

PEA2502 LABORATÓRIO DE ELETRÔNICA DE POTÊNCIA

COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS

W. KAISER 02/2009

1. OBJETIVOS

Análise e comprovação experimental de um compensador estático monofásico para pequenas potências, constituído de um capacitor fixo e indutores controlados a tiristores.

2. INTRODUÇÃO

Os compensadores estáticos são utilizados em instalações de corrente alternada para corrigir o fluxo de reativos provocado por cargas reativas indutivas e/ou capacitivas. Em sistemas de potência encontram aplicações na regulação de tensão em barras, compensação de reativos, balanceamento de cargas e estabilização de sistemas interligados. Em instalações industriais pode-se citar a correção do fator de potência e a redução de oscilações de tensão, como por exemplo o "flicker" provocado por fornos a arco.

A compensação pode ser realizada de duas formas: direta e indireta. Na compensação direta os capacitores são ligados através de chaves estáticas (utilizando tiristores em anti-paralelo) à fase, cujo fator de potência (indutivo) se deseja compensar.

Os capacitores, mantidos previamente carregados, são chaveados quando a tensão na fase passa pelo seu máximo, evitando-se assim picos de corrente no capacitor. A principal desvantagem desse método é o controle descontínuo do fator de potência devido a variação discreta no valor das capacitâncias inseridas. Na compensação indireta um reator é ligado à fase, cujo fator de potência se deseja compensar, através de chaves estáticas (tiristores em anti-paralelo).

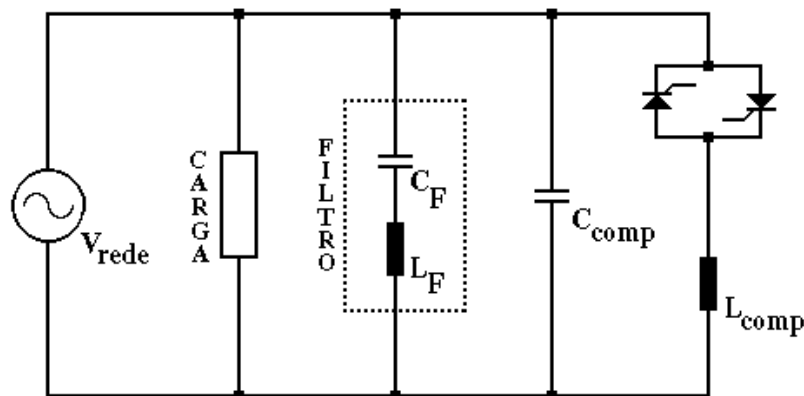


Fig. 1 - Compensação mista

Na compensação mista, e que será analisada nesta experiência, o fator de potência de uma carga indutiva é supercompensado, ou seja, torna-se capacitivo, através de um banco de capacitores. O controle de reativos é efetuado por um arranjo de indutores, ligados em

paralelo com o banco de capacitores fixo através de chaves estática, conforme mostra a fig. 1. O chaveamento pode ser realizado em qualquer instante, sem picos de corrente, permitindo um controle contínuo do fator de potência.

A principal desvantagem desse método é a distorção da forma de onda da corrente de alimentação (soma das correntes da carga, dos capacitores e do indutor), tornando-se necessária a instalação de filtros para redução do nível de harmônicas. Em instalações de potência, é uma prática comum a implementação de filtros sintonizados para as harmônicas de ordens mais baixas utilizando-se uma parte do banco de capacitores fixo.

O circuito utilizado na experiência é mostrado na fig. 2.

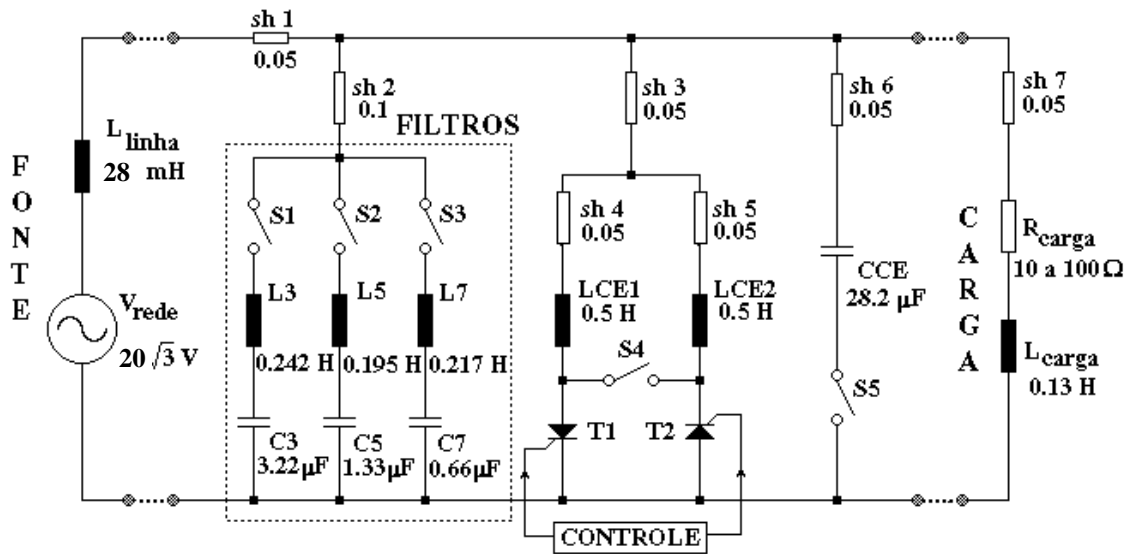


Fig. 2 - Circuito de potência do compensador estático

3. ARRANJO EXPERIMENTAL

O arranjo experimental mostrado na fig. 2 permite analisar duas configurações de compensação indireta: a) indutor controlado por chave bidirecional (chave S4 FECHADA); b) dois indutores controlados individualmente por chaves unidirecionais (chave S4 ABERTA).

3.1 Indutor controlado por chave bidirecional (Chave 4 FECHADA)

A chave bidirecional é constituída por dois tiristores em anti-paralelo. O circuito de controle fornece pulsos de disparo com ângulo de atraso α , medido a partir da passagem por zero da tensão da rede (vide fig. 3), ajustável através de um potenciômetro. A corrente no ramo indutivo para $\pi/2 < \alpha < \pi$ é dada por:

$$i(t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} V}{\omega \cdot L'} \cdot [\cos \alpha - \cos \omega \cdot t] & \pi - \alpha < \omega \cdot t < 2\pi - \alpha \\ \frac{\sqrt{2} V}{\omega \cdot L'} \cdot [-\cos \alpha - \cos \omega \cdot t] & 0 < \omega \cdot t < \pi - \alpha \text{ e } \pi + \alpha < \omega \cdot t < 2\pi \end{cases} \quad (1)$$

sendo:

- ω - frequência angular da rede
- L' - indutância equivalente ($LCE1/LCE2$) = $LCE1/2 = LCE2/2$
- V - valor eficaz da tensão de alimentação
- α - ângulo de disparo da chave estática medido em relação a passagem por zero da tensão da fonte.

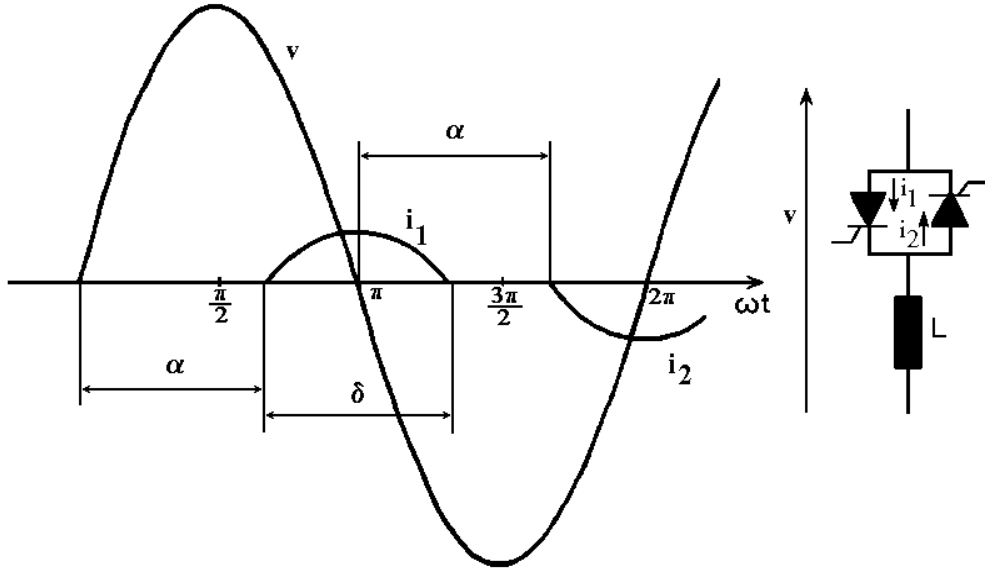


Fig. 3 - Formas de onda da corrente no ramo indutivo - chave bidirecional

O valor eficaz da componente fundamental da corrente do indutor controlado vale:

$$I_{\text{RMS-F}} = \frac{V}{\omega \cdot L'} \cdot \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \quad \pi/2 < \alpha < \pi \quad (2)$$

e o ângulo de condução σ de cada tiristor é dado por $\sigma = 2\pi - 2\alpha$. A equação acima pode ser reescrita na forma $I_{\text{RMS-F}} = V_{\text{RMS-F}} \cdot B_{\text{F-bi}}(\alpha)$, onde $B_{\text{F-bi}}(\alpha)$ (vide fig. 4) é a susceptância do compensador levando em conta apenas a componente fundamental, ou seja:

$$B_{\text{F-bi}}(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi \cdot \omega \cdot L'} = \frac{G_{\text{F-bi}}(\alpha)}{\omega \cdot L'} \quad \pi/2 < \alpha < \pi \quad (3)$$

O valor eficaz total I_{RMS} da corrente no indutor é dado por

$$I_{\text{RMS-tot}} = \frac{V}{\omega \cdot L'} \cdot \sqrt{\frac{(2\pi - 2\alpha)(2 + \cos 2\alpha) + 3\sin 2\alpha}{\pi}} \quad \pi/2 < \alpha < \pi \quad (4)$$

Da mesma forma pode se expressar a corrente na forma $I_{\text{RMS-tot}} = V_{\text{RMS-tot}} \cdot B_{\text{bi}}(\alpha)$, onde $B_{\text{bi}}(\alpha)$ (vide fig. 4) é a susceptância do compensador levando em conta o valor eficaz da corrente, ou seja:

$$B_{\text{bi}}(\alpha) = \frac{1}{\omega \cdot L'} \cdot \sqrt{\frac{(2\pi - 2\alpha)(2 + \cos 2\alpha) + 3\sin 2\alpha}{\pi}} = \frac{G_{\text{bi}}(\alpha)}{\omega \cdot L'} \quad \pi/2 < \alpha < \pi \quad (5)$$

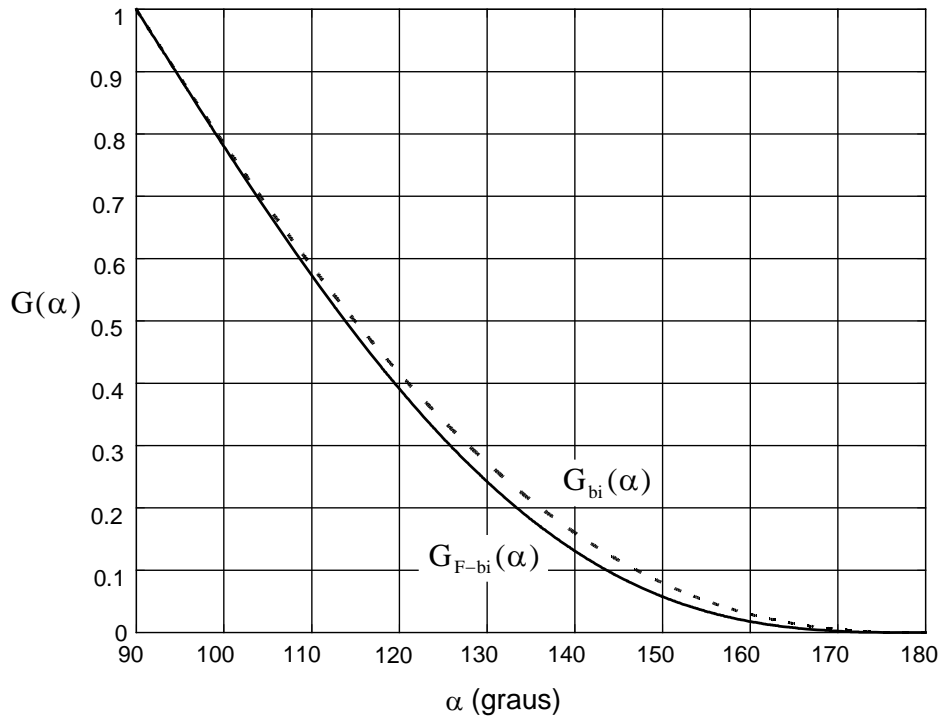


Fig. 4 - Curvas $G_{bi}(\alpha)$ (valor eficaz) e $G_{F-bi}(\alpha)$ (componente fundamental)

Admitindo ângulos de disparo simétricos nos dois semi-ciclos e perdas nulas no indutor, o percentual de harmônicas de ordem n referido ao valor máximo da componente fundamental é fornecido pela expressão (6) e apresentado na fig. 5 para $n=3,5$ e 7.

$$I_n = \frac{V}{\omega \cdot L'} \cdot \frac{1}{n \cdot \pi} \cdot \left[-\frac{4}{n} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(n\alpha) + \frac{2}{n-1} \cdot \sin(n-1)\alpha + \frac{2}{n+1} \cdot \sin(n+1)\alpha \right] \quad (6)$$

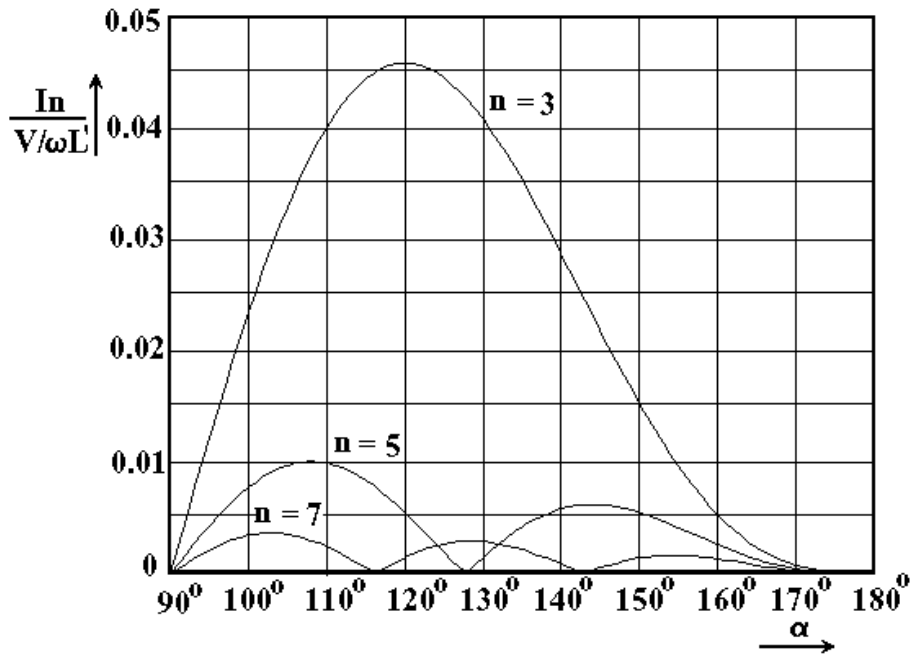


Fig. 5 - Harmônicas de corrente ($n=3,5$ e 7) - chave bidirecional

3.2 Sistema com dois indutores, controlados por chave unidirecional (CHAVE S4 ABERTA)

A utilização de dois indutores, controlados por chave unidirecional (vide fig. 6), aumenta o custo do sistema, oferecendo como vantagem uma redução de harmônicas e conseqüentemente no custo dos filtros. Para $0 < \alpha < \pi/2$ a corrente no ramo indutivo é dada por:

$$i(t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} V}{\omega \cdot L} \cdot [-\cos \alpha - \cos \omega \cdot t] & 0 < \omega \cdot t < \alpha \\ \frac{\sqrt{2} V}{\omega \cdot L} \cdot [-\cos \omega \cdot t] & \alpha < \omega \cdot t < \pi - \alpha \\ \frac{\sqrt{2} V}{\omega \cdot L} \cdot [\cos \alpha - \cos \omega \cdot t] & \pi - \alpha < \omega \cdot t < \pi + \alpha \\ \frac{\sqrt{2} V}{\omega \cdot L} \cdot [-\cos \omega \cdot t] & \pi + \alpha < \omega \cdot t < 2\pi - \alpha \\ \frac{\sqrt{2} V}{\omega \cdot L} \cdot [-\cos \alpha - \cos \omega \cdot t] & 2\pi - \alpha < \omega \cdot t < 2\pi \end{cases} \quad (7a)$$

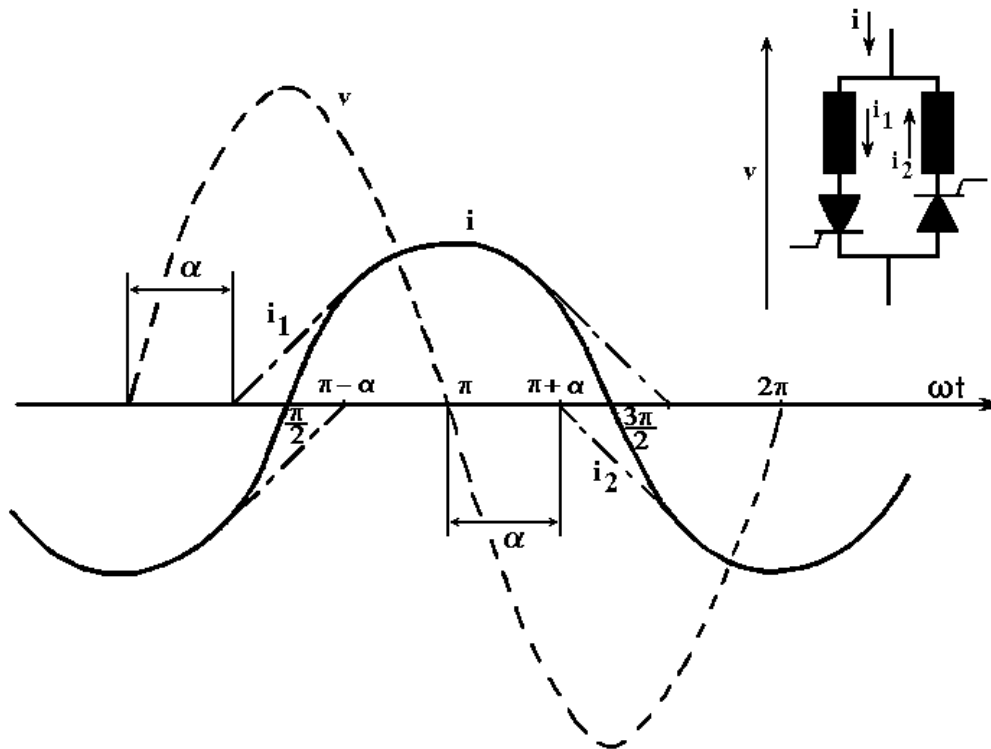


Fig. 6 - Formas de onda da corrente no ramo indutivo - duas chaves unidirecionais

Para $\pi/2 < \alpha < \pi$ a corrente no ramo indutivo é dada por:

$$i(t) = \begin{cases} \frac{\sqrt{2} V}{\omega \cdot L} \cdot [\cos \alpha - \cos \omega \cdot t] & \pi - \alpha < \omega \cdot t < \pi + \alpha \\ \frac{\sqrt{2} V}{\omega \cdot L} \cdot [-\cos \alpha - \cos \omega \cdot t] & 2\pi - \alpha < \omega \cdot t < 2\pi \end{cases} \quad (7b)$$

sendo

- ω - frequência angular da rede
- L - indutância equivalente ($LCE1=LCE2$)
- V - valor eficaz da tensão de alimentação
- α - ângulo de disparo da chave estática medido em relação a passagem por zero da tensão da fonte.

O valor eficaz da componente fundamental da corrente no ramo indutivo vale:

$$I_{\text{RMS-F}} = \frac{V}{\omega \cdot L} \cdot \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \quad 0 < \alpha < \pi \quad (8)$$

A equação acima pode ser rescrita na forma $I_{\text{RMS-F}} = V_{\text{RMS-F}} \cdot B_{\text{F-uni}}(\alpha)$, onde $B_{\text{F-uni}}(\alpha)$ (vide fig. 7) é a susceptância do compensador levando em conta apenas a componente fundamental, ou seja:

$$B_{\text{F-uni}}(\alpha) = \frac{2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi \cdot \omega \cdot L} = \frac{G_{\text{F-uni}}(\alpha)}{\omega \cdot L} \quad 0 < \alpha < \pi \quad (9)$$

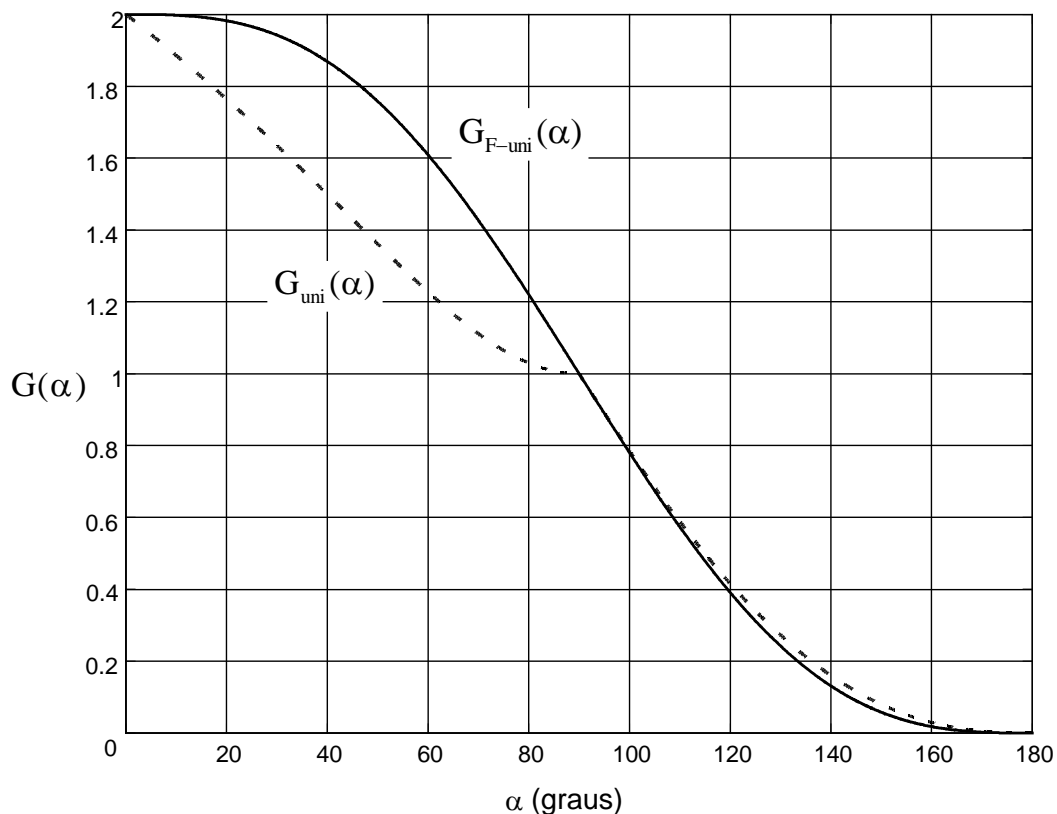


Fig. 7 - Curvas $G_{\text{uni}}(\alpha)$ (valor eficaz) e $G_{\text{F-uni}}(\alpha)$ (comp. fundamental)

O valor eficaz total $I_{\text{RMS-tot}}$ da corrente no ramo indutivo é dado por

$$I_{\text{RMS-tot}} = \begin{cases} \frac{V}{\omega \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{4\pi - 4\alpha + 2\alpha \cos 2\alpha - 3\sin 2\alpha}{\pi}} & 0 < \alpha < \pi/2 \\ \frac{V}{\omega \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{(2\pi - 2\alpha)(2 + \cos 2\alpha) + 3\sin 2\alpha}{\pi}} & \pi/2 < \alpha < \pi \end{cases} \quad (10)$$

Da mesma forma pode se expressar a corrente na forma $I_{\text{RMS-tot}} = V_{\text{RMS-tot}} \cdot B_{\text{uni}}(\alpha)$, onde $B_{\text{uni}}(\alpha)$ (vide fig. 7) é a susceptância do compensador levando em conta o valor eficaz da corrente, ou seja:

$$B_{\text{uni}}(\alpha) = \begin{cases} \frac{1}{\omega \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{4\pi - 4\alpha + 2\alpha \cos 2\alpha - 3\sin 2\alpha}{\pi}} = \frac{G_{\text{uni}}(\alpha)}{\omega \cdot L} & 0 < \alpha < \pi/2 \\ \frac{1}{\omega \cdot L} \cdot \sqrt{\frac{(2\pi - 2\alpha)(2 + \cos 2\alpha) + 3\sin 2\alpha}{\pi}} = \frac{G_{\text{uni}}(\alpha)}{\omega \cdot L} & \pi/2 < \alpha < \pi \end{cases} \quad (11)$$

Admitindo ângulos de disparo simétricos nos dois semi-ciclos e perdas nulas no indutor, o percentual de harmônicas de ordem n referido ao valor máximo da componente fundamental é fornecido pela expressão (12) e apresentado na fig. 8 para $n=3,5$ e 7 .

$$I_n = \frac{V}{\omega \cdot L} \cdot \frac{1}{n\pi} \cdot \left[-\frac{4}{n} \cdot \cos(\alpha) \cdot \sin(n\alpha) + \frac{2}{n-1} \cdot \sin(n-1)\alpha + \frac{2}{n+1} \cdot \sin(n+1)\alpha \right] \quad (12)$$

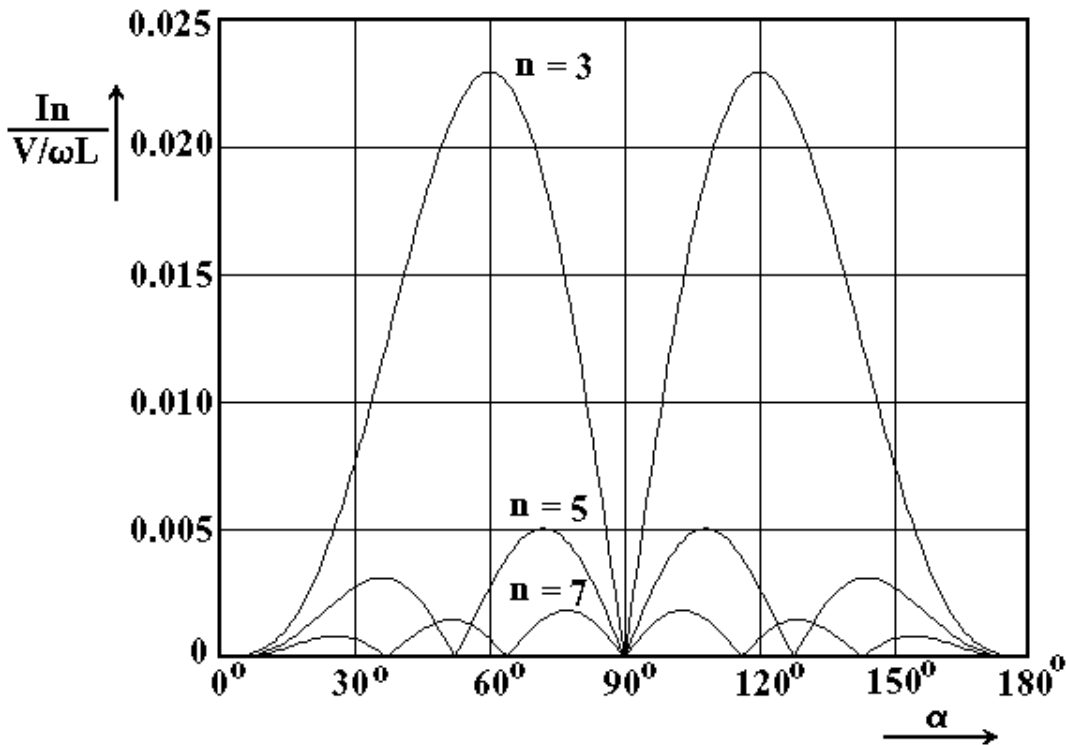


Fig. 8 - Harmônicas de corrente ($n=3,5$ e 7) - duas chaves unidirecionais

4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. Indutor controlado por chave bidirecional (Chave 4 FECHADA)

I - Previsões teóricas

- 4.1.1. Para $\alpha = 2\pi/3$, desenhar as formas de onda das correntes no capacitor (I_C), no ramo indutivo (I_L) e no compensador (I_{C+I_L}) com o sistema sem carga. Em seguida, incluir uma carga R-L e desenhar a forma de onda da corrente de linha, mostrando a atuação do compensador.
- 4.1.2. Determinar qual a máxima potência reativa da carga que pode ser compensada com o arranjo experimental.
- 4.1.3. Considerando a carga R-L ($L = 130$ mH) disponível no laboratório, verificar para que valores de R o arranjo consegue compensação total de seus reativos. Determinar o fator de potência da carga não compensada para R_{min} e R_{max} .
- 4.1.4. Escolher uma resistência conveniente de forma que a potência reativa da carga corresponda a aproximadamente 60% da potência reativa do capacitor fixo do compensador. Desenhar o diagrama fasorial da carga e do compensador para a componente fundamental. Determinar o fator de potência da carga não compensada e do sistema compensado.
- 4.1.5. Utilizando a curva $B_{bi}(\alpha)$ da fig. 4 (calculada levando-se em conta o valor eficaz total da corrente), determinar o ângulo α esperado para compensação total de reativos da carga escolhida no item anterior.

II - Medições

- 4.1.6. Curva $B_{bi}(\alpha)$ experimental.
Utilizando o arranjo experimental do laboratório, alimentar o compensador com a tensão de linha (34,5 V) da fonte trifásica de baixa tensão e substituir o amperímetro externo por um curto-circuito. Com o sistema **sem carga**, filtros e o capacitor fixo desligados (a chave do capacitor localiza-se na base do arranjo experimental) levantar a curva $B_{bi}(\alpha)$. Medir a corrente sobre o shunt utilizando um multímetro digital de valor eficaz verdadeiro. Comparar a curva experimental com a curva teórica e justificar eventuais desvios.
- 4.1.7. Validação de formas de onda teóricas.
Inserir o capacitor e ajustar um ângulo $\alpha = 2\pi/3$ e verificar se os valores experimentais estão de acordo com os valores previstos no item 4.1.1., comentando eventuais desvios.
- 4.1.8. Fator de potência da carga não compensada
Alimentar a carga escolhida no item 4.1.4. com a tensão de linha (34,5 V) da fonte trifásica de baixa tensão e medir a potência reativa (devida a componente fundamental) e o fator de potência da carga não compensada.
- 4.1.9. Fator de potência da carga compensada
Mantendo os filtros desligados ligar a carga na saída do compensador, ajustar o ângulo α até que a corrente na linha, medida no amperímetro, seja mínima. Desta forma a carga está compensada. Justificar este procedimento. Medir o ângulo α e

comparar com a previsão teórica e justificar eventuais desvios. Determinar o fator de potência da carga compensada e justificar o fato de não ser unitário.

4.1.10. Atuação dos filtros

Observar as formas de onda da tensão e corrente na linha. Inserir sucessivamente os filtros de harmônicos de ordem 3,5 e 7 e observar as formas de onda da corrente na linha para cada filtro individual e do conjunto. Comentar a atuação dos filtros.

Obs.: Lembrar que ao inserir filtros é necessário realizar ajustes no ângulo de controle do compensador pois na frequência da rede (que se encontra abaixo da frequência de ressonância do filtro) este se comporta como um capacitor

$$C_{\text{filtro}}(\omega_{\text{rede}}) = \frac{C_F}{1 - L_F \cdot C_F \cdot \omega_{\text{rede}}^2}$$

4.1.11. Harmônicos do compensador

Desligar os filtros, manter a mesma carga e, monitorando o espectro harmônico da corrente de linha, determinar os valores de α correspondentes aos máximos absolutos de terceiro e quinto harmônico. Comparar com os valores teóricos da fig. 5.

4.2. Indutor controlado por chaves unidirecionais (Chave 4 ABERTA)

I - Previsões teóricas

4.2.1. Para $\alpha = 75^\circ$, desenhar as formas de onda das correntes no capacitor (I_C), no ramo indutivo (I_L) e no compensador ($I_C + I_L$) com o sistema sem carga. Em seguida, incluir uma carga R-L e desenhar a forma de onda da corrente de linha, mostrando a atuação do compensador.

4.2.2. Utilizando a curva $B_{\text{uni}}(\alpha)$ da fig. 7 (calculada levando-se em conta o valor eficaz total da corrente), determinar o ângulo α esperado para compensação total de reativos da carga escolhida no item 4.1.4.

II - Medições

4.2.3. Curva $B_{\text{uni}}(\alpha)$ experimental.

Utilizando o arranjo experimental do laboratório, alimentar o compensador com a tensão de linha (34,5 V) da fonte trifásica de baixa tensão e substituir o amperímetro externo por um curto-circuito. Com o sistema **sem carga**, filtros e o capacitor fixo desligados (a chave do capacitor localiza-se na base do arranjo experimental) levantar a curva $B_{\text{bi}}(\alpha)$. Medir a corrente sobre o shunt utilizando um multímetro digital de valor eficaz verdadeiro. Comparar a curva experimental com a curva teórica e justificar eventuais desvios.

4.2.4. Validação de formas de onda teóricas.

Inserir o capacitor e ajustar um ângulo $\alpha = 75^\circ$ e verificar se os valores experimentais estão de acordo com os valores previstos no item 4.2.1, comentando eventuais desvios.

4.2.5. Fator de potência da carga compensada

Mantendo os filtros desligados, ajustar o ângulo α até que a corrente na linha, medida no amperímetro, seja mínima. Medir o ângulo α e comparar com a previsão teórica e justificar eventuais desvios. Determinar o fator de potência da carga compensada.

4.2.6. Harmônicos do compensador

Ligar os filtros, manter a mesma carga e, monitorando o espectro harmônico da corrente de linha, determinar os valores de α correspondentes aos máximos absolutos de terceiro e quinto harmônico. Comparar com os valores teóricos da fig. 8.

4.2.7. Comparar e comentar o desempenho, vantagens e desvantagens dos dois sistemas.

5. RELATÓRIO

O relatório deverá conter as formas de onda e gráficos acompanhados de uma análise da consistência dos dados experimentais baseada nas previsões teóricas.