

INVERSORES MULTIFUNCIONAIS PARA REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES: INJEÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA NO PONTO DE ACOPLAMENTO COMUM COM CONTROLE PREDITIVO



<https://doi.org/10.22533/at.ed.411142514019>

Data de aceite: 31/01/2025

Rafael dos Santos

Prof. Dr., UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Departamento de Engenharia de Controle e Automação

Igor César Moreira Bernardes

Graduando em Engenharia de Controle e Automação, UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Departamento de Engenharia de Controle e Automação

Leonardo Maier

Graduando em Engenharia de Controle e Automação, UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Departamento de Engenharia de Controle e Automação

Thiago Daniel Leptokarydis

Graduando em Engenharia de Controle e Automação, UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia de Sorocaba, Departamento de Engenharia de Controle e Automação

RESUMO: Cidades inteligentes adotam tecnologias inovadoras para promover eficiência energética e sustentabilidade, incluindo a adoção de redes elétricas inteligentes. Os inversores multifuncionais são fundamentais nesse cenário, permitindo a integração de fontes renováveis e

melhorando a qualidade da energia elétrica através da execução de serviços ancilares. Para assegurar a qualidade e estabilidade da rede elétrica inteligente, é crucial cumprir objetivos de controle, como a regulação de tensão no Ponto de Acoplamento Comum (PAC). No geral, o atendimento desse objetivo se baseia na injeção controlada de potência ativa e reativa no PAC por parte do inversor multifuncional. Este trabalho explora, por meio de simulações computacionais, o controle preditivo baseado em modelo de estados finitos (FCS-MPC) para alcançar esse objetivo. As simulações realizadas mostram que o FCS-MPC permite um rastreamento efetivo dos termos de potência ativa e reativa definidas pela central de controle local, mantendo a operação do inversor dentro de sua capacidade máxima.

PALAVRAS-CHAVE: *Smart Grids*; Controle Preditivo; Energia renovável; Eletrônica de Potência;

INTRODUÇÃO

As cidades inteligentes e sustentáveis integram tecnologias inovadoras e engenharia verde para promover eficiência, redução da emissão

de poluentes e maior uso de fontes de energia renováveis. Por outro lado, as redes elétricas inteligentes podem fornecer energia de forma confiável e eficiente, preservando as características de sustentabilidade, economia e segurança (KHALID, 2024). Nesse cenário, os inversores multifuncionais atuam como dispositivos-chave, fornecendo funcionalidades avançadas para o controle e a regulação da energia elétrica, contribuindo para a eficiência, confiabilidade e sustentabilidade das redes elétricas inteligentes. Os Inversores multifuncionais são dispositivos eletrônicos que desempenham várias funções além da simples conversão de corrente contínua (CC) em corrente alternada (CA). Esses inversores são projetados para também atuarem na melhoria da qualidade da energia elétrica, permitindo a injeção de potência ativa e reativa na rede, contribuindo para correção do fator de potência e compensação de harmônicos, por exemplo (POHL e MCKENNA, 2024). Tais dispositivos são especialmente úteis em sistemas de energia renovável, como os fotovoltaicos, onde podem otimizar a integração com a rede elétrica, garantindo uma operação mais eficiente e estável.

Além disso, a regulação de tensão no PAC é crucial para garantir a estabilidade e a qualidade da energia em sistemas elétricos, especialmente em redes que integram fontes de energia renovável. A norma IEEE 1547-2018 estabelece diretrizes para a injeção de potência reativa, permitindo que inversores ajustem sua saída para manter a tensão no PAC dentro de limites aceitáveis. Tradicionalmente, as estratégias de controle de potência ativa e reativa em inversores incluem o controle de corrente direta e em quadratura (dq), dentre outras estratégias (ANDRADE, PENA, *et al.*, 2021). Por outro lado, a abordagem de Controle Preditivo Baseado em Modelo (FCS-MPC) tem se destacado nos últimos anos como uma estratégia que agrega vantagens ao controle de inversores, incluindo capacidade de lidar com múltiplos objetivos de controle e apresenta relativa simplicidade de implementação. Para motivar mais estudos nessa área, o objetivo desse trabalho é demonstrar o controle de potência ativa e reativa de um inversor multifuncional trifásico conectado à rede elétrica utilizando a técnica FCS-MPC via simulação computacional, considerando um filtro passivo indutivo de primeira ordem no estágio de saída.

METODOLOGIA

A Figura 1 apresenta o sistema elétrico sob estudo nesse trabalho. Conectado ao PAC encontram-se o: a) O inversor trifásico multifuncional, que nesse caso também atua como um gerador distribuído solar e é controlado pelos sinais de controle $S_1 - S_6$, que controlam cada um dos seis transistores da ponte inversora; b) a rede elétrica principal, modelada como três fontes de tensão senoidais V_{ga} , V_{gb} , V_{gc} com impedâncias de linha r_g ; c) Um grupo de cargas genéricas, que representa uma seção da rede elétrica inteligente. O inversor conecta-se ao PAC por meio de um filtro indutivo $L_{f1} - L_{f3}$, e sensores de corrente i_{inv-a} e i_{inv-c} são utilizados para medir a corrente de saída do inversor para realização do controle em malha fechada. Os sensores de tensão V_{pac-AB} e V_{pac-BC} são utilizados para se medir as tensões de linha e são utilizados na malha de controle.

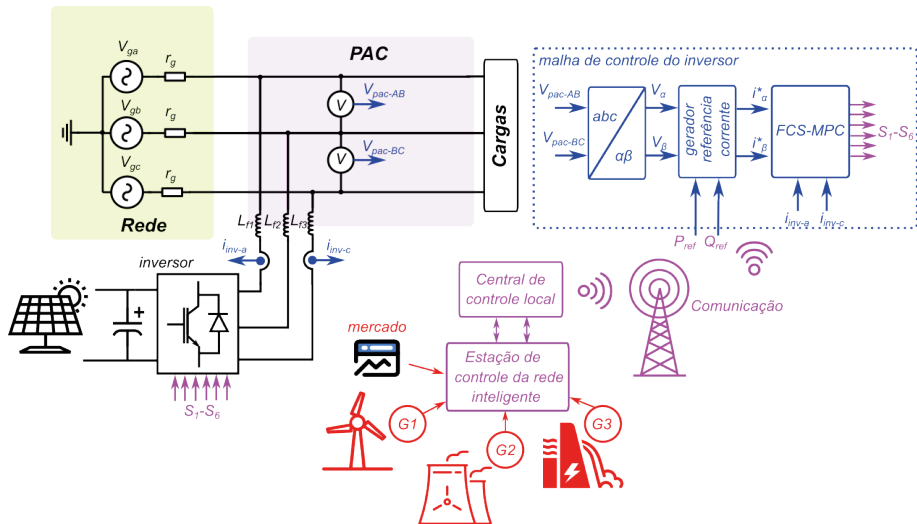


Figura 1 – Diagrama simplificado representativo do sistema elétrico sob estudo.

Fonte: Autores.

A estação de controle da rede inteligente (ECRI) recebe diversas informações a respeito do estado operacional de outros geradores elétricos (G_1 - G_3) que estão conectados à rede, bem como recebe atualizações a respeito de valores praticados no mercado de energia. A partir dessas informações, a ECRI comunica-se com a central de controle local (CCL) de modo a definir os diferentes modos de operação que os inversores conectados à rede devem assumir para que determinado objetivo de controle seja atingido – por exemplo, regulação da tensão CA em uma seção do barramento ao longo do dia. Por sua vez, a CCL comunica-se diretamente com a malha de controle local do inversor conectado ao PAC, definindo referências de potência ativa P_{ref} e reativa Q_{ref} que devem ser injetadas pelo inversor à rede. Conforme se sabe, a variação de potência ativa e reativa injetada pelo inversor pode ser utilizada para se regular a tensão CA do barramento (ISLAM, IQBAL, *et al.*, 2022). Para que de fato o inversor atenda os objetivos de injeção de potência definidos por P_{ref} e Q_{ref} , utiliza-se um controlador de corrente do inversor baseado em FCS-MPC. A malha de controle de corrente opera no sistema de coordenadas fixas $\alpha\beta 0$, em que as referências de corrente i_α^* e i_β^* são definidas de acordo com (1), de acordo com a teoria de potência PQ (WATANABE, AREDES e AKAGI, 2004), em que V_α e V_β são obtidos por meio da transformada de Clarke, de acordo com (2), e V_A , V_B e V_C são os valores de tensão de fase do PAC mensuradas com relação a um ponto virtual.

$$[i_\alpha^* \ i_\beta^*] = \frac{\sqrt{2/3}}{V_\alpha^2 + V_\beta^2} \begin{bmatrix} V_\alpha & V_\beta \\ V_\beta & -V_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{ref} \\ Q_{ref} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \\ V_0 \end{bmatrix} = \sqrt{3/2} \begin{bmatrix} 2/3 & -1/3 & -1/3 \\ 0 & 1/\sqrt{3} & -1/\sqrt{3} \\ 1/3 & 1/3 & 1/3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} \quad (2)$$

Controle FCS-MPC

O controle FCS-MPC leva em consideração o modelo do inversor e o da carga (KOURO, CORTÉS, *et al.*, 2008). De acordo com a configuração de acionamento dos transistores S_1, S_3, S_5 diferentes valores do vetor espacial de tensão $V_{inv}(k)$ são sintetizadas nos terminais de saída do inversor. Tais valores são utilizados para se realizar a predição do vetor espacial de corrente de saída do inversor $i_{inv}^p(k+1)$, de acordo com a expressão (3), em que $V_g(k)$ indica o valor atual do vetor de tensão de rede.

$$i_{inv}^p(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i(k) + \frac{T_s}{L} (V_{inv}(k) - V_g(k)) \quad (3)$$

Há sete ações maneiras distintas de se acionar os seis transistores que compõem a ponte inversora trifásica. Para cada configuração, o vetor $V_{inv}(k)$ é calculado e a corrente $i_{inv}^p(k+1)$, é determinada, a partir dos valores de resistência série equivalente e da indutância do filtro indutivo R e L - respectivamente, e do período de amostragem T_s informados ao controlador. A ação de controle que resulta em menor valor da função de custo $g(i_\alpha, i_\beta)$ é selecionada e aplicada ao inversor. A função custo é definida por (4) e leva em consideração a representação de $i_{inv}^p(k+1)$, no sistema de coordenada fixa α, β dados por i_α^p e i_β^p .

$$g = |i_\alpha^* - i_\alpha^p| + |i_\beta^* - i_\beta^p| \quad (4)$$

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para execução das simulações, considerou-se os seguintes parâmetros: a) tensão de barramento CC do inversor de $V_{DC}=520$ V; b) parâmetros do filtro indutivo $r_{Lf}=0.5\Omega$ e $L_f=10$ mH; c) Tensão de linha da rede $V_g=220$ eficazes com frequência de 60 Hz; d) Período de amostragem de $5 \mu s$. Adicionalmente, considerou-se um inversor com capacidade máxima de potência aparente de 10 kVA. A Figura 2 apresenta os resultados de simulação obtidos. Nota-se na Figura 2-a) que de modo geral o controle FCS-MPC foi bem-sucedido em garantir o atendimento do seguimento das referências dos termos de potência ativa P e reativa Q solicitados pela central de controle local ($P_{ref} - Q_{ref}$). Os valores de referência de P e Q buscam atender os seguintes cenários: a) injeção de máxima potência ativa – típica de geradores distribuídos solares, por exemplo; b) injeção de até 45% da capacidade máxima do inversor de potência reativa Q (positiva ou negativa), de acordo com o sugerido pela IEEE 1547; c) Apenas injeção de potência reativa, representando situações em que o gerador distribuído não pode injetar potência ativa – período noturno para inversor solares fotovoltaicos, por exemplo.

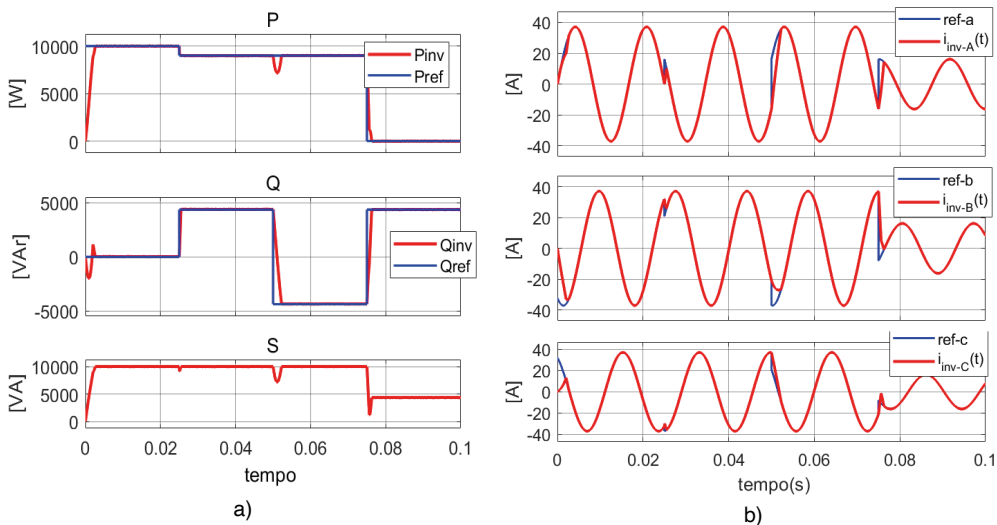


Figura 2 – Resultados de simulação: a) termos de potência P , Q e S injetados pelo inversor; b) Desempenho do controle das correntes de fase do inversor.

Fonte: Autores.

Nota-se ainda na Figura 2-a) que ao longo de toda simulação, o processamento de potência do inversor é igual ou inferior a sua capacidade máxima, definida por 10 kVA. Adicionalmente, observa-se na Figura 2-b) que as correntes de fase de saída do inversor $i_{inv-A}(t)$, $i_{inv-B}(t)$ e $i_{inv-C}(t)$ seguem de modo satisfatório as referências de corrente r_{ef-A} , r_{ef-B} e r_{ef-C} , levando até 1.33 ms (cerca de 8% do período relativo a 60 Hz) para concretizar o seguimento de referência de corrente.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho apresentou a utilização de inversores multifuncionais conectados à rede elétrica, que atuam na injeção de potência ativa e reativa, com o objetivo de atender às metas de controle estabelecidas pela central de controle da rede elétrica inteligente. As simulações realizadas demonstraram que o controle FCS-MPC foi eficaz em garantir o rastreamento dos termos de potência e das correntes de referência. Além disso, a capacidade de processamento de potência do inversor foi mantida dentro de sua faixa de processamento máxima, o que se mostra fundamental para integração de fontes de energia renovável.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, I. et al. An active/reactive power control strategy for renewable generation systems. *Electronics*, v. 10, p. 1061, 2021.

ISLAM, S. et al. Distributed secondary controller to ensure proportional sharing of reactive power in AC microgrid. *Energy Reports*, v. 8, p. 6779–6793, 2022.

KHALID, M. Smart grids and renewable energy systems: Perspectives and grid integration challenges. *Energy Strategy Reviews*, v. 51, p. 101299, 2024.

KOURO, S. et al. Model predictive control—A simple and powerful method to control power converters. *IEEE Transactions on industrial electronics*, v. 56, p. 1826–1838, 2008.

POHL, E.; MCKENNA, K. Interconnection of Distributed Energy Resources in the Indian Context: IEEE 1547-2018 Adaptation for Locally-Appropriate Grid Code Development. *National Renewable Energy Laboratory (NREL)*, Golden, CO (United States). [S.l.]. 2024.

WATANABE, E. H.; AREDES, M.; AKAGI, H. The pq theory for active filter control: some problems and solutions. *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, v. 15, p. 78–84, 2004.