Proteção de Redes Elétricas de Baixa Tensão Contra Descargas Atmosféricas Parte I : Sobretensões Transferidas

S. Visacro F., J.V.P. Duarte e A.R. De Conti

LRC: UFMG-CEMIG

Resumo-- Neste trabalho os autores descrevem os aspectos fundamentais da investigação que realizam no tema "Proteção de Redes de Distribuição de Baixa Tensão contra Descargas Atmosféricas" e apresentam os primeiros resultados do projeto, ora em desenvolvimento. Particularmente, é enfatizada a principal atividade já concluída, a avaliação da influência das diversas variáveis no desenvolvimento de surtos transferidos da média para a baixa tensão em redes de distribuição. Esta avaliação deve subsidiar a definição de práticas de proteção adequadas à preservação da qualidade da energia fornecida aos consumidores.

***Palavras-chave*—Proteção contra Descargas Atmosféricas. Proteção de Redes de Distribuição de Baixa Tensão. Sobretensões Atmosféricas nos Consumidores. Surtos Transferidos.**

I. Introdução

As descargas atmosféricas correspondem a uma das principais causas de interrupções e desligamentos nas redes de energia elétrica no Brasil. Seus efeitos destrutivos freqüentemente se estendem a equipamentos e consumidores conectados. Tal quadro determina a necessidade de definição e avaliação de práticas de proteção que assegurem a manutenção do fornecimento de energia dentro de limites de qualidade desejáveis.

A carência de investigações aprofundadas no tema, que contemplem as condições particulares do sistema de distribuição instalado em Minas Gerais e as específicas condições ambientais locais, motivou a CEMIG a formular o projeto "Proteção de Redes Elétricas de Baixa Tensão contra Descargas Atmosféricas". Este está atualmente em desenvolvimento, através de parceria com o LRC – Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas. O projeto tem duração aproximada de 2 anos, e na sua primeira etapa (período de um ano) se insere o presente artigo. Tal etapa foi basicamente dedicada a quatro tarefas básicas: uma avaliação crítica do tema, com exaustiva pesquisa bibliográfica, a caracterização da configuração física do sistema de distribuição da empresa e das condições ambientais locais de interesse, a definição e a elaboração de modelos e ferramentas para simulação do comportamento da rede frente a surtos atmosféricos e, finalmente, a aplicação dos mesmos especificamente para avaliação da questão dos surtos transferidos da média para a baixa tensão. Os primeiros tópicos foram abordados em relatório técnico dirigido à ANEEL [1]. O documento conta com uma descrição abrangente dos processos de interação entre as descargas atmosféricas e as redes de distribuição, bem como um levantamento das práticas atualmente adotadas pela CEMIG em seu sistema de distribuição.

O presente artigo é especificamente dedicado à avaliação da influência dos surtos transferidos da média para a baixa tensão nas sobretensões nas unidades consumidoras. Os desenvolvimentos do projeto neste tema têm sido abordados em publicações recentes e complementares dos autores [2-6]. Os conteúdos são apresentados de forma resumida no presente texto.

II. Sobretensões de Origem Atmosférica em Instalações Consumidoras

As sobretensões de origem atmosférica podem atingir as cargas consumidoras fundamentalmente através de quatro diferentes ocorrências: as descargas diretas e as tensões induzidas na baixa tensão, a transferência de surtos originados na média tensão através do transformador de distribuição e a incidência de descargas diretamente sobre edificações.

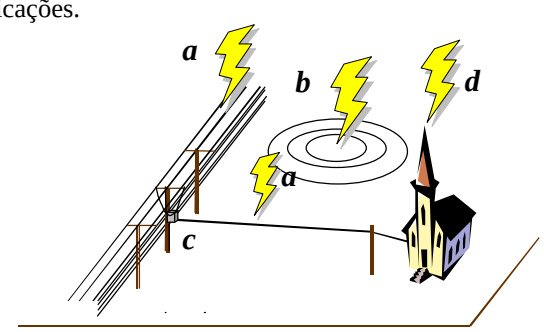

Figura 1 – Mecanismos de interação entre as descargas atmosféricas e as redes de distribuição

Com relação às descargas diretas, estas podem ocorrer sobre as redes de média e baixa tensão (figura 1-a), bem como sobre edificações (figura 1-d). São mais comuns em redes de média tensão rurais ou em regiões periféricas de cidades. São mais raras em áreas urbanas em decorrência da existência de edificações elevadas. A ocorrência de descargas diretas em redes de baixa tensão é pouco freqüente, já que estas estão instaladas sob as redes de média tensão. Os efeitos da incidência de descargas diretas em redes de distribuição possuem elevada severidade, podendo provocar diversos danos no sistema [7-9].

Descargas que incidam em regiões circunvizinhas a redes de média e baixa tensão (figura 1-b) podem originar sobretensões induzidas nas mesmas. O grau de severidade

Silvério Visacro F.: pesquisador e coordenador do LRC - Núcleo de Desenvolvimento Científico e Tecnológico em Descargas Atmosféricas (UFMG-CEMIG). Email: Lrc@cpdee.ufmg.br

José Vicente P. Duarte: engenheiro da CEMIG - Engenharia de Distribuição . Email: vicente@cemig.com.br

Alberto R. De Conti: pesquisador associado ao LRC, onde desenvolve tese de mestrado (PPGEE – UFMG) . Email:conti@cpdee.ufmg.br

dos fenômenos associados a este tipo de ocorrência é menor que os originados por descargas diretas, mas sua freqüência de ocorrência é muito superior àquela das descargas diretas, o que torna as sobretensões induzidas o elemento crítico de desempenho das redes de distribuição [10].

A ocorrência de descargas atmosféricas atingindo diretamente na unidade consumidora (figura1-d) também pode gerar solicitações na rede de baixa tensão da concessionária [11], especialmente se o aterramento do sistema de proteção da unidade for conectado ao aterramento da entrada de serviço do consumidor.

A disseminação de um surto na média tensão, gerado por uma descarga direta ou indireta, pode se estender até a rede de baixa tensão através do transformador de distribuição (figura 1-c). A intensidade e a forma das solicitações associadas a este processo são dependentes de inúmeros fatores. Seu grau de severidade pode alcançar níveis críticos, tanto do ponto de vista dos equipamentos instalados na rede de baixa tensão, quanto dos consumidores a ela conectados. O presente artigo pretende abordar estes aspectos.

III. Considerações Básicas

A. Descrição Sintética do Sistema Básico Analisado

A figura 2 representa simplificadamente a conexão de um transformador de distribuição às cargas instaladas na rede de baixa tensão. Usualmente, dispositivos pára-raios protegem o seus terminais de média tensão e, em alguns casos, também podem ser instalados junto aos seus terminais de baixa tensão. O condutor neutro é multi-aterrado e comum às redes de média e baixa tensão, estando conectado ao tanque do transformador. Os transformadores podem ser trifásicos (Δ-Y) ou monofásicos. R_t e R_c representam, respectivamente, os aterramentos do transformador e dos consumidores conectados. C1 a C3 representam as cargas consumidoras conectadas à rede de baixa tensão.

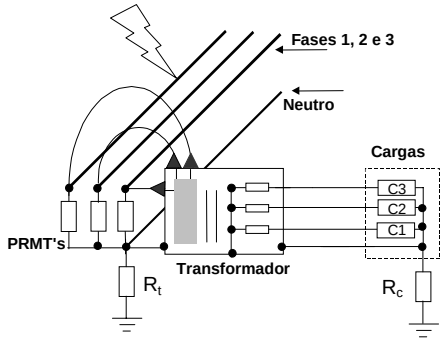

Figura 2 - Caracterização simplificada da conexão do transformador de distribuição às cargas consumidoras em redes de baixa tensão.

Os condutores da rede de baixa tensão (RBT) podem ter configuração convencional (verticalmente espaçada) ou multiplexada (condutores fase isolados entrelaçados em torno do condutor neutro). Em redes rurais, muitas vezes um transformador alimenta um único consumidor ou um pequeno conjunto concentrado de cargas. Em redes urbanas, ramais de até 200 m podem ser derivados a partir do transformador para alimentar diversos consumidores.

B. Sobretensões Transferidas em Transformadores de Distribuição

A transferência de surtos da média para a baixa tensão através do transformador de distribuição pode ocorrer de duas maneiras distintas e complementares. A primeira corresponde ao acoplamento direto entre os dois circuitos através dos enrolamentos do transformador e depende principalmente da constituição física do equipamento e das freqüências representativas da sobretensão solicitante. As capacitâncias parasitas do transformador transferem a parcela mais rápida do surto incidente para a rede de baixa tensão.

A segunda parcela está associada à condução da corrente de surto pelos pára-raios de proteção do transformador. Idealmente, seria desejável que essa corrente fosse totalmente drenada pelo aterramento do transformador (R_t), o que não ocorre na prática. Uma parte da corrente pode ser direcionada para o circuito de baixa tensão através dos condutores neutro (conectado ao tanque do transformador) e fase. A amplitude desta parcela é tanto maior quanto maior a elevação de potencial no aterramento do transformador.

As avaliações demonstraram que a parcela associada à elevação de potencial em R_t predomina amplamente [2-3] sobre a transferência por acoplamento capacitivo.

IV. Desenvolvimentos

A. Introdução

Caracterizada a configuração do sistema e definidas as avaliações a serem realizadas com relação à transferência de surtos para a baixa tensão, procedeu-se à definição dos modelos representativos da rede para a análise em foco e a uma etapa de simulação exaustiva.

B. Modelagem Básica do Sistema

O modelo de transformador é o mesmo utilizado em [12]. Redes de baixa tensão convencionais e multiplexadas foram aplicadas, utilizando modelos com parâmetros distribuídos e variáveis na freqüência. A resistividade do solo foi mantida fixa em 1000 Ω. R_t e R_c foram representados como simples resistências, já que este é o parâmetro usualmente medido pelas concessionárias. O condutor de descida que conecta R_t ao tanque do transformador foi modelado como uma indutância de 1 μH/m. As cargas consumidoras foram modeladas como resistências de 30 Ω.

C. Simulações

Assumindo-se o circuito da figura 2, simulações foram realizadas com uso do EMTP. Considerou-se a injeção de correntes de 1 e 10 kA (5/60 μs) diretamente sobre os terminais de alta tensão do transformador, representando, respectivamente, os limites superiores críticos das sobretensões induzidas e descargas diretas ocorridas nas redes de média tensão. Os tempos de frente e de meia-onda utilizados foram derivados dos dados representativos de descargas medidas na Estação do Morro do Cachimbo.

V. Resultados e Análises

As simulações realizadas buscavam avaliar o efeito dos diversos parâmetros constituintes do sistema nas sobretensões nas cargas consumidoras e no secundário dos transformadores devido à transferência de surtos da média para a baixa tensão. Cada um dos seguintes tópicos aborda um ponto de interesse.

A. Resistências de Aterramento do Sistema

A figura 3 ilustra a influência dos aterramentos do sistema nas sobretensões nas cargas consumidoras. Verificou-se que o melhor desempenho da RBT frente aos surtos transferidos é obtido para baixas relações R_t/R_c , no que concerne à limitação das tensões entre fase e neutro. Do ponto de vista de segurança, a limitação do nível das tensões neutro-terra e fase-terra requer, também, baixos valores para R_t.

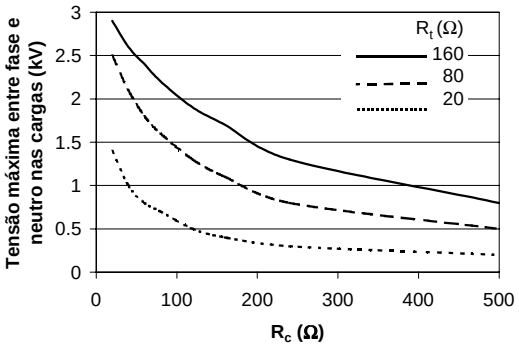

Figura 3 - Sobretensões máximas nas cargas (30 Ω) para variação dos aterramentos. Comprimento da RBT convencional: 30 m. I=1 kA (5/60 μs).

É importante ressaltar que, para a injeção de correntes com maiores amplitudes, sobretensões proporcionalmente maiores são esperadas nas cargas consumidoras. Métodos de proteção adicionais, como o uso de pára-raios na baixa tensão, podem ser necessários para que as solicitações máximas na rede sejam efetivamente limitadas.

B. Configuração Física dos Condutores da Rede de Baixa Tensão

A figura 4 ilustra as formas de onda das sobretensões nas cargas consumidoras, comparando-se o desempenho das redes de baixa tensão convencionais e multiplexadas. O maior acoplamento entre os condutores fase e neutro nas redes multiplexadas determina menores sobretensões nas cargas em relação àquelas verificadas para redes convencionais. Ademais, em redes convencionais o acoplamento entre os condutores da baixa tensão não é balanceado, determinando que a carga conectada à fase 3 (fase mais distante do condutor neutro) esteja sujeita aos níveis de sobretensão mais elevados.

As sobretensões no secundário do transformador também sofrem reduções com a aplicação de redes multiplexadas [3]. Para a injeção de correntes maiores que 1 kA, entretanto, os níveis de sobretensões máximos podem justificar a utilização de práticas de proteção específicas para o equipamento, como a aplicação de pára-raios.

C. Comprimento da Rede de Baixa Tensão

A figura 5 ilustra a influência do comprimento das redes de baixa tensão nas sobretensões nas cargas consumidoras para uma RBT convencional. Considerando-se a conexão de apenas um consumidor ao transformador, as menores sobretensões nas cargas são obtidas para as menores distâncias entre ambos.

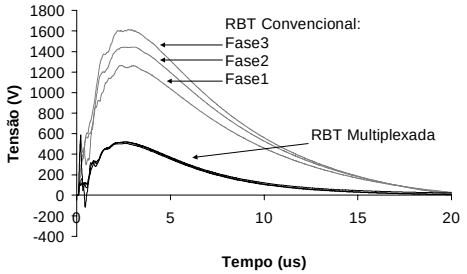

Figura 4 - Sobretensões entre fase e neutro nas cargas consumidoras. I=1kA (5/60 μs), R_c=R_t=80Ω. Comprimento da RBT=30m.

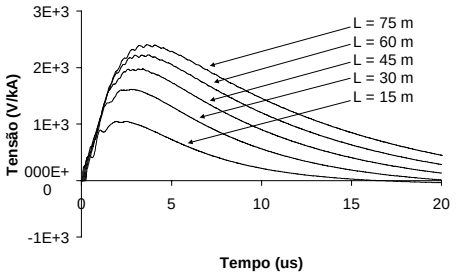

Figura 5 - Sobretensões entre fase e neutro no consumidor conectado à fase 3. I= 1kA (5/60 μs), R_c=R_t=80 Ω.

D. Tempos Característicos da Solicitação

A figura 6 demonstra a influência dos tempos de frente da solicitação nas sobretensões máximas nas cargas. Os tempos de frente mais rápidos estão associados a tensões induzidas e as correntes mais lentas são geradas por descargas diretas nas redes de média tensão.

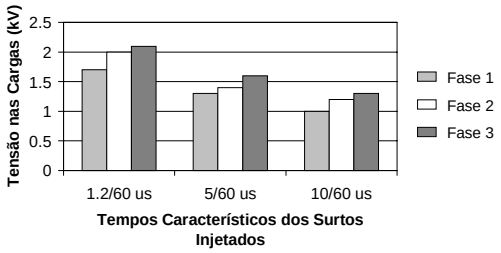

Figura 6 – Tensão fase-neutro máxima nas cargas em função dos parâmetros temporais do surto injetado. I=1kA. Rt=Rc=80Ω. Comprimento da RBT=30m. Cargas=30Ω.

E. Pára-raios na Rede de Baixa Tensão

O uso de pára-raios na rede de baixa tensão foi avaliado [3-4]. Quando instalado nos terminais de baixa tensão do transformador, assegura a proteção deste equipamento. Entretanto, para a ocorrência de sobretensões transferidas, sua presença neste ponto pode expor os consumidores conectados a solicitações mais intensas. Foi também avaliado o efeito do posicionamento de pára-raios em diversos pontos da rede. Para a proteção do transformador, a instalação do pára-raios no secundário é recomendável, não apenas com relação ao fenômeno de transferência em análise, mas, também, contra as tensões induzidas na RBT.

F. Ramificações na Rede de Baixa Tensão

Em redes de baixa tensão instaladas em áreas urbanas, usualmente um transformador alimenta vários consumidores. Neste caso, cada consumidor é conectado à rede através de um ramal de ligação exclusivo, o que está representado esquematicamente na figura 7. C0 a C5 representam os consumidores, enquanto P0 a P5 representam os pontos dos quais são derivados os ramais. Não foi considerada a presença de pára-raios no secundário do transformador.

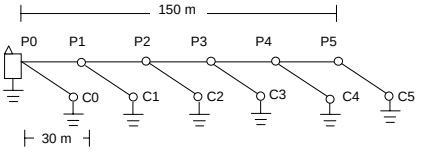

Figura 7 – Representação esquemática de uma rede ramificada

A figura 8 ilustra as sobretensões nos consumidores C0 a C5 para a injeção de 10 kA (5/60 μs). Este valor foi adotado observando-se que a injeção de 1 kA, neste caso específico, restringiu os valores máximos das sobretensões nos consumidores à faixa de 1 kV. Isto ocorre devido ao grande número de conexões à terra (no transformador e no neutro de cada consumidor) e à própria ramificação do circuito, que determina a divisão das correntes de surto

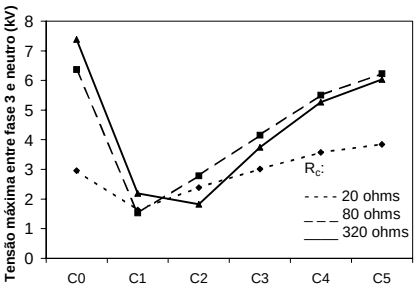

Figura 8 – Módulo da tensão fase-neutro máxima nas cargas em função de R_c. I=1kA (5/60 μs). Rt =80Ω. Cargas=30Ω. RBT multiplexada.

Nas simulações, utilizaram-se valores de R_c idênticos em todos os consumidores, em três faixas distintas (20, 80 e 320Ω). R_t foi fixada em 80 Ω. Percebe-se que de C1 a C5 é mantida a tendência de crescimento das sobretensões nas cargas com o aumento de sua distância até o transformador. Entretanto, para R_c=20 Ω é obtido o menor perfil de sobretensões no circuito. Isto ocorre porque boa parte da corrente do surto passa a ser drenada localmente, sendo compartilhada entre o aterramento do consumidor C0 e R_t.

VI. Conclusões

Com base nos desenvolvimentos realizados, foi possível estabelecer a influência dos diversos parâmetros constituintes das redes de baixa tensão na amplitude das sobretensões resultantes nas cargas conectadas. Entre as principais conclusões, pode-se mencionar:

- O modelo de transformador não constitui ponto de relevo na avaliação;
- A busca da menor relação R_t/R_c é recomendada do ponto de vista da proteção das cargas consumidoras contra surtos transferidos. Baixos valores para R_t são também desejáveis, sob a perspectiva de segurança, para redução das tensões fase-neutro e fase-terra;
- O uso de redes multiplexadas assegura sobretensões máximas nas cargas e no secundário do transformador de amplitude inferior àquelas verificadas para redes convencionais;
- Em redes de alimentação exclusiva, recomenda-se que o consumidor seja conectado o mais próximo possível do transformador que o alimenta;
- O uso de pára-raios nas redes de baixa tensão é recomendável para proteção do transformador e o posicionamento de dispositivo adicional pode ser otimizado, segundo as características da rede, para assegurar níveis de proteção adequados aos consumidores instalados;
- Em redes ramificadas o maior número de conexões à terra e a existência de derivações podem determinar comportamentos distintos daqueles observados em redes de alimentação exclusiva;

A pesquisa prossegue, buscando a definição de práticas de proteção adequadas às redes e aos consumidores conectados contra as sobretensões de origem atmosférica. Um estudo sistemático da aplicação de pára-raios e a análise das técnicas de aterramento otimizadas estão em curso. Deve ser iniciada a aplicação de modelo eletromagnético baseado nas equações de campo, desenvolvido no LRC, na avaliação do efeito das tensões induzidas nas redes de baixa tensão.

VII. References

[1] A.R. De Conti, S. Visacro F., C. Pereira, "Relatório Parcial do projeto Proteção das Redes Elétricas de Baixa Tensão contra Descargas Atmosféricas", Anexo ao Form.IV: Acompanhamento de Projeto ANEEL, Período de referência: Jun.2000 – Dez. 2000.

[2] A.R. De Conti, S. Visacro F., C. Pereira, J.V.P. Duarte., "Qualidade de Energia: Práticas de Proteção dos Consumidores", *Anais do IX ERLAC. – Encontro Regional Latino-Americano do CIGRE*, Foz do Iguaçu, Brasil, Jun. 2001.

[3] A.R. De Conti, S. Visacro F., C. Pereira, J.V.P. Duarte, "A Influência das Descargas Atmosféricas na Qualidade da Energia Oferecida aos Consumidores" artigo aprovado para a *XVI SNPTEE- Seminário Nacional de Produção e Distribuição de Energia Elétrica*, São Paulo, Brasil, Out. 2001.

[4] A.R. De Conti, S. Visacro F., C. Pereira, J.V.P. Duarte, "Lightning and consumer power quality", paper accepted: *SIPDA - International Symposium on Lightning Protection*, São Paulo, Brazil, Nov. 2001.

[5] A.R. De Conti, S. Visacro F., "Consumer power quality: the effect of multiplexed conductors on the reduction of lightning-related surges", paper accepted: *SICEL - International Symposium on Power Quality*, Bogotá, Colômbia, Nov. 2001.

[6] A.R. De Conti, S. Visacro F., "Lightning overvoltage in low voltage distribution lines: multiplexed versus conventional configuration", paper accepted: *IEEE Transmission and Distribution Conference*, São Paulo, Brazil, 2002.

[7] Joint CIRED/CIGRE Working Group 05, "Protection of MV and LV Networks Against Lightning. Part I: Basic Information", *Proc. CIRED Conference*, June 2-4, 1997.

[8] Joint CIRED/CIGRE Working Group 05, "Protection of MV and LV Networks Against Lightning. Part II: Application to MV Networks", *Proc. CIRED Conference*, June 2-4, 1997.

[9] C. Mirra, A. Porrino, A. Ardito, C. A. Nucci, "Lightning overvoltages in low voltage networks", *Proc.CIRED Conference*, June 2-4, 1997.

[10] C. A. Nucci, F. Rachidi, "Lightning-Induced Overvoltages", *IEEE Transmission and Distribution Conference, Panel Session "Distribution Lightning Protection"*, New Orleans, Apr. 14, 1999.

[11] A. Mansoor, F. Martzloff, "The effect of neutral earthing practices on lightning current dispersion in a low-voltage Instalation", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 13, No.3, Jul. 1998.

[12] W. Bassi, A. Piantini, "Voltages and currents on secondary lines caused by direct lightning hits on medium voltage lines," *em Proc. GROUND'2000 – 2nd International Conference on Grounding and Earthing*, Belo Horizonte – Brazil, Jun. 2000.