

ANÁLISE DE SUPERAÇÃO DE DISJUNTORES NO NÍVEL DE SEÇÃO DE BARRA

Abstract— The constant growth of the generation requires continuous analysis of the short-circuit current levels that circulate through the circuit-breakers to signal those that are overcome. The existing methods to calculate short-circuit currents use the conventional bus-branch network model, which do not directly provide the short-circuit current values that circulate internally through the circuit-breakers. But, the method of bus section level, which models the configuration of the circuit breakers inside the substations allows the direct analysis of them. So, this article aims to analyse and compare the influence of the bus section level model in studies of circuit breakers overcoming regarding the bus-branch network model, using National System Operator's rules of circuit-breakers overcoming. The system analysed are 5 and 291 buses.

Keywords— short-circuit current, section level modeling, circuit breakers overcoming

Resumo— O constante crescimento do parque gerador exige análise contínua dos níveis de corrente de curto-circuito que circulam pelos disjuntores instalados nas subestações a fim de sinalizar os que estão superados. Os métodos existentes para cálculo das correntes de curto-circuito utilizam o convencional modelo barra-ramo, que não fornece diretamente os valores de corrente de curto-circuito que circulam internamente pelos disjuntores que compõem as subestações. Já o método no nível de seção de barra modela a configuração dos disjuntores nas subestações e permite a análise direta dos mesmos. Assim, este artigo tem como objetivo analisar e comparar a influência da representação no nível de seção de barras com a tradicional representação barra-ramo em estudos de superação de disjuntores, utilizando para tanto as normas do Operador Nacional do Sistema referentes à superação de disjuntores. Os sistemas analisados são de 5 e 291 barras.

Palavras-chave — Cálculo de Curto-Circuito, Modelagem no Nível de Seção de Barra, Superação de Disjuntores

1 Introdução

A simulação numérica de correntes de curto-circuito em diferentes pontos da rede elétrica tem grande importância no planejamento e coordenação da proteção. Ela permite dimensionar as linhas de transmissão em relação ao seu limite térmico, dimensionar transformadores de corrente, definir ajustes de relés de proteção, analisar sobre e subtensões, ajustar tempo de atuação de relés, estudar a estabilidade dinâmica do sistema elétrico, definir a capacidade de interrupção de disjuntores e supervisionar sua superação.

Como os valores das correntes de curto-circuito dependem preponderantemente das fontes de geração e da capacidade de transmissão do sistema, sempre quando há aumento de geração ou mudança do sistema eles devem ser recalculados.

Deste modo, deve ser realizada uma constante supervisão da superação de equipamentos por corrente de curto-circuito, como, por exemplo, dos disjuntores, que uma vez detectada tem como opção a troca dos disjuntores superados já existentes, aberturas de barramentos ou a instalação de dispositivos limitadores de corrente de curto-circuito.

A análise destas soluções exige a realização de cálculo dos níveis de corrente de curto-circuito que circulam pelos disjuntores instalados nas subestações, a fim de sinalizar os que estão superados.

No Brasil, a análise de superação dos disjuntores é coordenada pelo Operador Nacional do Sistema (ONS) que utiliza o convencional método barra-ramo para cálculo de correntes de curto-circuito (Stevenson, 1976).

A análise de superação dos equipamentos inicia-se com o Relatório de Estudos de Curto-Circuito emitido

do anualmente pelo ONS (ONS, 2017), que fornece os níveis das correntes de curto-circuito simétricas e das relações X/R de todas as subestações do sistema brasileiro, considerando os dados do horizonte de três anos do Plano de Ampliações e Reforços (PAR). A responsabilidade de analisar a superação dos equipamentos dos módulos de manobra fica a cargo dos agentes detentores da subestação com problemas de superação que, uma vez consolidadas pelo GT-AS, são homologadas pelo ONS e encaminhadas à ANEEL através do Plano de Modernização das Instalações de Interesse Sistêmico (PMIS). Apesar da modelagem barra-ramo trazer diversas vantagens aos métodos de análise de sistemas elétricos, pois elimina a representação explícita de chaves e disjuntores e os consequentes problemas numéricos advindos da representação convencional desses elementos, ela impede a análise direta dos componentes internos às subestações, que quando necessários devem ser feitos a parte, num processo dispendioso de tempo.

Para contornar estas questões, o trabalho de Duarte, Fernandes e Lourenço (2014) propôs uma extensão da tradicional formulação matemática para cálculo de curto-circuito, de forma a torná-la capaz de processar redes modeladas no nível de subestação.

Esta representação no nível de seção de barra, que se baseia na representação explícita de ramos chaveáveis de impedância nula, utiliza o método de análise nodal modificada (Ho *et al.*, 1975) e a representação dos disjuntores conforme proposto por Lourenço, Silva e Simões Costa (2009), cujo trabalho versa sobre estimação de estados. Esta representação explícita também foi aplicada por Lourenço, Simões Costa e Ribeiro (2010) em problemas de análise de fluxo de potência e por Rosa, Lourenço e Fernandes (2012) em fluxo de potência ótimo.

Assim, este trabalho utiliza o modelo computacional desenvolvido por Duarte, Fernandes e Lourenço

(2014) que modela os disjuntores no nível de seção de barras, a fim de verificar quais disjuntores internos às subestações estão superados e analisar o impacto que esta representação tem na classificação da superação de disjuntores de alta tensão em relação ao convencional método barra-ramo.

Na próxima seção é apresentada o método da análise nodal adaptado ao problema de cálculo de corrente de curto-circuito simétrica de modo a se representar os disjuntores explicitamente (Duarte, Fernandes e Lourenço, 2014). Na sequência, são descritos os critérios para avaliação da superação de disjuntores (ONS, 2017) e finalmente, resultados e conclusões para sistemas de 5 e 291 barras.

2 Cálculo de corrente de curto-circuito simétrica

Os tipos de curto-circuito usualmente calculados são: fase-terra (de maior incidência), fase-fase-terra, fase-fase e trifásico (de menor incidência, porém de maior dano quanto à estabilidade transitória). Por simplicidade, o tipo de curto-circuito a ser analisado neste trabalho é apenas o trifásico e os resultados se estendem para os demais tipos de curto. Nas próximas subseções serão apresentados sucintamente os métodos de calculados via barra-ramo e seção de barra.

2.1 Curto-circuito trifásico – Modelagem no nível de seção de Barras

Uma opção bastante difundida para cálculo decorrente de curto-circuito em sistemas grandes é usar métodos matriciais, que se baseiam na montagem da matriz de impedância de barras ($\dot{\mathbf{Z}}_{barra}$) do sistema elétrico.

As correntes e as tensões para o curto-circuito trifásico são calculadas com base nas equações (1) e (2) (Stevenson, 1976):

$$\dot{I}_{Ak}^{total} = \frac{\dot{V}_{Ak}^{pré-falta}}{\dot{Z}_{kk}} \quad (1)$$

$$\dot{V}_{An}^{falta} = \dot{V}_{An}^{pré-falta} - \dot{V}_{Ak}^{pré-falta} \frac{\dot{Z}_{nk}}{\dot{Z}_{kk}} \quad (2)$$

onde \dot{I}_{Ak}^{total} é a injeção de corrente de falta na barra k , fase A; $\dot{V}_{Ak}^{pré-falta}$ é o fasor de tensão na barra k antes da ocorrência da falta; \dot{Z}_{kk} é o elemento $k-k$ da matriz $\dot{\mathbf{Z}}_{barra}$; \dot{V}_{An}^{falta} é o fasor de tensão na barra k durante a ocorrência da falta.

A corrente \dot{I}_{im} , na fase A, que percorre o elemento entre as barras i e m na direção $i-m$ é calculada para o modelo p de linha de acordo com a equação (3).

$$\dot{I}_{im}^{falta} = \dot{y}_{im} \cdot (\dot{V}_i^{falta} - \dot{V}_m^{falta}) + j \cdot b_{im}^s \cdot \dot{V}_i^{falta} \quad (3)$$

onde \dot{I}_{im}^{falta} é a corrente de falta que percorre elemento entre as barras i e m na direção $i-m$; \dot{y}_{im} é a admitância série da linha; b_{im}^s é a susceptância série da linha.

2.2 Método da análise nodal modificado para redes modeladas no nível de seção de barras.

A modelagem no nível de seção de barras é uma representação bem mais detalhada do que a modelagem barra-ramo, uma vez que permite a representação explícita dos arranjos e topologias das subestações. Para exemplificar a diferença entre as duas modelagens, a Figura 1 ilustra o diagrama unifilar de um sistema original de 5 barras para a modelagem barra-ramo (a) e para a modelagem no nível de seção de barras para a barra 3 (b).

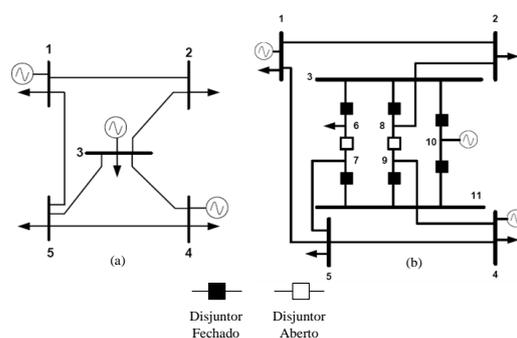


Figura 1. (a) Modelagem barra-ramo; (b) Modelagem no nível de seção de barra (Duarte, Fernandes e Lourenço, 2014)

Para se incluir os disjuntores na análise nodal clássica, considere as características básicas de um disjuntor aberto e fechado (impedância infinita e nula, respectivamente), representado como um ramo convencional, conforme Figura (2).

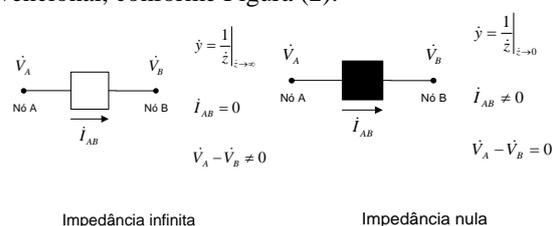


Figura 2 – Representação de disjuntores por ramos convencionais (Duarte, Fernandes e Lourenço, 2014)

A formulação do método da análise nodal modificado proposta em Duarte, Fernandes e Lourenço (2014) é uma extensão do método de análise nodal que aplica a Leis das Tensões de Kirchhoff em todas as barras da rede. Essa extensão inclui as correntes através dos disjuntores como novas variáveis do vetor de incógnitas, antes restrito às tensões de barra $\dot{\mathbf{V}}$. Assim, as incógnitas passam a ser as correntes através dos disjuntores, o que garante que as impedâncias atípicas dos dispositivos não apareçam na formulação do problema, já que as correntes através desses dispositi-

tivos passam a ser escritas diretamente em função das novas variáveis.

Além da definição das correntes como novas variáveis, as equações lineares que representam o *status* dos dispositivos devem ser incluídas como equações de igualdade do problema, possibilitando, assim, a determinação de um conjunto solúvel de equações não redundantes. Assim, sendo 1 e 2 duas barras de um determinado sistema entre as quais existe um disjuntor fechado, a equação linear incluída no conjunto de equações de igualdade para o mesmo é apresentada na equação (4).

$$\dot{V}_1 - \dot{V}_2 = 0. \quad (4)$$

Para ilustrar o método, considere o circuito elétrico representado na Figura 3. No qual existe um disjuntor fechado conectado entre os nós 1 e 2.

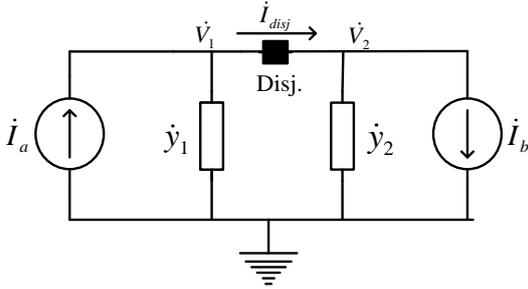


Figura 3: Circuito elétrico com disjuntor fechado (Disj)

Considerando que a corrente que circula pelo disjuntor fechado é \dot{I}_{disj} e aplicando a Lei das Correntes aos nós 1 e 2, tem-se que:

$$\dot{V}_1 \cdot \dot{y}_1 + \dot{I}_{disj} = \dot{I}_a \quad (5)$$

$$\dot{V}_2 \cdot \dot{y}_2 - \dot{I}_{disj} = -\dot{I}_b. \quad (6)$$

Além disso, a posição fechada do disjuntor impõe uma diferença de potencial nula entre seus nós terminais, ou seja, eq. (4). O conjunto de equações (4-6) tem como incógnitas: \dot{V}_1 , \dot{V}_2 e \dot{I}_{disj} , sendo \dot{y}_2 e \dot{y}_1 as admitâncias dos ramos convencionais.

Reorganizando estas equações, o sistema a ser resolvido passa a ser escrito na forma matricial por:

$$\begin{bmatrix} \dot{y}_1 & 0 & 1 \\ 0 & \dot{y}_2 & -1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{I}_{disj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ -\dot{I}_b \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Genericamente, o sistema de equações (7) pode ser reescrito como:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Y}}_{barra} & \mathbf{T} \\ \mathbf{T}^T & \mathbf{0}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{V}_2 \\ \dot{I}_{disj} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ -\dot{I}_b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

onde \mathbf{T} é matriz de incidência barras-disjuntores, dimensão $(nb \times ndisj)$, que indica o sentido da cor-

rente com relação aos nós (ou barras) terminais do disjuntor, sendo $ndisj$ o número de disjuntores fechados representados no circuito e $\dot{\mathbf{Y}}_{barra}$ é a matriz admitância de barra do sistema elétrico.

As matrizes e vetores da Eq. (8) podem se redefinidos como:

$$\dot{\mathbf{Y}}_{est} \cdot \dot{\mathbf{V}}_{est} = \dot{\mathbf{I}}_{est} \quad (9)$$

onde $\dot{\mathbf{Y}}_{est}$ é a matriz de admitância estendida de dimensão $(nb+ndisj \times nb+ndisj)$ composta pela matriz admitância nodal $\dot{\mathbf{Y}}_{barra}$, pela matriz de incidência \mathbf{T} , e matriz de zeros $\mathbf{0}_1$ de dimensão $(ndisj \times ndisj)$:

$$\dot{\mathbf{Y}}_{est} = \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Y}}_{barra} & \mathbf{T} \\ \mathbf{T}^T & \mathbf{0}_1 \end{bmatrix}; \quad (10)$$

$\dot{\mathbf{I}}_{est}$ é o vetor de dimensão $(nb+ndisj \times 1)$, formado pela justaposição de vetor das injeções de corrente, $\dot{\mathbf{I}}$ e de um vetor nulo, $\mathbf{0}_2$, que representa a diferença de potencial nula entre os nós do disjuntor fechado de dimensão $(ndisj \times 1)$, ou seja, $\dot{\mathbf{I}}_{est} = [\dot{\mathbf{I}}; \mathbf{0}_2]^T$, $\dot{\mathbf{V}}_{est}$ é o vetor de dimensão $(nb+ndisj \times 1)$, formado pela justaposição do vetor das tensões nodais $\dot{\mathbf{V}}$ e das correntes pelos disjuntores, $\dot{\mathbf{I}}_{disj}$, de dimensão $(ndisj \times 1)$, ou seja, $\dot{\mathbf{V}}_{est} = [\dot{\mathbf{V}}; \dot{\mathbf{I}}_{disj}]^T$.

Estendendo esta abordagem, que inclui as correntes nos disjuntores como novas variáveis do problema e a diferença de potencial nula nos terminais dos disjuntores fechados como novas equações, a eq. (2) que calcula a tensão de falta para curto-circuito trifásico na barra k inspirada na versão barra-ramo, pode ser reescrita como:

$$\dot{V}_{est_n}^{falta} = \dot{V}_{est_n}^{pré-falta} - \dot{Z}_{est_{nk}} \cdot \dot{I}_{est_k}^{falta}. \quad (11)$$

Como para um curto-circuito trifásico na barra k ($\dot{V}_{est_k}^{falta} = 0$), tem-se:

$$\dot{I}_{est_k}^{falta} = \frac{\dot{V}_{est_k}^{pré-falta}}{\dot{Z}_{est_{kk}}} \quad (12)$$

onde $\dot{\mathbf{V}}_{est}^{pré-falta}$ é o vetor que contém tensões nodais pré-falta e as correntes pelos disjuntores pré-falta (consideradas nulas, pois normalmente se desprezam as correntes de carga), com dimensão $(nb+ndisj \times 1)$. As correntes pelos disjuntores $\dot{\mathbf{I}}_{disj}$ estão contidas no vetor $\dot{\mathbf{V}}_{est}^{pré-falta}$ (da posição $nb+1$ até a posição $nb+ndisj$). E, as correntes de curto-circuito que percorrem os ramos entre as barras $i-m$ passam a ser calculadas por:

$$\dot{I}_{im}^{falta} = \dot{y}_{im} \cdot (\dot{V}_{est_i}^{falta} - \dot{V}_{est_m}^{falta}) + j \cdot b_{im}^s \cdot \dot{V}_{est_i}^{falta} \quad (13)$$

onde \dot{I}_{im}^{falta} é a corrente de falta que percorre um ramo convencional entre as barra i e m ; $\dot{V}_{est_i}^{falta}$ é a

tensão de falta na barra i ; \dot{V}_{estm}^{falta} é a tensão de falta na barra m .

3 Critérios de Superação de disjuntores

De acordo com o ONS, no Submódulo 11.3 *Estudos de curto-circuito* (SUBMÓDULO 11.3), a análise de superação dos equipamentos é realizada em duas etapas. A primeira, denominada de Análise Preliminar, indica as subestações da Rede Básica e da de Distribuição com problemas de superação por corrente de curto-circuito. A segunda etapa, chamada de Análise Detalhada, avalia detalhadamente os equipamentos da subestação sinalizada na etapa anterior.

Para facilitar apresentação de resultados, este trabalho apresentará apenas descrição da Análise Detalhada.

Os estudos de curto-circuito que verificam a superação de capacidade dos disjuntores consideram as condições mais críticas. Com o objetivo de se obter as correntes máximas de falta considera-se (SUBMÓDULO 23.3) a rede operando em regime subtransitário ($x''d$), com 100% da geração na configuração estabelecida para o horizonte de estudo do PAR e com todos os componentes em operação.

Os programas para o cálculo de curto-circuito no sistema informam, para cada subestação do sistema, as correntes simétricas de curto-circuito e a relação X/R equivalente para as faltas trifásica e monofásica. O valor eficaz da corrente de curto-circuito simétrica define a característica térmica do disjuntor, ou seja, a corrente de curto-circuito simétrica nominal do disjuntor é especificada por um valor capaz de suportar o aquecimento dos contatos por efeito *joule* e capaz de extinguir o arco elétrico (fase A, B e C).

A detecção da superação por corrente de curto-circuito simétrica compara os valores das correntes de curto-circuito simétricas nominais dos disjuntores (I_{cn}) com os valores das correntes de curto-circuito simétricas (I_{cc}) calculadas para as faltas trifásicas e fase-terra através destes equipamentos. O disjuntor é caracterizado como superado por corrente de curto-circuito simétrica se atingir a relação:

$$\frac{I_{cc}}{I_{cn}} \geq 1 \quad (14)$$

e considerado em estado de alerta se a relação atingir a equação (15):

$$0.9 \leq \frac{I_{cc}}{I_{cn}} \leq 1 \quad (15)$$

Os estudos de curto-circuito são realizados para condições de emergências de futuras configurações obtidas pelos dados do PAR. As correntes de curto-circuito simétricas nas subestações do sistema, obtidas pelos programas de curto-circuito convencionais (tais como ANAFAS - CEPEL), são distribuídas pelas seções de barramentos das subestações para a condição de curto nas barras das subestações.

Já o valor do pico máximo da corrente de curto-circuito assimétrica é responsável pelas características dinâmicas dos equipamentos da rede. A corrente total de curto-circuito assimétrica é representada pela equação (16) (Sato, 2005):

$$I_{assim} = 100 \cdot I_{ssim} \cdot \left(1 + e^{-\frac{t}{\tau}}\right) \quad (16)$$

onde que t é o tempo contado a partir do início da falta, I_{ssim} é a corrente de curto-circuito simétrica e τ é a relação equivalente da rede vista pela subestação (X/R).

Esta relação X/R influencia na composição do decaimento da corrente de curto-circuito ao longo do tempo e quanto maior for essa relação, mais lento é o decaimento da mesma.

A capacidade de interrupção assimétrica do disjuntor é confrontada com a relação X/R entre seus terminais e com a amplitude da corrente de curto-circuito simétrica passante por ele, de acordo com a Tabela 1, que estabelece cinco critérios de superação assimétrica.

Tabela 1. Critérios simplificados para identificação de superação e disjuntores pela relação X/R

| Critério | Assimetria | Simetria |
|----------|------------------|------------------------|
| 1 | $X/R < 45$ | $I_{cc} > 0,9 I_{cn}$ |
| 2 | $45 < X/R < 60$ | $I_{cc} > 0,85 I_{cn}$ |
| 3 | $60 < X/R < 75$ | $I_{cc} > 0,80 I_{cn}$ |
| 4 | $75 < X/R < 120$ | $I_{cc} > 0,70 I_{cn}$ |
| 5 | $X/R > 120$ | |

FONTE: Adaptado de SUBMÓDULO 11.3 do ONS

O disjuntor é caracterizado como superado por assimetria quando a relação X/R equivalente do sistema e o valor da corrente de curto-circuito simétrica correspondem simultaneamente aos critérios de assimetria e simetria Tabela 1.

4 Resultados

Nessa seção, apresentam-se as análises e os resultados de superação de disjuntores instalados em subestações de redes de transmissão e distribuição, utilizando-se as normas do ONS. Os sistemas testados são: 5 e 11 barras (Rosas, 2008), e 291 e 296 barras, que é o sistema elétrico referente ao estado do Paraná (Rosas, 2008).

Foram considerados os dois tipos de modelagem explanados nas seções anteriores (barra-ramo e nível de seção de barra).

4.1 Sistema de 5 e 11 BARRAS

O sistema teste de 5 barras (Stevenson, 1976) é constituído por 3 barras de geração e 6 linhas de transmissão, conforme representado na Figura 1.

A subestação indicada pela barra 3 foi escolhida para ser representada no nível de seção de barras, modelando a subestação e os disjuntores em operação (Fig. 1). A subestação 3 do sistema barra-ramo apresenta um arranjo em disjuntor e meio e a representação detalhada dessa subestação implica no aumento do

número de barras. Dessa forma, o sistema resultante passa a ser composto por 11 barras e por 6 disjuntores fechados.

As Figuras 4 e 5 apresentam a distribuição das correntes (em módulo) para os sistemas de 5 e 11 barras quando um curto-circuito trifásico é aplicado na barra 3, a título de ilustração.

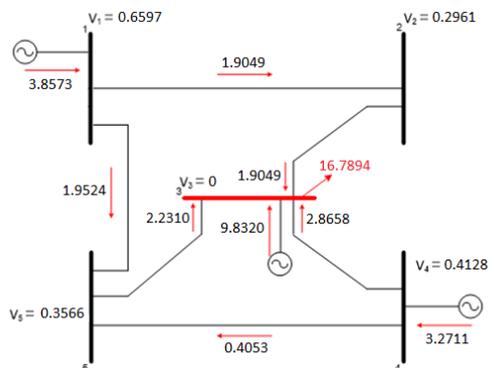


Figura 4. Distribuição das correntes de curto-circuito trifásico na barra 3 – Sistema 5 barras

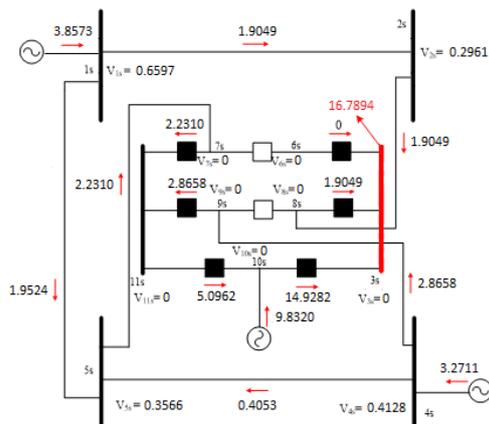


Figura 5. Distribuição das correntes de curto-circuito trifásico na barra 3 – Sistema 11 barras

Os resultados de superação por corrente de curto-circuito simétrica trifásica para o sistema de 5 barras e sua versão expandida de 11 barras estão apresentados na Tabela 2. Curtos trifásicos foram aplicados nas barras 1 a 5 (para representação 5 barras) e 1 a 11 (para representação 11 barras).

Tabela 2 – Resultados de superação por corrente de curto-circuito simétrica para o sistema de 5 e 11 barras

| Sítio | Barra | Modelagem Barra-Ramo - 5 barras | | | Modelagem Seção de Barras 11 barras | | | |
|-------|-------|---------------------------------|----------------------|----------------------------------|-------------------------------------|----------------------|----------------------|----------------------------------|
| | | I _{cc} [pu] | I _{cn} [pu] | I _{cc} /I _{cn} | Disj. | I _{cc} [pu] | I _{cn} [pu] | I _{cc} /I _{cn} |
| S | 1 | 14,715 | 10 | 1,471 | | 14,715 | 10 | 1,471 |
| S | 3 | 16,789 | 16 | 1,017 | | | | |
| S | 6 | | | | 3 - 6 | 16,789 | 16 | 1,017 |
| A | 3 | | | | 3 - 10 | 14,928 | 16 | 0,904 |
| A | 6 | | | | 3 - 10 | 14,928 | 16 | 0,904 |
| A | 8 | | | | 3 - 8 | 14,928 | 16 | 0,904 |
| A | 8 | | | | 3 - 10 | 14,928 | 16 | 0,904 |

LEGENDA: S – Subestação/disjuntor Superado
A – Subestação/disjuntor em Alerta

Segundo Tabela 2, observa-se que a subestação 1 e 3 estão sendo classificadas como superadas por sim-

etria para um curto-circuito aplicado nas barras 1 e 3 na modelagem convencional barra-ramo, pois a relação da corrente de curto-circuito simétrica calculada e a corrente de curto-circuito nominal do equipamento está numericamente acima do limite estabelecido pelo ONS

Já para a modelagem no nível de seção de barra (Figura 5), o curto é aplicado para as barras 1 a 5 e também para as barras internas à subestação 3 (6 a 11). Com isso, tem-se que a subestação 1 está superada quando o curto-circuito trifásico é aplicado na barra 1. Também, para um curto-circuito aplicado na barra 6, o disjuntor que liga as barras 3 e 6 (3-6) fica superado uma vez que a soma das contribuições dos disjuntores localizados entre as barras 3 e 8 e 3 e 10 superam a capacidade máxima dele (Tabela 2).

Ainda, para um curto-circuito aplicado na barra 3 ou 6 ou 8, o disjuntor que liga as barras 3 e 10 se encontra em alerta devido ao elevado valor das contribuições advindos do gerador da subestação 3 e do disjuntor que liga as barras 10 e 11. Para o curto na barra 8, o disjuntor que conecta as barras 3 e 8 também fica em estado de alerta com o mesmo valor do disjuntor (3-10), pois o caminho da corrente é o mesmo dado que o disjuntor que conecta as barras 6 e 7 está aberto e, portanto, não há circulação de corrente pelo disjuntor (3- 6).

A Tabela 3 apresenta os resultados de superação encontrados devido à corrente de curto-circuito assimétrica para as representações de 5 e 11 barras.

Tabela 3. Resultados de superação por corrente de curto-circuito assimétrica - Sistema de 5 e 11 barras

| Sit | Barra | Modelagem Barra-Ramo 5 barras | | Modelagem Seção de Barra 11 barras | | |
|-----|-------|-------------------------------|----------------------------------|------------------------------------|---------|----------------------------------|
| | | X/R [s] | I _{cc} /I _{cn} | Disjuntor | X/R [s] | I _{cc} /I _{cn} |
| S | 1 | 7,550 | 1,471 | | 7,550 | 1,471 |
| S | 3 | 7,537 | 1,017 | 3 - 10 | 7,537 | 0,904 |
| S | 6 | | | 3 - 6 | 7,537 | 1,017 |
| S | 6 | | | 3 - 10 | 7,537 | 0,904 |
| S | 8 | | | 3 - 8 | 7,537 | 0,904 |
| S | 8 | | | 3 - 10 | 7,537 | 0,904 |

LEGENDA: S – Subestação/disjuntor Superado
A – Subestação/disjuntor em Alerta

Na Tabela 3, observa-se que há superação por corrente de curto-circuito assimétrica na modelagem barra-ramo quando se aplica um curto-circuito trifásico nas barras 1 e 3. Lembrando que houve superação das subestações devido ao fato de que a relação X/R vista dos terminais das barras analisadas está abaixo de 45 graus e a relação das correntes de curto-circuito está acima de 0,9 conforme Tabela 1. Quando se analisa os resultados para a modelagem no nível de subestação, pode-se notar que a subestação 1 fica superada quando o curto-circuito é aplicado na barra 1 enquanto que o disjuntor fechado que liga a barra 3 e 10 fica superado quando o curto-circuito é aplicado na barra 3. Já para um curto-circuito trifásico executado nas barras internas à subestação 3, o

disjuntor conectado entre as barras 3 e 6 apresenta superação por assimetria quando o curto-circuito se encontra na barra 6. E, o disjuntor conectado às barras 3 e 8 está superado quando o curto-circuito é aplicado na barra 8 e o mesmo pode ser atestado para o disjuntor que liga as barras 3 e 10 quando o curto-circuito é ocorre na barra 6 ou na barra 8.

Fica evidenciado destas análises, o nível de detalhamento que a representação no nível de seção de barra é capaz de fornecer em estudos de superação de disjuntores.

4.1 Sistema de 291 e 296 barras

O sistema teste de 291 barras se refere à modelagem barra-ramo do sistema de 291 barras (equivalente do estado do Paraná), cujos dados podem ser obtidos em (Rosas, 2008). A Figura 6 ilustra parte da modelagem barra-ramo do sistema de 291 barras. A subestação (SE) de Bateias de 525 kV, representada pela barra 291 na Figura 6, foi selecionada para se modelada em detalhes. O sistema representado com o detalhamento da subestação apresenta 296 barras e 4 disjuntores fechados conforme a Figura 7. A capacidade de todos os disjuntores é de 40 pu.

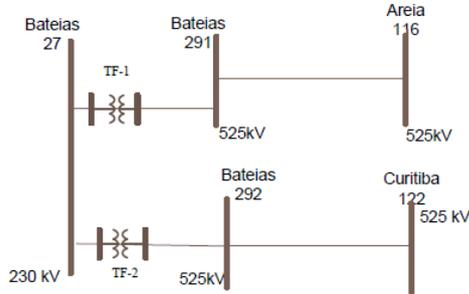


Figura 6. Sistema de 291 Barras - Modelagem Barra-ramo
FONTE: Adaptado de ROSAS (2008)

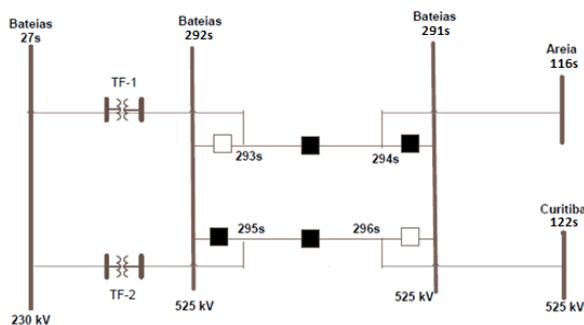


Figura 7. Sistema de 296 Barras – Modelagem Seção de Barras
FONTE: Adaptado de ROSAS (2008)

Os resultados de superação por corrente de curto-circuito simétrica trifásica para o sistema de 291 barras e sua versão expandida de 296 barras estão apresentados na Tabela 4.

Para as representações de 291 e 296 barras, há superação de subestação quando o curto-circuito trifásico ocorre nas barras 1, 16, 26, 27, 29, 34, 35, 37, 68, 106, 107, 114, 116, 117, 122, 123, 125, 131, 133, 286, 288 e 292 na modelagem barra-ramo. Mas,

quando o curto-circuito trifásico é aplicado nas barras 22, 24, 28, 127 e 291, as subestações correspondentes ficam apenas em alerta. Quanto aos resultados da modelagem no nível de seção de barra, o disjuntor que liga as barras 292 para 295 fica superado quando o curto-circuito trifásico é aplicado na própria barra expandida 292, pois a soma das contribuições das barras 27 e 122 superam a capacidade máxima do disjuntor. Já o disjuntor que conecta as barras 294 e 291 fica em estado de alerta para um curto-circuito na barra expandida 291 devido à soma das correntes de contribuição advindas das barras 27 e 116 que coloca a relação de superação entre 0,9 e 1,0.

Tabela 4. Superação por corrente de curto-circuito simétrica para os sistemas de 291 e 296 barras

| Sit | Barra | Modelagem Barra-Ramo – 291 barras | | Modelagem Seção de Barra 296 barras | | |
|-----|-------|-----------------------------------|---------|-------------------------------------|----------|---------|
| | | Icc [pu] | Icc/ICn | Disj. | Icc [pu] | Icc/ICn |
| S | 1 | 48,367 | 1,209 | | 48,367 | 1,209 |
| S | 16 | 45,583 | 1,139 | | 45,583 | 1,396 |
| S | 26 | 43,183 | 1,079 | | 43,183 | 1,079 |
| S | 27 | 44,363 | 1,109 | | 44,363 | 1,109 |
| S | 29 | 43,405 | 1,085 | | 43,405 | 1,085 |
| S | 34 | 46,160 | 1,154 | | 46,160 | 1,154 |
| S | 35 | 46,210 | 1,155 | | 46,210 | 1,155 |
| S | 37 | 64,111 | 1,602 | | 64,111 | 1,602 |
| S | 68 | 63,798 | 1,595 | | 63,798 | 1,595 |
| S | 106 | 42,144 | 1,053 | | 42,144 | 1,053 |
| S | 107 | 50,591 | 1,264 | | 50,591 | 1,264 |
| S | 114 | 41,218 | 1,030 | | 41,218 | 1,030 |
| S | 116 | 65,803 | 1,645 | | 65,803 | 1,645 |
| S | 117 | 44,279 | 1,107 | | 44,279 | 1,107 |
| S | 122 | 47,242 | 1,181 | | 47,242 | 1,181 |
| S | 123 | 46,216 | 1,155 | | 46,216 | 1,155 |
| S | 125 | 48,446 | 1,211 | | 48,446 | 1,211 |
| S | 131 | 43,211 | 1,080 | | 43,211 | 1,080 |
| S | 133 | 63,075 | 1,576 | | 63,075 | 1,576 |
| S | 286 | 44,234 | 1,105 | | 44,234 | 1,105 |
| S | 288 | 43,293 | 1,082 | | 43,293 | 1,082 |
| S | 292 | 43,092 | 1,077 | 292 - 295 | 43,092 | 1,077 |
| A | 22 | 37,209 | 0,930 | | 37,209 | 0,930 |
| A | 24 | 38,590 | 0,964 | | 38,590 | 0,964 |
| A | 28 | 37,219 | 0,930 | | 37,219 | 0,930 |
| A | 127 | 36,119 | 0,903 | | 36,119 | 0,903 |
| A | 291 | 39,296 | 0,982 | 294 - 291 | 39,296 | 0,982 |

LEGENDA: S – Subestação/disjuntor Superado
A – Subestação/disjuntor em Alerta

Os resultados de superação por corrente de curto-circuito assimétrica segundo as normas do ONS para os sistemas de 291 e 296 barras podem ser visualizados na Tabela 5.

Na Tabela 5, nota-se que há superação por simetria das mesmas subestações para ambas as configurações

(barra-ramo e seção de barras) com exceção das barras 291 e 292 na modelagem seção de barra, pois as mesmas são investigadas mais detalhadamente. Percebe-se que há superação de apenas 2 disjuntores: quando o curto-circuito é aplicado na barra 291 (com disjuntor 294-291 superado) e na barra 292 (com disjuntor 292-295 superado); e não de todos os disjuntores da SU Bateias como seria apontado na representação barra-ramo.

Tabela 5. Superação por corrente curto-circuito assimétrica para sistema de 291 e 296 barras

| S I T . | B A R R A | Modelagem Barra-Ramo | | Modelagem Seção de Barra | | |
|------------------|-----------------------|----------------------|---------|--------------------------|---------|---------|
| | | X/R [s] | Icc/Icn | Dis-jun-tor | X/R [s] | Icc/Icn |
| | | | | | | |
| S | 1 | 17,995 | 1,209 | | 17,995 | 1,209 |
| S | 16 | 38,765 | 1,139 | | 38,765 | 1,139 |
| S | 22 | 38,423 | 0,930 | | 38,423 | 0,930 |
| S | 24 | 54,809 | 0,964 | | 54,809 | 0,964 |
| S | 26 | 15,355 | 1,079 | | 15,355 | 1,079 |
| S | 27 | 15,553 | 1,109 | | 15,553 | 1,109 |
| S | 28 | 11,663 | 0,930 | | 11,663 | 0,930 |
| S | 29 | 13,866 | 1,085 | | 13,866 | 1,085 |
| S | 34 | 16,986 | 1,154 | | 16,986 | 1,154 |
| S | 35 | 16,969 | 1,155 | | 16,969 | 1,155 |
| S | 37 | 24,704 | 1,602 | | 24,704 | 1,602 |
| S | 68 | 27,721 | 1,595 | | 27,721 | 1,595 |
| S | 106 | 19,355 | 1,053 | | 19,355 | 1,053 |
| S | 107 | 24,764 | 1,264 | | 24,764 | 1,264 |
| S | 114 | 44,920 | 1,030 | | 44,920 | 1,030 |
| S | 116 | 24,979 | 1,645 | | 24,979 | 1,645 |
| S | 117 | 18,363 | 1,107 | | 18,363 | 1,107 |
| S | 122 | 18,42 | 1,181 | | 18,420 | 1,181 |
| S | 123 | 16,983 | 1,155 | | 16,983 | 1,155 |
| S | 125 | 18,018 | 1,211 | | 18,018 | 1,211 |
| S | 127 | 13,174 | 0,903 | | 13,174 | 0,903 |
| S | 131 | 15,219 | 1,080 | | 15,219 | 1,080 |
| S | 133 | 28,469 | 1,576 | | 28,469 | 1,576 |
| S | 286 | 15,582 | 1,105 | | 15,582 | 1,105 |
| S | 288 | 13,902 | 1,082 | | 13,902 | 1,082 |
| S | 291 | 17,736 | 0,982 | 294-291 | 17,736 | 0,982 |
| S | 292 | 17,138 | 1,077 | 292-295 | 17,138 | 1,077 |

LEGENDA: S – Subestação/disjuntor Superado
A – Subestação/disjuntor em Alerta

5. Conclusões

Ao longo deste artigo foi analisada uma abordagem alternativa para estudar curto-circuito em subestações por meio da análise no nível de seção de barra utilizando o método da análise nodal modificada (ANM) proposto (Duarte, Fernandes e Lourenço, 2014). Esta abordagem provou-se ser mais completa do que a tradicional abordagem barra-ramo (como pôde ser bem observado por meio das simulações computacionais de curto-circuito nos sistemas de 5 e 291 barras), pois a mesma permite analisar detalhadamente como são distribuídas as correntes dentro da subestação, e, com isso, aferir quais disjuntores realmente estão superados por corrente de curto-circuito simétrica e assimétrica.

Além disto, com esta representação explícita dos disjuntores vislumbra-se a possibilidade de ainda se realizar análises dinâmicas de configurações de subestação a fim de avaliar superação de disjuntores sob diversos arranjos operativos.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte financeiro do CNPq e UFPR.

Referências Bibliográficas

- Duarte, I. S.; Fernandes, T. S. P.; Lourenço, E. M. (2014). An Alternative Way to Model Switches and Circuit Breakers to Directly Determine Short-Circuit Currents Flowing Through Them. *Journal of Control, Automation and Electrical Systems*, v. 26, p. 46-56.
- Ho, C. W., Ruehli, A. E., Brennan, P. A. (1975). **The modified nodal approach to network analysis.** *IEEE Trans. Circuits and Systems*, vol. 22, no. 6, pp. 504–509.
- Lourenço, E. M.; Silva, N. S. Silva, Simões Costa, A. J. A. (2009). Fast Decoupled Steady-State Solution for Power Networks Modeled at the Bus Section Level. *IEEE Bucharest Power Tech, jun 2009*.
- Lourenço, E. M., Simões Costa, A. J. A., Ribeiro Jr., R. (2010). Steady-state solution for power networks modeled at bus section level, *IEEE Transactions Power Systems*, vol. 25, no. 1, pp.10-20.
- ONS. Submódulo 4.3. Metodologia para elaboração das propostas de ampliações e reforços. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 22/09/2017.
- ONS. Submódulo 11.3. Estudos de curto-circuito. Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 22/09/2017.
- ONS. *Submódulo 18.2. Relação dos sistemas e modelos computacionais.* Disponível em: <<http://www.ons.org.br>>. Acesso em: 02/08/2017.
- Rosas, G. B. (2008). Modelagem de redes no nível de subestação para estudos de fluxo de potência ótimo, Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica), Universidade Federal do Paraná.
- Rosas, G. B., Lourenço, E. M., Fernandes, T. S. P. (2012). Network Model at Substation Level for Optimal Power Flow Studies. *Controle & Automação*, vol. 23, pp. 766-781.
- Stevenson, W. D. (1976), *Elements of Power System Analysis*. McGraw-Hill Kogakusha. Ltda.