Universidade de São Paulo
Escola Politécnica

Daniel Texidor Dantas

**Algoritmos de proteção diferencial no
domínio do tempo baseados em energia
e potência reativa**

São Paulo
2019

Daniel Texidor Dantas

**Algoritmos de proteção diferencial no
domínio do tempo baseados em energia
e potência reativa**

Tese de doutorado apresentada à Escola Politécnica
para a obtenção do título de Doutor em Ciências.

Área de concentração: Sistemas de Potência

Orientador: Prof. Dr. Giovanni Manassero Junior

Coorientador: Prof. Dr. Eduardo Lorenzetti Pellini

São Paulo

2019

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

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 _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Dantas, Daniel Texidor

Algoritmos de proteção diferencial no domínio do tempo baseados em energia e potência reativa / D. T. Dantas -- versão corr. -- São Paulo, 2019. 103 p.

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

1. Proteção de sistemas elétricos 2. Sistemas elétricos de potência 3. Proteção diferencial 4. Domínio do tempo 5. Energia I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Energia e Automação Elétricas II. t.

Agradecimentos

Aos professores Giovanni Manassero Junior e Eduardo Lorenzetti Pellini pelo apoio, estímulo e voto de confiança para a execução deste trabalho.

Aos meus pais, irmão e esposa pelo suporte e carinho durante esta empreitada.

Aos meus amigos, que, além de estimular a volta à vida acadêmica, discutiram o comportamento do sistema elétrico e filosofia de proteção.

Aos colegas do Lprot, que acompanharam e contribuíram na busca de um aprimoramento acadêmico.

Ao CNPq pelo suporte financeiro que possibilitou esta pesquisa.

Resumo

Dantas, D. T. **Algoritmos de proteção diferencial no domínio do tempo baseados em energia e potência reativa.** 103 p. Tese de doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2019.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de uma metodologia para a detecção de faltas usando algoritmos diferenciais no domínio do tempo para a proteção de linhas de transmissão.

Os algoritmos propostos neste trabalho usam amostras de tensão e corrente para identificar faltas em componentes do sistema elétrico. Aqui estão descritos dois algoritmos diferenciais de proteção, um baseado em energia e outro em potência reativa.

Foram realizadas análises com componentes concentrados para compreender o comportamento do algoritmo em diversas situações e estes foram testados exaustivamente em simulações para buscar efeitos inesperados.

Os testes realizados demonstraram a aplicabilidade da solução para a proteção de linhas de transmissão. Estudos indicaram vantagens no uso desta metodologia para proteção.

Palavras-chave: Proteção diferencial, domínio do tempo, algoritmo diferencial de energia, algoritmo diferencial de potência reativa, proteção, sistemas elétricos, simulações, ATP, EMTP.

Abstract

Dantas, D. T. **Time-domain differential protection algorithms based on energy and reactive power**. 103 p. Ph.D. Thesis – Polytechnic School, University of São Paulo, 2019.

This thesis presents the development of a methodology for detecting faults using a time-domain differential algorithm for transmission line protection.

The algorithms proposed in this work use voltage and current samples to identify faults in electrical system components. Two differential protection algorithms are described here, one based on energy and the other on reactive power.

An analysis of the algorithm implementation using ideal components was made to support the understanding of the algorithms behaviour in several situations. The proposed methodology was also thoroughly tested in simulations to look for unexpected system effects.

The tests performed demonstrated the applicability of the solution for the protection of transmission lines. Studies indicate advantages in using this methodology for power systems protection.

Keywords: Differential protection, time-domain, energy differential algorithm, reactive power differential algorithm, protection, power systems, simulation, ATP, EMTP.

Lista de ilustrações

Figura 2.1 – Dispositivos em um vão de linha envolvidos na proteção.	6
Figura 2.2 – Diferentes representações para sinais senoidais trifásicos.	7
Figura 2.3 – Funções de proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada.	9
Figura 2.4 – Definições de zonas de atuação para a proteção de distância ANSI 21.	10
Figura 2.5 – Sistema de proteção diferencial de linha.	13
Figura 2.6 – Plano diferencial percentual.	14
Figura 3.1 – Representação gráfica das potências médias.	20
Figura 3.2 – Bipolo genérico.	20
Figura 3.3 – Quadripolo genérico.	21
Figura 3.4 – Fluxograma do algoritmo diferencial de energia para obtenção do sinal de <i>pickup</i>	24
Figura 3.5 – Quadripolo trifásico visto como uma única zona de proteção.	25
Figura 3.6 – Quadripolo trifásico dividido em três zonas de proteção independentes.	25
Figura 3.7 – Representação gráfica das potências estimadas pelo produto da corrente pela tensão de referência defasada de 90°	28
Figura 3.8 – Topologia simplificada da rede.	31
Figura 3.9 – Topologia simplificada da rede para o estudo de faltas internas.	32
Figura 3.10 – Topologia simplificada da rede para o estudo de faltas externas.	32
Figura 3.11 – Comparações entre faltas internas e externas.	34
Figura 3.12 – Representação gráfica das energias medidas.	34
Figura 3.13 – Grandeza de operação do algoritmo diferencial 87E perante diferentes resistências de falta.	35
Figura 3.14 – Limitações do algoritmo diferencial de potência reativa.	36
Figura 4.1 – Topologia para implementação da proteção.	39
Figura 4.2 – Fluxograma de operação do algoritmo ANSI 87E.	40
Figura 4.3 – Fluxograma de operação do algoritmo ANSI 87Q.	41
Figura 4.4 – Lógica de operação por fases da proteção 87E.	43
Figura 4.5 – Lógica de operação por fases da proteção 87Q.	44

Figura 5.1 – Topologia do sistema de testes.	47
Figura 5.2 – Característica 87E durante falta interna.	50
Figura 5.3 – Característica 87Q durante falta interna.	50
Figura 5.4 – Função de energia no domínio do tempo durante falta de alta impedância.	51
Figura 5.5 – Característica 87E durante falta de alta impedância.	52
Figura 5.6 – Característica 87E durante falta bifásica.	53
Figura 5.7 – Característica 87Q durante falta bifásica.	53
Figura 5.8 – Característica 87Q durante falta externa.	54
Figura 5.9 – Característica 87E durante falta externa.	55
Figura 5.10 – Característica 87Q durante falta externa.	55
Figura 5.11 – Característica 87E durante falta externa com amostras dessincronizadas.	56
Figura 5.12 – Característica 87Q durante falta externa com amostras dessincronizadas.	56
Figura 5.13 – Fluxograma do processo de simulação e análise em lote.	58
Figura 5.14 – Distribuição dos tempos de <i>trip</i>	59
Figura 5.15 – Função sensibilizada pela falta.	60
Figura 5.16 – Distribuição dos tempos de <i>trip</i> durante a análise de sensibilidade.	61
Figura 5.17 – Corrente vista por um TC saturado durante falta interna.	62
Figura 5.18 – Função de potência reativa executada com TC saturado durante falta interna.	63
Figura 5.19 – Característica 87Q durante falta franca em sistema com TC saturado.	63
Figura 5.20 – Corrente vista por um TC saturado durante falta externa.	64
Figura 5.21 – Função de potência reativa executada com TC saturado durante falta externa.	64
Figura 5.22 – Característica 87Q durante falta franca externa em sistema com TC saturado.	65
Figura 5.23 – Efeito do TPC durante uma falta franca.	66
Figura 5.24 – Função de energia durante falta franca em sistema com TPC.	66
Figura 5.25 – Característica 87E durante falta franca em sistema com TPC.	67
Figura 5.26 – Função de potência reativa durante falta franca em sistema com TPC.	67
Figura 5.27 – Característica 87E durante falta franca em sistema com TPC.	68
Figura 5.28 – Topologia do sistema de testes com múltiplas barras.	69
Figura 5.29 – Acoplamentos entre linhas para o cenário com múltiplas barras.	70
Figura 5.30 – Distribuição dos tempos de <i>trip</i>	71
Figura A.1 – Decomposição das potências.	82
Figura A.2 – Decomposição das potências com a tensão de referência defasada de 90°.	83

Lista de tabelas

Tabela 5.1 – Sistemas de transmissão testados.	48
Tabela 5.2 – Características dos cabos das linhas de transmissão.	48
Tabela 5.3 – Características dos cabos guarda e resistividade do solo.	48
Tabela 5.4 – Faltas aplicadas a cada nível de tensão.	57
Tabela 5.5 – Incertezas consideradas na medição para um sistema físico.	60
Tabela 5.6 – Faltas aplicadas no cenário com múltiplas barras.	70

Lista de siglas

ANSI 21 proteção de distância

ANSI 50 proteção de sobrecorrente

ANSI 51 proteção de sobrecorrente temporizada

ANSI 67 proteção de sobrecorrente direcional

ANSI 87E proteção diferencial de energia

ANSI 87Q proteção diferencial de potência reativa

ANSI 87 proteção diferencial de corrente

ANSI 87L proteção diferencial de linhas de transmissão

ATP/EMTP *Alternative Transient Program/Electromagnetic transient program*

ADC *analog digital converter*

DFT *discrete Fourier transform*

IED *intelligent electronic device*

LT linha de transmissão

ONS Operador Nacional do Sistema

PLL *phase-locked loop*

PCC potência de curto-circuito

PWM *pulse-width modulation*

RMS *root mean square*

SIN Sistema Interligado Nacional

SIR *source impedance ratio*

SI Sistema Internacional de Unidades

TC transformador de corrente

TP transformador de potencial

TPC transformador de potencial capacitivo

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Da escolha do tema	1
1.2	Motivação	2
1.3	Objetivos	3
1.4	Descrição da obra	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Proteção de sistemas elétricos	5
2.1.1	Transformadores para instrumentos	6
2.1.2	Relés de proteção	6
2.1.3	Disjuntores	8
2.2	Proteções aplicadas a linhas de transmissão	8
2.2.1	Princípios de coordenação e seletividade	8
2.2.2	Procedimentos de rede	9
2.2.3	Proteção de sobrecorrente (ANSI 50 e ANSI 51)	9
2.2.4	Proteção de distância (ANSI 21)	10
2.2.5	Proteção de sobrecorrente direcional (ANSI 67)	11
2.2.6	Teleproteção	11
2.2.7	Proteção diferencial de linhas de transmissão (ANSI 87L)	11
2.3	Considerações para a aplicação da 87L	12
2.3.1	Sincronização das amostras	12
2.3.2	Proteção diferencial	12
2.3.3	Diferencial percentual	13
2.3.4	Corrente capacitiva	14
2.4	Estado da arte	14
2.4.1	Distinção de <i>inrush</i> e faltas internas	15
2.4.2	Algoritmos no plano $\Delta P - P$	15
2.4.3	Modelo adaptativo	16

2.4.4	Proteções baseadas em ondas viajantes	17
3	METODOLOGIA PROPOSTA	19
3.1	Algoritmo diferencial de energia	19
3.1.1	Diferenças entre a energia medida nos terminais	20
3.1.2	Comportamento da energia em meio ciclo	21
3.1.3	Método de detecção de faltas baseada em energia	22
3.1.4	Modelo discreto para implementação digital	23
3.1.5	Generalização trifásica	25
3.1.6	Faltas severas e afundamento de tensão	26
3.2	Algoritmo diferencial de potência reativa	26
3.2.1	Causas dos desequilíbrios de potência reativa	29
3.2.2	Método de detecção de faltas baseada em potência reativa	30
3.2.3	Modelo discreto para implementação digital	30
3.2.4	Generalização trifásica	31
3.3	Comportamentos dos algoritmos	31
3.3.1	Exemplo de comportamento	33
3.3.2	Relações entre impedâncias e o ANSI 87E	33
3.3.3	Condições necessárias para o ajuste do ANSI 87Q	36
4	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA	39
4.1	Considerações para aplicação e implementação	42
4.1.1	Considerações de ajuste	44
5	SIMULAÇÕES E RESULTADOS	47
5.1	Cenários de simulação com duas barras	47
5.1.1	Casos de interesse	49
5.1.2	Casos gerados	57
5.1.3	Resultados	58
5.2	Cenário de simulação com múltiplas barras	68
5.2.1	Sistema analisado	68
5.2.2	Casos gerados	69
5.2.3	Resultados	70
6	CONCLUSÕES	73
6.1	Publicações decorrentes do doutorado	74
	REFERÊNCIAS	75

APÊNDICES

79

APÊNDICE A	–	DECOMPOSIÇÃO DA POTÊNCIA	81
A.1		Potência ativa ou energia	81
A.2		Potência reativa	82

Introdução

Esta obra descreve o desenvolvimento de algoritmos de proteção diferencial baseados em energia e potência reativa no domínio do tempo, visando apresentar alternativas de solução de proteções de sistemas elétricos confiáveis e seguras.

Este texto expõe também diversas habilidades, competências e conhecimentos que foram trabalhados durante o doutorado.

1.1 Da escolha do tema

Antes de voltar à universidade, passei anos trabalhando como engenheiro de proteção e controle para diferentes empresas. Meu retorno para a academia foi buscando trabalho mais teórico e de desenvolvimento.

Ainda trabalhando, cursei disciplinas focadas na proteção de sistemas elétricos na Universidade de Brasília (UnB), onde havia me graduado engenheiro eletricitista. Com o Professor Dr. Felipe Vigolvinho Lopes, desta instituição, iniciei pesquisas sobre proteção no domínio do tempo, que não avançaram devido a outros compromissos pessoais meus.

Ao final de 2015, interessado em seguir uma carreira acadêmica, busquei entre diversas instituições um lugar para continuar meus estudos em período integral. Dentre as universidades que me aceitaram, escolhi a Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Iniciei meu mestrado sob orientação do Professor Dr. Eduardo Lorenzetti Pellini, que estava interessado no tema que escolhi.

Meus esforços iniciais de pesquisa foram direcionados a simular transitórios eletromagnéticos usando processadores vetoriais (placas de vídeo). Na época era possível encontrar alguns trabalhos nessa área. A motivação inicial era usar essa solução para a execução de simulações em tempo real. No entanto, esse objetivo parecia inalcançável devido a como esses processadores operam.

Buscando tirar proveito da diversidade de disciplinas oferecidas pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, cursei matérias das mais diversas que despertavam meu interesse. Durante a disciplina de conversores estáticos do tipo *pulse-width modula-*

tion (PWM) ministrada pelo Professor Dr. Lourenço Matakas Junior, aprendi conceitos de potência instantânea e como estes poderiam ser utilizados para o controle de diversos dispositivos. Nesse momento surgiu a ideia de empregar esses conceitos para a execução de algoritmos de proteção no domínio do tempo.

Usando minha experiência adquirida como engenheiro e conhecimentos absorvidos no meio acadêmico, criei um protótipo para esse conceito. Os resultados iniciais foram positivos e a recepção do meu orientador foi excelente. Isso possibilitou a mudança do tema da dissertação de mestrado.

Nesta nova linha de pesquisa, o professor Manassero passou a contribuir com o desenvolvimento do trabalho, complementando a orientação que eu recebia do professor Pellini.

Os meses subsequentes foram extremamente produtivos; as dificuldades encontradas para os algoritmos foram vencidas, fazendo com que a solução rapidamente amadurecesse. No ato da qualificação, já haviam sido submetidos artigos para publicação em revista e congresso, ambos aceitos posteriormente.

Após a qualificação, me foi oferecida a opção para mudar de curso, convertendo o trabalho em um doutorado direto, a qual eu aceitei. Após continuar trabalhando nas submissões mencionadas anteriormente, essas foram aceitas e outros trabalhos, iniciados. Aqui estão concentrados os desenvolvimentos realizados na implementação desses algoritmos em linhas de transmissão.

1.2 Motivação

O aumento da utilização de conversores e inversores eletrônicos, assim como o funcionamento do sistema próximo à sua capacidade, faz com que seja necessário reduzir os tempos de isolamento das faltas para preservar a estabilidade do sistema. A evolução das normas do setor elétrico é um exemplo deste fenômeno que pode ser observado no “Procedimentos de Rede, Submódulo 2.6” do Operador Nacional do Sistema (ONS). A última versão deste documento (ONS, 2016) reduziu todos os tempos de isolamento que na versão anterior (ONS, 2011) poderiam ser de 150 *ms* para 100 *ms*. A redução dos tempos permitidos para o isolamento da falta ocorreu para equipamentos de tensão inferior a 345 *kV*.

Dentro desse intervalo de tempo devem ocorrer: a identificação da falta pelo relé de proteção; o comando para o isolamento da falta, *trip*; seguido da abertura do disjuntor e da extinção do arco elétrico. Como pode ser visto na literatura, o tempo de identificação das faltas pode ser reduzido com o uso de novos algoritmos de proteção, motivando a pesquisa de diferentes métodos para atingir esse resultado.

A proteção diferencial baseada em potência vem sendo validada como um método eficaz para a identificação de faltas e continua até hoje sendo um tema ativo de pesquisa (ALMEIDA; SILVA, 2017; NAMDARI; JAMALI; CROSSLEY, 2008; AZIZ et al.,

2008). Uma abordagem no domínio do tempo pode apresentar vantagens, como reduções no tempo máximo para o isolamento das faltas.

O conceito de potência instantânea vem sendo usado em diversas áreas da engenharia elétrica (AKAGI; WATANABE; AREDES, 2007). A análise dessa grandeza provê informações sobre mudanças no comportamento da rede em um curto intervalo de tempo. Em eletrônica de potência, o uso de potência instantânea como entrada de controle para filtros ativos e conversores é uma metodologia consolidada. Logo, o uso de uma abordagem similar pode trazer uma alternativa rápida e confiável às filosofias de proteção atuais baseadas em conceitos já utilizados na engenharia.

1.3 Objetivos

Esta tese tem como objetivo desenvolver uma solução de proteção baseada em algoritmos no domínio do tempo aplicada a linhas de transmissão.

Durante a pesquisa, buscou-se desenvolver uma solução de proteção que atendesse aos seguintes critérios:

- a) identificar faltas de forma segura e confiável no menor tempo possível;
- b) apresentar segurança e confiabilidade perante incertezas típicas do sistema elétrico:
 - imprecisão típica dos transformadores para instrumentos;
 - imprecisões dos *analog digital converter* (ADC) e erros inseridos no condicionamento de sinais analógicos trazendo erros aos sistemas de medição.

1.4 Descrição da obra

Os capítulos subsequentes descrevem o sistema de proteção desenvolvido, que opera no domínio do tempo, analisando grandezas de natureza energética para alcançar os objetivos descritos.

No capítulo 2 a literatura é explorada, revisando práticas atuais e o estado da arte de algoritmos de proteção.

No capítulo 3 está descrita a metodologia desenvolvida para a identificação de faltas usando dois algoritmos de proteção que operam no domínio do tempo baseados em energia e potência reativa.

No capítulo 4 é detalhada a implementação dos algoritmos para a proteção de linhas de transmissão.

No capítulo 5 estão descritos os casos de simulação utilizados para a validação da proteção para linhas de transmissão e os resultados alcançados.

No capítulo 6 estão descritas as conclusões decorrentes dos esforços para a criação desta obra.

Os principais conceitos deste trabalho foram publicado em Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018c). Outras publicações realizadas durante os estudos foram Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018a) e Dantas et al. (2018). Aqui se encontra uma descrição completa da metodologia desenvolvida.

Com exceção dos programas usados para simulações, todos os *softwares* utilizados para o desenvolvimento deste trabalho são livres e *open source*. Dentre estes, destacam-se o GNU Octave (EATON et al., 2017), uma linguagem de programação de alto nível usada para o desenvolvimento dos algoritmos; e o GNU Parallel (TANGE, 2011), uma ferramenta para a execução de programas em paralelo, que foi usada para acelerar as simulações. Esta obra foi escrita em $\text{\LaTeX}$, usando seus diversos pacotes, e todas as figuras contidas aqui foram produzidas pelo autor. Foram usados os pacotes Tikz (responsável por desenhos e conexões), PGFPlots (responsável por gerar os gráficos das simulação usando arquivos “csv” como entrada ou curvas programadas) e o Circuitikz (responsável por desenhar os diagramas elétricos e lógicos) para gerar as figuras automaticamente durante a compilação do texto pelo PDFLatex. O programa Inkscape foi utilizado para gerar as Figuras 3.2, 3.3, 3.5 e 3.6.

Revisão bibliográfica

Diversas técnicas tradicionais e da literatura recente foram estudadas em busca de algoritmos de proteção similares aos inicialmente idealizados. Esta obra relata o desenvolvimento e utilização de algoritmos de proteção aplicados a linhas de transmissão. A pesquisa foi primariamente focada em técnicas existentes usadas na identificação de faltas nesses equipamentos. Este capítulo descreve brevemente soluções comumente aplicadas e avanços no estado da arte.

2.1 Proteção de sistemas elétricos

A proteção de sistemas elétricos tem como intuito minimizar o tempo de operação do sistema em uma condição anormal ou intolerável, normalmente denominada falta. A proteção deve atuar de forma a limitar as consequências desses eventos para a rede elétrica e seus equipamentos, consequentemente reduzindo o tempo de indisponibilidade do sistema (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

Segundo Blackburn e Domin (2014), para maximizar a disponibilidade da rede elétrica, existem cinco critérios que devem guiar a aplicação de sistemas de proteção:

- a) confiabilidade: a proteção deve assegurar que condições intoleráveis serão detectadas, limitando suas consequências;
- b) seletividade: a proteção deve minimizar a parte da rede elétrica a ser desligada, aumentando a segurança do sistema e maximizando a disponibilidade da rede elétrica;
- c) Tempo de atuação: faltas devem ser detectadas e eliminadas o mais rápido possível para reduzir suas consequências;
- d) Simplicidade: deve buscar-se soluções menos complexas e com menos pontos de falha;
- e) Economia: soluções de proteção devem buscar maximizar os conceitos acima, almejando o menor custo possível.

Sistemas de proteção implementados em níveis elevados de tensão são o resultado da integração de diversos componentes, dos quais os relés de proteção são apenas um desses, como pode ser visto na Figura 2.1. Transformadores para instrumentos e disjuntores são partes essenciais desse sistema.

Figura 2.1 – Dispositivos em um vão de linha envolvidos na proteção.

- a* Fonte de tensão equivalente ao sistema
- b* Impedância de Thévenin equivalente ao sistema
- c* Transformador de potencial
- d* Barramento do sistema
- e* Transformador de corrente
- f* Disjuntor
- g* Linha de transmissão

2.1.1 Transformadores para instrumentos

Para a detecção de faltas, é essencial observar as condições do sistema. Para tal, são empregados transformadores para instrumentos, como transformadores de corrente (TCs) e transformadores de potencial (TPs), para compatibilizar as grandezas da rede com os relés de proteção em sistemas de geração, transmissão ou distribuição.

2.1.2 Relés de proteção

Dispositivos com a utilidade de detectar faltas e comandar o isolamento das mesmas são denominados de relés de proteção. Quando aplicados a sistemas de geração, transmissão ou distribuição, esses dispositivos usam as grandezas provenientes de transformadores para instrumentos a fim de detectar se o sistema protegido está operando fora das condições normais.

Primordialmente, interações eletromagnéticas eram usadas para detectar se grandezas encontravam-se dentro de limiares definidos como condições de operação normal. Diversos dispositivos eletromecânicos discretos eram comumente empregados para a proteção de apenas um componente do sistema (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

Com a evolução da eletrônica analógica, novos sistemas de proteção começaram a emular os mesmos princípios eletromecânicos com circuitos eletrônicos, mantendo as mesmas filosofias e funcionalidades. Posteriormente, implementações digitais dos mesmos fenômenos surgiram usando microprocessadores (ROCKEFELLER, 1969). Hoje esses

dispositivos acumulam diversas funções e são capazes de efetuar a proteção de sistemas de forma confiável e seletiva, reduzindo custos finais de implementação e manutenção. Relés multifuncionais são denominados *intelligent electronic device* (IED).

2.1.2.1 Algoritmos digitais para cálculo de grandezas

Para emular os princípios eletromecânicos, foram desenvolvidos diferentes métodos. Valores de corrente ou tensão amostrados são processados usando técnicas para se extrair informações de interesse destes sinais; normalmente essa análise é feita utilizando fasores. Esses são números complexos que representam um sinal oscilatório em uma frequência, possuem uma parte referente à amplitude, podendo ser o valor de pico ou valor eficaz, – também conhecido como *root mean square* (RMS) – e um ângulo de referência (FOX; BOLTON, 2002). Essas grandezas no domínio da frequência são calculadas usando diferentes técnicas de filtragem, tipicamente considerando o ciclo de valores amostrados anterior a cada cálculo (PHADKE; THORP, 2009). As curvas no tempo representadas na Figura 2.2a dizem respeito aos mesmos sinais que os fasores representados na Figura 2.2b.

Figura 2.2 – Diferentes representações para sinais senoidais trifásicos.

Ao decorrer do texto, a expressão “domínio do tempo” é usada para descrever algoritmos que realizam operações com os valores amostrados, ou seja, não se baseiam em grandezas calculadas no domínio da frequência.

O uso de fasores com uma janela de um ciclo é amplamente usado em proteção. A utilização desta janela deve-se ao equilíbrio entre segurança e tempo de atuação proporcionado por ela. Esse tempo faz com que a translação para o domínio da frequência seja consideravelmente menos impactada por componentes exponenciais amortecidas que janelas menores (PHADKE; THORP, 2009). Por definição, fasores restringem a informação usada para a identificação de fenômenos à frequência na qual eles são calculados.

É importante ressaltar que valores RMS são de natureza energética, uma vez que essa grandeza é a média quadrática de um sinal por definição. Sendo assim, o uso de grandezas energéticas para a proteção se assemelha a técnicas consagradas.

2.1.3 Disjuntores

Disjuntores são os dispositivos capazes de conectar ou desconectar partes energizadas do sistema elétrico.

Para isolar faltas, esses equipamentos criam uma separação física entre o curto-circuito e o resto do sistema, essa separação mecânica introduz um arco elétrico. Para que a corrente seja interrompida, a separação é realizada em um meio isolante (óleo, SF₆, vácuo ou ar). Dessa forma, o circuito é interrompido no momento em que a corrente é zero ou próxima de zero. Momentos após a extinção do arco elétrico surge a tensão de restabelecimento transitória; caso esta seja maior que a capacidade dielétrica do meio, o arco elétrico é reestabelecido. É comum que disjuntores não consigam interromper a corrente na primeira passagem pelo zero, aumentando o tempo necessário para o isolamento do circuito (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

Os relés de proteção identificam defeitos na rede e comandam a abertura dos disjuntores com o intuito de isolar partes do sistema em falta (BLACKBURN; DOMIN, 2014). Ao decorrer desse texto, será usado o jargão *trip* para o comando de abertura de um disjuntor pelo relé ou algoritmo de proteção.

Os disjuntores são omitidos das representações dos sistemas protegidos, pois o foco do trabalho é na metodologia usada para a identificação das faltas.

2.2 Proteções aplicadas a linhas de transmissão

Linhas de transmissão conectadas a redes podem ser protegidas usando diferentes estratégias. A escolha da abordagem depende da rede à qual ela está conectada, importância do circuito para o sistema, nível de tensão, o valor do *source impedance ratio* (SIR), dentre outros fatores.

2.2.1 Princípios de coordenação e seletividade

Sistemas demandam a coordenação da atuação da proteção com o objetivo de maximizar a seletividade (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

Para a determinação de quais proteções devem ser aplicadas a linhas de transmissão (LTs), é necessário avaliar as condições de curto-circuito em diversos pontos da rede. Essas informações são usadas para definir quais serão as proteções usadas e seus ajustes, de forma que a atuação da proteção isole apenas o circuito defeituoso (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

2.2.2 Procedimentos de rede

No Brasil o ONS define as diretrizes a serem seguidas pelas concessionárias ligadas à rede básica por meio do conjunto de documentos denominados “Procedimentos de Rede”. Os principais requisitos sobre o presente tema são tratados no “Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção” (ONS, 2016). As possíveis funções de proteção descritas no documento para linhas de transmissão conectadas à rede básica são:

- a) ANSI 21/21N - Relé de distância;
- b) ANSI 67N/67Q - Relé direcional de sobrecorrente;
- c) ANSI 87L - Relé de proteção diferencial de linha.

A proteção diferencial de linhas de transmissão (ANSI 87L) não é descrita como necessária, mas sua utilização está prevista no documento do ONS (2016). Outras funções de controle, proteção em condições específicas ou coordenação exigidas pelo documento foram omitidas por fugirem ao escopo deste trabalho.

2.2.3 Proteção de sobrecorrente (ANSI 50 e ANSI 51)

Fora da rede básica em sistemas radiais, medições de corrente podem ser suficientes para isolar corretamente faltas. Nesse caso, são avaliadas as correntes de curto-circuito em diversos pontos da rede. Essas informações são usadas para ajustar as funções de proteção de sobrecorrente (ANSI 50) e de proteção de sobrecorrente temporizada (ANSI 51) que atuam sobre cada disjuntor. Um exemplo de aplicação dessa implementação pode ser visto na Figura 2.3 com ajustes genéricos.

Figura 2.3 – Funções de proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada.

No caso de LTs em redes malhadas, são necessárias soluções de proteção mais complexas para obter sistemas seletivos, ou seja, que não atuem caso não exista falta no

componente protegido. Podem ser usadas soluções como proteção de distância (ANSI 21) ou proteção de sobrecorrente direcional (ANSI 67) para aumentar a seletividade dos sistemas de proteção aplicados a essas redes (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

2.2.4 Proteção de distância (ANSI 21)

A ANSI 21 usa medições de tensão e corrente na frequência da rede para estimar a impedância do sistema conectado a esse ponto da rede. Essa proteção é sensibilizada caso a impedância vista seja compatível com uma falta interna (BLACKBURN; DOMIN, 2014). As denominações ANSI 21 e ANSI 21N diferem no fato da primeira usar as grandezas de linha e a segunda, de fase para a identificação de faltas (IEEE, 2008).

Diferentes estratégias podem ser usadas para realizar a proteção de distância. Mesmo para sistemas em malha, é possível ajustar a função ANSI 21 e suas variações para detectar faltas em toda a linha. No entanto, é necessário coordenar essas funções para evitar falhas de segurança. Faltas identificadas em até 85% da linha devem provocar a abertura instantânea do disjuntor associado a esse relé. Para identificar faltas próximas ao terminal remoto (com possibilidade de sobrealcancá-lo), é feito outro ajuste sobrealcancando a linha, comumente chamado de segunda zona. Para evitar atuações provocadas por eventos externos, esse ajuste é temporizado, de forma que faltas externas sejam isoladas pela proteção primária do equipamento em falta (KINDERMANN, 2005). Exemplos de representações dessas zonas de proteção podem ser vistas na Figura 2.4.

Figura 2.4 – Definições de zonas de atuação para a proteção de distância ANSI 21.

2.2.5 Proteção de sobrecorrente direcional (ANSI 67)

A ANSI 67 usa medições de tensão além das medições de corrente da ANSI 50. Assim, é possível analisar também a direção da corrente. O sistema é ativado quando a corrente é compatível com valores esperados para faltas internas e o ângulo entre a tensão e a corrente é compatível com faltas diretas (HOROWITZ; PHADKE, 2014). A proteção pode usar atuações instantâneas e temporizadas, de forma similar à proteção de distância.

A variante de neutro, ANSI 67N, usa a tensão e corrente de sequência zero para identificar faltas desequilibradas para a terra (KINDERMANN, 2005). De forma análoga, a proteção ANSI 67Q avalia a direcionalidade da corrente de sequência negativa para realizar a identificação de faltas.

2.2.6 Teleproteção

Um canal de comunicação entre os terminais (teleproteção) pode ser usado para que a detecção seja segura sem a necessidade de atrasos intencionais de atuação citados nas seções anteriores (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

Antes da definição de qual esquema de teleproteção deve ser usado, deve-se optar por um sistema permissivo ou de bloqueio. Um critério simples tipicamente empregado considera o meio de comunicação usado. Caso a própria LT protegida seja usada, é preferível utilizar esquemas de bloqueio, pois uma falta interna poderia atenuar ou impossibilitar a comunicação. Caso outros meios de sejam usados, é possível usar esquemas permissivos (HOROWITZ; PHADKE, 2014).

São usadas diferentes estratégias para aplicar sistemas de teleproteção de forma a acelerar a detecção de faltas baseadas nas funções ANSI 21 e ANSI 67. Pode ser usada a transferência direta de disparo: quando a proteção local identifica uma falta no componente protegido e transmite o comando de abertura. Outra opção é a transferência de sinais permissivos: quando a proteção identifica uma possível falta interna ela disponibiliza essa informação para o terminal remoto, possibilitando que esse desconsidere temporização e atue de forma instantânea.

Desta forma o sistema é capaz de detectar faltas internas de forma segura em toda a extensão da LT, sem a necessidade de atrasos intencionais (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

No Brasil, o documento ONS (2016) exige que as funções ANSI 21 e ANSI 67 sejam equipadas com sistemas de teleproteção para coordenar suas atuações, de modo a reduzir o tempo de atuação e manter a segurança.

2.2.7 Proteção diferencial de linhas de transmissão (ANSI 87L)

Apesar de exemplos de aplicações anteriores (SCHOSSIG, 2008), avanços técnicos na área de telecomunicações digitais possibilitaram a transmissão de grandezas medidas em

ambos os terminais a custos cada vez menores. Esse novo paradigma tecnológico possibilitou a proliferação no uso de ANSI 87L para LTs de diversos tamanhos (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

A ANSI 87L calcula a diferença entre as correntes nos terminais de uma LT. Idealmente, essa diferença deve ser zero ou igual às cargas na zona protegida (HOROWITZ; PHADKE, 2014). Essa proteção é reconhecida como mais confiável e seletiva; no entanto, sua utilização no passado era restrita por dificuldades técnicas para a transmissão das informações entre os terminais da LT (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

2.3 Considerações para a aplicação da 87L

Atualmente, novos sistemas de proteção são baseados em processadores digitais, incluindo dispositivos que executam a ANSI 87L. A análise da implementação de algoritmos de proteção diferencial convencional exposta nesta seção se restringirá a relés microprocessados, comumente denominados de relés numéricos ou IEDs.

Esses dispositivos amostram as grandezas de TPs e TCs para executar algoritmos de proteção em seus processadores. Produtos no mercado realizam proteções fasoriais com taxas de amostragem de 48 ou 20 amostras por ciclo de 60 Hz o que corresponde a aproximadamente 2,8 kHz a 1,2 kHz (SCHNEIDER ELECTRIC, 2017; SIEMENS, 2018).

2.3.1 Sincronização das amostras

Diversas proteções necessitam que todas as grandezas envolvidas em seu cálculo sejam amostradas no mesmo instante de tempo para serem seguras e confiáveis (PHADKE; THORP, 2009). Esse sincronismo evita erros angulares de medição dos fasores.

A ANSI 87L depende de medidas provenientes de dois ou mais dispositivos digitais instalados em extremidades de uma LT. Esses equipamentos devem ter seus relógios internos sincronizados (usando sincronismo externo por GPS e/ou algoritmos de ping-pong) para evitar erros de sincronização de amostras (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

2.3.2 Proteção diferencial

A proteção diferencial tradicional se baseia na lei de Kirchhoff dos nós: a soma das correntes em um nó elétrico é nula. O algoritmo compara as correntes que atravessam os terminais da linha buscando discrepâncias, as quais podem indicar a presença de faltas internas (HOROWITZ; PHADKE, 2014). Dessa forma, a zona protegida pela ANSI 87L é muito bem definida, delimitada pelos TCs. O sistema usado para este tipo de proteção pode ser visto na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Sistema de proteção diferencial de linha.

Conteúdo adaptado de Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018c) ©2018 IEEE.

2.3.3 Diferencial percentual

Como TCs não são perfeitos, são esperados pequenos desvios nas medidas de corrente proporcionadas por esses. Para obter-se um sistema seguro usando esses instrumentos, implementa-se uma proteção percentual, isto é: cria-se uma corrente de referência, sob a qual a corrente diferencial deve atingir um percentual mínimo para a caracterização de uma falta interna (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

Consequentemente, além da corrente diferencial, ou corrente de operação, que está expressa na equação 2.1, é calculada uma grandeza de restrição, descrita na equação 2.2 para a execução deste método.

$$I_{op} = \sum_{x=1}^{N_{Ex}} I_x \quad (2.1)$$

$$I_{rest} = \sum_{x=1}^{N_{Ex}} |I_x| \quad (2.2)$$

Onde a corrente é contabilizada em cada ponto de troca x , para todas as fronteiras do componente N_{Ex} . Para o sistema representado na Figura 2.5, $N_{Ex} = 2$.

Outras formas para o cálculo das grandezas I_{op} e I_{rest} podem ser usadas; a escolha dessas interfere no ajuste da proteção (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

Quando ocorre uma falta interna, a corrente de operação deve superar um percentual da corrente de restrição, sensibilizando o algoritmo. Essa comparação dá o nome à função e está descrita na inequação 2.3.

$$I_{op} > slp \ I_{rest} \quad (2.3)$$

Devido ao fluxo remanescente em TCs, correntes capacitivas e possíveis erros de fundo de escala em ADCs, faz-se necessária a complementação da função usando um patamar diferencial mínimo para a atuação da proteção. Esse está expresso na inequação 2.4.

$$I_{op} > I_{min} \quad (2.4)$$

Figura 2.6 – Plano diferencial percentual.

Na Figura 2.6 está representado o plano de operação da função ANSI 87L. A comparação percentual esta representada na inclinação, ou *slope* (*slp*), da região de operação e o I_{min} determina o patamar mínimo da mesma.

2.3.4 Corrente capacitiva

Desconsiderar a corrente capacitiva da LT pode comprometer a aplicação da ANSI 87L, em especial para LTs longas ou operando em elevados níveis de tensão. Essa corrente não é medida pelos instrumentos usados para a proteção da linha e, conseqüentemente, precisa ser estimada indiretamente. Caso ela não seja contabilizada, atuações indevidas podem ocorrer (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

Uma das técnicas para viabilizar a proteção diferencial para linhas longas ou de elevados níveis de tensão se baseia em usar as capacitâncias obtidas a partir da geometria da LT. A corrente capacitiva é estimada com base na taxa variação das tensões nos terminais da LT, usando equação de corrente em um capacitor expressa por 2.5.

$$I_c(t) = C \frac{dV(t)}{dt} \quad (2.5)$$

Onde $I_c(t)$ é a corrente capacitiva estimada, C é a capacitância modelada e $\frac{dV(t)}{dt}$ é a variação da tensão sobre a capacitância modelada. Para um sistema trifásico, essa solução é realizada de forma matricial.

2.4 Estado da arte

Sistemas de proteção atuais costumam ser baseados em IEDs, que são dispositivos capazes de executar algoritmos em tempo real, incluindo funções de proteção. O uso

de processadores digitais facilita a implementação de diferentes algoritmos de proteção. Diversos princípios físicos podem ser usados para a identificação de faltas, o que é feito por meio da observação de diferentes fenômenos para determinar se o equipamento analisado está em falta.

Nesta seção estão descritas soluções para proteção de sistemas elétricos existentes baseadas em energia e executadas no domínio do tempo. Foram encontradas diversas técnicas na literatura, que estão agrupadas por similaridades na metodologia.

2.4.1 Distinção de *inrush* e faltas internas

A referência mais antiga encontrada na literatura a respeito de proteções baseadas em energia no domínio do tempo é a apresentada por Yabe (1997). Nela, é descrita uma aplicação para distinguir correntes de *inrush* de faltas internas em transformadores de potência.

O autor descreve o comportamento da contabilização de energia perdida em transformadores em diferentes condições do sistema. Ele observa que o *inrush* não gera discrepâncias significativas na energia consumida pelo transformador. Ele avalia essa grandeza usando a equação 2.6.

$$W(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T}^t (V_1 I_1 + V_2 I_2 + R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2) \quad (2.6)$$

Onde V_1 e V_2 são as amostras de tensão medidas nos terminais do transformador, I_1 e I_2 são as amostras de corrente e R_1 e R_2 são as resistências dos enrolamentos. É interessante notar que a equação acima desconta as perdas no cobre do cálculo diferencial.

É proposto um sistema de detecção de faltas imune ao *inrush*. Todavia, o autor observa que o mecanismo não é capaz de discernir entre faltas francas dentro ou fora da zona de proteção.

Portanto, Yabe (1997) usa o cálculo da potência instantânea para a confirmação de que o evento detectado pela proteção principal não é o resultado do *inrush*, aumentando a segurança da proteção.

2.4.2 Algoritmos no plano $\Delta P - P$

Um grupo da universidade de Menoufiya no Egito fez diversas contribuições para proteção energética no domínio do tempo (DARWISH; TAALAB; AHMED, 2005; TAALAB; DARWISH; AHMED, 2007; KAWADY; TAALAB; AHMED, 2010).

Os artigos citados descrevem mecanismos de identificação de faltas aplicados a linhas de transmissão. Deve ser ressaltado que os autores desses artigos descreveram o uso de filtros passa-banda, e em Kawady, Taalab e Ahmed (2010) é especificado o processo de filtragem utilizando *discrete Fourier transform* (DFT). Portanto, os sinais utilizados são baseados em fasores calculados na frequência da rede.

Após a filtragem, eles usam as amostras para calcular as grandezas de potência ativa e reativa em ambos os terminais, descritos como 1 e 2.

Essas grandezas são colocadas em um plano diferencial, onde as ordenadas são populadas pela equação 2.7 e as abscissas pela equação 2.8. As comparações realizadas para a detecção de faltas evoluem ao longo dos artigos publicados.

$$\Delta P = P_1 - P_2 \quad (2.7)$$

$$P = \frac{(P_1 + P_2)}{2} \quad (2.8)$$

Os autores afirmam ter atingido resultados seguros e confiáveis. No entanto, em Kawady, Taalab e Ahmed (2010) é dito que os algoritmos apresentam tempos de disparo típicos de dispositivos modernos de proteção. A busca por alternativas que não necessitem de cálculos fasoriais podem resultar em algoritmos similares com tempo de atuação menor.

Em He et al. (2018), os autores acrescentaram uma condição para que a proteção baseada em potência seja capaz de discernir faltas francas internas das externas mesmo quando estas são localizadas próximas a um dos locais de medição de tensão. Quando o potencial lido é insuficiente para a atuação segura do algoritmo diferencial de energia, uma condição adicional de diferença entre os ângulos das correntes é usada para discernir faltas internas das externas. Os autores não informaram os tempos típicos de detecção e tampouco demonstraram ter realizado um estudo de sensibilidade.

Os algoritmos no plano ΔP - P realizam a proteção usando grandezas similares às dos algoritmos desenvolvidos nesta tese. No entanto, esses omitem os tempos de atuação na maioria das publicações. Quando exemplos são usados, eles indicam tempos de atuação maiores que os resultados obtidos nesta tese.

2.4.3 Modelo adaptativo

Em Wen, Chen e Yin (2014), é apresentado um sistema adaptativo para identificação de faltas capaz de comandar *trips* de forma rápida e correta.

A característica de proteção adaptativa é usada para, dentre outras coisas, extrair as trocas reativas da linha de transmissão da energia diferencial medida. Esse artifício possibilita uma redução na janela de observação para duas vezes o tempo de trânsito da LT (τ).

Os autores calculam a energia consumida pela linha de transmissão (E_1) e estimam a troca energética do mesmo sistema usando um modelo com parâmetros concentrados (E_2). A identificação de faltas ocorre quando ambas as equações 2.9 e 2.10 são satisfeitas.

$$|E_1 - E_2| > slp \cdot \max(E_1, E_2) \quad (2.9)$$

$$\max(E_1, E_2) > E_{min} \quad (2.10)$$

Onde slp e E_{min} são ajustes da proteção.

A proteção proposta nesse artigo apresenta detecção rápida de faltas (menor ou igual a 10,8 ms). No entanto, o estudo de tempo de detecção é realizado em um sistema muito forte que, como será discutido nesta obra, favorece esse tipo de proteção. Dentre os dados apresentados pelos autores, foram variadas poucas condições de falta e uma dessas parece ter sido omitida na tabela de resultados.

Pela natureza do sistema proposto, é possível que a proteção tenha que ser dessensibilizada para que não provoque atuações indevidas quando expostas a variações entre a rede protegida e o modelo do observador de estados executado na proteção.

2.4.4 Proteções baseadas em ondas viajantes

Diversos autores descreveram métodos para utilizar a sobreposição de ondas decorrente de faltas para detectar ocorrências internas deste fenômeno em linhas de transmissão, como em Johns (1980) e Vitins (1981). É interessante notar que esses trabalhos fazem uso de computação analógica. Trabalhos e produtos recentes formulados para processadores podem ser vistos em Schweitzer et al. (2015) e Schweitzer et al. (2016).

O princípio fundamental destes algoritmos é identificar eventos detectando a direcionalidade da corrente com relação à tensão, possibilitando uma identificação rápida das faltas internas sem a necessidade de aguardar que o sistema atinja o regime de falta. Essas informações são usadas para diferenciar eventos internos dos externos.

Schweitzer et al. (2016) discorre também sobre o uso de algoritmos caracterizando o momento preciso da chegada de transitórios e sua polaridade. Essas informações são usadas para diferenciar eventos internos dos externos comparando as informações medidas em ambos os terminais. A implementação desses princípios em dispositivos digitais demanda requisitos de velocidade de aquisição e processamento de dados superiores aos comumente utilizados pelas proteções fasoriais além de um maior rigor no sincronismo de amostras. No entanto, ela apresenta tempos de detecção de falta da ordem de poucos milissegundos.

As referências aqui citadas não afirmam confiabilidade para a detecção de faltas com alta impedância. Johns (1980) afirma que o método proposto por ele é sensível a resistências comparáveis a proteção de distância.

Metodologia proposta

Este capítulo descreve o desenvolvimento do equacionamento necessário para a implementação de dois algoritmos de proteção, seguido de uma breve apresentação do comportamento dos mesmos em diferentes condições de regime permanente.

3.1 Algoritmo diferencial de energia

Devido à natureza oscilatória das tensões e correntes em sistemas elétricos de corrente alternada, os fluxos de potência e energia também têm natureza oscilatória. As variações de potência e energia podem ser úteis na proteção de sistemas elétricos, mas para isso é necessária adequada compreensão dos fenômenos de armazenamento, transmissão e dissipação dessas grandezas em cada componente.

O acrônimo proteção diferencial de energia (ANSI 87E), recorrente ao longo do texto, foi escolhido com base na norma C37.2 do IEEE (2008).

A demonstração a seguir é feita para um componente monofásico e as considerações necessárias para a generalização do mesmo princípio para redes trifásicas serão apresentadas na seção 3.1.5 e posteriormente validadas por simulações.

Usando um intervalo adequado, a energia integrada é proporcional à potência média, que pode ser vista na Figura 3.1. Dessa forma, uma integral no tempo é um processamento simples capaz de trazer maior estabilidade para o sinal de potência instantânea, reforçando a conveniência da utilização de energia para aplicação em proteção, controle e automação.

Para analisar os fluxos de energia, a troca energética de um componente monofásico genérico é descrita usando as convenções da Figura 3.2.

A troca energética pelos terminais do bipolo representado na Figura 3.2 quando conectado a um sistema elétrico é dada pela equação 3.1. É importante observar que todo o equacionamento desenvolvido a partir deste ponto descreve sistemas elétricos no domínio do tempo, exceto quando expressamente informado e usando valores complexos em negrito.

Figura 3.1 – Representação gráfica das potências médias.

Figura 3.2 – Bipolo genérico.

$$\Delta E(t_0, t) = E(t) - E(t_0) = \int_{t_0}^t v(t)i(t)dt \quad (3.1)$$

Onde $v(t)$ é a tensão entre os terminais do componente e $i(t)$ é a corrente circulando pelo mesmo quando este está conectado a um sistema qualquer. Devido à conservação da energia, independentemente da forma com a qual os elementos do circuito são associados (série ou paralelo) em um bipolo como o da Figura 3.2, a energia total trocada por eles com a rede é a soma das energias trocadas por cada elemento.

Esta seção descreve uma metodologia baseada na proteção diferencial percentual para identificar faltas internas dentro da zona protegida usando medições de energia no domínio do tempo.

3.1.1 Diferenças entre a energia medida nos terminais

As energias medidas nas fronteiras de um componente, como o quadripolo da Figura 3.3, podem ser diferentes por três razões: perdas no componente, trocas reativas e fugas de energia por conexões não intencionais em curtos-circuitos. Para distinguir uma situação de falta interna de outras causas, elas precisam ser cuidadosamente caracterizadas.

Perdas internas, na maioria dos casos, ocorrem devido à natureza resistiva dos componentes do sistema e por isso é necessário levá-las em consideração ao desenvolver o

Figura 3.3 – Quadripolo genérico.

algoritmo. O aumento das perdas internas provocadas pelas altas correntes que ocorrem durante faltas externas motivou a escolha de uma detecção diferencial percentual, familiar para engenheiros de proteção.

Trocas reativas são as diferenças instantâneas na energia consumida por equipamentos reativos que possuem média nula. A mitigação da oscilação na energia integrada decorrente desse fenômeno, para a frequência do sistema, pode ser feita definindo um intervalo de integração adequado, conforme demonstrado na seção 3.1.2.

Curtos-circuitos internos à zona de proteção são o fenômeno remanescente que se deseja observar com o intuito de isolar partes do sistema em falta.

3.1.2 Comportamento da energia em meio ciclo

Considerando um sistema de corrente alternada, a energia consumida por um bipolo genérico do sistema durante meio ciclo pode ser expressada por meio da equação 3.2.

$$E_{mc}(t_1) = \int_{t_1 - \frac{T}{2}}^{t_1} V \cos(\omega_0 t) I \cos(\omega_0 t + \theta) dt \quad (3.2)$$

Onde $E_{mc}(t_1)$ é a energia que entra em um dispositivo durante o meio ciclo ($T/2$) que precede um instante genérico t_1 na frequência angular ω_0 da rede elétrica. As grandezas elétricas V e I se referem à tensão e corrente de pico e θ é a diferença de fase entre tensão e corrente.

Reorganizando a equação 3.2 e resolvendo as integrais resultantes, obtém-se a equação 3.3.

$$E_{mc}(t_1) = VI \left\{ \cos(\theta) \left[\frac{t}{2} + \frac{\sin(2\omega_0 t)}{4\omega_0} \right]_{t_1 - \frac{\pi}{\omega_0}}^{t_1} - \sin(\theta) \left[\frac{\sin^2(\omega_0 t)}{2\omega_0} \right]_{t_1 - \frac{\pi}{\omega_0}}^{t_1} \right\} \quad (3.3)$$

Aplicando-se os limites de integração à equação 3.3, obtém-se a equação 3.4.

$$E_{mc} = VI \cos(\theta) \frac{\pi}{2\omega_0} = \frac{VI \cos(\theta)}{4f_0} \quad (3.4)$$

Esse desenvolvimento aplicado a componentes básicos – resistores, indutores e capacitores – resulta respectivamente nas equações 3.5, 3.6 e 3.7.

$$E_r = \frac{V_r I_r}{4f} \cos(0) = \frac{V_r I_r}{4f} \quad (3.5)$$

$$E_\ell = \frac{V_\ell I_\ell}{4f} \cos\left(\frac{\pi}{2}\right) = 0 \quad (3.6)$$

$$E_c = \frac{V_c I_c}{4f} \cos\left(-\frac{\pi}{2}\right) = 0 \quad (3.7)$$

As equações 3.5, 3.6 e 3.7 evidenciam que apenas a parcela resistiva dos componentes dissipa energia. Esse fenômeno pode ser graficamente constatado na Figura 3.1, onde a média da potência instantânea é igual a média da parte ativa da mesma. Os valores médios de potência multiplicados pelo tempo de integração representam a energia transferida neste tempo.

Portanto, se o dispositivo tiver uma natureza capacitiva ou indutiva, a energia integrada trocada é nula no período considerado (meio ciclo elétrico), devido à inerente relação de quadratura entre tensão e corrente. Isso faz com que metade de um ciclo elétrico, um período de energia, seja um intervalo de integração adequado, uma vez que cancela trocas reativas, dispensando a metodologia usada em Wen, Chen e Yin (2014).

3.1.3 Método de detecção de faltas baseada em energia

É possível aplicar essa análise energética no domínio do tempo para detectar faltas. Dada a natureza diferencial desse algoritmo, pode-se adotar uma filosofia semelhante à proteção diferencial de corrente. A característica diferencial percentual utilizada é semelhante às encontradas em Blackburn e Domin (2014) e Horowitz e Phadke (2014), com algumas peculiaridades que serão abordadas ao longo desta obra.

Apesar do fato da informação de tensão nos terminais do equipamento protegido também ser necessária para o funcionamento da proteção diferencial de energia, essa também tem os TCs como limites da zona de proteção.

Adotando a filosofia mostrada em Blackburn e Domin (2014), a grandeza de operação deste algoritmo, E_{op} , é definida como a soma das energias que entram na região protegida em meio ciclo, conforme expresso na equação 3.8. A grandeza de restrição E_{rest} , por outro lado, é a soma dos valores absolutos dessas energias, conforme equação 3.9.

$$E_{op} = \sum_{x=1}^{N_{Ex}} E_{mc_x} \quad (3.8)$$

$$E_{rest} = \sum_{x=1}^{N_{Ex}} |E_{mc_x}| \quad (3.9)$$

Onde E_{mc_x} é a energia que entra na zona protegida através de cada ponto de troca x , para todas as fronteiras do componente N_{Ex} . O equacionamento genérico proposto pode ser utilizado no sistema representado na Figura 3.3 considerando $N_{Ex} = 2$.

Compreender a implementação da grandeza de restrição escolhida é importante para se definir uma inclinação adequada para a característica diferencial percentual (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

Para a identificação das faltas, foi utilizado um comparador percentual apresentado na inequação 3.10, similar a outras proteções diferenciais.

$$E_{\text{op}} > \text{slp}_1 E_{\text{rest}} \quad (3.10)$$

Onde slp_1 é a inclinação ou *slope* dessa característica diferencial da função de proteção. A utilização de um ajuste adequado possibilita que o algoritmo de proteção seja robusto às perdas no componente protegido durante faltas externas e a possíveis imprecisões na medição das grandezas provenientes dos transformadores para instrumentos.

De forma similar à empregada pela proteção diferencial de corrente (ANSI 87) tradicional, uma quantidade mínima da energia de operação E_{min} também deve ser definida e usada como condição necessária para a detecção de faltas, conforme a inequação 3.11.

$$E_{\text{op}} > E_{\text{min}} \quad (3.11)$$

Esta deve ser ajustada para evitar atuações indevidas causadas pelo fluxo residual dos TCs ou erros do ADC, como na ANSI 87 tradicional. Todavia, devem ser levadas em consideração outras características do sistema, como características do elemento protegido e da rede que o alimenta, tornando o E_{min} parte fundamental do ajuste. As observações sobre esses no comportamento da função estão descritas na seção 3.3, assim como considerações para o ajuste da função.

3.1.4 Modelo discreto para implementação digital

Para implementar o algoritmo em um relé digital moderno, é necessário desenvolver um modelo discreto. Para tanto, a equação descrita em 3.1 foi expressa como uma somatória. Foi escolhida a formula de integração numérica aberta de Newton-Cortes de um ponto, o método do ponto médio. Os limites definidos na seção 3.1.2 foram incorporados neste processo, resultando em 3.12.

$$E_{hc_x}(k) = \sum_{n=k-\frac{N}{2}+1}^k \frac{v_x(n) i_x(n)}{N f_0} \quad (3.12)$$

Onde $E_{hc_x}(k)$ é a energia que entra na zona de proteção no meio ciclo que precede a k -ésima amostra e N é o número de pontos amostrados a cada período de uma rede com frequência f_0 , é interessante notar que o passo de integração está expresso na equação acima como $1/(Nf_0)$. Apesar de poderem ser utilizados modelos mais precisos de

Figura 3.4 – Fluxograma do algoritmo diferencial de energia para obtenção do sinal de *pickup*.

Todo o processamento aqui mostrado deve ser executado em ambos os terminais da linha de transmissão

integrações numérica, o método usado foi suficiente para realizar a proteção para todos os casos analisados, inclusive quando se usou frequências de amostragem relativamente baixas, como 16 amostras por ciclo.

A formulação apresentada até este ponto é utilizada para a determinação do *pickup* da função, como representado no diagrama de blocos da Figura 3.4. O fluxograma representa

a aplicação da função à uma linha de transmissão monofásica de dois terminais.

O fluxograma da Figura 3.4 descreve como o algoritmo de energia proposto pode ser implementado em relés digitais. Apesar de representadas apenas as operações de um dos terminais, aplicações desse sistema devem executar o algoritmo em todos os terminais da linha protegida.

Como descrito na seção 3.1.6, é necessário confirmar que a tensão nos terminais da linha é suficiente para uma atuação segura da proteção. Essa confirmação requer medição de sinais na frequência da rede, pode se basear em uma medição RMS de meio ciclo para avaliar a tensão. O mesmo intervalo pode ser usado para aumentar a segurança, exigindo que todos os sinais de *pickup* nesse período sejam positivos.

3.1.5 Generalização trifásica

O desenvolvimento monofásico apresentado até este ponto não considerou o acoplamento entre diferentes fases.

Para componentes intrinsecamente polifásicos, como transformadores, pode ser realizada uma abordagem considerando fases individuais como interfaces de troca energética. A partir dessas considerações, tem-se uma única zona de proteção, para a qual o método mostrado para um sistema monofásico continua válido. Assim sendo, o componente da Figura 3.5 possui uma única zona de proteção com $N_{Ex} = 6$.

Figura 3.5 – Quadripolo trifásico visto como uma única zona de proteção.

No entanto, seletividade por fase é desejável para a proteção de linhas de transmissão. Para isso, pode-se obter uma seleção intrínseca de fase por meio da separação da execução da proteção separada por fase, como ilustrado na Figura 3.6. O componente desta figura possui três zonas de proteção com $N_{Ex} = 2$.

Figura 3.6 – Quadripolo trifásico dividido em três zonas de proteção independentes.

Devido às indutâncias mútuas, existem tensões induzidas em uma fase devido às correntes circulantes nas fases vizinhas, com consequente circulação de energia através dos

acoplamentos eletromagnéticos, fenômeno representado pelas setas entre as zonas de proteção na Figura 3.6. Os efeitos desses acoplamentos precisam ser levados em consideração para se definir a inclinação slp_1 e o patamar E_{min} , aplicado a todas as fases do diferencial de energia quando é feita uma abordagem segregada por fase.

Além das considerações anteriores, faltas entre fases causam mudanças substanciais no fluxo energético entre essas, podendo resultar em medições de grandezas de operação (E_{Op}) negativas para uma das fases.

Nessas condições, para a identificação de todas as fases em falta, as equações 3.10 e 3.11 necessitam ser reescritas como 3.13 e 3.14, para uma implementação segregada por fase. Esse fenômeno é visto com mais detalhe na seção 5.1.1.1.

$$|E_{Op}| > slp_1 E_{rest} \quad (3.13)$$

$$|E_{Op}| > E_{min} \quad (3.14)$$

3.1.6 Faltas severas e afundamento de tensão

Durante um afundamento severo de tensão perto de um dos terminais de medição, a informação do fluxo de energia deixa de ser confiável. Nesta situação, a ANSI 87E deve ser bloqueada com o intuito de se evitar atuações indevidas. É importante confirmar que as tensões de fase e de linha estão operando dentro dos limites ajustados para que a proteção baseada em energia opere corretamente. Para verificar se o sistema protegido está funcionando em uma condição adequada, uma análise de valores RMS das tensões dos terminais de medição deve ser realizada a cada execução da proteção.

A definição do mínimo de tensão admissível para o funcionamento da função ANSI 87E interfere na determinação do patamar E_{min} . Essa relação e o comportamento da função com sistemas de diferentes características são tratados na seção 3.3.

Embora o requisito de uma condição de tensão adequada torne o algoritmo seguro, é necessário complementar a função ANSI 87E durante os afundamentos de tensão de forma a se obter uma solução confiável. Uma vez que as condições nas quais a proteção deve ser bloqueada ocorrem com grandes fluxos de correntes, as funções de proteção ANSI 87L ou ANSI 21 podem ser coordenadas de forma a complementar a ANSI 87E. Porém, a seguir, outro algoritmo no domínio do tempo similar ao ANSI 87E é proposto para complementar o mesmo.

3.2 Algoritmo diferencial de potência reativa

O intuito deste algoritmo é prover uma função complementar ao ANSI 87E usando conceitos similares, mas que seja imune a afundamentos de tensão. Para isso, usa-se um sinal sintetizado para substituir a tensão na multiplicação com a corrente, de forma a se

obter um sinal que dimensionalmente remete a uma potência e energia, e que preserva uma característica de direcionalidade para a grandeza calculada.

Levando em consideração que sistemas de potência são predominantemente indutivos, as correntes e tensões ficam aproximadamente em quadratura durante faltas francas. Desta forma, a direcionalidade de estimativas de energia usando essa técnica pode ser comprometida durante faltas francas para pequenos desvios angulares no sinal sintetizado. Isso faz com que a potência em quadratura seja uma escolha mais segura para a utilização em proteção.

Outras utilizações desta grandeza no domínio do tempo estão presentes na literatura, como por exemplo na medição e compensação de fator de potência (AKAGI; KANAZAWA; NABAE, 1984; NOHRA; KANAAN; FADEL, 2014).

No entanto, será usada uma formulação similar à demonstrada anteriormente na seção 3.1. Nesse segundo algoritmo proposto nesse trabalho, o fluxo de potência reativa é estimado integrando uma referência de tensão em quadratura (defasada de 90°) pela corrente ao longo do tempo, conforme descrito na equação 3.15.

É importante ressaltar que estimativas de potência baseadas em grandezas sintetizadas (em substituição a tensão) não representam realmente potência; porém, por compatibilidade dimensional, foi escolhida a nomenclatura proteção diferencial de potência reativa (ANSI 87Q). A norma IEEE (2008) sugere o uso do sufixo Q quando a potencia reativa é utilizada como grandeza de atuação (a sequência negativa deve ser representada pelo sufixo “-” ou “₂”).

O algoritmo ANSI 87Q foi desenvolvido para operar completamente no domínio do tempo. Seria desejável utilizar uma grandeza sintetizada independente de análises no domínio da frequência. Portanto, os sinais sintetizados são provenientes de *phase-locked loops* (PLLs) trifásicas, sincronizadas com as tensões do sistema e adequadamente defasadas de 90° elétricos de cada uma das tensões do sistema, proporcionando ondas senoidais com a mesma amplitude da tensão nominal do sistema. Implementações modernas de PLL, como as apresentadas em Golestan, Guerrero e Vasquez (2017), são capazes de fornecer esses sinais, provendo uma referência angular precisa, mesmo em condições adversas como a presença de harmônicas. A preservação da referência angular durante afundamentos de tensão pode ser feita usando lógicas adicionais que detectem essas condições.

Para o desenvolvimento da função ANSI 87Q, as trocas de potência reativa são expressas de forma semelhante à equação 3.2, porém a tensão é substituída pelo sinal sintetizado a partir da PLL atrasada de 90° elétricos, como pode ser visto na equação 3.15.

$$Q_{hc}(t_1) = \int_{t_1 - \frac{T}{2}}^{t_1} V_n \cos\left(\omega_{PLL}t - \frac{\pi}{2}\right) I \cos(\omega_0 t + \theta) dt \quad (3.15)$$

Onde $Q_{hc}(t_1)$ é a potência reativa fluindo pelo ponto de medição no meio ciclo anterior ao instante t_1 , V_n é a tensão nominal do sistema e ω_{pll} é a frequência de rastreamento

gerada pela PLL. Uma vez que a PLL atinja a estabilidade, $\omega_{pll} = \omega_0$, a integral da equação 3.15 resulta na equação 3.16.

$$Q_{hc}(t_1) = V_n I \sin(\theta) \frac{\pi}{2\omega_0} = \frac{V_n I \sin(\theta)}{4f_0} \quad (3.16)$$

A equação 3.16 representa as potências reativas transferidas para um componente devido ao fluxo de corrente reativa durante meio período elétrico. Para se obter uma grandeza no Sistema Internacional de Unidades (SI) com base segundo, é necessário multiplicar os valores calculados por um fator de escala relativo ao período de integração, $2/T = 2f_0$.

$$Q_{hcs}(t_1) = \frac{V_n I \sin(\theta)}{2} \quad (3.17)$$

A equação 3.17 representa a estimativa de potências reativas em *Var* calculadas a partir da multiplicação da tensão nominal pela integração da parcela da corrente em quadratura com a tensão por meio ciclo. Uma representação gráfica para um sistema em estado estacionário pode ser vista na Figura 3.7. Nessa, é possível observar que integrando a referência da tensão multiplicada pela corrente em um intervalo adequado, obtém-se a potência reativa fluindo pelo sistema.

Figura 3.7 – Representação gráfica das potências estimadas pelo produto da corrente pela tensão de referência defasada de 90° .

$V_\perp$ Corresponde à tensão de referência defasada de 90° elétricos.

É importante notar que, integrar a corrente em quadratura resulta em sinais distintos caso o componente seja preponderantemente indutivo ou capacitivo. Isso pode ser visto no caso de um resistor, indutor ou capacitor puros nas equações 3.18, 3.19 e 3.20.

$$Q_r = \frac{V_r I_r}{2} \sin(0) = 0 \quad (3.18)$$

$$Q_\ell = \frac{V_\ell I_\ell}{2} \sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = \frac{V_\ell I_\ell}{2} \quad (3.19)$$

$$Q_c = \frac{V_c I_c}{2} \sin\left(-\frac{\pi}{2}\right) = -\frac{V_c I_c}{2} \quad (3.20)$$

Esse método permite distinguir entre correntes indutivas de falta e correntes provocadas por capacitâncias parasitas, significativas em alguns sistemas, como linhas de transmissão de tensão elevada. Como foi adotada a mudança de fase na PLL de $+\pi/2$, o cálculo de Q_{hc} resulta em valores positivos para componentes indutivos. Consequentemente, a proteção é sensibilizada apenas para valores positivos.

3.2.1 Causas dos desequilíbrios de potência reativa

Para identificar faltas em sistemas predominantemente indutivos, a equação 3.17 é usada para analisar a transferência de potência reativa devido a correntes indutivas que entram na zona de proteção por todas as fronteiras que possuem medições de tensão e corrente.

Os elementos em série não provocam diferença de corrente entre dois terminais em sistemas estacionários devido à conservação da corrente. Salvo efeitos transitórios, o algoritmo proposto só observa desequilíbrio de potência reativa quando os componentes série estão sob uma diferença de tensão, seja essa causada por conexões *shunt* ou carregamento do componente.

Elementos *shunt* podem ser devidos a faltas internas ou capacitâncias parasitas. A direção de transferência de potência reativa pode ser levada em consideração para se distinguir o fluxo de potência reativa devido a elementos capacitivos.

Reatâncias indutivas dentro da zona protegida, quando submetidas a correntes elevadas de carregamento, aumentam os valores medidos pela equação 3.17. Esse efeito é discutido em detalhe na seção 3.3.

Os elementos que podem contribuir para o aumento da potência reativa medida devem ser avaliados em sua pior condição:

- a) Impedância indutiva série durante carregamentos máximos do componente (mesmo sob contingência);
- b) Impedância *shunt* indutiva na condição da máxima sobretensão aceita.

Essas características do sistema protegido devem ser levadas em consideração durante o ajuste da função ANSI 87Q. Na seção 3.3 é analisado como o aumento do carregamento do sistema afeta a diferença de potência reativa medida nos terminais.

3.2.2 Método de detecção de faltas baseada em potência reativa

Uma característica diferencial análoga às mostradas nas equações 3.10 e 3.11 é aplicada à potência reativa estimada para identificar faltas usando os princípios expostos nessa seção. Primeiramente, definem-se as grandezas de operação, Q_{op} , e restrição, Q_{rest} , como visto nas equações 3.21 e 3.22, respectivamente.

$$Q_{op} = \sum_{x=1}^{N_{Ex}} Q_{hc_x} \quad (3.21)$$

$$Q_{rest} = \sum_{x=1}^{N_{Ex}} |Q_{hc_x}| \quad (3.22)$$

Onde Q_{hc_x} é a potência reativa entrando na zona protegida calculada com base nos valores do último meio ciclo através de cada ponto de interface x , para todas as fronteiras N_{Ex} . A identificação de falhas ocorre quando as inequações 3.23 e 3.24 são, ambas, satisfeitas.

$$Q_{op} > slp_2 Q_{rest} \quad (3.23)$$

$$Q_{op} > Q_{min} \quad (3.24)$$

O ajuste da inclinação slp_2 requer as mesmas considerações anteriormente mencionadas para a proteção ANSI 87E. Além dessas, devem ser levados em consideração possíveis erros inseridos pelo algoritmo da PLL, os erros residuais dos TCs e as incertezas trazidas pelos ADCs. O carregamento máximo da linha deve ser considerado para especificar a potência reativa operacional mínima Q_{min} , definida na equação 3.24.

3.2.3 Modelo discreto para implementação digital

Assim como o ANSI 87E, foi aplicado um modelo computacional discreto visto na equação 3.25, que pode ser executado por IEDs modernos.

$$Q_{hc_x}(k) = \sum_{n=k-\frac{N}{2}+1}^k \frac{PLL_x(n) i_x(n)}{N f_0} \quad (3.25)$$

Onde $Q_{hc_x}(k)$ é a potência reativa devida à corrente em quadratura que entra na zona de proteção no meio ciclo anterior à k -ésima amostra, PLL_x é a referência sintetizada gerada pela PLL na fronteira x . É interessante notar que o passo de integração está expresso na equação acima como $1/(N f_0)$.

Para que a equação 3.25 resulte em valores no sistema internacional, é necessário multiplicar por um fator de escala relativo ao tempo de integração, $2/T = 2f_0$, resultando na equação 3.26.

$$Q_{hc_x}(k) = \frac{2}{N} \sum_{n=k-\frac{N}{2}+1}^k PLL_x(n) i_x(n) \quad (3.26)$$

3.2.4 Generalização trifásica

As mesmas considerações anteriormente expressas na seção 3.1.5 podem ser usadas para generalizar a operação de ANSI 87Q para componentes trifásicos. Além destas, as indutâncias mútuas (descritas na seção 3.2.1) devem ser levadas em consideração para a definição do patamar Q_{min} , de forma a evitar atuações indevidas. Considerações para o ajuste serão exemplificadas na seção 3.3.

Não foram observadas situações nas quais faltas bifásicas provocassem valores negativos de potências reativas de operação em regime de falta, conforme discorrido no capítulo seguinte. O algoritmo ANSI 87Q usa a direcionalidade para distinguir capacitâncias de indutâncias na zona protegida. Portanto as inequações 3.23 e 3.24 são usadas também para sistemas trifásicos.

3.3 Comportamentos dos algoritmos

Nessa seção, o comportamento de ambos os algoritmos em conjunto é exemplificado usando análises de sistema estacionário em diversas condições. Assim são expostas as limitações da solução de proteção proposta e descritos os ajustes necessários para o adequado funcionamento desses algoritmos de proteção.

Foi testada a proteção de um sistema com duas fontes monofásicas ideais alimentando um conjunto de três linhas de transmissão ligadas em série com parâmetros concentrados (com impedâncias representadas na frequência da rede) para verificar de forma analítica como o sistema de proteção se comporta para esses casos, conforme Figura 3.8.

Figura 3.8 – Topologia simplificada da rede.

É importante ressaltar que as análises feitas aqui consideram o regime permanente na frequência da rede. A notação em negrito foi usada para representar fasores de tensão

e corrente e a sobrelinha foi usada para representar impedâncias complexas. Uma vez resolvido o circuito usando estratégias no domínio da frequência, as grandezas são representadas no domínio do tempo de forma a compatibilizar o uso dos algoritmos descritos nas seções 3.1 e 3.2 para proteger a linha de transmissão entre as barras V_L e V_R .

Para realizar a análise de faltas internas, o circuito foi dividido conforme a Figura 3.9 e posteriormente resolvido usando a lei de Kirchhoff para os nós, como pode ser vista na equação 3.27.

Figura 3.9 – Topologia simplificada da rede para o estudo de faltas internas.

$$\frac{V_1 - V_f}{(\overline{Z}_L + x\overline{Z}_{LT})} + \frac{V_2 - V_f}{(\overline{Z}_R + (1-x)\overline{Z}_{LT})} + \frac{-V_f}{R_f} = 0 \quad (3.27)$$

Onde V_f é a tensão no ponto da falta e R_f é a resistência de falta. Resolvendo a equação 3.27, é possível obter de forma analítica os estados estacionários das variáveis usando o domínio da frequência V_L , I_L , V_R e I_R . Após representar esses resultados no domínio do tempo, podem ser calculadas as grandezas E_{op} , E_{rest} , Q_{op} e Q_{rest} para estimar os pontos de equilíbrio das funções propostas usando o equacionamento expresso nas seções 3.1 e 3.2.

É importante ressaltar que, como a ANSI 87Q opera usando tensões sintetizadas, criadas a partir de estados em regime permanente da rede antes da falta, para o cálculo de Q_{op} e Q_{rest} devem ser usadas as tensões de pré-falta, calculadas a partir da solução do sistema exposto na Figura 3.8.

A solução para faltas externas também foi baseada na Figura 3.8. De forma análoga ao estudo das faltas internas, uma das linhas conectadas a fonte de alimentação foi dividida para a inserção do ponto de falta, resultando na Figura 3.10.

Figura 3.10 – Topologia simplificada da rede para o estudo de faltas externas.

Resolvendo o circuito da Figura 3.10 de forma análoga ao realizado para a Figura 3.9, é possível observar o comportamento dos algoritmos propostos para faltas externas. A

convenção de x negativo para faltas externas simplifica o equacionamento mantendo o rigor matemático. Foi feita a correção $x' = x\bar{Z}_{LT}/\bar{Z}_L$ para que, independente da relação entre as impedâncias da linha de alimentação e da linha protegida, a referência sempre é a barra local e a base de impedância é a linha protegida.

3.3.1 Exemplo de comportamento

Inicialmente, são demonstrados os comportamentos das funções considerando as impedâncias das linhas adjacentes como metade da impedância da linha protegida ($50\%\bar{Z}_{LT}$), uma resistência de falta equivalente a trinta por cento do módulo da impedância da linha ($30\%|\bar{Z}_{LT}|$). Esses valores foram escolhidos pois refletem diversos testes realizados no capítulo 5 e exemplificam os fenômenos de interesse.

Foram aplicadas faltas ao longo de toda a linha protegida e em todo o comprimento de uma das linhas externas, mantendo o carregamento do sistema constante, decorrente de uma diferença de fase entre $\mathbf{V}_1$ e $\mathbf{V}_2$ fixada em vinte graus elétricos. As magnitudes das grandezas nesta análise são omitidas para enfatizar a importância da relação das mesmas.

Na Figura 3.11 estão representadas as funções ANSI 87E e ANSI 87Q em diversos estados estacionários em condição de faltas internas e externas. Pontos de interesse estão ressaltados na figura:

- a) falta dentro da zona protegida no terminal local é representada pelo ponto $x = 0^+$ em ambas as curvas;
- b) falta dentro da zona protegida no terminal remoto é representada pelo ponto $x = L$ em ambas as curvas;
- c) os pontos nos quais as grandezas de operação atingiram seu valor mínimo estão ressaltados para ambas as funções;
- d) falta externa conectada ao terminal de medição local é representada pelo ponto $x = 0^-$ em ambas as curvas.

Na Figura 3.11 pode-se observar um primeiro indício que o patamar Q_{min} é parte integrante na detecção de faltas. Uma análise comparando os efeitos do ângulo de carregamento com a resistência de faltas internas pode ser vista na seção 3.3.3.

3.3.2 Relações entre impedâncias e o ANSI 87E

O algoritmo estima o fluxo de energia pelo sistema e é consequentemente impactado pela impedância do circuito protegido, por suas fontes de alimentação e pela resistência de falta.

O sistema de uma linha monofásica baseado em parâmetros concentrados exposto nas Figuras 3.8, 3.9 e 3.10 foi usado para se fazer observações sobre o algoritmo em regime permanente. Foram estudados os efeitos de faltas internas e externas sendo alimentadas

Figura 3.11 – Comparações entre faltas internas e externas.

por diferentes combinações de impedâncias das linhas adjacentes conectadas a fontes ideais. As análises foram realizadas mantendo a relação R/X aproximadamente 10% para todas as linhas de transmissão. Variações dentro de limites realistas nesta relação não resultaram em impacto significativo nas análises.

Foram aplicados curtos-circuitos ao longo da linha de transmissão puramente resistivos equivalentes a $50\%|\bar{Z}_{LT}|$. Esta análise está representada pelas curvas tracejadas da Figura 3.12. Outras faltas, externas e francas, foram aplicadas de $x = 0$ até $x = -\infty$ na convenção da Figura 3.10. O *slope* considerado para a Figura 3.12 é de 30%, próximo dos valores utilizados nos capítulos subsequentes.

Figura 3.12 – Representação gráfica das energias medidas.

As curvas da Figura 3.12, representadas na cor verde mostram faltas com fontes mais fortes. Nessas curvas, é possível notar que faltas internas próximas ao terminal remoto

apresentam o fenômeno de *outfeed* (quando um terminal exporta potência recebida através do equipamento protegido durante uma falta interna). Esse fenômeno aumenta a energia de restrição. Logo, a determinação do *slope* afeta resistência máxima de falta detectável.

Os estados estacionários de características do algoritmo ANSI 87E para faltas francas externas estão representados no detalhe contido na lupa da Figura 3.12. Nessas curvas, pode-se observar que considerando apenas o *slope* não é possível distinguir curtos-circuitos internos dos externos. Isso reforça a necessidade de determinar o patamar E_{min} como uma parte integrante do ajuste dessa proteção.

Para avaliar os efeitos da resistência de falta, foram aplicadas faltas internas, em $x = 0^+$, variando por uma grande faixa de resistências, desde 0 a $500\%|\bar{Z}_{LT}|$. Esses resultados estão expostos na Figura 3.13.

Figura 3.13 – Grandeza de operação do algoritmo diferencial 87E perante diferentes resistências de falta.

A análise das Figuras 3.12 e 3.13 mostra que as impedâncias do sistema protegido e de suas fontes de alimentação precisam também ser levadas em consideração para a determinação do patamar E_{min} , descrito anteriormente.

As estrelas pretas sobre as respectivas curvas, verde ou laranja, das Figuras 3.12 e 3.13 se referem à mesma falta (sistema, posição da falta e resistência de faltas iguais). Os pontos verde e laranja dentro da lupa de ambas as figuras se referem às faltas internas ($x = 0^+$) e externas ($x = 0^-$), francas adjacentes à barra. Essas faltas possuem grandeza de restrição e operação iguais. Isso leva a conclusão de que é impossível ajustar o patamar E_{min} de forma a distinguir as faltas de baixa impedância internas das externas.

Como referido na seção 3.1, durante um afundamento severo de tensão perto de um dos terminais de medição, a informação do fluxo de energia deixa de ser confiável para proteção. Logo, na situação exemplificada no parágrafo anterior, a ANSI 87E deve ser bloqueada com o intuito de evitar atuações indevidas.

Para verificar se o sistema de energia está funcionando em uma condição adequada para o uso da ANSI 87E, deve-se estabelecer uma tensão a partir da qual o ajuste da função é capaz de identificar faltas internas.

Essa condição pode ser avaliada com uma análise dos valores eficazes das tensões de ambos terminais. É importante assegurar que as tensões de fase e de linha estejam operando dentro dos limites ajustados para que a proteção atue corretamente. Esse processo cria um algoritmo sensível às faltas de alta impedância e seguro.

3.3.3 Condições necessárias para o ajuste do ANSI 87Q

A função ANSI 87Q é impactada pelo carregamento da linha, assim como outras proteções. Isso ocorre porque o carregamento de uma LT predominantemente indutiva cria uma diferença entre a potência reativa (de operação) medida nos terminais da mesma. Esse efeito pode ser observado na Figura 3.14.

Figura 3.14 – Limitações do algoritmo diferencial de potência reativa.

Na Figura 3.14, o ângulo $\Delta\theta$ é o ângulo relativo entre a tensão do terminal local ($\mathbf{V}_L$) e terminal remoto ($\mathbf{V}_R$). A variação do ângulo de carga representada pela curva preta, varia desde $\Delta\theta = 0$ até $\Delta\theta = 45^\circ$, com $R_f = 50\%|\bar{Z}_{LT}|$. A curva de faltas internas foi levantada com um carregamento $\Delta\theta$ de 10° . Carregamentos menores reduzem os valores medidos, por isso, o ponto $R_f = 50\%|\bar{Z}_{LT}|$ (com $\Delta\theta = 10^\circ$) não está no começo da curva preta.

Como pode ser observado na Figura 3.14, a sobreposição entre a variação de carga e a elevação da resistência de falta faz com que o patamar Q_{min} delimite o ângulo máximo que a linha pode operar sem atuações indevidas ao mesmo tempo que determina a maior resistência de falta que esse algoritmo poderá detectar.

Ao se realizar a implementação do algoritmo ANSI 87Q, o fluxo de potência máximo do sistema deve ser avaliado para determinar a maior resistência de falta que pode ser

confiavelmente detectada pelo algoritmo. Dessa forma, deve-se garantir que exista uma sobreposição entre as menores resistências de falta detectadas pelo algoritmo ANSI 87E e as maiores resistências de falta que sensibilizam o ANSI 87Q.

Aplicação da metodologia

Sistema proposto foi testado para a aplicação em linhas de transmissão utilizando algoritmos executados em processadores digitais. Este capítulo descreve o desenvolvimento necessário para essa aplicação. A metodologia para a obtenção do sinal de *pickup* está expressa em detalhes no capítulo 3. O presente capítulo descreve os critérios usados para criar as lógicas de confirmação das faltas e seleção de fase.

A topologia escolhida para a aplicação dos algoritmos é similar à utilizada pela ANSI 87L, como mostrado na Figura 4.1. O sistema desenvolvido protege uma LT trifásica de dois terminais (local e remoto) onde um IED está instalado em cada extremidade, juntamente com os transformadores de instrumentos usuais. Ambos os IEDs são conectados por meio de um canal de comunicação para transferir e sincronizar informações.

Figura 4.1 – Topologia para implementação da proteção.

Foi desenvolvida uma plataforma de simulações de proteção utilizando o GNU Octave em um computador rodando a distribuição Ubuntu do GNU Linux. A interpretação de códigos de alto nível realizada pelo Octave foi utilizada para pré-processar os resultados das simulações de transitórios eletromagnéticos e executar as funções ANSI 87E e ANSI 87Q apresentadas nos fluxogramas 4.2 e 4.3.

Figura 4.2 – Fluxograma de operação do algoritmo ANSI 87E.

Figura 4.3 – Fluxograma de operação do algoritmo ANSI 87Q.

4.1 Considerações para aplicação e implementação

Como a maioria das falhas em linhas de transmissão aéreas são devidas à ruptura da suportabilidade dielétrica do ar, e dessas, a maioria são falhas monofásicas, um ciclo de religamento monopolar pode ser suficiente para extinguir o arco elétrico e retomar as operações regulares do sistema em grande parte dos curtos-circuitos (BLACKBURN; DOMIN, 2014). Isso motivou a aplicação da metodologia desenvolvida de forma segregada por fase.

Os fluxogramas 4.2 e 4.3 descrevem a implementação das proteções. A lógica usada para a determinação do sinal de *trip* (operações posteriores à obtenção dos sinais *pickup* e *aux*) é apresentada na forma de diagramas lógicos 4.4 e 4.5.

A maior parte da simbologia usada nas Figuras 4.2, 4.3, 4.4 e 4.5 é similar, com exceção dos mecanismos de:

a) confirmação de falta:

- “ $\sum_{n=k-\frac{N}{2}+1}^k \text{Pickup}_\phi(n) = \frac{N}{2}$ ” nas Figuras 4.2 e 4.3;
- bloco “CF” nas Figuras 4.4 e 4.5;

b) detecção de fase:

- “3 ($\text{Pickup}_\phi=1$) consecutivos no último meio ciclo” na Figura 4.2;
- “3 ($\text{Pickup}_\phi=1$ ou $\text{aux}_\phi=1$) consecutivos no último meio ciclo” na Figura 4.3;
- bloco “ $D\phi$ ” nas Figuras 4.4 e 4.5.

Os diagramas lógicos 4.4 e 4.5 evidenciam a natureza combinatória da seleção de fase. O critério para a confirmação de falta de todas as fases precisa ser executado para que o sinal “ $\text{trip}_{\text{outra } \phi}(k)=1$ ” e suas consequências possam ser avaliados.

Como exposto no capítulo 3, a ANSI 87E deve ser bloqueada caso seja detectado um afundamento de tensão. Essa comparação é realizada usando um algoritmo de RMS de meio ciclo. É necessário bloquear completamente a função caso seja identificada qualquer subtensão de fase ou linha.

Devido à necessidade de bloquear a atuação da proteção até a confirmação de que a tensão está adequada, exige-se que todos os sinais de *pickup* estejam ativos nesse intervalo para assegurar que o evento detectado diz respeito a uma falta interna e comandar o *trip*. Como o bloqueio por nível de tensão e o procedimento de confirmação usam a mesma janela de meio ciclo, a segurança é maximizada sem implicar qualquer atraso adicional para a proteção.

Após a detecção e confirmação de qualquer falta interna, a seleção de fase é realizada analisando as outras fases pela mesma proteção, seja ANSI 87E ou ANSI 87Q, com um critério menos exigente expresso como “ $D\phi$ ” nas Figuras 4.4 e 4.5 para detectar as demais fases envolvidas no evento. A presença de 3 amostras consecutivas dentro da zona de proteção foi o critério mais rápido suficiente para a manutenção da seletividade.

Figura 4.4 – Lógica de operação por fases da proteção 87E.

CF confirma ocorrência de falta interna após meio ciclo de ocorrências consecutivas do sinal de *pickup*. $D\phi$ identifica as demais fases participantes na falta usando um critério de três ocorrências consecutivas de *pickup* após confirmação de falta interna utilizando o critério CF. Esta lógica deve ser interpretada sendo executada em um processador síncrono, repetindo o processo a cada nova amostra.

Para a atuação da ANSI 87Q, é necessário que o sinal da PLL seja confiável. Caso o algoritmo de rastreamento de tensão não possa mais fornecer valores para a operação segura da proteção, este deve enviar um sinal de “PLL_{desincronizada}” para bloquear a proteção durante a reacomodação da PLL.

Mesmo o sinal “PLL_{desincronizada}” não exigindo meio ciclo de processamento após a falta, foi utilizada uma janela de confirmação como na proteção ANSI 87E. Esse artifício permitiu ajustes com maior sensibilidade de forma segura.

Conforme descrito no capítulo 3, para a ANSI 87Q é calculada também a função de proteção considerando valores absolutos da grandeza de operação, resultando no sinal aux_ϕ , como pode ser visto na Figura 4.3. Esse sinal é associado ao sinal do *pickup* da função entrando no bloco “ $D\phi$ ” da Figura 4.5.

Figura 4.5 – Lógica de operação por fases da proteção 87Q.

CF confirma ocorrência de falta interna após meio ciclo de ocorrências consecutivas do sinal de *pickup*. $D\phi$ identifica as demais fases participantes na falta usando um critério de três ocorrências consecutivas de *pickup* ou *aux* após confirmação de falta interna utilizando o critério CF. Esta lógica deve ser interpretada sendo executada em um processador síncrono, repetindo o processo a cada nova amostra.

4.1.1 Considerações de ajuste

As inclinações, ou *slopes*, do sistema de proteção apresentadas nas equações 3.13 e 3.23 e os limiares nas equações 3.14 e 3.24 requerem ajustes específicos para cada sistema protegido.

O fluxo de corrente durante o carregamento máximo da linha é usado para determinar a grandeza de operação nessa condição e conseqüentemente o parâmetro Q_{min} (Potência reativa máxima consumida na linha) para evitar falhas de segurança. O patamar mínimo para a confirmação de eventos com múltiplas fases, Q_{min2} , deve também levar em consideração a grandeza de operação considerando a maior corrente capacitiva esperada.

O limiar de tensão para o bloqueio da ANSI 87E foi ajustado em 50% da tensão nominal. Isso permitiu um patamar E_{min} mais baixo possibilitando a identificação faltas internas com resistência mais alta.

Para garantir a coordenação das proteções deve-se avaliar a queda de tensão durante as faltas com maior resistência detectadas pela ANSI 87Q limitada pelo patamar Q_{min} . Caso estas provoquem subtensão abaixo de 65% dos valores nominais, a associação dos algoritmos pode não ser confiável.

Para todos os casos estudados, E_{min} e Q_{min} resultaram ordens de magnitude maiores que a restrição imposta pelos erros considerados pela ANSI 87L, como erros de ADC e de magnetização residual de TCs (BLACKBURN; DOMIN, 2014).

Para definir os ajustes das inclinações das funções ANSI 87E e ANSI 87Q, slp_1 e slp_2 , requerem considerações similares às aplicáveis a proteção ANSI 87L: precisão dos TCs e o comprimento da linha.

Valores típicos encontrados para os *slopes* foram 0.25 e 0.35 para as funções ANSI 87E e ANSI 87Q respectivamente.

Simulações e resultados

A validação da metodologia foi realizada utilizando simulações. Este capítulo descreve os sistemas elétricos simulados e os resultados da execução dos algoritmos de proteção.

5.1 Cenários de simulação com duas barras

Para as simulações das redes elétricas e a aplicação dos algoritmos de proteção propostos, foram utilizados os programas *Alternative Transient Program/Electromagnetic transient program* (ATP/EMTP) em conjunto com o ATPDraw. Buscou-se utilizar dados de sistemas existentes para que as simulações fossem tão realísticas quanto possível.

Cinco linhas de transmissão com diferentes níveis de tensão, potências de curto-circuito, topologias dos condutores e condições de falta foram usadas para testar a implementação dos algoritmos propostos.

Foi usada uma topologia para testes como a vista na Figura 5.1, considerando-se inicialmente os transformadores para instrumentos ideais. Todos os casos se referem a circuitos simples, com exceção do caso de 138 kV, que avalia a proteção de uma linha de circuito duplo. Nesse sistema, não há nenhuma comunicação ou compensação dinâmica de parâmetros entre as proteções de cada um dos circuitos.

Figura 5.1 – Topologia do sistema de testes.

Conteúdo adaptado de Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018c) ©2018 IEEE.

Para usar um conjunto realístico de dados, as LT simuladas foram baseadas em equipamentos reais do Sistema Interligado Nacional (SIN), que funciona em corrente alternada a 60Hz. Os dados dos casos de simulação podem ser vistos nas Tabelas 5.1, 5.2 e 5.3.

Tabela 5.1 – Sistemas de transmissão testados.

Nível de tensão	Terminal 1 PCC(MVA)		Terminal 2 PCC(MVA)		Comprimento
	3ϕ	1ϕ	3ϕ	1ϕ	
138 kV	5409	6197	2294	1611	74 km
230 kV	2581	2370	8067	9333	80 km
345 kV	2832	3083	4015	4236	145 km
500 kV	23408	17381	20801	20446	181 km
765 kV	25321	14813	29349	24141	265 km

Conteúdo adaptado de Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018c) ©2018 IEEE.

Na Tabela 5.1 estão as potências de curto-circuito (PCC) dos equivalentes dos sistemas simulados. Essas foram usadas para calcular a impedância equivalente em elementos concentrados das fontes, representados na Figura 5.1. Os parâmetros das linhas de transmissão foram obtidos usando as geometrias das mesmas e especificações dos condutores através da rotina “*line constants*” do ATP/EMTP. Foram usados os dados de linha contidos das Tabelas 5.2 e 5.3, retirados de Santos (2004).

Tabela 5.2 – Características dos cabos das linhas de transmissão.

Nível de tensão	Pos A (m)		Pos B (m)		Pos C (m)		Flecha (m)	Condutor	Bundle
	x	y	x	y	x	y			
138 kV (1)	-3	24,95	-3	21,15	-3	17,35	6,5	Partridge	1
138 kV (2)	3	24,95	3	21,15	3	17,35	6,5	Partridge	1
230 kV	-6,5	22	0	22	6,5	22	14	Drake	1
345 kV	-7,4	18,8	0	18,8	7,4	18,8	7,8	Bluebird	2 (18")
500 kV	0	31	-4,6	22,3	4,6	22,3	11,4	Chukar	3 (18")
765 kV	-13,5	28,5	0	28,5	13,5	28,5	16,5	Dipper	4 (18")

Tabela 5.3 – Características dos cabos guarda e resistividade do solo.

Nível de tensão	Guarda		Guarda		Flecha (m)	Condutor	Resistividade do solo (Ω)
	x	y	x	y			
138 kV	0	29,1	-	-	6	Aço 1/2"(HS)	400
230 kV	-4,5	27,3	4,5	27,3	11,6	Aço 5/16"(HS)	400
345 kV	-5	26,3	5	26,3	4,7	Aço 7/16"(HS)	400
500 kV	-3,6	36,3	3,6	36,3	6,3	Allumoweld	400
765 kV	-15	41,6	15	41,6	14,4	Allumoweld	400

Os casos de simulações foram gerados automaticamente usando um script de GNU Octave (EATON et al., 2017), para fornecer uma ampla variabilidade de cenários. Esses foram posteriormente simulados usando o ATP/EMTP. Esse procedimento é descrito na seção 5.1.2.

Os algoritmos propostos nas seções 3.1 e 3.2 foram implementados usando o GNU Octave. O script resultante foi utilizado para testar e analisar a proteção em todos os casos simulados.

Os valores amostrados usados pelos algoritmos foram adquiridos a partir de cada forma de onda dos casos de simulação gravada em um arquivo com extensão “.LIS”. Simulando o processo aplicado a uma implementação física, um *script* de pré-processamento realiza a filtragem passa-baixas digital e reamostra as formas de onda simuladas. Esse também salva alguns comentários incorporados ao arquivo da simulação “.ATP” que foram usados para avaliar a assertividade da solução, resultando em um arquivo de dados “.mat”.

5.1.1 Casos de interesse

Alguns casos são usados para exemplificar e ilustrar o funcionamento dos algoritmos, bem como para corroborar considerações e ajustes previamente comentados para a proteção. Os casos apresentados abaixo consideram os IEDs com uma taxa de amostragem de 32 amostras por ciclo com a aquisição de dados devidamente sincronizada. Nesta seção foram considerados os terminais local e remoto com transformadores para instrumentos ideais.

As figuras que representam características no plano diferencial devem ser avaliadas considerando a evolução dos estados das grandezas (energia ou potência reativa) de operação e restrição, que iniciam na condição de regime (fora da região de atuação) e entram na região de atuação para faltas internas, ou tem sua restrição elevada para faltas externas.

5.1.1.1 Faltas internas

Para faltas similares variando apenas a resistência, é essencial que exista uma faixa de resistências de falta na qual ambos os algoritmos atuem. Essa sobreposição é essencial para a segurança do sistema, pois indica que não existem pontos cegos entre a implementação de ambas as funções.

Podem ser observados ambos algoritmos comportando-se de forma estável para uma falta de $10\ \Omega$ a $40\ \%$ da linha de $765\ kV$ nas Figuras 5.2 e 5.3. Em todos os casos estudados, a sobreposição foi consistente e não foram necessários novos aprimoramentos. No entanto, caso o ANSI 87E e ANSI 87Q não atinjam uma solução confiável, o segundo pode ser substituído ou complementado pela ANSI 87L.

Os efeitos do filtro *anti-aliasing* podem ser vistos em diversas figuras nessa seção; ele provoca um atraso entre o momento da falta e o início das alterações de comportamento das grandezas medidas mesmo para eventos ocorridos próximos a um dos barramentos.

Figura 5.2 – Característica 87E durante falta interna.

Figura 5.3 – Característica 87Q durante falta interna.

Faltas internas de alta impedância

Durante uma falta interna, existe um aumento na energia do sistema dissipada dentro da zona de proteção. Ela é consumida na resistência de falta e na parcela resistiva da impedância dentro da zona protegida. Esse fenômeno cria uma discrepância entre os valores de energia medidos em ambos os terminais da LT. A proteção ANSI 87E é capaz de distinguir essa discrepância das perdas que ocorrem em linhas de transmissão em regime permanente, mesmo para faltas de alta resistência.

Para ilustrar este fenômeno, uma falta monofásica, com uma resistência de 500Ω , é aplicada na linha de 765 kV , previamente descrita, a 60 % do comprimento da linha, durante o instante de tensão máxima da fase afetada pela falta (90° elétricos da passagem da tensão por zero). Essa falta foi detectada pelo sistema proposto, como pode ser observado nas Figuras 5.4 e 5.5.

Figura 5.4 – Função de energia no domínio do tempo durante falta de alta impedância.

Conteúdo adaptado de Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018c) ©2018 IEEE.

A Figura 5.4 representa uma forma de onda de energia do domínio do tempo. O *pickup* ocorre quando a energia diferencial se torna maior do que a energia mínima de operação e maior do que a energia de restrição multiplicada pelo *slope*. No entanto, como descrito anteriormente, para a operação ANSI 87E é necessária a confirmação de tensão adequada, exigindo meio ciclo adicional.

Pode-se notar valores negativos de energia de operação na pré-falta para a fase representada nas Figuras 5.4 e 5.5. Esses valores negativos significam energia deixando a zona de proteção dessa fase. Esse fenômeno ocorre pelo fato da linha de transmissão simulada não ser transposta e os acoplamentos eletromagnéticos da linha permitirem a transferên-

Figura 5.5 – Característica 87E durante falta de alta impedância.

Conteúdo adaptado de Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018c) ©2018 IEEE.

cia de energia entre as fases. No entanto, a energia total de operação, considerando todas as fases, é positiva e reflete as perdas na linha.

Falta bifásica interna

Observando o comportamento das características de energia durante uma falta bifásica na linha de 345 kV na Figura 5.6, observa-se que, em regime de falta, é possível a transferência direta de energia entre fases. Esse fluxo energético causa valores negativos de operação da função ANSI 87E, evidenciando a necessidade do uso de valores absolutos para definir a região de atuação conforme descrito na seção 3.1.5.

A proteção diferencial de potência reativa também pode assumir grandezas de operação negativas durante transitórios. No entanto, em regime, esses valores se estabilizam em grandezas positivas de operação, como pode ser visto na Figura 5.6, que ilustra uma falta interna na linha de transmissão de 138 kV. Podem ser usados valores absolutos apenas para atuação simultânea de todas as fases em falta, ou seja, quando a característica diferencial de potência reativa entra na região de atuação as demais fases podem ser consideradas em falta caso entrem na região de atuação ou de confirmação, representadas na Figura 5.7. Dessa forma, o *trip* ocorre simultaneamente para todas as fases.

A região de confirmação vista na Figura 5.7 diz representa a região onde a condição $aux=1$ da Figura 4.3 é satisfeita.

Figura 5.6 – Característica 87E durante falta bifásica.

Figura 5.7 – Característica 87Q durante falta bifásica.

5.1.1.2 Faltas externas

A solução proposta nessa obra é atingida pela utilização de dois algoritmos de proteção. Logo, para que esse sistema seja seguro, é necessário que nenhuma das proteções atue indevidamente para faltas externas.

Faltas francas externas

Durante faltas de baixa impedância próximas aos terminais de medição, ocorre um afundamento de tensão e a ANSI 87E é bloqueada, como descrito na seção 3.3. Nesse

caso, a proteção diferencial de potência reativa é mantida em operação. A Figura 5.8 mostra a característica diferencial de operação de potência reativa durante uma falta externa. É evidente que a função não passa pela região de atuação neste caso.

A ANSI 87Q tem sua grandeza de restrição elevada durante faltas externas, ao mesmo tempo que a grandeza de operação não apresenta grande elevação. Assim, essa função de proteção é capaz de distinguir curtos-circuitos francos internos dos externos.

Figura 5.8 – Característica 87Q durante falta externa.

Podem-se notar valores negativos para a potência reativa estimada na pré-falta na Figura 5.8. Nesse caso, esses valores são causados pela corrente capacitiva, que é uma transferência de potência reativa negativa na convenção adotada.

Faltas externas sem comprometimento de tensão

Durante a ocorrência de curtos-circuitos externos mais distantes ou com maior resistência de falta, que não provocam afundamentos de tensão nos terminais de medição, ambas as proteções são mantidas ativas e não devem atuar indevidamente. Para avaliar essa condição, foi aplicada uma falta externa de $40 \, \Omega$ no terminal remoto do sistema de $500 \, kV$.

É possível notar nas Figuras 5.9 e 5.10 que ambas as características não entram na zona de operação.

Figura 5.9 – Característica 87E durante falta externa.

Figura 5.10 – Característica 87Q durante falta externa.

5.1.1.3 Perda de sincronismo na amostragem entre terminais

Tensões e correntes são amostradas de forma simultânea em cada terminal. No entanto, podem existir diferenças entre os relógios de amostragem dos IEDs nos terminais da linha, em especial no intervalo entre pulsos de sincronismo comumente empregados (PHADKE; THORP, 2009).

Em regime permanente, o fluxo de energia e potência reativa medidos nos terminais não é impactado pelo sincronismo entre os diferentes IEDs, pois esses são calculados com correntes e tensões síncronas entre si.

Caso ocorra uma falta durante um escorregamento relativo entre os relógios de aqui-

sição, os algoritmos de proteção podem ser temporariamente levados a uma condição de *pickup*. Para ilustrar o fenômeno, faltas externas foram aplicadas ao sistema considerando um erro de sincronismo de cinco amostras inteiras, equivalente a $2,6\text{ ms}$ ou 56° elétricos.

Figura 5.11 – Característica 87E durante falta externa com amostras dessincronizadas.

Figura 5.12 – Característica 87Q durante falta externa com amostras dessincronizadas.

Observa-se nas Figuras 5.11 e 5.12 que as características diferenciais são levadas à região de operação. No entanto, não são mantidas nesta condição tempo suficiente para gerar erros de atuação.

O caso exemplificado de 5 amostras de erro de sincronismo foi utilizado para ilustrar as consequências dessa condição nos algoritmos apresentados. Uma análise de sensibilidade

a erros de sincronismo menores é apresentada na seção 5.1.3.2.

5.1.2 Casos gerados

Para validar a associação entre ANSI 87E e ANSI 87Q, foram gerados 5.280 casos para buscar falhas que não tivessem sido previstas durante o desenvolvimento do algoritmo.

A preocupação por efeitos indesejados também vem do fato de que foram usadas grandezas de energia e potência reativa para a proteção. Devido à dificuldade de se aplicar a sobreposição a esses fenômenos, estratégias convencionais de ajustes poderiam não encontrar problemas destas aplicações.

Foram gerados diversos casos utilizando os parâmetros da Tabela 5.4, usando um *script* de automação criado para o GNU Octave. A Figura 5.13 contém o fluxograma do sistema de testes utilizado.

Tabela 5.4 – Faltas aplicadas a cada nível de tensão.

Nível de Tensão (kV)	Tipo de falta	Ângulo de incidência da falta	$R_f \Omega$	Número de simulações
138	ABC	0° 45° 90°	0, 1, 2, 5	288
	AN		0, 2, 5, 10, 20, 40, 50, 100, 150	648
	BC		0, 1, 2, 10	288
	BCN		0, 1, 2	216
230	ABC		0, 1, 2, 5	192
345	AN		0, 2, 5, 10, 20, 40, 50, 100, 150	432
500			0, 1, 2, 10	192
765				0, 1, 2

O fechamento das chaves de falta é feito considerando o tempo de simulação. O ângulo de incidência de falta é válido apenas para o terminal local.

Conteúdo adaptado de Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018c) ©2018 IEEE.

Dos 5.280 casos simulados utilizando o ATP/EMTP, 3.600 correspondem a faltas internas. Pode ser observado na Tabela 5.4 que número de casos gerados no conjunto de 138 kV é maior pois este é um sistema com torres de transmissão de circuito duplo e todas as faltas foram aplicadas a ambas as linhas. Uma grande variedade de resistências de falta foi simulada de forma a observar a atuação conjunta do ANSI 87E e ANSI 87Q. Apesar de não serem esperadas impedâncias maiores que 100 Ω (ANDRADE; SORRENTINO, 2010), os casos simulados incluem faltas com impedâncias de 150 Ω de forma a comprovar a confiabilidade do sistema.

Uma função¹ de pré processamento foi aplicada a todas as oscilografias provenientes das simulações no ATP/EMTP. As formas de onda foram filtradas e reamostradas para 32 amostras por ciclo para serem utilizados pelos algoritmos de proteção.

¹ A palavra função nesta parte do texto se refere a um subprograma que retorna um resultado.

Figura 5.13 – Fluxograma do processo de simulação e análise em lote.

As proteções ANSI 87E e ANSI 87Q foram implementadas juntas em uma única função escrita no GNU Octave. Um *script* executa essa função para todos os casos de entrada. Cada execução da função retorna uma linha de resultados informando:

- a) nome do caso;
- b) ocorrência de erro na atuação;
- c) tempo de atuação;
- d) instante de tempo que cada uma das funções atuou em cada fase;
- e) descrição das incertezas consideradas;
- f) nível de tensão;
- g) tipo de falta;
- h) instante da falta;
- i) ponto de aplicação da falta.

O *script* responsável por chamar a função que executa as proteções então concatena as informações recebidas de cada execução em um único arquivo “csv” que pode ser aberto por qualquer software para visualização de planilhas.

5.1.3 Resultados

O arquivo “csv” gerado pelo *script* de automação foi analisado usando o Libreoffice Calc, um software de planilha eletrônica de código aberto. Esse arquivo também foi usado para gerar os gráficos de distribuição dos tempos de *trip*.

5.1.3.1 Análise dos dados sem a consideração de incertezas

Não foram encontradas falhas de segurança ou confiabilidade durante as simulações do algoritmo de proteção. A distribuição dos tempos de *trip* pode ser observada na Figura 5.14.

Figura 5.14 – Distribuição dos tempos de *trip*.

Todos os 3.600 comandos de *trip* ocorreram com seletividade correta de fase e em menos de 16,2 ms a partir do momento de aplicação da falta, atingindo os objetivos seleção de fase e tempo de *trip* inferior a um ciclo para todos os casos. Deve-se ressaltar que, como o algoritmo requer meio ciclo para realizar a confirmação de disparo e seleção de fase, o *pickup* das funções ocorreu em menos de meio ciclo para todas as atuações.

A Figura 5.15 mostra a incidência de *trip* de cada função. A maior detecção das faltas pela ANSI 87Q é atribuída ao estudo se restringir a faltas de até 150 Ω . O fato de 44% dos curtos-circuitos terem sensibilizado ambos algoritmos é devido ao intervalo de resistências de falta que ambas as proteções atuam.

A proteção ANSI 87Q detectou todas as faltas de até 10 Ω e diversos eventos com resistências maiores que essa. A função baseada em energia é sensibilizada para algumas faltas francas (afastadas do terminal) até curtos-circuitos de alta impedância.

5.1.3.2 Análise de sensibilidade

As incertezas representadas no diagrama de blocos da Figura 5.13 foram incluídas de forma a avaliar a sensibilidade dos algoritmos perante condições esperadas de operação prática. Os cenários adicionais foram criados baseados nas simulações anteriores, considerando fontes de erro e incertezas comuns ao sistema.

Figura 5.15 – Função sensibilizada pela falta.

Foram considerados erros de exatidão na linearidade dos TCs de 10 %, baseado em IEEE (2016). É importante observar que os erros de TCs foram considerados diferentes em cada terminal.

A possibilidade de diferenças entre os relógios de amostragem dos IED nos terminais da linha discutida na seção 5.1.1.3 motivou a avaliação das consequências de erros no sincronismo de amostra. Foram simulados casos de erro de sincronismo de até 1 *ms* (duas amostras em um sistema com 32 amostras por ciclo de 60 *Hz*).

A incerteza dos 3 bits menos significativos foi baseada nas especificações de componentes comerciais, como visto em Texas Instruments (2017).

Os fatores considerados para essa seção estão representados na Tabela 5.5. Valores positivos e negativos de erros de sincronismo correspondem a atrasos na amostragem nos terminais remoto e local, respectivamente.

Tabela 5.5 – Incertezas consideradas na medição para um sistema físico.

Fontes de erro	Erros considerados
Transformadores de corrente	0 e 10 %
ADCs de 14 <i>bits</i>	0 e 3 bits
Erros de sincronismo	-2, -1, 0, 1 e 2 amostras

Conteúdo adaptado de Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018c) ©2018 IEEE.

Todas as fontes de erro consideradas foram permutadas de forma a gerar 30 condições diferentes de teste para cada caso anteriormente simulado no ATP/EMTP, totalizando 158.400 simulações diferentes da proteção.

Todas as faltas internas foram detectadas corretamente em menos de 17,8 *ms*, incluindo os casos com erros de sincronismo, e não houve atuações da proteção para faltas

externas. No entanto, 34 destes apresentaram erro de segurança na detecção de fase. Esses erros ocorreram apenas nas circunstâncias de perda de sincronismo entre terminais, com atraso de duas amostras, equivalente a 1 ms ou $22,5^\circ$ elétricos.

Segundo Phadke e Thorp (2009), podem ser usados pulsos a cada segundo para sincronizar os relógios de aquisição dos IEDs e osciladores locais são inerentemente muito estáveis, com erros menores de 10 ppm . Como estudo realizado indica que desvios de até $521\text{ }\mu\text{s}$ (erro de uma amostra considerando a aquisição de 32 amostras por ciclo) podem ser considerados seguros, os algoritmos não necessitam amostragem síncrona nos terminais. A solução proposta permite a utilização das amostras com estampa de tempo mais próximas como entradas dos algoritmos.

Mesmo considerando condições nas quais o sistema deveria sair de operação, não foi detectado nenhum erro de confiabilidade; as únicas falhas de segurança foram erros de seleção de fase. Como a condição na qual elas foram detectadas pode ser evitada, o algoritmo foi considerado seguro e confiável.

A distribuição dos tempos de atuação para essa análise de sensibilidade na Figura 5.16 se assemelha à da Figura 5.14. O espalhamento dos tempos de *trip* pode ser atribuído a maior variabilidade nos casos avaliados.

Figura 5.16 – Distribuição dos tempos de *trip* durante a análise de sensibilidade.

5.1.3.3 Sensibilidade perante saturação de TC

Sistemas de potência, incluindo os TCs, são dimensionados para operarem com certas correntes de curto-circuito. Caso a potência de curto-circuito aumente, é possível que transformadores de corrente saturem. Nessa condição, esses equipamentos fornecem

correntes secundárias que não reproduzem adequadamente o sinal observado nos enrolamentos primários, como pode ser visto nas Figuras 5.17 e 5.20.

Para testar a sensibilidade da solução de proteção perante a saturação de um TC, foram inseridos transformadores de corrente baseados em Folkers (1999) no conjunto de casos de 765 kV. A saturação do transformador foi provocada elevando-se a resistência de *burden* conectada ao secundário do TC. Nessa nova configuração, 480 simulações foram feitas com faltas fase-terra e trifásicas, internas e externas, levando em consideração diferentes ângulos de incidência da falta, de forma a avaliar os efeitos da saturação na proteção.

As faltas foram geradas usando o mesmo TC e variando a resistência de *burden* em um dos secundários até a usada para produzir as correntes para faltas internas e externas vistas respectivamente nas Figuras 5.17 a 5.22.

Para todos os casos simulados, a proteção proposta foi capaz de discernir entre faltas internas e externas. Vale ressaltar que foi mantido o mesmo ajuste das seções anteriores.

Figura 5.17 – Corrente vista por um TC saturado durante falta interna.

Conteúdo adaptado de Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018c) ©2018 IEEE.

Durante a falta interna com saturação de TC representada na Figura 5.17, a função ANSI 87Q se manteve, de forma estável, na região de atuação, como pode ser visto nas Figuras 5.18 e 5.19.

Durante a falta externa com saturação de TC representada na Figura 5.20, a ANSI 87Q foi mantida fora da região de atuação, como pode ser visto nas Figuras 5.21 e 5.22.

A proteção diferencial tradicional faz uso de várias técnicas para evitar atuações indevidas durante saturações de TCs, como a mudança de característica diferencial perante a detecção de uma falta externa (BLACKBURN; DOMIN, 2014). A solução proposta nesta tese não necessitou destes recursos para apresentar resultados seguros.

Figura 5.18 – Função de potência reativa executada com TC saturado durante falta interna.

Figura 5.19 – Característica 87Q durante falta franca em sistema com TC saturado.

A função ANSI 87Q apresenta considerável robustez à saturação por componente aperiódica, o que pode ser atribuído à multiplicação da corrente por um sinal senoidal.

Figura 5.20 – Corrente vista por um TC saturado durante falta externa.

Conteúdo adaptado de Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018c) ©2018 IEEE.

Figura 5.21 – Função de potência reativa executada com TC saturado durante falta externa.

Figura 5.22 – Característica 87Q durante falta franca externa em sistema com TC saturado.

5.1.3.4 Sensibilidade perante o uso de TP capacitivos

Em sistemas de extra alta tensão, TPs com divisores capacitivos ou transformadores de potencial capacitivos (TPCs) são os equipamentos normalmente usados para realizar a medição do potencial elétrico. Apesar de desenvolvidos para realizar medições precisas em regime permanente, esses dispositivos apresentam distorções para sinais fora da frequência nominal da rede, como os que ocorrem durante transitórios. Como os algoritmos propostos nesta obra usam essa informação, é necessário avaliar o comportamento dos mesmos nessa condição.

Para avaliar os efeitos da instrumentação baseada em TPCs, o sistema de 500 kV foi alterado para que as medições de tensão fossem realizadas por TPs capacitivos baseados em Pajuelo, Ramakrishna e Sachdev (2008). As formas de onda de um TPC e um TP ideal podem ser vistas na Figura 5.23. Para testar os algoritmos de proteção nessa configuração as mesmas 960 faltas da Tabela 5.4 foram repetidas utilizando as medições por TPCs.

A solução de proteção atuou corretamente, com seleção de fase adequada para todos os casos. A assertividade pode ser atribuída ao fato do método se basear em dois algoritmos coordenados.

É possível observar nas Figuras 5.24 e 5.25 que um afundamento de tensão pode afetar a proteção ANSI 87E. No entanto, como esta é bloqueada por essa condição, o comportamento dinâmico do TPC não provoca erros de atuação deste algoritmo.

A proteção ANSI 87Q mantém seu comportamento fazendo uso da referência de tensão proveniente da PLL, que não é significativamente afetada durante os transitórios, como exemplificado nas Figuras 5.26 e 5.27.

Figura 5.23 – Efeito do TPC durante uma falta franca.

Conteúdo adaptado de Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018c) ©2018 IEEE.

Adicionalmente, durante faltas que não bloqueiam a ANSI 87E, a componente exponencial de tensão resultante do divisor capacitivo não provocou um acréscimo no diferencial de energia que produzisse erros de segurança ou confiabilidade.

Figura 5.24 – Função de energia durante falta franca em sistema com TPC.

Figura 5.25 – Característica 87E durante falta franca em sistema com TPC.

Figura 5.26 – Função de potência reativa durante falta franca em sistema com TPC.

Figura 5.27 – Característica 87E durante falta franca em sistema com TPC.

5.2 Cenário de simulação com múltiplas barras

Para a avaliação da proteção proposta, além das simulações de sistemas com dois equivalentes de Thévenin nas extremidades, foi simulado um sistema mais complexo buscando identificar algum comportamento anômalo quando nessa condição. Nesta seção são investigados os efeitos das trocas de ondas viajantes por diferentes caminhos e problemas gerados por faltas externas com maior carga indutiva sem colapso de tensão dos terminais.

5.2.1 Sistema analisado

O sistema analisado faz parte do sistema de 500 kV do SIN e está representado na Figura 5.28 com cinco barras principais (A, B, C, D, E). O sistema simulado, além de equivalentes de Thévenin, possui impedâncias que representam equivalentes de transferência entre barras, que usam a mesma simbologia.

A Figura 5.29 mostra os múltiplos acoplamentos eletromagnéticos entre diferentes linhas existente no cenário simulado. A linha protegida entre as barras A e B compartilha torres e corredores com diferentes LT em seu trajeto. Ela compartilha torres de transmissão com a linha A–E por 23,8 km (17,55% do seu comprimento) e compartilha corredores com as LT B–C e C–D por 87,4 km (64,45% do seu comprimento) e 24,4 km (17,99% do seu comprimento), respectivamente.

Figura 5.28 – Topologia do sistema de testes com múltiplas barras.

A simbologia desta seção difere do resto do documento, representando as linhas de transmissão como cilindros.

5.2.2 Casos gerados

Os pontos utilizados para a troca de modelo dos trechos de linhas de transmissão foram utilizados para a determinação dos pontos de falta, como pode ser visto na Figura 5.29. Foram aplicados curtos-circuitos ao longo da linha A–B (a 23,8 km da barra A e a 24,4 km da barra B), nos terminais (dentro e fora da zona protegida) e nas linhas A–E e B–C, a 23,8 km e a 24,4 km das barras, respectivamente. Os pontos de falta podem ser vistos na Figura 5.29.

Os nós definidos no sistema pelos arranjos de compartilhamento de torres e corredores corresponderem a aproximadamente 20% do comprimento da LT; por isso, foram usados como pontos de falta. Esta seção investiga o comportamento da proteção quando aplicada a um sistema interconectado com trocas de ondas viajantes por diferentes caminhos e também problemas gerados por faltas externas sem colapso de tensão dos terminais.

Foi usada a mesma abordagem de geração automática de casos retratada na Figura 5.13 resultando nos testes apresentados na Tabela 5.6.

Figura 5.29 – Acoplamentos entre linhas para o cenário com múltiplas barras.

Os acoplamentos em verde correspondem ao compartilhamento de torres.

Os acoplamentos em laranja correspondem ao compartilhamento de corredores.

Os raios em azul são os pontos nos quais foram aplicadas faltas.

O bloco proteção diz respeito aos dois IEDs e o canal de comunicação representados na Figura 5.28.

Tabela 5.6 – Faltas aplicadas no cenário com múltiplas barras.

Nível de Tensão (kV)	Tipo de falta	Ângulo de inserção da falta	$R_f \Omega$	Número de simulações
500	ABC	0°	0, 1, 2, 5	96
	AN	45°	0, 2, 5, 10, 20, 40, 50, 100, 150	216
	BC	90°	0, 1, 2, 10	96
	BCN		0, 1, 2, 10	96

O fechamento das chaves de falta é feito considerando o tempo de simulação. O ângulo de incidência de falta é válido apenas para a barra A.

5.2.3 Resultados

Após a simulação dos transitórios eletromagnéticos no ATP/EMTP e o processamento da proteção executada no GNU Octave, os resultados foram compilados na forma de uma base de dados que foi posteriormente analisada.

A proteção atuou de forma confiável e segura em todos os casos simulados; a seleção de fase atuou corretamente em todas as simulações. A distribuição dos tempos de *trip* está representada na Figura 5.30.

Figura 5.30 – Distribuição dos tempos de *trip*.

A distribuição da Figura 5.30 possui intervalos com incidência muito menor que os resultados expostos nas Figuras 5.14 e 5.16. Estes foram atribuídos a menor variabilidade nas distâncias internas de falta. Nestas simulações, como nas da seção 5.1, todos os *trips* ocorreram em menos de um ciclo após a incidência da falta.

Esse conjunto de simulações avaliou a segurança da proteção ANSI 87E durante faltas externas distantes dos terminais de medição e verificou que uma maior incidência de transitórios não afeta o funcionamento dos algoritmos propostos.

Conclusões

Ao longo desta tese foi desenvolvida uma solução de proteção diferencial baseada em dois algoritmos, um de energia e outro de potência reativa.

Os capítulos 3 e 4 descreveram o desenvolvimento e a aplicação dos algoritmos de proteção baseados em conceitos físicos e de engenharia. Foi avaliado o comportamento das grandezas calculadas em diversos cenários de forma a propor uma solução de proteção confiável e segura.

O capítulo 5 apresentou os testes realizados em simuladores de transitórios eletromagnéticos usando diferentes sistemas elétricos e seus resultados foram usados como entrada para os algoritmos de proteção. O comportamento das funções em casos de interesse foi exposto e corroborou o funcionamento previsto nos capítulos anteriores. Os testes em lote tiveram sucesso, não ocorreram falhas de confiabilidade e apenas foram detectadas falhas de seleção de fase que podem ser classificadas como de segurança durante a análise de sensibilidade. Essas ocorreram quando foi avaliada a atuação da proteção com erros de sincronismo de duas amostras.

Foi observado que a ANSI 87E atuou para 52% das simulações com faltas internas enquanto a ANSI 87Q atuou para 92% dos casos. O fato de 44% das faltas terem sensibilizado ambas as proteções indicou segurança na associação das funções.

Esses números levaram ao enquadramento da ANSI 87E (que utiliza valores amostrados de tensão e corrente para avaliar o comportamento energético da linha) como um algoritmo complementar capaz de detectar faltas de maior resistência com seleção intrínseca de fase.

O algoritmo que avalia a potência reativa, chamado ANSI 87Q, foi criado com o intuito de complementar o algoritmo baseado em energia. No entanto, o ANSI 87Q apresentou-se como uma alternativa à proteção diferencial tradicional ANSI 87L com tempos de atuação menores e seleção intrínseca de fase.

A partir de testes exaustivos utilizando simulações realizadas no ATP/EMTP, a solução proposta foi capaz de identificar faltas na linha de transmissão em todas as condições de operação esperadas. A robustez da solução perante imprecisões dos transformadores de

corrente, medições provenientes de TPCs e até sistemas com TCs saturados foi confirmada nas simulações realizadas.

Os algoritmos propostos não demandam taxas de amostragem elevadas, sendo compatível com dispositivos comerciais atuais. Os métodos são intrinsecamente imunes a correntes capacitivas e não necessitaram alterações para operar com circuitos duplos de linha de transmissão.

6.1 Publicações decorrentes do doutorado

No decorrer do doutorado foram realizadas as seguintes publicações:

- a) Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018c);
- b) Dantas, Pellini e Manassero Jr (2018a);
- c) Dantas et al. (2018);
- d) Solé et al. (2019);

As metodologias desenvolvidas também basearam um pedido de patente registrado pela Agência de inovação da Universidade de São Paulo (DANTAS; PELLINI; MANASSERO JR, 2018b).

Referências

- AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. **IEEE Transactions on Industry Applications**, IA-20, n. 3, p. 625–630, May 1984. ISSN 0093-9994.
- AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. **Instantaneous power theory and applications to power conditioning**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007. v. 31.
- ALMEIDA, M. L. S.; SILVA, K. M. Transmission lines differential protection based on an alternative incremental complex power alpha plane. **IET Generation, Transmission Distribution**, v. 11, n. 1, p. 10–17, 2017. ISSN 1751-8687.
- ANDRADE, V. D.; SORRENTINO, E. Typical expected values of the fault resistance in power systems. In: **2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T D-LA)**. [S.l.: s.n.], 2010. p. 602–609.
- AZIZ, M. M. A. et al. Transmission lines differential protection based on the energy conservation law. **Electric Power Systems Research**, v. 78, n. 11, p. 1865 – 1872, 2008. ISSN 0378-7796. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779608001065>>.
- BLACKBURN, J. L.; DOMIN, T. J. **Protective relaying: principles and applications**. [S.l.]: CRC press, 2014.
- DANTAS, D. T.; PELLINI, E. L.; MANASSERO JR, G. Energy and reactive power differential protection hardware-in-the-loop validation for transformer application. **The Journal of Engineering**, v. 2018, n. 15, p. 1160–1164, 10 2018. ISSN 2051-3305.
- Daniel Texidor Dantas, Eduardo Lorenzetti Pellini e Giovanni Manassero Jr. **”Método de identificação de faltas em ao menos um equipamento de um sistema elétrico, método de proteção de ao menos um equipamento de um sistema elétrico, sistemas que executam os métodos e uso dos métodos e sistema”**. 2018. BR 10 2018 004805-8.
- DANTAS, D. T.; PELLINI, E. L.; MANASSERO JR, G. Time-domain differential protection method applied to transmission lines. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 33, n. 6, p. 2634–2642, Dec 2018. ISSN 0885-8977.

- DANTAS, D. T. et al. Proteção diferencial no domínio do tempo aplicada a linhas de transmissão com compensação série – validação hardware-in-the-loop. In: **XIV Seminário Técnico de proteção e controle**. [S.l.: s.n.], 2018.
- DARWISH, H. A.; TAALAB, A. M. I.; AHMED, E. S. Investigation of power differential concept for line protection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 20, n. 2, p. 617–624, April 2005. ISSN 0885-8977.
- EATON, J. W. et al. **GNU Octave version 4.2.1 manual: a high-level interactive language for numerical computations**. [S.l.], 2017. Disponível em: <<https://www.gnu.org/software/octave/doc/v4.2.1/>>.
- FOLKERS, R. Determine current transformer suitability using emtp models. In: **26th Annual Western Protective Relay Conference**. [S.l.: s.n.], 1999.
- FOX, H.; BOLTON, W. **Mathematics for engineers and technologists**. [S.l.]: Elsevier, 2002.
- GOLESTAN, S.; GUERRERO, J. M.; VASQUEZ, J. C. Three-phase plls: A review of recent advances. **IEEE Transactions on Power Electronics**, v. 32, n. 3, p. 1894–1907, March 2017. ISSN 0885-8993.
- HE, Y. et al. An improved scheme of active power differential protection for transmission line. In: **2018 IEEE Power Energy Society General Meeting (PESGM)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–5. ISSN 1944-9933.
- HOROWITZ, S. H.; PHADKE, A. G. **Power system relaying**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2014. v. 22.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE standard electrical power system device function numbers, acronyms, and contact designations. **IEEE Std C37.2-2008 (Revision of IEEE Std C37.2-1996)**, p. 1–48, Oct 2008.
- INSTITUTE OF ELECTRICAL AND ELECTRONICS ENGINEERS. IEEE standard requirements for instrument transformers. **IEEE Std C57.13-2016 (Revision of IEEE Std C57.13-2008)**, p. 1–96, June 2016.
- JOHNS, A. T. New ultra-high-speed directional comparison technique for the protection of e.h.v. transmission lines. **IEE Proceedings C - Generation, Transmission and Distribution**, v. 127, n. 4, p. 228–239, July 1980. ISSN 0143-7046.
- KAWADY, T. A.; TAALAB, A.-M. I.; AHMED, E. S. Dynamic performance of the power differential relay for transmission line protection. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 32, n. 5, p. 390–397, 2010.
- KINDERMANN, G. Proteção de sistemas elétricos de potência, vol. 1. **Florianópolis: UFSC, 2005a. 283p**, 2005.
- NAMDARI, F.; JAMALI, S.; CROSSLEY, P. A. Power differential protection as primary. In: **2008 IET 9th International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2008)**. [S.l.: s.n.], 2008. p. 80–85. ISSN 0537-9989.

- NOHRA, A. F. H.; KANAAN, H. Y.; FADEL, M. A control strategy in active power filter for power quality improvement. In: **The 2nd IEEE Conference on Power Engineering and Renewable Energy (ICPERE) 2014**. [S.l.: s.n.], 2014. p. 42–47.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Procedimentos de Rede, Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção e de telecomunicações**. [S.l.], 2011.
- OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO. **Procedimentos de Rede, Submódulo 2.6 - Requisitos mínimos para os sistemas de proteção, de registro de perturbações e de teleproteção**. [S.l.], 2016.
- PAJUELO, E.; RAMAKRISHNA, G.; SACHDEV, M. S. Phasor estimation technique to reduce the impact of coupling capacitor voltage transformer transients. **IET Generation, Transmission Distribution**, v. 2, n. 4, p. 588–599, July 2008. ISSN 1751-8687.
- PHADKE, A. G.; THORP, J. S. **Computer relaying for power systems**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2009.
- ROCKEFELLER, G. D. Fault protection with a digital computer. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-88, n. 4, p. 438–464, April 1969. ISSN 0018-9510.
- SANTOS, R. C. dos. **Algoritmo Baseado em redes neurais artificiais para a proteção de distância de linhas de transmissão**. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo, 2004.
- SCHNEIDER ELECTRIC. **"Easergy MiCOM P54x"**. [S.l.], 2017.
- SCHOSSIG, W. Introduction to the history of differential protection. **PAC World**, p. 70–76, 2008.
- SCHWEITZER, E. et al. New time-domain line protection principles and implementation. In: **13th International Conference on Developments in Power System Protection**. [S.l.: s.n.], 2016.
- SCHWEITZER, E. O. et al. Speed of line protection - can we break free of phasor limitations? In: **2015 68th Annual Conference for Protective Relay Engineers**. [S.l.: s.n.], 2015. p. 448–461.
- SIEMENS. **"Distance and Line Differential Protection, Breaker Management for 1-Pole and 3-Pole Tripping 7SA87, 7SD87, 7SL87, 7VK87"**. [S.l.], 2018.
- SOLé, C. et al. Simulação em tempo real de algoritmo de proteção de distância para linhas de transmissão com compensação série com uso de redes neurais. In: **XVII Encontro regional ibero-americano de cigre**. [S.l.: s.n.], 2019.
- TAALAB, A. M. I.; DARWISH, H. A.; AHMED, E. S. Performance of power differential relay with adaptive setting for line protection. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 22, n. 1, p. 50–58, Jan 2007. ISSN 0885-8977.

TANGE, O. Gnu parallel - the command-line power tool. ;login: **The USENIX Magazine**, Frederiksberg, Denmark, v. 36, n. 1, p. 42–47, Feb 2011. Disponível em: <<http://www.gnu.org/s/parallel>>.

TEXAS INSTRUMENTS. "ADS547414-Bit,400-MSPSA analog-to-Digital Converter". [S.l.], 2017.

VITINS, M. A fundamental concept for high speed relaying. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, PAS-100, n. 1, p. 163–173, Jan 1981. ISSN 0018-9510.

WEN, M.; CHEN, D.; YIN, X. An energy differential relay for long transmission lines. **International Journal of Electrical Power & Energy Systems**, Elsevier, v. 55, p. 497–502, 2014.

YABE, K. Power differential method for discrimination between fault and magnetizing inrush current in transformers. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 12, n. 3, p. 1109–1118, Jul 1997. ISSN 0885-8977.

Apêndices

Decomposição da potência

Uma análise da decomposição das potências é outra forma de compreender os fenômenos estudados nesta tese.

A.1 Potência ativa ou energia

Analisando a potência medida nas interfaces de um componente pode-se separar a parcela ativa da reativa, conforme é visto no equacionamento a seguir:

$$p(t) = V \cos(\omega t) I \cos(\omega t + \theta) \quad (\text{A.1})$$

$$p(t) = V \cos(\omega t) I \{ \cos(\omega t) \cos(\theta) - \sin(\omega t) \sin(\theta) \} \quad (\text{A.2})$$

$$p(t) = VI \{ \cos(\theta) \cdot \cos(\omega t) \cos(\omega t) \} - VI \{ \sin(\theta) \cdot \sin(\omega t) \cos(\omega t) \} \quad (\text{A.3})$$

$$p(t) = VI \left\{ \cos(\theta) \cdot \frac{\cos(2\omega t) + 1}{2} \right\} - VI \left\{ \sin(\theta) \cdot \frac{\sin(2\omega t)}{2} \right\} \quad (\text{A.4})$$

$$p(t) = \underbrace{\frac{VI}{2} \left\{ \cos(\theta) \cdot \underbrace{[\cos(2\omega t) + 1]}_{\text{média} = 1} \right\}}_{\text{Parcela ativa}(t)} - \underbrace{\frac{VI}{2} \left\{ \sin(\theta) \cdot \underbrace{[\sin(2\omega t)]}_{\text{média} = 0} \right\}}_{\text{Parcela reativa}(t)} \quad (\text{A.5})$$

Sendo assim apenas a parcela ativa da potência possui média não nula fazendo com que o valor médio da potência instantânea seja a potência ativa. Isso pode ser observado graficamente na Figura A.1.

Figura A.1 – Decomposição das potências.

A.2 Potência reativa

De forma análoga à energia o equacionamento pode ser desenvolvido considerando a tensão defasada de um quarto de ciclo:

$$q(t) = V \cos(\omega t - \pi/2) I \cos(\omega t + \theta) \quad (\text{A.6})$$

$$q(t) = V \sin(\omega t) I \cos(\omega t + \theta) \quad (\text{A.7})$$

$$q(t) = V \sin(\omega t) I \{ \cos(\omega t) \cos(\theta) - \sin(\omega t) \sin(\theta) \} \quad (\text{A.8})$$

$$q(t) = VI \{ \cos(\theta) \cdot \sin(\omega t) \cos(\omega t) \} - VI \{ \sin(\theta) \cdot \sin(\omega t) \sin(\omega t) \} \quad (\text{A.9})$$

$$q(t) = VI \left\{ \cos(\theta) \cdot \frac{\sin(2\omega t)}{2} \right\} - VI \left\{ \sin(\theta) \cdot \frac{\cos(2\omega t) + 1}{2} \right\} \quad (\text{A.10})$$

$$q(t) = \underbrace{\frac{VI}{2} \left\{ \cos(\theta) \cdot \underbrace{\left[\sin(2\omega t) \right]}_{\text{média} = 0} \right\}}_{\text{Parcela ativa}(t)} - \underbrace{\frac{VI}{2} \left\{ \sin(\theta) \cdot \underbrace{\left[\cos(2\omega t) + 1 \right]}_{\text{média} = 1} \right\}}_{\text{Parcela reativa}(t)} \quad (\text{A.11})$$

Com essa transformação, só a potência reativa possui média não nula. Possibilitando que a integral do produto $V_{\perp} \cdot I$ estime a potência reativa fluindo no sistema, como pode ser observado na Figura A.2.

Figura A.2 – Decomposição das potências com a tensão de referência defasada de 90° .

$V_{\perp}$ Corresponde à tensão de referência defasada de 90° elétricos.