

الاختيار الآمن للمكثفات المستخدمة لتحسين عامل الاستطاعة

الدكتور فؤاد جبل*

(تاريخ الإيداع 14 / 8 / 2007. قُبل للنشر في 10/10/2007)

□ الملخص □

إن وجود المكثفات المستخدمة في تحسين عامل الاستطاعة وذات المفاعلة السعوية إلى جانب المفاعلة التحريضية المكافئة لنظام القدرة الذي يحتوي على توافقيات يزيد من احتمال حدوث حالة رنين تفرعي، مما قد يؤدي إلى تلف وانفجار وتخريب هذه المكثفات. بناء على ذلك فإنه يجب اختيار هذه المكثفات بعناية تامة بحيث يتم تجنب حدوث حالة الرنين ومن ثمة تجنب الأضرار الناتجة عنه. لذلك سوف أقدم ضمن هذا البحث طريقة عملية وسهلة التطبيق يمكن استخدامها عند اختيارنا لمكثفات تحسين عامل الاستطاعة بحيث يكون هذا الاختيار آمناً من حيث احتمال حدوث حالة الرنين. تعتمد هذه الطريقة على إنشاء مخطط يبين مناطق العمل الآمنة وغير الآمنة لعمل المكثفات المختارة، ويأخذ بالحسبان الشروط الحدية لتحميل المكثفات وبالاعتماد على قيمة دليل الرنين الذي يتحدد من خلال نسبة ممانعات التوافقيات إلى ممانعة التوافقية الأساسية ومن أجل قيمة محددة للتشوه الكلي للجهد يتم الحكم فيما إذا كان اختيار المكثفات آمناً أم لا. ولتوضيح هذه الطريقة أوردت ضمن البحث تطبيقاً على نموذج لنظم قدرة يبين خطوات تنفيذ هذه الطريقة.

كلمات مفتاحية: مكثفات - رنين تفرعي - التوافقيات - تحسين عامل الاستطاعة.

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

Safe Selection of Capacitor Banks Used for Power Factor Correction

Dr. Fouad Jabal*

(Received 14 / 8 / 2007. Accepted 10/10/2007)

□ ABSTRACT □

The presence of capacitors banks used for power factor correction besides the equivalent inductive reactance of power system which has harmonics increases the probability of the occurrence of parallel resonance causing harm and damage to these capacitors.

Therefore, this paper introduces an easy-to-use method for safe selection of power factor correction capacitors. The method depends on a chart that shows safe and non-safe working region of selected capacitors and takes into account the loading limits of capacitors. Knowing the resonance index, which is determined by the ratio of harmonic impedance to the basic system impedance and for a limited value of total harmonic distortion, we can decide that the selected capacitors are safe or not. To illustrate the method, practical examples were included in this paper.

Keywords: Capacitors, Parallel Resonance, Harmonics, Power Factor Correction.

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

مقدمة:

لتحسين أداء الشبكات الكهربائية الصناعية يلجأ عادة إلى ربط مكثفات على التفرع مع الأحمال بغية رفع عامل الاستطاعة، والتقليل من الاستطاعة الردية المنقولة عبر الشبكة والتي يحتاجها الحمل مما ينتج عنه تقليل في المفايد الحاصلة في عناصر الشبكات الكهربائية، وأيضاً التقليل في هبوطات الجهد مما ينتج عنه تحسين في قيمة الجهد عند هذه الأحمال.

في الآونة الأخيرة ازداد استخدام التجهيزات الكهربائية التي تعتمد في قيادتها على أنصاف النواقل (ثايرستورات - ديودات - PLC - Microprocessor -) والتي لها خصائص غير خطية (أي أنها بمثابة أحمال لاخطية) إلى جانب وجود أحمال أخرى مولدة للتوافقيات كالأفران القوسية، وتجهيزات اللحام الكهربائي، وأجهزة الإنارة الفلوريساننتية وغيرها، حيث تعد هذه الأحمال مصدر توليد رئيسي للتوافقيات العليا في الشبكات الكهربائية.

مع وجود هذه المكثفات ذات المفاعلة السعوية إلى جانب المفاعلة التحريضية المكافئة لنظام القدرة يزداد احتمال حدوث حالة رنين تفرعي، مما قد يؤدي إلى تلف وانفجار وتخريب هذه المكثفات .
بناء على ذلك فإنه يجب اختيار المكثفات بعناية تامة بحيث يتم تجنب حدوث حالة الرنين، ومن ثمة تجنب الأضرار الناتجة عنه.

لذلك سوف أقدم ضمن هذا البحث طريقة عملية وسهلة التطبيق يمكن استخدامها عند اختيارنا لمكثفات تحسين عامل الاستطاعة، بحيث يكون هذا الاختيار آمناً من احتمال حدوث حالة الرنين.

أهمية البحث وأهدافه:

يهدف هذا البحث أساساً لتقديم طريقة عملية وسهلة التطبيق عند اختيارنا لمجموعات المكثفات المستخدمة في تحسن عامل الاستطاعة بحيث يكون هذا الاختيار سليماً ويمنع حدوث حالة الرنين عند وجود التوافقيات العليا ومن ثمة تجنب تخريب هذه المكثفات.

طريقة البحث ومواده:

أنجز هذا البحث (في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية بجامعة تشرين) اعتماداً على المراجع العلمية التي تبحث في هذا المجال، حيث تم إنشاء مخطط يبين مناطق العمل الآمنة وغير الآمنة لعمل المكثفات اعتماداً على الشروط الحدية لتحميلها، وقد تمكنا من وضع الخطوات اللازمة لتنفيذ هذه الطريقة واستخلاص النتائج.
أصبح استخدام المكثفات التفرعية شائعاً في الشبكات الصناعية من أجل تحسين عامل الاستطاعة، ودعم مستوى الجهد فيها.

يجب الأخذ بالحسبان عند تصميم المكثفات احتمال حدوث حالة رنين بين مفاعلة المكثفات ومفاعلة النظام .
الطريقة العملية المتبعة والشائعة الاستخدام للتحقق فيما إذا كانت المكثفات المختارة تحقق حالة رنين مع مفاعلة نظام التغذية، هو إيجاد نسبة استطاعة القصر للنظام إلى استطاعة المكثفات [1] [2]، حيث يمكن تحديد تردد الرنين من خلال هذه النسبة، إلا أن الواقع العملي أثبت عدم دقة هذه الطريقة، وذلك لأن هذه العلاقة بنيت على الافتراض بأن المفاعلة التوافقية للنظام المتناسبة مع مفاعلة المركبة الأساسية تتحدد من خلال مستوى القصر، إلا أنه

لا توجد ضمانة على أن هذا الافتراض سيكون محققا من أجل أنظمة القدرة المرتبطة ببعضها بعضاً (شبكات الارتباط)، علاوة على ذلك لا يمكن تحديد الرنين من أجل جميع شروط تحقيقه.

خلافاً لما ورد أعلاه، هناك طرق أخرى تعتمد على دراسة جريان الاستطاعة التوافقية أو على دراسة المسح الترددي [3].

إن دراسة جريان الاستطاعة التوافقية معقد جداً، حيث يكون توضع مصادر توليد التوافقيات وخصائص هذه المصادر غير معروف، لذلك فإن الطريقة الأكثر ملاءمة هي تلك المعتمدة على المسح الترددي والتي يمكنها إظهار ترددات الرنين مع قيم مطال الممانعة المركبة (للنظام والمكثفات) المقابلة لهذه الترددات.

تعد هذه الطريقة سهلة التطبيق من الناحية العملية، ويمكن لأي مهندس القيام بها عند اختياره لمجموعة المكثفات. إلا أن هناك صعوبة رئيسية واحدة تواجه مستخدمي هذه الطريقة تتجسد في اتخاذ القرار النهائي من قبل المهندس المصمم ووفقاً لآثار التوافقيات على المكثفات المقترحة بعد حصوله على منحني الممانعة - تردد.

يمكن أن يتطابق أو لا يتطابق تردد الرنين مع تردد التوافقيات، وليس بالضرورة حتى عند التطابق أن تؤدي إلى مشاكل، حيث يمكن أن تقوم مقاومة النظام بعملية تخميد كبيرة نسبياً بالنسبة للرنين. وإذا لم يتطابق مع التردد التوافقي فإن تخميد النظام من المحتمل أن يكون صغيراً جداً، عندئذ ستستمر مشكلة الرنين.

توجد علاوة على ذلك، صعوبة أخرى تتجسد في كيفية تحديد مدى التقارب بين تردد الرنين وتردد التوافقية، فإذا أبدى النظام عدة ترددات للرنين فإنه يصبح من الصعب تحديد قيمة التوافقية المؤثرة في المكثفات.

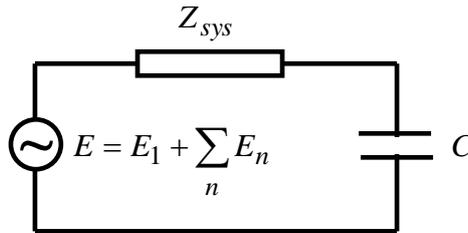
سنقوم خلال هذا البحث بمعالجة المشاكل المذكورة أعلاه واقتراح طريقة عملية وسهلة التطبيق لإيجاد تردد الرنين تعتمد على المخططات البيانية، بحيث يمكننا تحديد احتمالية تعرض المكثفات المراد تركيبها لظاهرة الرنين أم لا من خلال فحص نتائج المسح الترددي المقابلة للمخطط.

إن الأساس الذي تبنى عليه هذه المنحنيات يعتمد على تحديد دليل للرنين التوافقي كتابع إلى نسبة سماحية التوافقية ذات المرتبة n إلى سماحية التردد الأساسي.

إذا وقعت قيمة هذا الدليل ضمن المجال الآمن المبين على المخطط، فإننا لا نحتاج إلى أية دراسات تحليلية أخرى، وتعمل مجموعة المكثفات المختارة عندها بموثوقية عالية. أما إذا كانت قيمة الدليل واقعة خارج المجال الآمن، عندها ينصح بإجراء دراسات تحليلية وتفصيلية للتوافقيات.

1. مخطط الرنين التوافقي:

يبين الشكل (1) دائرة ثيفينين المكافئة لنظام قدرة عند مكان توضع المكثفات، حيث تمثل E جهد الدارة المفتوحة و تمثل Z_{sys} ممانعة ثيفينين.



الشكل (1) الدارة المكافئة لنظام قدرة مبسط مع مجموعة المكثفات

يتم تحديد Z_{sys} بواسطة دراسات المسح الترددي، وتتشكل الممانعة التوافقية الكلية من الوصل التسلسلي لممانعة النظام وممانعة المكثفات .

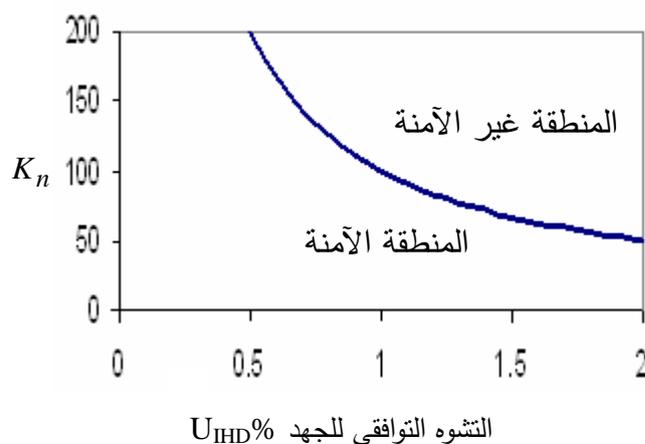
يتم حساب السماحية التوافقية الكلية عند كل توافقية، وبناء على ذلك تحدد نسبة سماحية التوافقية ذات المرتبة n (Y_n) إلى السماحية الأساسية (Y_1) قيمة دليل الرنين التوافقي.

$$K_n = \frac{Y_n}{Y_1} \quad ; \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

حيث المحور الأفقي لمنحني (مخطط) الرنين المقترح يمثل (IHD - Individual Harmonic

Distortion) مستوى التشوه قبل تركيب المكثفات والمحور الشاقولي يمثل دليل الرنين (K_n).

يبين الشكل (2) مخططاً مبسطاً يحتوي فقط على منحني واحد، حيث يظهر على الشكل المجالين الآمن (أسفل المنحني) وغير الآمن (أعلى المنحني) .



الشكل (2) مخطط مبسط للمنحني الممثل لدليل الرنين كتابع لـ $U_{IHD} \%$

تم إنشاء المنحني الفاصل بين المجالين الآمن وغير الآمن باستخدام الشروط الحدية وتحميل المكثفات [4]. لذلك تم تطوير المخطط المقترح ضمن هذا البحث من وجهة نظر المكثفات المعتبرة. وقد تم تضمين الجزء التالي من البحث طريقة استخراج وإنشاء هذا المنحني .

2: المخطط المقترح:

وفقاً للشكل (1) يعبر عن الجهد المكافئ للنظام متضمناً التوافقيات كما يلي :

$$E = E_1 + \sum_n E_n \quad (2)$$

حيث E_n تمثل المطال لـ E_n المقترح من قبل IEE - 519 لمستوى جهد $(V \leq 69 \text{ kV})$ [5] [6] .

الجدول (1) قيم $IHD\%$ و $THD\%$ (Total Harmonic Distortion) الحدية وفقاً لسويات الجهد

PCC Voltage	Individual Harmonic Distortion (%)	THDv (%)
$\leq 69 \text{ kV}$	3.0	5.0
69 – 161 kV	1.5	2.5
$\geq 161 \text{ kV}$	1.0	1.5

حيث :

$$E_n = \alpha_n E_1 ; \alpha_n \leq 3 \% \quad (3)$$

المركبة الأساسية لتيار وجهد المكثف :

$$\begin{aligned} I_{C1} &= E_1 Y_1 \\ V_{C1} &= \frac{I_{C1}}{\omega C} = \frac{E_1 Y_1}{\omega C} \end{aligned} \quad (4)$$

حيث :

 ω : التردد الزاوي الأساسي بـ $Rad./Sec.$

C : سعة المكثف بـ F .

 Y_1 : السماحية الأساسية بـ S .

ومن أجل توافقية ذات مرتبة n فإن تيار وجهد هذه التوافقية يساوي :

$$\begin{aligned} I_{Cn} &= E_n Y_n \\ V_{Cn} &= \frac{I_{Cn}}{n \omega C} = \frac{E_n Y_n}{n \omega C} \end{aligned} \quad (5)$$

حيث :

 Y_n : سماحية التوافقية n .

$$Y_n = \left| \frac{1}{Z_{sys(n)} + Z_{cap(n)}} \right| = \left| \frac{1}{R_{sys(n)} + jX_{sys(n)} - \frac{1}{jn\omega C}} \right| \quad (6)$$

يحدث الرنين التوافقي إذا تحقق الشرط التالي :

$$X_{sys(n)} = \frac{1}{n\omega C} \quad (7)$$

حيث تصبح السماحية المكافئة للنظام عند هذا الشرط كما يلي :

$$Y_n = \frac{1}{R_{sys(n)}} \quad (8)$$

تبين العلاقة (8) أن Y_n تصبح ذات قيمة كبيرة عند تردد الرنين، وأن مقاومة النظام تلعب دورا كبيرا في تخميد وتقليل التيار التوافقي. لهذا نجد أنه ليس بالضرورة أن يؤدي حدوث رنين إلى تخريب المكثفات. لذلك فإنه من الضروري تحديد حالة الرنين الأكثر قساوة. يبين الجدول (2) القيم الحدية لتحميل المكثفات [4].

الجدول (2) القيم الحدية لتحميل المكثفات

الكمية	الوصف	القيمة العظمى
S	الاستطاعة الظاهرية للمكثف $= I_{r.m.s} V_{r.m.s}$	135 %
$V_{r.m.s}$	القيمة الفعالة لجهد المكثف	110 %
V_{peak}	القيمة العظمى لجهد المكثف	120 %
$I_{r.m.s}$	القيمة الفعالة لتيار المكثف	180 %

يمكن حساب دلائل تحميل المكثف من خلال العلاقتين (4) و (5) كما يلي :

$$I_{r.m.s} = \sqrt{I_{C1}^2 + \sum_n I_{Cn}^2} = \sqrt{(E_1 Y_1)^2 + \sum_n (E_n Y_n)^2} \quad (9)$$

$$V_{r.m.s} = \sqrt{V_{C1}^2 + \sum_n V_{Cn}^2} = \frac{1}{\omega C} \sqrt{(E_1 Y_1)^2 + \sum_n \left(\frac{E_n Y_n}{n}\right)^2} \quad (10)$$

$$S = V_{r.m.s} I_{r.m.s} \\ = \frac{1}{\omega C} \sqrt{(E_1 Y_1)^2 + \sum_n \left(\frac{E_n Y_n}{n}\right)^2} \times \sqrt{(E_1 Y_1)^2 + \sum_n (E_n Y_n)^2} \quad (11)$$

إن القيمة الأعظمية في أسوأ الحالات للجهود المطبق على المكثف ستكون مساوية للمجموع الجبري للمركبة الأساسية والمركبات التوافقية، أي :

$$V_{peak} = \sqrt{2} V_{C1} + \sum_n \sqrt{2} V_{Cn} = \frac{\sqrt{2}}{\omega C} \left[E_1 Y_1 + \sum_n \frac{E_n Y_n}{n} \right] \quad (12)$$

ووفقا للجدول (2) يمكننا وضع الشروط التالية بحيث يكون المكثف واقعا ضمن مجال العمل الآمن :

$$S \leq 135 \% S_{rated} \quad (13)$$

$$V_{r.m.s} \leq 110 \% V_{r.m.s, rated} \quad (14)$$

$$V_{peak} \leq 120 \% V_{peak, rated} \quad (15)$$

$$I_{r.m.s} \leq 180 \% I_{r.m.s, rated} \quad (16)$$

حيث :

$$S_{rated} = V_{C1} I_{C1} = \frac{(E_1 Y_1)^2}{\omega C} \quad (17)$$

$$V_{r.m.s, rated} = V_{C1} = \frac{E_1 Y_1}{\omega C} \quad (18)$$

$$V_{peak, rated} = \sqrt{2} V_{C1} = \frac{\sqrt{2} E_1 Y_1}{\omega C} \quad (19)$$

$$I_{r.m.s, rated} = I_{C1} = E_1 Y_1 \quad (20)$$

بدمج العلاقة (3) بالعلاقات (9 - 20) وإيجاد دليل الرنين التوافقي كما في العلاقة (1) نحصل على:

$$\sqrt{1 + \sum_n \left(\frac{\alpha_n}{n} K_n \right)^2} \times \sqrt{1 + \sum_n (\alpha_n K_n)^2} \leq 135 \% \quad (21)$$

$$\sqrt{1 + \sum_n \left(\frac{\alpha_n}{n} K_n \right)^2} \leq 110 \% \quad (22)$$

$$1 + \sum_n \left(\frac{\alpha_n}{n} K_n \right) \leq 120 \% \quad (23)$$

$$\sqrt{1 + \sum_n (\alpha_n K_n)^2} \leq 180 \% \quad (24)$$

تتحول المسألة الآن إلى كيفية إيجاد العامل K_n الذي يحقق شروط المتراجحات المبينة أعلاه، حيث سنبين فيما يلي طريقة تقريبية لتقدير قيمة K_n من أجل ثلاث حالات مختلفة الشروط وهي:

A. حالة وجود مركبة توافقية وحيدة:

في حال وجود مركبة وحيدة للتوافقيات (أي توافقية من التوافقيات التي عددها n) عندها تصبح العلاقات السابقة كما يلي:

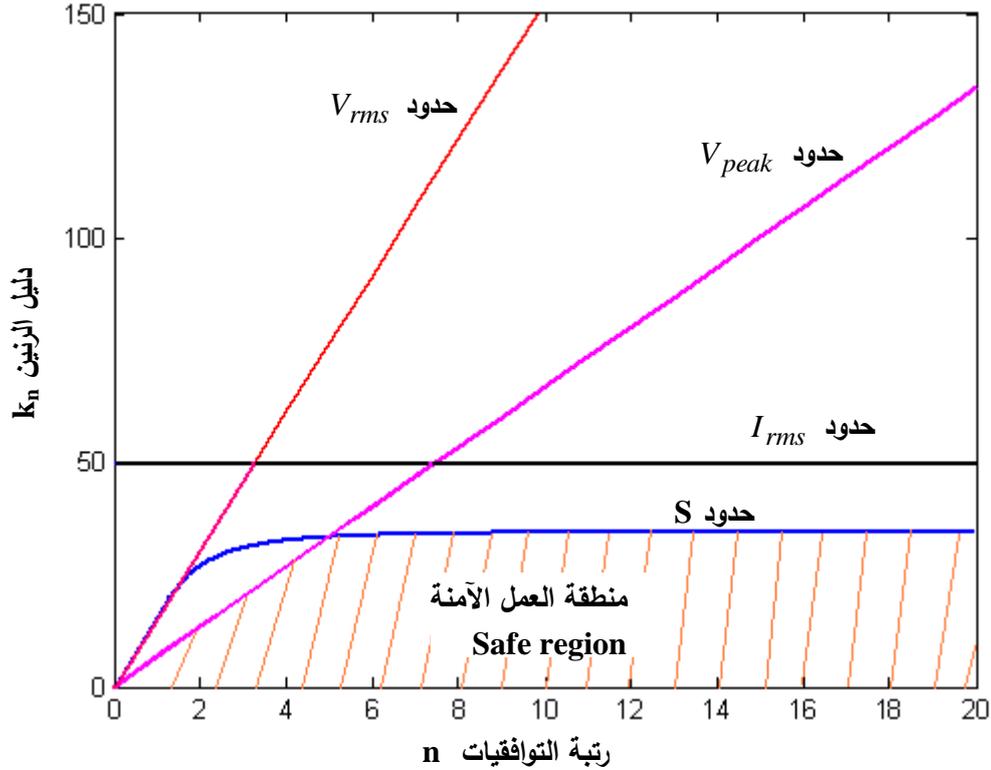
$$\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_n}{n} K_n\right)^2} \times \sqrt{1 + (\alpha_n K_n)^2} \leq 135 \% \quad (25)$$

$$\sqrt{1 + \left(\frac{\alpha_n}{n} K_n\right)^2} \leq 110 \% \quad (26)$$

$$1 + \frac{\alpha_n}{n} K_n \leq 120 \% \quad (27)$$

$$\sqrt{1 + (\alpha_n K_n)^2} \leq 180 \% \quad (28)$$

في حال عدم توفر أية معلومات حول التشوه التوافقي للجهد (V_{IHD}) عندها يمكن الأخذ بالاعتبار القيمة العظمى لـ E_n ، حيث $\alpha_n = 3\%$. يتم الحصول على الدليل K_n بحل المعادلات من (25) وحتى (28). يبين الشكل (3) العامل K_n كتابع للتوافقيات.



الشكل (3) دليل الرنين كتابع لرتبة التوافقيات

يمكن أن نستنتج من الشكل (3) ما يلي:

1. يعطي $I_{r.m.s}$ قيمة ثابتة لدليل الرنين التوافقي.
2. حد الدليل المقابل لـ $V_{r.m.s}$ هو دائما أكبر من الحد المقابل لـ V_{peak} .
3. بالقرب من التوافقية الخامسة (5) يكون لـ S و V_{peak} القيمة نفسها تقريبا للدليل التوافقي. ومن أجل التوافقيات الأعلى من التوافقية الخامسة يصبح حد S هو العامل المحدد للرنين التوافقي ويعد حداً ثابتاً تقريبا لجميع التوافقيات الأعلى من التوافقية الخامسة.

بما أن نظام القدرة نادرا ما يحتوي توافقيات أدنى من الخامسة، لذلك فإن حد الدليل المعطى من قبل حدود S عند التوافقية الخامسة، وهو يمثل أسوأ حالة، يمكن اعتباره بمثابة بداية عامة للحالة التي تأخذ بالحسبان توافقية واحدة .

B. حالة وجود عدة مركبات توافقية:

في حال وجود عدة توافقيات، فإنه يمكن تعديل العلاقات من (21) وحتى (24) وبحيث يبقى لـ K_n الحد نفسه وليكن K أو بكلمة أخرى، فإنه يصبح في حالة رنين عند جميع الترددات التوافقية وان نسبة السماحيات هي نفسها من أجل جميع الترددات التوافقية، حيث تصبح المعادلات السابقة كما يلي:

$$\sqrt{1 + K^2 \sum_n \left(\frac{\alpha_n}{n} \right)^2} \times \sqrt{1 + K^2 \sum_n (\alpha_n)^2} \leq 135 \% \quad (29)$$

$$\sqrt{1 + K^2 \sum_n \left(\frac{\alpha_n}{n} \right)^2} \leq 110 \% \quad (30)$$

$$1 + K \sum_n \frac{\alpha_n}{n} \leq 120 \% \quad (31)$$

$$\sqrt{1 + K^2 \sum_n (\alpha_n)^2} \leq 180 \% \quad (32)$$

من أجل جميع التوافقيات المعتبرة فإن المعادلات أعلاه ستبقى على حالها أيضا. بما أن معظم التوافقيات الهامة التي تظهر في نظام القدرة هي التوافقيات الخامسة والسابعة والحادية عشرة والثالثة عشرة [7]، فإنه يمكن استنتاج القيمة الحدية لـ K بدون أن يكون لدينا معرفة مسبقة عن قيمة تشوه جهد النظام، حيث حددت En كأسوأ حالة.

الجدول (3) حدود دليل الرنين في حال وجود توافقيتين

رتبة التوافقية	5	7	11	13
5	-	19.44	22.92	24.07
7		-	28.52	30.33
11			-	39.72
13				-

يمكن للجدول (3) أن يفسر ما يلي:

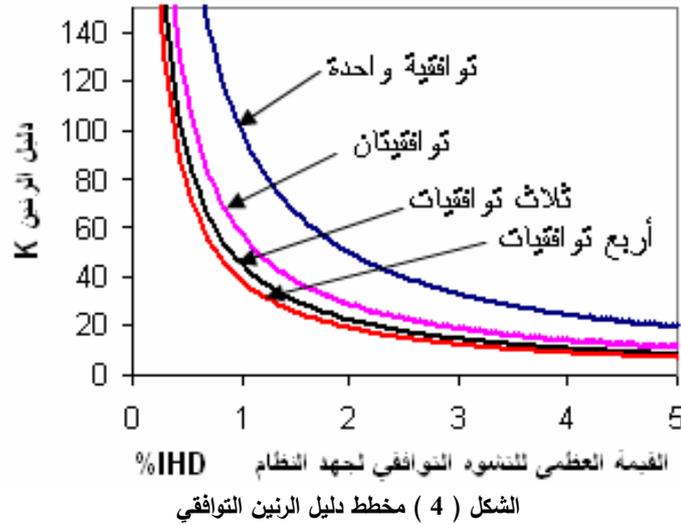
إذا كان النظام في حالة رنين عند التوافقيات 5 و 7 ومن أجل النسبة نفسها kn، فإن حد الدليل هو 19.44. وإذا كان بحالة رنين عند التوافقيات 7 و 11 فإن حد الدليل هو 28.52 وهكذا، حيث نرى أنه كلما ازدادت قيمة رتبة التوافقيات يصبح حد الدليل أكبر.

أما في حالة وجود ثلاث توافقيات، فإنه يتم حسابها على نحو مشابه لحالة وجود توافقتين، حيث الحالة الأعم هو وجود ثلاث توافقيات 5 و 7 و 11، وقد وجد في هذه الحالة أن الدليل k يساوي 15.37 وحالة وجود أربع توافقيات فإنه يساوي 13.05. نلاحظ أنه كلما ازداد عدد التوافقيات المتواجدة في نظام القدرة، كلما انخفض دليل الرنين kn وهذا ما يفسر ازدياد احتمال حدوث رنين مع زيادة عدد التوافقيات.

C. حالة وجود مستويات مختلفة في تشوه الجهد التوافقي:

في الفقرتين السابقتين تم الحصول على النتائج آخذين بالحسبان أسوأ حالة لتشوه الجهد التوافقي والمقابلة لتلك المعطاة في الجدول IEEE-519. ومن أجل تشوهات أعلى للجهد فإن ذلك سيسبب تيارات توافقية أكبر في المكثفات، ومن ثمة قيمة أخفض لحدود الدليل والعكس صحيح.

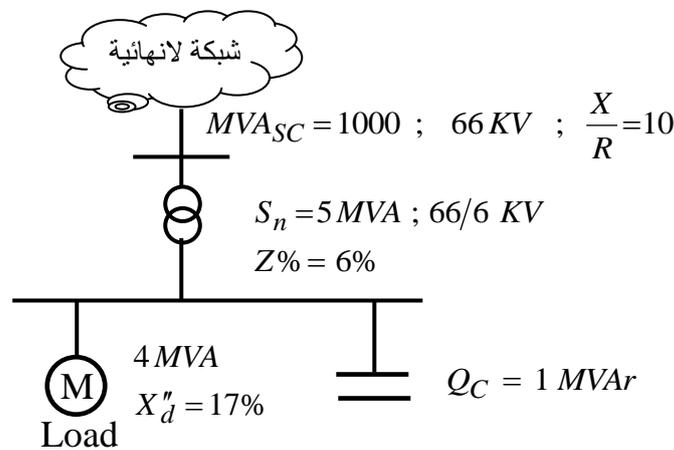
لذلك بتغيير قيمة تشوه الجهد التوافقي نحصل على مجموعة قيم لحدود الدليل K كما هو مبين في الشكل (4)، حيث افترضنا عند رسم هذا المنحنى بأن جميع التوافقيات لها القيمة نفسها لـ α ، حيث يمثل كل منحنى الحالة الأسوأ للتوافقيات الأساسية.



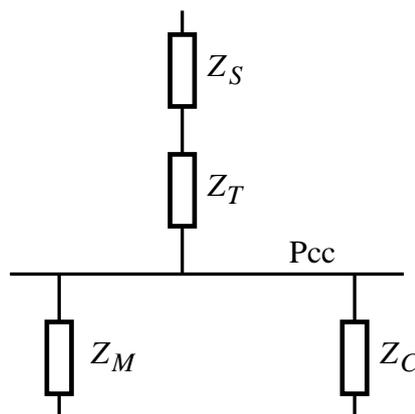
يبين الشكل (4) مخططاً لمنحنيات الرنين التوافقي عند استخدام المكثفات التفرعية، ومن أجل سويات جهود واقعة دون 69 kV، حيث نلاحظ من الشكل (4) أنه كلما ازداد عدد التوافقيات الموجودة في نظام القدرة انخفض دليل الرنين .

3 - تطبيق:

- يعد المخطط المبين بالشكل (4) سهل التطبيق والاستخدام، حيث نلخص خطوات تنفيذه بالنقاط التالية:
- (1) إيجاد الممانعة التوافقية لدارة ثيفينين المكافئة للنظام بدراسة المسح الترددي.
 - (2) حساب دليل الرنين التوافقي للنظام ولكل توافقية.
 - (3) إيجاد تشوه جهد ثيفينين للنظام، وللتوافقيات الموجودة والسائدة. فإذا لم تكن هذه المعلومات متوفرة يؤخذ مساوياً لـ 3% [6].
 - (4) إيجاد حد الدليل الموافق لتشوه جهد النظام من خلال المنحنيات المبينة بالشكل (4).
 - (5) مقارنة دلائل الرنين المحسوبة بقيم الدلائل الحدية والتقريب بناء على ذلك فيما إذا كانت هناك مشاكل ناتجة عن الرنين التوافقي.
- سنأخذ نظام القدرة المبين في الشكل (5) ويفرض أن ممانعة الأساس تساوي $S_{base} = 100 MVA$ وأن الحمل مكون من مجموعة من المحركات التحريضية باستطاعة $4 MVA$ ، واستطاعة المكثفات اللازم ربطها تساوي $Q_C = 1 MVar$.



الشكل (5) نظام القدرة المدروس



الشكل (6) الدارة المكافئة للنظام

لتبيان فيما إذا كان اختيار المكثفات آمناً أم لا سنقوم بالإجراءات التالية:

1. إيجاد الممانعة المكافئة للنظام عند نقطة وصل المكثفات وعند التردد الأساسي وعند ترددات بعض التوافقيات، حيث تم تمثيل ممانعات الشبكة كما هو مبين بالشكل (6).

أ- ممانعة المصدر Z_S

تم اختيار ممانعة الأساس $S_{base} = 100 \text{ MVA}$ ومنه :

$$Z_{S(p.u)} = \frac{S_{base}}{S_{S.C}} = \frac{100}{1000} = 0.1 \text{ p.u}$$

$$R_{S(p.u)} = \frac{Z_{S(p.u)}}{\sqrt{\left(\frac{X}{R}\right)^2 + 1}} = \frac{0.1}{\sqrt{(10)^2 + 1}} = 0.01 \text{ p.u}$$

حيث $\frac{X}{R} = 10$ وفقا للمرجع [8]

$$Z_{S(p.u)} = \sqrt{R_S^2 + X_S^2} \cong 0.0999 \text{ p.u} \quad X_{S(p.u)} = R_S \left(\frac{X}{R}\right) = 0.01 \times 10 = 0.1 \text{ p.u}$$

وبفرض أن ممانعة المصدر لا تتغير مع تردد التوافقيات .

ب- ممانعة المحول Z_T

$$Z_{T(p.u)} = \frac{Z\% S_{base}}{S_T} = \frac{0.06 \times 100}{5} = \frac{6}{5} = 1.2 \text{ p.u}$$

حيث $\frac{X}{R} = 12$ وفقا للمرجع [8]

$$R_{T(p.u)} = \frac{Z_{T(p.u)}}{\sqrt{\left(\frac{X}{R}\right)^2 + 1}} = \frac{1.2}{\sqrt{(12)^2 + 1}} = 0.0996 \text{ p.u}$$

$$X_T = R_T \cdot \frac{X}{R} = 1.1952 \text{ p.u}$$

وقيمة مفاعلة المحول ومقاومته بدلالة تردد التوافقيات تساوي :

$$R_{T(n)} = K' \cdot R_T$$

$$X_{T(n)} = n \cdot X_T$$

حيث: X_T ; R_T مقاومة و مفاعلة المحول عند التردد الأساسي .

n رتبة التوافقيات .

K' عامل الضرب للمقاومة، حيث وفقا لـ [8] ولبعض التوافقيات يساوي :

n	5	7	11	13
K'	4	6	12	17

ت- ممانعة المكثف X_C

$$X_{C(p.u)} = -\frac{S_{base}}{MVA_r} = -\frac{100}{1} = -100 \text{ p.u}$$

تهمل المقاومة، وقيمة مفاعلة المكثف عند تردد التوافقيات المختلفة تساوي :

$$X_{C(n)p.u} = \frac{X_C \text{ p.u}}{n}$$

ث- ممانعة المحركات

$$X_{M(p.u)} = \frac{X_d'' S_{base}}{S_M} = \frac{0.17 \times 100}{4} = 4.25 \text{ p.u}$$

حيث $\frac{X}{R} = 28$ وفقا للمرجع [8]

$$R_{M(p.u)} = \frac{X_{M(p.u)}}{\frac{X}{R}} = \frac{4.25}{28} = 0.15 \text{ p.u}$$

وقيمة مفاعلة المحرك ومقاومته بدلالة تردد التوافقيات تساوي :

$$R_{M(n)} = n \cdot R_M$$

$$X_{M(n)} = n \cdot X_M$$

ج- يتم حساب الممانعة المكافئة للنظام Z_{sys} وبالتالي Y_{sys} عند التردد الأساسي والترددات الأخرى للتوافقيات (الخامسة والسابعة والحادية عشر والثالثة عشر) وهي مدونة في الجدول (4)، كما تم أيضا حساب دليل الرنين (K) عند هذه التوافقيات وفقا لما هو مبين في الجدول نفسه.

الجدول (4) نتائج الحساب

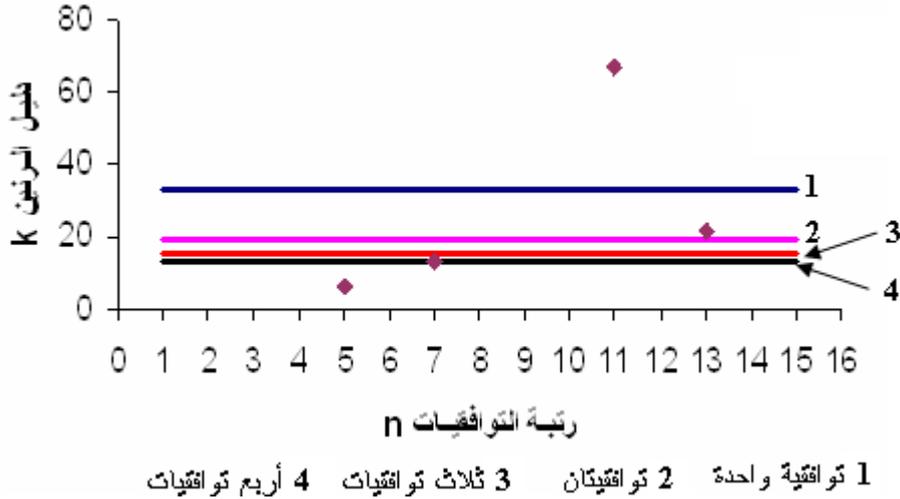
K	Zsys	n
1	99.0069 2	1
6.48085 8	15.2768 2	5
12.8499	7.70487 6	7
66.9179 2	1.47952 8	11
21.3089 8	4.64625 4	13

2. يتم رسم المنحنيات الحدية التي تبين قيمة دليل الرنين (K) كتابع للتوافقيات، حيث اعتبر أن التشوة للجهود (V_{ITH}) غير معروف، لذلك تم أخذ القيمة العظمى المسموح بها لمستوي جهد ($V \leq 69 \text{ KV}$) [5] والتي تساوي $\alpha_n \leq 3\%$. وقد تم رسم المنحنيات وفقا لهذه القيمة. كما تم تحديد قيمة الدليل المحسوب والمقابل للتوافقيات المعتمدة على المخطط نفسه المبين في الشكل (7).

نلاحظ من خلال الشكل (7) ما يلي:

1. الرنين التوافقي الناتج عن وجود التوافقية الخامسة لن يسبب أية مشاكل، حيث قيمة دليل الرنين التوافقي المقابل لهذه التوافقية هو أقل من حد الدليل التوافقي المقابل لحالة وجود أربع توافقيات.

2. التوافقية ذات الرتبة السابعة واقعة على الحد الفاصل المقابل لوجود التوافقيات الأربع.
3. أما التوافقية الحادية عشرة فهي الأكثر خطورة وهي ستسبب رنيناً حتى ولو كانت بمفردها، لذلك يجب إجراء تحليل توافقي مفصل للنظام أو اتخاذ الإجراءات المناسبة كوضع مرشح لهذه التوافقية .
4. التوافقية الثالثة عشرة لا تشكل أي خطر إذا كانت بمفردها، إلا أنه يظهر الخطر عند وجودها مع توافقيات أخرى.



الشكل (7) يبين تأثير التوافقيات الموجودة في النظام المدروس

على نحو عام يساعدنا هذا المخطط على التحديد السريع للتوافقيات الأكثر خطورة في النظام والتي يجب تفاديها عن طريق استخدام المرشحات أو إعادة اختيار المكثفات بحيث تتجنب حدوث رنين تفرعي في النظام، وتجنب المشاكل الناتجة عن حالة حدوث الرنين .

لقد تم إنشاء هذه المنحنيات بالأخذ بالحسبان القيم الحدية لـ (IHD)، إلا أنه يمكن إنشاؤها إذا كانت قيمة الـ (IHD) معروفة والتي هي أخفض من القيم الحدية، حيث وكما نلاحظ من العلاقات (25 - 28) أنه كلما انخفضت قيمة الـ (IHD) ارتفعت قيمة دليل الرنين (k) ومن ثمة يقل احتمال حدوث رنين تفرعي وتصبح المكثفات المختارة أكثر أماناً.

الاستنتاجات والتوصيات:

تم اقتراح دليل الرنين التوافقي ضمن هذا البحث للتقدير السريع للرنين التفرعي الناتج عن تركيب المكثفات التفرعية في نظام القدرة.

يعطي هذا المخطط العلاقة بين الدليل وتشوه الجهد عند بار المكثفات. تتحدد هذه العلاقة بالمنحني الفاصل في المخطط الممثل لتشوه الجهد - دليل الرنين.

نلاحظ أنه يجب إجراء تحليل توافقي مفصل للنظام عندما يقع دليل الرنين التوافقي داخل المنطقة الخطرة. أما في المنطقة الآمنة فيمكن للمصمم أن يتفادى التكاليف الباهظة اللازمة للدراسات التوافقية المفصلة. يوضح المثال أنه يمكن تطبيق هذا المخطط مباشرة.

أوصي بأن يتم وعلى نحو مشابه إنشاء منحنيات أخرى خاصة بسويات جهد أخرى.

المراجع:

1. *IEEE Recommended Practice and requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, IEEE Standard 519-1992, Published by IEEE ,1992.
2. Trans-Coil, Inc. *Meeting IEEE 519-1992 Harmonic Limits*. 25.3.2007. <www.transcoil.com>.
3. Control Techniques. *Harmonics Guide*.11.4.2007.<www.controltechniques.com>.
4. *IEEE Guide for Application of Shunt Power Capacitors* , IEEE Standard 1036-1992, ISBN 0-7381-0376-4, 1992.
5. HERBERT, L.G. *Improvement of Resonant Harmonic Filter Effectiveness in The Presence of Distribution Voltage Distortion*. Dissertation of Ph.degree. Louisiana State University, 2002,122.
6. Abu Dhabi Distribution Company, *Limits for Harmonics in the Electricity Supply System*, Version 1.0 30th November 2005,19.
7. ENRIQUE,A. ; MANUEL,M. *Power Systems Harmonics*. 2nd.ed.,John Willey & Sons, Inc New York & London,2002,365.
8. محمد، كاميليا. *التوافقيات في الشبكات الكهربائية*، منشورات شركة توزيع كهرباء الإسكندرية، مصر، 1994، 324 .