



**GRUPO XIII
GRUPO DE ESTUDO DE INTERFERÊNCIAS, COMPATIBILIDADE ELETROMAGNÉTICA E QUALIDADE DE
ENERGIA - GCQ**

CONCEITOS E PROCEDIMENTOS DE ENGENHARIA QUE ESTÃO SENDO REVISADOS

Sergio Toledo Sobral *	A.P.Reis Miranda	Sérgio Cordeiro Sobral	Georges Azzam
ST&SC		ST&SC	UVA
Serviços Técnicos Ltda	Consultor	Serviços Técnicos Ltda	Univ. Veiga de Almeida

RESUMO

O IT examina uma lista de conceitos e procedimentos de engenharia, listados na seção 1.0, que estão sendo reexaminados, ou devido a novos testes de laboratório, ou devido a uma larga comprovação operacional. O IT mostra que algumas dessas medidas, procedimentos e conceitos, ainda não foram levadas em conta nas normas correspondentes.

PALAVRAS-CHAVE

Resistência; junções; amortecimento; interferência; ruídos; ondas trafegantes; descargas.

1.0 – INTRODUÇÃO

O IT aborda os seguintes assuntos:

- Cada junção de condutores (nas malhas de terra, nas ferragens de concreto armado, nas escadas metálicas, nas esteiras de cabos, etc) é semelhante a um "operador" que causa importantes reduções nas intensidades das ondas de tensão e de corrente, que trafegam até à junção, produzidas por perturbações aperiódicas (raios, operação de disjuntores e chaves seccionadoras, manobras de circuitos, energização de equipamentos, etc).
- Eletrodos verticais, inclinados ou horizontais curtos, com 150 ohms cada, ligados a algumas junções de malha de terra são chamados eletrodos de amortecimento. Esses eletrodos maximizam a transformação da energia da perturbação aperiódica em calor.
- Nos "pontos quentes" da malha são aterrados os dispositivos e partes que injetam perturbações aperiódicas, tais como: condutores e hastes captoras de raios em uma subestação; captores de raios de edificações e edículas; pára-raios de potência; pórticos e estruturas metálicas; torres e postes de sustentação de antenas; postes de iluminação externa; cercas e alambrados.
- Nos "pontos frios" da malha, a intensidade das ondas de tensão e de corrente já foi bastante reduzida, devido às junções de condutores e eletrodos de aterramento encontrados no percurso. Nesses "pontos frios", podem ser aterradas as partes mais sensíveis dos circuitos: barramento de terra ("single point") das Salas Eletrônicas; "single point" das instalações de telecomunicação; partes metálicas dos "containers" de telecomunicação e telefonia celular; e parte das esteiras de cabos próximos aos "containers".
- Entre qualquer "ponto quente" e qualquer "ponto frio" devem existir pelo menos 3 eletrodos de amortecimento, em qualquer percurso sobre a malha de terra.*
- Não existe equipotencialidade em um sistema de aterramento submetido a perturbações aperiódicas. Entretanto depois de encontrar diversas junções e eletrodos de amortecimento, a intensidade das ondas de corrente e de tensão estarão bastante reduzidas (equipotencialidade grosseira).*
- Novos condutores que interliguem pontos remotos da malha, by-passando junções e eletrodos de amortecimento, podem aumentar, ao invés de diminuir, a intensidade das ondas de tensão e de corrente.*
- O IT lembra que a reorganização dos cabos sob a forma de "chicotes" ("bundles"), cada um deles destinado a um painel específico (com um condutor terra em cada "chicote"), minimiza os ruídos de modo comum e diferencial que chegam aos painéis. A minimização ocorre mesmo que uma onda de corrente consiga trafegar até o interior da

Sala Eletrônica. A reorganização mencionada é feita na entrada da Sala Eletrônica, nas imediações do “single point”.

- i) O valor da resistência de aterramento, quer seja alto, quer seja baixo, nada indica “á priori” sobre a segurança da instalação elétrica, tanto para perturbações periódicas como aperiódicas.
- j) Um valor baixo de resistência de aterramento (por exemplo menor que 3 ohms), pode aumentar o valor das tensões induzidas nos circuitos eletrônicos das instalações e de seus vizinhos. O problema pode ser resolvido com eletrodos de amortecimento.
- k) Para determinar a posição de captadores de raios o Modelo Eletrogeométrico é o único aceito pela norma italiana por ter base experimental, ao contrário do Modelo de Franklin e do Modelo das Malhas.
- l) A metodologia básica da indústria elétrica e dos engenheiros eletricitistas utiliza circuitos com impedâncias próprias e mútuas e fontes de corrente e de tensão. O objetivo principal é determinar o valor das tensões e das correntes em todos os pontos de circuitos complexos. Quando e se necessário, o campo elétrico em um local pode ser calculado com base na tensão local e o campo magnético local pode ser calculado com base nas correntes que o originam.
- m) Cada impedância própria de um condutor ou mútua entre dois condutores é calculada com base na soma dos envoltórios de fluxo que abraçam um condutor, ou dois condutores, até o condutor de retorno. Faz-se o mesmo raciocínio alternando a função de condutor de retorno. Somam-se os resultados. Obtém-se as impedâncias própria e mútua específicas para um trecho do circuito, que não dependem de caminhos escolhidos pelo usuário.
- n) O IT compara valores calculados por meio de circuitos deste tipo com valores correspondentes, medidos no laboratório do LACTEC, em Curitiba, com relação à tensão induzida ao longo de um condutor, instalado no interior de um eletroduto de aço galvanizado de 4,5 “de diâmetro, com 9 m de extensão. Foram feitos cálculos e medições considerando o eletroduto nas seguintes condições: não aterrado; aterrado em uma extremidade; aterrado nas duas extremidades; bi-aterrado, com a rosca existente na parte mediana do eletroduto sem curto-circuito, idem com a rosca curto-circuitada, para aumentar a eficiência da blindagem. Em todos os casos chegou-se a valores calculados quase idênticos aos medidos. Não foi utilizado o conceito de “impedância de transferência”. Foi quase insignificante o efeito da coroa metálica do eletroduto nos cálculos e nas medições.
- o) O IT comenta que alguns engenheiros eletrônicos estão introduzindo na bibliografia relativa a controle de interferência (IEC e CIGRE), métodos alternativos, que pretendem calcular os fenômenos de blindagem por meio de transformações sucessivas de campos elétricos e magnéticos utilizando diretamente as leis de Maxwell. O processo é muito mais complexo que o método que utiliza a Teoria de Circuitos e exige grande virtuosismo do usuário para a escolha dos caminhos de integração mais adequados. *Em geral não conduzem a resultados compatíveis com os medidos.*
- p) Informa-se que medições encomendadas à USP pelo eng A. P. Reis Miranda em Fevereiro de 2007, com um tubo em anel, com 9 mm de espessura, com condutor interior isolado de cobre, *confirmaram, a equipotencialidade de cada seção reta do tubo e a existência de f.e.m. induzida (campo elétrico) sobre o condutor interior.* Estes resultados negam interpretações sobre a natureza e a modalidade de utilização da “impedância de transferência” de uma blindagem e conceitos da norma IEC da série 60096.
- q) O IT lembra que é mais correto o termo “perturbações aperiódicas” que “perturbações de alta frequência” (Ver ANEXO B).

2.0 – A IMPORTÂNCIA DE JUNÇÃO DE CONDUTORES

Segundo a Teoria das Ondas Trafegantes [10] as junções de condutores são como “operadores” que reduzem o valor instantâneo das ondas de tensão e de algumas ondas de corrente, que trafegam nos condutores da junção.

As Figuras 1 e 2 ilustram o caso de uma junção de 1 para 3 condutores. Os fatores de refração (F”) e de reflexão (F’), para ondas de tensão, podem ser determinados como segue:

$Z_F = Z_A / 3$ (paralelo das 3 impedâncias de surto de saída, todas iguais a Z_A)

$F'' = 2 \cdot Z_F / (Z_A + Z_F) = 2 \cdot (Z_A / 3) / (Z_A / 3 + Z_A) = 0.5$

$F' = (Z_F - Z_A) / (Z_F + Z_A) = (Z_A / 3 - Z_A) / (Z_A / 3 + Z_A) = -0.5$

A Figura 3 mostra o resultado final da aplicação dos “operadores” à junção, como é detalhado na Ref [13]: O valor instantâneo das ondas de tensão caiu pela metade em todos os 4 condutores ligados à junção. O mesmo acontece com o valor instantâneo da corrente nos 3 condutores de saída da junção. O valor da corrente aumenta apenas no condutor de entrada da junção. Além disso, 75% da potência que chega à junção é refratada para os 3 condutores de saída da junção e 25 % é refletido pelo condutor de entrada da junção.

A Figura 4 mostra o caso da junção de uma torre (com impedância de surto de 150Ω), que suporta uma antena, ligada a uma pequena malha de terra (com 2Ω). Os cálculos dos valores das ondas de corrente, de tensão e os valores de potência correspondentes, são mostrados na Figura 5.

Vê-se que devido ao pequeno valor da resistência da malha, o valor da corrente refletida, que retorna pelo poste, é quase o dobro do valor da onda de corrente incidente. Isto pode causar perturbação nos circuitos eletrônicos da instalação e de seus vizinhos.

Apenas 5,2% da potência instantânea é refratada para a resistência de 2Ω , sendo transformada em calor por $i^2 R$. Inicialmente 94,8% da potência incidente é refletida, percorre o poste para cima, reflete-se na sua extremidade e volta à malha, onde perde outros 5,2 %. O processo se repete até que toda a energia seja transformada em calor. Isto expõe os circuitos eletrônicos locais e vizinhos a longos ciclos de indução com corrente elevada.

Os testes realizados no LACTEC mostraram que quando uma onda de corrente percorre as diversas junções das ferragens de uma canaleta de concreto armado, muito próximo entre si, reduz-se o efeito de “operador” das junções. Mesmo assim, mediu-se uma redução de tensão de diversas dezenas de kV em apenas 6 m de extensão.

3.0 –ELETRODOS DE AMORTECIMENTO

O eletrodo de amortecimento é um eletrodo vertical usual, de pequenas dimensões, com valor ôhmico de cerca de 150 Ω (ver Figura 6). Este valor é da mesma ordem de grandeza da impedância de surto dos condutores subterrâneos. Este casamento de impedâncias maximiza a conversão em calor da energia das ondas que chegam até o eletrodo de amortecimento. A Figura 7 mostra que 3 eletrodos de amortecimento ligados em cascata, (com um espaçamento adequado entre eles) conseguem reduzir a potência aplicada de 100% para apenas 8,8% (os cálculos são semelhantes aos mostrados na Figura 5).

4.0 – ESTRATÉGIA DO ATERRAMENTO SELETIVO USANDO PONTOS “FRIOS” E “QUENTES” DA MALHA

O uso das junções e dos eletrodos de amortecimento permitem estabelecer a estratégia de aterramento seletivo para controle de perturbações aperiódicas, descritos nos itens (a), (c), (d), (e),(f) e (k) da INTRODUÇÃO deste artigo. O assunto foi analisado com detalhe nas Referências [3,4,6,12,14].

5.0–COMO SE CONSEGUE UMA “EQUIPOTENCIALIDADE GROSSEIRA” DA MALHA PARA PERTURBAÇÕES APERIÓDICAS - O PROBLEMA DOS CONDUTORES DE INTERLIGAÇÃO

As junções e os eletrodos de amortecimento esclarecem também os problemas de “equipotencialidade grosseira” e da inconveniência dos condutores de interligação, mencionados nos itens (f) e (g) da INTRODUÇÃO. Ver Ref [9].

6.0 – TÉCNICAS DE PROJETO DAS CABLAGENS PARA MINIMIZAR PERTURBAÇÕES

Um sumário gráfico desses procedimentos é apresentado na Figura 8, que inclui também os procedimentos mencionados no item 4.0. Estes procedimentos foram aplicados com sucesso há mais de 25 anos em usinas, subestações, instalações de telecomunicação e telefonia celular de diversas empresas.

Nos percursos externos, os cabos são segregados pela sua importância e possibilidade de causar ruídos, em até 5 vias de cabos distintas. Na entrada da Sala Eletrônica os cabos são rearrumados em “chicotes” cada um destinado a um painel específico. Existe um condutor terra em cada “chicote”. Foi testado no LACTEC que os chicotes minimizam os ruídos de modo comum e diferencial que chegam aos painéis. Ver referências [3,4,5,6,7,8,12,14].

7.0 – RESISTÊNCIA DE ATERRAMENTO

O item (i) da INTRODUÇÃO está de acordo com o fato de existirem usinas e subestações operando há mais de 25 anos com valores de resistência acima de 40 ohms [1,2, 3,4, 6, 11, 12, 14]. A segurança das instalações e de seus vizinhos dependem dos seguintes itens: das junções, dos eletrodos e anéis de amortecimento; do aterramento seletivo em pontos “frios” e “quentes”; da técnica de condução de cablagens; das blindagem e seus aterramentos; do uso adequado de “chicotes”. Mas a segurança da instalação e de seus vizinhos não depende de um valor baixo da resistência de aterramento da instalação, muito pelo contrário.

8.0 – INTERFERÊNCIAS EM INSTALAÇÕES VIZINHAS

A experiência mostra que danos em instalações vizinhas ocorrem por indução à distância (devido a resistências baixas da malha local), ou devido ao aterramento do sistema de suprimento externo em um ponto “quente” da malha. A perturbação chega ao vizinho via suprimento externo. Há uma preocupação injustificada com a possibilidade da elevação de potencial de terra impulsiva da malha local atingir instalações próximas. Não há evidências reais sobre esse tipo de perturbações. Se existisse, seria problemática a proximidade com qualquer prédio onde o SPDA é aterrado em simples eletrodos de aterramento concentrados e freqüentemente de elevado valor, o que não ocorre realmente. O assunto merece medições cuidadosas para servir de calibração de modelos de simulação digital.

9.0-UTILIZAÇÃO PREFERENCIAL DA TEORIA DE CIRCUITOS NOS CÁLCULOS RELATIVOS A INTERFERÊNCIAS ELETROMAGNÉTICAS

O ANEXO A ilustra como a técnica clássica de circuitos permite calcular de maneira simples e elegante, diversos casos de tensão induzida em condutores situados dentro de blindagens metálicas. Não é necessário ou recomendável o uso do conceito de “impedância de transferência”. Os resultados calculados foram idênticos aos medidos no LACTEC. Isto justifica o que é dito nos itens (l), (m), (n), (o), (p) da INTRODUÇÃO.

10.0– CONCLUSÕES

Já existe atualmente um certo consenso nas equipes de revisão de Normas sobre os itens (f) e (i) da INTRODUÇÃO deste artigo. Espera-se que este consenso seja estendido também para itens (g) e (j), que são conseqüências naturais dos primeiros. O item (k) está sendo avaliado pela norma brasileira.

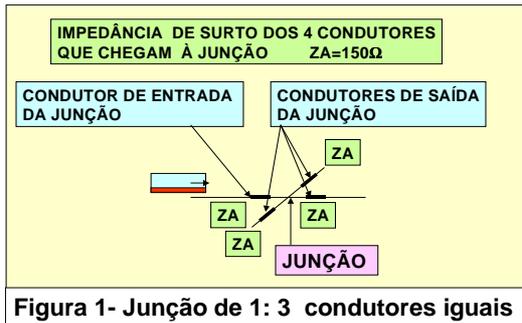


Figura 1- Junção de 1: 3 condutores iguais

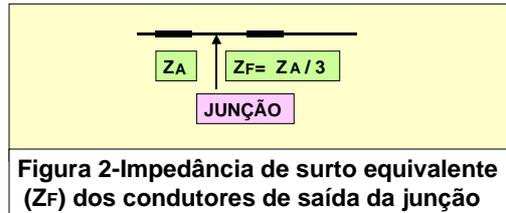


Figura 2-Impedância de surto equivalente (ZF) dos condutores de saída da junção

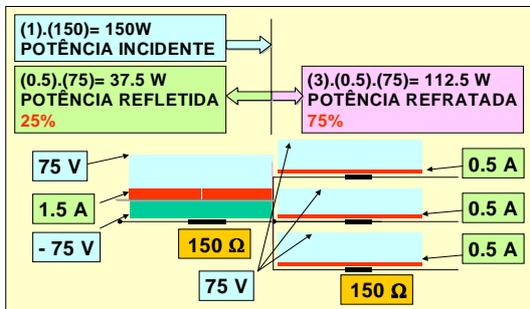


Figura 3-Onda de tensão incidente de 100 V. Ondas de corrente e de tensão modificadas pela junção. Potência instantânea antes e depois da junção

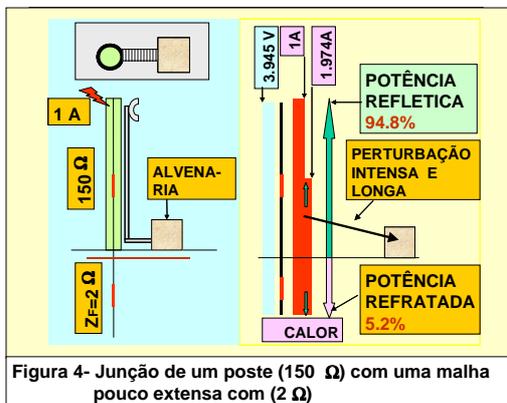


Figura 4- Junção de um poste (150 Ω) com uma malha pouco extensa com (2 Ω)

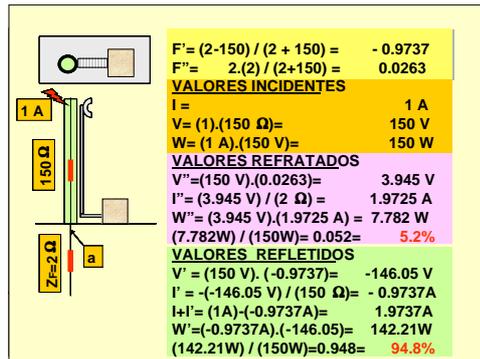


Figura 5-Cálculo dos valores refletidos e refratados em uma junção de 150:2 Ω

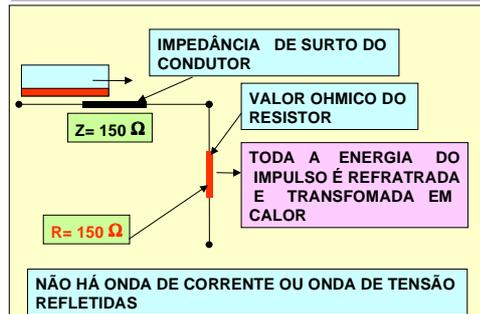


Figura 6-A idéia básica do eletrodo de amortecimento casamento de impedância para maximizar transformação da energia em calor

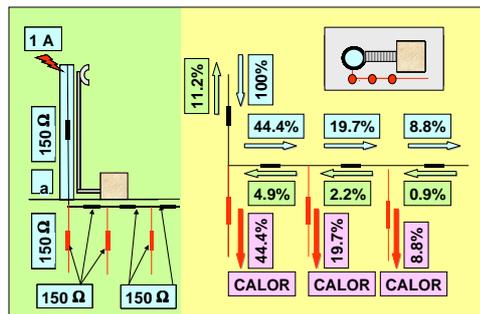


Figura 7- O efeito drástico de 3 eletrodos de amortecimento em cascata

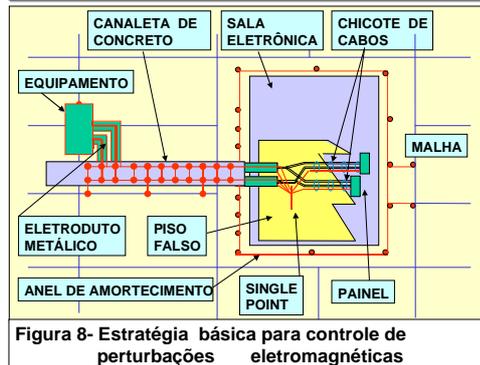


Figura 8- Estratégia básica para controle de perturbações eletromagnéticas

Acredita-se que já é tempo das normas incluírem recomendações sobre os itens (a), (b),(c),(d),(e), e (h), que já são utilizados há mais de 25 anos, com pleno sucesso, em diversas instalações de potência e de telecomunicações da maior relevância, além de terem comprovações experimentais e teóricas.

Os itens (l), (m), (n), (o), (p) recomendam que a bibliografia sobre controle de interferências em sistemas de potência e de telecomunicações, retorne à Teoria de Circuitos, que é a linguagem básica e natural da Indústria Elétrica, sistematizada por Charles Steinmetz. Isto porque ultimamente a Teoria de Circuitos está sendo lentamente invadida por métodos menos apropriados, menos seguros e menos práticos, mais adequados a algumas aplicações de engenharia eletrônica.

11.0- REFERÊNCIAS

- [1]- S.T. Sobral (IESA), J. O. Barbosa, J.V.C. Nunes, E. Chinelli, A. Ferreira Netto (LIGHT), D. Mukhedkar (ECOLE POLYTECHNIQUE DE MONTREAL). "Ground Potential Rise Characteristics Of Urban Step - Down Substations Fed By Power Cables- A Practical Example" IEEE Summer Meeting, 1987, San Francisco
IEEE Trans. On Power Delivery, Vol.PWRD-3, N^o4, OCT 1988 pp 1564-1572ry, Vol.PWRD-3, N^o4, OCT 1988 pp 1545-1552
- [2]- A. P. Reis Miranda "Instalações Elétricas Industriais" - Livro (ver especialmente Cap. 3 e item 3.17e Cap. 10 e item 10.6)
- [3]- S. T. Sobral (IESA) , Murilo V. Serra (FURNAS), Abelardo Milanez (IESA).
"Controle de Interferências e Compatibilidade Eletromagnética na Usina e na Subestação de Serra da Mesa".
XIV SNPTEE, Belém, 1997. Grupo XI (Sobretensões), artigo GSI/10
- [4]- S.T. Sobral (ST&SC), Alcení J. Sérgio, Osmar Tessmer, Ronni M. Campaner (INTERTECHNE/LEME-/ENGEVIX/ESTEIO) João A. Oliveira (COPEL). "Controle de Interferências e Compatibilidade Eletromagnética na Usina e na SE de Salto Caxias, da Copel"
XIV SNPTEE, Belém- 1997, Grupo VIII, IT GSU/23
- [5]- S. T. Sobral (ST&SC) , S. C. Sobral (ONS) , M. M. Nogueira, F. L. A. Souza E A. R. M. Souza (LIGHT). "Condições Onde Pode Existir Equipotencialidade em um Sistema de Aterramento Submetido a Perturbações Periódicas e Aperiódicas".
XV SNPTEE, Foz do Iguaçu - Brasil, 1999. Grupo X (Sobretensões), artigo GSI/24
- [6]- David S. Rezende (COPEL), José E.D. Olesko (COPEL), Sérgio T. Sobral (ST&SC) . "Controle de Interferências Eletromagnéticas nas Subestações da Copel" VII ERLAC- Encontro Regional Latino - Americano da CIGRE
- [7]- Sérgio T. Sobral (ST&SC), Flávio Luciano A. Souza, Murilo M.Nogueira, Georges Azzam (LIGHT)
"A Técnica de Blindagem Adaptada Para Instalações Digitalizadas que Alimentam Cargas Metropolitanas"
XVI -SNPTEE - São Paulo- 2001 - STE I- Seção Técnica Especial
- [8]- Sérgio T.Sobral (ST&SC), David S.Rezende, José Eduardo D.Olesko (COPEL)
"A Técnica de Disposição da Cablagem em "Chicotes" para Reduzir os Ruídos de Modo Comum e Diferencial- Resultado das Medições" XVI -SNPTEE - São Paulo- 2001 - STE I- Seção Técnica Especial
- [9]- S.T.Sobral (ST&SC), S.C.Sobral (ONS), J.R. Dellacqua (ESCELSA), A.P.Ribeiro (ENERSUL), David S.Rezende (COPEL)
"Em que condições pode existir equipotencialidade aproximada durante descargas atmosféricas em ferragens de prédios que abrigam instalações digitalizadas" XVII SNPTEE- GCQ 22
- [10]- C.F.Wagner , G.D.McCann "Wave propagation in transmission lines" Westinghouse T&D Reference Book
- [11]- S.T.Sobral (ST&SC), S.C.Sobral (ONS), J.R. Dellacqua (ESCELSA), A.P.Ribeiro (ENERSUL), David S.Rezende (COPEL) "Casos em que uma resistência de aterramento com valor muito reduzido pode prejudicar o desempenho de instalações digitalizadas" XVII SNPTEE- GCQ 22
- [12]- Sergio T. Sobral (ST&SC), Ariceu Martineli (ESCELSA), Antonio Luiz de Assis (ESCELSA), José Romeu Dellacqua (ESCELSA), Aroldo Cozer Boynard (ENERSUL), Antonio Pádua Ribeiro (ESCELSA) "Interference Control- Power Plants, Substations, Telecommunication Installations" IEEE Transmission & Distribution Latin America 2004
- [13]- Sérgio T.Sobral (ST&SC), David S. Resende(COPEL), Sérgio C. Sobral (ONS) "Como As Resistências De Aterramento Controlam Perturbações Periódicas E Aperiódicas: Verdades E Mitos" XVIII SNPTEE- Curitiba- 2005 Artigo GCQ-05
- [14]- Sérgio T. Sobral (ST&SC), Ariceu Martineli (ESCELSA), Antonio Luiz de Assis (ESCELSA), José Romeu Dellacqua (ESCELSA), Aroldo Cozer Boynard (ENERSUL), Antonio Pádua Ribeiro (ESCELSA).
"Design Procedures Used By Two Brazilian Utilities To Control Electromagnetic Interferences in Power Substations, Power Plants and Telecommunication Installations" International Symposium on Electromagnetic Compatibility 2005
- [15]- William D. Stevenson, Jr. "Elements of Power System Analysis" McGraw-Hill livro (principalmente itens 2.2 a 2.7)

ANEXO A – CÁLCULO DE TENSÕES EM CONDUTORES NO INTERIOR DE ELETRODUTOS METÁLICOS

A1- COMENTÁRIOS INICIAIS

A ST&SC contratou o LACTEC no período de 4 a 8 NOV 2002 para realizar diversos testes relativos à blindagens, que deram origem ao Relatório UTAT-098/2002, preparado pelo LACTEC. Cinco destes testes determinaram o valor da tensão de um par de condutores situados no interior de um eletroduto de aço galvanizado com 4,5" de diâmetro. Analisa-se a seguir 5 desses casos, comparando valores medidos e calculados por meio de circuitos.

A Figura 9 mostra a configuração dos circuitos de teste usado no laboratório. A Figura 10 mostra o circuito equivalente, utilizado nos cálculos. Todas as distâncias indicadas na Figura10 e os demais parâmetros elétricos utilizados nos cálculos constam da lista de parâmetros apresentados a seguir

A.2- PARÂMETROS BÁSICOS

$$D_o = 9,0 \text{ m} \quad D_{13} = 1,0 \text{ m} \quad D_{23} = 0,25 \text{ m} \quad D_{12} = 1,25 \text{ m} \quad I = 150,0 / 0,0^{\circ}$$

$$r_3 = (4,5) \cdot (2,54) / 2 = 5,72 \text{ cm} = 0,0572 \text{ m} \quad \text{raio externo do eletroduto de aço galvanizado de 4,5"}$$

$$r_{3i} = 0,0543 \text{ m} \quad \text{raio interno do eletroduto}$$

$$A = 0,000957 \text{ m}^2 \quad \text{área da coroa circular relativa ao eletroduto de 4,5"}$$

$$\rho_s = 0,15 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot \text{m} \quad \text{resistividade do aço.}$$

$$R_3 = 0,00015 \Omega / \text{m} \quad \text{resistência do eletroduto metálico de 4,5"} \quad R_3 = (\rho_s) \cdot (1,0) / A$$

$$r_2' = 0,008 \text{ m} \quad \text{raio do condutor equivalente que representa a malha de terra.}$$

$$r_t = 0,002 \text{ m} \quad \text{raio do condutor que interliga uma extremidade do eletroduto metálico com a malha}$$

$$R_2 = 0,0 \quad \Omega / \text{m} \quad \text{resistência do condutor equivalente da malha de terra.}$$

$$R_r = 0,0005 \Omega \quad \text{resistência de contato da rosca (arbitrado como cerca de 3 vezes o valor de R3).}$$

$$R_t = 0,0 \quad \Omega \quad \text{resistência do condutor de cobre que interliga uma extremidade do eletroduto metálico com a malha de terra.}$$

A.3- CÁLCULOS DEPOIS QUE O CIRCUITO EQUIVALENTE ESTA MONTADO

$V_3 = (I) \cdot (Z_{13})$, em V --- Tensão induzida ao longo do trecho (c-d) do eletroduto, causado pela passagem de (I) no trecho (a-b).

$V_4 = (I) \cdot (Z_{14})$, em V --- Tensão induzida ao longo do trecho (c-d) do par situado dentro do eletroduto, no caso do eletrodo não estar aterrado ou estar aterrado só de um lado.

$I_R = - V_3 / (Z_3 + R_r)$, em A--- Corrente de blindagem que percorre o eletroduto no sentido contrário de (I), quando o eletroduto está bi-aterrado. O valor da corrente I_R é limitado pela impedância longitudinal Z_3 do eletroduto (3) e pela resistência de contato R_r da rosca

$V_4' = (I) \cdot (Z_{14}) - (I_R) \cdot (Z_{34})$, em V---Tensão final aplicada ao longo do trecho (c-d) do par, incluindo a parcela negativa induzida pela corrente de blindagem. Como o par está aterrado na outra extremidade, então V_4' é igual ao ruído de modo comum entre a ponta aberta do par e a terra local.

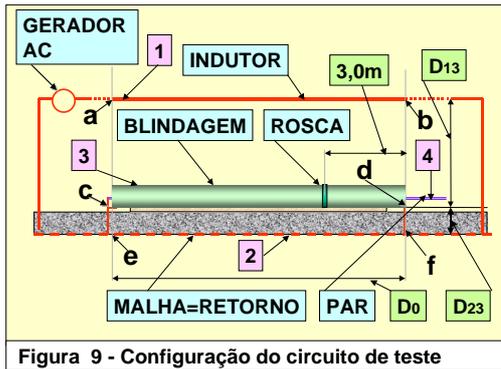


Figura 9 - Configuração do circuito de teste

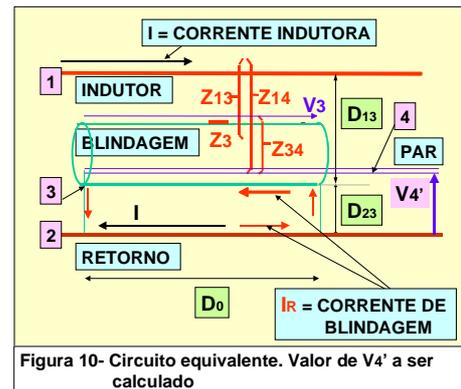


Figura 10- Circuito equivalente. Valor de V_4' a ser calculado

Os testes mostraram que o valor de (V_4) é praticamente o mesmo, quer o eletroduto esteja sem aterramento e mono-aterrado. Mesmo quando se substituiu o eletroduto de aço por outro idêntico de PVC, o valor de (V_4) não se alterou.

Quando o eletroduto de aço galvanizado foi bi-aterrado, o valor de (V_4) cai para um valor muito menor (V_4'). O valor de (V_4') é ainda menor quando a rosca é curto-circuitada, fazendo $R_r = 0$. Os valores calculados e medidos foram praticamente idênticos:

Rosca normal : $V_4' = 0,0834$ Volts (medido) $V_4' = 0,0830$ Volts (calculado)
 Rosca curto-circuitada : $V_4' = 0,0640$ Volts (medido) $V_4' = 0,0640$ Volts (calculado)

A.4- CÁLCULO DAS IMPEDÂNCIAS PROPRIAS E MÚTUAS DO CIRCUITO

A Ref [15] mostra claramente que a impedância mútua Z_{13} tem duas parcelas $Z_{13} = Z_{13}' + Z_{13}''$

a) Z_{13}' leva em conta a soma de todos os envoltimentos de fluxo produzidos pela corrente I (circulando por (1) e retornando por (2), que abraçam simultaneamente (3) e (2):

$$jZ_{13}' = j2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{13}' = j2 \cdot \pi \cdot f \cdot (2 \cdot 10^{-7} \cdot \ln(D_{12}/D_{13})) : Z_{13}' = 0,0 + j 0,754 \cdot 10^{-4} \ln(D_{12}/D_{13}), \text{ em } \Omega/\text{m}$$

D_{12} é a distância do indutor (1) ao retorno (2), em m D_{13} é a distância do indutor (1) ao eletroduto (3), em m.

b) Z_{13}'' leva em conta a soma de todos os envoltimentos de fluxo produzidos pela corrente I (circulando por (2) e retornando por (1)), que abraçam simultaneamente (3) e (1): $Z_{13}'' = 0,0 + j 0,754 \cdot 10^{-4} \ln(D_{21}/D_{23}), \text{ em } \Omega/\text{m}$

c) Finalmente $Z_{13} = 0,0 + j 0,00124 \Omega$, para os 9 metros.

d) Como o campo magnético no interior de (3) é nulo, o valor de Z_{13} é praticamente igual a $Z_{14} = 0,0 + j 0,00124 \Omega$.

e) A impedância própria do eletroduto Z_3 tem 5 parcelas, 4 delas fechando-se pelo ar e uma fechando-se no interior do metal: Corrente I_R circulando em (3) retornando por (2). Corrente I_R em (2) retornando por (3). Corrente I_R no trecho vertical (c-e) retornando por (d-f). Corrente I_R no trecho vertical (d-f) retornando por (c-e).

O quinto trecho é influenciado pela permeabilidade (μ) do aço e tem a forma: $Z_3^V = R_3 + j (\mu) \cdot 0,754 \cdot 10^{-4} \ln(r_3/r_3i)$, em Ω/m , onde (r_3) e (r_3i) são os raios externo e interno do eletroduto (3), em m.

Como a coroa metálica é muito fina, o peso dessa parcela é relativamente pequeno, mesmo com valores

elevados de (μ).

f) Finalmente o valor da resistência própria de (3) para os 9 metros é:

com a rosca curto-circuitada: $Z_3 = 0,00135 + j 0,00369 \Omega$

com a rosca não curto-circuitada: $Z_3 + R_r = 0,00185 + j 0,00369 \Omega$

g) Os envoltimentos de fluxo que envolvem simultaneamente o par (4) e o eletroduto (3) e vão até o retorno (2) são os mesmos que envolvem o eletroduto (3) até o retorno (2). Assim sendo tem-se:

$$Z_{34} = 0,0 + j 0,00369 \Omega$$

Deve ser lembrado que o trabalho seminal de Maxwell foi feito antes da invenção da corrente alternada. Após o advento da C.A, um dos fundadores da GE, Charles P. Steinmetz, sistematizou os procedimentos do que é hoje chamado a Teoria de Circuitos, a linguagem básica da Indústria elétrica moderna. A enorme vantagem do uso de circuitos fica clara quando se tenta calcular o valor da tensão induzida no interior de um eletroduto levando em conta o efeito da corrente de blindagem e de uma rosca, utilizando-se diretamente as leis de Maxwell para manipular campos elétricos e magnéticos. É uma tarefa que requer grande virtuosismo por parte de quem tenta, principalmente se não souber “a priori” os resultados esperados.

ANEXO B - PERTURBAÇÕES “APERIÓDICAS” E NÃO “PERTURBAÇÕES DE ALTA FREQUÊNCIA”

O que caracteriza perturbações como: descargas atmosféricas, operação de disjuntores e chaves e manobra de circuitos, é o fato da fonte perturbadora ser aplicada no circuito e não se repetir periodicamente. Neste caso o circuito responde por suas impedâncias próprias e mútuas de surto, segundo as expressões a seguir, que são válidas para cada valor instantâneo das ondas de tensão e corrente (e) e (i): $(e_1) = (Z_1) \cdot (i_1)$ $(e_2) = (Z_{12}) \cdot (i_1)$

Tem-se que (Z_1) é a impedância de surto própria de um trecho elementar do condutor 1. Tem-se também que (Z_{12}) é a impedância de surto mútua entre um trecho elementar do condutor 1 e um trecho elementar do condutor 2. O cálculo do parâmetro (Z_1) leva em conta todos os parâmetros L, C, R, G referentes a um trecho elementar do condutor 1. O mesmo vale para (Z_{12}) com referência a trechos elementares dos condutores 1 e 2.

Assim sendo, é mais correto reservar o nome de perturbações de alta frequência para as perturbações periódicas causadas por harmônicos de alta frequência, pois os valores de (Z_1) e de (Z_{12}) variam pouco com a frequência. Esses parâmetros são praticamente invariantes se R e G forem pequenos.

Para um trecho elementar de um condutor horizontal, vertical ou inclinado vale a expressão $(e_1) = (Z_1) \cdot (i_1)$ para todos os pontos das ondas de corrente e de tensão. Portanto não é correto utilizar.

$e_1 = L (d i_1 / dt)$ para a frente de onda aperiódica pois os conteúdos informacionais das duas expressões são diferentes. Na verdade $e_1 = L (d i_1 / dt)$ vale apenas para uma bobina, onde a geometria da mesma desabilitou os parâmetros C, R e G deixando apenas L.

C12.0 – DADOS BIBLIOGRÁFICOS

Sérgio Toledo Sobral

Graduado: PUC / RJ - Rio de Janeiro, 1964 – Engenheiro Eletricista
Companhia: ST & SC Serviços Técnicos Ltda.
Cargo: Diretor e proprietário

Artur Pereira Reis Miranda

Graduado: 1947 Instituto Superior Técnico de Lisboa
Companhia: Consultor

Sérgio Cordeiro Sobral

Graduado: UERJ (1994); Mestrado PUC (1997)
Companhia: ONS- Operador Nacional do Sistema Elétrico
Cargo: Engenheiro Senior

Georges Azzam

Graduado: UGF (1977) Especialização em Sistemas Potência (1982)
Companhia: ST & SC Serviços Técnicos Ltda.
Cargo: Coordenador de Estudos Especiais