

Capítulo II

Faltas entre fases e entre espiras

Por Geraldo Rocha e Paulo Lima*

A proteção do gerador deve ser analisada cuidadosamente, não apenas para faltas, mas também para as diversas condições anormais de operação de um gerador. Existem muitas razões para o desligamento de um gerador, as quais destacamos:

- Faltas no gerador
- Faltas no sistema de potência
- Proteção térmica
- Condições anormais de operação

Tendo em vista a fadiga, a vibração mecânica e o envelhecimento da isolamento dos enrolamentos do gerador, após um longo período de tempo, os geradores tendem a desenvolver defeitos em seus enrolamentos. As faltas no gerador são sempre consideradas graves, pois a elevada corrente de falta gerada pode danificar severamente a isolamento, o enrolamento e o núcleo. Além disso, devido ao decaimento lento do fluxo, a corrente de falta vai fluir por vários segundos mesmo após o gerador com defeito ter sido desligado e o campo desconectado. Esta corrente de falta prolongada pode resultar em maiores danos.

Faltas típicas no gerador incluem faltas

fase-fase, fase-terra e entre espiras. A falta fase-terra é a mais frequente (65% das ocorrências), sendo que as faltas fase-fase representam 23,5% das ocorrências e as faltas entre espiras, 11,5%.

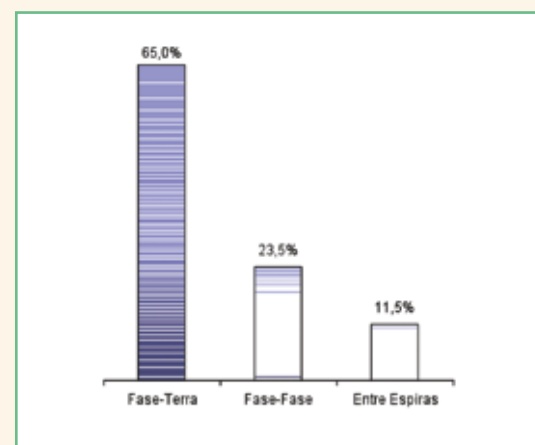


Figura 1 – Faltas no estator do gerador.

Sempre que ocorre uma falta no gerador, mesmo se a máquina for bem protegida, haverá custos para reparo do gerador e compra de energia de substituição. Este custo atinge facilmente muitos milhões de dólares no caso de geradores de 250 MW. A relação dos custos de danos para uma falta não protegida versus danos para uma falta protegida é de aproximadamente 6 para 1

para os geradores de 250 MW.

Como consequência, para faltas em geradores que produzem elevada corrente de falta, normalmente, são usados sistemas de proteção de alta velocidade para dar trip e desligar o gerador o mais rápido possível, de forma a reduzir os danos à máquina.

Proteção contra faltas entre fases no estator

Diferencial percentual

A proteção diferencial de corrente de alta velocidade é normalmente usada para proteger geradores contra faltas trifásicas, bifásicas e bifásicas-terra.

Se o gerador for aterrado por meio de baixa-resistência, a proteção diferencial de corrente também pode proteger contra faltas à terra nos enrolamentos desde o terminal até um pequeno percentual acima do neutro. Para geradores aterrados por alta resistência, a corrente de falta à terra é bem pequena, normalmente abaixo do nível de sensibilidade do relé diferencial de corrente.

O diagrama da Figura 2 mostra o mais simples dos esquemas diferenciais usando um relé de sobrecorrente instantâneo. Algumas vezes é denominado esquema de sobrecorrente diferencial.

A proteção diferencial é uma das formas mais efetivas de proteção dos equipamentos de potência. Colocando de uma forma simples, a proteção diferencial opera com base na diferença entre a corrente medida entrando e saindo da zona protegida. Uma vez que ela opera somente com base na diferença e não na corrente total que circula no circuito, um relé com essas características de proteção pode ter maior sensibilidade para faltas do que outros tipos de relés. Além disso, como a zona de proteção é definida com precisão pela localização dos TCs que envolvem a zona protegida, o relé é altamente seletivo. Com alta seletividade, um relé diferencial pode dar trip rapidamente sem o intervalo de tempo de coordenação.

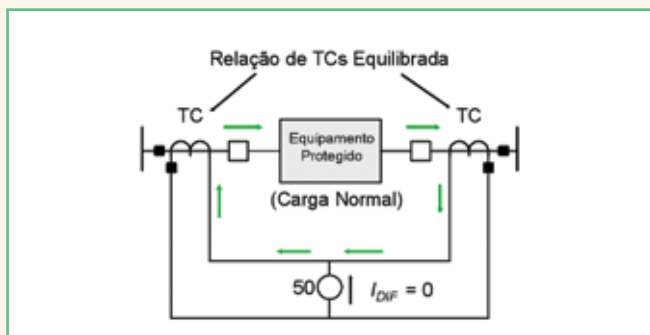


Figura 2 – Esquemas diferenciais usando um relé de sobrecorrente instantâneo.

As características da proteção diferencial podem ser resumidas como:

Princípio:

- Medir a corrente entrando e saindo da zona de proteção;
- Se as correntes não forem iguais, existe uma falta.

Fornecer:

- Alta sensibilidade;
- Alta seletividade.

Resultado:

- Velocidade relativamente alta.

Todas as proteções diferenciais devem lidar com o desafio de permanecerem seguras diante de elevadas correntes de faltas passantes.

Durante uma falta externa severa, um TC pode saturar e fornecer menos do que o valor de sua relação de corrente. Nesse caso, as correntes não são completamente canceladas, resultando numa falsa corrente diferencial. Para isso, os esquemas de proteção diferencial percentual são mais utilizados e oferecem maior segurança e confiabilidade ao compararem uma grandeza de operação com uma grandeza de restrição.

O princípio de operação da proteção diferencial percentual é o mesmo da proteção de sobrecorrente diferencial, conforme a Figura 4. Contudo, no esquema

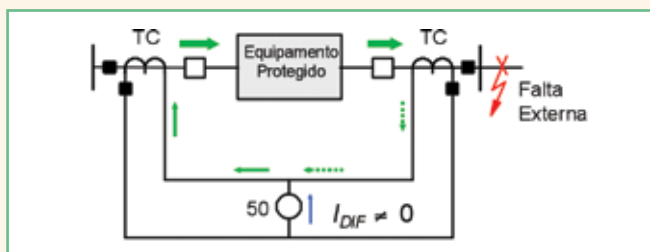


Figura 3 – Desafios da proteção diferencial.

diferencial percentual, a corrente de restrição tem uma magnitude elevada para uma falta externa severa. Logo, mesmo se houver uma corrente de operação significativa, a restrição será tão grande que o relé não vai operar. Se a falta for interna, a corrente de operação é consideravelmente maior do que a corrente de restrição, permitindo a operação do relé.

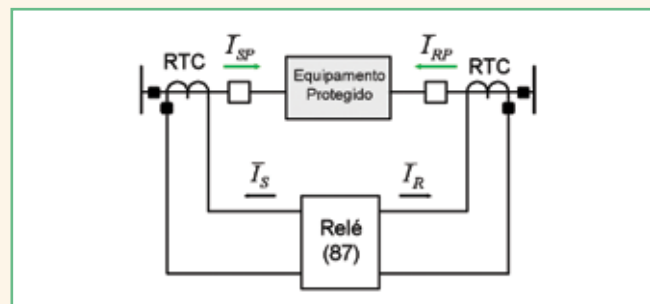


Figura 4 – Esquema de proteção diferencial percentual.

Nesse esquema, o relé opera quando a magnitude da corrente de operação do secundário, $\bar{I}_{OP} = \bar{I}_S + \bar{I}_R$, for maior do que uma determinada proporção da corrente de restrição do secundário I_{RT} . Para este esquema específico, a corrente de restrição é escolhida como $I_{RT} = (|\bar{I}_S| + |\bar{I}_R|) / 2$.

A constante de proporcionalidade, k , ou slope, é algumas vezes ajustável, com valores típicos de 0.1 a 0.8; ou 10% a 80%.

Nota: As duas setas das correntes primárias mostradas são uma convenção comum na análise da proteção diferencial. Geralmente, elas são mostradas com ambas as setas de corrente indo na direção do equipamento protegido. As duas correntes não terão o mesmo sinal ou ângulo quando em condições normais de operação do sistema (sem faltas), a não ser que o equipamento protegido seja um transformador. De forma contrária, durante operação normal, as duas correntes terão a mesma magnitude, porém os fasores vão estar defasados em 180 graus. Tenha em mente que alguns autores usam uma convenção diferente.

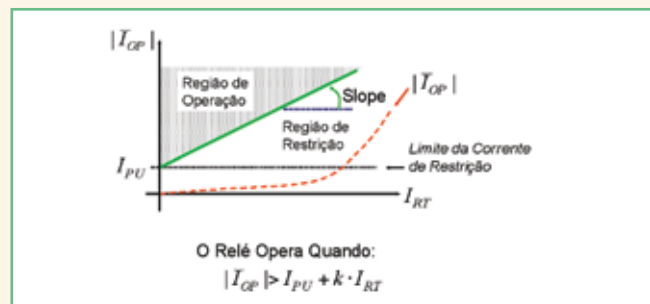


Figura 5 – Características de operação da proteção diferencial percentual.

Na Figura 5, um gráfico da corrente de operação versus a corrente de restrição mostra a característica diferencial percentual. Esta figura explica o conceito do slope (conhecido como inclinação ou rampa). A área sombreada representa os pontos do plano em que o relé vai operar.

Conforme mostrado, é a área acima da linha reta definida pela equação:

$$IOP = k \cdot IRT$$

O slope dessa linha é k .

A linha curva tracejada representa a corrente de operação como função da corrente de restrição para faltas externas de magnitudes diferentes. Para valores baixos da corrente de falta, a corrente de restrição tem uma magnitude pequena, assim como a corrente de operação. Para magnitudes elevadas da corrente de falta externa, os TCs saturam de forma diferente e o resultado é uma corrente de operação maior. A corrente de restrição também aumenta, evitando qualquer operação indevida do relé para uma falta externa.

Diferencial Autobalanceado

Para geradores pequenos, é mais econômico usar o esquema diferencial autobalanceado mostrado na Figura 6.

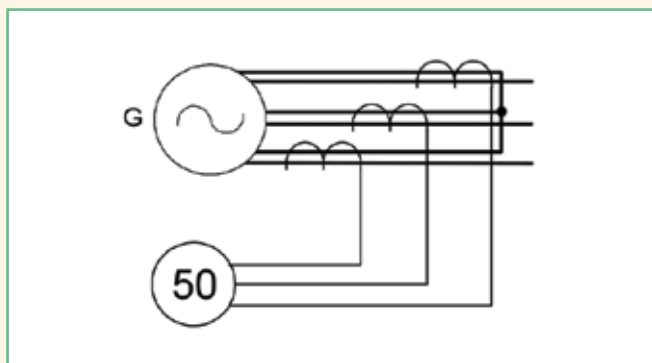


Figura 6 – Esquema de proteção diferencial autobalanceado.

Este esquema utiliza para cada fase um TC de baixa relação. Os condutores dos terminais dos dois lados dos enrolamentos do gerador passam pelos TCs de tal maneira que as correntes entrando e saindo se cancelam durante uma operação normal. Um relé de sobrecorrente simples é conectado aos TCs, propiciando uma proteção rápida e confiável pela detecção de qualquer diferença das correntes entrando e saindo do enrolamento.

O tamanho limitado do TC de janela limita o tamanho do condutor e, conseqüentemente, o tamanho do gerador a ser protegido. O relé deve ter um burden tão baixo quanto possível visando manter a alta sensibilidade e reduzir as chances de saturação do TC.

Proteção contra faltas entre espiras do gerador

Defeitos entre espiras são faltas graves para os geradores. A corrente de falta entre espiras pode ser muitas vezes maior do que a corrente de falta nos terminais do gerador.

A maioria dos enrolamentos do estator tem bobinas com espira única. Se um estator possuir enrolamentos com bobinas com múltiplas espiras e dois ou mais circuitos por fase (fase-dividida), como muitos dos geradores hidroelétricos, pode-se utilizar um sistema de proteção contra defeitos entre espiras do tipo diferencial de corrente de fase dividida ou autobalanceada de fase dividida.

Para geradores com múltiplas espiras e com apenas um circuito por fase, ou para um gerador que possua bobinas multicircuito conectadas de modo neutro dentro do gerador com apenas um condutor de neutro disponível externamente ao gerador, use um elemento direcional de potência de sequência-negativa ou sobretensão de sequência-zero (para geradores não aterrados) para a proteção contra defeitos entre espiras.

Proteção diferencial de corrente de fase dividida

A Figura 7 mostra o esquema diferencial de corrente de fase-dividida para proteção contra faltas entre espiras. A relação dos TCs do lado do neutro do gerador é o dobro da relação dos TCs do lado dos terminais do gerador. Esta diferença nas magnitudes das relações possibilita o balanceamento das diferenças de corrente durante condições normais de operação do gerador.

Este esquema diferencial de corrente de fase dividida também pode proteger o gerador contra faltas entre fases no enrolamento. Para geradores aterrados por meio de baixa resistência, este esquema propicia proteção contra faltas à terra no enrolamento.

Proteção autobalanceado de fase dividida

A outra maneira de proteger o gerador contra faltas

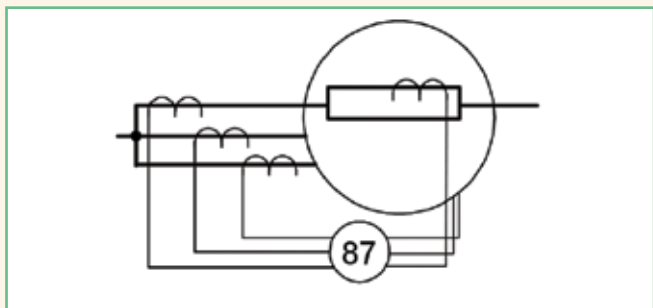


Figura 7 – Esquema de proteção diferencial de corrente de fase dividida.

entre espiras é usando elementos de sobrecorrente com TCs de núcleo balanceado, passando os dois condutores da bobina dentro da janela do TC em direção oposta. Durante a operação normal do gerador, as correntes nos dois enrolamentos são iguais. Consequentemente, a corrente de saída do TC é próxima de zero e o elemento de proteção de sobrecorrente não opera.

Se ocorrer uma falta entre espiras em um dos dois enrolamentos, as correntes fluindo em ambos os enrolamentos serão desiguais e não se cancelam no núcleo do TC. O elemento de sobrecorrente sensível atua e dá trip no gerador.

Uma consideração importante para este esquema

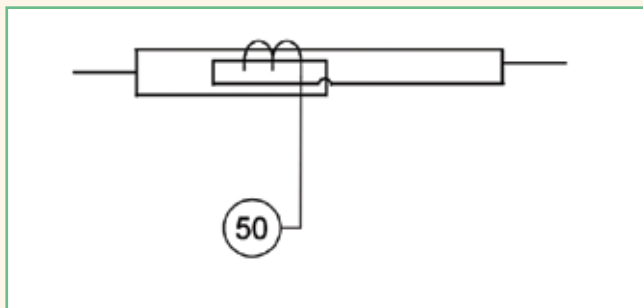


Figura 8 – Esquema de proteção autobalanceado de fase dividida.

de proteção é quando há reparo de emergência com corte do enrolamento.

**GERALDO ROCHA é engenheiro eletricista e especialista em proteção de sistemas elétricos. É atualmente engenheiro de aplicação da Schweitzer Engineering Laboratories, Inc.*

PAULO LIMA é graduado em engenharia elétrica, com ênfase em Sistemas Elétricos de Potência. Especialista em Proteção de Sistemas Elétricos, atua na SEL desde 2012 como engenheiro de aplicação e suporte e como professor da Universidade SEL.

Continua na próxima edição

Confira todos os artigos deste fascículo em
www.asetoreletrico.com.br

Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br