

Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações

— Filtros Ativos e FACTS —

Edson H. Watanabe
COPPE/UFRJ

Maurício Aredes
COPPE/EE/UFRJ

Laboratório de Eletrônica de Potência
Caixa Postal 68504, 21.945-970 Rio de Janeiro RJ, Brazil
E-mails: watanabe@coe.ufrj.br, aredes@coe.ufrj.br

Resumo: Este trabalho apresenta um tutorial sobre a teoria de potência ativa e reativa instantânea válida para sistemas trifásicos equilibrados e desequilibrados com e sem harmônicos. Com base nesta teoria são apresentados os conceitos básicos que envolvem a operação e o projeto de filtros ativos de potência tipo paralelo e série. Mostra-se em seguida as vantagens que podem ser obtidas com a associação de filtros ativos e passivos. Apresenta-se também a associação de filtros ativos paralelos e séries que compõem o UPQC (Universal Power Quality Conditioner) que garante a compensação plena de harmônicos de tensão e corrente. Como resultado da generalização dos conceitos do equipamento UPFC (Unified Power Flow Controller) associado com o UPQC, propõe-se o conceito do UPLC (Universal Active Power Line Conditioner), que além de compensar os harmônicos de tensão e corrente controlam também o fluxo de potência em uma linha de transmissão e regula a tensão ca de uma barra.

Abstract: This paper presents a tutorial about the instantaneous active and reactive power theory, which is valid for balanced and unbalanced three-phase systems, with and without harmonics. Based on this theory the basic concepts involving the operation and design of shunt and series active power filters is presented. The advantages of the association of active and passive filters are also discussed. The association of shunt and series active filters to form the UPQC (Universal Power Quality Conditioner), which guarantees the total compensation of voltage and current harmonics is also presented. As a result of the generalization of the UPFC (Unified Power Flow Controller) associated with the UPQC, the UPLC (Universal Active Power Line Conditioner) is proposed to compensate voltage and current harmonics as well as to control the power flow in a transmission line and regulate the ac bus voltage.

Keyword: Active filters, FACTS, Reactive Power Compensation, p - q Theory, Harmonics.

1. Introdução

A teoria de potência ativa e reativa convencional tem sido aplicada na análise, estudos e projetos em sistemas de potência há praticamente um século e é válida na grande maioria dos casos. Desta forma, existe um consenso entre a maioria dos Engenheiros Eletricistas de que esta é realmente uma teoria correta e válida em todos os casos. Porém, uma análise mais detalhada mostra que esta teoria tem a sua validade fisicamente confirmada apenas para sistemas operando em regime permanente e sem distorção, no caso monofásico. No caso trifásico o sistema deve ainda ser balanceado. É verdade que na maioria dos casos a rede elétrica apresenta aproximadamente estas características. No entanto, em sistemas especiais, como por exemplo em alimentação de ferrovias é comum esta ser feita apenas com uma ou duas fases, caracterizando um sistema desbalanceado. Também, o uso generalizado de retificadores e conversores baseados em chaves semicondutoras tem aumentado muito o número de cargas que além de gerarem correntes com alto conteúdo de harmônicos geram também desequilíbrios entre as fases e corrente de neutro.

O problema fundamental da teoria de potência ativa e reativa convencional vem do fato de que esta foi desenvolvida inicialmente para circuitos monofásicos e foi expandida para uso em circuitos trifásicos como se

estes fossem compostos por três sistemas monofásicos independentes. O acoplamento entre as fases foi ignorado. Esta teoria seria válida se os sistemas trifásicos fossem realmente compostos por três fases e três neutros não interligados.

Um outro problema nesta teoria convencional é que o conceito de potência reativa nasceu em conexão direta com os elementos indutivos e capacitivos, inclusive o nome “reativo” está relacionado com o termo “reatância”. Para as cargas da época em que esta teoria foi desenvolvida a idéia de que potência reativa estava relacionada com a energia armazenada nos elementos reativos era perfeitamente correta. Mas, se tomarmos um exemplo de um circuito muito simples e comum como um controlador de lâmpada incandescente (“dimmer”) como o mostrado na Fig. 1(a), e sua respectiva forma de onda de tensão e corrente, mostrada na Fig. 1(b) vemos que existe uma defasagem entre a componente fundamental da corrente e a tensão apenas por causa da operação dos tiristores, sem que existam elementos reativos (armazenadores de energia).

Além disto, a teoria convencional foi toda derivada com base em fasores e valores eficazes o que caracteriza ser uma técnica desenvolvida para uma frequência apenas. Assim, ela não é adequada quando mais de uma frequência estão presentes no sistema.

Não cabe aqui, a partir da análise acima concluir que

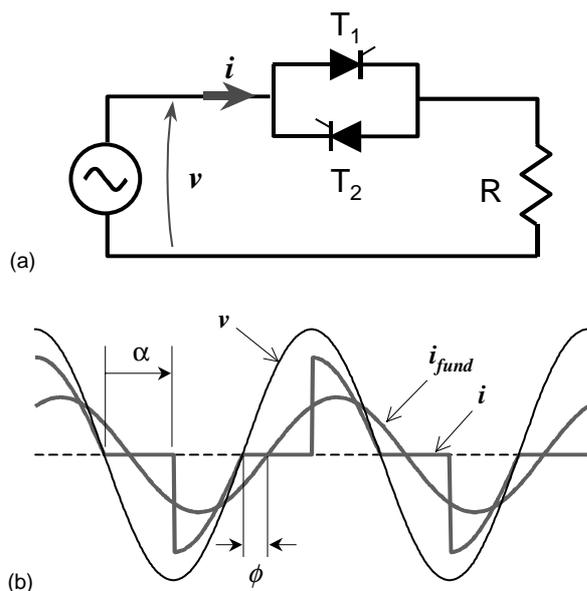


Fig. 1: (a) Fonte monofásica alimentando uma lâmpada através de um "dimmer"; (b) formas de ondas de tensão e corrente.

a teoria convencional não tem o seu valor. Ela tem, e resolve a maioria dos casos e apenas perde coerência nos casos em que existem distorções ou desbalanços.

Com o objetivo de se desenvolver uma teoria básica para o controle de filtros ativos de potência Akagi et al. (1983) propuseram a teoria da Potência Ativa e Reativa Instantânea. Foi mostrado posteriormente que esta teoria é mais geral que a teoria convencional e não só permite o controle correto de filtros mas também permite o correto entendimento físico dos problemas encontrados em sistemas desbalanceados ou não, com ou sem distorção.

O presente trabalho tem o objetivo de apresentar esta teoria na sua forma mais genérica envolvendo sistemas balanceados ou não, com ou sem distorção. Além disso, serão apresentados os conceitos básicos gerais para a filtragem ou compensação ativa. Aqui o conceito de filtragem ou compensação ativa está sendo aplicado de forma abrangente e portanto inclui-se a eliminação de harmônicos, a compensação de reativos ou mesmo a eliminação de desbalanços. Os casos específicos em que apenas a compensação de reativos está em jogo correspondem aos casos relativos aos equipamentos baseados em conceitos FACTS. Com isto espera-se apresentar, de uma forma global e coerente, a conceituação básica envolvida com os novos equipamentos de filtragem, compensação de reativos ou desbalanços. Este tutorial tem o seu núcleo baseado no trabalho de doutoramento de Aredes (1996a) e nos trabalhos realizados na COPPE/UFRJ.

2. Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea

2.1. Sistema trifásico genérico

Antes de entrar na teoria de potência ativa e reativa instantânea propriamente dita é importante caracterizar precisamente um sistema trifásico genérico. A Fig. 2 mostra a forma de onda de tensão de três sistemas trifásicos. No caso geral, as correntes podem estar também como qualquer uma das opções mostradas nesta figura. No caso mais geral de um sistema trifásico desbalanceado e com harmônicos as tensões e correntes são dadas por:

$$v_k(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{kn} \sin(\omega_n t + \phi_{kn}) ; k = (a, b, c) ; \quad (1)$$

$$i_k(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{kn} \sin(\omega_n t + \delta_{kn}) ; k = (a, b, c) . \quad (2)$$

A transformação em componentes simétricas (Fortescue, 1918) pode ser aplicada a cada fasor de cada

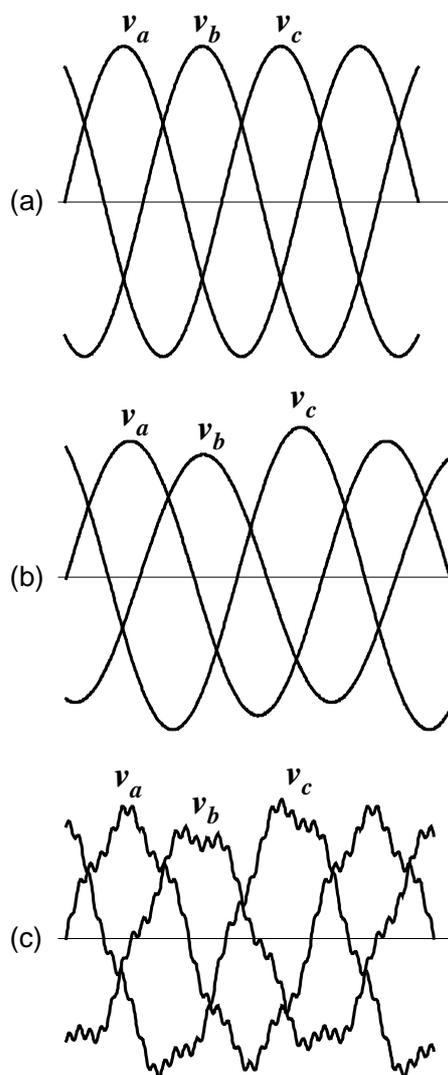


Fig. 2: Formas de onda de tensão de um sistema trifásico: (a) balanceado; (b) desbalanceado; e (c) desbalanceado e distorcido.

harmônico de tensão ou corrente das fases a - b - c para determinar as suas componentes de seqüência positiva, negativa e zero. No caso da tensão tem-se:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{0n} \\ \dot{V}_{+n} \\ \dot{V}_{-n} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{an} \\ \dot{V}_{bn} \\ \dot{V}_{cn} \end{bmatrix} \quad (3)$$

Os índices "0", "+" e "-" correspondem às componentes de seqüência zero, seqüência positiva e seqüência negativa, respectivamente. O "." sobre as variáveis indica fasor e α é o operador complexo dado por:

$$\alpha = 1 \angle 120^\circ = e^{j \frac{2\pi}{3}} \quad (4)$$

A transformada inversa é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{an} \\ \dot{V}_{bn} \\ \dot{V}_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{0n} \\ \dot{V}_{+n} \\ \dot{V}_{-n} \end{bmatrix} \quad (5)$$

A partir das transformações acima é possível se escrever as expressões destas tensões no domínio do tempo. Re-escrevendo as tensões harmônicas em termos das componentes simétricas no tempo, as seguintes expressões podem ser obtidas para o grupo do n -ésimo harmônico de tensão nas fases a - b - c :

$$\left\{ \begin{array}{l} v_{an}(t) = \sqrt{2}V_{0n} \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) + \\ \quad + \sqrt{2}V_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n}) + \\ \quad + \sqrt{2}V_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n}) \\ v_{bn}(t) = \sqrt{2}V_{0n} \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) + \\ \quad + \sqrt{2}V_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n} - \frac{2\pi}{3}) + \\ \quad + \sqrt{2}V_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n} + \frac{2\pi}{3}) \\ v_{cn}(t) = \sqrt{2}V_{0n} \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) + \\ \quad + \sqrt{2}V_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n} + \frac{2\pi}{3}) + \\ \quad + \sqrt{2}V_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n} - \frac{2\pi}{3}) \end{array} \right. \quad (6)$$

Expressões similares podem ser derivadas para as correntes.

2.2. Potência Ativa e Reativa Instantânea nas Coordenadas α - β -0

Akagi et al. (1983) e (1984) propuseram os novos conceitos de potência ativa e reativa instantânea, válido para regimes permanente e transitório, assim como para formas de ondas genéricas de tensão e corrente. Esta teoria foi desenvolvida originalmente para sistemas trifásicos a 3 fios com uma pequena menção a sistema com neutro. Posteriormente, ela foi estendida em detalhes para sistemas trifásicos a 4 fios (Watanabe et al., 1993). Esta teoria apresenta alguns aspectos que devem

ser esclarecidos. Alguns trabalhos tentando esclarecer os pontos básicos desta teoria já foram publicados por Watanabe et al. (1993), Willems (1994) e Aredes e Watanabe (1995a). A seguir esta teoria será apresentada de forma resumida.

A transformação de coordenadas de a - b - c para α - β -0 é na realidade uma transformação algébrica de um sistema de tensões e correntes trifásicas em um sistema de referência estacionário, como o sistema a - b - c , porém com as coordenadas ortogonais entre si (e não a 120° como no caso do sistema a - b - c). Esta transformação é também conhecida como Transformação de Clarke, em homenagem à sua propositora, Engenheira Edith Clarke, (1943). A transformação direta e inversa das tensões v_a , v_b , v_c para v_0 , v_α , v_β são dadas por:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (8)$$

Expressões similares podem ser escritas para as correntes i_a , i_b , i_c . Uma das vantagens desta transformação é a separação de sua componente de seqüência zero (v_0 e i_0).

A potência **real** p , **imaginária** q e de **seqüência zero** p_0 são dadas por:

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

A definição da potência imaginária q acima tem sinal contrário ao que foi originalmente proposto por Akagi (1983) e que foi utilizado até recentemente nos trabalhos da COPPE/UFRJ. Resolveu-se, porém, realizar esta troca de sinal para que haja uma perfeita compatibilização entre a teoria de potência instantânea e a teoria convencional. Com isso, a nova potência imaginária dada por (9) fornece valores médios positivos para correntes atrasadas (corrente indutiva) com relação a uma tensão de seqüência positiva.

A potência ativa trifásica instantânea em termos das variáveis nas coordenadas a - b - c e α - β -0 é dada por:

$$p_{3\phi} = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 = p + p_0 \quad (10)$$

Esta equação mostra que a potência ativa trifásica instantânea $p_{3\phi}$ é dada pela soma da potência real p e da potência de seqüência zero p_0 . Vale notar que esta potência de seqüência zero é normalmente uma potência não desejada no sistema elétrico convencional.

Por outro lado, se as variáveis α - β da potência imaginária q , definida em (9), forem substituídas pelas suas correspondentes nas coordenadas a - b - c a seguinte equação pode ser escrita:

$$q = -v_\alpha i_\beta + v_\beta i_\alpha = \frac{1}{\sqrt{3}}[(v_a - v_b)i_c + (v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b] \quad (11)$$

Esta é uma expressão similar àquela utilizada em sistemas de medidas de potência reativa trifásica ($Q = 3VI\sin\phi$). A diferença básica é que naquele caso, em lugar de valores instantâneos utilizam-se valores eficazes. Na teoria convencional a potência reativa corresponde àquela parte da potência cujo valor médio é nulo. Aqui, o significado físico da potência imaginária trifásica q instantânea é um tanto quanto diferente: esta potência corresponde a uma potência que existe nas fases individualmente, mas no conjunto trifásico não contribuem para a potência ativa instantânea trifásica.

Devido a este significado físico diferente, Akagi et al (1983) sugeriram uma nova unidade para q : o Volt-Ampere Imaginário ou "Imaginary Volt-Ampere", IVA. Neste trabalho sugerimos o símbolo "vai", fazendo analogia com o Volt-Ampere reativo "var", internacionalmente aceito pelas normas.

As correntes instantâneas que produzem a potência q nas coordenadas α - β podem ser obtida a partir da submatriz de (9) que depende de p e q , fazendo-se $p = 0$:

$$\begin{bmatrix} i_{q\alpha} \\ i_{q\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix} \quad (12)$$

A transformação destas correntes para as coordenadas a - b - c resultam em:

$$\begin{bmatrix} i_{qa} \\ i_{qb} \\ i_{qc} \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{q\alpha} \\ i_{q\beta} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Estas correntes são as correntes instantâneas imaginárias nas fases a - b - c , mas é possível demonstrar que elas também são iguais às correntes reativas instantâneas da teoria convencional. Apesar de ser óbvio de (9) que a potência imaginária q independe das correntes ou tensões de seqüência zero, vale deixar registrado explicitamente este fato uma vez que não é incomum ouvir que a potência reativa se altera em função das componentes de seqüência zero.

As correntes e tensões em (9) são instantâneas e genéricas podendo conter desequilíbrios e harmônicos.

Assim, no caso mais geral em que estas imperfeições estão presentes pode-se dizer que as potências instantâneas real, imaginária e de seqüência zero terão componentes de valores médios e oscilantes. Isto é:

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad ; \quad (14)$$

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad ; \quad (15)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad ; \quad (16)$$

onde, a "barra" indica valor médio e o "til" indica parte oscilante.

Na seção seguinte serão deduzidas as expressões correspondentes às potências de seqüência zero, real e imaginária de valor médio e oscilante para o caso de tensões e correntes desbalanceadas e distorcidas.

2.3. Potências instantâneas em função das componentes simétricas

A expressão da tensão dada em (6) e a correspondente expressão da corrente podem ser transformadas para as coordenadas α - β -0 e resultam em:

$$\begin{cases} v_\alpha = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{+n} \sin(\omega_n t + \phi_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{-n} \sin(\omega_n t + \phi_{-n}) \\ v_\beta = \sum_{n=1}^{\infty} -\sqrt{3}V_{+n} \cos(\omega_n t + \phi_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}V_{-n} \cos(\omega_n t + \phi_{-n}) \\ v_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{6}V_{0n} \sin(\omega_n t + \phi_{0n}) \end{cases} \quad (17)$$

$$\begin{cases} i_\alpha = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}I_{+n} \sin(\omega_n t + \delta_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}I_{-n} \sin(\omega_n t + \delta_{-n}) \\ i_\beta = \sum_{n=1}^{\infty} -\sqrt{3}I_{+n} \cos(\omega_n t + \delta_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{3}I_{-n} \cos(\omega_n t + \delta_{-n}) \\ i_0 = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{6}I_{0n} \sin(\omega_n t + \delta_{0n}) \end{cases} \quad (18)$$

Da expressão acima pode-se verificar que as componentes de seqüência positiva e negativa contribuem para as tensões e correntes nas coordenadas α e β . Por outro lado, a componente instantânea de seqüência zero só depende da componente simétrica de seqüência zero.

A potência real p , a potência imaginária q e a potência de seqüência zero p_0 , conforme definido em (9) podem ser calculadas com base nas tensões e correntes genéricas dadas em (17) e (18). Com o objetivo de melhor apresentar a relação entre os conceitos convencionais e os novos, a seguir estas potências serão apresentadas subdivididas em suas componentes médias (\bar{p} , \bar{q} , \bar{p}_0) e suas partes oscilantes (\tilde{p} , \tilde{q} , \tilde{p}_0).

$$\bar{p} = \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+n} I_{+n} \cos(\phi_{+n} - \delta_{+n}) + \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-n} I_{-n} \cos(\phi_{-n} - \delta_{-n}) \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \tilde{p} = & \left\{ \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left[\sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+m} I_{+n} \cos((\omega_m - \omega_n)t + \phi_{+m} - \delta_{+n}) \right] + \right. \\ & + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left[\sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-m} I_{-n} \cos((\omega_m - \omega_n)t + \phi_{-m} - \delta_{-n}) \right] + \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\sum_{n=1}^{\infty} -3V_{+m} I_{-n} \cos((\omega_m + \omega_n)t + \phi_{+m} + \delta_{-n}) \right] + \\ & \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\sum_{n=1}^{\infty} -3V_{-m} I_{+n} \cos((\omega_m + \omega_n)t + \phi_{-m} + \delta_{+n}) \right] \right\} \quad (20) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \bar{q} = & \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+n} I_{+n} \sin(\phi_{+n} - \delta_{+n}) + \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} -3V_{-n} I_{-n} \sin(\phi_{-n} - \delta_{-n}) \quad ; \quad (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tilde{q} = & \left\{ \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left[\sum_{n=1}^{\infty} 3V_{+m} I_{+n} \sin((\omega_m - \omega_n)t + \phi_{+m} - \delta_{+n}) \right] + \right. \\ & + \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left[\sum_{n=1}^{\infty} -3V_{-m} I_{-n} \sin((\omega_m - \omega_n)t + \phi_{-m} - \delta_{-n}) \right] \cdot \\ & + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\sum_{n=1}^{\infty} -3V_{+m} I_{-n} \sin((\omega_m + \omega_n)t + \phi_{+m} + \delta_{-n}) \right] \cdot \\ & \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\sum_{n=1}^{\infty} 3V_{-m} I_{+n} \sin((\omega_m + \omega_n)t + \phi_{-m} + \delta_{+n}) \right] \right\} \quad (22) \end{aligned}$$

$$\bar{p}_0 = \sum_{n=1}^{\infty} 3V_{0n} I_{0n} \cos(\phi_{0n} - \delta_{0n}) \quad ; \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \tilde{p}_0 = & \left\{ \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \left[\sum_{n=1}^{\infty} 3V_{0m} I_{0n} \cos((\omega_m - \omega_n)t + \phi_{0m} - \delta_{0n}) \right] + \right. \\ & \left. + \sum_{m=1}^{\infty} \left[\sum_{n=1}^{\infty} -3V_{0m} I_{0n} \cos((\omega_m + \omega_n)t + \phi_{0m} + \delta_{0n}) \right] \right\} \quad (24) \end{aligned}$$

Das expressões acima pode-se fazer uma comparação com as potências ativa e reativa convencional. A potência ativa convencional em circuitos trifásicos é dada por: $P_{3\phi} = 3VI\cos\phi$, quando se considera apenas a componente fundamental de seqüência positiva. Vê-se que este termo está contido na expressão de \bar{p} . Ou seja, a expressão de \bar{p} é muito mais genérica e é composta pelo produto de tensões e correntes de mesma frequência e mesma seqüência. Por outro lado, a potência reativa ($Q_{3\phi} = 3VI\sin\phi$) está incluída na expressão de \bar{q} . Neste caso, como no caso de \bar{p} , a potência imaginária média só depende do produto de tensões e correntes na

mesma frequência e na mesma seqüência. Enfim, todos os harmônicos na tensão ou na corrente podem contribuir para as potências médias \bar{p} e \bar{q} .

A presença de mais de uma frequência harmônica e/ou componentes de seqüência fazem aparecer \tilde{p} e \tilde{q} , conforme mostrado em (20) e (22). A potência de seqüência zero $p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0$ (dado pela soma de (23) e (24)) é tal que sempre que existe a parte média, que é boa do ponto de vista de transferência de energia, existe também a parte oscilante. Isto é, não há como ter a parte média desacoplada da parte oscilante, mesmo quando só existe a componente fundamental. Este acoplamento entre a parte média e parte oscilante de p_0 faz com que esta potência seja indesejável nos sistemas elétricos. Vale lembrar que a parte oscilante da potência de seqüência zero ou mesmo da potência real está diretamente ligada às oscilações eletromecânicas, sendo portanto prejudiciais aos sistemas de geração.

2.4. Significado físico das potências real, imaginária e de seqüência zero

Para o uso correto e eficiente da teoria de potência ativa e reativa instantâneas é importante entender o significado físico de cada uma das potências e seus termos. A Fig. 3 será utilizada para resumir os principais pontos dos novos conceitos. Nesta figura, $p + p_0$ representa a energia total por unidade de tempo fluindo pelo circuito e q representa a energia trocada entre as fases sem que haja transporte de energia. Os seguintes pontos devem ser enfatizados:

- \Rightarrow **As componentes de seqüência zero de tensão ou corrente não contribuem para as potências instantâneas p e q .**
- \Rightarrow **A potência ativa instantânea, que corresponde ao fluxo instantâneo de energia por unidade de tempo é sempre igual à soma da potência real p e a potência de seqüência zero ($p_{3\phi} = p + p_0$).**
- \Rightarrow **A potência imaginária q representa a energia que pode ser constante ou não e é trocada entre as fases do sistema. Isto significa que q não contribui para a transferência de energia entre a fonte e a carga em nenhum instante. Além disto, esta potência só existe em sistemas com mais de uma fase.**

Apesar desta teoria de potência instantânea ser um tanto quanto mais complicada, ela não é contraditória com a teoria convencional. Na realidade, a teoria convencional é um caso particular da teoria aqui apresentada.

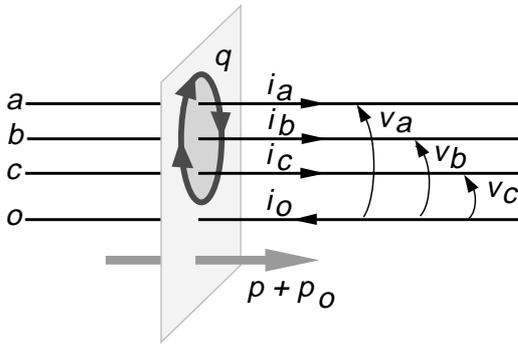


Fig. 3: Fluxo das potências instantâneas definidas nas coordenadas α - β -0.

3. Filtros Ativos

Akagi et al. (1983), quando propuseram a teoria de potência instantânea, tinham como objetivo o controle de filtros ativos de potência. Primeiro eles propuseram o filtro ativo paralelo (Akagi et al., 1984 e 1986) e em seguida o filtro série em conjunto com um filtro passivo (Peng et al., 1988). Depois disto vários trabalhos foram publicados nestes assuntos. No presente trabalho, não se pretende propor nada inovador em termos de filtros ativos paralelo ou série, mas sim apresentar os seus fundamentos de operação para casos idealizados. Acreditamos que, com o conhecimento destes fundamentos, o entendimento dos filtros reais seja não só facilitado, mas também seja decantado de forma coerente e precisa.

A seguir será apresentado o filtro ativo paralelo e em seguida o filtro ativo série.

3.1. Filtros Ativos Paralelo

A Fig. 4 apresenta o diagrama em blocos de um filtro ativo paralelo de potência. Nesta figura o sistema trifásico está representado por uma fonte de tensão. O filtro paralelo propriamente dito é representado pelo inversor fonte de tensão (VSI – Voltage Source Inverter) e seu controle. Este inversor funciona com malha de controle de corrente e tem a função básica de “curto-circuitar” as correntes indesejadas, geradas pela

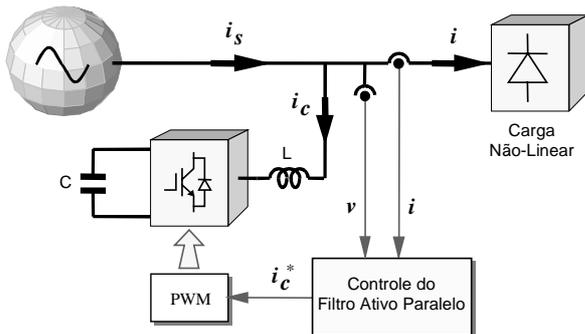


Fig. 4: Diagrama em blocos de um filtro ativo paralelo.

carga.

Aqui vale dizer que correntes não desejadas, na maioria dos casos são os harmônicos, mas podem, em alguns casos, ser correntes na frequência fundamental (e.g. corrente reativa ou de desequilíbrio). Assim, o grande desafio no projeto de um filtro ativo paralelo baseado em conversores deste tipo, está na determinação instantânea da referência de corrente a ser sintetizada. Nesta seção será mostrado como fazer este cálculo da corrente de referência.

O caso mais simples de filtro ativo é quando as tensões estão equilibradas e que será explicado a seguir.

3.1.1. Caso de Tensão Trifásica Balanceada

Subentende-se aqui que tensão trifásica balanceada é composta apenas da componente fundamental de seqüência positiva, como mostrado na Fig. 2(a). A Fig. 5 mostra o diagrama em blocos básico do sistema de geração da referência de corrente. Aqui assume-se que este cálculo instantâneo será baseado na teoria de potência ativa e reativa instantânea. Neste caso, as tensões trifásicas e as correntes de carga são medidas e transformadas para as coordenadas α - β -0. A partir destas correntes e usando (9) calcula-se as potências p_0 , p e q , sendo que p_0 é nulo porque a tensão é balanceada. Supondo que na corrente da carga existam apenas a componente fundamental de seqüência positiva e harmônicos, a potência real ($p = \bar{p} + \tilde{p}$) e imaginária ($q = \bar{q} + \tilde{q}$) terão componentes médias e oscilantes. Se pensarmos num filtro com seu significado original, este deverá curto-circuitar as correntes harmônicas da carga, que são as responsáveis pelas potências oscilantes \tilde{p} e \tilde{q} .

A separação das partes oscilantes \tilde{p} e \tilde{q} de p e q é feita através de um filtro de sinal passa alta devidamente

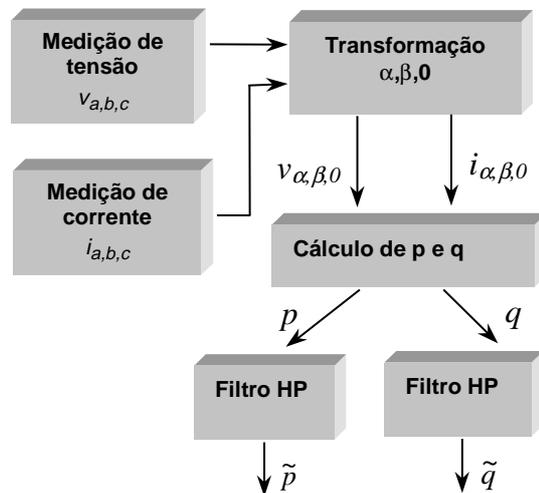


Fig. 5: Diagrama do algoritmo de cálculo de \tilde{p} e \tilde{q} .

calculado para este fim. É importante notar que a resposta deste filtro altera a dinâmica do filtro ativo como um todo (Monteiro, 1997). Este aspecto não será discutido neste trabalho, mas deve ser lembrado como um ponto importante para aplicações reais.

Assim, conhecendo-se estas duas potências oscilantes é possível determinar instantaneamente as parcelas de correntes indesejáveis através de:

$$\begin{bmatrix} i_{h\alpha} \\ i_{h\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (25)$$

Conhecendo-se as correntes de compensação nas coordenadas α e β , basta utilizar a transformada inversa, de forma análoga ao feito em (13), para se obter as correntes de referência de compensação nas coordenadas a-b-c: i_{ca}^* , i_{cb}^* e i_{cc}^* . Estas correntes devem servir de referência para o controle PWM de corrente do inversor e assim compensar as correntes harmônicas da carga.

Em sistemas trifásicos onde não existam harmônicos e o objetivo maior é a compensação de reativos, basta utilizar, em (28), \tilde{p} igual a zero e \tilde{q} em lugar de \tilde{q} . Com isto o “filtro” se transforma em um compensador de reativos que pode ser utilizado dentro dos conceitos FACTS (Barbosa et al., 1993 e 1995).

Em casos onde o interesse é a compensação de desequilíbrios na carga, a compensação pode ser de \tilde{p} apenas. Exemplo deste tipo de aplicação pode ser visto em (Ichikawa et al., 1995) para compensação de desequilíbrio devido à alimentação do trem bala japonês que é feito com apenas duas fases. Neste caso, a potência do “filtro” é da ordem de 50 MVA e apesar de estar eliminando uma parte oscilante da potência real esta não é devida aos harmônicos e portanto fica estranho, para alguns, o uso do nome “filtro”. Mas, isto é um exemplo da flexibilidade e generalidade dos conceitos da teoria geral de potência ativa e reativa instantânea.

É óbvio que apesar de toda a teoria ter sido desenvolvida com a idéia de se produzir um “filtro”, esta teoria é muito mais abrangente e permite o projeto de compensadores de reativos (na frequência fundamental). Também é possível se utilizar esta mesma teoria para se fazer “compensadores” de \tilde{p} . Na realidade, é muito estranho se falar em tais “compensadores”, pelo menos com este nome. O que é possível se fazer são “compensadores” com potência real positiva (potência saindo do inversor) e neste caso o que teremos é na realidade um conversor CC-CA onde a corrente gerada estará em fase com a tensão trifásica. Por outro lado, se esta potência for negativa teremos um inversor operando como retificador de fator de potência unitário e sem harmônicos na corrente. Este é o retificador tipo “boost” com controle baseado na teoria de potência ativa e reativa instantânea

e é um importante retificador quando se deseja tensão CC maior que a tensão pico-a-pico da tensão CA.

No projeto de filtros ativos paralelo ou mesmo série, é normal o uso do controle da potência \tilde{p} , não porque se deseja fazer um retificador, mas porque é necessário se controlar a tensão nos terminais do capacitor do lado CC do inversor. Neste caso, é necessário controlar a carga deste capacitor no início do processo de ativação do filtro e também durante a operação pois existem perdas e imperfeições no chaveamento e o capacitor pode se descarregar ou se carregar em demasia (Penello et al., 1992).

3.1.2. Caso de tensão trifásica desbalanceada

Um exemplo de tensão trifásica desbalanceada está mostrada na Fig. 2(b) e contém apenas componentes fundamentais de seqüência positiva, negativa e zero. O circuito equivalente, para uma fase está mostrada na Fig. 6. Desta figura é possível se compreender que uma carga conectada entre a fase e o neutro ou mesmo entre fases será alimentada pelas fontes equivalentes de seqüência positiva v_+ , de seqüência negativa v_- e de seqüência zero v_0 . Um filtro ativo paralelo também será conectado, obviamente, em paralelo e portanto não tem condições de eliminar a influência de v_- e v_0 sobre a carga. O filtro capaz de eliminar estas influências será o filtro série da próxima seção.

A Fig. 7 mostra um sistema onde a fonte de tensão contém componentes de seqüência positiva e zero. Assume-se que a carga é não-linear e a corrente desta contém componentes de seqüência positiva e também de seqüência zero. Portanto, existe potência de seqüência zero. Nesta figura também está representado um filtro ativo paralelo cuja função é o de não permitir que os harmônicos e a corrente de seqüência zero da carga fluam pela fonte. O controle deste filtro para eliminar os harmônicos de corrente é igual ao apresentado anteriormente. A compensação da corrente de seqüência zero é feita medindo-se esta corrente e fazendo com que o filtro injete esta corrente no neutro. Esta compensação é muito simples, no entanto, pelo fato de existir tensão de

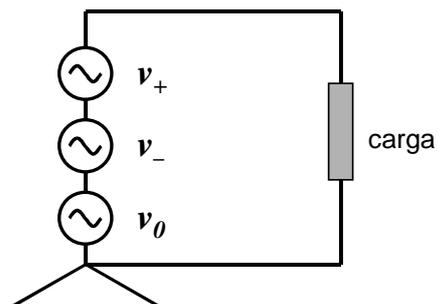


Fig. 6: Fonte de tensão trifásica desequilibrada aplicada sobre uma carga.

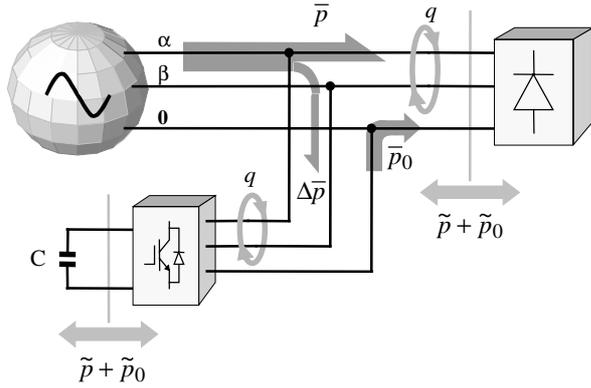


Fig. 7: Fluxo de potência relativo às coordenadas α - β -0.

seqüência zero, existirá também potência de seqüência zero (p_0) nos terminais do inversor do filtro.

Como explicado na seção anterior, sempre que existir p_0 existirá o seu valor médio \bar{p}_0 e sua parte oscilante \tilde{p}_0 . O problema da existência da parte média é que, se não houver uma fonte no lado CC do inversor, o capacitor se descarregará e o filtro não operará corretamente. Aqui um artifício interessante implementado no controlador do filtro ativo pode ser usado, que dispensa o emprego de uma fonte no lado CC do inversor. Para isso, basta que o controlador force o inversor a drenar uma potência *real* média $\Delta\bar{p}$ da rede CA. O detalhe importante aqui é que esta potência deve ser absorvida apenas da componente de seqüência positiva. Se esta potência $\Delta\bar{p}$ for igual a \bar{p}_0 , conforme mostrado na Fig. 7, o balanço de potências entrando/saindo no inversor será nulo e o capacitor não se descarregará. Com este filtro paralelo, mesmo existindo componentes de tensão de seqüência zero na fonte não haverá corrente de seqüência zero fluindo por esta.

Conforme mostrado na Fig. 7, as potências oscilantes \tilde{p} e \tilde{p}_0 entram e saem do capacitor C. Desta forma, é importante o seu correto dimensionamento, para que essas potências não provoquem oscilações de tensão que prejudiquem o funcionamento do conversor. Mais detalhes do cálculo deste capacitor podem ser vistos em Barbosa et al. (1994).

O caso de tensões desbalanceadas e contendo harmônicos (Fig. 2c) será analisado mais adiante na seção relativa ao UPQC.

3.2. Filtros Ativos Série

O filtro ativo série foi também proposto por Akagi, em 1988. Inicialmente, o filtro ativo série foi proposto em associação com um filtro paralelo *passivo* (Peng et al., 1988). Este tipo de filtro deveria ser classificado na categoria de filtros híbridos ativos/passivos, os quais serão discutidos mais adiante. Nesta seção, primeiro será discutido o princípio básico de operação de um filtro

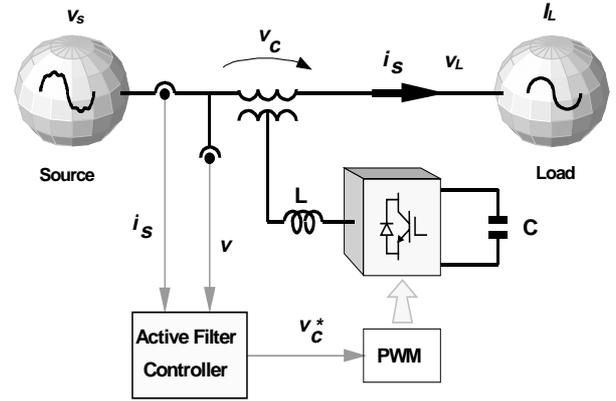


Fig. 8: Configuração básica do filtro ativo série.

ativo série puro (sem parte passiva). Este filtro é na realidade um filtro dual ao filtro paralelo.

A Fig. 8 mostra o diagrama unifilar básico de um filtro ativo série ideal. Nesta figura a fonte de alimentação está representada por uma fonte de tensão distorcida e desequilibrada. A carga está sendo representada por uma fonte de corrente ideal contendo apenas componente de seqüência positiva. Vale lembrar aqui que o filtro ativo série não é capaz de eliminar harmônicos de corrente gerados pela carga uma vez que este filtro está inserido em série com esta carga. Isto é exatamente o conceito dual do que ocorre com o filtro paralelo. O filtro ativo série é, da mesma forma que o filtro paralelo, composto por um inversor com um capacitor no seu lado CC e conectado à rede através de um transformador.

A função deste filtro é o de não permitir que as parcelas não desejáveis da tensão sejam aplicadas sobre a carga. Sendo a tensão na fonte distorcida e desequilibrada dada por v_{sa} , v_{sb} , e v_{sc} , a tensão de compensação dada por v_{ca} , v_{cb} , e v_{cc} a tensão na carga v_{La} , v_{Lb} , e v_{Lc} é dada por:

$$\begin{bmatrix} v_{La} \\ v_{Lb} \\ v_{Lc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{ca} \\ v_{cb} \\ v_{cc} \end{bmatrix} \quad (26)$$

A tensão de compensação deve ser tal que toda as parcelas de tensão de seqüência negativa e zero, assim como as parcelas de harmônicos na fonte não sejam aplicadas sobre a carga. Este seria o caso de compensação total de todas as parcelas de tensão não desejadas sobre a carga de componente positiva apenas.

No caso específico da fonte conter apenas tensão de seqüência positiva e harmônicos o compensador poderá operar eliminando estes harmônicos. Neste caso, usando-se um algoritmo dual ao caso do filtro paralelo pode-se medir a tensão na fonte e a corrente na carga e a partir deles calcular as potências instantâneas p e q . Passando-se estas potências por um filtro passa alta é possível se obter as componentes oscilantes \tilde{p} e \tilde{q} . A partir

destas parcelas oscilantes pode-se calcular a tensão de compensação através de:

$$\begin{bmatrix} v_{c\alpha} \\ v_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{i_\alpha^2 + i_\beta^2} \begin{bmatrix} i_\alpha & -i_\beta \\ i_\beta & i_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (27)$$

Como em geral não existe uma carga que gere corrente de seqüência positiva apenas este filtro por si só não encontra muitas aplicações. No entanto, ele pode ser utilizado em conjunto com filtros passivos ou filtros ativos, como será mostrado nas sessões seguintes.

3.3. Filtros Híbridos Ativos/Passivos

Existem vários casos de ocorrência de problemas com harmônicos que são resolvidos com o uso de filtros passivos. No entanto, estes filtros apresentam alguns inconvenientes que podem ser resolvidos com a sua associação com filtros ativos. Dentre os problemas pode-se citar: (i) os filtros passivos perdem a sua sintonia quando a frequência da rede varia; (ii) mesmo nos casos em que a frequência não varia podem ocorrer fenômenos de ressonância ou anti-ressonância. A Fig. 9(a) mostra um circuito unifilar de uma fonte de tensão, supostamente poluída com harmônicos, alimentando uma carga não-linear representada por uma fonte de corrente I_L , também contendo harmônicos. Assume-se que um filtro passivo, representado de forma simplificada pelo circuito paralelo L-C foi conectado com a função de eliminar os harmônicos da carga (em geral os harmônicos da fonte não são considerados no projeto de filtros passivos). A Fig. 9(b) mostra o circuito equivalente apenas para as componentes harmônicas V_{sh} da fonte (neste caso a carga foi considerada como um circuito aberto). O filtro passivo, em geral, é projetado para funcionar idealmente como um curto-circuito nas frequências dos harmônicos da carga. No entanto, é possível que dependendo dos valores de X_s (que pode variar

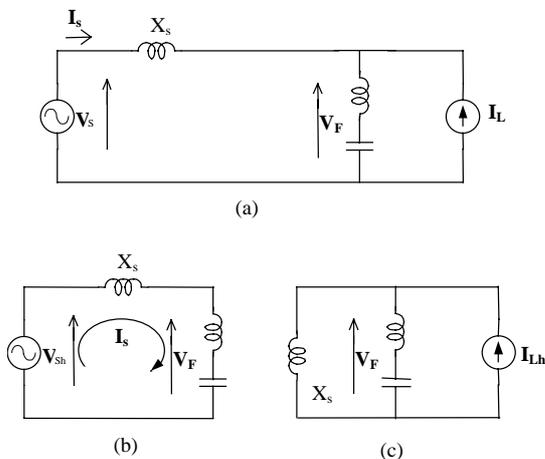


Fig. 9: (a) Carga não-linear com filtro passivo alimentada por fonte contendo harmônicos de tensão; (b) circuito equivalente para os harmônicos da fonte; (c) circuito equivalente para os harmônicos da carga.

de acordo com a configuração do circuito elétrico) pode ocorrer uma situação tal que a combinação série de X_s com o filtro passivo produza uma ressonância para uma dada frequência de V_s , acarretando no aparecimento de um “curto-circuito” na fonte e conseqüentemente uma sobre-corrente. Este é o fenômeno da ressonância que pode danificar o filtro ou impedi-lo de operar corretamente.

O problema da anti-ressonância ocorre quando, para um dado harmônico gerado pela carga não-linear, a combinação de X_s em paralelo com o filtro (Fig. 9c) produz uma alta impedância para um dado harmônico da carga. Em geral, isto ocorre para um harmônico não característico da carga, ou seja um harmônico que não deveria existir ou era muito pequeno para ser considerado no projeto do filtro. É muito comum este problema ocorrer com o harmônico de quarta ordem em retificadores, o qual só aparece por desbalanços no circuito ou nos ângulos de disparo. No entanto, apesar deste harmônico ser pequeno ele produz uma sobre-tensão quando tenta circular pela combinação X_s – filtro passivo. Nos casos reais, esta “sobre-tensão” de quarto harmônico sobre o filtro, em geral causa mais desequilíbrios no circuito de disparo do retificador que por sua vez produz mais componentes de quarto harmônico.

A solução dos problemas acima pode ser conseguido pela associação de filtros ativos com os filtros passivos.

3.3.1. Filtro Ativo Série / Filtro Passivo Paralelo

A Fig. 10 mostra o diagrama básico de um filtro ativo série combinado com um filtro passivo paralelo (Peng et al., 1988). Nesta figura, o filtro ativo série está representado por uma fonte controlada V_C , que pode ser sintetizada por um inversor fonte de tensão controlado em tensão. De acordo com Peng et al. (1988), o algoritmo de controle deste filtro baseia-se em: (i) medição das correntes e de p e q da carga; (ii) separação das partes oscilantes destas potências, \tilde{p} e \tilde{q} ; (iii) cálculo das correntes harmônicas da carga i_h ; (iv) sintetizar uma tensão $V_C = k \cdot i_h$. Este parâmetro k deve ser nulo para a frequência fundamental da rede e um valor diferente de zero para os harmônicos. Além disto, k deve ser tal que a relação entre a tensão e a corrente nos terminais do filtro seja como em uma resistência. Isto é, k funciona

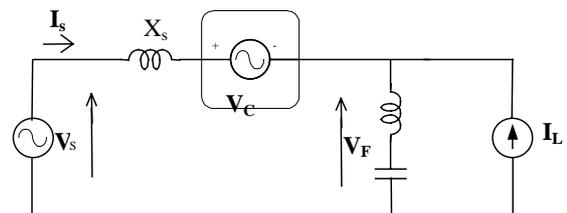


Fig. 10: Diagrama esquemático básico de um filtro ativo série associado a um filtro passivo paralelo.

como uma resistência de valor relativamente alto para os harmônicos e um curto-circuito para a frequência fundamental. Esta “resistência” válida somente para os harmônicos tem a função de garantir uma “isolação” entre a fonte e o conjunto filtro passivo/carga, em termos de harmônicos. Com isto, harmônicos da fonte têm dificuldade de fluir pelo filtro e harmônicos gerados pela carga têm dificuldade de fluir para a fonte. Enfim, pode-se conseguir um melhor desempenho do filtro passivo sem sobrecarregá-lo com os harmônicos vindo da fonte.

Peng et al. (1988) mostram em seu trabalho que este filtro pode ter uma potência da ordem de 1 a 2% da potência do filtro passivo, sendo portanto, muito pequeno e de baixo custo. As dificuldades na implementação deste filtro encontram-se na conexão série do conjunto inversores/transformador com o sistema elétrico. Além disto, pela sua própria concepção a fonte V_C quando sintetizado por inversores necessita de uma fonte no seu lado CC. Esta fonte é de pequena potência, no entanto a sua existência pode ser considerada como uma dificuldade a mais.

3.3.2. Filtro Ativo Paralelo / Filtro Passivo Paralelo

Um forma de evitar as dificuldades de um transformador em série com a linha de transmissão está no uso de filtro(s) ativo(s) paralelo(s), conectado(s) em série com filtros passivos [Fujita e Akagi (1991), Häfner, et al. (1997) e Monteiro (1997)]. Estes filtros híbridos podem vir a ser interessantes em casos de aplicações em altíssima potência, como é o caso, por exemplo, de sistemas de transmissão em corrente contínua. No Brasil o sistema de transmissão em corrente contínua de Furnas tem uma potência de 6,3 GW, sendo portanto uma faixa de potência em que filtros ativos paralelos ainda não conseguem atingir. Por outro lado, o uso (atual) de filtros passivos tem permitido o fluxo de correntes harmônicas gerados em outras fontes em níveis muito altos. Este é na realidade mais um “defeito” do filtro passivo: sua capacidade intrínseca de “filtrar” correntes harmônicas gerados “pelos outros”. Neste sentido, o filtro ativo permite a aplicação do conceito de que “quem poluiu é o responsável pela despoluição”.

A Fig. 11 apresenta o esquema básico de um filtro ativo paralelo, representado pela fonte V_C , em série com um filtro passivo representado por um circuito LC. É possível se mostrar que este filtro pode ter uma função similar ao filtro ativo série/passivo paralelo da Fig. 10 em termos de bloqueio de fluxo de harmônicos. Assim como na configuração anterior, esta combinação de filtros ativos e passivos também dificulta a saída de harmônicos gerados pela carga não-linear e atenua a circulação de correntes harmônicas provocadas pelas distor-

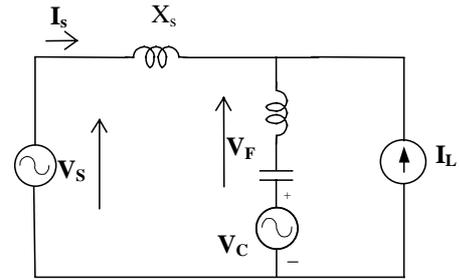


Fig. 11: Diagrama esquemático do filtro ativo paralelo em série com um filtro passivo.

ções na tensão de suprimento. Monteiro (1997) mostra que é possível sintetizar esta fonte de compensação V_C com o uso de inversores de tensão sem a necessidade de fontes no seu lado CC.

3.4. Filtro Ativo Série/Paralelo Combinados — UPQC —

Foi visto que o filtro ativo paralelo (Fig. 4) é apropriado para compensação de *correntes* e o filtro série para compensação de *tensões* (Fig. 8). Para a compensação simultânea da tensão e da corrente, Aredes (1995b) desenvolveu uma combinação de filtros ativos série/paralelo, a qual vem sendo chamada de UPQC ("Unified Power Quality Conditioner").

A Fig. 12 mostra uma situação típica para o emprego do UPQC. Este é um cenário onde se tem um grupo de cargas críticas, muito sensíveis às distorções harmônicas e requerem um suprimento de energia de boa qualidade. Porém, estas cargas estão conectadas a um barramento onde se encontram outras cargas (i_L), não lineares, geradoras de alto conteúdo de correntes harmônicas e desbalanceadas. Além disso, admite-se que a tensão de suprimento (v_S) deste barramento também seja desbalanceada e distorcida, independentemente destas cargas não lineares. O UPQC está inserido em paralelo, próximo à carga não linear e em série com a tensão de suprimento, de tal forma que a tensão do filtro série v_C compense a tensão v_S e torne a tensão v senoidal e balanceada. Por outro lado, a corrente i_C do filtro paralelo compensa os harmônicos e desbalanços da corrente i_L , impedindo que estas componentes indesejadas da corrente fluam pelo sistema, distorcendo ainda mais a tensão de suprimento.

Caso seja desejável, o filtro paralelo pode ainda compensar a potência reativa fundamental da carga, conforme mencionado anteriormente, sem a necessidade de elementos adicionais, armazenadores de energia (Akagi et al., 1994). Portanto, o UPQC compensa simultaneamente a tensão de suprimento e a corrente da carga não linear, de tal forma que a tensão compensada v e a corrente i_S drenada da fonte tornam-se senoidais, balanceadas e em fase, melhorando sensivelmente a qualidade da energia suprida ao grupo de cargas críticas.

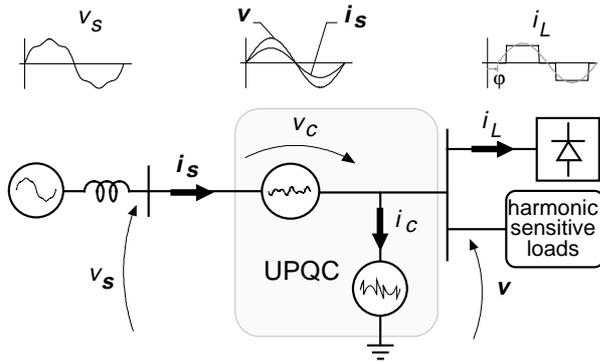


Fig. 12: Caso típico para aplicação do UPQC.

Um controlador integrado e totalmente baseado nos conceitos de potência ativa e reativa instantânea foi desenvolvido, testado e comprovado experimentalmente por Aredes et al. (1995b). Como ele é parte de um controlador ainda mais completo, capaz de realizar também o controle do fluxo de potência e regulação de tensão, maiores detalhes do circuito do controlador será mostrado mais adiante, no item relativo ao compensador universal, UPLC.

4. Equipamentos modernos para Sistemas FACTS

A concepção de sistemas FACTS envolve, de maneira geral, equipamentos de eletrônica de potência aplicado a sistemas de transmissão para controle *em tempo real* do fluxo de potência e prover suporte de tensão. De maneira geral, o problema se resume em otimizar do fluxo de potência nas linhas de transmissão, em tempo real.

Numa linha de transmissão curta, a potência ativa passante pode ser calculada por:

$$P = \frac{V_1 V_2}{X_L} \sin \delta_{12} \quad (28)$$

Onde V_1 e V_2 são os módulos das tensões terminais, X_L é a impedância série e δ_{12} é a defasagem angular das tensões terminais. Assim, um compensador pode ser classificado como dispositivo FACTS se ele for capaz de controlar, *em tempo real*, pelo menos um dos três principais parâmetros da equação (28), ou seja, (i) *tensão terminal*; (ii) *impedância da linha e/ou* (iii) *ângulo de potência*. Por exemplo, Compensadores Estáticos (SVC) [veja Gyugyi, (1979) e (1988)] controlam a tensão terminal de uma linha de transmissão através da injeção de corrente reativa variável no sistema de potência. Será visto que o UPFC ("Unified Power Flow Controller") pode não só regular a tensão da barra CA onde está conectado, como também controlar o fluxo de potência ativa e reativa de uma linha de transmissão, de forma independente.

Os conversores de comutação forçada para aplicações em sistemas CA flexíveis empregam os maiores GTOs (Gate Turn-Off Thyristor) disponíveis no mercado e são controlados de forma a atuarem como fonte controlada de tensão trifásica, síncrona e senoidal. Estes "geradores" eletrônicos operam em sincronismo com a rede e podem ser conectados em série ou em paralelo com as linhas de transmissão. Estudos e protótipos estão sendo desenvolvidos, em diversas configurações, empregando conversores de comutação forçada. Atualmente, estes compensadores avançados, quando ligados em derivação ("shunt") ao sistema de potência, são internacionalmente conhecidos como condensadores estáticos (STATCON) (Larsen et al., 1991 e Schauder et al. 1995), ou ainda como compensador síncrono estático (STATCOM) (Suzuki et al., 1997 e Chen et al., 1997). O compensador série composto de conversores de comutação forçada é comumente chamado de "Static Synchronous Series Compensator" (SSSC) (Gyugyi et al., 1997). O progresso dos conversores de comutação forçada permitiu o desenvolvimento do UPFC (Gyugyi, 1992, 1994 e Gyugyi et al., 1995). O STATCOM e o UPFC serão descritos a seguir.

4.1. O Compensador Síncrono Estático — STATCOM —

O predecessor do compensador síncrono estático, o compensador síncrono rotativo, foi extensivamente usado no passado para a compensação shunt de reativos, tanto nos sistemas de transmissão como nos de distribuição. O compensador rotativo apresenta várias características funcionais desejáveis, tais como a capacidade de injetar elevadas correntes capacitivas durante períodos transitórios de subtensão e possuir uma impedância interna indutiva, cujos valores típicos não causam ressonância com a rede de transmissão. Contudo, o compensador rotativo possui uma série de desvantagens. Ele tem um tempo de resposta lento. Apresenta instabilidade rotacional, tem baixa impedância de curto circuito e sofre manutenções frequentes. Além do mais, ele não atende aos requisitos modernos de flexibilidade no controle em tempo real de fluxo de potência (Sistemas FACTS) (Hingorani, 1988 e Gyugyi, 1994).

A fonte de tensão síncrona estática, que neste trabalho é referido como STATCOM, é o análogo da máquina síncrona ideal. Ela é capaz de gerar tensões trifásicas senoidais e equilibradas, na frequência fundamental, e de módulo e ângulo de fase controlável. Essa máquina ideal não tem inércia. Sua resposta é praticamente instantânea e não altera significativamente a impedância equivalente do sistema de potência. O STATCOM pode gerar internamente potência *reativa* (capacitiva ou indutiva), teoricamente, sem a necessidade do emprego de elementos armazenadores de energia (capacitores e re-

atores), assim como exposto anteriormente para filtros ativos (Watanabe et al., 1993). Além disso, ele pode dinamicamente realizar trocas de energia com o sistema CA, se o mesmo for dotado a um dispositivo armazenador de energia.

O STATCOM pode ter seu controle todo baseado na teoria de potência ativa e reativa instantânea, conforme mostrado em Barbosa et al. (1994). No entanto, para que este tipo de controle opere corretamente, é necessário que o conversor seja modulado em largura de pulso (PWM) e como as potências envolvidas são muito altas, este tipo de modulação tem sido evitado para limitar as perdas no chaveamento.

Hoje já existem exemplos de uso do controle PWM em altas potências, por exemplo em compensação de desbalanço (Ishikawa et al., 1995) com potência de 48 MVA. Porém, os estudos e projetos atuais de STATCOMs envolvem, na sua grande maioria, conversores de tensão operando com chaveamento tipo onda retangular de 120°. Desta forma, nas explicações do STATCOM a seguir só será considerado o controle mais utilizado que é o de chaveamento de onda retangular de 120°. Como estes geram muitos harmônicos de baixa ordem, em geral, são associados vários conversores para se aumentar o número de pulsos, que tipicamente são de 24 ou 48. Portanto, no controle do STATCOM a ser apresentado aqui, a teoria de potência instantânea será aplicada apenas no cálculo da potência imaginária.

Um modelo funcional do STATCOM está mostrado na Fig. 13. Os sinais de referência Q_{ref} e P_{ref} definem a amplitude V e o ângulo de fase ϕ da tensão gerada pelo STATCOM, que, por sua vez, define a troca de potência ativa (real) e reativa (imaginária) entre o STATCOM e a barra CA do sistema de potência a qual ele está conectado. Não existirá fluxo de corrente para o STATCOM, se a tensão gerada $v = V \sin(\omega t - \phi)$ tiver o mesmo

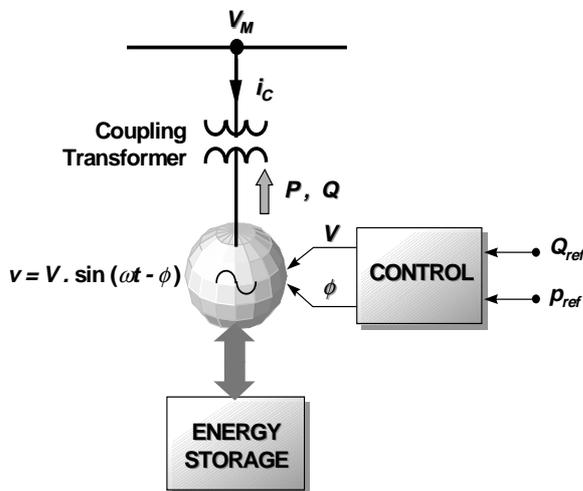


Fig. 13: Fonte de tensão síncrona ideal (STATCOM).

módulo (V) e ângulo de fase (ϕ) que da barra CA (V_M) do sistema. Por outro lado, se as perdas forem desprezadas e considerando apenas uma indutância de dispersão no transformador de acoplamento, pode-se dizer que não há fluxo de potência ativa (real) para o STATCOM, se o ângulo de fase de ambas tensões forem iguais (é o mesmo que considerar $\delta_{12} = 0$ na equação (28)). Se a amplitude V da tensão gerada for maior que da tensão do sistema ($|V_M|$), então, uma corrente capacitiva (em avanço) fluirá da barra CA para o STATCOM. Ou se a amplitude de V for menor que $|V_M|$, uma corrente indutiva (atrasada) fluirá da barra CA para o STATCOM (consumo de potência reativa).

De modo análogo, a potência ativa (real) que flui entre a fonte de tensão síncrona (STATCOM) e a barra CA do sistema pode ser controlada através da defasagem (ϕ) da tensão gerada pelo STATCOM (Gyugyi, 1994). Isto é, se a tensão de saída do STATCOM é adiantada em relação a da barra CA (V_M), o STATCOM drenará energia do seu dispositivo armazenador de energia (fonte CC) e injetará esta potência no sistema CA. Um fluxo reverso de energia ocorrerá quando a tensão de saída do STATCOM estiver atrasada em relação a da barra CA.

Se a troca dinâmica de energia com o sistema não for necessária ($P_{ref} = 0$), o STATCOM torna-se uma fonte auto-suficiente de potência reativa, de forma semelhante a um compensador síncrono ideal, e o dispositivo externo armazenador de energia (fonte CC) pode ser desconectado (Gyugyi, 1994).

4.1.1. Controle de Tensão Através do STATCOM

O STATCOM é o equivalente eletrônico do compensador síncrono *ideal*. Sua principal função é injetar corrente reativa no sistema de potência, de forma controlada. Para fazer isso, é necessário que o STATCOM trabalhe como uma fonte de tensão *controlada*. Através da injeção de corrente reativa no sistema, o STATCOM pode indiretamente regular o módulo da tensão da barra CA a qual ele está conectado em derivação (shunt). O princípio da regulação de tensão por injeção de corrente reativa está ilustrado na Fig. 14.

O STATCOM pode gerar corrente reativa fundamental adiantada (potência imaginária $q < 0$ na Fig. 14) ou atrasada (potência reativa $q > 0$ na Fig. 14) de 90° da componente fundamental de seqüência positiva da tensão v da barra CA. Neste caso, tem-se a corrente ortogonal à tensão e a potência ativa (real) é nula. Esta corrente fluiria pela impedância equivalente L_1 do sistema G1 da Fig. 14. Isto sugere uma regulação da tensão v por injeção de uma componente fundamental de seqüência positiva da corrente (i) ortogonal à componente

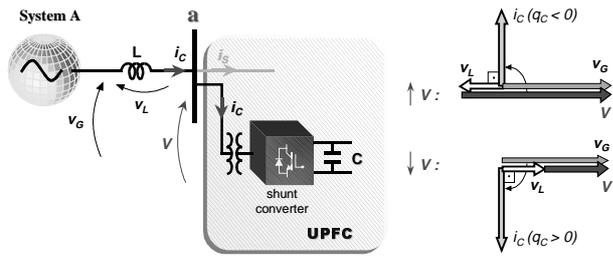


Fig. 14: Regulação de tensão CA através de STATCOM.

fundamental de tensão V . Desta forma, a queda de tensão sobre L_1 dada por v_{L1} estaria em fase ou em contra-fase com a tensão v_{G1} do sistema G1, causando, respectivamente, uma diminuição ou um incremento da tensão V .

Desta forma, variando a injeção de corrente reativa, o STATCOM controla indiretamente a amplitude da tensão da barra CA, como ilustra a Fig. 14 e está resumido abaixo:

$$\begin{cases} i_c(q > 0) \Rightarrow \text{redução da tensão } V \\ i_c(q < 0) \Rightarrow \text{incremento da tensão } V \end{cases} \quad (29)$$

Mais adiante, será apresentado um circuito simples de controle usado para controlar a potência reativa gerada pelo STATCOM. É oportuno lembrar que o princípio de controle de tensão acima envolve somente injeção de corrente reativa (imaginária). Como consequência, a fonte de tensão síncrona ideal (Fig. 13) torna-se auto-suficiente, como um compensador síncrono ideal, e a fonte externa armazenadora de energia pode ser eliminada. Este conceito pode ser perfeitamente explicado pela teoria de potência real (ativa) e imaginária (reativa) instantânea apresentados anteriormente.

4.2. O Controlador Unificado de Fluxo de Potência — UPFC

O UPFC ("Unified Power Flow Controller") é um equipamento de eletrônica de potência revolucionário, para aplicações em sistemas FACTS ("Flexible AC Transmission Systems") (Hingorani, 1988). É um compensador universal, capaz de controlar simultaneamente o fluxo de potência passante por uma linha de transmissão e a tensão CA de uma barra. Ele tem resposta muito rápida e não existe nenhum substituto, convencional ou de eletrônica de potência, que possa realizar todas suas funções de compensação, com desempenho equivalente. Ou seja, o UPFC é um equipamento que realiza funções de compensação, dentro da nova concepção de sistemas FACTS, oferecendo alternativas para o controle de sistemas de potência, até então impossíveis de serem realizadas com o uso de equipamentos tradicionais.

4.2.1. Uma descrição geral do UPFC

Imagina-se um cenário onde numa dada área do sistema de potência existam problemas de regulação de tensão, além de desequilíbrios no carregamento das linhas de transmissão e conseqüente sobrecargas, devido ao paralelismo de linhas de diferentes impedâncias. Estes são problemas típicos, impossíveis de ser solucionados com um único compensador tradicional, mas podem ser solucionados com o uso de um UPFC.

A Fig. 15 ilustra o problema acima. O conversor shunt do UPFC injeta corrente reativa controlável na barra "a" da subestação "A". Isso garante uma regulação da tensão dessa barra em torno de um valor de referência. Essa função de regulação de tensão é idêntica à realizada por um STATCOM conforme sugerido na Fig. 14. A novidade está no conversor ligado em série com o sistema, pelo lado CA, e em "back-to-back" com o conversor shunt, pelo lado CC. A conexão série é realizada através do primário de um transformador que insere uma tensão (v_C) entre as barras **a** e **a'** da subestação A. Esta tensão série controla a corrente i_S e ajusta a potência ativa passante na linha de transmissão que interliga as barras **a'** e **c**, além de controlar a potência reativa na barra **a'**, independentemente da tensão da barra **a** e da potência ativa passante. Por exemplo, poderia ser desejável manter a tensão da barra **a** fixa em 1 pu e a potência ativa transmitida pela linha entre as barras **a'** e **c** também fixa em 1 pu e com fator de potência unitário (potência reativa injetada na barra **a'** igual a zero). Estas são as funções de compensação atribuídas originalmente ao UPFC, por Gyugyi (1992) e (1994).

A flexibilidade do arranjo série/paralelo de dois conversores VSIs não para por aí. Além das funções de compensação na frequência fundamental citadas acima, o arranjo "back-to-back" de conversores VSIs (Fig. 15) pode também compensar potências harmônicas, atuando nas tensões e/ou nas correntes do sistema. Por exemplo, todas aquelas funções de compensação harmônica implementadas no UPQC (Fig. 12) podem ser incorporadas aqui, sem prejuízo das funções de compensação atribuídas ao UPFC. Este novo equipamento seria, então, um compensador universal, capaz de realizar compensação harmônica, desde frequências subsíncronas até alguns kilohertz. Este equipamento, desenvolvido durante os trabalhos de doutoramento de Aredes (Aredes e Heumann, 1996b e Aredes et al., 1998), vem sendo chamado de UPLC ("Universal Active Power Line Conditioner") e será descrito mais adiante.

As partes principais que compõem o UPFC estão mostradas na Fig. 16. Como dito anteriormente, o circuito de potência é constituído por dois conversores VSI interligados por um elo CC, onde predomina um banco

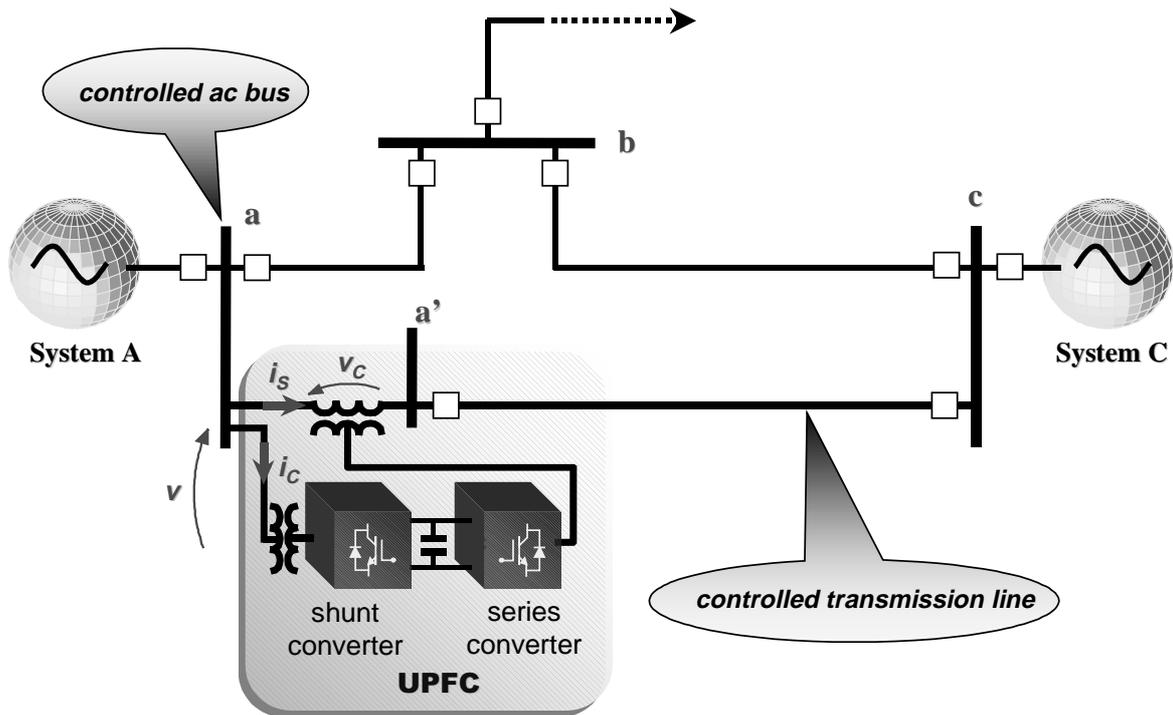


Fig. 15: Caso típico de aplicação do UPFC.

de capacitores, dando características de fonte de tensão ao elo CC. Note, porém, que não existe propriamente uma fonte de suprimento de energia no elo CC, mas sim, elementos armazenadores de energia. Portanto, é preciso um balanço de fluxo de energia através dos conversores série e shunt, de forma a manter devidamente carregado o capacitor CC.

É necessário manter a tensão no elo CC regulada, em torno de seu valor nominal. Porém, como não há restrições impostas ao ângulo de fase da tensão série de compensação (v_c), a tensão que o conversor série insere no sistema pode produzir com a corrente passante i_s , tanto potência ativa, como potência reativa.

É sabido que a potência reativa trifásica não gera fluxo de energia no lado CC dos conversores de potência. Porém, a potência ativa gera. Assim, a potência ativa que por ventura é drenada ou injetada no sistema

CA, pelo conversor série, causa variações na tensão do banco de capacitores CC, que devem ser compensadas pelo conversor shunt. Este conversor deve, então, injetar ou drenar energia do elo CC para reagir às variações de tensão no elo CC. Isso equivale a dizer que a potência ativa média que o conversor série eventualmente fornecendo à rede CA deve ser obtida desta, através do conversor shunt, ou vice-versa. Em termos gerais de balanço de energia, a potência ativa líquida que os dois conversores drenam do sistema CA equivale-se às perdas nos componentes do UPFC, incluindo seus transformadores.

Além de funcionar como regulador da tensão CC, o conversor shunt do UPFC controla também o módulo da tensão CA da barra controlada. Para isso, o controle do conversor shunt deve fazer com que este injete uma componente variável de corrente reativa (corrente trifásica ortogonal à tensão), gerando uma potência reativa trifásica variável, a fim de regular a tensão da barra CA. Os princípios de regulação de tensão ca pelo conversor shunt é análogo ao do STATCOM, apresentado anteriormente. Os princípios de controle de fluxo de potência pelo conversor série serão detalhados a seguir.

4.2.2. Controle de fluxo de potência através do UPFC

O conversor série do UPFC deve ajustar a corrente passante i_s (ver Fig. 15) de tal forma que esta produza com a tensão v a potência ativa e reativa desejada. Esta condição desejada de carregamento da linha, também conhecida como ordem de potência, pode ser pré-

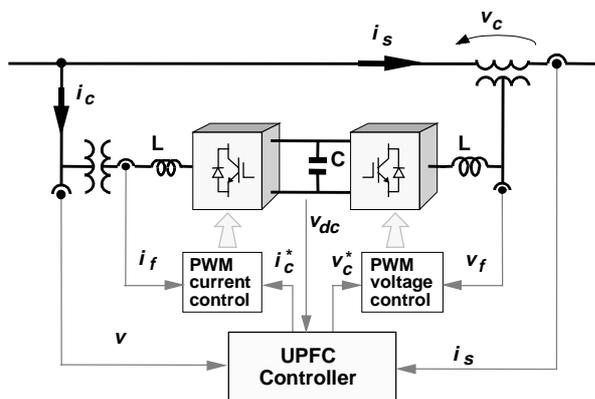


Fig. 16: Principais componentes do UPFC.

definida localmente ou controlada remotamente, de forma dinâmica ou não, por um controle central, em tempo real, de despacho de carga.

Como o controlador do UPLC que será apresentado mais adiante é totalmente baseado nos novos conceitos de potência ativa (real) e reativa (imaginária) instantâneas, desde já, as ordens de potência da linha controlada serão denominadas: "ordem de potência real", p_{ref} e "ordem de potência imaginária", q_{ref} .

A idéia básica do controle de fluxo de potência consiste em inserir uma tensão controlada v_C em série com a linha de transmissão, para alterar o módulo e o ângulo de fase da tensão do outro lado do conversor série, representada por v_S na Fig. 17. Varia-se a tensão v_S para ajustar a corrente i_S e manter o nível desejável de carregamento ($p = p_{ref}$ e $q = q_{ref}$) na linha de transmissão controlada.

Através da medição da tensão da barra CA (v) e da corrente da linha (i_S), calcula-se as potências real (p) e imaginária (q) da linha controlada, que são comparadas com suas respectivas ordens de potência (p_{ref} e q_{ref}). A tensão de referência v_C^* (Fig. 16) do conversor série para controlar essas potências é gerada a partir do erro entre p e p_{ref} e q e q_{ref} . Desses erros, dois sinais de controle são gerados: p_c e q_c . Este ponto ficará claro mais adiante, quando o controlador principal do UPLC será apresentado. Por hora, aceita-se que a partir desses erros é possível gerar componentes de tensão de compensação v_C que estejam em paralelo ou ortogonal à tensão v da barra CA controlada. O diagrama fasorial da Fig. 18 ilustra estas idéias.

Através da variação dos componentes paralelo [$v_C(p_c)$] e ortogonal [$v_C(q_c)$] é possível compor uma tensão v_C com módulo e ângulo de fase arbitrários. Esta é a tensão série inserida pelo UPFC, que é subtraída de v para alterar o módulo e ângulo de fase da tensão v_S da barra a' (Fig. 17) e controlar a corrente i_S .

Mais uma vez, considerando linhas curtas, a equação (28) pode ser aplicada ao cálculo da potência ativa passante. A corrente i_S produz uma queda de tensão (v_L) sobre a indutância equivalente L , que está 90° avançada com relação à i_S . A tensão v_L e a corrente i_S estão desenhadas na Fig. 18 considerando $v_C = 0$.

A seguir, será demonstrado através de diagramas fasoriais que a variação do módulo de v_S altera muito mais a potência imaginária (q) do que a potência real (p) da linha controlada. Por outro lado, a variação do ângulo de fase da tensão v_S altera muito mais a potência real (p) do que a potência imaginária (q). Estes são conceitos muito utilizados nos estudos de sistemas de potência, por exemplo, nos cálculos de fluxo de potência pelo método "desacoplado rápido".

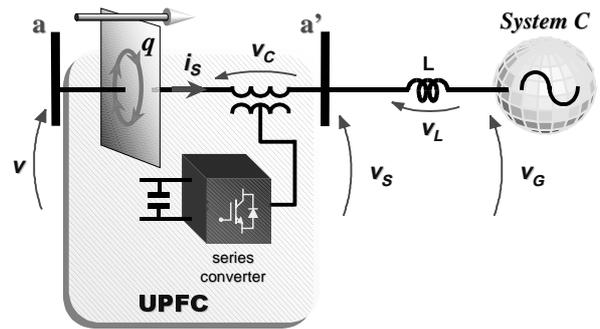


Fig. 17: Controle do fluxo de potência através do conversor série do UPFC.

Suponha que a tensão v na Fig. 17 corresponda à tensão v na barra a da Fig. 15, e que a tensão v_G corresponda à tensão na barra c . Então, v e v_G são tensões de dois subsistemas contendo cargas e gerações e portanto, possuem módulos e ângulos de fase que variam com uma dinâmica bem mais lenta do que o tempo de resposta do UPFC. Assim, podem ser consideradas como tensões de "barra infinita", como uma primeira aproximação. Com isso, estas permanecerão inalteradas durante a resposta transitória do UPFC e a tensão v_S da barra a' variará de acordo com a variação de v_C . A partir de v e v_G dadas na Fig. 18, determina-se v_S para quatro casos de componentes, paralelos [$v_C(p_c)$] e ortogonais [$v_C(q_c)$], da tensão v_C de compensação. Estes quatro casos estão mostrados nos diagramas fasoriais da Fig. 19.

Os diagramas superiores referem-se às componentes ortogonais de v_C , gerados a partir dos erros entre a potência ativa p medida e a ordem de potência ativa p_{ref} . Este erro de potência *ativa* deve ser tratado pelo controle principal do UPFC como uma "potência *imaginária* q_C ", pois a componente v_C gerada para minimizar o erro deve ser ortogonal à v . Suponha que num dado instante a potência ativa p cresça além de sua referência. Isso faz com que o erro entre potências ativas seja negativo ($p_{ref} - p = q_C < 0$). O controle do UPFC produz, então, uma tensão de referência v_C^* ortogonal e avançada com relação à v (em condições normais, a tensão v_C gerada pelo conversor série do UPFC segue perfeitamente sua referência v_C^*). O diagrama superior esquerdo mos-

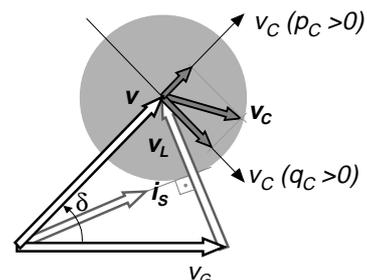


Fig. 18: Diagrama fasorial da linha de transmissão controlada.

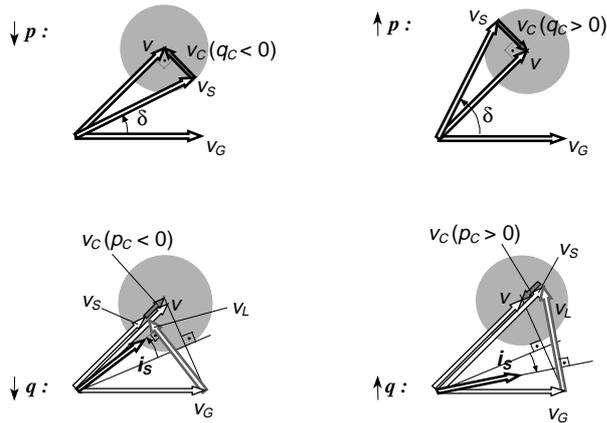


Fig. 19: Controle do fluxo de potência pelo UPFC — Diagramas fasoriais.

tra essa situação. Vê-se que a componente v_c^* ortogonal e avançada faz com que a tensão v_s se atrase, diminuindo o ângulo de potência δ entre esta e a tensão v_g , forçando uma diminuição de p e contrapondo-se a sua tendência de aumento. O inverso ocorre quando, num dado instante, a potência p tende a ficar menor que sua ordem de potência p_{ref} conforme mostra o diagrama superior direito da Fig. 19. Neste caso, o erro de potência é positivo ($p_{ref} - p = q_c > 0$) e gera uma tensão v_c^* ortogonal e atrasada, aumentando o ângulo de potência δ .

Os diagramas inferiores da Fig. 19 referem-se às componentes v_c paralelas à tensão v . Agora, o erro entre a potência q medida (ver Fig. 17) e sua ordem de potência q_{ref} é tratado pelo controle do UPFC como uma "potência real" p_c . Ou seja, se houver uma aumento da potência q medida e esta se tornar maior que sua referência, uma "potência real" p_c negativa surgirá no controle ($q_{ref} - q = p_c < 0$). Está-se adotando a convenção de potência imaginária positiva para i_s atrasada (indutiva) com relação à v . Portanto, se houve um aumento de q , então, a corrente i_s tornou-se mais indutiva (atrasada). Para erros negativos de potência imaginária ($q_{ref} - q = p_c < 0$), o controle do UPFC gera uma tensão v_c^* em fase com v , conforme mostrado no diagrama inferior esquerdo da Fig. 19. Vê-se que a tensão v_c^* em fase com v causa uma diminuição do módulo de v_s , o que avança a corrente i_s , tornando-a mais capacitiva (avançada) e contrapondo-se à sua tendência de tornar-se mais indutiva. O inverso ocorre quando a i_s tende a tornar-se mais capacitiva, além de seu valor de referência q_{ref} , e está mostrado no diagrama inferior direito da Fig. 19.

Como v_c é dada pela combinação dos componentes paralelos e ortogonais, seu módulo e ângulo de fase podem variar continuamente desde $0 \leq |v_c| \leq |v_{c|MAX}$ e $0 \leq \phi \leq 360^\circ$, respectivamente. A Fig. 20 resume os conceitos apresentados acima para controle do fluxo de potência da linha de transmissão, para os diversos valo-

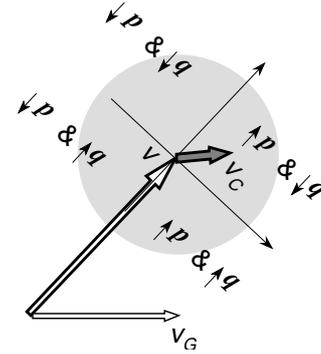


Fig. 20: Representação do controle de fluxo de potência por diagrama vetorial.

res de módulo e ângulo de fase da tensão de compensação v_c .

Uma forma de implementação dos princípios básicos de controle de tensão através do conversor shunt do UPFC e de controle de fluxo de potência através do conversor série será mostrado a seguir, como parte integrante do compensador universal (UPLC). Será visto que este controlador é totalmente baseado nos novos conceitos de potência real e imaginária instantâneas. A grande vantagem deste método consiste no fato de se trabalhar com tensões e correntes instantâneas, o que dispensa qualquer cálculo de valor eficaz ou defasagem angular, que demandam tempo e podem degenerar a dinâmica do controle. Além disso, será visto que é possível incorporar, caso seja desejável, as compensações harmônicas dos filtros ativos (UPQC) aos controles de fluxo de potência e de regulação de tensão (compensação na frequência fundamental) atribuídos ao UPFC.

5. O Compensador Universal (UPLC)

O Compensador Universal ("Universal Active Power Line Conditioner" UPLC) proposto por Aredes (1996a) engloba todos os conceitos de compensação apresentados anteriormente, num único equipamento de Eletrônica de Potência. Ou seja, ele realiza todas as funções de filtragem ativa série e paralelo combinadas (UPQC), além das funções de compensação originalmente atribuídas ao UPFC.

Uma nova concepção de controle para o arranjo "back-to-back" de conversores VSIs (Fig. 16) foi desenvolvida, de forma modularizada. Este controlador é totalmente baseado na teoria de potência ativa e reativa instantânea apresentada anteriormente e dispensa qualquer cálculo de valores eficazes.

A Tabela I lista todas as funções de compensação que podem ser implementadas com a combinação série/paralelo de conversores VSI (Fig. 16) e que foram incorporadas ao UPLC (Aredes et al., 1998).

Tabela I: Funções de compensação incorporadas ao UPLC

Universal Active Power Line Conditioner — UPLC	
Conversor Série	Conversor Shunt
<i>Unified Power Quality Conditioner — UPQC</i>	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ Compensar harmônicos de <i>tensão</i>, incluindo desbalanços na freqüência fundamental, devido a componentes de seqüência negativa e de seqüência zero ✓ impedir a propagação de harmônicos de corrente pela rede ("harmonic isolation") ✓ aumentar a estabilidade do sistema, através do amortecimento de ressonâncias super- e subsíncronas. 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Compensar harmônicos de <i>corrente</i>, incluindo desbalanços na freqüência fundamental, devido a componentes de seqüência negativa e de seqüência zero ✓ compensação da potência reativa da carga ✓ regular a tensão do elo CC que interliga os dois conversores
<i>Unified Power Flow Controller — UPFC</i>	
<ul style="list-style-type: none"> ✓ controlar o fluxo de potência ativa passante por uma linha de transmissão ✓ controlar a potência reativa no terminal de uma linha de transmissão 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ prover suporte de tensão em uma barra do sistema, através da injeção de corrente reativa.

As funções de compensação da Tabela I estão agrupadas em duas classes distintas: (1) compensação harmônica (UPQC), para melhoria da qualidade de energia e (2) compensação na freqüência fundamental da rede (UPFC), para controle de fluxo de potência e suporte de tensão. Todos estes princípios de compensação foram descritos anteriormente. Maiores detalhes podem ser encontrados em Aredes e Watanabe (1995a), Gyugyi (1992), Aredes (1996a), Aredes et al. (1998) e Aredes et al. (1995b).

5.1. Descrição geral do UPLC

Um cenário típico para aplicação de um UPLC está mostrado na Fig. 21. Assume-se que por um lado (esquerdo) tem-se um sistema CA com um alto grau de poluição harmônica e desequilíbrio, o que faz com que a tensão v_s do lado esquerdo do UPLC seja distorcida e desbalanceada, independentemente da grande carga não-linear conectada na barra CA do lado direito do UPLC. Por outro lado, assume-se outro sistema CA com tensões senoidais e balanceadas (lado direito), porém suprindo uma grande carga desbalanceada e geradora de correntes harmônicas. O problema se resume, então, em evitar que a tensão desbalanceada e distorcida se propague, prejudicando o sistema do lado direito do UPLC e impedir que a corrente distorcida e desbalanceada da carga não-linear (i_L) circule pelos sistemas CA de ambos os lados do UPLC.

Se todas as compensações harmônicas citadas acima

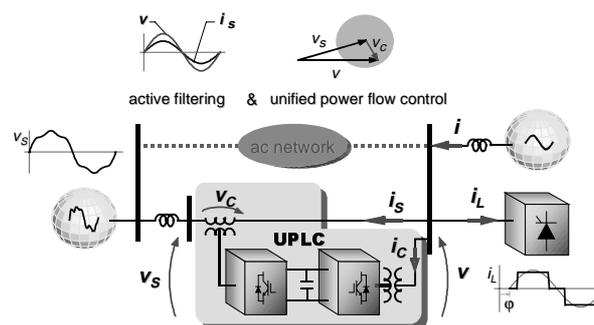


Fig. 21: Sistema de potência controlado por um UPLC.

e resumidas na Tabela I como parte referente ao UPQC forem realizadas, então, será garantido uma tensão senoidal e balanceada do lado direito (v) e correntes senoidais e balanceadas fluindo para os sistemas CA do lado esquerdo (i_s) e direito (i) do UPLC.

Além das compensações harmônicas, o UPLC também realiza o controle do fluxo de potência através de seu conversor série e regula a tensão (v) através de seu conversor shunt. Portanto, o conversor shunt deve compensar a corrente i_L da carga não-linear e controlar o valor eficaz da tensão v . O conversor série deve compensar os harmônicos e o desequilíbrio na tensão v_s e controlar a potência real e imaginária produzida por v e i_s .

Um outro controlador para UPLC foi desenvolvido para o caso onde se tem a carga não-linear (i_L) e a tensão distorcida e desbalanceada (v_s) de um mesmo lado do

UPLC (Aredes e Heumann, 1996b). Deve-se realçar o fato de que, se não houver um caminho alternativo de fluxo de potência entre os dois subsistemas CA, um controle adicional no conversor série deve ser implementado para que este possa controlar o fluxo de potência real na linha de interligação, sem perder o torque sincronizante entre os dois subsistemas.

O diagrama de blocos funcional do controlador do UPLC está mostrado na Fig. 22. Uma parte fundamental do controle é o cálculo das componentes fundamentais de seqüência positiva das tensões dos dois lados do UPFC (v'_α, v'_β e $v'_{s\alpha}, v'_{s\beta}$). É a partir dessas componentes que se chega aos valores corretos da tensão (v_c^*) e corrente (i_c^*) de compensação. O regulador de tensão do elo CC gera o sinal de controle \bar{p}_{loss} que é passado ao controlador do conversor shunt. Este realiza o balanço do fluxo de energia para o elo CC, forçando a tensão CC permanecer em torno de seu valor de referência.

O diagrama de blocos da Fig. 22 é geral e contempla também o caso em que se deseja compensar componentes de seqüência zero, num sistema trifásico a quatro fios. Isso explica a presença do sinal adicional ϵ para o controle de corrente por histerese, particularmente quando se utiliza conversores com topologia "split capacitor" (Aredes et al., 1997). Neste caso, é necessário um controle por histerese especial, que possa manter as tensões nos dois capacitores do elo CC equilibradas.

A seguir, será dada uma breve descrição de cada bloco funcional da Fig. 22.

5.2. Detetor de Seqüência Positiva

O bloco de controle denominado detetor de seqüência positiva na Fig. 22 está detalhado na Fig. 23. Ele extrai em tempo real os valores instantâneos das componentes de seqüência positiva (v'_α, v'_β e $v'_{s\alpha}, v'_{s\beta}$) das tensões v e v_s (Fig. 21), respectivamente. Para isso, é necessário um circuito PLL ("phase-locked-loop") capaz de operar satisfatoriamente com tensões distorcidas e desequilibradas, fornecendo o valor correto da freqüência fundamental (ω_1) da rede. A partir de ω_1 gera-se dois sinais senoidais: $i'_\alpha = \sin(\omega_1 t)$ e $i'_\beta = \cos(\omega_1 t)$. Eles correspondem a uma corrente auxiliar de seqüência positiva na freqüência fundamental da rede, já transformada para os eixos α - β . A partir daí, aplica-se os novos conceitos de potência instantânea descritos anteriormente, para obtenção do valor instantâneo da componente fundamental de seqüência positiva das tensões dos dois lados do UPLC.

O produto da corrente auxiliar (i'_α e i'_β) com as tensões medidas fornecem potências reais e imaginárias sem sentido físico. Este é apenas um artifício utilizado para poder se extrair em tempo real a componente fun-

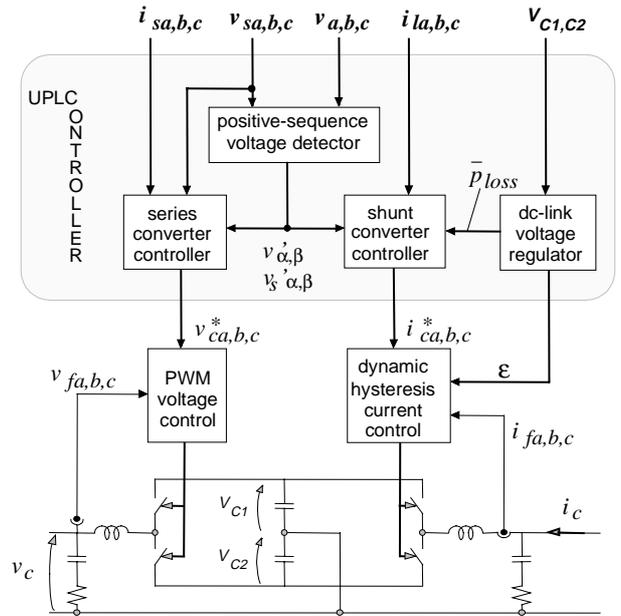


Fig. 22: Diagrama de blocos funcional do UPLC.

damental de seqüência positiva das tensões, sem erro de fase ou amplitude. Nas equações (19) a (22) pode-se ver que as componentes médias das potências reais (\bar{p}' e \bar{p}'_s) e imaginárias (\bar{q}' e \bar{q}'_s) contêm apenas a componente \dot{V}_{+1} das tensões v e v_s , que se deseja extrair, uma vez que, através do PLL, produziu-se correntes auxiliares na freqüência fundamental e de seqüência positiva.

5.3. Controle do Conversor Shunt

O controle do conversor shunt está detalhado na Fig. 24. A compensação das componentes de seqüência zero é realizada através de i_o . Na maioria dos casos, trata-se de sistemas a três fios e i_o é sempre zero. Neste caso e se não for usado conversores de topologia "split capacitor", i_o e ϵ podem ser eliminados e um controle PWM por histerese convencional pode ser aplicado. Por outro lado, se não for desejado que o UPLC faça filtragem ativa dos harmônicos, o cálculo de p e q podem também ser eliminados. O sinal \bar{q}_v faz o con-

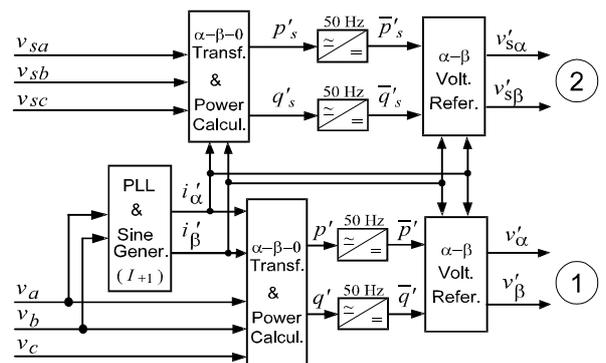


Fig. 23: Detetor de seqüência positiva.

trole da potência imaginária, associada à regulação da tensão v (barra controlada). Finalmente, o sinal \bar{p}_{loss} que está associado a uma potência real, que não deve nunca ser eliminado do circuito, pois ele regula a tensão CC do UPLC.

5.4. Controle do Conversor Série

O diagrama de blocos de controle do conversor série do UPLC está mostrado na Fig. 25. Aqui, ao contrário do conversor shunt, a componente de seqüência zero da tensão é compensada juntamente com o sinal de controle que compensa também a componente fundamental de seqüência negativa e os harmônicos. O diagrama de blocos mostra que a tensão de referência do conversor série é dada por: $v'_{ca} = v_{ha} + v'_{sa} - v_{sa}$, onde $(v'_{sa} - v_{sa})$ representa uma componente de compensação que inclui tudo o que não corresponde à componente fundamental de seqüência positiva da tensão v_s .

O sinal i_{ho} serve para oferecer uma resistência adi-

cional contra a circulação de corrente de seqüência zero através da linha de transmissão controlada, de forma similar ao algoritmo de controle de filtro ativo híbrido, proposto por Peng et al. (1988). Na verdade este princípio de bloqueio de correntes harmônicas está integralmente implementado aqui no controlador do UPLC, através dos sinais \tilde{p}_h e \tilde{q}_h .

A Fig. 19 ajuda na compreensão do controle da potência real passante, realizado pelo sinal \bar{q}_c da Fig. 25 (componente ortogonal de v_C).

O erro entre a potência imaginária medida q_h (produto da tensão de seqüência positiva de v pela corrente i_s) e a potência de referência resulta no sinal de controle \bar{p}_C que produz uma componente de tensão em v_{ha} , v_{hb} , v_{hc} paralela à tensão v (em fase com a tensão v). Foi visto na Fig. 19 que esta componente altera muito mais a potência imaginária da linha controlada, do que a potência real passante por ela.

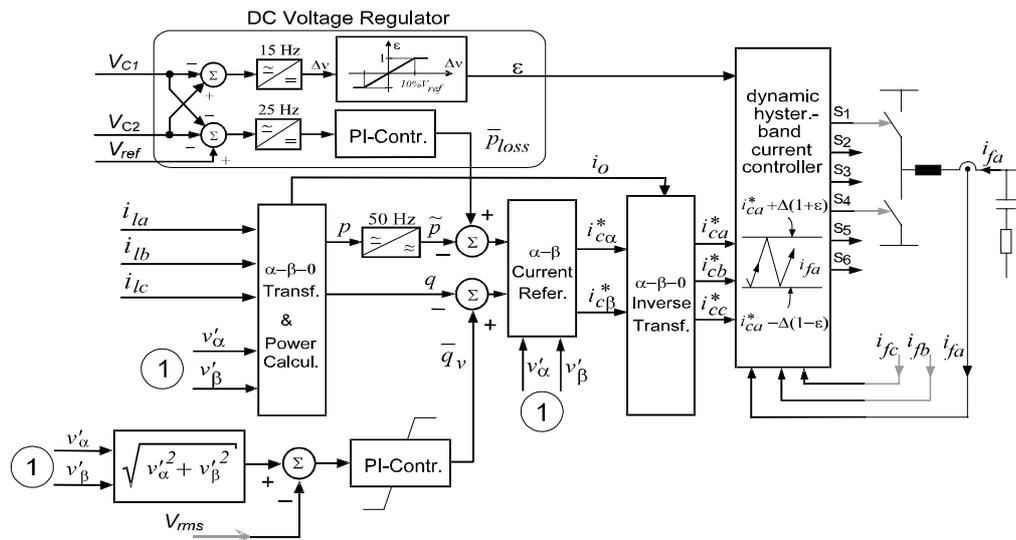


Fig. 24: Diagrama de blocos de controle do conversor shunt do UPLC.

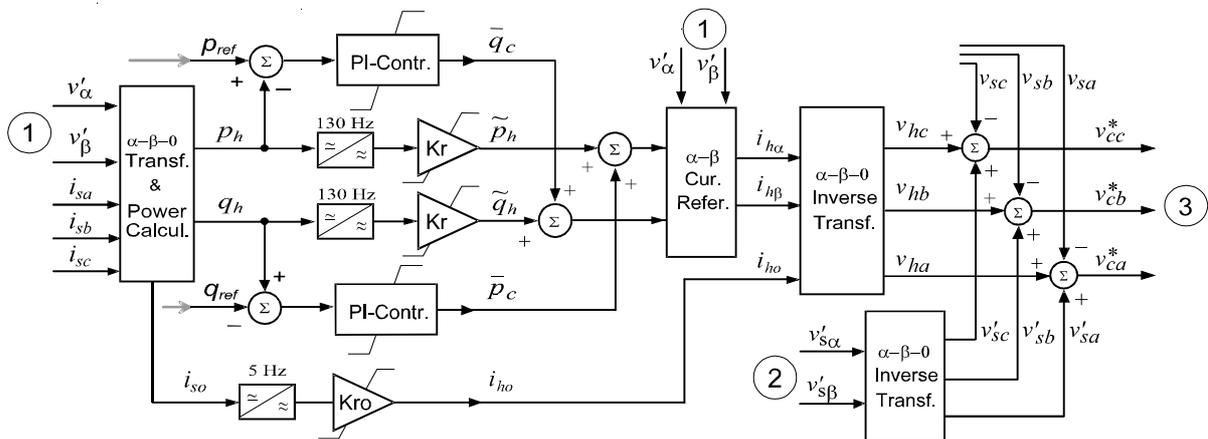


Fig. 25: Diagrama de blocos de controle do conversor série do UPLC.

6. Conclusões

Este trabalho mostra que os novos conceitos de potência ativa e reativa instantânea (*Teoria p-q*) constitui uma base consistente para análise de circuitos elétricos em regime balanceado ou não e com ou sem distorções. Os autores consideram esta teoria um ponto fundamental para o correto entendimento das aplicações de Eletrônica de Potência em Sistemas de Potência.

A *Teoria p-q* não só se mostra mais eficiente do que os métodos convencionais no domínio da frequência, para aplicação na compensação harmônica (filtros ativos), como também foi mostrado que ela pode ser usada no desenvolvimento de novos compensadores que atendem aos novos conceitos FACTS. Na análise de dispositivos FACTS, esta teoria é importante para o seu entendimento, mesmo quando os controles são baseados em outras técnicas.

Referências Bibliográficas

- Akagi, H., Kanazawa, Y. e Nabae, A. (1983). "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits," *Proceedings of the IPEC'83 – Int. Power Electronics Conf.*, Tokyo, pp. 1375-1386.
- Akagi, H., Kanazawa, Y. e Nabae, A. (1984). "Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **IA-20**(3): 625-630.
- Akagi, H., Nabae, A. e Atoh, S. (1986). "Control Strategy of Active Power Filter Using Multiple Voltage source PWM Converters," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, **IA-22**(3).
- Akagi, H. e Fujita, H. (1995). "A New Power Line Conditioner for Harmonic Compensation in Power Systems," *IEEE Trans. Power Delivery*, **10**(3): 1570-1575.
- Akagi, H. (1996). "New Trends in Active Filters for Power Conditioning," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, **32**(6): 1312-1322.
- Aredes, M. e Watanabe, E.H. (1995a). "New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters," *IEEE Trans. Power Delivery*, **10**(3): 1649-1656.
- Aredes, M., Häfner, J. e Heumann, K. (1995b). "A Combined Séries and Shunt Active Power Filter," *Proceedings of the IEEE/KTH Stockholm Power Tech Conf.*, Vol. PE, Stockholm, pp. 237-242.
- Aredes, M. (1996a). "Active Power Line Conditioners," *Dr.-Ing. Thesis*, Technische Universität Berlin.
- Aredes, M. e Heumann, K. (1996b). "An Advanced Unified Power Flow Controller," *Electrical Engineering Research Journal – Archiv für Elektrotechnik*, **79**(4): 303-310.
- Aredes, M., Häfner, J. e Heumann, K. (1997). "Three-Phase Four-Wire Shunt Active Filter Control Strategies," *IEEE Trans. on Power Electronics*, **12**(2): 311-318.
- Aredes, M., Heumann, K. e Watanabe, E.H. (1998). "A Universal Active Power Line Conditioner," *IEEE Trans. on Power Delivery*, **13**(2): 545-551.
- Barbosa, P.G., Misaka, I. e Watanabe, E.H. (1994). "Shunt-PWM advanced var compensators based on voltage source inverters for FACTS applications," *Proceedings of the IV Simpósio de Especialistas em Planejamento da Operação e Expansão Elétrica (SEPOPE)*, Foz do Iguaçu.
- Barbosa, P.G. e Watanabe, E.H. (1995). "Advanced series reactive power compensator based on voltage source inverters", *Proceedings of the Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência - COBEP'95*, São Paulo.
- Buchholz, F. (1922). "Die Drehstrom-Scheinleistung bei ungleichmäßiger Belastung der drei Zweige," *Licht und Kraft, Zeitschrift für elekt. Energie-Nutzung*, **2**: 9-11.
- Buchholz, F. (1929). "Die Darstellung der Begriffe Scheinleistung und Scheinarbeit bei Mehrphasenstrom," *Elektro-J.*, **9**: 15-21.
- Budeanu, C.I. (1927a) "Puissances reactives et fictives," *Instytut Romain de l'Energie*, **2**, Bucharest.
- Budeanu, C.I. (1927b). "The Different Options and Conceptions Regarding Active Power in Non-sinusoidal Systems", *Instytut Romain de l'Energie*, **4**, Bucharest.
- Chen, Y., Mwinyiwiwa, B., Wolanski, Z. e Ooi, B.-T. (1997). "Regulating and equalizing DC Capacitance Voltages in Multilevel STATCOM," *IEEE Trans. on Power Delivery*, **12**(2); 901-907.
- Clarke, E. (1943) *Circuit Analysis of A-C Power Systems, Vol. I—Symmetrical and Related Components*, New York: John Wiley and Sons, Inc..
- Depenbrock, M. (1993). "The FBD-Method, a Generally Applicable Tool for Analysing Power Relations," *IEEE Trans. Power Systems*, **8**(2): 381-387.
- Fortescue, C.L. (1918). "Method of Symmetrical Co-ordinates Applied to the Solution of Polyphase Networks," *A.I.E.E. Trans.*, **37**: 1027-1140.
- Fryze, S. (1932). "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nicht-sinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung," *ETZ-Arch. Elektrotech.*, **53**: 596-599, 625-627, 700-702.
- Fujita, H. e Akagi, H. (1991). "A Practical Approach to Harmonic Compensation in Power Systems – Series Connection of Passive and Active Filters," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, **27**(6): 1020-1025.
- Gyugyi, L. (1979). "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits," *IEEE Trans. on Ind. Appl.*, **IA-15**(5): 521-532.
- Gyugyi, L. (1988). "Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators," *Proceedings of the IEEE*, **76**(4).
- Gyugyi, L. (1992). "Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems," *IEE Proceedings-C*, **139**(4): 323-331.
- Gyugyi, L. (1994). "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-State Synchronous Voltage Sources," *IEEE Trans. Power Delivery*, **9**(2): 904-911.

- Gyugyi, L., Schauder, C.D., Williams, S.L., Rietman, T.R., Torgerson, D.R. e Edris, A. (1995). "The Unified Power Flow Controller: A New Approach to Power Transmission Control," *IEEE Trans. Power Delivery*, **10**(2): 1085-1093.
- Gyugyi, L., Schauder, C.D. e Sen, K.K. (1997). "Static Synchronous Series Compensator: A Solid-State Approach to the Series Compensation of Transmission Lines," *IEEE Trans. on Power Delivery*, **12**(1): 406-417.
- Häfner, J., Aredes, M. e Heumann, K. (1997). "A Shunt Active Power Filter Applied to High Voltage Distribution Lines," *IEEE Trans. on Power Delivery*, **12**(1): 266-272
- Hingorani, N.G. (1988). "High Power Electronics and Flexible AC Transmission System," *IEEE Power Eng. Rev.*, **7**.
- Ishikawa, F. et al. (1995). "Operating experience of a 50 MVA self-commutated SVC at the Shin-Shimano substation", *Proceedings of the International Conference on Power Electronics – IPEC'95*, pp. 597-602.
- Larsen, E. et al. (1991). "Benefits of GTO-Based Compensation Systems for Electric Utility Applications," *IEEE – PES Summer Power Meeting*, Paper No. 91 SM 397-0 PWRD.
- Lyon, W.V. (1920). "Reactive Power and Unbalanced Circuits," *ELECTRICAL WORLD*, **75**(25): 1417-1420.
- Monteiro, J.A.R. (1997). Filtros Híbridos Ativo/Passivo de Potência: Modelagem no Domínio da Frequência, *M.Sc. Thesis*, COPPE/UFRJ.
- Penello, L.F., Watanabe, E.H. e Aredes, M. (1992). Filtro ativo de potência com seleção da potência a ser compensada", *Proceedings of the IX Congresso Brasileiro de Automática*, vol. 2, Vitória, pp. 786–791
- Peng, F.Z., Akagi, H. e Nabae, A. (1988). "A New Approach to Harmonic Compensation in Power Systems," *Proceedings of the IEEE/IAS Ann. Meeting Conf.*, pp. 874-880.
- Schauder, C.D., Gernhardt, M., Stacey, E., Lemak, T., Gyugyi, L., Cease, T.W. e Edris, A. (1995). "Development of a ± 100 MVAR Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems," *IEEE Trans. on Power Delivery*, **10**(3): 1486-1496.
- Schering, H. (1924). "Die Definition der Schein- und Blindleistung sowie des Leistungsfaktors bei Mehrphasenstrom," *Elektrotechnische Zeitschrift*, **27**: 710-712.
- Suzuki, H., Nakajima, T., Izumi, K., Sugimoto, S. Y., Mino, S. e Abe, H. (1997). "Development and Testing of Prototype Models for a high performance 300 MW Self-Commutated AC/DC Converter *IEEE Trans. on Power Delivery*, **12**(4): 1589-1601.
- Watanabe, E.H., Stephan, R.M. e Aredes, M. (1993). "New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads," *IEEE Trans. Power Delivery*, **8**(2): 697-703.
- Willems, J. L. (1994). "Instantaneous Sinusoidal and Harmonic Active and Deactive Currents in Three-phase Power Systems," *ETEP – Eur. Trans. Elect. Power Eng.*, **4**(5): 335-346.