



Operação Conectada de Microrredes

CONNECTED OPERATION OF MICROGRIDS

Eduardo Henrique Pereira, Diogo Marujo.

RESUMO

As microrredes exercem um papel muito importante na geração distribuída e um dos fatores mais consideráveis para seu funcionamento é dado pelo comportamento dos conversores de tensão. Apesar da possibilidade de operação ilhada, este artigo apresenta um estudo sobre o modelo de controle proporcional integral (PI) de um conversor atuando em uma microrrede conectada à rede principal. Neste modo de operação, o conversor trabalha como uma barra P-Q fornecendo potência ativa e reativa para a rede e seu controle tem papel fundamental para o funcionamento adequado da microrrede. A modelagem e simulação foram executadas utilizando o software Matlab e sua plataforma Simulink. Os resultados obtidos indicam que o modelo do conversor e de seu controle PI utilizados operaram de maneira adequada, seguindo os valores de referência.

Palavras-chave: Microrredes, Conversor de Tensão, Controle, Operação Conectada.

ABSTRACT

Electric microgrids play a very important role in distributed generation and one of the most considerable factors for its operation is given by the behavior of voltage converters. Despite the possibility of an isolated operation, this paper presents a study on the proportional integrative (PI) control model of a converter operating in a microgrid connected to the main grid. In this operation mode, the converter works as a P-Q bus, providing active and reactive power to the grid and its control plays a fundamental role for the correct operation meeting its requirements. Modeling and simulation were performed using the software Matlab and your environment Simulink. The results obtained indicate that the converter model and the PI control used operated properly, following the reference values.

Keywords: Microgrids, Voltage Source Converters, Control, Connected Operation.

1 INTRODUÇÃO

Conforme estudos da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2017), a energia elétrica está progressivamente se tornando um dos recursos mais importantes da sociedade atual, principalmente devido ao fato da demanda energética ter um crescimento proporcional ao aumento populacional e a expansão dos setores industriais. Neste contexto, pesquisadores como Farhangi (2010) e Pepermans et al. (2005) propõem que a implantação e o desenvolvimento da geração distribuída através da utilização das microrredes (MRs) resultam em uma estratégia sólida para solucionar os futuros problemas de demanda energética de forma eficiente e flexível, dado sua possibilidade de operação conectada ou ilhada. As MRs podem ser compreendidas como sendo sistemas de potência em menor escala que visam facilitar a integração de geradores distribuídos no sistema elétrico (Lasseter, 2002, CERTS, 2002)

Segundo o A. Cagnano (2020), a microrrede dispõe de dois modos de operação, que são: o modo conectado, onde a MR trabalha em conjunto com a rede principal ocorrendo a possibilidade de intercâmbio de

potência e também o modo isolado/ilhadado em que a MR opera separada da rede principal definindo seus próprios parâmetros de atuação através do controle de suas unidades geradoras.

Rocabert et al. (2012) adiciona que uns dos maiores desafios para a implantação eficiente de uma MR depende da utilização de um controle eficaz em seus conversores, que desempenham um papel fundamental para uma operação robusta e confiável. Tal pontuação possibilita o surgimento da seguinte pergunta: Como controlar a MR para que ela funcione corretamente seguindo os parâmetros propostos?

Existem várias técnicas e métodos para efetuar o controle de uma MR, podendo ser implantado utilizando um referencial síncrono (dq0) em conjunto com o controle Proporcional Integral (PI) como descrito por Serban et al. (2017) ou um referencial estacionário ($\alpha\beta$) utilizando um controle Proporcional Ressonante (PR) (BLAABJERG, et al, 2006).

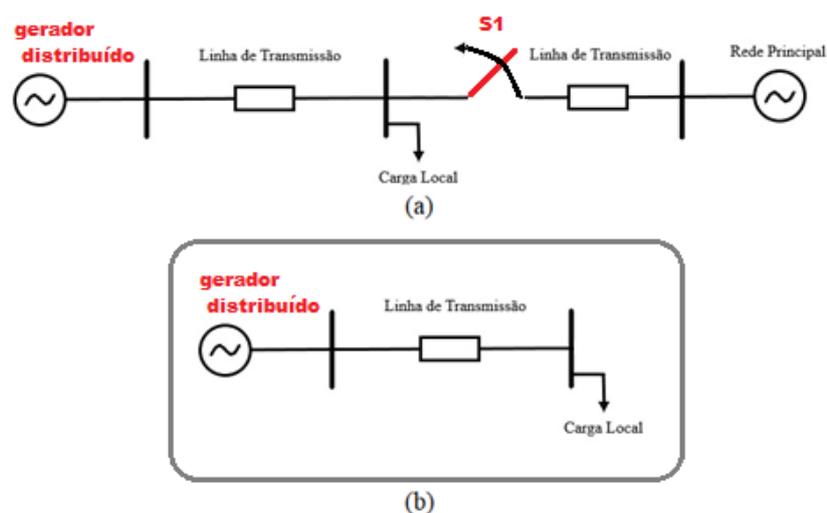
Diante desse contexto, este artigo tem como objetivo avaliar a operação de uma MR operando no modo conectado, atuando de forma que forneça potência ativa e reativa a rede de energia principal. Para isso, a MR é modelada utilizando o de controle de corrente com um controlador PI no referencial síncrono dq0 a fim de controlar sua corrente e conseqüentemente suas potências nos referenciais desejados.

2 PROCEDIMENTOS OPERACIONAIS DA PESQUISA

2.1 Apresentação do Sistema

Considere o diagrama unifilar da Fig. 1a, que compreende um único gerador conectado à rede principal e a uma carga local, através de linhas de transmissão. Caso a chave representada por “S1” esteja fechada, diz-se que a MR se encontra conectada ao sistema principal (Fig. 1a). Devido a uma perturbação na rede principal, por exemplo, a MR pode se tornar ilhada, através da abertura da chave “S1” (Fig. 1b). Neste caso a carga local seria suprida somente pela fonte distribuída, caracterizando uma MR. Contudo, neste trabalho será avaliada somente a operação no modo conectado.

Figura 1 – Diagrama Simplificado da Simulação. (a) Operação Conectada (b) Operação Ilhada

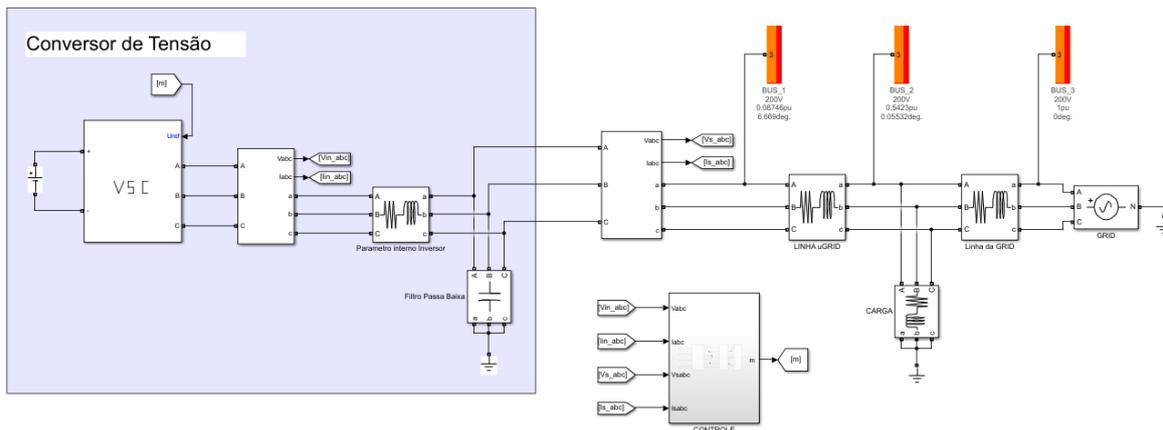


Fonte: Autoria Própria (2021)

Para avaliar a operação da MR no modo conectado, foi utilizado a plataforma Simulink do software MATLAB, como mostrado a Fig. 2. Cabe destacar alguns elementos básicos para sua composição do sistema

como o gerador distribuído, que é representado pelo conversor de tensão e seu controle, a carga local e a rede principal. Os principais parâmetros são apresentados no Apêndice..

Figura 2 – Microrrede Conectada à Rede Principal



Fonte: Autoria Própria (2021)

2.2 Conversor

O conversor utilizado foi um inversor PWM trifásico, que trabalha operando como uma fonte de tensão, onde a configuração de operação utilizada é chamada de modelo de valores médios, que segundo Yazdani e Iravani (2010) tem como objetivo dar mais ênfase no regime permanente. Esta configuração faz com que a saída do PWM dependa apenas da tensão aplicada e de seu sinal m recebido. Na saída do conversor é aplicado um filtro passa-baixa RC com o objetivo de melhorar o sinal de saída.

Com isso, podemos descrever a dinâmica do conversor com a equação 1, onde a tensão de saída V_t do PWM é dependente apenas do valor de tensão de entrada V_{dc} do conversor e de seu sinal modulador m .

$$V_t = m \frac{V_{dc}}{2} \quad (1)$$

2.3 Controle

Segundo Chung et al. (2000), para a viabilização dos controladores é necessário ocorrer uma mudança para o referencial síncrono (dq0) dado pela transformada de Park com a ajuda da malha de captura de fase ou *phase locked loop* (PLL), que trabalha com o intuito de acompanhar a frequência do sistema utilizando os sinais do eixo direto d e o eixo de quadratura q .

Pelo fato da MG trabalhar conectada à rede principal, o objetivo é atender as cargas locais e entregar potência ativa e reativa para a rede obedecendo a frequência nominal do sistema. Portanto, a primeira parte do controle tem como principal função encontrar as correntes de referência I_{dref} e I_{qref} através da combinação entre as tensões V_q e V_d com as referências de potências P_{ref} e Q_{ref} como pode ser visto na Fig. 3a.

Considerando que a diferença entre a corrente de referência definida e a corrente medida na saída do inversor estão situadas no referencial síncrono dq0, o controle de corrente pode ser construído utilizando dois

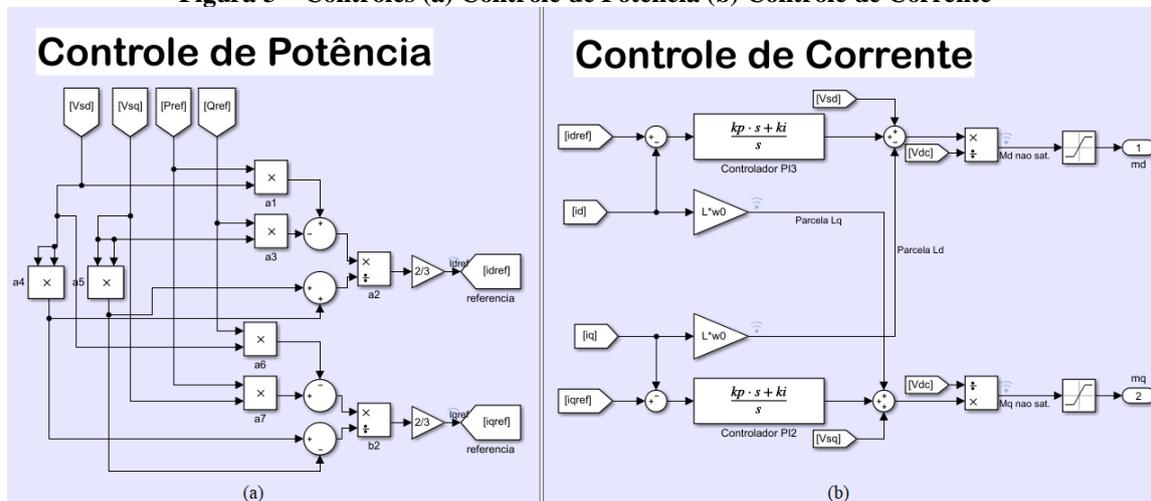
controladores PIs (Proporcional Integral) com desacoplamento (Fig. 3b)., a fim de zerar os erros de regime permanente que tendem a ter componentes contínuas

Considerando o comportamento do conversor e sabendo que os dois controladores são idênticos, as constantes que compõem a função de transferência podem ser determinadas pelas equações 2 e 3 onde as variáveis L , R e τ_{on} representam os parâmetros internos do inversor e τ_i representa a constante de tempo da malha fechada resultante, geralmente definida entre 0,5 e 5 milissegundos. (YAZDAMI e IRAVANI, 2010)

$$k_p = \frac{L}{\tau_i} \quad (2)$$

$$k_i = \frac{R + \tau_{on}}{\tau_i} \quad (3)$$

Figura 3 – Controles (a) Controle de Potência (b) Controle de Corrente



Fonte. Autoria Própria (2021)

Conforme Yazdami e Iravani (2010) o sinal que comanda o comportamento do inversor é dado pela transformação da soma dos sinais m_d e m_q para o referencial de tempo, resultando em m_{abc} . Este é seguido por um bloco de atraso discreto encontrado na biblioteca do Simulink com o nome de *unit delay* que tem como objetivo atrasar o sinal para o controle trabalhar de forma eficiente em loop na simulação.

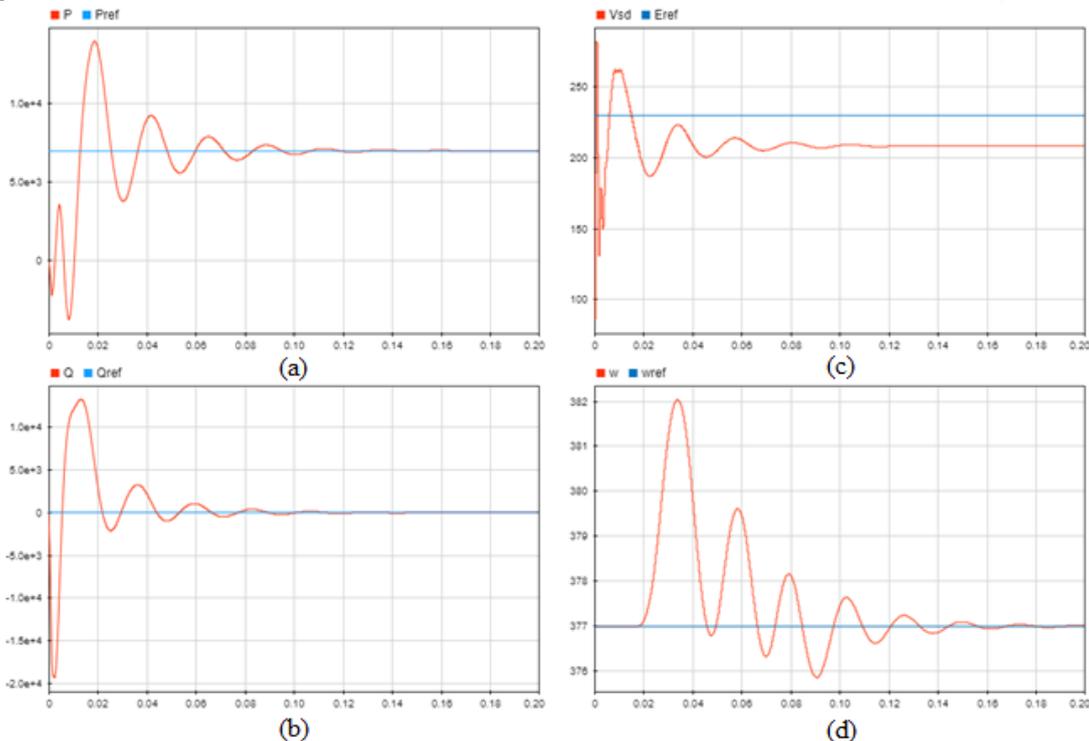
3 RESULTADOS

A operação do conversor foi avaliada a partir de uma comparação dos sinais de saída medidos e suas condições de referência que foram propostas nos parâmetros iniciais (Apêndice 1). Neste caso, não há a necessidade uma operação com muito tempo de simulação, pois o interesse se encontra apenas no regime transitório onde ocorre o funcionamento inicial dos controladores para a estabilização do sistema. Primeiramente foi feita a análise dos níveis de potência ativa e potência reativa (Fig. 4a e 4b respectivamente). As curvas em azul referem-se aos valores referência e as em vermelho as respostas obtidas. As potências ativas e reativas conseguem seguir os valores de referência de forma rápida (150 ms), o que indica que o controle está trabalhando de forma correta.

Pelo fato de que o compensador escolhido para ser utilizado na MR conectada ser o controle de corrente, não existe um foco direto em controlar os níveis de tensão, porém, observa-se na Fig. 4c um certo nível de aproximação entre o valor de tensão de saída e sua respectiva referência. Por fim, a frequência angular do

sistema segue a referência (Fig. 4d), resultando em erro nulo de regime permanente em, aproximadamente, 0.2 segundos de simulação. Note ainda que existe um desvio inicial causado pela adaptação da malha de captura de fase em estabelecer e se sincronizar com a frequência da rede principal.

Figura 4 – Resultados Obtidos (a) Potência Ativa (b) Potência Reativa (c) Tensões (d) Frequência



Fonte. Autoria Própria (2021)

4 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que a simulação com a proposta de uma microrrede conectada à rede principal foi capaz de realizar o controle adequado de frequência, níveis de tensão e potência ativa e reativa. Esta conclusão tem como base os erros nulos em regime permanente das saídas, já que estes se aproximaram dos seus respectivos referenciais.

O desempenho estável de operação do sistema como observado nos resultados obtidos, cria base para de projetos mais robustos e detalhados que possam operar sob circunstâncias mais hostis e simular melhor as condições reais de operação, permitindo que estudos mais avançados possam ser realizados, como a operação ilhada da MR, operação de vários conversores em paralelo e projeto dos controladores.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fundação Araucária pelo apoio financeiro e ao Eng. Paulo Godoy pelo apoio técnico.



REFERÊNCIAS

- BLAABJERG, F. et al. **Overview of Control and Grid Synchronization for Distributed Power Generation Systems**. Ieee Transactions On Industrial Electronics, [S.L.], v. 53, n. 5, p. 1398-1409, out. 2006. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- A. CAGNANO. **Microgrids: overview and guidelines for practical implementations and operation**. Applied Energy, [S.L.], v. 258, p. 114039, jan. 2020. Elsevier BV.
- CERTS (2002). The CERTS MicroGrid Concept, Integration of Distributed Energy Resources – The CERTS MicroGrid Concept p. 32.
- CHUNG, Se-Kyo. **A phase tracking system for three phase utility interface inverters**. IEEE Transactions on Power electronics, v. 15, n. 3, p. 431-438, 2000.
- Empresa de Pesquisa Energética - EPE. **Projeção de Demanda de Energia Elétrica (2017-2026)**. Rio de Janeiro. 2017.
- FARHANGI, H.. **The path of the smart grid**. Ieee Power And Energy Magazine, [S.L.], v. 8, n. 1, p. 18-28, jan. 2010. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- Lasseter, R. (2002). **MicroGrids**, 2002 IEEE Power Engineering Society Winter Meeting. Conference Proceedings (Cat. No.02CH37309), Vol. 1, IEEE, pp. 305–308.
- PEPERMANS, Guido et al. **Distributed generation: definition, benefits and issues**. Energy Policy, [S.L.], v. 33, n. 6, p. 787-798, abr. 2005. Elsevier BV.
- ROCABERT, Joan et al. **Control of Power Converters in AC Microgrids**. Ieee Transactions On Power Electronics, [S.L.], v. 27, n. 11, p. 4734-4749, nov. 2012. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE).
- SERBAN, Ioan et al. **Microgrid control based on a grid-forming inverter operating as virtual synchronous generator with enhanced dynamic response capability**. International Journal Of Electrical Power & Energy Systems, [S.L.], v. 89, p. 94-105, jul. 2017. Elsevier BV.
- YAZDAMI, Amirnaser; IRAVANI, Reza. **Voltage-Sourced Converters in Power System**. Willy-IEEE Press: Hoboken, NY, USA, v. 17, p. 91-107, 2010.

APÊNDICE

Além dos parâmetros apresentados a seguir, foi considerado um passo de integração de 10^{-5} segundos.

Variável	Valor	Unidade	Variável	Valor	Unidade
f_{ref}	60	Hz	C_{filtro}	45^{-6}	F
E_{ref}	230	V	R_{carga}	22	Ω
v_{dc}	600	V	L_{carga}	5^{-3}	H
P_{ref}	7000	W	R_{grid}	0.065	Ω
Q_{ref}	0	VAr	L_{grid}	1^{-3}	H
ω_{ref}	377	Rad/s	R_{linha}	0.065	Ω
R	0.1	Ω	L_{linha}	1^{-3}	H
r_{on}	0.88^{-3}	Ω	K_p	0.7250	-
L	1.45^{-3}	H	K_i	50.44	-
R_{filtro}	20	Ω	τ_i	2^{-3}	s

Fonte: Autoria própria (2021)