

CURTO-CIRCUITO EM REDES DE DISTRIBUIÇÃO DE 13,8 KV

José Adilson Silva de Jesus¹

Graziella Ferreira dos Santos²

Resumo

A energia elétrica é um dos recursos fundamentais solicitados pelo homem na atualidade. Sua falta ou escassez causa sérios problemas de sobrevivência e talvez a falência de sistemas econômicos. Os principais motivos que levam a interrupção do fornecimento de energia elétrica são os curtos-circuitos na rede, curtos-circuitos chamados de francos ou arcos elétricos. Neste artigo trataremos dos curtos circuitos francos, por serem os mais frequentes e de maior prejuízo para as empresas concessionárias de energia elétrica e seus clientes.

Palavras Chaves: Redes Radiais, Smart Grid, Controle Adaptativo.

Abstract

Electrical energy is the fundamental resource required by man today. Their lack or scarcity causes serious problems of survival and perhaps the bankruptcy of economic systems. The main reasons that lead to the interruption of the electric power supply are the short circuits in the network, short circuits called francs or by electric arcs. In this article we will deal with short circuits frank. Because they are the most frequent and of greater loss for the concessionaires of electric energy.

Key Words: Radial Networks, Smart Grid, Adaptive Control.

¹ Professor - SENAI "Jairo Cândido". Mestre em Engenharia de Automação e Controle, Engenheiro Eletricista. Instituto Federal de Ciência e Tecnologia de São Paulo. Email: jose.jesus@sp.senai.br

² Graduanda em Tecnologia em Automação Industrial pela FATEC de São Bernardo do Campo "Adib Moisés Dib". Email: grazy_gfs@hotmail.com

1 Introdução

Nos sistemas atuais de distribuição de energia elétrica, um dos problemas suportados pelas redes e administrados pelas atuais concessionárias do sistema de distribuição no Brasil e no mundo são os curtos circuitos do sistema, os chamados de curto circuito franco. Definido como aquele que se apresenta, quando duas fases do sistema se tocam ou com o neutro da rede elétrica, causando a interrupção do fornecimento de energia elétrica e a consequente oneração ao distribuidor, quando o mesmo não vem a restabelecer o sistema no prazo definido pelo Módulo 8 do PRODIST. Para o consumidor, em geral, o sistema elétrico parece comporta-se sempre em estado permanente, equilibrado e com capacidade infinita; entretanto, por ele ser um sistema interligado, composto por vários equipamentos, estará sujeito às perturbações provenientes de falhas ou defeitos que acontecem em regiões distantes do ponto de fornecimento. A determinação da corrente de curto-circuito nas redes de distribuição de energia elétrica de alta tensão é de fundamental importância para a elaboração dos ajustes das proteções e coordenação dos diversos elementos de segurança. Os valores dessas correntes são baseados no conhecimento das impedâncias das redes elétricas e do valor da fonte de tensão ao qual o sistema está conectado.

As correntes de curto-circuito adquirem valores de grande intensidade, porém com duração geralmente limitada a frações de segundos. São provocadas mais comumente pela perda de isolamento de algum elemento energizado do sistema elétrico, pela falta de manutenção preventiva e envelhecimento das isolações elétrico. Os danos provocados na instalação ficam condicionados à intervenção correta dos elementos de proteção. Os valores de pico estão, normalmente, compreendidos entre 10 e 100 vezes a corrente nominal no ponto de defeito da instalação e dependem da localização deste. Este fluxo de corrente elevada com a consequente liberação localizada de energia, provocará danos de grande extensão nas redes de distribuição, sobretudo nos transformadores e nos geradores. Além das avarias provocadas com a queima de alguns componentes da instalação, as correntes de curto-circuito geram solicitações de natureza mecânica, atuando, principalmente, sobre os barramentos, chaves e condutores, ocasionando o rompimento dos apoios e

deformações na estrutura dos quadros de distribuição, caso o dimensionamento destes não seja adequado aos esforços eletromecânicos resultantes. Neste artigo será considerado como fonte de corrente de curto-circuito todo componente elétrico ligado ao sistema que passa a contribuir com a intensidade da corrente de defeito, como é o caso dos geradores, condensadores síncronos e motores de indução e o transformador como componente de elevada impedância inserido no sistema elétrico.

2 Caracterização da corrente de curto-circuito

A análise dos indicadores de conformidade de nível de tensão em regime permanente da Companhia CPFL Paulista, como visto na Tabela 1.

Tabela 1: Indicador de Conformidade do Nível de tensão em regime Permanente. Fonte Aneel

Indicadores de conformidade do nível de tensão em regime permanente				
Região SUDESTE				
CPFL-Paulista				
ANO	DRCE	DRPE	Quantidade de compensações pagas	Valor de compensações (R\$)
2017	0,44	1,24	718	76.714,34
2016	0,41	1,30	443	105.852,52
2015	0,40	0,69	365	44.529,80
2014	0,00	0,22	113	51.896,30
2013	0,00	0,11	373	93.031,38
2012	0,00	0,16	240	89.594,73
2011	0,00	0,41	87	15.231,62
2010	0,00	0,15	0	0,00
2009	0,00	0,18		
2008	0,01	0,17		
2007	0,00	0,11		
2006	0,00	0,12		
2005	0,00	0,50		
2004	0,08	0,64		
2003	0,27	1,35		
As informações para o ano corrente são parciais, pois o envio dos dados ainda não está completo				
A quantidade e o valor pago das compensações só estão disponíveis a partir de 2010				
DRCE	Média dos indicadores individuais DRC			
DRPE	Média dos indicadores individuais DRP			
Os indicadores são passíveis de alterações após fiscalização da ANEEL.				

Demonstram de maneira indireta a relação das falhas causadas por curto circuito, através das compensações pagas pela companhia aos seus clientes. No ano de 2017 ocorreu o maior número de compensações, causados por curtos circuitos. Na Tabela 2, onde os tempos médios de atendimento

prestados pela concessionária descrevem a presença de falhas/defeitos do sistema causados por curto circuito na rede de distribuição elétrica e o tempo de atendimento para restabelecimento das condições de funcionamento do sistema.

Tabela 2: Tempos médios de atendimento para falhas/defeitos do sistema de distribuição

Tempos médios de atendimento					
CPFL-Paulista - Mensal / 2017					
MÊS	NIE	NUMOCORR	TMD	TME	TMP
Janeiro	18358	32697	37,65	52,42	156,04
Fevereiro	13794	25467	34,78	54,43	149,01
Março	15329	28914	34,34	55,95	128,88
Abril	11956	21738	34,67	47,83	101,66
Maio	12940	24176	36,38	54,33	106,84
Junho	10474	20024	35,91	39,83	77,11
Julho	11023	20079	35,42	39,88	76,86
Agosto	13796	25031	39,26	42,96	110,45
Setembro	11751	21944	41,95	59,22	116,15
Outubro	17217	31963	39,09	67,32	168,60
Novembro	18374	33230	40,21	70,30	172,94
CPFL-Paulista - ANUAL / 2017					
ANO	NIE	NUMOCORR	TMD	TME	TMP
2017	155012	285263	37,38	54,45	129,54
Os valores mensais dos indicadores NIE e NUMOCORR são obtidos pela soma dos valores informados para cada conjunto em um dado mês, enquanto que os valores mensais dos indicadores TMD, TME e TMP são obtidos das médias ponderadas desses indicadores pelo número de ocorrências (NUMOCORR). O mesmo procedimento foi adotado para os valores anuais mostrados para a distribuidora					
NIE	Número de Ocorrências Emergenciais com Interrupção de Energia Elétrica				
NUMOCORR	Número de Ocorrências Emergenciais				
TMD	Tempo Médio de Deslocamento (minutos)				
TMP	Tempo Médio de Preparação (minutos)				
TME	Tempo Médio de Execução (minutos)				
Os indicadores são passíveis de alterações após fiscalização da ANEEL.					

As Tabelas 1 e 2 se referem a curtos circuitos do tipo fase-fase-terra. A caracterização do fenômeno curto circuito na rede de distribuição faz-se necessária e seu modelamento torna a rede e suas particularidades mais conhecidas. A partir do evento transitório como o curto circuito a parametrização dos elementos responsáveis pela seletividade e coordenação da falha/defeito, torna a rede de distribuição de energia elétrica menos susceptível a falhas catastróficas. Desta forma um estudo que demonstre a influência dos valores das correntes de curto circuito em função da localização das fontes supridoras, fornecem os termos transientes e sua consequente formulação matemática simplificada. Os curtos-circuitos do tipo franco, com sua fase em contato direto com uma massa metálica aterrada, ou do tipo a arco, quando a corrente da fase circula através de um arco elétrico (condutor gasoso) para qualquer uma das fases ou para a terra, resultam em maiores correntes circulando no sistema elétrico de distribuição. Para os curtos-circuitos

em que a sua corrente é igual ou inferior à corrente de carga, são denominados curtos-circuitos de alta impedância para a terra. No caso de curtos-circuitos trifásicos, é um curto trifásico equilibrado, existindo apenas a sequência positiva para ser analisada. (SATO, 2015).

2.1 Análise das formas de onda das correntes de curto-circuito

As correntes de curto-circuito, ao longo de todo o período de permanência da falta, assumem formas diversas quanto à sua posição em relação ao eixo dos tempos.

2.1.1 Corrente simétrica de curto-circuito

É aquela em que o componente senoidal da corrente se forma simetricamente em relação ao eixo dos tempos. Conforme a Figura 1, esta forma de onda é característica das correntes de curto-circuito permanentes. Devido ao longo período em que esta corrente se estabelece no sistema, ela é utilizada nos cálculos a fim de determinar a capacidade que devem possuir os equipamentos para suportar os efeitos térmicos correspondentes.

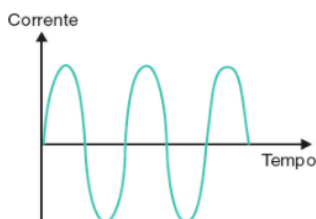


Figura 1: Corrente de Curto Circuito Simétrica

2.1.2 Corrente assimétrica de curto-circuito

É aquela em que o componente senoidal da corrente se forma de maneira assimétrica em relação ao eixo dos tempos e pode assumir as seguintes características. Corrente parcialmente assimétrica Corrente totalmente assimétrica. Neste caso, a assimetria é de forma parcial, conforme a Figura 2.

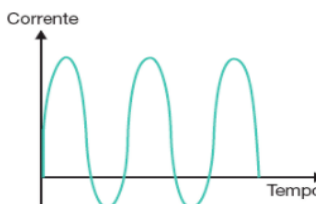


Figura 2: Corrente de Curto Circuito Parcialmente Simétrica

Corrente inicialmente assimétrica e posteriormente simétrica. Neste caso, toda a onda senoidal se situa acima do eixo dos tempos, conforme a Figura 3.

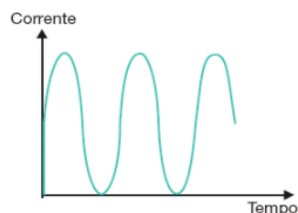


Figura 3: Corrente de Curto Circuito Totalmente Assimétrica

Na Figura 4, nos primeiros instantes de ocorrência do defeito, a corrente de curto-circuito assume a forma assimétrica e, em seguida, devido aos efeitos atenuantes, adquire a forma simétrica.

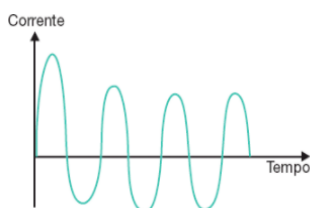


Figura 4: Corrente inicialmente Simétrica/assimétrica

3 Localização das fontes de corrente de curtos-circuitos

Serão analisados dois casos nos processos de curto-circuito. O primeiro refere-se aos defeitos ocorridos nos terminais do gerador ou muito próximos a ele, em que a corrente apresenta particularidades próprias em diferentes estágios do processo, e o segundo refere-se aos defeitos ocorridos longe dos terminais do gerador, que é o caso mais comum das redes de distribuição.

3.1 Curto-circuito nos terminais dos geradores

A principal fonte das correntes de curto-circuito são os geradores. No gerador síncrono, a corrente de curto-circuito, cujo valor inicial é muito elevado, vai decrescendo até alcançar o regime permanente. Assim, pode-se afirmar que o gerador é dotado de uma reatância interna variável, compreendendo inicialmente uma reatância pequena até atingir o valor constante, quando o

gerador alcança seu regime permanente. Para analisar os diferentes momentos das correntes de falta nos terminais do gerador, é necessário conhecer o comportamento dessas máquinas quanto às reatâncias limitadoras, conceituadas como reatâncias positivas. Essas reatâncias são referidas à posição do rotor do gerador em relação ao estator.

3.2 Curto-circuito distante dos terminais do gerador

Com o afastamento do ponto de curto-circuito dos terminais do gerador, a impedância acumulada das linhas de transmissão e de distribuição é tão grande em relação às impedâncias do gerador que a corrente de curto-circuito simétrica já é a de regime permanente, acrescida apenas do componente de corrente contínua. Neste caso, a impedância da linha de transmissão predomina sobre as impedâncias do sistema de geração, eliminando sua influência sobre as correntes de curto-circuito decorrentes. Assim, nas instalações elétricas alimentadas por fontes localizadas distantes, a corrente alternada de curto-circuito permanece constante ao longo do período, conforme se mostra na Figura 5.

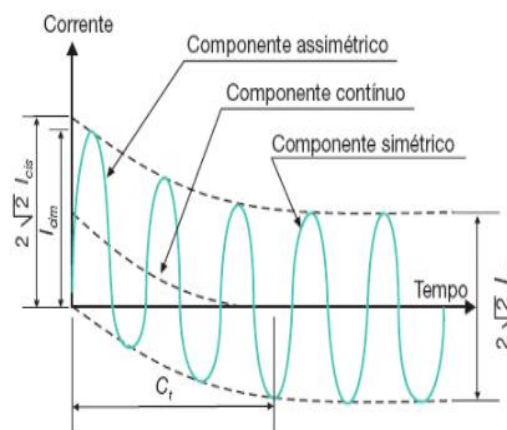


Figura 5: Distribuição da Corrente de Curto Circuito

Neste caso, a corrente inicial de curto-circuito é igual à corrente permanente. A corrente de curto-circuito assimétrica apresenta dois componentes na sua formação, ou seja:

- Componente simétrico

É a parte simétrica da corrente de curto-circuito.

- Componente contínuo

É a parte da corrente de curto-circuito de natureza contínua.

O componente contínuo tem valor decrescente e é formado em virtude da propriedade característica do fluxo magnético que não pode variar bruscamente, fazendo com que as correntes de curto-circuito nas três fases se iniciem a partir do valor zero. A qualquer instante, a soma desses dois componentes mede o valor da corrente assimétrica. A Figura 5 mostra graficamente os componentes de uma onda de corrente de curto-circuito. Com base nas curvas da Figura 5, podemos expressar os conceitos fundamentais que envolvem a questão da modelagem da corrente de curto circuito:

a) Corrente alternada de curto-circuito simétrica

É o componente alternado da corrente de curto-circuito que mantém em todo o período uma posição simétrica em relação ao eixo dos tempos.

b) Corrente eficaz de curto-circuito simétrica permanente (i_{cs})

São a corrente de curto-circuito simétrica, dada em seu valor eficaz, que persiste no sistema, depois de decorridos os fenômenos transitórios.

c) Corrente eficaz inicial de curto-circuito simétrica (i_{cis})

É a corrente, em seu valor eficaz, no instante do defeito. O gráfico da Figura 5 esclarece a obtenção do valor de i_{cis} em seus vários aspectos. Quando o curto-circuito ocorre longe da fonte de suprimento, o valor da corrente eficaz inicial de curto-circuito simétrica (i_{cis}) é igual ao valor da corrente eficaz de curto-circuito simétrica (i_{cs}), conforme se mostra na mesma figura.

d) Impulso da corrente de curto-circuito (i_{cim})

É o valor máximo da corrente de defeito, dado em seu valor instantâneo, e que varia conforme o momento da ocorrência do fenômeno.

e) Potência de curto-circuito simétrica (P_{cs})

É a potência correspondente ao produto de tensão de fase pela corrente simétrica de curto-circuito. Se o defeito for trifásico, aplicamos a este fator $\sqrt{3}$.

Observar, no entanto, que a tensão no momento do defeito é nula, porém a potência resultante é numericamente igual ao que se definiu antes.

4 Formulação Matemática da Corrente de Curto Circuito

Para o estudo de curto-circuito monofásico completo são necessárias as matrizes de impedâncias de sequências positiva e zero. A matriz de sequência zero é formada aplicando os mesmos algoritmos utilizados na sequência positiva; entretanto, a existência de linhas com acoplamentos mútuos na rede de sequência zero do sistema de energia elétrica exige um tratamento a parte. As correntes de curto-circuito apresentam uma forma senoidal, cujo valor em qualquer instante pode é dado pela Equação 1.

$$i_{cc(t)} = \sqrt{2} * i_{cs} * [\sin(\omega t + \beta - \theta) - e^{\frac{-t}{Ct}} * \sin(\beta - \theta)] \quad (1)$$

$i_{cc(t)}$ - valor instantâneo da corrente de curto-circuito, em determinado instante t ;

i_{cs} - valor eficaz simétrico da corrente de curto-circuito;

t - tempo durante o qual ocorreu o defeito no ponto considerado, em s;

Ct - constante de tempo, dada pela Equação 2:

$$C_t = \frac{X}{2 * \pi * F * R} \quad (2)$$

β - deslocamento angular, em graus ou radianos, medido no sentido positivo da variação dv/dt , a partir de $V = 0$, até o ponto $t = 0$ (ocorrência do defeito).

θ - ângulo que mede a relação entre a reatância e a resistência do sistema e tem sem valor calculado pela Equação 3:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{X}{R} \quad (3)$$

R - resistência do circuito, desde a fonte geradora até o ponto de defeito, em Ω ou pu ;

X - reatância do circuito, desde a fonte geradora até o ponto de defeito, em Ω ou pu ;

ωt - ângulo de tempo;

F - frequência do sistema, em Hz.

O primeiro termo da Equação 1, ou seja, $\sqrt{2} * i_{cs} * [\sin(\omega t + \beta - \theta)]$, representa o valor simétrico da corrente alternada da corrente de curto-circuito de efeito permanente. Por outro lado, o segundo termo da Equação 1, isto é, $\sqrt{2} * i_{cs} * [e^{\frac{-t}{\tau}} * \sin(\beta - \theta)]$ representa o valor do componente contínuo(LIMA,2006).

A Figura 6 mostra a contagem do ângulo β , que é nulo quando a ocorrência do defeito se dá no ponto nulo da tensão do sistema, demonstrado na Figura 6(a). Quando o defeito ocorre no ponto em que a tensão está em seu valor máximo, a sua representação é vista na Figura 6(b), para o valor de $\beta = 90^\circ$.

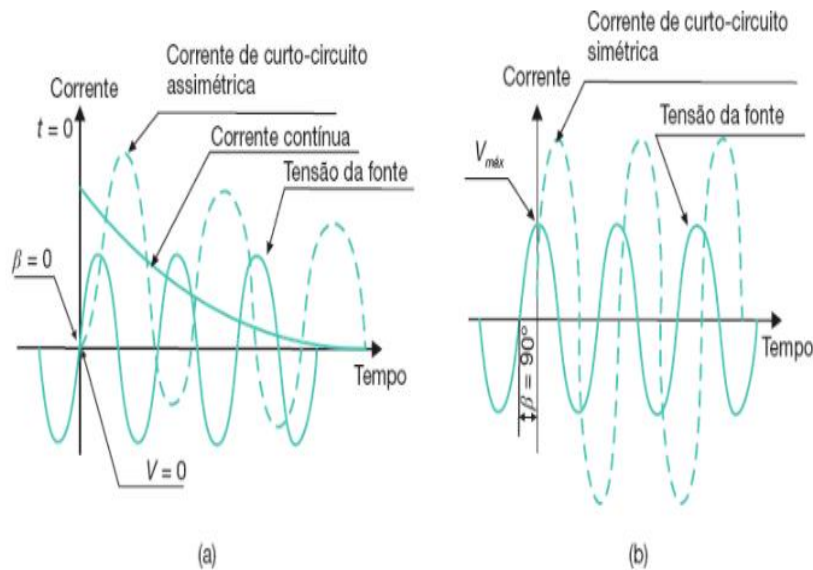


Figura 6: Corrente de curto-circuito em função do valor da tensão para $t = 0$.

Para o instante $t = 0 \rightarrow \beta = 0^\circ$, estas condições de análise para Equação 1 é reduzida às expressões, após as simplificações matemáticas têm-se a Equação(4).

$$i_{cc(t)} = \sqrt{2} * i_{cs} * [\sin(\omega t + 0 - 90) - e^{\frac{-t}{\tau}} * \sin(0 - 90)]$$

$$i_{cc(t)} = \sqrt{2} * i_{cs} * [\sin(\omega t + \beta - \theta) + e^{\frac{-t}{\tau}}] \quad (4)$$

Nos circuitos altamente indutivos, em que a reatância X é extremamente superior a resistência R , a corrente de curto-circuito é constituída somente de

Após a medição da impedância da rede, a aplicação das equações para definição do valor da corrente de curto-circuito torna-se trivial para o curto circuito apresentado na Figura 8.

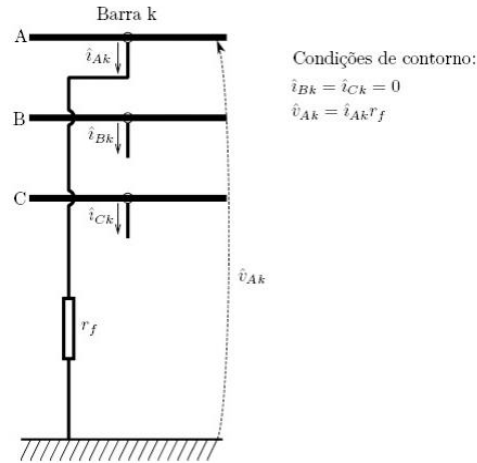


Figura 8: Curto Circuito no barramento OPE (Barramento K)

Para esta condição de trivialidade o desenvolvimento do modelo matemático para a condição de curto circuito fase-fase-terra, utilizaremos o método da Matriz $\dot{Z}$. Para o sistema em análise, as matrizes impedâncias $\dot{Z}^1$, $\dot{Z}^2$, $\dot{Z}^0$ e suas inversas, as matrizes admitâncias $\dot{Y}^1$, $\dot{Y}^2$, $\dot{Y}^0$ serão definidas para a rede em estudo, as correntes de sequência e as correntes nas fases que aparecem no momento do curto circuito franco são dadas pelas Equações 6, 7, 8 e 9:

$$\dot{I}_{A_k}^1 = \frac{\dot{V}_{A_k}^{pre\ falta}}{\dot{Z}_{kk}^1 + \frac{\dot{Z}_{kk}^2 * \dot{Z}_{kk}^0}{\dot{Z}_{kk}^2 + \dot{Z}_{kk}^0}} \quad (6)$$

$$\dot{I}_{A_k}^2 = -\dot{I}_{A_k}^1 * \frac{\dot{Z}_{kk}^0}{\dot{Z}_{kk}^2 + \dot{Z}_{kk}^0} \quad (7)$$

$$\dot{I}_{A_k}^0 = -\dot{I}_{A_k}^1 * \frac{\dot{Z}_{kk}^1}{\dot{Z}_{kk}^2 + \dot{Z}_{kk}^0} \quad (8)$$

$$\dot{I}_{A_k}^{total} = 0 \quad (9)$$

A matriz de corrente de sequência é dada pela Equação 10.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{A_k}^{total} \\ \dot{I}_{B_k}^{total} \\ \dot{I}_{C_k}^{total} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{I}_{A_k}^0 \\ \dot{I}_{A_k}^1 \\ \dot{I}_{A_k}^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Os parâmetros necessários para o modelamento de uma linha de distribuição são: os operadores a , a^2 e a^3 (MAMEDE, 2016). Para a corrente de terra no momento da falta, sua expressão matemática é dada pela Equação 11.

$$\dot{I}_{terra} = \dot{I}_{B_k}^{total} - \dot{I}_{C_k}^{total} = 3 * \dot{I}_{A_k}^0 \quad (11)$$

Modelando as tensões das sequências positiva, negativa e zero para o sistema em análise apresentado na Figura 8, têm-se as Equações:

$$\dot{V}_{A_k}^{total} = \dot{V}_{A_k}^1 + \dot{V}_{A_k}^2 + \dot{V}_{A_k}^0 \quad (12)$$

$$\dot{V}_{B_k}^{total} = \dot{V}_{C_k}^{total} = 0 \quad (13)$$

Assumindo que no sistema as tensões de pré falta no barramento k são iguais a tensão de pré falta nas barras OPE-1 e OPE-2 de acordo com a Figura 7. As Equações que descrevem este comportamento para o sistema em estudo são:

$$\dot{V}_{A_n}^1 = \dot{V}_{A_n}^{pre\ falta} - \dot{I}_{A_k}^1 * \dot{Z}_{n_k}^1 \quad (14)$$

$$\dot{V}_{A_n}^2 = -\dot{I}_{A_k}^2 * \dot{Z}_{n_k}^2 \quad (15)$$

$$\dot{V}_{A_n}^0 = -\dot{I}_{A_k}^0 * \dot{Z}_{n_k}^0 \quad (16)$$

Para a corrente $\dot{I}_{l_{im}}$ na fase A percorrendo as barras de alimentação do sistema na direção i-m(barra - carga) é formada por uma reatância serie e é definida a partir das tensões nos terminais $\dot{V}_{A_i}$ e $\dot{V}_{A_m}$ e dos parâmetros equivalentes da linha de transmissão. Dados pelas Equações 17, 18, 19 e 20 (SEN, 1997).

$$\dot{I}_{l_{im}}^1 = \frac{\dot{V}_{A_i}^1 - \dot{V}_{A_m}^1}{\dot{Z}_{l_{im}}^1} \quad (17)$$

$$\dot{I}_{l_{im}}^2 = \frac{\dot{V}_{A_i}^2 - \dot{V}_{A_m}^2}{\dot{Z}_{l_{im}}^2} \quad (18)$$

$$\dot{I}_{l_{im}}^0 = \frac{\dot{V}_{A_i}^0 - \dot{V}_{A_m}^0}{\dot{Z}_{l_{im}}^0} \quad (19)$$

$$\dot{I}_{l_{im}}^{total} = \dot{I}_{l_{im}}^1 + \dot{I}_{l_{im}}^2 + \dot{I}_{l_{im}}^0 \quad (20)$$

$$\dot{I}_0 = [A^T] \dot{I}_{0rm} \quad (22)$$

A forma matricial para a determinação do curto-circuito visto pelo centro de Operações é dada por:

$$\begin{bmatrix} \dot{v}_{0p-q} \\ \dot{v}_{0r-s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{v}_{0p} \\ \dot{v}_{0q} \\ \dot{v}_{0r} \\ \dot{v}_{0s} \end{bmatrix} \quad (23)$$

As correntes nodais em função das correntes nos ramos são as Equações 24, 25, 26 e 27.

$$\dot{I}_{0p} = \dot{I}_{0p-q} \quad (24)$$

$$\dot{I}_{0p} = -\dot{I}_{0p-q} \quad (25)$$

$$\dot{I}_{0p} = \dot{I}_{0r-s} \quad (26)$$

$$\dot{I}_{0p} = -\dot{I}_{0r-s} \quad (27)$$

E a forma matricial é descrita pela Equação 28(POWELL, 2009).

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{0p} \\ \dot{I}_{0q} \\ \dot{I}_{0r} \\ \dot{I}_{0s} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \dot{I}_{0p-q} \\ \dot{I}_{0r-s} \end{bmatrix} \quad (28)$$

e, portanto, para este caso, a matriz de incidência A será:

$$|A| = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{vmatrix}$$

5 Monitoramento da rede de distribuição de Energia

O Sistema digital de supervisão e controle (SDSC) monitora os parâmetros do sistema (tensão, corrente, potência, frequência). Estes parâmetros poderiam

ser indicados na unidade pu . Sendo vantajosa a utilização deste método pelos seguintes aspectos:

- A impedância em valor de pu de um transformador é a mesma, independente do lado de alta ou de baixa.
- A impedância em valor de pu de um transformador trifásico independe do seu tipo de conexão.
- O método pu independe dos níveis de tensão e deslocamento angular através de transformadores, cujas tensões de base nos enrolamentos são proporcionais ao número de espiras nos enrolamentos (FITZGERALD, 1971).

No sistema radial com suporte a falha, monitoramento e manutenção do sistema no centro de operações, na ocorrência de um curto circuito é feita uma manobra, visando isolar a área atingida pelo evento – curto circuito até o restabelecimento da condição funcional da rede. A Figura 11 apresenta a área de ocorrência do evento.

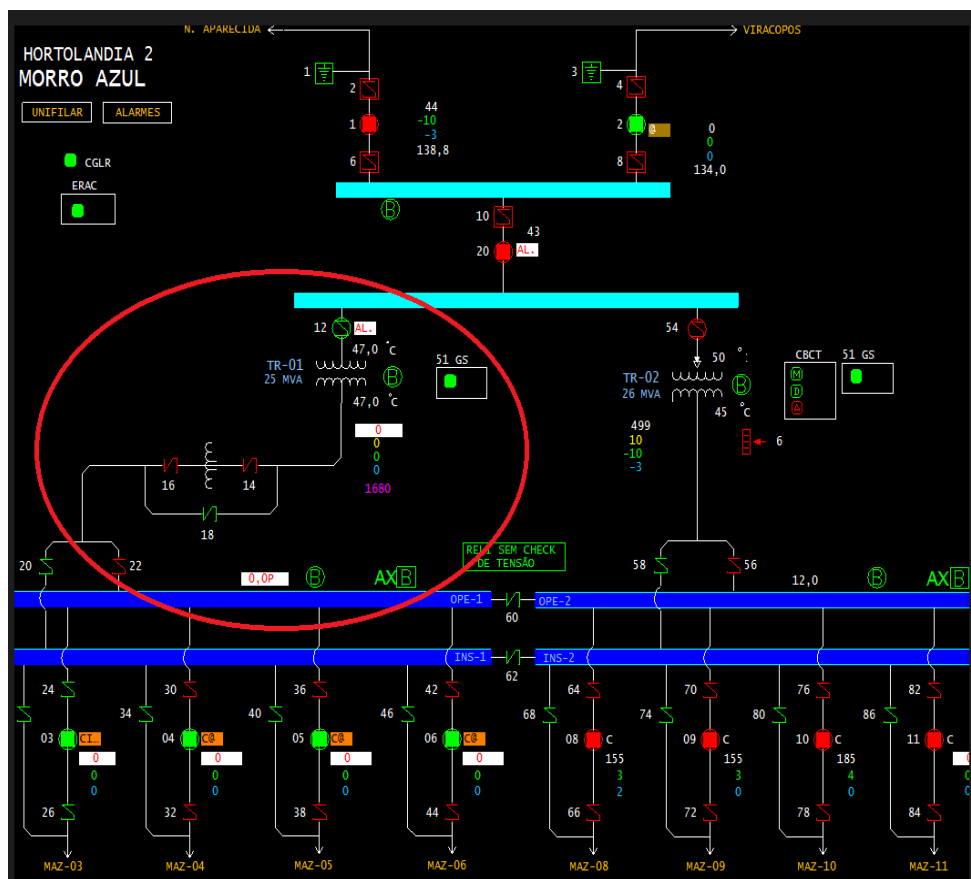


Figura 11: Área de ocorrência do curto circuito

A descrição do evento na tela do operador aparece conforme descrita na Figura 12.

Horário	Evento	Disposit - Ação / Valor - Unid	Descrição Dispositivo	Descrição (Entidade + Diagnóstico)	Origem
09:57:58	ALESTC	DISJUN LIGOU	DISJUNTOR	BAURU CTEEP BAU 1 138KV	NO
09:58:06	UTRRET			M. APRAZIV	NO
09:58:17	MANUT	DISJUN	DISJUNTOR	BAURU CTEEP BAU 1 138KV	SE Daniela
09:58:30	ALINF	13.80 KV		SAO JOSE N. BARRA 2 13.8KV	NO
09:58:46	COPER	DISJUN LIGAR	DISJUNTOR	JACAREZINH GERAL 2 11.4KV	SE FilipeRoldar
09:58:47	UTRRET			STO AARAC 2	NO
09:58:50	CEXEC	DISJUN LIGOU	DISJUNTOR	JACAREZINH GERAL 2 11.4KV	NO FilipeRoldar
09:59:24	LIRINF	132.30 AMP		JACAREZINH GERAL 2 11.4KV	NO
09:59:46	CEXSIM	SECLIN FECHOU	SECCIONADORA DE LINHA	CAFELANDIA ALIMENT 7 11.9KV	SE ThiagoHM
10:00:06	ALINF	22.98 KV		SAO BENTO BARRA 1 23KV	OE
10:03:11	CEXSIM	SECBY FECHOU	SECCIONADORA DE BY-PASS	TIMBURI GERAL 11.9KV	SE FilipeRoldar
10:03:13	CEXSIM	SEC1 ABRIU	SECCIONADORA 1	TIMBURI GERAL 11.9KV	SE FilipeRoldar

Figura 10: Tela de Evento para tomada de decisão para falhas do sistema

A falta de informações mais detalhadas sobre a falha no sistema diante do evento curto circuito, faz com que o Operador do Sistema fundamente sua decisão em relação à sua experiência e casos vivenciados pelo departamento na tomada de decisão. Para um sistema modelado em função das características das impedâncias do sistema, isso tornaria possível a rápida escolha de ações por parte de um controle adaptativo no restabelecimento do sistema elétrico em estudo.

6 Conclusão

As expressões apresentadas neste artigo para o cálculo das correntes de curto-circuito fornecem os valores eficazes de corrente alternada, para as impedâncias medidas na rede, levando em consideração os transformadores e geradores instalados no sistema. Das impedâncias que alteram e modificam os valores de um curto circuito, os geradores apresentaram posição de destaque nos eventos de falha/defeito na paralização da rede elétrica de distribuição de energia elétrica. Verificou-se ao longo do monitoramento da rede que quando a impedância se eleva, a corrente de curto-circuito se reduz, num grau tanto maior quanto mais próximo do gerador onde ocorre o curto-circuito.

A modelagem de curtos circuitos em redes de distribuição apesar de envolver mais variáveis no processo pela aplicação do método de Fortescue, conhecido como TCS – Técnica das Componentes Simétricas. Este método reduz um sistema trifásico desequilibrado em três sistemas equilibrados e esta decomposição é única. Estes sistemas decompostos são denominados sequências positivas, negativas e zeros e defasados entre si de 120 graus. O que facilita a definição de todas as impedâncias do sistema de distribuição de energia, reduzindo o tempo de cálculo e fornecendo para toda a extensão da rede de distribuição de energia os pontos necessários para a análise e definição dos parâmetros e ajustes para os dispositivos de proteção. A aplicação desta técnica em uma linha em condição de falha, como a analisada neste artigo, possibilitou a modelagem do sistema através da leitura em tempo real das grandezas elétricas envolvidas no evento. A aplicação dos recursos matemáticos e uma posterior simulação dos valores obtidos no Scilab possibilitará a criação de uma rede de controle adaptativa, o que facilitará a tomada de decisão e apoiará o operador do sistema no centro de Operações das concessionárias, liberando-os para trabalhos mais específicos como os de planejamento e inspeções de manutenção no sistema elétrico de distribuição de energia e das subestações que compõem ativos fixos da empresa.

Referências

ANDERSON, P. M., **Analysis of Faulted Power System**, Iowa, The Iowa State University Press, 1973.

FITZGERALD, A. E. e outros, **Electric Machinery**, McGraw-Hill Kogakusha Ltd. Inc., 1971.

HEISING, C. R.; Patterson, R. C.; e Weintraub, E. Y., **“Digital Relay Software Quality”**, GE Power Management, GER-3660, p. 1-11.

LIMA, R. C. de, **“O Impacto das Novas Tecnologias em Proteção nas Companhias de Energia”**, I Colóquio Sobre os Rumos da Proteção Digital de Sistemas Elétricos, 14 e 15 de setembro de 2006.

MONTICELLI, A. e GARCIA, A., **Introdução a sistemas de energia elétrica**, Editora da Unicamp, 1999.

POWELL, L. e HESLA, E., **“Electrical Engineering Calculations”**, IEEE Industry Applications Magazine, p. 8-11, novembro/dezembro de 2009.

SEN, P. C., **Principles of Electric Machines and Power Electronics**, John Wiley & Sons Inc., 1997.

SATO F., FREITAS W. **Análise de curto-circuito e princípios de proteção em sistemas de energia elétrica**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

www.aneel.gov.br/documents/656827/14866914/M%C3%B3dulo8_Revis%C3%A3o_9_LIMPO.pdf/d689590a-231d-b8ad-b354-bd6e0a4cd401. Acesso em 05/01/2018.