

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Energia e
Automação Elétricas

ISSN 1413-2214
BT/PEA/0413

**Compensação de Desequilíbrios
de Carga Empregando Conversor
Estático Operando com Modulação
em Largura de Pulso**

Rodrigo Cutri
Lourenço Matakas Junior

São Paulo – 2004

1441330

O presente trabalho é um resumo da dissertação de mestrado apresentada por Rodrigo Cutri, sob orientação do Prof. Dr. Lourenço Matakas Junior: "Compensação de Desequilíbrios de Carga Empregando Conversor Estático Operando com Modulação em Largura de Pulso", defendida em 27/02/2004, na EPUSP.

A íntegra da dissertação encontra-se à disposição com o autor e na biblioteca de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica da USP.

FICHA CATALOGRÁFICA

Cutri, Rodrigo

Compensação de desequilíbrios de carga empregando conversor estático operando com modulação em largura de pulso / Rodrigo Cutri, Lourenço Matakas Junior. -- São Paulo : EPUSP, 2004.

20 p. -- (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas ; BT/PEA/0413)

1. Eletrônica de potência 2. Energia elétrica (Qualidade) I. Matakas Junior, Lourenço II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas III. Título IV. Série

ISSN 1413-2214

CDD 621.317
621.31

COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIOS DE CARGA EMPREGANDO CONVERSOR ESTÁTICO OPERANDO COM MODULAÇÃO EM LARGURA DE PULSO

Rodrigo Cutri^{*,} / Lourenço Matakas Junior^{**}**

* IMT – Instituto Mauá de Tecnologia – Escola de Engenharia Mauá – E.E.Mauá
Departamento de Engenharia Elétrica – DEL

Praça Mauá, nº1 – 09580-900 - São Caetano do Sul, SP – BRASIL - Tel: +55(11)4239-3000
e-mail : rodrigo.cutri@maua.br

* EPUSP – Departamento de Energia e Automação – PEA- Universidade de São Paulo – USP
Av. Prof. Luciano Gualderto, trav.3, nº 158 – 05508-900 – São Paulo, SP – BRASIL –
Tel : +55(11)3091-5483

e-mail : lmatakas@pea.usp.br

RESUMO

É cada vez maior a preocupação com a qualidade da energia elétrica tanto do ponto de vista do consumidor quanto da concessionária. Um dos grandes problemas encontrados é o desequilíbrio de correntes trifásicas devido à utilização de cargas monofásicas, bifásicas ou trifásicas desequilibradas em sistemas trifásicos de potência. Para eliminar esse desequilíbrio é necessária a identificação da parcela de corrente de sequência negativa presente no sistema e sua eliminação. A injeção das correntes de compensação via conversores estáticos operando em PWM (Pulse Width Modulation) é uma das soluções aplicadas. Esta solução exige o cálculo em tempo real da componente instantânea de sequência negativa, que será utilizada para a obtenção da referência de corrente do conversor. Neste trabalho, alguns dos métodos mais conhecidos para a determinação das correntes de referências são agrupados segundo suas características comuns e suas notações são uniformizadas. Estes métodos são simulados e comparados segundo suas características a partir de resultados obtidos via simulação numérica utilizando o software MATLAB (Simulink-Power System Blockset). Um novo método é proposto para a extração em tempo real da componente da corrente de sequência negativa, apresentando um bom desempenho em comparação com os

outros métodos. O desempenho de um compensador completo é verificado via simulação numérica, utilizando-se um conversor do tipo fonte de tensão operando em PWM, incluindo as malhas de controle de corrente do lado CA e da tensão no barramento CC. As metodologias do projeto do conversor (indutor CA e capacitor CC) e das malhas de controle (rastreamento da corrente CA e regulação da tensão CC) são apresentadas.

ABSTRACT

It's large the concern with the power quality, not only from the consumer's point of view but also from the utilities point of view. One of the most common problem is the unbalanced three-phase currents due to the use of single-phase loads, two-phase loads or unbalanced three-phase loads in three-phase power systems. To eliminate this unbalance it is necessary to identify the negative sequence components of the load current and to eliminate it. The injection of the compensating currents by means of Static converters using PWM (Pulse Width Modulation) is one possible solution. This solution needs an algorithm for the real time extraction of the negative sequence component, that will be used for generating the reference current for the converter. In this work, well know methods for determination the reference currents are organized and explained according to their common characteristics. All the methods have their symbology unified, their performance are compared based on

simulation results. A new method, faster than the existing ones is proposed. It is fully simulated using a voltage source converter operating with PWM. Design methodologies are proposed for the converter (CA inductor, CC capacitor) and for the control loops (AC current tacking and CC voltages regulation).

1 INTRODUÇÃO

Distorções e desequilíbrios nas correntes que circulam pela rede elétrica provocam diversos efeitos negativos na rede elétrica. Equipamentos eletrônicos alimentados por retificadores (aplicações em eletrodomésticos, drivers de motores, reatores eletrônicos para iluminação, fornos de indução etc.), por exemplo, têm comportamento não linear, drenando correntes distorcidas da rede elétrica, mesmo quando alimentados por tensão perfeitamente senoidal. Os efeitos negativos destes harmônicos de corrente são notados no sobreaquecimento de dispositivos elétricos (máquinas rotativas, transformadores e capacitores de correção de fator de potência) e distorções na forma senoidal da tensão de fornecimento, o que pode prejudicar o funcionamento de circuitos mais sensíveis. Cargas desbalanceadas causam efeitos indesejáveis como perdas adicionais em motores e geradores com evidente redução na vida útil desses equipamentos, atuação da proteção contra sobrecarga provocada pela circulação de correntes de sequência negativa em motores de indução, aumento da ondulação ("ripple") na tensão de saída dos retificadores e saturação de transformadores (Penteado Jr., 1985), (Robba et al., 1996), (Watanabe; Aredes, 1998), (Senini; Wolfs, 2000) e (Senini; Wolfs, 2002).

Dentre as soluções para a compensação do desequilíbrio de cargas destacam-se o uso de transformadores para mudança do

número de fases (E.E. Staff del M.I.T, 1965), (Chen, 1994) e (Brittain, 2002); a inserção de impedâncias (Samesima, 1984), (Penteado Jr., 1985), (Lin et al., 1992), (Bhavaraju; Enjeti, 1993), (Willems, 1993), (Czarnecki, 1993), (Ledwich; George, 1994) e (Nikolaenko, 1998) e a injeção de correntes via conversor estático operando em PWM (Lin et al., 1992), (Bhavaraju; Enjeti, 1993), (Verdelho; Marques, 1994), (Dixon et al., 1995), (Hochgraf; Lasseter, 1998), (Watanabe; Aredes, 1998), (Abellán et al., 1999), (Chen; Hsu, 2000), (Choi et al., 2000), (Senini; Wolfs, 2000), (Zhang; Xu, 2001) e (Kim, 2002) apresentadas no capítulo 2. Esta última solução é o foco desta dissertação.

A injeção de correntes via conversor estático operando em PWM exige o cálculo em tempo real do componente instantâneo de sequência negativa, que será utilizado para a obtenção da referência de corrente do conversor. Várias estratégias foram desenvolvidas para a compensação de desequilíbrios de cargas utilizando esta solução (Matsui; Fukao, 1990), (Lin et al., 1992), (Akagi; Nabae, 1993), (Dixon et al., 1995), (Marques, 1998), (Abellán et al., 1999), (Senini; Wolfs, 2000), (Chen; Hsu, 2000), (Choi et al., 2000), (Zhang; Xu, 2001), (Kim et al., 2001), (Kim, 2002) e (Cutri; Matakas Jr., 2003). Dentre elas destacam-se no item 3: o sistema de referência síncrona positiva e negativa (Senini; Wolfs, 2000) e (Choi et al., 2000), a detecção em tempo real através de vetores espaciais (Zhang; Xu, 2001), o método da teoria de potência ativa e reativa instantânea (Akagi; Nabae, 1993) e a injeção direta de corrente de sequência negativa (Cutri; Matakas Jr., 2003). Uma comparação entre algumas destas estratégias é vista em (Marques, 1998) e (Chang; Shee, 2002). Neste trabalho, os métodos de extração das correntes de sequência negativa são agrupados segundo suas características comuns e têm suas notações uniformizadas (item. 3). Um novo método (Cutri; Matakas Jr., 2003) baseado na teoria de componentes

simétricas sem nenhuma transformação de base, utilizando apenas cálculos algébricos é proposto (item 3). Critérios para a avaliação dos métodos são propostos (item 4) a fim de compará-los segundo suas características a partir de resultados obtidos via simulação numérica utilizando o software MATLAB (Simulink – Power System Blockset) versão 6.1. A implementação do conversor de injeção de corrente de compensação é sucintamente apresentada no item 5. O método proposto de extração é simulado (item 7) utilizando-se um conversor do tipo fonte de tensão operando em PWM, incluindo as malhas de controle da corrente CA e da tensão no barramento CC. O projeto do conversor simulado no item 7 é apresentado no item 6.

2 TÉCNICAS UTILIZADAS PARA A COMPENSAÇÃO DA SEQUÊNCIA NEGATIVA

A definição do grau de desequilíbrio de corrente (Robba et al., 1996) em um sistema elétrico, é dada pela eq.(2-1).

$$X(\%) = \frac{\left| \frac{\dot{I}_-}{\dot{I}_+} \right|}{1} \cdot 100 \quad (2-1)$$

onde $\left| \frac{\dot{I}_-}{\dot{I}_+} \right|$ e $\left| \frac{\dot{I}_+}{\dot{I}_-} \right|$ são respectivamente o módulo dos fasores correspondentes aos componentes de sequência negativa e positiva da corrente.

Segundo (Penteado Jr., 1985), “Valores limites para o grau de desequilíbrio do sistema não são explicitados quantitativamente nas normas, que geralmente recomendam consulta aos fabricantes das máquinas para estabelecimento de um particular limite. Nas máquinas síncronas, a corrente de sequência negativa cria um campo girante em sentido contrário ao do rotor que provoca o aparecimento de correntes rotóricas com frequência dupla em

relação à rede, aumentando em consequência as perdas e provocando aquecimento”.

Tendo em vista os efeitos e consequências da presença de correntes de sequência negativa devido a cargas desequilibradas (item 1), torna-se necessária sua compensação. Os métodos existentes para o balanceamento de cargas incluindo o uso de transformadores para mudança no número de fases (2 fases para 3 fases - Ligação Scott), a inserção de reatâncias e a injeção de correntes via conversor operando em PWM, são apresentados, explicitando-se suas vantagens e desvantagens.

2.1 Transformadores para mudança no número de fases (2 fases para 3 fases - Ligação Scott)

A utilização de 2 cargas monofásicas de alta potência ligadas diretamente a um sistema trifásico conforme visto na Fig.2.1-1 introduz um desequilíbrio inaceitável.

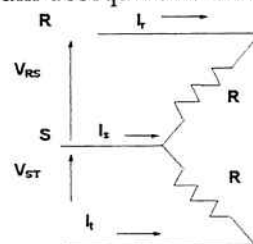


Fig.2.1-1 – Carga Desequilibrada para compensação através de montagem Scott

A transformação bifásico-trifásico necessária ao equilíbrio das correntes da rede pode ser obtida através da ligação de transformadores pela conhecida ligação Scott (E.E. Staff del M.I.T, 1965), (Chen, 1994) e (Brittain, 2002).

As cargas são conectadas aos enrolamentos secundários N_{1s} e N_{2s} de acordo com a Fig.2.1-2.

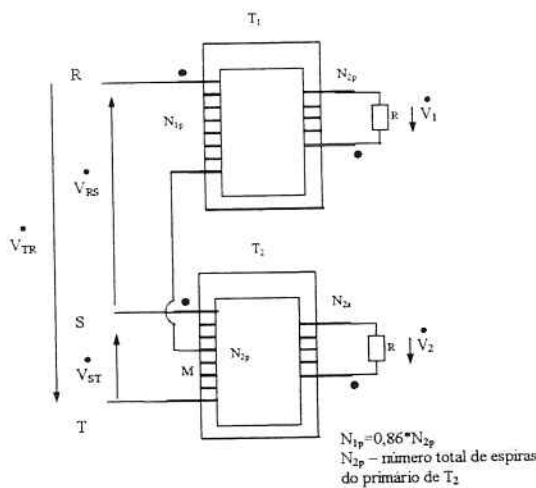


Fig. 2.1-2 - Montagem Scott

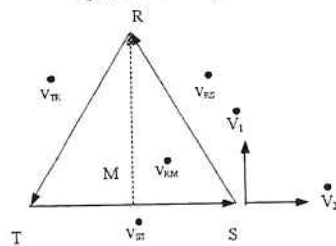


Fig. 2.1-3 - Diagrama Fasorial da montagem Scott

Este método apresenta como vantagem a relativa facilidade de implementação, no entanto somente é aplicado em situações onde existem obrigatoriamente duas cargas monofásicas iguais a serem equilibradas. Nos casos onde as cargas não são totalmente iguais a compensação não é total, mas o desequilíbrio entre as correntes de linha das cargas apresenta-se melhor do que sem nenhuma compensação. Idealmente as correntes na linha se apresentam balanceadas, no entanto, a dispersão nos valores dos parâmetros dos transformadores impede a perfeita compensação do desequilíbrio. Na presença de cargas com harmônicos verifica-se a compensação do desequilíbrio somente para a corrente fundamental.

A grande aplicação deste método se verifica na compensação de desequilíbrios causados por ferrovias eletrificadas em CA e fornos a arco, que

representam cargas monofásicas de elevada potência.

2.2 Inserção de Reatâncias

Uma solução tradicional, proposta por Steinmetz (Bhavaraju; Enjeti, 1993) para compensar uma carga monofásica resistiva conforme a Fig. 2.2-1 é a inserção de elementos passivos, compostos por indutores e capacitores conforme apresentado na Fig. 2.2-2 (Samesima, 1984), (Penteado Jr., 1985), (Lin et al., 1992), (Bhavaraju; Enjeti, 1993), (Willems, 1993), (Czarnecki, 1993), (Ledwich; George, 1994) e (Nikolaenko, 1998).

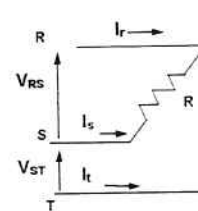


Fig. 2.2-1 - Carga monofásica resistiva

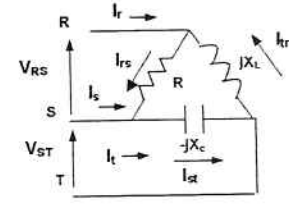


Fig. 2.2-2 - Compensação do desbalanço pela inserção de reatâncias

Se, na Fig. 2.2-2, $X_c = X_L = \sqrt{3}R$, e as tensões de sequência positiva forem dadas por

$$\dot{V}_{RS} = V \angle 0^\circ; \dot{V}_{ST} = V \angle -120^\circ; \dot{V}_{TR} = V \angle 120^\circ$$

têm-se as correntes de fase $\dot{I}_{RS}, \dot{I}_{ST}$ e

$$\dot{I}_{TR} \text{ dadas por } \dot{I}_{RS} = \frac{\dot{V}_{RS}}{R} = \frac{V}{R} \angle 0^\circ$$

$$\dot{I}_{ST} = \frac{\dot{V}_{ST}}{-jX_c} = \frac{V}{\sqrt{3}R} \angle -30^\circ; \dot{I}_{TR} = \frac{\dot{V}_{TR}}{jX_L} = \frac{V}{\sqrt{3}R} \angle 30^\circ$$

O que resulta nas correntes de linha apresentadas abaixo.

$$\dot{I}_R = \dot{I}_{RS} - \dot{I}_{TR} = \frac{V}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \angle -30^\circ$$

$$\dot{I}_S = \dot{I}_{ST} - \dot{I}_{RS} = \frac{V}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \angle -150^\circ$$

$$\dot{I}_T = \dot{I}_{TR} - \dot{I}_{ST} = \frac{V}{R} \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \angle 90^\circ$$

O novo sistema composto pela carga e pelas reatâncias de compensação está balanceado e apresenta fator de potência unitário. As

correntes de linha estão igualmente defasadas e possuem a mesma amplitude.

Para que se possa utilizar o método descrito acima com uma carga monofásica com baixo fator de potência, deve-se, a priori, compensar completamente sua potência reativa. Para um conjunto qualquer de cargas desbalanceadas, o método descrito acima pode ser aplicado juntamente com o teorema da superposição (Samesima, 1984), (Penteado Jr., 1985) e (Nikolaenko, 1998).

Para um fator de potência ($\cos(\phi)$) unitário, a carga compensada é vista pela rede como uma carga resistiva trifásica e balanceada. A carga compensada pode ser modelada através de uma conexão delta (estrela) de 3 resistências com valor de $3R$ (R).

Este método apresenta as seguintes características:

- é adequado para estratégias envolvendo inserção de reatâncias;
- as reatâncias de compensação apresentam grande volume e peso, e seus valores dependem das impedâncias das cargas. Para cargas variáveis os valores das reatâncias podem ser alterados pelo uso de reatores controlados com tiristores ("thyristor controlled reactors" (TCR)) e capacitores estáticos chaveados a tiristores ("thyristor switched capacitors" (TSC)) (Penteado Jr., 1985) e (Matsui; Fukao, 1990);
- o método acima é apropriado para o controle de compensadores TCR e TSC (Penteado Jr., 1985) e (Matsui; Fukao, 1990);
- este circuito de compensação é sensível a sequência de fases (Samesima, 1984) e (Penteado Jr., 1985);
- a substituição das reatâncias por conversores PWM emulando as reatâncias é possível, necessitando-se neste caso a obtenção das correntes de

referência instantâneas a partir de $Q_{rs_c} / Q_{st_c} / Q_{tr_c}$;

- harmônicos são negligenciados no método acima. As reatâncias, de compensação podem, juntamente com a reatância do transformador, apresentar ressonância série, constituindo um caminho de baixa impedância para as correntes harmônicas produzidas por cargas localizadas nas vizinhanças (Kaiser et al., 1990);
- existe um período transitório até o equilíbrio das correntes que depende das perdas dos elementos reativos inseridos para a compensação. A baixa perda do compensador impõe longos transitórios durante a energização do componente, variações na carga e na tensão da rede;

2.3 Injeção de correntes via conversor operando em PWM

Uma outra solução para a compensação de desequilíbrios é feita através da injeção de correntes de sequência negativa através de conversores autocomutados do tipo PWM (Lin et al., 1992), (Bhavaraju; Enjeti, 1993), (Verdelho; Marques, 1994), (Abellán et al., 1994), (Dixon et al., 1995), (Hochgraf; Lasseter, 1998), (Watanabe; Aredes, 1998), (C.C. Chen; Hsu, 2000), (Choi et al., 2000), (Senini; Wolfs, 2000), (Zhang; Xu, 2001) e (Kim, 2002). O diagrama em blocos do sistema de compensação ativa utilizando um conversor comutado do tipo PWM é apresentado na Fig. 2.3-1.

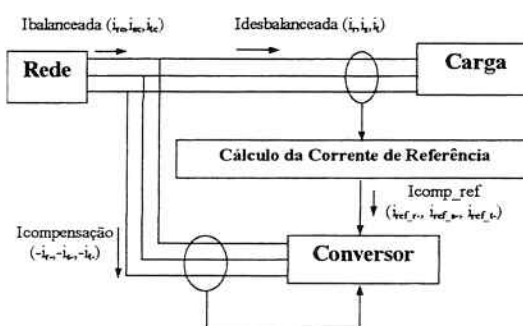


Fig. 2.3-1 – Diagrama em blocos do compensador ativo de desequilíbrios

As correntes da carga ($i_r(t)$, $i_s(t)$, $i_t(t)$) são medidas e um algoritmo efetua o cálculo das correntes de referência ($i_{r-}(t)$, $i_{s-}(t)$, $i_{t-}(t)$) a serem injetadas pelo conversor, de modo que as correntes resultantes na rede ($i_{rc}(t)$, $i_{sc}(t)$, $i_{tc}(t)$) sejam balanceadas. As correntes injetadas ($i_{r-}(t)$, $i_{s-}(t)$, $i_{t-}(t)$) são controladas a fim de se garantir que sigam com a maior fidelidade possível os valores de referência calculados (i_{ref_r-} , i_{ref_s-} , i_{ref_t-}). As estratégias de cálculo da corrente de referência e as técnicas de implementação do conversor são apresentadas respectivamente nos capítulos 3 e 5.

Esta estratégia possui as seguintes características:

- menor volume, menor peso e maior custo quando comparada ao método de inserção de impedâncias apresentado no cap.2.2;
- rápida compensação para cargas variáveis;
- pequena injeção de harmônicos e possibilidade de compensação dos harmônicos da corrente da carga;
- a potência ativa consumida pelo conversor resume-se à necessária para suprir as perdas no conversor;
- possibilidade de escolha de compensação total (potência reativa, harmônicos e desequilíbrios) ou compensação parcial, incluindo qualquer combinação de desequilíbrio, reativos e harmônicos (Watanabe; Aredes, 1998) e (McGranaghan, 2003).

Esta última vantagem é enfatizada durante a exposição no capítulo 3 dos métodos existentes para o cálculo em tempo real da componente de sequência negativa. Usualmente, o valor da potência aparente associada aos reativos e desequilíbrios é maior do que a associado aos harmônicos. Assim, a compensação de distúrbios que possuem

frequências menores (reativos e desequilíbrios) pode ser feita por um conversor chaveado de elevada potência operando com menor frequência de chaveamento enquanto que os harmônicos podem ser tratados com um conversor de menor potência e alta frequência de chaveamento.

3 Métodos de extração da corrente de sequência negativa

Podem-se dividir os métodos de extração da corrente de sequência negativa de acordo com a Fig.3-1.

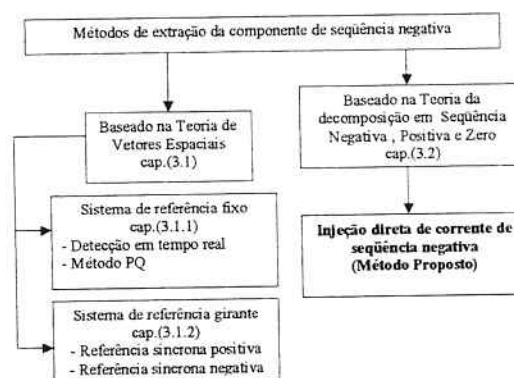


Fig.3-1 - Diagrama de Blocos – Métodos de extração das correntes de sequência negativa

3.1 Métodos baseados na Teoria de Vetores Espaciais

A Teoria de Vetores Espaciais é adequada para o tratamento matemático de valores instantâneos de tensões e correntes em circuitos trifásicos.

3.1.1 Sistema De Referência Fixa

3.1.1.1 Método De Detecção Em Tempo Real Através De Vetores Espaciais (DTRVE)

Para uma carga genérica com harmônicos e desequilíbrios, associam-se as correntes de linha $i_r(t)$, $i_s(t)$, $i_t(t)$ a um vetor espacial instantâneo $\vec{I}(t)$, em um sistema de referência fixo ($\alpha\beta$), utilizando-se as eqs. abaixo.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_r(t) \\ i_s(t) \\ i_t(t) \end{bmatrix} \quad (3-0)$$

$$\begin{bmatrix} i_r(t) \\ i_s(t) \\ i_t(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1/2 & \sqrt{3}/2 \\ -1/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (3-1)$$

O vetor $\vec{I}(t)$ é descrito na notação complexa por $\vec{I} = I(t) \overline{\theta(t)}$, com $I(t)$ e $\theta(t)$ variantes no tempo, de modo que $\vec{I}(t)$ percorra um percurso arbitrário, conforme mostrado na Fig.3.1.1-1. Na notação complexa o eixo α corresponde a parte real e o eixo β a parte imaginária.

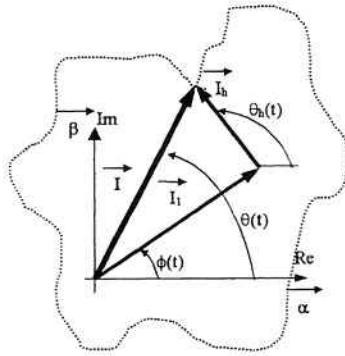


Fig. 3.1.1-1 - Vetor $\vec{I}$ e sua trajetória (pontilhada)

O vetor $\vec{I}$ pode ser decomposto em duas partes, $\vec{I}_1 = I_1(t) \overline{\phi(t)}$, correspondente aos componentes de corrente na frequência fundamental (Fig.3.1.1-1 em verde), e $\vec{I}_h = I_h(t) \overline{\phi_h(t)}$ que inclui todas as componentes harmônicas (Fig.3.1.1-1 em azul). O vetor $\vec{I}_1(t)$ pode ainda ser decomposto nas parcelas $\vec{I}_+$ e $\vec{I}_-$, correspondentes aos componentes de sequência positiva e negativa na frequência fundamental, de acordo com a eq.(3.1.1-1).

$$\vec{I}_1(t) = \vec{I}_+(t) + \vec{I}_-(t) = I_+ \overline{\phi^+(t)} + I_- \overline{\phi^-(t)} \quad (3.1.1-1)$$

O objetivo deste método (Zhang; Xu, 2001) é o cálculo de $\vec{I}_+$ e $\vec{I}_-$, seguindo a sequência abaixo descrita. Calcula-se inicialmente o vetor $\vec{I}$ a partir da eq.(3-0), decompondo-o nas projeções $i_\alpha(t)$ e $i_\beta(t)$ (Fig.3.1.1-2) conforme as eqs.(3.1.1-2) e (3.1.1-3).

$$i_\alpha(t) = I \cos(\phi(t)) = I_+ \cos(\phi^+(t)) + I_- \cos(\phi^-(t)) + \sum_2^{\infty} I_h \cos(\phi^h(t)) \quad (3.1.1-2)$$

$$i_\beta(t) = I \sin(\phi(t)) = I_+ \sin(\phi^+(t)) + I_- \sin(\phi^-(t)) + \sum_2^{\infty} I_h \sin(\phi^h(t)) \quad (3.1.1-3)$$

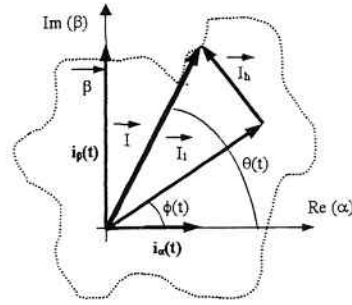


Fig. 3.1.1-2 - Projeção do Vetor $\vec{I}$ no sistema αβ

As parcelas $i_\alpha(t)$ e $i_\beta(t)$ são filtradas por dois filtros passa-baixas independentes (com ganho unitário e fase $(-\varphi)$ na frequência fundamental) eliminando-se as correntes harmônicas e introduzindo uma defasagem $(-\varphi)$ na componente de corrente na frequência fundamental conforme a Fig.3.1.1-3. Após a filtragem os componentes $i_{\alpha f}(t)$ (parte real) e $i_{\beta f}(t)$ (parte imaginária) que contêm as componentes das sequências positiva ($i_{\alpha f+}(t)$; $i_{\beta f+}(t)$) e negativa ($i_{\alpha f-}(t)$; $i_{\beta f-}(t)$) da frequência fundamental podem ser reescritas nas eqs.(3.1.1-4) e (3.1.1-5) respectivamente.

$$i_{\alpha f}(t) = I_+ \cos(\phi^+(t) - \varphi) + I_- \cos(\phi^-(t) - \varphi) = i_{\alpha f+}(t) + i_{\alpha f-}(t) \quad (3.1.1-4)$$

$$i_{\beta f}(t) = I_+ \sin(\phi^+(t) - \varphi) - I_- \sin(\phi^-(t) - \varphi) = i_{\beta f+}(t) + i_{\beta f-}(t) \quad (3.1.1-5)$$

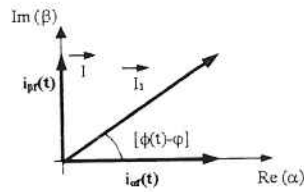


Fig. 3.1.1-3 – Projeção no sistema αβ do Vetor I_1 após a filtragem

Para separar as projeções das componentes de sequência positiva ($i_{\alpha f+}(t)$; $i_{\beta f+}(t)$) e negativa ($i_{\alpha f-}(t)$; $i_{\beta f-}(t)$) de $i_{\alpha f}(t)$ e $i_{\beta f}(t)$, propõe-se criar um novo vetor ($i_{\alpha f90}(t)$; $i_{\beta f90}(t)$), obtido a partir do vetor original ($i_{\alpha f}(t)$; $i_{\beta f}(t)$), rotacionando-o de $-\pi/2$, o que resulta nas eqs.(3.1.1-6) e (3.1.1-7) respectivamente.

$$i_{\alpha f90}(t) = I_+ \cdot \cos(\phi^+(t) - \phi - \frac{\pi}{2}) + I_- \cdot \cos(\phi^-(t) - \phi - \frac{\pi}{2}) = I_+ \cdot \sin(\phi^+(t) - \phi) + I_- \cdot \sin(\phi^-(t) - \phi) \quad (3.1.1-6)$$

$$i_{\beta f90}(t) = I_+ \cdot \sin(\phi^+(t) - \phi - \frac{\pi}{2}) - I_- \cdot \sin(\phi^-(t) - \phi - \frac{\pi}{2}) = -I_+ \cdot \cos(\phi^+(t) - \phi) + I_- \cdot \cos(\phi^-(t) - \phi) \quad (3.1.1-7)$$

Os componentes desejados de sequência positiva ($i_{\alpha f+}(t)$; $i_{\beta f+}(t)$) e negativa ($i_{\alpha f-}(t)$; $i_{\beta f-}(t)$) são obtidos a partir dos valores medidos ($i_{\alpha f}(t)$; $i_{\beta f}(t)$; $i_{\alpha f90}(t)$; $i_{\beta f90}(t)$) utilizando-se a matriz dada pela eq.(3.1.1-8).

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha f+}(t) \\ i_{\beta f+}(t) \\ i_{\alpha f-}(t) \\ i_{\beta f-}(t) \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha f90}(t) \\ i_{\beta f90}(t) \\ i_{\alpha f}(t) \\ i_{\beta f}(t) \end{bmatrix} \quad (3.1.1-8)$$

Para se corrigir o deslocamento da fase causado pelo filtro ($-\phi$), é necessário rotacionar-se os vetores ($i_{\alpha f+}(t)$; $i_{\beta f+}(t)$) e ($i_{\alpha f-}(t)$; $i_{\beta f-}(t)$) de acordo com o deslocamento (ϕ), obtendo-se assim os valores dos componentes de sequência positiva e negativa corrigidos ($i_{\alpha+}(t)$; $i_{\beta+}(t)$; $i_{\alpha-}(t)$; $i_{\beta-}(t)$) respectivamente nas eqs.(3.1.1-9) e (3.1.1-10).

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha+}(t) \\ i_{\beta+}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & -\sin \phi \\ \sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha f+}(t) \\ i_{\beta f+}(t) \end{bmatrix} \quad (3.1.1-9)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha-}(t) \\ i_{\beta-}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha f-}(t) \\ i_{\beta f-}(t) \end{bmatrix} \quad (3.1.1-10)$$

As correntes instantâneas de sequência positiva (negativa) de compensação são obtidas pela eq.(3-1), substituindo-se os valores de $i_{\alpha}(t)$ por $i_{\alpha+}(t)$ e $i_{\beta}(t)$ por $i_{\beta+}(t)$.

3.1.1.2 Método da Potência Ativa e Reativa Instantâneas (PQ)

Outra solução proposta por (Akagi; Nabae, 1993) e estudada em detalhe por (Watanabe; Aredes, 1998), define as potências ativa (p) e reativa (q) instantâneas. Os componentes instantâneos dos vetores de tensão e corrente em um sistema de referência fixo, são obtidos através da eq.(3-0). Os componentes das potências instantâneas são compostos por uma parte constante ($\bar{p}$; $\bar{q}$) e uma parte oscilatória ($\tilde{p}$; $\tilde{q}$) definidos pela eq.(3.1.1-11).

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) & v_{\beta}(t) \\ -v_{\beta}(t) & v_{\alpha}(t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix} \quad (3.1.1-11)$$

As potências de compensação p_c ; q_c são definidas como uma combinação de $-\bar{p}$, $-\bar{q}$ e $-\tilde{q}$, de acordo com o objetivo da compensação, e inseridas na rede via conversor estático operando como fonte de corrente, conectado em paralelo com a carga. Para a compensação de desequilíbrios na corrente de carga, deve-se considerar $p_c = -\bar{p}$ e $q_c = -\bar{q}$ se as tensões da rede forem equilibradas e simétricas. Os componentes $\bar{p}$, $\tilde{p}$, $\bar{q}$ e $\tilde{q}$ são obtidos através de filtros do tipo passa-alta (Fig.3.1.1-4).

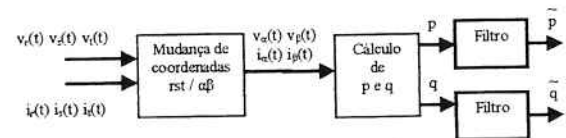


Fig. 3.1.1-4 – Algoritmo PQ

As correntes de compensação no sistema rst são obtidas através das eqs.(3.1.1-12) e (3-1).

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha}(t) & v_{\beta}(t) \\ -v_{\beta}(t) & v_{\alpha}(t) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} p_c \\ q_c \end{bmatrix} \quad (3.1.1-12)$$

Neste método é difícil a separação de harmônicos e desequilíbrios, pois ambas produzem termos oscilatórios. Uma análise mais detalhada com soluções para problemas como as influências das tensões distorcidas no PCC (ponto de acoplamento comum) é proposta em (Watanabe et al., 2002).

3.1.2 Sistema De Referência Girante

3.1.2.1 Referência Girante Positiva (RSP)

Este método requer a mudança do sistema de coordenadas fixo $\alpha\beta$ (Apêndice A) para o sistema de coordenadas girante dq. O sistema dq gira com velocidade ω de modo que o ângulo¹ entre os eixos α e d (β e q) tenha valor (ωt) . A transformação das coordenadas do vetor da corrente no sistema $\alpha\beta$ (sistema de referência fixo) para o sistema dq (sistema girante), também chamada Transformada de Park (Choi et al., 2000) e (Senini; Wolfs, 2000) é efetuada pelas eqs.(3-0) e (3.2.1-1) e observada na Fig. 3.1.2-1.

$$\begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha(t) \\ i_\beta(t) \end{bmatrix} \quad (3.1.2-1)$$

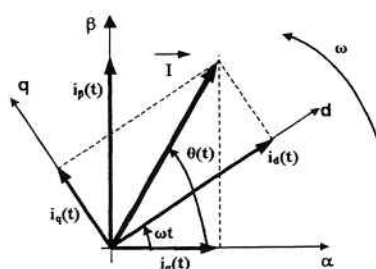


Fig. 3.1.2-1 - Vetores em um sistema girante de referência

Esse sistema está sendo rotacionado a uma velocidade constante em sincronismo com o vetor tensão da rede o que torna necessário um circuito de

¹ Para simplificar a explanação considerou-se o ângulo entre os eixos α e d com valor " ωt ". Para uma abordagem mais geral deve-se considerá-lo como sendo " $\omega t + \psi$ ".

sincronismo do tipo PLL para a obtenção de (ωt) .

O vetor $\vec{I}$ pode ser descrito pela soma das componentes fundamental $\vec{I}_1$ e harmônicos $\vec{I}_h$ mostrado na Fig. 3.1.1-1. O vetor da corrente fundamental $\vec{I}_1$ pode ser descrito pela soma dos vetores $\vec{I}_+$ e $\vec{I}_-$ correspondentes aos componentes de sequência positiva e negativa da corrente fundamental. No sistema $\alpha\beta$, $\vec{I}_+$ tem velocidade angular ω , enquanto $\vec{I}_-$ tem velocidade $-\omega$ conforme a Fig.3.1.2-2.

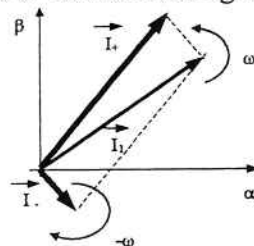


Fig. 3.1.2-2 - Vetores dos componentes fundamentais em um sistema fixo de referência

No sistema de referência girante o vetor $\vec{I}_+$ de sequência positiva permanece parado. Deste modo, as projeções de $\vec{I}_+$ nos eixos dq apresentam amplitude constante. No sistema dq o vetor $\vec{I}_-$ gira com velocidade " $-2.\omega$ ", fazendo com que suas projeções nos eixos dq apresentem frequência " $2.\omega$ ", conforme pode ser visto na Fig.3.1.2-3. Harmônicos de sequência positiva de ordem h produzirão componentes no sistema dq com frequência $(h-1).\omega$, enquanto que os de sequência negativa terão frequência $(h+1).\omega$. Assim, a parte oscilatória das coordenadas do vetor $\vec{I}$ no sistema dq é formada tanto por harmônicos como por componentes de sequência negativa.

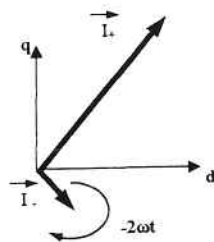


Fig. 3.1.2-3 - Vetores da componente fundamental representada em um sistema fixo e num sistema girante de referência

Portanto, no sistema dq o componente fundamental de sequência positiva pode ser filtrado utilizando-se um filtro passa-

baixa. A parte oscilatória ($\tilde{i}_d(t), \tilde{i}_q(t)$) (harmônicos e sequência negativa) corresponde ao vetor da corrente de compensação no sistema dq.

As correntes de compensação podem ser obtidas pelas eqs.(3.1.2-2) e (3-1), substituindo-se os valores de $i_\alpha(t)$ por $i_{ac}(t)$ e $i_\beta(t)$ por $i_{pc}(t)$.

$$\begin{bmatrix} i_{ac}(t) \\ i_{pc}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{i}_d(t) \\ -\tilde{i}_q(t) \end{bmatrix} \quad (3.1.2-2)$$

3.1.2.2 Referência Girante Negativa (RSN)

(Choi et al., 2000) e (Senini; Wolfs, 2000) propõe utilizar uma estratégia semelhante à referência girante positiva.

Propõe-se extrair a sequência negativa pela composição de dois vetores. O primeiro, obtido usando um sistema de referência girante positiva e o segundo com um sistema de referência girante negativa. O vetor da corrente da carga é transformado em um sistema de referência girante dq usando as eqs.(3-0) e (3.1.2-1). A sequência positiva da corrente de frequência fundamental no sistema dq é vista como um valor contínuo que pode ser isolado através de um filtro. A parte oscilatória do sinal é formada tanto por harmônicos como pela sequência negativa da fundamental que representa uma oscilação de 120Hz (numa rede de 60Hz). É difícil a separação entre elas por um filtro, pois a

componente de sequência negativa é próxima a frequência fundamental e apesar de ser menor que a de sequência positiva também a presença de uma corrente de sequência positiva de 3º harmônica resultará em um sinal de 120Hz. Assim, como tanto a sequência negativa quanto a 3º harmônica contribuem para o sinal de 120 Hz o desempenho compensatório do sistema poderia ficar prejudicado por uma filtragem parcial das componentes harmônicas em relação a componente de sequência negativa. No entanto, esta parte oscilante pode ser representada em um sistema girante horário (com velocidade -2ω). Assim, a componente de sequência negativa da fundamental neste sistema é vista como um valor contínuo que pode ser isolado por um filtro e corresponde ao vetor de corrente de compensação. Os harmônicos podem ser eliminados usando como referência a parte oscilatória do sistema de referência girante negativa.

As correntes de compensação podem ser obtidas pelas eqs.(3.1.2-2) e (3-1).

3.2 Método baseado na Teoria da decomposição em Sequência Negativa, Positiva e Zero -Injeção direta de Sequência Negativa (DNSI)

A utilização deste método para a obtenção das correntes instantâneas de compensação para um conversor do tipo PWM-VSI é proposta nesta dissertação (Cutri; Matakas Jr., 2003) baseado na teoria de componentes simétricos (Robba et al., 1996).

Nesta solução os harmônicos foram negligenciados, no entanto, a eliminação das correntes de sequência negativa é feita sem nenhuma transformação de sistema de coordenadas, operando diretamente com as correntes de linha medidas.

As correntes instantâneas de sequência negativa necessárias a compensação ($i_{r-}(t), i_{s-}(t), i_{t-}(t)$) podem ser calculadas diretamente a partir dos valores instantâneos das correntes de linha ($i_r(t), i_s(t), i_t(t)$) e dos valores instantâneos

das correntes de linha atrasados de $\frac{1}{4}$ de ciclo da fundamental ($i_{r90}(t)$, $i_{s90}(t)$, $i_{t90}(t)$) através da eq.(3.2).

$$\begin{bmatrix} i_{r-}(t) \\ i_{s-}(t) \\ i_{t-}(t) \end{bmatrix} = -\frac{1}{3} \begin{bmatrix} -1 & 1/2 & 1/2 \\ 1/2 & -1 & 1/2 \\ 1/2 & 1/2 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r}(t) \\ i_{s}(t) \\ i_{t}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{\sqrt{3}}{2} & 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{r90}(t) \\ i_{s90}(t) \\ i_{t90}(t) \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Este atraso é facilmente implementado armazenando-se as N/4 últimas amostras medidas onde N é igual ao número de amostras por ciclo da rede.

4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS MÉTODOS DE EXTRAÇÃO DA CORRENTE DE SEQUÊNCIA NEGATIVA

Todas as estratégias são simuladas no software MATLAB – Simulink (Power Systems Blockset) versão 6.1 modelando-se o inversor de potência como uma fonte de corrente ideal controlada. Deste modo, desprezam-se os efeitos do chaveamento, concentrando-se no comportamento em baixa frequência, obtendo-se assim uma simulação mais eficiente do ponto de vista do tempo de processamento e da quantidade de pontos armazenados.

A influência da tensão de alimentação no desempenho de filtros ativos de harmônicos é considerada em (Marques, 1998) e (Chang ;Shee, 2002). Para uma análise detalhada da operação com cargas desequilibradas, segue abaixo um quadro-resumo (Tabela I) contendo as principais características dos métodos comparados.

Observando-se a Tabela I pode-se concluir que quando se trata da compensação de desequilíbrios da componente fundamental o método proposto de injeção direta de correntes de sequência negativa (DSNI) é o mais eficiente, apresentando um tempo de resposta bem menor e uma compensação mais efetiva que os outros métodos.

	DTRVE	PQ	RSP	RSN	DSNI
Tempo de resposta aprox. (ciclos)	1*	2**	2**	2**	1/4
Resposta ao degrau pode ser melhorada ?	Sim ¹	Sim ¹	Sim ¹	Sim ¹	-
Compensação de desequilíbrio das correntes da carga (p/ os filtros considerados)	* ≤ 1.5%	** ≤ 1%	** ≤ 2%	** ≤ 1.5%	≤ 1%
Permite extração somente da sequência negativa da corrente	Sim	Não	Não	Sim	Sim
Permite a correção de harmônicos de corrente	Sim	Sim	Sim	Sim	(*) ²
Necessita PLL	Não	(*) ⁴	Sim	Sim	Não
Necessita filtro passa-baixa	Sim	Sim	Sim	Sim	Não

* (4º ordem, 100 Hz) / ** (2º ordem, 15 Hz) / *** (2º ordem, 80 Hz)

(1) às custas de uma deterioração no grau de compensação.

(2) a utilização do método DSNI, em conjunto com outros métodos, tendo como objetivo a compensação de desequilíbrios e harmônicos constitui objeto de pesquisa futura do autor e tem se mostrado promissora.

(3) se a correntes de carga for senoidal.

(4) se o objetivo for a obtenção de correntes senoidais é necessário a utilização de um circuito PLL (Watanabe et al., 2002).

Tabela I - Quadro comparativo dos métodos de compensação de sequência negativa

5 IMPLEMENTAÇÃO DO CONVERSOR DE INJEÇÃO DE CORRENTE DE COMPENSAÇÃO

5.1 Topologias de Conversores

A injeção das correntes de compensação de sequência negativa da carga pode ser feita empregando-se inversores do tipo fonte de tensão (VSI) ou de fonte de corrente (CSI) (Malesani, Tomasin, 1993), (Mohan et al., 1995), (Benchaita et al., 1999) e (Kazerani, Ye, 2002).

No caso de inversores VSI (Fig. 5.1-1) a tensão no barramento CC é controlada de modo a ser mantida constante (item 5.3),

fornecendo à rede a corrente necessária através do indutor de acoplamento L . O valor médio da tensão no barramento CC deve ser superior ao valor do pico de tensão da rede e a corrente injetada deve ser controlada (item 5.2) de modo a acompanhar a referência de corrente calculada por um dos métodos vistos no item 3.

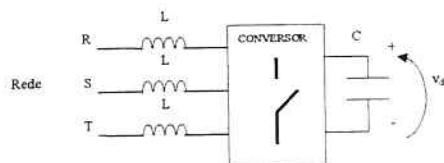


Fig. 5.1-1 - Conversor tipo VSI

Nos conversores VSI as chaves devem ser bidirecionais em corrente enquanto que nos conversores CSI as chaves devem ser bidirecionais em tensão. A topologia VSI é a mais utilizada atualmente em aplicações industriais. Esta preferência segundo (Malesani; Tomasin, 1993) e (Benchaita et al., 1999), é justificada pela disponibilidade de dispositivos de potência autocomutados bidirecionais em corrente (transistor e diodo em anti-paralelo), além do custo, volume e peso. Ressalta-se que a densidade de energia (em J/kg e J/m^3) é maior nos capacitores eletrolíticos, normalmente empregados no barramento CC, do que nos indutores de construção convencional com núcleo de ferro. No entanto, segundo (Benchaita et al., 1999) e (Kazerani; Ye, 2002) a evolução da performance dos dispositivos de chaveamento semicondutores e o emprego de materiais supercondutores em indutores tornam os conversores CSI uma alternativa promissora para aplicações em alta potência.

5.2 Estratégias de implementação da malha de controle da corrente injetada

Uma malha de controle da corrente é necessária para que a corrente de compensação injetada pelo conversor na

rede CA siga a referência de corrente calculada em tempo real. Existem várias estratégias de implementação da malha de corrente (Maswood, 1995), (Buso et al., 1998), (Malesani; Tomasin, 1993), (Kazmierkowski, 1993), (Junqueira et al., 2002) e (Buso, 2003) destacando-se o controlador linear analógico, o controle por banda de histerese e o controle do tipo "deadbeat". Uma comparação entre as diferentes estratégias de controle pode ser encontrada em (Buso et al., 1998), (Malesani; Tomasin, 1993) e (Kazmierkowski, 1993).

Controle do tipo "Deadbeat"

O controle do tipo "deadbeat" segundo (Malesani; Tomasin, 1993), (Buso et al., 1998) e (Junqueira et al., 2002) é uma técnica que prediz no começo de cada período de amostragem (Δ) o comportamento da corrente injetada. Baseia-se no erro atual entre a corrente injetada e a corrente de referência, nos parâmetros da carga e de outras variáveis. A tensão a ser gerada pelo PWM durante o próximo ciclo de modulação é determinada de modo a eliminar o erro no final do ciclo de amostragem. A estratégia "deadbeat" também pode ser entendida como uma estratégia de realocação de pólos, onde os pólos do sistema discreto são alocados na origem (Mattavelli, 2002).

O controle deadbeat é baseado em um modelo do conversor, que é utilizado na estimativa do comportamento dinâmico do sistema. O controle é assim sensível aos parâmetros adotados no modelo.

Neste trabalho, será adotada uma abordagem intuitiva para o cálculo de tensão de referência do PWM. O objetivo do controle deadbeat é tornar nulo o erro para o próximo instante de amostragem ($k+1$), independente do erro no instante atual (k) como pode ser vista na Fig.5.2-1.

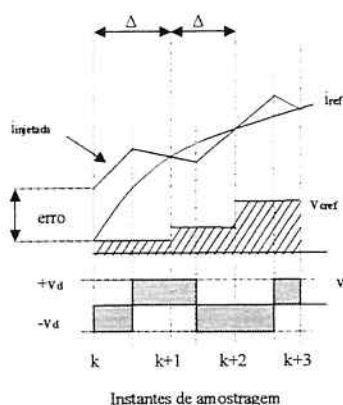


Fig.5.2-1 - Controle Deadbeat

Para se obter este comportamento através da estratégia “deadbeat”, é necessário impor-se a tensão de referência do conversor v_{cref} no instante k , de modo a impor $i_{injetada}(k+1) = i_{ref}(k+1)$ para cada uma das fases.

O modelo por fase de um conversor monofásico é mostrado na Fig.5.2-2, sendo descrito pela eq.(5.2-1).

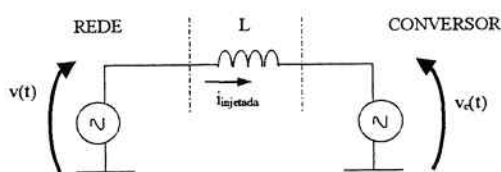


Fig.5.2-2 - Modelo do Conversor VSI

$$\frac{di_{injetada}(t)}{dt} = \frac{1}{L} \cdot (v(t) - v_c(t)) \quad (5.2-1)$$

Integrando-se a eq.(5.2-1) obtêm-se a eq.(5.2-2) que representa o acréscimo de corrente entre os instantes $t(k)$ e $t(k+1)$.

$$\int_{i_{injetada}(k)}^{i_{injetada}(k+1)} di_{injetada} = \frac{1}{L} \cdot \int_{t(k)}^{t(k+1)} (v(t) - v_c(t)) dt \quad (5.2-2)$$

Se a tensão principal for considerada constante durante o intervalo de tempo Δ (período de amostragem), a eq.(5.2-2) pode ser escrita na forma da eq.(5.2-3), descrevendo a corrente no instante $t(k+1)$.

$$i_{injetada}(k+1) - i_{injetada}(k) = \frac{1}{L} \cdot (v(k) \cdot \Delta - v_{cref}(k) \cdot \Delta) \quad (5.2-3)$$

Impondo-se o critério deadbeat ($i_{ref}(k+1) = i_{injetada}(k+1)$), obtêm-se a eq.(5.2-4).

$$i_{ref}(k+1) = i_{injetada}(k) + \frac{1}{L} \cdot (v(k) - v_{cref}(k)) \cdot \Delta \quad (5.2-4)$$

Como o conversor é do tipo fonte de tensão, deve-se calcular a referência de tensão a ser imposta no conversor conforme a eq.(5.2-5).

$$v_{cref}(k) = -\frac{L}{\Delta} \cdot (i_{ref}(k+1) - i_{injetada}(k)) + v(k) \quad (5.2-5)$$

Este controle apresenta as seguintes características:

- é inerentemente digital;
- permite a atuação independente por fase;
- tem atuação rápida;
- não requer filtro anti-aliasing;
- é sensível aos parâmetros adotados do modelo;
- apresenta frequência fixa de chaveamento;
- permite a implementação através da utilização de vetores espaciais (Kazmierkowski; Dzieniakowski, 1993);

Segundo (Malesani; Tomasin, 1993) o interesse por controladores do tipo preditivo vêm aumentando devido a crescente evolução no desempenho dos micro-controladores e processadores digitais de sinais (DSP).

Nesta dissertação utiliza-se a estratégia deadbeat por ser a que apresenta uma resposta rápida para distúrbios nas tensões CA e CC, por seguir a corrente de referência com um atraso máximo de 2 amostragens no tempo e por permitir que o controle seja efetuado por fase, usando-se assim três controladores monofásicos independentes para um sistema trifásico (Junqueira et al. 2002).

5.3 Estratégia de regulação de tensão do barramento CC

Na configuração de um conversor do tipo VSI é necessário um capacitor no barramento CC. Este capacitor é dimensionado de modo a suprir as potências

oscilatórias que o conversor deve compensar. Para que o conversor possa operar satisfatoriamente injetando correntes de compensação na linha é necessário que a tensão no capacitor $v_{dm}(t)$ tenha um valor maior que o pico da tensão da rede. Durante os transitórios no sistema elétrico (tensão CA, carga) o compensador pode absorver (injetar) elevados valores de potência ativa instantânea fazendo com que a tensão do barramento CC aumente (diminua). Assim, torna-se necessário que o capacitor consiga absorver (fornecer) o fluxo de energia sem que sua tensão ultrapasse os valores mínimo e máximo pré-estabelecidos. Terminado o transitório, deve-se restabelecer a tensão $v_{dm}(t)$ no valor estipulado (v_{d_ref}), através da malha de controle da tensão no capacitor.

O diagrama de blocos mostrando as malhas de controle da corrente CA e da tensão no barramento CC é visto na Fig.5.3-1.

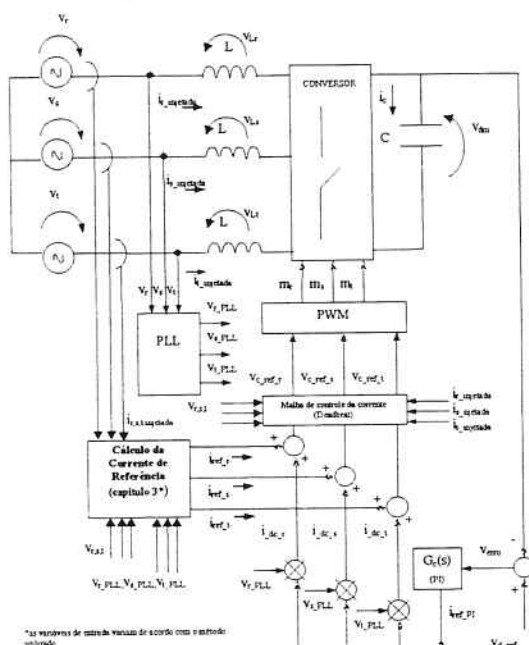


Fig.5.3-1 - Diagrama de bloco mostrando o conversor e as malhas de controle de tensão no barramento CC e da corrente CA

A tensão sobre o capacitor (v_{dm}) é subtraída da tensão de referência (v_{d_ref}),

gerando a tensão de erro (v_{erro}), que é aplicada ao controlador PI ($G_c(s)$). Multiplica-se a corrente de saída do controlador PI (i_{ref_PI}) pela tensão unitária de cada fase obtida de um circuito PLL (v_{r_PLL} , v_{s_PLL} , v_{t_PLL}), produzindo os sinais (i_{dc_r} , i_{dc_s} , i_{dc_t}) em fase com as tensões da rede e responsáveis pela injeção (absorção) de potência ativa no capacitor se $i_{ref_PI} > 0$ ($i_{ref_PI} < 0$). Estes sinais são somados aos sinais correspondentes as correntes de referência de cada fase (i_{ref_r} , i_{ref_s} , i_{ref_t}).

Obtém-se o projeto do controle da tensão do barramento CC através da linearização do modelo não linear que descreve o comportamento da tensão $v_{dm}(t)$ em função da corrente de referência $i_{ref_PI}(t)$. Incluindo-se o conversor, o PLL, multiplicadores e a malha de corrente no bloco G , pode-se redesenhar o circuito da Fig.5.3-1 de acordo com a Fig.5.3-2.

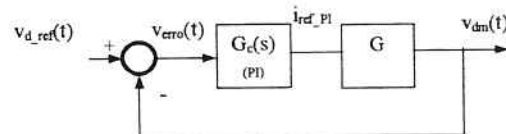


Fig.5.3-2 -Diagrama de bloco simplificado da malha de tensão

A função de transferência do controlador PI (Dorf, 1989) é ser dada pela eq.(5.3-1).

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (5.3-1)$$

A função de transferência em malha fechada do sistema pode ser descrita na eq.(5.3-2).

$$T(s) = \frac{\bar{G}(s) \cdot G_c(s)}{1 + \bar{G}(s) \cdot G_c(s)} = \frac{v_{dm}(s)}{v_{d_ref}(s)} \quad (5.3-2)$$

Pelo critério ITAE (Dorf, 1989) e (Junqueira et al. 2002) T_s é definido como o tempo de acomodação do sinal e ζ é o fator de amortecimento. Assim, o valor de K_p e K_I podem ser obtidos através eqs.(5.3-3) e (5.3-4).

$$K_p = \frac{0,93 \cdot \omega_n \cdot C \cdot v_{dm}}{V_p} \quad (5.3-3)$$

$$K_i = \frac{2}{3} \cdot \frac{\omega_n^2 \cdot C \cdot \overline{V_{dm}}}{V_p} \quad (5.3-4)$$

6 PROJETO DO CONVERSOR

Nesta dissertação optou-se pela utilização de um conversor do tipo VSI nas simulações do compensador completo. A seguir descreve-se o processo de cálculo do indutor de acoplamento do conversor VSI, da escolha da frequência de chaveamento, da tensão do link CC, da determinação do capacitor do link CC e do dimensionamento do controlador PI. Após a determinação de todos estes fatores, a simulação completa de um conversor do tipo fonte de tensão é apresentada no cap.7.

6.1 Dimensionamento do indutor de acoplamento do conversor VSI

A determinação do valor do indutor de acoplamento do conversor VSI é feita a partir do modelo do conversor monofásico visto na Fig.5.2-2. O mesmo procedimento é adotado para as outras fases. O indutor (L) de acoplamento define a taxa de crescimento da corrente injetada pelo conversor pela relação dada na eq.(5.2-1). Para regime senoidal, calcula-se o fasor da corrente injetada através da eq.(6-1).

$$\dot{I}_{injetada} = \frac{(\dot{V} - \dot{V}_c)}{j \cdot \omega L} \quad (6-1)$$

Para baixos valores de L, a elevada taxa de variação de corrente produzirá elevados valores de ondulação na mesma. Um maior valor de L propicia uma menor ondulação na corrente injetada, implicando em maior volume e custo.

Para cada fase, a reatância do filtro (X_L) deve ser da ordem de 10% a 20% do módulo da impedância de entrada (Z) vista pela rede. Este valor é empírico e deve-se observar que uma reatância

muito elevada provoca uma maior queda de tensão, requerendo um aumento no valor da tensão do barramento CC do conversor. Nesta dissertação, adotou-se uma reatância de 10% do módulo de impedância equivalente de entrada do conversor. O módulo da impedância de entrada do conversor, por fase, pode ser dado pela eq.(6-2), sendo V_p e I_p respectivamente os valores de fase de pico da tensão e da corrente da rede.

$$Z = \frac{V_p}{I_p} \quad (6-2)$$

O valor da indutância pode ser calculado pela eq.(6-3), sendo f a frequência da rede.

$$L = \frac{0,1}{2 \cdot \pi \cdot f} \cdot \frac{V_p}{I_p} \quad (6-3)$$

Na prática nunca existe um indutor puro, o mesmo sempre apresenta uma certa resistência incorporada. Assim, adota-se também empiricamente uma resistência em série com o indutor com um valor de 10% do valor da reatância calculada na frequência da rede. O fato de se considerar o modelo do indutor com uma resistência em série propicia a diminuição do tempo transitório quando da simulação do sistema de compensação, além de aproximar-se mais das características de um indutor real.

6.2 Escolha da frequência de chaveamento

Pela escolha da frequência de chaveamento determina-se qual a frequência da portadora triangular da modulação PWM. Quanto maior a frequência de chaveamento utilizada maior se torna o afastamento das harmônicas com relação à fundamental, reduzindo-se a amplitude da ondulação da corrente. No entanto, os dispositivos semicondutores de chaveamento (transistor, IGBT, MOSFET e outros) possuem limites quanto a frequência de chaveamento, o que impossibilita a escolha de uma frequência de chaveamento extremamente elevada. Não se deve utilizar uma frequência de

chaveamento muito baixa, pois assim a amplitude do sinal da fundamental acabar por ser influenciado pela amplitude da componente harmônica relativa ao chaveamento. Segundo (Pomilio, 1998), recomenda-se um valor mínimo para a frequência de chaveamento de aproximadamente 10 vezes o máximo valor da frequência do sinal de referência.

6.3 Escolha do capacitor do barramento CC

Teoricamente a potência média injetada pelo compensador de desequilíbrios é nula, fazendo com que o lado CC do conversor do compensador se resuma a um capacitor.

A tensão do barramento CC influi diretamente no dimensionamento desse capacitor. Adota-se o valor da tensão do barramento CC empiricamente. Este valor não deve ser muito elevado devido ao aumento do custo do conversor, pois necessita-se de dispositivos de chaveamento capazes de operar com tensões mais elevadas. Tensões elevadas implicam não só em melhor capacidade de rastreamento, como mais ondulação na corrente. Nesta dissertação adotou-se um valor da tensão do barramento CC de 1,2 a 1,3 vezes a tensão de linha de pico da rede. Dimensiona-se o capacitor do barramento CC de modo que este supra as potências oscilatórias que o conversor deve compensar e apresente valores reduzidos de ondulação na tensão $v_{dm}(t)$. No caso de um compensador de desequilíbrios, a potência oscilatória a ser compensada é a potência devido a sequência negativa na carga. Assim, o capacitor é calculado conforme a eq.(6-4).

$$C = \frac{3}{2} \cdot \frac{V_p \cdot I_-}{v_{dm} \cdot \omega \cdot \Delta v_{dm}} \quad (6-4)$$

Neste trabalho, adotou-se o valor de pico de fase $V_p=1$ V, a oscilação de tensão no barramento CC de 5%, e a tensão do

barramento CC (v_d) de 2,3 V compensando uma corrente de sequência negativa de 1 A. Calculando-se o valor de C pela eq.(6-4) obtêm-se o valor de 16 mF.

6.4 Cálculo do Controlador PI

No item 5 foi explanado e demonstrado o cálculo das constantes do controlador PI responsável pelo controle da tensão no barramento CC. Assim, considerou-se um tempo de acomodação T_s igual a 10 ciclos de uma senóide de 60 Hz e o fator de amortecimento $\zeta=0,7$ obtendo-se um valor de $\omega_n = 34,3 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$.

7 SIMULAÇÃO DE UM COMPENSADOR COMPLETO

Abaixo, apresenta-se um quadro resumo com as opções adotadas para a simulação completa de um sistema de compensação de desequilíbrios:

Conversor	VSI
Malha de tensão	PI
Malha de corrente	Deadbeat
Modulação	PWM com portadora triangular assimétrico $f_c=f_s/2$
Método para cálculo da corrente de referência	DSNI (Método proposto)
Tensão de pico de fase $[V_p]$	1 (p.u.)
Corrente de sequência negativa $[I_-]$	1 (p.u.)
Frequência da rede $[f]$ (Hz)	60
Impedância equivalente da rede $[Z]$ (por fase)	10%
Indutância de Acoplamento $[L]$	0,265 (mH)
Resistência em série com a indutância de acoplamento $[\Omega]$	10% de X_L
Capacitor do barramento CC $[C]$	16 (mF)
Tensão do barramento CC $[v_{d \text{ ref}}]$	2,3 (p.u.)
Ondulação da tensão do barramento CC	5%
Frequência de chaveamento $[f_c]$	10k (Hz)
Frequência de amostragem $[f_s]$	20k (Hz)
Tempo de acomodação do sinal $[T_s]$ (PI)	10 ciclos
K_p	1,18
K_i	28

Tabela III - Quadro resumo das características adotadas do compensador para a simulação completa do sistema

Todos os valores acima e opções de projeto foram calculados e justificados nos itens 5 e 6.

Para a simulação completa do sistema foi utilizado o software Matlab versão 6.1 – Simulink–Power System Blockset com passo de amostragem de $1\mu s$.

Nas Figs.7.1-1 é apresentada o espectro da corrente injetada utilizando a estratégia deadbeat, nota-se apenas a presença de harmônicos próximos a frequência de chaveamento (10 kHz), aparece também uma harmônica de baixa frequência cujo motivo aparente é devido à realimentação da malha fechada. Esta ondulação em baixa frequência pode ser vista também na Fig.7.1-2 que apresenta a tensão de referência (v_{ref}) enviada ao bloco PWM do conversor estático.

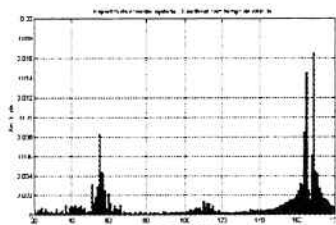


Fig. 7.1-1 - Espectro da ondulação da corrente (Estratégia deadbeat levando-se em conta o tempo de atraso para o cálculo do algoritmo)

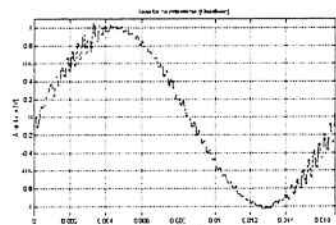


Fig. 7.1-2 - Tensão de referência do bloco PWM-fase r (Estratégia deadbeat levando-se em conta o tempo de atraso para o cálculo do algoritmo)

7.2 Simulação do Sistema de Compensação

A carga simulada é uma carga variável (Fig.7.2.1). Todas as simulações são apresentadas com condições quiescentes em “ $t=0$ ”, exceto o capacitor do barramento CC, que se encontra previamente carregado em 2,3 V.

O método proposto (DSNI) para o cálculo da componente de sequência negativa da corrente e sua compensação,

apresentado no item 3 é simulado para uma carga variável ligada em triângulo. Todas as amplitudes das tensões e correntes são representadas pelos seus valores de pico, exceto quando especificado em contrário e o grau de desequilíbrio (X%) é calculado segundo a eq.(2-1).

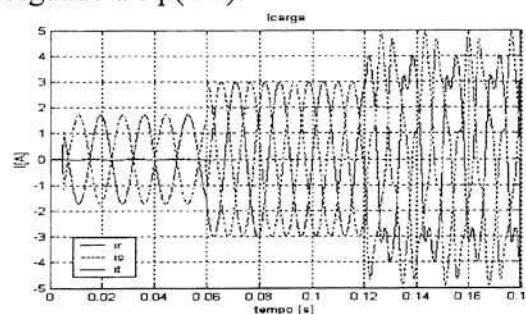


Fig.7.2-1 - Correntes de linha da carga variável

Apresentam-se a seguir, as formas de onda da corrente injetada pelo filtro e na rede após a compensação, respectivamente (Figs.7.2-2 e 7.2-3). Nas Figs.7.2-4 e 7.2-6 são apresentadas respectivamente a variação da tensão no barramento CC e a atuação da malha de corrente para uma das fases (fase r).

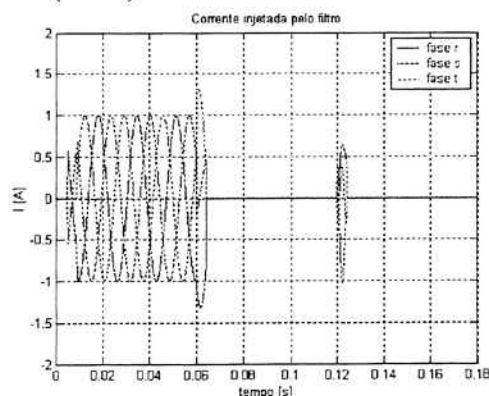


Fig.7.2-2 - Correntes injetadas pelo sistema de compensação

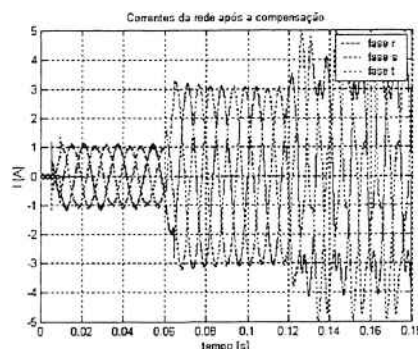


Fig.7.2-3 - Correntes de linha na rede após a compensação

Observa-se pela Fig.7.2-2 que a corrente injetada pelo filtro corresponde ao esperado, sendo injetada apenas a parcela referente a compensação da sequência negativa da corrente da carga. Na Fig.7.2-3, observa-se que a compensação foi realizada no tempo previsto de $\frac{1}{4}$ de ciclo compensando o desequilíbrio do sistema.

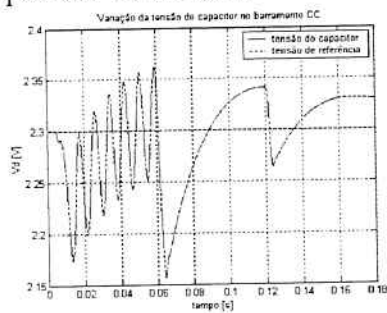


Fig.7.2-4 - Variação da tensão no barramento CC

Pode-se notar que a tensão no barramento CC vista na Fig.7.2-4 apresenta um afundamento no momento do degrau de carga e que a tensão no barramento volta a subir devido a atuação da malha de tensão forçando a injeção de potência ativa de média não nula no capacitor. Após cada aumento de carga, o atraso de $\frac{1}{4}$ de ciclo do bloco que calcula as correntes de referência, faz com que as correntes na rede variem de modo gradual. Como a carga variou de modo abrupto, o compensador deverá alimentar a carga durante o transitório, descarregando o capacitor. O tempo de acomodação não pode ser medido nos curtos intervalos de tempo considerados na Fig.7.2-4. Para tanto, o sistema foi simulado apenas com a carga monofásica, e a variação da tensão no barramento CC é mostrada na Fig.7.2.5, onde se confirma o tempo de acomodação especificado de 10 ciclos de 60 Hz. Esta figura deixa claro o efeito da injeção de potência instantânea de sequência negativa, de frequência igual a 120 Hz, na ondulação da tensão no capacitor. Verifica-se que a ondulação percentual é de 5% coincidindo com a especificação de projeto (item 6.3).

Verifica-se na Fig.7.2.4, que, para $t > 6\text{ms}$, tem-se uma ondulação quase nula, devido à ausência de sequência negativa.

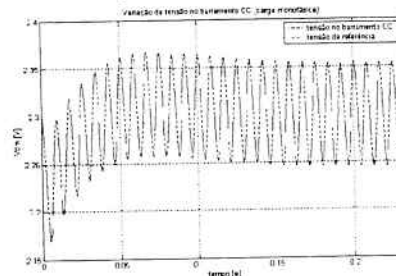


Fig.7.2-5 - Variação da tensão no barramento CC (carga monofásica)

O comportamento da malha de corrente na fase r é apresentado na Fig.7.2-6. Nota-se o bom funcionamento da malha de corrente.

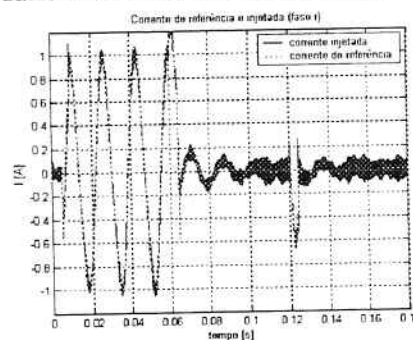


Fig.7.2-6 - Comportamento da malha de corrente (fase r)

8 CONCLUSÕES

A análise e comparação dos diferentes métodos para compensação de desequilíbrios feita no item 4 mostraram que quando o objetivo é somente a compensação de desequilíbrios das correntes da rede o método proposto de injeção direta de correntes de sequência negativa (DSNI) se mostrou o mais eficiente, apresentando resposta rápida com menor complexidade de cálculo.

A opção pela compensação total ou parcial dos distúrbios no sistema (desequilíbrios, harmônicos e reativos) depende das características desejadas e do custo envolvido. Sendo o custo dependente de uma série de fatores, incluindo a escolha do conversor e dos diversos componentes e materiais, entre outros, este trabalho não

considerou aspectos de implementação. Os procedimentos de cálculo das tensões, correntes e potências nos diversos componentes apresentados neste trabalho, bem como de projeto dos indutores, capacitores e dos controladores, fornecem ao projetista ferramenta para a execução do anteprojeto do compensador. As diversas comparações entre os métodos para o cálculo em tempo real da corrente de referência do conversor PWM servem como base para a escolha do método adequado de acordo com a necessidade de compensação.

Mostrou-se que o método DSNI é eficaz e promissor frente aos outros métodos. O tempo de resposta de $\frac{1}{4}$ de ciclo e sua fácil implementação, tornam sua utilização uma opção viável.

LISTA DE REFERÊNCIAS

- ABELLÁN, A.; GARCERÁ, G.; BENAVENT, J. A New Control Method for Obtaining Reference Currents of Shunt Active Power Filters in Unbalanced and Non-Sinusoidal Conditions. In: *Industrial Electronics- ISIE'99 Proceedings of the IEEE International Symposium on*, Jul. 1999. *Anais eletrônicos*. v.2.
- AKAGI, H.; NABAE, A. The p-q Theory in Three-Phase Systems Under Non-Sinusoidal Conditions. *ETEP*, v.3, n.1, Jan. Feb. 1993.
- BENCHAITA, S.; SALEM-NIA. A comparison of Voltage Source and Current Source Shunt Active Filter by Simulation and Experimentation. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.14, n.2. May. 1999.
- BHAVARAJU, V.P.; ENJETI, P.N. Analysis and Design of an Active Power Filter for Balancing Unbalanced Loads. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v.8, n.4, Oct. 1993.
- BRITTAIN, J.C. Charles F. Scott : A Pioneer in Electrical Power Engineering. *IEEE Industry Applications Magazine*, p.6-8. Nov. Dec. 2002.
- BUSO, S.; MALESAN, L.; MATTAVELLI, P. Comparison of Current Control Techniques for Active Filter Applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v.45, n.5, Oct. 1998.
- BUSO, S. Digital Control of Power Converters (Lecture Notes). Disponível em: <http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/Digital.html>. Acesso em: 2003.
- CHANG, G.W.; SHEE, T. A Comparative Study of Active Power Filter Reference Compensation Approaches. *IEEE 2002 Power Engineering Society Summer Meeting*, 21-25 July 2002. *Anais, IEEE*, v.2, p.1017-1021. 2002.
- CHEN, C.C.; HSU, Y. A Novel Approach to the Design of a Shunt Active Filter for an Unbalanced Three-Phase Four Wire System under Nonsinusoidal Conditions. In: *Power Engineering Society Summer Meeting*, Jul. 2000. *Anais eletrônicos*. v.2, p.1059.
- CHEN, Tsai-Hsiang. Criteria to estimate the Voltage Unbalances due to High-Speed Railway Demands. *IEEE Transactions on Power Systems*, v.9, n.3, Aug. 1994.
- CHOI, S.; LEE, W.; HYUN, D.; LEE, T. The Control system of the Active Power Filter Considering Power Factor in Unbalanced Load. In: *Industry Applications Conference*, Oct. 2000. *Anais eletrônicos*. v.4, p.2123-2128.
- CRUZ, J.J. da. *Controle Robusto Multivariável*. São Paulo: Edusp, 1996. cap.2.2. p.22
- CUTRIL, R.; MATAKAS JR., L. Reference Currents Determination Techniques For Load Unbalance Compensation. In: *7º Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência- COBEP'03*, Fortaleza, Set. 2003. CD-ROM
- CZARNECKI, L.S. Power Factor Improvement of Three-Phase Unbalanced Loads with Non-Sinusoidal Supply Voltage. *ETEP*, v.3, n.1, Jan. Feb. 1993.
- E.E. STAFF DEL M.I.T. *Circuitos Magnéticos Y Transformadores*. Madri: Editorial Reverte S.A., 1965. p.638-640.
- DIXON, J.W.; GARCIA, J.; MORÁN, T.L. A Control System for a Three Phase Active Power Filter which Simultaneously Compensates Power Factor and Unbalanced Loads. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v.42, Issue:6, p.636-641. Dec. 1995.
- DORF, R.C. *Modern Control Systems*. 5ed. Adison-Wesley Publishing Company, 1989. p.131-163.
- FERRERO, A.; MORANDO, P.; OTTOBONI, R.; SUPERTI-FURGA, G. On the Meaning of the Park Power Components in Three-Phase Systems under Non-Sinusoidal Conditions. *ETEP*, v.3, n.1, Jan. Feb. 1993.
- FERRERO, A. Unbalancing and Distorting Loads : Can They Be Detected and Their Detrimental Effect Be Measured ?. In: *Harmonics and Quality of Power*, Proceedings 8th International Conference on, Oct. 1998. *Anais eletrônicos*. v.2, p.809-813.
- HINGORANI, N.; GYUGYI, L. *Understanding Facts - Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems*. IEEE Press, 2000
- HOCHGRAF, C.; LASSETER, R. Statcom Controls for Operation with Unbalanced Voltages. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.13, n.2, Apr. 1998.
- JUNQUEIRA, A.D.; MATAKAS JR., L.; KOMATSU, W. Digital Implementation of Three-Phase Rectifier with Deadbeat Controller. *Revista Eletrônica de Potência*, v.7, n.1, Nov. 2002.
- KAISER, W.; KOMATSU, W.; MATAKAS JR., L.; PÔ, W.; ROSSI, L.N. Influência de conversores estáticos em fornos à canal. In: *VIII Congresso Brasileiro de Automática*, 1990, Bêlem, Brasil
- KAZERANI, M.; YE, Y. Comparative Evaluation of Three-Phase PWM Voltage- and Current-Source Converter Topologies in FACTS Applications. *Power Engineering Society Summer Meeting*, 21-25 July 2002. *Anais, IEEE*, v.1, p.473-479. 2002
- KAZMIERKOWSKI, M.P.; DZIENIAKOWSKI, M.A. Review of Current Regulation Methods For VS-PWM Inverters Industrial Electronics. Conference Proceedings, ISIE'93 - Budapest, IEEE International Symposium on, 1-3 June 1993, p.448-456. 1993
- KERSTING, W.H. Causes and Effects of Unbalanced Voltages Serving an Induction Motor. *IEEE Transactions on Industry Applications*. v.37, Issue:1, p.165-170. Jan. Feb. 2001.

- KIM,H. ;BLAABJERG,F. ;JENSEN,B.B. ;CHOLJ. Instantaneous Power Compensation in Three-Phase Systems by Using p-q-r theory. In:Power Electronics Specialists Conference,2001-PESC'2001- IEEE 32nd Annual,June,2001. **Anais eletrônicos.** v.2. p.478-485.
- KIM,H. Control an Active Filter in Unbalanced Non-sinusoidal Source Voltages. In:Power Conversion Conference Proceedings of,Osaka,Apr,2002. **Anais eletrônicos.** v.2. p.831-836. Acesso restrito disponível em:<periódicos IEEE-Capes>.
- LEDWICH,G. ;GEORGE,T.A. Using Phasors to analyze power system negative phase sequence voltages caused by unbalanced loads. **IEEE Transactions in Power Systems.** v.9, n.3, Aug. 1994.
- LIN,C.E. ; CHEN,C.L. ; HUANG,C.L. Calculating Approach and Implementation for active Filters in Unbalanced Three-Phase System using Synchronous Detection Method. In:Industrial Electronics,Control,Instrumentation and Automation - 'Power Electronics and Motion Control', Proceedings of the 1992 International Conference on,Nov.1992. **Anais eletrônicos.** v.1. p.374-380.
- MACHMOUM,M. ;BRUYANT,N. Control methods for three-phase active power filters under non-ideal mains voltages. In:Harmonics and Quality of Power, Proceedings 9th International Conference on,Oct.2000. **Anais eletrônicos.** v.2. p.661-666.
- MALESANI,L. ;TOMASIN,P. PWM Current Control Techniques of Voltage Source Converters - A Survey. Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, 1993. Proceedings of the IECON '93., International Conference on, 15-19 Nov. 1993. **Anais.** v.2. p.670-675. 1993.
- MARQUES,G.D. A Comparison of Active Filters Control Methods in Unbalanced and Non-sinusoidal Conditions. In:Industrial Electronics Society - IECON'98 Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE,Aug.Sep.1998. **Anais eletrônicos.** v.1. p.444-449. Acesso restrito disponível em:<periódicos IEEE-Capes>.
- MASWOOD,A.I. A PWM Voltage Source Inverter with PI Controller for Instantaneous Motor Current Control. Power Electronics and Drive Systems, 1995., Proceedings of 1995 International Conference on, 21-24 Feb. 1995. v.2. p.834-837. 1995.
- MATAKAS JR., L. Conexão Paralela de Conversores Estáticos do Tipo Fonte de Tensão Sem Transformador. 1998. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica,Universidade de São Paulo. São Paulo.
- MATAKAS JR.,L. ;MASADA. A Instantaneous Optimum PWM and its comparison to the Space Vector and Regular Sampling Methods. In:National Convention of the Institute of Elec. Eng. of Japan,1994. **Anais.** v.5. p.143. 1994.
- MATTAVELLI,P. A Modified Dead-Beat control for UPS using Disturbance Observers. In:Power Electronics Specialists Conference-PESC'02 33rd Annual,June. 2002 **Anais eletrônicos.** v.4. p.1618-1623.
- MATSUI,M. ;FUKAO,T. A Detecting Method for Active-Reactive-Negative Sequence Powers and its Application. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v.26, n.1, Jan. Feb. 1990.
- MCGRANAGHAM,M. Active Filter Design and Specification for Control of Harmonics in Industrial and Commercial Facilities. **Electrotek Concepts**,Inc. Knoxville TN, USA. Disponível em:<<http://www.dranetz-bmi.com/pdf/activeFilter.pdf>>. Acesso em:2003.
- MOHAN, N.; UNDELAND, T.M. ;ROBBINS, W.P. **Power Electronics Converters, Applications and Design.** 2ed. New York:John Wiley & Sons, 1995
- NABAE, A.; NAKANO, H.;TOGASAWA,S. An Instantaneous Distortion Current Compensator Without Any Coordinate Transformation. In:International Power Electronics Conference-IPEC'95,Yokohama,1995. p.1651-1655. 1995.
- NAGY, I.; MATAKAS JR., L.; MASADA, E. Application of the Theory of Chaos in PWM Technique of Induction Motors. In:International Power Electronics Conference-IPEC'95,Yokohama,1995. p.58-63. 1995.
- NIKOLAENKO,V.G. Optimal Balancing of Large Unbalanced Loads Using Shunt Compensators. In:Harmonics and Quality of Power , Proceedings 8th International Conference on,Oct.1998. **Anais eletrônicos.** v.1. p.537-542.
- PENTEADO JR., A.A. **Compensadores estáticos para desequilíbrios : um procedimento de especificação e de análises das interferências no sistema elétrico.** 1985. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica,Universidade de São Paulo. São Paulo.
- POMILIO, J.A. **Apostila Eletrônica de Potência.** São Paulo: Unicamp, Fev 1998 Rev. Jan. 2000 cap.2.
- ROBBA, J. et al. **Introdução a Sistemas Elétricos de Potência.** 2ed. São Paulo:Edgard Blucher, 1996.
- SAMESIMA, M.I. **Compensadores Estáticos de Reativos e de Desequilíbrios em Sistemas Elétricos de Potência.** 1984. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica,Universidade de São Paulo. São Paulo.
- SENINI,S. ;WOLFS,P. Hybrid Active Filter for Harmonically Unbalanced Three Phase Three Wire Railway Traction Loads. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v.15, n.4, July. 2000.
- SENINI,S.T. ;WOLFS,P.J. Novel Topology of Unbalanced Load in Single Phase Electric Traction Systems. In:Power Electronics Specialists Conference,2001-PESC'2002- IEEE 33rd Annual,June,2002. **Anais.** v.3. p.1208-1212. 2002.
- SOUZA , F.P. de. **Correção do Fator de Potência para Instalações de Baixa Potência empregando Filtros Ativos.** 2000. Tese (Doutorado) - Instituto Nacional de Eletrônica de Potência,Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis.
- VERDELHO,P. ; MARQUES,G.D. Design and Performance of an Active Power Filter and Unbalanced Current Compensator. In:Industrial Electronics,Control and Instrumentation,Sep.1994. IECON'94,20th International Conference on. **Anais eletrônicos.** 1994. v.1. p.422-427.
- WATANABE,E. ;AREDES,M. Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações - Filtros Ativos e FACTS". Tutorial in the CBA'98 (XII Brazilian Automatic Control Conference), Uberlândia, Brazil, Sep.14-18, 1998.
- WATANABE,E. ;AREDES,M. ;AKAGI,H. The p-q theory for active filter control : some problems and solutions. In:XIV Congresso Brasileiro de Automática-CBA,2002.
- WILLEMS,J.L. Current Compensation in Three-Phase Power Systems. **ETEP**, v.3, n.1, Jan. Feb. 1993.
- ZHANG, G.; XU, Z. A New Real-time Negative and Positive Sequence Components Detecting Method Based on Space Vector. In:POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER MEETING 2001,Jan.-Feb.2001. **Anais eletrônicos.** IEEE, v.1. p.275-280.

BOLETINS TÉCNICOS - TEXTOS PUBLICADOS

- BT/PEA/9301 - Alguns Aspectos do Problema de Planejamento de Sistemas de Transmissão sob Incertezas - CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN, ERNESTO JOÃO ROBBA
- BT/PEA/9302 - Vibrações em Motores Elétricos Provocadas por Forças Magnéticas - ORLANDO SILVIO LOBOSCO, HENRIQUE PRADO ALVAREZ
- BT/PEA/9303 - Corrente Contínua em Alta Tensão: Aplicação de Equipamentos Elétricos e Modelos para Análises de Confiabilidade - LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9504 - Automação e Informatização Aplicadas a Controle e Supervisão de Processos de Pesagem - EVALDO ARAGÃO FARQUI, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/9505 - Modernização e Reabilitação de Usinas Hidrelétricas - DJALMA CASELATO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9506 - Estudo do Campo Elétrico Provocado por Linhas de Transmissão em Corrente Alternada - CELSO PEREIRA BRAZ, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9507 - Aspectos Sobre Processos Automatizados de Pesagem Rodoferroviária: Uma Proposta de Modernização de Postos em Operação - SERGIO LUIZ PEREIRA, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9508 - Usinas Hidrelétricas em Rotação Ajustável: Novas Premissas para o Planejamento Energético - MARCO ANTONIO SAIDEL, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9509 - Desenvolvimento de um Sistema de Automação de Subestações pela integração de Módulos de Software e Hardware Existentes no Mercado Brasileiro - L. C. MAGRINI, J. A. JARDINI, S. COPELIOVITCH, N. KABA FILHO
- BT/PEA/9510 - Proposta de um Modelo para Estudos de Aplicação de Compensadores Estáticos em Sistemas de Potência - JOSÉ TOSHIYUKI HONDA, LUIS CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/9511 - Metodologia e Testes para Redução das Distâncias Elétricas entre Fases de Barramentos de Subestações de 138kV Abrigadas, ANDRÉ NUNES SOUZA, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9512 - Avaliação da Severidade da Poluição para o Dimensionamento da Isolação das Redes Elétricas - ARNALDO G. KANASHIRO, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9513 - Processos Auto-Adaptativos para Cálculo de Campos Eletromagnéticos pelo Método dos Elementos Finitos - LUIZ LEBENSZTAJN, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9514 - Investigação Experimental sobre os Arcos Sustentados em Sistemas Elétricos de Baixa Tensão - FRANCISCO H. KAMEYAMA, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/9515 - Fast Voltage Compensation: A Mean to Improve the Quality of Energy Supply - H. ARANGO, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9516 - Modelo Avançado para Planejamento de Sistemas Energéticos Integrados Usando Recursos Renováveis - LUIZ ANTONIO ROSSI, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9601 - Metodologias para Planejamento de Sistemas de Distribuição: Estado-da-Arte e Aplicações - PAULO ROBERTO NJAIM, CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/9602 - Integração de Relés Digitais em Sistemas de Automação de Subestação - JERÔNIMO CAMILO SOARES JR., JOSÉ A. JARDINI, LUIZ C. MAGRINI
- BT/PEA/9603 - Paradigma de Planejamento sob Incertezas - Aplicação ao Planejamento dos Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - ALBERTO BIANCHI JUNIOR, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9604 - Um Sistema de Controle de Velocidade para Motor de Indução Trifásico - CELSO KAZUMI NAKAHARADA, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9605 - Controle Vetorial de Motores de Indução, Independente das Alterações de Parâmetros da Máquina - NERY DE OLIVEIRA JÚNIOR, WALDIR PÓ
- BT/PEA/9606 - Compactação de Subestações de 145 kV Através da Redução das Distâncias entre Fases - GERVASIO LUIZ DE CASTRO NETO, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9607 - Curvas de Carga de Consumidores Industriais - Agregação com Outras Cargas - RONALDO PEDRO CASOLARI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9608 - Utilização de Curvas de Carga de Consumidores Residenciais Medidas para Determinação de Diversidade de Carga, e Carregamento de Transformadores de Distribuição - EDUARDO LUIZ FERRARI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9609 - Comportamento Elétrico de Cabos Cobertos e Pré-Reunidos pelo Método dos Elementos Finitos - JOÃO JOSÉ DOS SANTOS OLIVEIRA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9701 - Repotenciação de Hidrogeradores: Uma Proposta de Metodologia de Análise e Implantação - FÁBIO SALOMÃO FERNANDES SÁ, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.

- BT/PEA/9702 - Desenvolvimento de um Sistema de Automação para um Sistema de Automação para um Centro de Operação da Distribuição - PAULO SÉRGIO MIGUEL SURUR, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9703 - Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição Utilizando Programação Matemática Probabilística - MARIÂNGELA DE CARVALHO BOVOLATO, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9704 - Técnicas de Inteligência Artificial Aplicadas ao Problema de Planejamento da Expansão do Sistema de Distribuição de Energia Elétrica - SALETE MARIA FRÖES, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9705 - Aproveitamento Funcional de Sistemas de Controle e Proteção Digitais em Subestações de Distribuição - JOSÉ LUIZ PEREIRA BRITTES, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9706 - Avaliação de Algoritmo para Proteção Diferencial de Transformadores - LUÍS SÉRGIO PIOVESAN, EDUARDO CÉSAR SENER
- BT/PEA/9707 - Sistema de Proteção para Falhas de Alta Impedância - CAIUS VINICIUS SAMPAIO MALAGODI, EDUARDO CÉSAR SENER
- BT/PEA/9708 - Um Ambiente para Planejamento da Operação de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - KLEBER HASHIMOTO, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9709 - Análise do Custo - Benefício da Instalação de Equipamentos de Proteção em Redes Aéreas de Distribuição - ANTONIO CLAUDINEI SIMÕES, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9710 - Planejamento Integrado de Recursos Energéticos - PIR - para o Setor Elétrico - MIGUEL EDGAR MORALES UDAETA, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9711 - Análise de Defeitos no Motor de Indução Trifásico para Predição de Falhas Incipientes - JOSÉ ANTONIO URCIA MISARI, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9712 - Gerenciamento de Transformadores de Distribuição com Análise na Perda de Vida - CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN, VLADIMIR DUARTE BELCHIOR
- BT/PEA/9713 - Uma Nova Metodologia para a Avaliação de Sistemas de Aterramento Metro-Ferrovíarios - JOSÉ AUGUSTO PEREIRA DA SILVA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9714 - Um Exemplo de Decomposição de Fluxos em Transformadores - NICOLAU IVANOV, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9715 - Custos de Transporte de Energia Elétrica - Análise de Metodologias - DÁRIO TAKAHATA, CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/9716 - Bancada de Ensaios para a Avaliar o Comportamento de Acionamentos Controlados por Inversores PWM - JOSÉ ANTONIO CORTEZ, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9717 - Integração de Técnicas de Diagnóstico de Falhas em Motores de Indução Trifásicos ao Sistema de Gerenciamento da Manutenção Industrial - JOSÉ A. URCIA MISARI, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9801 - Análise de Confiabilidade para Gerenciamento Operacional de Sistemas Automatizados de Pesagem Rodoviária - RUBENS LOPES ROLIM, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9802 - Projeto de um Ondulador Híbrido e Estudo de Onduladores Derivados de Solenóide, para Utilização em Laser a Elétrons Livres - FRANCISCO SIRCILLI NETO
- BT/PEA/9803 - Configuração de Redes de Distribuição de Energia Elétrica com Múltiplos Objetivos e Incertezas através de Procedimentos Heurísticos - CARLOS C. BARIONI DE OLIVEIRA, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9804 - Conceituação e Aplicação de Metodologia de Gerenciamento pelo Lado da Demanda em uma Empresa Distribuidora de Energia Elétrica - FERNANDO MONTEIRO DE FIGUEIREDO, JOSÉ ANTÔNIO JARDINI
- BT/PEA/9805 - Acoplamento Circuito Elétrico - Método dos Elementos Finitos em Regime Transitório Utilizando a Metodologia de Dommei - NANCY MIEKO ABE, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9806 - Modelo de Arco Elétrico Aplicado ao Estudo da Interrupção da Corrente em Disjuntores de Média Tensão - LUCILIUS CARLOS PINTO, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9807 - Proteção para Falta de Alta Impedância Utilizando o Sistema de Rádio Troncalizado - MARCO ANTONIO BRITO, EDUARDO CESAR SENER
- BT/PEA/9808 - Contribuição ao Estudo e Projeto dos Motores Síncronos de Relutância - IVAN EDUARDO CHABU, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9809 - Cabos Cobertos: Metodologia para a Determinação da Espessura da Cobertura - ANTONIO PAULO DA CUNHA, JOSÉ ANTÔNIO JARDINI
- BT/PEA/9810 - Eletrificação Rural - Avaliações em São Paulo - MARCELO APARECIDO PELEGRINI, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/9811 - Política de Eletrificação Rural em São Paulo - LUIZ HENRIQUE ALVES PAZZINI, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/9812 - Uso Racional e Eficiente de Energia Elétrica: Metodologia para a Determinação dos Potenciais de Conservação dos Usos Finais em Instalações de Ensino e Similares - ANDRÉ LUIZ MONTEIRO ALVAREZ, MARCO ANTONIO SAIDEL
- BT/PEA/9813 - Diretrizes para a Regulação da Distribuição de Energia Elétrica - JAMES S. S. CORREIA, LINEU BELICO DOS REIS

- BT/PEA/9814 - Distribuição da Tensão de Impulso em Enrolamentos de Transformadores de Distribuição - PEDRO LUÍS SANTUCCI DE MENDONÇA, AUGUSTO FERREIRA BRANDÃO JÚNIOR
- BT/PEA/9815 - Estudo Comparativo entre os Diversos Métodos de Determinação do Rendimento de Motores de Indução - FRANCISCO ANTONIO MARINO SALOTTI, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/9816 - A Nodal Analysis Approach Applied to Electric Circuits Coupling in Magnetodynamic 2D FEM - MAURÍCIO CALDORA COSTA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9817 - Informatização e Automação dos Órgãos Gestores de Mão de Obra - EDUARDO MARIO DIAS, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/9818 - Frequência de Ocorrência de Sobretensões Originárias de Descargas Atmosféricas em Linhas de Distribuição - NELSON MASSAKAZU MATSUO, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9819 - Um Método de Imposição de Pólos no Estudo da Estabilidade de Redes Elétricas a Pequenas Perturbações - PERCIVAL BUENO DE ARAUJO, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9820 - Inter-Relação do Planejamento Agregado de Investimentos com o Planejamento Localizado de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica - JUCEMAR SALVADOR SIMÕES, NELSON KAGAN
- BT/PEA/9821 - A Produção de Energia Através das Células de Combustível - JOSÉ LUIZ PIMENTA PINHEIRO, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9822 - Automação de Processos - Revisão e Tendências - SERGIO LUIZ PEREIRA
- BT/PEA/9823 - Metodologia para Seleção e Gerenciamento de Transformadores e Distribuição, Aplicando Técnicas de Redes Neutrais Artificiais - SE UN AHN, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9901 - Contribuição ao Modelamento e Simulação de Motores em Ímãs Permanentes e Comutação Eletrônica de Alta Rotação - WANDERLEI MARINHO DA SILVA, CLOVIS GOLDEMBERG
- BT/PEA/9902 - Estudos de Sistemas de Potência e Automação: Plantas Industriais de Grande Porte - MAURÍCIO G. M. JARDINI, JOSÉ A. JARDINI
- BT/PEA/9903 - Synchronous Machines Parameters Identification Using Load Rejection Test Data - E. C. BORTONI, J. A. JARDINI
- BT/PEA/9904 - Identificação de Locais e Opções Tecnológicas para Implantação de Termoeletricas no Sistema Elétrico Brasileiro: Contribuição ao Estado da Arte e Aplicação ao Caso do Gás Natural - ELIANA APARECIDA FARIA AMARAL FADIGAS, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/9905 - Sistema de Manutenção Preventiva de Subestações: Uma Abordagem Semântica para o Monitoramento Integrado - ELIAS ROMA NETO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9906 - Previsão das Perdas Magnéticas na Presença de Harmônicos - MARCELO S. LANCAROTTE, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9907 - Comportamento do Aterramento de Sistemas e Equipamentos de Distribuição sob Impulso - CLEVERSON LUIZ DA SILVA PINTO, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/9908 - Modelo de Sistema de Supervisão e Controle Operacional de Terminais de Contêineres - LEVI SALVI, EDUARDO MARIO DIAS
- BT/PEA/9909 - Medição de Altas Correntes em Frequência Industrial: Instrumentação, Dispositivos de Medição e Calibrações - HÉLIO EIJI SUETA, GERALDO FRANCISCO BURANI
- BT/PEA/9910 - Conversores Auto-Comutados Aplicados em Derivações de Sistemas de Transmissão de Corrente Contínua e Alta Tensão - WILSON KOMATSU, WALTER KAISER
- BT/PEA/9911 - Análise de Desempenho de Sistemas de Aterramento em Alta Frequência pelo Método dos Elementos Finitos - ANGELO PASSARO, JOSÉ ROBERTO CARDOSO, VIVIANE CRISTINE SILVA
- BT/PEA/9912 - Simulação de Motores "Shaded Pole": Uma Nova Abordagem Analítico-Numérica - PASCHOAL SPINA NETO, SILVIO IKUO NABETA, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9913 - Estimadores de Estado para Sistemas de Potência: Análise do Estado da Arte - CLEBER ROBERTO GUIRELLI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9914 - Análise sobre o Comportamento de Sistemas de Proteção Contra Descargas Atmosféricas Utilizando o Método dos Elementos Finitos - SEBASTIÃO C. GUIMARÃES JR., LUCIANO MARTINS NETO, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/9915 - Automação do Atendimento a Reclamações de Interrupção de Energia Elétrica - H. K. Kiyohara, L. C. Magrini, E. P. PARENTE, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9916 - Controle Digital de Tensão e Reativos - PAULA S. D. KAYANO, LUIZ CARLOS MAGRINI, LINEU BELICO DOS REIS, ANTONIO JOSÉ GOMES CARMO, ELIAS DE SOUZA NETO
- BT/PEA/9917 - Localizadores Digitais de Falhas em Linhas de Transmissão - CARLOS EDUARDO DE MORAIS PEREIRA, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9918 - Religamento Monopolar em Linhas de Transmissão - Propostas de Uma Ferramenta para Investigações Paramétricas - IVANIL POMPEU, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/9919 - Viabilidade Técnica de Abertura Monopolar Permanente em Linhas de Transmissão Extra Alta Tensão - FABIANA AP. DE TOLEDO SILVA, JOSÉ ANTONIO JARDINI

- BT/PEA/9920 – Avaliação do U-Net em Custers com Rede My com Rede Myrinet – PAULO A. GEROMEL, SERGIO T. KOFUJI
- BT/PEA/9921 – SAG – Sistema de Apoio Gerencial via Internet – ADRIANO GALINDO LEAL, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/9922 – Desequilíbrio de Tensão em Redes Secundárias de Distribuição – PAULO VINÍCIUS SANTOS VALOIS, CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/9923 – Sistema Não Lineares Controlados pela Lógica Difusa: Uma Aplicação em Acionamentos Constituídos por Motores Assíncronos – WERNER W. PACHECO LUJAN, CÍCERO COUTO MORAES
- BT/PEA/9924 – Arborescência em Cabos Elétricos de Média e Alta Tensão – JOÃO JOSÉ ALVES DE PAULA, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JÚNIOR
- BT/PEA/9925 – Estudo para Otimização de Desempenho de Plantas Industriais Automatizadas – ANTONIO ORLANDO UGULINO, SERGIO LUIZ PEREIRA
- BT/PEA/9926 – Simulação e Análise de Desempenho de Processos Visando a Otimização de Sistemas Integrados de Produção – CÍCERO COUTO DE MORAES, SERGIO LUIZ PEREIRA, JOSÉ ROBERTO R. DE GODOY
- BT/PEA/9927 – Automação Moderna de Processos: Análise de Necessidade, Viabilidade e Tendências Tecnológicas – SERGIO LUIZ PEREIRA
- BT/PEA/9928 – Modelo de Compensação Série Controlada Aplicado ao Estudo do Amortecimento de Oscilações em Sistemas de Potência – JOSÉ ROBERTO PASCON, LUIZ CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/9929 – Cálculo de Trajetórias de Elétrons em Estruturas Magnéticas – YASMARA CONCEIÇÃO DE POLLI, VIVIANE CRISTINE SILVA
- BT/PEA/0001 – Monitoramento de Transformadores de Potência Direcionado à Manutenção com Base nas Condições – SERGIO COSTA, AUGUSTO F. BRANDÃO JR.
- BT/PEA/0002 – Redes Neurais Artificiais Aplicadas a Estudos de Subestações de Alta Tensão Abrigadas Frente a Ensaios de Impulsos Atmosféricos – ANDRÉ NUNES DE SOUZA, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/0003 – Relé Diferencial para Transformador de Potência Implementado com uma Rede MLP – RICARDO CANELOI DOS SANTOS, EDUARDO CESAR SENGER
- BT/PEA/0004 – Minimização de Resíduos Sólidos Urbanos e Conservação de Energia – PAULO HÉLIO KANAYAMA, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/0005 – Modelamento de Conversores CC/CC por meio da Chave PWM – LUIZ FERNANDO P. DE MELLO, WALTER KAISER
- BT/PEA/0006 – Estudo de Surtos em Redes Secundárias de Distribuição Causados por Descargas Atmosféricas Diretas na Rede Primária – WELSON BASSI, JORGE M. JANISZEWSKI
- BT/PEA/0007 – Modelagem da Magnetohidrodinâmica em 3D pelo Método de Elementos Finitos – SERGIO LUÍS LOPES VERARDI, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/0008 – Metodologia para Avaliação do Comportamento e Vida Útil de Motores Alimentados por Fontes Assimétricas de Tensão – JOSÉ LUIZ ANTUNES DE ALMEIDA, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/0009 – Esquema de Aterramento Híbrido (EAH) – FRANCISCO CARLOS PARQUET BIZZARRIA, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JUNIOR
- BT/PEA/0010 – Ferro-Ressnância em Redes Subterrâneas de Distribuição – REGINA LÚCIA LAMY, CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/0011 – A Análise do Ciclo de Vida e os Custos Completos no Planejamento Energético – CLÁUDIO ELIAS CARVALHO, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/0012 – A Agregação de Valor à Energia Elétrica através da Gestão Integrada de Recursos – ANDRÉ LUIZ VEIGA GIMENES, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/0013 – Tochas a Plasma: Características Básicas para Projeto e Construção – MIGUEL BUSSOLINI, ORLANDO SILVIO LOBOSCO
- BT/PEA/0014 – Um Estudo de Correntes Induzidas em Meios Maciços Ferromagnéticos – Aplicação no Projeto de Freios de Correntes Parasitas – ALVARO BATISTA DIETRICH, IVAN EDUARDO CHABU
- BT/PEA/0015 – Incorporação de Sistemas de Co-Geração aos Sistemas Elétricos de Potência: Um Roteiro para Avaliação de Viabilidade Técnico-Econômica – LUIZ DONIZETI CLEMENTINO, LINEU BELICO DOS REIS
- BT/PEA/0016 – Metodologia para Análise da Posse de Equipamentos e Hábitos de Consumo de Energia Elétrica em Baixa Tensão – ALEXANDRE ANGRISANO, RONALDO P. CASOLARI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/0017 – Análise de Índices de Qualidade no Planejamento Agregado de Investimentos em Ambiente de Incertezas – CARLOS ALEXANDRE DE SOUSA PENIN, NELSON KAGAN
- BT/PEA/0018 – Controle de Descarregadores de Navios Utilizando Lógica Fuzzy – ANTONIO DAGOBERTO DO AMARAL JÚNIOR, LUIZ CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/0019 – The Energy Absorption Capacity of Metal Oxide Surge Arresters An Approach for Switching Surges – MANUEL LUÍS BARREIRA MARTINEZ, LUIZ CERA ZANETTA JÚNIOR

- BT/PEA/0020 – Utilização Racional de Energia Elétrica em Instalações Elétricas Comerciais Empregando Sistemas de Automação – JOEL ROCHA PINTO, AUGUSTO FERREIRA BRANDÃO JÚNIOR
- BT/PEA/0021 – Sistema Automatizado para Aquisição de Dados de Consumo de Energia Elétrica, Água e Gás – JOSÉ WALTER PARQUET BIZARRIA, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/0022 – Estudo de Ignitores de Pulsos Superpostos para Lâmpadas de Vapor de Sódio de Alta Pressão – ALEXANDER FERNÁNDEZ CORREA, WALTER KAISER
- BT/PEA/0023 – Desenvolvimento de Medidor Eletrônico de Energia Elétrica de Custo Competitivo Associado a Estudos sobre Medições de Energia Elétrica – DOUGLAS ALEXANDRE DE A. GARCIA, SERGIO LUIZ PEREIRA
- BT/PEA/0024 – Uma Visão Educacional do Método dos Elementos Finitos Aplicado ao Eletromagnetismo – LUIZ NATAL ROSSI, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/0025 – An Application of the Finite-Element Method to Design a Switched Reluctance Motor – PEDRO P. DE PAULA, SILVIO I. NABETA, JOSÉ R. CARDOSO
- BT/PEA/0026 – Algoritmos de Alta Velocidade para a Proteção de distância de Linhas de Transmissão – ERVALDO GARCIA JÚNIOR, EDUARDO CÉSAR SENER
- BT/PEA/0027 – Sistema de Aquisição e Tratamento de Dados para a Monitoração da Tensão em Regime Permanente – SILVIO XAVIER DUARTE, CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/0028 – Análise da Confiabilidade e Manutenibilidade de Topologias do Sistema de Telefonia Fixa – RICARDO ELIAS CAETANO, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/0029 – Aspectos Tecnológicos Referentes à Repotenciação de Usinas Termoelétricas – MÁRCIO NESTOR ZANCHETA, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR
- BT/PEA/0030 – Controle de Iluminação Utilizando Dimerização por Lógica Fuzzy, Compensando a Iluminação Natural – ANDRÉ VITOR BONORA, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/0031 – Identificação do Nível de Redundância das Medidas de um Sistema, para Efeito da Estimação de seus Estados – JOÃO BOSCO AUGUSTO LONDON JUNIOR, NEWTON GERALDO BRETAS
- BT/PEA/0101 – Aplicação do Controlador de Subestação a um Sistema Digital Integrado de Supervisão e Controle – RENATO CAMPANINI TEIXEIRA, AUGUSTO F. BRANDÃO JR.
- BT/PEA/0102 – Uma proposta de um Filtro Ativo de Tensão para Aplicações em Redes Elétricas – JOSÉ TOSHIYUKI HONDA, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/0103 – Causas de Falhas e Critérios de Reaproveitamento de Transformadores de Distribuição de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica – MIGUEL ANGEL HERNANDEZ TORRES, MARCOS ROBERTO GOUVÊA
- BT/PEA/0104 – Um Sistema para Avaliação de Indicadores de Qualidade da Distribuição de Energia Elétrica – GERSON YUKIO SAIKI, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/0105 – Métodos de Análise de Sistemas de Aterramento de Linhas Metroviárias – ARMANDO DE OLIVEIRA ALVES DE SOUZA, LUIZ LEBENSZTAJN
- BT/PEA/0106 – Caracterização de Acionamentos na Indústria de Beneficiamento de Minério de Ferro – FERNANDO MARCELO CALADO DE ANDRADE, IVAN EDUARDO CHABU
- BT/PEA/0107 – Impacto da Privatização das Concessionárias de Distribuição de Energia Elétrica na Qualidade da Energia Suprida – MITSUO NITTA, ADERBAL DE AARUDA PENTEADO JÚNIOR
- BT/PEA/0108 – Estudo Comparativo de Ensaios de Chapa Única para Medidas de Perdas em Aços Elétricos – RONALDO ALVES SOARES, CARLOS SHINITSU MURANAKA
- BT/PEA/0109 – Modelagem de Transformadores de Distribuição para Altas Frequências – ARNALDO G. KANASHIRO, ALEXANDRE PIANTINI, GERALDO F. BURANI
- BT/PEA/0110 – Análise e Localização de Descargas Parciais em Transformadores de Potências por Métodos Elétricos – HÉDIO TATIZAWA, GERALDO FRANCISCO BURANI
- BT/PEA/0111 – A Eletrificação Rural em São Paulo – Custos e Padrões – LUIZ FERNANDO KURAHASSI, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/0112 – A Escola Rural sem Luz em São Paulo – OSWALDO TADAMI ARIMURA, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/0113 – Eletrificação Rural no Novo Cenário: O Caso de São Paulo – LUIZ HENRIQUE ALVES PAZZINI, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/0114 – Simulação do Aterramento em Sistemas MRT – OCTÁVIO FERREIRA AFFONSO, FERNANDO SELLES RIBEIRO
- BT/PEA/0115 – Otimização do Dimensionamento de Equipamentos para Automação de Terminal de Contêineres – FÁBIO LOPES CARNELOS, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/0116 – Sistema de Localização de Falhas para Redes Primárias de Distribuição – GIOVANNI MANASSERO JUNIOR, EDUARDO CESAR SENER
- BT/PEA/0117 – Proteção de Distância para Linhas de Transmissão com Compensação Série – JOSÉ GERALDO BARRETO MONTEIRO DE ANDRADE, EDUARDO CESAR SENER

- BT/PEA/0118 – Proposta de Acionamento Microprocessado para Empilhadeira Elétrica – MARCO AURÉLIO VILELA DE OLIVEIRA, WALTER KAISER
- BT/PEA/0119 – Técnicas "Anti-Windup" – LUIZ AUGUSTO PEREIRA FERNANDES, CLÓVIS GOLDEMBERG
- BT/PEA/0120 – Regulador de Tensão de Gerador – HERALDO SILVEIRA BARBUY, CLÓVIS GOLDEMBERG
- BT/PEA/0121 – Eficiência Operativa e Confiabilidade de Equipamentos Associados à Automação de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica – REINALDO BURIAN, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/0122 – Cálculo de Forças sobre Ímãs Permanentes: Uma Análise do Problema 23 do Team Workshop – HÉLIO JOSÉ DAMANTE, LUIZ LEBENSZTAJN
- BT/PEA/0123 – Análise de Guias de Ondas Ópticos pelo Método dos Elementos Finitos – MARCOS A. R. FRANCO, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/0124 – Transient Induced Voltage Computation in a High Building Struck by Lightning – CARLOS A. F. SARTORI, A. ORLANDI, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/0125 – Metodologia para Cálculo de Perdas Técnicas por Segmento do Sistema de Distribuição – ANDRÉ MÉFFE, CARLOS CÉSAR BARIONI DE OLIVEIRA
- BT/PEA/0126 – Cálculo da Distribuição da Corrente de Falta em Sistemas de Aterramento de Redes Primárias – GILBERTO DE MAGALHÃES FALCOSKI, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/0127 – Acionamento de Velocidade Variável Utilizando Motores de Corrente Alternada Assíncronos – JOSÉ ALBERTO MARQUES, IVAN EDUARDO CHABU
- BT/PEA/0201 – Unified Power Quality Conditioner with Energy Storing Module for Medium Voltage Adjustable Speed Drive – VALBERTO FERREIRA DA SILVA, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JUNIOR
- BT/PEA/0202 – Simulação de Marcha de Composição Ferroviária Acionada por Motores de Indução e PWM – CASSIANO LOBO PIRES, SILVIO IKUYO NABETA
- BT/PEA/0203 – Conservação de Energia Elétrica em Edificações Comerciais: Sistemas de Ar Condicionado com Central de Água Gelada – TEODORO MONGE DE AMORIM FILHO, MARCO ANTONIO SAIDEL
- BT/PEA/0204 – Reconfiguração de Redes Primárias de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Sistemas de Informações Geográficas – FERDINANDO CRISPINO, HERNAN PRIETO SCHMIDT
- BT/PEA/0205 – Previsão de Carga em Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Redes Neurais Artificiais – JORGE YASUOKA, HERNAN PRIETO SCHMIDT
- BT/PEA/0206 – Correção de Distorções Harmônicas, em Sistemas Industriais, Através de Filtros Passivos – ANTONIO PESTANA NETO, LUIZ CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/0207 – Proposta de Metodologia para Controle da Qualidade do Fornecimento de Energia Elétrica a Partir da Segmentação do Mercado Consumidor em Famílias de Redes Elétricas – RODOLFO COLI DA CUNHA, CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/0208 – Modelagens das Funções de uma Subestação Automatizada Empregando Modelos Orientados a Objetos – MILTHON SERNA SILVA, AUGUSTO F. BRANDÃO JR
- BT/PEA/0209 – Automação de Instalações Elétricas Prediais Através da Internet – ROBSON REBOUÇAS CARDOSO, AUGUSTO FERREIRA BRANDÃO JUNIOR
- BT/PEA/0210 – Identificação Automática de Vagões na Área Portuária: Uma Solução com Análise de Imagens – EDUARDO MANTOVANI, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/0211 – Concepção de Sistema de Supervisão e Controle no Processo de Descarga Rodoviária em Terminais Portuários Utilizando Identificadores Automáticos de Veículos – ROGÉRIO COSTA DE OLIVEIRA, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/0212 – Metodologia para Análise de Perda de Vida Útil de Transformadores, Alimentando Cargas não Lineares – ARLINDO GARCIA FILHO, EDUARDO MÁRIO DIAS
- BT/PEA/0213 – Sistema de Automação para Gestão do Carregamento de Transformadores Baseado na Confiabilidade – JOSÉ LUIZ PEREIRA BRITTES, JOSÉ ANTONIO JARDINI, HERNAN PRIETO SCHMIDT
- BT/PEA/0214 – A Conservação, Considerando Aspectos Relacionados à Qualidade de Energia Elétrica na Indústria Têxtil: Estudo de Caso – MÁRIO CÉSAR GIACCO RAMOS, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JR.
- BT/PEA/0215 – Cálculo de Parâmetros Operacionais de Desempenho de Redes Primárias de Distribuição Utilizando Redes Neurais Artificiais – ANA MARÍA GARCÍA CABEZAS, HERNAN PRIETO SCHMIDT
- BT/PEA/0216 – Análise Dinâmica de um Motor de Indução Linear pelo Método dos Elementos Finitos – EDUARDO FERREIRA DA SILVA, SILVIO IKUYO NABETA
- BT/PEA/0217 – Reômetro Rotativo de Taxa de Cisalhamento Imposta Acionado por Motor de Passo – SAMUEL E. DE LUCENA, WALTER KAISER
- BT/PEA/0218 – Acionamentos com Motores Brushless para Sistemas de Ventilação de Emergência – RENATO DE ALMEIDA PEREIRA, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/0219 – Retificador Trifásico de Alta Eficiência para Tochas de Plasma – MARIO GONÇALVES GARCIA JÚNIOR, LOURENÇO MATAKAS JÚNIOR

- BT/PEA/0220 – Impacto de Modelos de Mercado Espacial no Planejamento de Sistemas de Distribuição de Energia – MARIÂNGELA DE CARVALHO BOVOLATO, NELSON KAGAN
- BT/PEA/0221 – Proposta de Recuperador Dinâmico para Correção de Afundamentos de Tensão – FRANCISCO COSTA SARAIVA FILHO, EDUARDO CESAR SENER
- BT/PEA/0222 – Análise Preditiva de Defeitos em Motores de Indução Trifásicos Utilizando a Corrente de Alimentação – JOSÉ DANIEL SOARES BERNARDO, LUIZ CERA ZANETTA JÚNIOR
- BT/PEA/0223 – Cálculo de Iluminação Auxiliado por Computadores – NESTOR CÂNDIDO FERREIRA SEGUNDO, MARCO ANTONIO SAIDEL
- BT/PEA/0224 – Otimização de Sistemas de Distribuição de Energia Elétrica Utilizando Geração Distribuída – JAMEA CRISTINA BATISTA SILVA, NELSON KAGAN
- BT/PEA/0301 – Algoritmo Digital para a Proteção da Interligação Concessionária – Indústria Operando em Sistemas de Cogeração – FRANCISCO ANTONIO REIS FILHO, EDUARDO C. SENER
- BT/PEA/0302 – Dimensionamento da Infra-Estrutura para Automação de Terminais de Granéis Sólidos – FABIO DEL PAPA, EDUARDO MARIO DIAS
- BT/PEA/0203 – Desenvolvimento e Aplicação de Metodologia para Estudos de Viabilidade de Plantas de Cogeração – RICARDO SHEIGI ABE, SERGIO LUIZ PEREIRA
- BT/PEA/0304 – Applying Object-Oriented Technology to Project Hydroelectric Power Plant SCADA Systems – CARLOS ALBERTO VILLACORTA CARDOSO, JOSÉ ANTONIO JARDINI
- BT/PEA/0305 – Impactos Econômicos Causados pelos Distúrbios na Rede Básica de Energia Elétrica – JOSÉ JULIO DE ALMEIDA LINS LEITÃO, LINEI BELICO DOS REIS
- BT/PEA/0306 – Fault Location in Transmission Lines Using One Terminal Post Fault Voltage Data – CARLOS EDUARDO DE MORAIS PEREIRA, LUIZ CERA ZANETTA JR.
- BT/PEA/0307 – Impactos da Aplicação de Lâmpadas Fluorescentes Compactas em Habitações de Baixa Renda no Sistema de Distribuição de Energia Elétrica – LUIS VENTURA CASTELLS PEÑA, CARLOS MÁRCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/0308 – Análise e Melhoria do Controle Automático de Concentração de uma Planta de Ácido Nítrico Diluído – ELCIO RODRIGUES ARANHA, CÍCERO COUTO DE MORAES
- BT/PEA/0309 – Criação de Valor na Avaliação de Projetos Termelétricos sob Condições de Risco no Mercado Brasileiro de Energia Elétrica – WAGNER DA SILVA LIMA, DOREL SOARES RAMOS
- BT/PEA/0310 – Zoneamento Sócio-Econômico-Ecológico como Instrumento de Apoio a Regulação da Energia Elétrica – LUIZ MARIO TORTORELLO, MARCOS ROBERTO GOUVÊA
- BT/PEA/0311 – Análise de Transientes em Motor de Indução Modelo ABC/abc Aplicado ao Modelamento e Simulação de Soft-Starters - LUIS CARLOS RIBEIRO DOS SANTOS – CLOVIS GOLDEMBERG
- BT/PEA/0312 – Modelamento Matemático e Análise do Funcionamento do Acionamento para Motores de Anéis em Cadeia Sub-Síncrona – SÉRGIO LUIZ VOLPIANO – CLOVIS GOLDEMBERG
- BT/PEA/0313 – Considerações do Ambiente Eletromagnético Urbano na Análise de Interferências Eletromagnéticas em Veículos Automotores – GLÁUCIO SANTOS – CARLOS ANTONIO FRANÇA SARTORI
- BT/PEA/0314 – Contribuição a Aplicação das Wavelets na Eletrostática – ALDO ARTUR BELARDI, JOSÉ ROBERTO CARDOSO
- BT/PEA/0315 – Avaliação Ponderada da Hidreletricidade e Termoeletricidade Através dos Custos Completos – JULIO HENRIQUE BOARATI, MIGUEL EDGAR MORALES UDAETA
- BT/PEA/0401 - Previsão Espacial de Carga em Sistemas de Distribuição Utilizando Técnicas de Inteligência Artificial e Plataforma GIS – FRANZ HENRY PEREYRA ZAMORA, CARLOS MARCIO VIEIRA TAHAN
- BT/PEA/0402 – Modeling of Impulse Stressed Distribution Transformer Winding Oriented to Maintenance Purposes – PEDRO LUIS SANTUCCI DE MENDONÇA, AUGUSTO FERREIRA BRANDÃO JÚNIOR
- BT/PEA/0403 – Sistema para o Gerenciamento de Imóveis e Ocupação das Faixas de Linhas de Transmissão Utilizando Dados Georreferenciados e de Sensoriamento Remoto – MAURICIO GEORGE MIGUEL JARDINI, HERNAN PRIETO SCHMIDT
- BT/PEA/0404 – Proposta de Novas Topologias de Conversores "C-DUMP" para o Acionamento de Motores e Geradores de Relutância Chaveados – WANDERLEI MARINHO DA SILVA, CLOVIS GOLDEMBERG
- BT/PEA/0405 – Proposta de Aplicação de Motor de Indução Linear Tubular na Extração de Petróleo – BERNARDO PINHEIRO DE ALVARENGA, IVAN EDUARDO CHABU
- BT/PEA/0406 – Aplicação da Automação Elétrica no Controle de Temperatura de Grandes Edifícios – MARLENE DA SILVA BOSCATTO, AUGUSTO FERREIRA BRANDÃO JR.
- BT/PEA/0407 – Metodologia de Segurança para Intercâmbio Eletrônico de Documentos Aplicado ao Sistema Portuário Brasileiro – LEVI SALVI, EDUARDO MARIO DIAS
- BT/PEA/0408 – Proposta de um Novo Protocolo de Comunicação para a Saída Serial de Usuário de Medidores de Energia – ANDRÉ LUIZ MONTERO ALVAREZ, MARCO ANTONIO SAIDEL
- BT/PEA/0409 – Estimativa de Estado da Rede Durante Variações de Tensão de Curta Duração para o Monitoramento de Qualidade de Energia Elétrica – TANIA PAOLA LEDESMA ARANGO, NELSON KAGAN

- BT/PEA/0410 – Algoritmo Baseado em Redes Neurais Artificiais para a Proteção de Distância de Linhas de Transmissão – RICARDO CANELOI DOS SANTOS, EDUARDO CESAR SENGER
- BT/PEA/0411 – Modelo Computacional do Sistema de Conversão de Energia Eólica Equipado com Gerador de Indução – MARCELO MORAES, ADERBAL DE ARRUDA PENTEADO JUNIOR
- BT/PEA/0412 – Proteção de Planta Termoelétrica Operando em Co-Geração – ANTONIO CARLOS MOSCARDI, JOSÉ AQUILES BAESSO GRIMONI

