

TESE
244



Tombo 2.44

PROTEÇÃO DIFERENCIAL

Prof. Ademir Carnevalli Guimarães

ESCOLA FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ

E F E I



PROTEÇÃO DIFERENCIAL

1 9 7 4

CLASS. 621.316.925(043.2)

CUTT. Q 963/p

TOMBO 211

À minha esposa Ana Heloisa e
meus filhos Adriana e André
Luiz que tornaram as horas
de trabalho mais valiosas pe
lo carinho das horas de lazer.

P R E F Á C I O

Com o presente trabalho, procuramos tornar acessível aos nossos estudantes, um importante assunto da área profissional.

O trabalho em pauta nada tem de inédito, pois o tema já foi tratado por outros engenheiros. O maior mérito é sem dúvida organizar o tema, extraíndo dos catálogos dos fabricantes informações não contidas nos livros convencionais, tratando-as de uma forma simples e didática, de forma a permitir um acesso mais fácil àqueles que se iniciam neste apaixonante campo da Engenharia Elétrica.

Nada daquilo que foi feito seria possível sem a contribuição dos professores, Marcio Antonio Curi, orientador e pedra de sustentação deste trabalho não só pelo seu alto gabarito técnico, mas também pela confiança e incentivos dispensados ao longo de todo o trabalho e Amadeu Casal Caminha por encarnar o espírito da confiança naqueles que trabalham sob sua orientação.

Itajubá, dezembro de 1973

ADEMIR CARNEVALLI GUIMARÃES

ÍNDICE :-

CAPÍTULO I - Relés Percentuais	001
1.1 - Dificuldades da utilização de combinações de corrente, onde a resultante é normal - mente nula	001
1.2 - Soluções adotadas	004
1.3 - Construção dos relés percentuais	007
1 - Oposição mecânica	008
2 - oposição elétrica	015
3 - oposição magnética	015
1.4 - Ajuste e consumo dos relés percentuais	027
CAPÍTULO II - Princípio de medição	028
2.1 - Análise do circuito de medição de uma pro teção diferencial	028
2.2 - Fator K	034
2.3 - Equações de Funcionamento	034
2.4 - Ângulo ψ	043
2.5 - Características peculiares aos relés ope rados à corrente contínua	045
1 - Método de introdução do fator de re tenção K	045
2 - Característica composto de operação	050
3 - Somatório de correntes polifásicas	053
4 - Somatório aritmético dando uma pro teção multipolar	054
5 - Sensibilidade e tempo de operação	055
6 - Insensibilidade aos surtos de mag netização dos transformadores de força	056
7 - Relé com retificação da grandeza de influência	058

CAPÍTULO III - Aplicações	059
3.1 - Proteção diferencial de transformadores.....	059
3.2 - Proteção diferencial de geradores	061
3.3 - Proteção diferencial de linhas	061
3.4 - Proteção combinada de barras	066
3.5 - Conclusões	067
CAPÍTULO IV - Proteção diferencial para transformadores..	069
4.1 - Generalidades	069
4.2 - Estabilização da proteção	070
1 - Estabilização devido a corrente de magnetização de inrush	071
2 - Estabilização devido a corrente de magnetização permanente	085
3 - Estabilização devido às variações de tensão do sistema	086
4 - Estabilização devido aos transformadores com comutadores de tap's (sob carga)	088
5 - Estabilização da proteção para defeitos externos à zona de proteção	090
4.3 - Transformadores Auxiliares	125
CAPÍTULO V - Sensibilidade do relê diferencial	135
5.1 - Generalidades	135
5.2 - Curto Circuito trifásico	136
5.3 - Curto circuito fase-fase	138
5.4 - Curto circuito fase-terra	139

CAPÍTULO VI - Proteção Diferencial para Geradores	143
6.1 - Generalidades	143
6.2 - Princípio de medição	144
6.3 - Característica de Operação	146
1 - Operação normal	146
2 - defeitos externos à zona de proteção	146
3 - defeitos internos à zona de proteção	147
6.4 - Tempo de operação da proteção	151
6.5 - Exemplos de Aplicações	152
6.6 - Proteção fase terra e a forma de aterramento do gerador	157
1 - Gerador com neutro isolado	157
2 - Geradores aterrados	166
6.7 - Retenção por Harmônicos	168
6.8 - Conexões	169
 CAPÍTULO VII - Proteção diferencial para Barramentos	 170
7.1 - Generalidades	170
7.2 - Diagramas típicos	170
1 - Sistema Siemens	170
2 - Sistema ASEA	179
3 - Transformadores de corrente das linhas	185
4 - Transformadores de corrente intermediários	186
 ANEXO I	
Proteção Massa-cub.: para transformador	187
1.1 - Cálculo da Regulagem da proteção da massa ...	188
1.2 - Defeitos sobre o transformador	189

CAPÍTULO IPELÉS PERCENTUAIS1.1- DIFICULDADES DA UTILIZAÇÃO DE COMBINAÇÕES DE CORRENTE,
ONDE A RESULTANTE É NORMALMENTE NULA

Tendo em vista a detecção de um defeito, ou a sua localização, existe a possibilidade de comparação ou melhor combinação de correntes.

Algumas dentre elas (como as componentes sinétricas inversa e homopolar) são nulas em funcionamento normal e, mesmo que de pequena intensidade, a corrente resultante de tal combinação pode ser teóricamente considerada como a prova da existência de um defeito.

Poderíamos assim realizar dispositivos de proteção cuja sensibilidade seria limitada somente pelos relés utilizados.

A realidade no entanto não é tão simples por duas razões principais:

- a) As combinações somente darão resultado desejado se as corrente utilizadas são senoidais; este, no entanto (em geral) não é o caso no momento do estabelecimento de um defeito. A duração do período assimétrico pode ultrapassar ao de funcionamento do relé instantâneo. Um caso como o acima salientado pode ser ilustrado na fig. 1.1.

Esta condição de assimetria se produz tanto no circuito de potência, como no secundário dos transformadores de corrente, estabelecendo a sua própria componente de corrente.

contínua, no momento de uma brusca variação do regime de funcionamento.

Em consequência da forma assimétrica da maior parte dos defeitos, como da defasagem relativa de um terço de período existente entre as correntes de cada uma das fases, suas componentes contínuas não tem a mesma amplitude e dão geralmente uma resultante, qualquer que seja a combinação estabelecida para a alimentação de um determinado relê.

Esta resultante poderia provocar o funcionamento interpestivo de um determinado relê (por exemplo um relê de sequência homopolar).

A componente contínua pode se produzir, mesmo na ausência de um defeito, no momento de certas manobras nos sistemas de potência. (fechamento de um longo anel de interconexão, ou ainda a energização de um transformador a vazio devido a Inrush).

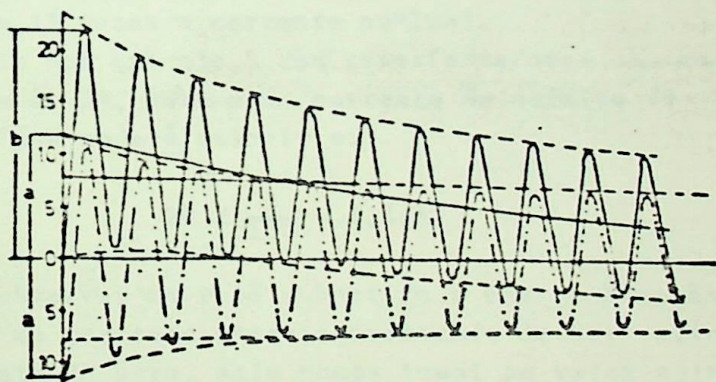


Fig. 1.1 - Corrente de curto circuito :

- a - corrente inicial subtransitória I''_k
- b - corrente de impulso de curto circuito I_S .

4) A combinação de correntes jamais é perfeita, até mesmo a razão do erro de transformação dos transformadores de corrente.

Estes erros de transformação não são idênticos entre si e eventualmente devemos tomar em consideração o erro dos transformadores intermediários e dos comprimentos dos condutores, enfim, o fator de probabilidade da sensibilidade.

Por esta razão, mesmo na ausência de um defeito, constata-se uma corrente resultante parasita susceptível de operar intempestivamente o relé (assimetria!).

Estes erros são ainda maiores, durante os defeitos que ocasionam violentas sobre-correntes, quando sua forma ou localização são tais que a combinação de correntes utilizadas para alimentação do relé deveriam dar uma componente nula.

Poderemos admitir aproximadamente que, com transformadores de corrente usados em proteção, os erros globais esperados (considerando fiação, transf. auxiliares etc.) são da ordem de 3%, para as intensidades de correntes de defeito que atinjam de 10 a 15 vezes a corrente nominal.

Assim por exemplo, com transformadores de corrente com secundário de 5%, para uma corrente de defeito de 50%, o erro em cada fase poderá atingir a:

$$50 \times \frac{3}{100} = 1.5(\%)$$

como podemos observar um relé submetido a uma combinação normalmente nula de corrente estaria arriscado de ser alimentado por uma corrente de erro, pelo menos igual ao valor acima, podendo ser maior.

Um relé amperimétrico normal (sistema Mercz Price) ajustado para um Pick-up da ordem de 4%, por exemplo, poderia manter-se insensível a este erro, mas em contrapartida seria incapaz de agir no caso de um defeito de pequena intensidade de corrente (caso de um curto entre espiras do enrolamento de um transformador ou alternador). Com correntes normais, no

entanto, não existiria qualquer problema, uma vez que os erros são bastante pequenos. Concluímos que para evitar a operação intempestiva da proteção devido aos erros anteriormente citados perderíamos em sensibilidade.

1.2- SOLUÇÕES ADOPTADAS

Para cada uma das dificuldades anteriormente mencionadas, foram propostas as seguintes soluções:

1.2.1- Para reduzir os efeitos das componentes de corrente contínua podemos retardar ligeiramente a operação do relê, para um valor superior à duração da assimetria.

Esta condição é automaticamente obtida quando a proteção deve ser temporizada por razões de seletividade.

Não devemos esquecer esta temporização nas proteções instantâneas, onde podemos realizá-la com auxílio de um relê intermediário, de tempo definido, montado em cascata no circuito de desligamento.

1.2.2- Bloquear a componente de corrente contínua, antes do relê.

Podemos neste caso, usar transformadores intermediários com vários enrolamentos, para obtermos a combinação de corrente desejada.

Se a constante de tempo do circuito secundário do transformador de corrente (que alimenta o relê) é suficientemente pequena, a componente contínua não é transformada (transformadores com entre-ferro).

Nas figuras 1.2 e 1.3 podemos observar os dois casos extremos.

Podemos assim introduzir o relê em um sistema de circuitos paralelos, onde as impedâncias são diferentes para a frequência normal de 60(Hz) e muito abaixo deste valor.

Neste caso a passagem da corrente senoidal de 60(Hz) através do relê é facilitada, enquanto a componente contínua

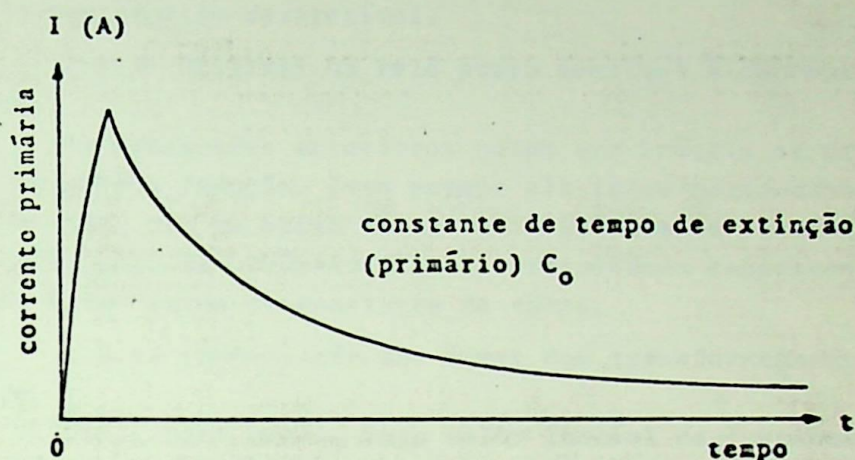


Fig. 1.2 - Constante $\sqrt{\text{de}}$ tempo primário

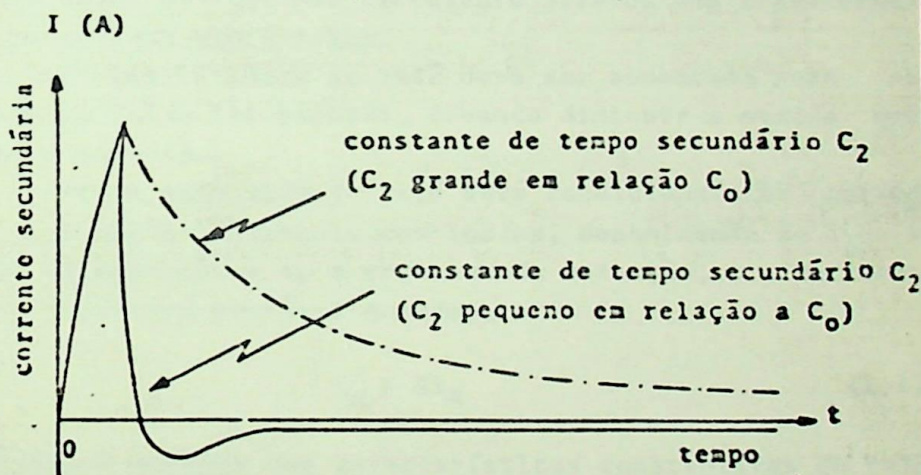


Fig. 1.3 - Constante $\sqrt{\text{de}}$ tempo secundário

desviada para um circuito paralelo exterior ao relê, a fim de tornar a sua atuação desprezível.

1.2.3- Utilizar um relê pouco sensível à componente contínua.

As precauções anteriores podem ser inúteis se utilizarmos um relê a indução. Isto porque ele se comporta como um transformador, com um baixo valor de indutância no secundário, constituído pelo seu próprio disco. Apresentando consequentemente um baixo valor de constante de tempo.

1.2.4- Compensação dos erros dos transformadores de corrente.

Utilizaros relês, cujo valor inicial de funcionamento depende do valor das correntes circulantes em cada condutor ou seja, relês percentuais.

Já tivemos oportunidade de analisar e verificar que os erros dos transformadores de corrente não são fixos mas dependem do valor da corrente circulante através dos transformadores, aumentando com a mesma.

A sensibilidade do relê deve ser aumentada para as correntes de baixa intensidade, devendo diminuir a medida que a corrente aumenta.

Assim se a ação do relê está condicionada às correntes em jogo convenientemente combinadas, denominando de i_0 a corrente de operação e i_R a corrente de retenção, o funcionamento do relê será possível quando:

$$i_0 > K i_R \quad (1.1)$$

A constante K depende das características construtivas do relê. A igualdade somente é possível se a constante K for maior que

$$\tan \delta = \frac{r_i \cdot L}{\cos \phi L} \text{ do transformador de corrente.}$$

Podemos ainda escrever que

$$\frac{i_o}{i_R} > K \quad (1.2)$$

ou ainda $i_o > 100K$, por cento de i_R . Surgindo daí o nome de uma família de relés denominados: "Percentuais".

Sendo a relação

$$S_T = \frac{i_o}{i_R} \times 100 \quad (1.3)$$

denominada sensibilidade relativa do relé. No caso de um relé amperimétrico ordinário (sistema Mercz-Price), este valor de sensibilidade é constante e obtido por meio de uma mola antagonista. Por isto a retenção é bastante falha pois é feita uma transdução: energia mecânica para elétrica.

1.3- CONSTRUÇÃO DOS RELÉS PERCENTUAIS

É oportuno notar, primeiramente, a necessidade de fixar a posição de repouso de um relé, quando as correntes são nulas, obriga a manutenção de uma mola antagonista sobre a parte móvel.

Desta forma a parte móvel de um determinado relé fica submetida a 3 ações diferentes.

- a) aquela das correntes, de operação e retenção
- b) devido à mola antagonista.

Este último deve apenas ser o suficiente para assegurar a estabilidade da posição do relé (notadamente contra as vibrações) e a pressão necessária para os contatos de repouso (contatos fechados na posição de repouso).

A modificação, devido a esta mola, no funcionamento de um relé a percentagem é sobretudo sensível nas pequenas correntes, uma vez que ela provoca um deslocamento em toda a curva característica de uma quantidade constante. A expressão desta curva deve ser:

$$\text{Ação da corrente } i_o = \text{Ação da corrente } i_R + \text{Ação da mola} \quad (1.4)$$

$$\frac{i_o}{i_R} > K \quad (1.2)$$

ou ainda $i_o > 100K$, por cento de i_R . Surgindo daí o nome de uma família de relés denominados: "Percentuais".

Sendo a relação

$$S_r = \frac{i_o}{i_R} \times 100 \quad (1.3)$$

denominada sensibilidade relativa do relé. No caso de um relé amperimétrico ordinário (sistema Mercz-Price), este valor de sensibilidade é constante e obtido por meio de uma mola antagonista. Por isto a retenção é bastante falha pois é feita uma transdução: energia mecânica para elétrica.

1.3- CONSTRUÇÃO DOS RELES PERCENTUAIS

É oportuno notar, primeiramente, a necessidade de fixar a posição de repouso de um relé, quando as correntes são nulas, obriga a manutenção de uma mola antagonista sobre a parte móvel.

Desta forma a parte móvel de um determinado relé fica submetida a 3 ações diferentes.

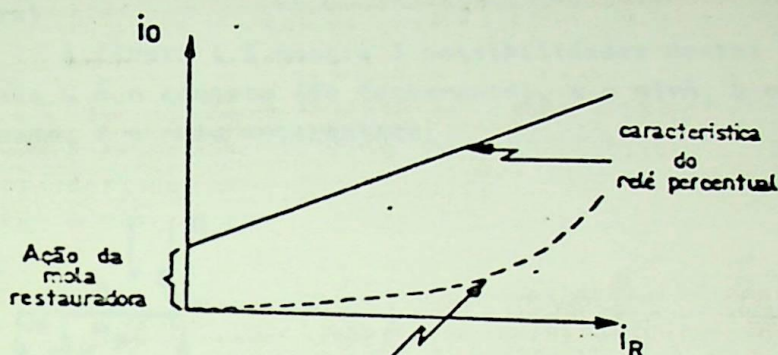
- a) aquela das correntes, de operação e retenção
- b) devido à mola antagonista.

Este último deve apenas ser o suficiente para assegurar a estabilidade da posição do relé (notadamente contra as vibrações) e a pressão necessária para os contatos de repouso (contatos fechados na posição de repouso).

A modificação, devido a esta mola, no funcionamento de um relé a percentagem é sobretudo sensível nas pequenas correntes, uma vez que ela provoca um deslocamento em toda a curva característica de uma quantidade constante. A expressão desta curva deve ser:

$$\text{Ação da corrente } i_o = \text{Ação da corrente } i_R + \text{Ação da mola} \quad (1.4)$$

A característica teórica de funcionamento é mostrada na figura 1.4.



ERRO DEVIDO AOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE (SATURAÇÃO)

Fig. 1.4 - Característica teórica de operação de um relé percentual.

Nós podemos classificar os relés amperimétricos a percentagem de diferentes construções segundo a maneira de o por praticamente a ação das correntes i_0 e i_R .

Examinaremos a seguir os processos de oposição mecânicos elétricos e magnéticos.

1.3.1- OPosição MECÂNICA

Ela é conseguida pelo acoplamento mecânico de dois (ou mais) órgãos motores elementares.

- um sendo alimentado, pela corrente i_0 , tendendo a fazer funcionar o relé;
- outro (ou outros) sendo alimentado pela corrente i_R , e tendendo a impedir o funcionamento do relé.

Eles podem apresentar uma mola antagonista comum a todos os órgãos motores, ou cada um pode ter a sua mola própria, e as suas ações se somam algebricamente. Estes relés recebem frequentemente a denominação de "RELÉS DE BALANCA", em razão da forma de montagem realizada para acoplamento de dois elementos

ferro magnéticos por suas partes móveis. (núcleo mergulhador ou armadura)

A figura 1.5 mostra 3 possibilidades destas balanças nas quais C é o contato (de fechamento), n o nível, b o batente de renouso, r a mola antagonista.

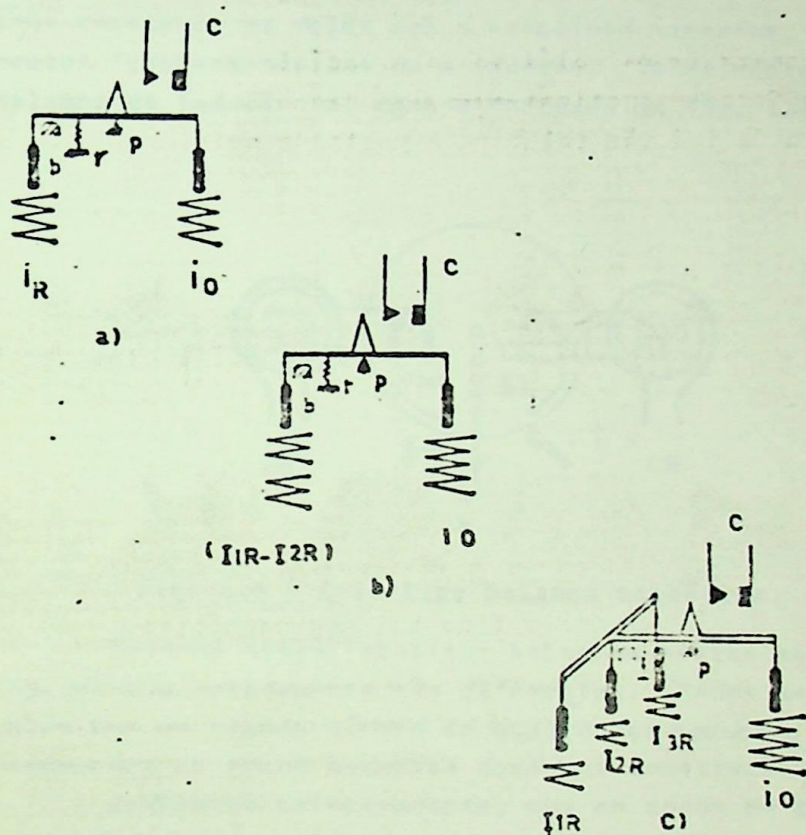


Fig. 1.5 - Montagem dos relés do tipo balança..

A força antagonista pode ser produzida pela corrente de uma fase (a) pela diferença vetorial de correntes de duas fases (b) ou ainda pela ação independente das correntes das

três fases, situação bastante cômoda principalmente em casos de correntes desequilibradas (c).

Dizemos no último caso (c) que a ação antagonista depende da soma dos módulos dos vetores representativos das correntes nas fases:

$$|i_{1R}| + |i_{2R}| + |i_{3R}| \quad (1.5)$$

Podemos construir os relés sob o princípio anterior, tanto com elementos ferro-magnéticos ou a indução. Normalmente temos uma balança de indução tal como a mostrada na fig. 1.6.

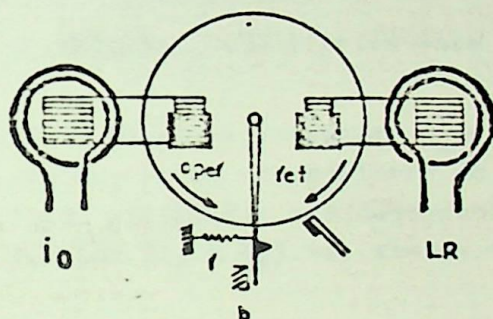


Fig. 1.6 - Relé tipo balança magnética.

Podemos assim realizar balanças mistas onde os elementos motor e antagonista são diferentes. Todos estes tipos de relés tem um grande número de qualidades comuns e necessitam de precauções de mesma natureza para sua construção.

Lembramos primeiramente, que em todos os casos analisados as forças ou conjugados desenvolvidos são sensivelmente proporcionais ao quadrado das correntes colocadas em jogo e dependem do valor do entre-ferro.

Seja n o número de espiras das bobinas, o funcionamento do relé se dará quando:

$$K_o^2 n_o^2 i_o^2 \geq K_R^2 n_R^2 i_R^2 \quad (1.6)$$

ou

$$\frac{i_o^2}{i_R^2} \geq \frac{K_R^2 n_R^2}{K_o^2 n_o^2} \quad (1.7)$$

finalmente

$$\frac{i_o}{i_R} \geq K \frac{n_R}{n_o} \quad (1.8)$$

As equações acima mostram que:

- os relés, balança, de indução, são efetivamente relés a percentagem;
- o defaseamento relativo entre as correntes i_o e i_R não intervêm pelo menos teoricamente, na regulacão do relê. Admi-tido que os esforços ou conjugados não dependem da posição relativa dos dois vetores (i_o e i_R) mas sim da sua amplitude;
- que os esforços desenvolvidos e suportados pelo nívô são proporcionais ao quadrado das correntes e provocam elevados esforços quando de grandes sobre correntes;
- que a anulação periódica dos fluxos e dos esforços não são simultâneos, o que resulta em uma amplificação das vibrações do eixo, notadamente no caso de uma grande sobre corrente e o anarrecimento de um efeito de fase não negligenciável nas balanças ferro magnéticas;
- que a diferença dos conjugados podendo ser pequena, o contato tem um fraco poder de fechamento e de corte, daí a necessidade frequente de um relê intermediário ou reatador;
- que a mola de retorno estando frouxa, o retorno ao repouso é muito lento.

A faixa de ajuste das balanças ferro magnéticas pode ser grande, sobretudo se desejamos uma grande separação dos contatos e uma boa pressão entre eles. Nas balanças de indução essa separação é bem menor por construção e a pressão de contato pode ser quase nula na posição de trabalho, daí a necessidade absoluta para estes relés de possuir um único contato fechado nesta posição e de utilizar um relé reatador (multiplicador) ou auxiliar.

Lembramos que se procuramos uma desensibilização tão uniforme quanto possível anular dos desequilíbrios é preciso na ação antagonista fazer intervir as correntes das 3 fases, exclusivamente por seus módulos.

Se as correntes estão defasadas umas em relação às outras, é indispensável, para este fim:

- retificar as 3 correntes antes de aplicá-las aos enrolamentos de um mesmo circuito magnético;
- aplicá-las a circuitos magnéticos distintos como mostrado na figura (1.5c)..

A solução mostrada pela figura (1.5b) é bastante frequente em razão da economia que ela proporciona, sendo no entanto menos perfeita.

Todavia é suficiente em inúmeros casos.

É indispensável evitar as fugas magnéticas de um circuito sobre o outro, (portanto evitar a saturação do núcleo de ferro) se temos em vista evitar efetivamente o efeito de fase entre os elementos de operação e retenção.

A característica de funcionamento do relé tipo balança percentual, difere um pouco da reta deslocada da origem mostrada na figura (1.4) por duas razões:

Para valores próximos a $i_R = 0$, para o funcionamento do relé, necessitamos de uma corrente i_0 a fim de vencer o efeito da mola antagonista de retorno. Desta maneira o núcleo magnético do elemento de operação i_0 está na zona de grande permeabilidade (ponto "a" da figura (1.7)), enquanto o núc

magnético do elemento antagonista está em uma zona de baixa permeabilidade magnética (ponto A da figura (1.7)).

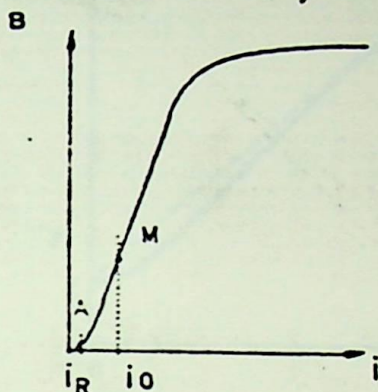


Fig. 1.7 - Curva de magnetização; indução B em função da corrente de magnetização.

A eficiência do enrolamento antagonista é reduzida dentro desta zona, daí o desvio da característica do relé para valores próximos à origem, conforme mostrado na figura (1.8). Para valores mais afastados da origem, a característica de operação do relé retorna a sua posição normal. (próxima à característica teórica, mostrada em linha pontilhada na figura (1.8))

Se ocorrer a saturação dos transformadores de corrente, a eficiência do elemento antagonista novamente diminui, devido ao fato da corrente primária, que i_R representa, ser menor que a corrente primária real.

Por esta razão o diagrama vetorial que representa o funcionamento real do relé, é traçado tendo as correntes primárias, I_0 e I_R , como coordenadas.

Para as aplicações comumente encontradas, alguns fabricantes normalizaram os valores mais representativos, da característica de funcionamento. Assim para um relé de percentagem "n", a ordenada na origem (ponto P da figura (1.8)) está definida em função da calibração do relé (corrente nominal I_n) e da percentagem sendo dada por:

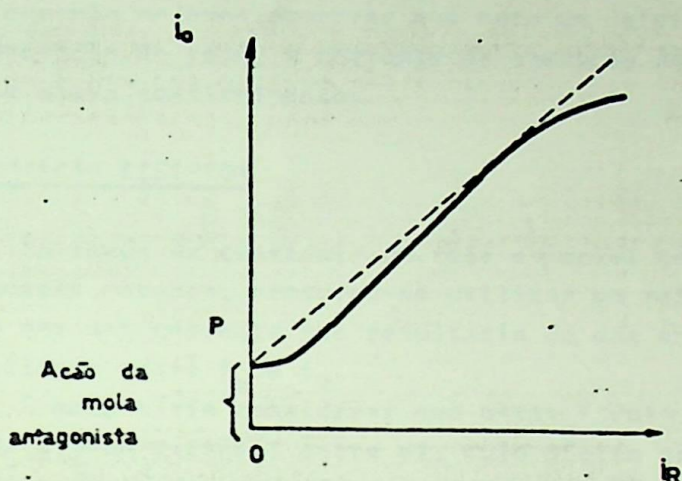


Fig. 1.8 - Característica real de um relé balança percentual (pontilhado aparece a característica teórica).

$$i_0 = n \times I_n \text{ (A)} \quad (1.9)$$

Por exemplo, para um relé calibrado em 5A e com 40% de percentagem:

$$\text{Se } I_n = 0 \quad (1.10)$$

o valor da corrente de operação será:

$$i_0 = \frac{40}{100} \times 5 = 2 \text{ (A)}$$

Enquanto que, para as correntes elevadas, por exemplo uma corrente de retenção igual a 5 vezes a corrente nominal, a corrente mínima de operação do relé será dada por

$$i_0 = \frac{40}{100} \times 5 \times 5 = 10 \text{ (A)}$$

Com este exemplo podemos observar que para um defeito fora da zona de operação do relé, a corrente de operação do relé percentual se eleva sensivelmente.

1.3.2- OPosição ELÉTRICA

Ao invés de construir um relé especial com dois ou mais elementos motores, procurou-se utilizar um relé comum alimentado por uma corrente que resultaria de uma oposição elétrica realizada entre i_0 e i_R .

É necessário considerar que estas duas correntes tem uma defasagem variável entre si, cujo efeito não pode ser desprezado a menos que se efetue a oposição após retificação das mesmas.

A figura (1.9) mostra o esquema de uma balança elétrica equivalente ao esquema da figura (1.5b).

Após passagem nas pontes P_1 e P_2 as correntes de operação e retenção são retificadas, resultando as correntes i_0 e i_R que são aplicadas aos enrolamentos do relé (neste caso um relé de bobina móvel).

As conexões são tais, que o relé é alimentado por duas correntes contínuas de sentido inverso. Na realidade, a corrente contínua emitida por cada ponte passa ao mesmo tempo pelo relé e pela outra ponte, na condição de equilíbrio as duas pontes dão a mesma tensão e a corrente circula apenas pelo relé não havendo erro a temer.

Uma balança elétrica permite uma maior sensibilidade que os relés de balança mecânica pelas seguintes razões:

- a) o relé à corrente contínua tem um pequeno consumo e são alimentados por retificadores de uma dada potência, eles podem ser construídos para uma grande sensibilidade.
- b) os esforços nesses relés são proporcionais, simplesmente às correntes aplicadas e não ao quadrado como nos casos anteriores: a fragilidade de um relé sensível é portanto

menos tenida nesta montagem.

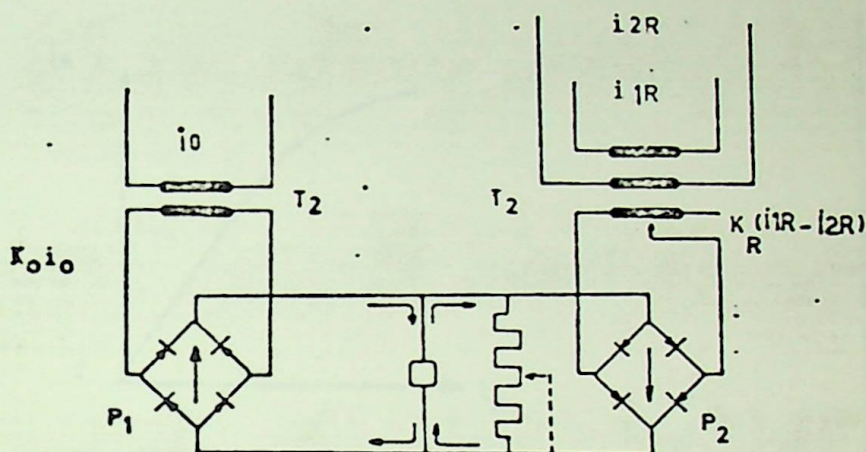


Fig. 1.9 - Relé diferencial tipo balan
ça elétrica (Siemens).

c) sabemos que a resistência interna aparente dos retificados diminui quando a corrente que os percorre aumenta.

Quanto mais intensas as correntes colocadas em jogo maior a proporção de correntes derivadas nas pontes (maiores intensidades), em detrimento do relé. (resistência interna da ponte muito baixa em relação ao relé). Isto proporcionará uma proteção automática aos relés de bobina móvel, sem reduzir a sua sensibilidade às correntes de pequenas intensidades.

Todavia esta vantagem tem seu inconveniente, uma vez que, com intensidades de corrente muito elevada nos redutores, a corrente fornecida por P_2 pode ser considerável. Nesse caso, em virtude da propriedade enunciada anteriormente, uma parte considerável da sua corrente contínua é derivada para P_1 sem passar através do relé que em consequência não é sensibilizado (retido) convenientemente. Razão pela qual a característica de operação do relé se curva para baixo, co

forças intensidades de corrente de retenção (i_R) conforme mostrado na figura (1.10).

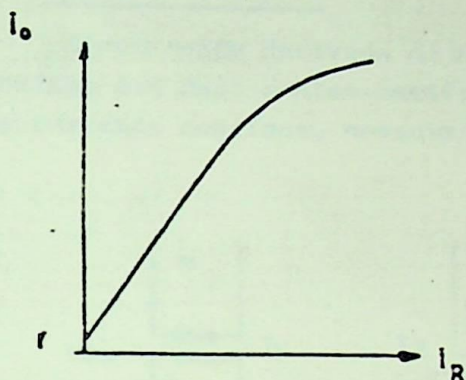


Fig. 1.10 - Característica de operação de um relê tipo balança elétrica.

A balança elétrica apresenta ainda duas vantagens que podem ser úteis para determinadas aplicações:

- A faixa de ajuste do relê tipo balança elétrica é maior que a do relê eletro-magnético.
- A regulação da percentagem de funcionamento pode ser efetuada com maior facilidade, se ao invés de prever tap's no transformador T_2 , conforme mostrado na figura (1.9) ligarmos entre a ponte P_2 e relê de bobina móvel, uma resistência variável, como aquela mostrada na figura (1.9) por linhas tracejadas.

1.3.3- OPosição MAGNÉTICA

Os fluxos magnéticos tendo a mesma fase que as correntes que os originam, a oposição dos fluxos criados por cada uma das correntes é sensível à defasagem das correntes.

Assim a oposição deve ser realizada após retificação das correntes de alimentação.

1.3.3.1- BALANÇA MAGNÉTICA

Diretamente derivada da balança elétrica, ela separa os circuitos das duas pontes retificadoras, figura (1.11) em um relê de corrente contínua, possuindo dois enrolamentos.

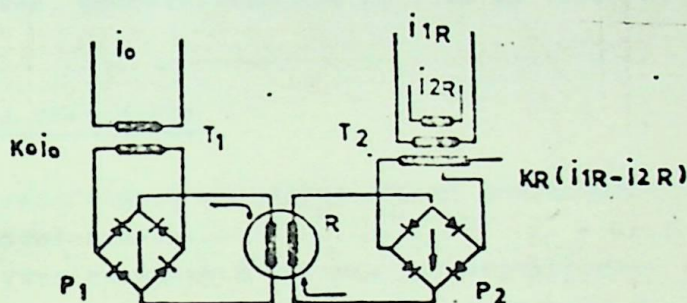


Fig. 1.11 - Relê tipo balança magnética (AEG).

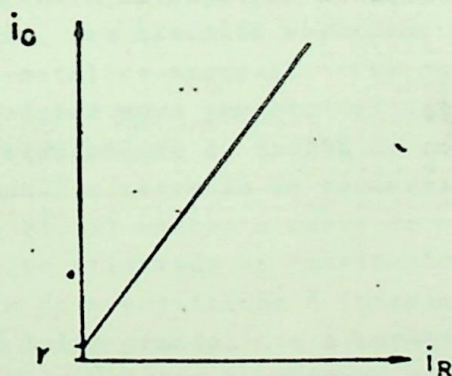


Fig. 1.12 - Característica de operação do relê tipo balança magnética.

As conexões são realizadas de forma que os fluxos sejam subtrativos dentro do relé.

Todo débito de corrente de uma ponte na outra é agora impossível, (caso da redução da resistência dos retificadores com aumento da corrente circulante) a curva característica de funcionamento não apresenta inflexão como no caso da balança elétrica. Como inconveniente temos o fato do relé ser composto de dois elementos móveis o que dificulta sua construção mecânica, tendo ainda menor sensibilidade para correntes de pequena intensidade, comparativamente ao relé do tipo balança elétrica.

1.3.3.2- PELÉ A TRANSDUTOR

Os transdutores são dispositivos aparentemente idênticos aos transformadores.

Seu funcionamento é todavia diferente porque no seu regime normal de funcionamento intervém a saturação do seu núcleo magnético, que procuramos evitar nos transformadores normais.

A fim de utilizar ao máximo as propriedades dos transdutores, no momento da passagem do regime de pequeno fluxo ao fluxo saturado, seu circuito magnético é constituído por chapas de uma liga metálica especial. Ela apresenta uma alta permeabilidade magnética para pequenos valores de fluxo, sua saturação se produz bruscamente a partir de um certo valor de fluxo (indução) quando a corrente de magnetização aumenta.

A figura (1.13) mostra a curva de magnetização do "Ni metal, frequentemente utilizado na construção dos transdutores. Enquanto a corrente de magnetização é inferior a i_s , a permeabilidade do núcleo é muito grande, mas a característica sofre uma mudança brusca para valores superiores a i_s . Para todos os valores de corrente de magnetização superiores a i_s , a indução é constante: o núcleo está saturado. A reatância de qualquer enrolamento montado sobre este circuito magnético é praticamente

nula enquanto subsistir a saturação.

Ao mesmo tempo que, a impossibilidade de variação do fluxo magnético impede qualquer efeito de indução, do enrolamento de excitação sobre uma outra bobina montada no mesmo núcleo.

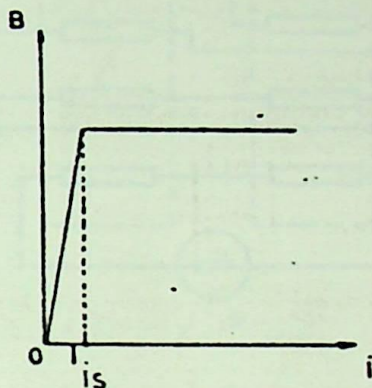


Fig. 1.13 - Curva de Magnetização do Mumetal.

1.3.3.2.1- RELÉ A TRANSISTOR SÉRIE

Neste caso, apresentamos dois exemplos, nas figuras (1.14a) e (1.14b). Um relé apericêntrico comum, de corrente alternada é ligado ao enrolamento terciário de um ou dois transformadores "T" sendo os outros dois enrolamentos alimentados:

- por uma combinação de correntes, dando como resultado a corrente (i_0) de operação.
- outro pela corrente antagonista i_R , retificada e regulada convenientemente.

A fim de evitar as correntes que, (na ausência de saturação) poderiam ser induzidas pela corrente i_0 nos circuitos de corrente contínua (ao detrimentos do relé R) é necessário utilizar, dois transdutores idênticos T_1 e T_2 , (figura 1.14a) cujos enrolamentos correspondentes ao mesmo circuito de

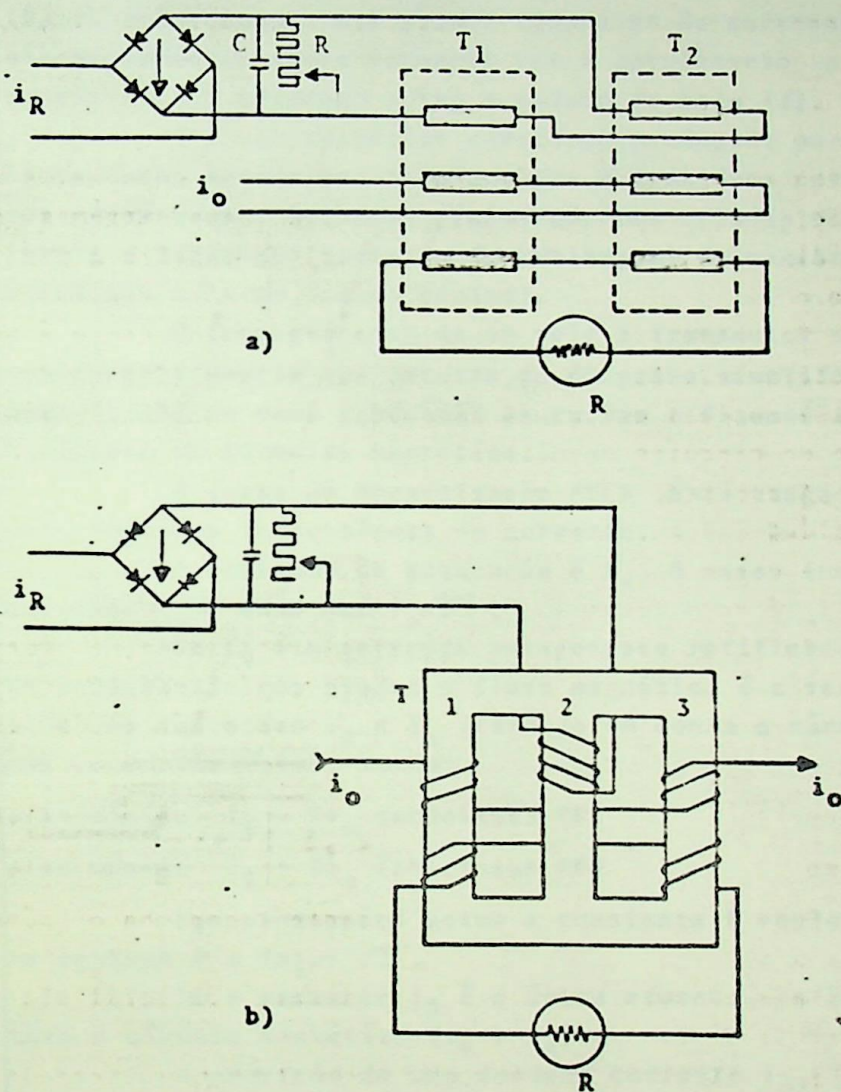


Fig. 1.14 - Relé diferencial tipo transdutor-Série.

corrente alternada são montados em série, enquanto que os enrolamentos de corrente contínua são montados em oposição.

Na figura (1.14b) apresentamos um transdutor T de 3 colunas. Nêsse caso os enrolamentos das colunas extremas (1) e (3) correspondentes aos mesmos circuitos de corrente alternada são montados em série enquanto que o enrolamento a corrente contínua está colocado sobre a coluna do meio (2).

O fluxo magnético constante produzido por esta coluna se fecha metade por cada uma das outras duas colunas. Os fluxos magnéticos alternados produzidos nas colunas extremas são iguais e dirigidos (sentido de bobinagem) de maneira a dar um resultado nulo na coluna central.

O funcionamento de um relê a transdutor série é aproximadamente aquele que decorre do diagrama simplificado da figura (1.15) no qual esboçamos as curvas e fizemos abstração da histerese do circuito magnético.

A curva de magnetização ABCD está traçada para os dois sentidos instantâneos da corrente.

A corrente de saturação é i_s . O valor instantâneo da corrente i_o é dado por $i_o \sqrt{2}$.

Se i_R é a corrente antagonista retificada, a corrente equivalente que produz o fluxo magnético é a resultante da ação das correntes i_R e i_o (tomando em conta o número de espiras do enrolamento), sendo:

$$\text{no mínimo } l_R - K i_o \quad (\text{abscissas OP}) \quad (1.11)$$

$$\text{no máximo } l_R + K i_o \quad (\text{abscissas OQ}) \quad (1.12)$$

Nas expressões acima a constante K engloba o número de espiras e o fator $\sqrt{2}$.

Se a corrente i_R é a única atuante, em geral ela satura o círculo magnético ($i_R > i_s$).

A aparição de uma pequena corrente i_{o1} (alternada) na saída da combinação, dá com i_R , uma resultante ondulada cuja amplitude varia entre $(i_R - K i_{o1})$ e $(i_R + K i_{o1})$. Uma vez que o caso mais desfavorável, a corrente $(i_R - K i_{o1})$ é ainda

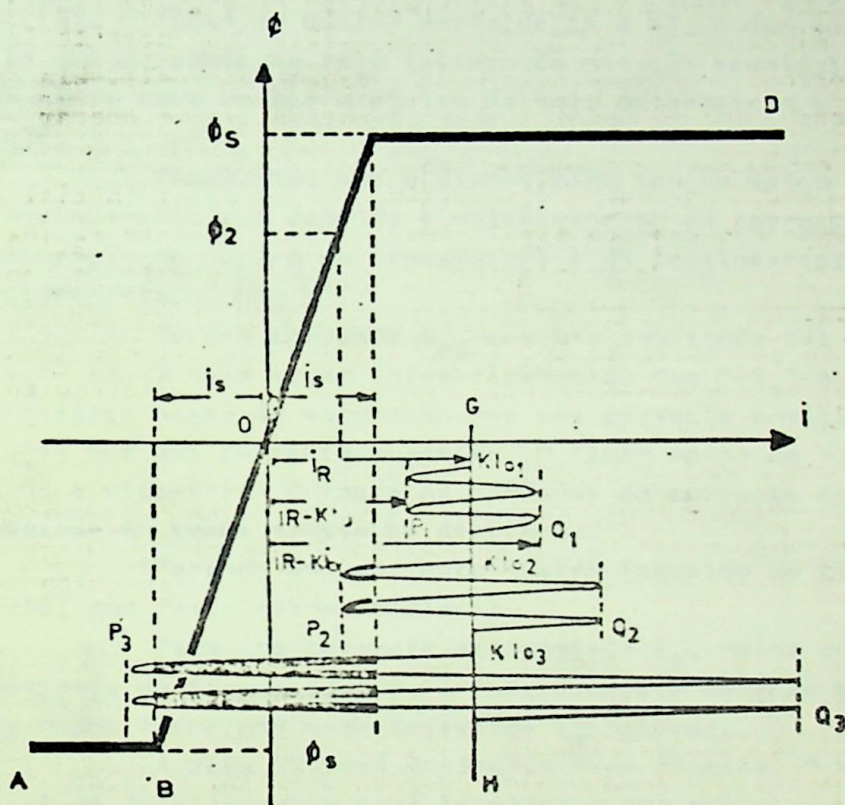


Fig. 1.15 - Característica de operação do relê tipo transdutor sêrie.

superior ao valor de i_s , o circuito magnético ainda se mantém saturado e nenhuma corrente é induzida no circuito do relê.

Se a corrente i_{o2} é maior, tal que a corrente $(i_R - Ki_{o2})$ esteja compreendida entre $-i_s$ e $+i_s$, o núcleo deixa de ficar saturado nos intervalos de tempo correspondentes às porções das senóides tracadas com traço grosso, na figura (1.15). O fluxo no núcleo varia de ϕ_s a ϕ_2 , o que permite induzir uma corrente no relê (alternada mas não senoidal). Ela pode nesse caso vencer o efeito da mola antagonista e operar o relê.

Concluimos que o dispositivo tem um valor inicial de funcionamento que depende simultaneamente da corrente i_R (de saturação do núcleo do transdutor) e do tensionamento da mola antagonista.

Se uma corrente i_{o3} com uma amplitude tal que $(i_R - Ki_{o3})$ seja menor (algebricamente) que $-i_s$, o circuito magnético passa da saturação por uma corrente positiva à saturação por uma corrente negativa. O fluxo passa de $+\phi_s$ para $-\phi_s$ e vice-versa durante os períodos da corrente Ki_{o3} representada em traço grosso no diagrama.

Teremos uma corrente máxima induzida no circuito do relê, que faz o mesmo funcionar.

Para uma corrente antagonista i_R maior que aquela mostrada na figura (1.15), o funcionamento do relê ocorrerá da mesma forma mas para correntes i_o maiores.

A reta GH será deslocada para direita. O valor inicial de funcionamento será igualmente acrescido.

Se i_R é nulo ou bastante menor que i_s , menores correntes i_o induzirão correntes no circuito do relê, sendo o funcionamento função praticamente da mola antagonista.

Concluimos portanto a possibilidade de se conseguir por meio de relês a transdutor série, uma curva característica de funcionamento próxima àquela de um relê tipo balança.

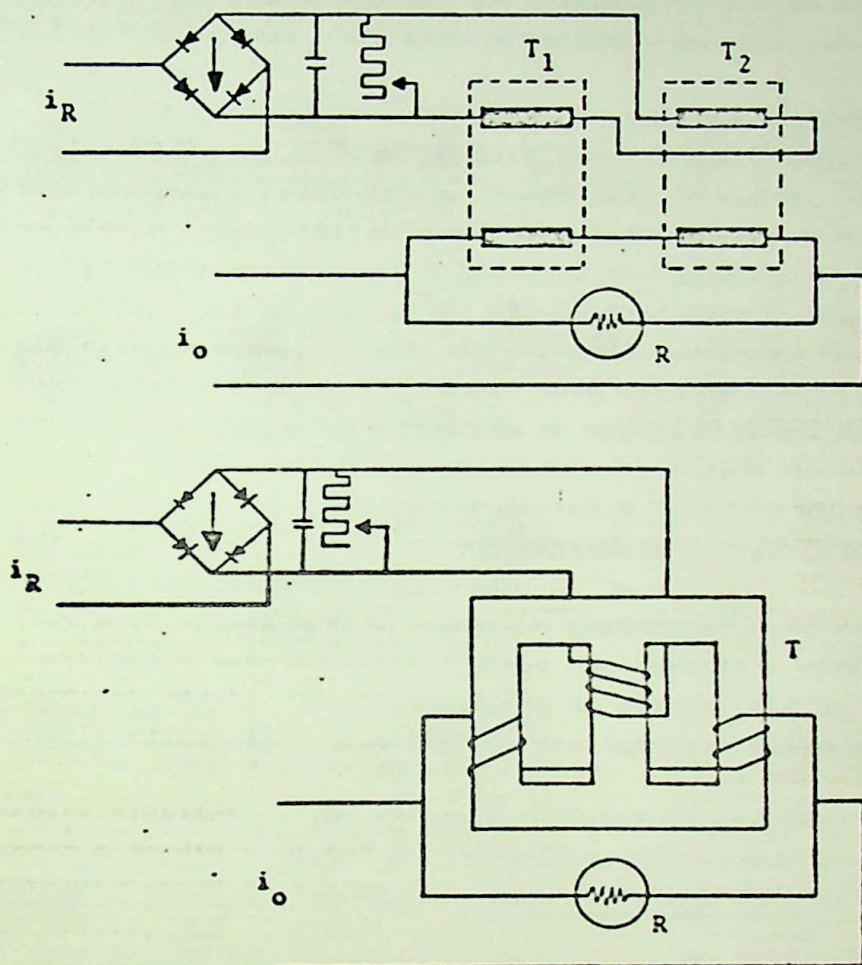


Fig. 1.16 - Relé diferencial do tipo transdutor paralelo.

1.3.3.2.2- RELÉ A TRANSDUTOR PARALELO

Baseado na observação (já enunciada) que a reatância de uma bobina diminui quando seu circuito magnético satura, podemos usar um sistema tal como o mostrado nas figuras (1.16a) e (1.16b).

Os transdutores tem neste caso dois enrolamentos. Um deles é percorrido pela corrente i_p retificada e ajustada, que produz a saturação do núcleo magnético. O outro, percorrido por corrente alternada, é montado em paralelo com o relé, em um circuito pelo qual circula a corrente de operação (i_o).

As mesmas precauções são tomadas para evitar as correntes induzidas no circuito de corrente contínua. Se a corrente antagonista i_p é muito pequena para saturar o núcleo do transdutor, o enrolamento montado em paralelo com o relé passa a ter uma grande impedância e a quase totalidade da corrente i_o passa através do relé antierótico R (relé de corrente alternada). O valor inicial de funcionamento é praticamente fixado pela mola antagonista do relé.

Se a corrente i_p satura o transdutor, por um raciocínio análogo ao anterior, concluímos que durante o período em que ocorre a saturação a impedância do enrolamento do transdutor é muito pequena e o relé fica praticamente curto circuitado.

Se o valor de i_p varia, o valor da corrente i_o suficiente para fazer cessar a saturação também varia, com isto conseguimos uma característica "PERCENTUAL DE FUNCIONAMENTO".

1.3.3.2.3- OBSERVAÇÕES GERAIS SOBRE OS RELÉS A TRANSDUTOR

Convenientemente fabricados, os relés a transdutor permitem a utilização de relés de fabricação normal, pois apresentam características bastante estáveis com o tempo e facilidade de ajuste conforme mostrado nos esquemas anteriores (resistência a cursor).

Apresentam ainda um consumo reduzido. Como inconveniente apresentam um tempo de funcionamento maior, comparados a certos relés tipo balança, em razão da constante de tempo própria dos transdutores (que pode ser elevada).

1.4- AJUSTE E CONSUMO DOS RELÉS PERCENTUAIS

Os relés percentuais são utilizados principalmente para aumentar a sensibilidade aos dispositivos de proteção ba sendos na medida de combinações de corrente nulas em regime normal de funcionamento. O enrolamento de operação, que é percorrido pela corrente i_o , somente se aquece no momento da ocorrência de um defeito.

É suficiente em geral que eles tenham capacidade de suportar durante pelo menos 10 segundos a máxima corrente que pode ser conseguida em um determinado relé.

O enrolamento antagonista é percorrido por i_R , estando sujeito permanentemente à corrente dos transformadores de corrente principais.

Devem ter em princípio uma corrente nominal igual à corrente secundária nominal dos seus transformadores de corrente.

Para um determinado tipo de relé percentual, o consumo é proveniente principalmente do seu enrolamento motor, variando com o quadrado da sua sensibilidade máxima. (Para $i_R = 0$)

Se utilizarmos relés cujo valor inicial de funcionamento para $i_R = 0$ é proporcional à corrente nominal, em uma percentagem igual à de funcionamento, pode-se dizer que o consumo do relé é inversamente proporcional ao quadrado da percentagem.

CAPÍTULO IICIRCUITO DE "MEDICÃO"2.1- ANÁLISE DO CIRCUITO DE "MEDICÃO" DE UMA PROTEÇÃO DIFERENCIAL

Vamos inicialmente fazer uma análise de todo conjunto. O princípio da proteção diferencial está baseado na comparação direta, "da magnitude e do ângulo de fases", das correntes nos extremos de um circuito elétrico, que pode incluir uma linha de transmissão, um gerador, um transformador ou um cabo.

Qualquer alteração no valor da corrente de entrada ou saída deve ser necessariamente causado devido a um defeito ocorrido na zona de proteção e a corrente de desequilíbrio pode ser usada para indicação da falta e desligamento do circuito em questão.

Por esta razão proteção por corrente diferencial combina alta seletividade com mínimo tempo de interrupção.

Uma vez que a comparação das correntes será feita apenas no secundário dos transformadores de corrente o sistema de proteção da forma simples como enunciado acima, só poderá funcionar, se no secundário dos transformadores de corrente, a corrente primária for reproduzida, com toda exatidão. "Esse para os casos de elevadas correntes fluindo através da secção protegida quando da ocorrência de faltas externas à zona de proteção. Foram desenvolvidos processos especiais para diminuir a influência destes erros introduzidos pelos transformadores de corrente.

Uma distorção similar na medição, é comum, por exemplo, no caso dos transformadores reguladores sob carga. Variando deliberadamente, a relação entre a corrente primária e

secundária, dentro de certos limites, sem entretanto fazer a correspondente mudança no circuito secundário dos transformadores de corrente. Havendo necessidade de se promover a estabilização da proteção, a fim de atender situações desta natureza.

A figura (2.1) mostra um diagrama simplificado de uma proteção diferencial.

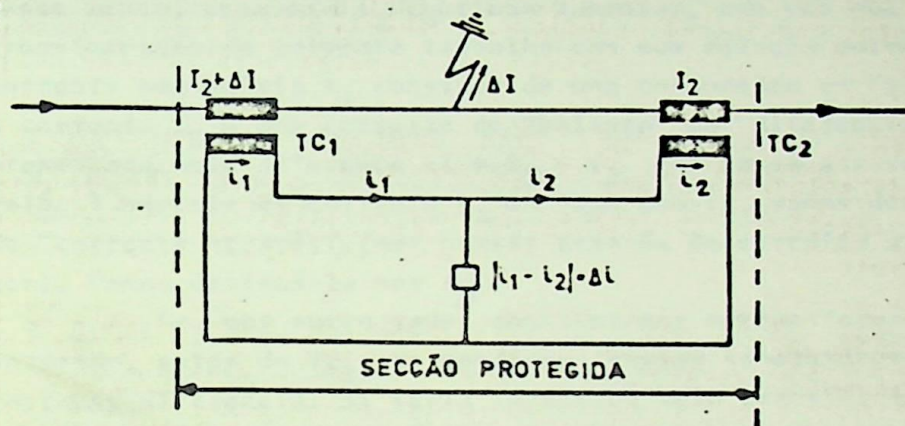


Fig.2.1. Circuito básico de uma proteção diferencial

Dois transformadores de corrente TC1 e TC2 transformam as correntes primárias I_1 e I_2 nas correntes secundárias i_1 e i_2 de igual módulo.

Sob condições normais de carga ou na ocorrência de um curto-circuito externo a relação $I_1:I_2$ será mantida.

Se usarmos transformadores de corrente adequados, as correntes secundárias serão praticamente iguais.

Um relé colocado na diagonal, como mostrado na figura (2.1) é energizado pela diferença entre as correntes, i_1 e i_2 , que é nula em condições normais de serviço. Com uma elevação da corrente proveniente de curto-circuito externo à região de proteção, uma corrente de falta ΔI pode aparecer no secundário sem que a relação $I_1:I_2$ tenha sido alterada. Isto acontecerá

sempre que um ou outro transformador de corrente se apresentar saturado.

Além do ponto de saturação as correntes secundárias i_1 e i_2 deixam de aumentar na mesma proporção que as correntes primárias I_1 ou I_2 .

Admitamos que o transformador de corrente Tc_2 tenha saturado, assim i_2 permanece praticamente constante a partir deste ponto, enquanto i_1 continua aumentando, uma vez que o transformador de corrente trabalha com sua relação correta. A corrente secundária i_1 consiste de uma componente em fase com a corrente i_2 e uma corrente de "balanço" ou "diferencial" representada pela diferença $\Delta i = i_1 - i_2$ que passa através do relê. A parcela da corrente i_1 em fase com i_2 , vamos denominar de "corrente através". (por passar através do circuito a proteger). Vamos designá-la por i_D .

Se, por outro lado, consideramos o transformador Tc_1 saturado, antes do Tc_2 , as condições seriam semelhantes e a corrente diferencial Δi seria fornecida pelo transformador Tc_2 . Para o propósito desta análise vamos considerar que o transformador Tc_2 tenha saturado.

É bastante possível que a corrente " Δi " tenha uma diferença de fase com a corrente i_D (corrente através), anteriormente definida. O ângulo de fase entre i_D e Δi é designado por ψ .

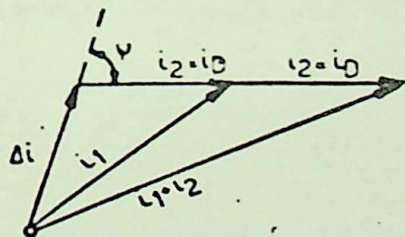


Fig. 2.2. Diagrama vetorial de correntes em circ. diferencial

Na construção do diagrama acima assumimos que i_2 é a menor das duas correntes.

Podemos então escrever as seguintes equações:

$$\begin{aligned} i_2 &= i_n \\ i_1 &= |i_n + \Delta i| \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$|i_1 + i_2| = |2i_n + \Delta i| \quad (2.2)$$

As equações (2.1) e (2.2) devem ser consideradas quando da discussão do problema de estabilização:

- 1- Com um defeito externo a soma geométrica de i_1 e i_2 será sempre maior que a corrente secundária estabelecida por um distúrbio, a qual torna-se perceptível como uma corrente de defeito, isto é:

$$|i_1 + i_2| > \Delta i \quad (2.3)$$

- 2- Com uma falta interna e desprezando a corrente de carga, a corrente de falta atual Δi será sempre maior, ou se o circuito é alimentado por um extremo apenas, no mínimo igual a soma de i_1 e i_2 :

$$|i_1 + i_2| < \Delta i \quad (2.4)$$

Uma simples comparação da soma e diferença geométricas de duas correntes, por meio de um relé sensível a relação entre a soma e diferença seria suficiente para estabelecer um critério para distinguir se a falta ocorreu dentro ou fora da zona protegida. Poderíamos usar neste caso um relé do tipo balança tal como o idealizado por McGill.

No capítulo I, analisamos em detalhe algumas concepções de relés do tipo balança.

Nesse caso duas bobinas atuam, uma de cada lado da balança. Uma das bobinas é percorrida pela soma geométrica das correntes, tendo um efeito retenção enquanto que a outra bobina, sob influência da diferença geométrica das correntes tende a operar o relé.

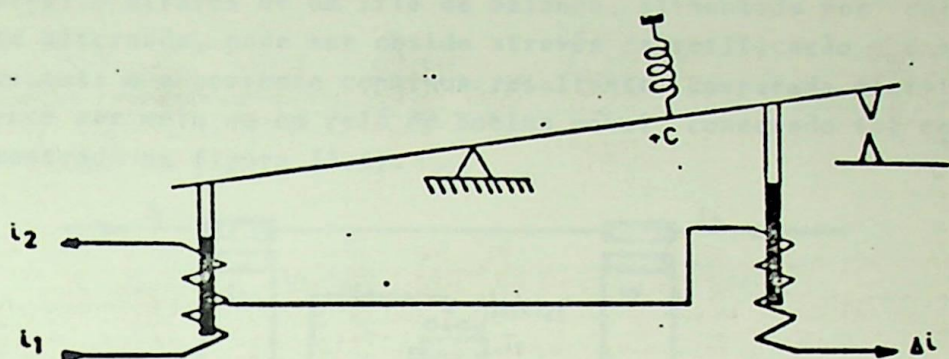


Fig. 2.3. Relé tipo Balança (A.C)

Estes relés conforme tivemos oportunidade de mostrar no capítulo I, receberam a denominação de relés percentuais.

Para se obter uma determinada característica de operação, o efeito de retenção pode ser alterado pela variação do número de espiras, ou a relação entre os comprimentos dos braços da balança.

Outra possibilidade consiste em adantar uma mola restauradora do lado oposto ao mostrado na figura (2.3); tal que o relé mantenha seus contatos fechados em condições normais, e não os abra até que a soma geométrica das correntes seja maior que a correspondente diferença geométrica.

Os relés que usam este tipo de conexão denominam-se: RELES DE RETENÇÃO OU DE BLOQUEIO. A diferença entre um relé "PERCENTUAL" e o de "RETENÇÃO" está somente no sentido da ação da mola. Adotaremos como positivo o sentido da força de mola correspondente ao relé "PERCENTUAL" e negativo no caso do relé de "RETENÇÃO".

A constante C é equivalente a uma corrente que fluindo através do relé, tenha uma intensidade suficiente para vencer a ação da mola.

No capítulo I, mostramos que o mesmo efeito

conseguido através de um relé de balança, alimentado por corrente alternada, pode ser obtido através da retificação das correntes; e a corrente continua resultante comparada eletricamente por meio de um relé de bobina móvel, conectado tal como mostrado na figura (2.4).

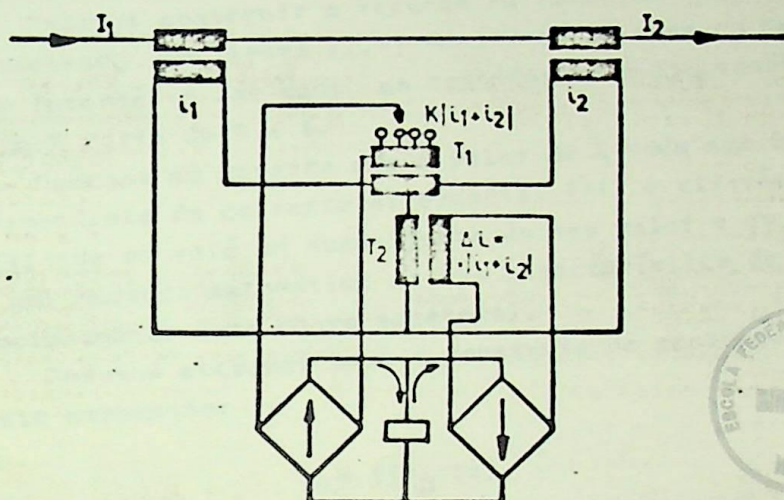


Fig. 2.4. Diagrama básico de um sistema diferencial com relé bobina móvel

No caso do relé mostrado na figura (2.4), a soma geométrica das correntes é obtida no transformador T1, enquanto que no transformador T2 circula a diferença geométrica das correntes: $Ai = |i_1 - i_2|$.

Dependendo, se a soma é maior ou menor que a diferença, a corrente diferencial flue em um determinado sentido através do relé de bobina móvel, fazendo-o fazer contato de um lado ou outro. Também nesse caso introduzimos uma mola restauradora que permite ajustar a sua sensibilidade, sendo a força restauradora considerada na constante $\hat{C}$.

Assim o relé acima, apresenta as mesmas características que o relé de balança, mostrado na figura (2.3).

2.2- FATOR K

O fator K representa a proporção na qual o efeito de retenção do relé é reduzido.

Podemos conseguir a redução da retenção do relé de várias maneiras, na figura (2.4) mostramos um caso em que é feito por intermédio dos taps no transformador T1, sendo que o valor de K varia de 0 a 1.

Veremos no entanto que o valor de K pode ser uma variável dependente da corrente diferencial (I_d) e através (i_n) possibilitando ao relé um auto-ajuste do seu valor e em consequência uma mudança automática na sua característica de operação (funcionamento como chave seletora).

Podemos escrever para a constante de restrição (K) a seguinte expressão:

$$K = f(i_n; I_d) \quad (2.5)$$

2.3- EQUAÇÕES GERAIS DE FUNCIONAMENTO

As relações matemáticas para a condição de funcionamento, ou mais precisamente, para o ponto de equilíbrio do relé, são as seguintes:

a) Para um relé a.c. como o mostrado na fig. (2.3)

$$K(i_1 + i_2)^2 - (i_1 - i_2)^2 \pm C = 0 \quad (2.6)$$

Onde +C se refere a um relé percentual
e -C a um relé de retenção

b) para um relé d.c. como mostrado na fig. (2.4)

$$K|i_1 + i_2| - |i_1 - i_2| \pm C = 0 \quad (2.7)$$

valendo para a constante C a mesma observação que no caso anterior. Substituindo nas equações acima as expressões (2.1) e (2.2), vamos obter as equações fundamentais:

$$a) \quad K(2iD + Ai)^2 - Ai^2 \pm C = 0 \quad (2.8)$$

$$b) \quad K|2iD + Ai| - Ai \pm C = 0 \quad (2.9)$$

sendo ψ o ângulo entre os vetores iD e Ai o módulo da soma geométrica é dado por:

$$|2iD + Ai|^2 = 4iD^2 + 4iD.Ai \cos\psi + Ai^2$$

Substituindo esta expressão nas equações (2.8) e (2.9) podemos expressar o valor de Ai em função da corrente iD , plotando esta expressão vamos obter a característica de operação do relé.

Para uma análise da característica de operação vamos considerar dois valores extremos do ângulo ψ (0° e 90°), os quais determinam as duas curvas limites.

Na análise que faremos não levaremos em consideração a mola restauradora, ou seja, consideraremos $C = 0$, neste caso a curva de operação é idêntica para ambos relés.

Analisemos a característica para os dois casos extremos:

$$I) \quad \psi = 0$$

$$a) \quad K(2iD + Ai)^2 - Ai^2 = 0 \quad (\text{relé a.c.}) \quad (2.10)$$

$$b) \quad K|2iD + Ai| - Ai = 0 \quad (\text{relé d.c.}) \quad (2.11)$$

No caso particular de $C = 0$, ficamos reduzidos a uma única equação.

Sabemos que:

$$|2iD + Ai|^2 = 4iD^2 + 4.iD.Ai \cos\psi + Ai^2$$

para $\psi = 0$; $\cos\psi = 1$

$$|2iD + Ai|^2 = 4iD^2 + 4.iD.Ai + Ai^2$$

$$|2iD + Ai|^2 = (2iD + Ai)^2$$

finalmente $|2iD + Ai| = |2iD| + |Ai|$

Substituindo nas expressões (2.10) ou (2.11):

$$K|2iD| + K|Ai| - |Ai| = 0$$

$$K|2iD| + |Ai|(K - 1) = 0$$

$$|Ai| = \frac{2K}{K-1} |iD| \quad (2.12)$$

nada mais é que a equação de uma reta passando pela origem do sistema de coordenadas.

II) $\psi = 90^\circ$

$$|2iD + Ai|^2 = 4iD^2 + 4.iD.Ai \cos\psi + Ai^2$$

para $\psi = 90^\circ$; $\cos\psi = 0$

$$|2iD + Ai|^2 = 4iD^2 + Ai^2$$

$$|2iD + Ai|^2 = |2iD|^2 + |Ai|^2 \quad (2.13)$$

Substituindo na equação (2.10) ou (2.11) vamos ter:

$$K^2 |2iD|^2 + K^2 |Ai|^2 - |Ai|^2 = 0$$

$$K^2 |2iD|^2 = |Ai|^2 (1 - K^2)$$

finalmente

$$|Ai| = \frac{2K}{\sqrt{1-K^2}} |iD| \quad (2.14)$$

que também é uma reta passando pela origem.

Na figura (2.5) podemos observar as curvas de operação do relé para vários valores do fator K.

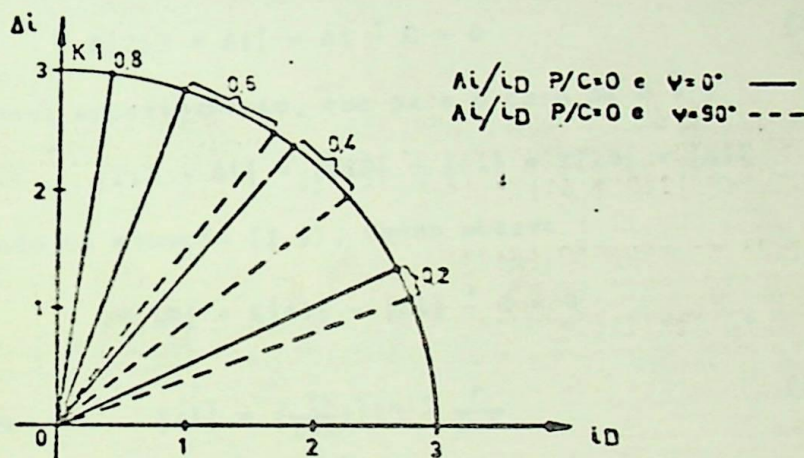


Fig. 2.5. Característica de operação do relé diferencial

Analisando as curvas acima podemos concluir:

- 1) para $iD = 0$ a retenção é máxima.
- 2) para relações iD/Ai grandes, significando portanto elevada corrente através do objeto a proteger, é interessante um elevado valor de retenção, portanto trabalhar com um valor de K apropriado (alto)
- 3) Já para as pequenas relações iD/Ai devemos sensibilizar o relé, ou seja reduzir o valor de retenção.

Podemos notar que todas as condições acima podem ocorrer quando do funcionamento do trecho a proteger, sendo desejável que o próprio relé se adaptasse a cada caso, modificando a sua característica de operação em função da relação ID/AI . Isto é, perfeitamente possível, nos relés semi-estáticos, com o uso de elementos não lineares.

Analisemos as curvas de operação dos relés a.c e d.c, considerando o efeito da mola restauradora, observando agora, que as curvas para os dois relés são bastante diferentes.

III) Vamos estudar em primeiro lugar o relé d.c.

A equação para o ponto de equilíbrio do relé d.c. é:

$$K|2iD + Ai| - |Ai| \frac{1}{1-K} = 0 \quad (2.9)$$

Já mostramos, anteriormente, que para o caso de $\psi = 0$

$$|2iD + Ai| = |2iD| + |Ai| = 2|iD| + |Ai|$$

Substituindo na equação (2.9), vamos obter:

$$2K|iD| + K|Ai| - |Ai| \frac{1}{1-K} = 0$$

Finalmente $|Ai| = \left(\frac{2K}{1-K}\right)|iD| \frac{C}{1-K} \quad (2.15)$

Podemos utilizar também as correntes i_1 e i_2 , substituindo na equação acima os seus valores convenientemente.

Sabemos que: $iD = i_2$

$$Ai = |i_1 - i_2|, \text{ lembrando que, para } \psi = 0$$

$$|Ai| = |i_1| - |i_2|, \text{ vamos ter:}$$

$$|i_1| = |i_2| \left(\frac{1+K}{1-K}\right) \frac{C}{1-K} \quad (2.16)$$

As curvas representativas são mostradas nas figuras (2.6) e (2.7):

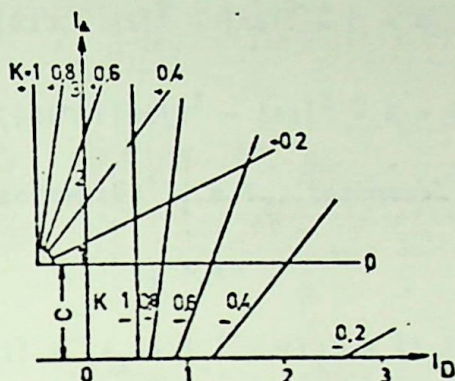


Fig. 2.6 - Relé d.c - $\psi=0$, $C=1$; K =variável.
+C= relé percentual; -C=relé retenção.

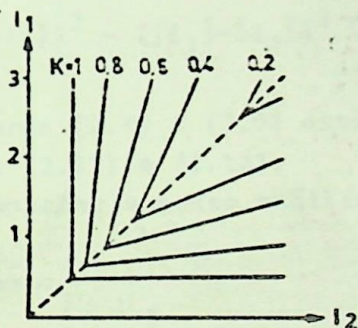


Fig. 2.7 - Relé d.c - $\psi=0$; $C=1$; K = variável.
-C = relé de retenção.

1°) Para o relé a.c. teríamos:

A equação do equilíbrio é $K(2I_0 + A_i)^2 - |A_i|^2 \pm C = 0$ (2.º)
para $\psi = 0$

$$|2I_0 + A_i| = 2|I_0| + |A_i|$$

Substituindo na equação (2.9), teremos:

$$K^2 |2iD + Ai|^2 - |Ai|^2 \pm C = 0$$

$$K^2 (|2iD| + |Ai|)^2 - |Ai|^2 \pm C = 0 \quad (2.17)$$

ou em termos das correntes i_1 e i_2 , teremos:

$$i_2 = iD$$

para $\phi = 0 \quad |Ai| = |i_1 - i_2| = |i_1| - |i_2|$

$$K^2 (2|i_2| + |i_1| - |i_2|)^2 - (|i_1| - |i_2|)^2 \pm C = 0$$

$$K^2 (|i_1| + |i_2|)^2 - (|i_1| - |i_2|)^2 \pm C = 0 \quad (2.18)$$

Nas figuras (2.8) e (2.9) estão as curvas representativas das equações (2.17) e (2.18).

Para completar a nossa análise, vamos examinar o caso em que $\phi = 90^\circ$.

Nesse caso:

$$|2iD + Ai| = \sqrt{4iD^2 + 4iD \cdot Ai \cos\phi + Ai^2}; \quad \cos\phi = 0$$

$$|2iD + Ai| = \sqrt{|2iD|^2 + Ai^2} \quad (2.13)$$

v) relê t.l.c.

Equação geral: $K|2iD + Ai| - |Ai| \pm C = 0 \quad (2.9)$

Substituindo na equação (2.9) a expressão (2.13) vamos obter:

$$K \sqrt{|2iD|^2 + |Ai|^2} - |Ai| \pm C = 0 \quad (2.19)$$

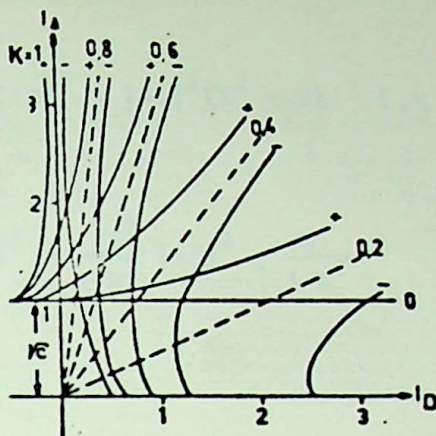


Fig. 2.8 - Relé A.c - $\psi=0$; $C=\pm 1$; K =variável
 $+C$ = relé percentual; $-C$ =relé de retenção

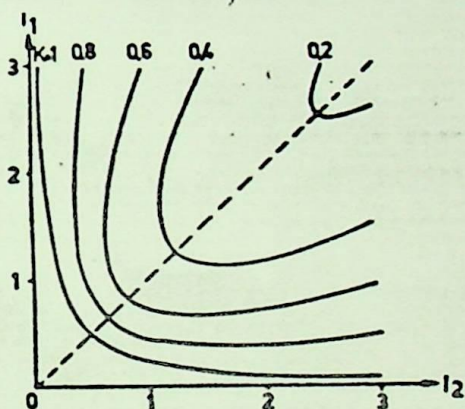


Fig. 2.9 - Relé A.c - $\psi=0$; $C=\pm 1$; K =variável
 VI) Relé a.c.

$$\text{Equação geral: } K(2i\Gamma + \Delta i)^2 - |\Delta i|^2 \pm C = 0 \quad (2.8)$$

Substituindo em (2.8) a expressão (2.13):

$$K^2(A|i\eta|^2 + |\Delta i|^2) - |\Delta i|^2 \pm C = 0$$

$$4K^2|i\eta|^2 + K^2|\Delta i|^2 - |\Delta i|^2 \pm C = 0$$

$$4K^2 |iD|^2 + |\Delta i|^2 (K^2 - 1) \pm C = 0$$

nalmente:

$$|\Delta i|^2 = \frac{4r^2}{1-K^2} |iD|^2 \pm \frac{C}{1-K^2} \quad (2.20)$$

OBSERVAÇÕES

- 1- Comparando as curvas de operação dos relés, podemos notar que, nas curvas onde consideramos o efeito restaurador, como acontece na prática, existe um valor mínimo de corrente A_i para operação do relé.
Este valor mínimo é importante para a operação com pequenas correntes.
- 2- As curvas considerando o efeito restaurador, mostram também a dependência entre o valor do fator K e da relação A_i/i_D .
- 3- As curvas $i_1 = F(i_2)$ apresentam uma simetria em relação a uma reta a 45° e passando pela origem, devido à possibilidade de intercâmbio entre i_1 e i_2 , o que está em perfeita concordância com as hipóteses iniciais.

2-4- ÂNGULO ψ

Na figura (2.2) apresentamos um diagrama vetorial no qual aparece o ângulo ψ , caracterizando um deslocamento angular entre a corrente A_i e a corrente i_D através do objeto a proteger.

Devemos dizer que o ângulo ψ , representa uma característica da porção de um circuito elétrico a proteger.

Para o caso de defeitos fase-terra, o ângulo ψ representa o deslocamento angular entre Z_0 , impedância de sequência zero e Z_1 , impedância de sequência positiva do circuito em questão.

Podemos ainda dizer que o ângulo ψ abaixo de 90° é característico de sistemas aterrados, onde Z_1 e Z_0 ainda mantêm seu caráter indutivo.

O caso do ângulo $\psi > 90^\circ$, praticamente só ocorreria em um sistema com ponto neutro isolado onde a impedância homopolar passa a sofrer influência da capacitância da linha enquanto que para os sistemas direto e inverso prevalece o

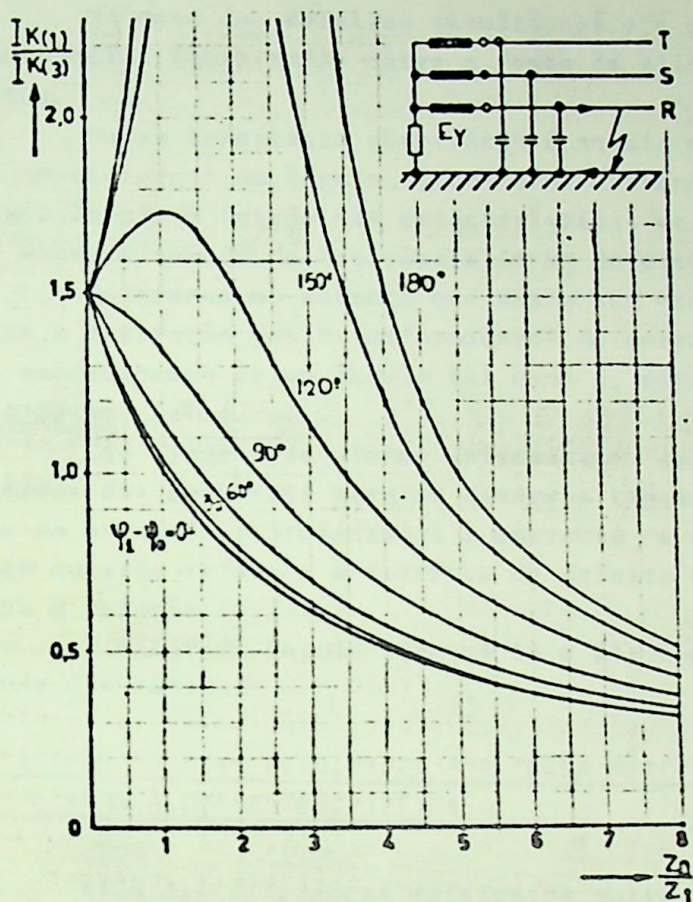


Fig. 2.11 - Corrente de curto circuito fase-terra

(I_{K1}) comparada com a trifásica (I_{K3})

Z_0 = impedância homopolar do sistema

Z_1 = impedância sequência positiva

Z_1 = impedância sequência negativa

$\phi_1 - \phi_0$ = defasamento entre as impedâncias Z_1 e Z_0

caráter indutivo.

No caso dos defeitos simultâneos ϕ é o ângulo entre as impedâncias localizadas entre a fonte de alimentação e os defeitos.

Outra importante observação é aquela que diz respeito ao aparecimento do ângulo ϕ , conforme dissemos anteriormente, este ângulo é função das características do sistema e somente aparece quando da ocorrência de um defeito.

Lembramos no entanto que mesmo sem ocorrência de um defeito a saturação dos transformadores de corrente pode causar o aparecimento de um ângulo tal como ϕ , simulando a ocorrência de uma falta.

Nas figuras seguintes apresentamos as curvas representativas das correntes para os diversos tipos de falta, sendo que em ordenada representamos a corrente de defeito para o caso em questão referida à corrente de defeito trifásico e na abscissa a relação Z_0/Z_1 .

O valor do ângulo ϕ (entre Z_0 e Z_1) é mostrado sobre cada uma das curvas.

2-5- CARACTERÍSTICAS REQUILIBRADAS DOS RELÉS DIFERENCIAIS OPERADOS À CORRENTE CONTÍNUA

Além das diferenças existentes entre as características de operação dos relés diferenciais d.c e a.c, o tipo d.c, equipado com retificadores e relé bobina nôvel, possui algumas características que não podem ser extendidas aos relés a.c. Dentre estas podemos destacar:

2.5.1- MÉTODO DE INTRODUÇÃO DO FATOR DE REDUÇÃO K

No item 2.2 onde analisamos o fator K, o mesmo era mudado através da variação do número de espiras do transformador responsável pelo somatório das correntes $|i_1 + i_2|$, ou na variação da relação entre os braços da alavanca no relé a.c

Quando as correntes retificadas são comparadas este fator pode ser facilmente introduzido, através de uma resistência ôhmica colocada no circuito do relê, que também proporciona um método conveniente para variação do "FATOR K".

No circuito mostrado na figura (2.12), o trip é conseguido sempre que a corrente "ib" suplante o efeito da força de mola c.

A soma $|i_1 + i_2|$ é composta, de uma parte a qual flui através de r_1 e uma outra parte i_b , que é contrariada pela corrente Δi .

Assim da figura (2.12) podemos escrever que:

$$|i_1 + i_2| = i_a + i_b \quad (2.21)$$

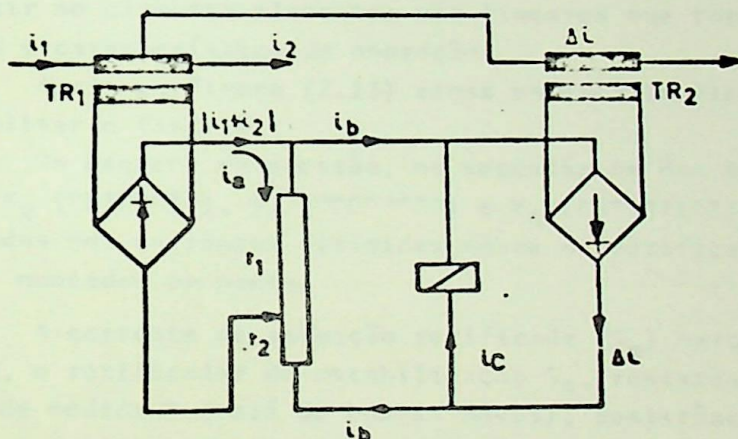


Fig. 2.12. Determinação do fator de redução

$$\text{Fator de redução } K = \frac{r_1}{r_1 + r_2}, \text{ no lado d.c.}$$

$$i_a = i_b + i_c \text{ ou } i_b = \Delta i - i_c. \quad (2.22)$$

$$\frac{i_a}{i_b} = \frac{r_2}{r_1} \quad i_a = i_b \frac{r_2}{r_1} \quad (2.23)$$

Por outro lado,

$$ib + ia = ib + ib \frac{r_2}{r_1} = |i_1 + i_2|$$

$$ib(1 + \frac{r_2}{r_1 + r_2}) = |i_1 + i_2| \quad (2.24)$$

Podemos concluir que $(\frac{r_1}{r_1 + r_2})$ desempenha um papel análogo ao fator de redução K anteriormente tratado.

Assim o fator K pode ser variado através de taps do resistor, enquanto que os dois transformadores TP_1 e TP_2 são perfeitamente iguais.

Além da possibilidade da variação do "FATOR K " através da resistência como mostrado no circuito acima, podemos introduzir no circuito elementos não lineares que tornam mais versátil a característica de operação.

Assim na figura (2.13) temos um exemplo ilustrativo para analisar o fator K .

No esquema em questão, os secundários dos transformadores X_R (RETENÇÃO), X_O (OPERAÇÃO) e X_S (ESTABILIZAÇÃO) são percorridos por correntes dirigidas sobre os retificadores G_R , G_O e G_S , montados em ponte.

A corrente de retenção retificada (G_R) percorre pela ordem, o retificador de estabilização G_S , resistência r_3 , elemento de medida D (relê de bobina móvel), resistência r_2 e retorna ao retificador G_R . Sendo que neste caso a corrente percorre o elemento de bobina móvel no sentido de bloqueio.

A corrente de operação fornecida pela ponte G_O vai percorrer o elemento de medida D em sentido contrário provocando portanto a sua operação.

A característica de operação é composta de 3 partes, na região a, com $(i_1 + i_2)$ variando de 0 a 0,5 In, a corrente diferencial necessária para entrada em funcionamento é

constante e igual ao ajuste básico "g".

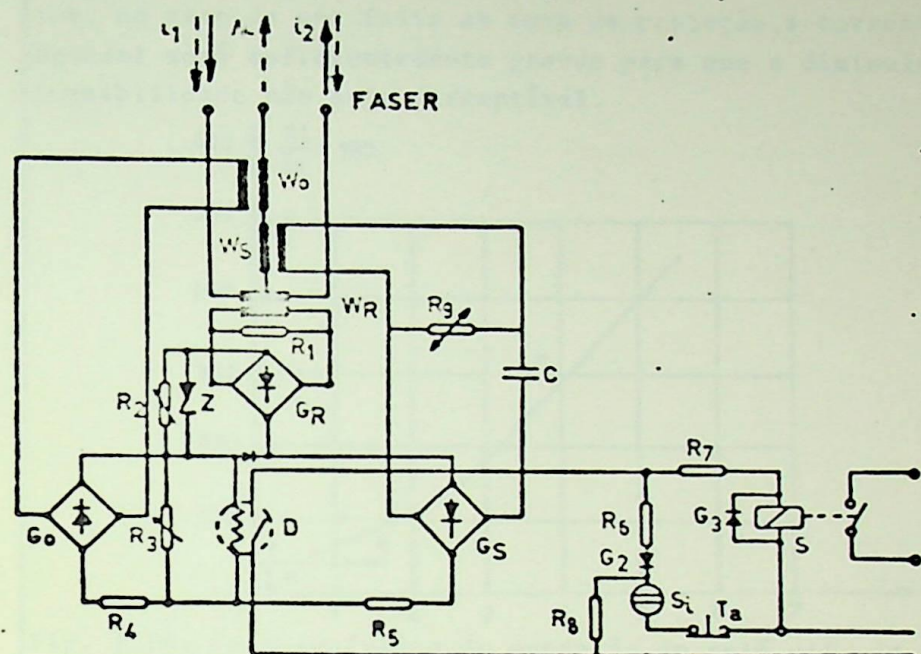


Fig. 2.13. Relé diferencial tipo D2 (BBC)

Entende-se por ajuste básico "g" ao valor da corrente diferencial ΔI em % da corrente nominal, para $(i_1 + i_2)$ igual a zero, capaz de operar o relé.

Na região "b" compreendida entre $(i_1 + i_2)$ igual a 0,5 até 2,5 vezes a corrente nominal, a corrente necessária para funcionamento aumenta.

Nesta região o valor da corrente de operação do relé é determinado através da relação de funcionamento v , que nada mais é, que a relação $\Delta I / I_N$ em % da corrente nominal. Na figura (2.14) caracterizada pelo ângulo α .

Finalmente na região c, para $(i_1 + i_2)$ acima de 2,5 I_N a característica é ainda mais inclinada, reforçando o efeito de retenção (aumentamos o valor de K). Assim conseguimos uma máxima sensibilidade para pequenas correntes (região a), nas regiões b e c temos uma diminuição da sensibilidade a fim de compensar os erros dos transformadores de corrente

para o caso de uma falta fora da zona de proteção, enquanto que, no caso de uma falta na zona de proteção, a corrente diferencial será suficientemente grande para que a diminuição da sensibilidade não seja perceptível.

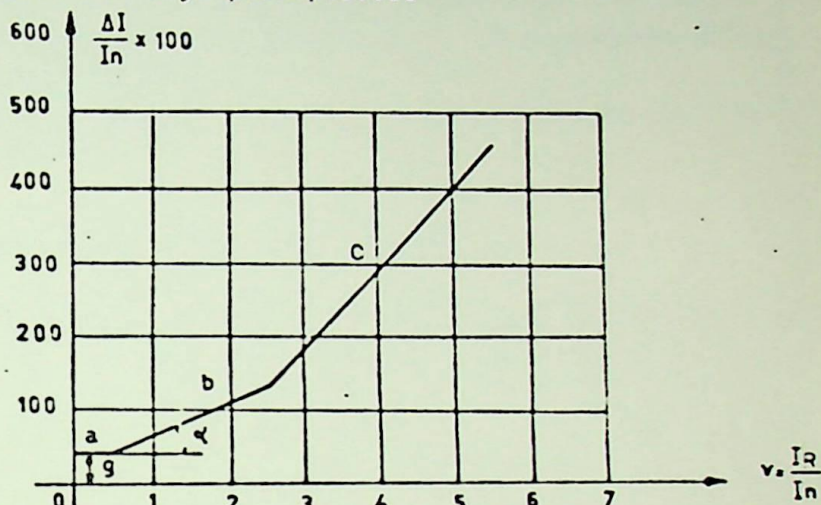


Fig. 2.14. Característica de operação do relé dif. da fig. 2.13

Esta característica de operação é conseguida da seguinte forma:

Na região "a", a corrente de retenção é bastante reduzida com auxílio da resistência R_1 , enquanto que a totalidade da corrente diferencial atravessa o dispositivo de medida.

O ajuste do valor básico de operação é feito através da resistência R_3 . A partir do instante em que a tensão através de R_1 atinge a tensão de condução das pontes G_p e G_c , a corrente de restrição começa a agir, no sentido de bloquear a operação, entramos então na região "b" de operação. A influência da corrente de bloqueio é ditada pela relação de funcionamento v , ajustada por meio da resistência R_2 .

A partir do momento em que a tensão através da resistência R_2 atinge o valor da tensão de condução do diodo Zener colocado em paralelo com a mesma, esta é curto-circuitada e a totalidade da corrente de retenção passa a agir (isto

significa, na nossa análise, $K = 1$).

Com este exemplo real ilustramos a possibilidade do emprego de resistência, no lado d.c do relé, para calibração e variação do Fator K, bem como emprego de elementos não lineares para obtenção de uma característica de funcionamento dependente da relação Ai/Id .

As demais partes do sistema serão estudadas posteriormente.

2-5-2- CARACTERÍSTICA COMPOSTA DE OPERAÇÃO

Tanto quanto possível uma característica de operação bastante inclinada é sugestiva para um relé percentual a fim de possibilitar a saturação dos transformadores de corrente. Isto pode ser no entanto uma desvantagem uma vez que o valor da corrente Ai , atinge valores elevados antes que a corrente atinja o seu valor nominal. Assim precisamos de uma característica que satisfaça as duas condições de funcionamento. Uma solução pode ser aquela utilizada no exemplo no item anterior. No entanto poderíamos partir para uma solução através da composição da característica de operação de dois relés. Uma solução satisfatória pode ser obtida com auxílio de um relé retenção, (força de mola -c).

Usaríamos um relé de corrente normal, o qual operaria com um valor constante da corrente diferencial (em geral 33% de I_n). Sempre que a corrente de retenção ($i_1 + i_2$) ultrapassar ao valor de retenção, o relé abre seus contatos e assim impede a operação do relé de corrente.

Na figura (2.15) apresentamos o esquema correspondente ao caso em questão.

A característica de operação resultante é mostrada na figura (2.16).

Observamos que, para uma corrente através da orden de 1,50 vezes a corrente nominal, o relé diferencial mantém

seu contato (1-2) fechado sendo a característica definida pelo relê de sobre-corrente normal.

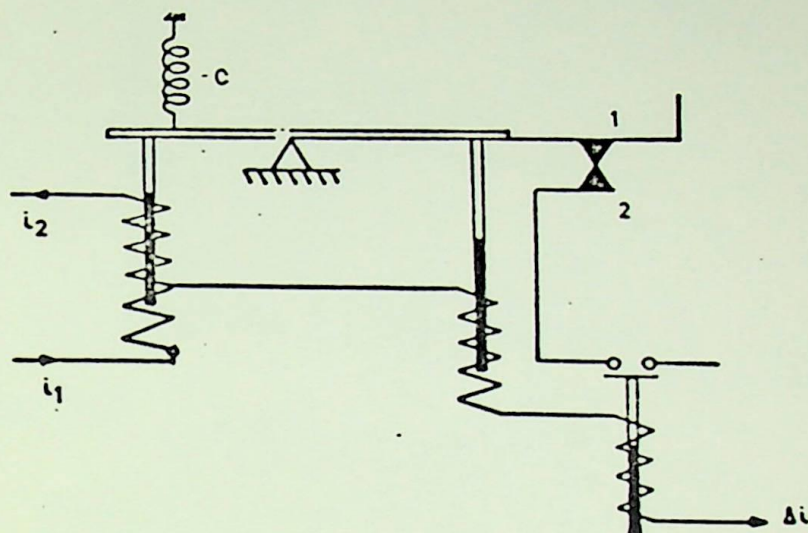


Fig. 2.15. Ação conjunta de dois relês para obtenção de uma característica de operação.

Com corrente superior a 1,50 vezes a nominal o relê diferencial mantém seu contato (1-2) aberto, impedindo o trip através da operação do relê de corrente.

A partir deste ponto a característica passa a ser definida pelo próprio relê diferencial.

Na figura (2.16) apresentamos a característica resultante. Se utilizarmos um relê diferencial a.c., necessitamos dois relês para obtenção da característica.

No entanto o mesmo efeito pode ser conseguido de uma maneira mais simples quando utilizamos um relê operado por corrente contínua.

Na figura (2.17) apresentamos o esquema de um relê operado por d.c., no qual o efeito desejado pode ser conseguido utilizando-se uma resistência r_2 , dependente da tensão e apresentando um alto valor de resistência para baixa tensão e

decrecendo rapidamente a partir do ponto em que a tensão, te nha atingido um valor pré-determinado. (Vide exemplo da figura (2.13)).

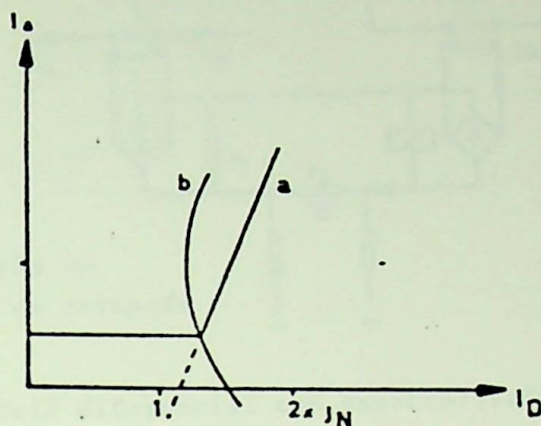


Fig. 2.16 - Característica de operação combinada.
a = relê de retenção d.c
b = relê de retenção A.c

Uma outra forma eficaz de se conseguir uma característica tal como a da figura (2.16), é mostrada na figura (2.17), onde uma corrente contínua constante percorre a resistência r_2 , de valor constante. Sendo gerada na resistência r_2 uma f.c.e.m., que é impedida de atuar sobre o relê, pelo diodo n_1 .

Enquanto a queda de tensão devido a corrente $(i_1 + i_2)$ através do resistor r_1 for menor que "e", não teremos corrente de retenção circulando através do relê.

No entanto a partir do momento que $|i_1 + i_2| \cdot r_1$ exceder ao valor de "e", circulará pelo relê em sentido contrário a corrente de operação a corrente de retenção, obtemos assim uma característica de funcionamento mostrado pela figura (2.16).

Notamos ainda que o método acima descrito nada mais é que outra forma de variação do fator K.

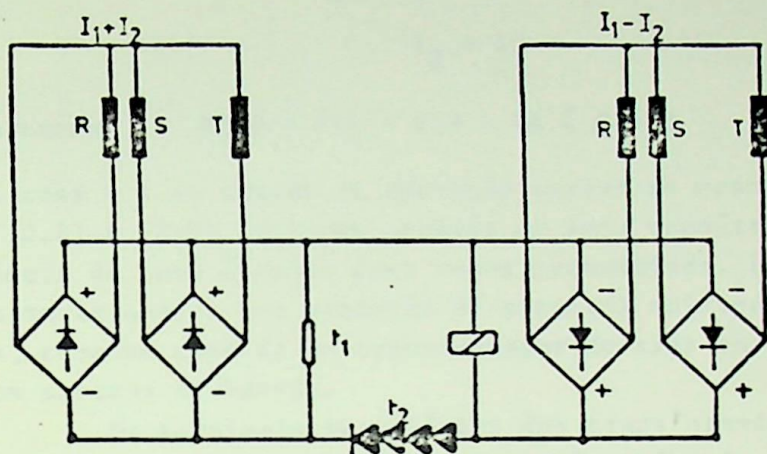


Fig. 2.18. Relé diferencial trifásico com relé de bobina móvel e r_2 com característica não linear

2-5-4- SOMATÓRIO ARITMÉTICO DANDO UMA PROTEÇÃO DIFERENCIAL MULTIPOLAR

Este caso é bastante importante, principalmente quando uma proteção multipolar é requerida, como no caso do enrolamento terciário de transformadores e sistemas de barras.

Nas análises anteriores, utilizamos a soma geométrica (vetorial) de i_1 e i_2 para retenção. O mesmo efeito pode ser conseguido pela retificação das correntes i_1 e i_2 , separadamente e somando a corrente contínua assim obtida. Assim resulta uma soma aritmética de acordo com a equação:

$$K(i_1 + i_2) - (i_1 - i_2) \pm C = 0$$

$$K(i_2 + i_1 - i_2) + Ki_2 - (i_1 - i_2) \pm C = 0$$

Sabemos ainda que:

$$|i_1 - i_2| = A_i$$

$$i_2 = i_D$$

$$\text{Resultando: } K(i_D + A_i) + K i_D - i_A \pm C = 0 \quad (2.25)$$

Para $\cos\psi = 1$ as curvas de operação seriam as mesmas das figuras (2.8) e (2.9), obtidas através de soma geométrica. A influência do $\cos\psi$ é neste caso menos pronunciada. Este fato é importante quando uma proteção diferencial multipolar é requerida, como no caso de um transformador de três enrolamentos ou um sistema de barras.

Os terminais secundários dos transformadores de corrente, pertencentes a uma mesma fase são todos levados a um mesmo ponto ao qual, o transformador de retenção é conectado ($|i_1 - i_2|$). Após retificação das correntes individuais a soma das correntes contínuas representariam a corrente fluindo através de todo o sistema em questão, não importando quantas linhas são agrupadas.

O fator de redução K é determinado por resistores diretamente no relê (vide figura (2.12)).

O relê simples necessitaria assim de ser suplementado por uma combinação de alguns pequenos transformadores e retificadores, os quais fornecem a sua corrente contínua diretamente do circuito de retenção.

Estabilização seria neste caso igualmente efetiva para cada saída.

Na figura (2.19) apresentamos o diagrama de um relê diferencial trifásico com relê de bobina móvel.

2-5-5- SENSIBILIDADE E TEMPO DE OPERAÇÃO

Um enrolamento curto-circuitado sobre a bobina móvel, do relê operado por corrente contínua, proporciona uma

maneira simples de amortecimento.

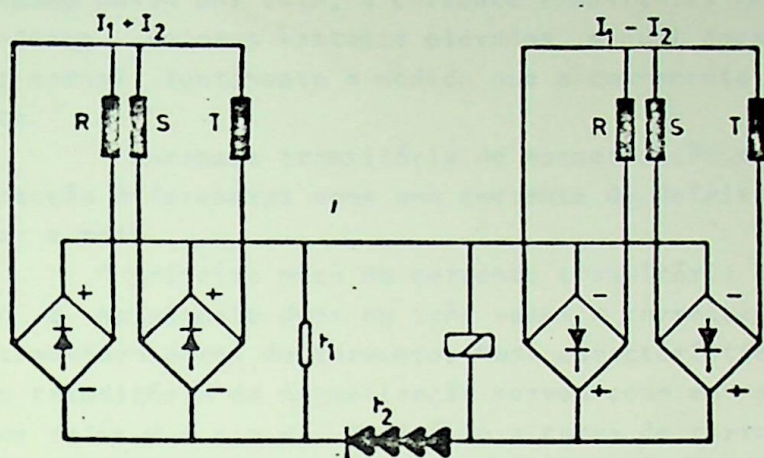


Fig. 2.19. Diagrama de um relé diferencial trifásico

O tempo de operação se tornaria assim uma função da corrente diferencial, isto é, seria menor para altas correntes diferenciais que para pequenas correntes.

As correntes transitórias de curta-duração no secundário dos transformadores de corrente, as quais podem se originar quando disjuntores são inadvertidamente fechados sobre um curto-circuito existente, permaneceriam assim sem efeito. (Curto fora da zona de proteção).

2-5-6- INSENSIBILIDADE AOS SURTOS DE MAGNETIZAÇÃO DOS TRANSFORMADORES DE POTÊNCIA

A velocidade de resposta e a característica própria de operação dos relés d.c. são, sem qualquer providência especial, suficiente para se manter insensível aos surtos de magnetização dos transformadores de potência.

Quando o transformador é energizado no instante em que a onda de tensão passa por zero, a corrente transitória de magnetização atinge valores bastante elevados, a qual decai ao seu valor normal, lentamente a medida que a componente d.c. desaparece.

A corrente transitória de magnetização se apresenta à proteção diferencial como uma corrente de defeito, tendendo a operar o relé.

O primeiro pico da corrente transitória de magnetização é geralmente duas ou três vezes a corrente nominal dos transformadores de corrente. Duas características da corrente transitória de magnetização servem como comparação entre os relés d.c e a.c. No início a curva de corrente está colocada inteiramente de um lado do eixo, não se apresentando senoidal, mas deformada.

Os relés d.c são sensíveis apenas ao valor médio aritmético da corrente. Este valor aumenta em menor proporção que o valor médio quadrático. (Valor eficaz). Com transformadores normais, por exemplo, a relação do valor eficaz para o valor aritmético da corrente transitória de magnetização excede de 2 : 1.

Os relés a.c respondem ao valor eficaz da corrente, isto é, já no primeiro pico se os relés são rápidos.

Os relés d.c no entanto são operados por uma força que é proporcional a área sob a curva de corrente. No entanto este valor médio aritmético é apenas ligeiramente maior que o valor de operação (normalmente da ordem de 20% In), e o relé ainda não operaria uma vez que sua velocidade de operação é dependente da corrente.

Quando adicionamos às condições anteriores, o consumo bastante baixo, o qual é uma característica inerente de qualquer circuito que use relés d.c, os circuitos de proteção diferencial com retificadores e bobina nôvel aparecem como dispositivos de proteção cuja simplicidade e eficácia

dificilmente podem ser suplantados.

2-5-7- RELÉ COM RETIFICAÇÃO DA GRANDEZA DE INFLUÊNCIA

A maioria dos exemplos até agora tratados foram baseados em relés com retificação da grandeza de influência.

Procuraremos dar ênfase a este tipo de relé devido a sua importância. Os relés com retificação da grandeza de influência são conhecidos de longa data, mas somente depois do grande desenvolvimento experimentado pela técnica dos semi-condutores durante os 15 últimos anos é que os mesmos conseguiram se impor.

Os relés com retificação da grandeza de influência ocupam uma posição intermediária entre os relés eletro mecânicos e os relés eletrônicos. Na realidade eles possuem componentes eletrônicos, tais como diodo, resistências, condensadores, mas a conversão da grandeza de medida em um sinal se realiza ainda eletro-mecanicamente por meio de um dispositivo de medida de bobina móvel.

A principal diferença é devido ao fato de que o elemento de bobina móvel faz sua medição através de uma integração dos valores médios lineares, enquanto que um relé eletrônico é capaz de medir os valores instantâneos. Assim por exemplo a grande velocidade de funcionamento dos relés eletrônicos não pode ser atingida pelos relés de bobina móvel devido ao seu tempo de integração.

No entanto os relés de bobina móvel são mais rápidos que os eletro-mecânicos devido a pequena massa da bobina móvel.

Basicamente o elemento de medida se compõe de um ímã permanente, uma bobina móvel e um contato. Uma das principais características do relé de bobina móvel é a sua sensibilidade, como exemplo, poderíamos dizer que alguns fabricantes conseguem elementos cuja corrente de colocação em funcionamento é de 50 μ A, com bobinas de 500 Ω correspondendo a uma potência consumida de 1,25 μ W, podendo se chegar até uma potência de 1,0 μ W.

CAPÍTULO III

APLICAÇÃO DOS RELÉS DIFERENCIAIS

Os relés diferenciais normais e percentuais estudados anteriormente, são aplicados para a proteção de diversos componentes de um sistema elétrico.

Podemos agrupar a proteção diferencial da seguinte maneira:

- a) Proteção diferencial longitudinal: feita através da comparação das correntes no início e final, da secção protegida.
- b) Proteção diferencial transversal: através da comparação de corrente em circuitos paralelos.
- c) Proteção diferencial de barras agindo através do somatório das correntes aplicadas a cada uma das barras do sistema.

Vejamos como são caracterizados cada um dos sistemas de medição citados.

3-1- PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES

A proteção diferencial de transformadores é um caso típico de proteção longitudinal.

Podemos ter dois ou, em caso mais complexo, três terminais para comparação de combinação de correntes.

Na figura (3.1) apresentamos o caso de uma proteção diferencial para dois terminais.

A proteção diferencial de transformadores requer uma série de precauções características, tais como, grupo de conexão do transformador, corrente de magnetização (INRUSH).

Os problemas inerentes à proteção diferencial dos

transformadores, serão estudados no capítulo seguinte.

Na figura (3.1) apresentamos um esquema de proteção diferencial para um transformador Y/ Δ .

Devenos chamar atenção para o fato que o relé diferencial deve desconectar o transformador completamente do sistema. Consequentemente, um relé auxiliar associado, opera ambos disjuntores simultaneamente.

O esquema em questão mostra ainda a proteção de reatuarda feita por relés de sôbre-corrente.

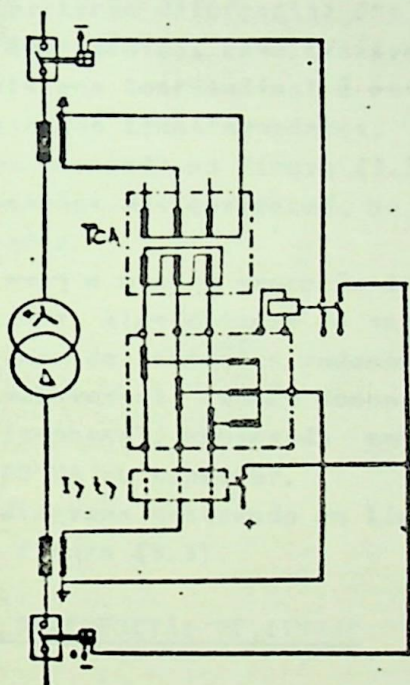


Fig. 3.1. Proteção diferencial de dois terminais

Os princípios aplicados para os transformadores de dois enrolamentos são também válidos para transformadores de múltiplos enrolamentos, com auxílio de um dispositivo para comparação das correntes.

O relé diferencial causa a operação de todos os disjuntores. Na figura (3.2) podemos observar um diagrama básico para proteção diferencial de um transformador de 3 enrolamentos.

3-2- PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE GERADORES

Na proteção diferencial dos geradores aplicamos tanto o sistema longitudinal como transversal.

O sistema longitudinal é em tudo análogo aquele empregado no caso dos transformadores.

Como mostrado na figura (3.3) o relé faz a comparação das combinações das correntes, no lado dos terminais e do neutro do gerador.

É comum o uso da proteção diferencial do bloco gerador-transformador, além daquela do gerador.

No caso de geradores podemos encontrar uma proteção diferencial transversal, também denominada proteção de fase dividida (split-phase), empregada em geradores com potência da ordem de 100 MVA ou superior.

Um diagrama mostrando em linhas gerais as conexões é mostrado na figura (3.3).

3-3- PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE LINHAS

No caso das linhas de transmissão vamos encontrar também, os dois tipos, longitudinal e transversal.

a) A proteção diferencial longitudinal das linhas de transmissão está limitada a seções de pequena extensão.

A comparação das combinações das correntes nos extremos da seção protegida é conseguida, com um condutor

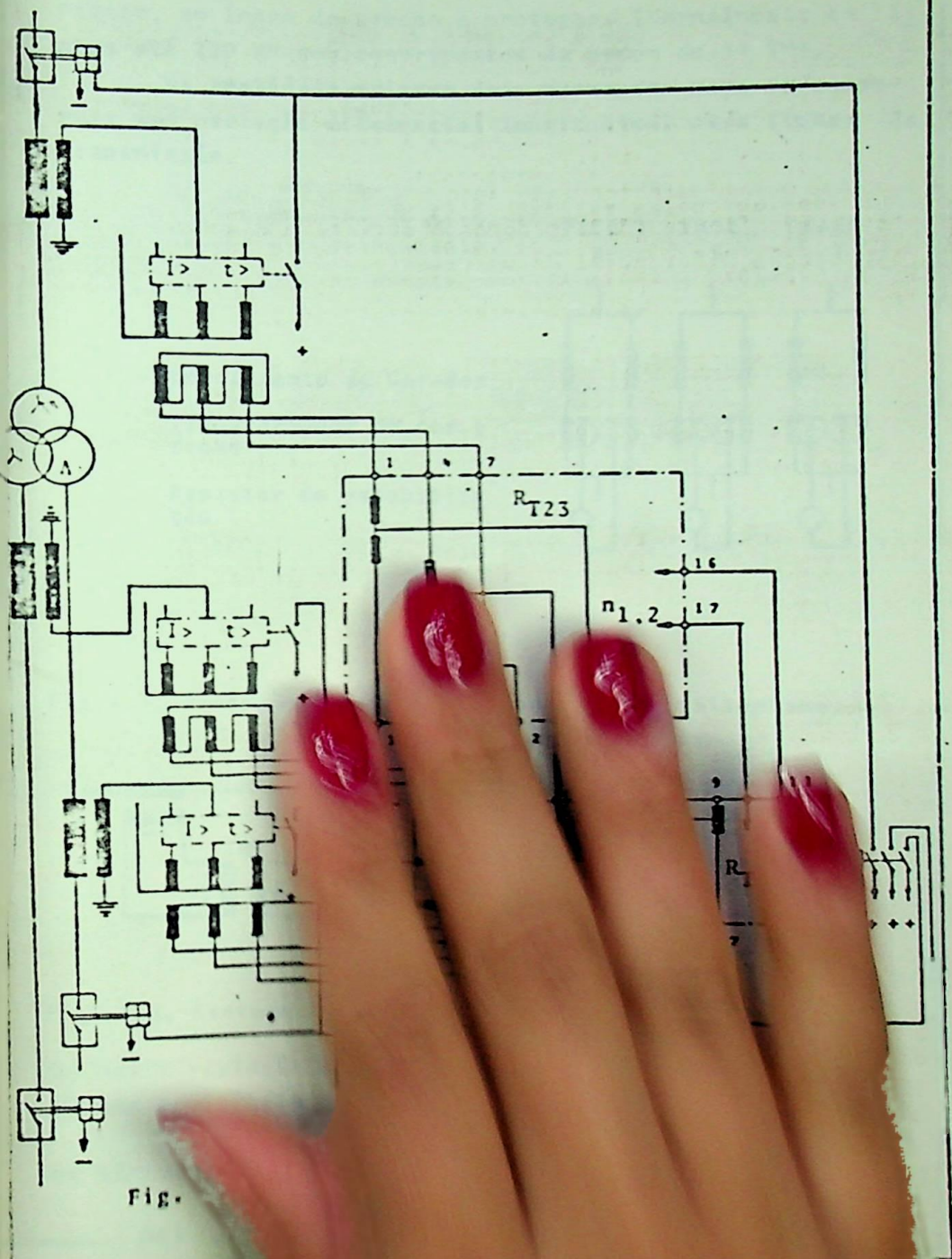


Fig.

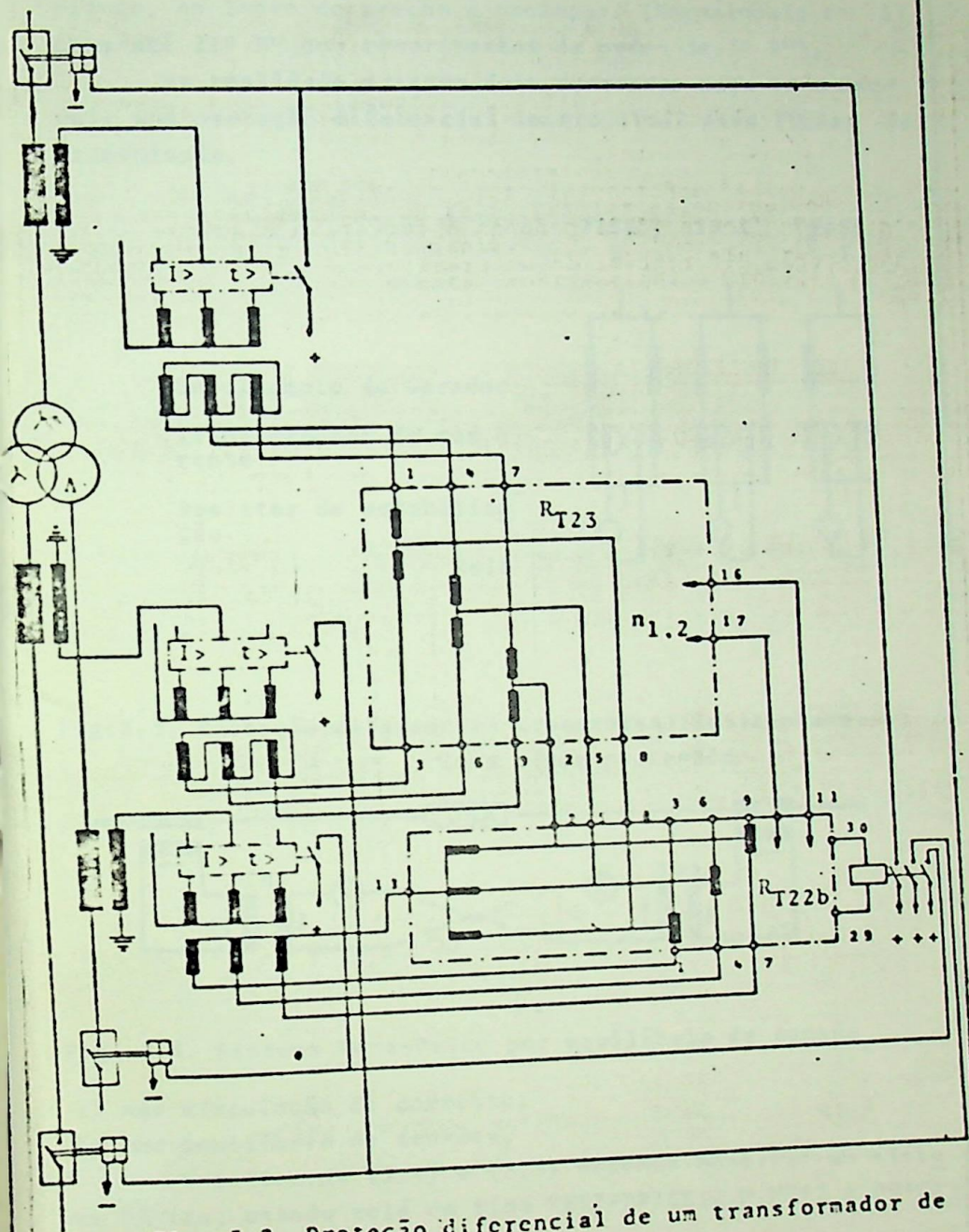


Fig. 3.2. Proteção diferencial de um transformador de 3 enrolamentos

Eng. Ademir C. Guimarães

piloto, ao longo do trecho a proteger. (Normalmente em linhas até 220 KV com comprimentos da ordem de 30 Km).

Na realidade existem dois processos para se conseguir uma proteção diferencial longitudinal para linhas de transmissão.

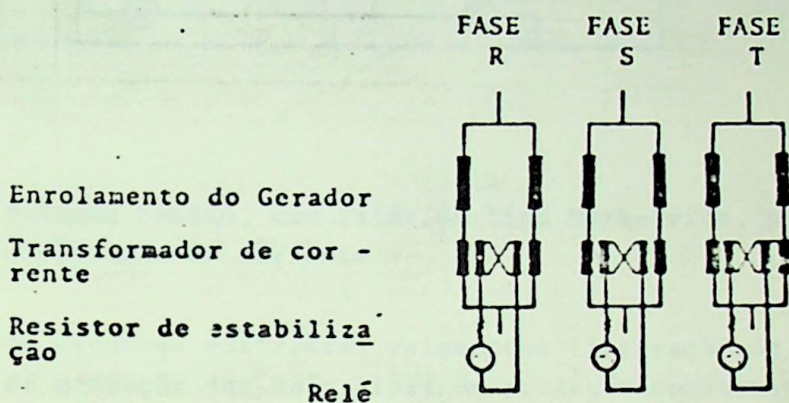


Fig:3.3. Proteção diferencial transversal (Split-phase)
Zona a ser protegida

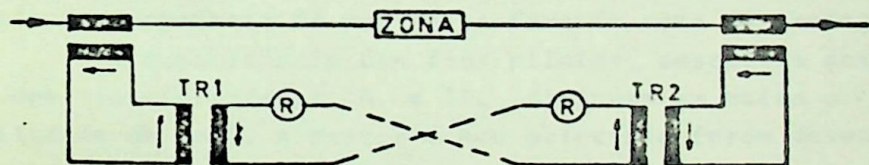


Fig. 3.4. Sistema Merz-Price por equilíbrio de tensão.

- a) por circulação de corrente;
- b) por equilíbrio de tensões.

Nas figuras (3.4) e (3.5) podemos observar um sistema básico, usando relê do tipo MERZ-PRICE (C.H. MERZ e PRICE).

Zona a ser protegida

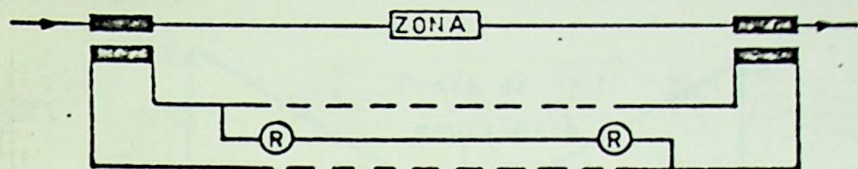


Fig. 3.5. Sistema básico, com relés do tipo Merz-Price, por circulação de corrente

Os esquemas mostrados, valem como ilustração do princípio de operação dos dois tipos de proteção comumente empregados.

O exemplo da figura (3.4) é baseado na transformação linear corrente/tensão (princípio, ainda usado, nos mais modernos dispositivos de proteção), através dos transformadores TR_1 e TR_2 , conectados de tal forma que a tensão de saída nos terminais dos fios pilotos estejam em oposição quando da ocorrência de uma falta fora da zona de proteção.

A capacitância dos fios pilotos, associada aos êrros dos transformadores TR_1 e TR_2 , diminuem em muito a sensibilidade do relé. A partir deste princípio foram desenvolvidos sistemas mais perfeitos.

Outro sistema encontra-se ilustrado na figura 3.5 nêsse caso para uma falta externa à zona de proteção, o relé está conectado a pontos equipotenciais, não havendo portanto circulação de corrente entre os relés, o mesmo não ocorre para uma falta situada dentro da zona de proteção, quando a diferença de potencial existente poderá dar origem a uma corrente de operação dos relés.

A figura (3.6) ilustra o caso de uma falta fora da zona de proteção.

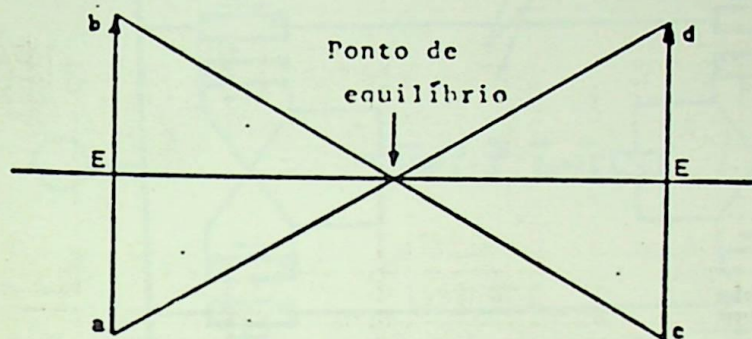


Fig. 3.6. Distribuição de potencial correspondente ao relê da Fig.(3.5) para uma falta externa

b) Proteção diferencial transversal para linhas:

A proteção diferencial transversal (direcional) é o mais simples dos tipos de proteção de alta-velocidade para proteção de linhas de transmissão que operam em paralelo. Podendo ser estabelecida em qualquer dos terminais das linhas em questão.

O princípio deste sistema de operação está ilustrado esquematicamente.

Pelo esquema de princípio mostrado na figura (3.7) podemos concluir que sob condições normais ou na presença de um curto-circuito fora da zona de proteção, a corrente secundária das linhas em paralelo, são iguais em magnitude e direção(fase).

Por esta razão resulta, uma corrente nula através do relê, circulando corrente somente pelos transformadores de corrente.

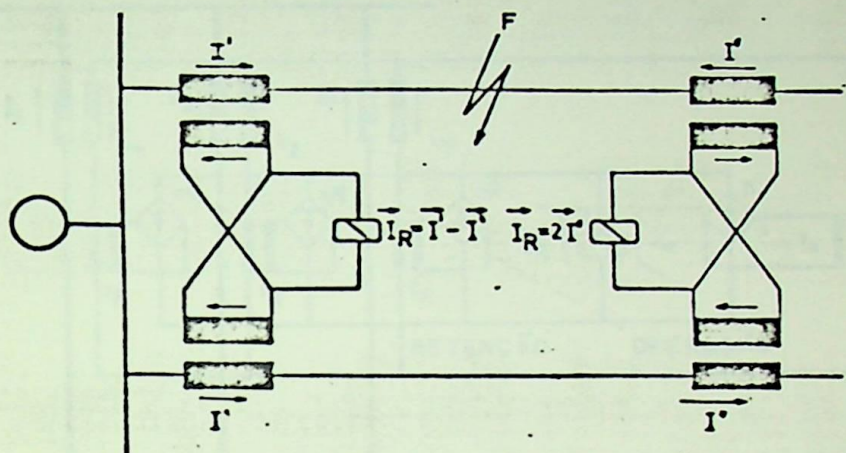


Fig. 3.7. Esquema básico de uma proteção diferencial transversal de linhas.

3.4- PROTEÇÃO DIFERENCIAL COMBINADA DE BARRAS

A experiência tem mostrado que um curto-circuito em um barramento pode ter sérias consequências para operação do sistema de potência.

Se o desligamento da falta é incerto, a tensão básica de outras importantes subestações pode não ser mantida nos níveis desejados.

A figura (3.8) mostra o esquema de princípio da proteção diferencial para barramento.

A corrente de estabilização ou retenção é obtida a partir dos transformadores intermediários fR , e retificada através das pontes nR , a corrente d.c. é somada algebricamente pela conexão paralela, fornecendo a corrente de retenção:

$$i_R = |i_1| + |i_2| + \dots + |i_n|$$

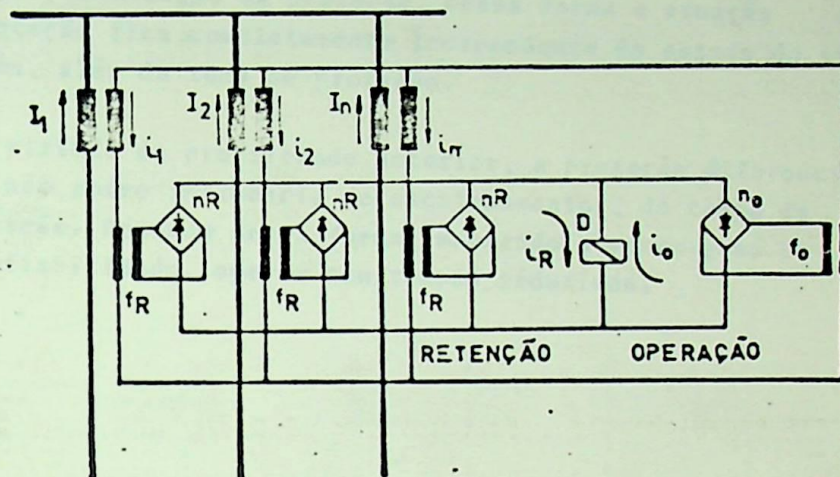


Fig. 3.8. Proteção diferencial para barramentos

O transformador intermediário f_R reduz a corrente a um valor menor que o transformador f_0 . Assim no caso de ocorrer um curto-circuito na zona de proteção, (mesmo que alimentado em um único sentido) a corrente de operação i_0 é maior que a corrente de retenção i_R e o relé "D" opera. A proteção é perfeitamente estável para um defeito fora da zona de proteção.

CONCLUSÕES

- 1- Da exposição efetuada concluímos que a proteção diferencial pode ser aplicada a todos os componentes de um sistema de potência.
- 2- O princípio básico é sempre o mesmo e consequentemente suas propriedades estendidas a cada caso.

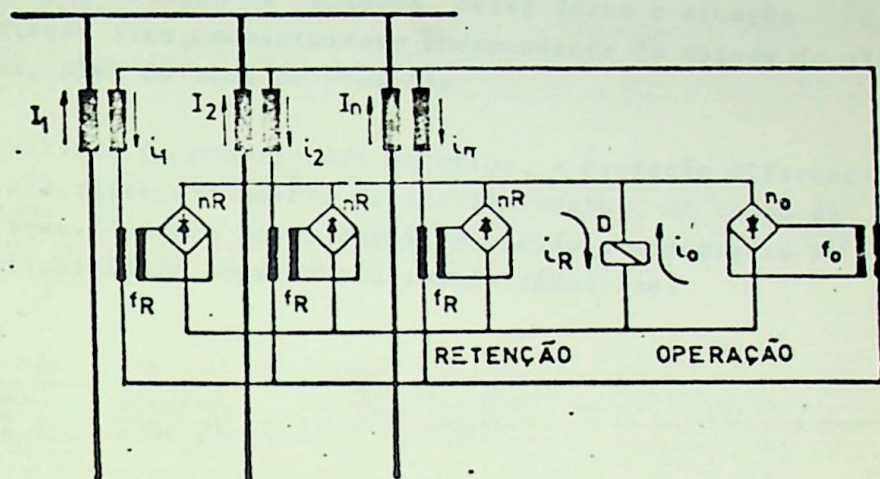


Fig. 3.8. Proteção diferencial para barramentos

O transformador intermediário f_R reduz a corrente a um valor menor que o transformador f_O . Assim no caso de ocorrer um curto-circuito na zona de proteção, (mesmo que alimentado em um único sentido) a corrente de operação i_O é maior que a corrente de retenção i_R e o relé "D" opera. A proteção é perfeitamente estável para um defeito fora da zona de proteção.

CONCLUSÕES

- 1- Da exposição efetuada concluímos que a proteção diferencial pode ser aplicada a todos os componentes de um sistema de potência.
- 2- O princípio básico é sempre o mesmo e consequentemente suas propriedades estendidas a cada caso.

- 3- Pode-se observar em todos os casos uma zona definida e fechada de atuação da proteção. Dessa forma a atuação da proteção fica completamente independente do estado do sistema, além da zona de proteção.
- 4- Em virtude da propriedade anterior, a proteção diferencial não sofre influência de escalonamentos, do tempo de operação. Podendo desta forma, mantendo o mesmo grau de confiabilidade, operar com tempos reduzidos.

- 3- Pode-se observar em todos os casos uma zona definida e fechada de atuação da proteção. Dessa forma a atuação da proteção fica completamente independente do estado do sistema, além da zona de proteção.
- 4- Em virtude da propriedade anterior, a proteção diferencial não sofre influência de escalonamentos, do tempo de operação. Podendo desta forma, mantendo o mesmo grau de confiabilidade, operar com tempos reduzidos.

CAPÍTULO IV

PROTEÇÃO DIFERENCIAL PARA TRANSFORMADORES

4-1- GENERALIDADES:

A proteção diferencial, para transformadores é uma das formas de proteção mais efetivas, e normalmente empregada para transformadores de potência igual ou superior a 2500 KVA.

A zona de proteção fica limitada àquela definida pelos transformadores de corrente, e para qual a proteção garante um desligamento restrito.

A proteção diferencial requer para o seu correto desempenho, uma série de precauções. Razões pelas quais em certos países, principalmente no caso da França, prefere-se a aplicação de um outro tipo de proteção, chamada massa-cubra. No entanto, podemos afirmar que, satisfeitas as condições para o correto funcionamento da proteção, o seu desempenho é de grande confiabilidade.

As condições a serem estabelecidas a seguir são necessárias para possibilitar ao relé uma atuação realmente efetiva, para condições normais de funcionamento e que podem se apresentarem aos terminais do relé como uma falsa informação de um defeito.

Os relés mais modernos, além de possuírem estabilização para os casos acima, possuem um atenuamento da sua sensibilidade para cada tipo de defeito.

4-2- ESTABILIZAÇÃO DA PROTEÇÃO

Passaremos a analisar todos fatores que influem sobre a proteção diferencial não devendo, entretanto, causar a atuação da mesma.

Em alguns casos a solução está incorporada ao próprio relê, através de um dos seus circuitos internos; em outros casos, tem que ser obtida através de conexões externas ao relê.

É importante ressaltar que a insensibilização do relê para condições de falsos defeitos, não deve, em hipótese alguma, promover tal situação para os casos de defeitos.

Dentre os casos que necessitamos promover a estabilização da proteção podemos apontar:

- 4-21. Estabilização devido a corrente transitória de magnetização (IMPUSH).
- 4-22. Estabilização devido a corrente de magnetização de regime permanente.
- 4-23. Estabilização devido a variações da tensão do sistema (variação da corrente de magnetização).
- 4-24. Estabilização devido ao fato dos transformadores protegidos, possuírem comutação de tap's (principalmente no caso de comutação automática sob carga).
- 4-25. Estabilização da proteção para defeitos fora da zona de proteção.
- 4-26. Estabilização devido as grandes correntes de defeito fora da zona de proteção (saturação dos transformadores de corrente).

4-2 - ESTABILIZAÇÃO DEVIDO A CORRENTE DE "MAGNETIZAÇÃO DE INRUSH"

Antes de mais nada devemos caracterizar a corrente transitória de magnetização(Inrush).

Suponhamos que vamos aplicar a um transformador, com secundário aberto, sua tensão nominal. Se o secundário está aberto, podemos tratar o transformador como um reator com núcleo de aço silício.

Nestas condições a equação diferencial do circuito pode ser escrita da seguinte forma:

$$e = Ri + N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (4.1)$$

onde:

e = valor instantâneo da tensão aplicada.

i = valor instantâneo da corrente.

R = resistência do enrolamento.

ϕ = valor instantâneo do fluxo através do enrolamento primário.

N_1 = número de espiras do enrolamento primário.

Devemos ainda considerar que, devido à saturação não existe proporcionalidade entre a corrente e o fluxo, a partir de um determinado valor deste.

A equação (4.1) pode ser escrita:

$$\text{Em } \sin(\omega t + \alpha) = Ri + N_1 \frac{d\phi}{dt} \quad (4.2)$$

A solução desta equação diferencial se apresenta bastante difícil, uma vez que se trata de uma equação não linear (relação entre ϕ e i é não linear: curva de magnetização)

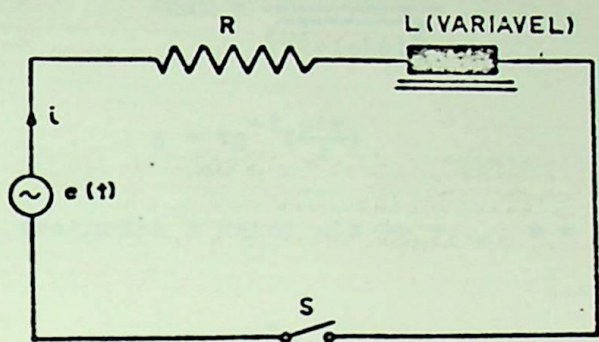


Fig. 4.1. Circuito equivalente de um transformador energizado em vazio

Assim é que existem dois métodos para resolução da equação (4.2):

- a) Resolução pelo método da linearização convencional: Este método consiste em considerarmos:

$$Ri = \frac{\psi}{L_c} \quad (4.3)$$

O valor de $L_c = \frac{\psi_{\max}}{i_{\max}}$, ou seja a relação entre o fluxo máximo e a correspondente corrente em regime permanente. Assim a equação (4.2), pode ser escrita da seguinte forma:

$$\text{Em } \sin(\omega t + \alpha) = \frac{\Lambda}{\tau} + \frac{d\phi}{dt} \quad (4.4)$$

sendo $\tau = \frac{L_c}{r}$, denominado constante de tempo do circuito.

Resolvendo a equação (4.4) vamos obter:

$$\phi(t) = \phi_{\max} \cdot \sin(\omega t + \alpha - \phi) - \phi_{\max} \sin(\alpha - \phi) e^{-\frac{t}{\tau}} + \phi(0) \quad (4.5)$$

onde:

$$\phi_{\max} = \frac{E_m L_e}{\sqrt{r^2 + (\omega L_e)^2}} \quad (4.6)$$

$$\phi = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{\omega L_e}{r} \right) \quad (4.7)$$

É bastante frequente o caso: $\omega L_e \gg r$..., $\phi = \pi/2$ e o valor máximo:

$$\phi_{\max} = \frac{E_m}{\omega} \quad (4.8)$$

Introduzindo estes valores na equação (4.5), vem:

$$\phi(t) = -\phi_{\max} \cos(\omega t + \alpha) + \phi_{\max} \cos \alpha + A(0) \quad (4.9)$$

O ângulo α define, na expressão acima, o instante da energização do transformador, em relação ao valor da tensão.

O máximo valor para $\phi(t)$ será alcançado no caso em que $\alpha = 0$, ou seja, o instante de energização coincide com a passagem por zero, da tensão. O valor $A(0)$ representa o fluxo residual do transformador no instante da energização. A expressão (4.9) toma, finalmente, a seguinte forma:

$$\phi(t)_{\max} = -\phi_{\max} \cos(\omega t) + \phi_{\max} + A(0) \quad (4.10)$$

A equação (4.2) admite ainda uma 2ª. forma de solução, denominada "dos intervalos consecutivos". Integrando a equação (4.2) em relação a um tempo de 0 a t .

$$\phi(t) = \phi(0) - \frac{E_m}{\omega} \cos(\omega t + \alpha) + \frac{E_m}{\omega} \cos \alpha - r \int_0^t i dt \quad (4.11)$$

Substituindo a integral acima, por uma soma de produtos das correntes no início de um intervalo de tempo pela duração

deste intervalo Δt , vamos obter:

$$\phi(n\Delta t) = \phi(0) - \frac{E_m}{\omega} \cos(n\omega\Delta t + \alpha) + \frac{E_m}{\omega} \cos \alpha - r\Delta t \sum_{i=1}^n i_{k-1} \quad (4.12)$$

As três primeiras expressões são calculadas diretamente para um tempo qualquer, enquanto que a parcela:

$$r\Delta t \sum_{i=1}^n i_{k-1}$$

é determinada pelo método dos intervalos consecutivos, de acordo com a característica de magnetização $\phi(i)$, conhecida.

Da exposição feita podemos concluir que a corrente i inicial, ao conectarmos o transformador à fonte, depende:

- a) da magnitude da tensão da fonte.
- b) do magnetismo residual no núcleo do transformador $\phi(0)$
- c) do instante em que o transformador é energizado (α)
- d) da impedância entre a fonte e o transformador em questão, pois fornece o coeficiente de amortecimento R/L , que também não é constante.

Assim, frequentemente a corrente transitória de magnetização excede a corrente de plena carga, e pode atingir valores da ordem de 8 a 10 vezes o valor da mesma.

Como esta corrente é estabelecida em um dos enrolamentos do transformador, vai aparecer aos terminais do relê com uma corrente diferencial e, conseqüentemente, causar indevidamente a operação do mesmo.

Na figura (4.2) podemos observar a corrente de magnetização transitória, típica, de um transformador energizado quando a tensão passa por diferentes valores.

Da equação (4.10) podemos concluir a presença de uma componente d.c na corrente de magnetização transitória, componente essa que decresce gradativamente com o tempo.

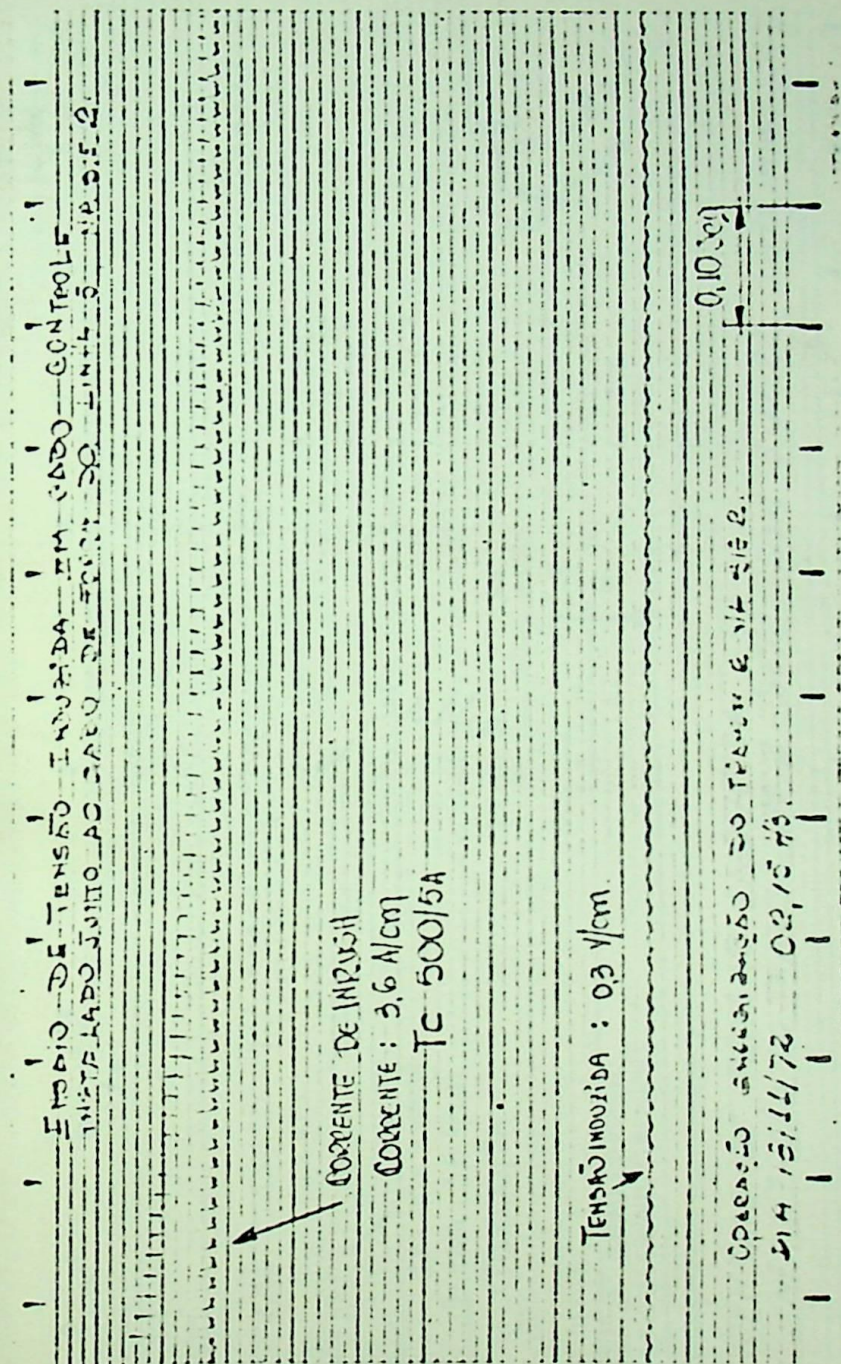


Fig. 4.2a. Aspecto da corrente de magnetização de um transformador 33/13,2 kV; 20 MVA (S/E 2 Brasília)

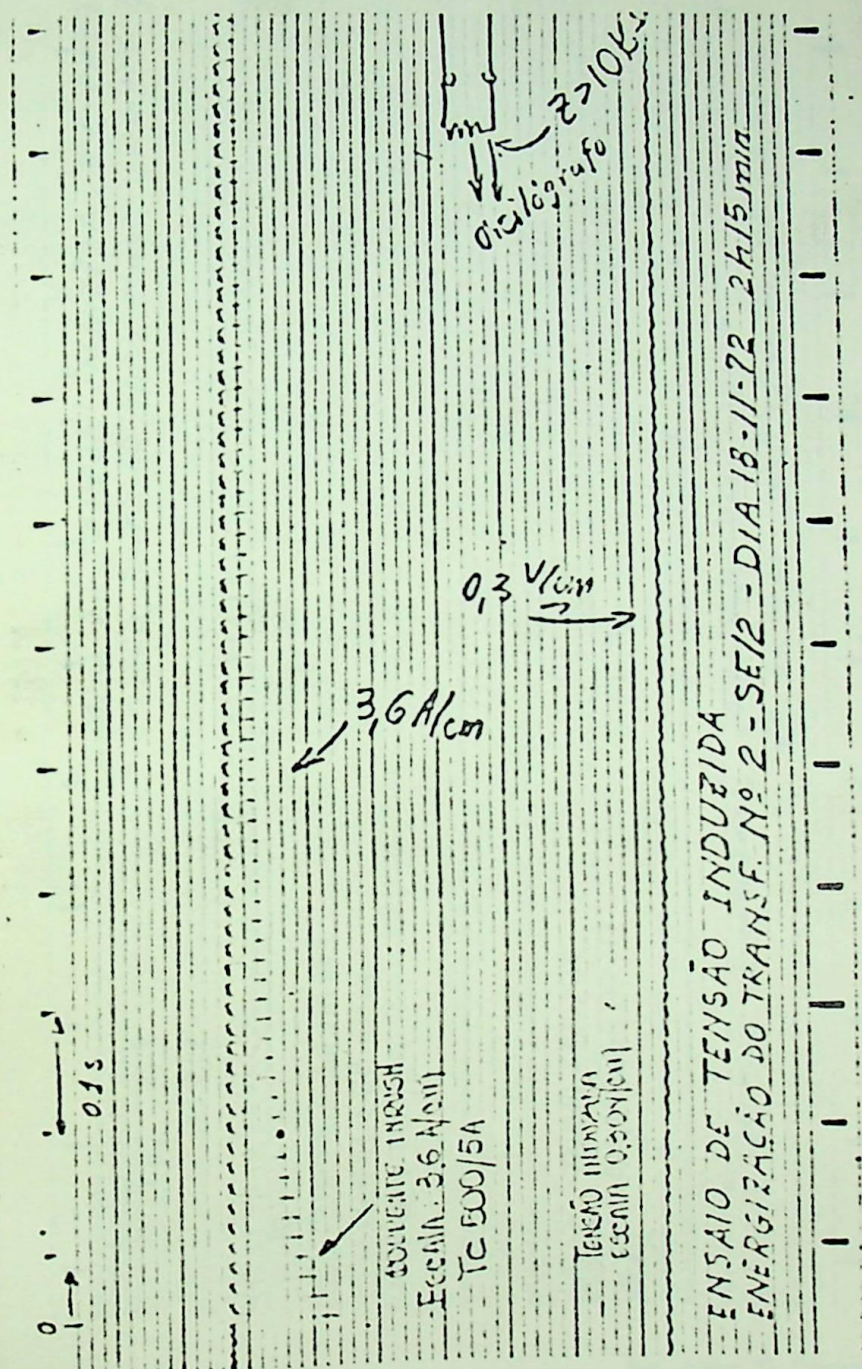


Fig. 4.2b. Aspecto da corrente de magnetização de um transformador 33/13,2 KV;
20 MVA (S/E 2 Brasília)

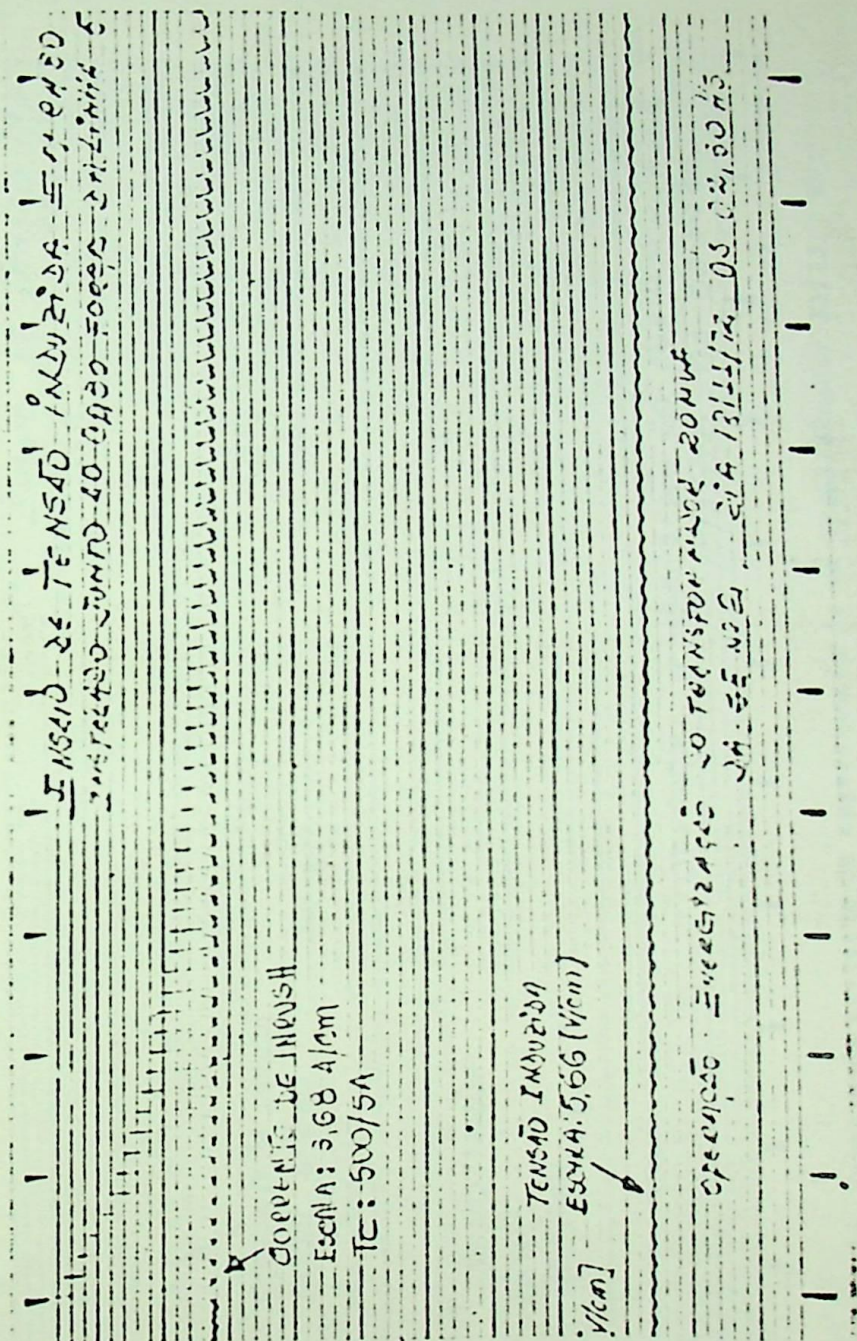


Fig. 4.2c. Aspecto da corrente de magnetização de um transformador 33/13,2 KV;
20 MVA (S/E 2 Brasília)

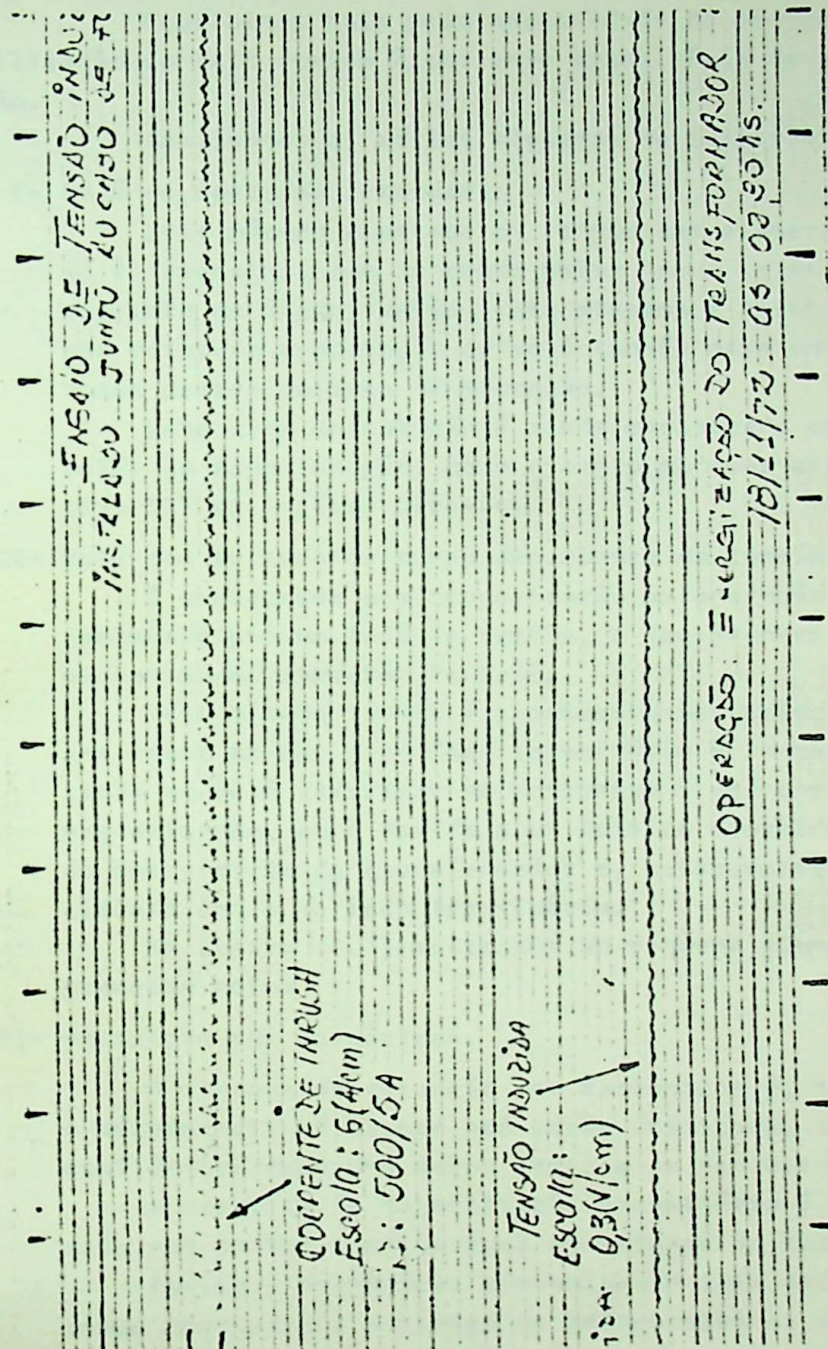


Fig. 4.2d. Aspecto da corrente de magnetização de um transformador 33/13,2 KV;
20 MVA (S/E 2 Brasilin)

Concluirmos pois pela necessidade de promover a estabilização do relé devido à corrente transitória de magnetização.

Analiseemos os vários sistemas de inibição dos relés:

I- Relé de operação retardada:

Este método consiste em temporizar a operação do relé diferencial, com um tempo maior que o transitório da corrente de magnetização. Este sistema é insatisfatório, por retardar a operação do relé também para uma falta situada dentro da zona de proteção.

Este tipo de solução é ainda encontrado em alguns relés do tipo indução: como exemplo podemos citar o relé tipo DDT da English Elêtric.

II- Relé com retardo de tempo dependente da tensão:

É conseguida uma temporização na operação do relé, comandada por um relé de tensão, e que promove um "shunt" na bobina de operação do relé.

Este método também é inconveniente, principalmente nos casos em que o período transitório é longo não permitindo ao relé verificar se realmente é uma corrente de magnetização, ou é devido a um defeito ocorrido quando da energização do transformador e, conseqüentemente, coincidente com o período transitório.

Na figura (4.3) mostramos um esquema ilustrando o processo acima

III- Restrição por Harmônicos:

O sistema de retenção por harmônicos é, sem dúvida, o método mais eficiente até então utilizado, razão pela qual dedicaremos uma maior atenção ao seu estudo.

A corrente de magnetização transitória é caracterizada por conter considerável quantidade de harmônicos.

Análises harmônicas efetuadas em tais ondas de corrente revelaram a presença de componentes de segundo

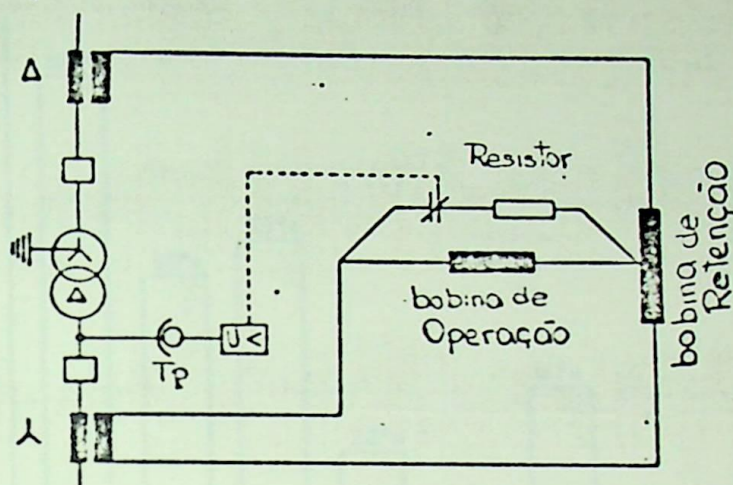


Fig. 4.3. Ilustração do processo de retardamento

harmônico (normalmente não existente em tal proporção, nas correntes de curto-circuito) em quantidade acentuada, em média da ordem de 35% da corrente transitória. (Segundo harmônico com uma frequência dupla da nominal).

Os dados estatísticos obtidos de várias fontes, apresentam a seguinte composição para a corrente transitória de magnetização, tomando como referência a componente fundamental.

Na figura (4.4) mostramos o resultado da análise efetuada na onda de corrente mostrada na figura (4.2), obtida quando da energização de um transformador.

Podemos observar a presença neta de componentes de 2o. harmônico, acompanhado de razoável quantidade de 5o. harmônico. Assim, o sistema de retenção ou estabilização do relé diferencial devido a corrente transitória de magnetização está baseado na presença do 2o. harmônico.

Devemos fazer ainda uma importante observação; o 3o. harmônico, que existe em pequena proporção na corrente transitória de magnetização, está presente em larga escala nas correntes de curto-circuito, o mesmo não acontecendo com o 2o.

harmônico.

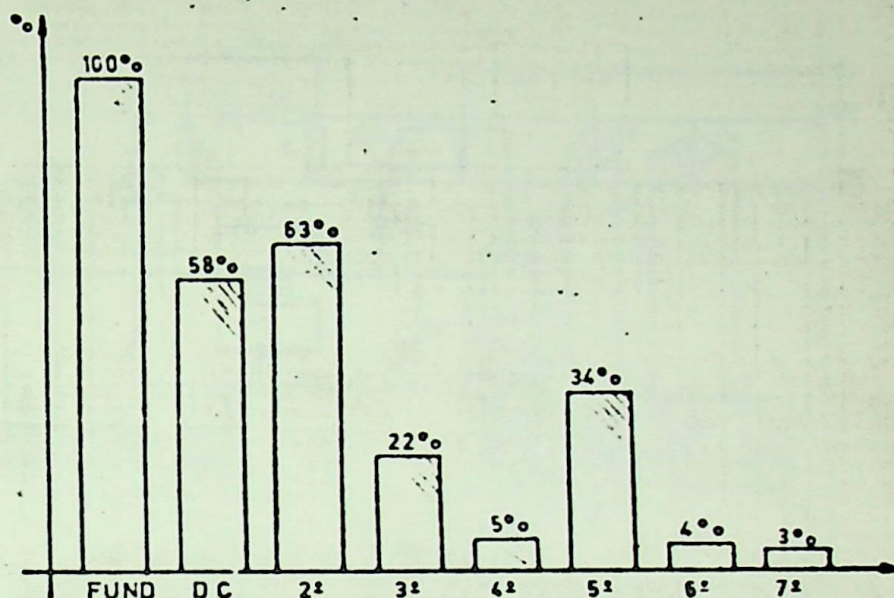


Fig. 4.4. Composição da corrente de Inrush

Vemos que este processo de estabilização é sem dúvida excelente, sendo função da própria corrente que chega aos bornes do relé.

A estabilização do relé é conseguida com auxílio de um filtro através do qual passa a corrente de operação do relé.

Este filtro é sintonizado para bloquear as componentes fundamental e de terceiro harmônico, ou seja 60 e 180 Hz.

O segundo harmônico (e outros de frequência acima do 3º) passam através do filtro, e em seguida são retificados e alimentam o relé de bobina móvel, no sentido de restrição, não permitindo portanto a operação do relé.

Na figura (4.5) mostramos um diagrama com o filtro para obtenção da restrição por 2º harmônicos e outros de frequência elevada, predominantemente o de 5º harmônico.

A figura (4.6) mostra a característica de frequência do dispositivo de estabilização de operação por corrente transitória.

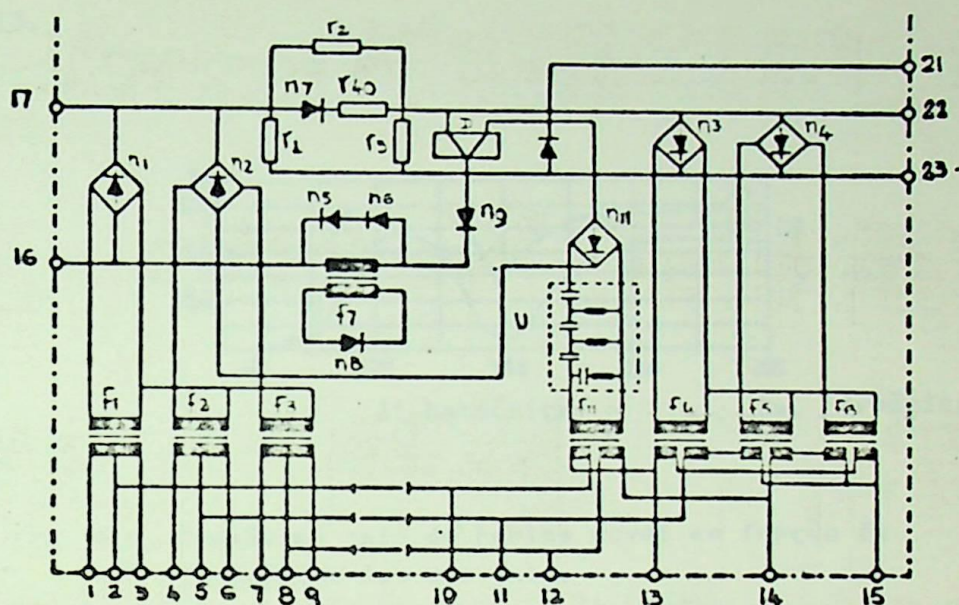


Fig. 4.5. Montagem do filtro para retenção pelo 2º harmônico

Na ordenada colocamos a tensão medida nos terminais do relê de bobina móvel, medida a partir dos terminais 21-22 (figura 4.5) em função da frequência das correntes senoidais circulantes pelos transformadores f_1 e f_3 .

Da figura (4.6) podemos observar que a tensão obtida no relê de bobina móvel, a partir do filtro, é pequena para correntes de 60 e 180 Hz, o que significa um baixo efeito de retenção; para o 2º. harmônico (120 Hz) e aqueles de ordem superior, já conseguimos uma tensão mais elevada e, conseqüentemente, um maior efeito de retenção.

Vamos fazer uma completa análise do circuito de esta bilização, por exemplo do relê RT22b da Siemens.

De acordo com a figura (4.5), a ponte retificadora n_{11} é alimentada a partir do filtro F , enquanto as pontes n_1 e

n2 são alimentadas pelos transformadores de corrente f1, f2 e f3.

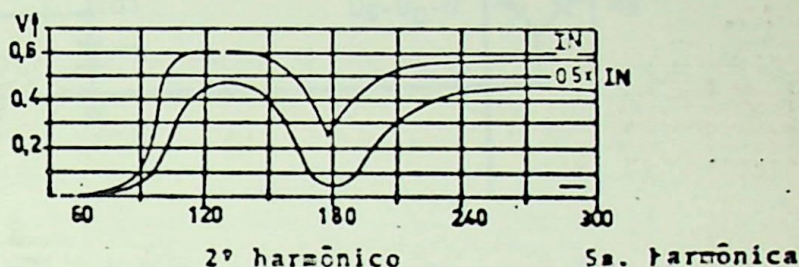


Fig. 4.6. Tensão no relé de bobina móvel em função da frequência das correntes

Consideremos que o diodo n9 está curto-circuitado; é óbvio que a corrente i_F circulando através do dispositivo de estabilização transitória é independente da corrente total i_n de retenção (d.c.). O diodo n9 acopla os dois dispositivos de estabilização. Uma corrente de estabilização é suprida por n1 e n2 para cada corrente transitória de magnetização. A corrente $(i_R - i_F)$ flui através de n9 e eleva o valor da tensão de condução do diodo n9. A corrente i_F é suprida pelo retificador n11. O diodo n12 limita a tensão no enrolamento do lado direito do relé. A queda de tensão através do diodo n9, alivia a ponte n11, e assim o transformador de corrente f11. Na figura (4.7) mostramos a tensão nos pontos de real interesse. Os valores colocados entre parêntesis aplicam-se quando o diodo n9 é curto-circuitado.

Chamemos a queda de tensão através do diodo n9 de U_9 , através do relé de bobina móvel de U_n (do enrolamento no lado) e a tensão de condução dos diodos que compõem a ponte retificadora n11 sendo U , então a tensão fornecida pelo

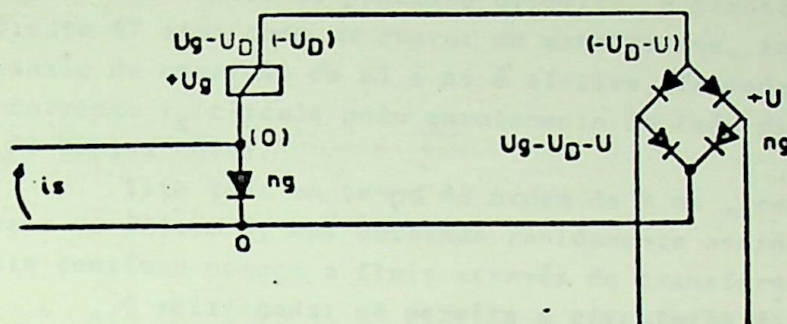


Fig. 4.7. Distribuição da corrente de retenção

filtro $\bar{c}$:

$$+U - (-U_D - U) = 2U + U_D \quad (4.13)$$

com o diodo n_9 curto-circuitado:

$$+U - (U_g - U_D - U) = 2U - U_g + U_D \quad (4.14)$$

Assim, n_9 alivia o filtro de uma quantidade igual a tensão de condução U_g .

Na figura (4.8) é mostrado o diagrama do circuito de estabilização.

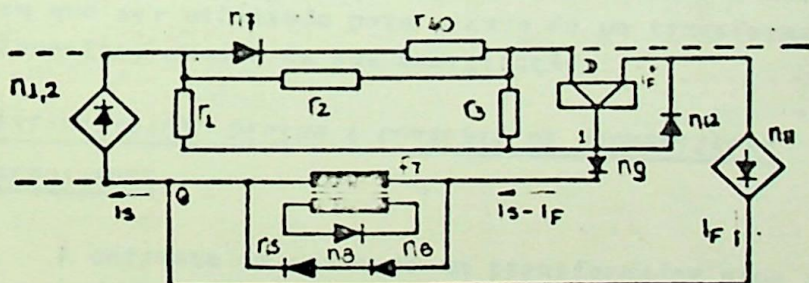


Fig. 4.8. Diagrama do circuito de estabilização

No início do processo descrito, o transformador de corrente f7 atua como um reator de maneira que, inicialmente, a tensão de oposição de n5 e n6 é efetiva, fazendo com que tô da corrente i_s circule pelo enrolamento do lado direito do re lê de bobina móvel.

Isto toma um tempo da ordem de 8 ns, compensando o atraso do filtro U, mas decaindo rapidamente assim que a cor rente contínua começa a fluir através do transformador f7.

O retificador n8 permite a circulação da corrente ' contínua através do enrolamento secundário de f7 mantendo-o ' saturado.

Na figura (4.9) podemos observar outro circuito de retenção por harmônicos, usado pela BBC; nesse, a corrente ' transitória provoca o aparecimento de uma corrente diferencial que atravessa o transformador de bloqueio colocado no cir cuito.

O circuito secundário do transformador "MS" forma ' um circuito ressonante, que permite a circulação da componen- te de 2o. harmônico.

Esta corrente retificada pela ponte "Gs" circula pe- lo sistema de medida no sentido de bloqueio anulando o efeito da corrente de desligamento.

Como observação final podemos dizer que o mesmo sis- tema tem que ser utilizado para o caso de um transformador de 3 enrolamentos, quando da sua energização.

4-2-2- ESTABILIZAÇÃO DEVIDO A CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO PERMANENTE

A corrente em vazio de um transformador atua (em re gime permanente) como uma corrente de falta, para o relê dife- rencial.

No entanto considerando que a corrente a vazio do ' transformador não excede, normalmente, 5% do valor da corrente

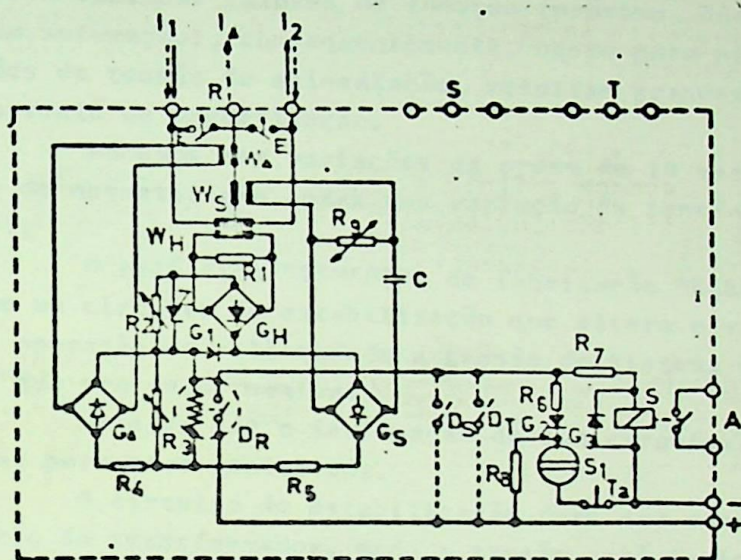


Fig. 4.9. Sistema de retenção pelo 2º harmônico(BBC)

nominal, podemos negligenciá-la tendo em vista o valor de calibração do relé diferencial.

Concluimos que a corrente de magnetização permanente não requer qualquer cuidado especial, devido à sua pequena intensidade.

4-23- ESTABILIZAÇÃO DEVIDO A VARIAÇÕES DA TENSÃO DO SISTEMA (VARIAÇÃO DA CORRENTE DE MAGNETIZAÇÃO)

Este é um caso muito comum na proteção diferencial

dos transformadores elevadores das usinas, onde as variações na tensão são bastante comuns.

Considerando-se que os transformadores modernos são construídos com aço silício laminado a frio, e que trabalham com elevados valores de indução (próximo dos seus valores de saturação), consequentemente, mesmo para pequenas variações da tensão de alimentação, resultam grandes variações na corrente de magnetização.

Podemos ter variações da ordem de 10 vezes na corrente de magnetização, para uma variação da tensão da ordem de 20%.

O relé tipo "TSMADT", de fabricação NELLE ALSTHOM, possui um circuito de estabilização que altera o valor mínimo de operação do relé quando a tensão do sistema torna-se maior que seu valor nominal.

Note-se que a inclinação da sua característica percentual permanece inalterada.

O circuito de estabilização deve ser conectado ao primário do transformador, onde a tensão está intimamente ligada com a indução.

Na figura (4.10) temos um diagrama de bloco do relé em questão, enquanto que na fig.(4.11) vemos a modificação imposta pelo sistema de estabilização à característica do relé.

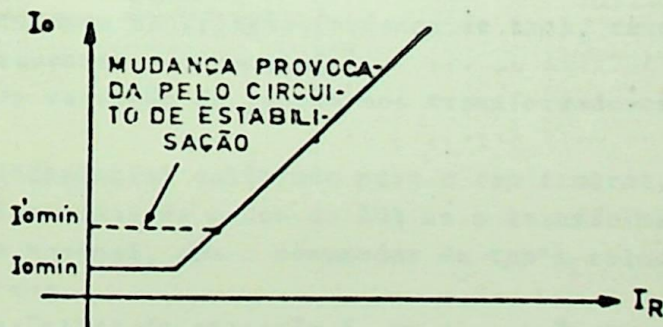


Fig. 4.11. Característica de operação do relé da Fig. 4.10

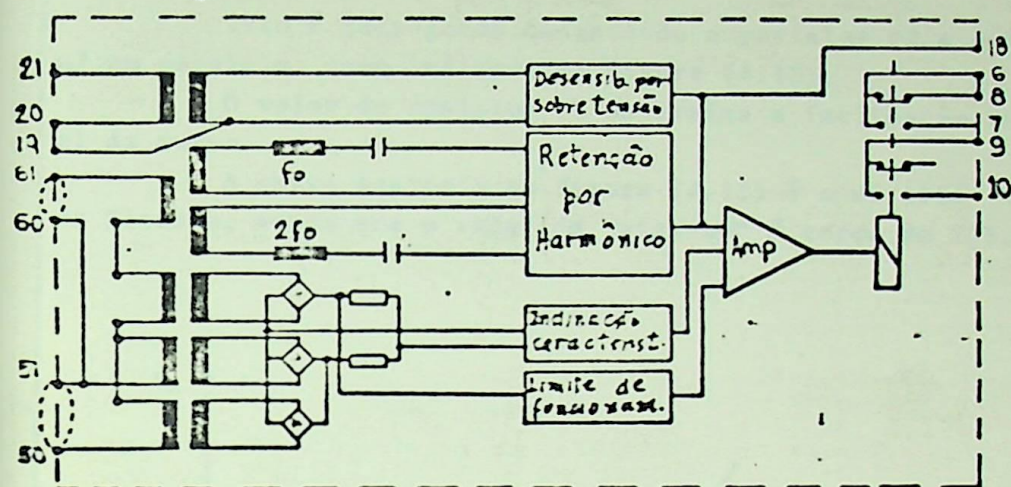


Fig. 4.10. Pelé diferencial do tipo Ismadt (Delle Alsthom)

4-24 ESTABILIZAÇÃO DEVIDO AOS TRANSFORMADORES COM COMUTADORES DE TAP'S (SOS CARGA)

É grande a incidência de transformadores equipados com comutador de tap's, e inclusive comutação sob carga. Se a proteção diferencial é ajustada para uma relação de transformação definida, uma mudança na relação (mudança de tap), causa a circulação de uma corrente diferencial.

A faixa de variação da tensão nos transformadores pode ser até $\pm 20\%$.

Um relé diferencial calibrado para o tap central, terá uma corrente diferencial da ordem de 20% se o transformador funciona à potência nominal, com o comutador de tap's colocado em uma posição extrema.

A característica de operação é, em consequência, ligeiramente inclinada na sua porção inicial, como mostrado na figura (4.12)

Isto é conseguido conectando o resistor r_2 e o diodo n_7 em paralelo, como indicado na figura (4.13).

O valor do resistor r_2 determina a inclinação inicial da curva.

A curva mostrada na figura (4.12) é a do relé RT22b da Siemens, sendo que o valor de "pick-up" é cerca de 20%.

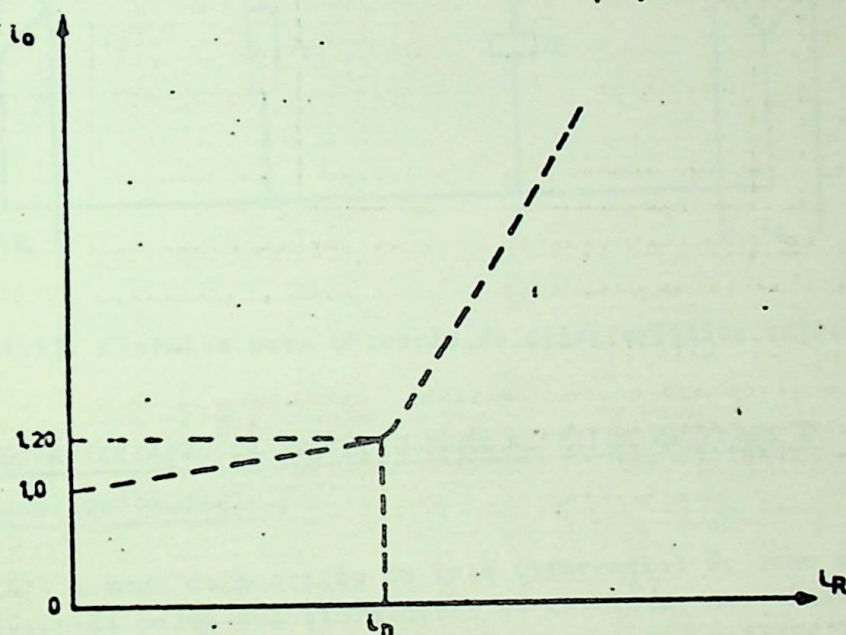


Fig. 4.12. Característica de operação do relé PT22b (Siemens)

maior, quando a corrente que circula através do objeto a proteger passa de zero ao seu valor nominal.

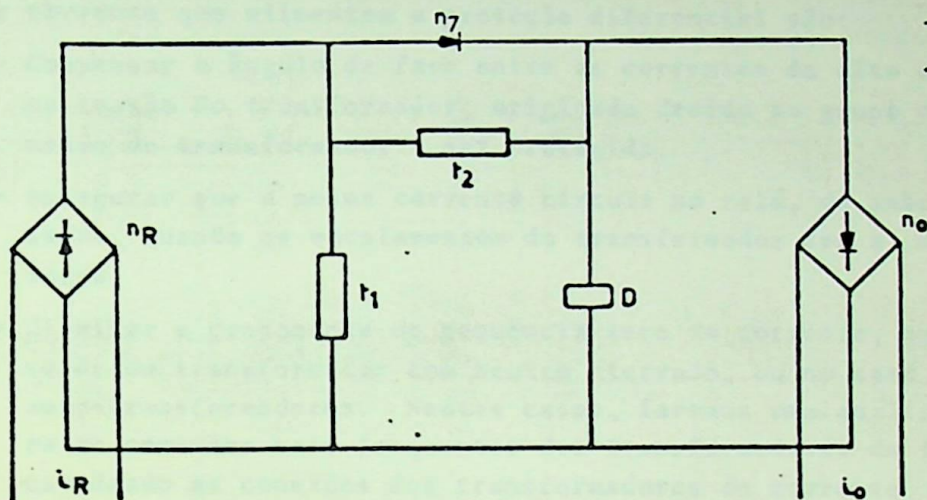


Fig. 4.13. Circuito para obtenção da característica anterior

4-25- ESTABILIZAÇÃO DA PROTEÇÃO PARA DEFEITOS EXTERNOS λ

ZONA DE PROTEÇÃO

A zona de proteção do relé diferencial é, como sabemos, limitada pelos transformadores de corrente; no entanto, alguns cuidados especiais devem ser tomados, com relação à conexão dos transformadores de corrente, a fim de evitar a operação da proteção para um defeito externo à região definida pelos transformadores de corrente.

Um defeito fora da zona de proteção, mesmo caracterizado por elevado valor de corrente, deve-se apresentar aos bornes do relé como uma condição normal de funcionamento; conseqüentemente, os vetores corrente devem se apresentar aos terminais do relé, com a mesma intensidade e em fase.

As condições acima são obtidas através dos transformadores de corrente principais e auxiliares.

Podemos dizer que as finalidades dos transformadores de corrente que alimentam a proteção diferencial são:

- 1- Compensar o ângulo de fase entre as correntes da alta e baixa tensão do transformador, originado devido ao grupo de conexão do transformador a ser protegido.
- 2- Assegurar que a mesma corrente circule no relê, de ambos os lados, quando os enrolamentos do transformador tem a mesma carga.
- 3- Eliminar a componente de sequência zero da corrente, no caso de um transformador com neutro aterrado, ou no caso de auto-transformadores. Nestes casos, faremos uma análise para as conexões mais frequentes dos transformadores de força estudando as conexões dos transformadores de corrente principais e auxiliares, para atender cada caso em específico.

a) Transformador Yd1 (grupo I)

Os transformadores de corrente devem compensar o deslocamento angular de 30° existente entre os vetores de baixa e alta tensão. (Vide figura 4.14).

Para uma falta fase-terra no lado estrêla, como o neutro está aterrado, haverá circulação de corrente pelo neutro. (Considerando o transformador alimentado pelo lado triângulo). Consequentemente surge a componente de sequência zero na corrente de curto circuito.

No lado triângulo esta corrente ficará confinada ao triângulo; assim sendo, devemos promover do lado estrêla, um bloqueio para a corrente de sequência nula, através da conexão dos tc's principais ou auxiliares em triângulo.

Vejamos o comportamento da proteção para os diversos tipos de defeito.

a-1) Defeito Fase-Terra

Consideremos a ocorrência de um defeito fase-R-terra

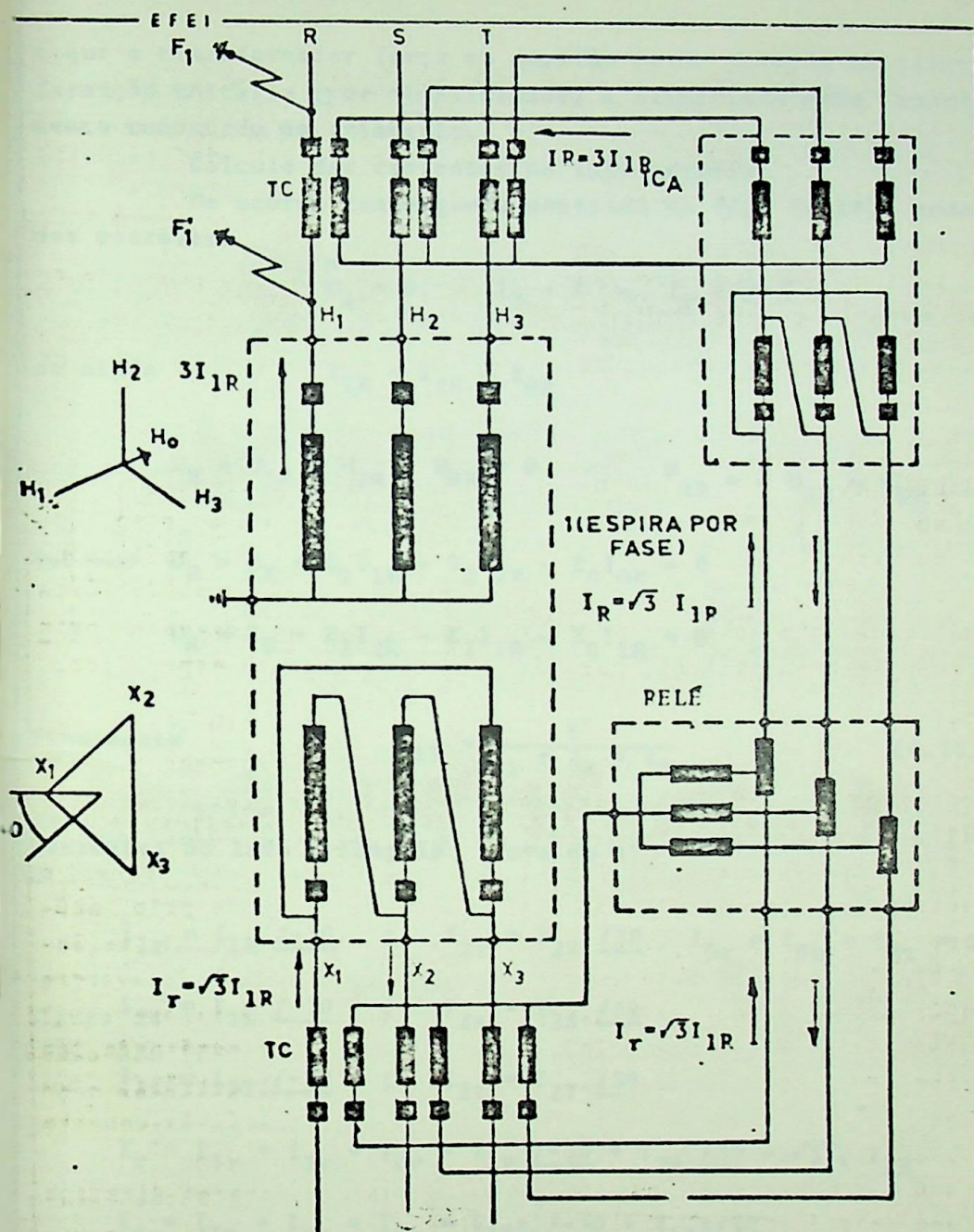


Fig. 4.14

e que o transformador força em questão tenha relação de transformação unitária (por simplicidade) e alimentado pelo enrolamento conectado em triângulo.

Cálculo das correntes no lado estrêla:

De acordo com esquema mostrado na fig. (4.14) podemos escrever:

$$\vec{U}_R = 0, \quad \vec{I}_S = 0 \text{ e } \vec{I}_T = 0$$

ou ainda

$$I_{1R} = I_{2R} = I_{0R}$$

$$U_R = U_{1R} + U_{2R} + U_{0R} = 0$$

$$U_{1R} = -U_{2R} - U_{0R}$$

Sabemos $U_R = E_Y - Z_1 I_{1R} - Z_2 I_{2R} - Z_0 I_{0R} = 0$

$$U_R = E_Y - Z_1 I_{1R} - Z_2 I_{1R} - Z_0 I_{1R} = 0$$

finalmente

$$I_{1R} = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (4.15)$$

Correntes no lado triângulo: (fora do A)

$$I_{1r} = I_{1R} \underline{/ -30} \quad ; \quad I_{2r} = I_{2R} \underline{/ 30} \quad I_{0r} = I_{0s} = I_{0t} = 0$$

$$I_{1s} = I_{1S} \underline{/ -30} \quad ; \quad I_{2s} = I_{2S} \underline{/ 30}$$

$$I_{1t} = I_{1T} \underline{/ -30} \quad ; \quad I_{2t} = I_{2T} \underline{/ 30}$$

$$I_r = I_{1r} + I_{2r} + I_{0r} = I_{1R} \underline{/ -30} + I_{2R} \underline{/ 30} = \sqrt{3} \cdot I_{1R}$$

$$I_s = I_{1s} + I_{2s} + I_{0s} = I_{1R} a^2 \underline{/ -30} + I_{1R} a \underline{/ 30}$$

$$I_S = I_{1R}(\frac{1}{210} + \frac{1}{150}) = -\sqrt{3} I_{A1} \quad (4.16)$$

$$I_t = I_{1t} + I_{2t} + I_{20} = I_{1R} \frac{a}{-30} + I_{2R} \frac{a^2}{30} \quad (4.17)$$

$$I_t = I_{1R} \frac{1}{90} + I_{1R} \frac{1}{270} = 0 \quad (4.18)$$

A distribuição das correntes é mostrada na fig.4.14. Concluímos daí a necessidade da conexão do transformador auxiliar em Y/A a fim de proporcionar um bloqueio à corrente de sequência nula, que circula no lado do enrolamento conectado em aterrado.

Salientamos ainda que neste caso não podemos usar um transformador auxiliar do tipo auto-transformador devido à compensação do deslocamento angular do transformador e ao bloqueio da componente de sequência zero.

Para um defeito F_1 dentro da zona de proteção, atuam os relés das fases R e S, tal como mostrado na fig.(4.14).

a-2) Defeito fase-fase (sem contato à terra)

Analisemos a ocorrência de um defeito entre duas fases, consideremos inicialmente um defeito F_2 tal como mostrado na fig. (4.15). Para o caso em questão podemos escrever que:

$$\vec{U}_S = \vec{U}_T; \quad \vec{I}_R = 0; \quad \vec{I}_S = -\vec{I}_T$$

resultando que:

$$\vec{I}_{0R} = \vec{I}_{0S} = \vec{I}_{0T} \quad (4.19)$$

$$\vec{I}_{1R} = -\vec{I}_{2R} \quad (4.20)$$

$$\vec{U}_{1R} = \vec{U}_{2R} \quad (4.21)$$

Das equações (4.20) e (4.21) podemos escrever que:

$$\vec{E}_Y - Z_1 \vec{I}_{1R} = -Z_2 (-\vec{I}_{1R})$$

$$\vec{I}_{1R} = -\vec{I}_{2R} = \frac{\vec{E}_Y}{Z_1 + Z_2} \quad (4.22)$$

As duas componentes da corrente de curto são transferidas ao enrolamento conectado em triângulo; assim a componente I_{1r}^* da corrente de defeito fora da conexão triângulo é dada por: (vide fig. 4.16)

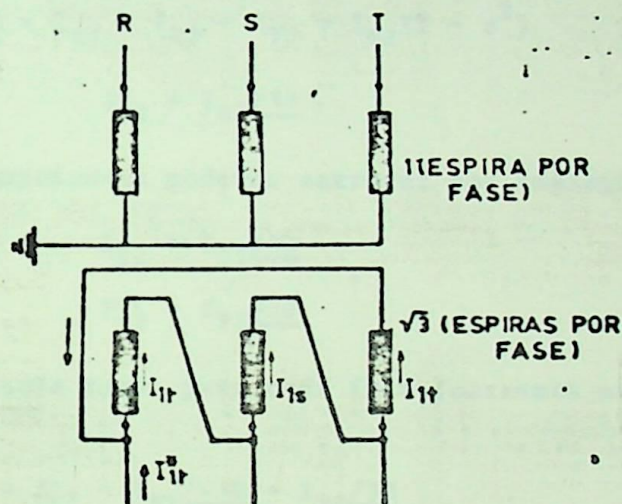


Fig. 4.16. Distribuição da corrente

$$I_{1r}^* = I_{1r} - I_{1t} = (I_{1R} - I_{1T})/\sqrt{3}$$

$$I_{1r}^* = I_{1R}(1 - a)/\sqrt{3} = I_{1R}/\underline{-30} \quad (4.23)$$

onde as correntes I_{1r} e I_{1t} são as correntes transformadas em cada uma das fases do transformador em questão, sendo iguais a $I_{1R}/\sqrt{3}$ e $I_{1T}/\sqrt{3}$ respectivamente, por estarmos considerando que o transformador tem relação de transformação unitária.

(1 espira no lado Y e $\sqrt{3}$ no lado A, por fase). Para as demais fases teremos:

$$I'_{1s} = I_{1s} - I_{st} = (I_{1s} - I_{1t})\sqrt{3} = I_{1s}/-30^\circ \quad (4.24)$$

$$I'_{t1} = I_{T1}/30^\circ \quad (4.25)$$

Para as componentes de sequência negativa podemos escrever que

$$I^\circ_{r2} = I_{r2} - I_{t2} = I_{R2} - I_{T2} = I_{R2}(1 - a^2)$$

$$I^\circ_{r2} = I_{R2}/30 \quad (4.26)$$

para as demais componentes podemos escrever por analogia que:

$$I^\circ_{s2} = I_{S2}/30 \quad (4.27)$$

$$I^\circ_{t2} = I_{T2}/30 \quad (4.28)$$

Calculando a corrente total para cada fase (corrente na linha) vamos obter:

$$I_r = I^\circ_{r1} + I^\circ_{r2} = I_{R1}/-30 + I_{R2}/30$$

$$I_r = I_{R1}(\underline{-30} - \underline{30}) = -jI_{R1} \quad (4.29)$$

$$I_r = I_{R1}/270^\circ \quad (4.30)$$

$$I_s = I^\circ_{s1} + I^\circ_{t1} = I_{S1}/-30 + I_{S2}/30$$

$$I_s = a^2 I_{R1}/-30 + a I_{R2}/30$$

$$I_s = I_{R1}(a^2 \underline{-30} - a \underline{30})$$

$$I_s = I_{R1}(\underline{210} - \underline{150}) = -jI_{R1} \quad (4.31)$$

$$I_s = I_{R1}/\underline{270^\circ} \quad (4.32)$$

$$I_t = I_{t1}^\circ + I_{t2}^\circ = I_{T1}/\underline{-30} + I_{T2}/\underline{30}$$

$$I_t = aI_{R1}/\underline{-30} + a^2I_{R2}/\underline{30}$$

$$I_t = I_{R1}(a/\underline{-30} - a^2/\underline{30})$$

$$I_t = I_{R1}(\underline{1/90} - \underline{1/270}) = 2jI_{R1} \quad (4.33)$$

$$I_t = 2I_{R1}/\underline{90} \quad (4.34)$$

A distribuição das correntes está mostrada na fig. (4.15).

Concluimos que a colocação do transformador auxiliar Y/ Δ , mantém a proteção estabilizada.

Na ocorrência de um defeito interno à zona de proteção, do tipo F_2' (vide figura 4.15) irão operar os relés das fases R, S e T.

a-3) Defeito Fase-Fase com Contato à Terra

Consideremos um defeito entre as fases S e T com contato à terra, de acordo com o mostrado na figura (4.17). Podemos estabelecer as seguintes condições:

$$U_S = U_T = 0 \quad (4.35)$$

$$I_R = 0 \quad (4.36)$$

Consequentemente $I_R = I_{R1} + I_{R2} + I_{R0} = 0$

Da equação (4.35) concluímos que:

$$U_{R1} = U_{R2} = U_{R0} \quad (4.37)$$

Da equação (4.36)

$$I_{R1} = - (I_{R2} + I_{R0}) \quad (4.38)$$

Sabemos ainda que:

$$U_{R1} = E_Y - Z_1 I_{R1} \quad (4.39)$$

$$U_{R2} = - Z_2 I_{R2} \quad (4.40)$$

$$U_{R0} = - Z_0 I_{R0} \quad (4.41)$$

Combinando as equações (4.38), (4.39), (4.40) e (4.41) concluimos:

$$I_{R1} = \frac{E_Y (Z_2 + Z_0)}{Z_1 Z_2 + Z_0 Z_2 + Z_0 Z_1} \quad (4.42)$$

$$I_{R2} = \frac{-E_Y Z_0}{Z_1 Z_2 + Z_0 Z_2 + Z_0 Z_1} \quad (4.43)$$

$$I_{R0} = \frac{-E_Y Z_2}{Z_1 Z_2 + Z_0 Z_2 + Z_0 Z_1} \quad (4.44)$$

Calculando as correntes nas fases envolvidas vamos encontrar

$$I_S = \frac{-j\sqrt{3} \cdot E_Y \cdot (1 + a^2) \cdot Z_2 + Z_0}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} \quad (4.45)$$



$$I_T = \frac{j \cdot \sqrt{3} \cdot E_Y \cdot (1 + a)Z_2 + Z_0}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_0 + Z_0 Z_1} \quad (4.46)$$

Para o caso que estamos analisando, podemos considerar

$$Z_1 = Z_2 \quad (4.47)$$

Se o transformador está excitado pelo enrolamento conectado em triângulo, podemos escrever que:

$$Z_1 = Z_2 = Z_0 = Z_{cc} \quad (4.48)$$

Sendo Z_{cc} a impedância de curto-circuito em ohms por fase, do transformador protegido:

Podemos simplificar as expressões anteriores da seguinte maneira:

$$I_S = -j \frac{E_Y}{Z_1} \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{E_Y}{Z_1} \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.49)$$

$$I_T = j \frac{E_Y}{Z_1} \frac{1}{\sqrt{3}} = \frac{E_Y}{Z_1} \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.50)$$

Calculando as correntes na linha do enrolamento conectado em triângulo, vamos obter:

$$I_r = I_{r1} + I_{r2} = I_{R1} \frac{1}{\sqrt{3}} + I_{R2} \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.51)$$

$$I_s = I_{s1} + I_{s2} = a^2 I_{R1} \frac{1}{\sqrt{3}} + a I_{R2} \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.52)$$

$$I_t = I_{t1} + I_{t2} = a I_{R1} \frac{1}{\sqrt{3}} + a^2 I_{R2} \frac{1}{\sqrt{3}} \quad (4.53)$$

Substituindo os valores de I_{R1} e I_{R2} dados pelas expressões (4.42) e (4.43) convenientemente simplificadas teremos:

$$I_R = \frac{E_Y}{\sqrt{3} Z_1} \angle -60^\circ \quad (4.54)$$

$$I_S = \frac{E_Y}{\sqrt{3} Z_1} \angle -120^\circ \quad (4.55)$$

$$I_T = \frac{E_Y}{Z_1} \angle 90^\circ \quad (4.56)$$

Para um defeito dentro da zona de proteção operam os relés das 3 fases. Na figura (4.17) podemos observar a distribuição das correntes.

a-4) Defeito Trifásico

A ocorrência de um defeito trifásico, fora da zona de proteção, vai aparecer aos terminais do relé, como uma condição perfeitamente equilibrada.

Na figura (4.18) podemos estabelecer as condições para cálculo das correntes.

Das condições estabelecidas pode-se concluir que teremos somente as componentes de sequência direta, pois se trata de uma condição equilibrada.

As condições que regem este caso são:

$$U_R = U_S = U_T = 0 \quad (4.57)$$

Dai concluímos

$$U_{1R} = U_{2R} = U_{0R} = 0$$

$$I_{2R} = I_{0R} = 0$$

$$I_{1R} = I_R = \frac{E_Y}{Z_1} \quad (4.58)$$

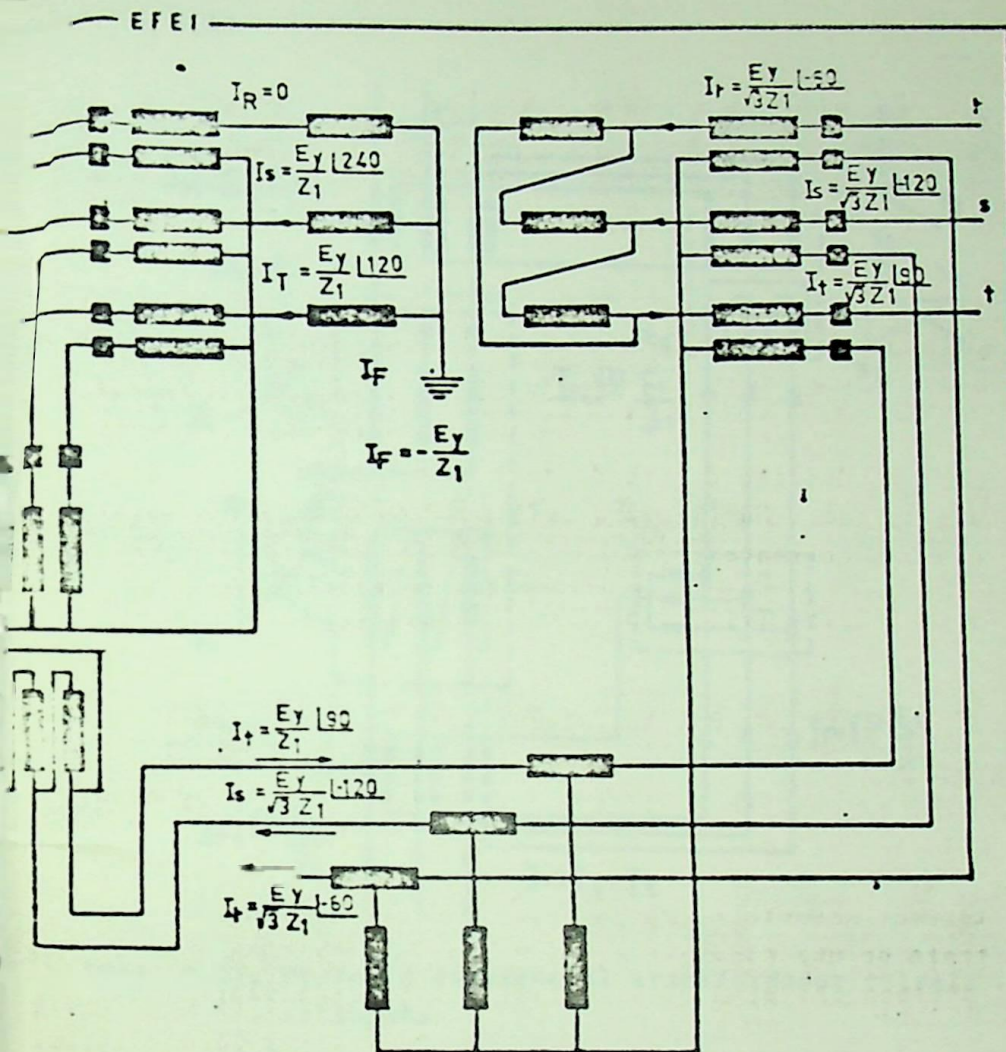


Fig. 4.17. Distribuição das correntes

ou ainda $I_R = I_S = I_T = \frac{E_Y}{Z_1}$.

As correntes no lado triângulo serão dadas por:

$$I_R = I_R / -30; \quad I_S = I_S / -30; \quad I_T = I_T / -30$$

Na figura (4.18) pode-se observar a distribuição das correntes.

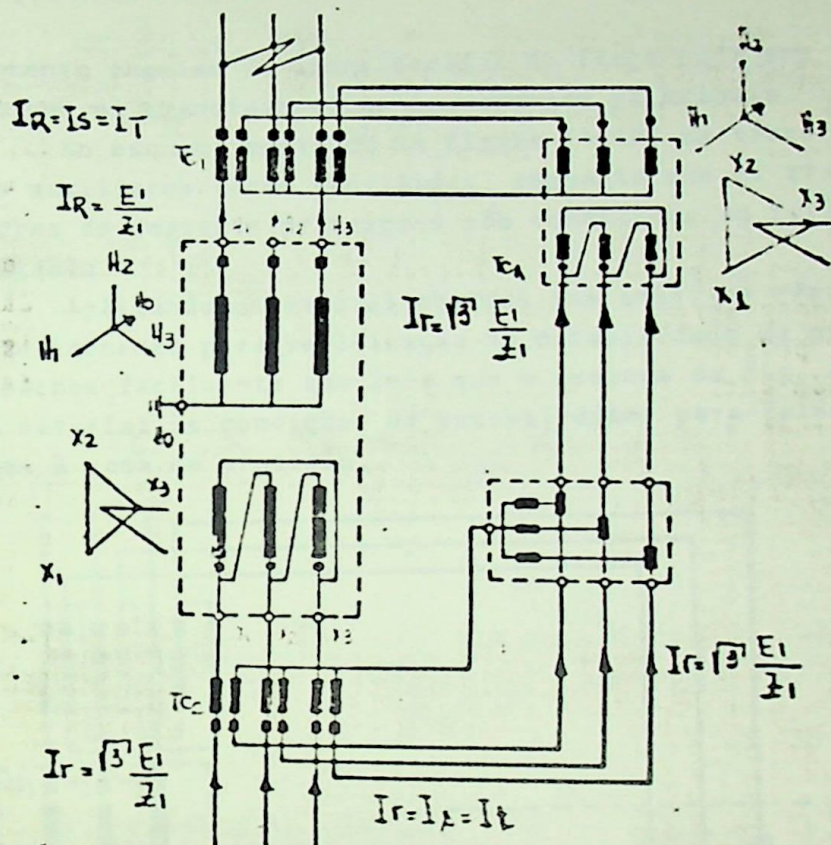


Fig. 4.18. Proteção diferencial transformador estrela triângulo

A figura (4.18) mostra um transformador estrêla-triângulo com deslocamento de 330° entre os vetores de baixa e alta tensão, para o qual são válidas as mesmas observações que para o caso anterior.

Vemos que o transformador auxiliar é conectado de forma a compensar o deslocamento angular do transformador principal. Nos esquemas apresentados incluímos sistematicamente o transformador auxiliar; seu uso, no entanto, não é obrigatório, uma vez que a compensação do

deslocamento angular do transformador de força pode ser conseguido com os transformadores de corrente principais.

No esquema mostrado na figura (4.19) os transformadores auxiliares foram suprimidos, enquanto que os transformadores de corrente principais são conectados em triângulo e estrêla.

Aplicando os valores obtidos nas análises efetuadas anteriormente para verificação da estabilidade da proteção, podemos facilmente concluir que o esquema da fig. 4.19 também satisfaz às condições de estabilidade, para faltas externas à zona de proteção.

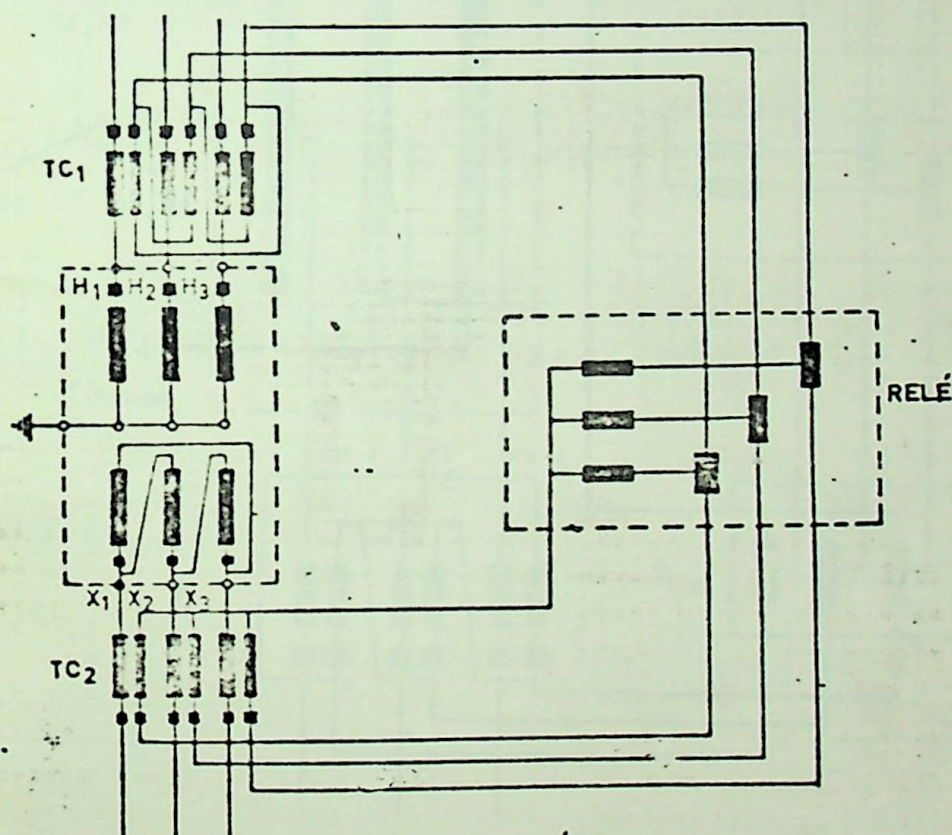


Fig. 4.19. Proteção diferencial sem transformadores intermediários

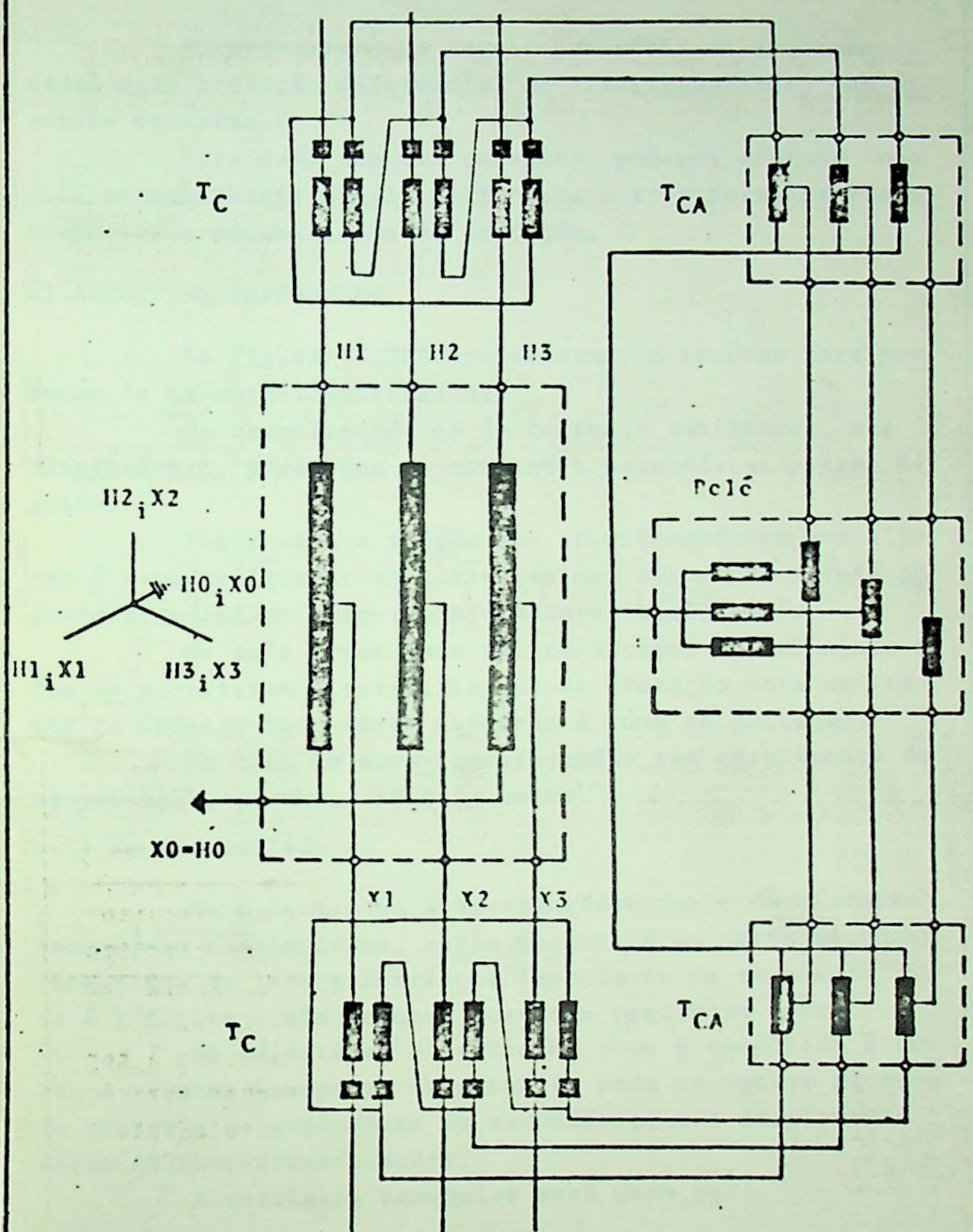


Fig. 4.20 - Auto-transformador

Apresentaremos a seguir uma série de esquemas usados para proteção diferencial de transformadores, com diversas conexões.

Para cada uma das conexões, podemos efetuar uma análise semelhante àquela feita para o transformador Y/Δ e comprovar a estabilidade da proteção.

b) Auto-Transformadores

Na figura (4.20) apresentamos o esquema para proteção de um auto-transformador.

Os transformadores de corrente auxiliares, são dispensáveis, desde que as correntes secundárias sejam iguais.

Neste caso a função dos transformadores auxiliares é somente igualar as correntes que alimentam o relé, podendo-se utilizar auto-transformadores auxiliares.

Os tc's principais são conectados em triângulo a fim de permitirem a estabilização da proteção para os casos de defeito fase-terra externos à zona de proteção.

No caso do auto-transformador sem enrolamento de compensação, podemos ter três casos.

b-1) Neutro Isolado

Se o neutro do auto-transformador e do circuito secundário são isolados, então quando de um curto-circuito fase-terra do lado primário, a impedância de sequência zero é infinita e não teremos corrente sequência zero.

Se no entanto o neutro da rede é conectado à terra, o sistema homopolar do primário pode se fechar através do neutro e os condutores do secundário, e o enrolamento série do auto-transformador.

A reatância homopolar será dada por:

$$X_0 = X_S + X_2$$

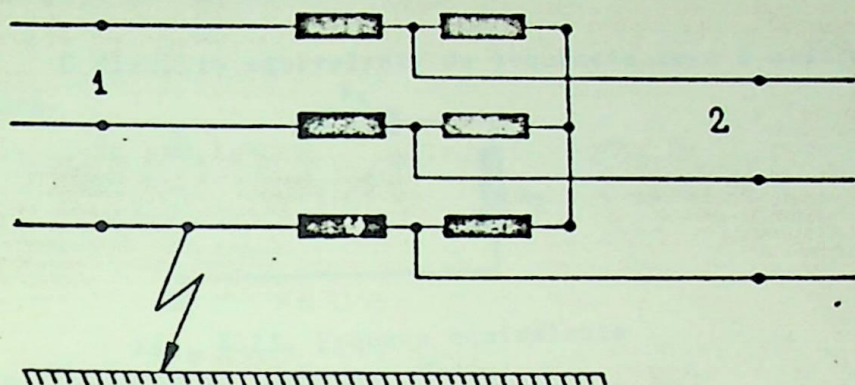


Fig. 4.21. Auto-transformador com neutro aterrado

A reatância homopolar X_2 do circuito secundário não será reduzida ao primário, porque neste caso o auto-transformador não transforma corrente nem tensão homopolar, seu neutro está isolado, e assim separado do circuito homopolar. As correntes homopolares percorrem somente o enrolamento série do auto-transformador. Sendo importante que se faça uma filtragem desta componente de sequência zero, razão pela qual a conexão dos transformadores de corrente principais deve ser em triângulo.

Na figura (4.22) podemos analisar o caso em

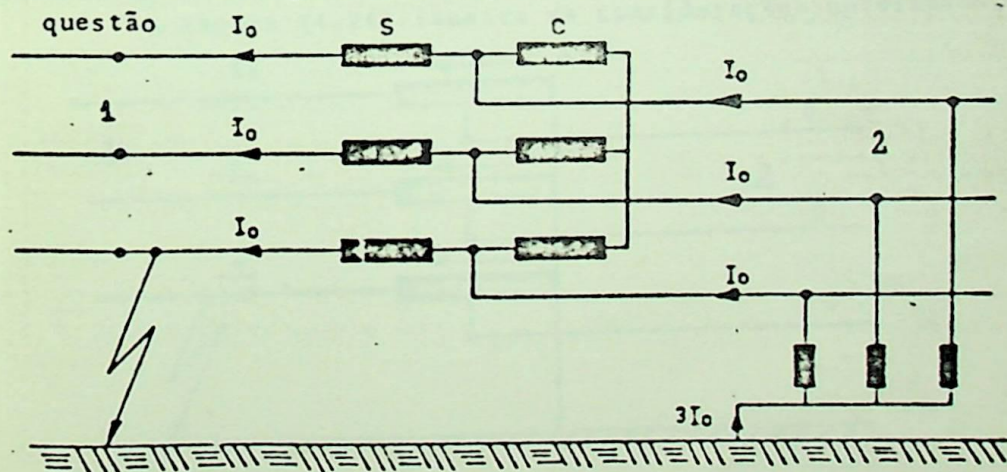


Fig.4.22. Auto-transformador com rede secundária aterrada

Eng. Ademir C. Guimarães

O circuito equivalente de sequência zero é mostrado na figura

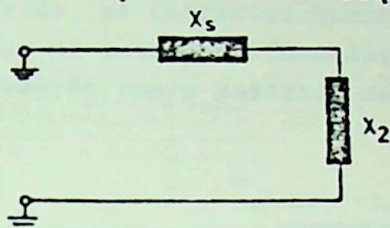


Fig. 4.23. Esquema equivalente

X_S = reatância do enrolamento série

X_2 = reatância homopolar do circuito secundário

b-2) Neutro Conectado à Terra

Suponhamos um defeito monofásico à terra, no enrolamento primário, sendo que o secundário está ligado a uma rede com neutro isolado. O sistema homopolar circula somente no primário, conseqüentemente tendo uma impedância homopolar da mesma grandeza que um transformador / (um valor bastante elevado).

Também neste caso a conexão em triângulo evita a influência da componente de sequência homopolar na proteção.

A figura (4.24) ilustra as considerações anteriores.

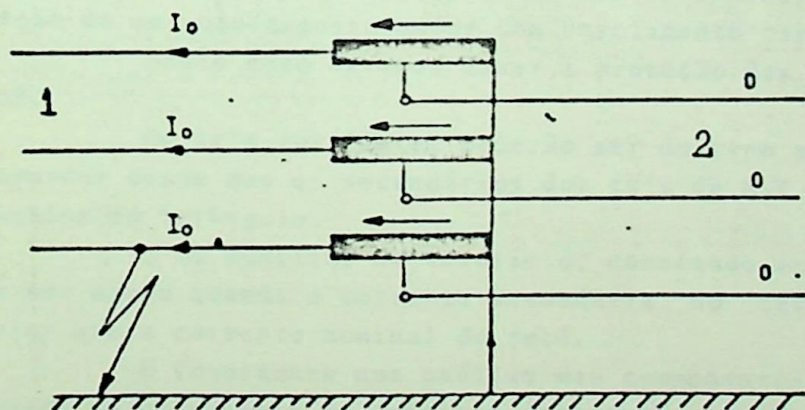


Fig. 4.24. Auto-transformador com neutro aterrado

No caso do secundário estar conectado a uma rede com ponto neutro aterrado, as correntes homopolares, do secundário são transformadas no auto-transformador, as correntes vão se distribuir de acordo com o mostrado na figura (4.25).

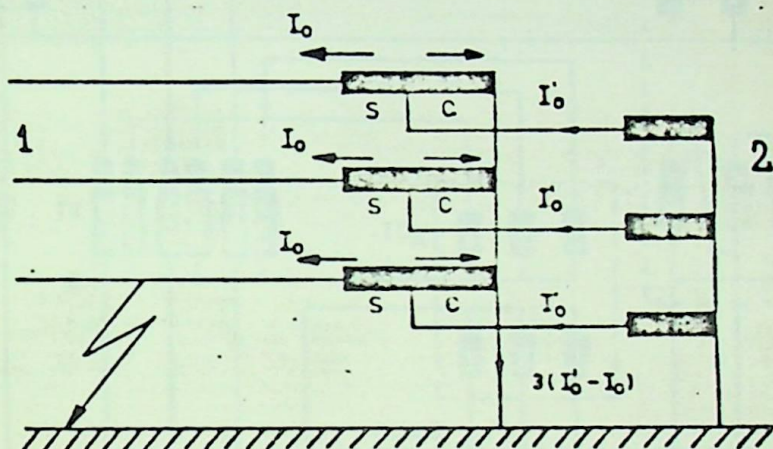


Fig.4.25. Auto-transformador com neutro aterrado

c) Auto-Transformador com Compensação

Na figura (4.26) apresentamos as conexões para proteção de um auto-transformador com enrolamento terciário.

Neste caso devemos fazer a proteção dos 3 enrolamentos.

Os tc's auxiliares poderão ser do tipo auto-transformador desde que os secundários dos tc's de A.T e B.T sejam ligados em triângulo.

O tc auxiliar do terciário, conectado em estrêla deve ser usado quando a corrente secundária do terciário for maior que a corrente nominal do relê.

É importante uma análise das componentes homopolares quando da ocorrência de defeitos fase-terra, vamos analisar três casos:

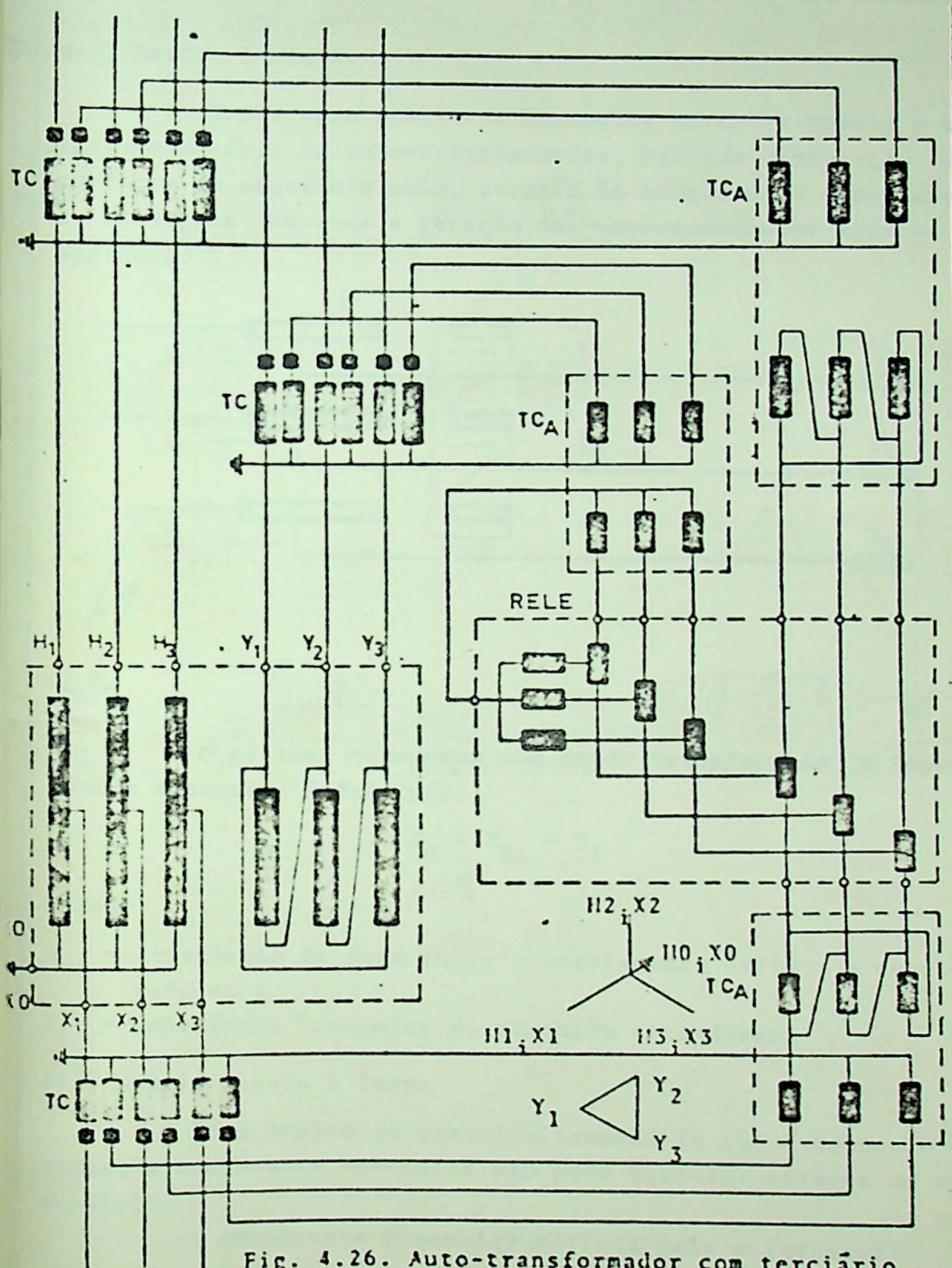


Fig. 4.26. Auto-transformador com terciário

c-1) Neutro Isolado

Neste caso o sistema homopolar percorre apenas o enrolamento série do auto-transformador, havendo circulação de corrente de sequência nula, através do enrolamento conectado em triângulo (havendo a geração dos correspondentes amperes-espiras).

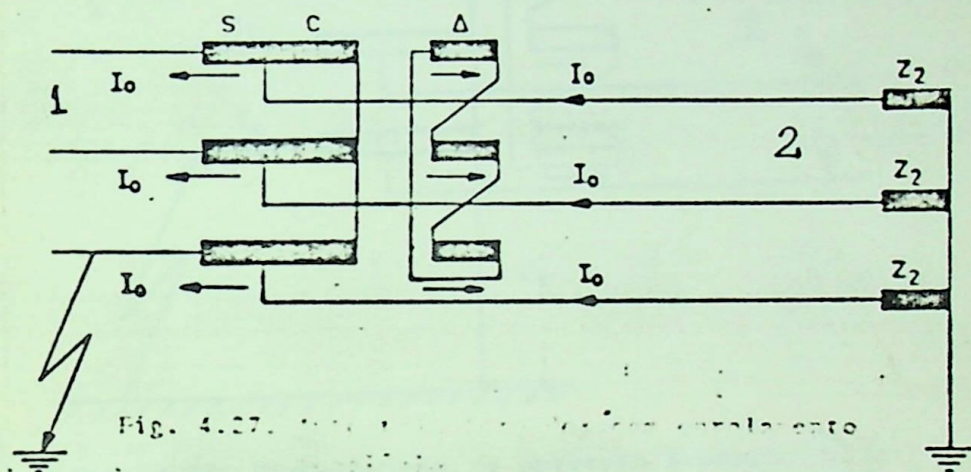


Fig. 4.27. Sistema homopolar com neutro isolado

O sistema homopolar não sendo transformado, a impedância homopolar é dada por:

$$Z_0 = Z_{SA} + Z_2$$

Onde:

Z_{SA} = impedância de fuga entre o enrolamento série e o conectado em Δ

Z_2 = impedância homopolar do circuito secundário.

c-2) Neutro Ligado à Terra

Se o neutro do circuito secundário não é colocado à terra, a componente homopolar não pode circular através do secundário.

A componente homopolar circula pelo enrolamento

série e comum, provocando os amperes-espira antagonistas no enrolamento de compensação, em triângulo. A figura (4.28) mostra a distribuição das correntes homopolares:

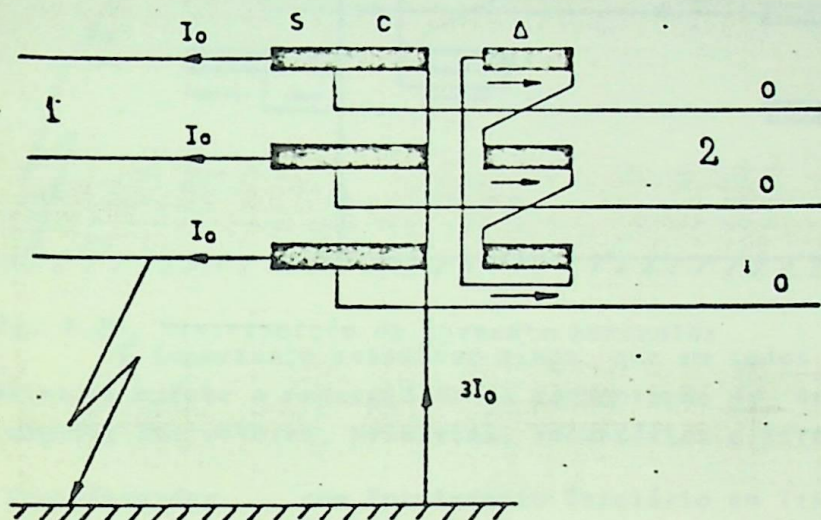


Fig. 4.28. Distribuição da corrente homopolar.

A impedância homopolar será igual a reatância de fuga entre os enrolamentos série e comum de uma parte e o enrolamento triângulo de outra parte.

$$Z_0 = Z(s + c)\Delta$$

Se o circuito secundário é colocado à terra, três caminhos se oferecem ao sistema homopolar: Um caminho principal pelo enrolamento série S, depois duas vias em paralelo, pelo enrolamento comum C, ou pelos condutores do circuito secundário. A figura (4.29) mostra a distribuição das correntes homopolar.

Também neste caso é importante a filtragem da componente de sequência homopolar, uma vez que no enrolamento conectado em triângulo ela está confinada a uma circulação interna.

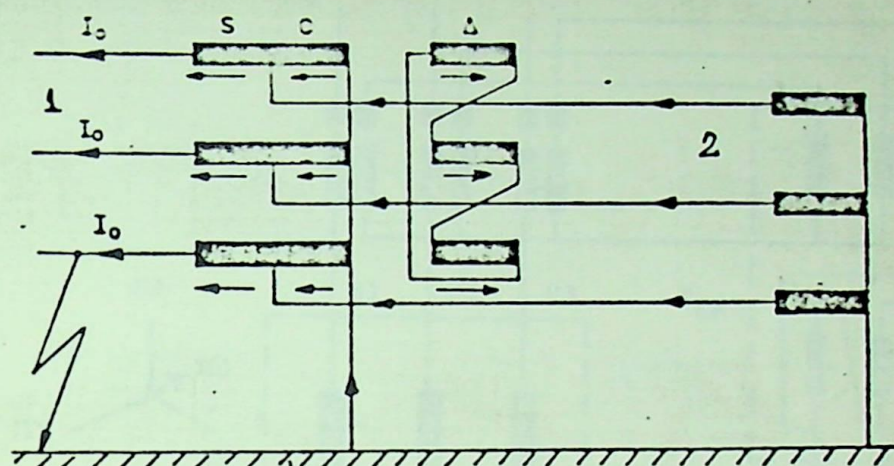


Fig. 4.29. Distribuição da corrente homopolar

É importante ressaltar ainda, que em todos os casos analisados existe a necessidade da compensação do deslocamento angular dos vetores, primários, secundários e terciários.

d) Transformador com Enrolamento Terciário em Triângulo

No caso mostrado na figura (4.30), o enrolamento terciário é usado somente como compensador, sendo os enrolamentos primários e secundários protegidos pelo relé diferencial.

Se as correntes secundárias dos tc's principais conectados em triângulo forem iguais os tc's auxiliares podem ser eliminados.

Nas faltas geradoras de componentes homopolares, podem ocorrer dois casos que merecem uma análise mais detalhada.

d-1) O Ponto Neutro do Secundário não está conectado à Terra

Assim nenhuma corrente pode circular no secundário, o grupo se comporta em relação a sequência homopolar como um acoplamento estrela-triângulo. A impedância de sequência zero é dada por:

$$Z_0 = X_1 + X_3 = X_{13}$$

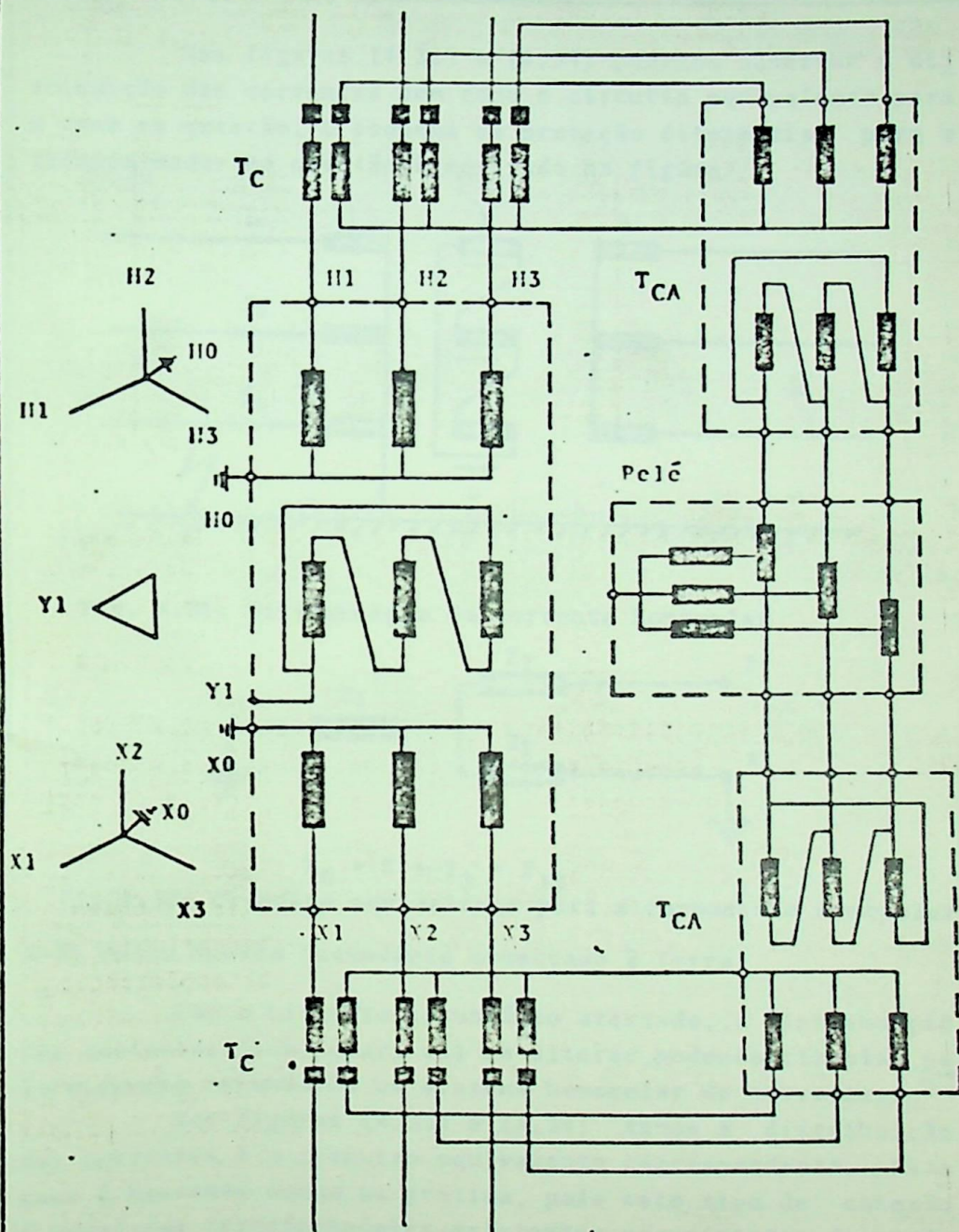


Fig. 4.30. Transformadores $Y \rightarrow Y$ com enrolamento terciário em triângulo

Nas figuras (4.31) e (4.34) podemos observar a distribuição das correntes bem como o circuito equivalente para o caso em questão. O esquema da proteção diferencial para o transformador em questão é mostrado na figura

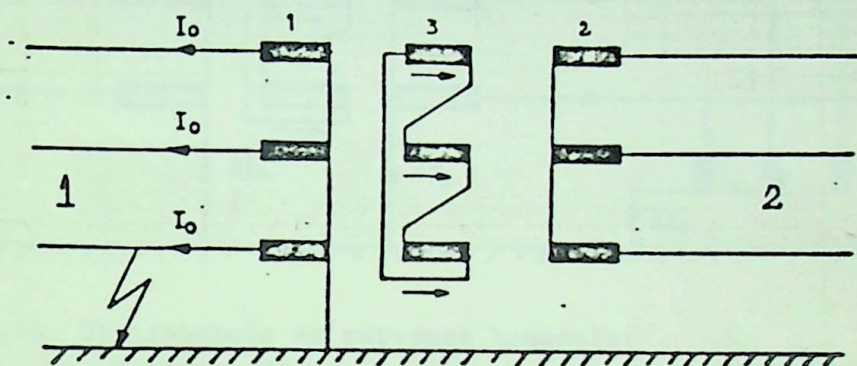
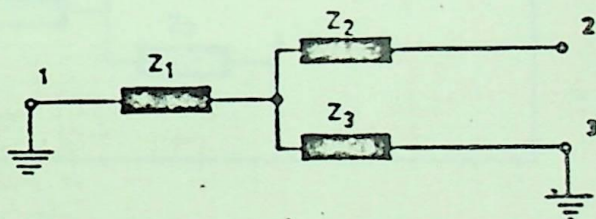


Fig. 4.31. Distribuição da corrente homopolar



$$Z_0 = Z_1 + Z_2 = Z_{13}$$

Fig.4.32- Circuito equivalente para a componente homopolar

d-2) Ponto Neutro Secundário conectado à Terra:

Com o circuito secundário aterrado, a distribuição das correntes (homopolar) vai se alterar, podendo circular pelo circuito secundário um sistema homopolar de correntes.

Nas figuras (4.33) e (4.34) temos a distribuição das correntes e o circuito equivalente correspondente. Este caso é bastante comum na prática, pois este tipo de conexão é usual nos transformadores existentes nos sistemas de potência.

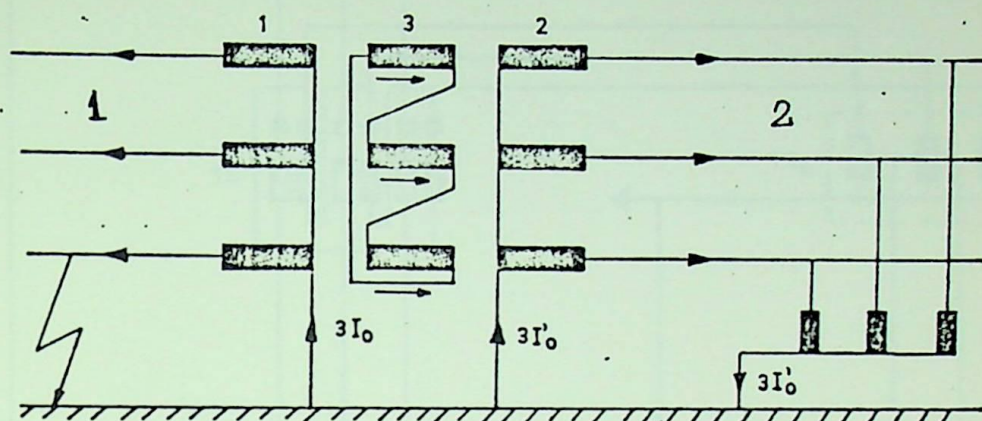


Fig. 4.33. Distribuição da corrente homopolar

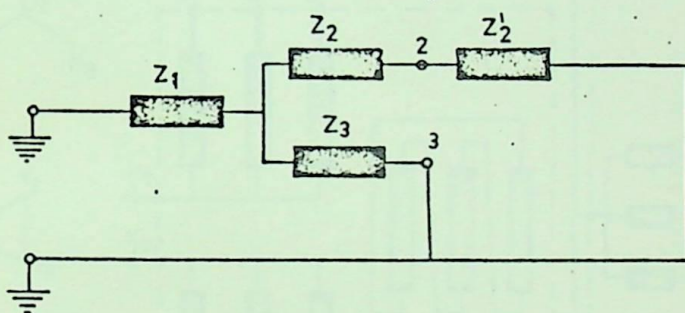
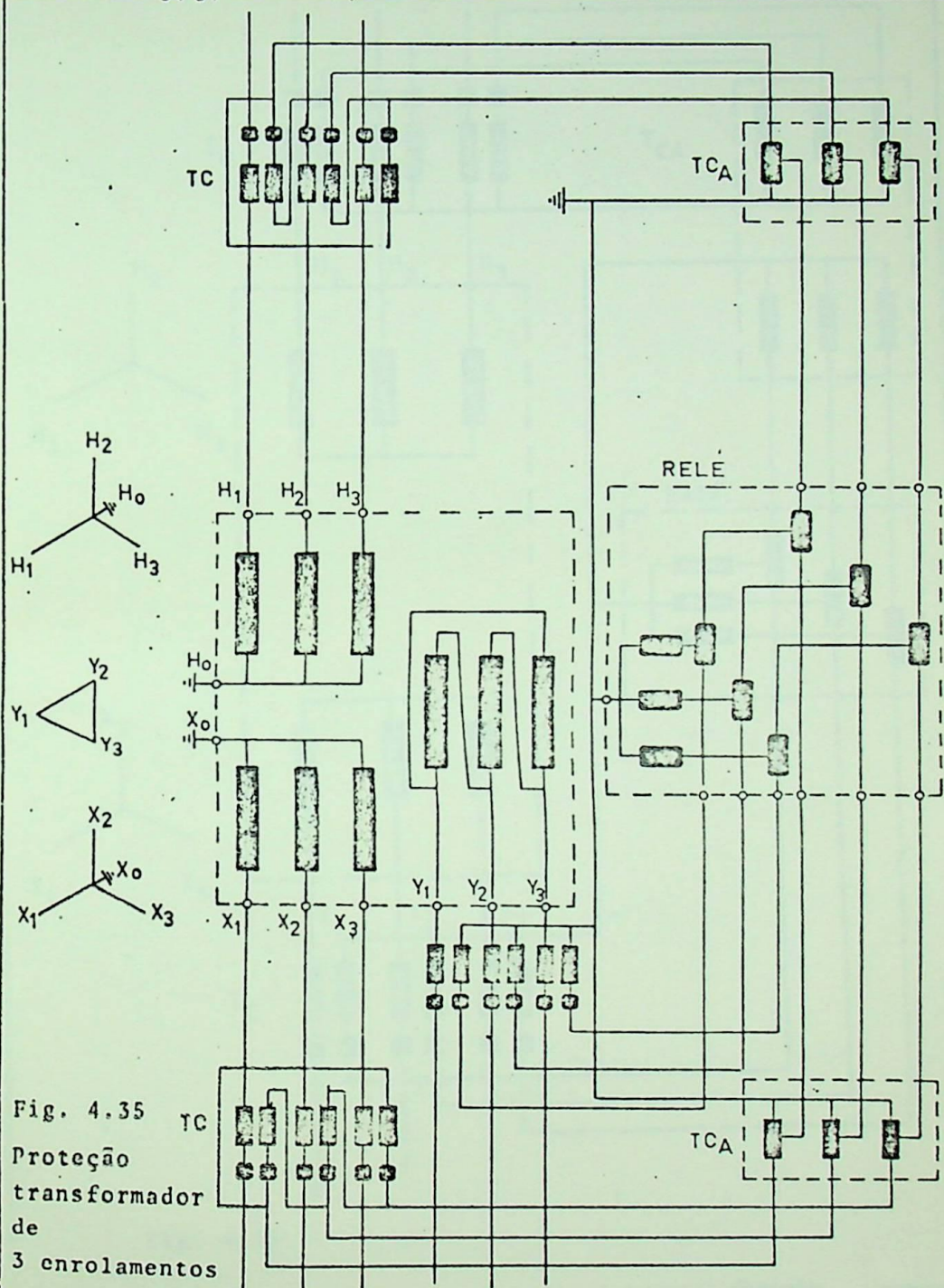


Fig. 4.34. Circuito equivalente para a componente homopolar

Z'_2 é a impedância da rede secundária, referida ao primário do transformador.

Pelo circuito equivalente podemos notar que, haverá uma distribuição da componente homopolar, podendo, portanto, ocasionar uma operação indevida da proteção.

Com uma conexão triângulo de cada um dos lados do relé diferencial, conseguimos que o mesmo se mantenha insensível à componente homopolar. (Vide fig. 4.30)



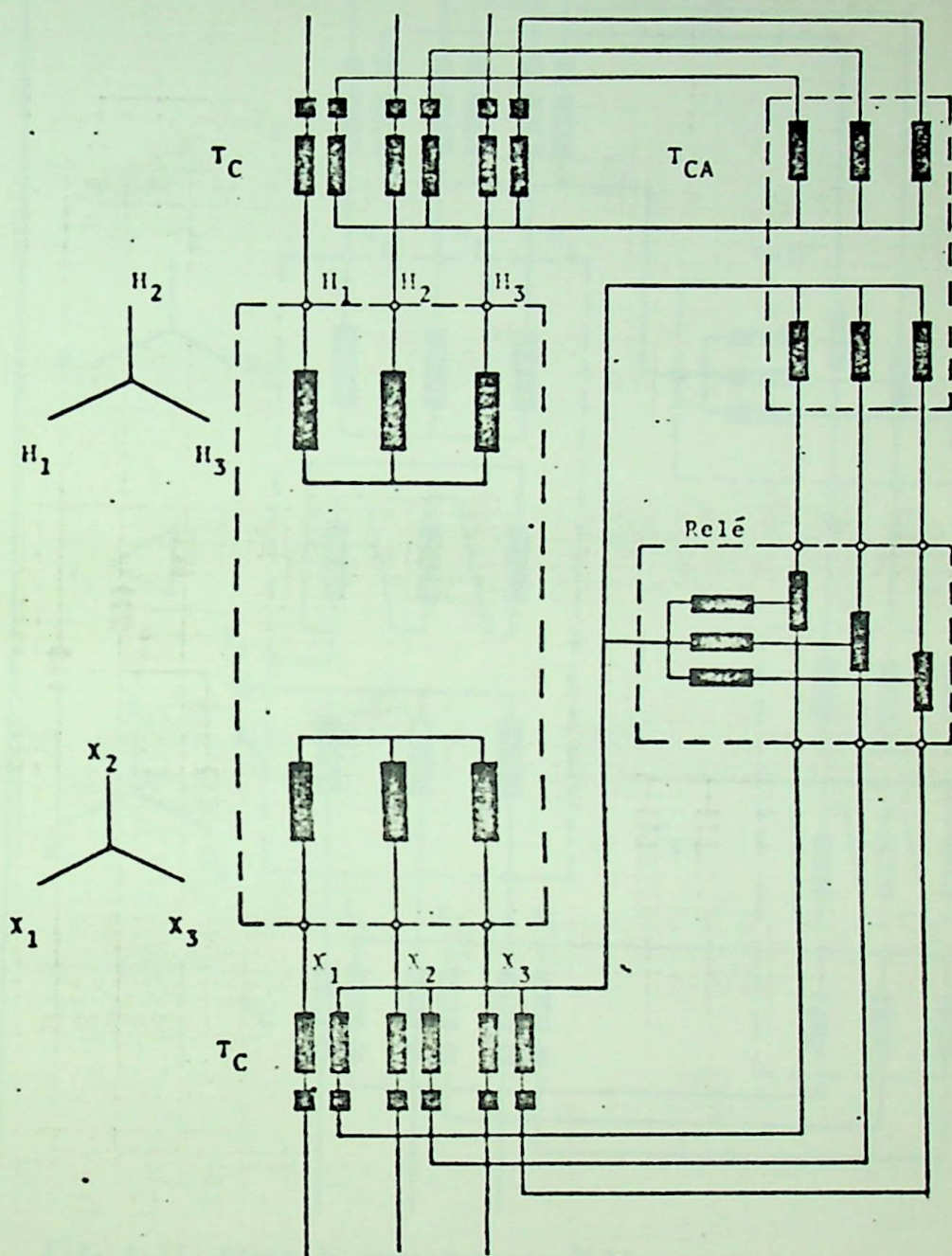


Fig. 4.36

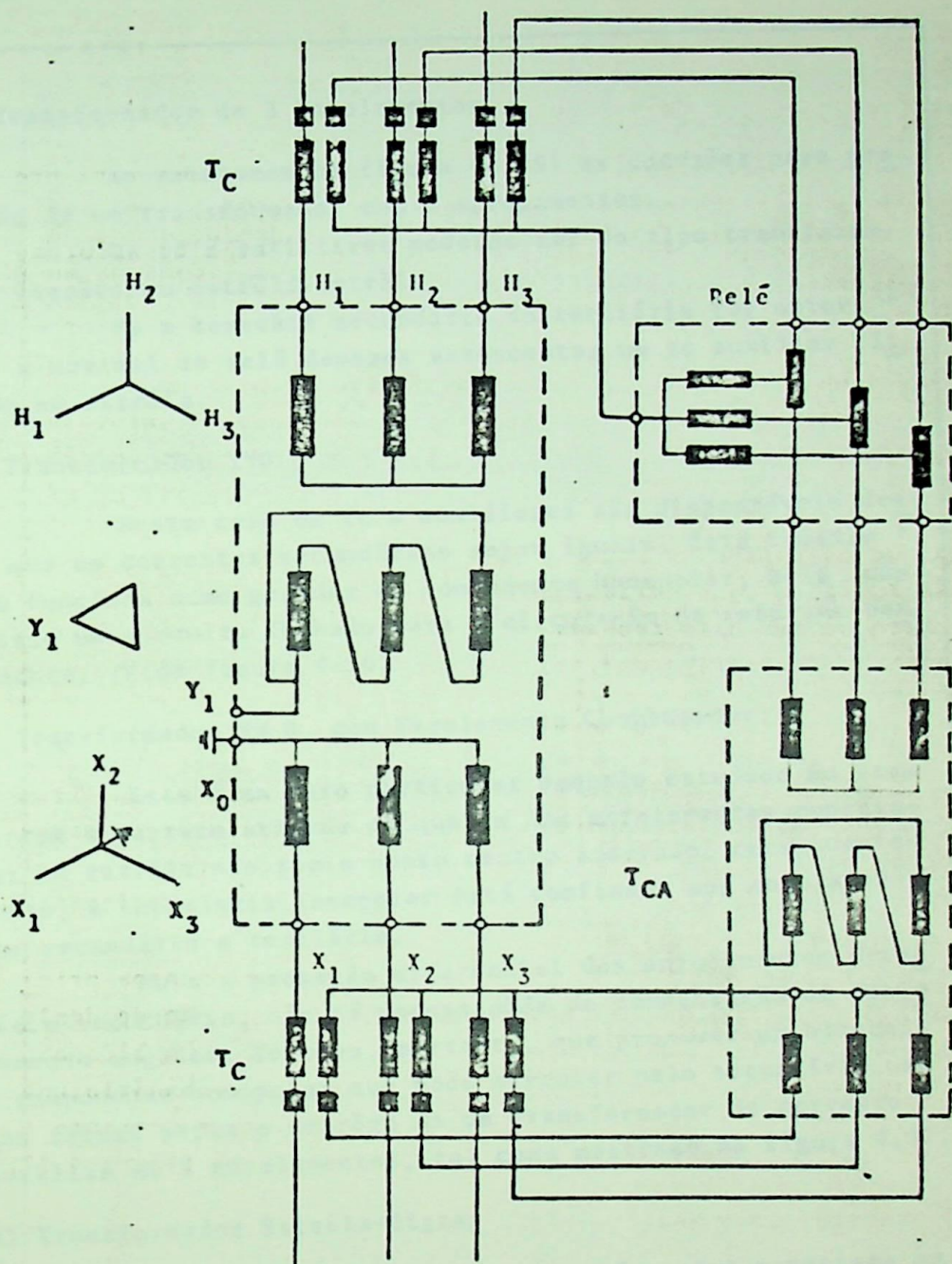


Fig. 4.37. Proteção transformador $Y \Delta$ com enrolamento de compensação

e) Transformador de 3 Enrolamentos

Apresentamos na figura (4.35) as conexões para proteção de um transformador com 3 enrolamentos.

Os tc's auxiliares poderão ser do tipo transformador ligados em estrêla-estrêla.

Se a corrente secundária do terciário for maior que a nominal do relé devemos acrescentar um tc auxiliar ligado em estrêla.

f) Transformador YY0

Neste caso os tc's auxiliares são dispensáveis, desde que as correntes secundárias sejam iguais. Esta conexão não funciona como gerador de componente homopolar, pois não existe um circuito fechado para a circulação da referida componente. (Vide figura 4.36)

g) Transformador YY,0 com Enrolamento Compensador:

Este é um caso particular daquele estudado no item d, com a particularidade de que um dos enrolamentos conecta-dos em estrêla não tem o ponto neutro aterrado; conseqüentemente, a impedância homopolar está confinada aos enrolamentos secundário e terciário.

Para a proteção diferencial dos enrolamentos primário e secundário, não há necessidade de compensação de deslocamento angular. Teremos, portanto, que promover um bloqueio à componente homopolar que pode circular pelo secundário; uma das formas seria o emprêgo de um transformador de corrente auxiliar de 3 enrolamentos, tal como mostrado na figura 4.37.

h) Transformador Estrêla-Zigzag

Vamos analisar agora um transformador conectado em estrêla/Zigzag.

A componente homopolar que circula em um ramo do

zigzag vai encontrar os amperes-espiras antagonistas sobre o segundo ramo (de uma outra fase), enrolada sobre o mesmo núcleo; conseqüentemente, na ocorrência de uma falta geradora de componente homopolar, esta componente não seria transferida ao enrolamento estrêla.

A impedância homopolar neste caso é, então, a impedância de fuga entre as duas partes do enrolamento zigzag, não havendo qualquer influência do enrolamento conectado em estrêla. Ao contrário, se o defeito se produz do lado secundário, conectado em estrêla, o transformador se comporta como um transformador estrêla-estrêla (não aterrado), pois nenhuma corrente homopolar é induzida no enrolamento conectado em zigzag.

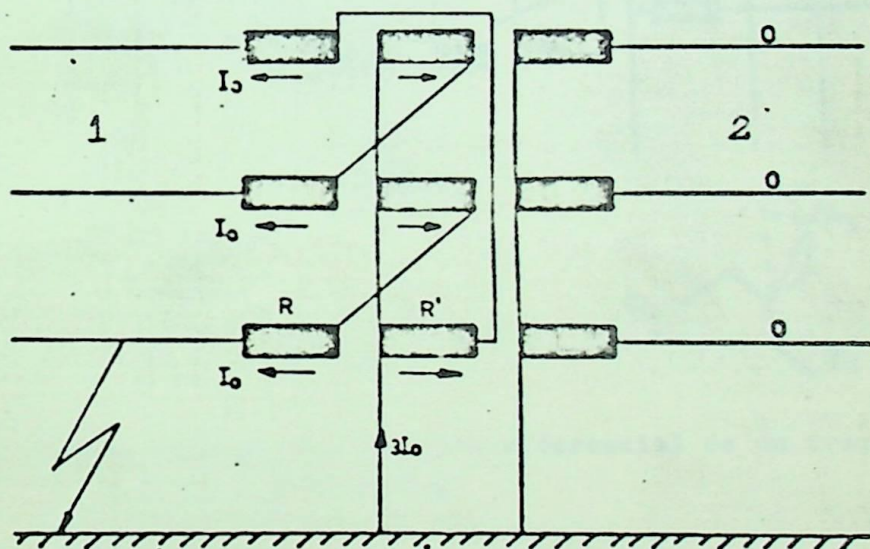


Fig. 4.38. Distribuição da corrente homopolar

Na figura (4.39) apresentamos as conexões para alimentação do relê diferencial de proteção de um transformador estrela-Zig-zag. Devemos compensar o deslocamento angular de 30° existente entre os vetores primários e secundários.

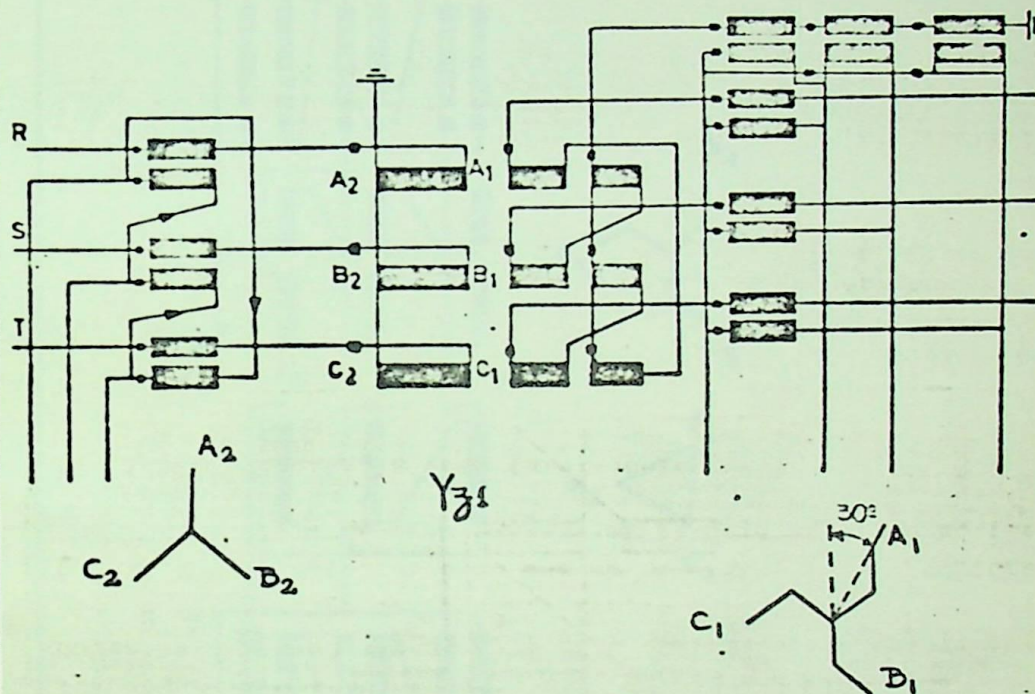


Fig. 4.39. Esquema para proteção diferencial de um transformador estrela/Zig-Zag

i) Transformador Δ/Z

Neste caso o defasamento entre os vetores primários e secundários é 0° ou 180° . Consequentemente, os tc's que alimentam o relê diferencial são conectados em Δ , eliminando assim a componente homopolar que aparece quando da ocorrência de uma falta à terra no lado conectado em zigzag.

Nas figuras (4.41) e (4.42) apresentamos as conexões dos transformadores de corrente.

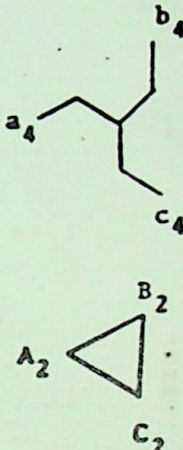


Fig.4.42 - Transformador triângulo Zig-Zag

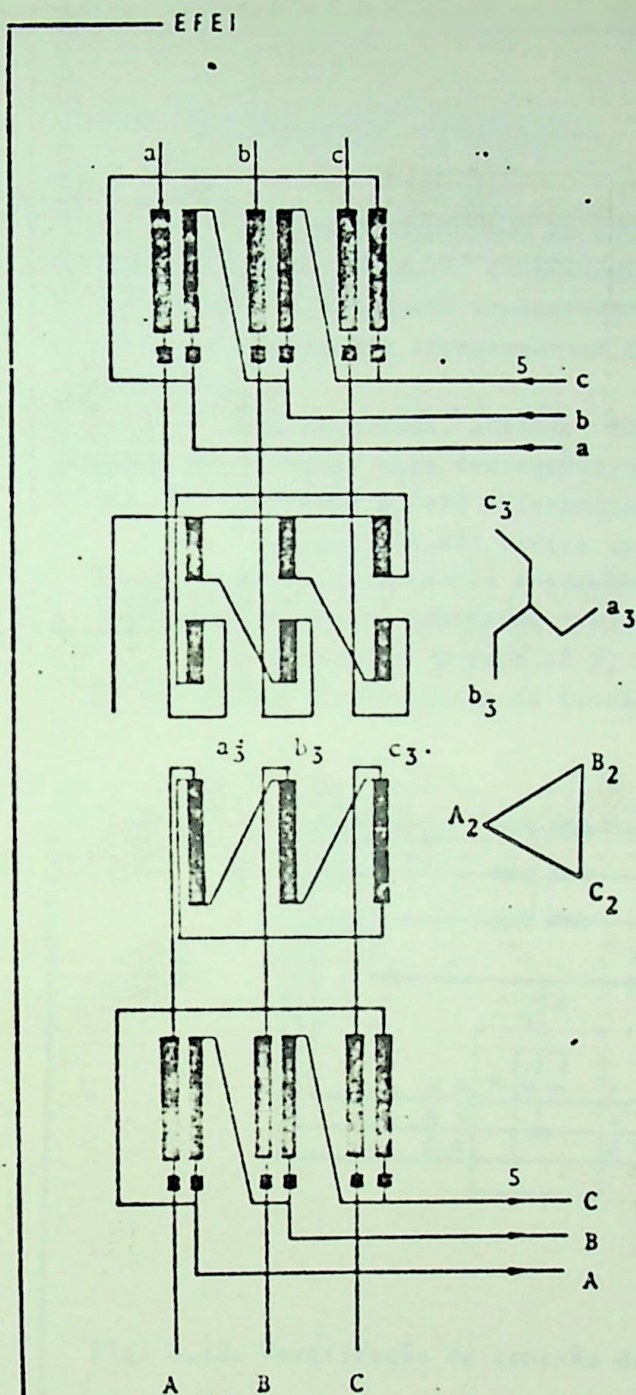


Fig.4.41 - Transformador Triângulo Zig-Zag

4-3- TRANSFORMADORES AUXILIARES

Os transformadores de corrente auxiliares desempenham um importante papel na proteção diferencial dos transformadores. É frequente encontrarmos relés diferenciais, cujos tc's auxiliares apresentam-se conectados de maneira correta.

Apresentamos, adiante, alguns dos erros mais comuns, bem como as suas consequências nos valores das correntes que alimentam o relé diferencial.

A figura (4.43) mostra as conexões que proporcionarão as correntes da tabela a seguir, as correntes i_A , i_B , i_C foram medidas na bobina de operação do relé.

Vamos tomar o caso nº 5, como exemplo, para cálculo das correntes mostradas na tabela a seguir.

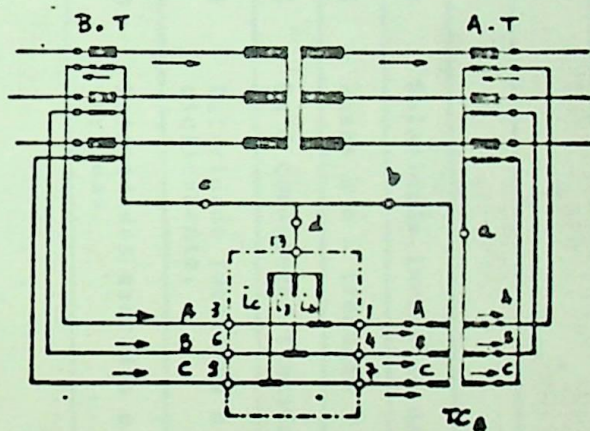


Fig. 4.43. Verificação da conexão do T_C auxiliar YY

Nº	Valor teórico			Valor medido			Erros
	I_A	I_B	I_C	I_A	I_B	I_C	-
0	0	0	0	0	0	0	
1	2	2	2	2,00	2,00	2,00	Polaridade invertida nas 3 fases
2	0	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	0,00	1,73	1,73	Fases B e C trocadas
3	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	1,73	1,73	1,73	Os 3 condutores trocados ciclicamente
4	1	1	1	1,00	1,00	1,00	Polaridade invertida e fases trocadas ciclicamente.
5	1	1	2	1,00	1,00	2,00	Polaridades trocadas e fases A e B invertidas.

Na figura (4.44) as conexões sofreram as inversões apontadas no item 5; vejamos como calcular as correntes que chegam ao relê.

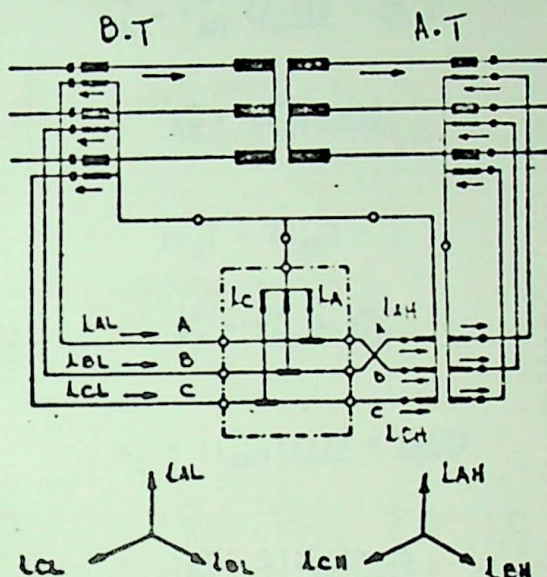


Fig. 4.44 - Inversão de conexões no Tc auxiliar.

Considerando as correntes com módulo unitário, temos:

$$|\vec{i}_{AH}| = |\vec{i}_{BH}| = |\vec{i}_{CH}| = |\vec{i}_{AL}| = |\vec{i}_{BL}| = |\vec{i}_{CL}| = 1$$

$$\vec{i}_A = \vec{i}_{AL} + \vec{i}_{BL} = |\vec{i}_{AH}| (\angle 0 + \angle -120)$$

$$\vec{i}_A = |\vec{i}_{AH}| (1 - \cos 60 - j \sin 60)$$

$$\vec{i}_A = |\vec{i}_{AH}| (1/2 - j \sqrt{3}/2) = |\vec{i}_{AH}| \angle -60^\circ$$

$$|\vec{i}_A| = |\vec{i}_{AH}| = 1$$

$$\vec{i}_B = \vec{i}_{BL} + \vec{i}_{AH}$$

$$\vec{i}_B = \vec{i}_{AH} (\underline{-120} + \underline{0})$$

$$\vec{i}_B = |\vec{i}_{AH}| \underline{-60}$$

$$|\vec{i}_B| = |\vec{i}_{AH}| = 1$$

$$\vec{i}_C = \vec{i}_{CL} + \vec{i}_{CH}$$

$$\vec{i}_C = |\vec{i}_{AH}| (\underline{120} + \underline{120})$$

$$\vec{i}_C = 2 |\vec{i}_{AH}| \underline{120}$$

$$|\vec{i}_C| = 2 |\vec{i}_{AH}| = 2$$

ERROS DE CONEXÃO DOS TRANSFORMADORES DE CORRENTE AUXILIAR,
CONECTADOS EM Y/Δ

A figura (4.45) mostra o diagrama usado para análise dos casos mais frequentes de erros de conexões dos transformadores de corrente auxiliares, quando os mesmos são conectados em Y/Δ.

Na tabela a seguir mostramos os erros cometidos a influência dos mesmos nas correntes que alimentam os rel

DEBITO

VALORES TEÓRICOS

VALORES NUMÉRICOS

Nº I_A I_B I_C I_A I_B I_C

0	0	0	0	0.00	0.00	0.00	
1	0	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	0.00	1.73	1.73	Fases B e C trocadas
2	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	1.73	1.73	1.73	Todas as fases trocadas ciclicamente
3	2	2	2	2.00	2.00	2.00	Dois condutores do lado A, B, C (B e C) trocados e dois condutores do lado D, E, F (D e E) trocados
4	1	1	1	1.00	1.00	1.00	Dois condutores do lado A, B, C ou D, E, F trocados (e A com B ou A com C e D com E)
5	1	1	2	1.00	1.00	2.00	D e F trocados
6	0	$2/\sqrt{3}$	$2/\sqrt{3}$	0.00	1.15	1.15	Transformador P com polaridade trocada
7	1	1	2	1.00	1.00	2.00	Transformador D e F com polaridade errada
8	0	$1/\sqrt{3}$	$1/\sqrt{3}$	0.00	0.50	0.50	Transformador P com polaridade errada e fases B e C trocadas
9	$2/\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	1.15	1.53	1.73	Transformador h com polaridade errada e condutores B e C trocados
10	$1/\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	0.50	1.53	1.73	Transformador E com polaridade trocada e A, B e C trocados ciclicamente
11	$1/\sqrt{3}$	1	$\sqrt{3}$	0.50	1.00	1.53	Transformadores E e F com polaridade errada, A, B e C trocados ciclicamente
12	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$	2	1.53	1.53	2.00	Transformadores B e F com polaridade errada, A e B trocados.
13	1	$1/\sqrt{3}$	$2/\sqrt{3}$	1.00	0.50	1.15	B trocado com P, B com C e lado do alto do transf. com polaridade errada

Análise do caso nº 9 da tabela anterior.

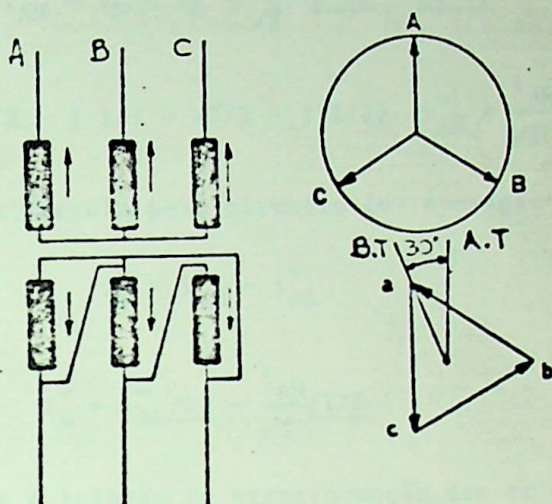


Fig. 4.47 - Distribuição das correntes.

Tomando como referência, os vetores de baixa tensão teremos:

$$\vec{i}_{AL} = i_{AL} / 0^\circ$$

$$\vec{i}_D = \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} / -30^\circ$$

$$\vec{i}_{BL} = i_{AL} / 240^\circ$$

$$\vec{i}_{CL} = i_{AL} / 120^\circ$$

$$\vec{i}_E = \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} / 210^\circ$$

$$\vec{i}_F = \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} / 90^\circ$$

Cálculo do vetor $\vec{i}_{AH}$

$$\vec{i}_{AH} = \vec{i}_D + \vec{i}_E = \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} (\underline{-30} + \underline{210})$$

$$\vec{i}_{AH} = \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} (\sqrt{3}/2 - j 1/2 - \sqrt{3}/2 - j 1/2) \quad \vec{i}_{AH} = \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} \underline{270^\circ}$$

A corrente $\vec{i}_A$ que circula pelo circuito de operação é dada por:

$$\vec{i}_A = \vec{i}_{AH} - \vec{i}_{AL}$$

$$\vec{i}_A = \vec{i}_{AH} \underline{0^\circ} - \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} \underline{270^\circ}$$

(Consideramos que a relação de transformação dos tc's seja $\underline{1}$ deal: $|\vec{i}_{AL}| = |\vec{i}_{AH}|$ se a conexão estiver certa)

$$\vec{i}_A = i_{AH} (1 + j \frac{1}{\sqrt{3}})$$

$$\vec{i}_A = i_{AH} \frac{2}{\sqrt{3}} (\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2}) \quad \vec{i}_A = \frac{2}{\sqrt{3}} i_{AH} \underline{30^\circ}$$

$$|\vec{i}_A| = \frac{2}{\sqrt{3}} i_{AH}$$

Cálculo da corrente $\vec{i}_{CH}$.

$$\vec{i}_{CH} = \vec{i}_F - \vec{i}_D$$

$$\vec{i}_{CH} = \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} \underline{90} - \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} \underline{-30} = \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} (\underline{90} - \underline{-30})$$

$$\vec{i}_{CH} = \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} (j - \frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2}) = \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} (-\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{3}{2})$$

$$\vec{i}_{CH} = i_{AH} \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right)$$

$$\vec{i}_{CH} = i_{AH} / 120$$

Cálculo da corrente $\vec{i}_{BH}$

$$\vec{i}_{BH} = -(\vec{i}_E + \vec{i}_F)$$

$$\vec{i}_{BH} = -\frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} (\angle 210^\circ + \angle 90^\circ)$$

$$\vec{i}_{BH} = -\frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} - j \frac{1}{2} + j \right) = -\frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right)$$

$$\vec{i}_{BH} = -\frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} \angle 150^\circ$$

A corrente $\vec{i}_C$ que circula pela bobina de operação é dada por

$$\vec{i}_C = \vec{i}_{CL} - \vec{i}_{BH}$$

$$\vec{i}_C = i_{AH} / 120 + \frac{i_{AH}}{\sqrt{3}} \angle 150^\circ$$

$$\vec{i}_C = i_{AH} \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \left(-\frac{\sqrt{3}}{2} + j \frac{1}{2} \right) \right)$$

$$\vec{i}_C = i_{AH} \left(-1 + j \frac{2\sqrt{3}}{3} \right)$$

$$|\vec{i}_C| = \sqrt{73} i_{AH}$$

Finalmente a corrente $\vec{i}_B$ vale:

$$\vec{i}_B = \vec{i}_{BL} - \vec{i}_{CH}$$

$$\vec{i}_B = i_{AH}/240 - i_{AH}/120 = i_{AH}(-\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2})$$

$$\vec{i}_B = -j\sqrt{3} i_{AH}$$

$$|\vec{i}_B| = \sqrt{3} i_{AH}$$

conforme mostrado na tabela anterior.

5. SENSIBILIDADE DO RELÉ DIFERENCIAL

5.1. GENERALIDADES

Trataremos neste capítulo da sensibilidade do relé diferencial para os vários tipos de falta.

Para a análise mencionada escolhemos o relé RT22b da Siemens, cujo diagrama completo com os transformadores de corrente e pontes retificadoras, é mostrado na figura (5.1).

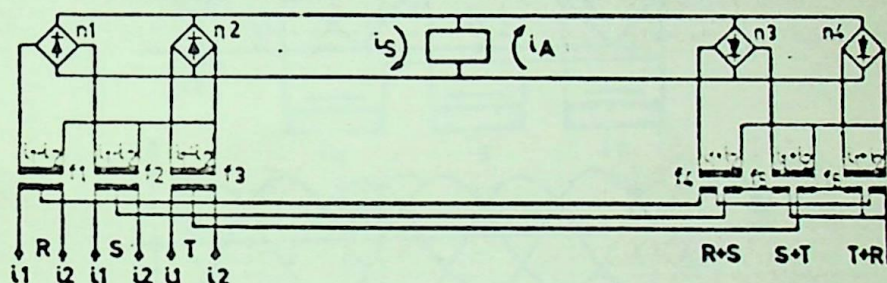


Fig. 5.1. Alimentação do relé diferencial

A análise da corrente circulante pelos transformadores internos e retificadores indica que, com uma mesma magnitude da corrente A.C. a corrente D.C. resultante, varia função da distribuição da corrente total, pelas três fases neutro. Assim o circuito mostrado na figura (5.1) apresent

diferentes valores de resposta, para os diferentes tipos de falta.

Passemos a análise das diversas faltas.

5.2. FALTA TRIFÁSICA

No caso de uma falta trifásica, teremos correntes nos três transformadores, e a distribuição das mesmas, através das pontes retificadoras, no instante t_1 é mostrado na figura (5.2a). Na figura (5.2b) podemos notar que a componente d.c é igual a magnitude da maior das correntes por um período de tempo igual a $\pi/3$.

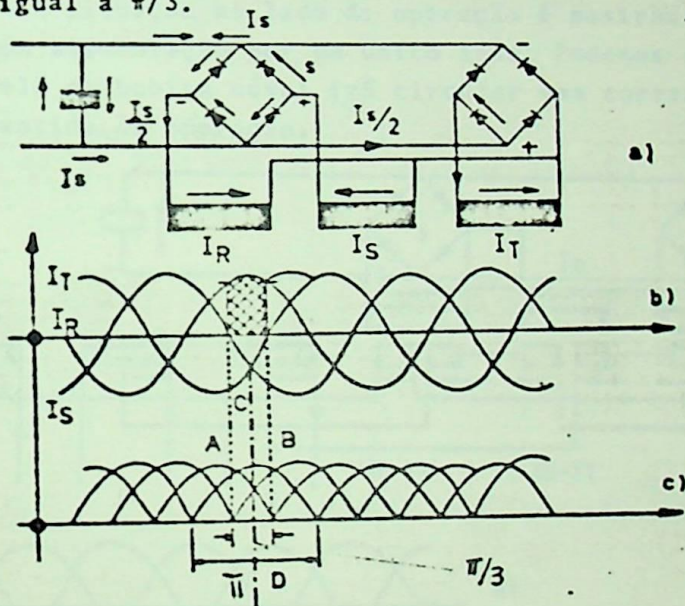


Fig. 5.2. Alimentação do relê no caso de uma falta trifásica

Consequentemente o valor médio da corrente d.c circula através do relê de bobina m e el é dado por:

$$|idc| = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = \quad (5)$$

$$|idc| = \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \cos \phi d\phi = \frac{3}{\pi} \operatorname{sen} \phi \Big|_{-\pi/6}^{\pi/6} \quad (5.)$$

$$|idc| = 3/\pi$$

Considerando o valor máximo, da senóide retificada, como um tário.

Na figura (5.2a) mostramos a retificação da corrente no lado de retenção do relé.

A situação no lado de operação é mostrada na figura (5.3), com alimentação por um único lado. Podemos concluir, que no relé de bobina móvel irá circular uma corrente igual a $3/\pi$ no sentido de operação.

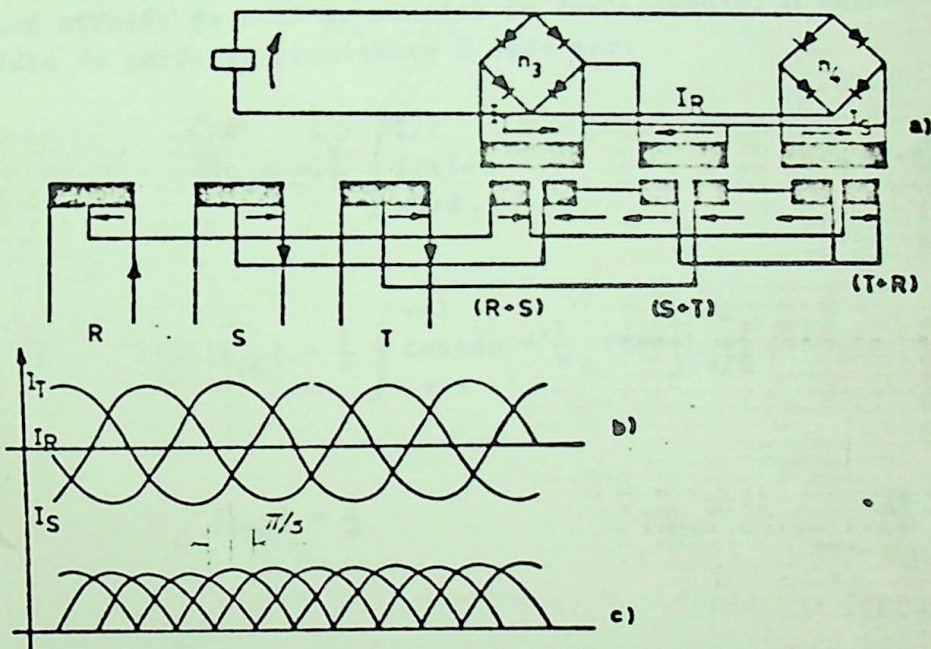


Fig. 5.3. Alimentação do relé bobina móvel no sentido de retenção

No caso de uma falta trifásica dentro da zona de proteção e alimentada pelos dois extremos, o efeito de retenção é reduzido enquanto o de operação é reforçado.

A figura (5.3) mostra a distribuição das correntes para o caso acima.

5.3. CURTO CIRCUITO FASE-FASE

No caso de um curto-circuito fase-fase, a corrente circulará por uma das fases envolvidas retornando pela outra, conforme mostrado na figura (5.4a).

No circuito de medição do relê as correntes se distribuirão tal como mostrado na figura (5.4b), considerando o mesmo instante t_1 , da figura (5.4a).

A figura (5.4c) mostra a corrente retificada que flue através do relê no sentido de desligamento. O valor médio da corrente resultante é dado por:

$$|i_{DC}| = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (5.4)$$

$$|i_{DC}| = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \phi d\phi = \left[\frac{1}{\pi} \sin \phi \right]_{-\pi/2}^{\pi/2}$$

$$|i_{DC}| = \frac{2}{\pi} \quad (5.5)$$

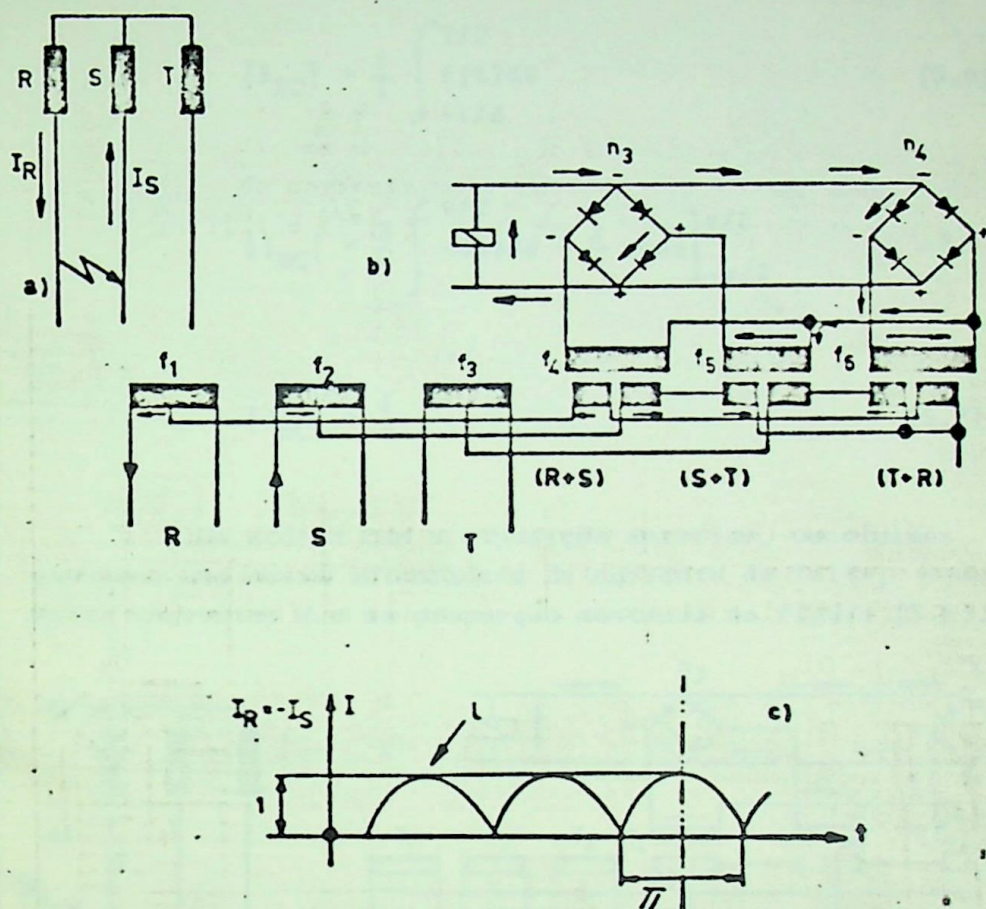


Fig. 5.4. Alimentação do relê de bobina móvel no caso de uma falta fase-fase

5.4. CURTO CIRCUITO FASE-TERRA

Vamos analisar o caso de um curto-circuito fase-neutro(em sistema aterrado).

A distribuição das correntes é mostrada na figura (5.5a). O valor médio da corrente que flue através do relê de bobina móvel será dado por: (figura 5.5c)

$$|i_{DC}| = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad (5.6)$$

$$|i_{DC}| = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \phi d\phi = \frac{2}{\pi} \sin \phi \Big|_{-\pi/2}^{\pi/2}$$

$$|i_{DC}| = \frac{4}{\pi} \quad (5.7)$$

De acôrdo com a exposição anterior, concluímos que para uma mesma intensidade de corrente de falta, vamos obter correntes d.c na proporção mostrada na figura (5.6).

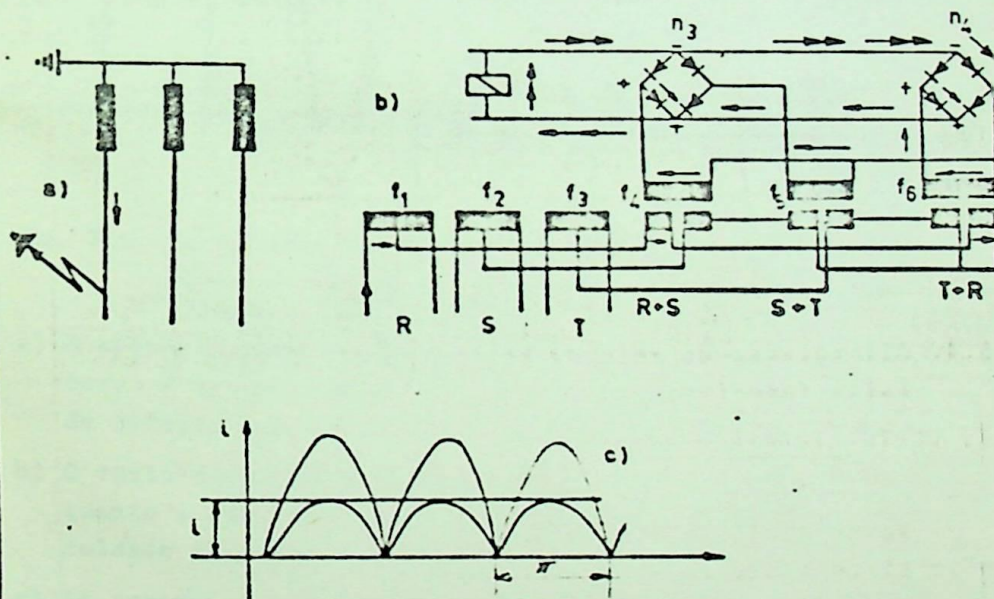


Fig. 5.5. Alimentação do relê bobina móvel no caso de uma falta fase-terra

Para operação do relé é necessário fluir através do relé de bobina móvel uma determinada corrente.

Assim as correntes de Trip necessárias, sob as diversas condições de falta, são inversamente proporcionais aos valores de corrente mostrados na fig.(5.6). A relação de sensibilidade do relé diferencial em questão seria:

$$\frac{1}{4} : \frac{1}{2} : \frac{1}{3} = 3 : 6 : 4$$

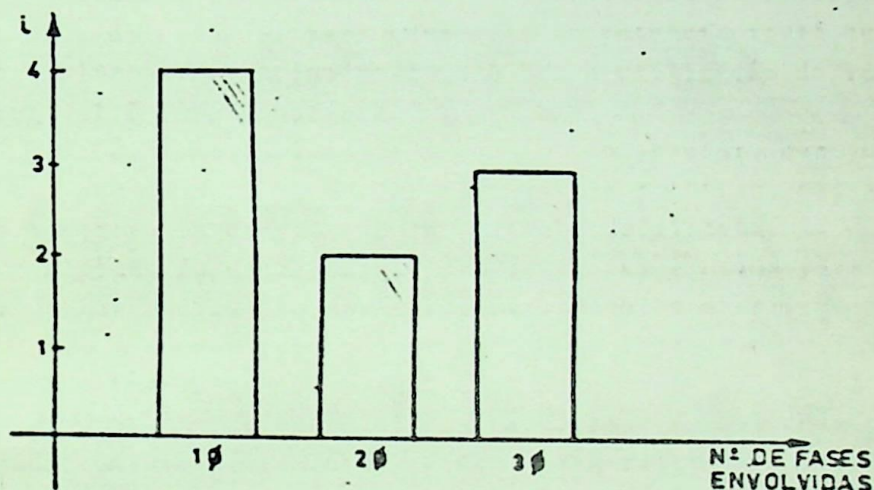


Fig. 5.6. Sensibilidade do relé diferencial para diferentes tipos de faltas

Podemos concluir que:

- A sensibilidade do relé para detecção de um defeito fase-terra é máxima; com uma menor intensidade de corrente de defeito conseguimos a operação do relé.
- O curto-circuito trifásico é um caso intermediário, enquanto o curto-circuito fase-fase apresenta maior dificuldade para sua detecção.
- Se tomarmos o curto-circuito trifásico como referência, podemos dizer que nos defeitos fase-fase sem contato a

terra a corrente é da ordem de $\sqrt{3}/2$ vezes do seu valor, (nos casos em que $Z_1 = Z_2$), o que dificulta ainda mais a detecção, pelo relé diferencial, deste tipo de falta. A falta fase-terra pode ter, em relação a corrente de defeito trifásico, vários valores, dependendo das condições de aterramento do sistema.

CAPÍTULO VI

PROTEÇÃO DIFERENCIAL PARA GERADORES:

6.1 - Generalidades

É comum a recomendação pelos fabricantes do emprego de proteção diferencial para geradores de potência igual ou superior a 1000 KVA. Acima de 10.000 KVA a utilização do relé diferencial é, uma constante.

Não é, necessariamente o tamanho do gerador, que justifica o emprego, ou não, de uma determinada proteção, mas sim sua importância em relação ao restante do sistema.

A proteção diferencial para geradores é usada para os casos de curto-circuito nos enrolamentos do estator.

Ela pode ser aplicada, a geradores, compensadores síncronos, motores síncronos e de indução.

A proteção diferencial dos geradores, normalmente é combinada com uma proteção específica para faltas à terra.

Esta preocupação reside no fato de que sendo as faltas fase-terra as mais frequentes, é desejável a sua eliminação mais rápida possível, afim de evitar a sua degeneração e outro tipo de falta com consequência ainda maiores para a unidade protegida.

Em alguns casos a proteção para faltas a terra é indispensável, dependendo da forma de aterramento do gerador, pois a detecção da mesma pela proteção diferencial não seria conveniente.

É o caso dos alternadores aterrados através de uma alta impedância, sendo a corrente de falta fase-terra uma pequena parcela da corrente de plena carga.

A sensibilização do relé diferencial para esta falta poderá causar operação indesejável na ocorrência de um defeito.

fora da zona de operação.

A figura (6.1) mostra o diagrama de conexões para proteção diferencial de um grupo gerador-transformador, e um sistema de detecção de defeitos à terra.

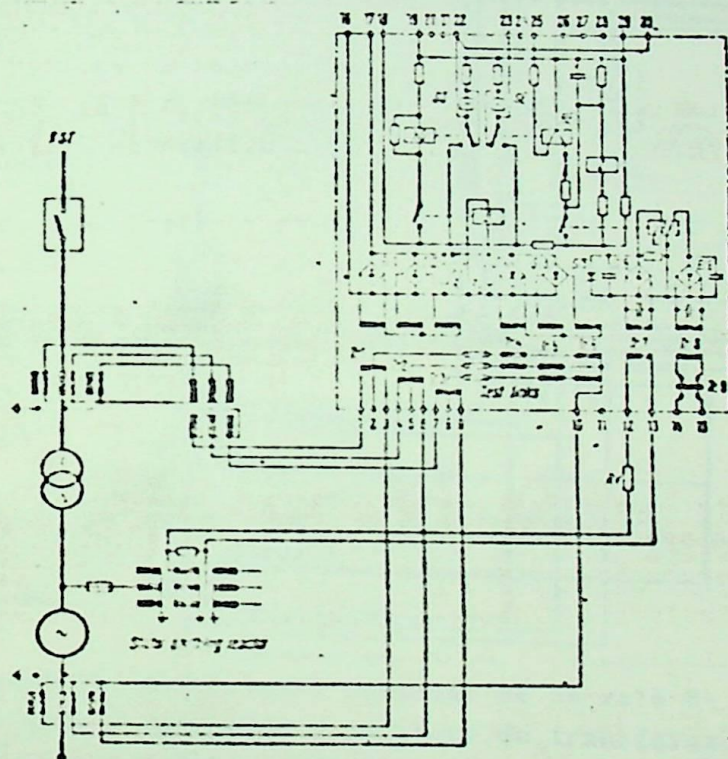


Fig. (6.1)

6.2 - Princípio de Medição :

O princípio de medição é o mesmo do relé diferencial para transformadores e tratado no capítulo 2 do presente trabalho.

Tendo em vista alguns aspectos específicos da proteção dos transformadores, alguns componentes são dispensáveis, como o circuito ressonância para captação da 2ª harmônica da corrente de "inrush" dos transformadores.

A figura (6.2) mostra as partes componentes e as conexões de um relê diferencial para geradores. (o relê RG-22 da Siemens)

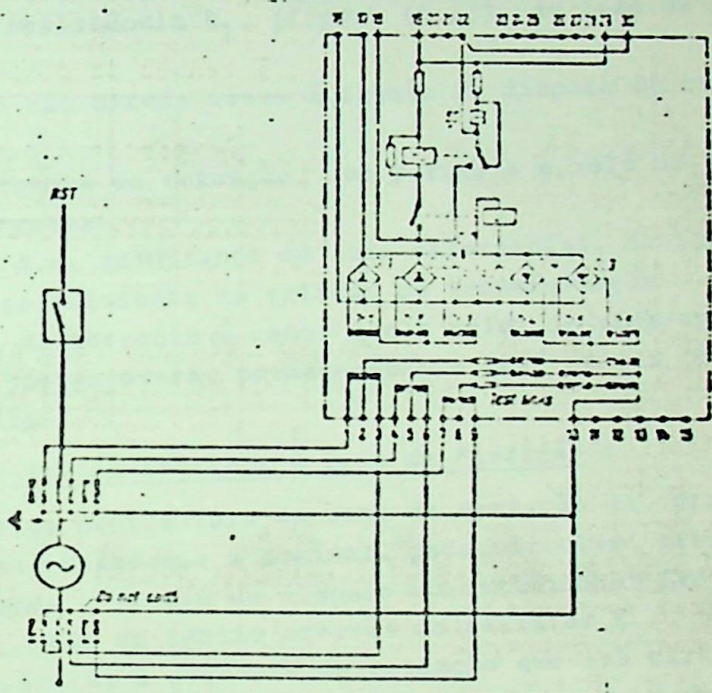


Fig. 6.2

A proteção diferencial consiste de um relê de bobina móvel D, o qual é conectado a um grupo de transformadores de corrente intermediários, TR1 a TR6, através dos retificadores GL1 a GL4 e GL7.

Tem ainda incorporado um relê auxiliar HD e um relê sinalizado SD, o qual pode ser rearmado pelo lado externo do relê.

Os transformadores intermediários são conectados de maneira análoga ao relê diferencial para transformadores, consequentemente apresenta a mesma sensibilidade para os diferentes tipos de falta (vide capítulo 5).

6.3 - Característica de Operação

6.3.1 - Operação Normal

Com uma corrente de operação menor ou igual à corrente nominal da máquina, apenas uma pequena queda de tensão é causada através da resistência R_1 , (figura (6.2)), do lado de retenção.

Esta tensão não excede ainda a tensão de disparo do retificador G17.

Ainda a corrente de retenção, que percorre o relé de bobina móvel, é pequena.

A corrente d.c. resultante do lado diferencial, devido à pequena diferença existente na relação de transformação dos transformadores de corrente, é menor que o valor de pick-up fixado pela mola restauradora, permanecendo o relé na sua posição de equilíbrio.

6.3.2 - Defeitos Externos À Zona de Proteção :

Se um defeito ocorre fora da zona de operação da proteção, uma corrente maior que a nominal, pode circular através do relé, superando a tensão de disparo do retificador G17, devido à grau de queda de tensão através do resistor R_1 .

Em consequência, a corrente de retenção que irá circular através do relé aumenta juntamente com a corrente de defeito, que circula através do gerador.

Nestas condições, teremos também uma corrente diferencial como resultado do erro de transformação das correntes, em consequência da saturação dos transformadores de corrente principais.

Isto causa a circulação de uma corrente na direção de "trip".

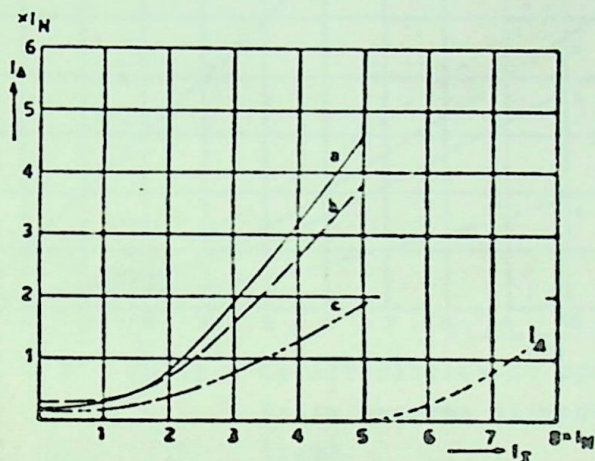
O relé diferencial D é acionado por uma corrente igual a diferença entre as correntes de operação e restrição.

O relé deve ser calibrado para que o efeito da corrente de retenção ou da corrente de retenção e mola de retenção,

neste caso, seja sempre superior ao efeito produzido pela corrente de operação.

Com isto evitamos falsas operações da proteção.

Na figura (6.3) é mostrado a característica de operação do relé diferencial RG-22 (Siemens), quando da ocorrência de um defeito fora da zona de proteção.



- a - defeito trifásico
- b - defeito fase-fase
- c - defeito fase-terra.

Fig. (6.3) - Característica de operação para uma falta externa.

6.3.3 - Faltas Internas à Zona de Proteção

Analisemos inicialmente a ocorrência de uma falta interna na zona de proteção e alimentada por um único terminal.

Neste caso a corrente de retenção é igual a corrente de operação.

O efeito de retenção é somente metade daquele existente quando da ocorrência de um defeito fora da zona de atuação da proteção, uma vez que a corrente flui somente em um dos conjuntos de tc's do lado de retenção.

No lado diferencial, no entanto, aparecerá uma preponderante corrente de operação; na figura (6.4) mostramos a car

terística de operação do relê, para o caso analisado.

Como no caso de uma falta externa, o tipo de defeito deve ser distinguido.

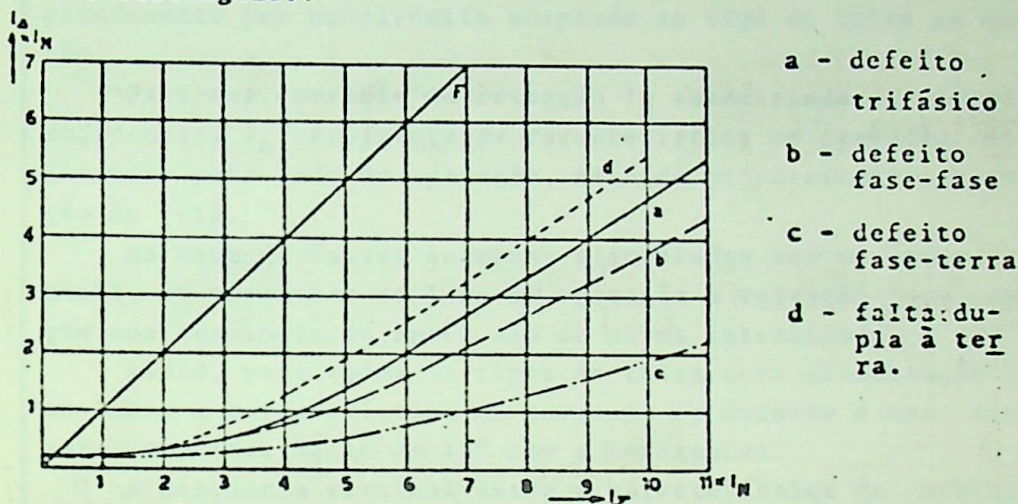


Fig. (6.4) - Característica de operação para uma falta interna alimentada por um extremo.

A figura (6.5) mostra a característica de operação no caso de uma falta interna à zona de proteção e alimentada pelos dois extremos.

Pode-se observar que neste caso o efeito de retenção do relê é violentamente reduzido, aparecendo somente a parte inicial da característica mostrada na figura (6.4)

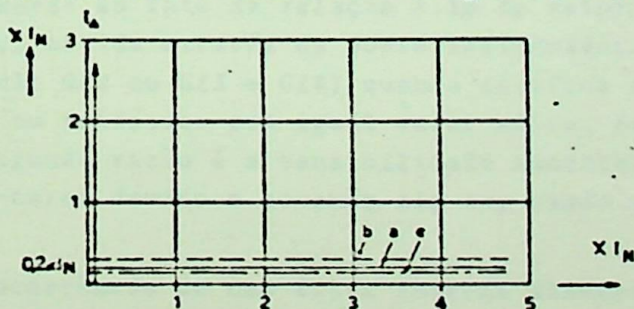


Fig. (6.5) - Característica de operação para uma falta interna alimentada pelos dois extremos.

As características anteriormente mostradas devem ser interpretadas da seguinte maneira:

Os circuitos de retenção e diferencial são excitados separadamente por um circuito adaptado ao tipo de falta em questão.

Para uma corrente de retenção I_R selecionada, a corrente diferencial I_0 resultante da característica de operação, deve circular pelo lado de operação, afim de proporcionar a operação do relé.

No caso de faltas internas alimentadas por um único terminal, as correntes do lado de operação e retenção (que chegam aos terminais do relé) são de mesma intensidade.

Assim, para todos os tipos de falta (com alimentação por um lado) a característica da corrente de defeito é uma linha reta, com inclinação de 45° com a horizontal.

A distância vertical entre a característica de operação do relé e a característica da corrente de defeito, é o excesso de corrente em relação a corrente de pick-up do relé.

Este excesso é comparativamente maior para as menores correntes de defeito, resultando assim uma rápida operação do relé para todas as condições de falta desenvolvidas na prática.

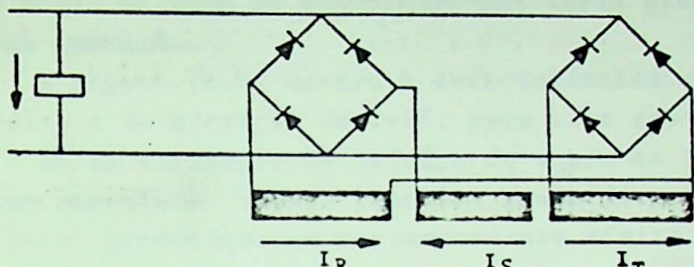
As características de operação diferem largamente, para os diferentes tipos de falta.

Existem duas razões para as diferenças existentes; a primeira deve-se ao fato da relação 1:15 do valor médio da corrente d.c. obtida através da ponte retificadora de onda completa (G11; G12 ou G13 e G14) quando retifica uma corrente monofásica ou trifásica com igual valor eficaz (vide fig. 6.6).

A segunda razão é a sensibilidade aumentada para as faltas fase-terra devido a conexão zig-zag usada no lado de operação.

Na ocorrência de uma falta interna alimentada pelos dois extremos, se as correntes fossem de igual magnitude, e de sen

a)



b)

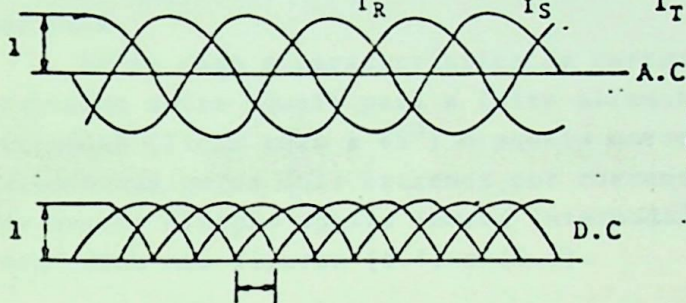


Fig. (6.6) - Retificação de uma corrente trifásica.

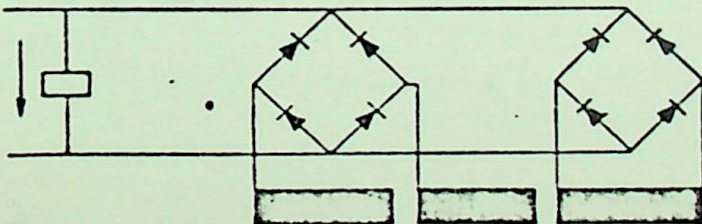
O valor médio da corrente dc será :

$$|i_{dc}| = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt = \frac{3}{\pi} \int_{-\pi/6}^{\pi/6} \cos \phi d\phi = \frac{3}{\pi} \left[\sin \phi \right]_{-\pi/6}^{\pi/6} = \frac{3}{\pi}$$

No caso de uma corrente monofásica, teremos :-

$$|i_{dc}| = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) dt \quad |i_{dc}| = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos \phi d\phi \quad |i_{dc}| = \frac{2}{\pi}$$

a)



b)

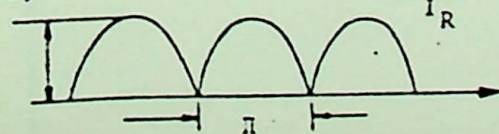


Fig. (6.7) - Retificação de uma corrente monofásica.

tidos opostos, a soma vetorial das mesmas poderia não resultar nula, no lado de restrição, mas teria pleno efeito no lado de operação.

A figura (6.5) mostra a característica da corrente de defeito e de operação do relé, para este caso particular.

Se as correntes de defeito de ambos os lados não tem mesma magnitude, a soma vetorial (lado de retenção) desvia-se de zero, produzindo um correspondente efeito de estabilização do relé.

Neste caso a característica da corrente de falta estaria colocada entre aquela para a falta alimentada por um único terminal (linha reta a 45°) e aquela correspondente à falta alimentada pelos dois extremos, por correntes de igual magnitude mas de direção oposta (curva intermediária entre aquelas mostradas nas figuras (6.4) e (6.5)).

6.4 - Tempo de Operação da Proteção :

Para completar a exposição das características de operação do relé diferencial, tomamos como exemplo o RG-22 (Siemens).

Na figura (6.8) mostramos a característica corrente-tempo do referido relé, incluindo relé auxiliar, sendo que relé auxiliar em questão RH-29 (Siemens) tem um tempo de operação de 20 (ms).

O tempo de operação tomado na maioria dos casos na prática é de 50 (ms).

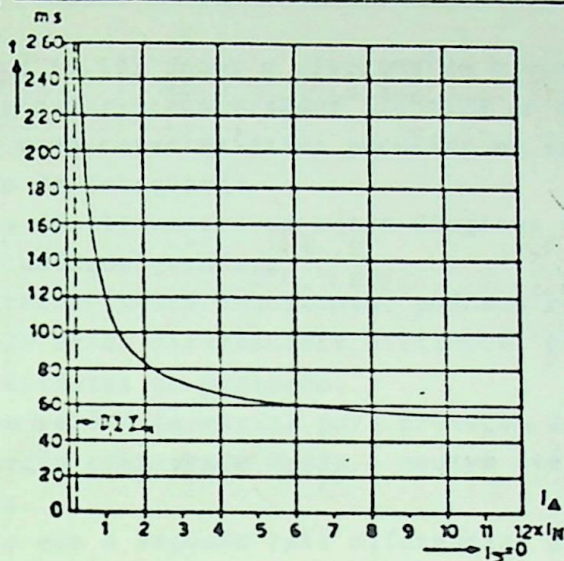


Fig. (6.8) - Característica tempo-corrente do relé diferencial.

6.5 - Exemplos de Aplicações

Apresentaremos a seguir alguns exemplos de aplicação de proteção diferencial a geradores, bloco geradores-transformadores e bloco gerador-transformador com transformador intermediário.

Na figura (6.9) apresentamos um esquema bastante simples para proteção do Bloco Gerador-transformador.

No mesmo esquema aparecem as demais proteções do gerador; no caso em questão, o relé diferencial abrange a zona compreendida entre o neutro do gerador e a alta tensão do transformador; temos ainda os tc's auxiliares para compensação do deslocamento angular do transformador.

Importante notar que a proteção diferencial oferece uma cobertura para 80% do enrolamento do estator, devido à contatos à terra.

Dai a existência de uma proteção específica à terra, com cobertura de 100% do enrolamento; a referida proteção mede componente de sequência zero originada por um contato a terra.

Na figura (6.10) temos o diagrama de bloco das proteção de um grupo gerador-transformador idêntico ao caso anterior apresentando como característica peculiar um relé de distância como proteção de retaguarda.

A figura (6.11) mostra um outro diagrama de bloco da proteção de uma unidade geradora.

Como característica importante, podemos ressaltar a existência de dois relés diferenciais distintos, consequentemente duas zonas distintas de proteção.

Temos um relé diferencial para proteção do gerador, cuja zona de proteção compreende desde o neutro até os seus terminais de saída.

Enquanto que o segundo relé diferencial protege somente o transformador elevador, cuja zona de proteção compreende seus enrolamentos de alta e baixa tensão.

Um cuidado especial deve ser tomado quanto a localização dos transformadores de corrente, (1) e (2), afim de manter mínimo comprimento de cabo sem proteção diferencial.

Para permitir uma completa proteção ao cabo, podemos trocar a posição dos transformadores de corrente (1) e (2), fazendo uma superposição das zonas de proteção dos relés em questão.

A figura (6.12) mostra o diagrama de proteção de um gerador de 228 MVA (GARDNER POWER STATION-MANILA), transformador levador: 14,4/115 KV, 232 MVA, e o transformador de Serviço 4,16/14,4 KV, 17 MVA.

A proteção do grupo em questão apresenta alguns aspectos que merecem ser ressaltados:

O gerador possui proteção diferencial cuja zona de proteção é sobreposta pela proteção diferencial do bloco gerador-transformador.

A proteção do bloco, compreende os três terminais existentes.

O transformador de 17 MVA, 4,16/14,4 KV possui proteção diferencial própria, enquanto que o gerador possui também pro

E F E I

- A : diferencial + contato à terra (80%)
B : Proteção contato à terra (100%)
C : Rotor à terra.
D : Sobre-tensão.
E : Desequilíbrio de carga.
F : Sobrecarga.
G : Potência Inversa.
H : Sobre corrente temporizado.

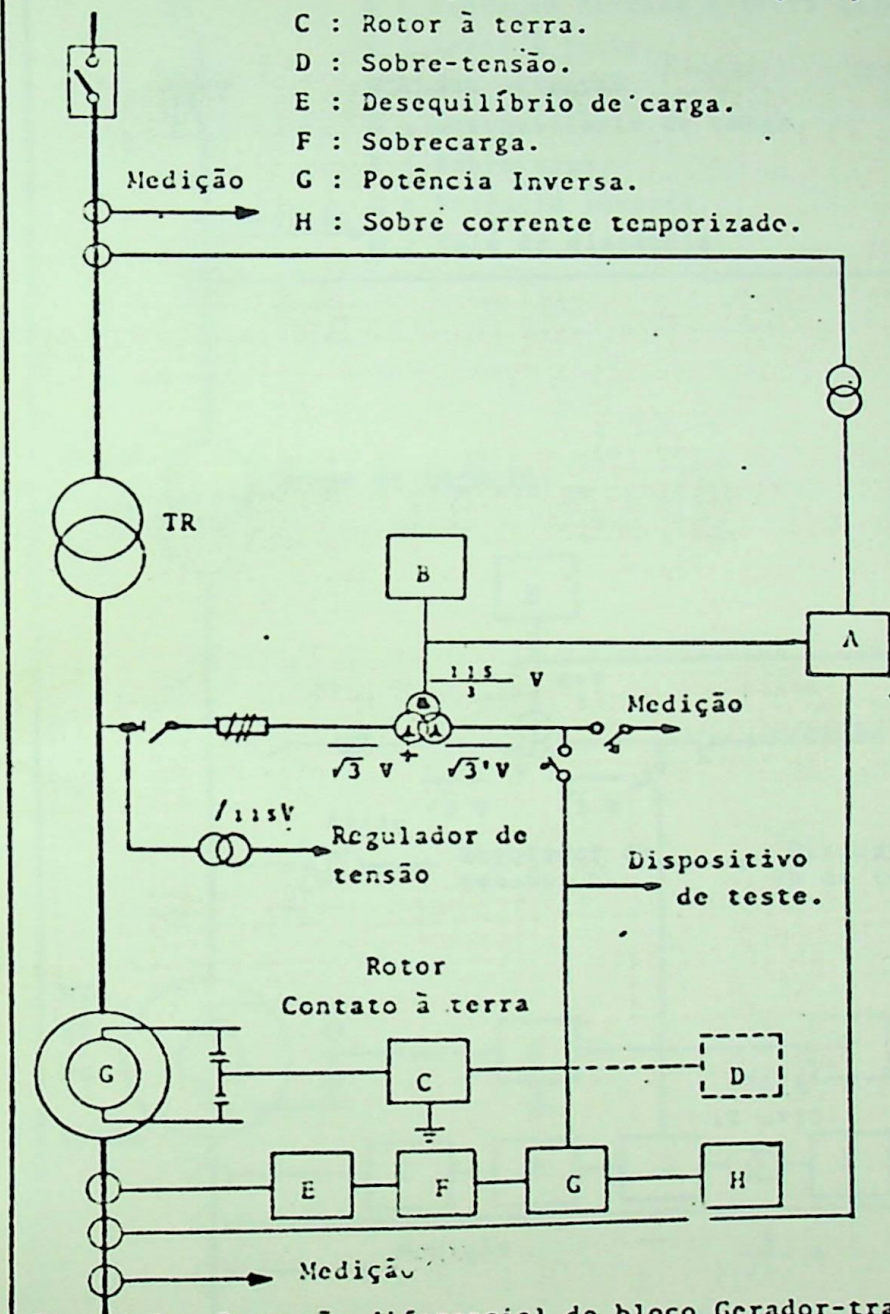


Fig. 6.9 - Proteção diferencial do bloco Gerador-transformado

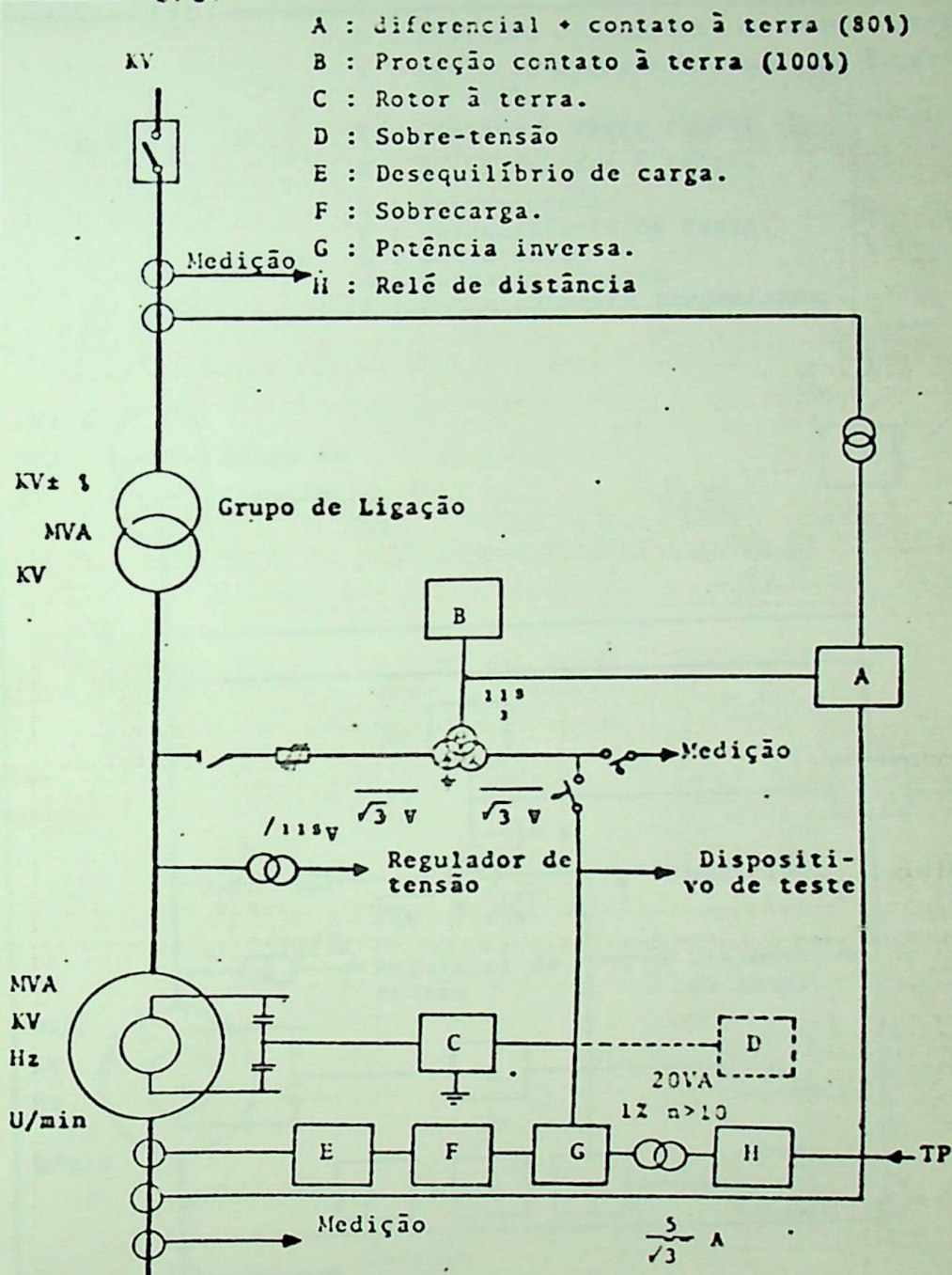


Fig. 6.10 - Proteção diferencial do bloco Gerador-Transformador e proteção de distância como retaguarda.

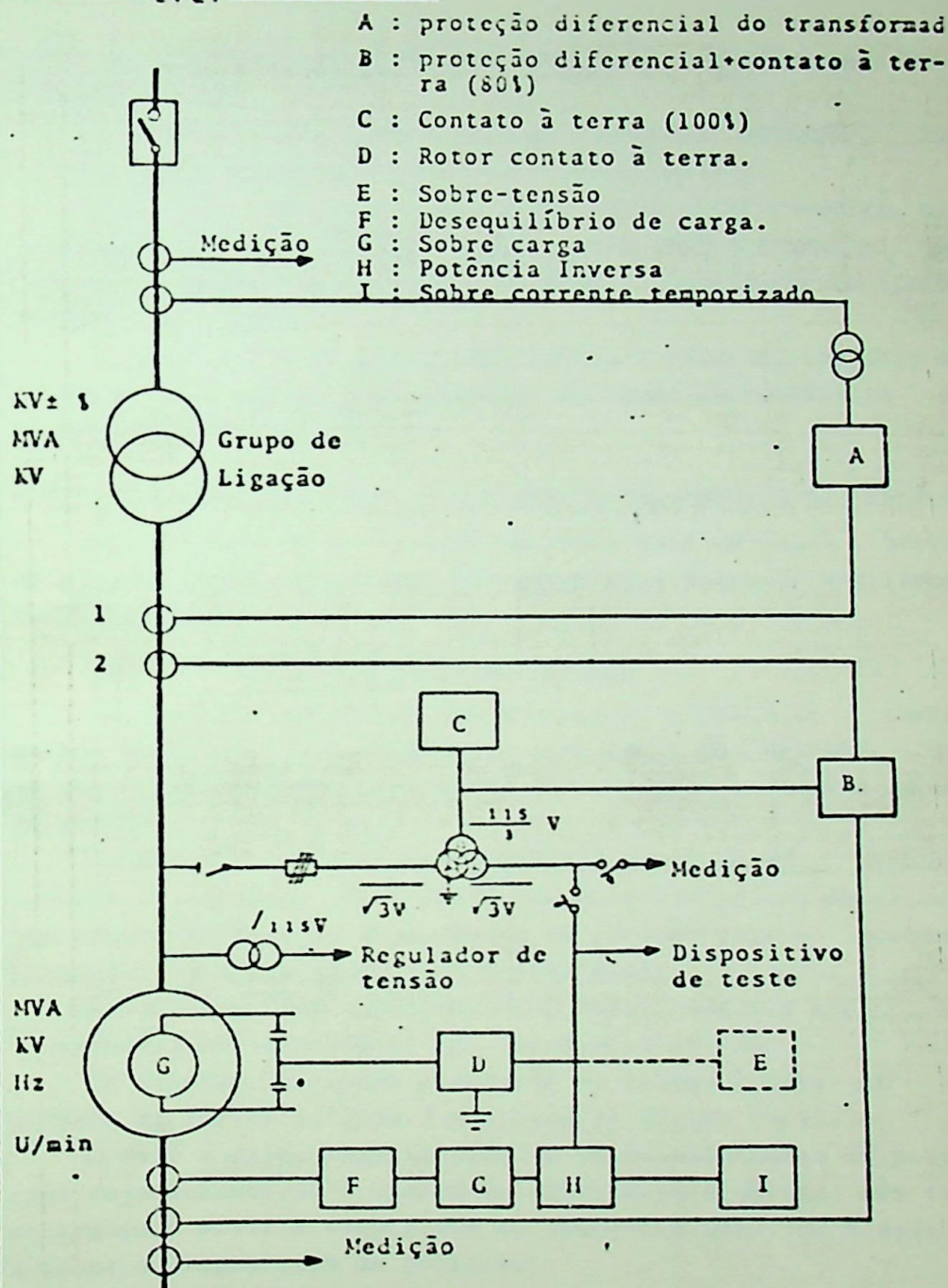


Fig. 6.11 - Proteção diferencial de uma unidade Gerador

teção de fase dividida e relé de distância com retarda (tipo condutância).

A figura (6.13) mostra mais um esquema de proteção, incluindo agora um transformador de 3 enrolamentos.

O gerador neste caso, tem a sua proteção diferencial, cuja zona de proteção está sobreposta pelo relé diferencial que abrange, gerador-transformador principal e saída para o transformador Auxiliar.

Finalmente, a figura (6.14) mostra o diagrama completo de proteção diferencial dos geradores da Usina Hidroelétrica Paranoá (CEB-Brasília).

6.6 - Proteção Fase Terra e a Forma de Aterramento do Gerador

A aplicação de um relé de proteção para faltas à terra no estator é influenciada diretamente pela forma de aterramento do gerador.

6.6.1 - Gerador com Neutro Isolado

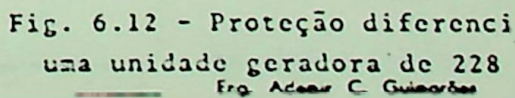
No caso dos geradores não aterrados, a proteção contra faltas à terra, não é baseada na circulação de correntes, mas em valores de tensão ocasionadas devido ao deslocamento do ponto neutro.

Obviamente, no caso dos geradores operando em paralelo com outras unidades, dependendo das características do circuito, haverá circulação de corrente do sistema para o gerador permitindo a operação do relé diferencial.

Na prática esta hipótese não é comum, uma vez que transformadores elevadores são conectados em Δ/λ .

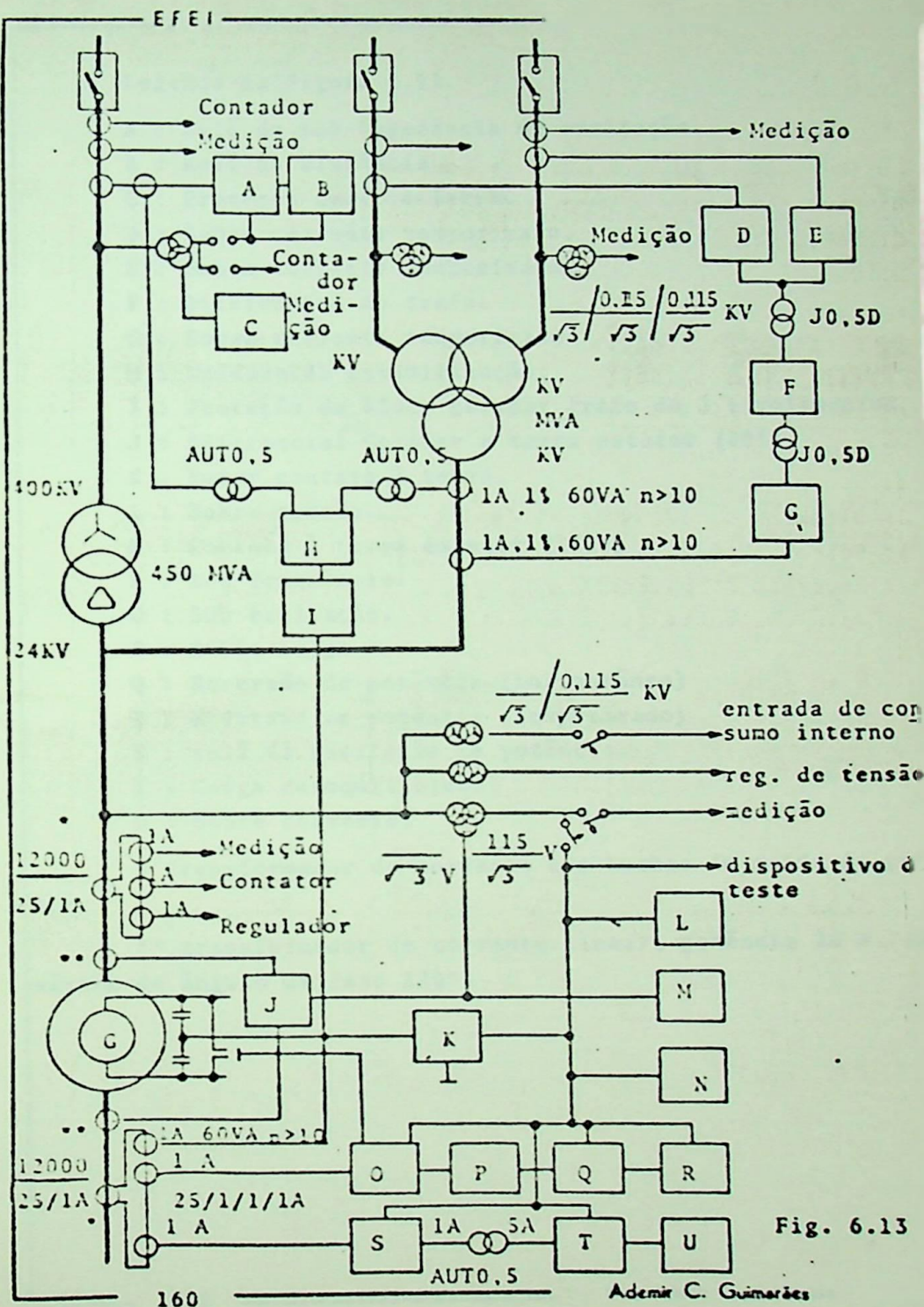
Um sistema mostrando a detecção de faltas à terra em gerador de neutro isolado é mostrado na figura (6.15).

O relé é alimentado através de um transformador de potencial cujo secundário é conectado em triângulo aberto; com isso conseguimos medir a componente de sequência zero, da tensão para acionar o dispositivo de proteção.



Legenda da Figura 6.12: Proteção de uma unidade Gerador de 228 MVA.

- A: proteção diferencial do transformador auxiliar.
- B: Sobre corrente.
- C: Sobre corrente de neutro.
- D: Unidade de estabilização.
- E: Proteção diferencial do bloco gerador transformador
- F: Proteção diferencial do gerador + dispositivo de contato à terra (80%)
- G: Contato à terra (100%)
- H: Rotor contato à terra.
- I: Sobre tensão.
- J: Diferencial transversal (split-phase)
- K: Sub-excitação.
- L: Reversão de potência.
- M: Relé distância (tipo condutância)
- N: Rejeição de carga.
- O: Relé de Sequência negativa.



Legenda da Figura 6.13.

- A : Relé de sub-impedância de excitação.
- B : Relé de distância.
- C : Proteção curto à Terra.
- D : Sobre corrente temporizado.
- E : Sobre corrente temporizado.
- F : Diferencial do trafo.
- G : Sobre corrente temporizado
- H : Unidade de estabilização.
- I : Proteção do bloco gerador trafo de 3 enrolamentos.
- J : Diferencial Gerador e terra estator (80%)
- K : Rotor contato à terra.
- L : Sobre tensão.
- M : Contato à terra estator (100%)
- N : Sub-frequência.
- O : Sub excitação.
- P : Sobre carga
- Q : Reversão de potência (instantâneo)
- R : Reversão de potência (temporizado)
- S : relé de oscilação de potência.
- T : Carga desequilibrada.
- U : Sobre corrente.

* transformador de corrente nas buchas de saída do gerador.

** transformador de corrente linear, potência 20 W, erro máximo de ângulo de fase 120'.

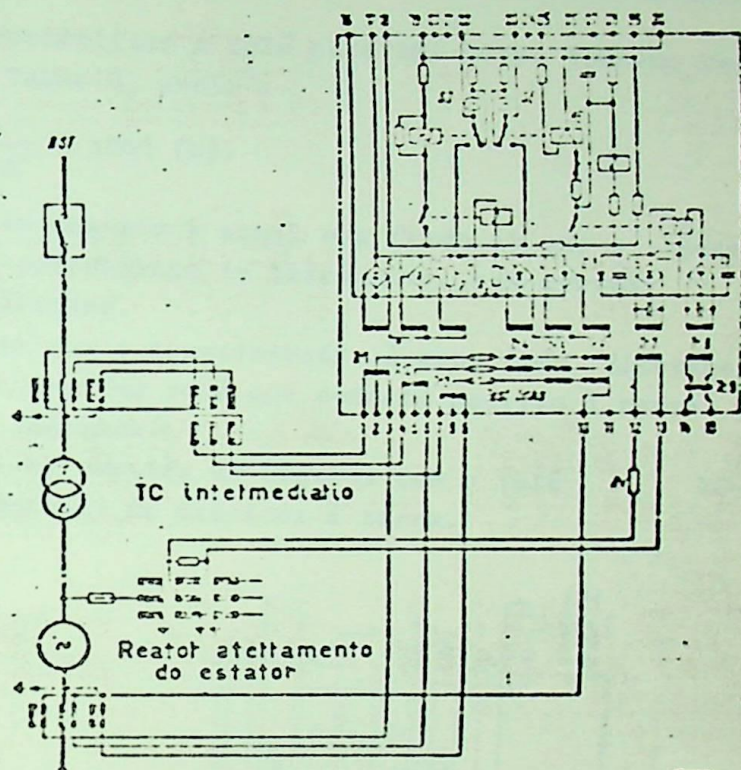


Fig. (6.15) - Dispositivo para proteção Fal-
tas Fase-Terra.

A unidade de detecção de defeitos a terra, RG-23 (Siemen mostrada no esquema anterior consiste de um relê de bobina nivel E, com enrolamento duplo, conectado através dos transformadores intermediários TR7, TR8 e TR9 e os retificadores GI G16 e G18 e um relê de tempo Z.

Podemos sensibilizar o relê para cobertura total ou parcial do enrolamento.

A sensibilização é feita através do resistor R_V . (a corrente de operação do relê RG-23 é de 10 mA)

Assim, no caso dos tp's de relação $\frac{100}{\sqrt{3}} / \frac{100}{3} / \frac{100}{\sqrt{3}}$ a tensão através do triângulo aberto, na ocorrência de uma ta a terra nos bornes do gerador é de 100 (V).

Podemos sensibilizar o relé para 10% desta tensão; consequentemente, o valor R_V seria :

$$R_V = \frac{10}{0,010} = 1000 (\Omega).$$

Este tipo de conexão é usual nos casos em que o gerador não é conectado diretamente ao barramento, mas através do transformador elevador.

Nos casos em que o transformador é conectado diretamente ao barramento, usa-se um relé que detecta defeito à terra por meio da própria corrente.

A figura (6.16) mostra um esquema com o relé (Siemens) para detecção de defeitos à terra.

RG-23

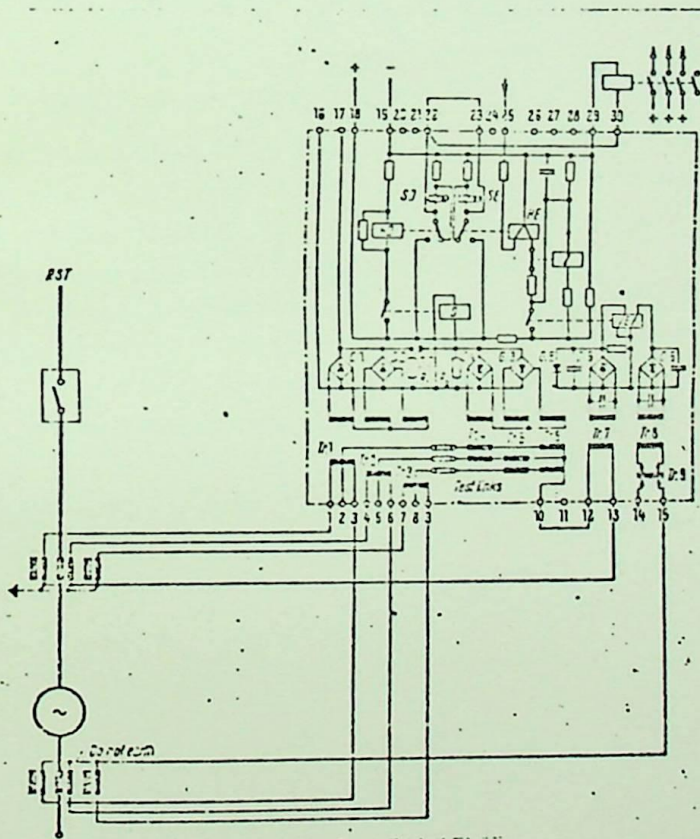
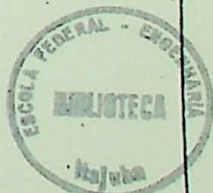


Fig. 6.16



O relê opera da seguinte maneira: no caso de uma falta terra, a capacitância do sistema, ou qualquer dispositivo artificial gerador de corrente à terra, no lado do sistema, faria circular uma corrente através do defeito.

Se a corrente de defeito está dentro da faixa de corrente ajustada no relê, ele opera (uma vez que ele é alimentado pelo lado de operação, terminais 12 e 13). Neste caso não flue corrente pelo lado de retenção do relê (bornes 14 e 15).

6.6.2 - Geradores Aterrados

No caso dos geradores aterrados, dois são os métodos utilizados :

a) Aterramento por resistência

Este normalmente limita os valores de corrente de falta à terra em 200-300 A (usado nos E.U.A.).

b) Aterramento através de um transformador de distribuição

Caso em que normalmente a corrente é limitada 5-10 (A).

Com isto, consegue-se inclusive assegurar uma mínima danificação ao núcleo do gerador.

É usada somente quando o enrolamento do estator é conectado ao enrolamento em triângulo do transformador.

Quando o gerador é aterrado através de uma resistência no neutro é montado um transformador de corrente que alimenta um relé instantâneo ou temporizado.

A figura (6.17) mostra um exemplo.

A utilização de um relé temporizado ou instantâneo depende se o gerador é conectado diretamente ou através de um transformador Δ/Y , ao barramento principal.

No primeiro caso, necessitamos de um relé temporizado, visto a necessidade de coordenação com outros relés, no segundo caso não existe este problema, uma vez que a malha de circulação da corrente de defeito está restrita ao estator do gerador e primário do transformador de força.

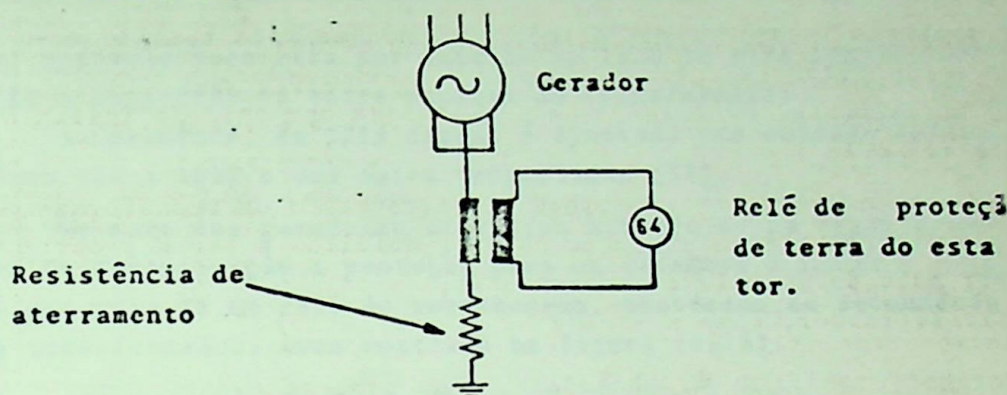
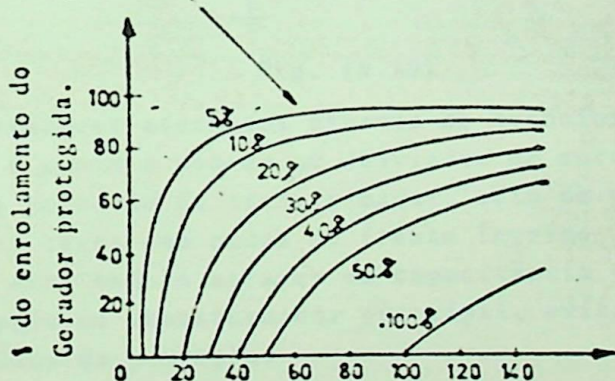


Fig. (6.17)

Com resistor de aterramento é impossível proteger 100% do enrolamento do estator. A percentagem do enrolamento protegido depende do valor da resistência de aterramento e do ajuste do relé.

Na figura (6.18) a percentagem do enrolamento protegido para vários valores de resistência de aterramento e diferentes ajustes dos relés, desde 5-100%.

Ajuste do relé em % da plena carga.



corrente nominal do resistor de aterramento em % da corrente nominal de gerador

Fig. (6.18)

Na calibração desta proteção, no caso de grandes unidades geradores-transformadores, deve-se tomar cuidado afim de e

tar operação incorreta por defeito no lado de alta tensão, devido a capacitância entre espiras do transformador.

Normalmente, em tais casos, é ajustada uma unidade instantânea (10 a 15%) e uma outra temporizada (5%).

No caso dos geradores aterrados através de um transformador de distribuição, a proteção para os defeitos à terra é obtida por meio de um relé de sobretensão, conectado ao secundário do transformador, como mostrado na figura (6.19).

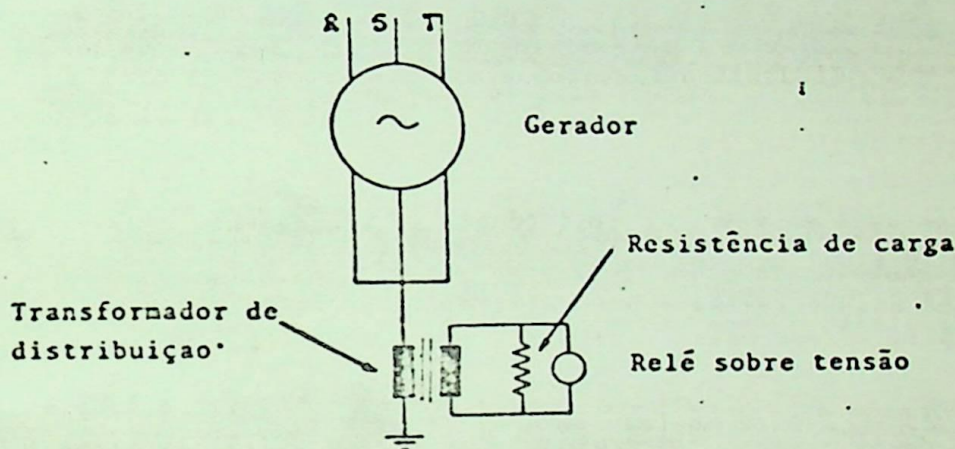


Fig. (6.19)

Nos geradores aterrados através de transformador de distribuição, é comum o uso de um desviador de surtos, que curto-circuita o primário do transformador, afim de permitir a circulação para terra das ondas de frente íngreme, que passam sistema de alta tensão através da capacitância entre espiras do enrolamento do transformador principal, evitando-se operações indevidas da proteção.

6.7- Retenção por Harmônicos:

Na proteção diferencial, do bloco gerador-transformador, o sistema de retenção por harmônicos, e que evita a operação devido à corrente transitória de magnetização, não é necessário por duas razões:

7.1 - Os surtos de corrente de magnetização, de intensidade apreciável, são produzidos quando o transformador é energizado próximo da tensão nula; consequentemente, ela não ocorre durante a partida do gerador, pois o transformador é energizado lentamente.

7.2 - Também não ocorre, quando da eliminação de um defeito externo, uma vez que a falta é eliminada próxima ao valor zero da corrente; consequentemente, próxima ao valor máximo da tensão, devido ao baixo fator de potência da corrente em questão.

6.8- Conexões :

Os transformadores de corrente devem ter : uma potência de 30 VA ou superior, quando a corrente secundária é de 5 (A) e o comprimento e secção transversal da fiação é usual (at 100 m de comprimento e uma secção transversal de $4,0 \text{ (mm}^2\text{)})$, uma classe de precisão de 2,5% e um fator de sobre carga de 20 vezes (ou seja tc's classe 2,5 M 100)

CAPÍTULO VII

PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE BARRAS

7.1 - Generalidades

Para proteção de Barras em estações que trabalham em alta tensão e elevadas correntes, a proteção diferencial representa a mais rápida proteção, limitando os possíveis danos um mínimo como resultado de um pequeno tempo de operação (orden de 0,10 seg), conseguido com este tipo de equipamento.

A maioria das estações são providas de várias seções de barramento, as quais podem operar separadamente; a proteção deve ser projetada de tal forma que isto não afete o sistema de operação.

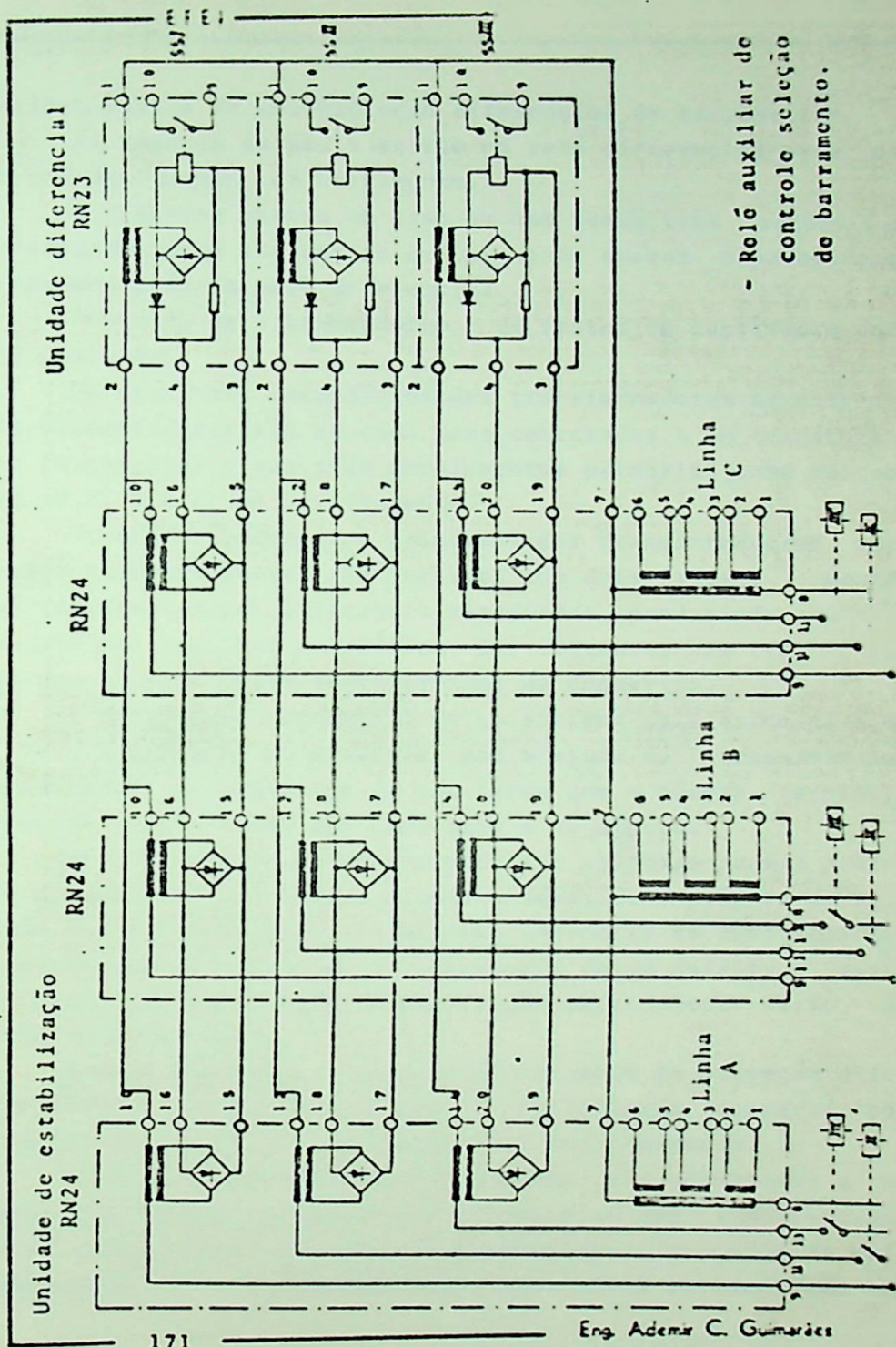
A proteção diferencial de barramentos tem sua aplicação contestada por algumas correntes, baseado no fato que o barramento possui uma alta confiabilidade de operação, no entanto não podemos jamais esquecer que a ocorrência de um defeito em um barramento e a sua eliminação em tempos longos podem causar uma perturbação no sistema, de consequências imprevisíveis.

7.2 - Diagramas típicos

7.2.1- Sistema Siemens (RN24)

Passaremos a analisar alguns tipos de proteção diferencial para barramentos.

No diagrama mostrado na figura (7.1) podemos observar



- Rolê auxiliar de controle seleção de barramento.

arranjo básico de uma proteção diferencial de barramentos.

No exemplo em pauta existe um relé diferencial para cada uma das seções de barramento.

O diagrama mostra um caso em que temos três seções de barramento, cada uma destas seções pode operar separadamente e tem seu próprio relé diferencial.

O número de alimentadores e de fontes de suprimento pode ser qualquer.

Os terminais secundários dos transformadores de corrente dos alimentadores são em cada caso conectados a um transformador intermediário com três enrolamentos primários, como mostrados em A, B e C, respectivamente.

Os três enrolamentos primários dos transformadores mostrados naqueles pontos são fechados com duas fases e neutro dos transformadores principais associados, produzindo assim uma corrente auxiliar monofásica, das correntes nas três fases com a ajuda deste transformador de conversão.

A proteção é convertida de um sistema polifásico para um sistema monofásico de proteção, com a ajuda do transformador de conversão de correntes de tal forma que o número de terminais e outros dispositivos são limitados a um mínimo.

Este método de conversão pode ser aplicado para a proteção diferencial de barras devido a velocidade própria de resposta deste dispositivo, às bruscas correntes de curto-circuito estão sempre presentes na ocorrência de um defeito, assim eliminando a necessidade de calibração extremamente baixa da corrente de partida.

A este respeito, o arranjo do circuito da proteção diferencial pode ser consideravelmente simplificado comparado por exemplo com a proteção diferencial do transformador.

Se no diagrama vários alimentadores são conectados a um barramento (único) as correntes secundárias dos transformadores de conversão são conectados ao respectivo circuito do relé diferencial, por contatos de relés auxiliares os quais são co

trolados por chaves auxiliares dos seccionadores de barramentos.

Se, por exemplo, todos os alimentadores são conectados a uma mesma barra I, a corrente secundária do transformador de conversão circula através do terminal 8 e o contato I do auxiliar, controlado pelo seccionador, terminal 9 através da unidade de estabilização RN24, para o terminal 10.

O terminal 10 de todas as unidades de estabilização R (Siemens) estão agora combinadas para formar o circuito diferencial o qual é conectado ao terminal 2 do relé diferencial o terminal comum de retorno nº 7 ao terminal 1 do relé diferencial.

Este circuito residual 10-7 constitui a corrente residual de todas as entradas e saídas.

Em condições normais (na ausência de defeitos) esta corrente residual é zero.

Na ocorrência de uma falta no barramento, uma corrente de defeito fluirá através do circuito diferencial do relé diferencial entre os terminais 2 e 1, energizando através do transformador auxiliar e circuito retificador, o relé de desligamento, o qual recebendo sinal permite a saída do trip através dos terminais 9 e 10.

A construção da proteção diferencial com relés de bobina móvel, retificadores e transformadores de corrente intermedios corresponde ao bem conhecido sistema usado para proteção diferencial de transformadores.

Se nem todos os disjuntores estão ligados a uma mesma secção do barramento, nas, por exemplo, a secção III do barramento é arranjada para formar um sistema separado o qual é independente do barramento nº 1, a linha B, por exemplo, é conectada a secção III do barramento, via contatos III, controlados pelo seletor de barramento.

Qualquer número desejado de disjuntores ou linhas pode ser conectados em paralelo de uma mesma forma.

O relé diferencial RN23 III, proporciona uma protecção diferencial para a secção III do barramento, totalmente independentes da protecção da secção I.

Na ocorrência de uma falta na secção III do barramento, apenas os disjuntores que estão conectados sobre esta secção de barramento, sendo que aqueles conectados à secção I do barramento permanecem conectados.

A fim de evitar que no caso da ocorrência de um defeito fora da zona de protecção, o relé diferencial de barramento já indesejavelmente operado pela circulação de correntes, devido à imprecisão dos transformadores de corrente, um elemento de estabilização é previsto e este é o mesmo dispositivo usado por exemplo, na protecção diferencial dos transformadores.

Como descrito anteriormente, a corrente secundária do transformador de conversão circula através da unidade de estabilização, cujo número deve corresponder ao número de alimentadores a ser supervisionado.

Cada unidade de estabilização incorpora um pequeno transformador, o qual fornece a corrente de estabilização, que é proporcional à corrente de defeito circulante através do barramento.

Este arranjo faz a protecção completamente insensível a defeitos fora da zona de protecção.

Na figura (7.6) podemos observar a atuação do sistema de retenção do relé para o caso de uma falta trifásica fora da zona de protecção.

Podemos concluir que a corrente entre os bornes 10 (RN24) e 7 (do transformador) é nula, consequentemente não temos corrente no circuito de operação do relé.

Podemos observar que também neste caso, o relé possui a maior sensibilidade para detecção das faltas fase-terra.

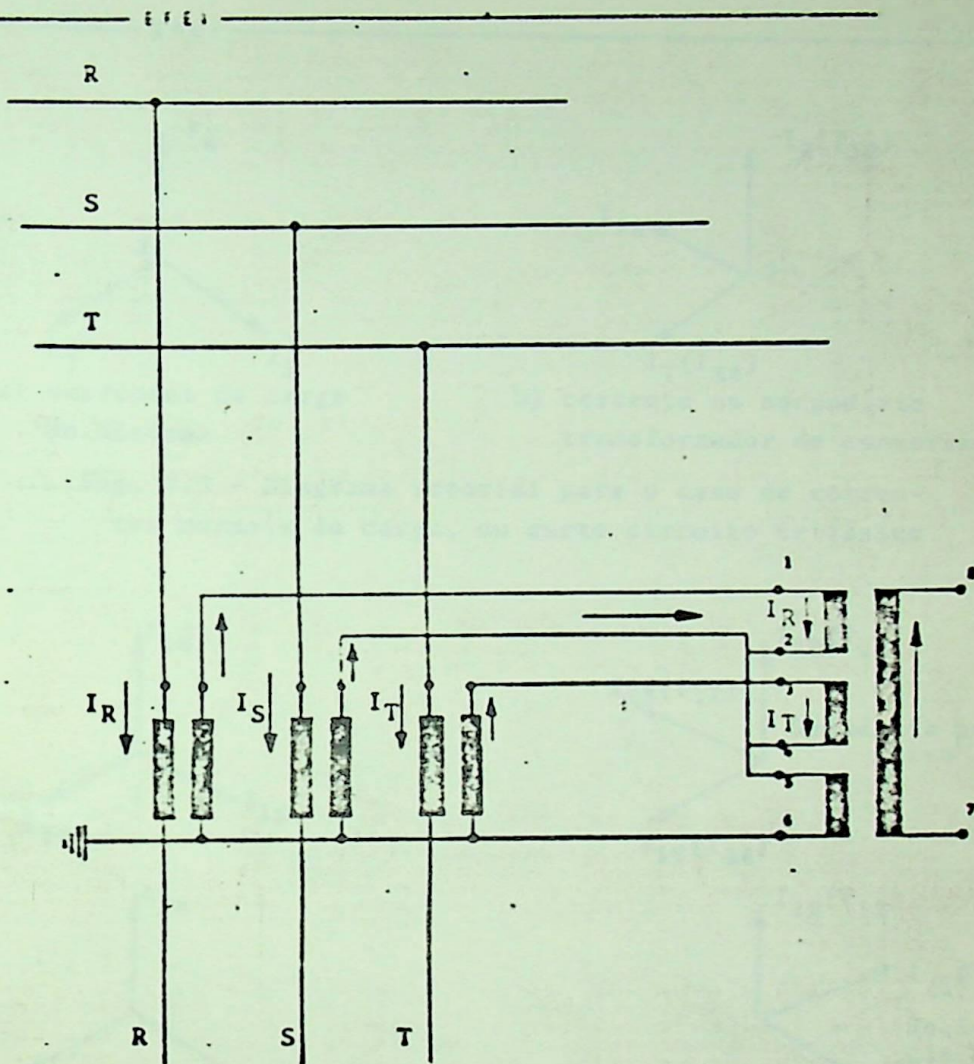


Fig. (7.2) - Conexão dos transformadores principais aos primários dos transformadores de conversão.

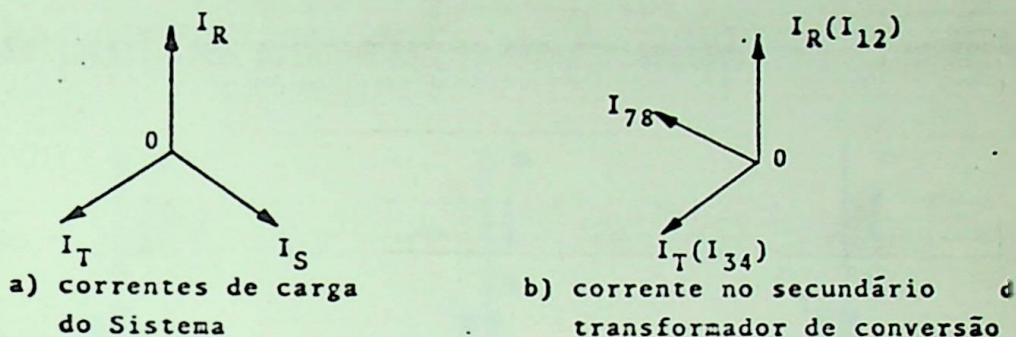
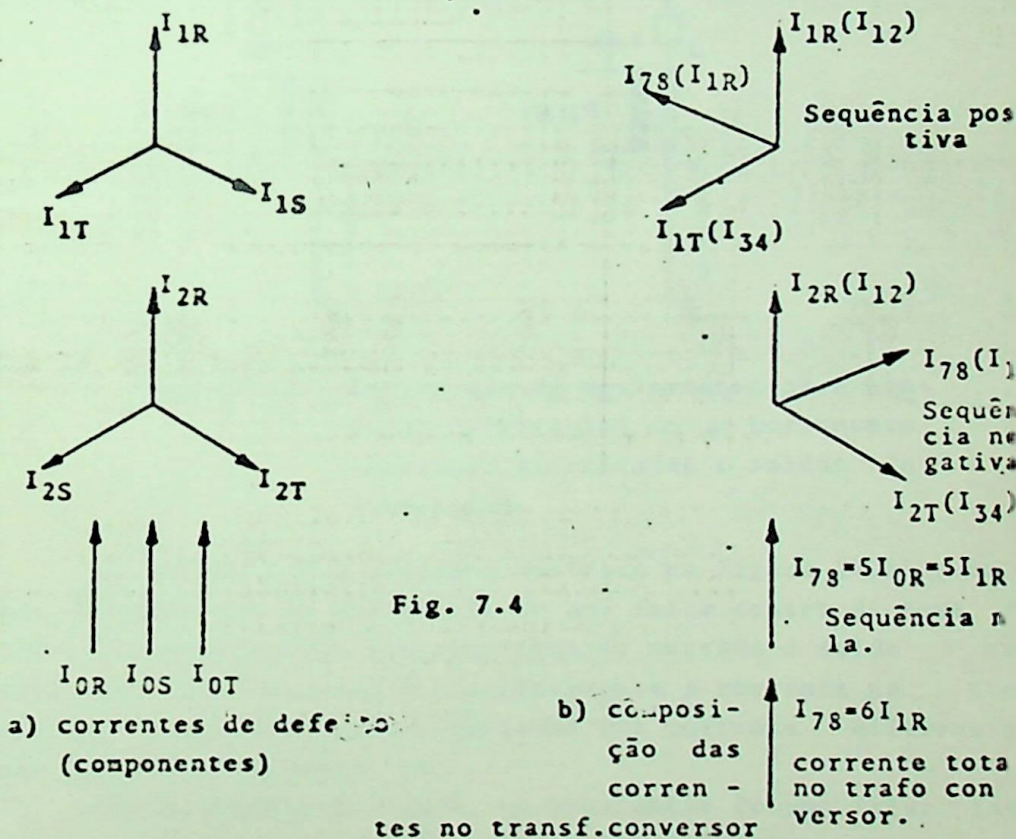


Fig. 7.3 - Diagrama vetorial para o caso de correntes normais de carga, ou curto circuito trifásico.



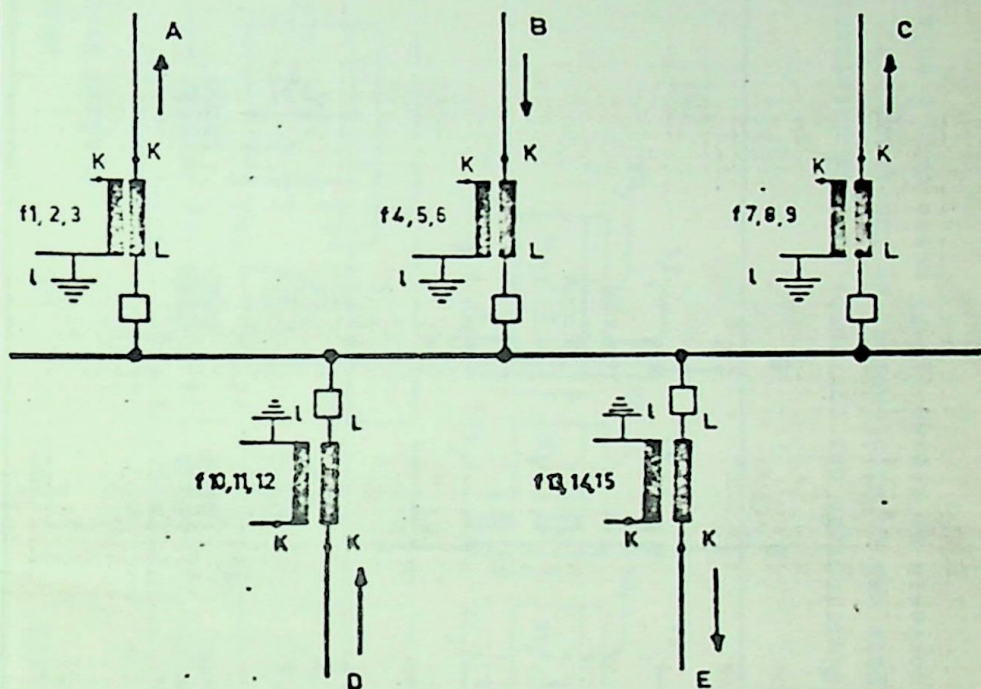


Fig. (7.5) - Disposição do equipamento para proteção diferencial de um barramento mostrando as entradas e saídas da subestação.

De acordo com o diagrama mostrado na figura (7.6) podemos concluir que na ocorrência de uma falta dentro da zona de proteção, o somatório das correntes de entrada e saída não mais será igual a zero, conseqüentemente a corrente no trecho (10-7) não será nula e teríamos uma corrente diferencial não sentido de operar o relé.

Com o sistema mostrado, na ocorrência de uma falta for

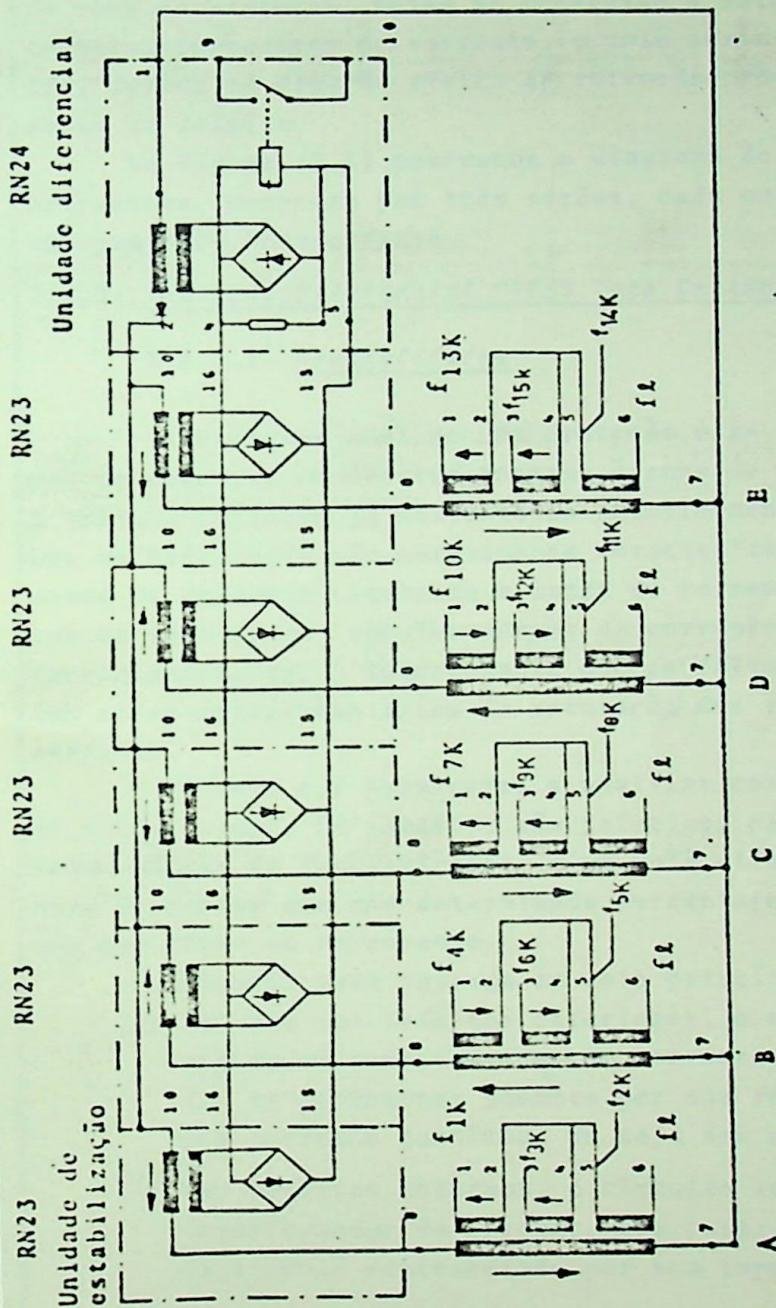


Fig. (7.6) - Distribuição das correntes no relé diferencial para uma condição normal de funcionamento. A corrente no trecho (10-7) neste caso é nula.

da zona de proteção, mesmo se ocorresse a saturação de al dos transformadores de corrente, o relé seria impedido de operar, devido ao elevado efeito de retenção produzido pela corrente de defeito.

Na figura (7.1) mostramos o diagrama de proteção de barramento, composto por três seções, cada uma das quais uma proteção independente.

7.2.2- Proteção Diferencial RVDSS Para Barramentos (ASEA)

7.2.2.1- Generalidades

Trataremos aqui de uma proteção para barramentos, capaz de detectar um defeito interno à zona de proteção em 12 (ms), e conforme já salientamos anteriormente, os defeitos sobre um barramento são normalmente caracterizados por uma corrente de corrente alternada e outra de corrente contínua, capazes de saturar os transformadores de corrente em 2 ou 3 (ms). Consequentemente, é interessante que as faltas nos barramentos sejam detectadas antes da saturação dos transformadores de corrente.

O sistema que passaremos a analisar consta de um relé de sobrecorrente de partida, não seletivo, para fixação de valor básico de funcionamento, e um relé diferencial ajustado para funcionar com uma determinada percentagem da corrente nominal tal que chega no barramento.

A proteção está baseada em dois princípios fundamentais:

- a) No caso dos defeitos exteriores, o circuito secundário de um transformador de corrente totalmente saturado, se representa somente por sua resistência em série com corrente contínua, ou seja sem nenhuma reatância.
- b) Nos defeitos internos, o circuito secundário de um transformador de corrente sem carga, de uma determinada linha, é representado por sua impedância de magnetização.

ção relativamente grande, principalmente sua reatância, conseqüentemente com uma elevada constante de tempo (L/R).

7.2.2 - 2 - Princípio de Funcionamento:

O relé em questão consta (RYDSS) de 3 unidades monofásicas, que podem ser agrupadas e formar uma unidade trifásica mediante o emprego de um transformador somador.

Na figura (7.8) mostramos o diagrama unifilar de um barramento singelo com linhas L_A , L_B , L_X .

A distribuição de corrente mostrada corresponde a um semi-período tomado como referência.

Mantendo as direções de referência dadas as correntes, nas diferentes linhas (I_{A3} ; I_{B3} ; I_{X3}) e prescindindo dos diodos nas linhas, se obtém um esquema consideravelmente simplificado, mostrado na figura (7.9).

a. Funcionamento Normal:

A corrente total I_{T3} que chega ao relé entra no mesmo através do terminal K, a corrente total, que deixa o relé, o

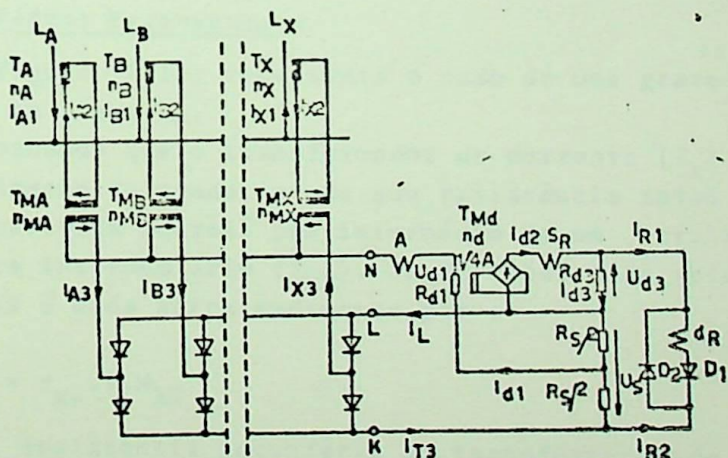


Fig.7.8 - Barramento singelo com lx linhas.

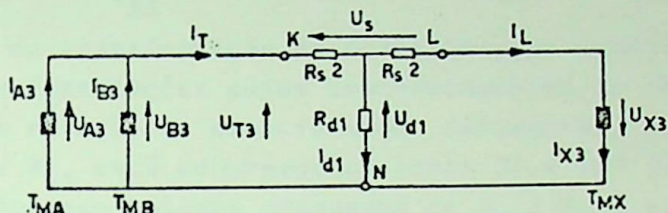


Fig. (7.9) - Esquema unifilar simplificado correspondente ao funcionamento normal.

faz terminal pelo terminal L.

Durante o funcionamento normal, estas correntes são iguais, consequentemente a corrente diferencial (I_{d1}) é nula. Entre os terminais K e L se obtém uma tensão estabilizadora U_s , que faz passar uma corrente (I_{R2}), vide figura (7.8), pelo diodo D_2 e a resistência R_{d3} até o terminal de saída 1.

Consequentemente o relé diferencial dR está bloqueado e não pode funcionar.

b. Faúlta Exteriores :

Na figura (7.10) representa o caso de uma grave falta exterior, na linha L_x .

Suponhamos que o transformador de corrente (T_x) da linha está totalmente saturado, e que sua resistência total secundária é transferida ao relé por intermédio de um transformador de corrente intermedário (T_{MX}). No terminal L do relé, esta resistência é dada aproximadamente por :-

$$R_{Lx} = r_{x2} \cdot R_{MX2}$$

sendo r_{x2} , resistência secundária do transformador de corrente principal (T_x), incluída a resistência do fio piloto, e

$$m_{\chi_2} = \frac{I_{\chi_2}}{I_{\chi_3}}.$$

relação de transformação do transformador intermediário T_{yx} .

Em instalações cujos transformadores de corrente das linhas tem relação de transformação diferentes, se observa que o valor de R_{LY} está compreendido entre 50 e 100 (Ω).

Adotando valores adequados de R_{d3} , $R_{S/2}$ e da relação n_d do transformador de corrente intermediário (T_{Nd}) do circuito diferencial, se consegue assegurar que o relé d_R não funcione para defeitos exteriores.

As condições limites para a estabilidade são as seguintes (vide figura 7.8).

$$I_{E1} = 0, \quad U_{d3} = U_S \quad \text{ou seja,}$$

$$I_{d2} = I_{d3} \text{ e } R_{d1} = R_{d3} \cdot R_{d2}$$

estas condições podem coincidir também com :

$$I_{d1} = 0,50 I_{T3}$$

permitindo que 50% da corrente total de chegada atravesse o circuito diferencial, sem que isto faça o relé funcionar.

Dizemos, então, que este relé tem uma característica de estabilidade de 50%.

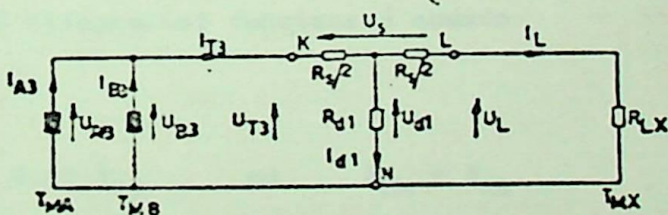


Fig.(7.10) - Esquema simplificado para defeito externo na linha L_Y .

Na figura (7.10) podemos observar que a equação de estabilidade $I_{d1} = 0.5 I_{T3}$ é cumprida quando os valores de resistência do circuito diferencial e do seu circuito diferencial e do seu circuito paralelo são iguais, ou seja :

$$R_{d1} = R_{S/2} + R_{LX} \quad \text{e ainda}$$

$$I_{d1} = I_1 = 0.50 I_{T3}$$

A estabilidade do relé depende unicamente dos valores relativos das resistências lineares R_{d1} e R_{LX} e é independente da potência de curto circuito da rede da saturação dos transformadores de corrente das linhas e de fenômenos transitórios.

c. Faltas Interiores :

As condições impostas aos relés quando da ocorrência de uma falta interna à zona de proteção, é mostrada na figura (7.11).

Consideramos também aqui que a corrente de falta entra na barra pelas linhas L_A e L_B . As demais desde L_C até L_X são consideradas como sem carga ou desligadas.

A impedância vista do terminal L do relé será dada por:

$$Z_L = \frac{U_L}{I_L} = Z_{LM},$$

que corresponde a impedância de magnetização total de todos transformadores de corrente principais sem carga.

O relé diferencial funcionará quando:

$$U_{d3} > U_S$$

ou seja,

$$I_{d1} > 0.50 I_{T3} \quad \text{ou} \quad Z_{LM} > R_{d1}$$

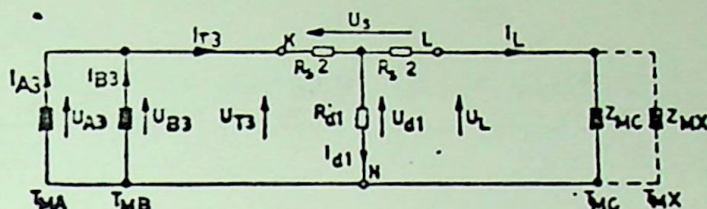


Fig. (7.11) - $Z_L = \frac{U_L}{I_L} = Z_{LM}$ impedância total de magnetização dos transformadores de corrente sem carga. Esquema simplificado para defeitos internos à zona de protecção.

A figura (7.12) mostra que a característica de funcionamento (linha de funcionamento mínimo) do relé d_R , segue a equação:

$$I_{d1} = 0.5 I_{T3} + 0.10 \text{ (A)}$$

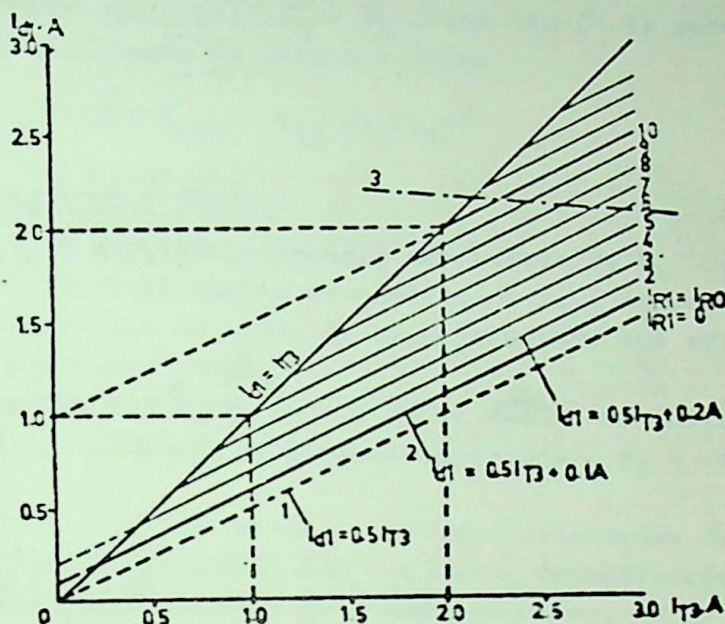
Assim o relé funcionará quando a equação de estabilidade for excedida de um valor constante igual a 0,10 (A).

Obviamente, podemos multiplicar o valor constante de funcionamento por 2, 3,10, a corrente de operação será conseqüentemente aumentada correspondentemente. Na característica de funcionamento mostrada na figura (7.12) supomos que a corrente total que chega ao barramento é dada por $I_{T3} = 1,0 \text{ (A)}$, que é igual à corrente nominal da linha mais carregada (I_{ALn}).

Normalmente, a impedância de magnetização total Z_{LM} é muito maior que a resistência R_{d1} . Fazão pela qual, a corrente I_{d1} resulta maior que I_L , garantindo a operação do relé.

Mesmo conectando um grande número de linhas sem carga (mais que 40) o funcionamento será seguro, porque Z_{LM} é basicamente uma reatância, significando que a tensão estabilizada U não está em fase com a tensão diferencial U_{d3} , além do que constante de tempo do circuito Z_{LM} é muito grande (200 ms) e quanto que a constante de tempo do circuito diferencial é pra

ricamente nulla.



- 1 - Característica de estabilidade.
- 2 - Corrente mínima de funcionamento.
- 3 - Saturação dos transformadores de corrente auxiliar

Fig. (7.12) - Característica de funcionamento do relê diferencial dq , onde observamos a relação entre a corrente que atravessa o circuito diferencial I_{d1} e a corrente total I_{T3} .

7.2.2 - 3 - Transformadores de corrente das linhas

Os transformadores de corrente não precisam ser necessariamente de um mesmo tipo, ou estarem adaptados entre si.

Normalmente, os transformadores tem uma tensão de saturação e uma resistência do enrolamento secundário que satisfaça:

perfeitamente as exigências da proteção.

A tensão de saturação que devem ter os transformadores de corrente principais T_A e T_X (vide fig (7.8) pode ser controlada facilmente da seguinte forma

$$U_{A2K} = 2.5 I_{A2n} \cdot r_{X2} (n_A/n_X)^2$$

$$U_{X2K} = U_{A2K} (n_X/n_A)$$

onde I_{A2n} é a corrente nominal secundária de T_A , r_{X2} é a resistência do enrolamento secundário de T_{X1} , sendo n_A/n_X igual ao quociente das relações de transformações dos transformadores de corrente T_A e T_X .

Supondo que n_A/n_X seja o valor máximo na instalação, ou seja, n_A se refere a linha mais carregada e n_X a menos carregada.

Estas condições mínimas afetam o desempenho do relé no caso de faltas internas, uma vez que a estabilidade do mesmo não será afetada no caso de faltas externas.

7.2.2 - 4 - Transformadores de corrente intermediários

Todos os transformadores de corrente intermediários, T_{MA} ,, T_{MX} tem núcleos de mesmo tamanho e estão enrolados com um mesmo número de espiras secundários.

Assim, se consegue uma tensão de saturação (U_{T3K}) comum no terminal de entrada K do relé. (Para relés RYDSS de corrente nominal 1A, esta tensão tem um valor de 500 V).

ANEXO I

PROTEÇÃO DE MASSA - CUBA PARA TRANSFORMADOR

Um transformador AT/MT, em rede de distribuição, por exemplo, tem sempre seu ponto neutro MT ligado à terra na proximidade da base que o suporta; o ponto neutro AT, ao contrário, não é ligado à terra nesse local, mas geralmente é em uma subestação MAT/AT situada a um ponto bastante importante (no sistema de transmissão, por exemplo).

Nessas condições, todo arco no interior da cuba do transformador AT/MT ou todo contorneamento de uma bucha de passagem dá origem a uma corrente de defeito que se dirige para a terra por intermédio da cuba.

Esta corrente utiliza, entre cuba e terra, os diferentes percursos que lhe são oferecidos: trilhos de rolamento, ferragens, suportes e canalizações do conservador de óleo, cabos de alimentação dos ventiladores, etc... (cuja resistência deve ser mantida superior a 5 ohms). Todavia, se se cria uma ligação direta, pouco resistente, (menor que 1 ohm), entre a cuba do transformador e a tomada de ligação à terra da subestação, a quase totalidade da corrente de defeito servir-se-á dela para atingir a terra.

Se se coloca sobre esta junção um transformador de corrente conectado a um relé amperimétrico sensível e robusto torna-se possível detectar a passagem da corrente de defeito: é o princípio da proteção de massa-cuba ou de cuba, largamente utilizada na França em substituição à clássica proteção diferencial.

As críticas relativas à proteção diferencial são as seguintes:

- os transformadores de corrente sendo escolhidos para tensões diferentes não podem jamais serem rigorosamente idênticos; em consequência, por ocasião de curto-circuitos, seus erros correm o risco de serem importantes;
- a utilização de tapanes de derivação para a regulação da tensão modifica a relação de transformação, o que falsifica o equilíbrio das correntes primária e secundária;
- a circulação de uma corrente homopolar devida a um defeito exterior pode, segundo o aconchamento do transformador, desequilibrar a proteção.

A fim de minorar esses inconvenientes, é-se obrigado a adotar um importante valor de regulação, o que reduz a sensibilidade da proteção; ela não poderia, então, funcionar senão para um defeito interno violento e tornar-se-ia ineficaz contra os curto-circuitos entre espiras de um enrolamento e contra os curto-circuitos entre a massa e a parte de um enrolamento situado próximo do ponto neutro.

1.1. CÁLCULO DA REGULAÇÃO DA PROTEÇÃO DE MASSA

A fim de tratar o caso geral da proteção de massa instalada seja sobre um transformador AT/MT, seja sobre um transformador MAT/AT, consideraremos que o transformador protegido tem seu ponto neutro ligado à terra (esse será o ponto neutro AT no segundo caso); além disso, e isso será essencialmente válido para os transformadores MAT/AT, a corrente de defeito à terra terá a possibilidade de fechar-se pelo circuito de neutro do transformador protegido e pelos circuitos de neutro de outros transformadores conectados à mesma rede AT.

Designemos por:

- Z_p a impedância das ligações parasitas entre o transformador e a terra (trilhos, cabos, etc...)

- Z_R a impedância do transformador de corrente, assegurando a ligação entre a cuba e a terra.
- Z_s a impedância da tomada de terra da subestação AT/MT ou MT/AT.

A regulagem da proteção de massa deve ser tal que ela se torne sensível aos defeitos produzidos sobre o transformador, porém permaneça insensível aos defeitos tendo sede no exterior do transformador (linhas, em particular).

1.2. DEFEITOS SOBRE O TRANSFORMADOR

A corrente de defeito J_T aparece em parte pelo neutro do transformador avariado e em parte pelas impedâncias fase-neutro dos outros transformadores da rede (seja na mesma subestação, seja em outras). Vide figura (1.1a)

Chamando:

- J_n a corrente de neutro do transformador avariado
- J_{nT} a corrente nos transformadores de corrente
- J_p a corrente nas impedâncias parasitas
- J_s a corrente na tomada de terra

e designando por "a" o coeficiente ($a < 1$) que representa a parcela da corrente J_T que passa pelo neutro do transformador avariado, pode-se escrever, sucessivamente:

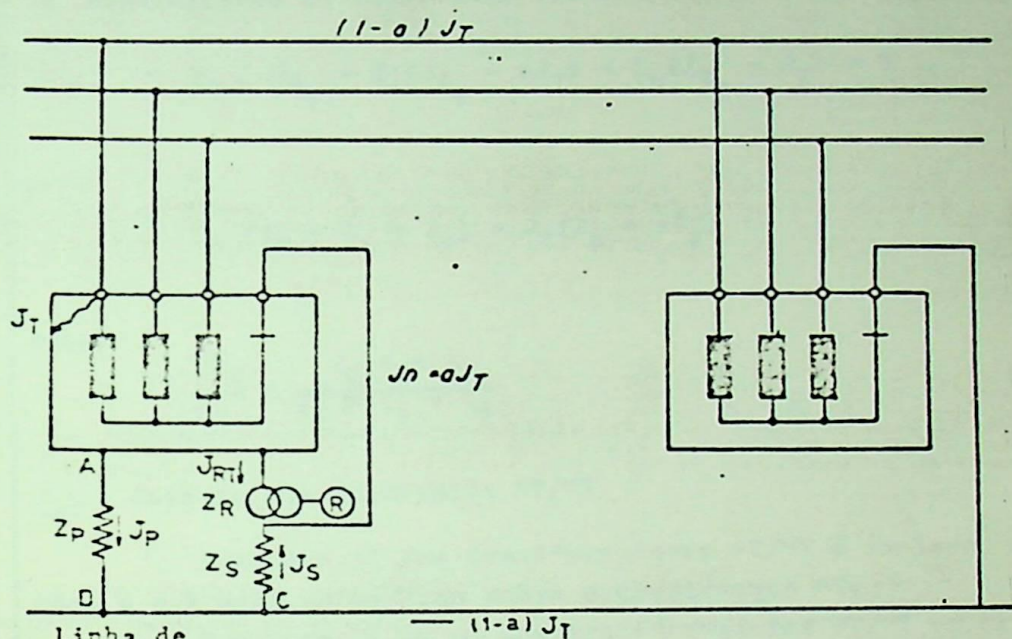
$$J_n = a J_T$$

$$J_T = J_p + J_{nT}$$

$$J_n = J_s + J_{nT}$$

A lei de Kirchhoff aplicada à malha ABCD dá:

$$Z_R \cdot J_{nT} - Z_s \cdot J_s - Z_p \cdot J_n = 0$$



Linha de
potencial zero

Fig.1.1.a- Defeitos sobre o transformador

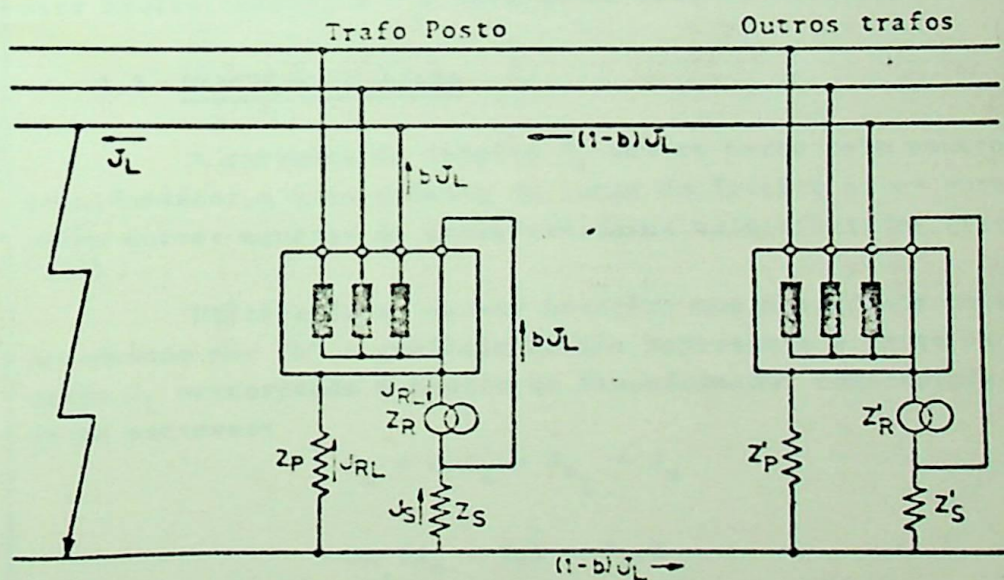


Fig.1.1.b- Defeitos na linha

ou, considerando as igualdades acima:

$$Z_R \cdot J_{R_T} + Z_S (J_{R_T} - a J_T) + Z_n (J_{R_T} - J_T) = 0$$

seja

$$J_{R_T} (Z_R + Z_S + Z_n) = J_T (Z_n + a Z_S)$$

donde

$$\frac{J_{R_T}}{J_T} = \frac{Z_n + a Z_S}{Z_R + Z_S + Z_n} \quad (1)$$

Obs.: Caso de uma subestação AT/MT

O neutro AT dos transformadores AT/MT é isolado; e, portanto, $a = 0$ para um defeito sobre o enrolamento AT.

O neutro MT de um dos transformadores AT/MT em serço é ligado à terra e toda a corrente de defeito J_T percorre esse neutro; então, $a = 1$ para um defeito no enrolamento MT.

1.3. DEFEITOS NA LINHA

A corrente de defeito J_L vem em parte pelo neutro transformador, o mais próximo do lugar do defeito e, em parte, pelos outros neutros de transformadores mais afastados. (Fig. 1.1b)

Utilizando as mesmas notações que precedentemente designando por "b" o coeficiente que representa a parte da corrente J_L percorrendo o neutro do transformador considerado, de-se escrever:

$$J_n = b \cdot J_L = J_{n_L} + J_S$$

$$J_{n_L} (Z_n + Z_n) = J_S \cdot Z_S$$

A última igualdade, considerada a precedente, pode ser escrita:

$$J_{pL}(Z_p + Z_n) = Z_s(b \cdot J_L - J_{nL})$$

ou ainda

$$J_{nL}(Z_p + Z_n + Z_s) = b \cdot J_L \cdot Z_s$$

donde

$$\frac{J_{nL}}{J_L} = \frac{b \cdot Z_s}{Z_p + Z_n + Z_s} \quad (2)$$

Obs.: Caso de uma subestação AT/MT

O neutro AT dos transformadores AT/MT é isolado; então $b = 0$ para um defeito sobre a rede AT.

O neutro MT de um dos transformadores AT/MT em serviço é ligado à terra; supondo, como é geralmente o caso, que o neutro da rede MT não é ligado à terra senão em um único ponto, $b = 1$ para todo defeito à terra sobre a rede MT.

De um modo geral, a REGULAÇÃO J_0 da proteção de massa deve ser tal que

$$J_{pL} < J_0 < J_{pT}$$

isto é, levando em conta as relações (1) e (2):

$$\frac{b \cdot J_L \cdot Z_s}{Z_p + Z_n + Z_s} < J_0 < \frac{(Z_n + a \cdot Z_s) \cdot J_T}{Z_p + Z_n + Z_s}$$

J_L sendo a corrente máxima de defeito à terra na linha,

J_T sendo a mais fraca corrente de defeito que se deseja detectar sobre o transformador protegido.

No caso particular de uma subestação AT/MT, as desigualdades seguintes definem a REGULAÇÃO J_0 :

- regulação relativa à AT:

$$J_0 < \frac{z_p \cdot J_{T1}}{z_p + z_R + z_s}$$

- regulação relativa à MT:

$$\frac{J_{L2} \cdot z_s}{z_p + z_R + z_s} < J_0 < \frac{(z_n + z_s) \cdot J_{T2}}{z_p + z_R + z_s}$$

com:

J_{T1} = corrente mínima de defeito sobre o enrolamento AT

J_{T2} = corrente mínima de defeito sobre o enrolamento MT

J_{L2} = corrente máxima de defeito à terra sobre a linha MT

1.4. REALIZAÇÃO DA PROTEÇÃO

A dupla desigualdade precedente escreve-se, no caso mais geral

$$b \cdot J_L \cdot z_s < J_T (z_p + a \cdot z_s)$$

ou

$$z_s (b \cdot J_L - a \cdot J_T) < z_p \cdot J_T$$

Esta condição será tanto mais fácil de realizar, quanto maior for z_p , o que conduz a aumentar o isolamento da cuba do transformador em relação ao solo.

Para isso, tomam-se as seguintes disposições:

- seccionamento dos trilhos de enrolamento entre a parte em que repousa o transformador e as vias gerais da subestação quando os transformadores repousam sobre traves, é suficiente isolá-las do chão por interposição de placas de plástico. (calço de borracha, etc)

- isolamento do conservador de óleo sobre seu suporte ou colocação de uma junta isolante nas tubulações de junção do transformador.

Ademais, como é necessário evitar o funcionamento da proteção de massa para um defeito sobre os auxiliares de corrente alternada da subestação, é preciso:

- isolar cuidadosamente esses elementos,
- limitar a 100A a corrente de defeito à terra dos auxiliares BT, por inserção de uma resistência no neutro; a corrente de neutro fará, então, funcionar um relé de alarme.

A fim de manter uma ligação visível e contínua da cuba do transformador à terra, o transformador de corrente utilizado é do tipo toroidal (tipo exterior, imerso em um isolante); as relações de transformação empregadas são 200/1, preferencialmente, ou 50/1 também.

1.5. DETERMINAÇÃO PRÁTICA DA REGULAGEM DA PROTEÇÃO

1.5.1. CASO CEPAL

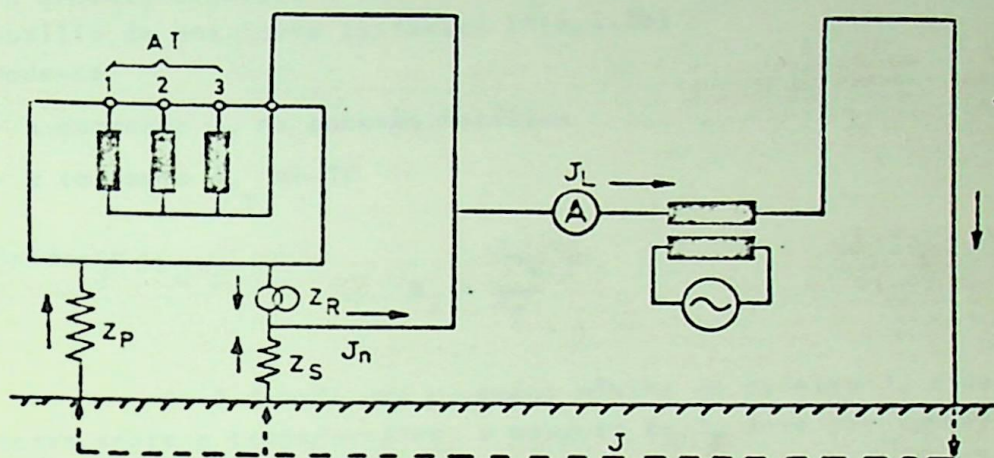
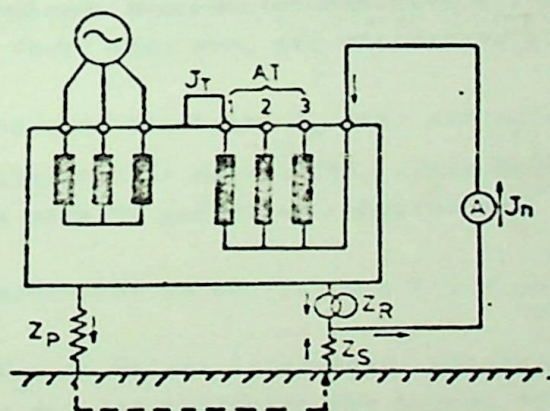
a) Regulagem relativa à AT

A dupla desigualdade definindo a regulagem J_0 escreve-se:

$$\frac{b \cdot Z_s \cdot J_L}{Z_p + Z_R + Z_s} < J_0 < \frac{(Z_n + a \cdot Z_s) \cdot J_T}{Z_p + Z_R + Z_s}$$

Para efetuar esta regulagem, é preciso conhecer valores de cada uma das expressões:

$$K_1 = \frac{b \cdot Z_s}{Z_p + Z_R + Z_s} \quad e \quad K_2 = \frac{Z_n + a \cdot Z_s}{Z_p + Z_R + Z_s}$$

Fig. 1.2a - Determinação de K_1 Fig. 1.2b - Determinação de K_2

Para medir K_2 , une-se um dos bornes 'T à cuba por uma conexão metálica e alimenta-se o transformador nela 'T com auxílio de uma fonte trifásica (Fig. 1.2b)

Mede-se:

- a corrente J_T na conexão metálica
- a corrente J_{R_T} no TC

Deduz-se

$$K_2 = \frac{J_{R_T}}{J_T}$$

Se é fixada uma corrente mínima de defeito J_T a detectar sobre o transformador, o produto $K_2 \cdot J_T$ deve ser superior à regulagem J_0 ; se não fosse assim, precisaria aumentar Z_n para reduzir K_1 e abaixar J_0 .

b) Regulagem relativa à 'T

$$\text{A determinação do coeficiente } K'_1 = \frac{Z_s}{Z_n + Z_0 + Z_s}$$

obtem-se como indicado precedentemente para K_1 ; todavia, é uma linha 'T que deve, esta vez, ser consignada e não uma linha AT.

A soleira de regulagem J_0 deve ser superior à $K'_1 \cdot J_L$, onde J_L tem o valor $< 300A$ ou $< 1000A$, (vide Norma EDP), segundo a natureza da rede 'T (aérea ou subterrânea).

$$\text{A determinação do coeficiente } K'_2 = \frac{Z_n + Z_s}{Z_n + Z_0 + Z_s}$$

é análoga à de K_2 ; as únicas diferenças, consistem, de um lado, em colocar o gerador trifásico nos bornes AT, e de outro lado, a ligar um borne 'T à cuba do transformador por uma conexão metálica.

A soleira de regulagem J_0 deve ser inferior a $K'_2 \cdot J_T$, onde J_T é a menor corrente de defeito que se deseja

detetar sobre o enrolamento 'MT do transformador. Se nenhuma soleira é exigida, o conhecimento de K'_2 e de J_0 fixará o valor limite dessa corrente.

1.5.2. CASO PARTICULAR DE SUBESTAÇÃO AT/MT

As relações escritas no fim do parágrafo mostram que, neste caso particular, a soleira de regulação J_0 deve ser tal que

$$J_0 > \frac{Z_s}{Z_n + Z_p + Z_s} \cdot J_L$$

ou

$$J_0 > K'_1 \cdot J_L$$

A regulação é fácil, pois que o conhecimento de K'_1 e J_L (este igual a < 300 ou $< 1000A$) fixa o valor de J_0 .

Com material habitualmente utilizado, acha-se corretamente

$$J_0 = 63 \cdot J_L$$

NOTA

A protecção de massa não é realmente eficaz senão em caso de avaria de borne ou de defeito à massa sobre uma fracção do enrolamento, lado fase; de fato, quando o defeito envolve espiras próximas do ponto neutro, a corrente resultante é fraca e frequentemente insuficiente para fazer funcionar a protecção (no entanto, esse tipo de defeito não é muito frequente devido à pequena diferença de potencial entre espira

1.6. ENSAIO DA PROTEÇÃO

1.6.1. CARACTERÍSTICAS DA PROTEÇÃO MASSA CUBA

Vinos que a finalidade dessa proteção é a de proteger o transformador contra um contato à terra dos enrolamentos cujo neutro é ligado à terra por uma fraca impedância.

A cuba do transformador deverá ter um isolamento pelo menos de 5 ohms em relação à terra. Esse isolamento é realizado, como sabemos, seja colocando placas isolantes sob os rodízios, seja simplesmente separando as peças dos trilhos - suporte do transformador, da terra geral. O concreto é geralmente suficiente para realizar esse isolamento na condição que não haja armaduras em contato com os trilhos.

As entradas de cabo BT (Buchholz, termômetros, etc.) deverão ser feitas por juntas isolantes de modo a isolar a cuba, da terra geral.

A cuba estando ligada à terra por um TC intermediário de relação 200/1A, e usando-se um relé de calibre 0.5A (tipo PPI da CUC, PPII da ASEA ou PPI da BBC, por exemplo), essa proteção permite detectar correntes de defeito à terra superiores a 80A. (A EDF normaliza os calibres de modo a detectar correntes superiores a 80A, e limitando-se a 300-400A no máximo, nas redes de distribuição).

No caso em que o transformador esteja equipado com centelhadores (para-raios de chifre) sobre cada fase, é preciso acautelar-se para que o chifre lado-massa esteja ligado diretamente à terra, e não à cuba, de modo a evitar o funcionamento dessa proteção sob uma descarga devida a fenômenos atmosféricos.

Note-se que no caso de uma proteção de massa de uma máquina a eixo horizontal, por isolamento do estator, o ensaio da proteção será conduzido da mesma forma que para a massa

cuba de um transformador, porém os TC e relés terão, evidentemente, calibre mais fracos.

O funcionamento dessa proteção deve ser instantâneo e provocará:

- a paralização de grupo, no caso de conexão bloco G-T.
- o disparo dos dois disjuntores, no caso de um transformador ligado a um jogo de barras.
- o disparo da eventual proteção contra incêndio, por água pulverizada somente, e o fechamento da válvula no circuito de circulação de óleo, eventual.

1.6.2. MÉTODO DE ENSAIO

Consta normalmente de cinco passos, como descrito a seguir.

I - Bloqueio da proteção contra incêndio.

II - Aferição do relé.

Retirar o relé do painel e fazer a montagem da figura (1.3)

Anotar a corrente mínima "i" de funcionamento do relé, após feita sua aferição.

III - Medição da impedância entre a cuba e a terra.

Retirar o TC e executar o esquema da figura com o auto-transformador de corrente, e injetar uma corrente entre a cuba e a terra por meio do reostato R

Anotar a tensão V_{1d} e a corrente I_{1d} .

A impedância Z_1 será $Z_1 = \frac{V_{1d}}{I_{1d}}$, que deve ser objetivamente $Z_1 > 5$ ohms.

Religar o TC, mantendo o esquema da figura (1.4)

Fazer as mesmas medições, anotando a tensão V_{2d} e a corrente I_{2d} .

A impedância Z_2 será $Z_2 = \frac{V_{2d}}{I_{2d}}$

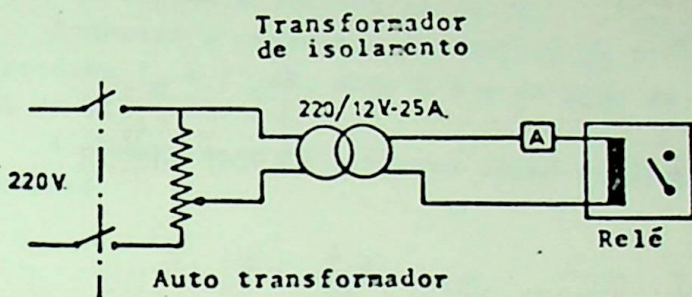


Fig. 1.3. - Esquema para aferição do relé

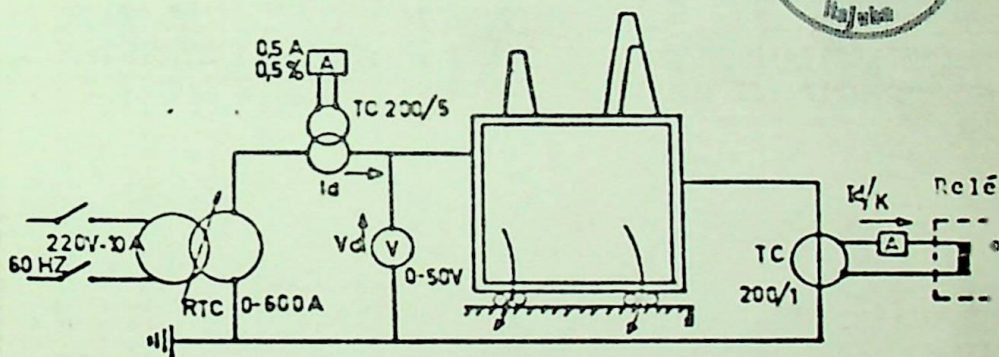


Fig. 1.4. - Medida da repartição das correntes de terra



IV - Medida da repartição das correntes de terra.

Conservar o esquema da figura 1.4, estando o amperímetro no circuito secundário do TC.

Aumentar a corrente com auxílio do RTC, e anotar as correntes I_d e I'_d/K , onde K é a relação de transformação do TC.

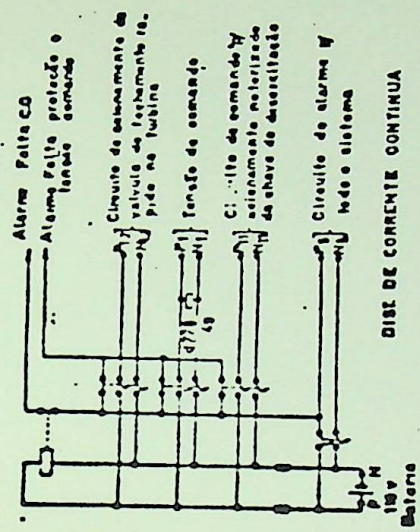
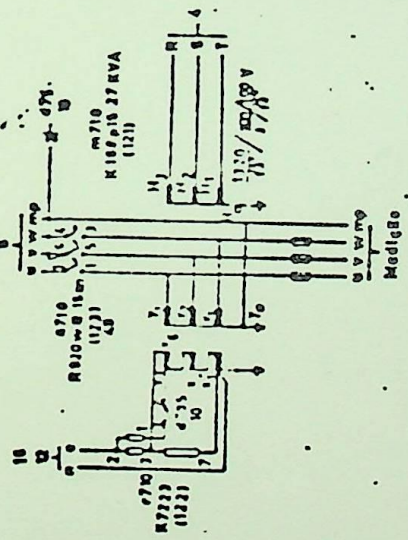
A percentagem da corrente total colhida pela proteção será:

$$P = \frac{I'_d}{I_d} \cdot 100$$

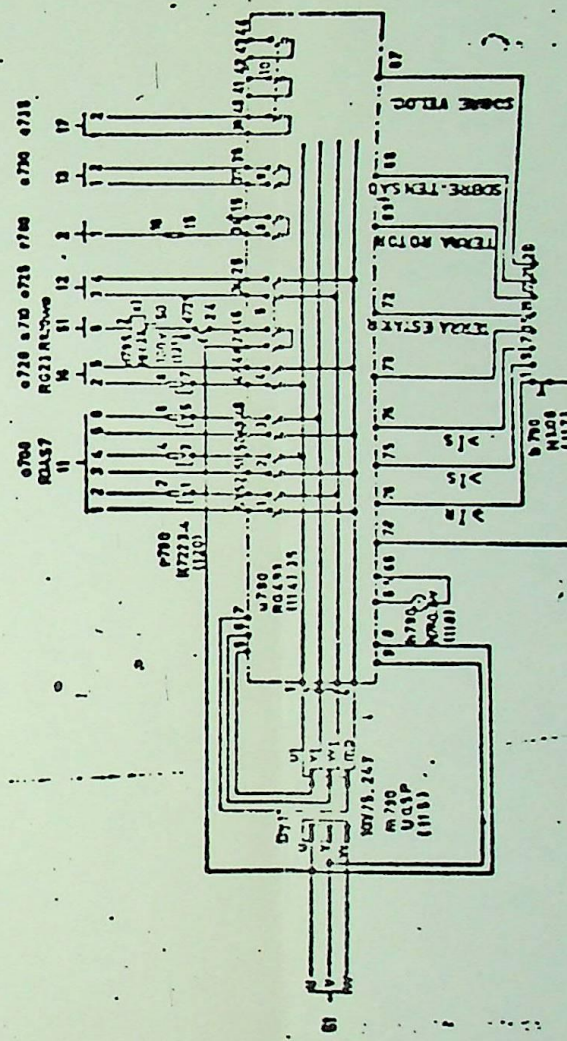
que deve ser obrigatoriamente $p > 80\%$.

V - Retirar o amperímetro do circuito secundário do TC e reestabelecer os circuitos em seu estado definitivo.

Aumentar novamente a corrente com auxílio do RTC verificar que a corrente I_d que provoca o funcionamento da proteção é realmente aquela achada precedentemente.



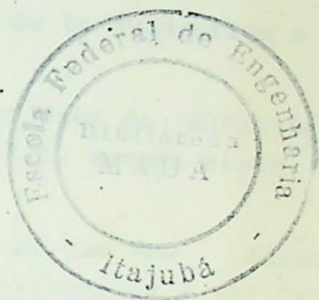
DISC DE CORRENTE CONTINUA



Sir Isaac Pitman (CANADA) LTD

Pitman House, 381-383. Church Street, Toronto.

- 21 - Warrington, A.R. - Protective Relays - Ed. Chapman &
Hall - 1962.



- 12 - Mason, C. Russel, The art and science of Protective relaying, John Wiley e Sons, INC., New York. Chapman e Hall, LTD., London, 1956.
- 13 - Methodes de Mesures et d'essais des circuits BT de commandes, de controle et de protection des usines hydrauliques.
Publicação nº 18/1966 da Direction de La Production e du Transport-Electricité de France.
- 14 - Netushil, A.V - S.V. Strajov. Princípios de eletrotécnica, Tomo II, Editorial Cartago S.R.L, Buenos Aires, 1959.
- 15 - Neugebauer, H. Measuring Principles of the New Siemens Differential Protection - Siemens Zeitschrift - Vol. XXVI Nº 5, July 1952 pp 219-224.
- 16 - Petard, M. Generalites sur la Protection des Reseaux D'energie Electrique - Électricité de France - 1961 - pp-214.
- 17 - Roepper, Richard. Las Corrientes de curto circuito en las redes trifásicas - Siemens - Traducción de la 5ª edición Alemana, Noviembre 1970 - Editorial DOSSAT S.A.
- 18 - Siemens - Transformer differential protective relay system RT22b - Stabilizing unit RT23. Operating Instrutions - MWB RT22 - 10/101. Printed in Germany.
- 19 - Siemens - Generator Differential RG22 and Stator Earth Fault Protetion RG23.
- 20 - Wellman, F.E. The protective Gear Handbook. Second Edition 1968
Sir Isaac Pitman and Sons LTD,
Pitman House, Pavker Street, Kingsway, London, W.C.2
Pitman Publishing Corporation
20 East 46th Street, New York, N.Y., 100/7

BIBLIOGRAFIA :-

- 1 - Asea - Protección diferencial RYDSS para barras Omnibus. Folleto RK60-204SP Enero 1971. Edition 1.
- 2 - Cigre - Proteção de Transformadores - Ano 1960; Tomo I; GR-31 pag.737.
- 3 - Caminha, Amadeu Casal. Proteção dos Sistemas Elétricos, EFEI, 1973.
- 4 - Dermierre, M. La protection des transformateurs. Revue Brown Boveri, Tome 53, N° 11/12; Novembre/Decembre 1966, pag. 820.
- 5 - Delle-Alsthom - Protection des Transformateurs - Protection contre Les défauts internes. Catalogue - 6/46-10.
- 6 - Eletrical transmission and Distribution - Reference Book Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation. East Pittsburgh, Pensilvania. Fourth edition, september, 1, 1950.
- 7 - Favraud, J Fonctionnement et protetion de distribution. Publicação do Centre de perfectionnement Electrique de Nanterre - Electricité de France.
- 8 - Fiches d'essais des Protections Eletriques - Usine de Bollene - G.R.P.H - Lyon - France.
- 9 - Haug, H - Relais de Protection avec redressement des grandeurs d'influence - Revue Brown Boveri, Tome 53; N° 11/12; Novembre/Decembre 1966 - pag. 747.
- 10- Kratzer, R. L'impédance homopolaire des transformateurs. Bulletin Sécheron, N° 27F, 1958 pag. 23 a 32.
- 11- Kauffman, M. M.I.E.E. The Protective Gear Handbook. Sir Isaac Pitman e Sons LTD - London - Reprinted 1965.

Cr\$

DATA

i g



NÃO DANIFIQUE ESTA ETIQUETA