

ESTUDO DO DESEQUILÍBRIO DE TENSÃO EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

GABRIEL F. TORREZAN, MÁRIO OLESKOVICZ, ANDRÉ L. DA S. PESSOA E PAULO E. T. MARTINS
*Laboratório de Sistemas de Energia Elétrica – LSEE, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação,
Escola de Engenharia de São Carlos – EESC, Universidade de São Paulo – USP
São Carlos, SP*

gabriel.torrezan@usp.br, olesk@sc.usp.br, alsp@usp.br e pauloetm@usp.br

Resumo - O presente artigo tem como objetivo mensurar e analisar o desequilíbrio de tensão em um sistema de distribuição, comparando algumas metodologias recorrentes na literatura para o cálculo. O distúrbio é quantificado, no geral, através do Fator K (FK). Deste modo, a fim de compreender melhor o desequilíbrio de tensão e suas definições, executou-se a simulação, via o *software* OpenDSS, do sistema de distribuição do IEEE de 13 barras. Através dos resultados dos quatro métodos empregados, foi realizada uma análise sobre as metodologias. Além disso, para o sistema em questão, estudou-se um método de redução do FK, através do ajuste do regulador de tensão.

Palavras-chaves—Sistema de distribuição; Qualidade da energia elétrica; Desequilíbrio de tensão; Fator K.

1. Introdução

O desequilíbrio de tensão é um distúrbio relacionado à falta de qualidade no fornecimento da energia elétrica. Segundo o PRODIST (ANEEL, 2018), o Desequilíbrio de Tensão (DT) está associado às alterações dos padrões trifásicos do sistema, sejam estes relacionados aos módulos, ou ângulos de fases, ou ambos, uma vez que as três tensões deveriam possuir o mesmo valor em amplitude e defasagem de 120° entre si. Ou seja, o DT pode ser definido como o desvio máximo da média das tensões trifásicas, dividido pela média das tensões trifásicas, expresso em porcentagem (Dugan *et al.*, 2002).

O DT pode ser causado, principalmente, por cargas monofásicas mal distribuídas no sistema, tais como fornos a arco e máquinas de solda, e a queima de fusíveis em uma fase de um banco de capacitores trifásicos, dentre outras (Paulilo, 2013).

Dentre suas consequências, caso as instalações elétricas operem sobre condições de tensão desequilibrada, os equipamentos podem apresentar funcionamento indevido. Nas máquinas síncronas as perdas no rotor são aumentadas significativamente. Pode ocorrer sobreaquecimento de motores de indução, devido ao aparecimento de conjugado pulsante no eixo da máquina, o que implica na redução da vida útil. Já no caso dos retificadores, estes passam a gerar harmônicos de terceira ordem e seus múltiplos (OLESKOVICZ, 2007).

Dentre as formas recorrentes na literatura de se amenizar o DT destaca-se o uso de um transformador regulador para o controle do módulo ou da fase da tensão, o uso de filtros passivos e ativos, bem como de compensadores de desequilíbrios e reguladores de tensão (Belchior, 2001).

São comuns sistemas de distribuição que apresentam DT. Apesar de conhecida a origem do problema, e alguns métodos para amenizar os seus danos, é difícil impedir a ocorrência deste distúrbio, visto a complexidade em distribuir os vários tipos de cargas igualmente no circuito, bem como de prever os seus instantes de operação (Paulilo, 2013).

Das diversas linhas de pesquisas realizadas relacionadas ao DT, muitos trabalhos visam compreender melhor as características do distúrbio, visando analisar suas causas e efeitos. A grande maioria dos trabalhos passa pela sua definição, quantificação e comparação entre as metodologias empregadas.

Como por exemplo, Bollen (Bollen, 2002) expõe que os diferentes métodos de cálculos do desequilíbrio podem gerar resultados distintos. Isto ocorre devido às diferentes definições que se tem sobre o DT.

Já a pesquisa relatada por Costa, Ferreira Filho e Nascimento (Costa, Ferreira Filho e Nascimento, 2007) visa analisar o DT (retratado pelo Fator K complexo) frente às variações das amplitudes e ângulos dos fasores de tensão pelo método das componentes simétricas. Tal procedimento também é referenciado na literatura correlata como *True Definition* (TD) (Dugan *et al.*, 2002), (Bollen, 2002).

Os impactos associados ao DT são principalmente estudados sobre máquinas elétricas. O trabalho desenvolvido por Eltom e Aziz (Eltom e Aziz, 2005) faz uma comparação entre o desempenho de dois motores alimentados em condições que caracterizam DT. O DT foi quantificado através do método NEMA (*National Electrical Manufacturers Association of USA*), frente ao qual se calculou o desempenho dos motores.

Ferreira Filho (Ferreira Filho, 2008) fez uma análise sobre a eficácia dos métodos mais comuns empregados para o cálculo do desequilíbrio, ou seja, do Fator K (FK). O principal ponto ressaltado no trabalho é que o FK é um índice inadequado para a quantificação do DT. Desta forma, o autor afirma a necessidade de novas investigações conducentes às ações que minimizem de forma eficiente os danosos efeitos que o DT pode ocasionar.

Echacarría, Acosta-Villarreal e Núñez (Echacarría, Acosta-Villarreal e Núñez, 2009) propuseram uma metodologia de ajuste de um regulador de tensão, baseada na tensão de sequência negativa vista no terminal de carga do equipamento. A finalidade foi de reduzir este parâmetro e, consequentemente, amenizar o DT.

Além desta introdução, este artigo está dividido em mais quatro seções. Na seção 2 são brevemente apresentados os métodos usados neste artigo para o cálculo do desequilíbrio de tensão. Na seção 3 é apresentado o sistema utilizado para os testes. Na seção 4 são apresentados os resultados e discussões decorrentes, e na seção 5 as conclusões.

Dentre os métodos mais recorrentes na literatura para o cálculo do FK, destacam-se os métodos das componentes simétricas (ou TD), NEMA, CIGRÉ e IEEE (Ferreira Filho, 2008). A seguir serão sucintamente apresentados os fundamentos dos respectivos métodos.

O método das componentes simétricas quantifica o FK através da decomposição das tensões de fase em três sequências equilibradas: a sequência positiva, negativa e zero. O cálculo do FK é dado por:

V_- é a magnitude da tensão de sequência negativa (valor eficaz); e V_+ é a magnitude da tensão de sequência positiva (valor eficaz).

O método das componentes simétricas é considerado o método de análise do DT matematicamente mais rigoroso, por levar em consideração a real configuração do sistema, empregando os valores dos módulos e dos ângulos das três fases.

Pelo método NEMA, segundo a norma NEMA-MG-14.34, o FK é calculado considerando V_m a partir dos módulos das tensões de linha (V_{ab} , V_{bc} e V_{ca}).

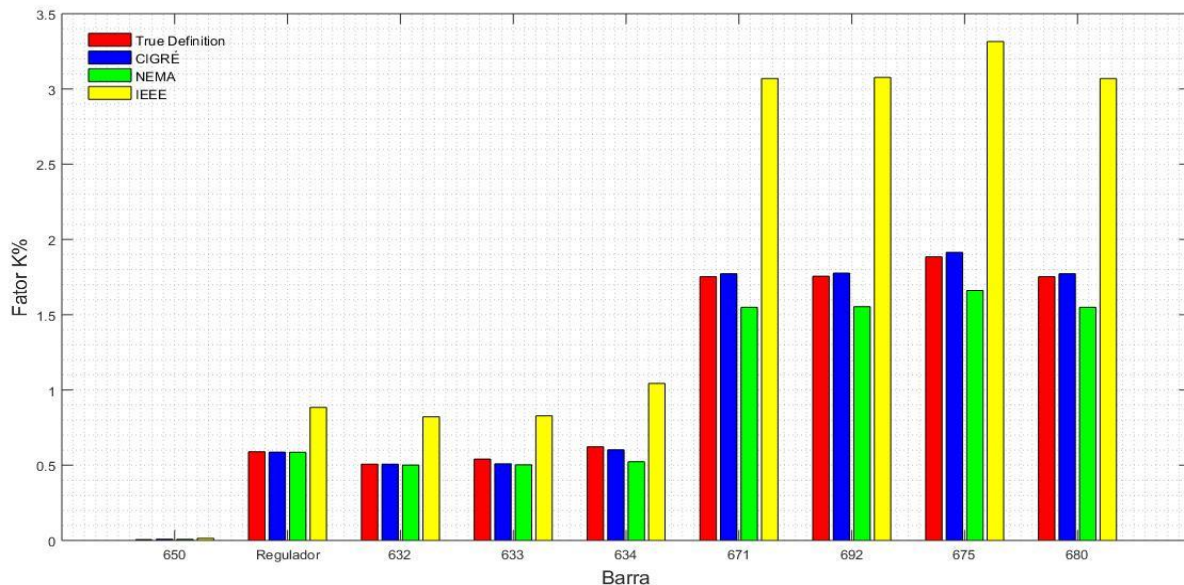


Figura 2. Comparação entre os cálculos do FK para cada um dos quatro métodos

Através da simulação do SD de 13 barras via o software *Open Distribution System Simulator - OpenDSS* (Dugan, 2016), foram obtidos os sinais das tensões trifásicas sobre o SD. Assim, com base nos quatro métodos anteriormente apresentados e nas equações de (1) a (6), foi obtido o FK para cada uma das barras trifásicas do sistema teste conforme apresentado na Figura 2.

Analisando a Figura 2, baseado nos limites estabelecidos (ANEEL, 2018), nota-se que os valores do FK observados não excederam o valor regulamentado no Brasil, uma vez que para todas as barras trifásicas, estes valores são inferiores a 2% para os métodos CIGRÉ e TD.

Além do estabelecido (ANEEL, 2018), existem diversas normas internacionais que também apresentam recomendações sobre o DT. Segundo (IEEE, 2009), para o método NEMA, a norma ANSI – C84.1-2011 estabelece como o limite máximo aceitável 3%. Ainda de acordo com IEEE (IEEE, 2009), para as metodologias das componentes simétricas ou CIGRÉ, o limite estabelecido é 2%.

Já a partir da análise da Figura 2, pode-se observar que, embora existam diversas metodologias para o cálculo do FK, cada uma delas culmina em valores absolutos diferentes. Logo, apenas expor o valor do FK não é o bastante para caracterizar o DT. Segundo (Rodriguez, Fuentes e Matta, 2015), ao se mencionar valores de desequilíbrios de tensão, deve ser citado qual dos métodos foi adotado para o cálculo do FK, pois existem muitas condições de desequilíbrio, e as definições podem resultar em valores distintos.

Estas divergências podem ocorrer, pois os métodos são baseados em metodologias distintas, utilizando parâmetros distintos para o cálculo. Alguns métodos, como NEMA, IEEE e CIGRÉ, envolvem a

tensão de linha para o cálculo do DT. Em contrapartida, o método TD é baseado nas componentes de sequência negativa e positiva. Consequentemente, faz uso das informações de amplitude e fase a partir do fasor de tensão observado.

É possível analisar que tanto o método CIGRÉ quanto a TD (componentes simétricas) implicam em valores próximos para o FK. Fato este esperado, uma vez que ambos os métodos são recomendados pela ANEEL (ANEEL, 2018). Outra observação importante, é que o método que apresentou os maiores valores foi o do IEEE, e este comportamento foi mantido para todas as barras.

Vale relembrar que o SD teste, realmente é desequilibrado. Através dos resultados das simulações via o OpenDSS e das cargas presentes no sistema, observa-se que a fase B é a menos carregada, conforme evidenciado na Tabela 1. Para praticamente todas as barras do sistema, esta fase apresenta os maiores níveis de tensão. Deste modo, ao ajustar o nível de tensão da fase B, será possível reduzir o FK do sistema.

Por se tratar de uma das metodologias propostas pela ANEEL (ANEEL, 2018), para a continuidade do trabalho, será utilizada a metodologia do CIGRÉ.

4.2. Ajuste do Regulador de Tensão

O ajuste da tensão da fase B pode ser feito através da alteração do *tap* do regulador de tensão do sistema teste. Este equipamento opera de modo análogo ao autotransformador, permitindo elevar ou abaixar a tensão no terminal secundário (TOSHIBA, 2012).

Segundo Buratti (Buratti, 2016), o regulador de tensão possui um Transformador de Potencial (TP), instalado no lado da carga, cuja função é amostrar a

Tabela 1. Tensões de fase para as barras do sistema

	Barra													
V [kV]	650	Regulador	646	645	632	633	634	611	684	671	692	675	652	680
V_A	2,401	2,536	-	-	2,436	2,428	0,274	-	2,355	2,360	2,359	2,344	2,342	2,360
V_B	2,401	2,491	2,445	2,449	2,471	2,466	0,279	-	-	2,498	2,498	2,504	-	2,498
V_C	2,401	2,536	2,402	2,407	2,411	2,405	0,272	2,307	2,312	2,317	2,316	2,312	-	2,317

tensão neste ponto. Se o valor medido for inferior a um valor de tensão pré-ajustado, o *tap* do equipamento é ajustado para cima, resultando na elevação de tensão em seu terminal. Caso contrário, se o valor amostrado for superior à tensão de referência, o *tap* é ajustado para baixo. Para que não haja comutação excessiva, é considerada uma faixa junto à tensão pré-ajustada ($V_{ref} \pm \Delta V$), cujo intuito é reduzir o desgaste dos contatos e elevando a durabilidade do equipamento.

Ainda segundo o autor, geralmente estes equipamentos possuem 32 possíveis posições de *tap*, sem contar o nível 0, sendo metade para elevação e a outra metade para redução da tensão. Tipicamente a faixa de regulação é de -10% a +10% com relação à tensão de regime do sistema. Portanto, baseado nestes números, cada possível ajuste do *tap* implicará em um acréscimo ou decréscimo de 0,625% da tensão no lado secundário.

A fim de determinar o *tap* que incidirá em um menor FK, inicialmente, foi estabelecido um valor de *tap* como ponto de partida, e, através das simulações foram obtidos os parâmetros do circuito, e calculado um FK médio para o sistema. A cada iteração (*i*) o valor do *tap* foi alterado, e os parâmetros anteriores calculados. Assim, com os valores de DT, das iterações *i* (iteração atual) e *i-1* (iteração anterior), foi possível compara-los apontando um acréscimo, ou

decréscimo, do *tap*. A lógica implementada para a seleção do ajuste, foi:

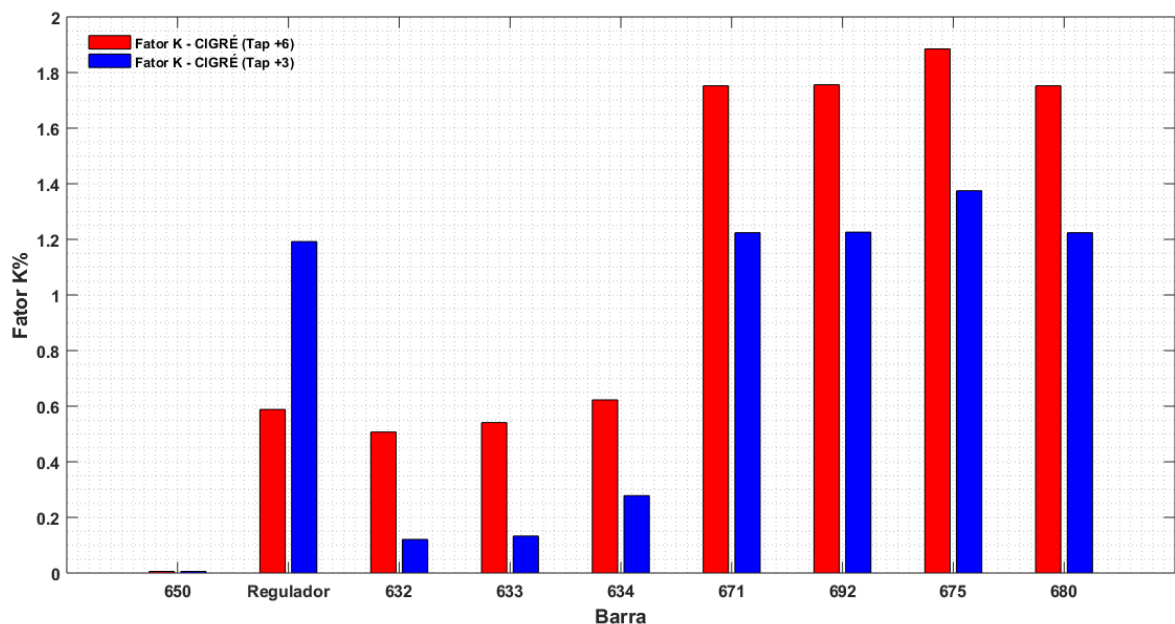
- Se o $FK_i > FK_{i-1}$: o sentido de variação do *tap* é alterado, bem como o *tap* em duas posições, no sentido contrário ao anterior.
- Se o $FK_i < FK_{i-1}$: o mesmo sentido de variação é mantido, e o *tap* é alterado em uma posição.

Este processo deve ser executado até que seja atendido o seguinte critério:

- Se $FK_{i-1} < FK_{i-2}$ e $FK_{i-1} < FK_i$: o *tap* da iteração *i-1* representa o ponto de menor valor do FK médio. Segundo este critério, independente do sentido que se varie, o valor médio do FK aumentará.

Além disso, a cada iteração foram verificados se os limites de tensão atendiam o limite estabelecido pela ANEEL (ANEEL, 2018), e também se considerou este parâmetro como critério de seleção da posição do *tap*.

Através da lógica descrita, foi determinado que a posição ótima, para esta análise, é +3. Nestas condições, o valor médio do FK foi de 0,678%. Vale ressaltar que a posição calculada foi diferente da estabelecida inicialmente pelo OpenDSS (+6). Isso ocorreu devido ao *software* não considerar o DT, além

Figura 3. Comparativo dos FK para as barras trifásicas do SD com ajuste do *tap* nas posições +6 e +3

da tensão em regime permanente, como foco principal do ajuste do regulador de tensão, como foi considerado para este ajuste.

A Figura 3 expõe os valores do FK, calculados através do método CIGRÉ para as posições de *tap* +6 e +3. Através da análise dos parâmetros, conclui-se que houve uma redução do FK para todas as barras do sistema, exceto para a barra onde o “Regulador” está fisicamente instalado. Entretanto, para este sistema teste, isto não caracteriza um problema, visto que na posição de instalação do regulador, não há cargas. Vale apontar que a maior redução para o FK foi de 76% para a barra 632 e que, na média, a redução foi de quase 25%.

5. Conclusão

Com base nos parâmetros do SD teste, obtidos via as simulações realizadas no software *OpenDSS*, calculou-se o FK através dos métodos mais recorrentes na literatura: TD (componentes simétricas), CIGRÉ, NEMA e IEEE. Além disso, através do estudo realizado sobre o sistema teste, foi também considerado um ajuste da posição do *tap* do regulador de tensão.

Por se tratarem de metodologias diferentes, com distintas definições e cálculos, a aplicação dos métodos resultou em valores absolutos distintos para uma mesma barra. O método da TD e do CIGRÉ apresentaram, praticamente, os mesmos valores, e o do IEEE foi o que mais se distanciou dos demais.

Para este SD teste em questão, e para a finalidade deste estudo, o ajuste do regulador de tensão apresentou-se como uma possível solução para amenizar o DT observado. Observou-se que após um ajuste adequado da posição do *tap*, houve uma redução média de quase 25% do FK para todo o SD.

Referência Bibliográfica

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, (2018). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST: Módulo 8. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 728/2016.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA, (2000). Contribuição para a Normalização da Qualidade da Energia Elétrica – Harmônicos e Desequilíbrios nas Redes Elétricas. Relatório Parcial 4 – Estado da Arte. Universidade Federal de Uberlândia.

ANSI – American National Standards Institute, 2011, ANSI C84.1 – Voltage Ratings (60 Hertz).

BELCHIOR, F. N., (2001). QEE – Desequilíbrios. Universidade Federal de Itajubá, Grupo de Estudos da Qualidade da Energia Elétrica. Disponível em:

<http://www.ggee.unifei.edu.br/arquivos_upload/disciplinas/20/Desequilíbrios.pdf>. Acesso em: ago. 2016.

BOLLEN M. H. J., Novembro (2002). Definitions of Voltage Unbalance. IEEE Power Eng. Rev. Mag., v. 22, n. 11, pg. 49-50.

BURATTI, R. P., (2016). Reguladores de Tensão em Redes Elétricas com Alta Penetração de Cargas Não Lineares. 2016. 137 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Ilha Solteira.

COSTA, M.V.C.; FERREIRA FILHO, A.L.; NASCIMENTO, F.A.O., 2007. Análise do Comportamento do Fator K Complexo e das Componentes Simétricas com a Variação dos Fasores de Tensão, 2007. VII Conferência Brasileira Sobre Qualidade da Energia Elétrica – CBQEE.

DUGAN, R. C., Março 2016. Reference Guide: The Open Distribution System Simulator (OpenDSS). Electric Power Research Institute, Revision 7.6.

DUGAN, R. C.; McGRANAGHAN, M. F.; SANTOSO, S. and BEATY, H. W (2002). Electrical Power System Quality, MCGRAW-HILL, 2nd Edition.

ECHAYARRÍA, R; ACOSTA-VILLARREAL, G.; NÚÑEZ, C. Na Unbalance Voltage Compensator Using a Fast On-Load Tap Changing Regulator. Universidad Politécnica de Victoria e Universidad Autónoma de San Luis Potosí. Ciudad Victoria e San Luis Potosí, México.

ELTOM, A.; AZIZ, M.A., 2005. The Economics of Energy Efficient Motors During Unbalanced Voltage Conditions. In: Inaugural IEEE PES Conference and Exposition. Africa Durban, South Africa.

FERREIRA FILHO, A.L. (2008). Análise do Comportamento do Fator do Desequilíbrio Frente a Variação da Amplitude e do Ângulo da Tensão. Faculdade de tecnologia. Departamento de Energia Elétrica. Universidade de Brasília. Brasília: PPGE.TD.

IEEE-PES Power & Energy Society, 2000-2010. IEEE-PES. Distribution Test Feeders. Disponível em: <<https://ewh.ieee.org/soc/pes/dsacom/testfeeders/>>. Acesso em: abr. de 2016.

IEEE (2009). IEEE 1159-2009 : recommended practice for monitoring electric power quality.[S.l.].

OLESKOVICZ, M. (2007). Apostila de Qualidade da Energia Elétrica (SEL5749). Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação, 2007.

PAULILO, G., Março 2013. Desequilíbrios de Tensão. O Setor Elétrico, Brasil, ed. 86, cap. 3, p. 42-48.

RODRIGUEZ, A. D.; FUENTES, F. M; MATTA, A. J., 2015. Comparative Analysis Between Voltage Unbalance Definition. In: Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA). Bogota, Colombia.

TOSHIBA INFRAESTRUTURA AMÉRICA DO SUL LTDA, Junho 2012. Manual de Instruções para Reguladores de Tensão Monofásicos. Revisão 3. 57 p.