



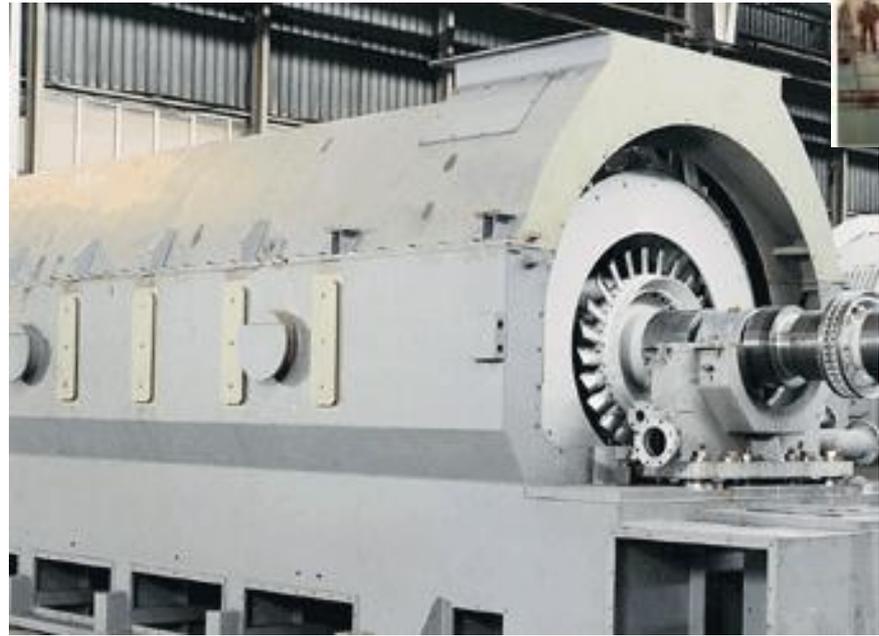
**UFPR**



# TE 131

## Proteção de Sistemas Elétricos

Capítulo 5 –  
Proteção de  
Geradores Síncronos



# 1. Introdução

- A máquina síncrona, operando como gerador, é um equipamento vital ao sistema elétrico;
- Sua capacidade de geração limita a demanda que pode ser suprida;
- No caso do Brasil, o SEP é mantido por poucos geradores, sendo que sua capacidade sendo que sua carga esta distribuída em milhares de pontos;
- Sendo o gerador um equipamento complexo, o qual possui peças girantes, está sujeito a maiores riscos.

- Apesar de muitos tipos de defeitos os princípios de aplicação de esquemas de proteção são relativamente simples;
- Os curtos-circuitos são geralmente detectados através de relés diferenciais ou sobrecorrentes;
- Muitos dos defeitos são de natureza mecânica que são detectadas através de dispositivos mecânicos (*micro - switches* de limitação, de pressão, etc. e detectores de temperatura).

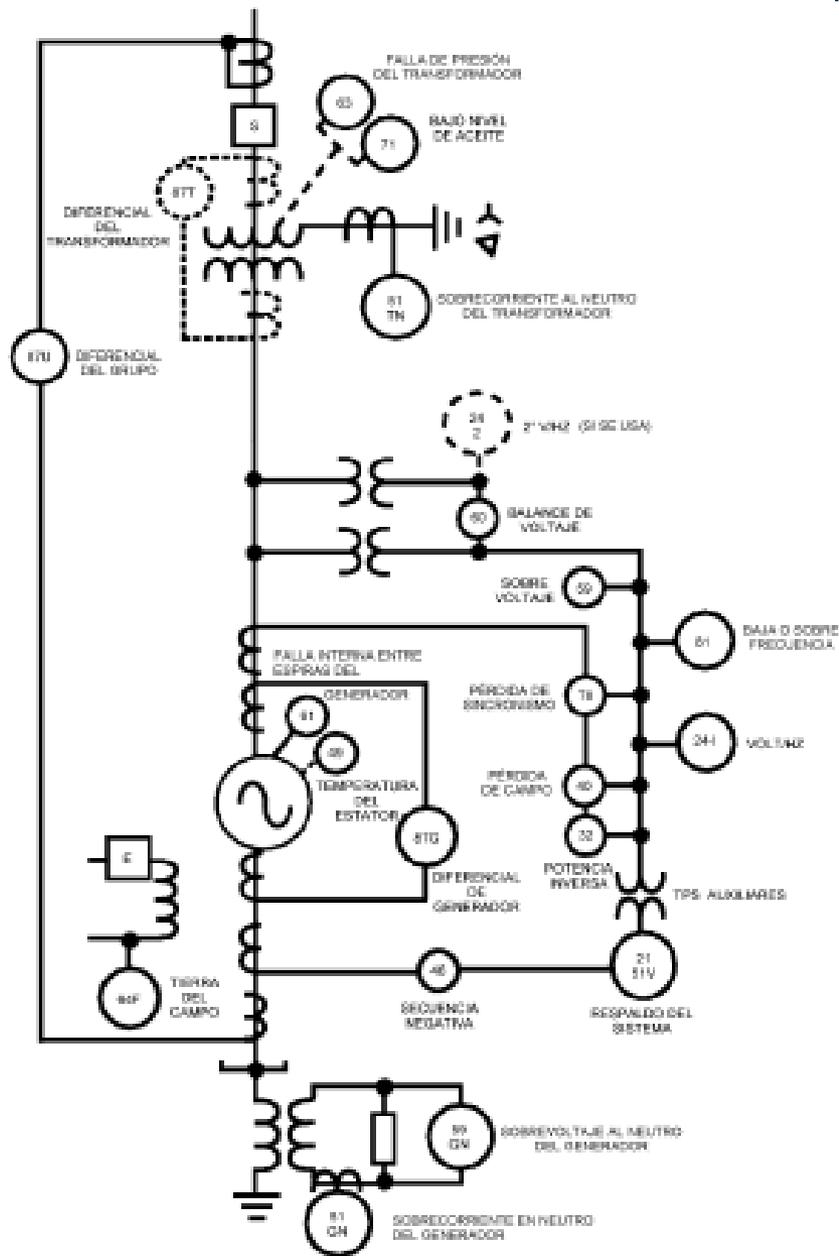
- Muitos dessas condições anormais não requerem um desligamento automático do gerador, que podem ser corrigidas com a máquina em operação;
- Assim, alguns dispositivos de proteção possuem estágios que atuam com alarmes. Outras condições, tais como curtos-circuitos requerem uma rápida remoção do gerador.

## 2. Principais defeitos em Geradores

- Os defeitos mais comuns em geradores são:
  - Curtos-circuitos nos enrolamentos do estator;
  - Terra no enrolamento do rotor;
  - Operação com correntes desequilibradas;
  - Sobreaquecimento nos enrolamentos do estator;
  - Motorização do gerador;
  - Perda de excitação;
  - Sobretensões;
  - Sobre velocidade.

# 3. Tipos de esquemas de proteção

- Proteção diferencial do gerador (87G);
- Proteção diferencial do conjunto gerador-transformador (87T);
- Proteção contra terra-enrolamentos do estator (64G);
- Proteção contra defeitos entre espiras dos enrolamentos do estator (61);
- Proteção contra terra-enrolamento do rotor (64F);
- Proteção contra correntes desequilibradas (46);
- Proteção contra sobreaquecimento nos enrolamentos do estator (49);
- Proteção contra motorização do gerador (32);
- Proteção contra perda de excitação (40);
- Proteção contra sobtensões (59);
- Proteção contra sobre velocidade (12).



- As proteções empregadas aos geradores dependem da potencia nominal do mesmo, assim a tabela abaixo mostra esta relação:

Proteção	Potencia Nominal em MW					
	0,1-0,5	0,5-1	1-5	5-10	10-50	50-100
Diferencial						
Sobrecorrente						
Sobrecarga						
Temperatura elevada						
Sobrevelocidade						
Perda de carga						
Perda de Sincronismo						
Perda de Excitação						
Subfrequencia						

## 4. Proteção diferencial

- Similar em princípio de funcionamento aos utilizados para a proteção de transformadores de potência, com as seguintes diferenças:
  - Não haverá a corrente *inrush*;
  - Não haverá diferença entre os módulos das correntes secundárias que entra e sai no relé;
  - Não haverá diferença angular entre as correntes secundárias que entra e sai no relé;
  - Os TC's são ligados nas mesmas relações de espiras e apresentam, em geral, características bem semelhantes (mesmo fabricante)

- Os aspectos citados possibilitam que os relés utilizados em geradores podem ser mais sensíveis do que utilizados em transformadores de potencia (*precent slope* de 10% e 20%);
- Muito eficiente para curto-circuito entre fases, sendo que para curto-circuito fase-terra depende muito do tipo de aterramento do gerador;
- A ligação dos TC's adotada é a estrela, propiciando uma proteção contra curto-circuito entre fases e entre fase e terra nos enrolamentos do estator e seus terminais.

Esquemas de ligação

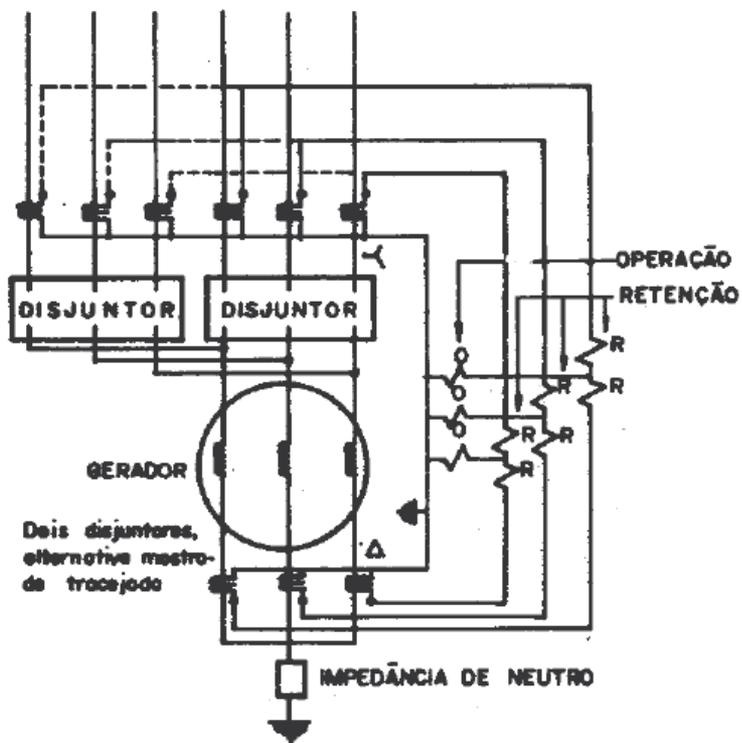


Fig. 5.1  
Conexão porcentual diferencial  
estrela para o gerador. Máquina  
com seis (6) saídas

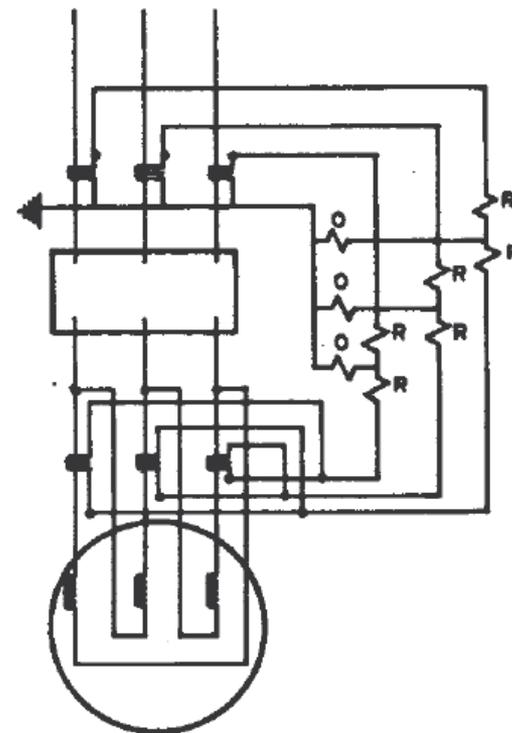


Fig. 5.2  
Conexão porcentual diferencial  
delta para o gerador  
com seis (6) saídas

- Esquemas de ligação

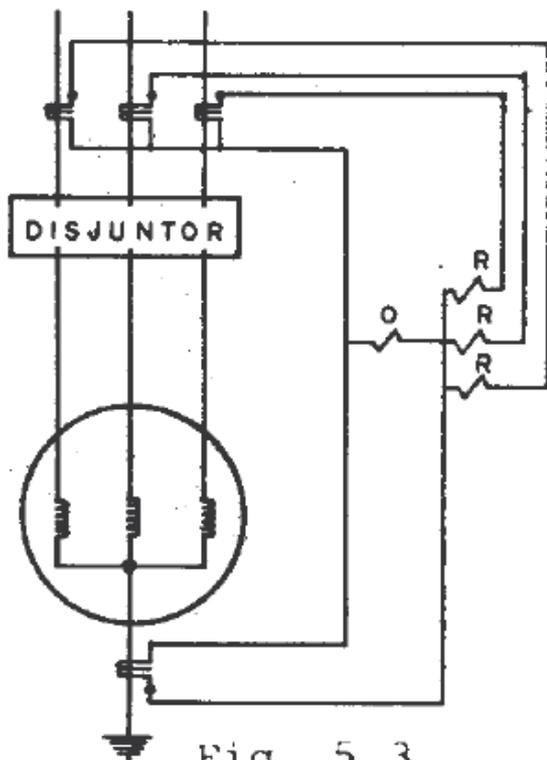


Fig. 5.3  
 Conexão porcentual diferencial  
 estrela, 4 saídas, somente  
 proteção de terra

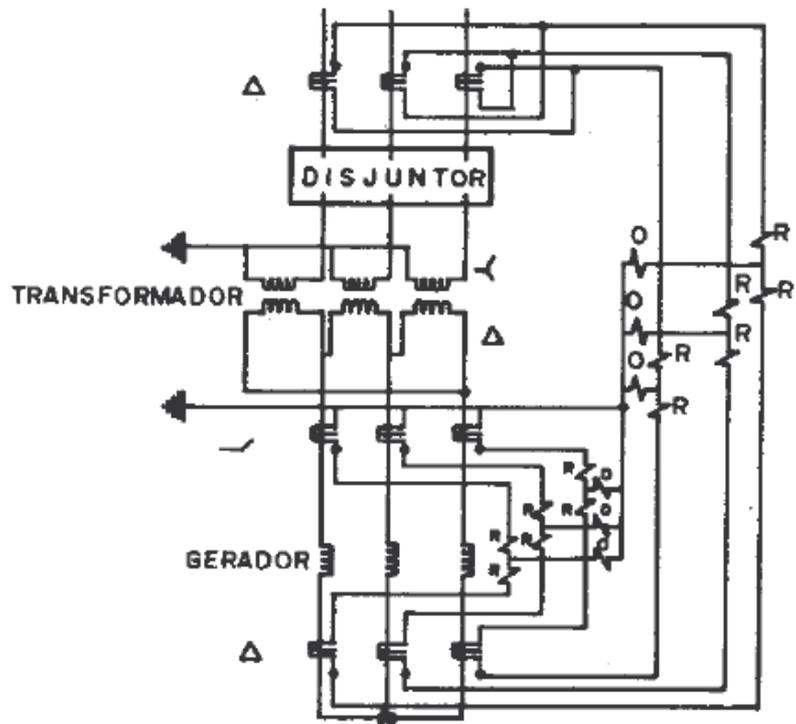


Fig. 5.4  
 Diferencial porcentual para  
 o gerador e transformador

## ○ **Proteção diferencial do conjunto gerador-transformador:**

- Comum em sistema de geração unitária;
- Esquema provém proteção contra qualquer tipo de curto-circuito no transformador;
- Propicia proteção de retaguarda para o diferencial do gerador.



- **Proteção contra terra-enrolamentos do estator (gerador aterrado por impedância)**

- Para limitar danos nos enrolamentos do gerador quando da ocorrência de um curto-circuito fase-terra nos seus enrolamentos é comum aterrar o seu neutro, utilizando:

- Reator;
- Resistor; ou
- Transformador monofásico de distribuição – mais utilizado por motivos econômicos.

- Método afeta diretamente o desempenho dos esquemas com relés diferencial;
- Quanto maior a impedância de aterramento, menor será a magnitude da corrente de curto-circuito fase-terra e mais difícil a sua detecção;
- Esquema de proteção separado localizado no aterramento do utilizando relés de sobretensão serve de retaguarda para a proteção diferencial;

- Para a ocorrência de um curto fase-terra em um ponto  $p\%$  do enrolamento do estator, a corrente  $I_{cc1\phi}$  dependerá do local do defeito e da impedância de terra:

$$I_{cc1\phi} = \frac{pE}{Z_N}$$

- Para este caso, as bobinas mais próximas ao neutro não são protegidas, pois, as correntes de curto neste ponto não serão capazes de sensibilizar o relé diferencial.
- Valores entre 10 a 5% da bobina podem ficar sem proteção.

- Para se calcular o percentual da bobina sem pela proteção diferencial:
- $I_{cc1\phi}$  limita o trecho desprotegido.

$$I_{cc1\phi} = \frac{pE}{Z_N} = I_{ajuste\ 87} \cdot RTC$$

$$p = \frac{\sqrt{3}Z_N}{V_L} \cdot I_{ajuste\ 87} \cdot RTC$$

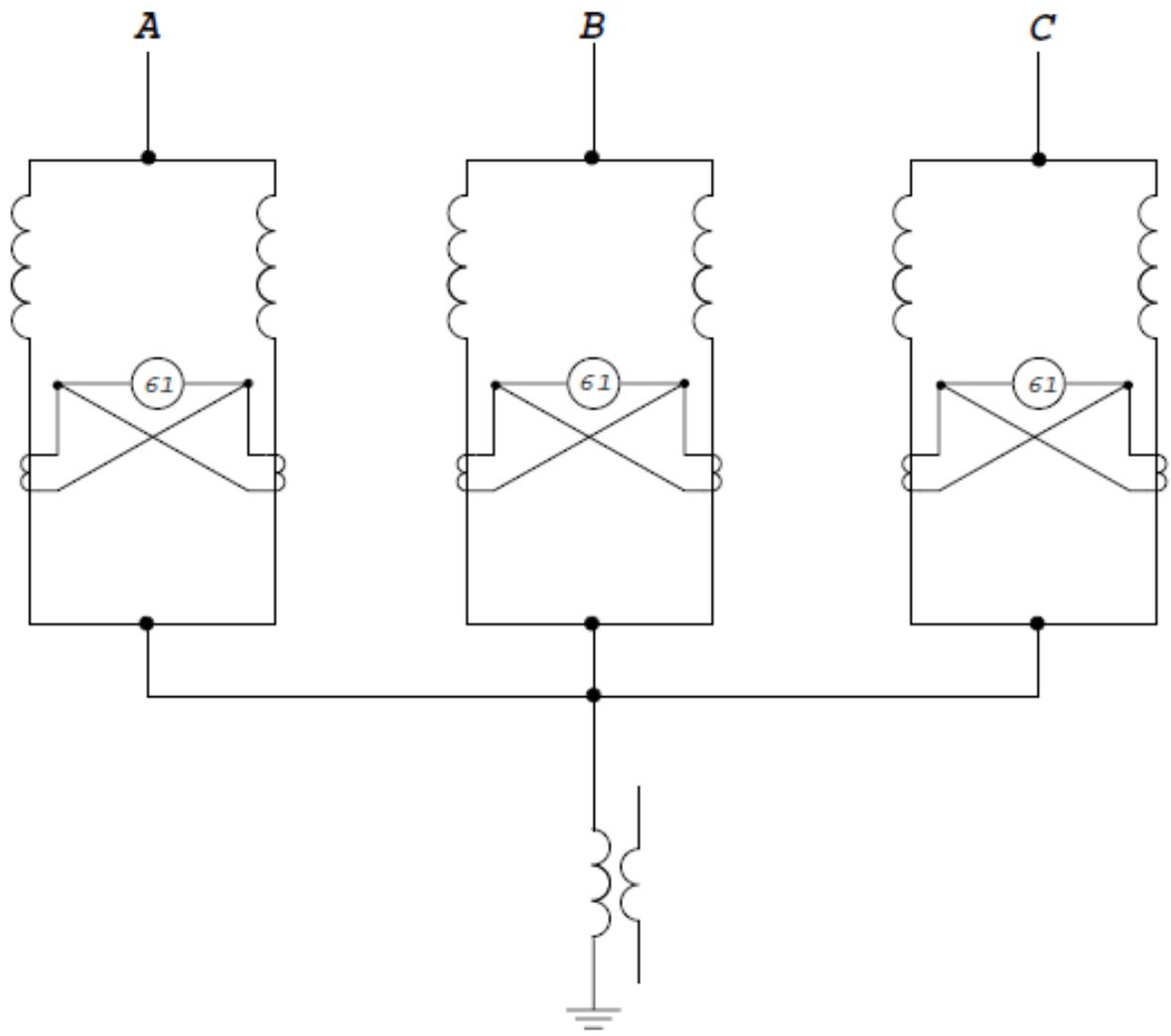
## Exercício 1

- Um gerador síncrono de polos salientes, bobina da armadura conectadas em Y, 30 MVA, 13,8 kV, 60 Hz, está funcionando a vazio com tensão nominal em seus terminais. Calcule:
  - a) O valor de  $Z_N$  para que a corrente  $I_{cc1\phi}$  nos terminais do gerador fique limitada a 10 A.
  - b) A proteção 87 utiliza TCs 1200/5. Percentual do enrolamento da armadura desprotegido, cuja  $I_{ajuste\ 87} = 0,2\ A$ ?
  - c) Repetir o item anterior para  $Z_N$  de 50  $\Omega$ .

## ○ Proteção contra curto-circuito entre espiras dos enrolamentos do estator

- Geradores síncronos de grande porte possuem dois enrolamentos independente por fase;
- A ocorrência de um curto-circuito entre as espiras dos enrolamentos não causa um desbalanço apreciável das correntes de fase e nem a circulação de corrente no neutro do gerador;
- As correntes no ponto de defeito podem atingir valores elevados;
- O método convencional de prover proteção é a utilização da proteção de fase dividida;
- $I_{\text{ajuste}} \geq 5\% I_N$  gerador.

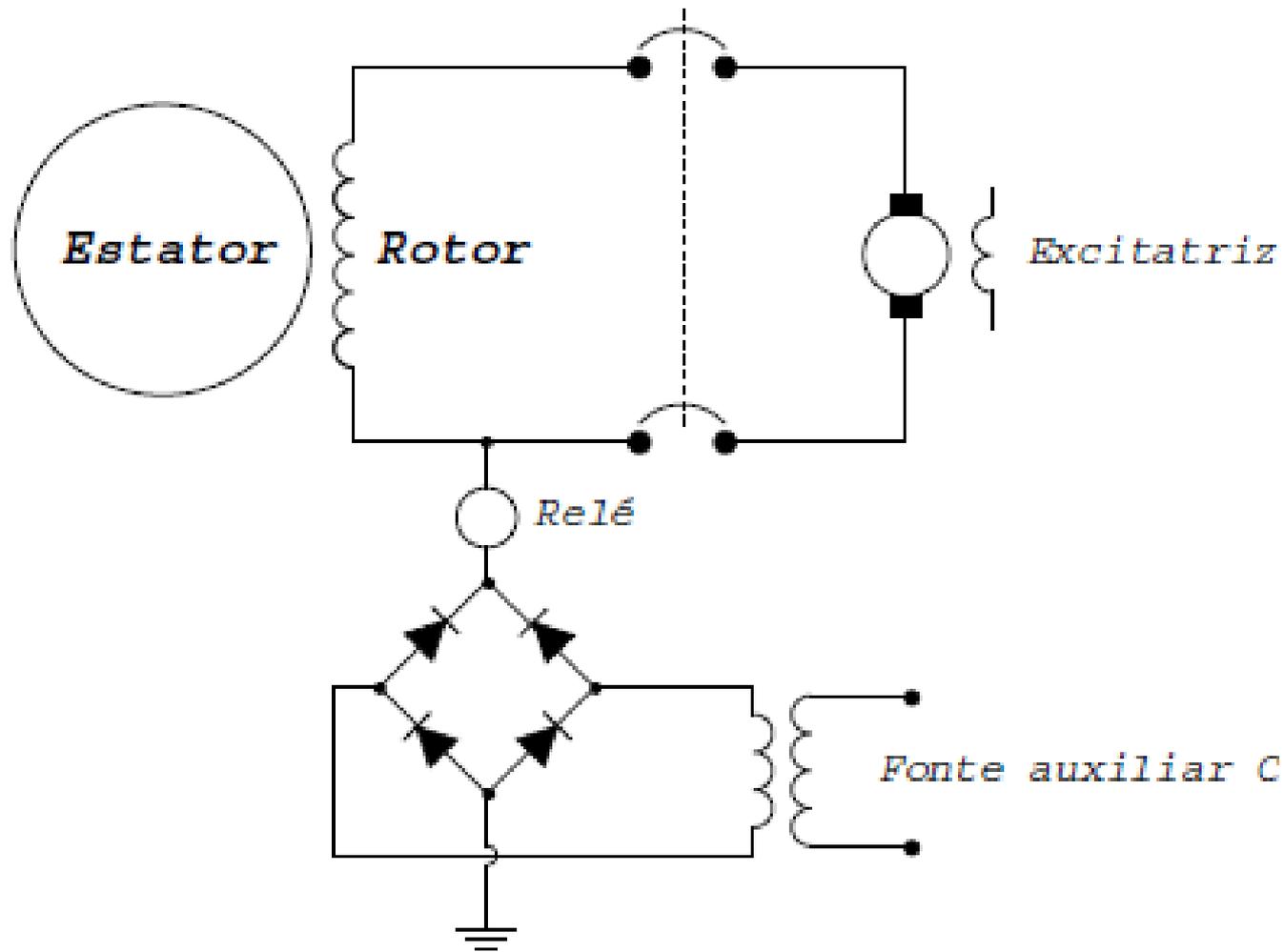
- Curto-circuito nas bobinas do enrolamento do estator pode iniciar pelos seguintes motivos:
  - Defeitos de montagem ou de fabricação dos materiais e não detectados durante os testes de alta tensão;
  - Vibração ou movimento dos enrolamentos durante as condições normais ou de defeito;
  - falha na isolação, geralmente provocada por umidade no enrolamento após um período de manutenção;
  - Defeito no sistema de refrigeração



# 5. Outras Proteções

## 5.1 – Proteção contra terra-enrolamento do rotor

- O circuito de campo de geradores síncronos são isolados da terra;
- Um curto-circuito para a terra em qualquer ponto do circuito de campo não afetara a operação normal da maquina;
- Um curto-circuito num segundo ponto implicaria na perda de varias espiras;
- Fluxos diferentes no entreferro e consequente conjugados desbalanceados, resultando em vibração e possíveis danos no eixo e nos mancais do gerador;
- Relé detecta o primeiro curto-circuito;



## 5.2 – Proteção de sobrecorrente dependente da tensão

- A proteção contra sobrecorrente simples pode ser usada de duas formas
  - proteção de pequenos geradores;
  - proteção de retaguarda para grandes geradores onde a proteção diferencial.
- A proteção de sobrecorrente dependente da tensão pode ser aplicada em:
  - quando a diferencial não seja justificada em grandes geradores,
  - quando há problemas na aplicação da proteção de sobrecorrente simples.

- Para relés de sobrecorrente convencionais, ajuste é feito da seguinte forma

$$I_{ajuste} = \frac{K \times I_{ng}}{RTC}$$

Onde:

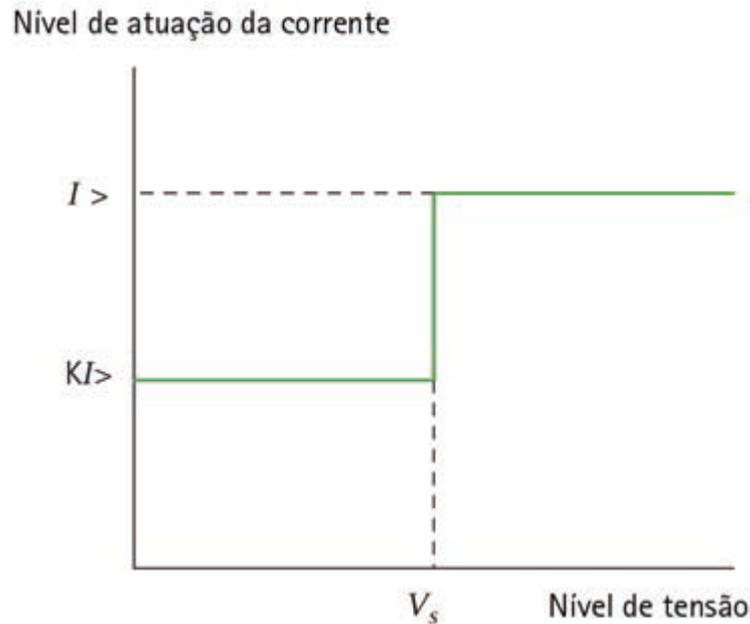
- $I_{ajuste}$  – Corrente da unid. temporizada de fase;
- $K$  – Fator de sobrecarga: 1,1 – 1,2;
- $I_{ng}$  – Corrente Nominal do gerador.

- Dificuldade do ajuste da proteção de sobrecorrente simples aparece devido a que se deve contemplar tanto o decremento da corrente de falta do gerador com o tempo quanto a passagem da corrente de carga máxima;
- Para superar a dificuldade da discriminação, a tensão terminal do gerador pode ser medida e usada para modificar de forma dinâmica as características básicas de sobrecorrente corrente/tempo do relé para faltas próximas à instalação de geração.

- Dificuldade do ajuste da proteção de sobrecorrente simples;
- A tensão terminal do gerador é usada para modificar as características básicas de corrente/tempo do relé;
- Usados em sistemas industriais como uma alternativa à proteção diferencial total;
- Não atua para sobrecargas normais;
- Ajustados para baixas correntes;
- Atua somente se a corrente cair a um determinado patamar.

## 5.2.1 - Proteção de Sobrecorrente com Controle por Tensão

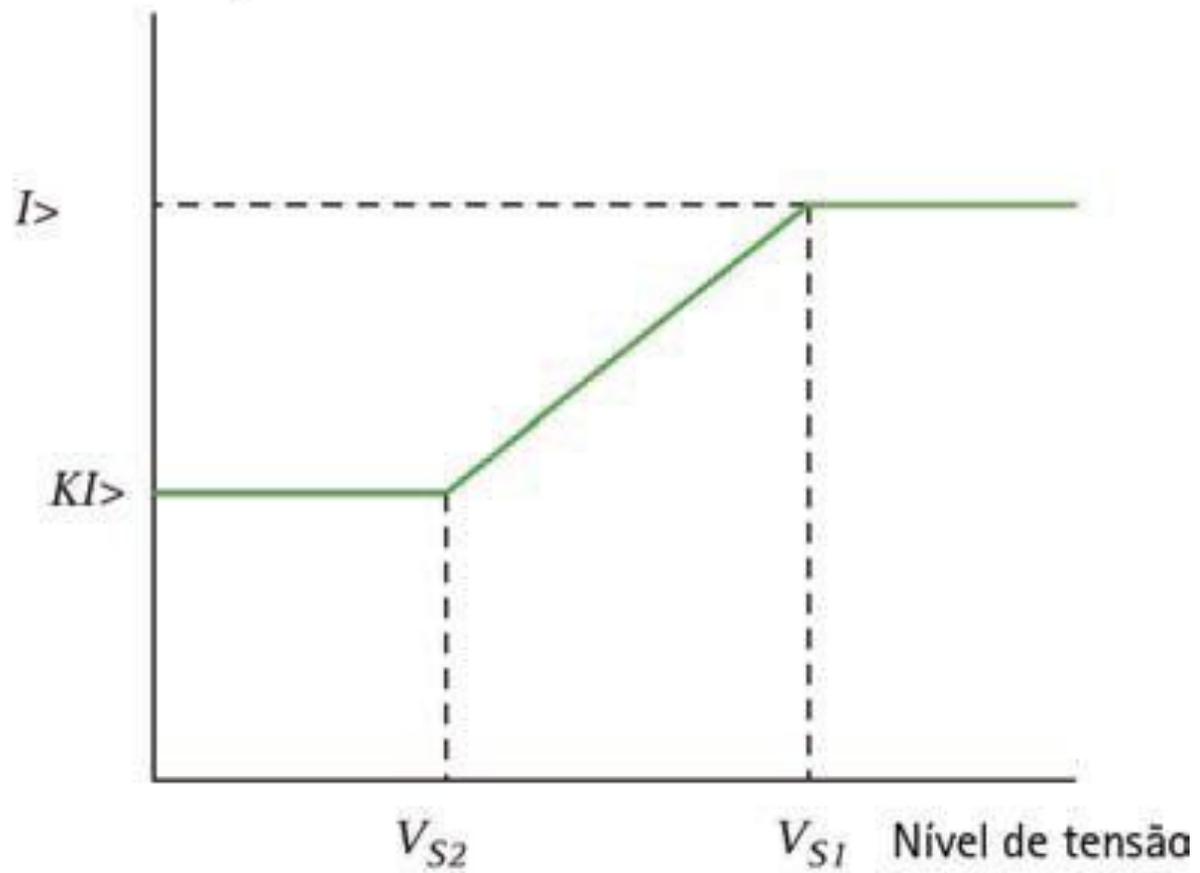
- Unidade de sobrecorrente é ativada quando a tensão cair abaixo de determinado patamar.



## 5.2.2 - Proteção de Sobrecorrente com Restrição por Tensão

- Consiste em variar continuamente o ajuste de atuação do relé com a variação da tensão do gerador entre um limite inferior e superior;
- A tensão é usada para restringir a operação do elemento de corrente.

Nível de atuação da corrente



## 5.3 – Proteção de Sobrecarga

- A relés de sobrecorrente não fornece proteção satisfatória;
- Relés térmicos podem ser usados em máquinas de pequena capacidade.
- Solução mais adequada é a imagem térmica;
- Curva ajustada em 10s abaixo da curva do gerador;

O tempo de atuação da unidade de imagem térmica pode ser calculado por duas condições:

- Sobrecarga do gerador a partir de uma corrente inicial nula

$$T = \sigma \cdot \ln \frac{I_m^2}{I_m^2 - I_{max}^2} \text{ (s)}$$

$\sigma$  – constante de tempo térmica;

$\ln$  – logaritmo neperiano;

$I_m$  – corrente medida;

$I_{max}$  – máxima corrente admissível em regime.

- Sobrecarga do gerador a partir de uma corrente inicial definida

$$T = \sigma \cdot \ln \frac{I_m^2 - I_i}{I_m^2 - I_{max}^2} (s)$$

$I_i$  – corrente medida antes da sobrecarga;

## Exercício 2:

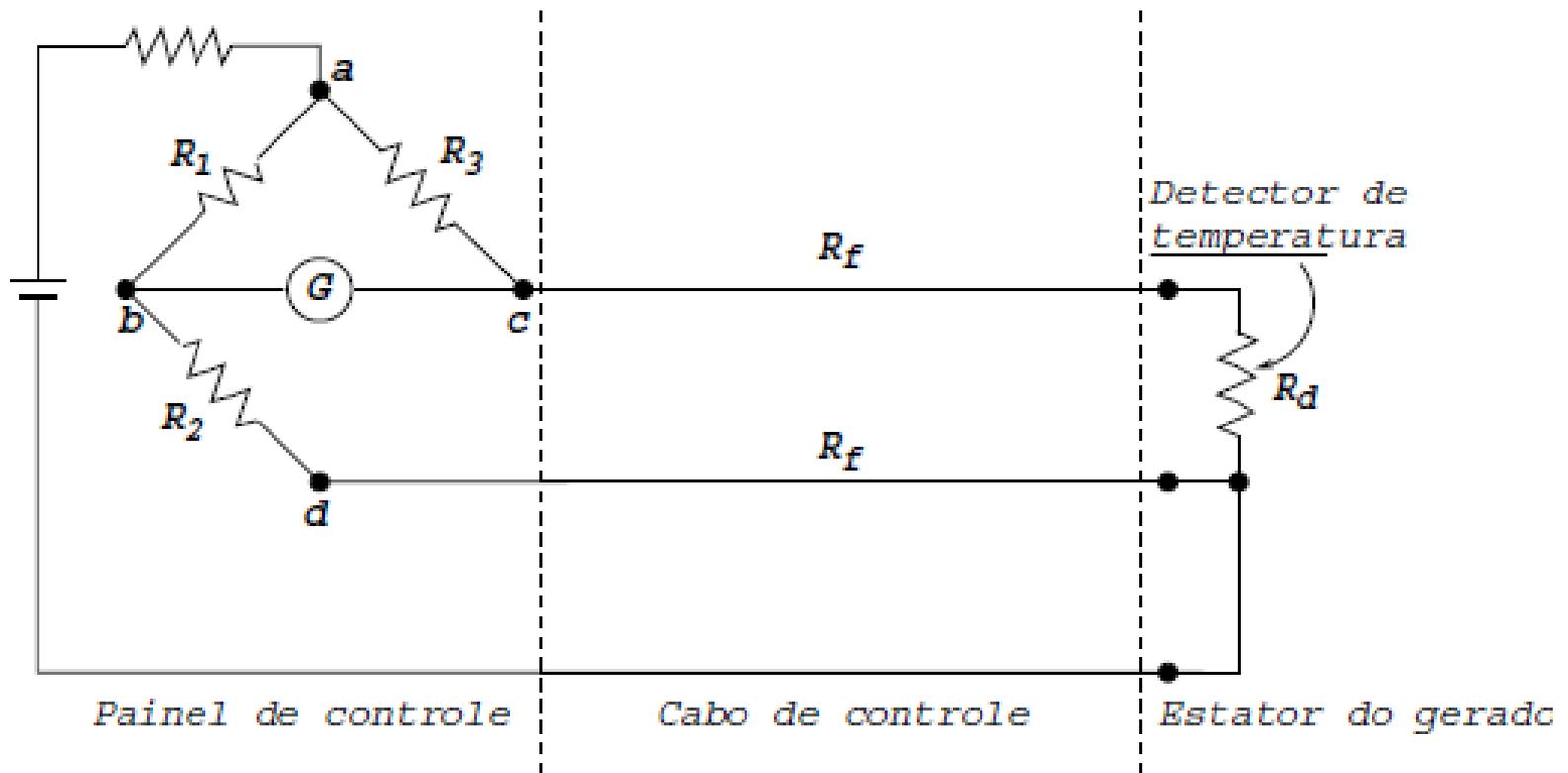
- Um gerador de 5 MVA, 2,4 kV, opera com 70% de capacidade. Devido a um ilhamento na rede o gerador passa a operar a 140% da capacidade nominal. Determinar o tempo de disparo da função 49, sabendo que a constante de tempo térmica do gerador é de 40 minutos e a corrente máxima admissível de  $1,1 I_n$ .

## 5.4 – Proteção Contra Correntes Desequilibradas

- Correntes desequilibradas no gerador causam a correntes de sequência negativa nos enrolamentos;
- Fluxos gerados por estas correntes induzirão correntes de frequência dupla na superfície do rotor provocando sobreaquecimento;
- Caso o gerador não seja desligado poderá causar até o derretimento do núcleo do rotor;
- Relé de sobrecorrente de tempo inverso ligado a saída de um filtro de sequência negativa.

## 5.5 – Proteção Contra Sobreaquecimentos

- O estator dos geradores síncronos estão sujeitos a sobreaquecimento;
- Estas condições podem ser detectadas através de resistores detectores de temperatura (RTD's) que são alojadas entre as espiras dos enrolamentos do estator do gerador;
- Ponte de Wheatstone que possui um relé ligado na sua diagonal.



## 5.6 – Proteção Contra Motorização

- Causada pela falha da máquina primária;
- Ausência de suprimento de energia da turbina, o gerador passa a funcionar como motor síncrono, acionando aquela;
- Motorização provoca o fenômeno de cavitação nas pás da turbina;
- Relé contra motorização é do tipo direcional de potência, sensível a reversão de potência.

## 5.7 – Proteção Contra Perda de Excitação

- A perda de excitação pode ocorrer como um resultado de:
  - Perda de campo da excitatriz principal;
  - Desligamento acidental do disjuntor de campo;
  - Curto-circuito nos circuitos do campo;
  - Mal contato nas escovas da excitatriz;
  - Perda da alimentação CA no sistema de excitação.
- A perda de excitação causa aceleração passando a operar como gerador de indução.

- A circulação da corrente induzida na parte metálica do rotor irá causar um sobreaquecimento;
- Esquema de proteção de ação rápida deve desligar o disjuntor principal e o disjuntor de campo do gerador;
- Relé mais seletivo é o direcional de distancia alimentado pelas tensões e correntes do gerador.

## 5.8 – Proteção Contra Sobretensões

- Prover proteção de retaguarda para o regulador de tensão e proteger o gerador nos casos de condições anormais, como rejeição de carga severa;
- O relé de sobtensão deverá ser ajustado em 110% da tensão nominal e instantâneo a 130% a 150% da tensão nominal.

## 5.9 – Proteção Contra Sobrevelocidades

- Somente ocorre quando o gerador é desacoplado do SEP;
- Necessária em todos os geradores acionados por turbinas hidráulicas;
- Consiste de um gerador CC acoplado ao eixo do grupo e fornece ao regulador de velocidade uma tensão proporcional a velocidade de rotação;
- Ajustado para operar para velocidades 3 a 5 % acima da velocidade nominal.