



Capítulo I

Escolha do tipo de resistor de aterramento do neutro em sistemas elétricos industriais

Paulo Fernandes Costa*

A aplicação de resistores de aterramento do neutro em sistemas industriais, tanto de média quanto de baixa tensão, é uma prática bastante disseminada no Brasil, nos Estados Unidos, no Canadá, assim como em muitos outros países do mundo.

A larga aplicação dos resistores encontra justificativas no fato de que mais de 85% dos curtos-circuitos nos sistemas industriais ocorrem de fase para terra, e grandes partes dos curtos entre fases resultam da evolução de um primeiro curto à terra, onde existe a formação de arco elétrico. A evolução decorre da ionização do ar no entorno do arco, o que propicia as condições de sua evolução para curto entre fases. O fenômeno é especialmente notório em sistemas com o neutro solidamente aterrado.

Outra razão importante para aplicação dos resistores no aterramento do neutro consiste na sua habilidade de controlar sobretensões transitórias factíveis de ocorrerem em sistemas com neutro isolado flutuante, isto é, neutro sem conexão à terra. Nestes sistemas, a corrente de falta à terra é em geral de pequeno valor e de natureza essencialmente capacitiva.

As dificuldades de identificação do local do curto – associadas à probabilidade de ocorrerem sobretensões transitórias nos sistemas com neutro isolado flutuante – e a incidência de arco elétrico e altas correntes de curto-circuito fase-terra nos sistemas com neutro solidamente aterrado justificam a grande aplicação, nos dias atuais, dos sistemas elétricos industriais com neutro aterrado por meio de resistores, tanto em baixa tensão quanto em média tensão.

Neste artigo trataremos dos aspectos conceituais mais importantes relativos à escolha do tipo de resistor para aterramento do neutro nos sistemas elétricos industriais. Servirá de alicerce para outros cinco artigos que se seguirão, abordando este importante tema.

Tipos de resistores para aterramento do neutro

Existem basicamente dois tipos de resistores para aterramento do neutro, a saber: resistores de alto valor ôhmico e resistor de baixo valor ôhmico.

Os resistores de alto valor ôhmico são aqueles que limitam a corrente de falta à terra a valores baixos, menores que 10 A, e para cuja aplicação não é

necessário o desligamento do sistema durante a primeira falta à terra, devido ao baixo valor de corrente e à inexistência de probabilidade de evolução da falta à terra para faltas entre fases (ausência de arco elétrico). Somente é possível aplicar esta tecnologia em sistemas de baixa tensão (tensões menores ou iguais a 1.000 V).

Em princípio, os resistores de baixo valor ôhmico são resistores que limitam a corrente a valores maiores que 10 A, sendo que, para sua aplicação, é necessário desligar o sistema durante a falta à terra, devido aos danos que a corrente ocasiona e à probabilidade do curto evoluir para curto entre fases (presença de arco elétrico). A aplicação típica destes resistores é nos sistemas de média tensão (tensões maiores que 1 kV e menores ou iguais a 69 kV).

Princípios que orientam a especificação dos resistores de aterramento do neutro

A especificação dos resistores apropriados para aterramento do neutro passa pela compreensão dos seguintes aspectos:

a) Quanto maior o valor ôhmico do resistor e, conseqüentemente, menor a corrente limitada, o

comportamento do sistema se aproxima de sistema com neutro isolado e, portanto, pode ser submetido a sobretensões transitórias, características destes sistemas, que ocasionam em geral o rompimento da isolação de motores, transformadores, cabos e outros componentes.

b) Quanto menor o valor do resistor de aterramento e, conseqüentemente, maior a corrente limitada, o comportamento do sistema se aproxima do sistema solidamente aterrado e, portanto, pode ser submetido a arcos elétricos e destruição de componentes associados aos sistemas com neutro solidamente aterrado.

c) O primeiro critério de dimensionamento de qualquer resistor para aterramento do neutro é, portanto, o de eliminar sobretensões transitórias, que é, na realidade, a condição de sobrevivência do sistema elétrico durante faltas à terra.

d) O critério de eliminar sobretensões transitórias, já provado em milhares de aplicações, consiste em dimensionar o resistor no neutro de forma que, durante a falta à terra, seja criada neste resistor uma corrente maior ou igual à corrente capacitiva do sistema. A corrente capacitiva pode ser entendida como a corrente que circula nas capacitâncias do sistema durante

uma falta à terra com o neutro isolado flutuante. A Figura 1 a seguir mostra as duas correntes referidas. Na figura, R_N é a resistência do neutro, X_{CO} é a reatância capacitiva de seqüência zero de cada fase do sistema para terra, $3I_{CO}$ é a corrente capacitiva, I_R é a corrente no resistor, I_F é a corrente total de falta à terra, sendo a soma vetorial de I_R e $3I_{CO}$. E_{LN} é a tensão fase-neutro do sistema, devendo ser observado que a corrente no resistor está em fase com a mesma e a corrente capacitiva está noventa graus adiantada.

Se o valor de R_N foi dimensionado de tal forma que os módulos de I_R e de $3I_{CO}$ sejam iguais, então a corrente total no ponto de falta será igual a $I_F = \sqrt{2}(3I_{CO})$.

e) Outro conceito importante para aplicação de resistores no neutro está associado ao entendimento do valor máximo de corrente que pode circular durante uma falta à terra sem que seja necessário desligar o sistema. Esta corrente não deve ocasionar danos nas chapas magnéticas dos motores, geradores e transformadores, que são partes essenciais destes equipamentos. Danos em chapas magnéticas obrigam em geral à substituição de parte do pacote magnético ou ao seu baralhamento para que seja reduzida a possibilidade de existência de pontos quentes no funcionamento pós-reparo.

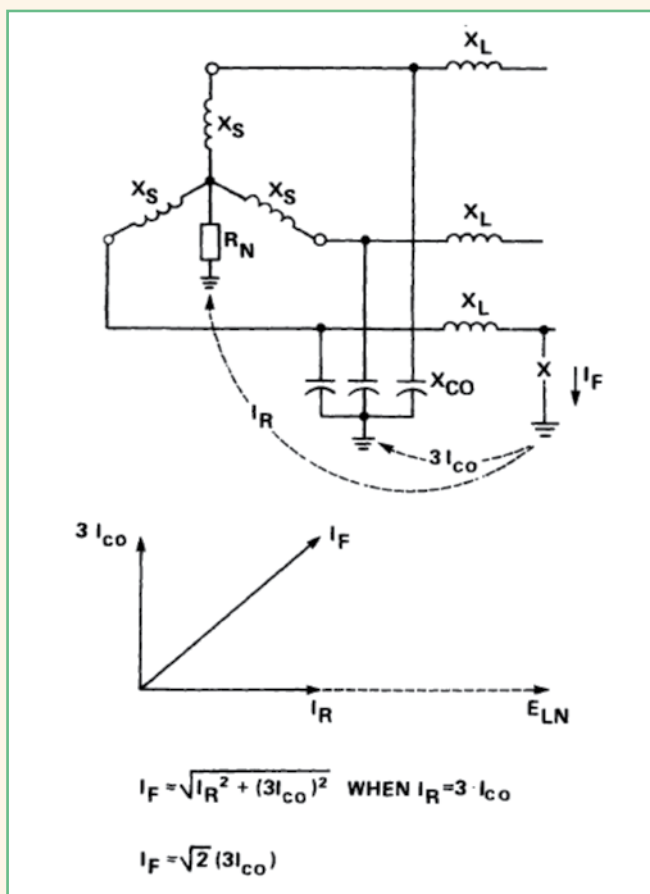


Figura 1 – Corrente capacitiva e no resistor.

A tarefa de substituir ou embaralhar o pacote magnético é trabalhosa, demorada e de alto custo, devendo ser evitada. Ao mesmo tempo, a corrente de falta à terra não deve manter arco elétrico no seu ponto de ocorrência, o que levaria à destruição de componentes ou de equipamentos e à possível evolução do curto fase-terra para curto entre fases. A presença do arco elétrico, mesmo de pequena intensidade, nas ranhuras é o que provoca a destruição da chapa magnética, e a sua presença em conjuntos de manobra oferece riscos severos para pessoas e equipamentos.

Com os conhecimentos atuais, podemos afirmar que, em baixa tensão (tensões menores ou iguais a 1.000 V), o valor 10 A é o valor que atende aos quesitos anteriormente estabelecidos, isto é, evita todos os inconvenientes apontados.

Em média tensão (tensões maiores que 1 kV e menores ou iguais a 69 kV), os limites de corrente para não se manter o arco são menores que 10 A. Por exemplo, para as tensões de 2.400 V, 4.160 V e 13.800 V, os valores de corrente para não se manter o arco são os indicados na Tabela 1. Observa-se que quando se aplica resistor no neutro, estes valores correspondem ao valor da corrente final no ponto de falta (valor de I_F na Figura 1).

Reduzindo-se a tensão entre fases do sistema de média tensão, as distâncias de isolamento, principalmente em quadros de manobra, são também reduzidas, e o arco se mantém para correntes também menores. Até 13.800 V, a corrente fase-terra com arco é mantida para valores inferiores a 10 A, o que significa que este valor não pode ser utilizado como referência para não se desligar o sistema durante uma fase-terra em sistemas de média tensão. A “regra dos 10 A” não se aplica a sistemas de média tensão com tensão entre fases até 13.800 V. Para sistemas industriais com tensões entre fases maiores que 13.800 V, onde ainda são construídos conjuntos de manobra (24.000 V, 36.000 V, por exemplo), não existem ainda estudos práticos que permitam definir quais são os limites de corrente para o arco ser mantido.

TABELA 1 – VALORES DA TENSÃO E DA CORRENTE PARA NÃO MANTER O ARCO

Valor da tensão entre fases (média tensão)	Valor máximo da corrente fase-terra para não se manter o arco
2.400 V	1,8 A
4160 V	4,6 A
13.800 V	7,4 A

f) Outro fator importante para dimensionamento do resistor é o conhecimento das correntes capacitivas do sistema que definem o menor valor de corrente que pode circular no

resistor para controle das sobretensões transitórias. A Tabela 2 mostra a ordem de grandeza destas correntes.

Como comentário dos valores da Tabela 2, observa-se que, em baixa tensão, os cabos isolados não possuem blindagem e as suas capacitâncias são baixas, levando a altas reatâncias capacitivas e baixas correntes capacitivas do sistema. Já na média tensão, os cabos são blindados, possuem alta capacitância, baixa reatância capacitiva e alta corrente capacitiva. A partir de 6.900 V, as correntes capacitivas variam muito com os comprimentos e montantes dos cabos isolados, que, por sua vez, variam com a potência do sistema. Dessa forma, não é possível estabelecer valores típicos da corrente capacitiva para sistemas de média tensão a partir de 6.900 V, devendo ser avaliada caso a caso. Na maioria dos sistemas industriais de média tensão de porte elevado, as correntes capacitivas superam o valor de 10 A.

Quanto à corrente capacitiva adicional devida a conjuntos de proteção de surto, observa-se que se trata dos conjuntos que são utilizados para proteção de transitórios rápidos em máquinas rotativas (grandes motores de indução ou síncronos e geradores), sendo que existe uma aplicação mais recente para proteção de transformadores secos.

g) Se combinarmos os critérios de eliminação da sobretensão transitória com o de destruição das chapas magnéticas/manutenção do arco, podemos afirmar, diante dos dados anteriores, que:

- Nos sistemas de baixa tensão, a corrente capacitiva é de baixo valor inferior a 10 A, exigindo um resistor que limite a corrente também a valores baixos para eliminar sobretensões transitórias. Além disso, nestes sistemas, o arco não se mantém para correntes inferiores a 10 A. Podemos, portanto, aplicar resistores de alto valor ôhmico, não sendo necessário desligar o sistema na ocorrência da primeira falta à terra.

Por exemplo, para um transformador trifásico de 440 V, com 5 MVA de potência nominal (já no extremo de potência para aplicação de 440 V), a corrente capacitiva possui valor em torno de 2,5 A. Um resistor de alto valor ôhmico que limite a

corrente em 3 A seria suficiente. Não é necessário especificar derivações (tapes) para tal resistor; isto encareceria a sua construção desnecessariamente. Para uma planta industrial alimentada em 440 V, podemos padronizar todos os resistores de aterramento do neutro limitando a corrente em 3 A, sem utilizar derivações nos mesmos, reduzindo significativamente os custos do fornecimento.

- No entanto, para os sistemas de média tensão, a corrente capacitiva é maior e o arco se mantém para correntes baixas, com alta probabilidade de evolução para curtos entre fases. Neste caso, é necessária a aplicação de resistores de baixo valor ôhmico, limitando a corrente em valores superiores a 10 A, e não é possível manter a operação do sistema durante uma falta à terra, sendo obrigatório o desligamento.

- A aplicação de resistores de alto valor ôhmico somente é possível para sistemas de média tensão, em que a corrente capacitiva é muito pequena, permitindo aplicar um resistor, no qual circule uma corrente que, somada vetorialmente com a corrente capacitiva, seja menor que os valores indicados na Tabela 1.

- Em sistemas de média tensão, uma vez definida a aplicação de resistores de baixo valor ôhmico e, conseqüentemente, desligar o sistema durante uma falta à terra, a corrente escolhida para limitação, além de atender ao critério de ser superior à corrente capacitiva, deve atender ainda a outro critério que é o de fornecer corrente suficiente para operação segura da proteção de falta à terra.

- Até a entrada em operação dos relés digitais modernos, há mais de uma década, utilizavam-se relés de proteção eletromecânicos para proteção de falta à terra. Estes relés possuíam alto consumo, não sendo possível utilizar transformadores de corrente toroidais de baixa relação de transformação para sua alimentação. A solução era aumentar a corrente de falta à terra, o que possibilitava também aumentar a relação dos TCs toroidais, aumentando sua relação e, por conseqüente, sua potência.

- Até esta época, os valores de limitação eram bastante elevados, sendo padrão os valores de 400 A, 600 A, 800 A, 1.000 A e maiores.

TABELA 2 – ORDEM DE GRANDEZA DAS CORRENTES

Tensão entre fases do sistema	Corrente capacitiva por 1.000 kVA de potência instalada	Corrente capacitiva adicional por conjunto de capacitor de surto típico utilizado
600 V	0,5 A	0,40 A (1 μ F/ fase)
2.400 V	0,7 A	0,78 A (0,5 μ F/ fase)
4.160 V	1,0 A	1,35 A (0,5 μ F/ fase)
6.900 V	Não é possível fixar	2,25 A (0,5 μ F/ fase)
13.800 V	Não é possível fixar	2,25 A (0,25 μ F/ fase)

- Atualmente, a situação se modificou, os relés digitais possuem baixíssimo consumo, permitindo utilizar TCs toroidais de baixa relação, com baixa potência. Com esta solução, pode-se utilizar atualmente níveis de limitação reduzidos, desde que atendam aos quesitos de dimensionamento estipulados anteriormente. Os valores mais utilizados na atualidade são: 25 A, geralmente, aplicado em sistemas de mineração e para sistemas industriais os valores de 50 A, 100 A, 150 A, 200 A e 300 A.
- Ao substituir um resistor de 400 A por outro de 50 A, com atendimento dos critérios de dimensionamento, a corrente de falta à terra é reduzida oito vezes e os efeitos térmicos e dinâmicos que variam com o quadrado da corrente são reduzidos 64 vezes.
- Com a utilização de recursos modernos, como o emprego de relés digitais que permitem utilizar a seletividade lógica, e ainda com a aplicação de relés de sobrecorrente associados a relés/sistemas de detecção de arco, recursos estes que permitem reduzir significativamente o tempo de desligamento do sistema durante faltas à terra, é possível evitar a evolução da falta à terra para faltas entres fases, em

sistemas com resistor de baixo valor ôhmico. Como a rapidez da evolução depende do valor da corrente de arco, limitar o curto em valores mais baixos auxilia significativamente no processo de evitar a referida evolução. Se o valor da corrente de limitação for elevado e a evolução ocorrer, por exemplo, dentro de um quadro de manobras, mesmo com o desligamento rápido podem ocorrer paralisações necessárias para limpeza dos isoladores e alguns reparos.

Avaliação da corrente capacitiva

A aplicação de resistores no neutro dos sistemas industriais depende fundamentalmente da avaliação da corrente capacitiva do sistema, como foi tratado anteriormente. Dependendo se o sistema é existente ou está em fase projeto, pode-se avaliar a corrente capacitiva das seguintes formas:

1) Dispondo-se do projeto detalhado do sistema elétrico, com as seções e comprimentos dos cabos de todos alimentadores, potências dos motores, transformadores, geradores e capacitores de surto (se existentes), pode-se proceder ao cálculo da corrente capacitiva.

2) Em sistemas elétricos existentes, em que não se dispõe

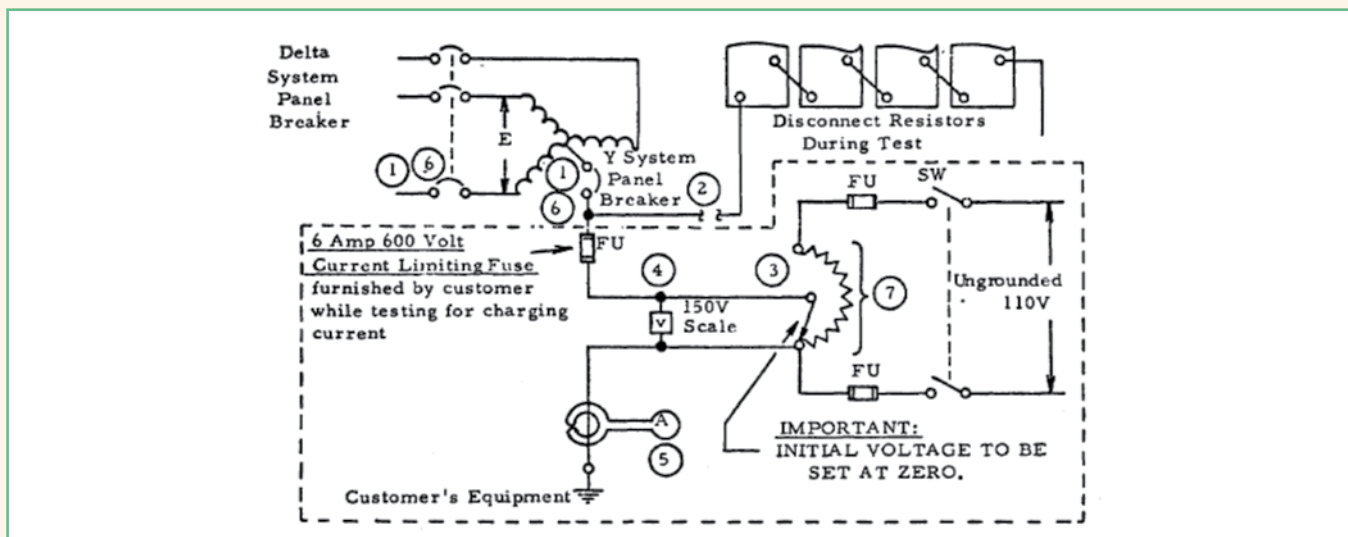


Figura 2 – Teste direto para medição da corrente capacitiva.

do projeto detalhado, pode-se proceder ao teste direto para medição da corrente capacitiva (ver referência [4]). Para segurança, o sistema elétrico deve ser desligado para montagem de uma fonte auxiliar que permite artificialmente deslocar o neutro e, dessa forma, provocar a circulação de uma corrente de sequência zero por meio das capacitâncias do sistema. A Figura 2, diretamente extraída da referência anterior, mostra o esquema proposto que, se for utilizado na prática, deve ser atualizado em termos de proteção e tecnologia.

A partir do teste, a corrente capacitiva do sistema pode ser avaliada através da expressão seguinte (equação 1), em que I_C é a corrente capacitiva do sistema a ser avaliada em Ampères, V_{FF} é a tensão entre fases do sistema em Volts, I_a é a corrente que foi medida em Ampères, e V é a tensão aplicada no teste em Volts para fazer I_a circular.

$$I_C = \frac{V_{FF}}{\sqrt{3}} \cdot \frac{I_a}{V} \quad (\text{Equação 1})$$

3) Os equipamentos atuais de aterramento do neutro, principalmente os resistores de alto valor ôhmico modernos, devem possuir este recurso de avaliação da corrente capacitiva disponível no mesmo, que pode ser utilizado a qualquer momento, até pelo sistema supervisor e com o sistema em operação normal.

Conclusão

O artigo tratou dos aspectos conceituais mais importantes que dizem respeito à escolha do tipo de resistor a ser aplicado no neutro dos sistemas elétricos industriais. Foi mostrado que em sistemas de baixa tensão aplica-se resistor de alto valor ôhmico, enquanto, na maioria dos sistemas de média tensão, deve ser aplicado resistor de

baixo valor ôhmico. Uma vez definido o tipo de resistor é necessário especificá-lo para aquisição. Os critérios de especificação de ambos os tipos serão fornecidos nos próximos artigos.

Referências

- [1] BEEMAN, D. "Industrial Power System Handbook-First Edition", McGraw-Hill, 1955.
- [2] COSTA, P. F. "Redução dos riscos proporcionados pelos arcos elétricos", Eletricidade Moderna, dez. 2009.
- [3] BAKER, D. S. "Charging Current Data for Guesswork-Free Design of High-Resistance Grounded Systems". IEEE Transactions on Industry Applications, v. IA-15, n. 2, mar./abr. 1979.
- [4] JR, B. B. "High-Resistance Grounding", IEEE Transactions on Industry Applications, v. IA-19, n. 1, jan./fev. 1983.
- [5] Catálogos Técnicos: Limitador de Corrente de Falta à Terra com Alta Tecnologia via Resistores de Alto Valor Ôhmico em BT – Sistema Limiter Geração MC3 e Limitador de Corrente de Falta à Terra Tradicional via Resistores de Alto Valor Ôhmico em BT. Sistema Limiter Geração MC4. Disponível em: <www.seniorequipamentos.com.br>.

*PAULO FERNANDES COSTA é Engenheiro Eletricista e Msc pela Universidade Federal de Minas Gerais, professor aposentado dos cursos de engenharia elétrica da UFMG e CEFET-MG e diretor da Senior Engenharia e Serviços LTDA, Belo Horizonte-MG. É palestrante e autor de vários artigos na área de aterramento, proteção, segurança, qualidade de energia e sistemas elétricos industriais em geral. Atua como consultor, bem como na área de desenvolvimento tecnológico, com experiência de mais de 40 anos. E-mail: pcosta@seniorengenharia.com.br.

Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br