

Capítulo VII

Proteção de falta à terra

Por Cláudio Mardegan*

Para a proteção de falta à terra, normalmente, são consideradas as seguintes normas:

- NEC® (National Electric Code - NFPA 70-1999 – Seção 230-95, alimentadores – Seção 215-10 e estruturas remotas – Seção 240-13)
- NEMA PB 2.2.1999

Origem das faltas à terra

As faltas à terra são originadas por:

(a) Redução da isolação devido a:

- Temperatura (mau contato, sobrecarga);
- Umidade;
- Contaminação (pó, sal, etc.);
- Animais;
- Objetos estranhos;
- Deterioração da isolação por idade ou ataque químico.

(b) Danos físicos à isolação (devido a esforços, falhas mecânicas, perfurações da isolação)

• Esforços decorrentes de sobretensões de regime ou transitórias sobre a isolação;

• Erros humanos (durante manutenções, comissionamentos ou instalações).

Características das faltas à terra

As faltas à terra possuem determinadas características que valem a pena ser ressaltadas e são apresentadas a seguir:

• A maior parte das faltas envolve a terra;

• A corrente de ajuste da proteção de falta à terra é relativamente independente da corrente normal de carga e os valores dos ajustes da proteção de falta à terra podem ser menores que os de fase;

• Devido ao fato de que as correntes de falta à terra não podem ser transferidas por transformadores delta-estrela ou delta-delta (ou seja, toda vez que houver um delta no sistema), a proteção de falta à terra para cada nível de tensão é independente da proteção em

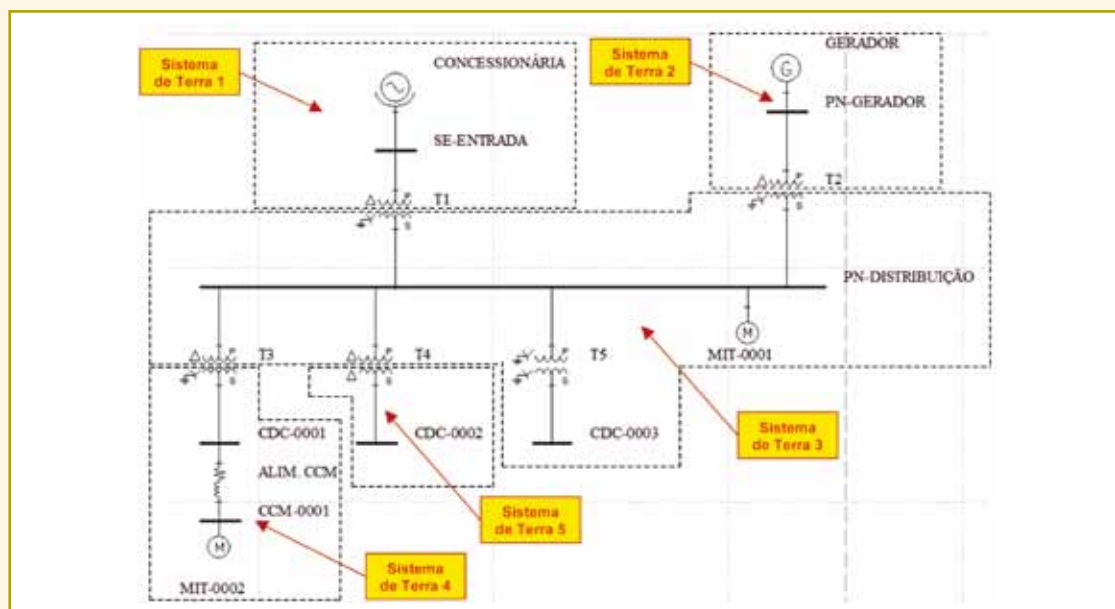


Figura 1 – Sistemas de terra definidos pelas conexões delta dos transformadores.

outros níveis. Isso permite um ajuste de temporização pequeno e, conseqüentemente, uma atuação mais rápida da proteção de falta à terra. A Figura 1 ilustra esta particularidade, indicando cinco diferentes sistemas de terra;

- Falta por arco à terra, que não são prontamente detectadas e eliminadas, podem ser extremamente destrutivas.

Valor das correntes à terra

Conforme demonstrado no capítulo anterior, o valor da corrente de falta à terra é calculado por:

$$I_{cc_{1\phi}} = \frac{3.E}{Z_1 + Z_2 + Z_o + 3Z_G}$$

Lembramos que as faltas por arco podem chegar a 20% do valor da falta franca.

No capítulo que abordamos o curto-circuito, foi mostrado que, em sistemas solidamente aterrados, as correntes de curto-circuito fase-terra são da mesma ordem de grandeza das correntes de curto-circuito trifásico (principalmente no secundário do transformador).

Pode-se constituir um erro gravíssimo deixar a proteção de falta à terra por conta da proteção de fase, tomando-se como base esta consideração, visto que, na prática, a maior parte das faltas ocorre por arco (e o valor da corrente de falta irá variar de 20% a 100% da falta franca).

NEC – Seção 230-95

O NEC, em sua seção 230-95, prescreve que todo sistema elétrico com mais de 150 V fase-terra e com correntes maiores que 1000 A deve possuir proteção específica de terra.

Esta proteção deve ser ajustada de forma que o pickup não seja superior a 1200 A e a temporização proteja o ponto 3000 A – 1 segundo.

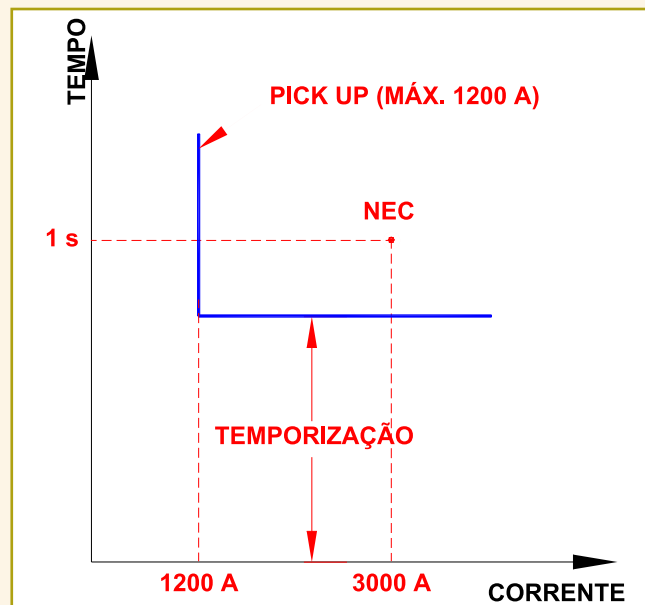


Figura 2 – Proteção de falta à terra de baixa tensão conforme NEC Seção 230-95.

Comparação da energia (I^2t) dissipada durante uma falta à terra para vários tipos de aterramento

Neste tópico serão comparados três tipos de sistemas de aterramento após a aplicação de uma falta à terra. Para tanto, considere um sistema de 480 V, alimentado por um transformador de 2000 kVA e $Z\% = 6$.

(a) Sistema Solidamente Aterrado (SSA)

Como já demonstrado anteriormente, a ordem de grandeza da corrente de curto-circuito fase-terra é da mesma ordem da trifásica.

$$ICC1\phi M\acute{A}X = 1/0.06 \times I_{ns} = 16.67 \times 2405.6$$

$$ICC1\phi M\acute{A}X = 40093 \text{ A} \sim 40000 \text{ A}$$

Para $t = 1 \text{ s}$, o valor do I^2t será:

$$I^2t = (40000)^2 \cdot 1 = 1\,600\,000\,000 \text{ A}^2\cdot\text{s}$$

(b) Sistema aterrado por resistor de 400 A (RBV)

(Aterramento por resistência de baixo valor)

Em um sistema aterrado por resistência de aterramento limitando o valor da corrente a 400 A, teremos uma corrente de falta à terra dada por:

$$ICC1\phi M\acute{A}X = 400 \text{ A}$$

Para $t = 1 \text{ s}$, o valor do I^2t será:

$$I^2t = (400)^2 \cdot 1 = 160\,000 \text{ A}^2\cdot\text{s}$$

(c) Sistema aterrado por resistor de 5 A (RAV)

(Aterramento por resistência de alto valor)

Em um sistema aterrado por resistência de aterramento limitando o valor da corrente a 5 A, terá uma corrente de falta à terra dada por:

$$ICC1\phi M\acute{A}X = 5 \text{ A}$$

Para $t = 1 \text{ s}$, o valor do I^2t será:

$$I^2t = (5)^2 \cdot 1 = 25 \text{ A}^2\cdot\text{s}$$

(d) Comparação entre os três sistemas

Comparando-se a energia dissipada na falta durante um segundo nos três sistemas, tem-se:

- O sistema solidamente aterrado libera 10.000 vezes mais energia que o sistema aterrado por resistência de baixo valor (400 A).
- O sistema solidamente aterrado libera 64.000.000 (64 milhões) de vezes mais energia que um sistema aterrado por resistência de baixo valor (5 A).

Proteções específicas para arco

(a) Generalidades

Existem situações em que os dispositivos de sobrecorrente

convencionais não se constituem um meio eficiente de proteção contra arco, como:

- Centelhamento na mesma fase (muito comum em disjuntores/contatores/gavetas extraíveis);
- Locais em que a energia incidente, durante um arco, é elevada e não se consegue uma proteção adequada às pessoas etc.

Para atender a estas situações, foi desenvolvido por alguns fabricantes um relé fotossensível, ou seja, sensível à luz. Com esta filosofia, o relé passa a monitorar o primeiro efeito do arco, a luz. Este conceito foi aperfeiçoado e pode-se atualmente integrar a monitoração da luz e da sobrecorrente (simultaneamente ou não).

Assim, a utilização de relés de proteção de arco proporciona: aumento na segurança das pessoas, na melhoria na proteção de equipamentos, diminuição do tempo de interrupção da falta, menor "stress" térmico e dinâmico devido às correntes de falta e aumento da disponibilidade (menor MTTR).

(b) Medidas para minimizar os problemas e danos por arcos

• Treinamento

Visto que a estatística mostra que 65% dos acidentes com arco ocorrem durante as manutenções, as primeiras e as mais importantes atitudes a serem tomadas são:

- Elaboração de APR para as atividades a serem desenvolvidas na manutenção;
- Realização de DDS (Diálogo Diário de Segurança) focando os pontos de maior risco;
- Seguir os procedimentos de desenergização;
- Elaboração de procedimentos detalhados, passo a passo;
- Utilização de pessoal qualificado/habilitado para as atividades/empresas especializadas;
- Acompanhamento dos serviços com técnico de segurança;
- Utilizar equipamentos de categoria/classe/isolação apropriadas;
- Executar todas as atividades com supervisão local.

• Operações remotas

Durante os comissionamentos, assim como em reenergizações, deve-se utilizar comando remoto, ou seja, a operação de ligar deve ficar afastada, de forma a garantir a segurança do operador (botoeira ou sistema supervisorio/sala de controle).

• Intertravamentos

Para as instalações novas, durante as fases de projeto, devem-se prever os intertravamentos necessários para garantir a segurança dos operadores e apenas permitir a abertura de uma seccionadora se, e somente se, o disjuntor estiver aberto.

Para instalações existentes, implementar intertravamentos. Veja Figura 3.

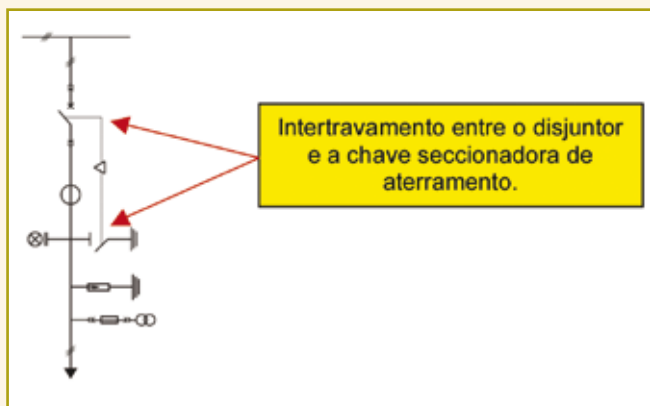


Figura 3 – Intertravamentos.

- Painéis à prova de arco interno

É necessária a utilização de painéis à prova de arco interno, pois em painéis convencionais, em caso de arco interno, uma pessoa pode morrer mesmo estando a alguns metros de distância do painel. Veja Figura 4.



Figura 4 – Painel à prova de arco interno.

- Controle de acesso

Criar uma forma de controle de acesso às subestações/salas elétricas (chaves, cartões magnéticos, controle digital, etc.).

- Vestimentas “flame retardantes” e EPIs adequados

Utilizar Equipamentos de Proteção Individual (EPIs) e vestimentas adequadas, determinadas por um estudo minucioso de “Arc flash evaluation”, constitui-se uma forma eficiente e



Figura 5 – Etiqueta gerada no estudo de “Arc flash evaluation”.

responsável de proteção, inclusive prescrita pela norma NR 10. A Figura 5 ilustra uma etiqueta típica que um estudo de “Arc flash” gera. A Figura 6 indica uma vestimenta típica, categoria 2.



Figura 6 – Camisa risco 2.

- Proteção física das partes vivas

- Utilização de trincos/fechos que pessoas leigas não consigam abrir;
- Utilizar chapas de policarbonato para a proteção de barramentos de quadros;
- Utilizar barreiras;
- Encapsulamento de barramentos.

- Inspeções termográficas

As inspeções termográficas periódicas (bimensais, trimestrais, quadrimestrais, semestrais ou anuais) identificam pontos de aquecimento que podem culminar em arcos elétricos e, logo, é um instrumento de manutenção preditiva. Veja Figuras 7 e 8.

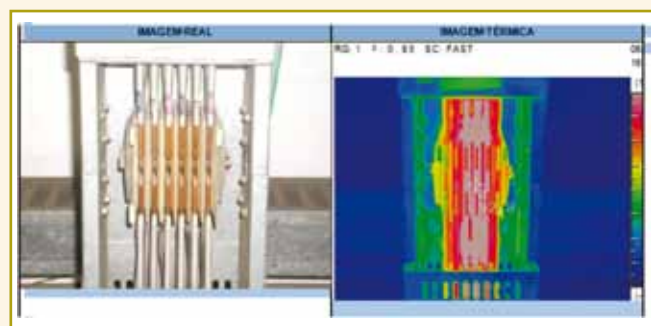


Figura 7 – Imagem real e térmica (termograma) gerada durante uma inspeção termográfica.



Figura 8 – Câmera infra-red para inspeção termográfica.

• Inspeções por ultrassom

O ultrassom pode e deve ser utilizado de forma a identificar falhas (descargas parciais) ainda em sua fase embrionária, evitando, assim, a formação futura de arcos. Veja Figura 9.



Figura 9 – Equipamento para inspeção termográfica.

• Relés sensíveis à luz/Relés de proteção de arco

Conforme mostrado no capítulo anterior, as faltas por arco geram elevadas temperaturas, as quais retiram material das extremidades e os transforma em vapor metálico, que se espalha no compartimento em que ocorre a falta e também

em outros, que, além de aumentar os danos, pode transformar a falta por arco em faltas múltiplas (bifásica, trifásica, etc).

Por suas características, além do alto poder de destruição dos equipamentos, as faltas são também extremamente danosas às pessoas que se encontram em suas circunvizinhanças. O risco de vida, muitas vezes, existe mesmo a vários metros do ponto onde ocorreu o arco.

Visando a reduzir tanto os danos aos equipamentos como às pessoas, as pesquisas mostraram que a redução do tempo de eliminação de falta é de vital importância. Foi então a partir daí que surgiram os relés sensíveis à luz.

As principais características dos relés de proteção de arco são apresentadas a seguir:

- Podem utilizar fibras óticas sensíveis para a detecção de luz;
- Podem utilizar sensores pontuais;
- O tempo de atuação do relé muito baixo (ordem de 2.5 ms para saída de estado sólido e 15 ms para saída a relé);
- O “trip” (desligamento) pode ser programado para atuar somente por luz;
- O “trip” (desligamento) pode ser programado para atuar por luz + sobrecorrente;
- Monitoramento do estado físico das fibras sensoras;
- Permitir seletividade lógica;

- Proteção de “break failure”;
- A extensão máxima da fibra sensora (*loop*) é da ordem de 60 m;
- Monitoramento de falha interna do relé.

• Danos devido a faltas por arco

As faltas por arco geram elevadas temperaturas as quais retiram material das extremidades e transforma-os em vapor metálico, que se espalha no compartimento onde ocorre a falta e também em outros, que além de aumentar os danos pode transformar a falta por arco em faltas múltiplas (bifásica, trifásica, etc.).

A importância do tempo na eliminação do arco

Um baixo tempo de eliminação do arco é um elemento primordial na preservação de vidas e equipamentos/sistemas elétricos e na recolocação do sistema em operação rapidamente.

Quando o arco é eliminado em até 35 ms, os danos às pessoas/equipamentos são irrelevantes. Se a eliminação ocorre em até 100 ms os danos às pessoas não são sérios (no que tange à queimaduras) e ocorrem pequenos reparos no sistema e equipamentos. Até 500 ms, os ferimentos às pessoas quase sempre são sérios e os danos aos equipamentos e sistema são graves, sendo o tempo de retomada/recolocação em serviço e retomada de produção elevados.

Apresentam-se nas páginas seguintes fotos típicas de faltas por arco reais ocorridas em uma planta industrial, em que um curto-circuito ocorreu em uma gaveta de 480 V (Figura 10). Houve a perda de toda a coluna (Figura 11) e também de outras colunas (Figuras 12 e 13). Como passava um leito de cabos (cabos de SDCD, cabos de instrumentação, cabos de comando, cabos de sinais) sobre o painel, os cabos acabaram também por queimar (Figura 14), paralisando a planta por trinta dias e promovendo um prejuízo de mais de 50 milhões de dólares.



Figura 10 – Curto à terra por arco em uma gaveta de 480 V.



Figura 11 – Queima de uma coluna devido a curto à terra por arco.



Figura 12 – Queima de várias colunas devido a falta à terra por arco.



Figura 13 – Queima de várias colunas devido a falta à terra por arco e queima de cabos no leito sobre o painel.



Figura 14 – Situação dos cabos do leito sobre o painel que sofreu curto à terra por arco.

Alguns casos práticos

Procurou-se colocar, neste item, alguns casos da não atuação da proteção de falta à terra.

• Arcos na mesma fase

Arco nas garras (tulipa) de uma mesma fase de disjuntores extraíveis constituem-se casos em que já ocorreram em sistemas elétricos. Neste tipo de ocorrência, os relés de sobrecorrente normais não os identificam como falta. Assim, a forma mais eficiente de se obter proteção consiste na utilização de relés protetores de arco e também atuar preditivamente com termovisão e ultrassom.

Quando os relés de sobrecorrente identificam a falta, os danos quase sempre já são sérios e os tempos para recolocação do painel em serviço são elevados.

• Fechamento errado da malha das blindagens de cabos de média tensão com a utilização de TCs “Ground Sensors”

Quando se tem TCs toroidais aplicados em cabos com blindagem, após o fechamento das blindagens das três fases, deve-se voltar com a blindagem por dentro do toroide. A Figura 15 ilustra as ligações corretas e incorretas. Deve-se observar a posição da fonte (source) em relação à carga (load).

O fechamento errado das malhas de aterramento pode fazer o relé de terra não operar. Veja as formas errada e correta de se fazer o fechamento.

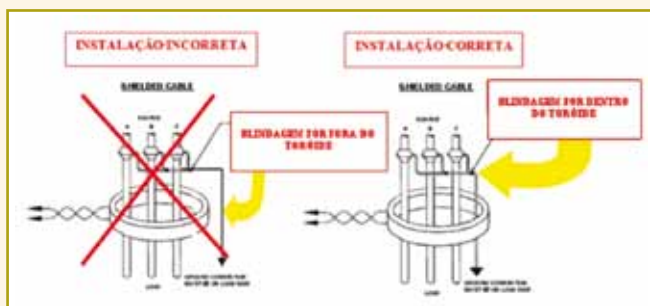


Figura 15 – Como passar a blindagem dentro de TCs toroidais.

• Casos de curto-circuito à terra mínimos em sistemas concessionários

É comum as concessionárias utilizarem uma impedância de $Z_G = 40$ Ohms no neutro para simular um curto-circuito mínimo à terra com o intuito de avaliar a eficiência/sensibilidade da proteção de falta à terra para estes baixos valores. Lembramos que este valor deve ser multiplicado por três quando inserido na equação apresentada no item “valor das correntes à terra”.

• Otimização de ajustes de unidades de sobrecorrente de falta à terra em sistemas aterrados por resistência

Nesses sistemas é fundamental que a proteção seja realizada sempre por TCs “Ground Sensors” ao invés de três TCs ligados na conexão residual. A técnica consiste em se “tirar” o sinal de trip e diminuir o valor do ajuste do relé de terra. Deixa-se este ajuste por certo tempo, durante o qual se faz energizações de equipamentos (transformadores e partida de motores) e se verifica se a proteção não atua nestas condições. Caso não atue, deve-se diminuir um pouco mais o ajuste do relé de terra e continuar o processo.

Esta técnica para determinar o menor ajuste confiável para os relés de terra é bem eficiente e prática na determinação do ajuste de terra. É possível chegar a valores da ordem de 2.5 A, ou mesmo menores, o que é um valor extremamente sensível.

Para que o sistema não fique desprotegido (sem o sinal de trip), recomenda-se a instalação de outro relé em série, com o relé de terra com um ajuste mais elevado (ajuste imediatamente anterior, já testado) para garantir que, durante o processo de teste, caso ocorra uma falta real, não coloque em risco o sistema elétrico.

• Falta à terra de alta impedância em ramais/alimentadores de distribuição

Quando ocorre uma falta à terra em um sistema de distribuição, seja pelo rompimento do condutor, seja por falha de isolamento, muitas vezes estas faltas são difíceis de serem detectadas por relés de sobrecorrente convencionais, principalmente devido à sazonalidade do valor da impedância de falta. Este fato é extremamente grave, visto que, se a falta não é eliminada, as pessoas estão expostas ao risco de choque elétrico e queimaduras. Pode-se utilizar uma das técnicas ou todas, conforme o grau de proteção desejado.

A seguir, algumas técnicas possíveis:

- Em sistemas solidamente aterrados;
- Em sistemas aterrados por impedância por meio de relé de sobretensão (função 59);
- Em sistemas aterrados por impedância por meio de relé de sobretensão de terra (função 59N).

a. Falta à terra em linhas radiais com fonte apenas de um lado em sistemas solidamente aterrados

Existem situações em que a linha aérea atravessa trechos em que pode haver a presença de pessoas que não conhecem os riscos da eletricidade e, adicionalmente, essas linhas podem ter seus cabos rompidos em locais de impedância muito elevada de forma que a proteção de sobrecorrente terra dificilmente detecte esta falta. É apresentada na Figura 16 uma forma de se obter a proteção de falta à terra independentemente do valor da impedância no ponto de falta que consiste em se instalar um relé de sequência de fase na barra da carga.

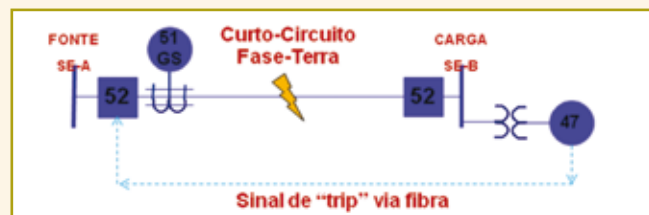


Figura 16 – Proteção de falta à terra pela utilização de relé de sequência de fase.

Esta técnica também pode ser utilizada em sistemas aterrados por impedância.

b. Em sistemas aterrados por impedância via relé de sobretensão (59)

Esta técnica consiste em utilizar um relé de sobretensão no

secundário de 3 TP's (de grupo de ligação 3) conectados em estrela aterrada no primário e no secundário. Quando uma fase vai à terra, a tensão nas outras duas sobe, o relé de sobretensão identifica e envia o sinal de trip via fibra, como indicado na Figura 17. Deve-se calcular o valor desta sobretensão para ajustar o relé.

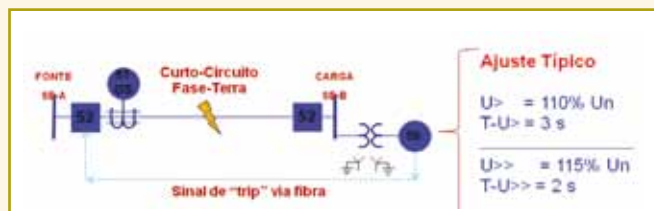


Figura 17 – Proteção de falta à terra por meio da utilização de relé de sequência de sobretensão.

Nota: O objetivo de temporizar esta função é o de coordenar com os relés de sobrecorrente de falta à terra.

c. Sistemas aterrados por impedância usando relé de sobretensão de terra (59N)

Esta técnica consiste em empregar um relé de sobretensão no secundário de 3 TP's (de grupo de ligação 3) conectados em estrela aterrada no primário e no secundário, podendo-se utilizar a função 59N calculada pelo relé ou o secundário ligado em delta aberto utilizando a função 59N pela entrada física no relé. Sem falta à terra,

a somatória das tensões de fase no delta aberto é zero. Quando uma fase vai à terra, a tensão nos terminais aumenta normalmente entre duas a três vezes a tensão do secundário do TP. Deve-se calcular o valor desta sobretensão para ajustar o relé. Temporiza-se esta unidade para coordenar com os relés de sobrecorrente de falta à terra. A Figura 18 ilustra o exposto.

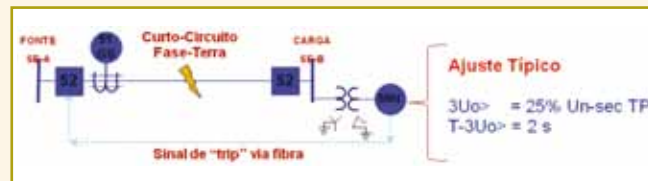


Figura 18 – Proteção de falta à terra por meio da utilização de relé de sequência de sobretensão de sequência zero.

*CLÁUDIO MARDEGAN é engenheiro eletricista formado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá (atualmente Unifei). Trabalhou como engenheiro de estudos e desenvolveu softwares de curto-circuito, load flow e seletividade na plataforma do AutoCad®. Além disso, tem experiência na área de projetos, engenharia de campo, montagem, manutenção, comissionamento e start up. Em 1995 fundou a empresa EngePower® Engenharia e Comércio Ltda, especializada em engenharia elétrica, benchmark e em estudos elétricos no Brasil, na qual atualmente é sócio diretor. O material apresentado nestes fascículos colecionáveis é uma síntese de parte de um livro que está para ser publicado pelo autor, resultado de 30 anos de trabalho.

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