

CORREÇÃO DE ANOMALIAS EM REDES ELÉTRICAS ATRAVÉS DA INJEÇÃO DE CORRENTES DE COMPENSAÇÃO INSTANTÂNEA

José Toshiyuki Honda
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo
jthonda@pea.usp.br

José Antônio Jardini
Escola Politécnica
Universidade de São Paulo
jardini@pea.usp.br

Héctor Arango
EFEI - Escola Federal
de Engenharia de Itájuba

Resumo - Este trabalho apresenta a modelagem no programa ATP de um filtro ativo, composto por uma ponte inversora de tensão com controle PWM, capaz de corrigir o fator de potência e simultaneamente eliminar as componentes harmônicas da corrente de carga. O fundamento teórico aplicado no sistema de controle é o conceito de potência real instantânea e potência imaginária instantânea. São mostrados os resultados de simulações realizadas.

Palavras chave - filtro ativo, potência reativa, fator de potência, harmônicas, ATP.

Abstract - This work presents the modelling of an active filter in the ATP (Alternative Transients Program), consisting of a voltage source inverter with PWM control, that is able to correct the power factor and simultaneously eliminate the harmonic currents generated by a load. The theoretical fundamental applied to the control systems is the concept of instantaneous real imaginary power and instantaneous imaginary power. Simulation results are presented.

Keywords - active filter, reactive power, power factor, harmonics, ATP.

INTRODUÇÃO

O tema qualidade de energia tem sido uma preocupação constante ao longo do desenvolvimento do serviço de energia elétrica.

Inicialmente, as cargas eram essencialmente do tipo tradicional (basicamente motores, iluminação e aquecimento) que se caracterizam por consumir correntes eminentemente senoidais e indutivas. Neste cenário a maior preocupação era com a queda de tensão, desequilíbrio introduzidos pelas cargas monofásicas e a correção do fator de potência associada a circulação da potência reativa.

Nos tempos mais recentes, com o crescente uso de equipamentos eletrônicos de potência, tem aumentado a quantidade de cargas não lineares acrescentando, desta forma, aos problemas de circulação de potência reativa e desequilíbrio em regime basicamente senoidal também o de circulação de correntes harmônicas no sistema que deformam a tensão prejudicando o desempenho e diminuindo a vida útil dos equipamentos elétricos.

Tradicionalmente estes problemas tem sido resolvidos com a instalação de filtros "shunt" passivos compostos por bancos de capacitores e reatores.

Com o desenvolvimento de dispositivos eletrônicos de chaveamento rápido com capacidade crescente de suportar elevadas correntes e tensões, pode-se vislumbrar como uma solução alternativa a

utilização de filtros ativos que eliminam as componentes harmônicas da corrente de carga e proporcionam a correção do fator de potência instantaneamente sem os elementos armazenadores de energia como ocorre nos filtros passivos.

O uso destes filtros ativos, constituídos por inversores de tensão com controle PWM, vem sendo analisados com crescente interesse desde a conceituação da potência real instantânea e potência imaginária instantânea realizada por Akagi, Kanazawa e Nabae (1984).

O presente trabalho apresenta um modelo de filtro ativo implementado no programa ATP (Alternative Transients Program) que permite a simulação do filtro ativo acoplado à rede elétrica com os seus elementos (geradores, transformadores, disjuntores, linhas de transmissão, etc...) representados detalhadamente, possibilitando assim a análise de desempenho do filtro em diferentes pontos da rede de distribuição.

A seguir é apresentado de maneira sintética a teoria de potência instantânea.

POTÊNCIA INSTANTÂNEA

Na definição de potência instantânea, conforme Akagi et al. (1984), Penello e Watanabe (1991), e Watanabe e Stephan (1991), as tensões e correntes instantâneas são representados através de sistema de coordenada α , β e 0:

$$\begin{bmatrix} e_o \\ e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = [M] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

onde:

$$[M] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix}$$

O produto da tensão pela corrente fornece a potência instantânea convencional:

$$p = e_\alpha i_\alpha + e_\beta i_\beta \quad (3)$$

Esta potência é chamada de potência real instantânea.

Define-se ainda a potência imaginária instantânea q como:

$$q = e_\alpha i_\beta - e_\beta i_\alpha \quad (4)$$

Desta forma as potências instantâneas no novo sistema de coordenadas podem ser expressas matricialmente como:

A potência p_o é chamada de potência instantânea de seqüência zero.

$$\begin{bmatrix} p_o \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_o & 0 & 0 \\ 0 & e_\alpha & e_\beta \\ 0 & -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_o \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

As potências p e q podem ser decompostas em duas componentes:

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (6)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (7)$$

onde:

\bar{p} = valor médio de p; é parcela da potência real transformada em trabalho útil.

\bar{q} = valor médio de q; é potência reativa convencional.

\tilde{p}, \tilde{q} = componentes oscilatória de p e q, respectivamente; estão relacionadas correntes harmônicas instantâneas e com a componente de seqüência negativa.

PRINCÍPIO DE COMPENSAÇÃO

O princípio de compensação consiste em eliminar da corrente de carga a parcela responsável pela circulação de potência reativa (\bar{q}) e de componentes harmônicas ($\tilde{p} + \tilde{q}$) bem como de potência de seqüência zero (p_o), permitindo somente a circulação da parcela correspondente a \bar{p} , responsável pela transferência de potência ativa da fonte para a carga.

Calculadas as potências instantâneas a serem eliminadas, as correntes de compensação são obtidas pela resolução da equação:

$$\begin{bmatrix} i_{co} \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_o & 0 & 0 \\ 0 & e_\alpha & e_\beta \\ 0 & -e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_o \\ \tilde{p} \\ q \end{bmatrix} \quad (8)$$

O seu equivalente trifásico é:

$$\begin{bmatrix} i_{ca} \\ i_{cb} \\ i_{cc} \end{bmatrix} = [M]^{-1} \begin{bmatrix} i_{co} \\ i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} \quad (9)$$

Estas correntes são referências para uma ponte inversora com controle PWM atuando como fonte de corrente controlada que fornece as correntes de compensação i_{ca}, i_{cb} e i_{cc} .

CONFIGURAÇÃO DA REDE E FILTRO ATIVO

A figura 1 apresenta a configuração da rede e o filtro ativo. Todos os elementos são modelados no ATP.

As tensões senoidais são fornecidas por geradores ideais com tensão de pico de 11,27kV (13,8kV eficaz e de linha). A carga é um retificador de onda completa com ângulo de disparo controlável.

O inversor de tensão é composto por chaves simples que conduz nos dois sentidos (ATP dispõe deste modelo de chave) acionados por pulsos

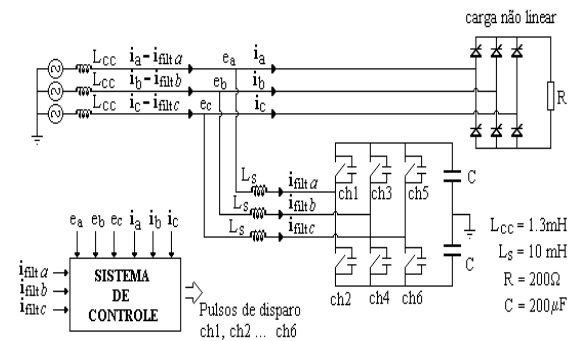


Figura 1: Configuração da rede e filtro ativo

fornecido pelo sistema de controle. Inicialmente foi utilizado o conjunto diodo+IGBT para representar as chaves, posteriormente estes dispositivos foram substituído por chaves simples, pois, comparando os dois métodos de simulação, foi verificado que os resultados não justificam o mencionado grau de detalhamento para os propósitos da modelagem.

A indutância L_{cc} representa a potência de curto circuito na barra de compensação. A indutância L_s tem a função de atenuar os picos de tensão provocados pelo chaveamento.

SISTEMA DE CONTROLE

Na figura 2 é apresentado o diagrama com principais funções do sistema de controle.

Inicialmente as tensões e_a, e_b e e_c medidas na rede são submetidas a um filtro tipo passa baixa de 2ª ordem com uma frequência de corte de 1000Hz. A função deste filtro é eliminar as componentes oscilatórias de alta frequência presentes na tensão da rede causados pela operação da ponte inversora. O filtro introduz um pequeno atraso na tensão medida que não interfere de modo significativo no cálculo das correntes instantâneas de compensação. As correntes não são filtradas por constituírem grandezas a serem compensadas.

Em seguida, tanto as tensões como as correntes trifásicas são transformadas para coordenadas $\alpha, \beta, 0$ através da matriz de transformação $[M]$. Estes sinais de tensão e corrente agora referenciadas às novas coordenadas são entrada para o bloco de cálculo das potências p, q e p_o . Os elementos da

matriz de transformação das correntes em potências são as tensões instantâneas e_α, e_β, e_o que variam continuamente no tempo.

A potência instantânea real p é submetida a um filtro tipo passa baixa com frequência de corte de 100Hz. O sinal de saída do filtro corresponde à potência instantânea constante \bar{p} . A diferença entre o sinal de entrada e saída corresponde a potência instantânea oscilatória \tilde{p} .

Uma alternativa para separar a componente \tilde{p} de p é utilizar diretamente um filtro tipo passa alta, contudo este segundo método tem-se mostrado inferior quanto resíduo ao harmônico, conforme Peng et al. (1990).

Não há necessidade de separar os sinais q e p_o em componentes oscilatória e constantes, pois os mesmos já são as potências a serem eliminadas pelo filtro ativo.

Obtidas as potências instantâneas \tilde{p}, q e p_o são recalculadas as correntes de compensação $i_{c\alpha}, i_{c\beta}$ e i_{co} considerando o inverso da matriz de transformação das correntes em potências. Multiplicado estas correntes de compensação pelo inverso da matriz $[M]$ obtém-se finalmente as correntes trifásicas i_{ca}, i_{cb} e i_{cc} . Estas correntes são injetadas na rede com a polaridade invertida de modo a anular as parcelas i_{ca}, i_{cb} e i_{cc} presentes na corrente de carga, responsáveis pela sua deformação e deslocamento em relação a tensão, permitindo assim somente a circulação das correntes relativas a \bar{p} . Deste modo as correntes i_{ca}, i_{cb} e i_{cc} com as polaridades invertidas são utilizadas como referências para o inversor.

Através de uma tolerância pré-fixada, define-se para cada fase o limite superior (i_{refS}) e inferior (i_{refI}) da faixa de atuação do PWM.

Em cada fase, os sinais i_{refS} e i_{refI} são entradas para dois detetores de níveis, onde são comparados com corrente i_{filt} fornecida pelo inversor. As saídas dos detetores, sinais reset e set, seguem as seguintes lógicas:

$$i_{filt} > i_{refS} \quad \text{sinal reset} = 1$$

$$i_{filt} < i_{refI} \quad \text{sinal set} = 1$$

caso contrário os sinais reset e set são nulo.

Os sinais set e reset, por sua vez, são entradas para um flip flop que fornecem dois pulsos que comandam a abertura e o fechamento das chaves da ponte inversora

A lógica do flip flop implementado impõe que estes pulsos sejam complementares de modo que quando uma chave está aberta a outra está necessariamente fechada. A lógica de disparo está ilustrada na figura 3.

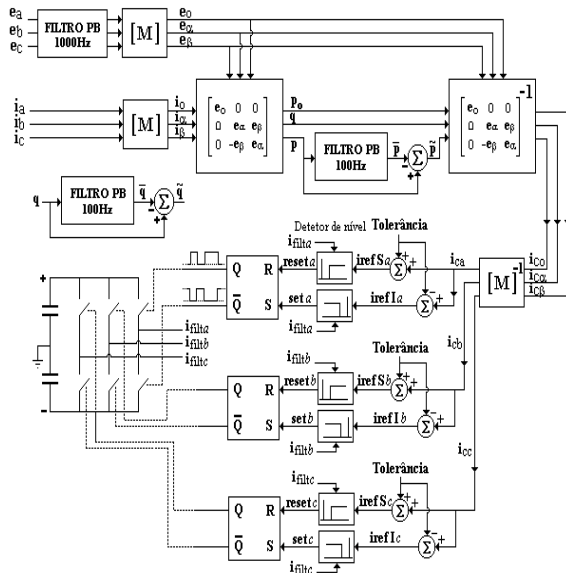


Figura 2: Sistema de controle

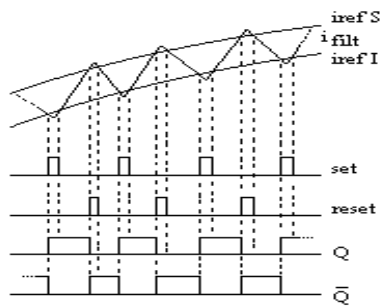


Figura 3: Lógica de disparo das chaves

A estratégia de controle mostrada na figura 2 e comentada neste item, é suficiente para a realização da compensação total com a eliminação das potências \tilde{p} , \tilde{q} e \tilde{q} . Contudo ainda são efetuados cálculos adicionais não representados no diagrama da figura 2. A potência instantânea q é separada em componentes \tilde{q} e \tilde{q} , de modo similar a efetuada para potência instantânea p com filtro passa baixa. Os sinais \tilde{q} e \tilde{q} são utilizados nos cálculos de outros tipos de compensação, tais como; somente correção do fator de potência ou componentes harmônica, etc... . A função destes cálculos é apenas permitir a visualização dos resultados de outros tipos de compensação sem a atuação na rede. Os sinais obtidos não são utilizados para a geração dos pulsos que controlam os chaveamentos da ponte inversora.

SIMULAÇÃO

São apresentados neste item três situações de operação do filtro ativo ilustrando o seu desempenho.

Carga não linear. A figura 4 mostra as curvas mais representativas do modo de atuação do filtro ativo. Na forma de onda da tensão (figura 4a) observa-se a presença de “ripples” em consequência dos chaveamentos na ponte inversora. Tais “ripples” podem ser atenuados com filtros de supressão instalados na rede.

A corrente referente a carga não linear (retificador com ângulo de disparo de 30° e a respectiva corrente de compensação total (sem as parcelas \tilde{p} , q e p_0) são apresentadas nas figuras 4b e 4c, respectivamente. A soma das duas correntes fornece a corrente compensada (figura 4d).

Ainda com referência a figura 4, é apresentada a forma de onda da corrente sem a parcela relativa a potência imaginária instantânea \tilde{q} e \tilde{q} (figura 4e), onde nota-se a correção do fator de potência devido a compensação da potência \tilde{q} e a eliminação apenas parcial das harmônicas uma vez que a componente oscilatória \tilde{p} não é suprimida. Já com a compensação das potências real e imaginária oscilatória, \tilde{p} e \tilde{q} respectivamente, a corrente

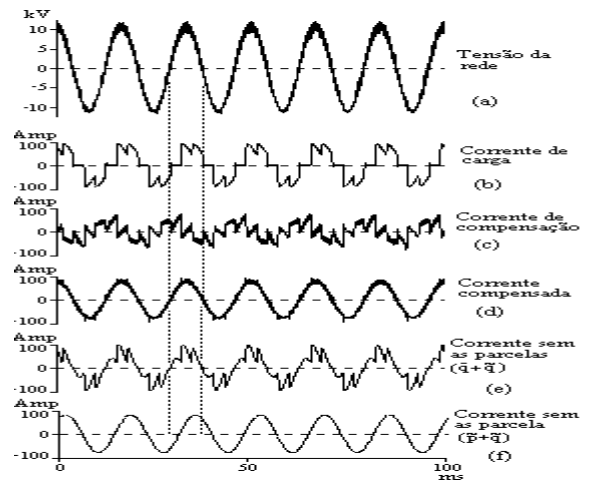


Figura 4: Formas de onda de tensão e corrente Carga não linear

compensada (figura 4f) apresenta-se senoidal mas agora sem a correção do fator de potência. Como nas duas situações os sinais são obtidos apenas por cálculo sem injeção de corrente na rede através da ponte inversora, os “ripples” não estão presentes nestas formas de onda.

Abertura de uma fase. A figura 5 exibe as correntes de carga, compensação e compensadas das três fases durante a manobra de abertura de uma das linhas (fase a) que alimentam a carga não linear.

Como não são utilizados elementos armazenadores de energia, a corrente de compensação de cada fase é obtida através das contribuições distintas das outras duas fases, instante a instante, mesmo com correntes de cargas desequilibradas e diferentes, como ocorre nesta simulação. O capacitor do inversor, neste sentido, é apenas um elemento comum às três fases que possibilita estas trocas de energia. As figuras 5d, 5e e 5f ilustram os citados comportamentos distintos das correntes de compensação.

Em particular na fase a , a partir do momento que ocorre a abertura, a corrente de compensação é a própria corrente compensada; senoidal e em fase com a tensão. A corrente é equilibrada e senoidal apenas no lado da fonte (figuras 5g, 5h e 5i). No lado carga, o desequilíbrio permanece (figuras 5a, 5b e 5c). Evidentemente a potência ativa transferida da fonte para a carga passa a ser menor, após a abertura, pois somente duas fases da carga são alimentadas. Na figura 6 é mostrado o comportamento da potência transferida \tilde{p} .

Com a correção do desequilíbrio a capacidade do filtro ativo de eliminar também as componentes de seqüência negativa é evidenciada.

Carga trifásica desequilibrada. A figura 7 expõe as formas de ondas das correntes considerando uma carga linear desequilibrada ligada em estrela aterrada ao invés de um retificador.

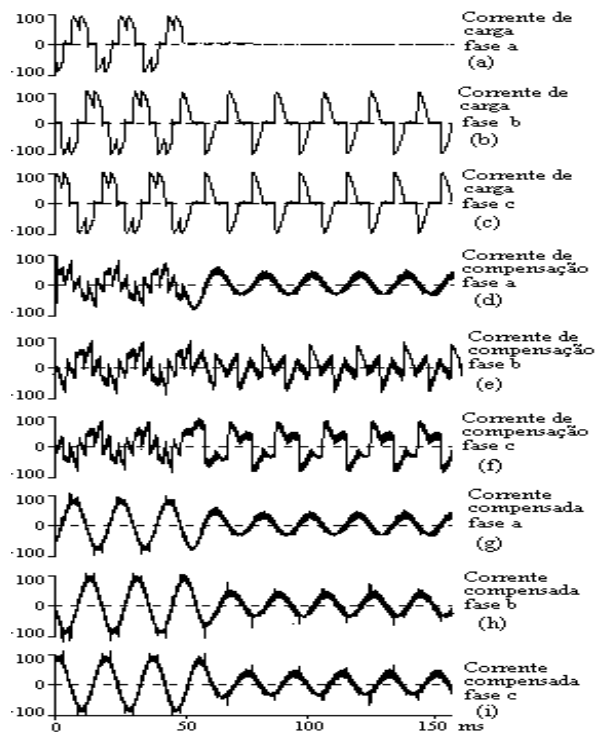


Figura 5: Formas de onda das correntes
Abertura de uma fase

Como a carga é aterrada e desequilibrada há a circulação de corrente de seqüência zero drenada pelo neutro da carga. A respectiva corrente de compensação é fornecida diretamente pelo filtro ativo através do neutro aterrado do capacitor, evitando a sua circulação pela fonte ou pela rede, provocando desequilíbrios, conforme é constatado na figura 7d.

CONCLUSÃO

Este trabalho mostra a adequação do programa ATP na modelagem do filtro ativo para a correção do fator de potência e eliminação das principais harmônicas para estudos de sistema de potência. Esta adequação possibilita a análise de desempenho do filtro em todas as ocorrências que podem ser reproduzidas no ATP. Ainda, mostra a possibilidade de analisar o desempenho de outros tipos de equipamentos de eliminação de harmônicas, tais como os filtro mistos, compostos por filtros passivo e ativos.

Os resultados das simulações são coerentes com os obtidos em ensaios experimentais apresentados em referências mencionadas neste trabalho.

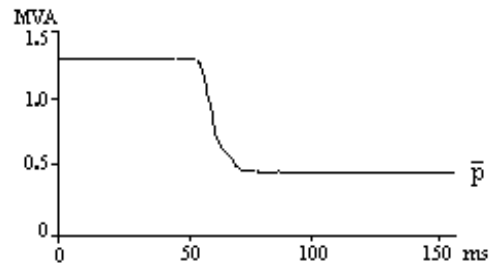


Figura 6: Potência real instantânea constante
Abertura de uma fase

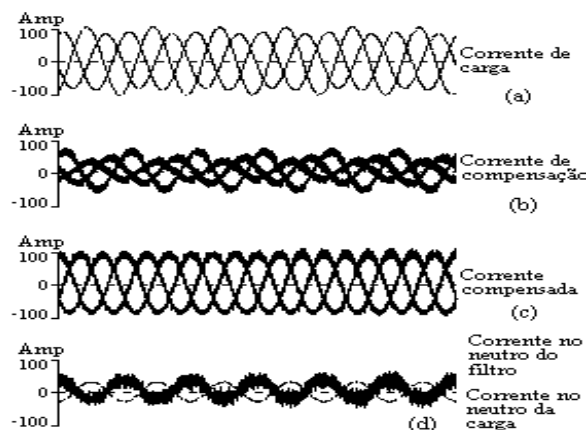


Figura 7: Formas de ondas das corrente
Carga linear

REFERÊNCIAS

- Akagi, H.; Kanazawa, Y.; Nabae, A. "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components". IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-20, n.3, p.625-30, May/June 1984.
- Penello, L.F.; Watanabae, E.H. "Filtro Ativo de Potência Tipo "Shunt" com Seleção da Potência a ser Compensada". SBA Controle & Automação, vol. 4, n.1, p.31-7, Ago./Set. 1993.
- Watanabe, E.E.; Stephan, R.M. "Potência Ativa e Reativa Instantânea em Sistemas Elétricos com Fontes e Cargas Genéricas". SBA: Controle e Automação, vol. 3, n.1, p.253-63, Mar/Abr, 1991.
- Peng, F.Z.; Akagi, H.; Nabae, A. "A Study of Active Power Filters using Quad-series - Voltage Source PWM Converter for Harmonic Compensation". IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 5, n.1, p.9-15, Jan. 1990.