

1

Disjuntores- Especificação Técnica e Componentes

Antonio Hayashi, José Carlos Barriquelo Júnior,
Juliana Quadros Moretti

Resumo – Este documento apresenta um estudo realizado a respeito de especificação técnica e componentes de disjuntores, mais especificamente em características relativas à manobra de correntes normais e manobra de correntes de falta.

Palavras-chave—Disjuntores, Componentes, Manobra, Especificação.

I. CARACTERÍSTICAS RELATIVAS À MANOBRA DE CORRENTES DE FALTA

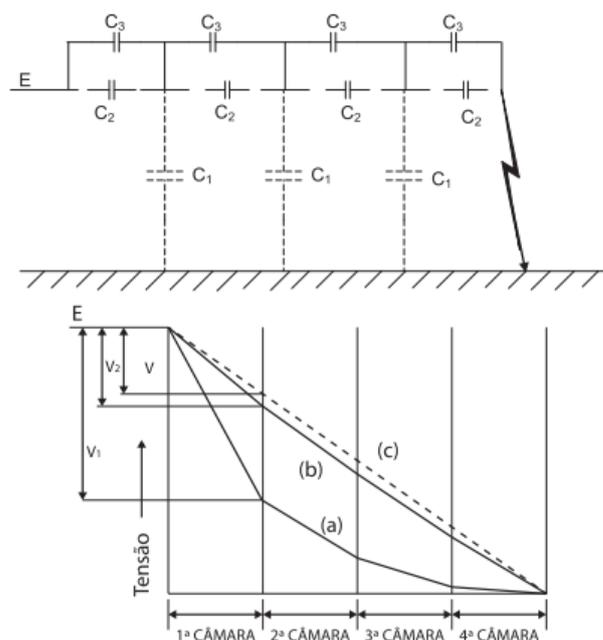
Os disjuntores são constituídos das seguintes partes, segundo a referência [5]:

- 1) Partes condutoras de corrente.
- 2) Partes isoladoras.
- 3) Dispositivos de extinção de arcos.
- 4) Mecanismos de operação.
- 5) Componentes auxiliares.

A. Dispositivos para Equalização de Tensões

Deve-se garantir uma distribuição uniforme da tensão total entre as diversas associações de câmaras de interrupção. Num disjuntor composto de quatro câmaras, até 60% da tensão através de um determinado polo, poderia surgir através de uma única câmara. Uma melhor distribuição de tensões é obtida pelo acréscimo de capacitores de equalização (voltage

grading capacitors) em paralelo com os contatos, de forma a minimizar o efeito das capacitâncias para terra.



Onde:

(a): sem capacitores de equalização.

(b): com capacitores de equalização.

(c): distribuição ideal.

C_1 : capacitâncias parasitas para terra.

C_2 : capacitâncias entre os contatos dos interruptores abertos.

C_3 : capacitâncias para equalização das tensões.

E : tensão total para terra.

V_1 : tensão através da câmara mais solicitada, sem equalização de tensões.

V_2 : tensão através da câmara mais solicitada, com equalização de tensões.

V : tensão através da primeira câmara com distribuição ideal da tensão total aplicada.

B. Resistores de Fechamento

Os resistores de fechamento têm função de atenuar solicitações transitórias e sustentadas aplicadas ao sistema em decorrência da súbita inserção na rede de linhas, transformadores, bancos de capacitores e outros componentes durante a manobra de fechamento dos disjuntores. Os resistores de fechamento são instalados em paralelo com as câmaras dos disjuntores (um resistor para cada câmara). Cada resistor é instalado no interior de uma câmara auxiliar, em que a interrupção do arco formado entre os contatos é feita por processo semelhante ao usado nas câmaras principais. Existem fabricantes que possuem versões de resistores de pré-inserção encapsulados juntamente com a câmara de interrupção

¹Antonio Hayashi, NUSP 9876543, T01.

José Carlos Barriquelo Júnior, NUSP 8011744, T01.

Juliana Quadros Moretti, NUSP 98765, T01.

Os resistores de fechamento são usados para as seguintes funções:

a) Resistores de Fechamento para Chaveamento de Linhas de Transmissão Longas:

O fechamento de linhas de transmissão longas pode dar lugar ao aparecimento de sobretensões elevadas na extremidade ainda desconectada, devido à superposição da duplicação da tensão causada pelas reflexões ao efeito Ferranti. A utilização de resistores de fechamento com um valor próximo da impedância de surto da linha serve para evitar as sobretensões. A prática usual é especificar uma faixa de valores ôhmicos e o tempo de inserção mínimo dos resistores destinados a essa aplicação.

b) Resistores de Fechamento para Chaveamento de Bancos de Capacitores:

Estes resistores são utilizados para limitar as correntes de alta frequência decorrentes do fechamento de bancos de capacitores em manobra isolada ou back-to-back (valor típico: 100 a 200 ohms por fase). A prática usual é especificar uma faixa de valores ôhmicos e o tempo de inserção dos resistores previstos para essa aplicação.

c) Resistores de Fechamento para Chaveamento de Transformadores:

Resistores de fechamento podem ser necessários ao controle de sobretensões sustentadas causadas pelas correntes de inrush formadas no chaveamento de transformadores, em certas situações especiais. Os resistores de fechamento são utilizados para atenuar as solicitações impostas ao sistema e não para melhorar o desempenho do disjuntor. A prática normalmente adotada é especificar uma faixa de valores ôhmicos para estes, bem como o tempo de inserção mínimo. Esses parâmetros são obtidos por meio de estudos de transitórios e comparação dos resultados obtidos com diferentes valores de resistência e tempo de inserção.

C. Características Comuns a Outros Equipamentos de Manobra

As características seguem as normas NBR IEC 60694:2006 [6] e serão apenas enumeradas a seguir.

1) Características Relativas à Corrente e Frequência

- Frequência nominal – f_r (Hz).
- Corrente nominal de regime contínuo – I_r (A, eficaz).
- Corrente suportável nominal de curta duração – I_k (kA, eficaz).
- Valor de crista da corrente suportável nominal – I_p (kA, crista).
- Duração nominal do curto-circuito – t_k (s).

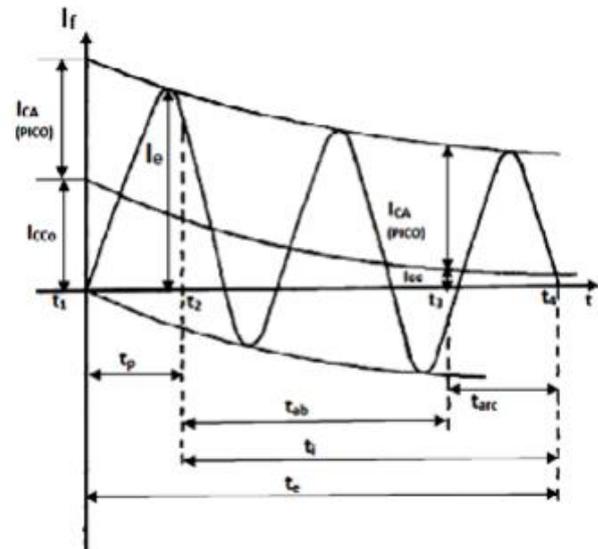
2) Características Dielétricas

- Tensão nominal – U_r (kV, eficaz).
- Tensão suportável nominal de curta duração à frequência industrial – U_d . Fase-terra e entre fases (kV, eficaz). Entre contatos abertos ou entre a distância de seccionamento (kV, eficaz).
- Tensão suportável nominal de impulso atmosférico – U_p . Fase-terra e entre fases (kV, crista). Entre contatos abertos ou entre a distância de seccionamento (kV, crista).

- Tensão suportável nominal de impulso de manobra – U_s (somente se $U_r \geq 300$ kV). Entre fase e terra e entre dispositivo de manobra aberto (kV, crista). Entre fases (kV, crista). Entre a distância de seccionamento (kV, crista).

II. CARACTERÍSTICAS RELATIVAS À MANOBRA DE CORRENTES DE FALTA

Considerando as correntes de curto-circuito podem ser consideradas como constituídas por uma componente periódica e uma aperiódica referidas respectivamente como CA e CC. Durante a interrupção de um curto-circuito por um disjuntor trifásico, dependendo do tipo de falta, as correntes nas fases terão uma certa assimetria. Como a atuação de cada disjuntor é independente dos demais, cada polo deve ser capaz de operar satisfatoriamente em uma eventual ocorrência de valores desfavoráveis das componentes CA e CC em sua respectiva fase. Os parâmetros a serem definidos para que a especificação garanta a operação correta do disjuntor são ilustrados na figura abaixo:



Onde:

- t_1 - instante de ocorrência de falta.
- t_2 - instante de energização da bobina de abertura do disjuntor.
- t_3 - instante de separação dos contatos dos contatos do disjuntor.
- t_4 - instante de interrupção de corrente.
- t_p - instante de atuação da proteção.
- t_{ab} - instante de abertura do disjuntor.
- t_{arc} - instante de duração do arco elétrico.
- t_i - instante de interrupção da falta pelo disjuntor.
- t_e - instante de estabelecimento.
- I_e - corrente de estabelecimento.

$I_{CA(pico)}$ - valor de crista da componente CA da corrente de falta ($=\sqrt{2} * I_{CA(eficaz)}$).

I_{CC0} - valor inicial da componente CC da corrente de falta (notar que, para a condição de máxima assimetria admitida, $I_{CC0} = I_{CA}$).

I_{CC} - valor da componente CC da corrente de falta no instante da separação dos contatos do disjuntor.

Definiremos então os seguintes parâmetros:

A. Tempo de interrupção nominal (ciclos)

Corresponde ao maior tempo t_i que o disjuntor pode levar para interromper uma corrente de qualquer valor, usualmente expresso em ciclos, variando de dois a cinco ciclos dependendo do disjuntor. Este tempo tem importância para a estabilização do sistema, pois a eliminação mais rápida da falta aumenta a estabilidade transitória do sistema e por consequência aumentar a capacidade de transmissão de uma ligação.

Respeitando os critérios definidos pelo ONS no submódulo 23.3 dos seus Procedimentos de Rede (Diretrizes e Critérios para Estudos Elétricos), que determina que o sistema deverá ser estável para falta monofásica sem religamento, considerando a perda de u de seus elementos e admitindo-se os tempos máximos (t_e) definidos na tabela abaixo para eliminação de defeitos (t_e = tempo de atuação da proteção (t_p) + tempo de interrupção de falta pelo disjuntor (t_i)):

TABELA - TEMPOS MÁXIMOS PARA ELIMINAÇÃO DE DEFEITOS EM FUNÇÃO DA TENSÃO DE OPERAÇÃO

Tensão Nominal de Operação [kV]	Tempos de eliminação dos defeitos (t_e)	
	ms	ciclos a 60Hz
765	80	4,8
525 e 550	100	6
440	100	6
345	100	6
230	150	9
138	150	9

Pela tabela, verificamos que o uso de disjuntores de 5 ciclos seria aceitável, pelos critérios do ONS, para sistemas de 138 a 550 kV, admitindo-se $t_p \leq 1$ ciclo. Porém, vista a capacidade atual dos disjuntores de interromper as faltas em menos de 5 ciclos, a conveniência desta e a evolução histórica do sistema brasileiro, recomenda-se especificar $t_i =$ dois ciclos para todos disjuntores de 750 e 500 kV. Para 345 e 230 kV podendo especificar $t_i =$ três ciclos. E para tensões menores que 138kV é usual especificar $t_i =$ cinco ciclos.

B. Capacidade de interrupção nominal em curto circuito

É o valor mais elevado da corrente de curto-circuito que o disjuntor é capaz de interromper, caracterizada pela declaração de valores das componentes periódicas da corrente para qual o disjuntor deve ser testado.

C. Valor da componente periódica (kA, eficaz)

Valor escolhido entre vários definido com base na série R10(10-12,5-16-20-25-31,5-40-50-63-80kA), devendo exceder por certa margem (por exemplo 20%) o valor eficaz da maior corrente de curto-circuito monofásico ou trifásico calculada para a subestação onde o disjuntor será instalado, ao longo de seu período de vida útil.

É conveniente que todos os disjuntores instalados num mesmo local tenham a mesma capacidade de interrupção.

Com uma eventual expansão da subestação, pode ocorrer que o novo curto-circuito calculado supere o especificado para o disjuntor instalado. Para isto, o ONS mantém um programa permanente de monitoramento da superação futura dos equipamentos instalados na rede básica do sistema interligado nacional, que impõe a adoção de medidas corretivas quando tal situação se configura. As diretrizes a serem configuradas nesse programa são definidas em [4].

D. Valor da componente aperiódica

A norma [3] determina que a componente CC da corrente de falta, no instante de separação dos contatos do disjuntor, seja especificada em porcentagem do valor inicial I_{CC0} e que o menor tempo possível de abertura seja considerado para a definição desta componente, juntamente com um tempo de atuação da proteção de 0,5 ciclo.

Sendo t o tempo contado a partir do curto circuito e τ a constante de tempo do curto circuito visto dos terminais do disjuntor, temos o valor da componente CC variando ao longo do tempo segundo a exponencial:

$$I_{CC}(\%) = e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot 100$$

Sendo τ função da relação X/R onde para circuitos trifásicos $X/R = X_1/R_1$ e para mono fásicos $X/R = (2X_1 + X_0)/(2R_1 + R_0)$.

Embora diferentes valores da relação X/R possam ser calculados para diferentes disjuntores da subestação, é conveniente que todos de mesma tensão nominal sejam especificados para a mesma componente CC, correspondendo à maior relação X/R dentre ele.

Caso os valores de X/R sejam menores que 17,0, recomenda-se adotar $\tau = 45$ ms para o cálculo da componente CA, correspondendo a um decaimento de 20% em 10 ms.

Porém, a norma [3] menciona valores alternativos para casos especiais, conforme a tensão nominal do disjuntor: 120ms para $U_r \leq 53kV$; 60ms para $72,5 \leq U_r \leq 420kV$ e 75 ms para $U_r = 550kV$ e $U_r = 800$ kV.

Em vista da constante de tempo considerada na definição da componente aperiódica de um disjuntor estar relacionada a sua capacidade de interrupção nominal em curto, com uma corrente simétrica de curto-circuito inferior à capacidade nominal do disjuntor, se for esperado constante de tempo superior a 45 ms, pode-se cobrir o caso pelo ensaio de corrente nominal de curto-circuito assimétrica usando uma constante de tempo de 45 ms.

O ONS correlaciona constante de tempo, tempos de interrupção e fatores de redução das correntes de curto para que esse efeito seja levado em conta na tabela 1 da referência [3]. A tabela abaixo apresenta valores de constante de tempo correspondentes a diversos valores da relação X/R.

TABELA - VALORES DA CONSTANTE DE TEMPO PARA RELAÇÕES X/R

X/R	τ (ms) para 60Hz
12	32
17	45
20	53
30	80
40	106
50	133
60	159

100	265
∞	∞

Como estes valores não são, em geral, conhecidos pelo fabricante, é recomendável indicar ou X/R ou τ a ele.

E. Capacidade de estabelecimento nominal em curto-circuito(kA, crista)

É o maior valor instantâneo de corrente que o disjuntor é capaz de estabelecer, isto é, fechar e grudar quando operando com tensão nominal. Em geral o primeiro pico de corrente após o início da falta. Este pode ser calculado por:

$$I_{fmax} = I_{CA(eficaz)} \times f$$

Onde f é o fator de assimetria tal que:

$$f = \sqrt{2} \cdot (1 + e^{-\frac{t}{\tau}})$$

Com $t=8,33$ ms para 60Hz ou $t=10$ ms para 50 Hz.

Para 60Hz temos na tabela a seguir os seguintes valores de fator de assimetria para as mesmas relações X/R anteriores. Indicaremos também valores de componentes CC em porcentagem no instante de separação dos contatos arredondados para valores inteiros.

TABELA - VALORES DO FATOR DE ASSIMETRIA E COMPONENTE APERIÓDICA PARA RELAÇÕES X/R

X/R	f	%CC ($t_3=1,5$ ciclos)	%CC ($t_3=2,5$ ciclos)
12	2,5	46	27
17	2,59	57	40
20	2,62	62	46
30	2,69	73	59
40	2,72	79	67
50	2,74	83	73
60	2,76	85	77
100	2,78	91	85
∞	2,83	100	100

Para constante de tempo normalizada de 45 ms, a IEC padroniza $f=2,5$ para 50Hz e $f=2,6$ para 60Hz. Para casos especiais de constante de tempo, independente da frequência, $f=2,7$.

Para subestações com banco de capacitores, devido o curto gerar uma componente de alta frequência com máximo não coincidente com o máximo da componente industrial, recomenda-se especificar o máximo da crista dessa componente de alta frequência e sua frequência, além da capacidade de estabelecimento correspondente à frequência industrial.

F. Tensão de restabelecimento transitória(TRT)

É a diferença de potencial entre terminais do disjuntor em seguida à interrupção de uma corrente durante o transitório anterior ao amortecimento das oscilações.

Como a TRT é particularmente elevada, para testes de abertura de curto-circuito, além de submeter o disjuntor a correntes características de sua capacidade de interrupção, deve-se estabelecer entre seus terminais uma tensão não inferior à TRT.

G. TRT na interrupção de faltas terminais

Abaixo, é ilustrada a formação da tensão de

estabelecimento em um disjuntor após a interrupção de corrente devido a uma falta trifásica aterrada alimentada por um sistema solidamente aterrado tipo barramento infinito.



Esta se forma em qualquer fase do disjuntor, sobre o terminal do lado oposto à fase.

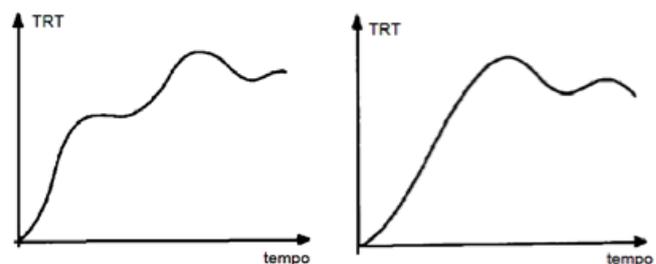
Diferente do caso ilustrado acima, a componente de frequência industrial da tensão de restabelecimento se confunde com a tensão aplicada no disjuntor pela fonte. Para um curto não aterrado ou sistema não solidamente aterrado, isso não ocorre, uma vez que a componente de frequência industrial da tensão de restabelecimento assumiria diferentes valores após a interrupção da corrente nos polos do disjuntor.

Após a abertura do primeiro pólo durante uma falta terminal trifásica não aterrada em um sistema solidamente aterrado, os outros dois continuam conduzindo a corrente por certo tempo, causando uma variação de potencial no ponto de falta.

Essa elevação da componente de frequência industrial da tensão de restabelecimento aplicada ao primeiro pólo a interromper de um disjuntor é expressa pelo fator de primeiro pólo f_{pp} . Para o caso dito acima (abertura de falta trifásica não aterrada) esse fator é 1,5, mas em outros casos ele é em geral menor.

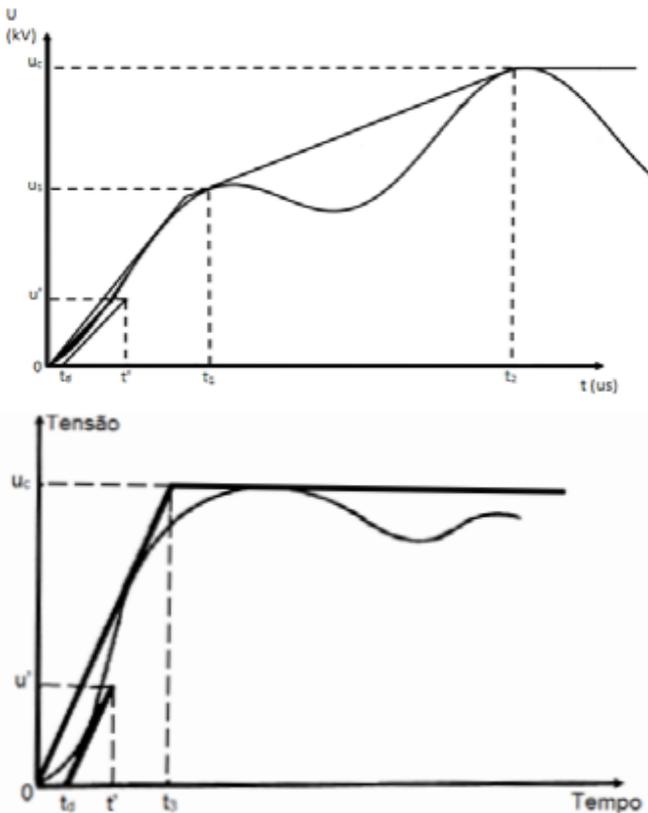
A norma define que: “Quando da interrupção de alguma corrente trifásica simétrica, o fator de primeiro pólo é a relação da tensão à frequência industrial através do primeiro pólo a interromper, antes da interrupção das correntes nos outros pólos, para a tensão à frequência industrial ocorrendo através do pólo ou dos pólos depois da interrupção em todos os três pólos”.

As figuras abaixo mostram dois aspectos típicos da forma de onda da TRT em que a o máximo ocorre depois ou durante o primeiro pico.



Tendo em vista estas formas de onda típica, as normas da

IEC definem envoltórias para caracterizar as tensões de restabelecimento aplicadas ao disjuntor durante os ensaios de interrupção de faltas terminais. As figuras a seguir ilustra essas envoltórias definidas por quatro parâmetros e dois parâmetros respectivamente.



A norma IEC 62271-100 define os parâmetros das envoltórias normalizadas para a corrente de falta (I_f) iguais a 10, 30, 60 e 100% da componente periódica da capacidade de interrupção nominal. Os fatores de tensão que estabelecem o contorno das envoltórias u_1 e u_c são definidos pelas expressões:

$$u_1 = 0,75 \cdot k_{pp} \cdot U_r \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}$$

$$u_c = k_{af} \cdot k_{pp} \cdot U_r \cdot \sqrt{\frac{2}{3}}$$

Onde U_r é a tensão nominal do disjuntor, k_{af} é denominado o fator de amplitude e k_{pp} o fator de primeiro pólo.

A definição quantitativa para os parâmetros das envoltórias é apresentado nas tabelas a seguir:

TABELA - DEFINIÇÃO DAS ENVOLTÓRIAS A DOIS PARÂMETROS PARA FALTAS TERMINAIS DEFINIDOS APENAS PARA $U_R < 100\text{kV}$ - CLASSE S1

Corrente de falta	k_{af}	t_3 (μs)	t_d (μs)	u' (kV)	t' (μs)	s (kV/ μs) (variável com U_r)
100%	1,4	$u_c/3$	$0,15t_3$	$u_c/3$	$td+t_3/3$	$0,15 \leq s \leq 0,75$
60%	1,5	$u_c/3$	$0,15t_3$	$u_c/3$	$td+t_3/3$	$0,37 \leq s \leq 1,82$
30%	1,6	$u_c/3$	$0,15t_3$	$u_c/3$	$td+t_3/3$	$0,79 \leq s \leq 3,94$
10%	1,7	$u_c/3$	$0,15t_3$	$u_c/3$	$td+t_3/3$	$0,83 \leq s \leq 4,19$

TABELA - DEFINIÇÃO DAS ENVOLTÓRIAS A DOIS PARÂMETROS PARA FALTAS TERMINAIS DEFINIDOS APENAS PARA $U_R < 100\text{kV}$ - CLASSE S2

Corrente de falta	k_{af}	t_3 (μs)	t_d (μs)	u' (kV)	t' (μs)	s (kV/ μs) (variável com U_r)
100%	1,54	$u_c/3$	$0,05t_3$	$u_c/3$	$td+t_3/3$	$0,91 \leq s \leq 1,47$

60%	1,65	$u_c/3$	$0,15t_3$	$u_c/3$	$td+t_3/3$	$1,44 \leq s \leq 2,35$
30%	1,74	$u_c/3$	$0,15t_3$	$u_c/3$	$td+t_3/3$	$2,56 \leq s \leq 4,19$
10%	1,8	$u_c/3$	$0,15t_3$	$u_c/3$	$td+t_3/3$	$2,67 \leq s \leq 4,32$

TABELA - DEFINIÇÃO DAS ENVOLTÓRIAS A DOIS PARÂMETROS PARA FALTAS TERMINAIS DEFINIDOS APENAS PARA $U_R \geq 100\text{kV}$

Corrente de falta	k_{af}	t_3 (μs)	t_d (μs)	u' (kV)	t' (μs)	s (kV/ μs) (variável com U_r)
30%	1,54	$u_c/3$	$0,15t_3$	$u_c/3$	$td+t_3/3$	5
10%	$0,9 \cdot 1,7$	$u_c/3$	$0,15t_3$	$u_c/3$	$td+t_3/3$	7

TABELA - DEFINIÇÃO DAS ENVOLTÓRIAS A DOIS PARÂMETROS PARA FALTAS TERMINAIS DEFINIDOS APENAS PARA $U_R > 800\text{kV}$

Corrente de falta	k_{af}	t_3 (μs)	t_d (μs)	u' (kV)	t' (μs)	s (kV/ μs) (variável com U_r)
10%	1,76	$u_c/3$	$0,15t_3$	$u_c/3$	$td+t_3/3$	7

Onde disjuntores classe S1 são aqueles destinados a uso em um sistema de cabos e os de classe S2 são destinados ao uso em um sistema de linhas ou sistema de cabos diretamente conectado a uma linha aérea.

$k_{pp}=1,5$ em todos os casos exceto para os ensaios com:

- $I_f=30\%$ e tensões nominais entre 100kV e 800kV ($k_{pp}=1,3$)
- tensões nominais acima de 800kV ($k_{pp}=1,2$)

TABELA - DEFINIÇÃO DAS ENVOLTÓRIAS A QUATRO PARÂMETROS PARA FALTAS TERMINAIS DEFINIDOS APENAS PARA $100\text{kV} \leq U_r \leq 800\text{kV}$

Corrente de falta	k_{af}	u_c (kV)	t_1 (ms)	t_2 (μs)	t_d (μs)	u' (kV)	t' (μs)	s (kV/ μs)
100%	1,4	$1,87u_1$	$u_1/3$	$4t_1$	2	$u_1/2$	$td+u'/s$	2
60%	1,5	$2u_1$	$u_1/3$	$6t_1$	$2 \leq td \leq 0,3t_1$	$u_1/2$	$td+u'/s$	3
30%	-	-	-	-	-	-	-	-
10%	-	-	-	-	-	-	-	-

TABELA - DEFINIÇÃO DAS ENVOLTÓRIAS A QUATRO PARÂMETROS PARA FALTAS TERMINAIS DEFINIDOS APENAS PARA $U_r > 800\text{kV}$

Corrente de falta	k_{af}	u_c (kV)	t_1 (ms)	t_2 (μs)	t_d (μs)	u' (kV)	t' (μs)	s (kV/ μs)
100%	1,5	$2u_1$	$u_1/3$	$3t_1$	2	$u_1/2$	$td+u'/s$	2
60%	1,5	$2u_1$	$u_1/3$	$4,5t_1$	$2 \leq td \leq 0,3t_1$	$u_1/2$	$td+u'/s$	3

Para a especificação as tensões de restabelecimento, deve-se fazer o estudo de TRT para diversos tipos de falhas. Desses, os gráficos das piores solicitações de devem ser comparados com as envoltórias padronizadas levando em conta a diferença de valor das correntes, já que as de falta são bem maiores que as dos ensaios. Caso a forma de onda não ultrapasse a suportabilidade fornecida, os parâmetros normalizados devem ser especificados. Em caso contrário, os parâmetros de uma envoltória especial poderão ser especificados, utilizando na medida do possível o formulário das tabelas anteriores para compatibilizar os parâmetros. Mas vale ressaltar, qualquer exceção à norma deve ser submetida à apreciação do requisito pelo fabricante do disjuntor.

Para a maioria dos casos o fator de primeiro pólo aceito é 1,3 de acordo com a norma, com 1,5 sendo considerado apenas nos seguintes casos:

- Disjuntores de tensão nominal entre 3,6 e 72,5 kV.
- Disjuntores de tensões superiores a estas na série de ensaios T10 (correntes de falta limitadas a 10%).
- Disjuntores de tensão nominal entre 100 e 170 kV

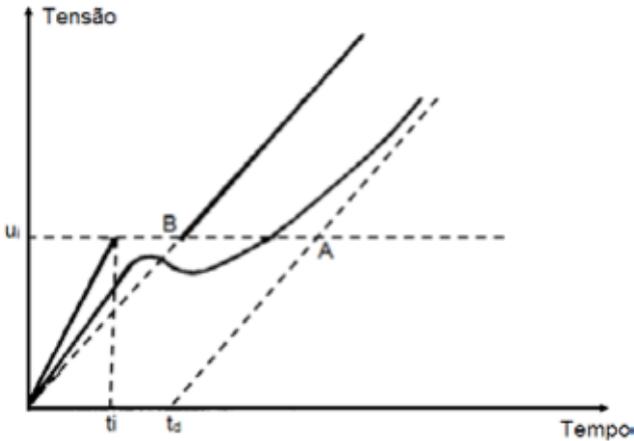
em sistema de neutro não solidamente aterrado.

Isso se deve a apesar da improbabilidade de faltas trifásicas não aterradas em sistemas de neutro solidamente aterrado, quando ocorrem, os valores de TRT são frequentemente maiores do que os de valores de pico normalizado(definidos para $k_{pp}=1,3$).

Porém, quase todos os fabricantes de disjuntores de alta e extra-alta tensão se dispõem a garantir o bom desempenho dos equipamentos quando expostos a TRTs admitindo $k_{pp}=1,5$, ou seja, 15,4% superior aos definidos na norma.

H. Tensão de restabelecimento transitória inicial(TRTI)

Logo após a interrupção de uma corrente a tensão de restabelecimento é determinada pelos parâmetros dos elementos muito próximos ao disjuntor(no máximo 1000 metros), assim dependendo fortemente do arranjo da subestação. A IEC caracteriza uma envoltória que a deve conter definindo parâmetros u_i (kV), t_i (μ s) e uma reta ligando a origem ao ponto definido por esse par como mostrado na figura abaixo.



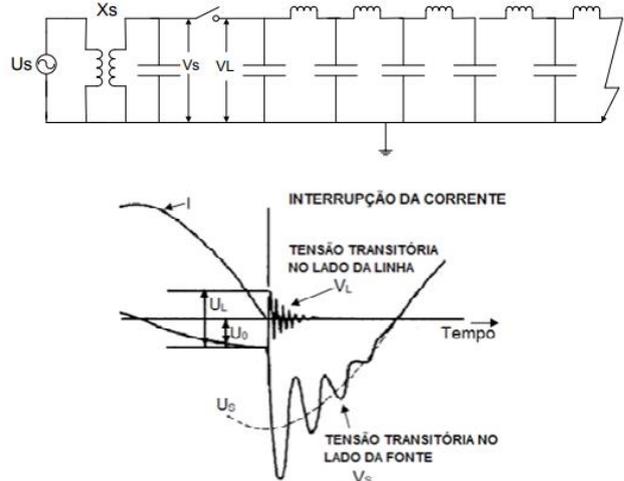
Com os tempos t_i variando de 0,4 a 1,5 μ s conforme a tensão no disjuntor e o parâmetro u_i determinado multiplicando o fator f_i pelo valor eficaz da componente CA da capacidade de interrupção nominal em curto circuito do disjuntor, sendo f_i variável conforme a tensão nominal deste. Ver tabela 7 da norma [3]. Usualmente, no Brasil, especifica-se os valores padronizados de TRTI pela IEC.

I. TRTs na interrupção de faltas quilométricas

Falta quilométrica é aquela que ocorre em uma linha de transmissão à pequena distância (1 a 5 km) do disjuntor responsável por sua manobra. Essa condição combina uma corrente falta de valor elevado a uma taxa de crescimento da tensão de restabelecimento transitória mais alta que uma junto ao disjuntor.

Sua formação é ilustrada na figura abaixo, para uma falta monofásica em um sistema solidamente aterrado, com o sistema representado por uma tensão U_s e uma reatância X_s , a linha representada por elementos indutivos e capacitivos em cascata caracterizada por um valor X_L por unidade de comprimento de reatância à frequência industrial e por um valor Z de impedância de surto. Para o estudo consideramos a tensão em ambos os lados do disjuntor idênticas logo antes

da interrupção de corrente e igual ao valor máximo da queda de tensão ocorrida entre o disjuntor e o ponto de curto.



A IEC determina que as características nominais de interrupção de faltas quilométricas sejam especificadas para disjuntores destinados a manobras de linhas com tensão nominal maior que 57kV e capacidade nominal de interrupção de 12,5kA. Para definir as características padronizadas, a IEC utiliza valores referentes à interrupção de uma falta monofásica em sistema solidamente aterrado, considerando que este cobre os outros tipos de falta.

A IEC então padroniza parâmetros para o lado da fonte e da linha separadamente.

Para o lado da fonte temos: tensão igual a nominal do sistema, corrente de curto igual a de interrupção nominal do disjuntor, TRTI igual a especificada para falta terminal e tensão de restabelecimento prospectiva (correspondente somente ao lado da fonte) definida conforme a tabela abaixo com parâmetros u_1 e u_c pelas envoltórias definidas pelas as mesmas expressões usadas para interrupção de faltas terminais com k_{pp} para faltas quilométricas sempre igual a 1.

TABELA - CARACTERÍSTICAS PADRONIZADAS DE TRT - LADO DA FONTE

NOTAS	Características a dois parâmetros					s(kV/ μ s)
	k_{af}	t_3 (μ s)	td (μ s)	u' (kV)	t' (μ s)	
(1)	1,4	u_c/s	$0,15t_3$	$u_c/3$	$td+t_3/3$	$0,62 \leq s \leq 0,98$

NOTAS	Características a quatro parâmetros							s(kV/ μ s)
	k_{af}	u_c (kV)	t_1 (ms)	t_2 (μ s)	td (μ s)	u' (kV)	t' (μ s)	
(2)	1,4	$1,87u_1$	u_1/s	$4t_1$	2	$u_1/2$	$td+u_1^2/s$	2
(3)	1,5	$2u_1$	u_1/s	$3t_1$	2	$u_1/2$	$td+u_1^2/s$	3

NOTAS:

- (1) Parâmetros definidos para $15kV \leq U_r < 100kV$
- (2) Parâmetros definidos para $100kV \leq U_r \leq 800kV$
- (3) Parâmetros definidos para $U_r = 1100kV$ e $U_r = 1200kV$

Para o lado da linha temos: Impedância de surto Z , fator de pico k , fator de taxa de crescimento s e tempo de retardo td_L , com valores definidos na tabela a seguir

TABELA - CARACTERÍSTICAS PADRONIZADAS DE LINHAS DE TRANSMISSÃO PARA FALTA QUILOMÉTRICA

Tensão nominal U_r (kV)	Impedância de surto $Z(\Omega)_f$	fator de pico k	fator de TCTRT p/ 60Hz $s(kV/\mu s)/kA$	Tempo de retardo $td_L(\mu s)$
$15 \leq U_r < 38$	450	1,6	0,24*	0,1

$48,3 \leq U_r < 170$	450	1,6	0,24*	0,2
$245 \leq U_r < 800$	450	1,6	0,24*	0,5
$U_r > 800$	330	1,6	0,176**	0,5

*para disjuntores de 50 Hz adotar $s = 0,20$

**para disjuntores de 50 Hz adotar $s = 0,147$

Fator de pico expresso por:

$$k = \frac{U_L}{U_0}$$

Onde U_L é o valor da variação da tensão no terminal do disjuntor a partir do valor inicial U_0 mostrada na figura anterior. Esse sendo determinado pela taxa de crescimento do transitório do lado da linha e pelo tempo t_L entre a interrupção da falta e a chegada ao disjuntor da primeira onda refletida, determinado pelo comprimento de linha entre disjuntor e falta, isto é:

$$U_L = (s \cdot I_L) \cdot t_L$$

Onde $s \cdot I_L$ define o valor da taxa de crescimento (I_L valor eficaz de I)

$$t = \frac{2 \cdot L}{c}$$

Onde L é a distância entre o disjuntor e a falta e c = velocidade de propagação.

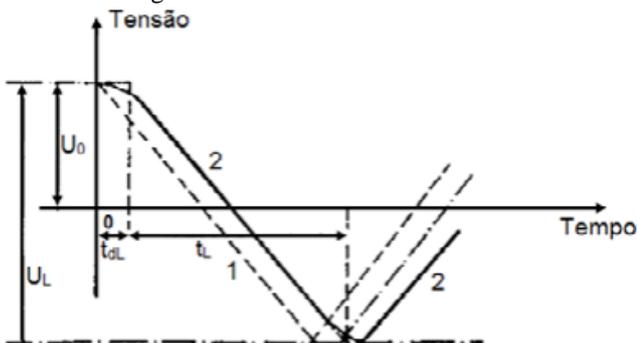
U_0 por sua vez é determinado pela reatância da linha (X_L) por unidade de comprimento, pela distância L e I_L

$$U_0 = \sqrt{2} \cdot X_L \cdot L \cdot I_L$$

O fator de TCTRT(s) não é parâmetro independente uma vez que seu valor pode ser determinado a partir da impedância de linha:

$$s = Z \cdot \sqrt{2} \cdot 2\pi f \cdot 10^{-6}$$

O tempo de retardo t_{dL} resulta do efeito das capacitância concentradas existentes entre o disjuntor e a linha de transmissão que amenizam os ângulos do transitório em forma de dente de serra formado no lado da linha, como mostrado na figura abaixo.



Em geral não se especifica a TRTI do lado da fonte e considera o tempo de retardo nulo, processo aprovado pela IEC.

Como as características padronizadas de TRT se referem apenas a evolução das TRTs formadas no lado da fonte do disjuntor, os valores de taxa de crescimento definidos pelas envoltórias não podem ser considerados como indicativos da suportabilidade às TCTRTs exigida neste tipo de interrupção, sendo necessário calcular em separado valores máximos admissíveis destas taxas considerando os transitórios do lado da fonte e da linha levando em conta o formulário apresentado na norma [1](tabelas 6 e 7). Em

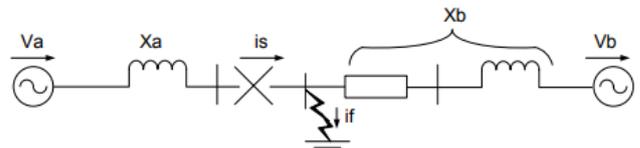
compensação os valores de crista das TRTs definidos pelas envoltórias podem ser utilizados sem restrições.

K. Condições de discordância de fases

Nos sistemas isolados e de neutro aterrado, a condição de maior severidade está associada à ocorrência de uma defasagem angular de 180° entre as tensões de cada lado do disjuntor, tendo assim um k_{pp} igual a 2 para um sistema solidamente aterrado. Em sistemas não solidamente aterrados temos $k_{pp} = 2,5$ e em sistemas de neutro isolado $k_{pp} = 3$.

Na norma IEC o fator de amplitude k_{af} (que relaciona u_c e u_1) é igual a 1,25 para testes de abertura em discordância de fases.

A corrente que passa por um disjuntor devido a discordância de fase entre dois sistemas é consideravelmente menor que uma de curto circuito. Considerando a figura abaixo, onde i_s é a corrente de sincronização, i_f a de falta, x_a e x_b reatâncias de curto circuito dos sistemas A e B respectivamente e $V_a = V_b = v$



Temos que:

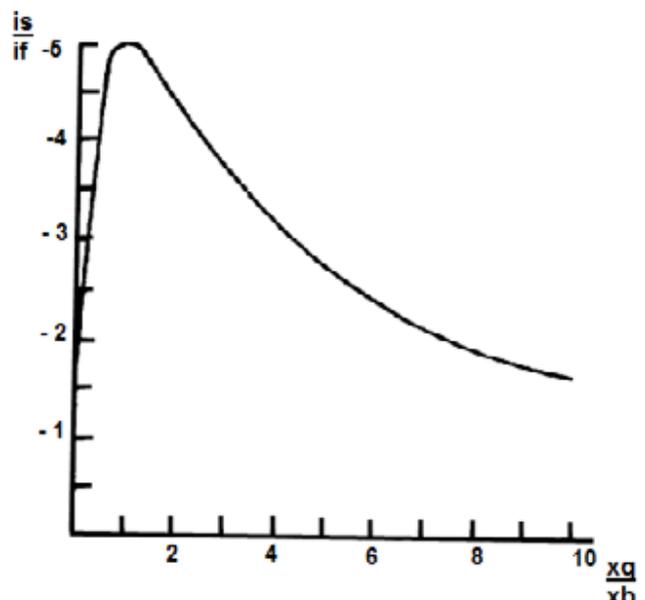
$$i_s = \frac{2v}{x_a + x_b}$$

$$i_f = \frac{v}{x_a} + \frac{v}{x_b} = \frac{v(x_a + x_b)}{x_a \cdot x_b}$$

E portanto, a relação entre elas será:

$$\frac{i_s}{i_f} = \frac{2 \cdot x_a \cdot x_b}{(x_a + x_b)^2}$$

Esta alcançará o valor máximo (0,5) quando $x_a = x_b$, com a variação da relação de correntes em função da relação das impedâncias ilustrada na curva abaixo:



Apesar disso, a ocorrência do valor máximo é pouco provável devido a velocidade de atuação dos modernos sistemas de proteção que determina a abertura antes de se verificar condição de oposição de fase. Mas ela ainda é possível, por isso a IEC padronizou uma corrente de 25% da

capacidade de interrupção nominal do disjuntor para testes de de abertura em condições de discordância de fase.

Por fim, a IEC considera não obrigatória a especificação de características especiais relativas a abertura em discordância de fase. Em seu lugar, normalmente se especifica:

- Capacidade de Interrupção nominal em discordância de fase(kA, Eficaz).

Igual a 25% da componente periódica da capacidade de interrupção nominal em curto-circuito.

- Requisitos de TRT para abertura em discordância de fases

Para a especificação dessas características deve-se calcular informações sobre as formas de onda da tensão de restabelecimento durante a abertura em condições de discordância de fases, na ausência de faltas, se esse tipo de operação for previsto. Para tanto são utilizadas envoltórias para caracterizar essas formas de onda para fins de ensaio e especificações de maneira semelhante às envoltórias da TRT definidas para ensaio de abertura de curtos-circuitos.

Para os parâmetros u_1 e u_C das envoltórias definidos pelas mesmas expressões aplicadas a faltas terminais e quilométricas, temos as características padronizadas padronizadas pela IEC definidas na tabela a seguir:

TABELA - CARACTERÍSTICAS PADRONIZADAS DE TRT - LADO DA FONTE

NOTA S	Características a dois parâmetros							s(kV/μs)
	k_{pp}	k_{af}	t_3 (μs)	t_d (μs)	u' (kV)	t' (μs)		
(1)	2,5	1,25	u_C/s	$0,15t_3$	$u_C/3$	$td+t_3/3$	$0,11 \leq s \leq 0,56$	
(2)	2,5	1,25	u_C/s	$0,15t$	$u_C/3$	$td+t_3/3$	$0,62 \leq s \leq 0,99$	
(3)	2	1,25	u_C/s	$0,05t$	$u_C/3$	$td+t_3/3$	1,54	

NOTAS	Características a quatro parâmetros								s(kV/μs)
	k_{pp}	k_{af}	u_C (kV)	t_1 (ms)	t_2 (μs)	t_d (μs)	u' (kV)	t' (μs)	
(4)	2*	1,4	$1,87u_1$	u_1/s	$A \leq s \leq 2A^{**}$	$2 \leq s \leq 0,1t_1$	$u_1/2$	$td+u'/s$	1,54***

NOTAS:

- (1) Parâmetros definidos para $3,6kV \leq U_r < 100kV$, disjuntores classe S1
- (2) Parâmetros definidos para $15kV \leq U_r \leq 100kV$, disjuntores classe S2
- (3) Parâmetros definidos para $U_r = 1100kV$ e $U_r = 1200kV$
- (4) Parâmetros definidos para $100kV \leq U_r < 800kV$

* Para sistemas não efetivamente aterrados com $100kV \leq U_r < 170kV$, $k_{pp} = 2,5kV/\mu s$

** A = valor de t_2 no ensaio T100(interrupção de falta terminal com corrente de 100%)

*** Para sistemas não efetivamente aterrados com $100kV \leq U_r < 170kV$, $s = 1,67kV/\mu s$

É conveniente que os cálculos de TRT sejam precedidos de simulações dinâmicas em que sejam determinados os máximos ângulos de afastamento de fase possível. Para isso, a simulação deve começar com 180° e reduzi-lo até ser encontrado um para o qual seja alcançada plena conformidade

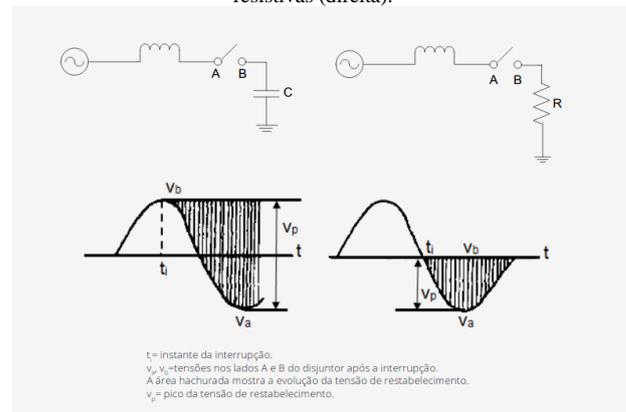
com a norma. O sistema de proteção da subestação deverá ser ajustado para garantir que a proteção out of step obrigue o disjuntor a abrir antes deste ângulo de discordância ser atingido.

III. CARACTERÍSTICAS RELATIVAS À MANOBRA DE CORRENTES NORMAIS

A interrupção das correntes verificadas em condições normais de funcionamento do sistema – com ordem de grandeza variável entre zero ampères e a corrente nominal do disjuntor – solicita de diferentes formas o equipamento, conforme o fator de potência verificado. Merece atenção particular a interrupção de correntes capacitivas e de pequenas correntes indutivas, que exigem a especificação de características especiais sempre que o disjuntor estiver destinado a realizar essas operações, isto é, chavear motores, reatores ou transformadores em vazio (pequenas correntes indutivas), banco de capacitores ou linhas de transmissão abertas (correntes capacitivas).

A interrupção de correntes de carga com fator de potência próximo de 1 é a operação de abertura executada com maior facilidade pelos disjuntores, não exigindo a especificação de características especiais. Neste tipo de interrupção, normalmente apenas a componente de frequência industrial da tensão de restabelecimento é significativa. Já na interrupção de correntes capacitivas, uma componente contínua se somará à componente de frequência industrial. Assim, no caso de interrupção de correntes capacitivas, a tensão de restabelecimento na ausência de reacendimento pode aproximar-se de duas vezes o valor de crista da tensão aplicada, já no caso de abertura de corrente com fator de potência próximo da unidade, o pico de tensão de restabelecimento não ultrapassará 1,0 pu. do valor de crista da tensão aplicada. A figura 1 ilustra a comparação entre as duas interrupções citadas.

Fig. 1 – Comparação entre abertura de correntes capacitivas (esquerda) e resistivas (direita).



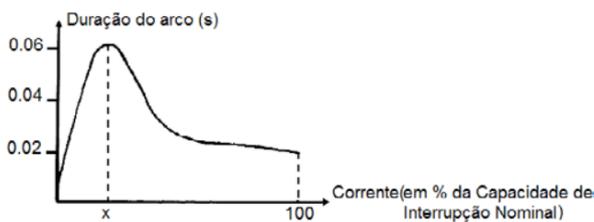
A. Problemas das Correntes Críticas

Na especificação de disjuntores a óleo em geral era necessário levar em conta a possibilidade de certas correntes de baixo valor serem críticas para o disjuntor. Nestes disjuntores, a extinção do arco formado entre os terminais de um pólo aberto era feita com auxílio de uma movimentação do óleo isolante provocada pela formação de gases decorrente

da própria presença do arco. Essa movimentação era necessária para desionização do caminho percorrido pelo arco, sem a qual o disjuntor sofreria reignições ou reacendimentos, por não poder suportar as tensões de restabelecimento. Correntes menores possuíam menores taxas de vaporização do óleo, e, por essa razão, poderia dificultar sua interrupção.

A figura abaixo ilustra esta situação, onde é apresentada a curva de variação do tempo de duração do arco com o valor da corrente. Nela pode-se observar a duração máxima de arco que pode corresponder à corrente crítica.

Fig. 2 – Variação da relação da duração do arco com o valor da corrente a interromper num disjuntor a óleo



Em disjuntores de pequeno volume de óleo, podia-se obter uma característica na qual os tempos de interrupção eram praticamente independentes do valor da corrente, não havendo assim uma corrente que fosse crítica para o equipamento. Esse efeito era, em geral, obtido pela utilização de uma das duas alternativas: ou adição de uma bomba de injeção de óleo ou a pressurização permanente das câmaras do disjuntor. O aumento da velocidade de separação dos contatos ou a utilização de maior número de câmaras também podiam contribuir para a interrupção na região de correntes críticas. Assim, justifica-se por que era importante exigir, quando da especificação de disjuntores a óleo, que esses equipamentos fossem submetidos a ensaios que demonstrassem sua imunidade ao problema das correntes críticas. Era desejável, também que o fabricante apresentasse, curvas de variação do tempo de arco com o valor da corrente a interromper, baseadas em ensaios de protótipo, de forma que fosse claramente demonstrada, nessa fase, a inexistência de correntes críticas para o equipamento. A Norma IEC 62271-100 (cláusula 6.107) recomenda a realização de ensaios de corrente crítica em qualquer tipo de disjuntor, sempre que o tempo de arco mínimo, nos ensaios de interrupção de curtos-circuitos das séries T10, T30 ou T60, tenha duração igual ou superior a meio ciclo em relação ao tempo de arco mínimo registrado numa das séries adjacentes.

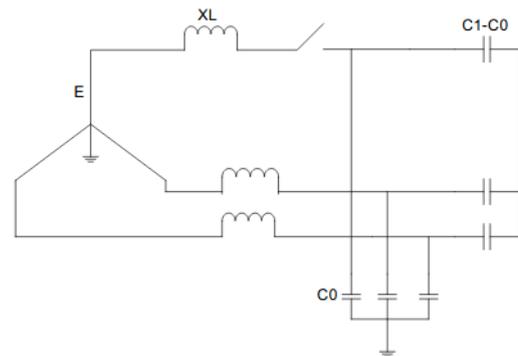
B. Abertura e Fechamento de Correntes Capacitivas

Na abertura de correntes capacitivas, tanto para banco de capacitores quanto para linhas em vazio, eles são mantidos carregados (em tensão) após a interrupção em cada fase. Essa tensão mantém-se aproximadamente constante, sofrendo uma lenta redução devido às correntes de fuga, já a tensão na fonte aumenta com a frequência do sistema, conforme ilustrado na figura 1. Nessas condições, a tensão de restabelecimento no disjuntor crescerá lentamente no início, facilitando assim a interrupção, que deverá ser feita por cada pólo do disjuntor após o primeiro zero de corrente. Após meio ciclo depois da

interrupção, a tensão de restabelecimento (TR) alcançará um valor de pico elevado. Esse valor elevado juntamente com uma insuficiente separação dos contatos, pode causar o reacendimento do arco através do disjuntor.

Este valor de pico da tensão de restabelecimento dependerá do aterramento do sistema e do banco de capacitores e da relação $C1/C0$. A figura abaixo mostra uma representação generalizada de todas as formas de circuitos capacitivos energizados a partir de uma fonte aterrada.

Fig. 3 – Representação generalizada de todas as formas básicas de circuitos capacitivos energizados a partir de uma fonte aterrada



Quando o disjuntor não consegue suportar a tensão de restabelecimento a que é exposto, ocorrerá reacendimento do arco elétrico através de suas câmaras, reconectando o capacitor à fonte. Como consequência, a tensão no capacitor passará a oscilar em torno da tensão da fonte, ultrapassando-a por um valor igual à tensão de restabelecimento existente antes do reacendimento do arco.

As figuras a seguir ilustram a evolução da tensão de restabelecimento após interrupção em diferentes casos.

Fig. 4 – Pico da tensão de restabelecimento através dos contatos do primeiro pólo do disjuntor ao abrir uma corrente capacitiva sem reacendimento.

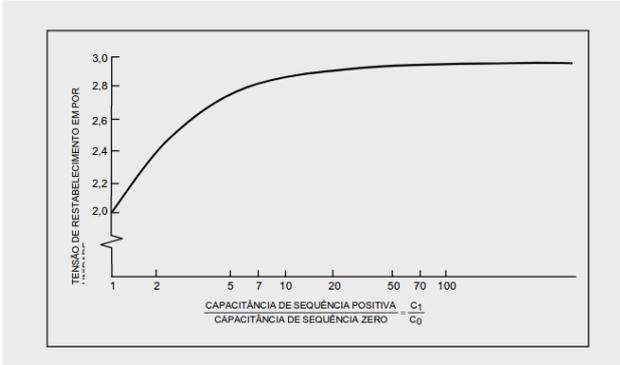


Fig. 5 – Escalada da tensão em consequência de reacendimentos na abertura de um banco de capacitores com neutro solidamente aterrado.

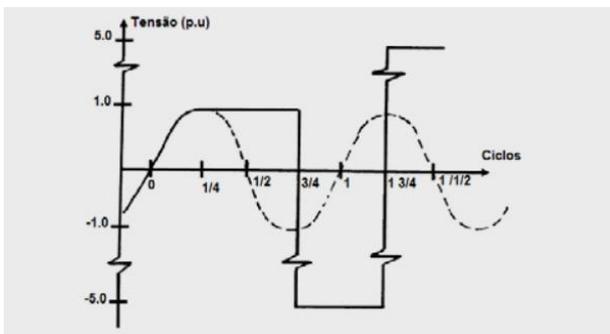
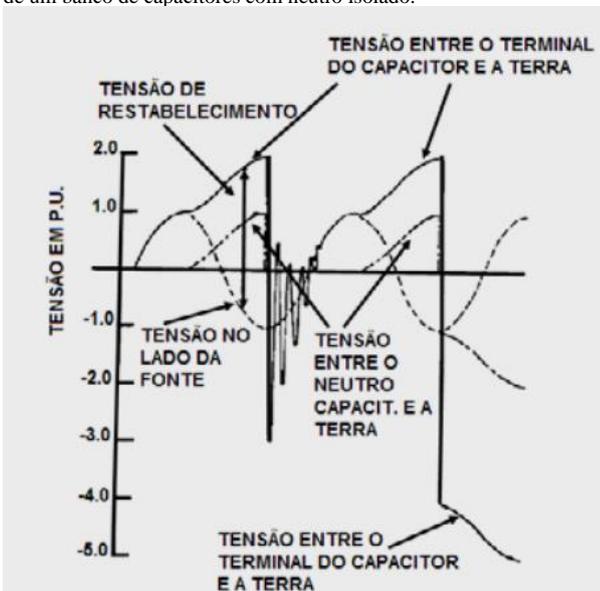


Fig. 6 – Escalada de tensão em consequência de reacendimentos na abertura de um banco de capacitores com neutro isolado.



A norma IEC 62271-100 classifica os disjuntores em duas classes, de acordo com a probabilidade aceita de ocorrência de reacendimentos na interrupção de correntes capacitivas: C1 (baixa probabilidade de reacendimentos), e C2 (baixíssima probabilidade de reacendimentos). A mesma norma define diferentes séries de ensaios para os disjuntores de cada classe.

As manobras de abertura de correntes capacitivas caracterizam-se, normalmente, pela quase inexistência de uma fase térmica da interrupção, devido aos valores reduzidos das correntes envolvidas. Isto facilita a ocorrência

de interrupções prematuras, em instantes nos quais o afastamento dos contatos pode ser insuficiente para oferecer a suportabilidade dielétrica capaz de contrapor-se às tensões de restabelecimento formadas. As descargas disruptivas que têm lugar nos primeiros instantes que se seguem às interrupções são denominadas reignições. Essas reignições são consideradas aceitáveis por não produzirem sobretensões.

Uma condição particularmente grave da abertura de correntes capacitivas é a abertura em seguida a uma rejeição de carga, quando a tensão aplicada à linha ou ao capacitor pode alcançar patamares da ordem de até 1,5 p.u., o que resultaria num aumento de 50% da tensão de restabelecimento. A consideração de tensões pré-abertura dessa ordem de grandeza na especificação provavelmente exigiria a aquisição de disjuntores com tensões nominais mais elevadas para evitar reacendimentos.

A exigência de bom desempenho na abertura de linhas em vazio ou de banco de capacitores com neutro aterrado durante a ocorrência de uma falta monofásica, é comum nas especificações de disjuntores. Este tipo de manobra só se caracteriza como abertura de corrente capacitiva nos polos das fases não afetadas pela falta. Em simulações dessa manobra, é conveniente definir os tempos de separação dos contatos dos polos do disjuntor de forma que a interrupção da fase em falta ocorra por último.

O fechamento de banco de capacitores, isoladamente ou na presença de bancos já energizados (back-to-back), dá lugar à formação de correntes de alta frequência. O disjuntor deve ser capaz de suportar essas correntes, que podem também ser reduzidas pela utilização de resistores de fechamento no disjuntor (100 a 200 Ω por fase) ou de reatores série no circuito.

Na energização de linhas de transmissão desconectadas na outra extremidade, o fenômeno é diferente do fechamento de capacitores, devido à natureza distribuída das reatâncias e capacitâncias da linha. Em seguida à energização, uma onda trafega pela linha, dobrando o valor ao atingir a outra extremidade. Em linhas de transmissão longas, esse efeito se superpõe ao efeito Ferranti. Nos sistemas de extra-alta tensão, em que a relação entre o nível de isolamento e a tensão nominal é baixa, a superposição dos dois efeitos pode provocar uma descarga disruptiva. Para reduzir o valor da sobretensão de manobra, os disjuntores destinados ao chaveamento de linhas longas são, em geral, providos de resistores de fechamento de valor ôhmico (por fase) aproximadamente igual à impedância de surto da linha. A energização é feita, inicialmente, através desse resistor, que é curto-circuitado pelo chaveamento dos contatos principais 10 a 20 ms depois.

Os itens a seguir devem ser apresentados na especificação de disjuntores destinados à manobra de capacitores ou linhas de transmissão em vazio.

C. Capacidade de interrupção nominal de linhas em vazio (ou de bancos de capacitores)

Essa corrente (que não deve exceder a corrente nominal do disjuntor) é a maior que o disjuntor deve ser capaz de interromper no tipo de manobra em referência, sob tensão nominal e nas condições de uso e comportamento especificadas pela norma IEC 62271-100. Os valores

padronizados são definidos na tabela 9 da norma. Algumas concessionárias preferem definir esse parâmetro considerando os valores mais elevados de sobretensão sustentada e sobrefrequência possíveis de ocorrer em seguida a contingências (como uma rejeição de carga) anteriores à abertura. Idealmente, essa sobretensão e sobrefrequência devem ser determinadas por meio de estudos dinâmicos prévios. Deve-se ter em mente que a especificação de valores desnecessariamente elevados pode tornar imperativa a aquisição de disjuntores com tensões nominais mais elevadas.

A corrente será também determinada pelo comprimento da linha. Por uma questão de uniformidade, recomenda-se considerar comprimentos não inferiores a certo valor.

D. Tensão de restabelecimento associada à interrupção de corrente capacitiva

A norma IEC 62271-100 permite definir envoltórias padronizadas de tensão de restabelecimento aplicáveis à interrupção de correntes capacitivas, que devem ser comparadas com os gráficos da evolução no tempo das TRs calculadas por meio de simulações digitais das interrupções previstas. Os parâmetros dessas envoltórias (u_1 , t_1 , u_c , t_2) são baseados na tabela 32 da norma. O parâmetro mais importante, u_c (valor de pico da TR) tem seu valor estabelecido, para sistemas de 60 Hz, como “igual ou maior a 1,95 vezes o valor de pico da tensão de ensaio”. O valor de pico pode ser calculado por: $u_c = 1,95 * 1,4 * U_r \cdot \sqrt{2} / \sqrt{3}$.

Considerando para t_2 o valor (7,3 ms) definido para sistemas de 60 Hz na tabela 32 da norma, pode-se definir (negligenciando u_1 e t_1) uma taxa de crescimento padronizada pela relação u_c/t_2 . A tabela I a seguir apresenta, para algumas tensões nominais, os valores de u_c e da taxa de crescimento (TCTR) calculadas dessa forma, para comparação com os gráficos da evolução no tempo das TRs calculadas.

TABELA I:

PARÂMETROS DAS ENVOLTÓRIAS PADRONIZADAS DAS TRS NA ABERTURA DE CORRENTES CAPACITIVAS

U_r (kV _{ef})	U_c (kV _{pico})	TCTR (kV/ μ s)
145	323	0,044
245	546	0,075
362	807	0,111
550	1226	0,168
800	1783	0,244

E. Capacidade de estabelecimento em operação isolada ou back-to-back

Especifica-se o valor de crista da corrente, a frequência e a constante de tempo da envoltória da oscilação de alta frequência, para caracterizar a rapidez de sua atenuação. Esse requisito é adicional à capacidade de estabelecimento correspondente à frequência industrial. Sendo a manobra de bancos de capacitores feita, em geral, diariamente, e tendo em vista o previsível desgaste dos contatos causados pelas altas correntes e frequências, é conveniente exigir que os disjuntores sejam capazes de efetuar o número de operações

diárias esperado ao longo de sua vida útil, sem necessidade de mudança de contatos ou qualquer forma de manutenção mais que uma vez por ano.

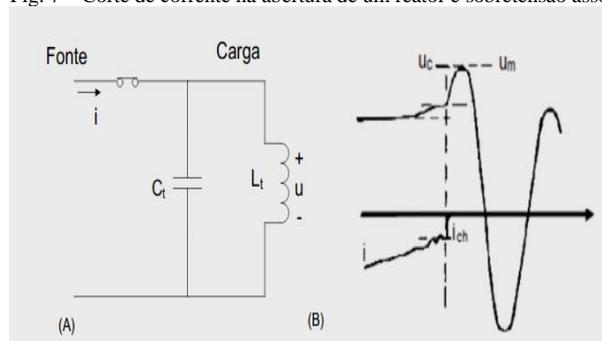
F. Corrente de curta duração para curtos-circuitos próximos a bancos de capacitores

Especifica-se o valor de crista de corrente, a frequência e a constante de tempo da envoltória da oscilação. Esse requisito é adicional à declaração da corrente suportável nominal de curta duração da componente de frequência fundamental. Essa característica deve ser especificada não apenas para disjuntores que chaveiam capacitores, mas para todos os disjuntores próximos de bancos de capacitores, que podem ser submetidos às correntes de alta frequência causadas por sua descarga, em caso de um curto-circuito na subestação.

G. Abertura de pequenas correntes indutivas

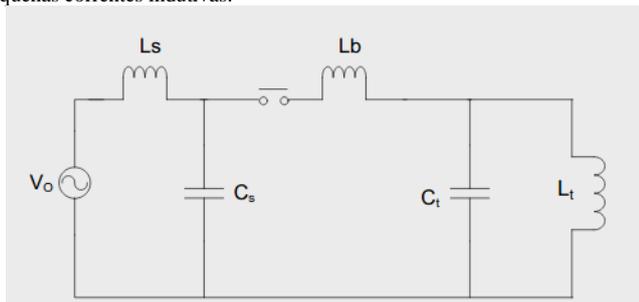
Na abertura de motores, transformadores em vazio, reatores e transformadores com reatores ligados ao terciário, as correntes a serem interrompidas (indutivas e pequenas com relação à capacidade de interrupção nominal dos disjuntores) passam por um processo de instabilidade ao se aproximarem de zero, durante o período de arco. Esse processo é determinado pela interação entre o arco do disjuntor e a rede e costuma determinar uma interrupção prematura ou “corte” da corrente, causada por sua passagem por zero antes do instante em que o zero de corrente ocorreria se o arco não se tornasse instável. O fenômeno do corte de corrente determina a formação de sobretensões nos terminais do equipamento desconectados em virtude da transformação da energia magnética armazenada no circuito indutivo em energia eletrostática, transferida para as capacitâncias do circuito (usualmente pequenas e formadas, principalmente, pelas capacitâncias para a terra de buchas e ligações). Após atingir um primeiro máximo, u_m , a tensão na carga indutiva oscilará a uma frequência determinada pelos parâmetros do circuito (usualmente 0,5 a 10 kHz). A figura abaixo ilustra essa situação.

Fig. 7 – Corte de corrente na abertura de um reator e sobretensão associada



A determinação dos valores das sobretensões esperadas resultantes da interrupção de transformadores em vazio, reatores etc. pode ter interesse para a definição dos disjuntores que farão a manobra desses equipamentos. Essas sobretensões são determinadas principalmente pelos valores da corrente cortada i_{ch} , da capacitância C_t e da indutância L_t da carga. A figura 8 mostra o circuito equivalente utilizado para análise.

Fig. 8 – Circuito equivalente simplificado para análise da manobra de pequenas correntes indutivas.



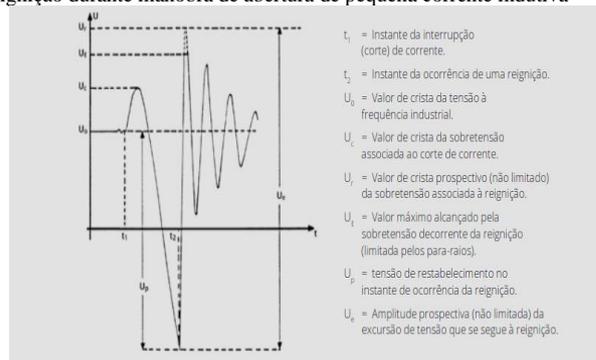
Como nem sempre a energia magnética de um circuito é inteiramente convertida em energia eletrostática, é introduzido o conceito de eficiência magnética (η_m), definida como a relação entre a energia magnética liberada pela carga no processo de desmagnetização e aquela recebida durante a magnetização. Para reatores, motores e transformadores com reatores no terciário η_m é próxima da unidade, enquanto para transformadores em vazio é da ordem de 0,3 a 0,5. Utilizando o fator η_m levando em conta a elevação prévia da tensão durante o período de arco até u_c , a conversão de energia eletromagnética em eletrostática passa a ser expressa por: $0,5 \cdot L_t \cdot i_{ch}^2 \cdot \eta_m + 0,5 \cdot C_t \cdot u_c^2 = 0,5 \cdot C_t \cdot u_m^2$. O fator de sobretensão é $k_a = u_m/u_0$.

Além das sobretensões causadas pelos cortes de corrente, ainda podem ocorrer, na interrupção de pequenas correntes indutivas, outras sobretensões de manobra causadas por reignições posteriores às interrupções. Estas ocorrem quando as tensões de restabelecimento formadas em seguida a essas interrupções excedem a suportabilidade dielétrica do espaço entre os contatos (em processo de afastamento) de um pólo do disjuntor operante. As sobretensões causadas por reignições se caracterizam por frequências superiores (da ordem de centenas de kHz) às daquelas causadas pelo corte de corrente (da ordem de 1 a 5 kHz). Além disso, as amplitudes das sobretensões decorrentes de reignições também superam, normalmente, as associadas a cortes de corrente: sendo k_a o valor (em p.u.) de crista das sobretensões do último tipo, as sobretensões resultantes de reignições podem alcançar valores de até $(k_a + 2)$ p.u.

Enquanto as amplitudes das sobretensões de manobra solicitam o isolamento para a terra dos enrolamentos dos equipamentos chaveados, a taxa de variação das oscilações de tensão que caracterizam as sobretensões solicitam, particularmente, o isolamento entre espiras dos enrolamentos. Este tipo de solicitação normalmente só alcança níveis críticos no caso de reignições, devido à alta frequência das oscilações de tensão a elas associadas. Embora os para-raios limitem a patamares seguros os valores eventualmente excessivos das amplitudes das sobretensões de manobra, nada podem fazer para limitar as taxas de variação das oscilações de tensão a elas associadas.

Essas oscilações estão ilustradas no gráfico a seguir.

Fig. 9 – Oscilações de tensão associadas ao corte de corrente e a uma reignição durante manobra de abertura de pequena corrente indutiva



Não é recomendado incluir nas especificações dos disjuntores dedicados à função em tela a exigência da limitação a níveis máximos das sobretensões de manobra para a terra. Considera-se preferível exigir que o fabricante informe o valor ou faixa de valores do número de corte característico dos equipamentos em aquisição, e informações sobre os ensaios que levaram à sua determinação. Esses dados poderão ser úteis em cálculos das sobretensões de manobra esperadas nas operações de abertura.

No que diz respeito ao desempenho do disjuntor na ocorrência de reignições, não devem ser especificados limites a serem observados nem feitas exigências de ensaios de laboratório para comprovação de conformidade. Entretanto, para disjuntores destinados ao chaveamento de reatores, é recomendável que o usuário realize, com apoio do fabricante dos disjuntores no que diz respeito a suas características, estudos que comprovem, por meio de simulações, que as taxas de variação das oscilações de tensão associadas a reignições na subestação não ultrapassarão o máximo suportável pelo isolamento entre espiras dos enrolamentos (a ser informado pelo fabricante do reator). Caso esse máximo seja excedido, o uso de sincronizadores para impedir a ocorrência de reignições pelo controle do processo de abertura poderá ser especificado. Esses dispositivos serão calibrados para impedir que o início do movimento dos contatos dos polos, nesse processo, tenha lugar pouco antes da passagem por zero da corrente indutiva a ser interrompida. Ao impedir a ocorrência de interrupções com insuficiente separação dos contatos, os sincronizadores estarão também inviabilizando a ocorrência de reignições.

Os itens a seguir são recomendados nas especificações dos disjuntores.

H. Características dos transformadores e reatores

Para transformadores e autotransformadores as características recomendadas para estarem nas especificação dos disjuntores são: tipo (trafo ou autotrafo), relação de transformação, ligação, indicação se é trifásico ou não, potência nominal (MVA), corrente de magnetização (%) e impedâncias(%).

Para reatores é recomendado incluir o tipo de ligação (indicando também se trifásico ou não), tensão nominal (kV), potência nominal trifásica (MVAr à tensão nominal), frequência natural (Hz), parâmetros à frequência natural: indutância (H), capacitância (nF), resistência (Ω) e a relação X_0/X_1 à frequência fundamental.

I. Características da subestação (no caso de chaveamento de reatores)

Neste caso são recomendados a especificação de: arranjo físico (diagrama unifilar da subestação, desenhos de planta e corte do pátio de manobra), composição e disposição dos condutores (cabos e tubos) na SE – entre si e para a terra, capacitâncias parasitas admitidas para os equipamentos instalados, na faixa de 100 a 500 kHz. e o valor máximo suportável do isolamento entre espiras dos enrolamentos do reator (informado pelo seu fabricante).

REFERÊNCIAS

- [1] INOVAEQ, “Equipamentos de alta tensão- Prospecção e Hierarquização de Inovações Tecnológicas” [Online]. Available: http://institucional.taesa.com.br/wp-content/uploads/2018/11/INOVAEQ_Livro_Completo.pdf. [Acesso em 07 Abril 2020].
- [2] Fernando Rodrigues Alves, “Características do Disjuntor para abertura de linha de transmissão em vazio- Metodologia de Estudo” [Online]. Available: <https://saturno.unifei.edu.br/bim/0030105.pdf> [Acesso em 06 Maio 2020].
- [3] ABNT. Transformadores de Potência: Parte 1 – Generalidades. Norma Técnica ABNT NBR 5356-1:2007. ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ. Dez. 2007, 95 p.
- [4] IEC. Power Transformers - Part 18: Measurement of Frequency Response. Technical Standard IEC60076- 18 Ed. 1.0 en. IEC International Electrotechnical Commission. Geneva, CH. July 2012, 90 p
- [5] ABNT. Transformadores de Potência: Parte 5 – Capacidade de Resistir a Curtos-Circuitos. Norma Técnica NBR 5356-5. ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ. Dez. 2007, 18 p
- [6] ABNT. Transformadores de Potência: Parte 2 – Aquecimento. Norma Técnica ABNT NBR 5356-2:2007. ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, RJ. Dez. 2007, 23 p.