

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Grupo de Sistemas Elétricos

ESTUDO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL
DE TRANSFORMADORES

André Dantas Germano

Campina Grande, novembro de 2008.

Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Departamento de Engenharia Elétrica
Grupo de Sistemas Elétricos

ESTUDO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL DE TRANSFORMADORES

*Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de
Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de
Campina Grande, em cumprimento parcial às exigências para
obtenção do Grau de Engenheiro Eletricista.*

Orientador:

Prof. Dr. Francisco das Chagas F. Guerra

Campina Grande, novembro de 2008.



Biblioteca Setorial do CDSA. Fevereiro de 2021.

Sumé - PB

Àqueles que me deram a vida,
e aos que a fizeram melhor.

*“Olha lá, quem sempre quer vitória e perde
a glória de chorar (...) E eu que já não sou
assim... muito de ganhar... junto as mãos ao
meu redor, faço o melhor que sou capaz
só pra viver em paz.”*

Marcelo Camelo

Resumo

A continuidade do fornecimento de energia elétrica depende do funcionamento adequado de vários sistemas e equipamentos, entre eles os transformadores e os sistemas de proteção. A proteção dos sistemas elétricos é feita por esquemas comandados por relés. Os transformadores requerem relés confiáveis, rápidos e seletivos, e os relés diferenciais são os que melhor atendem a esses requisitos. Este trabalho aborda os diversos tipos de proteção disponíveis para transformadores de potência, dando enfoque à proteção diferencial. São descritos os aspectos funcionais básicos das três gerações de relés (eletromecânicos, estáticos e digitais), assim como as vantagens de cada uma em relação à anterior. Os relés diferenciais e de sobrecorrente são descritos, assim como os distúrbios aos quais esses dispositivos estão sujeitos. As técnicas disponíveis para garantir que os relés diferenciais não atuem indevidamente também são apresentadas. O trabalho é encerrado com uma análise detalhada dos relés digitais, onde são discutidos a arquitetura básica dos mesmos e um algoritmo para detecção de defeitos.

Palavras-Chave: Proteção de Transformadores, Relé Diferencial, Relé Digital, Correntes de *Inrush*.

Abstract

The continuous electric energy supply depends on the proper operation of several systems and equipments, such as transformers and protection systems. The protection of electrical systems is done by relay controlled schemes. Transformers require relays that are dependable (no missing operations), fast and secure (no false tripping), and the differential relays are the ones that best suit these requirements. This work presents the several types of protection available for transformers, focusing on differential protection. Basic functional aspects of the three generations of relays (electromechanical, static and digital) are discussed, along with the advantages of each one over their predecessors. Both differential and overcurrent relays are described, besides the disturbances to which they are subjected. The available techniques to guarantee that differential relays do not operate inappropriately are presented. The work is concluded with a detailed analysis of digital relays, where their basic architecture and a fault detection algorithm are discussed.

Keywords: Transformer Protection, Differential Relay, Digital Relay, Inrush Currents.

Sumário

| | |
|---|-----------|
| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 01 |
| CAPÍTULO 2 – MATERIAIS MAGNÉTICOS EM TRANSFORMADORES | 03 |
| CAPÍTULO 3 – DISTÚRBIOS NO SISTEMA ELÉTRICO | 06 |
| 3.1. SOBRECORRENTES | 06 |
| 3.2. SOBRETENSÕES | 08 |
| 3.3. SOBREEXCITAÇÕES | 11 |
| 3.4. SOBRETENPERATURAS | 11 |
| 3.5. SOBREPRESSÕES | 11 |
| CAPÍTULO 4 – TIPOS DE RELÉ E FUNCIONAMENTO BÁSICO | 12 |
| 4.1. RELÉ ELETROMECAÂNICO | 12 |
| 4.2. RELÉ ESTÁTICO | 13 |
| 4.3. RELÉ DIGITAL | 14 |
| CAPÍTULO 5 – RELÉ DIFERENCIAL E DE SOBRECORRENTE | 16 |
| 5.1. RELÉ DIFERENCIAL | 16 |
| 5.1.1. Relé Diferencial Amperimétrico | 16 |
| 5.1.2. Relé Diferencial Percentual | 17 |
| 5.1.3. Esquemas Diferenciais | 19 |
| 5.2. RELÉ DE SOBRECORRENTE | 20 |
| CAPÍTULO 6 – BLOQUEIO DA PROTEÇÃO DIFERENCIAL | 23 |
| 6.1. RESTRIÇÃO POR HARMÔNICAS | 24 |
| 6.2. BLOQUEIO POR HARMÔNICAS | 24 |
| 6.3. DESSENSIBILIZAÇÃO POR RELÉS DE TENSÃO | 25 |
| CAPÍTULO 7 – RELÉ DIGITAL | 26 |
| CAPÍTULO 8 – CONCLUSÕES | 30 |
| APÊNDICE A | 32 |
| A.1. TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTOS | 32 |
| A.2. REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA PRIMÁRIO | 32 |
| A.3. TCs EM REGIME TRANSITÓRIO | 33 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 36 |
| | vii |

Capítulo 1

Introdução

Desde o século XIX, a partir dos inventos de Thomas Edison e Nikola Tesla, a energia elétrica tem se tornado indispensável à sociedade, sendo, atualmente, uma das formas de energia mais utilizadas. Os sistemas de transmissão e distribuição de energia devem ser confiáveis e garantir continuidade de fornecimento aos diversos tipos de consumidores. Para isto, faz-se necessário o perfeito funcionamento de vários sistemas e equipamentos, entre eles os transformadores e os sistemas de proteção.

Transformadores são equipamentos responsáveis pela alteração dos valores de tensões e correntes através do princípio da indução eletromagnética, interligando as diversas partes dos sistemas de transmissão e distribuição de energia elétrica. Um transformador é constituído de um núcleo feito de material ferromagnético¹, de três ou cinco colunas, sobre as quais se enrolam duas ou mais bobinas cilíndricas, que constituem os enrolamentos do transformador. Segundo D'AJUZ et al. (1985), não é rara a utilização de um enrolamento terciário, disposto em delta, para compensação de reativos e/ou alimentação de serviços auxiliares, com um terço da potência dos outros enrolamentos.

Os transformadores das subestações de alta tensão podem ser classificados, de acordo com a função que desempenham, em:

- Transformadores elevadores: elevam a tensão de geração para a tensão de transmissão;
- Transformadores de interligação: interligam partes do sistema de transmissão que possuem níveis diferentes de tensão;
- Transformadores abaixadores: abaixam a tensão de transmissão para a tensão de subtransmissão ou de distribuição.

Devido à sua importância nos sistemas de transmissão e distribuição, associada a seu alto custo, os transformadores requerem dispositivos de proteção confiáveis, que sempre atuem em caso de defeito e, concomitantemente, não atuem indevidamente. Para que isto ocorra, devem-se utilizar relés cuja concepção se atenha aos preceitos de confiabilidade, rapidez e seletividade.

¹ Materiais que possuem alta permeabilidade magnética, minimizando o fluxo de dispersão entre os enrolamentos do transformador, aumentando assim a eficiência do mesmo.

Transformadores de distribuição são geralmente protegidos por elos fusíveis, conhecidos popularmente por "canelas", enquanto nos transformadores de transmissão são usados relés de sobrecorrente e relés diferenciais. Os relés diferenciais são os que melhor atendem aos requisitos citados no parágrafo anterior, entretanto, constatam-se alguns problemas relacionados ao desempenho dos mesmos.

Durante a energização dos transformadores surgem correntes transitórias, com duração de vários ciclos, que podem apresentar amplitude de até 20 vezes o valor de pico da corrente nominal do equipamento (GUERRA, 2007). Esse efeito é conhecido como *inrush*, e essas correntes podem causar atuação intempestiva da proteção diferencial. A fim de evitar desligamentos indevidos, os relés podem ser dessensibilizados em relação às correntes transitórias de magnetização por diversos métodos, os quais serão estudados ao longo deste trabalho.

O objetivo deste trabalho é estudar os diversos tipos de proteção disponíveis para transformadores de potência, dando enfoque à proteção diferencial. São descritos os aspectos funcionais básicos das três gerações de relés (eletromecânicos, estáticos e digitais), assim como as vantagens de cada uma em relação à anterior. Os relés diferenciais e de sobrecorrente são abordados, assim como os distúrbios aos quais esses dispositivos estão sujeitos.

No Capítulo 2, apresentado a seguir, são apresentados os vários materiais magnéticos utilizados no núcleo de transformadores. O Capítulo 3 aborda os distúrbios no sistema elétrico, sendo seguido do Capítulo 4, onde são apresentados os três tipos de relés e seus aspectos funcionais básicos. O Capítulo 5 aborda os relés diferenciais e de sobrecorrente. No Capítulo 6 são abordadas as técnicas de bloqueio da proteção diferencial, enquanto o Capítulo 7 detalha os relés diferenciais numéricos. O Capítulo 8 finaliza o trabalho, apresentando as conclusões deste estudo.

Capítulo 2

Materiais Magnéticos em Transformadores

Diversos materiais magnéticos são utilizados para a constituição do núcleo do transformador de potência. Esses materiais e suas vantagens serão discutidos ao longo deste capítulo, assim como os problemas relacionados à utilização de cada um deles.

Graças às técnicas com que são fabricados, os transformadores modernos apresentam uma alta eficiência, transferindo ao terminal secundário acima de 98% da energia aplicada ao primário (BHARAT, 2003). No entanto, existem perdas intrínsecas ao processo de transformação da energia, associadas à resistência do fio das bobinas (perdas por efeito Joule) e ao material magnético utilizado no núcleo.

As perdas magnéticas no núcleo do transformador podem ser divididas em três parcelas: perdas histeréticas, perdas parasíticas clássicas e perdas anômalas (LANDGRAF et al., 1998; WERNER, 1992; MOSES, 1990). As perdas parasíticas nos núcleos magnéticos são proporcionais ao quadrado da frequência e da espessura do núcleo, razão pela qual este não é formado por uma peça maciça, mas sim laminado. Essas chapas são isoladas eletricamente por uma camada de verniz, para impedir a circulação das correntes parasitas geradas pela Lei da Indução de Faraday. Para aplicações em frequências mais elevadas se fazem necessárias lâminas de espessura bastante reduzida, que apresentam custos bastante elevados, limitando sua utilização.

No início do século XX descobriu-se que a adição de pequenas quantidades de silício ao ferro provocava um aumento da resistividade das lâminas, implicando na redução das perdas parasíticas. Esse processo culminava ainda no aumento da permeabilidade magnética do material e melhoria nas propriedades mecânicas (puncionabilidade, estampabilidade e elasticidade).

Devido às inúmeras vantagens apresentadas, desde o ano de 1905 as ligas de ferro-silício (Fe-Si) têm sido utilizadas nos núcleos de transformadores, muito embora a porcentagem de silício não exceda 4%. Acima dessa quantidade, o valor de saturação do material é reduzido e sua resistência mecânica é comprometida, dificultando a laminação.

As ligas de Fe-Si cujas perdas são reduzidas pela simples adição de silício às lâminas de ferro são denominadas aços de grãos não-orientados (GNO), e são utilizadas em equipamentos que operam nas frequências em torno de 60 Hz, como transformadores de pequeno porte, geradores e motores. Existem ainda os aços de grãos orientados (GO), desenvolvidos em 1933 por Norman Goss, que descobriu que quando submetidas a uma laminação a frio, com um recozimento intermediário, acrescido de um recozimento final a alta temperatura, as ligas de Fe-Si adquirem melhores propriedades (indução máxima de trabalho aumentada e menores perdas magnéticas).

Os aços GO são assim chamados porque seus domínios magnéticos (grãos) possuem um sentido preferencial de magnetização. Dessa forma, menos energia é consumida para alinhar os grãos na direção do campo magnético ao qual eles estão expostos. Estes materiais são aplicados em dispositivos onde o fluxo magnético percorre núcleos de posição fixa, no sentido mais favorável à magnetização, como os transformadores usados nos sistemas de transmissão e de distribuição de energia elétrica. Nesses sistemas, a alta potência justifica o maior custo associado à utilização destes materiais, visando à redução das perdas e conseqüente aumento da eficiência dos equipamentos.

Todos os equipamentos devem operar adotando preceitos de eficiência e conservação energética. Tem-se investido bastante na busca de materiais alternativos para utilização em transformadores. Entre esses materiais, destacam-se as ligas amorfas, também conhecidas como "vidros metálicos", em substituição ao aço-silício de grãos orientados laminado a frio.

As ligas amorfas surgiram em 1960 como uma alternativa aos aços GO e GNO, em aplicações de alta frequência, como fontes chaveadas, onde os aços tradicionais apresentam perdas muito elevadas (BOLL et al., 1981). Tais ligas consistem de sólidos não-cristalinos, criados a partir do resfriamento rápido de ligas metálicas, e já se encontram a venda com larguras de até 100 mm. Ainda não há capacidade tecnológica para produzir ligas com espessuras de 800 a 1000 mm, tamanho padrão das chapas de aço-silício em uso nos transformadores (BHARAT, 2003).

As ligas amorfas ainda apresentam outros problemas, como menor suportabilidade a estresses mecânicos e ponto de saturação mais baixo que o aço-silício. Todavia, os materiais amorfos são uma grande promessa, e espera-se que em um futuro próximo, esses e outros problemas, como o custo proibitivo, sejam superados.

Em 1988, foram desenvolvidos os materiais nanocristalinos (GRENÈCHE, 2003), obtidos a partir do recozimento de ligas amorfas tradicionais. Estes materiais apresentam uma estrutura cristalina de grãos com diâmetros da ordem de dezenas de nanômetros, fato que sugeriu sua denominação. As ligas nanocristalinas apresentam excelentes propriedades magnéticas, e já são produzidas industrialmente, tendo aplicações idênticas às ligas amorfas.

Capítulo 3

Distúrbios no Sistema Elétrico

As principais anormalidades que afetam o desempenho dos transformadores de potência são as sobrecorrentes, sobretensões e sobreexcitações. Também é comum a ocorrência de sobretensões e sobrepressões, provocadas, por exemplo, por baixo nível de óleo e curtos-circuitos internos, respectivamente.

A fim de evitar danos ao equipamento devido a essas anormalidades, utilizam-se diferentes formas de proteção, entre elas: diferencial, de sobrecorrente, de sobretensão, de sobrepressão, de carcaça, de nível e temperatura do óleo, etc. Tais formas de proteção serão detalhadas nas seções seguintes.

3.1. SOBRECORRENTES

As sobrecorrentes são causadas por curtos-circuitos, energização inicial dos transformadores e sobrecargas. **Curtos-circuitos** podem ocorrer no interior ou no exterior do tanque do transformador. Os curtos-circuitos provocam elevação da temperatura no transformador e conseqüente decomposição do óleo isolante, além do aumento da pressão. Os curtos-circuitos externos, devido à alta corrente demandada, ocasionam esforços eletromecânicos danosos equipamento.

Curtos-circuitos externos são provocados por chuva, neve, tempestades, entre outros, e podem ocorrer entre apenas uma ou todas as fases das linhas aéreas, envolvendo ou não a terra. A porcentagem de ocorrência de cada uma das faltas é apresentada abaixo, na Tabela 1 (BLACKBURN, 1998):

Tabela 1. Porcentagem Aproximada de Ocorrência de Faltas.

| | |
|----------------|--------|
| Monofásica | 70-80% |
| Bifásica-Terra | 17-10% |
| Bifásica | 10-8% |
| Trifásica | 3-2% |

As proteções que atuam durante curtos-circuitos são: a proteção diferencial, de sobrecorrente, de carcaça e, especificamente no caso de curto-circuito interno, o relé de sobrepressão. Segundo CAMINHA (1977), a proteção contra curtos-circuitos é feita preferencialmente por meio de relés diferenciais percentuais e de relés Buchholz, a gás.

Em regime permanente, os transformadores absorvem uma corrente de magnetização de, em média, 2% da corrente nominal do transformador. Entretanto, durante a **energização inicial**, esse valor pode alcançar valores muito elevados, chegando a 20 p.u., caracterizando a corrente transitória de magnetização (*inrush*).

O fenômeno é originado devido ao fluxo residual no núcleo do transformador no momento da energização, que somado ao fluxo total aumenta ou diminui a corrente de *inrush* (WESTINGHOUSE, 1976). Na Figura 1 ilustra-se a pior situação, em que o transformador é reenergizado no instante em que a linha de fluxo Φ , pontilhada, estaria no seu valor negativo máximo ($-\Phi_{Max}$). Como o fluxo residual Φ_R não pode ser criado ou destruído instantaneamente, a onda de fluxo, ao invés de começar de $-\Phi_{Max}$ e seguir a linha tracejada, cresce a partir de Φ_R , até alcançar o valor Φ_{tMax} .

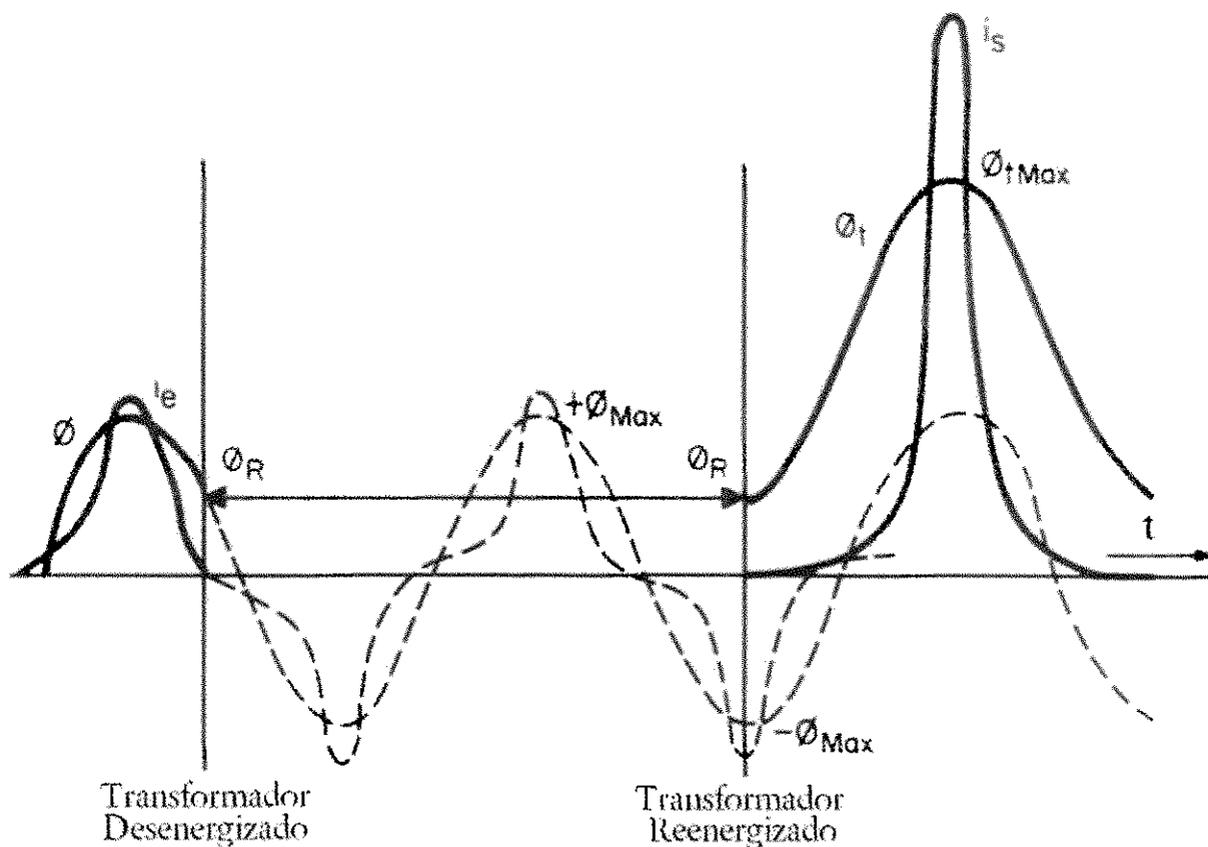


Figura 1. Corrente de magnetização quando o transformador é energizado no instante em que a onda de fluxo está no seu valor máximo (WESTINGHOUSE, 1976. Editada pelo autor).

Esse elevado valor de fluxo, representado na Figura 1, leva o núcleo do transformador a uma saturação profunda, onde pequenas variações do fluxo Φ implicam em variações muito intensas da corrente i , gerando o surto de corrente ilustrado na Figura 2.

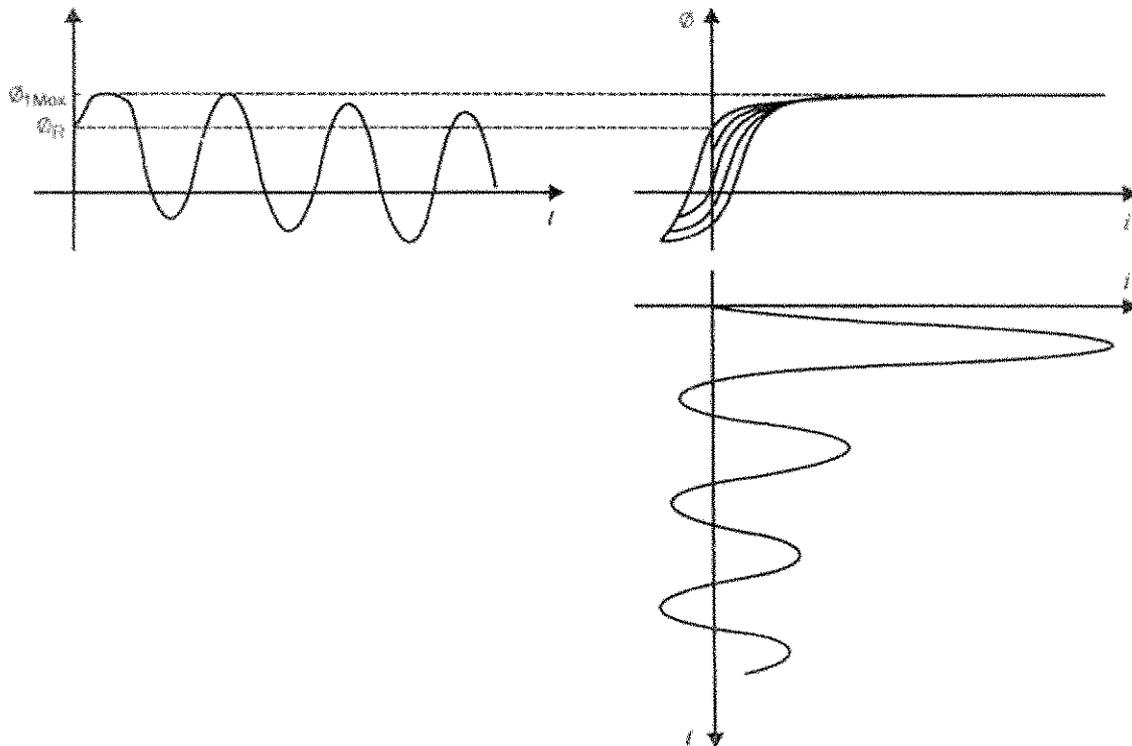


Figura 2. Fluxo de enlace e corrente de energização de um transformador (GUERRA, 2007. Editada pelo autor).

Por fim, **sobrecargas** são solicitações de corrente superiores à corrente máxima suportada pelo transformador. As sobrecargas são prejudiciais na medida em que o crescimento das perdas nos condutores por efeito Joule provoca um aumento na temperatura dos enrolamentos. Para proteger o transformador das sobrecargas, são utilizados relés temporizados e dispositivos térmicos.

3.2. SOBRETENSÕES

As redes elétricas estão sujeitas a vários fenômenos transitórios envolvendo variações súbitas de tensão, provocadas por descargas atmosféricas, faltas no sistema ou operação de disjuntores e chaves seccionadoras.

Neste trabalho as sobretensões são divididas em três grupos, de acordo com o tempo de duração e grau de amortecimento do transitório: sobretensões atmosféricas, de manobra e sustentadas.

As **sobretensões atmosféricas** são originadas por descargas diretamente sobre a linha ou nas proximidades da mesma, e são caracterizadas por uma frente de onda de alguns microssegundos a algumas dezenas de microssegundos. Os efeitos de uma sobretensão atmosférica são tão mais intensos quanto maiores o valor de pico e a inclinação da frente de onda incidente.

Na Figura 3 pode-se observar a forma de onda de uma sobretensão atmosférica nos terminais de um transformador, incluindo-se o efeito do pára-raios, que limita a amplitude da sobretensão. Observa-se uma tensão unidirecional, com valor máximo bem definido.

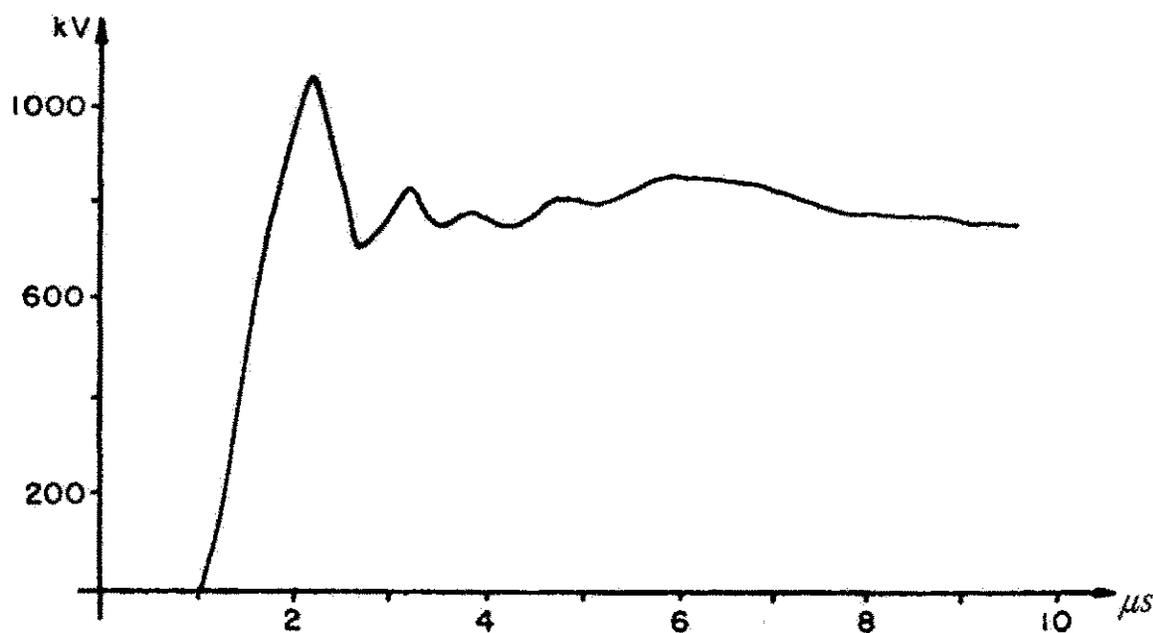


Figura 3. Forma de onda típica de uma sobretensão atmosférica (D'AJUZ, 1985. Editada pelo autor).

A proteção contra descargas atmosféricas é exercida por cabos-guia (cabos pára-raios), centelhadores e pára-raios de óxido de zinco ou carboneto de silício.

Sobretensões de manobra resultam de chaveamentos no sistema elétrico, como interrupção de curtos-circuitos, fechamentos fora de sincronismo e interrupção de correntes capacitivas ou pequenas correntes indutivas. Apresentam frentes de onda da ordem de dezenas a centenas de microssegundos, e podem ser unidirecionais ou oscilatórias, dependendo do amortecimento do circuito. A seguir, na Figura 4, observa-se a forma de onda da tensão durante a energização de uma linha.

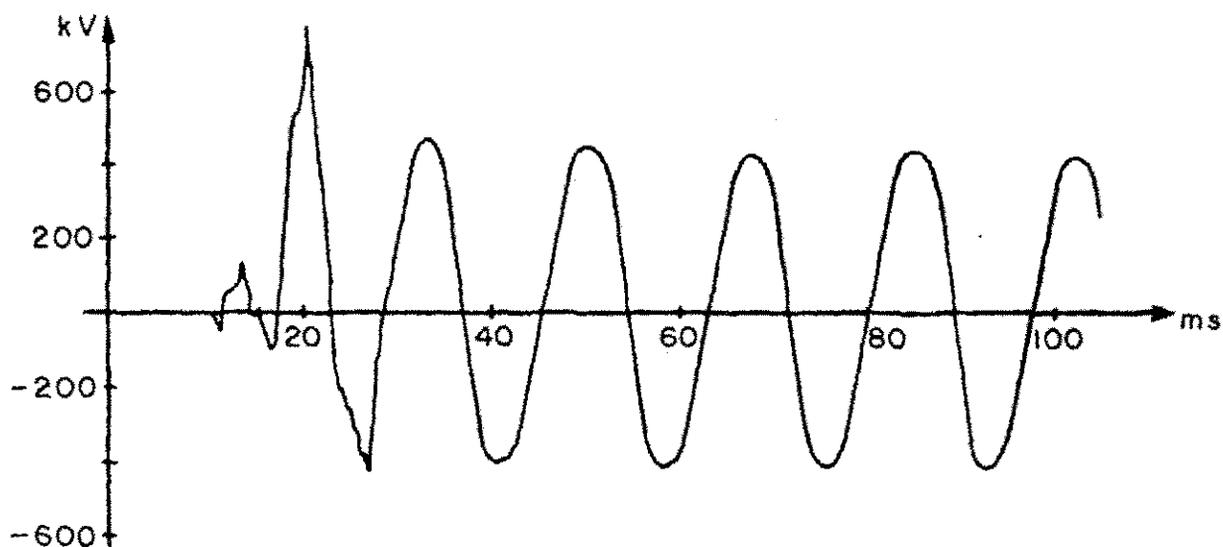


Figura 4. Sobretensão de manobra com forte amortecimento (D'AJUZ, 1985. Editada pelo autor).

Para proteção contra sobretensões de manobra, utilizam-se disjuntores com resistores de pré-inserção e circuitos amortecedores do tipo RLC ressonantes.

Por fim, as **sobretensões sustentadas** são provocadas por energização de linhas em vazio, rejeição de carga e defeitos fase-terra ou fase-fase-terra em sistemas com neutro isolado ou aterrado por resistência elevada (D'AJUZ et al., 1985). Possuem longa duração e picos de amplitude reduzida. A proteção deve ser exercida por relés de sobretensão.

Na Figura 5 pode-se observar um exemplo típico de sobretensão sustentada, devido a uma rejeição de carga. Apenas o envoltório da forma de onda da tensão é apresentado.

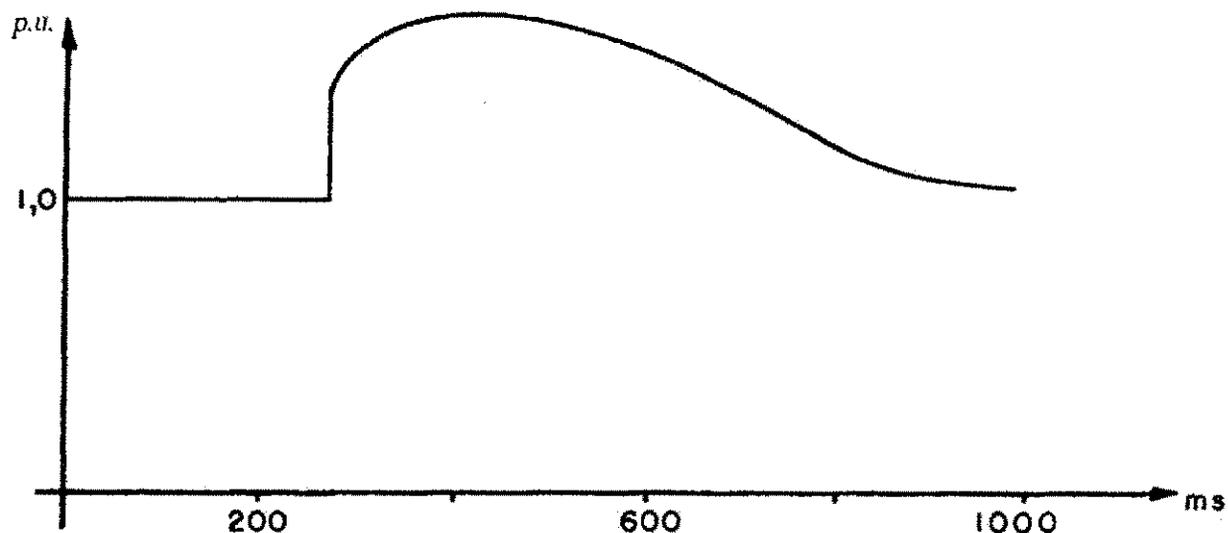


Figura 5. Exemplo típico de sobretensão sustentada (D'AJUZ, 1985. Editada pelo autor).

3.3. SOBREEXCITAÇÕES

As sobreexcitações consistem em um aumento do fluxo no núcleo dos transformadores, provocado por sobretensões ou subfrequências. Subfrequências ocorrem devido a manobras de entrada ou saída de geradores, desbalanceamento entre geração e carga, entre outros. As sobreexcitações ocasionam aumento da corrente de magnetização do núcleo, aumento dos ruídos e vibrações e, conseqüentemente, elevação das perdas no núcleo e partes metálicas não-laminadas, provocando sobreaquecimento.

Para proteger os transformadores de sobreexcitações utilizam-se relés Volts por Hertz, que detectam a relação V/f , e relés de sobretensão.

3.4. SOBRETEMPERATURAS

A sobretemperatura consiste num aumento da temperatura nos enrolamentos e no óleo do transformador devido a sobrecargas ou curtos-circuitos. A proteção dos enrolamentos é feita em transformadores acima de 2,5 MVA, através de termômetros ou relés de imagem térmica. Esses dispositivos promovem o acionamento de alarmes ou sistemas de alívio de carga, dependendo da intensidade da temperatura medida. A proteção contra sobretemperatura do óleo também é exercida por termômetros, porém, como as constantes térmicas do óleo isolante são muito maiores do que as dos enrolamentos, esses dispositivos atuam bem mais lentamente.

3.5. SOBREPRESSÕES

A proteção contra sobrepressões é exercida pelo relé tipo Buchholz, também denominado relé de gás. Este relé detecta falhas no interior do tanque do transformador através da análise dos gases formados pela decomposição do meio dielétrico (óleo isolante). O dispositivo atua em duas situações: acúmulo de pequenas quantidades de gás, devido, por exemplo, a leves sobrecargas; ou detecção de grandes quantidades de gás, devido à formação de arcos no interior do tanque do transformador (curto-circuito interno).

No caso de defeitos internos de menor gravidade (vazamento do óleo, leves sobrecargas, etc.), o relé simplesmente aciona um sistema de alarme. Para faltas internas graves, como formação de arcos intensos, um disjuntor é acionado, desligando completamente o transformador.

Capítulo 4

Tipos de Relé e Funcionamento Básico

A proteção dos sistemas elétricos é feita por esquemas comandados por relés. Segundo a ABNT (NBR 7097), um relé é um dispositivo por meio do qual um equipamento elétrico é operado quando se produzem variações nas condições deste equipamento, do circuito em que ele está ligado, ou de um outro equipamento ou circuito associado. A função primordial do relé é identificar defeitos, localizá-los e alertar ao sistema de proteção. O sistema de proteção, por sua vez, promove a sinalização da falta e a abertura dos disjuntores, isolando o defeito e prevenindo assim que este prejudique a operação normal do sistema.

De acordo com o princípio de funcionamento e aspectos construtivos, os relés podem ser classificados em:

- Relé eletromecânico;
- Relé estático ou eletrônico;
- Relé digital ou numérico.

4.1. RELÉ ELETROMECAÂNICO

Os relés eletromecânicos são os relés tradicionais, funcionando através de acoplamentos elétricos e magnéticos. Estes dispositivos são acionados por movimentos mecânicos, que fecham ou abrem os contatos correspondentes. Existem dois princípios fundamentalmente diferentes de operação: atração eletromagnética e indução eletromagnética (MASON, 1956).

Os relés de atração eletromagnética são os mais simples, funcionando de forma idêntica a um eletroímã. O relé é formado por uma bobina enrolada sobre um núcleo fixo, que fornece um caminho de baixa relutância para o fluxo magnético, e uma armadura móvel, solidária a um ou mais contatos. Uma mola mantém o circuito aberto, até que uma corrente elétrica passando pelos enrolamentos induza um campo magnético no núcleo que atraia a armadura, modificando o estado dos contatos. Um diagrama simplificado é apresentado a seguir, na Figura 6.

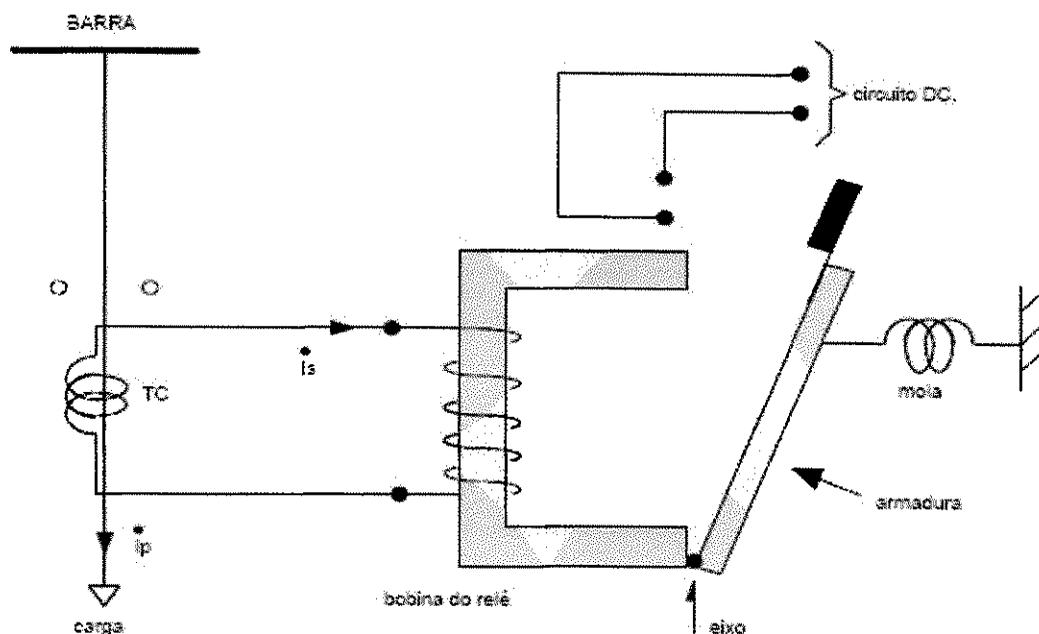


Figura 6. Relé de atração eletromagnética (KINDERMANN, 2005).

Os relés de indução eletromagnética utilizam um motor de indução, cujo torque produz o fechamento dos contatos do relé. Existem vários dispositivos que utilizam este princípio, como o relé de disco de indução por bobina de sombra, o relé tipo cilindro de indução e o relé tipo duplo laço de indução, mas suas características funcionais específicas não serão detalhadas neste trabalho.

4.2. RELÉ ESTÁTICO

Os relés estáticos têm esse nome em oposição aos relés eletromecânicos (uma vez que o relé estático é caracterizado essencialmente pela ausência de movimentos mecânicos), e desempenham a mesma função do seu antecessor. Esses relés são constituídos por dispositivos eletrônicos, principalmente tiristores, utilizando um acoplamento ótico para se obter o isolamento elétrico entre os circuitos, feito com um LED e um foto-transistor. Na Figura 7, pode-se ver um exemplo de relé estático, montado numa placa de circuito impresso.

Como nesses relés não há nenhum dispositivo móvel, todos os comandos e operações são feitos eletronicamente, o que implica em maior velocidade de operação, menor necessidade de manutenções e carga consideravelmente reduzida para os transformadores de instrumentos (TCs e TPs. Consultar Apêndice A).

Relés estáticos são mais sensíveis em relação a transitórios e pequenos harmônicos do sistema de potência que os relés eletromagnéticos, o que pode causar operação indevida. Felizmente, este problema é facilmente contornado com a adequada colocação de filtros.

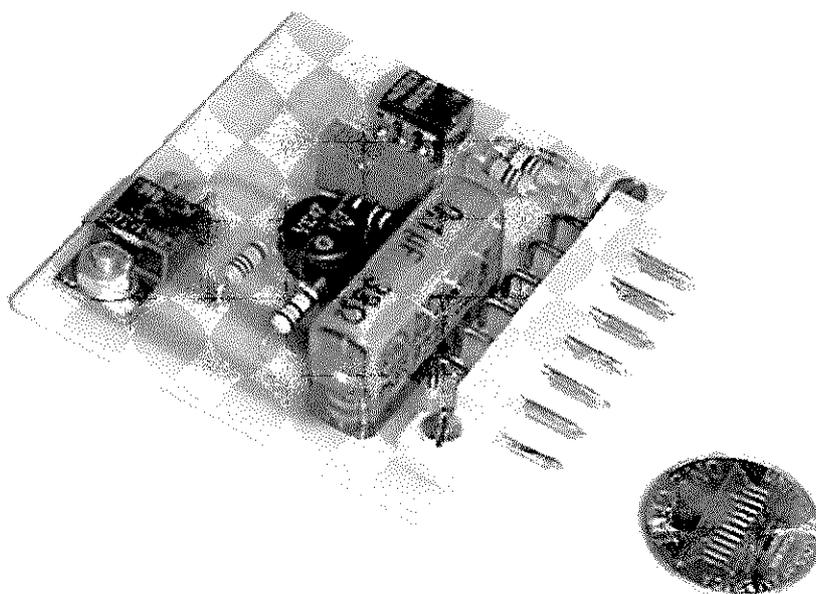


Figura 7. Relé estático em placa de circuito impresso (AgieCharmilles, 2008)

4.3. RELÉ DIGITAL

Os relés digitais são a mais nova geração dos relés estáticos, gerenciados por microprocessadores. A proteção digital de sistemas elétricos de potência surgiu entre as décadas de 60 e 70, quando se desenvolveram os primeiros algoritmos de relés de distância para proteção de linhas de transmissão (ALMEIDA, 2000). Estes dispositivos consistem em microcomputadores dedicados especificamente à proteção, medição e controle, controlados por um *software* onde dados e calibrações são fornecidos pelo usuário.

A principal vantagem dos relés numéricos é que, como todos os comandos são definidos por *software*, não há necessidade de variação física nos elementos do circuito para modificar os parâmetros da proteção. Estes relés são extremamente rápidos, apesar de muito susceptíveis a interferências eletromagnéticas conduzidas, necessitando, portanto, de filtros (KINDERMANN, 1999). Na Figura 8 é mostrada a configuração de *hardware* genérica de um relé digital.

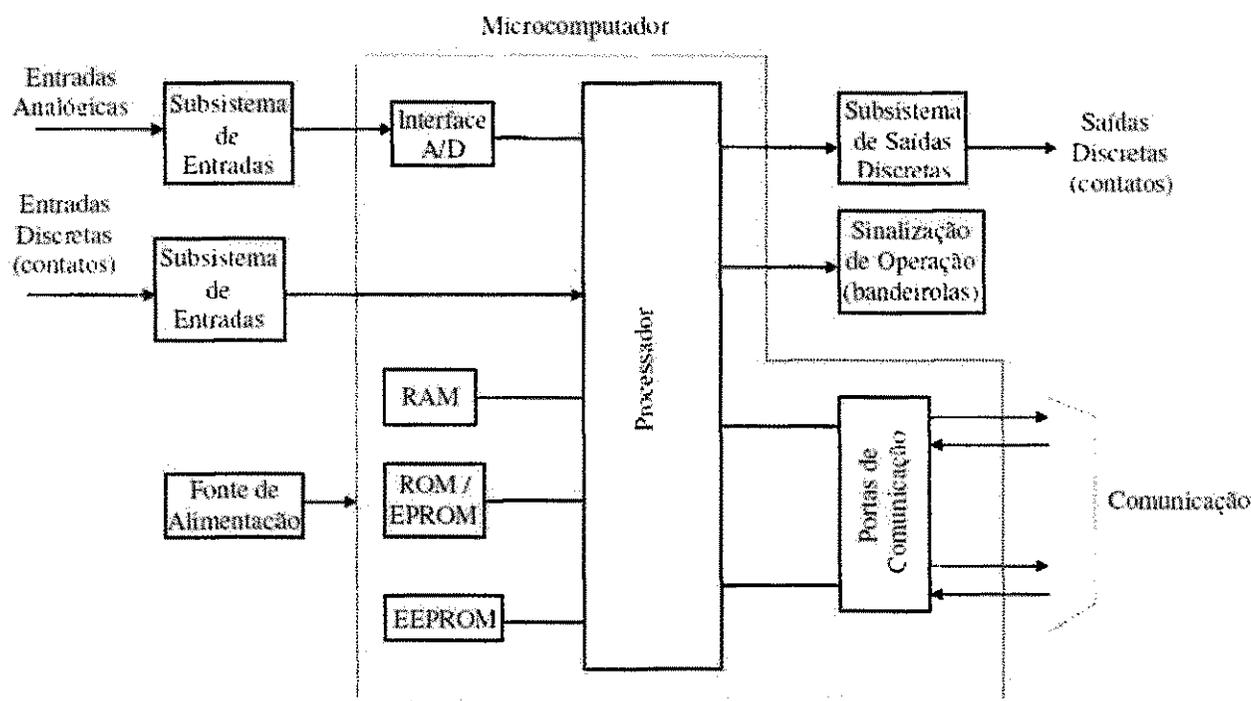


Figura 8. Estrutura física de um relé digital (ALMEIDA, 2000. Editada pelo autor).

Além de serem mais flexíveis e poderosos que os relés eletromecânicos e eletrônicos convencionais, os relés digitais também desempenham várias funções auxiliares, como autochecagem, supervisão de rede, conexão com computadores centrais (*mainframes*), transmissão de sinais, armazenamento de dados para relatórios, religamento de disjuntores, etc.

A técnica de proteção digital está atualmente consolidada, mas continua sendo uma área de investigação ativa, tendo em vista o desenvolvimento e aperfeiçoamento de microprocessadores (ALMEIDA, 2000).

Capítulo 5

Relé Diferencial e de Sobrecorrente

5.1. RELÉ DIFERENCIAL

Um relé diferencial é aquele que opera quando a diferença fasorial entre duas ou mais grandezas elétricas semelhantes excede uma quantidade predeterminada. Esta forma de proteção é economicamente viável para transformadores de potência igual ou superior a 5 MVA (GUERRA, 1992). Os relés diferenciais se dividem em:

- Relé diferencial amperimétrico;
- Relé diferencial percentual.

5.1.1. Relé Diferencial Amperimétrico

O relé diferencial amperimétrico opera mediante a comparação entre os fasores corrente de entrada e corrente de saída do elemento ou zona protegida. O circuito consiste basicamente de um relé de sobrecorrente instantâneo conectado diferencialmente, conforme o diagrama apresentado na Figura 9. A zona de proteção do circuito é limitada pelos transformadores de corrente (TCs).

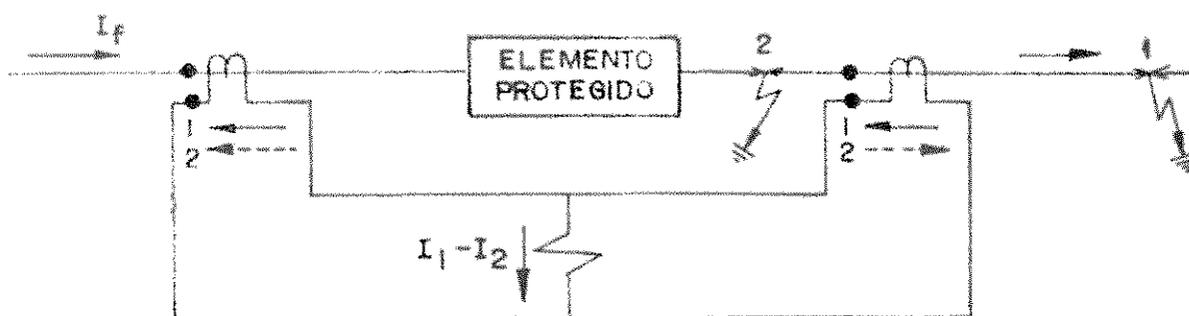


Figura 9. Relé diferencial amperimétrico (CAMINHA, 1977).

Caso ocorra um defeito no ponto (1), externo à zona protegida pelo equipamento, as correntes no secundário dos TCs terão o sentido dos vetores (1), preenchidos, e a corrente que circulará na bobina será $I_1 - I_2$, considerada nula, desprezando-se os erros de medição dos TCs.

No entanto, caso o defeito ocorra no ponto (2), dentro da zona protegida, o sentido da corrente no TC da esquerda muda, e as correntes nos enrolamentos secundários assumem os sentidos dos vetores (2), pontilhados, sensibilizando assim o relé com uma corrente igual a $I_1 + I_2$.

É importante ressaltar que o esquema da Figura 9 apresenta erros, principalmente na ocorrência de curtos-circuitos elevados fora da zona protegida, próximo a um dos TCs. Isso se deve a fatores como: o casamento imperfeito dos TCs, além dos erros de medição intrínsecos do equipamento; à saturação dos TCs, devido à componente contínua da corrente de curto-circuito (Apêndice A); à corrente de magnetização inicial do transformador, além do dispositivo trocador de tapes do mesmo; e ao carregamento (*burden*) nos secundários dos TCs, que também causa saturação do núcleo (KINDERMANN, 2007).

5.1.2. Relé Diferencial Percentual

O relé diferencial percentual consiste numa versão melhorada do relé amperimétrico. Sua forma constitutiva clássica, tipo atração eletromagnética com armadura em balanço, é apresentada na Figura 10:

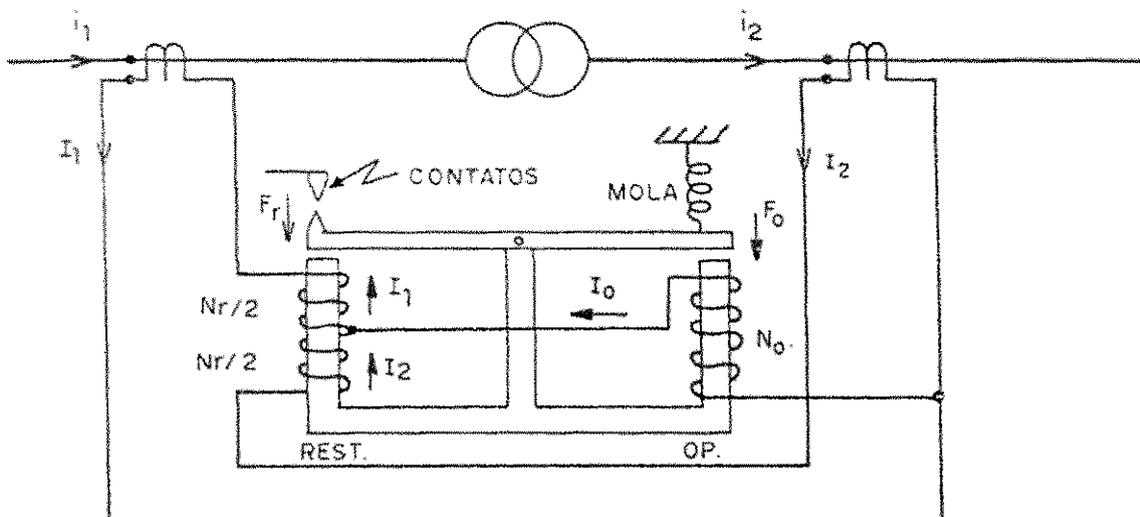


Figura 10. Relé diferencial percentual tipo armadura em balanço (GUERRA, 1992).

Este esquema baseia-se na interação de duas bobinas: a bobina de operação (à direita) e a bobina de restrição, à esquerda, que são assim chamadas porque enquanto a primeira produz um torque positivo, no sentido de fechar os contatos, a segunda produz um torque antagonista, visando a impedir a operação.

Quando da operação normal do sistema, ou em caso de defeito externo à zona protegida, o torque da bobina de operação, função de $I_0 = I_1 - I_2$, é nulo, uma vez que I_1 e I_2 são aproximadamente iguais. Em contrapartida, na bobina de restrição as correntes I_1 e I_2 geram um campo magnético concordante, que produz um forte torque negativo, restringindo a operação.

Se ocorrer um defeito entre os dois TCs, no entanto, I_1 e I_2 passam a fluir em direção ao defeito, e a inversão de sentido de I_2 anulará o torque negativo da bobina de restrição e produzirá um elevado torque positivo na bobina de operação, garantindo a atuação do relé.

Observa-se, portanto, que a grande vantagem do relé percentual é que este fortifica a restrição e enfraquece a operação em caso de defeitos externos, garantindo a não atuação do dispositivo. Adicionalmente, garante-se a atuação em caso de defeitos internos, através do enfraquecimento da restrição e fortalecimento da operação. Assim sendo, este relé apresenta-se muito mais seletivo e confiável que o relé diferencial amperimétrico.

A curva de operação do relé diferencial percentual, regida pela Equação 1, é apresentada na Figura 11, onde pode-se observar uma reta de inclinação $\alpha = \text{tg}^{-1} \sqrt{\frac{K_1}{K_2}}$, além de uma pequena distorção próximo da origem, provocada pela mola. Pode-se perceber, tanto pelo circuito da Figura 10 quanto pela curva da Figura 11, que o efeito da mola, inicialmente desprezado, é em favor da não-atuação.

$$I_1 - I_2 = \sqrt{\frac{K_1}{K_2}} \left(\frac{I_1 + I_2}{2} \right). \quad (1)$$

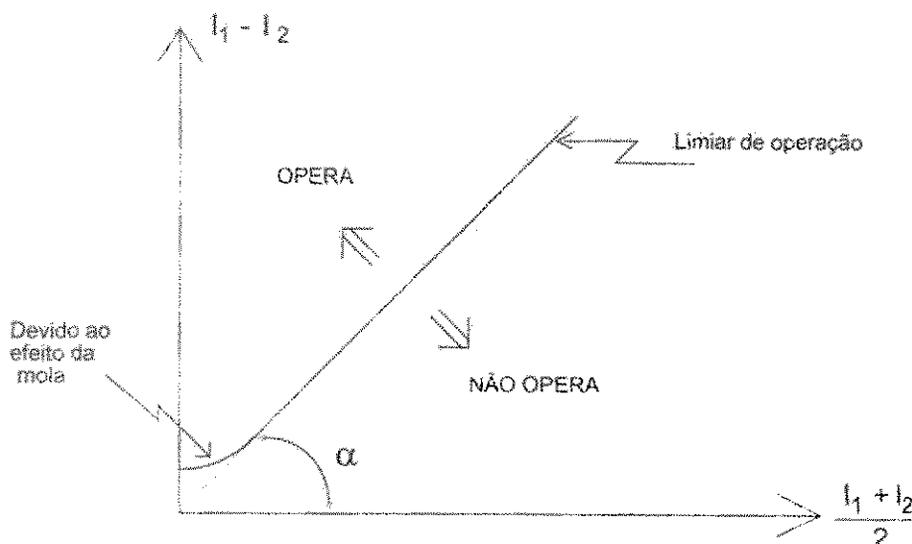


Figura 11. Curva de operação do relé diferencial percentual (KINDERMANN, 2006).

A inclinação α é chamada de declividade (*slope*) da reta do limiar de operação do relé, e varia de 10 a 45% nos transformadores de potência.

5.1.3. Esquemas Diferenciais

Para proteger transformadores delta-estrela, os TCs do lado delta são posicionados em estrela, e vice-versa, como se pode ver na Figura 12. Tal procedimento faz-se necessário para compensar a diferença fasorial entre as correntes de linha em cada um dos lados do transformador ($I_{estrela} = \sqrt{3}I_{delta}$).

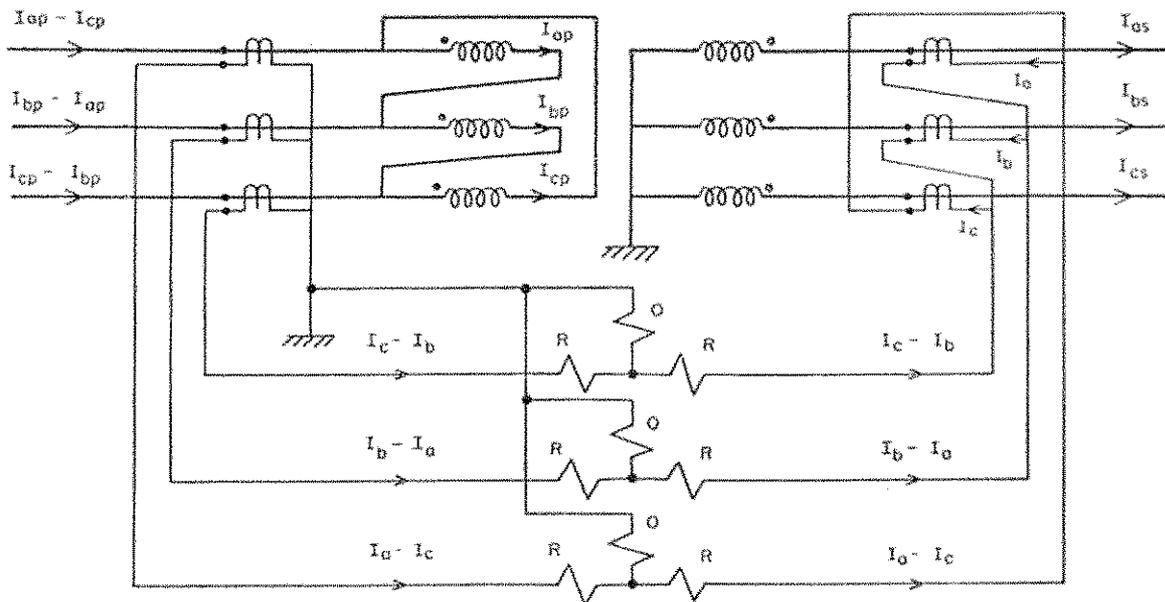


Figura 12. Proteção de um transformador delta-estrela (GUERRA, 1992).

Uma regra geral estabelece ainda que o relé diferencial deve estar localizado entre duas conexões delta (nesse caso, o delta do primário do transformador e o delta dos TCs do secundário). Isso ocorre porque uma ligação em estrela em um dos lados ocasionaria, neste lado, circulação de correntes de seqüência zero que não fluiriam no lado oposto. De tal modo, o relé diferencial compararia correntes diferentes, provocando atuação indevida.

As relações de transformação dos TCs são padronizadas em valores exatos e espaçados, tornando difícil a obtenção de correntes iguais nos terminais secundários. No circuito da Figura 12 pressupõe-se, portanto, que os relés possuem TCs internos, destinados à compensação dessas discrepâncias.

Quando os relés não possuem TCs próprios utilizam-se TCs auxiliares para a compensação das correntes secundárias, como pode ser visto na Figura 13. É mostrado também, no transformador de potência, um enrolamento terciário ligado em delta, utilizado na proteção de transformadores com ambos os terminais ligados em estrela aterrada. Este terciário "morto" destina-se à circulação das correntes de terceiro harmônico (seqüência zero), a fim de eliminá-las da linha.

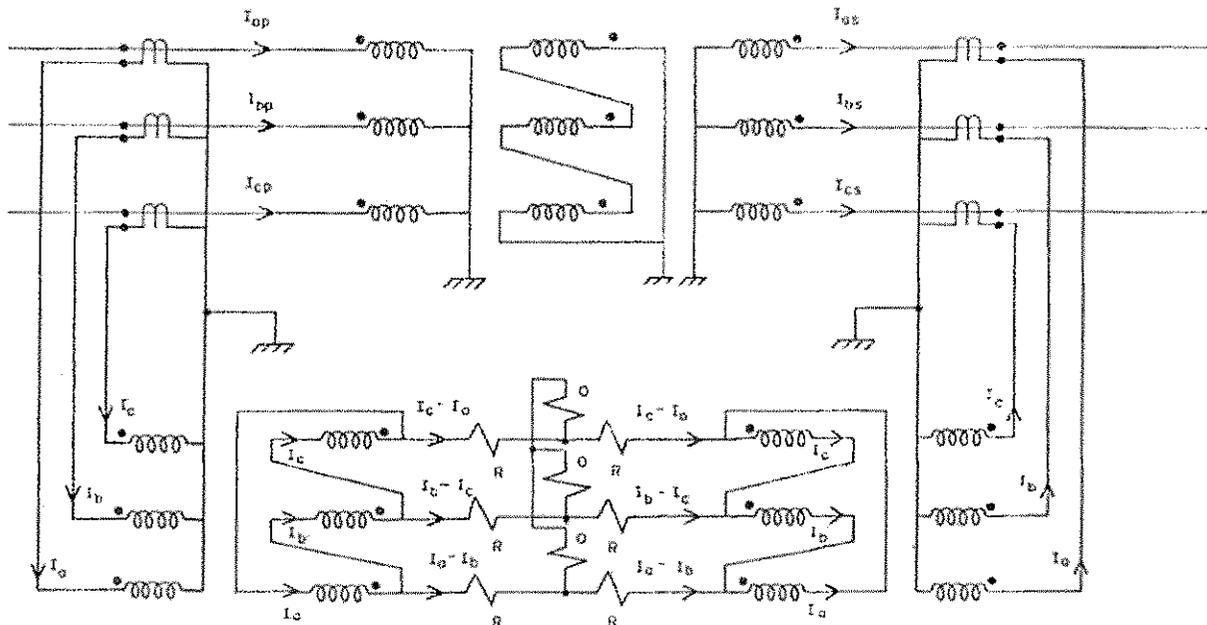


Figura 13. Proteção de um transformador Y-Y-Δ com terciário "morto" (GUERRA, 1992).

5.2. RELÉ DE SOBRECORRENTE

Como o próprio nome sugere, o relé de sobrecorrente é um dispositivo que atua quando detectada uma corrente maior que a do seu ajuste, seja instantaneamente ou de forma temporizada, de acordo com a intensidade da anomalia ocorrida no sistema. Os relés de sobrecorrente possuem as seguintes aplicações na proteção de transformadores: proteção primária, proteção de retaguarda e proteção de carcaça.

Estes dispositivos são utilizados como forma de **proteção primária** em transformadores de baixa potência (abaixo de 5 MVA), onde a proteção diferencial não é econômica. Os relés de sobrecorrente são mais lentos, além de menos sensíveis, menos eficientes e menos seletivos que os relés diferenciais.

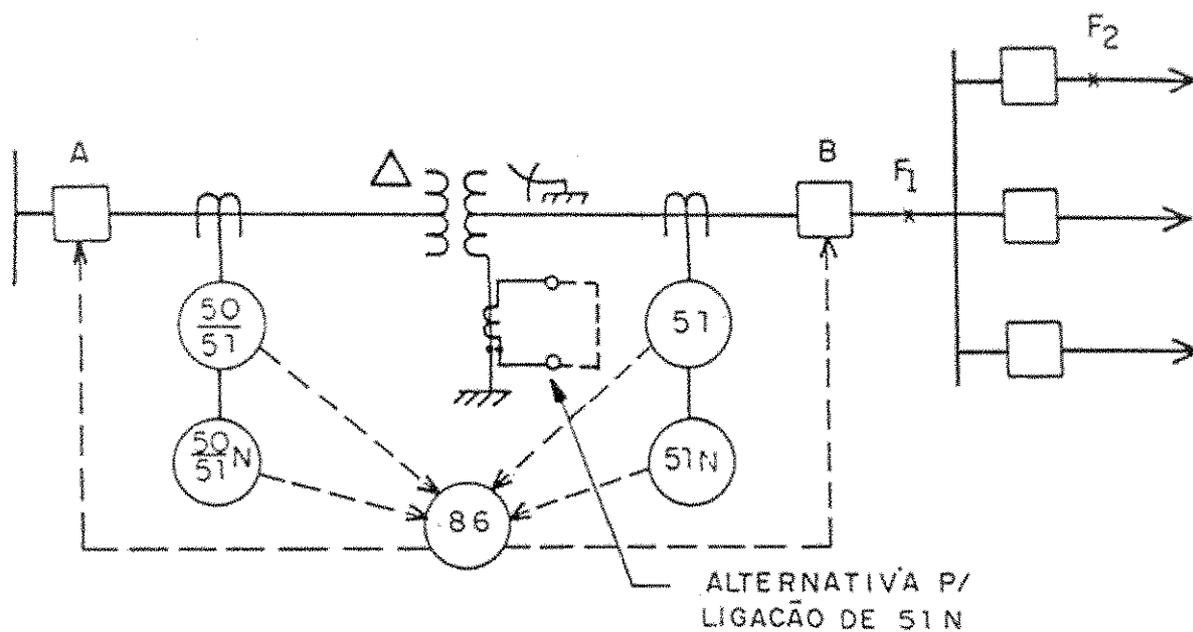


Figura 14. Proteção de transformadores por relés de sobrecorrente (GUERRA, 1992).

A respeito do esquema diferencial apresentado anteriormente, na Figura 14, são feitas as seguintes observações:

- Os relés $50^2/51^3$ e $50N^4/51N^5$ do lado primário atuam como proteção principal para defeitos internos ao transformador, assim como para defeitos externos entre o transformador e os TCs do primário.
- Os relés do secundário (51 e 51N) atuam como proteção principal para defeitos localizados entre os respectivos TCs e o barramento de baixa tensão (inclusive).
- Nos relés do secundário não são utilizadas unidades instantâneas, uma vez que, como as correntes de falta em F_1 e F_2 são iguais, haveria uma abertura do disjuntor B para uma falta em F_2 , desenergizando desnecessariamente todas as cargas ligadas ao barramento.
- O relé 51N poderia ser ligado no TC alimentado pela conexão de neutro do transformador, proporcionando proteção contra defeitos fase-terra no enrolamento secundário.

² **Relé 50:** Relé de sobrecorrente instantâneo (*instantaneous overcurrent* ou *rate-of-rise relay*). Este relé opera instantaneamente se a corrente de curto-circuito decorrente de um defeito em uma das fases do sistema ultrapassar um valor pré-ajustado.

³ **Relé 51:** Relé de sobrecorrente temporizado em CA (*a-c time overcurrent relay*). Esta unidade atua com um retardo intencional de tempo, quando a corrente elétrica alternada em uma das fases do circuito exceder um valor pré-ajustado.

⁴ **Relé 50N:** Relé de sobrecorrente instantâneo de neutro. Funciona de forma análoga ao relé 50, atuando para faltas que envolvem o condutor neutro.

⁵ **Relé 51N:** Relé de sobrecorrente temporizado de neutro. Funciona de forma análoga ao relé 51, atuando em faltas que envolvem o condutor de neutro. Na IEC (IEC 60617) este relé é representado pelo símbolo .

- O relé 86 é denominado relé de bloqueio de religamento (*locking-out relay*). Este dispositivo é acionado após a atuação de uma proteção impeditiva⁶, promovendo a abertura dos disjuntores e efetuando o alarme e a sinalização. Seu rearme pode ser manual ou elétrico, mas somente pela intervenção humana, devido à intensidade da falta.
- Os relés primários devem ser ajustados de modo que não atuem durante a energização do transformador, sensibilizados pelas correntes transitórias de magnetização (*inrush*).

Um esquema idêntico ao da Figura 14 pode ser usado como **proteção de retaguarda** em transformadores de grande porte, operando em caso de defeito da proteção diferencial (proteção primária), ou no caso dessa última estar em manutenção. Nesse caso, faz-se necessário que os ajustes de tempo de atuação dos relés de sobrecorrente sejam suficientemente altos, para que os mesmos sejam seletivos (só atuem depois dos demais relés do sistema).

A **proteção de carcaça** atua para defeitos que envolvam o tanque do transformador, e é feita isolando-se o tanque da terra, exceto por um único condutor, que o liga diretamente à malha de terra através de um TC que alimenta um relé de sobrecorrente temporizado. Essa forma de proteção é usada em transformadores acima de 5 MVA.

⁶ Tipo de proteção que opera no sentido de desligar o equipamento defeituoso.

Capítulo 6

Bloqueio da Proteção Diferencial

Conforme descrito no item 2.1, as correntes de *inrush* podem alcançar valores muito elevados durante a energização do transformador, tornando necessária a adoção de medidas no sentido de evitar a atuação indevida dos relés de alta velocidade (relés de sobrecorrente instantâneos e relés diferenciais). A atuação indevida dos relés diferenciais se dá porque estas altas correntes apenas são detectadas pelos TCs do enrolamento primário.

Sabe-se que uma corrente de magnetização típica apresenta a seguinte composição de harmônicas⁷:

Tabela 2. Composição de uma corrente de *inrush* típica (CHAGAS, 2007).

| Componente | DC | 2 ^a | 3 ^a | 4 ^a | 5 ^a | 6 ^a | 7 ^a |
|----------------------------|-----|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Porcentagem da Fundamental | 55% | 63% | 27% | 5% | 4% | 4% | 2% |

Observa-se, portanto, que é a harmônica de segunda ordem que sensibiliza os relés com maior intensidade. As correntes de curto-circuito, ao contrário, apresentam pequenas porcentagens de harmônicas, sendo formadas basicamente por uma componente contínua somada a uma componente fundamental (Apêndice A). Dessa forma, pode-se notar que a análise dos harmônicos da sobrecorrente detectada é um excelente meio de distinguir os fenômenos de curto-circuito dos transitórios de magnetização.

Uma vez percebida a ocorrência de *inrush*, os relés podem ser dessensibilizados em relação às correntes transitórias de magnetização por vários métodos, dentre eles: restrição por harmônicas, bloqueio por harmônicas e dessensibilização por relé de tensão. Estes três métodos serão brevemente abordados nas seções a seguir.

⁷ Esta análise foi feita tomando-se como base o primeiro ciclo da forma de onda da corrente de *inrush*.

6.1. RESTRIÇÃO POR HARMÔNICAS

Neste método são utilizados filtros constituídos por circuitos LC ressonantes que impedem a passagem das harmônicas pela bobina de operação, desviando-as para a bobina de restrição. Assim, em caso de energização, como as harmônicas representam uma porcentagem significativa da corrente, a restrição será intensa e o relé não atuará.

Durante curtos-circuitos internos, as harmônicas serão detectadas em pequenas quantidades, e a ação de restrição será desprezível. Todavia, para correntes de defeito interno elevadas, a componente DC pode causar intensa saturação dos TCs, produzindo harmônicos que restringiriam falsamente a operação do relé. Para assegurar a atuação, portanto, o relé deve ser dotado de uma unidade de sobrecorrente instantânea, ajustada em um valor superior ao máximo pico da corrente de *inrush*.

6.2. BLOQUEIO POR HARMÔNICAS

Este método consiste na utilização de uma unidade auxiliar de bloqueio, sensibilizada pelas harmônicas de segunda ordem. A Unidade de Restrição de Harmônicos (URH) tem um contato normalmente aberto, disposto em série com os contatos da Unidade Diferencial (UD). Caso as harmônicas de 2ª ordem representem 15% ou menos da componente fundamental, indicando um possível defeito interno, a unidade de restrição fecha seus contatos, energizando a UD.

Em operação normal as harmônicas de segunda ordem também representam menos de 15% da fundamental, fechando os contatos da URH. Portanto, cabe à unidade diferencial distinguir curto-circuito de operação normal, energizando ou não o circuito de disparo do disjuntor. Quando da ocorrência de *inrush*, entretanto, as harmônicas superarão o limite estabelecido, fazendo com que a URH mantenha seus contatos abertos. Isto impede que a UD seja sensibilizada pela sobrecorrente, garantindo a não-atuação da proteção.

6.3. DESSENSIBILIZAÇÃO POR RELÉS DE TENSÃO

O terceiro método para evitar operação indevida da proteção diferencial consiste em dessensibilizar o relé durante os primeiros instantes da energização do transformador. Esse momento é percebido através do monitoramento da tensão nos terminais do equipamento.

O circuito é apresentado na Figura 15, e funciona a partir de um relé de tensão temporizado (RTT), cujos contatos são normalmente fechados, e um relé de tensão instantâneo (RTI), que fecha seus contatos durante a energização, desviando parte da corrente para o resistor R , dessensibilizando assim o relé diferencial. Cessado o transitório, RTT abre seus contatos, e o relé diferencial recupera sua sensibilidade máxima.

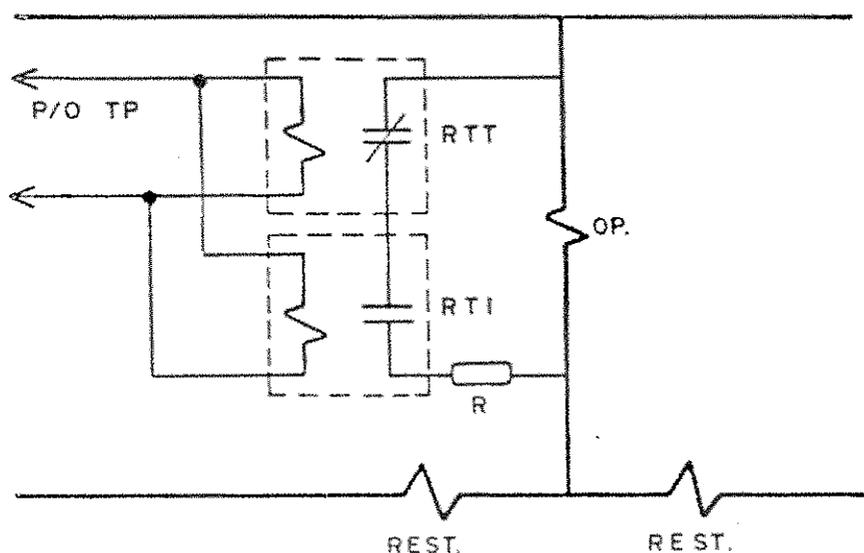


Figura 15. Relé diferencial com dessensibilização por relé de tensão.

Caso o transformador fosse energizado no instante em que ocorresse um defeito, a queda de tensão no sistema devido ao curto-circuito impediria que RTI fechasse seus contatos. Dessa forma, toda a corrente fluiria pela bobina do relé diferencial, sensibilizando-o e garantindo a operação apropriada da proteção diferencial.

Capítulo 7

Relé Digital

Uma descrição genérica da proteção digital já foi feita no item 3.3. Neste capítulo serão apresentadas as aplicações dos relés numéricos na proteção diferencial, um algoritmo de detecção de defeitos, e a arquitetura detalhada de funcionamento dos mesmos.

Algumas vantagens gerais dos relés digitais já foram apresentadas:

- Os relés modernos são multifuncionais, e além das aplicações de proteção são capazes de executar funções como armazenamento de dados de perturbações e supervisão de rede;
- Devido ao automonitoramento, podem ser aplicadas manutenções agendadas, ao invés de custosas rotinas de manutenção preventiva;
- Os equipamentos podem ser operados localmente ou a partir de um computador remoto;
- Todas as medições importantes são integradas, evitando-se a necessidade de instrumentos de medição externos.

Segundo ZIEGLER (2005), existem ainda vantagens específicas obtidas na sua utilização desses dispositivos em aplicações de proteção diferencial:

- As técnicas de medição digital melhoraram consideravelmente os filtros para detecção de *inrush*, e algoritmos de medição fornecem medições precisas mesmo durante a saturação dos TCs;
- Dispositivos convencionais necessitam elementos adicionais para compensar as discrepâncias entre as relações de transformação dos TCs. Relés numéricos implementam essa compensação internamente;
- Os *links* de comunicação também são cobertos pelo automonitoramento contínuo;
- A construção descentralizada da proteção se torna viável, através da conexão por cabos de fibra ótica e configurações baseadas em computadores, reduzindo significativamente a complexidade.

A Figura 8 apresenta a configuração de *hardware* de um relé digital para proteção de transformadores. Nesse sistema o relé recebe os sinais de tensão e corrente dos transformadores de instrumentos, além de sinais discretos que indicam o estado de disjuntores, chaves e outros relés. Estes sinais são processados nos respectivos subsistemas e alimentam o microcomputador, onde serão convertidos antes de entrar na unidade central de processamento (CPU). Os sinais de saída podem ser enviados diretamente aos disjuntores, efetivamente responsáveis pela abertura, ou ainda a outros equipamentos digitais.

O **subsistema de entradas analógicas** é responsável por condicionar os valores de tensão e corrente a valores adequados à conversão analógica-digital. Ainda protegem o relé contra transitórios, além de isolar eletricamente os circuitos eletrônicos do equipamento dos circuitos de entrada. O **subsistema de entradas digitais**, por sua vez, condiciona os sinais para sua aplicação no processador, provendo também isolamento elétrico entre as entradas e os circuitos eletrônicos e protegendo o relé contra sobretensões.

A **interface analógica-digital** é responsável pelo processo de amostragem do sinal analógico, onde o mesmo é discretizado. No **processador** do relé digital são executadas as rotinas de proteção, controle, além de todas as funções auxiliares do relé, como autodiagnóstico e comunicação com periféricos, e para isso são necessárias as seguintes memórias:

- RAM (*Random Access Memory*): funciona como um *buffer*, armazenando temporariamente os valores das entradas amostradas, assim como os resultados intermediários dos programas executados no processador;
- ROM (*Read Only Memory*): guarda os programas do relé, que podem ser carregados na RAM ou executados diretamente na ROM;
- EPROM (*Erasable Programmable Read Only Memory*) e EEPROM (*Electrically Erasable Programmable Read Only Memory*): contêm os parâmetros de ajuste do relé e outros dados importantes do mesmo que não variem com frequência.

As **portas de comunicação** permitem o intercâmbio de informações remotas, como ajustes à distância dos parâmetros do relé, e promovem o intercâmbio de informação em tempo real. O relé deve contar ainda com uma **fonte de alimentação** independente, geralmente do tipo comutável, para poder se conectar ao sistema de baterias da subestação.

O **subsistema de saídas discretas** processa a informação (palavra digital) de uma porta de saída do processador. Cada *bit* da palavra pode ser utilizado para definir o estado de um contato de saída. Deve haver acoplamento ótico entre esta porta e o relé auxiliar ou tiristor de saída do relé.

Por fim, o relé realiza ainda a função de **sinalização de operação** (*flags* ou bandeirolas) e de seu estado funcional, mediante dispositivos de sinalização (geralmente tipo luminoso) visíveis no exterior.

A Figura 16 representa um diagrama de fluxo simplificado da lógica de um relé diferencial para proteção de transformadores. Este é o fluxograma de um relé que utiliza os **critérios de restrição clássicos**: a detecção de *inrush* é feita a partir da análise da segunda harmônica; a quinta harmônica é utilizada para restringir a operação durante sobreexcitações; e a restrição da operação durante faltas externas é obtida a partir da característica percentual do relé diferencial (descrita no item 4.1.2).

Segundo KASZTENNY & KEZUNOVIC (1998), mesmo com a implementação digital, relés numéricos basicamente emulam seus predecessores analógicos, extraindo características específicas dos sinais e comparando-as com limiares predefinidos. O sinal de disparo é gerado baseado nessas comparações. No entanto, a tarefa de proteção dos relés é muito mais ampla: consiste em distinguir entre faltas internas e outras condições (reconhecimento de padrões) e assim gerar ou não o sinal de disparo (tomada de decisões).

As aplicações envolvendo **inteligência artificial** surgem, assim, como uma alternativa ou melhoramento dos métodos que utilizam os critérios de restrição clássicos. Métodos como **Redes Neurais Artificiais (RNA)** e **Lógica Fuzzy**, capazes de realizar o reconhecimento de padrões e tomada de decisão, utilizam-se de toda a informação disponível sobre os sinais de tensão e corrente obtidos, ao invés de parâmetros limitados, como amplitude e duração dos transitórios, tornando os relés mais confiáveis e seletivos.

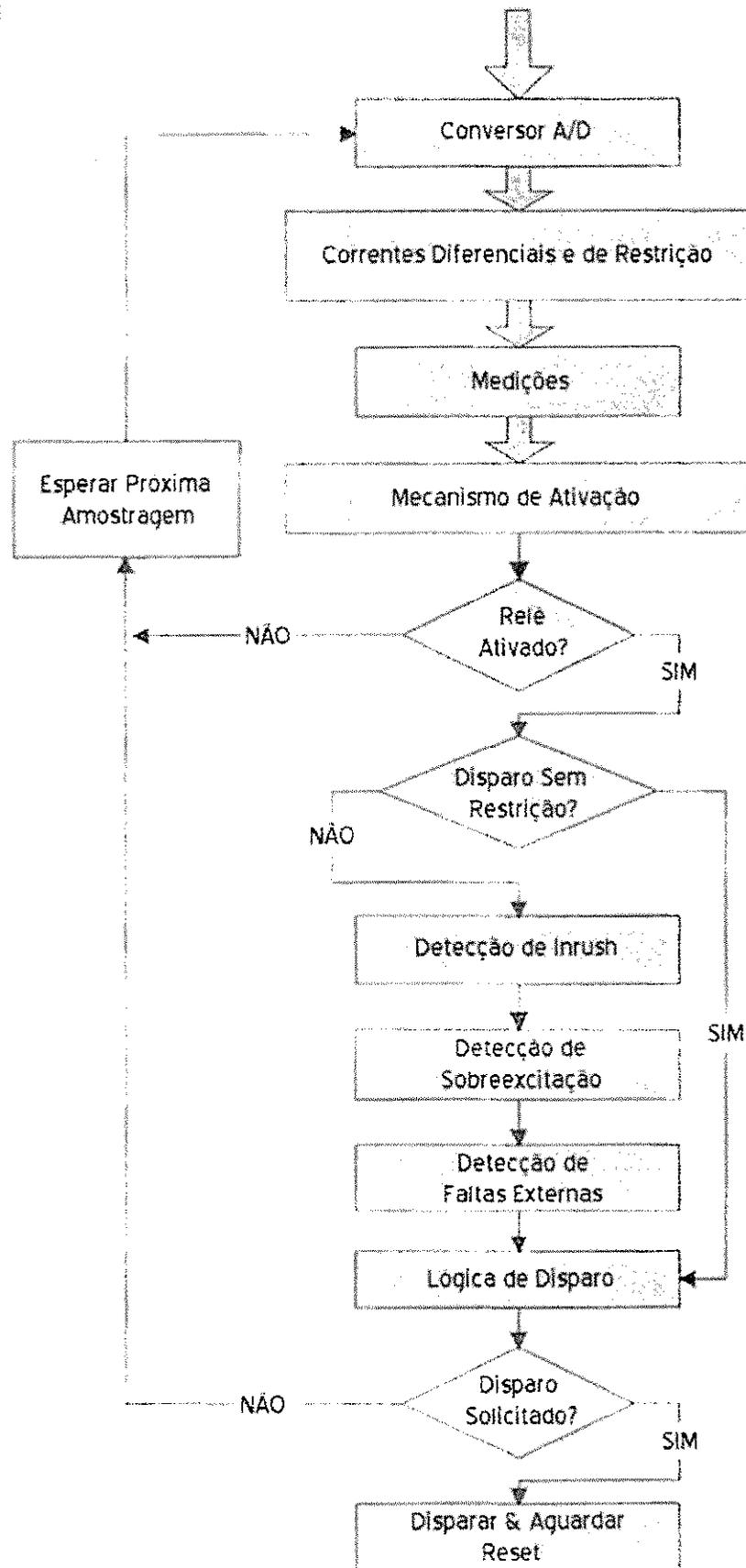


Figura 16. Lógica de funcionamento de um relé diferencial digital para transformadores (ALMEIDA, 2000. Editada pelo autor).

Capítulo 8

Conclusões

Neste trabalho a proteção de transformadores foi estudada sob vários aspectos. Foi feita uma análise das principais anormalidades que afetam os transformadores de potência, como sobrecorrentes, sobretensões, sobreexcitações, sobretemperaturas e sobrepressões. As formas de proteção disponíveis também foram apresentadas, dentre elas: relés diferenciais, relés de sobretensão, relés de imagem térmica e relés a gás.

As três gerações de relés foram listadas, assim como as inúmeras vantagens dos relés digitais, como capacidade de autochecagem e facilidades de comunicação. Por estas razões os relés eletromecânicos e estáticos, ainda em uso nas concessionárias de energia, têm sido substituídos pelos relés digitais.

Os relés diferenciais e de sobrecorrente foram comparados. Notou-se a clara superioridade do relé diferencial em quesitos como rapidez e seletividade. No entanto, os relés de sobrecorrente ainda são amplamente utilizados para proteção de transformadores de menor porte, devido ao custo inferior.

Os principais métodos de bloqueio da proteção diferencial foram apresentados. Esses métodos impedem a atuação indevida da proteção durante a energização dos transformadores. A restrição por harmônicas e o bloqueio por harmônicas baseiam-se na análise dos harmônicos de segunda ordem. A dessensibilização por relé de tensão, por sua vez, utiliza-se de relés de subtensão instantâneos e temporizados.

Observa-se ainda que o princípio dos relés atuais consiste basicamente na análise dos sinais de corrente, limitada à componente de frequência fundamental e múltiplas desta. Técnicas avançadas de processamento digital de sinais e inteligência artificial têm permitido a evolução dos princípios clássicos de proteção de transformadores. As novas abordagens utilizam toda a informação disponível, e permitem uma proteção mais rápida, seletiva e confiável.

Verifica-se atualmente uma tendência de integração entre os sistemas de monitoramento e proteção, permitindo, por exemplo, que:

- Os parâmetros dos relés sejam adaptados em função do envelhecimento dos transformadores, tornando a proteção mais inclinada à atuação em situações duvidosas, à medida que o equipamento protegido envelhece.
- Os circuitos de proteção sejam capazes de detectar transitórios devido à atuação de outros disjuntores do circuito, através monitoramento do estado dos demais relés e disjuntores.

Por fim, foi feito um estudo do comportamento dos transformadores de corrente em regime saturado, além da influência da saturação no funcionamento da proteção desses equipamentos.

Apêndice A

A.1. TRANSFORMADORES DE INSTRUMENTOS

Os relés de proteção são atuados por tensões e correntes supridas pelos transformadores de potencial (TPs) e de corrente (TCs). Estes equipamentos são chamados de transformadores de instrumentos, e proporcionam isolamento elétrico aos circuitos de proteção e medição. Além disso, os transformadores de instrumentos alimentam os relés com grandezas proporcionais às do circuito de potência, muito embora suficientemente reduzidas, permitindo que os transformadores sejam relativamente pequenos do ponto de vista do isolamento.

Os transformadores de corrente têm seu enrolamento ligado em série com o circuito de alta tensão. A impedância do mesmo, vista do enrolamento primário, é desprezível, mesmo quando se leva em consideração a carga associada. Dessa forma, a corrente que circula no primário dos TCs é ditada pelo circuito de potência, chamado de circuito primário. A corrente secundária nominal de um transformador de corrente é normalizada em 5 A.

A.2. REPRESENTAÇÃO DO SISTEMA PRIMÁRIO

Segundo RAO (1979), a corrente de curto-circuito em uma linha de transmissão representada pelo circuito monofásico da Figura 17 é dada pela Equação 2:

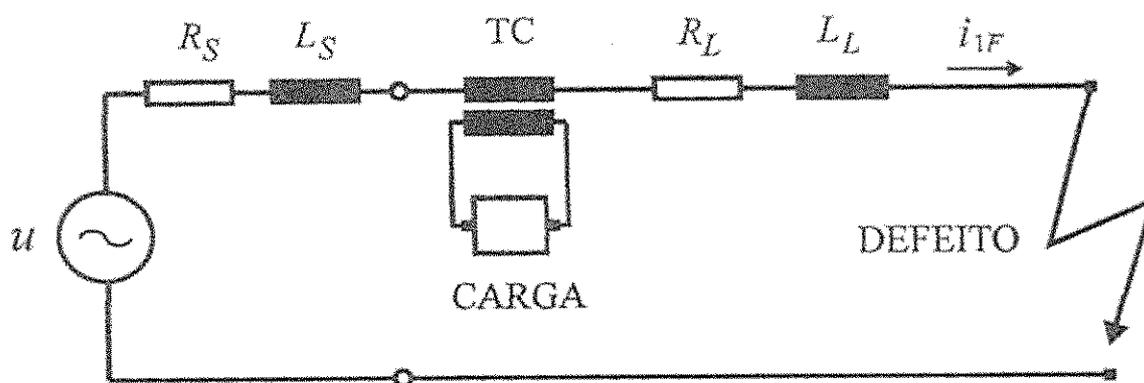


Figura 17. Representação simplificada do sistema primário (GUERRA, 2007).

$$i_{1F} = \frac{U_m}{Z_1} \text{sen}(\omega t + \theta - \Phi_1) + \left[I_0 - \frac{U_m}{Z_1} \text{sen}(\theta - \Phi_1) \right] e^{\frac{-t}{\tau}}. \quad (2)$$

Observa-se, portanto, que a corrente i_{1F} possui duas componentes: uma alternada, senoidal, e outra contínua, com decréscimo exponencial, como se pode ver na Figura 18. A situação mais pessimista, em que a corrente i_{1F} assume o máximo valor possível, se dá quando $\theta - \Phi_1 = -\pi/2$. Fazendo-se o valor instantâneo da corrente pré-falta nulo, ou seja, $I_0 = 0$, por simplificação, obtém-se a Equação 3.

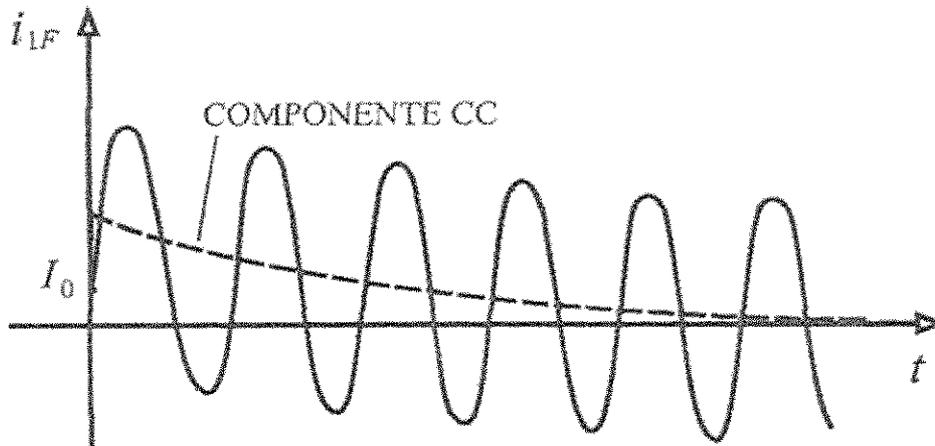


Figura 18. Corrente assimétrica de curto-circuito (GUERRA, 2007).

$$i_{1F} = \frac{U_m}{Z_1} \left(e^{\frac{-t}{\tau}} - \cos(\omega t) \right). \quad (3)$$

A.3. TCs EM REGIME TRANSITÓRIO

O modelo de um transformador de corrente, desprezando-se as capacitâncias dos enrolamentos, a impedância do primário e as perdas magnéticas no núcleo, é apresentado na Figura 19:

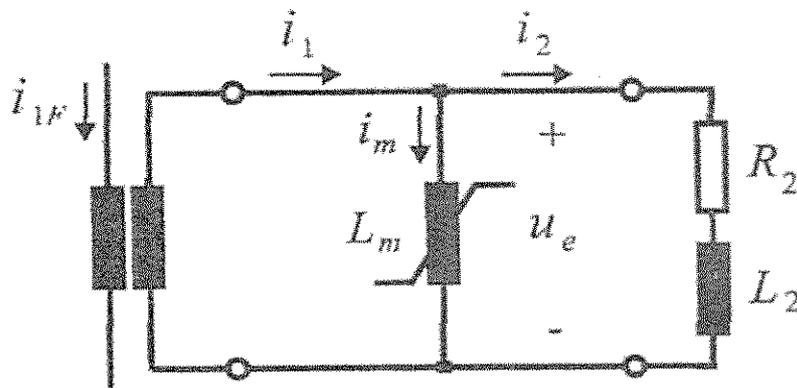


Figura 19. Circuito elétrico equivalente simplificado de um TC (GUERRA, 2007).

Segundo GUERRA (2007), a equação que descreve o fluxo de enlace λ no núcleo de um TC durante um curto-circuito no primário é dada pela Equação 4, cujo gráfico é apresentado em seguida, na Figura 20.

$$\lambda = \frac{\sqrt{2}I_{1F}R_2}{\omega k_N} \left[\frac{\omega T_1 T_2}{T_2 - T_1} \left(e^{-\frac{t}{T_2}} - e^{-\frac{t}{T_1}} \right) - \frac{1}{\cos(\phi_2)} \text{sen}(\omega t + \phi_2) \right]. \quad (4)$$

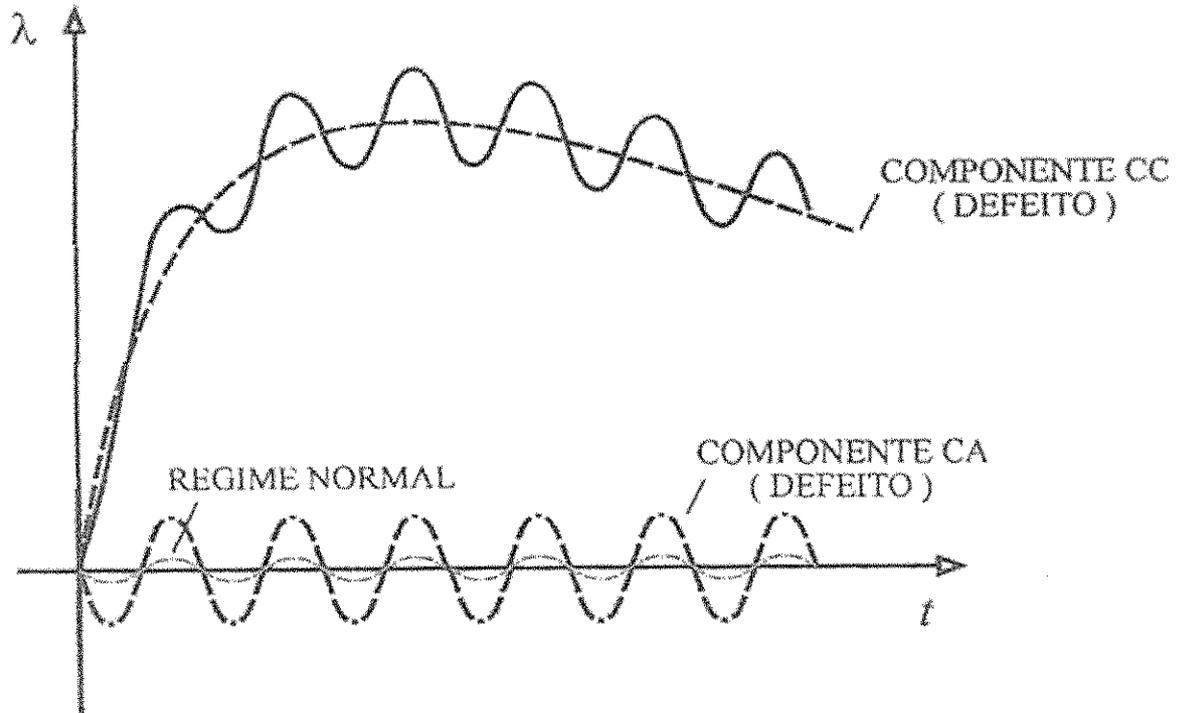


Figura 20. Fluxo de enlace no núcleo do TC em condição de curto-circuito no primário (GUERRA, 2007).

Na figura acima, pode-se observar que o fluxo de enlace (linha preenchida) é formado da soma de duas componentes (tracejadas): uma alternada, senoidal, e uma componente contínua, transitória, associadas, respectivamente, às componentes senoidal e exponencial da corrente i_{1F} .

O sobrefluxo causado pela componente alternada de i_{1F} é influenciado pelo valor eficaz dessa componente, além da impedância da carga ligada ao secundário. O sobrefluxo causado pela componente contínua depende, ainda, das constantes T_1 e T_2 .

Em regime saturado, considerando-se, por simplicidade, uma carga puramente resistiva ligada no secundário do transformador de corrente, observa-se que a saturação do núcleo faz com que o fluxo imposto pela fonte não cresça acima de um determinado valor λ_S , conforme indicado na Figura 21.

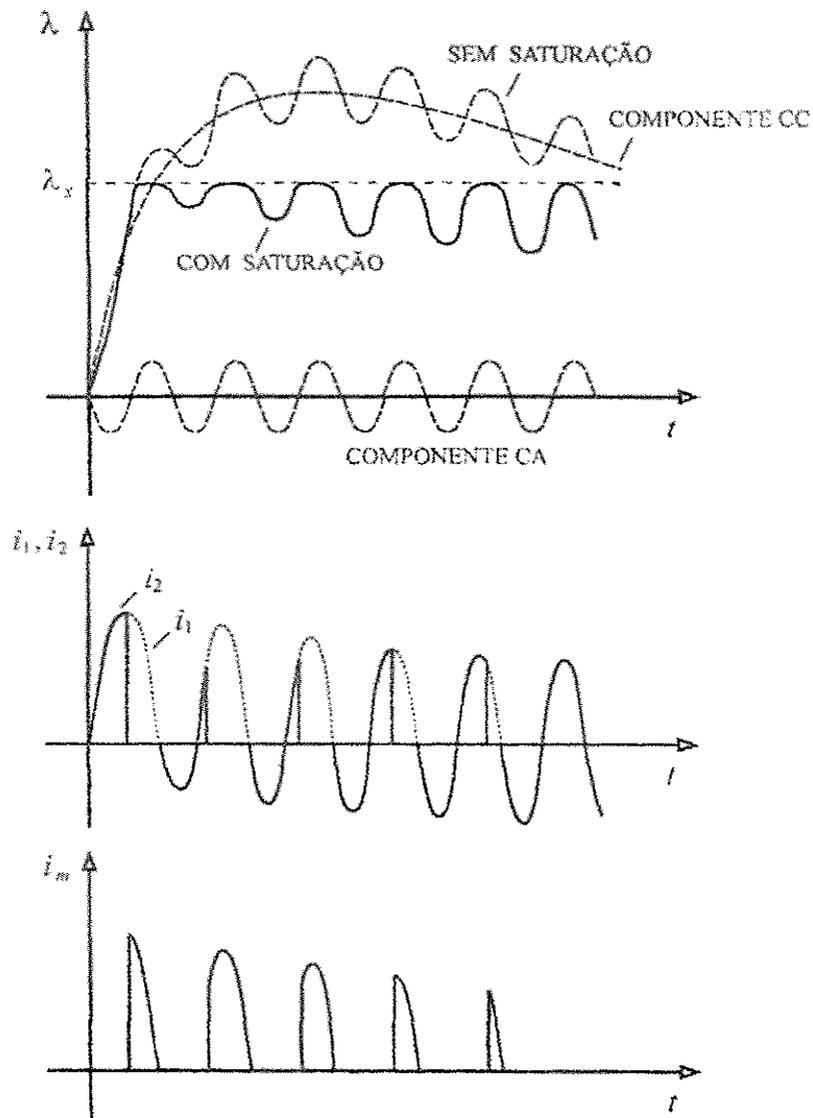


Figura 21. Fluxo de enlace e correntes primária (i_1), secundária (i_2) e de magnetização (i_m). GUERRA, 2007).

Na região não-saturada ($\lambda \leq \lambda_m$), a indutância de magnetização do TC (L_m , na Figura 18) é elevada, mantendo a corrente e magnetização i_m pequena. Contudo, quando o núcleo satura, o valor de L_m cai drasticamente, fazendo com que praticamente toda a corrente i_1 flua pelo ramo de magnetização ($i_1 \cong i_m$), o que provoca profundas distorções na forma de onda da corrente secundária (i_2).

Por norma, os TCs devem ser capazes de operar com correntes de curto-circuito de até 20 vezes a corrente nominal do enrolamento primário sem que haja saturação. No entanto, essa medida só é eficaz em relação à componente alternada da corrente de curto-circuito, não evitando a saturação provocada pela componente contínua.

Referências Bibliográficas

AGIECHARMILLES. GF **AgieCharmilles: Products.** Disponível em: <<http://www.charmillesus.com/service/parts/catalog/machines/E400/index.htm>>. Acesso em: 12 de novembro de 2008.

ALMEIDA, M. A. D. **Apostila de Proteção de Sistemas Elétricos.** Natal: Ed. do Autor, 2000.

BHARAT Heavy Electricals Limited. **Transformers.** Índia: Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited, 2003. 614p.

BLACKBURN, J. Lewis. **Protective Relaying: Principles and Applications.** Washington: Marcel Dekker, 1998. 538p.

BOLL, R.; WARLIMONT, H. **Applications of Amorphous Magnetic Materials in Electronics.** IEEE Transactions on Magnetics. Alemanha, v.17, n.6, p.3053-3058, 1981.

CAMINHA, Amadeu Casal. **Introdução à Proteção dos Sistemas Elétricos.** São Paulo: Edgard Blücher, 1977. 209p.

D'AJUZ, A.; RESENDE, F. M.; CARVALHO, F. M. S.; NUNES, I. G.; AMON FILHO, J.; DIAS, L. E. N.; PEREIRA, M. P.; KASTRUP FILHO, O.; MORAIS, S. A. **Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Alta Tensão.** Furnas: Ed. da Universidade Federal Fluminense, 1985. 285p.

GRENÈCHE, J. M. **Soft Magnetic Nanocrystalline Alloys.** Journal of Optoelectronics and Advanced Materials. França, v.5, n.1, p.133-138, 2003.

GUERRA, F. C. F. **Modelo de Transformador de Corrente para Estudos em Baixa Frequência.** 2007. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica), Centro de Engenharia Elétrica e Informática. Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

GUERRA, F. C. F. **Proteção de Sistemas Elétricos.** Campina Grande: Ed. da Universidade Federal de Campina Grande, 1992. 59p.

IEC 60801-4. **Electromagnetic Compatibility for Industrial-Process Measurement and Control Equipment.** International Electrotechnical Commission, 1988.

KASZTENNY, B.; KEZUNOVIC, M. **Digital Relays Improve Protection of Large Transformers**. IEEE Computer Applications in Power. Texas, v.11, n.4, p.39-45, 1998.

KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência: Volume 2**. Florianópolis: Ed. do Autor, 2006. 207p

KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência: Volume 1**. Florianópolis: Ed. do Autor, 2005. 283p

KINDERMANN, Geraldo. **Proteção de Sistemas Elétricos de Potência**. Florianópolis: Ed. do Autor, 1999. 231p.

LANDGRAF, F. J. G.; EMURA, M.; TEIXEIRA, J. C.; DE CAMPOS, M. F. **Separação dos Componentes de Perdas Magnéticas em Aços Totalmente Processados**. In: 53^o Congresso da ABM. Anais... Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM, Brasil, 1998. p.1542-1551.

MASON, C. Russell. **The Art and Science of Protective Relaying**. Nova Iorque: John Wiley & Sons, 1956. 410p.

MOSES, A. J. **Electrical Steels: Past, Present and Future Developments**. IEEE Proceedings. Reino Unido, v.137, n.5, p.233-245, 1990.

NBR 7097. **Relé de Medição com Mais de uma Grandeza de Alimentação de Entrada a Tempo Dependente Especificado**. ABNT, Dezembro/1981.

RAO, T. S. M. **Power System Protection: Static Relays**. New Deplphi: Tata McGraw-Hill, 1979.

WERNER, F. E. **Energy-Efficient Steels for Motor Laminations**. Journal of Materials Engineering and Performance. Pensilvânia, v.1, n.2, p.227-234, 1992.

WESTINGHOUSE Electric Corporation. **Applied Protective Relaying**. Nova Jersey: Westinghouse Electric Corporation, 1976.

ZIEGLER, Gerhard. **Numerical Differential Protection: Principles and Applications**. Alemanha: Siemens, 2005. 260p.