

COMPARAÇÃO ENTRE ALGORITMOS SÍNCRONOS E ESTACIONÁRIOS PARA A SINCRONIZAÇÃO DE SISTEMAS CONECTADOS.

ROCHA C.X.* CAMACHO J.R.* ROCHA, H.X.† VIAJANTE, G.P.† SANTOS JR., J.A.†
OLIVEIRA, C. A.*

**Universidade Federal de Uberlândia
Av. João Naves de Ávila, 2121 - Santa Monica
Uberlândia, MG, Brasil*

*†Instituto Federal de Goiás
Av. Furnas, 55 - Village Imperial
Itumbiara, GO, Brasil*

Email: cxrocha@hotmail.com jrcamacho@ufu.br hxrocha@hotmail.com

Abstract— The algorithms used in three-phase systems for the synchronization between voltage converters and power grid has been the subject of constant research, mainly due to the distributed generation units increment connected to the grid. Are objects of study methods in the time domain, which are recognizedly faster and more reliable than methods in the frequency domain (Wang and Li, 2013). This paper presents a comparison between two methods of synchronism in the time domain, the first based on Synchronous Reference Frame (dq), and second based on Stationary Reference Frame ($\alpha\beta$).

Keywords— PLL, FLL, Synchronization, DDSRF-PLL, DSOGI-FLL.

Resumo— Os algoritmos utilizados em sistemas trifásicos para a sincronização entre conversores de tensão e a rede elétrica tem sido objeto de constantes pesquisas, sobretudo devido ao incremento de unidades de geração distribuída conectadas a rede elétrica. São objetos de estudo os métodos no domínio do tempo, que são reconhecidamente mais rápidos e confiáveis que os métodos no domínio da frequência (Wang and Li, 2013). Este trabalho apresenta uma comparação entre dois métodos de sincronismo no domínio do tempo, sendo o primeiro baseado nas transformadas vetoriais síncronas (dq), e segundo baseado nas transformadas vetoriais estacionárias ($\alpha\beta$).

Palavras-chave— PLL, FLL, Sincronização, DDSRF, DSOGI-FLL.

1 Introdução

Uma dos desafios mais importantes na interligação dos conversores de energia a rede elétrica é a sincronização entre eles no ponto de acoplamento (PCC) (Moreno et al., 2007). Embora as formas de onda de tensão de rede sejam senoidais e equilibradas sob condições normais de funcionamento, elas podem facilmente tornar-se distorcidas e desequilibradas devido a utilização de cargas não-lineares e ao desbalanceamento de cargas entre fases da rede. Sob estas condições, os conversores conectados à rede devem estar devidamente sincronizados, a fim de permanecerem ativamente ligados, apoiando o sistema elétrico e mantendo a geração de energia elétrica em funcionamento (Rodriguez et al., 2009). Os métodos de sincronismo são geralmente classificados no domínio do tempo e no domínio da frequência. Entretanto neste trabalho foram analisados dois algoritmos no domínio do tempo, já que em aplicações em tempo real, eles são mais rápidos e mais confiáveis que os do domínio da frequência (Wang and Li, 2013). No domínio do tempo, aplicações baseados no algoritmo PLL têm sido tradicionalmente utilizado por conversores de tensão no controle da sincronização entre os conversores de energia e a tensão de rede. Em sistemas trifásicos, o método SRF-PLL baseado nas transformadas síncronas (dq) tem se

tornado uma técnica de sincronização padrão. Entretanto a resposta do SRF-PLL é deficiente em sistemas desbalanceados, onde aparecem componentes de tensões de sequência negativa. Para resolver a deficiência do SRF-PLL em sistemas desbalanceados, uma extensão denominada DDSRF-PLL foi desenvolvida (Rodriguez et al., 2007). O DDSRF-PLL utiliza dois SRF e uma rede de desacoplamento para isolar os efeitos das componentes positivas e negativas de tensão. Por outro lado, a utilização das transformadas estacionárias para a sincronização de conversores trifásicos com a rede elétrica tem aumentado consideravelmente. Esta metodologia é baseada em uma estrutura denominada SOGI, que é um filtro adaptativo em frequência, que tem como resposta o sinal filtrado e também seu correspondente em quadratura. O DSOGI é aplicado em sistemas trifásicos, e é utilizado para a filtragem das transformadas estacionárias ($V_{\alpha\beta}$) e para a geração de seus sinais correspondentes em quadratura ($qV_{\alpha\beta}$), permitindo o cálculo com facilidade das componentes simétricas instantâneas da tensão (V_{+0}).

2 Sincronização com Rede Utilizando Transformadas Síncronas DDSRF-PLL

Na Figura 1, o layout de uma estrutura de controle para um conversor trifásico de energia conectada à rede é apresentada. O bloco de sincronização da rede é responsável por calcular o ângulo, a frequência, e a amplitude das componentes da sequência positiva e negativa da tensão de rede, representados por θ_{-}^{+} , ω e V_{-}^{+} . Estes valores são usados pelo bloco de controle de corrente, e poderá atuar como um filtro ativo ou como um controlador de potência de um gerador de energia independente.

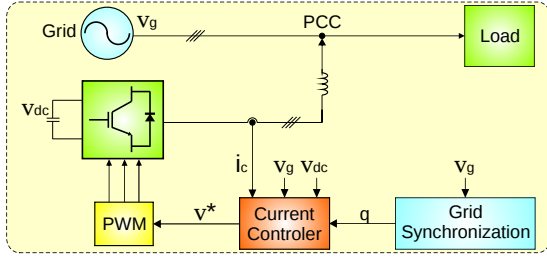


Figura 1: Circuito básico de sincronização de conversores de tensão com a rede elétrica.

O método DDSRF é composto de dois eixos de referência girantes: dq^{+1} girando na direção positiva com posição angular $+\theta$, e dq^{-1} girando na direção negativa com posição angular $-\theta$. A Figura 2 apresenta os vetores das componentes positivas V_s^{+} e negativas V_s^{-} de uma tensão desbalanceada V_s , juntamente com os vetores de referências síncronas (DRSF) dq^{+1} e dq^{-1} , de velocidades de rotação ω e posição angular θ .

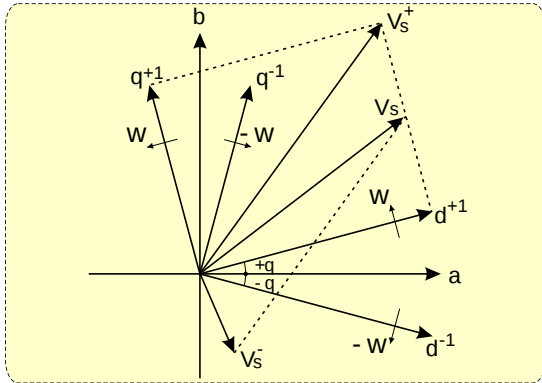


Figura 2: Vetores de tensão das transformadas síncronas desacopladas (DSRF)

De acordo com (Rodriguez et al., 2007), os vetores de tensão V_s podem ser expressos por (1) e (2).

Se considerarmos que a posição angular do vetor dq^{+} é a mesma do vetor da componente positiva V_s^{+} , o vetor de tensão de entrada pode ser escrito no DSRF, pelas equações (1) e (2).

$$v_{dq}^{+1} = \begin{bmatrix} v_d^{+1} \\ v_q^{+1} \end{bmatrix} = [T_{dq^{+1}}] \cdot v_{\alpha\beta}$$

$$v_{dq}^{+1} = V^{+1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} + V^{-1} \begin{bmatrix} \cos(-2wt) \\ \sin(-2wt) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$v_{dq}^{-1} = \begin{bmatrix} v_d^{-1} \\ v_q^{-1} \end{bmatrix} = [T_{dq^{-1}}] \cdot v_{\alpha\beta}$$

$$v_{dq}^{-1} = V^{+1} \begin{bmatrix} \cos(2wt) \\ \sin(2wt) \end{bmatrix} + V^{-1} \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde

$$[T_{dq^{+1}}] = [T_{dq^{-1}}]^T = \begin{bmatrix} \cos(\theta') & \sin(\theta') \\ -\sin(\theta') & \cos(\theta') \end{bmatrix} \quad (3)$$

O diagrama de blocos apresentado na Figura 3 representa a resolução das equações (1) e (2) no domínio do tempo. O bloco DC apresentado na Figura 4, é utilizado no desacoplamento das componentes síncronas positivas (V_{dq}^{+}) e negativas (V_{dq}^{-}) da tensão da rede. Para componentes simétricas positivas faz-se $n=+1$ e $m=-1$, e para componentes simétricas negativas faz-se $n=-1$ e $m=+1$. θ é encontrado aplicando-se V_q^{+} ao PLL tradicional da Figura 5.

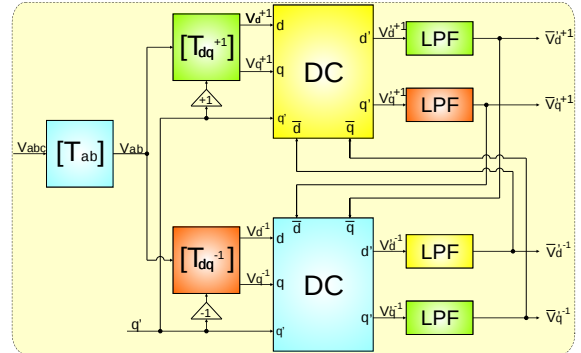


Figura 3: Circuito completo para a implementação do DDSRF-PLL

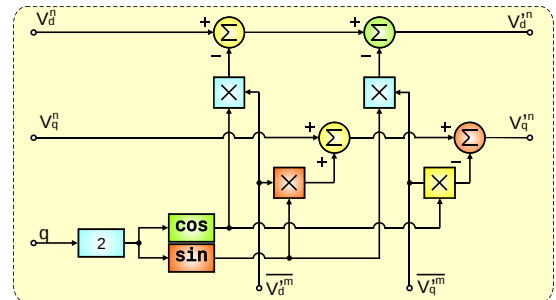


Figura 4: Bloco de desacoplamento DC do DDSRF-PLL.

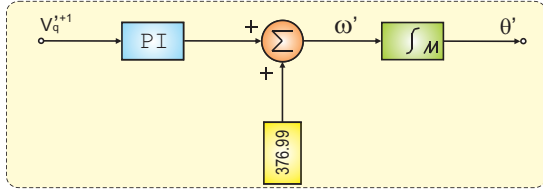


Figura 5: PLL utilizado no DDSRF.

3 Sincronização com Rede Utilizando Transformadas Estacionárias DSOGI-FLL

O método de sincronização baseado no DSOGI-FLL utiliza o método das transformadas vetoriais estacionárias ($\alpha\beta$), permitindo a eliminação do componente de sequência zero, que não pode ser controlada por conversores de energia de três fases com três fios. Por ser um sistema adaptativo em frequência, permite sincronizar a componente fundamental por meio de um FLL em vez de um PLL. O DSOGI-FLL possui um baixo custo computacional, uma vez que nenhuma transformação trigonométrica é realizada.

De acordo Lyon (Lyon, 1937), um vetor de tensão V_{abc} pode ser dividida em suas componentes instantâneas positiva, negativa e zero.

$$v_{abc} = v_{abc}^+ + v_{abc}^- + v_{abc}^0$$

Estes componentes podem ser encontradas através de Transformadas de Lyon $[T_+]$, $[T_-]$ e $[T_0]$. A maioria dos conversores de energia conectadas à rede trifásica empregam uma conexão de três fios. Portanto, a corrente injetada na a rede é exclusivamente sincronizada com a componente de positiva e negativa da tensão de rede. Como consequência direta, o vector de tensão trifásico pode ser representado em um referencial ortogonal por meio de dois sistemas independentes de variáveis $\alpha\beta$, graças à transformação de Clarke. Além disso, aproveitando as transformações de Lyon, as componentes de tensão instantânea positiva e negativa de $\alpha\beta$, podem ser calculadas como escrito em (4) e (5), em que $q = \exp -j(\pi/2)$ é um operador de atraso de fase de deslocamento de 90° aplicada no domínio de tempo para obter uma versão em quadratura das formas de onda de entrada.

$$v_{\alpha\beta}^+ = [T_{\alpha\beta}] v_{abc}^+ = [T_{\alpha\beta}] [T_+] v_{abc}$$

$$v_{\alpha\beta}^+ = [T_{\alpha\beta}] [T_+] [T_{\alpha\beta}]^T v_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & -q \\ q & 1 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta} \quad (4)$$

$$v_{\alpha\beta}^- = [T_{\alpha\beta}] v_{abc}^- = [T_{\alpha\beta}] [T_-] v_{abc}$$

$$v_{\alpha\beta}^- = [T_{\alpha\beta}] [T_-] [T_{\alpha\beta}]^T v_{\alpha\beta} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & q \\ -q & 1 \end{bmatrix} v_{\alpha\beta} \quad (5)$$

O resultado das equações (4) e (5) podem ser alcançadas a partir do DSOGI-FLL, que é composto por três blocos fundamentais:

- Dois blocos SOGIs (DSOGI);
- O bloco FLL, que alcança frequência da rede com precisão, sem envolver operações ângulo de fase;
- O bloco PNSC que implementa o método de componentes simétricas instantânea no domínio $\alpha\beta$.

A Figura 6 mostra dois diagramas de blocos SOGIs (DSOGI), sendo o primeiro utilizado para o processamento da componente α e o segundo para o processamento da componente β , e ambos acoplados ao bloco FLL. A Figura 7 apresenta o bloco PNSC, que realiza as operações matemáticas necessárias para encontrar as componentes estacionárias positivas ($v_{\alpha\beta}^+$) e negativas ($v_{\alpha\beta}^-$).

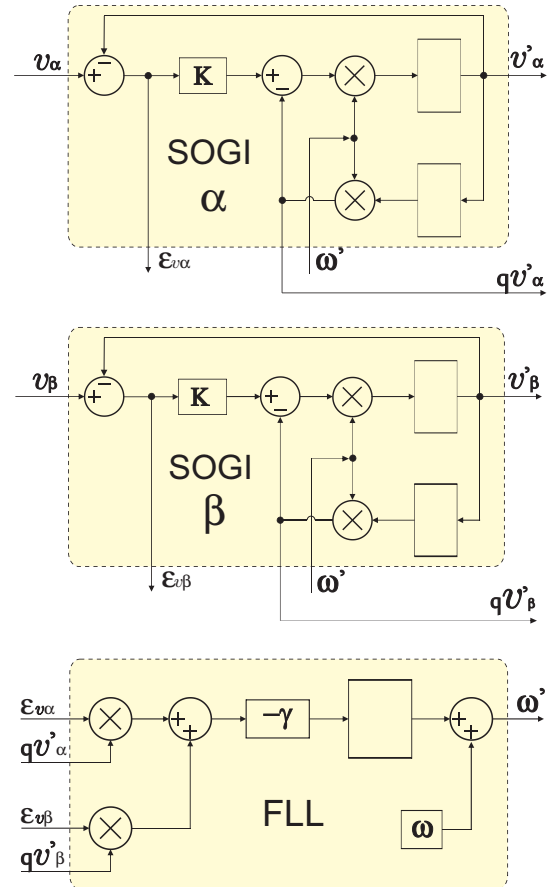


Figura 6: Duplo SOGI acoplado a um FLL

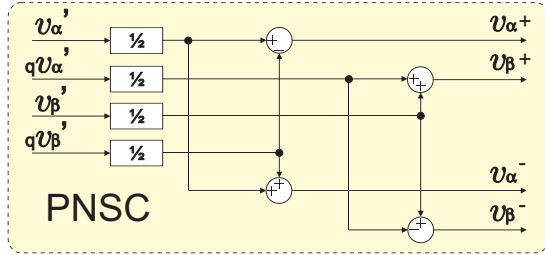


Figura 7: Positivo Negativo

4 Simulações

Para testarmos a estabilidade e tempo de resposta dos algoritmos descritos, foram criadas quatro situações de distúrbios da rede elétrica, introduzidas a partir de 110 ms do início das simulações:

1. Tensões harmônicas: Introdução da 5ª e da 7ª tensão harmônica, com valores de 10% da tensão fundamental;
2. Desbalanceamento de fases: Incremento de 20% em v_b , decremento de 25% em v_c , e v_a permanecendo constante;
3. Salto de fase: Salto de fase de 45° nas tensões da rede;
4. Alteração da frequência: Decremento da frequência da rede de 60 Hz para 55 Hz.

As simulações acima descritas e apresentadas na Figura 8 foram realizadas no software de simulação PSIM. Tais simulações foram realizadas até o tempo de 200 ms, mas foram apresentadas no gráfico apenas o período compreendido entre 100 ms e 200 ms.

No DDSRF-PLL foram utilizados os valores de $k_p = 2.22$ e $K_i = 246,7$ recomendados por (Rodriguez et al., 2007), e um filtro passa baixa de primeira ordem com frequência de corte de 20 Hz.

No DSOGI-FLL foi utilizado $k = \sqrt{2}$ e $\gamma = \frac{k\omega'}{V_\alpha^2 + V_\beta^2}\Gamma$, onde $\Gamma = -50$, recomendados por (Rodriguez et al., 2012).

A Figura 8(a) mostra as formas de onda da tensão um pouco antes e após a inclusão do distúrbio descrito acima no item 1. As Figuras 8(b) e 8(c) mostram os gráficos de ω e θ nos métodos de sincronização DDSRF-PLL E DSOGI-FLL respectivamente.

A Figura 8(d) mostra as formas de onda da tensão um pouco antes e após a inclusão do distúrbio descrito acima no item 2. As Figuras 8(e) e 8(f) mostram os gráficos de ω e θ nos métodos de sincronização DDSRF-PLL E DSOGI-FLL respectivamente.

A Figura 8(g) mostra as formas de onda da tensão um pouco antes e após a inclusão do distúrbio descrito acima no item 3. As Figuras 8(h)

e 8(i) mostram os gráficos de ω e θ nos métodos de sincronização DDSRF-PLL E DSOGI-FLL respectivamente.

A Figura 8 (j) mostra as formas de onda da tensão um pouco antes e após a inclusão do distúrbio descrito acima no item 4. As Figuras 8(k) e 8(l) mostram os gráficos de ω e θ nos métodos de sincronização DDSRF-PLL E DSOGI-FLL respectivamente.

5 Conclusões

Neste artigo é realizado um estudo comparativo entre dois métodos de sincronismo de conversores com a rede elétrica. O primeiro deles é baseado nas transformadas vetoriais síncronas (dq) e o outro transformadas vetoriais estacionárias ($\alpha\beta$), ambos no domínio do tempo. Durante as simulações, fez-se a aplicação de quatro possíveis distúrbios na rede elétrica, no intuito de verificar-se a estabilidade e a rapidez da resposta dos métodos testados.

Nas situações simuladas, verificou-se que ambos os métodos atingem satisfatoriamente os objetivos desejados. Entretanto, parametrizando os controladores conforme especificados na secção 'Simulações', verifica-se visualmente uma pequena vantagem na utilização de componentes vetoriais estacionárias em relação as componentes vetoriais síncronas, para as situações propostas. Deve-se considerar que os resultados encontrados foram obtidos com a utilização dos parâmetros sugeridos por (Rodriguez et al., 2007) no DDSRF-PLL e por (Rodriguez et al., 2012) no DSOGI-FLL. Entretanto, não podemos descartar a possibilidade de encontrar resultados mais satisfatórios em ambos os casos, caso os parâmetros utilizados sejam alterados.

1. Alta estabilidade. Podemos perceber que em todos os casos, o DSOGI-FLL atinge a estabilidade em um tempo menor que o DDSRF-PLL.
2. Rapidez no processamento de sincronização. A utilização da estrutura SOGI para encontrar o sinal em quadratura dos sinais $v_{\alpha\beta}$ de entrada, permite a utilização de apenas operações aritméticas simples (soma, subtração e multiplicação), que torna o processamento do DSOGI-FLL muito mais rápido do que o DDSRF-PLL, que utiliza várias vezes transformações trigonométricas. Tal rapidez torne-se extremamente importante nos casos de processamento em tempo real, que é o caso do sincronismo em sistemas conectados.

Agradecimentos

Agradecemos à CAPES, IFG e UFU por tornarem possível a realização deste trabalho.

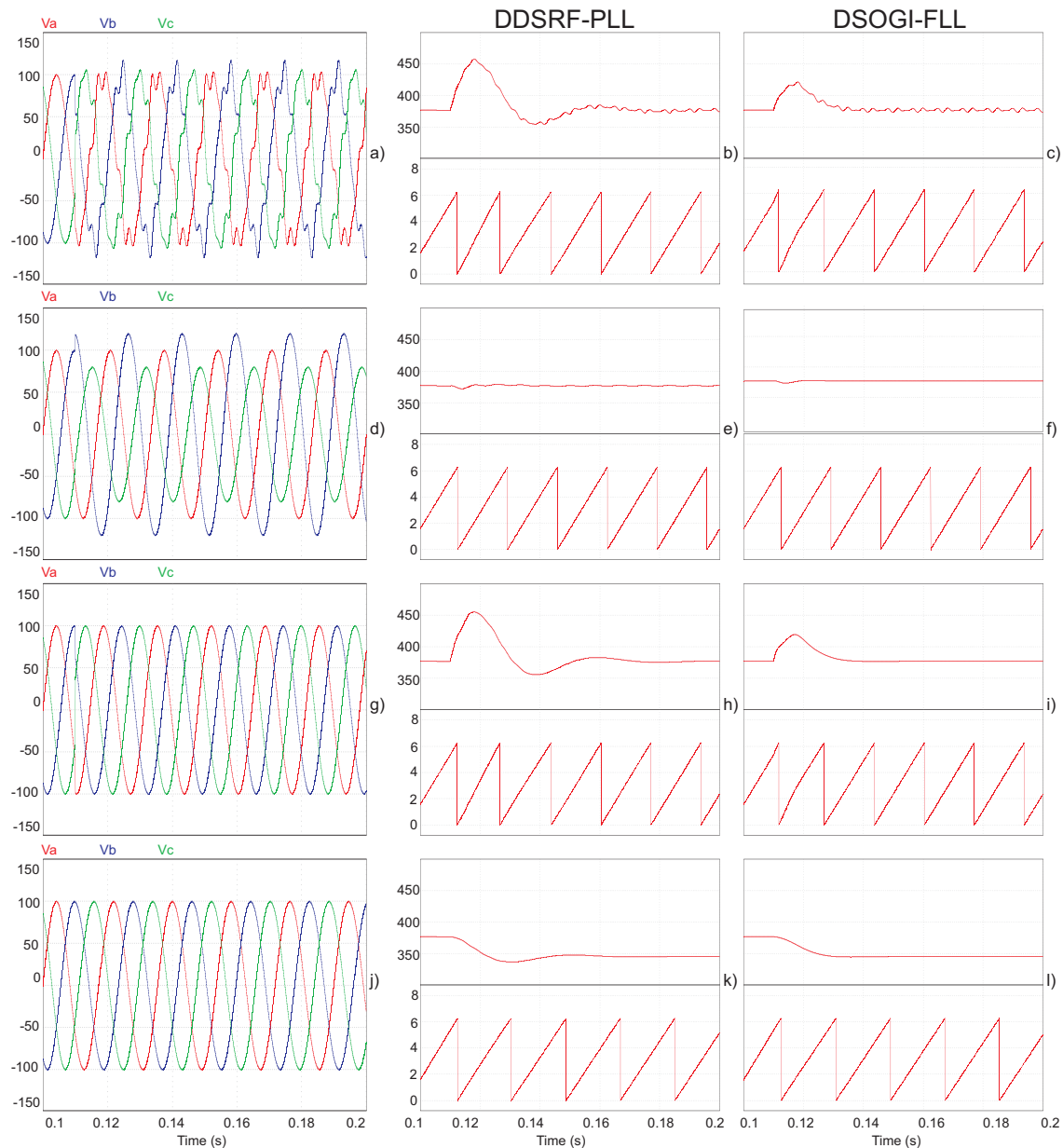


Figura 8: a)

Referências

- Lyon, W. (1937). Application of the method of symmetrical components, *McGraw-Hill*.
- Moreno, V. M., Liserre, M., Pigazo, A. and Dell'Aquila, A. (2007). A comparative analysis of real-time algorithms for power signal decomposition in multiple synchronous reference frames, *IEEE Transactions on Power Electronics* **22**(4): 1280–1289.
- Rodriguez, P., Luna, A., Munoz-Aguilar, R., Etxeberria-Otadui, I., Teodorescu, R. and Blaabjerg, F. (2012). A stationary reference frame grid synchronization system for three-phase grid-connected power converters under adverse grid conditions, *Power Electronics, IEEE Transactions on* **27**(1): 99–112.
- Rodriguez, P., Pou, J., Bergas, J., Candela, J. I., Burgos, R. P. and Boroyevich, D. (2007). Decoupled double synchronous reference frame pll for power converters control, *IEEE Transactions on Power Electronics* **22**(2): 584–592.
- Rodriguez, P., Timbus, A., Teodorescu, R., Liserre, M. and Blaabjerg, F. (2009). Reactive power control for improving wind turbine system behavior under grid faults, *IEEE Transactions on Power Electronics* **24**(7): 1798–1801.
- Wang, Y. F. and Li, Y. W. (2013). A grid fundamental and harmonic component detection

method for single-phase systems, *IEEE Transactions on Power Electronics* **28**(5): 2204–2213.