

CENTRO UNIVERSITÁRIO DO SUL DE MINAS UNIS
ENGENHARIA ELÉTRICA
LUIZ FELIPE SANTON

ELABORAÇÃO DE UM PROJETO DE SELETIVIDADE GRÁFICA NA PROTEÇÃO
DE TRANSFORMADORES E ALIMENTADORES COM RELÉS DE
SOBRECORRENTE

Varginha
2018

LUIZ FELIPE SANTON

**ELABORAÇÃO DE UM PROJETO DE SELETIVIDADE GRÁFICA NA PROTEÇÃO
DE TRANSFORMADORES E ALIMENTADORES COM RELÉS DE
SOBRECORRENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas – UNIS/MG como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel sob orientação do Prof. Esp. Silvio Bottrel Guimarães.

**Varginha
2018**

LUIZ FELIPE SANTON

**ELABORAÇÃO DE UM PROJETO DE SELETIVIDADE GRÁFICA NA PROTEÇÃO
DE TRANSFORMADORES E ALIMENTADORES COM RELÉS DE
SOBRECORRENTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Elétrica do Centro Universitário do Sul de Minas, como pré-requisito para obtenção do grau de bacharel pela Banca Examinadora composta pelos membros:

Aprovado em: 05/12/2018

Prof. Esp. Silvio Bottrel Guimarães

Prof.Me. Hugo Rodrigues Viana

Prof. Me. Eduardo Henrique Ferroni

OBS.:

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, ao meus pais, familiares e principalmente a minha namorada pelo apoio, aos meus colegas e professores e por todos que estiveram ao meu lado desde o começo.

"As pessoas de sucesso são aquelas que saem e procuram as condições que desejam; e, se não as encontram, criam-nas."

Didier Marlier

RESUMO

O presente trabalho tem como principal finalidade expor as informações e características de uma das principais falhas que ocorrem no sistema elétrico de potência. São os chamados curtos-circuitos, sendo abordado ademais, os relés de sobrecorrente digitais. Diante disso serão apresentados os principais cálculos necessários para parametrizar a proteção dos alimentadores e também dos transformadores, de acordo com sua classificação e eficiência. Além disso, busca-se mostrar também a curva de atuação do relé e seus parâmetros já modulados. Outrossim, através de todo o estudo de parametrização e do correto dimensionamento da proteção a ser utilizada, os sistemas podem operar de maneira segura, sem que exista a possibilidade do risco de danos maiores ao sistema durante uma falha. Deste modo, este projeto de proteção se torna de suma importância para qualquer sistema elétrico de potência a ser dimensionado.

Palavras-chave: Relé Digital de Sobrecorrente. Sistema de Proteção. Curto-circuito. Sistema Elétrico de Potência.

ABSTRACT

The present work has as main purpose to expose the information and characteristics of one of the main faults that occur in the electric power system. They are the so-called short circuits, being addressed in addition, the digital overcurrent relays. Therefore, the main calculations necessary to parameterize the protection of the feeders and transformers according to their classification and efficiency will be presented. In addition, we also try to show the curve of the relay and its already modulated parameters. Furthermore, throughout the study of parameterization and correct design of the protection to be used, the systems can operate safely, without the possibility of the risk of major damage to the system during a failure. In this way, this protection design becomes of paramount importance for any electric power system to be dimensioned.

Keywords: Digital Overcurrent Relay. Protection System. Short circuit. Electrical Power System

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 ESQUEMA BÁSICO DE FUNCIONAMENTO DE UM RELÉ	18
FIGURA 2 ZONAS DE PROTEÇÃO	20
FIGURA 3 ARRANJO DAS ZONAS DE PROTEÇÃO	21
FIGURA 4 DESCRIÇÃO FUNCIONAL DE UM RELÉ DE SOBRECORRENTE	24
FIGURA 5 CURVA TÍPICA DE UM RELÉ DE SOBRECORRENTE COMERCIAL.....	25
FIGURA 6 RELÉ URPE-7104 PEXTRON	26
FIGURA 7 DIAGRAMA UNIFILAR ESQUEMA ELÉTRICO	27

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 OCORRÊNCIA DE CURTO-CIRCUITO NO SISTEMA ELÉTRICO.....	15
QUADRO 2 OCORRÊNCIAS DE CURTO-CIRCUITO.....	16
QUADRO 3 TABELA PONTO ANSI.....	29
QUADRO 4 PARAMETRIZAÇÃO RELÉ DO TRANSFORMADOR (FASE).	32
QUADRO 5 PARAMETRIZAÇÃO RELÉ DO TRANSFORMADOR (NEUTRO).....	32
QUADRO 6 PARAMETRIZAÇÃO RELÉ DO ALIMENTADOR (FASE).....	36
QUADRO 7 PARAMETRIZAÇÃO RELÉ DO ALIMENTADOR (NEUTRO).	36
QUADRO 8 VERIFICAÇÃO GRÁFICA DE SELETIVIDADE.....	38

LISTA DE EQUAÇÕES

(1) Proporção de I_p e I_f	24
(2) I_f menor q I_p	24
(3) Fórmula Corrente Nominal	27
(4) Critério Curto Circuito Transformador	28
(5) RTC Transformador	28
(6) Corrente Magnetização do Transformador	28
(7) Fórmula Corrente de Partida do Relé	29
(8) Corrente de Fase ANSI do Transformador	29
(9) Corrente de Neutro ANSI do Transformador	29
(10) Cálculo do dT do Transformador	30
(11) Ajuste da Função Temporizada 51 N Transformador.....	31
(12) Ajuste Do Relé do Transformador	31
(13) Ajuste da Função Instantânea 50 Relé Transformador	31
(14) Ajuste da Função Instantânea 50 N Relé Transformador	31
(15) Corrente Nominal no Alimentador	33
(16) Corrente de Partida do Relé do Alimentador	33
(17) Critério Curto Circuito Alimentador.....	34
(18) RTC Alimentador	34
(19) Cálculo do dT do Alimentador	34
(20) Ajuste da Função Temporizada 51 N Alimentador	35
(21) Ajuste Do Relé do Alimentador.....	35
(22) Ajuste da Função Instantânea 50 Relé Alimentador.....	35
(23) Ajuste da Função Instantânea 50 N Relé Alimentador	35

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas técnicas

ANSI – American National Standards Institute

AT – Alta Tensão

BT – Baixa Tensão

CC – Curto-circuito

CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais

FT – Fator de Temperatura

IEC – International Electrotechnical Commission

LT – Linhas de Transmissão

RTC – Relação do Transformador de Corrente

SEP – Sistema Elétrico de Potência

TC – Transformador de Corrente

TP – Transformador de Potencial

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DE CURTO CIRCUITO (CC)	14
2.1 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CURTO CIRCUITO	14
2.2 OCORRÊNCIA DOS DEFEITOS NO SISTEMA ELÉTRICO.....	15
2.3 TIPOS DE CURTO-CIRCUITO	16
3 ASPECTOS GERAIS DO SISTEMA DE PROTEÇÃO.....	16
3.1 FUNÇÃO DOS RELÉS DE PROTEÇÃO.....	16
3.2 TERMOS CLÁSSICOS UTILIZADOS NO COTIDIANO PELOS TÉCNICOS QUE TRABALHAM NO SISTEMA DE PROTEÇÃO	17
3.3 ESTRUTURA BÁSICA DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO	18
3.4 REQUISITOS BÁSICOS DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO.....	19
3.5 PRINCIPAIS FUNÇÕES DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO.....	19
3.6 ZONAS DE ATUAÇÃO DA PROTEÇÃO.....	20
4 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE TRANSFORMADORES.....	21
4.1 INTRODUÇÃO	21
4.2 RELÉ DIGITAL DE SOBRECORRENTE.....	22
5 EXEMPLO DE COORDENAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE NA PROTEÇÃO DE ALIMENTADOR COM TRANSFORMADOR A JUSANTE.....	26
5.1 PROTEÇÃO TRANSFORMADOR.....	27
5.1.1. <i>Cálculo de Corrente Nominal (In) do Transformador</i>	<i>27</i>
5.1.2. <i>Dimensionamento do TC pela ANSI.....</i>	<i>28</i>
5.1.3. <i>Calculo Corrente de Magnetização do Transformador (In rush).....</i>	<i>28</i>
5.1.4. <i>Calculo da Corrente Nominal e De Partida do Relé</i>	<i>28</i>
5.1.5. <i>Cálculo do ponto ANSI do transformador.....</i>	<i>29</i>
5.1.6. <i>Dados de Proteção</i>	<i>29</i>
5.1.7. <i>Cálculo Da Relação de Transformação do TC</i>	<i>30</i>
5.2 PARAMETRIZAÇÃO DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO TRANSFORMADOR.....	31
5.3 PROTEÇÃO DO ALIMENTADOR	33
5.3.1. <i>Cálculo de Corrente Nominal do Alimentador (In alim)</i>	<i>33</i>
5.3.2. <i>Calculo da Corrente Nominal e De Partida do Relé</i>	<i>33</i>
5.3.3. <i>Cálculo do ponto ANSI do alimentador</i>	<i>33</i>
5.3.4. <i>Dimensionamento do TC pela ANSI.....</i>	<i>34</i>
5.3.5. <i>Dados de Proteção</i>	<i>34</i>
5.3.6. <i>Cálculo Da Relação de Transformação do TC</i>	<i>35</i>
5.4 PARAMETRIZAÇÃO DO RELÉ DE PROTEÇÃO DO ALIMENTADOR.....	35
6 CONCLUSÃO.....	39
REFERÊNCIAS	40

1 INTRODUÇÃO

Um sistema elétrico de potência está constantemente sujeito a quaisquer tipos de ocorrências que podem causar as perturbações em seu estado normal. Tais perturbações alteram as grandezas elétricas (corrente, tensão e frequência), provocando violações nas restrições operativas. As perturbações mais comuns e também as mais severas são os curtos-circuitos, que ocorrem quando no seu seguimento há rupturas da isolação entre fases ou entre fase e terra, normalmente ocasionadas por descargas atmosféricas, galhos de árvores, incêndios, acúmulo de resíduos/poluição e outros efeitos.

Para sistemas de pequeno porte os cálculos das correntes de curto-circuito podem ser feitos de forma relativamente simples. Entretanto, quando se trata de sistemas mais complexos (com diversas interligações) e de portes elevados, usam-se de programas computacionais, pois com o avanço da tecnologia e pela complexidade estes programas conseguem efetuar com maior exatidão e praticidade estes cálculos.

2 A IMPORTÂNCIA DO ESTUDO DE CURTO CIRCUITO (CC)

O estudo de curto-circuito é de suma importância dentro da análise de sistemas elétricos de potência (SEP), pois possibilita a elaboração do projeto de proteção e coordenação dos seus diversos elementos.

As correntes de (CC) adquirem valores de grande intensidade, porém com duração geralmente limitada a frações de segundos. São provocadas mais comumente pela perda de isolamento de alguns elementos energizados dos sistemas elétricos, dos quais, os danos ficam condicionados à intervenção correta dos elementos de proteção.

Os seus valores de pico normalmente são compreendidos entre 10 a 100 vezes a corrente nominal no ponto de defeito da instalação, dependendo da sua localização.

O conhecimento da corrente de curto circuito atende a diversos objetivos importantes e estão relacionados a seguir (KINDERMANN, 2010):

- Conhecer a dimensão do seu valor.
- Dimensionar a linha de transmissão em relação ao seu limite suportável de elevação da temperatura devido ao CC.
- Dimensionar o disjuntor quanto a secção dos seus contatos e capacidade disruptiva da sua câmara de extinção de arco-elétrico.
- Dimensionar o transformador de corrente (TC) quanto ao nível de saturação da sua curva de magnetização definido pela sua classe de exatidão.
- Efetuar a coordenação dos relés.

As proteções e os equipamentos elétricos quando inadequados podem representar as possibilidades de falhas, acidentes com vítimas e custos de reparos, bem como equipamentos arbitrariamente superdimensionados, que podem gerar custos extras desnecessários. Uma análise real das condições de curto-circuito dos sistemas de potência se faz necessário, tendo em vista que o cálculo da corrente de curto-circuito é considerado um trabalho tedioso e complicado, a ser feito por especialistas.

2.1 Características Gerais do Curto Circuito

Os defeitos que ocorrem ao longo dos circuitos de transmissão e/ou nas estações geradoras e de manobra de um sistema elétrico de potência podem ser classificadas como

transitórias, semi-transitórias ou permanentes.

Os defeitos transitórios podem ser extintos rapidamente, bastando isolar o trecho com defeito por alguns milissegundos e religá-lo em seguida. Um exemplo de ocorrência transitória seria uma descarga atmosférica incidindo sobre um dos condutores de fase de uma linha de transmissão, o que, normalmente, provoca a formação de um arco elétrico entre duas fases ou entre a fase e a torre.

Os defeitos semi-transitórios podem ser extintos desligando e religando o circuito envolvido por mais de uma vez. Este tipo de procedimento ocorre normalmente na proteção de sistemas de distribuição em nível de tensão relativamente reduzida, o que não resulta, em geral, em danos para a característica global de estabilidade do sistema elétrico interligado. Este tipo de defeito ocorre, por exemplo, quando um galho de árvore toca duas fases, provocando um curto-circuito fase-fase.

Já os defeitos permanentes são aquelas em que não é possível restabelecer a operação normal do circuito defeituoso apenas desligando-o. Exemplos disto são a ruptura de isolamento de cabos elétricos subterrâneos e o rompimento de cabo condutor de linha aérea.

2.2 Ocorrência dos defeitos no Sistema Elétrico

Cada setor, devido suas determinadas características, contribuem em maior ou menor escala para a ocorrência de curto-circuito. Estas ocorrências são obtidas através de um levantamento do histórico de defeitos nas empresas de energia. A contribuição de cada setor do sistema elétrico frente à curto-circuito é mostrada no Quadro 1:

Quadro 1 Ocorrência de Curto-circuito no sistema elétrico

Setor do Sistema elétrico	Curto-circuito em %
Geração	6
Subestação	5
Linhas de Transmissão	89

Fonte: Kindermann (2010)

Pela própria natureza do sistema elétrico, o setor com maior ocorrência de falha é o das linhas de transmissão devido sua grande extensão, percorrendo todo o país, passando por diversos lugares com climas e terrenos distintos.

Os elementos das linhas de transmissão (ferragens, cabos, estruturas) estão dispostos em série, diminuindo consideravelmente a sua confiabilidade. A rede de distribuição também contribui com as falhas, mas os curtos-circuitos causados por estas, não colocam tanto em risco o sistema elétrico em si como no caso dos causados nas linhas de transmissão. (KINDERMANN, 2010).

2.3 Tipos de Curto-Circuito

Os defeitos nos sistemas de energia podem acontecer das seguintes formas, conforme mostra a Quadro 2:

Quadro 2 Ocorrências de Curto-Circuito

Tipos de Curtos-circuitos	Ocorrências em %
Trifásico	5
Dupla fase	15
Dupla fase-Terra	10
Fase-Terra	70

Fonte: Benedito (2015)

3 ASPECTOS GERAIS DO SISTEMA DE PROTEÇÃO

Os sistemas elétricos estão sujeitos a falhas de operação decorrentes da queda de condutores, da deterioração de isolamento, descargas atmosféricas, entre outros. Estes resultam em correntes elevadas de curto circuito.

Estas ocorrências podem causar danos aos equipamentos utilizados nas fases de geração, transmissão e distribuição, podendo ainda interromper o fornecimento de energia, causar risco de vida as pessoas próximas à falha ou até mesmo distantes, em alguns casos. Surge então a necessidade de proteção dos sistemas elétricos, sendo esta proteção sendo feita por esquemas de proteção que, por sua vez, são basicamente comandados por relés.

3.1 Função dos Relés de Proteção

Sua função consiste em localizar a falta imediatamente e promover a abertura do disjuntor

para isolar a seção defeituosa.

Além disso, é sua função também, medir constantemente as quantidades e parâmetros elétricos do sistema, comparando-os com um limite ajustado, ou qualquer outro parâmetro do sistema, entre eles estão:

- Magnitude de tensão e corrente;
- Angulo de fase, inversão do sentido da corrente (direção de potência);
- Combinação dos parâmetros acima, tais como potência e impedância;
- Alteração da impedância do sistema;
- Frequência;
- Duração;
- Razão de variação (taxa);
- Harmônicos e formas de onda.

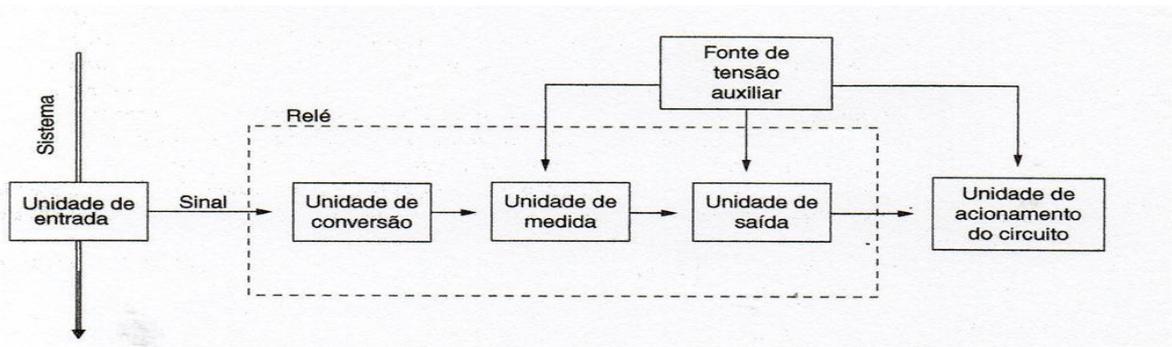
3.2 Termos clássicos utilizados no cotidiano pelos técnicos que trabalham no Sistema de Proteção

- **Corrente nominal:** valor nominal de corrente secundária que pode circular permanentemente no relé.
- **Corrente de Ajuste (Pick-up):** valor da corrente ajustada no relé, acima da qual o relé atuará.
- **Corrente de acionamento:** valor de corrente que provoca a atuação do relé.
- **Corrente máxima admissível:** é o valor máximo de corrente que pode suportar os componentes do relé de proteção, seja bobinas ou contatos, entre outros, durante um tempo especificado.
- **Potência nominal:** Potência que é requerida pelo relé e fornecida pelos transformadores de corrente e potencial.
- **Tensão nominal:** é o valor de tensão para o qual foi isolado o dispositivo.
- **Tensão de serviço:** é a tensão do sistema ao qual o relé está conectado.
- **Tensão máxima admissível:** é o valor de tensão máxima a que pode ficar submetido o relé em operação.
- **Temporização:** é o valor do tempo, geralmente em segundos, ajustado no relé, para o qual o mesmo atuará.

3.3 Estrutura básica de um Sistema de Proteção

A Figura 1 mostra o esquema básico de funcionamento de um relé de proteção.

Figura 1 Esquema básico de funcionamento de um relé



Fonte: Mamede (2011)

Sendo eles segundo Mamede (2011):

Unidade de entrada: recebem informações dos distúrbios do sistema elétrico (transformadores de corrente e potencial). Também oferecem isolamento entre o sistema e o dispositivo de proteção.

Unidade de conversão de sinal: interno ao relé que diante das informações recebidas dos TC`s e TP`s, os transforma em sinais com modulação adequada ao nível de funcionamento do relé. Nas proteções com relés primários não existe a unidade de conversão.

Unidade de medida: recebe os sinais da unidade de conversão e compara suas características (módulo da corrente e tensão, ângulo de fase, frequência, entre outros) com os valores que foram previamente armazenados nela e referência de operação.

Fonte de tensão auxiliar: fornece energia às unidades de medida para processar as informações e à unidade de saída. Também fornece energia à unidade de acionamento, às vezes constituída de uma pequena bobina que aciona um contato auxiliar. Geralmente é uma bateria. Em alguns dispositivos de proteção a fonte pode estar interna ao elemento.

Unidade de saída: Pode ser constituída de uma pequena bobina acionando um contato auxiliar ou por uma chave semicondutora.

Unidade de acionamento: normalmente constituída de uma bobina de grossas espiras montada no corpo do elemento de desconexão do sistema que pode ser um disjuntor ou um interruptor.

3.4 Requisitos Básicos de um Sistema de Proteção

Um projeto de proteção deve considerar algumas propriedades e características fundamentais para se obter um bom desempenho, como:

Seletividade: É a habilidade do sistema de proteção de operar de tal maneira a abrir, no caso de defeito, o menor número possível de disjuntores, ou seja, somente aqueles que alimentam diretamente o ponto de falha (defeito).

Sensibilidade: É a capacidade de o elemento de proteção operar com toda a certeza, quando assim for requerido, sob condições que produzem a menor tendência para operação, ou seja, para a sua operação e não operação.

Velocidade: Desde que seja definido um tempo mínimo de operação para um elemento de proteção, a velocidade de atuação deve ser a menor possível, a fim de reduzir a destruição e os distúrbios do sistema ao mínimo possível, a fim de propiciar as seguintes condições favoráveis:

- Reduzir ou mesmo eliminar as avarias e danos aos equipamentos protegidos.
- Reduzir o tempo de afundamento de tensão durante as ocorrências nos SEP, diretamente envolvido com a qualidade do serviço ao consumidor.
- Permitir a ressincronização dos motores.
- Segurança a vida e a propriedade.

Confiabilidade: É a propriedade de o elemento de proteção cumprir com segurança e exatidão as funções que lhe foram confiadas.

Automação: Propriedade de o elemento de proteção operar automaticamente quando solicitado, e voltar sem auxílio humano, se isso for necessário, à posição de operação depois de cessada a ocorrência.

3.5 Principais funções de um sistema de proteção

Principal função: assegurar a desconexão de todo o sistema elétrico, ou parte, quando submetido a uma Falha que o leve a operar fora dos limites previstos.

Segundo lugar: fornecer as informações ao centro de operação, de modo a facilitar a identificação dos defeitos e sua recuperação.

Geral: é projetado tomando como base os *fusíveis* e os *relés de proteção* incorporados

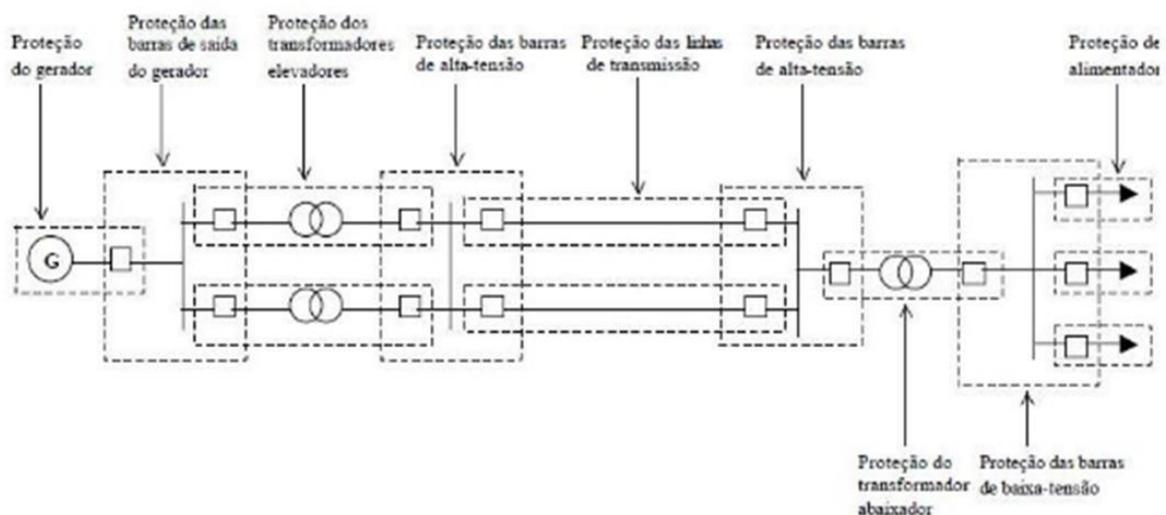
necessariamente a um disjuntor, que é responsável pela desconexão do circuito afetado com a rede de suprimento.

- **Os fusíveis** representam uma gama numerosa de dispositivos que são capazes de interromper o circuito ao qual estão ligados, sempre através de fusão de seu elemento metálico de proteção. Fusíveis são empregados nos sistemas de distribuição de média tensão e muito raramente no circuito de alta tensão, devido a sua baixa confiabilidade e a dificuldade de se obter sistemas seletivos.
- **Os relés** representam outra gama de dispositivos, com diversas formas de construção e funções incorporadas, para aplicações diversas em função da importância, do porte, e da segurança da instalação considerada, atuando para desligamento sobre disjuntor ou religador.

3.6 Zonas de atuação da Proteção

As zonas de atuação dos elementos de proteção do sistema são mostradas na Figura 2 que, por meio de disjuntores atuam dentro dos respectivos grupos de relés de proteção agindo no momento de qualquer tipo de falha. Havendo uma falta todos os disjuntores situados dentro da zona protegida onde se localiza a falta irão abrir Mamede (2011).

Figura 2 Zonas de proteção



Fonte: Mamede (2011)

Durante a ocorrência de um defeito o elemento de proteção deve ser capaz de definir se

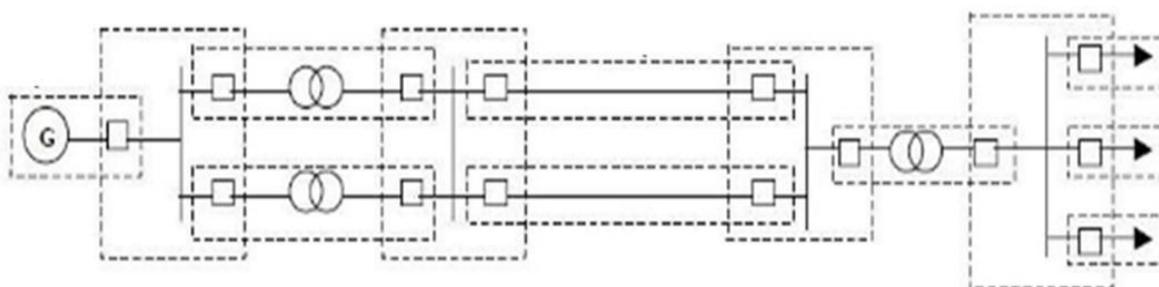
aquela ocorrência é interna ou externa a zona protegida.

Se a ocorrência está nos limites da zona protegida o elemento de proteção deve atuar e acionar a abertura do disjuntor associado, num intervalo de tempo definido pelo estudo de proteção.

Se a ocorrência está fora dos limites da zona de proteção, o relé não deve ser sensibilizado pela grandeza elétrica do defeito ou, se for, deve ter bloqueado o seu sistema restritor de atuação.

Procura-se arranjar as zonas de proteção conforme mostra a Figura 3, de maneira a evitar a existência no sistema de qualquer trecho onde pode ocorrer defeito “sem” causar a resposta por elemento de proteção associado, sendo a melhor maneira de conseguir isso é pela sobreposição das zonas protegidas ao redor dos disjuntores.

Figura 3 Arranjo das zonas de Proteção



Fonte: Mamede (2011)

Com este arranjo as faltas que ocorrem na área comum encerrada por duas zonas protegidas causam a resposta do relé de proteção de cada zona e a consequente abertura de ambos os conjuntos de disjuntores. E não havendo sobreposição de áreas, somente a proteção de retaguarda poderá responder, ou por operação manual.

4 PROTEÇÃO DE SOBRECORRENTE DE TRANSFORMADORES

4.1 Introdução

As subestações, de forma geral, podem assumir as mais variadas configurações, provendo soluções individuais para cada arranjo. Essas soluções passam necessariamente por uma análise de custo x benefício e dependem ainda dos seguintes aspectos (MAMEDE, 2011):

- Nível de confiabilidade desejada.
- Característica da carga a que irá atender.
- Esquema de proteção desejado.
- Número de transformadores desejado.
- Potência de curto circuito equivalente do sistema.

Como se trata do elemento de maior influência dentre os demais em uma subestação é fundamental o estudo de proteção na qual ele deve ser submetido com o intuito de manter sua integridade e da operação.

“As proteções que precisam ser aplicadas num transformador dependem da sua capacidade nominal e da importância da carga que alimenta. Assim, os transformadores de distribuição, normalmente, são protegidos por chaves fusíveis. Já os transformadores de força de instalações industriais com capacidade de até 300kVA são geralmente protegidos por chaves seccionadoras acionadas por fusíveis do tipo HH. Já transformadores industriais com capacidade não superior a 2000 kVA são protegidos por relés digitais dotados de unidades 50/51 e 50/51N, em geral acionados por disparo capacitivo. Para unidades superiores é conveniente, além da proteção de sobrecorrente dotada de unidades 50/51 e 50/51N, utilizando relés digitais, empregar também relés diferenciais de sobrecorrente e imagem térmica. Essas proteções devem ser complementadas com a utilização de relé de gás, relé de nível de óleo, relé de pressão etc., as denominadas proteções intrínsecas.

Os transformadores com tensões iguais ou superiores a 69 kV e iguais ou inferiores a 138 kV com potência nominal não superior a 7,5 MVA, instalados em áreas de baixa densidade de carga de característica puramente rural de cultura de subsistência podem ter proteção de sobrecorrente através de chaves fusíveis, associadas as proteções intrínsecas. Nessas condições, se for desejável melhorar o nível de proteção do transformador, podem ser utilizados relés diferenciais de sobrecorrente atuando sobre uma chave de aterramento rápido instalada do lado da tensão superior da subestação, forçando a abertura do disjuntor de proteção do alimentador da subestação a montante. Essa filosofia de proteção visa à redução de custos das subestações instaladas em áreas em que a continuidade do sistema não seja crítica, apesar de o órgão regulatório do setor elétrico cada vez mais exigir das distribuidoras de energia elétrica um nível crescente de qualidade e continuidade do sistema elétrico.

Já a proteção de transformadores industriais de tensão iguais ou superiores a 69 kV e iguais ou inferiores a 230 kV, em geral, é constituída de relés de sobrecorrentes, dotados de unidades 50/51 e 50/51N, relés diferenciais de sobrecorrente, as proteções intrínsecas, além das proteções de sub e sobretensões.” (MAMEDE, 2011. p.289).

4.2 Relé digital de sobrecorrente

Filosoficamente, o relé é um dispositivo sensor que comanda a abertura do disjuntor (ALMEIDA, 2000) no sistema elétrico protegido quando surgem condições anormais de funcionamento.

Os relés de um modo geral atuam respeitando quatro etapas:

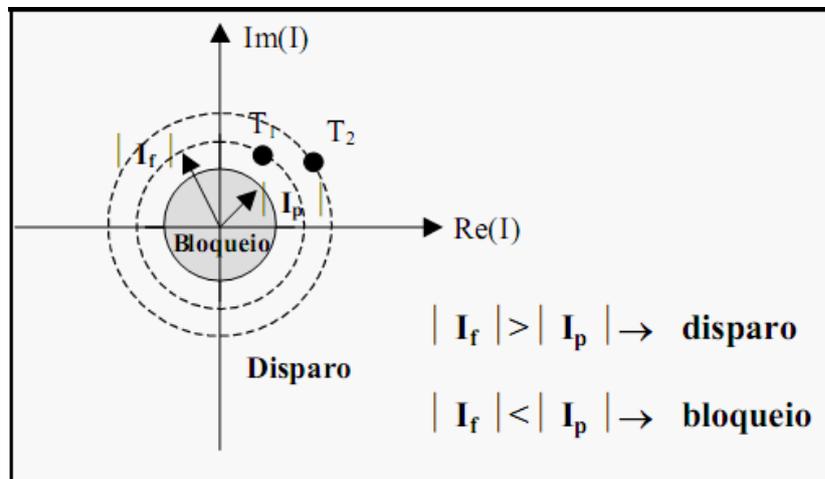
- **Etapa 1:** O relé encontra-se permanentemente recebendo informações da situação de operação elétrica do sistema protegido através das formas de ondas da corrente, tensão, frequência e/ou uma combinação dessas grandezas (potência, impedância, ângulo de fase, etc.).
- **Etapa 2:** Se, em um dado momento, surgirem condições anormais de funcionamento do sistema protegido, tais que estas venham a sensibilizar o relé, este deve atuar da maneira filosófica que lhe foi atribuída.
- **Etapa 3:** A atuação do relé é caracterizada pelo envio de um sinal que resultará em uma ação de sinalização (alarme), bloqueio ou abertura de um disjuntor (ou nas três ao mesmo tempo).
- **Etapa 4:** A abertura ou disparo do disjuntor, comandada pelo relé irá isolar a parte defeituosa do sistema.

O relé de sobrecorrente como o próprio nome sugere, tem como grandeza de atuação a corrente elétrica do sistema. Este pode ser aplicado para proteger qualquer elemento de um sistema de energia, como, por exemplo, linhas de transmissão, transformadores, geradores ou motores, entre outros dispositivos, equipamentos e sistemas (COURY e OLESKOVICZ e GEOVANINI, 2007).

Os relés de sobrecorrente podem ser eletromecânicos, eletrônicos (estado sólido) ou digitais (COURY e OLESKOVICZ e GEOVANINI, 2007). Contudo, atualmente, os relés eletromecânicos e eletrônicos estão sendo substituídos em larga escala pelos relés digitais. As concessionárias têm preferido a tecnologia digital, tendo em vista a grande quantidade de informações que os relés digitais conseguem armazenar e do elevado potencial de integração com outros dispositivos.

Para exemplificar a aplicação de um relé de sobrecorrente, assume-se um sistema com uma fonte somente no seu lado esquerdo (sistema radial). Pode-se afirmar que, se a mínima corrente de falta dentro da zona de proteção for maior do que a máxima corrente possível de carga tem-se então o princípio de operação do relé de sobrecorrente como representado na Figura 4.

Figura 4 Descrição funcional de um relé de sobrecorrente



Fonte: Coury (2003).

Onde I_f é a corrente de defeito observada na posição do relé e I_p é a corrente do secundário do TC previamente definida (corrente de pickup). Dessa forma, a Equação (1) nos mostra: (PHADKE e THORP, 1995):

$$|I_f| \geq I_p \quad (1)$$

Indica-se uma situação de defeito ocorrendo na zona de proteção, necessitando então da uma abertura do disjuntor associado ao sistema de proteção.

Agora, quando:

$$|I_f| < I_p \quad (2)$$

Acusa-se a ausência de uma situação de defeito na zona de proteção, a qual garante a não abertura do disjuntor, conforme foi ilustrado na Equação (2).

É importante ressaltar que a magnitude da corrente deve ser derivada de uma fonte de corrente alternada, a qual pode incluir um componente de decaimento CC, cuja magnitude depende do instante de ocorrência da falta.

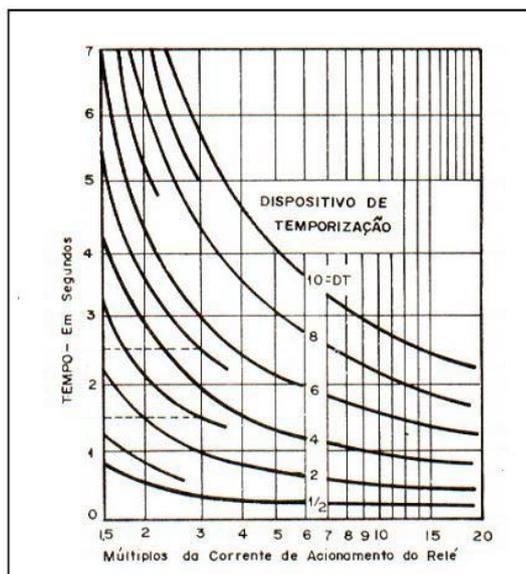
Os relés eletromecânicos, da maneira como são projetados, normalmente, estes podem ter dois tipos de ajustes (COURY, 2003):

- **Ajuste de Corrente:** dá-se pelo ajuste de tapes, pelo posicionamento do entreferro,

tensionamento da mola de restrição, pesos, tapes de variação da bobina, etc.

- **Ajuste de Tempo:** dá-se pelo ajuste do dispositivo de tempo (DT), por meio de diversos dispositivos de temporização. A Figura 5 representa uma curva típica característica de um relé de sobrecorrente disponível comercialmente (STEVENSON, 1986).

Figura 5 Curva típica de um relé de sobrecorrente comercial



Fonte: Coury (2003).

Embora esses ajustes possam ser feitos de forma independente, a interdependência é mostrada nas curvas tempo-corrente no catálogo do fabricante.

Para os relés digitais, encontrados comercialmente, estes dois tipos de ajustes são normalmente realizados via software específico de cada equipamento, podendo ser inseridos os valores desejáveis para cada função de proteção através de uma interface disponibilizada pelo programa do fabricante do relé (COURY, 2003).

Alguns relés digitais permitem também configuração de certas funções através do próprio teclado e display em seu painel.

Como fato, tem-se que em Sistemas Elétricos de Potência (SEPs), normalmente, correntes elevadas são causadas por curtos-circuitos ocorridos sobre o circuito. Para atenuar as consequências destes curtos, utiliza-se um determinado tipo de proteção.

Segundo (COURY, 2003) os tipos mais comuns de proteção que existem são:

- **Chaves termomagnéticas:** que apresentam arranjos mais simples e são utilizadas para baixa tensão.

- **Fusíveis:** usados na proteção de linhas de baixa tensão (BT) e transformadores de distribuição.
- **Relés de sobrecorrente:** são os mais comuns para se lidar com correntes elevadas e atuam em situação de sobrecorrente e sobrecarga do sistema.

5 EXEMPLO DE COORDENAÇÃO DOS RELÉS DE SOBRECORRENTE NA PROTEÇÃO DE ALIMENTADOR COM TRANSFORMADOR A JUSANTE

Para este estudo serão utilizados dois relés URPE-7104 PEXTRON com funções 50/51 e 50N/51N (funções de atuação instantânea e temporizada nas fases e no neutro/terra), um protegendo o transformador e outro para a proteção primária do alimentador e secundária do transformador. Conforme mostra a Figura 6, temos o modelo de relé citado acima.

Figura 6 Relé URPE-7104 PEXTRON



Fonte: PEXTRON (2018)

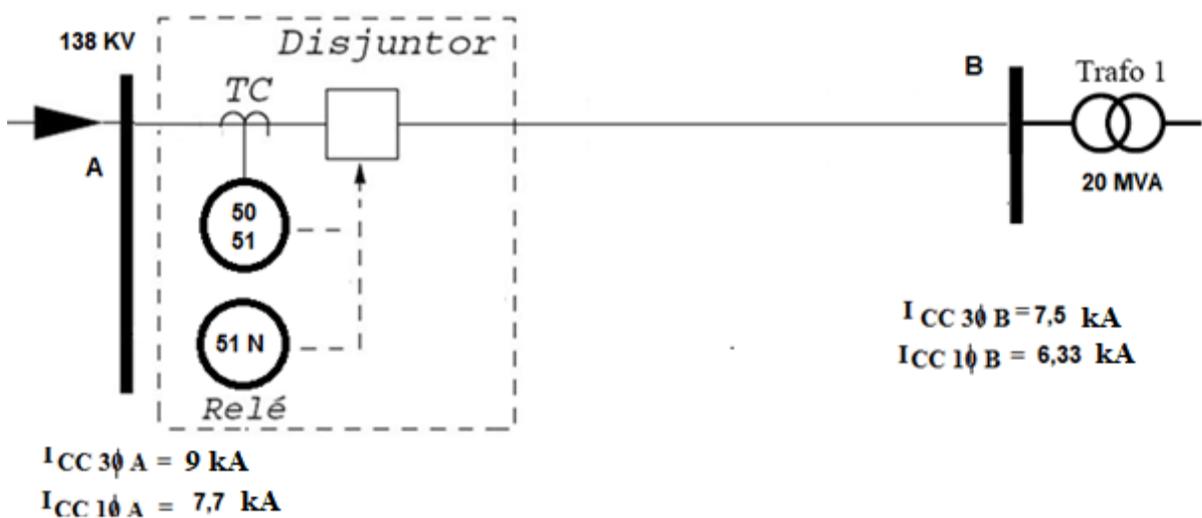
Os relés de sobrecorrente serão sensibilizados por meio de transformadores de corrente e, em casos de defeitos (sobrecargas ou curtos-circuitos), atuará no disjuntor correspondente

para devida proteção do alimentador ou do transformador, o que for o caso.

5.1 Proteção Transformador

Considerando as principais características do sistema tratado na Figura 7, temos:

Figura 7 Diagrama Unifilar Esquema elétrico



Fonte: O Autor.

Dados do Transformador:

$S = 20\text{ (MVA)}$.

Relação de tensões nominais 138 kV / 13,8 kV.

Impedância percentual do transformador ($Z\%$) 4,0%.

5.1.1. Cálculo de Corrente Nominal (I_n) do Transformador

Temos mostrado na Equação (3) o cálculo referente a corrente nominal do transformador, na qual ela pode ser encontrada pela diferença da potência do transformador (S) pela tensão (V) vezes $\sqrt{3}$

$$I_n \text{ trafo} = \frac{S}{1,73 * V} = \frac{20000\text{ kVA}}{1,73 * 138\text{ kV}} = 83,77\text{ A} \quad (3)$$

Sendo assim, no determinado circuito teremos uma corrente nominal (*In trafo*) igual a 83,77 A.

5.1.2. Dimensionamento do TC pela ANSI

- Pelo critério da corrente nominal temos **$I_n = 83,77A$** .
- Pelo critério de curto-circuito temos conforme a Equação (4)

$$F_s = \frac{I_{cc(max)}}{I_p(nominal)} = \frac{7,5 \text{ kA}}{20} = 375 \text{ A} \quad (4)$$

Isolando a corrente $I_p(nominal)$, e sabendo que F_s não pode exceder o limite de 20 vezes a corrente nominal encontramos o valor da corrente $I_p = 375 \text{ A}$. Considerando a maior das duas correntes encontradas, tem-se na Equação (5) as relações padrões recomendadas pela norma:

$$RTC = \frac{400}{5} \quad (5)$$

5.1.3. Calculo Corrente de Magnetização do Transformador (*In rush*)

Considerando a corrente de magnetização (*In rush*) oito vezes maior que a corrente nominal do transformador [ver Equação (3)] com um tempo de duração de 0,2 segundos, tem-se a Equação (6):

$$I_n \text{ rush} = 8 * I_n \text{ trafo} = 8 * 83,77 = 670,16 \text{ A} \quad (6)$$

Assim, O valor da corrente de magnetização (*In rush*) é mostrado na Equação (6) e tem seu valor igual a 670,16 Ampères.

5.1.4. Calculo da Corrente Nominal e De Partida do Relé

Para o cálculo da corrente de partida do relé, temos a Equação (7):

$$I_p = I_n * 1,20 = 83,77 \text{ A} * 1,20 = \mathbf{100,52 \text{ A}} \quad (7)$$

O valor da corrente de partida do relé (I_p) é 100,52 Ampères.

5.1.5. Cálculo do ponto ANSI do transformador

Para o cálculo do ponto ANSI, utilizamos o Quadro 3 como referência, sabendo que de acordo com o valor da impedância ($Z\%$) tem se o cálculo relacionado ao mesmo.

Quadro 3 Tabela ponto ANSI

Z% (Ohms)	I_{cc} máx. Simétrico, em múltiplo de I_n (A)	Tempo admissível (s)
Até 4	25 x I _n	2
Até 5	20 x I _n	3
Até 6	16,6 x I _n	4
Até 7	14,3 x I _n	5

Fonte: Caminha (1977)

Sendo assim, a Corrente de fase ANSI ($I_{\text{fase ANSI}}$) é dada pela Equação (8).

$$I_{\text{fase ANSI}} = 25 * 83,77 = \mathbf{2094,25 \text{ A}} \quad (8)$$

A Corrente de neutro ANSI ($I_{\text{neutro ANSI}}$) é igual a $0,58 * I_{\text{fase ANSI}}$. Seu valor é mostrado na Equação (9):

$$I_{\text{neutro ANSI}} = 0,58 * 2094,25 = \mathbf{1214,66 \text{ A}} \quad (9)$$

5.1.6. Dados de Proteção

Considerando que o nível máximo de curto-circuito no local é 7500 Ampères, serão utilizados TC's de relação de transformação 400/5 RTC = 20 e FT = 1,2.

O relê usado como referência para este estudo é o modelo URPE-7104 PEXTRON,

microprocessado com curva extremamente inversa de acordo com a IEC-255, BS-143 e ABNT-7099.

A equação da curva extremamente inversa é:

$$t = \frac{k * dT}{(M)^a - 1}$$

Onde:

t = tempo de acionamento / atuação do relê;

K = Constante da curva, no caso da extremamente inversa, K=80.

dT = multiplicador de tempo da curva do relê (dial de tempo);

M = I/Ip = relação entre a corrente circulante I com a corrente ajustada Ip no relê (pick-up).

a = Constante da curva, no caso da extremamente inversa, a=2.

Substituindo os valores já encontrados na Equação (10) e com o tempo de operação de 0,2 segundos, e I=400, temos:

$$0,2 = \frac{80 * dT}{\left(\frac{400}{100,52}\right)^2 - 1} \therefore dT = 0,039 s \quad (10)$$

Será escolhida a curva EI (extremamente inversa) por recomendação.

Com o valor encontrado na Equação (10), temos que o dial de tempo será ajustado em 0,037 para fase e 0,037 para neutro, visando obter seletividade na proteção.

A unidade de tempo independente (Idef.) será bloqueada para neutro e fase, no que diz respeito a tempo de atuação e corrente de partida.

5.1.7. Cálculo Da Relação de Transformação do TC

A relação de transformação do TC foi escolhida em função do nível de curto-circuito fornecido pela concessionária, e através de recomendação de que a corrente máxima de curto-circuito não exceda em mais de 20 vezes a corrente primária do TC.

Neste caso, os TC's de proteção serão de: $400/5 \text{ RTC} = 20$

- Ajuste da função temporizada 51 N (Neutro) é visto na Equação (11):

$$I_d = I_n * 0,3 = 83,77 * 0,3 = \mathbf{25,13 A} \quad (11)$$

- Os ajustes do relé são dados pela Equação (12):

$$I_{aj} = I_d * 1,10 = 25,13 * 1,10 = \mathbf{27,64 A} \quad (12)$$

- Ajuste da função instantânea 50 (Fase) é dado através da Equação (13):

$$I_{inst} = I_{inrush} * 1,10 = 670,16 * 1,10 = \mathbf{737,17 A} \quad (13)$$

- Ajuste da função instantânea 50 N (Neutro) é mostrado na Equação (14):

$$I_{inst n} = I_{inst} * 0,3 = 717,37 * 0,3 = \mathbf{221,15 A} \quad (14)$$

5.2 Parametrização do relé de Proteção do Transformador

Após o cálculo de todos os dados necessários para identificar o ajuste correto de relé, pode-se parametrizar devidamente o mesmo, de acordo com o Quadros 4 temos os ajustes do relé do transformador de fase.

Quadro 4 Parametrização relé do transformador (fase).

PARÂMETRO	CURVA	DESCRIÇÃO	AJUSTE	OBS.
TC	-	Relação do transformador de corrente (TC)		RTC = 20 400/5
I partida	vermelha	Corrente partida unidade de tempo dependente de fase	100,52 A	---
Curva	vermelha	Tipo de curva de atuação para fase	EI	extremamente inversa
D.T.	-	Ajuste do dial de tempo para fase	0,037	---
I def.	-	Corrente de partida da unidade independente de fase	-	bloqueado
I def.	-	Tempo da unidade independente de fase	-	bloqueado
I inst.	vermelha	Corrente da unidade instantânea de fase	737,17 A	---

Fonte: O autor

Quadro 5 Parametrização relé do transformador (neutro).

PARÂMETRO	CURVA	DESCRIÇÃO	AJUSTE	OBS.
TC	-	Relação do transformador de neutro (TC)		RTC =20 400/5A
I partida	verde	Corrente partida unidade de tempo dependente de neutro	27,64 A	---
Curva	verde	tipo de curva de atuação para neutro	EI	extremamente inversa
D.T.	-	Ajuste do dial de tempo para neutro	0,037	---
I def.	-	Corrente partida da unidade independente de neutro	-	bloqueado
I def.	-	Tempo da unidade independente de neutro	-	bloqueado
I inst.	verde	Corrente da unidade instantânea de neutro	221,15 A	---

Fonte: O autor

No Quadro 5 temos os ajustes calculados para o relé do transformador de neutro.

Ambos os resultados obtidos, são referenciados a proteção do transformador, que trabalhará sobreposto a uma proteção da linha de transmissão a qual os valores a princípio, não

serão calculados neste estudo. Podendo ser uma referência futura para continuação do projeto em si.

5.3 Proteção do Alimentador

5.3.1. Cálculo de Corrente Nominal do Alimentador (In_{alim})

Assim como no transformador, por estar inserido na mesma barra de tensão o valor de In do alimentador é igual ao do transformador, dado pela Equação (15):

$$In_{alim} = \frac{20000 \text{ kVA}}{1,73 * 138 \text{ kV}} = \mathbf{83,77 \text{ A}} \quad (15)$$

O valor da corrente nominal do alimentador (In_{alim}) é 83,77 Ampères.

5.3.2. Calculo da Corrente Nominal e De Partida do Relé

No alimentador o valor utilizado com referência para os cálculos será de 1,50, conforme nos mostra a Equação (16):

$$Ip = In * 1,50 = 83,77 * 1,50 = \mathbf{125,65 \text{ A}} \quad (16)$$

O valor da corrente de partida do relé (Ip) é 125,65 Ampères.

5.3.3. Cálculo do ponto ANSI do alimentador

Corrente de fase ANSI ($Ifase_{ANSI}$)

A corrente de fase ANSI do alimentador Equação (8) é igual a corrente de fase do alimentador, sendo assim, I fase ANSI do alimentador é igual a **2094,25 A**.

E a corrente de neutro ANSI ($Ineutro_{ANSI}$) do alimentador, também é igual a do transformador, que, conforme mostrado na Equação (9) vale **1214,66 A**

5.3.4. Dimensionamento do TC pela ANSI

- Pelo critério da corrente nominal temos $I_n = 83,77 \text{ A}$.
- Pelo critério de curto-circuito temos para os dados do alimentador operando da maneira mostrada na Equação (17):

$$I_p(\text{nominal}) = \frac{I_{cc}(\text{max})}{F_s} = \frac{9 \text{ kA}}{20} = 450 \text{ A} \quad (17)$$

De acordo com a Equação (17) encontramos o valor da corrente $I_p = 450 \text{ A}$. Considerando a maior das duas correntes encontradas, tem-se na Equação (18) as relações padrões recomendadas pela norma:

$$RTC = \frac{450}{5} \quad (18)$$

5.3.5. Dados de Proteção

Considerando que o nível máximo de curto-circuito no local é 9000 Ampères, serão utilizados TC's de relação de transformação 450/5 $RTC = 20$ e $FT = 1,2$.

O relê usado como referência para este estudo é o modelo URPE-7104 PEXTRON, microprocessado com curva extremamente inversa de acordo com a IEC-255, BS-143 e ABNT-7099.

A equação da curva extremamente inversa é mostrada na Equação (19) e com o tempo de operação de 0,2 segundos, e $I=450$, temos no alimentador:

$$0,2 = \frac{80 * dT}{\left(\frac{450}{125,62}\right)^2 - 1} = 0,029 \text{ s} \quad (19)$$

Será escolhida a curva EI (extremamente inversa) por recomendação.

O dial de tempo será ajustado de acordo com o valor encontrado na Equação (19), sendo este 0,029 para fase e 0,029 para neutro, visando obter seletividade na proteção.

A unidade de tempo independente (Idef.) será bloqueada para neutro e fase, no que diz

respeito a tempo de atuação e corrente de partida.

5.3.6. Cálculo Da Relação de Transformação do TC

A relação de transformação do TC foi escolhida em função do nível de curto-circuito fornecido pela concessionária, e através de recomendação de que a corrente máxima de curto-circuito não exceda em mais de 20 vezes a corrente primária do TC.

Neste caso, os TC's de proteção serão de: $450/5 \text{ RTC} = 20$

- Ajuste da função temporizada 51 N (Neutro) é visto na Equação (20):

$$I_d = I_n * 0,3 = 83,77 * 0,3 = \mathbf{25,13 A} \quad (20)$$

- Os ajustes do relé são dados pela Equação (21):

$$I_{aj} = I_d * 1,50 = 25,13 * 1,50 = \mathbf{37,69 A} \quad (21)$$

- Ajuste da função instantânea 50 (Fase) é dado através da Equação (22):

$$I_{inst} = I_{inrush} * 1,50 = 670,16 * 1,50 = \mathbf{1005,24 A} \quad (22)$$

- Ajuste da função instantânea 50 N (Neutro) é mostrado na Equação (23):

$$I_{inst n} = I_{inst} * 0,3 = 1005,24 * 0,3 = \mathbf{301,57 A} \quad (23)$$

5.4 Parametrização do relé de Proteção do Alimentador

Após o cálculo de todos os dados necessários para identificar o ajuste correto de relé, pode-se parametrizar devidamente o mesmo, de acordo com o Quadros 6 temos os ajustes do relé do transformador de fase.

Quadro 6 Parametrização relé do alimentador (fase).

PARÂMETRO	CURVA	DESCRIÇÃO	AJUSTE	OBS.
TC	-	Relação do transformador de corrente (TC)		RTC = 20 450/5
I partida	vermelha	Corrente partida unidade de tempo dependente de fase	125,25	---
Curva	vermelha	Tipo de curva de atuação para fase	EI	extremamente inversa
D.T.	-	Ajuste do dial de tempo para fase	0,029	---
I def.	-	Corrente de partida da unidade independente de fase	-	Bloqueado
I def.	-	Tempo da unidade independente de fase	-	Bloqueado
I inst.	vermelha	Corrente da unidade instantânea de fase	1005,24 A	---

Fonte: O autor

Quadro 7 Parametrização relé do alimentador (neutro).

PARÂMETRO	CURVA	DESCRIÇÃO	AJUSTE	OBS.
TC	-	Relação do transformador de neutro (TC)		RTC =20 450/5A
I partida	verde	Corrente partida unidade de tempo dependente de neutro	37,69 A	---
Curva	verde	tipo de curva de atuação para neutro	EI	extremamente inversa
D.T.	-	Ajuste do dial de tempo para neutro	0,029	---
I def.	-	Corrente partida da unidade independente de neutro	-	bloqueado
I def.	-	Tempo da unidade independente de neutro	-	bloqueado
I inst.	verde	Corrente da unidade instantânea de neutro	301,57 A	---

Fonte: O autor

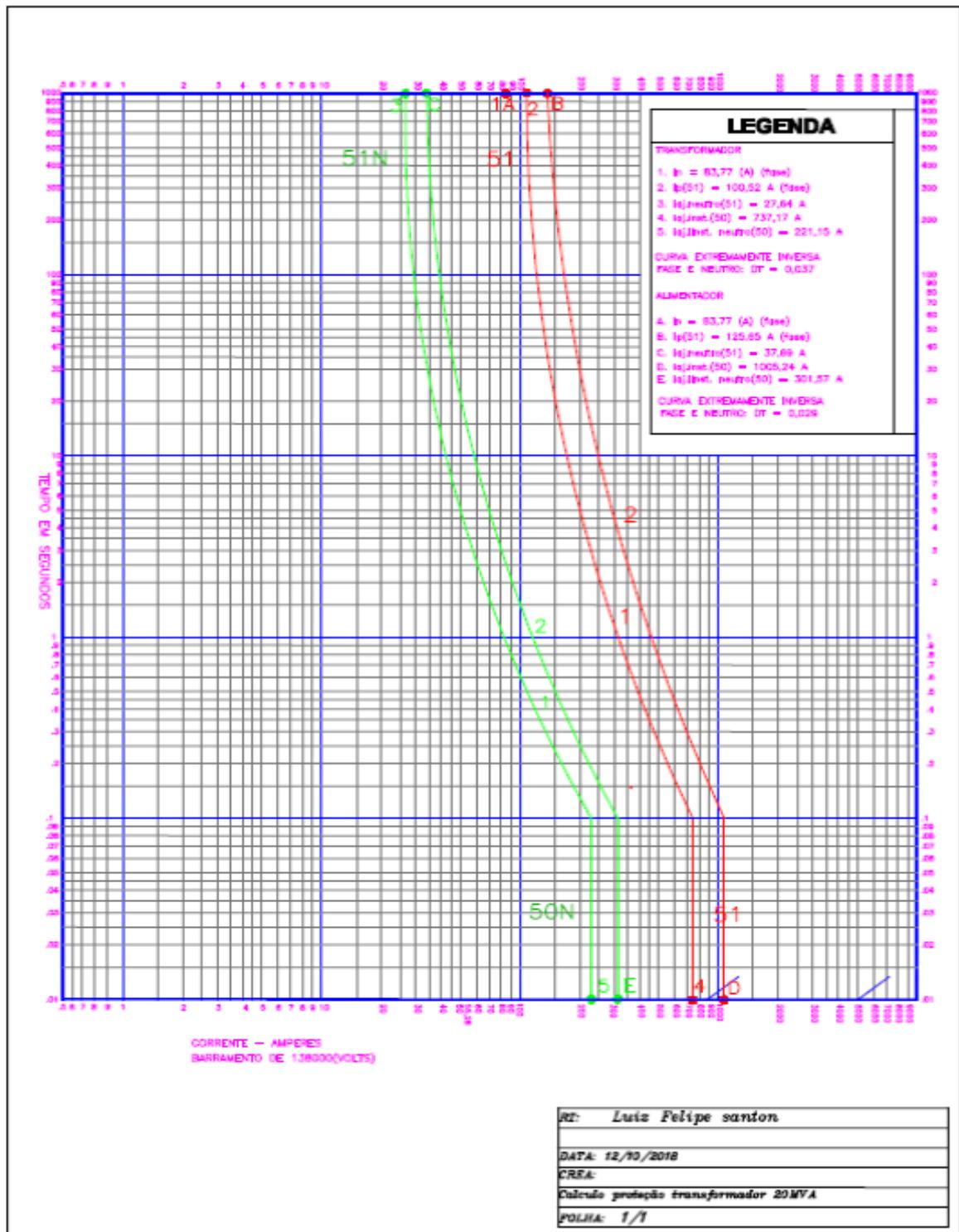
No Quadro 7 temos os ajustes calculados para o relé do transformador de neutro.

Ambos os resultados obtidos, são referenciados a proteção do alimentador, que trabalhará sobreposto a uma proteção da linha de transmissão a qual os valores a princípio, não

serão calculados neste estudo. Podendo ser uma referência futura para continuação do projeto em si.

No Quadro 8 temos a verificação gráfica de seletividade gerada através dos cálculos aqui demonstrados, ficando evidente as linhas de fase (vermelho) e de neutro (verde) do transformador (1) e alimentador (2) seguindo os parâmetros de seletividade encontrados para o sistema mostrado como base para este estudo através da Figura 7.

Quadro 8 Verificação gráfica de seletividade



Fonte: O Autor.

6 CONCLUSÃO

Mediante aos fatos expostos, é possível concluir que com o elevado número de sistemas elétricos espalhados por todos os locais do país estarem dispostos de tal maneira que possam sofrer com danos tanto quanto mecânicos (clima em geral, queda de árvores, quebra de um condutor, contato acidental entre condutores) como também sendo por uma falha de isolamento (devido a temperatura, umidade, descargas atmosféricas, outros) e afetar o seu sistema como um todo.

Por estes fatos e também por ser fundamental para garantir a eficácia e o funcionamento correto do sistema, a proteção de sobrecorrente é o principal estudo no que tange a proteção de um sistema elétrico de potência.

Como foi mostrado no decorrer deste trabalho, a corrente de curto-circuito pode causar um enorme dano no decorrer de toda a rede de distribuição, e com o correto dimensionamento de proteção tanto dos relés de sobrecorrente de fase e neutro, mas também dos TCs de proteção do alimentador, o sistema em geral possui um elevado grau de proteção.

Como aprofundamento neste assunto pode-se concentrar os estudos no dimensionamento dos TCs do alimentador, com os cálculos de dimensionamento dos cabos até as cabines dentre outros. Outro campo de pesquisa, seria adicionar a este trabalho o auxílio de programas computacionais para facilitar os cálculos e aumentar a precisão dos mesmos.

Por fim, pode-se concluir que o objetivo deste trabalho em promover o estudo do dimensionamento do relé de sobrecorrente foi satisfatório e o mesmo apresenta resultados conforme o esperado, sendo de grande ajuda para o cálculo de quaisquer sistemas de proteção.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, André L. Vitorino, Ajuste e Coordenação de Relés de Sobrecorrente. 2008
- ALMEIDA, M. A. D., “Proteção de Sistemas Elétricos”, Apostila da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2000.
- BENEDITO, Dr. Raphael A. de Souza, Análise de Curtos-circuitos ou falta. 2015 disponível em: <http://paginapessoal.utfpr.edu.br/raphaelbenedito>. Acesso em 25/10/2018
- CEMIG. “ND-5.3, Fornecimento de Energia Elétrica em Média - Rede de Distribuição Aérea ou Subterrânea”. Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.
- CAMINHA, Amadeu Casal, Introdução à proteção dos sistemas elétricos. São Paulo, Edgard Blucher, 1977.
- COURY, D. V., “Proteção de Sistemas Eletroenergéticos”, Apostila SEL354, São Carlos, 2003
- COURY, D. V., OLESKOVICZ, M., GEOVANINI, R., “Proteção Digital de Sistemas Elétricos de Potência: dos Relés Eletromecânicos aos Microprocessados Inteligentes”, USP/EESC, 2007.
- FITZGERALD, A. E. Máquinas Elétricas. Bookman, 2006.
- KINDERMAN, Geraldo. Curto Circuito. 2010.
- MAMEDE FILHO, J. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência, 2011.
- PEXTRON. “Relé de Proteção de Sobrecorrente com Fonte Capacitiva”, 2018. Disponível em: <https://www.pextron.com/index.php/pt-br/solucoes-01/coluna-3/cabines-primarias-03/urpe7104-02>
Acesso em: 01/11/2018
- PHADKE, A., THORP, G., J. S., “Computer Relaying for Power Systems”. Research Studies Press Ltd., 1995.
- SOUZA, JORGE NEMÉSIO DE, Apostila de Equipamentos Elétricos – DEE – UFRJ, 1998.
- STEVENSON, D. Jr., “Elementos de Análise de Sistemas de Potência”, McGraw-Hill, 2ª Edição em Português (4ª Edição Americana), 1986.
- TOSHIBA. Imagem Aspectos Construtivos. 2013 Disponível em: <<https://goo.gl/kYhWKw>> Acesso em 12/10/2018