

# A Compensation Strategy Based on Consumer's Voltage Unbalance Assessment for a Distribution Static Synchronous Compensator

S. Duarte, B. Souza, P. Almeida, *Member, IEEE*, L. Araújo, *Senior Member, IEEE*, and P. Barbosa, *Senior Member, IEEE*

**Abstract**—This paper presents a new control algorithm for a distribution static synchronous compensator (DSTATCOM) based on consumer's voltage unbalance assessment. The proposed controller quantifies, in real time, the parcels of voltage unbalances due to the supplier (utility) and consumer by using local measurements of voltages and currents. The compensator mathematical model is used to derive small signal models in such a way to design controllers to compensate for the negative sequence voltage caused by a consumer. Two inner control loops, designed in synchronous reference frame, assure the DSTATCOM tracks the reference signals generated by the voltage controllers. Digital simulation results obtained with an unbalanced distribution network are used to validate the proposed methodology. The comparison of the results shows that the capacity of the compensator can be significantly reduced when only the unbalanced voltage portion caused by the load is compensated.

**Index Terms**—Distribution Systems, DSTATCOM, Voltage Compensation, Unbalance Responsibility.

## I. INTRODUÇÃO

NAS últimas décadas, a qualidade da energia suprida pelas redes elétricas de distribuição tem sido um tema muito discutido nos meios técnico e científico [1]. Órgãos e agências de diversos países do mundo estabeleceram índices de desempenho e regras de conexão de unidades geradoras para suas redes elétricas [2], [3]. No Brasil, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) [4] e o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) [5], [6] estipulam algumas dessas regras e índices.

Os sistemas de distribuição modernos possuem diferentes tipos de cargas que drenam correntes desequilibradas e distorcidas dos alimentadores e comprometem os índices de qualidade da energia fornecida. A observância dos limites e regras recomendados pelos órgãos e agências reguladoras é fundamental para garantir a operação segura das redes elétricas, evitar o mal funcionamento e o desligamento de cargas críticas [7].

Um fenômeno frequentemente observado e que contribui para a degradação da qualidade da energia elétrica fornecida e consumida nas redes de distribuição é o desequilíbrio das tensões [3], [8], [9]. Estes eventos são causados pela conexão de cargas não equilibradas nas fases da rede, que consomem correntes desbalanceadas e desequilibram as tensões, ou ainda,

por fatores como pontos de maus contatos, defeitos em dispositivos de acionamentos e enrolamentos de motores elétricos [10].

Os desequilíbrios provocam o aparecimento de componentes de sequência negativa e zero nas tensões de alimentação que são responsáveis por produzir conjugados pulsantes nos motores elétricos, aumentar as perdas e provocar variações de velocidade [11]. Em gráficas, por exemplo, onde a tração das bobinas de papel é feita por cilindros acionados por máquinas elétricas, esses conjugados pulsantes podem provocar a perda da sincronização e a interrupção do processo de impressão. Esses problemas tendem a se agravar no futuro, quando se considera um cenário com elevada penetração de sistemas de geração distribuídos monofásicos, principalmente aqueles baseados em fontes alternativas de energia, como o solar fotovoltaico [12] e o eólico.

Uma alternativa que vem sendo discutida por especialistas do setor elétrico é a penalização de consumidores responsáveis por comprometer os índices de qualidade da energia das redes elétricas [13], [14]. Nesse sentido é fundamental desenvolver uma metodologia para quantificar as responsabilidades da concessionária e do consumidor sobre esses índices de desempenho. Embora muitos dos resultados apresentados na literatura tratem especificamente a questão da responsabilização frente a poluição harmônica [13], muitas dessas metodologias podem também ser adaptadas para identificar as responsabilidades dos desequilíbrios de tensão e corrente nas redes de distribuição [15].

O principal objetivo deste trabalho é apresentar uma metodologia para quantificar em tempo real as parcelas de desequilíbrios de tensão, no ponto de acoplamento comum (PAC), entre o supridor (concessionária) e um consumidor. A metodologia de responsabilização proposta neste trabalho será usada para controlar um compensador estático síncrono para distribuição (do inglês, *Distribution Static Synchronous Compensator*) (DSTATCOM) [16] com objetivo de compensar apenas a parcela do desequilíbrio provocado pelo consumidor, evitando compensar todo o desequilíbrio medido no PAC. Apesar do STATCOM [17] ser um controlador proposto para compensar potência reativa, regular tensão e corrigir o fator de potência, encontram-se trabalhos na literatura, onde esses equipamentos são propostos para compensar tensões e correntes desbalanceadas da rede [18], [19]. Resultados de simulações digitais de um DSTATCOM conectado em um sistema de distribuição desequilibrado serão usados para

S.N. Duarte, B.C. de Souza, P.M. Almeida, L.R. Araújo e P.G. Barbosa estão com o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil. samuel.neves@engenharia.ufjf.br

validar a metodologia proposta.

## II. METODOLOGIA DE RESPONSABILIZAÇÃO DE DESEQUILÍBRIO

O método de responsabilização de desequilíbrio apresentado neste trabalho é baseado na metodologia proposta por Xu e Liu em [13] para quantificar a distorção harmônica produzida por uma carga não linear conectada a um sistema elétrico de potência. O método apresentado aqui se diferencia por não usar medições anteriores à conexão do consumidor à rede, embora seja necessário conhecer os valores das impedâncias equivalentes do sistema e do consumidor no PAC [15].

Na Figure 1 (a) é mostrado o circuito Norton equivalente, no domínio da frequência, para os supridor e consumidor. Esse circuito pode ser decomposto nos circuitos equivalentes das Figure 1 (b) e Figure 1 (c), nos quais são destacadas as contribuições do supridor e do consumidor sobre a corrente de sequência negativa do PAC.

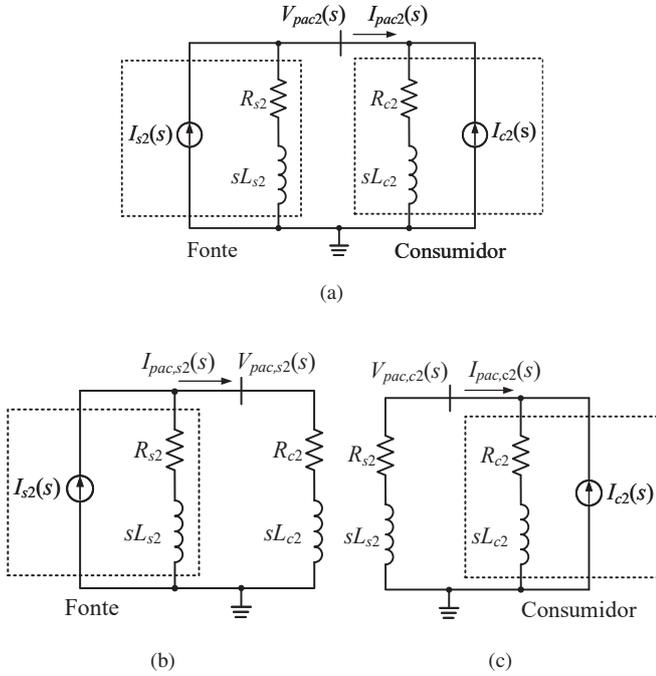


Fig. 1. Circuitos equivalentes Norton: (a) circuito equivalente de sequência negativa, (b) contribuição da fonte para  $I_{pac2}$  e (c) contribuição do consumidor para  $I_{pac2}$ .

Do circuito da Figure 1 (a) pode-se escrever a seguinte relação:

$$I_{c2}(s) = \frac{V_{pac2}(s)}{Z_{c2}(s)} - I_{pac2}(s), \quad (1)$$

onde  $I_{c2}(s)$  é a corrente de sequência negativa do consumidor,  $V_{pac2}(s)$  e  $I_{pac2}(s)$  são as tensão e corrente de sequência negativa no PAC, respectivamente, e  $Z_{c2}(s) = (R_{c2} + sL_{c2})$  é a impedância equivalente de sequência negativa do consumidor em relação ao PAC.

Já do circuito da Figure 1 (c) pode-se escrever as seguintes relações para a tensão e a corrente no PAC devido ao consumidor:

$$V_{pac,c2}(s) = -Z_{s2}(s) I_{pac,c2}(s) \quad (2)$$

e

$$I_{c2}(s) = \frac{V_{pac,c2}(s)}{Z_{c2}(s)} - I_{pac,c2}(s), \quad (3)$$

onde  $V_{pac,c2}(s)$  e  $I_{pac,c2}(s)$  são as tensão e corrente de sequência negativa no PAC devido à contribuição do consumidor, respectivamente, e  $Z_{s2}(s) = (R_{s2} + sL_{s2})$  é a impedância equivalente de sequência negativa do supridor vista do PAC.

Substituindo (1) e (2) em (3), tem-se:

$$\frac{V_{pac2}(s)}{Z_{c2}(s)} - I_{pac2}(s) = - \left[ \frac{Z_{s2}(s)}{Z_{c2}(s)} + 1 \right] I_{pac,c2}(s). \quad (4)$$

Manipulando (4) chega-se a seguinte expressão:

$$I_{pac,c2}(s) = - \left( \frac{1}{Z_{s2}(s) + Z_{c2}(s)} \right) V_{pac2}(s) + \left( \frac{Z_{c2}(s)}{Z_{s2}(s) + Z_{c2}(s)} \right) I_{pac2}(s). \quad (5)$$

Ou seja, conhecendo os valores das impedâncias equivalentes  $Z_{s2}$  e  $Z_{c2}$ , pode-se determinar a contribuição do consumidor para corrente de sequência negativa no PAC através de (5) medindo-se as tensão e corrente de sequência negativa no ponto de acoplamento. Quando estes parâmetros não são conhecidos, pode-se usar diferentes métodos para estimar as impedâncias da rede e do consumidor, conforme mostrado em [20].

### A. Adaptação da Metodologia de Responsabilização para o Domínio do Tempo

Aplicando a transformada inversa de Laplace em (5) e rearranjando os termos da expressão resultante chega-se a seguinte relação no domínio do tempo:

$$\frac{di_{pac,c2}}{dt} = - \left( \frac{R_{t2}}{L_{t2}} \right) i_{pac,c2} + \left( \frac{R_{c2}}{L_{t2}} \right) i_{pac2} + \left( \frac{L_{c2}}{L_{t2}} \right) \frac{di_{pac2}}{dt} - \left( \frac{1}{L_{t2}} \right) v_{pac2}, \quad (6)$$

sendo  $R_{t2} = (R_{s2} + R_{c2})$ ,  $L_{t2} = (L_{s2} + L_{c2})$  e as letras minúsculas  $v$  e  $i$  usadas para representar as tensões e correntes no domínio do tempo, respectivamente.

Fazendo uma mudança de variáveis, pode-se reescrever (6) como se segue:

$$\frac{d\xi}{dt} = - \left( \frac{R_{t2}}{L_{t2}} \right) \xi - \left( \frac{1}{L_{t2}} \right) v_{pac2} + \left( \frac{R_{c2}L_{t2} - R_{t2}L_{c2}}{(L_{t2})^2} \right) i_{pac2}, \quad (7)$$

onde  $\xi = i_{pac,c2} - (L_{c2}/L_{t2}) i_{pac2}$ .

A expressão (7) pode ser reescrita na forma de espaço de estados conforme mostrado a seguir:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu \\ y = Cx + Du \end{cases}, \quad (8)$$

onde  $A = \left[ \frac{-R_{t2}}{L_{t2}} \right]$ ,  $B = \left[ \frac{R_{c2}L_{t2} - R_{t2}L_{c2}}{(L_{t2})^2} \quad \frac{-1}{L_{t2}} \right]$ ,  $C = 1$ ,  $D = \left[ \frac{L_{c2}}{L_{t2}} \quad 0 \right]$ ,  $x = \xi$ ,  $y = i_{pac,c2}$ ,  $u = \left[ i_{pac2} \quad v_{pac2} \right]^t$ , sendo o índice  $t$  usado para representar o vetor transposto.

Determinando  $y = i_{pac,c2}$  através da solução de (7)-(8), pode-se reescrever (2) no domínio do tempo e calcular a contribuição do consumidor para o desequilíbrio de tensão do PAC através de:

$$v_{pac,c2} = -L_{s2} \frac{di_{pac,c2}}{dt} - R_{s2} i_{pac,c2}. \quad (9)$$

Na Figure 2 é mostrado o diagrama de blocos usado para quantificar em tempo real da parcela de responsabilidade do consumidor sobre o desequilíbrio no PAC. Pode-se notar que, a contribuição do consumidor para o desequilíbrio de tensão é calculada através dos valores medidos da tensão e da corrente no PAC.

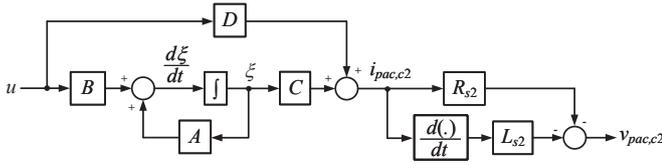


Fig. 2. Diagrama de blocos do espaço de estados para o cálculo em tempo real do desequilíbrio de tensão provocado pelo consumidor.

As equações dinâmicas apresentadas nessa seção podem ser facilmente incorporadas no controlador de um DSTATCOM com objetivo de compensar os desequilíbrios de sequência negativa no ponto de conexão.

### III. O COMPENSADOR ESTÁTICO SÍNCRONO

Na Figure 3 é mostrada a topologia do DSTATCOM, usado para compensar as tensões desequilibradas no PAC, conectado a uma rede de distribuição através de um filtro passivo de primeira ordem. Uma resistência  $R_p$  foi conectada em paralelo com o capacitor  $C_{eq}$  para modelar as perdas do barramento CC do DSTATCOM. Os parâmetros  $R_f$  e  $L_f$  representam, respectivamente, as resistência e indutância do filtro de interface. Já os parâmetros  $R_s$  e  $L_s$  representam as resistência e indutância equivalentes da rede elétrica, respectivamente.

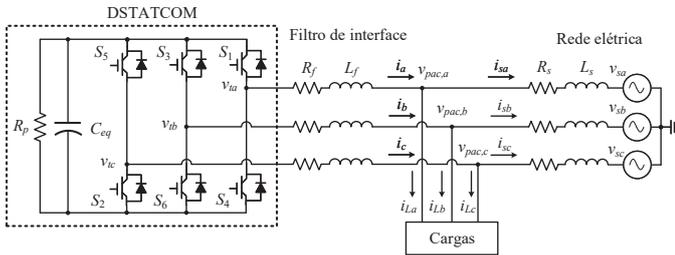


Fig. 3. Topologia do compensador estático síncrono conectado a uma rede elétrica de distribuição.

A modelagem matemática do circuito da Figure 3, no sistema de coordenadas síncrono, permite escrever as seguintes equações para as correntes de saída do conversor:

$$L_f \frac{di_d}{dt} = +\omega L_f i_q - R_{eq} i_d + v_{t,d} - v_{pac,d}, \quad (10)$$

$$L_f \frac{di_q}{dt} = -\omega L_f i_d - R_{eq} i_q + v_{t,q} - v_{pac,q}, \quad (11)$$

onde  $i_d$  e  $i_q$  são as correntes de saída do DSTATCOM,  $v_{pac,d}$  e  $v_{pac,q}$  são as tensões no PAC,  $v_{td} = m_d(\frac{V_{cc}}{2})$  e  $v_{tq} = m_q(\frac{V_{cc}}{2})$  são as tensões terminais do DSTATCOM, sendo  $V_{cc}$  a tensão do barramento CC,  $m_d$  e  $m_q$  os índices de modulação do conversor e  $\omega = (2\pi f)$  a frequência angular no PAC, estando todas as variáveis anteriores representadas nas coordenadas  $d$  e  $q$ , respectivamente.

A resistência equivalente  $R_{eq} = (R_f + R_{igbt})$  é formada pela associação série das resistências de condução dos interruptores semicondutores e do filtro de interface.

#### A. As Malhas de Controle das Correntes de Sequência Positiva e Negativa

O DSTATCOM deverá ser controlado para sintetizar correntes de sequências positiva e negativa com o objetivo de regular a tensão de sequência positiva e compensar a tensão de sequência negativa do PAC, respectivamente. Esta estratégia é conveniente em redes de distribuição cuja potência de curto circuito é baixa já que as correntes sintetizadas pelo compensador também serão baixas, uma vez que a impedância equivalente vista do PAC é elevada.

Reescrevendo (10) e (11) para as componentes de sequência positiva pode-se construir o diagrama de blocos da Figure 4 onde o subíndice  $(1)$  identifica as correntes de sequência positiva, de eixo direto e quadratura, respectivamente. Nessas figuras o sobrescrito  $(*)$  associado às variáveis é usado para identificar os sinais de referência.

Os blocos  $K_{i1}(s)$  são dois controladores proporcional-integral (PI) idênticos, com ganhos iguais a  $k_{p,i1} = (L_f/\tau_{i1})$  e  $k_{i,i1} = (R_{eq}/\tau_{i1})$ , respectivamente, para garantir uma resposta de primeira ordem para a função de transferência de malha fechada da corrente de sequência positiva sintetizada pelo DSTATCOM [21]. Os blocos  $F_{ff}(s)$  são filtros passa-baixas usados para eliminar os harmônicos de comutação presentes nas tensões do PAC.

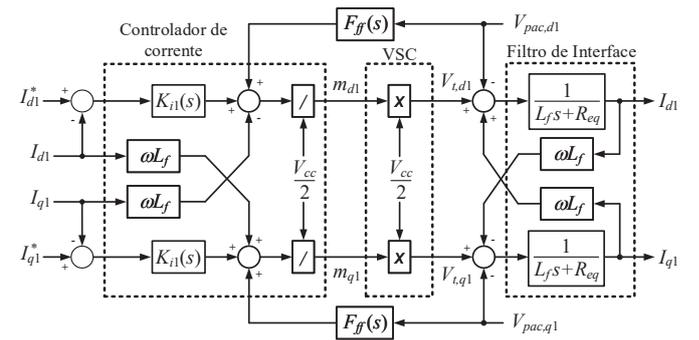


Fig. 4. Diagrama de blocos da malha de controle da corrente de sequência positiva.

Um diagrama de blocos idêntico ao mostrado na Figure 4, com exceção dos acoplamentos cruzados que devem possuir sinais contrários, pode ser construído para as correntes de sequência negativa, de eixo direto e quadratura, respectivamente. Neste caso deve-se usar o subíndice  $(2)$  para identificar os novos controladores  $K_{i2}(s)$  e variáveis. De maneira similar

à malha de corrente de sequência positiva, os ganhos proporcional e integral do controlador  $K_{i2}(s)$  foram projetados iguais a  $k_{p,i2} = (L_f/\tau_{i2})$  e  $k_{i,i2} = (R_{eq}/\tau_{i2})$ , respectivamente.

### B. Extração das Componentes de Sequências Positiva e Negativa

A separação dos sinais de sequências positiva e negativa, no domínio do tempo, se inicia aplicando a Transformação de Clarke nas tensões medidas no PAC, conforme mostrado a seguir:

$$\begin{bmatrix} v_{pac,\alpha} \\ v_{pac,\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{pac,a} \\ v_{pac,b} \\ v_{pac,c} \end{bmatrix}. \quad (12)$$

Os sinais ( $v_{pac,\alpha}$  e  $v_{pac,\beta}$ ) resultantes de (12) alimentam o algoritmo mostrado na Figure 5. Nessa figura são usados dois integradores generalizados de segunda ordem (do inglês, *Second Order Generalized Integrator*) (SOGI) [22], semelhantes ao mostrado na Figure 6, cujos sinais de saída ( $v'_{pac,\alpha}$ ,  $qv'_{pac,\alpha}$ ,  $v'_{pac,\beta}$  e  $qv'_{pac,\beta}$ ) são combinados para calcular as componentes de sequências positiva e negativa.

Na última parte do diagrama da Figure 5, as tensões de sequências positiva e negativa, nas coordenadas  $\alpha\beta$ , são transformadas para as coordenadas  $dq$  através de:

$$\begin{bmatrix} v_{pac,d1} \\ v_{pac,q1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\rho) & \sin(\rho) \\ -\sin(\rho) & \cos(\rho) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{pac,\alpha1} \\ v_{pac,\beta1} \end{bmatrix} \quad (13)$$

e,

$$\begin{bmatrix} v_{pac,d2} \\ v_{pac,q2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(-\rho) & \sin(-\rho) \\ -\sin(-\rho) & \cos(-\rho) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{pac,\alpha2} \\ v_{pac,\beta2} \end{bmatrix} \quad (14)$$

onde  $d\rho/dt = \omega$  é a frequência rastreada pelo circuito de sincronismo baseado no sistema de coordenada síncrono (SRF-PLL) (do inglês, *Synchronous Reference Frame - Phase Locked Loop*) localizado na parte superior direita da Figure 5.

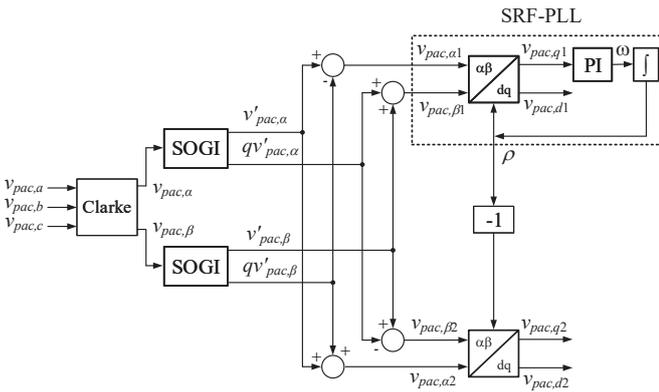


Fig. 5. Diagrama de blocos do detector de sequências positiva e negativa.

A extração das componentes de sequência positiva e negativa das correntes é feita com auxílio de um filtro *notch* ao invés do circuito SOGI. Esta escolha é justificada pela dinâmica mais lenta do SOGI, que tem dois integradores em sua estrutura.

Desse modo, as correntes do DSTATCOM e do PAC são medidas e transformadas para as coordenadas  $\alpha\beta$  da mesma

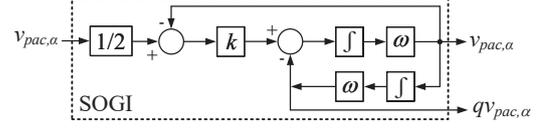


Fig. 6. Diagrama de blocos do integrador generalizado de segunda ordem.

maneira que as tensões em (12). As correntes resultantes são então transformadas para as coordenadas  $dq$  através de (13) e (14) e têm suas parcelas oscilantes eliminadas por um filtro *notch*, cuja função de transferência é dada por:

$$F_n(s) = \frac{s^2 + \omega_o^2}{s^2 + \left(\frac{\omega_o}{Q}\right)s + \omega_o^2}, \quad (15)$$

onde  $Q$  é o fator de qualidade do filtro,  $\omega_o = 2\omega$  é a frequência de ressonância do filtro, sendo  $\omega = 2\pi f$ , e  $f$  é a frequência fundamental da rede. Maiores detalhes sobre as etapas do algoritmo descrito nessa seção podem ser encontrados em [23].

### C. A Malha de Controle da Tensão de Sequência Positiva

Usando agora a rede elétrica da Figure 3 como referência pode-se escrever as seguintes equações para as tensões de sequência positiva do PAC:

$$v_{pac,d1} = L_{s1} \frac{di_{s,d1}}{dt} - \omega L_{s1} i_{s,q1} + R_{s1} i_{s,d1} + v_{s,d1}, \quad (16)$$

$$v_{pac,q1} = L_{s1} \frac{di_{s,q1}}{dt} + \omega L_{s1} i_{s,d1} + R_{s1} i_{s,q1} + v_{s,q1}, \quad (17)$$

onde  $R_{s1}$  e  $L_{s1}$  são as resistência e indutância de sequência positiva da rede, respectivamente,  $v_{s,d1} = \hat{V}_{s1} \cos(\omega_s t + \phi_{s1} - \rho)$  e  $v_{s,q1} = \hat{V}_{s1} \sin(\omega_s t + \phi_{s1} - \rho)$ , sendo  $\hat{V}_{s1}$ ,  $\omega_s$  e  $\phi_{s1}$  o valor de pico, a frequência angular e a fase da tensão de sequência positiva da rede, respectivamente.

A linearização de (16) e (17) resulta no seguinte modelo de pequenos sinais para o DSTATCOM:

$$\bar{V}_{pac,d1} = -\bar{\omega} L_{s1} \bar{I}_{s,q1} + R_{s1} \bar{I}_{s,d1} + \hat{V}_s \cos \bar{\rho}_0, \quad (18)$$

$$\bar{V}_{pac,q1} = +\bar{\omega} L_{s1} \bar{I}_{s,d1} + R_{s1} \bar{I}_{s,q1} - \hat{V}_s \sin \bar{\rho}_0, \quad (19)$$

e,

$$\tilde{v}_{pac,d1} = L_{s1} \frac{d\tilde{i}_{s,d1}}{dt} - \tilde{\omega} L_{s1} \bar{I}_{s,q1} - \bar{\omega} L_{s1} \tilde{i}_{s,q1} + R_{s1} \tilde{i}_{s,d1} - (\hat{V}_s \sin \bar{\rho}_0) \tilde{\rho}, \quad (20)$$

$$\tilde{v}_{pac,q1} = L_{s1} \frac{d\tilde{i}_{s,q1}}{dt} + \tilde{\omega} L_{s1} \bar{I}_{s,d1} + \bar{\omega} L_{s1} \tilde{i}_{s,d1} + R_{s1} \tilde{i}_{s,q1} - (\hat{V}_s \cos \bar{\rho}_0) \tilde{\rho}, \quad (21)$$

onde  $\cos(\omega_s t + \phi_{s1} - \rho) \approx \cos(\bar{\rho}_0 + \tilde{\rho}) = \cos \bar{\rho}_0 - (\sin \bar{\rho}_0) \tilde{\rho}$  e  $\sin(\omega_s t + \phi_{s1} - \rho) \approx -\sin(\bar{\rho}_0 + \tilde{\rho}) = -\sin \bar{\rho}_0 - (\cos \bar{\rho}_0) \tilde{\rho}$ .

As tensões, correntes e ângulos em (18)–(21) grafadas com o símbolo ( $\bar{\cdot}$ ) representam os valores de regime permanente enquanto que as destacadas com o símbolo ( $\tilde{\cdot}$ ) representam as pequenas perturbações em torno do ponto de operação.

Considerando ainda o modelo de pequenos sinais do PLL, pode-se escrever a seguinte equação adicional:

$$\frac{d\tilde{\rho}}{dt} = h(p) \tilde{v}_{pac,q1}, \quad (22)$$

onde  $p = d(\cdot)/dt$  é o operador derivador e  $h(p)$  é a resposta ao estado nulo da função de transferência  $H(s)$  do controlador PI do PLL.

Considerando  $\bar{V}_{pac,q1} = 0$ ,  $\tilde{\rho} \ll 1$  e  $\bar{V}_{pac,d1} \gg \tilde{v}_{pac,d1}$ , tem-se:

$$\tilde{v}_{pac,q1} = \bar{V}_{pac,d1} \tilde{\rho}. \quad (23)$$

Substituindo (23) em (22) pode-se escrever o seguinte modelo de pequenos sinais para o PLL:

$$\frac{d\tilde{\rho}}{dt} = h(p) \bar{V}_{pac,d1} \tilde{\rho}. \quad (24)$$

Resolvendo simultaneamente (18)–(21) e (24), considerando que o PLL rastreia a tensão de sequência positiva com erro nulo em regime permanente, obtém-se a seguinte relação de pequenos sinais, no domínio da frequência, para a tensão de eixo direto do PAC:

$$\tilde{V}_{pac,d1}(s) = G_{d1}(s) \tilde{I}_{s,d1}(s) - G_{q1}(s) \tilde{I}_{s,q1}(s), \quad (25)$$

onde  $G_{d1}(s) = (sL_{s1} + R_{s1})$  e  $G_{q1}(s) = \bar{\omega}L_{s1}$ .

Substituindo as correntes  $\tilde{I}_{s,d1}(s)$  e  $\tilde{I}_{s,q1}(s)$  em (25) pela diferença entre as correntes sintetizadas pelo DSTATCOM,  $\tilde{I}_{d1}(s)$  e  $\tilde{I}_{q1}(s)$ , e as correntes drenadas pela carga,  $\tilde{I}_{L,d1}(s)$  e  $\tilde{I}_{L,q1}(s)$ , tem-se:

$$\tilde{V}_{pac,d1}(s) = -G_{d1}(s) \tilde{I}_{L,d1}(s) + G_{q1}(s) \tilde{I}_{L,q1}(s) + G_{d1}(s) \tilde{I}_{d1}(s) - G_{q1}(s) \tilde{I}_{q1}(s). \quad (26)$$

A análise das duas primeiras parcelas de (26) mostra que  $\tilde{V}_{pac,d1}(s)$  depende diretamente das correntes, de eixo direto e quadratura, drenadas pela carga. Além disso, essa tensão pode ser controlada pelas correntes  $\tilde{I}_{d1}(s)$  e  $\tilde{I}_{q1}(s)$  sintetizadas pelo DSTATCOM.

Como a relação  $X/R$  dos sistemas de distribuição varia tipicamente entre 1,5 e 20 [24] e ainda, considerando que  $\tilde{I}_{d1} \approx 0$  já que o DSTATCOM absorve somente uma pequena quantidade de potência ativa em seus terminais para compensar suas perdas, é mais interessante controlar a tensão  $\tilde{V}_{pac,d1}$  através da corrente  $\tilde{I}_{q1}$ .

Na Figure 7 é mostrado o diagrama de blocos da malha de controle da tensão de sequência positiva do PAC. O bloco  $H_{i1}(s)$  representa a função de transferência em malha fechada do controlador de corrente de sequência positiva da Figure 4. Já o bloco  $K_{v1}(s)$  representa o controlador da tensão de sequência positiva do PAC.

Desse modo, baseado no princípio do modelo interno, como a planta  $G_{q1}(s)$  é modelada por um ganho, o controlador  $K_{v1}(s)$  deve possuir uma parcela integral para garantir que o sinal de saída siga o sinal de entrada com uma resposta de primeira ordem e um erro em regime permanente nulo. Assumindo que a constante de tempo  $\tau_{i1}$  é muito maior que a constante de tempo da malha de tensão  $\tau_{v1}$ , a função de transferência de malha fechada da tensão no PAC é dada por:

$$H_{v1}(s) = \frac{1}{s\tau_{v1} + 1}, \quad (27)$$

onde  $H_{i1}(s) = 1$ ,  $\tau_{v1} = 1/(k_{v1}\bar{\omega}L_{s1})$  e o ganho  $k_{v1}$  do controlador  $K_{v1}(s) = k_{v1}/s$  é calculado escolhendo-se  $\tau_{v1} \geq (10\tau_{i1})$ .

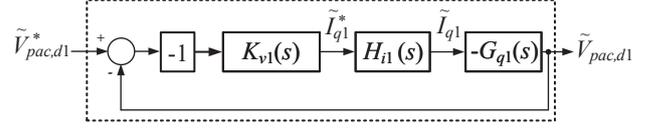


Fig. 7. Diagrama de blocos da malha de controle da componente  $d$  da tensão de sequência positiva do PAC.

#### D. As Malhas de Controle da Tensão de Sequência Negativa

Um modelo de pequenos sinais semelhante ao da seção anterior pode também ser desenvolvido e usado para projetar os controladores necessários para regular a tensão de sequência negativa do PAC. Contudo, diferentemente do caso anterior, aqui devem ser usados dois controladores, um para a componente de eixo direto e outro para a de eixo em quadratura, para controlar a tensão de sequência negativa do PAC.

Na Figure 8 é mostrado os diagramas de blocos das malhas de controle das componentes de eixo direto e quadratura da tensão de sequência negativa do PAC. Nessa figura a corrente  $\tilde{I}_{q2}(s)$  é usada para controlar a tensão  $\tilde{V}_{pac,d2}(s)$  enquanto a tensão  $\tilde{V}_{pac,q2}(s)$  é controlada pela corrente  $\tilde{I}_{d2}(s)$ . Os blocos  $H_{i2}(s)$  e  $K_{v2}(s)$  representam a função de transferência de malha fechada de corrente de sequência negativa e do controlador de tensão de sequência negativa, respectivamente. Já a planta é dada pela função de transferência  $G_{q2}(s) = \bar{\omega}L_{s2}$ , sendo  $L_{s2}$  a indutância de sequência negativa da rede.

De maneira similar à metodologia de projeto anterior, os ganhos dos controladores da tensão de sequência negativa de eixo direto e quadratura,  $K_{v2}(s) = k_{v2}/s$ , foram escolhidos de forma a garantir que  $\tau_{v2} = 1/(k_{v2}\bar{\omega}L_{s2}) \geq (10\tau_{i2})$ , onde  $\tau_{v2}$  e  $\tau_{i2}$  são as constantes de tempo das malhas de tensão e corrente de sequência negativa, respectivamente.

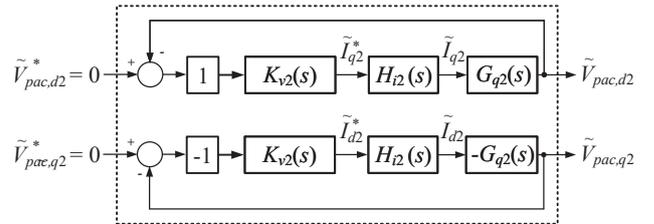


Fig. 8. Diagramas de blocos das malhas de controle das componentes  $d$  e  $q$  da tensão de sequência negativa do PAC.

A princípio as malhas de controle da Figure 8 garantem que todo o desequilíbrio de tensão no PAC seja compensado. No entanto, a metodologia apresentada na section II para detectar a parcela do desequilíbrio provocado pelo consumidor pode ser implementada no controlador do DSTATCOM da Figure 3.

#### E. O Controle da Tensão CC do DSTATCOM

Em [16] é apresentada uma modelagem de pequenos sinais para o controle da tensão CC de um DSTATCOM. Na Figure 9 é mostrado o diagrama de blocos da malha de controle da tensão do barramento CC do DSTATCOM da Figure 3. A tensão CC é medida e comparada com o valor de referência. O sinal resultante é enviado ao controlador PI  $K_{vcc}(s)$  que fornece a referência de corrente  $\tilde{I}_{d1}^*$ .

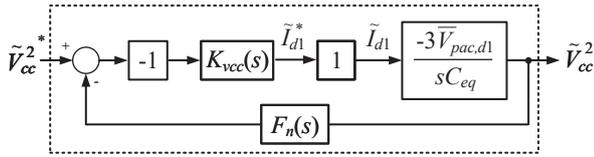


Fig. 9. Diagrama de blocos da malha de controle da tensão CC.

Como a tensão do barramento CC oscila com o dobro da frequência da rede, devido às componentes de sequência negativa nas correntes e tensões do PAC, deve-se usar um filtro *notch*  $F_n(s)$ , sintonizado em  $\omega_o = 2\omega$ , para garantir a correta operação do controlador da Figure 9. A função de transferência do filtro  $F_n(s)$ , usado na malha de controle da tensão CC, é idêntica à usada em (15) para extrair as correntes de sequências positiva e negativa do DSTATCOM. Ainda, este filtro foi projetado de forma a não interferir na malha fechada de controle da tensão CC.

Os ganhos proporcional e integral do controlador  $K_{vdc}(s)$  são projetados para serem iguais a:

$$k_{p,vdc} = \frac{2\zeta\omega_n C_{eq}}{3\tilde{V}_{pcc,d1}} \quad (28)$$

e

$$k_{i,vdc} = \frac{\omega_n^2 C_{eq}}{3\tilde{V}_{pcc,d1}}, \quad (29)$$

onde  $\omega_n$  e  $\zeta$  são a frequência natural e o fator de amortecimento da função de transferência de malha fechada da tensão CC, respectivamente; tendo a função de transferência de malha fechada da corrente de sequência positiva sido considerada com ganho unitário, já que a constante de tempo do controlador da tensão CC é muito maior que a do controlador de corrente [23].

#### IV. RESULTADOS E ANÁLISES

Na Figure 10 é mostrada a topologia de um sistema de distribuição desequilibrado, com 5 barras, modelado num programa de transitórios eletromagnéticos. Esta rede foi baseada numa modificação do sistema IEEE 13 barras, onde um DSTATCOM com todos os controladores foi modelado e conectado na Barra 670, visando compensar o desequilíbrio da carga conectada nesta barra. Essa barra foi escolhida por possuir a carga com maior potência, provocando também o maior desequilíbrio de tensão no sistema. Os detalhes das cargas e parâmetros dos alimentadores são apresentados no Apêndice. Dois casos distintos foram simulados com objetivo de validar a compensação seletiva da tensão de sequência negativa proposta neste trabalho: (i) compensação de todo o desequilíbrio de sequência negativa da tensão no PAC e (ii) compensação de somente a parcela de desequilíbrio de sequência negativa provocada pelo consumidor conectado na barra 670.

Os IGBTs do DSTATCOM são comutados com uma estratégia de modulação por largura de pulso senoidal. Nas Tabelas I, II, III e IV são dados os parâmetros da rede, do DSTATCOM, dos filtros e dos controladores do conversor, respectivamente.

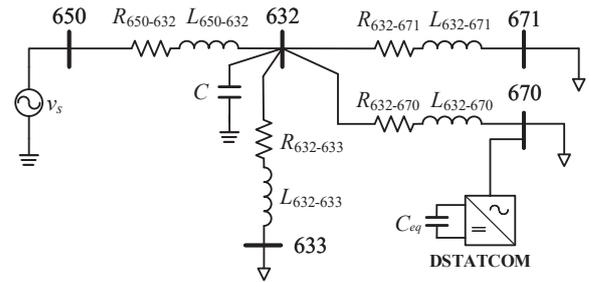


Fig. 10. Diagrama unifilar do sistema de distribuição com o DSTATCOM conectado na Barra 670.

TABELA I  
PARÂMETROS DA REDE

Parâmetro	Valor
Tensão eficaz de linha ( $V_s$ )	4,16 kV
Frequência fundamental ( $f_s$ )	60 Hz
Resistências equivalentes vistas da barra 670 ( $R_{s1}$ e $R_{s2}$ )	0,26 $\Omega$
Indutâncias equivalentes vistas da barra 670 ( $L_{s1}$ e $L_{s2}$ )	1,70 mH

TABELA II  
PARÂMETROS DO DSTATCOM

Parâmetro	Valor
Capacitância equivalente ( $C_{eq}$ )	3000 $\mu$ F
Resistência de perdas ( $R_p$ )	100 k $\Omega$
Tensão CC de referência ( $V_{cc}^*$ )	8,5 kV
Indutância do filtro passivo ( $L_f$ )	24 mH
Resistência do filtro passivo ( $R_f$ )	90 m $\Omega$
Frequência de comutação ( $f_c$ )	4,8 kHz

TABELA III  
PARÂMETROS DOS FILTROS

Parâmetro	Valor
Ganho do SOGI ( $k$ )	4,2
Frequência de corte do filtro $F_{ff}$	480 Hz
Frequência de ressonância do filtro $F_n$ ( $\omega_o$ )	754 rad/s
Fator de qualidade do filtro $F_n$ ( $Q$ )	0,5

TABELA IV  
GANHOS DOS CONTROLADORES DO DSTATCOM

Controlador	Ganho	Valor
$K_{i1}$ e $K_{i2}$	Proporcional	160 V/A
	Integral	730 V/(A s)
$K_{vcc}$	Proporcional	117,76 $\mu$ A/V <sup>2</sup>
	Integral	11,77 mA/(V <sup>2</sup> s)
$K_{v1}$ e $K_{v2}$	Integral	77,89 A/(V s)

##### A. Caso 1

Neste caso, o DSTATCOM compensa todo o desequilíbrio de sequência negativa na tensão do PAC. Nas Figuras 12 (a), (b), (c), (d) e (f) são mostradas as formas de onda das tensões eficazes do PAC, das correntes do consumidor, das correntes CA do DSTATCOM, das tensões de sequência negativa no PAC, do fator de desequilíbrio de tensão (FDT) no PAC e da tensão CC e o sinal de saída do filtro *notch*, respectivamente.

Em  $t = 0,2$  s o DSTATCOM começa a sintetizar correntes para compensar as tensões desbalanceadas no PAC. As tensões de sequência negativa no PAC atingem o zero em menos de 0,1 s. Pode-se notar ainda que, para compensar toda a componente de sequência negativa, o DSTATCOM sintetiza uma corrente de quase 100 A de pico. Desta maneira, a potência processada pelo conversor estático é de 397 kVA.

### B. Caso 2

Neste segundo caso o DSTATCOM compensa somente a parcela de desequilíbrio de sequência negativa provocada pela carga conectada à barra 670. Na Figure 11 é mostrado o diagrama de blocos do algoritmo de cálculo das referências dos controladores de tensão de sequência negativa. As tensões e correntes de sequência negativa medidas no PAC são usadas para extrair as parcelas de desequilíbrio provocado pelo consumidor através de três blocos de estimação de desequilíbrio (Figure 2). Os sinais de saída destes estimadores são subtraídos da tensão de sequência negativa do PAC e, após transformados para as coordenadas síncronas, são enviados como sinais de referência para os controladores de tensão da Figure 8.

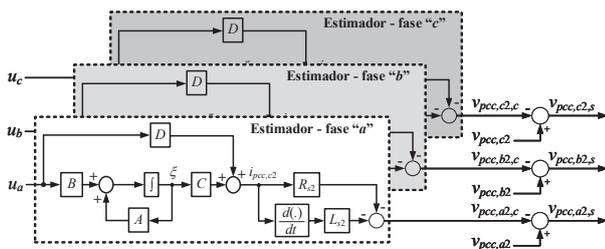


Fig. 11. Diagrama de blocos do algoritmo de cálculo das referências dos controladores de tensão.

Na Figure 13 são mostradas as mesmas formas de onda da Figure 12. Em  $t = 0,2$  s o DSTATCOM começa a sintetizar correntes para compensar somente a parcela da tensão de sequência negativa provocada pela carga desequilibrada da barra 670. Porém, as tensões de sequência negativa no PAC não são totalmente compensadas. Desta forma, o DSTATCOM sintetiza uma corrente muito menor (20 A de pico) e a potência processada é de 132 kVA. Outra conclusão interessante é derivada da comparação das Figuras 12 (f) e 13 (f). Como no segundo caso o DSTATCOM compensa apenas a parcela de desequilíbrio do consumidor a oscilação da tensão do capacitor CC é muito menor.

## V. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma metodologia para extrair a parcela de responsabilidade do desequilíbrio de tensão entre concessionária e consumidor em um sistema de distribuição. A metodologia proposta é usada para calcular em tempo real a componente de tensão de sequência negativa provocada pelo consumidor. O cálculo do desequilíbrio de tensão provocado pelo consumidor foi usado para gerar o sinal de referência para controlar um compensador estático síncrono para compensar as tensões desbalanceadas no ponto de acoplamento comum. Modelos matemáticos foram desenvolvidos e usados

para projetar as malhas de controle de tensão e corrente do DSTATCOM. Simulações digitais também foram usados para validar a metodologia de cálculo da responsabilidade do desequilíbrio no domínio do tempo e as malhas de controle do compensador. Os resultados obtidos mostraram que a capacidade do DSTATCOM é muito menor quando ele é projetado para compensar somente a parcela de desequilíbrio provocado pelo consumidor.

Com o aumento das unidades de geração distribuídas, principalmente aquelas baseadas em fontes alternativas de energia, como a solar fotovoltaica, o nível de desequilíbrio nos sistemas de distribuição tende a aumentar. Desta forma, a estratégia de regulação apresentada neste trabalho pode ser implementada nos controladores dos inversores usados como interface entre a rede e os painéis fotovoltaicos de maneira a se evitar possíveis penalizações financeiras devido ao desequilíbrio causado pelos consumidores.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio financeiro em parte da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil – Código de Financiamento 001, CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil, INERGE – Instituto Nacional de Energia Elétrica, e FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais. Os autores também gostariam de expressar seu agradecimento à UFJF.

## APÊNDICE

Os parâmetros das cargas, banco de capacitores e alimentadores do sistema de distribuição são dados nas Tabelas V, VI e VII, respectivamente.

TABELA V  
PARÂMETROS DAS CARGAS

Barra	Fase	P (kW)	Q (kvar)
671	A	110.66	71.93
671	B	133.33	86.66
671	C	166.66	108.33
633	A	371.80	214.50
633	B	220.00	100.00
633	C	184.80	84.70
670	A	760.00	430.00
670	B	623.70	454.30
670	C	863.59	495.30

TABELA VI  
PARÂMETROS DO BANCO DE CAPACITORES

Barra	Fase	Q (kvar)	V (kV)
632	$3\phi$	600	4,16

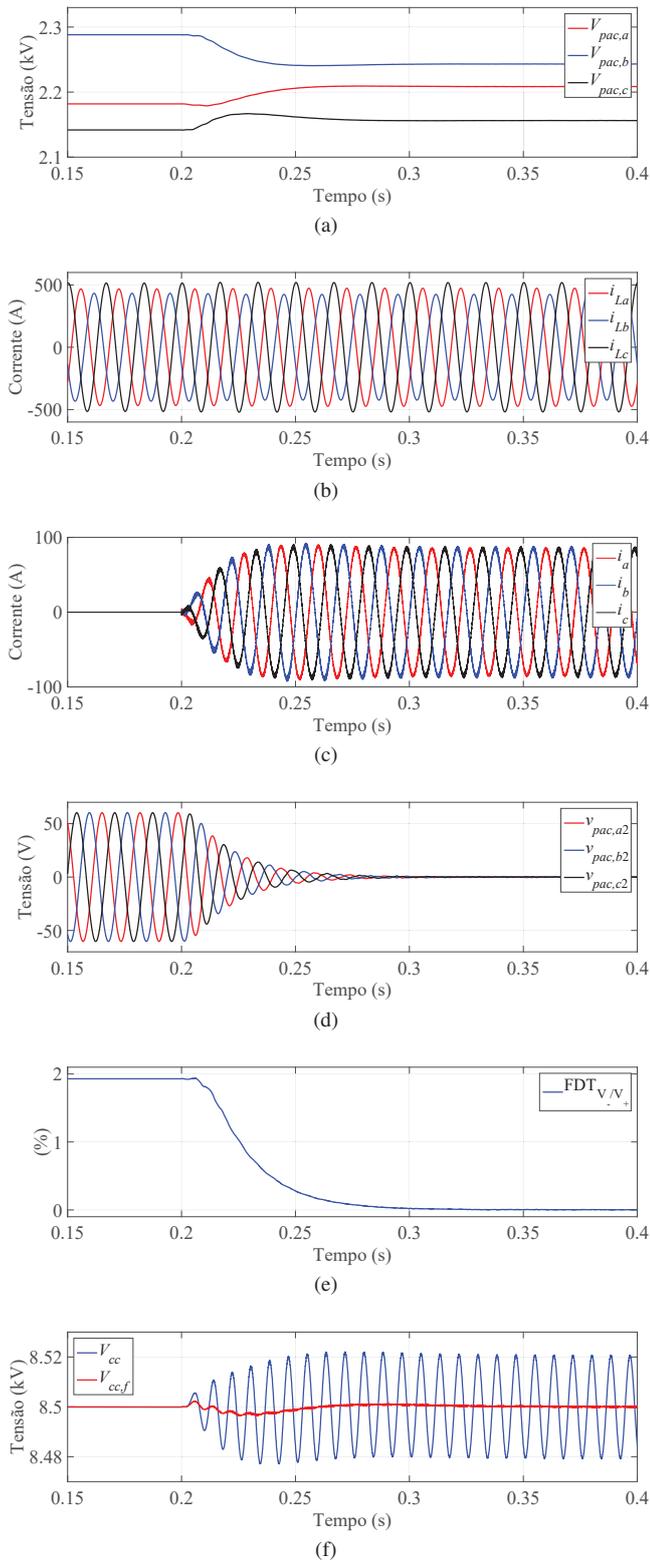


Fig. 12. Formas de onda do Caso 1: (a) tensões eficazes do PAC, (b) correntes do consumidor, (c) correntes CA do DSTATCOM, (d) tensões de sequência negativa do PAC, (e) fator de desequilíbrio de tensão e (f) tensão CC do DSTATCOM.

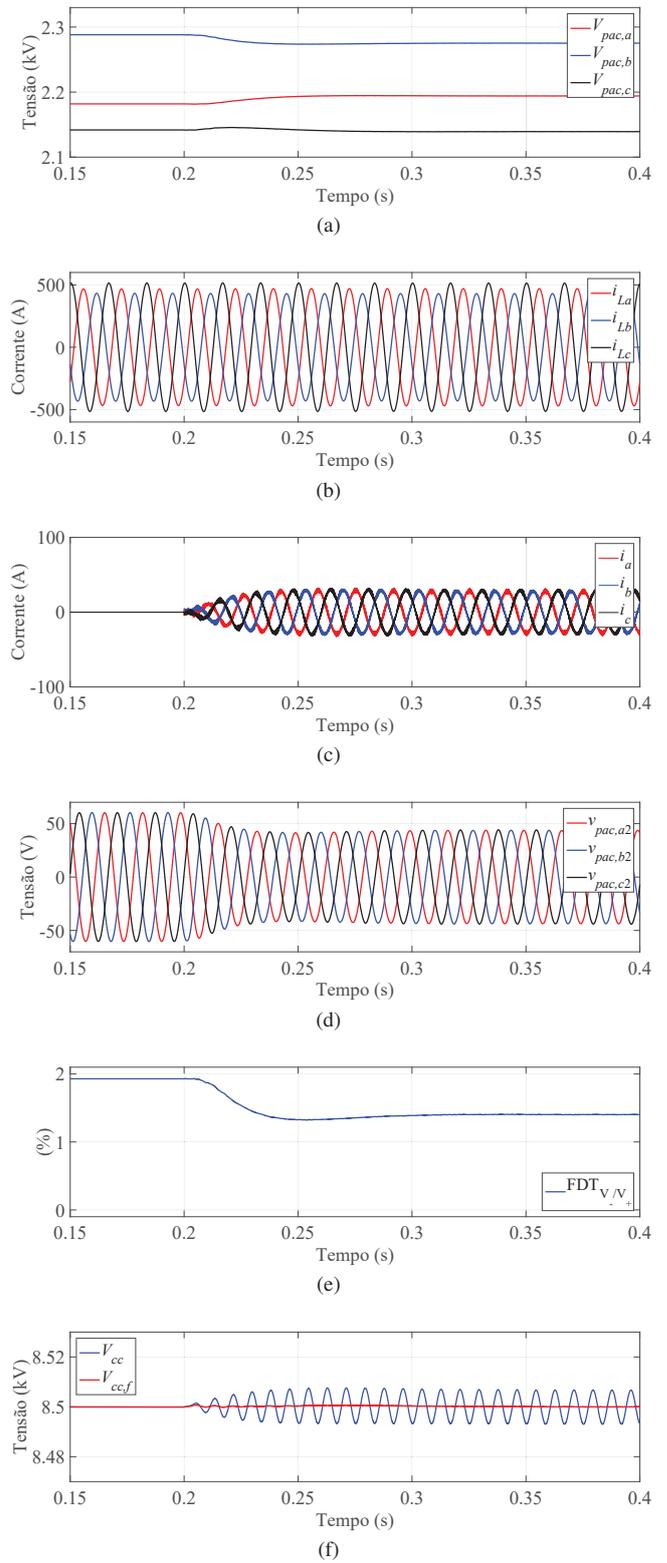


Fig. 13. Formas de onda do Caso 2: (a) tensões eficazes do PAC, (b) correntes do consumidor, (c) correntes CA do DSTATCOM, (d) tensões de sequência negativa do PAC, (e) fator de desequilíbrio de tensão e (f) tensão CC do DSTATCOM.

TABELA VII  
PARÂMETROS DOS ALIMENTADORES

Parâmetro	Alimentador			
	650-632	632-670	632-633	632-671
Comprimento (mi)	0,76	0,47	0,19	0,26
$R_{aa}$ ( $\Omega$ /mi)	0,3465	0,3465	0,7526	0,7526
$R_{ab}$ ( $\Omega$ /mi)	0,1560	0,1560	0,1580	0,1580
$R_{bb}$ ( $\Omega$ /mi)	0,3375	0,3375	0,7475	0,7475
$R_{ac}$ ( $\Omega$ /mi)	0,1580	0,1580	0,1560	0,1560
$R_{bc}$ ( $\Omega$ /mi)	0,1535	0,1535	0,1535	0,1535
$R_{cc}$ ( $\Omega$ /mi)	0,3414	0,3414	0,7436	0,7436
$X_{aa}$ ( $\Omega$ /mi)	1,0179	1,0179	1,1814	1,1814
$X_{ab}$ ( $\Omega$ /mi)	0,5017	0,5017	0,4236	0,4236
$X_{bb}$ ( $\Omega$ /mi)	1,0478	1,0478	1,1983	1,1983
$X_{ac}$ ( $\Omega$ /mi)	0,4236	0,4236	0,5017	0,5017
$X_{bc}$ ( $\Omega$ /mi)	0,3849	0,3849	0,3849	0,3849
$X_{cc}$ ( $\Omega$ /mi)	1,0348	1,0348	1,2112	1,2112

## REFERÊNCIAS

- [1] E. Fuchs and M. A. Masoum, *Power quality in power systems and electrical machines*. Academic press, 2011.
- [2] IEEE 519-2014, "Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2014.
- [3] IEC, "61000-3-13 - electromagnetic compatibility (EMC) - limits - assessment of emission limits for the connection of unbalanced installations to MV, HV and EHV power systems," 2008.
- [4] ANEEL, "Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST: Módulo 8 - Qualidade da Energia Elétrica - (Rev. 10)," Agência Nacional de Energia Elétrica, 2018. [Online]. Available: <http://www.aneel.gov.br/modulo-8>
- [5] ONS, "Procedimento de Rede: Submódulo 2.8 - Gerenciamento dos Indicadores de Desempenho da Rede Básica e de seus Componentes," Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2008. [Online]. Available: <http://www.ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>
- [6] ONS, "Procedimento de Rede: Submódulo 3.6 - Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão à Rede Básica," Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2009. [Online]. Available: <http://www.ons.org.br/pt/paginas/sobre-o-ons/procedimentos-de-rede/vigentes>
- [7] B. Singh, A. Chandra, and K. Al-Haddad, *Power quality: problems and mitigation techniques*. John Wiley & Sons, 2015.
- [8] A. Von Jouanne and B. Banerjee, "Assessment of voltage unbalance," *IEEE transactions on power delivery*, vol. 16, no. 4, pp. 782–790, 2001.
- [9] L. R. Araujo, D. R. R. Penido, S. Carneiro, and J. L. R. Pereira, "A methodology for optimization of unbalanced distribution systems," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 11, no. 5, pp. 1182–1189, Sep. 2013.
- [10] B. Meersman, B. Renders, L. Degroote, T. Vandoorn, and L. Vandeveld, "Control design of grid-connected three-phase inverters for voltage unbalance correction," in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2009 Proceedings of the 44th International*. IEEE, 2009, pp. 1–5.
- [11] B. C. Souza, A. M. Variz, P. G. Barbosa, and L. R. Araujo, "Comportamento de motores de indução alimentados a partir de fontes com tensões distorcidas e desequilibradas," in *11th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications-INDUSCON*, 2014.
- [12] P. M. Almeida, K. M. Monteiro, P. G. Barbosa, J. L. Duarte, and P. F. Ribeiro, "Improvement of PV grid-tied inverters operation under asymmetrical fault conditions," *Solar Energy*, vol. 133, pp. 363–371, 2016.
- [13] W. Xu and Y. Liu, "A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling," *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 15, no. 2, pp. 804–811, 2000.
- [14] M. Shojai and H. Mokhtari, "A method for determination of harmonics responsibilities at the point of common coupling using data correlation analysis," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, no. 1, pp. 142–150, 2014.
- [15] R. C. F. Gregory, T. M. Scotti, and J. C. Oliveira, "Avaliação das metodologias para a atribuição das parcelas de responsabilidade sobre os desequilíbrios," *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos (SBSE)*, 2018.
- [16] S. N. Duarte, "Estratégias de energização e desenergização de um compensador estático síncrono para distribuição," Dissertação de Mestrado (Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, 2017.
- [17] R. M. Pereira, C. M. Ferreira, and F. M. Barbosa, "Comparative study of STATCOM and SVC performance on dynamic voltage collapse of an electric power system with wind generation," *IEEE Latin America Transactions*, vol. 12, no. 2, pp. 138–145, 2014.
- [18] K. Jayakumar, N. Sriharish, and C. Rambabu, "Voltage unbalance correction in a grid using inverter," *International Journal of Computational Engineering Research*, p. 201, 2012.
- [19] H. TABASSUM and G. S. RAO, "Voltage unbalance correction in grid side by using multi variable filter in the presence of fuzzy logic controller," *International Journal of Research in Advanced Engineering Technologies*, 2015.
- [20] H. L. M. Monteiro, "Método de estimação de impedância utilizando a injeção de sinais controlados," Tese de Doutorado (Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, 2018.
- [21] A. Yazdani and R. Iravani, *Voltage-sourced converters in power systems: modeling, control, and applications*. John Wiley & Sons, 2010.
- [22] P. Rodriguez, R. Teodorescu, I. Candela, A. Timbus, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions," in *Proceedings of Power Electronics Specialist Conference*, June 2006, pp. 1–7.
- [23] 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 (Engenharia Elétrica), Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, Brasil, 2011.
- [24] A. A. Sallam and O. P. Malik, *Electric distribution systems*. Wiley-IEEE Press, 2018.

**Samuel Neves Duarte** recebeu os títulos 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.

**Bruno Cortes de Souza** recebeu os títulos 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.

**Pedro Machado de Almeida** recebeu os títulos de mestre e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora em 2011 e 2013, respectivamente. Atualmente é Professor Adjunto do curso de Engenharia Elétrica da UFJF.

**Leandro Ramos Araújo** (M'09; SM'15) recebeu os títulos de mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Juiz de Fora (2000) e doutor em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro/COPPE (2005). Atualmente ele é Professor Associado da Universidade Federal de Juiz de Fora.

**Pedro Gomes Barbosa** (S'94; M'00; SM'11) recebeu 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 Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora.