

IMPACTOS DA REGULAÇÃO DE TENSÃO COM COMPENSADOR ESTÁTICO DE REATIVOS EM SISTEMAS ELÉTRICOS COM GERAÇÃO DISTRIBUÍDA

Apresentado no
4º Congresso de Pós-Graduação do IFSP
27 e 28 de novembro de 2019- Sorocaba-SP, Brasil

RESUMO: Este trabalho aborda o emprego do Compensador Estático de Reativos (SVC) em redes de baixa tensão com geração distribuída de energia, tendo como objetivo a compensação de tensão. O SVC possui operação estabelecida como carga reativa controlável em sistemas de transmissão de energia, fazendo parte dos condicionadores da tecnologia FACTS (Flexible AC Transmission Systems). Neste trabalho esta tecnologia foi explorada em outro nível de tensão. Os principais impactos na qualidade de energia elétrica causados pela geração distribuída foram abordados. As análises foram realizadas através de simulações computacionais, desenvolvidas no ambiente MATLAB.

PALAVRAS-CHAVE: Compensador Estático de Reativos; Geração Distribuída; Qualidade de Energia Elétrica.

VOLTAGE REGULATION IMPACTS WITH STATIC VAR COMPENSATOR IN ELECTRICAL SYSTEMS WITH DISTRIBUTED GENERATION

ABSTRACT: This paper discusses the use of Static Var Compensator (SVC) on low voltage grids with distributed generation with the aim of voltage compensation. SVC has established operation as controllable reactive load in power transmission systems, being part of the conditioners of the FACTS (Flexible AC Transmission Systems) technology and in this work this technology was explored in another voltage level. The main impacts on the power quality caused by distributed generation were addressed. The analyzes were performed through computational simulations developed in the MATLAB environment.

KEYWORDS: Static Var Compensator; Distributed Generation; Power Quality.

INTRODUÇÃO

No modelo tradicional de fornecimento de energia elétrica, as fontes geradoras geralmente são instaladas em locais distantes dos consumidores. No modelo de rede com geração distribuída, os geradores são localizados próximos às cargas consumidoras (FRIGO, 2013). Assim, a geração distribuída pode ser definida como a geração de energia próxima ao consumidor final, com o objetivo de suprir a demanda local, podendo ou não gerar excedentes comercializáveis, para além das instalações do consumidor final (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2014). O PRODIST define a geração distribuída como centrais geradoras de energia elétrica, de qualquer potência, com instalações conectadas diretamente no sistema elétrico de distribuição ou através de instalações de consumidores, podendo operar de forma paralela ou isolada e despachadas – ou não – pelo ONS (Operador Nacional do Sistema) (ANEEL, 2012).

No Brasil a capacidade de geração distribuída proveniente de fontes renováveis possui grande potencial de crescimento. A geração de energia pelos próprios consumidores tornou-se possível a partir da Resolução Normativa de ANEEL nº 482/2012 que foi revista em 2015 e a estimativa é que em 2024, 1,2 milhão de consumidores passem a produzir a própria energia. A resolução autoriza o uso de qualquer fonte renovável, além da cogeração qualificada, denominando-se microgeração distribuída a central geradora com potência instalada de até 75 quilowatts (kW) e minigeração distribuída – aquela com potência acima de 75 kW e menor ou igual a 5 MW (sendo 3 MW para a fonte hídrica), conectadas à rede de distribuição por meio de instalações de unidades consumidoras (ANEEL, 2016)

MATERIAL E MÉTODOS

O Compensador Estático de Reativos (do inglês Static Var Compensator – SVC) é um condicionador do tipo quase-estacionário, utilizado em aplicações na transmissão de energia elétrica com o objetivo principal de controle rápido da tensão nos pontos fracos da rede (IEEE, 1994). Ele é formado pelo Reator Controlado a Tiristor – RCT em paralelo com capacitores fixo– FC (do inglês Fixed Capacitors).

O controle do ângulo do disparo dos tiristores faz com que a corrente seja controlada de forma que ele se comporte como uma susceptância variável, com uma faixa abrangendo desde valores capacitivos até indutivos.

A topologia deste circuito é apresentada na Figura 1. O SVC proposto possui três circuitos de Reatores Controlados por Tiristor (RCT), conectados em delta e representados pelos pares de tiristores e pelas indutâncias (LTCR), cada um em paralelo com um capacitor fixo (CSVC). Deste modo é possível que a região de trabalho do RCT inclua uma faixa capacitiva. Para monitoramento e controle devem ser medidas três tensões de linha (v_{12} , v_{23} , v_{31}) e três correntes de fase (i_1 , i_2 , i_3).

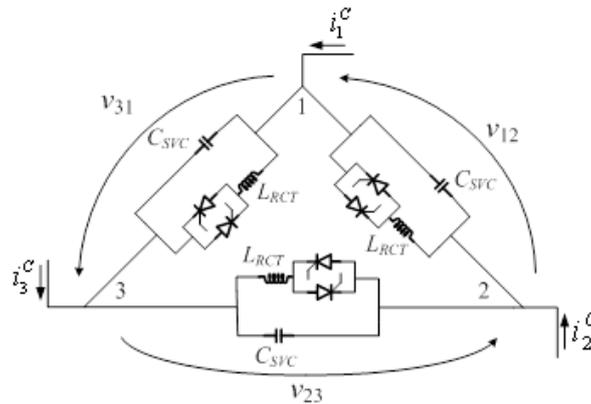


Figura 1 – Compensador Estático de Reativos.

O controle do ângulo de disparo dos tiristores causa um controle de corrente, fazendo com que o SVC se comporte como uma susceptância variável, com uma faixa desde valores capacitivos até indutivos (HINGORANI, 2000).

A figura 2 mostra a curva característica de operação V-I do SVC. O comportamento da curva demonstra que quando o ângulo de disparo dos tiristores é configurado para estar em 180° , capacitor fixo é responsável pela produção de corrente reativa total, pois o RCT não está operando. Por outro lado, quando o ângulo de disparo dos tiristores está em 90° , o indutor LTCR está totalmente inserido e o SVC se encontra no limite de absorção de corrente reativa (HINGORANI, 2000) (BALCELLS, 2013) (JÚNIOR, 2008).

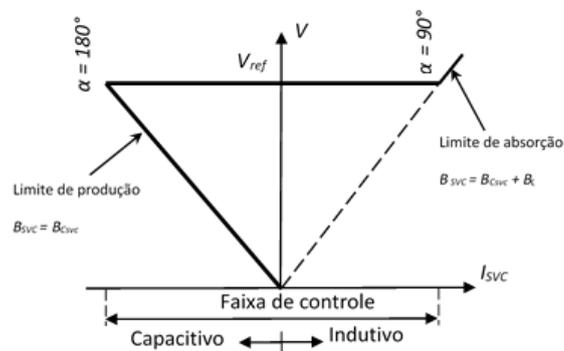


Figura 2 – Característica de operação V-I do SVC.

O objetivo é analisar o comportamento de um SVC, operando no modo de compensação de tensão, conectado a uma rede trifásica balanceada de baixa tensão com a inserção de geração distribuída trifásica e carga equilibrada. Foram avaliados os fatores de conformidade definidos pela teoria de potência CPT calculados através das medições de tensões, correntes e potências no PAC e no SVC. Os resultados foram obtidos através de simulação computacional no ambiente Matlab Simulink.

O SVC utilizado nesta simulação é composto pelo RCT em paralelo com o FC (banco de capacitores fixo), conforme o diagrama esquemático apresentado na figura 3. A rede trifásica a 4 fios é equilibrada, com impedância de linha correspondente a uma linha de distribuição de 220V com 350 metros. Sendo a rede equilibrada, os parâmetros RR_x ; LR_x ; RL_x ; LL_x ; L_x ; Cax , onde o índice x representa a fase a qual o elemento está conectado, possuem o mesmo valor equivalente entre si. Para estas análises, o dimensionamento dos valores dos capacitores e dos indutores levou em consideração os valores disponíveis nos equipamentos do laboratório GASI da UNESP câmpus Sorocaba, para futuros trabalhos com resultados experimentais. Foi levada em consideração uma rede balanceada alimentada por uma fonte trifásica com tensão de linha de 220 V, impedância de linha e compensador SVC conectado em delta no PAC.

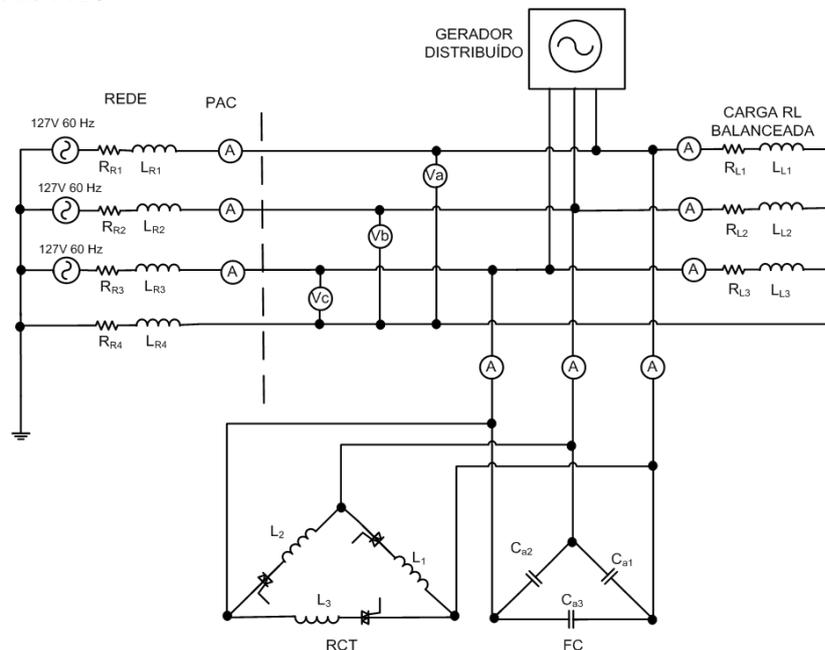


Figura 3 – Diagrama esquemático da rede com SVC para regulação de tensão.

Na tabela 1 são apresentados os parâmetros da rede elétrica.

Tabela 1 – Configuração do sistema com SVC regulando tensão

Valores da Linha	Tensão de Linha	Potência Reativa RCT	Indutor RCT	Potência Reativa FC	Capacitor Banco	Potência GD	Potência Aparente Carga	Potência Reativa Carga	Potência Ativa Carga
$L=0,52\text{mH};$ $R=0,119\Omega$	220 V	20 kVAr	19,25 mF	10 kVAr	182,7 μF	5 kW	7,5 kVA	4,5 kVAr	6 kW

Como convenção para as configurações dos elementos conectados ao PAC em diferentes instantes, foi adotada a denominação apresentada na tabela 2.

Tabela 2 – Configuração de carga conectada ao PAC em diferentes instantes da simulação com SVC regulando

Caso Inicial	Caso I	Caso II	Caso III
2,5 kVA	2,5 kVA + SVC	7,5 kVA + SVC	7,5 kVA + SVC + GD

Na figura 4 é apresentado o diagrama de eventos da simulação. O valor inicial da carga é de 2,5 kVA. No instante $t = 0,5$ s o SVC é ligado à rede (caso I). No instante $t = 3$ s a carga aumenta para 7,5 kVA (caso II) e no instante $t = 5$ s o GD é conectado (caso III) fornecendo uma potência ativa de 5kW.

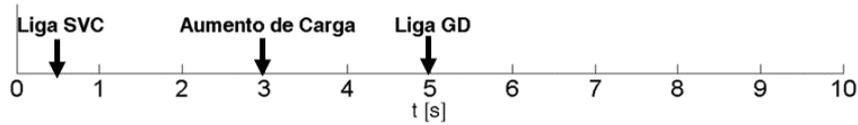


Figura 4 – Diagrama de instantes da simulação com SVC regulando tensão

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As tensões eficazes de linha são mostradas na figura 5a, onde é possível notar que se mantêm equilibradas e próximas do valor de referência de 220 V em regime permanente. No instante de conexão do SVC, mesmo com a existência de algoritmo de sincronismo e sistema de pré-carga dos capacitores, observa-se que há uma elevação de tensão de curta duração a qual não consegue ser compensada pelo SVC.

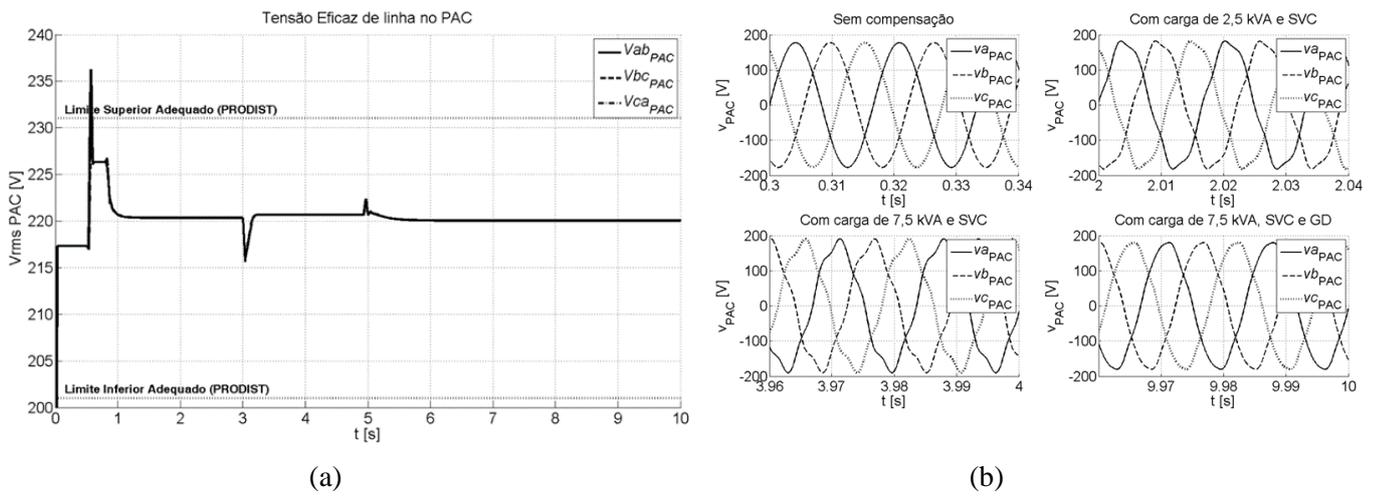


Figura 5 – a) Tensão eficaz de linha no PAC com SVC regulando tensão. b) Tensões de fase no PAC com SVC regulando tensão

As formas de onda das tensões de fase no PAC para os casos inicial, I, II e III são apresentadas na figura 5b. É possível notar a deformação da forma de onda da tensão no PAC com o advento da operação do SVC. Apesar de distorcidas, nas condições avaliadas, permanecem equilibradas. O espectro harmônico da forma da onda da tensão no PAC é apresentado na figura 6.

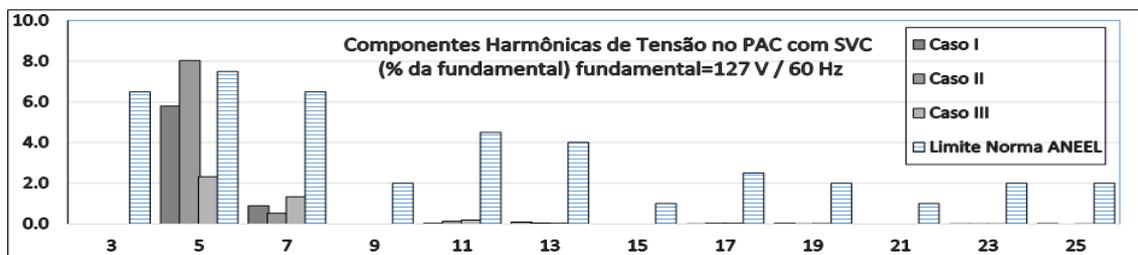


Figura 6 – Componentes harmônicas de tensão com SVC regulando tensão

A componente de 5ª ordem, no caso II, ultrapassa o valor limite individual de 7,5% da norma da ANEEL e também ultrapassa o limite de 5,0% recomendado pelo IEEE.

CONCLUSÕES

Verificou-se que o SVC atingiu o objetivo de compensação da tensão tanto no caso em que a carga aumenta como no caso em que o GD é conectado à rede, mantendo o valor da tensão próximo ao valor de referência.

Dessa maneira, o SVC, largamente utilizado em redes de alta e média tensão, mantém suas propriedades em redes de baixa tensão, se mostrando eficiente no controle de tensão, podendo representar uma solução de menor complexidade de implementação e custo para a finalidade de compensação de perfil de tensão, quando confrontada às soluções baseadas em chaveamento em elevadas frequências convencionalmente empregadas para esta finalidade em redes de baixa tensão.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo pelo fomento através do edital de incentivo à capacitação.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL, “Brasil ultrapassa 5 mil conexões de micro e minigeração”, disponível em: http://www.aneel.gov.br/sala-de-imprensa-exibicao/-/asset_publisher/XGPXSqdMFHrE/content/brasil-ultrapassa-5-mil-conexoes-de-micro-e-minigeracao/656877?inheritRedirect=false, publicado em Setembro de 2016. Acesso em: 28/09/2016.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 1 – Resolução Normativa nº 687/2015, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, Brasília, Maio de 2012.

BALCELLS, J.; BOGONEZ-FRANCO, P. Voltage control in a LV microgrid by means of an SVC, IECON Proceedings (Industrial Electronics Conference), 2013.

BORGES, R. T. Desenvolvimento de metodologias de análise sistêmica de sistemas de distribuição de energia elétrica com geração ultra-dispersa. Dissertação de Mestrado, Unicamp, 2014.

DUGAN, R. C.; MCGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S.; BEATY, H. W. Electrical Power System Quality. McGraw-Hill, Third Edition, Jan. 2010.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Análise da Inserção da Geração Solar na Matriz Elétrica Brasileira, 2012.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. Avaliação da Eficiência Energética e Geração Distribuída para os próximos 10 anos (2014-2023). Nota técnica DEA 26/14, Rio de Janeiro, Dezembro de 2014.

FRIGO, M. M. Impacto da microgeração de energia elétrica em sistemas de distribuição de baixa tensão. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS, 2013.

HINGORANI, N. G., GYUGYI, L., Understanding Facts: Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems, IEEE Series on Power Engineering Society; Mohamed E. El-Hawary, Series Editor, 2000.

JÚNIOR, G. S. S. Análise da Influência de um Compensador Estático de Reativos na Operação de Sistema Elétrico Industrial com Cogeração, Dissertação (Mestrado em engenharia elétrica) UFMA, 2008.

IEEE Special Stability Controls Working Group. Static Var Compensator Models for Power Flow and Dynamic Performance Simulation. IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9, no. 1, pp. 229-240, Feb. 1994.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, “Key Electricity Trends 2016”, www.iea.org, 2016.

KOJOVIC, L. Impact of DG on Voltage Regulation. IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, Jul. 2002, pp. 97 – 102.

MARAFÃO, F. P. Análise e Controle da Energia Elétrica Através de Técnicas de Processamento Digital de Sinais. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, dezembro, 2004.

MORREN, J.; HANN, S. W. H.; FERREIRA, J. A. Distributed Generation Units Contributing to Voltage Control in Distribution Networks. 39th International Universities Power Engineering Conference, vol. 2, pp. 789 – 793, 2004.

PADILHA, L. Análise Comparativa de Estratégias para Regulação de Tensão em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica na Presença de Geradores Distribuídos. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.