



**XXII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

BR/GPC/28
13 a 16 de Outubro de 2013
Brasília - DF

GRUPO - V

GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO DE SISTEMAS DE POTÊNCIA-GPC

Ensaio de RTDS com Relés de Proteção Elétrica: Dificuldades, Contribuições, Resultados Práticos e Perspectivas de Desenvolvimento no Brasil

Rafael de Oliveira Fernandes*
Siemens Brasil

Nilson Jose Francischetti Júnior
ISA CTEEP

RESUMO

Este trabalho tem por finalidade mostrar a contribuição dos ensaios de RTDS "*Real Time Digital Simulator*" para a verificação da *performance* e do comportamento do relé de proteção elétrica frente a fenômenos dinâmicos e transitórios no sistema elétrico, tais como: curto-circuito, rejeição de carga, oscilação de potência, faltas evolutivas e "*cross-country*", faltas de alta impedância, corrente de carga superimposta, "*infeed*" e "*outfeed*", localização de falta, saturação AC/DC do transformador de corrente, acoplamento mútuo e outros. Será apresentada a necessidade de se obter os dados reais dos equipamentos, o conhecimento aprofundado do relé de proteção e também do seu algoritmo/firmware, e por fim o cenário atual em relação aos ensaios à serem realizados no Brasil, o crescimento nas universidades, centros de pesquisa e empresas do setor elétrico e o subsídio do governo brasileiro para a compra destes equipamentos, no âmbito de projetos de pesquisa e desenvolvimento "*P&D*" e de parceria público-privada "*PPP*".

PALAVRAS-CHAVE

Relés de Proteção, RTDS, Finep, P&D, Ajustes Ótimos, Transitórios Eletromagnéticos

1.0 - INTRODUÇÃO

A complexidade do sistema elétrico brasileiro, a sua interligação e o novo cenário que se projeta a curto prazo, com uma contribuição significativa da geração distribuída e uma maior diversidade de fontes de geração de energia elétrica, como eólicas, biomassa, solar e outros, trazem a tona uma melhor compreensão em relação ao despacho desta energia elétrica, principalmente pelo desacoplamento da relação P-delta, Q-V, e também devido ao aumento da parcela resistiva nos cálculos de fluxo de potência. Outro ponto de destaque é a estimativa e o cálculo mais real do tempo crítico de ilhamento dos geradores elétricos, principalmente para os produtores independentes de energia. Para tanto, novos algoritmos nos relés de proteção elétrica deverão se adaptar a este comportamento de regime dinâmico e transitório e testes, principalmente com a utilização do RTDS, serão exigidos com mais frequência. Outra área investigativa serão os testes de performance dos PMU's "*Phasor Measurement Units*" no sistema elétrico brasileiro, e mais uma vez, o RTDS ganhará destaque, uma vez que atualmente o mesmo já possui um módulo de simulação de PMU.

O ensaio de TNA "*Transient Network Analyser*" com o uso do RTDS, tem por finalidade se aproximar, o mais possível, do caso real a ser analisado/investigado. A necessidade de maior confiabilidade dos sistemas, o inevitável crescimento dos Sistemas Elétricos de Potência (SEP), a política de redução de custos, dentre outros, tem levado a uma interligação cada vez maior entre os diversos sistemas de energia elétrica existente. Inevitavelmente atrelada ao constante crescimento desses sistemas, está o aumento na complexidade de operação do mesmo, tanto por parte dos diferentes Agentes quanto do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS).

(*)Av. Eng. João F.G. Molina, 1745 - CEP 13113-080 Jundiaí - SP - Brasil
Tel: (+55 11) 4585-8095 – Fax: (+55 11) 4585-8138 – Email: rafael.fernandes@siemens.com

O levantamento e detalhamento dos dados reais dos equipamentos, assim como os equivalentes elétricos das respectivas áreas de interesse, é imprescindível para a correta implementação no software de análise e sua respectiva simulação.

O condicionamento de não-linearidade do sistema elétrico não é representado em testes padrão, normalmente realizados em laboratório (testes de plataforma) e/ou comissionamento elétrico, através da injeção de corrente e aplicação secundária de tensão, o que torna este tipo de teste apenas como uma fonte de verificação das variáveis do hardware do relé de proteção e parte do seu algoritmo, pois os valores utilizados em testes secundários, com malas de teste, não representam condições transitórias eletromagnéticas e/ou dinâmicas. Algumas empresas do setor elétrico brasileiro tem mudado esta ótica e, em função de recursos práticos, tem utilizado testes de TNA através do uso do software ATP "Alternative Transient Program".

Estima-se uma redução de tempo em mais de 50% em relação ao teste convencional, substituindo-se, o teste padrão com uma mala de teste, pela utilização de arquivos do tipo *Comtrade*. A convergência, para o teste dinâmico será iminente e fará cada vez mais com que a equipe de proteção, das empresas do setor elétrico, passem a agregar valor nas empresas em relação a simulação de sistemas elétricos. Portanto, ao mesmo tempo, em que se reduz o tempo de ensaios, em fábrica e em campo, torna-se necessário que a equipe de proteção elétrica se especialize também nos ensaios dinâmicos e que, de preferência, se especialize nas ferramentas disponíveis para tais ensaios. A possível economia de gastos com a otimização dos ensaios pode ser investida na formação de engenheiros e técnicos de proteção para o estudo e treinamento das ferramentas disponíveis para tal tipo de análise.

Até o ano de 2009, somente a empresa Furnas possuía o equipamento de RTDS. Após este ano adquiriram, nesta sequência: Unifei/Itajubá, UFCG/Campina Grande, Schweitzer/Campinas, ITAI/Itaipu, USP/São Paulo, USP/São Carlos em conjunto com a Unicamp/Campinas, UFABC/São Bernardo do Campo, CTEEP/Jundiaí, CEMIG/Belo Horizonte, ABB/Guarulhos e Siemens/Jundiaí. Neste intervalo de tempo foram adquiridos, para o bem do desenvolvimento de pesquisa, ensaios e melhorias do sistema elétrico, 12 equipamentos de RTDS.

A maior parte desta aquisição se deu através de projetos subsidiados pelo governo brasileiro, através do órgão de fomento FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), no âmbito da Inovação Tecnológica, fundamentada na Lei da Inovação Tecnológica-substituta da Lei do Bem. Os projetos submetidos ao FINEP são de origem de P&D (Pesquisa e Desenvolvimento) e projetos de PPP (Parceria Público Privada). Outras fontes de recurso, além do Finep, como o Projeto META (Projeto de Assistência Técnica dos Setores de Energia e Mineração), cuja iniciativa partiu do MME (Ministério de Minas e Energia) e Banco Mundial, é por exemplo, uma outra fonte de financiamento visando a melhoria dos setores de energia. Desta forma, verifica-se uma forte tendência de que pesquisas e trabalhos que, fundamentalmente, eram realizados, com certa frequência, no exterior, sejam realizados no Brasil, uma vez que abrem-se portas para pesquisa e ganho de "know-how" por parte das empresas do setor elétrico brasileiro, centros de pesquisas, empresas fornecedoras e universidades brasileiras.

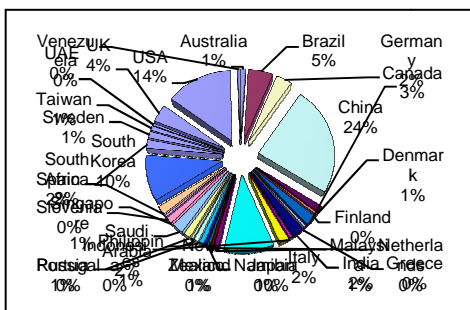


Figura 1 - Distribuição por País

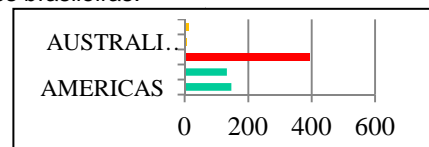


Figura 2 - Distribuição por Continente

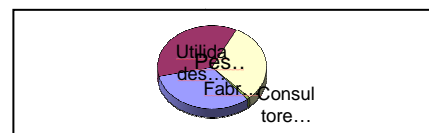


Figura 3 - Distribuição por Setor

Na figura 1, observa-se que atualmente o Brasil representa 5% do número de RTDS instalados no mundo. Já a China, com 24% e os Estados Unidos, com 14% são os maiores clientes. Na figura 3, observa-se uma participação muito próxima entre os setores de Utilidades, Fabricantes e Centros de Pesquisa - incluindo as Universidades ao redor do mundo. Já no Brasil, os Centros de Pesquisa e Universidades representam 42%, os Fabricantes 25% e o setor de Utilidades 33%, portanto há um equilíbrio em relação à distribuição mundial.

2.0 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O simulador em tempo real "RTDS" permite uma simulação em malha fechada e comandos de disparo do relé e comandos de fechamento do disjuntor. Com isso, é possível simular transitórios em sistemas complexos, e verificar o comportamento, como: disparos em sequência para o religamento automático. Em situações críticas de escolha para casos aonde se tenha: compensação série, acoplamento mútuo, corrente de carga superimposta e relação R/X significativa é possível definir qual a escolha ótima: proteção diferencial de linha ou proteção de distância, por exemplo. Todos os modelos necessários de linhas, transformadores de instrumentos, infeeds e geradores, são modelados no simulador com um intervalo de tempo de simulação de até 2μseg. Normalmente o passo de integração utilizado é de 50μseg e a duração depende do fenômeno a ser analisado.

Os relés em análise são conectados através de amplificadores analógicos de tensão e corrente. O comando de

disparo pode ser de fase-segregada e assim fica disponível para iniciar o disparo monopolar para o ciclo de religamento automático. As reações dos relés, como registros de oscilografia e registros em tempo real, e as informações de entradas digitais são registradas pelo software em análise. Em adição, as correntes e tensões das entradas analógicas são registradas juntas com as entradas digitais pelo relé de proteção e, com isso, é possível verificar o tempo de disparo e abertura dos disjuntores no software utilizado e também no registrador do RTDS.

Em relação aos amplificadores de tensão há três ajustes disponíveis. Estes amplificadores cobrem uma faixa de 0 a 130Vrms para frequências na faixa de: DC a 10kHz. Os ajustes de amplificadores de corrente trifásicos são usados e a sua faixa de frequência é de: 1 a 3kHz, a qual é suficiente, uma vez que a taxa de amostragem dos relés é normalmente 1kHz ou menor. Faixas de saída, por exemplo: 5Arms, 20Arms, 40Arms, ou outros, cobrem uma ampla faixa. A aquisição de dados fornece 16 ou 64 canais digitais, com taxas de amostragem de até 1MHz. Para testes de relés uma taxa de amostragem de 10KHz é usada, a qual fornece uma resolução de 0.1mseg. As correntes e tensões, tão bem como as entradas e saídas digitais são medidas diretamente nos terminais dos relés. Os resultados são convertidos para arquivos do tipo *Comtrade*.

O RTDS utiliza as simplificações desenvolvidas por Hermann Dommel e apresentado no artigo "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks" (1). Um breve desenvolvimento do circuito RLC é mostrado abaixo, com o intuito de demonstrar o método de cálculo utilizado pelo RTDS.

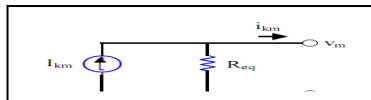


Figura 4 - Indutor

$$i_{km}(t) = \frac{1}{R_{eq}} [v_k(t) - v_m(t)] + i_{km}(t - \Delta t)$$

$$R_{eq} = \frac{2L}{\Delta t}$$

$$i_{km}(t - \Delta t) = i_{km}(t - \Delta t) + \frac{1}{R_{eq}} [v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t)]$$

A corrente i_{km} é conhecida chamada de Termo Histórico

Figura 5 - Representação do Indutor - Corrente Histórica

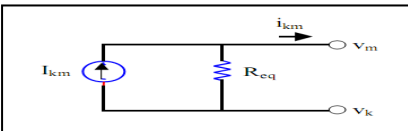


Figura 6 - Capacitor

$$i_{km}(t) = \frac{1}{R_{eq}} [v_k(t) - v_m(t)] + i_{km}(t - \Delta t)$$

$$R_{eq} = \frac{\Delta t}{2C}$$

$$i_{km}(t - \Delta t) = -i_{km}(t - \Delta t) - \frac{1}{R_{eq}} [v_k(t - \Delta t) - v_m(t - \Delta t)]$$

Figura 7 - Representação do Indutor - Corrente Histórica

Com as devidas simplificações, o circuito RLC pode ser representado como um conjunto de condutâncias e fontes de correntes.

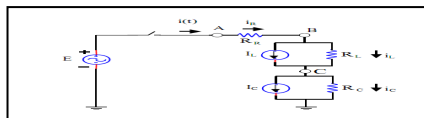


Figura 8 - Circuito Equivalente

$$\begin{bmatrix} V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_R + G_L & -G_L \\ -G_L & G_L + G_C \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} -I_L + G_R V_a \\ I_L - I_C \end{bmatrix}$$

Figura 9 - Cálculo das tensões nodais pelo circuito equivalente

Com isso, componentes como: ondas viajantes em linhas de transmissão, saturação de transformadores, geradores síncronos, etc. podem se modelados desta forma. A fim de se obter a simulação em tempo real, o RTDS utiliza processamentos em paralelo. A cada nova iteração a matriz de condutância 'G' é invertida.

3.0 - SISTEMA ANALISADO

Para a verificação dos resultados analisou-se o seguinte caso: linha de transmissão de 345kV entre Ibiúna-Interlagos qual foi simulada no laboratório de RTDS da Siemens Alemanha, em Erlangen, utilizando-se relés de proteção 7SA87 (Família Siprotec 5).

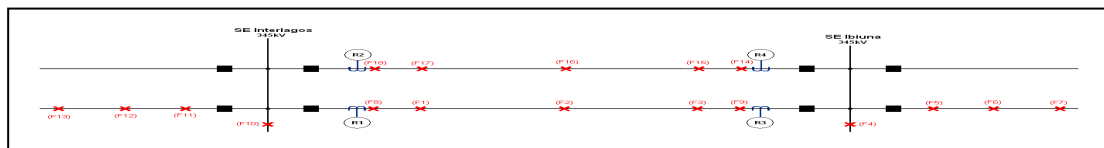


Figura 10 - Sistema a ser estudado

As faltas foram simuladas na linha de transmissão compreendida entre as Subestações Ibiúna e Interlagos, em 345kV. Um total de 366 testes foram realizados, de acordo com o padrão de exigência da CTEEP, sendo os principais: Faltas monofásicas, bifásicas e evolutivas no mesmo circuito e evolutivas entre circuitos paralelos "Cross-Country" (com intervalo de tempo de 20mseg), alta Impedância (variando a resistência de falta de 05 a 60 ohms), faltas com variação de frequência (variando de 57,5 a 62,5 Hz), faltas permanentes com religamento automático ativo, oscilação de potência (variação de frequência das fontes e contingências), sobretensão, falha de disjuntor, saturação AC/DC, perda de potencial (falha de fusível), teleproteção (comprovação dos esquemas de distância e direcional), faltas com variação da incidência do ângulo de falta e localização de falta, para cada caso simulado. Além de não executar as faltas em fases fixas.

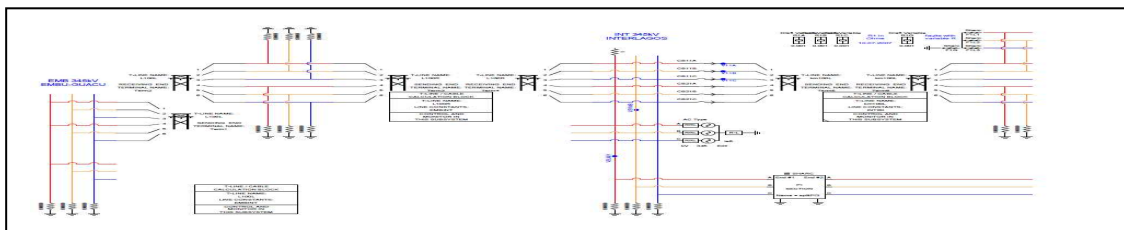


Figura 11 - Arquivo RSCAD do RTDS no laboratório da Siemens Alemanha - Erlangen, com relés 7SA87 (Siprotec 5)

Os diversos pontos de falta são analisados para a verificação da performance do relé de proteção. O fenômeno físico de acoplamento mútuo é simulado e pode mostrar a influência na medição de distância para faltas monofásicas a terra e com isso ter-se um ajuste ótimo para o esquema de teleproteção e também da primeira zona de alcance da função de distância. Se os relés com compensação de linha paralela são utilizados os mesmos podem ser ajustados para este efeito, quando eles são alimentados com a corrente residual da linha paralela, caso contrário é necessário realizar uma aproximação, no ajuste de fator de compensação de terra, em relação ao acoplamento mútuo. Normalmente dois relés são testados simultaneamente para verificar o correto comportamento do esquema de teleproteção. Os disjuntores são manipulados e o efeito da mútua pode ser removido, em determinados testes, os quais não são interessantes.

Transformadores de tensão capacitivos podem ser alocados tanto na barra quanto na linha. Saturação dos TC's (AC e DC) podem ser simuladas, mas normalmente, em alta e extra alta tensão, os mesmos são suficientemente dimensionados e não serão levados para a saturação antes da emissão de disparo do relé em uma falta interna, considerando que o fator transitório do TC e o tempo livre de saturação foram corretamente especificados, tão bem como a carga secundária "*burden*".

A simulação de falta é realizada através da variação dos pontos de falta e dos valores de resistência de falta. Devido a razões numéricas (oscilações causadas nos cálculos numéricos), não é possível usar 0.0 ohms e, para isto, utiliza-se valores de resistência muito baixos, da ordem de 0.02 a 0.1 ohm, de tal modo que não se comprometa os resultados. Uma vez que isto corresponde à uma parte ohmica muito pequena da linha, não há influência na medição da distância, a qual usa apenas a parte reativa do loop.

Um sequenciador controla o instante da mudança do valor. O ângulo de inserção da falta é normalmente sincronizado no lado esquerdo da barra para a tensão da fase correspondente. Para múltiplas faltas, a fase em avanço é usada e o ajuste deve ser observado no relé ("lead" or "leg" phase). Para a simulação de faltas externas e internas, simula-se com a possibilidade de remoção pelo sequenciador após 100msseg, simulando a eliminação da falta do dispositivo de proteção externo para verificar o correto dropout do relé sob análise, ou a falta não é removida pelo sequenciador de simulação através de uma falha do disjuntor, para verificar a operação do relé em relação às suas zonas de backup. Para faltas internas, a mesma será eliminada pelo relé pela abertura dos disjuntores. No caso de uma falta monofásica, a tensão da fase sob defeito será muito próxima de zero, desde que o resistor de falta seja de baixa resistência. Para circuitos com religamento monopolar o tempo de eliminação de falta é maior que em circuitos com religamento tripolar, isso ocorre porque as fases sãs induzem na fase defeituosa levando a tempos maiores na eliminação de faltas.

4.0 - PRINCIPAIS FATORES DE INFLUÊNCIA NA MEDIÇÃO DE UM RELÉ DE DISTÂNCIA FRENTE AOS ENSAIOS ELETROMAGNÉTICOS EM TEMPO REAL

Em relação ao cálculo do loop de medição, um relé analógico (eletromecânico e/ou estático) mede a impedância de modo global, enquanto que o relé digital apresenta a facilidade - que é a grande vantagem de medir separadamente as componentes reativas e resistivas da impedância. O relé possui 6 loops de medição. Para defeitos fase-fase, o loop de medição de impedância utiliza três tensões e três correntes compostas e pode ser facilmente calculado pela expressão: $Z_{AB} = (V_A - V_B) / (I_A - I_B)$, por exemplo para um curto entre as fases A e B.

Para defeitos fase-terra, utilizam-se três tensões e três correntes simples, calculado por: $Z_{AN} = V_{AN} / (I_A - k_0 I_n)$, por exemplo para um curto entre a Fase A e o Terra.

Os principais fatores que influenciam a medição de um relé de distância, podem ser enumerados como:

- 1) Fator de terra, k_0 ;
- 2) A resistência de defeito, R_f ;
- 3) A presença ou não de linhas paralelas;
- 4) A presença ou não de carga preexistente que provoca o afastamento ("underreach") ou a aproximação ("overreach"), dependendo do sentido do fluxo de potência.
- 5) O modo de alimentação, unilateral ou bilateral;
- 6) A presença ou não de injeção de corrente em um nó (corrente fornecida por um circuito em derivação);
- 7) Certos defeitos particulares e condições transitórias da linha;
- 8) Erros de medida das impedâncias das linhas e cabos;
- 9) O valor da relação de impedância entre as fontes (fonte forte e fonte fraca);
- 10) O valor da relação entre as impedâncias da linha e da fonte (SIR "System Impedance Ratio");
- 11) O valor da relação das reatâncias e resistências, das fontes em relação ao valor das reatâncias e resistências das linhas e segundo a localização de defeitos;
- 12) Erros de transformadores de corrente e de tensão.

Estudo da influência do fator de terra: O fator de terra só tem influência para defeitos fase-terra e o seu valor é dado por: $K_0 = 1/3[(Z_0 - Z_1)/Z_1]$, aonde Z_0 e Z_1 representam, respectivamente, as impedâncias de sequência zero do solo e de sequência positiva da linha.

O seu cálculo é geralmente, muito imprevisível, devido à dificuldade de se medir a impedância homopolar (terra), que pode ela mesma variar com condições atmosféricas, sobretudo em linhas sem condutor de terra (sem o cabo pára-raio).

Outro fator é que mesmo conhecido o seu valor com precisão, pode não ser possível introduzi-lo como valor de regulação porque, construtivamente, o relé só permite a regulação em valores discretos ou porque o relé permite regular a amplitude e não a fase. Para linhas aéreas, tais considerações não possuem tanta influência pois k_0 é aproximadamente real, porém para cabos subterrâneos isto torna-se diferente, pois há a parcela reativa capacitiva com grande influência.

Estudo da influência da resistência do defeito: A resistência de defeito pode ser através de elementos tais como os suportes de linhas, uma grua, um ramo de árvore e/ou um arco elétrico. Esta resistência pode, assim, ter dois componentes: um chamado de resistência de terra (suportes de linhas, grua, etc.) e outro, conhecido como resistência de arco. Em um defeito entre fases, sem terra, só a resistência de arco existirá. O início do arco entre duas fases da rede pode ser provocado por um balanceamento ou "galloping", fenômeno que se traduz na vibração de condutores de baixa frequência e elevada amplitude induzida pelo vento, provocando a sua aproximação.

Um defeito à terra nas linhas aéreas resulta, habitualmente, do contornamento dos isoladores causado pelo raio ou por uma deficiência dos isoladores. O trajeto de circulação para a terra da corrente provocada por esse defeito compreende a resistência do arco, a resistência de terra que por sinal compreende a impedância dos suportes, a impedância entre a fundação dos suportes e o solo, assim como a impedância dos cabos de guarda, que podem oferecer também um caminho para a terra. Um árvore ou uma grua, pode apresentar uma grande resistência, podendo afetar ou inibir o funcionamento correto dos relés de distância. O arco é um fenômeno resistivo, durante um curto-circuito com arco, a tensão e a corrente estão em fase. Deste modo, o arco aparece como uma resistência no anel de defeito.

A tensão de arco tem uma forma trapezoidal e ela vai se acrescentar à queda de tensão senoidal na linha aérea, com isso há uma deformação que, aliás, é mais pronunciada durante defeitos próximos do ponto de instalação do relé. No entanto, nos relés digitais, a influência desta deformação pode ser desprezada devido ao fato de que estes relés utilizam técnicas de filtragem. O suporte e os condutores de guarda são impedâncias complexas e a impedância entre a fundação dos suportes e a terra é essencialmente, uma resistência. A maior parte dos defeitos em linhas de alta tensão resulta em perda de isolamento da cadeia de isoladores. Neste caso, a corrente de curto-circuito circula no condutor de fase por intermédio do arco, através do isolador, e no suporte metálico, sendo que a partir daí, se encaminha finalmente, para a terra. Isso implica que no ponto de defeito, a resistência de arco e o suporte metálico estejam conectados em série. Com isso, pode-se concluir que, com todas estas variáveis envolvidas, se torna muito difícil representar a impedância de defeito com certo grau de certeza. Habitualmente, considera-se que a impedância de defeito pode ser associada a uma resistência e ser representada no diagrama R,X, como um segmento de reta horizontal, adicionado vetorialmente à impedância da linha no ponto de defeito.

Estudo da influência de carga preexistente e do fluxo de potência durante uma condição de defeito

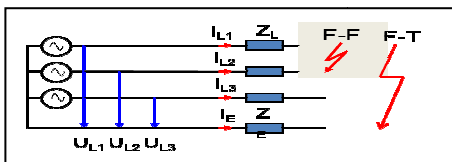


Figura 12 - Falta FasexFase e FasexTerra

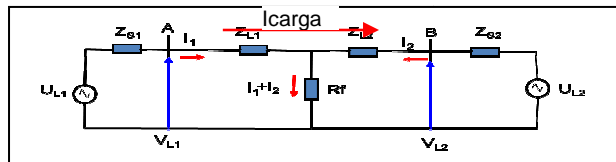


Figura 13 - Falta com infeed intermediário

1) Curto Circuito Bifásico:

Na figura 22, para uma falta bifásica, com resistência de falta, o relé medirá corretamente a reatância da linha ' X_{linha} ', porém a medição da resistência pelo relé terá duas parcelas: a primeira será a própria resistência da linha ' R_{linha} ' e a segunda será dada pela parcela: $R_{falta}/2$. Na figura 23, com fonte em ambos os terminais, para uma falta bifásica, com resistência de falta, a impedância aparente "vista" pelo relé em 'A' será composta de três parcelas: $Z_A = Z_{L1} + R_f + (I_2/I_1) \times R_f$. Supondo que U_{L1} e U_{L2} estejam em fase (assim não há circulação de corrente de carga) e que as impedâncias de fonte e de linha nas duas extremidades, tem o mesmo ângulo de curto-circuito), pode-se aproximar que as correntes de curto-circuito I_1 e I_2 tem a mesma fase e, com isso, a relação I_2/I_1 representa um valor real e a resistência de defeito é aumentada de $(I_2/I_1) \times R_f$, sendo que R_f é composto de uma resistência fixa (por exemplo: resistência do suporte) e por uma resistência de arco que é variável e diminui segundo a fórmula de Van Warrington, com o fator: $I_{arc}^{1,4}$.

Considerando agora que há uma corrente de carga, no sentido de A para B, com um transporte de carga na linha, as f.e.m. V_{L1} e V_{L2} são, necessariamente, defasadas entre elas de um certo ângulo, chamado ângulo de transmissão ou ângulo de carga, dado que a potência ativa é transferida da fonte, que possui o $Z_{ângulo}$ maior, para a fonte com o ângulo menor. Assim, como as correntes de curto-circuito I_1 e I_2 apresentam uma defasagem, o fasor soma $I_1 + I_2$ não está em fase com I_1 e o termo: $R_f \times (I_1 + I_2)/I_1$, apresenta uma componente reativa além da componente resistiva, devido à rotação imposta à R_f .

Portanto, visto de 'A', essa rotação é feita para baixo se I_1 está em avanço em relação a I_2 (carga circulando de A para B) e um relé em 'A' tenderá a medir uma reatância menor e, assim, aproximar o defeito ("overreach"), conforme observado na figura 25 abaixo, isto equivale que há uma possibilidade e que uma falta originada na barra B, em zona 2, possa ser vista, erroneamente, em zona 1. Considerando o fluxo de potência contrário, de B para A, ocorrerá um afastamento do defeito ("underreach"), como pode ser observado na figura 26 abaixo.

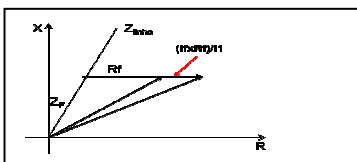


Figura 14: $\theta_A = \theta_B$ (Relé em A)

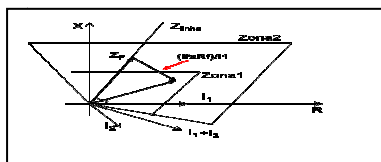


Figura 15: $\theta_A > \theta_B$ (Relé em A)

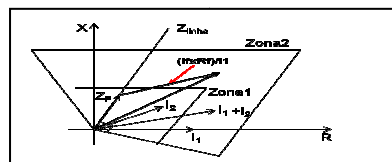


Figura 16: $\theta_B > \theta_A$ (Relé em B)

Uma condição muito importante é a corrente de carga superimposta, em casos aonde a corrente de carga, no terminal oposto ao da falta, chega a ser muito próxima ou até maior que a corrente de curto-circuito, torna-se tarefa difícil para o relé de proteção obter a polarização. Neste sentido torna-se necessário que os relés de proteção tenham um ajuste para compensação da corrente carga.

2) Curto Circuito Monofásico:

Para um curto monofásico, por exemplo, na fase A do circuito, tem-se: $V_{AN} = (R_L + R_E) \cdot i + (L_E + L_L) \cdot di/dt$, com: R_L e R_E : resistências de linha e terra, L_L e L_E : indutâncias de linha e de terra, respectivamente. Para os relés digitais, K_0 é regulado separadamente em R e em X, sendo $k_{0R} = (R_0 - R_L)/3R_L = R_E/R_L$ e $k_{0X} = X_E/X_L$, com $X_E = 1/3(X_0 - X_L)$. Introduzindo estas relações na equação da linha e resolvendo numericamente a equação em dois intervalos sucessivos de medida (2 equações e 2 medidas), obtém-se a resistência e a reatância do anel de defeito em questão, sendo: $R_{anel} = R_L(1 + k_{0R})$ e $X_{anel} = X_L(1 + k_{0X})$. Assim: $R_L = R_{anel}/(1 + k_{0R})$ e $X_L = X_{anel}/(1 + k_{0X})$. Conclui-se que a resistência e a reatância da linha são corretamente medidos pelo relé, se os coeficientes de terra resistivo e indutivo relativos às características da linha: k_{0R} e k_{0X} , forem respectivamente iguais a: k_{0R} e k_{0X} (fatores reais de terra). Isto significa dizer que tanto k_{0R} e k_{0X} devem ser ajustados de acordo com as características da linha protegida. Como k_{0R} e k_{0X} são números complexos, implica que o melhor ajuste para estes fatores deve ser realizado em amplitude e em fase.

Considerando uma resistência de falta, a reatância lida pelo relé, com as considerações acima, será a própria reatância da linha, porém a resistência da linha será: $R_{Lm} = R_L + R_f/(1 + k_{0R})$. Um ponto de destaque é que para faltas com resistência de arco, o ângulo do fator de compensação k_{0R} , introduz uma rotação da resistência de defeito, e a medida da resistência comporta uma componente reativa que introduz um erro na reatância. Na figura 23, considerando um curto-circuito monofásico à xkm à partir de A, a impedância vista pelo relé neste terminal será: $Z_{RA} = jX_{L1} + (R_{L1} + R_f \cdot (I_f/I_A))$ e neste caso $I_f = 3I_{01} + 3I_{02}$, e a corrente $I_A = I_1 + 3I_{01} \times K_{0Ar}$.

Se I_f/I_A é um número real, então a parcela $R_f \cdot (I_f/I_A)$ não introduz nenhum erro na medida da reatância vista pelo relé, porém se esta mesma parcela tem um valor complexo, a mesma introduzirá um erro na reatância X_{L1} , que dependendo da diferença angular, o relé faz uma aproximação do defeito ("overreach") ou um afastamento do defeito ("underreach"), no valor da reatância. Se agora considerarmos uma falta a terra devido à um arco elétrico, a impedância vista pelo relé situado em A, será: $Z_A = R_{L1} + jX_{L1} + (U_{arco}/I_1) \times k$, sendo $k = 1/2$ ou $k = 1/(1 + k_n) = 1/(1 + Z_n/Z_L)$. Esta expressão traduz uma conclusão importante: a impedância "vista" pelo relé de distância em A depende somente da corrente na extremidade, o que representa uma diferença clara em relação ao caso de uma resistência de defeito.

Estudo da influência da relação entre as impedâncias da linha e da fonte nas extremidades

Sejam: Z_{SA} =Impedância da fonte A, Z_{SB} =Impedância da fonte B, Z_L =Impedância da linha e Z_S =Impedância da fonte (função da potência de curto-circuito), considera-se uma rede não-homogênea: X_L/R_L é diferente de X_S/R_S .

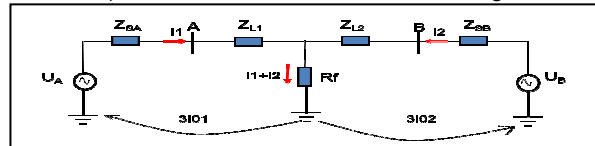


Figura 17: Relação entre as impedâncias de fonte e linha

1) Caso em que as duas fontes tem a mesma impedância de curto-circuito e que as impedâncias de curto-circuito da linha e da fonte diferem

Como exemplo, pode-se ter uma relação $Z_{SB}/Z_{SA} = 1,0$ e $Z_L/Z_S > 1$. O importante é verificar que o desequilíbrio entre as potências de curto-circuito nas duas extremidades de uma linha tem uma influência na medida feita pelos relés de distância em ambas as extremidades. Na figura 27, considerando a falta a 30% da barra B, a impedância "vista" pelos relés em A e em B será:

$$Z_{RA} = Z_{L1} + R_f(I_1 + I_2)/I_A = Z_{L1} + (3I_{01} + 3I_{02})/(I_1 + 3I_{01} \times K_{0r1}) \implies Z_{RA} = Z_{L1} + R_f \times \text{Fator}_A$$

$$Z_{RB} = Z_{L2} + R_f(I_1 + I_2)/I_B = Z_{L1} + (3I_{01} + 3I_{02})/(I_2 + 3I_{02} \times K_{0r2}) \implies Z_{RB} = Z_{L1} + R_f \times \text{Fator}_B$$

-Se o fator é complexo, há um erro devido ao fator $R_f \times \text{Fator}$, e segundo a localização do defeito, o relé faz uma aproximação do defeito ("overreach") ou afastamento do defeito ("underreach") na reatância (dependendo se a parte imaginária é negativa ou positiva).

-Se a resistência de falta é nula (curto sólido), o erro é nulo.

-Se o fator é um número real (pode não haver defasagem entre a corrente em R_f e a corrente "vista pelo relé" e, portanto, não há erro em relação a reatância. Para este caso exemplo, por causa da injeção na resistência de defeito, a proteção "enxerga" um valor da resistência superior ao valor normal sem injeção.

2) Caso em que as duas fontes tem impedâncias de curto-circuito diferentes e que a linha e a fonte tem, em uma extremidade, a mesma impedância de curto-circuito

Como exemplo, pode-se ter uma relação $Z_{SB}/Z_{SA} = 0,62$ e $Z_L/Z_S = 1$.

-Considerando agora um defeito na barra B, da figura 27, a impedância "vista" pelos relés em A e em B, será: $Z_{RA}=Z_{L1}+R_f \times \text{Fator}_A$ e $Z_{RB}=0+R_f \times I_f/I_B$. Neste caso, o relé de distância em A, do lado da fonte mais fraca, faz uma aproximação do defeito ("overreach") no valor da reatância, o relé "enxerga" uma distância menor que a realidade, o que implica que este relé pode ver em ultrapassagem em relação ao valor regulado.

-Para um defeito agora na barra A, a impedância "vista" pelos relés em A e em B, será: $Z_{RA}=0+R_f \times \text{Fator}_A$ e $Z_{RB}=Z_{L2}+R_f \times I_f/I_B$. Neste caso o relé em B, do lado da fonte mais forte, faz um afastamento do defeito ("underreach") na reatância, o relé "ve" uma distância maior do que a realidade, por causa da presença de R_f , que resulta em um erro: $R_f \times \text{Fator}_B$

- Se $R_f=0$, o erro é nulo.

Estudo da influência de uma corrente de alimentação intermediária no nó da rede

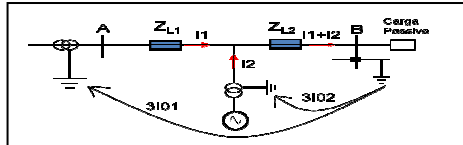


Figura 18: Corrente Intermediária entrando no nó

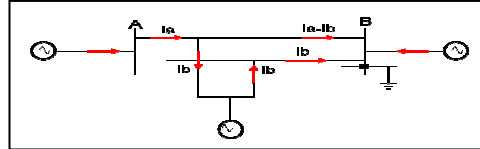


Figura 19: Corrente Intermediária saindo do nó

-Caso de uma alimentação com a corrente entrando no nó

Na figura 28, a tensão "vista" pelo relé em A será: $V_{RA}=Z_{L1} \times I_1 + Z_{L2} \times (I_1 + I_2) + (k_{OL} \times Z_{L1} \times 3I_{01}) + k_{OL} \times Z_{L2} \times (3I_{01} + 3I_{02})$, a qual pode ser rearranjada, sendo: $V_{RA}=Z_{L1} \times (I_1 + 3k_{OL} \times I_1) + Z_{L2} \times ((I_1 + I_2) + 3k_{OL} \times (I_{01} + I_{02}))$, como $Z_{RA}=V_{RA}/(I_1 + k_{OR} \times I_1)$, vem que a impedância "vista" pelo relé será: $Z_{RL1} = (I_1 + 3k_{OL} \times I_1) / (I_1 + k_{OR} \times I_1) + Z_{L2} \times ((I_1 + I_2) + 3k_{OL} \times (I_{01} + I_{02})) / (I_1 + k_{OR} \times I_1)$, sendo:

k_{OL} =coeficiente de terra característico da linha e k_{OR} =valor correspondente a esse coeficiente, regulado no relé. Estes dois parâmetros (em geral vetoriais) são, normalmente, iguais em módulo e em fase, o que nos permite dar à expressão as duas formas seguintes, sendo: $3I_{01}=I_1$ e $3I_{02}=I_2$:

Desta forma pode-se representar como sendo: $Z_{RL1} = Z_{L1} + Z_{L2} \times [1 + (I_2 + 3k_{OL} \times I_2) / (I_1 + k_{OR} \times I_1)]$, ou

$Z_{RL1} = Z_{L1} + Z_{L2} \times \text{Fator}_A$, sendo este fator chamado de coeficiente de injeção monofásica. Com isso o relé em A faz um afastamento do defeito ("underreach").

-Caso de uma alimentação com a corrente saindo do nó

Na figura 29, a tensão "vista" pelo relé em A será: $V_{RA}=I_a \times Z_a + (I_a - I_b) \times Z_b$ e a impedância "vista" pelo mesmo será: $Z_{RA} = V_{RA}/I_a = Z_a + Z_b \times (I_b/I_a) \times Z_b \Rightarrow Z_{RA} = Z_a + (1 - I_b/I_a) \times Z_b$.

Nesta expressão, para o relé em A, o termo $(1 - I_b/I_a) \times Z_b$ é chamado impedância aparente da seção de impedância Z_b para o relé em A. O fator: $(1 - I_b/I_a) \times Z_b$ é o coeficiente de injeção. A impedância vista pelo relé de distância em ausência de injeção $Z_a + Z_b$ é diminuída de um valor igual a $(I_b/I_a) \times Z_b$, o que quer dizer que este "enxerga" o defeito mais próximo do que ele está na realidade e, por conseguinte, tende a fazer uma aproximação ("overreach").

Estudo da influência da indução mútua homopolar para as linhas duplas

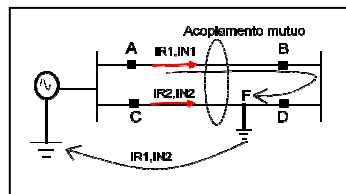


Figura 20: Influência da mútua no mesmo circuito

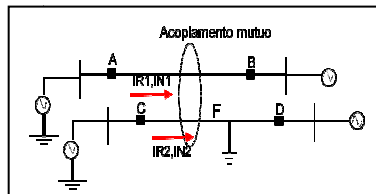


Figura 21: Influência da mútua em circuitos distintos

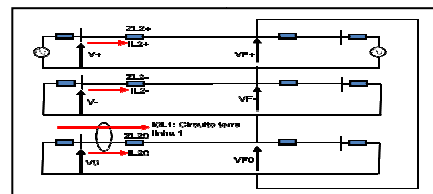


Figura 22: Circuitos sequenciais

A figura 30 representa as correntes de circulação envolvendo duas linhas em paralelo, durante um curto-circuito monofásico. A figura 31 representa um caso mais geral de duas linhas seguindo trajetos paralelos mais não se encontrando em paralelo nas duas extremidades, que é um caso mais típico. A literatura a influência da mútua, neste caso, pode-se fazer sentir até 100 metros ou mais de distância entre as linhas.

Duas linhas, situadas uma ao lado da outra (linhas paralelas), influenciam-se por indução mútua. A queda de tensão em um trecho da linha, não é somente função da corrente que circula neste trecho, dependendo também, por indução mútua, da corrente que circula no trecho de linha vizinho. Para linhas transpostas, esse efeito nas componentes direta e inversa é relativamente reduzido e pode, na prática, não ser levado em consideração (impedância mútua inferior a 5% da impedância própria). Isto implica que, durante as condições normais e dos curtos-circuitos sem terra, as duas linhas podem ser consideradas como independentes. Contudo, para defeitos envolvendo a terra, a indução mútua homopolar vai influenciar, de maneira bastante significativa, a medida do relé de distância.

As tensões podem ser escritas como: $V_d = (Z_{dL2} \times I_{dL2}) + V_{dF}$, $V_i = Z_{dL2} \times I_i + V_{iF}$ e $V_0 = Z_{0L2} \times I_0 + Z_{0m} \times I_{0L1} + V_{0F}$. Adicionando termo a termo, com $V_d + V_i + V_0 = V_C$ e $V_{dF} + V_{iF} + V_{0F} = 0$ e como $I_{L2} = I_{dL2} + I_{iL2} + I_{0L2}$, $I_{N2} = -3 \times I_{0L2}$, $I_{N1} = -3 \times I_{0L1}$ e $Z_{EL2} = (Z_{0L2} - Z_{dL2})/3$, tem-se que a tensão no ponto C, será: $V_C = Z_{dL2} \times (I_2 - (Z_{EL2}/Z_{dL2}) \times I_{N2} \times (Z_{0m}/3 \times Z_{dL2}) \times I_{N1})$, com $Z_C = V_C / (I_2 - k_{OR} \times I_{N2})$ e $k_{OR} = Z_{EL2}/Z_{dL2}$

$$ZC = Z_{dL2} \left(1 - \frac{Z_{0m} \times I_{N1}}{I_2 - k_{0m} \times I_{N2}} \right), \text{ com } k_{0m} = \frac{Z_{0m}}{3Z_{dL2}}, \text{ resulta em: } ZC = Z_{dL2} \left(1 - \frac{k_{0m} \times I_{N1}}{I_2 - k_{0m} \times I_{N2}} \right) \text{ e o erro será: } E$$

O erro é dependente do sinal e relação das amplitudes da corrente

- O erro é positivo quando as correntes de terra em ambas as linhas "enxerga" uma impedância muito grande, e faz um afastamento do relé
- O erro é negativo quando as correntes de terra circulam em direções contrárias. Neste caso o relé aproxima o defeito ("overreach") porque "enxerga" uma impedância menor.

O erro depende do modo de exploração das duas linhas, para tal verifica-se três modos de exploração:

- 1) A linha em paralelo está fora de serviço: a influência da mútua é anulada
- 2) A linha paralela está em serviço: as duas linhas dividem o caminho de retorno pelo terra. O defeito é aproximado (I_{N1} e I_{N2} em sentidos opostos) ou afastados (I_{N1} e I_{N2} no mesmo sentido), segundo os respectivos sentidos das correntes de neutro.
- 3) A linha em paralelo está fora de serviço e conectada à terra nas duas extremidades: essa situação cria um novo condutor de terra constituído pelos três condutores de fase ligados à terra. A impedância de terra aparente é fortemente reduzida e aproxima o defeito. Nestas condições, um defeito no barramento da subestação da extremidade oposta pode ser "visto" em zona 1. A consideração destes três casos mostra que é difícil ter em conta a indução mútua homopolar na regulação dos relés de distância. Em geral, não se utiliza a compensação da indução mútua homopolar (por uma entrada destinada à corrente de neutro da linha paralela nos relés em que essa entrada existe) e, em praxe, regula-se a zona 1 com um valor inferior ao que é normalmente aplicado (por exemplo, deve-se ajustar em um valor menor que a impedância "vista" pelo relé nessa situação). Com o sistema de teleproteção adequado, a segurança de funcionamento não é muito afetada negativamente.

Estudo da relação 'SIR' na performance dos relés de proteção de distância

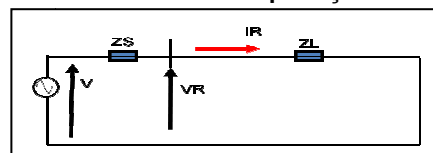


Figura 23: Esquema simplificado

Como a precisão de medida e o tempo de funcionamento são ambas funções da amplitude das grandezas de entrada, tem-se por hábito informar sobre a funcionalidade dos relés, por duas curvas:

- A curva de tensão em função do alcance do relé
- A curva do tempo de operação em função da posição do defeito para diferentes valores de SIR ("System Impedance Ratio").

O termo SIR é frequentemente utilizado para as características de funcionamento das proteções de distância na zona 1, sendo: $SIR = Z_S/Z_L$, aonde Z_S = Impedância da fonte da rede a montante do relé e Z_L = Impedância de linha equivalente ao valor de regulação do alcance do relé.

Pelo exame da figura, $V_R = I_R \times Z_L$, como $I_R = V / (Z_S + Z_L)$, tem-se: $V_R = (Z_L / (Z_S + Z_L)) \times V = V / ((Z_S/Z_L) + 1)$

Com isso deduz-se que, quanto maior é a impedância da fonte (potência da fonte fraca), em relação à impedância da linha até o defeito, menor é a tensão "vista" pelo relé e mais difícil o seu funcionamento. Assim, quanto maior o SIR, mais fraca é a tensão "vista" pelo relé.

5.0 - RECOMENDAÇÕES PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE RTDS COM RELÉS DE DISTÂNCIA

O comportamento do relé de distância diante de um ensaio eletromagnético, utilizando-se o RTDS, exige um conhecimento aprofundado do sistema elétrico de potência e também das funções do relé de proteção assim como o seu algoritmo. O levantamento de dados para o ensaio é premissa básica e os mesmos devem ser os dados reais dos equipamentos envolvidos. Um procedimento de ensaio torna-se essencial, assim como a quantidade de ensaios a serem realizados.

6.0 - RESULTADOS OBTIDOS

No total foram realizados 366 ensaios em tempo real no relé 7SA87 (Família Siprotec 5) que fará a proteção da LT 345kV Interlagos – Ibiúna C1 e C2. Em 6 ensaios (1,6%) o sistema de proteção não apresentou bom desempenho, após correções de ajustes ou em lógicas os ensaios foram realizados novamente onde apresentaram bom desempenho. Abaixo é apresentado o gráfico dos resultados dos ensaios.



Figura 24: Resultados dos Ensaio

7.0 - CONCLUSÃO

Demonstrou neste trabalho a importância de um ensaio eletromagnético em tempo real, utilizando-se o simulador RTDS. Há uma forte tendência de que o Brasil tenha mais equipamentos de RTDS no futuro, fazendo com que haja um ganho de *expertise* por parte dos profissionais da área de sistemas de potência, assim como os centros de pesquisa e as universidades brasileiras.

Com isso espera-se um maior desenvolvimento nas áreas de pesquisa e desenvolvimento, promovendo assim, um aprimoramento tecnológico e investigativo, tendo como resultado um ganho para a confiabilidade do sistema elétrico diante da análise do comportamento dinâmico dos relés de proteção nos ensaios envolvendo as áreas críticas do sistema elétrico brasileiro.

Um profundo conhecimento de sistemas elétricos de potência, de proteção elétrica e dos algoritmos das funções de proteção dos relés, torna-se premissa básica para a análise e verificação dos resultados dos ensaios com o RTDS. Após realização dos ensaios nos referidos relés conclui-se que o desempenho, frente as condições sistêmicas impostas, foi satisfatório e que não apresenta restrições na sua aplicação.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Dommel, H.W., "Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks"
- (2) Dommel, H.W., "Electromagnetic Transients Program Reference Manual: EMTP Theory Book" . Portland, BPA, 1986
- (3) Dommel, H.W., "A method for solving transient phenomena in multiphase system," Proc. 2nd Power System Computation Conference 1966 (Stockholm, Sweden), Rept. 5.8.
- (4) ATP: Alternative Transients Program Rule Book. Leuven, K.U. Leuven EMTP Center, 1987
- (5) Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems" 2. Ed. New York, John Wiley, 1991
- (6) Kimbark, E.W., "Transient Overvoltage Caused by Monopolar Ground Fault on Bipolar DC Line: Theory and Simulation ". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 89, n.4, pp.558-592, Apr. 1970
- (7) HEDMAN, D.E. "Propagation on Overhead Transmission Lines. I: Theory of Modal Analysis". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. 84, n.3, p.p. 200-294, Mar. 1965
- (8) Dommel, H.W. et. al. "Harmonics from Transformer Saturation" IEEE Transactions on Power Delivery, vol.1, n.2, pp. 209-215, Apr. 1986
- (9) Zanneta, L.C.J., " Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas De Potência"
- (10) Araújo, A.E.A. & Neves, W.L.A. "Cálculo de Transitórios Eletromagnéticos em Sistemas de Potência"
- (11) Siprotec 5, Distance Protection, Line Differential Protection and Breaker Management for 1-Pole and 3-Pole Tripping 7SA87, 7SD87, 7SL87, 7VK87. C53000-G5040-C011-1, www.siprotec.com

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Rafael de Oliveira Fernandes, nasceu em Florianópolis (SC) em agosto de 1977. Graduiu-se em Engenharia Elétrica/Sistemas de Potência em 2001 pela Universidade Federal de Itajubá-UNIFEI/MG, aonde foi monitor de Cálculo I e II. Atualmente é Engenheiro de Aplicação/Suporte Técnico na área de Proteção Elétrica e também de Estudos Elétricos da Siemens, em Jundiaí/SP. É coordenador da comissão de estudos da IEC TC95-MT04 (Funções de Proteção e Guias de Aplicação) do Cobei. Email de contato: raf.f@bol.com.br

Nilson José Francischetti Júnior, nasceu em São Paulo (SP) em janeiro de 1972. Ingressou na Faculdade de Engenharia São Paulo FESP em janeiro de 1993, onde foi monitor de diversas disciplinas. Graduiu-se em Engenharia Elétrica/Eletônica em 1998. Pós Graduado em Administração na Escola Superior de Negócios ESAN em 2000. Pós Graduado em Sistema de Proteção na Universidade Federal do Rio de Janeiro UFRJ em 2004. Atualmente é Engenheiro Senior na área de Estudos de Proteção da CTEEP, em Jundiaí/SP. Email de contato: njunior@ctEEP.com.br