

TRANSFORMADOR ELETRÔNICO E SUA INTEGRAÇÃO COM O SISTEMA DE MICRORREDES

WELBERT A. RODRIGUES, LENIN M. F. MORAIS, RENATO A. S. SANTANA, NEWTON J. A. JUNIOR, WANER W. A. G. SILVA, ANNA P. L. COTA

*Grupo de Eletrônica de Potência – Departamento de Engenharia Eletrônica – UFMG
Universidade Federal de Minas Gerais – Brasil*

Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha / CEP 31.270-901 Belo Horizonte, MG, Brazil

*E-mails: welbert@deelt.ufop.br/lenin@cpdee.ufmg.br/rass.eletrica@gmail.com/
newton.06@hotmail.com/waner@unifei.edu.br/paulalcota@gmail.com*

Abstract— This paper presents the design of the converters required for implementation of the electronic transformer (SST, the acronym Solid State Transformer). The work to provide an infrastructure for creating an intelligent energy system, which will enable the integration of smart grid concepts, microrrede generation distribute and distribution of direct current. The advantages of SST, listed the reduction of the volume and weight as well as fault isolation capability, voltage regulation, harmonic filtering, reactive power compensation and power factor correction. The work presents the advantages of applying the SST in a microgrid system. Therefore, simulation results in MATLAB/Simulink software are presented.

Keywords— Solid State Transformer, Microgrid, Smart Grid, Distributed Generation, Renewable Energy

Resumo— Este artigo apresenta o projeto dos conversores necessários para implementação do transformador eletrônico (SST, do acrônimo *Solid State Transformer*). O trabalho tem como objetivo disponibilizar uma infraestrutura para criação de um sistema inteligente de energia, que possibilitará a integração dos conceitos de *smart grid*, microrrede, geração distribuída e distribuição em corrente contínua. Como vantagens do SST, enumeram-se a redução do volume e do peso, bem como a capacidade de isolamento de falhas, de regulação de tensão, de filtragem harmônica, de compensação de potência reativa e de correção do fator de potência. O trabalho apresenta as vantagens da aplicação do SST em um sistema de microrredes. Para tanto, resultados de simulação no software MATLAB/Simulink são apresentados.

Palavras-chave— Transformador Eletrônico, Microrrede, Rede Inteligente, Geração Distribuída, Energia Renovável

1 Introdução

Recentemente, a integração de fontes de geração distribuída (GD) ao sistema elétrico de potência (SEP) e a diversificação das cargas conectadas à rede, exigiram uma reestruturação do sistema para que ele atenda à essas novas demandas de geração e consumo. Essa mudança introduz a necessidade de um sistema de distribuição com fluxo de potência bidirecional, controles locais e com capacidade de gerenciamento e monitoramento. Este novo sistema é referido na literatura como rede inteligente ou *smart grid*, que envolve a utilização de tecnologias (sensores, atuadores e elementos de automação) distribuídas ao longo do sistema elétrico e interligadas por uma grande rede de comunicação. A aplicação e a implementação das *smart grids* e, em particular, das microrredes – extensão do conceito de *smart grids* para as redes elétricas com fontes renováveis – passaram a ser estudadas em diversos centros de pesquisas (She, 2010).

Como vantagens da implementação das microrredes, citam-se: (i) a fácil integração de microgeradores distribuídos (eólicos, solares, biomassa, etc.); (ii) a redução das perdas no sistema de transmissão e distribuição de energia, em razão da proximidade entre geração e carga; (iii) a presença de equipamentos armazenadores de energia, que passam a alimentar as cargas quando há picos de demanda ou interrupções temporárias na geração; (iv) a possibilidade de alimentação de cargas locais em corrente contínua, dire-

tamente pelo barramento c.c.; (v) maior interação entre consumidor final e o sistema, em comparação com os sistemas elétricos tradicionais e (vi) a facilidade de tarifação diferenciada e instantânea em cada unidade consumidora (Lesseter, 2011).

Neste contexto, o transformador convencional, meramente passivo, não atende às demandas desse novo sistema. De fato, apesar da grande utilização e robustez, o transformador convencional, projetado para a frequência de 50/60 Hz, não permite, por exemplo: (i) o controle e a regulação de tensão (sem o uso de taps); (ii) o controle local do fluxo de potência ativa e reativa, necessário para a gestão do fluxo de energia na microrrede e (iii) a rejeição aos distúrbios ou anomalias que provêm do circuito primário (distorções harmônicas, variações de tensão de curta duração, etc), para que não se propaguem para o circuito secundário (She, 2012).

Assim, no contexto das redes inteligentes, o transformador eletrônico, referido na literatura técnica por SST (*Solid State Transformer*), se mostra como alternativa ao transformador convencional. O SST consiste, basicamente, em um conversor c.a./c.a., com entrada (ou por analogia, com "primário") em 13,8 kV e tensão de saída (ou "secundário") em baixa tensão (220V ou 380 V, por exemplo). A Figura 1 apresenta a arquitetura de uma microrrede baseada no transformador eletrônico (Merwe, 2009).

Um grande desafio para o projeto desses conversores são os altos níveis de tensão utilizados no sistema de distribuição. Os semicondutores disponíveis no mercado não suportam esses níveis de tensão.

Para resolver esse problema, propõem-se o uso de estruturas modulares para o projeto de conversores que operam em alta tensão (Kirsten, 2013).

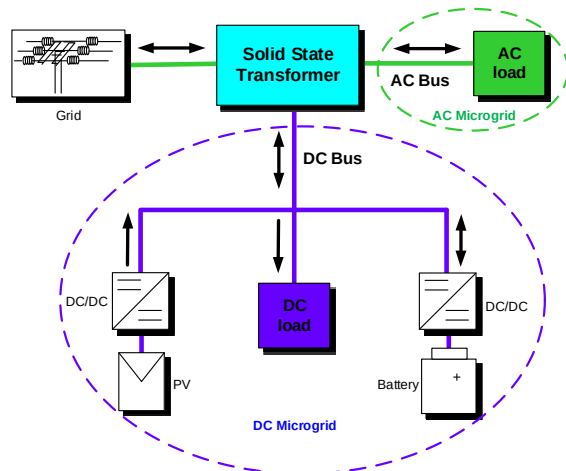


Figura 1. Arquitetura de uma microrrede baseada no SST.

2 Transformador Eletrônico

A concepção básica do SST já foi explorada no passado, contudo, as tecnologias disponíveis eram insuficientes para demonstrar as suas vantagens quando usados em aplicações em alta tensão (Kheraluwala, 1990). Com os avanços recentes da tecnologia de semicondutores de potência e do desenvolvimento de conversores multiníveis, o conceito por trás do SST vem sendo viabilizado e, consequentemente, a renovação do interesse da comunidade científica. Para aplicação em um sistema de microrredes, a topologia mais adequada é a de três estágios (Bhattacharya, 2014). Essa configuração é constituída pelo retificador PWM (AFE - *Active Front End*) no primeiro estágio, que é o conversor de interface entre a rede e o barramento c.c. de alta tensão. No segundo estágio tem-se o conversor isolado c.c.-c.c. bidirecional (IBDC - *Isolated Bidirectional DC-DC Converter*), que transfere potência em alta frequência, além de alterar o nível de tensão do sistema. Esse estágio é composto por um transformador de alta frequência e dois conversores, um no lado de alta tensão (AT) e outro no lado de baixa (BT). O conversor utilizado para implementar esse estágio é o DAB (*Dual Active Bridge*) (Kolar, 2014). O estágio de saída é composto pelo inversor fonte de tensão (VSI - *Voltage Source Inverter*), que fornece tensão senoidal e regulada à carga. A estrutura de três estágios do transformador eletrônico é ilustrada na Figura 2.

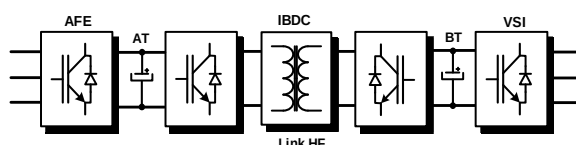


Figura 2. Topologia de três estágios do SST.

Como vantagens desta topologia para implementação do SST, enumeram-se: (i) a redução do peso e do volume, que pode atingir 75% e 50%, nesta ordem, em comparação com o transformador convencional; (ii) a compensação de afundamentos e elevações de tensão; (iii) a proteção contra curto-circuito, com a limitação da corrente de falta via controle; (iv) o desacoplamento da tensão de entrada e de saída, em razão do isolamento introduzido pelos barramentos c.c. e pelo conversor c.c.-c.c.; (v) a correção do fator de potência, como resultado do controle de fase da corrente de entrada; (vi) a regulação da tensão de saída, que decorre do controle de tensão no estágio c.c.-c.a.; (vii) a disponibilidade de barramentos c.c. para fins de conexão de fontes de geração distribuída, como painéis fotovoltaicos (PV); (viii) o controle de potência reativa e, como consequência, o controle local de tensão e (ix) a bidirecionalidade do fluxo de potência.

Portanto, o SST permite a eliminação de equipamentos do sistema elétrico, que são adicionados especificamente para desempenhar essas funções, como bancos de capacitores e reatores, conversores de frequência, compensadores estáticos de reativos (SVC), compensadores síncronos estáticos (STATCOM) e rotativos, filtros ativos, restauradores dinâmicos de tensão (DVR) e controladores unificados de fluxo de potência (UPFC) (Ratanapanachote, 2004).

3 Projeto dos Conversores

A seguir são apresentadas as topologias dos conversores de cada estágio do SST, bem como o controle associado a cada um dos conversores.

3.1 Retificador PWM - AFE

O retificador trifásico, operando sobre modulação PWM, compõe o primeiro estágio da topologia do transformador eletrônico em análise. Para um sistema de microrredes, em que se tem geração distribuída e elementos armazenadores de energia, é adequado que esse conversor seja bidirecional em potência, seja do tipo fonte de tensão e com elevado fator de potência. Esse conversor é responsável por regular a tensão do barramento c.c. de AT, que é a entrada do conversor c.c.-c.c. (segundo estágio). Além disso, ele garante que as correntes de entrada tenham formato senoidal e estejam em fase com a tensão. Impondo um alto fator de potência e baixo conteúdo harmônico.

Nessa topologia, a tensão trifásica fornecida por uma fonte c.a. é conectada à ponte retificadora através de indutores ou filtros (LC ou LCL). Além disso, há um filtro capacitivo na saída, caracterizando-o como um retificador *boost* fonte de tensão. O filtro, além de eliminar as componentes de alta frequência, oriundas do chaveamento, o seu indutor tem a finali-

dade de controlar a corrente injetada ou absorvida da rede.

O controle do retificador é baseado no método de controle das correntes ativa e reativa i_d - i_q instantâneas. A tensão de saída é controlada através da corrente ativa (i_d) e, para manter o fator de potência (fp) unitário a referência de corrente reativa (i_q) é mantida em zero. Com essa estrutura é possível controlar a quantidade de reativo injetado ou absorvido da rede através da manipulação da corrente de referência i_q , permitindo, assim, o controle de potência reativa.

O projeto do sistema de controle do retificador PWM deve satisfazer aos seguintes requisitos: impor correntes de entrada senoidais e em fase com as tensões c.a., proporcionando um fator de potência unitário; manter a tensão do barramento c.c. de saída regulada, rejeitando qualquer tipo de perturbações do sistema. Portanto, o sistema de controle deve ter uma malha de corrente, a fim de obter um alto fator de potência, e uma malha de tensão, que será responsável por regular a tensão do barramento c.c. A Figura 3 apresenta o sistema de controle do retificador trifásico (Sen, 2014).

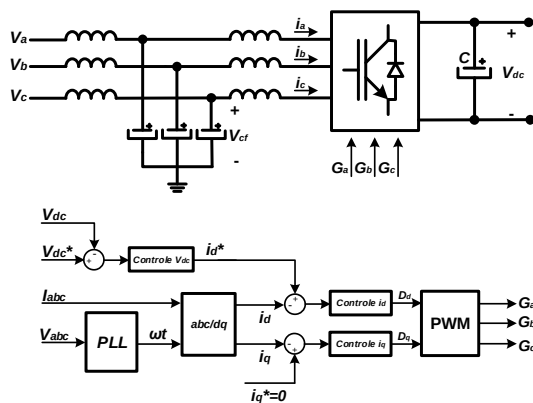


Figura 3. Sistema de controle do retificador PWM trifásico.

O controle de tensão é realizado através da variação da amplitude da corrente do indutor do filtro LCL . Essa malha deve apresentar uma banda passante inferior à menor frequência de ondulação da tensão do barramento c.c., a fim de que tais ondulações não distorçam os sinais de referência da malha de corrente. Isso é importante pois a saída do controlador da malha de tensão gera a referência de corrente do eixo direto (i_d). A malha de controle da corrente atua diretamente na razão cíclica das chaves da ponte retificadora, garantindo dessa forma um alto fator de potência. A malha de corrente deve ter uma banda passante elevada, a fim de apresentar uma rápida resposta transitória na ocorrência de perturbações do sistema. As Figuras 4 e 5 apresentam os diagramas de blocos das duas malhas de controle.

Os ajustes dos ganhos dos controlados são realizados pelo método de alocação de polos. A escolha desses ganhos deve ser realizada de forma a satisfazer os requisitos de tempo de resposta e rejeição a perturbações.

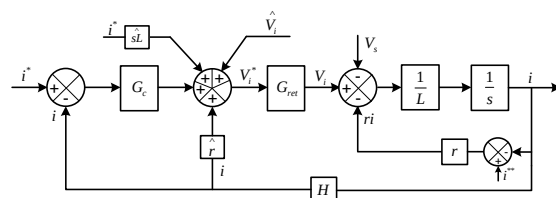


Figura 4. Diagrama de blocos do controle da corrente de entrada do retificador.

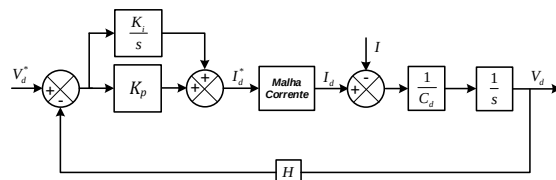


Figura 5. Diagrama de blocos do controle da tensão do retificador.

3.2 Conversor c.c.-c.c. bidirecional isolado - IBDC

O segundo estágio do SST desempenha as principais funções do transformador: isolamento galvânico e alteração do nível de tensão. Portanto, é o estágio de maior relevância para o projeto do transformador eletrônico aplicado a um sistema de microrredes. Esse conversor possui um transformador de alta frequência que faz a isolamento galvânico e permite obter grandes relações de transformação através da adequação da relação de espiras dos seus enrolamentos. Existem diferentes topologias para implementação desse estágio, atualmente a que lidera os estudos em diferentes centros de pesquisa é o DAB (do acrônimo em inglês *Dual Active Bridge*) (Krismer, 2010). A estrutura desse conversor consiste em duas pontes H alimentadas por fontes de tensão e conectadas por meio de um transformador de isolamento, conforme apresentado no circuito da Figura 6.

A estrutura de controle do DAB é baseada no deslocamento angular (ϕ) entre as tensões alternadas do primário (V_{acA}) e secundário (V_{acB}) do transformador, que são produzidas pelos pares de chaves diagonais de cada ponte. Quando a defasagem entre as tensões é igual a zero não há fluxo de potência entre as pontes do conversor. A máxima transferência de potência é obtida quando a defasagem angular é de $\pm 90^\circ$. A indutância de dispersão do transformador é elemento responsável pelo fluxo de potência entre as pontes. Dependendo do valor da potência que se deseja transferir é necessário adicionar um indutor auxiliar (L) em série com os terminais do transformador (Zhao, 2012).

Na estrutura de controle do SST, o conversor DAB é o responsável por garantir a regulação da tensão de saída (V_B). A sua tensão de entrada (V_A) é controlada pelo conversor do primeiro estágio (Retificador PWM), que para o projeto do DAB é considerada constante. A malha de controle atua no defasamento angular (ϕ) entre as tensões do primário e do secundário para garantir a regulação do barramento de saída e permitir a variação no sentido do fluxo de

potência. As chaves das pontes são comandadas com um defasamento a fim de garantir a tensão V_B no valor desejado, conforme mostrado na Figura 6. Essa mesma variável de controle é a responsável por garantir a bidirecionalidade do fluxo de potência. Para $\phi > 0$ o fluxo de potência é do sentido A para B , e $\phi < 0$ o fluxo de potência é do sentido B para A .

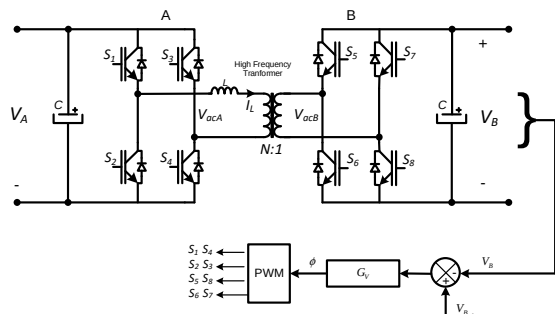


Figura 6. Malha de controle da tensão do barramento V_B .

3.3 Conversor c.c.-c.a. - VSI

O terceiro estágio do SST é composto pelo conversor c.c.-c.a. (VSI – Voltage Source Inverter), que é o estágio responsável por converter a tensão do barramento c.c. (saída do IBDC) em tensão alternada. A topologia adotada é o conversor em meia ponte, que para gerar o conjunto de tensão trifásica utiliza três braços, os quais geram as três tensões defasadas de 120° , a partir da modulação por largura de pulsos senoidal (SPWM). Tem-se na saída do inversor uma tensão modulada, o que exige a utilização de um filtro LC para eliminar os sinais de alta frequência gerados pela comutação das chaves. O indutor do filtro também permite o controle da corrente injetada. A Figura 7 apresenta o circuito do inversor trifásico.

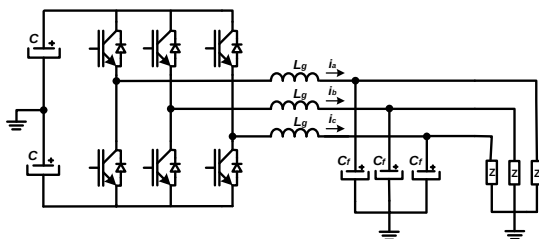


Figura 7. Circuito do inversor fonte de tensão.

O controle da tensão é realizado em função das grandezas elétricas do filtro (I_L e V_o). Para implementação da malha de controle é feita a medição dessas variáveis. Ao aplicar integralmente as técnicas usadas no controle clássico de motor, observa-se uma subutilização do potencial dos controladores.

Uma forma de melhor aproveitá-los é utilização dos valores medidos para a compensação das realimentações internas. Essa compensação é realizada com a introdução de termos com a mesma magnitude e em oposição ao sinal, que ajuda obter um sistema

com melhor resposta dinâmica. A Figura 8 apresenta a proposta da malha de controle da tensão de saída do inversor, onde são apresentadas as compensações das realimentações internas (Silva, 1999). Os ajustes dos ganhos K_p e K_i são realizados pelo método de alocação de polos. A escolha desses ganhos deve ser realizada de forma a satisfazer os requisitos de tempo de resposta e rejeição a perturbações.

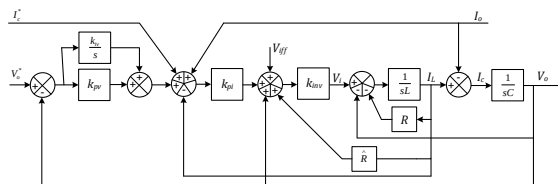


Figura 8. Diagrama de blocos do controle de tensão de saída do inversor.

4 Resultados de Simulação

Simula-se, no software MATLAB/Simulink, o transformador eletrônico com a topologia indicada na Figura 2. Para sua implementação é utilizado a topologia de conversores modulares (Zhu, 2012). Os conversores operam à frequência de chaveamento de 10 kHz. No sistema simulado, avaliam-se a robustez a afundamentos de tensão, bem como a capacidade correção de fator de potência e de reversão do fluxo de potência, a partir de um sistema hipotético de uma microrrede.

Os gráficos apresentados na Figura 9 mostram o SST atuando na rejeição de distúrbio de curta duração. Para isso, simula-se um afundamento de tensão de 0,2 pu, na fase “a” do lado da rede (AT), com duração de 6 ciclos. No gráfico da figura constam a tensão e a corrente nos lados de AT e BT. Nota-se que a carga, conectada no lado de BT não é afetada pelo distúrbio, já que a sua duração é insuficiente para prover variação significativa de tensão nos barramentos c.c. Nesse caso, o SST atua como restaurador de tensão, dispensando o uso de DVR para esse fim.

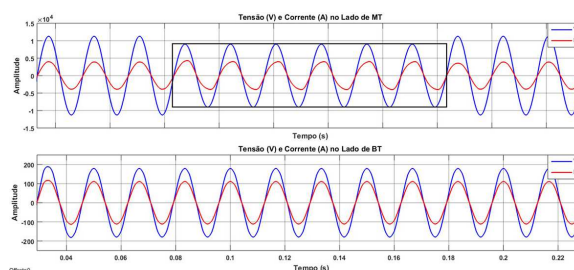


Figura 9. Resposta a afundamento de tensão no lado de AT, a corrente é apresentada em escala diferente da tensão.

Uma outra situação imposta ao SST, é a alimentação de uma carga com fator de potência 0,8 indutivo, conectada no lado de BT. Os resultados desta simulação constam nos gráficos da Figura 10, em que são apresentadas as tensões e as correntes nos lados

de AT e BT. Nota-se que, mesmo com uma carga indutiva conectada no primário do SST, o fator de potência do lado da rede se mantém unitário. O SST atua, portanto, na correção do fator de potência, dispensando a necessidade de adição de banco de capacitores..

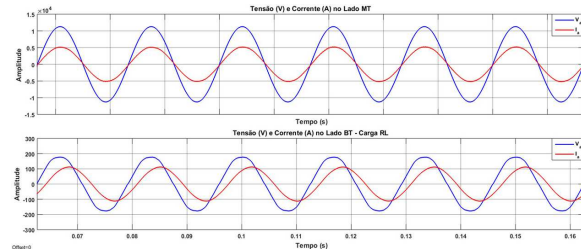


Figura 10. Correção do fator de potência: tensão e corrente nos lados de AT e BT.

Para avaliar a bidirecionalidade do fluxo de potência do SST e sua aplicação em microrredes, simula-se um sistema hipotético com um microgerador e uma carga RL, ambos conectados ao barramento c.c. de baixa tensão. Para tanto, é analisado cenários com três horizontes de fluxo de potência: caso 1, toda a energia gerada pela usina fotovoltaica é consumida pela carga e o restante é fornecida pela rede, as setas em azul indicam os sentidos do fluxo de potência; caso 2, há um aumento da carga e a geração PV continua a mesma, com isso observa-se um aumento do fluxo de potência que flui pelo transformador; caso 3, há um aumento substancial na geração da usina PV, valor maior do que o exigido pela carga, que está conectada no mesmo barramento. Nesse último caso a usina alimenta a carga e o excedente de energia é injetado na rede c.a. A Figura 11 ilustra a microrrede hipotética com a indicação dos três casos de fluxo de potência.

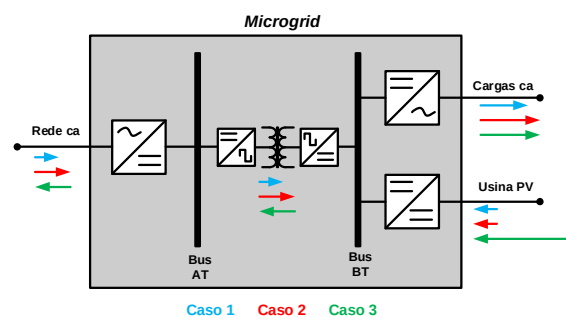


Figura 11. Microrrede hipotética, com três horizontes de fluxo de potência.

A Figura 12 registra as curvas de tensão e corrente da rede, em que é possível observar, no primeiro caso, a corrente em fase com a tensão e um fluxo de potência da barra AT para BT. No segundo caso, a corrente passa a ser maior, aumentando o fluxo de potência ativa entre as barras, mantendo o mesmo sentido. E por fim, no terceiro caso, tem-se a corrente e a tensão com oposição de fase, caracterizando, a

injeção do excedente de energia na rede elétrica. Durante toda a simulação o fator de potência da rede é unitário, mesmo com uma carga RL conectada no secundário.

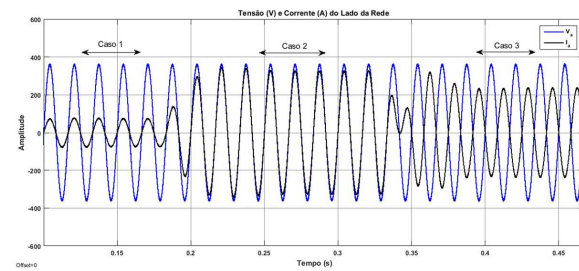


Figura 12. Tensão e corrente no lado da rede, primário do transformador.

A Figura 13 apresenta os gráficos das tensões nos terminais do transformador de alta frequência para os três casos de fluxo de potência, em que se pode constatar a variação da defasagem angular entre elas, que varia em função do cenário de fluxo de potência da microrrede. No primeiro caso, nota-se um pequeno ângulo de defasagem, sendo que a tensão do primário está adiantada em relação ao secundário, caracterizando um fluxo do primário para o secundário. No segundo caso, há um aumento da potência transferida e consequentemente da defasagem entre as tensões. No terceiro caso, há uma inversão do sentido do fluxo de potência, comprovado pelo adiantamento da tensão do secundário em relação ao primário.

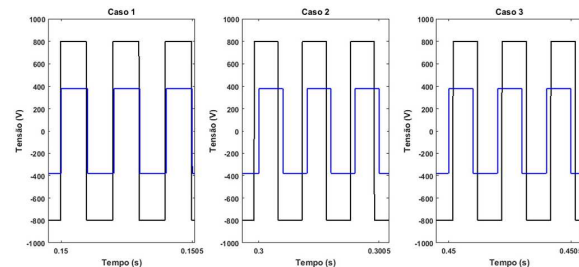


Figura 13. Tensões (V_{acA} e V_{acB}) nos terminais do transformador de alta frequência do conversor DAB.

5 Conclusão

O trabalho apresenta o transformador eletrônico como uma alternativa ao transformador convencional, em especial, no contexto das microrredes. A robustez do SST a afundamentos de tensão, bem como a capacidade de correção de fator de potência e de reversão do fluxo de potência são demonstradas via simulações. Infere-se, assim, que o SST pode atuar como elemento central das arquiteturas de microrredes, como um gestor e roteador de energia. Nas próximas décadas, a integração de novas fontes de geração distribuída ao sistema elétrico, aliada à redução dos custos da tecnologia dos conversores, devem contribuir para a plena aplicação do SST.

A montagem de um protótipo de SST em escala reduzida segue em curso, para fins de validação experimental das simulações. Este protótipo, fará uso de estrutura de conversores modulares, que deve integrar cerca de dez módulos de 2 kVA.

Referências Bibliográficas

- Bhattacharya, S., Roy, S. and De, A. (2014). Multi-port solid state transformer for inter-grid power flow control, 2014 Int. Power Electron. Conf. IPEC-Hiroshima – ECCE, vol. 1, p. 3286–3291.
- Kheraluwala, M. H., Novotny, D. W. and Divan, D. M. (1990). Design considerations for high power high frequency transformers”, in 21st Annual IEEE Conference on Power Electronics Specialists, 1990, p. 734–742.
- Kirsten, A. L., Oliveira, T. H., Roncalio, J. G. P. and Rech, C. (2013). Performance analysis of modular converter for solid state transformers, Brazilian Power Electronics Conference (COBEP), pp. 1154-1166.
- Kolar, J. W., Everts, J., Krismer, F., Keybus, J. Van Den and Driesen, J. (2014). Optimal zvs modulation of single-phase single-stage bidirectional dab ac-dc converters, IEEE Trans. Power Electronic, vol. 29, no 8, p. 3954–3970.
- Krismer, F. (2010). Modeling and Optimization of Bidirectional Dual Active Bridge DC–DC Converter Topologies, Technische Universität Wien.
- Lesseter, R. H. (2011). Smart distribution: Coupled microgrids, in Proceedings of the IEEE, vol. 99 issue 6, pp. 1074–1082.
- Merwe, J. W. and Mouton, H. du T. (2009). The Solid-State Transformer Concept: A New Era in Power Distribution, in AFRICON 2009, p.p. 1-6.
- Ratanapanachote, S. (2004). Applications of an Electronic Transformer in a Power Distribution System, Graduate Studies of Texas A&M University.
- Sen, S., K. Yenduri, e P. Sensarma (2014). Step-by-step design and control of LCL filter based three phase grid-connected inverter, in 2014 IEEE International Conference on Industrial Technology, ICIT, p. 503–508.
- Silva, S. M. (1999). Estudo e projeto de um restaurador dinâmico de tensão, Dissertação de mestrado UFMG.
- She, X., Lukic, S. and Alex, Q. H. (2010). DC zonal micro-grid architecture and control, in 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2988–2993.
- She, X. A., Huang Q., Lukic S. and Baran M. (2012). On integration of solid state transformer with zonal DC microgrid, in IEEE Transaction on smart grid, vol. 3, nº. 2, p.p. 975-985.
- Zhao, B., Song, Q. and Liu, W. (2012). Power characterization of isolated bidirectional dual-active-bridge dc–dc converter with dual-phaseshift control, IEEE Trans. on power electronics, vol. 27, nº. 9, p.p. 4172-4176.
- Zhu, H., Li, Y., Wang, P., Li, Z. and Chu, Z. (2012). Design of power electronic transformer based on modular multilevel converter, in Power and energy engineering conference (APPEEC), pp. 1–4.