Capítulo V

Sistemas de aterramento

Conceitos, sistemas não aterrados e solidamente aterrados

*Por Cláudio Mardegan**

O objetivo deste tópico é auxiliar o(s) engenheiro(s) a decidir se aterra ou não um sistema ou a melhor forma de aterrar o sistema, sob análise, e, para tanto, são necessários alguns conceitos.

Será revisto onde aterrar, a fonte ou carga, e ainda, neste tópico, serão tratados os seguintes tipos de aterramento de sistemas:

- Sistema não aterrado
- Sistema solidamente aterrado

Conceitos básicos

(a) Definições
(b) Sobretensões transitórias
(c) Onde aterrar? A fonte ou a carga?

(a) Definições

Capacitância - Dois condutores separados por um dielétrico formam uma capacitância. Exemplo: os condutores de uma linha de transmissão são condutores, a terra é condutora e o ar é isolante, desta forma, tem-se um capacitor gigante. Veja Figura 1.

Figura 1 – Capacitância.

Capacitância própria - Todos os equipamentos elétricos, como cabos, motores, geradores, etc., são constituídos de condutores. Estes condutores são isolados normalmente com papel, verniz, entre outros, e, como são instalados sobre uma parte metálica, forma-se o que chamamos de capacitância própria do equipamento. Esta capacitância também é conhecida como capacitância parasita, capacitância de charging ou capacitância de fuga.

Corrente de charging - É a corrente de fuga que circula pelas capacitâncias próprias dos equipamentos. Em sistemas trifásicos simétricos e equilibrados, essas correntes teoricamente se anulam por estarem defasadas de 120 graus uma da outra.

(b) Representação ideal de uma isolação

Pela definição de capacitância (dois condutores separados por um dielétrico), pode-se concluir que praticamente todos os equipamentos elétricos possuem uma capacitância própria. Na linha de transmissão, o cabo e a terra representam os condutores e o ar representa o meio isolante. No cabo, o condutor e a massa representam os condutores e o meio isolante é a própria isolação do cabo. Nas máquinas girantes, os fios dos enrolamentos e a carcaça da máquina representam os condutores e o esmalte do fio o isolante. Assim, genericamente pode-se representar a isolação ideal conforme Figura 2.

Como indicado na figura, consiste em uma resistência em paralelo com uma capacitância. Quando se mede com um megôhmetro, se está medindo apenas a resistência, visto que o megôhmetro possui fonte de alimentação DC (em corrente contínua) e, desta forma, a capacitância constitui-se um circuito aberto. Para fazer a medição dos dois elementos de circuito, faz-se necessário um instrumento

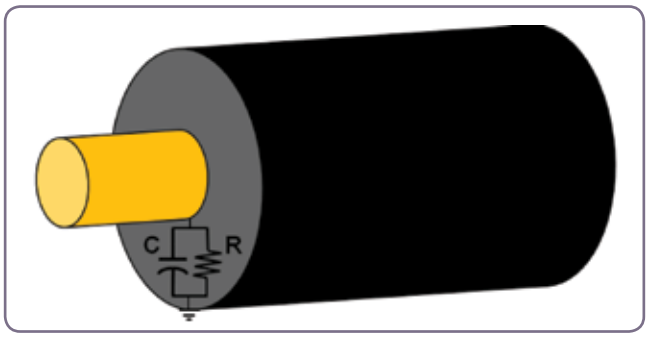

Figura 2 - Representação ideal de uma isolação.

em corrente alternada (por exemplo, o medidor de fator de potência de isolamento que mede a capacitância e tg δ).

(c) Onde aterrar? A fonte ou a carga?

Em primeiro lugar, quando se fala em aterrar um sistema é necessário que exista um ponto neutro para que isto seja possível. O ponto neutro pode ser da estrela de um transformador, da estrela de um gerador ou do ziguezague de um autotransformador de aterramento, um motor.

Nos primórdios dos aterramentos de sistema ainda havia esta dúvida. Hoje, não mais. Deve-se aterrar, sempre, a fonte, pois se carga sair de operação o sistema passa a ser não aterrado.

(d) Comparação entre sistema solidamente aterrado e sistema não aterrado sob falta à terra

Sistema solidamente aterrado sob falta à terra

A Figura 3(a) mostra o sistema solidamente aterrado, antes de uma falta à terra.

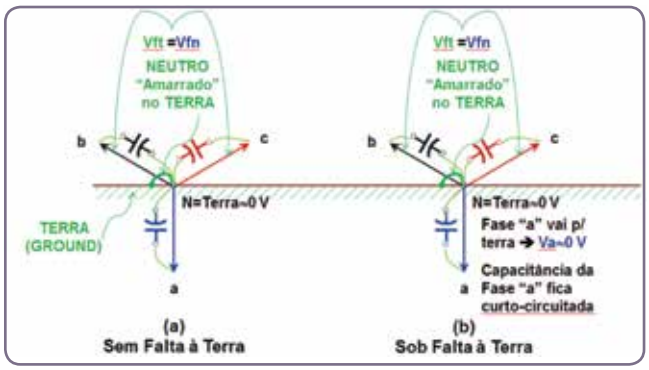

Figura 3 A - Sistema solidamente aterrado (a) sem falta à terra e (b) sob falta à terra.

Em que:

V_{ft} = Tensão fase-terra V_{fn} = Tensão fase-neutro

O sistema solidamente aterrado comporta-se como se o neutro estivesse "amarrado" ao terra. Em condições normais ao se energizar

o sistema, as capacitâncias próprias se carregam e o potencial do neutro é igual ao potencial do terra (a tensão fase-terra é igual à tensão fase-neutro).

Já na Figura 3(b), a fase "a" vai para a terra (curto-circuito fase-terra). Nesta situação, a ponta do fasor da fase "a" vai para o potencial zero. A capacitância da fase "a" fica então curto-circuitada, visto que a tensão em suas duas extremidades é a mesma (nula). Já quanto à tensão nas outras duas fases sãs do sistema (fases sem curto-circuito), os valores de tensão de antes da falta continuam os mesmos, ou seja, $V_{ft} = V_{fn}$.

Sistema não aterrado sob falta à terra

A Figura 3(a) mostra o sistema não aterrado, antes de uma falta à terra.

O sistema não aterrado comporta-se como se o neutro não estivesse "amarrado" ao terra. Em condições normais ao se energizar o sistema, as capacitâncias próprias se carregam e o potencial do neutro é praticamente igual ao potencial do terra (a tensão fase-terra é igual à tensão fase-neutro).

Na Figura 3(b), o sistema está na iminência da falta à terra.

Já na Figura 3(c), a fase "a" vai para a terra (curto-circuito fase-terra). Nesta situação, a ponta do fasor da fase "a" vai para o potencial zero. A capacitância da fase "a" não fica curto-circuitada, visto que a tensão em suas duas extremidades é agora diferente de zero, pois, o neutro não está "amarrado" ao terra. Como a capacitância da fase "a" está carregada e a ponta do fasor da fase "a" tem que ir para o potencial zero, vai ocorrer um deslocamento de neutro. A tensão nas outras duas fases sãs do sistema (fases sem curto-circuito), em relação ao terra, fica aumentada de √3, ou seja, $V_{ft} = \sqrt{3}.V_{fn}$. Nesta nova condição, as capacitâncias das fases "b" e "c" ficam carregadas com o valor da tensão entre fases.

(e) Sobretensões transitórias

Em sistemas não aterrados podem ocorrer sobretensões transitórias onde a tensão chega a atingir valores entre cinco e oito vezes a tensão normal.

Este fenômeno ocorre quando há falta intermitente em sistema não aterrado. É importante frisar que a maior parte das faltas se inicia de forma intermitente (fugas, descargas parciais e arcos).

A Figura 4 seguinte mostra os fasores de tensão em condições normais (sistema simétrico e equilibrado) em sistema não aterrado. Estes fasores giram a uma velocidade angular $\omega = 2\pi f$ [rad/s]. Se ocorre uma falta franca à terra, na fase "a", no instante em que os vetores estão como na figura seguinte (a), a tensão, nas outras duas fases sãs, no mesmo instante aumentam de √3. Isto significa que há um deslocamento do neutro em relação ao terra. Com isso, as capacitâncias próprias das fases "b" e "c" se carregam como se fossem um capacitor em cada fase.

Se a falta é removida, as capacitâncias tenderão a manter o deslocamento dos fasores de tensão, como se fosse um deslocamento DC.

Como os vetores de tensão giram após 1/2 ciclo, a posição desses fasores estará como mostrado na figura anterior (c). Nessa condição, a tensão fase-terra já é de duas vezes a tensão de pico fase-terra. Se quando o fasor estiver como indicado no item (c) e a falta for restabelecida, o potencial da fase "a" será forçado para o potencial da terra. Como o sistema possui uma reatância indutiva, haverá uma oscilação do potencial de fase entre +2 e -2 com uma frequência entre 20 e 100 x ω_N.

O processo pode-se repetir continuamente e a tensão pode chegar de 5 a 8 x Vn.

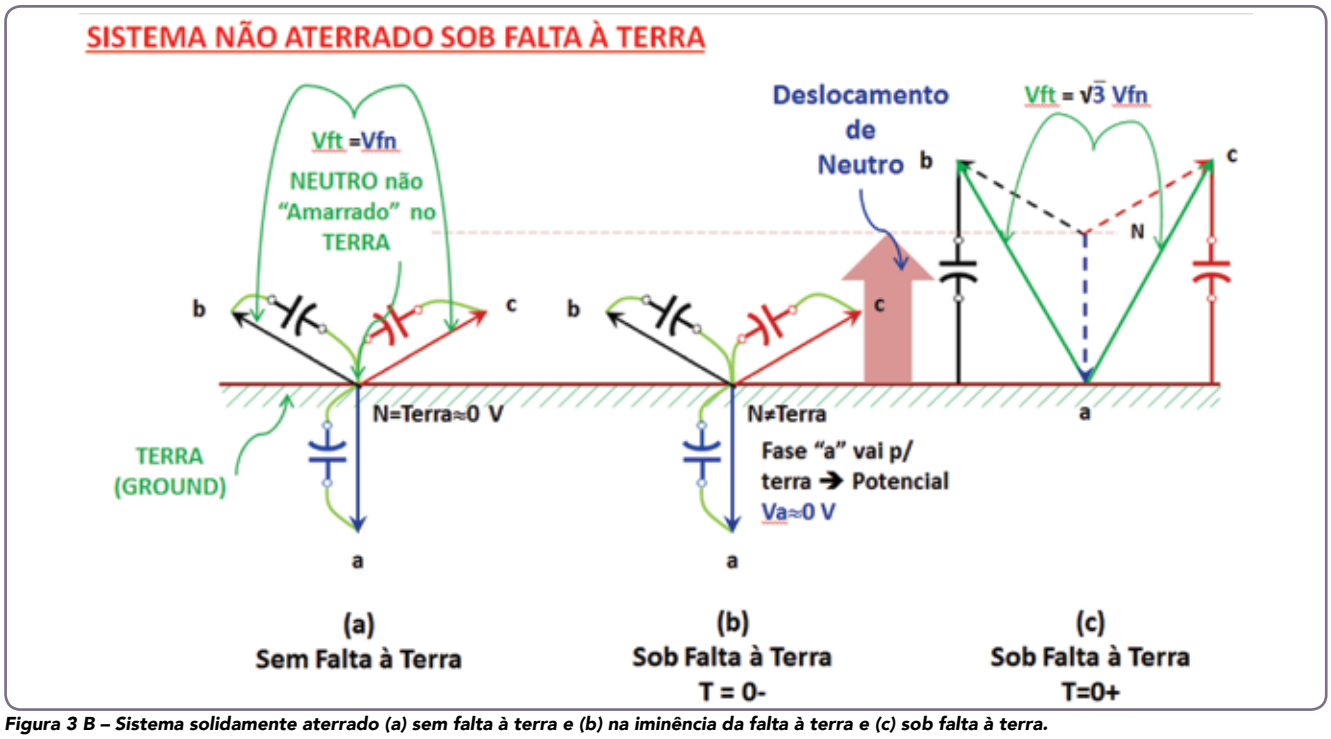

Figura 3 B – Sistema solidamente aterrado (a) sem falta à terra e (b) na iminência da falta à terra e (c) sob falta à terra.

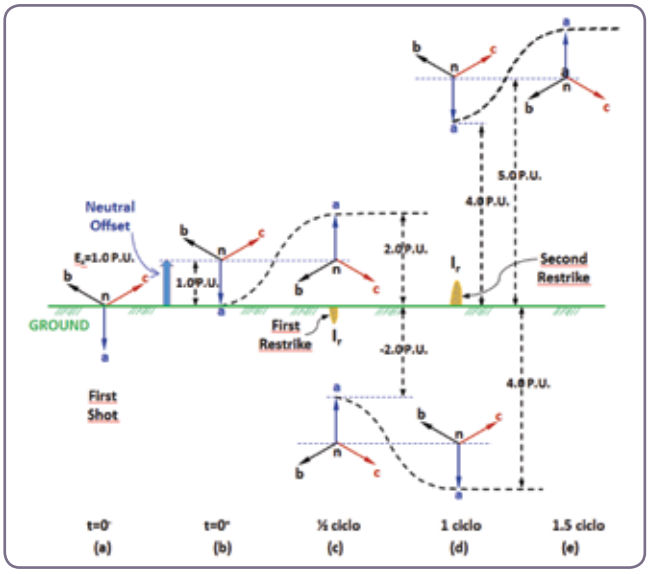

Figura 4 – Sistema não aterrado sem falta e sob falta à terra.

Sistema não aterrado

Os primeiros sistemas eram não aterrados, pois, o sistema trifásico a três fios era mais econômico, além de que quando a primeira fase cai para a terra não circula corrente de falta à terra.

Esta sempre foi, então, a grande bandeira do sistema não aterrado: a continuidade operacional.

Os sistemas não aterrados deveriam ser representados idealmente como mostrado na Figura 5.

(a) Ideal

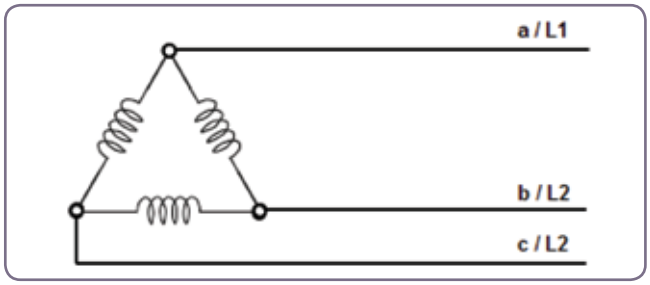

Figura 5 – Representação de um sistema não aterrado ideal.

Com base nessa definição poderia ser concluído que não circula corrente para a terra, pois não existe caminho fechado (loop) para ela.

Na prática, os sistemas não aterrados (isolados) estão acoplados à terra através das capacitâncias próprias dos equipamentos. Em sistemas de baixa tensão as duas fontes mais significativas de capacitância para a terra são os cabos e os motores.

Dessa forma, a representação real de um sistema não aterrado pode ser visualizada na figura seguinte.

(b) Sistema Não Aterrado Real

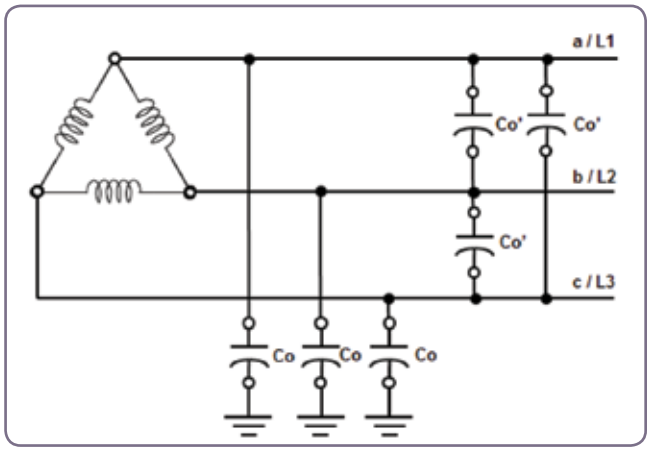

Figura 6 - Representação de um sistema não aterrado real.

As capacitâncias para a terra são distribuídas, porém, para a maior parte das modelagens, pode-se representá-la como se fosse uma única capacitância (parâmetros concentrados).

Embora a representação real do sistema não aterrado seja conforme mostrado na figura anterior, as capacitâncias entre fases podem ser desconsideradas na análise de faltas à terra e, assim, a representação seguinte pode ser aplicada.

(c) Sistema não aterrado real simplificado

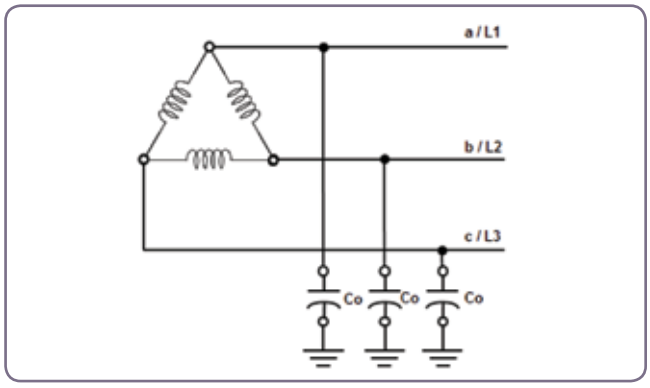

Figura 7 – Representação de um sistema não aterrado real simplificado.

Vantagens

- Manter as cargas alimentadas em caso de falta à terra
- Não existem danos térmicos e dinâmicos devidos à corrente de falta
- Não ocorrem afundamentos de tensão para a carga, em caso de falta à terra.

Desvantagens

- Dificuldade de isolar a falta automaticamente
- Dificuldade de localizar a falta
- Possibilidade de ocorrência de sobretensões transitórias
- Aumento do custo dos equipamentos (devem ter isolação entre fases ao invés de fase-terra)
- Risco de ocorrência de faltas múltiplas
- Aumento da tensão nas duas fases sãs quando da ocorrência de uma falta à terra

*Nota: *Atualmente existem dispositivos que monitoram permanentemente a isolação dos circuitos (p.ex. Vigilohm – Schneider).*

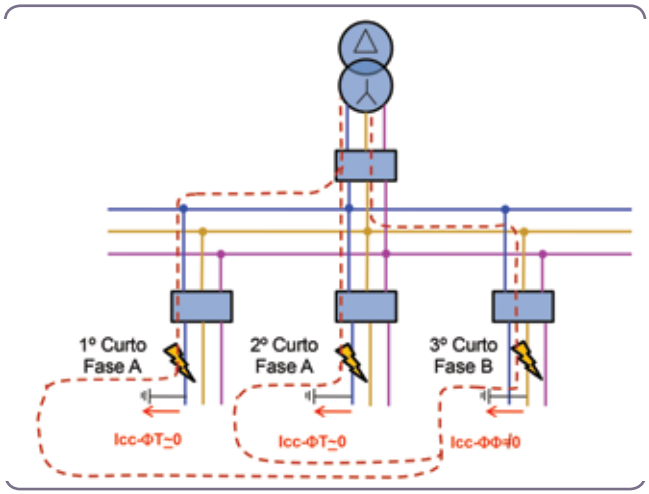

Figura 8 - Curto à terra em sistema não aterrado.

Sistemas solidamente aterrados

Este método de aterramento adveio das desvantagens do sistema não aterrado (ocorrência de faltas múltiplas, sobretensões transitórias, aumento de tensão nas fases sãs quando da ocorrência de faltas à terra, desligamento de vários circuitos até localizar a falta).

Apresenta, além das vantagens supracitadas, a de poder ligar cargas monofásicas.

O sistema solidamente aterrado é definido como o sistema que apresenta o seu neutro conectado à terra através de um condutor, sem a interposição de uma impedância intencional. Veja a Figura 9.

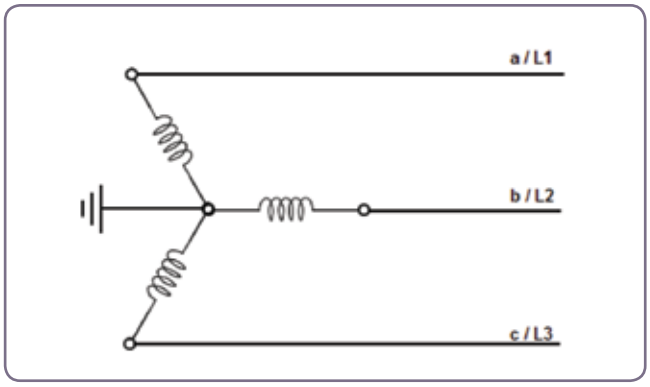

Figura 9 – Representação de um sistema solidamente aterrado.

Sistema efetivamente aterrado

De acordo com o IEEE Std 142 "Green Book", Capítulo 1, item 1.56, um sistema é considerado efetivamente aterrado até quando:

$$I_{CC-1\phi} \geq 0.6 \times I_{CC-3\phi} \qquad \frac{3E}{Z_o + 2Z_1} \geq 0.6 \times \frac{E}{Z_1} \qquad 3Z_1 \geq 0.6 \times (Z_o + 2Z_1)$$

$$0.6 \times Z_o \leq 1.8 \times Z_1 \qquad \frac{Z_o}{Z_1} \leq 3$$

Chamando o valor da relação Zo/Z1 de K, o valor da sobretensão será:

$$K = \frac{Z_o}{Z_1} = 3 \qquad FS = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt{3 \times \left(\frac{K}{K+2}\right)^2 + 1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times \sqrt{3 \times \left(\frac{3}{3+2}\right)^2 + 1} = 1.25$$

O "Green Book" complementa ainda que para um sistema ser considerado como efetivamente aterrado:

$$X_o \leq X_1 \rightarrow \frac{X_o}{X_1} \leq 1$$

Vantagens

- Isola a falta automaticamente
- Localiza-se a falta facilmente
- Não existe risco de sobretensões transitórias
- Isolação dos equipamentos pode ser fase-terra

Desvantagens

- Corrente de falta à terra elevada, podendo, inclusive, ser maior que a corrente de curto-circuito trifásica
- Elevada energia dissipada durante as faltas pode ser elevada
- Solicitações térmicas e dinâmicas elevadas nos equipamentos quando sob falta à terra
- Não mantém a carga ligada sob falta à terra
- As faltas por arco que não são prontamente eliminadas são extremamente destrutivas
- Pode haver perda da chapa magnética de máquinas girantes, em caso de falta à terra.
- Em caso de sistemas de média tensão, dificilmente se consegue a proteção da blindagem dos cabos, na ocorrência de uma falta à terra.
- Normalmente, está associada a danos elevados (e consequente valores de MTTR maiores)
- Ocorrem afundamentos de tensão em caso de falta à terra.
- A falta à terra pode evoluir rapidamente para uma falta bifásica/trifásica

*Cláudio Sérgio Mardegan é diretor da EngePower Engenharia e Comércio Ltda. É engenheiro eletricista formado pela Unifei, especialista em proteção de sistemas elétricos industriais e qualidade de energia, com experiência de mais de 35 anos nesta área. É autor do livro "Proteção e Seletividade em Sistemas Elétricos Industriais", patrocinado pela Schneider, e coautor do "Guia O Setor Elétrico de Normas Brasileiras". É membro sênior do IEEE e participa também dos Working Groups do IEEE que elaboram os "Color Books". É Chairman do Capítulo 6 do Buff Book, atual 3004 series (3004.6) sobre Ground Fault Protection e também participa de Forensics.

CONTINUA NA PRÓXIMA EDIÇÃO

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