



GRUPO IV

GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA – GAT

ANÁLISE DE DESEMPENHO DE STATCOM QUASI 24 PULSOS

FRANCISCO DA COSTA LOPES *
CEPEL

EDSON HIROKAZU WATANABE
COPPE/UFRJ

LUÍS GUILHERME B. ROLIM
COPPE/UFRJ

RESUMO

O compensador síncrono estático (*Static Synchronous Compensator* – STATCOM) é um equipamento construído dentro do conceito FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) e é composto basicamente por inversores, capacitor CC, transformadores e um sistema de controle. Sua principal função é a compensação de potência reativa em tempo real, podendo ser aplicado na correção do fator de potência junto a uma carga ou na correção de flutuações de tensão em uma rede de distribuição ou linha de transmissão.

Este artigo apresenta a implementação de um STATCOM *quasi* 24 pulsos e mostra uma análise em regime estacionário e dinâmico baseada em simulações computacionais de um STATCOM com esta topologia.

PALAVRAS-CHAVE

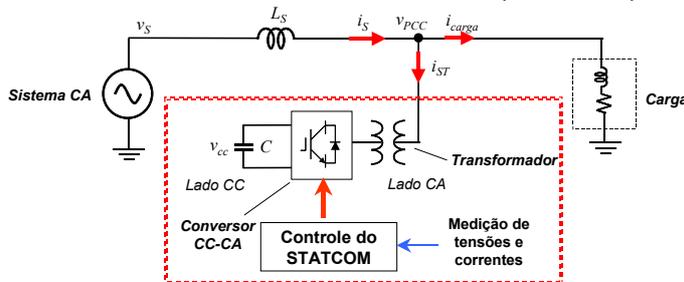
STATCOM, Implementação, Análise de desempenho

1.0 - INTRODUÇÃO

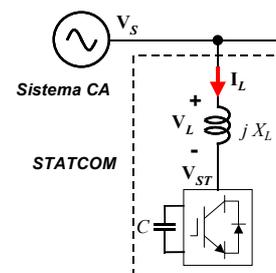
O STATCOM é um equipamento FACTS [1] do tipo paralelo capaz de injetar corrente reativa (indutiva ou capacitiva) controlada no ponto de conexão comum (PCC). O controle da potência reativa permite ao STATCOM ser aplicado em linhas de transmissão para aumentar, em regime permanente ou transitoriamente, a capacidade de transmissão de energia. Em aplicações de baixa e média tensão, o controle da potência reativa visa à correção do fator de potência ou a regulação de tensão.

O STATCOM, diferente de outros compensadores de potência reativa, é construído utilizando conversores estáticos de potência baseados em chaves autocomutadas, isto é, chaves com controle de corte e condução. Um diagrama do STATCOM conectado à rede elétrica é mostrado na Figura 1(a), onde são apresentadas suas partes componentes: conversor CC-CA com um capacitor em seu lado CC, transformador e sistema de controle.

O funcionamento do STATCOM como compensador de potência reativa pode ser visualizado com o auxílio do diagrama unifilar da Figura 1 (b), que é uma simplificação da Figura 1 (a) com as variáveis tensão e corrente representadas por fasores e os harmônicos desconsiderados. O sistema CA é representado pela fonte de tensão V_S com impedância nula e a tensão nos terminais do conversor que compõe o STATCOM é representada pelo fasor V_{ST} , que, por simplicidade, deve ser também entendido como uma fonte de tensão. A reatância equivalente entre o PCC e os terminais do STATCOM é representada por X_L .



(a) Partes componentes de um STATCOM.



(b) Diagrama unifilar equivalente do STATCOM.

FIGURA 1 – Diagrama de um STATCOM genérico conectado à rede elétrica.

As equações da potência ativa e reativa entre essas duas fontes [2] são dadas por:

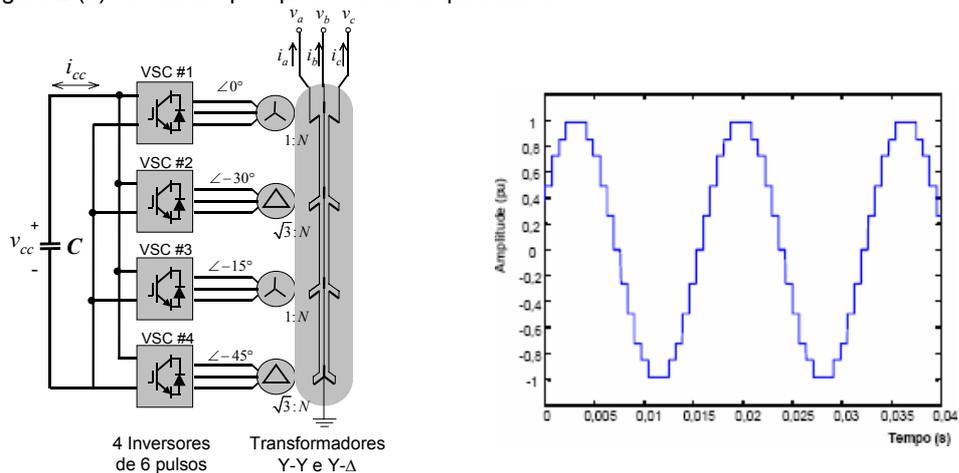
$$P_S = \frac{V_S \cdot V_{ST}}{X_L} \sin \delta, \quad (1)$$

$$Q_S = \frac{V_S^2}{X_L} - \frac{V_S \cdot V_{ST}}{X_L} \cos \delta. \quad (2)$$

De (1) tem-se que quando a tensão V_S está adiantada em relação à V_{ST} , isto é, $90^\circ > \delta > 0$, há um fluxo de potência ativa na direção do STATCOM (fonte V_{ST}) e um carregamento do capacitor do lado CC. Quando a tensão V_S está atrasada em relação à V_{ST} , isto é, $-90^\circ < \delta < 0$, há um fluxo de potência ativa na direção do sistema (fonte V_S) e um descarregamento do capacitor do lado CC. O controle do ângulo δ , portanto, pode ser usado para controlar a tensão do capacitor do elo CC e também para controlar o módulo da tensão V_{ST} , uma vez há uma relação direta de proporcionalidade entre essas duas tensões.

De (2) tem-se que quando V_{ST} é **menor** que V_S , isto é, $V_{ST} < V_S$ e $\delta = 0$, a potência reativa nos terminais do STATCOM é **indutiva**, isto é, $Q_S > 0$. Neste caso a corrente I_L está atrasada em relação à V_S . Quando V_{ST} é **maior** que V_S , isto é, $V_{ST} > V_S$ e $\delta = 0$, a potência reativa nos terminais do STATCOM é **capacitiva**, isto é, $Q_S < 0$. Neste caso a corrente I_L está adiantada em relação à V_S .

O STATCOM *quasi* 24 pulsos de que trata este trabalho é composto por quatro inversores fonte de tensão (Voltage Source Converter - VSC) de 6 pulsos, um capacitor comum do lado CC e quatro transformadores conectados em Y-Y e Δ -Y dois a dois, sendo que do lado CA estes transformadores estão em Y aberto com seus enrolamentos conectados em série como mostra a Figura 2 (a). Os VSCs 3 e 4 são acionados com uma defasagem de -15° em relação aos VSCs 1 e 2. Este arranjo permite a eliminação dos harmônicos 11, 13, 35, 37 etc, na tensão CA. A forma de onda de tensão nos terminais CA do conversor deste STATCOM *quasi* 24 pulsos é mostrada na Figura 2 (b). O sistema de controle do STATCOM da Figura 2 (a) foi omitido por questões de simplicidade.



(a) Conexão de transformadores e inversores. (b) Forma de onda de tensão – fase a.

FIGURA 2 – STATCOM *quasi* 24 pulsos.

2.0 - STATCOM QUASI 24 PULSOS EXPERIMENTAL

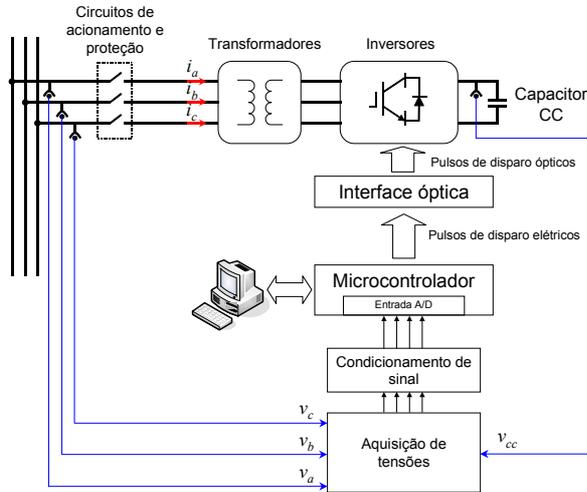
A Figura 3 (a) mostra o diagrama de blocos do STATCOM experimental [3], onde todo o sistema de controle é digital, tendo sido implementado em um microcontrolador conforme explicado mais adiante.

As conexões entre transformadores, inversores e capacitor CC é a mesma mostrada na Figura 2 (a). Este protótipo é composto por quatro inversores comerciais de 6 pulsos a IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), modelo CFW-09 (220 V), fabricados pela WEG Automação [4]. A potência nominal de cada inversor vale 15 kVA. Deste modo, a potência nominal do STATCOM é de 60 kVA, que é a soma da potência individual de cada inversor. Cada inversor possui um capacitor de $4.000 \mu\text{F}$. Como todos os capacitores estão em paralelo, a capacitância total do lado CC é de $16.000 \mu\text{F}$.

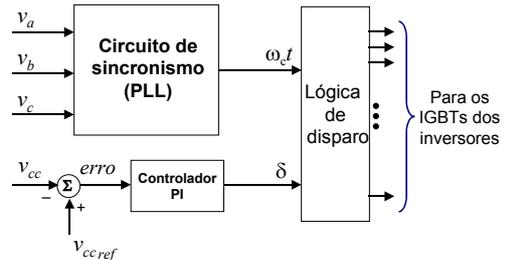
Os enrolamentos primários dos transformadores são aqueles conectados aos inversores e os enrolamentos secundários são os que estão conectados à rede elétrica. O protótipo foi construído para operar na tensão da rede do laboratório onde foi construído, isto é, 127 V fase-neutro. Para se ter esta tensão no lado conectado à rede, a tensão no enrolamento secundário de cada transformador deve ser de $\frac{1}{4}$ de 127 V, isto é, 31,75 V, uma vez que estes enrolamentos estão em série. Os transformadores Y-Y possuem relação de transformação igual a 4 e os transformadores Δ -Y possuem relação de transformação igual a 6,92.

Os demais blocos mostrados na Figura 3 (a), isto é, aquisição de tensões, condicionamento de sinal, microcontrolador e interface óptica, constituem o controlador do STATCOM. Foi utilizado o microcontrolador SH7047 da Hitachi Micro Systems Europe (atual Renesas) [5] para a implementação do sistema de controle que é

mostrado no diagrama de blocos da Figura 3 (b). O sistema de controle recebe como entradas as tensões trifásicas da rede e a tensão CC do capacitor e retorna como saída os pulsos de disparo dos IGBTs dos inversores. Estes pulsos de disparo acionam os inversores de modo a gerar tensões em seus terminais CA sincronizadas com as tensões da rede. O sinal de sincronismo, denominado $\omega_c t$, é calculado por meio de um PLL (*Phase Locked Loop*) [6].



(a) Diagrama de blocos do STATCOM experimental.



(b) Diagrama de blocos do sistema de controle do STATCOM.

FIGURA 3 – Diagramas de blocos do STATCOM experimental.

De (2) tem-se que a potência reativa depende da amplitude da tensão CA do STATCOM. Sabe-se que esta tensão é diretamente proporcional à tensão CC do capacitor (v_{cc}). Portanto, o controle de potência reativa pode ser feito controlando-se v_{cc} . Esta tensão é medida e comparada com uma tensão de referência, de onde se obtém um sinal de erro que é aplicado a um controlador PI. Este controlador retorna o ângulo δ que, de acordo com (1), proporciona um fluxo de potência ativa momentâneo que, por sua vez, irá proporcionar a carga ou descarga parcial do capacitor CC, elevando ou reduzindo sua tensão. Deste modo, consegue-se variar a amplitude da tensão CA e a potência reativa nos terminais do STATCOM.

2.1 Resultados experimentais

Para a obtenção dos resultados experimentais, foi aplicado um degrau na entrada de referência v_{ccref} que varia de 250 V a 310 V, conforme mostrado na Figura 4. Quando v_{cc} vale 250 V, a tensão CA é tal que proporciona potência reativa de 2 kvar (indutiva) em cada fase do STATCOM. Quando v_{cc} vale 310 V, a tensão CA é tal que proporciona potência reativa de - 2 kvar (capacitiva) em cada fase do STATCOM. Foi utilizado um indutor de 2 mH em série com os enrolamentos Y do lado CA do STATCOM. Pode-se observar que v_{cc} leva cerca de 0,5 segundo para atingir a referência após aplicado o degrau em $t = 2$ s. Será mostrado mais adiante através de simulações computacionais que indutores desta ordem de grandeza tornam a reposta do STATCOM lenta.

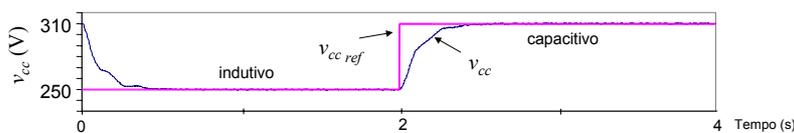


FIGURA 4 – Resposta experimental ao degrau aplicado em v_{ccref} .

Na Figura 5 (a)-(f) são mostradas as formas de onda de tensão e corrente e o espectro harmônico de tensão em regime permanente do STATCOM operando no modo indutivo ($Q_s > 0$) e no modo capacitivo ($Q_s < 0$).

Pode-se observar através das Figuras 5 (a) e (d) que a tensão na fase a do STATCOM está sincronizada com a referência (tensão v_a da rede elétrica). Nestas figuras se observa que ambas as ondas, a de referência (senoidal) e a de *quasi* 24 pulsos possuem a mesma frequência fundamental e fase.

Observando a Figura 5 (a) nota-se que a tensão nos terminais do STATCOM é menor que a tensão da rede CA. De acordo com (2) isto significa que há potência reativa indutiva nos terminais do STATCOM. Isto é comprovado pelo gráfico da Figura 5 (b) onde a corrente $i_{STATCOM}$ aparece atrasada em 90° em relação à tensão da rede, indicando comportamento indutivo.

Analogamente, o STATCOM tem comportamento capacitivo no caso mostrado na Figura 5 (d) e (e), onde a tensão em seus terminais é maior que a tensão da rede. Percebe-se que a corrente do STATCOM está adiantada em 90° em relação à tensão da rede CA.

As Figuras 5 (c) e (f) mostram que os harmônicos que se destacam na tensão do STATCOM são os de ordem 23, 24, 47, 49 etc e os demais aparecem minimizados (11, 13, 35, 37 etc) ou nulos, conforme explicado anteriormente.

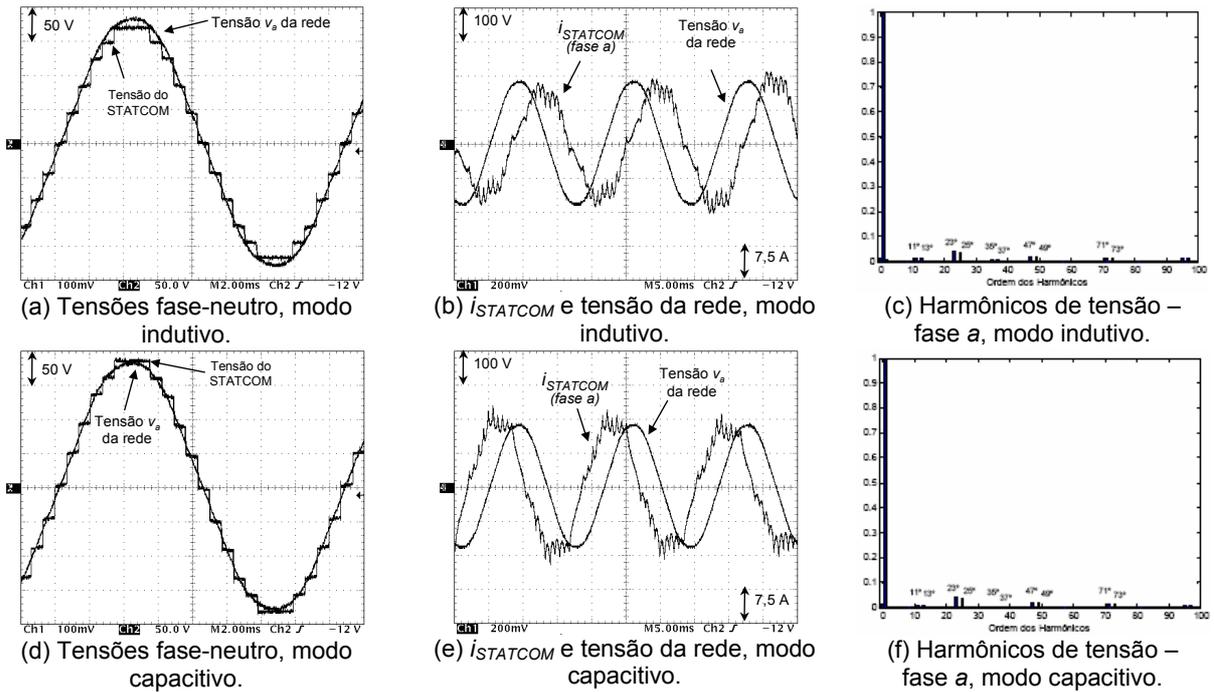


FIGURA 5 – Tensões e correntes no STATCOM e espectros harmônicos de tensão.

3.0 - ANÁLISE EM REGIME PERMANENTE

Foram realizadas simulações computacionais utilizando o programa PSCAD versão 4.01, onde os dados reais dos inversores e transformadores, descritos anteriormente, foram utilizados na modelagem do STATCOM neste programa de simulação. O STATCOM foi modelado de acordo com o diagrama unifilar da Figura 6.

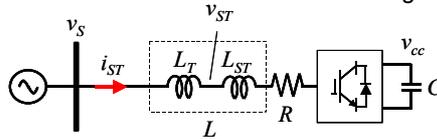


FIGURA 6 – Modelo do STATCOM utilizado nas simulações.

O resistor R representa as perdas resistivas nos transformadores. O indutor L_{ST} representa a indutância de dispersão dos transformadores do STATCOM. O indutor L_T , inserido propositalmente, pode estar representando a indutância de dispersão de um transformador de acoplamento ou um indutor auxiliar, por exemplo. A soma de L_T com L_{ST} representa a indutância de dispersão equivalente entre o STATCOM e o PCC, denominada apenas pela letra L e com reatância igual a X_L . A indutância de dispersão do sistema CA é considerada desprezível, ou seja, o STATCOM está conectado a uma barra infinita (sistema “forte”) e a tensão no PCC é invariável e igual à tensão v_s da fonte CA.

Uma nova abordagem para a potência reativa é feita neste trabalho. Nas simulações foi empregado o sistema de controle baseado na Teoria das Potências Instantâneas, ou Teoria p-q. Foi utilizada como variável de controle a **potência imaginária q** ao invés da potência reativa convencional Q_s , obtida de (2). A potência imaginária q é uma forma mais genérica de se tratar a potência reativa. O conceito de potência imaginária foi introduzido por Akagi em [7] quando propôs a Teoria Generalizada das Potências Instantâneas. Mais tarde, estudos de aplicabilidade foram feitos pelo mesmo Akagi [8] e a extensão detalhada da teoria para sistemas trifásicos a 4 fios foi feita por Watanabe *et al.* [9][10].

Na Teoria p-q utilizam-se tensões e correntes transformadas para um sistema de coordenadas α - β -0, onde as coordenadas α - β são ortogonais entre si. Esta transformação é conhecida como Transformação de Clarke e é dada pela seguinte expressão matricial:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

A matriz de transformação para as correntes é a mesma, bastando substituir as tensões v_a , v_b e v_c por i_a , i_b e i_c e as tensões v_0 , v_α e v_β por i_0 , i_α e i_β .

De posse das tensões e correntes nas coordenadas α - β -0, as potências **real p** , **imaginária q** e de **seqüência zero p_0** são obtidas através de:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4)$$

O diagrama de blocos do sistema de controle baseado na potência imaginária q é mostrado na Figura 7:

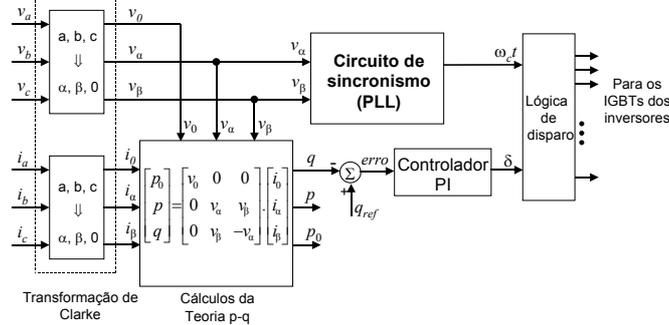


FIGURA 7 – Diagrama de blocos do sistema de controle baseado na potência imaginária q .

Uma vez medida a potência imaginária q , esta é comparada com uma referência q_{ref} e o erro proveniente desta operação é aplicado a um controlador PI, que retorna o ângulo de potência δ . A lógica de disparo recebe o ângulo de sincronismo $\omega_c t$ do PLL (já descrito anteriormente) e o ângulo de potência δ e aciona os IGBTs dos inversores.

3.1 Influência da reatância CA

Foi analisada a influência da indutância L nos harmônicos e na variação de v_{cc} . Foi utilizado o controle da potência imaginária q , como descrito anteriormente, com q_{ref} igual a 60 kva.

NOTA: kva: nova unidade de potência imaginária, conforme proposto por Watanabe *et al.* em [10]. Na ausência de harmônicos, desbalanços e distorções 1 kva equivale a 1 kvar.

O conteúdo harmônico da tensão v_{ST} é muito pouco influenciado pelo valor de L . A Distorção Harmônica total de tensão (DHT_v) se mantém em torno de 5,1 % para os valores de L utilizados nas simulações. Por outro lado, o conteúdo harmônico de corrente é fortemente influenciado pela indutância, o que pode ser mais bem visualizado através dos gráficos da Distorção Harmônica Total de corrente (DHT_i) da Figura 8.

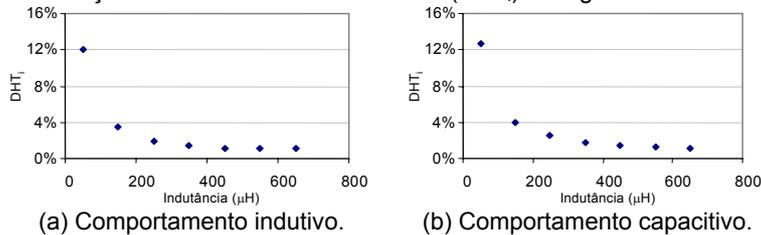


FIGURA 8 – Distorção Harmônica Total de corrente (DHT_i) em função da indutância L .

Nota-se que a DHT_i decresce com característica exponencial conforme L se torna maior. Para valores maiores que 300 μH a variação na DHT_i é mínima e esta se mantém praticamente constante. Portanto, a indutância L age como um filtro, atenuando os harmônicos. No caso de L ser menor que 300 μH , a inclusão de um filtro passivo deve ser considerada para se atenuar os harmônicos de maior amplitude, isto é, os harmônicos característicos.

De (2) sabe-se que a potência reativa depende da amplitude da tensão CA do STATCOM. Sabe-se também que a tensão CA é diretamente proporcional à tensão CC. Por outro lado, de (2) tem-se que a potência reativa depende também da reatância entre as fontes V_s e V_{sr} . Portanto, para manter a mesma potência reativa qualquer que seja o valor de L , o controle atua no sentido de variar as amplitudes das tensões CA e CC conforme se varia L . Os gráficos da Figura 9 mostram a tensão CC necessária em função de L para se ter 60 kva no STATCOM.

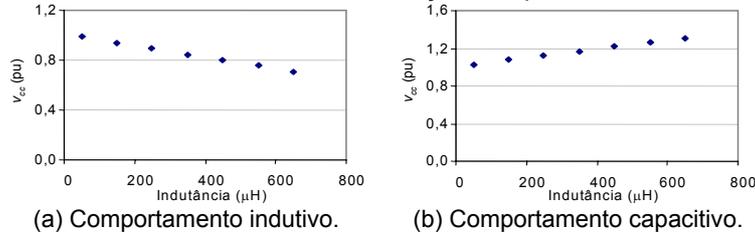


FIGURA 9 – Tensão CC em função da indutância L .

Percebe-se que v_{cc} varia linearmente com L . No caso indutivo nota-se que para L igual a 400 μH , v_{cc} vale aproximadamente 80 % de seu valor base, portanto há uma variação de -20 % em v_{cc} para este valor de L . No caso capacitivo, também se observa uma variação acima de 20 % em v_{cc} quando L é maior que 400 μH aproximadamente. Variações desta ordem de grandeza devem ser evitadas pois podem provocar desligamento

automático dos circuitos de proteção dos inversores do STATCOM por subtensão no circuito CC (no modo indutivo) ou então implicariam um sobredimensionamento de componentes (no modo capacitivo), o que elevaria consideravelmente os custos de projeto. Acredita-se que o mais razoável é que a indutância L esteja numa faixa intermediária de modo a favorecer uma variação em v_{cc} não superior a 20 %. Valores entre 200 e 400 μH estariam dentro de uma faixa aceitável, para o STATCOM considerado neste trabalho.

3.2 Influência do capacitor na oscilação sobre a tensão CC

Quando o STATCOM atinge o regime permanente, uma oscilação em v_{cc} irá existir devido aos harmônicos característicos da tensão CA do conversor *quasi* 24 pulsos, isto é, os harmônicos de ordem $12n \pm 1$ (n inteiro). Os valores teóricos destes harmônicos foram descritos por Barbosa [11] e são mostrados na Tabela 1, onde V_1 corresponde à amplitude da componente fundamental e V_i corresponde à amplitude do harmônico de ordem i .

TABELA 1 – Amplitude de cada harmônico do conversor *quasi* 24 pulsos.

Ordem do Harmônico	$V_i/V_1 \times 100$ (%)
11	1,197
13	1,013
23	4,348
25	4,000
35	0,376
37	0,356
47	2,127
49	2,041

A potência real p , obtida através de (4), é composta de uma parcela oscilante, denominada \tilde{p} , e de uma parcela fixa, denominada \bar{p} . Havendo fluxo de potência ativa entre o STATCOM e a rede elétrica, apenas a parcela oscilante \tilde{p} irá contribuir para produzir oscilação em v_{cc} , conforme mostra a Figura 10.

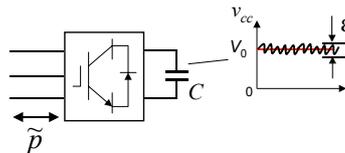


FIGURA 10 – Relação entre potência oscilante \tilde{p} e oscilação sobre v_{cc} .

Assumindo que as correntes nos terminais do STATCOM são puramente senoidais e que as tensões possuem as componentes harmônicas mostradas na Tabela 1, pode-se demonstrar utilizando as expressões matriciais dadas em (3) e (4) que a potência real p oscila na frequência de 720 Hz e seus múltiplos. Integrando \tilde{p} por meio período de onda, isto é, 694 μs , é obtida a variação de energia a ser armazenada ou descarregada do capacitor CC, dependendo do sinal de \tilde{p} . Deste modo, a seguinte equação é estabelecida:

$$\frac{1}{2}CV_1^2 - \frac{1}{2}CV_2^2 = \Delta E = \int_0^{T/2} \tilde{p} dt, \quad (5)$$

onde:

- V_1 é o valor máximo de tensão do capacitor;
- V_2 é o valor mínimo de tensão do capacitor;
- ΔE é a variação de energia no capacitor quando sua tensão varia de V_1 a V_2 ;
- T é o período de \tilde{p} .

Rearranjando os termos, a equação acima pode ser reescrita como:

$$CV_0^2 \cdot \frac{(V_1 - V_2)}{V_0} = \int_0^{T/2} \tilde{p} dt, \quad (6)$$

onde:

- V_0 é a tensão média sobre o capacitor, isto é, $(V_1 + V_2)/2$;
- o valor $(V_1 - V_2)/V_0$ é a variação percentual da tensão do capacitor, definida como ϵ e mostrada na Figura 12.

Sendo assim, uma vez escolhido um valor para ϵ e conhecendo-se as correntes e tensões do circuito, é possível determinar o valor de C :

$$C = \frac{\int_0^{T/2} \tilde{p} dt}{V_0^2 \epsilon}. \quad (7)$$

Para obter a potência real p foram utilizados os valores mostrados na Tabela 1 para a tensão, que tem componente fundamental igual a 127 V eficazes, e foi considerada uma corrente senoidal de 157,5 A eficazes, que é a corrente base do STATCOM. A partir da potência real p calculada, foi obtida a potência real oscilante \tilde{p} . Efetuando a integral mostrada em (5) foi obtida a variação de energia no capacitor, $\Delta E = 0,65$ Joules. Foi utilizado

o valor 282,16 V para V_0 , que é o valor base da tensão CC. Com base neste valor e na variação de energia calculada acima, foi traçado o gráfico da Figura 11 do capacitor CC mínimo para ε variando de 1 % a 20 %.

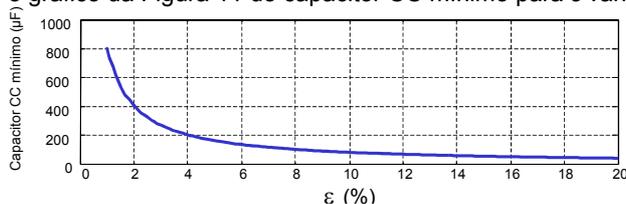


FIGURA 11 – Capacitor mínimo em função de ε .

Percebe-se que a curva acima possui uma assíntota no zero, significando que não existe capacitor capaz de proporcionar tensão CC isenta de oscilações. Para ε igual a 2 %, o capacitor mínimo deve ser de 400 μF . Se oscilações maiores na tensão CC forem permitidas, acima de 15 %, pode-se utilizar um capacitor menor que 100 μF , o que implicaria em diminuição de custos de projeto, porém com a conseqüente deterioração da qualidade da tensão e corrente geradas.

Rearranjando os termos de (7) pode-se determinar qual a variação de tensão ε que existirá na tensão CC para um dado capacitor. O capacitor de 16.000 μF usado no protótipo e nas simulações, teoricamente, proporciona uma variação (*ripple*) na tensão CC de aproximadamente 0,05 % em regime permanente.

4.0 - ANÁLISE DA RESPOSTA DINÂMICA

Nesta seção é analisada a resposta dinâmica do STATCOM operando em malha aberta, isto é, sem realimentação. Pode-se verificar através de um método gráfico se um sistema é ou não de primeira ordem, isto é, um sistema cuja função de transferência é $Y(s) = 1/(\tau s + 1)$, obtendo sua resposta à entrada degrau e traçando o gráfico da expressão dada em (8) em função do tempo com o eixo das ordenadas em escala logarítmica.

$$g(t) = \frac{|y(t) - y(\infty)|}{|y(0) - y(\infty)|}, \quad (8)$$

onde:

- $y(t)$ é o valor atual da variável y ;
- $y(\infty)$ é o valor de y para $t \rightarrow \infty$;
- $y(0)$ é o valor de y no instante zero.

Se a curva resultante for aproximadamente uma reta, fica comprovada que a resposta é uma função exponencial e o sistema pode ser considerado de primeira ordem. Uma outra propriedade deste método é a obtenção imediata da constante de tempo τ por inspeção gráfica. O valor de t correspondente a 36,8 % abaixo do valor final no eixo das ordenadas corresponde à constante de tempo τ .

Foi realizada uma simulação em malha aberta do STATCOM onde um degrau de referência foi aplicado ao ângulo de potência em $t = 2,5$ s de modo a proporcionar 1 p.u. indutivo de potência reativa nos terminais CA. O método descrito acima foi aplicado para $L = 264 \mu\text{H}$ e $C = 16000 \mu\text{F}$ e o gráfico resultante é mostrado na Figura 12.

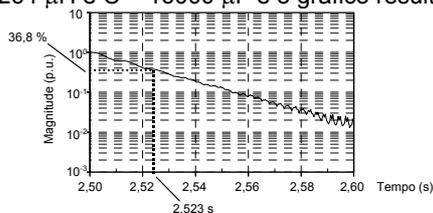


FIGURA 12 – Curva em escala logarítmica da resposta ao degrau do STATCOM operando em malha aberta.

Pode-se observar que o gráfico resultante é aproximadamente uma reta e o valor de τ neste caso vale 23 ms. Uma outra forma de se verificar qual a ordem de um sistema é através do levantamento da sua resposta em frequência. Conhecendo-se o valor do ângulo de potência necessário para se ter 1 p.u. de potência reativa na saída, aplicou-se um sinal senoidal com amplitude máxima igual a este valor de δ conhecido na entrada e observou-se a magnitude e fase do sinal de saída. Foram realizadas 30 simulações, uma para cada valor de frequência, utilizando os mesmos valores simulados anteriormente, isto é, $L = 264 \mu\text{H}$ e $C = 16000 \mu\text{F}$. Deste modo, obteve-se a resposta em frequência mostrada na Figura 13.

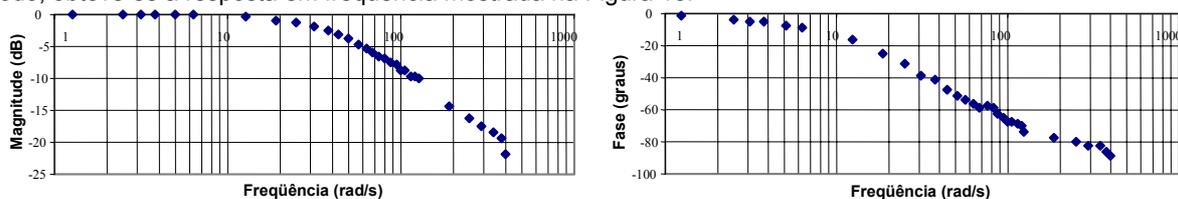
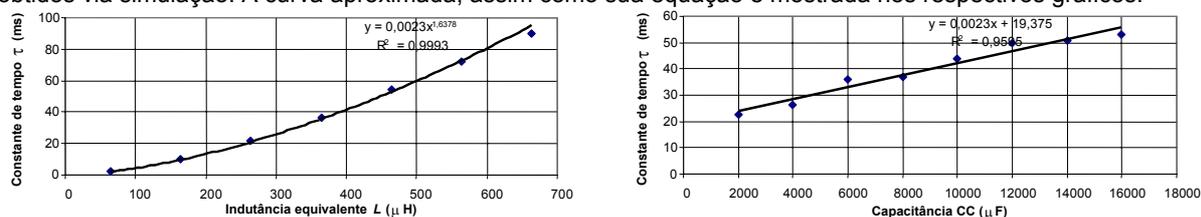


FIGURA 13 – Resposta em frequência em malha aberta do STATCOM para $L = 264 \mu\text{H}$ e $C = 16000 \mu\text{F}$.

Observando os gráficos da Figura 13 percebe-se que a curva da magnitude até o ponto de -3 dB permanece constante e muito próximo de zero e após este ponto decresce a uma taxa de 20 dB por década de frequência, o que caracteriza um sistema de primeira ordem. O gráfico da fase em função da frequência mostra que para baixas frequências há pouco atraso na resposta e para altas frequências a defasagem tende a -90° . Portanto, os gráficos da resposta em frequência mostrados acima revelam um comportamento típico de um sistema de primeira ordem.

Pode-se demonstrar que o valor da constante de tempo τ corresponde ao inverso da frequência no ponto de -3dB. Assim, uma vez que a frequência no ponto de -3 dB vale aproximadamente 40 rad/s, τ neste caso vale 25 ms, o que vem de encontro ao que foi obtido pelo método gráfico exposto anteriormente. Portanto, tal método pode ser usado para se ter uma boa estimativa da constante de tempo τ do STATCOM operando em malha aberta, assumindo que seu comportamento neste caso é semelhante ao de um sistema de primeira ordem.

Deste modo, foram realizadas 7 simulações alterando o valor de L e mantendo fixo em 16000 μF o valor de C e 8 simulações mantendo fixo em 464 μH o valor de L e alterando-se C . Em cada simulação foi obtida a constante de tempo τ através do método gráfico exposto acima. Deste modo, foi obtido o gráfico da Figura 14 (a) que mostra a influência de L na constante de tempo e o gráfico da Figura 14 (b) que mostra influência de C na constante de tempo. Em ambos os gráficos foi obtida, via cálculos computacionais, a curva que melhor se adequou aos pontos obtidos via simulação. A curva aproximada, assim como sua equação é mostrada nos respectivos gráficos.



(a) Influência da indutância L na constante de tempo. (b) Influência da capacitância CC na constante de tempo.

FIGURA 14 – Influência da indutância L e da capacitância C na constante de tempo τ .

A Figura 14 (a) mostra que a relação entre L e a constante de tempo τ é não linear. Se L tem seu valor dobrado, a constante de tempo aumenta muito mais que o dobro. Por outro lado, observando o gráfico da Figura 14 (b), nota-se que a relação entre C e τ pode ser aproximada por uma reta cuja equação é mostrada próxima aos pontos simulados. O gráfico da Figura 14 (b) mostra que um aumento no valor de C aumenta muito pouco o valor da constante de tempo. Com isto, pode-se dizer que a indutância equivalente L influencia bem mais a constante de tempo do STATCOM que a capacitância CC , o que interfere diretamente no seu tempo de resposta.

5.0 - CONCLUSÕES

Neste trabalho foi feita uma análise de desempenho em regime estacionário e dinâmico do STATCOM *quasi* 24 pulsos. Foi mostrada a implementação de um protótipo deste STATCOM e alguns resultados experimentais foram apresentados.

Através da modelagem do protótipo no programa PSCAD foi possível analisar a influência dos componentes passivos do STATCOM na sua resposta. Assim, foi constatado que a reatância CA tem forte influência sobre os harmônicos de corrente e sobre a variação da tensão CC . Um método de cálculo da capacitância CC foi descrito e foi analisada a influência desta capacitância sobre a oscilação da tensão CC .

Foi feito o levantamento da resposta em frequência em malha aberta do STATCOM e junto com a observação da sua resposta ao degrau nas mesmas condições, constatou-se que o mesmo em malha aberta comporta-se como um sistema de primeira ordem. Além disto, através de um método de inspeção gráfica foi possível determinar a constante de tempo do STATCOM e deste modo ter uma estimativa da sua velocidade de resposta. Foi constatado que a reatância do lado CA tem maior influência sobre a constante de tempo que a capacitância CC .

6.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] HINGORANI, N.G., GYUGYI, L., Understanding FACTS: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, IEEE Press, 2000.
- [2] KUNDUR, P., Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994.
- [3] LOPES, F.C., Análise de Desempenho de STATCOM *quasi* 24 Pulsos, Dissertação de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2006.
- [4] Manual do Inversor CFW-09 da WEG. Disponível no site: <http://www.weg.com.br/asp/files/CAT-CFW09.PDF>.
- [5] Sítio do fabricante Renesas (antiga Hitachi Micro Systems Europe) com informações sobre o microcontrolador SH7047: http://eu.renesas.com/fmwk.jsp?cnt=sh7047_root.jsp&fp=/products/mpumcu/superh_family/sh7047_series/sh7047_group/
- [6] BARBOSA, P.G., WATANABE, E.H., *et al.*, Investigação dos Modelos de Circuitos de Sincronismo Baseados na Teoria das Potências Real e Imaginária Instantâneas (p-PLL e q-PLL), *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Automática – CBA 2002*, Vol. 1, pp. 7-13, Natal, RN, Set. 2002.
- [7] AKAGI, H. KANAZAWA, Y., NABAE, A., "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits", *International Conference on Power Electronics*, Tokyo, 1983.
- [8] AKAGI, H. KANAZAWA, Y., NABAE, A., "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components", *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. IA-20, No. 3, pp. 625-630, May/June 1984.
- [9] WATANABE, E.H. STEPHAN, R. M., AREDES, M., "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems With Generic Loads", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 8, No. 2, pp. 697-703, April 1993.
- [10] WATANABE, E.H. AREDES, M., "Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações – Filtros Ativos e FACTS", In: *Tutorial do XII Congresso Brasileiro de Automática – CBA '98*, Uberlândia, MG, Setembro 1998.
- [11] BARBOSA, P.G., Compensador Série Sincrono Estático Baseado em Conversores VSI Multipulso, Tese de Doutorado, COPPE, Brasil, 2000.
- [12] OGATA, K., Modern Control Engineering, 3rd Ed, New Jersey, Prentice Hall, 1997.