

Aplicação do Transformador de Estado Sólido em Sistemas de Distribuição

W. A. Rodrigues, R. A. S. Santana, A. P. L. Cota
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Belo Horizonte, Brasil
welbertalves@gmail.com, rass.eletrica@gmail.com,
aplc@ufmg.br

P. C. Cortizo, L. M. Morais
Departamento de Engenharia Eletrônica
Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG
Belo Horizonte, Brasil
porfirio@cpdee.ufmg.br, lenin@cpdee.ufmg.br

Resumo— No sistema elétrico atual, o transformador convencional é extensivamente adotado para transmissão e distribuição da energia ao consumidor final. Todavia, este transformador, meramente passivo, não atende às demandas das redes inteligentes, referidas na literatura por *smart grids*. Neste contexto, o transformador de estado sólido (SST, do acrônimo *Solid State Transformer*), também conhecido como transformador eletrônico, se figura como nova alternativa. 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. Este trabalho demonstra as vantagens da aplicação do SST em sistemas de distribuição. Para tanto, resultados de simulação no *software* MATLAB/Simulink são apresentados.

Palavras-Chave— Transformador de Estado Sólido, *Smart Grid*, *Microgrid*.

I. INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a integração de fontes de geração distribuída (GD) ao sistema elétrico de potência (SEP) e a diversificação dos consumidores e dos acessantes de geração deste sistema (e.g., geradores fotovoltaicos e eólicos, veículos elétricos e híbridos e armazenadores de energia), introduziu a necessidade por um sistema de distribuição com fluxo de potência bidirecional, controles locais e com capacidade de gerenciamento, monitoramento e autoconfiguração. Este novo sistema – referido na literatura por rede "inteligente" ou *smart grid* – deverá promover a gestão racional dos múltiplos acessantes do sistema com o uso de recursos de tecnologia de informação e comunicação. A aplicação e a implementação das *smart grids* e, em particular, das *microgrids* – extensão do conceito de *smart grids* para as redes elétricas com GD de fontes renováveis – passaram a ser extensivamente estudadas e são abordadas nos trabalhos de [1]-[4]. Como vantagens da implementação das *microgrids*, citam-se: (i) a fácil integração de microgeradores distribuídos (eólicos, solares, de 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, diretamente pelo barramento c.c.; (v) maior interação entre consumidor final e a *microgrid*, em comparação com os sistemas elétricos tradicionais e (vi) a facilidade de tarifação diferenciada e instantânea em cada unidade consumidora.

Neste contexto, o transformador convencional, meramente passivo, não atende às demandas das *microgrids*. 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 *microgrid* 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.

Assim, no contexto das redes inteligentes, o transformador de estado sólido, referido na literatura técnica por SST (*Solid State Transformer*), se mostra como alternativa ao transformador convencional. O SST de distribuição 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 estrutura típica deste transformador é ilustrada na Fig. 1.

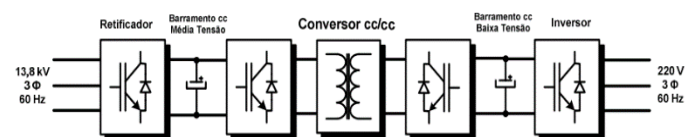


Fig. 1: Estrutura típica do SST.

No estágio de entrada do SST, há um conversor c.a./c.c., ou "retificador". O estágio intermediário compõe um barramento c.c. de média tensão, um conversor c.c./c.c. isolado com um transformador de alta frequência e um barramento c.c. de baixa tensão. Por fim, o estágio de saída integra um conversor c.c./c.a. ou "inversor". Como vantagens 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 [5][6]; (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; (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 pode substituir outros equipamentos em uso no sistema elétrico, 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) [6] e controladores unificados de fluxo de potência (UPFC) [3].

Em razão da flexibilidade no controle do fluxo de potência, o SST pode ainda promover a integração entre os novos agentes e acessantes e o sistema elétrico de potência, como mostra a Fig. 2. Neste cenário o SST atua como um "roteador de energia" [1][8] em uma arquitetura de *microgrid* com cargas c.a. e c.c., baterias, geradores eólicos e fotovoltaicos distribuídos e veículos elétricos.

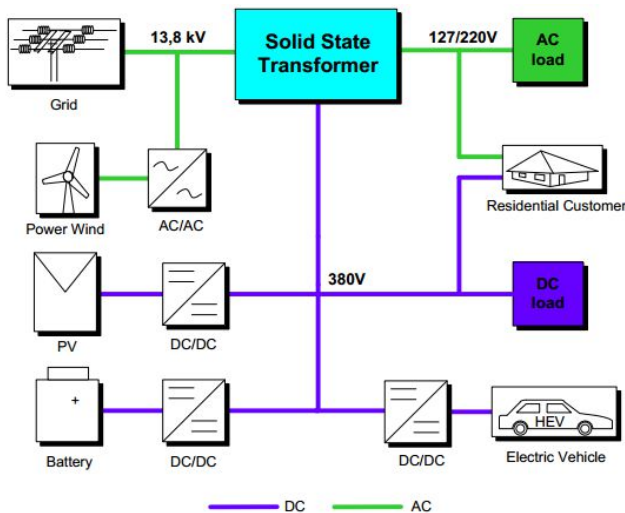


Fig. 2: Nova proposta de interação entre componentes do sistema elétrico, com o SST como elemento central.

As principais desvantagens do SST, comparada ao transformador de baixa frequência, são a confiabilidade, o custo e a complexidade de implementação. A complexidade se justifica pelos benefícios que um sistema inteligente disponibiliza. O custo das chaves semicondutoras tem diminuído significativamente ao longo do tempo, reduzindo, assim, os custos dos conversores de potência. Os conversores do SST são implementados a partir de topologias modulares [11], o que possibilita uma produção em massa de módulos, diminuindo o custo de fabricação e facilitando a montagem e manutenção. Além disso, a modularidade acrescenta a possibilidade de circuitos com redundância, elevando a confiabilidade do sistema e permitindo a versatilidade no projeto do transformador eletrônico com diferentes níveis de tensão e potência.

Este trabalho pretende apresentar o transformador eletrônico como alternativa ao transformador convencional, no contexto das *microgrids*. Para demonstrar as vantagens do SST em comparação com o transformador tradicional, propõem-se simulações de um SST de 75 kVA, com topologia ilustrada na Fig. 1, no *software* MATLAB/Simulink. Avaliam-se, neste sistema, a robustez do SST a afundamentos/elevações de tensão, bem como a capacidade de mitigação de distorções harmônicas, de correção de fator de potência, de compensação de potência reativa e de reversão do fluxo de potência.

II. O TRANSFORMADOR DE ESTADO SÓLIDO

Em linhas gerais, um transformador de estado sólido (Fig. 1) integra três estágios: o de conversão c.a./c.c., o de conversão c.c./c.c. e o de conversão c.c./c.a. Estes estágios são descritos nas seções a seguir.

A. O estágio de conversão c.a./c.c.

O estágio de conversão c.a./c.c. do SST compõe-se de um retificador a transistores com modulação PWM (*Pulse Width Modulation*). Outras estruturas passivas, a diodos, não admitem a reversão do fluxo de potência ou o controle do fator de potência de entrada e, portanto, não são adotadas no SST. Todavia, como este estágio se conecta diretamente ao barramento c.c. de alta tensão, a tensão de bloqueio de cada transistor pode se tornar proibitiva. Para reduzir esta tensão, são sugeridas, na literatura, topologias de retificadores trifásicos do tipo multiníveis [9][10] ou ainda, de retificadores monofásicos modulares, associados em série [12]. Desse modo, transistores comerciais, com tensões de bloqueio de até 6,5 kV, podem ser adotados no estágio de entrada do SST. Neste trabalho, implementa-se o estágio c.a./c.c. com um retificador trifásico multinível.

O estágio de entrada do SST deve controlar a tensão do barramento c.c. de alta tensão e, ainda, a corrente de entrada. Como parte deste controle de corrente, o ângulo de defasagem da corrente de entrada, em relação à tensão da rede elétrica, deve ser ajustado para absorver/injetar a potência reativa de referência. Já o controle de tensão do barramento c.c. deve não só garantir a regulação deste barramento, como também ajustar a tensão para que a potência ativa de referência seja absorvida/injetada.

B. O estágio de conversão c.c./c.c.

O conversor c.c./c.c. constitui o estágio intermediário do SST, que efetivamente promove a compactação e a redução do peso do SST. Este conversor deve ser bidirecional para que a energia gerada pelos acessantes possa ser injetada na rede de distribuição. Ademais, como a relação de transformação típica de um SST de distribuição é elevada (de 13,8 kV para 380 V ou 220 V), este estágio deve introduzir a isolação entre os lados de baixa tensão (BT) e de média tensão (MT). Assim, o conversor c.c./c.c. de um SST deve ser do tipo bidirecional e isolado, referido na literatura por IBDC (*Insulated Bidirectional dc-dc Converter*). A topologia típica do IBDC é ilustrada na Fig. 3.

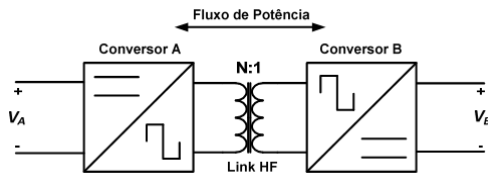


Fig. 3: Conversor c.c. do tipo IBDC.

Nesta estrutura, um transformador de alta frequência (HFT), mais compacto do que o análogo de baixa frequência, provê a isolamento galvânica entre a entrada e a saída do conversor. O volume e o peso do HFT são substancialmente menores, em comparação com o transformador de 50-60 Hz (LFT), em virtude da operação em frequências mais elevadas, da ordem de kHz.

O estágio IBDC deve ainda controlar a potência transferida e regular o barramento c.c. de baixa tensão. O IBDC pode ser implementado, como em [13][14] com um circuito do tipo DAB (*Dual Active Bridge*), usual em aplicações com elevadas potências e/ou densidades de potência. No conversor do tipo DAB, representado na Fig. 4, os dois conversores c.c./c.c., ilustrados no diagrama da Fig. 3, são de topologia monofásica em ponte completa ("ponte H"). Neste trabalho, um conversor DAB compõe o estágio c.c./c.c. do SST simulado.

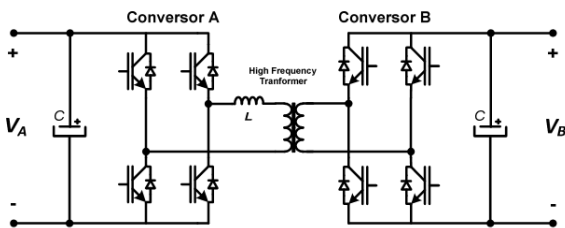


Fig. 4: Circuito típico de um conversor DAB.

C. O estágio c.c./c.a

O estágio c.c./c.a. inclui um inversor trifásico, também em modulação PWM. Na topologia de inversor de dois níveis – com dois transistores por fase, a tensão de bloqueio máxima de cada transistor deve ser maior do que a do barramento c.c. de baixa tensão (vide Fig. 1). Como a tensão deste barramento é da ordem de 380 V – para fins de conexão de cargas c.c., o uso de topologias multiníveis não se torna obrigatório neste estágio. Neste trabalho, portanto, um inversor trifásico de dois níveis é adotado no SST em análise.

O inversor de saída do SST deve controlar a tensão e a corrente na carga, de modo a prevenir sobretensões e sobrecorrentes que decorram, por exemplo, de variações ou reversões de carga. A referência de tensão deste inversor define a amplitude e a frequência da tensão de alimentação da carga.

III. APLICAÇÕES DO SST

O uso do SST no sistema de distribuição, em alternativa aos transformadores convencionais, viabiliza a aplicação dos conceitos de smart grid [1][3], e, assim, a integração de fontes de GD à rede. Ademais, o SST disponibiliza um barramento c.c., para fins de conexão em corrente contínua, já utilizada em

navios, aeronaves e em sistemas de telecomunicações. Estudos apontam que a alimentação em c.c. em ambientes residenciais pode aumentar a eficiência energética em até 15% [15]. A redução das perdas se deve, principalmente, na eliminação do retificador de entrada presente na maioria dos equipamentos eletrônicos, que causam uma enorme distorção harmônica de corrente, provendo maiores perdas. Como o SST disponibiliza um barramento em c.c., cargas eletrônicas de característica não linear podem ser alimentadas diretamente deste barramento.

No projeto dos conversores para aplicação em veículos elétricos, referido na literatura por PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) [16], o uso do SST contribui com a redução do volume e peso de toda a estrutura. Atualmente, o transformador eletrônico encontra-se em nível mais avançado de desenvolvimento para aplicações de tração elétrica do que em SEP. Diversas empresas já investem nesta tecnologia, como por exemplo: Siemens [17], Alstom [18], ABB [16][19] e Bombardier [20].

IV. RESULTADOS

Simula-se, no *software* MATLAB/Simulink, o SST com o sistema completo indicado na Fig. 1. A potência nominal dos conversores foi ajustada para 75 kVA. Os conversores operam à frequência de chaveamento de 10 kHz. Para o controle do retificador, do DAB e do inversor, adotam-se as metodologias descritas em [21][22]. No sistema simulado, avaliam-se a robustez a afundamentos/elevações de tensão, bem como a capacidade de atenuação de distorções harmônicas, de correção de fator de potência, de compensação de potência reativa e de reversão do fluxo de potência.

A. Rejeição de distúrbios de curta duração

No sistema simulado, avaliam-se os efeitos de elevações/afundamentos sucessivos de tensão de 0,2 pu, com duração de três ciclos, na fase "a" do lado de MT. Os resultados desta simulação constam na Fig. 5. A tensão e a corrente nos lados de MT e de BT são apresentadas, com os intervalos de duração dos distúrbios indicados. Nota-se que não há afundamentos/elevações no lado de BT, já que a duração típica dos distúrbios de curta duração é insuficiente para prover variação significativa de tensão nos barramentos c.c. Os barramentos c.c., portanto, filtram os distúrbios de curta duração da tensão de entrada do SST. Para tanto, os capacitores destes barramentos devem ser dimensionados para que sustentem a carga durante o intervalo de duração típica destes distúrbios.

B. Mitigação de harmônicos

Na sequência, os efeitos de distorções harmônicas do lado de MT e de BT são analisados. Inicialmente, supõe-se que a tensão da rede exibe harmônicos de 5ª e de 7ª ordens com amplitudes iguais aos limites definidos no Módulo 8 dos Procedimentos de Distribuição [23], *i.e.*, de 6% e 5%. A distorção harmônica total de tensão na entrada atinge cerca de 8%, nesta condição. Os resultados são indicados na Fig. 6, com tensões e correntes dos

lados de MT e de BT. Nota-se, portanto, que estas distorções são mitigadas no lado de BT. A distorção harmônica total de tensão em BT atinge 1,25%.

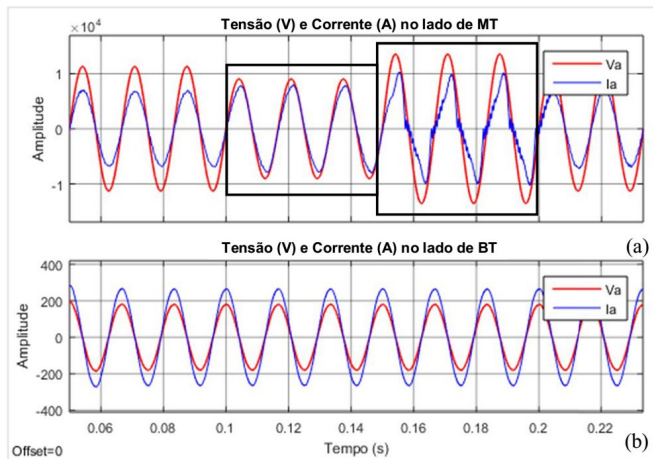


Fig. 5: Resposta a afundamentos/elevações de tensão no lado de MT: (a) tensão e corrente na fase "a" (V_a , I_a) no lado de MT, (b) tensão e corrente na fase "a" (V_a , I_a) no lado de BT. A corrente no lado de AT foi escalada por um fator de 500, para melhor visualização.

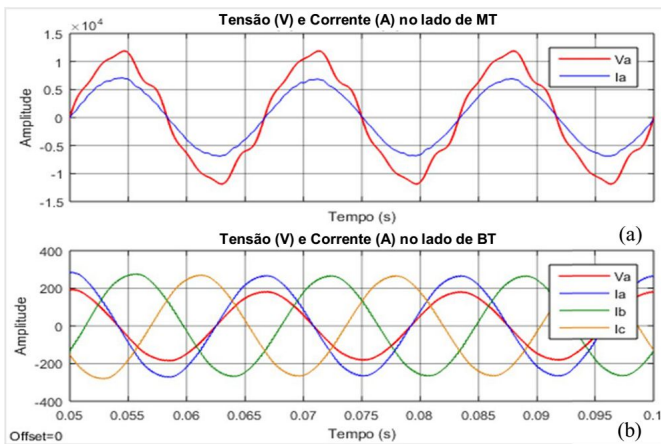


Fig. 6: Resposta a distorções harmônicas de tensão no lado de MT: (a) tensão e corrente na fase "a" (V_a , I_a) no lado de AT, (b) tensão e corrente na fase "a" (V_a , I_a) e corrente nas fases "b" e "c" (I_b , I_c) no lado de BT. A corrente no lado de MT foi escalada por um fator de 500, para melhor visualização.

Em um segundo cenário, supõem-se cargas no lado de BT do tipo não-linear. Para tanto, cargas monofásicas, alimentadas por retificadores a diodos, adicionadas no lado de BT. O padrão de corrente destas cargas, portanto, é típico de cargas eletrônicas. A distorção total de corrente no lado de BT é de 16,4%, nesta condição. A tensão e a corrente na entrada dos retificadores são apresentadas na Fig. 7, bem como a tensão e a corrente na fase "a" no lado de MT. O espectro harmônico desta corrente segue na Fig. 8, com distorção total de 1,45%. Os harmônicos da carga são, portanto, substancialmente atenuados no lado de MT.

Demonstra-se, com base nos resultados de simulação destes dois cenários, que o SST não transfere as distorções harmônicas de tensão do lado de MT para o lado de BT. Do mesmo modo, não há transferência das distorções de corrente do lado de BT para o lado de MT. O SST atua, portanto, como um filtro ativo

de harmônicos, se o estágio de conversão c.c./c.a. de saída for adotado no lado de MT, por exemplo.

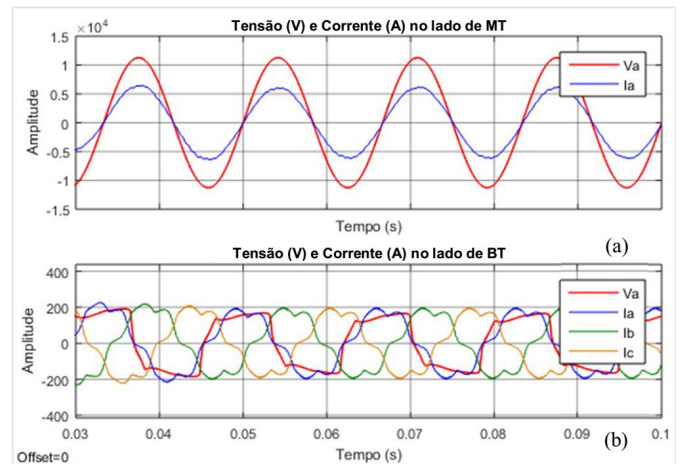


Fig. 7: Resposta a distorções harmônicas de tensão no lado de BT: (a) tensão e corrente na fase "a" (V_a , I_a) no lado de MT, (b) tensão e corrente na fase "a" (V_a , I_a) e corrente nas fases "b" e "c" (I_b , I_c) no lado de BT. A corrente no lado de MT foi escalada por um fator de 500, para melhor visualização.

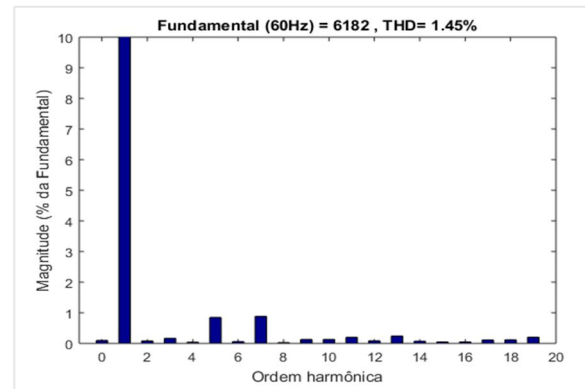


Fig. 8: Espectro harmônico da tensão no lado de média tensão (MT), quando se tem cargas não-lineares no lado de baixa tensão.

C. Correção de fator de potência

Supõe-se, em simulação, que o SST alimenta uma carga indutiva trifásica de 0,98 pu com fator de potência 0,8 indutivo, no lado de BT. Na Fig. 9 constam a tensão e a corrente na fase "a" desta carga. A tensão e a corrente no lado de MT na fase "a" são também indicadas na Fig. 9. Nota-se que o fator de potência no lado de MT se mantém unitário, ainda nesta condição. O SST atua, portanto, na correção do fator de potência da carga. Isso dispensa, por exemplo, a necessidade de adição de bancos de capacitores para este fim em sistemas com SST.

D. Injeção/absorção de potência reativa

O SST também pode injetar/absorver potência reativa no sistema, e, assim, contribuir para a regulação da tensão da rede elétrica. A Fig. 10 apresenta os resultados da simulação do caso em que o SST opera com fator de potência capacitivo de 0,92 na entrada e, na sequência, com fator de potência indutivo de 0,92 (regiões definidas na Fig. 10). Como se nota na Fig. 10, com tensão e corrente no lado de MT e de BT indicadas, o ângulo de

fase da corrente de entrada ora está em avanço, ora em atraso em relação ao da tensão da rede elétrica. Isso caracteriza, portanto, a injeção e a absorção de potência reativa, nesta ordem.

O ângulo de fase da corrente é ajustado via controle, nas malhas de corrente. O SST, pode, portanto, atuar no controle local de tensão, sem que sejam necessários equipamentos externos, como compensadores síncronos rotativos e estáticos (STATCOM).

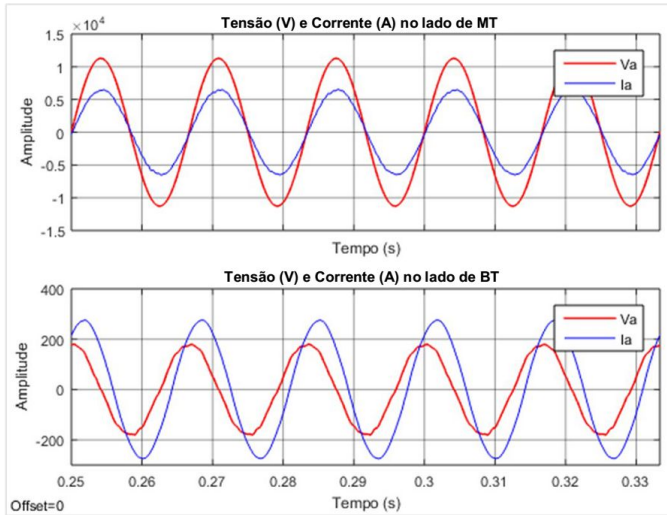


Fig. 9: Correção de fator de potência: (a) tensão e corrente na fase "a" (V_a , I_a) no lado de MT, (b) tensão e corrente na fase "a" (V_a , I_a) no lado de BT. A corrente no lado de MT foi escalada por um fator de 500, para melhor visualização.

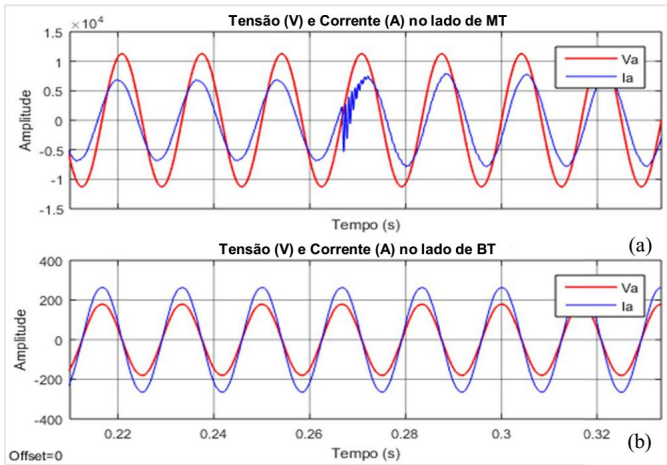


Fig. 10: Compensação de potência reativa: (a) tensão e corrente na fase "a" (V_a , I_a) no lado de MT, (b) tensão e corrente na fase "a" (V_a , I_a) no lado de BT. A corrente no lado de MT foi escalada por um fator de 500, para melhor visualização.

E. Fluxo bidirecional

A bidirecionalidade do fluxo de potência também se figura como funcionalidade do SST. Para demonstrar esta funcionalidade, propõe-se o estudo, via simulação, de uma *microgrid* hipotética de duas barras, ilustrada na Fig. 11, com um microgerador e uma carga no lado de BT. Nesta *microgrid*, simulam-se casos com três horizontes de fluxo de potência:

(i) *caso 1*: o SST absorve 1,0 pu de potência ativa da barra de 13,8 kV; (ii) *caso 2*: o SST absorve 0,3 pu de potência desta barra, já que um microgerador passa a gerar 0,7 pu; (iii) *caso 3*: o SST injeta 0,5 pu potência ativa na barra de 13,8 kV. Os três casos são indicados na Fig. 11. Potências negativas, na convenção aqui adotada, representam injeções de potência na barra.

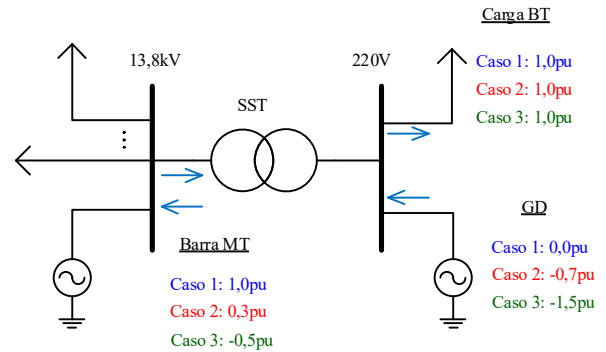


Fig. 11: *Microgrid* hipotética em estudo, com os horizontes de fluxo de potência representados.

Os resultados de simulação destes três casos são apresentados na Fig. 12, com a tensão da fase "a" da barra de 13,8 kV e a corrente nesta fase. No primeiro caso, com tensão e corrente em fase, há um fluxo de potência de MT para BT. No segundo caso, a corrente de entrada do SST passa a ser menor, com a redução do fluxo de potência ativa. No terceiro caso, a tensão e a corrente ficam em oposição de fase, representando, na convenção adotada, a injeção do excedente de energia gerada na rede elétrica.

Esta simulação demonstra a atuação do SST como "roteador" de energia na *microgrid*.

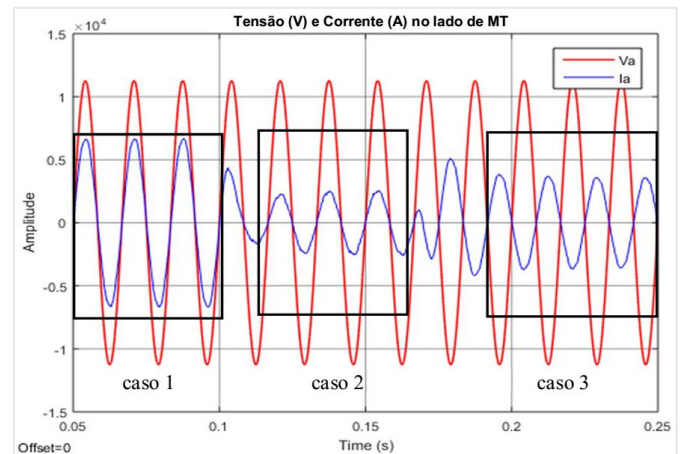


Fig. 12: Bidirecionalidade de fluxo de potência: tensão e corrente na fase "a" (V_a , I_a) em cada um dos três casos simulados. A corrente foi escalada por um fator de 500, para melhor visualização.

V. CONCLUSÕES

O trabalho apresenta o transformador de estado sólido como uma alternativa ao transformador convencional, em especial, no contexto das *microgrids*. A robustez do SST a afundamentos/elevações de tensão, bem como a capacidade de mitigação de distorções harmônicas, de correção de fator de potência, de

compensação de potência reativa 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 *microgrids*, 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, em estrutura modular, deve integrar cerca de dez módulos de 2 kVA.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio financeiro da CAPES - Brasil. Os autores agradecem a empresa Engetron pelo apoio financeiro para a participação no evento.

REFERENCES

- [1] X. She, A. Q. Huang, S. Lukic, and M. Baran, "On integration of solid state transformer with zonal DC microgrid," in *IEEE Trans. on smart grid*, vol. 3, n° 2, pp. 975-985, 2012.
- [2] X. She, S. Lukic, A. Q. Huang, S. Bhattacharya, and M. Baran, "Performance evaluation of solid state transformer based microgrid in FREEDM systems," in *2011 Twenty-Sixth annual IEEE applied power electronics conference and exposition (APEC)*, pp. 182-188, 2011.
- [3] X. She and A. Huang, "Solid state transformer in the future smart electrical system," in *2013 IEEE Power and energy society general meeting (PES)*, pp. 1-5, 2013.
- [4] R. H. Lessester, "Smart distribution: Coupled microgrids," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 99 issue 6, pp. 1074-1082, 2011.
- [5] M. K. Das, C. Capell, D. E. Grider, S. Leslie, J. Ostop, R. Raju, M. Schutten, J. Nasadoski and A. Hefner, "10 kV, 120 A SiC Half H-Bridge power MOSFET modules suitable for high frequency, medium voltage applications," *IEEE Energy conversion congress and exposition (ECCE)*, pp. 2689-2692 2011.
- [6] S. H. Hosseini, M. B. B. Sharifian, M. Sabahi, A. Y. Goharrizi and G. B. Gharehpetian, "Bidirectional power electronic transformer based compact Dynamic voltage restorer," in *IEEE Power & energy society general meeting*, pp.1-5, 2009.
- [7] X. She, S. Lukic, Q. H. Alex, "DC zonal micro-grid architecture and control," in *36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, pp. 2988-2993, 2010.
- [8] A. Q. Huang, M. L. Crow, G. T. Heydt, J. P. Zheng and S. J. Dale, "Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 99 issue 1, n°. 1, pp. 133-148, 2011.
- [9] J. S. Lai, A. Maitra, A. Mansoor and F. Goodman. "Multilevel intelligent universal transformer for medium voltage applications," in *Industry Applications Conference, Fourtieth IAS Annual Meeting, Conference Record of the 2005*, pp. 1893-1899 vol. 3, 2005.
- [10] H. Zhu, Y. Li, P. Wang, Z. Li and Z. Chu, "Design of power electronic transformer based on modular multilevel converter," in *Power and energy engineering conference (APPEEC)*, pp. 1-4, 2012.
- [11] S. Jianjiang, G. Wei, Y. Hao, Z. Tiefu, and A. Q. Huang, "Research on voltage and power balance control for cascaded modular Solid-State Transformer," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 26, pp. 1154-1166, 2011.
- [12] A. L. Kirsten, T. H. de Oliveira, J. G. P. Roncalio and C. Rech, "Performance analysis of modular converter for solid state transformers," *Brazilian Power Electronics Conference (COBEP)*, pp. 1154-1166, 2013.
- [13] A. S. Babokany, M. Jabbari, G. Shahgholian and M. Mahdavian, "A review of bidirectional dual active bridge converter," in *9th International Conference Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON)*, pp. 1-4, 2012.
- [14] B. Zhao, Q. Song and W. Liu, "Power characterization of isolated bidirectional dual-active-bridge dc-dc converter with dual-phase-shift control," *IEEE Transactions on power electronics*, vol. 27, n°. 9, pp. 4172-4176, 2012.
- [15] H. Kakigano, M. Nomura and T. Ise, "Loss evaluation of DC distribution for residential houses compared with AC system," *International power electronics conference (IPEC)*, pp. 480-486, 2010.
- [16] S. Ahmed, H. Kim, T. Prohaska, T. Ronkainen and R. Burgos, "Stability study of electric vehicle power electronics based power system," *IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, pp. 1 - 5, 2013.
- [17] M. Glinka and R. Marquardt, "A new AC/AC multilevel converter family," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 52, n°. 3, p. 662-669, 2005.
- [18] J. Taufiq, "Power electronics technologies for railway vehicles," in *Power Conversion Conference - Nagoya (PCC)*, pp. 1388-1393, 2007.
- [19] D. Dujic, C. Zhao, A. Mester, J. K. Steinke, M. Weiss, S. Lewdeni-Schmid, T. Chaudhuri and P. Stefanutti, "Power electronic traction transformer-low voltage prototype," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 28, n°. 12, pp. 5522-5534, 2013.
- [20] M. Teiner and H. Reinold, "Medium frequency topology in railway applications," in *European Conference on Power Electronics and Applications*, pp. 1-10, 2007.
- [21] J. Everts, F. Krismer, J. Van den Keybus, J. Driesen and J. W. Kolar, "Optimal ZVS modulation of single-phase single-stage bidirectional DAB AC-DC converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 29, n°. 8, pp. 3954-3970, 2014.
- [22] M. J. Ryan, W. E. Brumsickle and R. D. Lorenz, "Control topology options for single-phase UPS inverters," *Proceedings of the 1996 International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems for Industrial Growth*, vol. 1, pp. 553-558, 1997.
- [23] A. N. de E. Elétrica, "Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional - Módulo 3 - Acesso ao Sistema de Distribuição," Brasil, 2012.