

Análise Comparativa de Técnicas de PLLs Trifásicos Sob Condições de Tensões Desequilibradas e Distorcidas

Alex F. Silva
Instituto de Ciências e Tecnologia de Sorocaba
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Sorocaba, Brasil
alex.f.silva@unesp.br

Paulo Fernando Silva
Instituto de Ciências e Tecnologia de Sorocaba
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Sorocaba, Brasil
paulo.fernando-silva@unesp.br

Jakson Paulo Bonaldo
Departamento de Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT)
Cuiabá, Brasil
jakson.bonaldo@ufmt.br

Waner Wodson A. Gonçalves Silva
Instituto de Ciências Tecnológicas
Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)
Itabira, Brasil
waner@unifei.edu.br

Luis de Oro Arenas
Instituto de Ciências e Tecnologia de Sorocaba
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Sorocaba, Brasil
luis.arenas@unesp.br

Helmo K. Morales Paredes
Instituto de Ciências e Tecnologia de Sorocaba
Universidade Estadual Paulista (Unesp), Sorocaba, Brasil
helmo.paredes@unesp.br

Abstract— A crescente inserção de fontes renováveis de energia na rede elétrica exige algoritmos de sincronismo eficientes para garantir a estabilidade do sistema. O *Phase-Locked Loop* (PLL) é amplamente utilizado para sincronizar inversores com a rede elétrica, mas seu desempenho pode ser comprometido em microrredes despacháveis devido à intermitência das fontes renováveis e à diversidade de cargas desbalanceadas e não-lineares. Essas condições afetam a qualidade da energia elétrica, resultando em desequilíbrios e distorções de tensão assim como variações de frequência, que comprometem a precisão dos algoritmos de sincronismo. Este trabalho contribui com uma análise comparativa de métodos de PLLs projetados para operar em condições desafiadoras como são as distorções e os desequilíbrios de tensão. São avaliadas as técnicas DTOGI-PLL, DTOGI-MAF-PLL, DSOGI-MAF-PLL e DFOGI-PLL, considerando desempenho, robustez e tempo de resposta em regime permanente e transitório. Os resultados de simulação indicam que as técnicas DSOGI-MAF e DTOGI-MAF apresentam melhor resposta dinâmica, com menor overshoot e oscilação de frequência em condições de afundamento e distorção harmônica de tensão. Por outro lado, as técnicas DTOGI-PLL e DFOGI-PLL demonstraram maior estabilidade e resiliência frente a variações de frequência da rede.

Keywords—Geração distribuída, *Phase-Locked Loop*, Qualidade de Energia.

NOMENCLATURA

DSTATCOM	Distribution Static Compensator
DTOGI-PLL	Double Third Order Generalized Integrator Phase-Locked Loop
DFOGI	Dual Fourth Order Generalized Integrator
DSOGI	Dual Second Order Generalized Integrator
DSOGI-PLL	Dual Second Order Generalized Integrator Phase-Locked Loop

DTOGI-MAF-PLL	Dual Third Order Generalized Integrator-Moving Average Filter Phase-Locked Loop
DTOGI-MAF-PLL	Dual Third Order Generalized Integrator-Moving Average Filter Phase-Locked Loop
FAMAF-PLL	Frequency-Adaptive Moving Average Filter Phase-Locked Loop
FOGI	Fourth Order Generalized Integrator
FF-DSOGI-PLL	Frequency Fixed Dual Second Order Generalized Integrator Phase-Locked Loop
MAF	Moving Average Filter
PLL	Phase-Locked Loop
QSG	Quadrature Signal Generator
DFOGI-PLL	Second Fourth Generalized Integrator Phase-Locked Loop
SRF-PLL	Synchronous Reference Frame Phase-Locked Loop
SOGI	Secondary General Order Integrator
TOGI	Third Order Generalized Integrator

I. INTRODUÇÃO

Atualmente, há notável aumento na utilização de fontes renováveis de energia elétrica, impulsionado pelo contínuo crescimento da demanda, sendo a energia solar e eólica as principais fontes que impulsionam este crescimento [1],

refletindo avanços tecnológicos, políticas públicas de incentivo à transição energética e compromissos internacionais para a redução de emissões de gases de efeito estufa [2]. As fontes renováveis, por não dependerem da queima de combustíveis fósseis, desempenham um papel fundamental na mitigação dos impactos ambientais, principalmente no que se refere à redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂) e outros poluentes atmosféricos [3].

Inversores do tipo fonte de tensão são geralmente utilizados para conectar fontes de energia renováveis à rede elétrica, permitindo o fluxo bidirecional de energia [4]. Os sistemas de sincronismo fornecem informações sobre fase e frequência da componente fundamental da tensão da rede, as quais são essenciais para o controle adequado do inversor conectado à rede em diferentes aplicações, tais como sistemas fotovoltaicos, sistemas de turbinas eólicas, sistemas de carregamento de veículos elétricos e fontes de alimentação ininterrupta [5]. Problemas de sincronismo podem comprometer a estabilidade do sistema, prejudicando seu desempenho e segurança. Por exemplo, em sistemas fotovoltaicos e eólicos, falhas na sincronização podem levar a desconexões indesejadas, reduzindo a confiabilidade da geração distribuída [6]-[8].

A fim de assegurar o sincronismo, a maioria dos inversores utilizam alguma forma de estrutura *Phase-Locked Loop* (PLL) [9]. A técnica de sincronismo *Synchronous Reference Frame-PLL* (SRF-PLL) é amplamente utilizada em sistemas trifásicos. No entanto, não garante sincronização precisa entre o inversor e a rede elétrica diante de perturbações como desequilíbrios de tensão, variações de frequência e harmônicas [10]. Neste sentido, diversos estudos [11]-[14] foram direcionados ao desenvolvimento de PLLs trifásicos com capacidade de operar em condições de desequilíbrio de tensão, variação de frequência e distorção harmônica. Grande parte desses esforços têm buscado aprimorar a capacidade de rejeição de distúrbios de técnicas de PLLs convencionais baseados em SRF, visando enfrentar desafios cada vez maiores relacionados à qualidade da energia elétrica [15].

O trabalho apresentado em [16] revisou técnicas de PLL baseadas em filtros *Moving Average Filter* (MAF), ressaltando vantagens, como estrutura simples e a eficácia na atenuação de harmônicas. O trabalho analisou as abordagens MAF-PLL, *Frequency-Adaptive MAF-PLL* (FAMAF-PLL) e *Double Third Order Generalized Integrator-PLL* (DTOGI-PLL). No estudo descrito em [17], foram investigadas técnicas de PLLs fundamentadas na técnica *Dual Second Order Generalized Integrator* (DSOGI), avaliando seu desempenho sob condições de variação de frequência e foi comparado com a técnica *Frequency-Fixed-DSOGI-PLL* (FFDSOGI-PLL), que opera sob uma frequência fixa. Em [18] comparam-se as técnicas DTOGI-PLL e DSOGI-PLL em cenários que incluem desequilíbrios de tensão e distorções harmônicas.

Para melhorar o desempenho do sistema DTOGI-PLL, [19] introduziu a técnica *Dual Third Order Generalized Integrator-Moving Average Filter-PLL* (DTOGI-MAF-PLL), e demonstrou que a combinação DTOGI e MAF-PLL permite a eliminação completa dos sinais de sequência negativa na frequência fundamental em condições de rede desequilibrada. Além disso, em [20] foi proposta a técnica *Dual Second Order Generalized Integrator-Moving Average Filter-PLL* (DSOGI-MAF-PLL), evidenciando que a integração do DSOGI com o MAF-PLL foi capaz de reduzir o tempo de resposta transitória

e a ultrapassagem percentual do sinal de frequência em cenários de desequilíbrio de tensão. Em [21], foi apresentada a técnica *Dual Fourth Order Generalized Integrator-PLL* (DFOGI-PLL), aplicada ao controle do de compensadores estáticos (DSTATCOM). No entanto, até o presente momento, não foram identificados estudos realizando avaliação de desempenho que abrange técnica DFOGI-PLL em relação às outras técnicas consolidadas.

Portanto, este trabalho propõe uma análise comparativa do desempenho das técnicas DFOGI-PLL, DTOGI-PLL, DTOGI-MAF-PLL e DSOGI-MAF-PLL em regime permanente e transitório. A investigação será realizada por meio de simulações computacionais, avaliando os princípios de operação, robustez e tempo de resposta diante de diferentes distúrbios na rede elétrica, incluindo afundamentos de tensão, distorções harmônicas e variações de frequência. A comparação do desempenho das técnicas sincronismo visa fornecer subsídios para a seleção de abordagens mais eficientes para sistemas de sincronização de inversores conectados à rede, provendo informações inéditas quanto ao desempenho da técnica DFOGI-PLL e demonstrando suas vantagens e limitações em relação às estratégias convencionais.

O restante deste artigo está estruturado da seguinte maneira: na Seção II, é apresentada a técnica DSOGI-MAF-PLL. As técnicas DTOGI-PLL e DTOGI-MAF-PLL são detalhados na Seção III e a técnica DFOGI-PLL é apresentada na seção IV. Na seção V é realizada uma análise comparativa entre as estratégias abordadas. Finalmente, a Seção VI traz as principais conclusões.

II. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DSOGI – MAF-PLL

A Fig. 1 apresenta o diagrama do DSOGI-PLL, baseado no *Quadrature Signal Generator* (QSG), o qual tem como fundamento o *Secondary General Order Integrator* (SOGI). O DSOGI-PLL destaca-se como um dos extratores de sequência positiva mais empregados em sistemas elétricos com desequilíbrio de tensão [22], [23]. O DSOGI-PLL se baseia no SOGI, onde as funções de transferência que relacionam as saídas com as entradas são expressas por (1) e (2).

$$H_{\alpha}(s) = \frac{v'_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta}} = \frac{k\omega's}{s^2 + k\omega's^2 + \omega'^2} \quad (1)$$

$$H_{\beta}(s) = \frac{qv'_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta}} = \frac{k\omega'^2}{s^2 + k\omega's^2 + \omega'^2} \quad (2)$$

Em (1) e (2), ω' representa a frequência da rede, enquanto k denota o fator de amortecimento. O valor de k é fundamental para o desempenho do filtro, um aumento no valor de k leva a uma maior largura de banda, o que, por sua vez, reduz a capacidade de rejeição harmônica do filtro. Já coeficientes mais altos de k comprometem o tempo de resposta, no entanto ajudam a reduzir o *overshoot*. Conforme demonstrado em [22] e [23], $k = 1,41$ é ajustado de modo a garantir um equilíbrio entre a capacidade de atenuação e o tempo de resposta. Para aprimorar a resposta transitória do DSOGI-PLL convencional sem comprometer sua capacidade de rejeitar perturbações, uma versão melhorada dessa técnica foi proposta em [20], conforme ilustrado na Fig. 2. Essa nova abordagem, denominada DSOGI-PLL-MAF, incorpora um filtro MAF nos eixos dq do PLL, proporcionando um

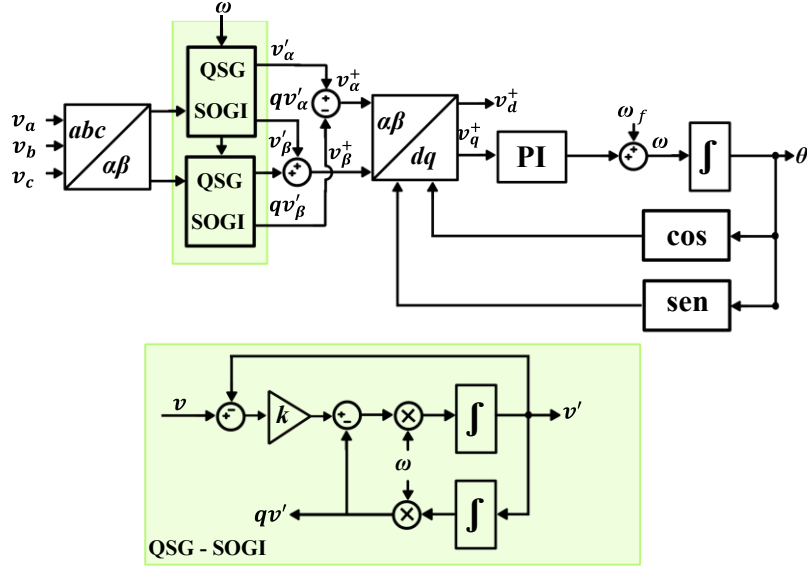


Fig.1. Diagrama de blocos do Dual Second Order Generalized Integrator-Phase-Locked Loop (DSOGI-PLL).

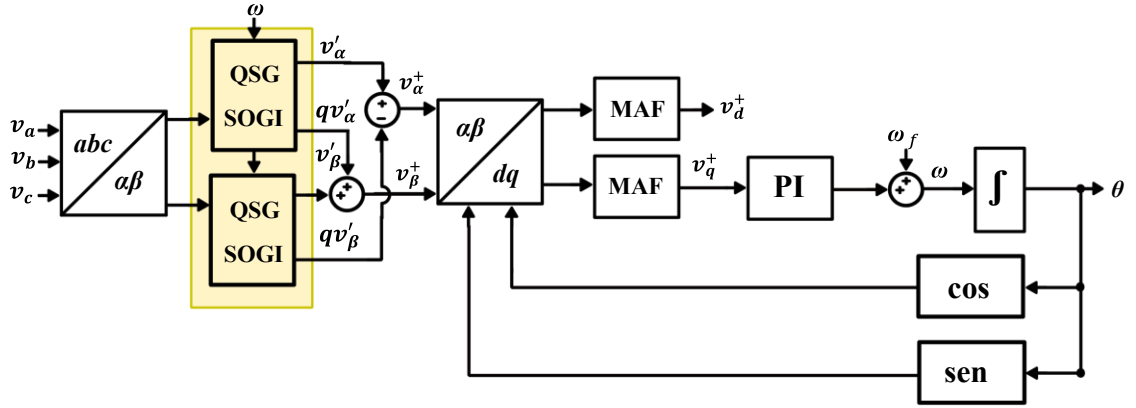


Fig.2 Diagrama de blocos do Dual Second Order Generalized Integrator-Moving Average Filter (DSOGI-MAF).

desempenho otimizado. A inclusão do MAF visa melhorar a resposta dinâmica do DSOGI-PLL enquanto mantém sua robustez contra distúrbios. O MAF é um filtro projetado para resposta ao impulso finito, capaz de funcionar como um filtro passa-baixa. Desta forma, opera a partir de uma janela deslizante, calculando a média dos valores recentes do sinal de entrada, o que resulta na atenuação das oscilações e ruídos no sinal de saída. A Fig. 2 ilustra a junção do DSOGI-PLL com o MAF. A função de transferência do MAF é dada por (3).

$$\text{MAF}(s) = \frac{1 - e^{-sT}}{sT} \quad (3)$$

III. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DTOGI-PLL

A técnica DTOGI-PLL ilustrado na Fig.3 emprega um *Third Order Generalized Integrator* (TOGI) para o referencial estacionário α e outro TOGI para o referencial estacionário β . A função de transferência do DTOGI-PLL pode ser expressa por (4) e (5).

$$H_{\alpha}(s) = \frac{v'_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta}} = \frac{k_1 \omega^2 s}{s^3 + k_2 \omega_0 s^2 + (k_1 + 1) \omega_0 s^2 + k_2 \omega_0^3} \quad (4)$$

$$H_{\beta}(s) = \frac{qv'_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta}} = \frac{k_1 \omega^3 s}{s^3 + k_2 \omega_0 s^2 + (k_1 + 1) \omega_0 s^2 + k_2 \omega_0^3} \quad (5)$$

Em (4) e (5), ω denota a frequência, enquanto k refere-se ao fator de amortecimento. Para que o DTOGI-PLL possa garantir um equilíbrio entre a capacidade de atenuação e o tempo de resposta os coeficientes são respectivamente, $k_1 = 2,82$ e $k_2 = 1,1$. Conforme indicado por [24], o DTOGI-PLL opera com o mesmo princípio de funcionamento do DSOGI-

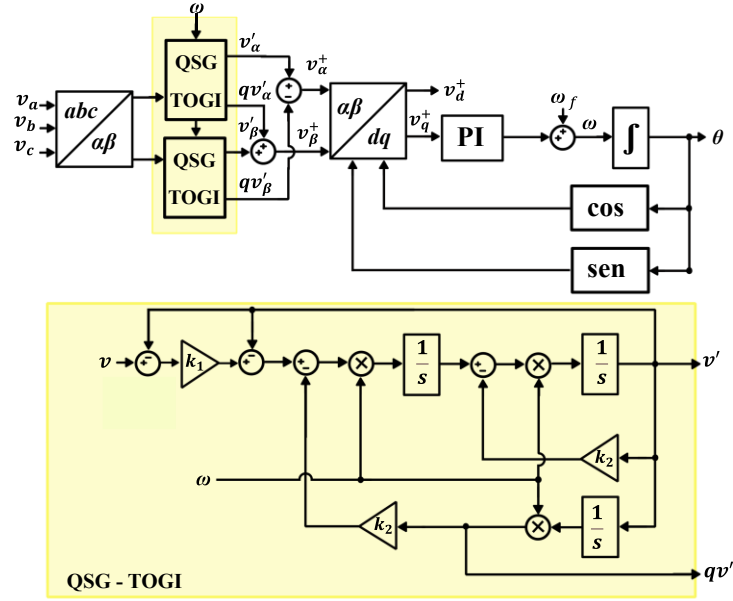


Fig.3 Diagrama de blocos do Double Third Order Generalized Integrator-Phase-Locked Loop (DTOGI-PLL).

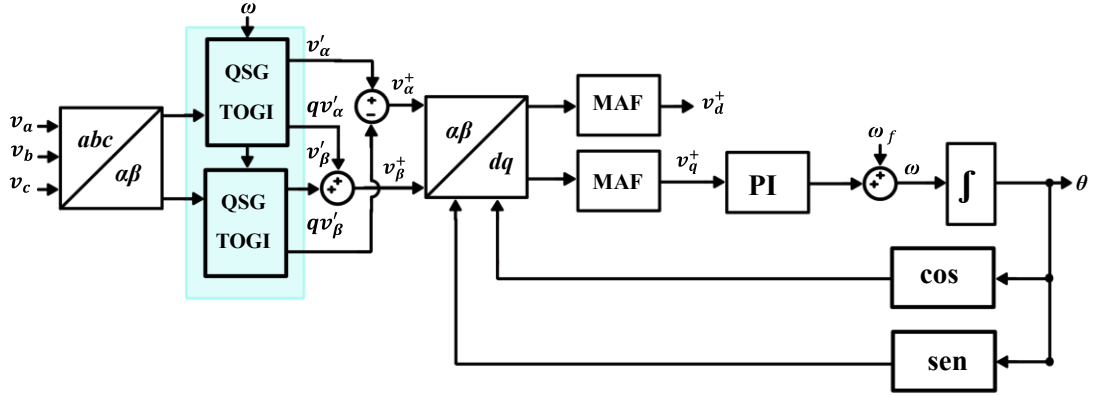


Fig.4 Diagrama de blocos do Double Third Order Generalized Integrator-Moving Average Filter (DTOGI-MAF).

PLL. No entanto, pode oferecer uma atenuação mais eficiente devido à sua função de transferência de terceira ordem, que permite que o DTOGI-PLL seja mais eficaz na redução de ruídos e distúrbios de alta frequência. A Fig. 4 ilustra o diagrama do DTOGI-PLL-MAF que pode ser visto como uma versão aprimorada DTOGI-PLL, tendo capacidade de mitigar completamente os sinais de sequência negativa na frequência fundamental em condições de desequilíbrio de tensão. Adicionalmente, apresenta a capacidade de atenuar harmônicas, conforme demonstrado em [19]. Da mesma maneira que o DSOGI-MAF o DTOGI-MAF usa um filtro MAF nos eixos dq do PLL.

IV. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DFOGI-PLL

A estrutura do *Dual Fourth Order Generalized Integrator* (DFOGI) é apresentada na Fig. 5. Nessa estrutura, o *Fourth Order Generalized Integrator* (FOGI) atua simultaneamente como um QSG e um filtro de rejeição de perturbações. O FOGI gera sinais ortogonais que são utilizados para calcular a fase e a frequência de forma precisa [25]. Na Fig. 5 as variáveis ω , v , v_α e v_β representam a frequência da rede,

tensão de entrada, tensão de saída em fase e em quadratura, respectivamente. Já $G_\alpha(s)$ e $G_\beta(s)$ são as funções de transferências dos sinais em fase e em quadratura, respectivamente, conforme apresentado em (6) e (7). Para que haja equilíbrio entre a capacidade de atenuação e o tempo de resposta, os coeficientes são ajustados para $k_1 = 1,56$ e $k_2 = 3,11$ [25].

$$H_\alpha(s) = \frac{v'_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta}} = \frac{k_1 k_2 \omega^2 s}{s^4 + k_2 \omega s^2 + (2 + k_1 k_2) \omega s^2 + k_2 \omega^2 s + \omega^4} \quad (6)$$

$$H_\beta(s) = \frac{qv'_{\alpha\beta}}{v_{\alpha\beta}} = \frac{k_1 k_2 \omega^3 s}{s^4 + k_2 \omega s^2 + (2 + k_1 k_2) \omega s^2 + k_2 \omega^2 s + \omega^4} \quad (7)$$

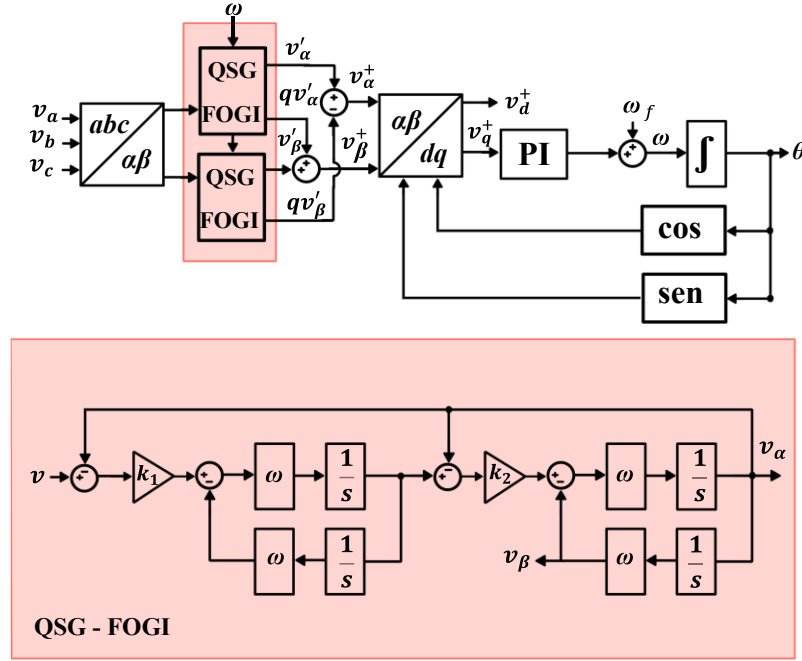


Fig.5. Diagrama de blocos do *Dual Fourth Order Generalized Integrator-Phase-Locked Loop* (DFOGI-PLL).

V. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Nesta seção são discutidos os resultados de simulações usando a plataforma MATLAB/Simulink, as quais foram preparadas para avaliar e comparar o desempenho das técnicas de sincronismo discutidas neste trabalho. O cenário base de simulação considera um sistema em regime permanente com tensão senoidal com amplitude de 180 V e frequência nominal de 60 Hz. Todas as técnicas investigadas utilizam um sistema SRF-PLL, conforme discutido nas seções anteriores. Desta forma, os parâmetros dos controladores do SRF-PLL, para todas as técnicas, foram definidos como $k_p = 30$ e $k_i = 500$, sendo mantidos constantes em todas as condições de teste avaliadas. As simulações foram realizadas considerando os seguintes cenários:

- 1) Afundamento de 90% na amplitude da tensão da fase b , enquanto as outras fases permanecem inalteradas.
- 2) Introdução de 10% de distorção na quinta e na sétima harmônicas, juntamente com um afundamento de tensão trifásico de 90%.
- 3) Introdução de 10% de distorção na quinta, sétima e nona harmônicas, combinada com um curto-circuito monofásico.
- 4) Incremento na frequência da rede, que normalmente opera a 60 Hz, para 65 Hz.

Os resultados de simulação para a primeira condição de teste estão apresentados na Fig. 6. As Fig. 6(a), Fig. 6(b), Fig. 6(c) correspondem, respectivamente, à tensão da rede, à frequência estimada e o sinal de entrada do controlador PI. A simulação é iniciada com as tensões equilibradas. No instante $t = 1$ s é introduzido um afundamento de tensão monofásico de 90% do valor tensão nominal na fase b , tal que a sua amplitude é reduzida para 18 V, essa condição de operação faz com que as tensões se tornem desequilibradas em amplitude

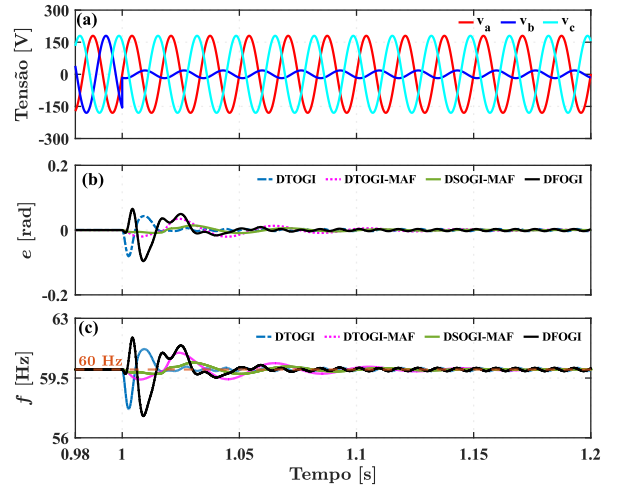


Fig.6. Cenário 1, afundamento de tensão na fase b . (a) Tensões na rede. (b) Sinal de entrada do controlador PI. (c) Frequência estimada pelos PLLs.

[26]. Nota-se que os sinais na entrada dos controladores PI são nulos, exceto durante o transitório relacionado ao início do afundamento. As técnicas DTOGI-PLL e DFOGI-PLL apresentaram um *overshoot* na frequência de 2% e 3,11% respectivamente em relação ao valor nominal, oscilações na frequência de 0,18 Hz, e tempo de acomodação (*settling time*) de 0,02 s e 0,08 s para DTOGI-PLL e DFOGI-PLL respectivamente. Para determinação do tempo de acomodação é considerado uma margem de erro de 2% para todos os PLLs. Em contrapartida, o DSOGI-MAF apresentou um *overshoot* de 0,5%, enquanto o DTOGI-MAF registrou 1,6%. Em relação ao tempo de acomodação, os valores foram 1,12 s para o DSOGI-MAF e 1,19 s para o DTOGI-MAF.

Referente às oscilações observadas nos sinais de frequência, o DSOGI-MAF e DTOGI-MAF apresentaram oscilações nulas. Este comportamento corrobora os dados de literatura, que indicam que o MAF melhora atenuação de ruídos, mas introduz um atraso que afeta a resposta dinâmica [27]. Destaca-se que, à medida que a tensão da rede sofre um afundamento, o fator de amortecimento é reduzido devido à alteração na resposta dos controladores e na dinâmica do sistema. Como consequência, o tempo de acomodação aumenta, resultando em um *overshoot* mais acentuado e oscilações mais intensas.

A Fig. 7(a) exibe as tensões para o segundo cenário analisado. A simulação é iniciada com a tensão da fase c distorcida com 10% na quinta e na sétima harmônicas. No instante $t = 1$ s, é introduzido um afundamento de 90% do seu valor nominal na tensão da fase b. As Fig. 7(b) e Fig. 7(c) mostram sinal de entrada do controlador PI e frequência. Nota-se que, mesmo antes da aplicação do afundamento de tensão as técnicas DTOGI-PLL e DFOGI-PLL produzem oscilações no sinal de entrada do controlador que corresponde a 0,007 rad. Após o afundamento, as oscilações tornam-se mais intensas, atingindo uma amplitude de 1,2 rad para o DTOGI-PLL e 1,5 rad para o DFOGI-PLL, com valores de 0,17 Hz e 0,19 Hz, respectivamente. Em relação às oscilações de frequência estão presentes tanto no DTOGI-PLL quanto no DFOGI-PLL antes do afundamento de tensão, com valores de 0,17 Hz e 0,19 Hz, respectivamente. Após o afundamento, essas oscilações aumentam para 0,35 Hz no DFOGI-PLL e 0,4 Hz no DTOGI-PLL. Já o DSOGI-MAF e DTOGI-MAF apresentam oscilações no sinal de entrada do controlador nulos e oscilações de frequência nulos antes e após o afundamento de tensão. Isso pode ser atribuído ao uso do MAF, que desempenha um papel crucial na atenuação de componentes harmônicas [18]. Em relação ao tempo de estabilização e *overshoot* os valores permaneceram os mesmos do teste anterior para as quatro técnicas estudadas.

A Fig. 8(a) ilustra as tensões para o terceiro cenário estudado. A tensão da fase c já inicia distorcida com 10% na quinta, sétima e nona harmônicas. Da mesma forma que no caso anterior, no instante de 1 s, é introduzido um curto-circuito monofásico na tensão da fase b, na qual a tensão atinge um valor de 0 V. As Fig. 8(b), Fig. 8(c) exibem, respectivamente, sinais na entrada dos controladores PI e a frequência rastreada pelos PLLs. Com base nos resultados observados na Fig. 8(b), e Fig. 8(c) é possível inferir novamente que as técnicas DTOGI-PLL e DFOGI-PLL tendem a exibir valores mais elevados de ultrapassagem percentual durante os distúrbios de afundamentos de tensão. Neste cenário específico, o percentual de ultrapassagem foi de 2,6 % e 4,16 % para o DTOGI-PLL e DFOGI-PLL, respectivamente. Os tempos de acomodação permaneceram inalterados em relação ao teste anterior. No que diz respeito às oscilações de frequência, os valores iniciais antes do distúrbio de curto-circuito foram de 0,2 Hz para ambos os PLLs. Após o distúrbio, as oscilações observadas foram de 0,4 Hz para o DFOGI-PLL e 0,44 Hz para o DTOGI-PLL, respectivamente. Em termos de sinal na entrada do controlador PI ambos os PLLs apresentaram um valor de 0,02 rad antes do distúrbio. Após o distúrbio, os sinais aumentaram, sendo de 1,2 rad para o DTOGI-PLL e 1,6 rad para o DFOGI-PLL. Por outro lado, o DTOGI-PLL registrou uma ultrapassagem de 2,3 %, com um tempo de acomodação de 0,167 s e oscilação na frequência de 0,8 Hz. O DSOGI-MAF e DTOGI-MAF por sua vez,

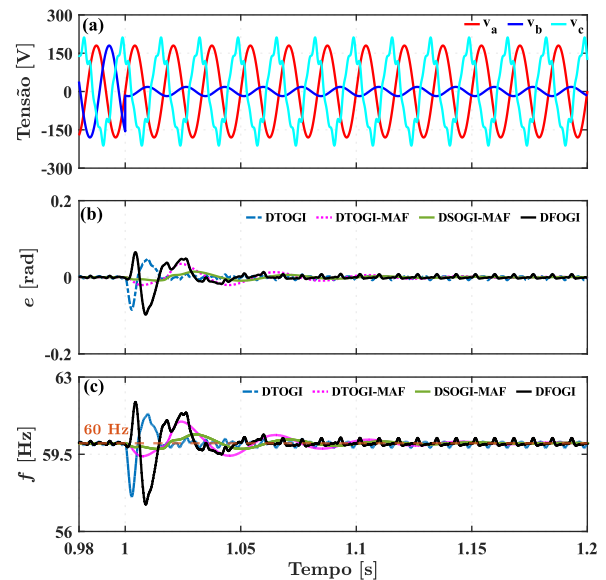


Fig. 7. Cenário 2, distorção harmônica e afundamento de tensão monofásico. (a) Tensões na rede. (b) Sinal de entrada do controlador PI. (c) Frequência estimada pelos PLLs (c).

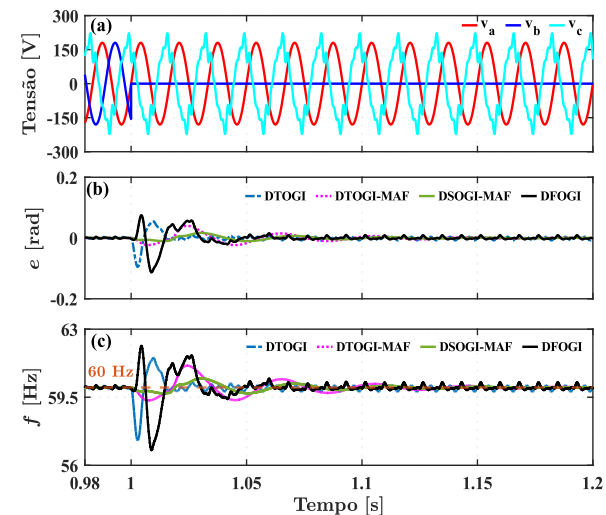


Fig. 8. Cenário 3, distorção harmônica e curto-circuito monofásico. (a) Tensões na rede. (b) Sinal de entrada do controlador PI. (c) Frequência estimada pelos PLLs.

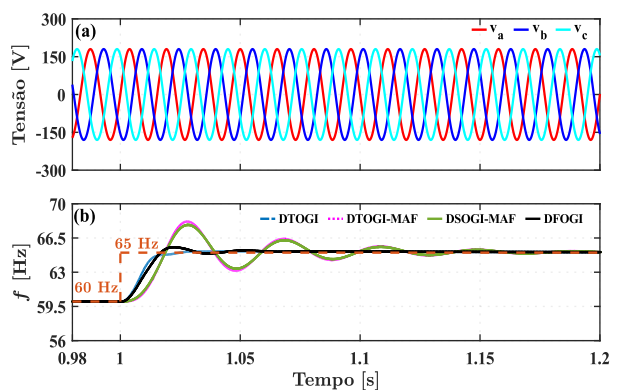


Fig. 9. Cenário 4, incremento na frequência da rede. (a) Tensões na rede. (b) Frequência estimada pelos PLLs.

mostraram consistentemente menores percentuais de ultrapassagem, tempos de acomodação e oscilações de frequências nulas em todos os casos estudados.

A Fig. 9. exibe o resultado dos PLLs quando submetido ao quarto cenário, onde é aplicado um incremento na frequência da rede elétrica, que opera a 60 Hz, e é ajustado para 65 Hz no instante 1 s. É possível observar que, para este cenário, o DTOGI-PLL e o DFOGI-PLL atingiram menores valores de *overshoot*, com 0,2% e 0,8%, respectivamente. Em relação ao tempo de estabilização, o DTOGI-PLL levou 0,1 s e o DFOGI-PLL, 0,14 s. Por outro lado, o DSOGI-MAF e DTOGI-MAF resultaram em maiores valores de *overshoot*, sendo 4,3 % e 4,6 % respectivamente, além de um maior tempo de acomodação, no qual corresponde a 0,15 s para ambas as técnicas. Esse comportamento pode ser explicado pela característica do filtro MAF, no qual possui uma largura de banda estreita em malha aberta, resultando em uma dinâmica mais lenta diante de variações bruscas de fase ou desvios de frequência [27].

A Tabela 1 resume a dinâmica comparativa entre as quatro técnicas em que, M_p representa a ultrapassagem percentual (*overshoot*), enquanto t_s indica o tempo de acomodação do sinal de frequência e Osc indica o valor da oscilação do sinal de frequência em regime permanente.

TABELA I. RESPOSTA DOS PLLs PARA OS 4 CENÁRIOS.

Técnica Analisada	Parâmetros		
	M_p [%]	t_s [%]	Osc [Hz]
Cenário 1			
DTOGI-PLL	2,0	0,02	0,18
DFOGI-PLL	3,10	0,08	0,18
DSOGI-MAF	0,50	0,12	0
DTOGI-MAF	1,60	1,15	0
Cenário 2			
DTOGI-PLL	2,0	0,02	0,35
DFOGI-PLL	3,10	0,08	0,40
DSOGI-MAF	0,50	0,12	0
DTOGI-MAF	1,60	0,15	0
Cenário 3			
DTOGI-PLL	2,60	0,02	0,37
DFOGI-PLL	4,16	0,08	0,42
DSOGI-MAF	0,80	0,14	0
DTOGI-MAF	1,80	0,16	0
Cenário 4			
DTOGI-PLL	0,20	0,02	0
DFOGI-PLL	0,80	0,08	0
DSOGI-MAF	4,30	0,15	0
DTOGI-MAF	4,60	0,15	0

Os dados revelam que as técnicas DSOGI-MAF e DTOGI-MAF têm desempenho superior em comparação ao DTOGI-PLL e DFOGI-PLL, tanto em termos de *overshoot*, tempo de acomodação e oscilação de frequência frente a distúrbios de afundamento de tensão e distorção harmônicas. Por outro lado, as técnicas DSOGI-MAF e DTOGI-MAF apresentaram desempenhos inferiores em comparação ao DTOGI-PLL e DFOGI-PLL nos *overshoots* e tempos de acomodação para o cenário de incremento na frequência da rede elétrica, sugerindo uma maior sensibilidade a alterações na frequência de operação.

Do ponto de vista prático, os resultados evidenciam que a escolha da técnica de PLL deve ser guiada pelo contexto específico de aplicação. Em microrredes, onde afundamentos

de tensão ocorrem frequentemente devido à conexão de cargas monofásicas, partida de motores elétricos e falhas na rede principal, torna-se essencial encontrar um equilíbrio entre tempo de resposta e estabilidade dos sistemas de sincronismo [28]. Para aplicações que exigem sincronização rápida, como inversores formadores de rede operando em modo isolado e conectado [28],[29] os métodos DTOGI-PLL e DFOGI-PLL demonstram maior eficiência, pois oferecem um menor tempo de resposta sem comprometer a precisão da estimação de frequência e fase. Por outro lado, em cenários onde a robustez e a imunidade a oscilações são fatores críticos, como em sistemas compostos por turbinas eólicas conectadas à rede [30], [31], os métodos DSOGI-MAF e DTOGI-MAF se destacam por proporcionar um desempenho mais estável, reduzindo o impacto de perturbações transitórias e distorções harmônicas. Assim, a seleção da técnica de PLL deve considerar o compromisso entre tempo de resposta, robustez e precisão, conforme demonstrado pelos resultados apresentados.

VI. CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou uma análise comparativa de quatro técnicas de PLL usadas para a sincronização de inversores eletrônicos de potência conectados à rede elétrica, considerando condições como desequilíbrios de tensão, distorções harmônicas e variações de frequência. O desempenho das técnicas foi avaliado com base na precisão da estimativa de fase e frequência, bem como na resposta a incrementos de frequência, afundamentos de tensão e componentes harmônicas. Os resultados demonstraram que as técnicas DFOGI-PLL e DTOGI-PLL apresentam menor tempo de estabilização, porém com maiores oscilações de frequência e *overshoot*, o que pode comprometer a precisão da sincronização em determinadas condições. Por outro lado, as técnicas DSOGI-MAF e DTOGI-MAF se destacaram pela robustez, oferecendo melhor desempenho em termos de oscilações de frequência e *overshoot*, especialmente em condições com afundamentos de tensão e distorção harmônica. No entanto, essas técnicas mostraram limitações quando submetido a variações de frequência, apresentando maior *overshoot* e tempo de acomodação. Como continuidade, pretende-se realizar a implementação experimental dos modelos em testes de bancada para validar os resultados em condições reais de operação.

ACKNOWLEDGMENT

Este trabalho foi financiado pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) sob o processo 2022/15423-3, pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) sob os processos 309297/2021-4, 441715/2023-0 e 141095/2024-5, pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso (FAPEMAT) sob o processo 2022/01047 e pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) com o código de financiamento 001.

REFERENCES

- [1] D. Rabie, T. Senjyu, S. Alkhalaf, Y. S. Mohamed, and E. Shehata, "Study and analysis of voltage source converter control stability for HVDC system using different control techniques," in *Ain Shams Engineering Journal*, vol. 12, no. 3, pp. 2763–2779, 2021. doi: <https://doi.org/10.1016/j.asej.2020.12.013>
- [2] The Paris Agreement, *Paris France*, September 2017, [online] Available: unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement.

- [3] Qudaih, Z. Bektas, D. Guven, G. Kayakutlu and M. Ö. Kayalica, "Technology Assessment of Hydrogen Storage: Cases Enabling the Clean Energy Transition," in *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 71, pp. 5744-5756, 2024. doi: 10.1109/TEM.2024.3366973.
- [4] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre and A. V. Timbus, "Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398-1409, Oct. 2006. doi: 10.1109/TIE.2006.881997.
- [5] S. Golestan, J. M. Guerrero, e J. C. Vasquez, "Single-Phase PLLs: A Review of Recent Advances," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 12, pp. 9013-9029, Dec. 2017. doi: 10.1109/TPEL.2017.2653861.
- [6] S. Gautam, W. Xiao, H. Ahmed and D. D. C. Lu, "Enhanced single-phase phase locked loop based on complex -coefficient filter", in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-8, 2022. doi: 10.1109/TIM.2022.3147891.
- [7] M. Rasheduzzaman and J. W. Kimball, "Modeling and tuning of an improved delayed signal cancellation PLL for microgrid application," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 34, no. 2, pp. 712–721, June 2019. doi:10.1109/TEC.2018.2880610.
- [8] F. D. Freijedo, J. Doval Gandoy, Ó. López, and E. Acha, "Tuning of phase-locked loops for power converters under distorted utility conditions," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 45, no. 6, pp. 2039–2046, Nov./Dec. 2009. doi: 10.1109/TIA.2009.2031790.
- [9] F. Lino, J. Assis, D. A. Fernandes, R. Jacomini, F. F. Costa and A. J. S. Filho "One cycle fourier finite position set PLL". in *Energies*, vol. 14 no. 7, pp. 1824, 2021. <https://doi.org/10.3390/en14071824>.
- [10] X.-Q. Guo, W.-Y. Wu, and H.-R. Gu, "Phase locked loop and synchronization methods for grid-interfaced converters: a review," in *Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review)*, vol. 87, no. 4, pp. 185–187, 2011.
- [11] A. Luna, C. Citro, C. Gavriluta, J. Hermoso, I. Candela, and P. Rodriguez, "Advanced PLL structures for grid synchronization in distributed generation," in *Renewable Energies & Power Quality Journal*, vol. 10, no. 13, pp. 1–10, 2010. <https://doi.org/10.24084/repqj10.826>.
- [12] A. Luna, J. Rocabert, I. Candela, P. Rodriguez, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Advanced structures for grid synchronization of power converters in distributed generation applications," 2012 *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, Raleigh, NC, USA, 2012, pp. 2769–2776. doi: 10.1109/ECCE.2012.6342381.
- [13] N. G. Rodriguez, A. B. Rey-Boué, and A. Rigas and V. Kleftakis, "Review of synchronization algorithms used in grid-connected renewable agents," in *Renewable Energies & Power Quality Journal*, vol. 12, no. 2, 2014. <https://doi.org/10.24084/repqj12.300>.
- [14] N. F. Guerrero-Rodríguez, A. B. Rey-Boué, E. J. Bueno, O. Ortiz, and E. Reyes-Archundia, "Synchronization algorithms for grid-connected renewable systems: Overview, tests and comparative analysis," in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 75, pp. 629-643, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.11.038>.
- [15] S. Golestan, J. M. Guerrero and J. C. Vasquez, "Three-Phase PLLs: A Review of Recent Advances," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 3, pp. 1894-1907, March 2017. doi: 10.1109/TPEL.2016.2565642.
- [16] Z. Wang, P. Fu, L. Huang, X. Chen, S. He, X. Zhang, and J. Yang, "Performance improvement of a three-phase PLL under distorted grid conditions based on frequency adaptive hybrid pre-filtering," in *IET Power Electron*, vol. 14, pp. 1429-1440, 2022. doi: 10.1049/pel2.12314.
- [17] J. Pinto, A. Carvalho, A. Rocha, and A. Araújo, "Comparison of DSOGI-Based PLL for Phase Estimation in Three-Phase Weak Grids," in *Electricity*, vol. 2, no. 3, pp. 244-270, 2021. 10.3390/electricity2030015.
- [18] B. Tripathy, B. Misra, and B. Nayak, "Performance Analysis of Dual Third Order Generalized Integrator based Phase Locked Loop for Three Phase Distorted Grid Condition," 2022 *1st IEEE International Conference on Industrial Electronics: Developments & Applications (ICIDEA)*, Bhubaneswar, India, 2022, pp. 135-140. doi: 10.1109/ICIDEA53933.2022.9970148.
- [19] F. Sevilimis and H. Karaca, "An advanced hybrid pre-filtering/in-loop-filtering based PLL under adverse grid conditions," in *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 24, no. 5, pp. 1144–1152, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2021.02.011>.
- [20] F. Sevilimis and H. Karaca, "Performance enhancement of DSOGI-PLL with a simple approach in grid-connected applications," in *Energy Reports*, vol. 8, no. 1, pp. 9-18, Apr. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.11.186>.
- [21] P. Shah, I. Hussain and B. Singh, "A Novel Fourth Order Generalized Integrator Based Control Scheme for Multifunctional SECS in the Distribution System," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 3, pp. 949-958, Sept. 2018. doi: 10.1109/TEC.2018.2806191.
- [22] P. Rodríguez, R. Teodorescu, I. Candela, A. V. Timbus, M. Liserre, and F. Blaabjerg, "New-positive-sequence voltage detector for grid synchronization of power converters under faulty grid conditions," in 2006 *37th IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Jeju, Korea (South), 2006, pp. 1–7. doi: 10.1109/pesc.2006.1712059.
- [23] P. Rodriguez, A. Luna, M. Ciobotaru, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Advanced Grid Synchronization System for Power Converters under Unbalanced and Distorted Operating Conditions," in *IECON 2006 - 32nd Annual Conference on IEEE Industrial Electronics*, Paris, France, 2006, pp. 5173-5178. doi: 10.1109/IECON.2006.347807.
- [24] W. Li, X. Ruan, C. Bao, D. Pan, and X. Wang, "Grid synchronization systems of three-phase grid-connected power converters: A complex vector filter perspective," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 61, no. 4, pp. 1855–1870, April 2014. doi: 10.1109/TIE.2013.2262762.
- [25] P. Shah, I. Hussain, and B. Singh, "A Novel Fourth Order Generalized Integrator Based Control Scheme for Multifunctional SECS in the Distribution System," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 33, no. 3, pp. 949-958, Sept. 2018. doi: 10.1109/TEC.2018.2806191.
- [26] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodriguez, "Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems," John Wiley & Sons, New York, 2011.
- [27] J. Wang, J. Liang, F. Gao, L. Zhang, and Z. Wang, "A Method to Improve the Dynamic Performance of Moving Average Filter Based PLL," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 10, pp. 5978-5978, Oct. 2015. doi: 10.1109/TPEL.2014.2381673.
- [28] K. S. Raja Sekhar, M. A. Chaudhari, and R. Kumar, "Impact of PLL and non-PLL vector current control techniques on grid connected inverter," in *Electric Power Systems Research*, vol. 235, pp. 110501, Oct. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110501>.
- [29] P. F. Silva, C. F. Nascimento, A. F. Q. Goncalves, A. F. Silva, A. J. Sguarezi Filho, and O. Diene, "Neutral Current's Effect on Four-Wire Voltage Source Converter Control Systems," 2021 *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, João Pessoa, Brazil, 2021, pp. 1–6. doi: 10.1109/COBEP53665.2021.9684081.
- [30] A. S. Mäkinen and H. Tuusa, "Analysis, comparison and performance evaluation of wind turbine grid synchronizing methods," *Eurocon 2013*, Zagreb, Croatia, 2013, pp. 1108-1115, doi: 10.1109/EUROCON.2013.6625119.
- [31] K. S. Raja Sekhar, M. A. Chaudhari, and R. Kumar, "Impact of PLL and non-PLL vector current control techniques on grid connected inverter," in *Electric Power Systems Research*, vol. 235, pp. 110501, Oct. 2024. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110501>.