

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO ESCOLA POLITÉCNICA DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

ENSAIOS DA FUNÇÃO DE DISTÂNCIA DO RELÉ DIGITAL DE PROTEÇÃO SEL 311-C COM CAIXA DE TESTE OMICRON CMC 256-6

GUSTAVO DA FONSECA ONOFRE

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL JULHO 2011

ENSAIOS DA FUNÇÃO DE DISTÂNCIA DO RELÉ DIGITAL DE PROTEÇÃO SEL 311-C COM CAIXA DE TESTE OMICRON CMC 256-6

GUSTAVO DA FONSECA ONOFRE

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

APROVADO POR:

Prof. Sebastião E. M. de Oliveira. D. Sc. (Orientador)

Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Maria Karla Vervloet Sollero, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL JULHO 2011

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus que me deu pais maravilhosos que sempre colocaram a minha educação como uma de suas prioridades e que sempre estiveram ao meu lado me dando conforto e tranqüilidade para estudar.

Agradeço aos meus irmãos, Gabriel e Gleicon, que sempre estiveram ao meu lado me apoiando e me ajudando da maneira que fosse possível.

Agradeço a minha namorada Adriana que sempre me deu muito amor, carinho e felicidade. E também me incentivou muito nesta caminhada final da faculdade.

Agradeço a todos os meus amigos e parentes que de alguma forma me ajudaram nessa caminhada. Em especial, a minha avó Hilda pela incansável torcida e preocupação com minhas provas, trabalhos e projeto de graduação.

Aos meus amigos da faculdade, tenho que agradecer a todos que estiveram presentes em momentos de diversão como festas, viagens e conversas no corredor, e principalmente a todos que estiveram ao meu lado e me ajudaram nos momentos de estudo.

Agradeço aos amigos da Abengoa Brasil que conheci nesses últimos anos e que fizeram parte de uma nova etapa em minha vida. Em especial, agradeço a todos os amigos da Omega que me apoiaram nesse momento final da faculdade.

Agradeço a Abílio José Cardoso e Robson de Almeida Vianna que, mesmo sem ter qualquer obrigação, estiveram sempre dispostos a me ajudar com meu projeto de graduação.

Agradeço à equipe de proteção da Light Energia SA. que se disponibilizou para me auxiliar com os ensaios realizados em seu laboratório.

Agradeço ao Professor Sebastião Oliveira pela orientação e a todos os professores da Escola Politécnica pelos ensinamentos passados.

Muito Obrigado a todos!

RESUMO

O trabalho apresentado demonstra a eficácia na utilização do relé digital SEL 311-C (fabricado pela Schweitzer Engineering Laboratories) para proteção com a atuação da função de distância. Este relé apresenta uma enorme gama de funcionalidades capazes de tornar mais simples, rápida e confiável a proteção dos equipamentos e, consequentemente, do sistema elétrico de potência.

Reconhecendo-se a importância dos estudos de curto-circuito, é apresentada no início do trabalho uma introdução sobre componentes simétricas e sobre as matrizes de impedância e admitância nodais do sistema. Para melhor conhecimento do funcionamento dos relés de proteção e da evolução dos mesmos ao longo dos anos, são apresentadas no trabalho informações sobre as características construtivas dos relés de proteção, com foco mais aprofundado sobre a atuação da função de distância.

ÍNDICE

| CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO | 1 |
|--|------|
| 1.1 - Objetivos | 3 |
| 1.2 – Estrutura do trabalho | 3 |
| CAPÍTULO 2 - CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS ELÉTRICOS | 5 |
| 2.1 – Componentes Simétricas | 6 |
| 2.2.1 – Matrizes de Equações da Rede Elétrica em Regime Permanente | . 10 |
| 2.2.1 – Matriz Admitância de Barra (Y _{barra}) | . 11 |
| 2.2.2 – Matriz Impedância de Barra (Z _{barra}) | . 14 |
| 2.3 – Tipos Básicos de Curto-Circuito | . 15 |
| 2.3.1 – Curto-circuito trifásico | . 17 |
| 2.3.2 – Curto-circuito monofásico para a terra | . 20 |
| 2.3.3 – Curto-circuito bifásico | . 23 |
| 2.3.4 – Curto-circuito bifásico para a terra | . 27 |
| CAPÍTULO 3 – CARACTERÍTICAS DOS RELÉS DE PROTEÇÃO | . 32 |
| 3.1 – Relés Eletromecânicos | . 34 |
| 3.2 – Relés Eletrônicos (Estáticos) | . 38 |
| 3.3 – Relés Digitais | . 39 |
| 3.4 – Zonas de Operação de um Relé de Proteção | . 43 |
| 3.5 – Relés de Distância | . 46 |
| 3.5.1 – Relé de Impedância | . 46 |
| 3.5.2 – Relé de Admitância | . 51 |
| 3.5.3 – Relé de Reatância | . 54 |
| 3.6 – Relés de Oscilação de Potência | . 56 |
| CAPÍTULO 4 – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA EXECUÇÃO DOS TESTES NO RE | ELÉ |
| DE DISTÂNCIA | . 58 |
| 4.1 – Mala de teste Omicron CMC 256-6 | . 58 |
| 4.1.1 – Conexões do Omicron CMC 256-6 | . 60 |
| 4.1.1.1 – Voltage Output ("Tensão de saída") | . 60 |
| 4.1.1.2 – Current Output ("Corrente de saída") | . 61 |
| 4.1.1.3 – Binary / Analog Input ("Entrada binária / analógica") | . 62 |
| 4.1.1.4 – Binary / Analog Output ("Saída binária / analógica") | . 63 |
| 4.1.1.5 – Analog DC Input ("Entrada Analógica CC") | . 63 |
| 4.1.1.6 – Aux DC ("Fonte Auxiliar CC") | . 64 |
| 4.1.2 – Omicron Test Universe | . 64 |
| 4.1.2.1 – State Sequencer | . 67 |
| 4.2 – Equipamento Simulador de Disjuntor | . 68 |
| 4.2 – Equipamento Transmissor de Sinal | . 70 |
| 4.3 – Equipamento Receptor de Sinal | . 71 |
| 4.4 – Relé Digital SEL 311-C | . 72 |
| 4.4.1 – Funções de Proteção | . 74 |
| 4.4.2 – Funções de Monitoração | . 75 |
| | v |

| 4.4.3 – Funções de Medição |
|--|
| 4.4.4 – Funções de Controle |
| 4.4.5 – Funções Lógicas Adicionais |
| CAPÍTULO 5 - TESTES EXECUTADOS EM RELÉ DE DISTÂNCIA SEL 311-C 78 |
| 5.1 – Estudos iniciais para os testes no relé de distância |
| 5.2 – Preparação do software AcSELerator do relé digital SEL 311-C |
| 5.2 – Preparação da ferramenta State Sequencer da mala de teste Omicron CMC 256-6 84 |
| 5.3 – Testes no relé de distância em um curto-circuito trifásico |
| 5.3.1 – Testes no relé de distância em um curto-circuito trifásico na 1ª zona de operação 86 |
| 5.4 – Testes no relé de distância em um curto-circuito monofásico para a terra |
| 5.4.1 – Testes no relé de distância em um curto-circuito monofásico para a terra na 1ª zona de |
| operação |
| 5.4.2 – Testes no relé de distância em um curto-circuito monofásico para a terra na 2ª zona de |
| operação acelerada (teleproteção) |
| 5.4.3 – Testes no relé de distância em um curto-circuito monofásico para a terra na 2ª zona de |
| operação temporizada101 |
| 5.4.3 - Testes no relé de distância em um curto-circuito monofásico para a terra na zona |
| reversa |
| CAPÍTULO 6 - CONCLUSÃO 110 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 112 |

LISTA DE FIGURAS

| Figura 1 - Fasores de seqüência positiva | 6 |
|---|-----|
| Figura 2 - Fasores de seqüência negativa | . 6 |
| Figura 3 - Fasores de seqüência zero | . 7 |
| Figura 4 - Sistema exemplo para equações nodais da rede | .11 |
| Figura 5 - Sistema exemplo com os modelos dos elementos da rede | 12 |
| Figura 6 - Diagrama unifilar do sistema exemplo com admitâncias | 12 |
| Figura 7 - Sistema exemplo para análise de curto-circuito | 17 |
| Figura 8 - Sistema exemplo com os modelos dos elementos da rede para análise de curto | 18 |
| Figura 9 – Sistema exemplo com os modelos dos elementos da rede com curto a 50% da linha. | 18 |
| Figura 10 - Sistema equivalente de Thévenin | 19 |
| Figura 11 - Circuito equivalente de sequência positiva | 21 |
| Figura 12 - Circuito equivalente de sequência negativa | 21 |
| Figura 13 - Circuito equivalente de sequência zero | 22 |
| Figura 14 - Circuito equivalente das três componentes de sequência em série | 22 |
| Figura 15 – Diagrama trifilar de um sistema com curto bifásico | 24 |
| Figura 16 - Circuito equivalente de Thévenin em um curto bifásico | 25 |
| Figura 17 - Diagrama trifilar de um sistema com curto bifásico para a terra | 27 |
| Figura 18 - Circuito equivalente de Thévenin em um curto bifásico para a terra | 30 |
| Figura 19 - Relé eletromecânico do tipo alavanca | 35 |
| Figura 20 – Relé de disco de indução com bobina de sombra | 36 |
| Figura 21 - Diagrama funciona simplificado do relé de proteção SEL 311-C. | 42 |
| Figura 22 - Representação das zonas de atuação de um relé em uma linha de transmissão | 44 |
| Figura 23 - Zona de atuação do tipo lente | .44 |
| Figura 24 - Zona de atuação do tipo poligonal | 44 |
| Figura 25 - Zona de atuação do tipo blinder | .45 |
| Figura 26 - Zona de atuação do tipo paralelogramo | 45 |
| Figura 27 - Zona de atuação do tipo MHO | 45 |
| Figura 28 - Representação da impedância no diagrama jX x R | 46 |
| Figura 29 - Zona de atuação do relé de impedância | 47 |
| Figura 30 - Zona de atuação do relé de impedância acoplado ao relé direcional | 48 |
| Figura 31 - Diagrama esquemático do comando de proteção | 49 |
| Figura 32 - Zonas de atuação do relé de impedância acoplado ao relé direcional | 50 |
| Figura 33 - Diagrama MHO | 51 |
| Figura 34 - Diagrama MHO com ajuste de impedância | 52 |
| Figura 35 - Ajuste para a zona 2 de proteção | 53 |
| Figura 36 - Diagrama de atuação do relé de reatância | 54 |
| Figura 37 - Relé de reatância combinado ao relé de admitância | 55 |
| Figura 38 - Diagrama esquemático de proteção | 56 |
| Figura 39 – Foto do Omicron CMC 256-6 montado para os testes | 59 |
| Figura 40 – Ponta de prova C-Probe 1 | 62 |
| Figura 41 – Tela inicial do software Omicron Test Universe | 65 |
| Figura 42 – Tela da ferramenta State Sequencer | 68 |
| Figura 43 – Foto frontal do Simulador de Disjuntor | 69 |

| Figura 44 – Foto da caixa de transmissão de sinal | 70 |
|---|-------|
| Figura 45 – Foto frontal da caixa receptora de sinal | 71 |
| Figura 46 – Exemplo de configuração do painel traseiro do relé digital SEL 311-C | 72 |
| Figura 47 – Exemplo de configuração do painel dianteiro do relé digital SEL 311-C | 73 |
| Figura 48 – Foto frontal do relé digital de operação SEL 311-C | 77 |
| Figura 49 - Foto da bancada onde foram realizados os ensaios de curto-circuito no relé SEL | 311- |
| C | 78 |
| Figura 50 – Diagrama a ser utilizado nos testes com o Relé SEL 311-C | 79 |
| Figura 51 - Diagrama das Zonas de atuação utilizadas no teste | 80 |
| Figura 52 - Tela inicial do software AcSELerator QuickSet. | 82 |
| Figura 53 - Tela do software AcSELerator QuickSet para escolha do relé a ser testado | 83 |
| Figura 54 - Tela do software AcSELerator QuickSet para configuração do relé 311-C. | 84 |
| Figura 55 - Tela do State Sequencer com sua configuração definida | 85 |
| Figura 56 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corr | ente |
| do Estado 1 trifásico com atuação na 1ª zona de operação | 87 |
| Figura 57 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corr | ente |
| do Estado 2 trifásico com atuação na 1ª zona de operação | 88 |
| Figura 58 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corr | ente |
| do Estado 3 trifásico com atuação na 1ª zona de operação | 89 |
| Figura 59 - Tela do State Sequencer com a configuração dos 3 Estados para um curto trifá | ísico |
| com atuação na 1ª zona de operação. | 90 |
| Figura 60 - Representação dos leds acesos no display do relé após ensaio de curto trifásico | o na |
| 2'0zona 1 | 90 |
| Figura 61 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corr | ente |
| do Estado 1 para um curto monofásico com atuação na 1ª zona de operação | 92 |
| Figura 62 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corr | ente |
| do Estado 2 para um curto monofásico com atuação na 1ª zona de operação | 94 |
| Figura 63 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corr | ente |
| do Estado 3 para um curto monofásico com atuação na 1ª zona de operação | 95 |
| Figura 64 - Tela do State Sequencer com a configuração dos 3 Estados para um curto monofá | isico |
| com atuação na 1ª zona de operação. | 95 |
| Figura 65 - Representação dos leds acesos no display do relé após ensaio de curto monofásic | o na |
| zona 1 | 96 |
| Figura 66 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corr | ente |
| do Estado 1 para um curto monofásico com atuação na zona acelerada | 97 |
| Figura 67 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corr | ente |
| do Estado 2 para um curto monofásico com atuação na zona acelerada | 98 |
| Figura 68 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corr | ente |
| do Estado 3 para um curto monofásico com atuação na zona acelerada | 99 |
| Figura 69 - Tela do State Sequencer com a configuração dos 3 Estados para um curto monofá | isico |
| com atuação na zona acelerada | 100 |
| Figura 70 - Representação dos leds acesos no display do relé após ensaio de curto monofásic | o na |
| zona acelerada | 100 |
| Figura /1 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corr | ente |
| do Estado 1 para um curto monofásico com atuação na zona temporizada. | 101 |
| Figura 72 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corr | ente |

| do Estado 2 para um curto monofásico com atuação na zona temporizada 103 |
|---|
| Figura 73 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente |
| do Estado 3 para um curto monofásico com atuação na zona temporizada 104 |
| Figura 74 - Tela do State Sequencer com a configuração dos 3 Estados para um curto monofásico |
| com atuação na zona temporizada104 |
| Figura 75 - Representação dos leds acesos no display do relé após ensaio de curto monofásico na |
| zona temporizada105 |
| Figura 76 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente |
| do Estado 1 para um curto monofásico com atuação na zona reversa 106 |
| Figura 77 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente |
| do Estado 2 para um curto monofásico com atuação na zona reversa 107 |
| Figura 78 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente |
| do Estado 3 para um curto monofásico com atuação na zona reversa 108 |
| Figura 79 - Tela do State Sequencer com a configuração dos 3 Estados para um curto monofásico |
| com atuação na zona reversa |
| Figura 80 - Representação dos leds acesos no display do relé após ensaio de curto monofásico na |
| zona reversa |

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

Na Inglaterra, no início do século XVIII, ocorreu uma das maiores revoluções da história da humanidade. Esta revolução que mudou completamente os rumos da economia e política mundial teve como principal elemento a tecnologia. A Revolução Industrial, como é hoje conhecida, foi baseada no uso de energia proveniente das grandes reservas de carvão da Inglaterra, que tornou possível por em funcionamento as primeiras grandes máquinas do mundo moderno.

No decorrer dos séculos seguintes, a tecnologia continuou a desenvolver-se e a busca por novas fontes de energia tornou-se uma necessidade para o contínuo desenvolvimento tecnológico. O carvão mineral continua a ser uma das principais fontes de energia do mundo devido à grande quantidade de reserva e à facilidade na exploração do mesmo.

O Brasil, por ser um país de dimensões continentais e de grande diversidade ambiental, possui um grande reservatório hidrográfico, fato que possibilitou que a energia hidrelétrica se tornasse a principal fonte de energia do país.

As regiões Sul e Sudeste do Brasil são as que concentram os principais pólos industriais do país, porém essas regiões se encontram afastadas das grandes bacias hidrográficas. Dessa forma, houve um acentuado distanciamento entre as principais indústrias e as grandes unidades geradoras.

Para interligar os grandes centros às grandes matrizes energéticas foi estruturado o Sistema Interligado Nacional (SIN) que possibilitou, através de linhas de transmissão de alta tensão, atender a demanda energética nacional.

O SIN pode ser considerado um sistema de características únicas em âmbito mundial, por ser constituído por um sistema hidrotérmico de grande porte, com forte predominância de usinas hidrelétricas. Segundo dados do ONS, apenas 3,4% da energia gerada no país não é processada pelo SIN, estando presente em pequenos sistemas isolados existentes, principalmente, na Amazônia.

Em 26 de dezembro de 1996, foi criada a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) com a finalidade de regulamentar e fiscalizar a produção, transmissão e comercialização de energia elétrica no Brasil.

A ANEEL fiscaliza através de indicadores de desempenho a qualidade do serviço prestado pelas empresas de energia elétrica atuantes no país, aplicando multas e, se necessário, até retirando a concessão de geração, transmissão ou distribuição de energia elétrica da empresa que não atender as normas estabelecidas.

Em 26 de agosto de 1998, foi criado o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) com a finalidade de tornar-se o órgão responsável pela coordenação e controle de todas as atividades envolvendo a geração, operação e manutenção do Sistema Interligado Nacional.

O ONS realiza estudos e análise diária da geração das usinas e do fluxo de potência do sistema de transmissão para garantir a segurança, continuidade do serviço e o correto funcionamento do sistema. Os agentes geradores e transmissores são coordenados pelos centros regionais onde o ONS encontra-se presente. Existem hoje quatro centros de operação regional, o COSR-S (Centro de Operação do Sistema – Regional Sul), COSR-SE (Regional Sudeste), COSR-NCO (Regional Centro-Oeste) e COSR-NE (Regional Nordeste).

A característica de segurança e de confiabilidade de um sistema elétrico é efetivada a partir dos estudos de proteção dos equipamentos e do sistema de transmissão que são realizados. Ao longo das últimas décadas, com o avanço da tecnologia, a proteção do sistema elétrico tornouse cada vez mais inteligente e confiável.

A proteção tem como principal objetivo proteger o sistema de possíveis perturbações e, em caso de desativação de uma função de transmissão, a proteção deve atuar na recomposição automática da função ou auxiliar o operador a identificar a causa e eliminá-la no menor tempo possível.

Para a perfeita atuação da proteção de um sistema interligado é preciso que seja feito o dimensionamento correto de cada componente, sendo assim possível efetuar a parametrização dos relés de proteção para que os mesmos atuem com precisão.

Após a parametrização, os relés precisam ser testados em laboratório com o auxílio de malas de teste. Os testes são realizados para todas as funções de proteção a serem aplicadas ao sistema a ser instalado, avaliando se o equipamento possui atuação com a devida coordenação, velocidade e sensibilidade para garantir a confiabilidade e a continuidade de operação sem que ocorram interrupções na operação de qualquer parte do sistema elétrico.

1.1 - Objetivos

O objetivo deste projeto é utilizar o relé digital SEL 311-C (fabricado pela Schweitzer Engineering Laboratories) e avaliar o desempenho da sua função de proteção de distância (21), verificando sua coordenação, velocidade e confiabilidade durante ensaios para diferentes tipos de curto-circuito.

O trabalho procura trazer informação sobre os tipos de relés de proteção utilizados nos sistemas de potência, em particular sobre o relé digital SEL 311-C, sobre os equipamentos utilizados nos testes e sobre a mala de teste Omicron CMC 256-6.

Além disso, é importante salientar os fundamentos teóricos associados aos ensaios e que resultam nos cálculos das componentes de corrente e tensões de curto-circuito. O objetivo final é, portanto, fixar a configuração do software da mala de testes para o tipo de curto-circuito desejado.

1.2 – Estrutura do trabalho

Este trabalho se encontra dividido em seis capítulos.

O capítulo 2 apresenta os fundamentos teóricos que permitem o cálculo das componentes simétricas e das matrizes de impedância e admitância de barra do sistema elétrico. Neste capítulo também são apresentados os tipos de curto-circuito existentes em um sistema de potência, e apresentados os cálculos das componentes de curto-circuito. Para a elaboração deste capítulo foram utilizadas as referências [1], [2], [3], [4], [6] e [13].

O capítulo 3 apresenta informações sobre proteção a partir das quais são detalhadas as diferentes características construtivas e a evolução dos relés de proteção ao longo dos anos. E também são apresentadas no capítulo as características das zonas de operação e da função associada de proteção de distância (21). Para a elaboração deste capítulo foram utilizadas as referências [5], [7], [11], [12] e [13].

O capítulo 4 apresenta descrição dos equipamentos utilizados durante os ensaios de atuação das zonas de operação do relé de distância sob ocorrência de curto-circuito. Os equipamentos descritos foram: a mala de teste Omicron CMC 256-6 (com o auxílio do software Omicron Test Universe), o equipamento simulador de disjuntor, o equipamento transmissor de sinal, o equipamento receptor de sinal e o relé digital SEL 311-C (com o auxílio do software AcSELerator QuickSet). As informações das características técnicas dos equipamentos, assim como do software utilizado foram descritas de acordo com as referências [7], [8], [9] e [14].

O capítulo 5 apresenta os ensaios realizados no relé digital de proteção SEL 311-C, como se seguem: ensaio de curto-circuito trifásico para a atuação da 1ª zona de operação do relé de distância, ensaios de curto-circuito monofásico para a atuação da 1ª, 2ª e 3ª zonas de operação do relé de distância. Em cada simulação são destacadas as configurações dos equipamentos e apresentados os resultados dos testes realizados. Para a realização dos testes e elaboração deste capítulo foram utilizadas as referências [7], [8], [9] e [14].

O capítulo 6 apresenta a conclusão do projeto, destacando-se o sucesso dos ensaios realizados e os aprendizados adquiridos durante o trabalho.

CAPÍTULO 2 – CURTO-CIRCUITO EM SISTEMAS ELÉTRICOS

Em um sistema elétrico de potência, poderá ocorrer a interrupção da transmissão de energia devido a fatores externos ou devido a falha interna dos componentes que compõem o sistema de transmissão. As perdas de transmissão de energia mais comum no sistema elétrico são resultantes da ocorrência de curto-circuitos.

Existem quatro tipo de curto-circuitos básicos conhecidos. São eles:

- Monofásico terra
- Bifásico
- Bifásico terra
- Trifásico

Dentre os tipos de curto citados acima, o mais comum é o curto-circuito monofásico para terra. Este tipo de curto normalmente ocorre devido a presença de vegetação próxima a linha de transmissão ou por conta de descargas atmosféricas.

Durante o curto-circuito, há a elevação da corrente que passa entre dois pontos previamente sob alta diferença de potencial e posteriormente com baixa impedância entre eles. Esta elevação anormal da corrente em um pequeno espaço de tempo faz com que haja uma grande elevação da temperatura do meio onde a corrente circula, podendo ocasionar danos à linha de transmissão e seus componentes, caso a proteção não atue imediatamente.

Assim, ao perceber a ocorrência de um curto-circuito a proteção atua impossibilitando que a corrente continue a circular por este trecho e, conseqüentemente, interrompendo a transmissão de energia da linha de transmissão.

2.1 – Componentes Simétricas

Para calcular as componentes desbalanceadas de um sistema trifásico, é utilizado o método dos componentes simétricas, baseado no Teorema de Fortescue, nome dado em homenagem a Charles L. Fortescue (1876–1936). A hipótese de balanceamento deste sistema e a aplicação do método resultam no desacoplamento entre as redes de sequência para as quais o cálculo monofásico se torna possível.

Segundo o teorema, pode-se decompor um sistema trifásico desbalanceado em três sistemas trifásicos com componentes balanceadas. Estas componentes são conhecidas como seqüência positiva, seqüência negativa e seqüência zero.

O sistema de seqüência positiva, representado como 1 ou +, é composto por três fasores de mesmo módulo e defasados de 120°, com sequência de fase igual ao do sistema original.



Figura 1 - Fasores de seqüência positiva

O sistema de seqüência negativa, representado como 2 ou –, é composto por três fasores de mesmo módulo e defasados de 120°, com sequência de fase diferente do sistema original.



Figura 2 - Fasores de seqüência negativa

O sistema de seqüência zero, representado como 0, é composto por três fasores de mesmo módulo e de mesma fase.



Figura 3 - Fasores de seqüência zero

Portanto, pode-se representar os fasores V_a , V_b e V_c como:

$$V_a = V_a^{(1)} + V_a^{(2)} + V_a^{(0)}$$
(2.1)

$$V_b = V_b^{(1)} + V_b^{(2)} + V_b^{(0)}$$
(2.2)

$$V_c = V_c^{(1)} + V_c^{(2)} + V_c^{(0)}$$
(2.3)

Sabendo-se que as componentes simétricas podem ser relacionadas por:

$$V_b^{(1)} = V_a^{(1)} \angle -120^{\circ}; V_b^{(2)} = V_a^{(2)} \angle 120^{\circ}; V_b^{(0)} = V_a^{(0)} \angle 0^{\circ}$$
(2.4)

$$V_c^{(1)} = V_a^{(1)} \angle 120^{\circ}; \ V_c^{(2)} = V_a^{(2)} \angle -120^{\circ}; \ V_c^{(0)} = V_a^{(0)} \angle 0^{\circ}$$
(2.5)

Logo, as tensões de fase podem ser representadas como:

$$V_a = V_a^{(1)} + V_a^{(2)} + V_a^{(0)}$$
(2.6)

$$V_b = V_a^{(1)} \angle -120^{\circ} + V_a^{(2)} \angle 120^{\circ} + V_a^{(0)} \angle 0^{\circ}$$
(2.7)

$$V_c = V_a^{(1)} \angle 120^{\circ} + V_a^{(2)} \angle -120^{\circ} + V_a^{(0)} \angle 0^{\circ}$$
(2.8)

Para uma maior simplificação das equações 2.6, 2.7 e 2.8, utiliza-se o operador α , que é um número complexo de módulo unitário e argumento 120°. Assim:

$$\alpha = 1 \angle 120^{\circ} \tag{2.9}$$

O operador α se comporta da seguinte forma ao ser elevado aos coeficientes numéricos:

$$\alpha^{1} = \alpha = 1 \angle 120^{\circ}$$

$$\alpha^{2} = \alpha \times \alpha = 1 \angle 120^{\circ} \times 1 \angle 120^{\circ} = 1 \angle -120^{\circ}$$

$$\alpha^{3} = \alpha^{2} \times \alpha = 1 \angle -120^{\circ} \times 1 \angle 120^{\circ} = 1 \angle 0^{\circ}$$

$$\alpha^{4} = \alpha^{3} \times \alpha = \alpha = 1 \angle 120^{\circ}$$
(2.10)

Assim, utilizando a equação 2.10, reescreve-se as equações 2.6, 2.7 e 2.8 da seguinte forma:

$$V_a = V_a^{(1)} + V_a^{(2)} + V_a^{(0)}$$
(2.11)

$$V_b = \alpha^2 V_a^{(1)} + \alpha V_a^{(2)} + V_a^{(0)}$$
(2.12)

$$V_c = \alpha V_a^{(1)} + \alpha^2 V_a^{(2)} + V_a^{(0)}$$
(2.13)

É possível representar as equações 2.11, 2.12 e 2.13 na forma matricial, da seguinte maneira:

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_a^{(0)} \\ V_a^{(1)} \\ V_a^{(2)} \end{bmatrix}, \text{ onde } \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \end{bmatrix} = \mathbf{T}$$
(2.14)

A matriz T, conhecida como matriz de transformação, ao ser invertida, resulta:

$$T^{-1} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix}$$
(2.15)

E pode-se calcular as componentes simétricas a partir das componentes do sistema, por

$$\begin{bmatrix} V_{a}^{(0)} \\ V_{a}^{(1)} \\ V_{a}^{(2)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^{2} \\ 1 & \alpha^{2} & \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_{a} \\ V_{b} \\ V_{c} \end{bmatrix}$$
(2.16)

Portanto, observa-se na equação 2.16 a decomposição das componentes V_a , V_b e V_c de um sistema trifásico assimétrico em componentes simétricas.

2.2.1 – Matrizes de Equações da Rede Elétrica em Regime Permanente

A análise do sistema de potência é uma ferramenta extremamente importante para que haja a contínua transmissão de energia no sistema elétrico. A partir destas análises podem ser feitos estudos de fluxo de potência em que se monitora o funcionamento do Sistema Interligado Nacional (SIN) sob condições de aumento ou redução de carga.

Assim, foram desenvolvidas técnicas de cálculo matricial avançado que representam a rede elétrica de corrente alternada em regime permanente senoidal, sendo possível montar, através das impedâncias entre barramentos, sistemas matriciais para cálculo de fluxo de potência através do sistema.

Devido a complexidade de sistemas elétricos como o SIN que possui dimensões continentais, ao serem feitos estudos de fluxo de potência, estes resultam em um número de equações impossíveis de serem resolvidas analiticamente pelo homem. Portanto, programas computacionais foram desenvolvidos para o auxílio no cálculo de sistemas complexos. Dentre os programas utilizados hoje em dia no Brasil, podem ser citados: ANAFAS, ANAREDE, ANATEM e ASPEN.

2.2.1 – Matriz Admitância de Barra (Y_{barra})

A matriz de admitância relaciona as correntes injetadas nos barramentos com as tensões medidas em relação a barra de referência.

Para mostrar o cálculo pelo método da matriz de admitância será utilizado o exemplo abaixo:



Figura 4 - Sistema exemplo para equações nodais da rede [4, págs. 17].

A figura 4 mostra o diagrama unifilar do sistema estudado. A figura 5 mostra o diagrama de impedância do unifilar da figura 4.



Figura 5 - Sistema exemplo com os modelos dos elementos da rede [4, págs. 18].

Na figura 5, as fontes de tensão em série com impedância são transformadas em fonte de corrente em paralelo com admitância e as impedâncias da linha são referidas por suas admitâncias, de forma que a figura 6 expressa esta transformação.



Figura 6 - Diagrama unifilar do sistema exemplo com admitâncias [4, págs. 18].

Calculando-se as equações nodais do circuito da figura 6:

Barra 1:
$$I_1 = y_4 \times (V_1 - V_2) + y_6 \times (V_1 - V_3) + y_1 \times (V_1 - V_0)$$

Barra 2: $I_2 = y_5 \times (V_2 - V_3) + y_4 \times (V_2 - V_1) + y_2 \times (V_2 - V_0)$
Barra 3: $I_3 = y_5 \times (V_3 - V_2) + y_6 \times (V_3 - V_1) + y_3 \times (V_3 - V_0)$
Barra 0: $(I_1 - I_2 - I_3) = y_1 \times (V_0 - V_1) + y_2 \times (V_0 - V_2) + y_3 \times (V_0 - V_3)$
(2.17)

A equação da barra 0 é linearmente dependente das outras três equações. Basta somar as equações das barras 1, 2, 3 para verificar. Agrupando-se termos das equações das barras 1, 2, 3 obtêm-se:

$$I_{1} = (y_{1} + y_{4} + y_{6}) \times V_{1} - y_{4} \times V_{2} - y_{6} \times V_{3}$$

$$I_{2} = -y_{4} \times V_{1} + (y_{2} + y_{4} + y_{5}) \times V_{2} - y_{5} \times V_{3}$$

$$I_{3} = -y_{6} \times V_{1} - y_{5} \times V_{2} + (y_{3} + y_{5} + y_{6}) \times V_{3}$$
(2.18)

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 + y_4 + y_6 & -y_4 & -y_6 \\ -y_4 & y_2 + y_4 + y_5 & -y_5 \\ -y_6 & -y_5 & y_3 + y_5 + y_6 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix}$$
(2.19)

Como se pode observar na equação 2.19, a matriz de admitância possui dimensões 3x3. Esta é uma característica desse método, em que a matriz de admitância é quadrada e possui dimensões nxn, onde n é o número de barras do sistema.

Outras características do método é o fato da matriz ser simétrica, complexa, esparsa (mais de 95% dos elementos são nulos), os elementos da diagonal principal são positivos e os elementos fora da diagonal principal são negativos.

2.2.2 – Matriz Impedância de Barra (Z_{barra})

A matriz impedância de barra é uma matriz que apresenta muitas das características da matriz admitância, como ser simétrica, complexa, quadrada de dimensões n x n,. Porém, a matriz impedância é uma matriz cheia.

Na equação 2.20 observa-se a configuração da matriz impedância, onde as impedâncias da diagonal principal são conhecidas como impedância própria e as impedâncias que se encontram fora da diagonal principal são conhecidas como impedância mútua.

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{11} & Z_{12} & Z_{13} \\ Z_{21} & Z_{22} & Z_{23} \\ Z_{31} & Z_{32} & Z_{33} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix}$$
(2.20)

Pode-se calcular essa matriz através de ensaio em circuito aberto ou simplesmente, caso possua o valor da matriz admitância, invertê-la, ou seja:

$$Z_{barra} = Y_{barra}^{-1} \tag{2.21}$$

Em um curto-circuito simétrico, pode-se calcular a corrente de curto-circuito de uma das barras do sistema elétrico, utilizando-se os valores encontrados na matriz impedância de barra. A equação 2.22 mostra o cálculo que deve ser feito para obter este resultado.

$$I_{k}(f) = \frac{V_{k}^{pf}}{Z_{kk} + Z_{cc}}$$
(2.22)

14

Em que:

 $I_k(f) - \acute{\mathrm{e}}$ a corrente de falta na barra k.

 V_k^{pf} – é a tensão pré-falta na barra k em estudo,

 Z_{kk} – é a impedância da diagonal principal na matriz Z_{barra} , da barra k,

 Z_{cc} – é a impedância de curto-circuito na barra k.

Para o cálculo da tensão, no mesmo curto-circuito utiliza-se a equação 2.23.

$$V_{k}(f) = V_{k}^{pf} - Z_{kk}I_{k}(f)$$
(2.23)

Em que:

 $V_k(f)$ – é a tensão de falta na barra k.

2.3 – Tipos Básicos de Curto-Circuito

Como já apresentado no inicio deste capitulo, existem quatro tipos de classificações para curto-circuito, cada um possuindo o seu grau de severidade que pode causar danos diferentes para o sistema, caso não haja uma imediata atuação da proteção.

Os tipos de curto-circuito mais freqüentes em um sistema elétrico são também os menos graves e menos danosos. A freqüência de cada tipo de curto-circuito, segundo dados estatístico, está apresentada abaixo:

- Curto-circuito monofásico para terra: possui freqüência de aproximadamente 70% das ocorrências.
- Curto-circuito bifásico: possui freqüência de aproximadamente 15% das ocorrências.

- Curto-circuito bifásico para terra: possui freqüência de aproximadamente 10% das ocorrências.
- Curto-circuito trifásico: possui freqüência de aproximadamente 5% das ocorrências.

É importante salientar que em uma linha de transmissão de grande extensão, os curtos menos graves nem sempre são os mais simples de serem eliminados.

Desligamentos causados por curto-circuito monofásico para terra que são originados por causa de vegetação próxima à linha de transmissão podem ser extremamente complicados para que a equipe de manutenção encontre a causa do desligamento e corrija o problema, evitando que ocorram seguidos desligamentos em poucos minutos.

Imagine uma linha de transmissão com centenas de kilometros de extensão e que possui um trecho em que há um galho de árvore tocando a linha e que, a todo o momento, o vento forte empurra o galho em direção a linha. Esta vegetação poderá resultar em sucessivos curto-circuitos na linha, impedindo que o sistema elétrico se mantenha disponível.

Até que seja possível a equipe de manutenção encontrar o ponto de defeito, a linha de transmissão poderá ficar indisponível durante horas ou até dias. Ainda há o agravante desses sucessivos desligamentos e religamentos causarem danos aos equipamentos e componentes da linha.

Portanto, não podemos tratar os curtos mais freqüentes e menos graves com menor rigor do que os curtos menos freqüentes. Assim, é necessário manter um monitoramento continuo não só dos equipamentos que compõem o sistema mas também do meio em que o mesmo se encontra.

Dentre os tipos de curto-circuito citados acima, há uma classificação que divide esses curtos em dois grupos, os simétricos e os assimétricos. O único tipo de falta considerada simétrica é o curto trifásico, enquanto o curto monofásico para a terra e os curtos bifásico e bifásico para a terra são considerados como faltas assimétricas.

No curto-circuito simétrico, as três fases são afetadas e, por conta disto, não há desbalanço entre elas e não ocorrerão efeitos de seqüência negativa e seqüência zero, necessitando-se portanto dos resultados de análise da seqüência positiva.

Nos curto-circuitos assimétricos tem-se desbalanço entre as fases, de modo que nem todas são afetadas durante a falta. Portanto, terá de ser feita a análise do defeito utilizando todas as três componentes simétricas citadas no início do capítulo.

2.3.1 - Curto-circuito trifásico

Como já definido anteriormente, o curto-circuito trifásico é a o tipo de falta menos freqüente no sistema, porém o mais grave. Este curto é classificado como simétrico, de forma que não há desbalanço entre as fases e, portanto, apenas será necessário fazer o estudo de sequência positiva do sistema.

Na figura 7 é observado um esquemático de um sistema de potência composto por dois trafos, duas fontes de tensão e duas barras interligadas por um circuito de transmissão. Estre sistema será utilizado para demonstrar os cálculos de curto-circuito.



Figura 7 - Sistema exemplo para análise de curto-circuito

Utilizando-se o modelo de cada elemento, o sistema fica como mostra a figura 8.



Figura 8 - Sistema exemplo com os modelos dos elementos da rede para análise de curto

Supondo a ocorrência de um curto-circuito trifásico no meio da linha de transmissão, entre as barras 1 e 2, a impedância Z_{12} será dividida 50% pra cada lado. Assim, observa-se a figura 9.



Figura 9 - Sistema exemplo com os modelos dos elementos da rede com curto a 50% da linha

Aplicando-se o teorema de Thévenin no ponto de curto-circuito indicado na figura 9, resulta a fig. 10,



Figura 10 - Sistema equivalente de Thévenin

na qual:

 E_{th} – tensão equivalente de Thévenin. Será utilizado o valor de 1 $\angle 0^{\circ}$

 Z_{th} – impedância equivalente de Thévenin do modelo utilizado, onde $Z_{th} = (Z_{11} + 0.5xZ_{12}) / (Z_{22} + 0.5xZ_{12})$

 Z_{cc} – impedância de curto-circuito que pode ou não aparecer durante a falta.

 I_{cc} – corrente de curto-circuito em regime permanente.

Logo, para calcular Icc será necessária uma simples equação utilizando a Lei de Kirchhoff:

$$I_{cc} = \frac{E_{th}}{Z_{th} + Z_{cc}} \tag{2.24}$$

Como já visto no item 2.2.2, pode-se calcular a I_{cc} em uma barra através do método da matriz impedância de barra.

19

2.3.2 - Curto-circuito monofásico para a terra

A falta monofásica para a terra é a mais comum em um sistema elétrico de potência, tendo como principais causas descargas atmosféricas e contato entre uma das fases e algum objeto estranho em contato com a terra.

Um tipo de falta muito comum resultante de contato com objetos estranhos é a presença de vegetação próxima a linha de transmissão. O toque de um galho na linha faz com que haja a condução da corrente de uma das fases para a terra ou entre fases. Sendo assim, é necessário que as equipes de manutenção mantenham um constante monitoramento do crescimento da vegetação e fazendo, quando necessário, a poda da mesma.

Durante a ocorrência de um curto monofásico, haverá presença de corrente apenas na fase atingida. Assim, supondo que no exemplo da figura 7 haja um desligamento monofásico causado pela presença de vegetação próxima a linha de transmissão, onde o galho toca o circuito da fase A, resulta então:

$$I_b = I_c = 0 \tag{2.25}$$

Portanto, fazendo-se a transformação para componentes simétricas observa-se que, porque as correntes das fases B e C são nulas, as correntes das sequências positiva, negativa e zero serão iguais a:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} I_a \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} I_a \\ I_a \\ I_a \end{bmatrix}$$
(2.26)

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{1}{3}I_a \tag{2.27}$$

20

Verificando-se a equação 2.27, conclui-se que os circuito equivalentes de sequência positiva, negativa e zero se aplicam a este caso. Também se observa que os circuitos equivalentes de sequência estão em série. Assim:



Figura 11 - Circuito equivalente de sequência positiva



Figura 12 - Circuito equivalente de sequência negativa



Figura 13 - Circuito equivalente de sequência zero

Conectando-se os circuitos equivalentes das três sequências, será obtida a figura 14:



Figura 14 - Circuito equivalente das três componentes de sequência em série

Analisando-se o circuito equivalente das três componentes de sequência em série, obtêm-

se:

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{E_{th}}{Z_{th1} + Z_{th2} + Z_{th0} + (3xZ_{cc})}$$
(2.28)

22

Sabendo-se que a corrente de curto é a corrente que passa pela fase A no instante da falta, então, fazendo uso das equações 2.27 e 2.28, obtêm-se:

$$I_{cc} = I_a = 3xI_0 = \frac{3xE_{th}}{Z_{th1} + Z_{th2} + Z_{th0} + (3xZ_{cc})}$$
(2.29)

Através da equação 2.29 também pode ser calculada a tensão na fase A durante o curto, como se observa na equação abaixo:

$$V_a = Z_{cc} I_a = \frac{3x E_{th} Z_{cc}}{Z_{th1} + Z_{th2} + Z_{th0} + (3x Z_{cc})}$$
(2.30)

2.3.3 – Curto-circuito bifásico

O curto-circuito bifásico ocorre quando duas fases entram em contato através ou não de um meio externo, sem que haja contato com o solo

Na figura 15 observa-se um exemplo de diagrama trifilar da figura 7, onde ocorre curtocircuito entre as fases B e C através de um corpo estranho representado pela impedância $Z_{cc.}$



Figura 15 – Diagrama trifilar de um sistema com curto bifásico

Através da figura 15, é possível observar que, desprezando-se a corrente de carga.

$$I_b = -I_c \tag{2.31}$$

$$I_a = 0 \tag{2.32}$$

$$V_b - V_c = Z_{cc} I_{cc} \tag{2.33}$$

Utilizando-se as equações 2.31 e 2.32 para encontrar as componentes simétricas do sistema:

$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{3}}{3} \angle 90^\circ \times \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ -I_b \end{bmatrix}$$
(2.34)

24

Observa-se na equação 2.34 que não haverá corrente no circuito equivalente de sequência zero e que a corrente de sequência positiva possui mesmo módulo que a corrente de sequência negativa, porém as mesmas circulam em sentido oposto. Portanto, conclui-se que os circuitos equivalentes de sequência positiva e negativa estão conectados em série.

Utilizando-se as equações 2.2, 2.3, 2.4 e 2.5 e fazendo uso do mesmo na equação 2.33, sabendo que não há componente de sequência negativa neste sistema, obtêm-se:

$$(V_b^{(1)} + V_b^{(2)}) - (V_c^{(1)} + V_c^{(2)}) = Z_{cc} (I_{cc}^{(1)} + I_{cc}^{(2)})$$
(2.35)

$$(V_a^{(1)} \angle -120^\circ + V_a^{(2)} \angle 120^\circ) - (V_a^{(1)} \angle 120^\circ + V_a^{(2)} \angle -120^\circ) = Z_{cc} (I_a^{(1)} \angle -120^\circ + I_a^{(2)} \angle 120^\circ)$$
(2.36)

$$(1 \angle -120^{\circ} - 1 \angle 120^{\circ}) (V_a^{(1)} - V_a^{(2)}) = (1 \angle -120^{\circ} - 1 \angle 120^{\circ}) Z_{cc} (I_I - I_I)$$
(2.37)

$$(V_a^{(1)} - V_a^{(2)}) = Z_{cc}(I_l)$$
(2.38)

Logo, o circuito das componentes de sequência positiva e negativa em paralelo pode ser observado na figura 16:



Figura 16 - Circuito equivalente de Thévenin em um curto bifásico

Com apoio da figura 16, calculam-se as componentes de sequência da corrente de curto através da equação 2.39.

$$I_1 = -I_2 = \frac{E_{th}}{Z_{th1} + Z_{th2} + Z_{cc}}$$
(2.39)

Como a corrente de curto no exemplo utilizado é a corrente que passa da fase B para a fase C, então pode ser utilizada a equação 2.34 para se obter as componentes abaixo.

$$I_1 = \frac{\sqrt{3}}{3} \angle 90^\circ \times I_b \tag{2.40}$$

$$I_{cc} = I_b = \sqrt{3\angle -90^{\circ} \times I_1} \tag{2.41}$$

Substituindo 2.41 em 2.39, resulta:

$$I_{cc} = \sqrt{3} \angle -90^{\circ} x \frac{E_{th}}{Z_{th1} + Z_{th2} + Z_{cc}}$$
(2.42)

2.3.4 - Curto-circuito bifásico para a terra

Diferentemente do curto anterior, o curto-circuito bifásico para a terra caracteriza-se por haver o contato entre as duas fases e o solo, através ou não de um corpo estranho. Este tipo de curto pode ocorrer por exemplo quando a o toque simultâneo de um galho de uma vegetação sobre duas fases do circuito.

Na figura 17 pode ser observado um exemplo de curto-circuito bifásico para a terra através do contato de um corpo estranho representado pela impedância $Z_{cc.}$



Figura 17 - Diagrama trifilar de um sistema com curto bifásico para a terra

Através da figura 17, é possível observar o seguinte comportamento das correntes em cada uma das fases do circuito:

$$I_{cc} = I_b + I_c \tag{2.43}$$

$$I_a = 0 \tag{2.44}$$

Assim, fazendo-se a transformação para as componentes simétricas obtêm-se:

27
$$\begin{bmatrix} I_0 \\ I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix}$$
(2.45)

$$I_{0} = \frac{1}{3}(I_{b} + I_{c}); I_{1} = \frac{1}{3}(I_{b} \angle 120^{\circ} + I_{c} \angle -120^{\circ}); I_{2} = \frac{1}{3}(I_{b} \angle -120^{\circ} + I_{c} \angle 120^{\circ})$$
(2.46)

Logo, ao somar as componentes simétricas das correntes obtêm-se:

$$I_0 + I_1 + I_2 = 0 (2.47)$$

Segundo a figura 17, a tensão de falta nas fases B e C são iguais entre si e iguais a tensão no ponto de curto do sistema.

$$V_{cc} = V_{b} = V_{c} = Z_{cc}I_{cc} = Z_{cc}(I_{b} + I_{c})$$
(2.48)

Considerando a igualdade das tensões das fases B e C e aplicando a matriz de transformação para as tensões, obtêm-se:

$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \times \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & \alpha & \alpha^2 \\ 1 & \alpha^2 & \alpha \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_b \end{bmatrix}$$
(2.49)

$$V_1 = V_2 = \frac{1}{3}V_a + \frac{1}{3}(\alpha + \alpha^2)V_b$$
(2.50)

28

$$V_0 = \frac{1}{3}V_a + \frac{2}{3}V_b \tag{2.51}$$

Com os resultados obtidos nas equações 2.50 e 2.51 e tendo conhecimento da equação 2.48 e do teorema de Fortescue apresentado na equação 2.1, a relação seguinte é válida.

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_0 + V_1 + V_1) + \frac{2}{3}Z_{cc}(I_b + I_c)$$
(2.52)

Substituindo-se 2.43 na equação 2.52, resulta:

$$3xV_0 = (V_0 + 2xV_1) + 2xZ_{cc}(3xI_0)$$
(2.53)

Simplificando-se a equação 2.53:

$$V_0 = V_1 + 3x Z_{cc} I_0 \tag{2.54}$$

Com o resultado dado por 2.54, observa-se que os circuitos equivalentes das componentes de sequências estão conectados em paralelo e resulta a seguinte configuração:



Figura 18 - Circuito equivalente de Thévenin em um curto bifásico para a terra

Para calcular as correntes das componentes de sequência e a corrente de curto-circuito será utilizada a configuração da figura 18, onde a impedância equivalente do circuito é definida pela equação abaixo;

$$Z_{ea} = Z_{th1} + Z_{th2} //(3xZ_{cc} + Z_{th0})$$
(2.55)

Assim, obtêm-se:

$$I_1 = \frac{E_{th}}{Z_{eq}} \tag{2.56}$$

$$I_{2} = -I_{1} \frac{3xZ_{cc} + Z_{th0}}{Z_{th2} + 3xZ_{cc} + Z_{th0}}$$
(2.57)

30

$$I_0 = -I_1 \frac{Z_{th2}}{Z_{th2} + 3xZ_{cc} + Z_{th0}}$$
(2.58)

Para calcular a corrente de curto-circuito será utilizada a equação 2.46, de modo que

$$I_{cc} = I_b + I_c = 3xI_0 = -I_1 \frac{3xZ_{th2}}{Z_{th2} + 3xZ_{cc} + Z_{th0}}$$
(2.59)

CAPÍTULO 3 – CARACTERÍTICAS DOS RELÉS DE PROTEÇÃO

O sistema elétrico de potência caracteriza-se por ser de alta complexidade. Sua operação contínua é uma necessidade, de forma a se minimizar as interrupções de formecimento de energia às suas cargas.

Poucos minutos fora de operação podem causar grandes problemas ao sistema elétrico. Por conta disso, os órgãos reguladores aplicam altas multas as concessionárias, de distribuição e transmissão de energia, por cada minuto que suas funções de transmissão estiverem indisponíveis.

Uma falha no sistema de proteção do barramento de uma subestação pode gerar uma reação em cadeia, transformando essa falha em sucessivos desligamentos de linhas de transmissão, podendo ocasionar blecautes em grandes metrópoles e até causando problemas econômicos à região.

Devido a esses fatores, o sistema de proteção deverá possuir confiabilidade, sensibilidade e velocidade no instante de atuação. Todos os equipamentos precisam estar corretamente coordenados com a proteção.

Os equipamentos que são diretamente ligados à proteção são: disjuntor, transformador de potencial (TP), transformador de corrente (TC) e relés de proteção. Cada anormalidade no sistema percebida por esses equipamentos ocasionará atuação de uma função de proteção. Esta atuação poderá gerar um alarme, um bloqueio ou, dependendo de sua gravidade, a função de transmissão afetada será isolada do sistema para evitar maiores danos à mesma, mantendo também a integridade dos equipamentos conectados a ela.

Os transformadores de potencial e de corrente são os responsáveis por captar as informações de corrente, tensão, freqüência ou uma combinação dessas grandezas (impedância, potência, ângulo de fase, entre outros), sendo assim necessário o monitoramento dos ajustes das relações de transformação desses TCs e TPs e a constante manutenção dos mesmos. O objetivo é evitar erros maiores nas medições realizadas e envio de informações equivocadas, podendo causar atuação indevida da proteção.

O disjuntor é o equipamento de manobra responsável por realizar o isolamento da função de transmissão, ou seja, ao ser detectada uma anomalia no sistema de potência caso haja a necessidade de desligar alguma função de transmissão, será acionada a abertura dos disjuntores que irão isolá-la.

O relé de proteção é o equipamento que coleta as informações transmitidas pelos TCs e TPs conectados a ele, analisando e monitorando o sistema até que ocorra uma anomalia e haja a necessidade de acionar os disjuntores para que os mesmos isolem o equipamento afetado, conseqüentemente isolando a falta.

O relé é importante não só na rapidez de atuação para isolar uma falta mas também ao final da anomalia é de extrema importância o restabelecimento do sistema com a maior rapidez possível. Assim, há o contínuo desenvolvimento das técnicas de proteção e com o avanço tecnológico os relés encontram-se cada vez mais simples de serem operados e de que seja feita sua manutenção, aumentando seu grau de confiabilidade e velocidade de atuação.

Todo operador e técnico mantenedor do sistema elétrico precisa conhecer os diversos tipos e funções dos relés de proteção. A incorreta operação ou manutenção dos mesmos pode ocasionar a instabilidade do sistema de potência.

Portanto, para o operador é necessário este conhecimento para se manter tranqüilo durante uma ocorrência, sabendo quais providências deve tomar para saná-la.

O técnico mantenedor ao fazer uma manutenção, estará consciente dos cuidados que deve tomar para não inverter uma lógica da proteção, ou durante uma ocorrência possuirá o conhecimento necessário para identificar a anomalia o mais rápido possível.

Neste capítulo serão estudados os diversos tipos de relés de proteção, analisando suas características construtivas (eletromecânico, eletrônico ou digital) e as funções de operação dos relés de distância, a qual será utilizada posteriormente para a simulação dos ensaios.

3.1 – Relés Eletromecânicos

Os relés eletromecânicos formaram o primeiro sistema de proteção do sistema elétrico de potência. Possuem uma elevada vida útil e um alto grau de confiabilidade e por conta desses fatores ainda está presente em grande quantidade no sistema elétrico.

Os relés eletromecânicos são acionados através de movimentos mecânicos e de acoplamentos elétricos e magnéticos. Existem dois tipos de relés eletromecânicos, os de atração eletromagnética e os de indução eletromagnética.

Os relés de atração eletromagnética são os de configuração mais simples e são ajustados para um determinado intervalo de corrente no qual deverão operar. Este ajuste da corrente de operação do relé está definido na equação 3.1.

$$(1,4 \text{ a } 1,5) \times I_{\text{nominal de carga}} \le I_{ajsute \ do \ rel\acute{e}} \le \frac{I_{curto-circuito \ mínimo \ no \ final \ do \ circuito \ protegido}}{1,5}$$
(3.1)

Como pode ser observado na equação 3.1, o relé de atração magnética possui um ajuste de 40 a 50% da corrente nominal de carga sem operar e deve operar abaixo da mínima corrente de curto-circuito

O relé ao identificar uma corrente dentro dos parâmetros ajustados irá acionar o disjuntor especificado a ele referenciado. Dentre os tipos de relé de atração eletromagnética podem ser citados o relé de êmbolo e o relé de alavanca. Na figura 19 está representada a configuração do relé de alavanca.



Figura 19 - Relé eletromecânico do tipo alavanca [5, pág. 75]

O relé de indução eletromagnética utiliza o mesmo principio dos motores de indução, em que um rotor irá entrar em funcionamento através do conjugado gerado. Dentre os tipos de relé de indução eletromagnética podem ser citados o relé de disco de indução com bobina de sombra, o relé tipo medidor de kWh, o relé tipo cilindro de indução e o relé tipo duplo laço de indução.

Os relés cilindro de indução e duplo laço de indução são do tipo instantâneo. Estes relés possuem bobinas defasadas de 90° e um rotor em formato de copo no centro.

Diferentemente dos relés acima, o relé de disco de indução não é do tipo instantâneo. Quando a bobina de operação do relé é energizada será induzido conjugado sobre o rotor (disco) fazendo com que o mesmo acelere até entrar em sua velocidade de regime permanente. O percurso configurado que o contato móvel irá realizar até atingir o contato fixo irá determinar o tempo para o qual o relé atue fechando os contatos normalmente abertos, após a energização da bobina. Na figura 20, segue uma visão espacial de um relé de disco de indução com bobina de sombra.



Figura 20 - Relé de disco de indução com bobina de sombra [5, pág. 78]

Os relés eletromecânicos apesar de serem considerados por muitos como ultrapassados, permanecem sendo usados em muitas subestações devido a muitas vantagens que apresentam, como:

 Alto grau de confiabilidade: fator importante visto a necessidade do sistema manter-se em contínua operação e de garantir a segurança das pessoas e integridade dos equipamentos presentes nas instalações elétricas.

- Alta durabilidade: fator importante para que não seja necessário modificar constantemente a estrutura do sistema e reduzir gastos com a infra-estrutura. Este é um dos principais fatores pelos quais há muitos relés eletromecânicos ainda em operação.
- Tolerância a elevadas temperaturas: importante, visto que muitas instalações elétricas encontram-se em locais extremamente quentes e com a presença de um grande número de equipamentos em operação a temperatura torna-se muito alta. Exemplo: subestações localizadas no Nordeste do Brasil.
- Baixa sensibilidade a surtos: o relé eletromecânico não sofre dano quando ocorre qualquer interferência de surtos eletromagnéticos.

Porém, os relés eletromecânicos apresentam algumas desvantagens que tornou rara a sua presença em novas subestações com a substituição de muitos por relés mais modernos. Dentre essas desvantagens, podem ser citadas:

- Equipamento grande e pesado: ocupam grande espaço na subestação e são difíceis de movimentar.
- Complexa instalação e manutenção: por serem equipamentos grandes e possuírem muito detalhamento, os relés eletromecânicos acabam por serem difíceis de serem instalados e sua manutenção se torna muito complexa.
- Lentidão na operação: por depender de muitos componentes mecânicos, esse relé não possui uma velocidade de atuação tão elevada quanto um software e com o desgaste do tempo se não receber uma adequada manutenção pode ter uma lentidão ainda maior em sua atuação.
- Não possui funcionalidades extras: o relé eletromecânico foi criado para proteger o sistema e não possui funcionalidades extras que auxiliem o operador a identificar as causas do problema. Relés modernos são capazes de apresentar oscilografias, registro de evento e até dar com precisão a distância em que ocorreu o curto-circuito em uma linha de transmissão.

3.2 – Relés Eletrônicos (Estáticos)

Com o avanço da tecnologia e com o aumento da confiabilidade nos equipamentos eletrônicos, começaram a ser instalados nas subestações os relés eletrônicos substituindo os relés eletromecânicos.

Os relés eletrônicos também são conhecidos como relés estáticos devido a não apresentarem dispositivos mecânicos em movimento. Porém, existem relés semi-estáticos que possuem sua composição de dispositivos eletrônicos associados a alguns dispositivos mecânicos.

Os relés eletrônicos no seu inicio de operação apresentou problema de atuação indevida, o que acarretou na substituição de muitos pelos antigos relés eletromecânicos, porém com o avanço tecnológico e com a inclusão de filtros adequados os relés eletrônicos passaram a ter um grau de confiabilidade mais elevado, causando menos transtornos à operação. Assim, podem ser citadas algumas vantagens do relé eletrônico que fez com que muitas subestações o mantivessem no lugar dos eletromecânicos, como:

- Baixo custo: possui menor gasto com componentes do que o relé eletromecânico em sua montagem e menos gastos com troca de peças que possam ser danificadas com o decorrer dos anos.
- Maior praticidade para a instalação e manutenção: mais leve, compacto e possui menos detalhes que o relé eletromecânico, facilitando assim a instalação e manutenção do mesmo.
- Maior velocidade: os dispositivos eletrônicos possuem maior velocidade de atuação do que os dispositivos mecânicos.
- Melhor monitoramento do funcionamento do relé: através de instrumentos de medição como voltímetros e amperímetros ou osciloscópios, podem ser monitorados os circuitos do relé facilitando encontrar a causa de defeitos e evitando-as quando possível.

Porém, o relés eletrônicos também possuem desvantagens que os fizeram ser substituídos pelos antigos relés eletromecânicos ou posteriormente pelos relés digitais. Algumas dessas desvantagens são:

- Baixa durabilidade: possui vida útil bastante inferior aos relés eletromecânicos, necessitando a sua troca com maior freqüência.
- Maior sensibilidade a surtos: os componentes eletrônicos se danificam com maior facilidade a surtos eletromagnéticos.
- Menor confiabilidade: durantes correntes de falta elevadas e operações de manobra, tensões transitórias podem ser induzidas nos condutores fazendo com que o relé atue indevidamente.

3.3 – Relés Digitais

Na década de 1960, com o desenvolvimento de microprocessadores, começou a se desenvolver relés que pudessem utilizar essa nova tecnologia para tornar a proteção do sistema elétrico mais confiável e eficiente.

Os relés digitais possuem a configuração interna formada por componentes eletrônicos, porém a diferença para os relés eletrônicos é o fato dos relés digitais terem seus componentes controlados por microprocessadores com softwares programados para exercer funções de proteção determinadas.

Nos microcomputadores não há mais a necessidade de se fazer mudança física no relé. Quando houver a necessidade de se fazer atualizações nas funções de proteção basta fazer atualizações no software. Assim, os relés podem se ajustar a proteção do sistema elétrico de maneira simples, rápida, eficiente e segura.

Uma característica dos relés digitais que os tornaram insubstituíveis, quando comparados aos relés eletromecânicos e eletrônicos, é a sua capacidade de exercer funções auxiliares que além de proteger o sistema torna mais eficiente o monitoramento e as análises de distúrbios. Entre as funções que os relés digitais podem exercer, destacam-se:

- Proteção: função principal de qualquer relé.
- Auto-checagem: o relé digital é capaz de supervisionar o seu próprio software e monitorar o estado do seu hardware.
- Religamento automático: ao ocorrer a abertura dos disjuntores que isolam uma função de transmissão, o relé digital é capaz de acionar automaticamente o religamento dos disjuntores (caso não estejam com função de bloqueio) e até efetuar uma segunda tentativa de religamento caso haja falha na tentativa anterior.
- Medição de grandezas: registro do valor das grandezas: corrente, tensão, freqüência ou uma combinação dessas grandezas (impedância, potência, ângulo de fase, entre outros).
- Registro de eventos: o relé registra e armazena em sua base de dados todos os eventos ocorridos no sistema que está sendo supervisionado.
- Identificação do defeito: o relé é capaz de identificar qual tipo de defeito ocorreu durante uma falha no sistema e auxiliar o operador do sistema como o mesmo deve agir pra sanar esse problema.
- Localização de falta: os relés mais modernos são capazes de identificar com exatidão o local em que ocorreu a falha em uma linha de transmissão, auxiliando a equipe de manutenção a se dirigir ao local rapidamente, tornando mais eficiente o trabalho de manutenção.
- Oscilografias: a capacidade dos relés digitais de apresentar oscilografias dos eventos do sistema se tornou uma ferramenta imprescindível para a análise de distúrbios e para estudos na melhoria da proteção do sistema elétrico.
- GPS: com o auxílio de GPS é possível saber o tempo exato em milissegundos em que ocorreu cada evento.

Além das vantagens já apresentadas acima, os relés digitais possuem outras vantagens quando comparados aos relés mais antigos, assim como;

- Menor tamanho: o relé digital é mais compacto e ocupa menos espaço na subestação, sendo assim o espaço dentro da sala de controle é otimizado.
- Diminuição do preço com o tempo: o preço de equipamentos modernos diminui no decorrer dos anos de acordo com o avanço tecnológico.
- Maior rapidez e confiabilidade: atua com maior velocidade que os relés antigos e a sua constante monitoração e atualização do seu software garante uma maior confiabilidade.
- Maior flexibilidade: pode se ajustar de acordo com o tipo de defeito identificado, com a mudança de configuração do circuito da subestação.
- Melhor coordenação do sistema: verifica a existência de redundâncias, troca de informações com outros relés para a coordenação correta do tempo de atuação de cada proteção.
- Menores custos: exigência de TCs com menores classes de exatidão, menores gastos com infra-estrutura, menores gastos com manutenção e instalação.

Porém, os relés digitais também possuem algumas desvantagens das quais podem ser citadas:

- Adaptação do sistema: necessidade de substituir toda a configuração analógica presente por um sistema digital.
- Impossibilidade de operar em alguns ambientes: os relés modernos não estão aptos a operar em ambientes hostis. Haverá gasto para manter a integridade do equipamento.
- Gastos com energia: o relé digital deverá estar ligado a fonte de energia a todo o tempo e ser refrigerado para que seus componentes não aqueçam.
- Baixa durabilidade: possui vida útil bastante inferior aos relés eletromecânicos necessitando a sua troca com maior freqüência.

Na figura 21, encontra-se um exemplo de um diagrama funcional de um relé digital de proteção:



Figura 21 - Diagrama funciona simplificado do relé de proteção SEL 311-C [7], pág. 2.

3.4 – Zonas de Operação de um Relé de Proteção

Antes de ser estudado o relé de distância, é importante que se possua o conhecimento das zonas de operação em que atuam os relés de proteção.

Os relés de proteção podem trabalhar com 3 a 4 zonas de operação, nas quais cada zona cobre uma determinada porcentagem da linha de transmissão e possui um tempo de atuação ajustado para manter a coordenação da proteção.

Normalmente trabalha-se com o seguinte ajuste de distância para as zonas de operação:

- Zona 1: 80% da linha de transmissão, a partir do terminal onde se encontra o relé.
- Zona 2: 120 a 150% da linha de transmissão, a partir do terminal onde se encontra o relé.
- Zona 3: 220 a 230% da linha de transmissão, a partir do terminal onde se encontra o relé.
- Zona reversa: irá monitorar o que ocorre no sentido oposto às outras zonas de operação ("enxerga para trás").

A temporização das zonas 1, 2 e 3 obedecem a ordem numérica crescente, em que a zona 1 deverá atuar instantaneamente e as zonas conseguintes possuem uma temporização acrescidas de um tempo Δt .

A zona reversa irá enxergar os distúrbio ocorridos na linha a montante. Essa zona de atuação poderá estar regulada com a temporização acima da zona 3, atuando assim caso todas as outras zonas venham a falhar. Esta zona de atuação também poderá estar regulada para apenas enviar um sinal para o relé da outra extremidade de sua linha de transmissão para que o mesmo não abra por conta de uma falha em outra linha.

Assim, o sistema possuirá diferentes escalas de proteção, que se comunicam e estão coordenados para atuarem quando necessário. Essas escalas de proteção são conhecidas como:

- Proteção primária: atuação em zona 1 do relé conectado no terminal da linha de transmissão afetada pela falta.
- Proteção de retaguarda: atuação em zona 2 ou 3 do relé conectado ao terminal de uma linha de transmissão anterior que atuou devido a falha da atuação em zona 1 do relé conectado no terminal da linha de transmissão afetada pela falta.



Figura 22 - Representação das zonas de atuação de um relé em uma linha de transmissão

Existem vários tipos distintos de modelos de zonas de atuação que podem ser utilizados em um relé de distância, dentre esses variados tipos encontram-se:





Figura 23 - Zona de atuação do tipo lente

Figura 24 - Zona de atuação do tipo poligonal





Figura 25 - Zona de atuação do tipo blinder

Figura 26 - Zona de atuação do tipo paralelogramo

O tipo de zona de atuação mais comum e a qual será trabalhada neste capítulo será do tipo MHO, a qual pode ser vista na figura abaixo:



Figura 27 - Zona de atuação do tipo MHO

3.5 – Relés de Distância

Os relés de distância são caracterizados por atuarem medindo as grandezas elétricas do sistema ao longo da linha de transmissão até o ponto onde ocorre o distúrbio. Com isso, torna-se simples a adequação deste relé para as constantes mudanças ocorridas no sistema elétrico, não sendo necessário também uma constante parametrização do relé.

As grandezas elétricas medidas pelo relé de distância são: impedância, admitância e reatância. Curiosamente, o relé de distância recebeu este nome devido aos parâmetros medidos serem proporcionais ao tamanho (ou distância) da linha de transmissão.

3.5.1 – Relé de Impedância

O relé de impedância recebe este nome pelo fato de operar através da medição da impedância ao longo da linha de transmissão. Este relé é parametrizado para uma determinada impedância e o mesmo irá operar caso seja medido um valor menor ou igual ao parametrizado.

Sabe-se que a impedância pode ser representada através do diagrama jX x R, da seguinte maneira:



Figura 28 - Representação da impedância no diagrama jX x R

$$Z = jX + R \tag{3.2}$$

$$Z^2 = X^2 + R^2$$
 (3.3)

A equação 3.3 representa geometricamente a equação de uma circunferência centralizada na origem e de raio $Z = \sqrt{X^2 + R^2}$, representado na figura 29.



Figura 29 - Zona de atuação do relé de impedância

Na figura 29, o Z_{ajuste} representa a impedância do limiar de operação, ou seja, a máxima impedância para a qual o relé irá atuar. Toda impedância localizada no interior ou no limiar da circunferência hachurada fará com que o relé opere, portanto toda impedância fora da circunferência estará fora da zona de operação do relé de impedância.

Como pode ser observado na figura 29, o relé de impedância possui uma zona de atuação que engloba ambos os sentidos (para frente e para trás), não possuindo assim uma

direcionalidade. Este fator poderia causar grandes problemas em um sistema como o que pode ser visto na figura 22, em que um distúrbio ocorrido em um ponto dentro de uma das linhas de transmissão poderia estar no alcance de observação de dois relés. Neste caso os relés atuariam simultaneamente, sendo que um atuaria corretamente e o outro indevidamente.

Para contornar este problema de direcionalidade do relé de impedância, se faz necessário a utilização de um relé direcional junto ao relé de impedância. Assim, a zona de operação do relé de impedância passará a possuir a seguinte característica:



Figura 30 - Zona de atuação do relé de impedância acoplado ao relé direcional

Na figura 31 encontra-se o diagrama de comando do sistema de proteção do relé de impedância junto ao relé direcional. Neste esquemático há o relé de impedância que está representado por uma chave NA (normalmente aberta) de nomenclatura 21 e há o relé direcional que está representado por uma chave NA (normalmente aberta) de nomenclatura 67 e há duas bobinas de comando.

Quando a impedância medida pelo relé encontrar-se fora da circunferência da figura 30, os relés de impedância e direcional não serão sensibilizados e consequentemente ambas as chaves NA permanecerão abertas e as bobinas de atuação permanecerão desenergizadas.

Quando a impedância medida pelo relé encontrar-se dentro da região hachurada na figura 30, os relés de impedância e direcional serão sensibilizado e consequentemente ambas as chaves NA fecharão e será energizada a bobina de operação que irá atuar abrindo o disjuntor da linha de transmissão.

Quando a impedância medida pelo relé encontrar-se dentro da circunferência na região não hachurada, o relé de impedância será sensibilizado e o direcional não. Assim, a chave NA 21 irá fechar e a chave 67 permanecerá aberta energizando a bobina de envio de sinal que irá atuar enviando sinal para o disjuntor da outra extremidade da sua linha de transmissão para que evite que o mesmo atue indevidamente.



Figura 31 - Diagrama esquemático do comando de proteção

Portanto, o relé de impedância estará sempre acoplado ao relé direcional, operando para defeitos em apenas em um sentido, e para defeitos na linha de transmissão a montante o relé enviará um sinal de bloqueio para o disjuntor da outra extremidade para que o mesmo não abra pela atuação da sua proteção primária.

A característica do relé de impedância com a sua direcionalidade ajustada e com as três zonas de operação está representado na figura 32.



Figura 32 - Zonas de atuação do relé de impedância acoplado ao relé direcional

3.5.2 – Relé de Admitância

O relé de admitância possui filosofia semelhante ao relé de impedância e possui característica de direcionalidade, não precisando assim que seja adicionado um relé direcional em sua configuração de proteção. Este relé também é conhecido como relé Mho.

$$Y = \frac{I}{V} = \frac{1}{Z} \tag{3.4}$$

A característica da zona de atuação do relé de admitância é representada, a exemplo do relé de impedância, no diagrama jX x R, e como já mostrado na figura 27, possui a seguinte representação:



Figura 33 - Diagrama MHO

Em que:

r – ângulo de máximo torque do relé de admitância, no qual irá operar o relé.

 θ – ângulo da linha de transmissão AB.

 Z_{max} – impedância da linha de transmissão AB que se encontra no limiar de operação do relé de admitância, no caso da figura acima Z_{max} representa a impedância máxima vista pela zona 1 de operação, ou seja, 80% impedância da linha de transmissão.

 Z_{ajuste} – impedância máxima da linha de transmissão AB ajustada para o máximo torque de operação do relé de admitância.

Como no relé de impedância, o relé irá operar quando for medida uma impedância localizada dentro ou no limiar da circunferência. Para as impedâncias medidas fora da circunferência o relé não opera.

Para calcular o Z_{ajuste}, primeiramente deverá ser traçado uma reta perpendicular ao ponto médio (M) da corda formada pela linha de transmissão AB passando pelo centro (C) da circunferência, como mostrado na figura 34.



Figura 34 - Diagrama MHO com ajuste de impedância

O segmento de reta AM será igual a metade da impedância Z_{max} e o segmento de reta AC será igual a metade da impedância Z_{ajuste} . Assim:

$$\cos(\theta - \mathbf{r}) = \frac{Z_{\text{max}} / 2}{Z_{ajuste} / 2} = \frac{Z_{\text{max}}}{Z_{ajuste}}$$
(3.5)

$$Z_{ajuste} = \frac{Z_{\text{max}}}{\cos(\theta - \mathbf{r})}$$
(3.6)

Por exemplo, para calcular a impedância de ajuste para a zona 2 de proteção (120% da linha de transmissão) de um sistema seria utilizada a equação 3.7, baseada na figura 35.

$$Z_{2} = \frac{Z_{AB} + 0.2xZ_{BC}}{\cos(\theta_{2} - \mathbf{r})}$$
(3.7)



Figura 35 - Ajuste para a zona 2 de proteção

3.5.3 – Relé de Reatância

O relé de reatância é caracterizado por trabalhar com a medição apenas da reatância da linha de transmissão. Este relé não possui propriedades de direcionalidade e tem como grande vantagem a operação para curtos de alta resistência.

$$X = \frac{V}{I}sen\theta = Zsen\theta \tag{3.8}$$



Figura 36 - Diagrama de atuação do relé de reatância

Na figura acima, a reta perpendicular ao eixo da reatância é a reta do limiar de operação do relé. As reatância medidas pelo relé que se encontram acima da reta não fará o relé atuar, e as reatância abaixo da reta ou no limiar de operação irão acarretar a atuação do relé.

Como já dito anteriormente, o relé de reatância não possui propriedade de direcionalidade, portanto será combinado a ele um relé de admitância formando um sistema de proteção direcional

e com atuação para altas resistência para as três zonas de proteção do relé de reatância, como pode ser observado na figura 37.



Figura 37 - Relé de reatância combinado ao relé de admitância

Portanto, com as características acima o sistema devido ao relé de reatância ficará protegido para curtos em que haja a influência de altas resistências como na presença de arcos elétricos. É também importante que quando a carga que é alimentada pela linha de transmissão possuir um fator de potência capacitivo, o deslocamento do ponto de operação não fará o relé atuar indevidamente por causa do relé de admitância.

3.6 - Relés de Oscilação de Potência

No sistema de potência normalmente ocorrem oscilações de potência devido a curtocircuitos, abertura de linhas de transmissão e outros fatores que acarretam na oscilação dos ângulos dos rotores dos geradores.

Essas oscilações de potência fazem com que a impedância vista pelo relé de distância oscile fazendo com que esta impedância possua transitórios alocados dentro das zonas de operação do relé de distância.

Quando a impedância migra para a 2^a ou 3^a zona de operação do relé de distância então não há riscos para a operação devido o tempo do transitório nesta zonas serem inferiores a temporização ajustada para atuação do relé nessas zonas de proteção.

Porém, o grande risco ocorre quando a impedância possui um transitório na 1^a zona de proteção, que possui atuação instantânea. Neste caso, para evitar uma atuação indevida do relé de distância será integrado ao sistema de proteção um relé de oscilação de potência que tem por características bloquear a atuação da proteção por conta de oscilações no sistema de potência.



Figura 38 - Diagrama esquemático de proteção

Em que:

Z1, Z2, Z3 – representam a 1^a, 2^a e 3^a zonas de operação, respectivamente.

T₂ – Chave de temporização da 2ª zona de operação.

 T_3 – Chave de temporização da $3^a\,$ zona de operação.

R – Relé de temporização das chaves 68, T₂ e T₃.

No diagrama da figura 38, observa-se que no caso de oscilações de potência no sistema a chave NF (normalmente fechada) do relé de oscilação de potência irá abrir fazendo com que não energize a bobina de operação.

Quando ocorrer curto na 1^a zona ou um oscilação de potência com temporização inferior ao do relé de bloqueio, então a chave NF permanecerá fechada e energizará a bobina de operação.

As chaves NA (normalmente aberta) das 2^a e 3^a zonas de operação poderão fechar caso ocorra uma migração da impedância medida para essas zonas de atuação, porém as chaves temporizadas só irão fechar energizando a bobina de operação no caso de um curto-circuito. Este fato ocorre devido a temporização dessas zonas de operação serem superiores ao tempo em que ocorre a oscilação.

CAPÍTULO 4 –EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NA EXECUÇÃO DOS TESTES NO RELÉ DE DISTÂNCIA

Os testes de bancada em relés de proteção são extremamente importantes para verificar se o mesmo está atuando conforme especificado pelo fabricante, e também pode ser utilizado para o auxílio em curso e treinamento para a equipe de proteção.

Conhecendo-se as funções do relé e assegurando-se que o mesmo é capaz de operar corretamente, pode-se inseri-lo no sistema sem que haja quaisquer riscos para a proteção e certificando-se que quando houver um distúrbio no sistema a equipe de proteção estará preparada para atuar com rapidez e eficiência verificando a causa da ocorrência, analisando-a e agindo com todo conhecimentos necessário para sanar o problema ou evitar, se possível, que o mesmo ocorra novamente.

Neste projeto serão analisados os testes realizados em um relé digital de proteção SEL 311-C, onde serão testadas as atuações da função de distância do mesmo durante a ocorrência de curto-circuito em pontos variados da linha de transmissão e será verificado se o relé irá atuar na zona de operação correta e se o mesmo irá atuar no tempo esperado.

Para a montagem da bancada de testes serão utilizados equipamentos auxiliares de testes onde cada um desempenhará uma determinada função e todos serão descritos nos itens a seguir. Os equipamentos auxiliares utilizados foram: mala de teste Omicron CMC-256-6, equipamento de simulação de disjuntor, caixa de simulação de equipamento transmissor de sinal para o relé de proteção e caixa de simulação de equipamento receptor de sinal para o relé de proteção.

4.1 – Mala de teste Omicron CMC 256-6

A mala de teste é o equipamento utilizado para enviar o comando específico para testar a atuação do relé de proteção. Este equipamento é capaz de simular curto-circuitos em um relé a ser inserido em uma linha de transmissão, na qual são conhecidas todas as grandezas, como corrente,

tensão, impedância, potência, entre outros. Através do conhecimento desses parâmetros é possível se calcular e simular curto-circuitos em diferentes pontos da linha de transmissão.

Devido ao fato de o relé digital ter sido consolidado no mercado como o relé de proteção mais confiável, o mesmo se tornou mais utilizado nas subestações que possuem condições de investir em sua modernização e melhoria no seu sistema de proteção. Com isso, aumentou a demanda por equipamentos de mala de teste e conseqüentemente a quantidade de fabricantes.

Hoje em dia existem muitos fabricantes para equipamentos de mala de teste, dentre eles: Omicron Eletronics, Conprove Engenharia, Eletroteste Indústria e Comércio Ltda., Fascitec Instrumentação e Eletrônica Ltda., Equilamang-Tecnologias em Movimento, Doble Engineering Company, entre outras.

A Omicron Eletronics é a líder mundial de equipamentos de teste de proteção, portanto será o modelo Omicron CMC 256-6 o equipamento que será utilizado nos testes de atuação do relé de distância deste projeto.



Figura 39 - Foto do Omicron CMC 256-6 montado para os testes

Na foto da figura 39, pode ser observado o equipamento Omicron CMC 256-6 com as suas devidas conexões feitas antes de serem realizados os testes.

Nos itens abaixo serão descritas as funções do Omicron CMC 256-6, assim como a importância de cada uma das conexões realizadas.

4.1.1 – Conexões do Omicron CMC 256-6

Durante os testes realizados foi feita a conexão direta entre a mala de teste e um computador e entre a mala e o relé de distância SEL 311-C.

Para conectar-se o Omicron ao computador foi necessário utilizar um cabo do tipo Ethernet e conectá-lo a saída localizada na parte de trás do equipamento e ligado a porta Ethernet do computador.

A conexão entre a mala de teste e o relé de distância é mais complexa e para que não haja problemas na operação durante o teste foi necessário estudar todas as entradas e saídas do equipamento. Abaixo estão descritos e explicados os tipos de conexão entre o Omicron CMC 256-6 e o relé digital de proteção.

4.1.1.1 – Voltage Output ("Tensão de saída")

O canal de tensão de saída é composto de 4 entradas em vermelho e 2 entrada em preto, onde as entradas são galvanicamente isoladas. Essas entradas são amplificadas com acoplamento CC e possuem 2 faixas de tensão, sendo uma com variação de 0 a 150 V e a outra com variação de 0 a 300 V.

A conexão para a realização dos testes é feita da seguinte forma:

- Entradas vermelhas numeradas de 1 a 3: Essas entradas enviarão para o relé digital o sinal referente às fases A, B e C do terminal em que na simulação o relé estaria conectado na linha de transmissão.
- Entrada vermelha de número 4: Essa entrada enviará para o relé de distância o sinal referente à tensão na linha de transmissão. Essa tensão deverá estar em sincronismo com uma das fases.
- Entrada em preto ("N"): Essa entrada é o neutro, a qual as entradas em vermelho estão referenciadas.

Obs.: Todas as entradas serão conectadas diretamente ao relé digital através de um cabo de conexão com terminal "banana".

4.1.1.2 – Current Output ("Corrente de saída")

O canal de corrente de saída é composto de 6 entradas em vermelho e 2 entradas em preto, onde as entradas são galvanicamente isoladas. Essas entradas são amplificadas com acoplamento CC e possuem 2 faixas de corrente, sendo uma com variação de 0 a 1,25 A e a outra com variação de 0 a 12,5 A.

A conexão para a realização dos testes é feita da seguinte forma:

- Entradas vermelhas numeradas de 1 a 3: essas entradas enviarão para o relé digital o sinal referente às fases A, B e C do terminal em que na simulação o relé estaria conectado na linha de transmissão.
- Entrada em preto ("N"): essa entrada é o neutro, a qual as entradas em vermelho estão referenciadas.

Obs.: Todas as entradas serão conectadas diretamente ao relé digital através de um cabo de conexão com terminal "banana".

4.1.1.3 – Binary / Analog Input ("Entrada binária / analógica")

O canal de entradas binárias / analógicas é composto de 10 canais em vermelho (entradas do sinal binário) e 10 canais em preto (o neutro de cada entrada se sinal binário), onde são separadas em 5 grupos de 2 canais vermelhos e 2 canais pretos e cada grupo é galvanicamente separado um dos outro. Essas entradas podem ser especificadas através de contatos molhados (com potencial) ou secos (sem potencial), e com contador de freqüência com capacidade de até 3 kHz.

Através do software Omicron Test Universe, que será estudado posteriormente no item 4.1.2, poderá ser utilizada a ferramenta EnerLyzer em que será possível transformar as entradas binárias em analógicas com capacidade de aquisição de sinais em uma faixa de freqüência de 0 a 10 kHz. As entradas de tensão possuem capacidade de aquisição de sinais de até 600 Vrms com faixas de medição de 100 mV, 1 V, 10 V, 100 V e 600 V.

Para a medição de correntes deverá ser usado, segundo o catálogo do fabricante, a ferramenta C-Probre 1 que é uma ponta de prova de corrente ativa AC e DC com saída de tensão. A C-Probre 1, possui duas faixas de medidas, de 10 e 80 A, faixa de freqüência de 0 Hz a 10 kHz. Na figura 40 encontra-se uma foto da ponta de prova C-Probe 1.



Figura 40 – Ponta de prova C-Probe 1 [8], pág. 56.

Através das 10 entradas disponíveis e utilizando as ferramentas do software da mala de teste, é possível obter simultaneamente várias grandezas de medição, como:

- Valores das tensões e das correntes em RMS.
- Valores das correntes de fase.
- Valores das componentes simétricas da tensão e da corrente.
- Diferença de fase entre duas grandezas
- Tensão fase-fase e tensão fase-neutro.
- Fator de potência.
- Potência ativa, reativa e aparente.

4.1.1.4 – Binary / Analog Output ("Saída binária / analógica")

O canal de saídas binárias / analógicas é composto de 8 canais em preto, onde as entradas são galvanicamente isoladas.

A conexão para a realização dos testes é feita da seguinte forma:

- Canais localizados na parte de cima e numeradas de 1 a 4: saídas binárias que podem ser utilizadas como contato sem potencial.
- Canais localizados na parte de baixo: são os canais de neutro, aos quais as saídas binárias estão referenciadas.

Obs.: Todas as saídas binárias serão conectadas diretamente ao relé digital, através de um cabo de conexão com terminal "banana".

4.1.1.5 – Analog DC Input ("Entrada Analógica CC")

O canal de entradas analógicas é composto por 2 canais em vermelho e 2 canais em preto, onde as entradas são galvanicamente isoladas.

A conexão para a realização dos testes é feita da seguinte forma:
- Canal em vermelho (0...± 20 mA): entrada de corrente CC, protegida por fusível e com 2 faixas de medição, uma de 0 a ± 1 mA e a outra de 0 a ± 20 mA.
- Canal em vermelho (0...± 10 V): entrada de corrente CC de alta precisão, com faixa de medição de 0 a ± 10 V.
- Canal em preto: esse canal é o neutro, a qual as entradas de corrente e tensão CC estão referenciadas.

Obs.: Todas as entradas serão conectadas diretamente ao relé digital, através de um cabo de conexão com terminal "banana".

4.1.1.6 – Aux DC ("Fonte Auxiliar CC")

O canal de fonte auxiliar de corrente contínua é composto por 1 canal em vermelho e 1 canal em preto, onde as entradas são galvanicamente isoladas. Essa entrada serve como uma fonte de corrente contínua para o equipamento testado. Esse canal possui a função de proteção, onde há um led que é acionado, como forma de alarme, caso a tensão de corrente contínua ultrapasse 42 V.

4.1.2 – Omicron Test Universe

O software Omicron Test Universe é o programa onde serão inseridos todos os dados necessários para a execução dos testes na mala de teste Omicron CMC 256-6. Devido a grande demanda de empresas solicitando este software, foi criado um programa simples de ser usado, com uma interface parecida com a dos conhecidos programas utilizados no Windows e com a disponibilidade de se salvar os dados utilizados para facilitar uma possível necessidade de refazer os testes no futuro.



Figura 41 – Tela inicial do software Omicron Test Universe

Na figura acima observa-se a interface da tela inicial ao iniciar o software Omicron Test Universe. Nesta interface pode-se observar que o programa é divido em títulos e subtítulos que podem ser selecionados e que cada um desempenha uma tarefa especifica.

Segue abaixo a descrição das principais ferramentas para a realização de testes no software:

 Módulo de teste: este é o módulo do programa que será utilizado para a realização dos testes no relé de operação. Este módulo possui ferramentas, em que cada uma possui um módulo de teste específico.

- Quick CMC: ferramenta em que é possível realizar os testes através de um controle simultâneo da magnitude, freqüência e fase de todas as grandezas disponíveis na mala de teste.
- Ramping: é possível realizar os mesmos testes da ferramenta anterior, porém nesta ferramenta será gerada uma rampa de amplitude, fase ou freqüência através de determinados valores limite.
- State Sequencer: esta é a ferramenta que será utilizada durante os testes no relé de distância deste projeto, portanto será destacada para um melhor detalhamento de suas funções no item 4.1.2.1.
- Advanced Transplay: essa ferramenta se utiliza de sinais transitórios obtidos em registrador de falta ou oscilografias para realizar testes no relé de proteção para verificar o funcionamento do mesmo nestas ocasiões.
- Overcurrent: ferramenta utilizada para o teste em relés de sobrecorrente, na qual serve para testar o tempo de disparo e avaliação da curva de sobrecorrente.
- Distance: ferramenta utilizada para testes em relés de distância, na qual é possível definir através de elementos pré-determinados as zonas de partida, disparo, extendida e não disparo.
- Autoclousure: essa ferramenta ajusta automaticamente as condições de teste em seqüência com ou sem sucesso, através de condições pré-estabelecidas pelo usuário. Assim, há um grande ganho de tempo quando necessário fazer a análise dos testes.
- Differential: ferramenta utilizada para testes em relés diferenciais, na qual é possível realizar testes da característica da operação e da função de bloqueio da corrente de magnetização.
- Syncronizer: ferramenta utilizada para realizar testes de sincronismo no relé, na qual se verifica a magnitude, freqüência e defasagem entre dois sistemas adjacentes, evitando interligá-los caso uma dessas características não seja respeitada.
- Annunciation Checker: ferramenta que auxilia o usuário a verificar se todas as conexões e configurações do relé foram feitas corretamente e que o equipamento está pronto para entrar em operação.

- Simulação de Rede: ferramenta que permite simulações instantâneas através de simples configuração de parâmetros da rede do sistema de potência, testar os relé em condições reais.
- Meter: ferramenta utilizada para testes manuais e automáticos em medidores de energia.
- Transducer: ferramenta utilizada para testes manuais e automáticos para a medida de qualquer grandeza, como: potência ativa, reativa e aparente, corrente, tensão fase-fase e fase-neutro, fator de potência, freqüência, defasagem entre duas componentes, entre outros.
- Enerlyser: como já descrido no item 4.1.1.3, esta ferramenta é utilizada para transformar as entradas binárias da mala de teste em entradas de medidas analógicas.

4.1.2.1 – State Sequencer

A ferramenta State Sequencer é utilizada como um seqüenciador de estados que permite simular as condições de pré-falta, falta e pós-falta. Cada estado pode ser configurado com os valores de tensão, corrente, ângulo de fase e freqüência das componentes que compõem o sistema no instante a ser representado.

A configuração dos estados deverá seguir uma seqüência lógica e a transição entre eles pode ser feita através de um tempo pré-definido, depois de um pulso de sincronização via GPS, através de uma condição de disparo nas entradas binárias do Omicron ou pelo simples acionamento de uma tecla do computador.

É importante ter conhecimento das configurações utilizadas para a execução dos testes, assim como saber qual tipo de curto-circuito está sendo simulado e a zona de operação que o relé testado deve atuar. Tendo conhecimento desses dados e das características do relé, é possível analisar o tempo de atuação em que o mesmo operou, sendo possível verificar se está dentro do esperado.

Esta ferramenta, assim como o software, possui uma interface simples, flexível e de fácil utilização, como pode ser observado na figura abaixo:



Figura 42 – Tela da ferramenta State Sequencer

4.2 – Equipamento Simulador de Disjuntor

Para simular a atuação de um disjuntor durante os testes de curto-circuito no relé de distância foi utilizado um equipamento de simulação de disjuntor. Este equipamento é uma caixa de testes com contatos NA (normalmente aberto) e NF (normalmente fechado) que serão chaveados de acordo com o comando enviado pelo relé.

A figura 43, é uma foto tirada, antes do inicio do experimento, do simulador de disjuntor com suas ligações ao relé já feitas e pronto para entrar em operação.



Figura 43 – Foto frontal do Simulador de Disjuntor

Na foto 43 foram numerados duas partes do equipamento que serão bastante analisadas durante os testes, as mesmas estão descritas abaixo:

1 - No instante da falta esta chave irá mudar de posição e será aceso o led verde indicando que o disjuntor está aberto e ao haver a recomposição do sistema a chave irá mudar para a sua posição original acendendo o led vermelho indicando que o disjuntor está fechado e a linha de transmissão está apta a operar normalmente.

2 – Esse contador de tempo irá cronometrar o tempo de religamento do disjuntor, a partir do momento que a chave 1 muda de posição para em aberto é iniciado o contador e o mesmo é pausado no instante que a chave muda de posição fechando o disjuntor. Em ocorrências normais é esperado um tempo de religamento em torno de 3 segundos.

4.2 – Equipamento Transmissor de Sinal

Para a realização de testes de curto-circuito na 2^a zona de operação temporizada, foi montada na bancada uma caixa de transmissão de sinal para o relé de distância. Esse equipamento simula o envio de sinal que o relé de operação do terminal a jusante enviará para que o relé de operação testado atue em 2^a zona temporizada.

Para que seja ativada a função de envio de sinal da caixa, deve ser mudada a posição da alavanca destacada com o número 1, na figura abaixo:



Figura 44 – Foto da caixa de transmissão de sinal

4.3 – Equipamento Receptor de Sinal

Para a realização de testes de curto-circuito na 3^a zona de operação (zona reversa), foi montada na bancada uma caixa receptora de sinal do relé digital testado. Esse equipamento simula o envio de um sinal de bloqueio para o relé de operação que se encontra no terminal a jusante.

Como o defeito simulado não ocorre na linha de transmissão que está sendo testada, não haverá chaveamento do equipamento simulador de disjuntor e o relé de distância testado não irá atuar nenhuma função de proteção, apenas irá enviar o sinal de bloqueio para que não haja atuação indevida do relé de proteção do terminal a jusante. Assim, a caixa receptora de sinal irá emitir um alarme sonoro e acenderá um de seus leds para que haja a certeza que o sinal foi enviado com sucesso.



Figura 45 – Foto frontal da caixa receptora de sinal

4.4 – Relé Digital SEL 311-C

O relé escolhido para o experimento foi o relé digital fabricado pela Schweitzer Engineering Laboratories, modelo SEL 311-C.

Este relé possui um avançado sistema de proteção e automação, com o qual é possível haver diversos esquemas de abertura através da proteção de distância nas diferentes zonas temporizadas.

O relé se conecta aos outros equipamentos através de uma porta serial na sua parte frontal e duas portas na sua parte traseira do tipo EIA-232, além de uma porta serial na parte traseira do tipo EIA-485. O relé ainda possui entradas de tensão e corrente, além de outras entradas opcionais em sua parte traseira como demonstrado na figura 46.



Figura 46 – Exemplo de configuração do painel traseiro do relé digital SEL 311-C [7], pág. 21.

Em seu painel dianteiro o relé possui um LCD, onde são exibidas informações de medições, eventos e ajustes que venham a ocorrer durante a atuação do relé. As informações a serem exibidas no LCD podem ser configuradas de acordo com o pressionamento dos oito botões que se encontram à sua direita.

Acima do LCD, há 16 leds de sinalização de estado e trip que ajudam o usuário a identificar com facilidade a ocorrência. Abaixo segue uma descrição das possíveis sinalizações dos leds.

- EN sinaliza que o relé está alimentado corretamente e pronto para a sua utilização.
- **TRIP** sinaliza que foi identificada atuação de trip.
- **TIME** sinaliza que ocorreu um trip temporizado.
- COMM sinaliza que ocorreu um trip por teleproteção.
- **SOTF** sinaliza que ocorreu um trip por chaveamento sobre falta.
- **RECLOSER:**
 - **RS** sinaliza que o relé está apto para o religamento.
 - **LO** sinaliza que há bloqueio do religamento.
- 51 sinaliza que ocorreu a atuação da função de proteção sobrecorrente temporizado.
- FAUL TYPE:
 - A, B, C, G sinaliza as fases envolvidas na falta e se envolveu o terra, por exemplo em um curto bifásico (fases A e B) para a terra, acenderá os leds A, B e G.
- ZONE/LEVEL:
 - ▶ 1, 2, 3, 4 sinaliza a zona de atuação em que ocorreu a falta.

Segue abaixo a figura 47 com um exemplo do painel frontal do relé digital SEL 311-C.

| © | BELING) | | 0 | | | 7054 | 0 |
|---|--|------------------|---|---------|-------------|--|----|
| | MC COMM STT R5 19 51 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 c c 1 2 mm 1000/10101 | | |) om | () (2007 | SEL-311C PROTECTION AND AUTOMATION SYSTEM | |
| |] | LANP CLICE STUCT | 1 | Y | DALL | | |
| |] | | | | | | |
| | | | | B | | - | |
| | | | | | SEL | SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORI | ES |
| | | | 0 | | | | 0 |



Os relés digitais com avançado sistema de proteção e automação, como o SEL 311-C, possuem como grande vantagem em relação aos relés eletromecânicos o fato de exercer diversas

funções simultaneamente. O relé SEL 311-C possui funções de proteção, monitoramento, medição e controle, funções as quais serão estudadas a seguir.

4.4.1 - Funções de Proteção

O relé digital de proteção SEL 311-C é capaz de exercer diversos tipos de funções de proteção, de acordo com a falta ocorrida na linha de transmissão na qual está instalado. As funções de proteção que o relé é capaz de exercer são:

- 21 função de proteção de distância de fase, quatro zonas tipo Mho;
- 21G função de proteção de distância de neutro, quatro zonas tipo Mho e quatro zonas tipo quadrilateral;
- 25 função de proteção de check de sincronismo;
- 27/59 função de proteção de subtensão e sobretensão fase-neutro e entre fases;
- **50/51** função de proteção de sobrecorrente de fase instantânea e temporizada;
- **50/51G** função de proteção de sobrecorrente residual instantânea e temporizada;
- 50/51Q (46) função de proteção de sobrecorrente instantânea e temporizada de seqüência negativa;
- **59G** função de proteção de sobretensão de neutro;
- **59Q** função de proteção de sobretensão de seqüência negativa;
- 50/62BF função de proteção de falha de disjuntor;
- 60 função de proteção de perda de potencial;
- 67G função de proteção de sobrecorrente direcional de neutro (polarizado por corrente ou tensão);
- 67Q função de proteção direcional de seqüência negativa;
- **78/68** função de proteção de disparo e bloqueio por oscilação de potência;
- 79 função de proteção de religamento automático monopolar ou tripolar, até quatro tentativas;
- **81** função de proteção de sub/sobrefreqüência e taxa de variação de freqüência;
- **85** função de proteção de esquemas de controle ou teleproteção.

4.4.2 – Funções de Monitoração

Para um melhor acompanhamento do sistema o relé é capaz de exercer funções de monitoramento, como as descritas a seguir:

- Registro de oscilografia, capaz de armazenar até 12 segundos de dados;
- Registro de seqüência de eventos, capaz de armazenar os últimos 1024 eventos;
- Localizador de faltas, em que indica em km ou % da linha de transmissão o ponto onde ocorreu a falta;
- Monitoramento do serviço auxiliar CC da subestação (banco de baterias), com indicação de alarme para sub ou sobretensão;
- Monitoramento de desgaste dos contatos do disjuntor por polo;
- Contador de operações dos disjuntor;
- Monitoramento das bobinas do disjuntor (através de programação lógica);
- Web-server integrado: permite a leitura e verificação de configurações, medições e ajustes através de servidor web integrados ao relé de proteção.

4.4.3 – Funções de Medição

Caso haja a necessidade de obter medições das grandezas elétricas da linha de transmissão protegida pelo relé, então é possível obter as seguintes grandezas:

- Correntes de fase (I_a, I_b, I_c) e de neutro (I_g) ;
- Correntes de sequência positiva, negativa e zero (I_1, I_2, I_0) ;
- Tensões de fase (V_a, V_b, V_c) e de sincronismo (V_s) ;
- Tensões de seqüência positiva, negativa e zero (V_1, V_2, V_0) ;
- Potência ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Fator de potência por fase e trifásico;
- Demanda de corrente de fase, de neutro e de seqüência negativa;
- Demanda de potência ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);
- Energia ativa e reativa por fase e trifásica (quatro quadrantes);

- Registro de valores máximos e mínimos de grandezas analógicas;
- Medição sincronizada dos fasores.

4.4.4 – Funções de Controle

O relé também possui um avançado sistema de automação, no qual é capaz de exercer controle de equipamentos a ele interligado. Dentre as funções de controle exercidas, estão:

- Possui 6 entradas binárias e 8 contatos de saída digitais com uma placa adicional (opcional) de 14 entradas binárias e 20 saídas digitais;
- Possui comando de abertura e fechamento de disjuntor, local e remoto;
- Possui comando de abertura e fechamento de seccionadora, local e remoto;
- Possui 16 relés auxiliares / temporizadores, 16 chaves biestáveis, 16 chaves de controle local e remoto;
- Possibilidade de programação de até 16 mensagens para serem exibidas no display;
- 10 pushbuttons configuráveis sinalizados por leds pré-programados com funções de controle mais comuns (opcional);
- 2 pushbuttons auxiliares sinalizados por leds para abertura/fechamento do disjuntor, independentes eletricamente do relé. Podem ser acionados mesmo com o relé desligado (opcional);
- Possui seletividade lógica;
- Possui 6 grupos de ajustes;
- Possui controle de torque das funções de sobrecorrente;
- Possui relé anunciador;
- Possui dispositivo de inibição de fechamento de disjuntor;
- Possui dispositivo de bloqueio de sinal de disparo de disjuntor;

4.4.5 – Funções Lógicas Adicionais

Além de todas as funções citadas acima, o relé também possui lógicas adicionais capazes de garantir um alto índice de confiabilidade para o sistema. Dentre as lógicas adicionais exercidas pelo relé, encontram-se:

- Função 21N quadrilateral com unidade de medição resistiva e reativa;
- Função 21 de fase compensada;
- Função de detecção de transitórios em TPCs;
- Compensação do tempo de fechamento do disjuntor na lógica de sincronismo;
- Função de trecho morto;
- Função de energização sob falta;
- Função de invasão de carga;
- Função de compensação de seqüência zero;
- Função de comunicação digital entre relés.



Figura 48 – Foto frontal do relé digital de operação SEL 311-C

CAPÍTULO 5 – TESTES EXECUTADOS EM RELÉ DE DISTÂNCIA SEL 311-C.

Após todos os estudos e conhecimentos teóricos, é necessário testar o funcionamento do relé digital, fabricado pela Schweitzer Engineering Laboratories, modelo SEL 311-C. Estes testes sãos utilizados para a verificação das funções do relé antes de colocá-lo em operação.

Os ensaios foram realizados em laboratório com o objetivo de testar a função de distância do relé para diferentes tipos de curto-circuito nas linhas de transmissão testando a correta atuação das zonas de operação ajustadas.



Figura 49 – Foto da bancada onde foram realizados os ensaios de curto-circuito no relé SEL 311-C

5.1 – Estudos iniciais para os testes no relé de distância

A configuração do sistema utilizado para os testes com o relé de distância está destacada na figura 50.



Figura 50 – Diagrama a ser utilizado nos testes com o Relé SEL 311-C

O relé digital de operação SEL 311-C que usaremos em bancada será o relé de distância SEL representado na figura acima ligado ao terminal A.

A impedância da linha de transmissão possui o seguinte parâmetro:

$$Z_{\rm LT} = 2,11 \ \angle 72,74^{\circ} \ \Omega \tag{5.1}$$

O diagrama das zonas de operação utilizadas no sistema a ser testado está representado na figura 51.



Figura 51 - Diagrama das Zonas de atuação utilizadas no teste

Como pode ser observado nas figura 50 e 51, o relé será parametrizado com apenas 3 zonas de operação. A 1^a zona estará ajustada para atuar até 80% da linha de transmissão, a 2^a zona estará ajustada para 100% da linha de transmissão AB mais 20% da linha de transmissão BC (totalizando 120%). A 3^a zona será reversa e com alcance de 120%. Assim, o cálculo das impedâncias ajustadas para as 3 zonas de operação serão:

$$Z_1 = 1,69 \ \Omega$$
 (5.2)

$$|\mathbf{Z}_2| = |\mathbf{Z}_3| = 2,53 \,\Omega \tag{5.3}$$

A 2^a zona de operação do relé utilizado é divida em duas zonas distintas. A primeira que é conhecida como zona acelerada (teleproteção), em que compreende a atuação da 2^a zona de 80

proteção dentro da linha de transmissão AB, ou seja, até 100% da LT. A segunda é conhecida como zona temporizada, em que compreende a atuação da 2ª zona de proteção na linha de transmissão BC, ou seja, o ajuste de 100 a 120% da zona.

As zonas de operação do relé SEL 311-C são ajustadas para atuar aproximadamente para os seguintes valores:

$$Z_1$$
 (zona instantânea) = 30 a 35 ms (5.4)

$$Z_2 (zona \ acelerada) = 70 \ ms \tag{5.5}$$

$$Z_2$$
 (zona temporizada) = 498 ms (5.6)

A 3^a zona de operação (zona reversa) não possui temporização de atuação do relé, devido o mesmo estar ajustado nos testes para apenas realizar o envio de sinal para o relé pertencente à linha de transmissão a montante em que ocorre o distúrbio.

5.2 – Preparação do software AcSELerator do relé digital SEL 311-C

Antes de serem iniciados os testes é necessário fazer a configuração do relé que será utilizado através do software AcSELerator QuickSet, do fabricante Schweitzer Engineering Laboratories.



Figura 52 - Tela inicial do software AcSELerator QuickSet.

Na tela de inicialização do programa, como mostrado na figura 52, será selecionada a opção "New" para a criação de um novo projeto e posteriormente deverá ser escolhido o modelo do relé que será utilizado no teste, neste caso é escolhido o relé digital SEL 311-C.



Figura 53 - Tela do software AcSELerator QuickSet para escolha do relé a ser testado

Após a seleção do modelo do relé, deverá ser inserido no programa as configurações desejadas para um suposto sistema no qual o relé deverá ser testado. Nestas opções serão parametrizadas as correntes de operação do relé, os ajustes das zonas de operação, as impedâncias de sequência da linha de transmissão, funções de check de sincronismo, comunicação, entre muitas outras possíveis configurações.

Na figura 54 observa-se a janela "General Settings" do ajuste das relações de transformação do Transformador de Corrente e Transformador Potencial, ao qual o relé estaria conectado ao terminal da linha de transmissão.



Figura 54 - Tela do software AcSELerator QuickSet para configuração do relé 311-C.

5.2 – Preparação da ferramenta State Sequencer da mala de teste Omicron CMC 256-6

Os ensaios serão realizados através de simulações preparadas na ferramenta Omicron State Sequencer do software Test Universe, já estudado no capítulo 4.1.2, da mala de teste Omicron CMC 256-6.

Nesta ferramenta será configurada uma sequência de três estados, em que o primeiro representa a configuração do sistema pré-falta, o segundo estado representa a configuração durante a falta, e o terceiro estado representa a configuração pós-falta.

Em cada estado haverá a parametrização das três tensões fase-neutro (defasadas de 120 graus entre si), das três correntes de fase (defasadas de 120 graus entre si), da tensão de sincronismo da linha de transmissão (que estará sincronizada com uma das fases, e representada

pelo nome V(4)-1), da freqüência em cada uma das tensões e correntes e do tempo de atuação da simulação neste estado.

A parametrização será feita em valores absolutos e com as tensões e correntes referenciadas ao secundário e o tempo será determinado em segundos, como presente nas configurações mostradas na figura abaixo:

| 🔄 OMICRON Stat | e Sequencer - [Visualização | da tabela: 05 | Relig | SEL_Z1_N | IUR_BRI_TRI | ÁSICO] | | | | | | |
|--------------------------|--|------------------------------|---------|------------|-------------|-------------|-----------|----------|-------------|---|----------|-----|
| \iint Arquivo Editar | Vista Teste Parametros Jane | la Ajuda | | | | | | | | | | |
| | Barra de ferramentas 🔹 🕨 | ¥ 🗊 🕷 🗵 | | 5 d | I II 🗙 🤋 | N? H | | F | •* E | 0 | 0110 abs | rel |
| | Barra de sobrecarga | | 2 | | 0 | 3 | | | | | | |
| Nome Estado 1 | Entradas binárias | ado 2 | | | Estado 3 | 0.000000000 | | | | | | |
| V A-N 66,40 | Histórico do estado | 8,000 V | 0,00 * | 60,000 Hz | 66,40 V | ° 00,0 | 60,000 Hz | | | | | |
| V B-N 66,40 | | 8,000 V -1: | 20,00 * | 60,000 Hz | 66,40 V | -120,00 * | 60,000 Hz | | | | | |
| V C-N 66,40 | Unidades 🕨 🕨 | Segundos | 1,00 * | 60,000 Hz | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | | | | | |
| IA 2,000 | 🖌 Tahela | Ciclos | 1,74 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | * 00,0 | 60,000 Hz | | | | | |
| 18 2,000 | A Relatório | Secundário | ,26 | 60,000 Hz | 0,000 A | -120,00 * | 60,000 Hz | | | | | |
| 1C 2,000 W(4) 4 88.40 | ✓ Detalbe | Primário | ,26 | 60,000 HZ | 0,000 A | 120,00 * | 50,000 HZ | | | | | |
| CMC Dol 0 output(o) | Diagrama vetorial | 2 | 1,00 | 00,000 Π2 | 0,000 v | 120,00 | 00,000 MZ | | | | | |
| | Visualização da Impedância | 🖌 Absoluto | | | | 8,000 e | | | | | | |
| | u Medida | Relativo | ····· | | L | 0,000 5 | | | | | | |
| | Sinal de tempo | | - | | | | | | | | | |
| | V Jina de tempo | 1 | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

Figura 55 - Tela do State Sequencer com sua configuração definida

5.3 – Testes no relé de distância em um curto-circuito trifásico

Como já estudado no capítulo 2.3.1, o curto-circuito trifásico envolverá as três fases do sistema de potência. Portanto, haverá uma corrente de falta e consequentemente haverá uma queda de tensão nas três fases.

Para executar os testes de curto-circuito trifásico para as zonas de operação prédeterminadas, deverá ser feito cálculo da tensão de curto-circuito a ser parametrizada através da equação 5.7.

$$V_{cc} = Z_{ajuste} x I_{cc} \tag{5.7}$$

Em que:

 V_{cc} – tensão das três fases durante o curto-circuito

 I_{cc} – corrente circulando nas três fases durante o curto-circuito

Zajuste – impedância de ajuste da zona de operação a ser testada

5.3.1 – Testes no relé de distância em um curto-circuito trifásico na 1ª zona de operação

O primeiro teste a ser realizado com o relé digital SEL 311-C é a simulação de um curtocircuito trifásico com atuação da 1ª zona de operação do relé.

Para a configuração do Estado 1, da sequência de estados da ferramenta State Sequencer, foram definidas tensões e correntes em fase com módulo de 66,40V e 2A, respectivamente. A tensão de sincronismo estará em fase com a tensão da fase C e o tempo de duração desse estado será de 4 segundos.



Figura 56 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 1 trifásico com atuação na 1ª zona de operação.

Para a configuração do Estado 2 é necessário fazer o cálculo da máxima tensão de curtocircuito trifásico do sistema para atuação da 1ª zona de operação do relé, através da equação 5.7, em que foi arbitrado uma corrente de curto-circuito igual a:

$$I_{cc} = 5 \angle -72,74^{\circ} \tag{5.8}$$

Assim, utilizando as equações 5.7 e 5.8 e o valor da impedância de ajuste da 1^ª zona de operação que foi definida na equação 5.2, obtêm-se a tensão de falta do limiar da 1^ª zona de operação:

$$V_{cc} = Z_{ajuste} x I_{cc} = V_{cc} = 1,69 \angle +72,74^{\circ} \ge 5 \angle -72,74^{\circ}$$
(5.9)

$$V_{cc} = 8,45V$$
 (5.10)

Através da equação 5.10 foi escolhido o módulo da tensão de curto-circuito igual a 8V nas três fases, as correntes de curto (como já arbitrado) possuirão módulo de 5A, a tensão de sincronismo não sofre alterações e o tempo de duração do estado será de acordo com o tempo de atuação do relé durante a simulação.



Figura 57 – Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 2 trifásico com atuação na 1ª zona de operação.

O Estado 3 é configurado com as tensões idênticas ao do Estado 1 (estado normal do sistema) e as correntes estarão zeradas (devido a abertura do disjuntor), pois caso não zere as correntes então o relé atuaria a função de falha de disjuntor. A tensão da linha de transmissão (V(4)-1) estará zerada devido também a abertura do disjuntor.



Figura 58 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 3 trifásico com atuação na 1ª zona de operação.

| Image: Stade 1 Estade 2 Estade 3 A-II 66,40 ∨ 0,00 ° 60,000 Hz 8,000 ∨ 0,00 ° 66,40 ∨ -120,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 ° 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,000 A 120,00 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 5,000 A 47,26 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz </th <th>Image: Stade 1 Estade 2 Estade 3 A-II 66,40 ∨ 0,00 ° 60,000 Hz 8,000 ∨ 0,00 ° 66,40 ∨ -120,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 66,000 Hz 0,00 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 5,000 A 47,26 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 60,000 Hz<!--</th--><th>Iome Estado 1 Estado 2 Estado 3 IA-II 66,40 ∨ 0,00 ° 60,000 Hz 8,000 ∨ 0,00 ° 66,000 Hz 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 60,000 Hz<</th><th></th><th></th><th>1</th><th></th><th></th><th>2</th><th></th><th></th><th>3</th><th></th><th></th></th> | Image: Stade 1 Estade 2 Estade 3 A-II 66,40 ∨ 0,00 ° 60,000 Hz 8,000 ∨ 0,00 ° 66,40 ∨ -120,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 66,000 Hz 0,00 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 5,000 A 47,26 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 60,000 Hz </th <th>Iome Estado 1 Estado 2 Estado 3 IA-II 66,40 ∨ 0,00 ° 60,000 Hz 8,000 ∨ 0,00 ° 66,000 Hz 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 60,000 Hz<</th> <th></th> <th></th> <th>1</th> <th></th> <th></th> <th>2</th> <th></th> <th></th> <th>3</th> <th></th> <th></th> | Iome Estado 1 Estado 2 Estado 3 IA-II 66,40 ∨ 0,00 ° 60,000 Hz 8,000 ∨ 0,00 ° 66,000 Hz 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 60,000 Hz< | | | 1 | | | 2 | | | 3 | | |
|--|---|--|---------|------------------------|-----------|-------------------|-------------------|------------|-----------|------------------|-----------|-----------|--|
| A-II 66,40 ∨ 0,00 ° 60,000 Hz 8,000 ∨ 0,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ -120,00 ° 60,000 Hz B-II 66,40 ∨ -120,00 ° 60,000 Hz 8,000 ∨ -120,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ -120,00 ° 60,000 Hz C-II 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 8,000 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz A 2,000 A 0,00 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 5,000 A 0,00 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,000 A -120,00 ° 60,000 Hz 5,000 A 47,26 ° 60,000 Hz 0,000 A -120,00 ° 60,000 Hz C 2,000 A 120,00 ° 60,000 Hz 5,000 A 47,26 ° 60,000 Hz 0,000 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz GR Rel 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) act | A-II 66,40 ∨ 0,00 * 60,000 Hz 8,000 ∨ -120,00 * 66,000 Hz 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz B-II 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 8,000 ∨ -120,00 * 66,000 Hz 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz <th>A-II 66,40 ∨ 0,00 * 60,000 Hz 8,000 ∨ -120,00 * 66,000 Hz 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 50,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 5,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 5,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 5,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,000 A -120,00 * 60,000 Hz C 2,000 A 120,00 * 60,000 Hz 5,000 A 47,26 * 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 0,000 * 0,000 * 6</th> <th>llome</th> <th>Estado 1</th> <th></th> <th></th> <th>Estado 2</th> <th></th> <th></th> <th>Estado 3</th> <th></th> <th></th> <th></th> | A-II 66,40 ∨ 0,00 * 60,000 Hz 8,000 ∨ -120,00 * 66,000 Hz 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 50,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 5,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 5,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 5,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,000 A -120,00 * 60,000 Hz C 2,000 A 120,00 * 60,000 Hz 5,000 A 47,26 * 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 0,000 * 0,000 * 6 | llome | Estado 1 | | | Estado 2 | | | Estado 3 | | | |
| B-II 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 8,000 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz C-II 66,40 ∨ 120,00 * 60,000 Hz 8,000 ∨ 120,00 * 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 * 60,000 Hz A 2,000 A 0,00 * 60,000 Hz 5,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz B 2,000 A -120,00 * 60,000 Hz 5,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz C 2,000 A -120,00 * 60,000 Hz 5,000 A 47,26 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz C 2,000 A 120,00 * 60,000 Hz 5,000 A 47,26 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz GH1 66,40 ∨ 120,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 ∨ 120,00 * 60,000 Hz GU0 utput(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 8,000 s | B-II 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 8,000 ∨ -120,00 * 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 50,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,000 A 0,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 50,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,000 A -0,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 50,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,000 A -0,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 50,000 A 167,26 * 60,000 Hz 0,000 A -120,00 * 60,000 Hz 50,000 A 172,74 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz 50,000 A 120,00 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz 120,00 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz 0,000 V 120,00 * 60,000 Hz 0,000 V 120,00 * 60,000 Hz 0,000 V 120,00 * <th>B-II 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 8,000 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 50,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 60,000 Hz 50,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 60,000 Hz 50,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 60,000 Hz 50,000 A 120,00 * 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 50,000 A 47,26 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz 50,000 A 120,00 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00</th> <th>V A-N</th> <th>66,40 V</th> <th>0,00 °</th> <th>60,000 Hz</th> <th>8,000 V</th> <th>0,00 °</th> <th>60,000 Hz</th> <th>66,40 V</th> <th>0,00 °</th> <th>60,000 Hz</th> <th></th> | B-II 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 8,000 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 66,40 ∨ -120,00 * 60,000 Hz 50,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 60,000 Hz 50,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 60,000 Hz 50,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 60,000 Hz 50,000 A 120,00 * 60,000 Hz 0,000 * 60,000 Hz 50,000 A 47,26 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz 50,000 A 120,00 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 | V A-N | 66,40 V | 0,00 ° | 60,000 Hz | 8,000 V | 0,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 V | 0,00 ° | 60,000 Hz | |
| C-II 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 8,000 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz A 2,000 A 0,00 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,00 ° 60,000 Hz 60,000 Hz B 2,000 A -120,00 ° 60,000 Hz 5,000 A 167,26 ° 60,000 Hz 0,00 ° 60,000 Hz 60,000 Hz C 2,000 A 120,00 ° 60,000 Hz 5,000 A 167,26 ° 60,000 Hz 0,00 ° 60,000 Hz 60,000 Hz C 2,000 A 120,00 ° 60,000 Hz 5,000 A 47,26 ° 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 ° 60,000 Hz 0,0 | C-II 66,40 V 120,00 * 60,000 Hz 8,000 V 120,00 * 66,40 V 120,00 * 60,000 Hz A 2,000 A 0,00 * 60,000 Hz 5,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 A 0,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 A 1,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 5,000 A 47,26 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 120,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 60,000 Hz 120,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 120,00 * 60,000 Hz 120,00 * 60,000 Hz 0,000 V 120,00 * 60,000 Hz 60,000 Hz 0 output(s) active 0 output(s) active | C-II 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 8,000 ∨ 120,00 ° 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz A 2,000 A 0,00 ° 60,000 Hz 5,000 A -72,74 ° 60,000 Hz 0,00 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 A 1,00 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 A 1,00 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 A 1,00 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 5,000 A 47,26 ° 60,000 HZ 0,000 A 1,20 ° 60,000 Hz 60,000 Hz 0,000 A 1,20 ° 60,000 Hz 0,000 A 1,20 ° 60,000 Hz 1,20 ° 60,000 Hz 0,000 A 1,20 ° 60,000 Hz | V B-N | 66,40 ∨ | -120,00 * | 60,000 Hz | 8,000 V | -120,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 V | -120,00 ° | 60,000 Hz | |
| A 2,000 A 0,00 * 60,000 Hz 5,000 A -72,74 * 60,000 Hz 0,00 * 60,000 Hz B 2,000 A -120,00 * 60,000 Hz 5,000 A 167,26 * 60,000 Hz 0,00 * -120,00 * 60,000 Hz C 2,000 A 120,00 * 60,000 Hz 5,000 A 47,26 * 60,000 Hz 0,000 A -120,00 * 60,000 Hz (4)-1 66,40 V 120,00 * 60,000 Hz 66,40 V 120,00 * 60,000 Hz 0,000 V 120,00 * 60,000 Hz MC Rel 0 output(s) active | A 2,000 A 0,00* 60,000 Hz 5,000 A -72,74* 60,000 Hz 0,00* 60,000 Hz 60,000 Hz 5,000 A 167,26* 60,000 Hz 0,00* 60,000 Hz 60,000 Hz 5,000 A 47,26* 60,000 Hz 0,00* 60,000 Hz 60,000 Hz 5,000 A 47,26* 60,000 Hz 0,000 A -120,00* 60,000 Hz 60,000 Hz 5,000 A 47,26* 60,000 Hz 0,000 A -120,00* 60,000 Hz 60,000 Hz 5,000 A 47,26* 60,000 Hz 0,000 A 120,00* 60,000 Hz 0 output(s) active 80,000 s | A 2,000 A 0,00* 60,000 Hz 5,000 A -72,74* 60,000 Hz 0,00* 60,000 Hz B 2,000 A -120,00* 60,000 Hz 5,000 A 167,26* 60,000 Hz 0,00* 60,000 Hz C 2,000 A 120,00* 60,000 Hz 5,000 A 47,26* 60,000 Hz 0,000 A -120,00* 60,000 Hz (4)-1 66,40 V 120,00* 60,000 Hz 66,40 V 120,00* 60,000 Hz 0,000 A 120,00* 60,000 Hz (4)-1 66,40 V 120,00* 60,000 Hz 0,000 A 120,00* 60,000 Hz O output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active rigger X 4,000 s X 8,000 s | V C-N | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | 8,000 V | 120,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | |
| B 2,000 A -120,00 ° 60,000 Hz 5,000 A 167,26 ° 60,000 Hz 0,000 A -120,00 ° 60,000 Hz C 2,000 A 120,00 ° 60,000 Hz 5,000 A 47,26 ° 60,000 Hz 0,000 A 120,00 ° 60,000 Hz (4)-1 66,40 V 120,00 ° 60,000 Hz 66,40 V 120,00 ° 60,000 Hz 0,000 V 120,00 ° 60,000 Hz MC Rel 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 120,00 s | B 2,000 A -120,00 ° 60,000 Hz 5,000 A 167,26 ° 60,000 Hz 0,000 A -120,00 ° 60,000 Hz C 2,000 A 120,00 ° 60,000 Hz 5,000 A 47,26 ° 60,000 Hz 0,000 A 120,00 ° 60,000 Hz (4)-1 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 56,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 0,000 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz MC Rel 0 output(s) active 8,000 s | B 2,000 A -120,00° 60,000 Hz 5,000 A 167,26° 60,000 Hz 0,000 A -120,00° 60,000 Hz 60,000 Hz C 2,000 A 120,00° 60,000 Hz 5,000 A 47,26° 60,000 Hz 0,000 A 120,00° 60,000 Hz (4)-1 66,40 V 120,00° 60,000 Hz 66,40 V 120,00° 60,000 Hz 0,000 V 120,00° 60,000 Hz MC Rel 0 output(s) active 8,000 s | A | 2,000 A | ° 00,0 | 60,000 Hz | 5,000 A | -72,74 * | 60,000 Hz | 0,000 A | 0,00 ° | 60,000 Hz | |
| C 2,000 A 120,00 * 60,000 Hz 5,000 A 47,26 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz (4)-1 66,40 V 120,00 * 60,000 Hz 66,40 V 120,00 * 60,000 Hz 0,000 V 120,00 * 60,000 Hz MC Rel 0 output(s) active | C 2,000 A 120,00 * 60,000 Hz 5,000 A 47,26 * 60,000 Hz 0,000 A 120,00 * 60,000 Hz (4)-1 66,40 V 120,00 * 60,000 Hz 66,40 V 120,00 * 60,000 Hz 0,000 V 120,00 * 60,000 Hz MC Rel 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 8,000 s | C 2,000 A 120,00° 60,000 Hz 5,000 A 47,26° 60,000 Hz 0,000 A 120,00° 60,000 Hz (14)-1 66,40 V 120,00° 60,000 Hz 0,000 V 120,00° 60,000 Hz MC Rel 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active Tigger X 4,000 s X 8,000 s | В | 2,000 A | -120,00 ° | 60,000 Hz | 5,000 A | 167,26 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | -120,00 ° | 60,000 Hz | |
| (4)-1 66,40 ∨ 120,00 * 60,000 Hz 66,40 ∨ 120,00 * 60,000 Hz 0,000 ∨ 120,00 * 60,000 Hz 0 output(s) active 0 | (4)-1 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 0,000 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz MC Rel ligger 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active | (4)-1 66,40 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz 0,000 ∨ 120,00 ° 60,000 Hz /MC Rel 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active 0 output(s) active rigger X 4,000 s ✓ X 8,000 s | с | 2,000 A | 120,00 * | 60,000 Hz | 5,000 A | 47,26 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | 120,00 ° | 60,000 Hz | |
| MC Rel 0 output(s) active 0 output(s) active rigger X 4,000 s | MC Rel 0 output(s) active 0 output(s) active rigger X 4,000 s | IMC Rel 0 output(s) active 0 output(s) active rigger 4,000 s A X 8,000 s | /(4)-1 | 66,40 ∨ | 120,00 * | 60,000 Hz | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | V 000,0 | 120,00 ° | 60,000 Hz | |
| rigger 🕱 4,000 s 🖌 🛧 🥻 🛣 8,000 s | rigger 🕱 4,000 s 🖌 🚣 🛛 🛣 8,000 s | rigger 🕱 4,000 s | MC Rel | 0 output(s) activ | /e | | 0 output(s) activ | /e | | 0 output(e) acti | ve | | |
| | | | mo noi | a sould not a sould be | | 10000000000000000 | o outpat(o) don | 1 0 | | o output(s) acti | | | |
| | | | Trigger | X | 4,000 s | | ~ | | | | 8,000 s | | |
| | | | rigger | | 4,000 s | | A | | | | 8,000 s | | |
| | | | rigger | | 4,000 s _ | | - Compan(o) Wali | | | a output(s) acti | 8,000 s | | |

Figura 59 - Tela do State Sequencer com a configuração dos 3 Estados para um curto trifásico com atuação na 1ª zona de operação.

Após todas as configurações ajustadas, é pressionado o botão de inicialização do teste encontrado na barra de ferramentas do software.

Os testes ocorreram de acordo com o esperado e apresentaram os seguintes resultados:

- Tempo de atuação do relé de distância: 31,20 ms
- Tempo de religamento do disjuntor: aproximadamente 3 segundos
- Mensagem no display do relé:

| EN | | TIME | Сомм | SOTF | RECL RS | OSER LO | 51 |
|----|------------|----------------|------|--------|-----------------|------------------|--------|
| Â | B FAULT | C C TYPE | ە() |) 1 | O 2 ZONE/ | O 3 /LEVEL | 0 4 |

Figura 60 - Representação dos leds acesos no display do relé após ensaio de curto trifásico na 2'0zona 1.

5.4 - Testes no relé de distância em um curto-circuito monofásico para a terra

Nos ensaios de curto-circuito monofásico haverá a circulação da corrente de curto-circuito de apenas uma fase para terra. Foi arbitrado para todos os ensaios monofásicos que a fase atingida foi a fase A, consequentemente será parametrizada uma corrente de falta e uma queda de tensão apenas para a fase A.

Para executar os testes de curto-circuito monofásico para as zonas de operação prédeterminadas, deverá ser feito calculo da tensão de curto-circuito na fase A, e deve ser parametrizada através da equação abaixo:

$$V_{cc} = Z_{ajuste} x I_{cc} (1 + k_0)$$
(5.11)

Em que:

 V_{cc} – tensão das três fases durante o curto-circuito

 I_{cc} – corrente circulando nas três fases durante o curto-circuito

 Z_{ajuste} – impedância de ajuste da zona de operação a ser testada

 k_0 – fator de compensação de sequência zero que é calculada de acordo com os parâmetros da impedância da linha de transmissão, e para os testes esse valor é configurado no software AcSELerator. O valor calculado para o fator de compensação para esses ensaios foi determinada igual a:

$$k_0 = 0,787 \angle -2,25^{\circ} \tag{5.12}$$

5.4.1 – Testes no relé de distância em um curto-circuito monofásico para a terra na 1^a zona de operação

O primeiro ensaio monofásico a ser realizado com o relé digital SEL 311-C é a simulação de um curto-circuito monofásico com atuação da 1ª zona de operação do relé.

Para a configuração do Estado 1 foram definidas tensões e correntes em fase com módulo de 66,40V e 2A, respectivamente. A tensão de sincronismo estará em fase com a tensão da fase C e o tempo de duração desse estado será de 4 segundos.



Figura 61 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 1 para um curto monofásico com atuação na 1ª zona de operação.

Para a configuração do Estado 2 é necessário fazer o cálculo da máxima tensão de curtocircuito monofásico do sistema para atuação da 1ª zona de operação do relé, através das equações 5.11 e 5.12, em que foi arbitrada uma corrente de curto-circuito igual a:

$$I_{cc} = 7 \angle -72,74^{\circ} \tag{5.13}$$

Assim, utilizando as equações 5.11, 5.12 e 5.13 e o valor da impedância de ajuste da 1^a zona de operação que foi definida na equação 5.2, obtêm-se a tensão de falta do limiar da 1^a zona de operação:

$$V_{cc} = Z_{ajuste} x I_{cc} (1+k_0) = 1,69 \angle +72,74^{\circ} x 7 \angle -72,74^{\circ} x (1+0,787 \angle -2,25^{\circ})$$
(5.14)

$$V_{cc} = 21,134 \angle -0,98^{\circ} V \tag{5.15}$$

Através da equação 5.15, foi configurada a tensão de falta da fase A com magnitude de 19V e as tensões das fases B e C permanecerão idênticas ao do Estado 1. A corrente de curto da fase A (como já arbitrado) possuirá módulo de 7A, e as correntes das fases B e C serão zeradas devido a não circulação de corrente nessas fases durante o distúrbio. A tensão de sincronismo não sofre alterações e o tempo de duração do estado será de acordo com o tempo de atuação do relé durante a simulação.



Figura 62 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 2 para um curto monofásico com atuação na 1ª zona de operação.

O Estado 3 é configurado com as tensões idênticas ao do Estado 1 (estado normal do sistema) e as correntes estarão zeradas (devido a abertura do disjuntor), pois caso não zere as correntes então o relé atuaria a função de falha de disjuntor. A tensão da linha de transmissão (V(4)-1) estará zerada devido também a abertura do disjuntor.



Figura 63 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 3 para um curto monofásico com atuação na 1ª zona de operação.

| | | 1 | | | 2 | | | 3 | | |
|--------|-------------------|-----------|-----------|-------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|--|
| lome | Estado 1 | | | Estado 2 | | | Estado 3 | | | |
| / A-N | 66,40 V | 0,00 ° | 60,000 Hz | 19,00 V | -0,98 ° | 60,000 Hz | 66,40 V | 0,00 ° | 60,000 Hz | |
| / B-N | 66,40 ∨ | -120,00 * | 60,000 Hz | 66,40 V | -120,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 V | -120,00 * | 60,000 Hz | |
| C-II | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | |
| A | 2,000 A | 0,00 ° | 60,000 Hz | 7,000 A | -72,74 * | 60,000 Hz | 0,000 A | 0,00 ° | 60,000 Hz | |
| B | 2,000 A | -120,00 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | 167,26 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | -120,00 * | 60,000 Hz | |
| С | 2,000 A | 120,00 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | 47,26 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | 120,00 * | 60,000 Hz | |
| (4)-1 | 66,40 ∨ | 120,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 ∨ | 120,00 ° | 60,000 Hz | 0,000 V | 120,00 * | 60,000 Hz | |
| MC Rel | 0 output(s) activ | /e | | 0 output(s) activ | /e | | 0 output(s) acti | ve | | |
| rigger | X | 4.000 s | | - | | | X | 8.000 s | | |

Figura 64 - Tela do State Sequencer com a configuração dos 3 Estados para um curto monofásico com atuação na 1ª zona de operação.

Após todas as configurações ajustadas, é pressionado o botão de inicialização do teste encontrado na barra de ferramentas do software.

Os testes ocorreram de acordo com o esperado e apresentaram os seguintes resultados:

- Tempo de atuação do relé de distância: 30,60 ms
- Tempo de religamento do disjuntor: aproximadamente 3 segundos
- Mensagem no display do relé:

| EN | TRIP | TIME | | SOTF | RECLI RS | | 51 () |
|----|-----------------|----------------|--------|------|-----------------|------------------|----------|
| | O B FAULT | O C TYPE |) G | 1 | O 2 ZONE/ | O 3 /LEVEL | 4 |

Figura 65 - Representação dos leds acesos no display do relé após ensaio de curto monofásico na zona 1.

5.4.2 – Testes no relé de distância em um curto-circuito monofásico para a terra na 2ª zona de operação acelerada (teleproteção)

O segundo ensaio monofásico a ser realizado com o relé digital SEL 311-C é a simulação de um curto-circuito monofásico com atuação da 2ª zona de operação do relé. Como já observado no inicio deste capítulo, a 2ª zona de operação é subdivida em 2 zonas particulares, a zona acelerada (compreendida até 100% da linha de transmissão) e a zona temporizada (compreendida de 100 a 120% da linha de transmissão).

Primeiramente será realizado o ensaio da 2ª zona de operação com uma simulação do curto-circuito dentro da linha de transmissão AB, ou seja, com alcance de 80 a 100% da linha (zona acelerada).

Para a configuração do Estado 1 foram definidas tensões e correntes em fase com módulo de 66,40V e 2A, respectivamente. A tensão de sincronismo estará em fase com a tensão da fase C e o tempo de duração desse estado será de 4 segundos.



Figura 66 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 1 para um curto monofásico com atuação na zona acelerada.

Para a configuração do Estado 2 é necessário fazer o cálculo da máxima tensão de curtocircuito monofásico do sistema para atuação da zona acelerada de operação do relé, através das equações 5.11 e 5.12, em que foi arbitrado uma corrente de curto-circuito igual a da equação 5.13.

Assim, utilizando as equações 5.11, 5.12 e 5.13 e o valor da impedância de ajuste da zona acelerada (impedância da linha de transmissão AB que foi especificada na equação 5.1), obtêm-se a tensão de falta do limiar da zona acelerada de operação:

$$V_{cc} = Z_{ajuste} x I_{cc} (1+k_0) = 2,11 \angle +72,74^{\circ} x 7 \angle -72,74^{\circ} x (1+0,787 \angle -2,25^{\circ})$$
(5.16)

$$V_{cc} = 26,389 \angle -0,98^{\circ} V \tag{5.17}$$

Através da equação 5.17, foi configurada a tensão de falta da fase A com magnitude de 25V e as tensões das fases B e C permanecerão idênticas ao do Estado 1. A corrente de curto da fase A (como já arbitrado) possuirá módulo de 7A, e as correntes das fases B e C serão zeradas devido a não circulação de corrente nessas fases durante o distúrbio. A tensão de sincronismo não sofre alterações e o tempo de duração do estado será de acordo com o tempo de atuação do relé durante a simulação.



Figura 67 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 2 para um curto monofásico com atuação na zona acelerada.

O Estado 3 é configurado com as tensões idênticas ao do Estado 1 (estado normal do sistema) e as correntes estarão zeradas (devido a abertura do disjuntor), pois caso não zere as correntes então o relé atuaria a função de falha de disjuntor. A tensão da linha de transmissão (V(4)-1) estará zerada devido também a abertura do disjuntor.



Figura 68 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 3 para um curto monofásico com atuação na zona acelerada.
| | | 1 | | | 2 | | l. | 3 | |
|---------|-------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|
| Nome | Estado 1 | | | Estado 2 | | | Estado 3 | | |
| V A-N | 66,40 ∨ | 0,00 ° | 60,000 Hz | 25,00 ∨ | -0,98 * | 60,000 Hz | 66,40 V | ° 00,0 | 60,000 Hz |
| V B-N | 66,40 ∨ | -120,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 V | -120,00 * | 60,000 Hz | 66,40 V | -120,00 ° | 60,000 Hz |
| V C-N | 66,40 ∨ | 120,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | 66,40 V | 120,00 ° | 60,000 Hz |
| IA | 2,000 A | 0,00 ° | 60,000 Hz | 7,000 A | -72,74 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | 0,00 ° | 60,000 Hz |
| IB | 2,000 A | -120,00 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | 167,26 * | 60,000 Hz | 0,000 A | -120,00 ° | 60,000 Hz |
| IC | 2,000 A | 120,00 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | 47,26 * | 60,000 Hz | 0,000 A | 120,00 ° | 60,000 Hz |
| V(4)-1 | 66,40 ∨ | 120,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 ∨ | 120,00 * | 60,000 Hz | 0,000 V | 120,00 ° | 60,000 Hz |
| CMC Re | 0 output(s) activ | /e | | 0 output(s) acti | ve | | 0 output(s) acti | ve | |
| Trigger | X | 4,000 s | | | Г | | X | 8,000 s | |

Figura 69 - Tela do State Sequencer com a configuração dos 3 Estados para um curto monofásico com atuação na zona acelerada.

Após todas as configurações ajustadas, é pressionado o botão de inicialização do teste encontrado na barra de ferramentas do software.

Os testes ocorreram de acordo com o esperado e apresentaram os seguintes resultados:

- Tempo de atuação do relé de distância: 64,50 ms
- Tempo de religamento do disjuntor: aproximadamente 3 segundos
- Mensagem no display do relé:



Figura 70 - Representação dos leds acesos no display do relé após ensaio de curto monofásico na zona acelerada.

5.4.3 – Testes no relé de distância em um curto-circuito monofásico para a terra na 2ª zona de operação temporizada

O terceiro ensaio monofásico a ser realizado com o relé digital SEL 311-C é a simulação de um curto-circuito monofásico com atuação da 2ª zona de operação temporizada do relé, ou seja, atuação da 2ª zona de operação para um curto-circuito na linha de transmissão BC.

Como já destacado no item 4.2 deste projeto, foi montado na bancada um equipamento transmissor de sinal que simula o envio do sinal do relé localizado no terminal a jusante. O transmissor irá enviar o sinal para o relé testado para que o mesmo possa atuar na zona de operação temporizada.

Para a configuração do Estado 1 foram definidas tensões e correntes em fase com módulo de 66,40V e 2A, respectivamente. A tensão de sincronismo estará em fase com a tensão da fase C e o tempo de duração desse estado será de 4 segundos.



Figura 71 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 1 para um curto monofásico com atuação na zona temporizada.

Para a configuração do Estado 2 é necessário fazer o cálculo da máxima tensão de curtocircuito monofásico do sistema para atuação da zona temporizada de operação do relé, através das equações 5.11 e 5.12, em que foi arbitrado uma corrente de curto-circuito igual a da equação 5.13.

Assim, utilizando as equações 5.11, 5.12 e 5.13 e o valor impedância de ajuste da zona temporizada (120% da impedância da linha de transmissão AB, que foi especificada na equação 5.3), obtêm-se a tensão de falta do limiar da zona temporizada de operação:

$$V_{cc} = Z_{ajuste} x I_{cc} (1+k_0) = 2,53 \angle +72,74^{\circ} x 7 \angle -72,74^{\circ} x (1+0,787 \angle -2,25^{\circ})$$
(5.18)

$$V_{cc} = 31,638 \angle -0,98^{\circ} V \tag{5.19}$$

Através da equação 5.19, foi configurada a tensão de falta da fase A com magnitude de 30V e as tensões das fases B e C permanecerão idênticas ao do Estado 1. A corrente de curto da fase A (como já arbitrado) possuirá módulo de 7A, e as correntes das fases B e C serão zeradas devido a não circulação de corrente nessas fases durante o distúrbio. A tensão de sincronismo não sofre alterações e o tempo de duração do estado será de acordo com o tempo de atuação do relé durante a simulação.



Figura 72 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 2 para um curto monofásico com atuação na zona temporizada.

O Estado 3 é configurado com as tensões idênticas ao do Estado 1 (estado normal do sistema) e as correntes estarão zeradas (devido a abertura do disjuntor), pois caso não zere as correntes então o relé atuaria a função de falha de disjuntor. A tensão da linha de transmissão (V(4)-1) estará zerada devido também a abertura do disjuntor.



Figura 73 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 3 para um curto monofásico com atuação na zona temporizada.

| | | 1 | 2 | | 2 | | | 3 | | |
|--------|-------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|--------------------|-----------|-----------|--|
| lome | Estado 1 | | | Estado 2 | | | Estado 3 | | | |
| / A-N | 66,40 V | 0,00 ° | 60,000 Hz | 30,00 V | -0,98 * | 60,000 Hz | 66,40 V | 0,00 * | 60,000 Hz | |
| B-N | 66,40 V | -120,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 ∨ | -120,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 V | -120,00 * | 60,000 Hz | |
| C-N | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | |
| A | 2,000 A | 0,00 * | 60,000 Hz | 7,000 A | -72,74 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | 0,00 * | 60,000 Hz | |
| В | 2,000 A | -120,00 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | 167,26 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | -120,00 ° | 60,000 Hz | |
| с | 2,000 A | 120,00 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | 47,26 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | 120,00 * | 60,000 Hz | |
| (4)-1 | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | 0,000 V | 120,00 * | 60,000 Hz | |
| MC Rel | 0 output(s) activ | /e | | 0 output(s) acti | ve | | 0 output(s) active | | | |
| riager | X | 4.000 s | | i 🚜 | | | X | 8.000 s | | |

Figura 74 - Tela do State Sequencer com a configuração dos 3 Estados para um curto monofásico com atuação na zona temporizada.

Após todas as configurações ajustadas, é pressionado o botão de inicialização do teste encontrado na barra de ferramentas do software.

Os testes ocorreram de acordo com o esperado e apresentaram os seguintes resultados:

• Tempo de atuação do relé de distância: 442,80 ms

• Não haverá religamento do disjuntor, pois o defeito ocorreu fora da linha de transmissão AB, onde se localiza o disjuntor montado para os testes.

- O equipamento transmissor de sinal operou corretamente.
- Mensagem no display do relé:



Figura 75 - Representação dos leds acesos no display do relé após ensaio de curto monofásico na zona temporizada.

5.4.3 – Testes no relé de distância em um curto-circuito monofásico para a terra na zona reversa

O último ensaio monofásico a ser realizado com o relé digital SEL 311-C é a simulação de um curto-circuito monofásico com atuação da 3ª zona de operação do relé (zona reversa).

Como já destacado no item 4.3 deste projeto, foi montado na bancada um equipamento receptor de sinal que simula a recepção do sinal bloqueio recebido pelo relé que localizado no terminal a jusante. O equipamento receptor de sinal irá soar com um alarme caso o sinal enviado pelo relé de distância seja recebido com sucesso.

Para a configuração do Estado 1 foram definidas tensões e correntes em fase com módulo de 66,40V e 2A, respectivamente. A tensão de sincronismo estará em fase com a tensão da fase C e o tempo de duração desse estado será de 4 segundos.



Figura 76 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 1 para um curto monofásico com atuação na zona reversa.

Para a configuração do Estado 2 foi utilizado o mesmo cálculo da máxima tensão de curto-circuito da atuação da zona de operação temporizada.

Assim, através da equação 5.19, foi configurada a tensão de falta da fase A com magnitude de 28V e as tensões das fases B e C permanecerão idênticas ao do Estado 1. Para simular o relé enxergando o fluxo inverso, serão defasadas as correntes de 180° em relação ao

Estado 1. A corrente de curto da fase A (como já arbitrado) possuirá módulo de 7A, e as correntes das fases B e C serão zeradas devido a não circulação de corrente nessas fases durante o distúrbio. A tensão de sincronismo não sofre alterações e o tempo de duração do estado será de acordo com o tempo de atuação do relé durante a simulação.



Figura 77 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 2 para um curto monofásico com atuação na zona reversa.

O Estado 3 é configurado com as tensões idênticas ao do Estado 1 (estado normal do sistema) e as correntes estarão zeradas (devido a abertura do disjuntor do terminal a montante).



Figura 78 - Tela do State Sequencer com a representação das componentes de tensão e corrente do Estado 3 para um curto monofásico com atuação na zona reversa.

| | | 1 | | | 2 | | | 3 | | |
|--------|-------------------|-------------|-----------|------------------|-----------|-----------|------------------|-----------|-----------|--|
| lome | Estado 1 | aaaaaaaaaa. | | Estado 2 | | | Estado 3 | | | |
| A-N | 66,40 ∨ | ° 00,00 | 60,000 Hz | 28,00 ∨ | -0,98 * | 60,000 Hz | 66,40 V | * 00,0 | 60,000 Hz | |
| B-N | 66,40 ∨ | -120,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 ∨ | -120,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 ∨ | -120,00 * | 60,000 Hz | |
| C-N | 66,40 ∨ | 120,00 * | 60,000 Hz | 66,40 ∨ | 120,00 * | 60,000 Hz | 66,40 ∨ | 120,00 * | 60,000 Hz | |
| A | 2,000 A | ° 00,00 | 60,000 Hz | 7,000 A | 107,26 * | 60,000 Hz | A 000,0 | ° 00,0 | 60,000 Hz | |
| B | 2,000 A | -120,00 * | 60,000 Hz | 0,000 A | -12,74 " | 60,000 Hz | A 000,0 | -120,00 * | 60,000 Hz | |
| с | 2,000 A | 120,00 * | 60,000 Hz | 0,000 A | -132,74 ° | 60,000 Hz | 0,000 A | 120,00 * | 60,000 Hz | |
| (4)-1 | 66,40 V | 120,00 ° | 60,000 Hz | 66,40 V | 120,00 " | 60,000 Hz | 66,40 V | 120,00 * | 60,000 Hz | |
| MC Rel | 0 output(s) activ | e | | 0 output(s) acti | /e | | 0 output(s) acti | /e | | |
| | 577 | 4.000 s | | 1- | | | X | 8,000 s | | |

Figura 79 - Tela do State Sequencer com a configuração dos 3 Estados para um curto monofásico com atuação

na zona reversa.

Após todas as configurações ajustadas, é pressionado o botão de inicialização do teste encontrado na barra de ferramentas do software.

Os testes ocorreram de acordo com o esperado e apresentaram os seguintes resultados:

• Não haverá tempo de atuação do relé de distância, devido o mesmo apenas realizar o envio de sinal.

• Não haverá religamento do disjuntor, pois o defeito ocorreu fora da linha de transmissão AB, onde se localiza o disjuntor montado para os testes.

• Foi observado o alarme sonoro do equipamento receptor de sinal, que prova que o sinal foi enviado com sucesso pelo relé de operação.

• Não haverá modificação no display do relé, devido o mesmo não ter atuado nenhuma função de proteção.

| EN | | TIME | Сомм | SOTF | RECL RS | OSER LO | 51 |
|----|------------|----------------|------|------|-----------------|------------------|----|
| •○ | B FAULT | C C TYPE | ٥ | 0 | 0 2 ZONE/ | ⊖ 3 ∕LEVEL | 4 |

Figura 80 - Representação dos leds acesos no display do relé após ensaio de curto monofásico na zona reversa.

CAPÍTULO 6 – CONCLUSÃO

O relé digital de operação SEL 311-C apresentou desempenho compatível, com velocidade, coordenação, sensibilidade e segurança em todos os testes aos quais foi submetido em laboratório, demonstrando assim possuir um alto índice de confiabilidade para a utilização do mesmo nos sistemas elétricos de potência.

Foi observado durante o trabalho que os relés digitais fazem parte de uma evolução da proteção do sistema, por se tratar essencialmente de um sistema microprocessado capaz de, em um único equipamento, armazenar informações importantes para auxiliar no estudo das ocorrências e também capaz de operar diversas funções de proteção simultaneamente. Em um sistema com relés eletromecânicos seria necessário um grupo de equipamentos conglomerados que ocupassem um espaço maior e que tornasse mais complexa e menos eficaz a sua operação e manutenção.

A mala de teste Omicron CMC 256-6 provou ser um equipamento fundamental para a simulação dos testes, visto que possui uma vasta gama de opções e variáveis para as quais é permitido ensaiar os mais variados tipos de distúrbios existentes em um sistema real. Assim, é possível assegurar que o equipamento testado e aprovado estará apto para entrar em operação.

Os equipamentos auxiliares utilizados nos ensaios (equipamento simulador de disjuntor, equipamento transmissor de sinal, equipamento receptor de sinal) apresentaram o desempenho esperado e permitiram que fosse possível testar e observar o perfeito funcionamento do relé de operação.

Os softwares AcSELerator (do fabricante Schweitzer Engineering Laboratories) e Omicron Test Universe (da mala de teste Omicron) possuem interface simples e fácil de ser utilizada por uma pessoa que possua conhecimentos básicos de informática e que receba um treinamento básico para o uso dessas ferramentas.

Portanto, através dos conhecimentos teóricos sobre a operação de sistemas elétricos, e com conhecimento a cerca dos equipamentos utilizados em ensaios de proteção, é possível

realizar ensaios em relés de proteção com eficácia e assegurar a confiabilidade nos mesmos para sua inserção na operação do sistema.

Espera-se que futuramente possam ser realizados outros tipos de ensaios com relés digitais, com levantamento de suas curvas de operação e que utilizem outras ferramentas do software Omicron Test Universe como Quick CMC, Ramping, Advanced Transplay, Syncronizer e Distance.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] STEVENSON, William D. JR; GRAINGER, J. J. *Power System Analysis*. McGraw-Hill International Editions, Electrical Engineering Series, 1994.

[2] ANDERSON, Paul M., Analysis of Faulted Power Systems. Iowa State University Press, 1973.

[3] ROBBA, Ernesto João et al. *Introdução a Sistemas Elétricos de Potência: Componentes Simétricas*, Edgard Blücher Ltda., 1996.

[4] BORGES, Carmen L. T., Análise de Sistemas de Potência, DEE -UFRJ, Março 2005

[5] KINDERMANN, Geraldo, *Proteção de Sistemas Elétricos de Potência*, 1. ed. Do Autor, 1999. 1v.

[6] NOTAS DE AULA DE ADESP (Análise de Defeitos em Sistemas de Potência), Professor Alessandro Manzoni

[7] SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES, Comercial LTDA, *Data Sheet SEL 311-C*

[8] OMICRON TEST UNIVERSE, Catálogo Linha, CM.

[9] EQUIPAMENTOS PARA TESTES em *Relés de Proteção e Calibração de Medidores*. Disponível em: http://www.adimarco.com.br/produtos-teste-secundario.php., acessado em 28 de abril de 2011.

[10] ONS *Operador Nacional do Sistema Elétrico*, Disponível em: http://www.ons.com.br, acessado em 20 março de 2011.

[11] CARDOSO, Abílio J. R., Ensaios das Funções de Sobrecorrente e Distância Utilizando Relé Digital de Proteção e Aplicação de Sinais com Caixa de Teste, Projeto de Graduação, DEE, Junho de 2009

[12] FREITAS, Rafael dos Santos, *Aplicação do Relé de Distância Digital SEL 311-C*, DEE, Março 2010.

[13] ARAÚJO, Carlos A. S., CÂNDIDO, José R. R., SOUSA, Flávio C., DIAS, Marcos P., *Proteção de Sistemas Elétricos*, 2ª Edição, Editora Interciência, Light, 2005

[14] *Schweitzer Engineering Laboratories, Comercial LTDA, modelo SEL 311-C*, Disponível em: http://www.selinc.com.br/Produtos/SEL-311C.aspx, acessado em 10 maio de 2011.