

# ESTRATÉGIAS DE ENERGIZAÇÃO E DEENERGIZAÇÃO DE UM COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO PARA DISTRIBUIÇÃO

Samuel N. Duarte, Gabriel A. Fogli, Pedro M. de Almeida, Pedro G. Barbosa  
Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora - MG, Brasil  
e-mails: samuel.neves@engenharia.ufjf.br, gabriel.fogli@engenharia.ufjf.br, pedro.machado@ufjf.edu.br, pedro.gomes@ufjf.edu.br

**Resumo** – Este trabalho propõe dois controladores para energizar e desenergizar compensadores estáticos síncronos destinados a serem conectados nas redes de distribuição. O primeiro circuito é baseado em um retificador semi-controlado enquanto o segundo controlador é baseado em um circuito gradador. Os dois controladores propostos são facilmente adaptados a estrutura do compensador estático sem a necessidade de realizar alterações topológicas no conversor. Um modelo matemático é usado para derivar as relações matemáticas usadas para controlar as correntes de energização e de desenergização. Aproximações lineares por partes foram usadas para reduzir o esforço computacional dos algoritmos de controle desenvolvidos. Resultados de simulação e experimentais são apresentados para validar a metodologia proposta.

**Palavras-chave** – Conversor Conectado à Rede, Desenergização de DSTATCOM, Energização de DSTATCOM.

## ENERGIZATION AND DE-ENERGIZATION STRATEGIES OF A DSTATCOM

**Abstract** – This paper proposes two controllers to energize and de-energize static synchronous compensators to be connected to distribution networks. The first circuit is based on a semi-controlled rectifier while the second controller is based on AC voltage controller. The two proposed controllers are easily adapted to the static compensator structure without the need of any topological changes. A mathematical model is used to derive the relationships used to control the energizing and de-energizing currents. Piecewise linear approximations are used to reduce the computational effort of the developed control algorithms. Simulation and experimental results are presented to validate the proposed methodology.

**Keywords** – DSTATCOM De-energization, DSTATCOM Energization, Grid-connected Converter.

### I. INTRODUÇÃO

Compensadores estáticos síncronos (do inglês, *Static Synchronous Compensator*) (STATCOM) são conversores

---

Artigo submetido em 07/03/2017. Primeira revisão em 23/04/2017. Aceito para publicação em 06/06/2017 por recomendação do Editor Marcelo Cabral Cavalcanti.

fonte de tensão (do inglês, *Voltage Source Converter*) (VSC) projetados para compensar potência reativa em seus terminais [1]. Apesar de terem sido originalmente propostos para sistemas de transmissão, observa-se um grande número de trabalhos onde estes compensadores são conectados nas redes de distribuição. Nestas aplicações, além de serem denominados DSTATCOM, funções básicas como o aumento da margem de estabilidade e da capacidade de transmissão são substituídas pelo controle de tensão e correção do fator de potência [2]. Existem também trabalhos onde os DSTATCOM são usados para compensar correntes desequilibradas e harmônicas consumidas por cargas não lineares [3].

Estes compensadores, quando construídos com VSC modulares, podem ser conectados diretamente às redes de distribuição sem a necessidade de estruturas magnéticas complexas ou filtros harmônicos de ordem elevada devido às tensões com múltiplos níveis sintetizadas em seus terminais [4]–[6]. Contudo, independente da topologia do DSTATCOM, correntes não controladas são drenadas da rede quando os capacitores CC destes compensadores estão descarregados. Estas correntes, de elevada amplitude e curta duração, circulam pelos diodos dos módulos de IGBT (do inglês, *Insulated Gate Bipolar Transistors*) e podem danificar os interruptores do VSC além de provocar mal funcionamento dos circuitos de proteção e controle [7], [8].

Em [9], o capacitor equivalente de um STATCOM foi energizado por um retificador controlado conectado temporariamente em paralelo com o barramento CC do conversor. Em [10], [11], os autores usaram um arranjo de resistores conectados em série com os terminais CA de um STATCOM para limitar a corrente de energização. Depois da carga inicial, esses resistores são curto circuitados por interruptores auxiliares numa estratégia semelhante à usada para limitar a corrente de partida de motores CC.

Uma estratégia semelhante foi usada em [12] para limitar a corrente de energização do filtro capacitivo de saída de um retificador monofásico não controlado. Em [13] é usado um resistor não linear conectado entre os terminais de um filtro EMI e os de entrada de um conversor CA/CC. Como nos casos anteriores, um interruptor conectado em paralelo retira o resistor não linear do circuito depois da carga inicial do capacitor CC.

A conexão de um VSC trifásico à rede elétrica através de um transformador Y- $\Delta$  é explorada em [8]. Durante a energização, o ponto comum dos enrolamentos ligados em Y é aberto. Um resistor é conectado entre duas bobinas, ficando a terceira desconectada. O capacitor do VSC é então pré-carregado pelas fases do transformador cuja resistência foi conectada. Após a pré-carga os enrolamentos

do transformador são novamente ligados em estrela e o VSC passa a regular as correntes das três fases para controlar a tensão CC do capacitor.

Em [14], o capacitor CC de um filtro ativo de potência (FAP) é carregado manualmente utilizando uma fonte auxiliar até a tensão de  $V_{cc} = 220$  V. Depois desta pré-carga, a tensão CC de referência foi variada em rampa até a tensão  $V_{cc}^* = 450$  V. Durante esta etapa, um controlador PI com uma malha *feedforward* garante que a tensão do capacitor equivalente siga o sinal de referência com precisão. Contudo, caso não seja efetuada a carga inicial dos capacitores, o controlador PI não consegue regular a tensão CC e uma elevada corrente de energização é drenada da rede a qual o FAP está conectado.

Estratégias para carregar o capacitor e regular a tensão do barramento CC de um filtro híbrido série são apresentadas e discutidas em [15], [16]. Nestes dois exemplos, a corrente de carga do capacitor CC tem sua amplitude naturalmente limitada pela elevada impedância passiva do filtro híbrido. Em [15], para conseguir carregar o capacitor CC até a tensão de operação, o VSC do filtro híbrido é controlado para sintetizar uma tensão em fase com a corrente em quadratura drenada pela parcela passiva do filtro híbrido. Já em [16] os autores usam a teoria das potências instantâneas para forçar o VSC absorver potência da rede e carregar o capacitor CC. Neste segundo caso, o sinal da potência reativa de referência foi usado para forçar o VSC carregar seu capacitor CC.

Por outro lado, quando o capacitor CC do STATCOM está carregado, o tempo para que o barramento CC do conversor se descarregue naturalmente pode ser demasiadamente longo. Nesse sentido, um procedimento de desenergização dos STATCOMs pode ser muito interessante a fim de descarregar o capacitor para realizar uma manutenção ou simplesmente retirar o compensador de operação. Em [17] os autores propõem uma estratégia para desenergizar um STATCOM formado por um VSC modular cujos braços são conectados em  $\Delta$ . Durante a desenergização, o STATCOM é desligado da rede elétrica e um banco de resistências, conectado em série com cada braço do VSC, fornece um caminho para que os capacitores dos diferentes módulos se descarreguem. No final do processo essas resistências são curto circuitadas por três interruptores auxiliares.

Pelo exposto, a energização e desenergização dos STATCOM é um tema que não tem recebido muita atenção nos últimos anos. Assim sendo, a principal contribuição deste trabalho é a proposta de dois controladores, e seus respectivos métodos, para energizar e desenergizar um DSTATCOM. O primeiro circuito é baseado no funcionamento de um retificador semi-controlado, enquanto o segundo é baseado em um circuito gradador. Os dois controladores propostos são facilmente adaptados à estrutura do compensador estático sem a necessidade de alterações topológicas significativas. As etapas de modelagem dos circuitos equivalentes são apresentadas e métodos matemáticos são utilizados para derivar algoritmos de controle. A corrente de energização/desenergização é controlada através do ângulo de disparo dos tiristores e não são usados resistores, indutores, fontes auxiliares ou transformadores adicionais. Resultados de simulação e experimentais de um DSTATCOM de pequena escala (3,8 kVA/220 V) são apresentados e discutidos para

validar a metodologia proposta.

## II. A PRÉ-ENERGIZAÇÃO DO DSTATCOM

Na Figura 1 é mostrada a topologia de um DSTATCOM conectado a uma rede elétrica CA através de um filtro passivo de primeira ordem. Além dos seis IGBTs ( $S_1 - S_6$ ) esta topologia possui um braço adicional formado por dois tiristores ( $T_1$  e  $T_2$ ). Os controladores do DSTATCOM foram projetados com uma malha dupla de corrente (interna) e uma malha externa de tensão. Nas Figuras 2 (a) e (b) são mostrados os diagramas de blocos das malhas de controle de corrente e de tensão, respectivamente.

As malhas internas de corrente foram projetadas no sistema de coordenadas síncrono conforme metodologia mostrada em [18]–[21]. As correntes  $I_d$  e  $I_q$  são responsáveis por regular as potências ativa e reativa nos terminais do DSTATCOM, respectivamente. Um circuito PLL (do inglês, “*Phase-Locked Loop*”) é usado para sincronizar as correntes sintetizadas pelo DSTATCOM com as tensões da rede elétrica. Na Figura 3 é mostrado o diagrama de blocos do PLL do DSTATCOM. Maiores detalhes do projeto deste circuito são encontrados em [18], [20], [21].

A malha externa de tensão regula a tensão do barramento CC através do sinal de referência  $I_d^*$  [3], [20]. Contudo, o DSTATCOM só conseguirá sintetizar as correntes de referência  $I_d^*$  e  $I_q^*$  se o capacitor CC do VSC da Figura 1 estiver previamente carregado.

O processo de carga do capacitor CC do DSTATCOM, desde 0 volts até o valor de pico da tensão CA da rede, é denominado neste trabalho pré-energização. Este procedimento é realizado bloqueando os pulsos de disparo dos IGBTs do VSC da Figura 1 e mantendo os contatos  $Sw_1$  e  $Sw_3$  abertos e o contato  $Sw_2$  fechado. Os tiristores  $T_1$  e  $T_2$  são então disparados de maneira a controlar a corrente pelo capacitor CC. Quando a tensão do barramento CC atinge um valor próximo à tensão de pico da rede, o disparo dos tiristores é desligado, os contatos  $Sw_1$  e  $Sw_3$  são fechados e os controladores de corrente e tensão do DSTATCOM (Figuras 2 (a) e (b)) são habilitados para elevar a tensão do barramento CC até o valor da tensão de operação. A partir deste ponto o DSTATCOM estará pronto para compensar potência reativa em seus terminais CA.

Na Figura 4 é mostrado o circuito equivalente durante a pré-energização, com a indicação do sentido da corrente no semiciclo positivo da tensão de linha  $v_{s,ab}(t)$ . Os parâmetros  $R = (R_s + R_f)$  e  $L = (L_s + L_f)$  representam as resistência e indutância equivalentes por fase da rede e do filtro de interface, respectivamente. A resistência  $R_p$  foi omitida no circuito da Figura 4 para simplificação da modelagem matemática apresentada nas próximas subseções.

Como os IGBTs do DSTATCOM estão bloqueados, o circuito da Figura 4 se comporta como um retificador semi-controlado [22] onde a corrente pelo capacitor CC é controlada através do ângulo de disparo dos tiristores. Nas Figuras 5 (a) e (b) são mostradas as formas de onda da tensão da rede, da tensão CC e da corrente pelo circuito para um ângulo de disparo  $\alpha$  genérico.

Considerando que  $C_{eq}$  está descarregado e ainda, que o tiristor  $T_1$  é disparado com um ângulo  $\alpha$  ligeiramente inferior

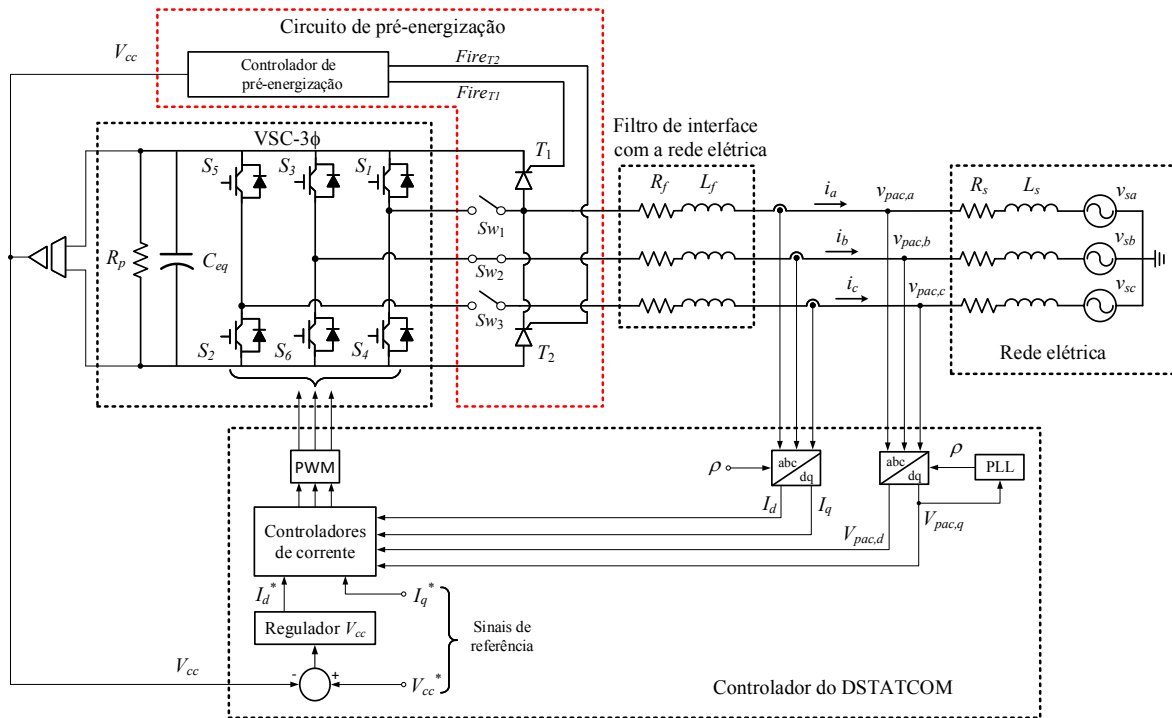


Fig. 1. Topologia do circuito de pré-energização do DSTATCOM.

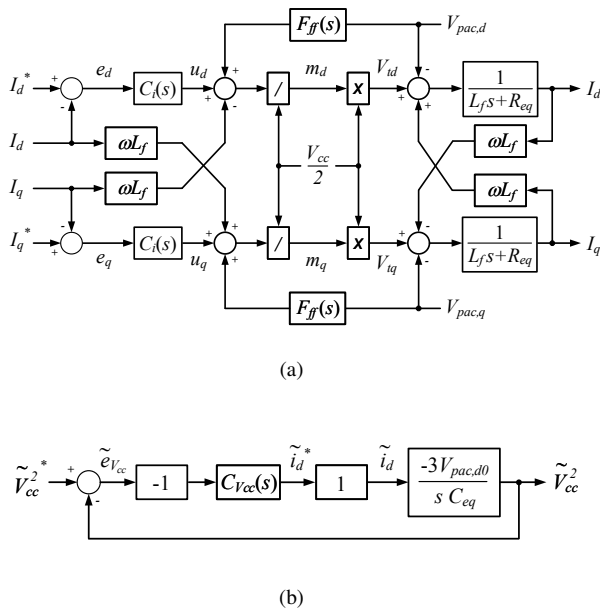


Fig. 2. Diagramas de blocos das malhas de controle do DSTATCOM: (a) corrente e (b) tensão CC.

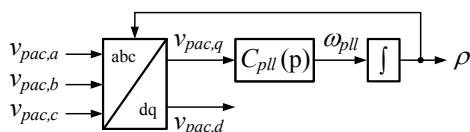


Fig. 3. Diagrama de blocos do circuito de sincronismo.

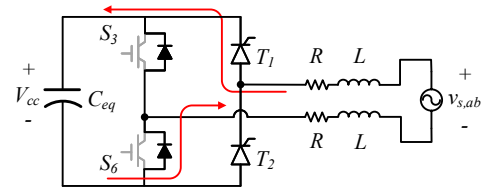


Fig. 4. Topologia simplificada do circuito de pré-energização do DSTATCOM.

à  $\gamma = 180^\circ$ , tem-se que a corrente fluirá pelo tiristor  $T_1$  e pelo diodo do interruptor  $S_6$ , forçando a tensão sobre o capacitor  $C_{eq}$  aumentar. No instante  $\omega t = \beta$  a corrente pelo circuito se torna nula novamente e o tiristor  $T_1$  fica bloqueado. Todo esse processo é repetido no semiciclo negativo da tensão  $v_{s,ab}(t)$ , porém, nesta condição, a corrente irá fluir pelo tiristor  $T_2$  e pelo diodo do interruptor  $S_3$ .

A cada disparo de  $T_1$  e  $T_2$  a tensão do barramento CC vai aumentando gradativamente e o ângulo  $\alpha$  do retificador semi-controlado da Figura 4 deve ser reduzido.

O pico da corrente durante o processo de pré-energização síncrona do conversor pode ser maior ou menor, dependendo da diferença entre os ângulos  $\alpha$  e  $\gamma$ . Quanto menor a diferença entre estes ângulos menor será a diferença entre a tensão do barramento CC e a tensão da rede elétrica e, conseqüentemente, menor será o pico da corrente pelo circuito.

#### A. Modelagem Matemática da Corrente de Pré-energização

Considerando que o tiristor  $T_1$  da Figura 4 é disparado no instante  $\omega t = \alpha$ , pode-se escrever a seguinte equação para a

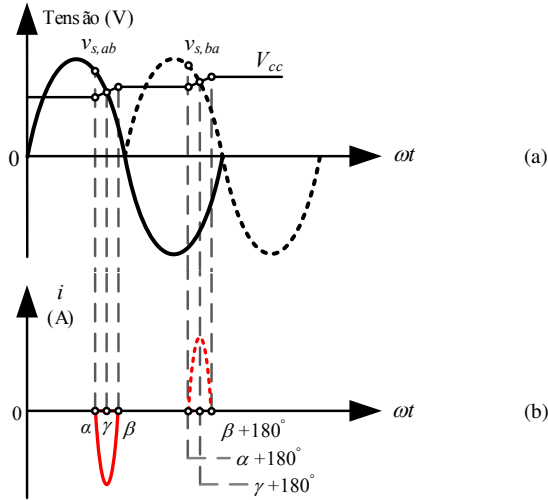


Fig. 5. Formas de onda durante a pré-energização síncrona do DSTATCOM: (a) tensão da rede e tensão CC e (b) corrente CA.

corrente pelo circuito equivalente:

$$2L \frac{di(t)}{dt} + 2Ri(t) + \frac{1}{C_{eq}} \int_0^t i(\lambda) d\lambda = [v_{s,ab}(t) - V_{cc}(\alpha^-)] U_{-1}(t - \alpha/\omega) \quad (1)$$

onde  $v_{s,ab}(t) = \sqrt{2}V_L \sin(\omega t)$ ,  $V_L$  é o valor eficaz da tensão da rede,  $\omega$  é a frequência angular fundamental,  $U_{-1}(t - \alpha/\omega)$  é a função degrau unitário aplicada no instante  $t_\alpha = (\alpha/\omega)$ .

Assumindo que o efeito da resistência série é desprezível ( $R_f + R_s \approx 0$ ) e que  $i(\alpha^-/\omega) = 0$  e  $V_{cc}(\alpha^-/\omega) = V_{cc}$ , chega-se à seguinte expressão, no domínio da frequência, para a corrente:

$$I(s) = \left( \frac{\sqrt{2}V_L}{2L} \right) \frac{e^{-s(\frac{\alpha}{\omega})} s(\omega \cos \alpha + s \sin \alpha)}{(s^2 + \omega^2)(s^2 + \omega_r^2)} - \left( \frac{V_{cc}}{2L} \right) \frac{e^{-s(\frac{\alpha}{\omega})}}{s^2 + \omega_r^2} \quad (2)$$

onde  $\omega_r = 1/\sqrt{2LC_{eq}}$ .

Aplicando a transformada inversa de Laplace em (2) tem-se que a corrente de pré-energização, no domínio do tempo, é dada por:

$$i(t) = \left\{ \frac{\sqrt{2}V_L \omega}{2L(\omega_r^2 - \omega^2)} \left[ \left( \frac{\omega_r}{\omega} \right) \sin(\alpha) \sin\left(\omega_r t - \frac{\omega_r \alpha}{\omega}\right) - \cos(\alpha) \cos\left(\omega_r t - \frac{\omega_r \alpha}{\omega}\right) + \cos(\omega t) \right] - \left( \frac{V_{cc}}{2L\omega_r} \right) \sin\left(\omega_r t - \frac{\omega_r \alpha}{\omega}\right) \right\} U_{-1}\left(t - \frac{\alpha}{\omega}\right). \quad (3)$$

A expressão (3) é válida para  $\alpha \leq \omega t \leq \beta$ . Na próxima seção será mostrado como a relação anterior pode ser usada para limitar a amplitude da corrente de carga do DSTATCOM.

### B. Controle da Corrente de Pré-energização

Da Figura 5 (b) tem-se que o valor de pico da corrente de pré-energização acontece no instante  $\omega t = \gamma_e$ , ou seja, quando o valor da tensão instantânea da rede é igual ao valor da tensão do barramento CC. Pode-se então estimar o valor de  $\gamma_e$  através de:

$$\gamma_e \approx \pi - \sin^{-1} \left( \frac{V_{cc}}{\sqrt{2}V_L} \right) \quad (4)$$

onde o subíndice ( $e$ ) foi adicionado à variável  $\gamma$  para indicar que esse ângulo é referente a energização do compensador.

Esse ângulo será  $180^\circ$  quando o capacitor CC estiver totalmente descarregado e igual a  $90^\circ$  quando o capacitor estiver carregado com a tensão de pico da rede CA. Desse modo, conhecendo o valor da tensão  $V_{cc}$  e do ângulo  $\gamma_e$ , pode-se resolver numericamente (3) de maneira a determinar o ângulo  $\alpha_e$  tal que:

$$i(t_{\gamma_e}) = I_{m\acute{a}x} \quad (5)$$

onde  $t_{\gamma_e} = (\gamma_e/\omega)$ .

Os ângulos de disparo dos tiristores podem ser obtidos aplicando-se o método de Newton-Raphson sucessivamente em (5), para  $V_{cc}$  variando de zero até a tensão CC máxima.

## III. SIMULAÇÃO DIGITAL DO CONTROLADOR DE PRÉ-ENERGIZAÇÃO

O sistema da Figura 1 foi modelado no programa PSIM a fim de demonstrar o processo de pré-energização proposto para o DSTATCOM. Os parâmetros da rede e do compensador estático são dados nas Tabelas I e II, respectivamente.

Na Tabela III são mostrados os ganhos dos controladores de corrente e tensão do DSTATCOM. Os controladores de corrente foram projetados a partir das funções de transferência obtidas do diagrama de blocos da Figura 2 (a). Os ganhos dos controladores de corrente foram escolhidos para cancelar o polo da planta com o zero do controlador e garantir uma constante de tempo de 0,1 ms para o sistema em malha fechada [18],[21]. O controlador de tensão (Figura 2 (b)) foi projetado com uma frequência de corte uma década abaixo da frequência de corte dos controladores de corrente e para garantir uma margem de fase de  $76^\circ$  em malha fechada [19].

TABELA I  
Parâmetros da Rede de Distribuição

Grandeza	Valor
Tensão de linha eficaz ( $V_L$ )	220 V
Frequência fundamental ( $f$ )	60 Hz
Resistência equivalente da rede ( $R_s$ )	0,1 $\Omega$
Indutância equivalente da rede ( $L_s$ )	150 $\mu$ H

Na Figura 6 é mostrado o diagrama de blocos do controlador de pré-energização do DSTATCOM. A tensão do barramento CC é medida e o sinal depois de passar por um limitador é processado pelo bloco *Solve* cuja saída é o ângulo  $\alpha_e$ . O circuito PLL do DSTATCOM é usado para determinar o ângulo  $\rho_{ab}$  da tensão de alimentação. O controlador  $C_e$  compara os ângulos  $\rho_{ab}$  e  $\alpha_e$  e fornece os sinais de disparo dos tiristores  $T_1$  e  $T_2$ . Os sinais de saída do bloco  $C_e$  são enviados

**TABELA II**  
**Parâmetros do DSTATCOM**

Grandeza	Valor
Tensão nominal	220 V
Potência nominal	3,8 kVA
Frequência de comutação ( $f_c$ )	20 kHz
Capacitância equivalente ( $C_{eq}$ )	4700 $\mu$ F
Resistência do barramento CC ( $R_p$ )	11 k $\Omega$
Resistência do filtro ( $R_f$ )	0,33 $\Omega$
Indutância do filtro ( $L_f$ )	1,25 mH
Resistência dos interruptores ( $R_{IGBT}$ )	13 m $\Omega$

**TABELA III**  
**Ganhos dos Controladores do DSTATCOM**

Controlador	Ganho	Valor
Corrente	Proporcional	12,5 V/A
	Integral	3430 V/(A s)
Tensão	Proporcional	17,4 mA/V <sup>2</sup>
	Integral	8,7 A/(V <sup>2</sup> s)

ao módulo de disparo de tiristores cujas saídas são  $Fire_{T1}$  e  $Fire_{T2}$ .

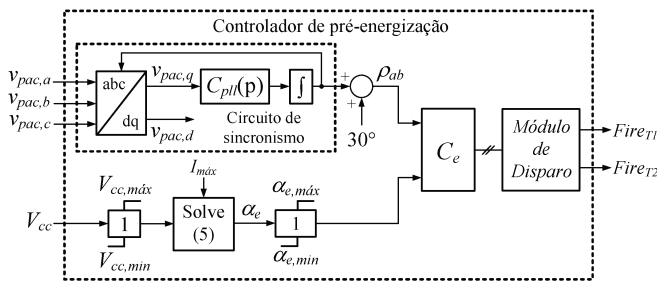


Fig. 6. Diagrama de blocos do controlador do ângulo de disparo dos tiristores durante a pré-energização do DSTATCOM.

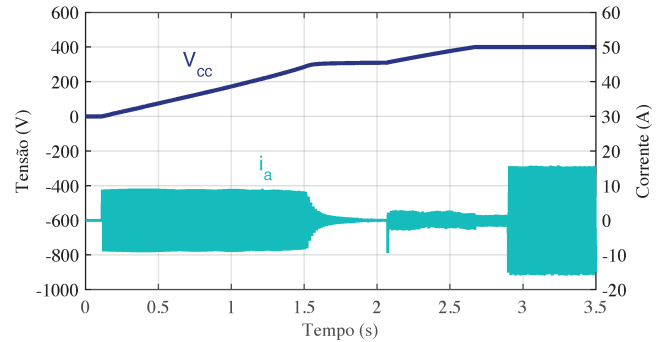
Na Figura 7 (a) são mostradas as formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” do DSTATCOM. Inicialmente o contato  $Sw_2$  é fechado enquanto os contatos  $Sw_1$  e  $Sw_3$  são mantidos abertos. De  $t = 0,1$  s a  $t = 1,5$  s, o capacitor CC é energizado com uma corrente controlada cujo valor de pico não ultrapassa  $I_{m\acute{a}x} = 10$  A. Como o valor médio da corrente de pré-energização é mantido constante durante esse período, a tensão CC sobre o capacitor do compensador cresce linearmente.

Na Figura 7 (b) é mostrado um detalhe da forma de onda da corrente da fase “a” durante a pré-energização. Em  $t = 2,1$  s, a tensão  $V_{cc}$  atinge 311 V. Assim, os contatos  $Sw_1$  e  $Sw_3$  são fechados, os controladores de tensão e corrente do DSTATCOM são habilitados e, em seguida, a tensão  $V_{cc}$  é regulada em 400 V. A partir deste momento o DSTATCOM realiza uma compensação de 3,8 kvar em seus terminais.

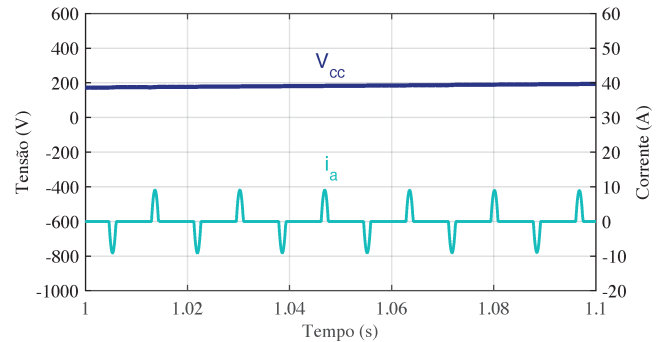
Na próxima seção será mostrada uma modificação no circuito anterior que permitirá também a desenergização do DSTATCOM.

#### IV. ENERGIZAÇÃO E DESENERGIZAÇÃO SÍNCRONA

Nas aplicações práticas é importante também descarregar totalmente o capacitor do DSTATCOM para realizar uma



(a)



(b)

Fig. 7. Formas de onda do DSTATCOM de 3,8 kVA/220 V: (a) tensão do barramento CC e corrente da fase “a” e (b) detalhe da corrente da fase “a” durante a pré-energização.

manutenção ou para retirar o compensador de operação.

Na Figura 8 é mostrada uma modificação do circuito de pré-energização na qual os tiristores  $T_1$  e  $T_2$  são conectados em antiparalelo em uma configuração de um gradador [22], [23]. Esta modificação permite realizar tanto a energização quanto a desenergização do DSTATCOM. Por simplicidade os diagramas de blocos dos controladores bem como os circuitos de interface e a rede elétrica foram omitidos desta figura.

Durante a pré-energização, os contatos  $Sw_1$  e  $Sw_3$  são mantidos abertos e o contato  $Sw_2$  fechado. O ângulo de disparo dos tiristores é calculado conforme metodologia descrita na Seção II. B. Na Figura 9 (a) é mostrado o circuito equivalente do DSTATCOM durante a pré-energização e o sentido da corrente de carga do capacitor CC para  $v_{s,ab} \geq 0$ . Esse circuito se comporta como um retificador a diodos em ponte completa cuja tensão de entrada é controlada pelos tiristores  $T_1$  e  $T_2$ .

Para realizar a desenergização do capacitor CC do DSTATCOM, além dos tiristores  $T_1$  e  $T_2$ , os interruptores ( $S_1 - S_6$ ) e ( $S_3 - S_4$ ) devem ser acionados em sincronismo com os semiciclos positivo e negativo da tensão de alimentação. Na Figura 9 (b) é mostrado o circuito equivalente do DSTATCOM durante o processo de desenergização e o sentido da corrente de descarga do capacitor CC para  $v_{s,ab} \geq 0$ .

Nas Figuras 10 (a) e (b) são mostradas as formas de onda da tensão CC do capacitor, da tensão CA da rede e da corrente de descarga, respectivamente. Durante a desenergização os tiristores  $T_1$  e  $T_2$  devem ser disparados com um ângulo  $\alpha < 90^\circ$ . Nessa região a tensão  $V_{cc}$  será maior que a tensão  $v_{s,ab}(t)$  e a corrente  $i(t)$  irá fluir do capacitor para a rede CA, conforme

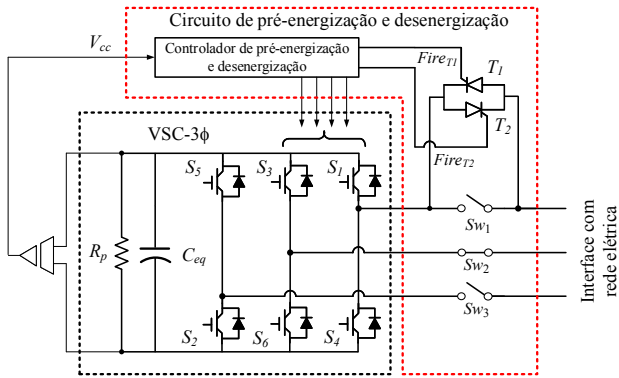


Fig. 8. Topologia do circuito de pré-energização e desenergização síncrona do DSTATCOM.

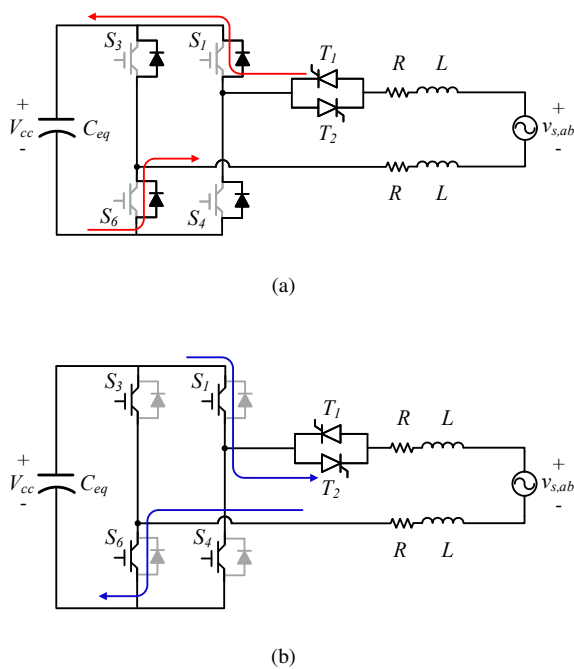


Fig. 9. Circuitos equivalentes do DSTATCOM: (a) pré-energização, (b) desenergização.

indicado na Figura 9 (b).

Os interruptores ( $S_1 - S_6$ ) devem ser mantidos fechados enquanto a corrente pelo circuito é positiva. Já os interruptores ( $S_3 - S_4$ ) devem ser disparados juntamente com  $T_1$ . Depois do disparo, ocorrerá o bloqueio natural dos tiristores em  $\omega t = \beta$  e os IGBTs poderão ser comutados com corrente nula.

#### A. Modelagem Matemática da Corrente de Desenergização

Tendo em mente o circuito equivalente da Figura 9 (b) pode-se escrever a seguinte relação para a corrente de desenergização do DSTATCOM:

$$2L \frac{di(t)}{dt} + 2Ri(t) + \frac{1}{C_{eq}} \int_0^t i(\lambda) d\lambda = [V_{cc}(\alpha^-) - v_{s,ab}(t)] U_{-1}(t - \alpha/\omega). \quad (6)$$

Desprezando o efeito da resistência série, a solução de (6)

é dada por:

$$i(t) = \left\{ \frac{\sqrt{2}V_L\omega}{2L(\omega_r^2 - \omega^2)} \left[ \cos(\alpha) \cos\left(\omega_r t - \frac{\omega_r \alpha}{\omega}\right) - \cos(\omega t) - \left(\frac{\omega_r}{\omega}\right) \sin(\alpha) \sin\left(\omega_r t - \frac{\omega_r \alpha}{\omega}\right) \right] + \left(\frac{V_{cc}}{2L\omega_r}\right) \sin\left(\omega_r t - \frac{\omega_r \alpha}{\omega}\right) \right\} U_{-1}\left(t - \frac{\alpha}{\omega}\right) \quad (7)$$

sendo  $\omega_r = 1/\sqrt{2LC_{eq}}$ . Como no caso anterior, a expressão analítica da corrente pelo circuito é válida somente para  $\alpha \leq \omega t \leq \beta$ .

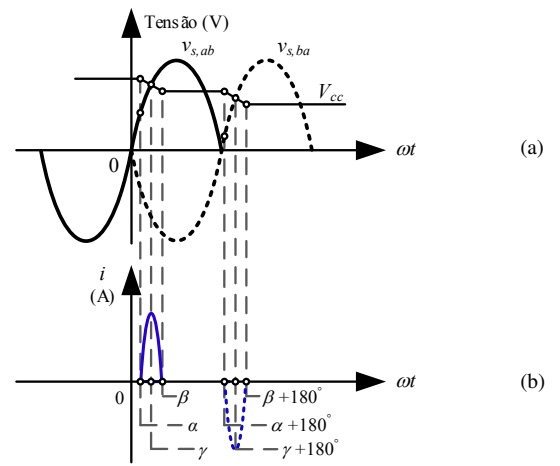


Fig. 10. Formas de onda durante o processo de desenergização síncrona do DSTATCOM: (a) tensão da rede e tensão CC e (b) corrente CA.

#### B. Controle da Corrente de Desenergização Síncrona

Da Figura 10 (b), tem-se que o valor de pico da corrente de desenergização acontece no instante  $\omega t = \gamma_d$ . Esse ângulo pode ser então estimado por:

$$\gamma_d \approx \text{sen}^{-1} \left( \frac{V_{cc}}{\sqrt{2}V_L} \right) \quad (8)$$

onde o subíndice ( $d$ ) foi adicionado à variável  $\gamma$  para indicar que esse ângulo é referente a desenergização do compensador.

Como no caso anterior, conhecendo o valor da tensão  $V_{cc}$ , pode-se utilizar (7) para calcular o ângulo  $\alpha_d$  de maneira que o pico da corrente de desenergização  $i(t_{\gamma_d})$  seja  $I_{máx}$ . Desse modo, os ângulos de disparo dos tiristores podem ser determinados aplicando-se o método de Newton-Raphson sucessivamente em (7), para a tensão CC variando do valor máximo até zero.

## V. RESULTADOS E ANÁLISES EXPERIMENTAIS

O circuito e a estratégia de energização/desenergização proposta neste trabalho foram incorporados no modelo digital do DSTATCOM e num protótipo de pequena escala. Os parâmetros da rede, do compensador e dos

controladores do DSTATCOM são os mesmos daqueles indicados nas Tabelas I, II e III, respectivamente. Na Figura 11 é mostrada a fotografia do protótipo utilizado para obter os resultados experimentais no laboratório. Todos os algoritmos de controle (controladores de corrente, tensão e energização/desenergização) do DSTATCOM foram implementados em um processador digitais de sinais (do inglês, “*Digital Signal Processor*”) (DSP) da Texas Instruments (TMS320F28335).

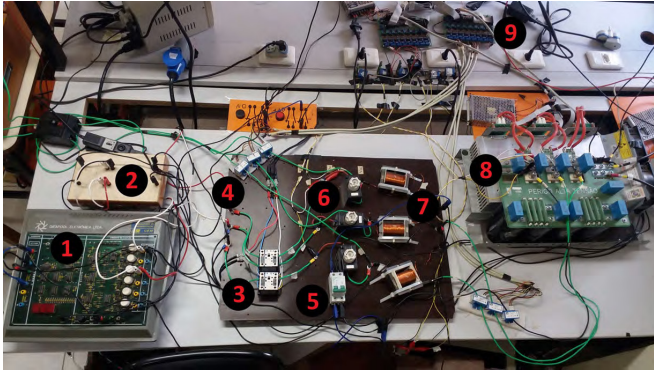


Fig. 11. Foto do protótipo em pequena escala do DSTATCOM: ① e ② módulo de disparo e tiristores, ③ e ④ sensores Hall, ⑤ disjuntor, ⑥ fusíveis, ⑦ filtros, ⑧ conversor, ⑨ placas de condicionamento.

Para reduzir o esforço computacional e aumentar a eficiência do algoritmo de energização e desenergização, as relações não lineares (3) e (7) não são resolvidas a cada passo de simulação/amostragem. Ao invés disso os vetores com as soluções  $(V_{cc}, \alpha_e)$  e  $(V_{cc}, \alpha_d)$  foram usados para ajustar os coeficientes de aproximações lineares por partes (do inglês, “*Piecewise Linear*”) (PWL) [24] com dez e oito pontos de quebra, respectivamente (Apêndice).

Na Figura 12 é mostrado o diagrama de blocos do controlador de energização/desenergização do DSTATCOM. A tensão do barramento CC é medida e processada pelos blocos  $PWL_e$  e  $PWL_d$ . Uma chave seletora é usada para determinar se o capacitor será energizado ou desenergizado. Os ângulos  $\alpha_e$  e  $\alpha_d$  são processados pelos blocos  $C_e$  e  $C_d$  cujas saídas são enviadas ao módulo de disparo dos interruptores, durante a pré-energização e desenergização síncrona, respectivamente.

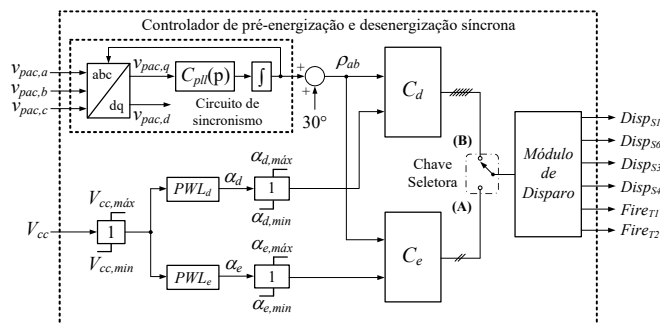


Fig. 12. Diagrama de blocos do controlador de pré-energização e desenergização síncrona do DSTATCOM.

Nas Figuras 13 (a) e (b) são mostradas as formas de onda da tensão do barramento CC e da corrente da fase “a” do DSTATCOM, respectivamente. Inicialmente o DSTATCOM

da Figura 8 é conectado à rede CA com os contatos  $Sw_1$  e  $Sw_3$  abertos e o contato  $Sw_2$  fechado.

Em  $t = 8,5$  s o bloco controlador de energização/desenergização da Figura 12 é habilitado. A tensão do barramento CC é usada pelo bloco  $PWL_e$  para gerar o ângulo de disparo dos tiristores de maneira que o valor de pico da corrente de pré-energização seja 10 A. Como o valor médio da corrente de carga é mantido praticamente constante, a tensão CC sobre o capacitor cresce linearmente durante esse período. Na Figura 14 é mostrado um detalhe da forma de onda da corrente da fase “a” durante a pré-energização.

Em  $t = 10$  s a tensão CC do DSTATCOM atinge o valor de pico da tensão CA da rede. O controlador de pré-energização do compensador bloqueia o disparo dos tiristores  $T_1$  e  $T_2$  e os contatos  $Sw_1$  e  $Sw_3$  são fechados. Neste instante não se observa nenhuma sobrecorrente drenada pelo compensador.

Em  $t = 12,5$  s os controladores de tensão e de corrente do DSTATCOM são habilitados. A corrente de referência  $I_d^*$  é usada então para carregar o capacitor até a tensão CC de 400 V. Em  $t = 14,5$  s a corrente de referência  $I_q^*$  é variada em degrau de zero para  $-14$  A. O DSTATCOM então começa a compensar potência reativa em seus terminais (3,8 kvar) até o instante  $t = 17,6$  s, quando o sinal de referência  $I_q^*$  é novamente variado em degrau para zero.

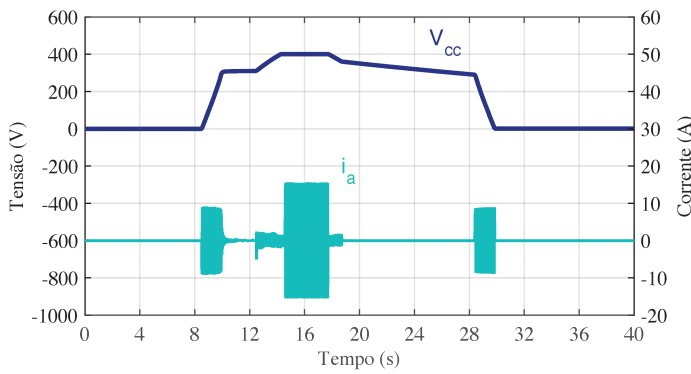
Em  $t = 17,7$  s a corrente  $I_d$  do compensador é controlada de maneira a realizar a redução da tensão do barramento CC. De  $t = 18,6$  s a  $t = 28,5$  s observa-se uma descarga natural do capacitor do compensador.

Finalmente em  $t = 28,6$  s os contatos  $Sw_1$  e  $Sw_3$  são abertos e o controlador de desenergização síncrona é habilitado. O bloco  $PWL_d$  gera o ângulo de disparo dos interruptores de maneira que o pico da corrente de desenergização seja 10 A. A tensão CC sobre o capacitor decresce linearmente até atingir o zero durante esse período. Na Figura 15 é mostrado um detalhe da forma de onda da corrente da fase “a” durante a desenergização síncrona.

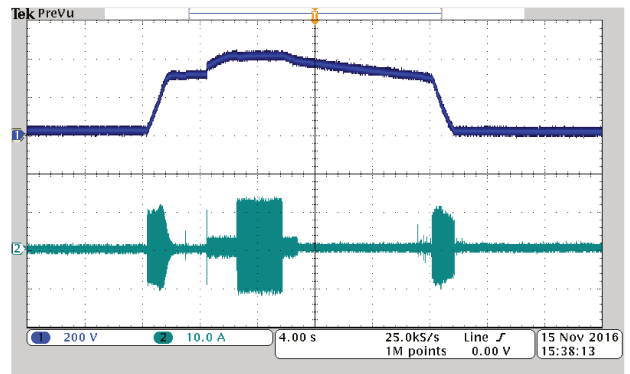
## VI. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi proposta uma estratégia para energizar/desenergizar um DSTATCOM de 3,8 kVA/220 V. Foram investigados dois circuitos distintos, o primeiro baseado em uma topologia de um retificador semi-controlado e o segundo baseado em um gradador. Diferentemente de outras estratégias, a estratégia proposta permite controlar a corrente de carga ou descarga do compensador sem utilizar transformadores, resistores, indutores ou fontes auxiliares adicionais.

A modelagem matemática dos circuitos de energização/desenergização propostos permitiu desenvolver uma metodologia para regular a corrente pelo circuito a partir do controle do ângulo de disparo dos tiristores. As estratégias de controle desenvolvidas foram validadas a partir de simulações digitais no programa PSIM. Como as correntes de carga e de descarga foram controladas, a tensão CC sobre o capacitor do DSTATCOM variou linearmente com o tempo. Para reduzir o esforço computacional, as relações não lineares entre a tensão CC e o ângulo de disparo dos tiristores foram aproximadas por uma função linear por partes.

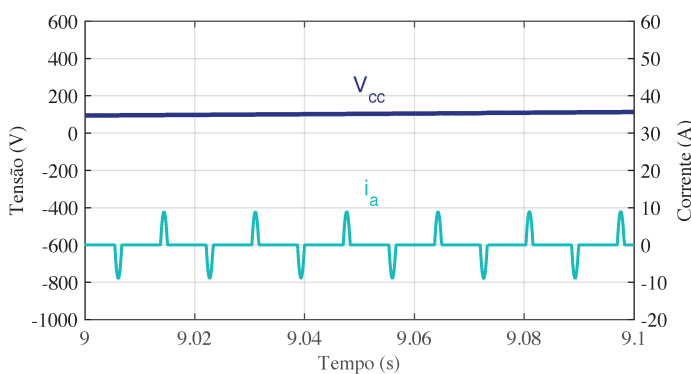


(a)

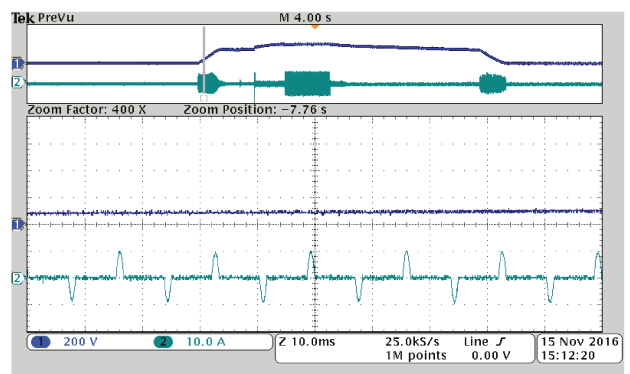


(b)

Fig. 13. Tensão do barramento CC e corrente da fase “a” durante a energização, compensação de potência reativa e desenergização do DSTATCOM: (a) simulação, (b) experimental.

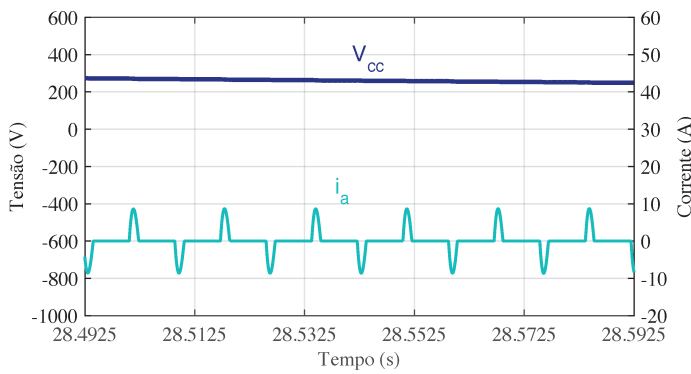


(a)

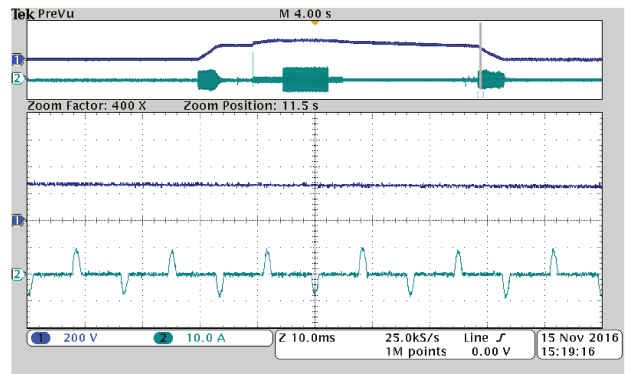


(b)

Fig. 14. Detalhe da tensão do barramento CC e corrente da fase “a” durante a pré-energização do DSTATCOM: (a) simulação, (b) experimental.



(a)



(b)

Fig. 15. Detalhe da tensão do barramento CC e corrente da fase “a” durante a desenergização síncrona do DSTATCOM: (a) simulação, (b) experimental.

Resultados experimentais obtidos com um protótipo de pequena escala em laboratório foram apresentados para validar os resultados teóricos e simulados. Apesar da potência reduzida do protótipo, o método proposto neste trabalho pode ser utilizado para energizar/desenergizar conversores de maior potência sem a necessidade de alterações significativas nas topologias dos conversores estáticos.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer o INERGE, a CAPES, o CNPq (Proc. 456040/2014-5) e a FAPEMIG (APQ-01046-15) pelo suporte financeiro e bolsas recebidas.

APÊNDICE  
 APROXIMAÇÃO LINEAR POR PARTES (PWL)

As características  $(V_{cc}, \alpha_e)$  e  $(V_{cc}, \alpha_d)$  resultantes da solução numérica de (3) e (7), podem ser aproximadas por duas funções lineares por partes escritas como se segue:

$$\alpha_{PWL}(V_{cc}) = a + bV_{cc} + \sum_{k=1}^P C_k |V_{cc} - V_{cc,k}| \quad (9)$$

onde  $\alpha_{PWL}$  é o ângulo dado pela aproximação linear por partes;  $V_{cc}$  é a tensão do barramento CC;  $P$  é o número de pontos de quebra da aproximação linear por partes e  $k$  é um número inteiro.

Os coeficientes  $a$ ,  $b$  e  $C_k$  da aproximação linear por partes são calculados por:

$$\begin{cases} a = \alpha(V_{cc,0}) - \sum_{k=1}^P C_k |V_{cc,k}| \\ b = \left( \frac{m_0 + m_P}{2} \right) \\ C_k = \left( \frac{m_k + m_{k-1}}{2} \right) \end{cases} \quad (10)$$

sendo  $m_k = (\alpha_{k+1} - \alpha_k) / (V_{cc,k+1} - V_{cc,k})$  o coeficiente angular (inclinação) do segmento de reta entre os pontos  $k$  e  $(k+1)$  da aproximação PWL.

Nas Tabelas IV e V são dados os valores dos pontos de quebra e dos coeficientes das aproximações PWL das características de energização e desenergização do DSTATCOM, respectivamente. Nas Figuras 16 (a) e (b) são mostradas as curvas reais e aproximadas referentes aos processos de pré-energização e desenergização síncrona do conversor estático, respectivamente. Para traçar a curva de pré-energização, os ângulos  $\alpha_e$  foram calculados para  $V_{cc}$  variando de zero até 290 V, enquanto que os ângulos  $\alpha_d$  foram calculados para  $V_{cc}$  variando de 290 V até zero. Ambas as curvas foram geradas para uma variação de 0,01 V em 0,01 V em  $V_{cc}$ .

**TABELA IV**  
**Coefficientes da Aproximação PWL da Característica de Pré-energização**

Pontos de quebra			Coeficientes
k	$V_{cc,k}$	$\alpha_k$	
Inicial	0	165,79°	$b = -1,3515975093$
1	100	146,43°	$c_1 = -0,0115820331$
2	150	135,58°	$c_2 = -0,0174506237$
3	200	123,00°	$c_3 = -0,0246203517$
4	225	115,47°	$c_4 = -0,0327530364$
5	250	106,31°	$c_5 = -0,0514447356$
6	265	99,27°	$c_6 = -0,0486501542$
7	270	96,43°	$c_7 = -0,0584521548$
8	278	90,97°	$c_8 = -0,1228378067$
9	284	85,39°	$c_9 = -0,2385467176$
10	288	79,76°	$c_{10} = -0,5515709826$
Final	290	74,74°	$a = 484,14928072$

**TABELA V**  
**Coefficientes da Aproximação PWL da Característica de Desenergização Síncrona**

Pontos de quebra			Coeficientes
k	$V_{cc,k}$	$\alpha_k$	
Inicial	290	47,98°	$b = 0,2603519202$
1	282	45,30°	$c_1 = 0,0030424563$
2	268	41,05°	$c_2 = 0,0040801834$
3	250	36,13°	$c_3 = 0,0055028908$
4	225	29,98°	$c_4 = 0,0074642444$
5	200	24,34°	$c_5 = 0,0102453137$
6	170	18,01°	$c_6 = 0,0133755719$
7	140	12,02°	$c_7 = 0,0153956608$
8	100	4,35°	$c_8 = 0,0156836159$
Final	0	-14,20°	$a = -31,70592591$

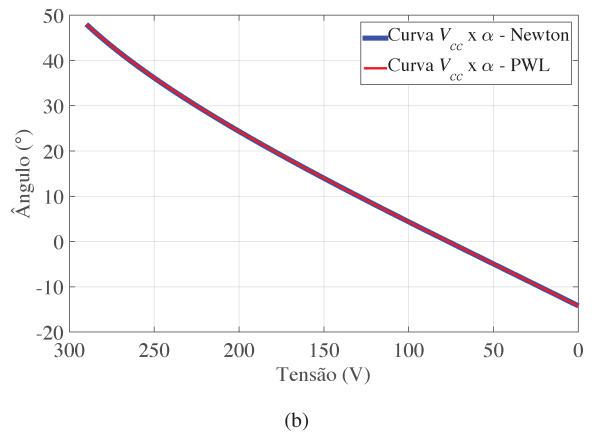
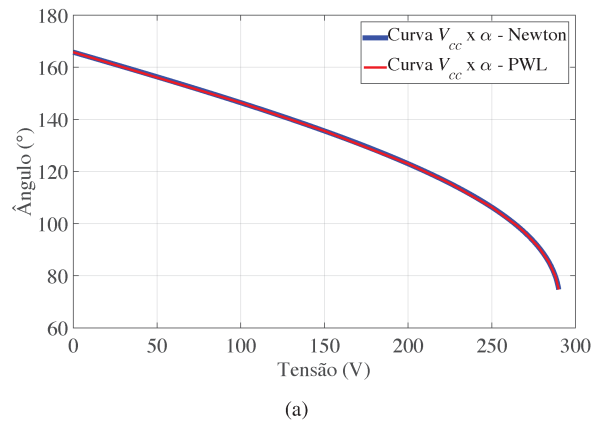


Fig. 16. Curvas PWL sobrepostas nas características  $V_{cc} \times \alpha$ : (a) pré-energização síncrona e (b) desenergização síncrona.

REFERÊNCIAS

- [1] N. G. Hingorani, L. Gyugyi, *Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems*, Wiley-IEEE press, 2000.
- [2] B. Singh, P. Jayaprakash, D. Kothari, "A T-connected transformer and three-leg VSC based DSTATCOM for power quality improvement", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 23, no. 6, pp. 2710–2718, Nov. 2008.
- [3] H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes, *Instantaneous*

*power theory and applications to power conditioning*, vol. 31, John Wiley & Sons, 2007.

- [4] J. Rodriguez, J.-S. Lai, F. Z. Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 49, no. 4, pp. 724–738, Aug. 2002.
- [5] H. Akagi, "Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (MMCC)", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, no. 11, pp. 3119–3130, Nov. 2011.
- [6] M. Malinowski, K. Gopakumar, J. Rodriguez, M. A. Pérez, "A survey on cascaded multilevel inverters", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 7, pp. 2197–2206, Jul. 2010.
- [7] M. Manolarou, G. Kostakis, S. Manias, "Inrush current limiting technique for low-voltage synchronous DC/DC converters", *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 152, no. 5, pp. 1179–1183, Sep. 2005.
- [8] T. Larsson, B. Thorvaldsson, B. Akesson, "Device for energizing a voltage-source converter", US Patent 6,337,802, Jan. 8 2002.
- [9] C. Schauder, E. Stacey, M. Lund, L. Gyugyi, L. Kovalsky, A. Keri, A. Mehraban, A. Edris, "AEP UPFC project: installation, commissioning and operation of the  $\pm 160$  MVA STATCOM (phase I)", *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 13, no. 4, pp. 1530–1535, Oct. 1998.
- [10] C. Han, *Power system dynamic voltage management with advanced STATCOM and energy storage system*. Ph.D. Thesis, North Carolina State University, Raleigh, USA, 2006.
- [11] C. Han, B. Chen, K. Tewari, W. Liu, A. Q. Huang, M. Ingram, A. A. Edris, S. Atcitty, "An ETO Thyristor and Modular H-bridge PWM Converter-based 4.5 MVA STATCOM: 480 V/500 A Transformerless Grid-Connected Experimentation", in *Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting*, vol. 2, pp. 1039–1044, 2006.
- [12] C. A. Petry, "Metodologia de projeto de retificadores com filtro capacitivo", *Revista Ilha Digital*, vol. 3, pp. 77–85, Jan. 2012.
- [13] D. Balocco, "AC/DC converter preloading circuit", US Patent App. 12/958,854, Jun. 9 2011.
- [14] R. L. Ribeiro, R. M. Sousa, E. C. Santos Jr., T. O. Rocha, "Enhanced power quality compensation of shunt active power filters without harmonic detection schemes", *Revista Eletrônica de Potência*, vol. 19, no. 4, pp. 332–342, Nov. 2014.
- [15] C. H. da Silva, R. R. Pereira, L. E. B. da Silva, G. L. Torres, R. B. Gonzatti, "Charging and regulating the DC-link voltage of hybrid active series power filters", in *14th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP)*, pp. 1–4, 2010.
- [16] W.-H. Choi, C.-S. Lam, M.-C. Wong, Y.-D. Han, "Analysis of DC-link voltage controls in three-phase four-wire hybrid active power filters", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, no. 5, pp. 2180–2191, May 2013.
- [17] J.-P. Hasler, "Methods for de-energizing a chain-link converter, controller, computer programs and computer program products", US Patent 8,760,120, Jun. 24 2014.
- [18] P. M. de Almeida, *Modelagem e Controle de Conversores Estáticos Fonte de Tensão utilizados em Sistemas de Geração Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica de Distribuição*, Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, 2011.
- [19] P. M. de Almeida, A. A. Ferreira, H. A. Braga, P. G. Barbosa, "Projeto dos controladores de um conversor VSC usado para conectar um sistema de geração fotovoltaica à rede elétrica", in *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 3960–3965, 2012.
- [20] A. Yazdani, R. Iravani, *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*, John Wiley & Sons, 2010.
- [21] S. N. Duarte, J. G. de Oliveira, P. G. Barbosa, "Projeto e simulação dos controladores de um sistema de geração eólica conectado à rede de distribuição", in *Anais do Congresso Brasileiro de Automática*, pp. 1014–1019, 2016.
- [22] M. H. Rashid, *Power electronics handbook: devices, circuits and applications*, Academic press, 2010.
- [23] J. R. Tibola, R. L. Sari, T. D. M. Lazzanov, M. E. S. Martins, H. Pinheiro, "Modeling and Control of a Low-Cost Driver For an Eddy Current Dynamometer", *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, vol. 27, no. 4, pp. 368–378, Apr. 2016.
- [24] L. O. Chua, P. Y. Lin, *Computer-aided analysis of electronic circuits: algorithms and computational techniques*, Prentice Hall Professional Technical Reference, 1975.

## DADOS BIOGRÁFICOS

**Samuel Neves Duarte** recebeu o título de Engenheiro e Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2014 e 2017, respectivamente, onde atualmente é aluno de doutorado.

**Gabriel Azevedo Fogli** recebeu o título de Engenheiro Eletrônico e de Telecomunicações pela PUC Minas, em 2011 e o título de Mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora, em 2014, onde atualmente cursa o doutorado. Desde 2016 ele é Professor Assistente do Departamento de Engenharia Elétrica da UFOP.

**Pedro Machado de Almeida** recebeu os títulos de Engenheiro, Mestre e Doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2009, 2011 e 2013, respectivamente. Desde 2014 ele é Professor Adjunto do Departamento de Energia Elétrica da UFJF.

**Pedro Gomes Barbosa** recebeu o título de Engenheiro Eletricista pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 1986 e os títulos de Mestre e Doutor, em Engenharia Elétrica, pela Universidade Federal do Rio de Janeiro em 1994 e 2000, respectivamente. Desde 2016 ele é Professor Titular do Departamento de Energia Elétrica da UFJF.