

## Análise de DSOGI-PLL e DTOGI-PLL Aplicados em um VSC Quatro Fios Conectado à Rede Elétrica com Desequilíbrio de Tensão e Harmônicos

Alex F. Silva\* Paulo F. Silva\* Claudionor F. Nascimento\*  
Alfeu J. Sguarezi Filho\*\* Fernando Lino\*\* Patricia R. Albuquerque\*  
José O. Domingues Júnior\* Lucas D. Augusto\*\*

\* Engenharia Elétrica, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP (e-mail: alex.ferreira21@hotmail.com, paulof2016silva@gmail.com, claudionor@ufscar.br, pralbuquerque@estudante.ufscar.br, josjunior13@yahoo.com.br)

\*\* Engenharia Elétrica, Universidade Federal do ABC, Santo André, SP (e-mail: alfeu.sguarezi@ufabc.edu.br, f.lino@ufabc.edu.br, lucas.demetrius.la@gmail.com)

**Abstract:** The three-phase four-wire voltage source converters are the equipment used in the connection of alternative sources to the distribution system where the loads are predominantly single-phase. Three-phase unbalanced neutral distribution system has unwanted components of negative and zero sequence. Under these conditions, the synchronism between the VSC and the electrical grid that is done using the PLL (Phase Locked Loop) is affected. Traditional PLLs such as SRF-PLL (*Synchronous Reference Frame-PLL*) is widely used, however they do not guarantee synchronism in unbalanced conditions. The PLLs DSOGI-PLL (*Dual Second Order Generalized Integrator-PLL*) and DTOGI-PLL (*Dual Third Order Generalized Integrator-PLL*) ensure accurate synchronization between the VSC and the mains under unsafe conditions. Thus, the objective of this article is to evaluate the effect of voltage unbalance and voltage harmonics on the ac currents of the VSC using DSOGI-PLL and DTOGI-PLL.

**Resumo:** Os conversores fonte de tensão trifásico a quatro fios são os equipamentos utilizados na conexão de fontes alternativas ao sistema de distribuição onde as cargas são predominantemente monofásicas. O sistema de distribuição trifásico desequilibrado com neutro apresenta componentes indesejados de sequência negativa e zero. Nestas condições, o sincronismo entre o VSC e a rede elétrica que é feito utilizando o PLL (*Phase Locked Loop*) é afetado. O PLL tradicional SRF-PLL (*Synchronous Reference Frame-PLL*) é comumente utilizado, contudo não garante o sincronismo em condições desequilibradas. Os PLLs DSOGI-PLL (*Dual Second Order Generalized Integrator-PLL*) e DTOGI-PLL (*Dual Third Order Generalized Integrator-PLL*) garantem o sincronismo com precisão entre o VSC e a rede elétrica em condições não ideais. Desta forma, objetivo deste artigo é avaliar o efeito do desequilíbrio de tensão e harmônicos de tensão nas correntes ca do VSC utilizando DSOGI-PLL e DTOGI-PLL.

**Keywords:** VSC, Voltage Unbalance, Harmonics, DSOGI-PLL, DTOGI-PLL.

**Palavras-chaves:** VSC, Desequilíbrio de Tensão, Harmônicos, DSOGI-PLL, DTOGI-PLL.

### 1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as fontes sustentáveis de energia elétrica estão passando por um rápido crescimento, isso em razão da crescente demanda por energia elétrica Rabie et al. (2021); Al-Ismail (2021). As gerações a partir de energia solar e eólica são as fontes que estão apresentando o crescimento mais rápido e isso requer interfaces de conversão de energia Vásquez et al. (2020). Os conversores fonte de tensão (VSCs - *Voltage Source Converters*) são equipamentos utilizados para realizar a interface entre a energia gerada pelas fontes sustentáveis e a rede elétrica Joorabli et al. (2021).

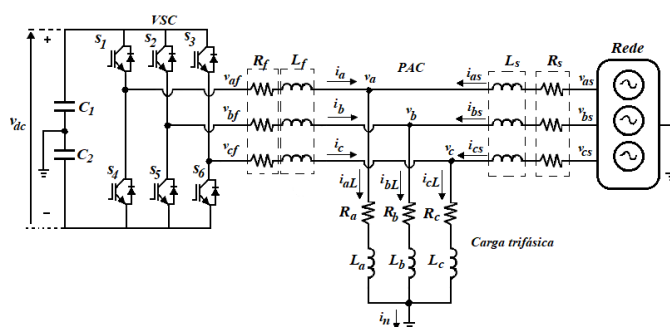


Figura 1. Diagrama do VSC quatro fios conectado à rede.

A aplicação dos VSCs trifásico a quatro fios tem sido bastante utilizada, pois permite a conexão de fontes sustentáveis ao sistema de distribuição, de modo que forneça não só as cargas trifásicas, mas também promovendo o fornecimento de cargas monofásicas Olives-Camps et al. (2020). A topologia do VSC a quatro fios com o capacitor dividido conforme, ilustrado na Figura 1, tem sido preferida em razão de possuir diversas vantagens, como menor número de chaves semicondutoras e estrutura de controle menos complexa Li et al. (2019).

Geralmente, os VSCs quando são conectados ao sistema de distribuição estão sujeitos a desequilíbrio de tensão Nascimento et al. (2017b), em virtude das cargas monofásicas desequilibradas serem predominantes no sistema de distribuição Wang et al. (2020). Desta forma, quando o VSC opera em condições de desequilíbrio de tensão, a qualidade das correntes ca do VSC depende do desempenho do sistema de controle, que por sua vez depende do desempenho do sincronismo entre o VSC e a rede elétrica Wen et al. (2016).

O sincronismo entre o VSC e a rede elétrica é feito comumente por meio de PLLs Lino et al. (2021). A técnica de sincronismo SRF-PLL (*Synchronous Reference Frame-PLL*) é a mais popularmente aplicada em sistemas trifásicos. No entanto, não garante o sincronismo com precisão entre o VSC e a rede elétrica com desequilíbrio de tensão Reza et al. (2019).

Para solucionar problemas de sincronismo entre VSCs e a rede elétrica com desequilíbrio de tensão, PLLs com capacidade de realizar o sincronismo entre o VSC e redes elétrica com desequilíbrio de tensão tem sido propostos na literatura:

Em Yazdani et al. (2009) são propostos os filtros de entalhe adaptativos para extrair componentes de sequência positiva. Vários outros PLLs robustos a distúrbio da rede elétrica foram introduzidos, como, por exemplo, o PLL baseado em filtro de média móvel que foi estudado por Golestan et al. (2014). O estudo do PLL baseado em Complex-Coefficient Filters (CCF-PLL), que também é robusto a distúrbio da rede elétrica, foi estudado por Guo et al. (2011). Em Svensson et al. (2007) é proposto o PLL baseado em Delayed Signal Cancellation (DSC) usado sistemas desequilibrados.

Em Rodriguez et al. (2006a) é proposto um trabalho robusto a desequilíbrio de tensão, o qual é denominado DSOGI-PLL (*Dual Second Order Generalized Integrator-PLL*) Integrador Generalizado de Segunda Ordem. Em Li et al. (2014) é proposto o trabalho denominado de DTOGI-PLL (*Dual Third Order Generalized Integrator-PLL*).

Majoritariamente, os PLLs aqui citados já foram aplicados em VSCs conectados à rede elétrica desequilibrada. No entanto, o estudo da comparação entre DSOGI-PLL e DTOGI-PLL aplicados a um VSC trifásico quatro fios operando conectado em uma rede elétrica com desequilíbrios de tensão e harmônicos de tensão não foi demonstrado na literatura consultada.

Este trabalho propõe a aplicação de um VSC trifásico quatro fios conectado à rede elétrica operando com desequilíbrio de tensão e harmônicos. Objetiva-se com o estudo

que o VSC injete correntes senoidais e equilibradas à rede elétrica. Este artigo está organizado da seguinte forma: Na seção 2 a modelagem do VSC e o sistema de controle utilizado são apresentados. O DSOGI-PLL é apresentado na seção 3. Posteriormente, na seção 4, o DTOGI-PLL é revisado. Para fins de comparação entre os PLLs, uma simulação executada no *Psim* é desenvolvida e apresentada na seção 5. Por fim, na seção 6 são apresentadas as conclusões.

## 2. MODELAGEM DO VSC QUATRO FIOS

A modelagem do VSC trifásico quatro fios com capacitor dividido foi desenvolvida por Silva et al. (2021) com base nos trabalhos realizado por Diene et al. (2017) e Nascimento et al. (2017a).

Neste trabalho, considera o VSC conectado à rede elétrica em que pode alimentar cargas equilibradas ou desequilibradas, conforme mostrado na Figura 1. Na análise realizada, a impedância da linha não foi considerada, isso em razão da consideração feita que a carga está próxima da fonte de alimentação. Assim, determina-se as correntes  $i_a, i_b, i_c$  considerando o VSC sem perdas e com tensões do lado ca dadas por:

$$\begin{cases} v_{af} = L_f \frac{di_a}{dt} + R_f i_a + v_a \\ v_{bf} = L_f \frac{di_b}{dt} + R_f i_b + v_b \\ v_{cf} = L_f \frac{di_c}{dt} + R_f i_c + v_c \end{cases} \quad (1)$$

Onde as tensão no PAC são dadas por:

$$\begin{cases} v_a = R_a i_{aL} + L_a \frac{di_{aL}}{dt} \\ v_b = R_b i_{bL} + L_b \frac{di_{bL}}{dt} \\ v_c = R_L i_{cL} + L_c \frac{di_{cL}}{dt} \end{cases} \quad (2)$$

Analisando as correntes pela lei de Kirchhoff, tem-se:

$$\begin{cases} i_{aL} = i_a + i_{as} \\ i_{bL} = i_b + i_{bs} \\ i_{cL} = i_c + i_{cs} \end{cases} \quad (3)$$

De modo que:

$$i_{aL} + i_{bL} + i_{cL} = i_n \quad (4)$$

$$\begin{cases} i_{aL} = i_n - i_{bL} - i_{cL} \\ i_{bL} = i_n - i_{aL} - i_{cL} \\ i_{cL} = i_n - i_{aL} - i_{bL} \end{cases} \quad (5)$$

Assim, (2) é uma função de  $i_n$ . Desta forma, tem-se:

$$\begin{cases} v_a = L_a \frac{d}{dt} [i_n - i_{bL} - i_{cL}] + R_a [i_n - i_{bL} - i_{cL}] \\ v_b = L_b \frac{d}{dt} [i_n - i_{aL} - i_{cL}] + R_b [i_n - i_{aL} - i_{cL}] \\ v_c = L_c \frac{d}{dt} [i_n - i_{aL} - i_{bL}] + R_c [i_n - i_{aL} - i_{bL}] \end{cases} \quad (6)$$

Substituindo (6) em (1) obtém-se:

$$\begin{cases} v_{af} = \left[ L_f \frac{di_a}{dt} + R_f i_a \right] + L_a \frac{d}{dt} [i_n - i_{bL} - i_{cL}] \\ \quad + R_a [i_n - i_{bL} - i_{cL}] \\ v_{bf} = \left[ L_f \frac{di_b}{dt} + R_f i_b \right] + L_b \frac{d}{dt} [i_n - i_{aL} - i_{cL}] \\ \quad + R_b [i_n - i_{aL} + i_{cL}] \\ v_{cf} = \left[ L_f \frac{di_c}{dt} + R_f i_c \right] + L_c \frac{d}{dt} [i_n - i_{aL} - i_{bL}] \\ \quad + R_c [i_n - i_{aL} - i_{bL}] \end{cases} \quad (7)$$

Analisando (7), observa-se que a corrente  $i_n$  é uma função de (5) e pode ser reescrita da seguinte forma:

$$\begin{cases} v_{af} = (L_f + L_a) \frac{di_a}{dt} + (R_f + R_a) i_a \\ \quad + L_a \frac{di_{as}}{dt} + R_a i_{as} \\ v_{bf} = (L_f + L_b) \frac{di_b}{dt} + (R_f + R_b) i_b \\ \quad + L_b \frac{di_{bs}}{dt} + R_b i_{bs} \\ v_{cf} = (L_f + L_c) \frac{di_c}{dt} + (R_f + R_c) i_c \\ \quad + L_c \frac{di_{cs}}{dt} + R_c i_{cs} \end{cases} \quad (8)$$

### 2.1 Descrição do sistema de controle do VSC

A estrutura de controle usada neste trabalho está ilustrada na Figura 2. O diagrama é constituído de um controle de tensão, o PLL em que faz a interface entre o VSC e toda a estrutura de controle, e por fim o controle de corrente. As correntes de referências são obtidas por meio de uma matriz baseada em potência instantânea. A referência de potência real  $p^*$  instantânea é calculada usando o PI de tensão, que considera a diferença entre a tensão desejada  $V_{cc}^*$  e a tensão do terminal cc do VSC instantâneo  $v_{cc}$  como entrada. A referência de potência imaginária  $q^*$  instantânea poderia ser calculada para controlar a tensão ca ou compensar a potência reativa. Contudo, neste estudo de caso, é considerada zero.

As seqüências positivas são extraídas do Ponto de Acoplamento Comum PAC com desequilíbrio de tensão, transformando as tensões  $v_a^+, v_b^+, v_c^+$  para  $v_d^+$  e  $v_q^+ = 0$  ao passo que ( $\theta = \omega t$ ), após isso o VSC está sincronizado com tensão de seqüência positiva do PAC. As tensões  $v_d^+$  e  $v_q^+$  são convertidas para as transformadas  $\alpha\beta$  e aplicado o conceito de potência instantânea para que possam ser obtidas as correntes de referências  $i_{\alpha}^*$  e  $i_{\beta}^*$ . Posteriormente, as correntes são submetidas a uma transformada de  $\alpha\beta$  para  $dq$  e comparadas com as correntes  $i_a, i_b, i_c$  e regulada por uma estratégia de comutação  $PWM$  para injetar correntes trifásicas equilibradas à rede elétrica.

### 2.2 Projeto do Controle de Corrente

Para realizar o projeto dos controladores de corrente do VSC foi utilizada metodologia proposta por Yazdani and Iravani (2010), em que os controladores PI nos eixos  $dq$  são projetados por meio das seguintes equações:

$$k_p = \frac{L}{\tau_i} \quad k_i = \frac{R + r_{on}}{\tau_i} \quad (9)$$

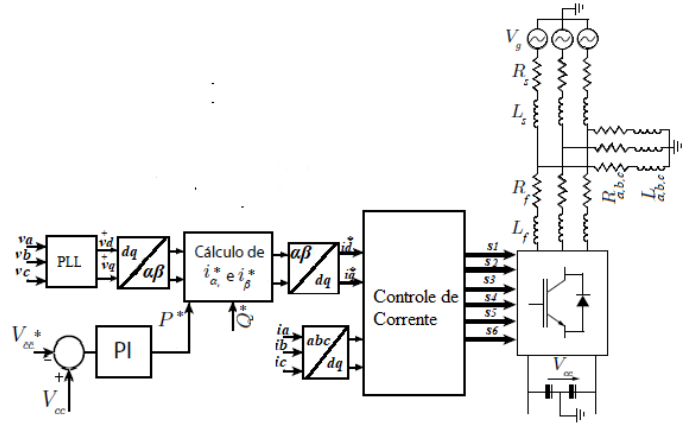


Figura 2. Diagrama da estrutura de controle do VSC.

Desta forma, calcula-se os ganhos dos controladores por meio dos valores de resistência interna dos indutores ( $R$ ), indutância ( $L$ ), a constante de tempo ( $\tau_i$ ) e resistência das chaves semicondutoras abertas ( $r_{on}$ ). Em razão da consideração feita que o VSC não possui perdas, a resistência ( $r_{on}$ ) é considerada zero.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados para os cálculos dos controladores de corrente.

Tabela 1. Parâmetros do controlador de corrente

| Parâmetros | Valor | Unidade |
|------------|-------|---------|
| $L$        | 5     | [mH]    |
| $R$        | 20    | [mΩ]    |
| $\tau_i$   | 2     | [ms]    |

### 3. DETECTOR DE SEQUÊNCIA POSITIVA E NEGATIVA COM BASE EM DSOGI-PLL

O diagrama do DSOGI-PLL está ilustrado na Figura 3. O DSOGI-PLL é baseado em QSG (*Quadrature Signal Generator*). Por sua vez, o QSG é fundamentado no SOGI (*Secondary General Order Integrator*). O DSOGI-PLL é um dos extratores de seqüência positiva mais utilizado em sistemas elétricos com desequilíbrio de tensão Rodriguez et al. (2006b). A estrutura original do DSOGI-PLL, proposta por Rodriguez et al. (2006b), considera uma realimentação de frequência que torna o DSOGI-PLL adaptativo em frequência. Entretanto, a técnica de realimentação de frequência não foi utilizada neste trabalho.

Conforme mostrado em Rodriguez et al. (2006), o DSOGI-PLL é fundamentado no SOGI no qual as funções de transferências que correlaciona as saídas pelas entradas é mostrada por meio das seguintes equações:

$$H(s) = \frac{v'_x}{v_x} = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (10)$$

$$Q(s) = \frac{qv'_x}{v_x} = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's + \omega'^2} \quad (11)$$

As expressões apresentadas em (10) e (11) correspondem as funções de transferências para sinais de tensão no referencial estacionário, conforme apresentado em Rodriguez et al. (2006). O  $\omega$  denotado na função corresponde à

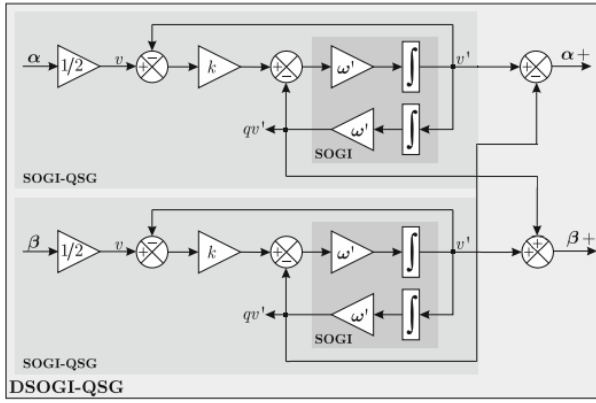


Figura 3. Diagrama DSOGI-PLL.

frequência, já o  $k$  corresponde ao fator de amortecimento. De acordo com Rodriguez et al. (2006b), o DSOGI-PLL se comporta como um filtro passa baixas onde promove a extração das componentes de sequência positiva da tensão ou corrente. Na Figura 3,  $\alpha^+$  e  $\beta^+$  são os sinais de saídas de tensão de sequência positiva no quadro de referência estacionário. Esses sinais alimentam um SRF-PLL, conforme ilustrado na Figura 4.

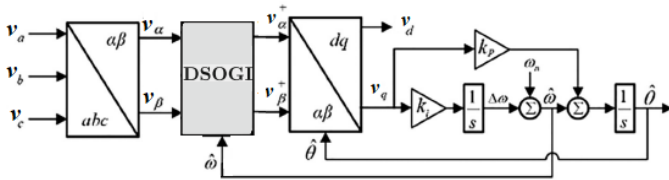


Figura 4. Diagrama da junção DSOGI e SRF-PLL.

A equação em malha fechada do PLL apresentada em (12) é semelhante a uma equação do segundo grau. Desta forma, é possível calcular o valor do PI usando valores adequados para a frequência natural ( $\omega_n$ ) e fator de amortecimento ( $\xi$ ) Gonçalves et al. (2014). A Tabela 1 apresenta os parâmetros utilizados para o cálculo do controlador do DSOGI-PLL e DTOGI-PLL.

$$s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega^2 = s^2 + k_p s + k_i \quad (12)$$

$$k_i = \omega_n^2 \quad (13)$$

$$k_p = 2\xi\omega_n \quad (14)$$

Tabela 2. Parâmetros do controlador PLL

| Parâmetros | Valor | Unidade   |
|------------|-------|-----------|
| $\omega_n$ | 125   | [rad/seg] |
| $\xi$      | 0,707 | -         |

#### 4. PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO DTOGI-PLL

O Diagrama do TOGI-PLL é ilustrado na Figura 6. Da mesma maneira ao DSOGI-PLL é utilizado um TOGI para o referencial estacionário  $\alpha$  e um TOGI para o referencial estacionário  $\beta$  respectivamente, dando origem assim ao DTOGI-PLL. Segundo Li et al. (2014) o DTOGI-PLL tem

o mesmo princípio de funcionamento do DSOGI-PLL proposto por Rodríguez et al. (2006). O filtro do DTOGI-PLL que está ilustrado na Figura 6 pode ter uma característica de filtragem inerente melhor do que o de DSOGI-PLL, em razão do aumento da ordem do denominador em sua função de transferência Li et al. (2014). Assim, a função de transferência do DTOGI-PLL no referencial estacionário pode ser dada por meio das equações apresentadas em (15) e (16). Conforme mencionado, a estrutura original do DSOGI-PLL proposta por Rodriguez et al. (2006b) considera uma realimentação de frequência que torna o DSOGI-PLL adaptativo em frequência. O mesmo conceito pode ser aplicado ao DTOGI-PLL. No entanto, o supracitado mecanismo não é utilizado neste trabalho.

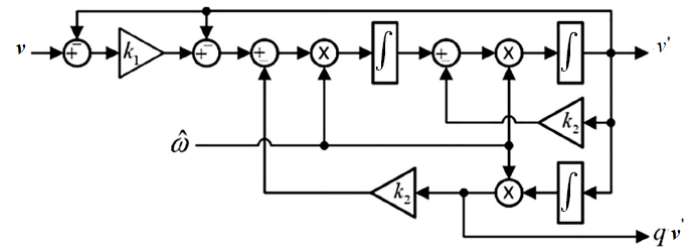


Figura 5. Diagrama filtro TOGI

$$H(s) = \frac{v'_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta}} = \frac{k_1\omega^2 s}{s^3 + k_2\omega_0 s^2 + (k_1 + 1)\omega_0^2 s + k_2\omega_0^3} \quad (15)$$

$$Q(s) = \frac{qv'_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta}} = \frac{k_1\omega^3 s}{s^3 + k_2\omega_0 s^2 + (k_1 + 1)\omega_0^2 s + k_2\omega_0^3} \quad (16)$$

Analogamente ao DSOGI-PLL, as expressões apresentadas em (15) e (16) correspondem as funções de transferência para sinais de tensão no referencial estacionário, conforme apresentado em Rodríguez et al. (2006). Da mesma maneira, o  $\omega$  denotado na função corresponde à frequência, assim como o  $k$  corresponde ao fator de amortecimento. Como pode ser notado a partir da Figura 6, as saídas  $v_{\alpha^+}$  e  $v_{\beta^+}$  do DTOGI-PLL também alimentam um SRF-PLL.

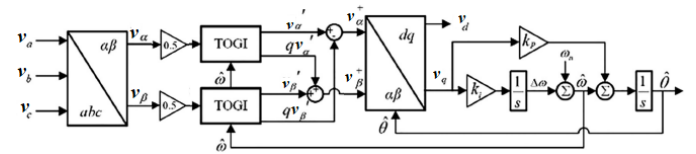


Figura 6. Diagrama DTOGI-PLL

#### 5. ANÁLISE DOS RESULTADOS.

Para validar o estudo proposto, um VSC quatro fios conectado à rede elétrica foi simulado no software *Psim*.

Os cenários testados foram submetidos nas seguintes condições:

- 1º) Tensões desequilibradas com fator de desequilíbrio de tensão igual a 6%.
- 2º) Tensões desequilibradas com fator de desequilíbrio de tensão igual a 12% e harmônicos de tensão de 5º ordem.

3°) Tensões desequilibradas com fator de desequilíbrio de tensão igual a 20% e harmônicos de tensão de 7° ordem.

A Figura 7 apresenta as tensões do PAC para o primeiro cenário investigado. Inicialmente, as tensões da rede estão totalmente equilibradas, no instante igual 0.15s é aplicado o desequilíbrio na carga da fase a. Esta condição de operação faz com que as tensões sejam desequilibradas em amplitudes. Com o objetivo de criar um cenário mais realístico foi realizado o teste com um fator de desequilíbrio de tensão ( $\delta$ ) inicial correspondente a 6%.

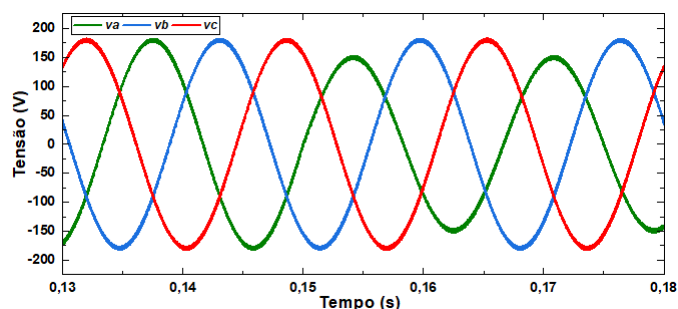


Figura 7. Tensões trifásicas no PAC desequilibradas.

Ainda que o valor de fator de desequilíbrio de tensão de 6% não seja permitido pelas normas, na prática tal distúrbio pode ocorrer. Por exemplo, quando tem-se um motor de indução monofásico conectado em uma das fases, no momento da partida do motor ocorre um afundamento de tensão de 10%, o que inevitavelmente ocasiona um fator de desequilíbrio de tensão equivalente a 6%.

Para analisar o que um fator de desequilíbrio de tensão no PAC equivalente a 6% ocasiona nas correntes ca do VSC, as Figuras 8 e 9 e são demonstradas. As correntes ca do VSC quando emprega-se o DSOGI-PLL são ilustradas na Figura 8. É possível observar que as correntes permanecem equilibradas e senoidais até o instante 0.15 s, momento em que o desequilíbrio é aplicado as cargas. Após o instante 0.15 s observa-se as correntes com distorções e desequilibradas. Conforme o estudo feito por Nascimento et al. (2017c), a origem da distorção das correntes é em razão de harmônicos de terceira ordem. Para este cenário as correntes ca do VSC apresentaram uma distorção harmônica total (THD - Total Harmonic Distortion) correspondente a 2,2%.

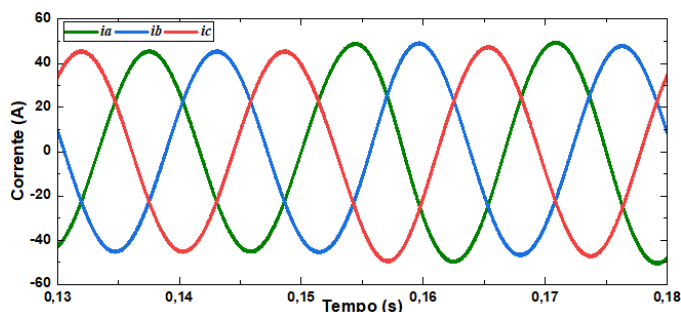


Figura 8. Correntes ca do VSC com  $\delta=6\%$  empregando o DSOGI-PLL.

A Figura 9 apresenta as correntes ca do VSC quando foi empregado o DTOGI-PLL, na mesma situação, ou seja, para o primeiro cenário analisado, com o fator de

desequilíbrio de tensão 6%. Observa-se que correntes sofreram alterações pouco significativas. Para este cenário a THD apresentada pelas correntes ca foram inferiores às apresentadas pelo DSOGI-PLL, cujo valor corresponde a 2,2%.

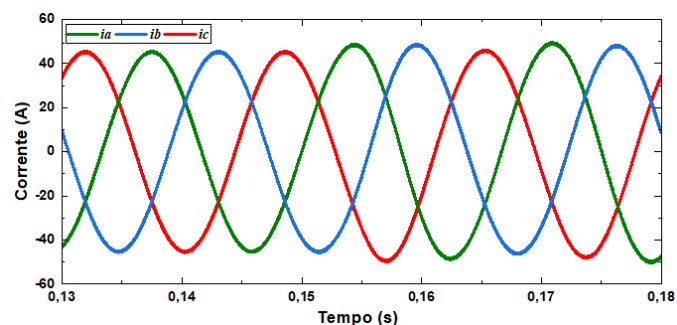


Figura 9. Correntes ca do VSC  $\delta= 6\%$  empregando o DTOGI-PLL.

A Figura 10 apresenta as tensões do PAC para o segundo cenário estudado. No instante igual a 0.15 s é aplicado o desequilíbrio de tensão na fase a. Além disso é aplicado na tensão da fase a uma harmônica de tensão de ordem 5°.

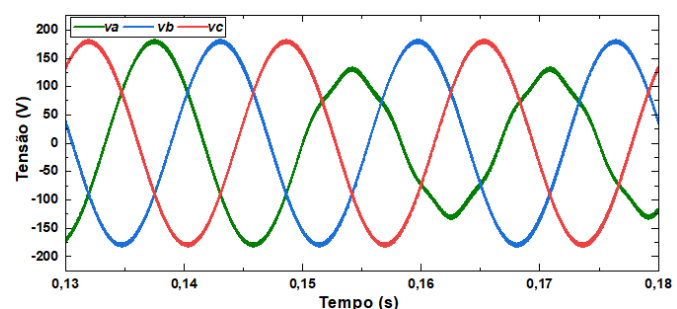


Figura 10. Tensões Trifásicas no PAC desequilibradas e com harmônicos de 5° ordem.

Para verificar as correntes ca do VSC para o segundo cenário, são apresentadas as Figuras 11 e 13. As correntes ca do VSC empregado o DSOGI-PLL são ilustradas na Figura 11. Para este cenário é possível notar que as correntes ca sofreram alterações significativas quando comparadas com o teste anterior. Neste teste a THD apresentada foi de 3,4%. No entanto, encontra-se ainda dentro das normas de qualidade da energia elétrica.

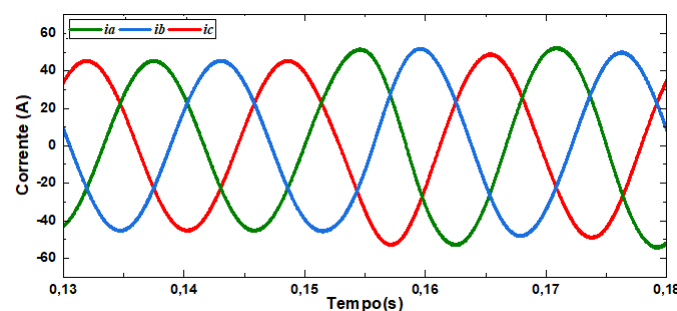


Figura 11. Correntes ca do VSC com  $\delta= 12\%$  e harmônicos de 5° ordem empregando o DSOGI-PLL.

A Figura 12 exibe as correntes ca do VSC para o segundo cenário quando foi utilizado o DTOGI-PLL. Neste teste

investigado, as correntes apresentaram um valor de THD ainda considerado baixo, correspondente a 2,4%. Nota-se portanto, que o DTOGI-PLL apresenta uma maior robustez em condições em que harmônicas de tensão estão presentes na rede elétrica. Conforme demonstrado por Hadjidemetriou et al. (2013), a medida que aumenta a ordem do denominador na função de transferência o filtro apresenta maior robustez.

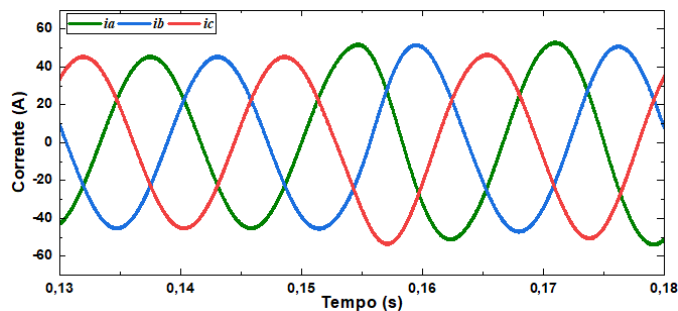


Figura 12. Correntes ca do VSC com  $\delta= 12\%$  e harmônicos de 5° ordem empregando o DTOGI-PLL

Foram realizados testes com o VSC operando com um fator de desequilíbrio de tensão de até 20%, pois quando ocorre um desequilíbrio de tensão superior o VSC é desligado Mori et al. (1993). Considerando que a rede elétrica sofra algum distúrbio e que o VSC passe a operar com um fator de desequilíbrio de tensão de 20% e acrescentado de harmônicos de ordem 7°, as correntes ca do VSC foram analisadas. A Figura 13 ilustra as tensões no PAC para o terceiro cenário investigado.

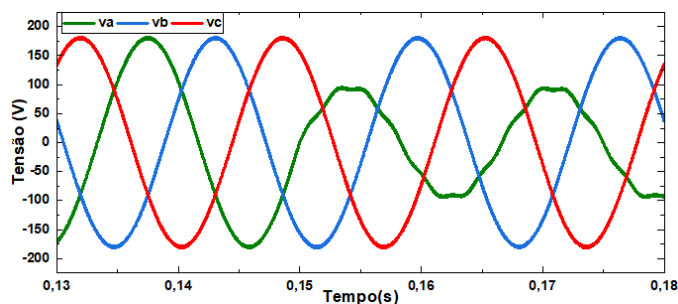


Figura 13. Tensões Trifásicas no PAC desequilibradas e com harmônicos de 7° ordem.

As correntes ca do VSC para os PLLs operando no terceiro cenário estão ilustradas nas Figuras 14 e 15. A Figura 14 apresenta correntes ca do VSC quando foi empregado o DSOGI-PLL, apresentando um valor THD correspondente a 4,8%, um valor próximo permitido pelos padrões de qualidade de energia elétrica.

A Figura 15 ilustra as correntes ca do VSC operando no terceiro cenário, no entanto, empregando o DTOGI-PLL. Neste teste é possível notar que as correntes ca sofreram alterações poucos significativas do ponto de vista de qualidade de energia elétrica cujo THD corresponde a 3,8%. Nota-se, portanto, que mesmo o VSC operando em condições altamente desequilibradas e com harmônicos as correntes ca permanecem com o valor THD dentro do valor estabelecido por normas.

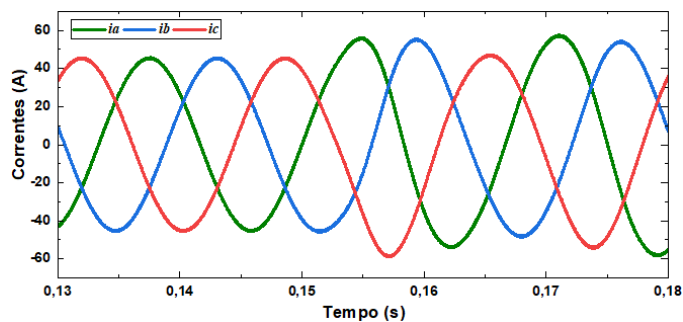


Figura 14. Correntes ca do VSC com  $\delta= 20\%$  e harmônicos de 7° ordem empregando o DSOGI-PLL.

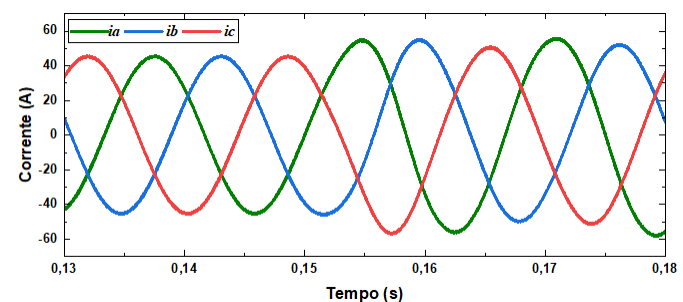


Figura 15. Correntes ca do VSC com  $\delta= 20\%$  e harmônicos de 7° ordem empregando o DTOGI-PLL.

Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros utilizados para a rede elétrica e para o VSC. Os valores referentes aos desempenhos de THD apresentados por ambos PLLs estão presentes na Tabela 4.

Tabela 3. Parâmetros da rede elétrica e VSC

| Parâmetros                | Valor | Unidade |
|---------------------------|-------|---------|
| Potência                  | 12k   | [VA]    |
| Frequência de chaveamento | 12k   | [Hz]    |
| $V_{eficaz}$              | 127   | [V]     |
| $V_{cc}$                  | 650   | [V]     |
| $L_f$                     | 5,5   | [mΩ]    |
| $R_f$                     | 2     | [mΩ]    |
| $C_1$                     | 315   | [μ F]   |
| $C_2$                     | 315   | [μ F]   |
| $L_s$                     | 1     | [mH]    |
| $R_s$                     | 0,5   | [mΩ]    |
| $R_a$                     | 2,15  | [Ω]     |
| $R_b = R_c$               | 4,03  | [Ω]     |

Tabela 4. Parâmetros de desempenho DSOGI-PLL e DTOGI-PLL

| Parâmetros | Valor   | Unidade   |           |
|------------|---------|-----------|-----------|
|            |         | DSOGI-PLL | DTOGI-PLL |
| Cenário    | THD (%) | Cenário   | THD (%)   |
| 1°         | 2,2     | 1°        | 1,2       |
| 2°         | 3,4     | 2°        | 2,4       |
| 3°         | 4,8     | 3°        | 3,8       |

## 6. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou o estudo do DSOGI-PLL e DTOGI-PLL aplicados em um VSC quatro fios com capacitor dividido operando conectado em uma rede elétrica com desequilíbrio de tensão e harmônicos.

Em todos os cenários estudados foi possível notar que é possível obter correntes senoidais. As correntes injetadas na rede elétrica para todos os cenários investigados apresentaram THD inferior a 5%.

A partir dos resultados foi possível verificar que o uso de ambos PLLs possibilita que o VSC promova correntes senoidais mesmo quando opera em condições com alto fator de desequilíbrio de tensão e harmônicos de tensão. Portanto, a análise dos limites operacionais do VSC injetando correntes senoidais a rede elétrica utilizando duas técnicas de PLLs foi demonstrado neste trabalho.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a CAPES pelo auxílio financeiro concedido por meio do projeto 88882.427094/2019-1.

#### REFERÊNCIAS

- Al-Ismail, F.S. (2021). Dc microgrid planning, operation, and control: A comprehensive review. *IEEE Access*, 9, 36154–36172. doi:10.1109/ACCESS.2021.3062840.
- Diene, O., Nascimento, C.F., and Watanabe, E.H. (2017). Stability analysis of grid-connected voltage-source converters with unbalanced loads. In *2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 208–213. doi:10.1109/PEDS.2017.8289283.
- Golestan, S., Ramezani, M., Guerrero, J.M., Freijedo, F.D., and Monfared, M. (2014). Moving average filter based phase-locked loops: Performance analysis and design guidelines. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 29(6), 2750–2763. doi:10.1109/TPEL.2013.2273461.
- Gonçalves, A.F.Q., Bastos, R.F., Aguiar, C.R., and Machado, R.Q. (2014). Three-phase vsi supplied by renewable energy sources and controlled in voltage and power modes for grid-tie operation. In *2014 IEEE 5th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, 1–6. doi:10.1109/PEDG.2014.6878701.
- Guo, X., Wu, W., and Chen, Z. (2011). Multiple-complex coefficient-filter-based phase-locked loop and synchronization technique for three-phase grid-interfaced converters in distributed utility networks. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58(4), 1194–1204. doi:10.1109/TIE.2010.2041738.
- Hadjidemetriou, L., Kyriakides, E., and Blaabjerg, F. (2013). A new hybrid pll for interconnecting renewable energy systems to the grid. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 49(6), 2709–2719. doi:10.1109/TIA.2013.2265252.
- Joorabli, H., Gharehpetian, G.B., Ghassem-Zadeh, S., and Ghods, V. (2021). A new control method for distortions compensation and power control using microgrid connecting voltage source converters. 47, 101373. doi:10.1016/j.seta.2021.101373.
- Li, W., Ruan, X., Bao, C., Pan, D., and Wang, X. (2014). Grid synchronization systems of three-phase grid-connected power converters: A complex-vector-filter perspective. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 61(4), 1855–1870. doi:10.1109/TIE.2013.2262762.
- Li, Y., Grimm, F., and Zhang, Z. (2019). Model predictive control for three-phase four-wire voltage source converters in standalone mode. In *2019 21st European Conference on Power Electronics and Applications (EPE '19 ECCE Europe)*, P.1–P.8. doi:10.23919/EPE.2019.8915479.
- Lino, F., Assis, J., Fernandes, D.A., Jacomini, R., Costa, F.F., and Filho, A.J.S. (2021). One-cycle fourier finite position set PLL. *Energies*, 14(7), 1824. doi:10.3390/en14071824.
- Mori, S., Matsuno, K., Hasegawa, T., Ohnishi, S., Takeda, M., Seto, M., Murakami, S., and Ishiguro, F. (1993). Development of a large static var generator using self-commutated inverters for improving power system stability. *IEEE Transactions on Power Systems*, 8(1), 371–377. doi:10.1109/59.221218.
- Nascimento, C.F., Diene, O., and Watanabe, E.H. (2017a). Analytical model of three-phase four-wire vsc operating as grid forming power converter under unbalanced load conditions. In *2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 1,219–1,224. doi:10.1109/PEDS.2017.8289287.
- Nascimento, C.F., Watanabe, E.H., Diene, O., Dietrich, A.B., Goedtel, A., Gyselinck, J.J.C., and Dias, R.F.S. (2017b). Analysis of noncharacteristic harmonics generated by voltage-source converters operating under unbalanced voltage. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(2), 951–961. doi:10.1109/TPWRD.2016.2593684.
- Nascimento, C.F., Watanabe, E.H., Diene, O., Dietrich, A.B., Goedtel, A., Gyselinck, J.J.C., and Dias, R.F.S. (2017c). Analysis of noncharacteristic harmonics generated by voltage-source converters operating under unbalanced voltage. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 32(2), 951–961. doi:10.1109/TPWRD.2016.2593684.
- Olives-Camps, J.C., Mauricio, J.M., Barragán-Villarejo, M., and Matas-Díaz, F.J. (2020). Voltage control of four-leg vsc for power system applications with nonlinear and unbalanced loads. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 35(2), 640–650. doi:10.1109/TEC.2019.2957185.
- Rabie, D., Senjyu, T., Alkhalaf, S., Mohamed, Y.S., and Shehata, E. (2021). Study and analysis of voltage source converter control stability for HVDC system using different control techniques. 12(3), 2763–2779. doi:10.1016/j.asej.2020.12.013.
- Reza, M.S., Sadeque, F., Hossain, M.M., Ghias, A.M.Y.M., and Agelidis, V.G. (2019). Three-phase pll for grid-connected power converters under both amplitude and phase unbalanced conditions. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 66(11), 8881–8891. doi:10.1109/TIE.2019.2893857.
- Rodriguez, P., Luna, A., Ciobotaru, M., Teodorescu, R., and Blaabjerg, F. (2006a). Advanced grid synchronization system for power converters under unbalanced and distorted operating conditions. In *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, 5173–5178. doi:10.1109/IECON.2006.347807.
- Rodriguez, P., Luna, A., Ciobotaru, M., Teodorescu, R., and Blaabjerg, F. (2006b). Advanced grid synchronization system for power converters under unbalanced and distorted operating conditions. In *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electro-*

- nics*, 5173–5178. doi:10.1109/IECON.2006.347807.
- Rodríguez, P., Teodorescu, R., Candela, I., Timbus, A.V., Liserre, M., and Blaabjerg, F. (2006). New positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions. In *2006 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, 1–7. doi:10.1109/pesc.2006.1712059.
- Silva, P.F., Nascimento, C.F., Gonçalves, A.F.Q., Silva, A.F., Sguarezi Filho, A.J., and Diene, O. (2021). Neutral current's effect on four-wire voltage source converter control systems. In *2021 Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, 1–6. doi:10.1109/COBEP53665.2021.9684081.
- Svensson, J., Bongiorno, M., and Sannino, A. (2007). Practical implementation of delayed signal cancellation method for phase-sequence separation. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(1), 18–26. doi:10.1109/TPWRD.2006.881469.
- Vásquez, V., Ortega, R., Ortega, L.M., García, V.H., and Carranza, O. (2020). Three phase four-wire inverter for grid-disconnected operation. *IEEE Access*, 8, 118324–118339. doi:10.1109/ACCESS.2020.3005628.
- Wang, T., Li, G., Han, H., Chen, H., Yan, Z., and Chen, W. (2020). Research on methods of suppressing three-phase unbalanced overvoltage in distribution network by substation photovoltaic system. In *2020 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 1–4. doi:10.1109/ICHVE49031.2020.9279519.
- Wen, B., Boroyevich, D., Burgos, R., Mattavelli, P., and Shen, Z. (2016). Analysis of d-q small-signal impedance of grid-tied inverters. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(1), 675–687. doi:10.1109/TPEL.2015.2398192.
- Yazdani, A. and Iravani, R. (2010). *Voltage-Sourced Converters in Power Systems*. John Wiley & Sons, Inc. doi:10.1002/9780470551578.
- Yazdani, D., Mojiri, M., Bakhshai, A., and Joós, G. (2009). A fast and accurate synchronization technique for extraction of symmetrical components. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(3), 674–684. doi:10.1109/TPEL.2008.2010321.