

Otimização por Enxame de Partículas Aplicada a Controladores de Corrente para Inversores Conectados à Rede

Iury Cleveston, Lucas C. Borin, Caio R. D. Osório, Gustavo G. Koch, Fabricio M. Bottega, Vinícius F. Montagner
Universidade Federal de Santa Maria
Grupo de Eletrônica de Potência e Controle
Santa Maria, RS 97105-900

Emails: (iurycl, lukasciolo, caio.osorio, gustavoguilhermekoch, bottegefabricio, vfmontagner)@gmail.com

Resumo—Este artigo apresenta projeto de ganhos de controle por realimentação de estados obtidos por meio de otimização por enxame de partículas, aplicado em inversores monofásicos conectados à rede por meio de um filtro LCL. O circuito utilizado para o estudo de caso da técnica proposta consiste em um inversor monofásico com tensão no barramento CC de 400 V e tensão da rede rms de 127 V. O controle é projetado *off-line* considerando incertezas na impedância de rede, atraso na implementação do sinal de controle e múltiplos controladores ressonantes. O algoritmo de otimização fornece os ganhos do controlador a partir da minimização de uma função objetivo baseada nos autovalores do sistema em malha fechada. O ganho fornecido prevê resultados de simulação satisfatórios, nos domínios do tempo e da frequência, mostrando a conformidade das correntes de rede com a norma IEEE 1547 e a viabilidade para utilização em aplicações no controle de corrente de inversores.

Keywords – Conversores conectados à rede, Filtro LCL, Otimização por enxame de partículas

I. INTRODUÇÃO

Conversores conectados à rede são importantes no cenário de geração baseada em energias renováveis permitindo, por exemplo, controlar o fluxo de potência entre a fonte primária e a rede [1], [2]. Neste contexto, um problema importante é o controle das correntes injetadas na rede, que devem respeitar limites rigorosos de distorção harmônica [3]. Dentre as estratégias de amortecimento ativo, destacam-se tanto as baseadas no domínio da frequência quanto as baseadas no domínio do tempo, como os controladores por realimentação de estados [4]–[9]. Um ponto comum ao projeto de controladores nesta aplicação é a necessidade de levar em consideração um compromisso adequado entre diferentes objetivos, como respostas dinâmicas rápidas e sinal de controle limitado.

Em eletrônica de potência, a otimização de parâmetros de projetos é frequentemente utilizada. Sendo assim, métodos de otimização metaheurísticos podem ser utilizados a fim de atingir resultados distintos dos métodos tradicionais, por exemplo, a partir de algoritmos inteligentes. Para isto, a inteligência artificial (IA) possui um ramo de estudo de modelos biológicos e sociais de inteligência, os algoritmos bio-inspirados. Nestes algoritmos, a busca é realizada simulando aspectos da natureza

como processos evolutivos ou comportamentos de enxame [10]–[12]. O algoritmo de otimização por enxame de partículas (do inglês, *particle swarm optimization* – PSO), proposto em [13], [14], é um exemplo destas metaheurísticas, sendo uma técnica de enxame inteligente com comportamento social e cooperativo. Trata-se de um algoritmo simples comparado a outros algoritmos bio-inspirados, como algoritmos genéticos, por exemplo, modelando um sistema como uma população auto-organizada de indivíduos autônomos que interagem entre si e com seu ambiente [11].

A inteligência artificial é empregada em eletrônica de potência em diversos contextos. Em [15], técnicas de IA evolutivas são utilizadas para controle do filtro ativo de potência Shunt e, através de simulações em regime permanente e em respostas transitórias, seus desempenhos são comparados sob diferentes cenários. Em [16], uma técnica de IA bio-inspirada é utilizada para otimização de um filtro passivo de potência utilizado como saída de um inversor multinível de 5 níveis H-bridge em cascata (CH-MLI). Sobre inteligência de enxames, em [17], PSO é utilizado para projetar e otimizar componentes do estágio de potência de um conversor DC-DC de quarta ordem para obter uma compensação entre o requisito de indutância contraditória, e em [18], ilustra sua eficiência ao tratar de um sistema fotovoltaico monofásico conectado à rede. Já em [19] e [20], usa-se o PSO para otimizar parâmetros de um controlador proporcional integral derivativo (PID) para conversores abaixadores Buck, e em [21] na otimização para um conversor Boost intercalado com controlador Tipo-III ideal.

O presente trabalho apresenta resultados sobre a utilização de algoritmo PSO a fim de obter controladores por realimentação de estados para aplicação em conversores conectados por meio de filtro LCL a uma rede com indutância incerta. Conversores conectados à rede permitem controlar o fluxo de potência entre a fonte primária e a rede [1], [22], [23] e, muito frequentemente, estes conversores utilizam inversores com filtros LCL de saída para interface entre fonte e rede [2], [24]. Neste contexto, um problema importante é o controle das correntes injetadas na rede, que devem seguir limites como os prescritos em [3], [4].

II. MODELAGEM

Considere o inversor conectado à rede por meio do filtro LCL, dado na Fig. 1.

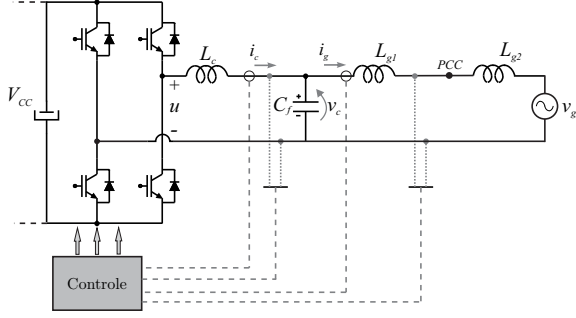


Figura 1. Inversor monofásico conectado à rede por meio de um filtro LCL.

Note que a rede neste caso é predominantemente indutiva. Adicionalmente, a indutância da rede, L_{g2} , é suposta incerta e pertencente a um intervalo \mathcal{P} cujos extremos são conhecidos, representando a operação desde a condição de impedância máxima até a operação em impedância mínima do sistema. No domínio do tempo contínuo, a planta da Fig. 1 pode ser modelada no espaço de estados como

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}_c \mathbf{x} + \mathbf{B}_{uc} u + \mathbf{B}_{wc} v_g \\ y &= \mathbf{C} \mathbf{x} \end{aligned} \quad (1)$$

em que \mathbf{x} representa o vetor de estados, u representa o sinal de controle, v_g representa um distúrbio (rede), y é a saída a ser controlada e as demais matrizes são dadas por

$$\begin{aligned} \mathbf{A}_c &= \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{L_c} & 0 \\ \frac{1}{C_f} & 0 & -\frac{1}{C_f} \\ 0 & \frac{1}{L_{g1}+L_{g2}} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_{uc} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_c} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C} &= [0 \ 0 \ 1], \quad \mathbf{B}_{wc} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ -\frac{1}{L_{g1}+L_{g2}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} i_c \\ v_c \\ i_g \end{bmatrix} \end{aligned}$$

Objetivando a aplicação de uma técnica de controle digital, pode-se escrever um modelo discretizado da planta como

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_u u(k) + \mathbf{B}_w v_g(k) \\ y(k) &= \mathbf{C} \mathbf{x}(k) \end{aligned}$$

em que, para um período de discretização T_s suficientemente pequeno, as matrizes discretas podem ser representadas por

$$\mathbf{A} = \mathbf{I} + \mathbf{A}_c T_s, \quad \mathbf{B}_u = \mathbf{B}_{uc} T_s, \quad \mathbf{B}_w = \mathbf{B}_{wc} T_s \quad (2)$$

Adicionalmente, para a implementação do controle em um processador digital de sinais e para garantir rastreamento de referências senoidais e rejeição de distúrbios com harmônicas, utilizam-se, respectivamente, um atraso na ação de controle e controladores ressonantes [7], levando à descrição

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A} \mathbf{x}(k) + \mathbf{B}_u \phi(k) + \mathbf{B}_w v_g(k) \quad (3)$$

$$\phi(k+1) = u(k) \quad (4)$$

$$\xi(k+1) = \mathbf{R} \xi(k) + \mathbf{T} (i_{ref}(k) - \mathbf{C} \mathbf{x}(k)) \quad (5)$$

em que ϕ representa o sinal de controle atrasado, i_{ref} é a referência para a corrente de rede, e ξ , \mathbf{T} e \mathbf{R} representam, respectivamente, os estados internos e as matrizes dos controladores ressonantes. O sistema aumentado (3) - (5) pode ser escrito como

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k+1) \\ \phi(k+1) \\ \xi(k+1) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B}_u & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 0 & 0 \\ -\mathbf{T} \mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \phi(k) \\ \xi(k) \end{bmatrix} \\ + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 1 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} u(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{B}_w \\ 0 \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} v_g(k) + \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ 0 \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} i_{ref}(k) & \quad (6) \\ y(k) &= [\mathbf{C} \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \mathbf{x}(k) \\ \phi(k) \\ \xi(k) \end{bmatrix} \end{aligned}$$

ou, de forma mais compacta, como

$$\begin{aligned} \rho(k+1) &= \mathbf{A}_{aum} \rho(k) + \mathbf{B}_{uum} u(k) + \\ &\quad + \mathbf{B}_{gaur} v_g(k) + \mathbf{B}_{raur} i_{ref}(k) \quad (7) \\ y(k) &= \mathbf{C}_{aum} \rho(k) \end{aligned}$$

A lei de controle por realimentação de estados a ser utilizada aqui é dada por

$$u(k) = \mathbf{K} \rho(k) \quad (8)$$

Para um estudo de caso, considere que a tensão no barramento é constante, o filtro LCL possui um amortecimento ativo e não são adicionados harmônicos na tensão de rede. Ademais, é utilizada uma modulação por largura de pulso (do inglês, *pulse width modulation* – PWM) por meio de um algoritmo de modulação vetorial (do inglês, *space vector modulation* – SVM) para o controle das chaves e o sincronismo com a tensão da rede é garantido por meio de um filtro de Kalman. Os parâmetros do sistema são vistos na Tabela I [1], [25].

Tabela I
PARÂMETROS DA PLANTA.

Parâmetros	Valores
L_c	1 mH
C_f	62 μ F
L_{g1}	0,3 mH
L_{g2}	[0, 1] mH
Tensão do barramento	400 V
Tensão da rede	180 V(pico); 60 Hz
Frequência de amostragem	20.040 Hz
Frequência de comutação	10.020 Hz
Frequências dos ressonantes	60, 180, 300, 420 Hz
Fator de amortecimento dos ressonantes	0,0001

Note que serão utilizados 4 controladores ressonantes, o que leva a um vetor ξ com 8 estados que, agregados aos 3 estados do filtro, \mathbf{x} , e ao estado referente ao atraso, ϕ , resulta em um ganho de controle com 12 elementos, dado por

$$\mathbf{K} = [k_1 \ k_2 \ \dots \ k_{12}] \quad (9)$$

Neste sentido, o problema a ser resolvido é a busca dos

elementos do ganho de controle no espaço dado pelo produto cartesiano dos intervalos $k_{imin} \leq k_i \leq k_{imax}$, $i = 1, \dots, 12$. A próxima seção traz uma solução para este problema utilizando um algoritmo PSO.

III. OTIMIZAÇÃO POR ENXAME DE PARTÍCULAS

PSO é um algoritmo de otimização baseado em padrões de enxame observados na natureza. A aptidão das partículas é avaliada a partir de uma função objetivo, que desempenha um papel análogo a uma função heurística na simulação cognitiva em IA [11]. Cada partícula é uma possível solução, direta ou indiretamente, e não há necessidade de considerações sobre o espaço de busca, sendo métodos capazes de otimizar funções complexas [26].

No algoritmo PSO, um conjunto de partículas i é chamado de enxame, sendo s_i a posição de cada partícula deste enxame. Cada partícula utiliza uma equação de velocidade para atualizar sua posição e deslocar-se no espaço de busca no decorrer das épocas. O algoritmo armazena a posição que resultou o melhor valor da função objetivo que cada partícula já obteve, denominado de $P_{i.best}$, e a posição que resultou o melhor valor da função objetivo entre todas as partículas do enxame, denominado de G_{best} .

O fluxo de execução do algoritmo PSO utilizado aqui é descrito a seguir:

- 1) Inicializa aleatoriamente a posição das partículas do enxame dentro dos limites do espaço de busca definido.
- 2) Calcula a função objetivo de cada partícula.
- 3) Atualiza $P_{i.best}$ de cada partícula e G_{best} do enxame.
- 4) Atualiza posição e velocidade das partículas.
- 5) Se o critério de parada é atingido, retorna a melhor solução (G_{best}) e finaliza a execução. Se não, retorna ao passo 2 [14].

A. Obtenção do ganho de controle

Conforme a descrição apresentada na Seção II, suponha a seguinte lei de controle por realimentação de estados

$$u(n) = K\rho(n) = \begin{bmatrix} K_x & K_\phi & K_\xi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x(n) \\ \phi(n) \\ \xi(n) \end{bmatrix} \quad (10)$$

A Fig. 2 mostra uma representação do sistema em malha fechada com a lei de controle (10).

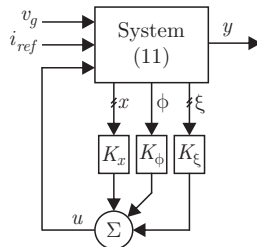


Figura 2. Diagrama de blocos evidenciando as entradas e saídas do sistema em malha fechada.

Aqui, tem-se como objetivo computar, *off-line*, o ganho fixo de controle, $K = \begin{bmatrix} K_x & K_\phi & K_\xi \end{bmatrix}$, de forma a garantir

estabilidade frente à incertezas em $L_{g2} \in \mathcal{P}$. A função objetivo é definida por

$$\sigma(K) = \max_{L_{g2} \in \mathcal{P}} |\lambda(A_{aum}(L_{g2}) + B_{uum}K)| \quad (11)$$

que provê o máximo módulo dos autovalores do sistema em malha fechada. A partir da função objetivo estabelecida, o problema de projeto do controlador pode então ser resolvido por meio de um problema de otimização dado por

$$\min(\sigma(K)) \quad s.a \quad K \in \mathcal{K} \quad (12)$$

em que \mathcal{K} é o espaço de busca restrito do controlador, por exemplo, definido a partir de um DLQR convencional, projetado para o ponto médio de L_{g2} .

O algoritmo PSO pode ser inicializado com taxas cognitivas e sociais de 0,5 e com valores apropriados de número de partículas e número de épocas, a fim de garantir uma boa convergência da função objetivo [14].

Ao final da execução, têm-se que a melhor partícula do enxame que representa o ganho de controle K é

$$K' = \begin{bmatrix} \sigma(K) = 0,9936 \\ -13,16108928784157 \\ -4,324263420719069 \\ -3,219230732731759 \\ -0,755616250730909 \\ 57,02697975531543 \\ -56,58227640999129 \\ 26,91066587139294 \\ -26,733811176937127 \\ 17,789789865190922 \\ -19,141330280468985 \\ 23,2316887459548 \\ -26,348007937950975 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Para comprovar a viabilidade do ganho de controle K , simulações e resultados do sistema em malha fechada são apresentados na próxima seção.

IV. RESULTADOS DE SIMULAÇÃO

Inicialmente, para comprovar a robustez do sistema contra incerteza no parâmetro de indutância de rede L_{g2} , é feita a análise dos autovalores em malha fechada [27], visto na Fig. 3.

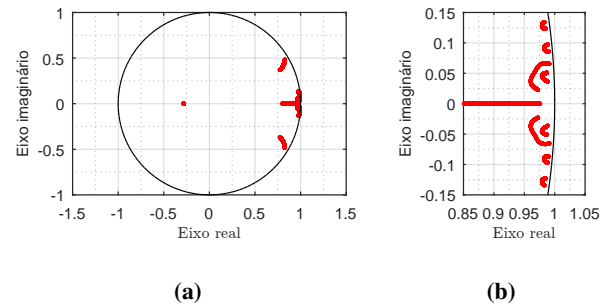


Figura 3. (a) Localização dos autovalores do sistema em malha fechada para $L_{g2min} \leq L_{g2} \leq L_{g2max}$. (b) Vista aproximada dos autovalores contidos próximo ao círculo de raio unitário.

Nota-se que todos os autovalores estão alocados no círculo de raio unitário, confirmando a estabilidade do sistema de malha fechada para toda a faixa de incerteza paramétrica. Além disso, os autovalores obedecem a restrição de raio menor que σ dado em (13) e estão localizados próximos à borda do círculo, sendo uma condição necessária para que os ressonantes possam rastrear referências senoidais [1], [27].

Após, verificou-se o comportamento do sistema em malha fechada considerando o intervalo de incerteza paramétrica da indutância da rede. Para avaliar as respostas transitórias e o rastreo de referência em regime permanente, realizou-se simulações do sistema em malha fechada com uma referência senoidal de 60 Hz com amplitude de 10 A. O primeiro ensaio foi realizado para a situação de rede com indutância mínima L_{g2min} , conforme mostrado na Fig. 4.

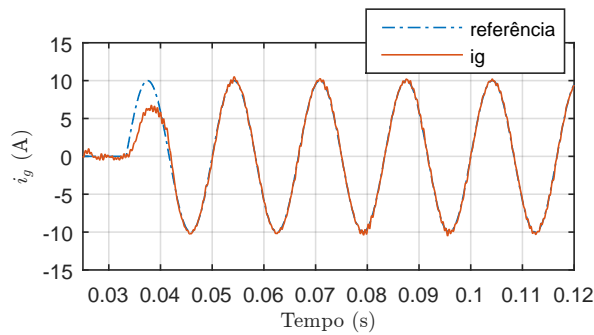


Figura 4. Simulação do sistema em malha fechada no PSIM do sinal de corrente i_g para L_{g2min} com referência senoidal.

Nota-se que o sistema em malha fechada com os ganhos de controle em (13) apresenta rastreamento de referência adequado em regime permanente e desempenho satisfatório em transitórios. Ademais, observa-se o rápido rastreo de referência, como pode ser visto na mudança da mesma (0,033 s), onde o sinal, em menos de um ciclo de onda, recupera-se de forma rápida e torna a seguir a referência novamente, sem *ripple* ou sobressinal significativos.

O ensaio de rede com indutância máxima L_{g2max} foi realizado conforme visto na Fig. 5. De mesmo modo que o ensaio para L_{g2min} , são obtidas boas respostas transitórias e em regime permanente. Na ocorrência de mudança da referência, o sinal de corrente controlado se recupera em um tempo suficientemente adequado para gerar um valor de i_g compatível como a mesma.

Outra questão verificada foi o diagrama de Bode, visto na Fig. 6, que confirma o bom desempenho em regime permanente nos resultados das Figs. 4 e 5, uma vez que tem-se ganho de 0 dB e fase equivalente a 0° na frequência de 60 Hz.

Por fim, a análise da qualidade da corrente foi feita através da taxa de distorção harmônica (THD). O valor nominal de THD foi medido em simulação utilizando até a quinquagésima harmônica em seu cálculo. Assim, o valor em regime

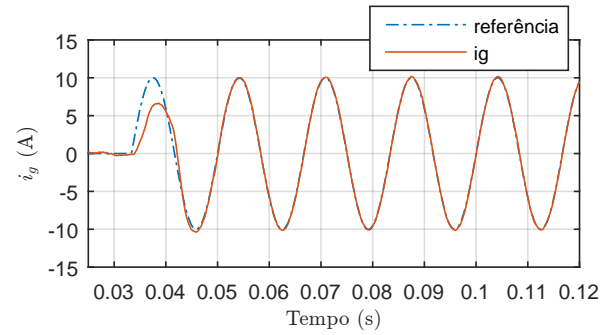


Figura 5. Simulação do sistema em malha fechada no PSIM do sinal de corrente i_g para L_{g2max} com referência senoidal.

permanente para o pior caso, dado em L_{g2min} , é de 2,3893%, dentro dos limites prescritos pela norma IEEE 1547.

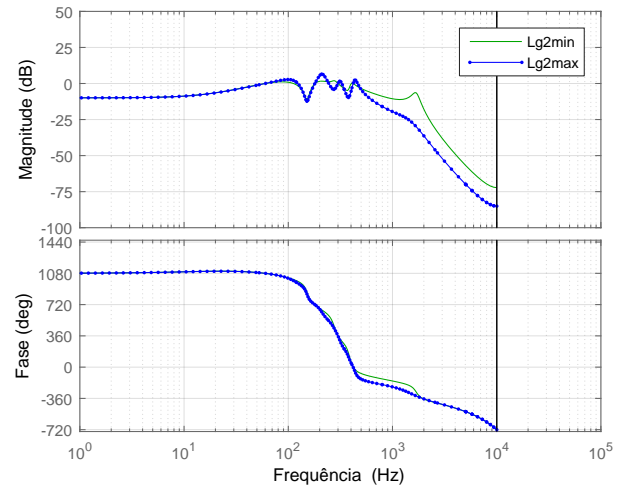


Figura 6. Diagrama de Bode do sistema em malha fechada da entrada i_{ref} para a saída i_g , para L_{g2min} e L_{g2max} .

V. CONCLUSÃO

Este artigo apresentou ganhos de controle por realimentação de estados projetados por meio de um algoritmo PSO e aplicados a inversores monofásicos conectados à rede. Aqui, os ganhos fornecidos pelo PSO são simulados e validados para o caso monofásico e com incertezas na rede. A otimização do controlador é baseada em uma função objetivo que visa a minimização do máximo módulo dos autovalores do sistema em malha fechada, sujeito a incertezas paramétricas na indutância de rede, o que garante robustez contra estas incertezas e respostas transitórias rápidas, conforme é observado pelos resultados de simulação. A análise das correntes de rede obtidas confirma THD e harmônicas individuais compatíveis com os limites da norma IEEE 1547, assegurando a viabilidade do controlador para esta aplicação.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Teodorescu, M. Liserre, and P. Rodríguez, *Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems*, ser. Wiley - IEEE. John Wiley & Sons, 2011.
- [2] F. Blaabjerg, Z. Chen, and S. Kjaer, "Power electronics as efficient interface in dispersed power generation systems," *Power Electronics, IEEE Transactions on*, vol. 19, no. 5, pp. 1184–1194, Sept 2004.
- [3] IEEE, "IEEE:1547 standard for interconnecting distributed resources with electric power systems," 2011.
- [4] F. Blaabjerg, R. Teodorescu, M. Liserre, and A. Timbus, "Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 53, no. 5, pp. 1398–1409, oct. 2006.
- [5] M. Liserre, R. Teodorescu, and F. Blaabjerg, "Multiple harmonics control for three-phase grid converter systems with the use of PI-RES current controller in a rotating frame," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 21, no. 3, pp. 836–841, May 2006.
- [6] J. Dannehl, F. W. Fuchs, S. Hansen, and P. B. Thogersen, "Investigation of active damping approaches for PI-based current control of grid-connected pulse width modulation converters with LCL filters," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 46, no. 4, pp. 1509–1517, July 2010.
- [7] L. A. Maccari, Jr., J. R. Massing, L. Schuch, C. Rech, H. Pinheiro, R. C. L. F. Oliveira, and V. F. Montagner, "LMI-based control for grid-connected converters with LCL filters under uncertain parameters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, no. 7, pp. 3776–3785, July 2014.
- [8] B. Liu, Q. Wei, C. Zou, and S. Duan, "Stability analysis of lcl-type grid-connected inverter under single-loop inverter-side current control with capacitor voltage feedforward," *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 14, no. 2, pp. 691–702, Feb 2018.
- [9] D. Pérez-Estévez, J. Doval-Gandoy, A. G. Yepes, . López, and F. Baneira, "Enhanced resonant current controller for grid-connected converters with lcl filter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 33, no. 5, pp. 3765–3778, May 2018.
- [10] K. A. De Jong, *Evolutionary computation: a unified approach*. MIT press, 2006.
- [11] M. Flasiński, *Introduction to artificial intelligence*. Springer, 2016.
- [12] S. E. De León-Aldaco, H. Calleja, and J. A. Alquicira, "Metaheuristic optimization methods applied to power converters: A review," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, no. 12, pp. 6791–6803, 2015.
- [20] S. Emami, M. B. Poudeh, and S. Eshtehardiha, "Particle swarm optimization for improved performance of pid controller on buck converter," in *Mechatronics and Automation, 2008. ICMA 2008. IEEE International Conference on*. IEEE, 2008, pp. 520–524.
- [13] J. Kennedy, "Particle swarm optimization," in *Encyclopedia of machine learning*. Springer, 2011, pp. 760–766.
- [14] R. Eberhart and J. Kennedy, "A new optimizer using particle swarm theory," in *Micro Machine and Human Science, 1995. MHS'95., Proceedings of the Sixth International Symposium on*. IEEE, 1995, pp. 39–43.
- [15] M. H. Alham, M. M. Hassan, and E. E.-D. A. El-Zahab, "Control of the shunt active power filter using artificial intelligence techniques," in *Control, Decision and Information Technologies (CoDIT), 2013 International Conference on*. IEEE, 2013, pp. 202–207.
- [16] B. Alamri, C. Marouchos, and M. Darwish, "Optimum design of passive power filter (ppf) at the output of 5-level chb-mli using genetic algorithm (ga)," in *Universities Power Engineering Conference (UPEC), 2017 52nd International*. IEEE, 2017, pp. 1–6.
- [17] M. Veerachary and A. R. Saxena, "Optimized power stage design of low source current ripple fourth-order boost dc-dc converter: A pso approach," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 62, no. 3, pp. 1491–1502, 2015.
- [18] S. A. O. da Silva, L. P. Sampaio, F. M. de Oliveira, and F. R. Durand, "Feed-forward DC-bus control loop applied to a single-phase grid-connected PV system operating with PSO-based MPPT technique and active power-line conditioning," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 1, pp. 183–193, 2016.
- [19] O. Altinoz and H. Erdem, "Evaluation function comparison of particle swarm optimization for buck converter," in *Power Electronics Electrical Drives Automation and Motion (SPEEDAM), 2010 International Symposium on*. IEEE, 2010, pp. 798–802.
- [21] S. Banerjee, A. Ghosh, and N. Rana, "An improved interleaved boost converter with PSO-based optimal type-III controller," *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 5, no. 1, pp. 323–337, 2017.
- [22] F. Blaabjerg and K. Ma, "Future on power electronics for wind turbine systems," *Emerging and Selected Topics in Power Electronics, IEEE Journal of*, vol. 1, no. 3, pp. 139–152, Sept 2013.
- [23] S. Kjaer, J. Pedersen, and F. Blaabjerg, "A review of single-phase grid-connected inverters for photovoltaic modules," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 41, no. 5, pp. 1292–1306, Sept 2005.
- [24] R. W. Erickson, *Fundamentals of Power Electronics*. New York, NY: Chapman & Hall, 1997.
- [25] J. R. Massing, "Aplicação de controle adaptativo a conversores estáticos conectados a rede." Ph.D. dissertation, Universidade Federal de Santa Maria - UFSM, 2013.
- [26] V. Kachitvichyanukul, "Comparison of three evolutionary algorithms: Ga, pso, and de," *Industrial Engineering and Management Systems*, vol. 11, no. 3, pp. 215–223, 2012.
- [27] K. Ogata, *Engenharia de controle moderno*, 2011.