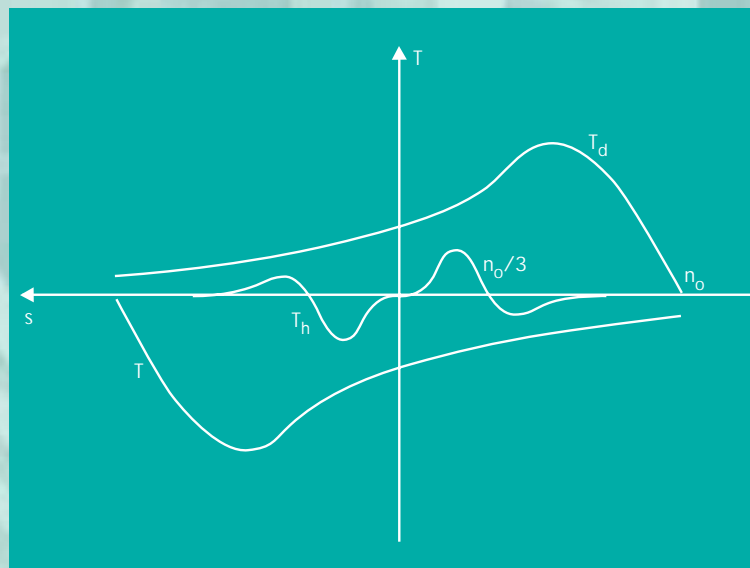
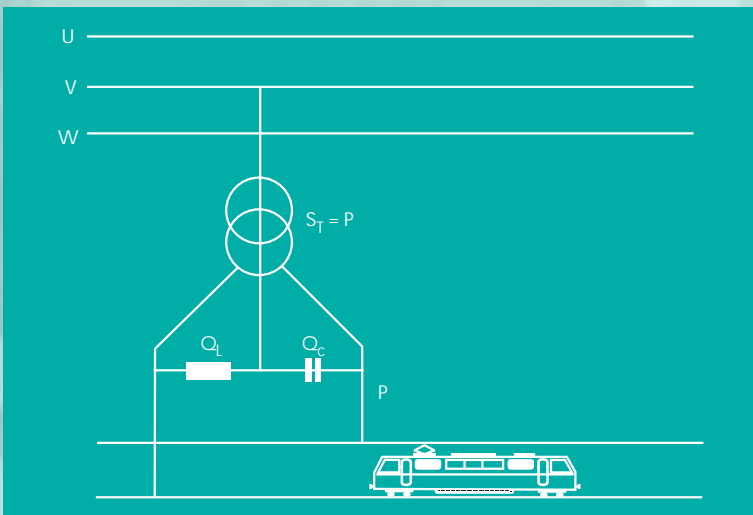


Guia de Aplicação de Qualidade de Energia



Perturbações de Tensão *Introdução ao Desiquilíbrio*

5.1.3



Perturbações de Tensão

Introdução ao Desiquilíbrio

Dr Johan Driesen & Dr Thierry Van Craenenbroeck

Katholieke Universiteit Leuven

Maio 2002

European Copper Institute (ECI)

O Instituto Europeu do Cobre é uma joint venture entre a ICA (Associação Internacional do Cobre) e o IWCC (Conselho Internacional do Cobre Forjado). Por sua qualidade de membro, o ECI age em nome dos maiores produtores de cobre do mundo e dos fabricantes líderes da Europa, na promoção do cobre na Europa. Formado em janeiro de 1996, o ECI é apoiado por uma rede de dez Associações de Desenvolvimento do Cobre (CDAs) no Benelux, França, Alemanha, Grécia, Hungria, Itália, Polônia, Escandinávia, Espanha e o Reino Unido. Fomenta os esforços empreendidos inicialmente pela Associação de Desenvolvimento de Produtos de Cobre, criada em 1959, e a INCRA (Associação Internacional de Pesquisa do Cobre) formada em 1961.

Instituto Brasileiro do Cobre - PROCOBRE

É uma instituição sem fins lucrativos, constituída por empresas produtoras e transformadoras de cobre com a missão de estimular o uso técnico e econômico do metal, promovendo sua utilização correta e eficiente. Desenvolve projetos nas várias áreas de aplicação do metal, divulgando as vantagens da utilização do cobre na energia elétrica, nas instalações hidráulicas e de gás, na arquitetura, no design e decoração de interiores, na saúde e muitas outras.

Reconhecimentos

Este projeto foi realizado com o apoio da Comunidade Européia e da International Copper Association, Ltd.

Advertência

O European Copper Institute, a Katholieke Universiteit Leuven, a Copper Development Association e o Instituto Brasileiro do Cobre, negam responsabilidade por qualquer dano direto, indireto, conseqüente ou incidental que possa resultar do uso da informação, ou da inabilidade para usar as informações ou dados contidos nesta publicação.

Copyright© European Copper Institute, Copper Development Association and Katholieke Universiteit Leuven.

A reprodução é autorizada com a condição de que o material não seja abreviado e a fonte seja reconhecida.



Av. Brigadeiro Faria Lima, 2128-cj.203
Cep 01451-903
São Paulo - SP
Brasil

Tel./Fax: 55 11 3816-6383
e-mail: procobrebrasil@copper.org
Internet: www.procobre.org



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org

Perturbações de Tensão

Introdução ao Desequilíbrio

Introdução

Este texto trata do desequilíbrio de tensões e correntes. Como correntes desequilibradas são uma causa importante de tensões não-simétricas e visto que o desequilíbrio de tensão é um parâmetro de qualidade de energia reconhecido, este texto, como seu título indica, refere-se principalmente ao desequilíbrio de tensões senoidais.

Em primeiro lugar, é definido o fenômeno. Depois, são determinados alguns parâmetros básicos necessários para sua quantificação. O leitor com menos interesse matemático pode omitir as equações e passar para o material mais descritivo, que trata de limites, causas e efeitos. Finalmente, são resumidas algumas técnicas de mitigação.

O que é desequilíbrio?

Definição

Um sistema de energia trifásico é chamado equilibrado ou simétrico se as tensões e correntes das três fases tiverem a mesma amplitude e o deslocamento entre as fases for de 120° . Se uma ou ambas destas condições não são atendidas, o sistema é chamado desequilibrado ou assimétrico.

Neste texto, é assumido implicitamente que as formas de onda são senoidais e assim não contém harmônicas.

Quantificação

Para quantificar um desequilíbrio na tensão ou na corrente de um sistema trifásico, são usadas as denominadas componentes de Fortescue ou componentes simétricas. O sistema trifásico é decomposto nos sistemas denominados direto ou de seqüência positiva, inverso ou de seqüência negativa e homopolar ou de seqüência zero, indicados através dos subscritos d, i, h (em alguns textos são usados os subscritos 1, 2, 0).

São calculadas utilizando transformações matriciais dos fasores trifásicos de tensão ou de corrente. Os subscritos u, v, w indicam as diferentes fases. (às vezes são usados os subscritos a, b e c). São formuladas aqui as expressões para a tensão U , mas esta variável pode ser substituída pela corrente I sem qualquer problema:

$$\begin{bmatrix} U_h \\ U_d \\ U_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_u \\ U_v \\ U_w \end{bmatrix} \quad (1)$$

onde o operador de rotação a é determinado por:

$$a = e^{j \cdot 120^\circ}$$

Estas transformações não variam com a energia, de forma que qualquer quantidade de energia, calculada com os valores originais ou transformados, resultará no mesmo valor.

A transformação inversa é:

$$\begin{bmatrix} U_u \\ U_v \\ U_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_h \\ U_d \\ U_i \end{bmatrix} \quad (2)$$

Introdução ao Desequilíbrio

O sistema de seqüência positiva é associado com um campo rotativo girando no sentido positivo, enquanto que o sistema de seqüência negativa representa um campo girante negativo (Figura 1). No caso de máquinas elétricas CA, esta é uma interpretação fisicamente correta para o campo magnético girante.

As componentes de seqüência zero têm ângulos de fase idênticos e somente oscilam. Em sistemas sem condutores neutros, obviamente não podem circular correntes de seqüência zero, mas podem surgir

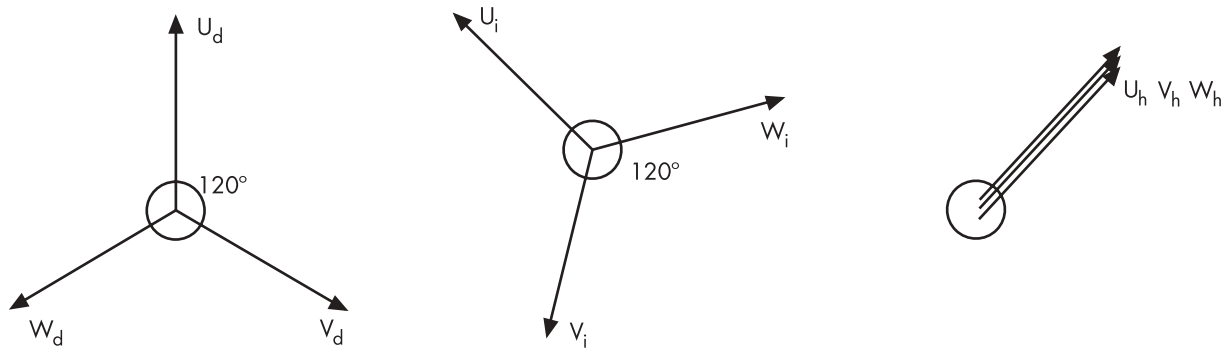


Figura 1 - Representação gráfica das componentes simétricas; notar a marcação inversa das contribuições de seqüência positiva (à esquerda) e seqüência negativa (centro) em relação aos fasores de tensão reais.

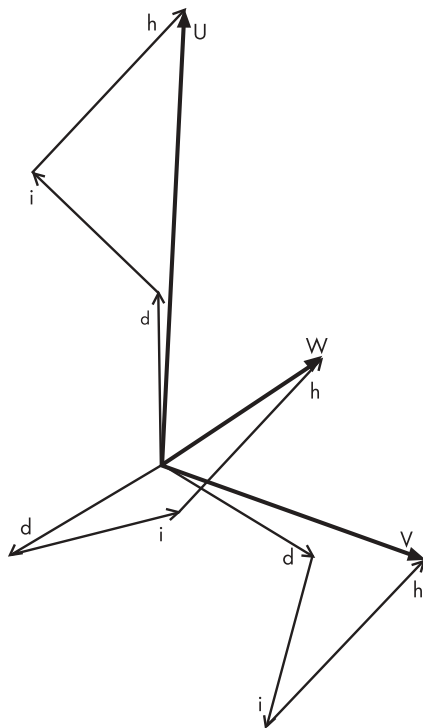


Figura 2 - Decomposição gráfica usando as componentes da Figura 1 (as contribuições respectivas para as três fases indicadas como U, V, W são somadas como fasores para obter o sistema desequilibrado real).

diferenças de tensão significativas entre as “tensões zero” nos pontos neutros das conexões Y no sistema de alimentação e nas cargas.

A Figura 2 ilustra a decomposição de um sistema desequilibrado em suas componentes.

A medição destas componentes não é direta na prática - especialmente para as componentes de seqüência positiva e seqüência negativa. Um dispositivo de medição digital que executa a operação matemática acima citada nas tensões e correntes amostradas leva a uma implementação mais simples do que é possível com o equipamento analógico clássico.

As relações u_U (tensão) e u_I (corrente) entre as magnitudes das componentes de seqüência negativa e positiva de tensão e corrente, respectivamente, são uma medição do desequilíbrio (em %):

$$u_U = \frac{U_i}{U_d} \cdot 100\% \quad (3)$$

Tais relações são, por exemplo, usadas em normas que tratam de assuntos de qualidade de energia, tais como a EN-50160 ou a série IEC 1000-3-x.

Uma proporção semelhante é também definida às vezes entre a magnitude da componente de seqüência zero e a componente de seqüência positiva, quando apropriado.

Introdução ao Desequilíbrio

Uma forma mais fácil, porém aproximada, para calcular a relação de tensão é:

$$u_U \approx \frac{S_L}{S_{SC}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Esta relação usa apenas a potência aparente da carga S_L e a potência de curto-circuito S_{SC} do circuito de alimentação.

Nas normas estão descritos procedimentos de medição completos para determinar estes parâmetros. Empregam técnicas estatísticas para determinar uma média de (3)-(4), durante um certo intervalo de tempo.

Limites

As normas internacionais (por exemplo, EN-50160 ou a série IEC 1000-3-x) estabelecem limites para a relação de desequilíbrio definida pela fórmula (3), de $< 2\%$ para sistemas de BT e de MT e $< 1\%$ para AT, medidos como valores de 10 minutos, com um máximo instantâneo de 4% . No entanto, este limite pode ser reduzido localmente, até mesmo para um valor tão baixo quanto $0,25\%$ no lado britânico do Túnel do Canal da Mancha, onde o sistema de trem representa uma carga monofásica grande. A razão para os limites mais apertados em sistemas de alta tensão é que eles são projetados para serem usados na sua capacidade máxima com uma carga trifásica equilibrada. Qualquer desequilíbrio causa operação ineficiente dos sistemas de transmissão, frequentemente muito carregados. No projeto de sistemas de distribuição (tensões mais baixas), a alimentação de cargas monofásicas é um dos propósitos fundamentais, portanto o sistema e as cargas conectadas devem ser projetadas e implementadas para tolerarem um desequilíbrio maior.

Como exemplo, é calculada a potência de curto-circuito exigida para uma via férrea dupla de alta velocidade, com uma potência nominal de duas vezes 15 MVA (arranjo típico do TGV francês). Usando a relação (4), a potência de curto-circuito deveria ser pelo menos 3 GVA para manter o nível de desequilíbrio de tensão de 1% , explicando por que é necessária uma conexão ao sistema de extra alta tensão.

Normalização mais detalhada pode ser encontrada na IEC 61000-2-x, como parte da normalização de CEM (compatibilidade eletromagnética), e na EN 50160, descrevendo as características de tensão no ponto de acoplamento comum (PCC, do inglês Point of Common Coupling). Junto com isto, os diferentes países europeus e as concessionárias que lá operam utilizam frequentemente suas próprias regras adicionais para a “emissão” de correntes de carga desequilibradas.

Como é causado o desequilíbrio ?

A concessionária tenta prover uma tensão de sistema equilibrada no PCC entre a rede de distribuição e a rede interna do cliente. Sob condições normais, estas tensões são determinadas pelas:

- ◆ tensões nos terminais dos geradores;
- ◆ impedância do sistema elétrico;
- ◆ correntes puxadas pelas cargas ao longo da rede de transmissão e de distribuição.

As tensões de sistema em uma central de geração são em geral altamente simétricas devido à construção e operação dos geradores síncronos usados em grandes plantas de energia centralizadas. Portanto, a geração centralizada não contribui em geral ao desequilíbrio. Mesmo com geradores de indução (assíncronos), como usados, por exemplo, em alguns tipos de turbinas eólicas, um conjunto trifásico de tensões equilibrado é obtido.

Entretanto, onde geração em pequena escala distribuída ou embutida, instalada no local do cliente,

Introdução ao Desequilíbrio

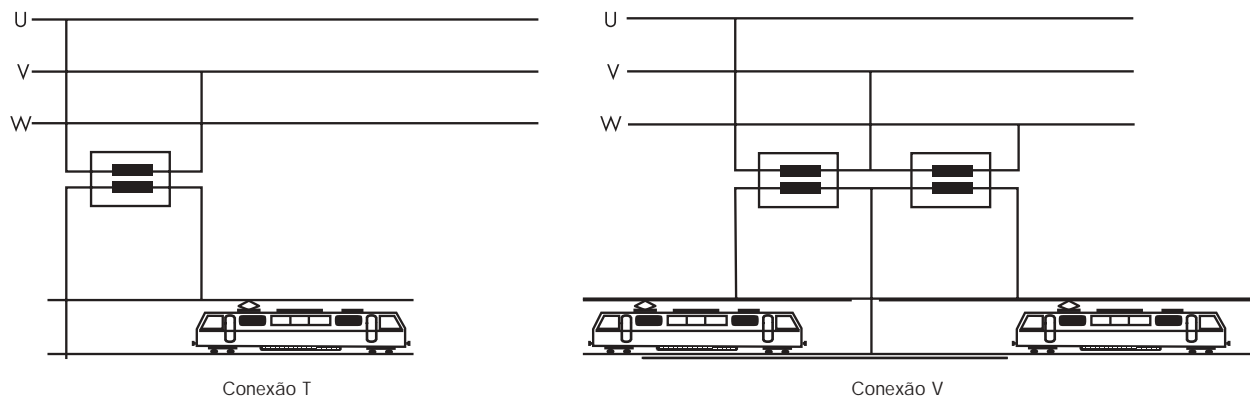


Figura 3 - Conexões de estrada de ferro em CA como exemplos de conexões de carga assimétrica.

tornou-se mais popular e atingiu uma parte significativa da produção de eletricidade, a situação é diferente. Muitas destas unidades relativamente pequenas, como instalações fotovoltaicas, são conectadas à rede de BT por meio de unidades inversoras eletrônicas monofásicas. O ponto de conexão tem uma impedância relativamente alta (a potência de curto-circuito é relativamente baixa), levando a um desequilíbrio potencialmente maior da tensão (equação (4)), que é o caso para conexões em nível de tensão mais alto.

A impedância dos componentes de sistemas de eletricidade não é exatamente a mesma para cada fase. A configuração geométrica das linhas aéreas, assimétrica com relação à terra, por exemplo, causa uma diferença nos parâmetros elétricos da linha. Geralmente, estas diferenças são muito pequenas e o seu efeito pode ser negligenciado quando são adotadas precauções suficientes, como a transposição de linhas.

Na maioria dos casos práticos, a assimetria das cargas é a causa principal de desequilíbrio.

Nos níveis de tensão alta e média, as cargas são normalmente trifásicas e equilibradas, embora podem ser conectadas grandes cargas mono ou bifásicas, como tração de ferrovia em CA (por exemplo, estradas de ferro de alta velocidade, ver Figura 3) ou fornos de indução (grandes sistemas de fundição de metal utilizando arcos potentes altamente irregulares para gerar calor).

As cargas de baixa tensão normalmente são monofásicas, por exemplo, PCs ou sistemas de iluminação, e o equilíbrio entre fases é então difícil de garantir. Na planta de um sistema de instalação elétrica que alimenta estas cargas, os circuitos de carga são distribuídos entre os sistemas trifásicos, por exemplo, uma fase por andar de um apartamento ou edifício comercial ou conexões alternadas em fileiras de casas. Não obstante, o equilíbrio da carga equivalente no transformador central flutua por causa da expansão estatística dos ciclos de trabalho das diferentes cargas individuais.

Condições de sistema anormais também causam desequilíbrio de fase. As falhas fase-terra, fase-fase e de condutor aberto são exemplos típicos. Estas falhas causam afundamentos de tensão em uma ou mais das fases envolvidas e podem até mesmo causar indiretamente sobretensões nas outras fases. O comportamento do sistema é então por definição desequilibrado, mas tais fenômenos são classificados normalmente como perturbações de subtensão, as quais são discutidas nos guias de aplicação correspondentes, já que o sistema de proteção da rede de eletricidade deveria eliminar a falha.

Quais são as consequências?

A sensibilidade de um equipamento elétrico ao desequilíbrio difere de uma aplicação para outra. É feita a seguir uma avaliação curta dos problemas mais comuns:

Introdução ao Desequilíbrio

Máquinas de indução

São máquinas assíncronas de CA com campos magnéticos girantes induzidos internamente. A magnitude é proporcional à amplitude das componentes de seqüência positiva e/ou seqüência negativa. O sentido de rotação do campo da componente de seqüência negativa é oposto ao campo da componente de seqüência positiva. Portanto, no caso de uma alimentação desequilibrada, o campo magnético girante total se torna “elíptico” em vez de circular. As máquinas de indução enfrentam três tipos de problemas devido ao desequilíbrio. Em primeiro lugar, a máquina não pode produzir seu conjugado pleno na medida em que o campo magnético girando inversamente do sistema de seqüência negativa causa um conjugado de frenagem negativo que tem que ser subtraído do conjugado básico ligado ao campo magnético girante normal. A Figura 4 mostra as diferentes características conjugado-velocidade de uma máquina de indução sob alimentação desequilibrada. A curva real em regime permanente é a soma ponderada destas curvas com as relações de desequilíbrio ao quadrado como pesos, bem como as escalas de conjugado com o quadrado da carga. Pode ser observado que na região operacional normal, que é a seção quase reta de T_d (a parte que começa no topo da curva, eventualmente cruzando o eixo horizontal na velocidade síncrona), T_i e T_h são ambos negativos. Estas características podem ser medidas com o motor conectado como mostrado na Figura 5.

Em segundo lugar, os mancais podem sofrer dano mecânico por causa das componentes de conjugado induzidas no dobro da freqüência do sistema.

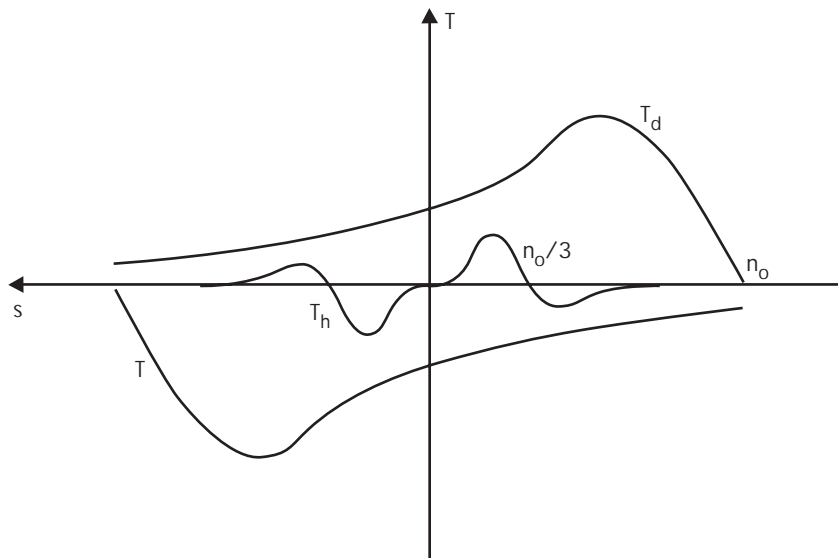


Figura 4 - Características conjugado-velocidade (escorregamento) de uma máquina de indução sob condições de alimentação desequilibrada.

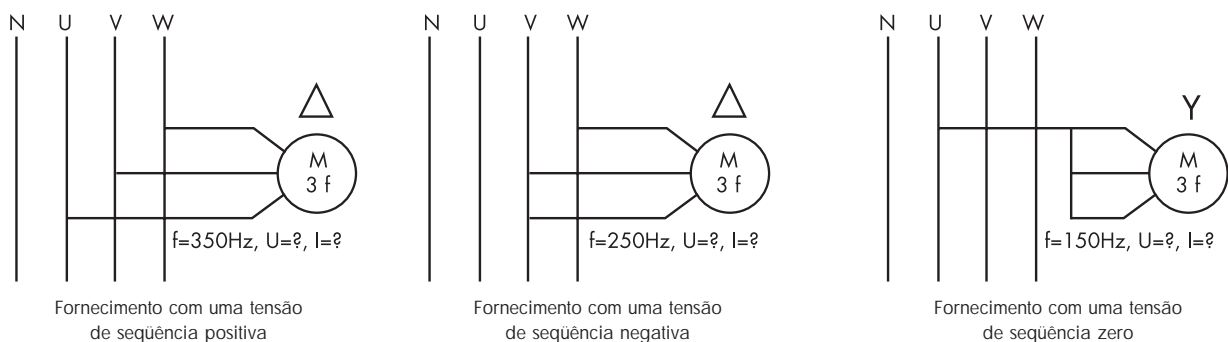


Figure 5 - Esquemas de fornecimento para alimentar um motor de indução com uma certa componente de desequilíbrio.

Introdução ao Desequilíbrio

Finalmente, o estator e, especialmente, o rotor estão excessivamente aquecidos, conduzindo possivelmente a envelhecimento térmico mais rápido. Este calor é causado por indução de correntes significativas pelo campo magnético inverso girando rapidamente (no sentido relativo), como visto pelo rotor. Para poder lidar com este aquecimento extra, o motor deve ser menos carregado, o que pode exigir a instalação de uma máquina de potência nominal maior.

Geradores síncronos

Os geradores síncronos são também máquinas de CA, usadas, por exemplo, em geração local como unidades de CHP. Exibem fenômenos semelhantes aos descritos para máquinas de indução, mas principalmente sofrem de aquecimento excessivo. Deve ser dedicado cuidado especial ao projeto de enrolamentos amortecedores de estabilização no rotor, onde as correntes são induzidas pelas componentes de seqüência negativa e de seqüência zero.

Capacidade de transformadores, cabos e linhas

A capacidade de transformadores, cabos e linhas é reduzida devido às componentes de seqüência negativa. O limite operacional é na realidade determinado pela capacidade RMS da corrente total, sendo composto também parcialmente de correntes “inaproveitáveis” de seqüência não direta. Isto tem que ser considerado ao ajustar os pontos de disparo dos dispositivos de proteção, operando na corrente total. A capacidade máxima pode ser expressada através de um fator de redução da capacidade nominal, a ser fornecido pelo fabricante, que pode ser usado para selecionar um sistema maior, capaz de manipulação da carga.

Transformadores

Os transformadores sujeitos a tensões de seqüência negativa as transformam da mesma maneira como tensões de seqüência positiva. O comportamento com respeito a tensões de seqüência zero depende das conexões primárias e secundárias e, mais particularmente, da presença de um condutor neutro. Por exemplo, se um lado tem uma conexão trifásica de quatro fios, podem circular correntes de neutro. Se ao outro lado do enrolamento é conectado em delta, a corrente de seqüência zero é transformada em uma corrente que circula (e causa calor) no delta. O fluxo magnético de seqüência zero associado passa através de partes construtivas do transformador, causando perdas parasitas em partes como o tanque, requerendo às vezes uma diminuição de capacidade adicional.

Conversores de potência eletrônicos

Estes conversores estão presentes em muitos dispositivos como acionamentos de velocidade ajustáveis, alimentações de energia para PCs, iluminação eficiente e assim por diante. Podem enfrentar harmônicas adicionais, não características, embora, em geral, a distorção harmônica total permanece mais ou menos constante. O projeto de bancos de filtros passivos lidando com estas harmônicas tem que levar em conta este fenômeno. Este assunto é tratado em outra Seção deste Guia.

Os dispositivos discutidos acima são obviamente cargas trifásicas. Certamente, cargas monofásicas também podem ser afetadas por variações de tensão na alimentação resultantes de efeitos de desequilíbrio.

Como o desequilíbrio pode ser mitigado ?

Para diminuir os efeitos do desequilíbrio, podem ser adotadas várias ações com diferentes graus de complexidade técnica.

A primeira e mais básica solução é rearranjar ou redistribuir as cargas de tal modo que o sistema se

Introdução ao Desequilíbrio

torna mais equilibrado. Para certas aplicações, há uma possibilidade de reduzir o desequilíbrio mudando os parâmetros operacionais.

Para reduzir a influência de correntes de seqüência negativa, que causam quedas de tensão de seqüência negativa na tensão de alimentação, é requerida uma baixa impedância interna do sistema. Isto pode ser alcançado conectando as cargas desequilibradas em pontos com nível de curto-circuito mais alto, ou através de outras medidas de sistema para reduzir a impedância interna.

Outro tipo de técnica de mitigação é o uso de transformadores especiais, como transformadores de Scott, e de Steinmetz:

- ◆ O “transformador de Scott” consiste de dois transformadores monofásicos, com relações de transformação especiais, acoplados a um sistema trifásico. Eles estão conectados de tal modo que na saída, é gerado um sistema de tensão ortogonal bifásico, permitindo a conexão de dois sistemas monofásicos. Este arranjo apresenta uma potência trifásica equilibrada para a rede.
- ◆ Um “transformador de Steinmetz” é na realidade um transformador trifásico com uma potência extra de carga de equilíbrio, que consiste de um capacitor e um indutor de capacidade proporcional à carga monofásica (ver Figura 6). Quando a potência reativa nominal do indutor e do capacitor iguala a potência ativa nominal da carga, dividida por 3, a rede trifásica vê uma carga equilibrada. A potência nominal trifásica do transformador iguala a potência ativa da carga monofásica. Notar que o equilíbrio só é perfeito para cargas com uma potência ativa igual ao valor usado para projetar o sistema.

Finalmente, circuitos eletrônicos de potência especiais, de ação rápida, como “Compensadores de Var Estáticos”, podem ser configurados para limitar o desequilíbrio. Estes se comportam como se fossem rapidamente transformados em impedâncias complementares, compensando por mudanças na impedância das cargas em cada fase. São capazes também de compensar potência reativa não desejada. Porém, são dispositivos caros, e usados apenas para cargas grandes (por exemplo, fornos à arco) quando outras soluções são insuficientes.

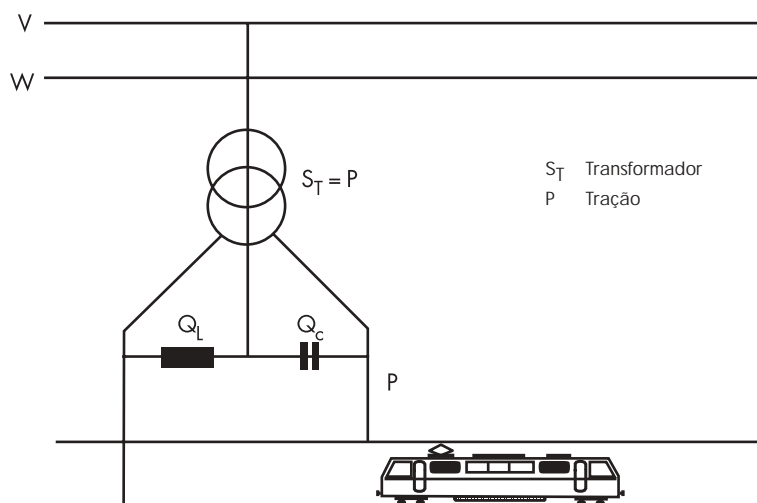


Figura 6 - Carga monofásica conectada a uma rede trifásica usando uma configuração de transformador de Steinmetz.

Introdução ao Desequilíbrio

Outros tipos de condicionadores de energia que podem lidar com sistemas desequilibrados bem como com outros problemas de qualidade de energia estão em desenvolvimento mas não estão ainda prontos para aplicação geral.

Conclusão

O desequilíbrio é um sério problema de qualidade de energia, afetando principalmente sistemas de distribuição de baixa tensão, como por exemplo os encontrados em edifícios comerciais com abundantes PCs e iluminação. Entretanto, pode ser quantificado de uma maneira relativamente simples resultando em parâmetros que podem ser comparados a valores padronizados.

Este texto explica as causas principais de desequilíbrio e detalha as conseqüências mais importantes. É prestada atenção especial às máquinas girantes, principalmente máquinas de indução, e transformadores.

São resumidas brevemente as principais técnicas de mitigação para este problema específico.

Rede de Parceiros

Copper Benelux
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 7090
Fax: 00 32 2 777 7099
Email: mail@copperbenelux.org
Web: www.copperbenelux.org

Contact: Mr B Dôme

Copper Development Association
5 Grovelands Business Centre
Boundary Way
Hemel Hempstead HP2 7TE
United Kingdom

Tel: 00 44 1442 275700
Fax: 00 44 1442 275716
Email: copperdev@compuserve.com
Web: www.cda.org.uk & www.brass.org

Contact: Mrs A Vessey

Deutsches Kupferinstitut e.V
Am Bonnhof 5
D-40474 Duesseldorf
Germany

Tel: 00 49 211 4796 323
Fax: 00 49 211 4796 310
Email: sfassbinder@kupferinstitut.de
Web: www.kupferinstitut.de

Contact: Mr S Fassbinder

ECD Services
Via Cardinal Maffi 21
I-27100 Pavia
Italy

Tel: 00 39 0382 538934
Fax: 00 39 0382 308028
Email: info@ecd.it
Web: www.ecd.it

Contact: Dr A Baggini

European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Web: www.eurocopper.org

Contact: Mr H De Keulenaer

Hevrox
Schoebroekstraat 62
B-3583 Beringen
Belgium

Tel: 00 32 11 454 420
Fax: 00 32 11 454 423
Email: info@hevrox.be

Contact: Mr I Hendriks

HTW
Goebenstrasse 40
D-66117 Saarbruecken
Germany

Tel: 00 49 681 5867 279
Fax: 00 49 681 5867 302
Email: wlang@htw-saarland.de

Contact: Prof Dr W Langguth

Istituto Italiano del Rame
Via Corradino d'Ascanio 4
I-20142 Milano
Italy

Tel: 00 39 02 89301330
Fax: 00 39 02 89301513
Email: ist-rame@wirednet.it
Web: www.iir.it

Contact: Mr V Loconsolo

KU Leuven
Kasteelpark Arenberg 10
B-3001 Leuven-Heverlee
Belgium

Tel: 00 32 16 32 10 20
Fax: 00 32 16 32 19 85
Email: ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be

Contact: Prof Dr R Belmans

Polish Copper Promotion Centre SA
Pl.1 Maja 1-2
PL-50-136 Wroclaw
Poland

Tel: 00 48 71 78 12 502
Fax: 00 48 71 78 12 504
Email: pcpm@miedz.org.pl

Contact: Mr P Jurasz

TU Bergamo
Viale G Marconi 5
I-24044 Dalmine (BG)
Italy

Tel: 00 39 035 27 73 07
Fax: 00 39 035 56 27 79
Email: graziana@unibg.it

Contact: Prof R Colombi

TU Wroclaw
Wybrzeze Wyspianskiego 27
PL-50-370 Wroclaw
Poland

Tel: 00 48 71 32 80 192
Fax: 00 48 71 32 03 596
Email: i8@elektryk.ie.pwr.wroc.pl

Contact: Prof Dr H Markiewicz

Dr Johan Driesen

Katholieke Universiteit Leuven
Electrical Engineering
Kasteelpark Arenberg 10
3001 Leuven
Belgium

Tel: 00 32 16 321020
Fax: 00 32 16 321985
Email: johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be
Web: www.esat.kuleuven.ac.be

Dr Thierry Van Craenenbroeck

Katholieke Universiteit Leuven
Electrical Engineering
Kasteelpark Arenberg 10
3001 Leuven
Belgium

Tel: 00 32 16 321020
Fax: 00 32 16 321985
Web: www.esat.kuleuven.ac.be



Av. Brigadeiro Faria Lima, 2128-cj.203
Cep 01451-903
São Paulo - SP
Brasil

Tel./Fax: 55 11 3816-6383
e-mail: procobrebrasil@copper.org
Internet: www.procobre.org



European Copper Institute
168 Avenue de Tervueren
B-1150 Brussels
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70
Fax: 00 32 2 777 70 79
Email: eci@eurocopper.org
Website: www.eurocopper.org