

النموذج الرياضي والمحاكاة لطريقة خفض تموجات التيار في الأنظمة الكهروميكانيكية بدون استخدام مرشحات

الدكتور كارلو يوسف مقدسي*

(تاريخ الإيداع 22 / 4 / 2008. قُبل للنشر في 25/8/2008)

□ الملخص □

يقدم هذا العمل شرحاً ودراسةً تحليلية لطريقة جديدة تسمح بالتخلص من تموجات التيار دون استخدام مرشحات (مفاعلات ترشيح) في الأنظمة التي تحتوي في بنيتها على آلات كهروميكانيكية مقودة عن طريق مبدلات أنصاف نواقل. سنقوم بإجراء الدراسة من أجل نظام (EM-SC) Electrical Machine- Semiconductor Converter، أي نظام (آلة كهربائية + آلية مقودة + مبدلة الكترونية). بهدف الحصول على خرج بترددات مختلفة عند التردد المغذي المولد، وذلك عندما تتطلب الأجهزة المستخدمة (الأحمال) ترددات أكبر أو أصغر من التردد المغذي. تجدر الإشارة إلى عدم استخدام مرشحات في الطريقة المدروسة للتخلص من التموجات (التوافقيات) الناشئة على خرج المبدلات الالكترونية المستخدمة في النظام المقترح، الأمر الذي يؤدي إلى تحسين المواصفات (الحجمية-الوزنية)، وكذلك تحسين الأداء الديناميكي للنظام المستخدم المؤلف من (آلة كهربائية-مبدلة).

سنقوم بتشكيل الموديل الرياضي للنظام المقترح وإجراء المحاكاة له باستخدام برامج مناسبة وإجراء المقارنة للمنحنيات الناتجة قبل التخلص من التموجات وبعد التخلص منها، لتبيان الفائدة والهدف من النظام المقترح استخدامه.

الكلمات المفتاحية: نظام كهروميكانيكي - مبدلة ترددية - التموجات - مبدلات نصف ناقلة.

*أستاذ مساعد - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - كلية الهمةك - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Modeling and Simulating Ripple Reduction in the System of Cascaded Machine and Semiconductor Converter without using Filters

Dr. Carlo Joseph Makdisie*

(Received 22 / 4 / 2008. Accepted 25 / 8 / 2008)

□ ABSTRACT □

In this paper, we attempt to study and explain new method for getting rid of ripples in the system of cascaded electromechanical machine and semiconductor converter (EM-SC) without using filters. The filterless method used to reduce ripples when the loads require a different output frequency from the supplying frequency (Up or Down) will not only enhance the dynamic properties but it will also improve its (size-mass) properties. By using suitable programs, the modeling and simulation of studied system will be carried out to show the benefits and results. The comparison between established curves (before and after using method being studied) will also be made.

Keywords: Electromechanical System, Frequency Converter, Ripples, Semiconductor Converters.

* Associate Professor, Department of Power Engineering, Faculty of Electrical and Mechanical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

مقدمة:

نظراً للانتشار الواسع للأنظمة الالكتروميكانيكية المؤلفة من (آلة كهربائية- مبدلة أنصاف نواقل) وخاصة الحاوية في بنيتها الداخلية على مجموعات تعاقبية لعدة مبدلات غير متزامنة، تقوم بالفصل والوصل (تعمل في نظام المفتاح - switching mode) ، بالإضافة إلى تقديم ونقل وحجز المعلومات (الإشارات).

ونظراً لمعرفتنا المسبقة، بأن عمل المبدلات أنصاف النواقل في هذا النوع من الأنظمة يتعلق بالتنظيم الزاوي للجهد المغذي المطبق على مداخل المبدلات المستخدمة، وكذلك بالقوة المحركة الكهربائية العكسية المتولدة في الآلة المقودة ، فإن منحنيات الخرج المتشكلة ستحتوي على مركبات توافقية عليا (تموجات)، تؤدي إلى تغيير قيمة مطال التيار الناتج وحدوث عزوم تأرجح في الآلات الكهربائية المقودة، بالإضافة إلى سوء المواصفات الكهربائية للنظام الناتجة عن الضياعات الناشئة مع زيادة التسخين بالآلة بسبب هذه التموجات .

تستخدم الطرق التقليدية المعروفة مفاعلات ترشيح (مرشحات) لتنعيم منحنى التيار والتخلص من التموجات الناشئة في منحنى تيار الخرج للمبدلات المستخدمة (العاملة في نظام التقويم أو القلب) Rectifying or (Inverting) .

ولما كان استخدام هذه الطرق التقليدية محدوداً عند الاستطاعات العالية لهذه الأنظمة بسبب ضرورة زيادة بارامترات المرشحات المستخدمة، الأمر الذي يؤدي إلى الإساءة بشكل واضح إلى المواصفات (الحجمية-الوزنية)، بالتالي زيادة عطالة النظام الإجمالية ، وكذلك تؤدي إلى سوء المواصفات والأداء الديناميكي. وهذا بالطبع أمر غير مرغوب في أنظمة التغذية الكهربائية ، وبشكل خاص عندما يكون النظام مستقلاً عن الشبكة العامة (الطائرات-السفن)، حيث يكون هناك أهمية كبيرة للمواصفات النوعية للأجهزة المستخدمة فيها (أي في الأنظمة المستقلة، والتي تعبر عن نسبة وزن (أو كتلة) الجهاز إلى استطاعته الاسمية).

أهمية البحث وأهدافه :

يرمي البحث إلى استنتاج طريقة إنقاص تموجات التيار الناشئة في النظام (EM-SC) بدون استخدام مرشحات (مفاعلات ومكثفات). معتمدة على تعويض التوافقية الأساسية (المركبة الأساسية) للتموج الناتج في منحنى خرج التيار الناتج عن طريق إدخال منابع كهروميكانيكية متحكم بمطالها وزاويتها الطورية، وسنقوم بإجراء المقارنة للمنحنيات الناتجة من خلال النظام المستخدم قبل و بعد التعويض، لتبيان تحسين المواصفات الديناميكية الناتج عن عدم استخدام المرشحات و نقصان الضياعات الناشئة عن التوافقيات في وسائط الترشيح في نظامي العمل الستاتيكي والديناميكي بشكل كبير، الأمر الذي سيؤدي إلى تحسين المواصفات (الحجمية-الوزنية) عند استخدام الطريقة المقترحة لبنية منابع الكهروميكانيكية وملفات المتحرض المستخدمة فيها لنظام التعويض المستخدم؛ بدلاً من المرشحات.

خطوات العمل :

سيتم توضيح جوهر الطريقة المقترحة للتخلص من التموجات من خلال نظام (EM-SC) مؤلف من مولد متناوب G (Generator)، ومحرك مغذى عن طريق مبدلات أنصاف نواقل تعاقبية، أي يحتوي في بنيته الداخلية على مبدلة ترددية FC (Frequency Converter) ذات حلقة مضاعفة، أي حلقة Rectifier (R)، ثم حلقة Inverter (Inv) كما يبين (الشكل 1).

سنقوم فيما يلي بتحقيق الغاية المطلوبة من خلال إجراء الخطوات التالية :

1. وضع الموديل الرياضي للنظام ومنحنيات الخرج الناتجة لعناصر النظام.
2. حساب التموج الناتج في منحنيات التيار للمبدلات المستخدمة في نظامي استمرارية وتقطيع التيار $(\gamma \neq 0)^\circ$.
3. وضع المعادلات الرياضية للمنابع الكهروميكانيكية المستخدمة في تعويض التموج الناتج.
4. إجراء المحاكاة للنظام المستخدم بأكمله قبل التعويض وبعده .
5. استنتاج تحليل فورييه للمركبات المتموجة الناشئة على خرج المقوم والقالب قبل التعويض.
6. إجراء مقارنة بين منحنيات تيار الخرج قبل وبعد التعويض ، واستخراج المنحنيات التي تبين دقة الطريقة المستخدمة في العمل من خلال التحليل الهارمونيكي الطيفي للمنحنيات الناتجة بعد التخلص من التموجات.

طريقة البحث و مواده :

يجب علينا كما أسلفنا سابقاً، القيام بالتنظيم أو التحكم الزاوي بعناصر النظام (EM-SC) مثل جهد المولد G وكذلك للقوة المحركة الكهربائية العكسية (-EMF) للمبدلة الكهروميكانيكية (Electromechanical Converter) (EMC)، وبالتالي سيحتوي منحنى التيار على خرج المقوم المقود المستخدم على مركبات متناوبة، بالإضافة إلى المركبة المستمرة الثابتة. كذلك الأمر بالنسبة للقوة المحركة الكهربائية العكسية للمبدل الكهروديناميكي (EMC).
- يمكننا التعبير عن تموج جهد المولد المقوم G عن طريق مجموع المركبات التوافقية [2] بالشكل التالي :

$$\Delta u_G = \sum_{k=1}^{\infty} A_{k1} \cdot \sin(6kw_1 t + \varphi_{k1}) , k = 1, 2, 3 \dots \dots (1)$$

$$A_{k1} = \frac{3}{\pi} \cdot U_{mL} \cdot \sqrt{\frac{\cos^2(6k+1) \cdot \frac{Y_1}{2} + \cos^2(6k-1) \cdot \frac{Y_1}{2} - 2 \cos(6k+1) \cdot \frac{Y_1}{2} \cos(6k-1) \cdot \frac{Y_1}{2}}{(6k+1)^2 + (6k-1)^2} \cos(2\alpha + \gamma_1) \dots (2)}$$

$$\varphi_{k1} = \arctan \frac{a_{k1}}{b_{k1}}$$

$$a_{k1} = \frac{3}{\pi} \cdot U_{mL} \cdot \left\{ \frac{\cos[(6k+1) \cdot \frac{Y_1}{2} + \alpha] \cdot \cos(6k+1) \cdot \frac{Y_1}{2} - \cos[(6k-1) \cdot \frac{Y_1}{2} - \alpha] \cdot \cos(6k-1) \cdot \frac{Y_1}{2}}{6k+1} \right\}$$

$$b_{k1} = \frac{3}{\pi} \cdot U_{mL} \cdot \left\{ \frac{\sin[(6k+1) \cdot \frac{Y_1}{2} + \alpha] \cdot \cos(6k+1) \cdot \frac{Y_1}{2} - \sin[(6k-1) \cdot \frac{Y_1}{2} - \alpha] \cdot \cos(6k-1) \cdot \frac{Y_1}{2}}{6k+1} \right\} \dots (3)$$

- يمكننا بشكل مشابه التعبير عن تموج منحنى القوة المحركة الكهربائية العكسية (ق.م.ك) المقومة في المبدل الكهروديناميكي (EMC) بالشكل التالي:

$$\Delta E_{EMC} = \sum_{k=1}^{\infty} A_{k2} \cdot \sin(6kw_2 t + \varphi_{k2}) , k = 1, 2, 3 \dots \dots (4)$$

$$A_{k2} = \frac{3}{\pi} E_{ML} \sqrt{\frac{\cos^2(6k+1) \cdot \frac{\gamma_2}{2} + \cos^2(6k-1) \cdot \frac{\gamma_2}{2} - 2 \cos(6k+1) \cdot \frac{\gamma_2}{2} \cos(6k-1) \cdot \frac{\gamma_2}{2}}{(6k+1)^2 + (6k-1)^2} - \frac{2 \cos(6k+1) \cdot \frac{\gamma_2}{2} \cos(6k-1) \cdot \frac{\gamma_2}{2}}{(6k+1)(6k-1)} \cos(2\beta + \gamma_2) \dots (5)}$$

$$\varphi_{k2} = \arctan \frac{\alpha_{k2}}{b_{k2}}$$

$$\alpha_{k2} = \frac{3}{\pi} \cdot E_{ML} \cdot \left\{ \frac{\cos \left[(6k+1) \cdot \frac{\gamma_2}{2} - \beta \right] \cdot \cos(6k+1) \cdot \frac{\gamma_2}{2}}{6k+1} - \frac{\cos \left[(6k-1) \cdot \frac{\gamma_2}{2} + \beta \right] \cdot \cos(6k-1) \cdot \frac{\gamma_2}{2}}{6k-1} \right\}$$

$$b_{k2} = \frac{3}{\pi} \cdot E_{ML} \cdot \left\{ \frac{\sin \left[(6k+1) \cdot \frac{\gamma_2}{2} - \beta \right] \cdot \cos(6k+1) \cdot \frac{\gamma_2}{2}}{6k+1} - \frac{\sin \left[(6k-1) \cdot \frac{\gamma_2}{2} + \beta \right] \cdot \cos(6k-1) \cdot \frac{\gamma_2}{2}}{6k-1} \right\} \dots (6)$$

- لقد تم في المعادلات (6 + 1)، استخدام الرموز التالية :

U_{ML} : مطال جهد الخط في المولد (G) (القيمة الأعظمية للجهد).

E_{ML} : مطال الـ (- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) .

β, α : زاوية التحكم بمفاتيح دائرة التقويم ، وزاوية سبق الفتح للقالبة على الترتيب .

γ_1, γ_2 : زوايا التقطيع (الإبدال) للمقوم والقالبة على الترتيب .

يتم تحديد القيمة الأعظمية لتموج التيار في المحرك (EM) كما هو معروف [2]، عن طريق التوافقيات الأساسية لكل من جهد المولد (G) المقوم، والـ (- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) (اعتبار $k=1$) ، مما يدعو إلى زيادة القيمة الأعظمية لزوايا الإبدال (التقطيع)، وكذلك زوايا سبق الفتح المرتبطة معها ، وبالتالي إلى هبوط العزم الكهرومغناطيسي للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) [3]. ونظراً لما سبق ذكره، وبالنظر إلى القيمة الأعظمية لتموج التيار تنتج عن التوافقيات الأساسية (المدرج الأساسي)، فإن تحديد تموج التيار في المحرك المتواقت (SM) عند غياب التوافقيات الأساسية في كل من منحنى جهد المولد (G) المقوم ومنحنى الـ (- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي يمتلك أهمية كبيرة ، مع الأخذ بعين الاعتبار عندها أن تموج التيار ينشأ بشكل رئيس بسبب التوافقيات الناتجة عن تعويض ($k=2$) .

تبين لنا المقارنة الرياضية (الحسابية) لحساب تموج التيار بحسب الطريقة السابقة المقترحة [2] عند وجود التوافقيات الرئيسية (الأساسية) في منحنى جهد المولد المقوم ، وكذلك في منحنى الـ (- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) من أجل نفس نظام العمل للمحرك (SM)؛ بأن المفاعلة التحريضية المطلوبة للمرشح في حال غياب التوافقيات الأساسية المذكورة تكون أقل بكثير من قيمتها في حال (عدم غياب) وجود التوافقيات الرئيسية المذكورة، وذلك من أجل الحصول على نفس التموج في منحنى التيار [4] .

إذا كان لدينا المعطيات الأولية التالية : $\beta = 50^\circ$ ، $\omega_1 = 2\pi f = 314 \text{ 1/s}$ ، $\gamma = 10^\circ$; عدد أزواج الأقطاب للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) ($P=2$) ، وعندما تكون سرعة الدوران الأعظمية ($n=2000 \text{ rpm}$) عند الحدود الدنيا لتنظيم السرعة ($v = 0.1$) ، القيمة الأعظمية المطلوبة والمسموحة لتموج التيار ($i_{max} = 0.1$) ، فإن مفاعلة المرشح النسبية المطلوبة عند وجود التوافقيات الأساسية ($k=1$) في منحنى جهد المولد (G) ، ومنحنى الـ (- ق . م . ك) للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) تبلغ القيمة (13) ، أما في حال غياب التوافقيات الأساسية فتبلغ (1). ومن هنا تأتي أهمية تعويض المركبات التوافقية الأساسية في المنحنيات المذكورة [6].

تكون بهذا الشكل مفاعلة التثنت لمفات المتحرض في المولد، والمبدل الكهروميكانيكي كافيين وحدهما للحصول على قيمة مقبولة لتموج منحنى التيار المار بهما ، وذلك عند قيامنا بتعويض التوافقية الأساسية لتموج كل من منحنى

جهد المولد المقوم ، ومنحني الـ (- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC). أي بمعنى يستطيع المحرك المغذى عن طريق عناصر نصف ناقلة (SM) العمل بدون مفاعلة ترشيح، أو العمل بمفاعلة ترشيح صغيرة جداً تكون قيمتها كافية لتأمين شروط الحماية المطلوبة في النظام .

يستخدم من أجل تعويض التوافقيات الأساسية لتموج منحني جهد المولد المقوم، وكذلك منحني الـ(- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) ، منابع جهد كهروميكانيكية بتنظيم مطالي وطوري (زاوي) (متحكم بمطال الجهد وزاويته الطورية) [1] . إذ يتم عندئذ توصيل وشائع ملفات المتحرض للمنابع المذكورة (آلات دوارة) مع دائرة التيار المتناوب أو دائرة التيار المستمر للمولد أو للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) (شكل 1)، بحيث تكون الجهود المولدة في هذه الآلات متعاكسة طورياً مع التوافقية الأساسية الموجودة في منحني جهد المولد المقوم وكذلك في منحني (- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (الشكل 1-2).

يمكننا بالطبع استخدام آلتين كهربائيتين إضافيتين أحاديتي الطور ** (ADEM) للعمل كمنابع جهد كهروميكانيكية، تكون متوضعة بحيث يمكن توليد جهد في كلتي الآلتين من ملف له نفس التسمية (ملف A مثلاً في كلتي الآلتين)، بإزاحة طورية بينها ($\pi/2$) ، وبحيث يكون لهما نفس التردد. ويتم توصيل الدوار لكلتا الآلتين بشكل متين مع دوار المولد والمبدل الكهروميكانيكي (EMC) (شكل 1) .

يتم تحديد المطال الكلي لجهد (لمجموع الجهود) الآلتين الإضافيتين (ADEM) عن طريق المعادلة التالية :

$$E_M = \sqrt{E_{M1}^2 + E_{M2}^2} \quad (7)$$

بينما تحديد الإزاحة الطورية لجهد الآلة الأولى في النظام (ADEM) من العلاقة :

$$\varphi = \arctg(E_{M2}/E_{M1}) = \arctg(i_{f2}/i_{f1}) \quad (8)$$

إذ إن :

$$; E_{M1} = E_M \cos \varphi$$

$$E_{M2} = E_M \sin \varphi$$

* (E_{M2}, E_{M1}) هما على الترتيب القيمة الأعظمية لجهد الآلة الأولى والثانية في النظام (ADEM) .

* (i_{f2}, i_{f1}) هما على الترتيب تيارا التهييج في الآلة (ADEM) .

** Additional Single phase machines (ADEM)

- يتم تغيير مطال الجهد الكلي المكافئ (مجموع الجهود) للآلة (ADEM) بشكل متناسب طردياً مع تغيير تيارات التهييج لكلتا الآلتين (i_{f2}, i_{f1}) في النظام (ADEM) ، بينما يتم تغيير الزاوية الطورية الكلية عن طريق تغيير النسبة بين تيارا التهييج للآلتين في النظام (ADEM) (الشكل 2) بحسب المعادلة (8)، بحيث يتحقق لدينا الشرط التالي :

$$(i_{f1} \sin \varphi = i_{f2} \cos \varphi) .$$

نبين على الشكل (2) مخطط الجهود للآلة أو النظام (ADEM) من أجل قيمتين لزاوية الطور لمجموع الجهود (الجهد الكلي المكافئ) (Φ, φ). يصبح بهذا الشكل بالإمكان التعويض الكلي للتوافقية الرئيسية الأساسية لتموج منحني جهد المولد المقوم ومنحني الـ (- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC)، وذلك عند إدخال (وجود) منبع جهد كهروميكانيكي موصول بشكل متعاكس طورياً مع التوافقية الأساسية لتموج المنحنيات المذكورة منحني جهد المولد المقوم والـ (- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) ، مع وجود إمكانية التنظيم المطالي والطوري وكذلك التردد لجهد المنبع المذكور. ولكن من الواضح بأن التحقيق العملي للعلاقات (2) و 3

وكذلك 5 و 6) يكون صعباً للغاية. لذلك سنقوم بتحديد علاقات أكثر بساطة لتنظيم مطال وطور (الزاوية الطورية) جهد المنبع الكلي المكافئ للآلة أو النظام (ADEM) .

1. سندرس في البداية حالة إهمال زوايا التقطيع (الإبدال) Y_2, Y_4 (أي إبدال قسري $Y \equiv 0$).

يمكننا عندها التعبير عن مطال التوافقيات الأساسية لتموج منحني جهد المولد (G) المقوم ولمنحني الـ (- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي بالشكل التالي :

$$\frac{3}{\pi} U_{ML} \cos \alpha \quad (9) U_{vm} = \frac{2}{v_1^2 - 1} \sqrt{1 + v_1^2 t g^2 \alpha}$$

$$\frac{3}{\pi} E_{ML} \cos \beta \quad (10) E_{vm} = \frac{2}{v_2^2 - 1} \sqrt{1 + v_2^2 t g^2 \beta}$$

إذ إن : - (v_2, v_1) هي على الترتيب التوافقيات الأساسية لتموج منحني جهد المولد (G) المقوم ، ولمنحني الـ (- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) على الترتيب .

- أما قيمة زوايا الطور لهذه التوافقيات الأساسية المذكورة ، فتحدد ابتداءً من لحظات الفتح (القدح) الطبيعي

للعناصر النصف ناقلة باستخدام العلاقات التالية :

$$\varphi_\alpha = -v_1 \alpha - \arctg \left(\frac{1}{v_1} ctg \alpha \right); \quad (11)$$

$$\varphi_\beta = -v_2 \beta - \arctg \left(\frac{1}{v_2} ctg \beta \right); \quad (12)$$

يمكننا تبسيط المعادلات المبينة أعلاه من (12) ÷ (9)، بإهمال الواحد في المقدار تحت الجذر التربيعي في

المعادلات (9) و (10) ، وكذلك إذا أهملنا الحد الثاني من الطرف الأيمن في المعادلات (11)، (12). وقد تم حساب

الخطأ الناتج عن هذا الإهمال (التبسيط) وتوضيحه فيما يلي في سياق هذا البحث. عندئذ وبالأخذ بعين الاعتبار :

$$U_{ML} = \sqrt{3} \cdot C_{e1} \cdot \varnothing_1 \cdot n_1 \quad , \quad E_{ML} = \sqrt{3} \cdot C_{e2} \cdot \varnothing_2 \cdot n_2 \quad ,$$

الأساسية في المولد والمبدل الكهروميكانيكي (EMC) ، فإنه يمكننا إعادة كتابة المعادلات (9) و (10) بالشكل التالي :

$$U_{vm} \approx a n_1 \cdot \sin \alpha; \quad (13) \dots\dots$$

$$E_{vm} \approx b n_2 \cdot \sin \beta; \quad (14) \dots\dots$$

إذ إن :

$$a = \frac{6\sqrt{3}v_1}{\pi(v_1^2-1)} C_{e1} \varnothing_1;$$

$$b = \frac{6\sqrt{3}v_2}{\pi(v_2^2-1)} C_{e2} \varnothing_2;$$

استخدمنا في المعادلات السابقة ، الرموز التالية :

n_2 ، n_1 على الترتيب سرعة دوران الدوار في المولد والمبدل الكهروميكانيكي (EMC) .

C_{e2} ، C_{e1} على الترتيب ثوابت تصميمية للمولد والمبدل الكهروميكانيكي .

على الترتيب السليمة المغناطيسية للتوافقية الأولى لحقل التهيج للمولد G والمبدل الكهروميكانيكي θ_1, θ_2 . (EMC).

نبين على الشكل (3) منحنيات الخرج (الجهد و التيار) لدارة التقويم المقودة المستخدمة قبل إجراء التحسين عليها، بعد إهمال زوايا الإبدال ($\gamma = 0$). كما نبين التركيب الهارمونيكي الناتج لهذه المنحنيات على الشكل (4). مع الإشارة إلى أنه عند إجراء التنظيم (التحكم بـ) لسليمة التهيج المغناطيسية للمولد (G) و المبدل الكهروميكانيكي (EMC) (وتتميز هذه الخاصية أنظمة القيادة والروافع وآليات الجر)، ستأخذ المعادلات (9) و (10) الشكل التالي :

$$U_{vm} \approx ce_1 \cdot \sin \alpha ; \quad \dots(15)$$

$$E_{vm} \approx de_2 \cdot \sin \beta ; \quad \dots(16)$$

إذ إن :

$$c = \frac{6\sqrt{6}}{\pi} \frac{v_1}{v_1^2 - 1} ;$$

$$d = \frac{6\sqrt{6}}{\pi} \frac{v_2}{v_2^2 - 1} ;$$

وهنا لدينا e_1, e_2 ، هي جهود تتناسب طردياً مع القيمة الفعالة لـ (ق . م . ك) في المولد (G) والمبدل الكهروميكانيكي (EMC) على الترتيب . أما تغيير الزاوية الطورية للتوافقيات الأساسية، فيتناسب طردياً مع زوايا التأخير (α) وزاوية سبق الفتح (β) على الترتيب وفقاً للمعادلات التالية :

$$\varphi_\alpha \approx -v_1 \alpha ; \quad \dots (17)$$

$$\varphi_\beta \approx -v_2 \beta ; \quad \dots (18)$$

بينما يتناسب تردد هذه التوافقيات طردياً مع تردد جهد المولد (G)، ومع تردد الـ (- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) ، أي نستطيع أن نكتب :

$$f_{v_1} = v_1 f_1 ;$$

$$f_{v_2} = v_2 f_2 ;$$

نبين على الرسم (6) منحنيات جهد المولد المقوم (G) وتياره بعد تعويض التوافقية الأساسية لتموج المنحني المذكور ، والتي تم إنشاؤها بحسب العلاقات الدقيقة، وأيضاً بحسب العلاقات التقريبية التبسيطية من أجل قيم $(=0^\circ, 30^\circ \alpha)$. تبين الحسابات ، بأن الفرق بين القيم اللحظية للجهد المقوم عند تعويض التوافقية الأساسية لتموج المنحني بحسب الطريقة الدقيقة ، وبحسب الطريقة التبسيطية (التقريبية) منسوباً إلى هذه القيم اللحظية لا يتجاوز المقدار (6%) وذلك من أجل أي قيمة لزاوية التنظيم .

بهذا الشكل ويهدف الحد من تموج جهد المولد المقوم ، فإنه يتم باستخدام آلتين ضمن هيكل واحد (ADEM) تشكيل جهد ينظم مطاله بشكل متناسب طردياً مع جيب زاوية التأخير (أو التحكم) ($\sin \alpha$) ومع سرعة دوران الدوار ،

أو ال(ق.م.ك) للمولد بحسب المعادلات (13) أو (15) . كما يتم تنظيم زاوية الطور لهذا الجهد بشكل متناسب طردياً مع زاوية التأخير (α) بحسب المعادلة(17). أما للحد من ترموج ال(- ق.م.ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC)، فإنه يتم باستخدام النظام (ADEM)؛ تشكيل جهد ينظم مطالبه بشكل متناسب طردياً مع جيب زاوية سبق الفتح ($\sin \beta$) ، ومع سرعة دوران الدوار أو ال(ق.م.ك) للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) بحسب المعادلات (14) أو (16)، ويتم كذلك تنظيم الزاوية الطورية لهذا الجهد بشكل متناسب طردياً مع زاوية سبق الفتح (β) بحسب المعادلة (18) . ويتم الحصول على تزامن (توافق) بين تردد جهد النظام (ADEM) مع تردد جهد المولد ، وتردد ال(- ق.م.ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC)، عن طريق تدوير دوار الآلات الموجودة في النظام (ADEM) على الترتيب بسرعة مساوية لسرعة دوران الدوار في كل من المولد والمبدل الكهروميكانيكي، وبشكل يكون هناك توافق في القطبية (اتجاه الدوران) .

وهنا تجدر الملاحظة إلى إمكانية استخدام آلة واحدة فقط بدلاً من آلتين في النظام (ADEM) ولكن بملف تهييج (طولاني - عرضاني) متعامد . كما تجدر الإشارة إلى أن الحالة العامة الأكثر انتشاراً لتأمين توافق بين تردد جهد المولد (G) و ال(- ق.م.ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC) مع تردد جهد الآلتين في النظام (ADEM) يكون باستخدام وسائط تعويض مؤلفة من (ADEM) مع محرك متواقت قائد؛ يوصل فيه ملف المتحرض مع مخرج أو مدخل مبدلة ترددية [3] (الشكل 1).

وتجدر الإشارة إلى أن هذه البنية لوسائط التعويض تسمح بتعميم هذه الطريقة على حالة استخدام منابع ساكنة لتغذية النظام (SE - EM) ، وكذلك بالنسبة للحالة التي يكون فيها تردد جهد الخرج للمبدلة الترددية غير متناسب طردياً مع سرعة الدوران للدوار في الآلة، كما هي الحال عند استخدام كاسكاد أو هيكل واحد (آلة تحريضية مع مبدلة أنصاف نواقل).

2- ندرس الآن الحالة التي تكون فيها زوايا الإبدال $\gamma_1 \neq 0, \gamma_2 \neq 0$

تبين لنا الحسابات باستخدام المعادلات الدقيقة عند اعتبار زوايا الإبدال ، وعند استخدام المعادلات التقريبية المبسطة عند عدم اعتبار زوايا الإبدال ، بأن زيادة زوايا الإبدال فوق القيمة (20°) تؤدي إلى إنقاص فعالية الأثر التعويضي بشكل كبير، وعند الزيادة اللاحقة فوق القيمة (30°) ستؤدي إلى الضياع الكامل للأثر التعويضي، بالرغم من عدم ملاحظة سوء تموج منحنى الجهد المقوم بالمقارنة مع حالة الإبدال الطبيعي. لهذا السبب، يجب علينا من أجل قيم كبيرة نسبياً لزوايا الإبدال ($0^\circ < \gamma \leq 15^\circ$)، وعند استخدام التنظيم المطالي - الزاوي لجهد النظام (ADEM)؛ أن نجري تصحيحاً إضافياً يأخذ بعين الاعتبار تأثير زوايا الإبدال هذه (γ_1, γ_2) . ويمكن تحديد ضرورة استخدام هذا التصحيح لكل حالة محددة من الحالات المدروسة عن طريق العلاقات الحسابية المبينة فيما سبق .

نبين على الشكلين (1) & (2) بنية النظام المدروس المغذى عن طريق مبدلة ترددية مباشرة (SE - EM)، مع وسائط لتعويض التوافقيات الأساسية (الرئيسية) لتموج منحنى جهد المولد (G) المقوم، ولمنحني ال(- ق.م.ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي (EMC)، كما نبين منحنيات الخرج بعد اعتبار زوايا الإبدال (التقطيع) لعناصر المبدلة الترددية على الشكل (8)، وكذلك التركيب الهارمونيكي وقيم المركبات التوافقية الموافقة على الأشكال (14÷9). وقد تم في (الشكل 1) استخدام الرموز التالية :

G- مولد ، EMC مبدل كهروميكانيكي

R (Rectifier) مقوم ، I (Inverter) قابلة ، CS نظام تحكم.

$ADR_1 ADR_2$, منظمات (مطالية - زاوية).

$ADEM_1 + ADEM_4$ آلات كهربائية إضافية.

$FDS_2 FDS_1 +$ حساس ترددي وطوري لجهد المولد (G) والمبدل الكهروميكانيكي (EMC) على الترتيب .

RS_2 ($RS_1 +$) حساس سرعة دوران الدوار في المولد (G) والمبدل الكهروميكانيكي على الترتيب.

U_α, U_β إشارات التحكم (نبضات التحكم بزوايا التنظيم).

عند استخدام مبدلة ترددية ذات اتصال مباشر (DC - FC) للعمل مع المحرك (SM) ، فإنه يكون ضرورياً تنفيذ ملفات المتحرض الأحادية الطور بشكل متعدد الطبقات (الوشائع). ويكون عندها عدد هذه الوشائع (الطبقات) مساوياً؛ إما إلى عدد أطوار المولد أو المبدل الكهروميكانيكي (EMC) ، أو مساوياً إلى ضعف هذه القيمة، وبذلك نحصل على وفر في النحاس المستخدم في تصنيع ملفات المتحرض المتعدد الطبقات (الوشائع) أقل بمقدار $\sqrt{3}$ من كمية النحاس المستخدمة في تصنيع ملفات المتحرض أحادي الطبقات (الوشائع) .

سيكون الخرج الناتج من المبدلة الترددية بالتردد المطلوب تأمينه (desired frequency)، بعد استخدام طريقة التعويض المقترحة جيئياً (الشكل 12)، الأمر الذي يسمح بدوره بتحسين كبير في المواصفات (الوزنية - الحجمية). وهذا يعتبر من الحسنات الهامة في الأنظمة المستقلة، التي لا تتلقى تغذيتها من الشبكة العامة (مثل الطائرات.. السفن).

النتائج و المناقشة:

- تحسين المواصفات النوعية (الحجمية - الوزنية) للنظام (SE - EM) عن طريق استخدام منابع جهد كهروميكانيكية متحكم بها مطالباً وطورياً .

- تحسين المواصفات الديناميكية للنظام (SE - EM) الناتج عن عدم استخدام مفاعلات تعميم ، أو استخدام مفاعلات تعميم ذات قيمة صغيرة جداً .

- تسمح الطريقة المقترحة بإنقاص تموج التيار والحصول على منحنى الـ (- ق . م . ك) العكسية للمبدل الكهروميكانيكي ، ومنحنى جهد للمولد مقوم بشكل شبه مثالي .

- تم الحصول على علاقات حسابية عامة يمكن استخدامها حتى في حالة استخدام منابع جهد ساكنة لتغذية النظام

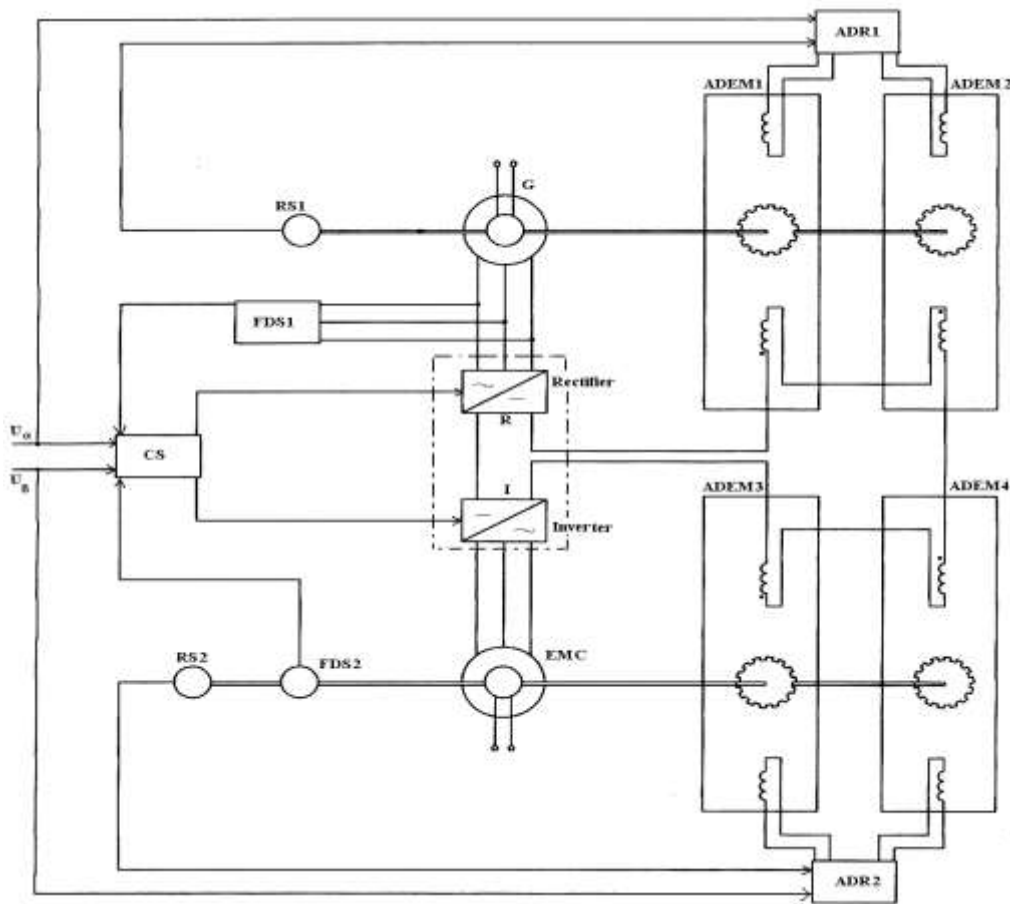
(SE - EM) ، وغيرها من الحالات الأخرى (أنظمة غير مترامنة) .

الاستنتاجات و التوصيات :

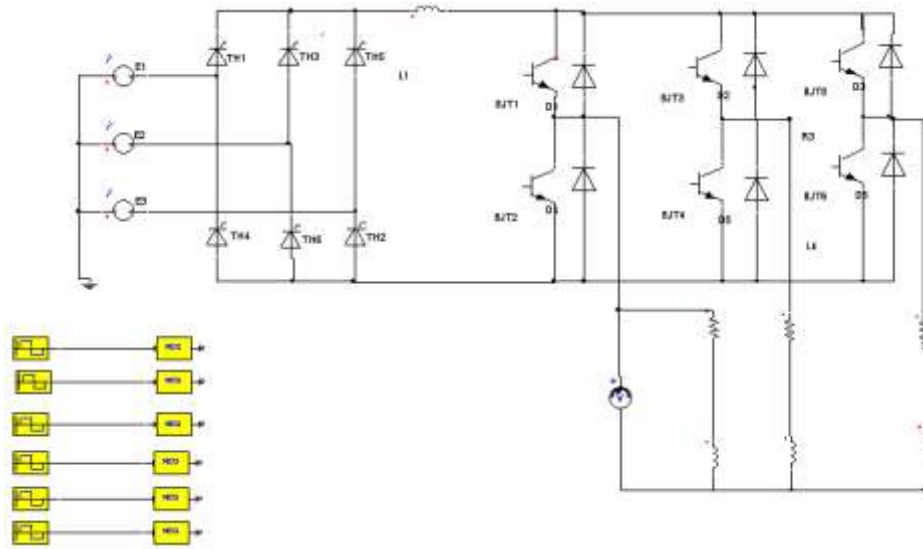
- إعطاء بعض المقترحات التصميمية في تنفيذ ملفات المتحرض للآلات الأحادية الطور المستخدمة في النظام (ADEM) تسمح بالحصول على وفر في كمية النحاس المطلوبة .

- وجود تطابق كبير عند استخدام المعادلات الدقيقة والمعادلات التقريبية ، مما يسمح باستخدام المعادلات التقريبية عند كون زوايا الإبدال $(0^\circ \leq \gamma_1 \cdot \gamma_2 \leq 15^\circ)$.

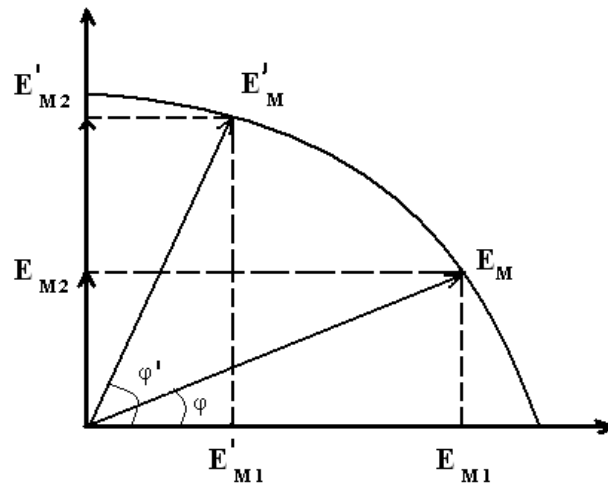
- يمكن استخدام الموديل الرياضي ونموذج المحاكاة في دراسات أخرى بعد تعديل البارامترات وفق النظام المستخدم؛ في معظم أنظمة التحكم والملاحقة التي تعتمد بنيتها الداخلية على أنظمة كهروميكانيكية ذات استطاعات العالية ومغذاة عن طريق مبدلات أنصاف نواقل.
- تكمن أهمية الدراسة و نتائجها في تحسين المواصفات (الحجمية - الوزنية)، وكذلك في تحسين الأداء الديناميكي للآلة المغذاة عن طريق مبدلات أنصاف نواقل في الأنظمة المستقلة (الطائرات والسفن...) وفي أنظمة الروافع الثقيلة كتلك المستخدمة في مرفأ اللاذقية (GANS - CRANS) .



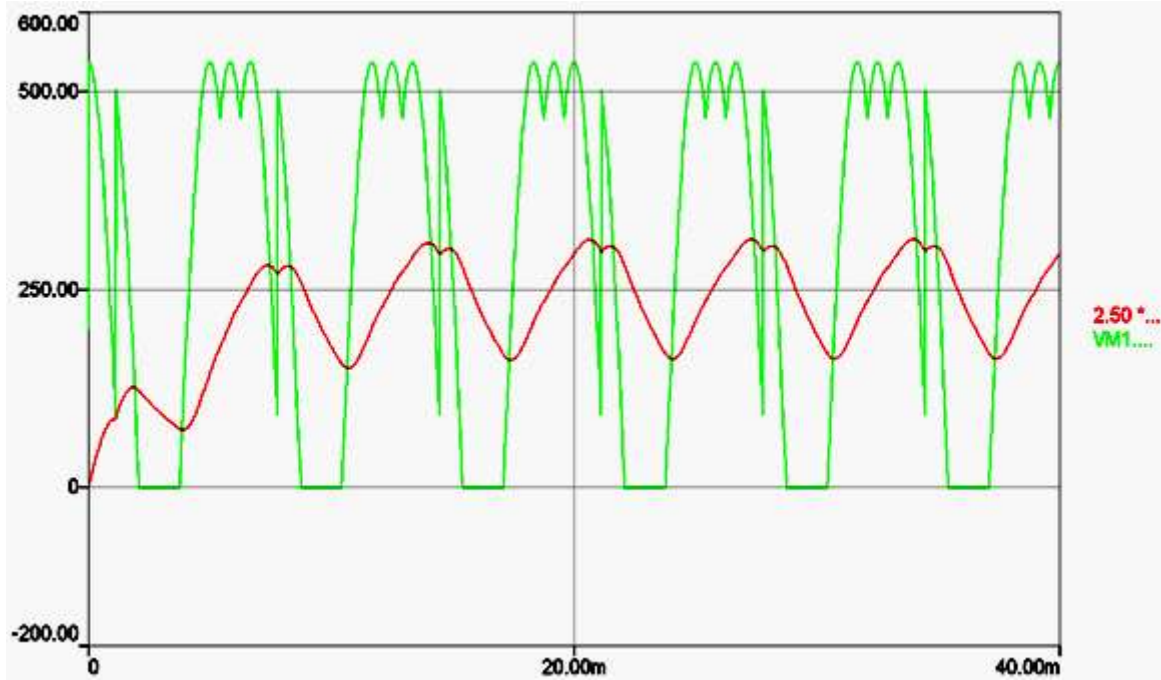
الشكل (1) يبين النظام المقترح (EM-SC) المؤلف من مولد G ومحرك SM مع مبدلة ترددية مباشرة



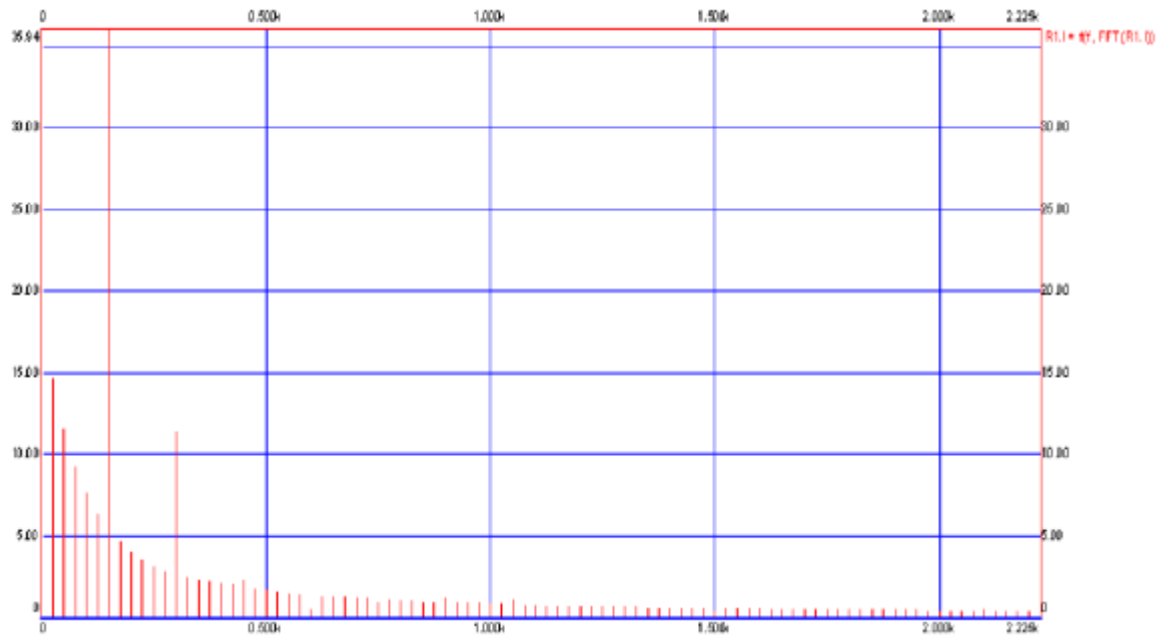
الشكل (1-2) يبين دائرة القالب المبدلة الترددية المؤلفة من (قالبية - مقوم مقود) التي تم إجراء المحاكاة عليها



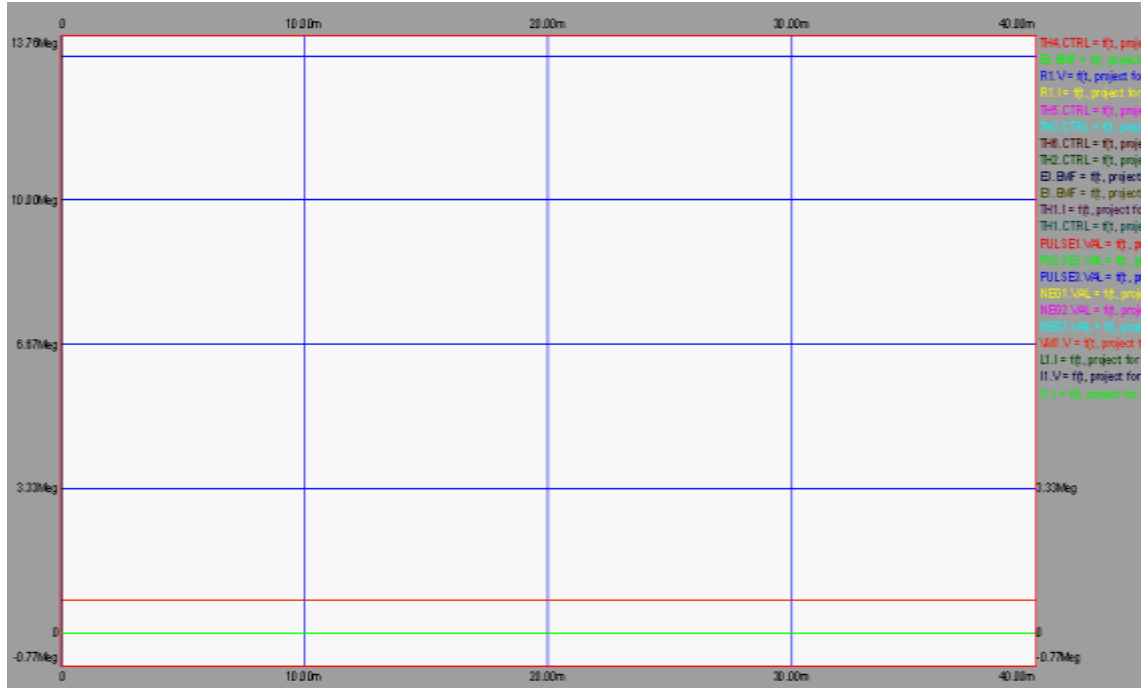
الشكل (2) يبين مخطط الجهود الشعاعي لآلة (ADEM)



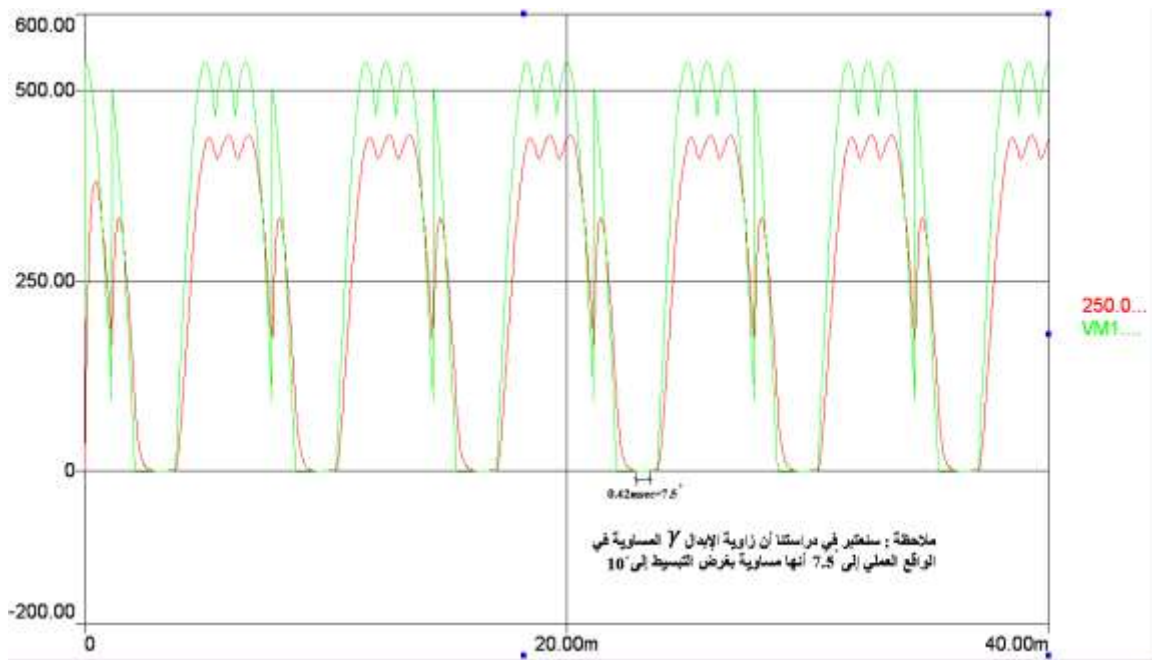
الشكل (3) يبين منحنى تيار وجهد الخرج للمقوم المقود قبل التعويض ($\gamma = 0$)



الشكل (4) يبين تحليل فورييه الطيفي لتيار الخرج للمقوم المقود قبل التعويض ($\gamma = 0$)



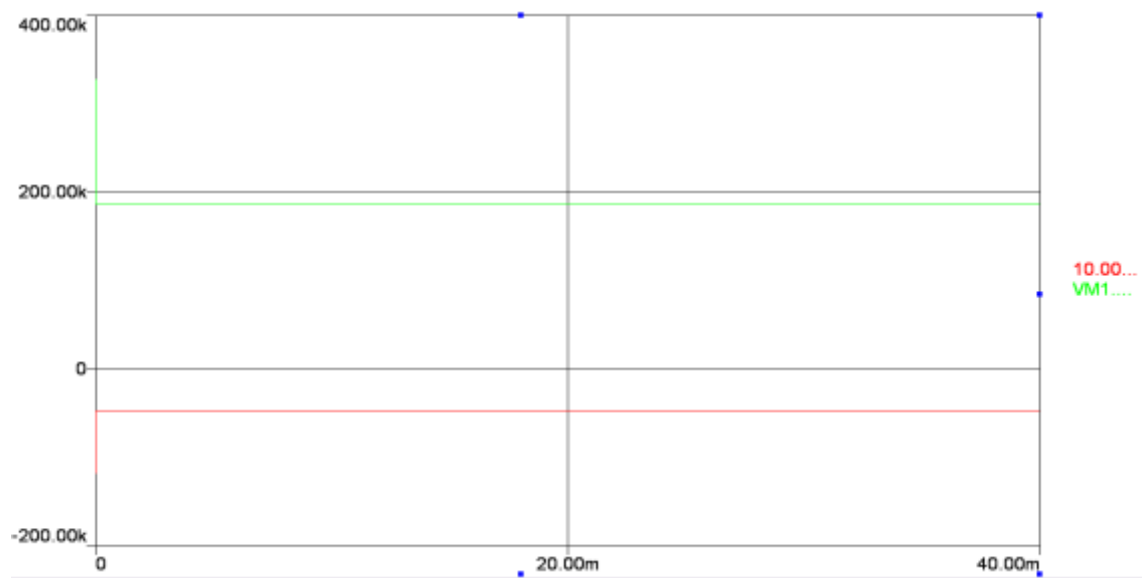
الشكل (5) يبين منحنى تيار وجهه الخرج للمقوم المقود بعد التعويض ($\gamma = 0$)



الشكل (6) يبين منحنى تيار وجهه الخرج للمقوم المقود قبل التعويض ($\gamma \neq 0$)

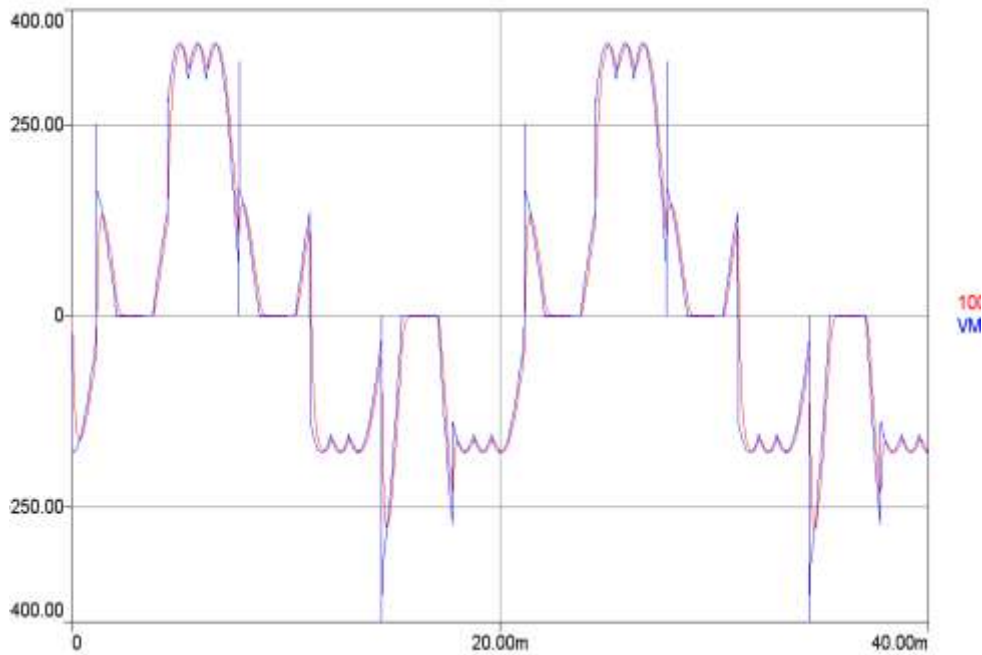


الشكل (7) يبين تحليل فورييه الطيفي لتيار الخرج للمقوم المقود قبل التعويض ($\gamma \neq 0$)

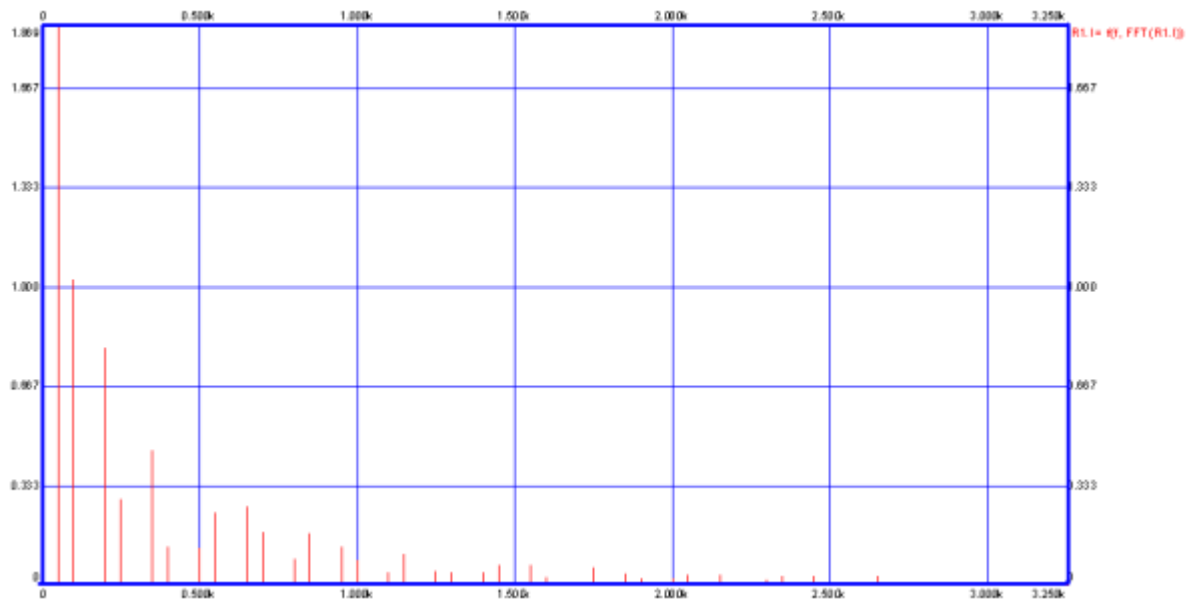


الشكل (8) يبين منحنى تيار وجهد الخرج للمقوم المقود بعد التعويض ($\gamma \neq 0$)

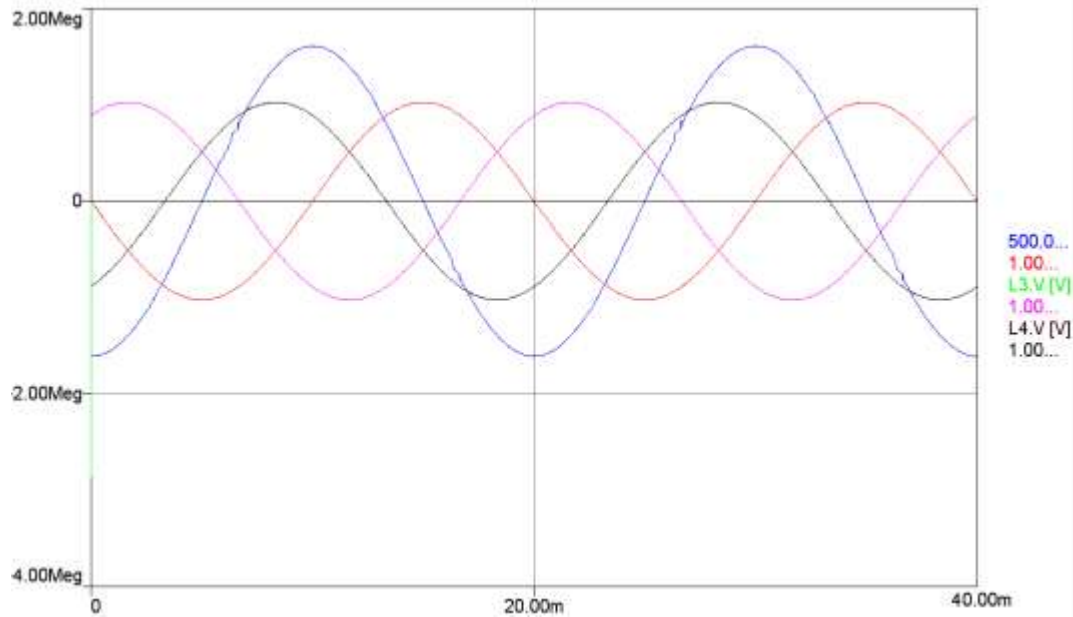
	f [Hz]	R1.I [A]	Phi [rad]	Phi [deg]	%(Max)
Minimum	25.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
Maximum	12.75000k	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
0	25.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
1	50.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
2	75.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
3	100.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
4	125.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
5	150.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
6	175.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
7	200.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
8	225.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
9	250.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
10	275.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
11	300.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
12	325.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
13	350.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
14	375.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
15	400.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
16	425.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
17	450.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
18	475.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
19	500.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
20	525.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
21	550.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000
22	575.00000	13.75878m	4.71239	270.00000	100.00000

الشكل (9) يبين تحليل فورييه للمركبات التوافقية لتيار الخرج للمقوم المقود بعد التعويض ($\gamma \neq 0$)

الشكل (10) يبين جهد و تيار الخرج للكالبة المغذاة بمقوم مقود (مبدلة ترددية) قبل التعويض



الشكل(11) يبين تحليل فورييه الطيفي لتيار الخرج للمبدلة الترددية قبل التعويض



الشكل(12) يبين جهد وتيار الخرج للقالبة المغذاة بمقوم مقود (مبدلة ترددية) بعد التعويض

المراجع:

1. WILLIAMS, T. *EMC for product designers*, 1996.
2. SKIBINSKI, G; KERKMAN, R. *EMI emissions of modern PWM AC drive*”1999.
3. SEN, P. C; *Electrical machines and power electronics Ontario-Canada*”1999.

4. TIHANY, L. *Electromagnetic compatibility in power electronics*, IEEE, Press”1995.
5. JUNG, J. *A feed back linearizing control scheme for PWM converter having a very small DC link filter*, IEE”1998.
6. SHAKARIN, J.E. *Electrical machines using in automatic control system*, Moscow”1988.
7. GIGLENKO, V.E. *A high harmonics in electrical power supply*- Moscow”1994.
8. SIMPLORER program for simulation, Version 7.0; Siemens Company 2007-Germany.
9. TRYSIM program for simulation, Version 3.5; Siemens Company 2007-Germany.
10. ARRISON, R. *Practical Filter design*; Prentice Hall, Australia”1993.