

COMPENSAÇÃO ESTÁTICA DE POTÊNCIA REATIVA UTILIZANDO REATORES
COM SATURAÇÃO CONTROLADA POR CORRENTE CONTÍNUA

ALAN KARDEC CANDIDO DOS REIS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DA ENGENHARIA
INSTITUTO SUPERIOR DE ENSINO
E PESQUISA DE ITUIUTABA
38.300 - ITUIUTABA - MG - BRASIL

HAROLDO RODRIGUES DE AZEVEDO
JOSÉ RUBENS CAETANO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
38.400 - UBERLÂNDIA - MG - BRASIL

RESUMO

O trabalho desenvolve um método de compensação estática de potência reativa, o qual consiste no emprego de capacitores fixos ligados em paralelo com reatores variáveis. A variação da indutância dos reatores é feita através da aplicação de corrente contínua num dos enrolamentos, de forma que se possa controlar o grau de saturação do núcleo magnético. São usados dois reatores por fase, ligados convenientemente de maneira a se anular a tensão alternada nos enrolamentos de corrente contínua. A excitação é feita, utilizando-se retificação controlada por tiristores.

No trabalho é realizado um estudo do ponto de vista de variáveis de estado, é proposta uma modelagem para a simulação computacional e são analisados os resultados experimentais obtidos em ensaios. Foram consideradas duas formas de excitação de corrente contínua, com o objetivo de se estudar a velocidade de resposta, o conteúdo harmônico presente na corrente alternada e outras características de operação de cada uma.

1. INTRODUÇÃO

A necessidade de compensação da potência reativa é um problema bastante conhecido. Há alguns fatores que podem ser mencionados como objetivos da compensação. Um destes fatores é a correção do fator de potência. Neste caso, os principais propósitos são a redução do custo da potência útil, a liberação da capacidade do sistema e secundariamente a redução nas perdas. Outro fator é a melhoria do nível de tensão em um barramento. Normalmente este tipo de compensação é feito nas instalações das concessionárias de energia elétrica. A potência reativa pode ser compensada, ainda, com o objetivo de se corrigir o desequilíbrio de cargas industriais. Em todos os casos citados, com frequência pode haver a necessidade de se exercer um controle sobre a potência reativa de forma a compensar as variações das cargas.

Atualmente há diversas formas de efetuar a compensação de potência reativa. Uma solução bastante tradicional, consiste no uso de capacitores fixos ligados em paralelo com a carga. Estes equipamentos são estáticos, possuem um baixo custo e uma resposta muito rápida. A desvantagem deste sistema é apresentar uma compensação descontínua, pois fornecem uma quantidade fixa de potência reativa e as cargas, muitas vezes, necessitam de quantidades de potência reativa variáveis no tempo. Uma forma de solucionar este problema, seria dividir a capacidade de compensação total em vários arranjos de ban-

cos de capacitores ligados em série e paralelo, chaveados por meio de disjuntores, mas com uma redução na velocidade de resposta, para minorar os problemas resultantes do chaveamento das correntes capacitivas.

Um outro tipo de equipamento de compensação são os condensadores síncronos, que nada mais são do que máquinas síncronas de construção especial, que produzem uma compensação contínua, aproveitando a sua capacidade natural de fornecer ou absorver energia reativa dependendo do seu grau de excitação. Por serem rotativas, necessitam de uma sala de máquinas totalmente equipada, manutenção periódica, elevando-se assim o custo de instalação. Este compensador não responde em intervalos de tempo inferiores a 1 seg., mesmo com alta velocidade dos sistemas de controle, apresentando assim uma resposta lenta.

O reator controlado a tiristor (RCT) ligado em paralelo com um banco de capacitores, é outro dispositivo estático também utilizado na compensação de potência reativa, cujo esquema está mostrado na figura 1.

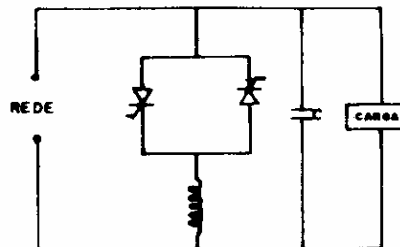


Figura 1 - Esquema do RCT

Este compensador permite uma variação contínua na potência reativa, conseguida através de mudanças no ângulo de disparo dos tiristores comandados pelo sistema de controle. Apresenta também uma resposta rápida, mas em contrapartida, gera um elevado conteúdo harmônico e exige o emprego de tiristores de alta corrente.

O reator a saturação controlada (RSC), proposto no trabalho, é mostrado na figura 2. É também um sistema estático que faz a compensação de forma contínua, através da variação da indutância aparente do lado de corrente alternada, obtida quando se aplica uma excitação contínua no núcleo do mesmo. Necessita de tiristores de corrente mais baixa, pois os mesmos fazem parte do circuito de excitação. O seu tempo de resposta é menor do que a dos compensadores síncronos e maior do que o do RCT.

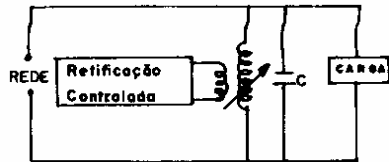


Figura 2 - Esquema de ligação do RSC

A parte experimental foi feita utilizando-se transformadores comerciais, sendo feito um estudo com dois tipos de configuração para se obter a tensão contínua de entrada e mantendo constante a tensão alternada eficaz.

2. OS REATORES E SEU EQUACIONAMENTO

Através da não linearidade das características do núcleo pode-se obter variações de indutância do lado de corrente alternada quando se aplica uma excitação de corrente contínua. A figura 3 mostra a característica fluxo versus corrente com o núcleo excitado por corrente contínua e corrente alternada simultaneamente.

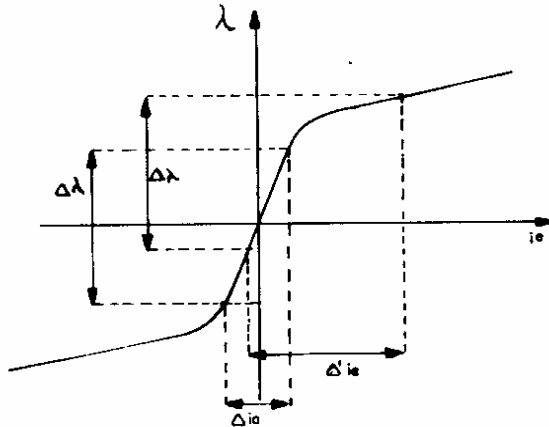


Figura 3 - Característica com as duas excitações superpostas.

Na figura 3 i_e representa a soma-tória entre a corrente alternada e a corrente contínua referida ao lado de corrente alternada. Para uma determinada excitação contínua e uma variação de fluxo $\Delta\lambda$ obtemos uma variação Δi_a na corrente alternada. Mantendo-se fixa a variação de fluxo $\Delta\lambda$, através de variações na excitação contínua pode-se obter grandes variações na corrente i_e , motivada pela não linearidade da curva característica. Esta mudança acarreta variação no valor da corrente alternada ($\Delta' i_a$), por meio da variação da indutância aparente vista do lado de corrente alternada. Com este compensador conseguiu-se variações de até 11 vezes na corrente alternada.

Usou-se no experimento dois reatores de modo a possibilitar o cancelamento da tensão alternada induzida nos enrolamentos de excitação, através de ligações apropriadas.

O estudo do comportamento em regime permanente de reatores controlados pela

saturação não é muito complexo e pode ser realizado se forem levantadas curvas características apropriadas do material magnético empregado no núcleo. Se os reatores são usados num sistema de controle, se faz necessária uma análise mais profunda para que se possa avaliar com precisão o seu comportamento dinâmico. No item seguinte é feito um desenvolvimento do ponto de vista de equações de estado, tomando-se as correntes como variáveis de estado. Conforme o tipo de ligação se farão necessárias duas, três ou quatro equações não lineares.

2.1. EQUACIONAMENTO COM AS BOBINAS DE CORRENTE ALTERNADA LIGADAS EM SÉRIE

A figura 4 mostra a ligação dos reatores com as bobinas de corrente alternada ligadas em série.

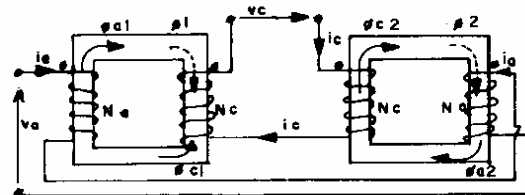


Figura 4 - Ligação dos reatores

Do circuito da figura 4, temos:

$$v_a = 2R_a i_a + N_a \frac{d\phi_1}{dt} + N_a \frac{d\phi_2}{dt} + 2L_{ad} \frac{di_a}{dt} \quad (1)$$

$$v_c = 2R_c i_c - N_c \frac{d\phi_1}{dt} + N_c \frac{d\phi_2}{dt} + 2L_{cd} \frac{di_c}{dt} \quad (2)$$

$$H_1 = \frac{N_a i_a - N_c i_c}{\ell} \quad (3)$$

$$H_2 = \frac{N_a i_a + N_c i_c}{\ell} \quad (4)$$

onde:

v_a = tensão alternada.

v_c = tensão contínua.

R_a = resistência do enrolamento de c.a.

R_c = resistência do enrolamento de c.c.

N_a = número de espiras do enrolamento c.a.

N_c = número de espiras do enrolamento c.c.

ϕ_1 = fluxo total efetivo no núcleo 1.

ϕ_2 = fluxo total efetivo no núcleo 2.

H_1 = campo magnético de excitação total no núcleo 1.

H_2 = campo magnético de excitação total no núcleo 2.

L_{ad} = indutância de dispersão do enrolamento de c.a.

L_{cd} = indutância de dispersão do enrolamento de c.c.

S = área de seção transversal do núcleo.

ℓ = comprimento médio do núcleo.

A última parcela nas equações 1 e 2 leva em consideração a dispersão de fluxo.

$$\text{Tem-se: } \phi = B \cdot S \Rightarrow \frac{d\phi}{dt} = S \frac{dB}{dt} \quad (5)$$

$$\text{Faremos: } \frac{dB}{dt} = \frac{dB}{dH} \cdot \frac{dH}{dt} \quad (6)$$

Combinando as expressões precedentes e colocando sob a forma de equações de estado, tem-se:

$$K' \cdot \begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2A_1 R_a & -2A_2 R_c \\ -2A_2 R_a & -2A_3 R_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} A_1 & A_2 \\ A_2 & A_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

sendo:

\dot{i}_a = derivada de i_a
 \dot{i}_c = derivada de i_c

$$A_1 = 2L_{cd} + \frac{N_c^2 \cdot S}{l} \left(-\frac{dB_1}{dH_1} + \frac{dB_2}{dH_2} \right)$$

$$A_2 = \frac{N_a N_c S}{l} \left(\frac{dB_1}{dH_1} - \frac{dB_2}{dH_2} \right)$$

$$A_3 = 2L_{ad} + \frac{N_a^2 \cdot S}{l} \left(\frac{dB_1}{dH_1} + \frac{dB_2}{dH_2} \right)$$

$$K' = A_1 A_3 - A_2^2$$

O sistema de equações 7 poderá ser usado para simulação computacional, desde que seja levantada com uma certa precisão a curva $\frac{dB}{dH}$ x H dos reatores.

2.2. EQUACIONAMENTO COM AS BOBINAS DE CORRENTE ALTERNADA LIGADAS EM PARALELO

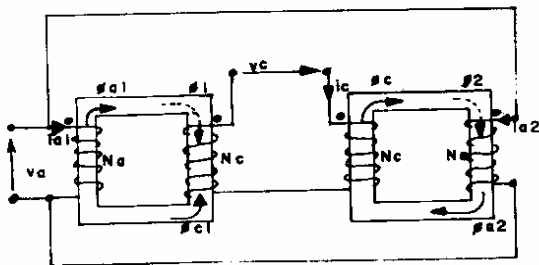


Figura 5 - Esquema de ligação com as bobinas de c.a. ligadas em paralelo.

Do circuito da figura 5, temos:

$$v_a = R_a i_a + L_{ad} \frac{di_a}{dt} + N_a \frac{d\phi_1}{dt} \quad (8)$$

$$v_a = R_a i_a + L_{ad} \frac{di_a}{dt} + N_a \frac{d\phi_2}{dt} \quad (9)$$

$$v_c = 2R_c i_c + 2L_{ad} \frac{di_c}{dt} - N_c \frac{d\phi_1}{dt} + N_c \frac{d\phi_2}{dt} \quad (10)$$

$$H_1 = \frac{N_a i_a - N_c i_c}{l} \Rightarrow \frac{dH_1}{dt} = \frac{N_a \dot{i}_a - N_c \dot{i}_c}{l} \quad (11)$$

$$H_2 = \frac{N_a i_a + N_c i_c}{l} \Rightarrow \frac{dH_2}{dt} = \frac{N_a \dot{i}_a + N_c \dot{i}_c}{l} \quad (12)$$

$$\frac{d\phi}{dt} = S \cdot \frac{dB}{dt} \quad (13)$$

$$\frac{dB}{dt} = \frac{dB}{dH} \cdot \frac{dH}{dt} \quad (14)$$

Combinando-se as equações:

$$v_a = R_a i_a + [L_{ad} + \frac{N_a^2 \cdot S}{l} \cdot \frac{dB_1}{dH_1}] \dot{i}_a - \frac{N_a \cdot N_c \cdot S}{l} \cdot \frac{dB_1}{dH_1} \cdot i_c \quad (15)$$

$$v_a = R_a i_a + [L_{ad} + \frac{N_a^2 \cdot S}{l} \cdot \frac{dB_2}{dH_2}] \dot{i}_a + \frac{N_a \cdot N_c \cdot S}{l} \cdot \frac{dB_2}{dH_2} \cdot i_c \quad (16)$$

$$v_c = 2R_c i_c - \frac{N_a \cdot N_c \cdot S}{l} \cdot \frac{dB_1}{dH_1} \cdot \dot{i}_a + \frac{N_a \cdot N_c \cdot S}{l} \cdot \frac{dB_2}{dH_2} \cdot \dot{i}_a + [2L_{cd} + \frac{N_c^2 \cdot S}{l} \cdot \frac{dB_1}{dH_1} + \frac{N_c^2 \cdot S}{l} \cdot \frac{dB_2}{dH_2}] \dot{i}_c \quad (17)$$

Fazendo:

$$A_5 = L_{ad} + \frac{N_a^2 \cdot S}{l} \cdot \frac{dB_1}{dH_1}; \quad A_7 = L_{ad} + \frac{N_a^2 \cdot S}{l} \cdot \frac{dB_2}{dH_2};$$

$$A_6 = \frac{N_a \cdot N_c \cdot S}{l} \cdot \frac{dB_1}{dH_1}; \quad A_8 = \frac{N_a \cdot N_c \cdot S}{l} \cdot \frac{dB_2}{dH_2};$$

$$A_9 = [2L_{cd} + \frac{N_c^2 \cdot S}{l} \left(\frac{dB_1}{dH_1} + \frac{dB_2}{dH_2} \right)];$$

$$A_{10} = \left[\frac{A_7 (A_5 A_9 - A_6^2) + A_5 A_8^2}{A_5 A_8} \right]$$

então:

$$A_5 \dot{i}_a - A_6 \dot{i}_c = v_a - R_a i_a \quad (18)$$

$$+ A_7 \dot{i}_a + A_8 \dot{i}_c = v_a - R_a i_a \quad (19)$$

$$-A_6 \dot{i}_a + A_8 \dot{i}_a + A_9 \dot{i}_c = v_c - 2R_c i_c \quad (20)$$

Resolvendo o sistema e colocando sob a forma de equações de estado, tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_a \\ \dot{i}_a \\ \dot{i}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{13} \\ A_{21} & A_{22} & A_{23} \\ A_{31} & A_{32} & A_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_a \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_a \\ v_a \\ v_c \end{bmatrix} \quad (21)$$

onde:

$$A_{11} = \left[-\frac{R_a}{A_5} \left(\frac{A_6^2 A_7}{A_5 A_8 A_{10}} + 1 \right) \right]; A_{12} = \left(-\frac{A_6 R_a}{A_5 A_{10}} \right);$$

$$A_{13} = \left(\frac{2R_c A_6 A_7}{A_5 A_8 A_{10}} \right); A_{21} = \left[\frac{(A_5 A_9 - A_6^2) R_a A_7}{A_5 A_8 A_{10}} - \frac{R_a A_6}{A_8} \right];$$

$$A_{22} = \left[\frac{(A_5 A_9 - A_6^2) R_a}{A_8 A_{10}} \right]; A_{23} = \left[\frac{-2R_c}{A_8} - \frac{(A_5 A_9 - A_6^2) 2R_c A_5}{A_8^2 A_{10}} \right];$$

$$A_{31} = \left(-\frac{A_6 A_7 R_a}{A_5 A_8 A_{10}} \right); A_{32} = \left(-\frac{R_a}{A_{10}} \right); A_{33} = \left(\frac{2R_c A_7}{A_8} \right);$$

$$A'_{11} = \left(\frac{1}{A_5} \right); A'_{12} = \left[\frac{A_6}{A_5 A_{10}} \left(1 + \frac{A_6 A_7}{A_5 A_8} \right) \right]; A'_{13} = \left(\frac{A_6 A_7}{A_5 A_8 A_{10}} \right);$$

$$A'_{21} = \left(-\frac{A_6 A_7 R_a}{A_5 A_8 A_{10}} \right); A'_{22} = \left[-\left(\frac{A_5 A_9 - A_6^2}{A_8 A_{10}} \right) \left(\frac{1}{A_{10}} + \frac{A_6 A_7}{A_5 A_8 A_{10}} \right) \right];$$

$$A'_{23} = \left[\frac{1}{A_8} + \frac{(A_5 A_9 - A_6^2) A_7}{A_8^2 A_{10}} \right]; A'_{31} = \left(\frac{1}{A_{10}} \right);$$

$$A'_{32} = \left(\frac{A_6 A_7}{A_5 A_8} \right); A'_{33} = \left(-\frac{A_7}{A_8 A_{10}} \right)$$

O sistema de equações (21) poderá ser usado na simulação computacional. Os parâmetros A_{ij} e A'_{ij} das matrizes da equação (21) dependem apenas de elementos construtivos dos transformadores, indutâncias de dispersão, resistências de enrolamento e da curva dB/dH em função de H . No item 3 há uma sugestão para a obtenção desta curva. Com os dados mencionados, a simulação torna-se viável.

Observa-se, ainda, que a ligação em série dos enrolamentos de corrente alternada possibilita o uso de um equacionamento mais simples. Enquanto que neste tipo de ligação é necessário manipular apenas duas equações de estado, no caso da ligação em paralelo são necessárias três equações. Se fosse desenvolvido o tratamento matemático para os enrolamentos de excitação ligados em paralelo e não em série, mais outra equação seria necessária.

As equações de estado apresentadas não são lineares, pois os parâmetros A_1 a A_{10} são variáveis no tempo uma vez que dependem da derivada dB/dH . Assim, a solução somente pode ser obtida por métodos numéricos em computador.

3. DETERMINAÇÃO DA CURVA $\frac{dB}{dH}$ x H DO REATOR

Os transformadores utilizados são do tipo nucleado e com oito enrolamentos iguais, sendo que quatro destes enrolamentos estão enrolados em torno de uma perna e os outros quatro, em torno da perna oposta.

Cada enrolamento possui a seguinte especificação:

- número de espiras = 131 espiras
- tensão nominal = 110 V
- corrente nominal = 2,27 A
- área da seção transversal do núcleo = 38cm²
- comprimento médio do núcleo = 0,519 m

Para a determinação experimental da curva $\frac{dB}{dH}$ x H utilizou-se o seguinte esquema:



Figura 6 - Esquema de ligação para a determinação de $\frac{dB}{dH}$ x H .

Do circuito da figura 6 tem-se:

$$v = N \frac{d\phi}{dt} = N S \frac{dB}{dH} \quad (22)$$

$$\text{mas: } \frac{v}{N S} = \frac{dB}{dH} \cdot \frac{dH}{dt} \quad (23)$$

$$H = \frac{N}{l} \cdot i \Rightarrow \frac{dH}{dt} = \frac{N}{l} \cdot \frac{di}{dt} \quad (24)$$

Substituindo (24) em (23), temos:

$$\frac{dB}{dH} = \frac{v \cdot l}{N^2 \cdot S} \cdot \frac{di}{dt} \quad (25)$$

Através de um circuito derivador pode ser obtida a função $\frac{di}{dt}(t)$.

Os sinais $v(t)$, $i(t)$ e $\frac{di}{dt}(t)$ fotografados da tela de um osciloscópio, permitem fazer as medidas necessárias para, através das equações (24) e (25), se determinar ponto a ponto a curva $\frac{dB}{dH}$ x H .

4. CONFIGURAÇÕES DE CIRCUITOS DE CONTROLE EMPREGADOS

Para excitar o enrolamento de corrente contínua usou-se as duas configurações de circuito da figura 7.

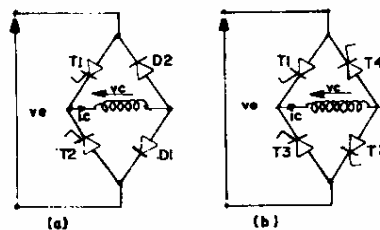


Figura 7 - Configurações de circuito

No circuito da figura 7.a, foram usados apenas dois tiristores, necessitando de circuito de disparo mais simples. No segundo circuito usando 4 tiristores na ponte retificadora, necessita-se de um circuito de disparo com um maior número de elementos, mas, verificou-se que o mesmo possui um tempo de resposta menor.

A figura 8 mostra as curvas esperadas da tensão e corrente nos enrolamentos de excitação para um ângulo de disparo de 135°, medido a partir do instante em que a tensão de excitação v_e passa por zero.

No circuito da figura 7.a, após o

disparo do tiristor T_1 , a corrente no reator começa a crescer. Quando a tensão v_e tem o seu sinal invertido, a corrente do reator se descarrega pelo circuito formado por D_2 e T_1 , e acordo com a constante de tempo do reator. Isto faz com que a tensão no diodo D_1 se inverta e o mesmo deixe de conduzir. Quando o tiristor T_2 é disparado, a corrente i_c do reator ainda não se anulou. Assim, a corrente atinge um máximo superior ao alcançado no semi-ciclo anterior. O processo se repete e os valores máximos da corrente i_c vão aumentando sucessivamente, até que se atinja um estado de regime permanente.

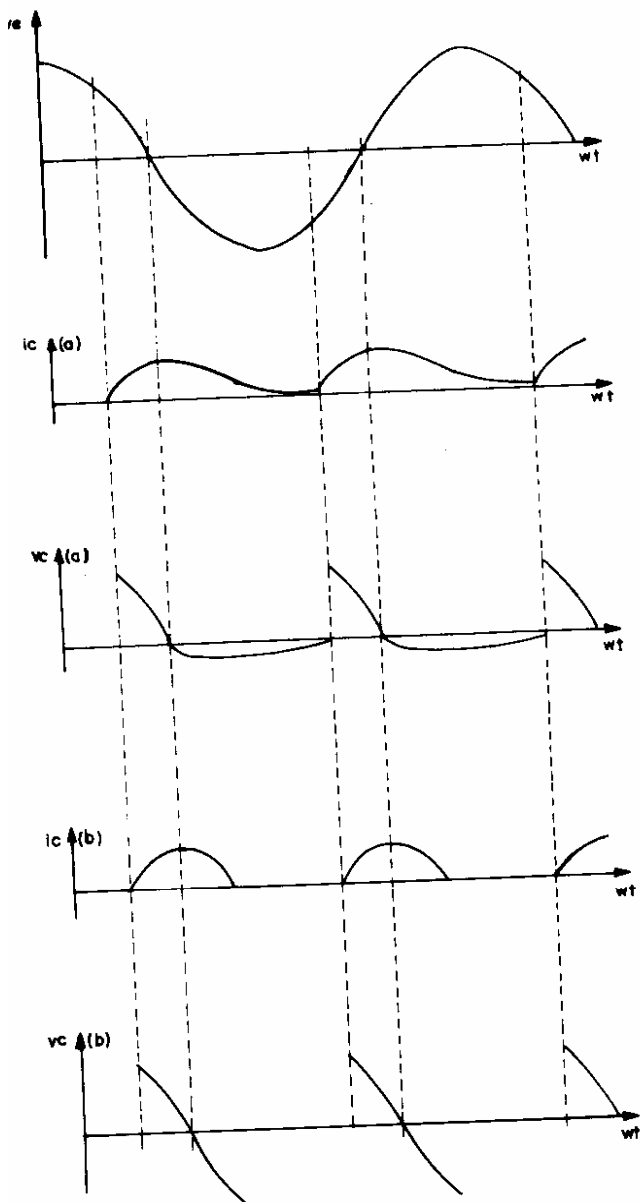


Figura 8 - Formas de onda esperadas.
(a) usando configuração do circuito 7.a.
(b) usando configuração do circuito 7.b.

No circuito da figura 7.b os tiristores T_1 e T_2 são disparados simultaneamente.

Neste caso, quando a tensão v_e se inverte os tiristores T_1 e T_2 continuam a conduzir até que a corrente i_c venha a zero. Quando forem disparados os tiristores T_3 e T_4 as bobinas de excitação dos reatores estão novamente em seu estado de corrente nula. Assim sendo, é de se esperar que esta configuração apresente uma resposta mais rápida do que a anterior.

Na análise que acabamos de fazer, foi ignorada a ação dos enrolamentos de corrente alternada. Na prática haverá algumas alterações nas formas de onda previstas na figura por causa deste efeito. Um estudo mais rigoroso sobre as formas de onda pode ser realizado pela solução das equações de estado do item 2. No caso da configuração da figura 7.b, embora a corrente i_c volte ao estado inicial (nulo) antes de cada novo disparo, a corrente i_a não retorna ao seu estado inicial antes de um segundo disparo. Com isto, tem-se um transitório de duração de vários ciclos, ao contrário do que seria de se supor à primeira vista. Mesmo assim, esta configuração apresentou respostas mais rápidas do que a da figura 7.a.

5. PARTE EXPERIMENTAL

5.1. LEVANTAMENTO DA CURVA $\frac{dB}{dH} \times H$

O circuito derivador da figura 6 foi utilizado para obter o sinal $\frac{di}{dt}(t)$ que, juntamente com os sinais $v(t)$ e $i(t)$, fotografados da tela de um osciloscópio (mostrados abaixo) e, através das equações (24) e (25), permitiram a obtenção ponto a ponto dos valores de H e $\frac{dB}{dH}$.

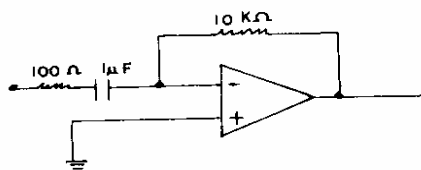


Figura 9 - Circuito derivador



Figura 10 - Valores instantâneos de $v(t)$ e $i(t)$.

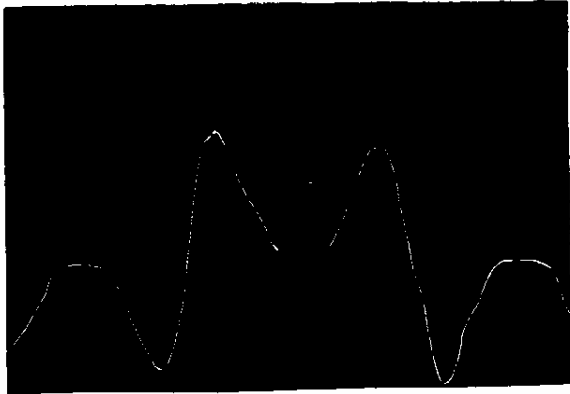


Figura 11 - Valores instantâneos de $v(t)$ e $-\frac{di}{dt}(t)$

Com os pontos já determinados e utilizando-se um programa que traça gráficos no sistema SP16, chegamos à curva da figura 12, a qual apresenta os pontos medidos.

EXPERIMENTAL

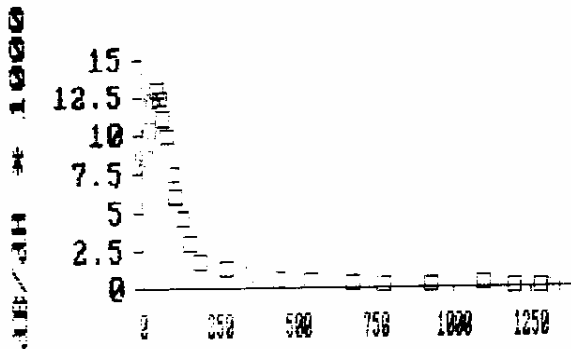


Figura 12 - Gráfico $(dB/dH) \times H$

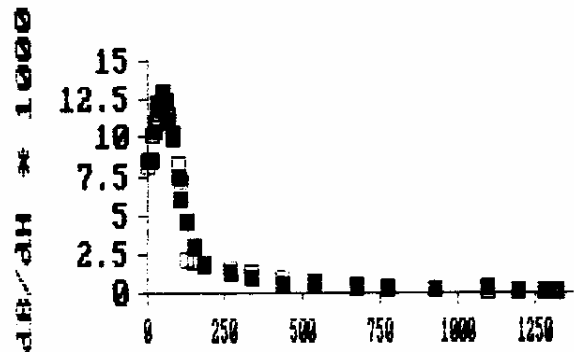
Mantendo-se a simulação computacional para se obter a expressão analítica da curva, chegamos às equações

$$\frac{dB}{dH} = -1,41 \cdot 10^{-6} H^2 + 1,44 \cdot 10^{-4} H + 8,1 \cdot 10^{-3} \quad \text{para } H \leq 127,97 \text{ A/m}$$

$$\frac{dB}{dH} = 3,08 \cdot 10^{-3} \cdot e^{(-2,64 \cdot 10^{-3} H)} - 1 \cdot 10^{-6} \quad \text{para } H \geq 127,97 \text{ A/m} \quad (26)$$

Para efeito comparativo, a figura 13 mostra as curvas experimentais e analítica superpostas, onde os pontos cheios representam a curva experimental e os vazios a equação analítica.

COMPARACAO



CAMPLO MAGNETICO

Figura 13 - Curvas experimental e analítica superpostas.

5.2. ENSAIOS EM REGIME PERMANENTE

Com os dois tipos de circuito de excitação de corrente contínua mostrados na figura (7), foram feitos vários ensaios e verificados os resultados para vários ângulos de disparo dos tiristores. Todos estes ensaios foram realizados com as bobinas de corrente alternada ligadas em paralelo.

Nas figuras seguintes são mostrados os valores instantâneos da tensão de excitação, corrente contínua e corrente alternada para cada configuração, com seus respectivos ângulos de disparo. Todos os ensaios foram realizados mantendo uma tensão constante de 100 volts eficazes nas bobinas de CA.

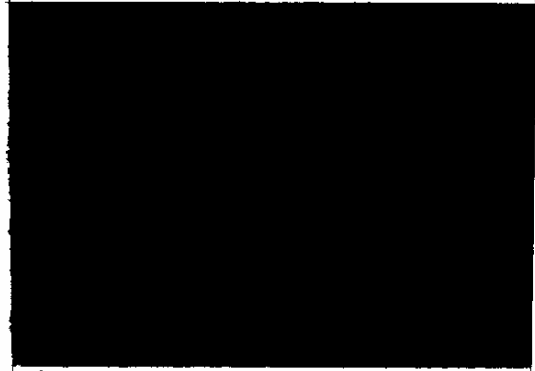
As figuras 14 e 15 apresentam formas de onda obtidas com a configuração da figura 7.a. As fotos das figuras 16, 17, 18 e 19 contêm formas de onda relativas à configuração 7.b para dois valores eficazes de tensão de excitação.

A tabela I mostra os valores obtidos em cada caso, em regime permanente.

Pelos dados da tabela I, pode-se concluir que o conteúdo harmônico é ligeiramente diferente para cada caso. Observando-se os valores máximos da corrente alternada, verifica-se que os mesmos aumentam ligeiramente do caso A até o caso C, por isto, supõe-se que este último deve apresentar um conteúdo harmônico um pouco maior que os demais casos.

5.3. ENSAIOS EM REGIME TRANSITÓRIO

Com o objetivo de determinar o tempo de resposta para cada circuito de excitação foram realizados alguns ensaios em regime transitório. Nas figuras seguintes são mostrados os transitórios de corrente contínua e corrente alternada, depois de serem dadas as variações bruscas no ângulo de disparo e fotografadas da tela de um osciloscópio de memória.



(a) i_c

(b) i_a

Figura 14 - $I_{aEF} = 24 \text{ A}$; $V_{eEF} = 64 \text{ V}$; $\alpha = 100,25^\circ$



(a) i_c

(b) i_a

Figura 15 - $I_{aEF} = 12 \text{ A}$; $V_{eEF} = 64 \text{ V}$; $\alpha = 122,31^\circ$



(a) v_e e i_c

(b) v_e e i_a

Figura 16 - $I_{aEF} = 24 \text{ A}$; $V_{eEF} = 80 \text{ V}$; $\alpha = 93,27^\circ$



(a) v_e e i_c

(b) v_e e i_a

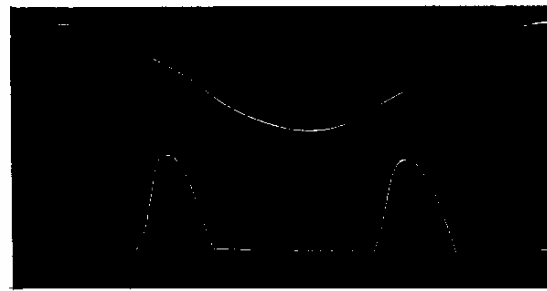
Figura 17 - $I_{aEF} = 12$ A; $V_{eEF} = 81,5$ V; $\alpha = 117,3^\circ$



(a) v_e e i_c

(b) v_e e i_a

Figura 18 - $I_{aEF} = 24$ A; $V_{eEF} = 260$ V; $\alpha = 125,39^\circ$



(a) v_e e i_c

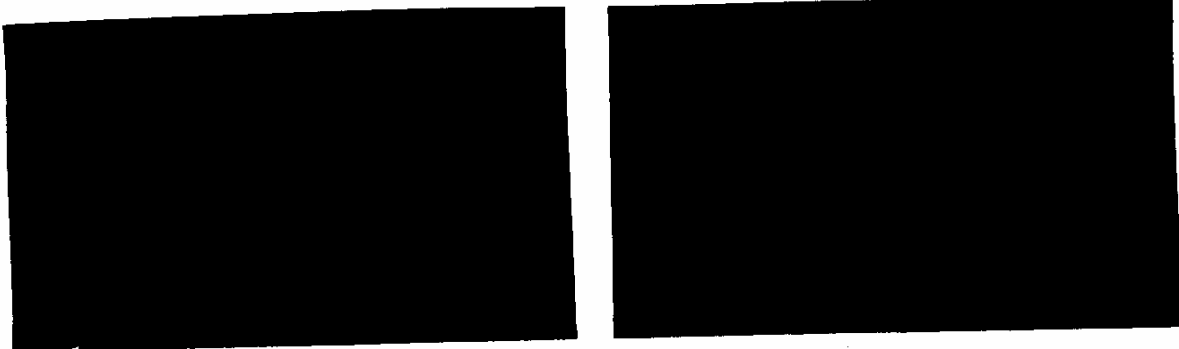
(b) v_e e i_a

Figura 19 - $I_{aEF} = 12$ A; $V_{eEF} = 260$ V; $\alpha = 136,72^\circ$

Configuração 7.a					Configuração 7.b									
CASO A					CASO B					CASO C				
V_{eEF} (V)	I_{CMED} (A)	I_{aEF} (A)	I_{Am} (A)	α (graus)	V_{eEF} (V)	I_{CMED} (A)	I_{aEF} (A)	I_{Am} (A)	α (graus)	V_{eEF} (V)	I_{CMED} (A)	I_{aEF} (A)	I_{Am} (A)	α (graus)
64	0,60	6	10,06	145,38	82	0,59	6	10,36	131,46	260	0,585	6	10,59	147,64
64	1,26	12	20,53	122,35	81,5	1,21	12	20,61	117,3	260	1,23	12	20,90	136,72
64	1,92	18	29,57	110,77	80,5	1,85	18	30,61	104,9	260	1,83	18	31,20	129,44
64	2,62	24	39,09	100,25	80	2,50	24	40,62	93,27	260	2,65	24	41,80	125,39

Tabela I

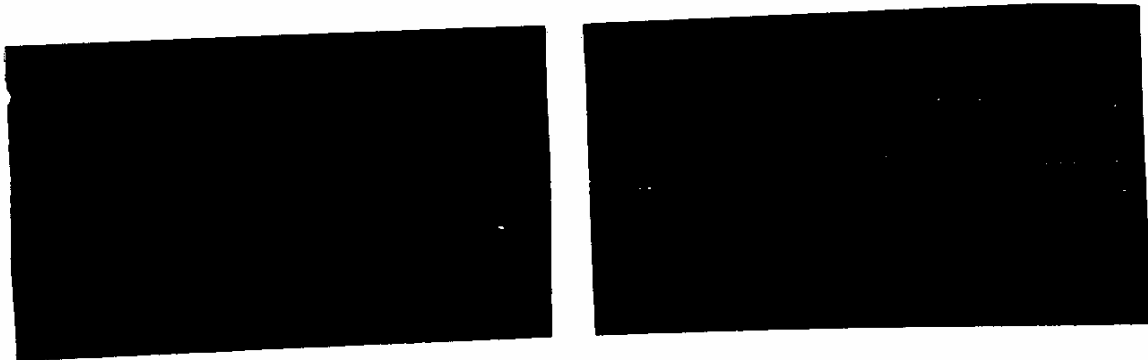
5.3.1. ENSAIOS USANDO A CONFIGURAÇÃO DA FIGURA 7.a.



(a) i_c

(b) i_a

Figura 20 - Transitórios em i_c e i_a - escala: 0,2 seg./div.. $V_{eEF} = 62$ V



(a) i_c

(b) i_a

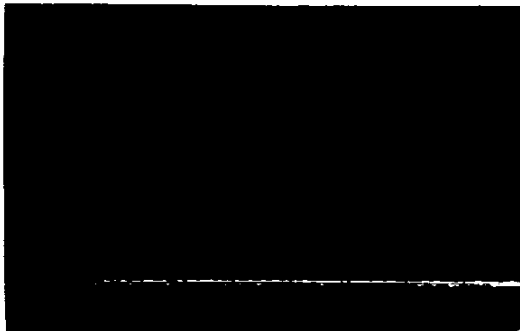
Figura 21 - Transitórios em i_c e i_a - escala: 0,2 seg./div.. $V_{eEF} = 82$ V

A figura 20 mostra os transitórios na corrente contínua e corrente alternada, para variações da corrente alternada de 0 a 12 e 12 a 18 A eficazes, obtendo-se respectivamente 0,9 seg. e 0,40 seg. como tempo de resposta e mantendo-se a tensão de excitação em 62 V eficazes.

Os transitórios da figura 21 ocorreram através de variações na corrente alternada de 0 - 12 e 12 a 18 A eficazes, obtendo-se, respectivamente, 0,8 seg. e 0,36 seg como tempo de resposta, com uma tensão de excitação em 82 V eficazes.

5.3.2. ENSAIOS USANDO A CONFIGURAÇÃO DA FIGURA 7.b.

As condições do transitório da figura 22, para variações em i_a de 0 - 12



(a) i_c



(b) i_a

Figura 22 - Transitórios em i_c e i_a - escala: 0,2 seg./div.. $V_{EF} = 260$ V.

12 - 18 A eficazes, obtendo-se, respectivamente, 0,7 seg. e 0,34 seg. como tempo de resposta, mantendo-se a tensão de excitação em 260 V eficazes (com ângulos de disparo maiores do que no caso anterior).

Como previsto anteriormente através das curvas da figura 8, usando o circuito da configuração 7.b obtemos um tempo de resposta menor, pois neste caso, quando a tensão v_e se inverte os tiristores T_1 e T_2 continuam a conduzir até que a corrente i_c venha a zero e, quando são disparados os tiristores T_3 e T_4 as bobinas de excitação dos reatores estão novamente em seu estado de corrente nula.

5.4. DETERMINAÇÃO DO CONTEÚDO HARMÔNICO

Para o cálculo do conteúdo harmônico utilizou-se o processo clássico, partindo da forma de onda da corrente (3).

Mostra-se a seguir, o cálculo das harmônicas usando o circuito da configuração 7.b, e, retirando-se os dados do experimento em que foi medida a corrente de 12 A eficazes no lado de corrente alternada. Os cálculos foram realizados para apenas um caso, pois pela análise da tabela I, verificou-se que o conteúdo harmônico de um caso para ou-

tro é apenas ligeiramente diferente. Pretende-se que este cálculo de harmônico seja incluído no programa de simulação computacional. Com isto, poder-se-á efetuar rapidamente o cálculo para diversas formas de excitação.

5.4.1. CÁLCULO DAS HARMÔNICAS DO LADO C.A.

Usando a figura 17.b para se obter os valores da corrente alternada em função do tempo e, aplicando-se o método gráfico (3), encontramos:

$$i_a(t) = 16,571 \text{ sen}\omega t - 0,407 \text{ cos}\omega t - 3,481 \text{ sen}3\omega t + 0,924 \text{ cos}3\omega t + 0,195 \text{ sen}5\omega t + 0,423 \text{ cos}5\omega t + 0,13 \text{ sen}7\omega t - 0,087 \text{ cos}7\omega t + 0,103 \text{ sen}9\omega t - 0,047 \text{ cos}9\omega t \quad (27)$$

5.4.2. CÁLCULO DOS HARMÔNICOS DO LADO DE CORRENTE CONTÍNUA

Da figura 17.a e usando o método gráfico (3), temos:

$$i_c(t) = 2,196 \text{ sen}\omega t + 0,622 \text{ cos}\omega t - 0,873 \text{ sen}3\omega t - 1,025 \text{ cos}3\omega t - 0,076 \text{ sen}5\omega t + 0,294 \text{ cos}5\omega t + 0,058 \text{ sen}7\omega t + 0,259 \text{ cos}7\omega t + 0,093 \text{ sen}9\omega t - 0,119 \text{ cos}9\omega t \quad (28)$$

ou:

$$i_c(t) = 2,282 \text{ sen}(\omega t + 15,81^\circ) - 1,346 \text{ sen}(3\omega t + 49,58^\circ) - 0,304 \text{ sen}(5\omega t - 75,50^\circ) + 0,265 \text{ sen}(7\omega t + 77,38^\circ) + 0,151 \text{ sen}(9\omega t - 51,99^\circ) \quad (29)$$

As harmônicas totais vistas pela fonte, serão:

$$i(t) = i_a(t) + i_c(t) \quad (30)$$

ou:

$$i(t) = 18,768 \text{ sen}(\omega t + 0,66^\circ) - 4,355 \text{ sen}(3\omega t + 1,33^\circ) + 0,727 \text{ sen}(5\omega t + 80,57^\circ) + 0,255 \text{ sen}(7\omega t + 42,45^\circ) + 0,208 \text{ sen}(9\omega t + 20,17^\circ) \quad (31)$$

5.4.3. RESULTADOS

A tabela II mostra uma comparação entre o conteúdo harmônico do reator controlado a tiristores (RCT) e o do reator a saturação controlada (RSC) proposto no trabalho, para um mesmo ângulo de disparo.

Pela tabela II verifica-se que o conteúdo harmônico do reator a saturação controlada é muito menor do que o do reator con-

	RSC		RCT	
	Corrente em A.	Corrente em % Fund.	Corrente em A.	Corrente em % Fund.
Fund.	18,768	100	2,282	100
3ª H.	4,355	23,20	1,346	58,98
5ª H.	0,727	3,87	0,304	13,32
7ª H.	0,255	1,36	0,265	11,61
9ª H.	0,208	1,11	0,151	6,62

Tabela II

trolado por tiristores. Através da ligação trifásica em triângulo (Δ), pode-se eliminar os harmônicos múltiplos de 3, reduzindo ainda mais o conteúdo harmônico.

6. CONCLUSÕES

O compensador de potência reativa controlado pelo grau de saturação (RSC), analisado neste trabalho, se comparado a uma máquina síncrona, apresenta as vantagens de ser estático, exigir manutenção menos rigorosa e possuir uma resposta mais rápida. Em contrapartida, é um dispositivo gerador de componentes harmônicas. Com relação ao sistema de compensação que emprega reatores controlados diretamente por tiristores (RCT), o RSC contém harmônicas com menor amplitude e emprega semicondutores de corrente menor portanto, de custo mais baixo. Apresenta, por outro lado, uma resposta mais lenta do que o RCT.

A variação conseguida na corrente alternada foi bastante significativa (cerca de 11 vezes). Isto indica que a potência reativa indutiva pode ser variada desta ordem de grandeza, ou mais, se for feito um projeto adequado.

O modelo matemático elaborado, permite que o RSC seja estudado dinamicamente sob diversas condições de trabalho.

Os experimentos mostraram que a configuração com quatro tiristores em ponte é mais favorável do ponto de vista da velocidade de resposta. A outra configuração, entretanto, devido ao seu custo menor, pode ser empregada, se o tempo de resposta não for um fator muito importante.

Pretende-se, em continuidade, fazer simulação através de computador, comparando os resultados com os já obtidos experimentalmente. Este modelo possibilitará a análise do tempo de resposta e do conteúdo harmônico para diversos ângulos de disparo.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] - AZEVEDO, H.R., (1982) - Controle Automático Contínuo do Fator de Potência com Dispositivos Estáticos. Tese D.Sc, EESC - USP.
- [2] - MILLER, T.J.E. - (1982) - Reactive Power Control in Electric Systems. John Wiley & Sons, New York
- [3] - KERCHNER e CORCORAN, (1962) - Circuitos de Corrente Alternada. 3ª ed., Globo, Porto Alegre.
- [4] - BARBI, I. (1986) - Eletrônica de Potência. 1ª ed., Editora da UFSC, Florianópolis.
- [5] - OLIVEIRA, J.C. (1986) - Compensação de Reativos em Sistemas Elétricos, UFU, Uberlândia.
- [6] - SAMESIMA, M.I., (1984) - Compensadores Estáticos de Reativos e de Desequilíbrios em Sistemas Elétricos de Potência. Tese M.Sc, EPUSP, São Paulo.