

SISTEMAS FOTOVOLTAICOS CONECTADOS À REDE ELÉTRICA COM ARMAZENAMENTO INTERNO DE ENERGIA VOLTADO A SERVIÇOS ANCILARES PARA A MELHORIA DA QUALIDADE DA ENERGIA ELÉTRICA

Luccas Tadeu Farnezes Soares¹ (IC), Arthur Costa de Souza (PQ)¹

¹Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira.

Palavras-chave: Sistemas fotovoltaicos. Prestação de serviços ancilares. Controle de frequência. Controle de tensão. Despachabilidade de sistemas fotovoltaicos.

Introdução

A concepção clássica de um sistema elétrico presume um fluxo de potência unidirecional em todas as etapas. Ou seja, a energia gerada nas usinas é transmitida a longas distâncias e posteriormente distribuída nos centros de consumo, não havendo, a possibilidade de um fluxo bidirecional de energia [1]. Entretanto, devido à penetração das fontes renováveis, esta dinâmica tende a ser alterada, já que presume-se a instalação de unidades geradoras próximas aos centros de consumo, permitindo assim um fluxo de potência bidirecional nos sistemas de transmissão e distribuição [2,3].

Uma das características mais marcantes da energia fotovoltaica é sua intermitência de geração. Este fenômeno é característico desta fonte, já que os painéis fotovoltaicos trabalham absorvendo a luz solar e convertendo esta energia incidente em eletricidade [4]. Assim, estes sistemas são sensíveis ao nível de irradiação e à temperatura ambiente, logo nuvens podem sombrear parte do arranjo fotovoltaico bem como ventos ou alterações climáticas podem afetar a temperatura ambiente. Havendo assim, o deslocamento do ponto de operação do sistema de forma relativamente rápida no sentido de diminuir ou aumentar a geração [2].

A intermitência da geração e a utilização de conversores estáticos apresentam implicações do ponto de vista da dinâmica do sistema e dos índices de qualidade da energia elétrica da rede. Tais como: alteração da curva de carga do sistema, impacto no fator de potência, variações de tensão e frequência e diminuição da inércia total do sistema. Por conseguinte, tendo em vista a atenuação destes fenômenos, pode-se utilizar em conjunto com as unidades geradoras fotovoltaicas sistemas de armazenamento de energia por baterias [5]. Dessa maneira, as instalações fotovoltaicas se assemelhariam mais às unidades de geração clássicas utilizando máquinas elétricas, conseqüentemente, do ponto de vista do sistema elétrico, a dinâmica de funcionamento se manteria, além de que, as instalações fotovoltaicas providas de capacidade de armazenamento de energia poderiam executar serviços ancilares.

Assim, este trabalho tem como objetivo realizar o estudo de sistemas fotovoltaicos conectados à rede com armazenamento interno de energia por meio de baterias voltado para fornecimento de serviços ancilares de suporte de reativo, de frequência, e de despacho de potência para manutenção da reserva operativa, conseqüentemente, refletindo em bons índices de qualidade de energia elétrica da rede relacionado às variáveis dos serviços ancilares supracitados. Para isso, o sistema foi implementado em ambiente de simulação computacional no software *Matlab/Simulink*.

Metodologia

A metodologia adotada neste trabalho foi pautada na análise da funcionalidade discutida anteriormente para inversores fotovoltaicos através de simulações computacionais no software *Simulink*. Sendo assim, a implementação computacional foi dividida em três etapas: modelagem e controle do conversor da unidade geradora, modelagem e implementação computacional da rede de distribuição IEEE 13 barras e implementação do controle para execução dos serviços ancilares citados anteriormente.

A – Modelagem e controle do sistema fotovoltaico com armazenamento de energia

A topologia do conversor utilizado neste trabalho pode ser visualizada na Figura 1, bem como as malhas de controle utilizadas. A modelagem e os ganhos dos controladores foram implementados conforme demonstrado em: [6-11]. Ressalta-se que foram implementados seis conversores c.c/c.c sendo três para o sistema de bateria e os outros três para o sistema fotovoltaico, cada um com potência de 75 kW, totalizando um sistema de aproximadamente 450 kVA. Esta topologia de projeto foi adotada, pois apresenta boa flexibilidade em relação à geração fotovoltaica (situações de somreamento), bem como possibilita a operação do sistema de armazenamento de energia de forma independente, havendo assim maior versatilidade no despacho de potência.

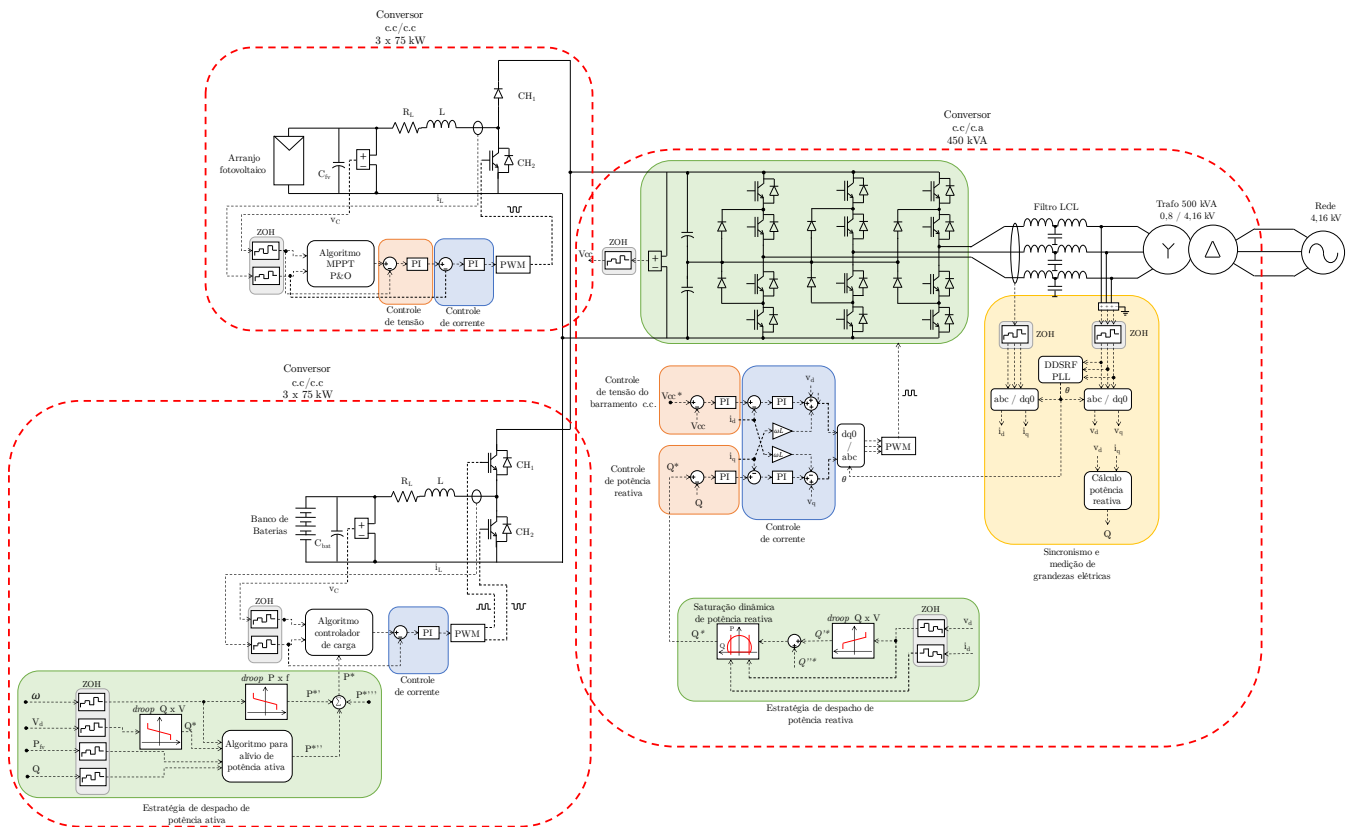


Figura 1 – Topologia e malhas de controle do conversor utilizado.

B – Implementação da rede IEEE 13 barras

De forma a validar o funcionamento do sistema proposto, foi implementada a rede IEEE 13 barras no *Simulink*, conforme apresentado em [12]. A unidade geradora em estudo foi conectada à barra 680 e em conjunto à ele foram adicionadas uma máquina síncrona de 2 MVA, cargas resistivas-indutivas e um disjuntor, conforme apresentada na Figura 2.

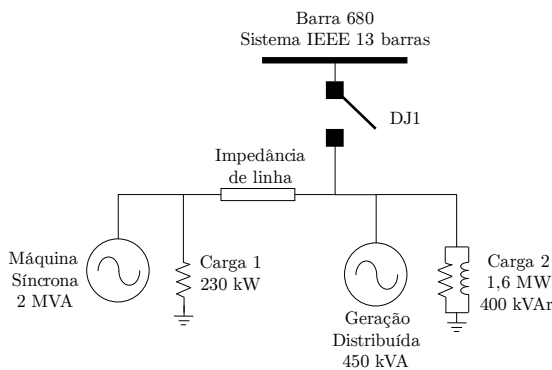


Figura 2 – Topologia de conexão de carga e geração à barra 680 do sistema IEEE 13 barras.

C – Implementação da estratégia de execução dos serviços ancilares

Para a execução dos serviços ancilares citados anteriormente, foram propostas duas malhas de controle, evidenciadas em verde na Figura 1. Uma das malhas é responsável por gerir o despacho de potência ativa, utilizando a estratégia *droop P x f*, bem como um algoritmo de carga para alívio de potência ativa. A outra malha é responsável por gerir potência reativa, também utilizando o controle *droop Q x V*, bem como uma estratégia de saturação dinâmica de potência reativa. As ações de controle destas malhas serão evidenciadas na seção de resultados e discussão.

Resultados e discussão

A seguir serão apresentados os principais resultados advindos do estudo realizado. Em primeira análise, verifica-se a possibilidade de o sistema exercer o serviço ancilar de despacho de potência para manutenção da reserva operativa. Na Figura 3 é demonstrado o despacho de potência do sistema realizado através das baterias.

Conforme pode ser observado na Figura 3 houve a excursão entre a potência máxima positiva e máxima negativa de despacho das baterias em torno de sete segundos. Este fato demonstra a flexibilidade e a dinâmica rápida do sistema, o qual poderia ser utilizada pela concessionária para realização de despacho de

potência em horário de pico, por exemplo. Garantindo assim, um alívio de potência para o sistema e, conseqüentemente, limitando índices de qualidade da energia elétrica como afundamento de tensão e variação de frequência dentro dos limites normalizados. É válido ressaltar que nos pontos máximos da curva houve uma saturação da corrente da bateria, devido à mesma estar próxima de seu valor nominal de descarga, desse modo, não atingindo a referência. Ressalta-se também que além do controle imposto pela concessionária, pode ser realizado um controle local de despacho de potência, conforme realizado no trabalho [13].

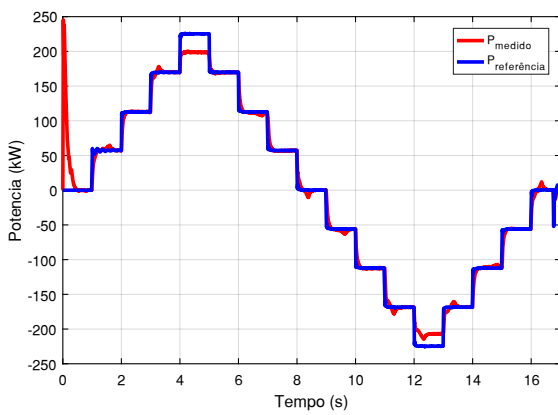


Figura 3 – Despacho controlado de potência ativa.

Por conseguinte, na Figura 4 é demonstrado a resposta do serviço ancilar de suporte de potência reativa em conjunto com o algoritmo de alívio de potência ativa.

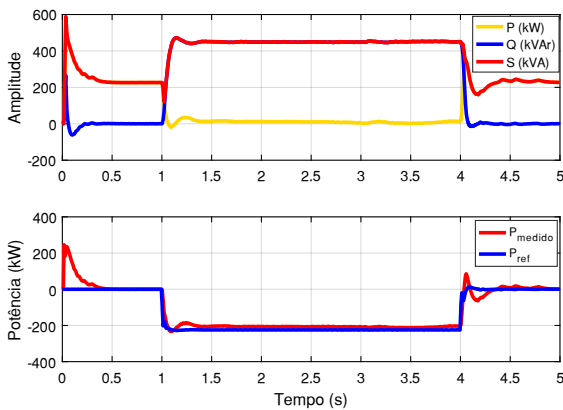


Figura 4 – Despacho controlado de potência reativa.

A Figura 4 evidencia que a unidade geradora fotovoltaica estava funcionando normalmente, injetando somente potência ativa. No instante de 1 s há um degrau de potência reativa equivalente à potência do conversor c.c/c.a, nesse sentido, atendida as condições de estado de carga da bateria, o fluxo de potência da geração fotovoltaica é redirecionado ao banco de baterias, restando assim, a margem de potência necessária para a injeção de reativo na rede. É válido destacar que o

conversor opera em 1 pu de potência, não ultrapassando assim seus limites nominais. Esta injeção de potência reativa pode ser necessária para controle da tensão ou para suporte à rede em condições críticas, como curto-circuito, há assim a possibilidade de se minimizar os impactos nos índices da qualidade da energia elétrica.

Por fim, será demonstrada a resposta do sistema perante o serviço ancilar de suporte de frequência, conforme demonstrado nas Figuras 5 e 6.

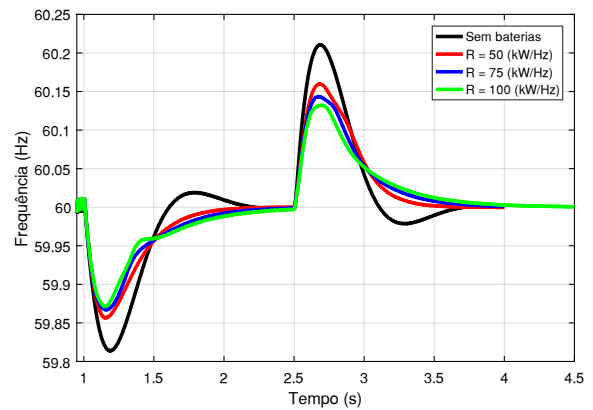


Figura 5 – Perfil da frequência à jusante da barra 680 para elevação da geração fotovoltaica.

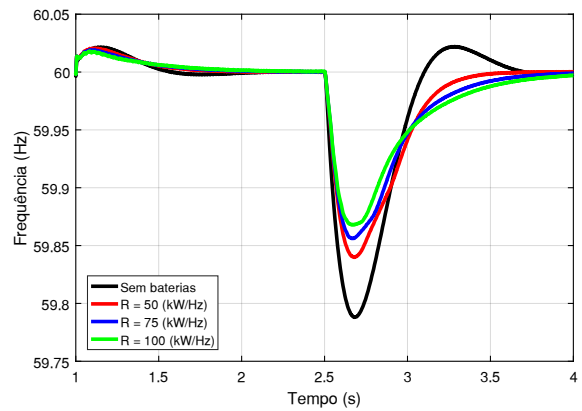


Figura 6 – Perfil da frequência à jusante da barra 680 para perda da geração fotovoltaica.

Os resultados demonstrados nas Figuras 5 e 6 foram obtidos para uma variação em degrau de 50% da geração fotovoltaica, além disso, foram simulados quatro casos, o primeiro sem o sistema de armazenamento de energia e os demais com o sistema de armazenamento de energia, entretanto, utilizando-se estatismos distintos.

Observa-se na Figura 5 que no instante da abertura do disjuntor DJ1, há uma oscilação negativa de frequência, decorrente do déficit de potência ativa. Logo em seguida, no instante de 2,5 s há o aumento de potência ativa fotovoltaica e uma variação positiva ocorre. Para ambos os casos é verificado um maior amortecimento do sistema que contém o sistema de armazenamento de energia.

De forma semelhante, na Figura 6, após a abertura de DJ1 há uma pequena variação, decorrente do superavit de potência ativa. No instante de 2,5 s a geração fotovoltaica é cortada pela metade e de forma similar às respostas anteriores, a resposta com o sistema de armazenamento de energia apresentou um comportamento mais amortecido com menos oscilações. Estes resultados demonstram que um sistema fotovoltaico com armazenamento de energia auxilia na estabilidade do sistema, já que foram obtidas respostas de menor amplitude e com menores oscilações para os sistemas com armazenamento quando comparado com o sistema de geração fotovoltaico clássico.

Conclusões

Portanto, a partir do estudo realizado, foi possível verificar que os sistemas de geração fotovoltaico com a integração de mecanismo de armazenamento de energia por baterias demonstrou respostas interessantes para a execução de serviços ancilares. Nesse sentido, a aplicação destes serviços para estas unidades geradoras se torna viável tecnicamente, o que consequentemente aumenta a qualidade da energia elétrica do sistema.

Para estudos futuros, recomenda-se o aperfeiçoamento da técnica de controle de despacho de potência das baterias utilizando-se a estratégia da máquina síncrona virtual.

Agradecimentos

Registra-se nesta seção os agradecimentos à UNIFEI, bem como ao órgão financiador, FAPEMIG.

Referências

- [1] - Empresa de Pesquisa Energética - EPE. Desafios da Transmissão no Longo Prazo: documento de apoio ao PNE 2050. Documento de apoio ao PNE 2050. 2018. Disponível em: [https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/D esafios% 20da% 20Transmissao.pdf](https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dadosabertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-457/D%20desafios%20da%20Transmissao.pdf). Acesso em: 11 mar. 2023.
- [2] - PEREZ, Filipe. Inserção e Controle de Armazenadores de Energia em Sistemas Fotovoltaicos Conectados à Rede Elétrica. 2015. 103 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.
- [3] - SOUZA, João Paulo Assunção de. Análise de sistemas de armazenamento de energia com baterias em uma rede real de distribuição de energia em média tensão. 2020. 136 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020. Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/34663>.
- [4] - CRECESB. Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos CEPEL. Rio de Janeiro: 530 p. 2014
- [5] - TAVARES, Suzanne Emanuelle. Estudo e Implementação de um Sistema de Controle de Tensão em uma Microrrede CC. 2018. 104 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. Disponível em: <https://ufsj.edu.br/portal2-repositorio/File/ppgel/189-2018-12-20-DissertacaoSuzanneTavares.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2023.
- [6] - G. F. Franklin, J. D. Powell, M. Workman, "Digital Control of Dynamics System", 3. ed., –Ellis Kangle Press, 1997.
- [7] - P. Rodriguez, J. Pou, J. Bergas, J. I. Candela, R. P. Burgos and D. Boroyevich, "Decoupled Double Synchronous Reference Frame PLL for Power Converters Control," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 22, no. 2, pp. 584-592, March 2007, doi: 10.1109/TPEL.2006.890000.
- [8] - M. Liserre, F. Blaabjerg and S. Hansen, "Design and control of an LCL-filter-based three-phase active rectifier," in IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 41, no. 5, pp. 1281-1291, Sept.-Oct. 2005, doi: 10.1109/TIA.2005.853373.
- [9] - Soares, L. ., Souza, A., Piccini, A., & Santos, I. (2023). Control proposal for photovoltaic inverters with reactive power supply for voltage stability during momentary sags and in steady state. IEEE Latin America Transactions, 21(9), 1007–1014. Retrieved from <https://latamt.ieee9.org/index.php/transactions/article/view/7860>
- [10] - K. Ogata, "Modern Control Engineering", 5 ed, Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice-Hall, 2010.
- [11] - SOARES, Lucas Tadeu Farnazes; SOUZA, Arthur Costa de; SANTOS, Claudio Henrique Gomes dos. Conversor cc/cc bidirecional em corrente aplicado como controlador de carga em sistemas de armazenamento de energia conectados à rede. In: Anais do Congresso Brasileiro Interdisciplinar em Ciência e Tecnologia. Anais. Online, 2023. Disponível em: <https://www.even3.com.br/anais/cobicet2023>. Acesso em: 11/09/2023
- [12] - IEEE PES, "IEEE 13 node test feeder", PSACE Committee, 1991. Disponível em: <https://site.ieee.org/pes-testfeeders/resources/>.
- [13] - Soares, L., Souza, A., Silva, R., & Silva, W. (2023). "Estratégia de Controle Para Inversor Fotovoltaico Conectado à Rede Com Dispositivo Interno de Armazenamento de Energia Destinado à Correção de Fator de Potência E Regulação de Curva de Carga". 2023 15th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON), São Paulo, Brazil, 2023. (Em publicação).