ANÁLISE DE SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA POR MEIO DE BATERIAS DE ÍON LÍTIO NA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA UTILIZANDO A ESTRATÉGIA DA MÁQUINA SÍNCRONA VIRTUAL

Luccas T. F. Soares[1] (IC), Arthur C. de Souza (PQ)[1]
[1]*Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)– Campus Itabira – Instituto de Ciências Tecnológicas.*

Palavras-chave: Máquina síncrona virtual. Sistema híbrido. Suporte de frequência.

Introdução

Os sistemas de energia ao redor do mundo, atualmente, vêm sofrendo grandes mudanças, entre elas, pode-se destacar a crescente inserção de fontes renováveis. Esta inserção massiva de fontes alternativas, principalmente as interfaceadas por conversores estáticos de potência, traz consigo um desafio para a operação do sistema elétrico, especialmente no que se diz respeito à estabilidade das seguintes variáveis: ângulo do rotor das máquinas síncronas e frequência do sistema [1]. Este risco à estabilidade tem grande relação com a falta de inércia dos conversores estáticos e com a alta variabilidade de geração das fontes renováveis.

Em sistemas de potência clássicos, os quais utilizam fontes de energia primária totalmente despacháveis e geradores síncronos, a estabilidade é garantida pela reserva de energia primária (combustível estocado) e também pela inércia das massas girantes dos motores primários e dos geradores. A inércia das máquinas síncronas garante que o sistema tenha uma tendência de sincronismo em uma situação de contingência [2].

Entretanto, devido à utilização de fontes renováveis interfaceadas por conversores eletrônicos de potência, o comportamento das máquinas síncronas tem-se diluído em sistemas com respostas rápidas e frágeis frente às contingências [3]. Logo, a estabilidade da rede fica comprometida, pois não há confiabilidade operacional no despacho de potência dessas modalidades de geração, bem como não há contribuição da inércia para o sistema de potência.

Nesse sentido, com o intuito de manter o comportamento inercial do sistema mesmo com a presença elevada de conversores estáticos de potência e fontes renováveis, este trabalho propõem a operação de um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia por baterias de íon-lítio, cujo o conversor de potência atua com a estratégia da Máquina Síncrona Virtual (MSV). A topologia do conversor adotada bem como sua técnica de controle se pauta em prover o comportamento de uma unidade de geração síncrona (capacidade de despacho de potência e inércia) para uma unidade de geração renovável, estática.

Dessa forma, este trabalho contribui com o entendimento e implementação de uma estratégia de controle de conversores estáticos, destinado a oferecer suporte para rede no controle primário de frequência bem como fornecer uma alternativa de despacho firme de potência para o sistema através de baterias utilizando a estratégia MSV.

Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho foi pautada na análise da funcionalidade discutida anteriormente para sistemas de geração fotovoltaico com armazenamento de energia através de simulações computacionais realizadas no *software Matlab/Simulink.* Sendo assim, a implementação computacional foi dividida em duas etapas: modelagem do sistema de geração fotovoltaica/armazenamento de energia e modelagem e controle da MSV.

A – Modelagem e controle do sistema de geração fotovoltaica/ armazenamento de energia

Este trabalho baseia-se na utilização do conversor eletrônico cuja topologia é demonstrada na Fig. 1. Conforme pode ser observado, o conversor de potência é composto por um sistema híbrido, o qual utiliza uma unidade de geração fotovoltaica de 350 kWp e um sistema de armazenamento de energia por baterias de íon-Lítio de mesma capacidade. Para o interfaceamento com a rede elétrica utilizou-se um conversor c.c/c.a de dois níveis trifásico acoplado a um filtro LCL e um transformador para conexão com a rede de média tensão. Toda a modelagem e implementação computacional é descrita em [4-6]. O sistema de armazenamento de energia é responsável por controlar a tensão do barramento c.c, nesse sentido a dinâmica da carga e descarga das baterias é realizada para manter esta tensão constante.

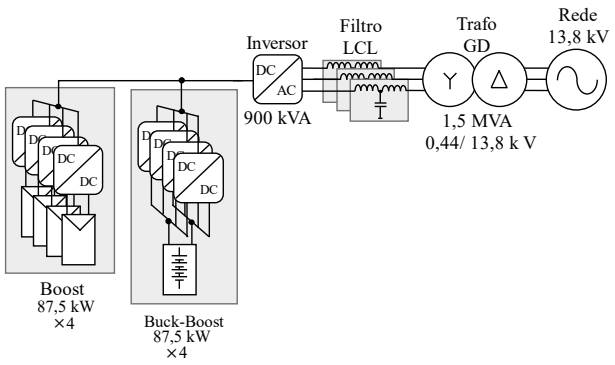

Figura 1. Esquemático da topologia do conversor em estudo.

B – Modelagem e controle da MSV

Tendo em vista o intuito de manter a fidelidade da resposta dinâmica da máquina síncrona na operação do conversor, neste trabalho foram implementados os modelos elétrico e mecânico, bem como os sistemas de controle auxiliares (sistema de excitação e turbina) da máquina. Assim sendo, a Fig.2 evidencia os subsistemas utilizados para o controle do conversor c.c/c.a. O estudo da MSV foi realizado conforme [7-11].

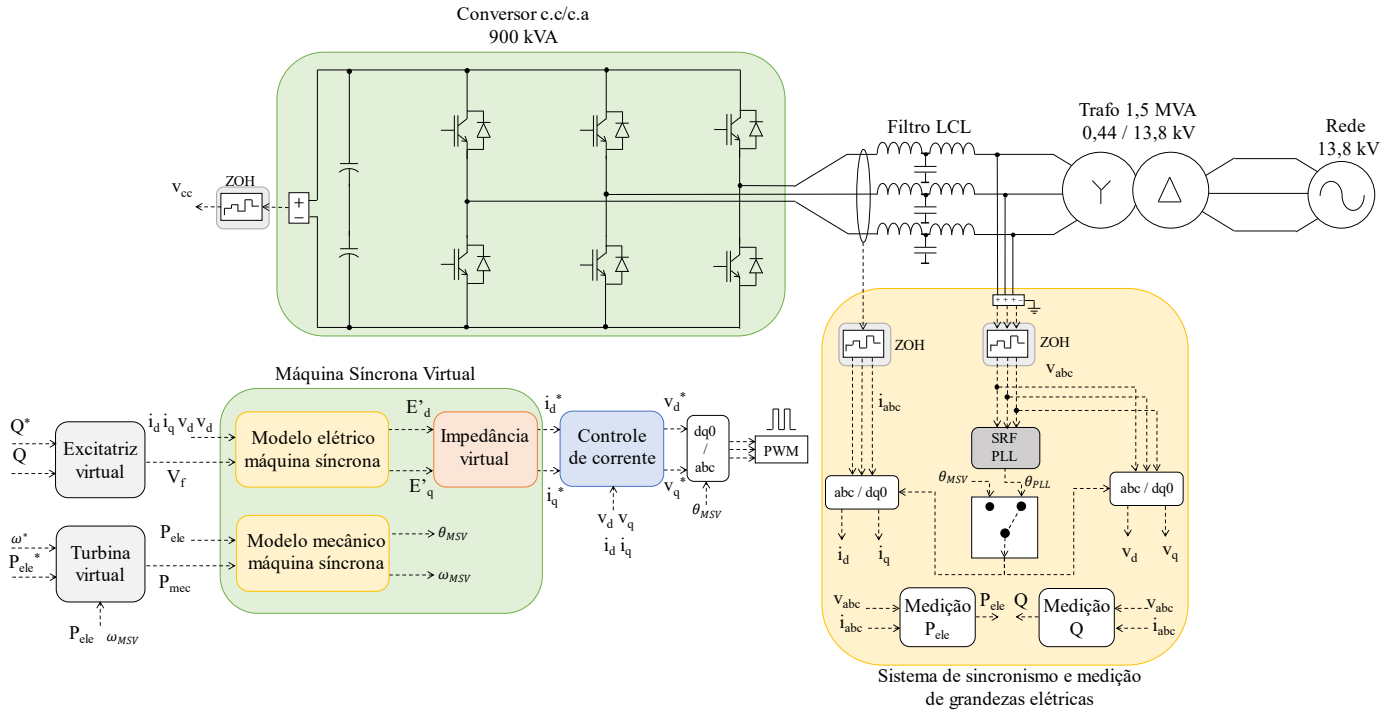

Figura 2. Sistemas de controle do conversor c.c/c.a.

Resultados e discussão

Para obtenção dos resultados, o sistema em questão foi implementado em uma rede, a qual é demonstrada na Fig. 3.

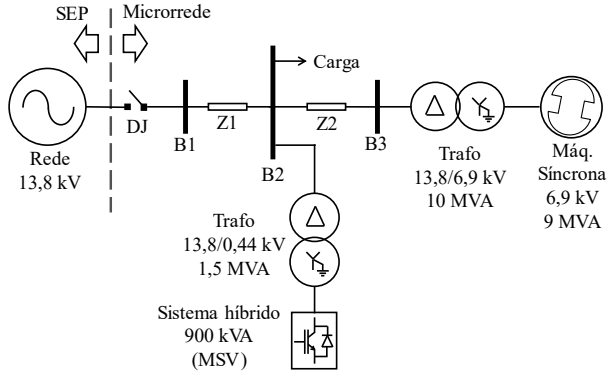

Figura 3. Unifilar da rede utilizada neste trabalho.

Para validação da estratégia da MSV foram avaliados quatro casos distintos de operação do conversor, os quais são descritos abaixo:

- Caso 1: a microrrede opera conectada à rede com carga leve, onde a máquina síncrona despacha potência ativa e reativa para a rede. O sistema híbrido opera flutuando na rede, sem despachar ou consumir potência, quando ocorre subitamente a abertura do disjuntor DJ. Também foi avaliada uma situação específica em que o sistema híbrido operava despachando potência antes da abertura do disjuntor;
- Caso 2: situação similar ao caso 1, exceto que há consumo de potência do sistema microrrede antes do ilhamento, bem como utilização da carga pesada. Também foi avaliada uma situação

específica neste estudo de caso em que o sistema híbrido operava, drenando potência;

- Caso 3: sistema híbrido conectado à rede, avalia-se o despacho de potência ativa controlado em regime permanente, bem como são avaliados os limitadores implementados;
- Caso 4: sistema híbrido conectado à rede, avalia-se o consumo de potência ativa controlado em regime permanente, bem como são avaliados os limitadores implementados.

A – Estudo de caso 1

Na Fig. 4 é demonstrado o transitório de frequência observado com o ilhamento da microrrede, ocorrido em 5 s.

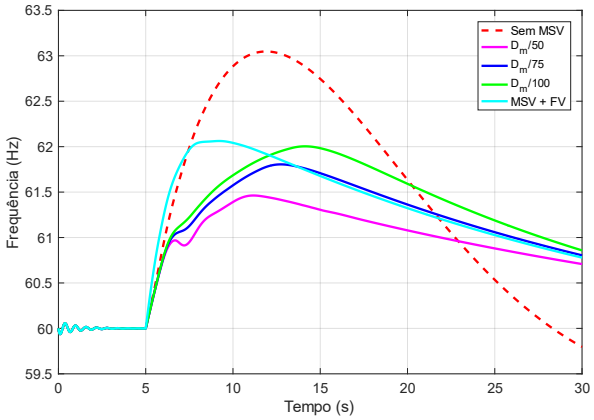

Figura 4 Oscilação de frequência para o estudo de caso 1.

Nota-se na Fig. 4 que a resposta primária de frequência para o caso da microrrede atingiu valores de sobre frequência da ordem de 63 Hz, também é verificado elevado *RoCoF* (*Rate of Change of Frequency*). Entretanto, para os casos da utilização da MSV é perceptível que a sobre frequência máxima foi reduzida à valores muito inferiores aos observados no caso da máquina síncrona solitária, evidenciado o amortecimento do sistema.

B – Estudo de caso 2

No estudo de caso 2 foi avaliada a resposta do sistema para um déficit de geração. Nesse sentido, a Fig.5 demonstra o comportamento da frequência para este estudo de caso.

Observa-se na Fig. 5 que para os casos em que a máquina síncrona operava de forma singela a frequência mínima atingida era próxima de 56,5 Hz, entretanto, com a utilização da MSV este valor se limitou entre 57,5 e 58,5 Hz, ou seja, o sistema se tornou mais amortecido. Observa-se também que o *RoCoF* para os casos com a utilização da MSV também se torna menor.

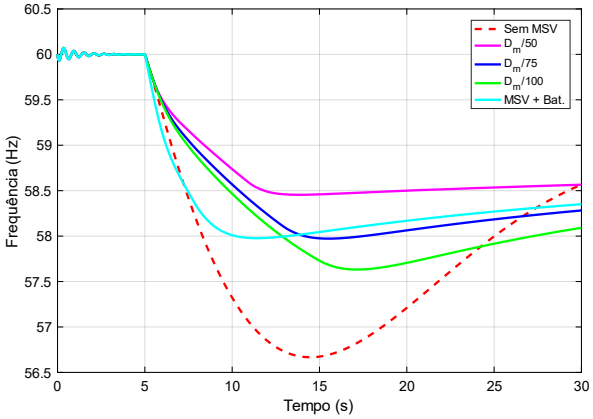

Figura 5. Oscilação de frequência para o estudo de caso 2.

C – Estudo de caso 3

Neste estudo de caso é avaliado a capacidade de despacho de potência controlado do sistema híbrido, além disso, são avaliados os limitadores de potência implementados. Para isso, é configurado um degrau, tanto de potência ativa como de reativa para 1 pu no tempo de 1 s. É válido destacar que o sistema fotovoltaico, desde o início da simulação, opera com potência máxima, sendo que no tempo de 10 s é realizado um degrau para uma irradiância mínima de 10 W/m². Nesse sentido, na Fig. 6 são demonstradas as potências do sistema.

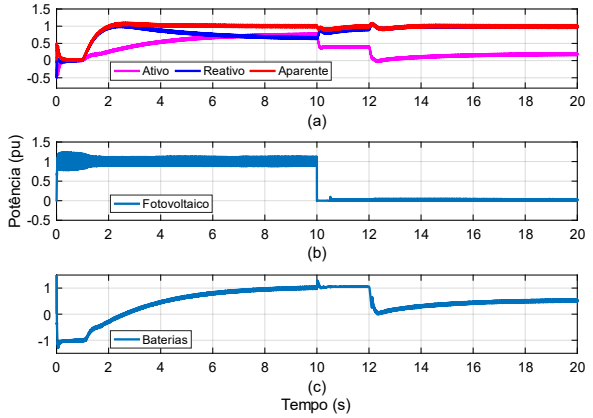

Figura 6. Potências condicionadas pelo sistema híbrido para o estudo de caso 3. Potências no inversor (a), potência da geração fotovoltaica (b), potência do banco de baterias (c)

O sistema híbrido, inicialmente flutuando na rede, drena a energia da geração fotovoltaica, resultando em potência negativa. Com o aumento da potência ativa após um degrau, a potência reativa diminui para manter o conversor c.c/c.a operando com 1 pu. Aos 12 segundos, uma variação na potência despachada reduz a ativa e

aumenta a reativa, mantendo o conversor em 1 pu.

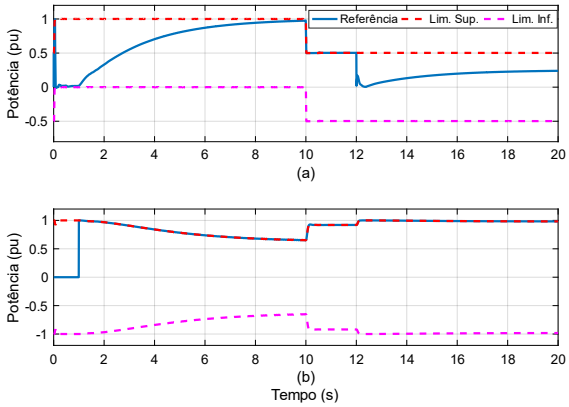

Figura 7. Resposta do limitador de potência ativa (a), resposta do limitador de potência reativa (b) para o estudo de caso 3.

Verifica-se na Fig. 7 que os limitadores dinâmicos de potência operaram conforme esperado. O limitador de potência ativa, saturou a referência de forma que a potência do sistema de armazenamento de energia nunca fosse ultrapassada. Em resposta à isso, o limitador de potência reativa saturou a referência em função da potência ativa despachada para que o carregamento do conversor c.c/c.a não fosse ultrapassado.

D – Estudo de caso 4

O estudo de caso 4 busca avaliar o comportamento da MSV para o consumo de potência ativa da rede. Serão avaliadas as mesmas figuras de mérito analisadas para o caso 3. Sendo assim, na Fig.8 é demonstrada as potências envolvidas nos subsistemas que compõem o sistema híbrido. Verifica-se que o sistema opera de forma semelhante ao caso 3, porém drenando energia da rede.

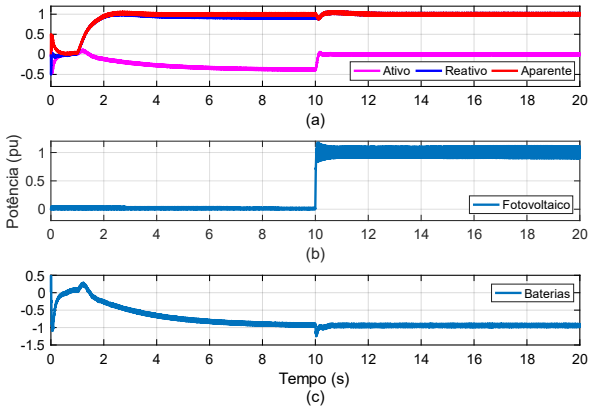

Figura 8. Potências condicionadas pelo sistema híbrido para o estudo de caso 4. Potências no inversor (a), potência da geração fotovoltaica (b), potência do banco de baterias (c)

Conclusões

Este trabalho verificou o funcionamento de um sistema híbrido estático (fotovoltaico e baterias) para suporte de frequência na rede, usando a estratégia da máquina síncrona virtual, implementada no Matlab/Simulink. Os resultados confirmam a viabilidade técnica e o despacho controlado do conversor híbrido, além de demonstrar melhora no amortecimento de transientes de frequência, reduzindo o Nadir e o RoCoF da rede. No entanto, foram observadas limitações, como sobretensão no barramento c.c e desafios na operação com estados extremos de carga da bateria, as quais são tidas como propostas de continuidade do estudo.

Agradecimentos

Registra-se aqui os agradecimentos à UNIFEI pelo apoio financeiro realizado pela União em parceria com a UNIFEI campus Itabira por meio do programa PIBIC

Referências

[1] - S. Rahman, S. Saha, S. N. Islam, M. T. Arif, M. Mosadeghy, M. E. Haque, A. M. T. Oo "Analysis of Power Grid Voltage Stability With High Penetration of Solar PV Systems," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 57, no. 3, pp. 2245-2257, May-June 2021, doi: 10.1109/TIA.2021.3066326.

[2] - P.Kundur “Power System Stability and Control” Mc Graw- Hill, New York, 1994.

[3] - D. Liu, X. Zhang and C. K. Tse, "Effects of High Level of Penetration of Renewable Energy Sources on Cascading Failure of Modern Power Systems," in IEEE Journal on Emerging and Selected Topics in Circuits and Systems, vol. 12, no. 1, pp. 98-106, March 2022, doi: 10.1109/JETCAS.2022.3147487.

[4] - SOARES, Luccas Tadeu Farnezes et al. Utilização de inversores fotovoltaicos para correção de fator de potência e gestão de reativo durante afundamentos momentâneos de tensão. In: ANAIS DA XV CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA, 2023, São Luís. Anais eletrônicos... Campinas, Galoá, 2023.

[5] - Soares, L.T.F.; de Souza, A.C.; Silva, W.W.A.G.; Pugliese, L.F.; Alves, G.H. Grid-Connected Photovoltaic Systems with Energy Storage for Ancillary Services. Energies 2023, 16, 7379. https://doi.org/10.3390/en16217379.

[6] - L. T. F. Soares, A. C. De Souza, W. W. A. G. Silva and R. M. Da Silva, "Estratégia de controle para inversor fotovoltaico conectado à rede com dispositivo interno de armazenamento de energia destinado a correção de fator de potência e regulação de curva de carga," 2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Bernardo do Campo, Brazil, 2023, pp. 186-193, doi: 10.1109/INDUSCON58041.2023.10374985.

[7] - S. D'Arco and J. A. Suul, "Virtual synchronous machines — Classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids," 2013 IEEE Grenoble Conference, Grenoble, France, 2013, pp. 1-7, doi: 10.1109/PTC.2013.6652456.

[8] - Anderson, P.M. and Fouad, A.A. (1977) Power System Control and Stability. Iowa State University Press, Ames, Iowa, 1.

[9] - Y. Hirase .K.Abe, K.Sugimoto and Y.Shindo “ grid-connected inverter with virtual sync ronous generator model o alge raic type ” lect. ng Japan ol. no. pp. –21, 2013, (translated from IEEJ Trans. Power Energy, vol. 132, no. 4, pp. 371–380, Apr. 2012).

[10] - "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," in IEEE Std 421.5-2016 (Revision of IEEE Std 421.5-2005) , vol., no., pp.1-207, 26 Aug. 2016, doi: 10.1109/IEEESTD.2016.7553421.

[11] - I. C. Report, "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System Studies," in IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-92, no. 6, pp. 1904-1915, Nov. 1973, doi: 10.1109/TPAS.1973.293570.