

COLÉGIO IGUAÇU

GERAÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE
POTÊNCIA POR RELÉS

PROFESSOR NILTON CÉSAR FIGUEIRA

2012

APRESENTAÇÃO

O mercado de trabalho para o eletrotécnico é muito amplo, podendo atuar na indústria de forma geral, executando atividades técnicas de manutenção em quadros de comandos, controle de processos automáticos de fabricação, no planejamento de sistemas de gerência de manutenção, qualidade e confiabilidade de energia elétrica.

O eletrotécnico também pode atuar na área comercial referente a operações com matérias e dispositivos elétricos, além de poder trabalhar na implantação de sistemas de iluminação e alarme residencial e comercial.

Os conhecimentos básicos para o eletrotécnico atuar nas áreas citadas acima, fazem parte da grade dos cursos de eletrotécnica e pode-se afirmar que são bem explorados, porém, há uma lacuna pouco trabalhada quando tratamos com o conhecimento relacionado ao sistema elétrico de potência.

Como o sistema elétrico brasileiro é um dos maiores do planeta, haja vista, também, a grande expectativa atual que vivemos de crescimento da nossa economia, as empresas concessionárias de energia elétrica irão demandar uma grande quantidade de técnicos para trabalhar no setor de proteção e estudos do sistema elétrico de potência.

A proposta desta matéria é fornecer um conhecimento básico introdutório sobre o princípio de funcionamento dos principais relés de proteção para o futuro eletrotécnico que irá atuar em empresas de geração, transmissão e distribuição de energia, tanto na operação, manutenção ou estudos do sistema elétrico de potência.

Professor Nilton César Figueira

Sumário

CAPÍTULO 1	5
1 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA – SEP	5
1.1 INTRODUÇÃO	5
1.2 DIAGRAMA UNIFILAR DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA	5
1.3 VALOR POR UNIDADE - PU	5
1.4 VALORES BASE DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS DO SISTEMA	6
1.5 SISTEMA MONOFÁSICO	6
1.6 SISTEMA TRIFÁSICO	6
1.7 MUDANÇA DE BASE DE UMA GRANDEZA (IMPEDÂNCIA)	8
1.8 IMPEDÂNCIA EM PU DE TRANSFORMADORE MONOFÁSICO DE DOIS ENROLAMENTOS	9
1.9 IMPEDÂNCIA EM PU DE BANCOS DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS	10
1.10 IMPEDÂNCIAS EM PU DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM DOIS ENROLAMENTOS	13
CAPÍTULO 2	15
2. COMPONENTES SIMÉTRICAS	15
2.1 INTRODUÇÃO	15
2.2 TEOREMA DE FORTESCUE	15
2.3 TEOREMA DE FORTESCUE A SISTEMAS TRIFÁSICOS	16
2.4 SISTEMA TRIFÁSICO DE SEQUÊNCIA POSITIVA	16
2.5 SISTEMA TRIFÁSICO DE SEQUÊNCIA NEGATIVA	17
2.6 SISTEMA TRIFÁSICO DE SEQUÊNCIA ZERO	18
2.7 EXPRESSÃO ANALÍTICA DO TEOREMA DE FORTESCUE	18
2.8 COMPONENTES DE SEQUÊNCIAS EM FUNÇÃO DO SISTEMA TRIFÁSICO DESBALANCEADO	20
2.9 TEOREMA DE FORTESCUE EM TERMOS DE CORRENTE	20
2.10 ANÁLISE DA CORRENTE DE SEQUÊNCIA ZERO	21
CAPÍTULO 3	24
3 ASPECTOS GERAIS DA PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA POR RELÉS	24
3.1 INTRODUÇÃO	24
3.2 DEFINIÇÃO DE RELÉ	24
3.3 CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DO RELEAMENTO	24
3.4 O RELÉ ELEMENTAR	25
3.5 ZONAS DE PROTEÇÃO	25

CAPÍTULO 4	28
4 INTRODUÇÃO AO RELÉ DE SOBRECORRENTE	28
4.2 RELÉ DE SOBRECORRENTE	28
4.3 RELÉ DE SOBRECORRENTE ELETROMECHANICO	29
4.4 AJUSTE DO TEMPO DE ATUAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE	32
4.5 AJUSTE DA CORRENTE DE ATUAÇÃO DO RELÉ DE SOBRECORRENTE	35
CAPÍTULO 5	41
5 INTRODUÇÃO AO RELÉ DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL.....	41
5.1 INTRODUÇÃO.....	41
5.2 RELÉ DE SOBRECORRENTE DIRECIONAL.....	41
5.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO RELÉ DIRECIONAL.....	42
5.4 RELÉ DIRECIONAL TIPO CORRENTE-CORRENTE	44
5.5 POLARIZAÇÃO DO RELÉ DIRECIONAL.....	45
1. POLARIZAÇÃO EM QUADRATURA OU 90°	45
2. POLARIZAÇÃO 30°	46
3. POLARIZAÇÃO 60°	46
4. POLARIZAÇÃO 0°	47
5.6 RELÉ DIRECIONAL DE SEQUÊNCIA ZERO	47
CAPÍTULO 6	51
6 INTRODUÇÃO AO RELÉ DE DISTÂNCIA.....	51
6.1 INTRODUÇÃO.....	51
6.2 O RELÉ DE DISTÂNCIA	51
6.3 RELÉ DE IMPEDÂNCIA OU OHM	52
6.4 RELÉ DE REATÂNCIA	56
6.5 RELÉ DE ADMITÂNCIA OU MHO.....	58
CAPÍTULO 7	61
7 INTRODUÇÃO AO RELÉ DIFERENCIAL.....	61
7.1 INTRODUÇÃO.....	61
7.2 RELÉ DIFERENCIAL AMPERIMÉTRICO	62
7.3 RELÉ DIFERENCIAL PERCENTUAL	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66

CAPÍTULO 1

1 REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA – SEP

1.1 INTRODUÇÃO

Devido à grande complexidade do sistema elétrico de potência - SEP, o qual é praticamente todo interligado, tanto do ponto de vista da operação quanto do planejamento, o comportamento do sistema deve ser acompanhado. Para isto, o sistema deve ser adequadamente modelado para poder ser estudado.

Por exemplo, devemos representar o sistema, para modelarmos as correntes de curto-circuito e o comportamento do SEP durante estes eventos. Para isso, usamos um circuito equivalente simplificado, representado por adequados componentes simétrico, dando origem a três modelos de representação: **de seqüências positivas, negativa e zero**.

1.2 DIAGRAMA UNIFILAR DE UM SISTEMA DE POTÊNCIA

Para o estudo do SEP, normalmente considera-se o sistema operando equilibrado, então substitui a representação trifásica pelo diagrama unifilar. Na representação unifilar, ao invés de representarmos as três fases de uma linha de transmissão é representado apenas uma.

A finalidade da representação unifilar é expressar claramente e concisamente os dados e topologia do sistema.

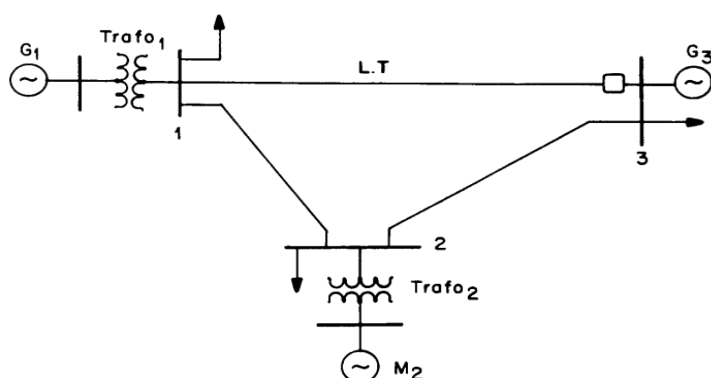


Figura 1.2.1.
Representação de um
sistema unifilar

1.3 VALOR POR UNIDADE - PU

Normalmente utilizamos nos cálculos o valor de base 1, entretanto, podemos utilizar qualquer número diferente de 1 como base. Neste caso, todos os números do sistema ficam referenciados a este número pré-fixado. A formulação utilizando esta técnica é conhecida como resolução por unidade – **pu**.

Na eletrotécnica, valor por unidade – **pu** produz várias simplificações na modelagem e resolução de sistemas. **VALOR POR UNIDADE – PU:** é a relação entre o valor da grandeza e o valor base da mesma grandeza, escolhida como referência.

$$\text{valor pu} = \frac{\text{valor real da grandeza}}{\text{valor base da grandeza}} \quad (1.3.1)$$

Exemplo 1.1: Referir as tensões abaixo em pu, usando arbitrariamente como BASE o valor de 120 KV.

a) $V_1 = 126 \text{ KV}$	$V_1 = \frac{126}{120} = 1,05 \text{ pu}$
b) $V_2 = 500 \text{ KV}$	$V_2 = \frac{500}{126} = 4,17 \text{ pu}$
c) $V_3 = 120 \text{ KV}$	$V_3 = \frac{120}{120} = 1 \text{ pu}$
d) $V_4 = 300 \text{ KV}$	$V_4 = \frac{300}{120} = 2,5 \text{ pu}$
e) $V_5 = 350 \text{ KV}$	$V_5 = \frac{350}{120} = 2,91 \text{ pu}$

1.4 VALORES BASE DAS GRANDEZAS ELÉTRICAS DO SISTEMA

Há quatro grandezas básicas com as quais podemos caracterizar um sistema elétrico:

- a) Tensão elétrica (V)
- b) Corrente elétrica (I)
- c) Potência aparente (S)
- d) Impedância (Z)

Conhecendo apenas duas destas grandezas, podemos definir as outras duas através de relações (equações). É comum para um SEP escolher como bases a **tensão (V_{base})** e **potência aparente (S_{base})**.

1.5 SISTEMA MONOFÁSICO

São as redes monofásicas (1 ϕ) e transformadores monofásicos (1 ϕ).

$$S_{base} = V_{base} \cdot I_{base} \Rightarrow I_{base} = \frac{S_{base}}{V_{base}} \quad (1.5.1)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{I_{base}} \Rightarrow Z_{base} = \frac{V_{base}}{\frac{S_{base}}{V_{base}}} \Rightarrow Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (1.5.2)$$

$$\begin{array}{l} \text{O} \\ \text{N} \\ \text{D} \\ \text{E} \end{array} \left\{ \begin{array}{l} S_{base} \Rightarrow \text{potência aparente de base} \\ V_{base} \Rightarrow \text{tensão base da fase no nível de tensão considerado} \\ I_{base} \Rightarrow \text{corrente de base no nível de tensão de base} \\ Z_{base} \Rightarrow \text{impedância base referida a tensão de base} \end{array} \right.$$

1.6 SISTEMA TRIFÁSICO

No SEP temos cargas e transformadores ligados em estrela e triângulo. Os cálculos sobre o SEP são feitos utilizando **componentes simétricas, que são equilibradas**. Deste modo pode-se utilizar a representação unifilar do SEP.

Então, toda a representação em **pu** do SEP é feita apenas para uma fase e na ligação estrela correspondente do sistema. Veja a figura 1.6.1.

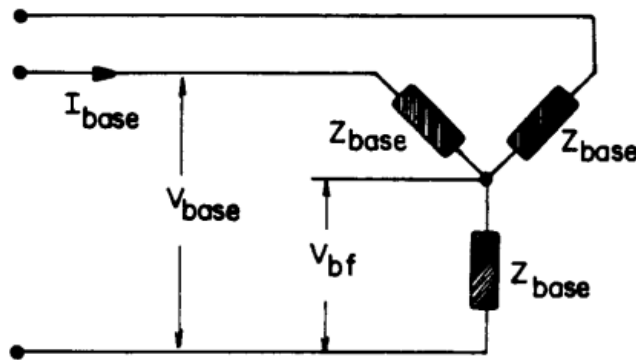


Figura 1.6.1. Modelo em Y correspondente

$$\text{BASES ADOTADAS} \begin{cases} S_{base} \\ V_{base} \end{cases}$$

Onde:

$S_{base} \Rightarrow$ Potência aparente base do sistema trifásico, ou seja, é a soma das potências aparentes base de cada fase.

$$S_{b(3\phi)} = 3 \cdot S_{b(1\phi)} \quad (1.6.1)$$

V_{base} : Tensão base de linha a linha, ou $\sqrt{3}$ vezes a tensão base de fase do Y correspondente.

$$V_{base} = \sqrt{3} \cdot V_{bf} \quad (1.6.2)$$

$V_{bf} \Rightarrow$ Tensão base de fase

Cálculo da corrente de base (I_{base}): A corrente base é a mesma da linha do sistema trifásico original e da fase do Y equivalente.

$$S_{base} = \sqrt{3} \cdot V_{base} \cdot I_{base} \Rightarrow I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \quad (1.6.3)$$

Cálculo da impedância de base (Z_{base}): A impedância base de um sistema trifásico é sempre a impedância da fase do sistema trifásico em Y equivalente.

$$Z_{base} = \frac{V_{bf}}{I_{bf}} \Rightarrow \text{temos que: } I_{base} = I_{bf}$$

$$V_{base} = \sqrt{3} \cdot V_{bf}$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}}{\sqrt{3} \cdot I_{base}} \Rightarrow \text{temos que: } I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \quad (1.6.4)$$

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \quad (1.6.5)$$

Observe que esta equação é igual à que definimos para o sistema monofásico.

Exemplo 1.2: Um sistema de potência 3 ϕ tem como base 100 MVA e 230 KV. Determinar:

a) Corrente base:
$$I_{base} = \frac{S_{base}}{\sqrt{3} \cdot V_{base}} \Rightarrow I_{base} = \frac{100 \text{ M}}{\sqrt{3} \cdot 230 \text{ K}} \Rightarrow I_{base} = 251,02 \text{ A}$$

b) Impedância de base:

$$Z_{base} = \frac{V_{base}^2}{S_{base}} \Rightarrow Z_{base} = \frac{(230 \text{ k})^2}{100 \text{ M}} \Rightarrow Z_{base} = 529 \Omega$$

c) Admitância de base:

$$Y_{base} = \frac{1}{Z_{base}} \Rightarrow Y_{base} = \frac{1}{529} \Rightarrow Y_{base} = 1,89 \cdot 10^{-3} \text{ Siemens}$$

d) A corrente $I=502,04 \text{ A}$ em pu:

$$I_{pu} = \frac{I}{I_{base}} \Rightarrow I_{pu} = \frac{502,04}{251,02} \Rightarrow I_{pu} = 2 \text{ pu}$$

e) A impedância $\bar{Z} = 264,5 + j1058 \Omega$ em pu:

$$\bar{Z}_{pu} = \frac{\bar{Z}}{Z_{base}} \Rightarrow \bar{Z}_{pu} = \frac{264,5 + j1058}{529} \Rightarrow \bar{Z}_{pu} = 0,5 + j2 \text{ pu}$$

f) Representar em pu, a impedância de uma linha de transmissão de 230 KV com 52,9 Km de comprimento, tendo 0,5 Ω/Km por fase.

$$Z_{LT} = 0,5 \frac{\Omega}{\text{Km}} \cdot 52,9 \text{ Km} \Rightarrow Z_{LT} = 26,45 \Omega$$

$$Z_{LTpu} = \frac{Z_{LT}}{Z_{base}} \Rightarrow Z_{LTpu} = \frac{26,45}{529} \Rightarrow Z_{LTpu} = 0,05 \text{ pu}$$

1.7 MUDANÇA DE BASE DE UMA GRANDEZA (IMPEDÂNCIA)

Geralmente os dados de placa dos transformadores não coincidem com a base no qual o sistema será calculado. A mudança de base da impedância do transformador deverá ser calculada como segue.

$$Z_{\text{REAL}} \rightarrow Z_{\text{PU1}} \left\{ \begin{array}{l} V_{\text{BASE1}} \\ S_{\text{BASE1}} \end{array} \right. \xrightarrow{\text{Mudança}} Z_{\text{PU2}} \left\{ \begin{array}{l} V_{\text{BASE2}} \\ S_{\text{BASE2}} \end{array} \right.$$

Na base 1 tem-se:

$$Z_{pu1} = \frac{Z_{real}}{Z_{base1}} \Rightarrow Z_{real} = Z_{pu1} \cdot Z_{base1} \quad (1.7.1)$$

Na base 2 temos:

$$Z_{pu2} = \frac{Z_{real}}{Z_{base2}} \Rightarrow Z_{real} = Z_{pu2} \cdot Z_{base2} \quad (1.7.2)$$

Igualando-se as equações: $Z_{pu1} \cdot Z_{base1} = Z_{pu2} \cdot Z_{base2}$

$$Z_{pu1} \cdot \frac{V_{base1}^2}{S_{base1}} = Z_{pu2} \cdot \frac{V_{base2}^2}{S_{base2}}$$

$$Z_{pu2} = Z_{pu1} \cdot \left(\frac{V_{base1}}{V_{base2}} \right)^2 \cdot \frac{S_{base2}}{S_{base1}} \quad (1.7.3)$$

Exemplo 1.3: A placa de um gerador síncrono apresenta os seguintes dados: 50 MVA, 13,8 KV e $X=20\%$. Calcular a reatância da máquina em pu referida à nova base de 100 MVA e 13,2 KV.

Dados:

$$X_{pu1} = ?; X_{pu2} = 0,2 \text{ pu}$$

$$S_{base1} = 50 \text{ MVA}; V_{base1} = 13,8 \text{ KV}$$

$$S_{base2} = 100 \text{ MVA}; V_{base2} = 13,2 \text{ KV}$$

$$X_{pu2} = X_{pu1} \cdot \left(\frac{V_{base1}}{V_{base2}} \right)^2 \cdot \frac{S_{base2}}{S_{base1}}$$

$$X_{pu2} = 0,2 \cdot \left(\frac{13,8 \text{ K}}{13,2 \text{ K}} \right)^2 \cdot \frac{100 \text{ M}}{50 \text{ M}}$$

$$X_{pu2} = \mathbf{0,44 \text{ pu na base nova}}$$

1.8 IMPEDÂNCIA EM PU DE TRANSFORMADORE MONOFÁSICO DE DOIS ENROLAMENTOS

As impedâncias do transformador, do lado primário (AT) e secundário (BT) são obtidas através do teste de curto-circuito.

$Z_{AT} \rightarrow$ impedância vista pelo lado AT (alta tensão)

$Z_{BT} \rightarrow$ impedância vista pelo lado BT (baixa tensão)

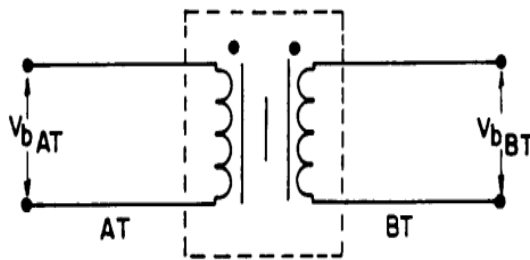


Figura 1.8.1. Transformador monofásico de dois enrolamentos.

Então, temos duas tensões de base, a do lado AT e a do lado BT.

$$V_{bAT} = V_{NAT}$$

$$V_{bBT} = V_{NBT}$$

$$S_{BASE} = S_N$$

V_{bAT} e $V_{bBT} \rightarrow$ são as tensões base do lado AT e BT do transformador.

V_{NAT} e $V_{NBT} \rightarrow$ são as tensões nominais do lado AT e BT do transformador.

$S_N \rightarrow$ é a potência aparente nominal do transformador.

$$Z_{ATpu} = \frac{Z_{AT}}{Z_{bAT}} = \frac{Z_{AT}}{\frac{V_{bAT}^2}{S_{base}}} \quad (1.8.1)$$

$$Z_{BTpu} = \frac{Z_{BT}}{Z_{bBT}} = \frac{Z_{BT}}{\frac{V_{bBT}^2}{S_{base}}} \quad (1.8.2)$$

Referindo Z_{AT} para o lado de BT:

$$Z_{BT} = \left(\frac{V_{NBT}}{V_{NAT}} \right)^2 \cdot Z_{AT} \quad \text{ou} \quad Z_{BT} = \left(\frac{V_{bBT}}{V_{bAT}} \right)^2 \cdot Z_{AT}$$

$$Z_{BTpu} = \left(\frac{V_{bBT}}{V_{bAT}} \right)^2 \cdot \frac{Z_{AT}}{\frac{V_{bBT}^2}{S_b}} = \frac{Z_{AT}}{\frac{V_{bAT}^2}{S_b}} = Z_{AT} \text{ Então: } Z_{Tpu} = Z_{BTpu} = Z_{ATpu}$$

Conclusão: Em um transformador, o valor em **pu** do lado de baixa ou de alta tensão é o mesmo. Assim, no dado de placa do transformador, apresenta-se apenas o valor da impedância percentual, através da qual se pode determinar os valores referentes em ohms no lado AT e BT.

Cabe lembrar que estas fórmulas determinadas para a impedância valem igualmente para a reatância e resistência percentual do transformador.

Exemplo 1.4: Em um transformador monofásico de 20 MVA de 69/13,8 KV, possui uma impedância de 0,762 Ω do lado BT.

a) Qual o valor da impedância em **pu**?

$$Z_{Tpu} = \frac{Z_{BT}}{Z_{bBT}} = \frac{Z_{BT}}{\frac{V_{bBT}^2}{S_{base}}} = \frac{0,764}{\frac{(13,8 K)^2}{20 M}} = \mathbf{0,08 pu}$$

b) Achar a impedância no lado AT.

$$Z_{AT} = \left(\frac{V_{NAT}}{V_{NBT}} \right)^2 \cdot Z_{BT} = \left(\frac{69 K}{13,8 K} \right)^2 \cdot 0,764 = \mathbf{19,05 \Omega}$$

$$Z_{AT} = Z_{Tpu} \cdot Z_{bAT} = 0,08 \cdot \frac{(69 K)^2}{20 M} = \mathbf{19,05 \Omega}$$

Também podemos utilizar a impedância em pu calculada no item (a).

c) Qual o valor da impedância em **pu**, numa nova base de 30 MVA com as mesmas tensões nominais do transformador?

$$Z_{pu2} = Z_{pu1} \cdot \left(\frac{V_{base1}}{V_{base2}} \right)^2 \cdot \frac{S_{base2}}{S_{base1}} \Rightarrow Z_{pu2} = 0,08 \cdot \left(\frac{13,8 K}{13,8 K} \right)^2 \cdot \frac{30 M}{20 M} = \mathbf{0,13 pu}$$

Exercício proposto 1.1: Um transformador monofásico de 10 MVA de 69/13.8 KV, com 8% de reatância (0,08 pu). Calcular:

- a) Z_{BT} (resp.: 1523 Ω)
- b) Z_{AT} (resp.: 38,1 Ω)

1.9 IMPEDÂNCIA EM PU DE BANCOS DE TRANSFORMADORES MONOFÁSICOS

Muitas vezes temos um banco de transformadores monofásicos ligados em estrela ou triângulo, formando um transformador trifásico. Quando as três unidades monofásicas são interligadas, formando um banco em triângulo ou estrela ligado a uma rede trifásica, sua placa fica mudada para:

$$S_{b(3\phi)} = 3S_{b(1\phi)}$$

$V_{b(3\phi)}$ é ditada pela ligação em Δ ou y .

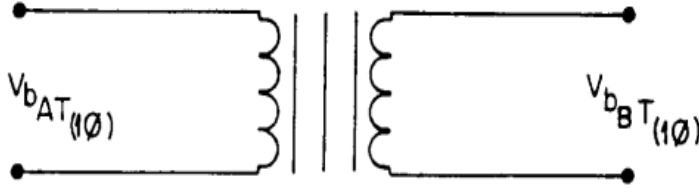


Figura 1.8.2:
Transformador
monofásico.

Os trafos 1 ϕ podem ser conectados formando diversas combinações de bancos 3 ϕ . A seguir será apresentado os dados de placas dos transformadores 1 ϕ .

a) Bancos 3 ϕ em y – y:

$$S_{b(3\phi)} = 3S_{b(1\phi)}$$

$$V_{bAT(3\phi)} = \sqrt{3}V_{bAT(1\phi)}$$

$$V_{bBT(3\phi)} = \sqrt{3}V_{bBT(1\phi)}$$

$$X_{T(3\phi)pu} = \frac{X_T \Omega / fase}{X_{b(3\phi)}} = \frac{X_T \Omega / fase}{\frac{V_{bAT(3\phi)}^2}{S_{b(3\phi)}}}$$

A reatância do transformador 3 ϕ em pu, representada pela reatância da fase do Y equivalente, é a própria reatância do transformador 1 ϕ .

$$X_{T(3\phi)pu} = \frac{X_{T(1\phi)}}{\left[\frac{\sqrt{3}V_{bAT(1\phi)}}{3S_{b(1\phi)}} \right]^2} = \frac{X_{T(1\phi)}}{\frac{V_{bAT(1\phi)}^2}{S_{b(1\phi)}}} = X_{T(1\phi)pu}$$

$$X_{T(3\phi)pu} = X_{T(1\phi)pu}$$

Verifica-se que o valor em pu não mudou do transformador 1 ϕ para o 3 ϕ , somente os valores bases foram adaptados à nova ligação.

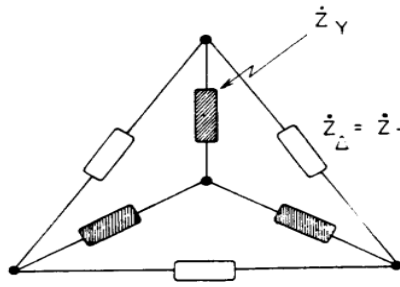
b) Bancos 3 ϕ em Δ – Δ :

$$S_{b(3\phi)} = 3S_{b(1\phi)}$$

$$V_{bAT(3\phi)} = V_{bAT(1\phi)}$$

$$V_{bBT(3\phi)} = V_{bBT(1\phi)}$$

Para o cálculo em pu, é necessário transformar a ligação Δ em Y equivalente. A impedância do enrolamento do transformador 1 ϕ é a impedância da fase do Δ .

**Figura 1.8.3:** Transformador Δ – Y.

Como as impedâncias de cada fase do Δ são iguais à impedância do trafo 1φ, as impedâncias de cada fase do Y equivalente são iguais e podem ser calculadas pela expressão: $\bar{Z}_y = \frac{\bar{Z}_\Delta}{3}$

Nota-se que os ângulos das impedâncias Δ e Y são iguais. Através do cálculo em pu da reatância da fase do trafo em Y equivalente, podemos obter a reatância do transformador em pu.

$$X_{T(3\phi)pu} = \frac{X_{T\Delta(3\phi)}}{3Z_{baseAT}} = \frac{X_{T\Delta(3\phi)}}{\frac{3[V_{bAT(3\phi)}]^2}{S_{b(3\phi)}}}$$

Substituindo os valores para o transformador monofásico:

$$X_{T(3\phi)pu} = \frac{X_{T(1\phi)}}{\frac{3[V_{bAT(1\phi)}]^2}{3S_{b(1\phi)}}} = \frac{X_{T(1\phi)}}{Z_{base(1\phi)}} = X_{T(1\phi)pu}$$

$$X_{T(3\phi)pu} = X_{T(1\phi)pu}$$

O valor da reatância do transformador não mudou apenas os valores bases foram adaptados à nova ligação.

c) Bancos 3φ em Y – Δ:

$$S_{b(3\phi)} = 3S_{b(1\phi)}$$

$$V_{bY} = \sqrt{3}V_{BT(1\phi)}$$

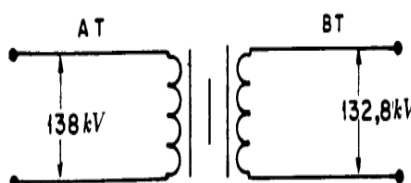
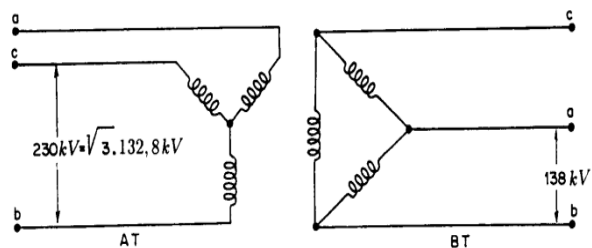
$$V_{b\Delta} = V_{bAT(1\phi)}$$

Analisando pelo lado do Y, recai-se no mesmo caso da ligação Y – Y. Analisando pelo lado do Δ, recai-se no mesmo caso da ligação Δ – Δ.

Conclusão: O valor em pu da impedância do transformador 1φ e do banco é a mesma, não importando o tipo de ligação.

Exemplo 1.5: Três transformadores monofásicos de 50 MVA e 132,8/138 KV, com reatância de 0,1 pu, são interligados formando um banco de Y – Δ. O lado BT da unidade 1φ é ligado em Y, e o lado AT do 1φ em Δ.

a) Qual a placa do banco?

**Figura 1.8.4:** Transformador monofásico - 1φ**Figura 1.8.5:** Ligação do banco em Y – Δ

$$\text{Placa do banco} \left\{ \begin{array}{l} S_{b(3\phi)} = 150 \text{ MVA} \\ V_{bAT(3\phi)} = 230 \text{ KV} \\ V_{bBT(3\phi)} = 138 \text{ KV} \\ X_T = 0,1 \text{ pu} \end{array} \right.$$

Observe que houve troca na denominação de AT e BT ao serem realizadas as ligações do banco 3 ϕ .

- c) Qual o valor da impedância do lado AT do transformador 1 ϕ em Ω ?

$$Z_{AT(1\phi)} = X_{T(pu)} \cdot \frac{V_{bAT(1\phi)}^2}{S_{b(1\phi)}} = \frac{0,1 \cdot (138 \text{ K})^2}{50 \text{ M}} = \mathbf{38,088 \Omega}$$

- d) Qual o valor da impedância do lado Δ do transformador 3 ϕ ?

$$Z_{\Delta} = Z_{AT(1\phi)} = 38,088 \Omega$$

Fazendo o mesmo cálculo, usando pu:

$$Z_{\Delta} = 3X_{T(pu)} \cdot Z_{baseBT(3\phi)} = \frac{3 \cdot 0,1 \cdot (138 \text{ K})^2}{150 \text{ M}} = 38,088 \Omega$$

- e) Qual a impedância do lado Y do transformador 3 ϕ ?

$$Z_Y = X_{T(pu)} \cdot Z_{baseAT(3\phi)} = \frac{0,1 \cdot (230 \text{ K})^2}{150 \text{ M}} = 35,26 \Omega$$

Exercício proposto 1.2: Três transformadores monofásicos de 376 MVA e 525/750 KV, com reatância de 0,1 pu, são interligados formando um banco de Y – Δ . O lado BT da unidade 1 ϕ é ligado em Y, e o lado AT do 1 ϕ em Δ . Calcule:

- Qual a placa do banco?
- Qual o valor da impedância do lado AT do transformador 1 ϕ em Ω ?
- Qual o valor da impedância do lado Δ do transformador 3 ϕ ?
- Qual a impedância do lado Y do transformador 3 ϕ ?

1.10 IMPEDÂNCIAS EM PU DE TRANSFORMADORES TRIFÁSICOS COM DOIS ENROLAMENTOS

O transformador trifásico de três enrolamentos interliga três níveis de tensão diferentes do sistema elétrico.

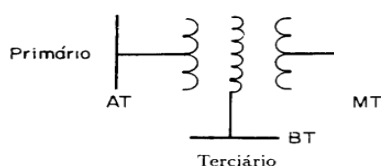


Figura 1.10.1: Transformador 3 ϕ de três enrolamentos.

Temos os seguintes enrolamentos:

Alta tensão (AT) – enrolamento primário

Média tensão (MT) – enrolamento secundário

Baixa tensão (BT) – enrolamento terciário

Muitas vezes o enrolamento de BT é usado em Δ como filtro de seqüência zero em aplicações de proteção.

A impedância de curto-circuito do transformador de três enrolamentos é obtida através do ensaio de curto-circuito, usando-se apenas dois dos enrolamentos, enquanto o outro fica a vazio, isto é, com seus terminais abertos. O ensaio segue a seguinte rotina:

Teste	Tensão	Curto-Circuito	Enrolamento Aberto	Impedância medida
1	Primário	Secundário	Terciário	Z_{ps}
2	Primário	Terciário	Secundário	Z_{pt}
3	Secundário	Terciário	Primário	Z_{st}

Tabela 1.9.1. Rotina de teste de curto-circuito no transformador de 3 enrolamentos.

As impedâncias $\bar{Z}_{ps}$, $\bar{Z}_{pt}$ e $\bar{Z}_{st}$ não são adequadas para compor um circuito equivalente por fase. Então usamos as seguintes equações abaixo.

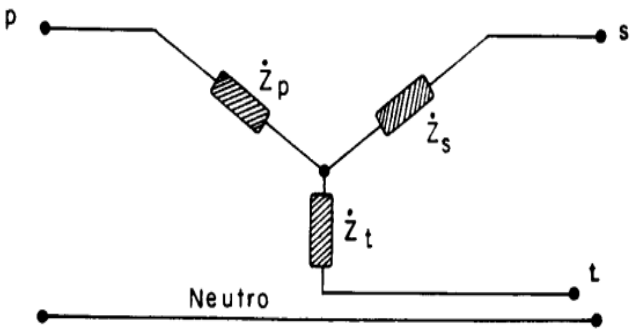


Figura 1.9.1: Circuito equivalente por fase em Y

$$\bar{Z}_p = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{ps} + \bar{Z}_{pt} - \bar{Z}_{st})$$
$$\bar{Z}_s = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{ps} + \bar{Z}_{st} - \bar{Z}_{pt})$$
$$\bar{Z}_t = \frac{1}{2}(\bar{Z}_{pt} + \bar{Z}_{st} - \bar{Z}_{ps})$$

As expressões para o Y equivalente são válidas se estiverem em pu na mesma base, ou se todos os valores das impedâncias em ohm estiverem refletidas a um só enrolamento

CAPÍTULO 2

2. COMPONENTES SIMÉTRICAS

2.1 INTRODUÇÃO

Os curtos-circuitos no sistema elétrico geram desbalanço. Dificultando os cálculos e as simulações da ocorrência. Em 1915, o Dr. C.L. Fortescue conseguiu formular uma ferramenta analítica muito poderosa, propondo, de maneira genérica, a decomposição de qualquer sistema de “n” fases desequilibradas nas suas respectivas componentes simétricas equilibradas.

A formulação proposta por Fortescue foi adaptada e aplicada ao sistema elétrico de potência, normalmente o sistema trifásico. As componentes simétricas são utilizadas para calcular as condições de desbalanço de um sistema 3φ usando somente cálculo 1φ. Isto simplifica enormemente o processo do cálculo das grandezas de falta nos sistemas de potência.

Consistem de grandezas de seqüência positiva, negativa e zero. Basicamente os valores de seqüência positiva são aqueles presentes durante condições trifásicas equilibradas do sistema de potência. As grandezas de seqüência negativa medem a quantidade de desbalanço existente no sistema. As grandezas de seqüência zero estão mais comumente associadas às condições de envolverem a terra em condições de desbalanço.

2.2 TEOREMA DE FORTESCUE

Fortescue, através do teorema intitulado de “Método de componentes simétricas aplicado à solução de circuitos polifásicos”, estabeleceu que um sistema de “n” fasores desequilibrados pode ser decomposto em “n” fasores equilibrados, denominados componentes simétricas dos fasores originais. A expressão analítica geral para um sistema desequilibrado com n fases é dado por:

$$\begin{aligned}
 \bar{V}_a &= \bar{V}_{a0} + \bar{V}_{a1} + \bar{V}_{a2} + \dots + \bar{V}_{ak} + \bar{V}_{a(n-1)} \\
 \bar{V}_b &= \bar{V}_{b0} + \bar{V}_{b1} + \bar{V}_{b2} + \dots + \bar{V}_{bk} + \bar{V}_{b(n-1)} \\
 \bar{V}_c &= \bar{V}_{c0} + \bar{V}_{c1} + \bar{V}_{c2} + \dots + \bar{V}_{ck} + \bar{V}_{c(n-1)} \\
 &\vdots \\
 \bar{V}_n &= \bar{V}_{n0} + \bar{V}_{n1} + \bar{V}_{n2} + \dots + \bar{V}_{nk} + \bar{V}_{n(n-1)}
 \end{aligned}
 \tag{2.2.1}$$

O sistema desequilibrado original de seqüência de fase a, b, c,..., n é representado pelos seus n fasores $\bar{V}_a, \bar{V}_b, \bar{V}_c, \dots, \bar{V}_n$ que giram na velocidade síncrona na frequência da rede polifásica.

Cada um dos fasores, é decomposto em “n” fasores, designados por componentes de seqüência zero, 1,2,3...k...n-1. Com isto se obtém um conjunto de “n” sistemas equilibrados.

Cada seqüência é composto de “n” fasores equilibrados, isto é, de mesmo módulo e igualmente defasados. A defasagem θ_K de dois fasores consecutivos do sistema de seqüência k-ésima, é dada por:

$$\theta_K = K \cdot \frac{2\pi}{n} \quad (2.2.2)$$

2.3 TEOREMA DE FORTESCUE A SISTEMAS TRIFÁSICOS

O teorema de Fortescue aplicado a redes trifásicas fica assim formulado: **“Um sistema 3 ϕ de três fasores desbalanceados pode ser decomposto em três sistemas 3 ϕ de três fasores balanceados chamados de componentes simétricas de seqüência positiva, negativa e zero”.**

2.4 SISTEMA TRIFÁSICO DE SEQUÊNCIA POSITIVA

É o conjunto de 3 fasores balanceados, ou seja, do mesmo módulo, defasado de 120° , com seqüência de fase idêntica a do sistema 3 ϕ original desbalanceado. **Usamos a notação de índice 1 para representar a grandeza de seqüência positiva.**

Vejamos a representação vetorial de um sistema trifásico de seqüência positiva. A seqüência de fase do sistema original será representada por $\overrightarrow{abc}$, cujo fasores giram na velocidade síncrona do sistema original

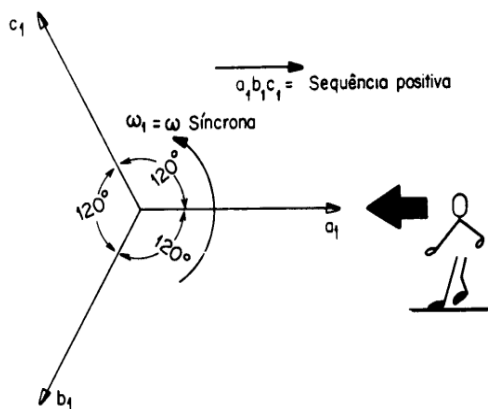


Figura 2.4.1: Seqüência positiva

A condição é simulada, imaginando-se um observador que vê as pontas dos fasores girando na seqüência $\overrightarrow{abc}$, isto é, positiva.

Supondo que os fasores sejam de tensão, temos:

$$\begin{aligned} V_{a1} &\rightarrow \text{referência} \\ V_{b1} &= 1 \quad V_{a1} \\ V_{c1} &= 1 \quad V_{a1} \end{aligned} \quad (2.4.1)$$

$$\text{Em módulo os fasores são iguais é: } V_{a1} = V_{b1} = V_{c1} \quad (2.4.2)$$

As outras tensões foram em função de V_{a1} , porque o sistema é equilibrado, então basta analisar uma única fase. Em vez de usar o termo $1\angle 120^\circ$, é praxe, substituir este número complexo por uma representação literal, batizada de $\bar{a}$, conhecida como **operador rotacional**. Assim,

$$\bar{a} = 1\angle 120^\circ \quad (2.4.3)$$

é interpretado como um operador que aplicado a um fasor, gira-o de 120° no sentido da rotação ω síncrona da seqüência positiva. Na forma quadrangular o operador $\bar{a}$ vale:

$$\bar{a} = -\frac{1}{2} + j\sqrt{3} \quad (2.4.4)$$

Representando a relação dos fasores na sequência positiva, em termos do operador rotacional $\bar{a}$ temos:

$$V_{a1} = V_{a1}$$

$$V_{b1} = \bar{a}^2 \cdot V_{a1} \quad (2.4.5)$$

$$V_{c1} = \bar{a} \cdot V_{a1}$$

O operador $\bar{a}$ é um número complexo com módulo unitário e ângulo de 120° . Isto é: $\bar{a} = 1 \angle 120^\circ$. O operador tem a propriedade de fazer girar qualquer fasor de 120° no sentido de giro da velocidade síncrona. A Figura 2.4.2 ilustra as possíveis combinações do operador $\bar{a}$.

$$\bar{a}^2 = 1 \angle 240^\circ = 1 \angle -120^\circ$$

$$1 - \bar{a}^2 = \sqrt{3} \angle 30^\circ$$

$$1 - \bar{a} = \sqrt{3} \angle -30^\circ$$

$$\bar{a}^2 - \bar{a} = \sqrt{3} \angle -90^\circ$$

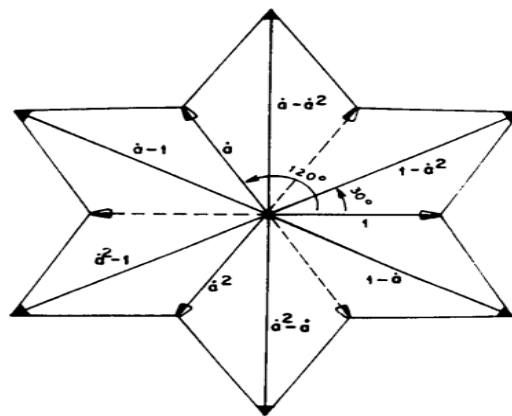
$$\bar{a}^2 - 1 = \sqrt{3} \angle -150^\circ$$

$$\bar{a} - 1 = \sqrt{3} \angle 150^\circ$$

$$\bar{a} - \bar{a}^2 = \sqrt{3} \angle 90^\circ$$

$$1 + \bar{a} + \bar{a}^2 = 0$$

Figura 2.4.2: Combinações do operador $\bar{a}$.



2.5 SISTEMA TRIFÁSICO DE SEQUÊNCIA NEGATIVA

É um conjunto de três fasores equilibrados, girando numa seqüência de fase contrária a do sistema original desbalanceado, em velocidade síncrona contrária a da seqüência positiva.

Usamos a notação de índice 2 para representar a seqüência negativa.

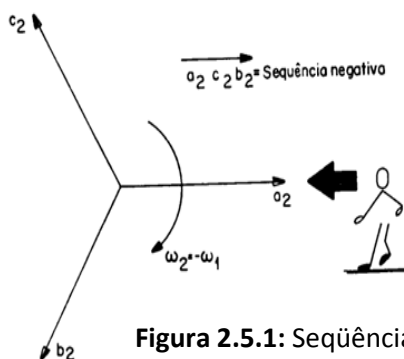


Figura 2.5.1: Seqüência negativa.

Nota-se que do ponto de vista do observador não houve nenhuma mudança. É exatamente isto que ocorre num enrolamento de uma máquina síncrona ou de um transformador.

Portanto, para fazer uma adaptação, há a necessidade de trocar a denominação de dois fasores, isto é, trocar o fasor b pelo c. Na prática, trocando duas fases de um motor trifásico de indução, o mesmo inverte a rotação. Colocando-se os fasores de tensão em função da tensão da fase a, temos:

$$\begin{aligned} V_{a2} \\ V_{b2} &= \bar{a}. V_{a2} \\ V_{c2} &= \bar{a}^2. V_{a2} \end{aligned} \quad (2.5.1)$$

Para possibilitar as operações algébricas com fasores, os fasores da seqüência negativa deverão girar no mesmo sentido da seqüência positiva. Assim, o diagrama fasorial fica modificado.

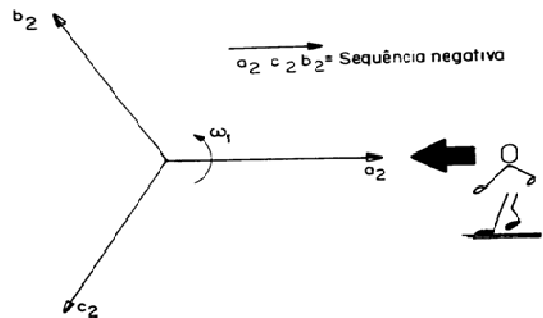


Figura 2.5.2: Seqüência negativa modificada pelo teorema de Fortescue.

2.6 SISTEMA TRIFÁSICO DE SEQÜÊNCIA ZERO

É um conjunto de três fasores iguais, em fase, girando no mesmo sentido da seqüência do sistema original desbalanceado, isto é, da seqüência positiva. **Usamos a notação de índice 0 para representar a seqüência zero.** Veja o diagrama fasorial.

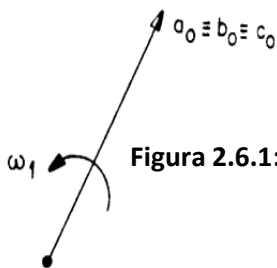


Figura 2.6.1: Seqüência zero

Em termos de tensão, os fasores da seqüência zero ficam:

$$V_{a0} = V_{b0} = V_{c0} \quad (2.6.1)$$

Todas as considerações e formulação feitas para a tensão, também são válidas para a corrente.

2.7 EXPRESSÃO ANALÍTICA DO TEOREMA DE FORTESCUE

Um sistema trifásico desequilibrado, pelo teorema de Fortescue, é composto por três sistemas trifásicos equilibrados de seqüência zero, positiva e negativa. Portanto, fazendo a superposição dos três sistemas equilibrados, obtém-se como resultado real o sistema desbalanceado original. A expressão analítica do teorema de Fortescue é:

$$\begin{aligned} \bar{V}_a &= \bar{V}_{a0} + \bar{V}_{a1} + \bar{V}_{a2} \\ \bar{V}_b &= \bar{V}_{b0} + \bar{V}_{b1} + \bar{V}_{b2} \\ \bar{V}_c &= \bar{V}_{c0} + \bar{V}_{c1} + \bar{V}_{c2} \end{aligned} \quad (2.7.1)$$

A

B

C

D

$A = \text{sistemea trifásico desequilibrado}$

$B = \text{sistemea trifásico equilibrado de seqência zero}$

$C = \text{sistemea trifásico equilibrado de seqência positiva}$

$D = \text{sistemea trifásico equilibrado de seqência negativa}$

Como os sistemas trifásicos de seqência são equilibrados, basta fazer todo o estudo em relação a uma fase “a”.

$$\begin{aligned}\bar{V}_a &= \bar{V}_{a0} + \bar{V}_{a1} + \bar{V}_{a2} \\ \bar{V}_b &= \bar{V}_{a0} + \bar{a}^2 \bar{V}_{a1} + \bar{a} \bar{V}_{a2} \\ \bar{V}_c &= \bar{V}_{a0} + \bar{a} \bar{V}_{a1} + \bar{a}^2 \bar{V}_{a2}\end{aligned}\quad (2.7.2)$$

Ou, mais claramente, na forma matricial:

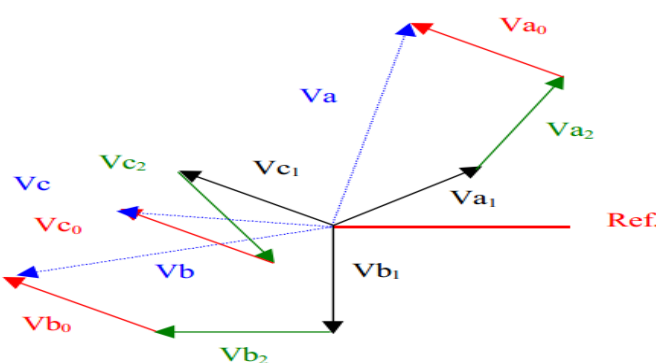
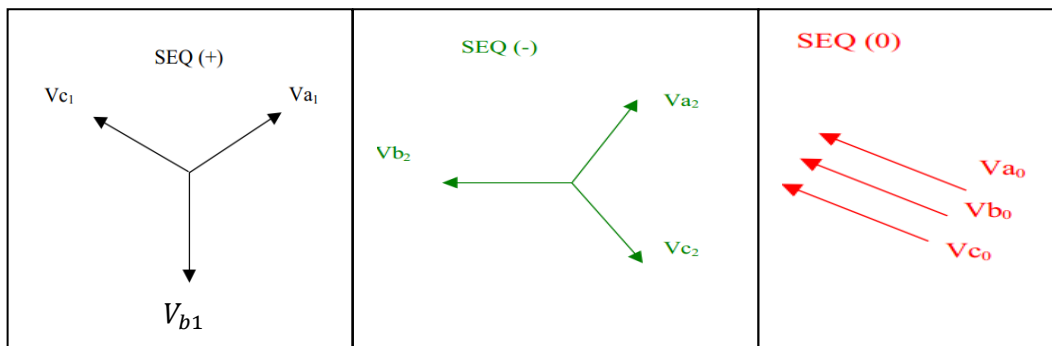
Representando-se a matriz por T, tem-se

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.7.3)$$

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \dot{a}^2 & \dot{a} \\ 1 & \dot{a} & \dot{a}^2 \end{bmatrix} \quad (2.7.4)$$

T é uma matriz quadrada 3x3 conhecida como matriz transformação das componentes de seqência nos fasores originais do sistema desbalanceado.

Exemplo 2.1: Dados três sistemas 3φ seqência positiva, negativa e zero, obtenha graficamente o conjunto de fasores trifásicos desbalanceados.



Esta é a representação do sistema original trifásico sob falta.

2.8 COMPONENTES DE SEQUÊNCIAS EM FUNÇÃO DO SISTEMA TRIFÁSICO DESBALANCEADO

Para obter componentes de sequência, em função do sistema desbalanceado, determinamos o inverso da expressão 2.7.2. Manipulando-se a expressão 2.7.2 de modo a isolar os termos $\dot{V}_{a0}$, $\dot{V}_{a1}$ e $\dot{V}_{a2}$ em função dos valores verdadeiros $\dot{V}_a$, $\dot{V}_b$ e $\dot{V}_c$ tem-se:

$$\dot{V}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c)$$

$$\dot{V}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{V}_a + a\dot{V}_b + a^2\dot{V}_c)$$

$$\dot{V}_{a2} = \frac{1}{3}(\dot{V}_a + a^2\dot{V}_b + a\dot{V}_c)$$

Ou em representação matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a0} \\ \dot{V}_{a1} \\ \dot{V}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}$$

Portanto, define-se:

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix}$$

Sendo T^{-1} a matriz inversa de T , ou seja, é a matriz transformação dos fasores originais verdadeiros de fase nos fasores componentes de sequência. A matriz inversa T^{-1} , também poderia ser obtida por qualquer processo de inversão de matriz, aplicado diretamente na matriz T .

2.9 TEOREMA DE FORTESCUE EM TERMOS DE CORRENTE

Toda a formulação do teorema de Fortescue foi formulada em termos do fasor de tensão, no entanto, o mesmo se aplica aos três fasores de corrente do sistema trifásico desbalanceado. Isto porque, as operações das matrizes de transformação T e T^{-1} , podem ser aplicadas a qualquer conjunto de fasores trifásicos.

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} \quad (2.9.1)$$

E:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_{a1} \\ \dot{I}_{a2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (2.9.2)$$

2.10 ANÁLISE DA CORRENTE DE SEQUÊNCIA ZERO

Na sequência zero, temos os três fasores em fase. A interpretação física da sequência zero tem aplicação direta sobre a proteção do SEP.

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \quad (2.10.1)$$

Com a equação 2.10.1, podemos analisar os seguintes casos:

a) Sistema trifásico terminado em Y aterrado ou com neutro

É o caso de uma carga equilibrada ou não, ou de um transformador ligado em Y aterrado.

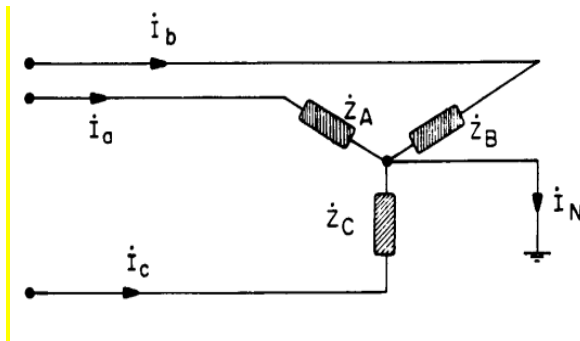


Figura 2.10.1: Carga ligada em Y aterrada.

$$\dot{I}_N = (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \quad (2.10.2)$$

Substituindo em 2.10.1:

$$\dot{I}_{a0} = \frac{\dot{I}_N}{3} \quad (2.10.3)$$

Isto significa que só pode existir corrente de sequência zero em um sistema com neutro ou aterrado.

b) Sistema em Y não aterrado e desbalanceado

É o caso de uma carga em Y desbalanceada ou carga balanceada e/ou transformador com uma fase aberta.

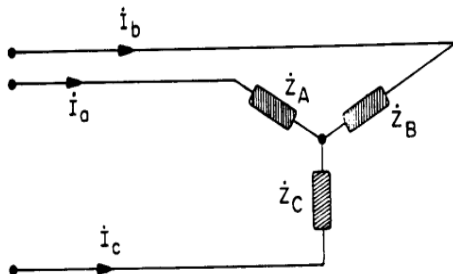


Figura 2.10.2: Carga ligada em Y.

$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$$

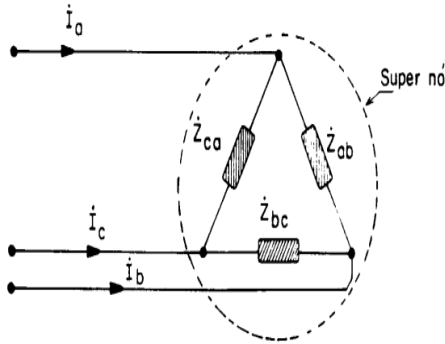
Substituindo-se em 2.10.1, obtém-se:

$$I_{a0} = \frac{1}{3} \cdot 0 \therefore I_{a0} = 0 \quad (2.10.4)$$

c) Sistema trifásico em delta desbalanceado

Caso da carga em Δ desbalanceado ou ligação de um transformador em Δ com uma fase aberta.

Figura 2.10.3: Carga ligada em delta.



A soma das correntes que entram no super nó é igual à soma das correntes que saem.

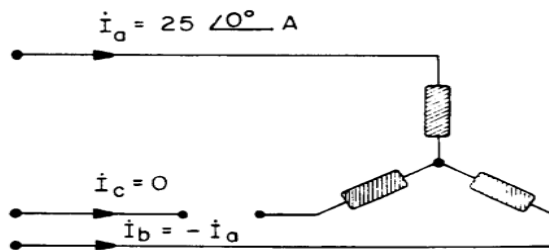
$$\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c = 0$$

Substituindo-se em 2.10.1, obtém-se:

$$I_{a0} = 0 \quad (2.10.5)$$

As conclusões são as mesmas do item b, isto é, não existe sequência zero.

Exemplo 2.2: Um condutor de uma linha 3 ϕ está aberto. A corrente que flui para uma carga em Y pela linha “a” é de 25 A. Fazendo a corrente na linha “a” como referência e supondo que seja a linha “c” aberta. Determinar as componentes de sequência das correntes de linha.



Solução: $\dot{I}_a = 25 \angle 0^\circ \text{ A}$; $\dot{I}_c = 0$; $\dot{I}_b = -\dot{I}_a$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a + \dot{a}^2 I_a + \dot{a} I_a)$$

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \therefore \dot{I}_{a0} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a - \dot{I}_a + 0) \therefore \dot{I}_{a0} = 0 \text{ A}$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3}(I_a - \dot{a}^2 I_a + 0)$$

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3}(\dot{I}_a + \dot{a} \dot{I}_a + \dot{a}^2 \dot{I}_a) = \frac{1}{3}(\dot{I}_a - \dot{a} \dot{I}_a + 0) = \frac{I_a}{3}(1 - \dot{a})$$

$$I_{a2} = \frac{I_a}{3}(1 - \dot{a}^2)$$

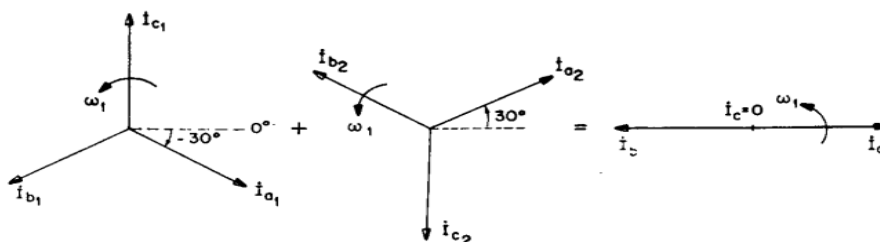
Lembrando que: $(1 - \dot{a}) = \sqrt{3} \angle -30^\circ$

lembrando que: $(1 - \dot{a}^2) = \sqrt{3} \angle 30^\circ$

$$\dot{I}_{a1} = \frac{I_a}{3} \sqrt{3} \angle -30^\circ = \frac{25 \angle 0^\circ}{3} \sqrt{3} \angle -30^\circ \therefore \dot{I}_{a1} = 14,43 \angle -30^\circ \text{ A}$$

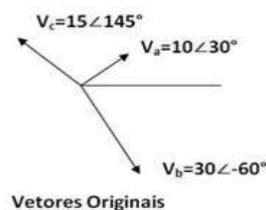
$$I_{a2} = \frac{25 \angle 0^\circ}{3} \sqrt{3} \angle 30^\circ$$

$$\dot{I}_{a2} = 14,43 \angle 30^\circ \text{ A}$$



Representação dos fasores de sequência positiva negativa e zero.

Exercício proposto 2.1: Obtenha as componentes simétricas do sistema de tensões, de seqüência de fase $\overrightarrow{abc}$.



Exercício proposto 2.2: No sistema trifásico a quatro fios, as correntes de linha são:

$$I_A = (120 + j0) A$$

$$I_B = (50 - j60) A$$

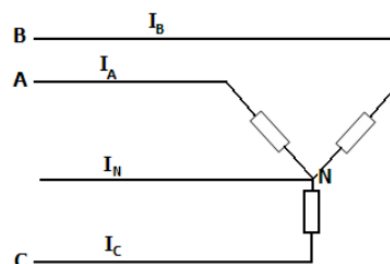
$$I_C = (j80) A$$

Onde:

$$I_A = I_{A0} + I_{A1} + I_{A2}$$

$$I_B = I_{B0} + I_{B1} + I_{B2}$$

$$I_C = I_{C0} + I_{C1} + I_{C2}$$



Calcule as acorrentes de linha de seqüência positiva, negativa e zero.

Exercício proposto 2.3: Calcule $\dot{V}_{a0}$, $\dot{V}_{a1}$ e $\dot{V}_{a20}$ dados os vetores do sistema original desequilibrado: $\dot{V}_a = 10\angle 30^\circ$; $\dot{V}_b = 30\angle -60^\circ$ e $\dot{V}_c = 15\angle 145^\circ$.

Exercício proposto 2.4: Dados os seguintes componentes simétricos da tensão

$$V_0 = 100 \text{ V}$$

$$V_+ = 200 + j100 \text{ V}$$

$$V_- = -100 \text{ V}$$

Determine as tensões de fase V_a , V_b e V_c .

Exercício proposto 2.5: As seguintes correntes foram determinadas sob condições de defeito num sistema trifásico

$$I_A = 150 \angle 45^\circ \text{ A}$$

$$I_B = 250 \angle 150^\circ \text{ A}$$

$$I_C = 100 \angle 300^\circ \text{ A}$$

Calcule os valores de seqüência positiva, negativa e zero

CAPITULO 3

3 ASPECTOS GERAIS DA PROTEÇÃO DO SISTEMA ELÉTRICO DE POTÊNCIA POR RELÉS

3.1 INTRODUÇÃO

A proteção do sistema elétrico de potência é feita por esquemas de proteção, que por sua vez, são basicamente comandados por **relés**. Estes relés são responsáveis por identificar defeitos, localizando-os de alguma forma e gerando avisos para quem opera o SEP.

Os relés ainda disparam alarmes, sinais de sinalização, partem registradores de perturbação digital (RDP) e dependendo do tipo de falta no SEP, promovem a abertura de disjuntores, a fim de isolar o trecho sob falta, mantendo funcionando, se possível, a parte sadia do sistema.

Existem vários tipos de relés, baseado na tecnologia de fabricação dos mesmos, podemos ter:

- d) Relés eletromecânicos
- e) Relés eletrônicos ou estáticos
- f) Relés digitais
- g) Relés numéricos (microprocessados semelhante a um computador)

3.2 DEFINIÇÃO DE RELÉ

Segundo a **ABNT**, o relé é um dispositivo por meio do qual um equipamento elétrico é operado quando se produzem variações nas condições deste equipamento ou do circuito em que ele está ligado, ou em outro equipamento ou circuito associado.

3.3 CARACTERÍSTICAS FUNCIONAIS DO RELEAMENTO

Sensibilidade, seletividade, velocidade e confiabilidade são termos comumente usados para descrever as características funcionais do releamento.

- a) **A velocidade de atuação:** Capacidade de o relé eliminar o defeito o mais rápido possível, com mínimo dano ao equipamento e com seletividade.
- b) **A sensibilidade:** É a capacidade do relé em responder às anormalidades nas condições de operação, e aos curtos-circuitos para o qual foi projetado. A sensibilidade do relé é mensurada pelo seguinte fator:

$$K = \frac{I_{CC-MIM}}{I_{PP}} \quad (3.3.1)$$

I_{CC-MIM} → Corrente de curto no extremo mais afastado da linha

I_{PP} → Corrente primária de atuação do relé

O valor de $K \geq 1,5$ a 2,0 é usual.

- c) **Confiabilidade:** É a probabilidade de o relé operar corretamente quando necessário.

- d) **Seletividade:** Capacidade do relé em reconhecer uma situação de imediata atuação de outras onde será necessário um retardo ou bloqueio de operação.

3.4 O RELÉ ELEMENTAR

Se considerarmos o circuito unifilar da figura 3.4.1, onde temos uma fonte de tensão (U), um disjuntor, uma linha de transmissão e uma carga. No circuito foi introduzido um **relé elementar eletromecânico** conectado diretamente na linha de transmissão.

O relé possui uma estrutura em charneira, composta de um núcleo fixo e uma armadura móvel ao qual estão solidários o contato móvel e uma mola, o que obriga o circuito magnético ficar aberto em uma posição regulável.

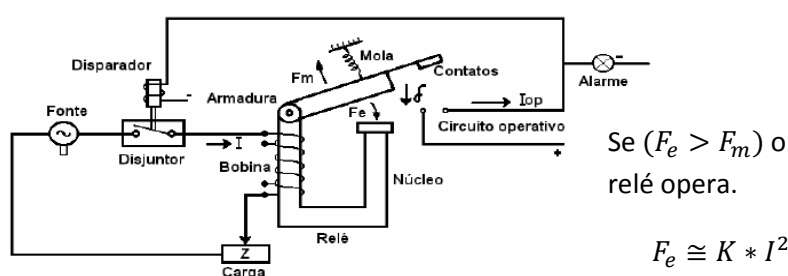


Figura 3.4.1: Relé elementar

Neste circuito, o disjuntor quando fechado, teremos a circulação da corrente I na bobina do relé, gerando um fluxo proporcional a esta corrente. Sempre que I atingir um valor de ajuste selecionado pelo **TAP do relé**, F_e será $>$ que F_m , atraindo a armadura móvel, fechando o circuito operativo enviando um sinal de abertura ao disjuntor e sinalização de alarme (uma lâmpada).

3.5 ZONAS DE PROTEÇÃO

A responsabilidade de proteção de uma determinada parte do SEP é delimitada por uma linha pontilhada, conforme representado a baixo, chamado de **zona de proteção**. Usualmente as zonas de proteção são definidas por disjuntores.

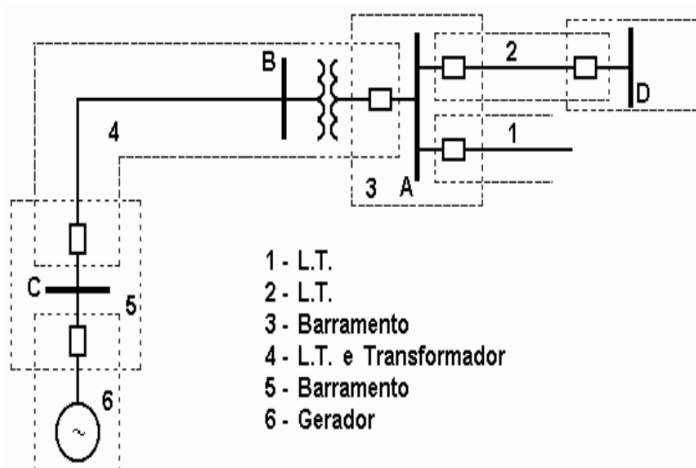


Figura 3.5.1: Zonas de proteção de um SEP.

A interposição das zonas de proteção visa eliminar pontos cegos.

Geralmente a atuação do releamento se dá em três níveis de proteção:

- Proteção principal:** É a proteção que deve atuar quando a falta ocorrer dentro da sua zona de proteção.
- Proteção de retaguarda:** É a proteção que só deve atuar quando ocorrer falha da proteção principal.
- Proteção auxiliar:** É constituída por funções auxiliares das proteções principais e de retaguarda.

Na configuração do SEP, as linhas podem estar conectadas em radial, em anel e ou uma combinação dos dois.

a) Sistema radial

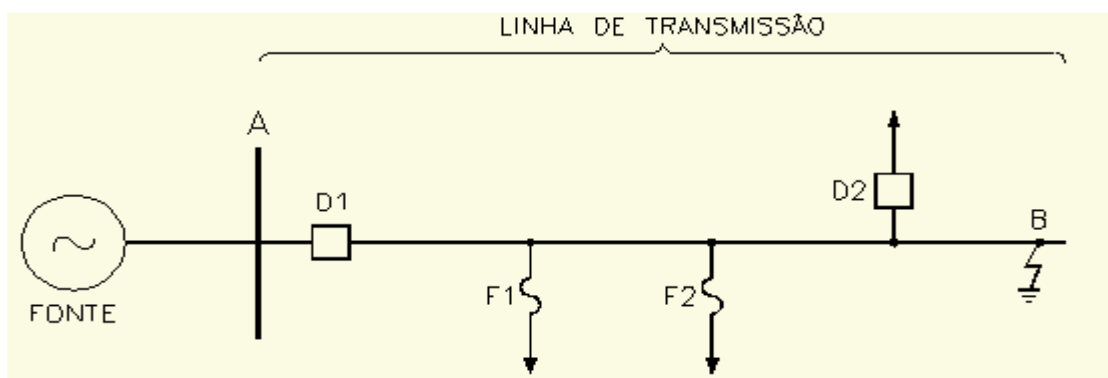


Figura 3.5.2: Exemplo de configuração de um sistema elétrico em radial.

- Linha com alimentação única
- Configuração muito simples, mais pouco confiável
- Por exemplo, um defeito no ponto B, causa o desligamento do disjuntor D1, causando a falta de tensão em todas as demais cargas

b) Sistema em anel

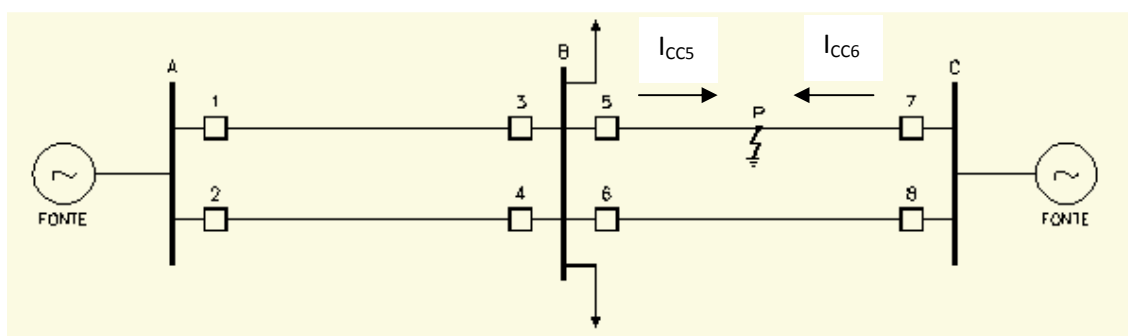


Figura 3.5.3: Exemplo de configuração de um sistema elétrico em anel.

- Linha com alimentação dupla ou mais
- Configuração mais confiável, porém a proteção é mais complexa
- Para o exemplo, uma falha no ponto P, terá corrente alimentando o curto-circuito vindo das duas fontes, sendo que o disjuntor 6 e 7 devem abrir para isolar completamente a falha

- Para este sistema, os relés devem ter incorporado uma função que os permita identificar o sentido da corrente, ou seja, os relés devem ter direcionalidade

CAPÍTULO 4

4 INTRODUÇÃO AO RELÉ DE SOBRECORRENTE

4.1 INTRODUÇÃO

A proteção do **SEP** é feita por esquemas de proteção que, por sua vez, são basicamente comandados por relés.

A função primordial destes relés é identificar situações de anormalidades no funcionamento de equipamentos e circuitos, promovendo a abertura do disjuntor que opera e protege esta zona do **SEP**.

Concomitantemente à atuação dos relés deve ser informado à operação do sistema, por meio de sinalização: partida de **RDP**, indicação luminosa no painel de proteção ou informação remota para o centro de operação do sistema.

4.2 RELÉ DE SOBRECORRENTE

São todos os relés que atuam para uma corrente maior que o seu ajuste. No sistema representado na figura abaixo, temos um relé de sobrecorrente atuando sobre a bobina de abertura de um disjuntor.

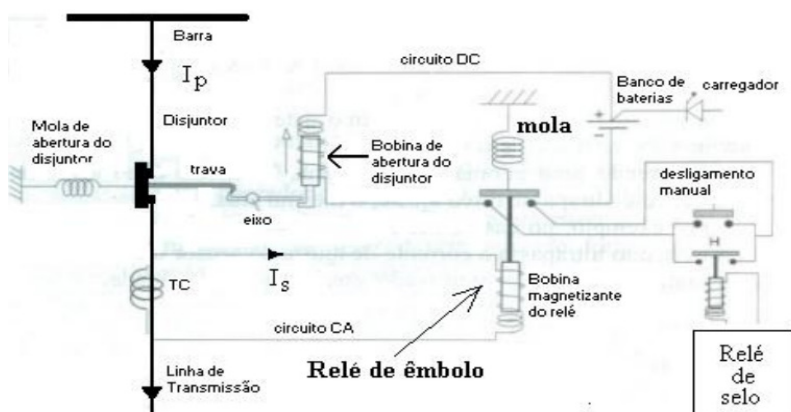


Figura 4.2.1: Sistema elétrico protegido por relé eletromecânico.

O relé de sobrecorrente representado é do tipo eletromecânico de atração magnética por êmbolo e monitora a corrente da linha através de um **TC**. Este **TC** fornece a corrente I_s que circula pela bobina magnetizante do relé.

Quando a corrente na bobina do relé for igual ou maior que a corrente de ajuste do relé, o campo magnético gerado fechará os contatos do relé. Os contatos do relé energizam a bobina de abertura causando o desligamento do disjuntor, isolando a linha.

O objetivo neste capítulo é abordar conceitos básicos para ajustarmos o relé de sobrecorrente. Veremos que os relés de sobrecorrente possuem dois ajustes básicos:

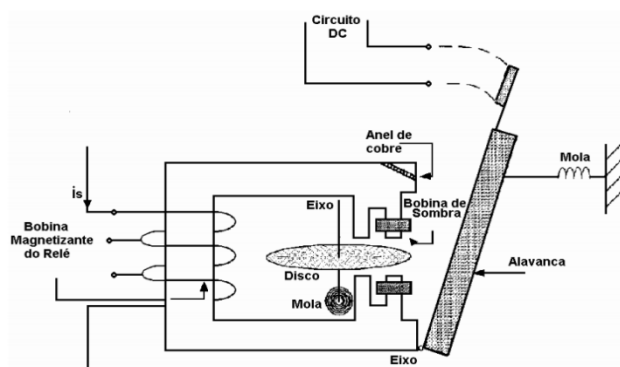
- Corrente de atuação e tempo de atuação

4.3 RELÉ DE SOBRECORRENTE ELETROMECAÂNICO

São os relés pioneiros da proteção. Hoje não são mais fabricados e as empresas concessionárias de energia estão sistematicamente atualizando as proteções, efetuando a troca dos relés eletromecânicos, eletromecânicos semi-estáticos e eletrônico-digitais por relés digitais numéricos. Os projetos novos de proteção, já são concebidos com a tecnologia dos relés digital-numéricos.

Os relés eletromecânicos são elaborados, projetados e fabricados com predominância dos movimentos mecânicos proveniente dos acoplamentos elétricos e magnéticos. Esses movimentos acionam o relé, fechando os contatos correspondentes.

Na figura 4.3.1 temos a representação de um relé eletromecânico. Este relé utiliza dois princípios básicos de atuação. A parte móvel tipo alavanca é atraída em função da atração eletromagnética e forma o que chamamos de unidade instantânea do relé.



Atuação instantânea quer dizer que o relé, ao atingir a corrente de ajuste da unidade instantânea atua de imediato, sem temporização intrínseca. O tempo de fechamento desses contatos nos relés eletromecânicos é da ordem de 2,7 ciclos.

Figura 4.3.1: Relé de atração eletromecânica do tipo alavanca e de indução eletromagnética.

Na figura 4.3.1, há dois relés em um: uma unidade de corrente instantânea (50 ASA) e uma unidade de corrente temporizada (51 ASA). A utilização da unidade instantânea depende de estudos para a sua aplicação, porém, geralmente quando utilizada é regulada para atuar dentro de até 85% do comprimento da linha a partir da instalação do relé. Então a corrente de ajuste da unidade 50 é bem maior que a da unidade 51.

A região onde observamos um disco entre o entreferro do núcleo magnetizante do relé, temos a unidade temporizada de tempo inverso. Esta unidade funciona com base no princípio da indução magnética.

A corrente magnetizante secundária gera um fluxo magnético ϕ que percorre o núcleo do relé e irá gerar dois fluxos defasados, que agindo sobre o disco de indução, provocam a rotação deste. A rotação do disco aciona a unidade temporizada do relé.

Nos extremos entre o disco de indução, no braço sem a bobina de sombra surge o fluxo $\phi_1(t)$ em fase com o fluxo original ϕ . No extremo com a bobina de sombra, é gerado um fluxo magnético em oposição à variação do fluxo original defasado de θ° devido à bobina de sombra (de 20° a 33°).

A equação do torque ou conjugado deste relé é dada por:

$$C = K_1 \phi_1 \phi_2 \sin \theta \quad (4.3.1)$$

Como a corrente magnetizante para gerar os dois fluxos defasados são produzidas pela mesma corrente I_s (corrente secundária) podemos escrever o torque deste relé na seguinte forma simplificada:

$$C = K_1 I^2 \quad (4.3.2)$$

Da equação 4.3.2 podemos concluir que a cada corrente de curto-circuito, temos um torque diferente. No relé de indução a disco representado na figura 4.3.1, quando o relé atua, inicia-se o movimento do disco e este movimento leva o contato móvel ao fixo (figura 4.3.2).

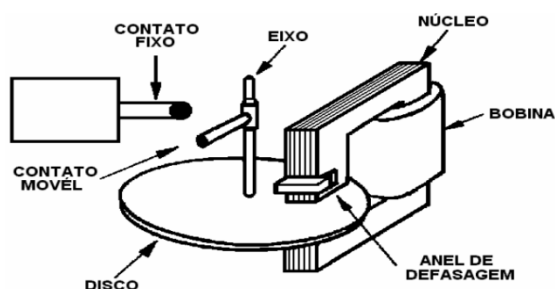


Figura 4.3.2: Relé de indução eletromagnética sem unidade instantânea.

A distância entre o contato fixo e móvel é regulável. Quanto maior a corrente de curto-circuito, maior a força de indução eletromagnética e maior é a velocidade de deslocamento do disco de indução.

Então, para cada posição de ajuste de distância temos uma constante K (definida pela construção do relé). Para cada corrente I de falta, teremos um tempo t e podemos escrever a seguinte equação:

$$I^2 t = K \quad (4.3.3)$$

A equação 4.3.3 dará origem a uma curva de atuação tempo X corrente para cada posição de ajuste da regulagem de distância entre os contatos. Para um mesmo relé teremos uma família de curvas de atuação, onde cada curva da família depende da posição de K .

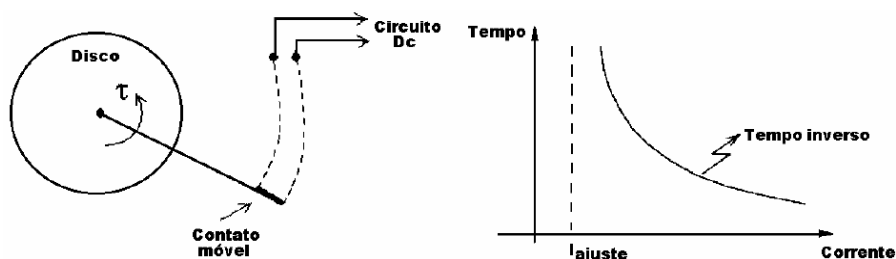
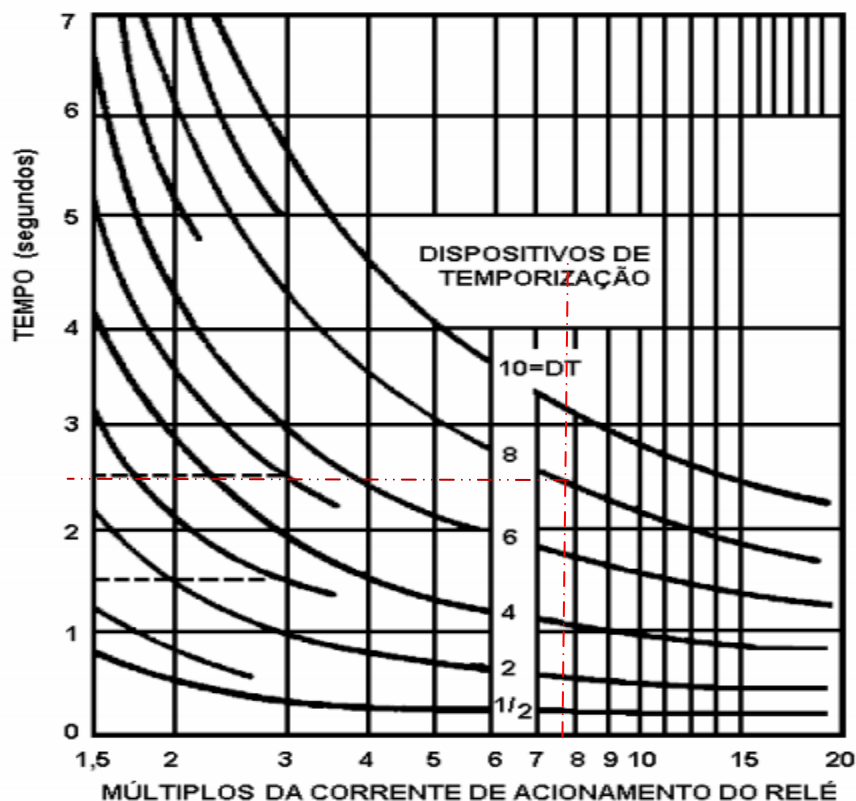


Figura 4.3.3: Disco de indução para uma posição de K e respectiva curva tempo X corrente.



DT representa posição do dispositivo de ajuste de tempo. É a constante K de equação. Todas as curvas são referenciadas à curva 10.

Figura 4.3.4: Família de curvas de um relé eletromecânico.

Os relés eletromecânicos aplicados no SEP são essencialmente monofásicos. Podem ser ligado um em cada fase, conectados em estrela. No centro da estrela pode ser instalado um relé de neutro.

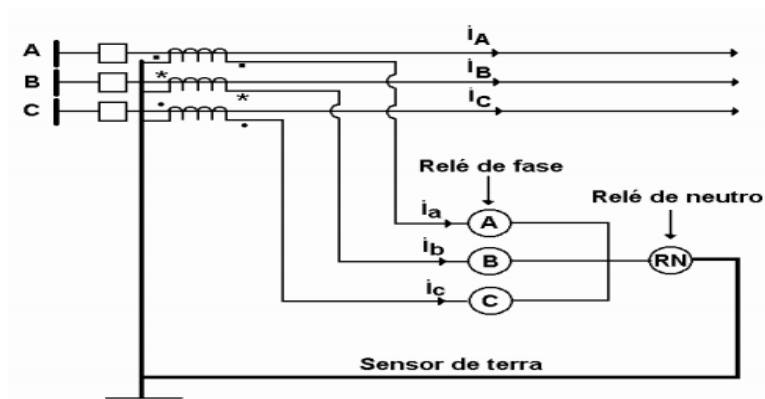


Figura 4.3.5: Relés de fase (50/51 F) e neutro (50/51 N).

Este tipo de configuração é ideal para a proteção por sobrecorrente de uma linha de transmissão ou distribuição. Temos proteção nas três fases e o relé de neutro (RN) atua para qualquer corrente de seqüência zero maior que seu ajuste.

$$\dot{I}_n = \dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c \quad (4.3.4)$$

$$\dot{I}_n = 3\dot{I}_0 \quad (4.3.5)$$



Foto 4.3.1: Relés eletromecânicos de General Electric tipo CO.

4.4 AJUSTE DO TEMPO DE ATUAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE

Nosso estudo será baseado na aplicação dos relés eletromecânicos, por questões didáticas. A escolha da curva de atuação visa garantir:

- A integridade dos equipamentos e linhas de transmissão, limitando o tempo que a corrente de curto permanece no sistema
- Garantir a coordenação entre os relés de proteção ligados em cascata
- Evitar operações indevidas durante oscilações causadas por manobras ou entradas/saídas de cargas

Os relés de sobrecorrente eletromecânicos que utilizam o princípio da atração eletromagnética, não possuem característica intrínseca de temporização. Estes relés são instantâneos e operam em 2,3 ciclos aproximadamente, a não ser que seja utilizado um temporizador externo. Para este caso, teremos uma curva de tempo definido.

Curva de tempo definido: uma vez ajustado o tempo de atuação e a corrente mínima de atuação, o relé sempre atuará neste tempo, independentemente de quanto a corrente de falta seja maior que a corrente de ajuste do relé.

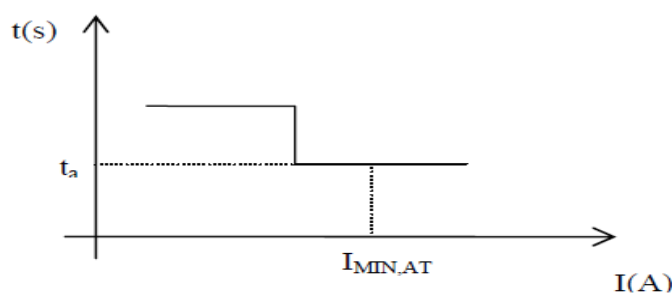


Figura 4.4.1: Curva de tempo fixo de um relé eletromecânico com temporização externa

Os relés eletromecânicos a disco utilizam o princípio da indução eletromagnética. Como já foi dito, as características das curvas apresentadas por este tipo de relé é função das diferentes distâncias entre o contato fixo e móvel.

Curva de tempo inverso: O tempo de atuação do relé é inversamente ao valor da corrente. Isto é, o relé irá atuar em tempos decrescentes para valores de correntes iguais ou maiores que a corrente mínima de atuação.

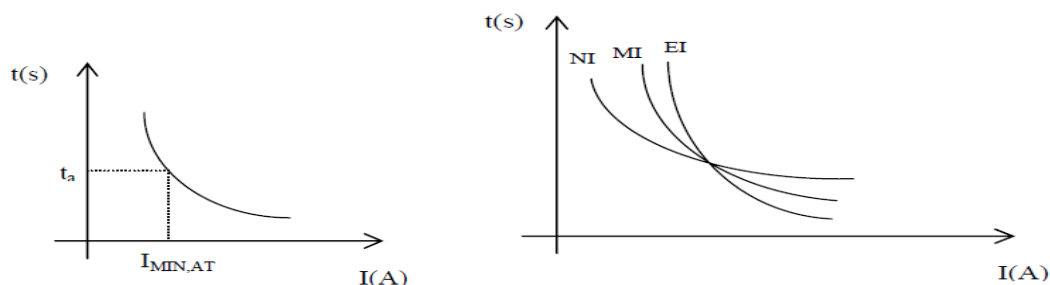


Figura 4.4.2: Curvas de tempo inverso de um relé de indução eletromecânico

As curvas apresentam características variáveis de e são aplicadas conforme as necessidades de coordenação do sistema elétrico. Na figura 4.4.2 temos: EI – extrema inversa; MI – muito inversa e NI – normalmente inversa.

Os fabricantes geralmente disponibilizam uma família contendo dez curvas para um mesmo tipo de relé. O ajuste pode ser dado em percentagem ou base de dez, conforme a figura 4.3.4 e os tempos de atuação para uma mesma corrente de curto é sempre referenciadas à curva de 10 ou 100%.

As curvas dos relés eletromecânicos são dadas a partir de um múltiplo de 1,5 da corrente de ajuste, que corresponde a um torque de 50% superior ou limiar de operação do relé. A partir deste múltiplo o fabricante garante a atuação do relé de forma precisa (repetição do resultado esperado). Este múltiplo deve ser aplicado, devido à tecnologia de fabricação destes relés e também por influência até do ambiente sobre as partes móveis do relé.

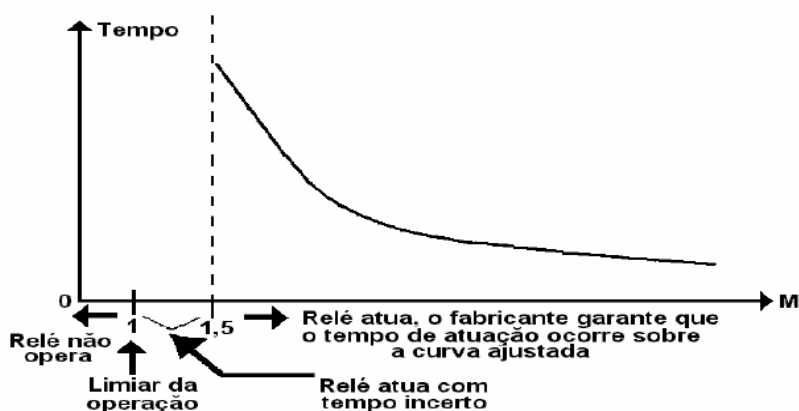


Figura 4.4.3: Curva tempo inverso do relé de sobrecorrente

Como a tecnologia dos relés eletromecânicos foi pioneira na aplicação do releamento na proteção do sistema elétrico de potência, as curvas de atuação destes relés receberam ao longo do tempo normalizações em função das suas inclinações. Estas normalizações foram introduzidas nas normas de diversos países.

Nos relés digitais, eles operam executando algoritmos. A curva de atuação destes relés é obtida através de uma função matemática padronizada, do tipo da equação 4.4.1. Onde as constantes são definidas por normas.

Esta função representa as curvas de tempos X múltiplos dos relés eletromecânicos estabelecidas pela IEC, I^2t e pela C37. 112-1996 IEEE Standart Inverse Time Characteristic Equations for Overcurrent Relays.

$$t_{\text{atuação_relé}} = T_{\text{curva}} \left(\frac{K}{M^{\alpha-\beta}} + L \right) \quad (4.4.1)$$

Onde:

$T_{\text{curva}} \rightarrow$ Múltiplo de tempo das curvas de tempo do relé eletromecânico, por exemplo, curva 100%= $T_{\text{curva}}=1$ ou curva de 20%= $T_{\text{curva}}=0,20$

$t_{\text{atuação_relé}} \rightarrow$ Tempo de atuação do relé em segundos

$M = \frac{I}{I_{\text{ajuste_relé}}} \rightarrow$ Múltiplo do relé

$I \rightarrow$ Corrente secundária que entra no relé ou corrente real

$I_{\text{ajuste_relé}} \rightarrow$ Corrente de ajuste do relé ou a corrente de tap

K, α, β e $L \rightarrow$ São coeficientes padronizados definido por normas e são fornecidos pela tabela abaixo:

Norma	Tipo de curva	K	α	L	β
IEC	Curva Inversa	0,14	0,02	0	1
	Moderadamente Inversa	0,05	0,04	0	1
	Muito Inversa	13,5	1	0	1
	Extremamente Inversa	80	2	0	1
IEEE	Moderadamente Inversa	0,515	0,02	1,14	1
	Muito Inversa	196,1	2	4,91	1
	Extremamente Inversa	282	2	1,217	1
I^2t	Curva I^2t	100	2	0	0
todas	Tempo Definido	0	-	qualquer	1

Tabela 4.4.1: Coeficientes da expressão 4.4.1

4.5 AJUSTE DA CORRENTE DE ATUAÇÃO DO RELÉ DE SOBRECORRENTE

O ajuste da corrente de atuação é feito escolhendo o TAP da bobina magnetizante do relé eletromecânico. A corrente de atuação do relé corresponde ao seu TAP. Não importa o TAP escolhido, a força magnetomotriz será sempre a mesma.

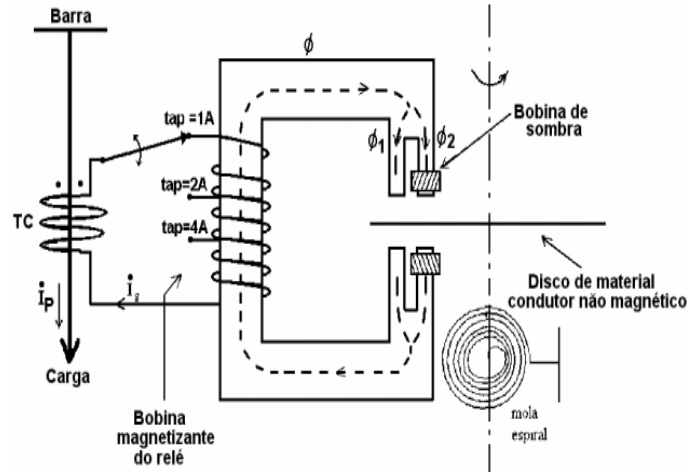


Figura 4.5.1: TAP para ajuste de corrente do relé eletromecânico de tempo inverso

Portanto, o consumo de potência pelo relé é sempre o mesmo, em qualquer TAP. Isto significa que a carga para o TC é sempre a mesma. Os fabricantes sempre fornecem a impedância do relé no menor TAP. Portanto, para determinarmos a impedância em outros TAPs, vale lembrar que:

$$Z_1 TAP_1^2 = Z_2 TAP_2^2 \quad (4.5.1)$$

$$Z_2 = Z_1 \left(\frac{TAP_1}{TAP_2} \right)^2 \quad (4.5.2)$$

Para adequada proteção, de modo que o relé tenha sensibilidade para que o relé possa perceber todas as correntes no trecho protegido, seu ajuste de corrente de fase deve obedecer a inequação 4.5.3.

$$(1,4 \text{ a } 1,5) I_{nominal} \leq I_{ajuste do relé} \leq \frac{I_{curto-circuito mínimo final linha}}{1,5} \quad (4.5.3)$$

O menor curto-circuito é o bifásico. O cálculo do curto bifásico pode ser efetuado de dois modos, conforme o tipo do gerador síncrono e da distância do curto:

Curto longe do gerador:

$$I_{cc2\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cc3\phi} \quad (4.5.4)$$

Curto perto do gerador:

Se os geradores forem de pólos lisos, usa-se a equação 4.5.3. Se forem de pólos salientes, deve-se utilizar a técnica das componentes simétricas aplica ao sistema elétrico em questão.

Para um relé que tenha uma unidade instantânea, valerá a seguinte relação:

$$1,5 * I_{ajuste\ do\ relé} \leq I_{curto} \leq I_{ajuste\ instantâneo} \quad (4.5.5)$$

Usualmente ajusta-se a unidade instantânea para um curto-circuito trifásico a 85% da linha de transmissão protegida:

$$I_{ajuste\ instantâneo} = I_{cc3\phi\ a\ 85\%\ da\ LT} \quad (4.5.6)$$



Figura 4.5.2: Zona de atuação do relé 50/51

O ajuste da corrente de neutro é orientado pela seguinte inequação:

$$0,1 I_{nominal} \leq I_{ajuste\ do\ relé\ de\ neutro} \leq 0,45 I_{nominal} \quad (5.5.7)$$

O valor de ajuste da corrente de neutro depende do local do sistema elétrico. Na zona de geração a corrente está mais equilibrada e não se permite um maior desequilíbrio da corrente de neutro para não danificar o gerador.



Figura 4.5.3: Zonas de ajuste do relé de neutro

Na região de distribuição se permite uma maior desequilíbrio devido às características de cargas monofásicas neste sistema. Na região de transmissão, o ajuste é maior próximo da distribuição em menor próximo da geração.

Quando formos ajustar um relé de sobrecorrente, antes devemos determinar a relação de transformação (RTC) do transformador de corrente (TC) que irá alimentar o relé. De forma básica, vamos seguir dois critérios:

- A corrente nominal primária do TC deve ser maior do a razão entre o curto-circuito máximo (no ponto de instalação) e o fator de sobrecorrente (FS) do TC. Geralmente FS=20.

$$I_{TCPrimária} \gg \frac{I_{cc3\phi}}{FS} \quad (5.5.8)$$

- A corrente nominal primária do TC deve ser maior que a máxima corrente de carga a ser considerada.

$$I_{TCPrimária} \geq I_{nominal\ de\ carga} \quad (5.5.9)$$

Exemplo de aplicação 4.1: Um sistema elétrico radial está representado na figura 4.5.4. Os relés de fase e neutro têm suas curvas temporizadas na figura 4.5.6. Determine os ajustes dos relés 50/51 F e 50/51 N. Considere que o relé de fase tenha TAP de 4 a 16 A e de neutro de 0,5 a 2:

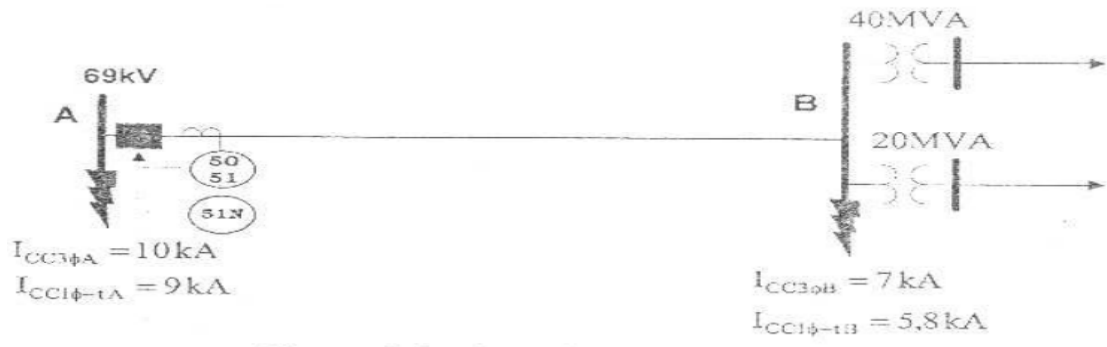


Figura 4.5.4: Diagrama unifilar

- Cálculo da corrente nominal do sistema, considerando os transformadores operando com potência nominal.

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} * V_{ll}} \therefore I_n = \frac{60 MVA}{\sqrt{3} * 69 KV} \therefore I_n \cong 502 A$$

- Determinação da relação de transformação do TC.

- Pelo critério do curto-circuito (equação 5.5.8):

$$I_{TCPrimária} \gg \frac{I_{cc3\phi}}{FS} \therefore I_{TCPrimária} \geq \frac{10 KA}{20} \therefore I_{TCPrimária} \geq 500 A$$

A RTC recomendada: $RTC = \frac{600}{5}$

- Pelo critério da corrente nominal (equação 5.5.9):

A RTC recomendada: $RTC = \frac{600}{5}$

Sempre devemos observar os dois critérios e escolher a maior das RTC recomendada.

- Cálculo do ajuste do relé 51 F (unidade temporizada de fase)

Devemos nos orientar pela inequação (4.5.3):

$$(1,4 \text{ a } 1,5) I_{nominal} \leq I_{ajuste\ do\ relé} \leq \frac{I_{curto-circuito\ mínimo\ final\ linha}}{1,5}$$

Devemos calcular primeiramente a corrente de curto-circuito mínima na barra B, que como sabemos é o curto bifásico.

$$I_{cc2\phi} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cc3\phi}$$

$$I_{ccMinBarraB} = \frac{\sqrt{3}}{2} * 7KA \therefore I_{ccMinBarraB} \cong 6062A$$

A corrente de ajuste do relé 51 F, calculada no secundário deverá estar entre:

$$1,5 \frac{I_{nominal}}{RTC} \leq I_{ajuste \text{ do relé } 51F} \leq \frac{I_{curto-circuito \text{ mínimo final linha}}}{RTC * 1,5}$$

$$1,5 \frac{502}{\frac{600}{5}} \leq I_{ajuste \text{ do relé } 51F} \leq \frac{6062}{\frac{600}{5} * 1,5}$$

$$6,275A \leq I_{ajuste \text{ do relé } 51F} \leq 33,67A$$

Como o relé possui TAP de 4-16A, escolheremos o **TAP 7**.

d. Cálculo do relé 50 F (unidade instantânea de fase):

Geralmente a unidade instantânea é calculada como sendo múltiplo do TAP do relé de sobrecorrente 51 F. Precisamos calcular a corrente de curto a 85% da LT da barra A para a barra B.

$I_{ajuste \text{ instantâneo}} = I_{cc3\phi} \text{ a } 85\% \text{ da LT}$ Não será demonstrada a fórmula para o cálculo do curto circuito entra barras em radial, pode ser pesquisado na referência [2].

$$I_{cc3\phi pLT} = \frac{I_{cc3\phi A} \cdot I_{cc3\phi B}}{p \cdot I_{cc3\phi A} + (1 - p) I_{cc3\phi B}} \Rightarrow I_{cc3\phi 85\%LT} = \frac{10K \cdot 7K}{0,85 \cdot 10K + (1 - 0,85) \cdot 7K} \Rightarrow$$

$$I_{cc3\phi 85\%LT} = 7329,87A$$

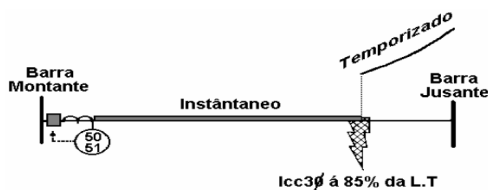


Figura 4.5.5: Curto a 85% de distância da barra A

Como vamos ajustar a atuação instantânea um função do TAP escolhido para a unidade temporizada, lembrando que o TAP selecionado da unidade 51 F foi o TAP 7, podemos escrever:

$$I_{UnidadeInstantânea} = \frac{I_{cc3\phi 85\%LT}}{RTC \cdot TAP_{UnidadeTemporizada}}$$

$$I_{UnidadeInstantânea} = \frac{7329,87A}{\frac{600}{5} \cdot 7} \Rightarrow I_{UnidadeInstantânea} = 8,72A$$

Isto quer dizer que toda a corrente no secundário do TC que seja maior ou igual que 8,72A atuará a unidade instantânea.

- e. Ajustar a corrente de atuação do relé de neutro 51 N para que o relé suporte um desequilíbrio de até 30% da corrente nominal calculada.

$$I_{AjusteNeutro} = \frac{0,3 \cdot I_{nominal}}{RTC} \Rightarrow I_{AjusteNeutro} = \frac{0,3 \cdot 502A}{\frac{600}{5}} \Rightarrow I_{AjusteNeutro} = 1,255A$$

Como o relé de neutro tem os TAP de 0,5 a 2, devemos escolher o **TAP 1,3**

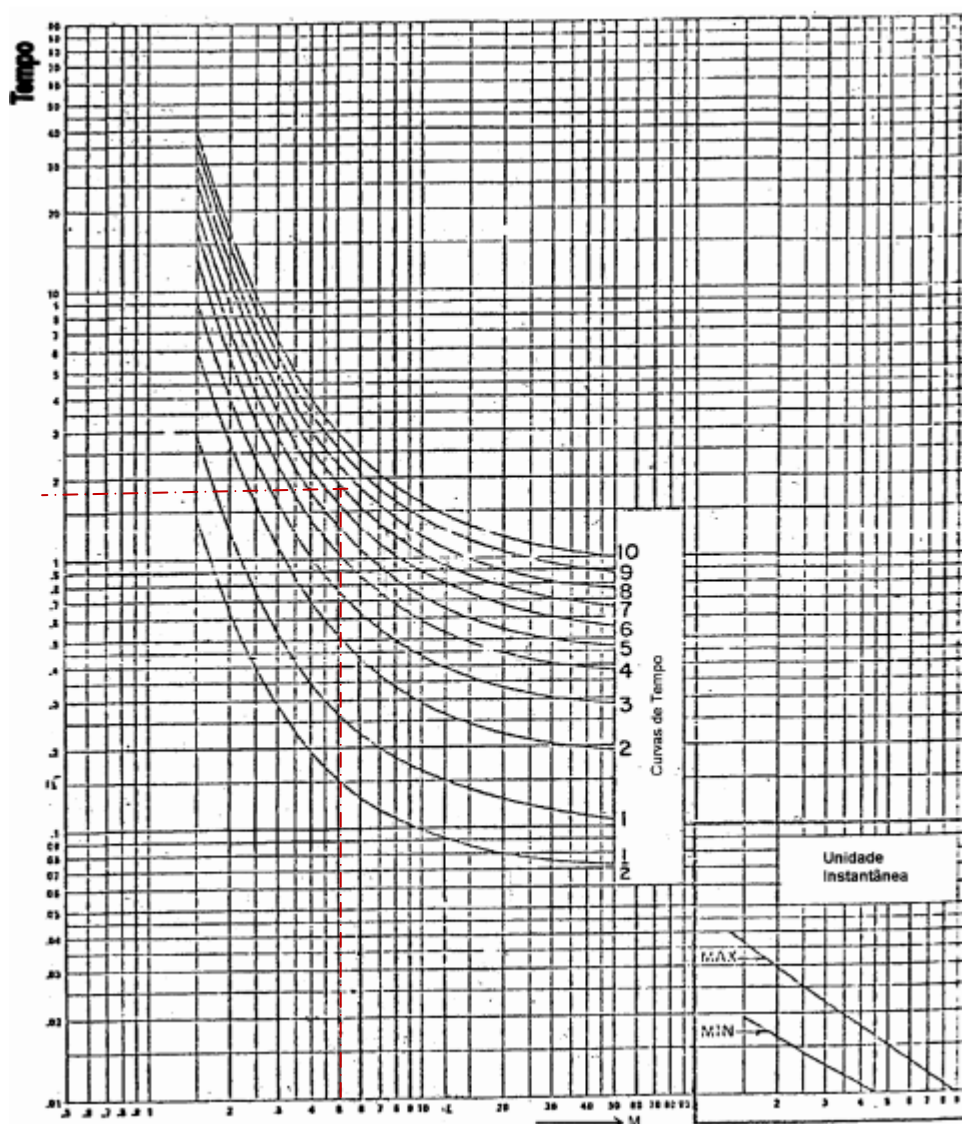


Figura 4.5.6: Curvas de tempo X corrente do relé IAC51 da GE

- f. Para uma corrente de curto-circuito bifásico de 4500 A, qual será o tempo de atuação da proteção, admitindo que a curva tempo seja a 7 e quais unidades atuaram?

Como o curto é bifásico, não teremos corrente de sequência zero e a unidade que deverá atuar será a 51 F (temporizada de fase). A não ser que esta falhe, haverá a atuação da unidade

51 N. Como não temos as curvas do relé de neutro para fazer esta análise, vamos admitir que atue antes a unidade 51 F de forma correta.

Como escolhemos o TAP 7 da unidade 51 F como ajuste do relé, devemos calcular o múltiplo da corrente de atuação, ou seja, quantas vezes a corrente de falta é maior que o ajuste do relé e plotarmos este dado na curva do relé (curva 7) e achamos o tempo de atuação. Veja na 4.5.6 curva 7.

$$M_{\text{múltiplo}} = \frac{I_{\text{falta Na Linha}}}{RTC \cdot TAP_{\text{relé}}} \Rightarrow M_{\text{múltiplo}} = \frac{4500}{\frac{600}{5} \cdot 7} \Rightarrow M_{\text{múltiplo}} \cong 5,35$$

Com este valor de M encontraremos o tempo de atuação de 1,8 segundos aproximadamente.

Exemplo de aplicação 4.2: Suponhamos que um relé de sobrecorrente deve ser usado em um circuito onde o disjuntor deve desligar para uma corrente sustentada de 450 A, aproximadamente; também o disjuntor deve desligar em 2,5 segundos para uma corrente de curto-circuito de 3750 A. Admitindo ainda que um transformador de corrente de relação 60:1 foi usado. Pede-se: determinar a calibração do relé utilizando as curvas da figura 4.5.6 e os TAP disponíveis do relé seja de 4 – 16 A.

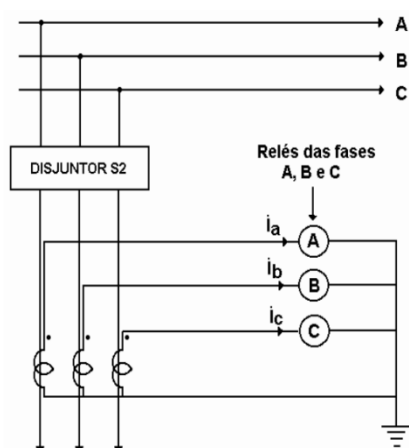


Figura 4.5.7: Representação trifilar do exemplo 4.2

➤ Ajuste do TAP de corrente

$$I_{\text{relé}} = \frac{I_{\text{nominal}}}{RTC} \therefore I_{\text{relé}} = \frac{450}{50} \therefore I_{\text{relé}} = 7,5 \text{ A}$$

O TAP mais próximo é o 8, então: $TAP_{\text{relé}} = 8$

➤ Ajuste do tempo apropriado: É necessário calcular quantas vezes a corrente de curto é maior que o TAP de corrente do relé, ou seja, achar o múltiplo M.

$$M_{\text{múltiplo}} = \frac{I_{\text{falta Na Linha}}}{RTC \cdot TAP_{\text{relé}}} \Rightarrow M_{\text{múltiplo}} = \frac{3750}{60 \cdot 8} \Rightarrow M_{\text{múltiplo}} \cong 7,8125$$

Agora, de posse do múltiplo e do tempo de atuação, entramos na curva da figura 4.3.4 e plotamos estes (M=7,8 e t= 2,5 segundos). Onde estas coordenadas caírem, será a curva de ajuste escolhida. O número da curva equivale ao ajuste do dispositivo de tempo do relé.

Como resultado abtemos a curva 8.

5.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DO RELÉ DIRECIONAL

No diagrama unifilar da figura 5.3.1 temos a representação de um relé direcional. Este relé tem dois conjuntos de bobinas em quadratura, alimentados pela corrente elétrica e pela tensão elétrica.

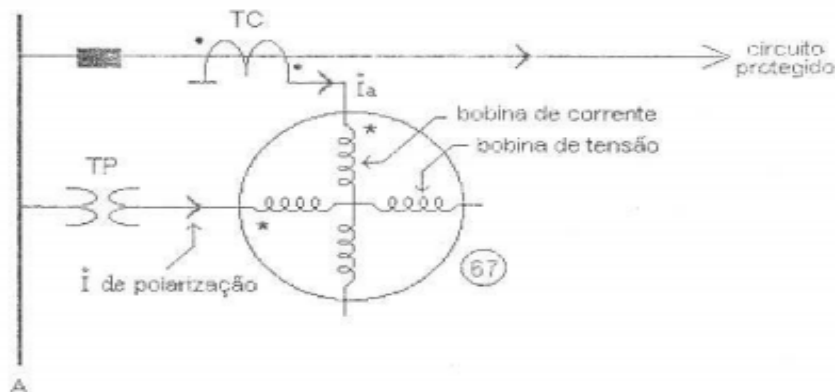


Figura 5.3.1: Diagrama unifilar de um relé direcional – 67

A corrente de operação da fase A, via secundário do TC, entra pela marca da bobina de corrente do relé, e a tensão de polarização, via secundário do TP, é referenciada na marca da bobina de tensão do relé.

O diagrama fasorial das grandezas envolvidas no relé direcional está apresentado na figura 5.3.2.

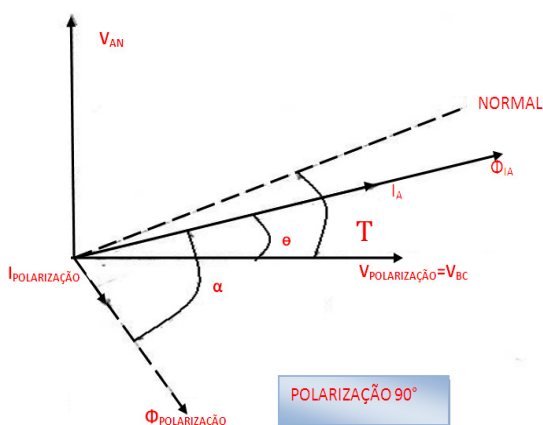


Figura 5.3.2: Diagrama fasorial de um relé direcional do tipo tensão-corrente

$\dot{I}_A \rightarrow$ Corrente da fase A que durante uma falta no sistema sofre alteração de seu valor e ângulo em relação à tensão de polarização

$\Phi_{IA} \rightarrow$ É o fluxo magnético criado pela corrente $\dot{I}_A$ na bobina de corrente do relé 67. Este fluxo está em fase com a corrente $\dot{I}_A$

$\dot{V}_{AN} \rightarrow$ Tensão da fase A em relação ao neutro do sistema

$\dot{V}_{POLARIZAÇÃO} \rightarrow$ Tensão de polarização. No caso deste exemplo é a tensão $\dot{V}_{BC}$

$\dot{I}_{POLARIZAÇÃO} \rightarrow$ Corrente elétrica que passa pela bobina de potencial. Surge devida a tensão de polarização aplicada sobre a bobina de tensão do relé 67

$\dot{\Phi}_{POLARIZAÇÃO} \rightarrow$ Fluxo magnético na bobina de tensão devido a $\dot{I}_{POLARIZAÇÃO}$. Este fluxo esta em fase com a $\dot{I}_{POLARIZAÇÃO}$

$\alpha \rightarrow$ Ângulo entre os fluxos, Φ_{IA} e $\dot{\Phi}_{POLARIZAÇÃO}$ (ângulo de projeto do relé)

$\theta \rightarrow$ Ângulo entre $\dot{I}_A$ e $\dot{V}_{POLARIZAÇÃO}$ irá variar durante as faltas definindo se o relé estará em bloqueio ou em atuação

$T \rightarrow$ Ângulo de máximo torque do motor do relé. Este ângulo é uma característica do relé de acordo com sua fabricação

A reta normal forma 90° com o $\dot{\Phi}_{POLARIZAÇÃO}$ do relé. O fluxo de polarização é caracterizado pelo fabricante de acordo com a impedância da bobina de tensão do relé. Durante um curto-circuito, devido às características indutivas da linha de transmissão, a corrente $\dot{I}_A$ fica bastante defasada da tensão V_{AN} .

O torque ou conjugado de atuação deste relé é dado pela seguinte equação:

$$C = K_1 I_A V_{BC} \cos(\theta - T) - K_2 \quad (5.3.1)$$

Onde:

$K_1 \Rightarrow$ Constante característica do relé

$K_2 \Rightarrow$ Constante característica do conjugado antagônico do relé

Se considerarmos o relé no limiar de operação ($C=0$):

$$K_1 I_A V_{BC} \cos(\theta - T) = K_2$$

Na ocorrência de um curto circuito, a tensão permanece praticamente constante, então podemos escrever:

$$I_A \cos(\theta - T) = \frac{K_2}{K_1 V_{BC}}$$

Então o segundo termo da equação, será também uma constante, que podemos representar por K_3 :

$$I_A \cos(\theta - T) = K_3 \quad (5.3.2)$$

Para traçarmos o diagrama vetorial de um relé 67, devemos observar os sentidos da polarização das grandezas de atuação e polarização. Para identificarmos a característica de atuação do relé 67, devemos identificar a reta de conjugado máximo e a reta de operação e bloqueio do relé. Veja a figura 5.3.3. A representação será feita apenas para a fase A e na polarização de 90° (veremos a seguir as polarizações mais usuais deste relé).

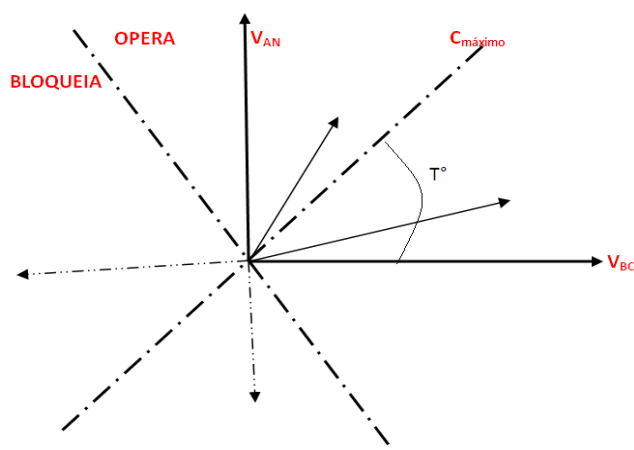


Figura 5.3.3: Diagrama da característica de atuação do relé 67

A bobina da tensão está polarizada entre as fases B e C (V_{BC}). A partir de se (V_{BC}), de posse do ângulo de máximo torque do relé (dado pelo fabricante), achamos a reta de máximo torque do relé. Nesta posição, o relé teria a situação ideal para atua.

A 90° da reta de máximo torque, temos as regiões de **opera**, contados no sentido do anti-horário (supondo que o ângulo de máximo torque seja adiantado da tensão). Do outro lado desta a reta-suporte, temos a região de **bloqueio**.

Toda a corrente de falta que cair na região de opera e estiver além da corrente de pick-up do relé causará a atuação do mesmo. Toda a corrente de falta que cair na região de bloqueio, independente do seu módulo, não causará a atuação do relé. Este é o princípio da direcionalidade do relé 67.

Neste diagrama, apenas nos interessa a característica de atuação do relé, não sendo necessária a corrente de polarização e fluxo de polarização da bobina de tensão. O que realmente é importante é a reta-suporte do conjugado máximo, região opera/bloqueia e corrente de atuação e tensão de polarização.

Interessante notar que: a reta-suporte de máximo torque representa a corrente no sentido de atuação ideal para o relé. Corrente de curto é dado quando o seu ângulo for de $(90^\circ - T)$, pois neste caso o fasor da corrente coincide com a reta-suporte de máximo conjugado do relé.

O ideal seria escolher o ângulo T° do relé o mais próximo possível do ângulo da corrente de curto-circuito da linha de transmissão protegida. No relé eletromecânico direcional, o fabricante disponibiliza três opções de escolha do ângulo T° .

Já os relés digitais direcional podem variar o ângulo T° dentro de uma ampla faixa, desde zero até 180° .

5.4 RELÉ DIRECIONAL TIPO CORRENTE-CORRENTE

É alimentado por duas correntes retiradas do sistema protegido através de TC. Uma corrente é a grandeza de atuação e a outra a de referência. Tipicamente é aplicado na

proteção de neutro ou terra nas linhas de transmissão ou nos alimentadores com múltiplas fontes de sequência zero.

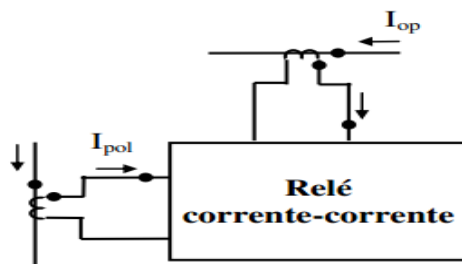


Figura 5.4.1: Relé 67 tipo corrente-corrente

A equação deste relé será dada pela seguinte equação:

$$C = K_1 I_{OP} I_{POL} \cos(T - \theta) - K_2 \quad (5.3.1)$$

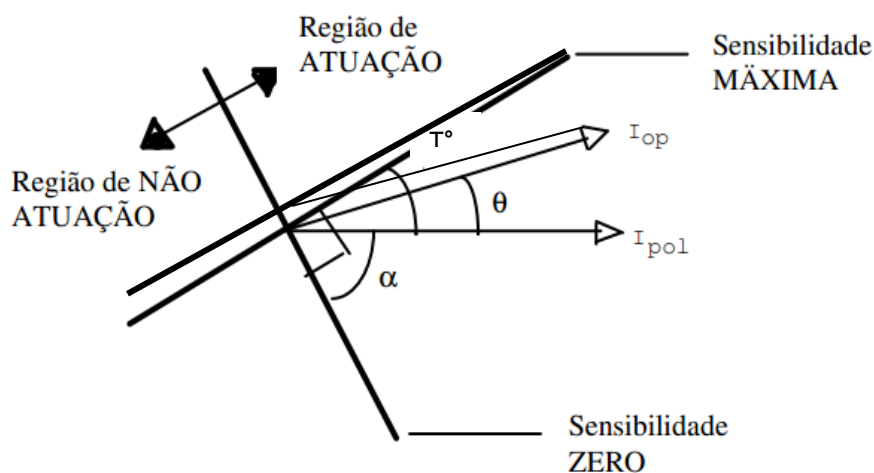


Figura 5.4.2: Diagrama fasorial do relé 67 tipo corrente-corrente

5.5 POLARIZAÇÃO DO RELÉ DIRECIONAL

A explicação até agora foi efetuado sobre uma polarização de 90°. Mas dependendo do local e da característica da linha de transmissão, outras características podem ser adotadas. As polarizações mais usuais são:

1. POLARIZAÇÃO EM QUADRATURA OU 90°

As tensões são sempre referenciadas ao relé da fase A ao neutro V_{AV} . A tensão de polarização é:

$$\dot{V}_{POLARIZAÇÃO} = \dot{V}_{BC} = \dot{V}_{BN} - \dot{V}_{CN}$$

Quando fazemos a composição vetorial, verificamos que a tensão de polarização está 90° defasada em relação a V_{AN} , daí o nome da polarização. Para os relés das demais fases, é só fazer a composição devida

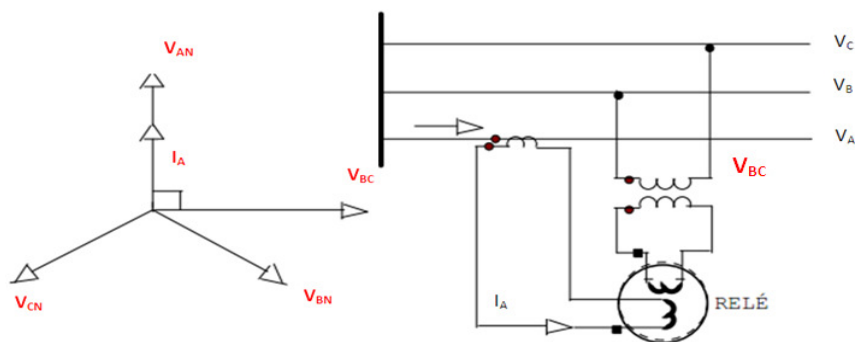


Figura 5.5.1: Polarização 90° do relé 67 com fator de potência igual a 1 (I_{AN} em fase com V_{AN})
Então a composição da polarização 90° é a seguinte:

$$I_A \Rightarrow V_{BC}; I_C \Rightarrow V_{AB}; I_B \Rightarrow V_{CA}$$

2. POLARIZAÇÃO 30°

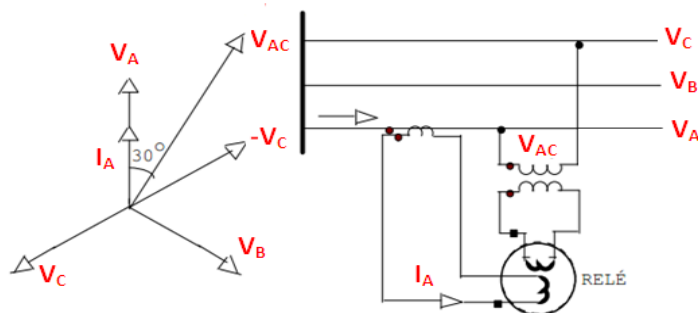


Figura 5.5.2: Polarização 30° do relé 67 com fator de potência igual a 1 (I_{AN} em fase com V_{AN})

Então a composição da polarização 30° é a seguinte:

$$I_A \Rightarrow V_{AC}; I_C \Rightarrow V_{CB}; I_B \Rightarrow V_{BA}$$

3. POLARIZAÇÃO 60°

A polarização da fase A pode ser:

- $-V_{CN}$
- $V_{AN} + V_{BN}$
- $V_{AC} + V_{BC}$

Vamos representar o último caso:

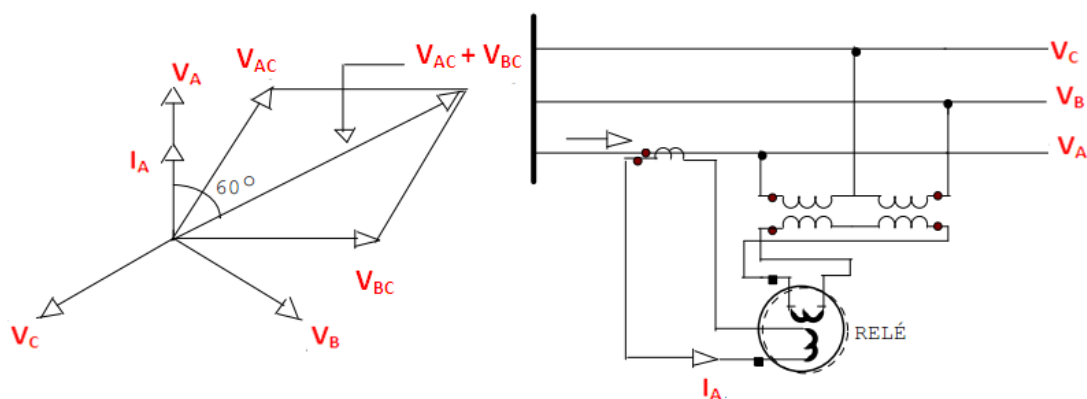


Figura 5.5.3: Polarização 60° do relé 67 com fator de potência igual a 1 (I_{AN} em fase com V_{AN})

Então a composição da polarização 60° para o exemplo da figura 5.5.3 é a seguinte:

$$I_A \Rightarrow V_{AC} + V_{BC}; I_C \Rightarrow V_{CB} + V_{AB}; I_B \Rightarrow V_{BA} + V_{CA}$$

4. POLARIZAÇÃO 0°

Neste caso, a corrente de atuação I_A é polarizada pela tensão da fase A. $I_B \rightarrow V_B$ e $I_C \rightarrow V_C$.

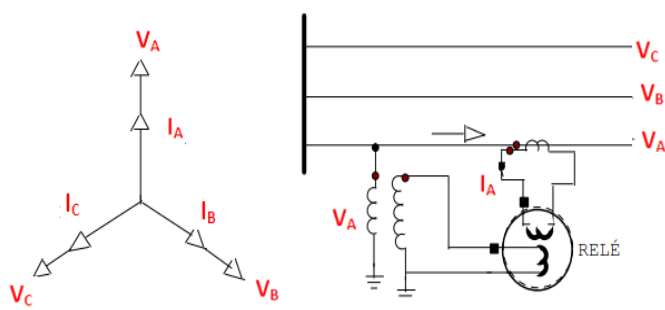


Figura 5.5.4: Polarização 0° do relé 67 com fator de potência igual a 1 (I_{AN} em fase com V_{AN})

5.6 RELÉ DIRECIONAL DE SEQUÊNCIA ZERO

O relé direcional de neutro é conectado da mesma forma que o de fase. Porém tensão de polarização e a corrente de atuação deve ser a de sequência zero. Este relé terá sensibilidade para as correntes de falta envolvendo o neutro e para cargas desequilibradas de sistemas aterrados.

A tensão polarizante de sequência zero pode ser fornecida por três TP ligados em delta aberto e a corrente de sequência zero pelos TC ligados em paralelo fechando o circuito pela passagem na bobina de atuação do relé 67 N. Veja a figura 5.6.1:

Então o relé de sobrecorrente direcional de neutro 67N representado é utilizado para a proteção de curto-circuito que envolve a terra, onde a grandeza de atuação é $3I_0$ e a de polarização é $3V_0$.

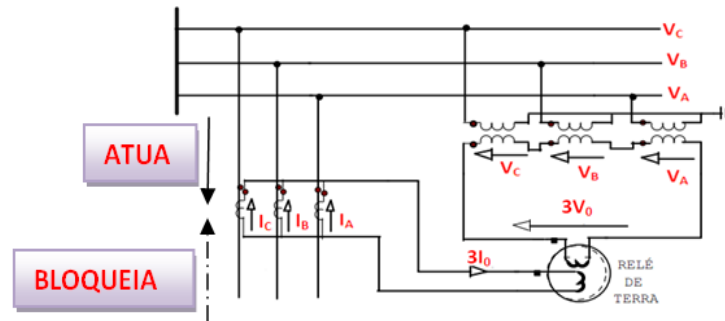


Figura 5.6.1: Esquema geral da ligação de um relé de neutro 67N

Considerando as posições fasoriais de um sistema elétrico com a da figura 5.6.2(a):

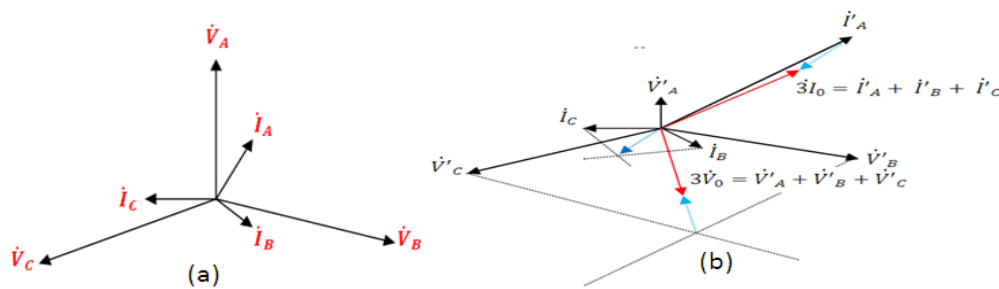


Figura 5.6.2: Diagrama fasorial de um sistema trifásico (a) e o mesmo diagrama com curto-circuito na fase A para a terra

Os valores de corrente são normais para a operação do sistema, defasados da tensão na relação correspondente ao fator de potência da carga alimentada pela linha de transmissão. Na ocorrência de um curto-circuito fase A para a terra, as posições fasoriais modificaram, conforme a grandeza do curto-circuito representado na figura 5.6.2(b).

No curto circuito a tensão $\dot{V}_A$ muda para $\dot{V}'_A$ e as tensões $\dot{V}_B$ e $\dot{V}_C$ quase não mudam. A corrente de curto da fase A, passou de $\dot{I}_A$ para $\dot{I}'_A$. As correntes $\dot{I}_B$ e $\dot{I}_C$ quase não mudam. As grandezas $3\dot{V}_0$ e $3\dot{I}_0$ são as grandezas que alimentam o relé.

Se o relé direcional de neutro da figura 5.6.1 tenha um ângulo de máximo torque de -60° , que é um valor comum para este tipo de relé. Fazendo o diagrama fasorial da corrente de curto-circuito ($3I_0$) e da tensão polarizante ($3V_0$), juntamente com seu ângulo de máximo torque, tem-se a figura 5.6.3.

Veja que no exemplo, o relé não atuaria para este curto, já que a corrente ficou na região de bloqueio do relé.

A figura 5.6.4 mostra um esquema típico de aplicação de relés de sobrecorrente direcionais de fase. Na figura 5.6.5 é apresentado o esquema funcional de contatos por fase deste relé.

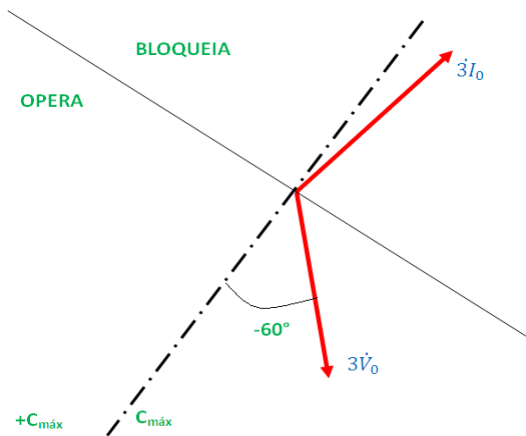


Figura 5.6.3: Diagrama fasorial do relé de neutro 67 N

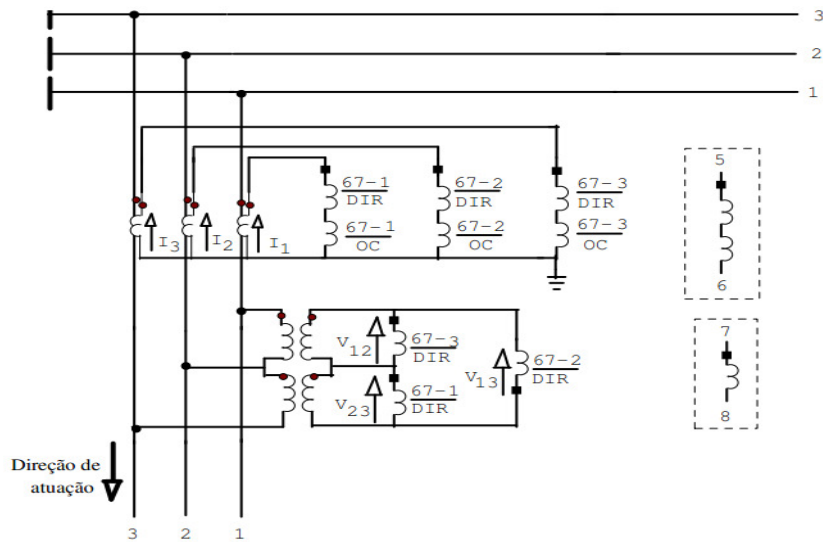


Figura 5.6.4: Esquema trifilar de uma aplicação relé 67 F

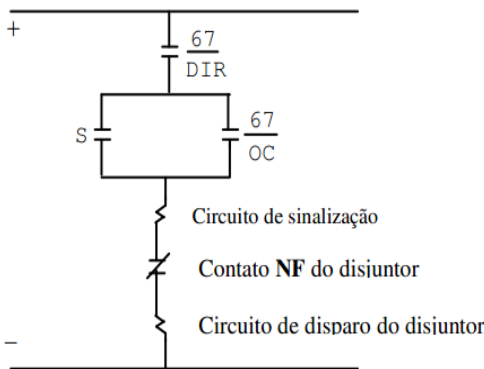


Figura 5.6.4: Diagrama funcional do relé 67 F

Exercício proposto 5.1: Identifique o tipo de conexão e trace o diagrama fasorial para o esquema da figura 5.6.3. Considere o relé com $T=45^\circ$ e depois $T=30^\circ$ e analise o desempenho do relé para uma falta de $I_{5,6}[-45^\circ]$. Repita o exercício para o relé na polarização 30° .

CAPÍTULO 6

6 INTRODUÇÃO AO RELÉ DE DISTÂNCIA

6.1 INTRODUÇÃO

O relé de distância recebe este nome genérico devido a sua filosofia de atuação basear-se na impedância, admitância ou reatância da linha de transmissão vista pelo relé. Como estes parâmetros são baseados na distância da linha de transmissão, estes relés são chamados de relés de distância.

6.2 O RELÉ DE DISTÂNCIA

O relé de distância é alimentado por duas grandezas elétricas de entrada: tensão e corrente, fornecidas por TP e TC. Grosso modo, pode-se dizer que a razão $Z = \frac{V}{I}$ é a impedância vista ou medida pelo relé.

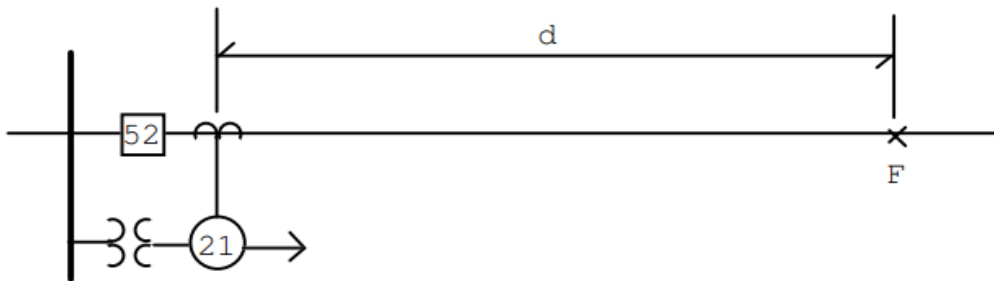


Figura 6.2.1: Diagrama unifilar de um disjuntor (52) protegido por um relé de distância (21) em uma linha de transmissão

Na ocorrência de um curto-circuito em F da LT, os parâmetros que o relé irá medir será a tensão de falta e a corrente de falta desde o ponto onde o relé está instalado até o ponto F.

$$Z_F = \frac{V_F}{I_F} \quad (6.2.1)$$

Estando o relé alimentado por tensão e corrente de linha, a impedância de curto-circuito bifásica ou trifásica medida pelo relé, será igual a impedância de sequência positiva (Z_1) do trecho entre o relé e a falta:

$$Z_F = Z_1 = Z_1 d \quad (6.2.2)$$

Como $Z_1 \text{ ohm/Km}$ é constante para cada linha de transmissão, então o relé mede a distância $d \text{ Km}$ do seu ponto de instalação à falta. Então porque novamente o nome relé de distância. Os relés de distância medem a impedância secundária baseado na informação dos TP e TC.

$$Z_S = \frac{V_S}{I_S} \Rightarrow Z_S = \frac{V_P}{\frac{I_S}{RTP}} \Rightarrow Z_S = \frac{V_P}{I_S} \frac{RTC}{RTP} \Rightarrow Z_S = Z_P \frac{RTC}{RTP} \quad (6.2.3)$$

As características dos relés de distância são traçadas em um plano denominado R-X (resistência-reatância). Vamos ver as características de operação dos relés de distância básicos.

No plano R-X são representadas as características de atuação dos relés de distância. Este plano irá caracterizar as zonas de atuação do relé. As zonas representam porções de distância da linha de transmissão onde o relé será sensível à redução da impedância da linha durante a falha.

Os ângulos das impedâncias medidas por estes relés dependem dos sentidos (sinais) dos fluxos de potência ativa e reativa nas linhas. Desta forma, as impedâncias estarão no quadrante correspondente aos sinais.

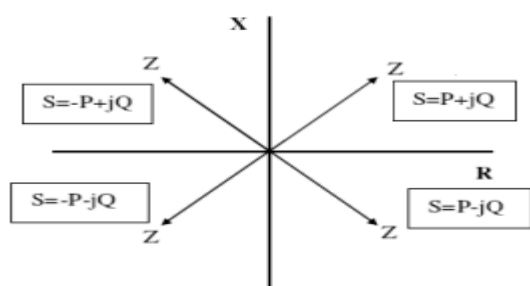


Figura 6.2.2: Localização de Z no plano R-X

Os relés de distância, denominados pelo número 21, apresentam três tipos básicos:

- Impedância
- Admitância ou Mho
- Reatância

6.3 RELÉ DE IMPEDÂNCIA OU OHM

Por definição é um relé de sobrecorrente por restrição por tensão. Assim seu conjugado será dado pela seguinte equação:

$$C = K_1 I^2 - K_2 V^2 - K_3 \quad (6.3.1)$$

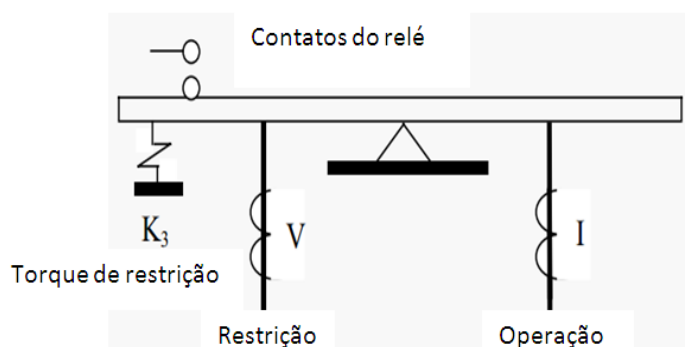


Figura 6.3.1: Estrutura tipo balanço representado para o relé de impedância

A parcela $K_2 V^2$ é a equação de um relé de tensão. Este tipo de relé não foi apresentado, porém seu funcionamento é semelhante ao relé de sobrecorrente, a diferença é que a grandeza de atuação é a tensão do sistema

O relé de tensão pode atuar quando ocorre sobre-tensões; neste caso recebe a denominação de relé 59 ou calibrado para atuar frente à sub-tensões no sistema; neste caso, são identificados pelo número 27.

Quando o relé de impedância está no seu limiar de operação, temos que seu conjugado é igual a zero. Fazendo $C=0$:

$$K_2 V^2 = K_1 I^2 - K_3 \Rightarrow (\text{dividindo por: } K_2 I^2)$$

$$\frac{V^2}{I^2} = \frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2} \Rightarrow \frac{V}{I} = Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2}} \quad (6.3.2)$$

K_3 Representa o efeito da mola de restrição, se a desprezarmos inicialmente, temos:

$$Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} = cte \quad (6.3.3) \Rightarrow (cte \text{ quer dizer um valor constante})$$

Esta é uma equação de um círculo com centro na origem, representado em um plano $Z = R + jX$, conforme a figura 6.2.3. Lembrando ainda que $K_3=0$, isto é não estamos considerando o efeito da mola de restrição:

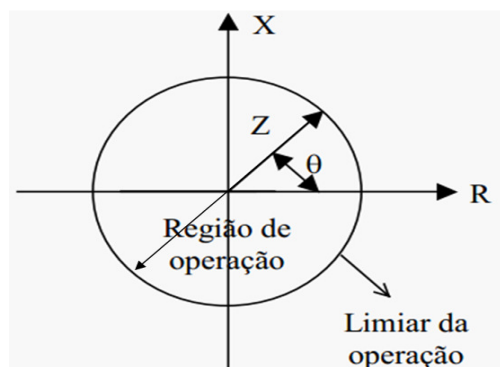


Figura 6.2.3: Característica no plano R-X para o relé de impedância sem considerar o efeito da mola de restrição

O relé é ajustado para atuar para faltas que produzam uma impedância que caia dentro do círculo (baixa impedância). Impedâncias maiores caem fora da zona de ajuste e o relé não enxerga. Veja que pela equação do relé de impedância, ele é intrinsecamente não direcional.

Então ele atuaria para frente e para trás do ponto onde esteja instalado. Para tornarmos o relé apto a ser aplicado em um sistema em anel, deve ser acoplada uma unidade direcional no mesmo.

Continuando a considerar o efeito da mola como nulo, isto é, $K_3=0$ podemos continuar explorando a equação 6.3.3.

$$Z = \frac{V}{I} \Rightarrow Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \quad (6.3.4) \Rightarrow I = \frac{V}{Z} \Rightarrow \frac{1}{Z} V \Rightarrow I = V \sqrt{\frac{K_2}{K_1}} \quad (6.3.5)$$

$I = V \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}$ É uma equação de uma reta passando pela origem no plano (I – V). Ou seja, da forma $y = ax$ como na figura 6.3.3. Agora, se passaremos a considerar o efeito de K_3 principalmente para os casos de baixos valores da grandeza de restrição (tensão no exemplo do relé de impedância) e voltando na equação 6.3.2. Vamos levar em conta que no momento do curto, a tensão diminui (teoricamente tendendo a zero) e a corrente teoricamente tendendo ao infinito, teremos $Z=0$:

$$Z = \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2}} \Rightarrow 0 = \sqrt{\frac{K_1}{K_2} - \frac{K_3}{K_2 I^2}} \Rightarrow I = \sqrt{\frac{K_3}{K_2}} \quad (6.3.6)$$

Na figura 6.2.4 temos a característica no plano (I – V) da influência da mola de restrição. Repare que esta é a equação da reta que representa o raio na figura 6.2.3 do plano R-X. Considerando o efeito da mola, não é mais uma reta passando pela origem, e sim uma curva mista que separa o plano em duas regiões de conjugado positivo e negativo. Voltaremos nesta curva quando formos estudar os relés diferenciais.

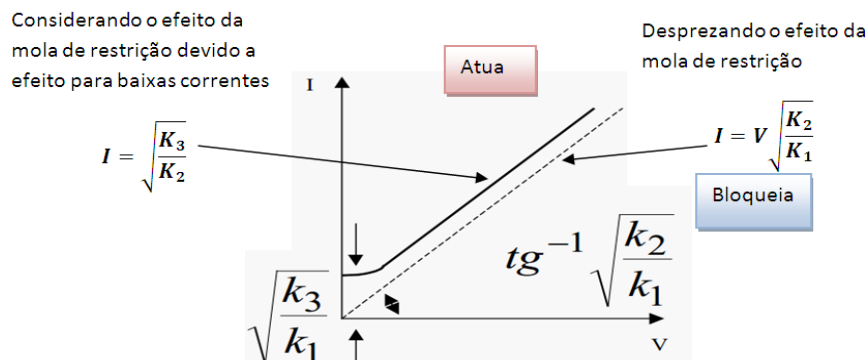


Figura 6.2.4: Efeito da mola de restrição

Voltando a questão de não direcionalidade dos relés de impedância. Para que o relé 21 possa atuar em um circuito em anel, basta que o mesmo opere em conjunto com um relé direcional 67. Neste método, o relé direcional controla a operação do relé de distância, bloqueando a sua atuação para faltas na sua montante. Veja a figura 6.2.5.

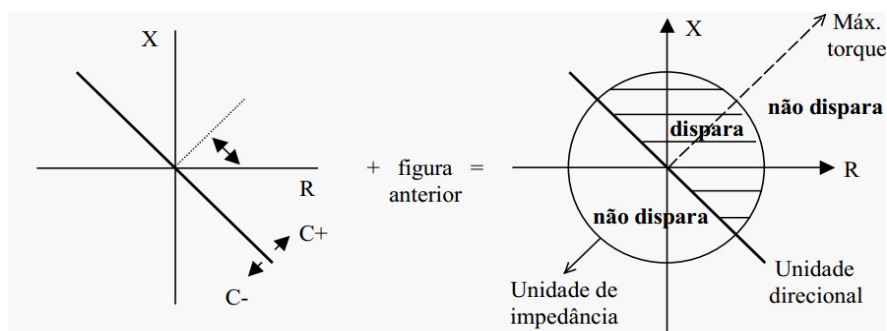


Figura 6.2.5: Relé de impedância acoplado ao relé 67

A nova equação do conjugado deste relé será dada por:

$$C = K_1 VI \cos(\theta - T) - K_2 \quad (6.3.7)$$

Até o momento, apenas comentamos sobre a primeira zona de atuação do relé de impedância. Geralmente o ele tem mais duas ou três zonas (neste caso, 3 diretas e 1 reversa). Cada zona do relé é como se fosse outro relé, ou seja, é como se tivéssemos 3 ou 4 relés juntos.

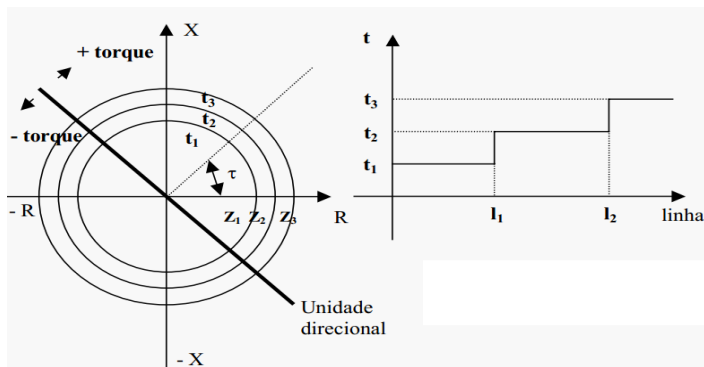


Figura 6.2.6: As três zonas de atuação de um relé de impedância

A quarta zona deste relé pode ser ajustada em um valor para ter grande alcance no SEP, ou ser ajustada para enxergar uma zona reversa onde neste caso pode ser aplicada em esquemas de bloqueios de relés instalados a sua montante ou então, se não utilizada, fica desligada.

Geralmente temos a seguinte regulação para o relé de impedância com três zonas de atuação, lembrando que este ajuste depende de estudo de cada caso de aplicação:

- Primeira zona (21-Z₁): Alcança até 80% da LT a jusante do relé, com temporização instantânea
- Segunda zona (21-Z₂): Alcança 120% da LT a jusante do relé, com temporização típica de 0,5 segundos
- Terceira zona (21-Z₃): Alcança 200% da LT a jusante do relé, com temporização típica de 1 segundo

Assim, o relé atuará da seguinte forma:

- Falta dentro da primeira zona: atuará as três zonas, como a primeira e instantânea, o disjuntor será aberto por 21-Z₁
- Para falta dentro da segunda zona: atuará 21-Z₂ e 21-Z₃, como a segunda zona é mais rápida o disjuntor será aberto por 21-Z₂
- Faltas dentro da terceira zona: atuará apenas 21-Z₃
- Para faltas atrás do relé (jusante) o relé 67 bloqueará a atuação do relé 21

Na figura 6.2.7 temos um esquema funcional em DC da atuação de um relé de impedância atuando sobre um disjuntor. Repare que o contato 52-a (NA) é um contato que estará fechado quando o disjuntor estiver nesta posição. Com o disjuntor aberto, o contato 52-a estará

aberto. 62-T é um relé de tempo e S representa a unidade de selo e sinalização do relé. A unidade de sinalização não foi representada no esquema.

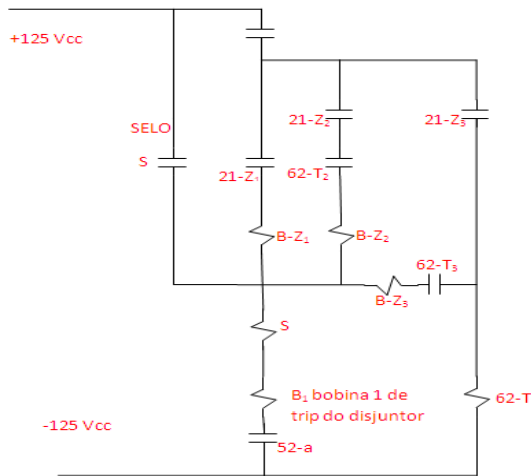


Figura 6.2.7: Esquema funcional (elementar) em DC do relé 21

Exercício proposto 6.1: Supor que um relé de impedância deva proteger 80% do trecho de uma linha de transmissão de 138 KV, cuja impedância seja de 86,25 Ω . A relação de transformação do TC é de 500/2 e a do TP é de 138000/115. Qual deve ser a regulação do relé de impedância?

6.4 RELÉ DE REATÂNCIA

Por definição, o relé de reatância é um relé de sobrecorrente com restrição direcional. Sua equação de conjugado é dada pela seguinte fórmula:

$$C = K_1 I^2 - K_2 VI \cos(\phi - T) - K_3 \quad (6.4.1)$$

Para $T=90^\circ$:

$$C = K_1 I^2 - K_2 VI \sin \phi - K_3$$

Na iminência de operação, $C=0$. Fazendo $K_3=0$, teremos:

$$K_1 I^2 = K_2 VI \sin \phi$$

Dividindo por $K_2 I^2$:

$$\frac{K_1}{K_2} = \frac{V}{I} \sin \phi \Rightarrow \frac{K_1}{K_2} = Z \sin \phi$$

$Z \sin \phi$ É fórmula da reatância, então podemos escrever:

$$X = Z \sin \phi \quad (6.4.2)$$

Por isso este relé é chamado de relé de reatância. Também podemos escrever:

$$X = \frac{K_1}{K_2} = cte \quad (6.4.3) \Rightarrow \frac{K_1}{K_2} = Z \sin \phi \quad (6.4.3)$$

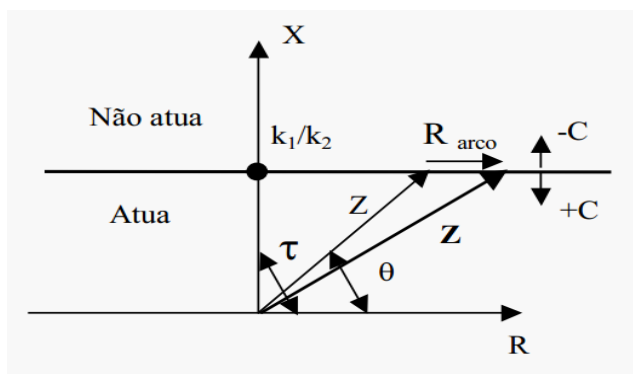


Figura 6.4.1: Característica de operação do relé de reatância

Quando ocorre um curto-circuito, temos a formação de um arco-elétrico. O arco-elétrico tem características puramente resistivas. Portanto, sua resistência elétrica equivalente é paralela ao eixo R do diagrama da figura 6.4.1.

Assim, sempre que houver um curto-circuito a impedância vista pelo relé será a impedância da LT somada com a resistência de arco do curto. A resistência de arco varia bastante, porém seu valor máximo é praticamente constante ao longo da LT. Então impedância vista pelo relé 21 pode ser representada na figura 6.4.2, onde está considerada a máxima resistência de arco ao longo da LT.

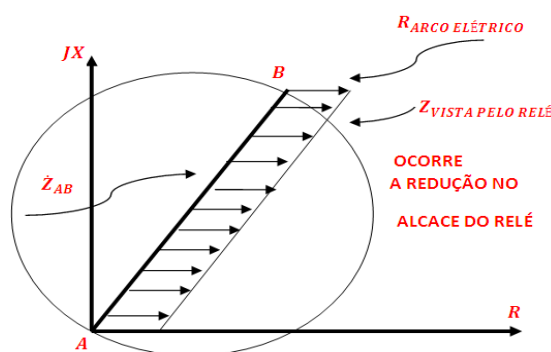


Figura 6.4.2: Impedância vista pelo relé 21

Portanto, a resistência do arco-elétrico pode jogar o ponto da impedância vista pelos relés 21 de impedância e admitância para fora da zona de atuação devida. O arco elétrico, no momento do curto-circuito, provoca uma redução no alcance dos relés.

Este problema é contornado pelo relé de reatância que é praticamente imune à resistência de arco elétrico. O relé de reatância é ótimo para proteger o sistema contra o efeito do deslocamento da impedância causada pelo arco, porém como é baseado na reatância, pode haver atuação indevida para cargas com elevado fator de potência ou fator de potência capacitivo.

O relé de reatância deve operar com um relé de admitância, ajustado em apenas uma zona. Com esta configuração, fica garantida a imunidade em relação à flutuação de carga em qualquer situação.

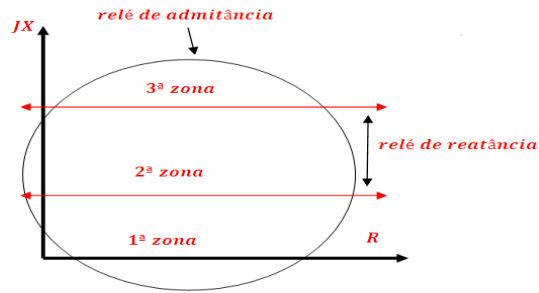


Figura 6.4.3: Relé de admitância e reatância

6.5 RELÉ DE ADMITÂNCIA OU MHO

Por definição, o relé de admitância é um relé direcional com restrição por tensão. Sua equação é da seguinte forma:

$$C = K_1 VI \cos(\theta - T) - K_2 V^2 - K_3 \quad (6.5.1); \text{ PARA } C = 0, \text{ TEREMOS:}$$

$$K_2 V^2 = K_1 VI \cos(\theta - T) - K_3, \text{ DIVIDINDO POR: } K_1 V^2$$

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{I \cos(\theta - T)}{V} - \frac{K_3}{K_1 V^2} \quad \text{PARA } K_3 = 0, \text{ TEREMOS:}$$

$$\frac{K_2}{K_1} = \frac{I}{V} \cos(\theta - T) \Rightarrow \frac{K_2}{K_1} = y \cos(\theta - T) \quad (6.5.2)$$

Como y representa a admitância, este relé é denominado de relé de admitância. Agora, lembrando que a admitância y é o inverso da impedância z , podemos escrever:

$$y \cos(\theta - T) = \frac{K_2}{K_1} \Rightarrow \frac{1}{z} \cos(\theta - T) = \frac{K_2}{K_1} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Z = \frac{K_1}{K_2} \cos(\theta - T) \quad (6.5.3)$$

Esta equação representa um círculo passando pela origem com diâmetro de inclinação de $\frac{K_1}{K_2}$ e inclinação de T .

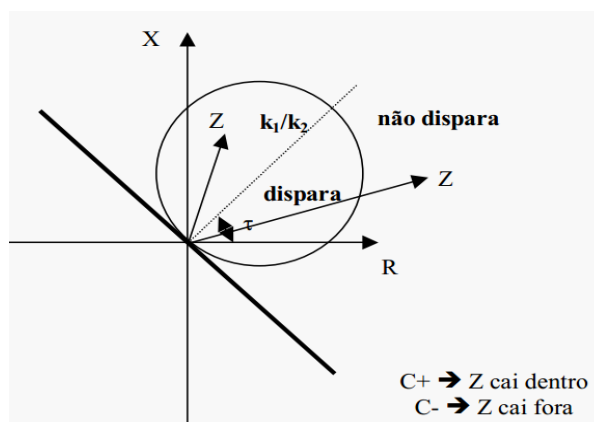


Figura 6.5.1: Diagrama (R-X) do relé de admitância

Esta circunferência tem as seguintes características:

- Passa pela origem
- Seu diâmetro vale $\frac{K_1}{K_2}$
- Sua inclinação tem o ângulo T
- Seu centro é Z/2

O relé de admitância é direcional e só atua para defeito cuja impedância esteja dentro do círculo da sua característica e a jusante do seu ponto de instalação.

A regulação do relé deve ser corrigida porque a característica da inclinação da circunferência do limiar de operação do relé de admitância, ou seja, o ângulo de inclinação do diâmetro, ou ângulo de máximo torque (T) do relé não coincide com o ângulo natural de impedância da linha de transmissão, a qual o relé está protegendo.

O ajuste do relé corresponde ao valor de $Z_{máx}$ do relé, posicionado no ângulo de máximo torque do relé. Portanto, o real ajuste do relé para proteger uma LT deve ser como mostrado na figura 6.5.2.

Na figura 6.5.2, todo o defeito na LT_{AB} , a impedância vista pelo relé tem ângulo θ_{AB} . No defeito, se o valor do módulo da impedância for menor que 80% da LT_{AB} , o relé atuará dentro da primeira zona. O ajuste do relé é feito com Z_{ajuste} posicionado na linha do seu ângulo de máximo torque.

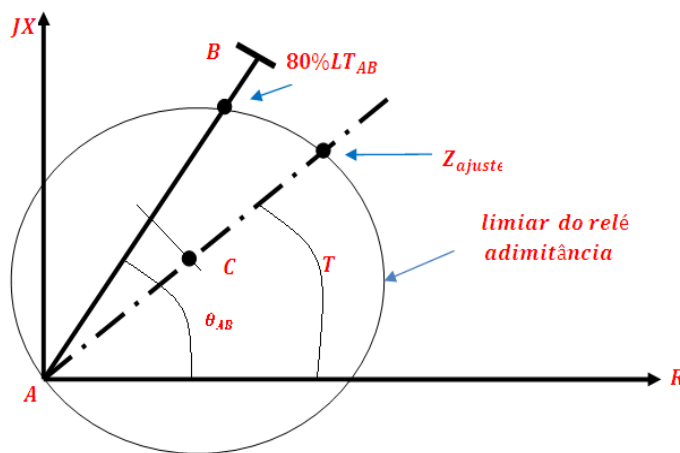


Figura 6.5.2: Valor real do ajuste do relé de admitância

Do ponto A ao ponto de 80% da LT_{AB} , temos uma corda da circunferência do limiar de operação do relé de admitância. Uma perpendicular traçada no ponto médio desta corda, passa pelo ponto C da circunferência. Então a correção do Z_{ajuste} do relé de admitância será:

$$\frac{Z_{80\%LTAB}}{2} = \overline{CA} \cos(\theta_{AB} - T) \Rightarrow \frac{Z_{80\%LTAB}}{2} = \frac{Z_{ajuste}}{2} \cos(\theta_{AB} - T) \Rightarrow$$

$$\Rightarrow Z_{ajuste} = \frac{Z_{80\%LTAB}}{\cos(\theta_{AB} - T)} \quad (6.5.4)$$

Exercício proposto 6.2: Utilizando um relé de admitância que tenha um ângulo de máximo torque de 30° , achar a impedância de ajuste do relé da barra A correspondente às 1ª, 2ª e 3ª zonas da linha de transmissão com as características abaixo:

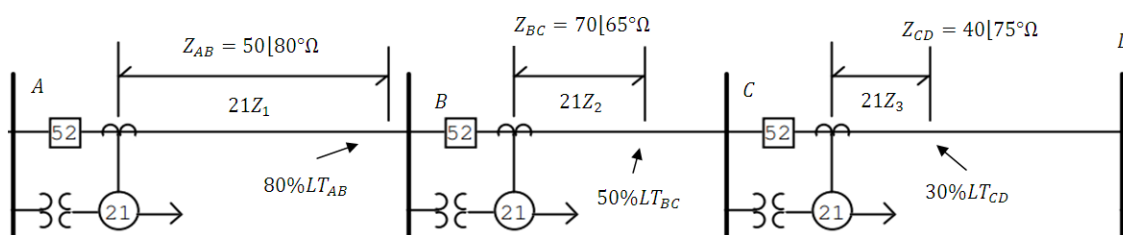


Figura 6.5.3: Esquema unifilar do exercício proposto 6.2

Faça os cálculos considerando a impedância real da linha no primário.

Exercício proposto 6.3: Supor que na barra A, relação de transformação do TC seja de 600/5 e a do TP é de 138000/115. Qual deve ser a impedância secundária vista pelos, nas três unidades calculadas acima?

CAPÍTULO 7

7 INTRODUÇÃO AO RELÉ DIFERENCIAL

7.1 INTRODUÇÃO

A proteção diferencial é baseada na primeira lei de Kirchhoff aplicada à proteção de equipamentos e dispositivos do sistema elétrico. A proteção diferencial faz a comparação entre a corrente que entra e a que saia de um equipamento e se esta diferença for superior ao ajuste da proteção, o equipamento, dispositivo ou circuito é considerado estar sob falta e medidas será adotado por esta proteção. Veja o esquema simplificado deste princípio na figura 7.1.1.

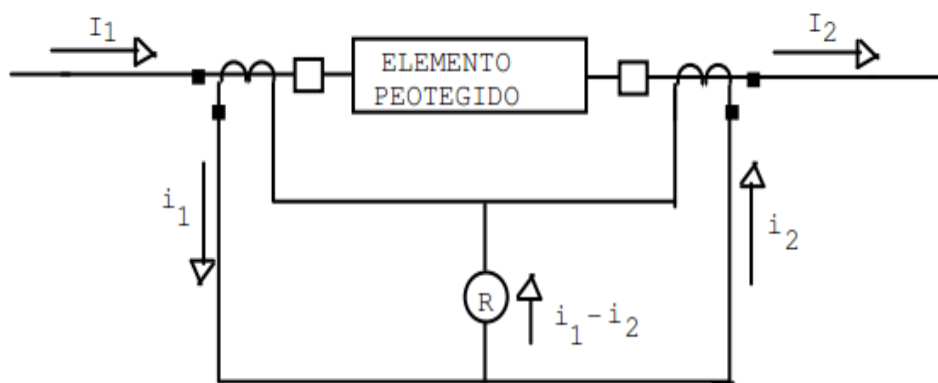


Figura 7.1.1: Princípio de funcionamento da proteção diferencial

Pelo esquema da figura, vemos que a proteção diferencial tem uma zona de proteção delimitada pelos TC. Este elemento protegido pode ser um gerador, transformador, motor ou uma linha de transmissão. Esta proteção pode ser empregada em sistemas configurados em radial ou anel.

Para entender o esquema, devemos seguir as correntes obedecendo às marcas de polaridades do TC (corrente entra na marca de polaridade – primário e sai na marca de polaridade – secundário dos TC). Elemento R é o relé diferencial.

O relé diferencial é identificado pelo número 87. Se a diferença de corrente entre I_1 e I_2 ultrapassar o seu valor de ajuste, o relé 87 manda abrir os disjuntores, geralmente nos dois extremos do equipamento.

A proteção diferencial só deve operar para faltas internas à sua zona de proteção (área delimitada pelos TC), qualquer corrente fora desta área não deve causar a atuação da função 87. Basicamente qualquer relé pode desempenhar a função 87.

Se o elemento protegido for um transformador ou qualquer equipamento que tenha níveis de tensão diferentes entre as zonas de proteção. As correntes I_1 e I_2 serão determinadas pela relação de transformação do elemento protegido e cujas diferenças deveram ser compensadas pelas relações de transformação dos TC.

7.2 RELÉ DIFERENCIAL AMPERIMÉTRICO

É simplesmente um relé de sobrecorrente 50 ou 51 ligado na configuração diferencial apresentada na figura 7.1.1.

Para um curto fora da zona protegida, não importando se o sistema esta em anel ou radial haverá a mesma corrente nos dois lados da zona de proteção e o relé não opera. Se o curto for interno a zona protegida, para um sistema em anel, haverá a inversão da corrente I_2 alimentando o curto. Sendo em um sistema radial, a corrente I_2 tenderá a zero. Seja como for haverá uma corrente diferencial que provocará a atuação do relé 87.

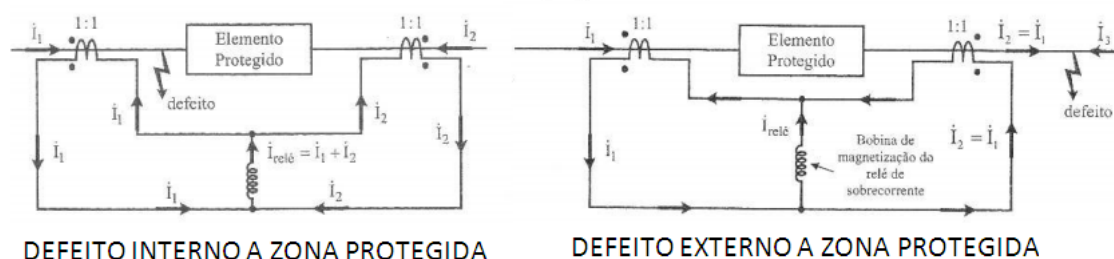


Figura 7.2.1: Comportamento do relé 50/51 ligado como relé 87

Este tipo de ligação utilizando relé de sobrecorrente na configuração diferencial apresenta problemas quando da ocorrência de elevado curto-circuito fora da zona seletiva, porém muito próximo dos TC. Isto se deve a vários fatores, tais como:

- Não ser perfeito o casamento entre os TC
- Saturação dos TC
- Carregamento dos TC
- A existência de corrente residual inerente aos equipamentos

Estas imperfeições inerentes ao sistema podem causar atuação indevida deste tipo de configuração. Veremos o relé diferencial percentual que melhora a resposta da proteção diferencial, principalmente frente a situações que causam a saturação do TC.

7.3 RELÉ DIFERENCIAL PERCENTUAL

Na figura 7.3.1 temos uma estrutura em balanço para estudarmos o princípio de atuação do relé diferencial percentual.

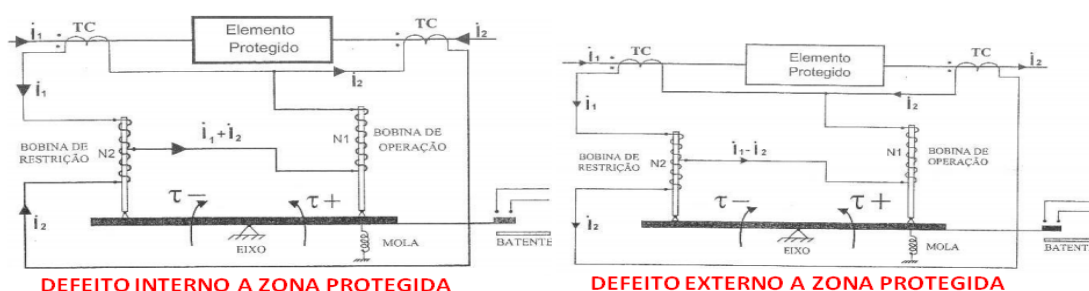


Figura 7.3.1: Comportamento do relé diferencial percentual

As correntes na bobina de restrição provocam torque negativo e na bobina de operação temos o torque positivo.

Com corrente normal ou uma falta fora da zona de proteção, as correntes passantes em cada metade da bobina de restrição geram campos que se somam, produzindo um forte torque negativo. Já na bobina de operação o torque será reduzido, pois se tem $I_1 - I_2$ atuando na bobina de operação, causando o baixo torque de operação.

Com a situação de falha interna, demos a inversão da corrente I_2 . Isto causa campos discordantes na bobina de restrição e um baixo torque de restrição (negativo). Já na bobina de operação teremos elevado magnético, produzindo um forte torque de operação (positivo) levando o relé a atuar, fechando os contatos.

Resumindo: para defeitos internos temos um alto torque de restrição e enfraquecimento do torque de operação; para uma falha externa temos um alto torque de operação e enfraquecimento do torque de restrição.

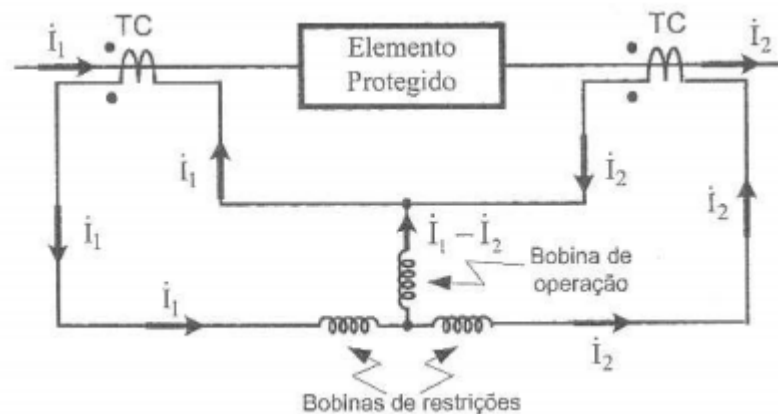


Figura 7.3.2: Relé diferencial percentual 87

- Na bobina de restrição, age a seguinte corrente: $I_{restrição} = \left| \frac{I_1 - I_2}{2} \right|$
- Na bobina de operação, age a seguinte corrente: $I_{operação} = \left| \frac{I_1 + I_2}{2} \right|$
- O conjugado deste relé é dado por: $C = K_1(I_1 - I_2)^2 - K_2 \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right)^2 - K_3$ (7.3.1)
- Fazendo $K_3 = 0$: $\Rightarrow I_1 - I_2 = \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right) \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}$ é equação de uma reta tipo: $y = ax$
fazendo $a = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}$, vem que: $\Rightarrow I_1 - I_2 = a \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right)$
fazendo $y = I_1 - I_2$ e $x = \frac{I_1 + I_2}{2}$, vem que: $y = ax$ (7.3.2)
- Fazendo o gráfico da equação 7.3.2, $a = \tan \alpha = \sqrt{\frac{K_2}{K_1}}$, que é chamada de inclinação ou slope da reta de limiar de operação do relé 87
- Se não desprezarmos o efeito da mola de restrição teremos: $I_1 - I_2 = \sqrt{\frac{K_3}{K_1}}$
- O efeito da mola de restrição do relé só aparecerá para baixas correntes, conforme já comentado no item 6.3. Neste caso a reta não passa mais pela origem mais tem um pequeno desvio

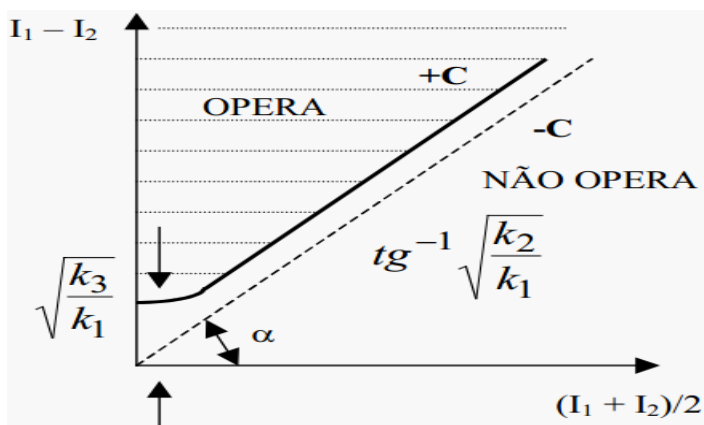


Figura 7.3.3: Curva de operação do relé diferencial percentual

Pode-se também representar o relé diferencial percentual, em um gráfico de corrente de retenção I_1 em função da corrente de retenção I_2 .

Para isso é definido outro termo que é a percentagem da corrente diferencial $I_1 - I_2$ em relação à menor das correntes de retenção I_1 ou I_2 .

Supondo que $I_2 < I_1$, assim a percentagem percentual “p” é dada por:

$$p = \frac{I_1 - I_2}{I_2} \cdot 100 \Rightarrow I_1 = \frac{100 + p}{100} \cdot I_2 \quad (7.3.3.)$$

Supondo que $I_1 < I_2$, tem-se:

$$p = \frac{I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100 \Rightarrow I_1 = \frac{100}{100 + p} \cdot I_2 \quad (7.3.4.)$$

Usando um relé diferencial percentual, o percentual de 10% e 25%, o gráfico da zona de atuação é representado na figura 7.3.3.

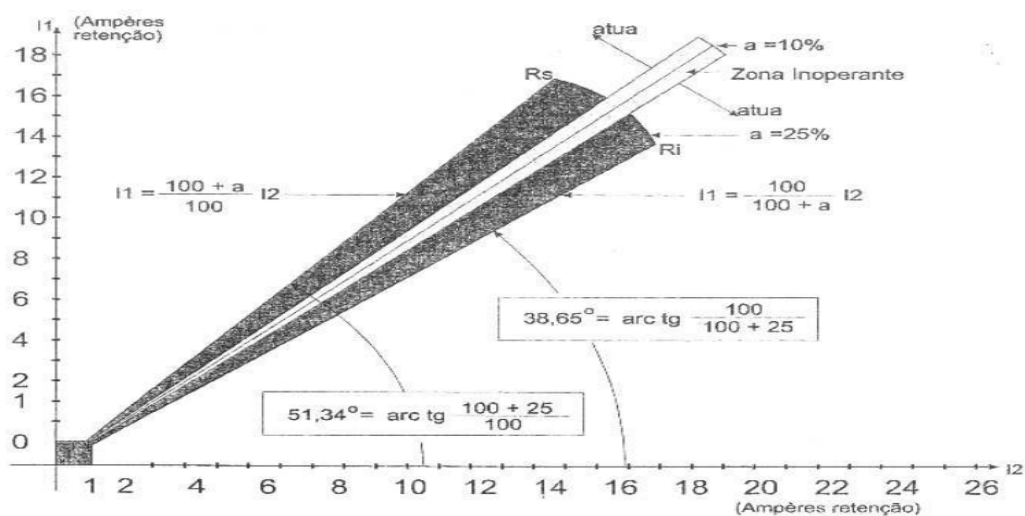


Figura 7.3.4: Zona de atuação do relé diferencial percentual em forma de gravata

Par qualquer ponto de operação dentro da área hachurada o relé 87 não atua. Qualquer ponto de operação fora da gravata representa uma corrente diferencial além do ajustado no relé 87 e a proteção atua.

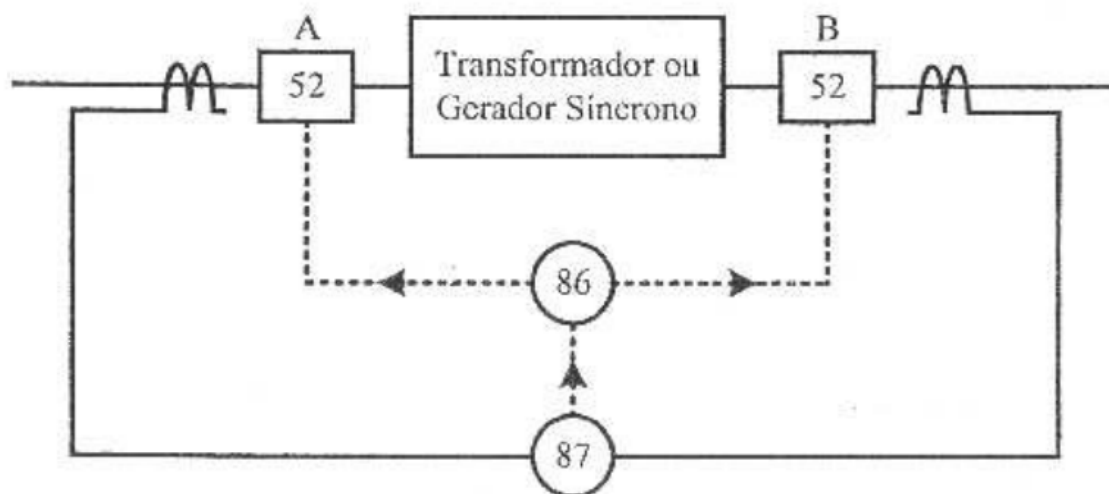


Figura 7.3.5: Diagrama esquemático da proteção diferencial

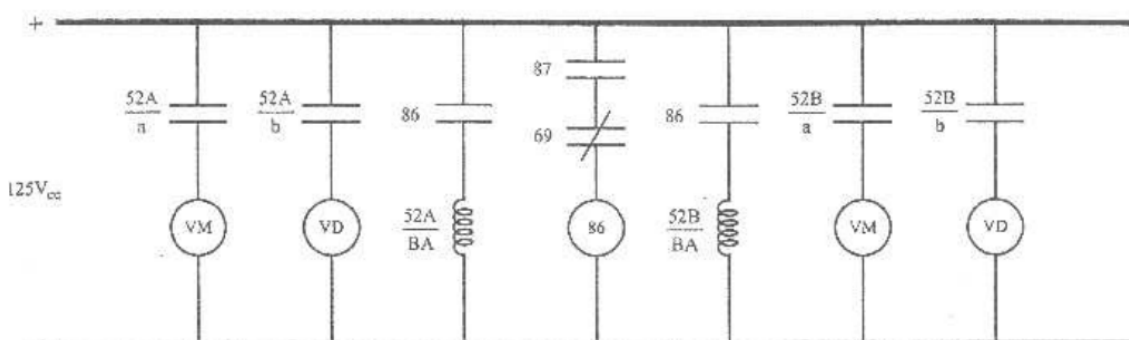


Figura 7.3.6: Esquemático em DC da proteção diferencial

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

KINDERMANN, Geraldo, 1997, Curto-Circuito, 2º ed. Florianópolis. Do autor.

KINDERMANN, Geraldo, 1999, Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, 1v. 1º ed. Florianópolis. Do autor.

KINDERMANN, Geraldo, 2006, Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, 2v. 1º ed. Florianópolis. Do autor.

CAMINHA, Amadeu C. 1978, Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos, São Paulo, Edgard Blücher.