

12º CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO EM PETRÓLEO E GÁS



TÍTULO DO TRABALHO:

MÉTODO COM FREQUÊNCIA MÍNIMA DE CHAVEAMENTO PARA CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO COM CONJUNTO FINITO DE CONTROLE APLICADO EM DRIVE DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL PARA O ACIONAMENTO DE BOMBA ELÉTRICA SUBMERSÍVEL

AUTORES:

João Pedro Brunoni^{1,*}, Rodolfo César Costa Flesch¹, Bruno Kretzer Barotto¹, Julio Elias Normey-Rico¹

INSTITUIÇÃO:

¹Departamento de Automação e Sistemas, Florianópolis - SC, Universidade Federal de Santa Catarina

MÉTODO COM FREQUÊNCIA MÍNIMA DE CHAVEAMENTO PARA CONTROLE PREDITIVO BASEADO EM MODELO COM CONJUNTO FINITO DE CONTROLE APLICADO EM DRIVE DE FREQUÊNCIA VARIÁVEL PARA O ACIONAMENTO DE BOMBA ELÉTRICA SUBMERSÍVEL

Resumo

Conversores controlados por controle preditivo baseado em modelo com conjunto de controle finito (FCS-MPC, do inglês *Finite Control Set Model Predictive Control*) costumam ter frequência de chaveamento com perfil de distribuição aleatório, o que pode ocasionar perdas por comutação em altas frequências ou ressonância no sistema mecânico, caso opere com períodos muito altos de chaveamento. Como forma de contornar essas limitações, o presente trabalho propõe um método que objetiva garantir uma mínima frequência de chaveamento, enquanto visa reduzir a quantidade de comutações através de uma função custo modificada. O método proposto foi avaliado em um estudo de caso com um circuito elétrico que representa uma bomba elétrica submersível e os resultados mostram que com ele a frequência mínima de chaveamento aumenta de 282 Hz para 303 Hz, respeitando a restrição definida em 300 Hz. Ainda, a frequência máxima é reduzida de 5 kHz para 2,8 kHz, em comparação ao FCS-MPC padrão. Portanto, é possível afirmar que o método fornece um bom balanço entre confiabilidade e eficiência, valioso em aplicações de alto custo e potência.

Palavras-chave: controle preditivo, eletrônica de potência, conjunto finito de controle.

Abstract

Converters controlled by finite control set model predictive control (FCS-MPC) usually present switching frequencies which are randomly spread in the spectrum, which can result in significant switching losses at high frequencies or mechanical system resonance if operating at very high switching periods. To overcome these limitations, this paper proposes a method that aims to ensure a minimum switching frequency while reducing the number of commutations, which is achieved by combining a modified cost function and a supervisor of the minimum switching frequency. The proposed method was evaluated in a case study with a model that represents an electrical submersible pump, and the results show that with this method, the minimum switching frequency increased from 282 Hz to 303 Hz, which is higher than the upper limit defined at 300 Hz. Additionally, the maximum frequency was reduced from 5 kHz to 2.8 kHz compared to standard FCS-MPC. Therefore, it can be concluded that the method provides a good balance between reliability and efficiency, valuable in high-cost and high-power applications.

Keywords: predictive control, power electronics, finite control set.

Introdução

Na indústria de petróleo e gás, bombas elétricas submersíveis (ESPs, do inglês *Electrical Submersible Pumps*) são a segunda ferramenta mais utilizada para a elevação artificial de fluidos e são consideradas a melhor escolha quando altos volumes de produção são solicitados (LIANG; FLEMING, 2013). Neste tipo de aplicação, motores de indução trifásicos são majoritariamente utilizados (BRINNER; MCCOY; KOPECKY, 2014; LINGOM et al., 2022) e, desde o final da década de 1970, o seu acionamento passou a ser feito por drives de frequência variável (VFDs, do inglês *Variable Frequency Drives*), o que permitiu aumentar a velocidade de bombeamento e manter a bomba dentro da sua melhor faixa de eficiência (LIANG; KAR; LIU, 2015).

Por mais de 20 anos, o controle por campo orientado (FOC, do inglês *Field Oriented Control*) e o controle direto de torque (DTC, do inglês *Direct Torque Control*) foram as técnicas de controle predominantemente utilizadas pela indústria para o acionamento de VFDs (MIRZAEVA; MO, 2023). Uma outra alternativa para o controle de inversores é o controle preditivo baseado em modelo (MPC, do inglês *Model Predictive Control*), uma estratégia de controle ótima, elaborada nos anos 1970, que calcula a ação de controle por meio da minimização de uma função custo e permite aplicar restrições diretamente nas variáveis controladas. Essas características fazem com que o MPC seja uma alternativa promissora para obter melhor desempenho dinâmico e para otimizar a operação do conversor. Por outro lado, o fato de exigir a solução de um problema de otimização tipicamente limita sua aplicação a processos com dinâmicas mais lentas que as encontradas em conversores. Com o advento de hardwares com alto poder de processamento nos últimos anos, a implementação deste método em conversores passou a ser cada vez mais pertinente e factível (RODRÍGUEZ; ESTAY, 2012).

Para a implementação em VFDs, a formulação de MPC mais comum é a de conjunto finito de controle (FCS-MPC, do inglês *Finite Control Set MPC*), que tem se popularizado devido ao sucesso em lidar com as comutações discretas desses processos (MCNABB; WANG, 2023). A técnica explora o número finito de opções para o sinal de controle, correspondente às opções de chaveamento disponíveis no conversor utilizado. Por conta disso, o controle é aplicado diretamente no conversor, sem precisar de qualquer tipo de modulação. Deste modo, a frequência do controlador impacta diretamente a qualidade do sinal da saída e, por isso, os controladores devem possuir baixos tempos de cômputo para que possam atender a rápida dinâmica dos conversores (BLAABJERG, 2021).

Do ponto de vista econômico, é importante garantir que o sistema seja o mais eficiente possível, consumindo o mínimo de potência elétrica (SHARMA; GLEMESTAD, 2013). Como existem perdas associadas a cada chaveamento executado, é necessário evitar frequências muito elevadas que possam resultar em perdas excessivas (ESPINOSA et al., 2016), sobretudo em operações entre média e alta potência, como é o caso das ESPs. Em contrapartida, frequências demasiadamente baixas também podem vir a se revelar como um problema, pois as frequências naturais do eixo do rotor são situadas em baixa frequência e, em caso de excitações nessa faixa, o sistema mecânico poderá entrar em ressonância, ocasionando possíveis danos materiais no sistema (LINGOM et al., 2022).

O objetivo deste trabalho é propor um método de FCS-MPC que permita diminuir as perdas por chaveamento, mas que limite a frequência mínima de chaveamento utilizada pelo controlador, de modo a evitar fenômenos indesejados em baixas frequências e, assim, obter um bom balanço entre eficiência e segurança para o processo com ESPs. A pesquisa está estruturada da seguinte forma: a seção intitulada “Fundamentação Teórica” apresenta os conceitos do sistema controlado e dos algoritmos de controle, necessários para a compreensão do método proposto, apresentado na seção seguinte. Posteriormente, os resultados são apresentados na seção “Resultados e Discussão” e, então, na seção “Conclusão”, é avaliado se os objetivos propostos foram cumpridos pela técnica apresentada.

Fundamentação Teórica

Conversores trifásicos de dois níveis, três níveis e multiníveis com ponte-H em cascata são as topologias de VFDs mais utilizadas no acionamento de ESPs (LINGOM et al., 2022). Neste trabalho, um VFD categorizado como inversor tipo fonte de tensão (VSI, do inglês *Voltage Source Inverter*) trifásico de dois níveis é selecionado como objeto de controle, mas vale ressaltar que o algoritmo apresentado pode ser adaptado para as outras topologias. Esta configuração de conversor aparece em outros trabalhos da literatura que estudam o efeito das harmônicas de carga geradas por VFDs em ESPs (LIANG; EL-KADRI, 2019; LINGOM et al., 2022).

Para representar o comportamento de motores de indução trifásicos, uma simplificação foi feita ao considerar uma carga resistiva-indutiva (RL) para cada fase. Entre o VSI e a carga, foi inserido um filtro indutivo-capacitivo (LC) para a redução de harmônicas indesejadas. Este sistema controlado pode ser visualizado na Figura 1(a). Na figura, nota-se que, pela perspectiva de um problema de controle, a corrente fornecida para a carga é vista como a Variável de Processo (VP), ou seja, é a variável do sistema que se deseja controlar para que siga uma dada referência estabelecida pelo projetista. Por outro lado, a tensão de entrada no filtro, resultante dos chaveamentos do inversor, é vista como a Variável Manipulada (VM), isto é, o sinal de controle utilizado pelo controlador para levar a VP para a referência desejada. Todavia, é importante destacar que o que é efetivamente manipulado dentro do sistema físico são os estados das chaves do conversor, representados aqui pelas variáveis S_1 até S_6 .

Para evitar um curto-circuito no barramento de Corrente Contínua (CC) que alimenta o VSI, os estados das chaves de um mesmo braço (S_1 e S_2 , S_3 e S_4 , S_5 e S_6) devem operar em estados diferentes (RODRÍGUEZ; ESTAY, 2012). Deste modo, é possível unir cada par em uma mesma variável de fase, representada por S_x , onde $x \in \{a; b; c\}$. Por exemplo, caso seja assumido que $S_1 = 1$ e $S_2 = 0$, a variável auxiliar representará o estado destas duas variáveis com $S_a = 1$. Caso as chaves estejam com os valores opostos, $S_a = 0$. Combinando todos os estados possíveis entre estas três variáveis, define-se o conjunto finito de controle do inversor, formado por 8 (2^3) vetores de tensão de entrada complexos, visualizados na Figura 1(b). Por conta da ortogonalidade do plano complexo, estes vetores também podem ser representados dentro do sistema de coordenadas $\alpha\beta$. Mais detalhes destes procedimentos podem ser encontrados em Brunoni et al. (2023).

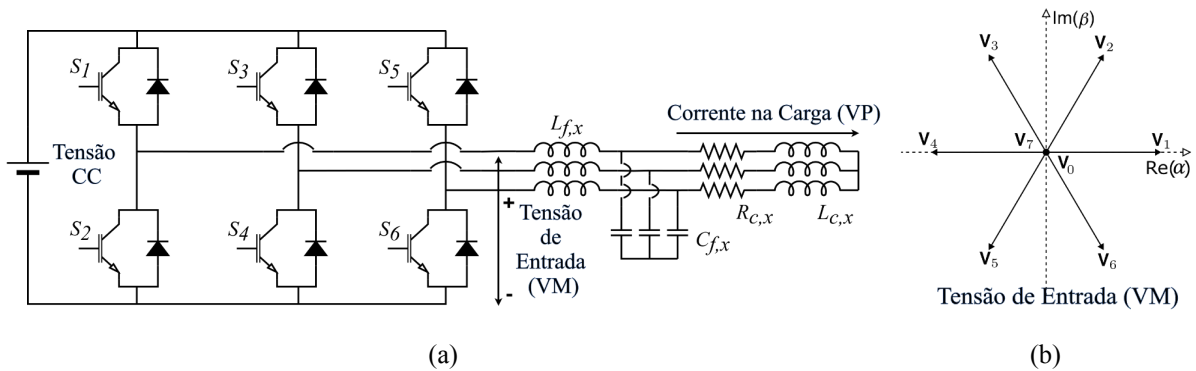


Figura 1 - Apresentação do sistema e das variáveis de controle. (a) VSI, filtro LC e carga RL. (b) Vetores disponíveis em um VSI trifásico de dois níveis.

O princípio de funcionamento de um algoritmo padrão de FCS-MPC consiste em calcular uma predição da saída do sistema para cada um dos vetores disponíveis no conjunto finito de controle e, então, através da diferença entre a referência futura e a saída predita avaliada, costuma-se definir um custo associado à implementação da opção avaliada. Em implementações modificadas, o custo pode considerar outros fatores além do erro de predição (BRUNONI et al., 2023). No fim, apenas o vetor com menor custo é implementado no sistema físico. Para compensar o atraso causado pelo tempo de cômputo do algoritmo, o sinal calculado em uma amostra ($k - 1$) é implementado apenas no início da amostra seguinte (k), conforme ilustrado na Figura 2. Então, seguindo as definições apresentadas previamente, a função custo padrão do FCS-MPC utilizada por este trabalho é definida por:

$$g = e_{\alpha}^2(k + 2) + e_{\beta}^2(k + 2), \quad (1)$$

onde e_α e e_β são as variáveis que representam as componentes do erro no eixo α e β , respectivamente. Assim como os vetores na Figura 1(b), as correntes na carga são transformadas para esse sistema de coordenadas ortogonal através da transformada de Clarke, trabalhando assim com o erro em apenas dois eixos, como costuma ser feito neste tipo de aplicação (BRUNONI et al., 2023).



Figura 2 - Princípio de funcionamento do FCS-MPC.

Entre as vantagens de utilizar a técnica FCS-MPC estão a sua versatilidade e a facilidade encontrada para adaptar o controlador para o estudo de caso abordado. Para cada objetivo definido, a função custo g pode ser modificada para atender a demanda do projeto (RODRÍGUEZ; ESTAY, 2012). Como este controlador não possui frequência de chaveamento bem estabelecida, durante a sua operação, frequências extremas podem ser atingidas e, por isso, uma modificação comum encontrada na literatura é a inserção de um termo que pondera a quantidade de chaveamentos necessários para a implementação de cada vetor dentro da função custo (RODRÍGUEZ; ESTAY, 2012; ESPINOSA et al., 2016; TRICARICO et al., 2022; BRUNONI et al., 2023). Este novo termo tem como objetivo reduzir as frequências de chaveamento obtidas com a técnica e, assim, diminuir as perdas de chaveamento, críticas em sistemas de alta potência. Assim como em Tricarico et al. (2022), a seguinte função custo é utilizada neste trabalho:

$$g_s = e_\alpha^2(k+2) + e_\beta^2(k+2) + \lambda_c c(S(k-1), S(k)). \quad (2)$$

O novo peso inserido, λ_c , pondera a variável c , que é um contador de trocas entre os vetores de estados das chaves, representados por S . Por exemplo, se em $k-1$ o vetor $S(k-1)$ fosse $[0 \ 1 \ 0]$, para $S(k) = [0 \ 0 \ 0]$ haveria mudança de estado de um par de chaves, logo $c = 1$, para $S(k) = [1 \ 0 \ 0]$ a variável c seria igual a 2 e, para o vetor oposto, $S(k) = [1 \ 0 \ 1]$, o contador assumiria o valor $c = 3$.

Método Proposto

Como discutido anteriormente, para processos como as ESPs, é importante garantir que frequências muito baixas não sejam implementadas para não ter risco de excitar uma frequência de ressonância do sistema mecânico ou elétrico (LINGOM et al., 2022). Por isso, simplesmente utilizar a função custo apresentada em (2) pode não ser uma alternativa segura neste tipo de sistema. Então, com o objetivo de manter a frequência baixa para diminuir as perdas do sistema mas evitar frequências muito baixas a ponto de promover a ressonância do sistema mecânico, é proposto neste trabalho um método, denominado FCS-MPC com Frequência Mínima Forçada (FCS-MPC-FMF) que garante uma frequência mínima de chaveamento para o FCS-MPC. Deste modo, em conjunto com a função custo descrita em (2), é possível concentrar o perfil de espalhamento da frequência de chaveamento da técnica dentro de um intervalo razoavelmente projetado e, assim, garantir as métricas de segurança e eficiência do processo com ESPs.

Primeiramente, conforme ilustrado na Figura 3, é definido no algoritmo qual será a frequência mínima aceita e, com isso, é encontrado o período máximo sem repetição de estado em cada chave. Então, no fim de cada amostra de controle, um algoritmo semelhante ao Algoritmo 1 apresentado em Tricarico et al. (2022), sem o cálculo da frequência estimada, é utilizado para obter qual é o tempo decorrido desde que cada uma das chaves foi acionada (T_x^+) ou desativada (T_x^-), onde $x \in \{a; b; c\}$.

Por conta da compensação de atraso considerada neste trabalho com $N_1 = 2$, estes tempos são calculados com relação a $k + 1$, pois é neste instante de tempo que os estados definidos em $S(k)$ são implementados.

A terceira parte do algoritmo consiste em verificar se, caso o vetor $S(k)$, que acabou de ser escolhido pelo algoritmo do FCS-MPC, for mantido o mesmo até $k + 3$, haverá violação da restrição definida pela frequência mínima aceita. Caso isso seja verdade, é verificado se na chave na qual isto ocorre o estado contrário já foi implementado ou não. Se ainda não foi, a próxima amostra de controle é o limite que o controlador tem para evitar que a restrição não seja violada, pois serão necessárias duas ações de correção: acionar o estado oposto e voltar para o atual. Por conta do atraso, um acionamento do estado oposto escolhido em $k + 1$ é feito em $k + 2$ e o retorno para o estado atual, definido em $k + 2$, é implementado em $k + 3$. Então, neste caso, o modo “forçado” é ativo no algoritmo. Este modo faz com que, dos 8 vetores presentes no conjunto finito de controle, na próxima amostra estejam disponíveis apenas os 4 vetores que acionam o estado oposto da chave que violaria a restrição. Ao fim da amostra $k + 1$, uma das ações de correção será escolhida para ser executada em $k + 2$, entretanto, ainda existirá outra para ser implementada. Portanto, no fim de $k + 1$, serão selecionados os vetores que estarão disponíveis para a escolha do FCS-MPC em $k + 2$, sendo estes apenas os 4 vetores que levam a chave de volta para o estado inicial, ou seja, o estado que estava implementado até a primeira ação de correção ser executada. Como pode ser visto na Figura 3, caso a verificação sobre a violação em $k + 3$ seja verdade mas o estado contrário já foi acionado, o modo “forçado” só é ativo em k no caso em que a restrição também seria violada em $k + 2$. Neste caso, apenas os 4 vetores que trazem a chave de volta para o estado inicial ficarão disponíveis em $k + 1$. Caso contrário, como apenas uma ação de correção deverá ser tomada no futuro, o modo “forçado” não é ativado em k , restando uma amostra de escolha livre para o controlador.

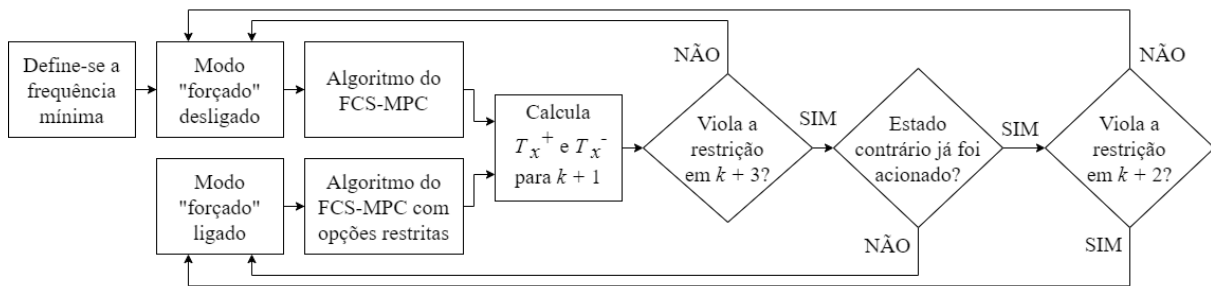


Figura 3 - Princípio de funcionamento do método proposto para garantir uma frequência mínima de chaveamento.

Resultados e Discussão

Com o intuito de avaliar o método proposto, o sistema descrito na Figura 1(a) foi implementado via simulação em ambiente computacional, com a ferramenta Simulink do software MATLAB®. Os valores dos componentes do filtro e da carga foram definidos como: $L_{f,x} = 150$ mH, $C_{f,x} = 7$ μ F, $R_{c,x} = 50$ Ω e $L_{c,x} = 2,3$ mH, seguindo uma das configurações de filtro LC e carga RL descritas por Yusran e Ikhsan (2019). A tensão do barramento CC utilizada é de 10 kV e a referência da corrente na saída é um sinal trifásico de 60 Hz e pico de 60 A, resultando em uma carga de alta potência, com cerca de 90 kW. Para fornecer essa corrente, a alimentação de tensão na carga chega próxima aos 3 kV, valor que está dentro do que é visto no contexto de ESPs (TAKÁCS, 2009).

Primeiramente, o sistema foi controlado por um algoritmo de FCS-MPC padrão, utilizando a função custo g , descrita em (1). Posteriormente, o mesmo sistema foi controlado pelo FCS-MPC com

ponderação da quantidade de comutações, utilizando a função custo g_s , apresentada em (2). O parâmetro λ_c foi definido em 0,001, experimentalmente, para que os índices de Distorção Harmônica Total (DHT) e do erro médio quadrático (MSE, do inglês *Mean Squared Error*) não fossem tão comprometidos. Neste trabalho, esta técnica é chamada de FCS-MPC com Frequência de Chaveamento Reduzida (FCS-MPC-FCR). Por fim, o método proposto denominado FCS-MPC-FMF é avaliado, utilizando a função custo g_s , com o mesmo valor de λ_c , em conjunto com a aplicação do modo “forçado”. A frequência mínima de chaveamento estabelecida neste teste foi 300 Hz, para demonstrar o impacto da técnica nas podas das frequências que não satisfazem esta restrição. Em Lingom et al. (2022), por exemplo, apenas frequências abaixo de 100 Hz excitaram uma ressonância mecânica. Deste modo, a frequência mínima poderia ser selecionada para um valor menor neste trabalho, mas como a restrição não seria violada com as formulações FCS-MPC e FCS-MPC-FCR, os resultados obtidos seriam os mesmos que com ambas as técnicas, dependendo do valor de λ_c utilizado.

Os índices de DHT e MSE, assim como as frequências mínima, máxima e predominante de cada técnica, são apresentados na Tabela 1. Estas frequências foram obtidas através do Algoritmo 1 apresentado por Tricarico et al. (2022), que realiza uma estimação das frequências instantâneas de chaveamento do conversor. Na Figura 4, são apresentados os gráficos que ilustram o perfil de espalhamento das frequências de chaveamento de cada uma das técnicas avaliadas, demonstrando que, além da efetividade do método proposto em garantir o cumprimento da restrição de frequência mínima, no estudo de caso avaliado, as frequências máxima ($f_{\max}$) e dominante (f_{dom}) foram reduzidas, o que ocasionou uma aglomeração das frequências em uma área mais estreita em comparação com os outros métodos. Entretanto, esta melhoria de índices não é uma garantia em outras faixas de operação. Se a frequência mínima for configurada para valores muito altos, por exemplo, isso pode levar o sistema para frequências mais altas de comutação e piorar o seguimento de referência do controlador.

Tabela 1 - Resultados obtidos com as técnicas avaliadas.

Técnica avaliada	DHT [%]	MSE [A ²]	Freq. mín. [Hz] (Incidência)	Freq. máx. [Hz] (Incidência)	Freq. dominante [Hz] (Incidência)
FCS-MPC	1,44	0,754	282 - (0,8%)	5000 - (0,3%)	1667 - (18,1%)
FCS-MPC-FCR	1,47	0,621	282 - (0,7%)	3333 - (0,2%)	1667 - (23,7%)
FCS-MPC-FMF	1,36	0,540	303 - (2,1%)	2800 - (0,5%)	1538 - (20,0%)

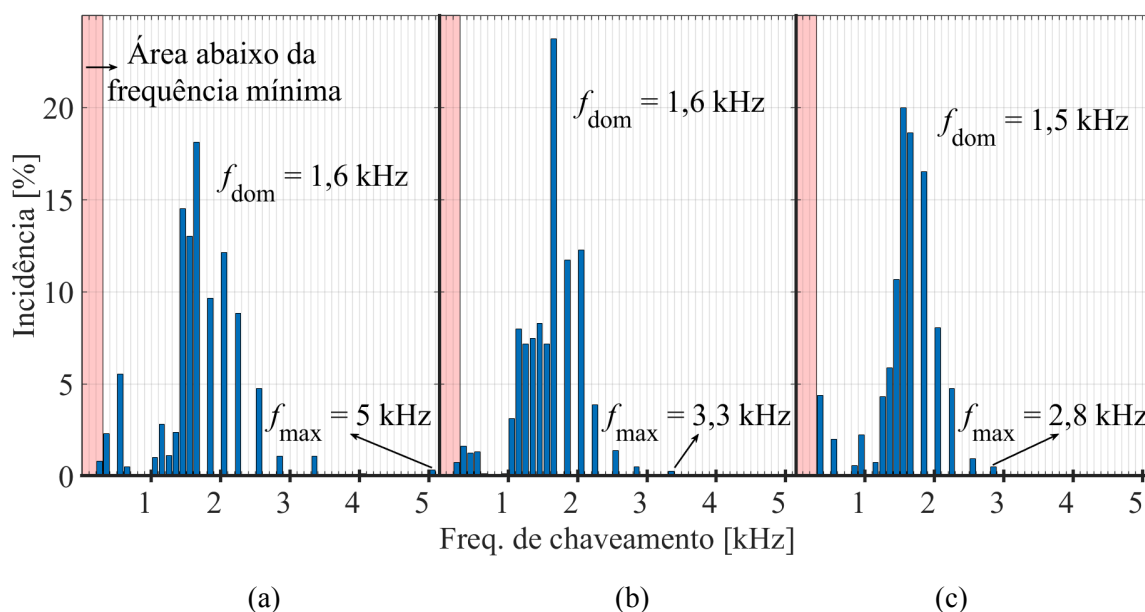


Figura 4 - Perfil de espalhamento das frequências de chaveamento das técnicas: (a) FCS-MPC; (b) FCS-MPC-FCR; (c) FCS-MPC-FMF.

Conclusões

Neste trabalho, é apresentado um método denominado FCS-MPC-FMF, com o objetivo de viabilizar implementações de FCS-MPC em situações em que uma frequência mínima de chaveamento é necessária. Isso garante que o controlador não opere em frequências indesejadas, como as frequências naturais dos sistemas mecânicos acionados. Como estudo de caso, um sistema com um VSI trifásico de dois níveis em conjunto com um filtro LC e uma carga RL representativa de uma ESP foi controlado via simulação. O sistema é controlado primeiramente com um algoritmo de FCS-MPC padrão. Posteriormente, a técnica FCS-MPC-FCR foi implementada através da função custo g_s , apresentada em (2), que pondera a quantidade de comutações para que a frequência de chaveamento seja reduzida. Por fim, o algoritmo FCS-MPC-FMF é aplicado, em conjunto com a função custo g_s , para limitar que a frequência mínima de chaveamento da técnica seja 300 Hz. A utilização do método proposto cumpriu o seu objetivo, pois passou a frequência mínima de chaveamento do sistema de 282 Hz para 303 Hz. Além disso, para o caso avaliado, a utilização da técnica ainda ocasionou uma redução na frequência máxima, de 3333 Hz para 2857 Hz, assim como na frequência dominante, indo de 1667 Hz para 1538 Hz. Deste modo, destaca-se que, para implementações em ESPs, ou em outros casos nos quais é importante garantir que a frequência de chaveamento não atinja níveis abaixo de certos valores, a implementação do método proposto atinge o seu objetivo em promover a segurança para o processo controlado. Ainda, em conjunto com a função custo g_s , a técnica possibilita reduzir as perdas de chaveamento sem comprometer a confiabilidade do sistema.

Agradecimentos

Este trabalho obteve o apoio financeiro do Programa de Recursos Humanos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis — PRH-ANP, suportado com recursos provenientes do investimento de empresas petrolíferas qualificadas na Cláusula de P,D&I da Resolução ANP nº 50/2015.

Referências

- BLAABJERG, F. **Control of power electronic converters and systems. Volume 3**. London San Diego, CA Cambridge, MA Oxford: Academic Press, 2021.
- BRINNER, T. R.; MCCOY, R. H.; KOPECKY, T. Induction Versus Permanent-Magnet Motors for Electric Submersible Pump Field and Laboratory Comparisons. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 50, n. 1, p. 174–181, jan. 2014.
- BRUNONI, J. P. et al. Performance Comparison of Finite Control Set Model Predictive Control Approaches Applied to Three-Phase Two-Level Inverters. 2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP). **Anais...** Em: 2023 IEEE 8TH SOUTHERN POWER ELECTRONICS CONFERENCE AND 17TH BRAZILIAN POWER ELECTRONICS CONFERENCE (SPEC/COBEP). Florianópolis, Brazil: IEEE, 26 nov. 2023.
- ESPINOSA, E. et al. FCS - MPC with reduced switching frequency applied to a multi - cell AFE rectifier with improved transient behavior. IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. **Anais...** Em: IECON 2016 - 42ND ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE INDUSTRIAL ELECTRONICS SOCIETY. Florence, Italy: IEEE, out. 2016.
- LIANG, X.; EL-KADRI, A. Operational Parameters Affecting Harmonic Resonance in Electrical Submersible Pump Systems. **Canadian Journal of Electrical and Computer Engineering**, v. 42, n. 3, p. 183–197, 2019.
- LIANG, X.; FLEMING, E. Electrical Submersible Pump Systems: Evaluating Their Power Consumption. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 19, n. 6, p. 46–55, nov. 2013.
- LIANG, X.; KAR, N. C.; LIU, J. Load Filter Design Method for Medium-Voltage Drive Applications in Electrical Submersible Pump Systems. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 51, n. 3, p. 2017–2029, maio 2015.
- LINGOM, P. M. et al. Electrical Submersible Pumps: A System Modeling Approach for Power Quality Analysis With Variable Frequency Drives. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 37, n. 6, p. 7039–7054, jun. 2022.
- MCNABB, L.; WANG, L. An Improved Horizon-1 Finite-Control-Set Model-Predictive Current Control Design for an Induction Machine With Integrated Anti-Windup. **IEEE Transactions on Control Systems Technology**, v. 31, n. 2, p. 985–988, mar. 2023.
- MIRZAEVA, G.; MO, Y. Model Predictive Control for Industrial Drive Applications. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 59, n. 6, p. 7897–7907, nov. 2023.
- NORMEY-RICO, J. E. et al. **Controle preditivo baseado em modelo: caso monovariável linear**. São Paulo, SP: Editora Edgard Blucher, 2024.
- RODRÍGUEZ, J.; ESTAY, P. C. **Predictive control of power converters and electrical drives**. Chichester, West Sussex, UK ; Hoboken, N.J: IEEE/Wiley, 2012.
- TAKÁCS, G. **Electrical submersible pumps manual: design, operations, and maintenance**. Amsterdam Boston: Gulf Professional Pub./Elsevier, 2009.
- TRICARICO, T. et al. Total Frequency Spread: A New Metric to Assess the Switching Frequency Spread of FCS-MPC. **Energies**, v. 15, n. 14, p. 5273, 20 jul. 2022.
- YUSRAN; IKHSAN, A. Simulation Of Filter And Load Influence On Single Phase Inverter Against Voltage And Current Harmonic. 2019 2nd International Conference on High Voltage Engineering and Power Systems (ICHVEPS). **Anais...** Em: 2019 2ND INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH VOLTAGE ENGINEERING AND POWER SYSTEMS (ICHVEPS). Denpasar, Bali, Indonesia: IEEE, out. 2019.