



IX International Symposium on Lightning Protection

26th-30th November 2007 – Foz do Iguaçu, Brazil



SURTOS DE TENSÃO INDUZIDOS EM SECUNDÁRIOS DE TRANSFORMADORES COM CARGAS CARACTERIZADAS POR EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS SENSÍVEIS.

João Roberto Cogo

GSI – Engenharia e Consultoria Ltda.

E-mail: gsi@gsiconsultoria.com.br

GSI - Rua Mato Grosso, 120, CEP 12062-120, Taubaté, São Paulo, Brasil

Hermann Wilhelm Dommel

University of British Columbia in Vancouver, Canada,

Professor Emeritus.

E-mail: hermannnd@ece.ubc.ca

Abstract - The grounding of sensitive electronic equipment such as computers, programmable logic controllers (PLC), process control systems, and other electronic equipment is one of the most important considerations towards obtaining an efficient operation of such systems. Such equipment, which for the purposes of this work is called "Sensitive Electronic Equipment – SEE" is very sensitive to faults and low intensity random voltages which have no effect upon the electrical power equipment and upon human beings. In this work, the grounding problem is evaluated, to guide the user on the proper installation of SEEs, so as to prevent them from being damaged. The following items will be discussed:

- Voltages which SEEs are subject to during incidence of atmospheric surges in the distribution overhead lines to which they are connected.
- Sustained voltage that the high voltage supply of SEEs must be able to withstand during line-to-ground faults that originate from atmospheric surges that reach the transmission lines which are connected to the electrical power self producers (or electrical power independent producers).

1 INTRODUÇÃO

As principais funções procuradas no aterramento de equipamentos elétricos, conforme [1] são:

- 1 - assegurar que a diferença de potencial entre as partes metálicas fique a menor possível de modo a garantir a segurança e a proteção contra choques elétricos;
- 2 - evitar incêndios de materiais inflamáveis e ignição de gases em atmosferas explosivas ou combustíveis através de um elemento condutor elétrico efetivo para o fluxo de corrente de falta a terra, de descargas estáticas e de origem atmosférica (relâmpagos);
- 3 - evitar interferência na operação adequada dos equipamentos que fazem parte do sistema elétrico e dos EES's;
- 4 - evitar o superaquecimento devido ao calor gerado em condutas metálicas, malhas de cabos, etc.

Quando ocorrer uma falha de isolamento ao longo de um circuito de energia elétrica, provocando uma conexão elétrica entre o condutor energizado e uma carcaça

metálica, existe tendência de se levar a carcaça ao mesmo potencial elétrico que existe no condutor de força, o que é evitado pelo correto sistema de aterramento.

A malha de terra da subestação abaixadora é, freqüentemente, interconectada com o sistema de aterramento da planta industrial, seja intencionalmente (por um fio terra instalado sob o solo ou junto das bandejas de cabos), ou não intencionalmente através de bandeja de cabos, sistema de condutos, carcaças de duto de barramento, estrutura metálica dos edifícios, etc. Como resultado desta interconexão [1], o sistema de aterramento da planta é levado, durante uma falta, ao mesmo potencial do terra remoto. Logo, deve-se evitar os potenciais perigosos de superfície internos a planta industrial.

Em certos casos (muito raros), podem-se eliminar os potenciais perigosos das carcaças dos equipamentos pelo isolamento efetivo do sistema de terra da subestação do sistema de terra da planta. No entanto, na maioria dos casos, a integração entre as duas malhas (principal e remota) deve ser feita para assegurar valores adequados (aceitáveis) para os potenciais de passo e de toque.

Os fabricantes de EES's, por vezes, especificam técnicas de aterramento para seus equipamentos que podem ser incompatíveis com aquelas especificadas pelo fabricante dos equipamentos que compõem, por exemplo, o sistema de potência.

2 RÚIDO ELÉTRICO

De um modo geral, qualquer distorção sobreposta a um sinal elétrico conhecido, que altere a sua forma de onda característica no tempo, é denominada ruído elétrico (ou distúrbio). Os mais comuns e abrangentes são: cortes de tensão, variação de freqüência, picos de tensão ("spikes"), sag, swell, etc.

Em particular, visando proteger os EES's, surgiu uma preocupação em se conhecer e controlar tais distúrbios (de modo a mantê-los longe das pastilhas semicondutoras sensíveis utilizadas), visto que, entre outras, podem:

- alterar dados armazenados em memórias;

- apagar pontos na tela de um monitor de vídeo;
- alterar dados gravados nos discos magnéticos;
- modificar os dados de um programa em andamento;
- colocar em condução tiristores, transistores, etc., em momentos indesejados;
- danificar componentes;
- etc.

3 CARACTERÍSTICAS DOS EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS SENSÍVEIS

3.1 Considerações gerais

Os sistemas de suprimento de energia elétrica aos EES's, possuem sistemas diversificados de aterramento que genericamente estão relacionados a seguir:

1 - Sinal comum, também referido como "sinal comum DC": é o sistema de referência para linhas de dados, e a parte de sinal que em geral representa o neutro dos EES's sendo bastante sensível as tensões transitórias e requer um ponto de referência estável de operação em relação a tensão de operação;

2 - Barramento da fonte DC: os EES's podem ter vários sistemas de tensão DC diferentes, tais como +5/0/-5V, +12/0/-12V, +24V/-24V, etc;

3 - Barramento de terra do equipamento: é a estrutura metálica dos EES's, que pode incluir o chassi dos diversos elementos que os compõe, bem como a carcaça externa ou gabinete. Alguns fabricantes de equipamentos eletrônicos se referem ao barramento terra dos EES's como "barramento de terra de segurança".

3.2 Formas de aterramento dos equipamentos eletrônicos sensíveis

3.2.1 Aterramento através de um ponto único

Para evitar interferências é desejável manter o sistema de terra dos EES's completamente isolado do sistema de terra relativo ao sistema de energia elétrica. Porém obrigatoriamente, existirão locais onde os dois sistemas de terra devem ser conectados juntos, em apenas um ponto, conforme mostra a Fig 1. Na Fig 1, tem-se:

Nota 1 - A conexão da barra de terra de referência (TR) dos EES's à Malha de terra de Referência (MTR) deve ser feita preferencialmente com fita ou cordoalha, de comprimento máximo igual ao adotado entre condutores da MTR;

Nota 2 - A conexão de equalização entre a MTR e a malha de terra de força é instalada para resolver problemas relativos a baixas frequências, principalmente para atender o critério de segurança pessoal. Podem existir mais de uma destas conexões sem prejuízo para o funcionamento do sistema;

Nota 3 - As barras de neutro (N) isoladas do quadro de distribuição, deverão ser conectadas à barra de terra de segurança (T) e, além disso, deverão existir pontos de

aterramento local no quadro de distribuição através de, pelo menos, um condutor;

Nota 4 - A barra TR deverá ser isolada do painel dos EES's.

Os cabos fase (F), neutro (N) e terra de segurança (CPE, normalmente na cor verde) devem ser isolados de acordo com a classe de tensão do sistema.

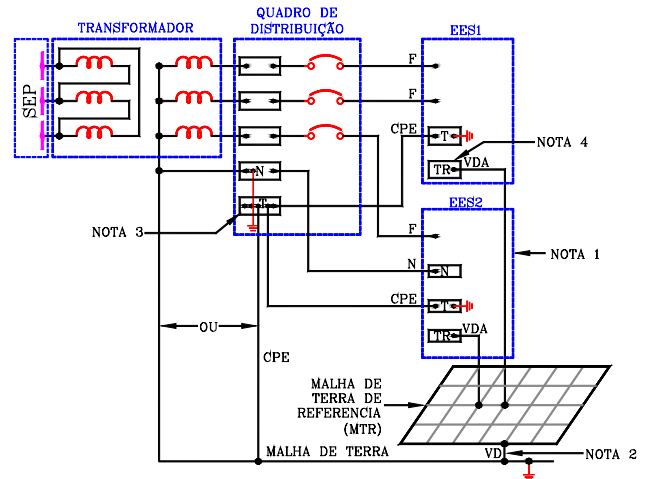


Fig 1 - Alimentação e Aterramento.

Caso o sistema de EES's seja composto de várias carcaças, as conexões de terras internos, e não o terra da carcaça, devem ser dirigidas a um ponto de coleta (T) interno ao painel, e este ponto deve ser conectado ao terra. A coleta dos terras individuais deve ser na forma de um sistema de distribuição radial, ou uma "árvore", evitando percursos de cabos terra em paralelo.

3.2.2 Aterramento envolvendo terras separados/isolados

A falta de entendimento quanto a função e operação do sistema de terra e aterramento de neutro, levou alguns fabricantes a exigirem a instalação dos sistemas de terra dos EES's de forma incorreta.

A alternativa usada foi aterrar os EES's em um eletrodo de aterramento isolado com uma ou mais hastes colocadas no solo e separadas do sistema de eletrodos de aterramento do sistema de potência, não atendendo aos requerimentos do NEC ([2], [3], [4]) e criando potenciais de transferência bastante perigosos.

Por outro lado, enquanto o ruído permanente de baixa intensidade era eliminado pela prática do terra isolado, vários incidentes foram catastróficos. A análise destes indicou que A SEPARAÇÃO DOS TERRAS ERA RESPONSÁVEL POR TENSÕES ELEVADAS impostas aos componentes dos EES's, em condições de tempestade.

Estas tensões ocorriam estando ou não os EES's em operação, onde nota-se [2] que seus componentes

semicondutores resistem a apenas cerca de 20 V ou menos, mesmo para um tempo da ordem de 1µseg. O NEC ([2], [3], [4]) proíbe aterramento múltiplo do condutor do circuito aterrado, no lado da carga do equipamento de serviço.

4 FONTE DE ALIMENTAÇÃO DO TIPO CHAVEADA PARA EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS SENSÍVEIS

Conforme [5], o padrão típico de fonte de suprimento para EES's, depende de cada fabricante, porém, tipicamente está ilustrado na Fig 2 a seguir onde se observa:

- Filtro de entrada: O filtro de linha (entrada) é um circuito que visa atenuar o efeito causado por emissões eletromagnéticas.
- Retificação e refiltragem: Converte a tensão AC da rede em tensão de corrente contínua (CC) utilizando-se, por exemplo, uma ponte retificadora.
- Circuito de potência: Nesse bloco existem os transistores, IGBT, etc para o chaveamento e o transformador, que isolam o circuito alimentado da rede.
- Retificação e filtro de saída: Neste bloco, a retificação feita pelos diodos é acoplada à saída por um indutor que promove o "alisamento" da corrente e transferência de energia no período onde os diodos estão cortados.
- Circuito de controle: Neste bloco, apesar de conter várias funções, normalmente é utilizado um único circuito integrado (CI) que realiza as funções de amplificador de erro, oscilador, modulador em largura de pulsos (PWM) e outras. Normalmente, no caso da modulação PWM, o sinal de realimentação que chega ao CI faz variar a largura do pulso que irá chavear os elementos de controle (transistores, IGBT, etc.).

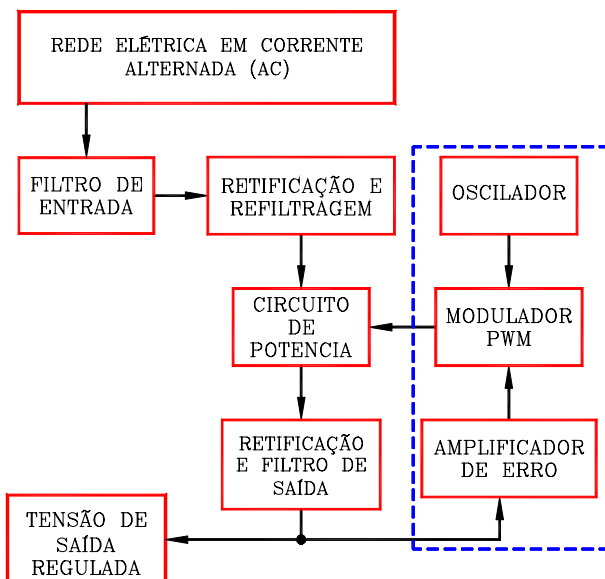


Fig 2 - Diagrama em blocos de fonte chaveada.

5 CURVA CBEMA

Conforme [6], a Fig 3 representa a curva originalmente desenvolvida pela Computer Business Equipment Manufacturers Association (CBEMA) que descreve a tolerância de EES's no que diz respeito a magnitude e a variação de tensão nos sistemas de suprimento de energia.

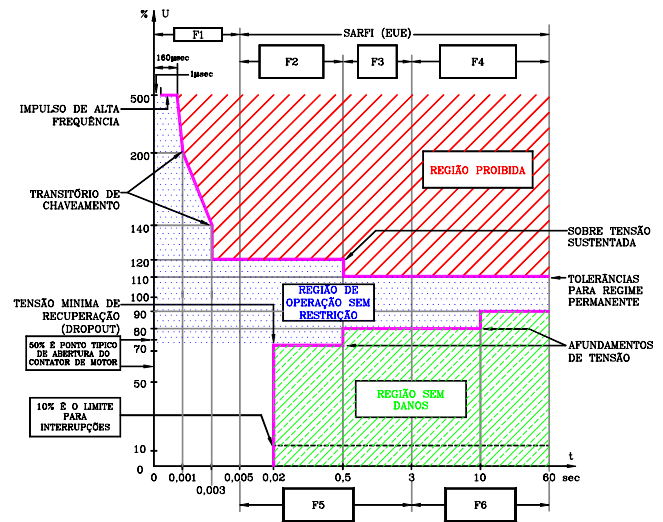


Fig 3 - Curva característica da tensão suportável pelo isolamento em função da duração do evento definida pela CBEMA

Na Fig 3 tem-se os pontos (P), as áreas (A) e as faixas (F):

F1 - Transitórios

F5 e F6 - Interrupções momentâneas e temporárias

F2, F3, F4 - Sag e/ou swell instantâneas, momentâneas ou temporárias, respectivamente.

Muitas queimas de EES's têm origem nas descargas atmosféricas. As tensões elevadas do tipo de impulso provocadas pelas descargas atmosféricas que caem próximas aos EES's, têm causado a destruição de tais dispositivos. Os efeitos mais danosos das descargas atmosféricas são aquelas que resultam em um arco elétrico no sistema de distribuição de energia provocando, por consequência, faltas a terra.

6 PROBLEMAS PRÁTICOS

No Brasil, os auto produtores de energia elétrica (ou produtor independente de energia), o concessionário local de energia elétrica e a rede de distribuição que alimenta um EES podem ser representados como na Fig 4.

Para verificar os efeitos dos raios no sistema elétrico foi considerado que o SEP mostrado na Fig 4 representa o concessionário de energia elétrica e o auto produtor de

energia elétrica opera em paralelo ao Ponto de Acoplamento Comum (PAC) onde o alimentador com carga elétrica especial também está conectado.

Na Fig 4 tem-se:

S1 a S3: chaves que representam os disjuntores correspondentes do sistema de distribuição;

TL1: linha de transmissão que interliga o SEP ao PAC;

LL: carga local do auto produtor;

T1, T2, etc.: transformador de distribuição com EES's

TL2, TL3, etc.: linhas de distribuição aos diversos consumidores;

L1, L2, etc.: cargas dos consumidores com EES's

Na Fig 4 admitiu-se que a potência de curto circuito é de 750 MVA ($X/R=10$) em 13,8 kV.

6.1 Caso 1 - Efeito do Raio incidente diretamente na linha de distribuição

Para ilustrar os valores de sobre tensão durante tempestades que podem aparecer no circuito, simula-se uma descarga atmosférica no começo da linha de distribuição TL2, na barra HA (fase A do circuito trifásico). Admite-se ainda uma ruptura de fusível e, portanto, apenas as duas fases da linha (HB e HC) ficam sujeitas a tensão na frequência de 60 Hz (vide Fig 5).

Para as simulações referentes às descargas atmosféricas utilizaram-se os dados práticos indicados na própria Fig 5 e a resistência de aterramento foi considerada de 1 Ω .

O programa de simulação utilizado foi o MicroTran® (MicroTran é marca registrada da Microtran Power System Analysis Corporation) que utiliza a técnica desenvolvida por Dommel [7], e que tem sido aperfeiçoada desde 1975. Adotou-se passo de integração de 0.005 μ seg e o tempo de simulação de 30 μ seg. Os pára-raios que foram utilizados na simulação apresentam as seguintes características:

Rated Voltage (RMS)	12 kV
Continuous Operating Voltage (RMS) com 1mA ..	9,6 kV
Temporary Overvoltages 1seg (RMS).....	13,9 kV
Temporary Overvoltages 10seg (RMS).....	13,2 kV
Residual Voltage Switching Surges (1 KA)	23,4 kV _{crest}
Residual Voltage Switching Surges (2 KA)	24,2 kV _{crest}
Residual Voltage Switching Surges (3 KA)	24,7 kV _{crest}
Residual Voltage 8/20 μ sec (5 KA).....	26,1 kV _{crest}
Residual Voltage 8/20 μ sec (10 KA).....	27,6 kV _{crest}
Residual Voltage 8/20 μ sec (20 KA).....	30,1 kV _{crest}
Residual Voltage 8/20 μ sec (40 KA).....	33,2 kV _{crest}

O surto (descarga atmosférica ou raio) foi representado como sendo uma fonte de corrente como mostra a Fig 6.

Para o transformador considerou-se, conforme [9], o modelo apresentado na Fig 7, considerando-se pequenas simplificações onde se eliminou os indutores de acoplamento e os resistores de amortecimento.

Os resultados de simulação estão ilustrados na Fig 8.

Os cabos de transmissão de sinais deverão estar preferencialmente, instalados por completo em tubos de aço

galvanizado, de parede espessa e conexões com luvas largas, aterrados nas duas extremidades. Na impossibilidade da instalação dos tubos recomenda-se cabos para sinais que tenham blindagem eletromagnética, visto que a cordoalha (malha) apenas bloqueia o campo elétrico e não o campo magnético.

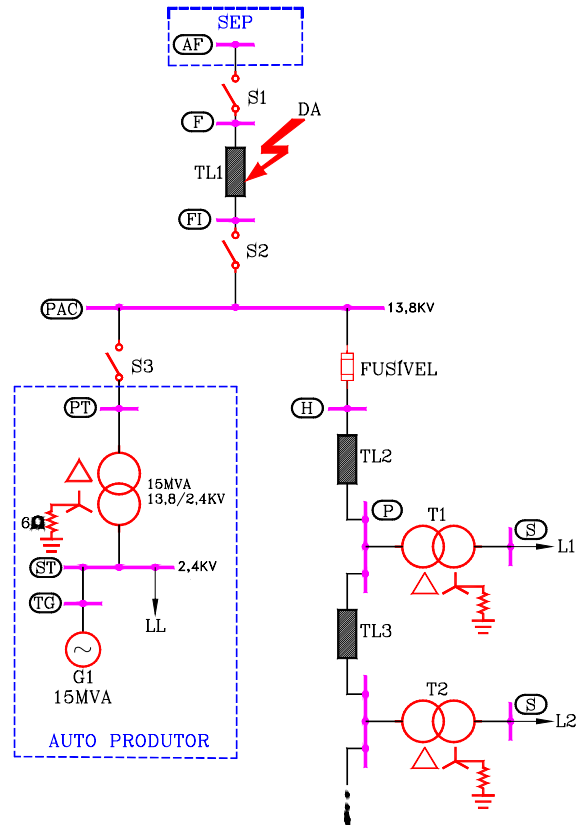


Fig 4 - Sistema em análise

É recomendável garantir um bom contato entre as placas de controle com a estrutura, através de chapas ou malhas de cobre colocadas entre as placas e a estrutura suporte. Note que os efeitos dos campos elétricos são eliminados por aterramento de um ponto e os campos magnéticos em dois pontos.

6.2 Caso 2 - Descargas atmosféricas convergindo para falta fase-terra

As descargas atmosféricas incidentes próximas às linhas de transmissão aumentam o potencial de terra e induzem tensões elevadas nos próprios condutores convergindo normalmente para faltas a terra.

Neste item considerando a Fig 4 admite-se que uma descarga atmosférica (DA) atinge um determinado ponto da linha de transmissão (TL1) em 13,8 kV e converge para uma falta fase terra. Foi admitido ainda que o sistema de proteção instalado no SEP detecta a corrente de falta a terra e provoca a abertura do disjuntor 1 (representado por S1).

Com a abertura de S1 o sistema elétrico restante constituído pelo auto produtor e os demais consumidores com EES's será do tipo isolado e a detecção da falta a terra não é mais possível de ser feita pelos relés de sobre corrente. A abertura do disjuntor 3 (representado por S3 na Fig 4), será feita pela proteção de sobre tensão que normalmente está ajustada para algo da ordem de 2,5 seg. Enquanto esta proteção não atuar, a tensão entre fase e terra (nas três fases) do PAC e por consequência os demais alimentadores TL2 e TL3 estão mostrados na Fig 9 para o lado primário de T1 onde nota-se uma sobre tensão transitória da ordem de 26 kV e uma sobre tensão sustentada da ordem de 19,4 kV (valor de pico).

Na Fig 10 tem-se as tensões fase neutro para o lado secundário de T1. Observar nesta figura que enquanto existir a falta fase terra com o disjuntor (S1) do concessionário conectado, a tensão fase terra é influenciada e após a abertura de S1 a tensão fase terra (AS, SB, SC) em regime permanente ficam iguais a condição pré falta (transformador T1 conectado em delta estrela).

7 CONCLUSÃO

Para garantir a segurança pessoal e ao mesmo tempo propiciar potenciais adequados em sistemas onde existam EES's em grandes quantidades, por exemplo, Centro de Processamento de Dados (CPD), é uma prática comum o uso de pisos falsos. Os cuidados de instalação para o piso e os pontos de aterramento são mostrados em [5].

Observa-se que as recomendações constantes em [5] devem ser seguidas aliadas a instalação de supressores de surto adequados nos terminais dos EES's pois, mesmo com pára raios instalados no sistema de distribuição, em 13,8 kV no caso do exemplo, os surtos de tensão que são transferidos atingem valores superiores a 7 kV, como mostra a Fig 8. A ausência do pára raios no lado de distribuição provoca sobretensões transitórias da ordem de 60 kV. Tensões com estas magnitudes, de acordo com a curva mostrada na Fig 3, não são suportadas pelos EES's instalados no lado de baixa tensão.

Mesmo com a proteção feita por pára-raios, os surtos obtidos atingem valores bastante elevados conforme mostrado na Fig 8, indicando que um critério de equalização de potencial para os EES's e para segurança pessoal fica mais eficiente e seguro.

As descargas atmosféricas que caem próximas das linhas de transmissão normalmente provocam faltas a terra. Estas faltas a terra provocam sobre tensões temporárias que basicamente dependem da configuração resultante após a atuação do sistema de proteção. Conforme mostram os resultados de simulação (Fig 9 e Fig 10) para o sistema da Fig 4, observa-se a presença de uma sobre tensão sustentada de 1,72 pu e transitória de 2,3 pu após a abertura do disjuntor (S1). Na Fig 9 este tipo de sobre tensão oriunda de um sistema isolado é bastante crítica, pois afeta muitos consumidores próximos.

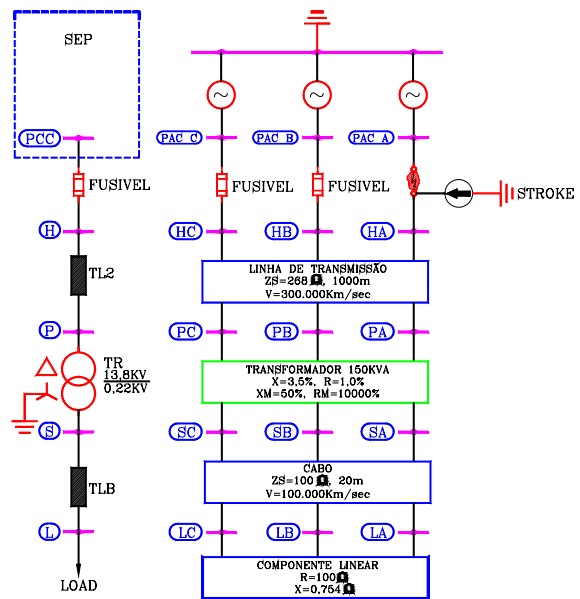


Fig 5 - Sistema para analisar o efeito dos surtos transferidos.

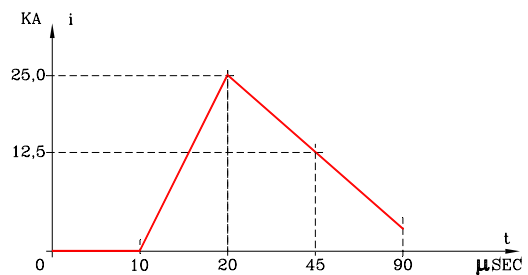


Fig 6 - Forma de onda utilizada para o raio incidente mostrado na Fig 5

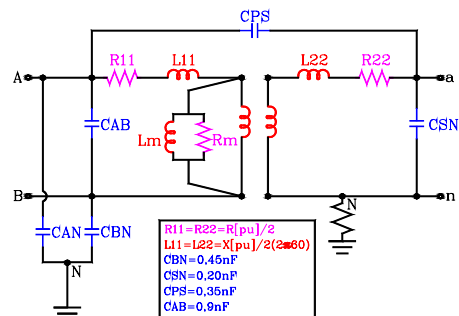


Fig 7 - Modelo por fase do transformador adotado na simulação

Destaca-se ainda que os concessionários de energia normalmente adotam pára raios com Tensão de Operação Contínua "Continuous Operating Voltage" (RMS) de 9,6 ou de 10 kV que se mostraram inadequadas para suportar as correntes resultantes da condição operacional mostrada no item 6.2 quando ocorre a abertura do paralelo entre o auto produtor e o concessionário local, ficando o auto produtor suprindo as cargas do sistema de distribuição.

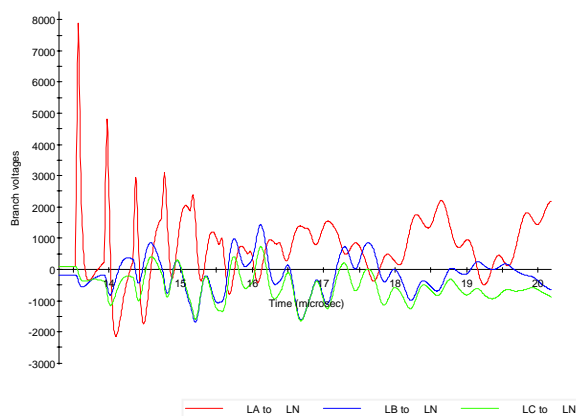


Fig 8 - Forma da onda de tensão entre fase e neutro do EES (LA-LN, LB-LN e LC-LN) de acordo com o circuito da Fig 5.

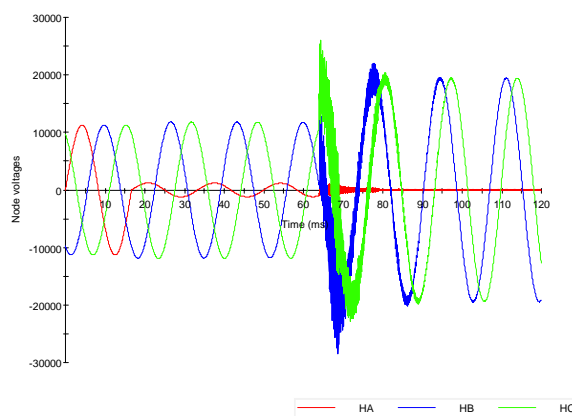


Fig 9 - Forma de onda de tensão entre fase e terra nos terminais do transformador de distribuição do EES (HA, HB e HC) de acordo com o circuito da Fig 4.

9 REFERÊNCIAS

- [1] IEEE STD 141-1993. "IEEE Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants - (Red Book) - Chapter 7 - Grounding.
- [2] IEEE STD 142-1981. Revisão 1991-1994 - "IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems - Green Book: Chapter 5 Sensitive Electronic Equipment Grounding."
- [3] The National Electrical Code (NEC) - Hand Book National Fire Protection Association (NFPA); Batlerymarch Park, Quincy MA.
- [4] National Electric Safety Code, Published by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., Accredited Standard Committee C2-1993.
- [5] COGO, J.R.; Monteiro, C.M.F. de O.: Aterramento para Equipamentos Eletrônicos sensíveis "Problemas e Soluções" - Revista Eletricidade Moderna - Ano XXIII, nº 255 - Junho de 1995 - página 118 à 127.
- [6] Information Technology Industry Council (ITI). Disponível em <http://www.itic.org>. Acesso em 02 jul. 2007.
- [7] Dommel, H.W. "Non-Linear and Time-Varying Elements in Digital Simulation of Electromagnetic Transients". IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-90, pp. 2561-2567, Nov/Dec. 1971.
- [8] IEEE Standard 446-1987, IEEE Recommended Practice for Emergency and Standby Power Systems for Industrial and Commercial Applications (IEEE Orange Book).
- [9] Obase, Paulo Futoshi, Surtos atmosféricos transferidos a rede secundária via transformador. Dissertação de mestrado Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas, 2004.

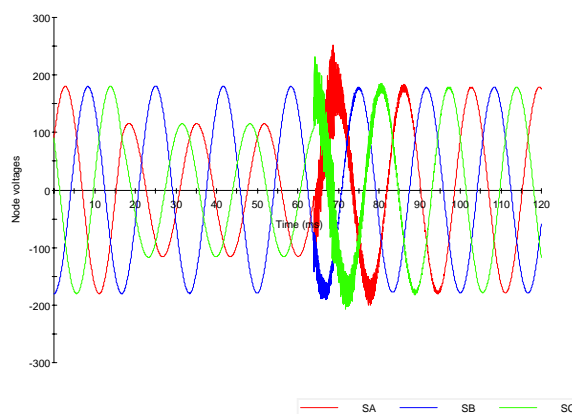


Fig 10 - Forma de onda de tensão entre fase e terra nos terminais do EES (SA, SB e SC) durante falta a terra no lado de 13,8 kV de acordo com o circuito da Fig 4.

Referência GSI:

- SPIDA20.dat caso sem pára raio falta fase terra
- SPIDA21.dat corrente no pára raio de 424A
- SPIDA30.dat surto com pára raios e RAT=1 Ohms
- SPIDA40.dat surto sem pára raios e RAT=1 Ohms
- SPIDA51.dat surto com pára raios e RAT=1 Ohms
- SPIDA52.dat surto com pára raios e RAT=2 Ohms
- SPIDA55.dat surto com pára raios e RAT=5 Ohms