



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica



TIPOS DE FALTAS ELÉTRICAS EM SUBESTAÇÕES E SUAS PROTEÇÕES

Tarcísio Moreira de Souza

Campina Grande, fevereiro de 2010

TARCÍSIO MOREIRA DE SOUZA
Matrícula: 20511450

**TIPOS DE FALTAS ELÉTRICAS EM
SUBESTAÇÕES E SUAS PROTEÇÕES**

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal
de Campina Grande em cumprimento parcial às exigências
para a obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.*

Orientador: Professor Doutor Edmar Candeia Gurjão

Campina Grande, fevereiro de 2010

A Deus que me deu a vida
e nela me dá a oportunidade de
conhecer pessoas as quais posso
perceber que vale a pena viver.

Agradecimentos

Aos meus pais que sempre acreditaram em mim e fizeram todo esforço para que a minha formação profissional se tornasse realidade.

A minha querida família pelo apoio e em especial a família de Campina Grande por me oferecer moradia nos primeiros anos do curso.

Ao Professor Edmar pelo apoio na realização deste trabalho.

Resumo

Para que um sistema elétrico de potência possa operar eficientemente é necessário que todas as suas partes constituintes tenham condições de operabilidade de modo a garantir essa eficácia.

As subestações, como parte constituinte para o bom funcionamento dos sistemas elétricos, são de vital importância para que esta operabilidade ocorra de forma eficaz.

O presente trabalho tem por objetivo o estudo das faltas elétricas em subestações e a proteção contra essas faltas sem a pretensão de esgotar o assunto.

Abstract

So That electric a framework of potency be able to undergo surgery efficiently be inevitable that all the his despatches constituintes have termes of operabilidade of manner at guarantee that effectiveness.

The subestações, as despatch constituinte for the good funciomanento dos electric frameworks, come from vital amount so that this operabilidade go on of effective figure.

The present job have along detached him study of the deficiencies electric in subestações and the protection against that deficiencies without the claim of drain the business.

Sumário

1. Introdução	14
2. Falta Eléctricas.....	16
2.1 Definições.....	16
3. Tipos de Falta Eléctricas	20
3.1 Sobretensões	20
4. Sobretensões Temporárias.....	21
4.1 Falta para Terra.....	21
5. Sobretensões Atmosféricas.....	23
5.1 Efeito das Descargas nos Sistemas de Potência	25
6. Sobretensões de Manobra	25
6.1 Aplicação e Eliminação de Falta	26
6.2 Rejeição de Carga.....	28
7. Subestações.....	32
7.1 Principais Equipamentos Componentes de uma Subestação	32
7.2 Equipamentos de Protecção	34
a. Pára-raios	34
b. Relés	36
8. Protecções em Subestações	40
8.1 Conceito	40
8.2 Protecção Principal e Protecção de Retaguarda	42
a. Protecção Principal	42
b. Protecção de Retaguarda.....	43
8.3 Protecção Diferencial	44
a. Tipos Básicos de Protecção Diferencial.....	45
8.4 Protecção de Transformador (Função 87T) – Conexões e Polaridades	49

9. Conclusões	53
Referências Bibliográficas	54

1. Introdução

A energia elétrica para que possa chegar aos locais a que se destina, sejam consumidores residenciais, sejam consumidores industriais, exige um complexo sistema de geração, transmissão e distribuição.

A geração de energia elétrica no Brasil se dá predominantemente através de usinas hidrelétricas, dado os abundantes recursos hídricos existentes.

A transmissão desta energia é feita através de níveis elevados de tensão, dentre eles: 138, 230, 345, 440, 500 e 750 kV em circuitos cuja natureza da tensão é em corrente alternada, e ± 600 kV em circuitos de corrente contínua. Toda a energia gerada é transportada através de linhas de transmissão que fazem a conexão das unidades geradoras com as subestações localizadas nos centros urbanos, alimentando os transformadores que fazem a distribuição desta energia aos consumidores industriais, comerciais e residenciais.

Todo este percurso constitui o que se denomina de sistema elétrico, o qual para operar obedece também aos padrões legais preestabelecidos pelo governo para o fornecimento de energia elétrica aos consumidores, na quantidade e qualidade exigida.

O sistema elétrico em sua totalidade opera em regime permanente na maior parte do tempo, mas são projetados para suportar as piores solicitações a que podem ser submetidos, dado que é impossível evitar que o sistema fique imune às perturbações, defeitos e falhas diversas. Essa mesma preocupação deve ser aplicada às subestações. Esses tipos de ocorrência normalmente acontecem durante situações transitórias do sistema. Portanto um sistema elétrico é projetado mais pelas condições de transitoriedade que possam ocorrer do que em seu comportamento de regime permanente.

Os transitórios são conseqüências de uma variedade problemas, podendo gerar sobretensões, sobrecorrentes, formas de ondas anormais e transitórios eletromecânicos. No geral um evento pode dar origem a todos os efeitos descritos acima. Contudo, na maioria dos estudos, alguns destes efeitos são mais importantes do que outros. Portanto, ao se fazer um estudo dos fenômenos transitórios é importante analisar estes fenômenos sob quatro aspectos: sobretensões, sobrecorrentes, formas de ondas anormais e transitórios eletromecânicos.

Para proteger o máximo possível os componentes de uma subestação dos fenômenos transitórios, esquemas de proteção são planejados para receberem as grandezas elétricas do sistema em tempo real, de forma a atuarem sempre que condições anormais ocorram.

Estes esquemas são os chamados sistemas de proteção que são constituídos por relés, transformadores para instrumentação, tais como os transformadores de potencial (TP's) e os transformadores de corrente (TC's), cabeamento, dentre outros; que atuam sobre equipamentos chaveadores tais como disjuntores e chaves seccionadoras motorizadas. Estes equipamentos isolam os trechos defeituosos do sistema, protegendo-o e evitando o agravamento dos danos aos equipamentos principais como transformadores, barramentos, linha de transmissão e distribuição, bancos de capacitores.

Neste texto serão apresentadas algumas maneiras de realizar a proteção dos sistemas elétricos.

2. Falas Elébricas

2.1 Definições

O termo falta elétrica nomeia o afastamento acidental das condições normais de operação de um sistema elétrico. A ocorrência mais comum de uma falta elétrica é um curto-circuito ou mesmo um condutor que tem suas condições normais de operação interrompida devido às sobretensões ou sobrecorrentes.

Este defeito pode modificar em maior ou menor grau as tensões e as correntes relativas ao componente considerado.

Um curto-circuito é caracterizado por:

- Correntes de valor bem acima do seu valor nominal e quedas de tensão, salientando que essas duas características não ocorrem exclusivamente em um curto-circuito;
- Variação da impedância aparente, que corresponde à relação tensão/corrente no local onde está instalado o relé. Esta variação percebe-se que é maior no momento em que ocorre um defeito do que numa simples variação de carga.
- Surgimento das componentes inversa (seqüência negativa) e homopolar (seqüência zero) da tensão e/ou corrente, no caso do defeito possuir caráter desequilibrado, certo que os vetores das tensões e correntes apresentam diferenças significativas entre si em termos de seus módulos e ângulos de fase.
- As correntes de entrada e saída de um elemento da rede apresentam diferenças consideráveis. As correntes derivadas, que são as correntes magnetizantes dos transformadores e capacitivas das linhas, são pequenas em relação às correntes de trabalho nominal; conseqüentemente se a diferença entre os ângulos de fase das correntes de entrada e saída é grande (cerca de 180°), isso é um indicativo de defeito interno do elemento controlado, caracterizando uma inversão do sentido da corrente de saída.

Existem dois tipos de faltas elétricas num sistema de potência quando se refere ao módulo e ângulo de fase da tensão e corrente, faltas simétricas e faltas assimétricas.

Falta elétrica simétrica é uma falta balanceada do ponto de vista do sinal de sua corrente, visto que a forma de onda das suas senóides é simétrica em relação ao eixo dos tempos e apresenta uma característica estacionária, porém o valor da tensão nas três fases é zero no local da falta.

Falta assimétrica apresenta uma componente exponencial de natureza transitória e é amortecida durante certo período de tempo até que o sinal da corrente entre em estado de regime permanente. Pode-se observar este comportamento na Figura 2.1

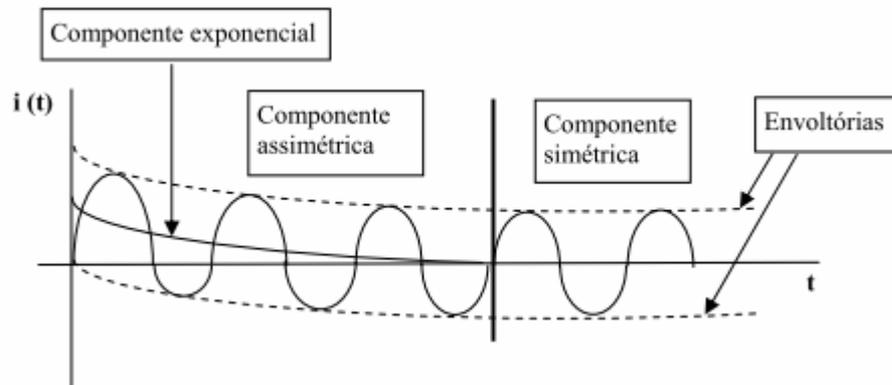


Figura 2.1 – Corrente elétrica, onde podem ser vistas a componente assimétrica, com sua exponencial, e simétrica (Marcos, UFRN, 2006. Editada pelo autor).

Um sistema elétrico trifásico equilibrado, ou seja, sistema em que a amplitude do sinal das tensões (e correntes) são iguais e seus ângulos de fase distam 120° entre si, pode ser representado por um conjunto de três vetores (ou fasores) de mesmo módulo e defasados de 120° entre si, numa seqüência tal que estes fasores estejam girando no sentido anti-horário convencionando-se uma seqüência chamada de positiva abc, conforme é indicada na Figura 2.2.

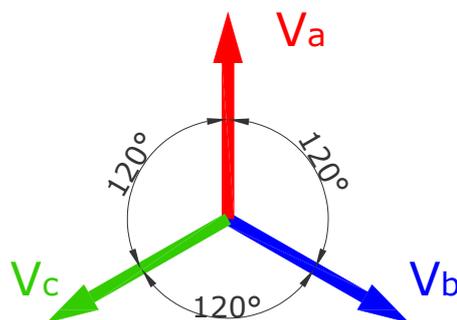


Figura 2.2 – Conjunto de três fasores representativos de um sistema elétrico equilibrado

Durante uma falta elétrica desequilibrada a amplitude do sinal das tensões e correntes apresentam valores diferentes, como também um defasamento desigual nos respectivos sinais como indicado na Figura 2.3.

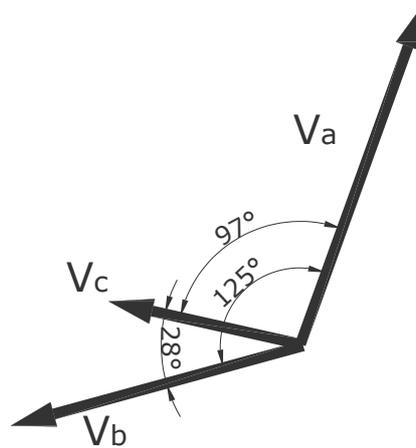


Figura 2.3 – conjunto de três fasores representativos de um sistema elétrico trifásico desequilibrado

Existem ferramentas matemáticas para se trabalhar com sistemas que apresentam este tipo de comportamento, dentre elas a mais conhecida é o Teorema de Fortescue.

Conforme o teorema de Fortescue, para um sistema trifásico, três fasores desequilibrados podem ser decompostos em três sistemas de fasores equilibrados. Os conjuntos equilibrados de componentes apresentam-se da seguinte forma:

- a. Componentes de seqüência positiva ou direta: essa componente representa as condições da tensão ou corrente em regime permanente, com um sentido de giro convencional positivo abc (geralmente no sentido anti-horário), conforme indicado na Figura 2.4;

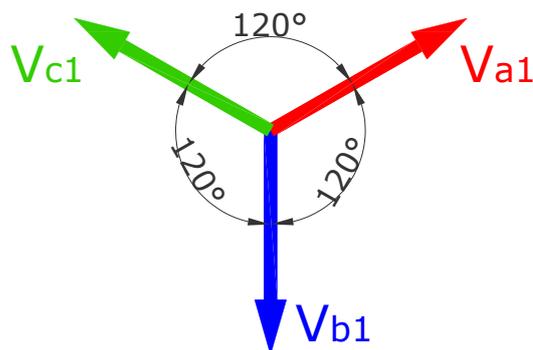


Figura 2.4 – Conjunto de três fasores representativos das componentes de seqüência positiva

- b. Componentes de seqüência negativa ou inversa: essa componente representa as condições da tensão ou corrente em regime transitório, ou seja, ela indica a quantidade de

desequilíbrio do sistema. Com sentido de giro convencional negativo acb ou contrário ao sentido original do sistema; conforme indicado na Figura 2.5;

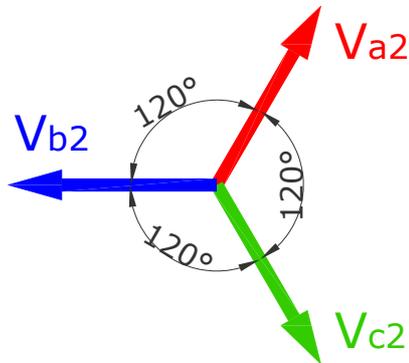


Figura 2.5 – Conjunto de três fasores representativos das componentes de seqüência negativa

- c. Componente de seqüência zero ou homopolar: representa as harmônicas de terceira ordem e seus múltiplos ímpares que normalmente estão em fase, por isso são chamadas de homopolares. Representam o elemento de tensão ou corrente não girante. Sua representação fasorial é indicada na Figura 2.6.

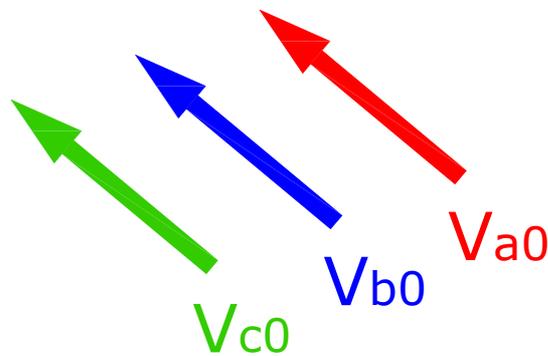


Figura 2.6 – Conjunto de três fasores representativos das componentes de seqüência zero

Ao serem adicionados vetorialmente os fasores representativos das componentes direta, inversa e homopolares, têm-se uma configuração destes vetores conforme pode-se observar graficamente na Figura 2.7.

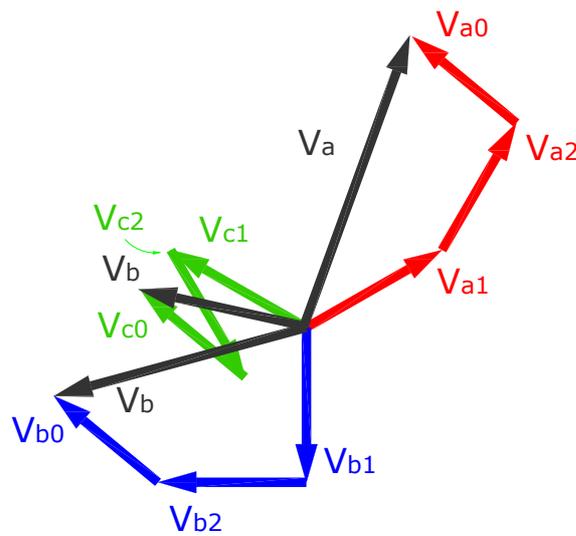


Figura 2.7 – Representação gráfica da soma vetorial das componentes simétricas em um sistema elétrico

3. Tipos de Falhas Elétricas

As faltas elétricas que podem ocorrer em um sistema elétrico são de origem diversa, tendo como conseqüência a geração de sobretensões, sobrecorrentes, formas de ondas anormais e transitórios eletromecânicos. O presente estudo se aterá ao detalhamento das sobretensões.

3.1 Sobretensões

O termo sobretensão designa a tensão que varia de acordo com o tempo, entre uma fase e a terra ou entre fases, que tem magnitude da crista superior ao valor de crista da tensão máxima de um sistema ($U_m\sqrt{2}/\sqrt{3}$ ou $U_m\sqrt{3}$ respectivamente, onde U_m é a amplitude da tensão). Pode-se diferenciar em dois tipos: as externas e as internas. Elas se diferenciam apenas na localização dos fenômenos que dão origem a essas sobretensões.

As sobretensões podem ser divididas em categorias conforme o grau de amortecimento e o seu tempo de duração, quais sejam:

- Sobretensões Temporárias;
- Sobretensões Atmosféricas;
- Sobretensões de Manobra.

Os limites para a transição entre estes grupos não é possível definir, pelo fato de que certos fenômenos podem causar sobretensões que se enquadram em uma outra classe.

O conhecimento das sobretensões que por ventura possam se suceder em um sistema de transmissão é de suma importância, uma vez que o conhecimento prévio do comportamento das sobretensões auxilia tanto no projeto de isolamento de linhas e subestações, como na escolha dos equipamentos.

4. Sobretensões Temporárias

A principal característica das sobretensões temporárias é sua longa duração com baixo amortecimento. Estas sobretensões, também chamadas de sobretensões sustentadas, persistem no sistema até que o mesmo seja modificado ou que seja eliminada a causa que deu origem às sobretensões.

Sendo assim, sua importância na coordenação de isolamento se dá no fato de que os equipamentos a elas submetidos terão que ser especificados de modo a suportá-las por muito tempo, uma vez que os pára-raios não são projetados, em regras gerais, com o intuito de absorver toda a energia associada a estas sobretensões.

Uma das principais causas do surgimento de sobretensões temporárias no sistema é esplanada abaixo.

4.1 Faltas para Terra

O tipo de falta mais comum que aparece em um sistema é o curto-circuito monofásico, sendo o bifásico e o trifásico, envolvendo ou não a presença da terra, muito menos freqüentes.

A ocorrência de uma falta-fase terra em um determinado ponto acarreta uma elevação da tensão nas fases sãs, cujo valor depende principalmente do grau de aterramento do sistema no ponto em questão. Esta condição de aterramento é expressa através do fator de falta para terra. Seu valor é independente do valor real da tensão de operação no local considerado, sendo calculado a partir das impedâncias de seqüência de fase. Ele traduz a relação entre o máximo eficaz da tensão fase terra à freqüência industrial no mesmo ponto, com a falta removida.

Para sistemas de neutro isolado, como por exemplo, uma carga não aterrada suprida pelo delta de um transformador, as sobretensões nas fases sãs podem exceder a tensão fase-fase, ou seja, alcançar valores superiores a 1,73 p.u.. Isto se deve ao ato de que na realidade este tipo de sistema é acoplado à terra através de suas capacitâncias distribuídas.

No caso de um sistema eficazmente aterrado, onde a relação entre a reatância de seqüência positiva é inferior a 3 ($X_0 / X_1 \leq 3$) e a relação entre a resistência de seqüência zero e a reatância de seqüência positiva é inferior a 1 ($R_0 / X_1 \leq 1$), as sobretensões nas fases sãs não alcançam 1,4 p.u., o que significa que podem atingir no máximo 80% da tensão fase-fase.

O fator de falta para terra para um determinado ponto do sistema elétrico, pode assumir tantos valores particulares quantos forem as configurações do sistema, porém o fator que caracteriza a localização é o maior destes valores. As configurações a serem consideradas são as existentes durante a falta; portanto, devem ser levadas em consideração aquelas modificações no sistema que possam ser produzidas pela própria falta, por exemplo, as devidas à operação dos disjuntores.

Nas Figuras 4.1 e 4.2 pode-se observar em um determinado sistema elétrico a representação gráfica de uma falta fase-terra na Fase C e a respectiva alteração do sinal na Fase A durante este defeito.

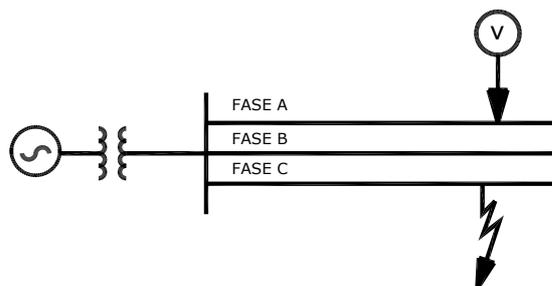


Figura 4.1 – Indicação do local de uma falta fase-terra em um determinado sistema elétrico.

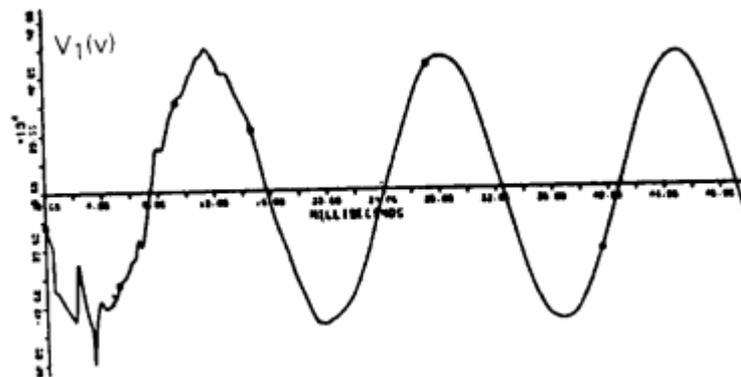


Figura 4.2 – Sinal da tensão na Fase A durante a ocorrência de uma falta na Fase C (D'AJUZ, Editada pelo autor).

5. Sobretensões Atmosféricas

Os equipamentos constituintes de um sistema de potência podem ser submetidos a valores altos de tensão devido às descargas atmosféricas. Há a possibilidade dessas descargas atingirem diretamente o equipamento, como é o caso das subestações, ou sobre as linhas de transmissão do sistema, dando origem desta forma a surtos de tensão que se propagam ao longo dessas linhas e terminando nas subestações.

As sobretensões que tem sua origem conforme o que fora descrito acima, são em geral de um nível de tensão tal que provocam falhas nos isolamentos, quer das linhas de transmissão quer nos equipamentos de uma subestação, acarretando assim a interrupção do fornecimento de energia para os consumidores. Para se evitar que este tipo de falha venha ocorrer usa-se uma blindagem, formada por cabos pára-raios (para as linhas e subestações) e mastros (para as subestações), que desviem estas descargas para a terra. Nas Figuras 5.1 e 5.2 pode-se observar os cabos pára-raios nas torres de linhas de transmissão e os mastros nas subestações.

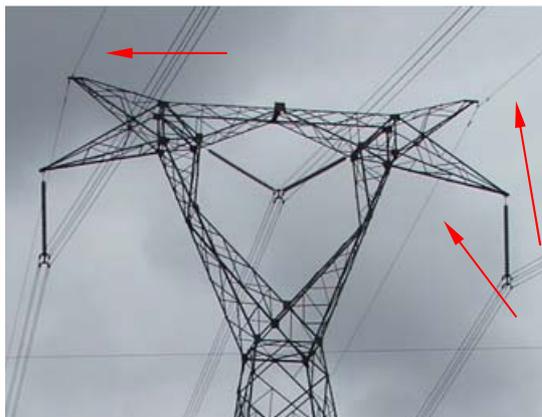


Figura 5.1 – Cabos pára-raios (retirado de <http://amarnatureza.org.br>).



Figura 5.2 – Mastro para a proteção contra descargas atmosféricas (retirado de www.weg.net).

Pelo fato das subestações ocuparem uma pequena área de exposição, as subestações estão menos susceptíveis à incidência de descargas atmosféricas. Além disso, o sistema de proteção das subestações, utilizando mastros e cabos pára-raios, impede, quando bem projetado, que as descargas de maiores intensidades atinjam os condutores e equipamentos, não permitindo o aparecimento de sobretensões elevadas no interior das mesmas. Desta forma o estudo de incidência de descargas atmosféricas fica então mais voltado para aquelas que atingem as linhas de transmissão.

O estudo do desempenho das linhas de transmissão quanto a descargas atmosféricas é de grande importância no projeto de sistemas de transmissão. Em sistemas de tensão até 230 kV, é fator determinante do isolamento das linhas. Nos sistemas com tensões superiores a 345kV, o isolamento é normalmente ditado pelas sobretensões de manobra, desde que as linhas de transmissão sejam adequadamente projetadas, mediante a conveniente determinação

dos espaçamentos elétricos, quantidade de isoladores, ângulo de blindagem e aterramento das estruturas.

Abaixo será dada uma breve descrição da descarga atmosférica, o efeito destas descargas nos sistemas de potência e o método utilizado na definição destes esquemas de blindagem.

5.1 Efeito das Descargas nos Sistemas de Potência

Quando uma sobretensão atinge um sistema de potência, uma elevada sobretensão é experimentada pelos equipamentos e pela isolação das linhas. Caso esta tensão exceda o limite de suportabilidade da isolação, ocorrerá uma descarga. Da ocorrência deste fenômeno tem-se como consequência a formação de um arco de potência, o qual será mantido pela tensão do sistema, tornando necessária a atuação do sistema de proteção com o fim de eliminar o curto-circuito gerado. Este tipo de descarga através do ar ou da cadeia de isoladores normalmente não produz nenhum dano. Por outro lado, em geradores, transformadores ou motores onde são utilizados materiais isolantes sólidos, uma descarga interna provoca um dano permanente.

Em geral, a proteção contra descargas atmosféricas é dirigida contra os surtos de tensão já que os surtos de corrente são menos preocupantes. Apesar dessa corrente ser extremamente elevada, seu tempo de atuação é muito curto, sendo facilmente suportado por um condutor de pequeno diâmetro. O tipo de condutor a ser dimensionado é normalmente determinado pelos esforços mecânicos ao invés da capacidade de corrente.

6. Sobretensões de Manobra

As sobretensões de manobra são diferentes das sobretensões atmosféricas, porque atingem valores de tensão bem mais altos e devido a isto influenciam no projeto econômico dos sistemas elétricos tanto dos equipamentos de subestações como de linhas de transmissão.

A origem das sobretensões de manobra resulta de chaveamento dos equipamentos de manobra, ou até mesmo uma variação brusca na rede proveniente de, entre outros motivos, curto-circuitos.

As sobretensões de manobra são fenômenos eletromagnéticos e são algumas vezes superimpostas à tensão à frequência industrial. A possibilidade de sua ocorrência depende do

número de faltas e operações de manobra no sistema. A magnitude é influenciada pela configuração do sistema e pela potência de curto-circuito.

As sobretensões de manobra possuem outra característica que é o aspecto probabilístico, em outras palavras para uma mesma manobra podem-se ter diferentes valores de sobretensão.

6.1 Aplicação e Eliminação de Falta

Quando ocorre uma falta, as sobretensões originadas durante essas faltas, podem ser entendidas como a composição de ondas trafegantes, nessa composição estão a aplicação de ondas de tensão devido ao curto e as ondas de tensão impostas pelo sistema em regime permanente propriamente dito. Da composição das ondas de tensão transitória, podem-se destacar dois tipos:

- As componentes transitórias nas fases são que se originam do próprio transitório e por causa do deslocamento do neutro;
- As componentes transitórias devido ao transitório de modificação do valor da tensão no ponto. Para esta situação, o curto pode ser visto como uma onda de módulo igual e polaridade oposta à tensão antes do defeito, de modo que o valor resultante da tensão no ponto da falta seja zero. Para uma melhor visualização destes fenômenos vide as Figuras 6.1 e 6.2

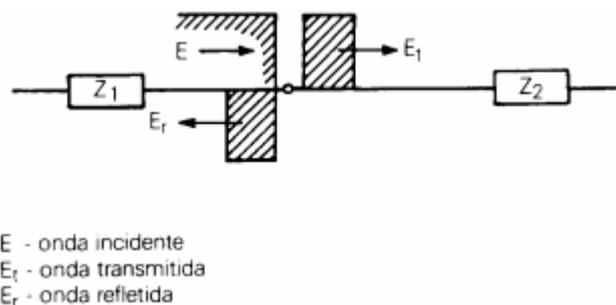


Figura 6.1– Transmissão e reflexão de onda (D'AJUZ, Editada pelo autor).

Sendo E_t e E_r as ondas transmitidas e refletidas, respectivamente. Suas expressões são dependentes das ondas incidentes E , quais sejam:

$$E_t = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} E \quad \text{e} \quad E_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} E$$

onde:

Z_1 – impedância característica por onde a onda chega;

Z_2 – associação de todas as impedâncias características conectadas a Z_1 .

Numa situação em que $Z_2 = 0$, ou seja, um curto circuito, pode obter as seguintes conclusões: $E_t = 0$ e $E_r = (0 - Z_1)/(0 + Z_1)E = -E$, conforme é mostrado na Figura 6.2.

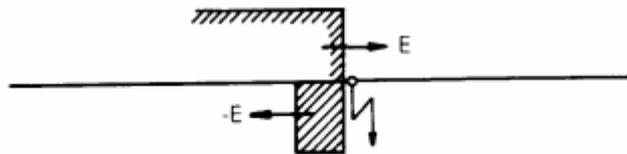


Figura 6.2– Aplicação de curto (D’AJUZ, Editada pelo autor).

A análise da manobra para a eliminação de falta, considerando que esta manobra foi realizada sem retirar a linha de operação (exemplo disto é um curto-circuito no barramento) pode ser feita considerando o circuito da Figura 6.3. O arranjo da Figura 6.3 lustra uma situação em que a chave fecha no momento que a tensão da fonte passa pelo seu valor máximo e o capacitor está descarregado, esta situação é semelhante a extinção do defeito, com a corrente passando pelo zero, através do capacitor.

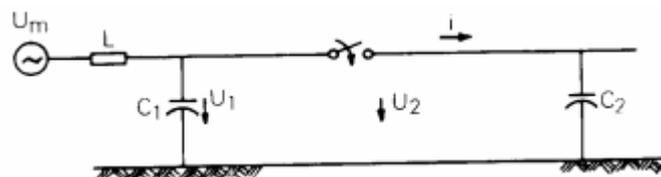


Figura 6.3– Eliminação de falta (D’AJUZ, Editada pelo autor).

A análise da abertura de um disjuntor que opera no sentido de seccionar uma linha na ocorrência da falta pode ser feita de forma análoga à abertura de circuitos capacitivos.

Para a análise da eliminação de falta, é importante observar as sobretensões geradas das aberturas dos disjuntores para a eliminação de qualquer defeito, como no caso específico da eliminação de uma falta elétrica, certo que o máximo valor das sobretensões ocorre não necessariamente no local do defeito, podendo ocorrer em todo o sistema.

Quando um disjuntor opera no sentido de eliminar uma corrente de falta, a magnitude das sobretensões que aparecem no momento da falta, pode ficar acima de 1,7 p.u. e se manifestar tanto nas fases sãs da linha defeituosa, como em linhas ou barras não defeituosas em outros pontos do sistema. Para casos específicos como estes, é importante observar as tensões ao longo de cada pólo do disjuntor, o tempo necessário para ocorrer o valor máximo e a taxa de crescimento das tensões. Estas observações são muito importantes para a especificação dos disjuntores.

Os principais fatores que influenciam no valor das sobretensões quando da aplicação e conseqüente eliminação da falta são:

- Natureza da falta;
- Comprimento da linha de transmissão;
- Grau de compensação da linha de transmissão;
- Grau de aterramento do sistema;
- Local da falta.

6.2 Rejeição de Carga

Rejeição de carga é uma técnica que consiste em desligar de forma seletiva as cargas de um sistema elétrico, com o fim de evitar que todo o sistema entre em colapso devido à incapacidade da geração de produzir energia na freqüência nominal do sistema.

No caso de uma subestação, a proteção de subfreqüência atua desligando os disjuntores e conseqüentemente as linhas que alimentam os consumidores promovendo assim o equilíbrio entre a geração e o consumo.

Quanto às sobretensões devido à rejeição de carga pode-se analisar sob dois pontos de vista: as sobretensões geradas nos primeiros ciclos imediatamente após a rejeição e sobretensões sustentadas que permanecem no sistema, essas geralmente com distorções harmônicas provocadas pela saturação dos elementos não-lineares do sistema como transformadores e reatores.

A magnitude das sobretensões é função dos fatores condicionantes da rejeição, ou seja, se a rejeição é total ou parcial no sistema. As sobretensões originadas da rejeição total possuem magnitude maior e por conseqüência solicitam severamente os equipamentos de proteção da subestação onde se processa a rejeição podendo solicitar outros pontos da rede.

Na ocasião de uma rejeição de cargas, os pára-raios conectados à rede são severamente solicitados de tal forma que apresentam elevados níveis de absorção de energia com descargas sucessivas. Para o estudo da configuração do pára-raios em termos de uma rejeição de carga, deve-se considerar o transitório de sobretensão sustentada.

O transitório inicial decorrente da abertura do disjuntor é da ordem de 1 a 2 ciclos tendo a forma de um surto de manobra. O valor deste surto não é superior aos obtidos em transitórios de correntes de energização e religamento.

Um fator a se preponderar, é que o nível das sobretensões sustentadas originadas à rejeição de carga de um modo geral são maiores do que grande parte das sobretensões sustentadas de outras operações. Caso os pára-raios vierem a atuar, eles deverão ser capazes de atenuar nos ciclos seguintes as sobretensões sustentadas de forma a não causar danos ao equipamento por causa da excessiva absorção de energia.

A análise da integridade do pára-raios pode ser feita através da observação da máxima tensão sustentada e conseqüente verificação da tensão de reseal (maior tensão para a qual o pára-raios tem condições de interromper a corrente subsequente) dos pára-raios. Caso o valor da sobretensão esteja abaixo da tensão de reseal do pára-raios em análise, então este é o equipamento a ser instalado.

Na situação em que após a rejeição de carga segue-se um curto-circuito, as sobretensões nas fases sãs aumentam significativamente, pode-se observar isto através dos gráficos da Figura 6.4.

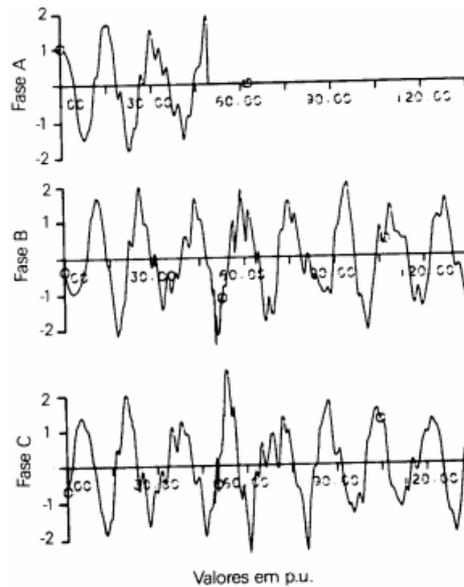


Figura 6.4 – Rejeição de carga seguida de curto circuito monofásico (D’AJUZ, Editada pelo autor).

Para a redução destas sobretensões nas subestações em que elas forem maiores, pode-se lançar mão de resistores de abertura.

Analisando ainda a situação da ocorrência de uma sobretensão seguida de um curto circuito, quando a proteção de um dos extremos da linha atuar abrindo rapidamente, os pára-raios associados devem possuir a capacidade de reseal transitório. Esta característica do pára-raios é imprescindível, sendo comum nos pára-raios modernos providos de “gap”. Os pára-raios providos de “gap” possuem tensão de “reseal” superior à nominal durante os instantes iniciais do surto. Este é um fator importante para análise da adequação do pára-raios.

Além da preocupação que se deve ter com o pára-raios em relação às sobretensões originadas da rejeição de carga, todo o isolamento deve ser verificado quando da ocorrência das solicitações impostas por estas sobretensões.

Com relação aos transformadores, estes são bastante protegidos contra sobretensões transitórias, visto que, possuem pára-raios conectados diretamente em seus terminais. As sobretensões que ocorrem à frequência industrial causam solicitações de efeito térmico, geralmente proveniente de harmônicas devido a natureza não linear dos transformadores, as quais o mesmo deve suportar. Deste modo, um transformador utilizado em transmissões de EAT (Extra Alta Tensão 345kV – 765kV), que é utilizado para a interconexão entre sistemas, dever ser capaz de suportar solicitações térmicas de devido a sobre-excitações originadas por uma rejeição de carga.

Para uma necessidade mais apurada quanto ao estabelecimento do limite de sobre-excitação do transformador, deve-se utilizar a curva da Figura 6.5. Esta é consequência da relação entre a tensão excitação primária (em porcentagem) e o máximo tempo (em minutos) permissível de sobretensão.

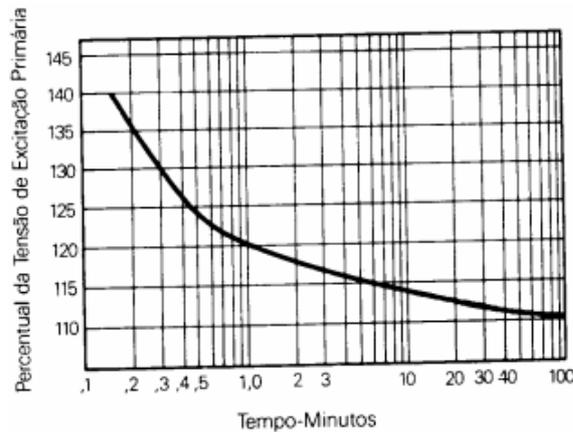


Figura 6.5 – Tensão de Excitação Primária em Função do Tempo Máximo Permissível de Sobretensão (D'AJUZ, Editada pelo autor).

Os valores do eixo da tensão de excitação são considerados como tensão nominal por hertz, ou seja, tensão de excitação nominal em p.u. dividido pela frequência em p.u. de 60Hz aplicada ao enrolamento primário do transformador para qualquer carregamento. Para qualquer operação abaixo da curva não causará perda significativa da vida do isolamento do transformador, por outro lado uma operação acima da curva poderá causar danos irreversíveis ao transformador.

Com relação aos disjuntores, estes podem também sofrer substancialmente com as sobretensões devido à rejeição de carga. O primeiro disjuntor a ser manobrado é aquele que provoca a rejeição de carga, interrompendo assim a corrente de curto-circuito ou a corrente de carga. A ação de interrupção da corrente pelo primeiro disjuntor é normal e não exige cuidados maiores, isso considerando que a tensão de restabelecimento fora corretamente especificada. Porém, para o disjuntor que interrompe a corrente na outra extremidade da linha há o agravante de se estar seccionando uma corrente capacitiva em níveis elevados de tensão e frequência. Uma interrupção deste tipo é mais severa do que a abertura de uma linha em operação normal, portanto deve-se ter os devidos cuidados na especificação do disjuntor para o atendimento deste tipo de solicitação.

Quanto a especificação da tensão que o disjuntor deverá ser capaz de interromper, é de uso comum o valor de 1,5 p.u. para uma corrente capacitiva em uma linha de 400km em vazio (operando sem carga) à frequência de 66Hz.

Como forma de garantir que os disjuntores não operem em tensões superiores a 1,5 p.u., instala-se sistemas de proteção contra sobretensão com valores ajustados para algo em torno de 1,25-1,30 p.u.. Presumindo-se desta forma que os disjuntores não sejam chamados a operar com tensões superiores aos ajustados. O que se deve ter cuidado também é quanto ao tempo de atuação dos relés, juntamente com a separação física dos contatos dos disjuntores. Este tempo não pode ser superior a ponto dos contatos do disjuntor se separarem quando a tensão for superior a 1,5 p.u.. Este tempo juntamente com a progressão da sobretensão deve ser determinado em análise de sistemas com o auxílio de programas de estabilidade.

7. Subestações

Pode-se definir uma subestação (SE) como a disposição organizada de equipamentos de manobra, transformação e também da compensação de reativos, com o fim de gerenciar o fluxo de energia em um sistema de potência, possibilitando a distribuição deste fluxo através de rotas alternativas, compreendendo também os componentes de proteção que tem o fim de detectar os vários tipos de faltas que podem ocorrer no sistema, como também isolar os locais da ocorrência destas faltas.

7.1 Principais Equipamentos Componentes de uma Subestação

Os equipamentos essenciais à constituição das subestações de média, alta e extra alta tensão estão relacionados abaixo:

- Equipamentos de transformação:
 - a. Transformador de força;
 - b. Transformadores de instrumentos:
 - b.1 Transformadores de corrente (TC);
 - b.2 Transformadores de potencial indutivo ou capacitivo (TPI ou TPC).

- Equipamentos de manobra:
 - a. Disjuntores;
 - b. Chaves seccionadoras.

- Equipamentos de para a compensação de reativos:
 - a. Reator shunt;
 - b. Banco de capacitores;
 - c. Compensador síncrono;
 - d. Compensador estático.

- Equipamentos de proteção:
 - a. Pára-raios;
 - b. Relés;

A disposição dos equipamentos dentro de uma subestação sejam eles equipamentos de transformação, manobra ou proteção, segue geralmente a seguinte configuração: primeiramente o pára-raios que está conectado diretamente à linha de transmissão que por sua vez se origina em uma unidade geradora ou outra subestação, depois o transformador de corrente (TC) e logo após o transformador de potencial (TP), as chaves seccionadoras (uma instalada antes e outra depois do disjuntor), o disjuntor, outro pára-raios (para o caso de SE acima de 69kV) e por fim o transformador de potencial. Um desenho esquemático para uma SE de 115/24kV é mostrado na Figura 7.1.

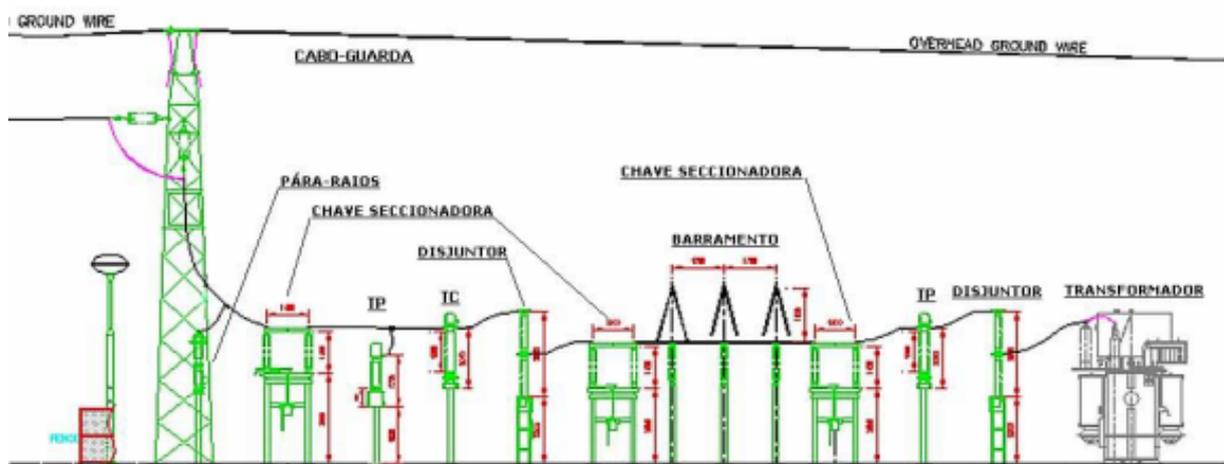


Figura 7.1 – Vista lateral do projeto de uma subestação de 115/24kV

7.2 Equipamentos de Proteção

a. Pára-raios

Os pára-raios são os equipamentos de uma subestação responsáveis pela proteção contra surtos de tensão de origem de descargas atmosféricas ou de operação de manobra. Os pára-raios são responsáveis também pela proteção contra sobretensões na frequência industrial, ou seja, em 60Hz, que por alguma causa anormal pode atingi-la. Um exemplo para uma causa desse tipo é a perda súbita de grandes centros consumidores de carga, que por consequência elevam a tensão do sistema provocando grandes perturbações no sistema. Através da Figura 7.2 é possível visualizar a parte interna de um pára-raios.

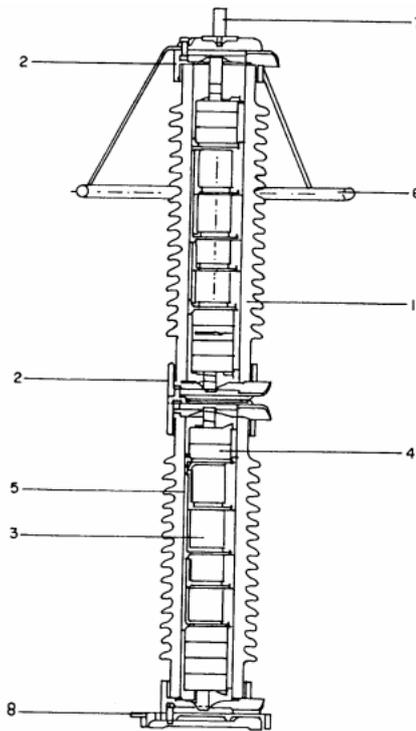


Figura 7.2 – Secção transversal de um pára-raios convencional (BROWN BOVERI).

A indicação numérica no pára-raios mostrado na Figura 8.13 corresponde aos seguintes elementos: 1 – Porcelana, 2 – flange terminal e dispositivo de alívio de pressão, 3 – centelhadores e câmara de extinção, 4 – resistor não-linear, 5 – resistor equalizador, 6 – anel equalizador de potencial, 7 – terminal de aterramento.

Os centelhadores têm a função de sustentar a tensão nominal do sistema, entrar em operação quando um nível de tensão pré-definido e voltar à sua característica de isolante

logo após a dissipação do surto que provocou o disparo. Os resistores não-lineares têm como finalidade a absorção da energia limitando a corrente de surto.

O pára-raios até então descrito refere-se ao construído por carboneto de silício (SiC), um pára-raios equivalente é o que faz uso somente de pastilhas de ZnO (óxido de zinco). O pára-raios de óxido de zinco é tão eficiente quanto o seu antecessor, dada a sua confiabilidade e simplificação.

A função do dispositivo de alívio de pressão é impedir que o pára-raios venha a explodir numa situação em que ele for solicitado por uma sobretenção acima dos valores para os quais ele fora especificado, expelindo assim os gases provenientes de uma excessiva solicitação do mesmo. Com isso impede-se também que outros equipamentos sejam danificados, e até mesmo o risco para pessoas que por ventura estejam nas proximidades na hora da ocorrência seja extremamente remoto. Na Figura 7.3 é mostrado a instalação de um grupo de pára-raios na entrada de um transformador de potência trifásico.



Figura 7.3 – Pára-raios conectado a um dos transformadores da SE Campina Grade II – Chesf

Os pára-raios são utilizados na proteção de equipamentos de um sistema elétrico contra as sobretensões atmosféricas ou de manobra. A finalidade dos pára-raios é utilizar impedir que sobretensões alcancem os demais equipamentos do sistema. Na Figura 7.4 é mostrado um esquema de como o pára-raios atua frente à ocorrência de uma sobretensão.

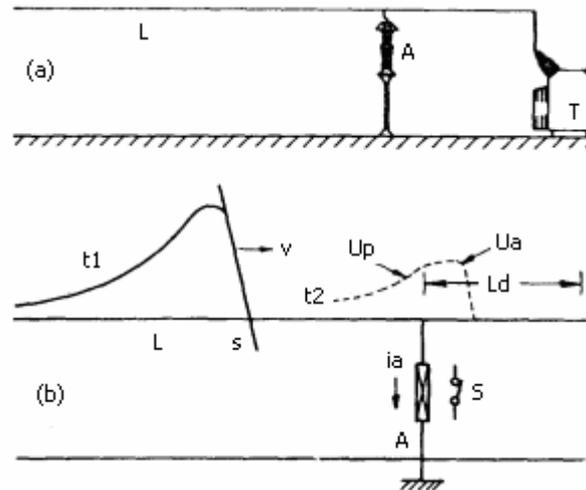


Figura 7.4 – Proteção de um transformador (a) Representação gráfica (b) Diagrama elétrico.

As letras indicativas da Figura 8.14 representam: L – linha de transmissão, A – pára-raios, T – transformador, i_a – corrente de descarga, U_a – tensão de disparo do pára-raios, U_p – tensão residual do pára-raios, t_1 – onda de tensão incidente, t_2 – onda modificada pelo pára-raios, v – velocidade de propagação do surto.

Considere que uma onda de tensão t_1 “viaje” em direção ao transformador T, ao passar pelo pára-raios uma onda de corrente i_a é absorvida por este fazendo com que uma chegue aos terminais do transformador uma onda de tensão t_2 . Supondo que a onda de tensão t_1 seja uma sobretensão atmosférica, no caso descrito acima a amplitude de t_2 não danificará o isolamento do transformador se a distância L_d é suficientemente pequena.

b. Relés

O relé de proteção é um equipamento que tem a finalidade de detectar situações anormais no sistema elétrico por meio de equipamentos auxiliares, atuando diretamente sobre um equipamento ou sistema, retirando de operação os equipamentos ou componentes relacionados com a anormalidade, acionando circuitos de alarme se necessário. De forma contrária, o relé pode também, nas mesmas condições descritas anteriormente, enviar comandos para a energização de equipamentos ou de um sistema.

O fim para o qual o relé se destina pode ser alguns como:

- fazer a medição das grandezas atuantes;
- realizar uma comparação dos valores medidos com os valores dos previamente ajustados;
- “decidir” pela atuação ou não, a depender do resultado da comparação;
- enviar comandos para a operação de disjuntores ou outros relés (no caso, relés auxiliares);
- ao atuar, o relé deve sinalizar a sua operação por meio de indicação visual ou sonora.

O aspecto construtivo de um relé consiste de um componente de operação e uma “trama” de contatos. O componente de operação capta um sinal em forma de corrente ou tensão por meio de transformadores de instrumentos (TC’s e TP’s), faz as devidas análises comparativas do sinal aferido com as grandezas pré-estabelecidas e caso seja necessário o relé envia um sinal de atuação para os correspondentes equipamentos responsáveis pela exata medida corretiva. Caso um equipamento entre em uma situação que caracteriza uma anormalidade quanto à operação do sistema, os contatos do relé mudam de posição provocando o processo para a isolação do elemento por hora em defeito, interrompendo o fluxo de corrente para aquele elemento e de uma forma geral indicando visualmente que operou.

Os relés de proteção apresentam diversas características que particularizam a sua aplicação num determinado sistema, de acordo com os requisitos exigidos. Essas características podem ser classificadas da seguinte forma:

- Quanto à natureza da grandeza atuante:
 - Elétrico;
 - Térmico;
 - Mecânico.
- Quanto ao tempo de operação:
 - Temporizado;
 - Instantâneo;
 - Alta Velocidade.

- Quanto à ligação do elemento sensitivo
 - Primário (conectado diretamente ao circuito de potência);
 - Secundário (conectado aos TC's/TP's).
- Quanto ao princípio de funcionamento
 - Relés de tração eletromagnética: tem sua aplicação tanto em circuitos de corrente alternada como de corrente contínua;
 - Relés de indução eletromagnética: utilizados somente em circuitos de corrente alternada;
 - Relés com elemento térmico: a sua forma construtiva é uma lâmina bimetálica colocada ao lado de um resistor. A passagem de corrente neste resistor irá transmitir calor ao bimetálico, que possuindo um contato móvel na extremidade penderá na direção de um contato fixo na estrutura do relé;
 - Relés estáticos: operam no princípio no funcionamento de circuitos lógicos eletrônicos de estado sólido. São aplicados de maneira idêntica aos relés eletromecânicos;
 - Relés digitais: a tecnologia digital está se tornando a base da maioria dos sistemas de uma subestação, atuando nas funções de proteção, medição, comunicação, proteção e controle. Além das funções de proteção os relés digitais podem ser programados para desempenhar outras tarefas tais como: medição de correntes e tensões dos circuitos. Estas funções são especificadas e executadas por softwares. Outra função importante dos relés digitais é o autodiagnóstico (autoteste) que faz com que o aparelho realize uma supervisão contínua de seu hardware e software, identificando anormalidades que venham a surgir e que possam ser reparadas antes que o relé opere incorretamente. Pela Figura 7.5 é possível visualizar um relé digital fabricado pela Schweitzer Engineering Laboratories – SEL.



Figura 7.5 – Relé digital (retirado de www.selinc.com.br/produtos)

Logo abaixo se têm uma citação e breve descrição dos tipos de relés mais utilizados:

- Sobrecorrente instantâneo (50): atua quando a magnitude da corrente excede certo limite, operando em poucos ciclos;
- Sobrecorrente temporizado e instantâneo (51): atua no momento em que o valor da corrente exceder o valor de referência após um tempo pré-determinado;
- Sobretensão (59): opera quando a tensão excede determinado limite;
- Subtensão (27): atua quando o valor da tensão fica abaixo de certo valor;
- Diferencial (87): pode ser diferencial aplicado a transformador, gerador, linha de transmissão e barramento. Atua comparando a corrente em posições diferentes;
- Direcional (67): atua no momento em que o fluxo de corrente está em um sentido determinado e seu valor excede certo limite;
- Relé de bloqueio (86): atua após o comando de outros relés. Atua bloqueando a energização de outros equipamentos;
- Relé de religamento (79): atua comando o religamento de um disjuntor;
- Relé auxiliar (50X, 59X, etc.): quando opera, aciona alarmes, indicações ou completa outras operações;
- Relé de pressão (63): atua quando ocorre defeitos internos em transformadores ou quando o nível de pressão está abaixo do estabelecido em equipamentos encapsulados;

- Relé de distância (21): opera em situações de defeitos em linhas de transmissão de alta tensão;
- Relé de subfrequência (81): este relé atua quando a frequência cai a um valor previamente ajustado nele;
- Relé de sincronismo (25): atua permitindo o fechamento do disjuntor no momento em que os pólos do disjuntor estão com magnitude, fase e frequência bastante aproximados.

8. Proteções em Subestações

8.1 Conceito

Um sistema de proteção é uma conjunção de dispositivos com a finalidade de “perceber”, localizar e comandar a extinção de um curto circuito ou qualquer outro fenômeno que venha a por um sistema elétrico em operação anormal, reduzindo tanto as possíveis avarias que possam ocorrer os equipamentos como o tempo de indisponibilidade dos equipamentos que foram desligados por consequência da condição de anormalidade.

Um sistema de proteção consiste, além dos relés de proteção, de outros subsistemas que participam do processo de remoção da falha. Esses subsistemas são mostrados na Figura 8.1.

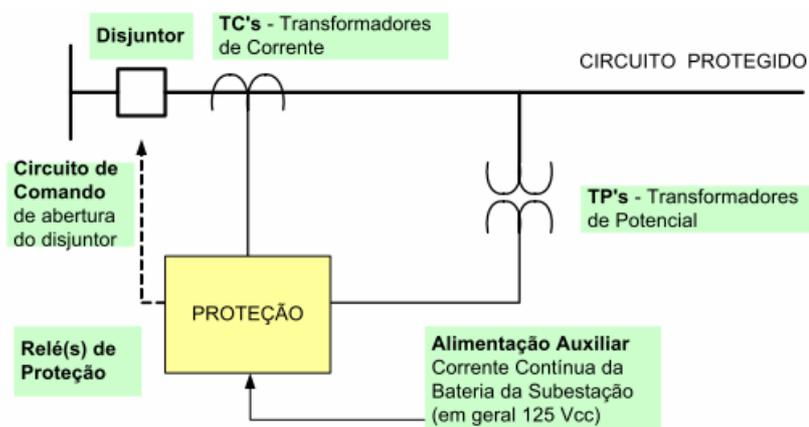


Figura 8.1 – Esquema de um sistema de proteção.

Um sistema de proteção mais eficaz, quanto melhor apresentar os princípios como:

- Seletividade: é a capacidade do sistema de proteção de prover a máxima continuidade do serviço do sistema protegido com um mínimo de desconexões para a isolação da falta;
- Confiabilidade: é a capacidade do relé ou sistema de proteção atuar de forma correta quando necessário e evitar operação desnecessária;
- Velocidade: é a garantia do menor tempo de duração da falha, com o mínimo de danos ou instabilidade no componente ou sistema protegido;
- Economia: é a prática de se ter a máxima proteção com menor custo, considerando sempre o aspecto custo x benefício que é a essência da engenharia;
- Simplicidade: é a utilização mínima de equipamentos e circuitos na execução da proteção;
- Mantenabilidade: é a capacidade da proteção permitir manutenção rápida e precisa, reduzindo-se ao máximo o tempo fora de serviço e os custos de manutenção;

A filosofia geral da proteção de um sistema elétrico é dividi-lo em zonas de proteção tal forma que, quando da ocorrência de uma anormalidade, haja o mínimo de desligamentos possível, preservando o máximo de continuidade dos serviços.

O sistema é dividido em zonas de proteção para:

- Geradores
- Transformadores
- Barras
- Linhas de transmissão e subtransmissão
- Dispositivos e sistemas de compensação reativa
- Circuitos de distribuição
- Transformadores de distribuição
- Motores
- Outras cargas

A Figura 8.2 mostra um desenho esquemático de um sistema elétrico dividido em zonas de proteção.

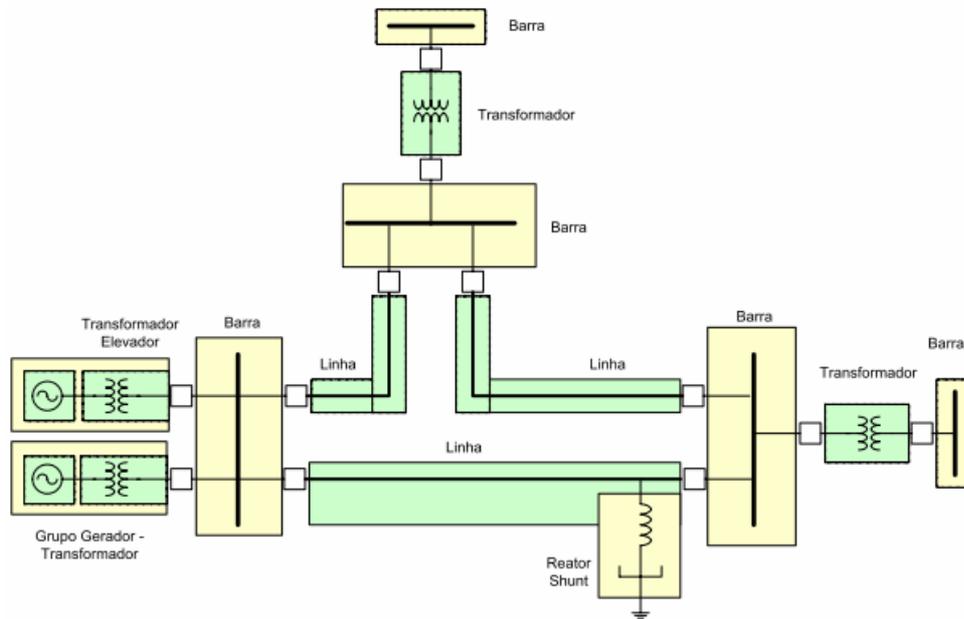


Figura 8.2 – Sistema elétrico dividido em zonas de proteção.

A separação das zonas de proteção se dá por meio da localização dos disjuntores e transformadores de corrente que alimentam os relés de proteção.

8.2 Proteção Principal e Proteção de Retaguarda

Com vista a garantir o requisito básico de confiabilidade para o sistema de proteção, existe a necessidade na maioria dos casos, a existência e uma segunda proteção, pelo menos para a detecção da mesma falha do componente protegido.

Deste aspecto resultam os conceitos de proteção principal e proteção de retaguarda.

a. Proteção Principal

Proteção principal é aquela que por especificação e escolha de projeto, tem condição de detectar uma anormalidade para a qual foi concebida, no componente protegido, contemplando os requisitos de seletividade, confiabilidade e velocidade.

A depender do componente a ser protegido, o projeto pode contemplar uma segunda proteção principal, que no caso de serem iguais são denominadas “duplicatas” ou

“primária+alternada”. O que caracteriza o fato de serem “principais” é o atendimento aos requisitos básicos de velocidade, seletividade e confiabilidade.

b. Proteção de Retaguarda

A proteção de retaguarda é aquela que por especificação e escolha de projeto, tem a finalidade de ser a segunda ou terceira proteção a detectar uma mesma anormalidade em um dado componente de sistema de potência, atuando o respectivo disjuntor quando da falha da proteção principal.

Para a garantia da seletividade a proteção de retaguarda utiliza temporização intencional para que se aguarde a atuação da proteção principal. Apenas no caso de falha da principal, após uma temporização ajustada, é que atuaria a proteção de retaguarda.

Uma proteção de retaguarda pode ser instalada no mesmo local da proteção principal. Neste caso a proteção é chamada de proteção de “retaguarda local”. Ou pode estar instalada em outro componente adjacente àquele original. Neste caso é chamada de “retaguarda remota”. A Figura 8.3 promove uma melhor visualização das configurações acima descritas.

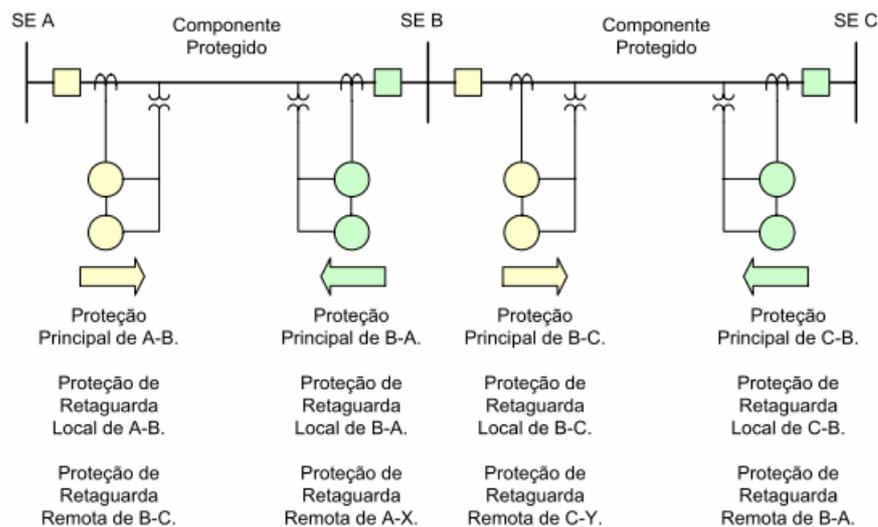


Figura 8.3 – Conceito de proteção principal e proteção de retaguarda.

Há em torno de 98 aparelhos de proteção e manobra e um número bastante razoável de funções de proteção para sistemas elétricos, que podem ser utilizados em diversos equipamentos dentro e fora das subestações, discorrer sobre cada um deles tomaria uma dimensão muito maior em termos de conteúdo para a realização deste estudo. Portanto me

aterei a descrever brevemente sobre a função diferencial de transformadores de potência, por ser este o principal e geralmente o mais caro equipamento de uma subestação como também a função diferencial uma das mais utilizadas na proteção de equipamentos.

8.3 Proteção Diferencial

A proteção diferencial tem como princípio a comparação entre grandezas que entram no circuito protegido e grandezas de mesma natureza que saem do circuito protegido.

A função diferencial é utilizada na proteção de transformadores, equipamentos de compensação reativa, máquinas rotativas, sistemas de barramentos, e linhas de transmissão. Pela Figura 8.4 mostra um diagrama para o princípio da proteção diferencial.

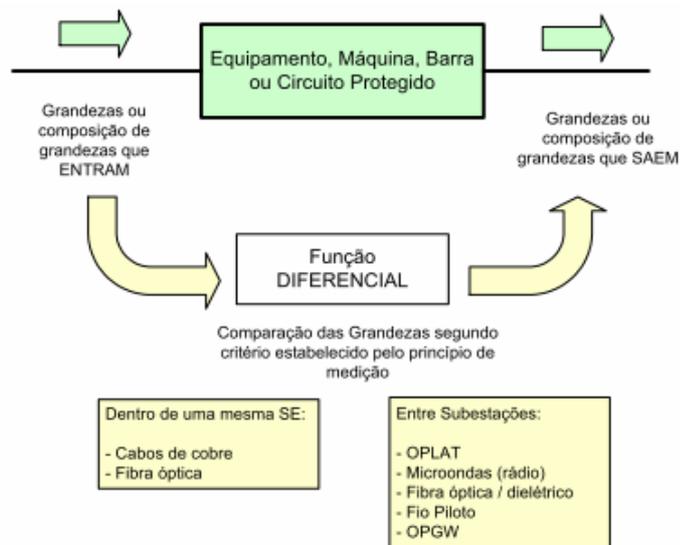


Figura 8.4 – Princípio da Proteção Diferencial

Para que se tenha uma boa proteção diferencial os seguintes requisitos devem ser satisfeitos:

- Os efeitos dos erros de precisão dos TC's e TP's auxiliares utilizados para conexão da proteção;
- A estabilidade deve ser mantida, ou seja, não atuar para curto-circuito externo à área protegida, ainda que ocorra a saturação do TC;

- Quando este tipo de proteção estiver aplicado a proteção de transformadores de potência, a estabilidade deve ser mantida para correntes de magnetização transitória;
- A atuação para curto-circuito interno deve ser rápida, mesmo para aquelas faltas de baixa corrente.

a. Tipos Básicos de Proteção Diferencial

Simple Balanceo de Corrente

Um relé de sobrecorrente que medisse apenas a corrente diferencial seria chamada de: simples balanço de corrente. A corrente diferencial seria a soma de todas as correntes medidas com base numa referência única:

$$I_{\text{Diferencial}} = \sum(I_A + I_B + I_C + \dots + I_X)$$

Um fato a ser considerado é mesmo em condições normais de carga, sem curto-circuito, haveria a corrente diferencial devido a erros nos TC's. Considerando I_A como sendo a corrente que entra num trecho protegido e I_B a corrente que sai, a corrente diferencial I_d existiria em decorrência do já exposto acima (erros de TC's).

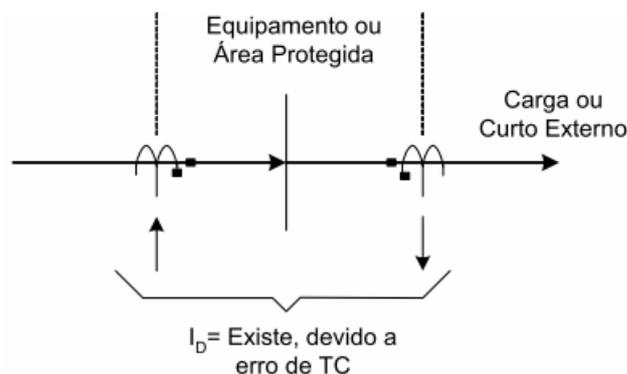


Figura 8.5 – Corrente Diferencial

Para o caso das condições normais de operação pode não ser muito grande, mas numa condição de curto circuito esse erro será maior.

Desta forma o relé de sobrecorrente que mediria I_d teria de ser ajustado com um valor alto, o que impediria que a proteção tivesse sensibilidade para curtos internos de baixa corrente.

Esse esquema de simples balanço de corrente fora utilizado no início da tecnologia de proteção ou adotado apenas em esquemas improvisados na falta de outros melhores.

Diferencial Percentual

Este tipo de proteção diferencial tem a finalidade de permitir uma proteção sensível para curtos-circuitos internos à área protegida, apresentado ao mesmo tempo uma boa estabilidade para curtos-circuitos externos, mesmo com erros de transformação no TC's (em condição de curto pode chegar a 10% cada TC para correntes elevadas) e até com certo grau de saturação de TC. O princípio é ilustrado na Figura 8.6.

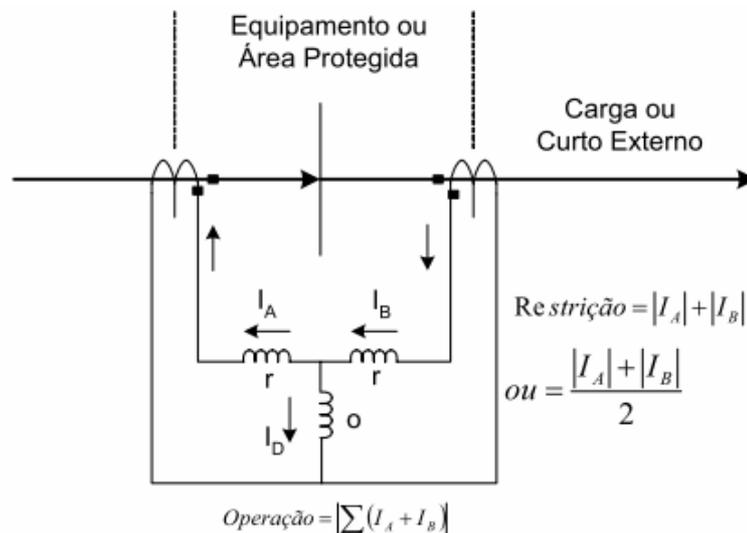


Figura 8.6 – Esquema de proteção diferencial percentual

Para melhor esclarecimento considere um relé eletromecânico, as correntes $|I_A| + |I_B|$ nas bobinas de restrição (r) tendem a restringir a atuação do relé. A corrente diferencial ($I_A + I_B$) pela bobina de operação (o) tende a operar o relé e é ajustado num valor percentual com relação à restrição.

Para um curto externo, com grande corrente diferencial, a restrição também seria grande, com o valor percentual da corrente diferencial não atingindo o valor de atuação. Para um curto interno, a restrição continuaria grande, mas percentualmente a corrente diferencial seria grande, e a proteção atuaria.

O princípio diferencial percentual é muito utilizado para proteção de todos os tipos de equipamentos e também para barras.

Esse princípio que era tradicionalmente implementado para as proteções eletromecânicas e estáticas, continua sendo implementado para as proteções de tecnologia digital.

O uso da proteção diferencial num relé digital, a implementação é feita comparando-se através de algoritmos, a soma dos módulos da corrente como grandeza de restrição e o módulo da soma das correntes como grandeza diferencial. Muitas implementações podem ser feitas através dos algoritmos e filtragens, buscando sempre a estabilidade para curtos externos e sensibilidade para curtos internos ao equipamento protegido. Numa proteção digital também é possível alterar a inclinação da característica percentual para correntes menores (menos erros nos TC's).

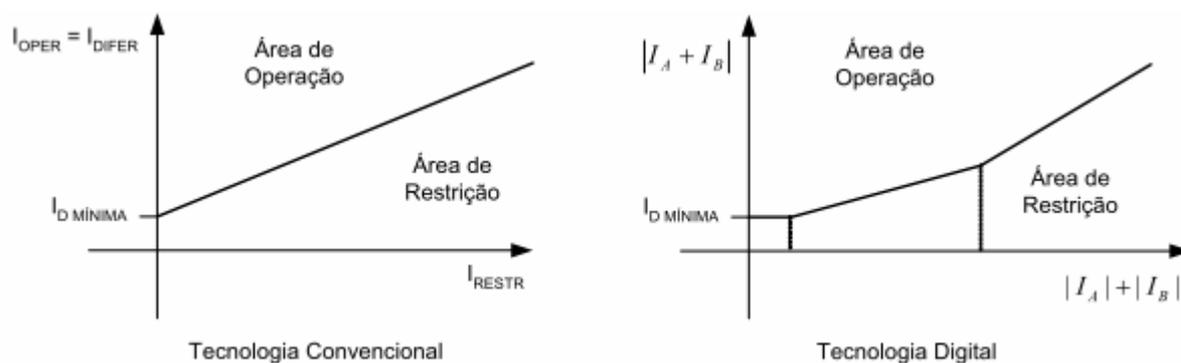


Figura 8.7 – Característica da proteção diferencial percentual

Diferencial de Alta Impedância

A proteção de alta impedância é indicada para barramentos e equipamentos com TC's onde não há transformação de tensão. É aplicada onde há a possibilidade de saturação completa de TC e se deseja, mesmo assim, estabilidade da proteção diferencial para curto-circuito externo a área protegida.

Seu princípio de funcionamento se baseia nos seguintes princípios:

- Quando o TC está totalmente saturado, o seu circuito secundário pode ser representado por um valor resistivo, sem imposição de corrente pelo seu lado primário;
- A corrente diferencial resultante da situação percorre o circuito diferencial e também o circuito secundário desse TC saturado;

Nessas condições, haveria uma divisão de corrente, em circuitos resistivos. A Figura 8.8 elucida melhor a argumentação anterior.

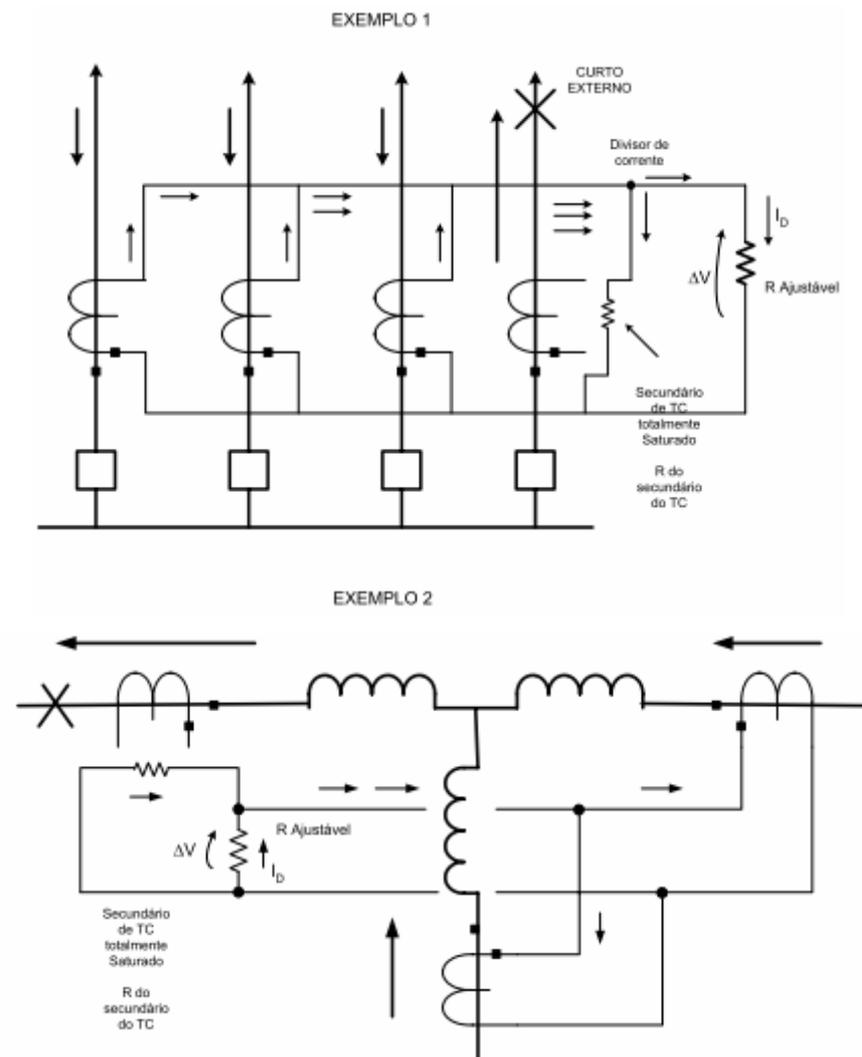


Figura 8.8 – Princípio da Proteção de Alta Impedância

Instala-se uma resistência ajustável no circuito diferencial, de modo que a tensão através desse circuito diferencial (resistência+relê) tenha um determinado valor para um TC totalmente saturado como mostrado na Figura 9.13.

Se a proteção for ajustada para operar com valor $> \Delta V$, então ele será estável para curto externo, mesmo com um TC totalmente saturado. Para ajuste dessa proteção há necessidade de se conhecer:

- Valor das resistências dos cabos secundários dos TC's até a proteção (adota-se a maior resistência);
- Valor da resistência do secundário do TC (valor de fábrica);

Para curto interno a área protegida, a possibilidade de saturação de TC é pequena. Então haverá grande corrente diferencial e a tensão será sempre maior que o ΔV ajustado. O circuito diferencial é mostrado na Figura 8.9.

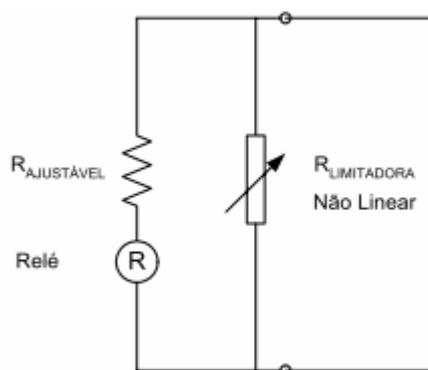


Figura 8.9 – Circuito Diferencial de Alta Impedância

A finalidade da resistência não linear, em paralelo com o circuito diferencial, é proteger o circuito quando ocorrer elevadas tensões ΔV para curtos internos ao circuito protegido, limitando a tensão através do circuito.

Esse tipo de proteção é muito utilizado para proteção de barras e também de reatores ou para proteção de enrolamentos.

8.4 Proteção de Transformador (Função 87T) – Conexões e Polaridades

A proteção diferencial percentual é basilar na proteção de transformadores de potência acima de 5000kVA.

Este tipo de proteção em transformadores possui um caso específico em que há a comparação das correntes medidas em níveis de tensão diferentes e com defasamentos introduzidos pelo tipo de conexão do transformador protegido. Portanto as correntes devem

ser devidamente condicionadas antes da medição da diferença entre as correntes de um lado e do outro.

Alguns aspectos devem ser considerados:

- As correntes primárias em ambos os lados dos transformadores são inversamente proporcionais aos respectivos níveis de tensão;
- Uma conexão estrela-triângulo introduz defasamento de $+30^\circ$ ou -30° entre as tensões do lado primário e do lado secundário.

Utiliza-se TC's acrescidos ou não de TC's auxiliares com relações de transformação diferentes e escolhidas de tal modo que compensem a relação de transformação do transformador. Utilizam-se conexões de TC's ou TC's auxiliares que compensem o defasamento introduzido pelo tipo de conexão do transformados protegido.

Área Protegida

A área de proteção neste caso é determinada pelo TC's que alimentam a proteção diferencial:

- Proteção Diferencial Ampla: alimentada por TC's de pedestal externos ao transformador. A área de proteção engloba o transformador em si, chaves seccionadoras e conexões externas até os TC's;
- Proteção Diferencial Curta: alimentada por TC's das buchas do transformador protegido. A área de proteção engloba apenas o transformador em si.

Estabilidade para Curto-Circuitos Fase-Terra Externo

A Figura 9.14 mostra um exemplo de conexão de proteção diferencial para um transformador de potência Delta-Estrela Aterrada que é posto em análise para o caso de um curto-circuito fase-terra externo à área protegida. A proteção deve permanecer estável.

Observa-se que os TC's auxiliares estão com polaridades e conexões exatamente iguais aos do transformador de potência protegido. Isso permite que, quando

ocorre um curto-circuito fase-terra externo à área protegida, a proteção diferencial tenha correntes iguais em módulo e ângulo de fase, sendo comparadas.

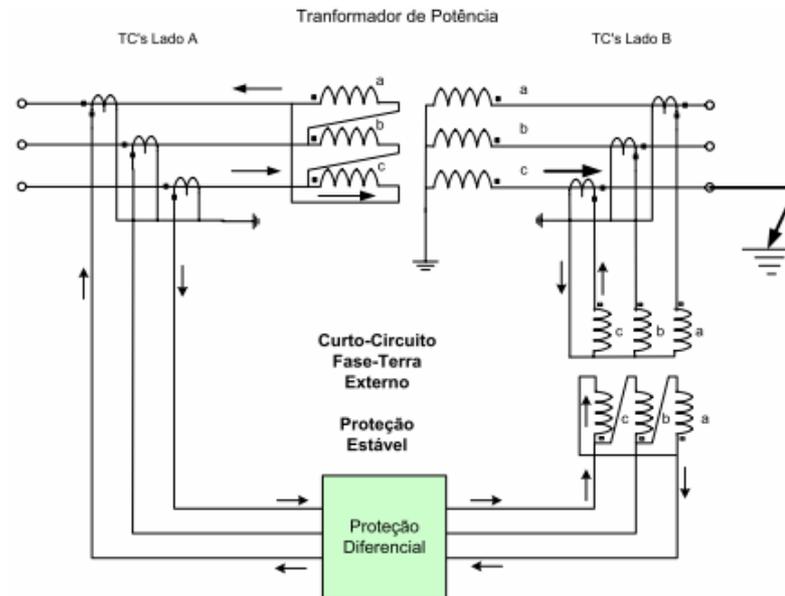


Figura 8.10 – Representação para uma proteção diferencial num transformador delta-estrela com um curto-circuito monofásico.

Bloqueio da Corrente de Seqüência Zero

O uso de TC's auxiliares no lado secundário com polaridade e conexões exatamente iguais ao do transformador de potência protegido permite a estabilidade para qualquer tipo de curto-circuito externo.

Essa providência pode ter outro tipo de interpretação quando se analisa a situação de um curto-circuito fase-terra, externo, em termos de componentes simétricas.

O mesmo caso anterior pode ser representado através de componentes simétricas como mostra a Figura 8.11.

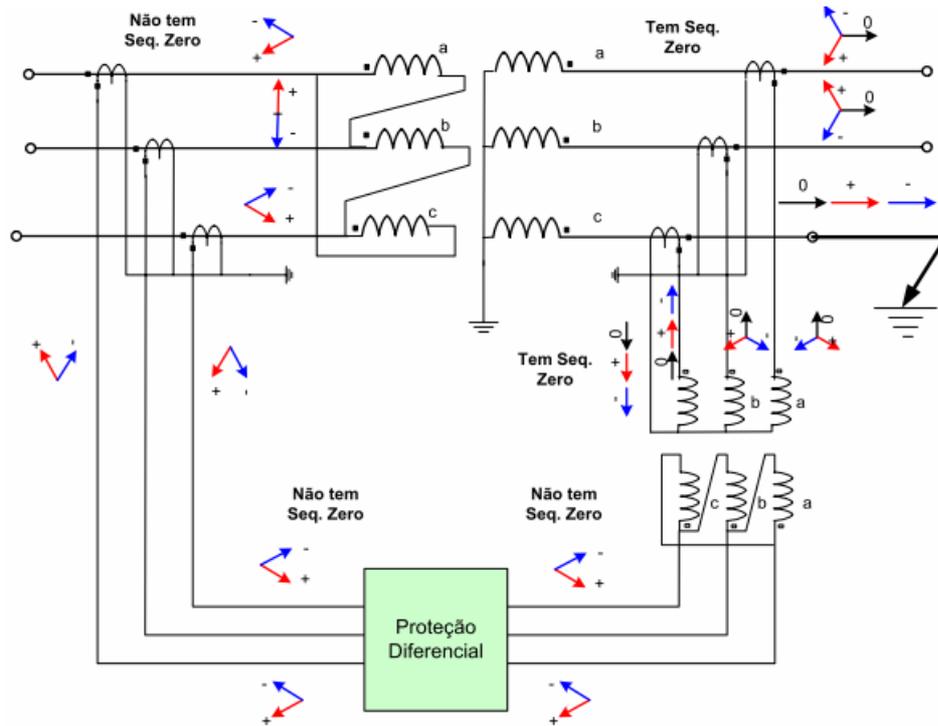


Figura 8.11 – A conexão Delta dos TC's Auxiliares Bloqueia a Seqüência Zero.

Pode-se constatar que em termos das componentes simétricas que, da mesma maneira que ocorre para o transformador de potência, a conexão delta nos TC's é um circuito aberto para a componente de corrente de seqüência zero.

No transformador de potência não há corrente de seqüência zero do lado externo ao delta. Desta forma, as correntes que chegam à proteção diferencial através dos TC's do lado A não possuem componente de seqüência zero.

Para que não chegue corrente de seqüência zero na proteção diferencial pelo lado B do transformador, deve haver um delta no lado B do transformador, seja nos TC's principais seja nos TC's auxiliares. Caso contrário não haverá estabilidade para a proteção diferencial para curtos à terra externos ao transformador.

Uma ação prática quanto à instalação dos TC's é que no lado delta do transformador de potência esses TC's devem ser conectados em estrela aterrada. E no lado estrela aterrada do transformador de potência tem que haver uma conexão delta no circuito dos TC's.

Outra regra prática é que através dos TC's principais ou através dos TC's auxiliares, deve-se representar no circuito dos TC's (lado secundário) a mesma conexão com as mesmas polaridades do transformador de potência protegido (lado primário).

9. Conclusões

Neste trabalho os tipos de faltas elétricas foram estudados sob os aspectos de como elas podem ocorrer, suas causas, conseqüências para os equipamentos pertencentes a uma subestação e para o sistema elétrico como um todo.

Quando uma falta elétrica assimétrica ocorre em uma parte do sistema, quer seja numa subestação ou fora dela, as grandezas como tensão e corrente passam a se comportar de forma anômala provocando o aparecimento de componentes de seqüência que podem prejudicar o correto funcionamento dos equipamentos, quer estejam ligados direta ou indiretamente ao sistema de transmissão ou distribuição. A exemplo disto podem-se citar as componentes inversa (seqüência negativa) e homopolar (seqüência zero), que fazem com que o campo girante de máquinas elétricas de qualquer tamanho sofra uma espécie de frenagem tentando parar o rotor, provocando assim um aumento da corrente e conseqüentemente o superaquecimento dos enrolamentos constituintes do mesmo.

As faltas elétricas têm sua origem desde a queda de uma linha de transmissão ou distribuição que esteja alimentando alguma carga, como também de fatores atmosféricos, manobras nos equipamentos do sistema ou até mesmo um galho de árvore que possa por alguns instantes servir de condutor entre uma linha e a terra, sendo este um caso que pode ocorrer em sistemas de distribuição.

O conhecimento das sobretensões no sentido de como elas ocorrem, e a sua causa é de grande importância para um sistema, tanto para a especificação dos seus equipamentos, como para o fornecimento de subsídios para a coordenação de isolamento das linha e subestações.

O domínio das normas para o projeto, execução e funcionamento de uma subestação é de suma importância para o bom funcionamento de todo o conjunto, pelo fato que um defeito que por ventura venha a ocorrer (a depender do equipamento) pode causar danos aos demais elementos constituintes e até mesmo se propagar para fora da subestação.

Como mencionado anteriormente, pela quantidade de aparelhos de proteção e manobra e um número bastante razoável de funções de proteção para sistemas elétricos, que podem ser utilizados em diversos equipamentos dentro e fora das subestações, discorrer sobre cada um deles tomaria uma dimensão muito maior em termos de conteúdo para a realização deste estudo. Portanto me ative a descrever sobre a proteção diferencia dos transformadores de potência pelas razões também já citadas.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, C. A. S... [et. Al.]. Proteção de Sistemas Elétricos. Rio de Janeiro: Ed. Interciência: Light, 2005.

CAMINHA, Amadeu Casal. Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos. São Paulo: Edgard Blücher, 1977.

COSTA, E. G. Gerações de Alta Tensão. Campina Grande: Ed. da Universidade Federal de Campina Grande.

D'AJUZ, A... [et. Al.]. Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão. Furnas: Ed. da Universidade Federal Fluminense, 1985.

GUERRA, F. C. F; Araújo L. A.; Medeiros L. D. C. Correntes Transitórias em Transformadores de Potência. Campina Grande: Ed. da Universidade Federal de Campina Grande.

GUERRA, F. C. F. Proteção de Sistemas Elétricos. Campina Grande: Ed. da Universidade Federal de Campina Grande, 1992.

KINDERMANN, Geraldo. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência: Volume 1. Florianópolis: Ed. do Autor.

MAZOMO, P. K., Proteção de Sistemas Elétricos.

MAMEDE FILHO, J., Manual de equipamentos elétricos, LTC, 2005.

ROSSI, R. Subestações Elétricas de Alta Tensão: Itajubá, 2004.

Duailibe, P. Subestações: Tipos, Equipamentos e Proteção. CEFET Celso Suckow da Fonseca, 1992.

Schweitzer Engineering Laboratories, Comercial Ltda.

Stevenson Jr., W. D. Elementos de Análise de Sistemas de Potência: McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1974.