

# SIMULAÇÃO DE UM COMPENSADOR SÍNCRONO ESTÁTICO DE POTÊNCIA

JAIME M. MIGUEL, LUÍS O. A. P. HENRIQUES, MAURICIO AREDES, EDSON H. WATANABE

Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE – Programa de Engenharia Elétrica  
Caixa Postal 68504 - 21945-970 - Rio de Janeiro - RJ

E-mails: jaime@coe.ufrj.br, porto@coe.ufrj.br,  
aredes@coe.ufrj.br, watanabe@coe.ufrj.br

**Resumo**— Este artigo apresenta a simulação computacional de um compensador síncrono estático tipo PWM utilizando a teoria da potência instantânea. O funcionamento de um compensador síncrono estático de potência reativa (STATCOM) é apresentada. É mostrado que com o emprego de um pequeno banco de capacitores, de dispositivos de chaveamento rápido e da teoria de potência instantânea é possível compensar instantaneamente a queda de tensão devida a cargas reativas. Além disso, o equipamento pode ser utilizado de forma contínua na correção de fator de potência tanto indutivo como capacitivo. Os princípios da teoria de potência instantânea são apresentados.

**Abstract**— This paper presents the computational simulation of a PWM type static synchronous compensator applying the instantaneous power theory. The operation of a reactive power static synchronous compensator (STATCOM) is presented. It is shown that it is possible to compensate the voltage drop relative to reactive loads using a small capacitor bank, fast switching devices and applying the instantaneous power theory. The equipment can be used for continuous power factor correction, inductive or capacitive. The instantaneous power theory is presented.

**Keywords**— Digital simulation, power system control, reactive power, STATCOM.

## Nomenclatura

CR-PWM – Current Regulated – PWM;  
FACTS – Flexible AC Transmission System;  
IGBT – Insulated Gate Bipolar Transistor;  
PLL – Phase Locked Loop;  
PWM – Pulse Width Modulation;  
STATCOM – Static Compensator;  
VSD-FC - Variable Speed Drives – Frequency Converters.

## 1 Introdução

Este trabalho apresenta a simulação realizada através do EMTDC / PSCAD de um sistema composto por um gerador, uma carga nominal, um motor de indução e um STATCOM, com o objetivo de mostrar a compensação da queda de tensão surgida durante a partida do motor, de forma que cargas sensíveis à variação de tensão não venham a ser desligadas intempestivamente ou o sistema operar com tensão diferente da considerada ideal.

O STATCOM é um equipamento de eletrônica de potência que é utilizado na compensação de potência reativa. Suas características principais são: a capacidade de aumentar o fluxo de potência em uma linha de transmissão e assegurar uma maior estabilidade para o sistema elétrico. Tem como função prover suporte de tensão em áreas críticas do sistema de potência. O predecessor do compensador síncrono estático, ou seja, o compensador síncrono rotativo, foi muito usado no passado para a compensação "shunt" de reativos. O compensador rotativo apresenta várias características funcionais desejáveis, tais como: a capacidade de injetar elevadas correntes capacitivas durante

períodos transitórios de subtensão e o fato de possuir uma impedância interna indutiva, cujos valores típicos não causam ressonância com a rede de transmissão. Contudo, o compensador rotativo possui uma série de desvantagens, tais como: (1) um tempo de resposta lento, (2) instabilidade rotacional, (3) baixa impedância de curto circuito e (4) necessita de manutenções freqüentes. Além do mais, ele não atende aos requisitos modernos de flexibilidade no controle em tempo real de fluxo de potência, dentro dos novos conceitos de sistemas FACTS.

O STATCOM é, dentro de certos limites, o equivalente eletrônico do compensador síncrono ideal. Sua principal função é injetar corrente reativa no sistema de potência de forma controlada. Para fazer isso, é necessário que o STATCOM trabalhe como uma fonte de tensão controlada. O STATCOM possui, em sua composição básica, um inversor, um capacitor, um transformador e um sistema de controle, estando conectado ao sistema em paralelo, tal como é mostrado na Figura 1. O transformador possui a função de conectar o inversor ao sistema de potência e também para limitar as variações de corrente através de suas reatância de dispersão.

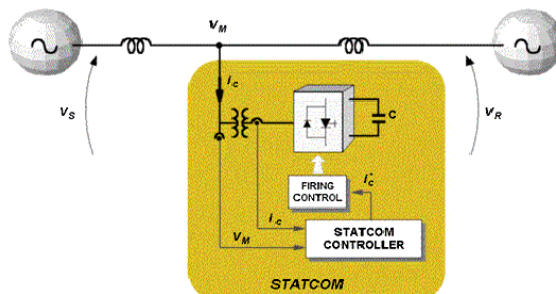


Figura 1 – Configuração básica do STATCOM

## 2 Fundamentos Teóricos

### Teoria da Potência Instantânea

A teoria da potência ativa e reativa instantânea apresentada por (Akagi et al., 1983) é bastante utilizada na modelagem e no controle de filtros ativos de potência. Esta teoria pode ser aplicada tanto a situações de regime permanente como em transitórios e na presença de harmônicos.

A potência ativa instantânea trifásica é dada por:

$$p_{3\phi}(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \\ = p(t) + p_0(t)$$

As equações apresentadas por Akagi para a potência instantânea são:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

As variáveis de corrente e tensão nas coordenadas  $\alpha$ - $\beta$ -0 são obtidas através da transformação de Clarke, conforme as equações relacionadas a seguir: (Watanabe e Aredes, 1998)

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

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

Uma vez determinados os valores de  $p$  e  $q$  que devem ser fornecidos pelo STATCOM o cálculo da corrente de compensação fornecida pelo equipamento é feito da seguinte forma: (Watanabe et al., 1993)

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{\sqrt{v_\alpha^2 + v_\beta^2}} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (4)$$

Observe que a análise é feita para sistemas equilibrados.

As componentes abc da corrente do STATCOM resultam da seguinte transformação:

$$\begin{bmatrix} i_{ca}^* \\ i_{cb}^* \\ i_{cc}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Os valores obtidos para  $i_{ca}^*$ ,  $i_{cb}^*$ , e  $i_{cc}^*$  serão empregados como as referências de corrente do inversor CR-PWM (Aredes, 1993).

### Obtenção do Valor $V_{rms}$

Como a função do STATCOM é regular a tensão de uma determinada barra do sistema, torna-se necessária uma realimentação de informação a partir da tensão que se deseja regular. Isto é obtido através do cálculo de  $V_{rms}$  que é comparada com a tensão desejada e seu resultado é aplicado a um controlador PI. A saída deste controlador fornece o valor da potência imaginária  $q$  usada no cálculo da corrente de referência do STATCOM.

$$V_{rms} = \sqrt{v_a^2 + v_b^2 + v_c^2} \quad (6)$$

onde  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$  são as tensões fase-terra

A obtenção da potência real  $p$  é feita de maneira similar a partir da medição da tensão sobre o capacitor presente no lado CC do STATCOM e de outro controlador PI.

### CR-PWM

O controle da corrente do STATCOM escolhido foi o controle por histerese ou CR-PWM. Neste método, adota-se o parâmetro  $\delta$  como o limite considerado aceitável de variação entre a corrente de referência e aquela que efetivamente circula no compensador estático. Assim, sempre que a corrente superar o valor de  $i_c + \delta$  ou for inferior a  $i_c - \delta$ , o controle de disparo das chaves semicondutoras do compensador atua de modo a manter a corrente dentro dos limites desejados.

## 3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA SIMULADO

O sistema elétrico simulado é alimentado em média tensão por uma fonte trifásica de 13,8 kV, 60 Hz, com neutro aterrado, uma carga resistiva constante e um motor de indução. Em paralelo com o gerador e as cargas está conectado um compensador síncrono estático.

O sistema de potência completo está representado na Figura 2. Os dados dos componentes do sistema são relacionados a seguir.

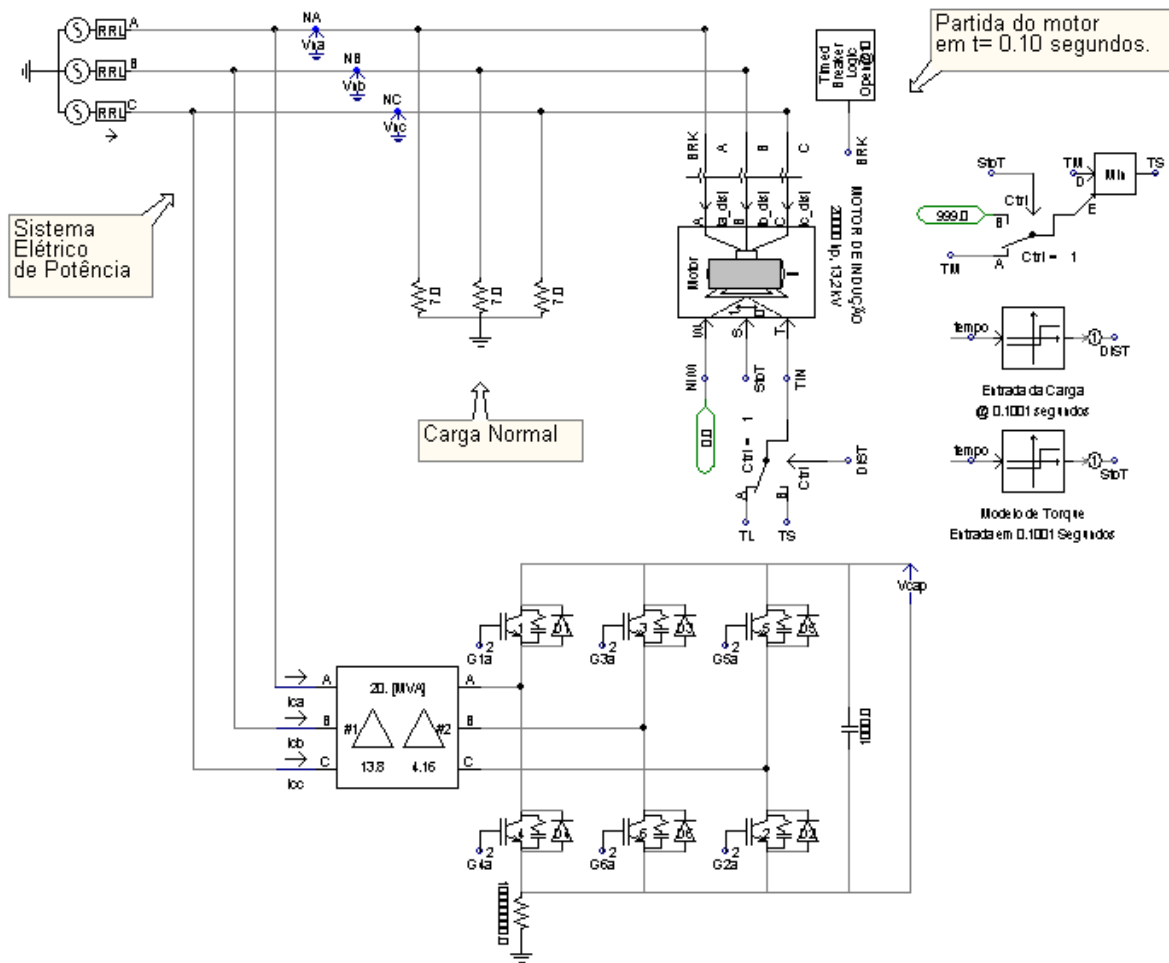


Figura 2– Fonte, STATCOM e cargas.

### 3.1. - Dados do caso:

Fonte de alimentação:

Gerador CA, trifásico, 60 Hz, 13,8kV.  
 Modelo utilizado: Impedância: 0,57132 ohm e  
 ângulo de fase: 85°

Carga Normal: Uma carga resistiva trifásica de 7Ω.

STATCOM:

Para o caso de 13,8kV: IGBT com “snubber” e com interpolação de pulso;

Motor de Indução:

No caso de alimentação em 13,8 kV temos um motor de 20000 hp / 13,2 kV.

Tabela 1- Dados do IGBT

Thyristor ON Resistance	1.0E-3 [ohm]
Thyristor OFF Resistance	1.0E8 [ohm]
Forward Voltage Drop	0.0[kV]
Forward Breakover Voltage	1.0E5[kV]
Reverse Withstand Voltage	1.0E5[kV]
Minimum Extinction time	0.0[μs]
Snubber Resistance	20000.0 [ohm]
Snubber Capacitance	0.5 [μF]
Loss Compenstion	yes

Tabela 2- Dados do motor de indução ( 20000 hp)

Data Generation/Entry	Typical
Multimass Interface	Disable
Number of coherent Machines	1
Number of Sub-iteration Steps	5
Rated RMS Phase Voltage	7.62[kV]
Rated RMS Phase Current	0.84[kA]
Horse Power	20000[hp]
Base Angular Frequency	376.99[rad/s]

**Carga no eixo do motor de indução:**

Utilizamos uma carga quadrática (Figura 3). Para uma modelagem mais apurada poderia ser utilizada uma carga que fosse o somatório de cargas com parcelas constante, linear, quadrática e cúbica com a rotação ou através de uma tabela  $T_L \times \omega$ . Foi utilizado  $KL = 1,01$ .

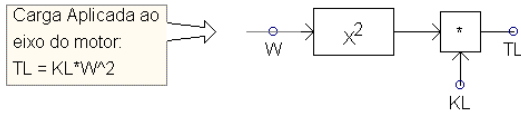


Figura 3 – Carga aplicada ao motor de indução.

**Detector de seqüência positiva: PLL**

O detector de seqüência positiva usado no controle do STATCOM tem como objetivo primordial a manutenção do sincronismo de fase entre as tensões do sistema e as tensões geradas pelo inversor. Assim, fornece-se o correto ângulo de fase da componente de seqüência positiva da tensão de alimentação do STATCOM (Figura 4).

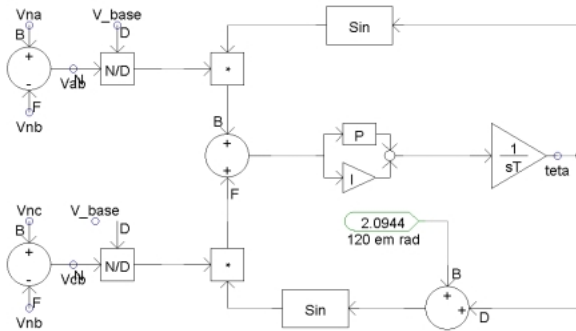


Figura 4– “Phase Locked Loop” ( PLL)

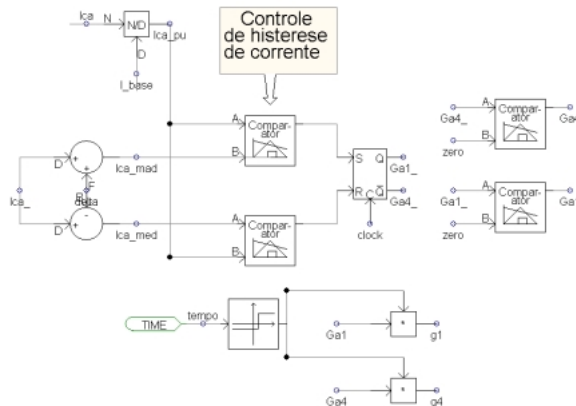


Figura 5– Controle de corrente (Histerese) e geração dos sinais de “gate”

**Comparador:**

O sistema representado na Figura 5 é utilizado na geração de pulsos sem interpolação. A Figura 6 mostra o mesmo sistema porém utilizando-se interpolação de pulsos.

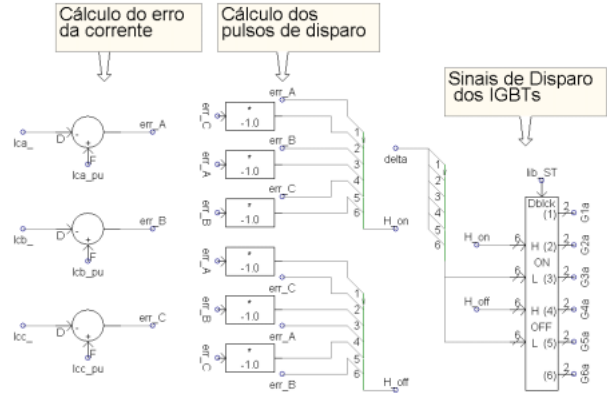


Figura 6– Controle de corrente (Histerese) utilizando interpolação de pulsos.

**Cálculo de P e Q**

Utiliza-se 2 filtros passa-baixa tanto no cálculo de P quanto no cálculo de Q. Isto ocorre devido à necessidade de se filtrar as altas freqüências que irão entrar nos controladores PI. Os filtros são do tipo Butterworth de terceira ordem com frequencia base em 150 Hz (Figura 8).

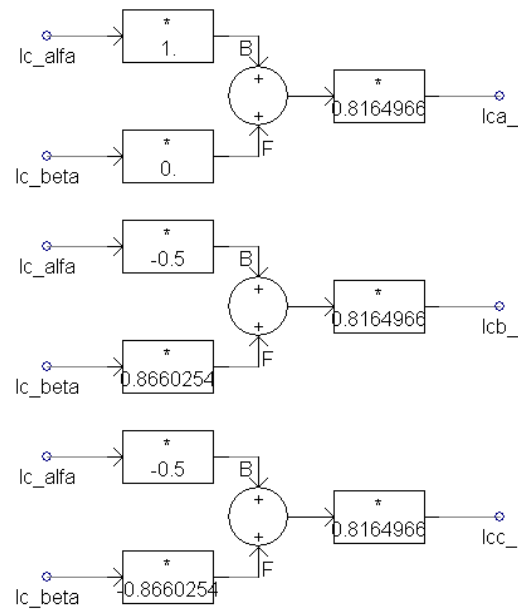


Figura 7 - Cálculo das correntes de referência.

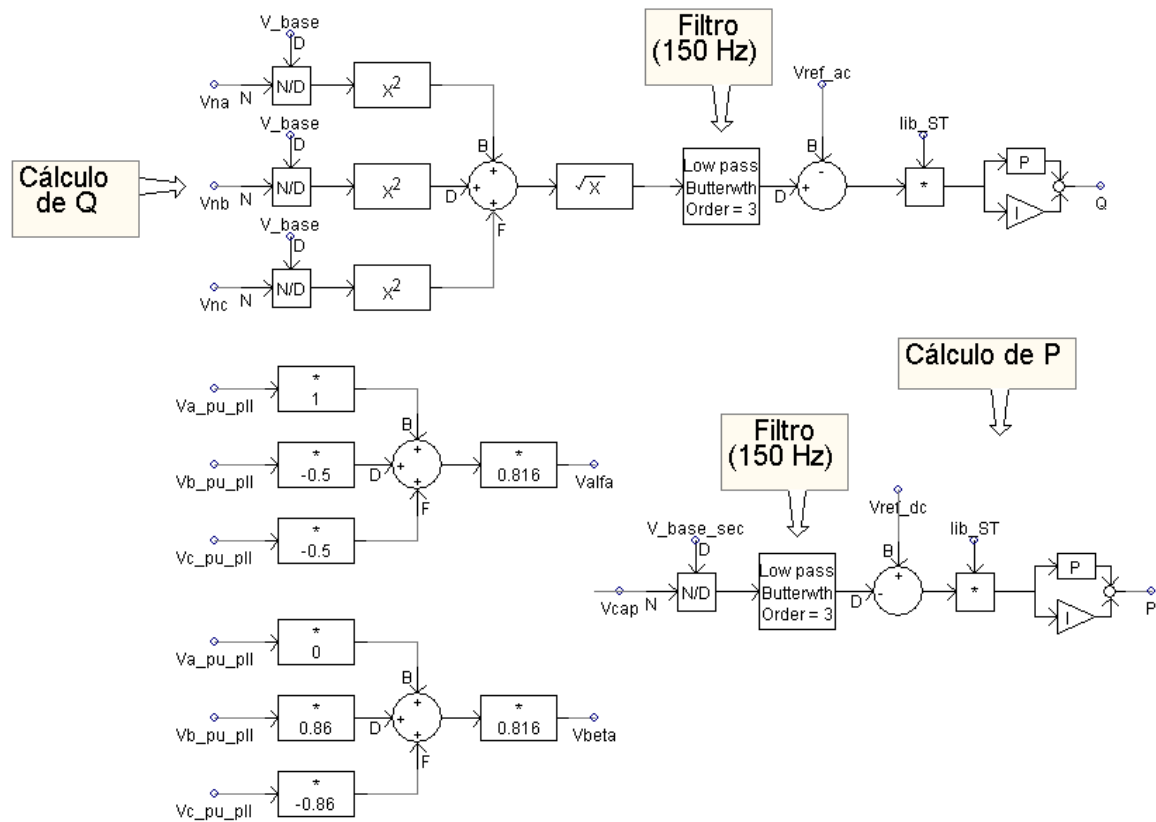


Figura 8 - Cálculo de P e Q e transformação ABC  $\rightarrow$   $\alpha\beta$ :

#### 4 - CASO SIMULADO

- Tensão base de 13,8 kV.

Em 0,05 s, o STATCOM entra em operação, aos 0,10 segundos o motor é inicializado e é inserida a carga quadrática a partir de 0,1001s. A partir deste momento o motor começa a acelerar até alcançar a velocidade síncrona em aproximadamente 2 segundos

Foi utilizada nesta simulação a interpolação de pulsos, pois sem ela seria muito lenta a simulação. Foi testada a simulação deste caso porém sem a interpolação para passo de integração de 0,5 $\mu$ s.

Quando se usa a interpolação, pode-se aumentar este passo para 10 $\mu$ s, ou seja, pode-se usar um passo 20 vezes maior do que o sistema sem pulsos interpolados.

Os resultados obtidos e apresentados na Figura 9 e Figura 10, mostram que em aproximadamente um ciclo de 60 Hz (16,67 ms) a tensão do sistema é recuperada de aproximadamente 78% para os desejados 90% de tensão nominal. Estes valores de tensão e tempo garantem a continuidade operacional de cargas sensíveis à variação da tensão, tais como: computadores, VSD-FC e contactores entre outros.

A determinação do valor de referência da tensão no capacitor, do valor do capacitor e da impedância do transformador ou reator do STATCOM afetaram significativamente, como não poderia deixar de ser o funcionamento do equipamento. Ocorreu, em alguns ensaios, a instabilidade no controle da tensão.

O método de controle consistiu basicamente das medições e controle das tensões de fase e tensão no capacitor do STATCOM. O cálculo da corrente de referência necessária é feita através da transformação abc  $\rightarrow$   $\alpha\beta$   $\rightarrow$  abc e do uso da teoria pq (Akagi et al, 1983) (Figura 7 e Figura 8). A utilização de filtros tipo passa baixa nas entradas dos controladores PI de P e Q do STATCOM foi necessária para impedir a instabilidade associada ao fato de o STATCOM tentar corrigir os ruídos surgidos devidos ao chaveamento dos IGBTs do próprio equipamento de compensação de tensão.

O método de cálculo do chaveamento dos IGBTs com interpolação foi utilizado pois a simulação sem este método implica na utilização de valores de tempos de passo de integração muito pequenos, a saber, 2 a 4  $\mu$ s para um caso similar de 100 V e aproximadamente 0,5  $\mu$ s para o caso de 13,8 kV. Empregando o método da interpolação para o caso de 13,8 kV o passo de integração pode ser fixado entre 10 e 20  $\mu$ s.

Com relação à utilização do programa percebeu-se ser interessante utilizar os dados de tensão em kV, os de corrente em kA e os de potência aparente em MVA, uma vez que estas são as unidades “default” do programa.

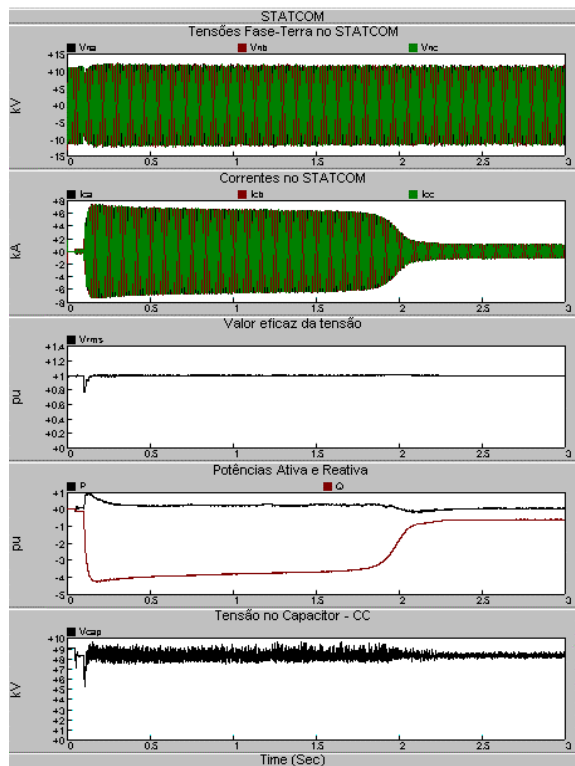


Figura 9 – Curvas características do STATCOM (13,8 kV).

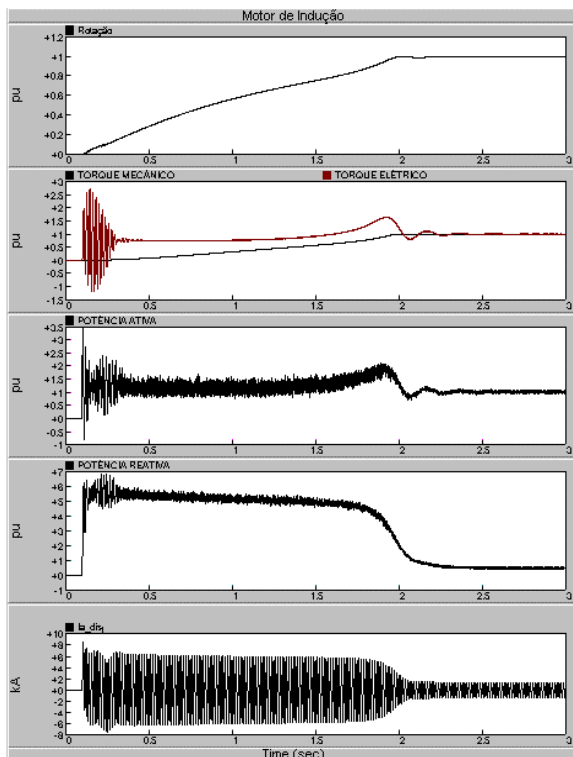


Figura 10 – Curvas características do Motor de Indução (13,8 kV).

Verificou-se que a presença de componente de seqüência negativa na tensão do barramento onde se deseja injetar reativos provoca a circulação de corrente de seqüência negativa no compensador. Uma das soluções para este problema é fazer o equipamento sintetizar uma tensão de seqüência negativa para anular este efeito, este caso não é apresentado neste trabalho.

## 5 CONCLUSÕES

O STATCOM simulado opera corretamente, compensando a queda de tensão surgida durante a partida de um motor de indução. Tal efeito é obtido através da injeção de corrente adiantada da tensão de aproximadamente 90 graus elétricos. A corrente do motor varia ao longo da partida e a tensão é mantida regulada no valor desejado de 1 pu.

A recuperação da tensão pelo STATCOM se dá em poucos ciclos, conforme observado nas curvas do dispositivo de compensação.

O caso de 13,8 kV simulado representa satisfatoriamente um caso real de partida de motor de indução, quando comparado a resultados obtidos na literatura (Krause et al.,1995).

Grandes vantagens podem ser citadas com relação à utilização do programa EMTDC / PSCAD, tais como, a possibilidade de executar a simulação de casos com relativa complexidade em uma versão livre (gratuita) em computadores com sistema operacional Windows 95<sup>®</sup> e conseqüente uso residencial pelos alunos, a existência de uma grande quantidade de casos exemplos e modelos em sua biblioteca, contando inclusive com manual e “help”.

## 6 REFERÊNCIAS

- Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A. (1983), Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits, IPEC'83. Tokyo, Japan, pp. 1375-1386.
- Aredes, M. (1996), Active Power Line Conditioners, Dr.-Ing. Thesis, Technische Universität Berlin, Berlin, Germany, March.
- Watanabe, E. H, Stephan, R.M., e Aredes, M., (1993) 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.
- Watanabe, E. H, Aredes, M.,(1998), Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações – Filtros Ativos e FACTS, CBA'98, Uberlândia, MG, Setembro.
- Krause, P.C., Wasynczuk, O. et al.,(1995), Analysis of Electrical Machinery, IEEE Press.