

Análise Comparativa de Curvas Características de Para-Raios Utilizados na Proteção de Sistemas Elétricos de Distribuição em 34,5 kV

Carlos Alberto Ferraz
UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas
Campinas (SP), Brasil
camdferraz@gmail.com

Maria Cristina Dias Tavares
UNICAMP - Universidade Estadual de Campinas
Campinas (SP), Brasil
ctavares@unicamp.br

Nelson Clodoaldo de Jesus
GSI - Engenharia e Consultoria Ltda
Taubaté (SP), Brasil
nelson@gsiconsultoria.com.br

Benedito Donizeti Bonatto
UNIFEI - Universidade Federal de Itajubá
Itajubá (MG), Brasil
bonatto@unifei.edu.br

Resumo—As interrupções do fornecimento de energia elétrica e falhas de isolamento de equipamentos para os sistemas de energia elétrica são devidos principalmente às sobretensões, sejam de origem interna ou externa. No sentido de atenuar esses efeitos são utilizados os Para-Raios como uma solução econômica e confiável. Nesse trabalho foram avaliadas a utilização de dois fabricantes de Para-Raios de óxido de zinco (ZnO) de distribuição frente a um curto-circuito monofásico do tipo fase-terra, ocorrido em uma determinada barra de um sistema de 34,5 kV. O desempenho dos Para-Raios foi analisado por meio do programa ATPDraw, verificando-se as suas sobretensões, correntes e capacidades de absorção de energia.

Palavras-Chave—Para-Raios, Sobretensões, Modelagem, Transitórios Eletromagnéticos, Rede de Distribuição de 34,5 kV, Energia Absorvida, ATPDraw.

I. INTRODUÇÃO

Os Para-Raios são equipamentos de grande importância para os sistemas de energia elétrica (SEE), pois quando conectados próximos aos principais equipamentos de uma subestação impedem que as sobretensões atinjam valores superiores aos valores projetados para os equipamentos [1], [3], [8]. Uma das características elétricas mais importante é a capacidade de dissipar as energias absorvidas durante as sobretensões temporárias e transitórias, e manter-se termicamente estável [4], [5].

Para simular no ATPDraw, a capacidade de absorção de energia dos Para-Raios durante sobretensões causadas por uma falta à terra, ou em manobras de equipamentos é necessário que sejam fornecidos dados completos das curvas características, com as transições entre as regiões não lineares, que correspondem as grandes variações das correntes que circulam por eles, para pequenas variações de tensão.

No entanto, os catálogos de fabricantes apresentam informações equivalentes somente aos trechos finais das regiões II e III, caracterizadas por surtos de manobras e surtos de descargas atmosféricas. Não apresentam quase nenhuma informação sobre esses dados na região I.

Esses dados incompletos quando inseridos no ATP geram uma curva altamente íngreme que nas simulações pode apresentar elevados valores de corrente e energia absorvida, e dessa forma, levar a conclusões equivocadas com relação a sua condenação, ou no superdimensionamento das suas características elétricas e mecânicas.

O objetivo desse artigo é mostrar a importância do conhecimento dos dados completos da curva característica dos Para-Raios nas regiões de operação contínua e não linear, para permitir conclusões seguras sobre a sua utilização na proteção contra sobretensões.

A metodologia utilizada consistiu na simulação no ATPDRAW, de uma falta fase à terra em uma barra de 34,5 kV, com a utilização de Para-Raios de dois fabricantes, com as respectivas curvas características com dados obtidos de catálogos, e com os mesmos dados ampliados com pontos estimados na região de operação contínua. Foram realizadas análises de sensibilidade das sobretensões, correntes e energias absorvidas, com vários valores da resistência de aterramento do neutro do sistema elétrico.

II. ASPECTOS BÁSICOS DAS SOBRETENSÕES

A sobretensão pode ser entendida com uma tensão que ocorre entre a fase e a terra, ou entre fases, cujo valor de crista U_{cs} é superior ao valor de crista da tensão máxima U_s de um sistema elétrico. No caso de falta fase-terra, tem-se:

$$U_{cs} > \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot U_s \quad (1)$$

No caso de falta entre fases:

$$U_{cs} > \sqrt{2} \cdot U_s \quad (2)$$

A norma NBR 6939 classifica as sobretensões em sobretensões temporária e sobretensões transitórias, de acordo com a forma de onda da sobretensão, sua duração e seu efeito sobre a isolamento, ou sobre o dispositivo de proteção [2].

A. Sobreensões Temporárias (TOV)

Por definição, são eventos oscilatórios que ocorrem entre fase e terra ou entre fases, geralmente na frequência industrial, e normalmente são originadas de faltas, operação de manobra como rejeição de carga, condições de ressonância, não linearidades (ferroressonância) ou por uma combinação dessas causas que permanecem no sistema até que a causa que lhe deu origem seja eliminada. O tipo de falta mais comum que aparece em um sistema elétrico, é o curto-circuito monofásico que resulta em sobreensões fase-terra que afetam as outras duas fases. A amplitude dessas sobreensões que surgem nas fases sãs (não afetadas) depende principalmente do tipo do sistema de aterramento do neutro do sistema no ponto em consideração, e podem ser determinadas, de forma simplificada, pela multiplicação do fator K pela amplitude da máxima U_{max} da tensão fase-terra de operação do sistema antes da ocorrência da falta, ou seja:

$$TOV = K \cdot U_{max,FT} \quad (3)$$

O fator K de falta para a terra, ou fator de aterramento pode ser definido como a relação entre o valor máximo da tensão eficaz da tensão fase-terra à frequência industrial de uma fase não afetada durante a falta e o valor da tensão fase-terra à frequência industrial no mesmo ponto, na ausência da falta. Nos sistemas com o neutro isolado, as tensões nas fases não afetadas podem exceder a máxima tensão fase-fase, ou seja:

$$TOV > U_{max,FF} \quad (4)$$

$$U_{max,FF} = \sqrt{3} \cdot U_{max,FT} \quad (5)$$

$$TOV > 1,73 \cdot U_{max,FT} \quad (6)$$

Nessas condições, a duração da falta pode variar de poucos segundos a poucas horas, em função da corrente de falta e da característica e sensibilidade dos dispositivos de detecção e abertura da falta. Nos sistemas com o neutro eficazmente ou solidamente aterrado, desde que obedecidas certas relações entre as resistências e reatâncias de seqüências, o fator K de aterramento é inferior a 1,4, isto é:

$$TOV \leq 1,4 \cdot U_{max} \leq 1,4 \cdot \frac{U_{max,FF}}{\sqrt{3}} \quad (7)$$

$$TOV \leq 0,8 \cdot U_{max,FF} \quad (8)$$

As sobreensões temporárias atingem no máximo 80% da tensão fase-fase do sistema. A duração da falta é normalmente inferior a 0,2 segundos para proteção de linha, e 1 segundo no caso de proteção de retaguarda. As referências [3], [6], [7] e [16] tratam com maiores detalhes, os efeitos dos diversos tipos de sistema de aterramento nos valores das sobreensões nas fases sãs.

B. Sobreensões Transitórias

Sobreensão de curta duração, de alguns ms ou menos, oscilatória ou não oscilatória, em geral fortemente amortecida e podem ser seguidas imediatamente por sobreensões temporárias. As sobreensões transitórias são classificadas em:

B.I - Sobreensões de Frente Lenta (SFO)

Sobreensão usualmente unidirecional, fortemente amortecidas, em geral são normalmente causadas pela operação de equipamentos de manobras (chaves, disjuntores) na energização e religamento de linhas, ou na aplicação e abertura de faltas, na rejeição de carga, na energização de transformadores, no chaveamento de correntes capacitivas e indutivas, entre outros.

B.II - Sobreensões de Frente Rápida (FFO)

Sobreensões entre fase-terra ou entre fases, em um dado ponto do sistema, devido a uma descarga atmosférica ou outra causa qualquer, incidindo diretamente nos condutores fase de linhas aéreas, nos cabos Para-Raios ou nas estruturas de linhas de transmissão ou por descargas à terra ou em estruturas próximas à linha considerada.

B.III - Sobreensões de Frente Muito Rápida (VFTO)

Sobreensões decorrentes das manobras de operação de seccionadores ou de faltas dentro de uma subestação isolada a SF6 (GIS), devido à disrupção rápida da isolamento gasosa e à propagação praticamente não amortecida do surto na GIS.

III. PARA-RAIOS

Os Para-Raios de Óxido de Zinco (ZnO) são basicamente resistores não lineares utilizados para proteção contra sobreensões transitórias (descargas atmosféricas ou manobras) com a finalidade de evitar que as sobreensões associadas a esses surtos alcancem valores superiores àqueles para os quais os equipamentos foram projetados [1], [3], [4], [7], [10].

A. Critérios de Especificação de Para-Raios

O correto dimensionamento dos para-raios propicia uma proteção adequada aos equipamentos do sistema a serem protegidos, além de uma otimização na relação entre custo e benefício para a sua aquisição.

A.I - Caracterização de Para-Raios do Tipo ZnO

Na caracterização da operação de um Para-Raios é fundamental a definição e o conhecimento da sua curva característica tensão versus corrente de descarga, cuja forma típica é mostrada na Fig. 1.

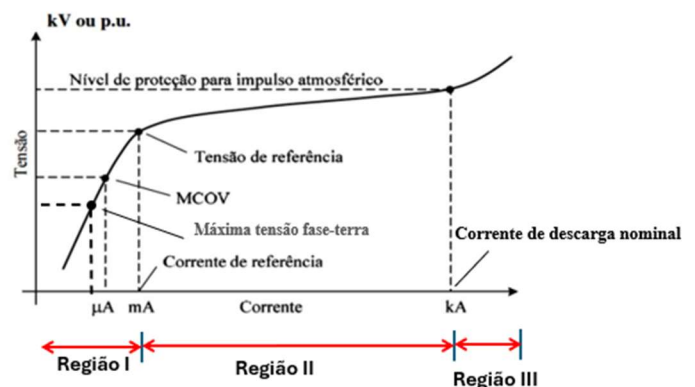


Fig. 1. Curva típica de tensão x corrente de para-raios do tipo ZnO.

A região I aproximadamente linear, corresponde a máxima tensão de operação contínua (MCOV), na qual os Para-Raios poderão operar de forma contínua sem danos para a sua integridade.

Essa tensão é nomeada pela norma IEC como U_c , que recomenda na sua determinação, um acréscimo de no mínimo 5% sobre a tensão máxima fase-terra para considerar os eventuais harmônicos na tensão que podem elevar o seu valor de pico [6], [7]. A transição da região I para a região II é caracterizada pela tensão nominal ou tensão de referência U_r , que não significa uma tensão que pode ser aplicada continuamente, mas corresponde a capacidade do Para-Raios suportar as sobretensões temporárias do sistema que pode ser aplicada temporariamente por um período específico. No caso da aplicação sucessiva da tensão nominal, os Para-Raios não poderão se resfriar e voltar ao estado normal, tornando-se termicamente instável e nessas condições, haverá um aquecimento contínuo (avalanche térmica) até atingir sua destruição.

A região II, altamente não linear, é caracterizada por pequenas variações de tensão que acarretam grandes variações na corrente. Essa região corresponde aos eventos transitórios dentro de uma faixa de ms para sobretensões de manobras até μ s para sobretensões atmosféricas e a corrente varia de miliampères a cerca de 2.000 A.

A aplicação de tensões sustentadas por um tempo superior a 10s resultará na degradação dos Para-Raios em frações de segundos. A transição da região II para a região III é caracterizada pelo nível de proteção contra surtos atmosféricos, e esse ponto corresponde a uma queda de tensão nos terminais do Para-Raios, ou tensão residual quando flui uma corrente de descarga nominal I_n .

A região III, linear, apresenta valores elevados de corrente, e corresponde as características de proteção dos Para-Raios contra descargas atmosféricas. Nessa região, os Para-Raios podem entrar em um processo de avalanche térmica, ou seja, não é possível assegurar que as suas características sejam mantidas. No caso do sistema de 34,5 kV, a Fig. 2 mostra a curva típica de um Para-Raios de tensão nominal de 30 kV, objeto desse estudo.

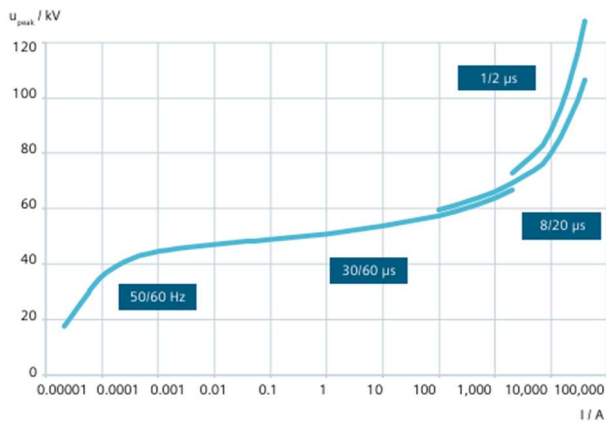


Fig. 2. Curva característica para-raios 30 kV.

Fonte: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/601/109747601/att_919929/v1/Medium-voltage_surge_arresters_US_-_Catalog_HP-AR_25.pdf. Acessado em 28.11.2024

Um outro fator importante no dimensionamento dos Para-Raios, é a sua capacidade de dissipar as energias absorvidas durante as sobretensões temporárias e transitórias, e manter-se termicamente estável, ou seja, poder resfriar e voltar a sua temperatura normal de operação, sem que haja comprometimento da sua integridade.

Para tal análise, são utilizados os conceitos de capacidade de absorção de energia de impulso e capacidade de absorção de energia térmica, em substituição ao conceito de classes de descarga da linha [4], [5], [7], [10], [11].

A.II - Escolha de Para-Raios ZnO

Nesse artigo os Para-Raios encontram-se instalados no lado de 34,5 kV do sistema de distribuição, e foram dimensionados inicialmente para o neutro solidamente aterrado. Os procedimentos de cálculo seguiram as recomendações baseadas na norma IEC 60099-4 [6], [7], [8].

Tensão de Operação Contínua dos Para-Raios (U_c):

A determinação do seu valor mínimo $U_{c,min}$ depende do máximo valor eficaz de operação fase-fase do sistema U_S , do tipo de aterramento utilizado, bem como suportar a tensão fase-terra aplicada, com uma margem de no mínimo, 5%, para considerar as flutuações das tensões e os possíveis aumentos das amplitudes da tensão devido à presença eventual de harmônicos no sistema. A Tabela I mostra os valores da tensão contínua de operação em função do tipo de aterramento.

TABELA I VALORES MÍNIMOS DAS TENSÕES DE OPERAÇÃO CONTÍNUAS

Configuração do Neutro do Sistema	Tensão de Operação Contínua
Solidamente Aterrado ^a	$U_{c,min} \geq 1,05 \cdot U_S / \sqrt{3}$
Isolado ou Ressonante	$U_{c,min} \geq U_S$

No caso em questão, para sistema solidamente aterrado:

$$U_{c,min} \geq 1,05 \cdot 34,5 \text{ kV} / \sqrt{3} \quad (9)$$

$$U_{c,min} \geq 20,9 \text{ kV} \quad (10)$$

$$U_c = 24 \text{ kV} \quad (11)$$

Tensão Nominal (U_r):

Preliminarmente, a tensão nominal U_{r1} e a tensão contínua de operação U_c estão diretamente relacionadas por um fator empírico, frequentemente de 1,25, que não depende dos fabricantes. Os valores mínimos U_c estão indicados na Tabela II.

TABELA II VALORES MÍNIMOS DAS TENSÕES NOMINAIS

Configuração do Neutro do Sistema	Tensão Nominal
Solidamente Aterrado	$U_{c,min} \geq 1,05 \cdot U_S / \sqrt{3}$
Isolado ou Ressonante	$U_{c,min} \geq U_S$

$$U_{r1} \geq 1,25 \cdot 1,05 \cdot 34,5 \text{ kV} / \sqrt{3} \quad (12)$$

$$U_{r1} \geq 26,1 \text{ kV} \quad (13)$$

Os valores adotados anteriormente, também consideram inicialmente um sistema solidamente aterrado. Um outro enfoque é calcular a tensão nominal U_{r2} por meio da análise das eventuais tensões temporárias no sistema.

No caso de sistemas com o neutro solidamente aterrado, as sobretensões temporárias U_{TOV} podem atingir valores até 1,4 vezes a máxima tensão fase-terra, por um período de alguns décimos de segundos até vários segundos. A Fig. 3 mostra a relação entre os valores eficazes permissíveis da tensão U_{TOV} , nomeada de U com a tensão nominal U_r .

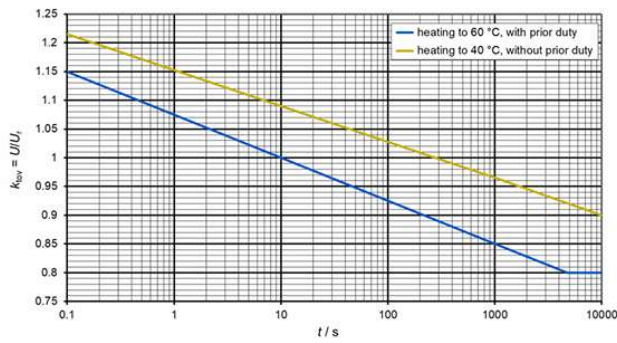


Fig. 3. Curva de sobretensão temporária de para-raios (TOV).

Essa relação é denominada de fator k_{TOV} , dada por:

$$k_{TOV} = \frac{U_{TOV}}{U_{r2}} \Rightarrow U_{r2} = \frac{U_{TOV}}{k_{TOV}} \text{ kV} \quad (14)$$

A curva inferior representa a pior condição de operação e mostra que uma sobretensão U_{TOV} ou U , cujo valor seja igual a tensão nominal do Para-Raios U_r pode ser aplicada durante 10s sem afetar a sua integridade. Para durações inferiores a 10s, podem ser aplicadas sobretensão U_{TOV} ou U com valores superiores a U_r . No caso de uma duração de 1s, U_{TOV} pode estar 7,5% acima do valor de U_r , e para durações superiores a 10 s, podem ser aplicadas sobretensão U_{TOV} ou U com valores inferiores a U_r . Caso seja conhecido o valor de U_{TOV} ou U em 1s, podemos calcular U_{r2} com a expressão:

$$U_{r2} = \frac{U_{1s}}{1,075} \text{ kV} \quad (15)$$

No caso desse artigo, não são disponíveis tais informações, e adotaremos fator de aterramento $k = 1,4$ e um período de 10 s para a ocorrência das sobretensões temporárias. Nessas condições, encontramos:

$$U_{TOV} = k \cdot \frac{U_s}{\sqrt{3}} = 1,4 \cdot \frac{34,5}{\sqrt{3}} = 27,9 \text{ kV} \quad (16)$$

$$k_{TOV} = 1,0 \text{ (curva azul ou inferior)}$$

$$U_{r2} = \frac{U_{TOV}}{k_{TOV}} = 27,9 \text{ kV} \quad (17)$$

A escolha de U_r é o maior valor entre U_{r1} e U_{r2} arredondando para o próximo múltiplo de 3. Portanto:

$$U_r = 30 \text{ kV} \quad (18)$$

O novo valor de U_c é dado por:

$$U_c = \frac{U_r}{1,25} = \frac{30 \text{ kV}}{1,25} = 24 \text{ kV} \quad (19)$$

Corrente nominal de descarga (I_n)

A corrente nominal de descarga é o valor de pico da corrente de impulso atmosférico que pode ser utilizada na classificação dos Para-Raios. Na prática está sendo consolidada a utilização de Para-Raios de 10 kA. Portanto foi escolhido o Para-Raios com I_n de 10 kA.

IV. MODELAGEM DO SISTEMA ELÉTRICO DE 138/34,5 kV

O diagrama unifilar equivalente de um sistema elétrico 138/34,5 kV interligado com um sistema fotovoltaico, por meio de cabos subterrâneos conectados a linhas aéreas, foi

considerado como base para essa análise. Todos os equipamentos de 138kV e 34,5 kV do sistema elétrico foram implementados na simulação de acordo com as suas características de fabricação. Para obter a resposta transitória frente as sobretensões, é necessário obter um modelo de equipamentos diferente ao tradicional, ou seja, um modelo transitório que leva em conta também a capacitância dos componentes utilizados no sistema. Nesse sentido, os equipamentos de 138 kV e 34,5 kV foram modelados no ATPDraw, por meio de suas capacitâncias parasitas de enrolamentos e das buchas à terra. Um aspecto importante a destacar se refere a modelagem adequada dos Para-Raios para proteção contra sobretensões. As referências [5], [11], [12], [16], apresentam um comparativo com os diversos tipos de modelos de Para-Raios utilizados nas simulações. No programa ATPDraw existem três modelos, e nesse estudo foi utilizado o modelo 92 para representar os Para-Raios ZnO de 30 kV dimensionados para um sistema com o neutro solidamente aterrado e foram utilizados pontos da curva característica tensão versus corrente obtidos de catálogos de fabricantes. Foram realizadas simulações de dois Para-Raios de 30 kV instalados em sistemas com o neutro solidamente aterrado, aterrado por resistores e neutro isolado. Para cada tipo de conexão do neutro foram utilizados na simulação, as curvas características, mostradas na Fig. 4.

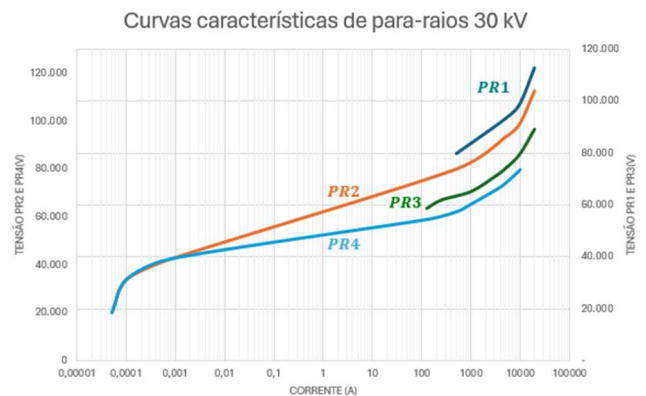


Fig. 4. Curvas características de para-raios ZnO

Onde:

- PR1: Curva com valores obtidos do catálogo do fabricante 1;
- PR2: Curva do PR1 acrescida com valores na região linear;
- PR3: Curva com valores obtidos do catálogo do fabricante 2;
- PR4: Curva do PR3 acrescida com valores na região linear.

Em uma primeira análise, as curvas dos Para-Raios PR1 e PR3 não oferecem segurança para avaliarmos a suportabilidade a um curto-circuito monofásico fase-terra. No entanto, as curvas dos mesmos Para-Raios acrescidos de valores teóricos da região linear fornecem subsídios para essa análise. O sistema em estudo é caracterizado por uma fonte de uma subestação de 138 kV, uma linha de transmissão curta com 550 m, uma subestação coletora em 138/34,5 kV, com um transformador de 80/100 MVA, o qual conecta o sistema de geração a partir dos circuitos de distribuição dos conjuntos de inversores fotovoltaicos. A Fig. 5 mostra o diagrama unifilar básico do sistema elétrico utilizado para a verificação da influência da representação das curvas dos Para-Raios na sua operação e aspectos associados ao seu dimensionamento.

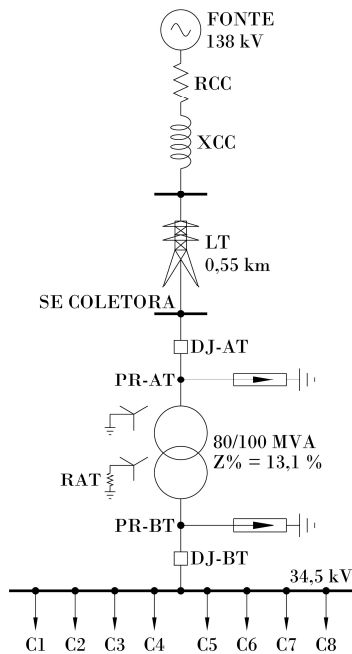


Fig. 5. Diagrama unifilar simplificado do sistema elétrico.

O diagrama do circuito equivalente da modelagem realizada no programa ATP está descrito na Fig. 6 e os principais dados estão relacionados no Apêndice I. Foi simulada na barra de 34,5 kV do sistema de distribuição, uma falta na fase A à terra, para diversos valores de resistência de aterramento RAT.

Nas simulações realizadas foi adotado um passo de integração de 1 μ s, considerando a operação sem e com falta por um intervalo de 1 s, com base no sistema da Fig. 6.

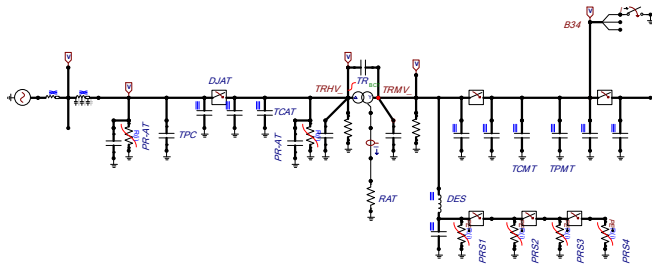


Fig. 6. Circuito utilizado para a modelagem no programa ATPDraw.

V. RESULTADOS OBTIDOS

Na análise dos resultados foram feitas as seguintes considerações para aprovação ou reprovação dos Para-Raios:

- Tensão máxima de sobretensão temporária de 7,5% acima do valor da tensão de referência de 30kV, isto é valor máximo permissível de 45,6kV de pico, durante 1segundo.

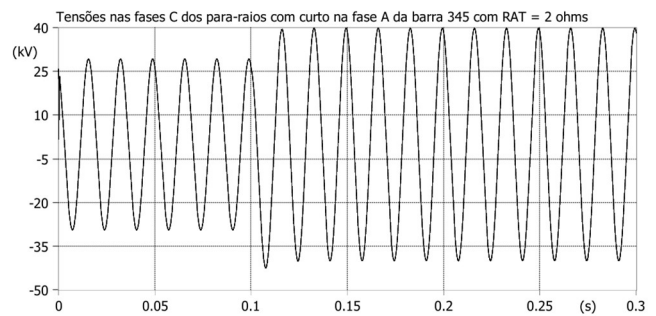
- valor máximo de dissipação de 3kJ/kV de referência, ou seja, 90 kJ

- Os resultados obtidos na simulação se referem somente a fase C dos Para-Raios, pois nessa fase foram encontrados os maiores valores de tensão, corrente e energia absorvida

A. Sobretensões dos Para-Raios

A Fig. 7 mostra que a tensão de pico na fase C, após o curto-circuito atinge o valor de pico de 42,4 kV, inferior ao

valor máximo de 45,6 kV, e desse modo, nesse quesito os dois Para-Raios estariam aprovados.



(file UNICAMPPR30KV.pl4; x-var t) v:PR1C - v:PR2C - v:PR3C - v:PR4C -

Fig. 7. Tensões nos para-raios para neutro aterrado com RAT = 2 Ω .

A Fig. 8 mostra o valor máximo da sobretensão de 48 kV de pico que corresponde a um valor superior em 13% em comparação com a tensão eficaz de referência, 30 kV. A sobretensão permissível em 1s é de 7,5%, e nesse caso, os para-raios PR1 e PR2 não atendem. Simulações com outros valores de RAT, acima de 5 ohms conduzem a mesma conclusão.

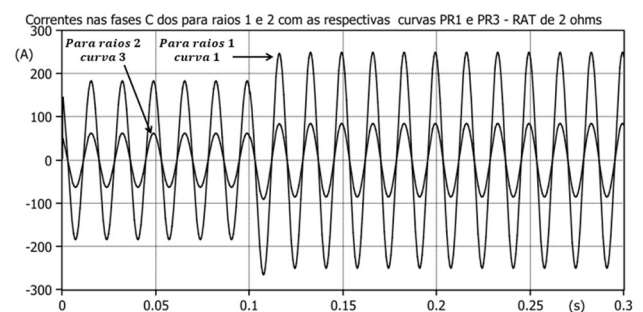


(file UNICAMPPR30KV.pl4; x-var t) v:PR1C - v:PR2C - v:PR3C - v:PR4C -

Fig. 8. Tensões nos para-raios para neutro aterrado com RAT = 5 Ω .

B. Correntes dos Para-Raios - Curvas de Catálogos

Os Para-Raios 1 e 2 foram representados pelas suas respectivas curvas incompletas, PR1 e PR3, cujas correntes resultantes podem ser verificadas na Fig. 9.



(file UNICAMPPR30KV.pl4; x-var t) c:PR1C - c:PR3C -

Fig. 9. Correntes nos para-raios para neutro aterrado com RAT = 2 Ω .

No sistema com o RAT de $2\ \Omega$, antes mesmo da ocorrência da falta, há uma circulação de correntes de 183 A em PR1 e 62 A em PR3, e eles estariam reprovados. As simulações com valores superiores de RAT apresentam a mesma conclusão.

C. Correntes dos Para Raios - Curvas Ampliadas

A Fig. 10 mostra o comportamento das correntes dos Para-Raios 1 e 2 simulados pelas suas respectivas curvas PR2 e PR4 para RAT = $2\ \Omega$, com valores estimados para a região I. Antes da falta, uma circulação de corrente de $84\ \mu\text{A}$, e após a falta, 0,6 mA. Nessas condições, atendem os critérios de especificação, pois estão operando na região I.

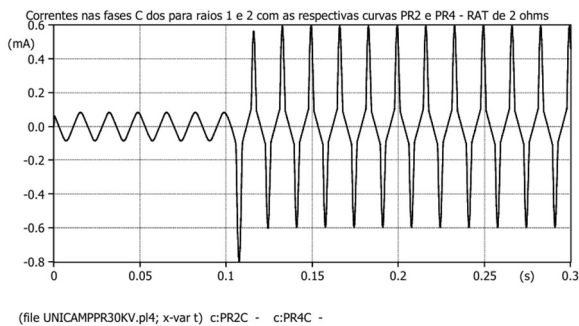


Fig. 10. Correntes nos para-raios para neutro aterrado com RAT = $2\ \Omega$.

As curvas ampliadas dos Para-Raios PR2 e PR4, indicam após a falta, com RAT de $5\ \Omega$, uma circulação de corrente de 80 A e 46 A, respectivamente, valores que reprovariam a utilização desses Para-Raios, conforme ilustrado na Fig. 11.

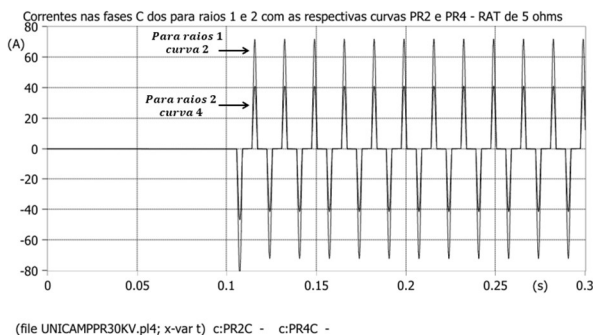


Fig. 11. Correntes nos para-raios para neutro aterrado com RAT = $5\ \Omega$.

D. Energias Dissipadas nos Para Raios

A Fig. 12 lustra a comparação entre as energias absorvidas pelos Para-Raios para uma impedância de falta a terra de $2\ \Omega$, enquanto a Fig. 13 mostra os mesmos resultados para uma impedância de falta de $5\ \Omega$.

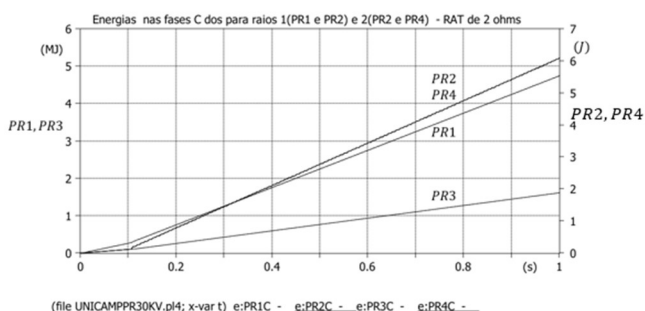


Fig. 12. Energias absorvidas pelos para-raios com RAT = $2\ \Omega$.

Considerando um tempo de extinção da falta em 0,4 s, constata-se que as curvas incompletas dos Para-Raios 1 (PR1) e do para-raios 2 (PR3) apresentam uma dissipação respectiva de 1,8 MJ e 600 kJ, ou seja, estão condenados. Utilizando as curvas completas PR2 e PR4, eles estariam aprovados. Para um tempo de extinção da falta em 0,4 s, constata-se que todas as curvas apresentam uma dissipação acima de 130 kJ, e, portanto, estariam reprovados.

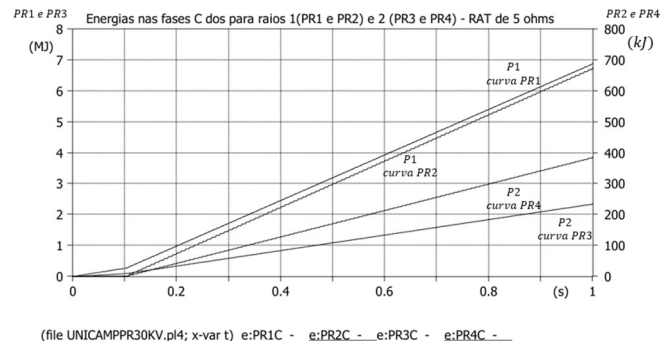


Fig. 13. Energias absorvidas pelos para-raios com RAT = $5\ \Omega$.

VI. CONCLUSÕES

Nos sistemas com o neutro solidamente aterrado com valores inferiores a $2\ \Omega$ para a resistência equivalente de falta, todos os Para-Raios atendem os quesitos de tensão sustentada, corrente e energia absorvida. Nos sistemas com neutro aterrado por resistores, acima de 5 ohms não é possível a utilização desses Para-Raios de 30 kV, dimensionados para sistema solidamente aterrados, pois nos seus terminais aparece uma tensão de pico de 50 kV, valor 18% acima da tensão nominal de 30 kV. Com relação a capacidade de absorção de energia, os Para-Raios 1 e 2 representados pelas curvas PR1 e PR3 seriam reprovados com base nos resultados das simulações, pois devido aos poucos pontos de suas curvas apresentam uma dissipação da ordem de MJ, enquanto com a utilização das respectivas curvas ampliadas, PR2 e PR4 seriam aprovados na simulação. Independente do sistema de aterramento do neutro, torna-se importante o conhecimento dos pontos da curva característica, na região linear e na região II, 30/60 μs , a qual é responsável na determinação da operação durante as condições de manobras ou faltas sustentadas, sendo esse um dos principais requisitos de especificação desses equipamentos. Deve-se salientar que as questões de especificação de Para-Raios foram alteradas desde 2020, quando se introduziu o conceito de transferência nominal de carga (Coulombs) dos Para-Raios, em contraponto a capacidade de absorção de energia [17], [18], [19].

Os resultados obtidos mostram a real importância de se representar nas simulações, no mínimo, a curva detalhada dos Para-Raios na região das sobretensões temporárias, pois a representação direta das informações de catálogos pode levar a erros significativos em termos da condução de correntes e energias absorvidas, resultando em um consequente superdimensionamento dos equipamentos. Uma contribuição desse trabalho é o de alertar sobre a necessidade de representação precisa da curva dos Para-Raios, o que deveria ser facilitado por melhorias das informações essenciais dos dados de catálogo dos fabricantes de Para-Raios, para possibilitar a sua representação adequada, especialmente quando se quer avaliar os efeitos das sobretensões temporárias e as respectivas energias absorvidas pelos Para-Raios.

VII. APÊNDICE I

Dados do Sistema Elétrico:

1) Fonte: 138 kV;

2) Impedância de curto-circuito:

$R_0 = 26,92 \, \Omega$; $X_0 = 125,66 \, \Omega$; $R_1 = 12,32 \, \Omega$; $X_1 = 63,06 \, \Omega$.

3) Linha de Transmissão:

$L = 0,55 \, \text{km}$;

$R_0 = 0,580 \, \Omega/\text{km}$; $X_0 = 1,3800 \, \Omega/\text{km}$; $C_0 = 0,005402 \, \mu\text{F}/\text{km}$;

$R_1 = 0,191 \, \Omega/\text{km}$; $X_1 = 0,5116 \, \Omega/\text{km}$; $C_1 = 0,008470 \, \mu\text{F}/\text{km}$.

4) Transformador Principal:

Potência Nominal = 100 MVA;

Tensão Nominal Primária = 138 kV;

Tensão Nominal Secundária = 34,5 kV;

Impedância Percentual = 13,1%

Corrente a Vazio = 0,10 %

Perdas a vazio = 53 kW;

Perdas em carga = 339,63 kW.

5) Capacitâncias Parasitas do Transformador:

Capacitância entre primário e terra = 3460 pF;

Capacitância entre secundário e terra = 5142 pF;

Capacitância entre primário e secundário = 2200 pF.

6) Capacitâncias Parasitas dos Equipamentos de AT:

Capacitâncias do Disjuntor de AT = 100 pF;

Capacitâncias dos Para-Raios de AT = 100 pF;

Capacitâncias dos TCs de AT = 350 pF;

Capacitâncias do TP Capacitivo = 7000 pF;

Capacitâncias entre primário e secundário = 2200 pF.

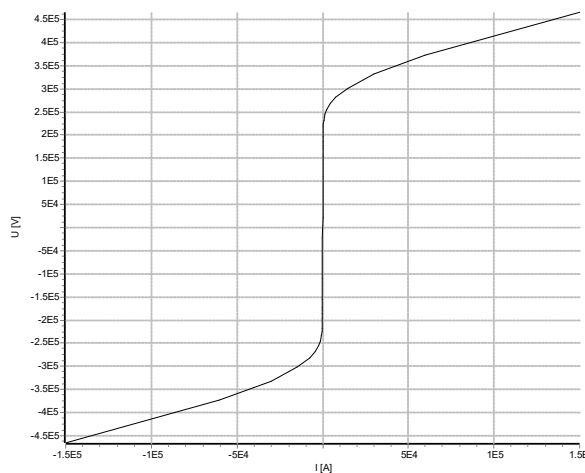
7) Dados dos Para-raios de AT:

Tensão Nominal = 120 kV;

Máxima Tensão de Operação Contínua = 98 kV;

Corrente Nominal = 10 kA;

Curva dos Para-Raios:



8) Capacitâncias Parasitas dos Equipamentos de MT:

Capacitâncias do Disjuntor de MT = 20 pF;

Capacitâncias dos Para-Raios de MT = 100 pF;

Capacitâncias dos TCs de MT = 100 pF;

Capacitâncias do TP Indutivo = 100 pF.

9) Dados dos Para-raios:

Indutância do cabo de descida para 1 m: 1 μH ;

Curvas dos Para-Raios (Conforme dados da Fig. 4).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D'Ajuz, A.; Fonseca, C. dos S.; Carvalho, F. M. S.; Filho, J. A.; Dias, L. E. N.; Pereira, M. P.; Esmeraldo, P.C.V.; Vaisman, R.; S.O.; Frontin; Transistórios Elétricos e Coordenação de Isolamento - Aplicação em Sistemas de Potência de Alta Tensão, EDUF - Editora Universitária da Universidade Federal Fluminense, 1987.
- [2] ANBT, Norma Brasileira NBR 6939: Coordenação do isolamento - Procedimento. 2ª edição, 2018.
- [3] Curso sobre Para-Raios: Aplicação em redes de distribuição e subestações. Organização: Franco Engenharia Ltda. Apoio: Unicamp, Campinas - SP 2 a 4 de setembro, 2008.
- [4] Jorge Luiz De Franco; José Pissolato Filho; Daiana Antônio da Silva; Nelson J. Batistela.; "Análise do Comportamento dos Para-Raios de Óxido de Zinco (ZnO) sem Centelhadores Frente as Sobreensões temporárias em Função da Quantidade de Energia Absorvida", XXI SNPTTEE - Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica, 23 a 26 de outubro de 2011, Florianópolis, SC.
- [5] G. R. S. Lira; D. Fernandes Jr; E. G. Costa, Computation of Energy Absorption and Residual Voltage in Metal Oxide Surge Arrester from Digital Models and Lab Tests: A Comparative Study. IEEE. the International Conference on Power Systems Transients (IPST'07) in Lyon, France on June 4-7, 2007.
- [6] Metal-Oxide Surge Arresters in High-Voltage Power Systems Fundamentals. Hinrichsen V. 3ª edição. Siemens, August, 2013.
- [7] Hinrichsen V. Metal-Oxide Surge Arresters Fundamentals. Edition 2024 (Seminar Edition). https://www.hst.tudarmstadt.de/media/hst/veroeffentlichungen_2/Volk_er_Hinrichsen_-_Metal-Oxide_Surge_Arrester_-_Fundamentals_Edition_2024_Seminar_Edition.pdf.
- [8] IEC International Standard, IEC 60099-4, - Metal-oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. Edition 3.0. 2014.
- [9] Martinez, M.L.B; Para-raios para Sistema de Média Tensão - Características Técnicas e Aplicação a Sistemas de Potência; Dissertação de mestrado; EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá - 1993.
- [10] D'Ajuz, A.; Resende, F. M.; Carvalho, F. M. S.; Nunes S, I. G.; Filho, J. A.; Dias, L. E. N.; Pereira, M. P.; Filho, O. K.; Morais, S. de A. Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão, ed. Universidade Federal Fluminense, 1985.
- [11] L. S. Marroques; L. M. Peres; M. L. R. Chaves; G. C. Guimarães. Uma análise dos modelos de para-raios utilizados para simulação no ATP. Conferência de Estudos em Engenharia Elétrica, XI CEEL ISSN 2178-8308, Universidade Federal de Uberlândia - UFU, 25 a 29 de novembro de 2013.
- [12] L. S. Marroques; "Modelagem e posicionamento de para-raios em redes subterrâneas de parques eólicos conectadas a redes aéreas utilizando o ATP". Dissertação de mestrado apresentado ao programa de pós-graduação da Universidade Federal de Uberlândia - Faculdade de Engenharia Elétrica, em fevereiro de 2015.
- [13] Norma INTERNATIONAL STANDARD - IEC 60071-2, - Insulation Coordination - Part 2: Application guidelines, 2018.
- [14] IEC International Standard, IEC 60099-4, - Metal-Oxide surge arresters without gaps for a.c. systems. Edition 3.0. 2014.
- [15] Analysis of MOV Surge Arrester Models by using Alternative Transient Program ATP/EMTP. IJSTE - International Journal of Science Technology & Engineering | Volume 3 | Issue 02 | August 2016.
- [16] Mukesh, Gautama; Arbind, Kumar Mishra.; Effect of Grounding Resistance and Lightning Arrester Non-linear Characteristics in Electrical Distribution System. Proceedings of IOE Graduat e Conference, 2017, Volume:5 ISSN:2350-8914 (Online), 2350-8906.
- [17] IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV), IEEE, 2020.
- [18] J. Woodword.; Understanding Changes in IEEE C62.11-2020 The MOV Arrester Test Standard- The MOV Arrester Test Standard, ArresterFacts 050 - Understanding Changes in IEEE C62.11-2020, February, 2020.
- [19] Z. Zhang, C. Kang, Z. Wang, Z. Chen, W. Jiao and J. Guo, "Study on applicability of metal oxide arrester simulation model considering residual voltage and energy characteristics," 18th International Conference on AC and DC Power Transmission (ACDC 2022), Online Conference, China, 2022, pp. 977-981, doi: 10.1049/icp.2022.1322.