



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

**Metodologia Para Compensação de Desequilíbrio em
Redes Elétricas**

Ricardo Gouveia Teodoro

Ilha Solteira - SP

1210001580



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ILHA SOLTEIRA PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA ELÉTRICA

**“Metodologia Para Compensação de Desequilíbrio em
Redes Elétricas”**

Ricardo Gouveia Teodoro

Luís Carlos Origa de Oliveira
Orientador

Dissertação submetida à Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia Elétrica (ME)**.

Ilha Solteira - SP, Fevereiro de 2005.

FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação/Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação da UNESP-Ilha Solteira

Teodoro, Ricardo Gouveia.

T314 m Metodologia para compensação de desequilíbrio em redes elétricas /
Ricardo Gouveia Teodoro . -- Ilha Solteira : [s.n.], 2005
85 p. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, 2005

Orientador: Luís Carlos Origa de Oliveira
Bibliografia: p. 75-76

1. Energia – Qualidade. 2. Potência reativa (Engenharia elétrica). 3. Fator de potência.
4. Redes elétricas.

30404002

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: METODOLOGIA PARA COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIO EM REDES ELÉTRICAS

AUTOR: RICARDO GOUVEIA TEODORO

ORIENTADOR: Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de MESTRE em ENGENHARIA ELÉTRICA pela Comissão Examinadora:

Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Dr. OLÍVIO CARLOS NASCIMENTO SOUTO

Dr. JOSE CARLOS ROSSI

Data da realização: 22 de fevereiro de 2005

Presidente da Comissão Examinadora
Dr. LUIS CARLOS ORIGA DE OLIVEIRA

Agradecimento

Agradeço primeiramente a Deus e em seguida a Nossa Senhora, pôr ter me permitido alcançar tão valeroso objetivo em minha vida.

A minha mãe que me ajudou e incentivou em todos os momentos, me dando carinho, compreensão, e apoio.

Ao meu pai, irmãos, avos e tios pôr desejarem a vitória de mais uma etapa em minha vida. Obrigado!

Aos meus amigos de coração Wilson M. Borges, Rogério M. da Silva, Thiago M. Moraes, Fábio P. Durão, Celso Tadao Miasaki, Josivaldo Godoy Da Silva, Mara Lúcia Martins Lopes, Sônia Regina dos Santos Silva, Eden Jair Rampazzo Junior, Vlademir De Jesus Silva Oliveira, Luciano Dos Santos, Pedro Aleixo Ferreira Brandini, Edson Bortoloto, Edilton Furquim Goulart Sobrinho e outros que por ventura me esqueci de citar.

Aos professores Olívio Carlos do Nascimento Souto, Dalgerti Lelis Milanez, Júlio Borges de Souza, Aparecido Augusto de Carvalho, José Roberto Sanches Mantovani, Mariângela de Carvalho Bovolato, José Carlos Rossi.

Em especial agradeço ao meu orientador professor Luís Carlos Origa de Oliveira pela admirável capacidade técnica e científica acumulada em todo a sua vida como pesquisador. Deixo aqui registrado que sem a ajuda e orientação correta e coerente do professor Luís Carlos Origa de Oliveira este trabalho não seria possível de ser concretizado.

1210001580



Proc. 055105 - NPD 062/05

UNESP - "CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA"	
SERVIÇO TÊC. DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO	
DATA DE CHEGADA	DATA DE TOMBO
01. 06. 05	30. 06. 05
REGISTRADO POR	TOMBO
Ailza	Te. 1580
AQUISIÇÃO	CLASSIFICAÇÃO
Wesley Autor R\$ 10.00	T314m

Ce. My 295584
295 58733

Resumo

Entre os problemas relacionados com a qualidade de tensão de suprimento, a regulação e o desequilíbrio são provavelmente os mais importantes sob ponto de vista do número de ocorrências. Visando a minimização dos mesmos, as entidades responsáveis pela gerência do setor elétrico, tem atuado no sentido de estabelecer os limites máximos aceitáveis, bem como incentivar o uso de equipamentos de compensação. Neste sentido um aspecto importante a ser investigado refere-se às metodologias a serem empregadas para definição do sistema de controle dos possíveis equipamentos de compensação.

De um modo geral as metodologias utilizadas para definição das correntes de compensação são baseadas na constatação física de que qualquer carga linear pode ser transformada em uma carga trifásica balanceada com fator de potência controlado sem, contudo, alterar o fluxo de potência ativa.

Neste trabalho apresenta-se uma análise comparativa de desempenho de duas principais vertentes das técnicas de compensação. A primeira baseia-se na determinação das componentes simétricas das correntes de carga objetivando eliminar ou minimizar as componentes de sequência negativa e zero bem como ajustar o fator de potência residual para um valor adequado. A segunda está fundamentada na determinação potências instantâneas referenciadas em um sistema de duas coordenadas através da transformação de Clark. Neste caso, as correntes de compensação são definidas a partir da eliminação ou redução das parcelas oscilantes das potências real e imaginária e do valor médio residual da potência imaginária.

As metodologias citadas são implementadas em um ambiente computacional de processamento de sinais em tempo real e os resultados obtidos são discutidos no sentido de destacar as principais características de cada técnica empregada.

Among the problems related with the quality of voltage supply, the regulation and the unbalance probably are the most important considering the number of occurrences. Seeking the minimization of these problems, the entities responsible for the management of the electric sector, have been acting to establish acceptable maximum limits, as well as to motivate the use of compensation equipments. In this sense an important aspect to be investigated refers to the methodologies to be used for the definition of the control system of the possible compensation equipments.

In a general way the methodologies used for definition of the compensation currents are based on the physical verification that any unbalanced linear load can be transformed in a balanced three-phase load with controlled power factor without altering the active power flow.

In this work it is presented a comparative analysis of the performance of the two main philosophies of compensation techniques. The first one is based on the determination of the symmetrical components of the load current aiming to eliminate or to minimize the negative and the zero sequence components as well as to adjust the residual power factor for an appropriate value. The second one is based on the determination of the instantaneous powers referred on a two coordinates system through Clark's transformation. In this case, the compensation currents are defined from the elimination or reduction of the unsteady components of the real and imaginary powers and of the residual medium value of the imaginary power.

The mentioned methodologies are implemented in a computational environment that processes signals in real time and the obtained results are discussed to highlight the principal characteristics of each employed technique.

Apêndice

Figura A - Blocos para captura de dados	79
Figura B - Obtenção do sinal de corrente de compensação através da derivada da	

Lista de Figuras

	Descrição	Página
Capítulo 2		
	Figura 2.1 - Índices de desequilíbrios calculados nas diferentes formulações.....	25
	Figura 2.2 - Custo anual em função % de desequilíbrio.....	27
Capítulo 3		
	Figura 3.1 - Rede trifásica com carga e compensador.....	31
	Figura 3.2 - Carga genérica ligada em triângulo (Δ).....	32
Capítulo 4		
	Figura 4.1 - Significado físico das grandezas da teoria PQ.....	51
	Figura 4.2 - Potências de um sistema equilibrado.....	53
	Figura 4.3 - Potências em um sistema desequilibrado.....	55
Capítulo 5		
	Figura 5.1 - Diagrama simplificado.....	58
	Figura 5.2 - Resultados obtidos através de simulação no DASYLab® 4.....	59
	Figura 5.3 - Resultados obtidos por simulação no DASYLab® 4.....	53
	Figura 5.4 - Configuração do sistema de compensação.....	60
	Figura 5.5 - Aquisição de dados.....	61
	Figura 5.6 - Sistema Compensado (total)	62
	Figura 5.7 - Sistema Compensado (parcial)	63
	Figura 5.8 - Ângulo de defasagem ($0,84 \text{ ms} \cong 18,2^\circ$).....	63
	Figura 5.9 - Potências instantâneas na carga.....	65
	Figura 5.10 - Sistema compensado (total).....	66
	Figura 5.11 - Potências instantâneas totais no sistema compensado.....	66
	Figura 5.12 - Sistema compensado (parcial).....	68
	Figura 5.13 - Potências instantâneas totais no sistema compensado.....	68
	Figura 5.14 - Ângulo de defasagem ($0,83 \text{ ms} \cong 17,9^\circ$).....	69
	Figura 5.15 - Sistema compensado (parcial).....	70
	Figura 5.16 - Potências instantâneas totais no sistema compensado.....	70
Apêndice		
	Figura A - Blocos para captura de dados.....	79
	Figura B - Obtenção do sinal de corrente de compensação através da derivada da	

tensão na condição desejada - método de Steinmetz..... 79

Figura C - Diagramas de blocos - método de Steinmetz..... 80

Figura D - Diagramas de blocos - teoria PQ..... 81

Figura E - "Black Box" (caixa preta)..... 82

Figura F - Diagrama de blocos - teoria PQ..... 84

Figura G - Regulador de potência - teoria PQ..... 84

Figura H - Correntes desequilibradas - teoria PQ..... 85

Tabela 4.2 - Sistema desequilibrado..... 88

Tabela 4.3 - Metodologia de compensação..... 86

Lista de Tabelas

Descrição	Significado	Página
Capítulo 2		
Tabela 2.1 - Efeitos do desequilíbrio de tensão na temperatura de motores.....		22
Capítulo 4		
Tabela 4.1 – Sistema equilibrado.....		53
Tabela 4.2 – Sistema desequilibrado.....		55
Tabela 4.3 - Metodologia de compensação.....		56
θ	Ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente;	
$\theta_+, \theta_-, \theta_0$	Ângulos correspondentes às fases +(seq. positiva), -(seq. negativa), 0 (seq. zero) da tensão;	
$\delta_+, \delta_-, \delta_0$	Ângulo de fase: +(seq. positiva), -(seq. negativa), 0 (seq. zero) da corrente;	
ω	Velocidade angular;	
t	Tempo;	
π	3,141592...	
a	$1\angle 120^\circ = 1e^{j2\pi/3} = -0,5 + j0,866$;	
T	Matriz de transformação das componentes de fase em função das componentes sequenciais;	
T^{-1}	Matriz inversa de transformação das componentes sequenciais;	
V	Valor eficaz da tensão fasorial fase-neutro em um sistema trifásico;	
V_+, V_-, V_0	Representação fasorial das tensões de fase;	
V_+, V_-, V_0	Tensões nas componentes sequências: +(seq. positiva), -(seq. negativa), 0 (seq. zero);	
V_a, V_b, V_c	Tensão fasorial na fase a, índice +(seq. positiva), -(seq. negativa), 0 (seq. zero);	
V_a	Parte real da tensão de fase;	
V_a	Parte imaginária da tensão;	
v_a, v_b, v_c	Tensão instantânea nas fases a,b,c;	

Simbologia

Símbolo	Significado
S_c	Potência monofásica instalada;
S_{cc}	Potência de curto-circuito;
$F_a, F_b, \text{ e } F_c$	Grandezas vetoriais de fase;
F_{a012}	Grandeza Vetorial de índice 1(seq. positiva), 2(seq. negativa), 0 (seq. zero) da fase a;
$\text{Re}[X]$	Parte real de um número complexo;
$\text{Im}[X]$	Parte imaginária de um número complexo;
ϕ	Ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente;
ϕ_+, ϕ_-, ϕ_0	Ângulos correspondentes às fases +(seq. positiva), -(seq. negativa), 0 (seq. zero) da tensão;
$\delta_+, \delta_-, \delta_0$	Ângulo de fase: +(seq. positiva), -(seq. negativa), 0 (seq. zero) da corrente;
ω	Velocidade angular;
t	Tempo;
π	3,141592...
α	$1\angle 120^\circ = 1.e^{j2\pi/3} = -0,5 + j.0866$;
T	Matriz de transformação das componentes de fase em função das componentes seqüenciais;
T^{-1}	Matriz inversa de transformação das componentes seqüenciais;
V	Valor eficaz da tensão fasorial fase-neutro em um sistema trifásico;
V_a, V_b, V_c	Representação fasoriais das tensões de fase;
V_+, V_-, V_0	Tensões nas componentes seqüências: +(seq. positiva), -(seq. negativa), 0 (seq. zero);
V_{a+}, V_{a-}, V_{a0}	Tensão fasorial na fase a, índice +(seq. positiva), -(seq. negativa), 0 (seq. zero);
V_R	Parte real da tensão de fase;
V_I	Parte imaginária da tensão;
v_a, v_b, v_c	Tensão instantânea nas fases a,b,c;

v_α, v_β, v_o	Tensões nas coordenadas α, β, o ;
V_{ab}	Tensões entre as fases ab de um sistema trifásico;
V_{bc}	Tensões entre as fases bc de um sistema trifásico;
V_{ca}	Tensões entre as fases ca de um sistema trifásico;
$\Delta V_{m\acute{a}x}$	Máximo desvio das tensões em relação a $V_{m\acute{e}dio}$;
$V_{m\acute{e}dio}$	Média aritmética dos módulos das tensões trifásicas;
$V_{m\acute{a}x}$	Maior valor dentre os módulos das tensões trifásicas;
$V_{m\acute{i}n}$	Menor valor dentre os módulos das tensões trifásicas;
V_{ab}, V_{bc} e V_{ca}	Módulo das tensões fase-fase;
V_a, V_b, V_c	Módulo das tensões de fase;
I^L	Corrente fasorial eficaz de carga;
I_{ab}	Corrente fasorial entre as fases ab de uma carga trifásica genérica;
I_{bc}	Corrente fasorial entre as fases bc de uma carga trifásica genérica;
I_{ca}	Corrente fasorial entre as fases ca de uma carga trifásica genérica;
I_1, I_2, I_0	Componentes seqüências do fasor corrente, índice 1 (seq. positiva), 2 (seq. negativa), 0 (seq. zero);
I_a, I_b, I_c	Representação das correntes fasoriais de cada fase;
I_a^L, I_b^L, I_c^L	Corrente fasorial nas fases a, b, c de uma carga trifásica;
I_+, I_-, I_0	Corrente nas componentes seqüências: +(seq. positiva), -(seq. negativa), 0 (seq. zero);
I_{a+}, I_{a-}, I_{a0}	Corrente na fase a , índice +(seq. positiva), -(seq. negativa), 0 (seq. zero);
$I_{aR}^L, I_{bR}^L, I_{cR}^L$	Parte real da corrente nas fases a, b, c de uma carga trifásica;
$I_{aI}^L, I_{bI}^L, I_{cI}^L$	Parte imaginária da corrente nas fases a, b, c de carga;
I_{an}, I_{bn}, I_{cn}	Correntes entre fases a, b, c e neutro;
i^L	Corrente instantânea na carga;
i_a, i_b, i_c	Corrente instantânea a, b, c ;
i_a^L, i_b^L, i_c^L	Corrente instantânea na fase a, b, c de carga;
i_α, i_β, i_o	Correntes nas coordenadas α, β, o ;
$i_\alpha^{comp}, i_\beta^{comp}, i_o^{comp}$	Corrente de compensação nas coordenadas α, β, o ;

$\hat{I}_a, \hat{I}_b, \hat{I}_c$	Corrente de pico das respectivas fases;	14
I_{ab}^L	Corrente fasorial entre as fases ab da carga;	14
I_{bc}^L	Corrente fasorial entre as fases bc da carga;	14
I_{ca}^L	Corrente fasorial entre as fases ca da carga;	14
I_1^L, I_2^L, I_0^L	Corrente fasorial de carga, índice 1(seq. positiva), 2(seq. negativa), 0(seq. zero);	15
$I_1^{comp}, I_2^{comp}, I_0^{comp}$	Corrente fasorial de compensação. Índice 1(seq. Positiva), 2(seq. negativa), 0(seq. zero);	15
$I_{ab}^{comp}, I_{bc}^{comp}, I_{ca}^{comp}$	Corrente de compensação entre fases;	16
y_{ab}^L	Admitância entre as fases ab da carga;	18
y_{bc}^L	Admitância entre as fases bc da carga;	18
y_{ca}^L	Admitância entre as fases ca da carga;	18
y_{ab}^{comp}	Admitância entre as fases ab do compensador;	19
y_{bc}^{comp}	Admitância entre as fases bc do compensador;	19
y_{ca}^{comp}	Admitância entre as fases ca do compensador;	20
B_{ab}^{comp}	Susceptância entre as fases ab do compensador;	21
B_{bc}^{comp}	Susceptância entre as fases bc do compensador;	21
B_{ca}^{comp}	Susceptância entre as fases ca de um compensador trifásico;	21
y_{ab}	Admitância entre as fases ab de uma carga trifásica genérica;	23
y_{bc}	Admitância entre as fases bc de uma carga trifásica genérica;	25
y_{ca}	Admitância entre as fases ca de uma carga trifásica genérica;	28
p	Potência real;	29
q	Potência imaginária;	29
p_o	Potência instantânea de seqüência zero;	31
$\bar{p}$	Valor médio da potência real;	39
$\bar{q}$	Valor médio da potência imaginária;	42
$\tilde{p}$	Componente oscilatória da potência real;	

Sumário

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

SIMBOLOGIA

Capítulo I: Introdução Geral.....	14
1.1- Aspectos Gerais e Motivação.....	14
1.2 - Estado da Arte.....	15
1.3 - Estruturação do Trabalho.....	16
Capítulo II: Desequilíbrio em Redes Elétricas.....	18
2.1 – Introdução.....	18
2.2 – Desequilíbrios.....	19
2.2.1 - Principais Causas de Desequilíbrios em Sistemas Elétricos.....	20
2.2.2 - Conseqüências do Desequilíbrio nos Sistemas Elétricos de Potência.....	21
2.2.3 - Métodos Para Cálculo do Fator de Desequilíbrio.....	23
2.3 - Limites e Recomendações.....	25
2.4 – Conclusão.....	28
Capítulo III: Componentes Simétricas Aplicadas na Compensação..	29
3.1-Introdução.....	29
3.2 - Compensação de Corrente Desequilibrada.....	31
3.3 - Mudança Para o Domínio do Tempo.....	39
3.4 – Conclusão.....	43



Capítulo IV: Compensação de Cargas Baseada na Teoria de	
Potência Ativa e Reativa Instantânea.....	44
4.1-Introdução.....	44
4.2 - Teoria PQ.....	44
4.2.1 - O Significado Físico das Potências na Teoria PQ.....	50
4.3 - Teoria PQ Aplicada a Sistemas Trifásicos Simétricos.....	51
4.4 - Compensação de Cargas Isoladas Baseada na Teoria PQ.....	56
4.5 – Conclusões.....	57
Capítulo V:	58
5.2 - Sistema Simulado.....	58
5.2 - Sistema Simulado.....	58
5.3 - Compensação da Carga Utilizando o Método Steinmetz.....	60
5.4 - Compensação do Desequilíbrio Utilizando a Teoria PQ.....	64
5.5 – Conclusão.....	71
Capítulo VI: Conclusões Gerais.....	72
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
APÊNDICE.....	77

Capítulo I

INTRODUÇÃO GERAL

1.1 - Aspectos Gerais e Motivação

Nos últimos anos o setor elétrico brasileiro tem passado por mudanças em sua legislação visando a criação de um ambiente competitivo favorável à inserção dos diferentes seguimentos produtivos no mercado globalizado.

A energia elétrica é reconhecidamente de extrema importância para o crescimento tecnológico e neste contexto, os fornecedores vêm sistematicamente elaborando ações para um melhor atendimento aos consumidores, tanto na qualidade do produto eletricidade quanto na questão tarifária.

Devido às mudanças na legislação do setor elétrico, as relações entre fornecedor e consumidor vêm sendo sistematicamente mais valorizadas. A legislação é mais rigorosa com os fornecedores no que diz respeito ao ressarcimento de danos provocados por um suprimento de má qualidade, sob o principal risco de perder o cliente. Neste caso as concessionárias normalmente optam pela excelência na qualidade do seu produto, não só pela posição estratégica como indústria de base vital para o desenvolvimento de qualquer país, mas, sobretudo para manter-se competitiva.

Mesmo neste cenário, observa-se ainda um crescimento no número de reclamações por parte dos consumidores, devido às inúmeras paradas de produção no seguimento industrial, causadas por problemas de qualidade da energia. Estes fatos se explicam na medida em que a busca da competitividade no mercado globalizado implica muitas vezes na utilização de equipamentos mais avançados nas suas linhas de produção. Estes equipamentos contribuem para o aumento da controlabilidade e eficiência no processo de produção, porém, por outro lado são muito mais sensíveis a pequenas variações da tensão de alimentação e particularmente aos desequilíbrios nas redes. Esta questão tem sido estrategicamente explorada na pauta de negociação de tarifas entre consumidores livres e empresas de energia elétrica, uma vez que os custos associados ao tempo desde a interrupção do processo produtivo, até a retomada da produção plena, normalmente atingem valor muito elevados.



Há, portanto, a necessidade de um controle rigoroso da qualidade da energia entregue ao consumidor. Entre os diferentes itens relacionados com a qualidade da energia, destaca-se a questão dos desequilíbrios de tensão e corrente. Atualmente é imprescindível manter os níveis de desequilíbrio dentro de limites que garantam a operação regular dos sistemas de energia a custos aceitáveis. Desta forma, esgotada as ações operacionais para a minimização do desequilíbrio de tensão, muitas vezes são recomendáveis a implantação um sistema auxiliar de compensação.

Dentro deste escopo, o presente trabalho tem como principal objetivo um estudo sobre os desequilíbrios de tensão e corrente, apresentando-se duas metodologias de compensação conhecidas como método de Steinmetz e da Teoria PQ (potência instantânea).

1.2 - Estado da Arte

Barros Neto em [1] apresentou modelos matemáticos aplicados na compensação de desequilíbrios de corrente, também conhecido como método de Steinmetz, nesta metodologia de compensação é utilizado componentes simétricas no domínio da frequência com algumas condições.

Sendo que os valores de correntes de compensação foram obtidos a partir de valores de susceptância de cada ramo do compensador.

O mesmo modelo de compensação mais tarde foi adaptado para o domínio do tempo para que pudesse ter uma compensação instantânea, ou seja, em tempo real.

Akagi et al [5] propõe um método diferente para a compensação de desequilíbrio de correntes através da aplicação da teoria da potência instantânea mais conhecida como teoria PQ. O trabalho de Akagi tem como objetivo promover o equilíbrio do sistema através da eliminação de potências indesejáveis que estejam presentes no sistema.

Este método de compensação é valido tanto para regimes transitórios quanto regimes permanentes, da mesma forma também é valido para formas de ondas genéricas de tensões e correntes. Este método transforma as coordenadas a-b-c para $\alpha - \beta - o$ também conhecida como transformação de Clarke.

Juane em [4] apresenta em seu trabalho alguns tipos de cargas que compromete a estabilidade do sistema. Nesta mesma linha de pensamento Juane apresentou algumas definições, conseqüências, prejuízos e técnicas de diminuição aplicadas aos desequilíbrios de

correntes. Este trabalho apresenta o custo – benefício obtido na presença de desequilíbrios de correntes, sendo adotado um valor percentual de tolerância de desequilíbrio permitido.

Menezes em [3] apresenta em seu trabalho um procedimento para otimização do dimensionamento do compensador estático, visando-se à minimização do custo de implantação. A técnica utilizada para definição dos critérios de otimização está fundamentada na metodologia de Steinmetz e no cálculo de fatores de redução das correntes compensatórias tomando-se por base os limites toleráveis de desequilíbrio, do fator de deslocamento e da regulação de tensão.

Destaca-se que não foi identificada, nesta pesquisa bibliográfica, nenhuma publicação que abordasse especificamente um estudo comparativo da aplicação das metodologias de compensação baseadas na técnica de Steinmetz e da teoria PQ na compensação de desequilíbrios nas redes elétricas.

1.3 - Estruturação do Trabalho

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

- O capítulo 2 dedica-se a comentar os desequilíbrios nas redes elétricas, sendo retratado de uma forma bem detalhada o real significado da palavra desequilíbrio. Ainda neste capítulo citam-se as principais causas de desequilíbrios em sistemas elétricos de potência e suas consequências. Nesta linha de raciocínio são abordadas as principais normas e recomendações para sistemas elétricos desequilibrados, assim com os diferentes propostas para o calculo o fator de desequilíbrio.
- O capítulo 3 apresenta-se um modelo matemático no domínio da frequência, método de Steinmetz, que baseado na interpretação das componentes simétricas da corrente permite realizar a compensação dos desequilíbrios e do fator de deslocamento ($\cos\phi$). Na seqüência, este modelo é adaptado para atuar no domínio do tempo visando-se futuras implementações da compensação em tempo real.
- No capítulo 4 apresenta-se a teoria da Potência Ativa e Reativa Instantânea aplicada na compensação de sistemas desequilibrados. Esta teoria está fundamentada na determinação das potências instantâneas a partir de uma transformação de coordenadas. A metodologia de compensação decorre da

interpretação dos efeitos dos desequilíbrios sobre as diferentes componentes das potências ativa e reativa instantâneas.

- No capítulo 5 apresentam-se os resultados de simulação digital para as duas metodologias apresentadas, comparando-as sob o ponto de vista da qualidade dos resultados, tempo de resposta e facilidades de implementação. Visando-se futuras aplicações experimentais utiliza-se uma plataforma computacional baseada em um software de processamento de sinais, particularmente o DASyLab[®] 4 da IOtech.

- O capítulo 6 é dedicado às conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

Por volta de 1970, começaram a ocorrer reclamações por parte dos consumidores com relação ao fornecimento de energia elétrica. A causa estava associada às interrupções na tensão de alimentação que refletia na "qualidade" da energia elétrica entregue ao consumidor.

Com o intuito de melhorar este cenário, o DNAEE lançou as Portarias N^o 046 e 047, de 17 de abril de 1978 e a Portaria N^o 031 de 11 de abril de 1980, através do qual regulamentou as normas que deveriam ser seguidas pelas empresas de energia elétrica. Essas normas visavam a definição dos "limites de variação das tensões", a "constituição de serviços adequados" de energia elétrica e o "estabelecimento de meios uniformes para apuração dos índices de continuidade de suprimento dos sistemas elétricos".

No final da década de 70, um grupo de estudo liderado pela ELETROBRÁS debateu sobre as metodologias e critérios adotados para o atendimento aos consumidores com cargas especiais. Deste debate foi gerado um conjunto de normas com a intenção de sanar os problemas de qualidade de energia elétrica. Passados aproximadamente 6 (seis) anos houve a necessidade de alterar essas normas. A ideia foi inserir a experiência operacional obtida pelas concessionárias de energia elétrica.

As propostas de critérios, procedimentos técnicos e limites recomendados nos relatórios emitidos, foram direcionadas essencialmente para o controle dos distúrbios de natureza "quase permanente" (distorção harmônica, flutuação de desequilíbrio de tensão) [3].

Como um processo natural de evolução, as normas sofreram novas mudanças. Em 1993, foram incluídas nas normas as experiências de outros grupos de trabalho, dentre eles podem ser citados: CIGRE, IEEE, IEC e IETC. As novas experiências das empresas brasileiras também contribuíram para a melhoria das regras. Deve ser enfatizado que houve a participação de entidades representativas dos grandes consumidores de energia elétrica.

Neste mesmo ano, os grupos de coordenação para operação interligada e o de planejamento dos sistemas elétricos redigiram um documento que estabelecia critérios e procedimentos de planejamento e de operação para a avaliar e controlar as perturbações

Capítulo II

DESEQUILÍBRIOS EM REDES ELÉTRICAS

2.1 – Introdução

Por volta de 1970, começaram a ocorrer reclamações por parte dos consumidores com relação ao fornecimento de energia elétrica. A causa estava associada às interrupções na tensão de alimentação que refletia na “qualidade” da energia elétrica entregue ao consumidor.

Com o intuito de melhorar este cenário, o DNAEE lançou as Portarias Nº 046 e 047, de 17 de abril de 1978 e a Portaria Nº 031 de 11 de abril de 1980, através do qual regulamentou as normas que deveriam ser seguidas pelas empresas de energia elétrica. Essas normas visavam a definição dos “limites de variação das tensões”, a “conceituação de serviços adequado” de energia elétrica e o “estabelecimento de método uniforme para apuração dos índices de continuidade de suprimento dos sistemas elétricos”.

No final da década de 70, um grupo de estudo liderado pela ELETROBRÁS debateu sobre as metodologias e critérios adotados para o atendimento aos consumidores com cargas especiais. Deste debate foi gerado um conjunto de normas com a intenção de sanar os problemas de qualidade de energia elétrica. Passados aproximadamente 6 (seis) anos houve a necessidade de alterar essas normas. A idéia foi inserir a experiência operacional obtida pelas concessionárias de energia elétrica.

As propostas de critérios, procedimentos técnicos e limites recomendados nos relatórios emitidos, foram direcionados essencialmente para o controle dos distúrbios de natureza “quase permanente” (distorção harmônica, flutuação de desequilíbrio de tensão) [3].

Como um processo natural de evolução, as normas sofreram novas mudanças. Em 1993, foram incluídas nas normas as experiências de outros grupos de trabalho, dentre eles podem ser citados: CIGRÉ, UIE, IEC e IEEE. As novas experiências das empresas brasileiras também contribuíram para a melhora das regras. Deve ser enfatizado que houve a participação de entidades representativas dos grandes consumidores de energia elétrica.

Neste mesmo ano, os grupos de coordenação para operação interligada e o de planejamento dos sistemas elétricos redigiram um documento que estabelecia critérios e procedimentos de planejamento e de operação para avaliar e controlar as perturbações



causadas por cargas não lineares, intermitentes ou desequilibradas [3]. Em 1997 houve novamente a complementação deste documento.

Deve-se salientar que neste trabalho não foram apresentadas todas as alterações feitas nas normas, apenas um breve relato das mudanças mais relevantes.

2.2 – Desequilíbrios

Neste subitem são apresentadas a definição de desequilíbrio de energia elétrica, algumas características e sua expressão geral.

Para definir um sistema senoidal que esteja em um estado não equilibrado são considerados os valores de corrente e tensão em cada fase como sendo a soma de três valores. As componentes de cada fase são conhecidas como:

- Componente de seqüência positiva;
- Componente de seqüência negativa;
- Componente de seqüência zero.

Um sistema é equilibrado quando a componente de seqüência zero, e as componentes de seqüência negativa ou positiva forem nulas. Por outro lado, um sistema é dito desequilibrado ou assimétrico, se apresentar simultaneamente duas das componentes de seqüenciais.

O grau de desequilíbrio presente numa rede elétrica é por definição dado pela equação 2.1, sendo válida tanto para as tensões como para as correntes.

$$\text{Fator de Desequilíbrio} = \frac{\text{Componente de Seqüência Negativa}}{\text{Componente de Seqüência Positiva}} \quad (2.1)$$

Uma forma alternativa para estimar o grau de desequilíbrio das tensões junto ao ponto de acoplamento (PAC) contendo uma carga monofásica é dada pela equação 2.2. Na expressão apresentada S_c [MVA] representa a potência monofásica instalada e S_{cc} [MVA] é o nível de curto circuito no PAC. Define-se desta forma um coeficiente de assimetria simplificado e muito útil para uma avaliação preliminar do “fator de desequilíbrio”, com boa precisão.

$$\text{Coeficiente de Assimetria} = \frac{S_c}{S_{cc}} \quad (2.2)$$

2.2.1 - Principais Causas de Desequilíbrios em Sistemas Elétricos.

Nos sistemas de distribuição de energia elétrica é onde se encontra a maior causa dos desequilíbrios de tensão devido à distribuição irregular de cargas por fase, que varia constantemente ocasionada pela inserção e/ou retirada de cargas.

Na transmissão, a causa mais importante de desequilíbrios está relacionada com a distribuição das fases ao longo de grandes trechos das linhas com irregularidades na sua transposição.

Um outro ponto importante a ser citado é o emprego excessivo de transformadores monofásicos, o que é comum para as concessionárias que utiliza sistema de distribuição primária a quatro fios com o neutro aterrado, sendo que em cada fase é conectado um transformador monofásico para suprir cargas monofásicas como residências e iluminação pública. Variações nas cargas monofásicas fazem com que as correntes nos condutores das três fases sejam diferentes, o que resulta em quedas de tensões diferentes, provocando desequilíbrio.

Anomalias encontradas no sistema são também causas importantes de desequilíbrios e podem representar atingindo níveis de até 5%. Entre elas destacam-se as falhas na isolação de equipamentos, aberturas de condutores ou a abertura de fusíveis em uma das fases de um banco de capacitores.

Mesmo equipamentos trifásicos podem apresentar algum grau de desequilíbrio individual, que pode contribuir para o aumento do desequilíbrio global de uma rede ou sistema elétrico. Um exemplo de equipamento desequilibrado é um motor com a impedância desbalanceada, devido ao aumento de aquecimento não homogêneo do estator.

Na magnetização dos transformadores trifásicos, a corrente de magnetização se diferencia de uma fase para outra devido a diferenças magnéticas encontradas na sua própria construção. Nestas condições, quando a conexão é do tipo estrela, com neutro isolado, as tensões de fase se apresentam sensivelmente desbalanceadas, fato que é minimizado caso o secundário seja tipo triângulo.

Os fornos elétricos trifásicos a arco, devido a alta potência processada, são as principais fontes de desequilíbrio nas redes elétricas. Durante o processo de fusão e refino, a carga elétrica equivalente provoca diferentes carregamentos entre as fases, originando altas

correntes desequilibradas que, normalmente, provocam grandes desequilíbrios nas tensões ao longo do sistema elétrico industrial [1].

2.2.2 - Conseqüências do Desequilíbrio nos Sistemas Elétricos de Potência

As conseqüências da alimentação trifásica desequilibrada podem se manifestar principalmente como degradação da potência útil disponibilizada nos processos de conversão eletromecânica e operação inadequada de equipamentos e sistemas. Desequilíbrios acentuados podem comprometer drasticamente desempenho operacional de muitos equipamentos levando-os à destruição.

Os desequilíbrios terão, portanto, reflexos imediatos nos custos operacionais dos equipamentos e sistemas elétricos podendo ocasionar grandes prejuízos financeiros relacionados com o aumento das perdas, interrupções de processos e queima de equipamentos.

Particularmente, os motores elétricos, por serem sensíveis a componente de seqüência negativa e utilizada em grande quantidade, são os primeiros a serem considerados. Devido às tensões de fase apresentarem desequilíbrios quando aplicadas aos terminais de um motor trifásico, resultam no aparecimento de correntes de seqüência negativa adicionais circulando no motor, aumentando as perdas no rotor devido ao aumento da temperatura.

As características de desempenho de um motor de indução trifásico são constituídas por um conjunto de grandezas térmicas e eletromecânicas que definem o seu comportamento operacional sob determinadas condições. A potência exigida pela carga em um determinado instante e a qualidade da tensão da rede de alimentação é dois importantes fatores que influenciam no desempenho do motor, em relação ao rendimento, fator de potência, corrente absorvida, velocidade, conjugado desenvolvido, perdas e elevação de temperatura.

Desta maneira, quando as tensões de alimentação do motor são desequilibradas, as suas características térmicas, elétricas e mecânicas sofrem alterações, afetando o seu desempenho e comprometendo a sua vida útil.

Vários estudos vêm sendo elaborados desde a década de 50 no sentido de explicar os efeitos que ocorrem internamente nos motores de indução. Primeiramente, tem-se a deformação do campo magnético girante, originando uma operação semelhante àquela existente quando o entreferro não é uniforme. Neste sentido, é inevitável a produção de esforços mecânicos axiais e radiais sobre o eixo resultando em: vibrações, ruídos, batimentos,

desgastes e aquecimento excessivo dos mancais, em consequência do surgimento de correntes parasitas no sistema eixo-mancais-terra. A deformação do campo magnético girante é resultado da composição dos campos de seqüência positiva e negativa. O campo de seqüência positiva executando as mesmas funções caso o campo fosse normal e o de seqüência negativa opondo-se ao anterior e produzindo o desequilíbrio magnético do motor.

Outro efeito importante relaciona-se ao fato das impedâncias de seqüência negativa do motor possuírem baixos valores quando comparadas às de seqüência positiva, resultando em um desequilíbrio de corrente bastante elevado. Fisicamente, sabe-se que a impedância de seqüência negativa é da mesma ordem de grandeza da impedância de rotor bloqueado de um motor, o que significa que a impedância de seqüência negativa é cerca de 1/5 a 1/10 da impedância normal a plena carga, o que resulta em uma corrente de seqüência negativa de 5 a 10 vezes maior para a tensão de seqüência positiva, em pu.

A tabela 2.1 ilustra os efeitos do desequilíbrio de tensões na composição das correntes e na temperatura de motores [1].

Tabela 2.1 - Efeitos do desequilíbrio de tensão na temperatura de motores.

Fator de Desequilíbrio de Tensão (%)	Corrente de Seqüência Negativa I_2 (%)	Elevação de Temperatura ($\Delta\theta$) °C
0,0	0	0
2,0	15	5
3,5	27	15
5,0	38	30

Para um motor apresentando uma corrente de partida de 7 (sete) vezes a corrente nominal, caso o fator de desequilíbrio da tensão ultrapasse 14%, o motor, a vazio, já atingirá sua temperatura de operação à plena carga.

Os compressores herméticos usados em condicionadores de ar são mais susceptíveis a esta condição. Estes motores operam com altas densidades de corrente nos enrolamentos devido ao efeito adicional de resfriamento da refrigeração, quando a operação destes motores se encontra trabalhando com desequilíbrio nas tensões de fases da alimentação, as perdas sofrem um incremento devido ao aumento da temperatura ocasionado pela circulação adicional de corrente [1].

Os geradores apresentam os mesmos problemas que os motores quando submetidos a

alimentações desequilibradas, e por este motivo, os níveis de desequilíbrio devem ser limitados. Os geradores modernos apresentam baixa tolerância quanto aos níveis de corrente de seqüência negativa.

Nos reguladores de tensão alimentados por tensões que apresentam desequilíbrios, poderá comprometer todo o seu funcionamento. Através de relatos já se testemunhou a ocorrência em que o equipamento regulador de tensão elevou a tensão quando de fato deveria reduzi-la.

Nos equipamentos eletrônicos de potência, especificamente os retificadores supridos por tensões trifásicas desequilibradas, as ordens e níveis de harmônicos presentes na corrente de alimentação ficam substancialmente alterados. Dentre as alterações ocorridas destaca-se o aparecimento de 3º ordem e seus múltiplos ímpares. Estas harmônicas não características não possuem apenas componentes de seqüência zero, como ocorre convencionalmente com o harmônico de 3º ordem, e, portanto, não podem ser eliminados por conexões delta ou pelo isolamento do neutro de transformadores. Do lado CC o componente harmônico adicional e dominante é o de 2º ordem, ou seja, um sinal de 120Hz, independentemente do número de fases do conversor.

Outro aspecto importante refere-se a variação do fator de deslocamento dos conversores CA-CC quando submetidos a tensões de alimentação desequilibradas, Rashid e Maswood [7]. Em condições normais sob carga nominal, normalmente se opera com fator de deslocamento satisfatório, entretanto, sabe-se que o mesmo diminui com a redução da tensão de saída CC. Verifica-se que o fator de deslocamento, em uma pequena faixa de variação da tensão de saída do conversor (ou seja, $110^\circ < \alpha < 120^\circ$), varia consideravelmente com o grau de desequilíbrio.

2.2.3 - Métodos Para Cálculo do Fator de Desequilíbrio.

Apresenta-se neste item algumas formas alternativas para determinação do fator de desequilíbrio. O objetivo destas formulações é definir valores numéricos que possam traduzir a intensidade do desequilíbrio através de cálculos simplificados que não envolvam grandeza vetoriais.

Como visto, por definição o fator de desequilíbrio é definido pela relação entre os módulos de tensão de seqüência positiva e negativa, como indicado na equação 2.1. Este procedimento envolve cálculos vetoriais para determinação das componentes seqüenciais e

normalmente não é uma forma prática para avaliação dos níveis de desequilíbrios. Objetivando a simplicidade de cálculo, principalmente no que se refere ao uso de grandezas que possam ser obtidas por medição, apresenta-se a seguir algumas propostas alternativas bem como o estudo comparativo dos índices gerados.

- NEMA: Esta norma faz uso do máximo desvio das tensões em relação à tensão média e da média aritmética dos módulos das tensões trifásicas para expressar o fator desequilíbrio de tensão. Para isso, toma-se como referência às tensões de linha. Sua expressão é a seguinte:

$$D_{\text{NEMA}} = \frac{\Delta V_{\text{máx}}}{V_{\text{médio}}} \cdot 100 \quad (2.3)$$

Sendo: $\Delta V_{\text{máx}}$ - Máximo desvio das tensões em relação a $V_{\text{médio}}$;

$V_{\text{médio}}$ - Média aritmética dos módulos das tensões trifásicas.

- CIGRÉ: Para representar o fator de desequilíbrio, o CIGRÉ (*Congress Internationale des Grand Réseaux Électriques a Haute Tension*) utiliza uma grandeza adimensional que correlaciona as tensões fase-fase. Calcula-se o desequilíbrio da seguinte forma:

$$D_{\text{CIGRÉ}} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\gamma}}{1 + \sqrt{3 - 6\gamma}}} \cdot 100 \quad (2.4)$$

$$\text{Sendo: } \gamma = \frac{|V_{ab}|^4 + |V_{bc}|^4 + |V_{ca}|^4}{(|V_{ab}|^2 + |V_{bc}|^2 + |V_{ca}|^2)^2}$$

V_{ab} , V_{bc} e V_{ca} - Módulo das tensões fase-fase

- IEEE: Uma relação que expressa a maior diferença entre as tensões medidas e o somatório das mesmas, é utilizada pelo IEEE para expressar o grau de desequilíbrio. O cálculo para o desequilíbrio é feito da seguinte maneira:

$$D_{\text{IEEE}} = \frac{3(V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}})}{V_a + V_b + V_c} \cdot 100 \quad (2.5)$$

Sendo: $V_{\max}$ - Maior valor dentre os módulos das tensões trifásicas;

$V_{\min}$ - Menor valor dentre os módulos das tensões trifásicas;

V_a, V_b, V_c - Módulo das tensões de fase;

A figura 2.1 apresenta um gráfico comparativo das formulações desenvolvidas para o cálculo dos índices de desequilíbrio de tensão. Observa-se que a formulação sugerida pelo CIGRÉ é a que mais se aproxima dos valores obtidos através da relação entre componentes sequenciais, ou seja, pela definição original, com uma vantagem de que em sua formulação o CIGRÉ utiliza apenas as amplitudes das tensões de linha.

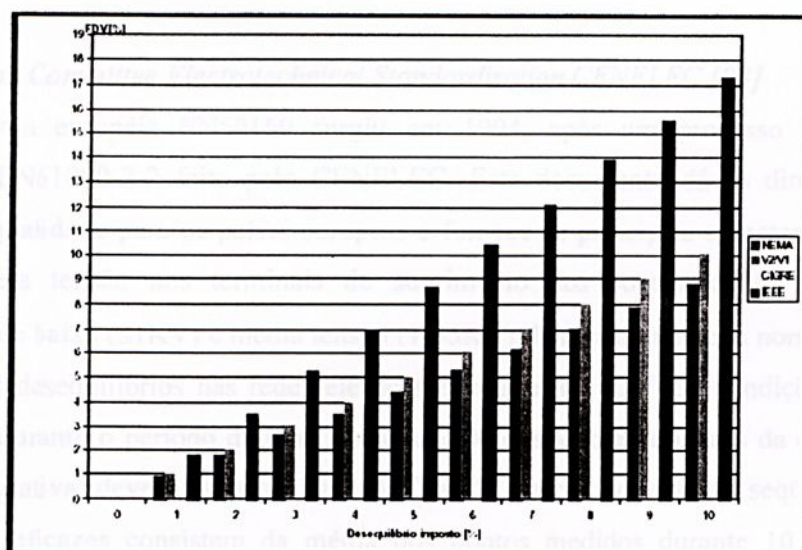


Figura 2.1 - Índices de desequilíbrios calculados nas diferentes formulações.

2.3 - Limites e Recomendações

A crescente preocupação com os níveis de desequilíbrios nas redes elétrica e suas consequências sobre a operação dos equipamentos e sistemas tem motivado a proposição de índices de conformidade por parte das diferentes órgãos reguladores de diferentes países, entre os quais destacam-se:

- *International Electrotechnical Commission - IEC [3]*

Em uma extensão da norma IEC 555-2, sob a denominação IEC 1000-2-2 (1990) estão contidas as questões relacionadas com desequilíbrios nas redes elétricas. Esta recomendação desequilíbrio de tensão em 3%, sob condições a vazio. Neste caso, recomenda-se que a

sugere 2% como nível aceitável de desequilíbrio de sequência negativa em sistemas de baixa tensão.

- *Grupo Coordenador para Operação Interligada - GCOI [03]*

No documento denominado “Critérios e Procedimentos para o Atendimento a Consumidores com Cargas Especiais”, foram estabelecidos às diretrizes para o planejamento e a operação dos sistemas elétricos. Esta norma recomenda que o fator de desequilíbrio de tensão provocado pela operação conjunta de todos os consumidores deve ser menor ou igual a 2% em qualquer ponto do sistema. Quando provocado por um único consumidor, não deve ultrapassar 1,5%. Nestas condições o fator de desequilíbrio deve ser avaliado conforme proposto na definição, ou seja, pela relação entre as componentes de seqüências positiva e negativa.

- *European Committee Electrotechnical Standardization CENELEC [03]*

A norma européia EN50160 surgiu em 1994, após um processo de revisão do documento EN61000-2-2 feito pelo CENELEC. Este documento dá as diretrizes para os padrões de qualidade para os países europeus e fornece as principais características a serem atendidas pela tensão nos terminais de suprimento dos consumidores, nos níveis de distribuição de baixa ($\leq 1\text{KV}$) e média tensão (1-35KV). Particularmente, a norma EN50065-1 refere-se aos desequilíbrios nas redes elétricas e estabelece que, sob condições normais de suprimento, durante o período de uma semana, 95% dos valores eficazes da componente de sequência negativa, devem estar na faixa de 0 a 2% da componente de sequência positiva. Tais valores eficazes consistem da média dos pontos medidos durante 10 (dez) minutos consecutivos. Esta norma admite desequilíbrios da ordem de até 3% para consumidores monofásicos ou bifásicos.

- *National Electricity Regulator - NER [03]*

Este órgão elaborou em 1996 a norma NRS 048 que tem como meta à regulamentação da qualidade de suprimento de energia elétrica. Para sistemas elétricos trifásicos o nível máximo de desequilíbrio de tensão deve ser de 2%, podendo, entretanto chegar a 3 % para consumidores monofásicos ou bifásicos.

- *American National Standards Institute - ANSI [03]*

Para estabelecer os valores nominais de tensão e tolerâncias operacionais de 110V a 230KV em 60Hz a ANSI desenvolveu a norma C84. 1 – 1995, a qual recomenda que os sistemas de suprimento elétrico devem ser projetados e operados de modo a limitar o máximo desequilíbrio de tensão em 3%, sob condições a vazio. Neste caso, recomenda-se que o fator

Figura 2.2 - Custo anual em função % de desequilíbrio

de desequilíbrio seja calculado através de uma fórmula alternativa 2.3, que leva em conta apenas os desvios em relação a uma média de tensões.

- *Operador Nacional do Sistema – ONS*

Baseado em estudos comparativos envolvendo os diferentes limites recomendados nas diferentes normas bem como a forma de avaliação dos fatores de desequilíbrio de tensão, recentemente o ONS definiu os limites a serem observados nos pontos de suprimento de energia elétrica.

Para a determinação do nível de desequilíbrio recomenda-se o uso da fórmula alternativa que produz resultados mais próximos daqueles preconizados na definição formal, ou seja a equação 2.4, proposta pela CIGRÉ.

O limite máximo recomendado para o nível de desequilíbrio é 2%. Este índice resulta basicamente de um compromisso envolvendo fornecedores de energia e fabricantes de equipamentos. Por um lado, para se ter um desequilíbrio próximo de zero os equipamentos utilizados apresentam um alto custo para os fornecedores de energia na implantação dos sistemas elétricos. Já para os fabricantes de motores a flexibilização dos limites de desequilíbrio admissíveis representam altos custos na implantação de tecnologia de fabricação que garantam a manutenção do desempenho operacional. A figura 2.2 ilustra resultados qualitativos de estudos específicos nesta ótica de abordagem do problema, os quais sinalizam que um valor em torno de 3% de desequilíbrio proporciona o menor custo combinado. O valor de 2% adotado representa, portanto uma garantia de que equipamentos elétricos não terão sua operação comprometida [4].

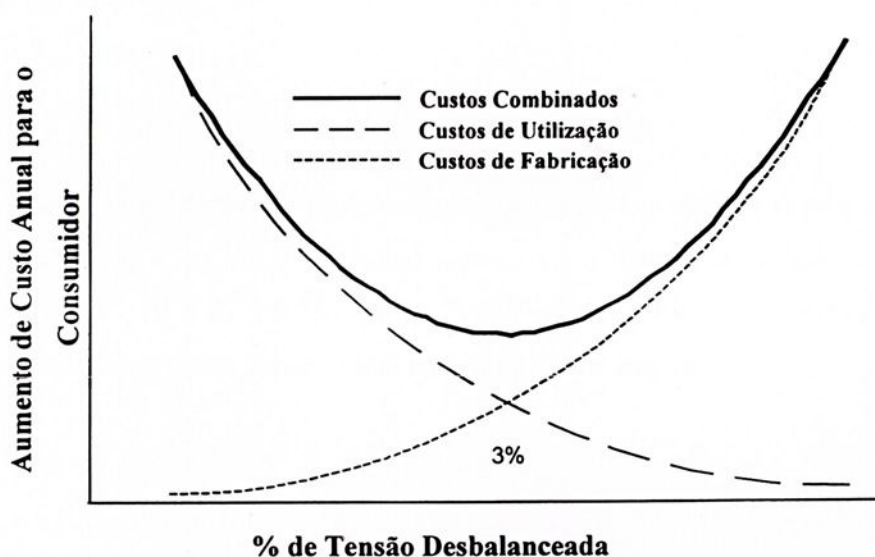


Figura 2.2 - Custo anual em função % de desequilíbrio

2.4 – Conclusão

Um sistema assimétrico ou desequilibrado é caracterizado pela presença simultânea de duas componentes sequenciais.

Os desequilíbrios de tensão produzem reflexos imediatos nos custos operacionais dos equipamentos e sistemas elétricos podendo ocasionar grandes prejuízos financeiros. Neste contexto, destaca-se a acentuada queda de rendimento dos motores elétricos mediante alimentação desequilibrada.

O aumento diversidade de cargas sensíveis a problema de qualidade da energia tornou o desequilíbrio de tensão um fator muito preocupante. Este aspecto tem sido freqüentemente observado mediante ao aumento do número de reclamações por parte dos consumidores com respeito a má qualidade do fornecimento de energia elétrica em vários países industrializados.

Considerando-se a dimensão do problema, os órgãos reguladores formalizaram recomendações e normas fixando-se limites máximos toleráveis para os desequilíbrios de tensão. Particularmente no Brasil, o Operador Nacional do Sistema (ONS) baseado na experiência internacional estabeleceu com limite um índice de desequilíbrio de tensão de 2%, calculado pela relação percentual entre as componentes de sequência negativa e positiva ou pela formula alternativa proposta pelo CIGRÉ.

Nestas condições, o sistema de faixas originais é obtido através das equações 3.1.

$$\begin{aligned} F_a &= F_{a1} + F_{a2} + F_{a0} \\ F_b &= F_{b1} + F_{b2} + F_{b0} \\ F_c &= F_{c1} + F_{c2} + F_{c0} \end{aligned} \quad (3.1)$$

A partir das definições das componentes sequenciais e utilizando-se o operador vetorial $\alpha = 1 \angle 120^\circ$ ($0,5 + j0,866$), é possível representar o sistema composto por três faixas desequilibradas F_a , F_b e F_c em função das componentes sequenciais, tomadas em relação a apenas uma das fases. Nesse sentido, com respeito a fase a, tem-se:

$$\begin{aligned} F_{a1} &= \alpha^2 F_{a0} & F_{a2} &= \alpha F_{a0} \\ F_{b1} &= \alpha F_{a0} & F_{b2} &= \alpha^2 F_{a0} \\ F_{c1} &= F_{a0} & F_{c2} &= F_{a0} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Capítulo III

COMPONENTES SIMÉTRICAS APLICADAS NA COMPENSAÇÃO

3.1 - Introdução

De acordo com o teorema de Fortescue, três fasores desequilibrados de um sistema trifásico F_a , F_b , e F_c , podem ser substituídos pela composição de três sistemas equilibrados de fasores, denominados:

- *Componentes de seqüência positiva*, constituído de três fasores iguais em módulo defasados de 120° entre si e tendo a mesma seqüência de fases dos fasores originais, (F_{a1} , F_{b1} , F_{c1});
- *Componentes de seqüência negativa*, consistindo de três fasores iguais em módulo defasados de 120° entre si e tendo a seqüência de fases oposta à dos fasores originais, (F_{a2} , F_{b2} , F_{c2});
- *Componentes de seqüência zero*, constituído de três fasores iguais em módulo e com defasagem zero entre si, (F_{a0} , F_{b0} , F_{c0});

Nestas condições, o sistema de fasores originais é obtido através das equações 3.1.

$$\begin{aligned} F_a &= F_{a1} + F_{a2} + F_{a0} \\ F_b &= F_{b1} + F_{b2} + F_{b0} \\ F_c &= F_{c1} + F_{c2} + F_{c0}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

A partir das definições das componentes seqüenciais e utilizando-se o operador vetorial $\alpha = 1\angle 120^\circ$ ($-0,5 + j0,866$), é possível representar o sistema composto por três fasores desequilibrados F_a , F_b , e F_c em função das componentes seqüenciais tomadas em relação a apenas uma das fases. Neste sentido, com respeito a fase a, tem-se:

$$\begin{aligned} F_{b1} &= \alpha^2 \cdot F_{a1} & F_{c1} &= \alpha \cdot F_{a1} \\ F_{b2} &= \alpha \cdot F_{a2} & F_{c2} &= \alpha^2 \cdot F_{a2} \\ F_{b0} &= F_{a0} & F_{c0} &= F_{a0} \end{aligned} \quad (3.2)$$

3.2 Na forma matricial tem-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_a \\ \mathbf{F}_b \\ \mathbf{F}_c \end{bmatrix} = \underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix}}_{\mathbf{T}} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{F}_{a0} \\ \mathbf{F}_{a1} \\ \mathbf{F}_{a2} \end{bmatrix} \quad (3.3)$$

ou genericamente;

$$\mathbf{F}_{abc} = \mathbf{T} \mathbf{F}_{a012} \quad (3.4)$$

Sendo: $\mathbf{F}_{abc}$ - vetores das componentes de fase;

$\mathbf{T}$ - matriz de transformação;

$\mathbf{F}_{a012}$ - vetores das componentes seqüenciais em relação à fase a.

Por outro lado, as componentes seqüências de um determinado sistema desequilibrado de fasores podem ser obtidas utilizando-se a transformada inversa, como descrito na equação 3.5.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{F}_{a0} \\ \mathbf{F}_{a1} \\ \mathbf{F}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{F}_a \\ \mathbf{F}_b \\ \mathbf{F}_c \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

ou, genericamente;

$$\mathbf{F}_{a012} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \mathbf{F}_{abc} \quad (3.6)$$

Considerando-se a representação de um sistema trifásico através das suas componentes seqüenciais, define-se:

- Sistema equilibrado ou simétrico: $\mathbf{F}_{a0} = 0$, ($\mathbf{F}_{a1} \neq 0$ e $\mathbf{F}_{a2} = 0$) ou ($\mathbf{F}_{a1} = 0$ e $\mathbf{F}_{a2} \neq 0$).
- Sistema desequilibrado puro: $\mathbf{F}_{a0} = 0$, $\mathbf{F}_{a1} \neq 0$ e $\mathbf{F}_{a2} \neq 0$.
- Sistema desequilibrado e impuro: $\mathbf{F}_{a0} \neq 0$, $\mathbf{F}_{a1} \neq 0$ e $\mathbf{F}_{a2} \neq 0$.

3.2 – Compensação de Corrente Desequilibrada

A figura 3.1 mostra uma carga trifásica desequilibrada, ligada a um sistema trifásico (a-b-c). Inserido a este sistema, temos um compensador trifásico ligado em paralelo com a carga.

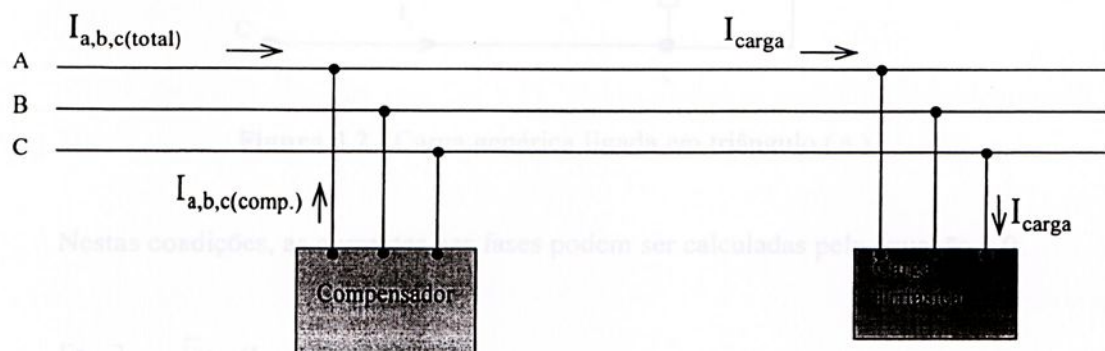


Figura 3.1 - Rede trifásica com carga e compensador

Admitindo-se as tensões de alimentação simétricas, tem-se:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} 1 \\ \alpha^2 \\ \alpha \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Sendo: V - valor eficaz da tensão fase-neutro.

As tensões de fase-fase podem então ser calculadas por:

$$\begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} 1 & -\alpha^2 \\ \alpha^2 & -\alpha \\ \alpha & -1 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Ao se considerar individualmente o compensador ou a carga equivalente conectada em triângulo, tem-se, genericamente:

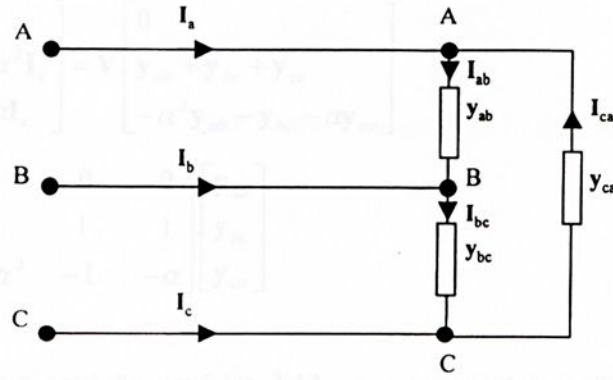


Figura 3.2 - Carga genérica ligada em triângulo (\$\Delta\$).

Nestas condições, as correntes nas fases podem ser calculadas pela equação 3.9.

$$\begin{bmatrix} I_{ab} \\ I_{bc} \\ I_{ca} \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} y_{ab}(1 - \alpha^2) \\ y_{bc}(\alpha^2 - \alpha) \\ y_{ca}(\alpha - 1) \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Sendo: \$y_{ab}, y_{bc}, y_{ca}\$ as admitância entre fases.

As correntes de linha são dadas por:

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = V \begin{bmatrix} y_{ab}(1 - \alpha^2) - y_{ca}(\alpha - 1) \\ y_{bc}(\alpha^2 - \alpha) - y_{ab}(1 - \alpha^2) \\ y_{ca}(\alpha - 1) - y_{bc}(\alpha^2 - \alpha) \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

As componentes simétricas das correntes de linha podem então ser determinadas a partir da matriz de transformação inversa \$T^{-1}\$, conforme ilustrado na equação 3.11.

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (3.11)$$

Fazendo os cálculos matriciais tem-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_a + \mathbf{I}_b + \mathbf{I}_c \\ \mathbf{I}_a + \alpha \mathbf{I}_b + \alpha^2 \mathbf{I}_c \\ \mathbf{I}_a + \alpha^2 \mathbf{I}_b + \alpha \mathbf{I}_c \end{bmatrix} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 0 \\ \mathbf{y}_{ab} + \mathbf{y}_{bc} + \mathbf{y}_{ca} \\ -\alpha^2 \mathbf{y}_{ab} - \mathbf{y}_{bc} - \alpha \mathbf{y}_{ca} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_0 \\ \mathbf{I}_1 \\ \mathbf{I}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ -\alpha^2 & -1 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{ab} \\ \mathbf{y}_{bc} \\ \mathbf{y}_{ca} \end{bmatrix} \quad (3.13)$$

Utilizando-se a equação genérica 3.13, as componentes seqüenciais das correntes na carga e no compensador, são dadas respectivamente pelas expressões 3.14 e 3.15.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_0^L \\ \mathbf{I}_1^L \\ \mathbf{I}_2^L \end{bmatrix} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ -\alpha^2 & -1 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{ab}^L \\ \mathbf{y}_{bc}^L \\ \mathbf{y}_{ca}^L \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_0^{comp} \\ \mathbf{I}_1^{comp} \\ \mathbf{I}_2^{comp} \end{bmatrix} = \mathbf{V} \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ -\alpha^2 & -1 & -\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_{ab}^{comp} \\ \mathbf{y}_{bc}^{comp} \\ \mathbf{y}_{ca}^{comp} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

A metodologia de compensação consiste, portanto na determinação das correntes de compensação de forma a compor uma corrente total equilibrada. Para isto, basta impor que a componente de seqüência negativa seja nula, uma vez que para o sistema isolado adotado não existe possibilidade de circulação da componente de seqüência zero. Desta forma tem-se:

$$\mathbf{I}_2^L + \mathbf{I}_2^{comp} = 0 \quad (3.16)$$

A partir das equações 3.15 e 3.16, obtém-se:

$$\mathbf{I}_2^L = \mathbf{V} [\alpha^2 \mathbf{y}_{ab}^{comp} + \mathbf{y}_{bc}^{comp} + \alpha \mathbf{y}_{ca}^{comp}] \quad (3.17)$$

Separando-se as partes real e imaginária das correntes e das admitância e ainda considerando-se o compensador como um dispositivo que não consome potência ativa, tem-se:

$$\operatorname{Re}[\mathbf{I}_2^L] + j \cdot \operatorname{Im}[\mathbf{I}_2^L] = \mathbf{V} [\alpha^2 \cdot j \cdot B_{ab}^{comp} + j \cdot B_{bc}^{comp} + \alpha \cdot j \cdot B_{ca}^{comp}] \quad (3.18)$$

Isolando-se as partes reais e imaginárias da expressão 3.18, obtém-se:

$$\operatorname{Re}[\mathbf{I}_2^L] = \mathbf{V} \frac{\sqrt{3}}{2} [B_{ab}^{comp} - B_{ca}^{comp}] \quad (3.19)$$

$$\operatorname{Im}[\mathbf{I}_2^L] = \mathbf{V} \left[B_{bc}^{comp} - \frac{1}{2} (B_{ca}^{comp} + B_{ab}^{comp}) \right] \quad (3.20)$$

O sistema de equações 3.19 e 3.20 possui três incógnitas e, portanto apresenta várias soluções. Uma solução particularizada pode ser obtida impondo-se condições sobre a componente de sequência positiva resultante. Uma possibilidade normalmente adotada é a imposição do fator de deslocamento final desejado para o conjunto formado pelo compensador e a carga a ser compensada. Neste sentido, define-se a seguinte equação:

$$\tan(\phi) = \frac{\operatorname{Im}[\mathbf{I}_1^L] + \operatorname{Im}[\mathbf{I}_1^{comp}]}{\operatorname{Re}[\mathbf{I}_1^L]} \quad (3.21)$$

Sendo: $\cos\phi$ - fator de deslocamento desejado.

$$\operatorname{Im}[\mathbf{I}_1^{comp}] = \tan(\phi) \cdot \operatorname{Re}[\mathbf{I}_1^L] - \operatorname{Im}[\mathbf{I}_1^L] \quad (3.22)$$

A partir das equações 3.15 e 3.22, desprezando-se as condutâncias no compensador, tem-se:

$$\tan(\phi) \operatorname{Re}[\mathbf{I}_1^L] - \operatorname{Im}[\mathbf{I}_1^L] = [B_{ab}^{comp} + B_{bc}^{comp} + B_{ca}^{comp}] \mathbf{V} \quad (3.23)$$

Das equações 3.20 e 3.23, obtém-se:

$$\operatorname{Im}[\mathbf{I}_2^L] = \frac{3}{2} \mathbf{V} \cdot B_{bc}^{comp} - \frac{1}{2} (\tan(\phi) \operatorname{Re}[\mathbf{I}_1^L] - \operatorname{Im}[\mathbf{I}_1^L]) \quad (3.24)$$

Logo,

$$B_{bc}^{comp} = \frac{1}{\sqrt{3}\sqrt{3}} (2 \operatorname{Im}[\mathbf{I}_2^L] + \tan(\phi) \operatorname{Re}[\mathbf{I}_1^L] - \operatorname{Im}[\mathbf{I}_1^L]) \quad (3.25)$$

Sabendo-se que $\sqrt{3}.V.B_{bc}^{comp} = I_{bc}^{comp}$; obtém-se:

$$I_{bc}^{comp} = -\frac{\sqrt{3}}{3} \left(\text{Im}[I_1^L] - 2 \text{Im}[I_2^L] - \tan(\phi) \text{Re}[I_1^L] \right) \quad (3.26)$$

Esta é a corrente que deve ser absorvida na fase *bc* do compensador para que a componente de sequência negativa global seja nula.

Isolando-se os termos necessários das equações 3.19 e 3.20 e em seguida fazendo-se a somatória membro a membro, tem-se:

$$2.B_{ab}^{comp} = 2.B_{bc}^{comp} + \frac{2 \text{Im}[I_2^L]}{V} - \frac{2 \text{Re}[I_2^L]}{\sqrt{3}.V} \quad (3.27)$$

Das equações 3.25 e 3.27, obtém-se as expressões 3.28 e 3.29 para o cálculo da susceptância e da corrente a ser absorvida entre as fases *ab* do compensador.

$$B_{ab}^{comp} = \frac{1}{3.V} \left(\sqrt{3} \cdot \text{Re}[I_2^L] - \text{Im}[I_2^L] - \text{Im}[I_1^L] + \tan(\phi) \text{Re}[I_1^L] \right) \quad (3.28)$$

$$I_{ab}^{comp} = -\frac{\sqrt{3}}{3} \left(\text{Im}[I_1^L] + \text{Im}[I_2^L] - \text{Re}[I_2^L] \sqrt{3} - \tan(\phi) \text{Re}[I_1^L] \right) \quad (3.29)$$

Finalmente, através de um processo semelhante determina-se a susceptância B_{ca}^{comp} e a respectiva corrente.

$$B_{ca}^{comp} = \frac{1}{3V} \left(-\text{Im}[I_2^L] - \text{Im}[I_1^L] + \tan(\phi) \text{Re}[I_1^L] - \sqrt{3} \cdot \text{Re}[I_2^L] \right) \quad (3.30)$$

$$I_{ca}^{comp} = -\frac{\sqrt{3}}{3} \left(\text{Im}[I_1^L] + \text{Im}[I_2^L] + \text{Re}[I_2^L] \sqrt{3} - \tan(\phi) \text{Re}[I_1^L] \right) \quad (3.31)$$

As correntes de compensação I_{ab}^{comp} ; I_{bc}^{comp} ; I_{ca}^{comp} dadas pelas expressões 3.26, 3.29, 3.31, são apresentadas em função das componentes seqüências das correntes na carga. Os resultados equivalentes em função das componentes de fase *abc* podem ser obtidos, como se segue.

Inicialmente apresenta-se o cálculo das partes reais e imaginárias das equações 3.26, 3.29, 3.31, para em seguida efetuar as devidas substituições de variáveis. Tem-se:

$$\text{Im}[\mathbf{I}_1^L] + \text{Im}[\mathbf{I}_2^L] = \frac{1}{3} \text{Im}[\mathbf{I}_a^L + \alpha \mathbf{I}_b^L + \alpha^2 \mathbf{I}_c^L] + \frac{1}{3} \text{Im}[\mathbf{I}_a^L + \alpha^2 \mathbf{I}_b^L + \alpha \mathbf{I}_c^L] \quad (3.32)$$

ou seja;

$$\text{Im}[\mathbf{I}_1^L + \mathbf{I}_2^L] = \frac{1}{3} \text{Im}[2\mathbf{I}_a^L + (\alpha + \alpha^2)\mathbf{I}_b^L + (\alpha + \alpha^2)\mathbf{I}_c^L] \quad (3.33)$$

$$\text{Im}[\mathbf{I}_1^L + \mathbf{I}_2^L] = \frac{1}{3} \text{Im}[2\mathbf{I}_a^L - \mathbf{I}_b^L - \mathbf{I}_c^L] \quad (3.34)$$

Para um sistema isolado, a componente de sequência zero é nula, implicando que $\mathbf{I}_a^L + \mathbf{I}_b^L + \mathbf{I}_c^L = 0$. Assim, a partir de 3.34, obtém-se:

$$\text{Im}[\mathbf{I}_1^L] + \text{Im}[\mathbf{I}_2^L] = \text{Im}[\mathbf{I}_a^L] \quad (3.35)$$

Por outro lado, tem-se.

$$\text{Im}[\mathbf{I}_1^L] - 2\text{Im}[\mathbf{I}_2^L] = \text{Im}[\mathbf{I}_1^L - 2\mathbf{I}_2^L] \quad (3.36)$$

Substituindo-se as componentes seqüências pela respectiva composição das componentes de fase e reagrupando os termos, obtém-se:

$$\text{Im}[\mathbf{I}_1^L] - 2\text{Im}[\mathbf{I}_2^L] = [\text{Im}[\mathbf{I}_a^L] + \text{Im}[\alpha \mathbf{I}_b^L] + \text{Im}[\alpha^2 \mathbf{I}_c^L]] \quad (3.37)$$

Os termos relacionados com a parte real das componentes seqüenciais podem ser expressos em função das partes imaginárias, como:

$$\text{Re}[\mathbf{I}_2^L] = \frac{1}{3} \text{Re}[\mathbf{I}_a^L + \alpha^2 \mathbf{I}_b^L + \alpha \mathbf{I}_c^L] \quad (3.38)$$

Separando as partes reais e imaginárias das correntes de linha $\mathbf{I}_a$, $\mathbf{I}_b$ e $\mathbf{I}_c$ e representando o operador α na forma retangular, tem-se:

$$\operatorname{Re}[\mathbf{I}_2^L] = \frac{1}{3} \operatorname{Re} \left[I_{aR}^L + jI_{aI}^L + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (I_{bR}^L + jI_{bI}^L) + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (I_{cR}^L + jI_{cI}^L) \right] \quad (3.39)$$

ou seja;

$$\operatorname{Re}[\mathbf{I}_2^L] = \frac{1}{3} \left[-\frac{3}{2} I_{bR}^L - \frac{3}{2} I_{cR}^L - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{bI}^L - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cI}^L \right] \quad (3.40)$$

Sabendo-se que:

$$\operatorname{Im}[\alpha \cdot \mathbf{I}] = \frac{\sqrt{3}}{2} I_R - \frac{1}{2} I_I \quad (3.41)$$

$$\operatorname{Im}[\alpha^2 \cdot \mathbf{I}] = -\frac{\sqrt{3}}{2} I_R - \frac{1}{2} I_I \quad (3.42)$$

Substituindo-se 3.41 e 3.42 em 3.40, obtém-se:

$$\operatorname{Re}[\mathbf{I}_2^L] = \frac{\sqrt{3}}{3} [-\operatorname{Im}[\alpha \cdot \mathbf{I}_b^L] + \operatorname{Im}[\alpha^2 \cdot \mathbf{I}_c^L]] \quad (3.43)$$

Da mesma forma, para a parte real da componente de seqüência positiva, tem-se:

$$\operatorname{Re}[\mathbf{I}_1^L] = \frac{1}{3} \operatorname{Re}[\mathbf{I}_a^L + \alpha \cdot \mathbf{I}_b^L + \alpha^2 \cdot \mathbf{I}_c^L] \quad (3.44)$$

$$\operatorname{Re}[\mathbf{I}_1^L] = \frac{1}{3} \operatorname{Re} \left[I_{aR}^L + jI_{aI}^L + \left(-\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (I_{bR}^L + jI_{bI}^L) + \left(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) (I_{cR}^L + jI_{cI}^L) \right] \quad (3.45)$$

$$\operatorname{Re}[\mathbf{I}_1^L] = \frac{1}{3} \left[-\frac{3}{2} I_{bR}^L - \frac{3}{2} I_{cR}^L - \frac{\sqrt{3}}{2} I_{bI}^L + \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cI}^L \right] \quad (3.46)$$

$$\operatorname{Re}[\mathbf{I}_1^L] = \frac{\sqrt{3}}{3} [\operatorname{Im}[\alpha^2 \cdot \mathbf{I}_b^L] - \operatorname{Im}[\alpha \cdot \mathbf{I}_c^L]] \quad (3.47)$$

A partir das relações anteriores, 3.37, 3.47, substituindo na expressão 3.26, obtém-se:

3.3 - Mudança Para o Domínio do Tempo.

$$\mathbf{I}_{bc}^{comp} = -\frac{\sqrt{3}}{3} \left[-\text{Im}[\mathbf{I}_a^L] + \text{Im}[\alpha \cdot \mathbf{I}_b^L] + \text{Im}[\alpha^2 \cdot \mathbf{I}_c^L] - \frac{\tan(\phi)}{\sqrt{3}} (\text{Im}[\alpha^2 \cdot \mathbf{I}_b^L] - \text{Im}[\alpha \cdot \mathbf{I}_c^L]) \right] \quad (3.48)$$

Substituindo-se as expressões 3.35, 3.43 e 3.47 na expressão 3.29, tem-se:

$$\mathbf{I}_{ab}^{comp} = -\frac{\sqrt{3}}{3} \left(\text{Im}[\mathbf{I}_a^L] - \sqrt{3} \left[\frac{\sqrt{3}}{3} (\text{Im}[\alpha^2 \cdot \mathbf{I}_c^L] - \text{Im}[\alpha \cdot \mathbf{I}_b^L]) \right] - \frac{\tan(\phi)}{3} (\text{Im}[\alpha \cdot \mathbf{I}_c^L] - \text{Im}[\alpha^2 \cdot \mathbf{I}_b^L]) \right) \quad (3.49)$$

ou seja;

$$\mathbf{I}_{ab}^{comp} = -\frac{\sqrt{3}}{3} \left(\text{Im}[\mathbf{I}_a^L] + \text{Im}[\alpha \cdot \mathbf{I}_b^L] - \text{Im}[\alpha^2 \cdot \mathbf{I}_c^L] - \frac{\tan(\phi)}{\sqrt{3}} (-\text{Im}[\alpha^2 \cdot \mathbf{I}_b^L] - \text{Im}[\alpha \cdot \mathbf{I}_c^L]) \right) \quad (3.50)$$

Partindo-se da expressão 3.31 e substituindo-se as expressões 3.35, 3.43 e 3.47, tem-se:

$$\mathbf{I}_{ca}^{comp} = -\frac{\sqrt{3}}{3} \left(\text{Im}[\mathbf{I}_a^L] - \text{Im}[\alpha \cdot \mathbf{I}_b^L] + \text{Im}[\alpha^2 \cdot \mathbf{I}_c^L] - \frac{\tan(\phi)}{\sqrt{3}} (\text{Im}[\alpha^2 \cdot \mathbf{I}_b^L] - \text{Im}[\alpha \cdot \mathbf{I}_c^L]) \right) \quad (3.51)$$

As equações 3.48, 3.50 e 3.51 podem então ser utilizadas para o cálculo das correntes de compensação em função das correntes de linha absorvidas pela carga. Estas equações podem ser reescritas na forma matricial conforme apresentado em 3.52.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{ab}^{comp} \\ \mathbf{I}_{bc}^{comp} \\ \mathbf{I}_{ca}^{comp} \end{bmatrix} = -\frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \text{Im} \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a^L \\ \alpha \cdot \mathbf{I}_b^L \\ \alpha^2 \cdot \mathbf{I}_c^L \end{bmatrix} + \frac{\tan(\phi)}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \cdot \text{Im} \begin{bmatrix} \alpha^2 \cdot \mathbf{I}_b^L \\ \alpha \cdot \mathbf{I}_c^L \end{bmatrix} \quad (3.52)$$

As correntes instantâneas nas fases a, b e c podem ser obtidas por:

As correntes $\mathbf{I}_{ab}^{comp}$, $\mathbf{I}_{bc}^{comp}$, $\mathbf{I}_{ca}^{comp}$ são portanto as correntes reativas necessárias em cada ramo do compensador para que o conjunto carga-compensador opere de forma equilibrada e com um fator de potência $\cos(\phi)$ preestabelecido[1].

3.3 - Mudança Para o Domínio do Tempo.

As equações desenvolvidas anteriormente possibilitam que o conjunto carga compensador seja visto como equilibrado e com um fator de potência determinado. As equações 3.52 são úteis para as análises e simulações digitais no domínio da frequência. Os dados são obtidos a partir da medição dos valores eficazes de I_a^L , I_b^L e I_c^L na carga e da determinação das respectivas partes imaginárias, fixando-se uma referência de fase.

Para implementação física do sistema de controle, visando-se a operação em tempo real, as equações 3.52 não são adequadas. Neste caso é importante que dados relativos às correntes de alimentação da carga sejam obtidos a partir de amostragens das correntes e no menor tempo possível. Para isto, as equações das correntes de compensação formuladas anteriormente são adaptadas no sentido de incorporar grandezas obtidas no domínio do tempo. Para as tensões simétricas, tem-se:

$$v_a = \sqrt{2} \operatorname{Re}[V_a e^{j(\omega t)}] = \sqrt{2} [V_{aR} \cos \omega t - V_{aI} \sin \omega t] \quad (3.53)$$

$$v_b = \sqrt{2} \operatorname{Re}[V_b e^{j(\omega t)}] = \sqrt{2} \operatorname{Re}[V_a e^{j(\omega t - 120^\circ)}] = \sqrt{2} [V_{aR} \cos(\omega t - 120^\circ) - V_{aI} \sin(\omega t - 120^\circ)]$$

$$v_c = \sqrt{2} \operatorname{Re}[V_c e^{j(\omega t)}] = \sqrt{2} \operatorname{Re}[V_a e^{j(\omega t + 120^\circ)}] = \sqrt{2} [V_{aR} \cos(\omega t + 120^\circ) - V_{aI} \sin(\omega t + 120^\circ)]$$

Admitindo a fase a como referência de ângulos, resulta $V_{aI} = 0$. Substituindo-se nas equações 3.53, tem-se:

$$v_a = \sqrt{2} V \cos \omega t$$

$$v_b = \sqrt{2} V \cos(\omega t - 120^\circ) \quad (3.54)$$

$$v_c = \sqrt{2} V \cos(\omega t + 120^\circ)$$

As correntes instantâneas nas fases a, b e c podem ser obtidas por:

$$i_a^L = \operatorname{Re}[\hat{I}_a e^{j(\theta_a + \omega t)}] = \sqrt{2} \operatorname{Re}[I_a e^{j(\omega t)}]$$

$$i_b^L = \operatorname{Re}[\hat{I}_b e^{j(\theta_b + \omega t)}] = \sqrt{2} \operatorname{Re}[I_b e^{j(\omega t)}] \quad (3.55)$$

$$i_c^L = \operatorname{Re}[\hat{I}_c e^{j(\theta_c + \omega t)}] = \sqrt{2} \operatorname{Re}[I_c e^{j(\omega t)}]$$

Genericamente para uma fase qualquer, tem-se:

$$i^L = \sqrt{2} \operatorname{Re} \left[\mathbf{I} \cdot e^{j\omega t} \right] = \sqrt{2} \operatorname{Re} \left[(\operatorname{Re}[\mathbf{I}^L] + j \operatorname{Im}[\mathbf{I}^L]) (\cos \omega t + j \operatorname{sen} \omega t) \right] \quad (3.56)$$

Extraindo a parte real, obtém-se;

$$i^L = \sqrt{2} \left[\operatorname{Re}(\mathbf{I}^L) \cos \omega t - \operatorname{Im}(\mathbf{I}^L) \operatorname{sen} \omega t \right] \quad (3.57)$$

Observando-se a equação 3.56 verifica-se que a parte imaginária da corrente complexa na fase a pode ser obtida quando $\cos(\omega t^*) = 0$ e $\operatorname{sen}(\omega t^*) = -1$, conforme equação 3.58.

$$i_a^L = \sqrt{2} \operatorname{Im}[\mathbf{I}_a^L] \quad (3.58)$$

Este instante pode ser identificado, observando-se o momento em que a tensão na fase passa por zero com derivada positiva. Das equações 3.55, tem-se:

$$v_a = \sqrt{2} V \cos(\omega t^*) = 0 \quad (3.59)$$

$$\frac{dv_a}{dt} = -\sqrt{2} V \operatorname{sen}(\omega t^*) > 0 \quad (3.60)$$

Para representar este procedimento utiliza-se a notação dada em 3.61.

$$\operatorname{Im}[\mathbf{I}_a^L] = \frac{i_a^L}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_a=0 \\ \frac{dv_a}{dt} > 0}} \quad (3.61)$$

Por outro lado, quando a tensão na fase b passa por zero com derivada positiva, tem-se;

$$v_b = \sqrt{2} V \cos(\omega t^{**} - 120^\circ) \quad (3.62)$$

$$\frac{dv_b}{dt} = -\sqrt{2} V \operatorname{sen}(\omega t^{**} - 120^\circ) \quad (3.63)$$

ou seja $\omega t^{**} = 30^\circ$

Substituindo-se $\omega t^{**} = 30^\circ$ na expressão genérica 3.57, tem-se:

$$i^L(\omega t^{**} = 30^\circ) = \sqrt{2} \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \text{Re}(\mathbf{I}^L) - \frac{1}{2} \text{Im}(\mathbf{I}^L) \right] \quad (3.64)$$

Sabendo-se que;

$$\sqrt{2} \text{Im}[\alpha \mathbf{I}^L] = \sqrt{2} \text{Im} \left\{ \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) [\text{Re}(\mathbf{I}^L) + j \text{Im}(\mathbf{I}^L)] \right\} = \left[\frac{\sqrt{3}}{2} \text{Re}(\mathbf{I}^L) - \frac{1}{2} \text{Im}(\mathbf{I}^L) \right] \quad (3.65)$$

Conclui-se:

$$i_b^L = \sqrt{2} \text{Im}[\alpha \mathbf{I}_b^L] \quad (3.66)$$

e;

$$i_c^L = \sqrt{2} \text{Im}[\alpha \mathbf{I}_c^L] \quad (3.67)$$

ou, na forma compacta, conforme apresentado anteriormente:

$$\text{Im}[\alpha \mathbf{I}_b^L] = \frac{i_b^L}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_b=0 \\ \frac{dv_b}{dt} > 0}} \quad (3.68)$$

e;

$$\text{Im}[\alpha \mathbf{I}_c^L] = \frac{i_c^L}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_c=0 \\ \frac{dv_c}{dt} > 0}} \quad (3.69)$$

Considerando-se ainda a passagem por zero da tensão na fase c, tem-se:

$$v_c = \sqrt{2} V \cos(\omega t^{***} + 120^\circ) \quad (3.70)$$

$$\frac{dv_c}{dt} = -\sqrt{2} V \sin(\omega t^{***} + 120^\circ) \quad (3.71)$$

ou seja $\omega t^{***} = -30^\circ$

Substituindo-se $\omega t^{***} = -30^\circ$ na expressão genérica 3.57, tem-se

$$i^L(\omega t^{**} = -30^\circ) = \sqrt{2} \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{I}^L) - \frac{1}{2} \operatorname{Im}(\mathbf{I}^L) \right] \quad (3.72)$$

Sabendo-se que;

$$\sqrt{2} \operatorname{Im}[\alpha^2 \mathbf{I}^L] = \sqrt{2} \operatorname{Im} \left\{ \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) [\operatorname{Re}(\mathbf{I}^L) + j \operatorname{Im}(\mathbf{I}^L)] \right\} = \left[-\frac{\sqrt{3}}{2} \operatorname{Re}(\mathbf{I}^L) - \frac{1}{2} \operatorname{Im}(\mathbf{I}^L) \right] \quad (3.73)$$

Conclui-se:

$$i_b^L = \sqrt{2} \operatorname{Im}[\alpha^2 \mathbf{I}_b^L] \quad (3.74)$$

e;

$$i_c^L = \sqrt{2} \operatorname{Im}[\alpha^2 \mathbf{I}_c^L] \quad (3.75)$$

Na forma compacta, tem-se:

$$\operatorname{Im}[\alpha^2 I_b^L] = \frac{i_b^L}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_c=0 \\ \frac{dv_c}{dt} > 0}} \quad (3.76)$$

e;

$$\operatorname{Im}[\alpha^2 I_c^L] = \frac{i_c^L}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_c=0 \\ \frac{dv_c}{dt} > 0}} \quad (3.77)$$

Considerando-se as equações anteriores e reescrevendo a equação 3.52 em função dos valores instantâneos das correntes, tem-se:

$$\begin{bmatrix} I_{ab}^{Comp} \\ I_{bc}^{Comp} \\ I_{ca}^{Comp} \end{bmatrix} = \frac{-1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_a}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_a=0 \\ \frac{dv_a}{dt} > 0}} \\ \frac{i_b}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_b=0 \\ \frac{dv_b}{dt} > 0}} \\ \frac{i_c}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_c=0 \\ \frac{dv_c}{dt} > 0}} \end{bmatrix} + \frac{\tan(\phi)}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_b}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_c=0 \\ \frac{dv_c}{dt} > 0}} \\ \frac{i_c}{\sqrt{2}} \bigg|_{\substack{v_b=0 \\ \frac{dv_b}{dt} > 0}} \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

3.4 – Conclusão

Este capítulo foi dedicado à apresentação da metodologia de compensação baseada nas componentes simétricas da corrente da carga, também conhecida como método de “Steimnetz”.

Para compensação do desequilíbrio, o procedimento consiste basicamente na eliminação das componentes de seqüências negativa e zero, através de um equipamento auxiliar genericamente denominado por compensador. A compensação do fator de deslocamento residual é também efetuada ajustando-se a parte imaginária da componente de seqüência positiva.

Apesar de ser desenvolvida no domínio da frequência, é possível estabelecer um procedimento auxiliar para determinação das correntes compensatórias partindo-se amostragens em tempo real. Destaca-se, entretanto, que para aplicação desta técnica o circuito de controle deve conter dispositivos de detecção de zeros e identificação dos sinais das derivadas da tensão, o que, pode comprometer o desempenho com relação a atuação em tempo real.

4.2 - Teoria PQ

Nesta seção apresenta-se uma análise das potências na teoria PQ a partir das suas expressões gerais. A análise é feita para sistemas trifásicos com o neutro, equilibrados ou desequilibrados. Embora os algoritmos de controle baseados na teoria PQ utilizem as grandezas instantâneas de tensões e correntes, na análise que se apresenta a seguir, o sistema é considerado operando em regime permanente senoidal. Tal procedimento tem por objetivo permitir a utilização da representação fasorial das grandezas elétricas e, sob o estabelecimento do uso das componentes simétricas no sentido de proporcionar uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos.

As expressões gerais das tensões são dadas por:

Capítulo IV

COMPENSAÇÃO DE CARGAS BASEADA NA TEORIA DE POTÊNCIA ATIVA E REATIVA INSTANTÂNEA

4.1 - Introdução

A teoria geral da potência reativa instantânea trifásica ou ainda teoria da potência instantânea é genericamente designada por teoria PQ. Foi apresentada pela primeira vez por Akagi et al. em 1983 e em seguida foi estendida para sistemas trifásicos a quatro fios por Watanabe e Aredes.

Os algoritmos de controle baseados na teoria PQ operam sobre valores instantâneos de tensões e correntes. Os cálculos são feitos no domínio do tempo e são relativamente simples, tornando a sua aplicação indicada para o controle em tempo real de equipamentos de compensação, tanto em regime permanente como em regime transitório. Além disso, é ainda possível atribuir significado físico às grandezas em foco, o que facilita a compreensão de qualquer sistema trifásico genérico [5].

4.2 - Teoria PQ

Nesta seção apresenta-se uma análise das potências da teoria PQ a partir das suas expressões gerais. A análise é feita para sistemas trifásicos sem o neutro, equilibrados ou desequilibrados. Embora os algoritmos de controle baseados na teoria PQ utilizem as grandezas instantâneas de tensões e correntes, na análise que se apresenta a seguir, o sistema é considerado operando em regime permanente senoidal. Tal procedimento tem por objetivo permitir a utilização da representação fasorial das grandezas elétricas e, sobretudo viabilizar o uso das componentes simétricas no sentido de promover uma melhor compreensão dos fenômenos envolvidos.

As expressões gerais das tensões são dadas por:



$$\begin{aligned}
 v_a(t) &= \sqrt{2} \cdot V_a \cdot \sin(\omega t + \phi_a) \\
 v_b(t) &= \sqrt{2} \cdot V_b \cdot \sin(\omega t + \phi_b) \\
 v_c(t) &= \sqrt{2} \cdot V_c \cdot \sin(\omega t + \phi_c)
 \end{aligned}
 \quad (4.1)$$

Genericamente, para as correntes, tem-se:

$$\begin{aligned}
 i_a(t) &= \sqrt{2} \cdot I_a \cdot \sin(\omega t + \delta_a) \\
 i_b(t) &= \sqrt{2} \cdot I_b \cdot \sin(\omega t + \delta_b) \\
 i_c(t) &= \sqrt{2} \cdot I_c \cdot \sin(\omega t + \delta_c)
 \end{aligned}
 \quad (4.2)$$

Nestas condições, as representações fasoriais das tensões do sistema trifásico genérico são escritas como:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{V}_a &= V_a \angle \phi_a \\
 \mathbf{V}_b &= V_b \angle \phi_b \\
 \mathbf{V}_c &= V_c \angle \phi_c
 \end{aligned}
 \quad (4.3)$$

Analogamente, para as correntes tem-se:

$$\begin{aligned}
 \mathbf{I}_a &= I_a \angle \delta_a \\
 \mathbf{I}_b &= I_b \angle \delta_b \\
 \mathbf{I}_c &= I_c \angle \delta_c
 \end{aligned}
 \quad (4.4)$$

Aplicando-se a transformação para componentes simétricas (teorema de Fortescue) aos fasores representativos das tensões e correntes tem-se:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_{a0} \\ \mathbf{V}_{a+} \\ \mathbf{V}_{a-} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix}
 \quad (4.5)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_{a0} \\ \mathbf{I}_{a+} \\ \mathbf{I}_{a-} \end{bmatrix} = [T] \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix}
 \quad (4.6)$$

$$\text{Sendo: } \mathbf{T} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \quad (4.7)$$

Como se sabe, as componentes simétricas assim obtidas correspondem a três sistemas trifásicos, constituídos cada um deles, por três fasores de igual amplitude, em fase no caso da componente de seqüência zero e defasados 120° entre si nos casos da seqüência positiva e de seqüência negativa.

As componentes simétricas das tensões podem então ser escritas na forma:

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_0 &= V_0 \angle \phi_0 \\ \mathbf{V}_+ &= V_+ \angle \phi_+ \\ \mathbf{V}_- &= V_- \angle \phi_- \end{aligned} \quad (4.8)$$

De forma análoga, as componentes simétricas das correntes são dadas por:

$$\begin{aligned} \mathbf{I}_0 &= I_0 \angle \delta_0 \\ \mathbf{I}_+ &= I_+ \angle \delta_+ \\ \mathbf{I}_- &= I_- \angle \delta_- \end{aligned} \quad (4.9)$$

Os parâmetros $V_0, V_+, V_-, I_0, I_+, I_-$ correspondem aos valores eficazes das componentes de seqüência zero, positiva e negativa da tensão e corrente. Os ângulos $\phi_0, \phi_+, \phi_-, \delta_0, \delta_+, \delta_-$ são as fases das componentes de seqüência zero, positiva e negativa da tensão e corrente, respectivamente. Aplicando-se a transformação inversa das componentes simétricas, obtêm-se as tensões e correntes do sistema trifásico.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{V}_{a0} \\ \mathbf{V}_{a+} \\ \mathbf{V}_{a-} \end{bmatrix} \quad (4.10)$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{I}_a \\ \mathbf{I}_b \\ \mathbf{I}_c \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{I}_{a0} \\ \mathbf{I}_{a+} \\ \mathbf{I}_{a-} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

$$\text{Sendo: } \mathbf{T}^{-1} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \quad (4.12)$$

Escrevendo-se as expressões gerais das tensões do sistema trifásico no domínio do tempo, tem-se:

$$\begin{aligned} v_a &= \sqrt{2} \cdot V_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_0) + \sqrt{2} \cdot V_+ \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_+) + \sqrt{2} \cdot V_- \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_-) \\ v_b &= \sqrt{2} \cdot V_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_0) + \sqrt{2} \cdot V_+ \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_+ - 2\pi/3) + \sqrt{2} \cdot V_- \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_- + 2\pi/3) \\ v_c &= \sqrt{2} \cdot V_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_0) + \sqrt{2} \cdot V_+ \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_+ + 2\pi/3) + \sqrt{2} \cdot V_- \cdot \text{sen}(\omega t + \phi_- - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (4.13)$$

Da mesma forma para as correntes, tem-se:

$$\begin{aligned} i_a &= \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_0) + \sqrt{2} \cdot I_+ \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_+) + \sqrt{2} \cdot I_- \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_-) \\ i_b &= \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_0) + \sqrt{2} \cdot I_+ \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_+ - 2\pi/3) + \sqrt{2} \cdot I_- \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_- + 2\pi/3) \\ i_c &= \sqrt{2} \cdot I_0 \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_0) + \sqrt{2} \cdot I_+ \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_+ + 2\pi/3) + \sqrt{2} \cdot I_- \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_- - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (4.14)$$

A teoria PQ utiliza a transformação de coordenadas de a-b-c para $\alpha - \beta - 0$ o que na realidade é uma transformação algébrica de um sistema de tensões e correntes trifásicas em um sistema de referência estacionário como o sistema a-b-c, mas com as coordenadas ortogonais. Esta transformação é também conhecida como Transformação de Clarke, dada pelas expressões 4.15 e 4.16.

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4.16)$$

Escrevendo-se as tensões resultantes nas coordenadas $\alpha - \beta - 0$, obtém-se:

$$\begin{aligned} v_0 &= \sqrt{6} V_0 \text{sen}(\omega t + \phi_0) \\ v_\alpha &= \sqrt{3} V_+ \text{sen}(\omega t + \phi_+) + \sqrt{3} V_- \text{sen}(\omega t + \phi_-) \\ v_\beta &= -\sqrt{3} V_+ \text{sen}(\omega t + \phi_+) + \sqrt{3} V_- \text{sen}(\omega t + \phi_-) \end{aligned} \quad (4.17)$$

Analogamente, as correntes nas coordenadas $\alpha, \beta, 0$, são dadas por:

$$\begin{aligned} i_0 &= \sqrt{6} I_0 \text{sen}(\omega t + \delta_0) \\ i_\alpha &= \sqrt{3} I_+ \text{sen}(\omega t + \delta_+) + \sqrt{3} I_- \text{sen}(\omega t + \delta_-) \\ i_\beta &= -\sqrt{3} I_+ \text{sen}(\omega t + \delta_+) + \sqrt{3} I_- \text{sen}(\omega t + \delta_-) \end{aligned} \quad (4.18)$$

Os valores instantâneos das potências da teoria PQ podem então ser calculados a partir dos valores das tensões e correntes segundo os eixos α - β -0.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.19)$$

A potência instantânea p pode ser convenientemente representada através dos seus valores médios e oscilantes, conforme equação 4.20.

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta = \bar{p} + \tilde{p} \quad (4.20)$$

Substituindo-se as expressões 4.17, 4.18 em 4.20, o valores médio $\bar{p}$ e oscilante $\tilde{p}$ podem ser obtidos por:

$$\bar{p} = 3.V_+.I_+.\cos(\phi_+ - \delta_+) + 3.V_-.I_-. \cos(\phi_- - \delta_-) \quad (4.21)$$

$$\tilde{p} = -3.V_+.I_-. \cos(2.\omega t + \phi_+ + \delta_-) - 3.V_-.I_+. \cos(2.\omega t + \phi_- + \delta_+) \quad (4.22)$$

Observa-se que o valor médio da potência real instantânea é formado pelo produto de tensões e correntes de componentes da mesma seqüência, positiva ou negativa. Por outro lado, a componente oscilatória é função do produto cruzado das componentes seqüenciais.

$$q = v_\alpha.i_\beta - v_\beta.i_\alpha = \bar{q} + \tilde{q} \quad (4.23)$$

Substituindo-se as expressões 4.17, 4.18 em 4.23, o valores médio $\bar{q}$ e oscilante $\tilde{q}$ podem ser obtidos por:

$$\bar{q} = -3.V_+.I_+.\sin(\phi_+ - \delta_+) + 3.V_-.I_- \sin(\phi_- - \delta_-) \quad (4.24)$$

$$\tilde{q} = 3.V_+.I_- \sin(2.\omega t + \phi_+ + \delta_-) - 3.V_-.I_+ \sin(2.\omega t + \phi_- + \delta_+) \quad (4.25)$$

Analisando-se a expressão 4.25, de forma análoga, verifica-se que o valor médio da potência instantânea $\bar{q}$ é formado pelo produto de tensões e correntes de componentes da mesma seqüência, positiva ou negativa, enquanto a parcela oscilante é formada pelo produto cruzado das componentes seqüenciais. Observa-se que a potência instantânea q difere da potência reativa trifásica convencional, na medida em que se considera a presença de desequilíbrios nas tensões e/ou correntes.

A exemplo dos casos anteriores a potência instantânea p_0 também pode ser representada através de uma componente média e uma componente oscilatório, conforme equação 4.26.

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (4.26)$$

Substituindo-se as expressões 4.17, 4.18 em 4.26, obtém-se:



$$\bar{p}_0 = 3.V_0.I_0.\cos(\phi_0 - \delta_0) \quad (4.27)$$

$$\tilde{p}_0 = -3.V_0.I_0.\cos(2.\omega.t + \phi_0 + \delta_0) \quad (4.28)$$

Neste caso, tanto a componente média como a oscilatório dependem unicamente do produto das tensões e correntes de componentes de seqüência zero. Desta forma, conclui-se que se um sistema trifásico possuir potência de seqüência zero, esta terá sempre uma componente contínua e uma componente oscilante, não sendo possível que uma componente exista sem a outra.

Finalmente, destaca-se que a soma da potência instantânea p com a potência instantânea p_0 é igual à potência ativa instantânea trifásica total, conforme equação 4.29.

$$p_{3\phi} = v_a.i_a + v_b.i_b + v_c.i_c = v_\alpha.i_\alpha + v_\beta.i_\beta + v_0.i_0 = p + p_0 \quad (4.29)$$

4.2.1 - O Significado Físico das Potências na Teoria PQ

Como visto, as potências instantâneas p e q possuem duas componentes: uma componente constante, correspondente ao valor médio, e uma componente oscilante. Nesta ótica, o significado de cada componente é:

p – Potência real instantânea.

$\bar{p}$ – Valor médio da potência real instantânea que corresponde à energia transferida da fonte para a carga por unidade de tempo, através dos eixos $\alpha - \beta$ ou seja, pelas fases do sistema trifásico.

$\tilde{p}$ – Valor alternado da potência real instantânea que corresponde à energia por unidade de tempo trocada entre fonte e carga, de uma forma oscilante, ou seja, a fonte fornece uma determinada parcela de energia, que em seguida é devolvida pela carga através das fases do sistema.

q – Potência imaginária instantânea corresponde a uma energia por unidade de tempo trocada entre as fases do sistema, não contribui para qualquer transferência entre fonte e carga.

$\bar{q}$ – Valor médio da potência imaginária instantânea que em alguns casos corresponde à potência reativa trifásica convencional.

$\tilde{q}$ – Valor oscilatório da potência imaginária instantânea.

p_0 – Potência instantânea de seqüência zero que corresponde a energia transferida da fonte para a carga por unidade de tempo, através das componentes de seqüência zero, das tensões e das correntes. No sistema trifásico é transferida por uma fase (ou mais) e pelo neutro.

$\bar{p}_0$ – Valor médio da potência instantânea de seqüência zero.

$\tilde{p}_0$ – Valor oscilatório da potência instantânea de seqüência zero.

Considerando-se as dependências das potências instantâneas descritas com as componentes seqüências de corrente e tensão, constata-se que a potência instantânea de seqüência zero que aparece somente em sistemas trifásicos desequilibrados a quatro fios [12].

A figura 4.1 ilustra o significado físico das grandezas da teoria PQ, conforme descrito anteriormente.

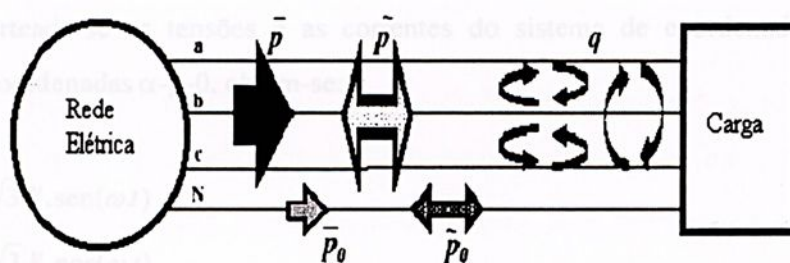


Figura 4.1 - Significado físico das grandezas da teoria PQ

4.3 - Teoria PQ Aplicada a Sistemas Trifásicos Simétricos

Um caso interessante a ser analisado refere-se a situação onde o sistema de alimentação trifásico é simétrico. Nestas condições, as tensões podem ser escritas como:

$$\begin{aligned} v_a(t) &= \sqrt{2}V \cdot \sin(\omega t) \\ v_b(t) &= \sqrt{2}V \cdot \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ v_c(t) &= \sqrt{2}V \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) \end{aligned} \quad (4.30)$$

Sendo: V - valor eficaz das tensões fase-neutro.

Entre as possíveis condições da carga destacam-se as seguintes configurações:

a) carga linear equilibrada

Considerando-se a carga equilibrada, as correntes nas linhas podem ser expressas pelas equações:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= \sqrt{2}.I.\text{sen}(\omega t - \phi) \\ i_b(t) &= \sqrt{2}.I.\text{sen}(\omega t - \phi + 2\pi/3) \\ i_c(t) &= \sqrt{2}.I.\text{sen}(\omega t - \phi - 2\pi/3) \end{aligned} \tag{4.31}$$

Sendo: I - valor eficaz das correntes de linha
 ϕ - ângulo de fase

Convertendo-se as tensões e as correntes do sistema de coordenadas a-b-c para o sistema de coordenadas α - β -0, obtém-se:

$$\begin{aligned} v_\alpha &= \sqrt{3}.V.\text{sen}(\omega t) \\ v_\beta &= \sqrt{3}.V.\cos(\omega t) \\ v_0 &= 0 \end{aligned} \tag{4.32}$$

$$\begin{aligned} i_\alpha &= \sqrt{3}.I.\text{sen}(\omega t - \phi) \\ i_\beta &= \sqrt{3}.I.\cos(\omega t - \phi) \\ i_0 &= 0 \end{aligned} \tag{4.33}$$

Calculando-se as potências instantâneas reais e imaginárias, conclui-se que estas são iguais à potência ativa trifásica e à potência reativa trifásica convencional, respectivamente, conforme previsto anteriormente:

$$p = v_\alpha.i_\alpha + v_\beta.i_\beta = 3.V.I.\cos(\phi) = P_{3\phi} \tag{4.34}$$

$$q = v_\alpha.i_\beta - v_\beta.i_\alpha = 3.V.I.\text{sen}(\phi) = Q_{3\phi} \tag{4.35}$$

Figura 4.2 - Potências de um sistema equilibrado

Este caso ilustra a equivalência dos conceitos de potência da teoria PQ com os conceitos tradicionais de potência ativa e potência reativa.

A título de ilustração, apresenta-se o resultado simulado para a condição descrita. As correntes, tensões e respectivas potências instantâneas são apresentadas na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Sistema equilibrado

Fases	Tensões (pu)	Correntes (pu)	Potência Real (pu)			Potência Imaginária		
			P	$\bar{P}$	$\tilde{P}$	q	$\bar{q}$	$\tilde{q}$
A	$\sqrt{3}\angle 0^\circ$	$0,5\angle -30^\circ$	1,3	1,3	0	0,75	0,75	0
B	$\sqrt{3}\angle -120^\circ$	$0,5\angle -150^\circ$						
C	$\sqrt{3}\angle +120^\circ$	$0,5\angle +90^\circ$						

Pela figura 4.2, observa-se para este caso, não existe presença de potências oscilatórias $\tilde{p}$ e $\tilde{q}$, uma vez que o produto cruzado de componentes seqüenciais é nulo. A potência reativa convencional é dada por $\bar{q}$ e a potência média $\bar{p}$ é responsável pela produção de trabalho útil.

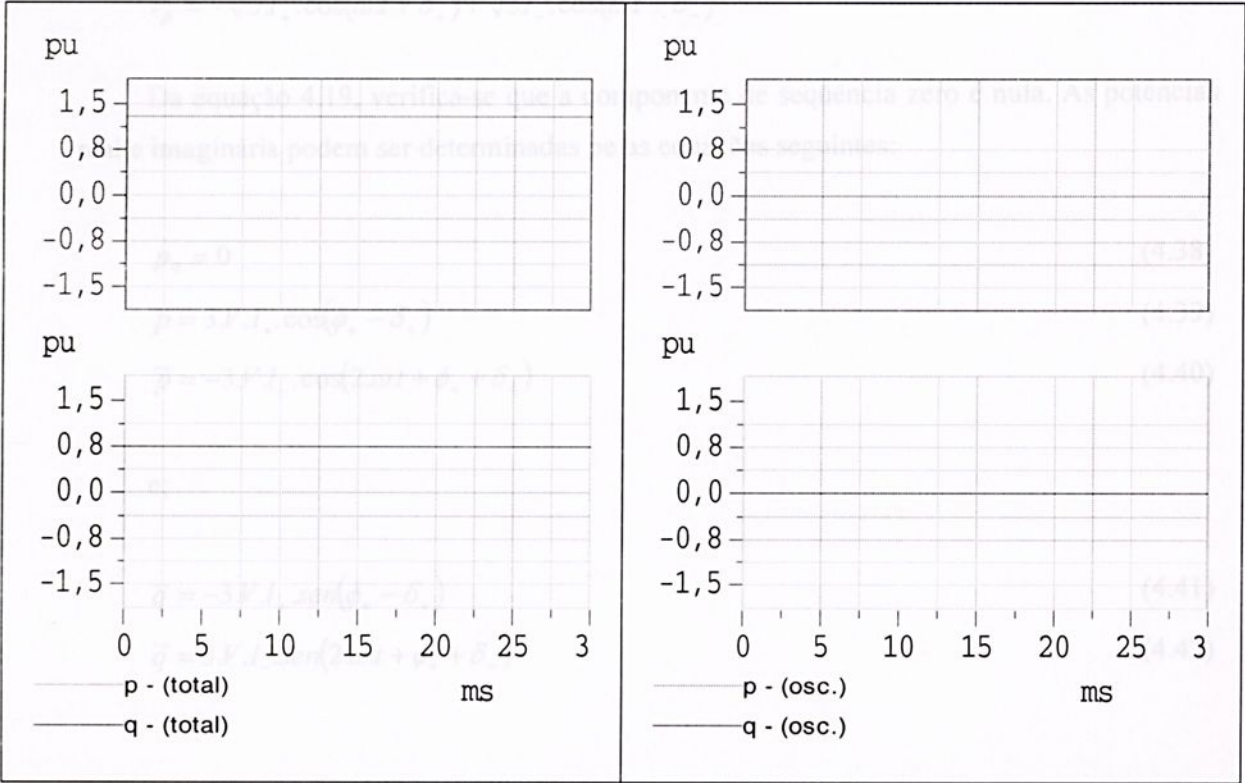


Figura 4.2 - Potências de um sistema equilibrado

b) carga linear desequilibrada e isolada

Se a carga é desequilibrada, as correntes nas linhas podem ser expressas genericamente pelas equações seguintes:

$$\begin{aligned} i_a(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_{an} \cdot \text{sen}(\omega_n t + \delta_{an}) \\ i_b(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_{bn} \cdot \text{sen}(\omega_n t + \delta_{bn}) \\ i_c(t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} \cdot I_{cn} \cdot \text{sen}(\omega_n t + \delta_{cn}) \end{aligned} \tag{4.36}$$

Sendo: I_a, I_b, I_c – valores eficazes das correntes nas linhas a, b e c respectivamente.

$\delta_a, \delta_b, \delta_c$ – ângulos de fase das correntes nas linhas a, b e c respectivamente.

Convertendo as tensões e as correntes do sistema de coordenadas a-b-c para o sistema de coordenadas α - β -0 em função das suas componentes simétricas, obtém-se:

$$\begin{aligned} i_0 &= 0 \\ i_{\alpha} &= \sqrt{3} \cdot I_{+} \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_{+}) + \sqrt{3} \cdot I_{-} \cdot \text{sen}(\omega t + \delta_{-}) \\ i_{\beta} &= -\sqrt{3} \cdot I_{+} \cdot \cos(\omega t + \delta_{+}) + \sqrt{3} \cdot I_{-} \cdot \cos(\omega t + \delta_{-}) \end{aligned} \tag{4.37}$$

Da equação 4.19, verifica-se que a componente de sequência zero é nula. As potências real e imaginária podem ser determinadas pelas equações seguintes:

$$p_0 = 0 \tag{4.38}$$

$$\bar{p} = 3 \cdot V \cdot I_{+} \cdot \cos(\phi_{+} - \delta_{+}) \tag{4.39}$$

$$\tilde{p} = -3 \cdot V \cdot I_{-} \cdot \cos(2 \cdot \omega t + \phi_{+} + \delta_{-}) \tag{4.40}$$

e;

$$\bar{q} = -3 \cdot V \cdot I_{+} \cdot \text{sen}(\phi_{+} - \delta_{+}) \tag{4.41}$$

$$\tilde{q} = 3 \cdot V \cdot I_{-} \cdot \text{sen}(2 \cdot \omega t + \phi_{+} + \delta_{-}) \tag{4.42}$$

Figura 4.3 - Potências em um sistema desequilibrado

Analisando as equações de 4.39, 4.40, 4.41 e 4.42, verifica-se que estas potências são, como visto, constituídas por uma componente contínua e por uma componente alternada.

Como ilustração apresenta-se um caso simulado para um sistema com tensões simétricas e correntes desequilibradas. As tensões, correntes e os resultados obtidos para as potências instantâneas são ilustrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Sistema desequilibrado

Fases	Tensões	Correntes	Potência Real (pu)			Potência Imaginária		
	(pu)	(pu)	p	$\bar{p}$	$\tilde{p}$	q	$\bar{q}$	$\tilde{q}$
A	$\sqrt{3}\angle 0^\circ$	$0,28\angle -10^\circ$	0,95	0,89	0,31	0,66	0,58	0,31
B	$\sqrt{3}\angle -120^\circ$	$0,5\angle -150^\circ$						
C	$\sqrt{3}\angle +120^\circ$	$0,34\angle +..^\circ$						

Neste exemplo, pode ser observado que a presença de correntes desequilibradas e ainda defasadas das respectivas tensões, leva a valores não nulas para a potência média $\bar{q}$, e para as potências oscilantes $\tilde{p}$ e $\tilde{q}$, conforme ilustrado na figura 4.3.

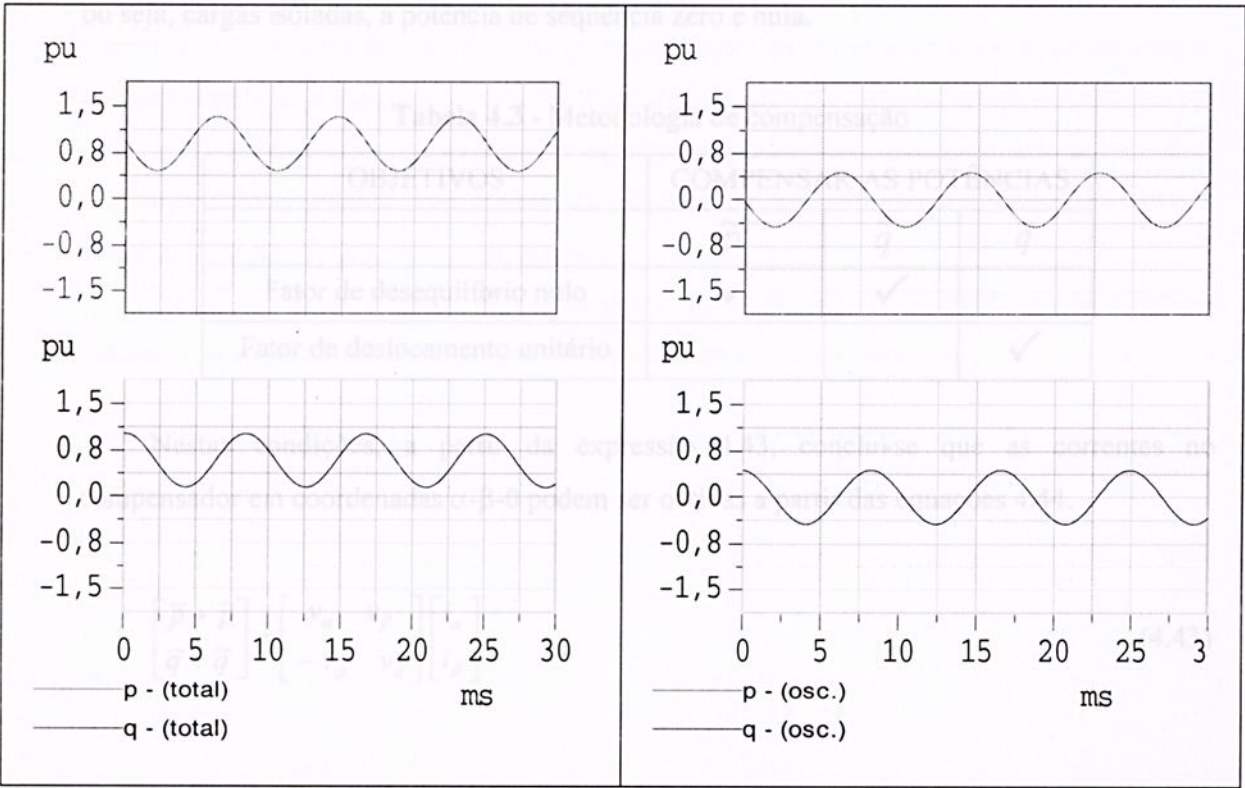


Figura 4.3 - Potências em um sistema desequilibrado

Observa-se que, como citado anteriormente, as componentes da potência instantânea de sequência zero não se fazem presentes nestas simulações, pois o sistema simulado não possui condutor neutro.

4.4 - Compensação de Cargas Isoladas Baseada na Teoria PQ

A situação ideal seria que nos sistemas elétricos trifásicos existisse apenas o valor médio da potência real $\bar{p}$ (tal como é definida pela teoria PQ). A compensação das potências oscilantes $\tilde{p}$ e $\tilde{q}$ através de um compensador faz com as energias associadas deixem de transitar entre a fonte e a carga, passando a transitar entre a carga e o sistema de compensação.

O compensador absorve energia, que depois devolve, sendo o balanço energético nulo, num sistema ideal. A potência imaginária não está associada a nenhuma troca de energia entre fonte e carga, fato que viabiliza um sistema de compensação apenas com elementos armazenadores de energia (indutores e capacitores). O compensador proporciona, portanto, um caminho alternativo para a troca de energia entre as fases do sistema elétrico.

Desta forma, a metodologia de compensação consiste basicamente em anular as componentes oscilantes e a potência média imaginária para garantir a operação equilibrada e com fator de deslocamento unitário, tabela 4.3. Para o caso particular tratado neste trabalho, ou seja, cargas isoladas, a potência de sequência zero é nula.

Tabela 4.3 - Metodologia de compensação

OBJETIVOS	COMPENSAR AS POTÊNCIAS		
	$\tilde{p}$	$\tilde{q}$	$\bar{q}$
Fator de desequilíbrio nulo	✓	✓	
Fator de deslocamento unitário			✓

Nestas condições, a partir da expressão 4.43, conclui-se que as correntes no compensador em coordenadas α - β -0 podem ser obtidas a partir das equações 4.44.

$$\begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (4.43)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^{comp} \\ i_{\beta}^{comp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -(\tilde{q} + \tilde{q}) \end{bmatrix} \quad (4.44)$$

As correntes instantâneas de compensação nas linhas, em coordenadas a-b-c são obtidas pela transformada Clark inversa, conforme equações 4.45.

$$\begin{bmatrix} i_a^{comp} \\ i_b^{comp} \\ i_c^{comp} \end{bmatrix} = \left(\sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \right)^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ i_{\alpha}^{comp} \\ i_{\beta}^{comp} \end{bmatrix} \quad (4.45)$$

4.5 – Conclusões

A teoria PQ é fundamentada no cálculo das potências instantâneas a partir de em sistema de coordenadas ortogonais, obtidos através da transformação de Clark.

Apesar desta teoria apresentar, aparentemente, uma maior complexidade, ela não é contraditória em relação a teoria convencional. Na realidade, a teoria convencional é um caso particular que resolve a maioria dos casos e perde coerência nos casos onde existem desequilíbrios.

A teoria PQ proporciona uma forma relativamente simples e intuitiva de controle dos sistemas de compensação aplicados na correção do desequilíbrio e do fator de deslocamento. A metodologia de compensação está fundamentada no cálculo das parcelas das potências real e imaginária oscilantes e da potência imaginária média, a partir das quais determinam-se as correntes compensatórias que podem ser absorvidas por componentes armazenadores de energia, ou sejam, indutores e capacitores.

Nesta teoria, os cálculos são efetuados a partir de valores instantâneos de tensões e correntes, o que a torna indicada para sistemas de controle em tempo real.



Figura 5.1 – Diagrama simplificado

Capítulo V

COMPARAÇÃO ENTRE AS METODOLOGIAS UTILIZADAS NA COMPENSAÇÃO DE DESEQUILÍBRIOS DE CORRENTES

5.1 – Introdução

Neste capítulo, apresenta-se a aplicação das metodologias de compensação demonstradas nos capítulos anteriores.

Ambos os métodos de compensação foram implementados em ambiente computacional de processamento de sinais através do software DASYLab® 4. Os detalhes da implementação encontram descritos no APÊNDICE deste trabalho.

Com a finalidade de obter um melhor entendimento das teorias aplicadas na compensação de correntes desequilibradas e do fator de deslocamento, foram simuladas diferentes situações de desequilíbrios em ambos os casos.

Os métodos foram comparados segundo às facilidades de implementação e o desempenho com relação ao tempo de resposta.

5.2 – Sistema Simulado

As análises que se seguem foram realizadas considerando-se o sistema simplificado ilustrado na figura 5.1 e tomando-se a tensão na fase a como referência de ângulos.

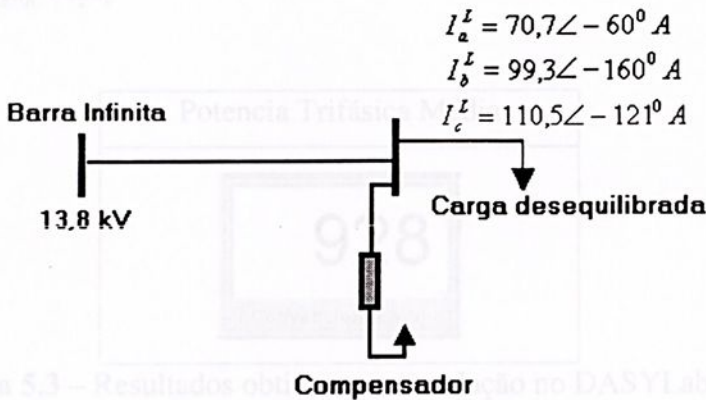


Figura 5.1 – Diagrama simplificado

O sistema ilustrado foi implementado no ambiente DASYLab[®] 4 e os resultados relacionados com a carga, obtidos por simulação digital, são apresentados na figura 5.2.

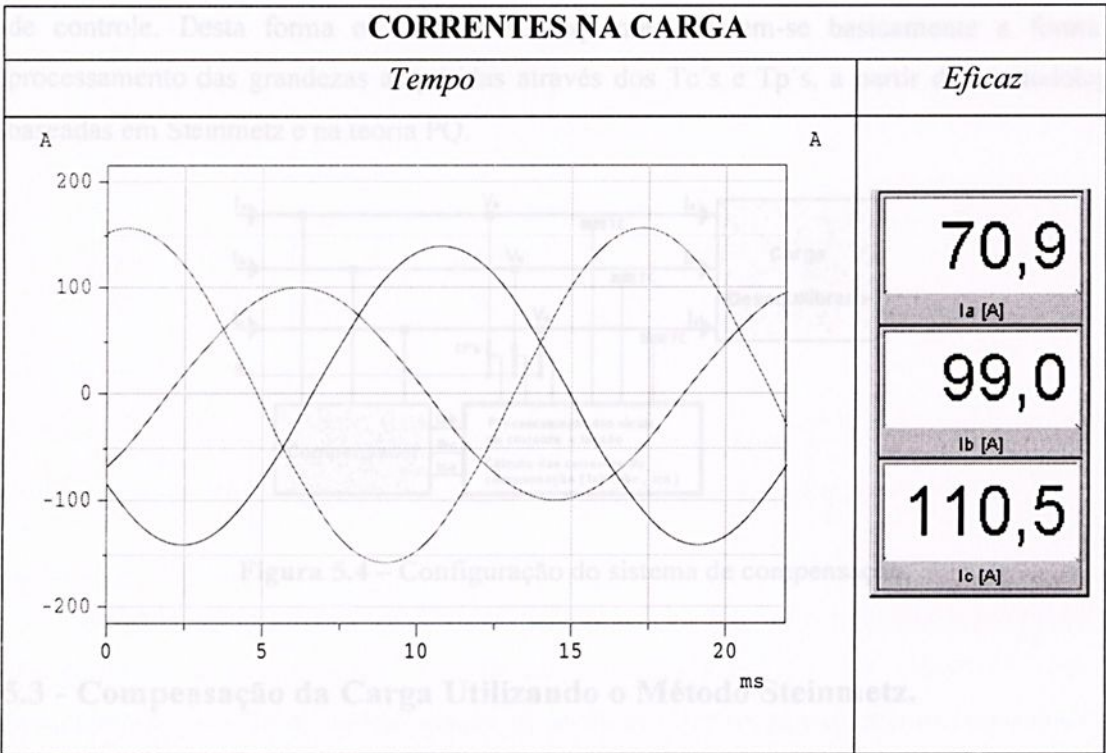


Figura 5.2 – Resultados obtidos através de simulação no DASYLab[®] 4.

Nestas condições a potência ativa (potência média) registrada é dada na figura 5.2. Esta potência é obtida a partir da média calculada através da expressão 5.1.

$$p_{3\phi} = e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c$$

(5.1)



Figura 5.3 – Resultados obtidos por simulação no DASYLab[®] 4.

A seguir foram implementadas as diferentes metodologias de compensação apresentadas neste trabalho, objetivando as compensações totais e parciais do desequilíbrio de corrente e do fator de deslocamento. Para isto considerou-se o sistema compensação

composto apenas por elementos armazenadores de energia, ou seja, capacitores e indutores a partir dos quais seja possível obter as correntes de compensação definidas pelo sistema de controle.

A figura 5.4 ilustra a configuração proposta para conexão do compensador e do sistema de controle. Desta forma os estudos subseqüentes referem-se basicamente a forma de processamento das grandezas adquiridas através dos Tc's e Tp's, a partir das metodologias baseadas em Steinmetz e na teoria PQ.

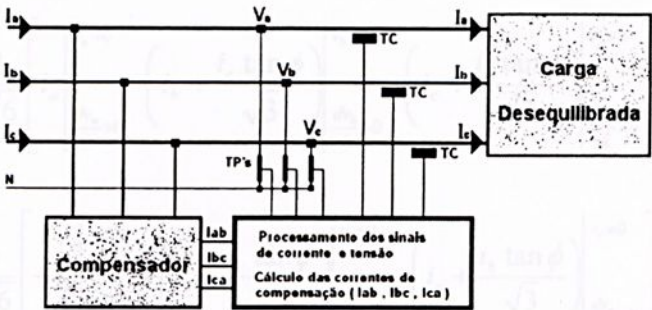


Figura 5.4 – Configuração do sistema de compensação.

5.3 - Compensação da Carga Utilizando o Método Steinmetz.

Este método de compensação permite que se faça uma compensação total ou parcial da corrente de seqüência negativa e do fator de deslocamento, ou seja, da parte imaginária da corrente de seqüência positiva final.

Conforme descrito no capítulo III deste trabalho, sabe-se que as correntes de compensação podem ser determinadas a partir de amostras instantâneas da corrente da carga, aplicadas na equação 5.2.

$$\begin{bmatrix} I_{ab}^{Comp} \\ I_{bc}^{Comp} \\ I_{ca}^{Comp} \end{bmatrix} = \frac{-1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_a}{\sqrt{2}} \left| \begin{matrix} v_a = 0 \\ \frac{d.v_a}{dt} > 0 \end{matrix} \right. \\ \frac{i_b}{\sqrt{2}} \left| \begin{matrix} v_b = 0 \\ \frac{d.v_b}{dt} > 0 \end{matrix} \right. \\ \frac{i_c}{\sqrt{2}} \left| \begin{matrix} v_c = 0 \\ \frac{d.v_c}{dt} > 0 \end{matrix} \right. \end{bmatrix} + \frac{\tan(\phi)}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_b}{\sqrt{2}} \left| \begin{matrix} v_c = 0 \\ \frac{d.v_c}{dt} > 0 \end{matrix} \right. \\ \frac{i_c}{\sqrt{2}} \left| \begin{matrix} v_b = 0 \\ \frac{d.v_b}{dt} > 0 \end{matrix} \right. \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Esta equação pode ser reescrita de forma a evidenciar as correntes a serem captadas pelo sistema de controle em cada passagem por zero das tensões de linha com as respectivas derivadas positivas, conforme equações 5.3, 5.4 e 5.5.

$$I_{ab}^{Comp} = -\frac{1}{\sqrt{6}} \left[i_a \left| \begin{matrix} v_a=0 \\ \frac{dv_a}{dt} > 0 \end{matrix} \right| + \left(i_b - \frac{i_c \tan \phi}{\sqrt{3}} \right) \left| \begin{matrix} v_b=0 \\ \frac{dv_b}{dt} > 0 \end{matrix} \right| - \left(i_c - \frac{i_b \tan \phi}{\sqrt{3}} \right) \left| \begin{matrix} v_c=0 \\ \frac{dv_c}{dt} > 0 \end{matrix} \right| \right] \quad (5.3)$$

$$I_{ca}^{Comp} = -\frac{1}{\sqrt{6}} \left[i_a \left| \begin{matrix} v_a=0 \\ \frac{dv_a}{dt} > 0 \end{matrix} \right| - \left(i_b + \frac{i_c \tan \phi}{\sqrt{3}} \right) \left| \begin{matrix} v_b=0 \\ \frac{dv_b}{dt} > 0 \end{matrix} \right| + \left(i_c + \frac{i_b \tan \phi}{\sqrt{3}} \right) \left| \begin{matrix} v_c=0 \\ \frac{dv_c}{dt} > 0 \end{matrix} \right| \right] \quad (5.4)$$

$$I_{bc}^{Comp} = -\frac{1}{\sqrt{6}} \left[-i_a \left| \begin{matrix} v_a=0 \\ \frac{dv_a}{dt} > 0 \end{matrix} \right| + \left(i_b - \frac{i_c \tan \phi}{\sqrt{3}} \right) \left| \begin{matrix} v_b=0 \\ \frac{dv_b}{dt} > 0 \end{matrix} \right| + \left(i_c + \frac{i_b \tan \phi}{\sqrt{3}} \right) \left| \begin{matrix} v_c=0 \\ \frac{dv_c}{dt} > 0 \end{matrix} \right| \right] \quad (5.5)$$

A figura 5.5 ilustra o procedimento para aquisição dos dados necessários para o cálculo das correntes de compensação, a partir das equações 5.3, 5.4 e 5.5. Observa-se que este procedimento envolve a implementação de técnicas específicas para identificação dos zeros das tensões de fase bem como das derivadas positivas. Por outro lado, verifica-se também que o tempo mínimo para captação dos dados necessários para o cálculo é de aproximadamente 11,1 ms (240°).

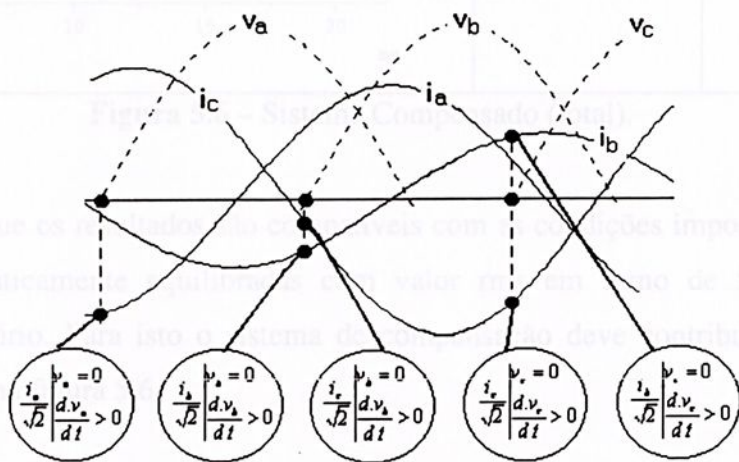


Figura 5.5 – Aquisição de dados.

Caso 01: *Compensação total do desequilíbrio e do fator de deslocamento.*

Baseado na metodologia de Steinmetz, a compensação total do desequilíbrio consiste na eliminação completa da componente de seqüência negativa das correntes da carga. A correção plena do fator de deslocamento se faz fixando-se o ângulo de deslocamento em $\phi=0$ nas equações 5.3, 5.4 e 5.5.

Os resultados para as correntes totais de alimentação, obtido por simulação digital, encontram-se ilustrados na figura 5.6.

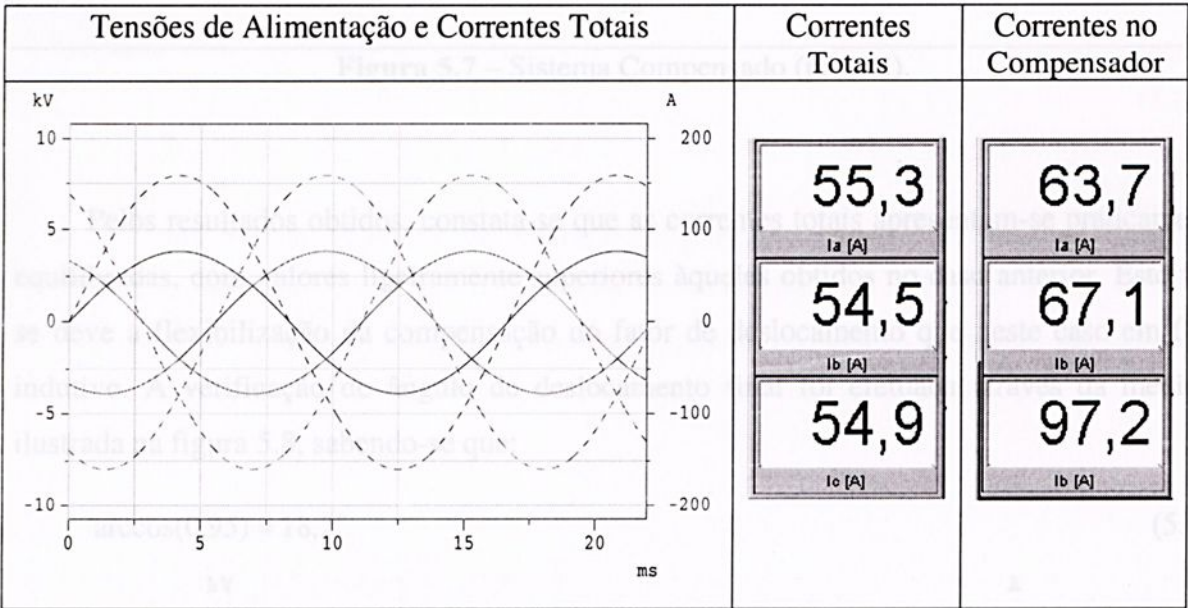


Figura 5.6 – Sistema Compensado (total).

Observa-se que os resultados são compatíveis com as condições impostas. As correntes se apresentam praticamente equilibradas com valor rms em torno de 55 A e fator de deslocamento unitário. Para isto o sistema de compensação deve contribuir com correntes reativas ilustradas na figura 5.6.

Caso 02: *Compensação total do desequilíbrio e parcial do fator de deslocamento.*

A correção parcial do fator de deslocamento se faz fixando-se o ângulo de deslocamento no valor desejado, conforme previsto nas equações 5.3, 5.4 e 5.5. Particularmente, neste exemplo adotou-se um fator de deslocamento final desejado em 0,95 indutivo, mantendo-se a compensação total do desequilíbrio de corrente. Os resultados são ilustrados na figura 5.7

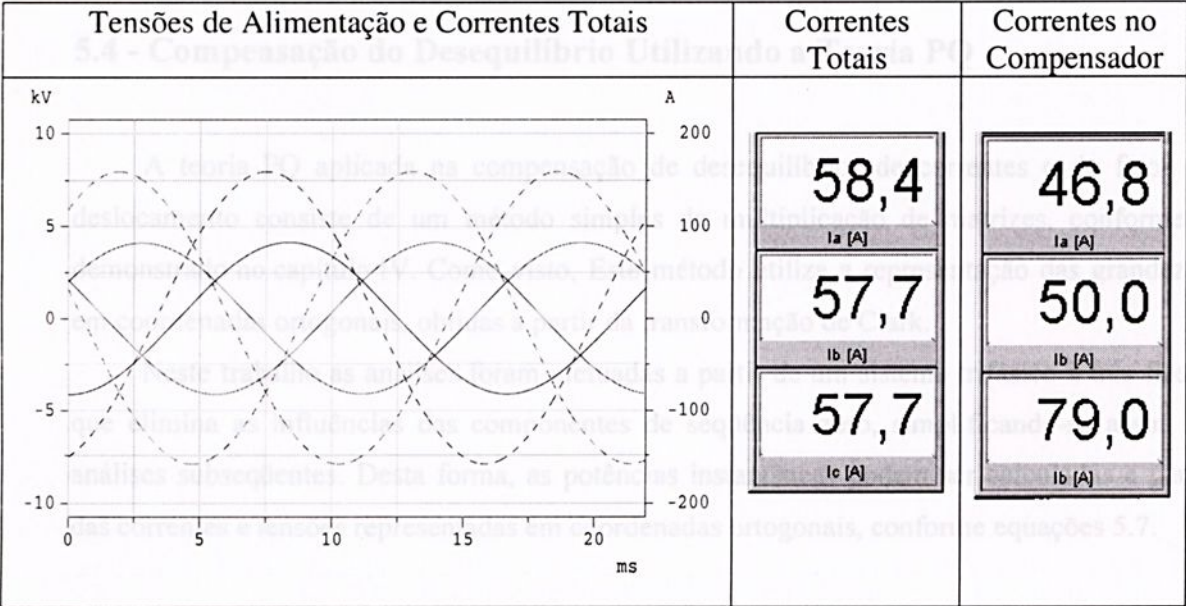


Figura 5.7 – Sistema Compensado (parcial).

Pelos resultados obtidos, constata-se que as correntes totais apresentam-se praticamente equilibradas, com valores ligeiramente superiores àqueles obtidos no caso anterior. Este fato se deve a flexibilização da compensação do fator de deslocamento que neste caso em 0,95 indutivo. A verificação do ângulo de deslocamento final foi efetuada através da medição ilustrada na figura 5.8, sabendo-se que:

$$\arccos(0,95) = 18,2^\circ$$

(5.6)

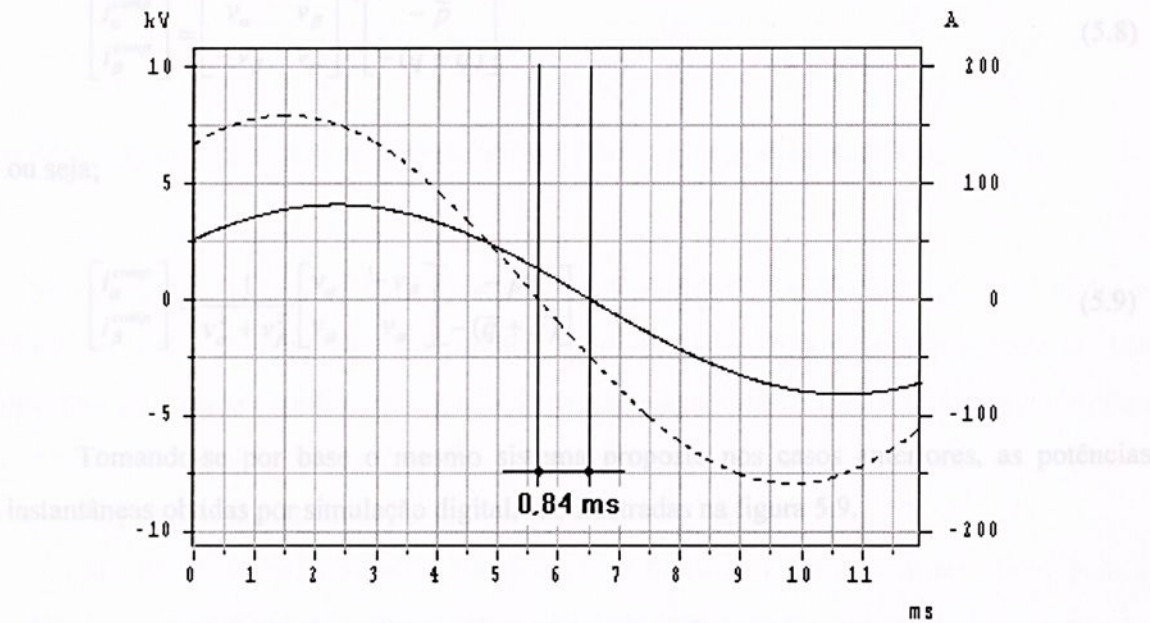


Figura 5.8 – Ângulo de defasagem (0,84 ms $\cong$ 18,2°).

5.4 - Compensação do Desequilíbrio Utilizando a Teoria PQ

A teoria PQ aplicada na compensação de desequilíbrios de correntes e do fator de deslocamento consiste de um método simples de multiplicação de matrizes, conforme é demonstrado no capítulo IV. Como visto, Este método utiliza a representação das grandezas em coordenadas ortogonais, obtidas a partir da transformação de Clark.

Neste trabalho as análises foram efetuadas a partir de um sistema trifásico a três fios o que elimina as influências das componentes de sequência zero, simplificando-se assim as análises subseqüentes. Desta forma, as potências instantâneas podem ser calculadas a partir das correntes e tensões representadas em coordenadas ortogonais, conforme equações 5.7.

$$\begin{bmatrix} \bar{p} + \tilde{p} \\ \bar{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} \quad (5.7)$$

Uma vez obtidas as parcelas médias e oscilantes das potências instantâneas, conforme discutido no capítulo IV, a compensação do desequilíbrio de corrente e do fator de deslocamento se faz eliminando-se as potências indesejáveis através da injeção das correntes de compensação. Nestas condições, as correntes de compensação são obtidas por:

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^{comp} \\ i_{\beta}^{comp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -(\bar{q} + \tilde{q}) \end{bmatrix} \quad (5.8)$$

ou seja;

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^{comp} \\ i_{\beta}^{comp} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & -v_{\beta} \\ v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -(\bar{q} + \tilde{q}) \end{bmatrix} \quad (5.9)$$

Tomando-se por base o mesmo sistema proposto nos casos anteriores, as potências instantâneas obtidas por simulação digital, são ilustradas na figura 5.9.

Como previsto, os resultados, tanto com respeito as correntes totais como para as correntes de compensação, são equivalentes aqueles obtidos com a aplicação do método de Steinmetz.

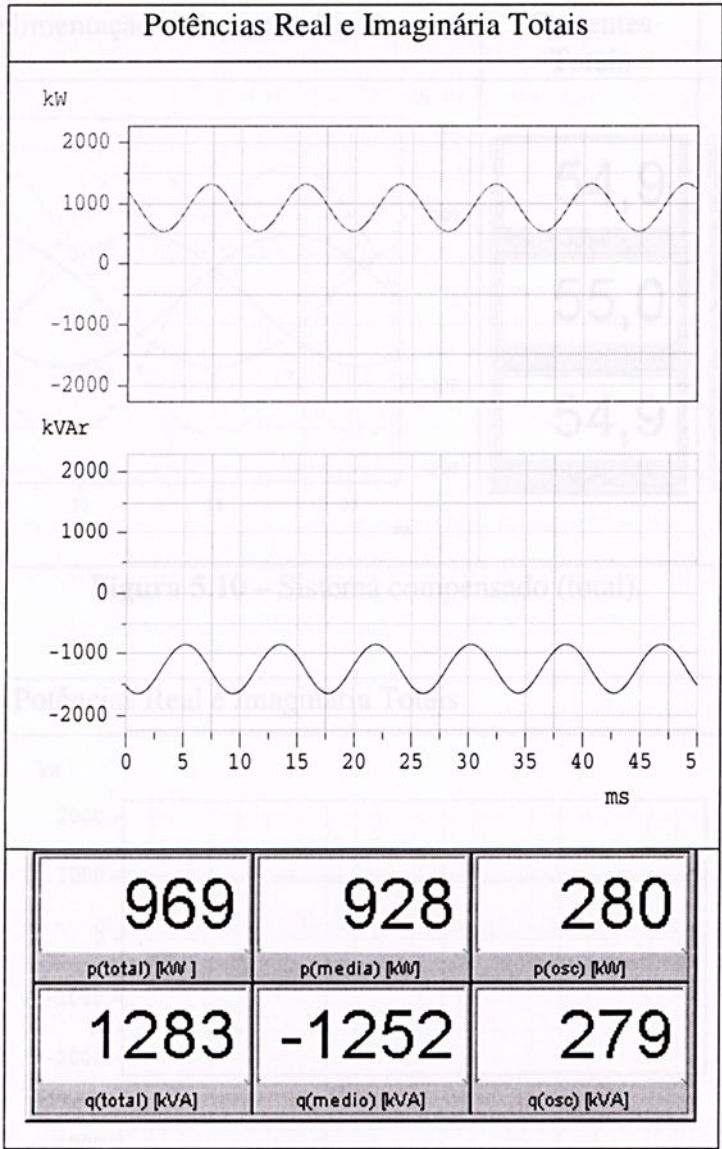


Figura 5.9 – Potências instantâneas na carga

Caso 03: *Compensação total do desequilíbrio e do fator de deslocamento.*

Neste caso a compensação total consiste na eliminação completa das parcelas oscilantes da potencias real e imaginárias das correntes da carga. Por outro lado compreende também eliminação do valor médio da potência imaginaria, garantindo-se assim um fator deslocamento final unitário. Os resultados obtidos por simulação digital encontram-se ilustrados nas figuras 5.10 e 5.11.

Como previsto, os resultados, tanto com respeito as correntes totais como para as correntes de compensação, são equivalentes àqueles obtidos com a aplicação da metodologia de Steinmetz.

Figura 5.11 – Potências instantâneas totas no sistema compensado.

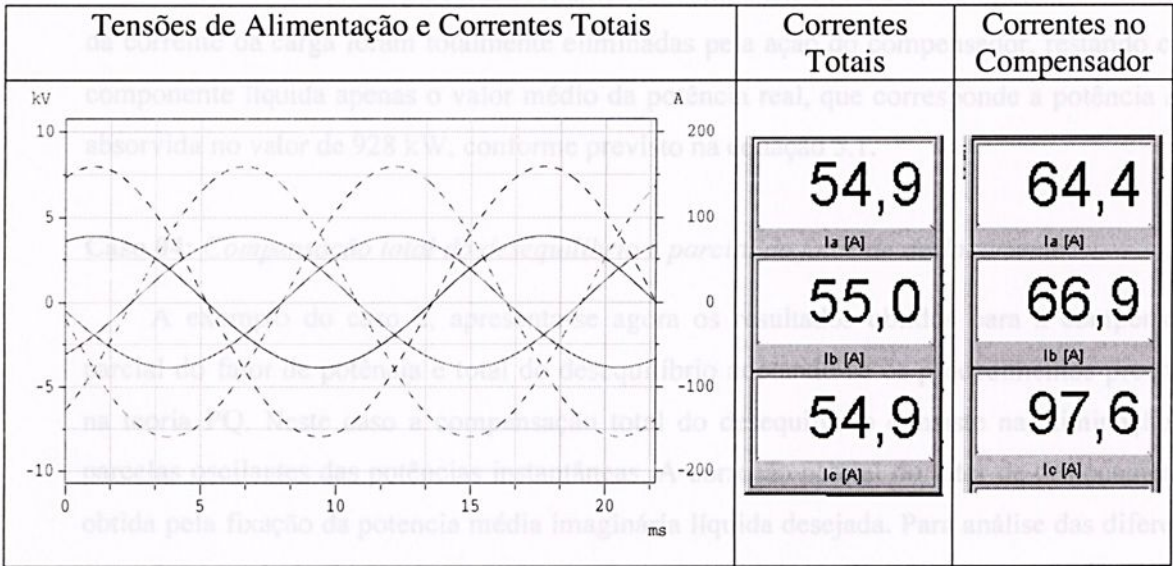


Figura 5.10 – Sistema compensado (total).

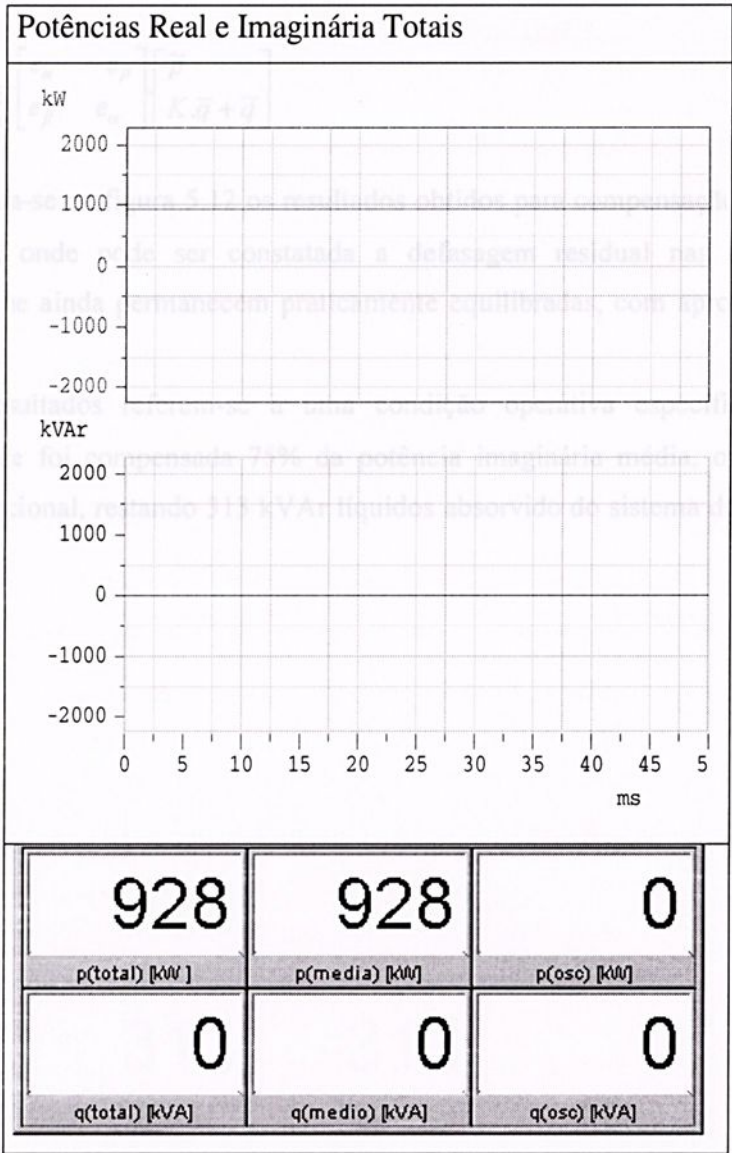


Figura 5.11 – Potências instantâneas totas no sistema compensado.

Observa-se que as parcelas oscilantes da componente real e da componente imaginária da corrente da carga foram totalmente eliminadas pela ação do compensador, restando como componente líquida apenas o valor médio da potência real, que corresponde a potência ativa absorvida no valor de 928 kW, conforme previsto na equação 5.1.

Caso 04: *Compensação total do desequilíbrio e parcial do fator de deslocamento.*

A exemplo do caso 2, apresenta-se agora os resultados obtidos para a compensação parcial do fator de potência e total do desequilíbrio adotando-se os procedimentos prescritos na teoria PQ. Neste caso a compensação total do desequilíbrio consiste na eliminação das parcelas oscilantes das potências instantâneas. A correção parcial do fator de deslocamento é obtida pela fixação da potência média imaginária líquida desejada. Para análise das diferentes situações possíveis foi implementado um fator de modulação K sobre a parcela da potência imaginária média a ser compensada, conforme equação 5.10.

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_{\alpha}^2 + e_{\beta}^2} \begin{bmatrix} e_{\alpha} & -e_{\beta} \\ e_{\beta} & e_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ K \cdot \tilde{q} + \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (5.10)$$

Apresenta-se na figura 5.12 os resultados obtidos para compensação parcial do fator de deslocamento, onde pode ser constatada a defasagem residual nas correntes totais de alimentação que ainda permanecem praticamente equilibradas, com aproximadamente 58 A (rms) por fase.

Estes resultados referem-se a uma condição operativa específica, escolhida para ilustração, onde foi compensada 75% da potência imaginária média, ou seja, da potência reativa convencional, restando 313 kVAr líquidos absorvido do sistema de suprimento, figura 5.13.

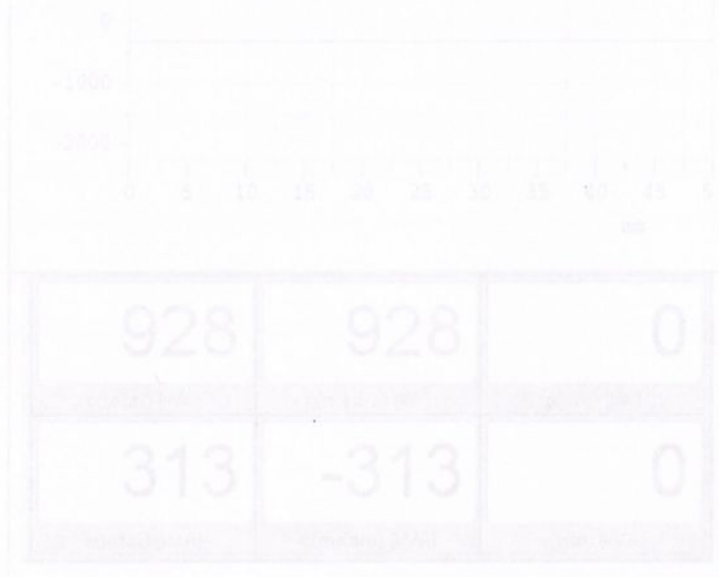


Figura 5.13 – Potências instantâneas totais no sistema compensado.

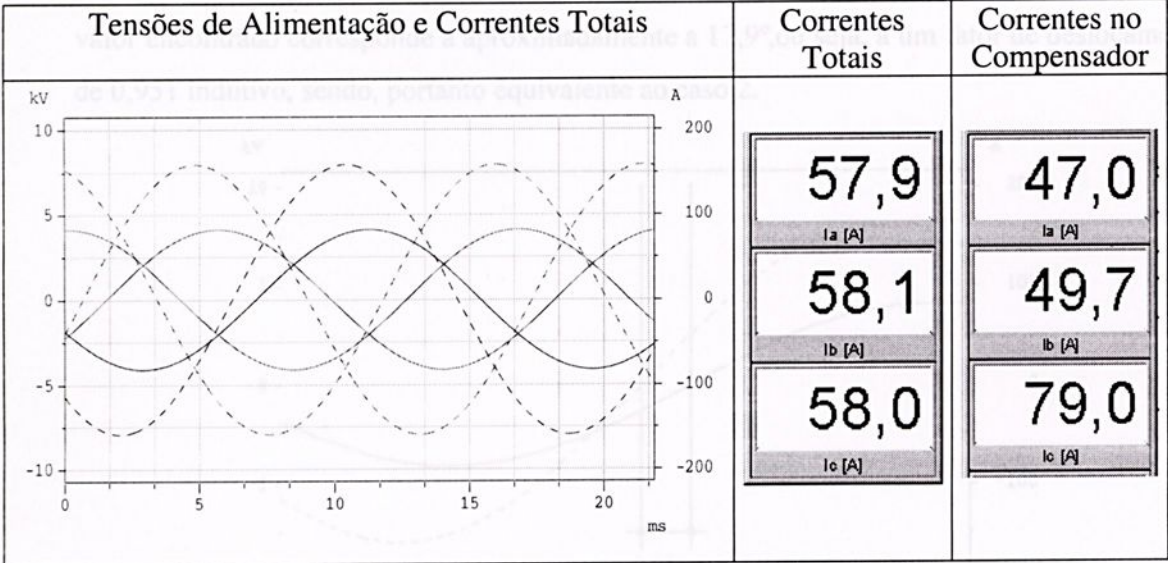


Figura 5.12 – Sistema compensado (parcial).

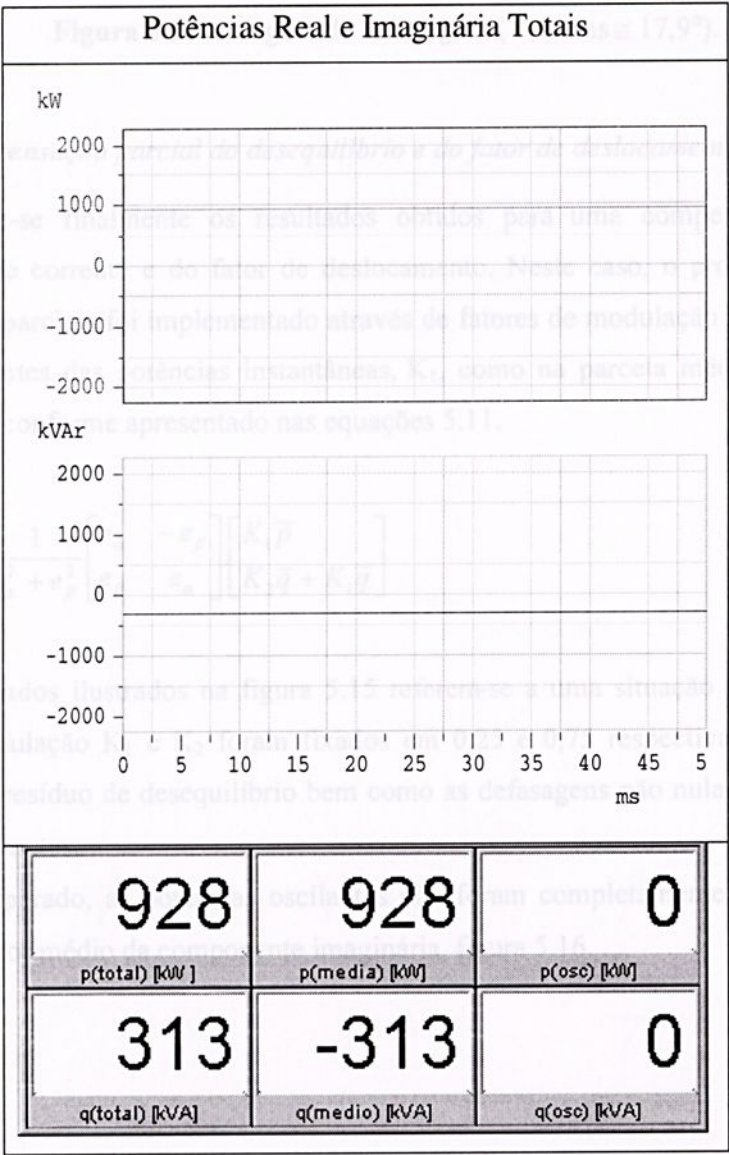


Figura 5.13 – Potências instantâneas totais no sistema compensado.

O fator de deslocamento residual pode ser obtido, conforme ilustrado na figura 5.14. O valor encontrado corresponde a aproximadamente a 17,9°, ou seja, a um fator de deslocamento de 0,951 indutivo, sendo, portanto equivalente ao caso 2.

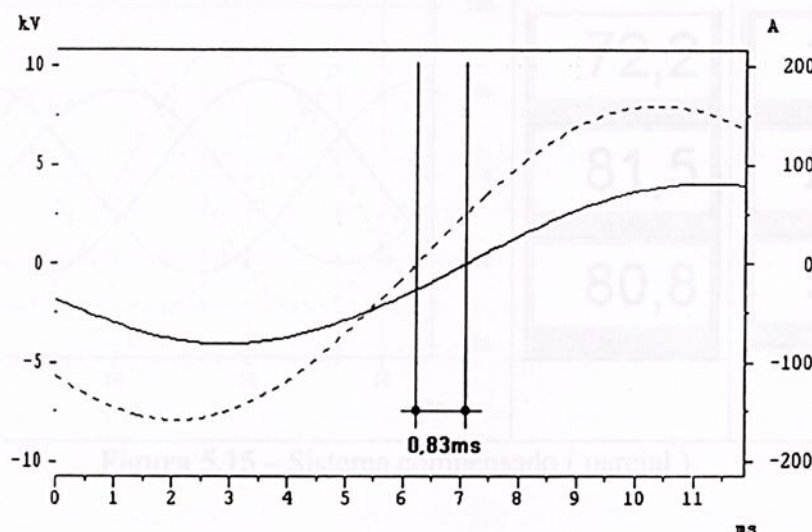


Figura 5.14 – Ângulo de defasagem (0,83 ms $\cong$ 17,9°).

Caso 05: Compensação parcial do desequilíbrio e do fator de deslocamento.

Apresenta-se finalmente os resultados obtidos para uma compensação parcial do desequilíbrio de corrente e do fator de deslocamento. Neste caso, o procedimento para as compensações parciais foi implementado através de fatores de modulação aplicados tanto nas parcelas oscilantes das potências instantâneas, K_1 , como na parcela média da componente imaginária K_2 , conforme apresentado nas equações 5.11.

$$\begin{bmatrix} i_{c\alpha} \\ i_{c\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{e_\alpha^2 + e_\beta^2} \begin{bmatrix} e_\alpha & -e_\beta \\ e_\beta & e_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_1 \tilde{p} \\ K_2 \tilde{q} + K_1 \tilde{q} \end{bmatrix} \quad (5.11)$$

Os resultados ilustrados na figura 5.15 referem-se a uma situação específica onde os fatores de modulação K_1 e K_2 foram fixados em 0,25 e 0,75 respectivamente. Observa-se neste caso um resíduo de desequilíbrio bem como as defasagens não nulas entre as tensões e respectivas correntes.

Como esperado, as potências oscilantes não foram completamente eliminadas e nem tampouco o valor médio da componente imaginária, figura 5.16.

Figura 5.16 – Potências instantâneas totais no sistema compensado.

5.5 – Conclusão

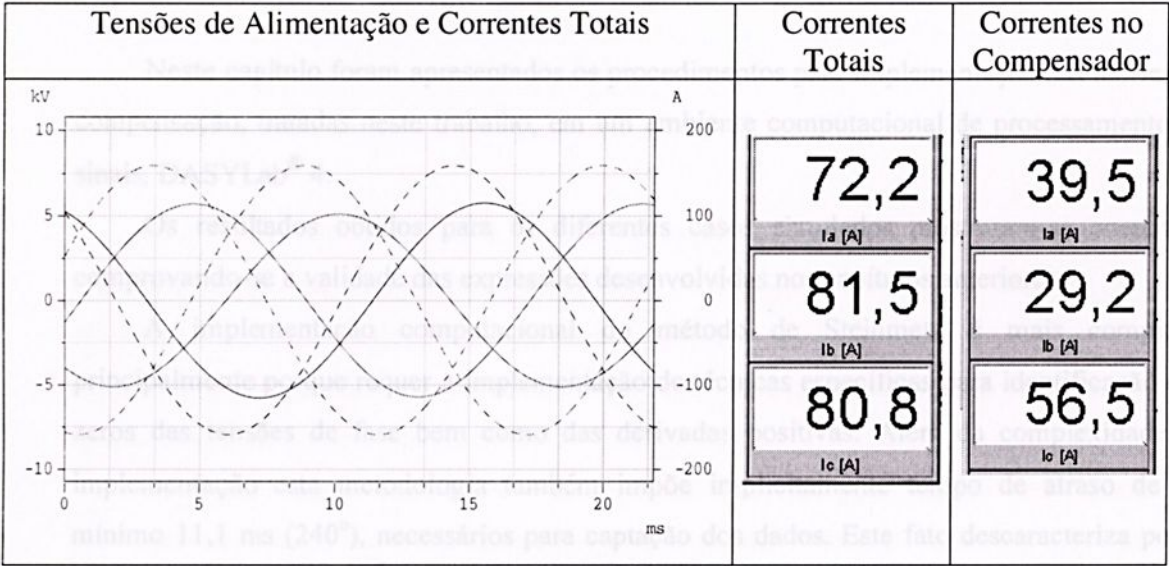


Figura 5.15 – Sistema compensado (parcial).

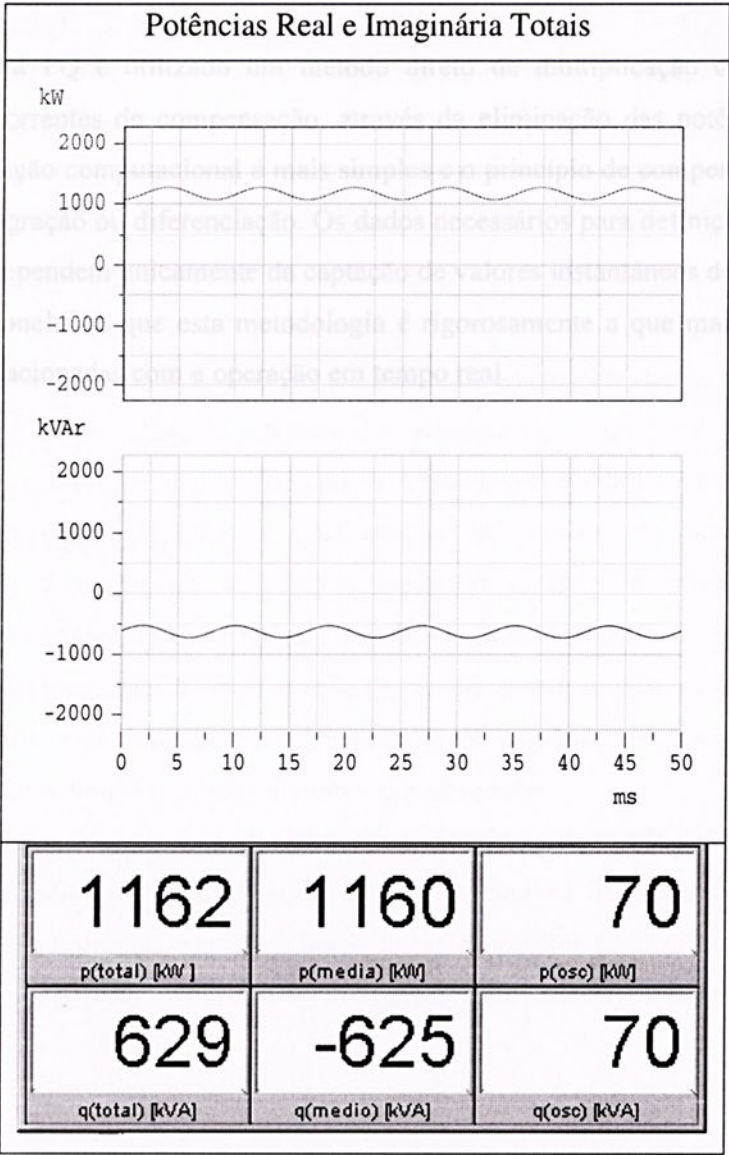


Figura 5.16 – Potências instantâneas totais no sistema compensado.

5.5 – Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os procedimentos para implementação das teorias de compensação, tratadas neste trabalho, em um ambiente computacional de processamento de sinais, DASYLab[®] 4.

Os resultados obtidos para os diferentes casos simulados mostraram-se coerentes, comprovando-se a validade das expressões desenvolvidas nos capítulos anteriores.

A implementação computacional do método de Steinmetz é mais complexa principalmente porque requer a implementação de técnicas específicas para identificação dos zeros das tensões de fase bem como das derivadas positivas. Além da complexidade de implementação esta metodologia também impõe implicitamente tempo de atraso de no mínimo 11,1 ms (240°), necessários para captação dos dados. Este fato descaracteriza por si só, a possibilidade de operação em tempo real. Entretanto, considerando-se a natureza temporal dos fenômenos elétricos é possível atender satisfatoriamente a maioria dos casos práticos.

Na teoria PQ é utilizado um método direto de multiplicação de matrizes para a obtenção das correntes de compensação, através da eliminação das potências indesejáveis. Sua implementação computacional é mais simples e o princípio de compensação não envolve técnicas de integração ou diferenciação. Os dados necessários para definição das correntes de compensação dependem unicamente da captação de valores instantâneos de corrente e tensão. Desta forma, conclui-se que esta metodologia é rigorosamente a que mais se aproxima das expectativas relacionadas com a operação em tempo real.

Neste trabalho apresentou-se uma análise comparativa de desempenho de duas principais vertentes das técnicas de compensação conhecidas na literatura. Por simplicidade os estudos foram direcionados apenas para sistemas trifásicos e três fios.

A primeira baseia-se na determinação das componentes simétricas da corrente da carga objetivando eliminar ou minimizar as componentes de sequência negativa e zero bem como ajustar o fator de potência residual para um valor adequado.

Esta técnica, também conhecida como método de "Steinmetz", apesar de ser desenvolvida no domínio da frequência, a partir da análise das relações entre grandezas envolvidas com as correntes e tensões instantâneas é possível estabelecer um procedimento auxiliar para determinação das correntes compensatórias partindo-se amostragens em tempo

Capítulo VI

6.1 – Conclusões Gerais

A crescente competitividade nos mercados de bens duráveis onde a eletricidade se apresenta como um importante insumo, tem provocado a busca por tecnologias mais eficientes visando à modernização da planta industrial e minimização do consumo. Neste contexto a proporção de venda de equipamentos com tecnologias avançadas do ponto de vista operacional e energético vem crescendo de forma notável.

Ocorre, entretanto que, sendo estes equipamentos, em geral, muito mais sensíveis a problemas associados à qualidade da energia elétrica, têm sido registradas inúmeras paradas da linha produtiva devido a má operação ou desligamentos intempestivos pelo sistema de proteção, provocando muitas vezes grandes prejuízos financeiros. Entre os distúrbios na qualidade da energia destacam-se os desequilíbrios do sistema de suprimento de energia elétrica, provocados pela alimentação de cargas desequilibradas de grande porte.

As inúmeras reclamações, principalmente por parte dos consumidores, motivaram a definição, por parte de órgão responsável pelo setor elétrico brasileiro, de níveis aceitáveis para os índices de desequilíbrios na tensão, sendo atualmente fixado de 2%.

Para a adequação dos níveis de desequilíbrios aos padrões preconizados pelo órgão controlador, muitas vezes se torna necessário o uso de equipamentos de compensação. Independentemente da tecnologia a ser utilizada na concepção destes equipamentos, um aspecto comum a ser tratado, refere-se ao sistema de controle e especificamente à metodologia a ser empregada para definição das correntes de compensação.

Neste trabalho apresentou-se uma análise comparativa de desempenho de duas principais vertentes das técnicas de compensação conhecidas na literatura. Por simplicidade os estudos foram direcionados apenas para sistemas trifásicos a três fios.

A primeira baseia-se na determinação das componentes simétricas da corrente da carga objetivando eliminar ou minimizar as componentes de seqüência negativa e zero bem como ajustar o fator de potência residual para um valor adequado.

Esta técnica, também conhecida como método de “Steinmetz”, apesar de ser desenvolvida no domínio da frequência, a partir da análise das relações entre grandezas envolvidas com as correntes e tensões instantâneas é possível estabelecer um procedimento auxiliar para determinação das correntes compensatórias partindo-se amostragens em tempo

real. Os resultados colhidos através de simulação digital em uma plataforma computacional de processamento, "DasyLab4", mostraram-se coerentes e elucidativos para a compreensão dos fenômenos relacionados com a compensação de cargas elétricas.

Destaca-se, entretanto, que para aplicação do procedimento proposto o circuito de controle deve conter dispositivos de detecção de zeros e identificação dos sinais das derivadas da tensão, o que, além de introduzir uma maior complexidade para sua implementação física, ainda pode provocar atrasos, frustrando assim algumas expectativas mais otimistas com relação ao seu desempenho na atuação em tempo real.

A segunda está fundamentada na determinação potências instantâneas referenciadas em um sistema de duas coordenadas através da transformação de "Clark", também conhecida como teoria PQ.

A teoria PQ proporciona uma forma relativamente simples e intuitiva de controle dos sistemas de compensação aplicados na correção do desequilíbrio e do fator de deslocamento. Neste caso, as correntes de compensação são definidas a partir da eliminação ou redução das parcelas oscilantes das potências real e imaginária e do valor médio residual da potência imaginária.

Os resultados obtidos por simulação digital na plataforma computacional "DASYLab 4" mostraram-se, mais uma vez, coerentes e elucidativos para a compreensão das influências das diferentes parcelas da potência instantânea na identificação e minimização dos desequilíbrios e do fator de deslocamento.

Uma das grandes vantagens desta teoria é a possibilidade de se implementar fisicamente um sistema de controle relativamente simples, pois, as correntes compensatórias são obtidas apenas pela multiplicação de matrizes, dispensando-se procedimentos auxiliares envolvendo integração ou diferenciação. Nesta teoria, os cálculos são efetuados a partir de valores instantâneos de tensões e correntes e as correntes de compensação são obtidas a cada instante de amostragem, sendo, portanto, indicada para sistemas de controle de sistemas em tempo real.

Como sugestões para trabalhos futuros, apresentam-se:

- Desenvolver o *hardware* do sistema de controle para compensação de cargas envolvendo as duas metodologias estudadas e realizar estudos experimentais de compensação de cargas a partir de tecnologias passivas envolvendo apenas armazenadores de energia;



- Analisar o desempenho das metodologias sob uma ótica mais abrangente, incorporando-se os desequilíbrios nas tensões de alimentação e a expansão das configurações para sistemas trifásicos a quatro fios;
- Particularmente, no caso da teoria PQ, introduzir os efeitos das distorções harmônicas na tensão e corrente, visando a implementação de compensadores mais avançados baseados em tecnologias ativas e híbridas.

- [1] BARROS, M. C. Compensação de Desequilíbrios em Redes Elétricas. Ilha Solteira - SP, 2000. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica - Sistemas de Energia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP - Universidade Estadual Paulista.
- [2] AMARAL, J. C. S. Compensação de Desequilíbrios em Redes Elétricas. Ilha Solteira - SP, 1998. 100f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica - Sistemas de Energia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP - Universidade Estadual Paulista.
- [3] MENEZES, P. N. Z. Dimensionamento Otimizado de Compensadores Estático Tipo RCT. Ilha Solteira - SP, 2003. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica - Sistemas de Energia Elétrica) - Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP - Universidade Estadual Paulista.
- [4] JOUANNE A. V.; BANERJEE, B. Assessment of Voltage Unbalance. *IEEE Transactions on Power Delivery*, v.16, n. 4, October-2001.
- [5] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 16-20, n. 3, p.625-630, May/June 1984.
- [6] MARSHAL, D. A.; VENTER, E. P.; VAN WYK, J. D. An evolution of the instantaneous calculation of load current components. *European Transactions on Electrical Power Engineering*, v.3, n.1, p. 53-59, Jan./Feb. 1993.
- [7] EPRI Power Electronic Applications Center, "Light Flicker in Compact Fluorescent Lamps Caused by Voltage Fluctuations", Brief No. 23, August 1994.
- [8] AREDES, M. Active Power Line Conditioners. Berlin, 1996. 155P. Dr. Thesis, Vom Fachbereich 12 Elektrotechnik der Technischen Universität Berlin.
- [9] FURGA, G.S.; TIRONI, E.; UBEZIO, G. Shunt active filter for four wire lowvoltage systems: theoretical operating limits and measuring for performance improvement. *European Transactions on Electrical Power Engineering*, v.7, n.1, p. 41-48, Jan./Feb.1997.
- [10] AKAGI, H. New trends in active filters for power conditions. *IEEE Transactions on Industry Applications*, v. 32, n.6, p.1312-1322, Nov./ Dec 1996.
- [11] WILLEMS, J. L. Instantaneous sinusoidal and harmonic active and reactive currents in three-phase power systems. *European Transactions on Electrical Power Engineering*, v.4, n.5, p. 335-346, Sep/Oct. 1994.

Referências Bibliográficas

- [1] BARROS, M. C. **Compensação de Desequilíbrios em Redes Elétricas**. Ilha Solteira – SP, 2000. 96f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Sistemas de Energia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP – Universidade Estadual Paulista.
- [2] ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica **Legislação Básica do Setor Elétrico**. Brasília – DF, 1998.
- [3] MENEZES, P. N. Z. **Dimensionamento Otimizado de Compensadores Estático Tipo RCT**. Ilha Solteira – SP, 2003. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica – Sistemas de Energia Elétrica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, UNESP – Universidade Estadual Paulista.
- [4] JOUANNE A. V.; BANERJEE, B. Assessment of Voltage Unbalance. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v.16, n. 4, October-2001.
- [5] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous reative power compensators comprising switching devices without energy storage components. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. IA-20, n.3, p.625-630, May/June 1984.
- [6] MARSHAL, D. A.; VENTER, F. P.; VAN WYK, J. D. An evolution of the instantaneous calculation of load current components. **European Transactions on Electrical Power Engineering**, v.3, n.1, p. 53-59, Jan./Feb. 1993
- [7] EPRI Power Electronic Applications Center, “**Light Flicker in Compact Fluorescent Lamps Caused by Voltage Fluctuations**”, Brief No. 23, August 1994.
- [8] AREDES, M. **Active Power Line Conditioners**. Berlin, 1996. 155P. Dr. Thesis, Vom Fachbereich 12 Elektrotechnik der Technischen Universitat Berlin.
- [9] FURGA, G.S.; TIRONI, E.; UBEZIO, G. Shunt active filter for four wire low-voltage systems: theoretical operating limits and measuring for performance improvement. **European Transactions on Electrical Power Engineering**, v.7, n.1, p. 41-48, Jan./Feb.1997.
- [10] AKAGI, H. New trends in active filters for power conditions. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 32, n.6, p.1312-1322, Nov./ Dec 1996.
- [11] WILLEMS, J. L. Instantaneous sinusoidal and harmonic active and reactive currents in three-phase power systems. **European Transactions on Electrical Power Engineering**, v.4, n.5, p. 335-346, Sep/Oct. 1994.

- [12] FREITAS, M. J. S. M. **Implementação de um Filtro Ativo de Potência para Otimização da Interface entre a Rede e outros Sistemas Elétricos**. Braga – Portugal, 2004. 120f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica). Universidade do Minho.
- [13] WATANABE, E. H.; AREDES, M.; PING, W.W.; PILOTT, L. A. S. O Estado da Arte em Eletrônica de Potência. In: CIGRÉ / COPPE/ CEPEL, Agosto, 1998, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. **CIGRÉ**, Agosto 1998.
- [14] ONS - OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA. Histórico de Energia do ONS. <<http://www.ons.org.br/ons/>>. Acesso em: 20 september 2004.

O Software DASYLab® 4 tem funções que permitem fazer análise e controle em tempo real, além da habilidade de criar rapidamente interfaces gráficas.

O Software DASYLab® 4 apresenta a possibilidade de promover o perfeito controle de uma planta elétrica (diagrama esquemático), através de funções encontradas nos blocos de dados.

As funções oferecidas pelo Software DASYLab® 4 permitem obter entradas ou saídas analógicas, disparar sinais digitais, gerar funções, atuarem como filtros digitais, fazer a análise de formas de ondas distorcidas, operações matemáticas, estatísticas, e lógicas entre outras.

Os sinais gerados pelo software apresentam características TTL com frequências diferenciadas.

O Software DASYLab® 4 merece um destaque ainda maior por apresentar bons resultados na aquisição de dados, tornando um software requisitado para aplicação em laboratórios.

Neste trabalho o Software DASYLab® 4 foi utilizado para simulação de resultados obtidos a partir da implementação de diferentes situações de desequilíbrios de correntes presentes no sistema elétrico.

2.0 - Implementação Computacional - Método de Steinmetz

A figura C representa o modelo de compensação adotado por Steinmetz implementado em ambiente DASYLab® 4.

Através da equação 1.2, é possível seguir passo a passo a montagem do diagrama de blocos interligados por cordas conforme é apresentado na figura C. Os blocos de entrada representam tensões e correntes de entrada, assim como os demais blocos que tem suas funções específicas.

Apêndice

1.0 - Introdução ao DASYLab[®] 4 da IOTech

O Software DASYLab[®] 4 da IOTech é uma ferramenta computacional com interface compatível ao Windows é bastante utilizada no processamento de aquisição de dados, cuja facilidade de entendimento e controle proporciona rapidez nos resultados.

O Software DASYLab[®] 4 tem funções que permitem fazer análise e controle em tempo real, além da habilidade de criar rapidamente interfaces gráficas.

O Software DASYLab[®] 4 apresenta a possibilidade de promover o perfeito controle de uma planta elétrica (diagrama esquemático), através de funções encontradas nos blocos de dados.

As funções oferecidas pelo Software DASYLab[®] 4 permitem obter entradas ou saídas analógicas, disparar sinais digitais, gerar funções, atuarem como filtros digitais, fazer a análise de formas de ondas distorcidas, operações matemáticas, estatísticas, e lógicas entre outras.

Os sinais gerados pelo software apresentam características TTL com frequências diferenciadas.

O Software DASYLab[®] 4 merece um destaque ainda maior por apresentar bons resultados na aquisição de dados, tornando um software requisitado para aplicação em laboratórios.

Neste trabalho o Software DASYLab[®] 4 foi utilizado para simulação de resultados obtidos a partir da implementação de diferentes situações de desequilíbrios de correntes presentes no sistema elétrico.

2.0 - Implementação Computacional - Método de Steinmetz

A figura C representa o modelo de compensação adotado por Steinmetz implementado em ambiente DASYLab[®] 4.

Através da equação I.2, é possível seguir passo a passo a montagem do diagrama de blocos interligados por cordas conforme é apresentado na figura C. Os blocos de entrada representam tensões e correntes de entrada, assim como os demais blocos que tem suas funções específicas.

Analisando a figura C, no bloco C1 foi implementado a equação I.1. Sua função é obter o sinal da derivada da tensão, quando a mesma estiver passando por zero.

$$\frac{d.v_{a,b,c}}{dt} \geq 0 \quad (I.1)$$

No momento em que a tensão da respectiva fase estiver em zero com derivada positiva, neste momento o pulso (sinal) de 5V é bloqueado.

No bloco C2 foi implementado a equação I.2, que permite obter o valor da corrente de compensação na condição desejada.

$$\begin{bmatrix} I_{ah}^{Comp} \\ I_{bc}^{Comp} \\ I_{ca}^{Comp} \end{bmatrix} = \frac{-1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 \\ -1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_a}{\sqrt{2}} \left| \begin{matrix} v_a = 0 \\ \frac{d.v_a}{dt} > 0 \end{matrix} \right. \\ \frac{i_b}{\sqrt{2}} \left| \begin{matrix} v_b = 0 \\ \frac{d.v_b}{dt} > 0 \end{matrix} \right. \\ \frac{i_c}{\sqrt{2}} \left| \begin{matrix} v_c = 0 \\ \frac{d.v_c}{dt} > 0 \end{matrix} \right. \end{bmatrix} + \frac{\tan(\phi)}{3} \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & -1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{i_b}{\sqrt{2}} \left| \begin{matrix} v_c = 0 \\ \frac{d.v_c}{dt} > 0 \end{matrix} \right. \\ \frac{i_c}{\sqrt{2}} \left| \begin{matrix} v_b = 0 \\ \frac{d.v_b}{dt} > 0 \end{matrix} \right. \end{bmatrix} \quad (I.2)$$

Observando detalhadamente a figura C e fazendo uma analogia com a equação I.2, os blocos de entrada são fontes de sinais da tensão e da corrente. Sendo as tensões de entrada equilibradas e as correntes desequilibradas conforme o valor desejado inserido no regulador.

O bloco “Trigger” após analisar e derivar o sinal da tensão de entrada quando a mesma passar por zero na condição em que o valor seja positivo, este sinal juntamente com o sinal da corrente instantânea é absorvido pelo bloco “Latch”. O “Latch” que por sua vez ao analisar o valor de sinal da tensão na condição desejada, processa o sinal da corrente de compensação em tempo instantâneo.

Pela figura C, o método de compensação adotado por Steinmetz, possibilita fazer a compensação parcial ou total de corrente reativa utilizando um regulador que permite variar o ângulo de defasagem entre a tensão e a corrente.

Uma vez obtido o sinal da corrente de compensação somada a corrente de carga do sistema através do módulo “Aritmetic 3” tem-se a corrente total e equilibrada do sistema.

Os blocos que merecem uma atenção especial são:



O bloco "Trigger" tem a função de analisar e obter o sinal de tensão quando a mesma estiver passando por zero.



O bloco "Latch" é responsável pela obtenção do sinal da corrente de fase do compensador, através do produto da corrente instantânea pelo sinal da tensão.

A proposta de inserir um regulador que permite fazer a variação das correntes de entrada tem o objetivo de comprovar que o desenvolvimento matemático apresentado e implementado via Software DASYLab® 4 atende perfeitamente as expectativas de compensação de desequilíbrios de correntes. De forma semelhante pode ser constatado para o fator de potência.

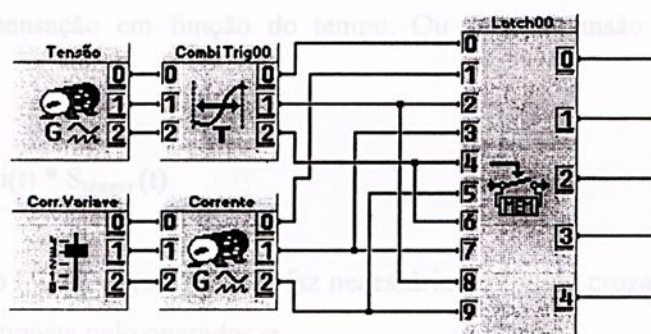


Figura A - Blocos para captura de dados.

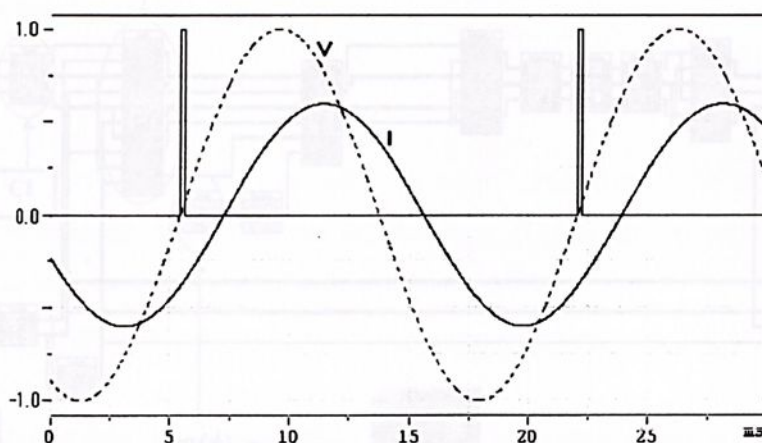


Figura B - Obtenção do sinal de corrente de compensação através da derivada da tensão na condição desejada - método de Steinmetz.

3.0 - O bloco "Trigger" é utilizado para identificar o zero das tensões no momento em que estas apresentam derivadas positivas. A identificação deste instante se faz através de um pulso com duração e amplitudes controladas. Nesta aplicação, as entradas do bloco são as tensões de alimentação e as saídas são pulsos de valor unitário. A figura B ilustra o procedimento em um dos canais.

O bloco "Latch" conforme é apresentado na figura A, recebe o sinal de valor unitário originado da derivada positiva da tensão e o sinal de corrente instantânea da linha.

Ao receber o pulso de tensão, em um tempo próximo de zero, a chave é fechada conforme é apresentado pelo desenho do bloco, neste momento é capturado o valor de corrente que se encontra no mesmo instante da tensão que está passando por zero.

De acordo com a expressão I.3, o produto da corrente e do sinal da tensão resulta na corrente de compensação em função do tempo. Ou seja, a tensão e corrente estão em sincronismo.

$$S_{\text{latch}}(t) = i(t) * S_{\text{trigger}}(t) \quad (\text{I.3})$$

Pela equação I.2, observa-se que se faz necessário o produto cruzado de fases diferentes devido a rotação imposta pelo operador α .

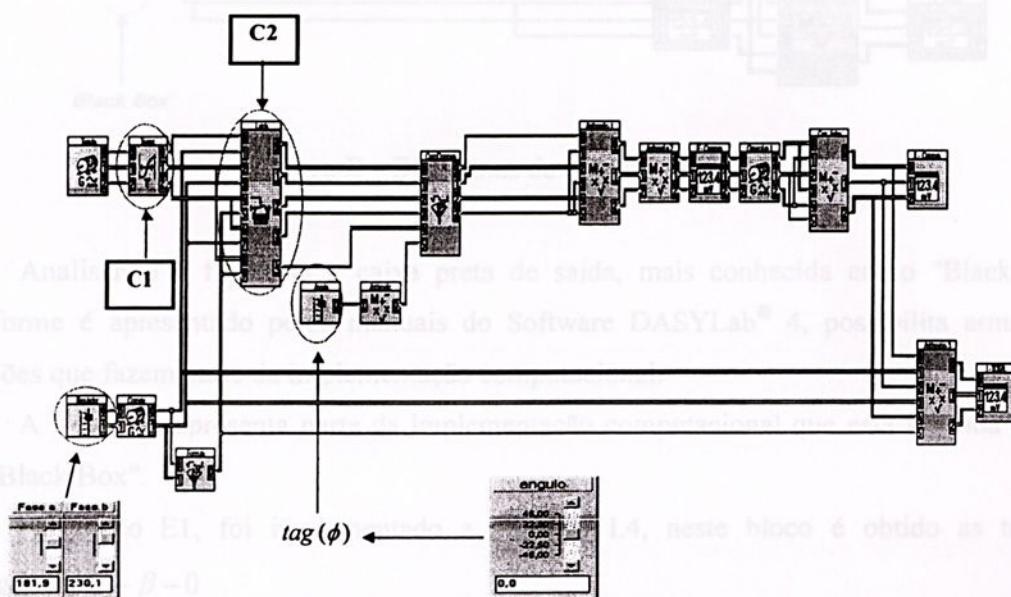


Figura C - Diagramas de blocos - método de Steinmetz.

3.0 - Implementação Computacional - Teoria PQ

A implementação computacional da teoria PQ conforme apresentada no capítulo IV também se fez através do software DASYLab® 4.

A figura D apresenta a ligação dos blocos através de cordas, sendo cada bloco com uma função específica.



O bloco Fórmula possibilita realizar diversas formas de operações e funções matemáticas.

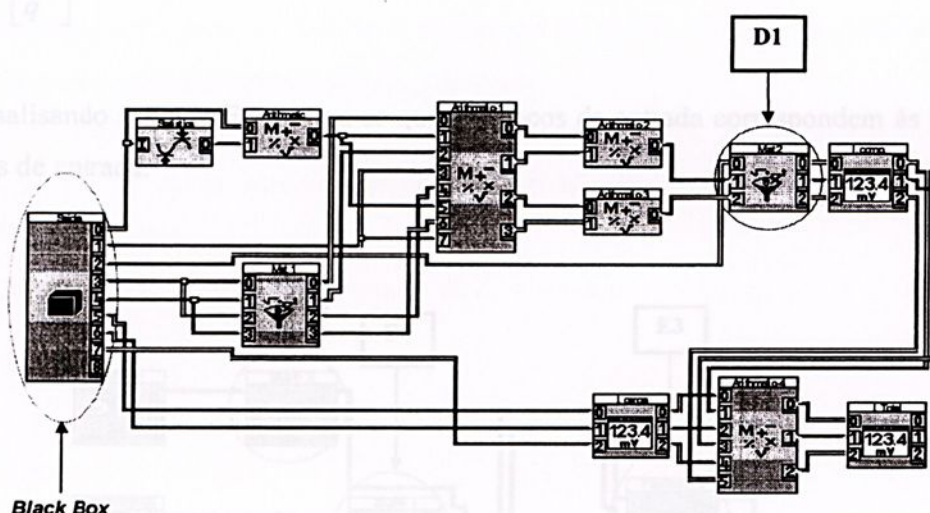


Figura D - Diagramas de blocos - teoria PQ.

Analisando a figura D a caixa preta de saída, mais conhecida como "Black Box" conforme é apresentado pelos manuais do Software DASYLab® 4, possibilita armazenar funções que fazem parte da implementação computacional.

A figura E representa parte da implementação computacional que está inserida dentro do "Black Box".

No bloco E1, foi implementado a equação 1.4, neste bloco é obtido as tensões ortogonais $\alpha - \beta - 0$

$$v_{\alpha\beta 0} = M \cdot v_{abc} \quad (1.4)$$

O bloco E2, através da implementação da equação 1.5, tem-se as correntes ortogonais $\alpha - \beta - 0$ em perfeito equilíbrio. O produto da tensão e da corrente de fase pela transformada de Clark geram valores ortogonais representados pelas siglas $\alpha - \beta - 0$.

$$i_{\alpha\beta 0} = M \cdot i_{abc} \quad (1.5)$$

Pelo bloco E3, a partir do produto das equações 1.4 e 1.5 é obtido as potências: p (real), q (imaginária) e de p_0 (seqüência zero). Conforme mostra a equação 1.6.

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha\beta 0} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha\beta 0} \end{bmatrix} \quad (1.6)$$

Analisando a figura E, observa-se que os blocos de entrada correspondem às tensões e correntes de entrada.

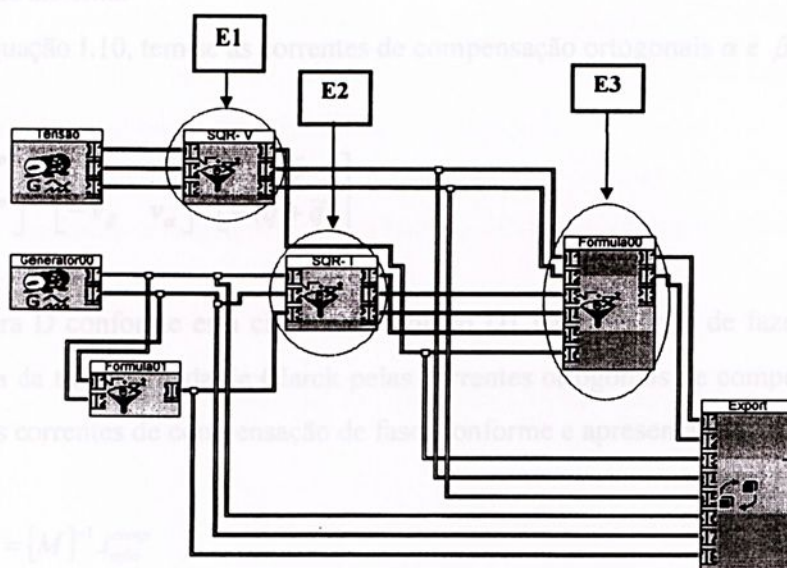


Figura E - "Black Box " (caixa preta)

Conforme citado anteriormente, o bloco fórmula tem uma expressiva utilização devido a sua facilidade de inserir expressões e funções matemáticas.

Nos blocos E1 e E2 são gerados os sinais de tensões e correntes ortogonais. Estes blocos estão implementados com a transformada de Clarke.

As correntes de entrada são correntes desequilibradas, contrário das tensões que apresentam perfeito equilíbrio. O produto da tensão e da corrente de fase pela transformada de Clarck geram valores ortogonais representados pelas siglas $\alpha \beta o$.

O produto das tensões e das correntes ortogonais resultam nas potências p, q e p_0 .

$$p = v_{\alpha} \cdot i_{\alpha} + v_{\beta} \cdot i_{\beta} = \bar{p} + \tilde{p} \quad (1.7)$$

$$q = v_{\alpha} \cdot i_{\beta} - v_{\beta} \cdot i_{\alpha} = \bar{q} + \tilde{q} \quad (1.8)$$

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (1.9)$$

Através das equações 1.7, 1.8, 1.9, observa-se que cada potência é composta por uma parte constante e outra parte oscilatória. E sabido que para se ter um sistema equilibrado basta eliminar as partes oscilantes presentes nas potências.

Neste trabalho considerou-se um sistema isolado, ou seja, não se tem a presença da componente de seqüência zero, conseqüentemente não há potências de seqüências zero circulando pelo sistema.

Através da equação 1.10, tem-se as correntes de compensação ortogonais α e β .

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}^{comp} \\ i_{\beta}^{comp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ -v_{\beta} & v_{\alpha} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} -\tilde{p} \\ -(\bar{q} + \tilde{q}) \end{bmatrix} \quad (1.10)$$

Na figura D conforme esta circulado, o bloco D1 tem a função de fazer o produto da matriz inversa da transformada de Clarck pelas correntes ortogonais de compensação $\alpha - \beta$, resultando nas correntes de compensação de fase, conforme e apresentado pela equação (1.11)

$$i_{abc}^{comp} = [M]^{-1} \cdot i_{\alpha\beta o}^{comp} \quad (1.11)$$

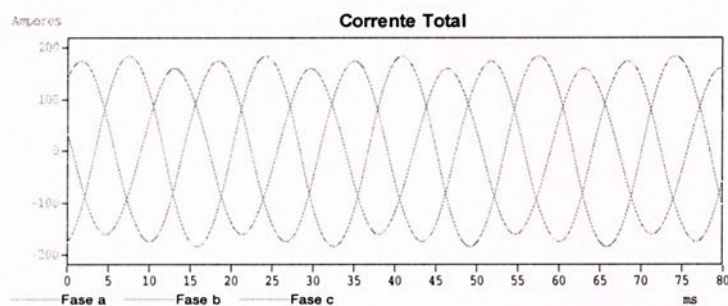


Figura H - Correntes desequilibradas - teoria PQ

A figura H apresenta as correntes trifásicas desequilibradas devido a variação intencional das potências oscilatórias $\tilde{p}$ e $\tilde{q}$.

No bloco F2, tem-se a corrente ortogonal de compensação conforme apresentada pela equação I.10.



**,UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de Ilha Solteira
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica
Av. Brasil Centro, 56
15385-000 Ilha Solteira - SP
www.dee.feis.unesp.br**

