

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS
CAMPUS JATAÍ**

RAFAEL FRANCO SILVEIRA

**FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA: CONCEITO E
FERRAMENTAS MATEMÁTICAS**

Jataí, Junho de 2013.

Rafael Franco Silveira

FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA: CONCEITO E FERRAMENTAS MATEMÁTICAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, como exigência parcial para obtenção do grau de Bacharelado em Engenharia Elétrica.

Jataí, Junho de 2013.

SIL/fil Silveira, Rafael Franco.
Filtro ativo de potência: conceito e ferramentas matemáticas /
Rafael Franco Silveira. - - Jataí: IFG – Campus Jataí/ Coordenação
dos cursos de Indústria – Engenharia Elétrica, 2013.

Orientador: Prof. Msc. Marcelo Semensato.
Bibliografias: f.53; il.

1. Eletrônica de potência. 2. Potência instantânea. 3. Filtro Ativo.
4. Harmônicas. I. Título. II. IFG – Campus Jataí: Coordenação dos
cursos de Indústria – Engenharia Elétrica.

CDD 621.317

Rafael Franco Silveira

FILTRO ATIVO DE POTÊNCIA: CONCEITO E FERRAMENTAS MATEMÁTICAS

Trabalho de Conclusão de Curso defendido e aprovado pela banca examinadora em 01/07/2013, com conceito _____.

Msc. Marcelo Semensato
Orientador

Dr. Fernando Silva Pereira
Membro da Banca Examinadora

Dr. André Luiz Silva Pereira
Membro da Banca Examinadora

Thiago Romeiro de Jesus
Coordenador do Curso de Engenharia Elétrica

DEDICATÓRIAS

Dedico essa dissertação ao meu pai Cleomar (*In memoriam*), à minha mãe Maria Eunice e meu irmão Rubens pelo carinho e incentivo aos estudos. Minha grande admiração e eterna gratidão. E àqueles que acreditaram que seria possível.

AGRADECIMENTOS

Para a realização de qualquer trabalho deve-se contar com a ajuda e o apoio de algumas pessoas e, portanto, a gratidão para com elas torna-se necessária e virtuosa.

Agradeço ao IFG e ao CNPQ pelo apoio financeiro durante os projetos de IC desenvolvidos.

Agradeço ao professor Semensato por ter me aturado nos últimos anos, mesmo não tendo demonstrado o meu melhor, e pela oportunidade, orientação e confiança de que poderia desenvolver um bom trabalho.

Agradeço aos meus amigos Cristian, Murilo, Kayê e Alex, pelas valiosas horas de trocas de informações, companheirismo e aborrecimentos, sem estes teria sido mais difícil e monótona esta jornada.

Agradeço aos meus amigos Edson, Paulo, Roberto e Stêfany que mesmo distantes sei que constituem grandes amizades.

Muito obrigado a todos!

“Mesmo com toda lógica, razão, ciência e estudiosos. Mesmo se as provas irrefutáveis forem jogadas na minha cara, ainda assim, acreditarei.”

Fábio Cavalcanti

RESUMO

As componentes harmônicas de uma onda são frequências da componente do sinal que são múltiplos inteiros da frequência fundamental. Em sistemas de energia elétrica elas são provocadas por cargas não lineares. O grau com que harmônicas podem ser toleradas em um sistema de alimentação depende da susceptibilidade da carga (ou da fonte de potência). Os equipamentos menos sensíveis, geralmente, são os de aquecimento (carga resistiva), para os quais a forma de onda não é relevante. Os mais sensíveis são aqueles que, em seu projeto, assumem a existência de uma alimentação senoidal como, por exemplo, equipamentos de comunicação e processamento de dados. No entanto, mesmo para as cargas de baixa susceptibilidade, a presença de harmônicas (de tensão ou de corrente) pode ser prejudicial, produzindo maiores esforços nos componentes e isolantes. Uma maneira de realizar a correção ativa do fator de potência desse tipo de distorção na onda é através de um filtro ativo, que é um tipo de filtro eletrônico analógico, distinguido dos outros pelo uso de um ou mais componentes ativos. Tipicamente este componente pode ser uma válvula termiônica, um transistor ou um amplificador operacional. A partir de estudos da Teoria da Potência Ativa e Reativa Instantânea (Teoria P-Q) e da Teoria da Potência Complexa Instantânea (TPCI) é possível elaborar filtros ativos de potência para a correção instantânea tanto de harmônicas, presentes na rede de energia elétrica, como do fator de potência de cargas não lineares. Ambas as teorias são ferramentas matemáticas que permitem identificar a potência reativa instantânea trifásica para a correção ativa do filtro bem como as componentes oscilantes da potência ativa. Inicialmente a Teoria P-Q foi desenvolvida por Akagi e difundida nos meios de pesquisa, já a TPCI é um estudo mais recente desenvolvido por Milanese baseado na primeira. Neste trabalho as teorias estão sendo apresentadas e comparadas.

Palavras – Chave: Potência Instantânea, Filtro Ativo, Harmônicas.

ABSTRACT

The harmonic components of a wave is the signal component frequencies that are integer multiples of the fundamental frequency. In electric power systems they are caused by nonlinear loads. The degree to which harmonics may be tolerated in a supply system depends upon the susceptibility of the load (or power source). Equipment less sensitive generally are of heating (resistive load), for which the waveform is irrelevant. The most sensitive are those who, in your project, assume the existence of a sinusoidal supply, eg, communications equipment and data processing. However, even for loads of low sensitivity, the presence of harmonics (voltage or current) can be harmful, producing major efforts in components and insulators. A way to perform the fix active power factor of this type of distortion wave is through an active filter, which is a type of analog electronic filter, distinguished from others by the use of one or more active components. Typically this component may be a thermionic valve, a transistor or an operational amplifier. From studies of the Theory of Instantaneous Reactive and Active Power (P-Q Theory) and the Theory of Instantaneous Power Complex (TIPC) can produce active power filters for instant fix both of harmonics present in the power grid, as the power factor of non-linear loads. Both theories are mathematical tools which enable the instantaneous reactive power for three-phase active correction filter and oscillating components of the active power. Initially to P-Q theory was developed by Akagi and spread in the means of research, since the TIPC is a more recent study developed by Milanese based on the first. In this study the theories is being presented and compared..

Keywords: Instantaneous Power, Active Filters, Harmonics.

Sumário

LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE SÍMBOLOS	12
1. INTRODUÇÃO	13
2. HARMÔNICAS: CAUSAS E EFEITOS.....	15
2.1. Taxa de Distorção Harmônica Total (TDH)	17
2.1.1. Vantagens e Desvantagens do Índice THD	18
2.2. Cargas Produtoras de Harmônicas	18
2.2.1. Cargas Lineares	18
2.2.2. Cargas Não Lineares.....	19
2.3. Normatização	19
2.3.1. IEC 61000-3-2 (2005).....	20
2.3.2. IEC 61000-3-4 (1998).....	22
2.3.3. IEE/ANSI 519 (1992)	24
2.3.4. PRODIST 8 (2012)	26
3. TEORIA DA POTÊNCIA ATIVA E REATIVA INSTÂNTANEA – TEORIA PQ	28
4. TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA INSTANTÂNEA – TPCI.....	33
5. FILTRO ATIVO	39
5.1. Filtro Ativo Paralelo	41
5.2. Filtro Ativo Série	44
5.3. Controle por Histerese	46
6. COMPARATIVO: TEORIA P-Q E TPCI	49
7. CONCLUSÃO E DISCUSSÕES.....	52
7.1. Trabalhos Futuros	53
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	54
ANEXO.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo da uma onda não senoidal de corrente decomposta e seu espectro de uma Lâmpada Fluorescente Compacta – LFC (Fonte: Harmônicas Geradas por LFC's: Sousa, E.da C. – Pós-Graduação UFU, 2011).....	16
Figura 2 - Rede Elétrica comprometida pela ação de uma carga não linear.	17
Figura 3 – Significado físico das potencias ativa média e reativa	30
Figura 4 - VEI's no plano complexo (Fonte: Semensato, 2005)	35
Figura 5 – Sistema bifásico $\alpha\beta$ (Fonte: Semensato, 2005).....	35
Figura 6 – Correntes de parcela reativa no plano complexo	37
Figura 7 – Forma de onda de tensão balanceada em sistema trifásico (Fonte: Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Unicamp).	41
Figura 8 – Diagrama de um filtro ativo paralelo (Fonte: Watanabe, 1998).	42
Figura 9 – Forma de onda de tensão desbalanceada em sistema trifásico (Fonte: Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Unicamp).	43
Figura 10 – Fluxo de potência α - β -0. (Fonte: Watanabe, 1998).....	44
Figura 11 – Diagrama básico de um filtro ativo série (Fonte: Watanabe, 1998).	45
Figura 12 – Circuito em malha Aberta com inversor de tensão como filtro de uma carga	46
Figura 13 – Bloco de controle.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Ordem, frequência e sequencia das harmônicas.....	15
Tabela 2 – Limites para equipamentos Classe A (IEC 61000-3-2:2009)	21
Tabela 3 – Limites para equipamentos Classe C (IEC 61000-3-2:2009).....	22
Tabela 4 – Limites para equipamentos Classe D (IEC 61000-3-2:2009).....	22
Tabela 5 – Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental (IEC 61000-3-4:1998).....	23
Tabela 6 – Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental, monofásicas e trifásicas desbalanceadas (IEC 61000-3-4:1998).....	24
Tabela 7 – Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental, trifásicas balanceadas (IEC 61000-3-4:1998).	24
Tabela 8 – Máximo limite para harmônicas ímpares em sistemas de distribuição de 120V até 69kV em % (IEE/ANSI 519:1992)	25
Tabela 9 – Máximo limite para harmônicas ímpares em sistemas de distribuição de 69,001kV até 161kV em % (IEE/ANSI 519:1992).....	25
Tabela 10 – Máximo limite para harmônicas ímpares em sistemas de distribuição de alta tensão – maior do que 161KV e Sistemas de geração e cogeração isolados em % (IEE/ANSI 519:1992).....	25
Tabela 11 – Limites percentuais de distorção da tensão de alimentação em relação à fundamental em % (IEE/ANSI 519:1992)	26
Tabela 12 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais em porcentagem da tensão fundamental – PRODIST 8	26
Tabela 13 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em porcentagem da tensão fundamental) – PRODIST 8	27

LISTA DE SÍMBOLOS

P	Potência Ativa
Q	Potência Reativa
S	Potência Complexa
H	Potência Harmônica
φ	Ângulo entre corrente e eixo real
θ	Ângulo entre tensão e eixo real
p	Potência ativa instantânea trifásica de Akagi
q	Potência reativa instantânea trifásica de Akagi
p(t)	Potência ativa instantânea
\tilde{S}	Potência complexa instantânea de Milanese
\tilde{V}	Vetor espacial instantâneo tensão de Milanese
\tilde{I}	Vetor espacial instantâneo corrente de Milanese
\tilde{I}_q	Vetor espacial instantâneo corrente em quadratura com vetor espacial tensão
\bar{p}	Parte média de p
\tilde{p}	Parte oscilante de p
\bar{q}	Parte média de q
\tilde{q}	Parte oscilante de q
v_a	Tensão instantânea na fase a
i_a	Corrente instantânea na fase a

1. INTRODUÇÃO

A Eletrônica de Potência é hoje uma das ciências de mais destaque na área de sistemas de controle e transformação de energia. Seu principal foco é o estudo dos semicondutores como forma de matéria prima para componentes eletrônicos. Componentes esses, utilizados principalmente na construção de fontes chaveadas, por exemplo, amplamente utilizadas nos sistemas eletrônicos de potência.

Os conversores, também interpretados como fontes chaveadas, surgiram com o intuito de substituir as fontes reguladas convencionais, que são de tipos lineares, volumosas, pesadas e dissipativas, por fontes compactas com alto rendimento. O avanço da microeletrônica e com a necessidade cada vez maior de se produzir equipamentos compactos e de baixo consumo, as fontes chaveadas começaram a ser empregadas generalizadamente.

Esses avanços propiciaram o desenvolvimento de diversos equipamentos eletrônicos que aperfeiçoaram tanto atividades pessoais quanto atividades do sistema de produção, entretanto há um valor a se pagar por tais facilidades, nesse contexto quando há um grande número de computadores pessoais (cargas monofásicas), fontes de alimentação ininterrupta (UPS's), inversores de frequência variável (CA e CC) ou qualquer outro dispositivo eletrônico usando fontes interruptoras de estado sólido para converter a entrada CA para CC criam harmônicas por arrancos abruptos de correntes, ao invés de uma forma harmoniosa senoidal.

As correntes harmônicas na rede elétrica percorrem a linha de transmissão e podem afetar diversas cargas ligadas a esta rede, causando diversos danos à sua operação. As cargas sensíveis às tensões de 60 Hz, principalmente aparelhos eletrônicos, podem queimar ou ter um mau funcionamento, pois as ondas distorcidas têm componentes harmônicas de várias frequências, múltiplas da frequência fundamental. As componentes harmônicas podem ser obtidas pela decomposição em série de Fourier da onda total.

Outros efeitos da distorção harmônica são o aquecimento de cabos, do neutro da rede elétrica e de motores de indução trifásico.

Quando na linha há componentes harmônicos se torna difícil o cálculo da potência utilizando os fasores convencionais, principalmente no que se trata da definição de potência reativa e sua correção. Por isso surgiram novas abordagens

sobre o cálculo da potência, tais estudos resultaram na Teoria da Potência Ativa e Reativa Instantânea de Akagi (1983) e posteriormente na Teoria da Potência Complexa Instantânea de Milanese (1993).

Estas teorias permitem o estudo da potência ativa e reativa instantânea em casos de distorção harmônica e dão base matemática para projetos de filtros para correção da potência reativa excedente e do fator de potência.

A Teoria da Potência Complexa Instantânea (TPCI) foi proposta por Milanese (1993), com base na potência instantânea de Akagi (1983). A teoria de Akagi propõe a decomposição escalar das tensões e correntes trifásicas nos eixos, real e imaginário. Decompondo a corrente e tensão trifásica é possível calcular as potências ativas e reativas instantâneas da rede elétrica trifásica.

A nova teoria de Milanese propõe o uso vetorial da potência instantânea de Akagi. Pelo uso vetorial é possível enxergar melhor as variações das grandezas físicas da rede elétrica. Possibilita obter a potência ativa e reativa instantânea trifásica como também a potência instantânea reativa e ativa para uma única fase tanto para sistemas equilibrados como para sistemas desequilibrados e/ou não senoidais.

Esta nova abordagem permite a análise da rede trifásica com mais eficiência para componentes harmônicos. A TPCI está sendo estudada por alguns pesquisadores no intuito de implementar aos poucos em disciplinas como circuitos elétricos, que tratam apenas de sistemas equilibrados e senoidais.

2. HARMÔNICAS: CAUSAS E EFEITOS

Harmônica nada mais é do que a componente de uma onda periódica cuja frequência é um múltiplo inteiro da frequência fundamental (no caso da energia elétrica, 60 Hz). As harmônicas são um fenômeno contínuo e não devem ser confundidas com fenômenos de curta duração.

As harmônicas ainda podem ser classificadas quanto a sua ordem, a frequência e sequencia. A ordem esta relacionada ao múltiplo da frequência fundamental enquanto a sequencia pode ser positiva, negativa ou nula. Há ainda uma distribuição entre pares e ímpares, a primeira tem origem da corrente contínua já a outra está originada da corrente alternada. No geral tende-se a encontrar nas instalações elétricas as de ordem ímpar, as de ordem par estão mais ligadas à presença de componente continuas causando assimetrias.

Para um melhor entendimento, em um sistema de quatro condutores, sendo 3 fases e o neutro, o efeito das harmônicas ocorre da seguinte forma:

- Harmônicas de sequencia positiva e negativa provocam aquecimento nos condutores de fase (efeito pelicular);
- Harmônicas de sequencia nula, ou zero, somam-se algebricamente no condutor de neutro;
- Podem provocar até mesmo a explosão de bancos capacitores.

Tabela 1 – Ordem, frequência e sequencia das harmônicas.

Ordem	Frequência (Hz)	Sequencia
1	60	+
2	120	-
3	180	0
4	240	+
5	300	-
6	360	0
n	n*60	(+,-,0)

Quando se aplica uma tensão senoidal a uma carga linear, toda a corrente flui na frequência fundamental do respectivo sistema de fornecimento CA. Desse modo um sistema de 60 Hz produzirá somente uma corrente com 60 Hz em uma carga linear.

Porém, quando se trata de uma carga não linear essa situação modifica

radicalmente, sua linha de curva faz com que a aplicação de tensão de 60 Hz gere uma corrente com mais de uma frequência, sendo essas frequências, múltiplos inteiros da frequência do sistema CA. Essas correntes são chamadas harmônicas. Com este tipo de carga não é possível fazer uma previsão sobre a relação corrente-tensão como é feita para cargas lineares.

Ondas periódicas não senoidais podem ser decompostas em uma série infinita de ondas senoidais com magnitude e ângulos de fases a partir da Série de Fourier, conforme mostrado pela equação 1, sendo a primeira componente a fundamental, as outras componentes sendo frequências múltiplas desta e uma componente CC para complemento, mostrada pela Figura 1.

$$y(t) = y_0 + \sum_{n=1}^{\infty} y_n \sqrt{2} \sin(n\omega t - \varphi_n) \quad (\text{Eq. 1})$$

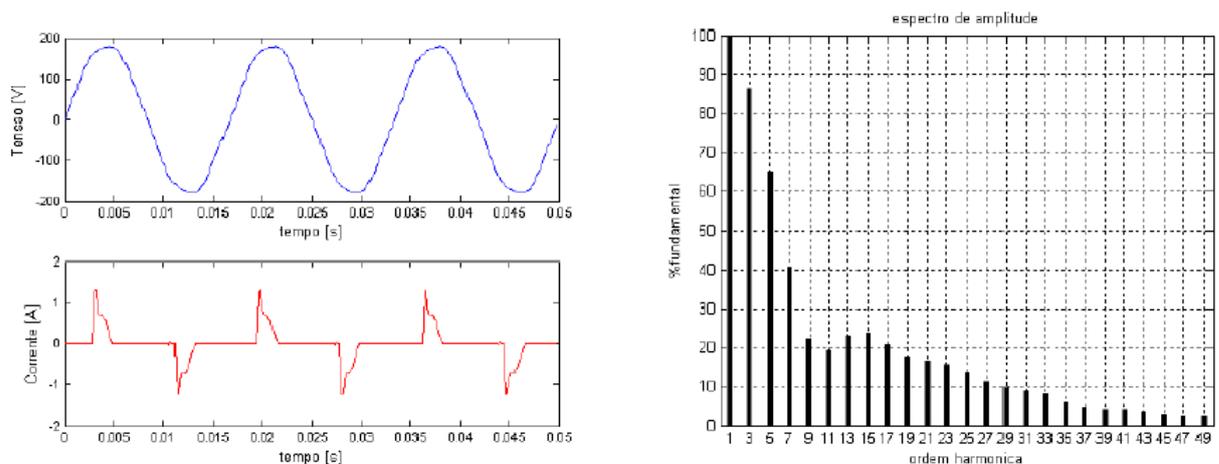


Figura 1 - Exemplo da uma onda não senoidal de corrente decomposta e seu espectro de uma Lâmpada Fluorescente Compacta – LFC (Fonte: Harmônicas Geradas por LFC's: Sousa, E.da C. – Pós-Graduação UFU, 2011).

Ondas não senoidais simétricas geram, basicamente, apenas componentes de ordem ímpar, como pode ser visto no espectro acima. Aparelhos convencionais não medem o valor RMS verdadeiro de harmônicas, mas há aparelhos de medição modernos que utilizam essa decomposição para obter este valor além dos espectros.

Essa onda, gerada pelas cargas não lineares, afeta completamente o sistema elétrico, distorcendo a onda de corrente. A onda distorcida percorre todo o

circuito e provoca quedas de tensões não lineares nas impedâncias de linha afetando outras cargas (Figura 2).

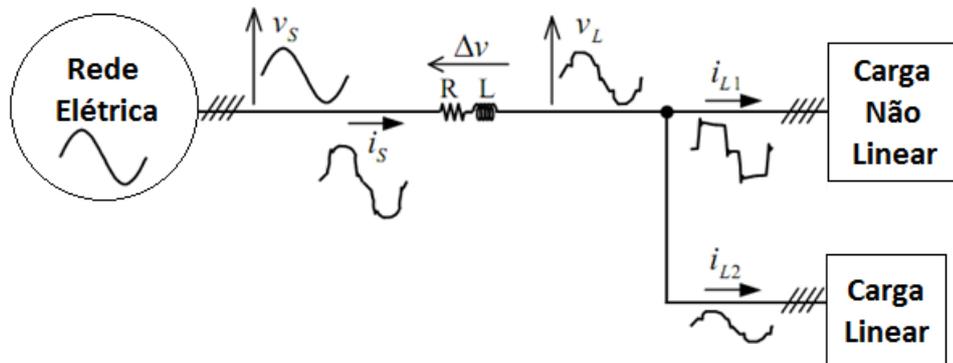


Figura 2 - Rede Elétrica comprometida pela ação de uma carga não linear.

Como pode ser verificado acima há uma completa deteriorização do sistema acarretando no surgimento de diversos efeitos, tais como:

- Correntes no neutro, devido presença de 3ª harmônica;
- Perdas por Efeito Skin;
- Aumento das perdas nos condutores por Efeito Joule;
- Vibração em máquinas;
- Erros de medição dos aparelhos tradicionais;
- Atuação de reles e disjuntores indevidamente;
- Queima de motores de indução;
- Danificação de capacitores destinados à correção de FP;
- Mau funcionamento de equipamentos sensíveis.

Para solucionar os problemas de harmônicas podemos utilizar: filtros passivos, transformadores de separação e redução de harmônicas e filtros ativos, sendo este último o alvo deste trabalho.

2.1. Taxa de Distorção Harmônica Total (TDH)

Determina o quanto a corrente ou a tensão é afetada pelas componentes harmônicas em um dado ponto da instalação.

Há duas formas de mensura-la:

$$TDH_f = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{h_1} * 100\% \quad (Eq. 2)$$

$$TDH_r = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + (h_4)^2 + \dots + (h_n)^2}}{\sqrt{(h_1)^2 + (h_2)^2 + (h_3)^2 + \dots + (h_n)^2}} * 100\% \quad (Eq. 3)$$

A primeira esta relacionada à componente fundamental enquanto a outra considera o sinal total. Entretanto é válido ressaltar que ambas, na falta das componentes harmônicas o valor de TDH será zero, indicando que quanto menor o resultado menos distorcido o sinal está em relação a fundamental.

Nesse contexto há dois valores definidos para THD sendo um para a tensão, denominando THDv, e outro para corrente, o THDi, indicando o grau de distorção de ambas. Sendo o THDv produzido pela fonte de geração como uma consequência da circulação das correntes, já distorcidas, dentro da instalação, enquanto a THDi está intimamente ligada as cargas.

2.1.1. Vantagens e Desvantagens do Índice THD

Assim como todo método de mensuração o THD têm seus prós e contras.

Dentre os prós temos:

- Facilmente calculado;
- Índice mais comum da área de Qualidade de Energia (QE);
- Permite uma rápida medida do grau de distorção;
- Tensão RMS pode ser calculada através da THD.

Dentre os contras:

- Informação do espectro é perdida;
- Sinais de diferentes frequências são tratados igualmente.

2.2. Cargas Produtoras de Harmônicas

2.2.1. Cargas Lineares

São àquelas cargas constituídas por resistências, indutâncias e capacitâncias, sendo as suas formas de onda da tensão e da corrente sempre

senoidais.

2.2.2. Cargas Não Lineares

São àquelas que possuem dispositivos como diodos, tiristores, transistores, quase todos sendo utilizados ininterruptamente. Funcionam em dois estados:

- Condução – onde o interruptor está fechado, permitindo a corrente ter valores elevados e tensões quase nulas, assim há pouca dissipação de potência;
- Bloqueio – onde o interruptor está aberto, aqui a tensão e corrente invertem seus papéis, logo também há pouca dissipação de potência.

Estas cargas são as responsáveis pelo aparecimentos das harmônicas no sistema de energia.

2.3. Normatização

Existem alguns parâmetros que podem ser estabelecidos a fim de controlar a presença de harmônicos. Podem-se destacar duas importantes normas internacionais para controle e calculo das harmônicas, a IEC 61000-3-2 e a IEEE 519-1992.

A IEC 61000-3-2 trata da limitação de correntes harmônicas (≤ 16 A por fase) injetadas no sistema de abastecimento público além de especificar os limites das componentes harmônicas da corrente de entrada que podem ser produzidos pelo equipamento testado sob condições específicas. Essa parte da IEC 61000 é aplicável aos equipamentos elétricos e eletrônicos, com uma corrente de entrada até e incluindo 16 A por fase, e destinado a ser ligado a sistemas de distribuição pública de baixa tensão.

A IEEE 519 é um conjunto de recomendações para práticas e requisitos para controle de harmônicas no sistema elétrico de potência e indica métodos de medição e limites de distorção. Os limites estabelecidos referem-se aos valores medidos no ponto de acoplamento comum (point of common coupling - PCC), e não em cada equipamento individual. A filosofia é que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação.

Apesar de não haver uma normatização brasileira quanto ao controle da qualidade de energia, possui-se uma série de recomendações como os Procedimentos de distribuição de energia elétrica no sistema elétrico nacional - PRODIST 8 – qualidade de energia elétrica. Onde se propõe valores para a distorção harmônica da tensão no sistema de distribuição.

2.3.1. IEC 61000-3-2 (2005)

Esta norma trata dos limites para emissão de harmônicas de corrente (menor ou igual que 16 A por fase).

Trata da limitação de correntes harmônicas injetadas no sistema de abastecimento público, especificando os limites das componentes harmônicas da corrente de entrada que podem ser produzidos pelo equipamento testado sob condições específicas.

Essa parte da IEC 61000 é aplicável aos equipamentos eletrônicos, com uma corrente de entrada até e incluindo 16A por fase, e destinado a ser ligado a sistemas de distribuição pública de baixa tensão. Também incluem equipamento de soldadura não profissional, com entrada de mesma faixa de corrente.

Os testes de acordo com esta norma são os ensaios de tipo, que é o mais simples dos modelos de certificação. Este ensaio fornece uma comprovação de conformidade de um item, em um dado momento. É uma operação de ensaio, única no seu gênero, efetuada de uma só vez, limitando aí os seus efeitos.

Ainda nesta norma há uma classificação dos equipamentos com o propósito de limitação da corrente harmônica, conforme descritas abaixo:

- Classe A – corresponde os equipamentos com alimentação trifásica equilibrada, aparelhos de uso doméstico (excluindo os classe D), ferramentas, exceto as portáteis, “dimmers” para lâmpadas incandescentes, equipamentos de áudio, e todos os demais não contemplados nas demais classes;
- Classe B – corresponde às ferramentas portáteis, equipamentos de arco de solda não profissionais;
- Classe C – corresponde os dispositivos de iluminação, equipamentos de potência ativa de entrada superior a 25W;

- Classe D – integra o Item 6.6.2 presente na norma, onde se encontram os computadores pessoais, monitores de vídeo e aparelhos de televisão, caso a corrente de entrada apresente a forma mostrada na figura abaixo; sendo que a potência ativa de entrada deve ser igual ou inferior a 600 W, medida esta feita obedecendo às condições de ensaio estabelecidas na norma (que variam de acordo com o tipo de equipamento).

Abaixo estão relacionadas às tabelas da norma referentes à ordem das harmônicas e a tolerância permitida de corrente geradas por elas.

Tabela 2 – Limites para equipamentos Classe A (IEC 61000-3-2:2009)

Ordem da harmônica	Máxima corrente harmônica permitida
N	A
Harmônicas ímpares	
3	2,30
5	1,14
7	0,77
9	0,40
11	0,33
13	0,21
$15 < n \leq 39$	$0,15 \times 15/n$
Harmônicas pares	
2	1,08
4	0,43
6	0,30
$8 < n \leq 40$	$0,23 \times 8/n$

Para a obtenção dos valores aceitos para a Classe B basta multiplicar o valores da Tabela 3 por 1,5.

Tabela 3 – Limites para equipamentos Classe C (IEC 61000-3-2:2009)

Ordem da harmônica N	Máxima corrente harmônica permitida expressa em porcentagem da frequência fundamental
2	2
3	$30 \times \alpha^*$
5	10
7	7
9	5
$11 < n \leq 39$ (somente harmônicas ímpares)	3
* α é o fator de potência do circuito	

Tabela 4 – Limites para equipamentos Classe D (IEC 61000-3-2:2009)

Ordem da harmônica N	Máxima corrente harmônica permitida por W mA/W	Máxima corrente harmônica permitida A
3	3,40	2,30
5	1,90	1,14
7	1,00	0,77
9	0,50	0,40
11	0,35	0,33
$13 < n \leq 39$ (somente harmônicas ímpares)	$3,85/n$	Ver tabela para classe A

2.3.2. IEC 61000-3-4 (1998)

Esta norma trata da limitação das emissões de correntes harmônicas em sistemas de abastecimento de energia de baixa tensão para equipamentos com corrente nominal superior a 16A.

As recomendações deste relatório técnico são aplicáveis aos equipamentos elétricos e eletrônicos com uma entrada de corrente nominal superior a 16 A por fase e destinados a ser ligados às redes públicas de baixa tensão de corrente alternada e sistemas de distribuição dos seguintes tipos:

- Tensão nominal até 240 V, monofásico, dois ou três fios;
- Tensão nominal até 600 V, trifásico, três ou quatro fios;
- Frequência nominal de 50 Hz ou 60 Hz.

Estas recomendações buscam especificar as informações necessárias para

permitir que as autoridades avaliem a oferta de equipamentos quanto de perturbação harmônica e tempo para decidir ou não se o equipamento é aceitável para a conexão que diz respeito ao aspecto da distorção harmônica.

Os limites para distorção harmônica em equipamentos que possuem potência aparente menor ou igual a 33 vezes a potência de curto-circuito (relação entre a tensão nominal ao quadrado e a impedância de curto-circuito) da instalação.

Abaixo estão relacionadas às tabelas da norma referentes aos limites individuais de corrente para cada harmônico em relação à fundamental.

Tabela 5 – Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental (IEC 61000-3-4:1998)

Ordem da harmônica n	Harmônico admissível I_n/I_1 %	Ordem da harmônica n	Harmônico admissível I_n/I_1 %
3	21,60	21	$\leq 0,60$
5	10,70	23	0,90
7	7,20	25	0,80
9	3,80	27	$\leq 0,60$
11	3,10	29	0,70
13	2,00	31	0,70
15	0,70	≤ 33	$\leq 0,60$
17	1,20		
19	1,10	Sempre	$\leq 8/n$ ou $\leq 0,60$

Caso o equipamento que está sendo analisado exceda os limites estabelecido pela tabela acima, e se a potência de curto-circuito (R_{scc}) permitir, outros limites podem ser aplicados. Se este for monofásico ou trifásico desbalanceado, é possível utilizar os limites da tabela abaixo, sem exceder a relação $16/n$ %. Nesta situação quanto maior for o valor de potência de curto-circuito, maior será o limite de distorção tolerado.

Tabela 6 – Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental, monofásicas e trifásicas desbalanceadas (IEC 61000-3-4:1998).

Mínimo Rsce	Fator de distorção harmônica admissível %		Limites individuais de harmônico admissível I_n/I_1 %					
	THD	PWHD	I_3	I_5	I_7	I_9	I_{11}	I_{13}
66	25	25	23	11	8	6	5	4
120	29	29	25	12	10	7	6	5
175	33	33	29	14	11	8	7	6
250	39	39	34	18	12	10	8	7
350	46	46	40	24	15	12	9	8
450	51	51	40	30	20	14	12	10
600	57	57	40	30	20	14	12	10

Se o equipamento seja trifásico equilibrado, respeitando o limite de $16/n$ %, os limites são descritos na tabela a seguir:

Tabela 7 – Limites individuais de harmônicos de corrente em % da fundamental, trifásicas balanceadas (IEC 61000-3-4:1998).

Mínimo Rsce	Fator de distorção harmônica admissível %		Limites individuais de harmônico admissível I_n/I_1 %			
	THD	PWHD	I_5	I_7	I_{11}	I_{13}
66	16	25	14	11	10	8
120	18	29	16	12	11	8
175	25	33	20	14	12	8
250	35	39	30	18	13	8
350	48	46	40	25	15	10
450	58	51	50	35	20	15
600	70	57	60	45	25	18

2.3.3. IEE/ANSI 519 (1992)

Trata-se de um documento de recomendação, por parte do IEEE, para práticas e requisitos para controle de harmônicas no sistema elétrico de potência, onde descreve os principais fenômenos causadores de distorção harmônica, indica métodos de medição e limites de distorção.

Seu enfoque é diverso daquele da IEC 61000-3-2, uma vez que os limites estabelecidos aqui se referem aos valores medidos no chamado ponto de acoplamento comum (point of common coupling - PCC), e não para cada equipamento individual. Sendo assim quanto maior a corrente de curto-circuito (I_{cc})

se comparada à corrente de carga, maiores são as distorções de corrente admissíveis, uma vez que elas irão distorcer em menor intensidade a tensão no PCC, logo quanto mais se eleva o nível de tensão, menores serão os limites aceitáveis.

A ideia estabelecida é que não interessa ao sistema o que ocorre dentro de uma instalação, mas sim o que ela reflete para o exterior, ou seja, para os outros consumidores conectados à mesma alimentação.

As tabelas abaixo indicam os limites de correntes para sistemas de distribuição de baixa e de alta tensão. As componentes harmônicas pares estão limitadas a 25% dos valores das tabelas de 8 a 10.

Tabela 8 – Máximo limite para harmônicas ímpares em sistemas de distribuição de 120V até 69kV em % (IEE/ANSI 519:1992)

Icc/Io	<11	11≤n<17	17≤n<23	23≤n<35	35≤n	TDD (%)
<20	4,00	2,00	1,50	0,60	0,30	5,00
20-50	7,00	3,50	2,50	1,00	0,50	8,00
50-100	10,00	4,50	4,00	1,50	0,70	12,00
100-1000	12,00	5,50	5,00	2,00	1,00	15,00
>1000	15,00	7,00	6,00	2,50	1,40	20,00

Tabela 9 – Máximo limite para harmônicas ímpares em sistemas de distribuição de 69,001kV até 161kV em % (IEE/ANSI 519:1992)

Icc/Io	<11	11≤n<17	17≤n<23	23≤n<35	35≤n	TDD (%)
<20	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
20-50	3,50	1,75	1,25	0,50	0,25	4,00
50-100	5,00	2,25	2,00	0,75	0,35	6,00
100-1000	6,00	2,75	2,50	1,00	0,50	7,50
>1000	7,50	3,50	3,00	1,25	0,70	10,00

Tabela 10 – Máximo limite para harmônicas ímpares em sistemas de distribuição de alta tensão – maior do que 161KV e Sistemas de geração e cogeração isolados em % (IEE/ANSI 519:1992)

Icc/Io	<11	11≤n<17	17≤n<23	23≤n<35	35≤n	TDD (%)
<50	2,00	1,00	0,75	0,30	0,15	2,50
≥50	3,00	1,50	1,15	0,45	0,22	3,75

Tabela 11 – Limites percentuais de distorção da tensão de alimentação em relação à fundamental em % (IEE/ANSI 519:1992)

Tensão no PCC	Harmônicas Individuais	THD_v
69kV e abaixo	3,00	5,00
69001V até 161kV	1,50	2,50
Acima de 161kV	1,00	1,50

2.3.4. PRODIST 8 (2012)

Os Procedimentos de Distribuição – PRODIST – são documentos elaborados pela ANEEL que normatizam e padronizam as atividades técnicas relacionadas ao funcionamento e desempenho dos sistemas de distribuição de energia elétrica.

O PRODIST contém, atualmente, 9 Módulos, sendo que o oitavo módulo trata da Qualidade de Energia. Este documento estabelece critérios de amostragem, os valores de referência e os procedimentos relativos à qualidade do produto em regime permanente ou transitório.

Tabela 12 - Valores de referência globais das distorções harmônicas totais em porcentagem da tensão fundamental – PRODIST 8

Tensão nominal do Barramento	Distorção Harmônica Total de Tensão (DTT) [%]
$V_n \leq 1\text{kV}$	10
$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	8
$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	6
$69\text{kV} < V_n < 230\text{kV}$	3

Tabela 13 - Níveis de referência para distorções harmônicas individuais de tensão (em percentagem da tensão fundamental) – PRODIST 8

Ordem Harmônica		Distorção Harmônica Individual de Tensão [%]			
		$V_n \leq 1\text{kV}$	$1\text{kV} < V_n \leq 13,8\text{kV}$	$13,8\text{kV} < V_n \leq 69\text{kV}$	$69\text{kV} < V_n < 230\text{kV}$
Ímpares não múltiplas de 3	5	7,50	6,00	4,50	2,50
	7	6,50	5,00	4,00	2,00
	11	4,50	3,50	3,00	1,50
	13	4,00	3,00	2,50	1,50
	17	2,50	2,00	1,50	1,00
	19	2,00	1,50	1,50	1,00
	23	2,00	1,50	1,50	1,00
	25	2,00	1,50	1,50	1,00
	> 25	1,50	1,00	1,00	0,50
Ímpares múltiplas de 3	3	6,50	5,00	4,00	2,00
	9	2,00	1,50	1,50	1,00
	15	1,00	0,50	0,50	0,50
	21	1,00	0,50	0,50	0,50
	> 21	1,00	0,50	0,50	0,50
Pares	2	2,50	2,00	1,50	1,00
	4	1,50	1,00	1,00	0,50
	6	1,00	0,50	0,50	0,50
	8	1,00	0,50	0,50	0,50
	10	1,00	0,50	0,50	0,50
	12	1,00	0,50	0,50	0,50
	> 12	1,00	0,50	0,50	0,50

3. TEORIA DA POTÊNCIA ATIVA E REATIVA INSTÂNTANEA – TEORIA PQ

Como mencionado anteriormente esta teoria propõe o desenvolvimento de filtros ativos de potência que permitem responder, de uma forma eficaz e dinâmica, às situações de distorções e de desequilíbrio em sistemas elétricos. Para o estudo matemático, Akagi (1983), realizou a transformação do sistema estacionário a-b-c para um sistema de coordenadas α - β .

A equação da potência instantânea para um sistema trifásico é:

$$p(t) = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 = P_a + P_b + P_c = P_\alpha + P_\beta + P_0 \quad (Eq.4)$$

A transformação de coordenadas é conhecida como Transformada de Clark (Akagi et al., 2007), que é uma transformação algébrica de um sistema de três fases (a, b, c) para um sistema de duas fases ortogonais (α , β) estacionárias, fazendo coincidir a fase α com a fase a (de referência).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (Eq.5)$$

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (Eq.6)$$

As equações 5 e 6 demonstram a transformação das tensões entre os dois sistemas. A transformação de corrente é obtida de forma análoga (equações 7 e 8).

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \sqrt{\frac{3}{2}} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 7})$$

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \sqrt{\frac{3}{2}} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\sqrt{\frac{3}{2}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 8})$$

Esta mudança de variáveis é favorável devido as frequentes situações onde temos $v_a + v_b + v_c = 0$ ou então $i_a + i_b + i_c = 0$, pois as componentes v_0 ou i_0 são nulas.

Akagi (1983) propôs uma variável q , para que o produto entre tensão e corrente passe a ficar adiantando 90° , da seguinte forma:

$$q(t) \triangleq v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \quad (\text{Eq. 9})$$

Desta forma, considerando v_0 ou i_0 nulos, o cálculo das potência é feito neste novo referencial e podemos escrever o sistema de equações como:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 10})$$

Partido deste sistema Watanabe (1998) calcula as correntes de α e β com base nas potências p e q e define as componentes de corrente:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \triangleq \begin{bmatrix} i_{\alpha P} \\ i_{\beta P} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha Q} \\ i_{\beta Q} \end{bmatrix} \quad (\text{Eq. 11})$$

$$i_{\alpha P} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} * p \quad (\text{Eq. 12})$$

$$i_{\alpha Q} = \frac{-v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} * q \quad (\text{Eq. 13})$$

$$i_{\beta P} = \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} * p \quad (\text{Eq. 14})$$

$$i_{\beta Q} = \frac{v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} * q \quad (\text{Eq. 15})$$

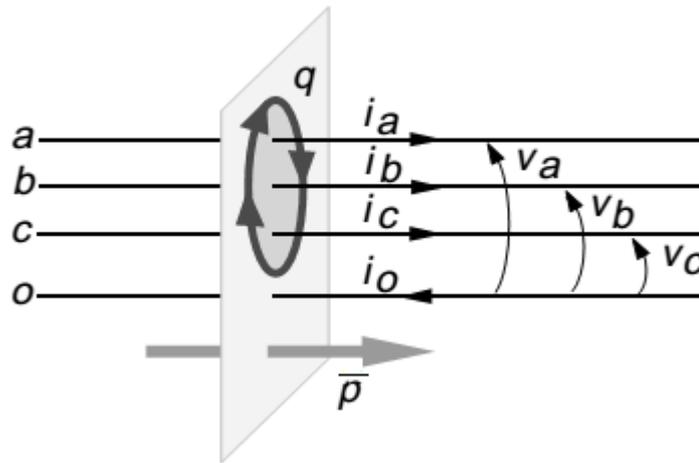


Figura 3 – Significado físico das potências ativa média e reativa

A potência reativa é a energia que está sendo trocada entre as fases do sistema trifásico e a potência ativa é aquela fornecida pelo sistema gerador.

Tendo como base as equações e figura apresentadas acima e considerando a presença de harmônicas no sistema, pela carga, por exemplo, é possível desenvolver uma forma de calcular as parcelas de potência devido aos harmônicos.

Partindo das equações 4 e 9 Watanabe (1998) faz as seguintes constatações:

$$p = v_{\alpha}i_{\alpha} + v_{\beta}i_{\beta} + v_0i_0 = P_{\alpha P} + P_{\beta P} \triangleq \bar{p} + \tilde{p} \quad (\text{Eq. 16})$$

$$q = v_{\alpha}i_{\beta} - v_{\beta}i_{\alpha} \triangleq \bar{q} + \tilde{q} \quad (\text{Eq. 17})$$

Sendo que o valor médio de p equivale à potência ativa trifásica e o valor médio de q equivale à potência reativa trifásica, além de:

$$\sqrt{\tilde{P}^2 + \tilde{Q}^2} = H \quad (Eq. 18)$$

Onde H é a potência harmônica e \tilde{P} e \tilde{Q} são os valores eficazes de \tilde{p} e \tilde{q} . Neste caso é possível eliminar a parcela de potência H através de filtros.

A partir das Equações 16 a 18 e considerando o visto nas Equações 12 a 15, podemos concluir que haverá as variáveis $i_{\alpha\tilde{p}}$, $i_{\alpha\tilde{q}}$, $i_{\beta\tilde{p}}$, $i_{\beta\tilde{q}}$.

Assim retirando a parcela média da potência ativa obtemos a componentes de corrente para \tilde{p} :

$$i_{\alpha\tilde{p}} = \frac{v_{\alpha}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} * \tilde{p} \quad (Eq. 19)$$

$$i_{\beta\tilde{p}} = \frac{v_{\beta}}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} * \tilde{p} \quad (Eq. 20)$$

Neste ponto podemos visualizar a possibilidade de compensar as parcelas reativas $i_{\alpha q}$, $i_{\beta q}$ e parcela oscilantes \tilde{p} através de fontes correntes $i_{\alpha c}$ e $i_{\beta c}$ além da:

$$i_{\alpha c} = i_{\alpha\tilde{p}} + i_{\alpha q} \quad (Eq. 21)$$

$$i_{\beta c} = i_{\beta\tilde{p}} + i_{\beta q} \quad (Eq. 22)$$

Daqui entende-se que $i_{\alpha q}$, $i_{\beta q}$, $i_{\alpha\tilde{p}}$ e $i_{\beta\tilde{p}}$ são as correntes a serem compensadas. Para tal estas são convertidas para o sistema a-b-c e têm seus sinais invertidos para serem injetadas no sistema.

Watanabe (1998) ressalta ainda que 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 idealizar compensadores de potência ativa. Pode-se se fazer compensadores com potência real positiva e neste caso ter um conversor CC/CA onde a corrente gerada estará em “fase” com a tensão trifásica. Entretanto, caso a potência seja negativa haverá um inversor funcionando como um retificador de fator de potência unitário, sem harmônicos na corrente. Este retificador será do tipo “Boost”, ou seja, elevador de tensão, com um sistema de

controle utilizando a teoria de potência ativa e reativa instantânea, além de ser um importante retificador quando a tensão CC tem de ser maior que a tensão pico-a-pico na CA.

Um caso de simulação da teoria p-q está descrito no Anexo.

4. TEORIA DA POTÊNCIA COMPLEXA INSTANTÂNEA – TPCI

A Teoria da Potência Complexa Instantânea (TPCI) foi proposta por Milanese (1993), com base na potência instantânea de Akagi (1983). A teoria de Akagi propõe a decomposição escalar das tensões e correntes trifásicas nos eixos, real e imaginário com base na transformação de Clarke (Semensato, 2005). Decompondo a corrente e tensão trifásica é possível calcular as potências ativas e reativas instantâneas da rede elétrica trifásica.

A transformada de Clarke realiza a transformação algébrica do sistema de três fases (a,b,c) para o sistema de duas fases ortogonais (α , β) estacionárias, coincide a fase α com a fase a. A transformação é mostrada na equação abaixo, aplicada ao sistema trifásico sem neutro (Ivanov, 1988).

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} * \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (Eq. 23)$$

A nova teoria de Milanese propõe o uso de vetores espaciais instantâneos da potência instantânea de Akagi. Pelo uso vetorial é possível enxergar melhor as variações das grandezas físicas da rede elétrica. Possibilita obter a potência ativa e reativa instantânea trifásica como também a potência instantânea reativa e ativa para uma única fase tanto para sistemas equilibrados como para sistemas desequilibrados e/ou não senoidais.

Milanese (1993) usa a expressão de vetor espacial instantâneo (VEI) dado pela Equação 24.

$$\tilde{V} = \frac{2}{3} (v_a + av_b + a^2v_c) \quad (Eq. 24)$$

Seguindo o conceito do sistema trifásico temos que:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (Eq. 25)$$

Esta transformação considera que as projeções dos VEI's nos eixos das máquinas trifásicas equivalem aos valores instantâneos das grandezas que estes representam.

O vetor espacial instantâneo corrente é obtido analogamente.

$$\tilde{I} = \frac{2}{3}(i_a + ai_b + a^2i_c) \quad (Eq. 26)$$

Estes vetores são complexos e giram com certa velocidade angular, que pode ser variada:

$$\tilde{V} = |\tilde{V}| e^{j\omega_V t} e^{j\phi_V} \quad (Eq. 27)$$

$$\tilde{I} = |\tilde{I}| e^{j\omega_I t} e^{j\phi_I} \quad (Eq. 28)$$

Onde:

$$\omega_V = \frac{d\phi_V}{dt} \quad (Eq. 29)$$

$$\omega_I = \frac{d\phi_I}{dt} \quad (Eq. 30)$$

Ao considerar um instante qualquer podemos dizer que os VEI's são:

$$\tilde{V} = |\tilde{V}| e^{j\phi_V} \quad (Eq. 31)$$

$$\tilde{I} = |\tilde{I}| e^{j\phi_I} \quad (Eq. 32)$$

Em sistemas sem distorção, e de sequencia positiva o vetor tensão resulta em:

$$\tilde{V} = V_p e^{j\omega t} e^{j\phi_V} \quad (Eq. 33)$$

Neste caso a equação considera a tensão de pico, a frequência da rede e o ângulo inicial para tensão, este último coincide com o ângulo inicial para tensão da fase a. Temos aqui um vetor com magnitude e velocidade angular constante.

Abaixo vemos os vetores em um determinado momento de tempo (Figura 4).

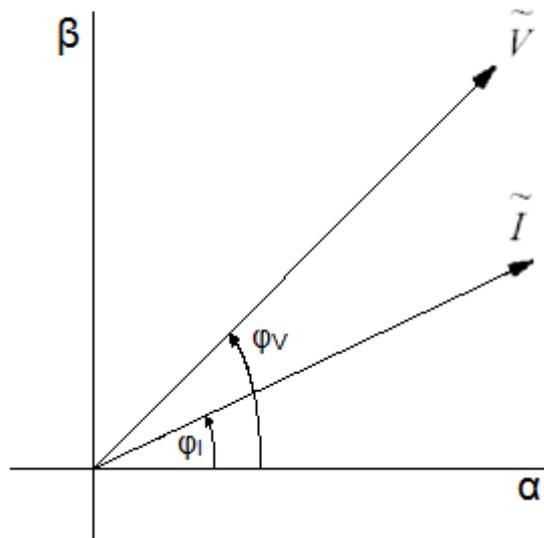


Figura 4 - VEI's no plano complexo (Fonte: Semensato, 2005)

Ainda podemos representar os vetores em sua forma cartesiana:

$$\tilde{V} = V_{\alpha} + jV_{\beta} \quad (\text{Eq. 34})$$

$$\tilde{I} = I_{\alpha} + jI_{\beta} \quad (\text{Eq. 35})$$

Desta forma temos uma transformação também dos sistemas elétricos para um sistema bifásico.

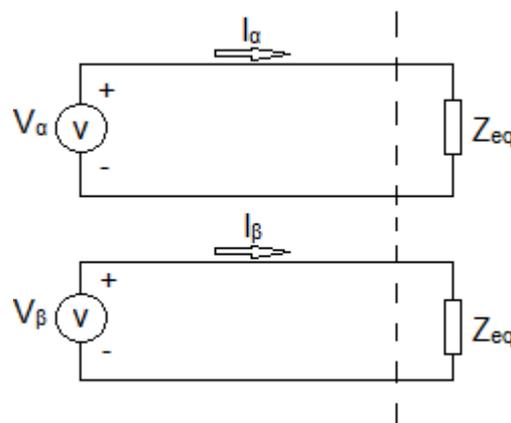


Figura 5 – Sistema bifásico $\alpha\beta$ (Fonte: Semensato, 2005)

Como comentando no início deste capítulo, o eixo α coincide com o eixo a , assim:

$$i_\alpha = \text{Real}\{\tilde{I}\} = I_\alpha \quad (\text{Eq. 36})$$

Usando como base as Equações 10, 16 e 17 proposta por Akagi (1983), Milanese (1993) propôs a potência complexa instantânea para sistemas trifásicos sem neutro, conforme equações abaixo:

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} \tilde{V} \tilde{I}^* = \frac{3}{2} (V_\alpha + jV_\beta)(I_\alpha - jI_\beta) \quad (\text{Eq. 37})$$

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}| e^{j\varphi} = |\tilde{S}| e^{j\varphi} \quad (\text{Eq. 38})$$

$$\tilde{S} = \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}| \cos \varphi + j \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}| \sin \varphi \quad (\text{Eq. 39})$$

Então temos:

$$\tilde{S} = P + jQ = \frac{3}{2} (V_\alpha I_\alpha + V_\beta I_\beta) + j \frac{3}{2} (V_\beta I_\alpha - V_\alpha I_\beta) \quad (\text{Eq. 40})$$

sendo,

$$P = \text{Real}\{\tilde{S}\} = \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}| \cos \varphi = \frac{3}{2} (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) \quad (\text{Eq. 41})$$

$$Q = \text{Imag}\{\tilde{S}\} = \frac{3}{2} |\tilde{V}| |\tilde{I}| \sin \varphi = \frac{3}{2} (v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (\text{Eq. 42})$$

Como verificado acima, a teoria da potência complexa instantânea retrata, assim como demonstrado por Akagi (1983), o valor instantâneo das potências complexa, ativa e reativa.

A partir dela também é possível obter o valor do fator de potência do sistema trifásico instantaneamente, que pode ter valor variável:

$$FPI = \frac{P}{|\tilde{S}|} = \cos \varphi \quad (\text{Eq. 43})$$

Temos que potência trifásica dissipada é:

$$P = \frac{3}{2} R |\tilde{I}|^2 \quad (\text{Eq. 44})$$

E a impedância vista pelo sistema trifásico é:

$$Z = \frac{\tilde{V}}{\tilde{I}} \quad (\text{Eq. 45})$$

A potência complexa instantânea reativa pode ser reescrita da seguinte forma:

$$Q = \frac{3}{2} \tilde{V} \tilde{I}_Q^* \quad (\text{Eq. 46})$$

$$I_{\alpha I_Q} = |\tilde{I}_Q| \sin\left(\frac{\pi}{2} - \theta_V\right) \quad (\text{Eq. 47})$$

$$I_{\beta I_Q} = |\tilde{I}_Q| \cos\left(\frac{\pi}{2} - \theta_V\right) \quad (\text{Eq. 48})$$

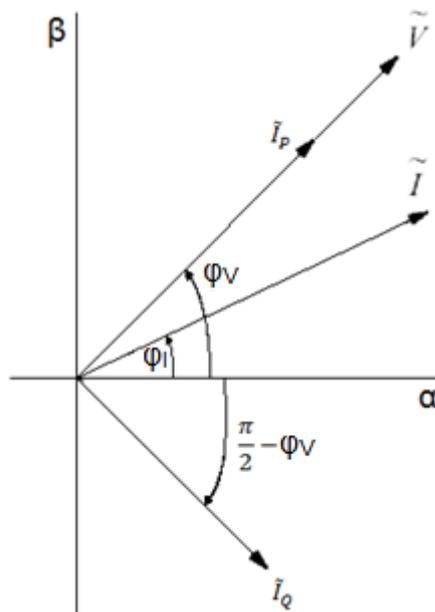


Figura 6 – Correntes de parcela reativa no plano complexo

Onde Q é a potência que deve ser corrigida e \tilde{I}_Q , que está em quadratura com \tilde{V} , é a corrente a ser compensada. Para tal esta corrente é projetada para o sistema a-b-c e invertida para ser injetada no sistema.

Nesta teoria ainda não está claro como proceder para a correção da parte oscilante da potência ativa.

5. FILTRO ATIVO

O uso crescente de cargas eletrônicas, com o intuito de melhorar a eficiência e o controle do sistema, aumenta a preocupação com os níveis de distorção harmônica tanto em instalações dos usuários finais quanto do próprio sistema de energia. Aplicações utilizando filtros passivos geram novas ressonâncias dentro do sistema, que dependem de condições específicas do sistema. Além disso, os filtros passivos muitas vezes precisam de um considerável super dimensionamento para conseguir realizar uma possível absorção do harmônico presente na rede. Tais filtros são coordenados conforme a potência reativa das cargas, entretanto há dificuldade em projetá-los para evitar principalmente a variação do fator de potência.

Filtros ativos têm a vantagem de serem capazes de compensar harmônicas. A filtragem ativa é uma opção quando há a necessidade de realizar uma correção do fator de potência no ponto de entrada de cada equipamento, ou conjunto deles.

Normalmente esta filtragem é realizada na onda de corrente com a finalidade de se obter uma nova forma de onda que seja compatível com a da tensão, ou seja, idealiza-se um conjunto de carga e filtro que represente uma carga resistiva, assim maximiza-se o fator de potência, minimizando a corrente eficaz retirada da fonte, mantendo a potência ativa da carga.

Quando se fala em correção de sistemas elétricos logo se recorre à teoria de potência ativa e reativa convencional, entretanto quando realizado um estudo mais detalhado sobre a mesma mostra que esta tem sua validade física confirmada apenas em sistemas que operam em regime permanente e sem distorções, em monofásico, e ainda balanceada no caso do trifásico, como descrito por Watanabe (1998).

Dito isto, temos problemas recorrentes a essa situação uma vez que inicialmente essa teoria foi desenvolvida para sistemas monofásicos e depois reestruturada para sistemas trifásicos como se este último comporta-se como se fosse três sistemas monofásicos, logo ignorando o acoplamento das fases. Outra situação é que essa ideia de potência reativa surgiu embasada em elementos indutivos e capacitivos, onde considera que a potência reativa está ligada ao armazenamento de energia, o que pode ser facilmente quebrada ao analisarmos um circuito simples de controle de luminosidade composto de um dimmer em uma lâmpada incandescente. E finalmente a teoria convencional deriva em base de

fasores e valores eficazes caracterizando uma técnica desenvolvida para apenas uma frequência, segundo Watanabe (1998). Logo como se trata de casos onde verifica a existência de diversas frequências no sistema seria errôneo utilizar tal teoria.

Em casos como esse podemos utilizar a Teoria P-Q, de Akagi (1983), a qual propõe a decomposição escalar das tensões e correntes trifásicas nos eixos real e imaginário, conforme demonstrando no capítulo 3. Decompondo a corrente e tensão trifásica é possível calcular as potências ativas e reativas instantâneas da rede elétrica trifásica permitindo responder de uma forma eficaz e dinâmica às situações de distorções e de desequilíbrio em sistemas elétricos.

A base da correção está nos filtros ativos de potência, que nada mais são que sistemas eletrônicos de potência instalados em série ou paralelo com a carga não linear, visando compensar seja as tensões harmônicas, seja correntes harmônicas geradas pela carga.

Os filtros atuam através de um processo de aplicação de correntes harmônicas contrárias àquelas produzidas pela carga não linear, promovendo a compensação reativa. Ele é composto por um inversor de corrente e um controlador.

O controlador, a partir da medida dos valores instantâneos das tensões e correntes na carga, calcula as correntes de compensação de referência para o inversor. O inversor, por sua vez, injeta as correntes de compensação requeridas pela carga de forma que as correntes nas fases da rede elétrica passam a ser senoidais e equilibradas.

Outra teoria que pode ser destacada é a Teoria da Potência Complexa Instantânea de Milanese (1993), que define a potência complexa a cada instante de tempo, baseada na transformação vetorial de um sistema trifásico (a-b-c) em um sistema bifásico (α e β), visto no capítulo 4.

Ainda sobre os filtros ativos, quando Akagi (1983) propôs a teoria de potência instantânea, havia o intuito de realizar o controle dos filtros ativos de potência. Nesse contexto foram propostos o filtro ativo paralelo (Akagi et al., 1984 e 1986) e o filtro série em conjunto com um filtro passivo (Peng et al., 1988).

Abaixo serão apresentados os fundamentos de operação para casos idealizados destes tipos de filtros.

5.1. Filtro Ativo Paralelo

Este filtro é composto por um inversor de fonte de tensão e seu controle. Este inversor funciona com malha de controle de corrente e tem como função realizar um curto-circuito das correntes indesejadas, geradas pela carga.

Tais correntes, em sua maioria, são os harmônicos, mas podem, em determinadas situações, ser de correntes na frequência da fundamental. Desta forma a grande preocupação no desenvolvimento deste tipo de projeto está em determinar de forma instantânea a referência de corrente que será sintetizada.

O caso mais simples de filtro ativo é quando as tensões estão equilibradas, ou seja, é composta apenas da componente fundamental com sequência positiva.

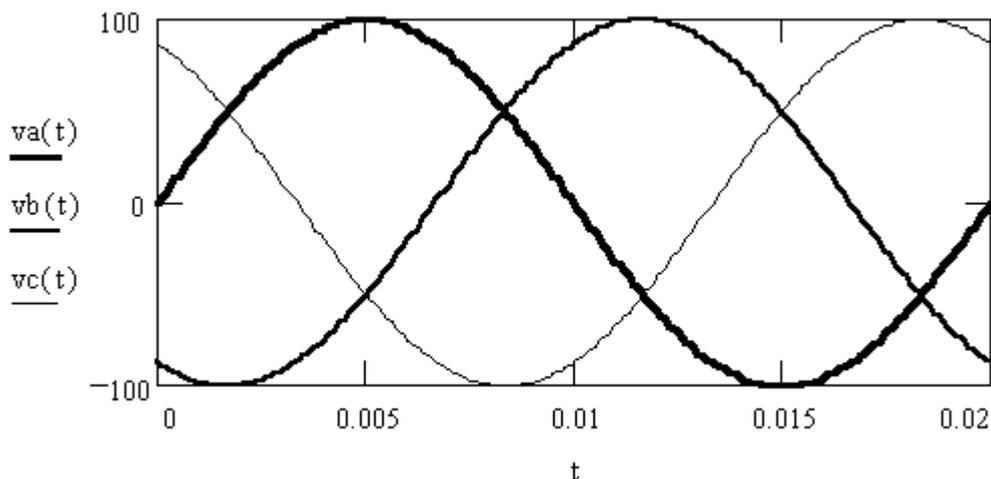


Figura 7 – Forma de onda de tensão balanceada em sistema trifásico (Fonte: Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Unicamp).

Segundo Watanabe (1998), usando como base de cálculo a teoria de potência ativa e reativa instantânea, as tensões trifásicas e as correntes de carga são medidas e transformadas para o sistema $\alpha\text{-}\beta\text{-}0$. A partir destas correntes calculam-se as potências ativa, reativa e de sequência 0, sendo que esta última é nula devido à tensão ser balanceada. Ainda assumimos a condição de que a carga possua apenas, em sua forma de onda de corrente, a componente fundamental e de também de sequência positiva e harmônicos, a potência real e imaginária terão apenas as componentes média e oscilante. Originalmente os filtros ativos se baseiam na ideia de curto-circuitar as correntes harmônicas da carga, sendo assim este fará o procedimento nas partes oscilantes das potências.

Sabendo destas duas potências oscilantes consegue-se determinar

instantaneamente as parcelas de correntes indesejáveis e desta forma obter as correntes de compensação no sistema $\alpha\text{-}\beta$ e posteriormente estas correntes de referenciadas no sistema a-b-c.

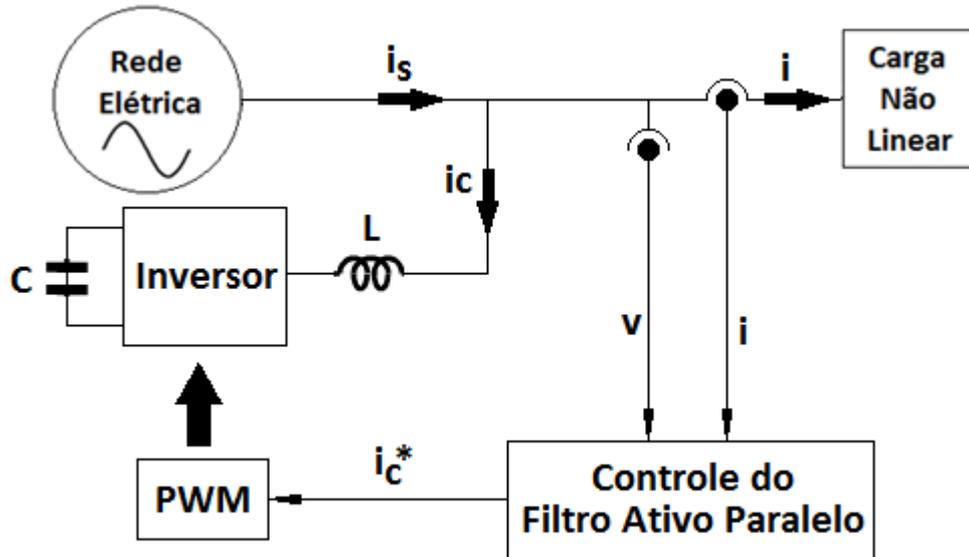


Figura 8 – Diagrama de um filtro ativo paralelo (Fonte: Watanabe, 1998).

Em um sistema onde não há harmônicos, a compensação é feita apenas em relação aos reativos da rede. Caso seja para compensar um desequilíbrio nas cargas à compensação deve ser feita na parte oscilante da potência reativa.

No projeto de filtros ativos, paralelo ou mesmo série, é normal o uso do controle da potência ativa média, 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).

Watanabe (1998) também descreve o caso do filtro ativo quando as tensões estão desequilibradas, ou seja, é composta apenas por componentes fundamentais de sequência positiva, negativa e zero.

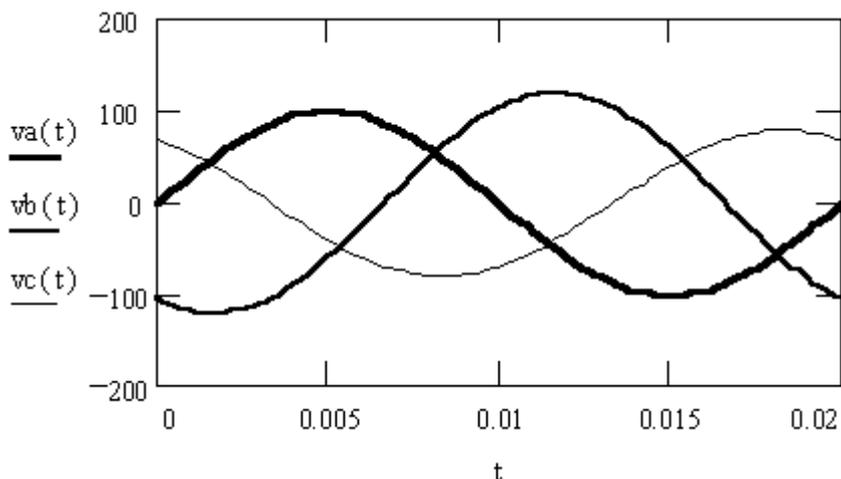


Figura 9 – Forma de onda de tensão desbalanceada em sistema trifásico (Fonte: Departamento de Sistemas e Controle de Energia, Unicamp).

Logo se uma carga for conectada entre a fase e o neutro ou mesmo entre fases será alimentada pelas fontes equivalentes de sequência positiva, de sequência negativa e de sequência zero. Neste caso um filtro ativo paralelo também será conectado e, portanto, não tem condições de eliminar a influência das tensões de sequência negativa e de sequência zero presentes sobre a carga. O filtro capaz de eliminar estas influências será o filtro série.

A figura abaixo indica um sistema onde a fonte de tensão contém as componentes de sequência positiva e zero. Considerando a carga como não linear e a corrente desta com componentes de sequência positiva e de sequência zero. Logo, há a potência de sequência zero. Nesta figura também está representado um filtro ativo paralelo cuja função é não permitir que os harmônicos e a corrente de sequência zero da carga fluam para a fonte. O controle deste filtro, para eliminar os harmônicos de corrente, é o mesmo do anterior. A compensação da corrente de sequência zero é realizada medindo-se tal corrente e ordenando que o filtro injete esta corrente no neutro. Esta compensação é muito simples, no entanto, pelo fato de possuir tensão de sequência zero, existirá também potência de sequência zero nos terminais do inversor acoplado ao filtro. Assim haverá também um valor médio e um valor oscilante desta potência.

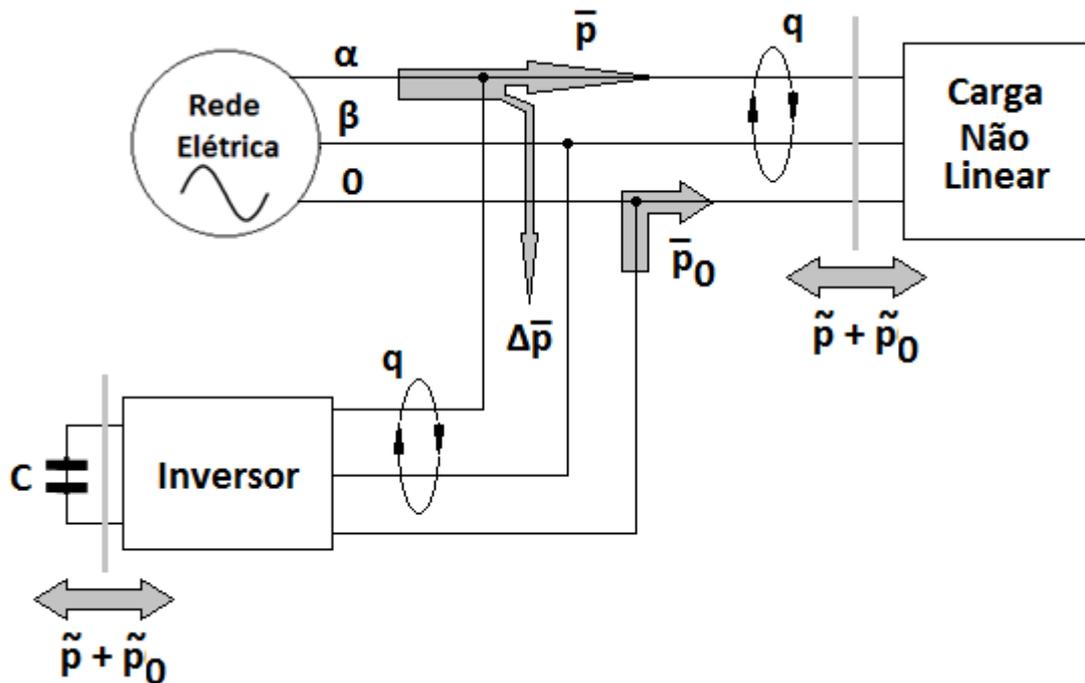


Figura 10 – Fluxo de potência α - β -0. (Fonte: Watanabe, 1998).

Com 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. Neste caso é interessante implementar no controlador do filtro ativo um artifício que dispense 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 da rede alternada. Esta potência tem de ser absorvida apenas da componente de sequência positiva; se esta variação for igual à potência média de sequência zero o balanço das potências de entrada e saída no inversor será nulo, bloqueando o descarregamento do capacitor. Assim, neste filtro paralelo, mesmo ocorrendo componentes de tensão de sequência zero na fonte não haverá corrente desta sequência fluindo por esta.

5.2. Filtro Ativo Série

O filtro ativo série, da mesma forma que o paralelo, é composto por um inversor com um capacitor no seu lado CC e conectado à rede através de um transformador.

Este filtro não é capaz de eliminar harmônicos de corrente gerados pela carga uma vez que este filtro está inserido em série com esta carga, exatamente o mesmo conceito dual que ocorre no filtro paralelo.

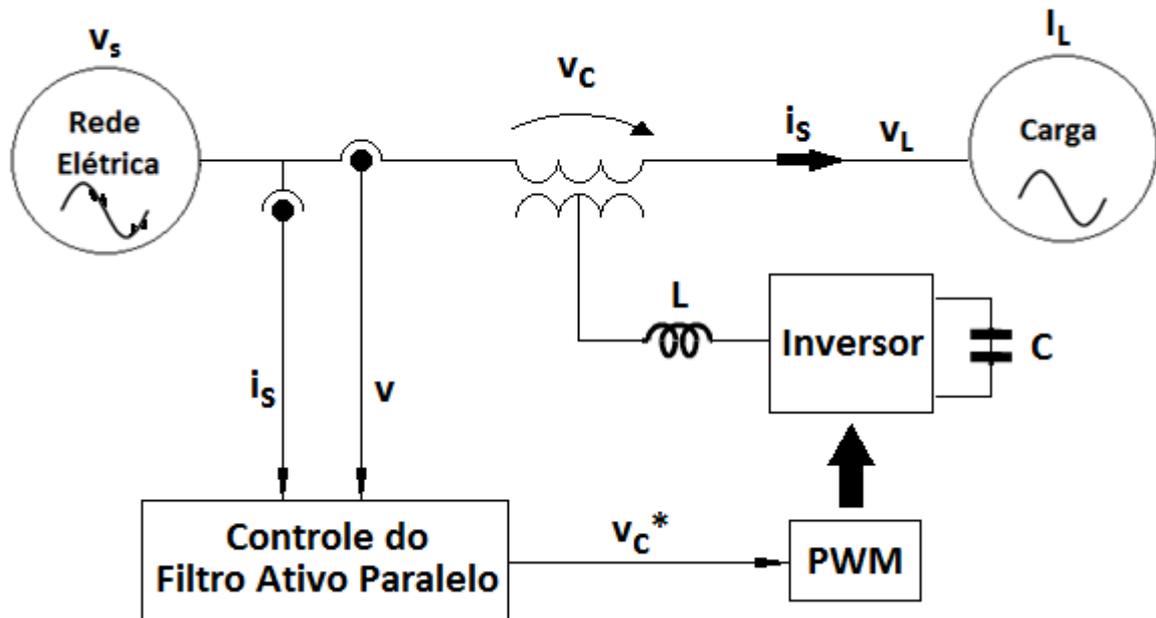


Figura 11 – Diagrama básico de um filtro ativo série (Fonte: Watanabe, 1998).

Conforme citado por Watanabe (1988) a função deste filtro é não permitir que parcelas indesejáveis da tensão sejam aplicadas sobre a carga. Considerando a tensão da fonte seja distorcida e desequilibrada temos que a tensão de compensação deve ser de tal forma que todas as parcelas de tensão de sequência negativa e zero, assim como as parcelas de harmônicos na fonte não sejam aplicadas diretamente sobre a carga. Neste caso haveria compensação total de todas as parcelas de tensão indesejadas sobre a carga de componente positiva apenas. Caso a fonte contenha apenas tensão de sequência positiva e harmônicos o compensador poderá operar eliminando estes harmônicos. Então, usando um filtro passa alta é possível se obter as componentes oscilantes das potências ativa e reativa. Obtendo as medidas destas componentes é possível calcular as tensões de compensação.

Entretanto vale ressaltar que, de modo geral, não há cargas que gerem somente correntes de sequência positiva, o que dificulta a aplicação do filtro série. Contudo é possível utilizar outros tipos de filtros, tanto passivos quanto ativos, em conjunto com o filtro série para maiores aplicações.

5.3. Controle por Histerese

A figura abaixo mostra um exemplo de inversor de tensão acoplado a rede elétrica para compensação de possíveis sinais harmônicos. Este inversor recebe sinais emitidos por um sistema de controle através de um método de que utiliza curvas de histerese para gerar um sinal que irá cancelar as harmônicas produzidas pela carga não linear.

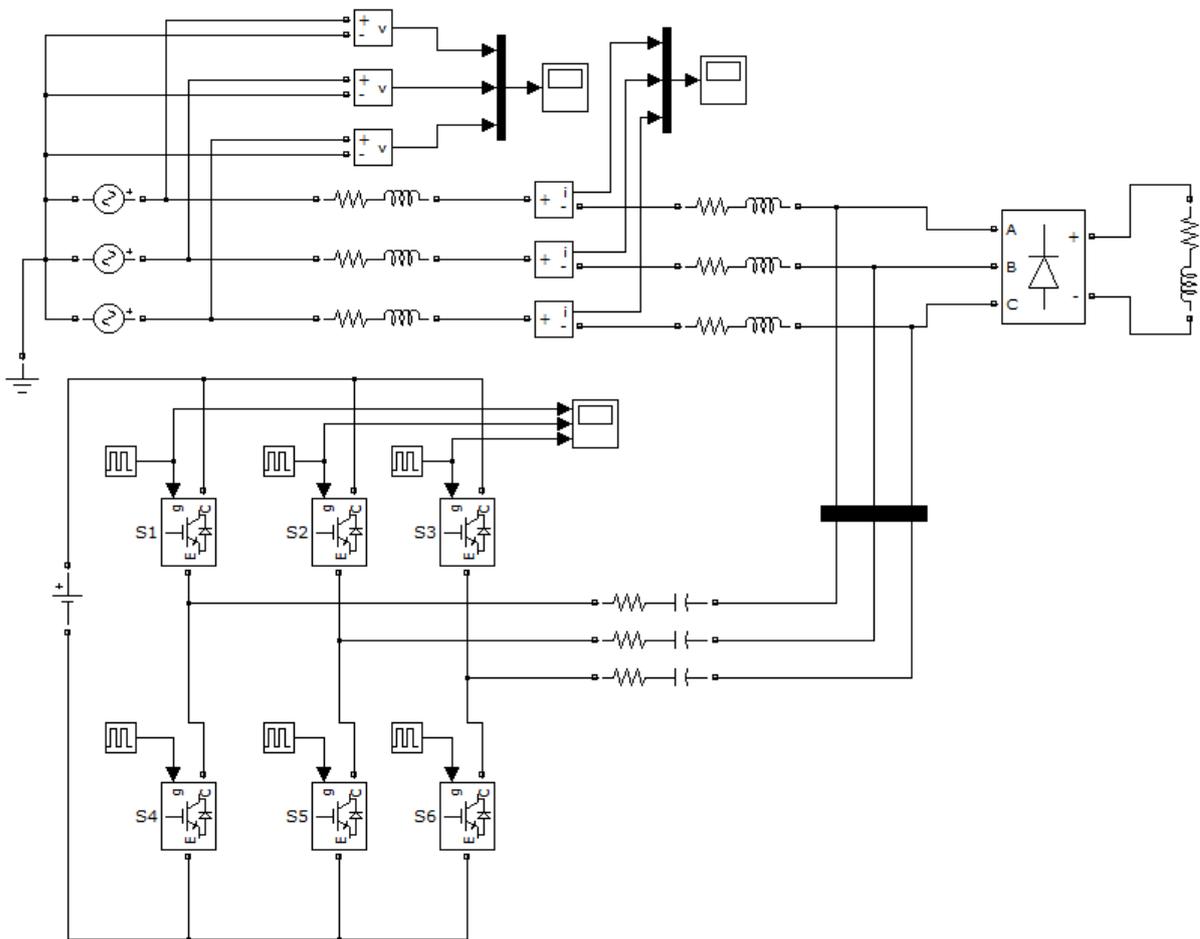


Figura 12 – Circuito em malha Aberta com inversor de tensão como filtro de uma carga

Uma das formas mais simples de gerar as correntes de compensação para um filtro ativo é através de um inversor de tensão. O controle de corrente por histerese é um método para controlar um inversor de fonte de tensão de modo que uma corrente de saída seja gerada, seguindo uma forma de onda de referência. Este método controla as chaves em um inversor gerando a onda do sinal de referência. Este método de controle é o mais fácil de implementar, sendo uma estratégia

robusta e com boa resposta dinâmica.

Este controlador pode ser implementado com um sistema de controle de malha fechada, conforme figura 13. Um sinal de erro, $e(t)$, é usado para controlar os comutadores do inversor. Este erro é a diferença entre a corrente da rede elétrica (i_{fa} , i_{fb} e i_{fc}) e a corrente a ser injetada pelo inversor, (i_{ca}^* , i_{cb}^* , i_{cc}^*). Quando o erro atingir um limite superior, os transistores são ligados para forçar a corrente a abaixar. Em um segundo momento quando o erro atingir um limite inferior, a corrente é obrigada a aumentar. Os valores de sinal mínimo e máximo do erro são e_{\min} e e_{\max} respectivamente.

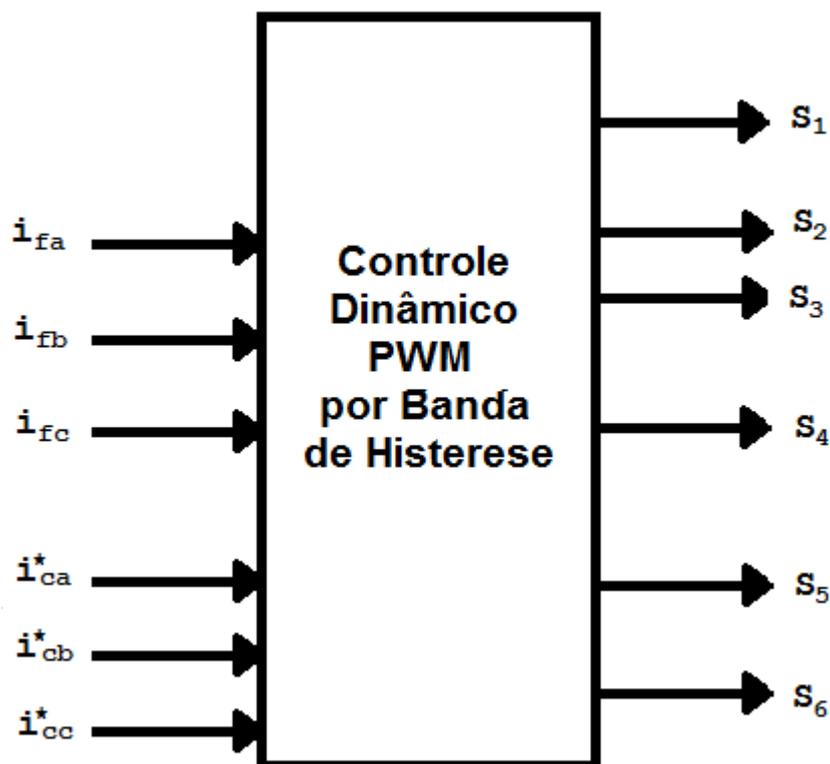


Figura 13 – Bloco de controle

A faixa do sinal de erro, $e_{\max} - e_{\min}$, controla diretamente o tamanho do ripple na corrente de saída do inversor e isso é a chamada banda de histerese.

Os limites de histerese, e_{\min} e e_{\max} , estão diretamente relacionados com um deslocamento do sinal de referência e são referidos como o limite inferior e superior da histerese. A corrente é forçada a ficar dentro desses limites, mesmo quando a referência muda.

Assim, estes pulsos de comutação S_1 , S_2 , S_3 , S_4 , S_5 e S_6 são dados para o inversor de tensão, de modo a produzir correntes harmônicas a fim de compensar as correntes harmônicas produzidas pelas cargas não lineares.

Entretanto, como a frequência de comutação não é constante, há dificuldade em dimensionar os elementos de filtragem e do interruptor.

6. COMPARATIVO: TEORIA P-Q E TPCI

Neste capítulo será realizado um pequeno paralelo entre as duas teorias apresentado algumas considerações sobre a utilização das mesmas. Vale ressaltar que a TPCI é baseada na Teoria P-Q.

Como apresentado em capítulo anterior sabe-se que a Teoria P-Q é fundamentada em um conjunto de potências instantâneas definidas no domínio do tempo. Já a TPCI aplica a definição de potência complexa instantânea de Torrens (1981) à definição algébrica de Akagi (1983), sendo assim há uma interpretação baseada na aplicação de vetores espaciais instantâneos, logo ambas não se atém aos fasores convencionais da teoria de circuitos elétricos para regimes permanentes senoidais.

Tratando das transformações entre sistema (abc para $\alpha\beta$) ambas utilizam a Transformada de Clarke (Akagi et al. 2007) para conversão e foram percorridas em seus trabalhos originais desconsiderando as componentes de sequência zero, visto que em um sistema a três fios ela acaba por ser eliminada. Lembrando que Milanese (1993) se utiliza da transformação sugerida por Ivanov (1988), que também é referenciada na Transformada de Clarke, mas voltada a análise do transitório das máquinas elétricas trifásicas. Até o presente momento o sistema a quatro fios foi tratado apenas na Teoria P-Q, neste caso por Watanabe (1993) e Aredes (1995). Como a segunda teoria abordada neste trabalho é bem recente ainda há poucos trabalhos tratando da mesma, sendo este último caso citado ainda não estudado.

Ambas as teorias conseguem obter as componentes ativa e reativa instantâneas através das equações 16 e 17 (Teoria P-Q), 41 e 42 (TPCI), entretanto apenas na segunda teoria é possível calcular os valores complexos das potências, conforme equações de 37 a 40, neste caso, denominada potência complexa instantânea.

As correntes i_α e i_β são obtidas com suas respectivas parcelas de p e q, quando pegamos a teoria p-q, elas estão calculadas nas equações 12 a 15 sendo nas equações 19 e 20 as componentes oscilantes de p, ou seja, é retirada a parcela média da potência p total. Estas são as correntes que devem ser compensadas dentro do sistema. No caso específico da TPCI, podemos visualizar apenas as componentes referentes à Q (equações 47 e 48) sendo a corrente \tilde{I}_q , que está em quadratura com o vetor espacial tensão, a ser compensada, em contrapartida ainda

não foi possível definir a parcela de potência ativa que também necessita ser corrigida.

Ao final de sua tese Milanese (1993) destaca que o uso de variáveis complexas para uma reinterpretação da teoria de Akagi permite uma melhor concepção dos significados físicos dos conceitos envolvidos.

As duas teorias proporcionam uma forma relativamente simples e intuitiva para o cálculo dos valores instantâneos tanto de tensão, de corrente quanto de potência, sendo indicadas para sistemas de controle em tempo real. A teoria p-q além de muito conhecida e aceita pela comunidade internacional é tema de diversos trabalhos, alguns autores a consideram como sendo uma ferramenta teórica, não apenas para sistemas de controle de filtros ativos, mas também para as definições e entendimento das propriedades de potência. De mesma forma, outros autores a analisam, do ponto de vista de instrumentação e monitoramento de distúrbios na qualidade de energia, como uma teoria que não permite uma fácil separação e identificação de origem desta deterioração, neste caso, quando há vários fatores presentes simultaneamente no sistema.

Do ponto de vista de compensação, há afirmações de que a teoria p-q deve ser aplicada em dois casos principais (Paredes, 2012):

- Garantir potência constante no ponto de acoplamento comum (PAC);
- Garantir correntes senoidais e equilibradas no PAC.

Tais casos só podem ser atendidos simultaneamente quando as tensões no PAC forem senoidais e equilibradas. Para outras condições de tensão (distorções ou assimetrias, por exemplo), só podem ser atendidos isoladamente, significando uma dependência direta das tensões do PAC e do caso escolhido para uma dada aplicação a fim de obter resultado final da compensação (Paredes, 2012).

Com relação à TPCI, os vetores espaciais instantâneos permitem o levantamento em tempo real da variação de grandezas tais como tensões, correntes e potências em função da variação de certos parâmetros dos sistemas elétricos de potência. Dessa forma os mesmos, em certas circunstâncias, podem ser interpretados como fasores convencionais e, com isto, o sistema durante transitórios pode ser considerado como estando em regime permanente senoidal. Os VEI's são

úteis para análise, monitoração e proteção de máquinas síncronas em sistemas de potência, possibilitando calcular a impedância equivalente instantânea em tempo real, servido como elementos para o desenvolvimento de algoritmos para relés digitais de impedância e sobrecorrente e, adicionalmente, como relés direcionais de fluxos de potência.

Moraes (2005) destaca que este método fornece elementos que analisam a distinção de eventos dentro do sistema elétrico de potência, particulariza os elementos para a análise em processos de sincronização, variações súbitas de cargas e até mesmo curtos-circuitos. Com a possibilidade de se traçar as curvas de potência complexa instantânea, calculadas em tempo real no barramento transmissor de uma linha de distribuição, por exemplo, abre possíveis aplicações desta teoria para monitoração comportamento de sistemas de potência quanto ao fluxo de potência ativa e reativa em regimes permanentes e transitórios, prever estabilidade estática e dinâmica de máquinas síncronas, identificar o tipo de evento e proteger contra variações de impedância da linha a fim minimizar as perdas no sistema de distribuição e à energia magnética armazenada nos elementos indutivos.

7. CONCLUSÃO E DISCUSSÕES

Neste trabalho foram apresentadas e demonstradas normas, teorias e tipos de equipamentos relacionados tanto a qualidade de energia, como estudo em potência elétrica e compensação de distúrbios harmônicos.

As teorias tratam de uma nova abordagem relacionada ao sistema elétrico de potência e a forma com a qual são obtidas as grandezas elétricas. Tais estudos são motivados, principalmente, pelo avanço da eletrônica de potência, que possibilitou a inserção de novos equipamentos eletrônicos capazes de executar tarefas complexas. Entretanto estes mesmo equipamentos, que são vistos pelo sistema elétrico como cargas não lineares e, portanto, trabalham em altas frequências, enviando para rede sinais distorcidos tanto de tensão como corrente provocando uma deterioração na qualidade do fornecimento de energia.

Esses distúrbios geram frequências harmônicas na rede elétrica que dificilmente são solucionados com os equipamentos de correção usuais, gerando danos a todas as cargas acopladas. Há esforços de toda a comunidade científica internacional em definir parâmetros para a presença de tais distúrbios e limita-los a valores plausíveis, dado que é difícil eliminar os harmônicos. Normas e recomendações, como as mencionadas no trabalho, agregam os estudos desenvolvidos para este fim.

Particularizando o caso para o Brasil, ainda não há uma legislação clara para auxiliar os profissionais a tratarem destes eventos, entretanto medidas como as estabelecidas no PRODIST, demonstram um avanço da comunidade científica nacional e espera-se que nos próximos anos tenhamos normas reguladoras voltadas para melhoria da qualidade de energia tanto para o setor industrial como residencial.

Após a análise das teorias pode-se concluir que apesar delas serem bastante úteis para aplicações em compensação de distúrbios ou para o controle de dispositivos eletrônicos, a interpretação dos circuitos elétricos através das mesmas torna-se uma tarefa complexa, uma vez que misturam diferentes características dos circuitos em suas parcelas de corrente e potência. Além disto, em determinadas condições de operação e em função das decomposições aplicadas, são geradas algumas componentes harmônicas de difícil interpretação.

Maiores comparações entre as teorias se torna complicado visto que uma é embasada na outra além de não haver grande quantidade de estudos com relação à

TPCI.

Tais teorias tem por intuito servir de base para elaboração de um sistema de controle para um filtro ativo potência. Diferentes abordagens de controle são possíveis, mas todas elas compartilham um mesmo objetivo que é impor correntes senoidais na rede elétrica, eventualmente, trazendo o fator de potência para o unitário. O filtro nada mais é que um conversor eletrônico de potência de alto desempenho que pode operar com diferentes finalidades, seja na eliminação de harmônicos, na correção de fator de potência, na regulação de tensão ou compensação do desequilíbrio de carga.

Os filtros já estão bem estabelecidos no mercado, no entanto, alguns pontos precisam de mais pesquisas. A dinâmica do filtro depende da frequência de comutação; frequências mais elevadas proporcionam melhores resultados, mas também geram perdas mais elevadas. Há necessidade de melhorias nas estratégias de modulação específicas e algoritmos de controle.

7.1. Trabalhos Futuros

Como sugestão para continuidade dos estudos relacionados a este tema fica:

- Estudo mais aprofundado da Teoria da Potência Complexa Instantânea;
- Realizar novas simulações das teorias para comparação de resultados;
- Estudo da Teoria da Potência Conservativa (CPT) de Tenti e Mattavelli, esta teoria não foi apresentada devido espaço curto de tempo para estudo da mesma;
- Agregar os estudos de harmônicos e das teorias apresentadas neste trabalho no currículo das disciplinas de Circuitos Elétricos, Máquinas Elétricas, Conversão de Energia e Qualidade de Energia e o estudo de filtros ativos de potência no currículo das disciplinas de Eletrônica Analógica e Eletrônica de Potência.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKAGI, H.; AREDES, M.; WATANABE, E. H. **Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning**. 1. ed. New York: IEEE Press/Wiley Interscience, 2007. 400p.

AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. **Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits**. PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL POWER ELECTRONICS CONFERENCE, Tokio: IEEE, n.1, p.1375-1386, 1983.

AREDES, M.; WATANABE, E. H. **Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações - Filtros Ativos e Facts**. CBA'98 - XII BRAZILIAN AUTOMATIC CONTROL CONFERENCE, Uberlândia, n.1, p.81-122, 1998.

BEATY *et al.* **Electrical power systems quality**. 1. ed. New York: McGraw-Hill Professional, 1996. 256p.

IVANOV, A.; SMOLENSKY. **Electrical Machines**. Mir Publishers, Moscou, v.1, n.2, 1988, 400p.

NABAE, A., TANAKA, T. **A new Definition of Instantaneous Active-Reactive Current and Power Base don Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits**. A paper recommended and approved by the IEEE Power System Instrumentation & Measurements Committee of the IEEE Power Engineering Society for presentation at the 1996 IEEE/PES Winter Meeting, Baltimore, January 21-25, 1996.

MILANESE, D. L.; MISKULIN, M. S. **The Instantaneous Complex Power Applied to Three-phase Machines**. INTERNATIONAL ANNUAL MEETING IEEE, Toronto: IEEE, n.28, p.171-176, 1993.

MORAES, J. P. de. **Aplicação Da Teoria Da Potência Complexa Instantânea Na Análise E Estimção De Parâmetros Da Máquina Síncrona Em Condições Transitórias**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2005, 111p.

PAREDES, H. K. M. **Tópicos Em Teorias De Potência Em Condições Não Ideais De Operação**. Campinas: Unicamp/DSCE-FEE, 2012. Disponível em : <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdf/it744/CAP6.pdf>> Acesso: 23 de junho de 2013.

PENELLO, L.F., WATANABE, E.H., AREDES, M. **Filtro ativo de potência com seleção da potência a ser compensada**. Anais do IX Congresso Brasileiro de Automática, vol. 2, Vitória, p.786–791, 1992.

SEMENSATO, M. **Aplicações da Teoria da Potência Complexa Instantânea no Cálculo das Grandezas de Buchholz-Goodhue**. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Energia Elétrica) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de

Engenharia de Ilha Solteira, 2007, 121p.

STEPHAN, R. M.; WATANABE, E. H. **New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Power in Electrical Systems With Generic Loads.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, nº. 2, April 1993.

TORRENS, A.B. **Dependent Complex Quantities Instantaneous Complex Power.** International Journal of Electrical Engineering Education, Manchester, U.K, vol. 18, p. 645-350, 1981.

WATANABE, E.H; AREDES, M. **New Control Algorithms for Series and Shunt Three-Phase Four-Wire Active Power Filters.** IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 10, n. 3, July 1995.

ANEXO

Resumo publicado na SBPC – Recife (PE) - 2013

B. Engenharias - 1. Engenharia - 8. Engenharia Elétrica

Correção ativa do fator de potência utilizando vetores espaciais

Marcelo Semensato - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Rafael Franco Silveira - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás

INTRODUÇÃO:

A eletrônica de potência trouxe uma mudança nas cargas industriais. Tornou-se possível a partir dos semicondutores de potência controlar as grandezas elétricas nas cargas industriais. Essa prática levou a distorções na forma de onda da tensão e corrente elétrica nas redes elétricas. Essas formas de ondas distorcidas podem possuir diversas frequências chamadas componentes harmônicas, múltiplas da fundamental. Essas ondas podem afetar diversas outras cargas acopladas no ponto comum (PAC).

Os efeitos das componentes harmônicas nas redes elétricas são sobreaquecimentos nos equipamentos elétricos, ressonância na rede, alteração do fator de potência, entre outros.

Uma maneira de corrigir essas distorções é a utilização do filtro ativo de potência. O filtro ativo de potência corrige instantaneamente o fator de potência da rede elétrica através da injeção de correntes contrárias que anulam o efeito indutivo ou capacitivo provocado pelas componentes harmônicas geradas pela carga. A Teoria da Potência Complexa é uma nova ferramenta utilizada para o cálculo dessas correntes contrárias injetadas pelo filtro ativo de potência. A Teoria da Potência Complexa Instantânea fornece a potência reativa trifásica instantânea do sistema utilizando vetores espaciais instantâneos. Essa potência reativa instantânea deve ser compensada para corrigir o fator de potência.

OBJETIVO DO TRABALHO:

Calcular a potência reativa instantânea trifásica de um sistema trifásico. Com base neste cálculo é possível identificar o vetor espacial instantâneo corrente em quadratura com o vetor espacial instantâneo tensão. A transformada inversa do vetor espacial corrente em quadratura resulta nas correntes trifásicas instantâneas que serão corrigidas, resultando em um fator de potência unitário.

MÉTODOS:

Simulação de uma carga não-linear trifásica, sem neutro, no ambiente Simulink®. Na simulação é obtido o vetor corrente espacial em quadratura com o vetor espacial tensão. Aplica-se a transformada inversa e obtém-se as correntes trifásicas que são compensadas no sistema. A diferença angular entre o vetor espacial corrente e tensão deve ser zero após a correção.

RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A simulação da Teoria da Potência Complexa Instantânea aplicada a uma carga não-linear mostrou-se eficiente para o cálculo da potência reativa trifásica instantânea e conseqüentemente a correção do fator de potência. Após a compensação da potência reativa os vetores espaciais instantâneos tensão e corrente permaneceram em fase, constatando um fator de potência unitário. Para análise final, a soma das potências instantâneas por fase do sistema trifásico (potência ativa total) obtida pela simulação é igual à potência aparente do sistema trifásico calculada pela norma 1459-2000 da IEEE.

CONCLUSÕES:

A Teoria da Potência Complexa Instantânea é uma nova ferramenta matemática que pode ser utilizada nos cálculos microprocessados utilizados pelo filtro ativo de potência para a compensação de reativos. Esta teoria é uma alternativa rápida em relação à teoria de Akagi (1983) para a compensação instantânea de reativos.

Palavras-chave: Teoria da Potência Complexa Instantânea, Filtro ativo de potência, Componentes harmônicas