

ANÁLISE DE UTILIZAÇÃO DO CONTROLE POR INCLINAÇÃO PARA INVERSORES FOTOVOLTAICOS EM PARALELO COM A REDE ELÉTRICA MONOFÁSICA

Fábio E. Bisogno, E. P. Bastos e M. de Miranda

Grupo de Eletrônica de Potência e Controle - GEPOC

Universidade Federal de Santa Maria - UFSM Santa Maria, RS, Brasil

Email: fbisogno@gepoc.ufsm.br, doprado84@gmail.com e maicondemiranda@hotmail.com

Resumo - Neste artigo é apresentado o cenário recente, da quantidade de geradores de energia solar instalados no estado do Rio Grande do Sul, tendo como principal objetivo analisar um caso real envolvendo dois inversores de energia fotovoltaicos. Estes, por sua vez, possuem potências diferentes, estando interligados em uma rede elétrica monofásica. Com os dados amostrais coletados in loco e através de análise em fontes ininterruptas, propõem-se um circuito equivalente com n inversores, baseando-se no princípio de funcionamento de máquinas síncronas. Para isso, se utiliza do método de controle por inclinação com simulação em um software específico.

Palavras Chaves – Controle por inclinação, Fontes ininterruptas, Inversores de energia fotovoltaicos.

I. INTRODUÇÃO

O Sistema Elétrico de Potência engloba os processos de geração, transmissão, distribuição e consumo de energia elétrica, neste contexto o sistema nacional é subdividido em Geração Centralizada (GC) e Geração Distribuída (GD) [1]. Dados da Agência Nacional de Energia Elétrica-ANEEL indicam que o Estado do Rio Grande do Sul (RS), no início do mês de outubro de 2020 possuía 41.820 unidades geradoras de energia solar fotovoltaicas, em 493 municípios e um total de 474.069 kW instalados. Este crescimento sofreu um significativo aumento a partir do ano de 2019, sendo descrito na Tabela I [2].

Tabela I

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS INSTALADOS NO RIO GRANDE DO SUL

Ano	Unidades Instaladas
2013	1
2014	28
2015	125
2016	641
2017	2.086
2018	4.312

2019	15.068
out./20	19.587

Dentro das fronteiras legais deste estado estão estabelecidas sete concessionárias de energia e dezesseis permissionárias [3]. Neste cenário, foram criados Regulamentos de Instalações Consumidoras (RICs), que são documentos padronizados para garantir boas práticas no fornecimento de energia elétrica. Estas regras são regidas pelo Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional [4]. No entanto, ao adaptar seus RICs de Baixa Tensão, as concessionárias de energia podem interpretar e cobrar de forma diferente o protocolo de acesso para instalação de sistemas de energia solar.

A Orientação Técnica de Distribuição da Federação das Cooperativas de Energia, Telefonia e Desenvolvimento do Rio Grande do Sul, por exemplo, traz no item 7.1.5 a indicação que as potências instaladas de inversores de energia solar devem ser idênticas, não sendo permitida a conexão de inversores de potências diferentes no mesmo circuito monofásico [5]. Neste caso, o intuito do trabalho é analisar o comportamento de dois inversores de potências diferentes, em um circuito monofásico, para primeiramente entender o comportamento do sistema e averiguar o porquê da restrição imposta e em seguida obter a análise do controle por inclinação. Uma hipótese é que as potências diferentes podem causar fenômenos eletromagnéticos como: variação de tensão; transitórios; e distorção no formato da onda senoidal [4], [6], [7].

Levando em consideração a falta de estudos que abordem especificamente este assunto, foram feitas revisões bibliográficas em trabalhos que utilizam como tema fontes ininterruptas denominadas Uninterruptible Power Supplies (UPS) [8], [9], [29], [30], [31], para propor a simulação de um circuito equivalente com n inversores [22], [23], [24], [25], [32], [33].

II. ESTUDO DE CASO

O estudo envolveu dois inversores fotovoltaicos conectados em paralelo em uma rede elétrica monofásica.

Durante um certo período de tempo foram coletadas amostras in loco, que foram armazenadas na Plataforma SMTEN para análises posteriores [11], [12], [13]. No entanto, originalmente, o sistema está instalado em uma rede bifásica descrita pela concessionária local como consumidor do grupo B Rural, ocupando as duas fases do padrão de energia.



Figura 1: Inversores Solar Fotovoltaicos, da esquerda para direita, CSI-3K-MTL e CSI-5K-MTL, in loco.

A Tabela II indica os parâmetros dos inversores citados.

Tabela II

DADOS DOS INVERSORES SOLAR FOTOVOLTAICO

Parâmetros dos Inversores	inversor 2 mod. CSI-5K-MTL	inversor 2 mod. CSI-3K-MTL
Max. potência de saída AC	5000 W	3000 W
Max. Corrente de saída	22,7 A	14,3 A
Voltagem nominal AC	220 VAC	220 VAC
Frequência da rede AC	60 Hz	60 Hz

Estes equipamentos recebem nos terminais AC, a tensão do ponto de conexão fornecido pela concessionária de energia, que por sua vez devem estar condizentes com os parâmetros fornecidos pela ANEEL [1]. Outro dado importante, é que o limite de operação não pode ser menor que 80% e maior que 110% da tensão nominal, segundo a ABNT NBR 16149/2013 [16].

A análise, na Figura 2, demonstra que as tensões AC ultrapassam a tensão limite de rede da concessionária de

energia [1]. Uma hipótese para este fenômeno, que justificaria o intuito inicial do trabalho, pode ser relacionada à performance do sistema. Quando a geração é maior que o consumo, a corrente elétrica pode fazer o sentido inverso devido ao fluxo de energia injetado na rede elétrica pelo inversor. Sendo assim, a tensão no ponto de conexão dos inversores tende a sofrer uma elevação em relação à tensão de fornecimento pela concessionária. Este efeito tende a piorar quanto a distância do ponto de conexão e a entrada de energia da concessionária for aumentado [14].

Outro dado relevante que podemos verificar na Figura 2 é a disparidade de tensão entre os equipamentos, este efeito pode causar problemas aos equipamentos elétricos das imediações e dependendo do caso afetar outras unidades consumidoras que estão na mesma rede de distribuição [15], [16]. Para mitigar esta disparidade entre os inversores de energia solar de potências diferentes, verificou-se na literatura um método que atendesse o propósito.

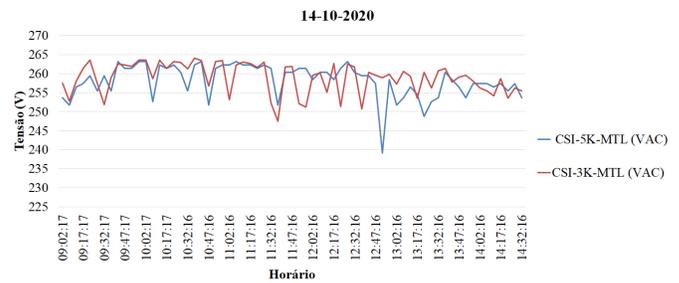


Figura 2: Dados de tensão AC dos inversores de energia solar em relação ao horário que a informação foi analisada pela Plataforma SMTEN.

Proposta para método de controle

O método utilizado para o estudo está baseado no princípio de funcionamento das máquinas síncronas, sendo denominado de controle por inclinação. Os inversores são controlados pelas curvas de potência ativa, frequência angular da tensão de saída, além de potência reativa e amplitude da tensão na saída.

Sendo assim, se mantém a premissa de que, com variáveis locais de corrente e tensão de saída [17], se obtém confiabilidade no sistema em paralelo.

A. Fluxo de potência entre fonte de tensão e barramento

A análise de operação do controle pode ser identificada através do fluxo de potência entre uma fase δ_1 e uma tensão de amplitude E_{o1} , utilizando um barramento infinito com impedância de linha de ângulo δ_{L1} e módulo Z_{L1} .

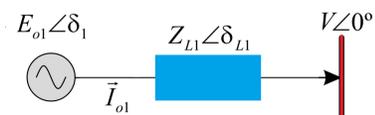


Figura 3: Equivalente ao circuito básico.

Neste caso o ponto de conexão entre a rede elétrica da concessionária de energia e a fonte de tensão é representado por um barramento com ângulo de fase zero ($V \angle 0$) e uma seta que identifica o sentido do fluxo de potência [18].

Na forma retangular, a impedância complexa será expressa por uma parte resistiva real e uma parte reativa imaginária.

$$Z = R + jX \quad (1)$$

Sendo representada também na forma exponencial, polar e trigonométrica. Esta análise se dá em virtude de sua utilização em sistemas de energia onde é usual o uso do valor eficaz [19].

$$Z = |Z|e^{j\delta} = |Z|\angle\delta = |Z|(\cos\delta + j\sin\delta) \quad (2)$$

A potência aparente de saída (S_o) é a relação vetorial entre a potência ativa (P_o) e a potência reativa (Q_o).

$$S_o = P_o + jQ_o \quad (3)$$

Então, a fonte de tensão, por sua vez, possui uma potência aparente que pode ser calculada através da multiplicação entre o conjugado da corrente e a tensão.

$$S_{o1} = E_{o1}I_{o1} \quad (4)$$

$$E_{o1}I_{o1} = E_{o1}\angle\delta_1(E_{o1}\angle\delta_1 - V\angle 0 \div R_{L1} \pm jX_{L1}) \quad (5)$$

Isolando a potência ativa e reativa fornecida pela fonte de tensão, simplificando também a equação (5), obtemos as equações abaixo descritas.

$$P_{o1} = (1 \div (R_{L1}^2 + X_{L1}^2))(R_{L1}E_{o1}^2 - R_{L1}E_{o1}V\cos(\delta_1) + X_{L1}E_{o1}V\sin(\delta_1)) \quad (6)$$

$$Q_{o1} = (1 \div (R_{L1}^2 + X_{L1}^2))(X_{L1}E_{o1}^2 - X_{L1}E_{o1}V\cos(\delta_1) - R_{L1}E_{o1}V\sin(\delta_1)) \quad (7)$$

Com a variação do ângulo de fase δ_1 , se obtém as simplificações $\sin(\delta_1) \sim \delta_1$ e $\cos(\delta_1) \sim 1$, com isso elas podem ser reescritas conforme as equações (8) e (9). Neste caso, a potências ativa e potência reativa, fornecidas pela fonte de tensão, dependem da relação de linha $X_{L1} \div R_{L1}$, [20].

$$P_{o1} = (R_{L1}E_{o1}^2 - R_{L1}E_{o1}V + X_{L1}E_{o1}V\delta_1) \div (R_{L1}^2 + X_{L1}^2) \quad (8)$$

$$Q_{o1} = (X_{L1}E_{o1}^2 - X_{L1}E_{o1}V - R_{L1}E_{o1}V\delta_1) \div (R_{L1}^2 + X_{L1}^2) \quad (9)$$

B. Indução de linha

Por se tratar de uma análise em rede de baixa tensão, a impedância de linha é de predominância resistiva [21], neste caso desprezando a parte reativa da impedância de saída, equações (8) e (9), podem ser obtidas as equações (10) e (11).

$$P_{o1} = (E_{o1}(E_{o1} - V) \div R_{L1}) \quad (10)$$

$$Q_{o1} = (-E_{o1}V \div R_{L1})\delta_1 \quad (11)$$

Sendo assim, o controle por inclinação resistiva pode ser implementado.

$$E_{o1} = E_{ref} - n_1 P_{o1} \quad (12)$$

$$\omega_1 = \omega_{ref} + m_1 Q_{o1} \quad (13)$$

A potência reativa é proporcional à diferença de fase δ_1 , além de que, a potência ativa é proporcional à diferença de amplitude entre o barramento AC e a tensão da fonte.

Gerando a Figura 4, que demonstra curvas resistivas do controle por inclinação.

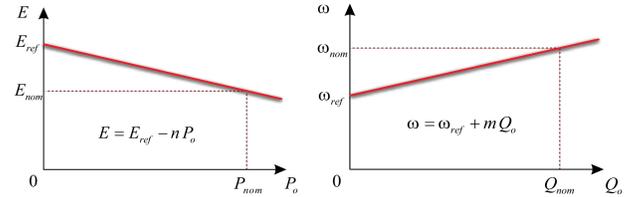


Figura 4: curvas do controle por inclinação resistiva.

C. Proposta de Análise

Será verificado um circuito equivalente, onde 2 inversores operam com controle de inclinação. Similar a análise em máquinas síncronas com conexão a um barramento infinito, onde a estabilidade se mantém em condições normais e com pequenas oscilações de operação.

As características resistivas em dois inversores em paralelo com carga e as impedâncias são denominadas de cargas Z, conforme ilustrado na Figura 5. No entanto cabe ressaltar que a análise pode ser feita em n inversores [26], [27].

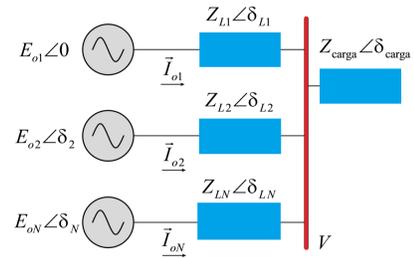


Figura 5: Fontes conectadas ao barramento infinito.

A Figura 6 demonstra, de forma sucinta, o circuito simulado no software LTSpice.

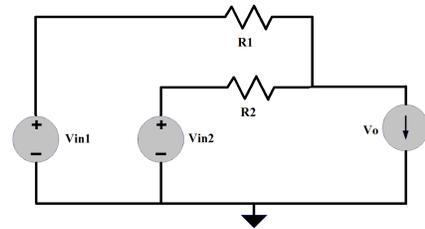


Figura 6: Circuito de potência equivalente

Sendo que os valores indicados em $R1 = 6$ e $R1 = 10$ são simulados como resistências físicas, mas que futuramente podem ser referenciados como impedâncias virtuais com características resistivas.

A fonte de corrente representa a carga Z , neste caso foram utilizados os valores da tensão de saída V_o , divididas pelos valores das resistências que foram encontradas nas amostras coletadas em campo, Figuras 2 e 7.

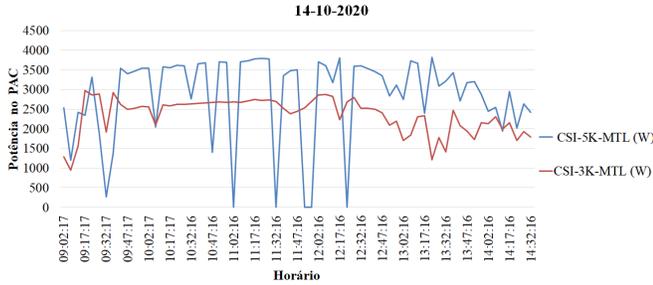


Figura 7: Potências em relação aos horários que as informações foram analisadas.

As fontes de tensão $V_{in 1}$ e $V_{in 2}$ simulam os dois inversores, neste ponto teremos a ação do controle por inclinação individualizada. Em cada um dos casos, foram aplicados dois filtros passa-baixa que utilizam das equações descritas em (12), (13).

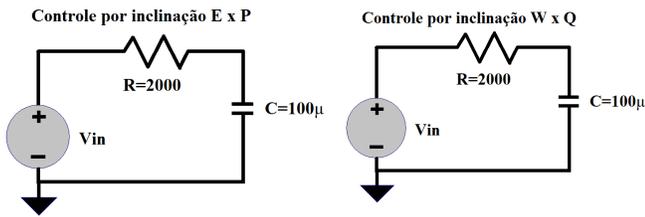


Figura 8: Filtros passa-baixa utilizados para simular o controle por inclinação.

Devido a oscilações bruscas no sistema de energia solar, as simulações do capítulo III usam como referência o horário das 12 horas e 32 minutos e seguindo com as próximas 7 amostras consecutivas. Para efeito de redução do tempo, os valores em segundos foram divididos por 1000, este ajuste só pode ser feito pois, como já mencionado, o método de controle por inclinação não apresenta transitórios bruscos [27].

III. SIMULAÇÃO E RESULTADOS

A simulação demonstrada na Figura 9 indica uma variação de potência de 1.669,6 W entre o maior e o menor valor de potência. O período desta variação não apresentou transitórios de tensão elevados e a taxa de amostragem ficou no limite de 5%, predefinido para a simulação [1]. Se analisarmos a Figura 2 veremos uma elevada tensão, esta verificação pode ser confrontada com a Figura 7, que demonstra uma significativa melhora nesse quesito.

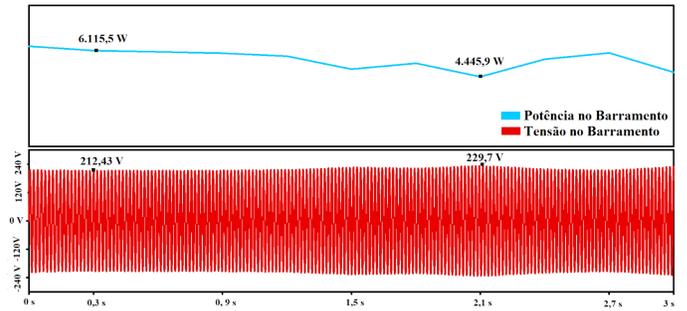


Figura 9: Dados de potência e tensão durante o período de análise.

As correntes, por sua vez, estão dentro dos limites considerados como máximo valor estipulado pelo fabricante [11], Tabela II.

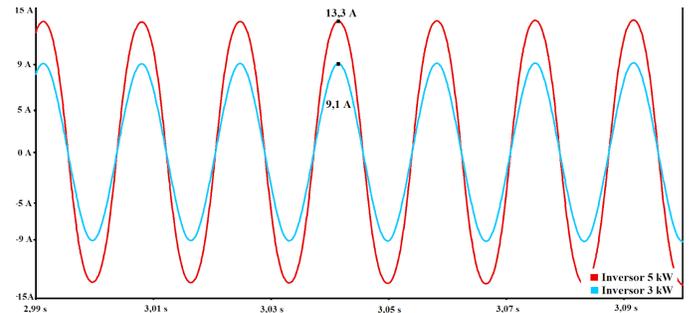


Figura 10: Correntes máximas no barramento AC durante o período de análise.

Também foram simuladas perturbações no teto mínimo e máximo de potência. Os resultados indicam que um sistema produzindo em sua capacidade máxima mantém a tensão em torno de 187 V, não estando no limite de 5% estipulado para a simulação mas dentro do padrão ABNT NBR 16149/2013 [14]. No entanto, potências muito baixas não trazem uma boa convergência ao sistema, sendo necessário estudos futuros para adequação.

Para finalizar, podemos notar uma distribuição de potência mais uniforme do controle por inclinação, em relação ao caso real. Usando para este fim, um cruzamento entre a simulação no LT Spice e os dados coletados in loco.

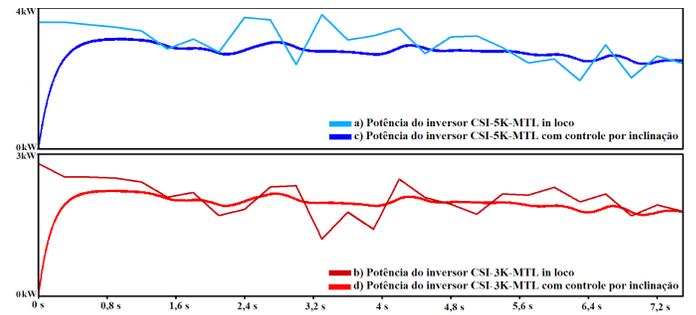


Figura 12: a) Potência do inversor CSI-5K-MTL in loco, b) Potência do inversor CSI-3K-MTL in loco, c) Potência do inversor CSI-5K-MTL com controle por inclinação, d) Potência do inversor CSI-3K-MTL com controle por inclinação.

IV. CONCLUSÃO

Em campo, a realidade das instalações dos geradores de energia solar traz consigo muitos desafios. O trabalho proposto analisa os dados amostrais coletados em uma rede monofásica, onde em paralelo estão acoplados dois inversores fotovoltaicos com potências diferentes e tensão de fase 220 V. A análise indica uma distribuição de potência mais uniforme e uma melhor estabilidade de tensão no sistema, quando utilizado o controle por inclinação. Contudo, esta estrutura de controle pode auxiliar em futuros trabalhos acadêmicos, referentes a inversores fotovoltaicos em paralelo a rede elétrica monofásica.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001 e com o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ), também a Empresa Agro Comercial AFUBRA pelo apoio técnico na coleta dos dados pertinentes ao trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - PRODIST: Módulo 8, rev. 10 - Qualidade da Energia Elétrica", Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2018.
- [2] ANEEL, "Sistema de Informação de Geração da ANEEL-SIGA", Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020.
- [3] Atlas Socioeconômico do Estado do Rio Grande do Sul, "Distribuição de Energia Elétrica", Brasília: Estado do Rio Grande do Sul, 2020.
- [4] ANEEL, "Procedimento de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional -PRODIST", Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2017.
- [5] FECOERGS, "Orientação Técnica de Distribuição", p. 16, 2019.
- [6] P. H. O. Rezende, "Efeitos do desequilíbrio de tensões de suprimentos nos motores de indução trifásico", Revista Horizonte Científico, vol. 6, 2012.
- [7] IEEE, "IEEE 1159-2009: Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality", 2009.
- [8] IEC61000-2-2, "Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-2: Environment Compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems". 2002.
- [9] CHEN, J., "Stability analysis and parameters optimization of islanded microgrid with both ideal and dynamic constant power loads". IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 65, n. 4, p. 3263-3274, 2018.
- [10] FECOERGS, "Regulamento de Instalações Consumidoras, Fornecimento em Baixa Tensão", p. 23-66, 2020.
- [11] CANADIAN SOLAR, "Configuração do Monitoramento Inversores Monofásicos 1.5k - 3k - 5k Plataforma SMTEN", p. 3-5, 2019.
- [12] G. R. Walker, P. C. Sernia, "Cascaded DC - DC Converter Connection of Photovoltaic Modules", IEEE Trans. on Power Electron., vol. 19, p. 1130-1139, 2004.
- [13] L. V. Bellinaso, C. Rech, L. Michels, "Methodology for Product Design of Photovoltaic Inverter", IEEE International Symposium on Industrial Electronics, p. 550-555, 2010.
- [14] ABNT NBR 5410, "Instalações elétricas de baixa tensão", 2004
- [15] P. Alves, R. M. de Azevedo, L.N. Canha, J. L. Paixão, "Minimization of the Impacts Caused by Distributed Generation to the Electric System by Exploring the Reactive Control Range of Solar Inverters", IEEE Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos 2018 (SBSE), 2018.
- [16] ABNT NBR 16149. "Sistemas fotovoltaicos (FV) - Características de interface de conexão com a rede elétrica de distribuição". Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- [17] J. C. Vasquez, R. A. Mastromauro, J. M. Guerrero, and M. Liserre, "Voltage support provided by a droop-controlled multifunctional inverter," IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 56, no. 11, pp. 4510-4519, Nov. 2009.
- [18] E. P. de Paiva, J. B. Vieira, Jr., L. C. de Freitas, V. J. Farias, and E. A. A. Coelho, "Small signal analysis applied to a single phase inverter connected to stiff AC system using a novel improved power controller," in Proc. 20th Annu. IEEE APEC, Jun. 2005, vol. 2, pp. 1099-1104.
- [19] M. Sadiku, C. K. Alexander, "Fundamentals of Electric Circuits", 5th Edition, 2013.
- [20] H. I. Avelar, W.A. Parreira, J. B. Vieira, L. G. Freitas, E. A. Alves Coelho, "A State Equation Model of a Single-Phase Grid-Connected Inverter Using a Droop Control Scheme With Extra Phase Shift Control Action," IEEE Trans. Ind Electron., vol. 59, no.3, p.1527-1537, March 2012.
- [21] J. M. Guerrero, L. Hang, J. Uceda, "Control of Distributed Uninterruptible Power Supply Systems", IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 55, n. 8, p. 2845 - 2859, 2008.
- [22] M. Zhang, B. Song, J. Wang, "Circulating Current Control Strategy Based On Equivalent Feeder for Parallel Inverters in Islanded Microgrid" IEEE Transactions on Power Systems, v. 34, n. 1, p. 595-605, 2019.
- [23] B. Wei et al. DAVIC "A New Distributed Adaptive Virtual Impedance Control for Parallel-Connected Voltage Source Inverters in Modular UPS System", IEEE Transactions on Power Electronics, v. 34, n. 6, p. 5953-5968, 2019.
- [24] O. Kulkarni, S. Doolla, B. G. Fernandes, "Simple Controller Configuration for Decentralized Parallel Operation of Inverters", IEEE Transactions on Power Electronics, v. 34, n. 2, p. 1356-1369, 2019.
- [25] S. Guo, D. Liu, "Analysis and design of output LC filter system for dynamic voltage restorer", Conference Proceedings - IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, p. 1599-1605, 2011.
- [26] E. A. Coelho, P. C. Cortizo, P. F. Garcia, "Small-signal stability for parallel-connected inverters in stand-alone ac supply systems", IEEE Transactions on Industry Applications, v. 38, n. 2, p. 533-542, 2002.
- [27] P. S. Kundur, "Power system dynamics and stability", 3 Edição, 2017.
- [28] A. Woyte, V. Van Thong, R. Belmans, "Voltage fluctuations on distribution level introduced by photovoltaic systems", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 1, pp. 202-209, March 2006.
- [29] KIM, E.-H., KWON, J.-M., KWON, B.-H. "Transformerless three-phase on-line ups with high performance", IET Power Electronics, v. 2, n. 2, p. 100-112, 2009.
- [30] BRANCO, C. G. C. et al. "Proposal of three-phase high frequency transformer isolation ups topologies for distributed generation applications", IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 60, n. 4, p. 1500-1530, 2013.
- [31] PASCUAL, M. et al. "Robust model-following control of parallel ups single-phase inverters". IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 55, n. 8, p. 2860-2880, 2008.
- [32] VENTURINI, BISOGNO. "Estrutura de controle hierárquico para o paralelismo de ups de dupla conversão com equalização das temperaturas dos capacitores dos barramentos cc. Eletrônica de Potência" - SOBRAEP, v. 23, n. 4, p. 442-453, 2018.
- [33] Wu Tsai-Fu, CHEN, Y. K. "3C strategy for inverters in parallel operation achieving an equal current distribution", IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 47, n. 2, p. 273-281, 2000.