

DESEMPENHO DOS PÁRA-RAIOS NOS SISTEMAS
DE TRANSMISSÃO

Tadeu da Mata Medeiros Branco

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNI
VERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECES
SÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc).

Dr. JOHN ERNEST JONES (Ph.D)
- Orientador -

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL

NOVEMBRO - 1973



B816d Branco, Tadeu da Mata Medeiros.
Desempenho dos pára-raios nos sistemas de transmissão /
Tadeu da Mata Medeiros Branco. - Campina Grande, 1973.
136 f.

Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade
Federal da Paraíba, 1973.
"Orientação: Prof. Dr. John Ernest Jones".
Referências.

1. Pára-raios. 2. Sistemas de Transmissão. 3. Sistemas
de Potência. 4. Ciências - Dissertação. I. Jones, John
Ernest. II. Universidade Federal da Paraíba - Campina
Grande (PB). III. Título

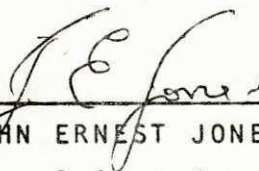
CDU 616.316.93(043)

DESEMPENHO DOS PÁRA-RAIOS NOS SISTEMAS
DE TRANSMISSÃO


Tadeu da Mata Medeiros Branco

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS (M.Sc).


Aprovado por:



JOHN ERNEST JONES (Ph.D)
- Orientador -



JOOST PIETER REY (M.Sc)



Dr. ANDRÉ DIAS DE ARRUDA FALCÃO

CAMPINA GRANDE
ESTADO DA PARAÍBA - BRASIL
NOVEMBRO - 1973

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Quero deixar expresso, o meu mais sincero agradecimento a todos aqueles que de uma maneira direta ou indireta colaboraram para a realização deste; em especial,

- ao Corpo Administrativo dos Cursos de Pós-Graduação desta Escola Politécnica;
- aos meus professores, durante os Cursos de Pós-Graduação;
- ao Dr. John Ernest Jones, pela idêia deste trabalho; bem como pelo seu apoio e firme orientação durante a realização do mesmo;
- ao Professor Joost Pieter Rey, pela ajuda que muitas vezes prestou, no decorrer deste trabalho;
- ao Dr. André Dias de Arruda Falcão, pela sua participação na Comissão Examinadora.

R E S U M O

O objetivo deste trabalho é mostrar de uma maneira geral, o comportamento dos pára-raios quando aplicados em um sistema, com a finalidade de reduzir os surtos que caminham para a subestação. Considerações práticas na sua aplicação; características construtivas e testes são aqui apresentados.

A B S T R A C T

The objective of this work, is to show in a general manner, the performance of the lightning arresters when a simulated condition is applied on the systems, in order to reduce the surges which travel to the substations. Practical considerations in its application; constructive characteristics, and tests are here showed.

APÊNDICE ANOMENCLATURA E SIMBOLOGIA

ASA	- American Standard Association
AEP	- American Electric Power Company
ASEA	- Allmänna Svenska Elektriska Aktiebolaget
ANACOM	- Transient System Analyzer
BREAKDOWN	- Valor de tensão ou corrente de descarga
BIL	- Basic Insulation Level
E_p	- Eficiência de proteção
EHV	- Tensão Extra Elevada, variando de 245 a 765 KV
EDA	- Electric Differential Analyzer
FLASHOVER	- Valor da tensão disruptiva
FOLLOW-CURRENT..	- Corrente subsequente a descarga
GRADING-RESISTOR-	Resistor de nivelamento
IEC	- International Electrotechnical Commission
LTT	- Line Time Travel (tempo para a onda atravessar a linha de transmissão)
LIGHTNING SURGE.-	Surto devido a descarga de raio
NBI	- Nível Básico de Isolamento
NEMA	- National Electric Manufacturing Association
PR	- Pára-Raios (Lightning Arresters)
POWER SOURCE	
FREQUENCY ...	- Frequência de operação do sistema (60 Hz)

- R_f - Resistência de falha
- RISE TIME- Taxa de crescimento
- SPARKOVER- Valor da tensão disruptiva
- SWITCHING SURGE.- Surto devido a operação de chaveamento no sistema
- TNA- Transient Network Analyzer
- UHSR- Religação com ultra-alta velocidade
- V_{FN} - Tensão fase terra ou fase neutro do sistema
- V_{FF} - Tensão nominal do sistema
- X_0 - Reatância de seqüência zero
- X_1 - Reatância de seqüência positiva
- X_2 - Reatância de seqüência negativa
- Z_0 - Impedância de seqüência zero
- Z_1 - Impedância de seqüência positiva
- Z_2 - Impedância de seqüência negativa

I N D I C E

Capítulo 1

INTRODUÇÃO	1
------------------	---

Capítulo 2

SOBRETENSÕES NOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 - Introdução	4
2.2 - Tipos de Surtos	4
2.3 - Mecanismo de Formação de Raio	6
2.4 - Tipos de Sobretensões devido a Queda de Raio	8
2.5 - Característica da Onda Padrão de Impulso	9
2.6 - Aterramento dos Sistemas	10
2.7 - Dispositivo de Proteção as Sobretensões	12
2.8 - Blindagem Contra as Descargas Diretas	15

Capítulo 3

ESTUDO DOS PÁRA-RAIOS

3.1 - Introdução	19
3.2 - Características Definíveis em um PR	19
3.3 - Tipos de PR	23
3.4 - Modo de Operação dos PR	25
3.5 - Eficiência de Proteção Assegurada por um PR	27
3.6 - Determinação da Tensão Nominal do PR	28
3.7 - Aplicação de PR em Sistema de Distribuição	32
3.8 - Determinação da Tensão Nominal de um PR a ser aplicado em Sistema de EHV	35
3.9 - Localização e Aterramento dos PR	38
3.10 - Contadores de Descargas através dos PR	39

Capítulo 4

COMPORTAMENTO DOS PÁRA-RAIOS NA COORDENAÇÃO DOS ISOLAMENTOS

4.1 - Introdução	42
4.2 - Fatores que Contribuem para uma Perfeita Coordenação	42
4.3 - Nível Básico de Isolamento	42
4.4 - Considerações na Determinação do NBI do Transformador	45
4.5 - Coordenação na Proteção de Transformadores	45
4.6 - Considerações a serem tomadas na Determinação do Nível de Isolamento adequado para um Sistema	47
4.7 - Coordenação de Isolamento em EHV	51

Capítulo 5

CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS NA APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS

5.1 - Introdução	58
5.2 - Distribuição dos Equipamentos na Subestação, e Atenuação sofrida pela Onda	58
5.3 - Seleção da Tensão Nominal do PR	59
5.4 - Seleção do Nível de Isolamento do Transformador ..	62
5.5 - Exemplo Prático	64

Capítulo 6

CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS PÁRA-RAIOS

6.1 - Introdução	69
6.2 - Constituição Interna dos PR	69
6.3 - Efeito dos Capacitores nos PR	86
6.4 - Selagem dos PR	87

Capítulo 7

MODELO ANALÓGICO DE UM PÁRA-RAIOS

7.1 - Introdução	88
7.2 - Modelo de Circuito Empregado em Laboratório, Visando Reproduzir as Curvas de Operação do PR no Sistema Real	89
7.3 - Considerações para a Modelagem de PR	92
7.4 - Comparação Entre as Formas de Tensão nos Testes de Laboratório e com o Modelo Analógico	98

7.5 - Modelo Matemático do Gap Limitador de Corrente ...	99
--	----

Capítulo 8

TESTES NOS PÁRA-RAIOS

8.1 - Introdução	104
8.2 - Descrição de Novo Teste	105
8.3 - Energia Acumulada Durante Operação de Chaveamento no Sistema	106
8.4 - Cálculo da Energia Armazenada no Sistema	107
8.5 - Circuito Empregado para o Teste da ASA	109
8.6 - Teste de Descarga em Sistema de 345 KV	112
8.7 - Efeito da Contaminação da Descarga Disruptiva dos PR	124

Capítulo 9

DISCUSSÕES E SUGESTÕES	128
BIBLIOGRAFIA	131

1. INTRODUÇÃO

Com o advento atual de sistemas de transmissão que operam em tensões cada vez elevadas, constituindo as Extra Altas Tensões (EHV) e Ultra Altas Tensões (UHV), os fabricantes de dispositivos de proteção, foram obrigados a construir tais equipamentos, dotados de novas características que pudessem assegurar um nível de proteção bastante alto aos equipamentos que devem proteger.

Anos de estudos e pesquisas, foram realizados no propósito de unir tanto a parte econômica quanto a parte de segurança na fabricação destes dispositivos, pois; com os novos sistemas de transmissão operando naquelas classes de tensão, o custo de montagem do projeto se torna elevado, devido principalmente ao valor do transformador que necessita ter uma classe de Nível Básico de Isolamento (NBI) muito alto, provocando o encarecimento do projeto, uma vez que o custo da aquele, varia proporcionalmente com o valor do seu NBI, conforme mostra a Figura 1.1.

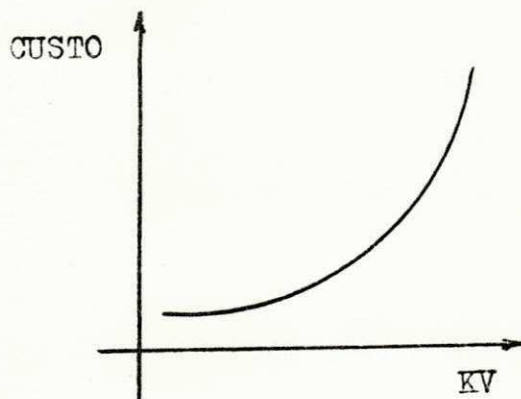


Fig. 1.1 - Variação do preço do transformador, em função do NBI e da tensão de operação.

Desta forma, durante estes anos de estudo, procurou-se construir dispositivos de proteção tais como: procu
pâra-

raios, desviadores de surto, e outros, proporcionando um valor de tensão residual cada vez menor, a fim de melhorar cada vez mais as características protetivas, oferecendo uma eficiência de proteção (E_p) muito maior ao equipamento a ser protegido, a tal ponto que se possa adquirir por exemplo um transformador para operar em uma determinada tensão, mas com sua classe de isolamento reduzida alguns valores abaixo, tornando mais acessível o custo do projeto.

Com o emprego dos gaps limitadores de corrente, nos modernos descarregadores, foi possível também reduzir o valor da tensão nominal dos mesmos, para uma determinada classe de tensão.

Ainda com relação ao fator econômico, procura-se sempre utilizar o neutro do sistema aterrado solidamente, pois como veremos no Capítulo 4, favorecem o emprego de descarregadores com tensão nominal, mais baixo do que o valor que seria empregado com o neutro do sistema isolado. Em termos quantitativos é comum se empregar para o primeiro caso, descarregadores com tensão nominal de 80% da tensão nominal do sistema e, no segundo caso 100%. Por outro lado o descarregador de valor mais baixo, admitirá uma tensão residual menor, em contraste com o de valor maior, oferecendo uma grande margem entre a sua característica protetiva e a do transformador, que representa o elemento principal do sistema.

No capítulo referente à aplicação prática, mostrar-se-á a importância do descarregador ficar o mais próximo quanto possível do transformador.

Relacionando-se à Coordenação dos Isolamentos, o estudo de proteção do sistema deve ser feito tomando base em uma tensão de 300 KV. Para sistemas que operam em classe de tensão menor que este valor base, deve-se proteger os equipamentos contra as sobretensões devido a descargas de raios e,

em sistemas que operam acima deste valor base, deve-se con
si
derar as sobretensões devido a operações de chaveamento na
linha, que correspondem aos surtos de tensão interna.

Em sistemas de EHV e UHV, atenção especial é dada
para os surtos devido a chaveamento na linha, tal como abertu
ra e fechamento de chaves seccionadoras produzindo sobreten
sões da ordem de 1a3 vezes a tensão nominal do sistema.

A aplicação de pãra-raios em sistemas de EHV e UHV,
conduziu para um aumento nas exigências tãrmica do mesmo. De
vido ao fator econãmico procurou-se uma reduçãõ nas caracte
rísticas de tensão disruptiva e tensão de descarga, aumentan
do a probabilidade de operação e também admitindo uma maior
fluência de corrente durante a operação de descarga.

Neste trabalho, procura-se mostrar o resultado des
tas pesquisas, procurando-se aplicar os mesmos para serem usa
dos em sistemas reais.

2. SOBRETENSÕES NOS SISTEMAS DE POTÊNCIA

2.1 - Introdução

Entende-se como sobretensão (overvoltages) qualquer tensão acima do valor nominal de operação do sistema, que venha por em risco o isolamento dos equipamentos a ele conectado.

2.2 - Tipos de Surtos

De acordo com sua natureza, os surtos podem ser classificados em:

- devido à sobretensões na frequência do sistema;
- devido à sobretensões provocada por operações de chaveamentos no sistema;
- devido à descargas atmosféricas.

Os dois últimos são considerados de origem externa e o primeiro de origem interna.

2.2.1 - Sobretensões à Frequência do Sistema

São provocadas devido ao funcionamento não apropriado dos reguladores de velocidade dos grupos geradores, ou condições de defeito desbalanceados para a terra.

Este tipo de sobretensão, é protegido com relês do tipo sobretensão (overvoltage relay), os quais operam dentro de uma faixa de 110 a 150% da tensão máxima de operação do sistema.

2.2.2 - Sobretensões devido à Descargas Atmosféricas

Para sistemas que operam com tensão abaixo de 300 KV, as sobretensões devido a descargas atmosféricas constituem o fator principal no estudo da proteção de sistema. Para isto, é importante conhecer como são efetuadas as descargas de raio.

2.2.3 - Sobretensões devido a Operações de Chaveamento no Sistema

São provocadas pela abertura ou fechamento de disjuntores, atingindo um valor que varia entre 1 a 3 vezes o valor de tensão máxima do sistema. Em alguns tipos de sistemas, este valor pode atingir a 5 vezes. Em sistemas que operam acima de 300 KV, este tipo de sobretensão predomina quando no estudo da proteção do sistema. É possível reduzir-se a amplitude deste surto, com a aplicação de resistores nos contatos dos disjuntores, reduzindo o surto para 2.7 da tensão nominal do sistema. Na Figura 2.1 abaixo tem-se o oscilograma que representa a sobretensão no sistema devido a abertura de um disjuntor no tempo t_1

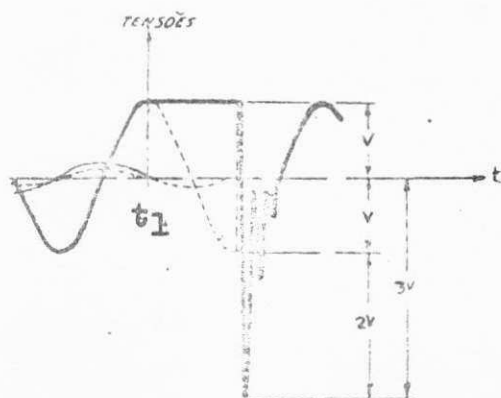


Fig. 2.1 - Oscilograma da abertura do disjuntor que alimenta uma longa linha de A.T. sem carga; t_1 é o instante no qual se dá a abertura do disjuntor. Como se vê, a sobretensão atingiu 3 vezes a tensão V do sistema

2.3 - Mecanismo de Formação de Raio

Elevados gradientes de potencial, são constituídos entre uma nuvem eletricamente carregada e a terra, alcançando o valor de 50 a 2500 V/Cm produzindo uma diferença de potencial da ordem de 10 a 1000 M.V. (1 - 3)

A partir de um ponto que se chama centro elétrico da nuvem, é estabelecido uma descarga piloto, devido a ionização do ar, que abre caminho para as descargas subsequentes, Figura (2.a), Após esta descarga, é formada uma descarga da terra para a nuvem, com o nome de descarga de retorno, Figura (2.b). Novamente são estabelecidas correntes dentro da nuvem e novas descargas pilotos são constituídas na direção da terra, provocando novas descargas de retorno, Figura (2.c), que são as grandes responsáveis pelos efeitos do raio. O raio é então, um conjunto de pares de descarga, compreendendo uma descarga piloto e uma de retorno, separadas por um tempo de aproximadamente igual a $30.000 \mu s$.

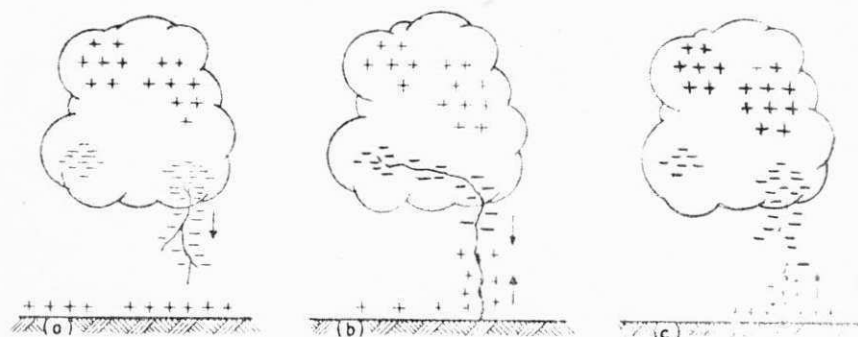


Fig. 2.2 - Etapas sucessivas do raio

Deve-se considerar que uma nuvem carregada, passando as proximidades de uma linha de transmissão, cria um campo eletrostático entre a nuvem e a terra e, cargas elétricas com polaridade contrária as da nuvem, são induzidas na terra e condutores da linha, conforme mostra-se na Figura 2.3.

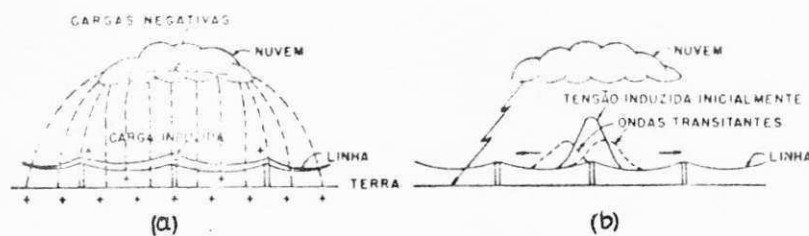


Fig. - 2.3 Campo elétrico criado por ação da nuvem, induzindo cargas na terra e na linha de transmissão. (a). Tensão induzida em uma linha de transmissão por um colapso do campo elétrico da nuvem, descarregada pelo raio que não atingiu a linha. (b).

As cargas que se acumulam nos condutores da linha, tendem a caminhar nas duas direções, produzindo surtos de corrente.

2.4 - Tipos de Sobretensão devido a Queda de Raio

Sobretensões desta natureza, podem ser divididas em três categorias. (4)

2.4.1 - Sobretensões Induzidas

São constituídas por uma descarga atmosférica nas proximidades dos condutores de fase, provocando um valor de sobretensão da ordem de 400 KV em cada fase com uma taxa de crescimento da ordem de 50 KV/ μ s. Este tipo de sobretensão é responsável pela interrupção de serviço em sistemas de 22 KV e abaixo, sendo desprezível para tensões acima de 66 KV.

2.4.2 - Sobretensões devido a Descarga Direta

São produzidas pela incidência direta de um raio nos condutores de fase, ou devido a faiscamento do fio guarda aéreo para os condutores. O valor máximo é da ordem de 1500 KV, com uma taxa de crescimento de 500KV/ μ s. Uma sobretensão devido a descarga direta, deslocando-se no condutor, ao atingir a cadeia de isoladores, se tiver um valor maior que a tensão disruptiva da cadeia, descarregará para a terra, entrando na subestação um valor aproximadamente igual ao da tensão disruptiva da cadeia de isoladores. Entretanto, se tiver valor menor que esta, transitará livremente na linha na direção de subestação.

Isto não ocorrerá se a estrutura suporte das linhas, for de madeira pois o escoamento de sobretensão para a terra é bastante difícil.

2.4.3 - Sobretensões devido a Descarga nas Vizinhanças (sob o aspecto de corrente)

São induzidas correntes que atingem um valor da ordem de 200 KA com uma taxa de crescimento de 30 KA/ μ s. Muito pouco das descargas; apenas 10 ou 20% tem valor de crista excedendo 70 KA.

2.5 - Características de uma Onda Padrão de Impulso

Resultado de inúmeras pesquisas, estudos e investigações, levaram a conclusão que a onda de impulso que ocorre nas linhas de transmissão devido a queda de raio, tem a forma semelhante da Figura 2.4.

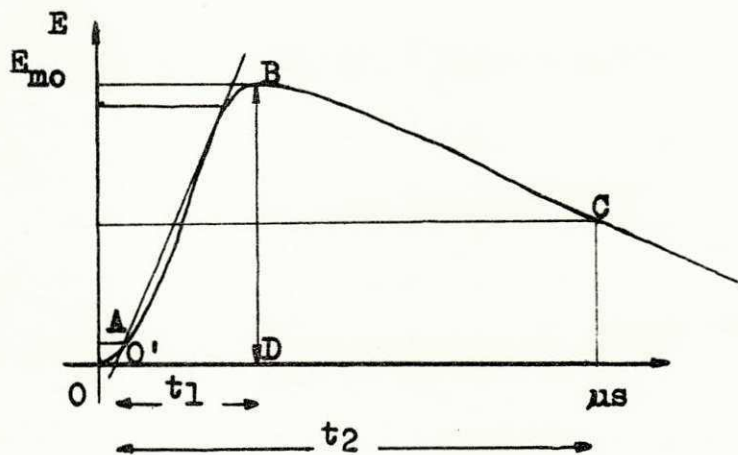


Fig. 2.4 - Forma da onda padrão de impulso devido a raio

Nesta onda pode-se definir:

Frente da Onda - parte crescente (AB) da onda, atin-
gindo um valor de crista E_{mo} a par-
tir de 0

Cauda da Onda - parte decrescente (BC) da onda,
atingindo um valor de 50% de E_{mo} .

Crista da Onda - valor máximo da onda E_{mo} .

Os valores t_1 e t_2 , representam respectivamente o tempo para que a onda alcance o valor de crista a partir de zero virtual 0', variandô entre 1 a $10 \mu s$ e, tempo para que a onda alcance 50% do valor de crista a partir de zero virtual, variando de 10 a $100 \mu s$ para ondas do tipo lightning. É co-
mum se dizer: uma onda T_1/T_2 .

Para ensaios de laboratório, os valores de t_1 e t_2 , são fixados de acordo com os

- padrões americanos $1.5/40 \mu s$
- padrões europeus $1/50 \mu s$
- padrões internacionais (IEC) $1.2/50 \mu s$

Para ensaios de laboratório, uma onda devido a switching é simulada por uma do tipo $250/2500 \mu s$.

2.6 - Aterramento dos Sistemas

É de grande importância na determinação da tensão nominal do PR, o tipo de aterramento que é utilizado no siste-
ma. Relações como X_0/X_1 e R_0/X_1 caracterizam a natureza do aterramento. Em geral se considera $X_2 = X_1$ e $R_2 = R_1$ com ex-
ceção em sistemas de distribuição

2.6.1 - Sistemas com Neutro Isolado

Caracteriza-se pelo fato de possuir reatância de sequência zero (X_0) capacitiva, resultando numa relação X_0/X_1 menor que 0. Em sistemas deste tipo, quando ocorre falha de uma fase, a tensão nas outras fases, alcançam um valor muito maior que a tensão nominal do sistema.

2.6.2 - Sistemas Aterrados

O neutro dos sistemas podem ser aterrados através de Bobina de Peterson; de impedâncias; efetivamente aterrado e multiplamente aterrados.

2.6.2.1 - Sistemas Aterrados com Bobina de Peterson

Quando ocorre uma perfeita sintonização; existindo uma falha para a terra, a tensão nas outras fases alcança um valor igual a tensão nominal do sistema (V_{FF}).

Se a bobina não estiver perfeitamente sintonizada, o valor desta tensão pode atingir um valor maior que V_{FF} , e, o tipo de aterramento comporta-se como se o neutro estivesse isolado.

2.6.2.2 - Sistemas Aterrados através de Impedâncias

Neste tipo de aterramento, procura-se obter uma reatância de sequência zero positiva, resultando numa relação X_0/X_1 positiva. Caso ocorra falha de uma

fase para a terra, a tensão nas outras fases pode atingir um valor igual ou menor que a tensão fase neutro ($V_{FF}/\sqrt{3}$) do sistema,

2.6.2.3 - Sistemas Efetivamente Aterrado

Caracteriza-se pelo fato de posuir a relação X_0/X_1 variando entre 0 e 3, a relação R_0/X_1 menor que a unidade, visto a partir do ponto de falha. Atualmente é o tipo de aterramento mais empregado nos sistemas.

2.6.2.4 - Sistemas Multiplamente Aterrado

São sistemas onde é empregado aterramento efetivo em cada 4 pontos por milha de comprimento da linha. No caso de defeito para a terra, a tensão nas outras fases pode atingir um valor maior que a tensão fase neutro do sistema. Este tipo de aterramento é utilizado em sistemas de distribuição. (5)

2.7 - Dispositivos de Proteção as Sobretensões

Os dispositivos que se pode empregar como uma maneira de reduzir as sobretensões que chegam a subestação são:

- (Centelhadores de Haste) Rod-Gaps
- Tubos Protetores
- Pãra-Raios

2.7.1 - Rod-Gaps

Quando sujeitos a uma sobretensão; produzido o arco entre suas hastes, não há um meio que possa vir a

cessar o mesmo. Chaves disjuntoras terão que ser usadas para eliminar este arco, retirando o sistema de operação; provocando interrupção no fornecimento de energia. Devido a este fato, não é um dispositivo muito usado na proteção às sobretensões. Além do mais, não oferece boa proteção ao transformador quando ocorre uma sobretensão de frente muito escarpada (por exemplo uma do tipo lightning), conforme se pode observar a partir da Figura 2.5. (6)

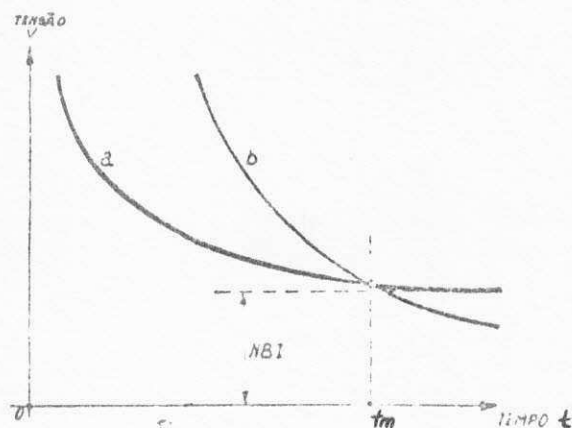


Fig. - 2.5 - Curva característica tensão-tempo de um centelhador de haste (curva b) comparada com a curva característica do transformador por óleo protegido (curva a)

A curva A representa a característica do transformador e a curva B, a característica do centelhador de Haste. Ocorrendo uma sobretensão de valor elevado e tempo de crista menor que t_m , o transformador será danificado, visto que o centelhador começará a desviar as sobretensões a partir do tempo t_m . Entretanto como proteção de retaguarda proporciona um meio econômico de suplementação à proteção do isolamento de uma subestação, que tem PR, próximos aos transformadores. Com o auxílio da Figura 2.6 pode-se avaliar a proteção assegurada por um rod-gap. (7)

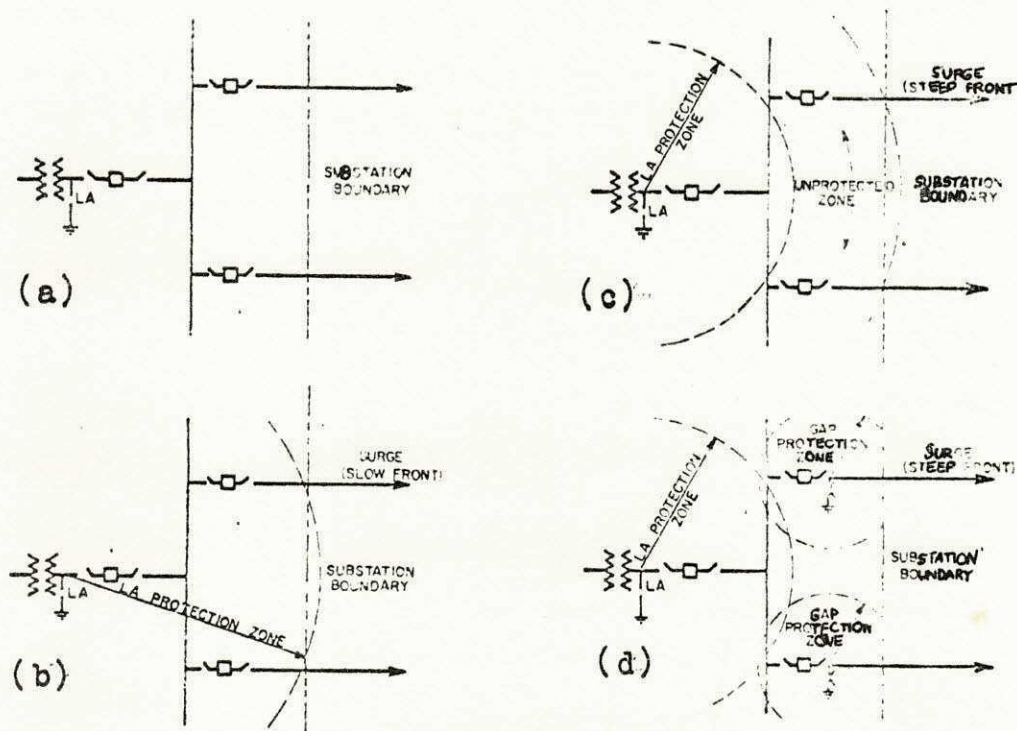


Fig. 2.6 - Proteção de retaguarda assegurada por um rod gap (centelhador de haste)

Em 2.6-a, é apresentado a disposição dos elementos da subestação, protegida com PR, cuja área de atuação para surtos de baixa frente de onda é mostrado na Figura 2.6-b. Para surtos de frente escarpada, esta área sofre uma redução (2.6-c), que deve ser protegido com o emprego de rod-gaps. Na Figura 2.6-d, é mostrada a proteção que estes asseguram para os surtos de frente escarpada.

2.7.2 - Tubos Protetores

São constituídos de centelhadores arrumados em um tubo revestido de material orgânico que gera uma grande

quantidade de gás quando sujeito ao calor, proveniente do arco elétrico, que é expelido através de orifícios, tendo capacidade de interromper a corrente subsequente no seu primeiro zero.

São utilizados na proteção de transformadores de 15 KV e abaixo, do tipo distribuição, visto que em sistemas de tensão superior, são requeridas certas limitações nas correntes de curto no local da instalação.

2.7.3 - Pára-Raios

Constitue o dispositivo mais eficiente na proteção às sobretensões. Servindo de base para o nosso trabalho atual, terá suas características e performance apresentadas nos capítulos que se seguem.

2.8 - Blindagem contra as Descargas Diretas

Uma proteção bastante satisfatória contra descargas direta nos condutores de fase, é obtida com o emprego de fios terra que são colocados sobre os condutores de fase, servindo com um ponto de atração para as descargas. Apesar disso, ocorrendo uma descarga no fio terra, surgem tensões induzidas nos condutores de fase, embora com menor intensidade que os anteriores.

2.8.1 - Proteção da Linha de Transmissão

Como proteção às linhas de transmissão, os fios terra aéreo, devem acompanhar a mesma, durante uma certa distância, situando os condutores de fase dentro de um ângulo no máximo igual a 45° . A Figura 2.7 mostra um arranjo com o emprego de fios terra aéreo.

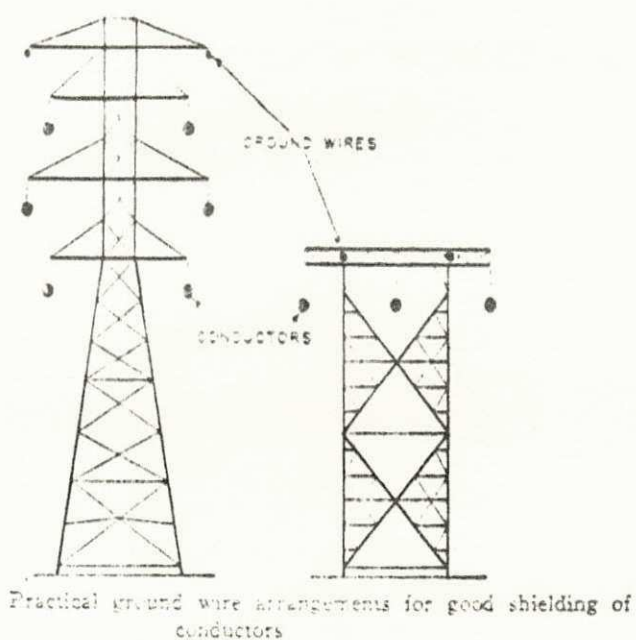


Fig. 2.7 - Disposição dos fios terra como um meio de proteger descarga direta nos condutores.

2.8.2 - Proteção dos Equipamentos da Subestação Contra Descarga Direta

Como um meio de evitar a queda direta de raio nos equipamentos da subestação ou, nas suas adjacências; que possam vir a provocar excessivas correntes de descarga, são empregados:

- a) fio terra aéreo a partir da subestação
- b) hastes de aço.

O fio terra aéreo a partir da subestação, deve acompanhar a linha de transmissão durante $1/2$ ou $3/4$ de milha de sua extensão. Em cada torre, o fio terra aéreo deve ser aterrado por meio de uma resistência de valor muito baixo. Na figura 2.8 é apresentado a blindagem de uma subestação, com fio terra aéreo, com 2500 pés de extensão.

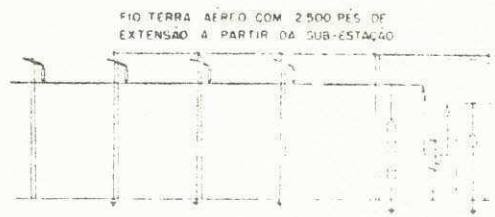


Fig. 2.8 - Proteção da subestação com fio terra-aéreo

As hastes de aço, são empregadas para proteger os equipamentos no exterior da subestação dentro de um cone no máximo igual a 60° . Geralmente deve ser usado 45° ou 30° , assegurando uma perfeita proteção a todos os elementos da subestação.

A figura 2.9 apresenta a disposição entre as hastes de aço e os equipamentos protegidos contra descarga direta.

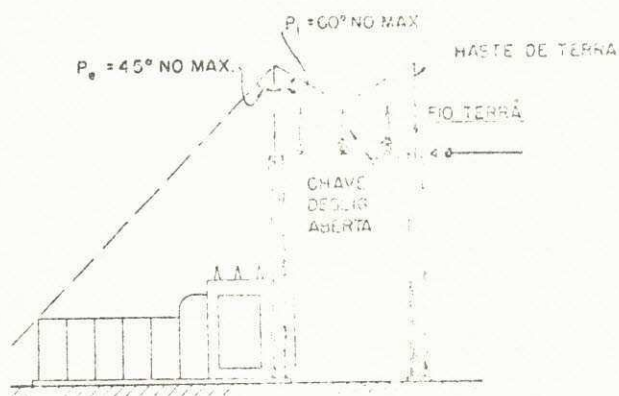


Fig. 2.9 - Hastes de aço blindando os equipamentos da subestação

Caso seja impossível a aplicação de um fio terra, deve ser aplicado tubos protetores de expulsão em cada estrutura suporte da linha de transmissão, com uma baixa resistência de aterramento, até uma distância de 2500 pés após a subestação. Isto assegura que a corrente de curto-circuito, esteja dentro da capacidade de interrupção destes tubos, muito embora ofereçam um nível de proteção demasiado alto para oferecer uma coordenada proteção dos equipamentos da subestação.

Referências:

- | | | |
|-----|------------------|---------|
| 1 - | Ver bibliografia | 23 e 29 |
| 2 - | " | " 21 |
| 3 - | " | " 27 |
| 4 - | " | " 46 |
| 5 - | " | " 20 |
| 6 - | " | " 29 |
| 7 - | " | " 49 |

3. ESTUDO DOS PÁRA-RAIOS

3.1 - Introdução

São aplicados a um sistema com a finalidade de desviar para a terra, as sobretensões que atingem seus terminais, tanto de origem de raio como de chaveamento, prevenindo a interrupção no fornecimento de energia elétrica, assim como evitar danos nos equipamentos da subestação e também, que flua corrente de 60 Hz elevada quando cessar a sobretensão. Desta forma, devem apresentar uma resistência bastante alta a tensão normal do sistema e, um valor bastante pequeno às sobretensões para facilitar a descarga para a terra (1-3).

3.2 - Características Definíveis em um Pára-Raios

As seguintes características tornam-se importantes quando da aplicação dos PR:

3.2.1 - Tensão Nominal

É o valor máximo de tensão, à 60 Hz, para o qual, no caso de ocorrer uma sobretensão, o PR terá capacidade para desviar este surto para a terra, interrompendo a corrente subsequente no primeiro zero.

3.2.2 - Tensão Disruptiva à 60 Hz

É o valor máximo de tensão que pode estar sujeito; a partir da qual o PR começa a descarregar a corrente do sistema. Deve-se considerar que o pára-raios sujeito a uma sobretensão de 60 cps, maior que a sua tensão nominal, porém menor que sua tensão disruptiva a 60 Hz; se ocorrer uma

sobretensão devido a switching ou lightning, ele desviará o surto, mas não terá condições de interromper a corrente subsequente, funcionando a partir de então como um curto-circuito, até a queima total do mesmo.

As normas obrigam que esta tensão disruptiva, seja no máximo igual a 150% da tensão nominal do PR. Para determinar o valor de tensão disruptiva, a 60 Hz é empregado circuito semelhante ao mostrado na figura 3.1, onde R representa uma resistência oferecida a corrente de descarga.

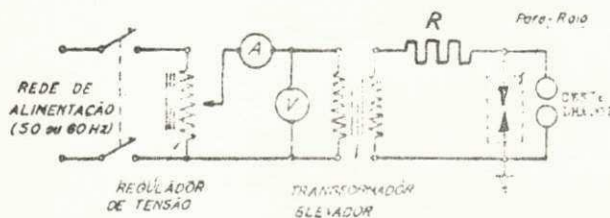


Fig. - 3.1 Diagrama das ligações para o teste da tensão disruptiva à frequência industrial. R é uma resistência a corrente de descarga

O centelhador verifica se os valores de tensão disruptiva, estão de acordo com as normas estabelecidas.

3.2.3 - Tensão Disruptiva com Onda Normalizada

Na determinação da tensão disruptiva de um PR, este é submetido a uma série de impulsos com onda padronizada americana ou européia devendo a descarga ocorrer na crista ou na cauda da onda. A tensão disruptiva é dada pelo valor de tensão que provoca 50% de descargas. Para determinar o valor da tensão disruptiva, é empregado circuito semelhante ao mostrado na figura 3.2, onde R representa uma resistência li

mitadora e R_m , divisor de tensão para alimentar o osciloscópio.

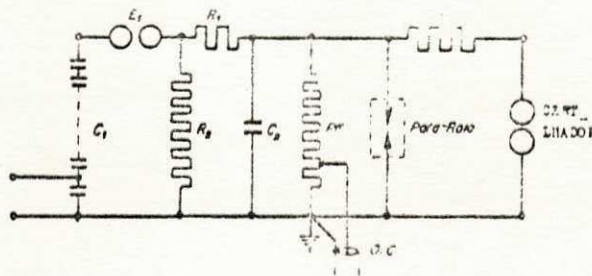


Fig. - 3.2 - Diagrama das ligações para o teste da tensão disruptiva com onda de impulso normalizada. R_1 é uma resistência limitadora. R_m é o divisor de tensão para alimentar o oscilógrafo de raios catódicos (O.C.)

3.2.4 - Tensão Residual de Descarga

Assegura a proteção proporcionada pelo pára-raios. São determinadas em função da corrente de descarga. Catálogos de fabricantes fornecem esta tensão baseada em um determinado valor de corrente, com onda de 8/20 μ s ou 10/20 μ s. Na curva característica do PR, a tensão residual equivale ao máximo valor de tensão, após ter ocorrido a tensão disruptiva. Variando diretamente com a corrente de descarga. Na figura 3.3, mostra-se a característica de descarga de um pára-raios.

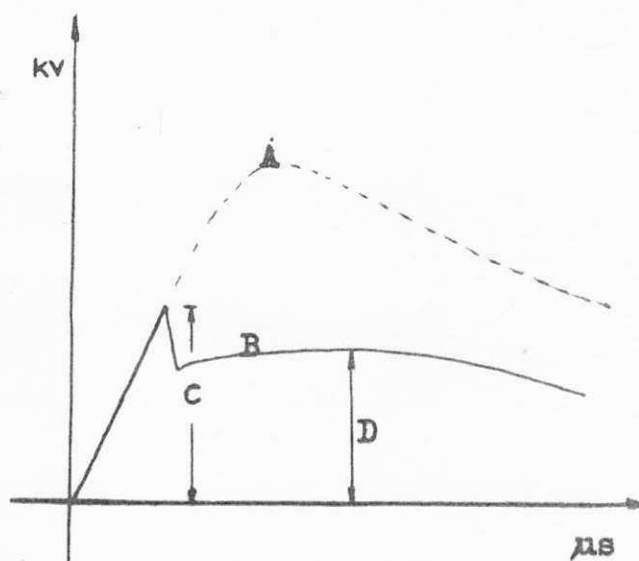


Fig. 3.3 - Característica de descarga de um PR

- A - representa a curva da sobretensão que atingiria a subestação sem o PR (tensão prospectiva)
- B - onda que atinge a subestação com o PR,
- C - tensão disruptiva na frente de onda,
- D - tensão residual de descarga.

3.2.5 - Limite Térmico

Consiste na habilidade em permitir a passagem repetida, ou por longo tempo de correntes de surto sem alterar a temperatura interna, evitando a danificação do mesmo.

3.2.6 - Corrente Nominal de Escoamento

Os pára-raios devem permitir o escoamento de corrente nominal normalizada com onda de 10/20 μs sem serem danificados. 20 impulsos na norma americana e 30 na europeia. Os pára-raios do tipo distribuição, possuem corrente no

minal de 5 KA e os do tipo subestação possuem 10 KA ou mais (4).

3.2.7 - Máxima Capacidade de Descarga

As normas fixam o valor máximo de corrente de impulso para os pára-raios. O do tipo subestação deve suportar dois ensaios com onda de corrente de 5/10 μ s e valor de crista 150 KA. O do tipo distribuição deve suportar dois ensaios com onda de corrente 5/10 μ s e 65 KA.

3.2.8 - Ensaio com Onda Retangular

Tem a finalidade de verificar a capacidade do PR em escoar correntes relativamente pequenas em tempo relativamente grandes. Os do tipo distribuição devem suportar de acordo com as normas americanas, 20 ensaios com onda de 75A/1000 μ s. Os do tipo subestação devem suportar 20 ensaios com onda de 150A/2000 μ s.

3.3 - Tipos de Pára-Raios

De acordo com a sua aplicação no sistema, os PR podem ser do tipo (3.)

- a) distribuição
- b) subestação

Os do tipo distribuição, são os mais comumente encontrados e de custo bastante reduzido, em consequência da simplicidade de sua construção.

Os do tipo subestação, necessitam de características bem mais elevadas que os do tipo distribuição, de custo

superior, devido a complexidade de fabricação.

De acordo com sua construção os PR estão divididos em:

- a) tipo expulsão
- b) tipo válvula
- c) tipo sopro magnético

3.3.1 - Tipo Expulsão

Caracteriza-se por possuir uma tensão residual menor que a do tipo válvula, muito embora a descarga disruptiva se dê em um valor maior que o do tipo válvula, conforme é mostrado na figura 3.4. Os gases produzidos devido a gasificação da substância orgânica que constitui as paredes internas do mesmo (tipo expulsão) são expelidos por abertura destinada a este fim, podendo vir a contaminar os equipamentos que estejam a sua proximidade. É usado em distribuição rural. Neste tipo de PR, deve-se dar importância à tensão disruptiva de impulso que é função do tipo de onda que alcança seus terminais.

3.3.2 - Pára-Raios Tipo Válvula

De todos os dispositivos de proteção é o que oferece uma maior proteção do equipamento. É adequado para proteger transformadores em classe de tensão superior onde a margem entre a tensão de operação e a sua resistência à impulso é baixa, visto a natureza da sua característica ser quase que achatada, a qual é ilustrada com a curva b da figura 3.4.

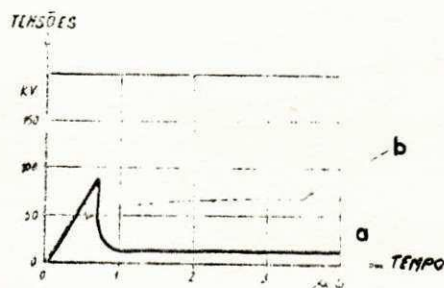


Fig. 3.4 - Comparação entre o comportamento do PR tipo expulsão (a) e tipo válvula (b)

3.3.3 - Pára-Raios Tipo Sopros Magnético

Usados em classe de tensão superiores, caracterizam-se por serem dotados de bobinas de sopros, que oferecem elevada impedância às sobretensões e baixa impedância à corrente de 60 Hz. Em paralelo com estas bobinas são aplicados resistores para impedir que as bobinas sejam submetidas a sobretensões elevadas, durante a descarga, evitando danificação das mesmas.

As características construtivas dos diversos tipos de PR, serão discutidas detalhadamente no Capítulo 6 deste trabalho.

3.4 - Modo de Operação dos Pára-Raios

Se da necessidade de proteger um equipamento contra sobretensão, independentemente a interrupção do serviço, poder-se-ia utilizar simplesmente um Spark-Gap, que desviaria o surto para a terra, muito embora a corrente a 60 Hz mantivesse o ar

co entre os eletrodos, sendo então necessário o emprego dos seccionadores do circuito para eliminar este arco, interrompendo o fornecimento de energia.

Para evitar isto foram aplicados em série com os Spark-Gaps, resistências que variam inversamente com o valor de tensão aplicada; os resistores válvulas que tem a capacidade de de uma redução considerável no valor de resistência, com o aumento da tensão e da corrente, muito rapidamente, antes mesmo da sobretensão atingir o valor de crista.

Cessando a sobretensão, continua apenas a corrente de serviço; aí então, a resistência aumenta seu valor, limitando a corrente de serviço para um valor bem próximo de 50 amps que é a corrente subsequente. Esta é imediatamente eliminada pelos Spark-Gaps tão logo passe pelo primeiro zero da corrente alternada. A partir daí, o pára-raios passa a funcionar como um quase isolante a tensão nominal do sistema, deixando fluir através de si uma corrente de 3 ou 4 mA (5).

Os oscilogramas apresentados na figura 3.5 mostram a variação da resistência interna dos PR, com a tensão aplicada. Curvas a, b e c, tensão-corrente de PR, fabricados pela ASEA, para operação em classes de tensão de 4 a 106 KV, com correntes nominal de 1.5, 5.0 e 10 KA respectivamente. Curvas d₁ e d₂, corrente e tensão no PR.

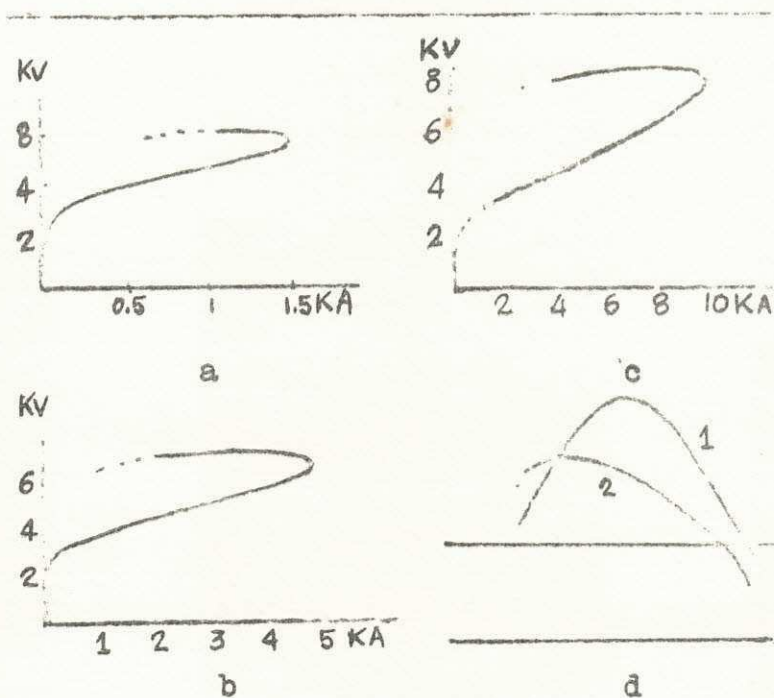


Fig. 3.5 - Curva de resistência dos PR tipo XBA e XBB fabricados pela ASEA com corrente nominal de 1.5; 5.0 e 10 KA

3.5 - Eficiência de Proteção Assegurada por um Pára-Raios

Na determinação desta eficiência, deve-se considerar o valor da resistência que o equipamento a ser protegido, oferece às sobretensões e, a característica de descarga de um pára-raios. Na figura 3.6 tem-se na curva a, resistência oferecida pelo transformador às sobretensões. Curva b, a característica de descarga de um pára-raios. A eficiência de proteção é assegurada pela distância AA que se deve manter o maior possível.

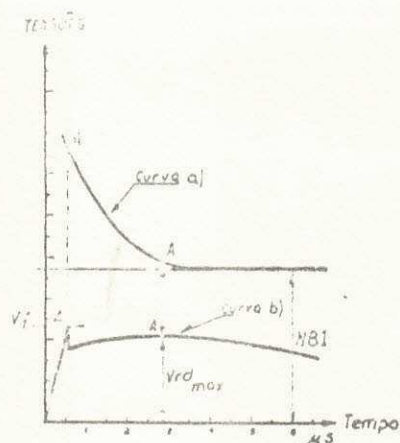


Fig. 3.6 - Proteção assegurada por um PR

Isto pode ser definido pela Eq. 3.1 onde:

E_p - Eficiência de Proteção

NBI - Resistência oferecida pelo equipamento as so
bretensões

$V_{rd_{m\acute{a}x}}$ - Tensão Residual Máxima do Pára-Raios.

$$E_p = \frac{NBI - V_{rd_{m\acute{a}x}}}{NBI} \times 100 \quad (3.1)$$

3.6 - Determinao da Tensão Nominal do PR

A tensão nominal do PR, pode ser determinada a par
tir das constantes do sistema como: tipo de falha, resistên
cia de falha e tipo de construo da linha. O valor da sobrer
tensão nas fases b e c devido a falha em a, num sistema com
neutro aterrado podem ser determinadas a partir das equaoes
(6).

$$V_b = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_f} \quad (3.2)$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{Z_0 - Z_1}{2Z_1 + Z_0 + 3R_f} \quad (3.3)$$

onde

V_b, V_c - tensão no ponto de falha entre fase e neutro em pu da tensão do sistema.

Para sistemas com neutro isolado, o valor máximo da sobretensão pode ser determinado a partir dos gráficos representados nas figuras 3.7.a, b, c e d, para diversos valores de R_1 .

No gráfico correspondente a um determinado R_1 , com os valores de R_0/X_1 e X_0/X_1 , localiza-se o ponto e a curva sobre este. Esta curva representa o valor pu em percent máxima da tensão nominal do sistema, que corresponderá a tensão nominal do PR a ser aplicada.

É norma se utilizar em sistemas com neutro aterrado, PR com tensão nominal igual a 80 - 85% de V_{FF} equivalente a 140% de V_{FN} . Para sistemas com neutro isolado, deve-se usar PR com tensão nominal de 100 a 105% de V_{FF} , correspondendo a 173% de V_{FN} (4, 7, 8).

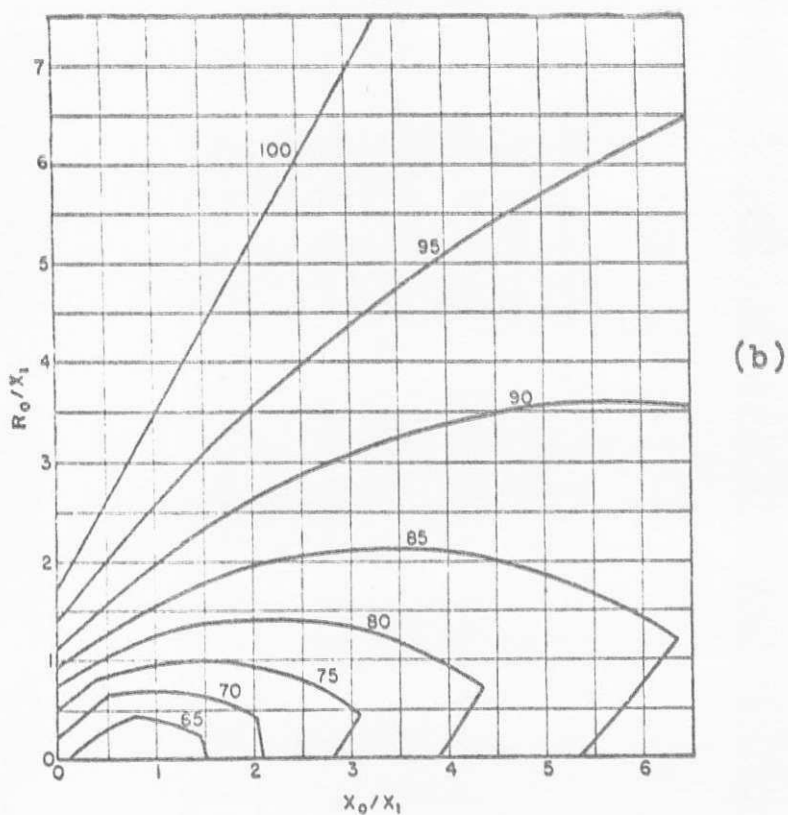
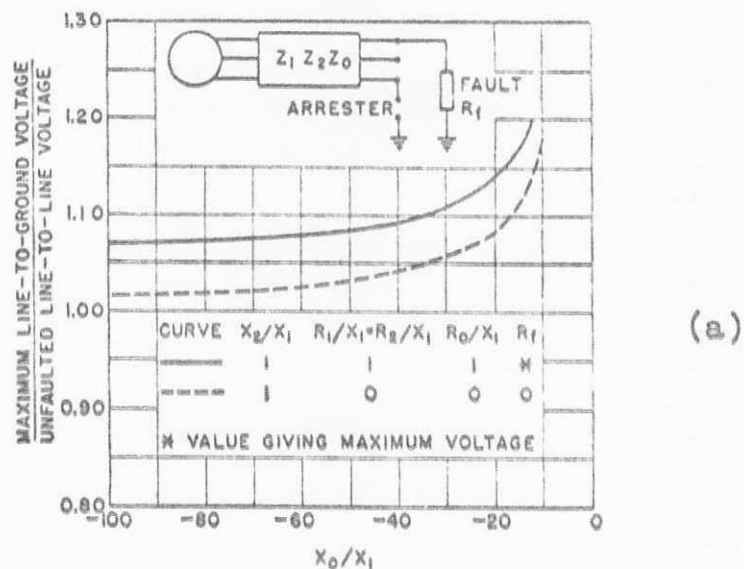
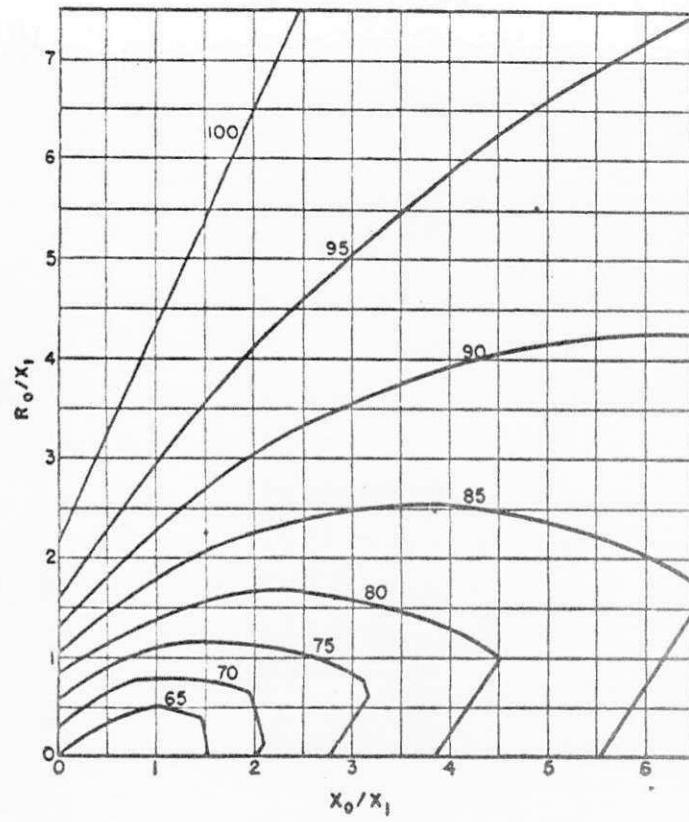
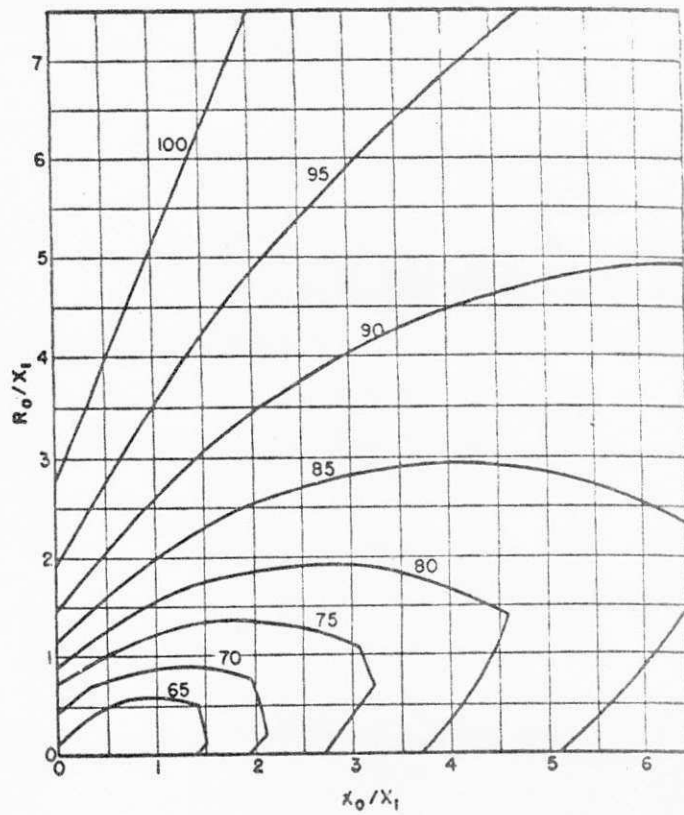


Fig. 3.7a, b

- a - máxima tensão no ponto de falha em sistema com neutro isolado.
- b - condição de tensão para $R_1=R_2=0$



(c)



(d)

Fig. 3.7c,d

- c - condição de tensão para $R_1=R_2=0,1X_1$
 d - condição de tensão para $R_1=R_2=0,2X_2$

3.7 - Aplicação de Pára-Raios em Sistemas de Distribuição

Na determinação de tensão nominal de um PR, para aplicação em sistema de distribuição, com neutro multiplamente aterrado, depende dos parâmetros do circuito, tais como: tensão limite de operação, tipo de construção da linha e também da reatância magnetizante do transformador (6).

Em sistemas com construção do tipo open-wire (4 fios separados) aparece um fator de sobretensão nas fases sem de feito, da ordem de 1.3 pu de V_{FN} devido a uma falha. Conside rando o transformador aplicado ao sistema, este fator é redu zido de 6 a 8%, resultando em um fator de 1.2 pu de V_{FN} .

Considerando as oscilações do sistema, a tensão de operação atinge um valor de 1.05 ou 1.058 pu de V_{FN} .

Em sistemas do tipo onde os condutores de fase se localizam num cabo, um fator de 1.50 pu de V_{FN} ocorre nas fases sãs devido a falha. Considerando o efeito do transforma dor acoplado ao sistema, este fator é reduzido a 1.46 de V_{FN} .

Para sistema de distribuição, de construção do tipo open-wire, a tensão nominal do PR deve ser encontrada a par tir de

$$E = 1.20 \times 1.05 \times V_{FN} \quad (3.4)$$

Para sistema do tipo cabo, deve ser determinada a partir de

$$E = 1.46 \times 1.05 \times V_{FN} \quad (3.5)$$

Tensões nominais de PR a serem aplicados em siste mas de distribuição variando de 4 a 34 KV, com neutro multi plamente aterrado, assim como valores de sobretensões dinâmi

cas são apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1

MAXIMUM DYNAMIC OVERVOLTAGES AND MINIMUM ARRESTER RATINGS
FOR FOUR-WIRE MULTIGROUNDED NEUTRAL DISTRIBUTION SYSTEMS

Nominal Voltage	Maximum* Range A Voltage (1.05 Times the Nominal Voltage)	Maximum* Range B Voltage (1.058 Times the Nominal Voltage)	kV Arrester Rating Usually Applied	Maximum Dynamic L-G Over- voltage for Open-Wire Lines	Maximum Dynamic L-G Overvoltage for Spacer Cable Circuits
4160Y/2400	4370Y/2520	4400Y/2540	3	3.0	3.6
8320Y/4800	8730Y/5040	8800Y/5080	6	6.0	7.2
12000Y/6900	12600Y/7270	12700Y/7330	9	8.6	10.4
12470Y/7200	13090Y/7560	13200Y/7620	9	9.0	10.8
13200Y/7620	13860Y/8000	13970Y/8070	10	9.5	11.4
13800Y/7970	14490Y/8370	14520Y/8380	10,12	10.0	12.0
20780Y/12000	21820Y/12600	22000Y/12700	15	15.0	18.0
22860Y/13200	24000Y/13860	24200Y/13970	18	16.5	19.8
24940Y/14400	26190Y/15120	26400Y/15240	18,21	18.0	21.6
34500Y/19920	36230Y/20920	36510Y/21080	27	24.8	29.9

*ANSI-C84

Minimum Arrester Rating = (1.05 to 1.058) · (Nominal Line-to-Neutral System Voltage) · K
 - K = 1.20 for Open Wire
 - K = 1.46 per Spacer Cable

Na tabela 3.2 são apresentadas as características de PR do tipo válvula, aplicados em sistemas de 3 a 242 KV, mostrando o valor de tensão disruptiva e, tensão de descarga

obtido com ensaios de ondas do tipo 10/20 μ s com 5, 10 e 20 KA de crista.

Tabela 3.2

PERFORMANCE CHARACTERISTICS OF VALVE-TYPE LIGHTNING ARRESTERS

Arrester Type and Rated Voltage—Kv	Front of Wave Impulse Sparkover				Discharge Voltage-Kv on 10 x 20 Microsecond Current Wave**								
	Rate of Rise* Kv per μ sec.	Kv**			5,000 Amperes			10,000 Amperes			20,000 Amperes		
		Avg.	Max.	†	Avg.	Max.	†	Avg.	Max.	†	Avg.	Max.	†
<i>Distribution</i>													
3	25	18	23	23	14	17	17	16	20	20	18	23	23
6	50	34	45	45	26	34	34	30	38	38	34	44	44
9	75	48	62	62	39	51	51	44	57	57	51	66	66
12	100	61	77	77	49	62	62	55	69	69	62	78	78
15	125	73	91	91	61	77	77	69	87	87	79	99	99
<i>Line</i>													
20	167	75	90	85	83	96	91	92	106	102	101	116	111
25	208	93	111	105	101	116	111	111	128	122	121	139	133
30	250	110	132	125	121	139	133	135	155	149	149	172	164
37	308	136	163	154	149	172	164	164	189	181	181	208	199
40	333	147	176	167	161	185	177	177	204	195	196	225	216
50	417	183	220	208	202	232	225	222	255	245	243	280	268
60	500	220	264	250	242	278	267	271	312	300	298	344	328
73	608	267	320	302	297	342	328	328	378	361	360	414	396
<i>Station</i>													
3	25	13	15	15	10	11	11	11	13	12	12	14	13
6	50	23	26	26	20	22	22	22	25	23	24	27	26
9	75	35	39	39	30	33	32	33	37	35	35	39	38
12	100	43	50	48	40	44	43	44	48	47	47	52	51
15	125	53	61	59	50	55	54	54	60	58	59	65	63
20	167	72	83	80	67	74	72	72	80	77	78	86	84
25	208	89	102	98	83	92	89	90	99	96	100	110	107
30	250	106	122	117	100	110	107	108	119	115	118	130	126
37	308	131	151	144	124	137	133	132	146	141	145	160	155
40	333	136	157	150	134	148	143	144	159	154	153	169	164
50	417	178	205	196	167	184	179	179	197	191	191	211	205
60	500	214	246	236	200	220	214	217	239	231	234	258	250
73	608	261	300	288	245	270	262	262	288	279	283	313	303
97	808	345	397	380	323	356	345	349	384	372	377	415	403
109	908	388	446	427	363	400	388	394	434	420	424	467	453
121	1008	430	495	474	403	444	430	438	482	467	470	517	502
145	1208	515	592	566	487	536	520	523	575	558	564	622	602
169	1408	602	693	663	566	624	605	610	672	650	658	725	702
196	1633	691	796	760	647	713	691	698	768	744	755	832	803
242	2017	860	988	945	806	887	860	872	960	931	940	1035	1004

*100 kv per microsecond per 12 kv of arrester rating.
**Impulse of polarity giving higher sparkover voltage.

†95% of the arresters manufactured will have characteristics not exceeding the value in this column. For distribution arresters use the maximum values.

3.8 - Determinação da Tensão Nominal de um PR a ser Aplicado em Sistema de EHV

Em sistemas de EHV, costuma-se empregar pára-raios com tensão nominal 75% de E_L , ao contrário de 80 - 85% que é empregado nos sistemas comuns com neutro solidamente aterrado. E_L é a tensão nominal do sistema (9).

3.8.1 - Corrente de Descarga em Sistemas de EHV

Resultado de vários testes e dados de campo, concluem que as correntes de descarga, variam na ordem de 100 a 20 KA. A probabilidade de diferentes amplitudes de corrente de descarga apresentadas na tabela 3.3, asseguram que um PR, com corrente nominal de 10 KA, oferece boa proteção. Isto equivale a uma probabilidade de uma falha em 147 anos de operação.

Tabela 3.3

Probabilidade de Corrente de Descargas

Máximo valor da corrente de descarga (KA)	Número de descargas por PR, por ano	Probabilidade de uma descarga por ano
5	0.028	1/36
10	0.007	1/147
15	0.0025	1/400

3.8.2 - Seleção do Nível Básico de Isolamento à Impulso Aplicado a um Sistema de 400 KV Tensão Nominal

Equivalente a 75% de EL $E = 0.75 \times 400 = 300$ KV. Para se determinar este nível, os seguintes itens devem ser considerados:

a) Tensão de Descarga e Fator de Descarga

A relação entre o valor de crista da tensão de descarga (E_d) e o valor RMS da tensão nominal do PR(E), recebe o nome de fator de descarga

$$F_d = \frac{E_d}{E} \quad (3.6)$$

Em PR de alguns anos atrás, o fator de descarga era aproximadamente igual a 5.6. Atualmente, devido a melhoramentos introduzidos na construção de PR, este valor caiu para 2.4 - 3.0, utilizando-se na prática um valor de 2.6.

b) Cálculo da Tensão de Descarga

Para um PR de 10 KA de corrente nominal

$$\frac{E_d}{E} = 2.6 \quad E_d = 2.6 \times 300 = 760 \text{ KV}$$

c) Nível de Isolamento contra Surtos

$$I_1 = 1.15 (1.10 \times E_d + 40) \quad (3.7)$$

$$I_1 = 1.15 (1.10 \times 760 + 40) = 1.033 \text{ KV (crista)}$$

d) Tensão de Descarga à Surto de Chaveamento

A resistência à surto de chaveamento do equipamento, deve ser considerada 80% da sua resistência à impulso. Dados de fabricantes indicam um valor de 1.6 entre a tensão mínima de surto de chaveamento e a tensão nominal do PR.

$$E_{ss} = 1.6 \times E = 1.6 \times 300 = 480 \text{ KV} \quad (3.8)$$

3.8.3 - Nível de Isolamento Assegurado Contra Surto de Chaveamento

Deve-se considerar uma margem de 25% entre a tensão de descarga de surto de chaveamento e o nível assegurado I_s (crista) contra surto de chaveamento. Considera-se também um fator de 10% para considerar desvios de fabricação, podendo ser determinado a partir de:

$$I_s = (1.25 \times 1.10 \times 1.6 \times \sqrt{2} E) / 0.8 = 3.88E \quad (3.9)$$

$$I_s = 3.88 \times 300 \text{ KV} \approx 1.150 \text{ KV (crista)}$$

a) Fator de Sobretensão à Surto de Chaveamento

Considerando as oscilações naturais do sistema, deve-se usar um valor de tensão igual a 1.05 pu de EL, assim como um fator de segurança de 10%. O fator de sobretensão à surto de chaveamento é determinado por:

$$F_s = 3 I_s / (1.05 \times 1.10 \sqrt{2} E_L) \quad (3.10)$$

$$= 4,11 (E/E_L)$$

$$F_s = 4.11 \times 300/400 = 3.10$$

b) Nível de Proteção à Sobretensão de 60 Hz

Determina-se o nível de proteção à sobre tensões de 60 Hz, devido à conduções de falha para a terra, a partir da Eq.

$$I_p = 2.73 E_L \quad (3.11)$$

$$I_p = 2.73 \times 400 = 948 \text{ KV (crista)}$$

Dos valores encontrados, a partir dos ní veis básicos de isolamento para EHV, deve-se empregar um NBI de valor igual ou maior que o nível de isolamento assegurado contra surtos de chaveamento (I_s), e, conclue-se que um NBI de 1300 KV, oferece plena proteção a um sistema de 400 KV.

No capítulo seguinte, mostraremos o que re presenta o NBI de um equipamento bem como sua determinação.

3.9 - Localização e Aterramento dos Pãra-Raios

Os pãra-raios devem ser colocados o mais prõximo quanto possível do equipamento a proteger. Deve-se utilizar um PR em cada fase do sistema, entretanto; o fio terra dos mes mos devem ser juntos e aterrados através de uma resistẽncia de valor bem reduzido. É muito bom que se procure colocar o terra dos PR, solidamente aterrado com o terra dos equipamen tos da subestação.

3.10 - Contadores de Descargas através dos Pára-Raios

Com o propósito de registrar o número de descargas verificadas em um PR; contadores de descarga são aplicados ao terminal de terra destes, antes do aterramento conforme ilustrado na figura 3.8.

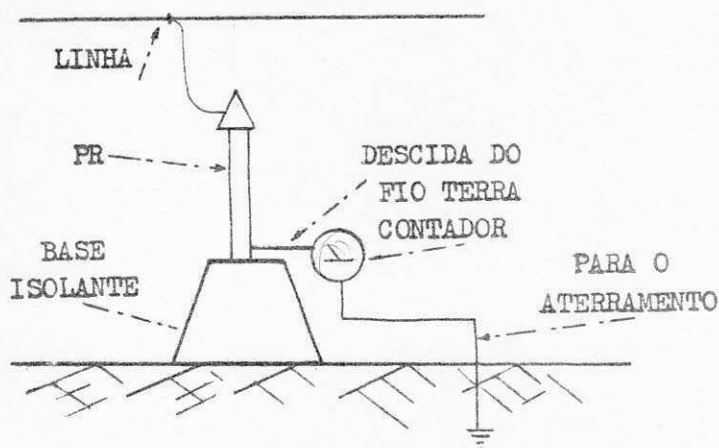


Fig. 3.8 - Ligação dos contadores de descarga

Antes da década de 1960, os contadores destinavam-se apenas a registrar as descargas. Depois, uma outra finalidade foi imposta a ele: funcionar também como um dispositivo que registrasse a corrente que flue através do PR, quando em operação normal do sistema diferindo-o dos tipos de contadores usados anteriormente.

O circuito equivalente dos contadores de descarga atualmente em uso é apresentado na figura 3.9. Este circuito é dotado de meios de proteção que evitam danos quando flue através dele, correntes de valor elevado e de longa duração, provenientes da alta energia que é dissipada através dos PR devido a operações de chaveamento em sistemas de tensões superiores (10).

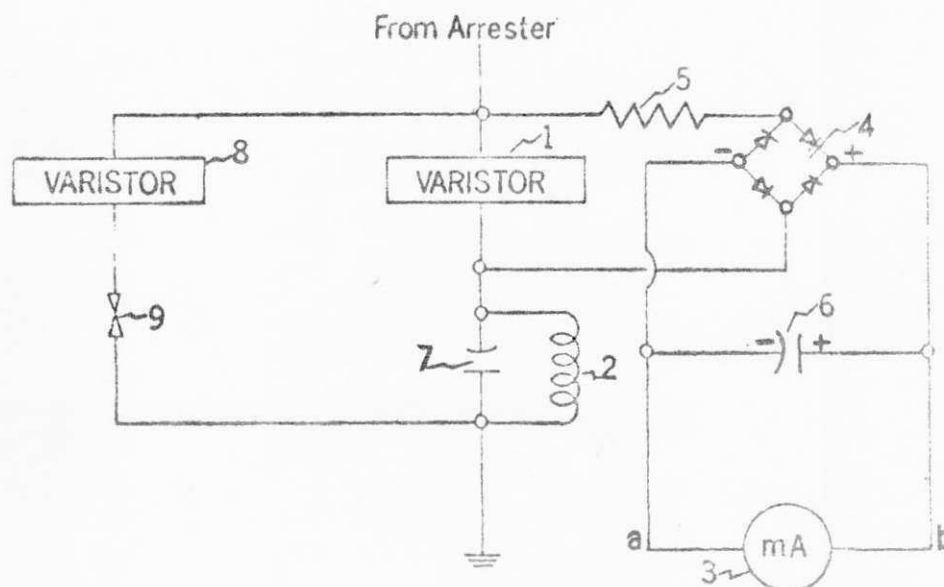


Fig. 3.9 - Circuito equivalente do contador de descarga

3.10.1 - Princípio de Funcionamento dos Contadores

Quando ocorre sobretensão nos terminais do PR, a corrente que flue para o terra, alcança inicialmente o contador, provocando descarga disruptiva no Gap 9 da figura 3.9, ocasionando uma queda de tensão no varistor 8. Esta queda de tensão leva a uma energia armazenada no capacitor 7, permitindo atuar o mecanismo de contagem, provido da indutância 2.

A velocidade de registro de descarga do contador é de um em cada 12 ciclos, baseado em 60 Hz; implicando em 5 registros por segundo.

Em condições normais do sistema, a corrente de dispersão que flue através do PR, alcança o contador e, segue a resistência 5 e os componentes 4, 6 e 3 da figura 3.9. Em 3, o amperímetro mostra a corrente que flue no PR.

A avaliação do funcionamento dos PR, pode ser constatada, com a comparação entre as correntes que flue através dele na ocasião da montagem e, aquela verificada após algum tempo. Em condições normais do PR, esta corrente deve estar entre 3 a 4 mA. Se em qualquer instante a leitura de corrente no amperímetro, apresentar um valor maior que este; é provável que o PR esteja com suas características de construção alteradas e portanto deve ser recuperado.

Os contadores de descargas podem ser usados também para analisar o nível isocerâmico de uma determinada região, registrando apenas as descargas provenientes de origem atmosférica. Para isto seria necessário então que nenhuma operação de chaveamento fosse produzida no sistema.

Referências:

1	-	Ver bibliografia	46
2	-	"	31
3	-	"	29
4	-	"	32
5	"	"	15
6	"	"	20
7	"	"	23
8	"	"	45
9	"	"	35
10	"	"	34

4. COMPORTAMENTO DOS PÁRA-RAIOS NA COORDENAÇÃO DOS ISOLAMENTOS

4.1 - Introdução

A Coordenação dos Isolamentos, representa uma correlação entre a resistência oferecida pelos equipamentos as sobretensões (NBI) e as sobretensões que podem resultar no sistema segundo o tipo de proteção empregado.

4.2 - Fatores que Contribuem para uma Perfeita Coordenação

Para que se possa obter uma coordenação perfeita entre os equipamentos de uma subestação e os dispositivos de proteção, deve-se considerar: (1)

- a) aterramento do sistema
- b) blindagem contra descargas diretas
- c) queda de tensão indutiva $L di/dt$
- d) oscilações e tensões refletidas
- e) distância do pára-raios ao equipamento a proteger
- f) nível de proteção oferecida pelo pára-raios.

4.3 Nível Básico de Isolamento (NBI)

É caracterizado pela curva impulso tempo de um determinado equipamento, que representa a resistência que ele oferece às sobretensões. (2-5)

4.3.1 - Determinação do NBI

Com o emprego do gerador de Marx são aplicadas ao elemento em teste, ondas padrão de impulso do tipo 1.5/40 μ s, com um determinado valor de crista, e localiza-se o ponto (em μ s) onde se deu a descarga disruptiva. Novamente são aplicadas ondas com tensão mais elevada, e assim sucessivamente dando condições para construir uma curva do tipo mostrado na figura 4.1, que representa a característica de tensão disruptiva do elemento em teste.

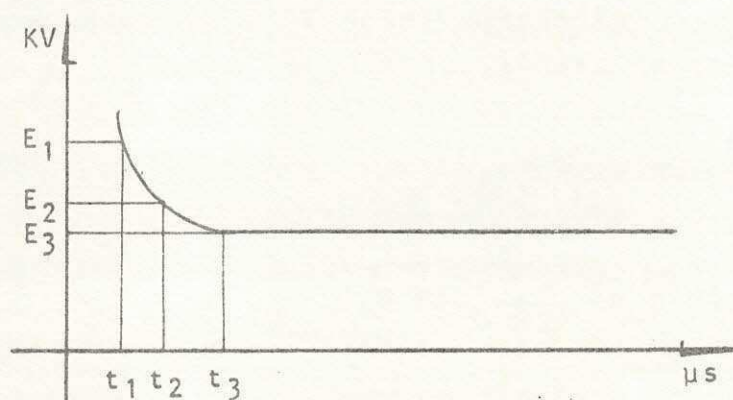


Fig. 4.1 - Curva representativa do NBI de um elemento em teste.

O Nível Básico de Isolamento é fixado em um valor de tensão E_1 , menor que o valor de tensão E , que produziu 50% de descargas durante as aplicações. A onda de valor de crista E_1 na figura 4.2, representa a onda plena de resistência a impulso, cujo valor máximo E_1 , é o Nível Básico de Isolamento do equipamento estudado, e E o valor da tensão de descarga disruptiva crítica.

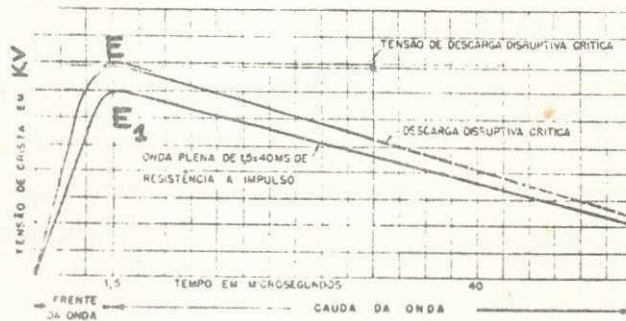


Fig. 4.2 - Onda de descarga disruptiva crítica (E) e onda plena de impulso (E₁) que representa o NBI do elemento em teste.

4.3.2 - Efeito de Polaridade da Onda na Descarga Disruptiva

Os valores de descarga disruptiva, diferem para cada equipamento, de acordo com o tipo de onda. Comparações entre descargas devido a onda de polaridade positiva e polaridade negativa mostram que:

- a) em isoladores de suspensão a descarga disruptiva é 5-10% menor para ondas positivas
- b) em isoladores de pedestal 20-40% menor na onda positiva
- c) coluna de isoladores 5-20% menor na onda positiva
- d) centelhadores de haste 5-15% menor na onda positiva
- e) para as buchas aplicadas em transformador, em determinado nível de tensão, a descarga devido a onda positiva é menor e, para outro nível de tensão ocorre o oposto.

Deve-se considerar que nos PR do tipo subestação, devido a característica de sua construção, a diferença

entre as descargas disruptivas devido a polaridade das ondas é praticamente desprezível.

4.4 - Considerações na Determinação do NBI do Transformador (4-5)

Devido a estrutura complexa de isolamento que apresenta um transformador; na determinação do seu NBI, deve ser aplicado ensaio com uma onda cortada, obtida com um centelhador aplicado em paralelo com o transformador, devendo cortar esta onda entre 1.5 a 3 μ s, dependendo do valor de tensão aplicada. A onda cortada, deve ter um valor de crista 15% maior que a onda plena de impulso. Este ensaio consiste na aplicação de duas ondas cortadas e uma de onda plena. Na tabela 4.1, são apresentados o NBI dos equipamentos representativos da subestação, para classe de tensão entre 1.2 e 330 KV. Uma observação desta tabela, mostra que no ensaio de resistência padrão para transformadores a óleo, no que concerne ao ensaio de impulso com onda cortada, suporta uma tensão de valor muito maior que aquela determinada pela crista da onda plena de impulso que representa o NBI do transformador. Isto mostra que existe uma margem de segurança entre a resistência a impulso estimada e, a verdadeira resistência que o transformador pode resistir a uma determinada sobretensão.

4.5 - Coordenação na Proteção dos Transformadores

Para se determinar a coordenação adequada para proteção de transformadores deve-se considerar:

- a) tensão devido ao raio deve ser inferior a 80% do nível de tensão de impulso. O mesmo para a queda de tensão IR durante a descarga

Tabela 4.1

NBI e ensaios existente de resistência padrões da indústria para o isolamento dos equipamentos representativos das sub-estações

Classe do tensão do sistema kV	NBI padrão, kV	NBI típicos dos abalxos do padrão	Ensaios de resistência padrão AIEE tentativos para unidades de barra e chaves ao tempo		Ensaios de resistência padrão para transformador a óleo			Ensaios de resistência padrão para buchas de equipamentos ao tempo											
			Baixa frequência 1 min. seco, kV VMQ	Baixa frequência da o. plena pos. ou neg. Molhado, kV VMQ	kV da crista da o. plena de 1,5 x 40 MS do e. pulso	Onda cortada		kV da crista da onda plena de 1,5 x 40 MS	Ensaios de baixa frequência		kV da crista da onda plena de 1,5 x 40 MS do ensaio de impulso								
						Classe Distr. Fôrça	Tempo mínimo para descarga disruptiva, microssegundos		Ensaio de 1 min. a seco kV VM Quadrático	Ensaio de 10 seg. molhado, kV VM Quadrático		Equipamento Pequ. Grande	Equipamento Pequ. Grande						
			Classe Distr. Fôrça	Classe Distr. Fôrça	Classe Distr. Fôrça	Classe Distr. Fôrça	Classe Distr. Fôrça	Equipamento Pequ. Grande	Equipamento Pequ. Grande	Equipamento Pequ. Grande									
1,2	30	45	10	36	54	1,0	1,5	30	45	10	15	21	27	35	50	30	45	60	
2,5	45	60	19	69	88	1,5	1,6	45	60	15	21	27	35	50	60	80	100	120	150
5,0	60	75	26	88	110	1,6	1,8	60	75	19	26	34	45	60	75	95	120	150	200
8,7	75	95	34	110	130	1,8	2,0	75	95	26	34	45	60	75	95	110	145	175	230
15	95	110	50	110	130	2,0	3,0	95	110	34	45	60	75	95	110	145	175	230	300
23	150	200	50	175	230	3,0	3,0	150	200	50	60	75	95	110	145	175	230	300	400
34,5	200	250	70	230	290	3,0	3,0	200	250	70	80	100	120	150	200	250	300	400	500
46	250	350	95	290	400	3,0	3,0	250	350	95	120	150	200	250	300	400	500	650	800
69	350	550	140	400	550	3,0	3,0	350	550	140	175	230	300	400	500	650	800	1000	1300
115	550	800	230	630	850	3,0	3,0	550	800	230	280	335	425	545	650	800	1000	1300	1700
138	650	900	185	520	750	3,0	3,0	650	900	280	335	425	545	650	800	1000	1300	1700	2200
161	750	1050	275	750	1050	3,0	3,0	750	1050	335	425	545	650	800	1000	1300	1700	2200	2800
230	1050	1400	375	855	1150	3,0	3,0	1050	1400	425	545	650	800	1000	1300	1700	2200	2800	3600
287	1400	1900	460	1210	1650	3,0	3,0	1400	1900	545	650	800	1000	1300	1700	2200	2800	3600	4600
330	1900	2600	690	1550	2100	3,0	3,0	1900	2600	650	800	1000	1300	1700	2200	2800	3600	4600	5800
			520	1350	1875	3,0	3,0	1350	1875	800	1000	1300	1700	2200	2800	3600	4600	5800	7300

- b) para surtos de chaveamento, com duração da ordem de alguns milhares de μ s, a tensão de resistência deve ser da ordem de 30% acima do valor de crista da tensão de ensaio de 1 minuto a baixa freqüência do transformador
- c) os surtos de chaveamento de longa duração não deve exceder 80% do nível de tensão de resistência dos transformadores, ou seja:

$$80\% \times 130\% \times \sqrt{2} \times T_E \quad (4.1)$$

onde T_E representa a tensão de ensaio de um minuto em baixa freqüência.

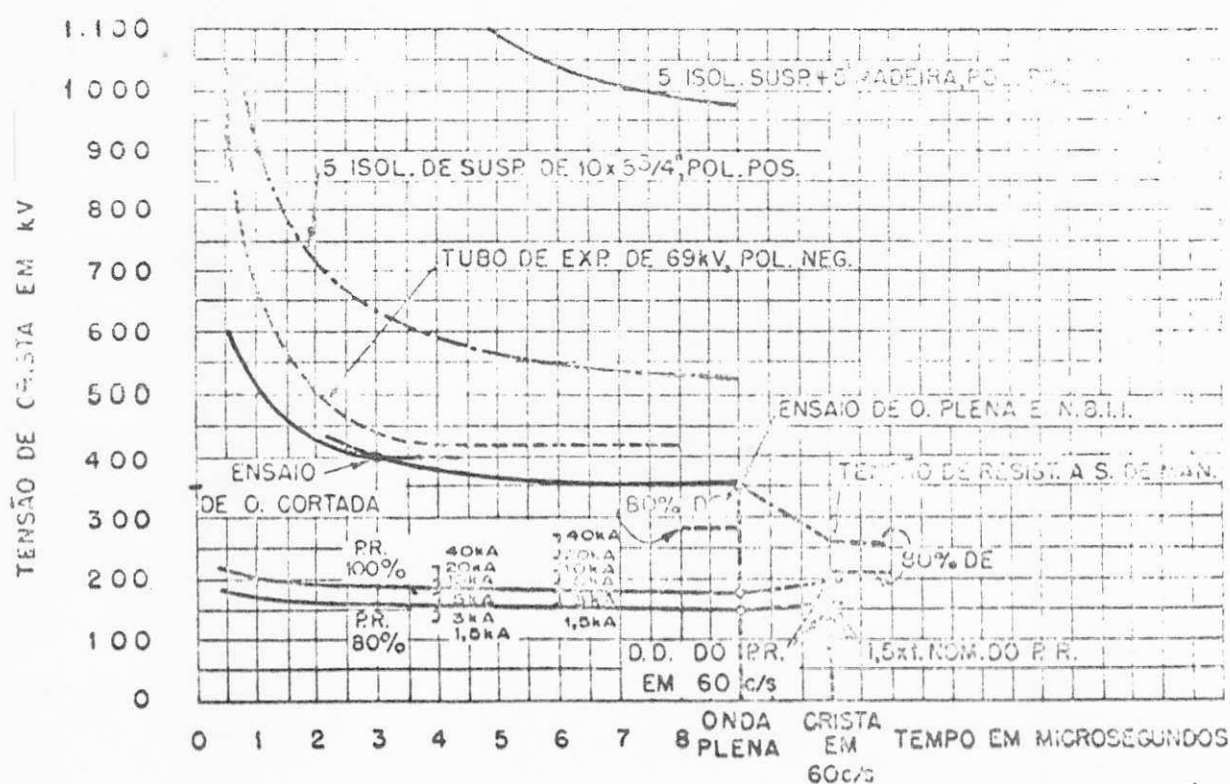
4.6 - Considerações a Serem Tomadas na Determinação do Nível de Isolamento Adequado para um Sistema (6)

- a) Determinar a máxima tensão que venha a ocorrer nos terminais de um PR, devido a uma falha para a terra e, encontrar a sua tensão nominal
- b) As características de descarga, devem ser determinadas a partir de dados fornecidos pelos fabricantes
- c) Calcular em função de dados de operação disponíveis e, experiência, o valor das correntes de descarga máxima que venha a ocorrer e determinar o PR que satisfaça estas exigências
- d) Baseado em recomendações disponíveis e experiências práticas, certa margem de segurança sobre a tensão de descarga, é considerada como o nível de proteção do PR
- e) O nível de isolamento do equipamento à ser proteu

gido, deve estar a um valor maior que o nível de proteção do PR.

4.6.1 - Exemplo de Coordenação na Proteção de Sistemas

Um exemplo de coordenação na proteção de sistemas é apresentado na figura 4.3, para um sistema de 69 KV.



As curvas desta figura, mostram a característica de tensão-tempo do transformador e equipamentos da subestação. Na parte esquerda, uma curva mostrando o ensaio de onda cortada e de onda plena que representa o NBI do transformador. Imediatamente abaixo a curva de 80% que representa o nível máximo que deve ser alcançado pela proteção de PR, em função do tipo de aterramento empregado no sistema.

Observa-se que a proteção assegurada pelo PR de 80%, oferece uma distância maior entre a sua característica de descarga e o NBI do transformador, em comparação com aquela oferecida pelo PR de 100%.

Para surtos de chaveamento, apresentado na parte direita da figura 4.3, a tensão de chaveamento está muito abaixo da curva de resistência do transformador e com uma margem menor em relação a curva de proteção assegurada pelo PR.

A descarga disruptiva a 60 Hz é aproximadamente igual a 1.80 pu da tensão nominal do PR, assegurando a margem de 1.50 pu exigida pelas normas.

O PR de 100%, apresenta uma queda de tensão IR, aproximadamente igual a 69% do nível de onda plena do transformador. Neste caso, é indicado empregar blindagem contra descarga direta, evitando que ocorram descargas da ordem de 5 a 10 KA, favorecendo quedas de tensão IR menor nos PR, aumentando a margem que assegura uma proteção satisfatória ao transformador.

O estudo da Coordenação dos isolamentos, além de prever uma proteção satisfatória a todos os equipamentos da subestação, associa a maneira mais econômica que possibilite com baixo custo; garantir um nível de proteção suficiente para a subestação. Tomemos como exemplo, um sistema operando na classe de 138 KV, apresentado na tabela 4.2. Existem dois valores de NBI para esta classe de tensão: 650 e 550 KV. (Col.2). Quando o sistema possui o neutro solidamente aterrado, pode-se aplicar PR de 75% ou 80% e, utilizar um transformador com NBI de 550 KV, ao contrário do NBI de 650 KV que seria necessário empregar caso o neutro do sistema não fosse aterrado, devido se utilizar PR de 100%.

Foi comentado anteriormente que quando o

Proteção coordenada de transformadores de força por para-raios Thyrite Magnés-valva tipo estação

Classe de tensão de operação do sistema de transmissão, em kV valor médio quadrático	KV de tensão de ensaio de onda plena do transformador e NRH	KV de tensão de ensaio de onda plena (80% do ensaio de onda plena 1,5 x 40 MS do transf.)	Tensão máxima entre linha e terra do para-raio, em kV VM Quadrático	Para-raio de 80% ou 75% para sist. com neutro aterrado e de 100% para sist. com neutro não aterrado	Níveis de proteção para impulso				KV de crista da tensão de desc. disruptiva do para-raio em 60 c/s e em surtos de manobra lentos	Tensão de surto de manobra max. permissível (80% de 1,5 do nível de resist. estimada do transf. a s. de man.)	KV de crista da desc. disruptiva do para-raio em 60 c/s e em surtos de manobra lentos (1,5 vezes a crista de tensão nominal do para-raio, normas da AIEE)	
					KV de crista da tensão de descarga 10 x 20 MS de correntes de descarga de							
					5 000 A	10 000 A	20 000 A	40 000 A				
Col. 1	Col. 2	Col. 3	Col. 4	Col. 5	Col. 6	Col. 7	Col. 8	Col. 9	Col. 10	Col. 11	Col. 12	Col. 13
23 kV	150	120 120	20 25	80% 100%	59/ 64 67/ 72	54,25 62	59,5 68	66,5 76	79 90	55 63	73,5 73,5	42 52
34,5	200	160 160	30 37	80% 100%	76/ 92 90/110	77,5 93	85 102	95 114	113 135	79 95	103 103	63 78
46	250	200 200	40 50	80% 100%	97/120 118/147	100 124	110,5 136	123,5 152	146 180	103 127	140 140	84 105
69	350	280 280	60 73	80% 100%	146/182 173/218	155 186	170 204	190 228	227 270	159 191	206 206	126 152
92	450	360 360	79 97	80% 100%	187/235 228/287	201 248	221 272	247 304	293 360	203 252	272 272	165 203
115	550	440 440	97 121	80% 100%	228/287 283/355	248 310	272 340	304 380	360 450	252 318	339 339	203 253
115 Isolam. reduz. para 92 kV	450	360	97	80%	228/287	248	272	304	360	252	272	203
138	650	520 520 520	121 109 145	80% 75% 100%	283/355 256/321 338/419	310 279 372	340 306 408	380 342 456	450 405 510	318 286 382	405 405 405	253 228 303
138 Isolam. reduz. para 115 kV	550	440 440	121 109	80% 75%	283/355 256/321	310 279	340 306	380 342	450 405	318 286	339 339	253 228
161	750	600 600	145 133	80% 75%	338/419 311/387	372 341	408 374	456 418	510 495	382 350	469 469	303 280
161 Isolam. reduz. para 138 kV	650	520 520	145 133	80% 75%	338/419 311/387	372 341	408 374	456 418	510 495	382 350	405 405	303 280
230	1050	840 810	195 182	80% 75%	419/512 422/512	496 456	544 510	608 570	720 675	507 477	677 677	408 379
230 Isolam. reduz. para 186 kV	900	720 720	195 182	80% 75%	419/512 422/512	496 465	544 510	608 570	720 675	507 477	581 581	408 379
230 Isolam. reduz. para 161 kV	825	660	182	75%	422/512	465	510	570	675	477	515	379
287 Isolam. reduz. para 161 kV	1050	840	228	75%	532/628	590	646	722	855	604	677	476
330 Isolam. reduz. para 230 kV	1350	1080	276	80%	733/842	713	782	875	1035	732	884	585
330 Isolam. reduz. para 230 kV	1175	940	264	75%	615/708	682	748	836	990	700	765	560

CENTRO DE CIÊNCIAS E BIBLIOTECA

sistema não é aterrado, deve-se empregar fio terra para evitar que ocorram correntes de descargas da ordem de 5 ou 10 KA. Uma análise da coluna 7, mostra que no PR de 100% a tensão de descarga com onda de 10/20 μ s, é de 372 KV e no PR de 80% é igual a 310 KV. Isto leva a análise que, visando a redução no custo da instalação de uma subestação, é melhor empregar aterramento no sistema por que, pode-se adquirir equipamento com NBI reduzido bem como, PR com tensão nominal menor; observando que a diferença entre os dois tipos: sistema aterrado e não aterrado, é muito grande, considerando que neste último é somado o gasto com fios de aterramento.

4.7 - Coordenação dos Isolamentos em EHV

A Coordenação dos Isolamentos em sistemas de EHV, deve fazer uso de conceitos estatísticos com o propósito de predeterminar o risco de falha que venha a ocorrer no isolamento, associando à probabilidade de ocorrer um determinado surto; a probabilidade que este mesmo surto venha a provocar falha na isolação do sistema. (7)

Com a finalidade de reduzir o risco de falha, as seguintes observações devem ser consideradas:

a) Reduzir a probabilidade que um surto possa vir a causar falha, aumentando o isolamento. Algumas vezes, economicamente isto se torna dispendioso.

b) Reduzir a probabilidade de ocorrer surtos elevados, evitando que tais surtos venham a produzir falhas no isolamento. Para os sistemas de EHV, onde predominam as descargas devido a operações de chaveamento, isto pode ser obtido pela aplicação de resistores shunt nos seccionadores, assim como procurando sincronizar o fechamento dos pólos dos disjuntores, evitando surtos de tensão produzidos em outras fases, devido a energização das mesmas, através do terciário do

transformador que termina esta linha, assim como devido a ressonância.

c) Aplicar desviadores de surto, prevenindo falhas no isolamento, e, devido a descarga disruptiva destes, reduzir a amplitude do surto.

4.7.1 - Redução do Risco de Falha

No estudo estatístico da redução do risco de falha, com o emprego de PR, deve-se considerar alguns conceitos, relacionados com o isolamento do sistema:

a) Distribuição da frequência cumuiativa de surtos, aplicado ao isolamento do sistema que corresponde a probabilidade de ocorrer um surto através do isolamento, de valor igual ou maior que V , devido a operação de chaveamento, representada por

$$f(V)$$

a tensão V , apresentada no oscilograma da figura 4.4 equivale ao valor de pico prospectivo de uma onda de impulso tipo chopped. Tensão prospectiva, é igual ao valor máximo que o surto atinge sem operação do PR.

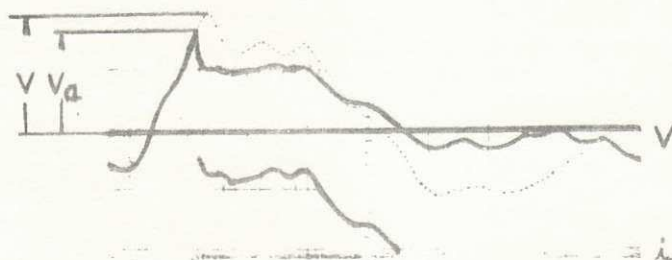


Fig. 4.4 - Tensão prospectiva (V) e tensão após a descarga disruptiva do PR (V_a).

b) Distribuição da freqüência de surtos, aplicada ao isolamento do sistema, representada por

$$\delta(V) = - df(V)/dV \quad (4.2)$$

Nesta relação, o produto $\delta(V).dV$, corresponde a probabilidade de ocorrer um surto através do isolamento, compreendido entre V e $V + dV$.

c) Probabilidade de descarga do isolamento, corresponde a probabilidade que um surto de valor V , venha a produzir descarga disruptiva no isolamento, dependendo do valor de pico do surto e da forma de onda, representada por

$$F(V)$$

d) Número de descargas esperado no sistema, devido a N operações de chaveamento, representado por

$$N_d = N/F(V) . \delta(V) . dV \quad (4.3)$$

e) Grau de proteção de um PR, com respeito a um dado isolamento, correspondendo a razão entre o número de descargas que são eliminadas no isolamento devido a aplicação de PR e o número de descargas que ocorre sem a presença deste. Isto é muitas vezes uma dependência direta de $f(V)$, e é representado por α .

Uma análise pode ser feita, para o PR, aplicado ao sistema com dupla finalidade:

- 1) como um dispositivo para reduzir surtos
- 2) como um dispositivo para reduzir descargas.

Isto pode ser mostrado, a partir da figura 4.5 que apresenta curvas de probabilidade de descarga em função da tensão aplicada.

4.7.2 - PR como um Elemento Redutor de Surtos

Considera-se o PR aplicado ao sistema, no instante de ser determinada a frequência cumulativa dos surtos, equivalendo a $f(V)$. Voltando a figura 4.4, observa-se duas curvas de tensão V e V_a . Curva V , representa o valor de tensão prospectiva e V_a , chamada de "valor de pico atual da onda" equivale a tensão que aparecerá no sistema com a operação de descarga do PR. Deve-se também considerar que o valor de pico V_a , ocorre em diferentes tempos, produzindo diferentes valores de tensão devido a fatores como: duração da frente de onda, oscilações no surto, condições de umidade, tempo seco, neblina e outros.

Com o auxílio da figura 4.5 pode-se avaliar a atuação do PR, na redução de surtos:

1) $f(V)$ representa a probabilidade da ocorrência da frequência cumulativa de surtos sem existir nenhum dispositivo de supressão.

2) $f_1(V)$ representa a mesma probabilidade anterior reduzida pela aplicação de resistores shunt nos seccionadores.

3) $f_2(V)$, representa a mesma probabilidade, reduzida no limite superior de tensão, pela aplicação de PR, fazendo com que o valor V , caia para V_a . Nesta figura, nota-se uma parte hachurada, representando os diversos valores de V_a , visto que o valor de descarga disruptiva dos PR, depende dos fatores mencionados anteriormente, apresentado uma certa dispersão, daí não poder haver um ponto definido como V_a .

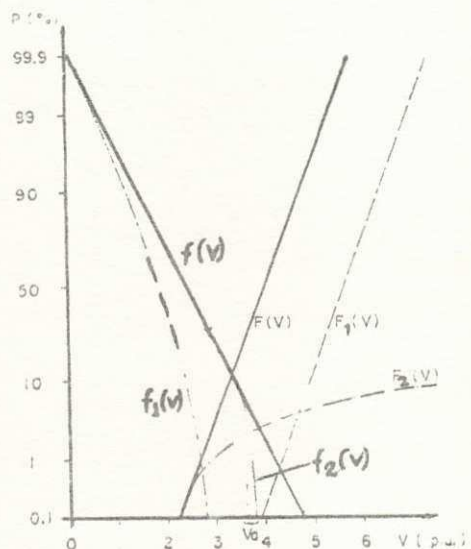


Fig. 4.5 - Frequência cumulativa da ocorrência de surtos $f(V)$ e probabilidade de descargas no isolante.

4.7.3 - PR como um Dispositivo para Reduzir Descargas

Para encontrar a probabilidade de um determinado surto vir a provocar descarga no isolamento, considere-se o PR em paralelo ao isolamento, assim como a resistência que este oferece aos impulsos e, o valor de descarga disruptiva do PR.

Ainda com o auxílio da figura 4.5, pode-se analisar a atuação do PR, na redução das descargas no isolamento:

1) $F(V)$, representa a probabilidade de descarga no isolamento, sem o emprego de qualquer meio de redução.

2) $F_1(V)$, representa a probabilidade anterior reduzida para uma determinada faixa de tensão, devido ao aumento de isolamento.

3) $F_2(V)$, representa a mesma probabilidade reduzida consideravelmente pela aplicação do PR. A figura 4.6, mostra com mais clareza, esta redução na probabilidade de descarga.

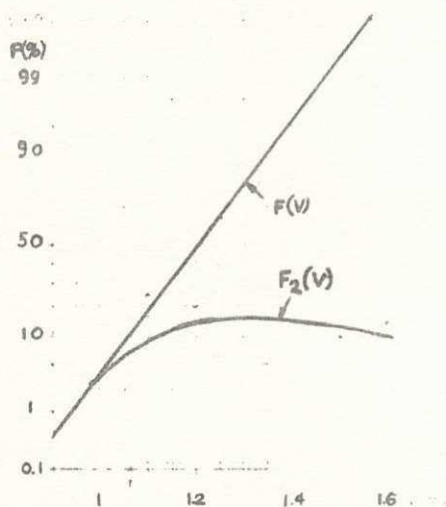


Fig. 4.6 - Redução na probabilidade de descarga no isolamento.

$F(V)$ - sem PR
 $F_2(V)$ - com PR

O número de descargas esperado (N_d) anteriormente definido é dado pelo produto de $F_2(V)$ e do risco de falha $f(V)$, sem o PR aplicado.

Uma aproximação probabilística para o problema de coordenação de isolamento, deve analisar o comportamento do PR, por duas maneiras: como redutor de surto e como elemento para reduzir descargas. É mais compacta para a maneira anterior, visto que sua consideração é baseada no fato de que dentro de certos limites, a tensão de descarga através do isolamento não depende da forma de onda de tensão aplicada, enquanto que para a segunda maneira como elemento para reduzir descargas, depende da natureza da onda, e, por esta razão, os valores de tensão disruptiva do PR, difere para surtos devido a manobra e para surtos devido a lightning. Portanto, o grau de proteção oferecido pela presença do PR apli

cado ao sistema, apresenta um valor muito menor que a unida
de. (8)

Referências:

1 - Ver bibliografia	23
2 - " "	27
3 - " "	31
4 - " "	32
5 - " "	30
6 - " "	35
7 - " "	33
8 - " "	52

5. CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS NA APLICAÇÃO DE PÁRA-RAIOS

5.1 - Introdução

Neste capítulo, procurar-se-á mostrar algumas consi derações que são indispensáveis quando se determina um PR, para proteger os equipamentos de uma subestação. A proteção contra descarga direta; atenuação sofrida pela onda ao cam inhar pela zona de blindagem, calculada pela equação de FOUS e MENGER; bem como a distância tolerável a ser mantida entre o PR e o transformador, serão considerados, procurando se mini mizar o custo de montagem da subestação e também oferecer um nível protetivo adequado, evitando "outages" no sistema.(1-3)

5.2 - Distribuição dos Equipamentos na Subestação e Ate nuação Sufrida pela Onda

Inicialmente no projeto de uma subestação, deve-se considerar o "lay-out" de todos os equipamentos, levando em conta as distâncias observadas entre eles, baseada em dados fornecidos pelos fabricantes, e inclusive localizando os PR.

Neste "lay-out" inicial, deve-se também blindar a subestação (SE) contra descargas diretas, com o emprego de fios terra inicialmente a partir de 1/2 milha da SE, bem como as hastes de aço, discutidas no capítulo 2.

Se for necessário, deve-se recalcular a linha nesta zona de blindagem com o propósito de reduzir para um valor bem pequeno a probabilidade de falha na blindagem ou back-flashover. Da mesma forma, deve-se determinar a máxima ten são de impulso E_m que pode atingir a SE, após um surto de va lor E_{m0} ter passado pela última torre suporte dos fios de blindagem.

Este valor de tensão E_m , equivale a atenuação sofrida pela onda resultante após a descarga disruptiva na cadeia de isoladores, ao caminhar dentro da zona blindada pelos fios de terra aéreo (overhead ground wires), e é calculado através da fórmula de FOUS e MENGER. (4-6)

$$E_m = \frac{E_{mo}}{1 + K_o \cdot E_{mo} \cdot X} \quad (5.1)$$

onde:

E_{mo} - valor da tensão disruptiva da cadeia de isoladores da linha dentro da zona de blindagem.

X - comprimento em milhas da zona blindada.

K_o - dependendo do tipo de onda, que possa ocorrer na linha, como por exemplo:

- onda curta 1/5 μs = 0.0003

- onda longa 1:5/40 μs = 0.00016

- onda chopped 0.5/0.5 μs = 0.0006

Na prática, considera-se o valor de E_{mo} igual ao valor da tensão disruptiva da cadeia de isoladores mais 20%.

5.3 - Seleção da Tensão Nominal do Pára-Raios

Para se determinar a tensão nominal do PR, a ser aplicado na proteção do sistema, deve-se considerar:

a) máxima tensão de 60 Hz, relacionada com o terra no ponto onde será aplicado o PR, levando em conta as sobretensões dinâmicas que ocorrem no sistema.

b) coeficiente de aterramento.

- c) o valor de pico da corrente que o PR, deve deixar descarregar e selecionar sua corrente nominal.
- d) em função de a, b e c determina-se a tensão nominal do PR, e a partir de dados de fabricantes, escolhe-se aquele que possui valor igual ou ligeiramente maior que este. Consideremos a tabela 5.1.
- e) levando em conta a queda de tensão indutiva no "lead" do PR, calcular o nível real de descarga E_d . O "lead" significa o cabo que liga o PR a linha de transmissão. Na prática, é empregado um valor de $0.4 \mu\text{H}$ por cada pé de linha, e esta queda de tensão é dada por:

$$E_i = L \frac{di}{dt} \quad (5.2)$$

onde:

L - indutância total do "lead"

di/dt - taxa de variação da corrente com o tempo.

- f) o nível protetivo E_p do PR, levado em conta o valor mais alto de tensão entre a descarga disruptiva e a de descarga, segundo a tabela fornecida pelos fabricantes.

Deve-se observar que no instante em que ocorre uma sobretensão nos terminais do PR, devido a reflexão que a onda de surto sofre quando atinge seus terminais, pelo fato de apresentar naquele ponto uma resistência infinita, o surto tem seu valor duplicado e o circuito equivalente da linha e PR se comporta da maneira apresentada na figura 5.1.

Tabela 5.1

PROTECTIVE CHARACTERISTICS

Arrester Rating KV RMS	Max. ASA Front- of-wave Sparkover KV Crest	Max. 1½ x 40 Sparkover Range KV Crest 1½ ± .2 µ sec.	Max. Switching Surge Sparkover KV Crest	Max. 60 Cycle Sparkover KV RMS	Maximum Discharge Voltage (in Crest KV) at Indicated Impulse Current, 8 x 20 µ sec.					
					1.5 KA	3.0 KA	5.0 KA	10.0 KA	20.0 KA	40.0 KA
3	12	12	12	5.3	5.0	5.8	6.4	7.3	8.3	10.2
4.5	16	15	15	7.9	7.4	8.7	9.5	10.8	12.3	15.1
6	20	18	18	10.5	9.8	11.5	12.6	14.3	16.3	19.9
7.5	25	22	23	13.2	12.2	14.3	15.7	17.7	20.3	24.8
9	30	25	27	15.8	14.6	17.1	18.8	21.2	24.3	29.6
12	39	32	35	21.0	19.4	22.7	24.9	28.1	32.1	39.2
15	48	39	43	26.3	24.2	28.2	31.0	35.0	40.0	48.8
18	57	47	51	31.5	28.9	33.7	37.1	41.8	47.8	58.5
20	66	54	59	36.8	33.7	39.3	43.2	48.7	55.5	68.0
25	76	61	67	42.0	38.4	44.8	49.2	55.5	63.5	77.5
30	95	75	84	52.5	47.8	56.0	61.5	69.5	79.0	96.5
37	113	90	110	63.0	57.5	67.0	73.5	83.0	94.5	115
40	123	97	108	68.3	62.5	72.5	79.5	89.5	102	125
50	151	118	132	84.0	76	89.0	97.5	110	125	153
60	180	136	142	99	95	111	122	137	156	190
73	213	166	170	119	114	133	146	164	187	227
78	231	183	184	129	123	144	158	178	202	246
84	247	198	198	139	133	155	170	191	217	265
90	267	214	213	149	142	166	182	204	232	283
96	280	231	227	159	151	177	194	218	248	302
108	315	262	253	178	170	198	218	245	278	339
120	347	294	294	198	192	220	241	272	309	376
132	380	320	312	218	207	241	263	294	333	402
144	413	350	340	238	226	262	287	321	363	439
168	497	396	397	277	263	305	334	374	422	510
180	538	430	425	297	281	327	358	400	452	550
192	580	460	453	317	300	349	382	427	482	585
228	702	547	539	376	355	413	452	510	575	695
240	743	575	567	396	374	435	476	535	605	730
258	805	623	609	426	402	467	515	575	650	785
264	825	640	624	436	411	478	525	585	665	800
276	876	672	650	455	429	500	550	615	690	835
288	907	706	680	475	448	525	570	640	720	875
300	948	738	709	495	467	545	595	665	750	910
312	988	771	737	515	485	565	620	690	780	945

Características Protetivas dos Para-Raios Fabricados Pela General Electric

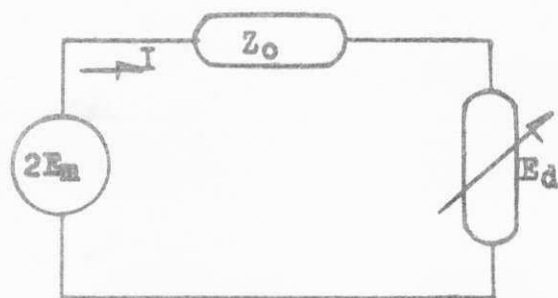


Fig. 5.1 - Circuito equivalente de PR e linha de transmissão quando ocorre um surto de valor E_m .

Da figura 5.1 tira-se a seguinte equação:

$$2E_m = IZ_0 + E_d \quad (5.3)$$

onde:

E_m - valor do surto que atinge o terminal do PR.

Z_0 - impedância característica da linha.

I - corrente no PR.

E_d - valor da tensão nominal do PR obtida pelos itens considerados anteriormente, para um dado valor de corrente.

Para se calcular o valor da máxima corrente através do PR, utiliza-se a equação:

$$I = \frac{2E_m}{Z_0} \quad (5.4)$$

que é derivada da equação anterior.

5.4 - Seleção do Nível de Isolamento do Transformador

Na determinação do NBI do transformador, deve-se levar em conta todos os itens mencionados na seção 5.3 e, escolher um NBI acima do nível de proteção E_p oferecido pelo PR.

Considera-se também: (1)

- a) capacitância do transformador. Esta tem o efeito de aumentar 10 ou 20% a tensão nos seus terminais.
- b) o crescimento da tensão no transformador acima da tensão nominal do PR somado com a queda de tensão indutiva é dada por $2KT$, devido a reflexão. Isto é uma função direta da distância entre o ponto de conexão do PR na linha e o transformador, onde a onda leva um tempo T para atravessar este percurso.
- c) a tensão total no transformador, devido ao PR e as reflexões, bem como a queda de tensão indutiva é dada por:

$$E_T = E_p + L \frac{di}{dt} + 2KT \quad (5.5)$$

embora se empregue na prática a equação

$$E_T = E_p + 2KT \text{ equivalente a}$$

$$E_T = E_p + 2K \frac{L_0}{1000} \quad (5.6)$$

onde:

E_p - nível protetivo assegurado pelo PR.

K - taxa de crescimento da onda que caminha para o SE, estimada entre 500 e 1000 KV/ μ s, ou pode ser considerada também como o valor usado para o teste de frente de onda nos PR, equivalendo a 100 KV/ μ s para cada 12 KV de tensão nominal dos PR.

L_0 - distância em pés do transformador até a conexão do PR na linha.

- d) para se calcular a distância ótima onde se deve aplicar o PR, oferecendo uma margem de segurança ao isolamento do transformador, deve-se empregar a equação 5.7 que é derivada de 5.6.

$$L_0 = \frac{[(NBI - Margem) - E_p] \times 1000}{2K} \quad (5.7)$$

em que:

L_0 - distância do transformador até a conexão do PR a linha.

NBI - Nível Básico de Isolamento do transformador.

Margem - representa uma segurança ao isolamento. Se emprega geralmente 10%.

K e E_p - definidos no item anterior.

5.5 - Exemplo Prático

Com o propósito de mostrar a maneira de se determinar um PR, assim como o NBI dos equipamentos, considere-se uma SE de 132 KV, constituída de:

Tensão máxima de operação do sistema - 145 KV

Sobretensão dinâmica - 1.05 pu

Coefficiente de aterramento - 0.8

Isoladores de disco - 9 de 10x5 3/4"

Impedância de surto - 400 ohms

Distância entre torres - 1000 pés

Transformadores - 30 MVA 132/33 KV

Conexão do PR a linha - 20 pés
 Distância da conexão
 do PR na linha até o
 transformador - 100 pés.

Solução:

- a) A partir do número de isoladores que constituem a cadeia, determina-se o valor da descarga disruptiva acrescentando mais 20%. Uma cadeia do tipo usado neste problema, tem uma tensão disruptiva da ordem de 845 KV para onda com polaridade negativa. Tem-se:

$$E_{mo} = 845 \text{ KV} \times 1.20 = 1014 \text{ KV}$$

- b) Consideremos inicialmente uma zona de blindagem de 1/2 milha e calculemos a amplitude do surto que atinge o SE com o auxílio da equação 5.1, empregando um $K_0 = .00016$

$$E_m = \frac{1014}{1 + 1014 \times 1/2 \times .00016} = 940 \text{ KV}$$

- c) Com o emprego dos gráficos da figura 5.2, para um condutor 0.927" ACSR; onda de polaridade negativa e 940 KV temos

$$\frac{\Delta t}{d} = 0.31 \text{ } \mu\text{s/mil pés}$$

a taxa de crescimento para 1/2 milha = 2.64 mil pés

$$\frac{\Delta t}{d} \times d = 0.31 \times 2.64 = 0.71 \text{ } \mu\text{s}$$

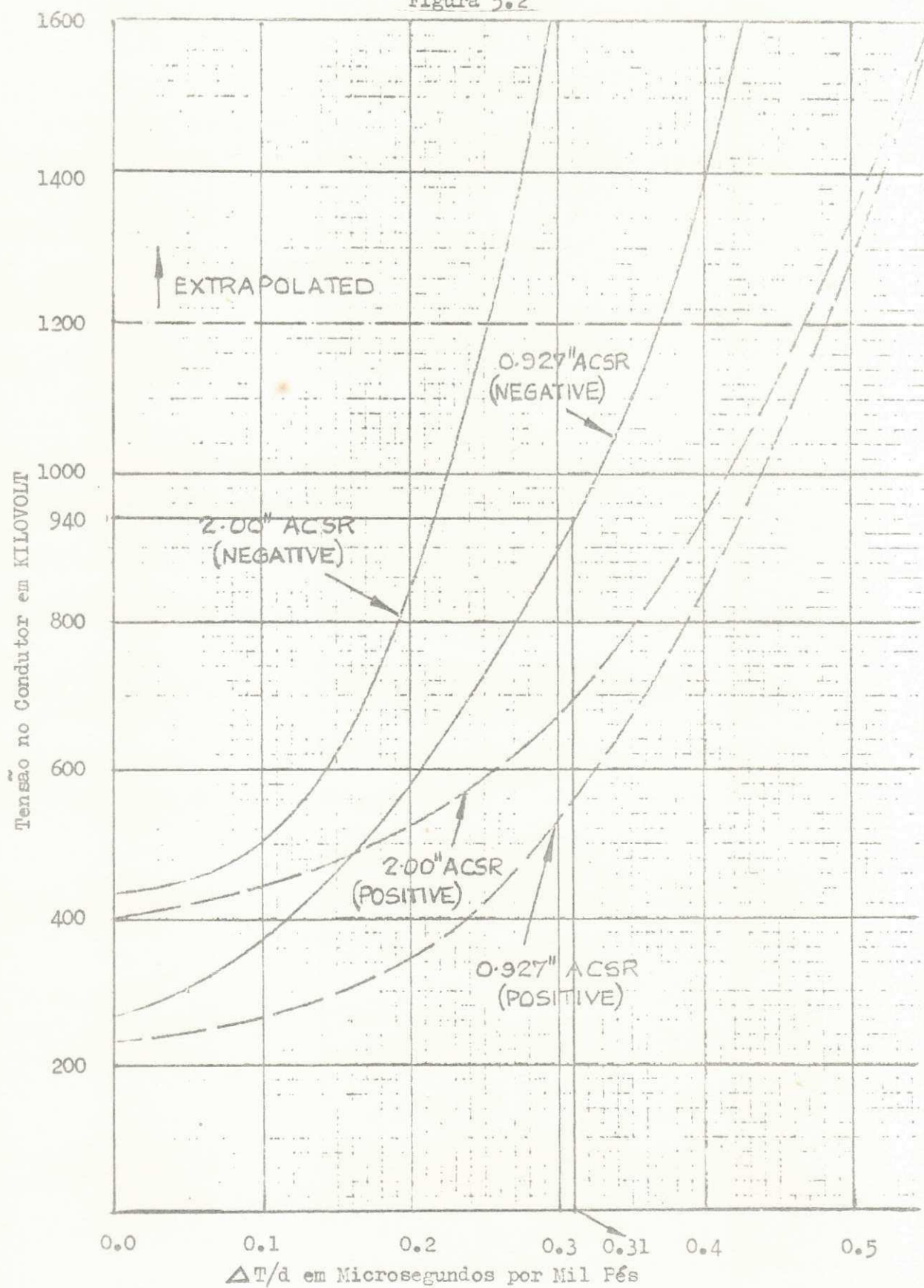
$$\Delta t = 0.71 \text{ } \mu\text{s}$$

$$K = 940 \text{ KV}/0.71 \text{ } \mu\text{s}$$

$$K = 1150 \text{ KV}/\mu\text{s}$$

- d) Cálculo da máxima tensão no ponto de aplicação do PR de acordo com o item a da seção 5.3

Figura 5.2



$$145 \times 1.05 \times 0.8 = 122 \text{ KV}$$

com este valor, utilizando a tabela 5.1, escolhemos o PR de tensão nominal imediatamente maior 132 KV.

- e) Cálculo da corrente máxima de descarga, com o auxílio da equação 5.4

$$I = \frac{2 \times 940 \text{ KV}}{400} = 4.7 \text{ KA}$$

deve-se empregar então um PR de 132 KV e 5 KA de corrente nominal, que dá na tabela um $E_d = 263 \text{ KV}$.

- f) Cálculo da queda de tensão indutiva nos "leads" do PR a linha, empregando a equação 5.2 e uma corrente de 5 μs de frente

$$L \frac{di}{dt} = 0.4 \mu\text{H} \times 20 \times \frac{4.7 \text{ KA}}{5 \mu\text{s}} = 7.52 \approx 8 \text{ KV}$$

- g) O nível protetivo do PR equivale a soma do item e e f igual a

$$E_p = (263 + 8) \text{ KV} = 271 \text{ KV}.$$

Para surto com taxa de crescimento de $K = 1100 \text{ KV}/\mu\text{s}$, na tabela 5.1, temos a frente de onda de descarga disruptiva igual a 380 KV.

- h) Os transformadores para classe de tensão de 132 KV, possuem NBI de 550 e 650 KV. Calculemos a distância do terminal do PR ao transformador para empregar um NBI de 550 KV, utilizando a equação 5.7

$$L_o = \frac{[(550 - 10\%) - 380] \times 1000}{2 \times 1150} = 50 \text{ pés}$$

Para surtos de chaveamento o NBI do transformador, deve ser considerado igual a 83% do seu nível de tensão disruptiva com onda de 1.5/40 μs .

O valor da distância obtida com o item h, da seção

5.4, equivale a 50% do valor estimado no "lay-out" inicial da subestação. Neste exemplo o valor de 50 pés deve ser considerado, com o propósito de não colocar em risco o isolamento de 550 KV do transformador, em lugar de 100 pés que seriam empregado inicialmente.

Pode-se também reduzir a amplitude do surto que atinge o PR pelo aumento da zona de blindagem, oferecendo um E_m menor.

Referências:

- | | | |
|-----|------------------|----|
| 1 - | Ver bibliografia | 38 |
| 2 - | " " | 23 |
| 3 - | " " | 32 |
| 4 - | " " | 1 |
| 5 - | " " | 2 |
| 6 - | " " | 4 |
| 7 - | " " | 44 |

6. CARACTERÍSTICAS CONSTRUTIVAS DOS PÁRA-RAIOS

6.1 - Introdução

Basicamente o PR, consiste de um número de centelhadores em série com resistores do tipo não linear, chamados resistores válvulas.

Os resistores variáveis, são blocos constituídos de silicato de carbono (SiC), apresentando variação no seu valor, de acordo com a tensão aplicada; variando inversamente com estas. Em condições normais do sistema, oferecem elevado valor de resistência, decrescendo com o aumento da tensão, alcançando um valor bem próximo de zero, quando vem a ocorrer uma sobretensão.

Os centelhadores (spark gaps) constituem uma determinada quantidade de espaços disruptivos (gaps) em série, separados uniformemente, por meio de distanciadores de alta constante dielétrica. Estes gaps são pré-ionizados e, a descarga disruptiva ocorre tão rapidamente e com a mesma precisão com que a irradiação num gap.

Os resistores de nivelamento de alto valor são empregados entre os centelhadores com o propósito de assegurar uma uniformidade de tensão nos gaps, e ao mesmo tempo, melhorar a capacidade de extinção do arco.

6.2 - Constituição Interna dos Pára-Raios

A apresentação dos elementos que compõe um PR depende do tipo de funcionamento do mesmo. Da maneira como foram designados no capítulo 3, serão aqui comentados.

6.2.1 - Pára-Raio tipo Expulsão

Ao contrário dos PR tipo válvula e sopro magnético, como serão posteriormente apresentados; são constituídos de um isolador de porcelana que envolve uma câmara anular onde está localizado o air gap interno (1). As paredes desta câmara, são constituídas de substância orgânica, que se gaseifica quando em presença de um arco; aumentando o comprimento dele, permitindo seu resfriamento e deionizando o ambiente interno através de um orifício para esta finalidade. Este tipo de PR, tem a capacidade de extinguir a corrente no primeiro zero.

Na figura 6.1, apresenta-se o corte de um PR tipo expulsão: em (1) e (2), respectivamente o gap externo e interno. O gap externo, tem capacidade de suportar uma tensão de 1.25 pu da tensão nominal do PR. Em (3) e (4), os terminais que devem ser ligados a linha e ao aterramento. Em (5) o cilindro de material orgânico, que constitui a câmara de arco, e finalmente em (6) o isolador externo.

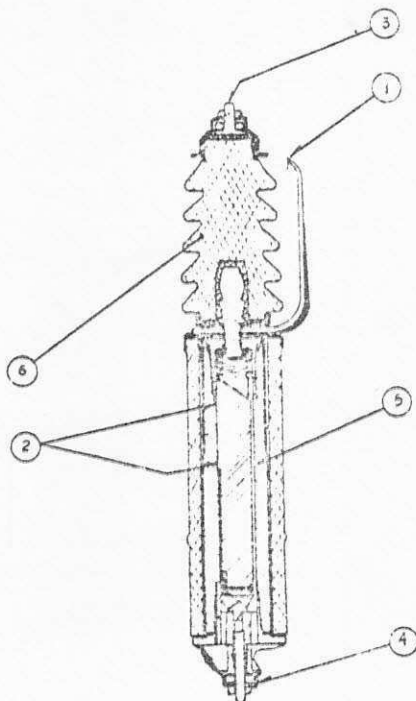


Fig. 6.1 - Corte de um PR do tipo expulsão

Embora este tipo apresente algumas vantagens com relação aos outros tipos de PR, não é de muita aplicação visto que tem uma vida reduzida, pelo fato da transformação em gases de uma parte dos cilindros da câmara de arco, assim como, pelo escape dos gases que vem a contaminar os equipamentos adjacentes. Geralmente a aplicação deste se reduz a distribuição rural.

6.2.2 - Pára-Raio tipo Válvula

Localizados no interior de um envoltório de porcelana, estão arrumados os resistores não linear, os spark gaps, distanciadores e os resistores de nivelamento, organizados de tal maneira que o conjunto de gaps fica em série com os blocos válvulas (resistores variáveis). Dependendo da tensão em que devem operar, os PR são formados de uma ou várias seções (2). Atenção especial deve ser dado para o fato de que os elementos válvulas, são colocados quase sempre na parte inferior, conectado aos spark gaps e distanciadores, por meio de mola de pressão.

Com o propósito de reduzir a altura dos PR, como por exemplo os fabricados pela ASEA do tipo XBA que operam na faixa de tensão de 4 a 32 KV, mostrado na figura 6.2; os spark gaps, estão arrumados na parte superior do envoltório de cerâmica, dispostos em duas camadas paralelas, permitindo uma redução de aproximadamente 50% no tamanho que seria alcançado se as duas camadas estivessem em série.

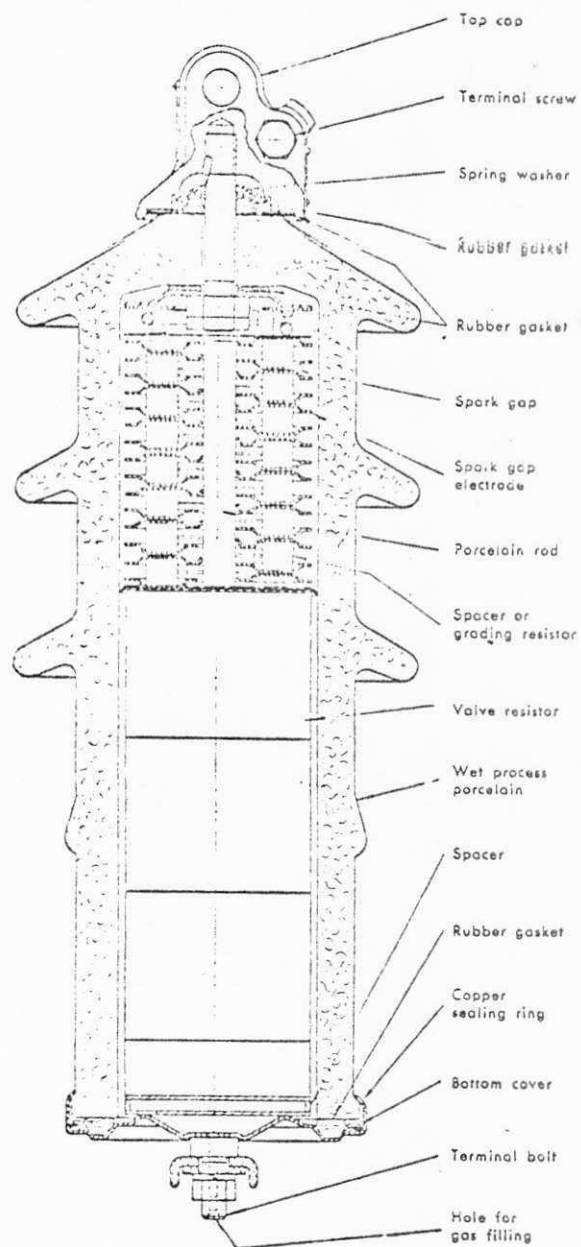


Fig. 6.2 - Corte do PR tipo XBA de fabricação da ASEA, apresentando a disposição dos componentes.

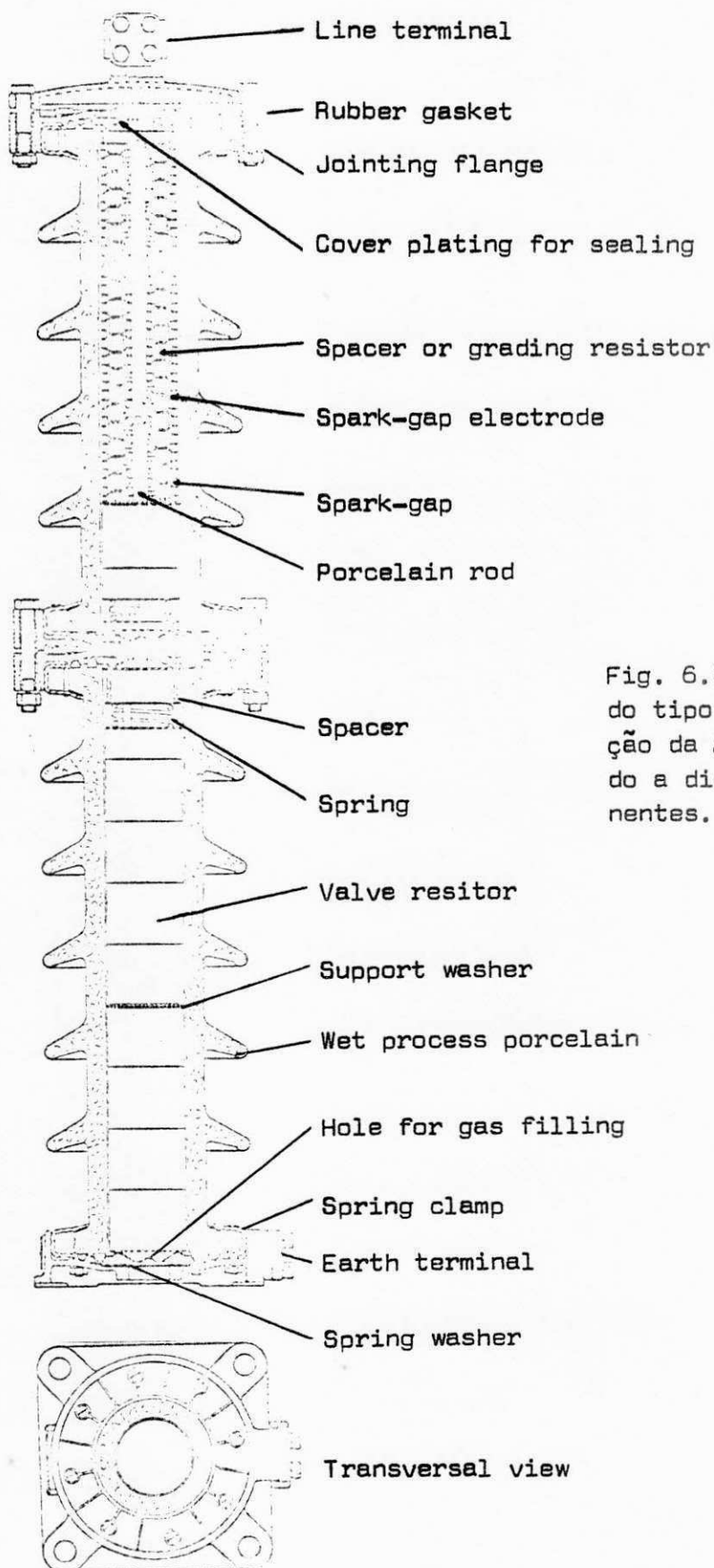
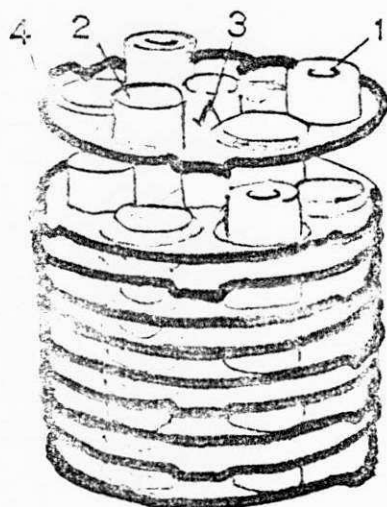


Fig. 6.3 -Corte de um PR do tipo XBB de fabricação da ASEA, apresentando a disposição dos componentes.

Em classes de tensão onde há necessidade de se reunir duas ou mais camadas, a disposição dos componentes é exemplificada através do perfil do PR também da ASEA, do tipo XBB que opera em classes de tensão de 32 a 106 KV, apresentado na figura 6.3. São constituídos de duas partes, em cuja seção superior estão o conjunto de gaps e resistores de nivelamento; na seção inferior, os resistores válvula.

6.2.2.1 - Efeito dos Resistores de Nivelamento na Descarga Disruptiva dos PR Tipo Válvula

Com o propósito de assegurar uma distribuição de tensão uniforme no conjunto de gaps, com variação de tensão relativamente lenta, resistores de nivelamento são aplicados entre os centelhadores conforme mostrado na figura 6.4, que apresenta a constituição do conjunto resistor-gap, usado nos PR de fabricação da ASEA, que operam em classes de tensão acima de 4.5 KV, até 106 KV (2).



Spark gap assembly, Top electrode plate lifted.

1. Spacer
2. Grading resistor.
3. Irradiation point.
4. Electrode plate.

Fig. 6.4 - Disposição interna dos componentes dos PR fabricados pela ASEA.

Estes resistores, oferecem uma tensão disruptiva alta, para as tensões de serviço e para os surtos devido a operações de chaveamento. Para variações de tensão muito rápida, a distribuição de tensão é determinada pela capacitância entre os eletrodos e a terra, provocando uma distribuição de tensão não uniforme entre os gaps, fazendo com que ocorra descarga disruptiva em um valor muito abaixo do que o devido a operações de chaveamento e defeitos do sistema para a terra. A avaliação dos resistores de nivelamento na descarga disruptiva, pode ser observada a partir da figura 6.5. Na curva A, temos a característica de tensão disruptiva em função de $KV/\mu s$, para um conjunto de spark gaps, contendo resistores de nivelamento entre os eletrodos; em B a característica do mesmo conjunto de spark gaps, sem os resistores e em C, um outro conjunto, com o número de spark gaps aumentado, e sem os resistores de nivelamento.

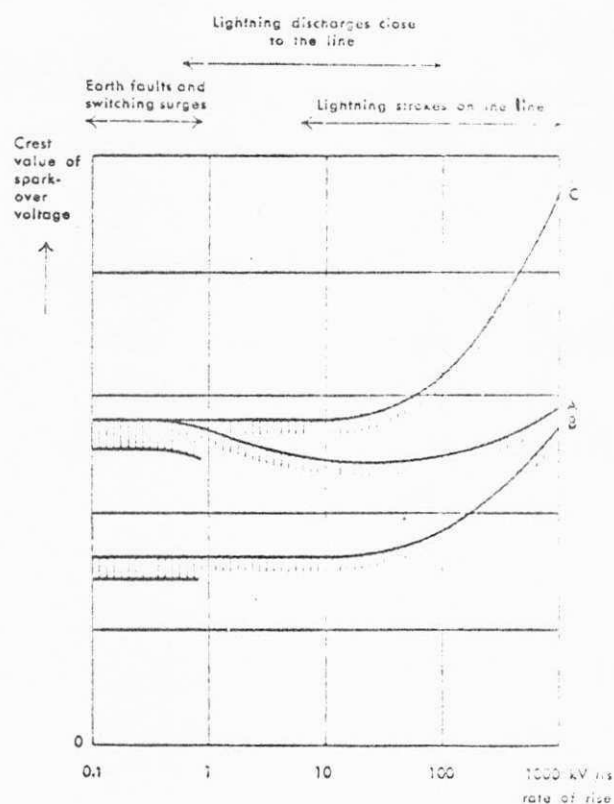


Fig. 6.5 - Efeito dos resistores de nivelamento, na tensão disruptiva dos PR.

Deve-se considerar na figura anterior, que as hachuras, representam a variação no valor da descarga disruptiva. O emprego de resistores de nivelamento ajudam a melhorar a capacidade de extinção do arco no gap.

O pára-raio apresentado na figura 6.2 é do tipo suspensão e o da figura 6.3, do tipo pedestal.

Alguns tipos de PR do tipo suspensão, aplicados em sistemas de distribuição, são dotados de centelhadores auxiliar e separadores automático. Como exemplo; na figura 6.6, é mostrado um PR fabricado pela H.K. Porter, apresentando o circuito de funcionamento com e sem o desligador automático conectado.

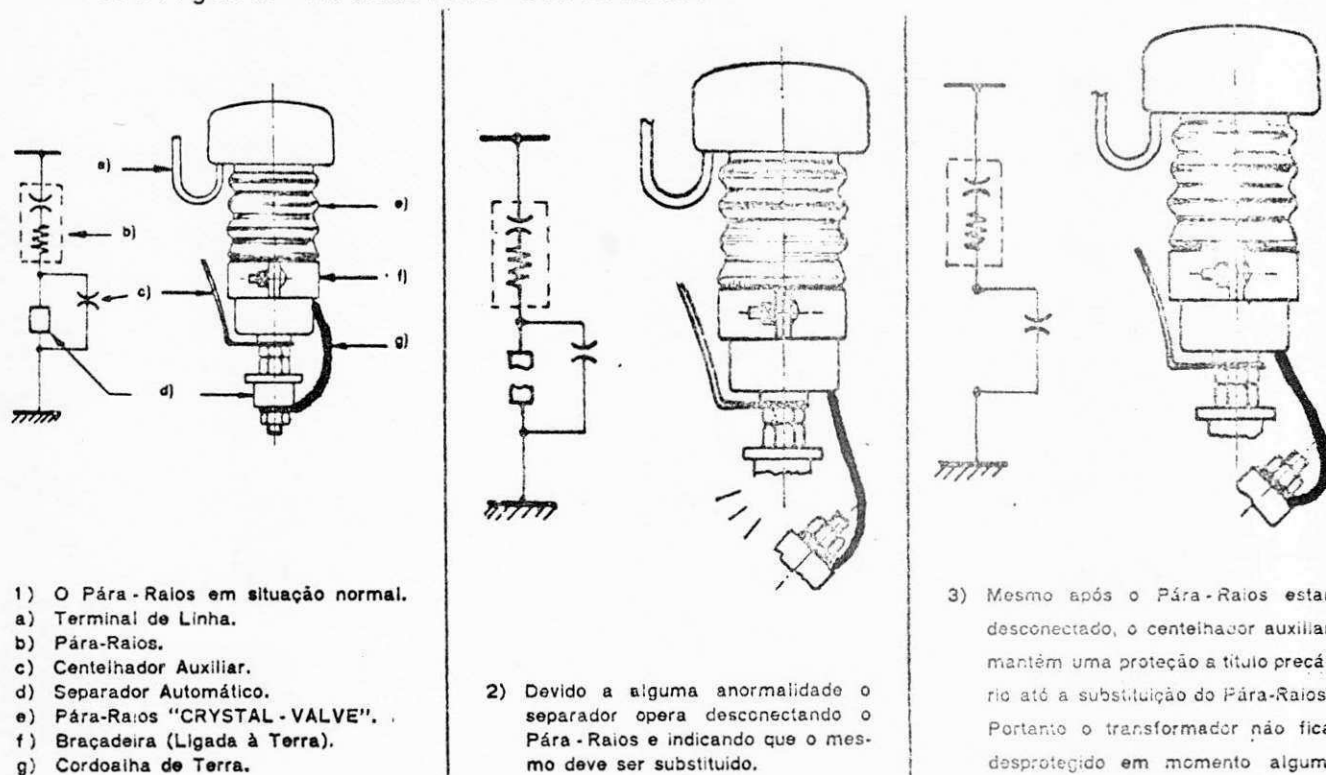


Fig. 6.6 - Pára-Raios do tipo suspensão fabricado pela H.K. Porter com centelhador auxiliar e separador automático, para ser usado em sistema de distribuição.

6.2.2.2 - Construção e Operação do Desligador Automático

É constituído de um gap de centelhamento com uma resistência em paralelo, que é empregado com a finalidade de evitar o aparecimento de rádio interferência.

Um pequeno cilindro, contendo pó combustível é aplicado sob pressão em uma camada de baquelite de alta resistência mecânica.

Ocorrendo uma corrente de descarga de valor anormal, devido a descarga direta no condutor ou mesmo devido a sobretensões de 60 Hz, haverá combustão do pó contido no cilindro, provocando a expulsão do desligador, indicando visivelmente que o PR fôra danificado. Como mostrado na figura 6.6.3, o PR continua a oferecer proteção ao transformador, embora não muito eficiente.

6.2.2.3 - Dispositivo para Aliviar a Pressão de Descarga

Muitas vezes, a tensão de 60 Hz aplicada aos terminais do PR, excede consideravelmente a tensão nominal deste, provocadas por: (3)

- a) auto excitação de máquinas, por longas linhas sem carga ou,
- b) variações de um menor para um maior nível de tensão.

Isto faz com que descarga ocorra através do PR, embora não seja certo que o arco seja propriamente extinto. Com o propósito de aliviar a pressão interna, resultante da sobretensão; os PR devem ser dotados de dispositivos de escape de pressão, prevenindo explosão do mesmo, e

assegurando proteção aos equipamentos e pessoal na instalação.

6.2.2.4 - Funcionamento do Dispositivo

Pela observação da figura 6.7 compreende-se perfeitamente o funcionamento do dispositivo. Uma lâmina de mola, pressiona a placa de selagem contra o isolador, conforme mostrado em A. Quando a pressão se torna bastante alta, esta placa é forçada, de tal maneira que abre uma saída na periferia do PR, permitindo que os gases sejam evacuados (B).

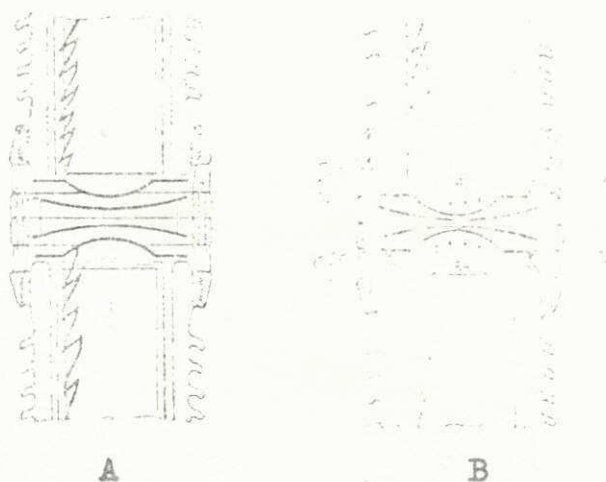


Fig. 6.7 - Funcionamento do dispositivo de escape da pressão de descarga dos PR.

- A - Descarga disruptiva interna e formação dos gases.
- B - Abertura do dispositivo e escape do gás.

Um cilindro de proteção é colocado entre o dispositivo e o isolador de porcelana, evitando que haja quebra deste, devido ao calor proveniente do escape dos gases.

6.2.3 - Pára-Raio com Extinção do Arco através de Sopro Magnético

Este tipo de PR, tem funcionamento mais complexo, do que o do tipo válvula anteriormente explanado, muito embora suas constituições sejam semelhantes, diferindo apenas no tipo presente, por possuir eliminação de arco através do princípio de sopro magnético (3). São caracterizados pela larga aplicação em classes de tensão que atingem até as faixas de EHV e UHV, visto que os gaps convencionais não possuem os requisitos necessários para atuarem em tensões desta natureza.

Nestes sistemas, foram introduzidos melhoramentos com o propósito de evitar falhas que viessem a ocorrer no PP, visto que a capacidade do gap convencional, é insuficiente para eliminar a alta potência devido a corrente subseqüente.

6.2.3.1 - Considerações na Construção de Pára-Raios em EHV

Com base na redução do nível de isolamento em sistemas de EHV, os fabricantes de PR devem levar em consideração os seguintes problemas: (4-6)

- 1) As características protetivas dos PR, devem ser melhoradas com o objetivo de oferecer uma adequada margem de proteção
- 2) As características de tensão disruptiva à surtos de chaveamento, deverão oferecer uma margem adequada de proteção, relacionada com a resistência a surto de chaveamento do transformador

- 3) A redução no nível de tensão residual, provoca alta potência devido a corrente subsequente. O PR, deve ter capacidade suficiente de eliminar esta corrente dentro de 1/2 ciclo
- 4) Repetidas operações de serviço nos PR, poderão ser provocadas devido a redução nas características de tensão disruptiva, bem como devido a outros transitórios que venham a ocorrer no sistema
- 5) A grande capacidade de curto-circuito, nestes sistemas, sujeita o PR a elevados valor de pressão de descarga
- 6) O tamanho do PR, não deve crescer diretamente com a tensão do sistema.

6.2.3.2 - Elementos que Constituem um Pára-Raio do tipo Sopros Magnético

Com o propósito de mostrar, o comportamento deste tipo de pára-raio, consideremos dados de fabricantes que nos permitiu avaliar corretamente o funcionamento destes: (3)

Desde 1962, a Brow Boveri introduziu no mercado, seu PR com extinção do arco através do princípio do sopros magnético, podendo ser usado em sistemas variando de 4,5 a 750 KV. Os elementos que constituem este tipo de PR, estão relacionados na seqüência abaixo. Apresentados na figura 6.8; estes elementos, assim como as curvas de tensão e corrente durante o funcionamento.

- a) Curva das quantidades (tensão e corrente) durante a descarga e corte

- b) Pára-Raio em condições normais
 - c) Pára-Raio durante o fluxo de corrente de descarga
 - d) Pára-Raio durante a passagem de corrente subsequente
 - e) Semelhante com a figura 6.8.b, apresenta o PR em condições normais de operação após descarregar o surto que atingiu seus terminais.
-
- A) Ponto de descarga disruptiva, mostrando o arco causado pela corrente de descarga
 - B) Bobina de sopro magnético, localizadas no topo e na parte inferior dos spark-gaps
 - E) Eletrodos do spark-gap
 - i_A) Corrente de descarga
 - i_N) Corrente subsequente
 - i_S) Corrente de controle que flue através de S em condições normais de serviço
 - K) Paredes da câmara de arco
 - L) Arco durante o processo de alongamento e resfriamento
 - M) Linhas de força do alto campo magnético produzido pelas bobinas
 - N_p) Nível de proteção que é a maior tensão que ocorre em seus terminais durante a descarga disruptiva
 - R) Resistores não linear do tipo Resorbit

- S) Resistor de controle
- μ) Tensão de serviço através do pára-raio
- μ_a) Tensão disruptiva
- μ_L) Tensão do arco durante o corte
- μ_p) Tensão residual
- μ_R) Queda de tensão através dos resistores variáveis
- μ_s) Tensão impulsiva
- F) Spark-Gap auxiliar (by-pass)

6.2.3.3 - Funcionamento do Pára-Raio de Sopro Magnético

O conjunto de gaps, é constituído por placas que se juntam duas a duas para formar a câmara de arco, igualmente espaçado com um eletrodo fixado a cada placa (3-7), a consistência na tensão disruptiva, é plenamente assegurada por um elemento pré-ionizante fixado a placa inferior de cada conjunto de gaps.

Os spark-gaps, iniciam a passagem de corrente, logo que um valor de sobretensão exceda o nível de tensão disruptiva, interrompendo a corrente subsequente devida a tensão de serviço, tão logo seja completada a descarga. Os resistores ajudam a manter a corrente subsequente bastante baixa assegurando que ela pode ser eliminada uma vez que oferecem um valor bastante elevado à corrente de serviço.

Com o auxílio da figura 6.8, mostra-se o princípio de operação de um PR, dotado de bobinas de sopro magnético. Representado por a, curvas de tensão e corrente assim como o tempo de duração durante a descarga e

corde. Para efeito de melhor clareza, as curvas não estão em escala, relacionadas ao tempo de duração.

Na figura 6.8.b, o PR em condições normais de funcionamento, mostrando os eletrodos, as bobinas que produzem o campo magnético e os resistores variáveis. A esquerda desta figura denotado por S, o resistor de controle através do qual flue a corrente de serviço de tal maneira a manter uma distribuição uniforme de tensão entre os centelhadores.

Na figura 6.8.c, é apresentado o PR funcionando no instante em que ocorre um surto nos seus terminais. Ocorre descarga disruptiva no gap principal e no gap by-pass, permitindo que flua a corrente de descarga representado pelo caminho em negrito nesta figura, muito embora a corrente devido a 60 Hz, passe através da bobina magnética produzindo um campo magnético poderoso apresentado por M na figura 6.8.d, com intensidade tão elevada que é capaz de alongar e resfriar o arco formado por L nesta mesma figura, através de toda a pilha de spark-gap. Em cada gap individual, o arco é estriado e dirigido na direção da parede da câmara cilíndrica que envolve o conjunto.

Uma tensão de retorno é constituída através do conjunto de gaps e do conjunto de resistores não linear, e; quando estas duas tensões tem a soma igual a tensão aplicada nos terminais do PR, a corrente subsequente é limitada para próximo de zero, muito antes da tensão de serviço alcançar o ponto de inflexão.

Por último na figura 6.8.e; o PR novamente em condições normais de serviço semelhante a 6.8.b.

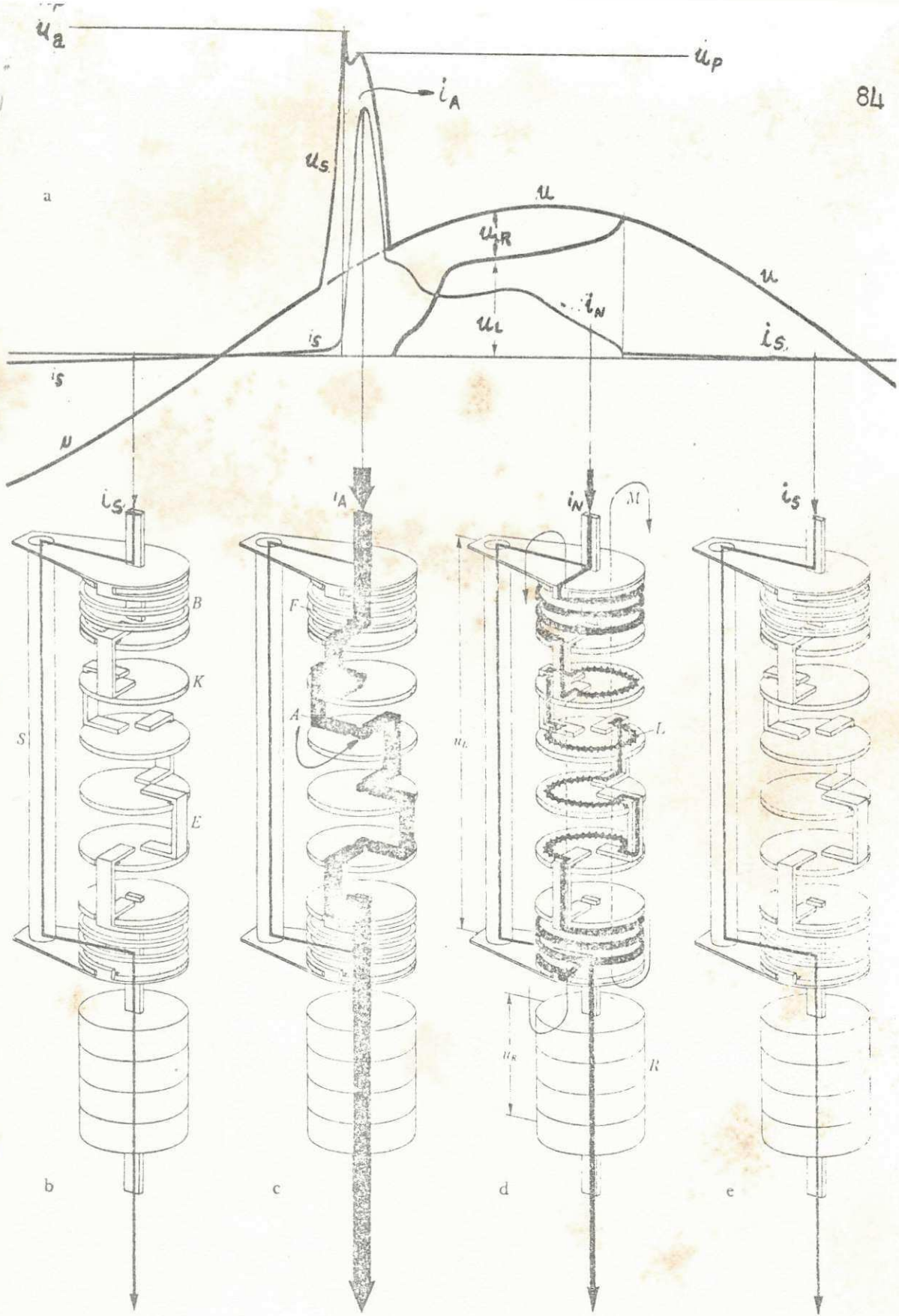


Fig. 6.8 - Funcionamento passo a passo de um PR com extinção do arco pelo princípio do sopro magnético fabricado pela Brown-Boveri.

6.2.3.4 - Montagem dos Pára-Raios de Sopro Magnético

Conforme, foi comentado na seção 6.2.2, a disposição dos elementos que compoe o PR, devem ser colocados de tal maneira no interior do envoltório de porcelana, a fim de evitar que alcancem um tamanho considerável, quando construídos para operar em sistemas de tensões elevadas.

Os pára-raios do tipo HKFdw, fabricado pela Brown Boveri, que operam em tensões de 4,5 a 123 KV, possuem todos os seus componentes arrumados em coluna, onde os resistores não lineares são colocados na parte inferior, como se pode observar a partir da figura 6.9.a. Em baixas freqüências, a distribuição de tensão ao longo dos gaps é governada pelo resistor de controle.

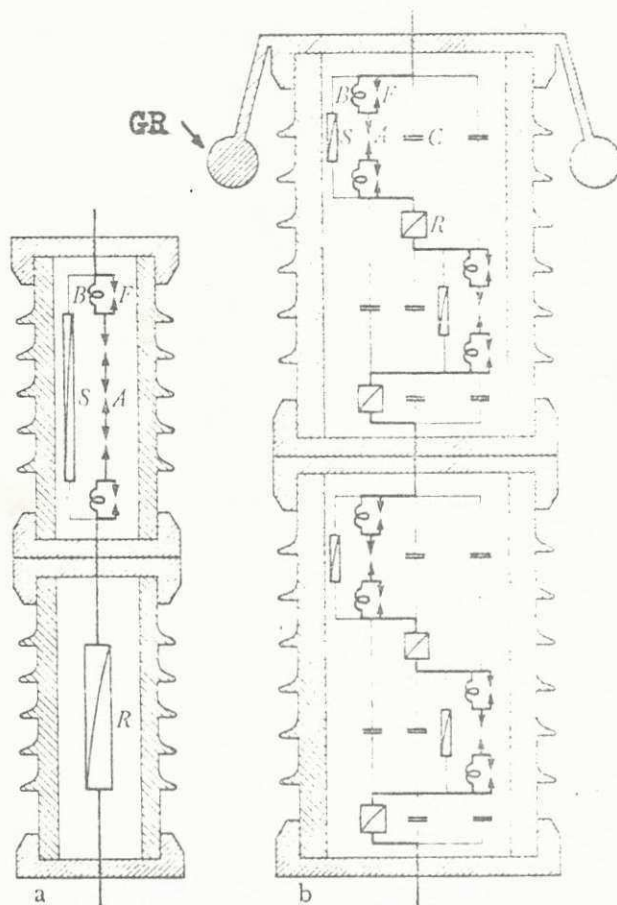


Fig. 6.9 - Disposição interna dos PR, fabricados pela Brown-Boveri.

- a - para tensões entre 4.5 a 123 KV
- b - para tensões acima de 123 KV.

Os do tipo HKF_p de mesma fabricação que o anterior, operando em tensões acima de 123 KV, tem a disposição interna conforme apresentado na figura 6.9.b.

Diferente do tipo HKF_{dw}, o atual, possui os gaps, resistores de controle e resistores não lineares, arrumados em todas as seções que constituem o PR. Esta disposição, reduz em aproximadamente 40% a altura do PR. Na parte superior deste, referido por GR na figura 6.9.b, são colocados anéis de guarda com o propósito de exercer controle da tensão durante os transitórios.

6.3 - Efeito dos Capacitores nos PR

Para manter o controle capacitivo da distribuição de tensão com o crescimento da tensão nominal, capacitores de controle são colocados em paralelo com os spark-gaps, assegurando uma curva de resposta tensão-tempo, quase plana.

A posição dos elementos e a distribuição de tensão durante os transitórios e serviço normal, são apresentadas na figura 6.10, que contém os capacitores, resistores não lineares; de controle e os spark-gaps.

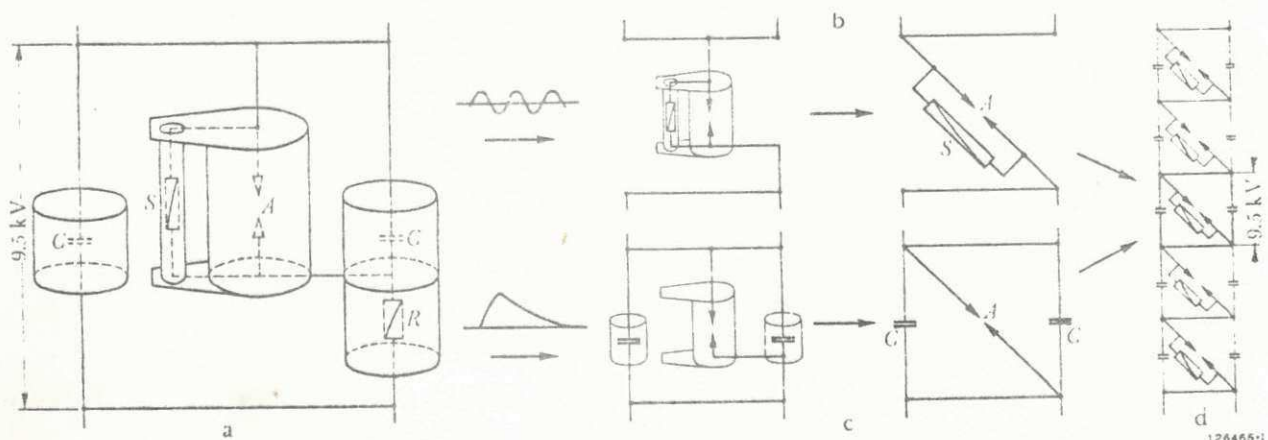


Fig. 6.10 - Position of the elements and system of voltage distribution control in the high-voltage arresters type HKF_p

- a) disposição dos elementos constituintes em três seções paralelas
- b) elementos que funcionam durante as baixas frequências
- c) elementos que funcionam durante as altas frequências, devido a fenômenos transitórios
- d) diagrama do controle de distribuição de tensão para um pára-raio total.

Nesta figura, o valor 9.5 KV, representa a tensão suportável por cada bloco de resistor.

6.4 - Selagem dos Pára-Raios

Completada a montagem das partes constituintes de um PR, é submetido a um tratamento de vácuo, a fim de retirar toda a umidade, e o ar preso entre os componentes. Em seguida, são completamente cheio com nitrogênio a pressão de 760 mm de Hg, sem qualquer contato com o ambiente externo.

Referências:

1 - Ver bibliografia	29
2 - " "	46
3 - " "	50
4 - " "	40
5 - " "	41
6 - " "	42
7 - " "	12

7. MODELO ANALÓGICO DE UM PÁRA-RAIOS

7.1 - Introdução

Nos dias atuais grande atenção tem sido dada para o projeto de PR. Melhoramentos vem sendo introduzidos nas características construtivas, possibilitando reduzir os níveis de descarga disruptiva e de tensão residual. Isto vem permitir que em sistemas de tensões elevadas, se obtenha uma economia considerável no que concerne a redução de isolamento.

Visando estas reduções; em sistemas de EHV, principalmente, foi necessário introduzir nos PR um tipo de gap provido de bobinas de sopro magnético conforme foi ilustrado com detalhes no capítulo anterior. A estrutura deste gap foi desenvolvida, com o objetivo de ajudar o resistor variável, também chamado elemento válvula, produzindo um arco de tensão que reduz a corrente do PR a zero muito antes do que o tempo necessário para ser limitado pelos gaps convencionais. Uma outra característica deste tipo de gap; é que oferece uma grande redução na sua descarga disruptiva.

A partir de oscilogramas obtidos em laboratórios, uma grande quantidade de informações são apresentadas, com respeito a tensão no gap, tensão no bloco de resistores e tensão total através dos pára-raios oferecendo condições para o estudo do comportamento analógico destes.

Para que se possa fazer o estudo analógico de um pára-raios; é necessário que se faça em primeiro lugar, testes em laboratório utilizando modelo representativo da linha real e, aplicando nela diversos PR; possa se obter as curvas de tensão de cada uma das seções que constitui o mesmo. A partir destas curvas, por meio de simuladores deve-se tentar aproximar através de modelo matemático, uma equação que aplicada ao

computador analógico, reproduza curvas semelhantes aquelas de terminadas a partir de testes de laboratório em seções proporcionais de PR. (1)

7.2 - Modelo de Circuito Empregado em Laboratório, Visando Reproduzir as Curvas de Operação do PR no Sistema Real

No estudo do comportamento dos pára-raios em laboratório, quando submetidos a operações que simulam um surto de chaveamento, deve-se utilizar dois tipos de circuitos, apresentados na figura 7.1.

Nesta figura, são mostrados o modelo do laboratório de Alta Tensão que representa a linha de transmissão, fonte de energia e fontes DC para carregar a linha com o valor da energia que é armazenada no sistema; bem como o modelo TNA, cuja maneira de excitar o modelo representativo difere do modelo de laboratório de Alta Tensão. (2)

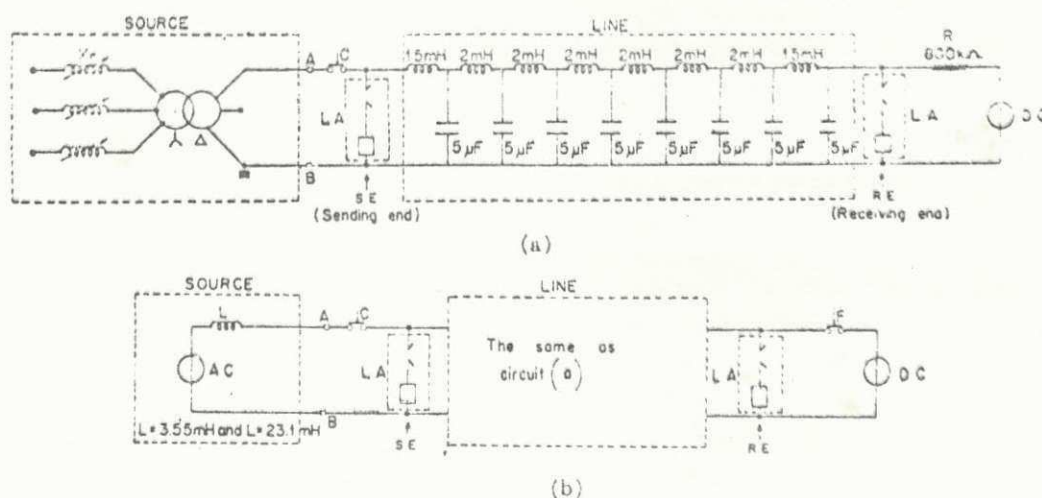


Fig. 7.1 - Modelo representativo no laboratório de Alta Tensão simulando uma linha real, bem como os dispositivos para produzir operações de descarga de energia armazenada na linha de transmissão.
 a - Circuito do laboratório de Alta Tensão
 b - Circuito TNA equivalente da linha

Nesta figura temos:

- X_S - reatância limitadora para ajustar a potência de curto-circuito.
- V_{AB} - valor de tensão proporcional entre a linha representada no laboratório, em função da tensão nominal proporcional do PR.
- C - circuito seccionador para fechamento e abertura.
- L - modelo representativo da linha constituído de capacitores e indutores.
- DC - retificador para carregar o modelo representativo da linha, com a energia equivalente acumulada no sistema real, calculada através de formulas que serão mostradas no capítulo seguinte.
- LA - equivalente aos PR, conectados no início e término da linha.

No capítulo seguinte, será dada ênfase no que se refere a testes em PR; entretanto, no estudo feito em laboratório para determinar as curvas características das tensões que ocorrem nos elementos de um PR; são utilizados os circuitos apresentados na figura anterior com condições de representar um sistema real.

Observa-se que o modelo da linha é igual para os dois circuitos considerados, embora a excitação seja feita de uma maneira diferente.

7.2.1 - Seqüência para obter Formas de Onda através dos Pára-Raios em Laboratório

Para se obter as formas de onda que ocorrem nos pára-raios em laboratório, determina-se o valor da energia que é armazenada na linha de transmissão considerando:

- a - comprimento da linha
- b - impedância da linha
- c - valor pu do surto que possa ocorrer de vido a operação no sistema.

Calculada esta energia, é aplicada ao modelo representativo da linha de transmissão, através de DC, representado na figura 7.1 e, as fontes de tensão aplicam uma diferença de potencial semelhante a um sistema real.

Os pára-raios aplicados no início ou no final da linha modelada, são proporcionais aqueles existentes no sistema real. As formas de tensões e corrente através dos pára-raios, são registradas nos osciloscópios e, como objeto principal deste capítulo, mostra-se como é possível reproduzir por meio de um modelo matemático, as mesmas curvas obtidas através de testes em laboratório e compará-las com as obtidas nos oscilogramas de computadores analógicos. Uma pequena diferença surge: no teste de laboratório, são empregados modelos de PR, enquanto que em estudo de computadores analógico, são usados simuladores.

Procuraremos aqui, encaminhar o desenvolvimento obtido a partir da literatura consultada e, deixar uma base para que futuramente quando estiver em funcionamento o laboratório de Alta Tensão desta Escola; algum outro estudante possa fazer experiências e simulações tentando reproduzir as formas de onda encontrada e talvez contribuir com uma par

cela no que diz respeito ao estudo de PR.

7.3 - Considerações para a Modelagem de um Pára-Raios

Alguns problemas surgem quanto a reprodução nos computadores analógicos, das curvas obtidas a partir de laboratórios. Na literatura estudada, os autores fazem uma aproximação um tanto brusca, visando esta comparação. Por exemplo, a modelagem do gap limitador de corrente se torna um tanto complexo visto que, a natureza da curva de tensão no gap reproduzidas em laboratório, apresenta uma característica de função não linear de tempo e corrente, sendo necessário uma função de múltiplas variáveis a fim de reproduzir suas características. O mesmo acontece para o elemento válvula embora menos acentuado.

Na representação analógica, devemos considerar a modelagem de três parâmetros:

- a - característica de descarga
- b - tensão no resistor não linear
- c - tensão no gap limitador de corrente.

7.3.1 - Modelagem da Característica de Descarga

Obtém-se a modelagem da característica de descarga pelo emprego de chaves de estado sólido.

7.3.2 - Modelagem da Tensão no Resistor Não Linear

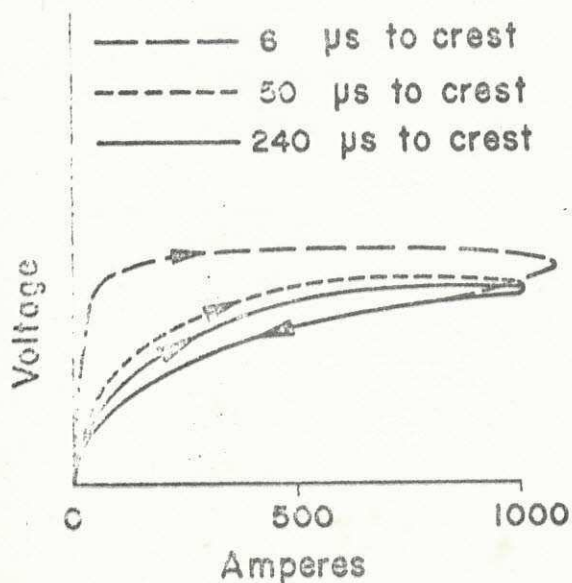
A modelagem da característica de tensão através do resistor não linear, é obtida de duas maneiras:

- 1 - por meio de pequenos discos de silicato de carbono (SiC) com características

volt-ampere proporcional entre a tensão nominal do PR e o nível de tensão do computador.

- 2 - a segunda maneira, que é a atualmente empregada, na simulação nos TNA, ANACOM e EDA; consiste na arrumação de diodos; resistores de características linear e fontes de tensão de polarização. A característica obtida desta maneira, aproxima-se daquela apresentada pelo modelo anterior, constituído de discos de silicato de carbono; visto que esta característica é formada através de pulsos.

A tensão desenvolvida pelo resistor não linear, é uma função não linear de corrente e da taxa de crescimento da mesma. Para ilustrar consideremos, as curvas volt-ampere apresentadas na figura 7.2, resultante da aplicação de correntes com tempo para atingir o valor de crista de 6, 50 e 240 μ s.



Volt-ampere curve - surge arrester block.

Fig. 7.2 - Curva tensão-corrente através do resistor não linear do PR.

Uma análise desta figura, mostra que, como fôra previamente comentado, a forma da frente de onda da corrente no bloco, depende diretamente da taxa de crescimento da corrente aplicada ao mesmo. Para ondas de corrente com frente mais escarpada, a tensão correspondente no bloco, terá um valor mais elevado que a obtida com correntes de frente menos escarpada.

Uma outra observação, é a natureza da característica de resistência não linear, apresentada pelo retorno da corrente, originando o nome dado ao bloco de resistores; bem como há uma semelhança muito grande com uma curva de histerese, devido a ferroressonância do transformador.

O comportamento do elemento válvula, pode ser verificado nos computadores analógicos pelo emprego do modelo matemático definido através da expressão:

$$V_b = R_b i_a + L_b \frac{di_a}{dt} \quad (7.1)$$

Em que a resistência R_b devido a sua natureza não linear pode ser definida por

$$R_b i_a = K i_a^b \quad (7.2)$$

ou

$$R_b = K i_a^{b-1}$$

onde:

R_b - resistência não linear do PR

i_a - corrente através do PR

K e b - constantes para uma dada escala de corrente.

7.3.3 - Modelagem da Tensão no Gap Limitador de Corrente

A modelagem do gap limitador de corrente, deve ser considerada a partir, de uma combinação de componentes estáticos capazes de reproduzir uma função monotônica.

Devem ser constituídos de tal forma a determinar as seguintes regiões que constituem a característica tensão-tempo no gap:

- a - ponto zero de tensão
- b - crescimento linear da tensão
- c - máxima tensão no gap.

Da literatura usada para este capítulo, os autores consideram que a tensão no gap pode ser determinada por 3 estágios, ilustrados na figura 7.3. (3)

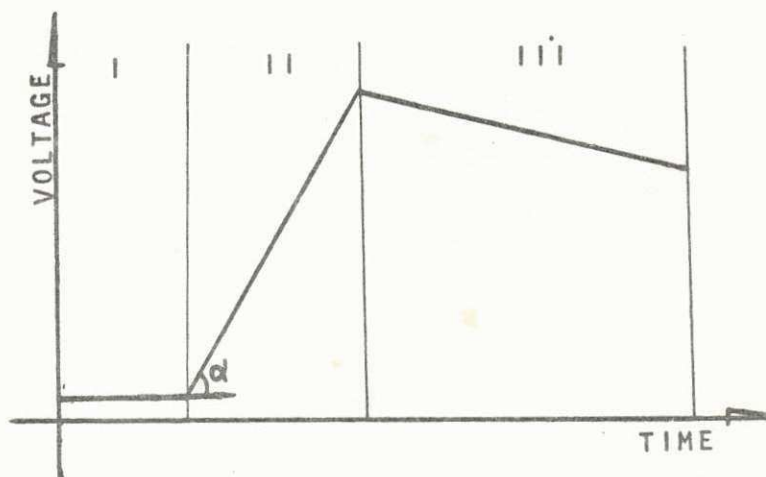
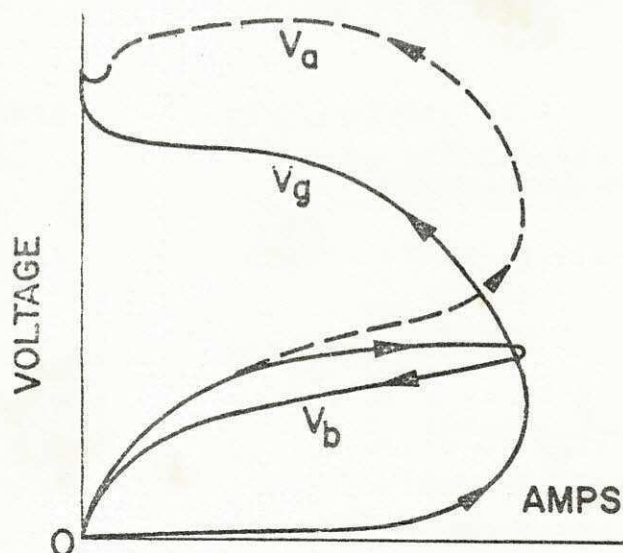


Fig. 7.3 - Desenvolvimento da tensão no gap limitador de corrente.

Uma análise desta figura, mostra que para o estágio I, durante o desenvolvimento inicial do arco, ocorre uma tensão praticamente constante de valor muito baixo e de

duração variando entre 100 ou 200 μ s. No estágio II, um rápido crescimento de tensão provocado pelo crescimento do valor do arco com um ângulo α . No estágio III, ocorre um decréscimo na tensão, que continua até a interrupção da corrente.

Da maneira como foi apresentada a característica do elemento válvula nos eixos volt-ampere; na figura 7.4 é mostrada a tensão no bloco, a tensão no gap, e a tensão total através do PR.

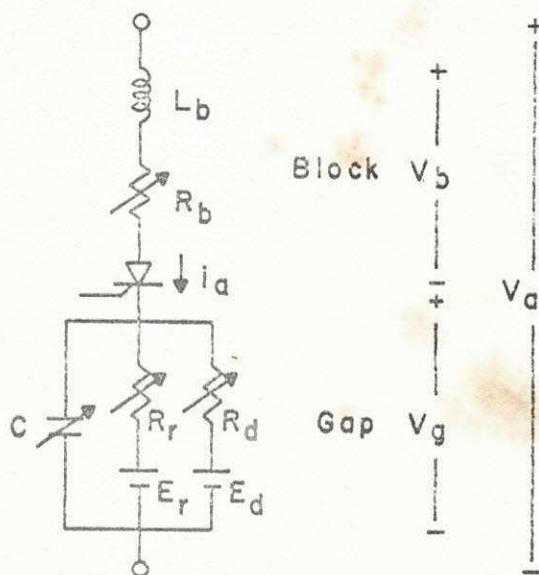


Typical volt-ampere characteristics.

Fig. 7.4 - Características de tensão-corrente nos componentes do PR com gap limitador de corrente.

Pesquisas vem se desenvolvendo atualmente, com o propósito de determinar uma equação matemática que realmente represente as características dinâmicas apresentadas pelo gap limitador de corrente. Entretanto, o modelo ilustrado na figura 7.5, através de sua equação matemática, aplicada a computadores analógico, mostra para uma determinada escala de condições dinâmicas, características que se assemelham com aquelas que são obtidas através de testes em laboratório rea

lizadas em seções proporcionais de PR.



Arrester model equivalent circuit.

Fig. 7.5 - Modelo analógico equivalente do circuito de um PR com gap limitador de corrente.

As equações matemáticas que definem as dinâmicas do elemento gap são:

$$i_a = \frac{CdV_g}{dt} + \frac{V_g - E_r}{R_R} + \frac{V_g - E_d}{R_d} \quad (7.3)$$

em que

$$\begin{aligned} C &= f_c(i_a, t) \\ R_R &= f_R(i_a, t) \\ R_d &= f_d(V_g, i_a, t) \\ E_r &= g_R(i_a) \\ E_d &= \text{constante.} \end{aligned} \quad (7.4)$$

Estas equações conduzem a um conhecimento perfeito do modelo físico, possibilitando o estudo do compor

tamento dos PR durante transitórios.

7.4 - Comparações entre as Formas de Tensão nos Testes de Laboratório e com o Modelo Analógico

Com o propósito de estabelecer os parâmetros para a simulação de PR em computadores analógico, são utilizados geradores de surtos em laboratório, submetendo os PR a testes de corrente forçada. (1)

Das seções que constituem o PR, deve-se dar maior importância ao gap, visto que se torna bastante complexo a reprodução do modelo matemático que possa dar origem a curvas semelhantes aquelas obtidas em testes de laboratório. Por exemplo: a tensão no gap, representado na figura 7.6, apresenta uma taxa de crescimento que é proporcional ao crescimento de corrente. Para corrente com taxa de crescimento elevada, obtêm-se tensão no gap com crescimento elevado.

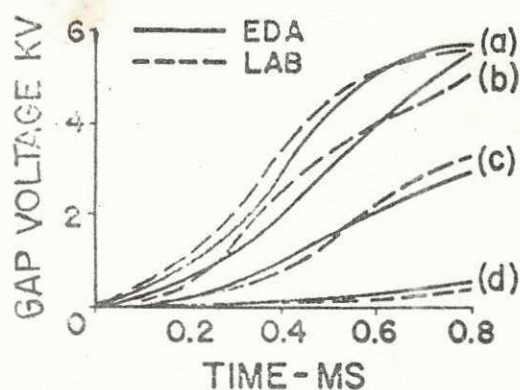


Fig. 7.6 - Formas de tensão no gap, para surtos de frentes com taxa de crescimento decrescentes de a até d.

A partir de resultados de testes em laboratórios nas seções constituintes de um PR, foram obtidas as curvas ilustradas na figura 7.7 em que foi simulada uma linha de 200 milhas de um sistema de 500 KV, com 300 ohms de impedância ca

racterística, energizada com 2.1 pu, descarregada através de um PR de 420 KV (80% de V_{FF}).

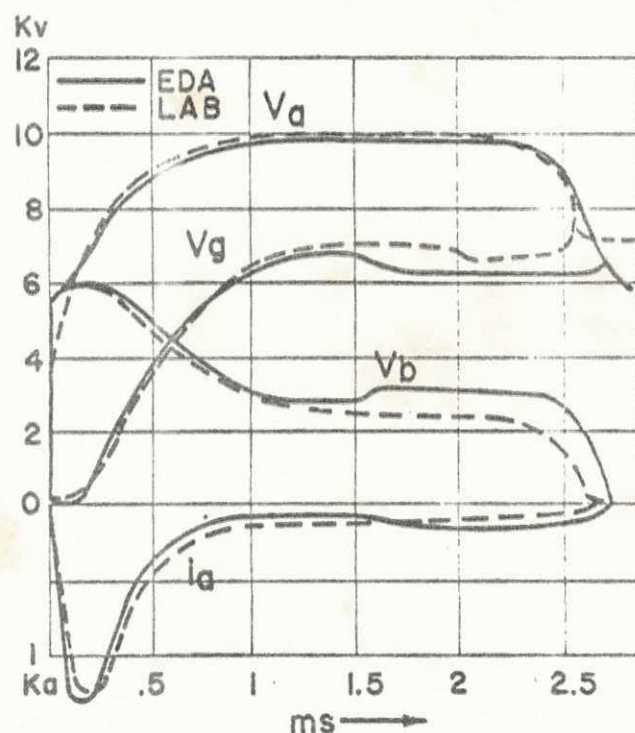


Fig. 7.7 - Formas de tensão nos diversos elementos do PR obtidos em laboratório e no computador analógico.

V_a - tensão no PR
 V_g - tensão no gap
 V_b - tensão no bloco válvula
 i_a - corrente no PR

Uma análise desta figura mostra que uma boa aproximação existe entre a curva obtida a partir do teste com o modelo de laboratório e com o modelo representado no computador analógico, entretanto o emprego de uma indutância variável em lugar da indutância fixa, apresentada na figura 7.5, pode ser utilizada, favorecendo uma aproximação maior entre as duas curvas: a do laboratório e a do EDA.

7.5 - Modelo Matemático do Gap Limitador de Corrente

Na representação do modelo matemático, para aproximar a curva de tensão no gap limitador de corrente em função

do tempo, mostrado na figura 7.7, separamos a referida curva em 4 regiões distintas conforme se pode observar a partir da figura 7.8:

a) na primeira região limitada por $t_0 < t \leq t_1$, a tensão no gap apresenta uma taxa de crescimento muito rápido, assemelhando-se a curva que representa o carregamento de um capacitor, definida por:

$$V_g = \int_{t_0}^t \frac{i_a}{C} dt \quad (7.5)$$

onde a capacitância C , conforme designada nas eqs. 7.4 é uma $f(i_a, t)$ podendo ser definida por:

$$\frac{1}{C} = K_c \int_{t_0}^t i_a' dt \quad \begin{array}{l} i_a' = i_a; i_a < I_c \\ i_a' = I_c; i_a \geq I_c \end{array} \quad (7.6)$$

onde K_c e I_c são constantes para um dado desenho de gap. Esta tensão cresce até atingir um valor $V_g(t_1)$

b) na segunda região, limitada por $t_1 < t \leq t_2$ a tensão apresenta a forma de uma resistência negativa, podendo ser obtida a partir de

$$V_g = K_r \int_{t_1}^t \frac{K_0 - V_g}{1 + K_1 + K_2 i_a} dt + V_g(t_1) \quad (7.7)$$

e, as quantidades definidas em 7.4 são definidas por:

$$\begin{aligned} E_R &= K_0 - K_1 i_a + K_2 i_a^2 \\ R_R &= K_1 + K_2 i_a \\ C &= 1/K_R \end{aligned} \quad (7.8)$$

onde K_R, K_0, K_1 e K_2 são constantes para um dado desenho de gap.

c) na terceira região limitada por $t_2 < t \leq t_3$ a

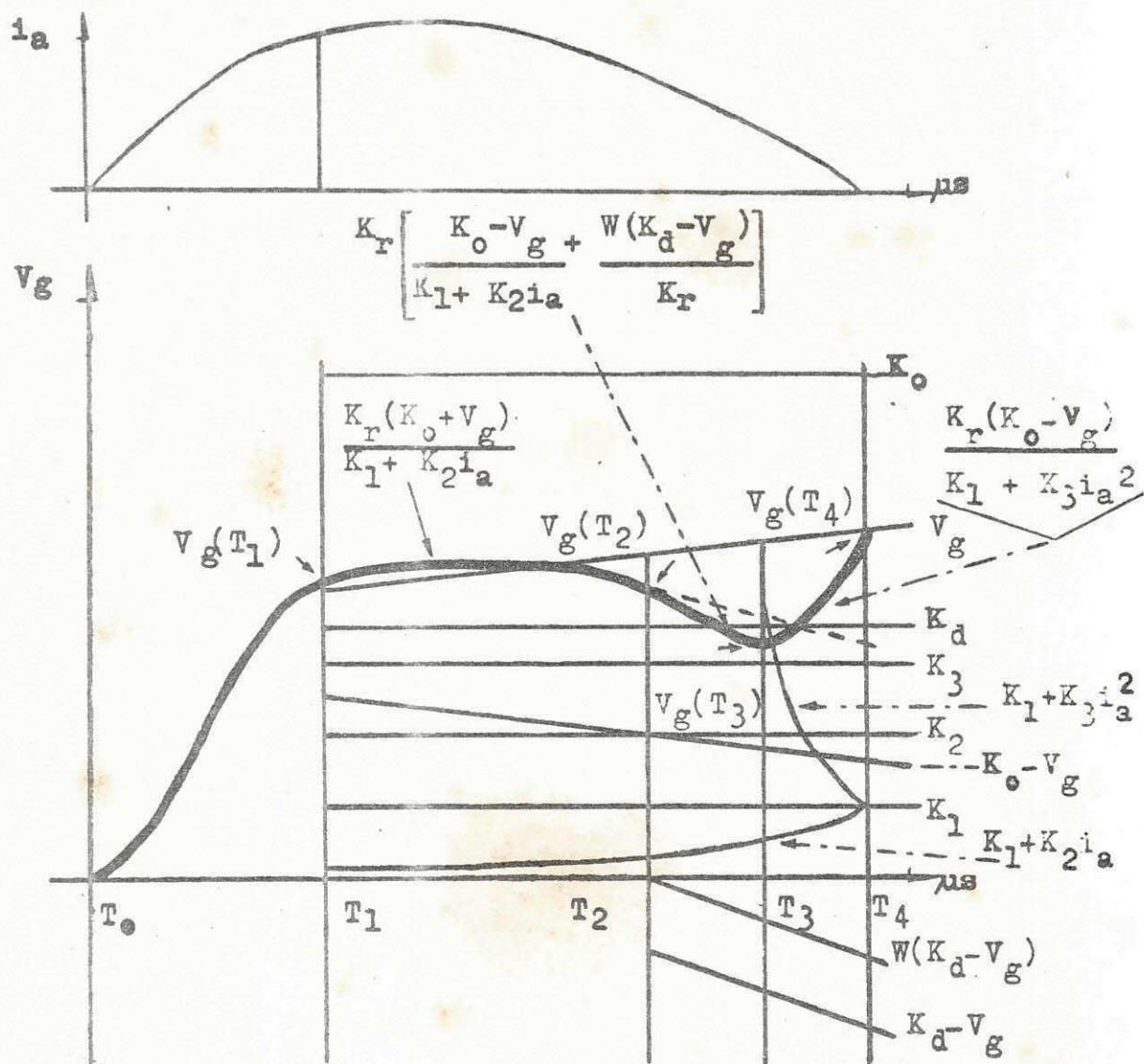


Fig. 7.8 - Modelo matemático representativo da tensão no gap limitador de corrente.

tensão no gap tende a diminuir devido ao aquecimento do arco, nas paredes da câmara do arco que constitui o PR. Para se obter esta parte da curva, deve-se adicionar um termo negativo relacionado a energia e definir a tensão nesta região pela equação:

$$V_g = K_R \int_{t_2}^t \left[\frac{K_0 - V_g}{K_1 + K_2 i_a} + \frac{W}{K_R} (K_d - V_g) \right] dt + V_g(t_2) \quad (7.9)$$

W, definido como fator de energia térmica é dado pela expressão

$$W = W_0 + W_1 \int_{t_1}^t V_g i_a dt \quad (7.10)$$

em que K_d , W_0 e W_1 são constantes e, as quantidades definidas em 7.4 devem ser substituídas por:

$$\begin{aligned} E_d &= K_d \\ R_d &= \frac{K_R}{W} \end{aligned} \quad (7.11)$$

d) na última região compreendida entre $t_3 < t \leq t_4$, a tensão no gap cresce muito rapidamente, até um valor tal onde a corrente no PR atinge o valor zero. A tensão nesta região é determinada por:

$$V_g = K_R \int_{t_3}^t \frac{K_0 - V_g}{K_1 + K_3 i_a^2} dt + V_g(t_3) \quad (7.12)$$

e finalmente as quantidades apresentadas em 7.4 devem ser substituídas por:

$$\begin{aligned} E_R &= K_0 - K_1 i_a - K_3 i_a^3 \\ R_R &= K_1 + K_3 i_a^2 \end{aligned} \quad (7.13)$$

onde K_3 é constante.

Com o emprego das equações 7.5; 7.7; 7.9 e 7.12, observando as variações de corrente e também as constantes de cada equação, construiu-se a curva apresentada em 7.8; numa tentativa de reproduzir aquela mostrada na figura 7.7. Deve-se ressaltar, que a seqüência em que foi dividida a figura 7.8 para estudo, não é sempre obedecida pelas formas de onda obtidas em laboratório ou em computador, visto que a passagem de um estágio para outro, depende da natureza da forma de onda aplicada ao modelo simulado e muitas vezes não se pode distinguir estas passagens.

Referências:

- 1 - Ver bibliografia 19
- 2 - " " 47
- 3 - " " 37

8. TESTES NOS PÁRA-RAIOS

8.1 - Introdução

Durante muitos anos, a capacidade térmica dos PR, era verificada pelo teste de longa duração e baixa corrente, aplicado ao elemento válvula do mesmo; consistindo na aplicação de um determinado número de descargas com uma onda retangular do tipo 150A/2000µseg, com o propósito de mostrar a capacidade dos mesmos em descarregar a energia que lhes são imposta quando estão aplicados a um determinado sistema, visto que; nestas condições, podem absorver energia devido a:

- a) descarga direta ou indireta nos condutores
- b) energia armazenada na capacitância do sistema
- c) energia dos geradores do sistema.

Com o aumento da tensão de operação dos sistemas, este teste tornou-se inadequado uma vez que o valor de energia que é dissipado através dele, no sistema real, é muito maior que aquela dissipada nos antigos testes de laboratório.

Em sistemas que operam acima de 230 KV; adicionado à quantidade de energia muito maior, que varia com o quadrado da tensão; a aplicação de PR, tem conduzido a um aumento nas suas características térmica, uma vez que; objetivando reduzir as características de tensão disruptiva e de tensão de descarga, visando a parte econômica, diminuindo o nível de isolamento dos equipamentos; submete-se o PR, a um número muito maior de operações de descarga assim como o valor de corrente que flue através dele tem um valor bastante elevado. Consequentemente, um novo teste de serviço foi padronizado, podendo ser aplicado em qualquer classe de tensão. (1-2)

8.2 - Descrição de Novo Teste

Consiste em descarregar através de um modelo proporcional de PR; a energia equivalente àquela armazenada na linha de transmissão em que deve operar o PR - modelado em laboratório - quando ocorre uma operação de chaveamento. Ao contrário do modelo usado no teste de longa duração e baixa corrente, este novo teste inclui tanto o elemento válvula como o gap.

O comportamento dos PR, é determinado pelas condições do sistema:

- a) máxima tensão de surto
- b) impedância de surto da linha
- c) comprimento da linha em milhas.

8.2.1 - Descrição do Teste Proposto pela ASA

No laboratório é utilizado uma seção proporcional (test specimen) do PR que será aplicado ao sistema real e também um modelo representativo do circuito da linha de transmissão, onde deve atuar o PR, com um valor de energia, equivalente a armazenada na linha real. Nestes modelos de laboratório, a tensão de carga e a impedância da linha, variam em proporção com o modelo do PR. Isto quer dizer que o teste admite cada tamanho de PR ser testado dentro das condições simuladas em serviço, muito embora seja mantido o produto LC da linha e, sejam desprezados os efeitos de serviço, como corona, e impedância fase-terra.

Este teste propoe 20 aplicações consecutivas de descarga no modelo, com um tempo entre elas de um minuto. A vantagem deste tipo de teste, é que pode ser aplicado em qualquer classe de tensão.

8.3 - Energia Acumulada durante Operação de Chaveamento do Sistema

Devido a operação de abertura ou fechamento de disjuntores, são produzidas sobretensões que variam de 1 a 3 vezes a tensão nominal do sistema, propagando-se na linha de transmissão, nas duas direções com uma larga variação nas características de tempo. O circuito equivalente da linha de transmissão e do PR, no instante de uma operação desta natureza pode ser representado da maneira mostrada na figura 8.1.

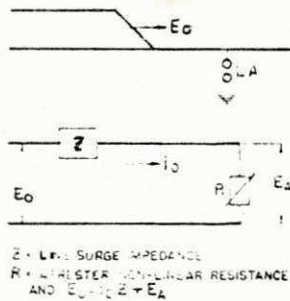


Fig. 8.1 - Circuito equivalente da linha de transmissão durante a descarga.

Deste circuito pode-se tirar a seguinte relação

$$E_0 = I_0 Z + E_A \quad (8.1)$$

onde:

E_0 - sobretensão devido a chaveamento no sistema

Z - impedância característica da linha, variando de 250 a 500 Ω , conforme o tipo de construção da linha

R - resistência não linear do PR.

A corrente I_0 que flue durante a descarga é proporcional a

$$I_0 \propto E_0, Z, R$$

e a energia armazenada

$$W_{SS} \propto I_0, E_A, t$$

onde o tempo t , equivale ao tempo de duração do surto, variando diretamente com o comprimento da linha.

Usualmente, a quantidade de energia armazenada na linha, é descarregada em um tempo igual a $2LTT$ - duas vezes o tempo para atravessar a linha - equivalente a $10\mu\text{s}/\text{milha}$.

8.4 - Cálculo da Energia Armazenada no Sistema

Para se calcular a energia armazenada em uma linha de transmissão devido a operações de chaveamento no sistema, deve-se considerar uma tensão limite de 345 KV. Em sistemas que operam na parte inferior deste limite, e inclusive, são calculadas a partir de

$$W = \frac{1.98 DK^2 E^2}{Z} \quad (8.2)$$

Em sistemas que operam na faixa superior a 345 KV, a energia armazenada no sistema deve ser calculada a partir de

$$W = \frac{2.16 DK^2 E^2}{Z} \quad (8.3)$$

Nas equações 8.2 e 8.3 são definidas:

W - energia em watts.segundo

E - tensão de operação do sistema (V_{FF}) em KV

K - máxima tensão devido a surto de chaveamento, em pu do máximo valor de crista da tensão fase-neutro

D - comprimento da linha em milhas

Z - impedância de surto da linha em ohms.

Uma comparação entre as energias dissipadas nos modos de PR, são apresentadas na figura 8.2. A energia dissipada por cada KV de tensão nominal do PR, é determinada pela razão entre as energias armazenadas no sistema, calculadas a partir de 8.2 ou 8.3. e, a tensão nominal do PR.

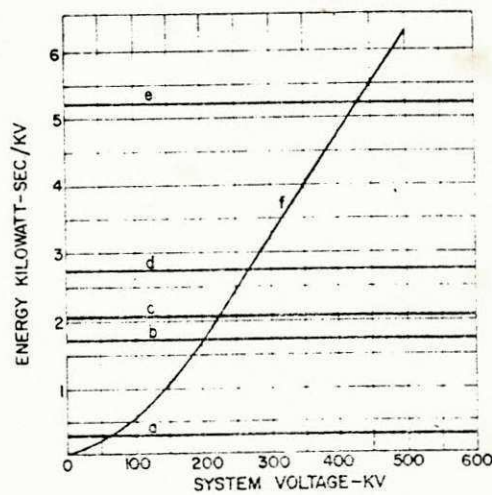


Fig. 8.2 - Lightning-arrester design tests compared to available energy from switching surges

Resultado das energias por KV nominal de PR com:

- a) teste de longa duração, baixa corrente com onda 150A/2000 μ s
- b) onda de surto 10/20 μ s, com corrente de 10 KA, mais corrente subsequente

- c) onda de surto 10/20 μ s, com corrente de 20 KA, mais corrente subsequente
- d) onda de surto 12/45 μ s, com corrente de 10 KA, mais corrente subsequente
- e) onda de surto 4/8 μ s com corrente de 100 KA, mais corrente subsequente
- f) energia devido a surto de chaveamento calculada com auxílio das equações 8.2 ou 8.3.

Observa-se, que em determinadas classes de tensões, há uma diferença marcante entre a energia imposta ao PR obtida a partir do teste com as ondas de surto mencionadas de a até e, com a energia obtida a partir da curva f. Quer dizer que os antigos testes, para uma determinada faixa de tensão, submetem o PR a condições inferiores àquelas existentes no sistema real.

Com o propósito de registrar as formas de tensão e correntes obtidas através do modelo em teste, osciloscópios são empregados e, uma aproximação muito acentuada é obtida quando estes oscilogramas são comparados com aqueles que ocorrem no PR quando operam no sistema real.

Dentre as 20 descargas aplicadas ao modelo, uma comparação é feita entre a 1^a e a 20^a forma de onda registrada no osciloscópio, assim como é comparada a tensão de descarga à 60 Hz, antes e depois do teste, para verificar se houve alteração no comportamento do PR.

8.5 - Circuito Empregado para o Teste da ASA

O gerador usado para o teste de descarga, apresentado na figura 8.3, tem suas constantes distribuídas com base nas seguintes características da linha de transmissão: (2)

- D_L - comprimento da linha (milhas)
- V_m - máxima tensão fase-fase do sistema (KVRms)
- V_G - máxima tensão fase-neutro do sistema, equivalente a $V_m \sqrt{2/\sqrt{3}}$
- E_L - tensão de carga na linha de transmissão em KV (dc)
- Z_L - impedância de surto da linha de transmissão (ohms)

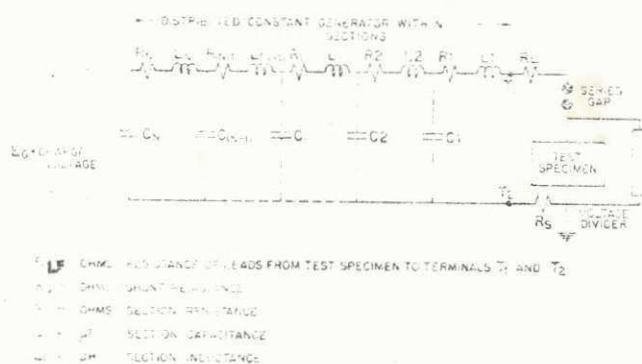


Fig. 8.3 - Gerador usado no teste de descarga da energia acumulada na linha de transmissão.

8.5.1 - Constantes do Gerador

Fator de proporcionalidade K

K - relação entre a tensão nominal do PR (KVRms) e a tensão nominal do modelo teste (KVRms)

Tensão de carga do gerador $E_G \geq E_L/K$ (KVdc)

Impedância de surto do gerador $Z_G \leq Z_L/K$ (ohms)

Indutância total do gerador L_G (μH)

Capacitância total do gerador C_G (μF)

Número de seções do gerador $N \geq 10$

Cada seção do gerador é representada por:

Resistência dos "leads" de saída com a resistência em Shunt R_A (ohms)

Indutância da seção L_i (μH)

Capacitância da seção $C_i \leq C_G/N$

Impedância de surto da seção $Z_i = \sqrt{L_i/C_i}$

As seguintes exigências devem ser satisfeitas:

tas:

$$Z_G \pm 5\% = Z_i + R_A + \sum_{i=1}^i R_i$$

$$L_G C_G \geq 5.4 D_L$$

Também deve ser considerado o tempo de duração inicial do surto do gerador

$$T_D = 2 \sqrt{L_G \cdot C_G} = 10.8 D_L \mu s$$

Na figura 8.3, o divisor de tensão empregado para medir a tensão no PR teste, deve ter uma impedância no mínimo de 100 vezes a do modelo proporcional ao PR em teste durante a descarga.

No momento este tipo de teste vem sendo empregado com muita frequência em sistemas que operam em tensões acima de 345 KV. Raros são os fabricantes de PR, com tensões abaixo, que aplicam este tipo de teste.

8.6 - Teste de Descarga em Sistemas de 345 KV

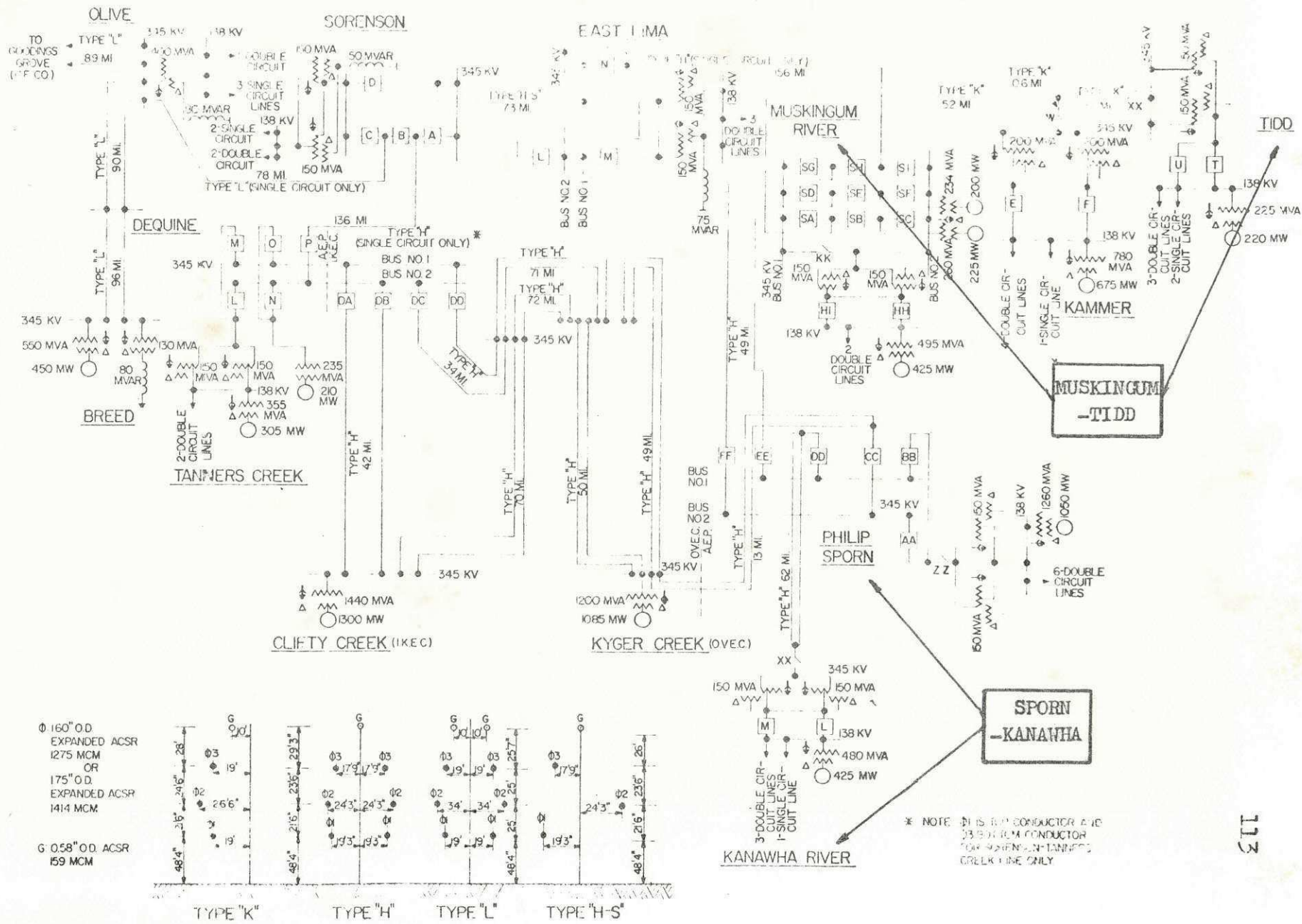
Durante os anos de 1960 e 1961, a American Electric Power Company, realizou testes com base no sistema de 345 KV, representado na figura 8.4; ensaiando PR que estiveram em operação por 4 ou 5 anos. Osciloscópios foram aplicados na entrada e na saída da linha em teste, com a finalidade de registrar as formas de corrente e tensão através do PR.

8.6.1 - Tensões e Correntes nos Pára-Raios em Sistemas de 345 KV

Uma linha de transmissão, de 84 milhas de comprimento ligando Muskingum a Tidd, apresentada na parte superior direita da figura 8.4; foi empregada para determinar as formas de tensões e correntes de descargas através dos PR, devido a operações de chaveamento em Muskingum. Em Tidd; a linha é terminada por um banco de auto transformadores de 300 MVA, 345/138 KV, protegido por PR. (3)

Considerando-se o esquema apresentado na figura 8.5, que mostra a característica do circuito em teste, tem-se: na seqüência de fechamento das fases do disjuntor em Muskingum; quando fechada a fase 1, fica energizada a fase correspondente em Tidd, conforme os oscilogramas apresentados na figura 8.6, e; como resultado do acoplamento do transformador terciário e ressonância, ficam energizadas as fases 2 e 3, com tensões idênticas, na direção de Muskingum com uma freqüência da ordem de 180 Hz.

Fig. 8.4 - Características elétricas do sistema de 345 KV da AEP



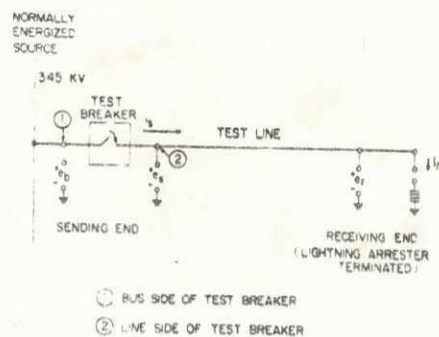


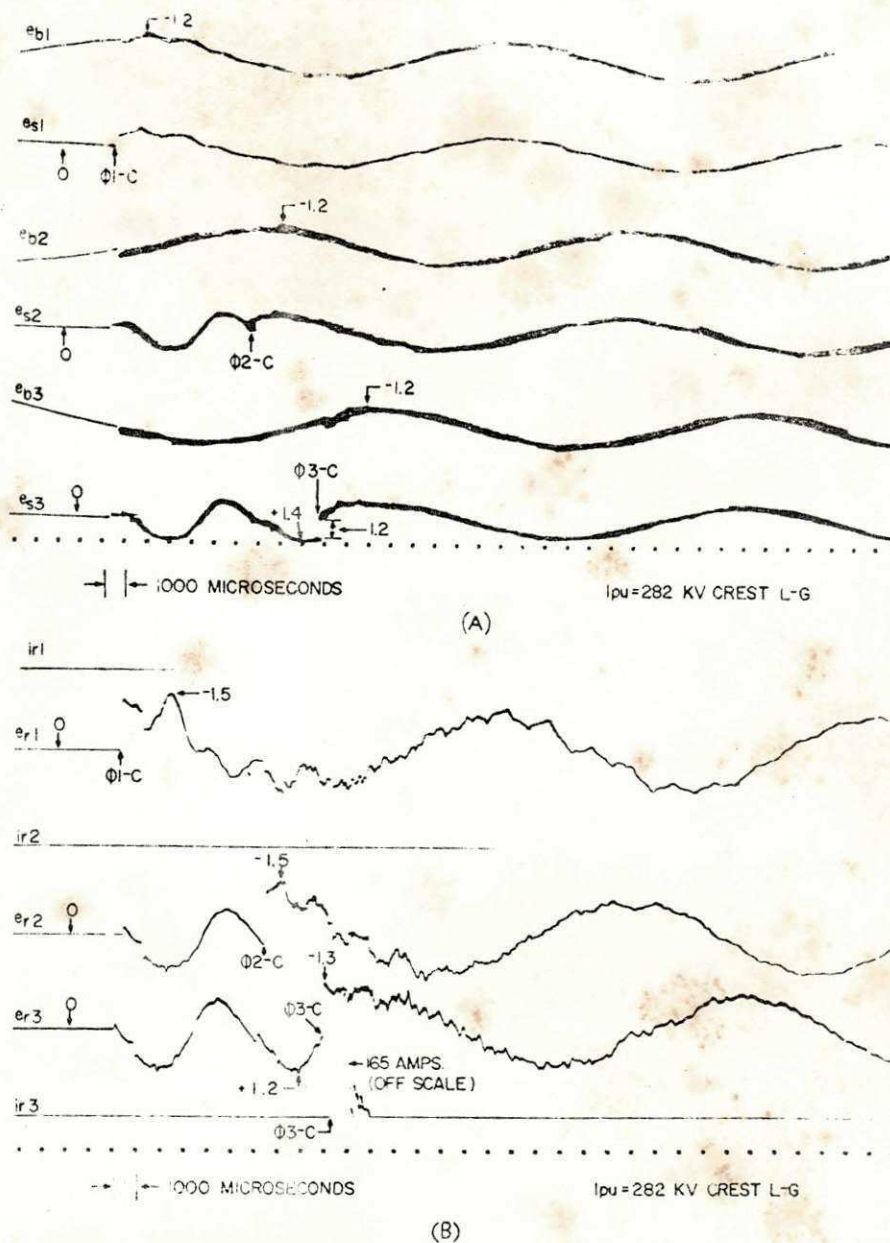
Fig. 8.5 - Características gerais do circuito teste

Depois de estar fechada a fase 1 do seccionador, 6000 μ s após, é fechada a fase 2 e; a diferença entre a tensão na linha energizada a partir de Tidd e a tensão no barramento de Muskingum cria um surto que chega em Tidd, causando descarga no PR, com um valor de -1.5 pu de V_{FF} , apresentado pela curva e_{r2} da figura 8.6.

Com o fechamento da fase 3 no seccionador, aproximadamente 3000 μ s após a fase 2, são produzidas descargas disruptiva do PR situado na fase 3 em Tidd.

No oscilograma e_{r3} da figura 8.6, observa-se que o crescimento da tensão para a descarga disruptiva do PR, é tão rápida, provocando a descarga dentro de aproximadamente 10 μ s ou menos, após ser ligado aquela fase. Naquele oscilograma, a tensão -1.3 pu, após a descarga, representa a queda de tensão I.R do PR. Nos oscilogramas apresentados na figura 8.6 o valor pu é baseado numa tensão de 282 KV de crista linha-terra.

Com o auxílio de computadores analógico, o oscilograma apresentado na figura 8.7, mostra que o surto de entrada na fase 3; da figura 8.6 (e_{s3}) com o valor de 1.2



Energizing 84-mile transformer-terminated line

A—Sending-end oscillogram

B—Receiving-end oscillogram

Fig. 8.6 - Oscilogramas de tensão na entrada e saída da linha de 84 milhas, do sistema de 345 KV da AEP, considerando apenas o transformador conectado na saída do sistema.

pu, produz uma sobretensão de 2.4 pu sem a presença do PR, no local onde estão aplicados os transformadores.

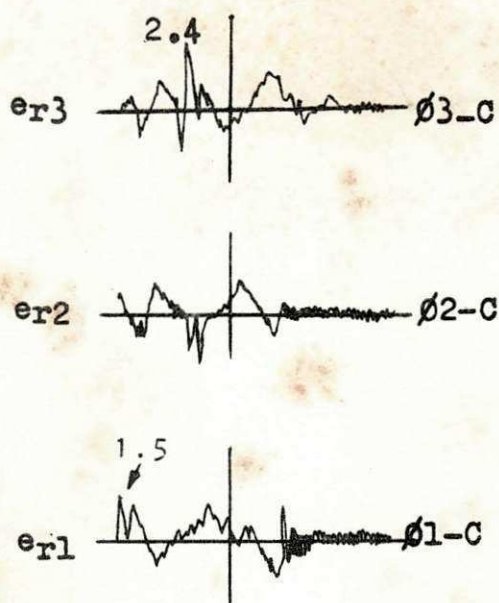
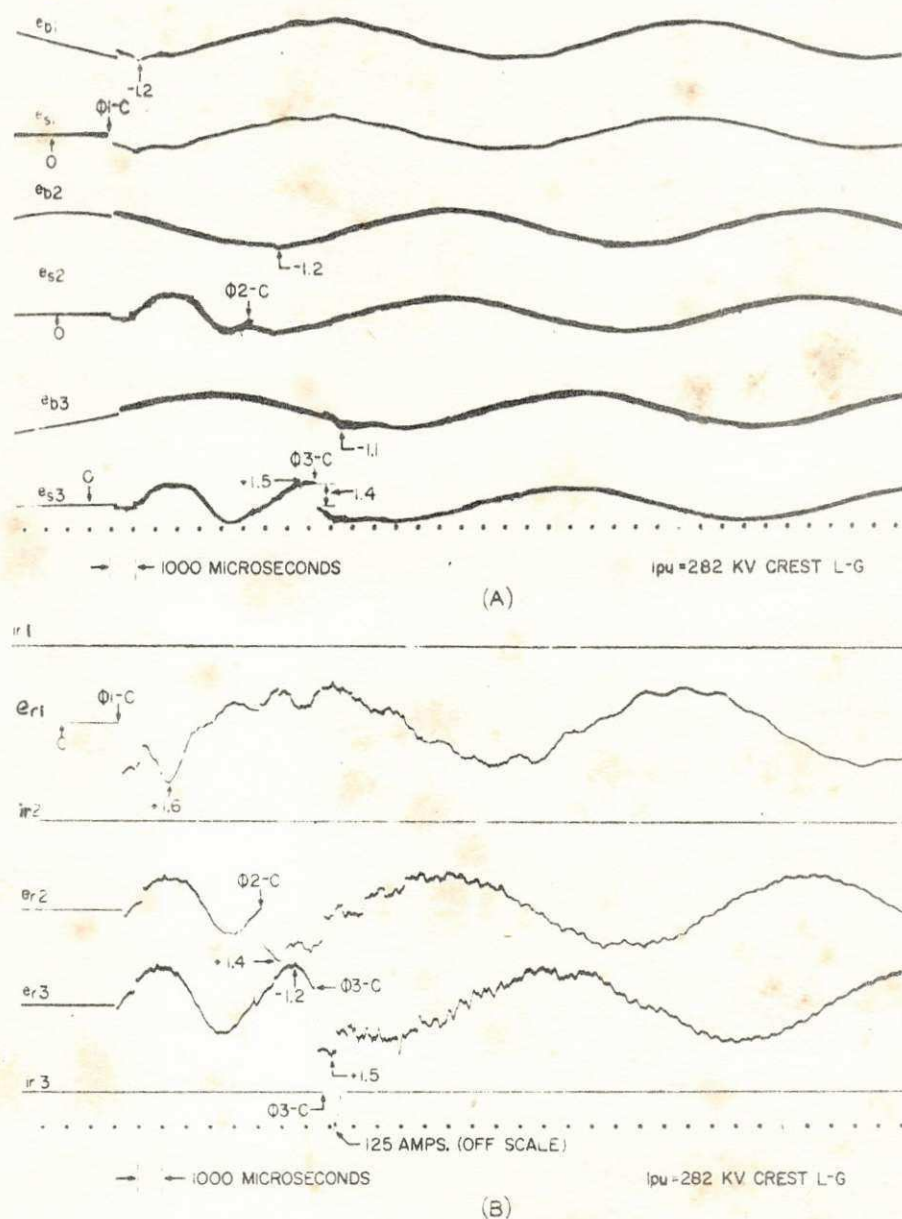


Fig. 8.7 - Oscilogramas em Tidd sem PR aplicados.

A tensão que causa corrente subsequente, seguindo a descarga é igual a 2.4 pu - 1.4 pu (tensão IR no PR). Se considerarmos uma linha com impedância de surto de 478Ω , teremos um pico de corrente de aproximadamente 650 amps no PR.

Devido ao ângulo relativo de fase entre as 3^{as} harmônicas e a tensão no barramento em Muskingum os surtos gerados na entrada do sistema são maiores que os considerados no caso anterior, provocando um aumento na queda de tensão IR, nos PR situados no terminal da linha em Tidd para 1.4 e 1.5 pu, conforme mostra os oscilogramas e_{r2} e e_{r3} da figura 8.8.



Energizing 84-mile transformer-terminated line

A—Sending-end oscillogram

B—Receiving-end oscillogram

Fig. 8.8 - Oscilogramas de tensões na entrada e saída da linha de 84 milhas do sistema de 345 KV da AEP considerando o ângulo relativo de fase e as harmônicas, ainda com transformador aplicado a saída do sistema.

Deve-se considerar que o surto de entrada de 1.4 pu, produzido na fase 3 (e_{s3}) produzirá um surto de 1.6 pu em e_{r1} , provocando descarga disruptiva no PR.

Devido a diferença de tempo no fechamento das fases no disjuntor, ocorrerá surtos de valores diferentes em cada fase. O surto produzido pelo fechamento da última fase, será o mais elevado de todos. Isto provoca um número de operações diferente em cada PR, conectado no sistema.

Resultado de cálculos mostram que para surtos iguais produzidos na entrada da linha, com base na última fase a ser fechada (θ_3), as componentes de surto fase-fase que alcançam o terminal da linha em pu são:

1.00 pu para a fase 3

0.88 pu para a fase 2

0.62 pu para a fase 1

Isto vem a mostrar a diferença entre as operações dos PR conectados, ao fim da linha. Ocorrerá algumas descargas nas fases 2 e 3 e provavelmente nenhuma descarga na fase 1. Como exemplo; devido a operações de chaveamento neste sistema estudado; desde 1957, foram registradas descargas nos PR, conectados em Tidd, com a seguinte distribuição:

11 descargas no PR da fase 3

1 descarga no PR da fase 2

0 descargas no PR da fase 1

Pode-se então concluir que devido a diferença de tempo na sequência de fechamento dos pólos do disjuntor, a primeira fase a ser fechada, oferece a probabilidade de nenhuma descarga no PR, localizado no terminal da linha e na fase correspondente.

8.6.2 - Operações de UHSR em Linhas

Resultados tem mostrado que a amplitude dos surtos são maiores quando ocorre uma operação com ultra alta velocidade (UHSR) no sistema. Desenergização de um trecho da linha, através de um circuito seccionador, deixa picos elevados de tensão na linha durante o "tempo morto".

Operações em seccionadores no sistema de 345 KV da AEP, após 19 ciclos de tempo morto, conduziram a surtos de valores elevados, em particular no terminal da linha, devido a diferença entre a tensão nos barramentos onde se efetua a operação com o seccionador, e a tensão armazenada na linha.

No sistema acima mencionado, diversas formas de correntes, foram registradas devido a operações em linhas de 136, 62 e 49 milhas de comprimento.

Os testes produzidos na linha de 62 milhas, ligando Philip Sporn a Kanawha River, por meio de uma linha dupla com impedância de surto de 282 ohms, conforme se observa na parte central da figura 8.4, forneceram maior quantidade de dados, visto que, operações de chaveamento no seccionador DD em Sporn produziram diferentes valores de corrente e tensão nos PR, conectados do lado da linha, que foram registrados em osciloscópios, devido as várias ligações no barramento de Kanawha entre linhas e banco de transformadores, dispostos de acordo com a sequência abaixo:

- 1) Todas as linhas e o banco de transformadores conectados ao barramento
- 2) Apenas as linhas conectadas
- 3) Apenas o banco de transformador

Os osciloscópios registradores das formas de onda, foram aplicados ao sistema em estudo, dispostos da mesma maneira como na figura 3.5.

8.6.2.1 - UHSR em Circuito Terminado por Linha e Banco de Transformador

O oscilograma apresentado na figura 8.9.A ilustra as formas de tensões obtidas, antes e depois do seccionador em Sporn, com os respectivos valores iniciais de tensão armazenada na linha de -0.80, -1.20 e -0.95 pu, com base em uma tensão de 283 KV de crista (linha-terra); para o sistema de 62 milhas de comprimento terminado por banco de transformadores e linhas em Kanawha.

Nos oscilogramas de 8.9.B, as formas de tensão e corrente, no terminal da linha.

Observa-se que a sobretensão em e_{r2} , aumentou de -1.20 para 1.6 pu em 50 μ seg após a chegada do surto, provocando uma corrente máxima de descarga no PR de 730 amps.

8.6.2.2 - UHSR em Circuito Terminado por Linhas

Para o mesmo sistema anterior, testes de UHSR, com terminação por linhas, mostram que de acordo com os oscilogramas em Kanawha ilustrados na figura 8.10, a tensão na fase 1, (e_{r1}) variou de 0.85 a 1.4 pu, em 50 μ s, provocando descarga disruptiva no PR desta fase, com uma corrente máxima de descarga de 195 amps.

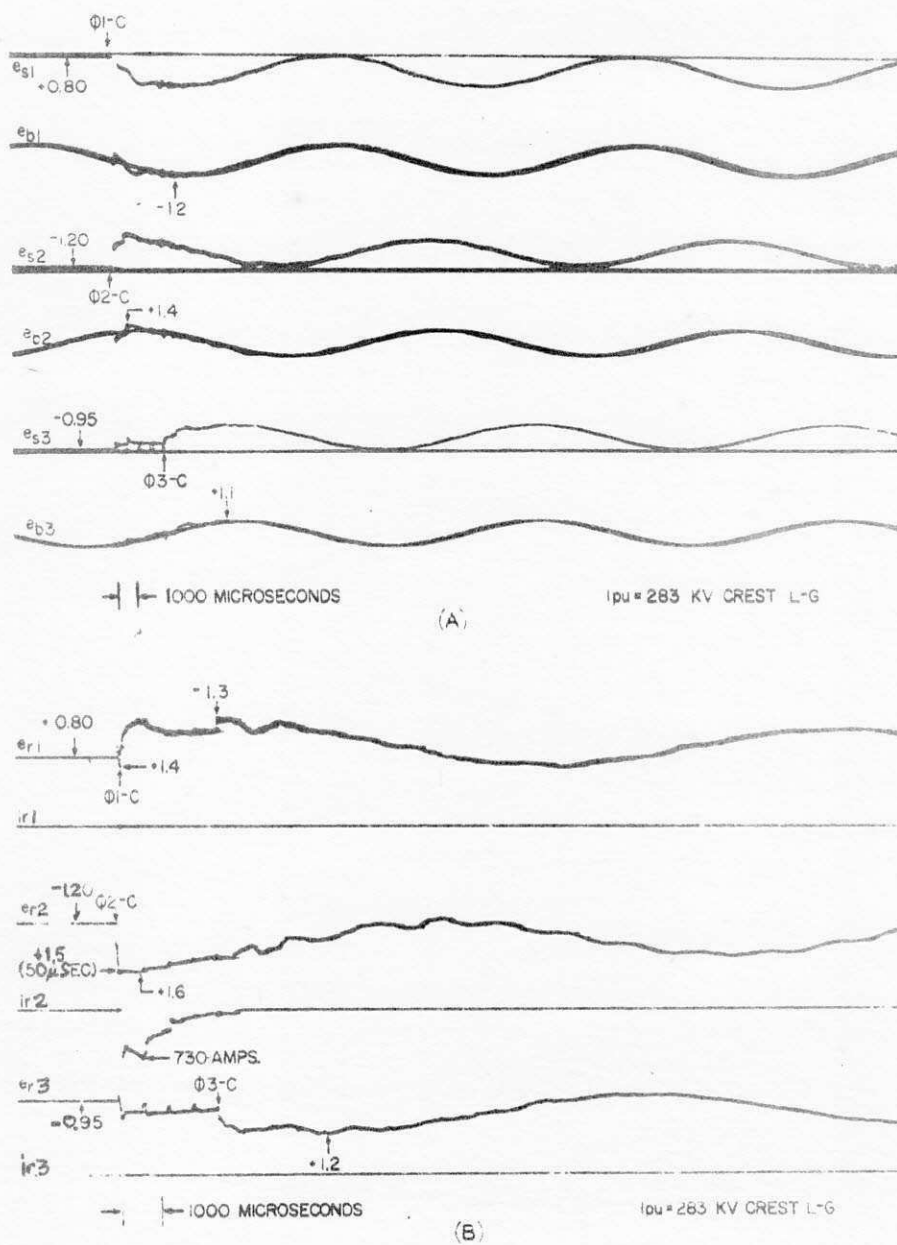


Fig. 8.9 - Formas de tensão e corrente no sistema de 345 KV, com 62 milhas ligando Sporn a Kanawha com transformador e linhas conectados.

A - Sporn

B - Kanawha

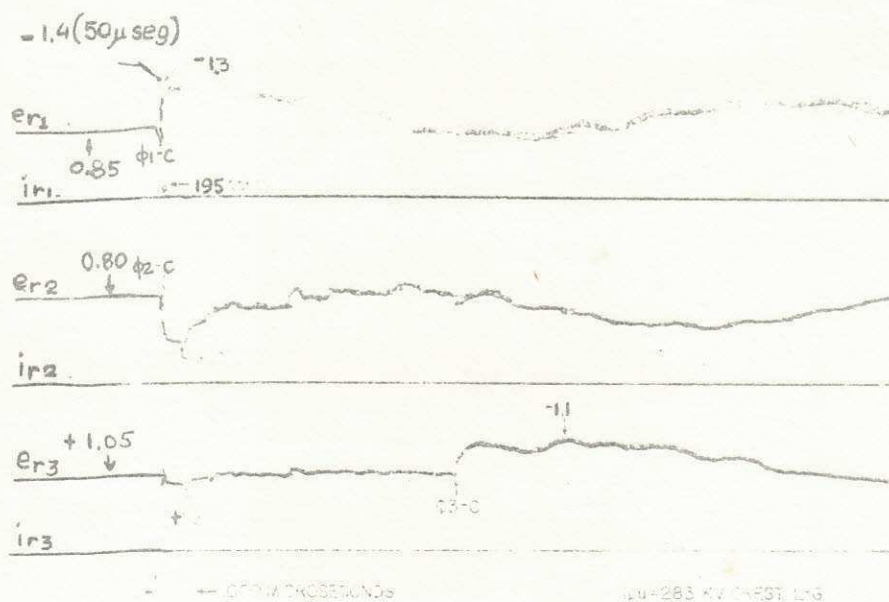


Fig. 3.10 - Oscilograma em Kanawha das formas de tensão e corrente para o sistema de 62 milhas 345 KV terminado por linhas, com operação de UHSR.

8.6.2.3 - UHSR em Sistema Terminado por Banco de Transformadores

Considerando o mesmo sistema em estudo, observando os oscilogramas da figura 3.11, nota-se que dos tipos de conexão até o momento apresentados este é o que apresenta o maior valor de sobretensão no terminal da linha, apresentando uma frente de onda de crescimento muito lento devido a indutância de dispersão do transformador e a capacitância da linha. Como exemplo, a tensão em e_{r1} , que inicialmente estava em -1.20 pu, cresceu para 1.80 pu, com base em uma tensão de 283 KV crista linha-terra, em $665 \mu\text{seg}$, provocando descarga disruptiva no PR com corrente de descarga igual a 680 amps. O mesmo ocorreu para e_{r3} que, inicialmente energizada com 0.80 pu, crescem para -1.4 pu em $665 \mu\text{seg}$, provocando corrente de descarga de 940 amps no PR conectado nesta fase.

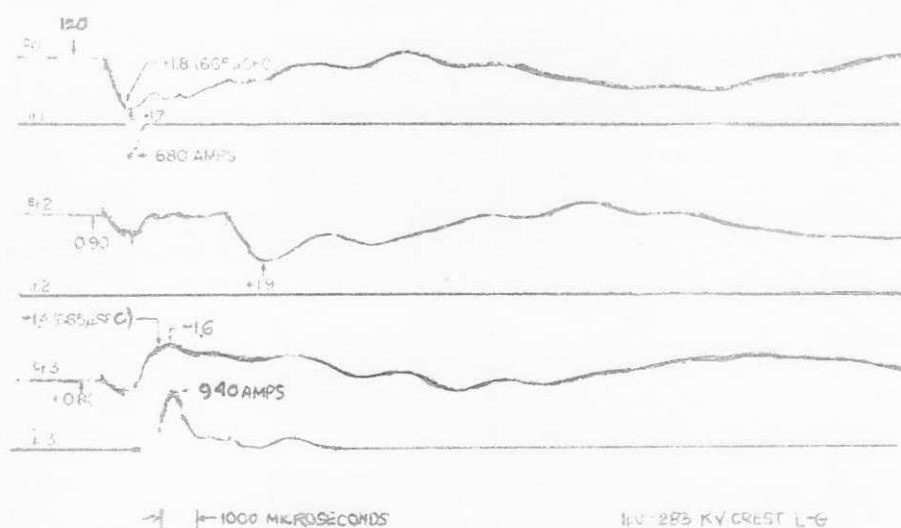


Fig. 8.11 - Formas de tensões e correntes em Kanawha do sistema de 345 KV, 62 milhas, terminado apenas por transformador, com operação de UHSR.

Das combinações entre linhas e bancos de transformadores conectados ao terminal do sistema este último apresenta maior valor de corrente de descarga. Para avaliar o máximo valor de tensão que ocorre no sistema sem que haja operação de PR; com o auxílio dos oscilogramas representados na figura 8.12, nota-se que em e_{r1} , inicialmente com uma tensão armazenada de 0.90 pu, cresceu em 1190useg para 2.8 pu, ainda com base na tensão anterior (283 KV de crista fase-terra) semelhante em e_{r2} e e_{r3} , cresceram para 1.9 e -2.4 pu respectivamente.

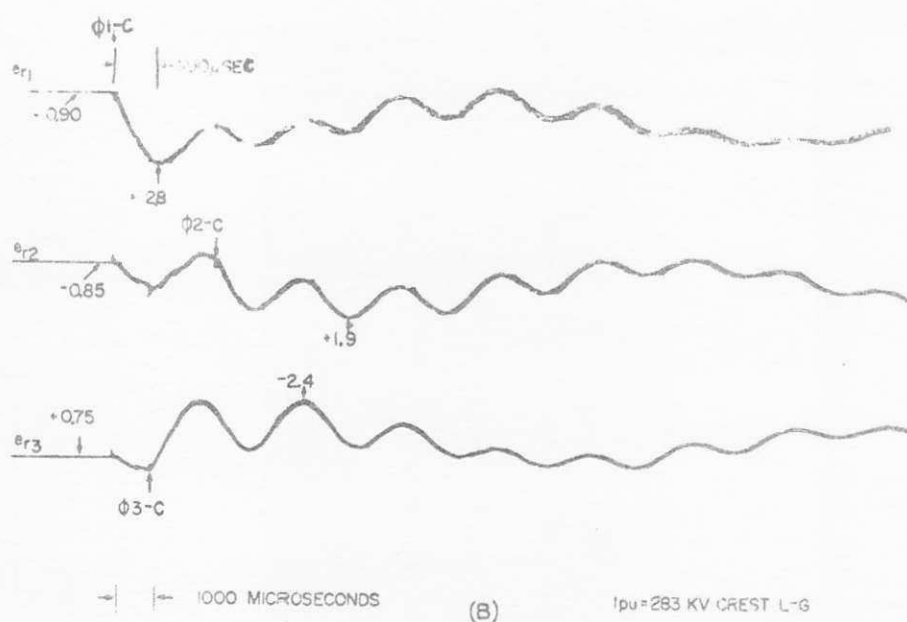


Fig. 8.12 - Oscilogramas de tensões na linha de 345 KV, 62 milhas, terminada por banco de transformador sem operação de PR.

É muito grande a diferença entre o nível de descarga disruptiva do PR no sistema real, e aquele obtido nos testes de laboratório, tornando difícil uma coordenação entre as duas tensões. Observa-se que os valores de corrente a que são submetidos os PR durante a descarga, neste sistema de 345 KV, é maior que aquela de 150 amps, aplicada aos PR, pelo teste da ASA. Deste modo, o teste de descarga da energia armazenada na linha, sujeita o PR, a um rigor mais acentuado, impondo ao mesmo as condições do sistema real.

8.7 - Efeito da Contaminação na Descarga Disruptiva dos Para-Raios

Os efeitos da contaminação e mistura na superfície

externa dos PR, são de influência considerável na descarga disruptiva interna dos mesmos. Com o propósito de verificar quão perigoso é o efeito dos agentes contaminadores na superfície externa, testes vem sendo realizados por vários fabricantes colocando os PR sob diversas condições de poluição, e aplicando valores de tensão, comparam a tensão disruptiva obtida; com aqueles valores que são obtidos em PR, sob condições normais sem estar contaminados e secos. (4-5)

O estudo da contaminação se torna importante por que o acoplamento capacitivo entre os elementos internos do PR, e a camada contaminadora aplicada a superfície externa, pode produzir uma distribuição não uniforme de tensão nos gaps do PR, ocasionando muitas vezes, descarga disruptiva interna, na própria tensão de operação do sistema.

Deve-se considerar que a descarga disruptiva externa de um PR, se dá num intervalo de tempo muito pequeno após o umedecimento da camada contaminadora que envolve a superfície externa do mesmo. Quando esta superfície está contaminada, antes da descarga, flue através dela uma corrente de valor muito pequeno denominada de "creepage" corrente. Nem sempre, a camada contaminadora é distribuída uniformemente ao longo de todo o isolante externo provocando uma redistribuição de potencial, e a sobretensão em uma ou mais seções que constituem o PR, pode conduzir também a uma descarga disruptiva externa e conseqüentemente falha no mesmo.

8.7.1 - Redução no Nível de Descarga a 60 Hz Devido a Contaminação

Objetivando comparar os níveis de descarga disruptiva a 60 Hz de um PR contaminado com diversos tipos de agentes poluidores, e um pára-raio limpo e seco (em condições normais de superfície), testes foram elaborados no

Laboratório de Alta Tensão da General Electric. Um PR de tensão nominal de 396 KV, foi submetido a diversas condições de contaminação e, umedecido por meio de chuva artificial ou neblina.

O resultado destes testes, são apresentados na tabela 3.1.

Tabela 3.1
60-Hz CONTAMINATION DESIGN TESTS ON A 396-kV ARRESTER

Arrester Rating	Type of Surface Contamination	Clean Water Applied As	External Flashover Range (kV rms, per unit)	Internal Sparkover Range (kV rms, per unit)	Leakage-Grading Current at 351 kV rms* Crest (mA)	Guaranteed Minimum 60-Hz Clean, Wet Sparkover (kV rms, per unit)
396	Salt-encrusted	12-inch per hour rain	340 to 495, 0.86 to 1.25	493 to 523, 1.25 to 1.32	120 to 35	562, 1.42
396	Salt-encrusted	Fog (3 1/2 hours)	none	560, 1.42	8	562, 1.42
396	Very severe service condition†	12-inch per hour rain	none	562, 1.42	—	562, 1.42
396	Very severe service condition†	Fog (3 1/2 hours)	none	562, 1.42	—	562, 1.42

* 120 percent of maximum line-to-ground voltage.

† Equivalent to that which would reduce the flashover of a wetted string of insulators to approximately 50 percent of its dry, clean flashover level.

Uma análise desta tabela, apresenta que quando a superfície externa de todo o isolante que envolve o PR é contaminada por sal encrustado, e umedecida por chuva de 12 polegadas por hora, apresenta uma descarga disruptiva interna variando de 493 a 523 KV, correspondendo a um valor em pu da tensão nominal do PR entre 1.25 a 1.32. Para os três últimos resultados, o teste feito em condições muito severa de poluição, e umedecido por neblina de 3 e 1/2 hora; a descarga disruptiva interna ocorre em 562 KV, equivalendo a 1.42 da tensão nominal do PR.

No capítulo 3, foi comentado que os PR, devem ter descarga disruptiva à 60 ciclos com um valor de no mínimo 1.50 pu da sua tensão nominal, embora em sistema de EHV, seja tolerado descarga disruptiva à 60 Hz variando em

tre 1.45 a 1.55 pu. Dos resultados encontrados a partir destes testes, pode-se avaliar o quanto é perigoso para os PR, o efeito de agentes contaminadores. Por exemplo, uma linha longa em vazio, localizada em uma região de contaminação severa, pode conduzir a consecutivas descargas nos pãra-raios aplicados ao sistema, levando a danificação dos mesmos visto que, por um lado; a contaminação reduzindo o nível de tensão disruptiva conforme explicado no decorrer da seção anterior e por outro lado a elevação de tensão na linha, pelo efeito capacitivo, submete o PR a uma corrente de descarga, que é incapaz de ser eliminada pelo gap, ocasionando derretimento dos blocos que constituem os resistores válvula do mesmo, funcionando como um curto-circuito para o sistema.

Referências:

- 1 - Ver bibliografia 16
- 2 - " " 22
- 3 - " " 21
- 4 - " " .22
- 5 - " " 51

9. DISCUSSÕES E SUGESTÕES

No decorrer deste trabalho algumas conclusões foram apresentadas paralelamente ao texto em estudo; entretanto cabe-nos analisar e discutir alguns aspectos que se julga necessário:

- No que diz respeito a parte construtiva de PR, com o auxílio da figura 6.5, observa-se que a aplicação de resistores de nivelamento entre os spark-gaps, oferecem condições de se obter um baixo valor de tensão disruptiva para surtos de tensão com taxa de crescimento muito elevada, como é o caso dos surtos devido a descargas atmosféricas. Entretanto, para surtos de tensão com taxa de crescimento muito lenta, tal é o caso dos surtos devido a operações de manobra no sistema, ou mesmo devido a falhas para a terra, oferecem um valor de descarga bastante alta.

É do conhecimento que em sistemas de EHV, onde o estudo da proteção se baseia no segundo tipo de surto mencionado neste item, o emprego de resistores de nivelamento nos spark-gaps de PR desta classe de tensão, produziram alta tensão disruptiva e conseqüentemente a margem de proteção entre a curva característica do PR e a curva de NDI do transformador seria muito pequena, colocando em risco o isolamento deste. Por esta razão, a utilização destes resistores são ineficientes nos PR aplicados em sistemas de EHV.

- Com o propósito de analisar o aspecto de que no estudo da proteção dos sistemas, deve-se tomar como base uma tensão de 300 KV, justifica-se pelo fato de todos os equipamentos de tensão nominal acima deste valor base, tem isolamento capaz de suportar os surtos provenientes

de descarga atmosférica, visto que existe uma probabilidade de ocorrer 10 ou 20% de correntes de descarga com valor de 70 KA e, o produto desta corrente pelo baixo valor da resistência de aterramento dos PR, dá origem a uma sobretensão suportável pelos equipamentos de tensão nominal acima daquele valor, onde o estudo deve ser baseado nos surtos devido a operações de manobra.

- Visando manter o isolamento dos equipamentos a serem protegidos dentro de um limite economicamente tolerável, mostrou-se no decorrer deste trabalho que os PR devem ter um baixo valor de tensão disruptiva bem como de tensão residual. Em conformidade com o baixo nível protetivo, os PR devem ser aptos para eliminar os surtos devido a operação de chaveamento, embora isto resulte em uma habilidade muito maior de corte, e no caso de PR que operam em sistemas de EHV, devem ser capazes de suportar a descarga através de si, obrigando-os a uma grande capacidade térmica.

- A construção dos modernos PR, provê uma redução muito grande no nível de descarga disruptiva e de tensão residual, visando reduzir o NBI do transformador que é o principal elemento da subestação. Ocorre entretanto, que em regiões de poluição muito severa, conduz a um decrescimento no nível de tensão disruptiva a 60 ciclos, a tal ponto que: por um lado a construção permitindo pequena descarga disruptiva, isto é, para um surto de pequeno valor, começa a haver descarga através do PR e por outro lado torna-se perigoso por que esta contaminação reduz o nível de descarga, de tal maneira que para qualquer variação na tensão nominal do sistema, pode haver descarga no PR e devido a duração da sobreten

são de 60 Hz causar a danificação dos blocos válvulas de que são constituídos.

Se nos cabe dar uma sugestão, poder-se-ia construir PR com desenho de isolante externo diferente, aumentando o caminho para o fluxo de "creepage" corrente, evitando uma distribuição de potencial desigual ao longo das várias seções que constituem o PR, impedindo que haja descarga disruptiva interna com valores da ordem de 1.25 pu da tensão nominal do mesmo, conforme se pode observar a partir dos valores contidos na tabela 8.1.

- O desenvolvimento deste trabalho, observou vários pontos referentes a performance de um PR no sistema de transmissão. Uma das partes bastante interessante, se refere aos testes em laboratórios, comentados no capítulo 8. Para o futuro, quando estiver em pleno funcionamento o laboratório de Alta Tensão desta Escola, algum estudante poderá tomar os capítulos finais deste trabalho e, a partir da bibliografia consultada, poderá simular modelo representativo de uma linha de transmissão, bem como, tentar reproduzir em computador analógico, um modelo matemático, a partir das equações constantes do capítulo 7 que conduza as curvas através dos PR. Para isto, é necessário que uma equipe seja constituída entre operadores de computadores e, estudantes de potência, a fim de estabelecer estas experiências e talvez contribuir com alguma inovação para a construção de PR.

BIBLIOGRAFIA

- 1) L.V. BEWLEY - Traveling Waves on Transmission Systems
Dover Publications, Inc. New York, 1963.
- 2) W.W. LEWIS - The Protection of Transmission Systems Against Lightning. Dover Publications, Inc. New York, 1965.
- 3) L.L. ALSTON - High Voltage Technology. Oxford University Press. Harwell Post Graduate Series, 1968.
- 4) MAX WELLAWER - Introdução à Técnicas das Altas Tensões. Editôra Polígono S/A São Paulo, 1973.
- 5) WILLIAM D. STEVENSON - Elements of Power Systems Analysis. McGraw-Hill Book Company Inc. International Student Edition - Kogakusha Company Ltd. Tokio, 1962.
- 6) L. BAPTIDANOV, V. TARASOV - Power Stations and Substations. Peace Publishers - Moscow.
- 7) HAROLD A. PETERSON - Transient in Power Systems. Dover Publications Inc. New York, 1966.
- 8) E. KUFFELAND, M. ABDULLAH - High Voltage Engineering. Pergamon Press Ltd. Hungary, 1970.
- 9) GAUDÊNCIO ZOPPETTI JUDEZ - Estaciones Transformadoras y de Distribucion. Editorial Gustavo Gili S/A Barcelona, 1966.
- 10) REINHOLD RUDENBERG - Electrical Shock Waves in Power Systems. Harward University Press. Cambridge Massachussets 1968.

- 11) EDISON ELECTRIC INSTITUTE - EHV - Transmission Line Reference Book. New York, 1968.
- 12) JAMES DILLON COBINE - Gaseous Conductors. Theory and Engineering Applications. Dover Publications, Inc. New York, 1957.
- 13) ARTHUR R. VON HIPPEL - Dielectric Materials and Applications. John Willey & Sons Inc. New York. Chapman & Hall, Ltd. London, 1954.
- 14) ARTHUR R. VON HIPPEL - Dielectrics and Waves. John Willey & Sons, Inc. New York, 1954.
- 15) ARTHUR W. GOTHBERG, ARTHUR R. KOERBER - Contamination Testing of Arresters for 500 KV Systems. IEEE Transactions - March 1968, pg. 703-10.
- 16) R.W. FLUGUM, J.D. PHELPS, E.F.W. BECK, A.J. McELROY - Switching-Surge Energy Characteristics from Transmission-Line Discharge Fields Tests. IEEE Transactions March 1965, pg. 244-9.
- 17) O.J. MELVOLD, B.V. PALKER - Quake Jolts Utility into Arrester Test. Transmission and Distribution. November 1972, pg. 38-42.
- 18) IEEE COMMITTEE REPORT - Testes on Pressure Relief Devices for Station and Intermediate Lightning Arresters. IEEE Transactions. February 1965, pg. 163-71.
- 19) DENNIS P. CARROL, HAROLD A. PETERSON, ROBERT W. FLUGUM, JOHN W. KALB - A Dinamic Surge Arrester Model for Use in Power Systems Transient Studies. IEEE Transactions. May-June 1972. N° 3, pg. 1057-64.

- 20) IEEE Transactions _ Voltage Rating Investigation for Application of Lightning Arresters on Distribution Systems. May-June 1972, pg. 1067-74.
- 21) W.S. PRICE, and all - Field Measurement of 345 KV. Lightning Arrester Switching Surge Performance. IEEE Transactions, August 1963, pg. 487-79.
- 22) A.G. YOST, and all - Transmission Line Discharge Testing for Station and Intermediate Lightning Arresters. IEEE Transactions January 1965, pg. 79-82
- 23) A.M. CORREA - Coordenação dos Isolamentos e Aplicação de Pára-Raios, Seção de Eng^a. Aplicada da General Electric.
- 24) KEN UEHARA, GENICH OHWA - Investigation of Lightning Damages on Distributed Lines. IEEE Transactions, April 1968, pg. 1018-24.
- 25) Certified DESIGN TEST DATA - General Electric S/A.
- 26) E.W. BOEHNE, R.E. KOCH, G.L. GAIBROIS, H.W. MIKULECKY - Coordination of Lightning Arresters, and Limiting-Fuses IEEE Transactions. May-June 1972, pg. 42.8.
- 27) Isolação Coordenada nas Redes de Alta Tensão. Revista Eletricidade Moderna. Dezembro 1972, pg. 42-8.
- 28) ESSAM NASSER - Spark Breakdown in Air at a Positive Point. IEEE Spectrum. November 1968, pg. 127-34.
- 29) ARTIGOS DA REVISTA MUNDO ELÉTRICO de Ítalo F. Morel.
- Sobretensões nas Linhas de Transmissão e Redes de Distribuição.

- A Função dos Pára-Raios nas Modernas Instalações Elétricas.
 - O Pára-Raios nas suas várias Modalidades Construtivas.
- 30) DIRK A. RHEINBOLDT - Ensaio de Impulso em Transformadores - General Electric S/A.
 - 31) Pesquisa em Alta Tensão - Contribuição do Departamento de Normas Técnicas da General Electric S/A. Revista GE Nº 13 pg. 39-52.
 - 32) Sobretensão nos Sistemas de Potência. Artigo da Escola Mauá.
 - 33) GIANGUIDO CARRARA, LUIGI DELLERA - Switching Surge Insulation Coordination: Lightning Arresters. IEEE Transactions. Vol. Pas 87, January 1968, pg. 154-62.
 - 34) E.J. ALLEN, J.S. NESBITT - New Instrumentation for Lightning Arresters. Transmission and Distribution, July 1962, pg. 66-9.
 - 35) V.N. RIKH - Modern Arresters Promise Large-Insulation-Cost Reduction on EHV Systems. The New Zealand Electrical Journal, 25 November 1971, pg. 210-3.
 - 36) J.B. OWENS - The Determination of Switching Surges for EHV Insulation Systems. IEEE Transactions, March 1964, pg. 263-6.
 - 37) E.R. TAYLOR, S.M. MERRY - Switching Duty on Modern Arresters. IEEE Transactions. Vol. Pas 90, May 1971, pg. 1102-11

- 38) M. DARVENIZA - Overvoltage Protection of Substations. Lecture 38. University of Queensland.
- 39) J.G. STELL, H.W. WHITTINGTON - Breakdown of Series Connected Air-Gaps. Proceedings IEEE. Vol. 119 No 10, October 1972, pg. 1526-8.
- 40) H.V. GOPALAKRISHNA - Discriminative Design Features in EHV Lightning Arresters. ISI Bulletin Vol. 23, November 1971, pg. 508-9.
- 41) V. SRINIVASAN - Characteristics and Duties on Lightning Arresters in EHV Systems. ISI Bulletin Vol. 23, November 1971, pg. 509-10.
- 42) B. CHAUDHURI - Characteristics of Polluted Surge Diverters ISI Bulletin. Vol. 23, November 1971, pg. 510-1.
- 43) JOHN R. NEUENSWANDER - Modern Power Systems. International Series in Electrical Engineering, Toronto 1971.
- 44) WALTER C. JOHNSON - Transmission Lines and Networks. International Student Edition. Kogakusha Company Ltd. Tokyo 1950.
- 45) Transmission and Distribution, Electrical Reference Book. Westinghouse Electric Corporation 1964.
- 46) ASEA - Lightning Arresters for 4 to 106 KV. Types XBA and XBB.
- 47) GIANGUIDO CARRARA, ALLESSANDRO CLERICI, GIAMPAOLO MAZZA, ACHILE TASCHINI - TNA and Laboratory Study of the

Switching Surge. Behavior of Lightning Arresters. IEEE Transactions. Vol. Pas 88 Nº 10, October 1969, pg.1449-62.

- 48) INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION - Insulation Coordination, July 1970.
- 49) T.F. WATSON JR. and R. HIATT - Line Entrance Gaps for Protection of Substation Insulation. AIEE Nº 53, pg. 43.
- 50) Artigos da Brown-Boveri Review, cedidos para consulta pela Companhia de Eletricidade da Borborema em Campina Grande (CELB).
- A - New Lightning Arresters for Voltages from 4.5 to 750 KV (1964).
 - B - The Installation of Lightning Arresters (1964)
 - C - A New Lightning Arrester for High-Voltage Networks (1962).
 - D - Low-Voltage Lightning Arresters for ~~re~~ Protection of Silicon Rectifiers and other Applications.
- 51) H.O. FLUGUM, A.R. KOERBER - Contamination Tests for Lightning Arresters. IEEE Transactions, Vol. Pas 89 Nº 8, Nov/Dec. 1970.
- 52) Dr. J.E. JONES - Técnicas de Coordenação de Isolamentos, apresentado nos Cursos Modernos de Análise de Sistemas de Potência e Alta Tensão, julho 1973.