلفة الاقتصادية.

إن التحكم الكامل ذا الأرباع الأربعة في محركات التيار المستمر أمر ضروري من أجل تحقيق المقاييس الصناعية للسرعة العالية، وينطبق الأمر نفسه على التحكم الترددي بمحركات التيار المتناوب. تكون محركات التيار المستمر خاضعة للتحكم عن طريق تغيير توتر التغذية أو تيار التهيج، في حين تكون محركات التيار المتناوب خاضعة للتحكم عن طريق تغيير التوتر والتردد معاً [3,2,1].

لكن قد نتساءل هنا إذا كانت آلات التيار المستمر تقوم بهذا الدور البارز فلماذا تستعمل أيضاً آلات التيار المتناوب وبشكل خاص المحركات التحريضية؟ ولم السعي لإحلال هذا النوع من المحركات محلها؟ هناك عدة أسباب أهمها:

- 1- ارتفاع ثمن محركات التيار المستمر بالمقارنة مع المحركات التحريضية؛
- 2- المحركات التحريضية لا تحوي على مبدل (مجمع) ولا مسفرات وخاصة المحركات التحريضية ذات الدوائر المقصور، بالتالي أعطالها تكون أقل وموثوقيتها أكبر؛
- 3- المحركات التحريضية أكثر متانة وتعمل بشكل أفضل في الأوساط ذات الظروف المناوئة؛
- 4- تملك المحركات التحريضية عزوماً مرتفعة وإمكانية للتحكم بالسرعة ضمن مجال واسع؛
- 5- تستطيع المحركات التحريضية أن تعمل على توترات تصل إلى (25Kv)، بينما محركات التيار المستمر بحدود (6000V)؛
- 6- تصنع المحركات التحريضية بحجم أقل واستطاعة أكبر (حتى 30000Kw)، بينما محركات التيار المستمر محدودة بحوالي (2000Kw)؛

7- يمكن أن تعمل المحركات التحريضية بسرعات عالية، في حين محركات التيار المستمر الضخمة لا تزيد سرعتها عن (2000r.p.m).

على الرغم من تعقيدات نظام قيادة المحركات التحريضية وارتفاع ثمن القابلات الإلكترونية أكثر من نظام قيادة محركات التيار المستمر، إلا أن تقانات التحكم الرقمي والإلكترونيات المتكاملة تساهم في التقليل من كلفة وتعقيدات دارات نظام قيادة المحرك التحريضي. فنظام التحكم بهذه المحركات يجب أن يكون قادراً على تشكيل موجة جيبية متناوبة من جهد مستمر، وكذلك قادراً على التحكم بكل من مطال وتردد هذه الموجات. هذه الأسباب المذكورة أعلاه بالإضافة إلى التطور الواسع والسريع للعلوم الإلكترونية واقتصادية هذه العلوم دفعت العلماء والباحثين للسعي والوصول إلى إمكانية قيادة وتنظيم سرعة دوران المحركات التحريضية بحيث أصبحت خواصها مماثلة مئة بالمئة لمحركات التيار المستمر، وبالتالي حلت محلها في شتى مجالات العمل. فعلى سبيل المثال أصبحت المحركات التحريضية تستخدم كمحركات جر لحافلات النقل الكهربائية، المغذاة من شبكة تلامسية مستمرة أو منبع تيار مستمر وذلك باستخدام المبدلات القابلة المستقلة للجهد [1,4].

المبدلة القابلة المستقلة للجهد ومجال استخدامها:

المبدلات القابلة المستقلة هي عبارة عن تجهيزات تقوم بتبديل التيار المستمر إلى تيار متناوب بتردد ثابت أو منظم، وسميت بالمبدلات المستقلة كونها تعمل على حمولة مستقلة غير متعلقة بشبكة التيار المتناوب، ويمكن أن تكون حمولة هذه المبدلة عبارة عن مستهلك واحد، مثال محرك تحريضي، أو أن تكون عبارة عن مجموعة مشتركة من تجهيزات الاستهلاك (مجموعة من الحمولات التي تعمل وفق مخطط معين).

تشبه المبدلة القابلة في عملها المقطع وذلك عندما يكون المطلوب عملية إبدال قسري لثايرثورات القدرة المستخدمة كمفاتيح الكترونية نصف ناقلة، مع مراعاة خاصة هامة في القابلة، وهي أن خرجها هو جهد متناوب وليس مستمر كما في المقطع.

يمكن أن تكون دارات المبدلات القابلة أحادية الطور أو ثلاثية الأطوار ويمكن أن تكون جسرية أو ذات نقطة مشتركة. لكن أغلب دارات القابلة سواء كانت ذات نقطة مشتركة أو جسرية وبغض النظر عن نظام الإبدال المستخدم يمكن أن تعمل بعدة طرق للتحكم بالجهد، ما عدا تغيير قيمة المركبة الأساسية للجهد المتناوب وهذا يعطي قياس للتحكم أكبر في توافقيات شكل الموجه [2,1].

يمكن أن تكون المفاتيح بالمبدلة عبارة عن ترانزستورات أو ثايرثورات ثنائية العمليات. أما عند استخدام الثايرثورات العادية وحيدة العملية لا بد عندئذ من إضافة عناصر أخرى إلى دارة المبدلة لتقوم بعملية الإبدال. ويعتبر المكثف واحداً من أهم عناصر المبدلات القابلة المستقلة.

تستخدم المبدلات القابلة المستقلة للجهد بتغذية تجهيزات الأسلاك التي تعمل بالتيار المتناوب في المجالات التي تكون فيها منابع التغذية الوحيدة عبارة عن مدخرات (مثلاً منابع التغذية على السفن)، وكذلك يستخدم هذا النوع من المبدلات كمفاتيح للتغذية الاحتياطية لتجهيزات الأسلاك الهامة (نظم الاتصالات والحاسبات الإلكترونية). كذلك تستخدم في وسائط النقل الكهربائي، التي تتغذى من شبكة تلامسية أو منبع للتيار المستمر، حيث يفضل في وسائط النقل هذه استخدام المحركات التحريضية ذات الدائر المقصور التي تمتاز ببساطتها ووثوقيتها العالية

ورخص ثمنها. كذلك تستخدم في جمل القيادة الكهربائية التي تعتمد على المحركات التحريضية والمحركات المتوافقة، حيث تعمل المبدلة هنا كمنبع للجهد والتردد المنظمين، وكذلك في مجالات أخرى متنوعة [2].
يوضع شرط إضافي في بعض الأحيان أمام المبدلات القابلة المستقلة من حيث إعادة القدرة إلى الشبكة، فمثلاً هذا ضروري لتأمين كبح المحركات التحريضية بطريقة إعادة القدرة إلى الشبكة.

يحتوي منحنى جهد الخرج في المبدلات القابلة المستقلة للجهد على مجموعة من المركبات التوافقية، التي تؤثر سلبياً على مؤشرات الأداء لهذه المبدلات وهذا ينعكس سلبياً أيضاً على الحمولة المربوطة على خرج هذه المبدلات. يتم تقييم جودة ومستوى أداء هذه المبدلات استناداً إلى مؤشرات الأداء التالية: [2,5,6]

- معامل التوافقيات (HF (Harmonic Factor):

يعبر معامل التوافقيات (بالنسبة للتوافقية v) على مدى تأثير كل مركبة من المركبات التوافقية على حده في التركيب التوافقي، ويحدد هذا المعامل بالعلاقة التالية:

$$HF_v = U_v / U_1$$

حيث أن:

U_1 - القيمة الفعلية لمركبة التوافقية الأساسية؛ U_v - القيمة الفعلية للمركبة التوافقية v حيث $v = 1, 2, \dots, n$

- معامل التشوه الكلي للتركيب التوافقي (THD (Total Harmonic Distortion):

يعبر معامل التشوه التوافقي الكلي عن درجة تطابق شكل منحنى الجهد (أو التيار) مع شكل المركبة التوافقية الأساسية لهذا الجهد (أو التيار) ويحدد بالعلاقة التالية:

$$THD = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{v=2,3,\dots,n}^{\infty} U_v^2}$$

- معامل التشوه (DF (Distortion Factor):

يعبر معامل التشوه التوافقي الكلي (THD) عن التركيب التوافقي الكلي، لكنه لا يبين مستوى كل من المركبات التوافقية ضمن هذا التركيب، فإذا استخدمت مرشحات على خرج المبدلات القابلة المستقلة سيؤدي ذلك إلى خفض قيمة التوافقيات العليا، ويكون تأثير هذه المرشحات أكثر فعالية كلما كانت درجة التوافقية أكبر، لذلك من الضروري جداً معرفة تردد ومطال كل مركبة من المركبات التوافقية العليا ليتم على أساسها تصميم المرشحات اللازمة.

يبين معامل التشوه مقدار التشوه المتبقي في شكل موجة جهد الخرج بعد إخضاع المركبات التوافقية للترشيح للمرة الثانية (أي بعد تقسيمها على v^2)، وبالتالي فإن معامل التشوه يعبر عن درجة تخفيض التوافقيات غير المرغوبة وذلك بدون تحديد قيم عناصر المرشح من الدرجة الثانية، ويتم إيجاد معامل التشوه هذا من العلاقة التالية:

$$DF = \frac{1}{U_1} \sqrt{\sum_{v=2,3,\dots,n}^{\infty} \left(\frac{U_v}{v^2}\right)^2}$$

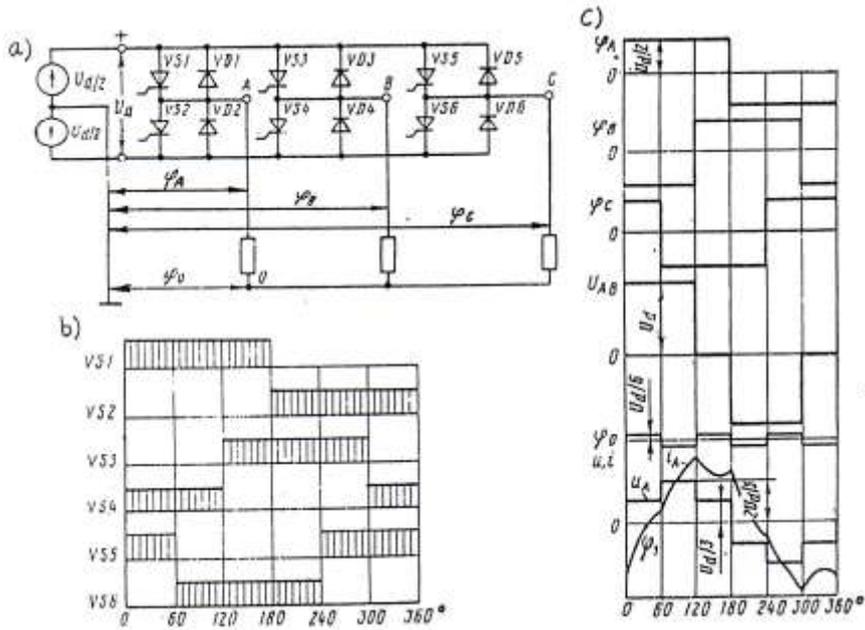
أما معامل التشوه لأي مركبة من المركبات التوافقية فيحدد بالعلاقة التالية:

$$DF_v = \frac{U_v}{U_1 \cdot v^2}$$

العلاقات الأساسية للمحرك التحريضي عند تغذيته عن طريق مبدلة قابلة مستقلة للتوتر:

إن المبدلات القابلة المستقلة للتوتر، التي تحول التوتر المستمر إلى متناوب لاقت انتشاراً واسعاً في علم القيادة الكهربائية، حيث استخدمت في القيادة الكهربائية لمحركات الجر التحريضية وفي التحكم بالتنظيم الترددي الصناعي. تشكل المبدلة القابلة المستقلة للتوتر على خرجها توتراً متناوباً يأخذ شكل مستطيلي متدرج، ويتحدد شكل منحنى التيار اعتماداً على خواص الحمولة.

يبين الشكل (1,a) مخطط المبدلة القابلة المستقلة للتوتر بدون مجموعات التبديل القسرية للثايرتورات. تتلخص الصفة المميزة لهذه القابلة في أن الثايرتورات الأساسية ($VS1 - VS6$) توصل على التوازي مع الديودات ($VD1 - VD6$). إن هذا النوع من الوصل يجعل الثايرتور والديود يشكلان مفتاح توصيل ذا اتجاهين. على سبيل المثال عند وصل الطور (A) إلى موجب منبع التغذية (U_d) من خلال الثايرتور ($VS1$) يمكن أن يمر تيار الحمولة بالاتجاه المباشر (من النقطة A إلى النقطة 0)، وخلال الديود ($VD1$) يمكن أن يمر تيار الحمولة بالاتجاه العكسي. لذا نسمي الديودات ($VD1 - VD6$) بديودات التيار الردي أو ديودات التغذية العكسية [7,2]. إن هبوط التوتر على الثايرتور والديود عندما يكونان في حالة التمرير (التوصيل) صغير جداً ويمكن إهماله، لذا يمكن اعتبار أن الإجهاد (الكمون) الكهربائي على خرج القابلة (يعني كمون النقاط A, B, C) مساوٍ إما للإجهاد الكهربائي للقطب الموجب لمنبع التغذية (عند حالة التمرير للثايرتورات $VS1, VS3, VS5$ أو الديودات $VD1, VD3, VD5$)، أو للإجهاد الكهربائي للقطب السالب لمنبع التغذية (عند حالة التمرير للثايرتورات $VS2, VS4, VS6$ أو الديودات $VD2, VD4, VD6$).



الشكل (1) - مخطط جسري ثلاثي الطور لمبدلة قابلة مستقلة للتوتر (a) والفواصل (الفترة) الزمنية لتمرير الثايرتور (b) ومخطط الإجهادات الكهربائية والتوترات على الحمولة (c)

إذا حصل خلال دور واحد لتوتر الخرج فصل ووصل متكرر للثايرتورات، فإن القالبية المستقلة للتوتر تسمح بتنظيم جهد الخرج عند توتر دخل غير متغير (U_d).

سندرس في هذه الفقرة المبدلة القالبية المستقلة للتوتر بدون تنظيم داخلي للتوتر. ينظم هذا النوع من القالبات فقط التردد، وتنظيم التوتر يتم على دخل القالبية من جزاء تغيير التوتر (U_d). تستخدم لأجل هذا الغرض مقومات تحكمية (عند التغذية من شبكة متناوبة) أو قاطع نبضي (عند التغذية من شبكة تيار مستمر).
لنعتبر أن التوتر (U_d) ناعم (أملس) بشكل تام أو مثالي. ندرس الخوارزمية 180 للتحكم بالدرجات (للتحكم الزاوي) والأكثر استخداماً للقالبية المستقلة للتوتر، والتي عندها تكون فترة التمرير (التوصيل) لكل ثايرتور من الثايرتورات (VS1 – VS6) مساوية إلى نصف دور توتر الخرج. لنعتبر أن الأطوار محملة بحمولة متوازنة وموصولة على شكل نجمي.

إن الديودات والثايرتورات الموصولة إلى الطرف الموجب لمنبع التغذية (U_d)، يعني الديودات والثايرتورات ذات الدليل 1، 3، 5 تنتسب إلى المجموعة الموجبة (المصعدية)، والثايرتورات والديودات ذات الدليل 2، 4، 6 موصولة إلى الطرف السالب لمنبع التغذية، يعني تنتسب إلى المجموعة السالبة (المهبطية).

حتى يتشكل على خرج المبدلة القالبية المستقلة للتوتر نظام متوازن ثلاثي الطور للتوتر يجب أن تكون مجالات توصيل الثايرتورات التابعة لنفس المجموعة مزاحة بالنسبة لبعضها البعض بزاوية 120 و 240 درجة، وأن تكون مجالات توصيل ثايرتورات الأطوار المتعكسة والتابعة لنفس الطور (يعني VS1 و VS2 و VS3 و VS4 و VS5 و VS6) مزاحة بالنسبة لبعضها البعض بزاوية 180 درجة (شكل 1,b).

نعتبر الإجهاد الكهربائي الصفري هو إجهاد النقطة الوسطى لمنبع التغذية (U_d). في هذه الحالة تأخذ إجهادات الأطوار على خرج القالبية ($\varphi_A, \varphi_B, \varphi_C$) القيمة ($+U_d/2$) عند حالة التوصيل لديودات و ثايرتورات المجموعة المصعدية، أو تأخذ القيمة ($-U_d/2$) عند حالة التوصيل لديودات و ثايرتورات المجموعة المهبطية (شكل 1,C).

تكون الجهود الخطية $u_{CA} = \varphi_C - \varphi_A$; $u_{BC} = \varphi_B - \varphi_C$; $u_{AB} = \varphi_A - \varphi_B$. تأخذ هذه الجهود شكل نبضات مستطيلة ثنائية القطبية مع زمن (استمرارية) مقداره (120°) ومطال مقداره (U_d).

إن توترات الأطوار بالنسبة للنقطة الوسطية للحمولة (o) تحقق المساواة التالية: $u_A + u_B + u_C = 0$. يتحدد إجهاد النقطة (o) بالمعادلة التالية: $\varphi_0 = (\varphi_A + \varphi_B + \varphi_C) / 3$ وبأخذ شكل نبضات مستطيلة ثنائية القطبية ومطال مقداره ($U_d / 6$) واستمرارية مقدارها (60°) وبالتالي مع تردد ($3f_1$)، حيث تردد العمل للقالبية. تكون التوترات على أطوار الحمولة $u_C = \varphi_C - \varphi_0$; $u_B = \varphi_B - \varphi_0$; $u_A = \varphi_A - \varphi_0$ وتأخذ هذه التوترات شكل منحني ثنائي التدرج. عند ذلك تكون التدرج الصغرى تساوي ($U_d / 3$) والتدرج الكبرى تساوي ($-2U_d / 3$) (أنظر الشكل 1,C).

لندرس الفاصلة الزمنية وبالتتابع خلال زمن (180°). فإذا كانت الحمولة أومية صرفية، مباشرة وبعد فصل (قطع) الثايرتور (VS1) ووصل الثايرتور (VS2) يحصل تغير في قطبية التوتر وفي اتجاه تيار الطور (A). بما أن تيار ثابت الآلة التحريضية يضم مركبة تحريضية (ردية)، بعد فصل الثايرتور (VS1) يبقى تيار الطور (A) وخلال الفاصلة الزمنية من (180°) وحتى ($180 + \varphi_0$) محافظاً على اتجاهه السابق. مع أن إشارة التحكم لأجل وصل الثايرتور (VS2) خلال هذه الفاصلة الزمنية قد أعطيت وطبقت عليه، فإن هذا الثايرتور (VS2) لا

يستطيع أن يحول تيار الطور (A) لنفس الاتجاه. بعد فصل الثايرتور (VS1) يدخل إلى العمل الديود (VD2) والذي يمرر تيار الطور (A) خلال الفترة (الفاصلة) من (180°) وحتى $(180^\circ + \varphi_1)$. يطبق على الثايرتور (VS2) في فترة التمرير هذه توتر عكسي صغير مساوياً إلى هبوط التوتر على الديود (VD2).

عند ذلك يكون التوتر على الطور (A) مساوياً إلى $(-U_d/3)$ ، هذا يعني نفس القيمة عند الحمولة الأومية الصرفة. يلاحظ مما سبق أن المبدلة القالبية المستقلة للتوتر تحقق خواص هامة جداً في نظام الخوارزمية 180 للتحكم الزاوي، هذا يعني أن توتر خرج القالبية (كقيمة وكشكل) لا يتعلق بمعامل الاستطاعة للحمولة. بالتالي عند استخدام هذا النوع من القالبات في قيادة الجر الكهربائي فإنها وكقاعدة عامة تعمل في هذا النظام. لكن في المرحلة البدائية لإقلاع محرك الجر التحريضي يفضل استخدام الخوارزمية 150 للتحكم بالدرجات (للتحكم الزاوي). عند ذلك يتحقق وصل الثايرتورات مع تأخير زمني مقداره (30°) بعد فصل الثايرتور الموافق للطور المعطى. عند نشر منحنى توتر الطور والمبين على الشكل (1,C) وفق سلسلة فورييه نحصل على المعادلة:

$$u_\phi(\omega t) = \frac{2}{\pi} \cdot U_d \cdot \sin(\omega t) + \frac{2}{\pi \cdot \nu} U_d \cdot \sum_{\nu=5}^{\infty} \sin(\nu \omega t) \quad (1)$$

حيث أن: $\nu = 5, 7, 11, 13, \dots$ ، يعني أنه في التوتر الطوري يدخل فقط التوافقيات العليا الفردية باستثناء التوافقية الفردية 3 ومضاعفاتها.

إن الحد الأول من الطرف الأيمن للمعادلة (1) يوافق التوافقية الأولى (الأساسية). إن العلاقات بين التوتر الثابت (U_d) على دخل القالبية وقيمة المطال (U_{1a}) والقيمة الفعلية (U_1) للتوافقية الأولى لتوتر خرج المبدلة القالبية المستقلة للتوتر تملك الشكل:

$$U_{1a} = \frac{2}{\pi} U_d = 0.636 U_d ; U_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} U_d = 0.45 U_d \quad (2)$$

إن معامل تشوه شكل منحنى التوتر يساوي إلى نسبة القيمة الفعالة للتوافقية الأساسية إلى القيمة الفعالة لكافة المركبات التوافقية العليا $K_u = 3/\pi = 0.955$.

يمكن كتابة الطرف الأيمن من المعادلة (1) على شكل مجموع $u_1(\omega t) + u_B(\omega t)$ ، يعني منحنى التوتر الطوري عبارة عن مركبتين: مركبة التوافقية الأولى $u_1(\omega t)$ والمركبات المتعلقة بمجموع كافة التوافقيات العليا ابتداءً من التوافقية الخامسة. يمكن أن تكتب المركبة الثانية (شكل 2) بالشكل:

في المجالات أو الفواصل $0-60^\circ$ و $120-180^\circ$

$$u_B(\omega t) = \frac{U_d}{3} - u_1(\omega t) = U_d \left(\frac{1}{3} - \frac{2}{\pi} \sin \omega t \right) \quad (3)$$

في المجال أو الفاصلة $60-120^\circ$

$$u_B(\omega t) = U_d \left(\frac{2}{3} - \frac{2}{\pi} \sin \omega t \right) \quad (4)$$

على اعتبار أن الآلة التحريضية في التقريب الأول هي دائرة خطية، وتيار الطور (i_ϕ) يمكن اعتباره أيضاً مكون من مركبتين: التوافقية الأولى $i_1(\omega t)$ ومجموع كافة التوافقيات العليا $i_B(\omega t)$:

$$i_\phi(\omega t) = i_1(\omega t) + i_B(\omega t) = \sqrt{2} I_1 \cdot \sin(\omega t - \varphi_1) + i_B(\omega t) \quad (5)$$

نحدد تيار التوافقية الأولى (I_1) لملف ثابت المحرك التحريضي والزاوية (φ_1) بالعلاقات التالية: [9,8]

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1x}^2} \quad ; \quad \cos\varphi_1 = I_{1a} / I_1 \quad (6)$$

حيث أن:

$$I_{1a} = P_{Fe} / (3U_1) + I_2' \cdot \cos\psi_2$$

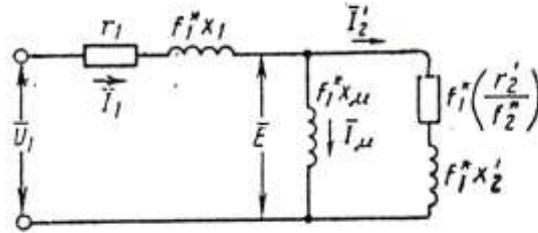
$$I_{1x} = I_\mu + I_2' \cdot \sin\psi_2$$

$$I_2' = \sqrt{2} \cdot M_{em} / (P \cdot m_1 \cdot W_1 \cdot K_{w1} \cdot \phi \cdot \cos\psi_2)$$

$$P_{Fe} - \text{الضياع الحديدي في الثابت} \quad ; \quad M_{em} - \text{العزم الكهرومغناطيسي.}$$

من أجل كافة التوافقيات العليا يمكن اعتبار الآلة التحريضية أنها تعمل في نظام الدارة القصيرة. بالتالي تتحدد مجموع مركبات تيار الطور $i_B(\omega t)$ اعتماداً على بارامترات الآلة (r_K, L_K) في نظام الدارة القصيرة، عند ذلك ومن مخطط الدارة المكافئة (شكل 2) للمحرك التحريضي مع قبول $f_2^* = 1$ واعتبار أن $X_\mu \gg X_1 + X_2'$ نحصل:

$$r_K = r_1 + r_2' \quad ; \quad L_K = (X_1 + X_2') / (2\pi \cdot f_{1n}) \quad ; \quad \varphi_{1K} = \arctg(2\pi \cdot f_{1n} \cdot L_K / r_K)$$



الشكل (2) - الدارة المكافئة لمحرك جر تحريضي

يعبر عن المركبة $i_B(\omega t)$ بالشكل التالي:

في المجال $0-60^\circ$ -

$$i_B(\omega t) = I_{1K} \left[\frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos\varphi_{1K}} (1 - B_1 \cdot e^{-\frac{\omega t}{\text{tg}\varphi_{1K}}} - \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi_{1K})) \right] \quad (7)$$

في المجال $60-120^\circ$ -

$$i_B(\omega t) = I_{1K} \left[\frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos\varphi_{1K}} (2 - B_2 \cdot e^{-\frac{\omega t - \pi/3}{\text{tg}\varphi_{1K}}} - \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi_{1K})) \right] \quad (8)$$

في المجال $120-180^\circ$ -

$$i_B(\omega t) = I_{1K} \left[\frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{2} \cdot \cos\varphi_{1K}} (2 - B_3 \cdot e^{-\frac{\omega t - 2\pi/3}{\text{tg}\varphi_{1K}}} - \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi_{1K})) \right] \quad (9)$$

حيث أن:

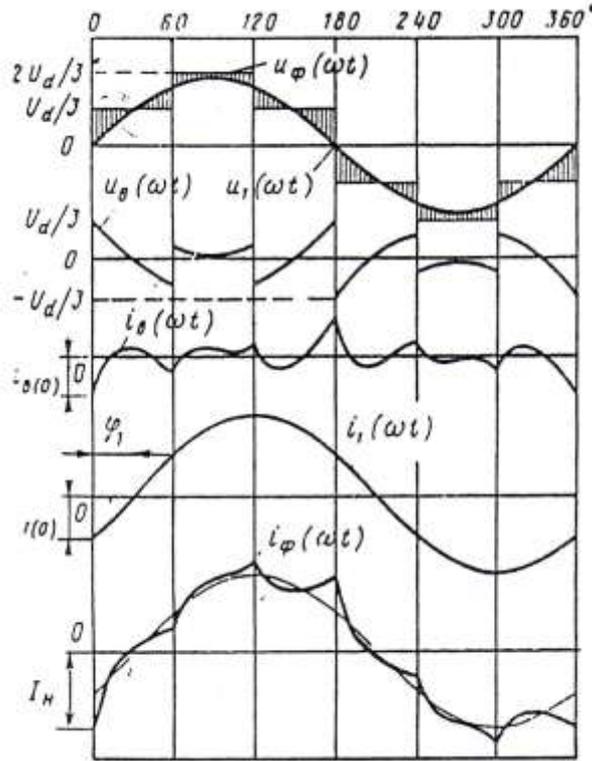
$$I_{1K} = \sqrt{2} \cdot U_d \cdot \cos\varphi_{1K} / (\pi \cdot r_K)$$

$$B_1 = (2 + e^{-\frac{\pi}{3 \cdot \text{tg}\varphi_{1K}}} - e^{-\frac{2\pi}{3 \cdot \text{tg}\varphi_{1K}}}) / (1 + e^{-\frac{\pi}{\text{tg}\varphi_{1K}}}) ;$$

$$B_2 = (1 + e^{-\frac{\pi}{3tg\phi_{1K}}})^2 / (1 + e^{-\frac{\pi}{tg\phi_{1K}}}) ;$$

$$B_3 = B_1 - B_2 .$$

نوجد القيم اللحظية لتيار الطور للألة التحريضية على شكل مجموع $\sqrt{2}I_1 \sin(\omega t - \phi_1) + i_B(\omega t)$ لأجل كل قالبة من قالبات التوتر الطوري. إن المميزات البيانية للتيارات اللحظية $i_B(\omega t)$ و $i_\phi(\omega t)$ مبينة على الشكل (3).



الشكل (3) - مخططات التوترات والتيارات على خرج القالبة

تعتبر قيمة التيار (i_ϕ) في اللحظة الزمنية الموافقة للصفر (0^0) لها أهمية علمية (تطبيقية)، لأن هذا التيار يعتبر أولي من أجل حساب أنظمة التبديل القسرية لتأثيرات التوترات القالبة. نعين القيمة المشار إليها للتيار الطوري (I_H) ونعوض في المعادلات السابقة $\omega t = 0$ فنحصل على:

$$I_H = i_1(0) + i_B(0) = -\sqrt{2}I_1 \sin \phi_1 + I_{1K} \left[\frac{\pi}{3\sqrt{2} \cos \phi_{1K}} (1 - B_1) - \sqrt{2} \sin(-\psi_K) \right] \quad (10)$$

إن قيمة التيار $i_1(0)$ المتعلقة بالتوافقية الأساسية لتيار الطور، وعند توترات معطاة وتردد الثابت، تكون متعلقة بشكل فعال وجوهري مع الانزلاق المطلق (f_2)، وإن قيمة $i_B(0)$ متعلقة بكافة التوافقيات العليا لتيار الطور، وغير متعلقة عملياً مع القيمة المطلقة للانزلاق (f_2)، وعند توترات معطاة وتردد تيار الثابت تكون هذه القيمة عبارة عن القسم غير المتغير للتيار (I_H) في لحظة التبديل للقالبة.

إن إجراء الحسابات بوساطة المعادلات المشار إليها سابقاً صعب نسبياً. فعند إجراء الحسابات التقريبية الأولية مع الأخذ بالحسبان الصيغة الحقيقية لتيار الطور (i_ϕ) عند تغذية الألة التحريضية عن طريق مبدلة قالبة

مستقلة للتوتر (أنظر الشكل 3)، في التقريب الأول مسموح قبول التيار في لحظة التبديل (I_H) مساوٍ إلى مطال التوافقية الأولى، يعني $I_H \approx \sqrt{2} \cdot I_1$.

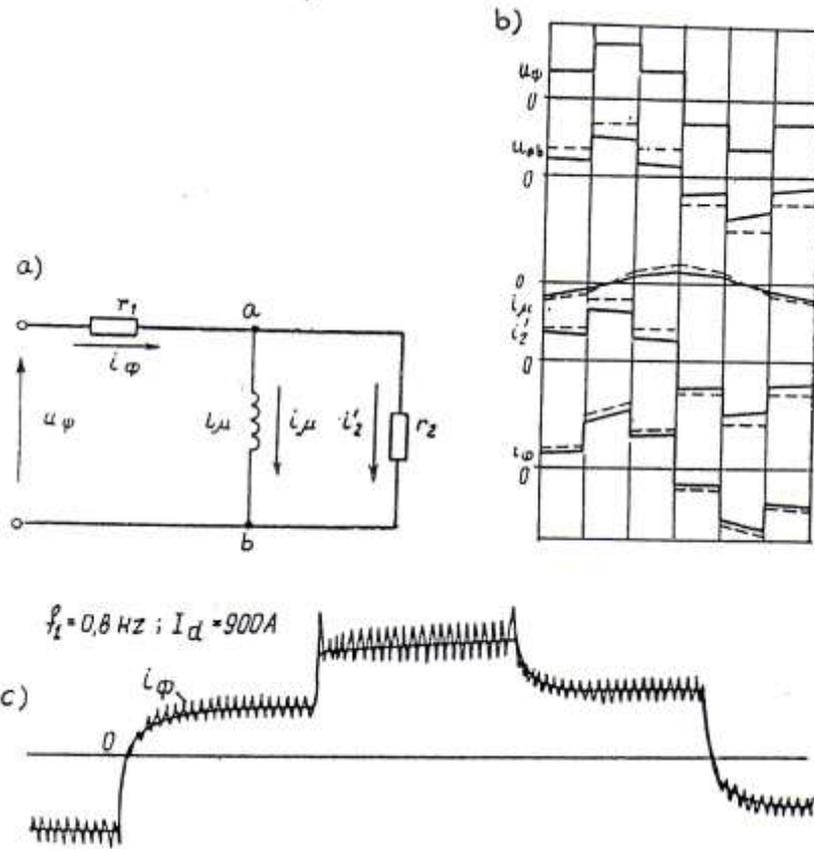
كذلك يجب الملاحظة بأن منحنى تيار الطور للآلة التحريضية والمبين على الشكل (3) عند تغذية الآلة عن طريق مبدلة قالبية مستقلة للتوتر يملك مستويًا عاليًا بما فيه الكفاية لمحتوى التوافقية الأولى. إن معامل تشوه شكل التيار يساوي إلى النسبة بين القيمة الفعلية للتوافقية الأولى والقيم الفعلية لكافة التوافقيات العليا، ويساوي إلى $K_i = 0.98 \div 0.985$.

إن الأهمية العلمية (التطبيقية) التي لا غنى عنها تتلخص في تحديد منحنى تيار الطور لمحرك جر تحريضي في المرحلة الأولى للإقلاع. عند بداية الإقلاع، وحيث الدائر لا يزال واقفًا (لم يتحرك الدائر بعد) يكون تردد تيار الدائر يساوي تردد تيار الثابت $f_1 = f_2$. بالتالي على الدارة المكافئة ولأجل الجزء الخاص بالدائر تكون قيمة $f_1^* \cdot r_2' / f_2^*$ تساوي إلى r_2' . يجب أن يؤخذ بالحسبان بأن الثابت الزمني لملف الدائر ($T_2 = L_2' / r_2'$) ولف الثابت ($T_1 = L_1 / r_1$) يكونان وبشكل واضح أقل من (1/6) الدور. بالتالي يمكن إهمال تأثير التحريضية L_1 و L_2' على شكل منحنى تيار الدائر (i_2') وعلى شكل منحنى تيار الثابت (i_ϕ). بالتالي عند الدراسة والحساب يمكن اعتبار المخطط (شكل 4,a)، حيث (L_μ) تمثل تحريضية دارة الفيض المغناطيسي الأساس.

بما أن $di_\mu / dt = u_{ab} / L_\mu$ فإن معرفة التوتر بين النقطتين a ، b يساعدنا في إيجاد قيمة تيار التمغنط (i_μ). إذا اعتبرنا أن ($r_1 = 0$)، فإن ($u_{ab} = u_\phi$) وتيار الدائر (i_2') يأخذ بالشكل تماماً شكل المنحنى التدرجي لتوتر الطور (u_ϕ). حسب الافتراض ($r_1 = 0$) فإن المنحنيات (i_2') و (i_μ) و ($i_\phi = i_2' + i_\mu$) تكون موضحة على الشكل (4,b) وهي الخطوط المنقطعة. يمكن اعتبار أنه من أجل القيم الاسمية للعزم والفيض يكون التيار (i_μ) عادة يشكل حوالي نسبة (30%) من تيار الدائر (i_2') (لأجل التوافقية الأساسية).

لكن فعلياً، وطالما أنه بالعادة تكون ($r_1 \approx r_2'$) فإن التوتر (u_{ab}) يختلف عن التوتر (u_ϕ) بالمقدار $i_\phi \cdot r_1 -$ إن منحنيات التيار (i_μ) و (i_2') و (i_ϕ) لما ($r_1 \approx r_2'$) موضحة على الشكل (4,b) وهي الخطوط المستمرة (غير المنقطعة).

بهذه الصورة، في المرحلة الابتدائية للإقلاع يكون تيار الثابت للمحرك التحريضي (i_ϕ) قريب بالشكل من المنحنى المتدرج لتوتر الطور (u_ϕ)، لكن قيم التيار (i_ϕ) خلال الفاصلة ($0-60^\circ$) أقل منها خلال الفاصلة ($120-180^\circ$). إن هذا الكلام يترجم عملياً ويوضح من خلال المخطط التذبذي لتيار الطور لمحرك جر تحريضي نوع (NB-602) عند دائر مكبوح (غير متحرك) في نظام ($f_1 = f_2 = 0.8Hz$) و ($I_d = 900 A$)، عند ذلك المركبات النبضية ذات التردد ($100Hz$) متعلقة بتغذية المبدلة القالبية المستقلة من مقوم أحادي الطور (أنظر الشكل 4,C).



الشكل (4) - المخطط الحسابي (a) والمخطط البياني للتيارات والجهود (b) والمخطط التذبذبي للتيار (c) لأجل المرحلة الابتدائية لإقلاع محرك جر تحريضي

حساب عناصر المبدلة القابلة المستقلة للتوتر والمرشح:

إن العلاقات الحاصلة في الفقرة السابقة والتي تحدد تيارات الأطوار للآلة التحريضية وأيضاً العلاقات بين التوتر المطبق على المحرك (U_1) وتوتر منبع التغذية (U_d) تساعد في تقدير حمولة ديودات وثايرتورات المبدلة القابلة المستقلة للتوتر بوساطة التوترات والتيارات.

ينبغي أن نختار الثايرتورات (VS1 - VS6) (أنظر الشكل 1,a) من الشروط، بحيث يكون الجهد المباشر المؤثر على هذه الثايرتورات مساوياً إلى (U_d). عند ذلك من الضروري أن يؤخذ بالحسبان خلال الاستثمار إمكانية رفع التوتر في أسلاك تغذية القاطرة الكهربائية، وأيضاً نبضان التوتر على مكثف الترشيح، الوصول على دخل المبدلة القابلة المستقلة للجهد.

إن الجهد العكسي المؤثر على الديودات (VD1 - VD6) يساوي أيضاً (U_d).

عند اختيار الديودات والثايرتورات يجب أن تكون قادرة على تحمل الاحتياط (الزيادة) المحدد بالتوتر، وذلك لكي لا يتجاوز التوتر الأعظمي المؤثر على الأجهزة % (75 ÷ 85) من الجهد النبضي المسموح المتكرر.

نوجد القيمة الوسطية لتيار الثايرتور (I_T) انطلاقاً من القيمة الفعالة للتوافقية الأولى لتيار الطور للمحرك (I_1). بما أن الثايرتور يمرر التيار خلال الفاصل من (ϕ_1) إلى (180°) تكون القيمة الوسطية لتيار الثايرتور:

$$I_T = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \int_{\phi_1}^{\pi} I_1 \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{I_1}{\sqrt{2} \cdot \pi} (1 + \cos \phi_1) \quad (11)$$

القيمة الوسطية لتيار الديود:

$$I_D = \frac{\sqrt{2}}{2\pi} \int_0^{\phi_1} I_1 \cdot \sin(\omega t) \cdot d\omega t = \frac{I_1}{\sqrt{2} \cdot \pi} (1 - \cos \phi_1) \quad (12)$$

إن العلاقة (12) لا تأخذ بعين الاعتبار حمولة الديودات، الناتجة عن مرور تيار المكثف التبدلي عند قطع ثايرتورات القالبية. يلاحظ من المعادلات (11) و (12) وعند القيمة العادية أو المألوفة $\cos \phi_1 \approx 0.85$ لمحرك الجر التحريضي بأنه عند عمل الآلة في نظام التحريك يكون $I_T \approx 0.42I_1$ و $I_D \approx 0.035I_1$. هذا يعني أن التيار الوسطي لديودات القالبية المستقلة للتوتر في نظام الجر يشكل أقل من 10% من التيار الوسطي للثايرتورات. تحتاج عند اختيار ديودات وثايرتورات المبدلة القالبية المستقلة للتوتر إلى الأخذ بالاعتبار أن تيار المحرك يتضاعف عند الإقلاع ويقاوم الاحتياط المحدد بالتيار، بحيث التيار الوسطي الأعظمي لا يشكل أكثر من (85%) من القيمة المسموحة للتيار الوسطي الحدي (النهائي) لأجل النوع المقترح (المعين) للجهاز مع وحدة تبريد نموذجية عند شروط تبريد محددة [7].

سندرس لاحقاً المرشح الموصول على دخل المبدلة القالبية المستقلة للتوتر. لذا قبل كل شيء من الضروري الأخذ بالحسبان القيمة اللحظية لتيار الدخل للقالبية (i_{ii}) وبنفس الوقت يتحدد منحني التيار الطوري للآلة التحريضية في الفاصلة الزمنية الثانية لتوتر الطور ($60-120^\circ$). إن هذا موضح على المخطط البياني المبين على الشكل (5). يمكن أن تكون قيمة تيار الطور في الفاصلة 60° ($i_{\phi 60}$) والفاصلة 120° ($i_{\phi 120}$) محسوبة بوساطة المعادلات الموضحة في الفقرة (3) من هذا المقال. يؤخذ بعين الاعتبار الشكل الحقيقي لمنحني تيار الطور للآلة التحريضية عند تغذيتها من قالبية مستقلة للتوتر، ومسموح بالتقريب الأول اعتبار أن التيار بين القيمتين ($i_{\phi 60}$) و ($i_{\phi 120}$) يتغير بين فواصل التبدل (بين فترات الوصل والقطع) وفقاً لقانون خطي، وعند التبدل للقالبية يتغير الفاصل الزمني بشكل قفزي إلى قيمة $\Delta I = i_{\phi 60} - i_{\phi 120}$.

على هذا النحو فإن تيار الدخل للقالبية المستقلة للتوتر يعتبر تياراً نبضياً وقريباً من شكل سن المنشار. إن شكل التيار المشار إليه لا يسبب زيادة توتر ملحوظة على دخل القالبية. فقط في هذه الحالة يعتبر فيها منبع التغذية لا حثي (لا تحريضي) ويملك مقاومة داخلية صغيرة (كمثال إذا استخدمت مدخرة).

تعتبر شبكة التغذية الكهربائية لحافلات النقل الكهربائية منبع تغذية ذا تحريضية داخلية محددة، لذا من أجل الحد من التوتر الزائد (تجاوز التوتر) على دخل القالبية المستقلة للجهد يجب تركيب مكثف ترشيح. لكي لا يسبب التيار النبضي (i_{ii}) تأثير معيق (تداخل وتشويش) على خطوط الاتصالات والإشارات ولا يتسرب في شبكة التغذية الكهربائية يوصل أمام القالبية مفاعل تنعيم [10,7].

نتلخص الغاية الأساسية من استخدام مكثف ترشيح من أجل إنقاص تناقض التوتر على دخل القالبية حتى مستوى معطى (معين)، والمشروط بالتيار النبضي (i_{ii}). نعتبر بأن المركبة المتغيرة للتيار (i_{ii}) تتغلق بشكل حلقة

خلال المكثف الترشيجي. يملك تيار المكثف (i_c) عند الافتراضات المشار إليها أعلاه سعة أو مطال $I_C = 0.5\Delta I = 0.5(i_{\phi 60} - i_{\phi 120})$ ويتغير مع الزمن بشكل خطي، عند ذلك يكون دور التيار $T_K = 1/f_K$ (حيث هنا f_K تردد التبديل للقالبية) [7,2].

إن القيمة اللحظية لتيار المكثف $i_c = I_C(1 - 2/T_K \cdot t)$. نعين من خلال (U'_C) القيمة الأصغرية للجهد اللحظي على المكثف. إن الجهد على المكثف يساوي:

$$u_C = U'_C + \frac{I_C}{C} \int_0^t (1 - \frac{2}{T_K} \cdot t) dt = U'_C + \frac{I_C}{C} (t - \frac{1}{T_K} \cdot t^2) \quad (13)$$

من شرط تساوي المساحات S_1 و S_2 (لاحظ الشكل 5) يمكن أن نعتبر $\int_0^{T_K/2} u_C \cdot dt = 0$ فتأخذ المعادلة

(13) وبعد إجراء التحويل المذكور الشكل:

$$U'_C = -\frac{I_C \cdot T_K}{6 \cdot C} = -\frac{\Delta I}{12 \cdot C \cdot f_K} \quad (14)$$

$$U_C = \frac{I_C \cdot T_K}{12 \cdot C} = \frac{\Delta I}{24 \cdot C \cdot f_K}$$

من الضروري عند حساب توتر العمل لديودات و ثايرتورات المبدلة القالبية المستقلة للتوتر أن يؤخذ بعين الاعتبار القيمة (U_C)، والتي تظهر المقدار الذي يزيد التوتر اللحظي على دخل القالبية عن التوتر الوسطي (U_d) لمنبع التغذية.

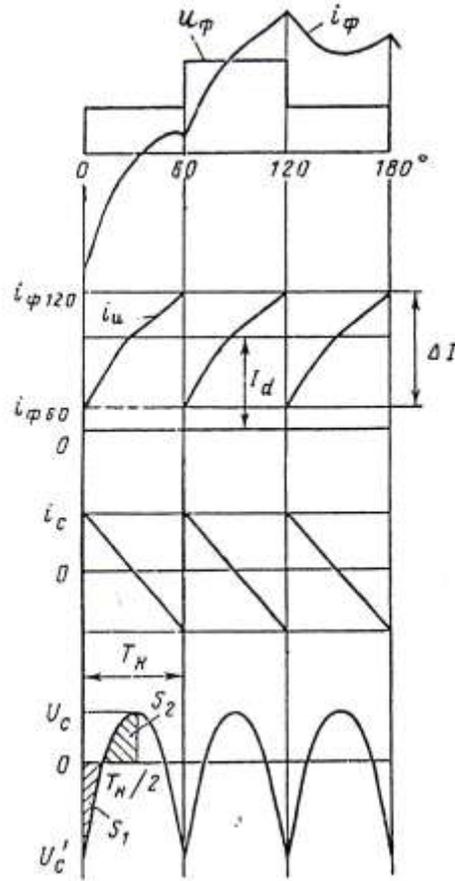
بإعطاء القيمة المسموحة U_C (عادة تؤخذ 5% من القيمة الاسمية U_d)، ومن المعادلة (14) نحصل على المعادلة التي نحدد لنا السعة المطلوبة لمكثف الترشيج:

$$C = \Delta I / (24 \cdot f_K \cdot U_C) \quad (15)$$

من أجل الحسابات التقريبية الأولية يمكن أن نقبل التيار (ΔI) في المعادلة (15) مساوياً في التقريب الأول

$$\Delta I \approx \sqrt{2} \cdot I_1$$

يلاحظ إمكانية التقليل الواضح لسعة مكثف الترشيج عند عمل عدة قالبات بتعدد خرج مماثل (واحد). عند عدد قالبات مقداره (N)، وفي الحالة التي فيها كل قالبية من هذه القالبات تملك مكثف ترشيج فردي (خاص بها)، وسعة هذه المكثفات تحسب اعتماداً على العلاقة (15)، ستكون السعة الكلية مساوية إلى $C \cdot N$.



الشكل (5) - المخططات البيانية للتوترات والتيارات من أجل حساب بارامترات مكثف الترشيح

يمكن الحصول على التخفيض الملحوظ للسعة إذا جمعت القابلات على الدخل وتحقق تبديل لهذه القابلات على التوالي (بالتناوب) مع انزياح بالزمن مقداره (T_K / N) . إن التيار (ΔI) يصبح متقدماً وتردد عملية التبديل يكبر بمقدار (N) مرة. إن سعة مكثف الترشيح (عند توتر معطى U_C) وبما يتناسب مع العلاقة (15) يقل بمقدار (N) مرة. بالمقارنة مع الحالة الأولى (حالة الترشيح الفردي) لأجل كل قابلة ترشيح (مع سعة كلية $C \cdot N$) عند استخدام التبديل المتتالي والمرشح العام (المشترك) تقل سعة مكثف الترشيح بمقدار (N^2) مرة. لكن يجب أن يؤخذ بالاعتبار أنه مع تزايد تردد التناوب تنقص القيمة المسموحة للتوتر (U_C) لأجل المكثفات بمقدار محدد.

إن تحقيق نظام التبديل المتتالي لبعض القابلات، والتي تملك مرشحاً مشتركاً هو حل فعال وناجع. على سبيل المثال، في بعض القاطرات الروسية كل زوج من القابلات (كل قابلتين) تغذي لمحركين على عربة واحدة، وتغذي المرشح المشترك أو العام، وتتبدل هاتان القابلتان بالتناوب خلال (90°) . يساعد هذا الحل المشار إليه في تخفيض سعة مكثف الترشيح بمقدار أربع مرات [7].

لندرس حساب الملف الخائق الذي يعمل كمرشح على دخل المبدلة القابلة المستقلة للتوتر عند تغذية القابلة من شبكة أسلاك التلامس (أسلاك تغذية القاطرة الكهربائية) ذات التيار المستمر. إن مجموع التوترين (U_C) و (U'_C) والمحسوبين بالعلاقة (14) يحدد السعة (المدى) الكلي لنبضان التوتر على دخل القابلة. إن المغزى أو المدلول الأساس للملف الخائق المستخدم كمرشح يتلخص في إخماد نبضات التوتر الشبكي، والمتعلقة بالتأثيرات العكسية للقابلة المستقلة للتوتر على شبكة التغذية.

من أجل الحسابات التقريبية مع خطأ من جهة (جانبا) زيادة المفاعلة التحريضية يقبل اعتبار أن مجموع $(U_C + U'_C)$ يساوي إلى مطال التوافقية الأساسية لنبضان التوتر بتردد تبديلي مقداره (f_K) . لنعطي سعة مسموحة للتيار الشبكي (I_{PI}) ، والذي يملك التردد (f_K) ، ولنوجد تحريضية مفاعل الترشيح:

$$L_d = (U_C + U'_C) / (2 \cdot \pi \cdot f_K \cdot I_{PI}) \quad (16)$$

بما أن التحريضية تتناقص عند تزايد تردد التبديل (f_K) ، بالتالي استخدام التبديل المتتالي لـ N قابلة والتي تملك مرشح مشترك، يساعد على تقليل تحريضية المفاعل بمقدار N مرة.

نتخلص الأهمية الأساسية لمفاعل التنعيم عند تغذية القابلة المستقلة للتوتر من شبكة أحادية الطور من خلال مقوم في تخفيض نبضان التيار المقوم (I_d) حتى مستوى محدد، وهذا مرتبط بالمقوم أحادي الطور. إن تحريضية مفاعل التنعيم عند قيمة معطاة للتوتر المقوم (U_d) تساوي:

$$L_d = (U_d \cdot K_{PI}) / (2 \cdot \pi \cdot 2f_C \cdot K_T \cdot I_d) \quad (17)$$

حيث أن:

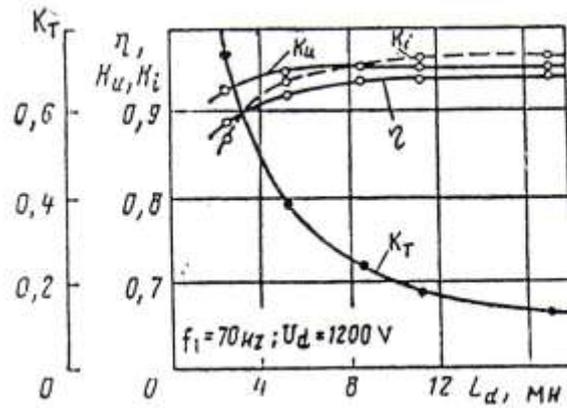
K_{PI} - معامل نبض الجهد المقوم، والمتعلق بنظام التحكم للمقوم وبزاوية التبديل، (لأجل المقومات التحكمية $K_{PI} = 0.66$ عند التبديل اللحظي و $K_{PI} = 0.78 \div 0.83$ عند التبديل الزاوي العادي في الاستثمار $30 \div 35^0$)؛ $f_C = 50 \text{ Hz}$ - تردد شبكة التغذية؛ K_T - معامل نبض التيار المقوم.

حسب مطال المركبات النابضة للتيار المقوم:

$$I_{PI} = K_T \cdot I_d = K_{PI} \cdot U_d / (2 \cdot \pi \cdot 2f_C \cdot L_d) \quad (18)$$

لقد أظهرت الأبحاث التجريبية التي أجريت حول تأثير المعامل (K_T) على مؤشرات محرك الجر التحريضي (NB-602) لإحدى القاطرات الكهربائية الروسية، أنه من المناسب اختيار تحريضية مفاعل التنعيم (L_d) من الشروط التي تحقق $K_T = 0.2 \div 0.25$ (شكل 6). إن زيادة (K_T) إلى قيمة تفوق هذه القيمة المذكورة يستدعي لأجل محرك الجر للقاطرة تخفيض مردوده وتخفيض معاملات تشويه توتر الطور والتيار K_u و K_i . إن زيادة التحريضية (L_d) أيضاً بهدف تقليل القيمة (K_T) إلى قيمة أقل من 0.2 لا يؤدي إلى الشعور الملموس بزيادة المردود ومعاملات التشويه، عند ذلك، وفي حالة $K_T = 0.2$ لأجل محرك الجر التحريضي (NB-602) عند تردد $f = 70 \text{ Hz}$ واستطاعة على المحور 850 Kw يكون المردود بحدود (0.93) ومعاملات تشويه توتر الطور والتيار مساوية $(K_u = 0.95)$ و $(K_i = 0.96)$.

إن نبضان التوتر والتيار المقومين عند التغذية من شبكة متناوبة أحادية الطور ترددها $(f_1 = 50 \text{ Hz})$ له ترددات زوجية مضاعفة والتردد الأساسي للنبضان يساوي (100 Hz) .

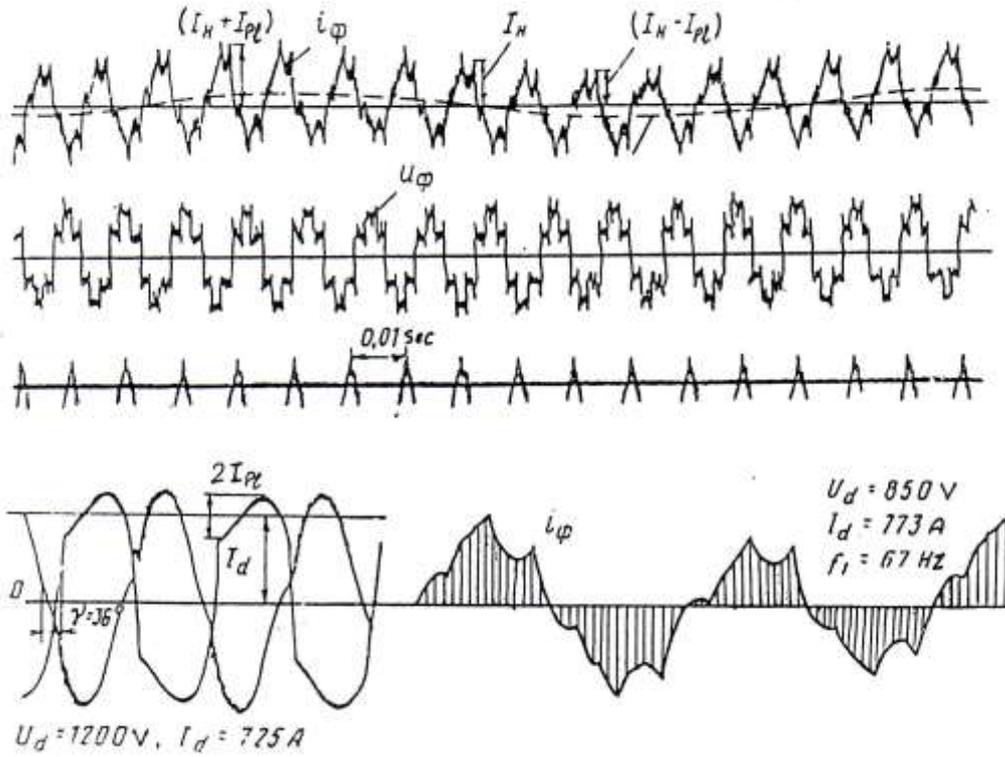


الشكل (6) - يبين العلاقة بين مؤشرات محرك جر تحريضي وتحريضية مفاعل التنعيم

إن المركبة النبضية الأساسية ذات التردد (100 Hz) تؤدي إلى نشوء في التوترات والتيارات الطورية مركبات ذات ترددات موحدة (جانبية)، عند ذلك يمكن أن تظهر في التيار الطوري مركبات ذات انخفاضات (هبوطات) جانبية للتردد ($100 - f_1$) هرتز ومركبات ذات زيادات (ارتفاعات) جانبية للتردد ($100 + f_1$) هرتز. يوضح على الشكل (7,a) المخطط التذبذبي للتوتر الطوري لمحرك جر تحريضي مستخدم في جر إحدى أنواع القاطرات الكهربائية الروسية عند تردد (92 Hz) وتوتر $U_d = 1200\text{ V}$ و تيار $I_d = 725\text{ A}$. تظهر بوضوح في منحنى التيار الطوري المركبة ذات التردد $100 - 92 = 8\text{ Hz}$. بنتيجة تحليل المخطط التذبذبي المعطى نجد أن محتوى التوافقية الأساسية للتيار الطوري يساوي (93%) ومحتوى المركبات ذات الترددات ($100 - f_1$) Hz و ($100 + f_1$) Hz بالترتيب يساوي 27% و 8% .

إن منحنى التيار الطوري لمحرك الجر التحريضي غير مستقر ويتغير من إحدى أنصاف الدور إلى النصف الأخر، بسبب وجود مركبات ذات ترددات موحدة. وبالنتيجة يحصل تغير دوري للتيار في لحظة تبديل القالبية بالنسبة للقيمة (I_H)، المحددة بالعلاقة (10) لأجل شرط التنعيم المثالي للتوتر (U_d). يعتبر سبب ظهور المركبات ذات الترددات الموحدة، والتي تؤدي إلى حدوث اللااستقرار لمنحنى تيار الطور لمحرك الجر التحريضي عند نصف الدور وجود المركبات النبضية للتيار المقوم ذي المطال (I_{pl} السعة). بالتالي من الطبيعي أن نتوقع أن التيار في لحظة التبديل للقالبية يتغير من ($I_H - I_{pl}$) حتى ($I_H + I_{pl}$).

إن المخطط التذبذبي للتوتر (u_{TP}) وللتيار (i_{TP}) للملف الأولي لمحول قاطرة كهربائية والموافق لنظام عمل المحرك التحريضي (NB-602) مبين على الشكل (7,b). إن الحساب وفق العلاقة (18) لأجل الشروط، الموافقة للمخطط التذبذبي المعطى ($U_d = 1200\text{ V}$; $K_{pl} = 0.86$; $L_d = 9.5\text{ mH}$) تعطى القيمة ($I_{pl} = 170\text{ A}$)، هذا يعني ($K_T = 0.23$) عند ($I_d = 725\text{ A}$). من نتائج تحليل المخطط التذبذبي شكل (7,a) نجد أن التيار في لحظة تبديل القالبية يتغير من قيمته الوسطية ($I_H = 880\text{ A}$) في المجالات ($\pm 180\text{ A}$)، هذا يعني حدود التغير عملياً تتطابق مع القيمة الحسابية ($\pm I_{pl} = \pm 170\text{ A}$). بالتالي عند تحديد بارامترات النقطة (العقدة) لتبديل القالبية يجب أن نقرّب إلى قيمة التيار المساوية إلى مجموع ($I_H + I_{pl}$)، عند ذلك من الضروري أن تحسب قيمة التيار (I_H) بالعلاقة (10) وقيمة التيار (I_{pl}) بالعلاقة (18).



الشكل (7) - المخطط التذبذبي لتوتر وتيارات محرك تحريضي NB-602 وللملف الأولي لمحول قاطرة كهربائية

إن عدم استقرارية منحنى تيار الطور لمحرك الجر التحريضي في نصف الدور متعلق بالمركبات ذات الترددات الموحدة عند تغذيتها من مقوم وحيد الطور، ويظهر ضمن مجال واسع لتردد الثابت. من أجل الإيضاح بالرسوم على الشكل (7,C) موضح الشكل التذبذبي لتيار محرك جر تحريضي نوع (NB-602) عند تردد $f_1 = 67 \text{ Hz}$. بنتيجة تحليل هذا المخطط التذبذبي نجد أن محتوى التوافقية الأساسية يساوي (96%)، ومحتوى المركبات ذات التردد $(100 - f_1) = 33 \text{ Hz}$ و $(100 + f_1) = 167 \text{ Hz}$ يساوي وبالترتيب (17%) و (6%). بالتحليل يلاحظ بأن لا استقرارية منحنى تيار الطور لمحرك الجر التحريضي يحصل في نظام الكبح بالتوليد المعاكس للمحرك الكهربائي عند إعادة القدرة إلى الشبكة الأحادية الطور التابعة للمبدلة القالبة المستقلة.

النتائج:

يمكن تلخيص أهم النتائج الحاصلة في هذا البحث بالنقاط الآتية:

- 1- إمكانية استخدام المحركات التحريضية في جر وسائط النقل الكهربائية العاملة على شبكة التيار المستمر عند تغذيتها عن طريق مبدلة قالبة بدلاً من محركات التيار المستمر، وتحقيق نتائج فنية واقتصادية أفضل؛
- 2- تحديد نوع المبدلة القالبة المستقلة للتوتر المناسبة، التي تعطي أداءً جيداً وهذا ينعكس إيجابياً على الحموله الموصولة على خرجها (على محرك الجر التحريضي)؛

- 3- التوصل إلى نظام التحكم بالدرجات (نظام التحكم الزاوي) المناسب عند العمل الاسمي للجملة وعند الإقلاع أيضاً بحيث نحصل على أقل تشوه ممكن في منحني التوتر والتيار للمحرك التحريضي؛
- 4- إمكانية إهمال تأثير التحريضية الذاتية لملف الطور للثابت (L_1) وللدائر منسوبة للثابت (L_2) في مرحلة الإقلاع على شكل منحني تيار الدائر والتيار الثابت، بالتالي التوصل إلى نموذج جديد للدائرة المكافئة للمحرك التحريضي؛
- 5- تحديد أهم الشروط المناسبة عند اختيار ديودات واثايرتورات المبدلة القابلة المستقلة للتوتر مع الأخذ بالحسبان نظام الإقلاع للمحرك التحريضي؛
- 6- التوصل إلى تحديد السعة المناسبة لمكثف الترشيح وكيفية التقليل من سعة المكثف اللازم عند عمل عدة قالبات بتردد خرج مماثل (واحد)؛
- 7- اختيار تحريضية مفاعل التعميم (L_d) بحيث نحصل على القيمة المناسبة لمعامل نبض التيار المقوم؛
- 8- إن لا استقرارية منحني تيار الطور للمحرك التحريضي يحصل في نظام الكبح بالتوليد المعاكس للمحرك عند إعادة القدرة للشبكة أحادية الطور التابعة للمبدلة القابلة.

المراجع:

.....

- 1- د. الياس طوشان "القيادة الكهربائية" - الجزء الأول - منشورات جامعة حلب - 1982-1983 م
- 2- د. محمد سعيد عقيل "الإلكترونيات الصناعية" - الجزء لثاني - منشورات جامعة حلب 1996 م
- 3- В. А.Винокуров ; Д. А. Попов – Электрические Машины Железно- Дорожного Транспорт – Транспорт – Москва - 1986
- 4- В. Е. Розенфельд ; И. П. Сидоров – Теория Электрической Тяги –Москва – (Транспорт) - 1983
- 5- R. Leidens , J. C. Brage , J. T. Bertuol " Power Factor Measurement with THD correction – Member, IEEE- 1998.
- 6- D. Daniel Sabin , Daniel L. Brooks " Indices for assessing harmonic distortion from power quality measurements: Definitions and benchmark data, Member IEEE , 2001.
- 7- Электроподвижной Состав с Асинхронными Тяговыми Двгателями –Под Редакций Н. А. Ротанова – " Транспорт- 1991
- 8- S. K. Bhattacharya – Electrical Machines – New Dalhi 1999
- 9- I. J. Nagrath , D. P. Kothari – Electric Machines – New Dalhi 1999
- 10- Power Quality Application Guide "Voltage Disturbances introduction to unbalance – Copper Development Association –IEE Endorsed Provider – 2002