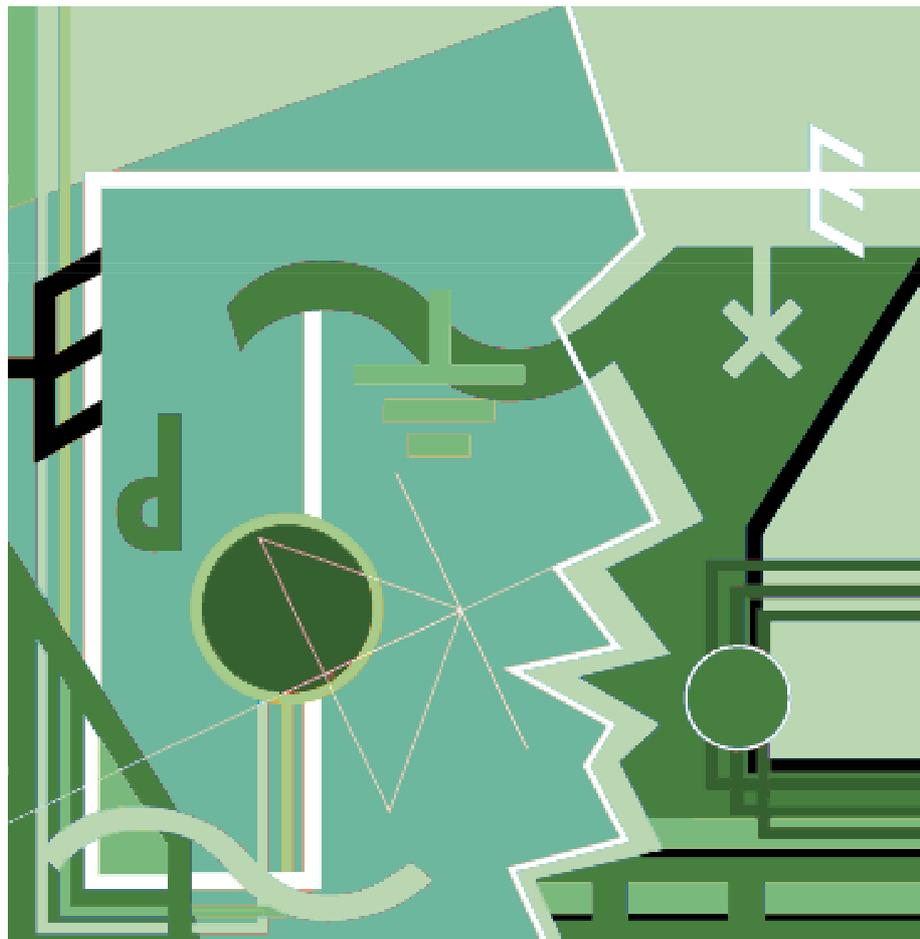


Programa de Formação Técnica Continuada

Os Efeitos dos Curtos-Circuitos



Merlin Gerin

Modicon

Square D

Telemecanique

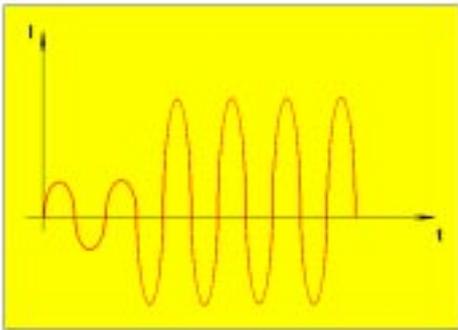
Schneider
 **Electric**

Índice

1.	Introdução	2	9.	Cálculo das correntes de curtos-circuitos na baixa tensão	8
2.	As causas dos curtos-circuitos	2	9.1	Corrente nos terminais secundários do transformador	8
3.	Os efeitos mecânicos	3	9.1.1	Caso de um único transformador	8
4.	O dimensionamento dos barramentos	3	9.1.2	Caso de vários transformadores em paralelo em um barramento	8
5.	Os contatos	5	9.2	Corrente de curto-circuito trifásico em um ponto qualquer da instalação	8
6.	Os transformadores	6	9.2.1	Método de cálculo de ZT	8
7.	O efeito térmico	6	9.2.2	Determinação da impedância da rede de alta tensão (AT)	9
8.	Dispositivos de proteção	7	9.2.3	Impedância dos transformadores	8
8.1	Generalidades	7	9.2.4	Disjuntores	9
8.2	Valores nominais	7	9.2.5	Barramentos	9
			9.2.6	Condutores dos circuitos	9
			9.2.7	Motores	9
			9.2.8	Curtos de alta resistência	9

1. Introdução

Um curto-circuito é uma ligação de baixa impedância entre dois pontos a potenciais diferentes. Essa ligação pode ser metálica quando se diz que há um curto-circuito franco ou por um arco elétrico, que é a situação mais comum; uma situação intermediária é a dos curtos causados por galhos de árvores ou outros objetos que caem sobre as linhas. Há nesse instante uma rápida elevação da corrente atingindo valores, em geral, superiores a 10 vezes a corrente nominal do circuito.



Em alguns casos, como em circuitos de distribuição longos, a corrente de curto-circuito pode ser da ordem da corrente de carga, o que exige técnicas especiais para sua identificação (são os chamados curtos-circuitos de alta impedância).

Com a elevação da corrente, surgem esforços mecânicos entre os condutores ou entre componentes dos equipamentos (são os chamados efeitos mecânicos) e aquecimentos dos condutores ou das partes condutoras dos equipamentos (são os chamados efeitos térmicos).

No caso dos curtos-circuitos através de arcos elétricos podem ocorrer ainda explosões e incêndios. Se não houver uma pronta atuação da proteção, os outros curtos-circuitos também podem dar origem a incêndios e explosões (que às vezes são denominados efeitos explosivos).

Vamos nos restringir aqui aos efeitos térmicos e mecânicos.

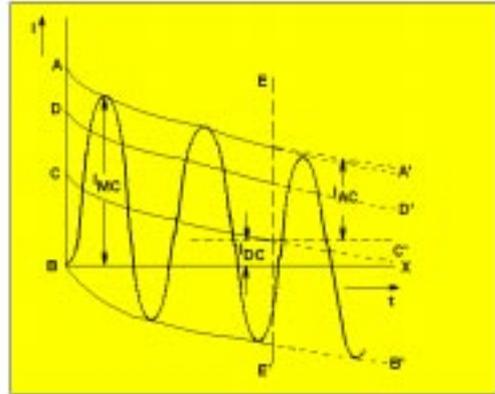
Como regra geral de proteção nas médias e altas tensões, considera-se que os efeitos mecânicos devem ser suportados pelos equipamentos e faz-se a proteção contra os efeitos térmicos.

Para as baixas tensões (em alguns casos também para as médias tensões) foram desenvolvidos equipamentos de proteção limitadores (que cortam a corrente de curto antes de ela atingir o primeiro valor de crista) que conseguem proteger também contra os efeitos mecânicos.

Os barramentos, condutores e equipamentos das instalações elétricas e seus sistemas de proteção precisam ser dimensionados levando-se em conta os maiores valores das correntes de curto circuito que podem ocorrer em cada parte do circuito.

Sempre que houver aumento da capacidade geradora, os

cálculos precisam ser refeitos. Em alguns casos é possível, economicamente, ao invés de redimensionar os equipamentos e barramentos, introduzir reatores que limitam a corrente de curto-circuito deixando-a no valor anterior. Esse artifício é usado geralmente pelas concessionárias que instalam reatores de núcleo de ar na saída das subestações (SE) sempre que há aumento da capacidade de geração ou interligação com outros sistemas de geração.



No instante do curto-circuito a corrente sobe rapidamente atingindo o valor de crista e vai em seguida diminuindo exponencialmente, passando pelos valores sub-transitório e transitório para atingir, depois de vários ciclos, o valor permanente de curto-circuito.

Neste instante começa a ser mais importante o efeito térmico: os condutores ou partes condutoras dos equipamentos têm suas temperaturas aumentadas podendo sofrer alterações na sua estrutura ou deterioração de sua isolação, conforme o caso. Os valores das correntes serão determinados pela f.e.m. dos geradores e pelas impedâncias (principalmente as reatâncias dos condutores e equipamentos) entre os geradores e o ponto de curto. Os motores que passam a funcionar como geradores contribuem para aumentar a corrente e os transformadores, reatores e condutores para reduzi-la.

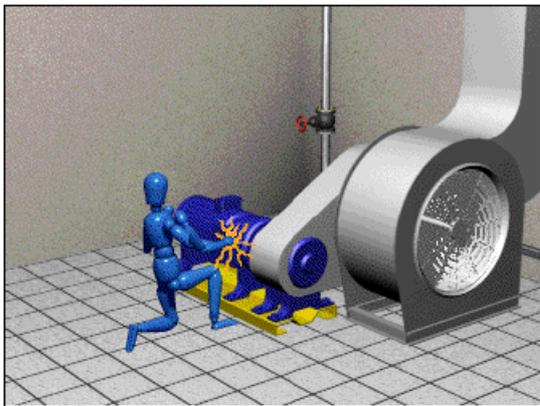
Convém frisar que o valor da corrente de curto-circuito não depende das cargas de uma instalação mas somente da fonte, sendo possível que uma indústria de pequeno porte instalada próximo a uma grande SE (subestação) ou usina, necessite de disjuntores de maior capacidade de interrupção que uma indústria de maior porte, situada a maior distância da SE.

2. As causas dos curtos-circuitos

Os curtos-circuitos são causados por uma falha da isolação sólida, líquida ou gasosa que sustenta a tensão entre condutores ou entre condutores e terra; pode ser também causada por uma redução da distância entre os condutores (ou entre condutores e terra).

A falha da isolação, por sua vez, pode ser motivada por:

- danos mecânicos - quebra de isoladores, quebra de suportes, queda de poste, etc.,
- uso abusivo - exigindo de um equipamento potência maior que a nominal provoca-se uma deterioração mais ou menos rápida da isolação que trabalhará a uma temperatura mais alta que a de projeto,

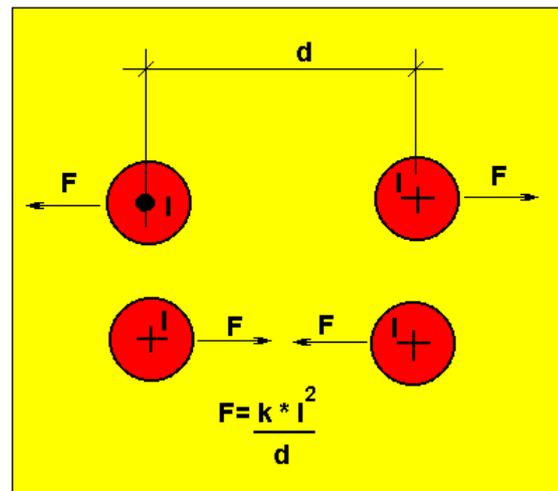


- umidade - isolantes porosos (orgânicos e inorgânicos) apresentam uma redução rápida da sua rigidez quando absorvem umidade (é o caso do óleo, do papel, da fenolite, da porcelana porosa usada em baixa tensão, do papelão, etc.)
- descargas parciais - as isolações sólidas sempre apresentam alguns vazios no seu interior. Sob ação do campo elétrico surgem nesses vazios descargas que por vários mecanismos (erosão, corrosão, arvorejamento) vão mais ou menos lentamente reduzindo a rigidez dielétrica até sua perfuração (o tempo pode ser de dias, semanas, meses ou anos),
- sobretensões - dois tipos de sobretensões podem levar a uma perfuração da isolação: as de manobra (ou internas), que ocorrem quando se efetua um desligamento (voluntário ou provocado) ou um ligamento de um circuito, e as atmosféricas que surgem nos condutores de um circuito (em baixa, média ou alta tensão) quando cai um raio nas proximidades ou diretamente nas linhas do circuito.

3. Os efeitos mecânicos

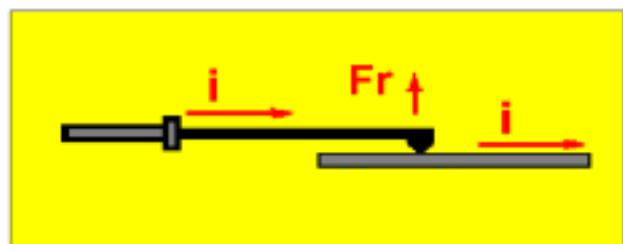
São dois os princípios que regem os efeitos mecânicos que interessam ao dimensionamento de barramentos e equipamentos:

1. Condutores paralelos imersos em campo magnético e percorridos por correntes ficam submetidos a forças diretamente proporcionais ao produto das correntes e inversamente proporcionais à distância entre eles.



Se for a mesma corrente que passa pelo condutores de ida e retorno da corrente a força será proporcional ao quadrado da corrente.

2. No ponto de contato entre dois condutores em que haja mudança na direção do percurso da corrente, surge uma força de repulsão que tende a afastar as duas peças e que é proporcional à intensidade da corrente e inversamente proporcional à distância entre eles.



4. O dimensionamento dos barramentos

Para o dimensionamento dos barramentos das subestações e escolha dos isoladores que os suportem, os projetistas utilizam-se da relação (1):

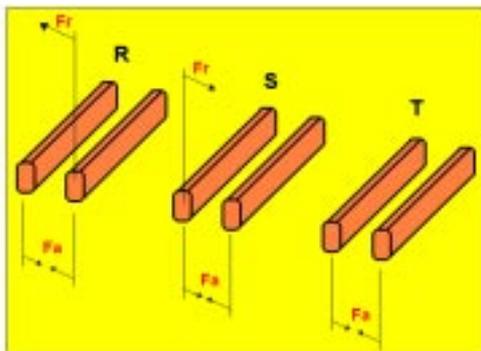
$$F = \frac{k \cdot k' \cdot I^2 \cdot 10^{-6}}{d} \text{ kg/m}$$

Onde I é o valor eficaz da componente alternada inicial; d é a distância entre os condutores em metros; k é o fator de forma; k' é uma constante variável com a relação entre reatância e resistência do circuito.

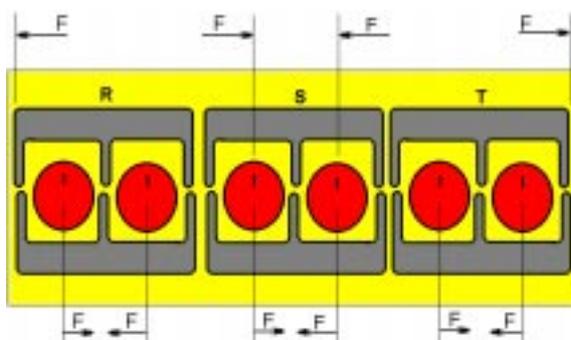
Os valores usuais das constantes, neste cálculo, são indicados a seguir:

Para k usa-se o valor $k = 1$, para cabos, dutos, barras redondas ou quadradas dispostos como condutores singelos, assim como para condutores retangulares com distância grande em relação às dimensões, também como condutores singelos. Quando as distâncias não são grandes, pode-se utilizar ábacos que se aplicam também para condutores múltiplos.

Dois tipos de força devem ser considerados nos cálculos para condutores múltiplos: forças de atração entre condutores de uma mesma fase, que são elevadas pela pequena distância e forças de repulsão entre os conjuntos de condutores de uma e outra fase.



No primeiro caso, os condutores mais solicitados são os das fases externas porque a força de atração não sofre compensação como nas fases internas.



O valor da força é calculado considerando-se a corrente dividida pelo número de condutores e aplicando-se a relação (1).

Os valores de k' são:

8 - quando se requer o dimensionamento com valores folgados;

9,9 - (o máximo valor possível) só se aplica a barramentos de geradores de potência muito elevada;

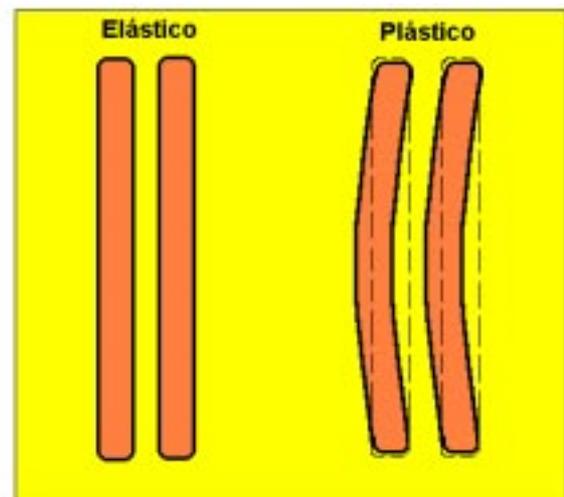
6,5 - para circuitos alimentados por transformadores de grande potência;

4 - para circuitos alimentados por transformadores de baixa e média potência;

5,1 - para circuitos de baixa tensão.

Conhecida a força, o dimensionamento da seção do condutor poderá ser feito através de dois critérios.

No primeiro caso, o material deverá trabalhar no regime elástico, em que não há deformação permanente; no segundo, o material poderá trabalhar no regime plástico, permitindo-se uma pequena deformação permanente que, por razões estéticas, não deve ser perceptível a olho nu – essa deformação deverá ser de, no máximo, 0,2%.



O segundo critério é mais econômico, já que se pode admitir para a seção uma tensão 1,333 vezes menor do que a obtida pela outra opção.

Existem ábacos (vide anexo) que permitem um cálculo rápido da força, do módulo da seção da barra a ser utilizada e da distância entre os suportes isolantes do barramento. Com o auxílio de uma tabela pode-se determinar a seção de condutor mais indicada para o caso em vista.

O método a ser seguido pode ser dividido em duas etapas.

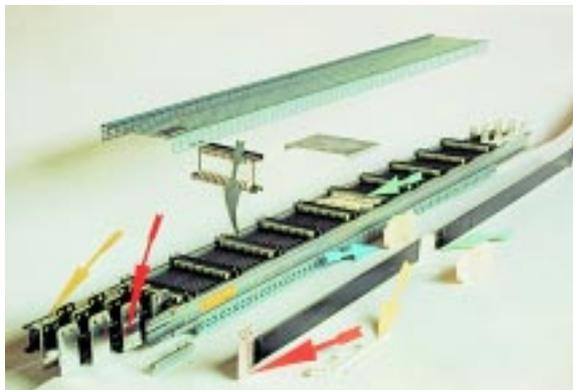
Em primeiro lugar, unem-se os pontos que representam a corrente (reta I) e a distância entre os barramento (reta d), determinando-se a força máxima na reta W. Depois, girando-se a régua em torno desse ponto determinam-se dois valores de S (módulo da seção) e de L (distância entre os suportes) que satisfazem às condições.

São muitas as soluções possíveis, pois, diminuindo a distância entre os isoladores, pode-se diminuir a resistência mecânica da barra o que pode ser mais econômico do que usar uma barra mais resistente.

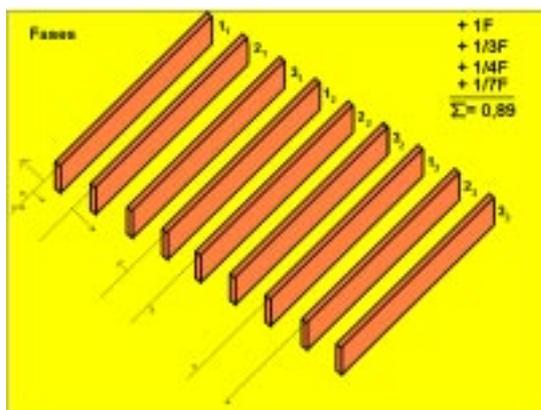
É importante frisar que, quando se fala em barra mais ou menos resistente estamos falando no módulo de resistência e não nas dimensões da barra.

Exemplificando: uma barra retangular com o lado maior na posição horizontal terá muito mais resistência a esforços horizontais do que a mesma barra instalada com o lado maior na posição vertical.

É possível, quando se tem circuitos múltiplos em barramentos pré-fabricados, fazer uma distribuição das barras de modo a reduzir os esforços, como é feito, por exemplo, nos **CANALIS**.



Quando se tem três circuitos no mesmo invólucro, instalando-os todos em paralelo, as forças serão como mostradas a seguir.



A força que vai determinar o dimensionamento da barra 1, que é a mais solicitada (juntamente com a 3₃) será, para um curto-circuito envolvendo as fases 1 e 2, a somatória das forças de atração (consideradas positivas) entre as barras "1" dos três circuitos e as de repulsão (consideradas negativas) entre a barra 1₁ e as barras 2 dos três circuitos. Como as correntes são as mesmas, as forças serão determinadas pelas distâncias entre as barras nos diversos casos.

Outra disposição também usadas em barramentos pré-montados é indicada abaixo (para dois circuitos):

1	1	2
2	3	3

Neste caso, para um curto envolvendo as fases 1 e 2, teremos nas barras superiores forças de atração entre as duas barras 1 e de repulsão entre a barra 2 e as outras duas barras 1. Não haverá forças horizontais entre as barras superiores e as inferiores. É uma disposição favorável ao dimensionamento mecânico mas apresenta dificuldades para derivações.

Até aqui, as forças foram consideradas constantes em relação ao tempo, o que na realidade não acontece, pois a força, variando com o quadrado da corrente, terá uma frequência dupla da mesma. No Brasil, adota-se a frequência de 60 Hz. Tem-se, assim, atuando nos barramentos uma força com frequência de 120 Hz, sendo que o valor da corrente instantânea de curto-circuito e o valor da força dependem, com visto acima, do instante em que o curto ocorre. As forças são sempre perpendiculares aos condutores e às linhas de fluxo, fator que deve ser levado em consideração quando o sistema de condutores é tridimensional.

Devido à variação da força em relação ao tempo, é necessário verificar a relação entre a frequência própria do barramento e a frequência da força, para que não haja ressonância, quando ocorrem esforços muito elevados.

A norma alemã VDE-0103 fornece uma curva que pode ser usada para verificação do comportamento da barra com relação à frequência natural do barramento e a frequência da corrente. No eixo das abscissas temos a relação entre a frequência natural do barramento e a frequência da corrente; nas ordenadas, o fator pelo qual a força que atua sobre a barra precisa ser multiplicada para a obtenção da força no suporte, ou na própria barra.

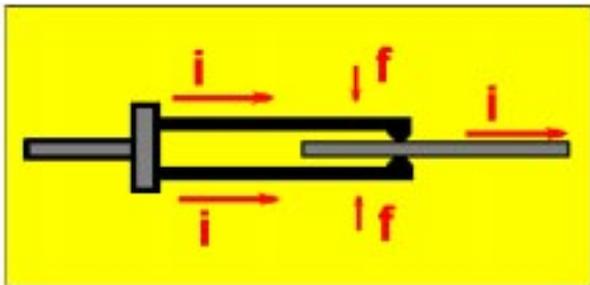
Hoje existem programas muito rápidos que funcionam em PC's e que são utilizados no projeto mecânico das subestações de transmissão e na verificação de subestações alimentadas por novos circuitos, cujo dimensionamento precisa ser revisto.

5. Os contatos

A construção de contatos nos equipamentos de manobra – como seccionadores e disjuntores – deve ser cuidadosamente estudada.

Um contato elétrico deficiente pode ser destruído pelo arco elétrico como consequência imediata da soldagem dos contatos.

Os tipos de contato mais indicados pela sua resistência são os adinâmicos – que se utilizam da força para aumentar a pressão – e os contatos de tulipa, que dividem a corrente em vários percursos (os dedos dos contatos) dispostos simetricamente em torno da haste (veja capítulo interrupções das correntes).



Nos seccionadores unipolares, o dimensionamento em função da corrente instantânea faz com que unidades de mesma tensão e corrente nominais mostrem as partes condutoras e os isoladores suporte muito diferentes, em correspondência às diversas capacidades de suportar os curtos circuitos.

Os seccionadores têm, ainda, um sistema de travamento que impede a abertura da faca – e, conseqüentemente, a formação de um arco elétrico – quando o aparecimento da corrente força-a no sentido da abertura.



Nos disjuntores de baixa tensão limitadores, (como os **NS Compact**) em que se deseja uma abertura rápida, pode-se usar um tipo de contato em que não haja compensação das forças e as peças em contato fiquem livres para se mover pela ação da força de repulsão que surge pela mudança de direção da corrente.



6. Os transformadores

Quanto aos transformadores, se o esforço mecânico não for suportado pela impregnação com resina e pela amarração feita nas bobinas, haverá condições para um deslocamento das espiras, com provável rompimento da isolamento. Poderá surgir, então, novo curto-circuito, que destruirá o transformador parcial ou totalmente.

Um curto-circuito externo – um arco provocado por um raio, por exemplo – que teria conseqüências mínimas com a adoção de medidas preventivas como o uso de disjuntores rápidos e de preferência limitadores, ganha proporções muito maiores. A interrupção de curta duração (o tempo de desligamento + o de religamento) do fornecimento de energia transforma-se em dano de reparo mais demorado e custoso.

É utilizada no cálculo mecânico dos transformadores a hipótese de que o equipamento é alimentado por uma fonte de capacidade infinita (ou, o que é o mesmo, impedância nula) no momento do curto-circuito, quando o valor de crista da corrente da corrente seria (2):

$$I_{cc} = \frac{1,8 \times MVA \times 10^6 \times \sqrt{2}}{\sqrt{3} \times E \times Z}$$

Onde:

I_{cc} é o valor de crista da corrente de curto-circuito em ampères;

MVA é a potência aparente nominal;

E é a tensão nominal em kV;

Z é a impedância percentual.



7. O efeito térmico

A corrente de curto-circuito provocará o aquecimento dos condutores percorridos, se não for rapidamente suprimida por meio de equipamentos de atuação rápida de proteção.

Quando passam pelos condutores correntes de curta duração (1 a 5 s), admite-se que o aquecimento é adiabático, isto é, todo calor é utilizado no aquecimento dos condutores.

O aquecimento $d\Theta$ de um condutor de resistência elétrica R com massa M e capacidade térmica C , percorrido por uma corrente de valor eficaz I durante um intervalo de tempo dt pode ser calculado pela expressão:

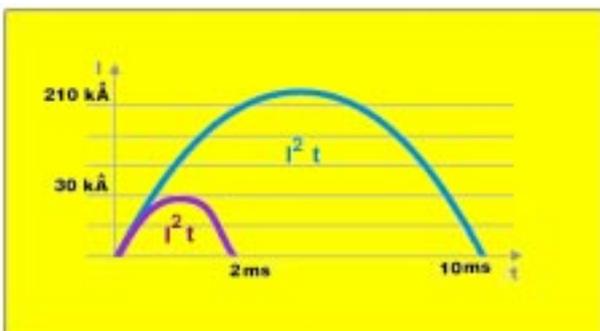
$$d\Theta = \frac{0,24xRx I^2 dt}{MxC}$$

Considerando um condutor de cobre de seção 100 mm^2 e uma corrente de curto de 10.000 A passando por 1 s , o aquecimento será de $57 \text{ }^\circ\text{C}$ e para 3 s será $254 \text{ }^\circ\text{C}$. Já o condutor de alumínio com um tempo de 3 s teria um aquecimento de $890 \text{ }^\circ\text{C}$.

Esses aquecimentos podem representar uma redução da resistência mecânica dos condutores e se eles forem isolados, a destruição do material isolante com risco de incêndio.

Os disjuntores, ao interromperem a corrente de curto circuito, limitam a energia que provocaria aquecimento exagerado de condutores e barramentos. Costuma-se indicar essa energia pelo produto do quadrado da corrente em ampères pelo tempo em segundos ($\text{A}^2 \cdot \text{s}$).

Quando o disjuntor é limitador, essa redução é muito grande permitindo um dimensionamento bem menos generoso dos condutores, barramentos e equipamentos a jusante.



No caso dos cabos isolados, geralmente não é necessária a verificação da suportabilidade aos efeitos térmicos dos curtos-circuitos, a qual é feita considerando que para tempos até 5 s é válida a relação (4):

$$I^2 xt = k^2 S^2$$

Esta expressão indica o tempo t (em segundos) durante o qual um condutor de seção S (em mm^2) pode conduzir uma corrente I (amp. ef.) antes que sua isolamento seja danificada.

Para o PVC o valor de k^2 é de 13.225 para condutor de cobre e 5.776 para condutor de alumínio

O dimensionamento dos barramentos pré-montados como os CANALIS é feito pelas seguintes características:

- Corrente máxima de crista I_{cr}

Esta característica indica o limite da suportabilidade eletrodinâmica dos barramentos. Este valor é freqüentemente o que determina o dimensionamento.

- Corrente de curta duração (valor eficaz) I_{cw}

É a característica que determina o limite do aquecimento admissível durante um tempo determinado (desde $0,1$ a 1 s).

- O esforço térmico $\text{A}^2 \cdot \text{s}$

Em geral, se o barramento suporta os outros dois esforços, será naturalmente satisfeita esta solicitação. A corrente de curto circuito presumida, a considerar para efeito de proteção das CEP, é a que é disponível na alimentação.

8. Dispositivos de proteção

8.1 Generalidades

Os dispositivos de proteção usados para reduzir os efeitos dos curtos-circuitos sobre os equipamentos e as instalações de baixa tensão são os seguintes:

- Fusível: pela fusão de uma parte especialmente projetada, abre o circuito e interrompe a corrente quando esta excede um dado valor durante um certo tempo.
- Disjuntor: pela separação rápida entre os contatos móvel e fixo e através de um meio de extinção do arco (sopro magnético, vácuo, gás SF₆, óleo, ar comprimido) abre o circuito e interrompe a corrente quando esta excede um dado valor detectado por um relé o qual comandou a sua operação.

Note-se que o disjuntor não desliga ou religa automaticamente um circuito, se não for comandado por relés; deve-se lembrar sempre, pois, que o disjuntor é um equipamento que é capaz de abrir um circuito quando há um curto-circuito e de religar o circuito depois de um dado

tempo e, se o curto persistir, é capaz de abrir novamente o circuito, mas só executa tais operações se for, neste caso, comandado por relés de sobrecorrente e relés de religamento.

8.2 Valores Nominais

Para especificar corretamente estes dispositivos de proteção dos circuitos, devemos conhecer os principais dados nominais:

- VN - tensão nominal: é a máxima tensão de operação de um circuito no qual o dispositivo pode operar.
- IN - corrente nominal: é a corrente que pode passar permanentemente pelo fusível ou disjuntor, sem que nenhuma parte dos mesmos atinja uma diferença de temperatura acima da ambiente, maior que um Dt padronizado, de acordo com o material (varia de 30 °C a 55 °C).

NOTAS:

1. Para os fusíveis é também a maior corrente permanente que não provoca a fusão.
 2. Para os disjuntores é também a corrente com que o disjuntor pode operar repetidas vezes sem manutenção ou substituição de componentes. O número de operações depende do tipo de disjuntor.
- I_{int} - corrente de interrupção ou capacidade de interrupção: é a maior corrente simétrica de curto-circuito que o dispositivo (fusível ou disjuntor) é capaz de interromper sob a tensão nominal.
 - I_{prosp} - corrente prospectiva de um dispositivo limitador: é o valor de crista de mais alto valor da corrente de curto-circuito que seria atingido se o dispositivo não tivesse atuado. Para os dispositivos não limitadores, esse valor é denominado corrente momentânea, corrente dinâmica ou ainda valor de crista da corrente de curto-circuito suportável.

NOTAS:

1. A capacidade de interrupção dos disjuntores anteriormente era dada em algumas normas pela corrente assimétrica ou pela potência de interrupção (MVA) simétrica ou assimétrica. Atualmente, no entanto, só se fala em corrente de interrupção simétrica. A possibilidade de o dispositivo suportar ou interromper correntes assimétricas é assegurada pelos ensaios especificados pelas normas.

Estas fixam as condições de realização dos ensaios de modo que se verifiquem as condições de interrupção mais desfavoráveis tanto em relação à assimetria quanto ao fator de potência do circuito envolvido no curto-circuito.

2. As normas para disjuntores de baixa tensão da IEC

fixaram três valores para as correntes de curto-circuito:

- I_{cu} - é a corrente limite ou máxima que o disjuntor é capaz de interromper executando um ciclo de operação do tipo: O - 3min - CO (em caso de curto-circuito, o disjuntor é capaz de abrir, esperar 3 min, fechar novamente e se o curto continuar, abrir novamente sem nenhum retardo).
- I_{sc} - é a corrente sob a qual o disjuntor é capaz de executar o ciclo: O - 3min - CO - 3min - CO e é denominada de curto-circuito em serviço.

- I_{cw} - é a corrente que o disjuntor é capaz de suportar durante 1 s sem que a temperatura de suas partes sofra uma elevação de temperatura maior que a permitido pelas normas.

NOTA:

As normas IEC permitem que I_{sc} seja menor (25%, 50%, 75%) que I_{cu}, mas para alguns disjuntores I_{sc}=I_{cu}, ou seja: o disjuntor é capaz de executar o ciclo de serviço com dois religamentos com a mesma corrente com a qual executa um único religamento.

Estes disjuntores terão necessariamente mais capacidade de dissipação do calor e/ou uma maior limitação da corrente.

9. Cálculo das correntes de curtos-circuitos na baixa tensão

9.1 Corrente nos terminais secundários do transformador

9.1.1 Caso de um único transformador

Corrente de curto circuito nos terminais de um transformador AT/BT de distribuição

Como uma primeira aproximação, a impedância do circuito de AT é considerada desprezível, de modo que:

$$I_{sc} = I_n \times 100 / Z\% \quad \text{onde } I_n = P \times 10^3 / 1,41 \times U_{20} \quad \text{e:}$$

P = potência em kVA do trafo,

U₂₀ = tensão fase - fase do secundário em circuito aberto,

I_n = corrente nominal em ampères

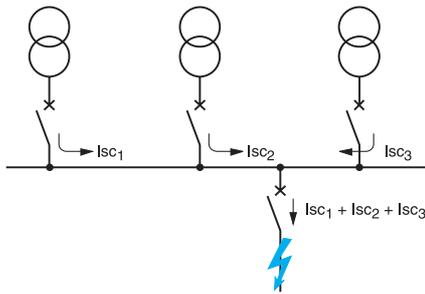
I_{sc} = corrente de curto-circuito em ampères

Z% = impedância porcentual do trafo.

Na prática o valor da corrente é um pouco menor que o calculado por este método, mas a precisão é suficiente para um cálculo básico destinado a projeto da instalação.

9.1.2 Caso de vários transformadores em paralelo em um barramento

O valor da corrente de falta imediatamente após o barramento (fig. abaixo), pode ser estimado como a soma das correntes de curto de cada transformador. Com isso estamos assumindo que todos os transformadores são alimentados pela mesma fonte e que são desprezadas as impedâncias dos disjuntores e dos barramentos.



9.2 Corrente de curto-circuito trifásico em um ponto qualquer da instalação

Em um ponto qualquer de uma instalação trifásica, a corrente de curto-circuito é dada por:

$$I_{sc} = U_{20} / 1,73 Z_T$$

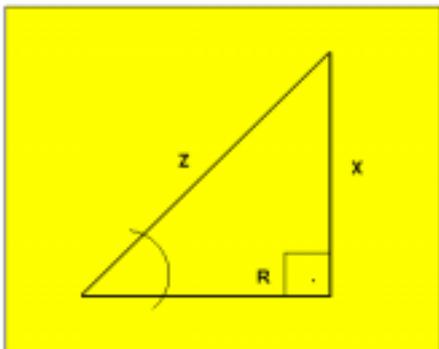
onde:

U₂₀ = foi definido acima (em Volts)

Z_T = impedância total por fase da instalação a montante do ponto de curto (em ohms)

9.2.1 Método de cálculo de Z_T

Todos os componentes da instalação (rede AT, transformador, cabos, disjuntor, barramento ...) são caracterizados por uma impedância Z, compreendendo uma resistência e uma reatância indutiva; as capacitâncias não têm importância no cálculo das correntes de curto-circuito. Os parâmetros Z, R e X são expressos como os lados de um triângulo retângulo (triângulo das potências), como indicado na figura abaixo.



O método consiste em dividir a rede em seções convenientes e calcular a resistência R e a reatância X de cada seção. Sendo as seções ligadas em série, os elementos resistivos e indutivos de cada seção são somados aritmeticamente e a impedância Z será calculada por:

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$$

Nos sistemas radiais raramente se encontram seções em paralelo; se isto acontecer devem ser calculadas pelo método de redução de impedâncias a uma impedância equivalente.

9.2.2 Determinação da impedância da rede de alta tensão (AT)

O nível de curto-circuito na entrada da instalação é fornecido pela concessionária seja em MVA trifásico ou em kA. Quando expresso em MVA o seu cálculo é feito por:

$$MVA = \sqrt{3} \times EL \times I_{sc}$$

A partir desse dado é possível calcular a impedância pela fórmula (que já dá o valor referido à baixa tensão):

$$Z_s = \frac{U_o^2}{P_{sc}}$$

onde:

Z_s = impedância da rede de alta tensão expressa em mili-ohms,

U_o = tensão em vazio fase - fase, na baixa tensão, expressa em Volts

P_{sc} = nível de curto-circuito trifásico na alta tensão (AT), expressa em kVA.

A resistência do circuito é geralmente desprezível em face da indutância, isto é Z_a @ X_a. Se houver necessidade de maior precisão, pode-se adotar R_a = 0,15 X_a.

9.2.3 Impedância dos transformadores

A impedância dos transformadores vista da BT, é dada por:

$$Z_{tr} = U_{20}^2 / P_n \times Z / 100$$

onde:

P_n = a capacidade do transformador em kVA e U₂₀ e Z já foram definidos acima.

Se for necessária maior precisão pode-se calcular a resistência do transformador a partir das perdas totais (P_{cu} = 3 I_n² x R_{tr}, com R_{tr} = resistência de uma fase em mili-ohms) e daí calcular a reatância (pelo triângulo da potência). Para cálculos aproximados, entretanto, admite-se X_{tr} @ Z_{tr}.

9.2.4 Disjuntores

Para os disjuntores admite-se uma reatância de 0,18 mili-ohms e despreza-se a resistência.

9.2.5 Barramentos

Também aqui se despreza a resistência e adota-se uma reatância de 0,18 mili@ohms/metro, desprezando-se a diferença devido à distância entre as barras.

9.2.6 Condutores dos circuitos

A resistência de um condutor é dada pela relação:

$$R_c = \frac{\rho \times L}{S}$$

onde:

r = resistividade do material nas condições normais de operação, sendo 22,5mW.mm²/m para o cobre e 36mW.mm²/m para o alumínio

L = comprimento do condutor

S = seção transversal do condutor

A reatância dos cabos pode ser obtida dos fabricantes. Para condutores de até 50 mm², a reatância pode ser ignorada. Na ausência de outra informação pode-se usar o valor de 0,096 mW/m. No caso de barramentos pré-fabricados, o fabricante deve ser consultado.

9.2.7 Motores

No instante do curto circuito, o motor passa a funcionar, por um breve período como gerador, contribuindo para aumentar a corrente de curto circuito. Essa contribuição, no caso de grandes motores trifásicos pode ser estimada pela fórmula:

$$I_{scm} = 3,5 I_n \text{ de cada motor}$$

Isto é particularmente importante nos disjuntores de baixa tensão e alta velocidade.

9.2.8 Curtos de alta resistência

A resistência dos arcos normalmente é baixa, mas nas baixas tensões ela pode contribuir para reduzir em cerca de 20% a corrente de curto circuito.