

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a) autor(a), o texto completo desta dissertação será disponibilizado somente a partir de 19/02/2017.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

ROBERTO CESAR PESSOA CHAVES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO E METODOLOGIA PARA
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Ilha Solteira
2016

ROBERTO CESAR PESSOA CHAVES

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE PROTEÇÃO E METODOLOGIA PARA
LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia - Campus de Ilha Solteira – UNESP, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Conhecimento: Automação.

Prof. Dr. Fábio Bertequini Leão
Orientador

Ilha Solteira
2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvido pelo Serviço Técnico de Biblioteca e Documentação

C512d Chaves, Roberto Cesar Pessoa .
Desenvolvimento de um sistema de proteção e metodologia para localização de faltas em sistemas de distribuição / Roberto Cesar Pessoa Chaves. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2016
189 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Automação, 2016

Orientador: Fábio Bertequini Leão
Inclui bibliografia

1. Energia elétrica - distribuição. 2. Proteção de sistemas de distribuição.
3. Localização de faltas. 4. Geração distribuída. 5. Indicadores de falta.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Desenvolvimento de sistema de proteção e metodologia para localização de faltas em sistemas de distribuição.

AUTOR: ROBERTO CESAR PESSOA CHAVES

ORIENTADOR: FABIO BERTEQUINI LEÃO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em ENGENHARIA ELÉTRICA, área: AUTOMAÇÃO, pela Comissão Examinadora:

Fabio Bertequini Leão

Prof. Dr. FABIO BERTEQUINI LEÃO

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Antonio Padilha Feltrin

Prof. Dr. ANTONIO PADILHA FELTRIN

Departamento de Engenharia Elétrica / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira

Jose Carlos de Melo Vieira Junior

PROFESSOR DOUTOR JOSE CARLOS DE MELO VIEIRA JUNIOR

Departamento de Engenharia Elétrica / ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS-USP

Ilha Solteira, 19 de fevereiro de 2016

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por ter me dado força, fé e coragem para superar os obstáculos, pois sem Ele nada seria possível.

Aos meus pais, Valdir e Patrícia, por todos os ensinamentos necessários para a formação do meu caráter, por todo o apoio e confiança na busca de efetivar os meus sonhos e pelas palavras de ânimo nos momentos de dificuldade, me ajudando a superar os desafios.

Aos meus irmãos, André e Marcela, que sempre acreditaram no meu potencial.

Aos meus familiares, que de alguma maneira ajudaram para esta realização.

A todos os mestres e funcionários da Unesp que me acompanharam durante a minha formação acadêmica.

Ao meu orientador Fábio, pelo incentivo, auxílio, competência, disponibilidade de tempo e paciência no direcionamento para a conclusão deste trabalho.

Aos meus companheiros do LaPSEE e a todos os meus amigos, que conviveram ao meu lado na realização deste tão almejado objetivo.

A cidade de Ilha Solteira que me acolheu de braços abertos.

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio financeiro durante esta pesquisa.

“Não fique ansioso com aquilo que você ainda não tem. Tudo tem o seu tempo. Jogue as sementes no chão... Cuide... E um dia elas irão germinar.”

Padre Fábio de Melo

RESUMO

O sistema de proteção tradicional de sistemas de distribuição predominantemente utiliza relés de sobrecorrente alocados na subestação e religadores automáticos ao longo dos alimentadores principais coordenados com fusíveis em ramais laterais. A inserção de GD (Geração Distribuída) na rede de distribuição pode causar diversos impactos do ponto de vista da proteção do sistema. Um dos impactos mais expressivos é a perda de coordenação dos dispositivos tradicionalmente empregados, devido a inserção da GD possibilitar fluxos de potência bidirecionais na rede. Portanto, neste trabalho é proposta uma solução para proteção e monitoramento da rede de distribuição considerando a inserção de fontes dispersas de energia. O sistema proposto é baseado na separação da rede de distribuição em zonas de proteção de acordo com a possibilidade de ilhamento da GD. Para o monitoramento da rede são empregados sensores indicadores de falta. Um método denominado Método de Degrau de Correntes (MDC) é proposto para identificação e localização de faltas a partir dos dados de monitoramento da rede em tempo real. Uma estratégia de restauração é proposta baseada nos resultados obtidos pelo MDC. Para os estudos, utilizou-se do software de simulação de Sistemas Elétricos de Potência DlgSILENT Power Factory 14.0, empregado para análise de fluxo de potência e verificação de estabilidade nas situações pós-falta. O software MATLAB (MATrix LABoratory) é empregado para o desenvolvimento do algoritmo e metodologia de identificação, localização de faltas e isolamento da rede de distribuição utilizando-se dos dados disponibilizados pelo DlgSILENT. Quanto aos resultados, percebeu-se que o algoritmo possui uma alta confiabilidade para os mais diferentes tipos de falta (até razoáveis valores de resistência de falta), permitindo ainda que haja erros de comunicação entre alguns indicadores de falta e o algoritmo, pois o Método de Degrau de Correntes pode identificar diversas faltas analisando o perfil de corrente ao longo da trajetória de falta.

Palavras-chave: Geração distribuída. Proteção. Distribuição. *Smart grids*. Curto-circuito. Disjuntores. Indicadores de falta.

ABSTRACT

The traditional protection system uses predominantly overcurrent relays allocated in substation and automatic reclosers along the main feeders coordinated with fuses in side branches. The penetration of GD (Distributed Generators) in distribution systems can cause different impacts in terms of system protection. One of the most significant impacts is the loss of coordination of the protection devices traditionally employed due to insertion of GD, which allows bidirectional power flows on the network. Therefore, this work proposes a solution for protection and monitoring the distribution network considering the insertion of dispersed energy resources. The proposed system is based on the separation of the distribution network in protection zones in accordance with the possibility of islanding of GD. For network monitoring fault indicators sensors are employed. A method called Currents Step Method (MDC) is proposed to identify and locate faults based on the network monitoring data in real time. A restoration strategy is proposed based on the results obtained by the MDC. For the studies, the DIgSILENT Power Factory 14.0 was employed to carry out power flow and stability analysis. The MATLAB (Matrix Laboratory) software was also used to develop the algorithm and methodology of identification, fault location and isolation of the distribution network using the data provided by the DIgSILENT. Regarding the results, it was noticed that the algorithm has a high reliability for the most different fault types (until reasonable fault resistance values), still allowing that there are communication errors between some fault indicators and the algorithm because the Current Step Method can identify many faults analyzing the current profile along of fault trajectory.

Keywords: Distributed generation. Protection. Distribution. Smart grids. Short-circuit. Breakers. Fault indicators.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Típico caso afetando coordenação fusível-fusível e fusível-religador	23
Figura 2 - Estados de operação de um sistema elétrico.....	29
Figura 3 - Quantidade de alimentadores afetados pelo número de ligações de consumidores em um temporal	32
Figura 4 - Alimentador de distribuição típico.....	33
Figura 5 - Rede de distribuição com geradores distribuídos	38
Figura 6 - Coordenação entre relé da subestação e os demais dispositivos de proteção - situação com e sem GD	40
Figura 7 - Ilustração de IF com comunicação.....	47
Figura 8 - Diferentes modelos de IF	49
Figura 9 - Sensor do IF.....	50
Figura 10 - IFs direcionais: a) ComPass B (Horstmann Germany); b) Flite 3xx (Schneider Electric)	53
Figura 11 - Indicadores de falta atuando em momento de contingência	54
Figura 12 - Presença de um único indicador de faltas no sistema de distribuição ...	55
Figura 13 - Esquema de zoneamento do sistema de proteção proposto aplicado a um sistema de 6 barras.....	60
Figura 14 - Visão geral do sistema de proteção proposto	61
Figura 15 - Falta simples a jusante do IF2 com GD	69
Figura 16 - Perfil de corrente ao longo da trajetória de falta simples com GD	70
Figura 17 - Falta simples a jusante do IF2.....	70
Figura 18 - Perfil de corrente ao longo da trajetória da falta simples a jusante do IF2	71
Figura 19 - Falta múltipla com GD.....	71
Figura 20 - Perfil de corrente ao longo da trajetória da falta múltipla com GD	72
Figura 21 - Esquema para faltas múltiplas. a) Faltas concorrentes. b) Faltas divergentes.....	73
Figura 22 - Circuito elétrico monofásico para falta múltipla	74
Figura 23 - Fluxograma completo do algoritmo desenvolvido para operação da proteção e localização de faltas	77
Figura 24 - Método de Degrau de Correntes.....	79
Figura 25 - Fluxograma do passo 6.....	81

Figura 26 - Comunicação dos programas utilizados.....	82
Figura 27 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição teste de 9 barras	83
Figura 28 - Zoneamento do sistema de distribuição teste	83
Figura 29 - Sistema implementado no DIgSILENT	84
Figura 30 - Curto-circuito 1 ϕ no ponto médio da linha a jusante do IF3	87
Figura 31 - Perfil de corrente para o caso 1	88
Figura 32 - Comportamento da potência da GD na simulação de curto-circuito na linha 3-4	90
Figura 33 - Comportamento da tensão da GD na simulação de curto-circuito na linha 3-4	91
Figura 34 - Comportamento da corrente da GD na simulação de curto-circuito na linha 3-4	91
Figura 35 - Comportamento da velocidade da GD na simulação de curto-circuito na linha 3-4	91
Figura 36 - Comportamento da frequência da GD na simulação de curto-circuito na linha 3-4	92
Figura 37 - Curto-circuito 1 ϕ no ponto médio da linha entre os IF3 e IF4 (com falha em todos os IFs, com exceção do IF3)	93
Figura 38 - Curto-circuito 1 ϕ no ponto médio da linha entre os IF3 e IF4 (com falha no IF2).....	95
Figura 39 - Curto-circuito 1 ϕ nos pontos médios das linhas entre os IFs 2 e 3 e IFs 3 e 4	97
Figura 40 - Perfil de corrente para o caso 4	98
Figura 41 - Curto-circuito 3 ϕ no ponto médio da linha a jusante do IF7	99
Figura 42 - Perfil de corrente para o caso 5	100
Figura 43 - Curto-circuito 3 ϕ no ponto médio da linha a jusante do IF7 (com falha no IF7).....	102
Figura 44 - Perfil de corrente para o caso 6	103
Figura 45 - Curto-circuito 1 ϕ múltiplo nos pontos médios das linhas entre os IFs 4 e 5 e a jusante do IF 7.....	105
Figura 46 - Perfil de corrente para o caso 7. Trajetória até o IF4	106
Figura 47 - Perfil de corrente para o caso 7. Trajetória até o IF7	107
Figura 48 - Curto-circuito 3 ϕ no ponto médio da linha a jusante do IF6 (com falha no IF5).....	109

Figura 49 - Perfil de corrente para o caso 8. Trajetória até o IF5	110
Figura 50 - Curto-circuito 1 ϕ no ponto médio da linha a jusante do IF5 (com RF) .	112
Figura 51 - Perfil de corrente para o caso 9	113
Figura 52 - Diagrama unifilar do sistema de distribuição real de 134 barras	117
Figura 53 - Sistema implementado no DIgSILENT	119
Figura 54 - Curto-circuito 3 ϕ no ponto médio da linha a jusante do IF3	121
Figura 55 - Perfil de corrente para o caso 1	123
Figura 56 - Comportamento da potência das GDs na simulação de curto-circuito na linha 48-61.....	127
Figura 57 - Comportamento da tensão das GDs na simulação de curto-circuito na linha 48-61.....	127
Figura 58 - Comportamento da corrente das GDs na simulação de curto-circuito na linha 48-61.....	127
Figura 59 - Comportamento da velocidade das GDs na simulação de curto-circuito na linha 48-61.....	128
Figura 60 - Comportamento da frequência das GDs na simulação de curto-circuito na linha 48-61.....	128
Figura 61 - Curto-circuito 1 ϕ no ponto médio da linha 82-84.....	130
Figura 62 - Perfil de corrente para o caso 2	131
Figura 63 - Curto-circuito 2 ϕ no ponto médio da linha 92-95.....	134
Figura 64 - Perfil de corrente para o caso 3	135
Figura 65 - Curto-circuito 2 ϕ no ponto médio da linha 108-109.....	138
Figura 66 - Perfil de corrente para o caso 4	140
Figura 67 - Curto-circuito 1 ϕ nos pontos médios das linhas 46-47 e 102-103.....	143
Figura 68 - Perfil de corrente para o caso 5	144
Figura 69 - Curto-circuito 1 ϕ nos pontos médios das linhas 54-55 e 90-91.....	148
Figura 70 - Perfil de corrente para o caso 7. Trajetória até o IF8	149
Figura 71 - Perfil de corrente para o caso 7. Trajetória até o IF14	150
Figura 72 - Curto-circuito 1 ϕ no ponto médio da linha a jusante do IF5 (com RF) .	152
Figura 73 - Perfil de corrente para o caso 9	153
Figura 74 - Curva de capacidade da GD do sistema de 9 barras	1
Figura 75 - Curva de capacidade da GD 1 do sistema de 134 barras	167
Figura 76 - Curva de capacidade da GD 2 do sistema de 134 barras	168
Figura 77 - Curva de capacidade da GD 3 do sistema de 134 barras	168

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Atividades em um centro de controle considerando dois estados do sistema.....	30
Tabela 2 - Comparação entre alguns fabricantes de indicadores de faltas instalados em cabo	51
Tabela 3 - Comparação entre alguns fabricantes de indicadores de faltas instalados em poste.....	52
Tabela 4 - Tabela verdade da operação realizada no vetor $[I_{AIF}]$	68
Tabela 5 - Valores de <i>pick-up</i> para cada indicador de falta	85
Tabela 6 - Estado do sistema em ilhamento da GD.....	88
Tabela 7 - Carregamento da GD.....	89
Tabela 8 - Falta em ramal lateral (jusante do IF5)	115
Tabela 9 - Falta em ramal principal (jusante de IF2).....	115
Tabela 10 - Valores de pick-up para cada indicador de faltas no sistema de 134 barras	119
Tabela 11 - Estado do sistema em ilhamento da GD.....	123
Tabela 12 - Carregamento das GDs	125
Tabela 13 - Estado do sistema em ilhamento da GD.....	131
Tabela 14 - Carregamento das GDs	133
Tabela 15 - Estado do sistema em ilhamento da GD.....	136
Tabela 16 - Carregamento das GDs	137
Tabela 17 - Estado do sistema em ilhamento da GD.....	140
Tabela 18 - Carregamento das GDs	142
Tabela 19 - Estado do sistema em ilhamento da GD.....	145
Tabela 20 - Carregamento das GDs	146
Tabela 21 - Falta em ramal lateral (ponto médio 130-132)	155
Tabela 22 - Falta em ramal principal (ponto médio 90-91)	155
Tabela 23 - Parâmetros da rede externa	168
Tabela 24 - Parâmetros do transformador da subestação.....	169
Tabela 25 - Impedâncias de sequência (+)/(-)/(o) e comprimento das linhas do sistema.....	169
Tabela 26 - Parâmetros do transformador da GD.....	170

Tabela 27 - Parâmetros do gerador	170
Tabela 28 - Parâmetros do regulador de tensão do gerador	170
Tabela 29 - Parâmetros do regulador de velocidade do gerador	171
Tabela 30 - Cargas conectadas no sistema teste	172
Tabela 31 - Tensão nas barras com 50% de carga	172
Tabela 32 - Tensão nas barras com 75% de carga	173
Tabela 33 - Tensão nas barras com 100% de carga	173
Tabela 34 - Parâmetros da rede externa	174
Tabela 35 - Parâmetros do transformador da subestação	174
Tabela 36 - Dados de linhas e cargas do alimentador de 134 barras	175
Tabela 37 - Parâmetros do transformador da GD	179
Tabela 38 - Parâmetros do gerador	179
Tabela 39 - Parâmetros do regulador de tensão do gerador	179
Tabela 40 - Parâmetros do regulador de velocidade do gerador	180
Tabela 41 - Tensão nas barras com 50% de carga	181
Tabela 42 - Tensão nas barras com 75% de carga	182
Tabela 43 - Tensão nas barras com 100% de carga	183

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANEEL	- Agência Nacional de Energia Elétrica
CA	- Condutor de Alumínio
COD	- Centro de Operação de Distribuição
DEC	- Duração Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
DMS	- <i>Distribution Management System</i>
DPL	- <i>Digsilent Program Language</i>
EMS	- <i>Energy Management System</i>
FD	- Fontes Diversas
FDIR	- <i>Fault Detection, Isolation and Restoration</i>
FEC	- Frequência Equivalente de Interrupção por Unidade Consumidora
FPI	- <i>Fault Passage Indicator</i>
GD	- Geração Distribuída
GIS	- <i>Geographic Information System</i>
GPS	- <i>Global Positioning System</i>
GSM	- <i>Global System for Mobile Communication</i>
IED	- <i>Intelligent Electronic Devices</i>
IEEE	- Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IF	- Indicador de Falta
IHM	- Interface Homem-Máquina
LED	- <i>Light Emitting Diode</i>
MAIFI	- <i>Momentary Average Interruption Frequency Index</i>
MDC	- Método Degrau de Correntes
OG	- <i>Outage Management</i>
ONS	- Operador Nacional do Sistema Elétrico
PMU	- <i>Phasor Measurement Unit</i>
PRODIST	- Procedimentos de Distribuição
SAIFI	- <i>System Average Interruption Frequency Index</i>
SCADA	- <i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
SE	- Subestação
TC	- Transformador de Corrente
UTR	- Unidades Terminais Remotas

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	REVISÃO DA LITERATURA	21
3	SISTEMA DE PROTEÇÃO TRADICIONAL E DIAGNÓSTICO DE FALTAS NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO	27
3.1	DIAGNÓSTICO DE FALTAS NOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	27
3.2	SISTEMA DE PROTEÇÃO TRADICIONAL DAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO	33
3.3	IMPACTOS DA GERAÇÃO DISTRIBUÍDA NO SISTEMA DE PROTEÇÃO DE REDES DE DISTRIBUIÇÃO	35
3.3.1	Religamento automático	36
3.3.2	Desempenho das funções de sobrecorrente	38
3.3.3	Ilhamento não intencional	40
3.3.4	Ilhamento intencional ou microrrede	41
3.4	TECNOLOGIAS PARA O MONITORAMENTO REMOTO DA REDE DE DISTRIBUIÇÃO	42
3.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	43
4	INDICADORES DE FALTA EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA	44
4.1	HISTÓRICO REFERENTE AOS INDICADORES DE FALTA	44
4.2	ASPECTOS GERAIS DOS INDICADORES DE FALTA.....	46
4.2.1	Sinalização	46
4.2.2	Rearme	46
4.2.3	Bateria	46
4.2.4	Comunicação	47
4.2.5	Programação	48
4.2.6	Manutenção	48
4.2.7	Tipos de indicadores de falta de redes de distribuição aéreas	48
4.2.8	Pontos para instalação em redes aéreas	53
4.3	VANTAGENS DA UTILIZAÇÃO DOS INDICADORES DE FALTA	55
4.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO	58

5	SISTEMA DE PROTEÇÃO E METODOLOGIA PARA LOCALIZAÇÃO DE FALTAS EM SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO CONSIDERANDO A PRESENÇA DE GERADORES DISTRIBUÍDOS.....	59
5.1	VISÃO GERAL	59
5.2	PROCESSO DE ZONEAMENTO DE REDE.....	61
5.3	DADOS DE ENTRADA REQUERIDOS	63
5.4	MEDIDAS REQUERIDAS ON-LINE	64
5.5	PROCEDIMENTO ON-LINE DE DIAGNÓSTICO E LOCALIZAÇÃO DA FALTA	65
5.5.1	Método de degrau de correntes	66
5.5.2	Isolação da zona de falta e restauração da rede	75
5.5.3	Algoritmo implementado para atuação do sistema de proteção e diagnóstico de faltas.....	76
6	RESULTADOS.....	82
6.1	TESTES E RESULTADOS PARA UM SISTEMA DE 9 BARRAS.....	82
6.1.1	Diagrama do sistema no DigSILENT	84
6.1.2	Testes da metodologia de localização de faltas	85
6.2	TESTE E RESULTADOS PARA UM SISTEMA REAL DE 134 BARRAS.....	116
6.2.1	Diagrama do sistema no DigSILENT	118
6.2.2	Testes da metodologia de localização de faltas	120
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	156
7.1	CONCLUSÕES	156
7.2	TRABALHOS FUTUROS.....	157
	REFERÊNCIAS.....	159
	APÊNDICE A	165
A.1	MODELAGEM DOS SISTEMAS DE DISTRIBUIÇÃO	165
A.2	PARÂMETROS DOS COMPONENTES DO SISTEMA ELÉTRICO DE 9 BARRAS.....	168
A.2.1	Rede	168
A.2.2	Transformador SE (Subestação)	169

A.2.3	Características das linhas	169
A.2.4	Geração distribuída	170
A.2.5	Cargas	171
A.2.6	Resultados de fluxo de potência	172
A.3	PARÂMETROS DOS COMPONENTES DO SISTEMA ELÉTRICO DE 134 BARRAS	174
A.3.1	Rede	174
A.3.2	Transformador SE (Subestação)	174
A.3.3	Características das linhas e cargas	174
A.3.4	Geração distribuída	179
A.3.5	Resultados de fluxo de potência	180
	ANEXO A	186
	ANEXO B	191

1 INTRODUÇÃO

O sistema de proteção da rede de distribuição de energia elétrica tradicional, predominantemente, utiliza relés de sobrecorrentes alocados na subestação e religadores automáticos ao longo dos alimentadores principais coordenados com fusíveis em ramais laterais. Religadores automáticos são utilizados devido ao fato de cerca de 80% das faltas possuírem característica temporária, e desta forma, a atuação do religador na curva instantânea possibilitar a eliminação da corrente de curto-circuito antes da queima do fusível. A coordenação entre fusíveis, religadores e relés é bem estabelecida e implementada, assumindo que o sistema possui natureza radial [1]. Este método tradicional vem sendo aceito e empregado devido ao sistema de distribuição até então concebido apresentar natureza radial (caracterizado por uma única fonte/concessionária que alimenta toda a rede), sem significativa (ou nenhuma) penetração de componentes ativos, tais como Geração Distribuída (GD) ou Fontes Dispersas (FD) e sem a necessidade de reconfiguração dos alimentadores ou alteração de parametrização da proteção sob condições normais de operação. Devido à possibilidade de grande penetração de fontes renováveis dispersas de energia nas redes de distribuição, os sistemas de distribuição, que antes eram operados radialmente (fluxos de potência radial), podem apresentar fluxos de potência bidirecionais, ou seja, do gerador disperso (consumidor) para a rede. A inserção de GD em sistemas de distribuição pode causar diversos impactos do ponto de vista da proteção do sistema, tais como: atuação falsa da proteção em alimentadores adjacentes, atuação desnecessária da proteção dos geradores, redução do alcance da proteção de sobrecorrente alocada na subestação, perda da coordenação entre os dispositivos de proteção, aumento/diminuição dos níveis de curto-circuito,ilhamento não intencional e problemas no religamento automático devido à perda de sincronismo dos geradores [2; 3; 4].

O crescente desenvolvimento de novas tecnologias de informação e comunicação e a redução de seus custos, juntamente com as necessidades técnicas, operacionais e ambientais, devido à penetração da GD, tem motivado discussões em torno da concepção de rede ativa e inteligente ou *Smart Grid*. O conceito de *Smart Grid* simboliza a corrida tecnológica e de pesquisa em busca de soluções adequadas e aplicáveis aos sistemas de distribuição. Ele representa a

formalização da operação integrada de diversas tecnologias (sensores, sistemas de comunicação, medidores inteligentes ou *smart meters*, etc) que tornam possível a operação do sistema de distribuição de forma robusta, mesmo com grande penetração de fontes de energia dispersas. A realização e implementação da *Smart Grid* vem sendo largamente discutida em diversos trabalhos, seja de órgãos governamentais [5] e artigos na literatura especializada [6; 7; 8; 9].

A ideia de uma rede inteligente vem ao encontro de várias soluções de filosofias de proteção propostas na literatura para superar os impactos causados pela penetração da GD [10; 11; 12; 13]. As filosofias e esquemas de proteção propostos requerem um ambiente com comunicação remota rápida e níveis de automação e inteligência oferecidos pela implementação da rede inteligente.

Devido à possibilidade de grande penetração de componentes ativos nas redes de distribuição, principalmente fontes dispersas, a filosofia de proteção, monitoramento e controle de sistemas de distribuição até o momento empregada não é suficientemente adequada para a operação eficiente e robusta da rede. A ideia de formalização de uma rede inteligente vem ao encontro do uso de tecnologia alocada em toda a rede, de modo que o controle e operação sejam realizados de forma eficiente. Nesse sentido, as concessionárias de distribuição de energia buscam, com auxílio de novas tecnologias, o monitoramento da rede de distribuição, juntamente com o emprego seletivo de sensores de baixo custo e o uso de informações disponíveis nos medidores inteligentes (*smart meters*) soluções para essa nova realidade.

Nesse contexto, o principal objetivo desta dissertação de mestrado é o desenvolvimento de um sistema de proteção robusto e adequado aos sistemas de distribuição, considerando a inserção de fontes dispersas de energia.

Neste trabalho foram realizados estudos para o conhecimento da filosofia de proteção e dos dispositivos de proteção empregados nos sistemas de distribuição tradicionais, além da apresentação dos indicadores de falta que são os principais elementos utilizados para o método de localização de falta proposto. Tal metodologia se baseia nos sinais (enviados remotamente até a subestação) de atuação dos indicadores de falta e na análise do perfil de corrente elétrica ao longo da trajetória de falta, caracterizada pela existência de um degrau de corrente elétrica negativo. Foram também avaliados os impactos causados na proteção dos sistemas

de distribuição devido à penetração da GD. Um pequeno sistema de distribuição com um gerador distribuído e um grande sistema de distribuição de 134 barras com três geradores distribuídos foram modelados utilizando o programa DlgSILENT *Power Factory*, além da utilização do software MATLAB para o desenvolvimento do algoritmo implementado.

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

7.1 CONCLUSÕES

A ideia para a proteção e monitoramento de sistemas de distribuição desenvolvida neste trabalho oferece uma aceitável solução para a proteção e localização de faltas, pois é independente do local de alocação da GD no sistema de distribuição, sendo ainda, totalmente adaptativo a futuras e contínuas inserções de geradores. Deve-se observar que a potência da geração distribuída não deve alcançar valores elevados relativos à potência fornecida pela subestação, pois o nível de corrente de curto-circuito poderá atingir níveis que não gere um degraú negativo no perfil de corrente ao longo da trajetória de falta, conforme demonstrado na descrição do Método de Degraú de Correntes. Mesmo sem o MDC, o algoritmo tem seu funcionamento e resultado de localização de faltas satisfatório com apenas o auxílio da primeira parte da metodologia, ou seja, com os sinais de atuação dos IFs. Para que o método realmente não funcione, é necessário que haja determinados tipos de falha de comunicação dos IFs. Ainda assim, utiliza-se do processo de zoneamento, ou seja, divide-se o sistema de distribuição em zonas, onde cada zona é capaz de operar de forma independente. O algoritmo consegue diagnosticar o local exato de falta através da primeira operação entre o vetor $[I_{AIF}]$ e a linha da matriz $[M_{CF}]$, além do Método de Degraú de Correntes, responsável pela análise do perfil de corrente ao longo da trajetória de falta identificada através da primeira operação entre os vetores. O vetor de atuação é obtido a partir de sinais enviados remotamente pelos indicadores de falta distribuídos no sistema elétrico. Ao detectar a falta, o algoritmo envia um sinal ao dispositivo de proteção que deve isolar a zona de falta do resto da rede. Este algoritmo ainda aceita um processo de religamento, o qual restaura o sistema no momento de faltas temporárias.

O algoritmo descrito neste trabalho pode ser visto por dois cenários de tipos de faltas diferentes – faltas simples e múltiplas – além de dois cenários de envio de comunicação remota – sem falhas e com falhas na troca de sinais entre os IFs e o algoritmo. Considerando os dois primeiros aspectos de cada cenário, o esquema oferece a melhor solução para o problema de localização de faltas, pois a identificação é absoluta graças aos IFs e a operação entre os vetores. Ainda em um

contexto sem falhas, porém agora dentro do campo das faltas múltiplas, o Método de Degrau de Correntes mostra sua eficiência entre as diferentes faltas de trajetórias concorrentes e divergentes. Para as trajetórias concorrentes, é possível que haja faltas múltiplas que possuem o mesmo sinal de atuação para uma falta simples, tornando-se identificável graças ao MDC, pois o degrau negativo ao longo da trajetória representará uma segunda falta. Para as trajetórias divergentes, é possível que haja atuações falhas nos IFs, tornando-se identificável graças ao MDC, pois não haverá degrau negativo, ou seja, ponto de divisão de correntes ao longo das trajetórias de falta.

O algoritmo é dependente do valor de resistência de falta, sendo possível notar que as faltas no ramal principal são mais afetadas que as faltas no ramal lateral, pois os IFs alocados no ramal principal possuem um *pick-up* mais alto e, conseqüentemente, uma menor sensibilidade quando comparado aos IFs posicionados nos ramos laterais. Se o valor da R_F for muito alto, pode comprometer a atuação de alguns IFs e, conseqüentemente, afetar na formação do vetor de atuação $[I_{AIF}]$. A R_F também poderá influenciar no balanço de potência, diminuindo a contribuição de cada fonte geradora, tornando-se uma falta não identificável.

A partir do momento que se inserem as falhas de atuação dos IFs no contexto tanto das faltas simples quanto das faltas múltiplas, é preciso considerar que a quantidade de erros de comunicação não atinja um grande volume, pois isso se tornaria não identificável, além de não ser esperado no campo das redes inteligentes. Neste sentido, em um número limitado de falhas, a identificação pela MDC é precisa, dando a correta saída de sinais para isolamento da zona com falta.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Analisar e determinar os limites para cada sistema, verificando o tamanho das GDs que podem comprometer o funcionamento do MDC (não gere um degrau negativo no perfil de corrente).

Normalmente, o tempo total de eliminação de falta é resultado do somatório do: tempo de identificação dos sensores; tempo de transmissão dos sinais dos sensores até o COD; tempo de processamento do algoritmo de localização de falta; tempo de transmissão do COD até os dispositivos de proteção; tempo de atuação

dos dispositivos de proteção. O tempo de eliminação total desta metodologia é razoavelmente superior quando comparado à proteção convencional, pois a totalidade do procedimento de localização e eliminação não é somente efetuada *in loco*, ou seja, depende da resposta do algoritmo do COD. Tal prolongamento da falta causa maior insegurança, comprometimento da isolação dos dispositivos e equipamentos alocados na rede, entre outros fatores. Logo, há a necessidade de uma metodologia com o tempo total de eliminação de falta menor.

A resistência de falta é de natureza estocástica, ou seja, possui caráter indeterminado. Sendo assim, não é possível avaliar com precisão um valor de resistência de falta para as faltas. Nesse sentido, deve-se desenvolver uma metodologia com total independência da resistência de falta.

Custo é um fator de alta relevância para qualquer empresa. O alto investimento na aquisição de novas tecnologias compromete, de certa forma, a receita da concessionária. Os indicadores de falta com módulo direcional são, em regra, mais caros que os indicadores de falta comuns. Desta forma, soluções que possibilitem um maior reaproveitamento dos dispositivos já alocados na rede gera um menor custo de investimento para a atualização da metodologia de proteção.

REFERÊNCIAS

- 1 ANDERSON, P. M. **Power system protection**. New York: IEEE Press Series on Power Engineering, McGraw-Hill, 1999.
- 2 DUGAN, R. C.; MCDERMOTT, T. E. Distributed generation: operating conflicts for distributed generation interconnected with utility distribution systems. **IEEE Industry Applications Magazine**, New York, v. 8, n. 2, p. 19-25, março-abril, 2002.
- 3 BARKER, P. P.; MELLO, R. W. D. Determining the impact of distributed generation on power systems: Part 1 – Radial distribution systems. In: POWER ENGINEERING SOCIETY SUMMER MEETING, 2000, Seattle. **Meeting...** Seattle: IEEE, 2000. p. 1645-1656.
- 4 SALMAN, K. S.; RIDA, I. M. Investigating the impact of embedded generation on relay settings of utilities electrical feeders. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 16, n. 2, p. 246-251, abril 2001.
- 5 PLATFORM, E. S. T. **Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future**. Luxemburgo: European Communities, 2006. p. 44.
- 6 IPAKCHI, A.; ALBUYEH, F. Grid of the future. **IEEE Power & Energy Magazine**, New York, v. 7, n. 2, p. 52-62, março-abril 2009.
- 7 COLLIER, S. E. Ten steps to a smarter grid. **IEEE Industry Applications Magazine**, New York, v. 16, n. 2, p. 62-68, março-abril 2010.
- 8 AMIN, S. M.; WOLLENBERG, B. F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century. **IEEE Power & Energy Magazine**, New York, v. 3, n. 5, p. 34-41, setembro-outubro, 2005.
- 9 FALCÃO, D. M. Integração de tecnologias para viabilização da smart grid. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SISTEMAS ELÉTRICOS, 3., 2010, Belém. **Anais...** Belém: SBSE, 2010. p. 1-5.
- 10 BARAN, M.; EL-MARKABI, I. Adaptive over current protection for distribution feeders with distributed generators. In: POWER SYSTEMS CONFERENCE

- AND EXPOSITION, IEEE PES, 2004, New York. **Conference...** New York: IEEE, 2004. p. 715-719.
- 11 BRAHMA, S. M.; GIRGIS, A. A. Development of adaptive protection scheme for distribution systems with high penetration of distributed generation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 19, n. 1, p. 56-63, janeiro 2004.
 - 12 CHAITUSANEY, S.; YOKOYAMA, A. Microprocessor-based reclosing to coordinate fuse and recloser in a system with high penetration of distributed generation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 23, n. 4, p. 2545-2554, outubro 2008.
 - 13 JAVADIAN, S. A. M.; HAGHIFAM, M. R.; BARAZANDEH, P. An adaptive over-current protection scheme for MV distribution networks including DG. IEEE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON INDUSTRIAL ELECTRONICS- ISIE. 2008, Cambridge. **Conference...** Cambridge: IEEE, 2008. p. 2520-2525.
 - 14 AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA- ANEEL. **Procedimentos de distribuição de energia elétrica nacional**. [S.l.: s.n.], 2008 (Módulo do PRODIST, 8).
 - 15 MARQUES, F. A. S.; MORÁN, J. A.; ABREU, L.; DA SILVA, L. C. P.; FREITAS, W. Impactos da expansão da geração distribuída nos sistemas de distribuição de energia elétrica. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL E GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, 5., 2004, Campinas. **Proceedings...** Campinas: AGRENER GD, 2004.
 - 16 SCOTT, W. G.; WILLIS, H. L. **Distributed power generation planning and evaluation**. New York: Marcel Dekker, 2000.
 - 17 CORPORATION, R. D. **DG technologies**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: < <http://www.distributed-generation.com/dgtechnologies.html> >. Acesso em: 10 maio 2015.
 - 18 HADJSAID, N.; CANARD, J. F.; DUMAS, F. Dispersed generation impact on distribution networks. **IEEE Computer Applications in Power**, New York, v. 12, p. 22-28, abril 1999.

- 19 BRAHMA, S. M.; GIRGIS, A. A. Impact of distributed generation on fuse and relay coordination: analysis and remedies. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON POWER AND ENERGY SYSTEMS– IAESTED, 2001, Florida. **Proceedings...** Florida: IAESTED, 2001. p. 384-389.
- 20 GIRGIS, A. A.; BRAHMA, S. M. Effect of distributed generation on protective device coordination in distribution system. In: LARGE ENGINEERING SYSTEMS CONFERENCE ON POWER ENGINEERING– LESCOPE, 1., 2001, Halifax. **Conference...** Halifax: LESCOPE, 2001. p. 115-119.
- 21 BRAHMA, S. M.; GIRGIS, A. A. Microprocessor-based reclosing to coordinate fuse and recloser in a system with high penetration of distributed generation. In: POWER ENGINEERING SOCIETY WINTER, 2002, New York. **Meeting...** New York: IEEE, 2002. p. 453-458.
- 22 JAVADIAN, S. A. M.; HAGHIFAM, M. R.; REZAEI, N. A fault location and protection scheme for distribution systems in presence of DG using MLP neural networks. In: POWER & ENERGY SOCIETY GENERAL MEETING– PES, 9., 2009, Calgary. **Meeting...** Calgary: IEEE, 2009. p. 1-8.
- 23 LOTFIFARD, S. K., M.; MOUSAVI, M. J. Voltage sag data utilization for distribution fault location. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 26, n. 2, p. 1239-1246, abril 2011.
- 24 BRAHMA, S. M. Fault location in power distribution system with penetration of distributed generation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 26, n. 3, p. 1545-1553, julho 2011.
- 25 TRINDADE, F. C. L.; FREITAS, W.; VIEIRA, J. C. M. Fault location in distribution systems based on smart feeder meters. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 29, n. 1, p. 251-260, fevereiro 2014.
- 26 TENG, J. H.; HUANG, W. H.; LUAN, S. W. Automatic and fast faulted line-section location method for distribution systems based on fault indicators. **IEEE Transactions on Power Systems**, New York, v. 29, n. 4, p. 1653-1662, julho 2014.
- 27 CONG, W. W. H.; YU C.; XUN T. Study on fault section determination algorithm for distribution system with multi micro-grids. In: POWER AND

- ENERGY ENGINEERING CONFERENCE– APPEEC, 2010, Chengdu. **Conference...** Chengdu: APPEEC, 2010. p. 1-4.
- 28 TENG J.; LUAN S.; HUANG, W. L., D.; HUANG Y. A cost-effective fault management system for distribution systems with distributed generators. **Electric Power and Energy Systems**, Amsterdã, v. 65, p. 357-366, fevereiro 2015.
- 29 LEÃO, F. B. **Metodologia para análise e interpretação de alarmes em tempo real de sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2011. 345 f. Tese (Doutorado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista-UNESP, Ilha Solteira, 2011. Disponível em: <http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/bis/33004099080P0/2011/leao_fb_dr_ilha.pdf> Acesso em: 5 jan 2015.
- 30 CARDOSO, G.; ROLIM, J. G.; ZÜRN, H. H. Application of neural-network modules to electric power system fault section estimation. **IEEE Transactions on Power Delivery**, New York, v. 19, n. 3, p. 1034-1041, julho 2004.
- 31 NORTHCOTE-GREEN, J. W., R. **Control and automation of electrical power distribution systems**. Boca Raton: CRC Taylor & Francis, 2007.
- 32 SHORT, T. A. **Electric power distribution handbook**. Boca Raton: CRC, 2004.
- 33 BARBOSA, E. A. C.; TRINDADE, F. C. L.; MEIRA, P. C. M.; FREITAS, W.; MORELATO, A. Análise da influência da prática de eliminação de faltas nos principais índices de confiabilidade e qualidade de energia em modernos sistemas de distribuição. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AUTOMÁTICA–CBA, 18., 2010, Bonito. **Anais...** Bonito: CBA, 2010. p. 4170-4175.
- 34 IEEE. **Std 1547**: standard for interconnecting distributed resources with electric power systems. p. 16, 2003.
- 35 CAMPITELLI, E. M. **Análises e estudos para alocação e ajustes de dispositivos de proteção em redes de média tensão de energia elétrica com geração distribuída**. 2007. 99 f. Dissertação (Mestrado)- Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista- UNESP, Ilha Solteira, 2007.

- 36 KROPOSKI, B. L., R.; ISE, T.; MOROZUMI, S.; PAPATLIANASSIOUS, S.; HATZIARGYRIOUS, N. Making microgrids work. **IEEE Power & Energy Magazine**, New York, v. 6, n. 3, p. 40-53, maio-junho, 2008.
- 37 HUET, O.; GRECARD, S.; DEVAUX, O.; CARRÉ, O. Power Steering. **IEEE Power & Energy Magazine**, New York, v. 9, n. 5, p. 42-51, setembro-outubro 2011.
- 38 BACALINI, M.; SILVA, I. N. **Metodologia experimental para testes padronizados de confiabilidade em dispositivos indicadores de faltas**. 2011. Dissertação (Mestrado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo- USP, São Carlos, 2011.
- 39 SOUZA, D. M. B. S. S., SILVA, I. N. **Abordagem baseada em lógica fuzzy para alocação de indicadores de faltas em sistemas de distribuição de energia elétrica**. 2009. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 2009.
- 40 USIDA, W. F.; COURRY, D. V. **Sistema inteligente para alocação eficiente de dispositivos indicadores de falta em alimentadores de distribuição**. 2011. Tese (Doutorado)- Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo- USP, São Carlos, 2011.
- 41 ANGERER, F. OH and UG fault indication via radio networks. **IEEE/PES Transmission and Distribution and Exposition**, Atlanta, v. 2, p. 991-992, 2001.
- 42 KRAJNAK, D. J. Faulted circuit indicators and system reliability. In: RURAL ELECTRIC POWER CONFERENCE– REPC, 44., 2000, Louisville. **Conference...** Louisville: IEEE, 2000. p. A4/1-A4/4.
- 43 BJERKAN, E. Efficient fault management using remote fault indicators. In: INTERNATIONAL CONFERENCE AND EXHIBITION ON ELECTRICITY DISTRIBUTION – CIRED, 20., 2009, Prague. **Conference...** Prague: CIRED, 2009. p. 1-4.
- 44 NORTROLL. **User manual lineTroll R400D**. [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em: < <http://www.mr-bh.com/documents/nortroll/UG%20LineTroll%20R400D.pdf>>. Acesso em: 10 maio 2015.

- 45 ELECTRIC, S. **Flite 3xx**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: < <http://www.schneider-electric.com> >. Acesso em: 1 dez 2015.
- 46 GERMANY, H. **ComPass B**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: < <https://www.horstmannmbh.com> >. Acesso em: 1 dez 2015.
- 47 LABORATORIES, S. S. E. **Indicadores de falta**. [S.l.: s.n.], 2015. Disponível em: < <http://www.selinc.com.br/indifaltas.aspx> >. Acesso em: 10 maio 2015.
- 48 FALAGHI, H.; HAGHIFAM, M. R.; TABRIZI, M. R. O. Fault indicators effects on distribution reliability indices. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICITY DISTRIBUTION– CIRED, 18., 2005, Turin. **Conference...** Turin: CIRED, 2005. p. 1-4.
- 49 USER manual. Gomaringen. [S.l.: s.n., 200-] Disponível em: < <http://www.digsilent.de>>. Acesso em: 1 jan 2016.
- 50 GRAINGER J. J.; STEVENSON, W. D. **Power system analysis**. New York: McGraw-Hill International Editions, 1994.
- 51 KOSOW, I. L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 4. ed. Porto Alegre: Editora Globo, 1979.
- 52 NEXANS. **Catálogo nexans condutores nus: alumínio**. [S.l.: s.n.], 2013. Disponível em: <http://www.nexans.com.br/eservice/Brazil-pt_BR/fileLibrary/Download_540134436/Brazil/files/catalogo%20nus_maio%202013.pdf>. Acesso em: 12 dez 2015.