



Grupo de Estudo de Proteção, Medição, Controle e Automação em Sistemas de Potência-GPC

Modernização da Proteção Diferencial de Barras 345 kV na Subestação Campinas Baseada na Norma IEC 61850

ALESSANDRO CLEBER RODRIGUES(1); RENATO WEINGARTNER PERNAS(2); EDUARDO ANDRADE GONÇALVES(3); EDMAR MASSAMITSU IMOTO(3); Furnas(1);Furnas(2);SEL(3);

RESUMO

Este trabalho descreve o projeto de modernização do sistema de proteção diferencial do barramento de 345 kV da Subestação Campinas. O projeto envolve a substituição da proteção dos relés eletromecânicos de alta impedância por relés digitais microprocessados de baixa impedância integrados em rede de comunicação Ethernet. A troca das informações digitais de disjuntores e chaves seccionadoras envolvidos nesta proteção é realizada por meio do protocolo GOOSE (*Generic Oriented Substation Event*), definido na Norma IEC 61850. O trabalho descreve os critérios de projeto e a operação do sistema de proteção baseado na infraestrutura Ethernet.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção diferencial, barramentos, Ethernet, IEC 61850, GOOSE

1.0 - INTRODUÇÃO

A Subestação Campinas possui três níveis de tensão e se destina às funções de interligação de sistemas, compensação de reativos e transformação de energia.

O setor de 500 kV recebe energia gerada pela Usina Hidrelétrica de Marimondo através da Subestação Araraquara e a encaminha ao estado do Rio de Janeiro por meio da conexão à Subestação de Cachoeira Paulista. Também possui interligação com a Região Sul, pela qual recebe energia da Subestação Itatiba. O arranjo dos barramentos deste setor é em anel e sua conexão ao setor de 345 kV é feita através de dois autotransformadores de 560 MVA de potência individual.

O setor de 345 kV recebe energia produzida pela Usina Hidrelétrica de Furnas através da subestação Poços de Caldas e a encaminha à região de São Paulo – Capital - através da conexão com a Subestação de Guarulhos. Nele são conectados dois bancos de capacitores para compensação de reativos de 100 MVA de potência individual. Sua interligação ao setor de 138 kV é realizada através de cinco autotransformadores de 150 MVA de potência individual. O arranjo dos barramentos do setor de 345 kV é barra dupla com disjuntor simples a cinco chaves.

O setor de 138 kV corresponde à fronteira com a distribuidora regional. Os barramentos deste setor são de responsabilidade da CPFL, onde as linhas de 138 kV são conectadas ao barramento de 138 kV da subestação de Tanquinho, fornecendo aproximadamente 750 MVA para a região metropolitana de Campinas.

2.0 - ESCOPO DO PROJETO

O projeto envolveu a modernização da proteção diferencial dos barramentos do setor de 345 kV da subestação. Foram substituídos os relés diferenciais de alta impedância PVD, que estavam em operação há mais de 40 anos, por relés digitais microprocessados [1].

As características construtivas dos relés de alta impedância limitavam a modernização da subestação [2], pois a repotencialização das linhas, com a troca de equipamentos como chaves seccionadoras, disjuntores e transformadores de corrente, não era acompanhada do aumento em suas capacidades de condução por superar a maior relação de transformação de corrente (1200: 5 – 240:1) permitida nos relés PVD.

O setor em modernização tem previsão para 17 vãos, totalizando 12 vãos em operação e mais cinco vãos reservas para futuras ampliações. O diagrama unifilar representativo do setor de 345 kV é apresentado na Figura 1.

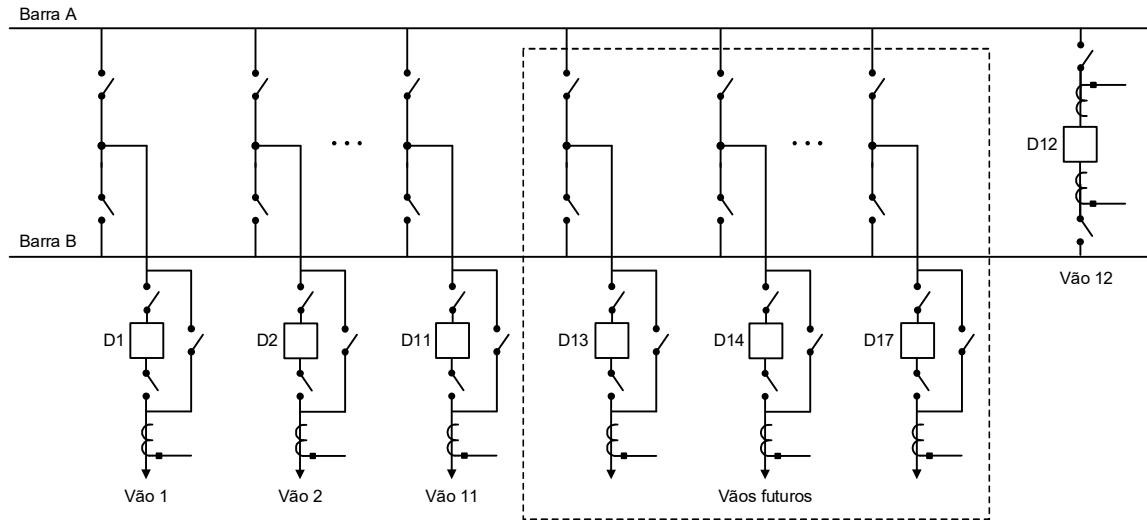


FIGURA 1 – Diagrama unifilar do setor de 345 kV

3.0 - ARQUITETURAS DE PROTEÇÃO DE BARRAMENTOS

Tradicionalmente, existem duas arquiteturas para sistemas de proteção de barramentos: arquitetura de proteção concentrada e arquitetura de proteção distribuída [3] [4].

3.1 Proteção Concentrada

Também conhecida como proteção centralizada, nesta arquitetura de proteção os sinais digitais e analógicos dos equipamentos de pátio são conectados em um único relé ou em um conjunto de relés localizados em um painel central. A Figura X ilustra um caso típico de aplicação da arquitetura de proteção concentrada com a utilização de três relés de proteção, onde cada um é responsável pela proteção de uma das fases do sistema elétrico.

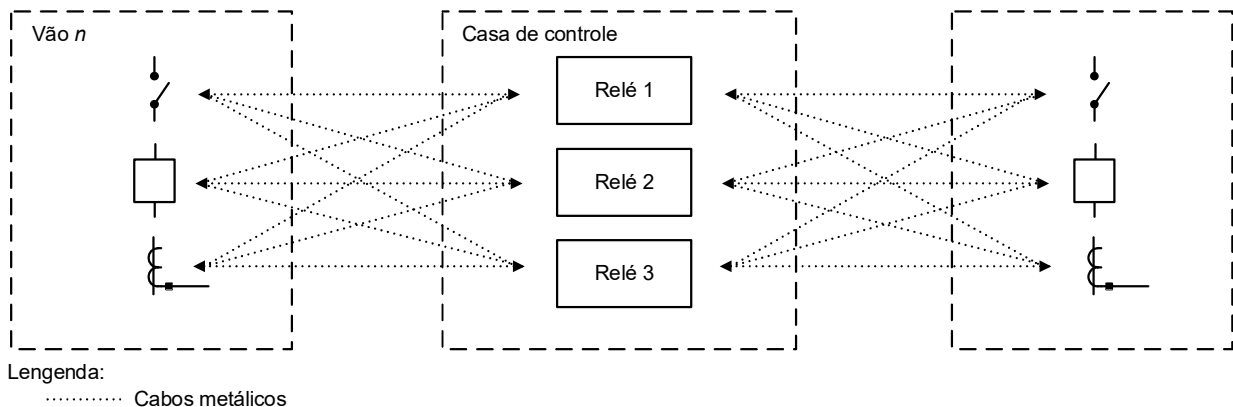


FIGURA 2 – Arquitetura de proteção diferencial concentrada

Nesta arquitetura os relés diferenciais possuem interface física com cada um dos dispositivos de manobra para aquisição e envio de sinais de comando. Ou seja, as informações digitais de disjuntores e chaves seccionadoras são replicadas para todos os relés. É comum a utilização de relés auxiliares para isolamento elétrico entre os circuitos de comando dos painéis e dos equipamentos de pátio, protegendo os relés contra anormalidades nos circuitos de comando externos.

Verifica-se a simplificação de lógicas de proteção e controle pelas equipes de engenharia na etapa de concepção do projeto. Como todos os relés têm acesso a todos os sinais dos dispositivos de manobra suas lógicas são semelhantes. A diferença reside nas conexões físicas dos circuitos de corrente, utilizando um relé para proteção diferencial de cada uma das fases dos barramentos.

Destaca-se também o fato de modernizações utilizando este tipo de arquitetura não representarem mudanças significativas de paradigma para as equipes de operação e manutenção, muitas vezes habituadas com sistemas legados baseados na aplicação de relés eletromecânicos. Por ser independente de redes de comunicação, todas as informações de projeto são documentadas em diagramas funcionais e de interligação dos circuitos de proteção e controle.

No entanto, deve-se atentar para os custos envolvidos com o lançamento de cabos de controle dos equipamentos de pátio. No caso de aplicação com três relés diferenciais, a necessidade de aquisição individual dos sinais duplica a quantidade de cabos para cada dispositivo de manobra. Adicionalmente, tem-se uma elevada quantidade de relés auxiliares em cada painel.

3.2 Proteção Distribuída

Na proteção distribuída a aquisição dos sinais digitais e analógicos dos equipamentos de pátio é realizada por módulos, usualmente instalados nos painéis de seus respectivos vãos, conforme mostrado na Figura X. Os relés de proteção, denominados de unidades centrais, realizam o processamento do algoritmo de proteção diferencial coletando as informações dos módulos de aquisição por protocolos via rede de comunicação.

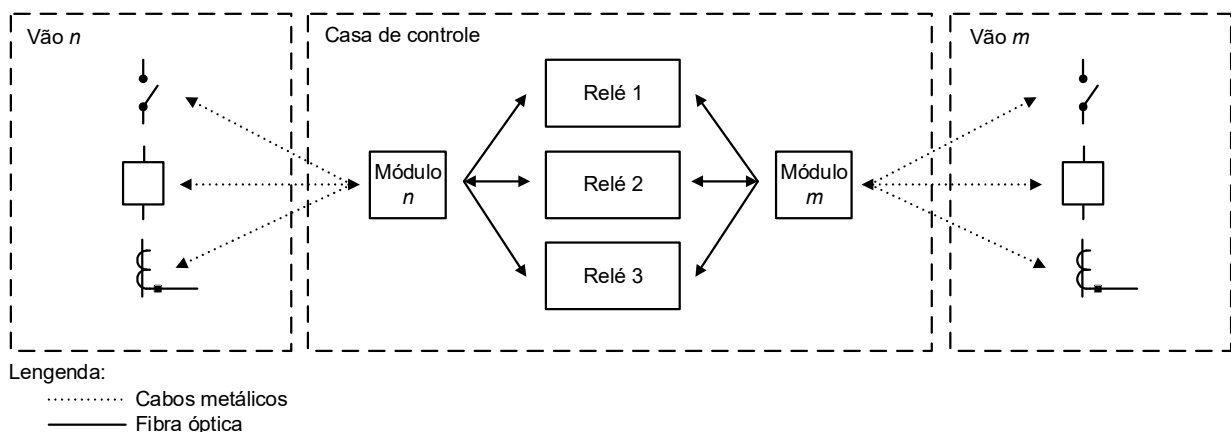


FIGURA 3 – Arquitetura de proteção diferencial distribuída

Nesta arquitetura a distribuição dos sinais dos equipamentos de pátio para as unidades centrais é realizada através de cabos de fibra óptica. As conexões utilizadas podem ser do tipo ponto-a-ponto ou ponto-a-multiponto. Na conexão do tipo ponto-a-ponto cada módulo de aquisição se comunica com uma unidade central, enquanto na conexão do tipo ponto-a-multiponto cada módulo de aquisição se comunica com todos os relés de proteção diferencial.

Assim como verificado na arquitetura de proteção concentrada, a aplicação da arquitetura de proteção distribuída permite a simplificação das lógicas de proteção e controle. Na arquitetura de proteção distribuída os módulos de aquisição representam extensões físicas das unidades centrais, permitindo o desenvolvimento de lógicas semelhantes entre as unidades de proteção de cada fase. A diferença traduz-se na definição dos sinais de interface com cada módulo de aquisição.

Na arquitetura de proteção distribuída o uso de conexões do tipo ponto-a-ponto ou ponto-a-multiponto requer baixa configuração e baixa quantidade de dispositivos integrantes da rede de comunicação. Dessa forma a aplicação desta arquitetura em projetos de modernização também não incorre em mudança de paradigma para as equipes de operação e manutenção.

Neste tipo de arquitetura deve-se atentar para os requisitos de disponibilidade do sistema de proteção, dependente da integridade das unidades centrais, dos módulos de aquisição e dos links de comunicação entre estas unidades.

Em situações anormais como a falha de equipamento ou do link de comunicação com uma unidade efetua-se o bloqueio da proteção diferencial gerando um alarme para as ações corretivas.

4.0 - SOLUÇÕES IMPLANTADAS NO PROJETO

4.1 Arquitetura de Proteção Utilizada

A arquitetura de proteção de barramentos aplicada na modernização da Subestação Campinas possui características observadas nas arquiteturas concentrada e distribuída. Assim como na arquitetura concentrada são utilizados três relés diferenciais, responsáveis pela aquisição dos sinais digitais e analógicos dos equipamentos de pátio. As informações digitais são distribuídas entre os relés via rede de comunicação Ethernet. A Figura 4 ilustra o diagrama esquemático desta arquitetura de proteção.

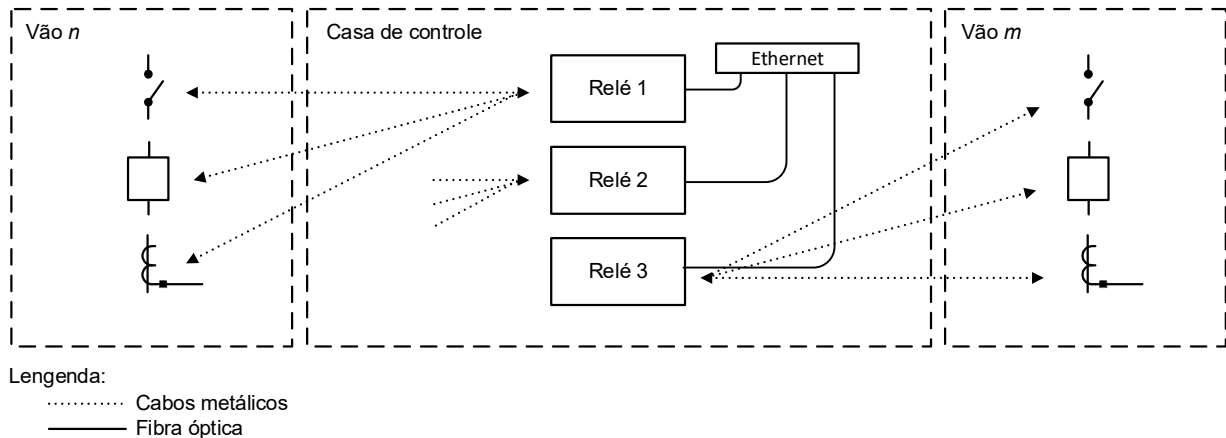


FIGURA 4 – Arquitetura de proteção diferencial da em rede Ethernet

As informações de estados e de envio de comandos aos equipamentos de manobra são coletadas pelos relés de proteção das fases A (UPB1), B (UPB2) e C (UPB3), conectados aos conjuntos de vãos de 1 a 6, de 7 a 12 e de 13 a 17, respectivamente. O vão correspondente ao disjuntor de interligação é conectado ao relé UPB2. Estas informações são distribuídas entre os relés por meio do protocolo GOOSE [5], definido na Norma IEC 61850. A Tabela 1 resume as interfaces dos relés com seus vãos correspondentes.

Tabela 1 – Mapeamento das Interfaces entre Relés e Vãos

Sinal	UPB1	UPB2	UPB3
Correntes	Fase A de todos os vãos	Fase B de todos os vãos	Fase C de todos os vãos
Entradas digitais	Vãos de 1 a 6	Vãos de 7 a 11 e disjuntor de interligação	Vãos de 13 a 17
Saídas digitais	Vãos de 1 a 6	Vãos de 7 a 11 e disjuntor de interligação	Vãos de 13 a 17

A atuação do sistema é descrita através de duas situações exemplo, baseadas na topologia de operação apresentada na Figura 5. Para fins de simplificação são representados somente sete dos 17 vãos da subestação.

a. Falta localizada na fase A da Barra A (F1)

Neste caso o relé UPB1 é o responsável pela detecção da falta e envio dos sinais de disparo da proteção diferencial. Os disjuntores dos vãos 1, 7, 13 e de interligação dos barramentos são os disjuntores pertencentes à zona sob falta e devem ser abertos. O disparo do disjuntor do vão 1 é realizado diretamente com o acionamento do contato de saída do relé UPB1. Este relé publica na rede mensagens GOOSE referentes ao sinal de disparo que são assinadas pelos demais relés. O relé UPB3 recebe estas mensagens e efetua o comando de disparo acionando o contato de saída correspondente ao disjuntor do vão 13. Da mesma forma, o relé UPB2 efetua o disparo dos disjuntores dos vãos 7 e de interligação.

b. Falta localizada na fase C da Barra B com falha do disjuntor de interligação (F2)

A identificação da falta é realizada pelo relé UPB3 e a dinâmica para acionamento dos circuitos de disparo local e dos demais relés é análoga a descrita no item (a), com a abertura dos disjuntores dos vãos 6, 11 e 18. Após a identificação de falha de abertura do disjuntor de interligação o relé UPB2 efetua o comando de disparo do disjuntor do vão 7 e publica na rede mensagens GOOSE para abertura dos disjuntores conectados à Barra A. Com a recepção destas mensagens os relés UPB1 e UPB2 efetuam os comandos de disparo dos disjuntores referentes aos vãos 1 e 13.

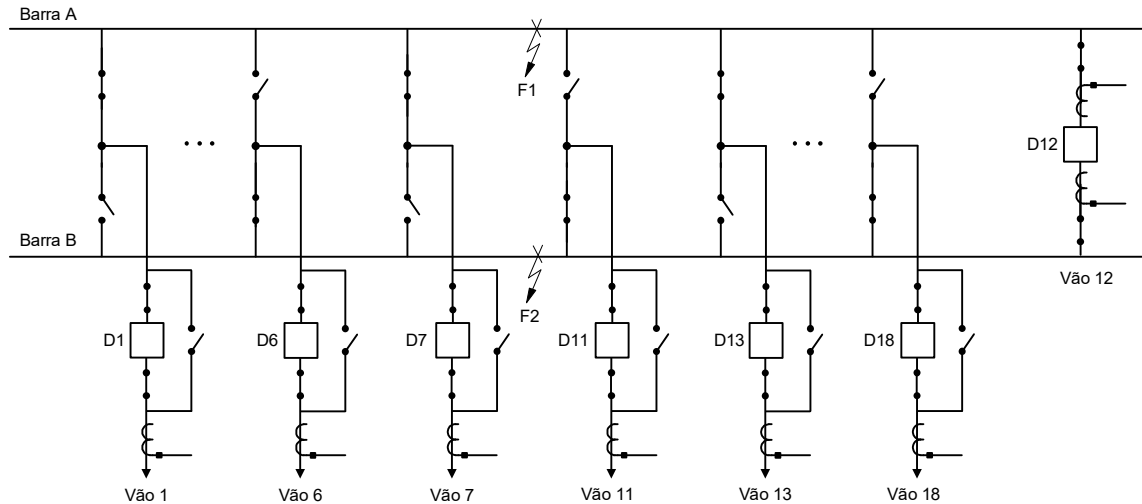


FIGURA 5 – Representação de faltas nos barramentos do setor de 345 kV

4.2 Ensaio de Polaridade dos Transformadores de Corrente

Para todos os vãos convencionou-se o sentido das correntes entrando nos relés de proteção diferencial. Para isso foram realizados ensaios para determinação das polaridades de todos os transformadores de corrente, uma vez que devido à ação do tempo as marcas de polaridade foram apagadas das placas de alguns equipamentos. O método utilizado para determinação das polaridades é o chamado golpe indutivo, descrito pela ABNT NBR 5356 [6].

O ensaio de golpe indutivo consiste na aplicação de tensão contínua ao circuito primário dos transformadores de corrente e verificação do sentido de deflexão do ponteiro em um voltímetro de zero central conectado ao seu circuito secundário. As figuras 6 (a) e 6 (b) ilustram os dois possíveis comportamentos ao aplicar-se uma tensão de 9 Vcc aos terminais H1 e H2 com o voltímetro de zero central conectado aos terminais X1 e X2.

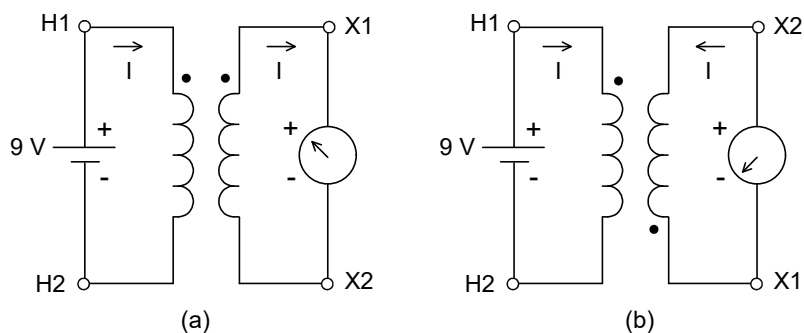


FIGURA 6 – Ensaio de golpe indutivo em transformadores corrente com polaridade (a) aditiva e (b) subtrativa

Na Figura 6 (a) verifica-se o comportamento de transformadores de corrente com polaridade aditiva, pois os ponteiros dos voltímetros apresentam deflexões no mesmo sentido; na Figura 6 (b) verifica-se polaridade do tipo subtrativa, com a deflexão dos ponteiros em sentidos opostos.

5.0 - REDE DE COMUNICAÇÃO

5.1 Arquitetura de Rede

A arquitetura de rede utilizada é do tipo estrela dupla. Os relés de proteção trabalham com suas portas em modo *failover*, realizando o chaveamento em poucos milissegundos para a porta reserva em caso de falha do link de comunicação. Visando maior disponibilidade do tráfego dos pacotes GOOSE foram utilizadas duas portas *trunk* entre os switches de comunicação [7]. A Figura 7 ilustra a arquitetura de rede utilizada no projeto.

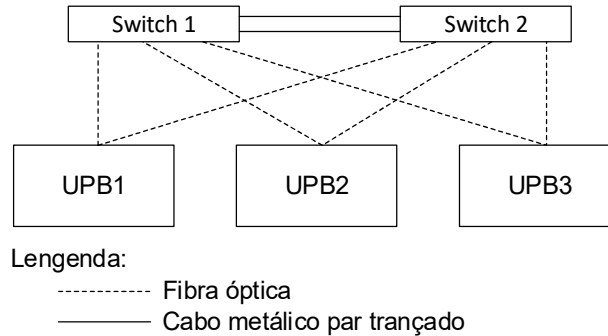


FIGURA 7 – Arquitetura de Rede do Projeto em Estrela Dupla

Foi configurado o protocolo RSTP (*Rapid Spanning Tree Protocol*) visando garantir previsibilidade e rápida recomposição em caso de falhas, validando-se diferentes cenários de contingências.

5.2 Segregação por VLANs e Prioridades das Mensagens

Seguindo a recomendação da norma IEC 61850, para cada mensagem foi definida uma VLAN (*Virtual Local Area Network*) e uma respectiva prioridade. As mensagens de transferência de disparo foram definidas com prioridade 7; as de atuação dos pontos de proteção destinadas ao Registrador Digital de Perturbações (RDP) com prioridade 5 e; as de estados dos equipamentos de pátio, com prioridade 4. Foram atribuídos nomes às VLANs visando facilitar o entendimento das mensagens trafegadas por cada uma.

5.3 Monitoração

O protocolo SNMP é um protocolo amplamente utilizado para monitorar os ativos de redes de comunicação, possui implementação simples e não afeta a rede de comunicação. São monitoradas: portas dos switches conectadas aos relés de proteção, no que tange disponibilidade, colisões, tráfego e erros; portas *trunk*, quanto à disponibilidade, colisões, tráfego e erros; portas de conexão com a rede operativa local, fontes de alimentação existentes nos switches e; processos internos dos switches.

O protocolo MMS é utilizado visando reportar ao sistema supervisor (SAGE) erros internos e de processos nos quais estão envolvidos os relés de proteção. São monitoradas: falha no conjunto fibra-porta, onde na identificação de falha do link de comunicação o relé efetua a comutação para a porta reserva reportando um sinal de alarme ao sistema supervisor; falha GOOSE, na qual é bloqueada a proteção diferencial e reportado um alarme ao sistema supervisor local e; contato físico de falha do relé (*watchdog*), onde a saída digital de monitoramento de um relé é conectada a uma entrada digital de seu dispositivo vizinho, que reporta sinal de alarme ao sistema supervisor em caso de falha do relé monitorado.

6.0 - DOCUMENTAÇÃO E NECESSIDADES

Devido à relação direta entre a proteção e a rede de comunicação são necessários documentos adicionais para correto mapeamento de todos os processos, bem como para contribuir com o aprendizado das novas tecnologias pela equipe local.

6.1 Documentação das Mensagens GOOSE

Caso haja algum problema na rede ou nas lógicas internas, a correta e detalhada documentação é extremamente necessária na busca de informações para uma recomposição tempestiva. O documento chamado Mapa GOOSE é utilizado para este fim, o qual contém informações como: origem dos sinais IEC 61850 utilizados, variável lógica do sinal correspondente nos dispositivos de origem e de destino, descrição da funcionalidade do sinal e necessidade de atualização do ponto.

6.2 Necessidades da Equipe Local

Normalmente as equipes de manutenção local possuem muita experiência em proteção, painéis e circuitos elétricos e pouca experiência em redes e protocolos. Porém devido ao caráter interdisciplinar do projeto, é essencial que a equipe de manutenção local tenha conhecimento de diversos protocolos de rede, como o GOOSE, MMS, SNMP e RSTP, além de conhecimentos em topologias de rede, VLANs e em configuração de switches.

7.0 - CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta as topologias disponíveis para implementação de sistemas de proteção diferencial. O projeto de modernização da proteção diferencial dos barramentos de 345 kV da Subestação Campinas integra conhecimentos de proteção de sistemas e de redes de comunicação. Com sua implementação destaca-se a redução na quantidade cabos de interligação entre painéis e equipamentos de manobra e relés auxiliares, contribuindo para a otimização de espaço nos painéis de proteção. Adicionalmente, a disponibilização dos sinais de estado e disparo de chaves seccionadoras e disjuntores de forma digital confere maior flexibilização para elaboração das lógicas de proteção e controle.

Visando assegurar a correta operação do sistema de proteção é necessária uma engenharia de redes utilizando-se as melhores práticas na configuração de protocolos de comunicação, como a segregação de mensagens GOOSE utilizando-se o conceito de VLANs, a configuração das rotas de recomposição pelo protocolo RSTP e o monitoramento da rede através do protocolo SNMP. Dessa maneira, o sistema requer dos profissionais envolvidos com a operação e manutenção do sistema um conhecimento interdisciplinar nas áreas de proteção e de comunicação.

8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) K. Behrendt, D. Costello, S. E. Zocholl – “Considerations for Using High-Impedance or Low-Impedance Relays for Bus Differential Protection”, 2013
- (2) R. Franklin, H. Nabi-Bidhendi, M. J. Thompson, H. J. Altuve – “High-Impedance Differential Applications With Mismatched CTs”, 2017
- (3) L. Steenkamp, C. Labuschagne, E. Stokes-Waller – “Tutorial: Complex Busbar Protection Application”, 2007
- (4) C. Labuschagne, R. Moxley, E. Jessup, J. Needs – “Low-Impedance Bus Differential – Security and Reliability in Complex Bus Arrangements”, 2012
- (5) IEC 61850-8-1, "Communication networks and systems in substations - Part 8-1: Specific Communication Service Mapping (SCSM) - Mappings to MMS (ISO 9506-1 and ISO 9506-2) and to ISO/IEC 8802-3," IEC, Geneva, Switzerland, 2004.
- (6) ABNT NBR 5356-1 Transformadores de Potência
- (7) S. Chelluri, D. Dolezilek, J. Dearien, A. Kalra – “Understanding and Validating Ethernet Networks for Mission-Critical Protection, Automation, and Control Applications”, 2014

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Alessandro Cleber Rodrigues técnico em eletro-eletrônica pelo colegio técnico da Unicamp em 1995. É graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Paulista em 2001 e atua na área de proteção, supervisão e controle do sistema elétrico desde 2002, implementando soluções de “retrofit” e comissionamentos de equipamentos de supervisão, proteção e controle de autotransformadores, banco de capacitores, reatores e linhas de transmissão de alta tensão.

Renato Weingartner Pernas nasceu em São Paulo, Brasil, em 1984. Formou-se em Engenharia Elétrica em 2009, na Universidade Federal Fluminense (UFF). Possui MBA em Gerenciamento de Projetos e em Tecnologia da Informação. Atuou por 10 anos na área de produção e desenvolvimento de sistemas na Caixa Econômica Federal e desde 2015 desenvolve suas atividades em Furnas Centrais Elétricas, atuando nas áreas de supervisão e proteção de sistemas elétricos, principalmente na Rede de Oscilografia.

Eduardo Andrade Gonçalves é formado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Itajubá. Em 2014 ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) como engenheiro de proteção. Posteriormente, atuou como engenheiro de estudos realizando ensaios de simulações digitais em tempo real. Em 2016 trabalhou na matriz da empresa junto à divisão de Pesquisa e Desenvolvimento aplicadas em subestações digitais. Atualmente é engenheiro de aplicação e suporte técnico na SEL Brasil.

Edmar Massamitsu Imoto é graduado em Engenharia Industrial Elétrica pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) em 2004. No mesmo ano começou a trabalhar na ARTECHE como Engenheiro de Sistemas, sendo responsável pelos testes em fábrica e comissionamento em campo de sistemas de proteção e controle. Em 2014 ingressou na Schweitzer Engineering Laboratories, Inc. (SEL) como Engenheiro de Proteção. Atualmente é Engenheiro de Projetos na SEL Brasil e atua como Líder Técnico para projetos de proteção e controle.