

MARCOS ROSA DOS SANTOS

METODOLOGIAS PARA EXECUÇÃO DE MANOBRAS DE
PARALELISMO EM REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO NA
OPERAÇÃO DE TEMPO REAL

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia

São Paulo
2013

MARCOS ROSA DOS SANTOS

METODOLOGIAS PARA EXECUÇÃO DE MANOBRAS DE
PARALELISMO EM REDES AÉREAS DE DISTRIBUIÇÃO NA
OPERAÇÃO DE TEMPO REAL

Tese apresentada à Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo para obtenção
do título de Doutor em Engenharia

Área de concentração:
Sistemas de Potência

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Eduardo de Moraes Pereira.

São Paulo
2013

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, de maio de 2013.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Santos, Marcos Rosa dos

**Metodologias para execução de manobras de paralelismo em redes aéreas de distribuição na operação de tempo real / M.R. dos Santos. Versão corr. -- São Paulo, 2013.
186 p.**

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas.

1. Redes de distribuição de energia elétrica 2. Tempo-real (Operação) 3. Paralelismo de alimentadores I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

À Deus

AGRADECIMENTOS

À Deus.

À minha família.

Ao **Prof. Dr. Carlos Eduardo de Moraes Pereira**, pela orientação dispensada no decorrer do trabalho.

Aos **Profs. Drs. Hernan Pietro Schmidt e Giovanni Manassero Jr.**, pelas sugestões e comentários apresentados na qualificação.

À AES Eletropaulo por permitir testes na rede aérea primária de distribuição.

Aos amigos **Sandro Zanata e Jairo Lima da Costa** pela colaboração na revisão do texto e montagem do trabalho.

Às demais pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram na execução deste trabalho.

*Talvez eu seja enganado
inúmeras vezes. Mas não deixarei
de acreditar que, em algum lugar,
alguém merece a minha
confiança.*

(Aristóteles)

SUMÁRIO

1. Introdução e Revisão Bibliográfica.....	26
1.1 Introdução.....	26
1.2 Objetivo	27
1.3 Motivação	28
1.4 Contextualização e Revisão Bibliográfica.....	30
2. Metodologia e Modelagem.....	46
2.1 Introdução.....	46
2.2 Metodologia	47
2.3 Modelagem.....	57
3. Simulações e Resultados Reais.....	67
3.1 Simulação no ATP	69
3.1.1 Análise das tensões.....	70
3.1.2 Análise das correntes	86
3.2 Medições reais das Manobras Realizadas	96
4. Conclusões	127
4.1 resultados imediatos obtidos	130
4.2 Propostas de novos trabalhos	132
Anexo A – Proteção e cálculo de curto-circuito.....	133
A1. Dispositivos de Proteção	133
A2. Cálculo de Curto-Circuito para os Alimentadores BRU-109 e TAM-114.....	140
Anexo B – Carregamento das Subestações Edgard de Souza e Anhanguera	145
B1. Subestação Edgard de Souza	145

B2. Subestação Anhanguera	148
Anexo C – Equipamentos e Acessórios da Rede Aérea Primária.....	153
C1. Postes.....	153
C2. Estruturas Básicas Classe 15 kV – Rede Convencional.....	155
C3. Rede Compacta.....	159
C4. Rede com Cabos Pré-Reunidos	162
C5. Travessias	164
C6. Afastamentos Mínimos Padrão ABNT	166
C7. Condutores	168
a. Condutores Padronizados	168
b. Dimensionamento de Condutores	169
C8. Configuração da Rede Aérea	170
a. Radial Simples.....	170
b. Radial com Recurso	170
c. Radial Seletivo.....	170
C9. Chave Faca	171
a. Montagem Horizontal.....	171
b. Montagem Vertical.....	172
C10. Chave Tripolar	173
C11. Chave Fusível.....	175
C12. Saída de Circuitos em Estações Transformadoras de Distribuição.....	176
a. Saída Convencional de Alimentador.....	176
b. Saída Através de Pré-Reunido	177
Anexo D – Parâmetros Elétricos de Equipamentos e Estruturas	178
Anexo E – Dados Técnicos do Medidor Elspec Blackbox G4500	181
Referências Bibliográficas	185

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Diagrama esquemático da transmissão brasileira.....	31
Figura 1.2 – Demanda do Sistema Interligado Nacional brasileiro em 2011 e 2012.	32
Figura 1.3 – Demanda da região Sudeste do Brasil em 2011 e 2012.	33
Figura 1.4 – Demanda do sistema de subtransmissão da AES Eletropaulo – abril/2012.	34
Figura 1.5 – Representação simplificada dos estados de um AL pós-falta.	37
Figura 1.6 – Diagrama unifilar representando transferência de carga entre dois alimentadores.	39
Figura 1.7 – Diagrama unifilar simplificado para transferência de carga entre dois alimentadores.	40
Figura 1.8 – Esquema simplificado de fechamento em anel entre dois alimentadores.....	41
Figura 1.9 – Transformadores de estações transformadoras de distribuição adjacentes, com mesmas características.....	42
Figura 1.10 – Curvas das capacidades de curto-circuito versus a distância entre a estação transformadora de distribuição e o ponto do alimentador em falta.	45
Figura 2.1 – Algoritmo para fechamento em anel entre dois alimentadores.	48
Figura 2.2 – Diagrama unifilar das S/Es, LTAs e ETDs.....	50
Figura 2.3 – Diagrama unifilar da S/E Edgard de Souza.....	51
Figura 2.4 – Diagrama unifilar da S/E Anhanguera.	52
Figura 2.5 – Carregamentos secundários dos transformadores das S/Es Edgard de Souza e Anhanguera.	53

Figura 2.6 – Diagrama unifilar da ETD Barueri.....	54
Figura 2.7 – Diagrama unifilar da ETD Tamboré: a) Transformador 2, alimentando barras 2 e 4 de 13,8 kV; b) Transformador 1, alimentando barras 1 e 3 de 13,8 kV	55
Figura 2.8 – Diagrama unifilar dos alimentadores vistos no xOMINI Maps: a) BRU-109, e; b) TAM-114.....	58
Figura 2.9 – Diagrama dos circuitos BRU-109 x TAM-114 de 13,8 kV - xOMINI Maps	59
Figura 2.10 – Carregamento do alimentador BRU-109 – Dados do Cymdist.....	61
Figura 2.11 – Carregamento do alimentador TAM-114 – Dados do Cymdist.....	62
Figura 2.12 – Carregamento de trecho do TAM-114, alem seccionadora 40343 – Cymdist.	63
Figura 2.13 – Modelagem dos alimentadores BRU-109 e TAM-114 no ATP: a) Representação das S/Es, ETDs e modelo do acoplamento entre as S/Es; b) Seccionadoras de fechamento e abertura do anel entre as S/Es.....	65
Figura 2.14 – Esquema simplificado de fechamento em anel do tipo IX, entre dois alimentadores.....	66
Figura 3.1 – Medidor de qualidade de energia G4500 Blackbox da ELSPEC®.....	67
Figura 3.2 – Tensão de fase no transformador 2 da ETD Tamboré – ATP.....	70
Figura 3.3 – Tensão de linha no transformador 2 da ETD Tamboré – ATP.....	71
Figura 3.4 – Tensões de linha nos primários dos bancos de transformadores das S/Es Edgard de Souza e Anhanguera – ATP.....	72
Figura 3.5 – Tensão de linha no primário do transformador 2 da ETD Barueri – ATP.....	73

Figura 3.6 – Tensão de linha no primário do transformador 2 da ETD Tamboré – ATP.....	74
Figura 3.7 – Tensão de linha no secundário do transformador 2 da ETD Barueri – ATP.....	76
Figura 3.8 – Tensão de linha no secundário do transformador 2 da ETD Tamboré – ATP.....	77
Figura 3.9 – Tensões nos terminais das seccionadoras 43286 e 40343 – ATP.....	78
Figura 3.10 – Tensões máximas nos terminais da seccionadora de vis-à-vis 43286 antes do fechamento – ATP.....	79
Figura 3.11 – Tensões eficazes nos terminais da seccionadora de vis-à-vis 43286 no momento do fechamento – ATP.....	80
Figura 3.12 – Tensões pré-manobra de abertura nos terminais da seccionadora 40343 – ATP.....	81
Figura 3.13 – Chave LoadBuster para manobra de seccionadoras sob carga.....	82
Figura 3.14 – Tensões de fase pré-manobra de fechamento da seccionadora de vis-à-vis 43286 – ATP.....	83
Figura 3.15 – Tensões pós-manobra de abertura da seccionadora 40343 – ATP.....	84
Figura 3.16 – Tensões pré e pós manobras de fechamento em anel, a jusante da seccionadora 40343 e do secundário do transformador 2 da ETD Tamboré – ATP.....	85
Figura 3.17 – Carregamentos dos alimentadores: a) BRU-109, e; b) TAM- 114, de 13,8 kV – ATP.....	87
Figura 3.18 – Carregamentos dos alimentadores BRU-109 e TAM-114 referidos ao primário dos bancos de transformadores das S/Es Anhanguera e Edgard de Souza – ATP.....	90

Figura 3.19 – Carregamentos dos alimentadores BRU-109 e TAM-114 referidos nas LTAs Anhanguera-Mutinga e Edgard de Souza-Mutinga de 88 kV – ATP.	91
Figura 3.20 – Correntes pré e pós manobras de fechamento da chave de vis-à-vis 43286 – ATP.....	92
Figura 3.21 – Correntes pré e pós manobras das seccionadoras 43286 e 40343 – Medições nas estações transformadoras de distribuição.....	93
Figura 3.22 – Corrente pré e pós manobras de abertura da seccionadora monopolar 40343 – ATP.	94
Figura 3.23 – Tensão nas barras das S/Es Anhanguera e Edgard de Souza.	100
Figura 3.24 – Tensões rms dos secundários dos transformadores das ETDs Barueri e Tamboré durante as manobras de fechamento e abertura do anel.	104
Figura 3.25 – Correntes rms dos alimentadores BRU-109 e TAM-114 durante as manobra de fechamento e abertura do anel.....	105
Figura 3.26 – Tensões e correntes rms para os secundários dos transformadores e para os alimentadores envolvidos nas manobras de fechamento em anel.....	106
Figura 3.27 – Forma de onda com os mínimos e máximos das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, Fase 1.	107
Figura 3.28 – Forma de onda com os mínimos e máximos das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, Fase 2.	107
Figura 3.29 – Forma de onda com os mínimos e máximos das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, Fase 3.	108
Figura 3.30 – Forma de onda da corrente do neutro dos alimentadores BRU-109 e TAM-114.	109
Figura 3.31 – Forma de onda das correntes dos alimentadores BRU-109 e	

TAM-114	110
Figura 3.32 – Detalhe das correntes dos alimentadores no momento do fechamento do anel entre as S/Es Anhanguera e Edgard de Souza.	111
Figura 3.33 – Forma de onda das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, com a ampliação do ponto A.	112
Figura 3.34 – Forma de onda das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, com a ampliação do ponto A1.	113
Figura 3.35 – Detalhe das correntes dos alimentadores no momento da abertura do anel entre as S/Es Anhanguera e Edgard de Souza.....	114
Figura 3.36 – Forma de onda das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, com a ampliação do ponto B.	115
Figura 3.37 – Forma de onda das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, com a ampliação do ponto B1.	116
Figura 3.38 – Correntes dos alimentadores no momento do fechamento do anel entre as S/Es.	117
Figura 3.39 – Forma de onda das correntes dos alimentadores BRU-109 e TAM-114, com a ampliação do ponto C.....	118
Figura 3.40 – Forma de onda das correntes dos ALs BRU-109 e TAM-114, com a ampliação do ponto C1.....	119
Figura 3.41 – Forma de onda das correntes dos alimentadores com a ampliação do ponto D	120
Figura 3.42 – Correntes dos alimentadores no momento da abertura do anel entre as S/Es Anhanguera e Edgard de Souza.....	121
Figura 3.43 – Forma de onda das correntes: a) Ponto E, ampliado para os ALs BRU-109 e TAM-114; b) Ponto E1 para BRU-109, e; c) Ponto E1 para TAM-114.	122

Figura 3.44 – Forma de onda das correntes: a) Ponto F, ampliado para os ALs BRU-109 e TAM-114; b) Ponto F1 para o BRU-109, e; c) Ponto F1 para o TAM-114	124
Figura 3.45 – Forma de onda das correntes: a) Ponto H, ampliado para os ALs BRU-109 e TAM-114; b) Ponto H1 para o BRU-109, e; c) Ponto H1 para o TAM-114	126
Figura A.1 – Diagrama unifilar simplificado de proteção.	133
Figura A.2 – Diagrama trifilar simplificado de proteção.	134
Figura A.3 – Relé de sobrecorrente CDG com disco de indução: a) Esquema de funcionamento; b) Detalhes do relé.....	136
Figura A.4 – Corrente circulando em um alimentador para condição normal de operação.	136
Figura A.5 – Tipos de faltas encontradas na rede: a) curto-circuito monofásico, fase-terra; b) curto-circuito dupla fase, e; c) curto-circuito trifásico.....	138
Figura A.6 – Amplitudes e ângulos das correntes de curto-circuito trifásico para o alimentador BRU-109 próximo à ETD Barueri.	141
Figura A.7 – Amplitudes e ângulos das correntes de curto-circuito fase-terra para o alimentador BRU-109 no ponto mais distante da ETD Barueri.	142
Figura A.8 – Amplitudes e ângulos das correntes de curto-circuito trifásico para o alimentador TAM-114 próximo à ETD Tamboré.....	143
Figura A.9 – Amplitudes e ângulos das correntes de curto-circuito fase-terra para o alimentador TAM-114 no ponto mais distante da ETD Tamboré.	144
Figura B.10 – Demandas máximas diárias da S/E Edgard de Souza, período julho/2011 – Patamares de cargas leve/média e pesada.....	146
Figura B.11 – Demandas máximas da S/E Edgard de Souza para o mês de julho de 2011.....	147

Figura B.12 – Curvas diárias das demandas da S/E Edgard de Souza para o mês de julho de 2011.....	148
Figura B.13 – Demandas máximas diárias da S/E Anhanguera para o mês de julho de 2011 – Patamares de cargas leve/média e pesada.....	149
Figura B.14 – Demandas máximas da S/E Anhanguera para o mês de julho de 2011	150
Figura B.15 – Curvas diárias das demandas da S/E Anhanguera para o mês de julho de 2011.....	151
Figura B.16 – Carregamentos dos bancos de transformadores da S/E Edgard de Souza em 13/07/2011.....	152
Figura B.17 – Carregamentos dos bancos de transformadores da S/E Anhanguera em 13/07/2011.....	152
Figura C.18 – Estrutura básica classe 15 kV.....	153
Figura C.19 – Estrutura básica classe 15 kV: a) Estrutura M1; b) Estrutura M4.....	155
Figura C.20 – Estrutura básica classe 15 kV: a) Estrutura M3; b) Estrutura B1.....	156
Figura C.21 – Estrutura básica classe 15 kV: a) Estrutura B3; b) Estrutura B4.....	156
Figura C.22 – Estrutura classe 15 kV tipo RC1.....	157
Figura C.23 – Estrutura classe 15 kV tipo RC2.....	158
Figura C.24 – Estrutura classe 15 kV tipo RC3.....	158
Figura C.25 – Estrutura classe 15 kV tipo RC4.....	159
Figura C.26 – Estrutura classe 15 kV tipo RC5.....	159
Figura C.27 – Estrutura classe 15 kV tipo RC6.....	160

Figura C.28 – Estrutura classe 15 kV tipo RC3 Dupla.....	160
Figura C.29 – Estrutura classe 15 kV tipo RCEL.....	161
Figura C.30 – Estrutura classe 15 kV tipo RCT.....	161
Figura C.31 – Estrutura classe 15 kV – Suporte simples PRE1.....	162
Figura C.32 – Estrutura classe 15 kV – Suporte duplo PRE2.....	163
Figura C.33 – Estrutura classe 15 kV – Ancoragem simples PRE3.....	163
Figura C.34 – Estrutura classe 15 kV – Ancoragem dupla PRE4.....	163
Figura C.35 – Estrutura classe 15 kV tipo K41.....	164
Figura C.36 – Estrutura classe 15 kV tipo K42.....	164
Figura C.37 – Estrutura classe 15 kV tipo K51.....	165
Figura C.38 – Estrutura classe 15 kV tipo K52.....	165
Figura C.39 – Montagem horizontal de chave faca.....	171
Figura C.40 – Montagem vertical de chave faca.....	172
Figura C.41 – Chave tripolar – vista frontal.....	173
Figura C.42 – Chave tripolar – vista lateral.....	174
Figura C.43 – Chave tripolar: a) Operação manual, e; b) Automatizada.....	174
Figura C.44 – Padrão de instalação de chave fusível.....	175
Figura C.45 – Saída convencional de alimentador aéreo primário.....	176
Figura C.46 – Saída de alimentador utilizando cabo pré-reunido.....	177
Figura E.47 – Medidor de qualidade de energia Blackbox G4500.....	181
Figura E.48 – Diagrama de blocos do tratamento dos dados do Blackbox G4500 pelo PQSCADA.....	184

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Possibilidades de manobras de paralelismos entre alimentadores.....	56
Tabela 2.2 – Comprimentos dos cabos condutores dos alimentadores BRU-109 e TAM-114.	60
Tabela 2.3 – Carregamento dos alimentadores calculados pelo software Cymdist.	64
Tabela 3.1 – Dados de sincronização e amostragem do medidor Elspec Blackbox G4500.....	68
Tabela 3.2 – Tempos de abertura e fechamento das chaves seccionadoras 43286 e 40343, utilizados na parametrização do aplicativo ATP.....	69
Tabela 3.3 – Transformadores utilizados nas estações da AES Eletropaulo com ou sem reguladores de tensão.	75
Tabela 3.4 – Características elétricas das seccionadoras de distribuição classe 15 kV.....	80
Tabela 3.5 – Cargas dos alimentadores TAM-114 e BRU-109 no momento das manobras – SSC.	97
Tabela 3.6 – Tensões e correntes dos transformadores das estações transformadoras de distribuição.	99
Tabela 3.7 – Carregamentos e capacidades dos alimentadores BRU-109 e TAM-114.....	101
Tabela 3.8 – Carregamentos e capacidades dos transformadores das ETDs Barueri e Tamboré.	102
Tabela 4.1 – Carga do trecho do alimentador TAM-114, entre seccionadoras 40343 e 43286.	128
Tabela 4.2 – Capacidade de curto-circuito das barras secundárias dos	

transformadores das ETDs Barueri e Tamboré.....	139
Tabela C.3 – Capacidade dos postes em função das alturas: a) Postes de concreto; b) Postes de madeira; c) Postes especiais.....	154
Tabela C.4 – Distâncias entre condutores de um mesmo circuito.....	166
Tabela C.5 – Distâncias mínimas das partes energizadas à fase ou a terra em pontos fixos.	166
Tabela C.6 – Distâncias entre condutores de circuitos diferentes.....	166
Tabela C.7 – Distâncias entre os condutores e o solo.	167
Tabela C.8 – Dimensionamento de condutores.	169
Tabela C.9 – Dados técnicos característicos de uma chave faca.	175
Tabela D.10 – Parâmetros elétricos dos bancos de transformadores das S/Es Edgard de Souza e Anhanguera.	178
Tabela D.11 – Parâmetros elétricos das linhas de subtransmissão aéreas.	179
Tabela D.12 – Parâmetros elétricos dos transformadores das ETDs Barueri e Tamboré.....	179
Tabela D.13 – Parâmetros elétricos dos alimentadores aéreos primários BRU-109 e TAM-114, ambos de 13,8 kV.....	180
Tabela E.14 – Dados gerais do medidor Blackbox G4500.....	182
Tabela E.15 – Dados de entrada de tensão e corrente do medidor Blackbox G4500	182
Tabela E.16 – Sincronização e amostragem do medidor Blackbox G4500.....	183
Tabela E.17 – Faixas de medição do medidor Blackbox G4500.....	183
Tabela E.18 – Detecção de transitórios de tensão do medidor Blackbox G4500.	183

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A2: classe de tensão de fornecimento de energia elétrica (88 kV)

AC: corrente alternada

AL: alimentador aéreo primário

ALT: alimentador com limitação térmica

ANEEL: Agência Nacional de Energia Elétrica

ANH: Anhanguera

AQT: alimentador com queda de tensão limitada

ARSESP: Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo

ATP: programa para cálculo numérico de transitórios eletromagnéticos em sistemas

de potência

AZ: fase azul

BC: banco de capacitores instalado ao longo do AL

BCA: banco de capacitores instalado na barra da ETD

BJA: Bom Jardim

BR: fase branca

BRU: Barueri

CCC: capacidade de curto circuito

CF: chave faca

CH SECC: chave seccionadora

CH VIS: chave seccionadora de vis-à-vis.

COD: centro de operação da distribuição

CSPE: Comissão de Serviços Públicos de Energia

CTEEP: Companhia de Transmissão de Energia Elétrica Paulista

CYMDIST: Distribution System Analysis

DEC: duração equivalente de interrupção por unidade consumidora

DIC: duração de interrupção individual por unidade consumidora

DJ: disjuntor

DMIC: duração máxima de interrupção contínua por unidade consumidora

DMS: distribution management system

EBC: estação de banco de capacitores

EOC: estação de chaves classe 88/138 kV, na subtransmissão

EPC: equipamento de proteção coletivo

EPI: equipamento de proteção individual

ETD: estação transformadora de distribuição

EMS: energy management system

ESD: estação do sistema de distribuição

ESO: Edgard de Souza

FALTA: condição da rede durante a falta

FEC: frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora

FIC: frequência de interrupção individual por unidade consumidora

FUNDAMENTAL: componente de 60 Hz do sinal com harmônicas

GIS: geographic information systems

GPS: "Global Positioning System", sistema de localização geográfica e de referência de tempo global

i: corrente elétrica

IEO: instrução específica de operação

IMPEDÂNCIA-SÉRIE: modelo de linha que desconsidera a capacitância da linha e o efeito do comprimento

LB: Loadbuster, bastão de manobras com câmara de extinção de arco voltaico

LI: linha de interligação

LINE CONSTANTS: rotina do programa ATP para cálculo de parâmetros de linhas de transmissão

LT: linha de transmissão

LTA: linha de transmissão aérea

LTS: linha de transmissão subterrânea

MATLAB: programa de processamento numérico e geração de gráficos

MCM: milhar circular mil

MPT: manual de procedimento técnico

MODELS: rotina do programa ATP similar a linguagens de programação de alto nível, e que permite o modelamento de componentes da rede, geração de arquivos de saída e interfaceamento com a linguagem "C"

MUT: Mutinga

MVA: mega volt ampère

OMS: outage management system

ONS: Operador Nacional do Sistema

OTR: operação em tempo real

PRÉ-FALTA: condição da rede antes da ocorrência de falta

PRI: Pirituba

PRODIST: procedimentos de distribuição de energia elétrica

PÓS-FALTA: condição da rede durante a falta

pu: por unidade

RA: religadora automática

RMS: root mean square (valor médio eficaz para grandezas elétricas)

RP: regime permanente

RRA: relé de religamento automático

S/E: subestação de transmissão de energia

SCADA: supervisory control and data acquisition

SECC: seccionadora

SEP: sistema elétrico de potência

SIN: sistema interligado nacional

SINAP: Sistema de Análise Integrada AT/MT/BT

SPOT NETWORK: rede distribuição curta e local, comumente utilizados em sistemas reticulados subterrâneos

SSC: sistema de supervisão e controle

TA: transferência automática

TAM: Tamboré

TAP: derivação elétrica no enrolamento de um TR, podendo ser no primário ou no secundário

TCH: torre de chaves seccionadoras

THD: taxa de distorção harmônica total

TR: transformador

TRIP: comando de desligar

U: tensão elétrica

V: tensão elétrica

VA: volt-ampère

Vef: tensão eficaz

VIS-À-VIS: fronteira entre dois alimentadores onde é possível o fechamento em anel

π -corrigido: modelo de linha que considera a capacitância da linha e o efeito do comprimento

π -nominal: modelo de linha que considera a capacitância da linha, mas despreza o efeito do comprimento

RESUMO

Este trabalho tem por objetivo apresentar novos desenvolvimentos e a evolução do conceito de manobras de paralelismo entre alimentadores aéreos primários de distribuição, bem como os efeitos eletromagnéticos provocados por manobras em tempo real, visando a segurança operacional dos equipamentos e operadores de campo.

São apresentadas propostas para fechamento de subestações transformadoras de transmissão em anel, através de alimentadores aéreos primários, além de algoritmo simplificado para a operação e despacho do sistema.

Uma nova metodologia de operação em tempo real foi desenvolvida através de algoritmo de viabilidade usando dados do SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition). Esta metodologia de operação oferece algumas vantagens como o restabelecimento de cargas interrompidas, o isolamento de trechos defeituosos na rede de distribuição aérea, bem como o atendimento de serviços programados no sistema elétrico de potência.

Para essa metodologia é feita uma análise das grandezas elétricas e capacidades dos equipamentos envolvidos, bem como dos ajustes e parâmetros dos dispositivos de proteção, de forma a obter sucesso na operação da rede em tempo real.

O estudo foi baseado em manobras reais em alimentadores aéreos de distribuição da AES Eletropaulo. A validação do modelo que direcionou para o sucesso das manobras em tempo real foi baseada principalmente em simulações de transitórios eletromagnéticos, fluxo de carga e curto-circuito através dos programas ATP e CYMDIST.

ABSTRACT

This work aims to present new developments and the evolution of the parallelism switch operation concept among distribution primary overhead feeders, as well as the electromagnetic effects caused by switch operations in real time, in order to keep field operators and equipments in safety.

Hereby are presented some proposals for closed-loop arrangement between two power transmission substations through overhead feeders and a simplified algorithm for the system's operation and dispatch as well.

A new real time operation methodology was developed through viability algorithm using the SCADA's (Supervisory Control and Data Acquisition) database. This operation methodology offers some advantages such as restoration of interrupted loads, isolation of the faulty section in the overhead distribution network as well as scheduled services.

For this methodology was made an analysis of the electric magnitudes and of the involved equipment capabilities, as well as the protection devices' adjustments and parameters, so as to obtain successful in real time operation.

The study was based on actual switch operations over the distribution overhead feeders of AES Eletropaulo. The validation of the model that drove to the real time switch operations success was mainly based on electromagnetic transients simulations, load flow and short-circuit in ATP (Alternative Transient Program) and CYMDIST softwares.

ESTRUTURA DA TESE

A tese está estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1

Contém a introdução e a revisão bibliográfica sobre os tópicos mais relevantes de operação de redes aéreas primárias, dos transitórios eletromagnéticos provocados por manobras em tempo real, além dos efeitos físicos em componentes e equipamentos da rede em regime permanente quando dois alimentadores de diferentes subestações são fechados em anel.

Capítulo 2

Apresenta a metodologia empregada para desenvolvimento do novo algoritmo de fechamento em anel entre subestações de energia, realizado através do paralelismo entre dois alimentadores aéreos primários de distribuição. Também apresenta a modelagem dos alimentadores, transformadores e estações transformadoras de distribuição.

Capítulo 3

Neste capítulo são apresentadas as simulações realizadas no aplicativo ATP, os transitórios eletromagnéticos constatados no momento das manobras de formação do anel, além dos resultados obtidos em função dos testes reais realizados na rede aérea de distribuição da AES Eletropaulo.

Capítulo 4

Inclui a discussão e as conclusões, onde se busca esclarecer as vantagens e desvantagens do algoritmo desenvolvido. Contém propostas de novos trabalhos dentro dessa linha de pesquisa, dados técnicos de equipamentos e instrumentos utilizados, além das simulações de curto-circuito para os alimentadores estudados.