

Gian Dias de Mello

**Melhoria da Resposta Transitória em Máquinas
Síncronas Virtuais com Controle de
Decaimento Auxiliar via Filtros de Washout**

Alegrete, RS

19 de dezembro de 2018

Gian Dias de Mello

Melhoria da Resposta Transitória em Máquinas Síncronas Virtuais com Controle de Decaimento Auxiliar via Filtros de Washout

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Área de Concentração em Controle de Sistemas, da Universidade Federal do Pampa (Unipampa, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Elétrica**.

Universidade Federal do Pampa – Unipampa

Curso de Engenharia Elétrica

Orientador: Prof. Dr. Márcio Stefanello

Alegrete, RS

19 de dezembro de 2018

GIAN DIAS DE MELLO

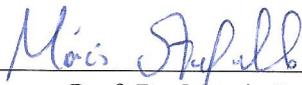
**MELHORIA DA RESPOSTA TRANSITÓRIA EM MÁQUINAS SÍNCRONAS VIRTUAIS COM
CONTROLE DE DECAIMENTO AUXILIAR VIA FILTROS DE WASHOUT**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Pampa, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

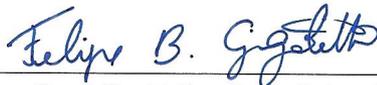
Área de Concentração: Controle de Processos Eletrônicos e Eletrônica Industrial

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado em: 7 de dezembro de 2018.

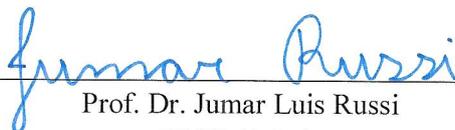
Banca examinadora:



Prof. Dr. Marcio Stefanello
Orientador



Prof. Dr. Felipe Bovolini Grigoletto
UNIPAMPA



Prof. Dr. Jumar Luis Russi
UNIPAMPA

Dedico este trabalho a meus pais, pois sem eles eu não estaria concluindo a graduação.

Agradecimentos

Agradeço a minha família, em especial aos meus pais pelo apoio tanto financeiro quanto emocional para que eu finalizasse a graduação. Agradeço aos meus amigos por todos os momentos vividos durante essa etapa tão importante da minha vida. Agradeço aos colegas de laboratório e professores do grupo GPSEL, por me propiciarem um ambiente incrível que possibilitou o meu desenvolvimento profissional e pessoal.

“Tudo aquilo que o homem ignora, não existe para ele. Por isso o universo de cada um, se resume no tamanho de seu saber.”
(Albert Einstein)

Resumo

A crescente demanda por fontes renováveis de energia e sua inserção no sistema elétrico de potência tem motivado diversos trabalhos na área de controle aplicado em microrredes. Dentre as diversas técnicas de controle existentes, a máquina síncrona virtual (MSV) têm despertado grande interesse por parte dos pesquisadores nos últimos anos. A MSV consiste em conversores de potência controlados de forma a emular, com certa fidelidade, as dinâmicas de uma máquina síncrona real através de malhas de controle de frequência e fluxo. Dessa forma, os conversores adquirem propriedades importantes presentes em máquinas síncronas reais, tais como inércia e auto sincronização, contribuindo para a estabilidade de tensão e frequência do sistema. Nesse trabalho a MSV conhecida como synchronverter é modificada por meio da adição de controladores por curvas de decaimento (ou controle de droop) baseado em filtros de washout. As correntes do conversor são melhoradas de forma a obter melhor resposta em regime transitório. O projeto da constante de tempo dos filtros de washout é obtido de acordo com os parâmetros da MSV. Uma nova grandeza denominada quorte, recentemente introduzida na literatura, é usada ao invés da potência reativa para gerar o fluxo da MSV. O quorte é relacionado com a potência reativa da mesma forma que o torque é relacionado com potência ativa. São apresentados resultados de simulação para demonstrar o bom desempenho da estratégia de controle proposta.

Palavras-chave: Máquina Síncrona Virtual. Curvas de decaimento. Filtros de washout. Microrredes.

Abstract

The increasing demand for renewable sources of energy and its insertion in the electric power system has motivated several works in the area of control applied in micrredes. Among the several existing control techniques, the virtual synchronous machine (MSV) has aroused great interest on the part of the researchers in recent years. The MSV consists of controlled power converters in order to emulate, with some fidelity, the dynamics of a real synchronous machine through frequency and flow control loop. In this way, the converters acquire important properties present in real synchronous machines, such as inertia and self-synchronization, contributing to the system's voltage and frequency stability. In this work the MSV known as synchronverter is modified by the addition of controllers by decay curves (or droop control) based on washout filters. The converter currents are improved so as to obtain a better transient response. The time constant design of the washout filters is obtained according to the MSV parameters. A new quantity called quorte, recently introduced in the literature, is used instead of the reactive power to generate the MSV flow. The quorte is related to reactive power in the same way that torque is related to active power. Simulation results are presented to demonstrate the good performance of the proposed control strategy.

Key-words: Virtual synchronous machine. droop control. Washout filters. microgrids.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Sistema elétrico com unidades de geração distribuída	21
Figura 2 – Microrrede de energia e seus componentes básicos	24
Figura 3 – Níveis hierárquicos de controle em MR's	25
Figura 4 – Circuito de potência do synchronverter adaptado de (ZHONG; WEISS, 2011).	31
Figura 5 – Diagrama de blocos da estrutura de controle do synchronverter adaptado de (ZHONG; WEISS, 2011).	32
Figura 6 – Sistema elétrico considerado.	33
Figura 7 – Diagrama de blocos da estrutura completa do controlador proposto. . .	36
Figura 8 – Sequência de eventos utilizada na simulação	39
Figura 9 – Tensão entre conversor e a rede no período de sincronização	39
Figura 10 – Comportamento da frequência da MSV	39
Figura 11 – Comportamento da potência ativa da MSV	40
Figura 12 – Comportamento da potência reativa da MSV	40
Figura 13 – Comportamento do fluxo da MSV	41
Figura 14 – Comportamento da corrente	41

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do sistema utilizados na simulação.	38
---	----

Sumário

1	Introdução	19
2	Geração Distribuída	21
3	Microrredes de Energia	23
3.1	Estrutura Geral das MR's	23
3.2	Controle Aplicado em MR's	24
4	Máquina Síncrona Virtual (MSV)	27
4.1	Principais Trabalhos da Literatura	27
4.2	Descrição e Implementação do Synchronverter	29
5	Proposta de Máquina Síncrona Virtual Com Controle por Curvas de Decaimento Auxiliar Baseada em Filtros de Washout	33
5.1	Modelagem da Planta	33
5.2	Descrição da Estrutura de Controle	35
5.3	Operação e Resultados de Simulação	38
6	Conclusão	43
	Referências	45

1 Introdução

A geração distribuída é uma realidade. De acordo com dados da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a potência instalada em microgerações no Brasil passou de 0,5 MW (em 05/2013) para 114,7 MW (em 05/2017). Desses 114,7 MW, 70% são oriundos da geração solar fotovoltaica seguido de 9% de geração eólica. Além disso, foi elaborado um estudo estimando que até 2024, a potência instalada de geração fotovoltaica no Brasil será de 3,2 GW. Esse contexto motiva a disseminação das denominadas microrredes de energia (MR's).

Microrredes de energia são definidas como uma ou mais unidades de geração distribuída em pequena escala que atendem cargas locais, podendo ou não conter dispositivos armazenadores de energia (OLIVARES et al., 2014). É comum o uso de conversores de potência no processamento da energia gerada e como interface na conexão da MR com a rede principal. Em sistemas de geração fotovoltaicos e eólicos, conversores de potência são utilizados para extrair a máxima potência de geração, visto que essas fontes geradoras operam em diversos níveis de tensão e corrente (ABDEL-RAHIM; FUNATO, 2015). Em aplicações onde a MR possui dispositivos armazenadores de energia, são empregados conversores específicos para controlar a carga e descarga desses equipamentos, de forma a aumentar sua eficiência (MARCELINO, 2017). Em MR's que possuem geração em corrente contínua, são utilizados conversores CC-CA denominados inversores, que possibilitam a conexão da MR com a rede principal. O controle do inversor é de fundamental importância para garantir a estabilidade e funcionamento do sistema elétrico.

Uma das técnicas mais difundidas no controle de MR's é o controle por curvas de decaimento (*droop control*). Consiste em fazer o compartilhamento de carga entre os conversores presentes na microrrede utilizando a relação entre variação de potência ativa e reativa com frequência e tensão (CHANDORKAR; DIVAN; ADAPA, 1993). Desde a proposta inicial, diversas contribuições foram feitas no controle por curvas de decaimento, de forma a obter melhorias e tratar as desvantagens em relação à proposta inicial (PLANAS et al., 2013). A principal limitação do controle por curvas de decaimento são os desvios de frequência e tensão que faz com que essa técnica não garanta a sincronização com a rede. De forma a solucionar esses desvios, estruturas de comunicação de dados são utilizadas para gerar referências em cada unidade de processamento de energia (GUERRERO et al., 2013b). Entretanto, estruturas de comunicação não são desejáveis, pois à medida que o número de conversores aumenta, o sistema ganha complexidade. Além disso, problemas com integridade de dados durante a transmissão podem comprometer o funcionamento de todo o sistema. Recentemente, foram utilizados filtros de washout para implementar controladores por curvas de decaimento, demonstrando que a abordagem é equivalente

à adição de estruturas de comunicação (HAN et al., 2017). Dessa forma, estruturas de comunicação não são mais necessárias.

A máquina síncrona Virtual é uma alternativa ao controle por curvas de decaimento e tem se mostrado uma tecnologia promissora para ser adotada no controle de conversores de potência em MR's. Do conhecimento do autor, a primeira abordagem que utiliza o conceito de MSV no controle de conversores é proposta em (BECK; HESSE, 2007). A ideia fundamental é emular as dinâmicas presentes numa máquina síncrona real, como a inércia, o amortecimento e a capacidade de sincronização com a rede.

Desde a proposta inicial, diversas abordagens foram realizadas para implementar MSV's, com uma possível classificação apresentada em (D'ARCO; SUUL, 2013). Dessas abordagens, o synchronverter proposto em (ZHONG; WEISS, 2011) e suas variações (ZHONG et al., 2014) e (ZHONG; STEFANELLO, 2017) tiveram grande destaque devido a inserção de propriedades como auto sincronização e passividade às MSV's.

MSV's, em geral, não utilizam realimentação direta da corrente. Dessa forma, dependendo do perfil de carga, transitórios podem ocasionar sobrecorrentes severas. O presente trabalho propõe uma abordagem que utiliza a estrutura modificada da MSV (ZHONG; STEFANELLO, 2017) incluindo uma malha auxiliar de controle por curvas de decaimento via filtros de washout. O objetivo principal é mitigar as sobrecorrentes ocorridas devido a transitórios em MSV's. As propriedades de auto sincronização e passividade são mantidas. O trabalho é organizado da seguinte forma: Nos Capítulos 2 e 3 são fundamentados os conceitos de geração distribuída e microrredes de energia bem como sua estrutura, propriedades e desafios relacionados a controle; No capítulo 4 é feita uma breve revisão sobre as MSV's e suas características; No capítulo 5 é apresentada a MSV proposta sendo descrito todo o equacionamento e operação além de expor os resultados obtidos; O capítulo 6 conclui o trabalho.

2 Geração Distribuída

O sistema tradicional de energia elétrica se caracteriza por grandes unidades de geração atendendo cargas localizadas, geralmente, em longas distâncias. Assim, a energia gerada nesses grandes centros necessita de sistemas de transmissão e distribuição de energia para possibilitar o suprimento de energia para o consumidor final. Devido às características de construção e às longas distâncias, ocorrem perdas consideráveis de energia ao longo do sistema de transmissão (TUTTELBERG; KILTER, 2015).

Diferentemente do sistema elétrico tradicional, um sistema com geração distribuída é caracterizado por conter diversas fontes de geração de energia, em menor escala, próximas às cargas. A Figura 1 demonstra um sistema de energia genérico com unidades de geração distribuída.

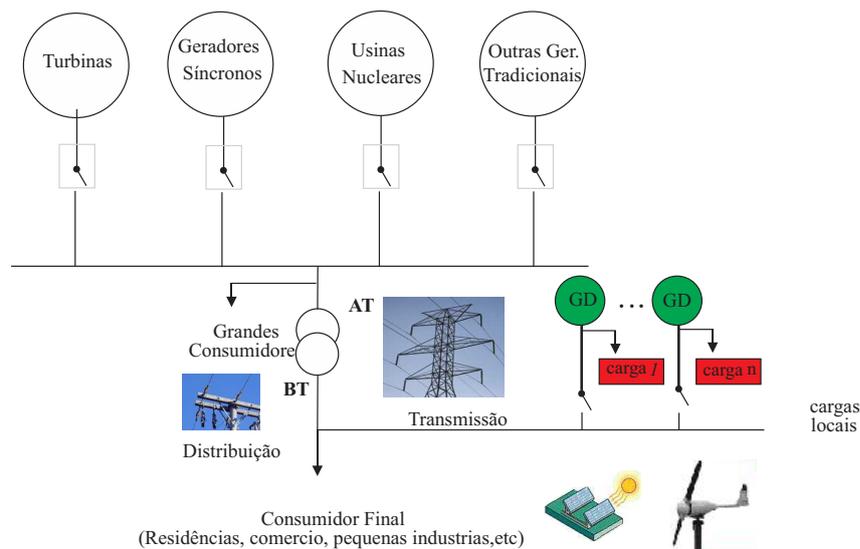


Figura 1 – Sistema elétrico com unidades de geração distribuída .

Como é possível observar na Figura 1, o sistema passa a ser mais complexo pois, além das unidades de geração tradicionais, possui unidades geradoras distribuídas ao longo do sistema. Outra observação é que as perdas de energia por transmissão e distribuição são reduzidas, devido à proximidade entre a geração e as unidades consumidoras. Essa proposta de sistema elétrico descentraliza a geração de energia e permite a integração de fontes renováveis no sistema elétrico contribuindo para a disseminação das denominadas microrredes de energia.

3 Microrredes de Energia

De acordo com (OLIVARES et al., 2014) microrredes de energia (MR's) consistem de um sistema com múltiplas unidades de geração distribuída, alimentando cargas de diversas naturezas, possuindo ou não unidades de armazenamento de energia bem como conversores eletrônicos de potência. As MR's podem operar em modo ilhado (isoladas) ou conectado ao sistema elétrico principal. Esse capítulo faz uma revisão sobre a estrutura geral das MR's, topologias e principais técnicas de controle.

3.1 Estrutura Geral das MR's

Dependendo da aplicação, uma MR pode ser concebida de diversas formas. Assim, podem ser de corrente contínua (CC) ou alternada (CA); podem estar conectadas ou não ao sistema elétrico principal; podem conter ou não sistemas de armazenamento de energia e ainda existem MR's híbridas que operam tanto no modo conectado quanto no modo ilhado. A seguir, são descritos os principais elementos que constituem uma MR.

- Unidades de geração distribuída. São oriundas de fontes renováveis como solar fotovoltaica, eólica, biocombustível e hidrogênio, por exemplo. Também podem ser compostas por geradores a combustíveis fósseis, embora possuam desvantagens ambientais
- Conversores eletrônicos de potência. São utilizados como dispositivos de interface entre as unidades de geração e cargas locais situadas ao longo da MR. Esses conversores processam a energia gerada, provendo níveis e características adequadas para a devida alimentação das cargas presentes na MR. Além disso são utilizados na conexão com a rede principal. São dispositivos fundamentais nas MR's, pois precisam ser devidamente controlados de forma a manter a estabilidade do sistema elétrico.
- Dispositivos de armazenamento de energia. Baterias, flywheels, supercapacitores, etc. São utilizados em sistemas que garantem o fornecimento de energia, mesmo durante faltas na rede principal. É comum o uso em conjunto com conversores específicos para um aumento na eficiência e vida útil, controlando a carga e descarga.

Como foi dito anteriormente, MR's podem ser concebidas para operar tanto em corrente contínua quanto em corrente alternada. No entanto, existe um interesse pelas MR's híbridas que integram fontes CC e CA de maneira a agregar as vantagens de cada uma. Nas MR's CC não ocorre circulação de potência reativa, o que reduz as perdas

ao longo da MR. Além disso, as aplicações em sistemas fotovoltaicos, armazenamento em baterias, unidades ininterruptas de energia viabilizam ainda mais as microrredes CC (JIANG; YU, 2008). A Figura 2 mostra a composição geral de uma MR.

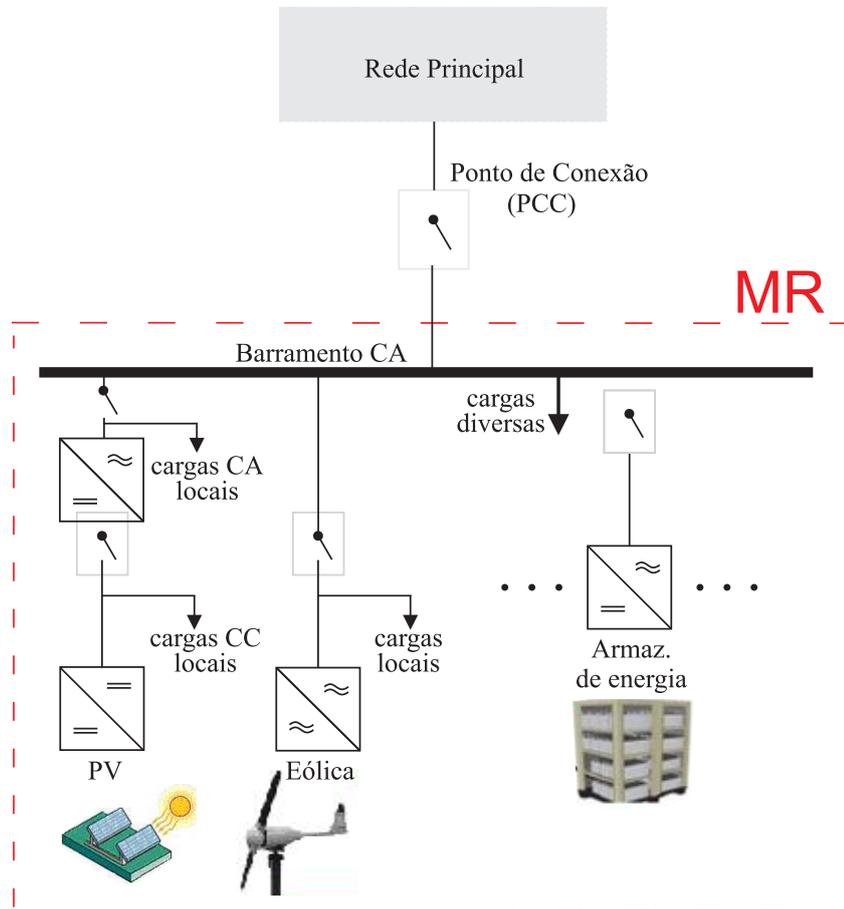


Figura 2 – Microrrede de energia e seus componentes básicos

Através da Figura 2, é possível observar a presença de conversores eletrônicos ao longo de um sistema contendo MR's. Esses conversores devem ser controlados de forma a manter a estabilidade do sistema de forma a possibilitar a operação da MR tanto no modo conectado quanto no modo ilhado.

3.2 Controle Aplicado em MR's

A disseminação de microgeradores de energia conectados ao sistema elétrico interligado pode ocasionar sérios problemas do ponto de vista de estabilidade (HOROWITZ; PHADKE; RENZ, 2010). Isso ocorre pois, diferentemente das máquinas síncronas tradicionais, os conversores eletrônicos utilizados como interface nos microgeradores não possuem grandes inércias atuando como amortecimento às oscilações no sistema. A inércia dos conversores é limitada, pois está associada com a energia disponível para processamento proveniente das unidades de geração ou dos sistemas de armazenamento conectados aos

conversores. Dessa forma, as MR's possuem necessidades do ponto de vista de controle, que variam de acordo com a aplicação e estrutura utilizada. Quando operadas em modo ilhado, ou seja, isolado da rede principal, é necessário sintetizar os níveis de tensão, frequência e fase requeridas pela carga. Quando operada no modo conectado ao sistema principal, a MR precisa estar devidamente sincronizada com a rede principal, de forma a não comprometer a estabilidade do resto do sistema (ASHABANI; MOHAMED, 2012). Existem diversas topologias de controladores utilizadas em MR's. De acordo com (GUERRERO et al., 2013a), foi convencionada a divisão do controle de microrredes em três níveis com finalidade específica, utilizando técnicas avançadas de controle em cada nível. Essa divisão deu origem ao controle hierárquico de microrredes que possui os níveis de controle primário, secundário e terciário. A Figura 3 ilustra o funcionamento e localização desses níveis.

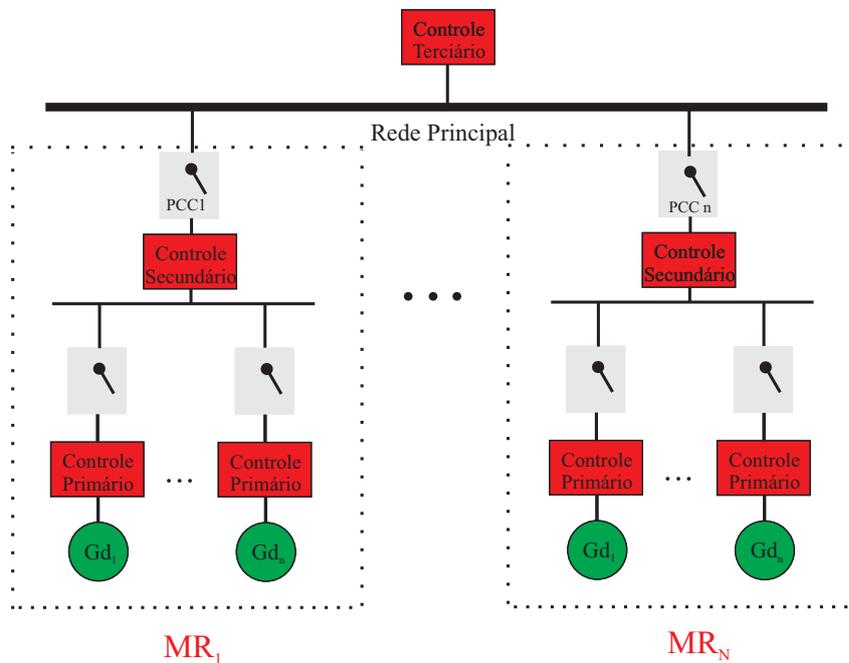


Figura 3 – Níveis hierárquicos de controle em MR's

O primeiro nível consiste no controle primário que utiliza sinais e medidas locais. Esse nível caracteriza-se por não possuir estruturas de comunicação. O principal objetivo é controlar as unidades de geração distribuídas presentes na MR de forma a gerar as grandezas de referência. Algoritmos de rastreamento da máxima potência (MPPT) e controle por curvas de decaimento são comumente utilizados (SCHONBERGERSCHONBERGER; DUKE; ROUND, 2006).

O controle secundário objetiva realizar o sincronismo entre a MR e a rede principal, de forma a possibilitar a conexão com o restante do sistema elétrico. Outro objetivo do controle secundário é restaurar os desvios de tensão e frequência decorrentes do controle primário. Como ilustrado na Figura (3), o controle secundário atua no nível de gerenciamento entre as fontes de geração distribuída presentes na MR.

O controle terciário atua no despacho de energia. É responsável por estimar a impedância da rede e sintetizar as potências ativa e reativa de referência. Atua no nível da rede elétrica, e necessita de informações medidas em outras MR's do sistema. É importante destacar que em cada nível, são utilizadas diversas estratégias avançadas de controle, que são definidas e projetadas de acordo com cada caso específico e aplicação de MR. Dentre essas estratégias, destacam-se o controle por curvas de decaimento e a máquina síncrona virtual (MSV) que objetivam fazer o controle em nível primário.

4 Máquina Síncrona Virtual (MSV)

O sistema tradicional de geração de energia elétrica é dominado por máquinas síncronas atuando como geradores. Os geradores síncronos consistem de máquinas que transformam energia mecânica em energia elétrica. A energia mecânica é provida por uma força de movimento primária, usualmente vapor de água aquecido e energia cinética contida no fluxo de grandes massas de água.

A principal característica das máquinas síncronas é a relação entre a frequência do sistema e a velocidade de rotação da máquina. Assim, através do controle de velocidade, um Gerador síncrono é capaz de sincronizar-se com a rede ou com outros geradores. Além disso, essas máquinas possuem elevada inércia armazenada em seus rotores, o que contribui proporcionando estabilidade e amortecimento ao sistema. Esses fatores caracterizam a predominância das máquinas síncronas no sistema de geração convencional.

Diferentemente das máquinas síncronas, a inércia dos conversores eletrônicos é limitada pela energia disponível nas unidades de geração ou unidades de armazenamento de energia conectadas nesses conversores. Em um cenário onde ocorra elevada penetração de conversores, devido ao aumento do número de unidades de geração distribuída conectadas à rede principal, a inércia do sistema elétrico como um todo é comprometida. Uma possível alternativa para prover inércia ao sistema é o conceito de máquina síncrona virtual (MSV) que possibilita controlar esses conversores de modo que, do ponto de vista da rede, eles possuam o mesmo comportamento dinâmico das máquinas síncronas.

4.1 Principais Trabalhos da Literatura

De acordo com o conhecimento do autor, o conceito de MSV foi proposto em (BECK; HESSE, 2007), e consiste em conversores eletrônicos de potência controlados de forma a emular as dinâmicas presentes nas tradicionais máquinas síncronas. Dessa forma, é possível atribuir ao conversor propriedades importantes presentes em máquinas síncronas tais como inércia, amortecimento e auto-sincronização. Para isso, são utilizadas as medidas de tensão no ponto de conexão, para que sejam calculadas as correntes de referência fornecidas para o controlador. O controlador calcula a tensão a ser modulada e utilizada no acionamento das chaves do inversor a partir do modelo da máquina síncrona, descrito por equações diferenciais já conhecidas na literatura. Dessa forma, a fidelidade das dinâmicas depende da modelagem utilizada, sendo de maior ou menor complexidade, dependendo da aplicação e necessidade da característica da máquina Síncrona.

O sistema reproduz as propriedades desejáveis e indesejáveis das máquinas síncronas.

As propriedades mecânicas são meramente conceituais, usadas na modelagem e para melhor entendimento, pois não existem partes físicas girantes. A inércia presente na MSV é um parâmetro virtual que pode ser escolhido de acordo com a necessidade da aplicação. Assim, é possível atribuir parâmetros virtuais que não seriam possíveis numa máquina síncrona real. A energia necessária para o funcionamento da MSV é fornecida da própria tensão de alimentação do inversor, geralmente conectado a fontes de geração fotovoltaica e eólica.

Desde a proposta inicial, diversos trabalhos foram desenvolvidos visando a implementação de MSV's. As abordagens se diferem basicamente pelo modelo da máquina síncrona, e pelas grandezas utilizadas como referência para realizar o controle. Dessas diferentes abordagens, o Synchronverter proposto em (ZHONG; WEISS, 2011) se destaca devido à simplicidade do modelo que utiliza a equação da oscilação, para modelar as dinâmicas mecânicas, e a equação do fluxo em máquinas síncronas, para modelar as dinâmicas elétricas. Essa abordagem possibilita controlar a frequência e tensão através de malhas de potência ativa e potência reativa somente com medidas e grandezas locais.

Em aplicações onde conversores de potência são conectados na rede elétrica, como em MR's, são necessárias unidades de controle dedicadas que objetivam sincronizar a MR com a rede principal, de forma a possibilitar a devida conexão. Uma técnica de sincronismo bastante difundida e estudada é o controle Phase Locked Loop (PLL). Uma unidade PLL faz a sincronização extraíndo a amplitude, frequência e fase da tensão da rede para gerar a referência utilizada no controle. No entanto, controladores PLL são extremamente não lineares e aumentam consideravelmente a complexidade da técnica de controle utilizada (WEN et al., 2013).

Em (ZHONG et al., 2014) foi proposta uma estrutura que realiza a implementação do synchronverter sem o uso de unidades dedicadas para sincronização. Dessa forma, foi atribuída a propriedade de auto-sincronização. Essa característica foi possibilitada pela inclusão de uma malha de controle adicional, baseada nas equações de conexão de uma máquina síncrona ao barramento infinito. De acordo com o autor, essa modificação possibilitou a redução da complexidade, melhora no rastreamento da frequência (65%) bem como nos controles de potência ativa (83%) e reativa (70%).

Recentemente, em (ZHONG; STEFANELLO, 2017) foi proposta uma estrutura de controle baseada na teoria da porta hamiltoniana com a finalidade de atribuir passividade em conversores eletrônicos. Dessa forma, é possível garantir, em determinadas condições, a operação estável do conversor. Para facilitar a implementação, foi utilizado uma nova grandeza denominada quorte, representada por Γ . Essa grandeza está relacionada com potência reativa da mesma maneira que o torque (T) está relacionado com potência ativa.

4.2 Descrição e Implementação do Synchronverter

Como já foi mencionado, existem diversas topologias de máquinas síncronas virtuais onde as principais diferenças são a modelagem e as grandezas e medidas que são utilizadas. Nessa seção será abordada a descrição e implementação da topologia de MSV denominada synchronverter inicialmente proposta em (ZHONG; WEISS, 2011).

O synchronverter consiste de um inversor trifásico controlado de forma a reproduzir dinâmicas presentes em uma máquina síncrona. A modelagem é realizada com base na equação da oscilação, representando a parte mecânica, e nas equações do fluxo, representando a parte elétrica da máquina. Além disso, é utilizado um modelo dinâmico passivo e não linear. Todas as indutâncias no estator são consideradas constantes, não são considerados enrolamentos amortecedores no rotor nem efeitos de saturação magnética no núcleo. Também não são consideradas correntes parasitas. Essas simplificações são cabíveis pois o interesse, nesse caso, é a emulação da inércia, o amortecimento e a capacidade de sincronização da máquina.

A parte elétrica da máquina síncrona é representada pelas equações dos fluxos que atuam nos eixos do rotor. A indutância mútua M entre o campo e os três eixos do estator varia com o ângulo θ do rotor e é dado por 4.1.

$$\begin{aligned} M_{af} &= M_f \cos(\theta) \\ M_{bf} &= M_f \cos(\theta - 2\pi/3) \\ M_{cf} &= M_f \cos(\theta - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (4.1)$$

O fluxo nos enrolamentos é dado por

$$\begin{aligned} \phi_a &= Li_a - Mi_b - Mi_c + M_{af}i_f \\ \phi_b &= -Mi_a + Li_b - Mi_c + M_{bf}i_f \\ \phi_c &= -Mi_a - Mi_b + Li_c + M_{cf}i_f \\ \phi_f &= L_f i_f - M_{bf}i_b - M_{cf}i_c + M_{af}i_a \end{aligned} \quad (4.2)$$

onde i_a , i_b e i_c são as correntes de fase no estator. i_f é a corrente de excitação no rotor. Assumindo que não existe linha de neutro, então

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4.3)$$

O fluxo do estator e o fluxo de campo podem ser reescritos de acordo com as expressões 4.4 e 4.5, respectivamente.

$$\phi = L_s i + M_f i_f \tilde{\cos}\theta \quad (4.4)$$

$$\phi_f = L_f i_f + M_f \langle i, \tilde{\cos}\theta \rangle \quad (4.5)$$

Onde $L_s = L + M$. $\langle i, \cos\theta \rangle$ representa o produto vetorial. Assumindo uma resistência R_s nos enrolamentos, então a tensão nos terminais $v = [v_a \ v_b \ v_c]^T$ é obtida em

$$v = -R_s i - L_s \frac{di}{dt} + e \quad (4.6)$$

Onde e é a tensão eletromotriz induzida, e é dado pela Equação 4.7.

$$e = M_f i_f \dot{\theta} \tilde{\sin}\theta - M_f \frac{di_f}{dt} \tilde{\cos}\theta \quad (4.7)$$

Como no synchronverter a corrente de fluxo i_f é constante e é utilizada como grandeza de entrada para o controlador, então a tensão eletromotriz pode ser reescrita como

$$e = M_f i_f \dot{\theta} \tilde{\sin}\theta \quad (4.8)$$

A parte mecânica da máquina é feita com base na conhecida equação da oscilação, exposta em 4.9.

$$J\ddot{\theta} = T_m - T_e - D_p \dot{\theta} \quad (4.9)$$

Onde J é a inércia acumulada no rotor da máquina, T_m é o torque mecânico, T_e é o torque eletromagnético e D_p é o fator de amortecimento. O torque elétrico é deduzido a partir da energia cinética armazenada no campo magnético da máquina. A Energia cinética é dado por

$$E = \frac{1}{2} \langle i, L_s i \rangle + M_f i_f \langle i, \tilde{\cos}\theta \rangle + \frac{1}{2} L_f i_f^2 \quad (4.10)$$

Através da definição de torque elétrico $T_e = \frac{\partial E}{\partial \theta}$ e incluindo o sentido da corrente, obtém-se

$$T_e = M_f i_f \langle i, \tilde{\sin}\theta \rangle \quad (4.11)$$

A potência ativa P e a potência reativa Q do conversor podem ser calculadas através das expressões

$$\begin{aligned} P &= \dot{\theta} M_f i_f \langle i, \tilde{\sin}\theta \rangle \\ Q &= -\dot{\theta} M_f i_f \langle i, \tilde{\cos}\theta \rangle \end{aligned} \quad (4.12)$$

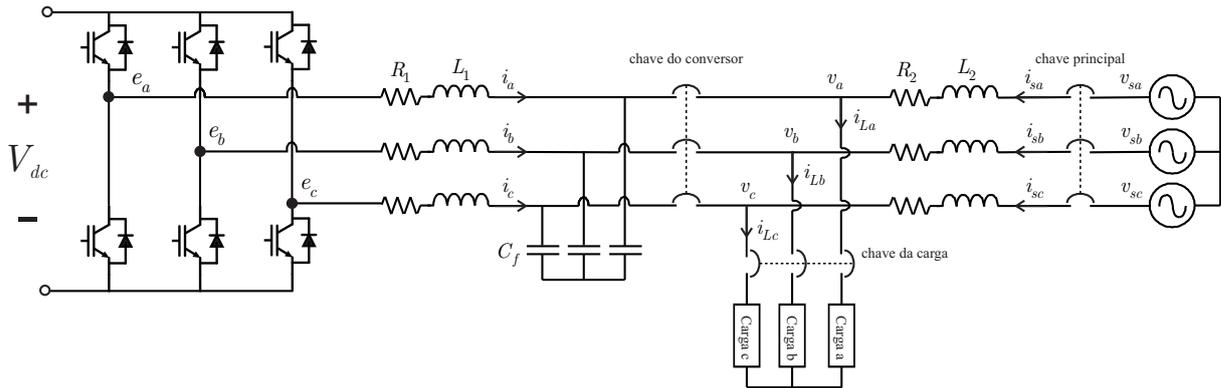


Figura 4 – Circuito de potência do synchronverter adaptado de (ZHONG; WEISS, 2011).

Na Figura 4 a parte de potência do synchronverter é representada por um inversor com um filtro de saída com valores $L_1 C_f$. A chave principal permite a conexão com a rede elétrica. Além disso é possível observar a presença de cargas que podem estar conectadas ou não nas fases do sistema. É importante ressaltar que a comunicação entre o circuito de potência e o circuito de controle é feita através dos sinais dos vetores $e = [e_a \ e_b \ e_c]^T$ e $i = [i_a \ i_b \ i_c]^T$. As tensões do vetor e são as grandezas sintetizadas pelo conversor, sendo sinais de saída do controlador. As correntes do vetor i são medidas das correntes no filtro de saída do conversor, necessárias para que o controle seja processado. A impedância da rede é representada pela resistência R_2 e indutância L_2 . Os vetores $v_s = [v_{sa} \ v_{sb} \ v_{sc}]^T$ e $i_s = [i_{sa} \ i_{sb} \ i_{sc}]^T$ representam, respectivamente, o vetor de tensão e corrente da rede.

Como é possível observar na Figura 5, o controlador consiste de duas malhas principais. A malha de potência ativa é responsável pelo controle de frequência, e a malha de potência reativa é responsável pelo controle de fluxo do synchronverter. Para isso são utilizadas medidas da corrente i e da amplitude da tensão da rede (v_m) como grandezas de entrada, de forma a possibilitar o processamento do controlador. O cálculo e processamento das grandezas é realizado de acordo com as equações 4.7, 4.11 e 4.12, utilizadas na modelagem.

Embora não esteja representado na Figura 5, é necessário um controlador PLL para realizar a sincronização, de forma a possibilitar a conexão do synchronverter com a rede elétrica, conforme ilustrado na Figura 4.

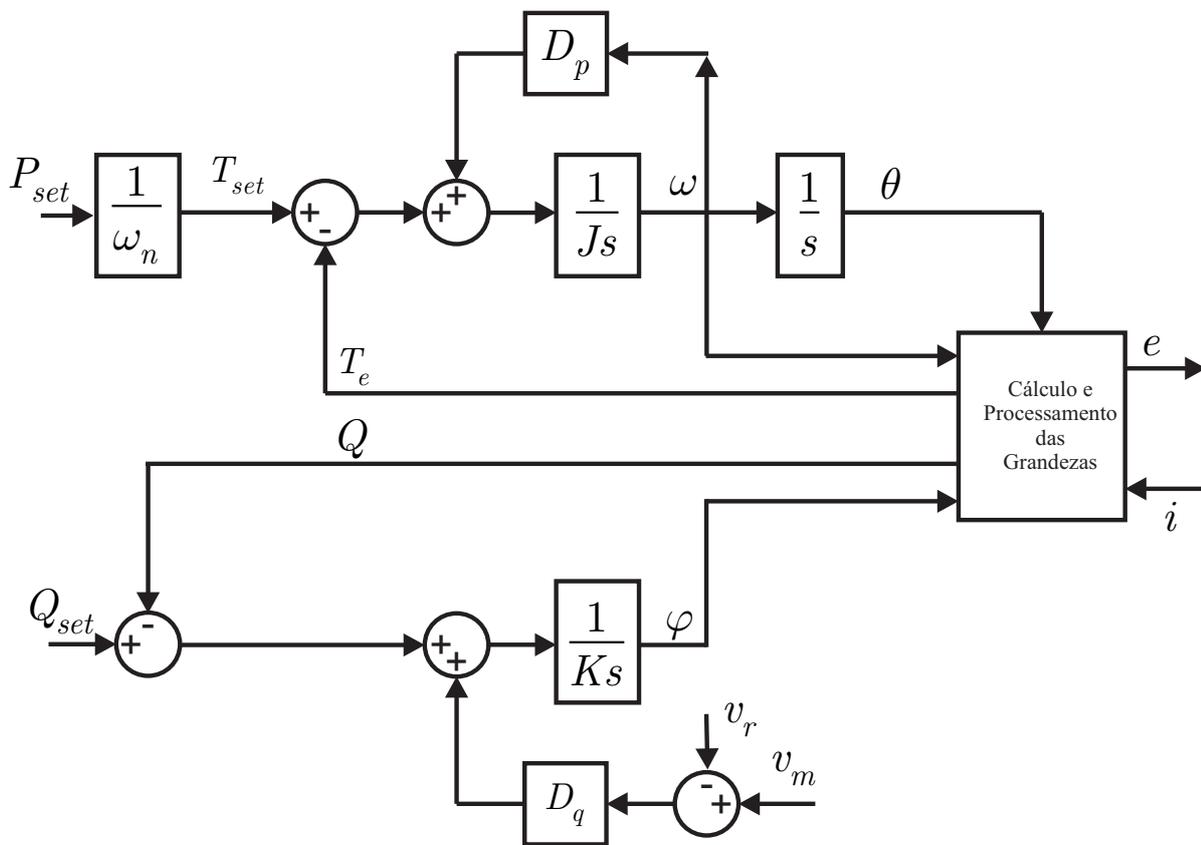


Figura 5 – Diagrama de blocos da estrutura de controle do sincronverter adaptado de (ZHONG; WEISS, 2011).

5 Proposta de Máquina Síncrona Virtual Com Controle por Curvas de Decaimento Auxiliar Baseada em Filtros de Washout

Como já foi mencionado, as microrredes podem alimentar cargas locais, bem como conter elementos armazenadores de energia. Eventualmente ocorrem variações na forma de operação desses sistemas. Conexões e desconexões de carga, bem como a transição da MR entre os modos ilhado e conectado são exemplos de situações onde existem variações em regime transitório. MSVs geralmente não utilizam a realimentação direta da corrente. Dessa forma, quando a MR é controlada através de MSVs, dependendo do perfil da carga, podem ocorrer severas sobrecorrentes devido à transitórios (ZHONG, 2018).

Em (ZHONG, 2018) foi implementada uma estrutura baseada na realimentação da tensão no ponto de conexão, com a finalidade de mitigar as sobrecorrentes em MSVs. No presente trabalho foi proposta uma abordagem alternativa. O controlador proposto utiliza a estrutura modificada da MSV, apresentada em (ZHONG; STEFANELLO, 2017), pela inclusão de controladores por curvas de decaimento (controle de droop) baseado em filtros de Washout (YAZDANIAN; MEHRIZI-SANI, 2016). As propriedades de auto-sincronização e passividade são mantidas, O objetivo principal é mitigar as sobrecorrentes e melhorar a resposta da MSV em termos de suavidade e velocidade de convergência. Nesse capítulo a planta é apresentada e modelada na seção 5.1. A estrutura de controle é fundamentada e descrita na seção 5.2. Por fim são mostrados os resultados de simulação na seção 5.3.

5.1 Modelagem da Planta

A estrutura de uma MSV conectada na rede principal e alimentando uma carga local é apresentada na Figura 6.

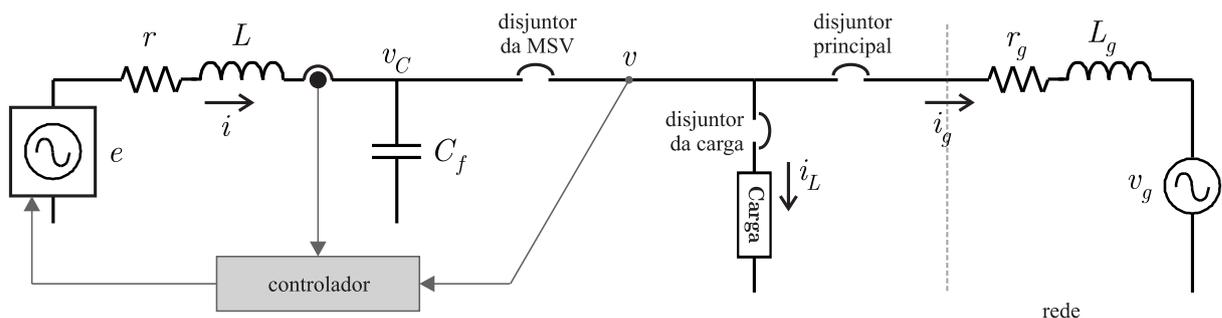


Figura 6 – Sistema elétrico considerado.

A MSV é representada por uma fonte de tensão, um controlador e um filtro de saída. Também é considerado no modelo uma carga local e a possibilidade da operação nos modos ilhado e conectado a rede. Foi considerada a possibilidade de alteração do modo de operação através dos disjuntores na MSV, na carga e na rede. É importante definir as grandezas ilustradas na Figura 6. O vetor de tensões da rede é dado por $v_g = [v_{ga} \ v_{gb} \ v_{gc}]^T$ onde

$$\begin{aligned} v_{ga} &= V_g \sin(\omega_g t + \theta_{g0}) \\ v_{gb} &= V_g \sin\left(\omega_g t + \theta_{g0} - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{gc} &= V_g \sin\left(\omega_g t + \theta_{g0} + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (5.1)$$

considerando uma rede trifásica. ω_g é a frequência angular da rede e θ_{g0} é a fase inicial para $t = 0$ segundos. V_g é a amplitude da tensão de fase da rede.

Os vetores com as grandezas envolvidas na modelagem são: a tensão sintetizada pelo conversor $e = [e_a \ e_b \ e_c]^T$; a corrente do filtro de saída $i = [i_a \ i_b \ i_c]^T$; a tensão no capacitor $v_C = [v_{Ca} \ v_{Cb} \ v_{Cc}]^T$; a tensão no PCC $v = [v_a \ v_b \ v_c]^T$; a corrente de carga $i_L = [i_{La} \ i_{Lb} \ i_{Lc}]^T$; e a corrente da rede $i_g = [i_{ga} \ i_{gb} \ i_{gc}]^T$. A carga é modelada de acordo com a forma hamiltoniana dissipativa generalizada, dada pela Equação (5.2) (KONSTANTOPOULOS; ALEXANDRIDIS, 2013).

$$\begin{aligned} M_L \frac{dq}{dt} &= (J_L - R_L) q + G_L v \\ i_L &= G_L^T q \end{aligned} \quad (5.2)$$

A partir da análise do circuito da Figura 6, considerando a MSV conectada à rede e incluindo a dinâmica da carga obtém-se

$$\begin{aligned} L \frac{di}{dt} &= -ri - v + e \\ L_g \frac{di_g}{dt} &= -r_g i_g + v - v_g \\ C_f \frac{dv}{dt} &= -i_g - G_L^T q + i \\ M_L \frac{dq}{dt} &= (J_L - R_L) q + G_L v. \end{aligned} \quad (5.3)$$

É possível escrever o sistema de equações 5.3 na forma dissipativa hamiltoniana

generalizada

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} LI & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L_g I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C_{eq} I & 0 \\ 0 & 0 & 0 & M_L \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{di}{dt} \\ \frac{di_g}{dt} \\ \frac{dv}{dt} \\ \frac{dq}{dt} \end{bmatrix} &= \left(\begin{bmatrix} 0 & 0 & -I & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \\ I & -I & 0 & -G_L^T \\ 0 & 0 & G_L & J_L \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} rI & 0 & 0 & 0 \\ 0 & r_g I & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_L \end{bmatrix} \right) \begin{bmatrix} i \\ i_g \\ v \\ q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I & 0 \\ 0 & I \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ -v_g \end{bmatrix} \\
 \begin{bmatrix} i \\ i_g \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i} \\ \dot{i}_g \\ v \\ q \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

A garantia da passividade da planta elétrica aliado à estrutura de controle proposta é considerada um passo em direção à operação estável de sistemas com elevada penetração de conversores eletrônicos (ZHONG; STEFANELLO, 2017).

5.2 Descrição da Estrutura de Controle

A estrutura de controle do presente trabalho baseia-se nas equações do synchronverter original (ZHONG; WEISS, 2011) com o acréscimo das estruturas de auto-sincronização (ZHONG et al., 2014) e a recente modificação proposta em (ZHONG; STEFANELLO, 2017) que introduz uma grandeza chamada quorte Γ . O Γ está relacionado com potência reativa da mesma forma que o torque está relacionado com a potência ativa. Além disso também é incluída uma malha de controle por curvas de decaimento baseado em filtros de washout. Essa malha tem a finalidade de gerar uma frequência e fluxo auxiliares, extraíndo a variação do erro de T e Γ através dos filtros de washout. Dessa forma, os erros de frequência e tensão são mitigados mais rapidamente, resultando na melhora da resposta da MSV durante transitórios.

A estrutura completa é mostrada na Figura 7, onde são ilustradas todas as malhas utilizadas no controlador. As duas malhas principais são a malha do torque (T, ω) e a malha do quorte (Γ, φ) que controlam a frequência (ω) e o fluxo (φ) da MSV. A partir da integração de ω também é gerado o ângulo θ da MSV. O bloco Σ_I é responsável pelo cálculo de Γ e T , expressando a relação entre essas duas grandezas pelas Equações (5.7). A tensão sintetizada pelo inversor é dada por

$$e = \varphi \omega z \tag{5.5}$$

A partir da Equação (5.5) obtém-se as expressões de potência ativa e reativa do conversor,

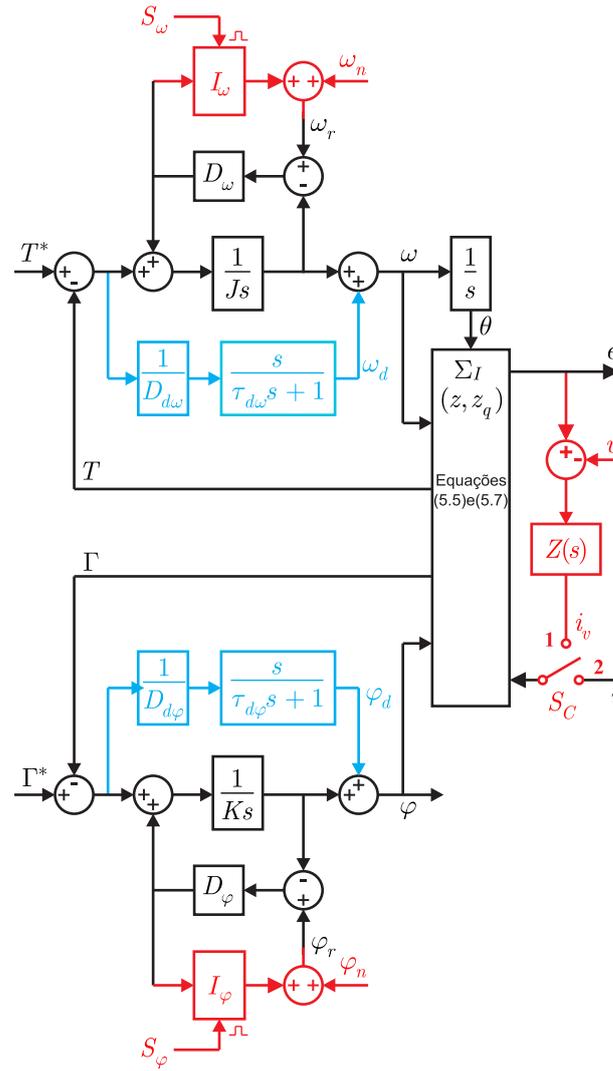


Figura 7 – Diagrama de blocos da estrutura completa do controlador proposto.

obtendo-se a Equação (5.6).

$$P = \varphi \omega z^T i \quad \text{e} \quad Q = -\varphi \omega z_q^T i \quad (5.6)$$

Dividindo P e Q por w e φ obtém-se T e Γ dado pelas expressões mostradas em (5.7).

$$T = \frac{P}{\omega} = \varphi z^T i \quad \text{e} \quad \Gamma = \frac{Q}{\varphi} = -\omega z_q^T i. \quad (5.7)$$

A equação (5.7) mostra a dualidade entre (P, ω) e (Q, φ) . Os blocos em vermelho consistem nos integradores I_ω e I_φ que objetivam fazer o rastreamento das referências de torque e quorte $T^* = \frac{P_{set}}{2\pi f_n}$ e $\Gamma^* = \frac{Q_{set}}{\varphi_n}$. Onde P_{ref} e Q_{ref} são os setpoints de potência ativa e reativa, respectivamente. Os integradores são implementados pelas equações (5.8).

$$I_\omega = -\frac{k_{I_\omega}}{s} \quad \text{e} \quad I_\varphi = -\frac{k_{I_\varphi}}{s} \quad (5.8)$$

sendo kI_ω e kI_φ os parâmetros dos integradores sempre maiores do que zero. Em vermelho também está destacada uma função $Z(S)$ que consiste de uma impedância responsável por gerar a corrente virtual i_v . Até que a MSV atinja o sincronismo com a rede, o controlador faz $i = i_v$ e a MSV se auto sincroniza. Mais detalhes sobre a operação serão descritos na seção 5.3.

Os blocos mostrados em azul na Figura 7 são responsáveis por implementar o controle por curvas de decaimento via filtros de washout. São a contribuição mais importante do trabalho proposto. Os filtros de washout podem ser entendidos como uma função matemática responsável por extrair apenas a variação do sinal de entrada. Dessa forma, o erro entre T e T^* é utilizado para produzir uma frequência auxiliar ω_d , e realimentado na malha de (T, ω) . O Mesmo foi realizado de maneira análoga para a malha de (Γ, φ) , produzindo um fluxo auxiliar φ_d . A metodologia de implementação do controlador possibilitou o projeto das constantes dos filtros de washout em função dos parâmetros da MSV, sem grandes modificações na estrutura original. Dessa forma, a frequência e fluxo auxiliares são definidos por

$$\begin{aligned}\omega_d &= \omega_{dr} + \frac{1}{D_{d\omega}} \frac{s}{\tau_{d\omega}s + 1} (T^* - T), \quad \omega_{dr} \triangleq 0 \\ \varphi_d &= \varphi_{dr} + \frac{1}{D_{d\varphi}} \frac{s}{\tau_{d\varphi}s + 1} (\Gamma^* - \Gamma), \quad \varphi_{dr} \triangleq 0.\end{aligned}\tag{5.9}$$

e o modelo dinâmico da MSV incluindo o controle é dado por

$$\begin{aligned}\dot{\theta} &= \omega \\ J\dot{\omega} &= T^* - T + D_\omega (\omega_r - \omega) + D_\omega \left(\frac{J}{D_\omega} \dot{\omega}_d + \omega_d \right) \\ K\dot{\varphi} &= \Gamma^* - \Gamma + D_\varphi (\varphi_r - \varphi) + D_\varphi \left(\frac{K}{D_\varphi} \dot{\varphi}_d + \varphi_d \right)\end{aligned}\tag{5.10}$$

onde J e D_ω podem ser vistos como a inércia e o coeficiente de amortecimento de uma máquina síncrona. Se fizermos $\dot{\omega} = 0$ e $\dot{\varphi} = 0$ então D_ω e D_φ correspondem aos ganhos de um controlador por curvas de decaimento convencional. Observe ainda que a implementação de uma equação diferencial para φ juntamente com a definição do quorte Γ , permite a implementação de malhas de controle análogas para a síntese de ω e φ , conforme mostrado na Figura 7.

De acordo com a equação (5.9) é possível escrever

$$\tau_{d\omega}\dot{\omega}_d + \omega_d = -\frac{1}{D_{d\omega}}\dot{T} \quad \text{e} \quad \tau_{d\varphi}\dot{\varphi}_d + \varphi_d = -\frac{1}{D_{d\varphi}}\dot{\Gamma}\tag{5.11}$$

desde que as grandezas de referência T^* e Γ^* sejam constantes. É assumido também que ω_r e φ_r possuem dinâmicas suficientemente lentas para que suas derivadas sejam

aproximadamente nulas. Dessa forma é possível definir

$$\tau_{d\omega} = \frac{J}{D_\omega} \quad \text{e} \quad \tau_{d\varphi} = \frac{K}{D_\varphi} \quad (5.12)$$

e então, o modelo resultante é finalmente escrito como

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= \omega \\ J\dot{\omega} &= T^* - T + D_\omega (\omega_r - \omega) - \frac{D_\omega}{D_{d\omega}} \dot{T} \\ K\dot{\varphi} &= \Gamma^* - \Gamma + D_\varphi (\varphi_r - \varphi) - \frac{D_\varphi}{D_{d\varphi}} \dot{\Gamma} \end{aligned} \quad (5.13)$$

com as derivadas de torque e quorte incorporadas na MSV convencional de forma que sua estrutura, em regime permanente, não seja alterada.

5.3 Operação e Resultados de Simulação

Com a finalidade de validar a estrutura proposta, foram realizadas simulações para verificar os resultados do controlador. Os parâmetros utilizados na simulação são descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros do sistema utilizados na simulação.

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
L_1	2,5mH	L_2	0,1mH
R_1	0,1Ω	R_2	1Ω
C_f	22mF	Q_{set}	200Var
V_n	110V	f_n	60Hz
φ_n	$\frac{\sqrt{2}V_n}{\omega_n}$	Carga RL	1Ω;0.1H
$V_g(0)$	112V	θ_{g0}	10 graus
$f_g(0)$	59,8Hz	Carga RC	200Ω; 100μF
D_ω	0,7	D_φ	1,17x10 ⁵
R	1Ω	L	2mH
P_{set}	400W	S_n	1kVA
J	0,0014	K	2,35x10 ³

A MSV é intencionalmente submetida a diversas situações para que seja possível constatar o desempenho do controlador proposto. A sequência de eventos é ilustrada na linha de tempo da Figura 8.

A simulação inicia em $t = 0s$ onde começa o período de sincronização.

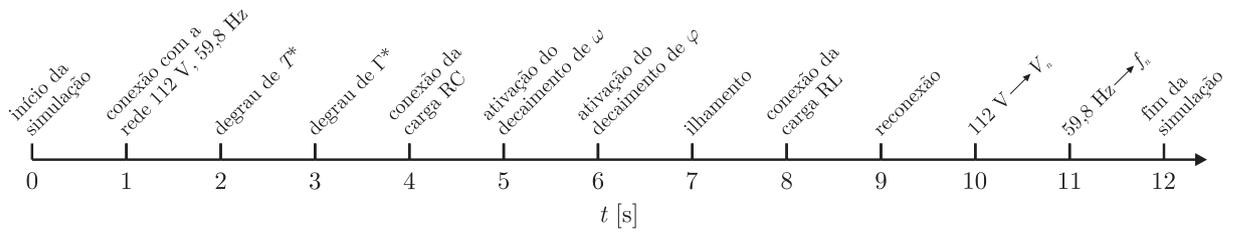


Figura 8 – Sequência de eventos utilizada na simulação

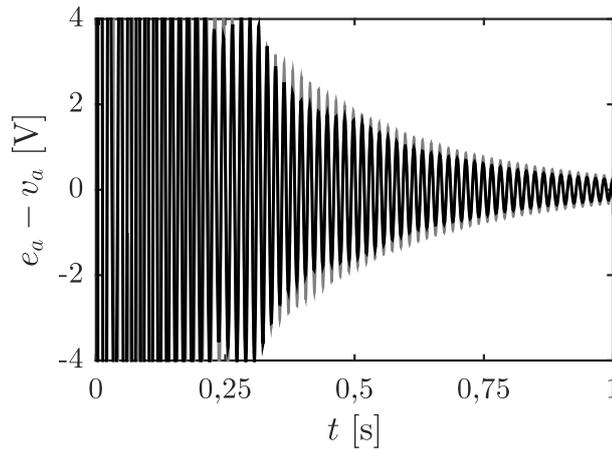


Figura 9 – Tensão entre conversor e a rede no período de sincronização

Para melhor avaliar o desempenho do mecanismo de sincronização a fase inicial θ_{g0} foi iniciada em 10 graus. Nesse período de tempo, T^* e Γ^* são nulos, e os integradores I_ω e I_φ operam no modo de rastreamento dessas referências. Além disso a MSV utiliza a corrente virtual i_v para gerar T e Γ . A Figura 9 mostra que a diferença entre a tensão sintetizada e e a tensão v diminuem com o passar do tempo, ressaltando o bom desempenho da malha de auto sincronização. Nesse período o comportamento entre a máquina proposta em (ZHONG; STEFANELLO, 2017) e a abordada nesse trabalho se comportam similarmente.

No instante $t = 1s$ é realizada a conexão com a rede elétrica pois foi obtida sincronização suficientemente adequada, como mostra a Figura 9. A partir desse instante a corrente i é utilizada para realizar o cálculo de T e Γ .

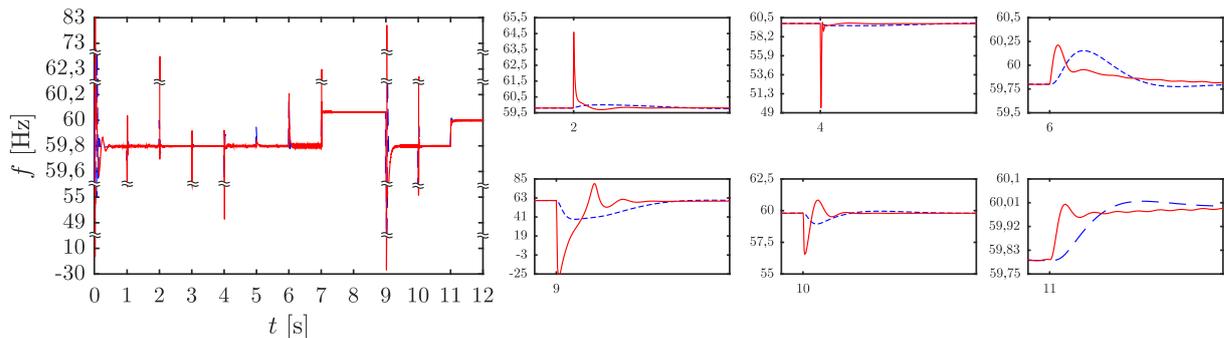


Figura 10 – Comportamento da frequência da MSV

São mostradas as formas de onda das principais grandezas associadas ao sistema. As formas de onda em azul são a abordagem de (ZHONG; STEFANELLO, 2017) e as em vermelho são as do presente trabalho, que incluem o controlador por curvas de decaimento via filtros de washout. Em $t = 2s$ e $t = 3s$ são aplicados degraus de referência de torque e quorte, respectivamente. Nas Figuras 10 e 13 são mostrados os comportamentos dinâmicos da frequência e do fluxo da MSV. Na Figura 10 é possível constatar transitórios mais rápidos ou de maior magnitude em função do efeito dos filtros de washout. É possível perceber que na abordagem proposta ocorrem desvios de frequência em determinados instantes. No entanto, esses desvios não constituem um problema, visto que possuem duração muito curta de tempo.

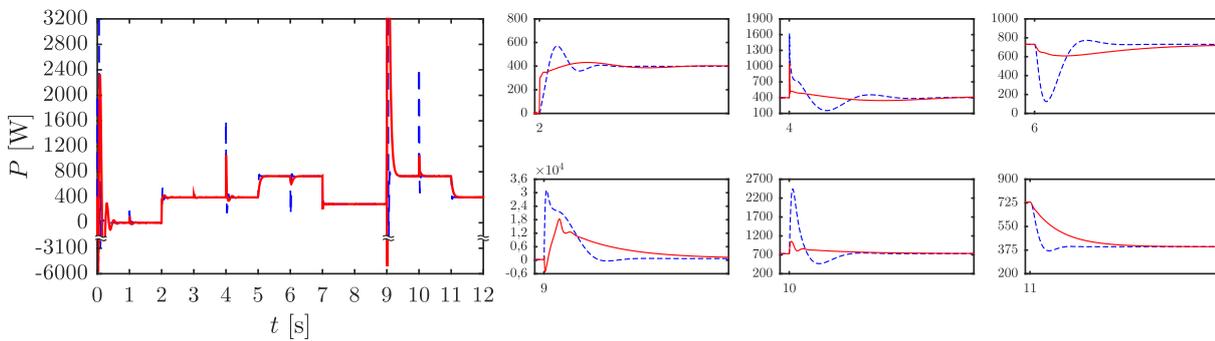


Figura 11 – Comportamento da potência ativa da MSV

Os efeitos dos filtros de washout também são refletidos na potência ativa P e na potência reativa Q como exposto nas Figuras 11 e 12. Dessa forma, percebe-se maior suavidade e velocidade de convergência do controlador proposto em relação ao original.

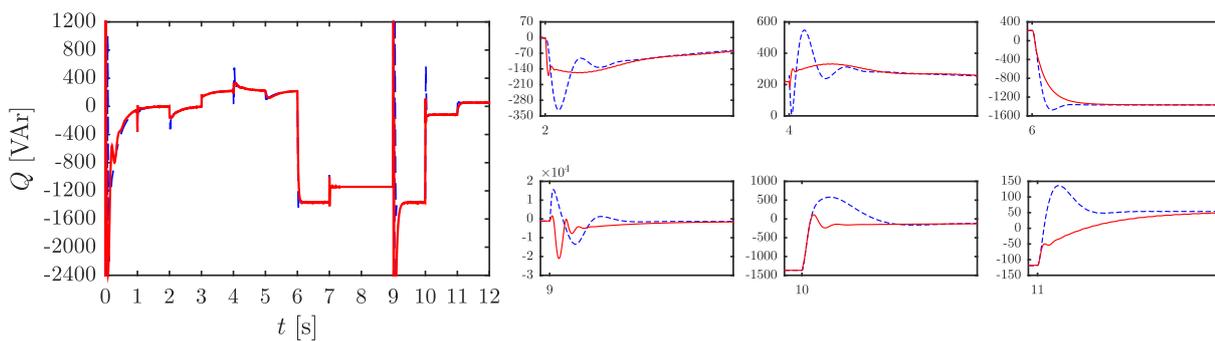


Figura 12 – Comportamento da potência reativa da MSV

A Figura 14 evidencia a melhora da corrente de saída, principalmente quando a MSV é reconectada, no instante $t = 9s$. Da mesma forma que nas outras principais grandezas do sistema, é possível observar a melhora das correntes de saída em termos de suavidade e velocidade de convergência para valores em regime permanente. Assim, o objetivo principal desse trabalho foi satisfeito.

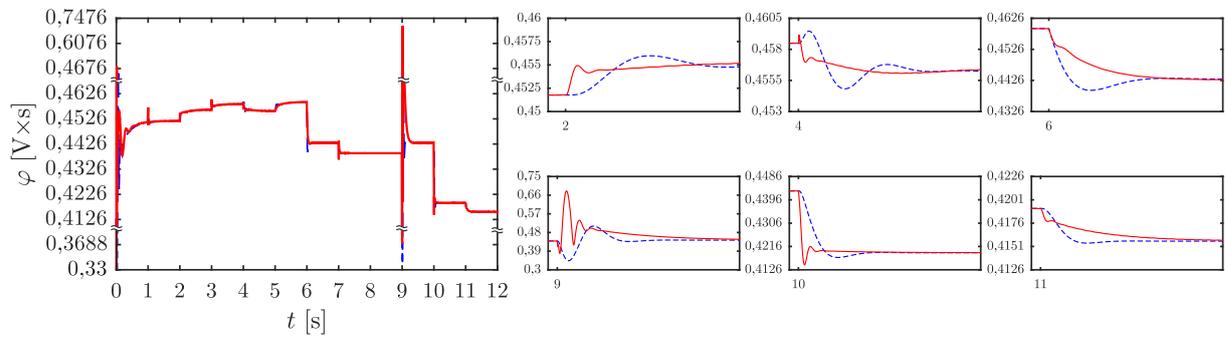


Figura 13 – Comportamento do fluxo da MSV

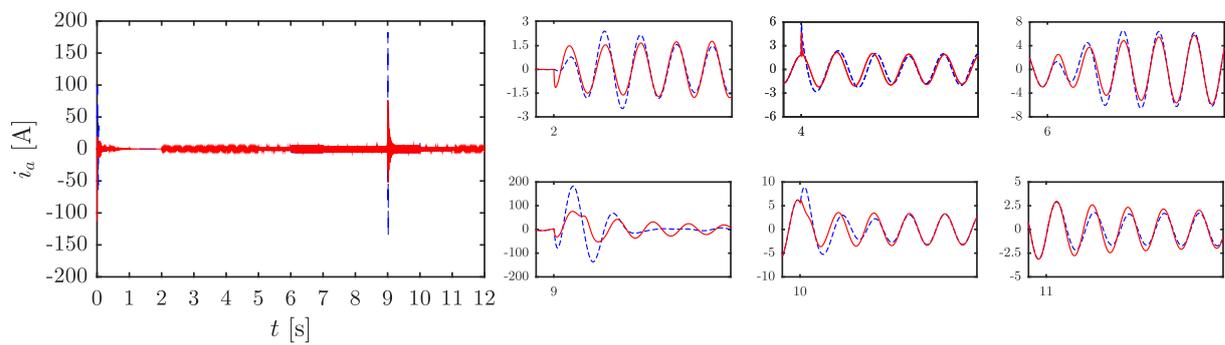


Figura 14 – Comportamento da corrente

6 Conclusão

Neste trabalho, foi utilizada uma topologia de máquina síncrona virtual (MSV) recentemente introduzida na literatura. Esta MSV foi aprimorada pela inclusão de um controlador auxiliar por curvas de decaimento utilizando filtros de washout para a síntese da frequência e fluxo virtuais. Como a entrada desses filtros depende da corrente do conversor, eles geram ações de controle auxiliares que tendem a zero em regime permanente, assumindo valores diferentes de zero durante transitórios. Com isso, a inércia é mantida, característica necessária para uma máquina virtual.

Foi obtida uma metodologia para o cálculo das constantes de tempo e foi demonstrado por meio de simulações que a resposta transitória das correntes (e por consequência de todas as variáveis do sistema) foram melhoradas quando de transitórios de carga e de modo de operação. Devido às ações de controle auxiliares, a frequência e o fluxo podem assumir valores elevados, mas com duração de somente alguns ciclos da frequência fundamental. Isso não constitui um problema desde que as correntes se comportem de modo adequado, como foi observado.

A melhoria na resposta transitória para a corrente do conversor torna a estrutura de controle interessante para sua aplicação no controle de conversores em microrredes quando estes operam de acordo com o princípio da MSV. Em microrredes, a comutação de cargas capacitivas bem como de outros conversores, pode resultar em variações abruptas de corrente que devem ser limitadas. Ainda, a estrutura proposta é simples e demanda pouca alteração da malha de controle já existente. De fato, não é necessário reprojeter a MSV quando da inclusão dos filtros de washout.

A estrutura de controle proposta e descrita ao longo desse trabalho resultou na publicação de um artigo apresentado na 13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications (INDUSCON 2018).

Referências

ABDEL-RAHIM, O.; FUNATO, H. An experimental investigation of modified predictive hysteresis control based MPPT strategy for PV applications. In: *2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*. [S.l.]: IEEE, 2015. Citado na página 19.

ASHABANI, S. M.; MOHAMED, Y. A. R. I. A flexible control strategy for grid-connected and islanded microgrids with enhanced stability using nonlinear microgrid stabilizer. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 3, n. 3, p. 1291–1301, Sept 2012. ISSN 1949-3053. Citado na página 25.

BECK, H. P.; HESSE, R. Virtual synchronous machine. In: *2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–6. ISSN 2150-6647. Citado 2 vezes nas páginas 20 e 27.

CHANDORKAR, M.; DIVAN, D.; ADAPA, R. Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems. *IEEE Transactions on Industry Applications*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 29, n. 1, p. 136–143, 1993. Citado na página 19.

D'ARCO, S.; SUUL, J. A. Virtual synchronous machines classification of implementations and analysis of equivalence to droop controllers for microgrids. In: *2013 IEEE Grenoble Conference*. [S.l.]: IEEE, 2013. Citado na página 20.

GUERRERO, J. M. et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids—part i: Decentralized and hierarchical control. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 60, n. 4, p. 1254–1262, apr 2013. Citado na página 25.

GUERRERO, J. M. et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids - part ii: Power quality, energy storage, and ac/dc microgrids. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 60, n. 4, p. 1263–1270, April 2013. ISSN 0278-0046. Citado na página 19.

HAN, Y. et al. Analysis of washout filter-based power sharing strategy - an equivalent secondary controller for islanded microgrid without lbc lines. *IEEE Transactions on Smart Grid*, p. 1–1, 2017. ISSN 1949-3053. Citado na página 20.

HOROWITZ, S.; PHADKE, A.; RENZ, B. The future of power transmission. *IEEE Power and Energy Magazine*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, n. 2, p. 34–40, mar 2010. Citado na página 24.

JIANG, Z.; YU, X. Hybrid DC- and AC-linked microgrids: Towards integration of distributed energy resources. In: *2008 IEEE Energy 2030 Conference*. [S.l.]: IEEE, 2008. Citado na página 24.

KONSTANTOPOULOS, G. C.; ALEXANDRIDIS, A. T. Generalized nonlinear stabilizing controllers for hamiltonian-passive systems with switching devices. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, IEEE, v. 21, n. 4, p. 1479–1488, 2013. Citado na página 34.

- MARCELINO, F. L. F. *Paralelismo de Unidades de Armazenamento de Energia em Microrredes CC*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Minas Gerais, 2017. Citado na página 19.
- OLIVARES, D. E. et al. Trends in microgrid control. *IEEE Transactions on Smart Grid*, v. 5, n. 4, p. 1905–1919, July 2014. ISSN 1949-3053. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 23.
- PLANAS, E. et al. General aspects, hierarchical controls and droop methods in microgrids: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier BV, v. 17, p. 147–159, jan 2013. Citado na página 19.
- SCHONBERGERSCHONBERGER, J.; DUKE, R.; ROUND, S. DC-bus signaling: A distributed control strategy for a hybrid renewable nanogrid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 53, n. 5, p. 1453–1460, oct 2006. Citado na página 25.
- TUTTELBERG, K.; KILTER, J. Real-time estimation of transmission losses from PMU measurements. In: *2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. [S.l.]: IEEE, 2015. Citado na página 21.
- WEN, B. et al. Influence of phase-locked loop on input admittance of three-phase voltage-source converters. In: *2013 Twenty-Eighth Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*. [S.l.]: IEEE, 2013. Citado na página 28.
- YAZDANIAN, M.; MEHRIZI-SANI, A. Washout filter-based power sharing. *IEEE Transactions on Smart Grid*, IEEE, v. 7, n. 2, p. 967–968, 2016. Citado na página 33.
- Q.-C. Zhong. *Reconfiguration of Inertia, Damping and Fault Ride-Through for a Virtual Synchronous Machine*. 2018. UK Patent GB1800572.8 pending. Citado na página 33.
- ZHONG, Q.-C. et al. Self-synchronized synchronverters: Inverters without a dedicated synchronization unit. *IEEE Transactions on Power Electronics*, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 29, n. 2, p. 617–630, feb 2014. Citado 3 vezes nas páginas 20, 28 e 35.
- ZHONG, Q.-C.; STEFANELLO, M. Port-hamiltonian control of power electronic converters to achieve passivity. In: IEEE. *Decision and Control (CDC), 2017 IEEE 56th Annual Conference on*. [S.l.], 2017. p. 5092–5097. Citado 6 vezes nas páginas 20, 28, 33, 35, 39 e 40.
- ZHONG, Q.-C.; WEISS, G. Synchronverters: Inverters that mimic synchronous generators. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, IEEE, v. 58, n. 4, p. 1259–1267, 2011. Citado 7 vezes nas páginas 13, 20, 28, 29, 31, 32 e 35.