



Universidade Federal
de Campina Grande

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
GRUPO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso

**DISJUNTORES DE POTÊNCIA:
UMA BREVE INTRODUÇÃO A TEORIA E ENSAIOS BÁSICOS EM
LABORATÓRIO**

BRUNO PATRÍCIO DA SILVA PORTO

Professor Orientador: Tarso Vilela Ferreira

Campina Grande, dezembro de 2009

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE

**CENTRO DE ENGENHARIA ELÉTRICA E INFORMÁTICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
GRUPO DE SISTEMAS ELÉTRICOS**

**DISJUNTORES DE POTÊNCIA:
UMA BREVE INTRODUÇÃO A TEORIA E ENSAIOS BÁSICOS EM
LABORATÓRIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para obtenção da graduação em Engenharia Elétrica.

BRUNO PATRÍCIO DA SILVA PORTO

Professor Orientador: Tarso Vilela Ferreira

Campina Grande, dezembro de 2009

Agradecimentos

Antes de tudo, gostaria de agradecer todas as pessoas que me ajudaram e fizeram parte da minha vida no decorrer do curso de engenharia elétrica.

Agradecer, primeiramente, a Deus por me dar forças e saúde. Toda minha família, principalmente aos que estão sempre ao meu lado, me apoiando tanto nos momentos de felicidades quanto nos de dificuldades. Em especial meus avôs e avós, meus pais, minha irmã, minha namorada, meus tios, dentre outros. Todos os professores, em especial ao professor Tarso Vilela Ferreira por ter aceitado ser meu orientador tanto no trabalho de conclusão de curso quanto no estágio, e ao professor Edson Guedes da Costa, por transmitir parte dos conhecimentos por mim obtidos.

Resumo

Nesse trabalho serão apresentados os princípios de funcionamento, as principais partes integrantes, os ensaios de tipo e de rotina de disjuntores de potência.

Estes equipamentos são utilizados em sistemas elétricos, nos mais diversos níveis de tensão. Fenômenos como arco elétrico e tensão de restabelecimento transitório, diretamente relacionados aos disjuntores, serão citados e explicados no decorrer do trabalho.

Palavras chave: disjuntor, ensaio, arco elétrico, tensão de restabelecimento transitório.

Sumário

<u>Agradecimentos.....</u>	<u>3</u>
<u>Resumo.....</u>	<u>5</u>
<u>Sumário.....</u>	<u>6</u>
<u>Lista de Figuras.....</u>	<u>7</u>
<u>Lista de Tabelas.....</u>	<u>8</u>
<u>Capítulo 1 - Introdução.....</u>	<u>9</u>
<u>Capítulo 2 - Conceitos e desenvolvimento histórico.....</u>	<u>10</u>
<u>Capítulo 4 - Tipos de disjuntores.....</u>	<u>11</u>
<u>4.1. Disjuntores a sopro magnético.....</u>	<u>11</u>
<u>4.2. Disjuntores a grande volume de óleo.....</u>	<u>12</u>
<u>4.3. Disjuntores a pequeno volume de óleo.....</u>	<u>12</u>
<u>4.4. Disjuntores a vácuo.....</u>	<u>12</u>
<u>4.5. Disjuntores a ar comprimido.....</u>	<u>13</u>
<u>4.6. Disjuntores a SF6.....</u>	<u>13</u>
<u>4.7. Disjuntores semicondutores.....</u>	<u>13</u>
<u>Capítulo 5 - Aspectos burocráticos referentes aos disjuntores.....</u>	<u>14</u>
<u>5.1. Especificações técnicas.....</u>	<u>14</u>
<u>5.2. Ensaios.....</u>	<u>14</u>
<u>Capítulo 6 - Uma introdução à Tensão de restabelecimento transitório</u> <u>.....</u>	<u>16</u>
<u>Capítulo 7 - Manobras críticas.....</u>	<u>17</u>
<u>Capítulo 8 - Sobrecargas e a teoria do arco elétrico.....</u>	<u>18</u>
<u>8.1. Sobrecargas contínuas.....</u>	<u>18</u>
<u>8.2. Sobrecargas de curta duração.....</u>	<u>18</u>
<u>8.3. Teoria do arco elétrico.....</u>	<u>20</u>

<u>Capítulo 9 - Normas relativas a disjuntores.....</u>	<u>22</u>
<u>Capítulo 10 - Ensaio realizado no laboratório de alta tensão.....</u>	<u>24</u>
<u>10.1. Medição da resistência estática dos contatos do disjuntor.....</u>	<u>24</u>
<u>10.2. Medição da impedância do óleo isolante.....</u>	<u>24</u>
<u>10.3. Capacidade de extinção de arco do ar e do óleo mineral.....</u>	<u>24</u>
<u>Considerações Finais.....</u>	<u>26</u>
<u>Referências bibliográficas:.....</u>	<u>27</u>

Lista de Figuras

Figura 1: Disjuntor a sopro magnético	12
Figura 2: Disjuntor GVO	12
Figura 3: Disjuntor PVO	13
Figura 4: Disjuntor a vácuo até 36 kV	14
Figura 5: Disjuntor a ar comprimido de 7,2 a 245 kV	14
Figura 6: Disjuntor a SF6	15
Figura 7: Transitório da tensão do lado da fonte	20
Figura 8: Corrente de energização do banco capacitivo	21
Figura 9: Ganho de corrente em função x variação de temperatura máxima	23
Figura 10: Variação da temperatura com a mudança da corrente	24
Figura 11: Fenômenos de reignição e reacendimento do arco elétrico	26
Figura 12: Esquema relacionando a ponte Thompson e os contatos do disjuntor	29
Figura 13: Esquema para ensaios de extinção de arcos elétricos o ar e no óleo	31

Lista de Tabelas

Tabela 1: Relação das variáveis para uma sobrecarga de curta duração, com $n=1,8_{24}$

Tabela 2: Relação das variáveis para uma sobrecarga de curta duração, com $n=2_{25}$

Capítulo 1 - Introdução

Nesse trabalho serão apresentados, inicialmente, os principais componentes que são indispensáveis ao funcionamento de um disjuntor e suas funções. Em seguida, serão descritos os tipos de disjuntores existentes e os que estão previstos para aplicações futuras, especificando-se ainda em que nível de tensão cada um deles é mais utilizado, bem como as suas vantagens e desvantagens.

Será abordada também a especificação técnica, documento no qual se descrevem as características de projeto, de ensaio e de utilização de um determinado equipamento ou conjunto de equipamentos. Os tipos de ensaios, a manutenção e uma noção breve de tensão de restabelecimento transitória (TRT) também serão assuntos abordados.

Posteriormente, serão apresentadas situações conhecidamente problemáticas para os disjuntores, como manobras de cargas capacitivas e interrupções de pequenas correntes indutivas. Ainda serão assuntos deste trabalho as sobrecargas, uma introdução à teoria do arco elétrico e o fenômeno de reacendimento e reignição.

Por fim, serão apresentadas normas que regulamentam os disjuntores de potência e um experimento de laboratório com objetivo de medir-se a resistência estática dos contatos, impedância do óleo isolante e as características de extinção do arco elétrico no ar e no óleo isolante.

Capítulo 2 - Conceitos e desenvolvimento histórico

Os disjuntores são equipamentos responsáveis pela manobra, interrompendo a corrente elétrica e/ou proteção do sistema no qual está inserido. O desenvolvimento dos disjuntores ocorreu devido à complexidade dos sistemas, por esse motivo, existe uma grande variedade desses equipamentos.

Em 1886 foi fabricado o primeiro disjuntor a óleo para operar a 15 kV. Em 1909 foi feito o primeiro protótipo do disjuntor a pequeno volume de óleo. Em 1920 foram iniciados estudos de outros meios de interrupção tais como: ar comprimido, água, vácuo, entre outros. Em 1935 foram iniciados estudos sobre a tensão de restabelecimento transitório. Em 1939 foi introduzida a teoria do arco elétrico. Em 1945 foram feitos progressos na questão de chaveamento de linhas de transmissão. Em 1960 foram desenvolvidos os testes sintéticos e introduzidos os disjuntores a hexafluoreto de enxofre (SF_6). Em 1963 foram introduzidos os disjuntores de 750 kV podendo interromper correntes de até 750 kA. Em 1970 foram inseridos os disjuntores de geradores para interrupção de correntes até 250 kA. Capítulo 3 – Funcionamento básico e principais componentes de um disjuntor

Os disjuntores são equipamentos que tem como principal função interromper correntes elétricas, independente da situação que as proporcionou. É um equipamento operado com o auxílio de relés ajustados de acordo com as grandezas elétricas típicas do sistema.

Os principais componentes de um disjuntor são:

- A câmara de extinção do arco elétrico, que pode ter vários formatos. O meio no qual será feita a extinção também varia, como, por exemplo, o vácuo, hexafluoreto de enxofre (SF_6), óleos ou ar. A finalidade da câmara de extinção, como o próprio nome sugere, é de extinguir o arco elétrico produzido no momento em que é feita a abertura dos contatos do disjuntor.
- Os contatos do disjuntor são peças localizadas na câmara de expansão responsáveis pela abertura e fechamento elétrico do equipamento. Em geral existe um contato móvel e um fixo.
- Os mecanismos de acionamento, que são capazes de acionar os contatos, estão diretamente ligados aos relés. Os relés recebem as informações dos sistemas e informam ao mecanismo de acionamento, que pode ser baseado em molas, óleo ou ar.
- Os conectores, que podem ser do tipo chapa-cabo, de aperto, fazem a conexão dos disjuntores a outros equipamentos.
- Os componentes auxiliares são utilizados para aumentar o grau de proteção e confiabilidade do sistema, a saber: impedâncias indutivas em série ao disjuntor para limitar a corrente e a frequência de energização transitória de bancos de capacitores em paralelo; capacitor em paralelo ao contato principal do equipamento para aumentar a capacidade de interrupção no caso de falta na linha; resistores de fechamento ou abertura para limitar as sobretensões de manobra.

Esses são os componentes básicos do disjuntor, alguns mais específicos serão citados e explicados *a posteriori*.

Capítulo 4 - Tipos de disjuntores

Os disjuntores são classificados de baixa tensão quando operam em um sistema com tensão abaixo de 1000 V, de média tensão quando a mesma varia entre 1 kV e 36 kV, e de alta

tensão quando superior a 36 kV. Outra maneira de classificá-los é de acordo com o meio de extinção do arco elétrico, por exemplo, a ar comprimido, a grande volume de óleo (GVO), a pequeno volume de óleo (PVO), entre outros. Para cada faixa de tensão utiliza-se o mais apropriado, a depender da confiabilidade e dos custos de cada um. A seguir, serão apresentados os mecanismos de extinção de arco mais usuais em disjuntores de potência.

4.1. Disjuntores a sopro magnético

Disjuntores a sopro magnético são utilizados em média tensão, até 24 kV. A extinção do arco elétrico é feita no ar e transferido para a câmara de extinção, que possui várias fendas. Essas fendas têm a função de eliminar o arco.

Quando ocorre a abertura dos contatos no ar, o arco elétrico é atraído pelo campo magnético produzido pela própria corrente que passa por uma ou mais bobinas, para as fendas da câmara de extinção. A interrupção é obtida devido ao aumento da resistência do arco devido ao alongamento, de acordo com a Lei de Ohm.

Se a resistência aumenta com uma corrente constante, conseqüentemente ocorrerá o aumento da tensão. Esse aumento da resistência é obtido através do seguinte processo: primeiramente ocorre o alongamento do arco, em seguida o arco é fragmentado em menores arcos nas fendas da câmara, e logo após é resfriado nas paredes da mesma que são construídas de material isolante, aço, ou uma combinação de ambos. Caso a corrente produzida seja pequena a tal ponto de não se conseguir impelir o arco através do campo magnético produzido, utiliza-se o sopro pneumático que é proporcionado pelo mecanismo de acionamento.

A alta resistência gerada interage com o circuito modificando o ângulo de fase e tendendo a torná-lo resistivo, além de diminuir o valor da TRT após a interrupção. Temos que as vantagens de se usar tal disjuntor é que eles não geram grandes surtos de manobra e, por não possuírem elementos inflamáveis, são considerados seguros. Porém precisam de manutenção mais freqüente e geram poluição sonora considerável. Na figura 1 pode-se verificar um exemplar do disjuntor a sopro magnético.

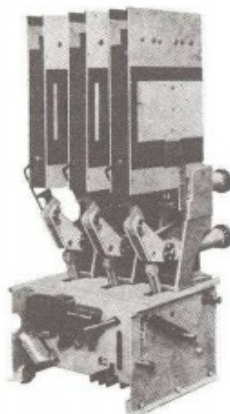


Figura 1: Disjuntor a sopro magnético (FEUP, 2009).

4.2. Disjuntores a grande volume de óleo

Disjuntores a grande volume de óleo (GVO) empregam o óleo mineral, elemento que apresenta uma grande capacidade de ruptura do arco elétrico. Os disjuntores a óleo são utilizados em média e alta tensão, até 230 kV.

A extinção do arco em óleo mineral pode acontecer de duas formas: pelo efeito do hidrogênio ou pelo efeito do fluxo líquido. Em altas temperaturas o óleo libera gases, principalmente o hidrogênio, que é um bom condutor térmico, proporcionando assim a retirada de calor das vizinhanças do arco, resfriando-o. No efeito do fluxo líquido, o óleo é jogado contra o arco elétrico com o intuito de liberar gases, retirando calor das vizinhanças e resfriando-o. Nos disjuntores GVO, apenas a extinção por efeito do hidrogênio toma lugar.

Os disjuntores a grande volume de óleo foram pioneiros. Eram constituídos por apenas um recipiente contendo os contatos envolvidos no óleo onde a formação e eliminação dos arcos acontecia, não existindo a câmara de extinção.

A principal vantagem dos disjuntores GVO é a alta capacidade de interromper correntes de curto-circuito, e as principais desvantagens são: a necessidade de realizar manutenção com uma grande frequência para filtragem do óleo; a possibilidade de incêndio e o grande volume de óleo a ser utilizado. Na figura 2 pode-se verificar um exemplar do disjuntor GVO.

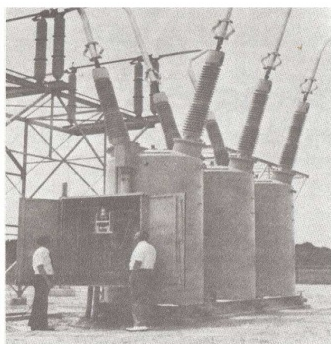


Figura 2: Disjuntor GVO (FEUP, 2009)..

4.3. Disjuntores a pequeno volume de óleo

Disjuntores a pequeno volume de óleo (PVO) surgiram com o intuito de substituir os GVO. Os disjuntores PVO utilizam o efeito de fluxo líquido para eliminar o arco elétrico, sendo empregados em baixa, média e alta tensão até 138 kV, com a condição da corrente de interrupção ser inferior a 20 kA. Como as correntes de interrupção variam entre 31,5 kA, 40 kA e 50 kA, devem-se utilizar várias câmaras em série com uso de capacitores de equalização, aumentando assim a complexidade do equipamento.

As principais vantagens dos PVO são a redução no dimensionamento do equipamento e o aperfeiçoamento das características elétricas e de desempenho em relação ao GVO. A manutenção é simples, prática e é confiável. Todavia, eles não são aplicáveis em extra alta tensão, pois nestes casos requerem-se muitos pontos de corte por pólo, elevando a complexidade e reduzindo-se a confiabilidade do disjuntor. Na figura 3 pode-se verificar um exemplar do disjuntor PVO.



Figura 3: Disjuntor PVO (SOLOSTOCKS, 2009).

4.4. Disjuntores a vácuo

Disjuntores a vácuo são aplicados principalmente em média tensão. O processo de extinção do arco ocorre devido à formação de uma nuvem metálica que é originada pela evaporação do metal que compõe os contatos. Após a interrupção do arco, esse material é depositado nos contatos, e a rigidez dielétrica entre eles é recomposta.

Esse tipo de disjuntor apresenta várias vantagens tais com: um curto tempo do arco, a capacidade de executar religamentos rápidos, não apresenta gases ou elementos inflamáveis, os contatos não sofrerem desgastes significativos, possuem uma elevada vida útil. Todavia, disjuntores a vácuo apresentam a desvantagem da complexidade construtiva, além de não ser trivial a manutenção do vácuo na câmara de extinção.

Neste tipo de disjuntor podem-se associar várias câmaras de extinção para aumentar a capacidade de interrupção. Na figura 4 pode-se verificar um exemplar do disjuntor a vácuo.

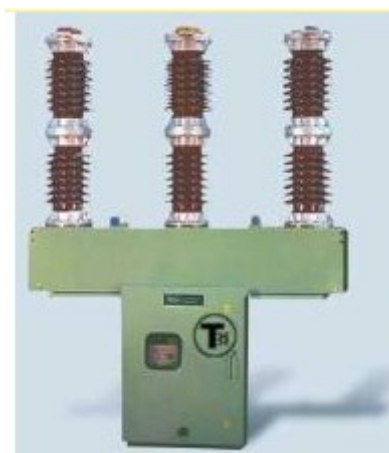


Figura 4: Disjuntor a vácuo até 36 kV (SOLOSTOCKS, 2009).

4.5. Disjuntores a ar comprimido

Disjuntores a ar comprimido são utilizados em todas as faixas de tensão, mas principalmente na alta e extra alta tensão. A extinção do arco elétrico é feita pela liberação do

ar comprimido que o alonga e resfria-o simultaneamente, eliminando. Essa extinção é feita pelo sopro axial do ar comprimido, podendo ser unidirecional ou bidirecional.

Como vantagens, os disjuntores a ar comprimido não apresentam elementos inflamáveis; o meio extintor também é o meio que ativa o mecanismo de acionamento; a capacidade de interrupção e o nível de isolamento podem ser ajustados variando a pressão. Em contrapartida, o sistema de ar comprimido apresenta custo elevado para a geração e para manutenção, além de gerar elevados níveis de poluição sonora. Na figura 5 pode-se verificar um exemplar do disjuntor a ar comprimido.



Figura 5: Disjuntor a ar comprimido de 7,2 a 245 kV (NDS engenharia, 2009).

4.6. Disjuntores a SF₆

Disjuntores a SF₆ são utilizados em média e alta tensão. Esse gás apresenta as seguintes características: não é corrosivo, não é tóxico, não é combustível, é incolor, inodoro e apresenta estabilidade nas suas moléculas. Além disso, por possuir elevada eletronegatividade, apresenta uma grande capacidade de interrupção de correntes elevadas.

Inicialmente foram construídos os disjuntores a dupla pressão, como o próprio nome sugere, nesses equipamentos o gás é armazenado em duas câmaras: um reservatório a alta pressão e outro a baixa pressão (câmara de extinção). No momento em que ocorre a abertura dos contatos e, conseqüentemente, a formação do arco, o gás da câmara de alta pressão é liberado em direção aos contatos (câmara de extinção) onde a pressão é menor, eliminando o arco. Em seguida, o gás é bombeado por um compressor, para o reservatório de alta pressão.

Com o advento dos disjuntores de única pressão, os quais não utilizam compressores, os disjuntores a SF₆ tornaram-se mais simples, viáveis, e confiáveis. Inicialmente, o gás encontra-se num reservatório de baixa pressão, e quando ocorre a abertura dos contatos, o gás é comprimido por um êmbolo solidário ao contato móvel. Este movimento cria um fluxo de gás que tende a eliminar o arco. Além disso, em conformidade a Lei de Pascal, a pressão aumenta com a diminuição do volume, contribuindo também para a extinção.

Para sistemas de tensão mais elevadas são aplicados disjuntores a gás SF₆ de dois ciclos, eles são caracterizados por apresentarem um tempo de interrupção de arco elétrico

muito pequeno para altas correntes de curto-circuito, utilizando apenas dois ciclos na frequência industrial para realizarem a extinção.

Portanto tem-se que os disjuntores a SF_6 apresentam excelentes capacidade de interrupção de correntes de curto-circuito, não são tóxicos e inflamáveis. Em contrapartida, seu custo pode ser proibitivo, principalmente de média tensão (69 kV). Na figura 6 pode-se verificar um exemplar do disjuntor a SF_6 .

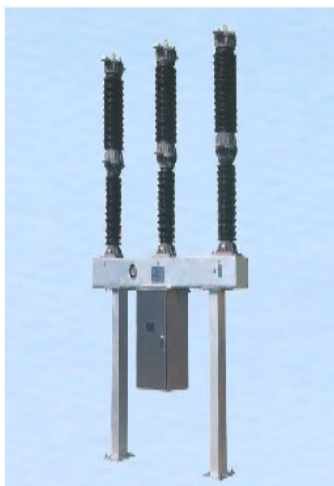


Figura 6: Disjuntor a SF_6 (Alibaba.com, 2009).

4.7. Disjuntores semicondutores

Disjuntores a semicondutores são propostas para o futuro, pois atualmente não existem tais equipamentos em uso nas subestações. Teoricamente, a interrupção de correntes por disjuntores a semicondutores apresenta características quase ideais. Materiais semicondutores podem variar drasticamente a resistência, quando ocorre a passagem da corrente por zero. Outra vantagem é que a energia requerida para a interrupção é quase nula, em contrapartida eles não suportam sobrecargas elevadas e atualmente seriam economicamente inviáveis.

Os principais fatores favoráveis a utilização futura desses equipamentos são: obtenção de condições ideais de manobra, sem provocar sobretensões, a desnecessidade de manutenção dos contatos e da parte mecânica.

Capítulo 5 - Aspectos burocráticos referentes aos disjuntores

5.1. Especificações técnicas

Todo equipamento deve passar por uma especificação técnica, ou seja, quando existe a necessidade de utilização do disjuntor em um determinado sistema, um documento descrevendo-o deve ser obtido e verificado para obter uma aprovação da utilização do mesmo. Este documento contém todas as características de projeto, de ensaio e de aplicação, sendo denominado especificação técnica. Em algumas situações são inseridos na especificação técnica dados comerciais tais como: termo de garantia, prazo de entrega, montagem, comissionamento, entre outros.

5.2. Ensaaios

Os ensaios nos disjuntores estão divididos em duas subclasses: ensaios de tipo e ensaios de rotina.

Os ensaios de tipo são realizados para verificar as características dos disjuntores, dos seus dispositivos de manobra e de seus equipamentos auxiliares. Nestes ensaios os disjuntores são submetidos a elevados esforços térmicos e elétricos, diminuindo assim a sua vida útil. Por isso, geralmente ensaios de tipo são realizados por amostragem.

Após os ensaios deve ser preparado um relatório no qual constam as devidas informações coletadas, resultados e conclusões. Podem-se citar como ensaios de tipo para disjuntores os seguintes procedimentos:

- Ensaio mecânico e climático: todos os elementos do disjuntor são ensaiados separadamente. Eles são submetidos a esforços mecânicos e térmicos e devem suportá-los para que sejam aprovados. Os esforços aos quais os componentes são submetidos são os mesmos que o equipamento deve ser capaz de suportar. Após esse processo devem-se ser listados os seguintes pontos: tempo de fechamento e abertura, simultaneidade de operação dos contatos da câmara de extinção, consumo do circuito de comando e dos dispositivos de disparo, entre outros. O equipamento deve manter as suas condições de funcionamento normais. Os disjuntores são submetidos a diversas condições climáticas tais como: temperatura e umidade variáveis.
- Ensaio de medição de resistência ôhmica do circuito principal: devem ser medidas as resistências dos pólos dos disjuntores na temperatura ambiente e novamente na mesma temperatura após o mesmo ter passado pelo ensaio a altas temperaturas. Diferença não deve ser superior a 20%. Os dados, corrente, temperatura ambiente, entre outros, devem estar presentes no relatório.

- Ensaio dielétrico: são realizados com a finalidade de verificar os níveis de isolamento dos componentes do disjuntor.

Os ensaios de rotina são realizados para verificar o estado em que se encontram os disjuntores. Diferentemente dos ensaios de tipo, estes ensaios não diminuem a vida útil dos equipamentos, podendo ser realizados no próprio local de instalação. Dentre os ensaios de rotina, destacam-se: ensaio de tensão suportável à frequência industrial a seco do circuito principal, de comando e auxiliares; medição da resistência ôhmica do circuito principal; ensaio de funcionamento mecânico e verificações gerais.

Todo um processo de transporte, armazenamento e montagem devem ser realizados pelo receptor para que o equipamento não venha a danificar. Após a instalação dos equipamentos são feitos ensaios para o comissionamento, com a finalidade de observar se houve danos nas etapas de transporte e armazenamento.

Algumas das medidas a serem seguidas para uma correta manutenção de disjuntores são listadas a seguir:

- Em se tratando do circuito principal deve-se inspecionar, regular e renovar os contatos;
- Verificar as condições dos fluidos utilizados para a isolação e a extinção do arco elétrico;
- Manutenção e ajuste do mecanismo de operação;
- Verificação das bobinas, relés, dispositivos de intratavamento, dispositivos elétricos reguláveis, dispositivos de aquecimento e secagem;
- Condições dos mancais e das ligações;
- Verificar as condições dos sistemas de ar comprimido ou hidráulico.

Capítulo 6 - Uma introdução à Tensão de restabelecimento transitório

A tensão de restabelecimento transitório (TRT) é a tensão estabelecida entre os contatos do disjuntor após a abertura dos mesmos.

O cálculo da TRT, geralmente, é realizado baseado num disjuntor ideal, eliminando o arco elétrico, o que não acarreta na perda de confiabilidade dos cálculos. Em alguns casos, como TRT inicial em falta quilométrica o arco deve ser levado em consideração. Esse cálculo é realizado para obter o grau do esforço térmico e elétrico a que o disjuntor será submetido e verificar os aspectos da rede que definem esses esforços.

Os fatores cruciais para a determinação da TRT são: a corrente de pré-abertura, responsável pela definição da recuperação da rigidez dielétrica; a taxa de crescimento da TRT, que deve ser menor que a taxa de recuperação do meio de extinção; e o valor máximo da TRT, que deve ser menor que o valor máximo de rigidez dielétrica.

Para calcular-se a TRT utilizamos a representação de cada componente inserido no sistema com suas respectivas equações diferenciais. Portanto tem-se que quanto mais sofisticado o sistema e detalhado o equipamento, mais complexo será o sistema de equações, o que dificulta os cálculos. Boa parte da teoria de circuitos elétricos é envolvida nestes cálculos, envolvendo desde as equações diferenciais, transformada de Fourier e transformada Z, passando pelos conceitos de equivalente de Thevenin e Norton.

A configuração dos equipamentos componentes do sistema é feita dependendo do grau de confiabilidade que será necessário. Após esse critério, leva-se em consideração o menor custo. Outro fator relevante para a escolha das configurações dos sistemas é a escala de tempo e frequência pretendida para observação.

Capítulo 7 - Manobras críticas

A manobra de cargas capacitivas é freqüentemente utilizada nos sistemas elétricos, ocorrendo quando há a energização e abertura de bancos de capacitores, linhas e cabos em vazio. O estudo desse tipo de manobra é importante, pois são geradas sobretensões e sobrecorrentes, dando-se ênfase à suportabilidade dielétrica.

Antes da abertura de um banco capacitivo, quando o disjuntor encontra-se fechado, observa-se uma variação de tensão nula, em regime permanente entre seus pólos. Porém, após a abertura, a freqüência de oscilação do circuito capacitivo é maior que a freqüência da rede. Assim, a tensão do lado da carga permanece com o valor do instante da interrupção enquanto que a tensão do lado da fonte varia senoidalmente, como pode ser visualizado na figura 7.

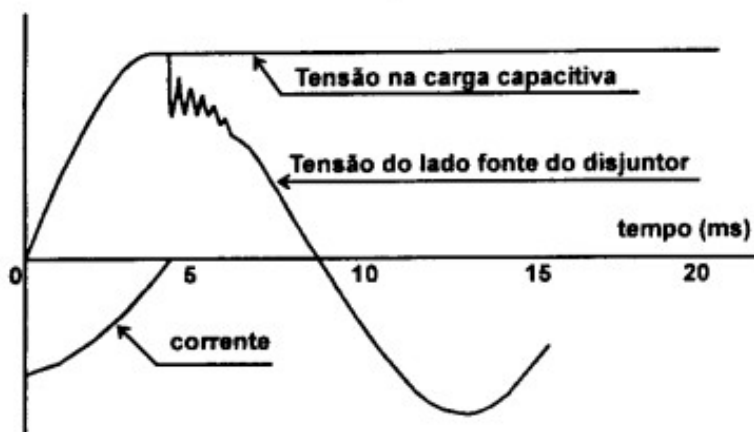


Figura 7: Transitório da tensão do lado da fonte (CARVALHO et al, 1995).

Na energização de um banco capacitivo, ocorre a aproximação mecânica dos contatos do disjuntor. A corrente, inicializada com a formação do arco elétrico que ocorre antes da conexão dos contatos, apresenta um comportamento transitório com elevada amplitude, denominada de corrente de *inrush*. Na figura 8 podemos observar o comportamento da corrente na energização do banco de capacitor.

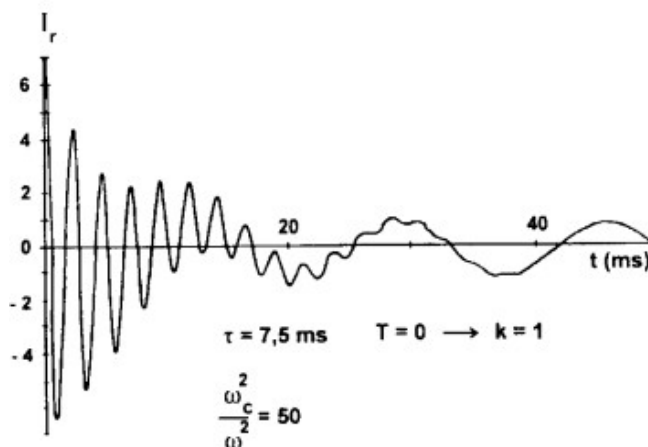


Figura 8: Corrente de energização do banco capacitivo (CARVALHO et al, 1995).

A interrupção de pequenas correntes indutivas é realizada quando ocorrem manobras em motores (partida ou operação em vazio), em transformadores (em vazio ou carga terciária indutiva) e em reatores. A potência destas correntes indutivas muitas vezes não é suficiente para causar a vaporização do óleo mineral, sendo de difícil extinção em disjuntores que empregam este material. Tal processo gera sobretensões de manobra, portanto há a necessidade de obter artifícios para limitação da sobretensão, quando não se tem a certeza que o equipamento tem a possibilidade de suportar tais esforços.

Para assegurar tal limitação, geralmente são utilizados pára-raios próximo ao equipamento manobrado. Porém algumas medidas conservadoras devem ser tomadas, pois eles podem não proteger adequadamente os equipamentos a serem manobrados em algumas situações, tais como: uma distribuição acentuada e não uniforme da tensão ao longo do enrolamento ocasionando sobre-solicitação em certos pontos, e ocorrência de ressonância interna, no enrolamento, para frequências importantes do espectro.

Capítulo 8 - Sobrecargas e a teoria do arco elétrico

O volume de cargas nos sistemas elétricos é sempre crescente. Devido à ampliação dessa demanda, alguns equipamentos devem ser trocados, pois os mesmos não respondem de maneira eficiente quando são solicitados, principalmente em horários de pico e em situações de emergência.

Sobrecarga pode ser definida como qualquer corrente superior a nominal do equipamento que o mesmo venha a conduzir num determinado período de tempo. Quando o disjuntor conduz essa corrente elevada por um longo período de tempo, no qual a temperatura é estabilizada, denomina-se de sobrecarga contínua; quando o intervalo de tempo de condução é pequeno e a temperatura não se estabiliza, tem-se sobrecarga de curta duração.

8.1. Sobrecargas contínuas

A máxima temperatura ambiente estipulada para os disjuntores é de 40 °C. Como na maior parte do tempo esses equipamentos operam a uma temperatura ambiente inferior a esse limite, o seu carregamento térmico em operação geralmente não atinge o limite de temperatura para os materiais componentes, não diminuindo assim a sua vida útil. Pode-se determinar matematicamente a corrente de sobrecarga suportável pelo equipamento através da equação (1):

$$I_C = I_N \times \theta_{MAX}^{-\theta_a} 1n \Delta\theta_N, \quad (1)$$

em que:

I_C é a corrente de sobrecarga contínua admissível;

I_N é a corrente nominal da placa do equipamento;

θ_{MAX} é a temperatura máxima admissível do material;

θ_a é a temperatura ambiente;

n é o expoente de sobrecarga, para disjuntores seu valor varia entre 1,6 e 2, o valor normalmente utilizado é 1,8;

$\Delta\theta_N$ é a variação de temperatura máxima admissível do material ($\Delta\theta_N = \theta_{MAX} - 40$ °C).

Na figura 9 pode-se verificar a razão entre a corrente de sobrecarga e a corrente nominal do equipamento em função da variação de temperatura máxima admissível do material para várias temperaturas ambientes. Conclui-se que com a elevação da temperatura máxima admissível pelo material o ganho (I_C/I_N) diminui.

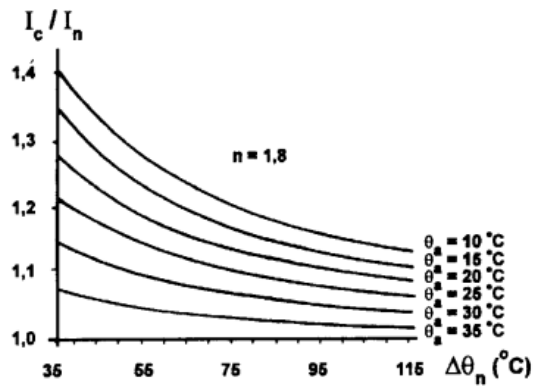


Figura 9: Ganho de corrente em função *versus* variação de temperatura máxima (CARVALHO et al, 1995).

8.2. Sobrecargas de curta duração

Na energização de um equipamento, a corrente influenciada na sua temperatura pode ser estimada pela equação (2):

$$\Theta_1(t) = \Delta\theta \times (1 - e^{-t/\tau}) + \theta_0 \quad (2)$$

em que:

Θ_1 é a temperatura durante o processo de estabilização;

$\Delta\theta$ é a variação de temperatura até a nova estabilização;

θ_0 é a temperatura inicial do equipamento;

t é o tempo a partir da passagem da corrente pelo equipamento até a estabilização da temperatura;

τ é a constante de tempo térmica do material.

Portanto tem-se que na sobrecarga de curta duração, com o aumento da corrente a variação de temperatura é pequena. A equação (3) permite ter-se uma idéia quantitativa dessa variação.

$$I_t = I_n \ln \left[1 + (40 - \theta_a) \Delta\theta N \times (1 - e^{-t/\tau}) \right]^{1/n} \quad (3)$$

em que:

I_t é a corrente de sobrecarga de curta duração.

Na figura 10 pode-se observar a variação da temperatura com a mudança do valor da corrente.

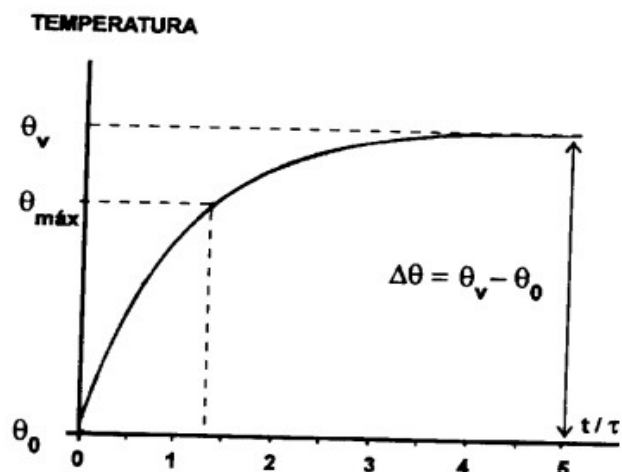


Figura 10: Variação da temperatura com a mudança da corrente (CARVALHO et al, 1995).

Na tabela 1 pode-se encontrar os valores dos ganhos de correntes para as sobrecargas de curta duração, para um expoente de sobrecarga igual a 1,8.

Tabela 1. Relação das variáveis para uma sobrecarga de curta duração, com n=1,8 (CARVALHO et al, 1995).

n	t/τ	Temperatura ambiente (°C)	Δθ _n (°C)									
			35	40	50	60	65	75	80	90	115	140
1,8	0,5	10	1,90	1,81	1,67	1,58	1,54	1,48	1,45	1,41	1,33	1,27
		15	1,78	1,70	1,58	1,49	1,46	1,41	1,38	1,35	1,28	1,23
		20	1,65	1,58	1,48	1,41	1,38	1,33	1,31	1,28	1,23	1,19
		25	1,51	1,45	1,37	1,31	1,29	1,26	1,24	1,22	1,17	1,14
		30	1,35	1,31	1,26	1,22	1,20	1,18	1,17	1,15	1,12	1,10
	1,0	10	1,61	1,54	1,45	1,38	1,36	1,31	1,30	1,27	1,21	1,18
		15	1,52	1,47	1,38	1,32	1,30	1,27	1,25	1,22	1,18	1,15
		20	1,43	1,38	1,31	1,27	1,25	1,22	1,20	1,18	1,14	1,12
		25	1,33	1,30	1,24	1,20	1,19	1,16	1,16	1,14	1,11	1,09
		30	1,23	1,20	1,16	1,14	1,13	1,11	1,11	1,09	1,07	1,06
	2,0	10	1,47	1,41	1,34	1,29	1,27	1,24	1,22	1,20	1,16	1,13
		15	1,40	1,35	1,29	1,24	1,23	1,20	1,19	1,17	1,13	1,11
		20	1,33	1,29	1,24	1,20	1,18	1,16	1,15	1,14	1,11	1,09
		25	1,25	1,22	1,18	1,15	1,14	1,12	1,12	1,10	1,08	1,07
		30	1,17	1,15	1,12	1,10	1,10	1,08	1,08	1,07	1,05	1,05

Na tabela 2 observam-se tais variáveis para as sobrecargas de curta duração, para um expoente de sobrecarga igual a 2.

Tabela 2: Relação das variáveis para uma sobrecarga de curta duração, com n=2 (CARVALHO et al, 1995).

2,0	0,5	10	1,78	1,70	1,59	1,51	1,47	1,42	1,40	1,36	1,29	1,24
		15	1,69	1,61	1,51	1,43	1,41	1,36	1,34	1,31	1,25	1,21
		20	1,57	1,51	1,42	1,36	1,33	1,30	1,28	1,25	1,20	1,17
		25	1,45	1,40	1,33	1,28	1,26	1,23	1,22	1,19	1,15	1,13
		30	1,31	1,28	1,23	1,19	1,18	1,16	1,15	1,13	1,10	1,09
	1,0	10	1,53	1,48	1,40	1,34	1,32	1,28	1,26	1,24	1,19	1,16
		15	1,46	1,41	1,34	1,29	1,27	1,24	1,22	1,20	1,16	1,13
		20	1,38	1,34	1,28	1,24	1,22	1,19	1,18	1,16	1,13	1,01
		25	1,30	1,26	1,21	1,18	1,17	1,15	1,14	1,12	1,10	1,08
		30	1,20	1,18	1,15	1,12	1,12	1,10	1,09	1,08	1,07	1,05
	2,0	10	1,41	1,37	1,30	1,26	1,24	1,21	1,20	1,18	1,14	1,12
		15	1,35	1,31	1,26	1,22	1,20	1,18	1,17	1,15	1,12	1,10
		20	1,29	1,26	1,21	1,18	1,16	1,14	1,14	1,12	1,10	1,08
		25	1,22	1,20	1,16	1,14	1,13	1,11	1,10	1,09	1,07	1,06
		30	1,15	1,14	1,11	1,09	1,09	1,07	1,07	1,06	1,05	1,04

Quando a temperatura no interior do equipamento supera a máxima admitida pelo mesmo, fatalmente, ocorrerá um sobreaquecimento dos materiais componentes ocasionando a diminuição da vida útil desse equipamento. Em uma situação limítrofe, pode acontecer a explosão ou o derretimento das partes sujeitas às altas temperaturas.

8.3. Teoria do arco elétrico

O arco elétrico é formado quando ocorre uma manobra, abertura ou fechamento, no disjuntor. Portanto, seu estudo é de fundamental importância para a determinação dos esforços térmicos e elétricos que os equipamentos devem estar preparados para suportar.

Diversos são os estudos sobre o arco elétrico, por motivo dos diversos tipos de surtos, como por exemplo: o curto-circuito que gera uma elevada corrente ou uma interrupção de pequenas correntes indutivas que geram sobretensões elevadas. Não se chegou a um modelo aplicável para simular seu comportamento no instante da interrupção, pois esses estudos estão focados na passagem da corrente pelo zero, pois essa será a área que definirá o sucesso ou fracasso da interrupção do arco elétrico.

Os arcos são classificados como: arco a alta pressão e arco a vácuo. Os arcos a alta pressão são aqueles gerados em qualquer meio onde a pressão é superior a 100 kPa. Eles ocorrem nos disjuntores a sopro magnético, a ar comprimido, a SF₆ e a óleo.

Os arcos a vácuo são formados nos disjuntores a vácuo, onde a pressão não ultrapassa os 13 mPa. Os arcos a alta pressão, surgem em uma variedade maior de equipamentos, recebendo uma atenção maior.

A formação do arco ocorre com o início da abertura ou fechamento dos contatos do disjuntor. A densidade da corrente aumenta bastante devido à diminuição da área de passagem, aumentando a temperatura dos contatos. Nesse momento ocorre a ionização do meio isolante devido ao aumento da temperatura, bem como a atividade de choques entre os íons acelerados pelo campo elétrico entre os contatos.

Todo disjuntor é projetado para que extingua o arco, sem que haja reacendimento, ou seja, os terminais dos contatos devem ser capazes de suportar a tensão que lhe é imposta pelo

sistema. Quando ocorre o fenômeno de reacendimento do arco elétrico, a corrente voltará a se estabelecer pelo meio dielétrico. Esse fenômeno pode ocorrer devido à temperatura elevada ou a falha do meio dielétrico.

A reignição é um reacendimento do arco elétrico que ocorre até um quarto de ciclo após a passagem da corrente por zero, independentemente da causa térmica ou elétrica. Na figura 11 pode-se verificar os fenômenos da reignição e reacendimento.

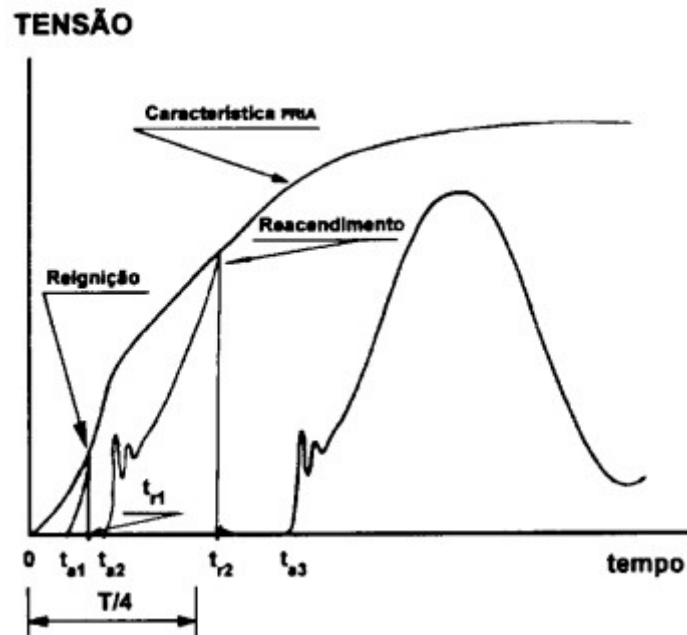


Figura 11: Fenômenos de reignição e reacendimento do arco elétrico (CARVALHO et al, 1995).

Como conseqüências destes fenômenos podem-se citar elevadas sobretensões, incluindo descargas para a terra, podendo gerar a descarga para a terra danificando assim outros equipamentos.

Capítulo 9 - Normas relativas a disjuntores.

NBR 7118 – Disjuntores de alta tensão. As características nominais a serem especificadas são:

- Tensão nominal: que é definida como a tensão entre fases que o disjuntor é designado. Os valores normalizados pela norma NBR 7118 são: 7,2; 15; 24,2; 36,2; 72,5; 145; 242; 362; 460; 550; 800 kV. Quando os sistemas de 23 kV e 34,5 kV exigirem tensões nominais de seus disjuntores superiores a 24,2 kV e 36,2 kV, respectivamente, deverão ser utilizadas as tensões nominais de 25,8 kV e 38 kV;
- Frequência nominal: A frequência nominal dos disjuntores de acordo com a norma 7118 é 60 Hz;
- Corrente nominal: O valor da corrente nominal deve ser escolhido entre os seguintes valores: 400, 630, 800, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000 e 6300 A.;
- Nível de isolamento nominal;
- Capacidade de interrupção nominal em curto-circuito;
- Tempo de interrupção nominal;
- Capacidade de estabelecimento nominal em curto-circuito;
- Corrente nominal suportável de curta duração;
- Requisitos para o religamento rápido;
- Tensão de restabelecimento;
- Tensão de restabelecimento transitória.

NBR 5034 – Buchas para tensões alternadas superiores a 1 kV;

NBR 5389 – Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Método de ensaio;

NBR 5456 – Eletricidade geral – Terminologia;

NBR 5459 – Manobra, proteção e regulação de circuitos – Terminologia;

NBR 5460 – Sistemas elétricos de potência – Terminologia;

NBR 6403 – Números normalizados – Procedimento;

NBR 6936 – Técnicas de ensaios elétricos de alta tensão – Procedimentos;

NBR 6977 – Proteção radiológica – Regras básicas de proteção contra Raios X para fins médicos – Procedimentos;

NBR 7034 – Materiais isolantes elétricos – Classificação térmica – Classificação;

NBR 7102 – Ensaios sintéticos em disjuntores de alta tensão – Procedimento;

NBR 7876 – Medição de RI na faixa de 0,15 a 30 MHz em linhas e equipamentos de alta tensão – Método de ensaio;

NBR 11902 – Hexafluoreto de enxofre – Especificação;

NBR 12160 – Hexafluoreto de enxofre – Verificação das propriedades – Métodos de ensaio;

NBR 12318 – Hexafluoreto de enxofre – Procedimentos;

CNP-18/85 – Óleo mineral isolante para transformadores e equipamentos de manobra;

IEC-480 – Guide to the checking of sulphur hexafluoride (SF₆) taken from electrical equipment.

Capítulo 10 - Ensaio realizados no laboratório de alta tensão

No laboratório de alta tensão, da Universidade Federal de Campina Grande, foram realizados alguns ensaios para medir a resistência estática dos contatos do disjuntor, a impedância do óleo isolante situado no interior do disjuntor e para verificar a diferença da formação do arco elétrico em diferentes meios de extinção. A seguir serão explicados os seguintes experimentos.

10.1. Medição da resistência estática dos contatos do disjuntor

Para realizar a medição da resistência estática dos contatos do disjuntor utilizou-se uma fonte de tensão de 2 V. Esta fonte alimentou a Ponte Thompson (PT), que por sua vez é um equipamento capaz de medir resistências da ordem de micro ohms. As pontas de prova da PT foram conectadas aos terminais do disjuntor, como pode ser verificado na figura 12.

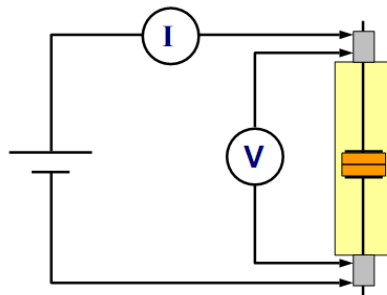


Figura 12: Esquema relacionando a ponte Thompson e os contatos do disjuntor.

Foram realizados os seguintes procedimentos:

- i. Foi estabelecida a alimentação da PT com uma tensão de 2 V;
- ii. Montou-se o arranjo conforme a figura 13;
- iii. A escala da resistência da ponte foi ajustada para a magnitude desejada ($10^{-3} \Omega$);
- iv. O botão correspondente ao ajuste grosso foi pressionado, enquanto verificava-se se houve variação no visor (galvanômetro). Caso esta variação ocorra, as resistências de ajuste da PT são variadas, a fim de obter-se o equilíbrio da ponte;
- v. A partir do momento em que o ponteiro do visor se aproxima do zero, o botão de ajuste fino deve ser pressionado juntamente com o do grosso, e o procedimento (iv) é repetido até que o ponteiro do galvanômetro esteja zerado (ponte em equilíbrio).

Para obter o valor da resistência estática do disjuntor, basta multiplicar o valor obtido através das quatro resistências internas à PT pela magnitude aplicada, e ao final multiplicar por 10 (dado fornecido pela ponte);

Para realizar a medição dos outros contatos do disjuntor os mesmos procedimentos devem ser realizados. Pôde-se concluir com esse experimento que a resistência dos contatos é muito pequena (36,3 m Ω , 23,1 m Ω e 121,5 m Ω), no disjuntor ideal essa resistência é nula, pois não deseja-se uma diferença de potencial entre os contatos fechados do disjuntor.

10.2. Medição da impedância do óleo isolante

A impedância do óleo isolante situado no interior do disjuntor pode ser obtida com o auxílio de um megômetro, aparelho utilizado para medir resistências elevadas. Esse experimento é realizado com os contatos do disjuntor abertos, os contatos do megômetro devem estar conectados aos terminais do disjuntor. O resultado obtido é a medida da impedância do óleo retido em cada reservatório.

Pode-se concluir com esse experimento que a resistência do material isolante deve ser o maior possível.

10.3. Capacidade de extinção de arco do ar e do óleo mineral

Com a finalidade de mostrar a diferença da capacidade de extinção de um arco elétrico, foi feito um experimento utilizando uma descarga em dois meios, o ar e o óleo. Foram utilizados os seguintes materiais:

- 01 VARIAC;
- 01 transformador 220/1910 V, $X_0 = 0,358$ pu (75 °C), S = 1,15 kVA e 60 Hz;
- 01 chave a óleo;
- 01 chave a ar.

O VARIAC foi conectado ao lado de baixa tensão do transformador, e o lado de alta foi conectado à chave na qual se desejava observar a descarga. Para que a descarga ocorra, basta elevar a tensão no VARIAC. O esquema da montagem pode ser visualizado na figura 13.

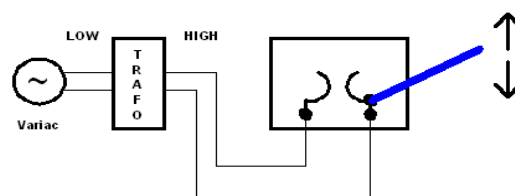


Figura 13: Esquema para ensaios de extinção de arcos elétricos o ar e no óleo.

Pôde-se concluir com esse experimento que o arco elétrico é extinto de maneira diferente em cada meio, sendo um mais eficiente do que outro. Neste caso, o óleo demonstrou ser mais eficiente.

Considerações Finais

Com esse trabalho foi possível verificar-se que existe todo um conjunto de normas regendo a aplicação dos disjuntores nos sistemas elétricos. Pôde-se observar ainda as várias técnicas de ensaios, bem como os componentes elementares e complementares desses equipamentos. Ainda, destacaram-se as diversas técnicas de extinção de arco, e os materiais que estas empregam.

Assuntos relacionados aos disjuntores também foram apresentados no decorrer do texto tais como: tensão de restabelecimento transitória, sobrecarga, arco elétrico, entre outros.

Portanto, podemos verificar que esse relatório contém informações essenciais no que se diz respeito ao equipamento disjuntor, e pode ser utilizado como primeira bibliografia por pessoas que estão começando a lidar com o assunto.

Referências bibliográficas:

ALIBABA.COM. Disponível em: <<http://portuguese.alibaba.com/product-gs/sf6-circuit-breaker-207615643.html>>. Acesso em: 10 dez. 2009, 14:32.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 07118: Disjuntores de Alta Tensão. Rio de Janeiro, 1994.

CARVALHO, A. C. C. E OUTROS. Disjuntores e Chaves – Aplicações em sistemas de potência. Furnas – Editora da Universidade Federal Fluminense, 1995.

DUTRA FILHO, Getúlio Delano. Fundamentos de Proteção e comando. CEFET-RS. Pelotas, 2008.

EQUIPAMENTOS ELÉTRICOS; Especificação e aplicação em subestações de alta tensão. Rio de Janeiro: FURNAS, 1985.

FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO (FEUP), Aulas 0506 Disponível em: <http://paginas.fe.up.pt/~jrf/aulas0506/sobreintensidade/resumo_sp.pdf>. Acesso em: 10 dez. 2009, 14:48.

NDS ENGENHARIA, Disponível em: <<http://www.ndsengenharia.com.br/servicos.htm>>. Acesso em: 10 dez. 2009, 14:27.

SOLOSTOCKS. Disponível em: <<http://www.solostocks.com.br/venda-produtos/eletricidade-equipamentos-eletricos/protecao-eletrica/disjuntor-pvo-tripolar-sprecher-hp-306-205296>>. Acesso em: 10 dez. 2009, 14:24.

SOLOSTOCKS Disponível em: <<http://www.solostocks.com.br/venda-produtos/eletricidade-equipamentos-eletricos/protecao-eletrica/disjuntores-a-vacu-ate-36kv-73172>>. Acesso em: 10 dez. 2009, 14:30.