

## CAPÍTULO 6

### PROTEÇÃO E MONITORAÇÃO

#### 6.1. INTRODUÇÃO

A função central do conversor deve ser considerada através de um sistema apropriado de proteção.

Para um projeto tecnicamente seguro com respeito a aspectos de altas correntes, as faltas internas são causadas, em termos práticos, exclusivamente por falha de tiristores. Uma falha de tiristor significa a perda da capacidade de bloqueio ocasionando um curto-circuito que deve ser interrompido por um fusível especial em série com o tiristor defeituoso.

As sobretensões externas e sobrecargas são perigosas para os tiristores. As sobrecargas podem ser causadas por pulsos de disparo ausentes ou impróprios ou mesmo uma falha no sistema de refrigeração (sistema de excitação de grande porte).

A filosofia de proteção visa então três níveis diferentes:

- Manter a operação através de medidas seletivas desde que haja redundância disponível;
- Limitar danos por meio de desconecções rápidas e indicação da causa do defeito;
- Evitar superesforços através de medidas preventivas.

As medidas preventivas compreendem:

- a - limitação de sobretensões a valores seguros;
- b - limitação de sobrecorrentes, em função do tempo, a valores termicamente seguros;
- c - monitoração de pulso e/ou condução dos tiristores;
- d - monitoração do sistema de refrigeração.

Normalmente faz-se o conversor redundante, colocando em paralelo pontes de tiristores adiconais ou tiristores individuais por ramo, para que a operação possa ser mantida sem restrições no caso de defeitos em uma ponte ou um tiristor.

O tiristor defeituoso deve ser desconectado seletivamente para que esta redundância se torne efetiva. Isto é realizado com o fusível especial para tiristores, onde a integral da corrente de ruptura do mesmo deve ser cuidadosamente ajustada a integral da corrente máxima ( $I^2 \cdot t$ ) do tiristor correspondente. Durante o período de interrupção, a corrente de curto-circuito, em desenvolvimento, também flui através dos tiristores paralelos do grupo comutado, que estão diretamente polarizados. A fim de evitar o isolamento dos fusíveis deste grupo, deve passar por cada tiristor somente um terço da corrente de curto-cir

cuito. Por isso, os conversores redundantes compreendem no mínimo três pontes paralelas ou três tiristores por ramo.

Os objetivos da proteção são alcançados pelos seguintes esquemas de proteção:

- proteção de sobretensões
- limitadores de corrente
- monitoração da ponte
- fusíveis para tiristores
- relê de sobrecorrente eletrônico

## 6.2. PROTEÇÃO DE SOBRETENSÕES

Os tiristores têm resistência reversa muito grande e baixa capacitância entre eletrodos. Sua capacidade de suportar transitórios de tensão através de armazenamento e dissipação de energia é por isso limitada. Devem ser fornecidos meios externos para limitar os transitórios de tensão a valores abaixo do pico inverso de tensão do tiristor.

Nas excitatrizes estáticas ocorrem transitórios de tensão no lado de CA, no lado do rotor e internas ao retificador. Estas sobretensões e as respectivas proteções são analisadas a seguir.

### 6.2.1. TRANSITÓRIOS COM ORIGEM NO CIRCUITO PRIMÁRIO DO TRANSFORMADOR DE EXCITAÇÃO

As descargas atmosféricas, surtos de linha para terra com uma frente de onda muito rápida, são acopladas ao secundário do transformador de excitação através da capacitância entre os seus enrolamentos.

As operações de chaveamento no sistema de potência também podem causar transitórios, cujas magnitudes dependem da velocidade de chaveamento e do ponto da onda de tensão onde tal chaveamento ocorre.

Se o surto é acoplado ao secundário através da capacitância entre enrolamentos como em uma descarga atmosférica, a instalação de capacitores no secundário do transformador de excitação ou uma blindagem eletrostática entre os dois enrolamentos atenua efetivamente o surto.

A capacitância entre enrolamentos nos transformadores de retificadores de potência elevada, é da ordem de 1000 pfd (0,001 ufd). Um capacitor de 0,1 ufd, conectado de linha para terra no secundário do transformador, atenua um transitório de frente de onda muito rápida de  $0,1/0,001 = 100,0$ .

A conexão de para-raios da linha para terra no primário do transformador, caso esta proteção já não esteja sendo utilizada no secundário do transformador elevador ou nos terminais do gerador, limitará a crista do transitório de uma descarga atmosférica ou de um surto de chaveamento.

Deve-se notar que os surtos de chaveamento são normalmente de frente lenta e são acoplados ao secundário por ação transformadora; os surtos de descarga atmosférica são acoplados pela capacitância entre enrolamentos. Portanto, o para-raio deve ser dimensionado com uma tensão de centelhamento para surtos de frente lenta inferior a capacidade de bloqueio do retificador considerando a relação de transformação. E com base na tensão de centelhamento do para-raio para surtos de frente rápida, determina-se o fator de atenuação do capacitor dividindo-se a tensão de centelhamento pela tensão da capacidade de bloqueio do retificador. No caso de se utilizar blindagem eletrostática entre os enrolamentos, é dispensado o uso de capacitores.

### 6.2.2. TRANSITÓRIOS GERADOS NO LADO DO ROTOR

As sobretensões no lado do rotor podem ter origem em uma das seguintes condições operativas anormais [44]:

- sincronização com defasagem angular
- auto excitação
- faltas assimétricas com baixa corrente de campo
- perda de sincronismo

Estas sobretensões podem atingir valores superiores a 100 vezes a tensão nominal de campo (referida a tensão na linha do entreferro) [33].

Durante as condições transitórias citadas acima a corrente de campo pode assumir valores negativos por um certo intervalo de tempo. Entretanto, como a corrente de campo não pode fluir no sentido negativo, nos geradores com excitatrizes está-

ticas sem esta capacidade, o circuito de campo comporta-se como se estivesse aberto durante este período. Conseqüentemente, a tensão induzida no campo aparece nos seus terminais.

A conexão incorreta de uma das fases dos transformadores de tensão do equipamento de sincronização pode conduzir a ângulos de defasagem de  $\pm 60^\circ$ ;  $\pm 120^\circ$  e  $180^\circ$ , mesmo que a indicação do sincronoscópio aparente ser correta. Nesta condição a corrente de campo pode tornar-se negativa já no primeiro ciclo da rede ou mesmo após vários ciclos.

Os curto-circuitos entre fases são os mais desfavoráveis. Isto se deve, em parte, a descontinuidade na componente contínua da corrente de campo que é a metade da que ocorre durante um curto-circuito trifásico. Por outro lado, junto a componente CA (com frequência fundamental), cuja amplitude permanece inalterada em relação ao curto trifásico, é produzida uma componente adicional com o dobro da frequência fundamental. Por isso, a amplitude total da componente de CA na corrente de campo resultante é maior do que no curto-circuito trifásico. Assim, no caso de curto-circuitos entre fase a corrente de campo tende a ser ligeiramente mais negativa.

As sobretensões no rotor podem assumir valores que variam significativamente, dependendo do tipo de falta, operação, máquina e do projeto dos enrolamentos amortecedores.

Infelizmente, o tipo de distúrbio que conduziria à maior sobretensão não pode ser precisamente predeterminado. O estudo individual de diversos tipos de distúrbios é um método completamente insatisfatório.

A referência [48] mostra que as maiores sobretensões no circuito de campo são as induzidas por rotação do campo girante do estator em relação ao fluxo produzido pelo enrolamento de campo. As tensões induzidas pela relação de transformação entre estator e rotor desempenham um papel secundário.

Este fato possibilita a determinação dos maiores valores possíveis de sobretensões por meio de um procedimento simples. As tensões de rotação induzidas no circuito de campo (que assume-se estar aberto) são determinadas pelo escorregamento "s" dos campos girantes na base do diagrama do circuito equivalente de eixo direto. Uma vantagem adicional deste método é que pode-se levar em conta as resistências a correntes induzidas nas partes sólidas do rotor, que variam com a frequência, o enrolamento amortecedor e também a saturação.

Com base no maior valor de sobretensão encontrado, que geralmente corresponde a  $s = 1$  em hidrogeradores, pode-se dimensionar o dispositivo de proteção de sobretensões de campo.

O dispositivo de proteção para sobretensões, Figura 6.1, é composto de tiristores antiparalelos disparados por sensores de tensão e do equipamento de desexcitação de campo, que inclui o disjuntor de campo e o resistor de descarga.

O equipamento de desexcitação é necessário já que no caso em que a alimentação do sistema de excitação provem dos terminais do gerador, a desexcitação deve realizar-se independente da tensão de alimentação. No procedimento da desexcitação não se deve empregar o retificador, uma vez que a tensão de alimentação pode estar sendo afetada por algum defeito. Além disso

pode ocorrer que o sistema de excitação possa ser a própria causa do defeito, de modo que não seria possível uma desexcitação através dos retificadores. Por estas razões, emprega-se um sistema que funciona independentemente do retificador e de sua função de desexcitação.

Os enrolamentos de campo são reatores de alta qualidade e, portanto, armazenam energia magnética, ou seja,  $W_{mgt} = L \cdot I^2 / 2$ . Por isso, o princípio utilizado na desexcitação é o de converter esta energia em calor. Isto ocorre parcialmente no interior do enrolamento de campo e parcialmente no resistor de descarga conectado em paralelo ao campo do gerador. A corrente proveniente da excitatriz é cortada (através do disjuntor de campo) ou pelo menos zerada (deslocando-se os pulsos de disparo da ponte para  $180^\circ$  ou  $120^\circ$ , dependendo do tipo do conversor).

O processo de desexcitação ocorre normalmente com a parada de máquina, na atuação de alguma proteção vinculada a abertura do disjuntor principal do gerador, como consequência da atuação da proteção de sobretensão ou para o curto-circuito nos anéis coletores do enrolamento de campo, embora neste último caso a proteção mais efetiva seja através do bloqueio dos pulsos de disparo do retificador.

As principais proteções que devem atuar o disjuntor de campo são, segundo a origem do defeito:

a) Turbina:

- sobrevelocidade
- bloqueio da turbina
- baixa pressão do óleo



## b) Gerador:

- bloqueio do gerador
- diferencial do gerador
- fase dividida
- perda de excitação
- falha para terra no estator do gerador
- seqüência negativa
- sobretensão inatantânea
- sobretensão temporizada
- botoeira de parada de emergência
- bloqueio de marcha em vazio
- sobrecorrente temporizada

## c) Transformador:

- sobrecorrente do neutro do transformador
- relê bucholz

## d) Barra:

- diferencial de barra

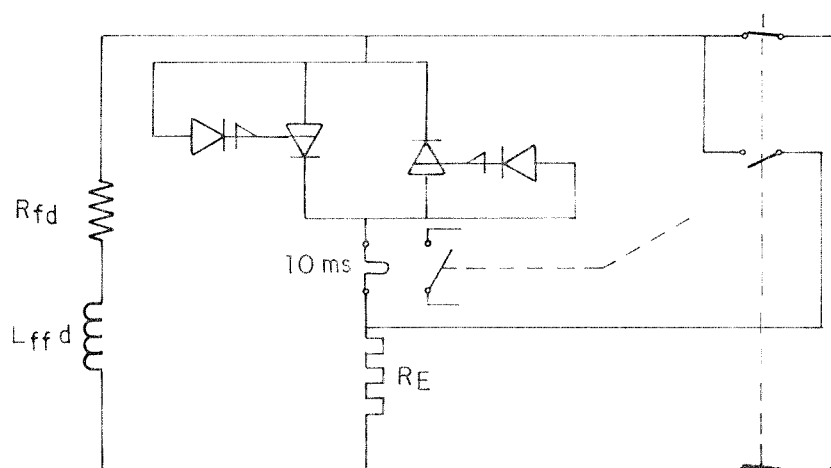


Figura 6.1 - Sistema de desexcitação e proteção de campo

A Figura 6.2 mostra a condição de operação normal onde a tensão da fonte e do campo são iguais. A eliminação da excitação começa, Figura 6.2b, com o fechamento do contato de desexcitação. A corrente total cresce devido a componente adicional  $i_e$  através do resistor de descarga  $R_e$ . Imediatamente após este fechamento, o contato principal começa a abrir. É criado um arco cuja tensão eleva-se rapidamente. A corrente através de  $R_e$  eleva-se enquanto a corrente no arco diminui até a sua extinção completa. A partir de então a comutação está terminada. A tensão induzida  $e_{fd} = L_{ffd} \cdot di/dt$  é a fonte de tensão para a corrente de campo agora fluindo por  $R_e$ .

A corrente de campo diminui gradualmente segundo uma função exponencial com constante de tempo efetiva de

$$T_e = T_d'' \frac{R_{fd}}{R_{fd} + R_e}$$

Normalmente, com um regulador de tensão em condições normais de operação, a desexcitação é iniciada movendo-se a ponte de tiristores para o modo inversor antes de se abrir o disjuntor de campo de modo a que se evite o desgaste dos contatos. Porém o dimensionamento do disjuntor e resistor de descarga deve ser baseado na tensão de saída máxima da ponte (tensão de teto) devido a possibilidade de falha do regulador.

Desprezando-se a queda de tensão na resistência do enrolamento de campo, a tensão que aparece nos contatos principais  $E_{ch}$ , Figura 6.2b, é a soma da tensão de excitação  $E_{exc}$  e a tensão induzida no campo  $E_{fd}$  devido a inversão de corrente.

A seguir são analisados os principais elementos do sistema

ma de desexcitação e proteção de sobretensões. Sõ não estã incluindo o circuito de controle que faz atuar o disjuntor de campo segundo a lōgica descrita.

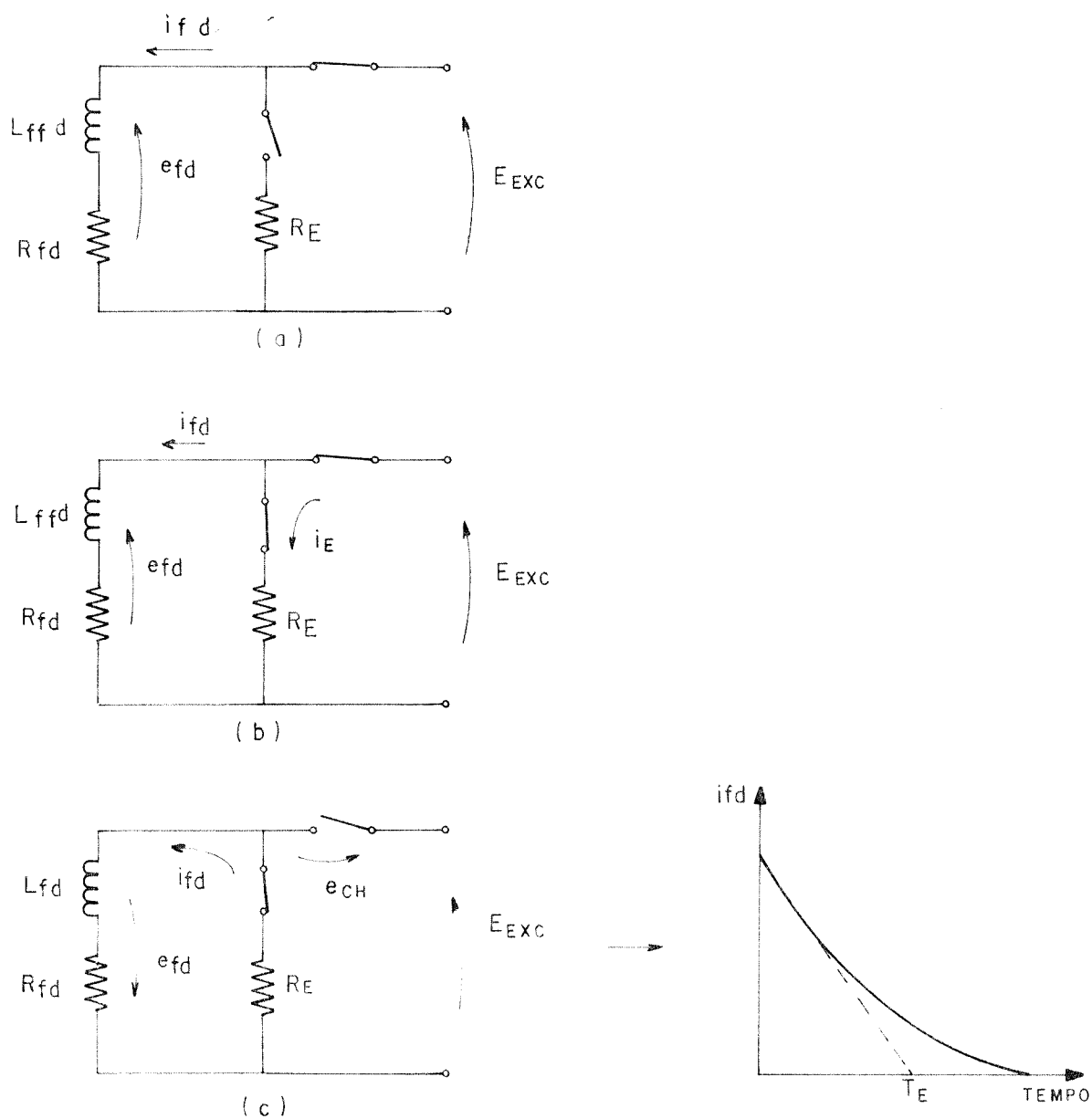


Figura 6.2 - Procedimento para desexcitação do gerador;  
 a) operação normal;  
 b) início da descarga  
 c) desexcitação

### 6.2.2.1. DISJUNTOR DE CAMPO

O disjuntor de campo tem que interromper uma corrente contínua em um circuito RL. Isto só é possível, principalmente para tensões e correntes baixas, com o auxílio da tensão inversa criada através do arco,  $E_{arc}$ , quando da abertura do disjuntor, Figura 6.3. Pode-se escrever a equação da soma das tensões no circuito.

$$E_{ch} = R \cdot i + L \cdot di/dt + E_{arc} \quad (6.1)$$

onde

$R$  - é a resistência equivalente do circuito;

$L$  - é a indutância equivalente do circuito;

$i$  - é a corrente resultante,

de 6.1 pode-se determinar a expressão  $i(t)$

$$i(t) = E_{arc} \cdot e^{-(1/T) \cdot t} - (E_{arc} - E_{ch})/R \quad (6.2)$$

onde

$$T = L/R$$

A condição para que  $i(t)$  passe por zero é que  $E_{arc} > E_{ch}$ . É possível atualmente, com disjuntores a ar comuns, obter-se uma tensão de arco aproximadamente constante durante a extinção [39]. Isto permite se determinar as características teóricas de tensão e corrente. O arco se extingue com a passagem da corrente

por zero no instante (teórico) determinado pela Equação 6.2.

$$t_{\text{arc}} = T \cdot \ln [e_{\text{arc}} / (e_{\text{arc}} - e)] \quad (6.3)$$

Na realidade os disjuntores apresentam desvios em relação ao comportamento idealizado. A tensão do arco necessita de algum tempo para elevar-se, aproximadamente 10 ms para o aquecimento do plasma. O decaimento da corrente começa somente após a tensão do arco ultrapassar a tensão na chave  $E_{\text{ch}}$ .

A característica mais importante do disjuntor é a sua capacidade de interrupção, que é determinada pela tensão de arco máxima, corrente interrompida máxima e energia de arco máxima.

A tensão é dada principalmente pelas dimensões geométricas. As forças dinâmicas e a capacidade de extinção de arco são importantes para determinação da corrente.

A energia permissível dentro do arco é limitada pela capacidade de refrigeração da câmara e da distância entre os contatos. É a energia armazenada no campo magnético do rotor, que é convertida em calor no plasma. Por isso, normalmente a indutância máxima admissível ou a constante de tempo do circuito é fornecida nos dados do disjuntor.

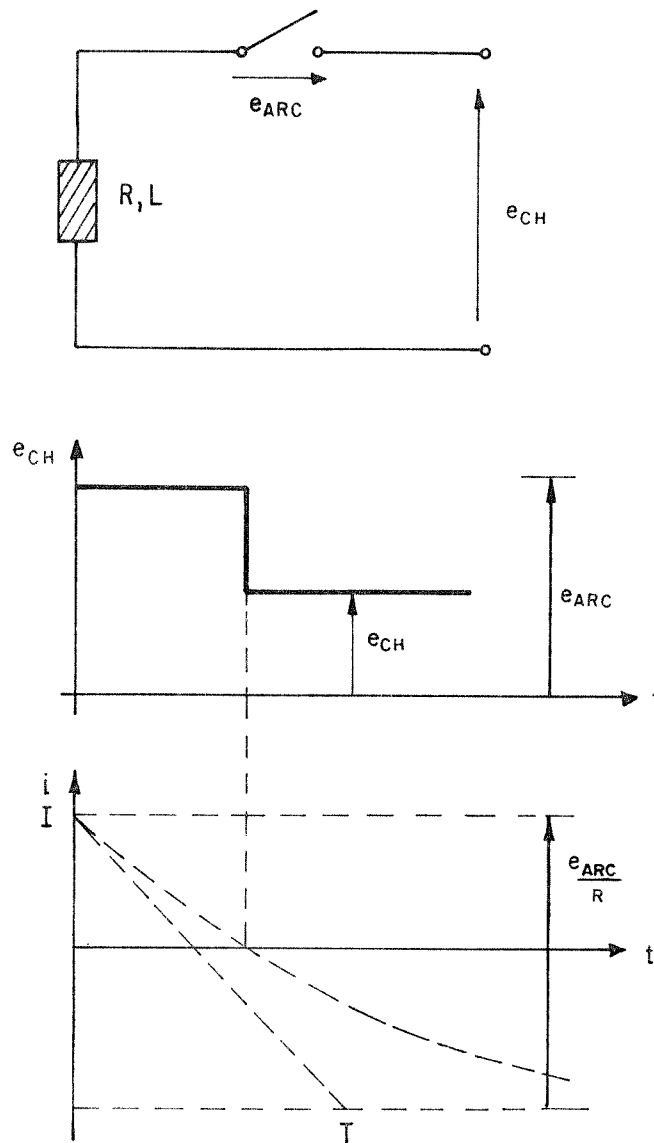


Figura 6.3 - Processo de extinção da corrente de campo

#### 6.2.2.2. RESISTOR DE DESCARGA

Conforme já mencionado, uma parte da energia armazenada no enrolamento de campo é convertida em calor no resistor de descarga. O dimensionamento é determinado pela capacidade de armazenamento de calor. Outra característica importante é a rigidez do condutor, dos terminais de conexão e do próprio resis

tor para suportar as forças dinâmicas dos picos de corrente. Os resistores de descarga podem ser lineares ou não-lineares (função da tensão).

Para geradores até 200 MVA são empregados resistores lineares. Neste caso a corrente de campo decresce exponencialmente, Figura 6.4. O valor inicial máximo da corrente de campo é dado pelo curto-circuito trifásico nos terminais do gerador e a tensão de campo decresce proporcionalmente à corrente. Por isso, o seu valor máximo  $E_{fcc} = i_{fcc} \cdot R_e$  deve ser menor do que a tensão de teste de isolamento do campo. Por outro lado o disjuntor de campo só pode comutar a corrente sobre o resistor de descarga se a sua tensão de arco é maior do que a soma da tensão de campo máxima  $e_{fdmax}$  e a tensão de teto. A energia a ser armazenada é dada pela seguinte expressão

$$W_e = R_e \cdot \int^2 i(t) \cdot dt \quad (6.4)$$

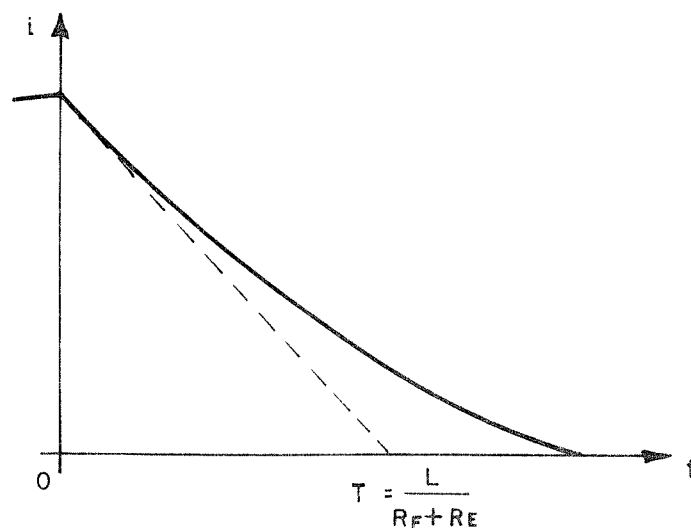


Figura 6.4 - Descarga da corrente de campo para um resistor linear

A fim de acelerar a descarga de campo, em grandes geradores, são utilizados resistores variáveis com a tensão, fabricados de carbureto de silício. Este material mostra uma elevação acentuada da sua resistência específica com a diminuição de tensão. O valor inicial da resistência é igual ao de um resistor linear, sendo limitado pela tensão máxima admissível, Figura 6.5. Entretanto, esta tensão decresce lentamente devido ao aumento da resistência, enquanto a corrente é reduzida rapidamente. Por isso, a desexcitação é mais rápida. A constante de tempo de caimento da corrente de campo torna-se uma função da tensão do momento.

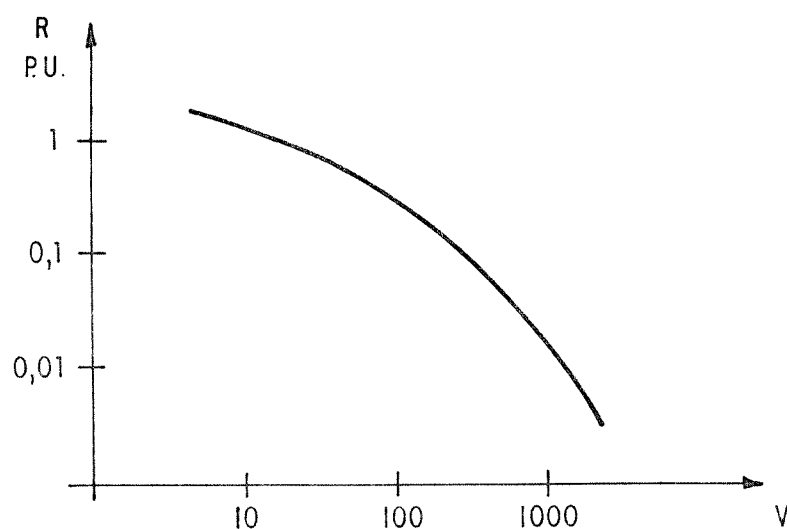


Figura 6.5 - Característica típica do resistor variável com a tensão

### 6.2.2.3. PROTEÇÃO CONTRA SOBRETENSÕES

A Figura 6.6 mostra o circuito de proteção de sobretensões mais detalhadamente. O nível de tensão é estado por



uma série de SUS (*Silicon Unilateral Switch*),  $D_2$ , cuja característica está mostrada na Figura 6.7. Assim que a tensão em cada SUS alcança o ponto de quebra  $E_{dr}$ , um conjunto de tiristores,  $T$ , antiparalelos é disparado. O diodo  $D_1$  evita a inversão de corrente no gatilho do tiristor,  $R_1$  limita esta corrente e  $R_2$  permite a polarização do gatilho ao mesmo tempo que limita a corrente em  $D_1$  e  $D_2$ . Este dispositivo é muito rápido, tem boa exatidão e o retorno a condição de bloqueio é automático.

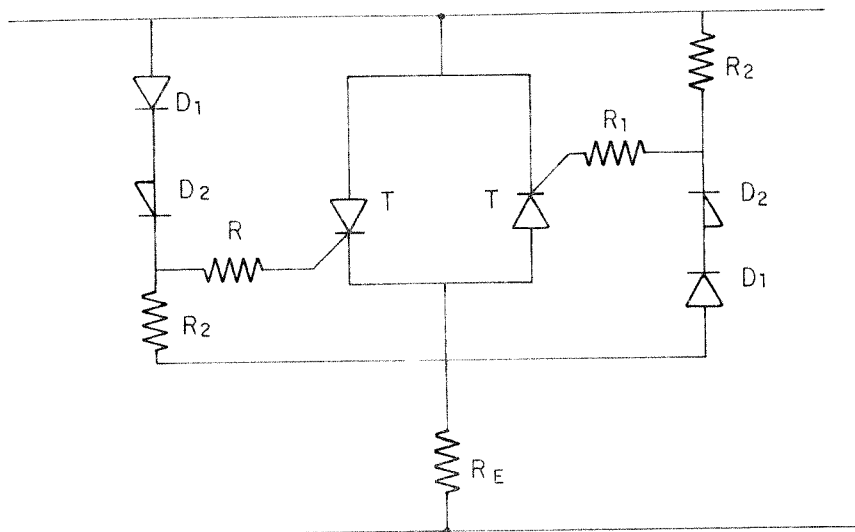


Figura 6.6 - Circuito de proteção contra sobretensões no campo

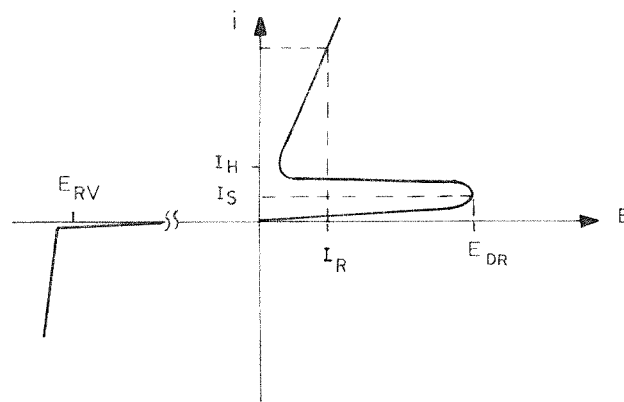


Figura 6.7 - Curva característica do SUS

### 6.2.3. TRANSITÓRIOS COM ORIGEM INTERNA À PONTE

#### 6.2.3.1. TENSÃO DE ARCO DO FUSÍVEL DE PROTEÇÃO

Os fusíveis utilizados para isolamento de tiristores defeituosos, conforme será analisado neste item, quando operam, provocam sobretensões nos semicondutores que estão conectados em paralelo.

A Figura 6.8 mostra uma falha de tiristor em  $t = 0$ . A corrente começa a elevar-se. Caso não houvesse o fusível a corrente de curto alcançaria um valor de pico que, conforme visto, depende dos parâmetros do circuito.

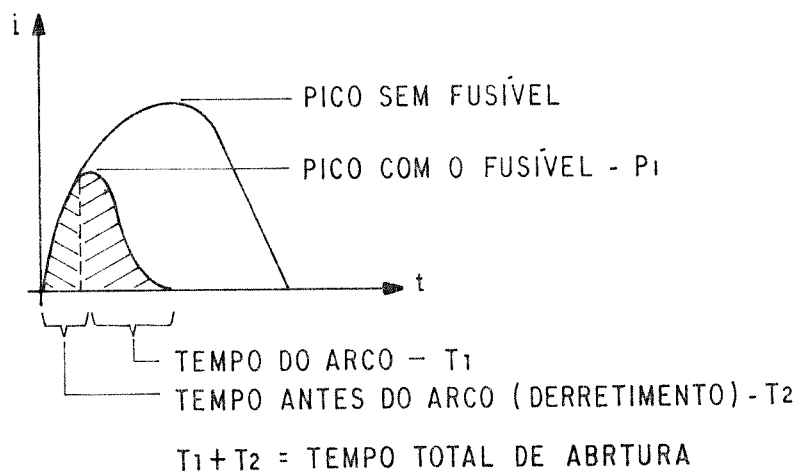


Figura 6.8 - Operação do fusível

O fusível funde estabelecendo um arco. A tensão do arco se opõe a tensão da falta e limita a corrente de pico a um valor inferior ao que ocorre quando não há fusível.

A taxa de variação da elevação de corrente de curto,  $di/dt$  é função da tensão que induz a corrente e da indutância do circuito. Quando a tensão de arco do fusível é igual a tensão induzida,  $di/dt$  é zero e o valor de pico  $P_1$  (Figura 6.8) é atingido. Para que a corrente decresça na mesma taxa, a tensão do arco deve ser duas vezes a tensão da fonte. Esta tensão é aplicada diretamente sobre os tiristores em paralelo ao defeituoso. A única proteção contra este transitório é dimensionar o tiristor com  $E_{dsm}$  (*Non-Repetitive Peak Off-State Voltage*) suficiente, e coordenar este valor com a tensão de arco do fusível.

#### 6.2.3.2. TRANSITÓRIO DE COMUTAÇÃO

Após a condução no sentido direto em um elemento semicondutor, é necessário um breve intervalo (usualmente poucos microsegundos) para fazer desaparecer completamente os portadores de corrente antes que o semicondutor se torne capaz de bloquear tensões reversas. Até que o semicondutor se recupere, ele comporta-se como um curto-circuito no sentido reverso. A corrente reversa é denominada corrente de recuperação, e só é limitada pela impedância de comutação. Uma vez que os portadores de corrente tenham sido eliminados, o semicondutor assume seu estado de bloqueio abruptamente. Este corte repentino da corrente de recuperação resulta em um transitório de tensão gerado sobre o semicondutor pela energia armazenada na indutância de comutação. A Figura 6.9 mostra este processo.

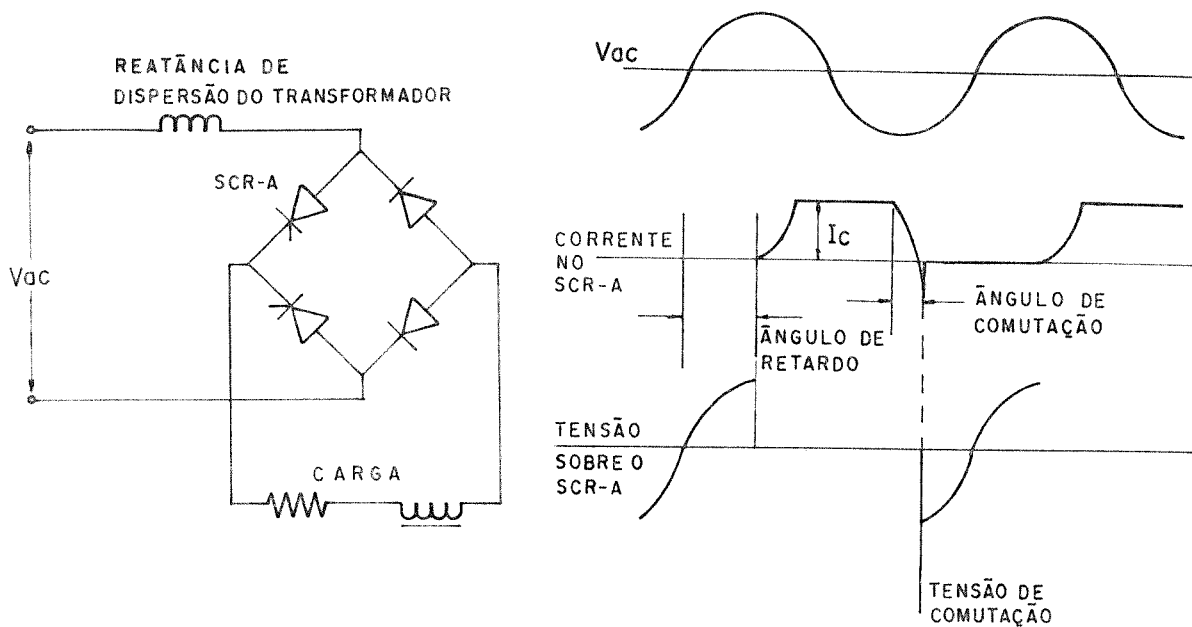


Figura 6.9 - Transitórios cíclicos de tensão devido ao corte da corrente de recuperação

Para reduzir este transitório, deve ser criado um caminho alternativo para a corrente de recuperação quando o bloqueio é alcançado. Normalmente utiliza-se um capacitor ou uma combinação capacitor-resistor para produzir este caminho, que é denominado de circuito amortecedor.

### 6.2.3.3. CIRCUITO AMORTECEDOR

O circuito amortecedor é conectado no secundário do transformador e/ou através dos elementos retificadores, conforme mostrado na Figura 6.10.

Apenas o amortecedor de linha é satisfatório se não há indutância apreciável entre este circuito e os tiristores. Como isto normalmente não pode ser obtido, utiliza-se circuitos amortecedores entre anodo e catodo em cada elemento retificador, além dos amortecedores de linha.

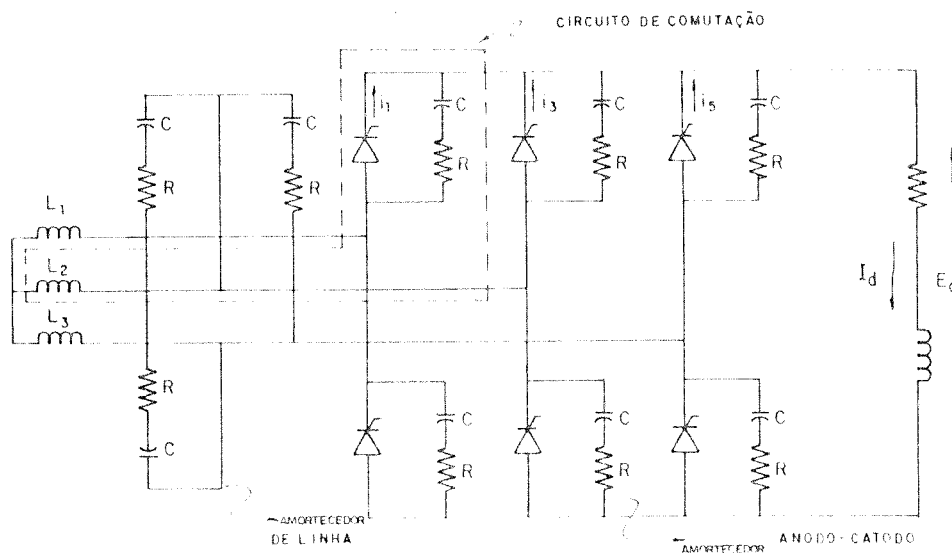


Figura 6.10 - Circuitos amortecedores para uma ponte trifásica

Durante a comutação o elemento retificador que deve cortar não o faz instantaneamente. A tensão de comutação provoca um fluxo de corrente reverso até que o retificador corte, quando isto ocorre a corrente é interrompida subitamente, Figura 6.11. Esta variação rápida na corrente pode resultar numa tensão reversa elevada ( $E = L \cdot di/dt$ ) que pode destruir o retificador.

A colocação de um capacitor do anodo para o catodo do retificador reduz o  $di/dt$  quando a corrente reversa é interrompida, em outras palavras o capacitor absorve a energia armazenada na indutância de comutação  $L_c$ . Entretanto, se só se utiliza o capacitor, o circuito é fortemente sub-amortecido e aparece uma

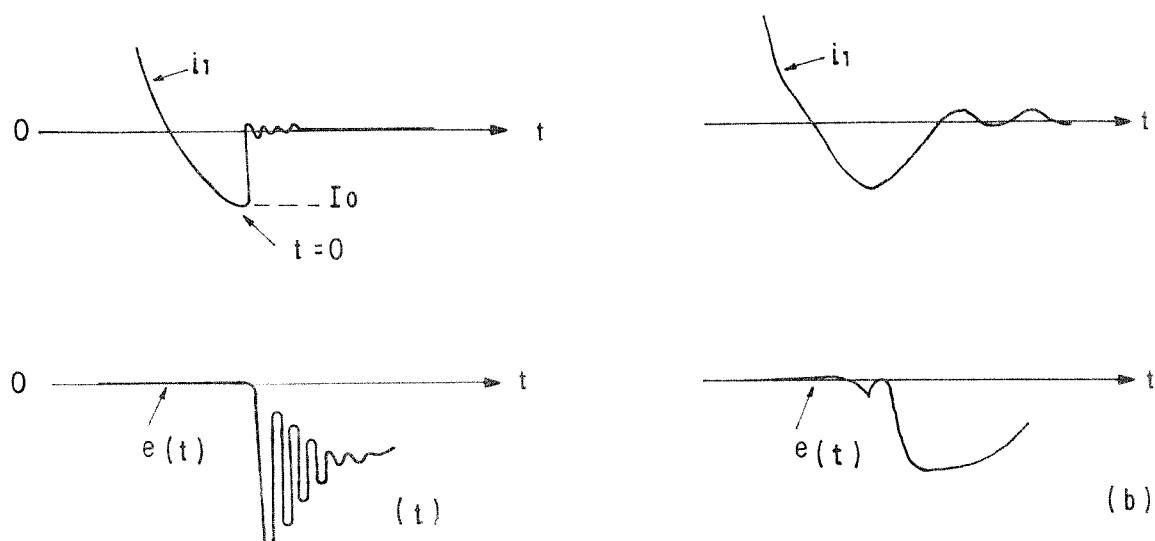


Figura 6.11 - Tensão inversa inicial

tensão razoavelmente alta no pico da primeira oscilação. O valor máximo é duas vezes a tensão de pico inversa nominal, caso não haja resistência no circuito. Por isso, é colocado um resistor em série com o capacitor a fim de se obter amortecimento adequado (aproximadamente crítico) no circuito.

A Figura 6.12 mostra o circuito durante a comutação. A chave representa o elemento retificador. A corrente no retificador no instante de bloqueio ( $t = 0$ ) é denominada corrente de recuperação reversa ( $I_0$ ).

A corrente  $I_0$  é uma função da taxa de decaimento da corrente ( $di/dt = E/L$  como mostrado na Figura 6.13) exatamente antes do instante de bloqueio. Este dado deve ser fornecido pelo fabricante do semiconductor. A tensão reversa inicial é  $I_0 \cdot R$ .

Como indicado na Figura 6.13, os valores de  $R$  e  $C$  são selecionados de forma que o circuito seja levemente subamortecido. O amortecimento crítico normalmente resulta em  $I_0 \cdot R$  gran

de. Pouco amortecimento acarreta um pico de ultrapassagem elevado na tensão reversa transitória inicial.

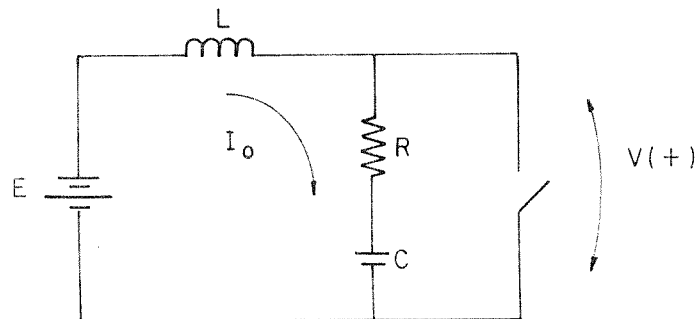


Figura 6.12 - Circuito equivalente de comutação

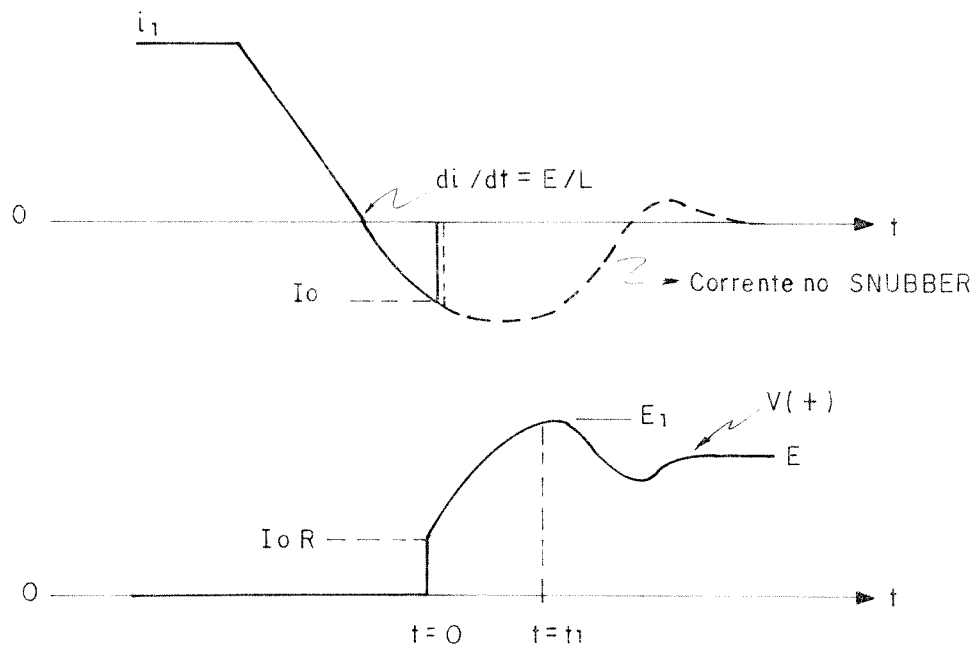


Figura 6.13 - Corrente de recuperação reversa

Do circuito da Figura 6.12 podemos escrever a seguinte expressão:

$$E/s = s \cdot L \cdot I(s) - I_0 \cdot L + R \cdot I(s) + I(s)/s \cdot C \quad (6.5)$$

$$I(s) = (E/L + I_0 \cdot s)/(s^2 + s \cdot R/L + 1/(CL))$$

$$= (E/L + I_0 \cdot s)/[(s + \alpha)^2 + W^2] \quad (6.6)$$

onde

$$\alpha = R/2L \quad (\text{Fator de decaimento}) \quad (6.7)$$

$$W = \sqrt{W_0^2 - \alpha^2} \quad (\text{Frequência amortecida}) \quad (6.8)$$

$$W_0 = 1/\sqrt{LC} \quad (\text{Frequência natural não amortecida}) \quad (6.9)$$

$$\zeta = \alpha/W_0 \quad (\text{Fator de amortecimento}) \quad (6.10)$$

A tensão sobre o retificador é dada por

$$e_{tr}(s) = I(s) \cdot (R + 1/s \cdot C) = \frac{(E/LS + I)(R \cdot S + 1/C)}{[(S + \alpha)^2 + W^2]} \quad (6.11)$$

Para o caso do circuito subamortecido,  $\zeta < 1$ , a transformada inversa de 6.11 é

$$e_{tr}(t) = E - (E - I_0 \cdot R) \left( \cos w t - \frac{\alpha}{w} \sin w t \right) e^{-\alpha t} +$$

$$+ \frac{I}{W \cdot C} \sin w t \cdot e^{-\alpha t} \quad (6.12)$$



$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} = & (E - I_0 \cdot R) \left( 2 \cdot \alpha \cdot \cos w t + \frac{W^2 - \alpha^2}{w} \sin w t \right) \cdot e^{-\alpha t} + \\ & + \frac{I_0}{C} \left( \cos w t - \frac{\alpha}{w} \sin w t \right) \cdot e^{-\alpha t} \end{aligned} \quad (6.13)$$

O valor inicial de  $dv/dt$  pode ser determinado fazendo-se  $t = 0$ , ou seja,

$$\left. \frac{dv}{dt} \right|_{t=0} = \frac{(E - I_0 \cdot R) R}{L} + \frac{I_0}{C} \quad (6.14)$$

se este valor  $\bar{e}$  negativo, a tensão inversa inicial  $I_0 \cdot R$   $\bar{e}$  o valor mais elevado, como na Figura 6.14.

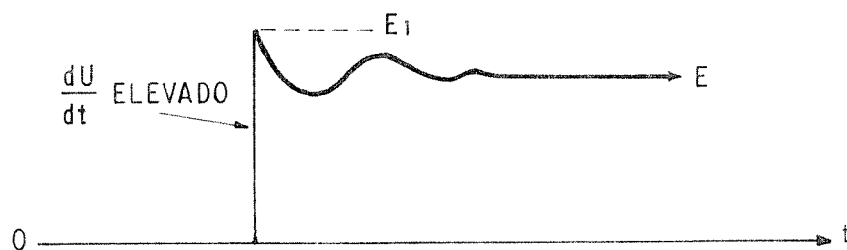


Figura 6.14 - Tensão inversa elevada

Isto normalmente não  $\bar{e}$  desejável jã que um  $I_0$  muito alto pode produzir um  $dv/dt$  acima da capacidade do tiristor. Se a Equação 6.14  $\bar{e}$  positiva então a curva  $\bar{e}$  equivalente a da Figura 6.13 e a tensão de pico reversa pode ser calculada fazendo-se a Equação 6.13 igual a zero e resolvendo-a para  $t_1$ . Em seguida substituindo-se  $t_1$  na Equação 6.12 obtem-se a tensão máxima  $e_{tr}(t_1) = E_1$ .

As referências [18], [43] e [50] fornecem métodos de selecionar os valores de R e C tendo em consideração a tensão de pico e o  $dv/dt$ . Entretanto, pode ser utilizado também o método de tentativa e erro. Geralmente ajusta-se o pico de ultrapassagem entre 1,2 e 1,3 e o  $dv/dt$  máximo deve estar abaixo do suportado pelo tiristor.

### 6.3. LIMITAÇÃO DE CORRENTE

Os conversores para sistemas de excitação estática devem fornecer a corrente de teto por alguns segundos de forma a satisfazer algumas necessidades operativas dos geradores aos quais estão conectados. A fim de evitar sobrecargas, a corrente de campo é momentaneamente limitada através de um circuito de controle limitador, que é analisado no Capítulo 7.

### 6.4. SISTEMAS DE MONITORAÇÃO

#### 6.4.1. MONITORAÇÃO DA PONTE

Nos sistemas onde haja redundância de circuitos de controle (canal de controle manual independente) é necessário poder observar possíveis falhas de pulso, sua localização com respeito ao ramo do conversor e as conseqüências, de modo a tomar-se medidas de proteção (tais como mudança do controle para o canal

manual).

Quando se utiliza pontes em paralelo ou tiristores em paralelo também é necessário monitorar a perda de condução de algum tiristor e sua localização com respeito ao ramo da ponte a fim de se detectar a perda de capacidade do conversor. Uma filosofia que pode ser adotada quando não há canais de controle redundantes é de se prover pontes em paralelo, ao invés de tiristores em paralelo, com circuitos de disparo independentes. Neste caso somente a monitoração de condução se faz necessária.

#### 6.4.1.1. MONITORAÇÃO DOS PULSOS DE DISPARO

Para funcionamento adequado de um conversor se faz necessário a presença de todos os pulsos de disparo com extensão e amplitude correta.

Em seguida está uma relação das falhas de pulso que podem aparecer:

- um ou vários dos seis pulsos estão ausentes;
- um ou vários dos seis canais produzem pulso contínuo;
- todos os pulsos estão ausentes;
- aparecem pulsos indevidos.

Também é possível que sejam produzidos pulsos de duração muito curta. A amplitude dos pulsos sempre mantêm uma relação com a tensão de alimentação, do(s) circuito(s) amplificador(es) de pulso. Esta tensão deve ser monitorada separadamente.

Um pulso contínuo na saída de um estágio intermediário ou final de amplificação de pulso significa que o transistor de saída está com defeito ou sempre recebendo um sinal de controle.

Os pulsos indevidos são aqueles que aparecem num momento indesejado. Na maioria das vezes estes pulsos são induzidos por influências externas.

As falhas de pulso podem ter sua origem no:

- ajuste do controle de disparo (gerador de pulso e sinal de controle),
- estágio intermediário de amplificação de pulso (caso haja);
- estágio final de amplificação de pulso;
- transformador de pulso ou circuito de disparo do tiristor.

Evidentemente que as interrupções entre os componentes relacionados acima também conduzem a perda de pulso. Os pulsos indevidos são sempre causados por blindagem insuficiente dos cabos que os transmitem.

#### **6.4.1.2. CONSEQUÊNCIAS DAS FALHAS DE PULSO**

As falhas no ajuste do controle de disparo e no estágio intermediário de amplificação de pulso (caso haja este estágio) têm consequências em todos os estágios finais, isto é, todos os tiristores em paralelo são afetados simultaneamente.

As falhas em um estágio de saída afeta somente os tiristores controlados por aquele estágio de saída. Isto porque um determinado ramo pode necessitar de mais de um estágio de amplificação dependendo do número de tiristores (série e paralelo deste ramo).

Na perda de um pulso individual ocorre que o tiristor correspondente ou todos os tiristores do grupo de comutação afetado não conduzirão, ou seja, não haverá comutação. A corrente na carga flui através do último ramo disparado até que o próximo tiristor ou grupo de tiristores, corretamente disparados possam assumir a corrente.

Se apenas um dos tiristores em paralelo não comutar pelas razões acima, os tiristores restantes são conseqüentemente sobrecarregados. Entretanto, se um grupo de comutação completo (todos os tiristores em paralelo em um ramo) não é disparado, ocorre uma redução substancial do valor médio da tensão de saída do conversor que é compensada com um conseqüente aumento do ângulo de disparo e sobrecarga dos ramos perfeitos. Esta sobrecarga pode ou não ser suportada dependendo da filosofia de dimensionamento dos tiristores. Caso seja suportada deverá haver uma indicação da condição de operação tal como um alarme. Caso não seja suportada deve haver a transferência do controle de pulsos para um canal redundante ou, caso não exista este canal, o desligamento da unidade.

Dependendo do instante em que se apresenta, um pulso indevido acarretará pequenas variações na partição de corrente ou até mesmo uma falta no tiristor com conseqüente curto-circuito interno.

### 6.4.1.3. POSSÍVEIS PONTOS PARA A MONITORAÇÃO DE PULSOS

O exposto acima indica as providências adequadas à monitoração dos pulsos de disparo e as medidas a serem tomadas no caso de falta.

Um monitor de pulsos na saída do estágio intermediário de amplificação pode identificar aquelas faltas que produzem sérias conseqüências para a instalação e que tem sua origem no ajuste de controle de disparo ou no estágio intermediário.

Com os sistemas de dois canais é vantajoso também verificar o canal sobressalente ao mesmo modo, para que as faltas possam ser eliminadas independentemente. Deste modo é assegurada a comutação para um canal sobressalente (canal manual) em perfeito estado em caso de defeito no canal automático.

Em sistemas com um único canal esta falha de pulso conduzirá indiretamente a desconecção da unidade via a proteção de subexcitação (relê de perda de excitação), já que a tensão de campo será substancialmente reduzida.

Conforme as considerações acima pode-se definir quatro tarefas para o sistema de monitoração, como segue:

- Verificar se os seus pulsos estão simetricamente dispostos;
- Verificar se todos os pulsos têm duração acima de um valor especificado;
- Verificar se não é fornecido pulso contínuo;

- Verificar se a amplitude dos pulsos é satisfatória.

Se uma das condições acima não é satisfeita, deverá ser acionada uma sinalização com um retardo de tempo ajustável. Este retardo se faz necessário já que durante ações de controle rápidas os pulsos deixam de ser simétricos por um pequeno intervalo de tempo.

#### 6.4.2. MONITORAÇÃO DE CONDUÇÃO

Para todos os defeitos com origem entre o ajuste do controle de disparo e a saída do estágio intermediário é possível supervisionar os próprios pulsos. A questão é diferente nos estágios individuais finais. Se o pulso está ausente no gatilho do tiristor, pode haver um defeito no transformador de pulso ou um circuito aberto no próprio tiristor. Estas causas não podem ser verificadas pelo monitor de pulso. Se um tiristor não está conduzindo, também pode haver outra causa. Neste caso utiliza-se um sensor de corrente, monitor de condução, capaz de determinar a localização de quaisquer defeitos na ponte conversora.

A monitoração de condução verifica se todos os tiristores do conversor realmente conduzem sua parte de corrente. Os tiristores que não estejam conduzindo devem ser sinalizados.

Os conversores de alta potência, como os utilizados para os sistemas de excitação estáticos de geradores de grande porte, operam com tiristores em paralelo. Neste caso, eles são projetados com redundância, o que significa que a falha de um tiristor ou mesmo a perda de uma ponte não impede um bom desempenho

global. Se um tiristor perde sua capacidade de bloqueio, o fú-sível deste tiristor deve interromper o caminho e sinalizar a falha. Se um tiristor não dispara, e por isso não assume sua parte da corrente total, não ocorre subrecarga devido a redun-dância, mas a capacidade extra é esgotada sem que haja indica-ção da ocorrência. Caso outro tiristor no mesmo ramo falhe pos-teriormente, os elementos paralelos restantes estão sujeitos a sobrecarga térmica.

A monitoração da condução preenche este espaço na super-visão das funções dos tiristores. Portanto, tem como função de tectar a perda de condução de quaisquer dos tiristores que este jam operando em paralelo. A causa disto pode ser a queima de um fusível, um tiristor defeituoso ou um defeito nos circuitos de pulso.

A monitoração da condução pode ser implementada por meio do circuito da Figura 6.15. Se todos os tiristores dos ramos 1 e 4 do conversor estão conduzindo as tensões  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$  serão aproximadamente zero.

Considerando, por exemplo, que o tiristor  $T_{11}$  pare de conduzir, as tensões  $E_1$  e  $E_3$  serão diferentes de zero. Se o conversor foi projetado para operar com apenas dois elementos em paralelo, então esta ocorrência deve apenas ser sinalizada. Caso ocorra, por exemplo, um defeito em  $T_{12}$  deve haver desliga-mento do gerador. Assim, pode-se determinar um circuito lógico que armazene as posições de  $E_1$ ,  $E_2$  e  $E_3$  sempre que estas variá-veis passarem do nível zero para o nível 1. Com isto, Sempre que existir dois níveis 1 haverá um alarme e quando os três ní-veis forem 1 ocorrerá o desligamento da unidade.



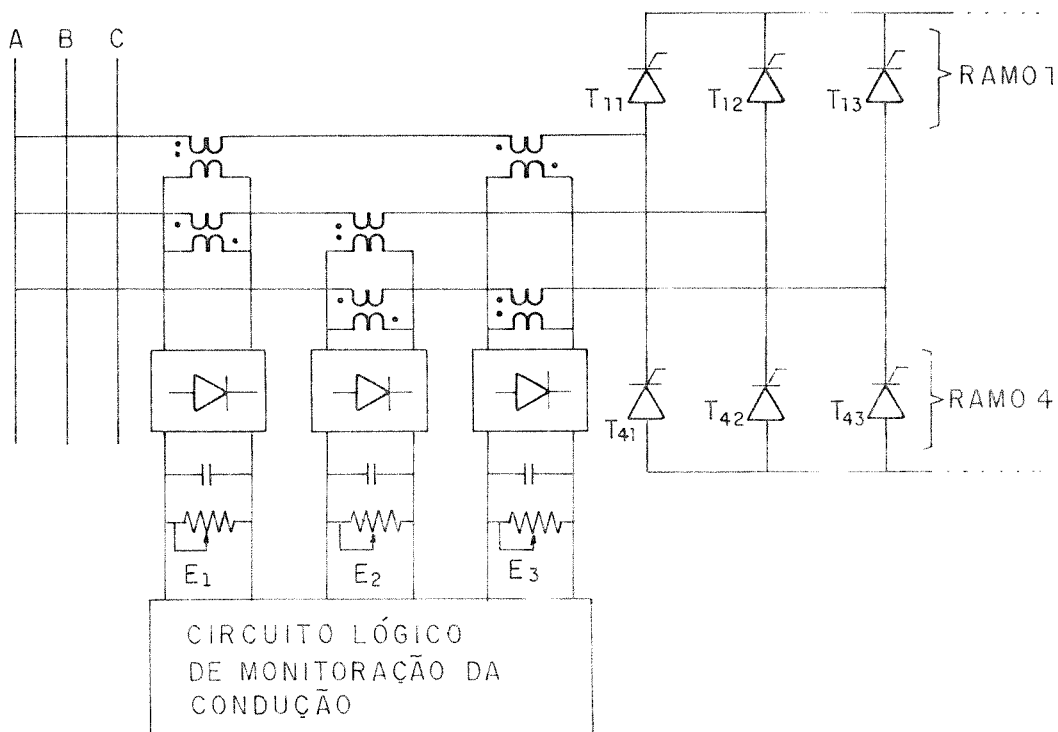


Figura 6.15 - Monitoração de condução

### 6.4.3. MONITORAÇÃO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Os sistemas de refrigeração forçada devem ser monitorados, pois a perda da capacidade de refrigeração implica na diminuição da capacidade de corrente sendo necessário desligar a unidade. Pode-se também utilizar a redundância no sistema de refrigeração a fim de aumentar a confiabilidade global da excitatriz.

## 6.5. PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE INSTANTÂNEA

A proteção para curto-circuito do lado de corrente contínua do conversor é realizada por meio de um relê de sobrecorrente eletrônico que possibilita medir a corrente com extrema rapidez e bloquear completamente os pulsos de disparo a fim de minimizar as conseqüências de um curto-circuito nos anéis coletores de forma melhor do que seria possível com o retardo de abertura do disjuntor de campo. A área de proteção, neste caso, compreende o disjuntor de campo e o barramento até o conversor. Os elementos primários de medição são TC's no secundário do transformador de excitação.

## 6.6. FUSÍVEIS PARA TIRISTORES

Para proteção de faltas internas são utilizados fusíveis especiais extremamente rápidos. Eles devem ser precisamente ajustados ao tipo de tiristor com respeito a tensão e corrente. Se abrirem muito tarde, os tiristores em boas condições correm o risco de se danificarem, por outro lado interrompendo muito cedo resulta em perda de redundância e por conseguinte desligamento da unidade. Se o fusível é dimensionado adequadamente, somente o tiristor defeituoso é seletivamente desconectado. Portanto, os fusíveis são utilizados para isolar tiristores defeituosos operando somente após um tiristor ter falhado e não para proteger os tiristores.

Os fusíveis podem estar conectados em série com cada elemento retificador ou nas linhas de CA de alimentação do conversor, Figura 6.16.

Se são utilizados apenas fusíveis de linha, a falha de bloqueio de qualquer tiristor, abre o circuito de todo o ramo do retificador. Normalmente ambos os fusíveis envolvidos na falta queimarão. Isto impossibilita esta aplicação para as excitatrizes estáticas, pois resultaria em abertura do circuito de campo do gerador. O propósito do uso de fusíveis individuais é manter o retificador em serviço a despeito de uma falha de tiristor. Obviamente isto só pode ser feito com mais de um tiristor em paralelo por ramo. Como mostrado na Figura 6.16, o tiristor defeituoso conduz toda a corrente de curto e os tiristores dos outros ramos têm que suportar  $1/N$  desta corrente. A magnitude da corrente e a forma de onda foram descritas na seção 4.6.3. Como o tipo de fusível que é utilizado rompe muito rapidamente, a limitação da corrente inicia antes de começar  $i_{a5}$ . Isto implica em que as correntes nos ramos 1 e 3 sejam aproximadamente as mesmas.

É desejável que o fusível no tiristor defeituoso queime antes que qualquer dos fusíveis no ramo que está conduzindo queime ou mesmo sejam danificados. O calor necessário para fundir e interromper um fusível pode ser expresso em amperes ao quadrado-segundo ou  $I^2 \cdot t$ . Assim, para coordenação é necessário que o  $I^2 \cdot t$  de fusão e interrupção do fusível defeituoso seja menor ou igual ao  $I^2 \cdot t$  dos outros fusíveis em série.

Desta forma, se existem  $N$  tiristores e fusíveis em para-

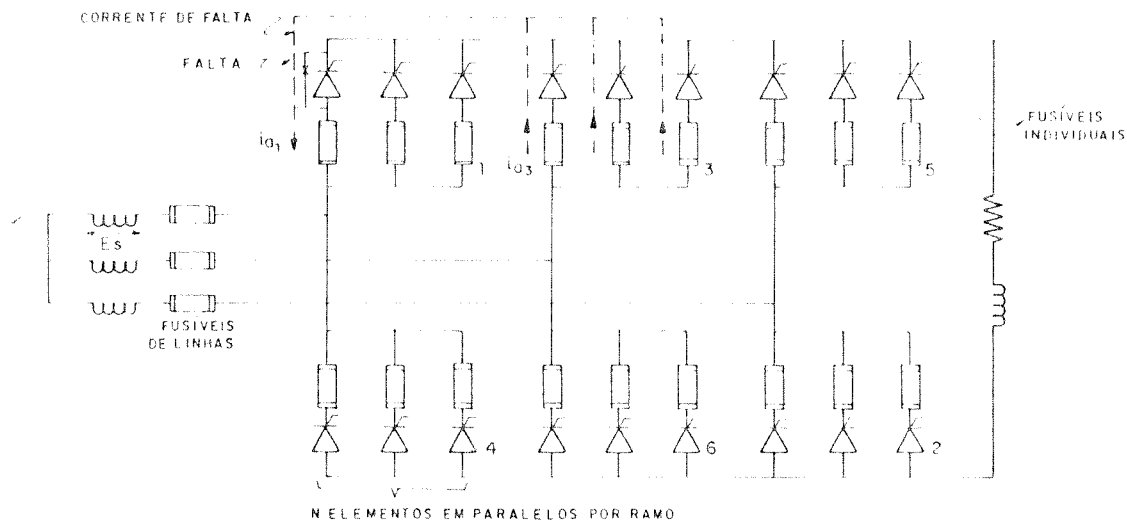


Figura 6.16 - Utilização de fusíveis em conversores

lelo por ramo,

$$\frac{I^2 \cdot t}{N^2} \text{ (de fusão e ruptura)} \leq I^2 \cdot t \text{ (de fusão)} \quad (6.15)$$

Tem sido constatado pelas características dos fusíveis que para cumprir esta restrição, normalmente é necessário que se tenha  $N \geq 3$ . Isto significa que com menos do que três tiristores em paralelo por ramo, os fusíveis de linha poderiam ser igualmente utilizando no lugar de fusíveis individuais.

As técnicas de coordenação fusível-tiristor estão descritas nas referências [44,51,52]. A seguir estão apresentadas as principais características e parâmetros dos fusíveis.

Na realidade o fusível limita o pico da corrente de fal-

ta. A Figura 6.17 mostra a ação de um fusível limitando a corrente. A fusão ocorre no ponto A. Dependendo do circuito e do projeto do fusível, a corrente pode continuar a crescer um pouco além do ponto B, pico de corrente passante (*peak letthrough*). Além deste ponto a impedância do arco do fusível força a corrente de falta para baixo até zero no ponto C.

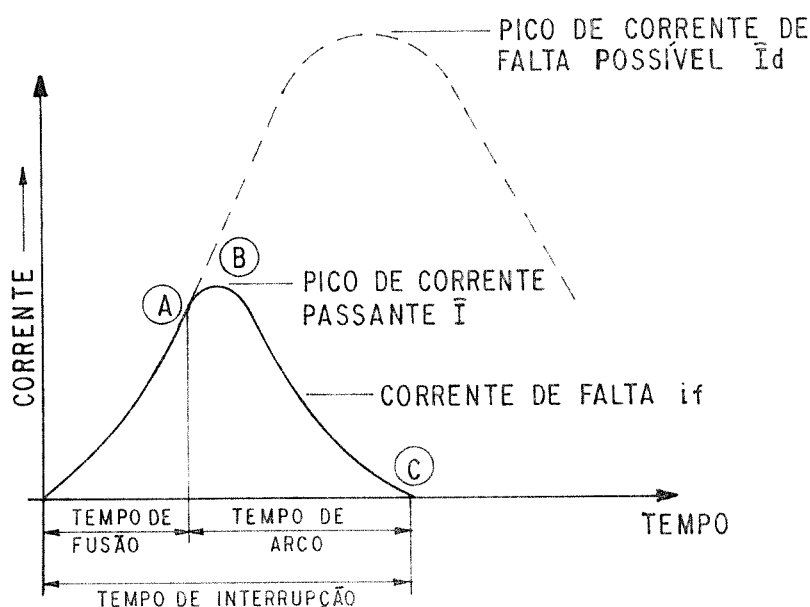


Figura 6.17 - Ação de limitação de corrente do fusível

Os fabricantes de fusíveis geralmente fornecem os seguintes dados:

- Características de  $I^2 \cdot t$  e pico de corrente de falta possível ( $\hat{I}_d$ ) para diferentes tensões efetivas de circuito;
- Curvas de pico passante ( $\hat{I}$ ) versus pico de corrente RMS possível ( $\hat{I}_d$ ).

O  $I^2 \cdot t$  do fusível segundo a curva da Figura 6.17 pode ser calculado pela seguinte integral

$$\begin{aligned}
 I^2 \cdot t_c &= \int_{t_0}^{t_0+t_c} i_f^2 \cdot dt = I^2 \cdot t_m + I^2 \cdot t_a \\
 &= \frac{\hat{I}^2}{3} \cdot t_c \text{ (forma de onda triangular)}
 \end{aligned}
 \tag{6.16}$$

onde

$t_m$  - tempo de fusão

$t_a$  - tempo de arco

$t_c = t_m + t_a$  - tempo de interrupção

$\hat{I}$  - pico de corrente passante instantânea

$i_f$  - corrente instantânea no fusível

Para um dado  $\hat{I}_d$  (corrente de pico para falta interna),  $t_c$  pode ser determinado resolvendo-se a Equação 6.16.