

Solicitações Elétricas em Dispositivos de Proteção contra Surtos em Redes de Baixa Tensão

A. Piantini, IEE/USP, W. Bassi, IEE/USP, N.M. Matsuo e J. M. Janiszewski, EPUSP, e S. Nosaki, ELEKTRO

Resumo - Este artigo apresenta as principais conclusões acerca de um estudo realizado tendo em vista a análise das solicitações elétricas a que estão submetidos os dispositivos de proteção contra surtos em redes de baixa tensão (SPDs). Após o desenvolvimento de modelos para representação dos mais importantes componentes da rede, foram efetuadas centenas de simulações computacionais abrangendo diversas situações, utilizando-se o programa ATP (*Alternative Transients Program*). A análise dos resultados dessas simulações possibilitou a elaboração de recomendações técnicas relativas à proteção de redes de baixa tensão, contemplando a definição dos requisitos a serem atendidos pelos SPDs e o estabelecimento de critérios para a sua utilização.

Palavras-chave – descargas atmosféricas, baixa tensão, dispositivos de proteção contra surtos.

I. INTRODUÇÃO

A utilização cada vez maior de equipamentos sensíveis ligados às instalações de consumidores na rede de baixa tensão (BT) tem ressaltado a importância do problema de qualidade da energia fornecida. Dentro desse contexto, assume especial importância o problema dos surtos na rede secundária devidos a descargas atmosféricas na rede de média tensão. Convém ressaltar que também os transformadores utilizados na rede estão sujeitos a tais surtos, podendo sofrer danos. A fim de melhorar o desempenho das redes é importante o conhecimento das características desses surtos em função de parâmetros tais como resistências de aterramento, características dos transformadores, comportamento dos isoladores, características dos pára-raios, etc..

A introdução de dispositivos de proteção de baixa tensão permite reduzir as sobretensões não apenas nos equipamentos da rede mas, também, nos consumidores. A eficácia dessa proteção é dependente da forma de instalação dos dispositivos e de uma correta especificação dos mesmos. A determinação das condições de funcionamento, definidas pelos valores máximos de corrente e carga é, portanto, de

suma importância.

Este artigo apresenta informações a respeito das solicitações elétricas nos dispositivos de proteção contra surtos em redes de baixa tensão (SPDs). O estudo consistiu das seguintes etapas:

- modelagem dos diversos componentes utilizados nas redes, tais como transformador, pára-raios, cargas dos consumidores, aterramentos, isoladores, ramais e cabos de conexão;
- simulações através do programa ATP, análise dos surtos no transformador e nos consumidores de uma configuração típica de rede e verificação da influência de diversos parâmetros dos componentes da rede e da descarga considerando, ainda, a presença de dispositivos de proteção;
- estudo das correntes e cargas nos dispositivos de proteção em diversas condições de instalação.

II. METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o estudo consistiu, em linhas gerais, na avaliação das tensões na rede de BT e das correntes em SPDs resultantes de descargas diretas na linha primária. Foram realizadas simulações para vários pontos de descarga ao longo da linha primária, obtendo-se as grandezas de interesse. Duas correntes de descarga de forma triangular foram usadas para as simulações básicas:

- 45 kA de crista, com tempo de frente de 2,25 μ s e tempo até a metade do valor de crista de 80 μ s;
- 90 kA de crista, com tempo de frente de 4,5 μ s e tempo até a metade do valor de crista de 80 μ s.

As correntes de 45 kA e 90 kA foram tomadas, respectivamente, como representativas de descargas com média e alta probabilidade de ocorrência. De acordo com [1], são as seguintes as probabilidades de tais valores serem excedidos:

- amplitude superior a 45 kA: 32%;
- amplitude superior a 90 kA: 5 %;
- tempo até a metade do valor de crista, na cauda, superior a 80 μ s: pouco menor que 50 %.

As simulações com descargas ao longo da linha fornecem uma melhor base para julgamento quanto à efetividade de diferentes posicionamentos de SPDs na rede em termos de sobretensões e para a escolha das características adequadas dos SPDs. Como parâmetro característico da capacidade dos SPDs em relação às correntes de surto (I) foram utilizados, além dos valores de crista de corrente, os valores da carga

Este trabalho foi apoiado pelas empresas ELEKTRO, CPFL e BANDEIRANTE, através do Centro de Excelência em Distribuição (CED).

A. Piantini trabalha no Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (e-mail: piantini@iee.usp.br).

W. Bassi trabalha no Instituto de Eletrotécnica e Energia da Universidade de São Paulo (e-mail: welson@iee.usp.br).

J. M. Janiszewski trabalha na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (e-mail: jorge@lcs.poli.usp.br).

N. M. Matsuo trabalha na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (e-mail: matsuonm@usp.br).

S. Nosaki trabalha na ELEKTRO Eletricidade e Serviços S. A. (e-mail: shiguematsu.nosaki@elektro.com.br).

associada à corrente de forma normalizada ($8 \times 20 \mu s$), normalmente empregada nas especificações dos SPDs. Essa carga é obtida pela integração $\int Idt$, que resulta num valor igual a 17 mC para corrente com amplitude de 1 kA.

III. CONFIGURAÇÕES DA REDE E MODELAGEM DOS COMPONENTES

A configuração básica utilizada nas simulações está representada na Fig. 1 e consiste em:

- linha primária de 10 km, com condutores de fase 3x336,4 MCM (Al) e de neutro 1x1/0 AWG (Al), com neutro aterrado a cada 300 m;
- transformador de distribuição, que supre o circuito secundário, localizado no ponto médio do circuito primário;
- circuito secundário com extensão de 150 m em cada lado do transformador, acoplado à linha primária, com condutor de fase 1/0 AWG (Al); neutro comum com a linha primária;
- derivações de consumidores secundários a cada 30 m;
- neutro aterrado nas entradas dos consumidores.

Tanto a forma de utilização dos SPDs como as sobretensões na rede dependem do esquema de aterramento utilizado. No esquema TN, em que o aterramento dos equipamentos é ligado ao neutro da rede de alimentação, as grandezas de maior importância são as tensões entre os condutores de fase e, principalmente, entre fase e neutro. No esquema TT, onde o aterramento dos equipamentos é independente (não ligado ao neutro da rede), as tensões dos condutores fase e neutro em relação à terra toma grande importância.

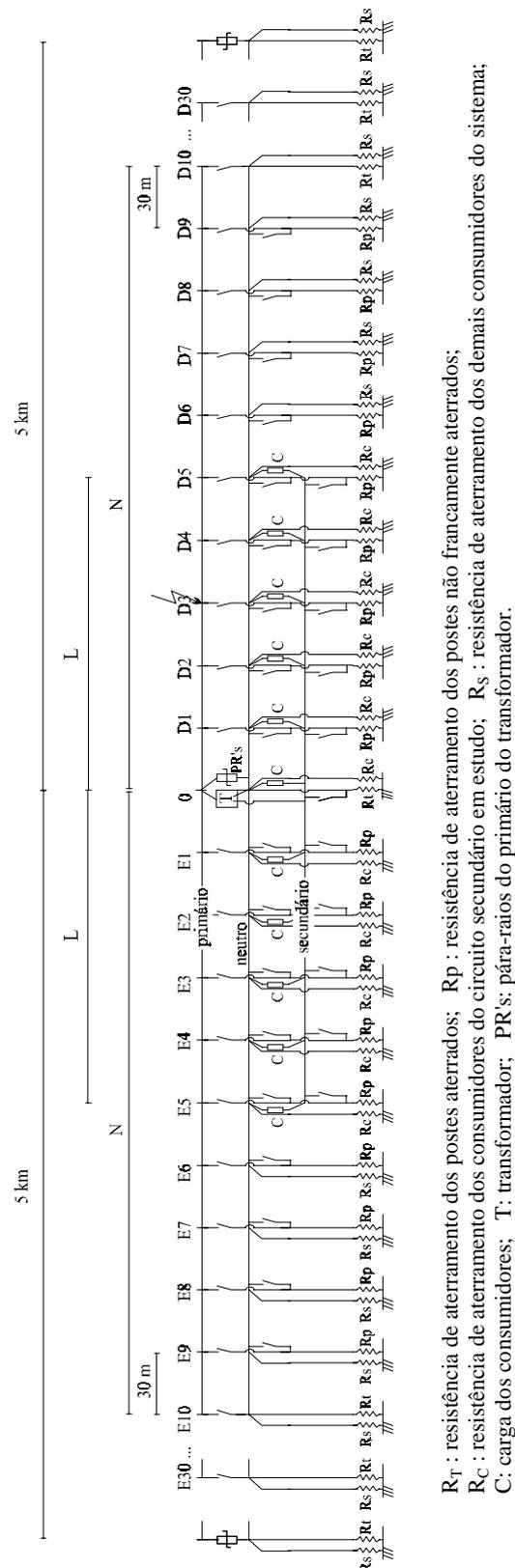
A forma de utilização dos SPDs e as grandezas avaliadas neste estudo consideram a utilização do esquema de aterramento TN nas instalações de consumidores de BT, de acordo com o padrão utilizado. Assim, nos casos que simulam a utilização de SPDs, estes foram conectados entre os condutores fase e neutro. As seguintes configurações, apresentadas na Fig. 2, foram analisadas quanto ao posicionamento dos SPDs:

- G1: sem nenhuma proteção de BT;
- G2: com proteção apenas na saída do transformador;
- G3: com proteção na saída do transformador e nas extremidades do circuito secundário;
- G4: com proteção na saída do transformador e em todas as entradas de consumidores.

Nas simulações utilizou-se, para representação das linhas (primária e secundária), o modelo de parâmetros distribuídos dependentes de frequência. Os para raios de média tensão (de ZnO) foram representados através de um modelo disponível no programa ATP considerando uma curva característica VxI típica. No caso dos SPDs, foram consideradas tensões residuais de 1000 V (quando instalados no circuito secundário) e de 500 V (quando instalados nas entradas de consumidores).

Para a representação do transformador de distribuição foi utilizado o modelo desenvolvido em [2, 3] para um transformador trifásico com potência nominal de 30 kVA, conexão delta-estrela e relação 13800 V – 220/127 V.

As cargas dos consumidores de BT foram representadas através de resistências e capacitâncias. Os valores utilizados nessas simulações foram: resistência de 30Ω entre fase e neutro e capacitância de 4 nF entre os condutores (fase e neutro) e terra.



As interrupções de isoladores afetam as sobretensões na rede e as correntes nos SPDs de uma forma muito marcante.

Os isoladores foram simulados através de chaves normalmente abertas, que se fecham quando uma determinada condição de tensão é alcançada. O modelo utilizado para controlar a ocorrência da disrupção baseia-se na grandeza denominada “efeito disruptivo” (DE) [3], a qual é definida pela expressão

$$DE = \int_{t_0}^t [U(t) - U_0]^k dt,$$

onde $U(t)$ representa a tensão aplicada, t_0 indica o instante de tempo em que $U(t) > U_0$, U_0 corresponde à tensão de início de atuação e k é uma constante. Nas simulações foram considerados os valores $U_0 = 90\%$ do valor da tensão crítica de descarga e $k = 1$. Os valores de U_0 adotados para os isoladores de média e de baixa tensão foram, respectivamente, 108 kV e 18 kV.

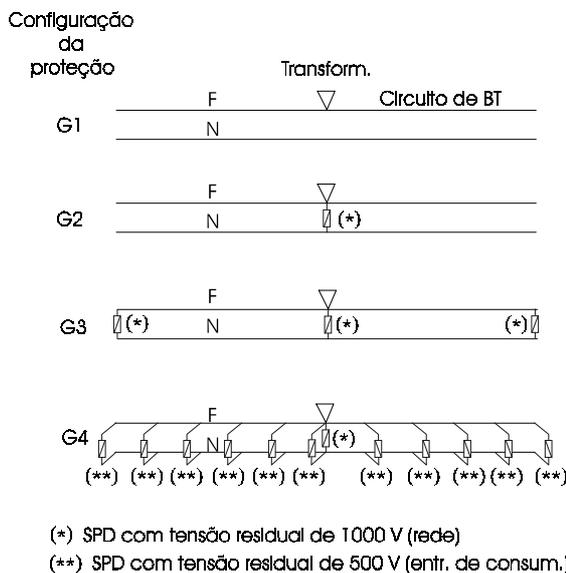


Fig. 2 - Configurações de proteção da rede de BT estudadas (diagrama simplificado representando apenas uma fase).

Os aterramentos foram representados através de resistências, enquanto que os ramais de ligação dos consumidores e os cabos de conexão dos aterramentos foram representados por meio de indutâncias de 10 μ H.

IV. RESULTADOS OBTIDOS

O conhecimento da distribuição de frequência das grandezas relevantes é fundamental para a especificação adequada das características dos SPDs. Considerando a impossibilidade de se considerar, nas simulações, toda a faixa de variação de amplitudes e formas de onda das correntes das descargas, bem como a complexidade da rede analisada, foram consideradas duas correntes: 45 kA, (2,25x80 μ s) e 90 kA (4,5x80 μ s). As distribuições de frequência das grandezas apresentadas neste item referem-se às ocorrências dos valores dessas grandezas em função da variação do ponto de incidência da descarga direta na linha primária até o transformador (desde 0 m a 1500 m), considerando as correntes adotadas. Ao longo deste trabalho

utiliza-se a seguinte nomenclatura para designar os valores das resistências de aterramento indicadas na Fig. 1:

- resistências baixas: 10 Ω (R_C) e 25 Ω (R_P , R_T , R_S);
- resistências médias: $R_C = R_P = R_T = R_S = 100 \Omega$;
- resistências altas: $R_C = R_P = R_T = R_S = 300 \Omega$.

As Figs. 3 e 4 apresentam as frequências acumuladas das sobretensões nos consumidores, considerando ou não a presença de SPDs na rede, para a corrente de descarga de 45 kA e os pontos de impacto a 90 m, 300 m, 600 m, 900 m, 1200 m e 1500 m do transformador. Na Fig. 3 verifica-se a influência das resistências de aterramento e na Fig. 4 são apresentados os resultados relativos às configurações G1, G2 e G3. Apesar do número limitado de pontos de impacto ao longo da linha, as distribuições de frequência obtidas fornecem informações importantes sobre o comportamento das sobretensões nas situações analisadas.

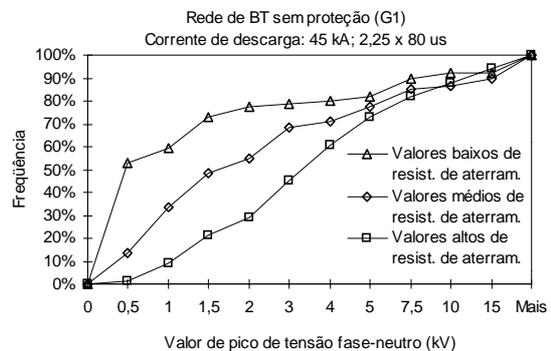


Fig. 3 - Frequências acumuladas das sobretensões nos consumidores com rede de BT sem proteção (G1). Corrente de descarga de 45 kA.

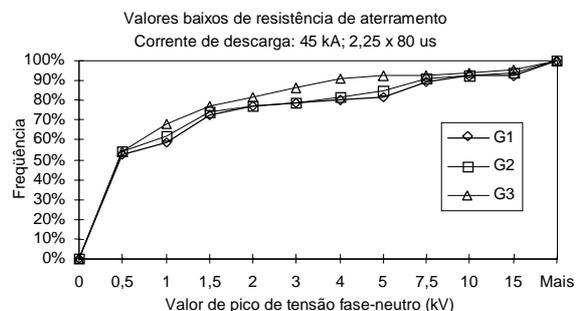


Fig. 4 - Frequências acumuladas das sobretensões nos consumidores para diferentes configurações da proteção. Corrente de descarga de 45 kA.

Os resultados das simulações mostraram que:

- as sobretensões (fase-neutro) nos consumidores tendem a aumentar com o aumento do valor da resistência de aterramento;
- o efeito dos SPDs depende dos valores das resistências de aterramento, obtendo-se maiores reduções das sobretensões quando as resistências de aterramento são altas;
- a instalação de SPDs apenas na saída do transformador praticamente não afeta as sobretensões nos consumidores;
- a instalação de SPDs nas extremidades do circuito secundário traz uma redução apreciável das sobretensões

nos consumidores quando as resistências de aterramento são altas.

Com relação ao transformador, o problema não se restringe às sobretensões nos seus terminais, mas envolve também aquelas que aparecem internamente, cuja análise está além do escopo deste trabalho. Os enrolamentos do transformador sem proteção ficam sujeitos a sobretensões com presença de uma componente oscilatória de alta frequência de pequena duração que pode atingir valores muito elevados, superiores a 30 kV. Tal componente se superpõe à onda de impulso mais lenta, que apresenta menor amplitude. É recomendável a utilização da proteção no secundário do transformador, principalmente tendo-se em conta que o mesmo é um equipamento de importância fundamental no sistema de distribuição e que sobretensões repetidas, mesmo as que não produzem danos imediatos, podem ocasionar deterioração da isolamento.

Devido ao comportamento extremamente não linear das correntes nos SPDs para pequenas distâncias entre o ponto de incidência da descarga e o transformador, um número maior de simulações foi efetuado nessas condições. A distribuição de frequência das correntes para uma distribuição de probabilidade uniforme de descarga direta ao longo da linha foi obtida variando os pontos de impacto a intervalos pequenos, no trecho entre 0 m e 1500 m do transformador, e estimando, através de interpolação, as grandezas relativas às correntes nos SPDs dos pontos não contemplados nas simulações. Embora esse procedimento corresponda a uma aproximação, o mesmo torna os resultados compatíveis com uma densidade de probabilidade de descarga uniforme ao longo da linha. A título de exemplo, as Figs. 5 e 6 apresentam, para a configuração G3 (SPDs no secundário do transformador e nas extremidades do circuito secundário), gráficos das frequências acumuladas das cargas e dos valores de crista das correntes nos SPDs das extremidades do circuito secundário, respectivamente.

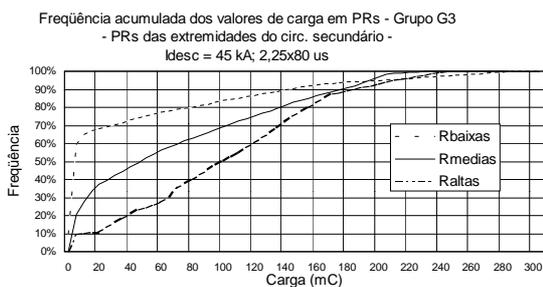


Fig. 5 – Freq. ocorrência: valores de carga nos SPDs.

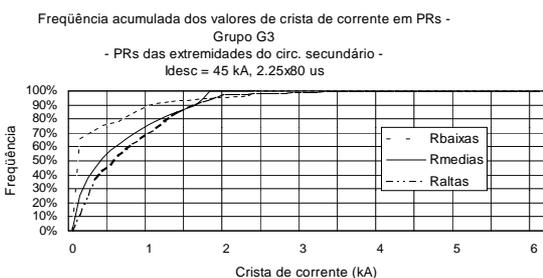


Fig. 6 – Freq. ocorrência: valores de crista de corrente nos SPDs.

O aspecto mais crítico para a determinação da suportabilidade dos SPDs é a carga. Embora em diversos casos tenham sido verificados aumentos nos valores das cargas escoadas através dos SPDs com a diminuição da resistência de aterramento, não foram observadas tendências suficientemente uniformes para correlacionar essas grandezas. Além disso, considerou-se mais adequado tomar o maior dos valores de carga obtidos nas simulações para as diferentes resistências de aterramento consideradas, pois não seria recomendável utilizar SPDs com capacidade reduzida no caso de altos valores de resistência de aterramento, uma vez que é procedimento usual procurar reduzir tais valores por diversos motivos, entre os quais a segurança.

De maneira geral, as cargas nos SPDs do transformador tendem a ser maiores na configuração G2 que na G3, embora possam ocorrer situações onde se verifique o contrário. Do ponto de vista prático pode ser conveniente considerar o maior dos valores entre os casos G2 e G3 para que os SPDs do transformador não fiquem na dependência da presença efetiva de SPDs das extremidades do circuito.

V. CONCLUSÕES

O estudo do qual se originou este trabalho teve por objetivo a elaboração de recomendações técnicas relativas à proteção de redes secundárias de distribuição contra descargas atmosféricas, contemplando a definição dos requisitos a serem atendidos pelos dispositivos de proteção e o estabelecimento de critérios para sua utilização, levando-se em consideração as particularidades dos padrões de rede secundária das empresas paulistas de energia. Após o desenvolvimento de modelos para os diversos componentes da rede, foram efetuadas centenas de simulações, as quais possibilitaram a análise das solicitações impostas aos SPDs em diferentes situações, tanto em termos de amplitude de corrente como da carga a ela associada. As simulações contemplaram redes com diferentes topologias, tendo-se verificado também a influência de diversos fatores e parâmetros nos valores das correntes, cargas e energias absorvidas pelos SPDs.

A partir da análise dos resultados obtidos foram estabelecidos critérios de utilização dos SPDs especificando-se as características de tensão e corrente mais apropriadas para cada condição e os ensaios elétricos - e respectivas metodologias - necessários para assegurar o seu bom desempenho.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] R. B. Anderson and A. J. Eriksson, "Lightning parameters for engineering applications". *Electra*, n. 69, Mar. 1980.
- [2] Piantini, A.; Bassi, W.; Janiszewski, J. M. "A Simple transformer model for analysis of transferred lightning surges from MV to LV lines". In: *Proc. Int. Conf. on Electricity Distribution (CIRED)*, Nice, June 1999. Session 2, Paper 2.18.
- [3] M. Darveniza and A. E. Vlastos, "The generalized integration method for predicting impulse volt-time characteristics for non-standard waveshapes - a theoretical basis", *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, vol. 23, n. 3, pp. 373-381, June 1988.