



Grupo de Estudo de Sistemas de Distribuição-GDI

Avaliação da Seleção de Fases para Falhas de Alta Impedância em Redes de Distribuição a partir da Comparação Angular de Componentes Simétricas

JEAN PEREIRA ROSSINI*(1); GHENDY CARDOSO JUNIOR(1); ADRIANO PERES DE MORAIS(1); MARCELO COSTA SANTOS(2); JOÃO PAULO ABREU VIEIRA(3); PATRICK ESCALANTE FARIAS(4); MAIRON GALLAS(1); ALDAIR WONTROBA(1); UFSM(1); CELPA(2); UFPA(3); IFFar(4);

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo realizar a avaliação da aplicação do método de seleção de fases por comparação angular de componentes simétricas em sistemas de distribuição de energia elétrica, perante falhas de alta impedância (FAI). São consideradas ocorrências de FAIs em diversos tipos de solos, com diferentes configurações: *shunt*, *shunt*-série com contato de alta impedância do lado da fonte e *shunt*-série com contato de alta impedância do lado da carga. A boa performance e simplicidade do método faz com que sua aplicação em relés ou religadores seja promissora, mesmo em condições de forte desequilíbrio de corrente no alimentador.

PALAVRAS-CHAVE

Seleção de Fases, Classificação de Falhas, Falta de Alta Impedância, Componentes Simétricas, Sistemas de Distribuição.

1.0 - INTRODUÇÃO

Uma falta de alta impedância (FAI) ocorre quando um condutor do sistema de distribuição entra em contato com superfícies que possuem alta impedância ocasionando uma pequena corrente de falta que acaba por não sensibilizar os elementos de proteção da rede (1), tais como, relés de sobrecorrente, religadores e chaves-fusíveis. A FAI pode ser originada desde o contato de vegetação com a sistema até o rompimento de um condutor que entra em contato com o solo. Por não sensibilizar os dispositivos de proteção, uma FAI apresenta grande perigo a qualquer ser vivo em uma área próxima ao defeito, dessa forma é necessário localizá-la da forma mais rápida possível. Sendo assim, diversos algoritmos localizadores de FAI vêm sendo propostos na literatura especializada e muitos deles utilizam metodologias auxiliares como detectores e classificadores de falta para auxiliar na tarefa de localização. É dentro do ramo de classificadores de falta que destacam-se os selecionadores de fase, um tipo de classificador que caracteriza a falta de acordo com as fases envolvidas no defeito.

Selecionadores de fases desempenham papéis importantes juntamente à localizadores de falta, ajudando na solução do problema da múltipla estimativa, em que mais de um ponto do alimentador é tido como local da falta devido à grande quantidade de ramificações de sistemas de distribuição. A resposta oriunda do selecionador permite que aqueles pontos que não possuem as fases apontadas pela seleção, sejam excluídos dos possíveis locais de falta. A exclusão de um ou mais pontos permite limitar a área de trabalho das equipes de manutenção, de forma a reestabelecer as condições normais de operação do alimentador o mais rápido possível. Identificar as fases em que ocorre uma falta também desempenha uma importante função no que se refere a ações de *trip* em religadores presentes em sistemas de distribuição durante FAIs temporárias. Segundo (2) a ação de *trip* em religadores pode ser monopolar, em que apenas uma fase sofre interrupção, ou tripolar em que todas as três fases são interrompidas. Sendo assim, algoritmos de seleção de fases permitem apontar com maior exatidão a

fase defeituosa, evitando que chaveamentos em fases incorretas ou ainda chaveamentos trifásicos desnecessários sejam realizados, permitindo, assim, continuidade no fornecimento de energia elétrica.

As metodologias utilizadas para a seleção de fases são as mais diversas, com base em ondas viajantes (3), morfologia matemática (4), transformada de Wavelet (5), redes neurais (6), lógica Fuzzy (7), entre outros. Apesar das várias metodologias existentes, a maioria delas são destinadas à aplicação em linhas de transmissão, sendo poucos os trabalhos que possuem foco em sistemas de distribuição e mais raros ainda aqueles que abordam o desempenho de selecionadores de fase mediante faltas de alta impedância. Sendo assim, esse artigo tem como objetivo principal avaliar o desempenho do método de seleção de fases por comparação angular de componentes simétricas em redes de distribuição, perante FAIs.

O restante deste artigo está estruturado da seguinte maneira: a seção 2 aborda as principais características de FAIs, bem como suas diferentes configurações; a seção 3 apresenta o métodos de seleção de fases por comparação angular de componentes simétricas com foco em faltas do tipo monofásica e por fim, as seções 4 e 5 trazem, respectivamente, os resultados obtidos com a aplicação do método de seleção de fases e conclusões finais.

2.0 - FALTAS DE ALTA IMPEDÂNCIA - FAI

As FAIs são defeitos em sua grande maioria monofásicos, que além da baixa corrente de falta, possuem características específicas (Figura 1a) como: *buildup*, *shoulder*, intermitência e assimetria da corrente de falta. *Buildup* trata-se de períodos de aumentos graduais na amplitude da corrente enquanto *shoulder* refere-se à períodos em que a amplitude permanece constante. Os períodos de *buildup* e *shoulder* podem se repetir mais de uma vez, alternadamente, durante a falta. A intermitência está relacionada aos períodos em que o arco elétrico originado por uma FAI é extinto devido à perda de umidade do solo, fazendo com que a corrente de falta permaneça nula. A assimetria, por sua vez, refere-se a diferenças entre o semiciclo positivo e negativo da corrente causado pela sílica presente no solo que causa maior queda de tensão no semiciclo negativo da corrente. A não linearidade da característica $V \times I$ no ponto de uma FAI também está ligado à assimetria. Isso pode ser observado na Figura 1b que mostra a relação de tensão (v_f) e corrente (i_f) no ponto de falta, em que a curva em azul representa a parte ascendente de um ciclo da corrente, enquanto a curva em vermelho representa a parte descendente da mesma. As variáveis v_f e corrente i_f estão em fase devido a característica predominantemente resistiva do arco elétrico provocado pela FAI. É interessante ressaltar que para cada tipo de solo ou superfície de alta impedância, um comportamento distinto da curva $V \times I$ será obtido (8).

As FAIs, conforme a Figura 2, podem ocorrer em três configurações distintas: falta *shunt* (FS), falta *shunt*-série com contato de alta impedância do lado da fonte (FSSF) e falta *shunt*-série com contato de alta impedância do lado da carga (FSSC). A Figura 2 também apresenta uma simulação da medição de corrente (a partir da subestação) de um alimentador durante estas três diferentes configurações de falta. Para faltas do tipo FS, a partir do momento em que o defeito se estabelece, é possível notar um aumento na corrente do alimentador, em que as características específicas da FAI podem ser notadas, principalmente os períodos de *buildup* e *shouder*. Em faltas do tipo FSSF, primeiramente há o rompimento do condutor que fará com que o alimentador tenha sua corrente de carga reduzida devido a abertura do circuito seguido do estabelecimento da falta que fará com que a corrente volte a crescer de acordo com as características específicas da FAI. Por fim, as faltas do tipo FSSC, também provocam a redução da corrente de carga do alimentador a partir do rompimento do condutor, porém a corrente não volta a crescer, pois uma vez que o contato foi realizado do lado da carga, a subestação não fornece contribuição ao defeito de forma que sua corrente permanece praticamente a mesma.

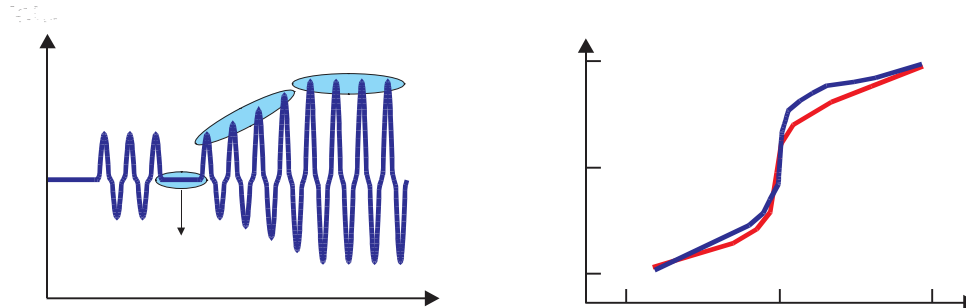


FIGURA 1 - Características da Falta de Alta Impedância: (a) corrente de falta de uma FAI; (b) característica $V \times I$ no ponto de falta

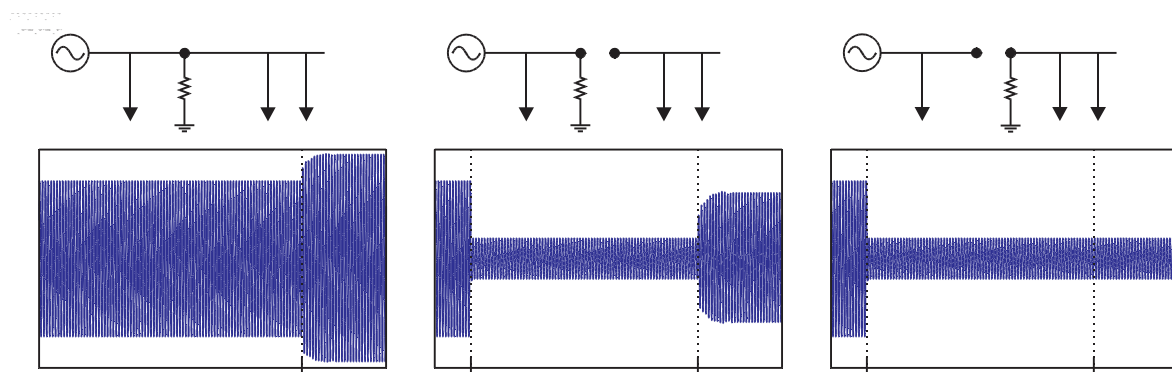


FIGURA 2 - Configurações de FAI: (a) falta *shunt*; (b) falta *shunt-série* com contato de alta impedância do lado da fonte; (c) falta *shunt-série* com contato de alta impedância do lado da carga

3.0 - COMPORTAMENTO ANGULAR DE COMPONENTES SIMÉTRICAS DURANTE FALTAS MONOFÁSICAS

113Equation Chapter 3 Section 1

A Figura 3 representa uma situação usual de uma falta monofásica em que a fase 'a' está em contato à terra de forma que as correntes de falta nas fases restantes são nulas. Dessa forma, as componentes simétricas resultantes das correntes de falta são dadas pela Equação (3.1). Caso a falta monofásica ocorra nas fases 'b' ou 'c', o comportamento das componentes simétricas pode ser analisado pelas Equações (3.2) e (3.3), respectivamente. É possível estabelecer um padrão do comportamento angular das componentes simétricas para faltas do tipo monofásicas através de dois coeficientes: M_1 e M_2 . O primeiro deles (M_1) diz respeito ao valor do argumento da divisão entre os fasores das componentes de sequência negativa e positiva durante a falta, conforme Equação (3.4). Já o segundo coeficiente (M_2) é referente ao argumento da divisão entre as componentes de sequência negativa e zero, também durante a falta, de acordo com a Equação (3.5). O argumento de uma divisão de fasores, é equivalente a diferença entre as fases de numerador e denominador. A Tabela 1 relaciona os valores de M_1 e M_2 para cada tipo de falta através dos resultados obtidos nas Equações (3.1), (3.2) e (3.3).

10 a 13 de novembro de 2019
Belo Horizonte - MG

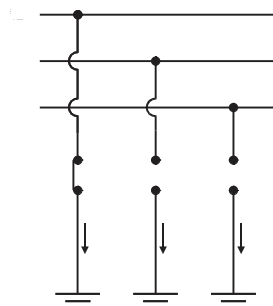


FIGURA 3 - Falta Monofásica

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix} \quad 232 \backslash * \text{ MERGEFORMAT}$$

(.)

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_b \\ \alpha I_b \\ \alpha^2 I_b \end{bmatrix} \quad 333 \backslash * \text{ MERGEFORMAT}$$

(.)

$$\begin{bmatrix} I_{a0} \\ I_{a1} \\ I_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} I_c \\ \alpha^2 I_c \\ \alpha I_c \end{bmatrix} \quad 434 \backslash * \text{ MERGEFORMAT}$$

(.)

$$M_1 = \arg \left(\frac{I_{a2}}{I_{a1}} \right) \quad 535 \backslash * \text{ MERGEFORMAT } (.)$$

$$M_2 = \arg \left(\frac{I_{a2}}{I_{a0}} \right) \quad \backslash * \text{ MERGEFORMAT } 636 \backslash * \text{ MERGEFORMAT } (.)$$

TABELA 1 – Relação Angular entre Componentes Simétricas para Falta Monofásicas

Coeficientes	Tipos de Falta		
	AG	BG	CG
M_1	0°	120°	240°
M_2	0°	240°	120°

Os valores da Tabela 1 são utilizados em diversos trabalhos referentes a seleção de fases (9,10) em que, geralmente, a medição da corrente é realizada em uma das extremidades da linha de transmissão ou, no caso de sistemas de distribuição, a partir da subestação de onde partem os alimentadores. Assim, durante o período de falta, a corrente no ponto de medição (corrente total) equivale, aproximadamente, a soma da corrente de carga do sistema e da corrente de falta. Dessa forma, para a obtenção da corrente de falta, subtrai-se da

corrente total medida a corrente de carga que comumente é referida como a corrente no período de pré-falta. A Equação (3.6) é utilizada para estimar as correntes de sequência no ponto de falta.

$$\begin{aligned} \vec{I}_{a0\ FALTA} &= \vec{I}_{a0\ TOTAL} - \vec{I}_{a0\ PRÉ-FALTA} \\ \vec{I}_{a1\ FALTA} &= \vec{I}_{a1\ TOTAL} - \vec{I}_{a1\ PRÉ-FALTA} \\ \vec{I}_{a2\ FALTA} &= \vec{I}_{a2\ TOTAL} - \vec{I}_{a2\ PRÉ-FALTA} \end{aligned}$$

737* MERGEFORMAT (.)

O método apresentado em (9) além de utilizar a subtração de valores pré-falta, também considera que a mesma relação da Tabela 1 é válida para as tensões de fases do sistema. Assim, pode-se calcular quatro tipos de coeficientes, dois deles em relação à corrente (M_{1i} e M_{2i}), conforme Equação (3.7), e dois em relação à tensão (M_{1v} e M_{2v}), conforme Equação (3.8). Ainda segundo os autores de (9) os coeficientes utilizados na seleção de fases podem apresentar valores que diferem dos dados da Tabela 1. Dessa forma, (9) estabelece um limite máximo de variação (β_{max}) que cada coeficiente pode sofrer: para M_{1i} e M_{1v} , a variação máxima permitida é de 30° , já para M_{2i} e M_{2v} o limite é de 60° . Assim são formadas regiões para a seleção de fases, que recebem o nome de sinos devido ao seu formato, conforme mostrado na Figura 4. O ângulo central de cada sino é equivalente aos valores da Tabela 1. A partir do uso do limite de variação β_{max} é possível que a seleção de fases seja realizada através de uma zona de cobertura referente a cada sino e não mais ficar dependente de apenas um valor. Dessa forma, por exemplo, caso os valores dos coeficientes M_{1i} e M_{2i} sejam, respectivamente, 15° e 40° pode-se afirmar, segundo a Figura 4, que a falta é do tipo monofásica AG. O mesmo é válido para os coeficientes M_{1v} e M_{2v} . Um detalhe importante sobre este método, quando aplicado a FAIs, refere-se ao fato de que os coeficientes M_2 não podem ser empregados isoladamente para a seleção de fases, pois os mesmos valores dos sinos da Figura 4 também podem ser utilizados para seleção de fases em faltas bifásicas à terra. Dessa forma, a resposta da seleção de fases para FAIs monofásicas será dada por M_1 e confirmada por M_2 , sendo que estes coeficientes devem sempre ser utilizados de forma conjunta, aumentando a confiabilidade da resposta do método.

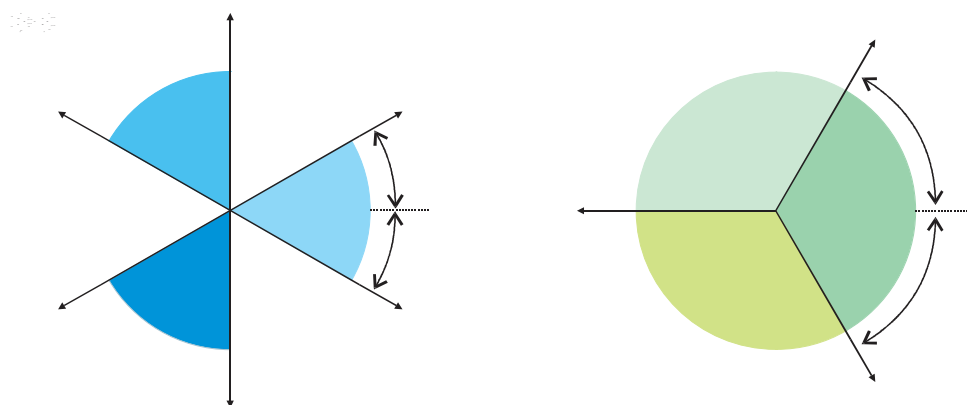


FIGURA 4 - Sinos de Seleção de Fases: (a) para coeficientes M_{1i} e M_{1v} ; (b) para coeficientes M_{2i} e M_{2v}

$$\begin{aligned} M_{1i} &= \arg \left(\frac{I_{a2\ FALTA}}{I_{a1\ FALTA}} \right) \text{ e } M_{2i} = \arg \left(\frac{I_{a2\ FALTA}}{I_{a0\ FALTA}} \right) & 838* \text{ MERGEFORMAT (.)} \\ M_{1v} &= \arg \left(\frac{V_{a2\ FALTA}}{V_{a1\ FALTA}} \right) \text{ e } M_{2v} = \arg \left(\frac{V_{a2\ FALTA}}{V_{a0\ FALTA}} \right) & 939* \text{ MERGEFORMAT (.)} \end{aligned}$$

4.0 - METODOLOGIA DE IMPLEMENTAÇÃO

O método de comparação angular apresentado na Figura 4, foi implementado, passo-a-passo, conforme o diagrama da Figura 5. Os dados de entrada referem-se à valores instantâneos de tensão e corrente medidos a partir de transformadores de potencial e corrente localizados na subestação e amostrados a 3840Hz (64 amostras por ciclo).

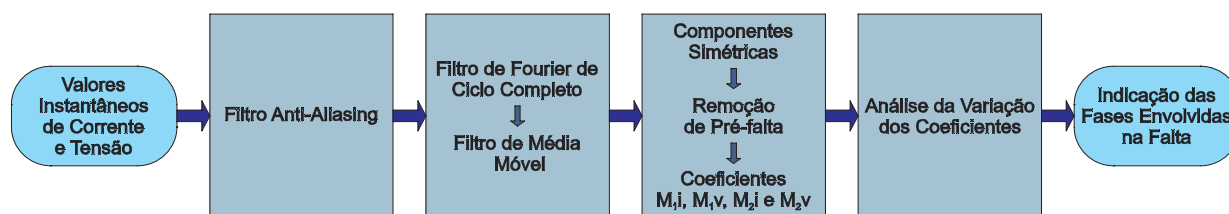


FIGURA 5 - Esquemático de Implementação do Método de Seleção de Fases

ETAPA 1: trata-se do uso de um filtro *anti-aliasing* que é aplicado aos sinais de entrada. É comum a utilização de filtros do tipo passa-baixas para que a frequência máxima do sinal analisado seja limitada. Geralmente opta-se pela escolha de filtros Butterworth para a execução desta tarefa pois não apresentam *ripple*, têm baixa distorção de fase (quando comparados com outros filtros) e possuem banda de transição compatível com as aplicações de estimação fasorial (11). Quanto menor a ordem do filtro, menor o seu tempo de convergência o que implica em uma menor diferença angular entre a entrada e a saída do filtro (12). Desta forma, escolheu-se um filtro passa-baixas do tipo Butterworth de ordem 2 para a aplicação na metodologia de seleção de fases de forma a reduzir as diferenças angulares entre a saída e entrada do filtro. A frequência de corte escolhida foi de 480 Hz.

ETAPA 2: existem diversos métodos para estimação fasorial, sendo a Transformada Discreta de Fourier amplamente utilizada em relés de proteção (11). Sendo assim, para a segunda etapa da metodologia, os fasores de tensão e corrente são estimados através do uso de um Filtro de Fourier de Ciclo Completo (FFCC). A saída do FFCC é conectada à um filtro de média móvel que tem como objetivo reduzir possíveis variações dos parâmetros de magnitude e ângulo dos fasores. Utilizou-se uma janela móvel de 64 amostras, que equivale a um ciclo de sinais amostrados em uma frequência de 3840 Hz.

ETAPA 3: primeiramente, os fasores de corrente e tensão estimados pelo uso do FFCC são transformados em componentes simétricas através do uso da matriz de transformação de Fortescue. Posteriormente, caso uma falta seja detectada, é necessário que haja a remoção dos valores pré-falta em relação a cada componente simétrica. Para isso, é necessário que um detector de faltas informe o instante inicial do defeito para que o valor pré-falta seja definido. Para a implementação do método de seleção de fases optou-se por não utilizar nenhuma metodologia de detecção de faltas de forma que será considerado que o instante inicial da falta é igual ao instante de detecção. O valor pré-falta para cada uma das componentes simétricas será adotado como sendo referente ao instante de tempo localizado um ciclo atrás do instante de detecção. Uma vez realizada a remoção dos valores pré-falta, os coeficientes M_1 e M_2 são calculados de modo a possibilitar a seleção de fases.

ETAPA 4: O valor dos coeficientes M_1 e M_2 (tanto de corrente quanto de tensão) oriundos da terceira etapa podem apresentar variações ocasionadas, por exemplo, pela subtração dos valores pré-falta ou ainda pelas assimetrias na amplitude e forma dos sinais oriundos da FAI. Sendo assim, na quarta e última etapa, é necessário que estes coeficientes passem por alguns testes de análise da estabilização de seus valores para que a seleção de fases possa ser realizada corretamente. Utiliza-se uma janela móvel de 64 amostras que varre os resultados obtidos nos coeficientes M_1 e M_2 a partir do instante de detecção da falta. Para que a seleção de fases seja realizada é necessário que:

- Não haja variação superior a 2° em relação a diferença entre o valor máximo e mínimo da janela de dados;

- A diferença entre a média aritmética das primeiras 32 amostras da janela e as 32 amostras finais não supere o limiar de 0,1°;
- As amostras da janela estejam todas dentro do mesmo sino de seleção.

Caso os três critérios sejam satisfeitos, considera-se como valores finais para M_1 e M_2 a média dos valores de suas respectivas janelas. Sendo assim, a partir deste resultado é possível utilizar a lógica apresentada na Figura 4 para que finalmente a indicação das fases envolvidas na falta seja realizada.

5.0 - METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

1015Equation Chapter 5 Section 1

O método de seleção de fases apresentado na seção anterior foi implementado no software MATLAB®. As simulações de faltas e obtenção dos valores instantâneos de tensão e corrente foram realizadas no sistema teste IEEE 34 barras modelado no software ATPDraw, conforme Figura 6a. O sistema teste foi modificado em relação ao modelo original. Optou-se por implementar a tensão de 13,8kV, bem como modelar todas as cargas com impedância constante e acumuladas no nó. Os reguladores de tensão que são originalmente contidos entre os pontos 814-850 e 852-832 substituídos por linhas com configuração equivalente ao trecho a jusante destes pontos. No ponto 800, que representa a subestação, foi realizada a medição das correntes e tensões instantâneas em cada uma das fases do sistema.

As FAIs foram implementadas com base no modelo primeiramente previsto em (13) e aperfeiçoado por (8), conforme Figura 6b. A resistência R_1 modela as propriedades de assimetria e não linearidade da característica $V \times I$ no ponto da falta, sendo calculada a partir das curvas apresentadas na Figura 7 ($V_{base} = 7,967$ kV) que variam de acordo com o tipo de solo no qual ocorre a FAI. A resistência R_2 , por sua vez, representa as características de *buildup* e *shoulder* que possuem carácter temporário durante a FAI, sendo calculada a partir da Equação 5.1. O tempo de permanência (Δt) e coeficientes dos polinômios utilizados para calcular o valor de R_2 são apresentados na Tabela 2. Após o tempo determinado na Tabela 2 o valor de R_2 se mantém igual ao último valor calculado pelo polinômio.

$$R_2(t) = c_k \cdot t^k + c_{k-1} \cdot t^{k-1} + \dots + c_1 \cdot t + c_0 \quad 11511 \backslash * \text{MERGEFORMAT } (.)$$

As FAIs foram simuladas na configuração *shunt* e *shunt-série* (com contato de alta impedância do lado da fonte e da carga), bem como considerando níveis de desequilíbrio de corrente leve (5%) e pesado (35%) no sistema. Ao total foram simulados 490 casos, cujos nós de escolhidos estão apresentados na Tabela 3.

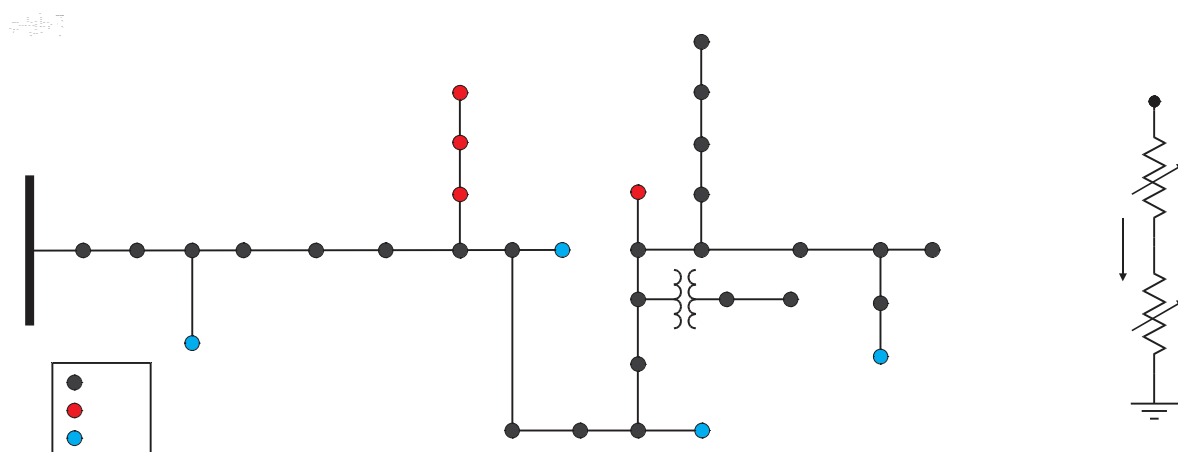


FIGURA 6 – Modelos de Simulação: (a) sistema teste IEEE 34 barras; (b) modelo de falta de alta impedância

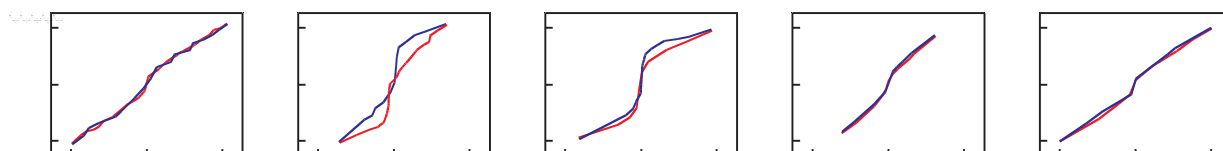


FIGURA 7 - Curvas $V \times I$ para Diferentes Solos: (a) areia; (b) asfalto; (c) brita; (d) grama; (e) calçamento

TABELA 2 – Características de Modelagem do Resistor R_2

Solo	c8	c7	c6	c5	c4	c3	c2	c1	c0	$\Delta t(s)$
Areia	3,25E11	-2,9E11	1,14E11	-2,3E10	2,84E9	-1,98E8	7,74E ₆	-1,55E5	1,68E3	0,2
Asfalto	3,2E12	-3,0E12	1,1E12	-2,5E11	3,1E10	-2,3E9	9,52E ₇	-1,98E6	1,68E4	0,2
Brita	1,29E8	-2,92E8	2,73E8	-1,37E8	4,00E7	-6,89E6	6,88E ₅	-3,79E4	1,10E3	0,5
Grama	6,61E9	-1,66E9	1,91E9	-8,99E8	2,18E8	-2,87E7	2,01E ₆	-7,10E4	1,34E3	0,2
Calçamento	6,5E10	-5,7E10	2,0E10	-4,00E9	4,47E8	-2,91E7	1,05E ₆	-2,03E4	2,24E2	0,3

TABELA 3 – Nós de Simulação das FAIs

Tipo da Falta	Desequilíbrio de Corrente	Tipo de Solo	Fase	Nós de Simulação
FS	5% e 35%	Areia, asfalto, brita, grama e calçamento	AG	806, 828, 822, 864, 858, 840, 848
			BG	806, 828, 826, 838, 858, 840, 848
			CG	806, 828, 858, 840, 848
FSSF e FSSC			AG	806, 828, 858, 860, 846
			BG	
			CG	

6.0 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados encontrados nas 490 simulações são apresentados na Figura 8 em que a porcentagem de respostas corretas dadas por cada coeficiente de seleção é apresentada de acordo com os três tipos de configurações de falta simuladas: *shunt*, *shunt-série* com o condutor caído do lado da fonte e *shunt-série* com o condutor caído do lado da carga. É possível observar que o aproveitamento de seleções de fase realizadas de maneira correta é de 100% para as duas primeiras configurações enquanto para as faltas do tipo FSSC é muito inferior. Faltas de alta impedância já produzem correntes de falta de baixa magnitude que somadas a uma configuração FSSC faz com que a corrente se torne ainda mais baixa devido à ausência da contribuição da fonte para a falta. Sendo assim, é justificável que faltas FSSC tenham um menor desempenho quando comparadas com outras configurações devido à dificuldade que medição realizada na subestação tem de notar a presença deste defeito. É possível observar também, nas faltas FSSC, que apesar dos coeficientes M_{1i} e M_{1v} possuírem aproveitamento acima de 60%, as respostas destes não podem ser confirmadas pelos coeficientes M_{2i} e M_{2v} que alcançam apenas cerca de 3% de seleções corretas.

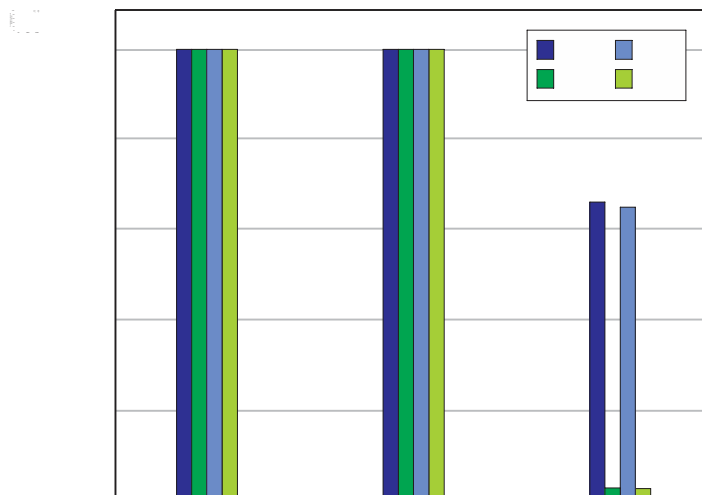


FIGURA 8 – Porcentagem de Seleções de Fase Corretas

Levando em consideração apenas faltas do tipo FS e FSSF, a Figura 9 apresenta o efeito da variação do tipo de solo (areia, asfalto, brita, grama e calçamento) e do desequilíbrio de corrente (5% e 35%) em relação à seleção de fases. Nesta figura, são representados os casos que exibiram o maior afastamento em relação ao ângulo central dos sinos de seleção para cada tipo de solo. É possível notar que, uma vez que 100% das seleções de fase foram realizadas de maneira correta, mesmo os casos apresentados na Figura 8 não ultrapassam os valores de β_{max} que são de 30° para os coeficientes M_1 e 60° para os coeficientes M_2 . O efeito do desequilíbrio de corrente sobre os resultados é maior em $M_{1,i}$ e $M_{1,v}$ e, na maioria dos casos, tende a afastar os valores dos coeficientes de seleção do ângulo central de cada sino, porém não impede a correta resposta obtida na seleção de fases. A variação do tipo de solo, por sua vez, também não apresentou efeito significativo nos valores dos coeficientes de seleção de forma que os diferentes graus de não linearidade e assimetria que cada tipo de solo possui não demonstrou influência sobre o método. Quanto ao tempo de resposta do selecionador, obteve-se uma média de 0,05 segundos, a partir do início da falta, para que a resposta final da seleção de fases fosse encontrada. É necessário lembrar que este valor de tempo se refere apenas ao desempenho da lógica de seleção de fases, sendo que caso um detector de faltas também seja considerado, este valor será alterado. Deve-se optar pelo uso de detectores de falta que possibilitem a indicação da falha o mais rápido possível de forma que os valores de pré-falta possam estar disponíveis para utilização no método selecionador.

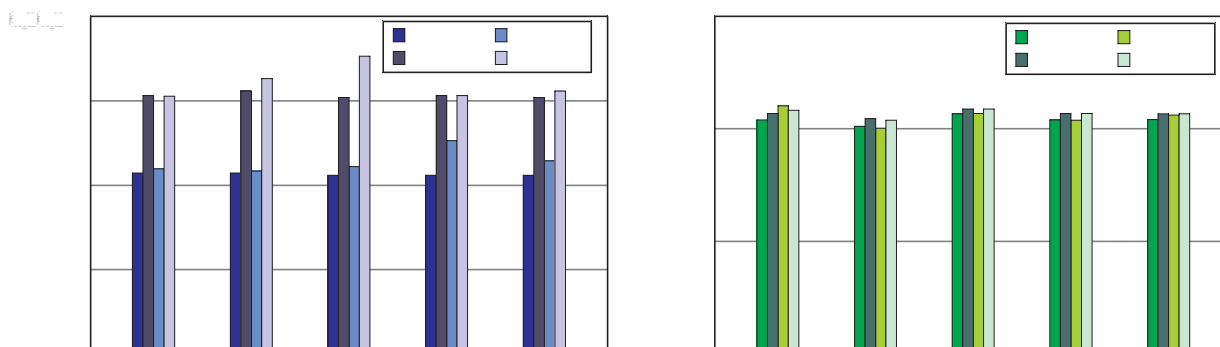


FIGURA 9 – Casos com os maiores afastamentos em relação aos ângulos centrais dos sinos de seleção considerando diferentes solos e desequilíbrios de corrente: (a) coeficientes M_1 ; (b) coeficientes M_2

7.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou a avaliação do método de seleção de fases com base na comparação angular de componentes simétricas considerando faltas de alta impedância em sistemas de distribuição de energia elétrica. Os resultados não demonstram bom desempenho do método para faltas do tipo shunt-série com contato de alta impedância do lado da carga devido as pequenas influências que tal defeito provoca nas correntes e tensões medidas no alimentador a partir da subestação. Porém, para faltas do tipo *shunt* e *shunt-série* com contato de alta impedância do lado da fonte, um total de 100% de seleções de fases foram realizadas corretamente. No geral, fatores como a variação do solo em que ocorre a falta de alta impedância ou o grau de desequilíbrio de corrente do alimentador não apresentaram influências significativas no desempenho do método de seleção de fases. Sendo assim, ainda que o desempenho perante faltas *shunt-série* com contato de alta impedância do lado da carga não tenha sido satisfatório, o método de seleção de fases por comparação angular de componentes simétricas se mostra uma boa alternativa para aplicação em relés e religadores do sistema de distribuição devido a simplicidade do método e boa performance perante as características de faltas de alta impedância.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) TENGDIR, J. et. al. High Impedance Fault Detection Technology. Report of PSRC Working Group D15, março 1996.
- (2) HATAWAY, G.; CHENEY, R. M.; THORNE, J. T. Distribution single-phase tripping and reclosing: overcoming obstacles with programmable recloser controls. 35° Annual Western Protective Relay Conference, outubro 2008.
- (3) SALEHI, M.; NAMDARI, F. Fault classification and faulted phase selection for transmission line using morphological edge detection filter. IET Generation, Transmission & Distribution, v. 12, p. 1595-1605, março 2018.
- (4) WU, Q. H.; LU, Z.; JI, T. Y. Protective relaying of power systems using mathematical morphology. Londres: Springer, 2009.
- (5) LIU, D. X. Y.; XIAO, W. W. W.; Zheng, Y. Research of fault phase selection on UHV transmission lines based on wavelet analysis. International Conference on Smart Grids and Clean Energy Technologies, outubro 2016.
- (6) LOU, K.; AGGARWAL, R. K. Current transients based phase selection and fault location in active distribution networks with spurs using artificial intelligence. IEEE Power & Energy Society General Meeting, julho 2013.
- (7) RAY, P.; MISHRA, D. P.; MOHAPTRA, S. Fault classification of a transmission line using wavelet transform & fuzzy logic. 1° IEEE International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems, julho 2016.
- (8) SANTOS, W. C. et al. High impedance faults: from field tests to modeling. Journal of Control, Automation and Electrical System, v. 24, p. 885–896, setembro 2013.
- (9) KASZTENNY, B.; CAMPBELL, B.; MAZEREEUW, J. Phase selection for single-pole tripping – weak infeed conditions and cross-country faults. 27° Annual Western Protective Relay Conference. Spokane, outubro 2000.
- (10) ESPINOZA, R. G. F.; TAVARES, M. C. Faulted Phase Selection for Half-Wavelength Power Transmission Lines. IEEE Transaction on Power Delivery, v. 33, n. 2, p. 992-1001, abril 2018.
- (11) SILVA, C. D. L. Estimativa fasorial aplicada a relés de proteção numéricos utilizando os métodos de ajuste de curvas e redes neurais artificiais. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.
- (12) WINDER, S. Analog and digital filter desing. 2. ed. Woburn: Elsevier Science, 2002.



(13) NAN, S. R. et al. A modeling method of a high impedance fault in a distribution system using two series time-varying resistances in emtp. Summer Meeting 2001: IEEE Pres, v. 2, p. 1175–1180, 2001.

9.0 - AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com o apoio de: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES/PROEX) – Código de Financiamento 001, Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Geração Distribuída (INCT-GD), Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Universidade Federal do Pará (UFPA), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul. Este trabalho faz parte de um projeto P&D entre ANEEL, CELPA e CEMAR.

10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Jean Pereira Rossini, graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Maria (2018). Atualmente é aluno do Programa de Pós-graduação em Energia Elétrica da UFSM, nível mestrado, em que suas principais linhas de pesquisa referem-se a detecção, classificação e localização de faltas em sistemas de potência.