

Desenvolvimento de novas metodologias para proteção de equipamentos eletrônicos em subestações de alta tensão

M. C. Souza, M. L. y Gonzalez, S. Visacro F. (UFMG) e H. G. Tostes (ESCELSA)

Resumo - Neste trabalho os autores apresentam as etapas do projeto de pesquisa e desenvolvimento realizado entre a Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG e a Espírito Santo Centrais Elétricas – ESCELSA, que teve como objetivo geral a definição de metodologias, procedimentos e práticas de proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis instalados em subestações de alta tensão contra interferências eletromagnéticas, especificamente as provocadas pela incidência direta e indireta de descargas atmosféricas nas subestações e nas suas proximidades.

Palavras-chave— Descargas Atmosféricas. Equipamentos Eletrônicos Sensíveis. Interferências Eletromagnéticas. Protetores Contra Surtos. Subestações.

I. INTRODUÇÃO

As subestações de alta tensão têm experimentado significativa transformação com a crescente digitalização e automação das mesmas, sobretudo no que concerne à instalação de equipamentos eletrônicos sensíveis que têm as funções de supervisão, controle e proteção. Por outro lado, esses equipamentos apresentam uma susceptibilidade muito maior em relação aos equipamentos eletromecânicos tradicionais, quanto a diversas solicitações transitórias existentes no ambiente de uma subestação [1]. Dentre tais solicitações, podem ser citadas as operações de manobras, condições de falta e descargas atmosféricas. Os campos eletromagnéticos transitórios gerados por esses fenômenos acabam causando perturbações nos equipamentos eletrônicos sensíveis, com possíveis conseqüências na integridade dos mesmos [2].

Tal situação tem requerido a adoção de metodologias, procedimentos e práticas específicas de proteção desses equipamentos, envolvendo questões técnicas complexas, tais como a influência que a configuração física das redes e instalações das subestações exercem nos surtos no percurso destes até os equipamentos, a caracterização do perfil das solicitações transitórias, a configuração e detalhes dos aterramentos elétricos e as características necessárias da filosofia, topologia e dispositivos empregados para proteção des-

ses equipamentos eletrônicos sensíveis.

As soluções de proteção que vêm sendo empregadas têm origem demasiadamente empírica ou, muitas vezes, são baseadas em tecnologias "importadas" e desenvolvidas para aplicações em ambientes muito diversos daquele típico das subestações brasileiras. A prática das empresas concessionárias de energia tem demonstrado que tais soluções não atingem um nível satisfatório. Em decorrência, é frequente a danificação de equipamentos eletrônicos sensíveis em subestações, com comprometimento do desempenho das funções de supervisão, controle e proteção e, por conseguinte, da qualidade de energia fornecida pelas empresas, inclusive com aumento do risco de interrupção do serviço.

Esse contexto justifica o desenvolvimento de uma investigação sobre a proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis. Tal desenvolvimento constitui a proposta deste trabalho, que tem como objetivo geral a definição de metodologias, procedimentos e práticas de proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis instalados em subestações de energia de alta tensão, quanto aos surtos provocados por descargas atmosféricas.

II. ETAPAS DO PROJETO

Para a realização deste projeto, dividiu-se o mesmo em seis etapas, que foram as seguintes: Pesquisa Bibliográfica, Caracterização do Ambiente das Subestações de Alta Tensão, Definição do Perfil Representativo dos Surtos, Investigação de Soluções Potenciais, Definição de Critérios de Proteção, e por fim, Avaliação dos Resultados.

A primeira etapa do projeto, constitui-se na realização de uma pesquisa bibliográfica em artigos, normas e livros nacionais e internacionais, conseguindo-se diversas referências bibliográficas no tema Proteção de Equipamentos Eletrônicos Sensíveis. Tais referências foram analisadas e fez-se um documento [3], composto pelo resumo de cada uma das referências levantadas durante a pesquisa bibliográfica.

Nas seções seguintes, as outras etapas do projeto serão descritas em maiores detalhes.

III. CARACTERIZAÇÃO DO AMBIENTE DAS SUBESTAÇÕES DE ALTA TENSÃO

Com o objetivo de identificar a influência do ambiente físico da subestação (topologia de redes de alimentação, disposição de equipamentos nos pátios e na casa de comando, trajeto das canaletas etc.) na propagação dos surtos, entre os

Marcelo C. Souza: aluno de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da UFMG (e-mail: marcelo_cs@cpdee.ufmg.br).

Manuel L. y Gonzalez: professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG (e-mail: manuel@cpdee.ufmg.br).

Silvério Visacro F.: professor do Departamento de Engenharia Elétrica da UFMG (e-mail: silverio@cpdee.ufmg.br).

Hércules G. Tostes – Supervisor de Manutenção e Operação de Telecomunicações da ESCELSA (e-mail: herculestostes@escelsa.com.br)

pontos de introdução dos mesmos na subestação e os equipamentos eletrônicos sensíveis, realizou-se uma investigação sobre a configuração das subestações da Espírito Santo Centrais Elétricas – ESCELSA, escolhidas para a realização do projeto. Tais subestações são: SE Paineiras, SE Conceição da Barra e SE Praia, que apresentam, respectivamente, tensões máximas de 34,5 (kV), 69 (kV) e 138 (kV).

Essa etapa constituiu-se na análise de desenhos e diagramas elétricos, e ainda, visitas às subestações, com o objetivo de caracterizar o ambiente das mesmas, listando seus principais equipamentos, bem como a disposição dos mesmos nos pátios e nas casas de comando. Além disso, outros dados foram avaliados, tais como o índice cerâmico e a resistividade do solo do estado do Espírito Santo.

Alguns pontos durante a realização dessa etapa foram observados, dentre eles, o fato de que os cabos de diferentes funções, inclusive cabos de aterramento, são lançados dentro das canaletas dos pátios e das casas de comando das subestações estudadas, sem nenhum tipo de separação entre os mesmos.

Outro ponto observado, é que o aterramento dos painéis e equipamentos instalados no interior das casas de comando das subestações, geralmente é feito por um cabo de aterramento que parte da malha de aterramento da subestação, e entra pela canaleta da casa de comando, juntamente com todos os outros cabos provenientes dos pátios da subestação.

IV. DEFINIÇÃO DO PERFIL REPRESENTATIVO DOS SURTOS

A próxima etapa do projeto concentrou-se na investigação das características das descargas atmosféricas e a sua interação com os sistemas elétricos, especificamente os sistemas que compõem um subestação. Além disso, avaliou-se um estudo da amplitude dos efeitos causados pela incidência de descargas atmosféricas nas instalações de uma usina hidroelétrica [4]. Por fim, de posse desse estudo, fez-se uma estimativa das possíveis diferenças de potencial que podem aparecer entre dois pontos das subestações da ESCELSA.

A. Descargas Atmosféricas

O processo físico de formação das descargas atmosféricas é complexo e dependente de diversos fatores. Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos tendo em vista a coleta e a medição das correntes associadas às descargas atmosféricas, bem como a avaliação estatística de seus parâmetros descritivos. Dentre esses parâmetros, destacam-se a forma, a amplitude e os tempos de frente e de cauda da onda de corrente da descarga atmosférica. Essa onda apresenta um formato impulsivo, com um rápido crescimento em seus instantes iniciais, seguido de uma redução mais tênue de perfil.

B. Mecanismos de Interação entre as Descargas Atmosféricas e as Subestações

A Figura 1 ilustra os principais processos de acoplamento entre as descargas atmosféricas e as subestações. Esse acoplamento pode ocorrer de duas formas, como indicado pelos números mostrados na figura: descargas diretas, que atingem diretamente a subestação (1), ou as linhas de transmissão, distribuição e de comunicação ligadas à mesma (4, 6 e 9). E descargas indiretas, que atingem as proximidades da

subestação (2), ou das linhas ligadas à mesma (1, 3 e 8).

Além das descargas diretas e indiretas, outro mecanismo pode provocar sobretensões na subestação. Como indicado pelo número (7), os surtos podem ser provenientes de outras malhas de aterramento que estejam conectadas à malha da subestação, e tais malhas podem ser de uma construção, ou até mesmo de outra subestação, que, fisicamente, por meio de cabos, ou pela terra, estão acopladas à malha de aterramento da subestação atingida.

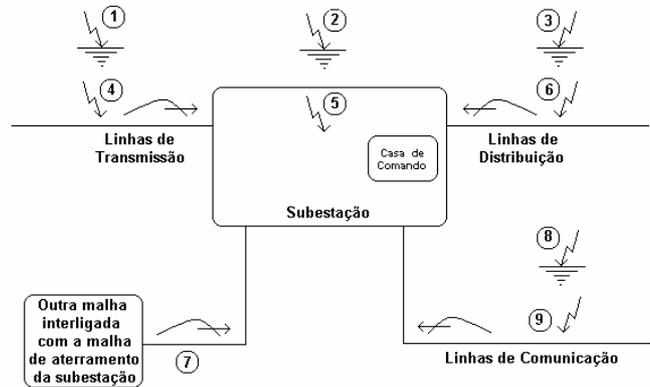


Figura 1. Mecanismos de interação entre as descargas atmosféricas e as subestações.

C. Estudo da Incidência de Descargas Atmosféricas

A referência [4] apresenta um estudo que avaliou a amplitude dos efeitos causados pela incidência de descargas atmosféricas nas instalações de uma usina hidroelétrica. Devido à similaridade de situações com as SEs da Escelsa, seus dados podem ser considerados, com referência à este projeto. Tal estudo foi motivado pela queima de componentes eletroeletrônicos na subestação da usina e a abertura dos disjuntores locais. Dentre as causas potenciais identificadas, estava a incidência de descargas atmosféricas nas instalações da usina, nas linhas de transmissão e de distribuição da subestação, e nas proximidades das mesmas.

Algumas simulações computacionais foram realizadas neste estudo, com o objetivo de investigar os efeitos da incidência das descargas atmosféricas. Dentre tais simulações, pode ser citada a apresentada na Figura 2, que mostra as diferenças de potencial resultantes entre diferentes pontos da subestação (pontos 2 a 7) em relação ao ponto onde está localizada a casa de comando (ponto 1), devido à incidência de uma descarga atmosférica no topo da torre de telecomunicação, instalada na subestação.

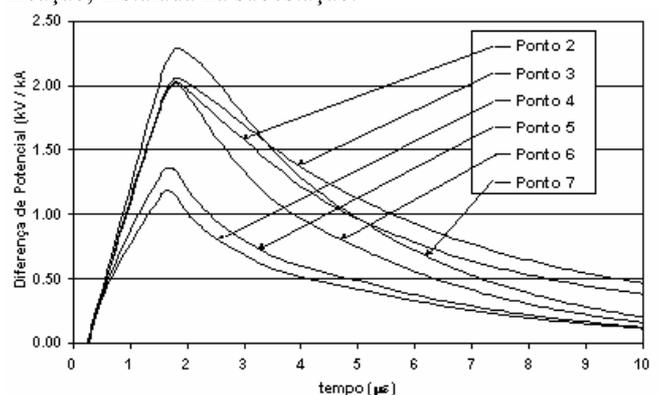


Figura 2. Diferenças de potencial entre diferentes pontos da subestação. No gráfico da Figura 2, é possível verificar que uma con-

dição de equipotencialização elétrica não consegue ser garantida pela malha de aterramento, caso uma descarga atmosférica incida em algum ponto da subestação. Ou seja, diferenças de potencial de valor elevado podem surgir em diferentes pontos da subestação, caso ocorra a incidência de uma descarga atmosférica na mesma.

D. Aplicação dos Resultados nas Subestações da ESCELSA

De posse dos resultados da simulação apresentada anteriormente, fez-se uma estimativa de qual seria a diferença de potencial entre diferentes pontos das subestações Paineiras, Conceição da Barra e Praia, caso ocorresse a incidência de uma descarga atmosférica em um destes pontos.

Com base nas curvas da Figura 2, obteve-se um valor aproximado das diferenças de potencial entre os pontos 2, 3, 4, 5, 6 e 7 e o ponto 1. Em seguida, mediu-se as distâncias aproximadas entre estes pontos. Além disso, fez-se uma relação entre as diferenças de potencial e as distâncias dos pontos. O valor resultante reflete a diferença de potencial, em (kV) por (kA) de corrente injetada, entre os pontos indicados e o ponto 1, ou seja, a unidade é ((kV/kA)/m). Os valores encontrados estão indicados na Tabela I.

TABELA I
VALORES ENCONTRADOS PARA DIFERENÇA DE POTENCIAL E DISTÂNCIA ENTRE OS PONTOS 2, 3, 4, 5, 6 E 7 E O PONTO 1

Ponto	Diferença de potencial – dV (kV/kA)	Distância em relação ao ponto 1 – c (m)	dV / c ((kV/kA)/m)
2	2,04	49,5	0,0412
3	2,08	49,5	0,0420
4	1,17	27	0,0433
5	1,38	45,1	0,0308
6	2,04	49,4	0,0413
7	2,25	60,9	0,0369

De posse dos valores de dV/c, fez-se uma média entre os mesmos, e chegou-se a um dV/c médio igual a 0,03924 ((kV/kA)/m). Esse valor indica qual é a diferença de potencial (kV) entre dois pontos por (kA) de corrente por metro.

Em seguida, pegou-se diferentes pontos dos pátios das subestações Paineiras, Conceição da Barra e Praia, afim de se estimar qual seria a diferença de potencial entre eles. Para encontrar as diferenças de potencial entre os pontos escolhidos, utilizou-se uma corrente de descarga atmosférica de 40 (kA) de pico, que é um valor que está próximo do valor mediano de corrente de descarga atmosférica em Minas Gerais (48 kA de pico) [5]. Os valores estão indicados na Tabela II.

TABELA II
DIFERENÇA DE POTENCIAL ENTRE DOIS PONTOS PARA UMA CORRENTE DE DESCARGA ATMOSFÉRICA DE 40 (KA) DE PICO

Subestação	Pontos	Distância (m)	dV (kV)
Paineiras	Trafo ⁽¹⁾ / CC ⁽²⁾	13,1	20,8
Conceição da Barra	Trafo / CC	22,3	34,8
Praia	Trafo / CC	69	108

⁽¹⁾ Transformador

⁽²⁾ Casa de Comando

Estes dados levam a conclusão de que a incidência de descargas atmosféricas em um ponto dentro da subestação, pode ocasionar diferenças de potencial consideráveis entre este ponto e um outro, posicionado a uma certa distância.

V. INVESTIGAÇÃO DE SOLUÇÕES POTENCIAIS

A proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis instalados em subestações de alta tensão começa com a análise dos problemas de compatibilidade eletromagnética [6]. Para que ocorra a interferência eletromagnética, é necessário que três elementos estejam presentes: fonte, acoplamento e equipamento a ser atingido (vítima). Assim, um bom projeto de proteção deve atuar nestes elementos, através da minimização ou eliminação dos níveis de emissão da fonte de perturbação, da interrupção do meio de acoplamento e da proteção da vítima [7].

O estudo das possíveis interferências e a adoção de um sistema de proteção integrado, pode incluir aterramento correto, blindagem eletromagnética, condutores segregados e blindados e a utilização dos Dispositivos de Proteção contra Surtos. Todas essas possibilidades integram a solução para evitar danos aos sistemas eletrônicos.

A. Aterramento

O aterramento é essencial para segurança e desempenho satisfatório dos equipamentos eletrônicos. Dentro de uma subestação, além da malha de aterramento principal (ou malha de força), recomenda-se o uso de um sistema de aterramento para os equipamentos eletrônicos sensíveis, que pode ser feito pelo sistema de terra de ponto único ou pelo sistema terra de múltiplos pontos (ou malha de referência de sinal). A escolha de qual sistema usar está ligada ao comprimento dos cabos de interconexão. Isto significa que para frequências baixas ou sistemas pequenos, o terra de ponto único é o indicado. Em grandes instalações, com cabos de comprimentos maiores (acima de 10 metros) e/ou sujeitos a sinais interferentes de alta frequência, o terra de múltiplos pontos é recomendado. Em situação transitória, pode ser aplicado um sistema de aterramento híbrido (único ponto e múltiplos pontos, simultaneamente).

B. Blindagem

Os equipamentos eletrônicos atuam de alguma forma como receptores e/ou transmissores de interferências eletromagnéticas, o que faz com que seja necessário considerar o ambiente eletromagnético onde esses equipamentos estão instalados [8]. Sendo assim, existe a necessidade de conter os níveis de interferências eletromagnéticas dentro de limites aceitáveis, e isso é feito através da blindagem eletromagnética. Uma blindagem eletromagnética pode ser definida como qualquer barreira que reduza o nível de um campo eletromagnético.

As formas de utilização da blindagem são variadas, como por exemplo blindagem do prédio, das salas, dos equipamentos eletrônicos e dos cabos ligados aos mesmos. Muitas vezes, devido a questões econômicas, utiliza-se somente a blindagem dos cabos, que pode ser feita da seguinte forma: blindagem simples (o cabo possui apenas uma blindagem externa), blindagem dupla (o cabo possui uma blindagem

interna e uma externa) e blindagem adicional (além da blindagem do cabo, o mesmo é conduzido dentro eletrodutos ou bandejas, que operam como blindagem adicional).

C. Cabeamento

Os cabos existentes dentro de uma subestação merecem atenção especial em um projeto de proteção de equipamentos eletrônicos sensíveis, devido ao fato de serem um dos principais meios de propagação de surtos provocados por descargas atmosféricas entre o ponto de incidência e os equipamentos a serem protegidos.

Algumas das técnicas que podem ser usadas quanto ao cabeamento podem ser: blindagem e segregação. A blindagem dos cabos pode ser feita como descrito no item anterior. Quanto a segregação, os cabos de energia, de comando, de medição, de sinalização e de telecomunicações devem ser separados dos cabos de alimentação e de força. Isso pode ser feito através do uso de eletrodutos, bandejas, eletrocalhas ou canaletas.

D. Dispositivos de Proteção Contra Surtos

Afim de reduzir a intensidade dos surtos que chegam aos equipamentos eletrônicos sensíveis, podem ser usados os dispositivos de proteção contra surtos, ou protetores contra surtos. Esse tipo de dispositivo pode ser usado nos cabos que entram nas instalações da casa de comando, tais como cabos de energia, controle, comando, proteção, linhas telefônicas e cabos de antenas, com o objetivo de garantir que o nível das sobretensões ou sobrecorrentes, como por exemplo aquelas provocadas por descargas atmosféricas, seja menor que o nível de suportabilidade dos equipamentos [9]. Dependendo das características dos componentes e ou dos circuitos a serem protegidos, estes dispositivos podem ser utilizados individualmente ou associados em cascata. A velocidade de resposta e a capacidade de conduzir corrente (energia) são os parâmetros básicos para a escolha do dispositivo a ser utilizado [10].

VI. DEFINIÇÃO DE CRITÉRIOS DE PROTEÇÃO

A definição de critérios de proteção objetiva apresentar as recomendações e técnicas de proteção dos equipamentos eletrônicos sensíveis instalados em subestações de alta tensão, contra surtos provocados pela incidência de descargas atmosféricas. Tais critérios estão listadas, em maiores detalhes, em [11].

VII. AVALIAÇÃO DOS RESULTADOS

Dentre as recomendações propostas durante a realização deste projeto, a instalação de protetores contra surtos foi efetivamente implantada nas subestações da ESCELSA. Isso se deve ao fato da dificuldade técnica de se trabalhar em subestações que já estão construídas e em operação.

Como não houve registros, até o presente momento, de incidência de descargas atmosféricas nas subestações onde os protetores foram instalados, não se tem resultados sobre a eficiência das soluções implantadas.

VIII. CONCLUSÕES

Dentre as conclusões obtidas durante realização deste trabalho, podem ser citadas as seguintes:

- o arranjo físico da subestação é determinante na propagação dos surtos até os equipamentos a serem protegidos, pois o caminho seguido por esses surtos dependerá da disposição dos equipamentos, cabos e canaletas instalados no interior da subestação;
- caso ocorra a incidência de uma descarga atmosférica em um ponto da subestação, a malha de aterramento não irá se comportar como uma equipotencial, podendo haver diferenças de potencial consideráveis entre diferentes pontos dessa subestação;
- caso um equipamento tenha conexões em diferentes partes da malha, o mesmo poderá estar sujeito a essas diferenças de potencial, que dependendo da intensidade, poderá levar a queima do mesmo.

É necessário ressaltar que, para que se tenha um efetivo sistema de proteção contra surtos provocados por descargas atmosféricas, é recomendável que se faça um sistema de proteção integrado, envolvendo todas as técnicas citadas neste trabalho.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. R. Daconti, and J. J. Saad, "Compatibilidade Eletromagnética entre Equipamentos de Subestações e Usinas", *Eletricidade Moderna*, Aranda Editora, N.º 308, pp. 56-73, Nov. 2000.
- [2] M.F. ALVES, "Compatibilidade Eletromagnética entre Circuitos Secundários e de Alta Tensão," 2º ENEAT – Encontro Nacional de Engenharia de Alta Tensão, Belo Horizonte, Brasil, Jun. 1997.
- [3] M. C. Souza, M. L. y Gonzalez, and S. Visacro. F., "Compilação das Referências Bibliográficas," UFMG, Belo Horizonte, Brasil, Relatório Técnico, Fev. 2003.
- [4] A. J. Soares, "Queima de Equipamentos em Subestação de UHE devido a Descargas Atmosféricas – Análise das Ocorrências e Proposição de Soluções," XVII SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Uberlândia, Out. 2003.
- [5] M.A.O. Schroeder, "Modelo Eletromagnético para Descontaminação de Ondas de Corrente de Descargas Atmosféricas: Aplicação às Medições da Estação do Morro de Cachimbo", Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica – PPGEE, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Belo Horizonte, 2001.
- [6] A. C. P. Sartin and C. J. Sant'ana, "Compatibilidade Eletromagnética em Usinas e Subestações – Como Evitá-las"; XVI SNPTEE – Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, Campinas, Brasil, Out. 2000.
- [7] C.R. Paul, *Introduction to Electromagnetic Compatibility*, New York: Wiley, 1992.
- [8] "Blindagem Interna e Externa", Sub Grupo de Aterramento, Proteção e Compatibilidade Eletromagnética – GTECOM/SCC, Relatório Técnico, Dez. 1998.
- [9] R. M. Barreto, "Compatibilidade Eletromagnética no Aterramento de Sistemas de Telecomunicações," *Eletricidade Moderna*, Aranda Editora, N.º 324, pp. 104-115, Mar. 2001.
- [10] A. R. Lobo and H. G. Assumpção, "Proteção de Instalações Eletrônicas Contra Surtos," *Eletricidade Moderna*, Aranda Editora, pp.28-39, Jun. 1988.
- [11] M. C. Souza, M. L. y Gonzalez, and S. Visacro. F., "Critérios para Proteção de Equipamentos Sensíveis em Subestações de Alta Tensão," UFMG, Belo Horizonte, Brasil, Relatório Técnico, Jan. 2004.