RELIGAMENTO MONOPOLAR EM LINHAS DE TRANSMISSÃO – MODELAGEM TEÓRICA E ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DO REATOR DE NEUTRO COMO MÉTODO REDUTOR DA CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO

Sergio Luiz Pinto de Castro Valinho

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Ivan Herszterg, M.Sc. (Orientador)

Prof. José Luiz da Silva Neto, Ph.D.

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL JANEIRO DE 2007

O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.

Einstein

A Roberta,

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que ofereceram contribuições valiosas para a realização deste projeto e de modo especial:

A Deus, por todas as bênçãos;

Aos meus pais, José Luiz de Castro Valinho e Maria de Fátima de Jesus Pinto, e meu irmão, Pedro Henrique, por me amarem acima de tudo;

Ao professor e orientador Ivan Herszterg, pela colaboração imprescindível na elaboração desta monografia;

Aos professores e revisores José Luiz da Silva Neto e Sergio Sami Hazan, pelo apoio na finalização deste trabalho, a quem desejo muito sucesso;

Ao coordenador do curso Sergio Sami Hazan;

Aos colegas de curso Victor de Senna Araújo, Daniel Bollos e demais;

Aos amigos do Operador Nacional do Sistema Elétrico e do LASUP/UFRJ;

À minha noiva e companheira Roberta,

Aos meus familiares e amigos, pelo apoio dado nos momentos necessários.

S	U	M	Á	R	0

	LISTA DE FIGURAS	vii
	LISTA DE TABELAS	viii
	LISTA DE ANEXOS	ix
	LISTA DE SÍMBOLOS	х
	RESUMO	xii
1.	INTRODUÇÃO	1
2.	ASPECTOS BÁSICOS DO RELIGAMENTO MONOPOLAR	4
2.1.	Sistemas de Proteção	6
2.2.	Medidas para a redução da corrente de arco secundário	8
2.3.	O Arco elétrico no ar livre	10
2.4.	Características empíricas da extinção do arco	14
3.	EQUACIONAMENTO DO RELIGAMENTO MONOPOLAR	17
3.1.	Acoplamento capacitivo	17
3.2	Acoplamento indutivo	20
3.3	Método de redução da corrente de arco secundário – reatores	
	em derivação	22
4.	CÁLCULO DA CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO	29
4.1.	Rede utilizada	29
4.2.	Modelos utilizados dos sistemas equivalentes e da linha de	
	transmissão	30
4.3.	Casos processados	31
4.3.1.	LINHA DE TENSÃO NOMINAL IGUAL A 500 kV	32
4.3.1.1.	Estudos em regime transitório, considerando-se os efeitos da	
	variação do carregamento da linha, da variação do percentual de	
	compensação reativa e da utilização dos reatores de neutro na	
	corrente de arco secundário	32
4.3.1.2.	Estudos em regime transitório, considerando	32
4.4.	Resultados obtidos	33
4.4.1	LINHA DE 500 kV	33
4.4.1.1.	Estudos em regime transitório	33

	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	45
	ANEXOS	41
5.	CONCLUSÕES	39
c.3.	Comparação entre os casos 4 e 6	38
c.2.	Comparação entre os casos 2 e 5	37
c.1.	Comparação entre os casos 1 e 4	36
C.	Análise quanto a influência do reator de neutro	36
	linha (comparação entre os casos 1 e 3)	35
b.	Análise quanto a influência do percentual de compensação da	
	(comparação entre os casos 1 e 2)	33
a.	Análise quanto a influência do carregamento da linha	

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Rede com religamento monopolar	3
Figura 2.1 – A corrente de arco	5
Figura 2.2 – Acoplamento mútuo e corrente de arco secundário	7
Figura 2.3 – Banco de reatores monofásicos com reator de neutro	10
Figura 2.4 – Dispersão dos resultados	15
Figura 2.5 – Característica Limite	15
Figura 2.6 – Curva de extinção do arco	16
Figura 3.1 – Linha trifásica	17
Figura 3.2 – Representação capacitiva da linha	18
Figura 3.3 – Tensão equivalente de Thèvenin	18
Figura 3.4 – Circuito equivalente de Thèvenin	19
Figura 3.5 – Linha trifásica – acoplamento indutivo	20
Figura 3.6 – Circuito para a fase C aberta	21
Figura 3.7 – Ligação dos reatores em derivação e de neutro	22
Figura 3.8 – Admitâncias indutivas entre fases e fase-terra	23
Figura 3.9 – Representação capacitiva e indutiva da linha	24
Figura 3.10 – Ligação dos reatores de fase somente	25
Figura 3.11 – Circuito resultante – fase C aberta - arco secundário no início da	
linha	26
Figura 3.12 – Circuito resultante – fase C aberta - arco secundário no ponto	
intermediário entre o centro e a extremidade do trecho aberto	28
Figura 4.1 – Rede utilizada	29
Figura 4.2 – Circuito utilizado para modelar os reatores de compensação	30
Figura 4.3 – Modelo da falta monofásica	31
Figura 4.4 – Corrente de arco secundário para o caso 1	34
Figura 4.5 – Corrente de arco secundário para o caso 2	34
Figura 4.6 – Corrente de arco secundário para o caso 3	35
Figura 4.7 – Corrente de arco secundário para o caso 4	36
Figura 4.8 – Corrente de arco secundário para o caso 5	37
Figura 4.9 – Corrente de arco secundário para o caso 6	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1 – Distribuição média de falhas em linhas de transmissão de alta	
tensão	1
Tabela 1.2 – Distribuição média de falhas em linhas de transmissão de extra	
alta tensão	2
Tabela 4.1 – Casos analisados – linha de 500 kV	32

LISTA DE ANEXOS

1 – Parâmetros da linha de transmissão de 500 kV utilizada	42
2 – Memória de cálculo dos reatores de neutro	43

LISTA DE SÍMBOLOS

X_0 / X_1	Relação entre a reatância de seqüência zero e a reatância de seqüência
	positiva do reator em derivação
L_{S}	Indutância própria por fase
C_0	Capacitância para a terra
L _m	Indutância mútua entre fases da linha de transmissão
C_{m}	Capacitância mútua entre fases da linha de transmissão
C_{th}	Capacitância equivalente de Thèvenin
I _c	Corrente de arco secundário devida ao acoplamento capacitivo
V_{c}	Tensão de restabelecimento devida ao acoplamento capacitivo
X_{0L}	Reatância de seqüência zero da linha de transmissão
X_{1L}	Reatância de seqüência positiva da linha de transmissão
X_{11L}	Reatância de seqüência positiva da linha de transmissão – trecho 1
X_{12L}	Reatância de seqüência positiva da linha de transmissão – trecho 2
X_{01L}	Reatância de seqüência zero da linha de transmissão – trecho 1
X_{02L}	Reatância de seqüência zero da linha de transmissão – trecho 2
X_{SL}	Reatância indutiva própria da linha de transmissão
X_{m}	Reatância indutiva mútua entre as fases da linha de transmissão
V_{ind}	Tensão induzida na fase aberta
I ₀	Corrente de seqüência zero
I _A	Corrente na fase A da linha de transmissão
I_{B}	Corrente na fase B da linha de transmissão
I _C	Corrente na fase C da linha de transmissão
li	Corrente de arco secundário devida ao acoplamento indutivo
I	Corrente de arco secundário considerando o acoplamento capacitivo e
	indutivo
I_1	Corrente de arco secundário no trecho 1 devida ao acoplamento indutivo,
	considerando as reatâncias dos reatores em derivação e de neutro
l ₂	Corrente de arco secundário no trecho 2 devida ao acoplamento indutivo,

considerando as reatâncias dos reatores em derivação e de neutro

- l'i Corrente de arco secundário devida ao acoplamento indutivo,
 considerando as reatâncias dos reatores em derivação e de neutro
- L₁ Comprimento do trecho 1
- L₂ Comprimento do trecho 2
- T_e Intervalo de tempo entre a extinção do arco secundário e a extinção do arco primário
- Y_S Admitância do reator em derivação
- Y_n Admitância do reator de neutro
- X₀ Reatância de seqüência zero do reator em derivação
- X₁ Reatância de seqüência positiva do reator em derivação
- Y_{ab} Admitância indutiva entre as fases A e B
- Y_{bc} Admitância indutiva entre as fases B e C
- Y_{ca} Admitância indutiva entre as fases C e A
- Y_{a0} Admitância indutiva entre a fase A e a terra
- Y_{b0} Admitância indutiva entre a fase B e a terra
- Y_{c0} Admitância indutiva entre a fase C e a terra
- Y_{ft} Admitância equivalente fase terra
- Y_{ff} Admitância equivalente fase fase
- V'c Tensão de restabelecimento na fase aberta devida ao acoplamento capacitivo, considerando as admitâncias equivalentes fase – terra e entre fases
- l'_c Corrente de arco secundário devida ao acoplamento capacitivo, considerando as admitâncias equivalentes fase – terra e entre fases
- X_s Reatância do reator em derivação
- X_n Reatância do reator de neutro
- E Tensão fase terra na linha de transmissão

RESUMO

O religamento monopolar tem sido utilizado com intuito de reduzir as perturbações oriundas da abertura tripolar em linhas de transmissão, após a ocorrência de defeitos fase-terra. Para se obter sucesso no religamento monopolar em um intervalo de tempo relativamente pequeno, alguns fatores relativos à probabilidade de extinção da corrente de arco secundário devem ser considerados. Neste trabalho foram realizados estudos transitórios abrindo-se uma das fases de uma linha de transmissão de 500 kV transposta. Variações no carregamento da linha, no percentual de compensação shunt da linha e a utilização de reatores no neutro como método redutor da corrente de arco secundário serão analisados. Através da análise dos resultados de ensaios obtidos na literatura, foi determinada uma região de provável extinção do arco secundário, que foi utilizada como referência de análise e calibração dos modelos. Como resultados do trabalho, gráficos da corrente de arco secundário foram gerados nas simulações feitas em MatLab e comparados para as diversas situações citadas acima, tais guais, variação de carregamento da linha, do percentual de compensação shunt da linha e eficácia do reator de neutro na redução da corrente de arco secundário.

Palavras chaves: religamento monopolar, reator de neutro.

1. INTRODUÇÃO

Com o constante crescimento do sistema elétrico brasileiro e mundial, o número de linhas de transmissão em operação no Brasil e no resto do mundo tem aumentado cada vez mais. Aliado a esse fato, surge a necessidade de se buscarem técnicas que otimizem o desempenho das redes quanto aos aspectos relativos à confiabilidade, segurança, perdas, etc.

A tabela 1.1 apresenta o percentual relativo à contribuição dos diferentes tipos de falhas ocorridas em linhas de transmissão de alta tensão [1].

Tabela 1.1 – Distribuição média de falhas em linhas de transmissão de alta tensão.

Tipos de Faltas	Porcentagem (%)
Curto fase-terra	70
Curto fase-fase	15
Curto bifásico para terra	10
Curto trifásico	05
Total	100

Conforme mostra a tabela 1.1, 70% dos defeitos ocorridos em linhas de transmissão são do tipo curto fase-terra.

Ao analisar as linhas de transmissão de extra alta tensão ou ultra alta tensão, observa-se que 93% dos defeitos ocorridos nesses tipos de linhas são curtos fase-terra. Esses dados relativos a linhas de extra alta tensão ou ultra alta tensão são relatados na tabela 1.2.

Tabela 1.2 – Distribuição média de falhas em linhas de transmissão de extra alta tensão e ultra alta tensão.

Tipos de Faltas	Porcentagem (%)
Curto fase-terra	93
Curto fase-fase	04
Curto bifásico para terra	02
Curto trifásico	01
Total	100

Um dos possíveis motivos da porcentagem ser maior quando estamos tratando de linhas de extra alta tensão é o fato de essas linhas possuírem um espaçamento maior entre seus condutores de fase.

Devido a essas altas porcentagens de defeitos monofásicos para a terra, onde somente uma das três fases é diretamente afetada, o estudo do religamento monopolar torna-se interessante devido a não necessidade de interromper o fluxo de potência nas fases que não estão sendo afetadas diretamente pelo defeito, neste tipo de religamento.

Em contraste com as técnicas atuais de eliminação de defeitos, onde independentemente do tipo de falta ocorrida as três fases são abertas, com o objetivo de minimizar os distúrbios resultantes de uma abertura tripolar e especialmente perda de sincronismo, é desejável abrir somente o pólo do disjuntor da fase submetida ao defeito, conforme a figura 1.1, e religar num intervalo de tempo menor possível.

Atualmente, para um curto fase-terra, o aumento significativo de corrente em uma das fases faz com que os disjuntores adjacentes ao ponto de defeito atuem abrindo todas as fases, isolando assim o trecho defeituoso. Já no religamento monopolar tal fato não ocorre, pois somente a fase defeituosa será aberta, enquanto que as fases sãs permanecem com seus respectivos disjuntores fechados, não ocorrendo à interrupção do fluxo de potência nas mesmas. Sua utilização se torna mais importante no caso de sistemas radiais, onde uma eventual abertura tripolar acarretaria em perda de carga.



Figura 1.1 – Rede com religamento monopolar.

Neste trabalho foram realizados estudos transitórios abrindo-se uma fase de uma linha de transmissão durante a ocorrência de um defeito monofásico para a terra, objetivando através das simulações feitas em MatLab comparar o valor em amplitude da corrente de arco secundário para as situações de variação de carregamento, de percentual de compensação shunt da linha e uma análise para o caso onde fez se utilizar um reator de neutro para redução desta corrente.

No capítulo 2 será feita uma revisão das principais bibliografias sobre o arco elétrico, com o objetivo de reunir em um único trabalho, os resultados já obtidos em laboratórios.

No capítulo 3 será feita a modelagem teórica dos acoplamentos capacitivos e indutivos existentes. Neste mesmo capítulo será abordada a modelagem com e sem a utilização dos reatores em derivação e de neutro.

No capítulo 4 serão apresentados os dados utilizados na simulação, bem como o simulador utilizado e os resultados obtidos para cada caso simulado. Neste mesmo capítulo será feita uma comparação entre alguns destes casos simulados, com o objetivo de avaliar a variação da amplitude da corrente de arco secundário no tempo.

O capítulo 5 é a conclusão do trabalho, onde alguns dos resultados do capítulo 4 serão comentados e propostas para futuros trabalhos serão apresentadas.

2. ASPECTOS BÁSICOS DO RELIGAMENTO MONOPOLAR

Ao se planejar um sistema de transmissão levando-se em conta a utilização do religamento monopolar, deve-se ter disponíveis as informações que permitam identificar com razoável confiabilidade se o arco secundário, nas condições de cada linha de transmissão, pode ou não se extinguir, ou até mesmo se medidas e equipamentos adicionais serão necessários para essa extinção.

A interação do arco secundário com a rede elétrica se processa através do acoplamento capacitivo mantido através das capacitâncias mútuas entre fases, originando uma componente da corrente de arco secundário, independente do carregamento e diretamente proporcional ao comprimento da linha de transmissão.

Da mesma forma que existe o acoplamento capacitivo, também ocorre o acoplamento indutivo, devido à existência de correntes nas outras fases que não foram afetadas pelo defeito. Estas correntes criam campos magnéticos os quais induzem corrente na fase aberta. Este acoplamento em geral tem menor influência do que o capacitivo.

O arco elétrico que será analisado não é aquele que ocorre entre os contatos dos disjuntores da fase submetida ao defeito no momento da abertura destes contatos. O arco elétrico em que estamos interessados neste trabalho é aquele que ocorre na cadeia de isoladores, devido a uma possível falha de isolamento, não sendo de interesse analisar a causa desta falha, e sim os efeitos da corrente de arco que irá se estabelecer.



Figura 2.1 – A corrente de arco

A figura 2.1, extraída da referência [21], retrata a corrente de defeito que ocorre no caso de uma falta monofásica para a terra em uma linha de transmissão, quando um arco elétrico se estabelece entre a fase e a terra, rompendo a cadeia de isoladores. Como pode ser visto, enquanto não ocorre à abertura dos disjuntores associados à fase submetida ao defeito, o arco elétrico estabelecido é alimentado pelo sistema de potência (corrente de arco primário), atingindo valores de pico da ordem de kA. Após a abertura dos disjuntores da fase sob defeito, o sistema de potência pára de alimentar de forma direta o arco elétrico, porém devido aos acoplamentos capacitivos e indutivos existentes entre as fases sãs e a fase defeituosa, a corrente de arco continua sendo sustentada por esses acoplamentos (corrente de arco secundário), porém com amplitudes menores e da ordem dos A.

Caso o religamento seja feito e a corrente de arco secundário ainda não tenha sido extinguida, o religamento não terá sucesso e o sistema sofrerá uma abertura tripolar.

2.1 . Sistemas de Proteção

No caso de um sistema de proteção que atue realizando um chaveamento tripolar, ao abrirem os disjuntores, estes isolam completamente o trecho defeituoso, ou seja, como as três fases foram abertas quase que simultaneamente, não existem mais correntes circulando nas fases do sistema, o que facilita a extinção do arco secundário, pois existe somente uma carga residual na linha e após isso, se o defeito não tiver conseqüências ou causas mecânicas, o religamento tripolar do sistema pode ser efetuado com sucesso. O intervalo de tempo desde a ocorrência do defeito até o pleno restabelecimento do sistema varia ao redor de 500 a 1000 ms. Com a interrupção do fornecimento, é inevitável o surgimento de problemas como perdas de sincronismo em unidades geradoras, sobretensões, etc.

Já em sistemas que operam com chaveamento e religamento monopolar, as proteções são seletivas e somente atuam na fase defeituosa, isolando-a. Portanto, devido aos acoplamentos existentes (figura 2.2), não se pode afirmar que a corrente de arco secundário irá se extinguir no período de interesse. Os fatores principais associados ao chaveamento monopolar que determinam a probabilidade de extinção da corrente de arco secundário em um dado intervalo de tempo são: o comprimento da cadeia de isoladores (comprimento inicial do caminho do arco), a corrente de arco primário, a corrente de arco secundário, a tensão de restabelecimento à freqüência industrial e as condições atmosféricas. A corrente elevada e a alta energia do arco primário, aquecem e ionizam o caminho do arco até que a fase submetida ao defeito seja aberta. Esse caminho do arco aquecido e ionizado pode sustentar uma corrente menor, de arco secundário, alimentado pelos acoplamentos capacitivo e indutivo da linha. Todos os métodos de extinção dessa corrente são direcionados para a redução da sua amplitude, objetivando um religamento com sucesso num intervalo de tempo relativamente pequeno.



Figura 2.2 - Acoplamento mútuo e corrente de arco secundário

No caso de religamento e chaveamento monopolar algumas necessidades de projeto devem ser consideradas:

 Sistema de proteção deve ser capaz de selecionar e chavear somente a fase defeituosa.

• Os disjuntores devem ser capazes de operar seus pólos de maneira independente.

• O dimensionamento dos disjuntores deve levar em consideração que se em dadas condições de corrente de arco não forem auto-extinguíveis, ou seja, se o efeito dos acoplamentos capacitivo e indutivo entre fases ainda energizadas tender a suportar uma corrente de arco secundário estes devem realizar uma abertura tripolar, ou seja, as outras duas fases devem ser abertas quase que simultaneamente.

 Os disjuntores devem estar dimensionados para suportarem as amplitudes e as taxas de crescimento da tensão de restabelecimento que surgem após a extinção da corrente de arco secundário, que podem ocasionar uma reignição impossibilitando o religamento com sucesso.

2.2. Medidas para a redução da corrente de arco secundário

Em sistemas de transmissão de 500 kV, ou até mesmo em linhas entre 230 e 500 kV, o uso de banco de reatores monofásicos com reator de neutro cuja relação X_0/X_1 esteja entre 1,5 e 2, se constitui em uma medida de boa relação custo/benefício segundo a referência [9], uma vez que o isolamento requerido no neutro dos reatores de fase é condizente com práticas normais de projeto e com pouca influência nos custos. Os reatores de neutro dimensionados para esses circuitos são equipamentos convencionais, cujo impacto no custo da compensação reativa é menor que 10%.

Seguem abaixo algumas medidas encontradas na literatura quando se deseja analisar a aplicação do religamento monopolar em diversas condições operacionais do sistema:

Religamento híbrido dos circuitos: abre-se a fase submetida ao defeito.
 Com o objetivo de eliminar os acoplamentos capacitivos e indutivos presentes, abrem-se as fases sãs antes de efetuar o religamento por um determinado tempo.
 Esta medida, no entanto, só deve ser aplicada quando não houver perda de sincronismo nas máquinas do sistema durante a operação. Tal medida é inviável na prática, pois acarreta uma abertura tripolar do sistema.

 Chaveamento nos reatores das fases e/ou do neutro, com a finalidade de aumentar a impedância para terra e conseqüentemente reduzir a amplitude da corrente de arco secundário.

 Esquema com capacitor série [10]: este esquema visa reduzir a componente da corrente devida ao efeito eletrostático através de um capacitor série entre a fase aberta e o restante do sistema, inserido durante a abertura monopolar.
 Esta medida também é inviável na maioria dos casos, pelo alto custo de um capacitor série e por limitações técnicas em linhas curtas.

 Chaves de aterramento rápido [11]: após a abertura dos disjuntores correspondentes a fase submetida ao defeito fase terra, o arco primário é extinguido e as chaves de aterramento rápido, instaladas em cada uma das extremidades da linha são fechadas estabelecendo duas malhas através da terra. As correntes nas

8

fases sãs induzem duas correntes de sentidos opostos entre si, superpostas à corrente de arco secundário, diminuindo a tensão de restabelecimento na cadeia de isoladores na passagem da corrente por zero, contribuindo, dessa maneira, para a extinção do arco secundário. Após a abertura dessas chaves será realizado o religamento monopolar.

Vale ressaltar que essas chaves são disjuntores com requisitos específicos [11] haja vista os valores de corrente que devem ser interrompidas quando as chaves se abrem precedendo o religamento da fase defeituosa.

A maior desvantagem no uso destas chaves, além do custo, é decorrente das complicações adicionais introduzidas no esquema de proteção e chaveamento, o que pode prejudicar a confiabilidade desta solução.

Já a solução com o reator de neutro, conforme apresentada em diversas referências, minimiza fundamentalmente a componente da corrente de arco secundário devida ao acoplamento capacitivo com as fases sãs, influindo também no valor da tensão de restabelecimento.

Para fluxos de potência elevados, a corrente devida ao acoplamento indutivo irá se compor fasorialmente com a corrente devida ao acoplamento capacitivo, podendo haver um aumento do módulo da corrente de arco secundário.

Para os bancos de reatores monofásicos com reator de neutro (figura 2.3), a relação X_0/X_1 é dada por:

$$\frac{X_0}{X_1} = \frac{3X_n + X_1}{X_1}$$
(2.1)

Onde X_1 na equação 2.1 assume o valor de X_S na figura 2.3.



Figura 2.3 – Banco de reatores monofásicos com reator de neutro.

O valor calculado de X_n, segundo a equação 2.1, é aquele que reduzirá a componente da corrente de arco secundário devida ao acoplamento capacitivo e a tensão de restabelecimento aos valores de desejados.

2.3. O Arco elétrico no ar livre

Um aspecto de extrema importância a ser considerado é a possibilidade de extinção do arco secundário verificada através de ensaios de campo ou de laboratório. Na ausência destes testes deve-se recorrer a resultados da bibliografia que será revista, procurando traçar um panorama dos principais conceitos abordados em cada referência citada.

Uma análise será feita sem a pretensão de se efetivar em futuros critérios, porém contribuindo para uma discussão dos principais resultados bibliográficos que se encontram dispersos. Para tanto estes resultados serão apresentados numa base comum referida à taxa de variação da corrente de arco secundário (A/ms) e a de variação da tensão de restabelecimento (kV/ms), com o tempo de duração do arco associado, contado a partir da interrupção do arco primário. Sempre que possível serão apresentadas às taxas de variação da tensão de restabelecimento (kV/ms) por metro de cadeia de isoladores e por metro do comprimento do arco em função do tempo decorrido.

Será feita uma revisão das principais publicações que apresentam resultados experimentais de arco secundário em linhas de transmissão e em laboratórios.

A referência [3] é uma detalhada pesquisa sobre arco secundário, realizada em laboratório, voltada para uma rede tensão nominal de 500 kV, com comprimentos de 200 e de 84 km. A suportabilidade dielétrica foi definida para as seguintes condições:

- Após o arco primário somente (sem corrente de arco secundário)
- Após o arco primário, seguido de arco secundário
- Após o arco secundário somente (sem arco primário)

A extinção térmica, nesse artigo, é apresentada como "auto-extinção" associada ao tempo necessário para o arco se alongar e apagar, seguido da recuperação da suportabilidade dielétrica de forma a permitir um religamento com sucesso.

O crescimento da suportabilidade no tempo é verificado através de observações de fotografias obtidas nos testes.

O arco elétrico no ar livre apresenta variações no espaço (alongamento) e no tempo (desionização dos segmentos aquecidos e luminosos). Neste teste [3] foram utilizadas cadeias de isoladores tipo suspensão, ancoragem e "V".

Para uma cadeia de suspensão de 4,05 m, com uma corrente de arco primário de 8 kA por 5 ciclos (50 Hz), a suportabilidade dielétrica cresceu a uma taxa média de 3 kV/ms, imediatamente após a interrupção do arco primário. Se imediatamente após a interrupção dessa corrente de arco primário houver uma corrente de arco secundário de valor igual a 30 Aef por 200 ms, a suportabilidade dielétrica cresce a uma taxa média de aproximadamente 10 kV/ms. Sem a presença do arco primário, para uma corrente de arco secundário de 40 Aef, a suportabilidade dielétrica cresce praticamente para o dobro, a uma taxa média de 20 kV/ms.

Os resultados para a auto-extinção do arco secundário foram apresentados para uma cadeia de isoladores de 4,05 m. A corrente de arco secundário foi medida

logo após a interrupção do arco primário, uma vez que esta pode ir se reduzindo com o alongamento do arco.

Na referência [4] os resultados foram obtidos de ensaios em laboratório utilizando-se cadeias de isoladores de 3 a 5 m (linhas de 400 a 700 kV) e correntes de arco primário de 9 kA. As extinções do arco secundário foram definidas por rápidas e mais demoradas, sendo rápidas aquelas nas quais o tempo de extinção foi menor que 150 ms pós-interrupção do arco primário, para uma corrente de arco secundário de 40 Aef, com interrupção nos primeiros ciclos. Com a subida da tensão tem-se uma reignição dielétrica pois a taxa de restabelecimento (de 4 a 8 kVef/m) aumenta mais rapidamente do que a taxa de crescimento da suportabilidade dielétrica ainda pequena face a proximidade com o arco primário. Após algumas reignições dielétricas a suportabilidade dielétrica aumenta e mantém o arco apagado.

No caso das extinções mais demoradas, com a mesma corrente de arco secundário (40 Aef), mas com uma maior tensão de restabelecimento (de 7 a 13 kVef/m), os tempos de extinção foram maiores que os citados anteriormente (de 250 ms a 600 ms).

Assim, quanto maior for à tensão de restabelecimento, maior será o tempo necessário para alongar o arco e diminuir qualquer influência do arco primário.

Na referência [5] os ensaios foram realizados em uma cadeia de isoladores de 500 kV, variando-se a corrente de arco secundário e a tensão de restabelecimento. Também foram apresentados experiências operacionais e ensaios de chaveamento monopolar no campo. Dos resultados obtidos nos ensaios da cadeia de isoladores, conclui-se que para correntes de arco secundário de até 20 Aef, os tempos de extinção são menores que 200 ms, para corrente de 60 Aef variam entre 500 ms e 1000 ms e para correntes de 80 Aef e 85 Aef não se obtém a auto-extinção.

12

Na referência [6] foram realizados ensaios de campo com aplicações de falta, abertura e religamento monopolar, com medições oscilográficas e registros do arco através de fotografias.

Os resultados obtidos na pesquisa, apresentados no artigo, verificaram a eficiência do uso do reator de neutro. Para os ensaios, foi projetado um arranjo especial conectado a uma linha de transmissão de 500 kV, sendo que o comprimento da cadeia de isoladores utilizada foi de 3,5 m (cadeia de isoladores formada por 24 isoladores de suspensão). Uma análise apresentada no artigo, mostra que o arco tem um alongamento aparente da ordem de 30% depois de 400 ms e que provavelmente o alongamento real deva ser da ordem de 50%. Esse teste foi realizado sem reator de neutro, com uma corrente de arco secundário registrada inicialmente igual a 22,5 A.

Na referência [7] foram realizados ensaios em uma linha de transmissão de 765 kV, de comprimento 243 km, circuito único, não transposto e grau de compensação igual a 86% sendo feita uma comparação entre a corrente de arco secundário calculada a 60 Hz e a corrente real obtida nos transitórios. Em cada banco de reatores foi utilizado um reator de neutro. O comprimento da cadeia de isoladores utilizada no ensaio foi de 4,2 m. Observou-se a presença de 5ª harmônica e da 3ª harmônica na corrente de arco secundário. O aparecimento da terceira harmônica foi atribuído à natureza intermitente observada, ou seja, à não linearidade da resistência equivalente do arco.

Dos resultados obtidos foi verificada uma relação aproximada entre a componente fundamental da corrente de arco secundário e a taxa média da tensão de restabelecimento.

$$K_r [kV/ms] = 0.2 . I (Aef)$$

Onde: K_r é a taxa média de subida da tensão de restabelecimento e I a componente fundamental da corrente de arco secundário.

A tensão suportável média (V_g) para o "gap" em ar em função do tempo (t), foi expressa por:

V_g [kV] = 10 . t [ms] (para os primeiros 50 ms após a extinção do arco)

Em continuação aos ensaios realizados por Sheperling em 1979 [7], foram realizados cinco ensaios adicionais com faltas monofásicas na mesma linha de transmissão [8]. A linha foi compensada através de um banco de reatores de 300 MVAr em cada extremidade da mesma, sendo adicionado um reator de neutro em cada um dos bancos de reatores a fim de se minimizar a contribuição dos acoplamentos capacitivos e indutivos na corrente de arco secundário.

Nessa série de ensaios foram utilizadas diferentes combinações de compensação reativa e reatores de neutro, de forma a se investigar o fenômeno do arco secundário para valores maiores de correntes e tempo de religamento. As 5 faltas foram aplicadas à fase central da linha, resultando em uma corrente eficaz de falta primária de 2700 A. Verificou-se que a extinção térmica ocorreu após aproximadamente 750 ms da interrupção do arco primário para correntes de arco secundário de 51 A e 58 A. A cadeia de isoladores suportou taxas de crescimento da tensão de restabelecimento de até 15 kV/ms. O aumento da taxa de suportabilidade de 10 kV/ms para 15 kV/ms, explicam os autores, se deve ao fato que um maior tempo decorrido da interrupção do arco primário, proporciona um alongamento e um resfriamento do arco secundário dispersando progressivamente as partículas ionizadas.

2.4. Características empíricas da extinção do arco

As figuras a seguir têm como objetivo determinar as regiões onde a extinção do arco secundário é favorável, com base nas taxas de variação da corrente (dl/dt) na passagem da corrente por zero e nas taxas de variação da tensão de restabelecimento sobre a cadeia de isoladores (du/dt), parametrizada no tempo T_e (intervalo de tempo entre a extinção do arco primário e a extinção do arco secundário).

A figura 2.4 a seguir, apresenta a dispersão dos resultados obtidos nos ensaios citados nas referências [3], [4], [5] e [6].



Figura 2.4 – Dispersão dos resultados

A curva traçada na figura 2.5 é uma tentativa de se estabelecer uma característica limite a ser usada como uma primeira referência de análise ou de calibração de modelos.



Figura 2.5 – Característica Limite

Considerando-se uma cadeia de isoladores de 3,5 m, equivalente ao comprimento de uma cadeia de isoladores de 500 kV, composta por 24 isoladores do tipo suspensão e considerando-se o alongamento do arco [6], pode-se traçar uma curva limite da taxa da tensão de restabelecimento (kV/ms) em função da taxa de variação da corrente (A/ms), para cada valor de T_e.



Figura 2.6 – Curva de extinção do arco (T_e = 400 ms)

Da figura 2.6, deve-se ressaltar que na referência [12] não constam o tempo de extinção considerado e o crescimento do alongamento do arco secundário.

3. EQUACIONAMENTO DO RELIGAMENTO MONOPOLAR

Antes de analisar os aspectos relativos aos métodos de redução da corrente de arco secundário, serão equacionados os acoplamentos existentes em linhas de transmissão. Assim sendo, seja o trecho de uma linha de transmissão representada abaixo, onde L_s é a indutância própria por fase, C_0 a capacitância para terra (de seqüência zero) e L_m e C_m , respectivamente, as indutâncias e capacitâncias mútuas entre fases.



Figura 3.1 – Linha trifásica

3.1. Acoplamento capacitivo

Desprezando-se a impedância série e o acoplamento indutivo da linha trifásica da figura 3.1, obtém-se um modelo simplificado, muito utilizado, que representa apenas o acoplamento capacitivo da linha de forma concentrada (figura 3.2).



Figura 3.2 - Representação Capacitiva da Linha

A capacitância equivalente de Thèvenin (C_{th}) vista do ponto C, na figura 3.2, será:

$$C_{th} = 2.C_m$$

O cálculo da tensão do gerador equivalente de Thèvenin (E_{th}) resulta em:



Figura 3.3 - Tensão equivalente de Thèvenin

$$jwC_m(E_A - E_C) = jwC_m(E_C - E_B)$$
$$E_A - E_C = E_C - E_B$$
$$2 E_C = E_A + E_B$$
$$E_C = E_{th} = \frac{1}{2} (E_A + E_B)$$

Como:

$$E_A = E \angle -120$$
$$E_B = E \angle 120$$

Logo:

$$E_{th} = \frac{1}{2} E \angle 180$$

O circuito equivalente de Thèvenin ficará:



Figura 3.4 – Circuito Equivalente de Thèvenin

A corrente de arco secundário pode ser simulada fechando-se a chave indicada na figura 3.4. Assim sendo, a corrente estabelecida devida ao acoplamento capacitivo será a corrente I_C representada. Analogamente, a tensão V_C indica a chamada tensão de restabelecimento devida ao acoplamento capacitivo.

Do circuito anterior, calculam-se V_C e I_C para um arco secundário ocorrido na fase C:

$$V_{c} = \frac{\frac{1}{jwC_{0}}}{\frac{1}{j2wC_{m}} + \frac{1}{jwC_{0}}} (-E/2) \Longrightarrow V_{c} = \frac{-Ej2wC_{m}jwC_{0}}{j2wC_{0}(jwC_{0} + j2wC_{m})}$$
$$V_{c} = \frac{C_{m}}{C_{0} + 2C_{m}} E \angle 180$$
(3.1)

Um valor típico para V_C é da ordem de 10% a 25% da tensão de linha, para casos sem reatores em derivação [1]. Fechando-se a chave da figura 3.4, tem se que:

$$I_{c} = \frac{-E/2}{\frac{1}{j2wC_{m}}} \implies I_{c} = -\frac{E}{2}jw2C_{m}$$
(3.2)

Então se obtém para a corrente de arco secundário devida ao acoplamento capacitivo:

$$I_c = wEC_m \angle -90$$

3.2. Acoplamento indutivo

A inclusão do acoplamento indutivo no equacionamento exige uma representação mais complexa do que no caso capacitivo.

Um cálculo simplificado para a corrente de arco secundário, devida ao acoplamento indutivo, para uma linha de transmissão transposta é apresentado na referência [1].

Seja portanto, o circuito abaixo, resultante da figura 3.1 desconsiderando-se os componentes devido ao acoplamento capacitivo:



Figura 3.5 – Linha trifásica – acoplamento indutivo

Trabalhando-se com componentes simétricas, as reatâncias de seqüência positiva e zero da linha de transmissão da figura 3.5 serão:

$$X_{1L} = X_{SL} - X_m$$
$$X_{0L} = X_{SL} + 2X_m$$

Onde:
$$X_{SL} = wL_s e X_m = wL_m$$

Portanto:

$$X_{SL} = \frac{2X_{1L} + X_{0L}}{3}$$

e
$$X_{m} = \frac{X_{0L} - X_{1L}}{3}$$

O circuito para uma das fases abertas é:



Figura 3.6 – Circuito para a fase C aberta.

Pode-se calcular a tensão induzida na fase aberta (fase C) devida ao acoplamento indutivo, diretamente por:

$$V_{ind} = (I_A + I_B) X_m$$

A corrente I_i, devida ao acoplamento indutivo, é função da tensão V_{ind} e da localização da falta. Para um caso hipotético de chaves curto-circuitando a fase nas duas extremidades da linha simultaneamente, pode-se ter uma idéia do máximo valor da corrente I_i, através da expressão:

$$I_{i} = \frac{V_{ind}}{X_{1L} + \frac{X_{0L} - X_{1L}}{3}}$$

Ou seja,

$$I_{i} = \frac{3V_{ind}}{X_{0L} + 2X_{1L}}$$

A corrente de arco secundário, considerando-se os acoplamento capacitivo e indutivo, pode ser calculada por:

$$I = I_C + I_i$$

3.3. Método de redução da corrente de arco secundário – reatores em derivação

Este é o método clássico de redução da corrente de arco secundário, que será utilizado neste trabalho. Está baseado na inclusão de reatâncias concentradas em determinados pontos da linha, em paralelo com as capacitâncias distribuídas, conforme a figura 3.7.



Figura 3.7 – Ligação dos reatores em derivação e de neutro.

O reator de neutro altera a compensação reativa de seqüência zero:

$$X_0 = X_1 + 3X_n$$

Usualmente a relação X₀/X₁ é utilizada para trabalho, logo:

$$\frac{X_0}{X_1} = \frac{X_1 + 3X_n}{X_1} = 1 + \frac{3X_n}{X_1}$$

Dos resultados obtidos em estudos de linhas de transmissão em relação ao arco secundário, observa-se que para linhas longas e de alta tensão de operação, uma relação $X_0/X_1 = 1,7$ é adequada quanto a corrente de arco secundário, sem que a tensão de restabelecimento atinja valores proibitivos ou mesmo tensões elevadas no neutro.

Da referência [21], utilizando-se as técnicas de eliminação de Kron ao centro estrela da figura 3.7 resulta o circuito equivalente para o reator:



Figura 3.8 – Admitâncias indutivas entre fases e fase-terra.

Para o caso de sistema equilibrado e linha com transposição, tem-se:

$$Y_{ao} = Y_{bo} = Y_{co} = \frac{Y_s Y_n}{3Y_s + Y_n}$$

e
$$Y_{ab} = Y_{bc} = Y_{ca} = \frac{Y_s^2}{3Y_s + Y_n}$$

Introduzindo-se o esquema de ligação dos reatores da figura 3.8 na representação da linha de transmissão da figura 3.2, resultará o circuito equivalente da figura 3.9.



Figura 3.9 – Representação capacitiva e indutiva da linha.

Definindo-se:

 $Y_{ft} = jwC_0 + Y_{ao}$ (admitância equivalente fase terra) e $Y_{ff} = jwC_m + Y_{ab}$ (admitância equivalente fase fase)

Através da equação 3.1, substituindo-se C_m por Y_{ff} e C_0 por Y_{fn} , a tensão de restabelecimento na fase aberta será:

$$V_c' = -\frac{Y_{ff}}{Y_{ft} + 2Y_{ff}}E$$

Através da equação 3.2, substituindo-se C_m por Y_{ff} , a corrente de arco secundário será:

$$I_c = -jwEY_{ff}$$

Substituindo-se os valores de Y_{ft} e de Y_{ff}, resultam as expressões da corrente de arco secundário e da tensão de restabelecimento, em função das reatâncias introduzidas e dos parâmetros da rede.



Casos onde se utilizam reatores em derivação sem a inclusão de reatores de neutro (figura 3.10) podem facilmente ser equacionados tomando-se o limite de Y_{ao} e Y_{ab} para Y_n tendendo ao infinito, ou seja:

$$\lim_{Y_{n->\infty}} Y_{ao} = Ys$$

$$\lim_{Y_{n->\infty}} Y_{ab} = 0$$

Nestes casos não existe compensação do acoplamento capacitivo entre as fases e a corrente é mais elevada.



Figura 3.10 – Ligação somente dos reatores de fase

A seguir será examinado o efeito da existência de compensação reativa na linha com reatores em derivação, com ou sem reatores de neutro, na componente indutiva da corrente de arco secundário e, geralmente, de menor amplitude comparada à componente da corrente devida ao acoplamento capacitivo.

Os aspectos decorrentes da seqüência positiva são comparados pela variação da reatância em derivação X_S , enquanto os da seqüência zero são compensados pela variação da reatância de neutro X_n .

Para a rede da figura 3.6, onde são incluídas as impedâncias dos reatores em derivação e de neutro, a rede resultante é a indicada na figura 3.11:



Figura 3.11 - Circuito resultante - fase C abeta - arco secundário no início da linha

A amplitude da corrente de arco secundário (I_i') depende da localização da falta no trecho aberto, pois a tensão induzida ao longo deste (V_{ind}) é distribuída. Deve-se observar que os cálculos a seguir são uma primeira referência, uma vez que estes ignoram as correntes que fluem no neutro dos reatores em derivação para as fases sãs.

Então, teremos três possibilidades diferentes:

1 - O arco secundário ocorre em uma das extremidades próxima ao disjuntor.

Neste caso a corrente de arco será dada por:

$$I_{i}' = \frac{V_{ind}}{\frac{X_{0L} + 2X_{1L}}{3} + X_{S} + X_{n}}$$

2 - O arco secundário ocorre exatamente no meio do trecho aberto.

Neste caso a corrente de arco (modelo ideal) será:

$$I_{i}^{'} = 0$$

Nessa condição a tensão induzida no trecho 1 (figura 3.12) será numericamente a mesma que a tensão induzida no trecho 2 e as correntes resultantes em cada malha terão a mesma amplitude porém sentidos opostos.

3 – O arco secundário ocorre em um ponto intermediário, entre o centro e a extremidade do trecho aberto.

Neste caso, a corrente de arco resultante será:

$$I_{i}^{'} = I_{1} - I_{2}$$

Onde:

$$I_{1} = \frac{l_{1}}{l_{1} + l_{2}} \frac{V_{ind}}{\frac{X_{01L} + 2X_{11L}}{3} + X_{S} + X_{n}}$$

$$e$$

$$I_{2} = \frac{l_{2}}{l_{1} + l_{2}} \frac{V_{ind}}{\frac{X_{02L} + 2X_{12L}}{3} + X_{S} + X_{n}}$$

Onde, o comprimento do trecho 1 é I_1 e o do trecho 2 é I_2 .



Figura 3.12 – Circuito resultante – fase C aberta – arco secundário no ponto intermediário entre o centro e a extremidade do trecho aberto.

4. CÁLCULO DA CORRENTE DE ARCO SECUNDÁRIO

Este cálculo de rede trifásica desequilibrada com uma fase aberta será feito com o auxílio do programa MatLab, mais especificamente com o aplicativo Simulink.

O MatLab calcula as correntes e tensões em todos os nós da rede, utilizando a matriz de admitâncias trifásica do sistema simulado, incluindo também os equivalentes da rede nas extremidades. Os cálculos que serão realizados pelo MatLab referem-se à situação de um defeito monofásico, seguido do estabelecimento de um arco secundário e de sua extinção no lado receptor da linha de transmissão, conforme apresentado na figura 4.1.

Nos estudos transitórios serão verificada a influência significativa da utilização do reator de neutro na limitação da amplitude da corrente de arco secundário, a variação da corrente de arco secundário conforme a variação de carga e a variação da corrente de arco secundário quando se altera o percentual de compensação da linha de transmissão.



4.1. Rede utilizada

Figura 4.1 – Rede Utilizada

4.2. Modelos utilizados dos sistemas equivalentes e da linha de transmissão

Para o equivalente do lado emissor foi utilizado um modelo de um gerador trifásico, onde são informados os dados sobre a tensão eficaz entre fases em volts, a freqüência em Hz, o nível de curto-circuito trifásico em VA e a relação X/R.

Para a linha de transmissão foi utilizado o modelo que utiliza os parâmetros distribuídos da linha de seqüência positiva e zero, a freqüência em Hz, o número de fases e o comprimento da linha em km.

Para os reatores de compensação do lado emissor e receptor respectivamente, foi montado o circuito da figura 4.2.



Figura 4.2 – Circuito utilizado para modelar os reatores de compensação.

Os valores dos reatores de compensação de cada fase são determinados compensando uma parcela da admitância total de seqüência positiva da linha de transmissão. Uma chave foi utilizada em paralelo com o reator de neutro para permitir o chaveamento do mesmo durante a simulação. Esse chaveamento é necessário para que possam ser simulados os casos com e sem o reator de neutro.

Um bloco chamado falta monofásica foi utilizado para simular a aplicação de uma falta para a terra na fase C do sistema. Esse bloco constitui-se de um amperímetro, um disjuntor (DJ3) e uma resistência característica do arco elétrico [9], no valor de 100 Ω conforme pode ser visto na figura 4.3.



Figura 4.3 – Modelo da falta monofásica.

Para modelagem da carga foi utilizado um circuito estrela aterrado puramente resistivo e equilibrado, pois erros na simulação foram apresentados quando se fez uso de um modelo RLC estrela aterrado e equilibrado para a carga.

Os disjuntores DJ1 e DJ2 da figura 4.1 são responsáveis pela abertura da fase sob defeito.

As medições da corrente de arco secundário serão feitas através do amperímetro 1 da figura 4.3.

A potência característica da linha de transmissão foi adotada como uma referência para se definir o carregamento da linha, sem uma preocupação maior com a viabilidade deste carregamento em sistemas reais. Nos estudos que se seguem, foram adotadas relações entre a potência ativa trifásica da carga e a potência característica da linha de 50% e 100%, para o comprimento e tensão nominal da linha considerada.

4.3. Casos processados

Será estudada uma linha típica de 500 kV com as configurações presentes no anexo A.

Os valores dos reatores de neutro que serão utilizados neste trabalho e que estão presentes na tabela 4.1 foram projetados segundo os cálculos presentes no anexo 2 deste trabalho.

4.3.1. LINHA DE TENSÃO NOMINAL IGUAL A 500 kV

4.3.1.1. Estudos em regime transitório, considerando-se os efeitos da variação do carregamento da linha, da variação do percentual de compensação reativa e da utilização dos reatores de neutro na corrente de arco secundário.

Os casos analisados estão descritos na tabela 4.1.

Caso (n°)	Carregamento (% da potência característica da linha)	Compensação da linha (%)	Valor do reator de neutro utilizado (MVAr)	Valor de pico aproximado da corrente de arco secundário obtido (A)
1	50	30	-	103
2	100	30	-	72
3	50	50	-	91
4	50	30	602,7	52
5	50	50	1004,5	19
6	50	30	312,5	27

Tabela 4.1 – Casos analisados – linha de 500 kV.

O valor do reator de neutro utilizado no caso 6 listado na tabela 4.1 foi escolhido como sendo metade do valor do reator de neutro que foi calculado segundo o anexo 2 para o caso 4.

4.3.1.2. Estudos em regime transitório, considerando

- Início do arco primário: 40 ms
- Abertura dos disjuntores da fase submetida ao defeito: 100 ms
- Instante da extinção do arco secundário: 600 ms
- Comprimento da linha: 304 km

- Potência de curto-circuito do equivalente do lado emissor: 14000 MVA
- X/R do equivalente do lado emissor: 17
- Tensão entre fases: 500 kV
- Relação X₀/X₁ dos reatores = 1 (casos sem reator de neutro)
- Relação X_0/X_1 dos reatores = 1,7 (casos com reator de neutro)

Os parâmetros de seqüência positiva e zero da linha de transmissão utilizada na simulação estão disponíveis para consulta no anexo 1. Trata-se de uma linha real que interliga as cidades de Itacaiúnas e Colinas.

4.4. Resultados obtidos

Para os casos processados citados no item 4.3.1.1, através dos gráficos obtidos na simulação feita em MatLab, pode-se analisar o comportamento da corrente de arco secundário em relação à variação do percentual de compensação reativa da linha, a variação do carregamento da linha e em relação à utilização ou não do reator de neutro.

- 4.4.1. LINHA DE 500 kV
- 4.4.1.1. Estudos em regime transitório

a. Análise quanto à influência do carregamento da linha (comparação entre os casos 1 e 2)

No estudo dos casos com variação de carregamento (casos 1 e 2), tem-se uma boa visão do efeito indutivo. O carregamento da linha modifica principalmente a parcela da corrente de arco secundário (I_i) devida ao acoplamento indutivo (item 3.2). O efeito indutivo na corrente de arco da fase aberta foi praticamente desprezível em relação ao capacitivo (3.13).

A figura 4.4 apresenta a corrente de arco secundário referente ao caso 1 da tabela 4.1.



Figura 4.4 – Corrente de arco secundário para o caso 1.

A figura 4.5 apresenta a corrente de arco secundário para o caso 2 da tabela 4.1.



Figura 4.5 – Corrente de arco secundário para o caso 2.

Conforme pode ser observado através das figuras 4.4 e 4.5, apesar de o efeito indutivo na corrente de arco da fase aberta ser praticamente desprezível em

relação ao capacitivo (3.13), é pequena a redução da amplitude da corrente de arco secundário após ser atingido o regime permanente senoidal.

b. Análise quanto à influência do percentual de compensação da linha (comparação entre os casos 1 e 3)

O comportamento da corrente de arco secundário para o caso 1 pode ser visto na figura 4.4, já a mesma característica para o caso 3 pode ser observado através da figura 4.6.



Figura 4.6 – Corrente de arco secundário para o caso 3.

Nas figuras 4.4 e 4.6 observa-se que se aumentando a compensação reativa da linha de 30% para 50%, obtêm-se correntes de arco secundário levemente inferiores.

c. Análise quanto à influência do reator de neutro

c.1. Comparação entre os casos 1 e 4

Conforme os dados da tabela 4.1, o caso 1 difere do caso 4 somente pelo fato de o caso 4 apresentar a utilização do reator colocado no neutro dos reatores de compensação. A utilização desses reatores no neutro dos reatores de compensação tem como objetivo reduzir os valores de corrente de arco secundário, contribuindo assim, para que o religamento monopolar tenha maior probabilidade de ser realizado com sucesso.

A figura 4.7 apresenta a corrente de arco secundário para o caso 4 da tabela 4.1, onde foi utilizado um reator no neutro dos reatores de compensação de potência 602,7 MVar.



Figura 4.7 – Corrente de arco secundário para o caso 4.

Comparando-se o resultado obtido na figura 4.4 referente à simulação do caso 1 com o resultado obtido da simulação do caso 4, figura 4.7, percebe-se que para o caso onde foi utilizado o reator de neutro, a amplitude da corrente de arco

secundário foi reduzida, o que comprova a eficácia do mesmo no que diz respeito à redução da corrente de arco secundário.

c.2. Comparação entre os casos 2 e 5

Conforme citado no item 3.3 deste trabalho, a utilização do reator de neutro reduz o valor da amplitude da corrente de arco secundário. Tal fato ficou comprovado através da comparação das figuras 4.4 e 4.7 referentes a uma compensação shunt de 30% da linha de transmissão.

Através das figuras 4.5 e 4.8, podemos observar o mesmo resultado obtido no item 4.4.1.4.2.



Figura 4.8 - Corrente de arco secundário para o caso 5.

Percebe-se então que mesmo modificando o percentual de compensação da linha de transmissão, a utilização do reator de neutro reduz consideravelmente a amplitude da corrente de arco secundário.

c.3. Comparação entre os casos 4 e 6

A análise que será feita neste item tem como objetivo mostrar que para um mesmo caso de carregamento da linha e um mesmo percentual de compensação, a utilização de um reator de neutro de maior impedância gera uma redução maior da amplitude da corrente de arco secundário.



Figura 4.9 - Corrente de arco secundário para o caso 6.

Observando-se a figura 4.7, referente ao caso 4 e a figura 4.9 referente ao caso 6, fica evidenciado que a utilização de um reator de neutro com maior impedância reduz ainda mais a corrente de arco secundário, quando está se tratando de casos onde o carregamento e a compensação shunt da linha são as mesmas.

5. CONCLUSÕES

Neste trabalho foram abordados alguns aspectos importantes de estudos de religamento monopolar, com um enfoque especial nos estudos transitórios e nos critérios de extinção do arco elétrico.

O cálculo da rede trifásica desequilibrada com uma fase aberta, pode ser feito com o programa Simulink do MatLab, ou com qualquer outra ferramenta do gênero, porém os ajustes das condições iniciais deve ser feito caso a caso, demandando um tempo total de preparação dos arquivos relativamente longo.

Através das saídas gráficas do MatLab foram analisadas as diversas correntes de arco secundário para cada caso da tabela 4.1.

Este trabalho organiza resultados diversos de ensaios em laboratórios e em campo, citados na bibliografia, referentes à extinção do arco secundário em cadeia de isoladores.

Com a finalidade de comparação, estes resultados são apresentados tomando-se como base a taxa de variação da corrente de arco secundário (A/ms) na passagem da corrente por zero e a taxa de variação da tensão de restabelecimento (kV/ms), com o tempo de duração do arco associado, contando a partir da interrupção do arco primário.

Embora a organização desses resultados seja uma primeira contribuição a este tema, devido à complexidade dos ensaios e modelos, muito ainda se requer de pesquisa e estudos nesta área.

Os estudos realizados para efeito de exemplificação do que foi enunciado na modelagem teórica, abordou uma linha típica de 500 kV, e neles foram representados o comportamento da corrente de arco secundário para diversas situações, dentre as quais, variação de carga, variação de compensação shunt e

utilização do reator de neutro como método para redução da corrente de arco secundário.

O efeito da variação da carga que estava sendo alimentada pela linha foi pequeno na corrente de arco secundário uma vez que o carregamento modifica apenas a parcela da corrente devida ao acoplamento indutivo, de menor valor quando comparado à parcela devida ao acoplamento capacitivo.

Então para a linha de 500 kV estudada foi percebido que se variando a carga, a corrente de arco secundário sofreu pequenas variações.

Com relação à variação do percentual de compensação reativa de 30% para 50%, observou-se no caso estudado, sem o reator de neutro, que a corrente de arco secundário para o caso onde a compensação era de 50% tinha amplitude levemente menor do que para o caso onde a compensação reativa era de 30%.

Foi observado que à medida que são incluídos os reatores de neutro com relação $X_0/X_1 = 1,7$, as correntes de arco secundário reduziram-se, tanto para o caso onde a compensação shunt era de 30% quanto para o caso onde era 50%, ficando evidenciado a eficácia desse método para reduzir a corrente de arco secundário.

Com relação à corrente de arco secundário, novamente se observa que à medida que se utiliza um reator com impedância maior, esta corrente de reduz ainda mais.

Vários trabalhos podem ser visualizados como possibilidades de futuras investigações, como por exemplo o estudo de linhas compactas, linhas sem reatores shunt, linhas de extra alta tensão, utilização de redes neurais, técnicas de reconhecimento de voz utilizadas em telefonia celular para determinar o momento em que as harmônicas características do arco elétrico não estão mais presentes no sistema, etc. No entanto, os maiores desafios se encontram em uma modelagem do arco mais próxima dos fenômenos físicos, que possibilite uma elaboração mais refinada dos critérios.

40

ANEXOS

Seqüência Positiva			Seqüência Zero		
R_{1L}	X _{1L}	C _{1L}	R _{0L}	X _{0L}	C _{0L}
(Ω/km/fase)	(Ω/km/fase)	(uS/km/fase)	(Ω/km/fase)	(Ω/km/fase)	(uS/km/fase)
0,0172	0,2676	6,1680	0,3544	1,5044	2,7272

ANEXO 1. Parâmetros da linha de transmissão de 500 kV utilizada

ANEXO 2. Memória de cálculo dos reatores de neutro

Apartir dos dados da linha de transmissão presentes no anexo 1, foi calculada a potência reativa da linha de transmissão Q_c, que é expressa por:

$$Q_c = V_{ff}^2 * B_{CLT} * l \tag{1}$$

Onde V_{ff} é a tensão entre fases, B_{CLT} é a susceptância capacitiva da linha de transmissão e *l* é o comprimento da linha.

Sabe-se que:

$$B_{CLT} = w * C_{LT} \tag{2}$$

Onde C_{LT} é a capacitância da linha de transmissão de seqüência positiva.

Utilizando as expressões 1 e 2, o valor da capacitância de seqüência positiva da linha de transmissão presente na tabela do anexo 1, o valor do comprimento da linha que é 304 km e o valor da tensão entre fases que é 500 kV, obtemos o seguinte valor para Q_c :

$$Q_{c} = 468,768 \, MVAr$$

A partir deste valor obtido para Q_C , e de posse do valor do percentual de compensação (*PC*) para cada caso simulado, pode-se calcular o valor da componente de seqüência positiva dos reatores de compensação X_{RI} , pela equação 3.

$$X_{R1} = \frac{V_{ff}^2}{PC * Q_C} \tag{3}$$

Para uma relação X_0/X_{RI} igual a 1,7 e de acordo com a equação 4, pode ser calculado o valor do reator de neutro, conhecendo somente o valor de X_{RI} .

$$\frac{X_0}{X_{R1}} = \frac{X_{R1} + 3X_n}{X_{R1}} = 1 + \frac{3X_n}{X_{R1}}$$
(4)

Utilizando as equações 3 e 4 e os percentuais de compensação da linha de transmissão respectivamente iguais a 30 e 50 %, foi montada a tabela 1 que relaciona a potência reativa dos reatores de neutro com os respectivos percentuais de compensação acima.

Tabela 1 – Valores calculados dos reatores de neutro utilizados na simulação.

	PC (%)	Valor do reator de neutro calculado (MVAr)
Caso 4	30	602,7
Caso 5	50	1004,5

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] ESZTERGALYOS, J.; et al. Single phase tripping and auto reclosing of transmission lines. <u>IEEE Transactions on Power Delivery</u>, v. 7 n. 1 p. 182-192, Jan. 1992

[2] KIMBARK, E. A. Charts of three quantities associated with single pole switching. <u>IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems</u>, v. PAS-94, n. 2, p. 388-395, Mar/Apr. 1975

[3] FUKUNISH, M.; et al. Laboratory study on dead time of high speed reclosing of 500 kV systems. <u>CIGRÉ</u>, paper 31-03, 1970

[4] HAUBRICH, J.; HAUSEMANN, G.; THOMAS, R. Single pole reclosing on long EHV transmissions lines. <u>CIGRÉ</u>, paper 31-09, 1974

[5] PERRY, D.; et al. Investigation and evaluation of single phase switching on EHV networks in the United States. <u>CIGRÉ</u>, paper 39-08, 1984

[6] EDWARDS, L.; et al. Single pole switching on TVA's Paradise-Davidson 500 kV line – design concepts and staged fault test results. <u>IEEE Transactions on Power</u> <u>Apparatus and Systens</u>, v., n., p., Nov/Dec. 1971

[7] SHPERLING, B. R.; et al. Analysis of single phase switching field tests on the AEP 765 kV system. <u>IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems</u>, v. PAS – 100, n. 4, p. 1729-1735, Apr. 1981

[8] FAKHERI, A. J.; et al. Single phase switching tests on the AEP 765 kV system. Extinction time for larger secondary arc currents. <u>IEEE Transactions on</u> <u>Power Apparatus and Systems</u>, v. PAS-102, n. 8, p. 2275-2783, Aug. 1983

[9] ZANETTA, L. C. Religamento monopolar em redes de ultra alta tensão. São Paulo, EPUSP, 1992.

[10] PETERSON, H. A.; DRAVID, N. V. A method for reducing dead time for single phase reclosing in EHV lines. <u>IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems</u>, v. PAS-88, p. 286-292, Mar. 1969

[11] HASIBAR, R. M.; et al. The applications of high speed grounding switches for single pole reclosing on 500 kV power system. <u>IEEE Transactions on Power</u> <u>Apparatus and Systems</u>, v. PAS-100, p.1512-1515, Apr.1981

[12] LIMA, J. A.; BORGONOVO, G.; SATO, W. Interligação Chesf/Eletronorte – alternativa com compensação reativa estática, V SNPTEE RE/GSP/13, 1979

[13] SHPERLING, B. R.; et al. Compensation scheme for single pole switching on untransposed transmission lines. <u>IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems</u>, v. PAS-97, n. 4, p. 1421-1429, Jul./Aug. 1978

[14] KAPPENMAN, J. G.; et al. Staged fault tests with single phase reclosing on the Winnipeg – Twin cities 500 kV interconnection. <u>IEEE Transactions on Power</u> <u>Apparatus and Systems</u>, v. PAS-101, n. 3, p. 662-673, Mar. 1982

[15] LAMBERT, S. R.; et al. Long line single phase switching transient and their effect on station equipament. <u>IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems</u>, v. PAS-97, n. 3, p. 857-865, May./Jun. 1978

[16] FAKHERI, A. J.; et al. The use of reactor switches in single phase switching. <u>CIGRÉ</u>, paper 13-06, 1980

[17] THOMANN, G. C.; LAMBERT, S. R. Non – optimum compensation schemes for single pole reclosing on EHV double circuit transmission lines. <u>IEEE Transactions</u> <u>on Power Delivery</u>, v. 8, n. 2, p. 651-569, Apr. 1993

[18] Goda, Y.; et al. Forced extinction characteristics of secondary arc on UHV transmission lines. <u>IEEE Transactions on Power Delivery</u>, v. 8, n. 3, p. 1322-1330, July 1993

[19] WEBSPER, S. P.; et al. Investigation into breaker reclosure strategy for adaptive single pole autoreclosing. <u>IEEE Proceedings-Generation, Transmission and</u> <u>Distribution</u>, v. 142, n. 6, p. 601-607, Nov. 1995

[20] EL-SERAFI, A. M.; FARIED, S. O. Effect of adaptive reclosing on turbinegenerator shaft torsional torques. <u>IEEE Transactions on Power Systems</u>, v. 9, n. 4, p. 1730-1736, Nov. 1994

[21] POMPEU, I.; Religamento Monopolar em Linhas de Transmissão – Proposta de uma ferramenta para investigações paramétricas. São Paulo, 1999