تصميم مرشحات التيار المتناوب لتخميد التوافقات العالية في الشبكة الكهربائية

د.م. مصطفى سليمان دليلة
استاذ مساعد في قسم هندسة الطاقة الكهربائية
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة تشرين

د.م فؤاد جبل
مدرس في قسم هندسة الطاقة الكهربائية
كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية
جامعة تشرين

مقدمة:

نظـراً للانتشـار الواسـع لاسـتخدام الثـاير وسـتورات في مختلـف الأنظمـة والتجهيزات الكهربائية، يزداد طيف التوافقيات العالية المتولدة في الشبكة الكهربائية مسببة مشاكل جمة للنظام الكهربائي، وانطلاقاً مـن هـذه الظـروف يجـري البحـث بخطوات سريعة عن مرشحات للقضاء، أو للتخفيف من أثر التوافقيات العالية علـى الشبكة الكهربائية.

يخوض هذا البحث في مجال الاستفادة من المرشحات في تخميد بعض التوافقيـات العالية في الشبكة الكهربائية، وفي أسس تصميم هذه المرشحات.

إن وجود التوافقيات العالية يشوه الشكل الجيبي لموجـة الجهـد والتيـار، مسـببة الكثير من المشاكل سواء لمنبع القـدرة أو لمسـتقبلي القـدرة والحمـولات المختلفـة. فالتوافقيات العالية في موجة الجهـد قـد تتسـبب مثـلاً في زيـادة تسـخين المكثفـات والأجهزة السعوية، وفي التشغيل الزائف للثايرستورات، بينما قد يسبب وجودها في موجة التيار إلى تسخين زائد للنواقـل، وتشـغيل زائـف لـلزواجل وأجهـزة الحمايـة من التيارات الزائـدة. هـذا ويمكـن تلخيـص أهـم الأثـار السيئة للتوافقيـات العاليـة بالآتي:-

1- تحميل زائد للأجهزة السعوية.

والمحولات.

3- انخفاض السعة الكهربائية "القدرة المنقولة" لكابلات القدرة وخطوط النقل.

4- زيادة تسخين أو احتراق المكثفات المخمدة للضجيج، أو محولات البالاست في مصابيح النيون.

5- تأثير سلبي على مميزات أجهزة الحماية، والتشغيل الزائف لها.

6- التأثير السلبي على الدارات الالكترونية، كدارات التحكم في زاوية الطور في الدارات الثايروستورية.

7- تشغيل زائف لأنظمة التحكم.

8- تشويش على أنظمة الاتصالات المجاورة.

ويمكن أن نلخص تأثير التوافقيات العالية على بعض الأجهزة الكهربائية بالجدول رقم 1.

جدول رقم (1)

نوع الجهاز			طبيعة الآثار السلبية
أجهزة تعديل الطور	مكثفات قدرة	بمفاعل	حمولة زائدة، تسخين زائد
		بدون مفاعل	حمولة زائدة، تسخين زائد، أصوات اهتزازات
	مفاعلات		تسخين زائد، احتراق، أصوات
تجهيزات أخرى	ريليه حماية من التيارات الزائدة		تشغيل زائف، احتراق الملف
	أجهزة الاتصالات اللاسلكية مثل أجهزة الراديو والتلفزيون		تداخل أمواج (تشويش)
	أجهزة التصوير بأشعة "X"		تأثير سلبي على الخيال
	منصهرات قدرة		تسخين زائد للمنصهرة
	محركات		طنين وأزيز
	عدادات القدرة		احتراق ملف التيار

وقد أثبتت التجربة أن الأجهزة السعوية هي الأكثر تضرراً بالتوافقيات العالية.

تعتبر المولدات والمحولات الكهربائية أحد مصادر التوافقيات العالية في الشبكة الكهربائية. ومع تطور تقنية أنصاف النواقل، أصبحت دارات التقويم والتبديل الثايروستورية أحد المصادر الأساسية لظهور التوافقيات العالية في الشبكة الكهربائية. ويشكل هذا النوع من التوافقيات حوالي 45٪ من مجمل التوافقيات العالية في الشبكة الكهربائية الحديثة.

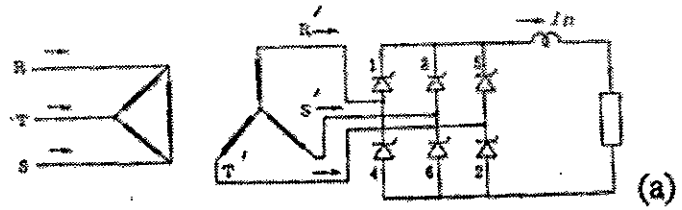
التوافقيات العالية الناشئة عن المبدلات الثايروستورية

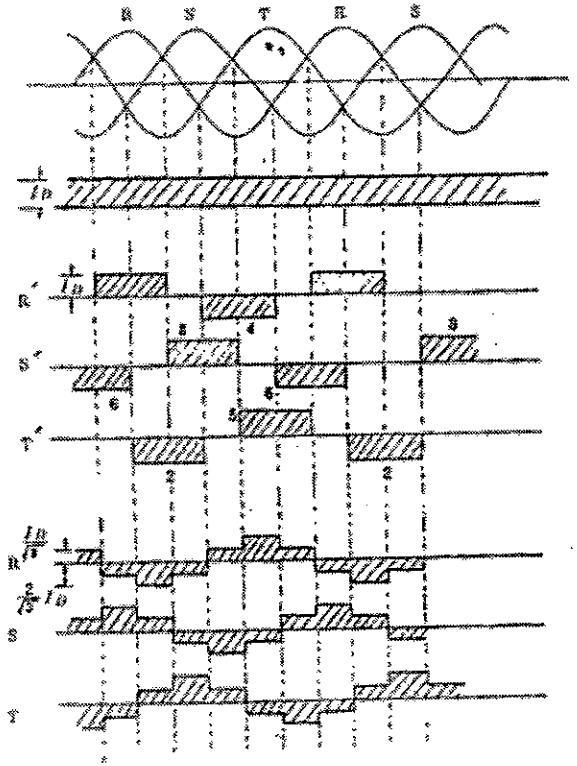
High Harmonic's Generated by Thyristor Converters

تستخدم الثايروستورات في تجهيزات مختلفة مثل المبدلات والمقومات ومنظمات الجهد المقادة وغير المقادة. وتبقى المقومات الثايروستورية من أكبر الأجهزة المولدة للتوافقيات العالية. لنفرض أننا حصلنا على تيارحمولة مستمر I_d نعّم تماماً (رشّح) بواسطة الملف، وأن الملفات المحولة موصولة Δ / Y، كما في الشكل (1-a)، فسوف يمر في ملفي المحولة الأولى والثانوي تياراً متناوباً مستطيل الموجة كما في الشكل 1)-(b. أما إذا وصلنا ملفي المحولة بشكل Y/Y فسوف تكون موجة التيار متشابهة في ملفي المحولة. وبتحليل الموجة المستطيلة وفق سلسلة فوريه نحصل على مجموعة من التوافقيات تحوي التوافقية الأساسية (n = 1) وتوافقيات عالية من مرتبة $n = 6\ k \pm 1$، (حيث $k = 1, 2, 3, ..$):

$$i = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\sin \omega t \pm \frac{1}{5} \sin 5\,\omega t \pm \frac{1}{7} \sin 7\,\omega t \pm \frac{1}{11} \sin 11\,\omega t \pm ..\right) \quad (1)$$

بالنسبة لـ (± أو ±) تستخدم الإشارات العليا في حالة التوصيل Y / Y والدنيا في حالة التوصيل Y ? Δ للمحول.





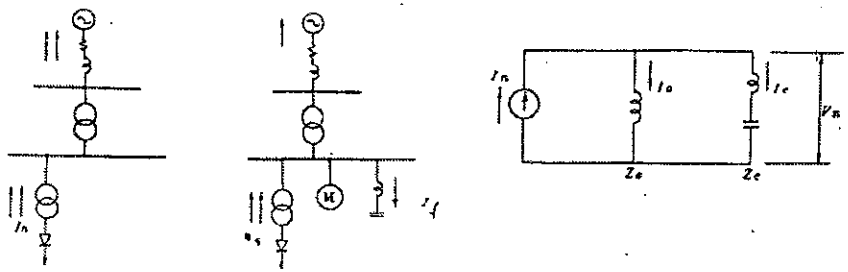
شكل رقم (1)

ملاحظة:

افترضنا أن المقوم مثالي وأن زاوية فتح الثايروستورات مساوية الصفر.

تمر تيارات التوافقيات العالية عبر الحمولات المغذاة بثايروستورات مقادة، لهذا يمكن اعتبار هذه الحمولات كمنابع لتيارات التوافقيات العالية. حيث تتعلق تيارات التوافقيات العالية High harmonic Currents بمميزات الحمولة فقط ولاتتعلق بمنبع القدرة أو بالحمولات الأخرى.

تغلق هذه التيارات مساراتها عبر منبع القدرة والمكثفات وغيرها من الفروع المتوازية. وبافتراض أن النظام لا يحوي أية دارة تفرعية غير منبع القدرة كما في الشكل (2 - a) فإن تيارات التوافقيات العالية ستمر، مغلقة مساراتها، عبر مولد القدرة فقط. ولكن إذا احتوى النظام على دارات تفرعية أخرى كما في الشكل (2 - b) فإن جزءاً من هذه التيارات سوف يغلق دارته عبر هذه التفريعات، وبالأخص إذا كان لها صفة سعوية نظراً لانخفاض معاوقتها عند التوافقيات العالية. ويبين الشكل (2 - c) الدارة الكهربائية المكافئة.



شكل رقم (2)

وبتطبيق قانون أوم على الدارة المكافئة يمكن حساب كل من الجهد والتيار لكل فرع من فروعها.

$$I_0 = \frac{Z_c}{Z_0 + Z_c} \cdot I_n \qquad (2)$$

$$I_c = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_c} \cdot I_n \qquad (3)$$

$$V_n = \frac{}{Z_0^{-1} + Z_c^{-1}} \qquad (4)$$

أهملنا في الدارة المكافئة الحمولات التحريضية نظراً لأن معاوقتها للتوفقيات العالية تكون كبيرة مما يحد من مرور تيارات التوافقيات العالية التي يمكن إهمالها عملياً.

سنتعرض في الجدول رقم (2) لبعض الحالات الخاصة لحمولة موصولة على التفرع مع منبع التيار للتوافقيات العالية:

لجعل التجهيزات السعوية ذات صفة تحريضية بدءاً من توافقية محددة وأعلى يتم وصل مفاعل على التسلسل مع المكثف. ولتغيير الحمولة لتصبح تحريضية بدءاً من التوافقية رقم n يجب أن يتحقق ما يلي:

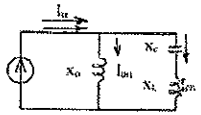
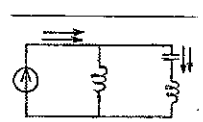
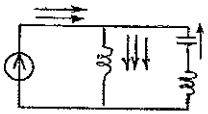
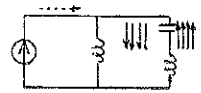
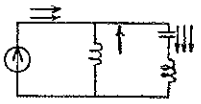
$$-J\frac{x_c}{n} + Jn\,x_c \geq 0 \Rightarrow x_l \geq \frac{x_c}{n^2} \qquad (5)$$

حيث x_c , x_L - المفاعلتين السعوية والتحريضية للمكثفات والمفاعل عند التردد الأساسي للشبكة (التوافقية الأولى). ولجعل الحمولة تحريضية بدءاً من التوافقية الخامسة يجب أن يتحقق:

$$x_L \geq \frac{x_c}{5^2} = 0.04\,x_c \qquad (6)$$

أي أن x_L يجب أن تكون أكبر بمقدار 4 % من x_c على الأقل وذلك للحد من مرور تيارات التوافقيات العالية بدءاً من التوافقية الخامسة وما فوق. هذا وتحدد الدول المتقدمة هذه النسبة في أنظمتها المعيارية بحيث لاتقل عن 4 %.

جدول رقم (2)

الحالة	مسارات تيارات التوافقات العالية في الدارة المكافئة*	صفة الحمولة ومعاوقتها	ملاحظات
العادية		تحريضية	بزيادة رقم التوافقية تزداد x_L ويقل تيار التوافقيات العالية عبر المكثف
الرنين التسلسلي (حالة المرشح)		أومية فقط	يجب زيادة الصفة التحريضية لها بزيادة x_L تجنباً لزيادة التحميل
ازدياد تيار التوافقيات العالية		سعوية	زيادة تشويه الجهد على البارات. وإذا لم يسمح بهذه الحالة يجب تغيير الحمولة إلى تحريضية (مرشح)
رنين تفرعي		سعوية	لايسمح بهذه الحالة إطلاقاً. ويجب تغيير الحمولة إلى تحريضية
زيادة I_{cn}		سعوية	تغيير الحمولة إلى تحريضية

*يشير عدد الأسهم إلى شدة تيار التوافقيات العالية

ولكن من الصعب بشكل عام وضع حد للتوافقيات العالية في الشبكة الكهربائية نظراً لتنوعها، وللتعدد الهائل للأجهزة المولدة لها والمتأثرة بها. وبشكل عام يتم تحديد التوافقيات العالية وفق معيارين أساسيين: مقدار تأثيرها على المعدات الموصولة مع الشبكة، وتداخلها مع خطوط الاتصالات اللاسلكية.

حتى تاريخية، و لم تضع النظم والقوانين التي تحد من هذه التوافقيات في الشبكة الكهربائية. وقد بدأت بعض الدول المتقدمة بدراسة جدية لهذا الموضوع وأولته اهتمامات جدية. ومن أولى هذه الدول الولايات المتحدة واليابان. كما ويعتبر النظام القياسي البريطاني من خيرة وأقسى النظم المحددة للتوافقيات العالية في الشبكة الكهربائية.

تصميم مرشح تيار متناوب Design of A . C . Filter:

مبدأ العمل:

ينشأ التشويه الهرموني Harmonic disturtion أساساً من وجود دارات تقويم وحمولات أخرى تعتبر منبعاً للتوافقيات العالية في الشبكة الكهربائية. وأفضل طريقة للحد من التشويه الناجم عن التوافقيات العالية هو امتصاص تيارات هذه التوافقيات في نقطة قريبة من مصدرها (منبعها) بحيث لايسمح إلا للحد الأدنى منها بالمرور في أجزاء الدارة الأخرى.

توصل مرشحات التيار المتناوب بالقرب من الحمولات المولدة للتوافقيات العالية وعلى التوازي معها بغية امتصاص هذه التيارات. ولتصميم مرشح للحالة الثانية من الجدول (2) مثلاً يجب أن تكون معاوقته قريبة من الصفر للتيار التوافقي لكي تمتصه، وتتحقق العلاقة:

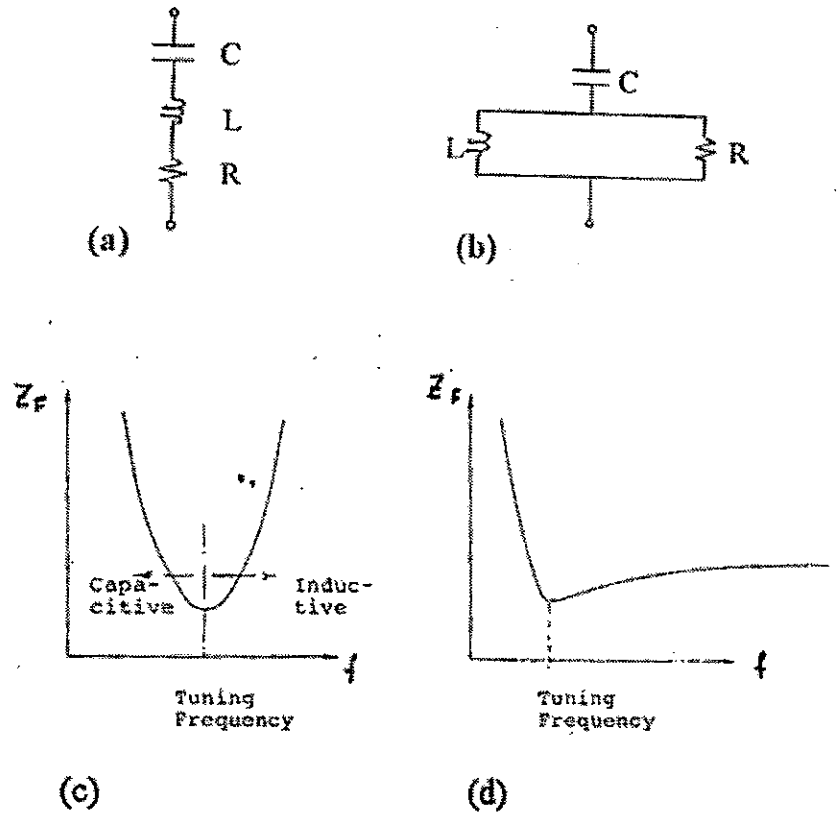
$$x_L = \frac{x_c}{n^2} \qquad \text{(دارة تسلسلية)}$$

ولهذا يجب اختيار قيمة الممانعة التحريضية للمفاعل مساوية $\frac{1}{n^2}$ من الممانعة السعوية لمكثفات المرشح وذلك بغية الحد من التوافقية رقم n وما فوق.

يستخدم نوعان أساسيان من المرشحات، المرشح الموآلف (Tuned Filter) حيث توصل كل من السعة والمفاعل والمقاومة الأومية على التسلسل (الشكل 3-a)، ومرشح الترددات العالية (مرشح تمرير عالي) High - Pass Filter (الشكل 3-b).

ويوضح الشكلان (3-c, d) علاقة المعاوقة بالتردد لكل نوع من هذين المرشحين.

يتضح من الشكل (3-c) أن المشرح الموآلف يكون فعالاً عند قيم للتردد تكون قريبة من ترد الرنين. أي من أجل توافقية محددة وليس من أجل جميع التوافقيات. ولهذا فمن أجل ترشيح أكثر من توافقية يستخدم أكثر من مرشح بجانب بعضهم (على التوازي). بينما تبقى معاوقة هذا المرشح أعلى من معاوقة المرشح الموآلف. ولهذا يستخدم هذا المرشح لترشيح التوافقيات عالية الدرجة من مرتبة $n = 11$ وما فوق. ولترشيح التوافقيات الأقل مرتبة $n < 11$ يستخدم المرشح الموآلف على التفرع معه.



شكل رقم (3)

تتعلق تيارات التوافقيات العالية بمقاومة المرشح عند كل توافقية، ومن هنا فإن فعالية المرشح في ترشيح توافقية ذات تردد محدد سوف تنخفض إذا ازدادت معاوقة المرشح عند هذه التوافقية لأسباب مختلفة، كسوء مؤالفة المرشح، أو لأسباب خارجية. وتعود أسباب عدم مؤالفة المرشح إلى:

أ – انحرافات أولية ناجمة عن أخطاء إنتاجية في المكثف والمفاعل (يمكن التخفيف من هذا الانحراف بتزويد المفاعل بأطراف تعديل، ولكن ذلك لن يزيل الانحراف نهائياً).

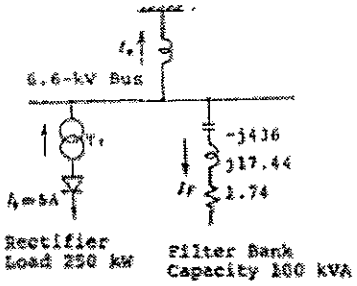
ب– تغير السعة بتغير درجة الحرارة أو الجهد المطبق.

جـ– تغير المفاعلة التحريضية بتغير درجة الحرارة أو التيار.

د– انحراف تردد الشبكة عن القيم النظامية.

ولدراسة تأثير الموآلفة السيئة على المرشح الموآلف سنتعرض لبعض الأمثلة العملية:

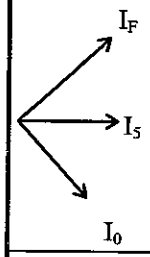
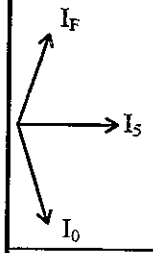
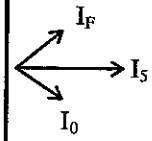
حيث مثلنا نظام القدرة عند المستهلك بالمخطط المبين بالشكل (4). ويغذي حملاً (250 KW) من قضيب تجميع 6.6 KV عبر دارة تقويم. ولترشيح التوافقية الخامسة استخدم مرشحاً مؤالفاً ذو مجموعة مكثفات قدرتها 100 KVA.



شكل رقم (4)

وقد أجرينا الحسابات التالية المتعلقة بترشيح تيار التوافقية الخامسة بواسطة المرشح ولثلاث حالات (جدول 3).

جدول رقم (3)

رقم	الحالة	معاوقة المرشح Z_F (Ω)	التيار عبر منبع القدرة I_o (A)	التيار عبر المرشح I_F (A)	فاعلية المرشح F_{eff} (%)	المخطط الشعاعي
1	المرشح مؤالف تماماً على تردد التوافقية الخامسة	= 1.744 Ω	= 3.12	= 3.9	37.6	
2	المفاعلة السعوية أكبر بمقدار +2% عن القيمة التصميمية	= 1.744 j 1.744	= 6.86	= 6.05	-37.2	
3	المفاعلة السعوية أصغر بمقدار 2% عن القيمة التصميمية	= 1.744 + j 1.744	= 2.87	= 2.54	42.6	

ملاحظة:

1- حسبت قيم I_0 و I_F من العلاقتين (2) و (3).

2- حسبت F_{eff} من العلاقة $F_{eff} = \frac{I_5 - I_0}{I_5}$.

يستنتج من الجدول (3) أن فعالية المرشح تتغلق كثيراً بمقدار موآلفته، وأي تغير بسيط في الموآلفة سيؤدي إلى تغير واضح (كبير) في معاوقة المرشح.

كما يبين الجدول أن تيار التوافقيات العالية الذي يغلق دارته عبر المنبع في الحالة الثانية أكبر من تيار التوافقية الخامسة I_5، وهذا عائد إلى عدم تأمين الموآلفة الدقيقة للمرشح، ولرفع فعالية المرشح ينبغي اتباع إحدى الطريقتين:

أ – تقليل معاوقة المرشح وذلك بموآلفته بشكل جيد وبحيث تكون هذه المعاوقة منخفضة بما فيه الكفاية مقارنة مع معاوقة منبع التوافقيات العالية.

ب– زيادة المفاعلة التحريضية للمرشح قليلاً عن القيمة المفترضة.

وكاختبار لهاتين الطريقتين نجري بعض التعديلات على معطيات المثال السابق. ونقوم بحساب I_F , I_o , Z_F كما في المثال السابق وللحالات الثلاث. حيث دونا النتائج في الجدول 4.

التعديل الأول (الحالة الأولى):

جميع معطيات المثال السابق تبقى دون تغيير باستثناء:

$X_c = -j\ 218\ \Omega$ وهذا يعادل زيادة قدرة المكثفات للمرشح إلى 200 KVA

$X_L = j\ 8.72\ \Omega$ وهذا يساوي 4 % من قيمة X_c.

$R = 0.87\ \Omega$

التعديل الثاني (الحالة الثانية):

نحافظ على قدرة المكثفات مساوية 100 KVA، ولكن نزيد X_L بنسبة 2.5 % لتصبح 4>1 % من قيمة X_c كما يلي: $X_c = j\ 436\ \Omega$، $X_c = j\ 17.9\ \Omega$، $R = 1.74\ \Omega$.

الجدول رقم (4)

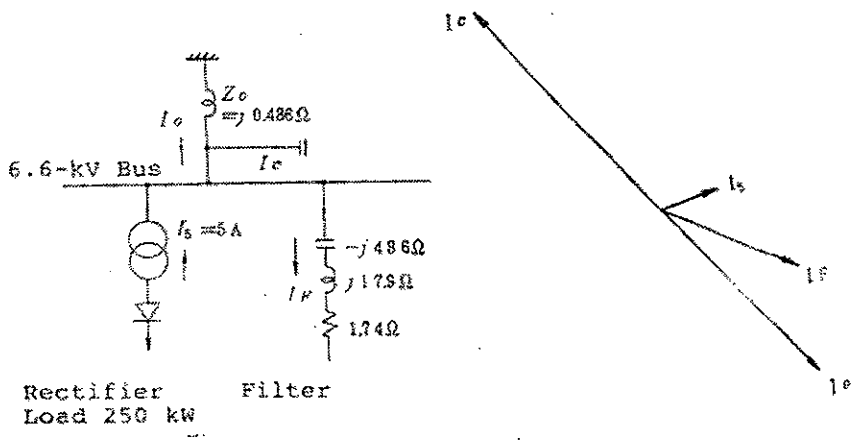
		مقاومة المرشح مساوية لقيمتها التصميمية	المفاعلة السعوية تساوي % 102 من قيمتها التصميمة	المفاعلة السعوية تساوي % 98 من قيمتها التصميمة
الحالة الأولى	Z_F ; Ω	0.87 + j O Ω	0.87 - j 0.872	0.87 + j 0.872
	I_o ; A	1,85	3.92	1.94
	F_{eff} %	63 %	21.6 %	16.2 %
	I_F, A	4.64	6.95	3.44
الحالة الثانية	Z_F; Ω	1.74 + j 2.3	1.74 + j 0.556	1.74 + j 4.04
	I_o ; A	3.0	2.82	3.4
	F_{eff} ;%	40 %	43.6 %	32 %
	I_F ; A	2.27	3.36	1.69

تشير هذه النتائج إلى نجاح هاتين الطريقتين في تحسين فعالية المرشح. حيث تشير الحالة الأولى إلى أن فعالية المرشح لا تعتمد فقط على شروط الموآلفة ولكن أيضاً على حجم معاوقة مصدر (منبع) التوافقيات العالية.

تأثير منبع القدرة Effect of Power Source System:

لم نتطرق في المثالين السابقين إلى تأثير منبع القدرة على التوافقيات العالية. أما الآن سندرس حالة خاصة تكون فيها قضبان التجميع (البارات) مقصورة مع قيم كبيرة للمكثفات بدون أي محارصة تسلسلية. (تمثل هذه الحالة السعات المتشكلة بين خط نقل قدرة، أو كبل جهد عالي وبين الأرض. في هذه الحالة يمكن أن تصبح معاوقة منبع القدرة للتوافقات العالية ذات صفة سعوية مما يسمح بمرور تيارات توافقية عبر منبع القدرة. وهذا ما سنوضحه من خلال النموذج التالي:

الخلاف هو وصل مكثفات على التفرع مع قضيب التجميع 6.6KV قيمتها 5500 KVA مفترضين أيضاً أن مكثفات المرشح تساوي 98 % من قيمتها التصميمية.



شكل رقم (5)

ومن الشكل نجد معاوقة منبع القدرة للتوافقات العالية:

$$Z_0 = \frac{1}{\frac{1}{j0.436\times5} + \frac{1}{-j7.92/5}} = j\,5.79\ \Omega$$

ومن الجدول 4 معاوقة المرشح تساوي:

$$Z_F = 1.74 + j\,4.04$$

ومنه:

$$I_o = \frac{1.74+j4.04}{1.74+j4.04-j5.79}\times5\times\frac{j7.92/5}{j0.436\times5-j7.92/5} = 23.65\ A$$

$$I_F = \frac{-j5.75 \times 5}{1.74 + j4.04 - j5.79} = 11.7\ A$$

يوضح الشكل (5 - b) المخطط الشعاعي للتيارات I_o ، I_F.

يمثل هذا النموذج (المثال) حالة خاصة جداً. حيث فيه المعاوقة الكلية لمنبع القدرة (السعوية والتحريضية) ومعاوقة المرشح قريبتان من الرنين التفرع عند التردد التوافقي. وبالرغم إن الحالة المبينة خاصة جداً، إلا أنها توحي بضرورة إجراء اختبارات حذرة على تشغيل نظام منابع القدرة.

المعطيات الضرورية لتصميم المرشح Necessary Data for Filter Design:

عند تصميم مرشح تيار متناوب لابد من معرفة المعلومات التالية:

أ – من الضروري معرفة معاوقة مصدر القدرة لكل توافقية من التوافقيات لحساب تيار كل توافقية يمر عبر مصدر القدرة وعبر المرشح، وأيضاً لحساب جهد التوافقية على البارات.

ب– انحراف التردد عن القيمة النظامية. وقد حدد هذا الانحراف في معظم الدول المتقدمة بما لايزيد عن % 1 ±. ومعرفة ذلك ضروري من أجل تحديد مجال الموآلفة.

جـ– التشوه التوافقي على البارات قبل تركيب المرشح. وهذا ضروري لحساب تيارات التوافقيات العالية الكلية عبر المرشح.

د– قيمة تيار التوافقيات العالية من أجل مختلف أنظمة وشروط التشغيل.

هـ– سعة المكثفات في المرشح. ويجب الأخذ بالاعتبار التوفيق بين عملها كمكثفات قدرة عند التوافقية الأساسية لتحسين عامل استطاعة الشبكة وفعاليتها لامتصاص التوافقيات العالية.

و– شروط تشغيل النظام، وهي ضرورية لمعرفة التغيرات في ممانعة منبع القدرة وخلال الحالات العابرة.

تصميم عناصر المرشح Design of Filter Components:

يمكن اعتبار أجهزة الترشيح بمثابة سعة متغيرة بالمقارنة مع سعتها عند التردد الأساسي للشبكة (التوافقية الأساسية). كما أن تيار التوافقيات العالية الذي يسري عبر مكثف المرشح المصمم للعمل على التردد للشبكة يزيد من الجهد على طرفي هذا المكثف ومن الضياعات فيه.

يعطي جهد التوافقية n على طرفي المكثف بالعلاقة:

$$V_{cn} = \frac{X_{c1}}{n} I_n = \frac{1}{n}.\frac{I_n}{I_1} . V_{c1}$$

يضاف جهد هذه التوافقية إلى الجهد الأساسي $V_{c\,1}$ عند التردد الأساسي (n = 1) وبالتالي يجب أن تصمم عازلية المكثف بحيث تتحمل جهد التوافقية الأولى مضافاً إليه جهد التوافقيات العالية.

تضاف قدرة المكثف عند التوافقية (n) والمساوية:

$$Q_{cn} = \frac{1}{n}.\left(\frac{I_n}{I_1}\right)^2 . Q_{cI} \qquad (8)$$

إلى قدرة عند التوافقية الأساسية مسببة زيادة في الضياعات، حيث من الضروري عندها زيادة مساحة الإشعاع الحراري.

يعطي جهد التوافقية n على طرفي المفاعل بالعلاقة:

$$V_{l.n} = n . \frac{I_n}{I_1} V_{LI} \qquad (9)$$

والقدرة المخزنة في ملف المفاعل للتوافقية (n)

$$Q_{l.n} = n . \frac{(I_n)^2}{(I_1)} . Q_{LI} \qquad (10)$$

وعند تصميم مرشح للعمل على توافقيه محددة يجب الأخذ بالاعتبار ما يلي:

أ – يتناسب الفيض المغناطيسي للمفاعل مع التيار الكلي له (تيار التوافقية الأولى زائد التوافقيات العالية) لذلك يجب حساب قلب (نواة) المفاعل بحيث لايشبع عند القيمة العظمى للتيار.

ب– تزداد ضياعات المفاعل بسبب زيادة الجهد عند التوافقيات العالية. ولهذا يجب زيادة قطر النوافل من أجل تخفيف كثافة التيار وتقليل الضياعات.

جـ– التثبيت المتين للعناصر لمقاومة القوى الناجمة عن الجهود والتيارات العالية.

د– زيادة مساحة الإشعاع الحراري.

هـ– خلوصات إنتاجية محكمة للمكثفات والمفاعلات لتقليل انحراف الموآلفة إلى الحد الأدنى.

و– تحديد مقاطع النواقل بشكل جيد منعاً لزيادة السخونة.

ز– تخفيض كثافة الفيض المغناطيسي لنواة المفاعل بحيث لايحدث الإشباع.

حـ– تجديل النواقل وتخفيض كثافة التيار للحد من الضياعات الناجمة عن تيارات فوكو والأثر السطحي.

ط– تعيير المفاعلة خلال التصنيع وفقاً لقيمة المكثف المستخدم بغية الوصول إلى الحد الأدنى من عدم الموآلفة.

المراجع

1- T. J. E. MILLER: "Reactive Power Control In Electric Systems" John wiley. 1982

2- Cyril w. Laules: "Power Electaonics" Mc GRAW - Hill, 1993

3- A. S. AKPINAR - S. A. NASAR: "Harmonic Balance Analysis of the Subharmonic Ferroresonace". Electric Machines and Power Systems, Vol.18, No. 4 - 5, 1990.

4- A. Sowaied - M. Taleb: "Assessment of Power Converter Harmonics Electric Machines and Power Systems", Vol. 24 , No. 2, 1990

5- D. Carlson and others: "The Analysis and Measurement of Harmonics in vicinity of an HVDC itlverter". Electric Machines and Power Systems. Vol.ll, No. 6, 1986.

6- M. Beides - G. T. Heyat: "Power System Harmonics Estimation and Monitoring". Electric Machines and Power Systems, Vol. 20, No . 2, 1992