

## **MODELAGEM DE UM CONVERSOR ESTÁTICO PARA APLICAÇÃO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO MONOFÁSICA<sup>1</sup>**

**Carlos Moises Tiede<sup>2</sup>, Taciana Paula Enderle<sup>3</sup>.**

<sup>1</sup> Projeto de Pesquisa realizado no curso de Engenharia Elétrica Câmpus Santa Rosa

<sup>2</sup> Acadêmico do Curso de Engenharia Elétrica

<sup>3</sup> Professora do Curso de Engenharia Elétrica

### Introdução

Atualmente, com a crescente demanda da energia elétrica no país, os investimentos das concessionárias deveriam crescer na mesma proporção, como forma de garantir um suprimento de qualidade e confiável para seus consumidores. Sabe-se que níveis precários e críticos de tensão, em especial subtensões, causam diversos problemas para os consumidores, tais como: possível interrupção de equipamentos eletrônicos, redução do índice de iluminação para os circuitos de iluminação incandescente, elevação do tempo de partida e da corrente de motores de indução. Os consumidores rurais são os mais afetados pelos problemas de regulação de tensão, isso ocorre devido ao grande comprimento das linhas de distribuição, desta forma os dispositivos utilizados para a regulação de tensão estão conectados a longas distâncias dos mesmos. Neste sentido, a ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), atua constantemente na fiscalização dos níveis de qualidade de energia do setor energético brasileiro, e em casos de inconformidade, aplica as devidas penalidades. O Módulo 8 do PRODIST (Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico), é a normatização a qual as concessionárias de energia devem seguir, obtendo informações como parâmetro para análise de critério de amostragem, valores de referência e os procedimentos relativos às qualidades do produto e do serviço (PRODIST, 2011). Dentre estes itens fiscalizados pela ANEEL podemos destacar a importância do nível de tensão que é disponibilizado pelas concessionárias aos seus consumidores. Com o desenvolvimento da eletrônica de potência e o avanço de técnicas de controle e supervisão, novos equipamentos têm sido propostos para o uso em redes de distribuição, melhorando a qualidade e consecutivamente a confiabilidade no fornecimento de energia elétrica. Reguladores de tensão, ajuste na derivação de operação dos transformadores ou instalação de banco de capacitores, fazem parte das técnicas empregadas para regulação da tensão. Outra alternativa para reduzir problemas provenientes de níveis de tensão e controlar o fluxo de potência através da rede é a compensação de reativos, utilizando conversores estáticos. O D-STATCOM (Distribution Static Synchronous Compensator) tem a capacidade de corrigir o fator de potência, eliminar correntes harmônicas, balancear cargas, compensação de tensão e de potência reativa. Emprega dispositivos semicondutores totalmente controlados, que operam com modulação

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico

**Evento:** XXII Seminário de Iniciação Científica

por largura de pulso (PWM – Pulse Width Modulation) em alta frequência (na ordem de kHz) (Haque, 2001; Hatami, 2007). O D-STATCOM adotado neste trabalho é flexível quanto ao seu modo de controle, que pode ser em tensão ou em corrente (SINGH, 2008). Uma vez que o sistema de controle deve assegurar que a tensão do PAC permaneça em níveis adequados, mesmo sob as variações de carga, da impedância da linha ou da tensão da rede, o modo de controle direto da tensão é adotado nesse trabalho. Neste sentido, o objetivo deste trabalho é desenvolver a modelagem de um inversor PWM monofásico conectado a rede através de um filtro LC, o qual será utilizado futuramente para projetar o sistema de controle deste compensador.

### Metodologia

O D-STATCOM atua como regulador de tensão e é composto por um inversor monofásico em ponte completa alimentado em tensão e por um modulador por largura de pulso (PWM) em alta frequência. O Inversor PWM é conectado em paralelo com o ponto de acoplamento comum através de um filtro de segunda ordem (Lfcf) para reduzir os harmônicos de alta frequência produzidos pelas comutações dos interruptores do inversor. Um inversor PWM conectado em paralelo com o PAC pode ser empregado para manter a tensão em níveis adequados, essencialmente injetando ou absorvendo potência reativa da rede de distribuição. Dessa forma, para um correto funcionamento do sistema de regulação, o sistema de controle do inversor PWM deve garantir que a tensão do PAC seja mantida em níveis adequados, assim como manter a tensão do seu barramento CC regulada.

Para realizar o projeto dos compensadores que compõem o sistema de controle são necessários dois modelos dinâmicos. Neste trabalho será apresentada a modelagem de um deles, chamado de modelo do lado CA, que deve descrever matematicamente a relação entre o sinal de controle do inversor, proveniente das malhas de amortecimento ativo e de controle da tensão do PAC, e as variáveis CA do sistema (tensão no PAC, corrente na rede e corrente de saída do inversor). Inicialmente, as seguintes hipóteses são assumidas: 1) A tensão do barramento CC é constante e igual ao seu valor nominal VCC; 2) Os semicondutores são considerados elementos ideais; 3) As cargas conectadas ao PAC são desprezadas, podendo ser consideradas como distúrbios no sistema; 4) Como a frequência de comutação é muito maior que a frequência fundamental, as ondulações e, portanto, os harmônicos em alta frequência gerados pelas comutações dos interruptores, são desprezados. Considerando essas hipóteses, o circuito equivalente mostrado na Figura 1 pode ser utilizado para obter o modelo médio dinâmico do lado CA.

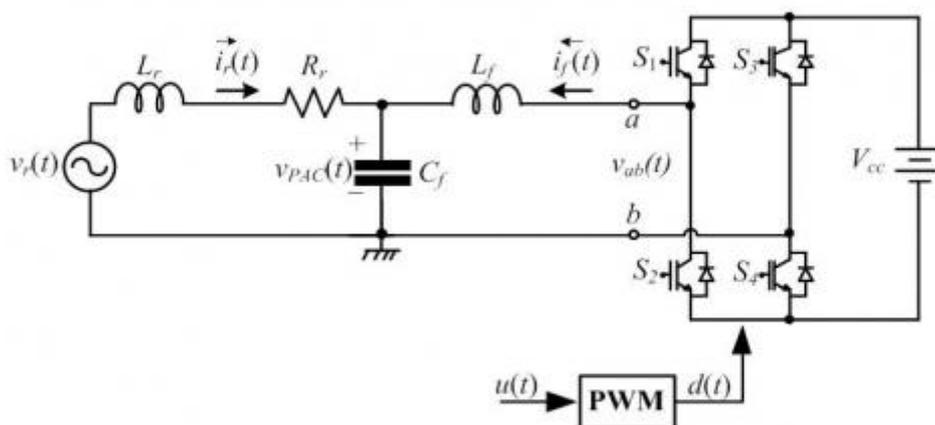


Figura 1 - Circuito equivalente para obter o modelo médio dinâmico do lado CA

Para obter o modelo médio dinâmico do lado CA, podemos dividir esse circuito em três partes: modulador por largura de pulso, inversor em ponte completa e o circuito composto pelo filtro passa-baixas e a rede. O inversor em ponte completa é modulado por largura de pulso, usando a estratégia PWM unipolar (Moran, 1995). Nessa estratégia de modulação, o braço A do inversor compara o sinal de controle  $u(t)$  com a portadora triangular para gerar os pulsos de comando para os interruptores S1 e S2. De forma similar, o braço B do inversor compara o sinal  $-u(t)$  com a portadora triangular para gerar os pulsos de comando para os interruptores S3 e S4: Como resultado dessa estratégia de modulação, a tensão de saída do inversor pode assumir três níveis distintos de tensão:  $V_{CC}$ , zero e  $-V_{CC}$ .

Considerando que o inversor opera na região linear de operação, ou seja,  $-VM/2$  (menor,igual)  $u(t)$ (menor,igual)  $VM/2$ , onde  $VM$  é o valor pico-a-pico da portadora triangular, então a relação entre a razão cíclica  $d(t)$  do interruptor S1 (braço A) e o sinal de controle  $u(t)$ .

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico  
**Evento:** XXII Seminário de Iniciação Científica

O valor médio da tensão de saída do inversor em ponte completa  $v_{ab}(t)$  em um período de comutação depende dos valores médios das tensões dos braços. Uma vez que a tensão de saída do inversor  $v_{ab}(t)$  é controlada pela razão cíclica  $d(t)$ , pode-se representar o inversor em ponte completa por uma fonte de tensão controlada. O modelo médio dinâmico do sistema apresentado na Figura 1 pode ser representado em espaço de estados e é dado por (1) e por (2):

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + Bv_{ab}(t) + B_w w(t) \quad (1)$$

$$y(t) = Cx(t) \quad (2)$$

onde  $x(t)=[i_f(t) \ i_r(t) \ v_{PAC}(t)]^T$  é o vetor de estados,  $v_{ab}(t)$  é a entrada da planta,  $w(t)=v_r(t)$  é um distúrbio,  $y(t)=v_{PAC}(t)$  é a saída e as matrizes da equação de estados dadas por(3):

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{L_f} \\ 0 & -\frac{R_r}{L_r} & -\frac{1}{L_r} \\ \frac{1}{C_f} & \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad B_w = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{L_r} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad C = [0 \ 0 \ 1] \quad (3)$$

Ainda, obtém-se o modelo médio dinâmico do lado CA, considerando o sinal de controle  $u(t)$  como entrada da planta dada por (4):

$$\frac{dx(t)}{dt} = Ax(t) + B_u u(t) + B_w w(t) \quad (4)$$

Ainda, obtém-se o modelo médio dinâmico do lado CA, dado por (4), considerando o sinal de controle  $u(t)$  como entrada da planta e a matriz  $B_u$  dada por (5).

$$B_u = \begin{bmatrix} \frac{2V_{CC}}{V_M L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (5)$$

## Resultados e Discussão

Após obter o modelo médio dinâmico do lado CA em espaço de estados, foram realizadas simulações do circuito apresentado na Figura 1 e do modelo para validação do mesmo. Os principais parâmetros do sistema são dados na Tabela 1.

Parâmetros	Valor
Tensão nominal da rede ( $V_r$ )	220 VRMS / 60 Hz
Potência nominal	1 kVA
Tensão nominal do barramento CC ( $V_{CC}$ )	420 V
Frequência de comutação ( $f_s$ )	19,98 kHz
Indutância da rede ( $L_r$ )	18 mH (0,14 pu)
Resistência da rede ( $R_r$ )	6 $\Omega$ (0,14 pu)
Indutância de filtro ( $L_f$ )	1 mH
Capacitância de filtro ( $C_f$ )	6 $\mu$ F

Tabela 1 - Parâmetros do sistema

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico  
**Evento:** XXII Seminário de Iniciação Científica

O simulador escolhido para fazer a montagem do sistema após a modelagem do mesmo foi o simulink. O simulink é uma plataforma de software para modelagem, simulação e análise de sistemas dinâmicos. Suporta sistemas lineares, não lineares, tempo contínuo, tempo amostrado, ou híbrido de ambos. Devido a sua maior facilidade de manipulação e maior inserção no meio acadêmico acaba sendo uma ferramenta muito útil e de resultados satisfatório em termos de simulação

Na Figura 2 é apresentada uma comparação das formas de onda da tensão no PAC obtidas a partir da simulação do circuito da Figura 1 e do modelo obtido. Desconsiderando a parcela relativa à tensão da rede e provocando uma perturbação na razão cíclica de 2% é possível observar o comportamento do modelo em um transitório, e, além disso, cabe ressaltar que o modelo dinâmico obtido nessa seção representa o sistema físico de forma apropriada.

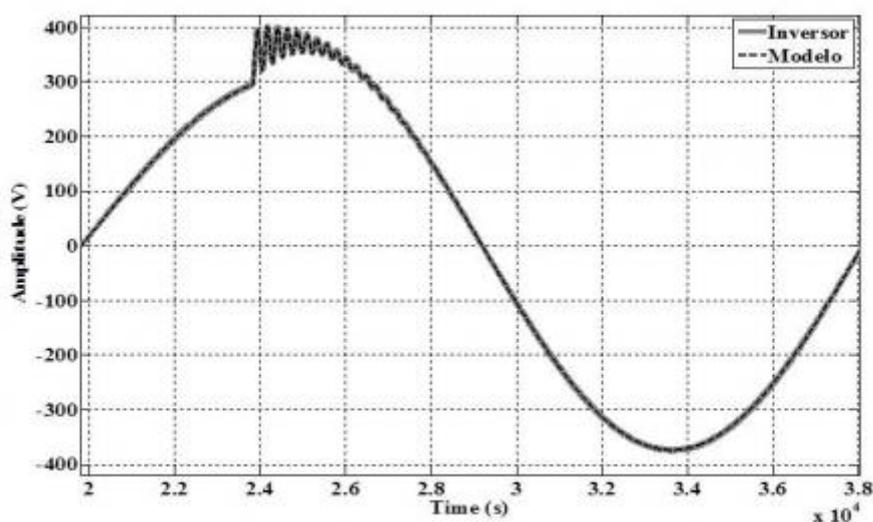


Figura 2 - Validação do modelo do lado CA

**Modalidade do trabalho:** Relatório técnico-científico  
**Evento:** XXII Seminário de Iniciação Científica

## Conclusões

Garantir um fornecimento de energia elétrica confiável e de qualidade é uma das principais preocupações das concessionárias de energia elétrica. Nos últimos anos, os órgãos responsáveis estão intensificando as fiscalizações e punindo as concessionárias que fornecem tensões fora dos limites adequados. Para diminuir este problema, equipamentos de fácil instalação e que sejam capazes de restaurar a tensão conforme as exigências do PRODIST poderiam ser provisoriamente instalados em pontos com níveis de tensão inadequados, enquanto uma solução definitiva não for executada pela concessionária.

Nesse sentido, este trabalho de pesquisa tem como objetivo final o desenvolvimento de um D-STATCOM para redes monofásicas rurais de baixa tensão. Inicialmente, a modelagem matemática do inversor PWM conectado a rede, juntamente como o filtro LfCf, foi desenvolvida. Este modelo representou de forma satisfatória o sistema e pode ser utilizado para o desenvolvimento dos controladores, próximos passos da pesquisa.

**Palavras-Chave:** D-STATCOM, Regulador de Tensão, Modelagem Matemática;

## Referências Bibliográficas

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA – ANEEL. Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST, Módulo 8 – Qualidade da Energia Elétrica, de 06 de setembro de 2011.

HAQUE, M.H., “Compensation of distribution system voltage sag by DVR and D-STATCOM,” Power Tech Proceedings, vol.1, pp.5 pp. vol.1, 2001.

HATAMI, H.; SHAHNIA, F.; PASHAEI, A.; HOSSEINI, S.H., “Investigation on D-STATCOM and DVR Operation for Voltage Control in Distribution Networks with a New Control Strategy,” IEEE Lausanne Power Tech, pp.2207-2212, 1-5, 2007.

MORAN, N.; UNDERLAND, T.M.; ROBBINS, W.P. Power electronics: Converters, applications, and design, IEEE Press, v. Segunda edição 1995.

SINGH, B.; ADYA, A.; MITTAL, A.P.; GUPTA, J.R.P., “Modeling, Design and Analysis of Different Controllers for DSTATCOM,” Power System Technology and IEEE Power India Conference, pp.1-8, 12-15, 2008.