

CONTROLE *DROOP* ADAPTATIVO PARA BALANCEAMENTO DO ESTADO DE CARGA DE MÚLTIPLOS SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM MICRORREDES DESCENTRALIZADAS COM BARRAMENTO CA

Abstract— In this paper, a modified droop technique is described to perform the state of charge balancing of multiple battery storage systems in microgrids. Each of these systems is independent and maintained by its own grid-forming converter. In addition, this balancing is done without the use of logical communication between the different grid forming converters. In this way, it is possible to distribute them over the microgrid, helping to enhance the quality of energy delivered to the loads. The proposed parallelism technique is capable of balancing energy storage systems with different characteristics and connected to grid forming converters with different nominal powers. It is also noted that, unlike some techniques found in the literature, the technique proposed here is capable of operating without causing power limitations or reducing the power availability of the converters.

Keywords— Microgrids, Parallel Converters, Grid Forming Converters, State of Charge Balancing, State of Charge

Resumo— Neste artigo, descreve-se uma técnica de paralelismo por decaimento (*droop*) modificada para realizar o balanceamento do estado de carga de múltiplos sistemas de armazenamentos de baterias em microrredes. Cada um desses sistemas é independente e mantido pelo seu próprio conversor formador de rede. Também, esse balanceamento é feito sem uso de comunicação lógica entre os diferentes conversores formadores de rede. Desta forma, é possível que sejam distribuídos pela microrrede, auxiliando na melhor qualidade de energia entregue às cargas. A técnica de paralelismo proposta é capaz de balancear sistemas de armazenamento de energia com diferentes características e conectadas a conversores formadores de rede com potências distintas. Observa-se também que diferente de algumas técnicas dispostas na literatura, a técnica proposta é capaz de funcionar sem causar limitações de potência ou reduzir a disponibilidade de potência dos conversores.

Palavras-chave— Microrredes, Conversores em Paralelo, Conversores formadores de rede, Balanceamento, Estado de Carga

1 Introdução

A crescente presença das fontes de geração renováveis (*RES*, do inglês *Renewable Energy Sources*), especialmente solar fotovoltaica, conectadas ao sistema de distribuição de energia elétrica tem favorecido o desenvolvimento dos conceitos de microrredes. Estas, podem ser definidas como sistemas formados por um conjunto de unidades de geração distribuída (*DGU*, do inglês *Distributed Generation Unit*), cargas e sistemas de armazenamento de energia elétrica (*ESS*, do inglês *Energy Storage System*), todos interconectados e possivelmente conectados também à uma rede elétrica convencional externa [1]. Estes elementos são apresentados na Figura 1.

Uma microrrede é capaz de fornecer energia de forma ininterrupta, estando ela conectada à rede externa ou em operação isolada. Quando conectada à rede externa, a microrrede normalmente mantém seus *ESS* carregados e busca maximizar a produção, utilização e exportação da geração renovável [2].

Quando isolada da rede externa, em operação isolada, o balanço energético passa a ser função primordial da microrrede. Então, a mesma utiliza os *ESS* para superar a característica intermitente das fontes renováveis e manter controlados os níveis de tensão fornecidos às cargas.

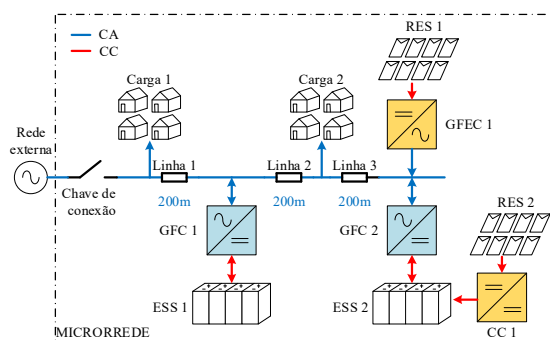


Figura 1. Principais elementos de uma microrrede: conversores formadores de rede (GFC), sistemas de armazenamento de energia (ESS), cargas, barramentos de distribuição, conversores alimentadores de rede (GPEC) e fonte renováveis (RES)

Existem diversas abordagens para a gestão e controle dos elementos de uma microrrede [3]. Algumas são baseadas em sistemas de controle centralizado [4] com estruturas de comunicação lógica entre todos os elementos [5]. Outras, em controles descentralizados (multimestre e mestre/escravo) porém com comunicação lógica [6]. Entretanto, em ambos os casos a presença da estrutura de comunicação lógica representa um risco de falha da rede por conta de um problema em qualquer dos elementos de comunicação [7] e também um acréscimo de custo devido à implantação desses sistemas em redes distribuídas por longas distâncias.

Outras abordagens propõem a gestão do balanço energético da microrrede de forma descentralizada sem qualquer estrutura para comunicação lógica entre os elementos da mesma [8]. Estas, normalmente se baseiam na divisão de potência entre os conversores através técnicas de paralelismo por *droop* [9] ou pela emulação de geradores síncronos [10].

A presença de *ESS*, que irão carregar-se ou descarregar-se para manter o balanço energético independentemente dos níveis de geração instantânea

das RES e do consumo das cargas, também pode trazer outros benefícios [11]. Entre eles, pode-se destacar: permitir otimizações econômicas de despacho, *peak shaving*, capacidade de suportar falhas de baixa tensão (LVRT, do inglês *Low Voltage Ride Through*), e melhoria da qualidade de tensão da rede, especialmente quando múltiplos ESS são aplicados de forma distribuída na microrrede.

Para algumas implementações de microrrede com barramentos CA de baixa tensão (e.g. 380V), a extensão total da que deve ser atendida com a rede de distribuição pode se tornar um complicador [12], e chegar a exigir que sejam utilizados barramentos de distribuição em média tensão (e.g. 13,8kV). Para algumas aplicações isso representa um aumento considerável no custo de operação e na insegurança do sistema, podendo chegar a inviabilizar a microrrede.

A utilização de múltiplos ESS certamente traz um novo nível de flexibilidade e confiabilidade para a microrrede. No entanto, acrescenta também novas preocupações, tais como: 1) conseguir operar mais de um ESS simultaneamente com controle descentralizado, mantendo-se ainda o controle da taxa de carga e descarga de cada um deles; 2) o balanceamento e a igualdade entre o número de ciclos de carga e descarga, de forma a maximizar a vida útil de cada ESS.

Via de regra, microrredes com controle descentralizado são gerenciadas através de alguma técnica de divisão de potência, como o *droop*, entre os conversores formadores de rede que estão associados aos ESS. Entretanto, o *droop* convencional busca somente o rateio da potência de cada elemento conforme a potência nominal dos conversores, não levando em consideração o estado de carga (SOC, do inglês *State of Charge*) ou o nível de saúde (SOH, do inglês *State of Health*) do ESS.

Para incluir as funções de balanceamento dos ESS algumas modificações do *droop* convencional já foram propostas. Em [13] propõe-se a utilização de um coeficiente de decaimento adaptativo, alterado em função do estado de carga dos ESS; em [14] propõe-se a divisão da curva de potência ativa em duas seções com coeficientes distintos.

Tais estratégias, apesar de funcionais, normalmente causam uma redução da disponibilidade de potência dos GFC à microrrede, fazem o sistema operar fora da faixa de frequência nominal ou causam o aparecimento de zonas não operacionais dentro da curva *droop*.

A abordagem mais clássica para realizar a inclusão dos valores de SOC nas curvas de decaimento é a modificação da inclinação conforme alguma equação ditada pelo SOC. Em [15] propõe-se uma técnica generalizada para a correção das curvas de decaimento conforme o modo de operação: em carga ou descarga, e conforme o valor do SOC, conforme a Figura 2.

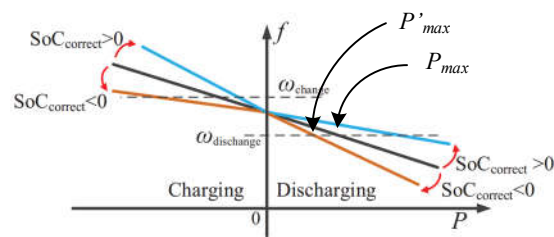


Figura 2. Figura adaptada de [15] mostrando as curvas frequência e potência ativa conforme correção do coeficiente de decaimento. Reduz-se o valor máximo de P, para o mesmo valor limite de frequência mínima ou máxima.

Entretanto, pode-se observar que, se inicialmente a potência máxima de operação daquele conversor fosse P_{max} , esta potência seria reduzida para P'_{max} . Nessa estratégia, caso todos os ESS de uma microrrede não estejam plenamente carregados, cria-se uma diminuição do somatório de potência máxima que os conversores poderiam fornecer, mesmo que transitoriamente.

Deve-se ter um claro entendimento de que, caso os ESS não estejam plenamente carregados, isso não significa que a capacidade de potência da microrrede deva ser alterada. Isso na verdade significa somente uma limitação da quantidade de energia que ela tem armazenada, e da autonomia antes de atingir a profundidade de descarga máxima dos ESS, caso não haja algum superávit momentâneo de energia por parte das fontes de geração. Uma limitação de potência pode deixar a rede vulnerável a transitório da carga, ou mesmo pode fazer com que a quantidade de potência dos GFC sejam sobre dimensionadas.

A principal contribuição deste artigo é propor uma estratégia capaz de balancear os ESS de uma microrrede, garantindo que a disponibilidade total de potência seja a mesma independente do estado de carga do sistema. Está técnica baseia-se em uma alteração do controle *droop* para atingir o balanceamento de múltiplos ESS distribuídos em uma microrrede CA, sem comunicação lógica e independente do número de elementos ou das características de capacidade de armazenamento e potência individual destes.

O artigo é disposto da seguinte forma: a Seção 2 descreve a técnica de paralelismo proposta e sua diferenciação em relação ao *droop* clássico; a Seção 3 apresenta resultados de simulação para uma microrrede de testes; e, por fim, tem-se as conclusões na Seção 4.

2 Proposta de *droop* modificado

Em geral, uma microrrede é composta por pelo menos dois tipos de elementos, conversores formadores de rede e conversores de conexão à rede. Os primeiros estão comumente associados à ESS, visto que precisam ter um suprimento estável de energia para manter controlados os níveis de tensão dentro da rede. Os segundos estão associados às fontes primárias de geração solar, eólica, etc., e tem o

objetivo de gerar a máxima quantidade de energia possível a cada instante, sendo limitados somente quando não há outro elemento na rede capaz de usar ou armazenar essa energia. Neste caso eles devem identificar a necessidade de limitar a sua potência de geração, ajudando dessa forma a manter o balanço energético da microrrede. Essa limitação está fora do escopo deste artigo e não será tratada. Entretanto, é utilizada essa limitação nas simulações, para garantir a estabilidade e o balanço energético da microrrede [16].

Os conversores formadores de rede (*GFC*, do inglês *Grid Forming Converter*) precisam suprir a potência ativa e reativa das cargas presentes dentro da microrrede, dividindo-as conforme a capacidade de potência individual de cada *GFC*. Elementos de maior potência assumem uma parte maior da carga e elementos de menor potência participam com uma potência proporcional à sua capacidade. Tudo isso pode ser garantido por um controle *droop* clássico, conforme apresentado nas equações 1 e 2. Adicionalmente pode-se utilizar uma parcela derivativa como forma de melhorar a resposta transitória da divisão de potências ativa e reativa [17].

$$f = f_0 - m_f \cdot P - m_{fd} \cdot \frac{dP}{dt} \quad (1)$$

$$V = V_0 - m_v \cdot Q - m_{vd} \cdot \frac{dQ}{dt} \quad (2)$$

O método proposto tem por objetivo considerar, na composição da curva de decaimento, o *SOC* dos *ESS* associados aos *GFC* de forma a alterar a proporção de energia fornecida ou absorvida da microrrede. Deseja-se alcançar uma curva de decaimento em que o *ESS* que possua menor *SOC*, em relação a outro, absorva maior potência ativa ou forneça menor potência ativa, proporcionalmente. Isso é alcançado fazendo com que o ponto $(f_0, 0)$ seja deslocado ao longo do eixo vertical, no sentido da origem, de uma quantidade Δf , que é função do *SOC*. No entanto as inclinações devem ser corrigidas de forma a manter os pontos de limites máximos e mínimos de potência e frequência, inalterados.

Esse deslocamento é apresentado na Figura 3 para dois *GFC* com mesma potência e capacidade de *ESS*. Nesta figura, pode-se perceber que o efeito desse deslocamento é, de fato, a diminuição da potência ativa fornecida ou o aumento da potência ativa absorvida para qualquer valor de frequência em que a curva de decaimento é definida.

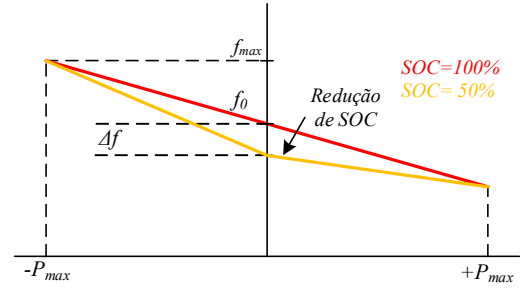


Figura 3. Curvas de decaimento de frequência em função da potência ativa para a técnica proposta. Em vermelho a curva para um *SOC* de 100% e em verde um exemplo para *SOC* de 50%. Mostrando uma redução no ponto central e consequente alteração das inclinações em ambos os lados da curva

Portanto, para que o método descrito seja realizado, a curva de decaimento passa a ser descrita pela equação (3), para a potência ativa, e pela equação (4), para a potência reativa. Sendo m_f e m_v os coeficientes de decaimento clássicos do método *droop*; P_{max} a potência nominal de cada *GFC*; *SOC* o estado de carga associado a cada *GFC*; P a potência ativa instantânea daquele elemento; e Q a potência reativa instantânea daquele elemento.

Utilizando as equações (3) e (4) a inclinação da reta é alterada conforme o *SOC*, sem que haja alteração dos valores limites de frequência e potências máximos e mínimos de operação. Permitindo-se o *GFC* operar de 0 até sua potência nominal, sem limitações impostas pela sua condição de *SOC*.

A Figura 4 apresenta a curva de decaimento modificada de acordo com a técnica proposta, considerando-se três diferentes estados de carga. Observa-se que para um *SOC* de 100%, a curva, em vermelho, seria exatamente igual à curva de decaimento clássica. Com *SOC* de 0%, observa-se que a inclinação da região da curva de decaimento localizada à direita do eixo de frequência se torna nula. Isso causa uma instabilidade na operação de paralelismo e precisa ser evitado através da definição de um valor mínimo para o *SOC* aplicado nas equações.

Considerando-se o caso de aplicação com baterias, essa limitação de *SOC* é intrínseca ao sistema, visto que um sistema prático não deve operar com estado de carga abaixo daquele definido pela profundidade de descarga máxima admitida pelas baterias. Normalmente, esta profundidade de descarga não ultrapassa 50% para baterias de solução chumbo-ácido.

$$f_i = \begin{cases} f_0 + (SOC_i - 1)m_f P_{i,max} - m_f \cdot SOC_i \cdot P_i & , se P_i \geq 0 \\ f_0 + (SOC_i - 1)m_f P_{i,max} + (SOC_i - 2)m_f \cdot SOC_i \cdot P_i & , se P_i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

$$V_i = V_0 - m_v \cdot Q_i \quad (4)$$

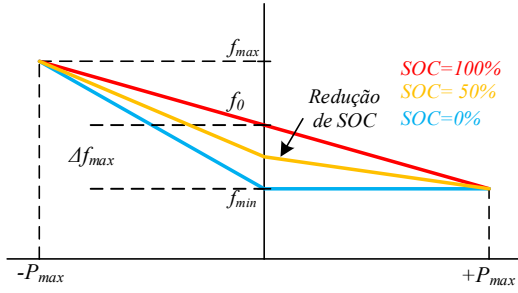


Figura 4. Curvas de decaimento da frequência em função da potência ativa considerando $SOC = \{0, 50 \text{ e } 100\}\%$.

Mostra-se na Figura 5 um exemplo de dois conversores de mesma potência e capacidade de armazenamento, operando em paralelo na ausência de qualquer outra carga ou fonte. Supondo que inicialmente eles possuíssem SOC de 100% e 50% respectivamente, eles trocariam energia entre si, de forma que ambos teriam potências opostas, até que eles se estabilizassem com SOC de 75%, mantendo então potência nula. Uma vez balanceados, os dois SOC permanecem balanceados, independente da inserção de cargas ou fontes no sistema. Reforça-se, entretanto, que a técnica alcança o balanceamento, independente da presença de cargas ou fontes no sistema.

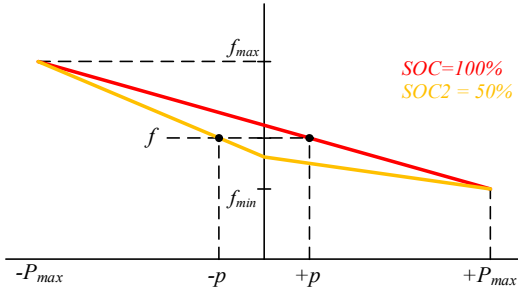


Figura 5. Curvas de decaimento da frequência em função da potência ativa considerando dois GFC com $SOC1=100\%$ e $SOC2=50\%$. Caso não houvesse nenhuma carga ou fonte conectada ao sistema, eles iriam operar com potências contrárias até que fosse realizado o balanceamento completo.

O coeficiente m_f é utilizado para relacionar o valor de potência ativa instantânea com a frequência a ser aplicada pelo sistema. Dessa forma, pode-se dimensioná-lo conforme a máxima variação de frequência nominal aceitável para a microrrede:

$$m_f = \frac{\Delta f_{max}}{P_{max}} = \frac{f_0 - f_{min}}{P_{max}} \quad (5)$$

Uma vez que a frequência central $f(P = 0)$ é função linear de SOC , pode-se determinar a frequência mínima de operação do GFC para potência zero conforme o valor mínimo de SOC a ser utilizado, da seguinte forma:

$$f_{min}(P = 0) = f_0 - \Delta f_{max}(1 - SOC_{min}) \quad (6)$$

3 Resultados de simulação

Para efeito de análise da técnica proposta, foram realizadas simulações em uma microrrede monofásica descentralizada com barramento CA interconectando dois GFC , cada um conectado a um ESS individual simulando bancos de baterias estacionárias, um conversor alimentador de rede ($GFEC$, do inglês *Grid Feeding Converter*) conectado a um sistema de geração fotovoltaica, e três cargas CA em pontos distintos da rede, conforme visto na Figura 6.

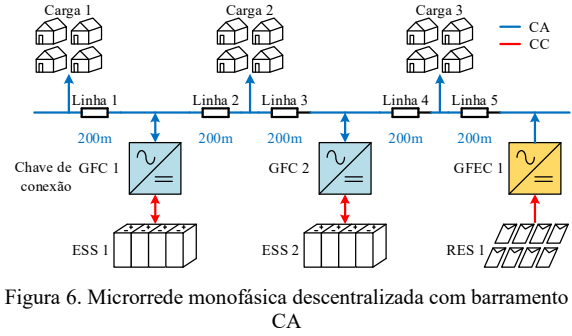


Figura 6. Microrrede monofásica descentralizada com barramento CA

3.1 Configuração da Microrrede

O barramento de distribuição é composto por cinco linhas de 200 m cada. Para as características da linha foram consideradas a resistência de $0,46\Omega/km$ e indutância de $291\mu H/km$, que são típicas de uma rede de distribuição aérea trifásica multiplexada com cabos de cobre de $50mm^2$ com isolamento XLPE. Tal rede é comumente utilizada em redes de distribuição em tensões de 220/380V.

Essa extensão total de 1km é um limite prático comumente adotado para redes de distribuição em sistemas isolados. Dependendo da distribuição de cargas, a queda de tensão nos extremos da linha se torna muito elevada e exige a utilização de cabos maiores ou a distribuição em níveis mais elevados de tensão. Esse tipo de problema pode ser resolvido de forma mais eficiente através do uso de múltiplos GFC alocados ao longo da rede de distribuição.

Os valores para ajuste da curva de decaimento foram configurados em: $f_{max} = 60,5Hz$, $f_{min} = 59,5Hz$, com valor central em 60Hz. Foi admitida uma saturação de cada SOC com o valor mínimo de 50%, de forma a evitar problemas de instabilidade relacionados a coeficientes de decaimento muito pequenos.

Cada ESS foi configurado com uma capacidade de armazenamento de 100 A. s, para manter os tempos de carregamento e descarregamento dentro de intervalos da ordem de alguns segundos. Isso faz com que a dinâmica de variação dos SOC seja mais rápida que em um sistema real.

A potência nominal para cada GFC é de 10kVA. Cada GFC é controlado como uma fonte de tensão, cujas referências de frequência e amplitude são geradas conforme (2) e (3).

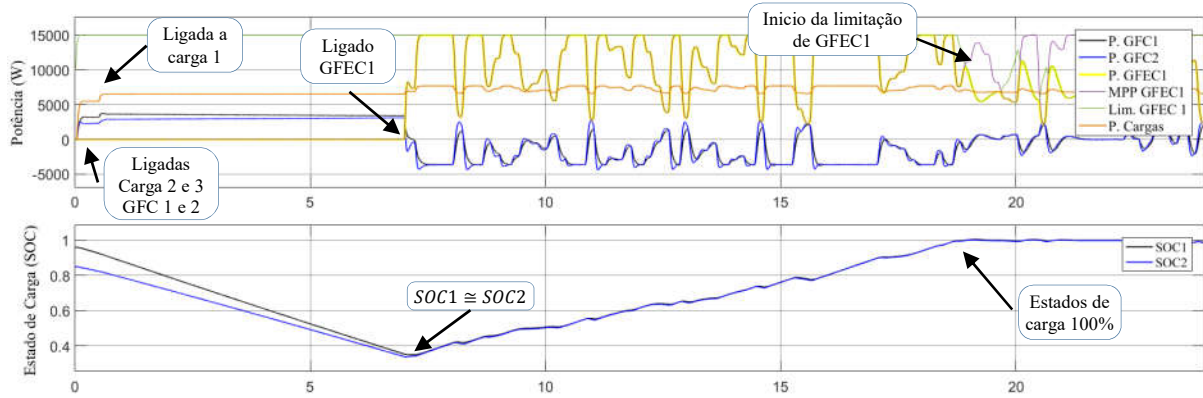


Figura 7. Curvas de potência e SOC para todo o período de testes de 0 a 23 segundos. Na parte superior a potência de *GFC1* (preto), a potência de *GFC2* (azul), a potência de *GFEC1* (amarelo), a potência máxima da fonte renovável (roxo), a potência limite de injeção de *GFEC1* (verde) e a potência total das cargas 1,2 e 3 (laranja).

A conexão dos *GFC* à microrrede é realizada através de um filtro LCL, com $L_1 = 1\text{mH}$, $L_2 = 0,5\text{mH}$, $C_f = 30\mu\text{F}$.

A potência nominal do *GFEC* é de 15kW. Ele é acionado como uma fonte de corrente e configurador para trabalhar com potência aleatória e intermitente, permitindo a injeção de potências que variam entre 3 e 15kW

3.3 Resultados

A Figura 7 mostra um ciclo completo de descarga e carga de ambos os *ESS* durante um intervalo em que as cargas 1,2 e 3 são conectadas e desconectadas. Inicialmente o *SOC* do *ESS1* associado ao *GFC1* e do *ESS2* associado ao *GFC2* foram configurados em 96 e 85% respectivamente. Todas as cargas possuem característica resistiva e têm sua potência nominal em 220V. Inicialmente estão conectadas a carga 2 com 500W e a carga 3 com 5000W. Na Figura 8 mostra-se em detalhe o intervalo de 0 a 1s.

Na Figura 8, inicialmente há um transitório de aproximadamente 150ms para estabilização do paralelismo dos *GFC*. Conta-se também nesse início o transitório relacionado aos filtros utilizados para cálculo das potências ativa e reativa, que possuem um característica passa-baixa com largura de faixa de 10Hz para eliminar as oscilações de potência inerentes a um sistema monofásico.

Após o transitório inicial, nota-se que, por conta da diferença entre os *SOC*, *GFC1* e *GFC2* estão fornecendo 3192W e 2308W respectivamente, entregando às cargas 5457W. Durante este intervalo *GFEC1* está desligado. Em 0,5s a carga 1 passa a consumir 1000W. Essa potência adicional é fornecida em conjunto por *GFC1* e *GFC2*, que aumentam proporcionalmente suas potências.

De 0,5s a 7s, a diferença de *SOC* dos conversores vai sendo reduzida, fazendo com que aos 7 segundos eles estejam com 34% e 33% e os seus conversores, com 3377W e 3100W, respectivamente, (ver Figura 7).

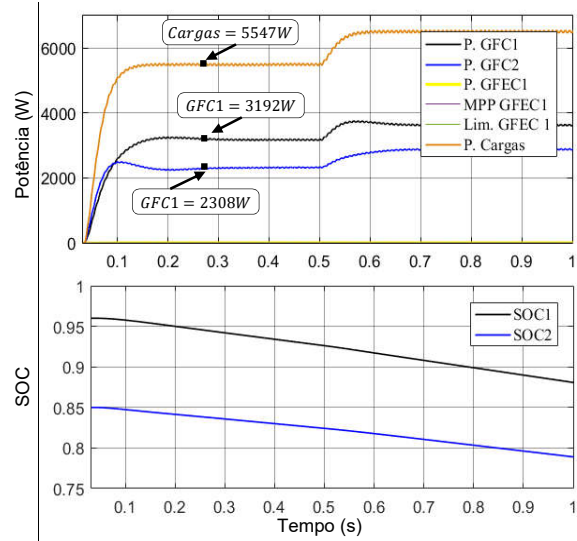


Figura 8. Curvas de operação da microrrede entre 0 e 1s. Mostra-se a inicialização dos conversores e a sua divisão de potência frente a diferentes SOC e degraus de carga.

Aos 7s é habilitada a fonte de geração através de *GFEC1*, que opera simulando uma geração intermitente entre 3 e 15kW. Na Figura 7 a curva em amarelo mostra a potência injetada por *GFEC1*, a curva em roxo o valor máximo que poderia ser injetado, conforme o ponto de máxima potência (*MPP*) de *RES1*, e em verde o limite que pode ser injetado conforme o balanceamento de potência da microrrede. Pode-se observar que sem que o *SOC1* é menor que 100% a potência injetada (amarelo) coincide com a curva de *MPP* (roxo). Após *SOC1* atingir 100% a curva de potência passa a ser limitada pelo limite de potência para balanceamento (verde).

O intervalo de 7 a 15s é destacado na Figura 9 nele observa-se que, transitoriamente, *GFC1* e *GFC2* fornecem e absorvem potência com uma dinâmica diferente, porém convergem para a mesma potência. No modelo de rede utilizado para a simulação *GFC2* está mais próximo a barra onde *GFEC1* está conectado, dessa forma ele possui uma resposta mais rápida às variações de potência e tensão ocasionadas nesta barra por *GFEC1*. Entretanto após o transitório, as potências se equilibram e são divididas conforme os

SOC individuais, que neste exemplo são aproximadamente os mesmos.

Conforme a potência injetada por *GFEC* varia, os *GFC* absorvem o excedente ou fornecem energia para continuar suprindo a necessidade de potência das cargas. Observa-se que a potência total das cargas (curva laranja) varia ao longo do tempo, mesmo não havendo mudança nas cargas conectadas ao sistema. Isso acontece pela variação de tensão no ponto de conexão das cargas, ocasionada pelas quedas de tensão nas linhas de distribuição conforme o fluxo de potência no sistema se altera.

Observa-se, também, que mesmo com as variações de potência da rede os estados de carga permanecem balanceados durante todo o intervalo. A partir de 7s o sistema opera com superávit de energia, causando o aumento do *SOC* dos *ESS* associados a cada *GFC*.

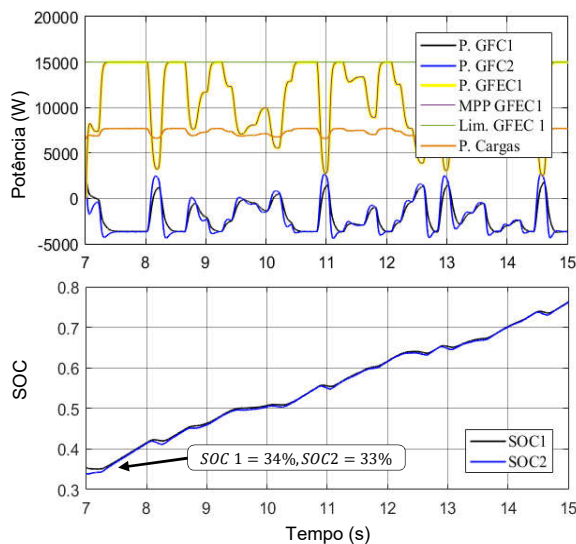


Figura 9. Curvas de operação da microrrede entre 7 e 15s. Mostra-se que os *SOC* permanecem balanceado mesmo enquanto sendo carregados de forma intermitente.

Na Figura 10 é mostrado o intervalo entre 15 e 23s. Durante esse intervalo, o sistema permanece com superávit de energia, dessa forma ambos os *SOC* continuam se elevando. Aos 19s eles atingem a 100% de carga e, a partir desse momento, a fonte *GFEC1* deixa de injetar toda a energia disponível (curva em roxo) e passa a seguir um limite de potência estabelecido dinamicamente (curva em verde) para manter o equilíbrio de energia dentro da microrrede. Como comentado anteriormente, não é foco deste artigo tratar dessa metodologia de limitação, entretanto mostra-se que, mesmo na situação de limitação de energia na microrrede, o método de balanceamento proposto é capaz de balancear e manter balanceados os *ESS* independente do estado de carga ou geração.

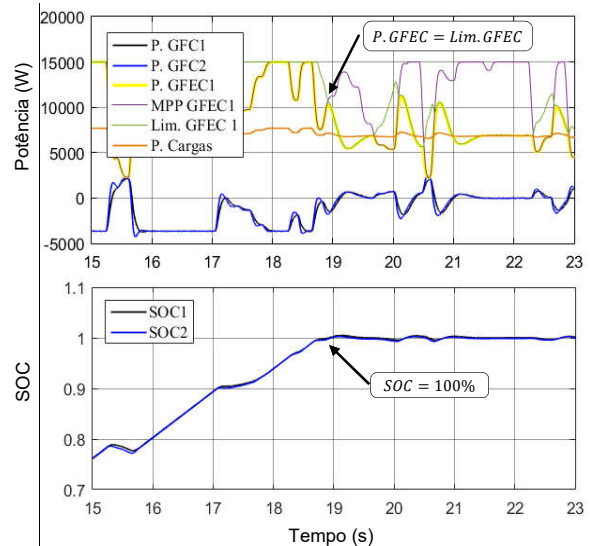


Figura 10. Curvas de operação da microrrede entre 15 e 23s. Mostra-se o momento em que os *SOC* atigem 100% e a potência de *GFEC1* passa a ser limitada.

4 Conclusão

Observa-se que a estratégia proposta foi capaz de balancear os estados de carga de dois sistemas de armazenamento de energia distribuídos em uma microrrede independentemente do estado de carga inicial de cada um. O balanceamento independe também do saldo de energia da microrrede, isto é, se os *ESS* estão se carregando ou descarregando.

A técnica proposta não altera os valores de potência máxima de fornecimento e absorção nas curvas de decaimento. Dessa forma a potência total dos conversores formadores de rede está sempre disponível para ser utilizada pela microrrede, independente do estado de carga individual de cada elemento.

Referências Bibliográficas

- [1] N. Hatziaegyriou, H. Asano, R. Iravani, and C. Marnay, "Microgrids," *IEEE Power Energy Mag.*, vol. 5, no. 4, pp. 78–94, 2007.
- [2] A. Gkountaras, *Modeling techniques and control strategies for inverter dominated microgrids*. 2017.
- [3] E. Federau, E. Blasius, and P. Janik, "Classification of control features related to microgrid operation standardisation," no. 10, pp. 254–257, 2016.
- [4] J. Y. Kim *et al.*, "Cooperative control strategy of energy storage system and microsources for stabilizing the microgrid during islanded operation," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 25, no. 12, pp. 3037–3048, 2010.
- [5] K. T. Tan, X. Y. Peng, P. L. So, Y. C. Chu, and M. Z. Q. Chen, "Centralized control for parallel operation of distributed generation inverters in microgrids," *IEEE Trans. Smart*

- Grid*, vol. 3, no. 4, pp. 1977–1987, 2012.
- [6] A. Mortezaei, M. Simoes, M. Savaghebi, J. Guerrero, and A. Al-Durra, “Cooperative Control of Multi-Master-Slave Islanded Microgrid with Power Quality Enhancement Based on Conservative Power Theory,” *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3053, no. c, pp. 1–1, 2016.
 - [7] V. S. Bindhu and D. M. M. S. R. Prabha, “A Survey on Control and Communication of Smart Micro Grid,” *Indian J. Sci. Technol.*, vol. 8, no. 25, pp. 1–6, 2015.
 - [8] K. O. Oureilidis and C. S. Demoulias, “Microgrid wireless energy management with energy storage system,” *Proc. Univ. Power Eng. Conf.*, 2012.
 - [9] X. Zhu, “Micro-grid Inverter Parallel Droop Control Method for Improving Dynamic Properties and the Effect of Power Sharing,” no. Iea, pp. 124–129, 2015.
 - [10] Dongxu Wang and Hongbin Wu, “Application of virtual synchronous generator technology in microgrid,” *2016 IEEE 8th Int. Power Electron. Motion Control Conf. (IPEMC-ECCE Asia)*, pp. 3142–3148, 2016.
 - [11] K. O. Oureilidis and C. S. Demoulias, “An enhanced role for an energy storage system in a microgrid with converter- interfaced sources,” vol. 2014, pp. 1–8, 2014.
 - [12] L. A. Luiz, O. R. Saavedra, J. G. De Matos, G. Bonan, and A. S. Martins, “Small renewable hybrid systems for stand alone applications,” *2009 IEEE Power Electron. Mach. Wind Appl. PEMWA 2009*, 2009.
 - [13] R. Hu, “State of Charge Balancing Droop,” 2015.
 - [14] S. I. Gkavanoudis, K. O. Oureilidis, and C. S. Demoulias, “An adaptive droop control method for balancing the SoC of distributed batteries in AC microgrids,” in *2016 IEEE 17th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL)*, 2016, pp. 1–6.
 - [15] G. Shi, Y. Sun, H. Han, M. Su, X. Hou, and Z. Luo, “A unified SOC balancing method with low-bandwidth distributed communication in island microgrid,” no. 2016, pp. 573–578, 2017.
 - [16] J. G. De Matos, L. A. D. S. Ribeiro, and E. D. C. Gomes, “Power control in isolated Microgrids with renewable distributed energy sources and battery banks,” *Proc. 2013 Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl. ICRERA 2013*, no. October, pp. 258–263, 2013.
 - [17] M. I. Azim, “An Improved Droop Control Scheme for Islanded Microgrids,” pp. 225–229, 2015.