



**GRUPO V
GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO E CONTROLE EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC**

UM SISTEMA COMPACTO E EFICIENTE PARA PROTEÇÃO DE AUTOTRANSFORMADOR

José Newton R. Romeiro Filho *
COPEL

Luís Jordélio Becker
COPEL

Egon Kaul
COPEL

RESUMO

Este artigo apresenta um sistema compacto e eficiente concebido para a proteção de um autotransformador. Apresenta-se a concepção do esquema de proteção e adaptações necessárias para se prover uma proteção possível, eficiente e adequada, contando com apenas três relés de proteção. O esquema lógico adotado é apresentado, mostrando-se que a multifuncionalidade dos relés e integração à automação foram exploradas, bem como novos conceitos para a proteção de autotransformadores. Resultados de simulações e detalhes do comissionamento são apresentados. Em suas conclusões, o artigo comenta sobre a versatilidade dos relés numéricos atuais que podem permitir esquemas de proteção mais compactos e eficientes do que as proteções convencionais, além de mais confiáveis e seguros, obtendo-se simplificação do projeto elétrico com a tecnologia numérica.

PALAVRAS-CHAVE

Relés numéricos. Esquema de proteção. Proteção de transformadores. Filosofia de proteção.

1.0 - INTRODUÇÃO

O planejamento dos sistemas elétricos de potência envolve estudos de importância e obras necessárias, cuja postergação pode levar determinado subsistema à condições críticas. Por outro lado, o planejamento do sistema deve levar em consideração a proteção do sistema, prevendo e antecipando problemas futuros ou soluções que possam causar riscos à integridade de componentes e equipamentos por não se dispor de proteção adequada. Em função de postergação de obras no sistema elétrico da concessionária, determinado subsistema foi levado à uma situação crítica obrigando-se a tomar uma solução emergencial de instalação de um autotransformador para evitar sobrecargas inadmissíveis em linhas de transmissão, bem como uma operação com limites aceitáveis de tensão.

Inicialmente, no artigo é apresentado o subsistema em questão e são discutidos os aspectos que envolveram a não utilização dos painéis móveis. Discute-se a solução adotada desde a definição de instalação de disjuntores e esquema de comunicação, bem como a definição de construção de painel único para a proteção do autotransformador e da linha de proteção. Apresenta-se a concepção do esquema de proteção, bem como as adaptações que foram necessárias para se prover uma proteção possível, eficiente e adequada, contando com apenas três relés de proteção. O processo definido para a elaboração do projeto elétrico, que contou com a utilização de um projeto padrão e simplificação deste é apresentado.

O esquema lógico adotado é apresentado, mostrando-se que utilizou-se amplamente a multifuncionalidade dos relés disponíveis, a integração possível à automação local, bem como novos conceitos para a proteção de autotransformadores.

Mostra-se que no esquema utilizado, considerou-se a utilização de funções direcionais de sobrecorrente de fase com controle de tensão, reduzindo-se com isto o tempo de eliminação de falta. As funções direcionais de sobrecorrente de fase e de neutro disponíveis foram utilizadas com direção direta e reversa, quando possível. Funções de sobrecorrente de tempo definido de fase e neutro bastante sensíveis foram utilizadas para permitir a adoção de uma proteção adaptativa rápida e seletiva para condições críticas. Mostra-se também que a multifuncionalidade da proteção diferencial foi explorada, utilizando-se proteção de sobrecorrente disponível no relé numérico em questão de forma a se ter uma proteção amplamente redundante e confiável. Comentários sobre o comissionamento são feitos. Finalmente, em suas conclusões, o artigo comenta sobre a versatilidade dos relés numéricos atuais que podem permitir esquemas de proteção, mais compactos e eficientes do que as proteções convencionais, ainda assim, mais confiáveis e seguras e comenta-se, também, que, com a tecnologia numérica, obteve-se simplificação do projeto elétrico.

2.0 - SUBSISTEMA ELÉTRICO DO MÉDIO IGUAÇU

A figura 1 mostra o subsistema elétrico da região do Médio iguaçu. Neste subsistema deve-se observar que a linha de subtransmissão Guarapuava – Laranjeiras do Sul 69kV conta com praticamente 100km, sendo uma linha longa para este nível de tensão, configurando-se uma fonte fraca para a região. Por outro lado, limites de carregamento da linha de transmissão Salto Osório – Laranjeiras do Sul 69kV impunham a necessidade de desligamento da linha de transmissão Laranjeiras do Sul – Quedas do Iguaçu 69kV no terminal de Quedas do Iguaçu. A figura 2 mostra a configuração final do subsistema após os melhoramentos previstos. Observar que todo sistema será reisolado e que a região será bastante afetada pela entrada em operação da UHE Santa Clara e da UHE Fundão. Do ponto de vista de proteção, este subsistema atual apresenta diversas dificuldades, tendo em vista a conexão de fonte intermediária proveniente da Madeireira Santa Maria (STA), implicando, inclusive, em problemas com proteção de retaguarda.

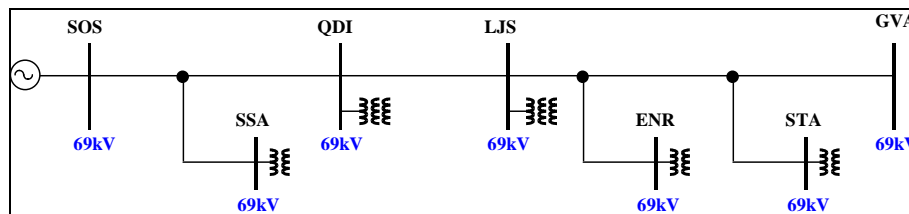


FIGURA 1 – SUBSISTEMA DO MÉDIO IGUAÇU

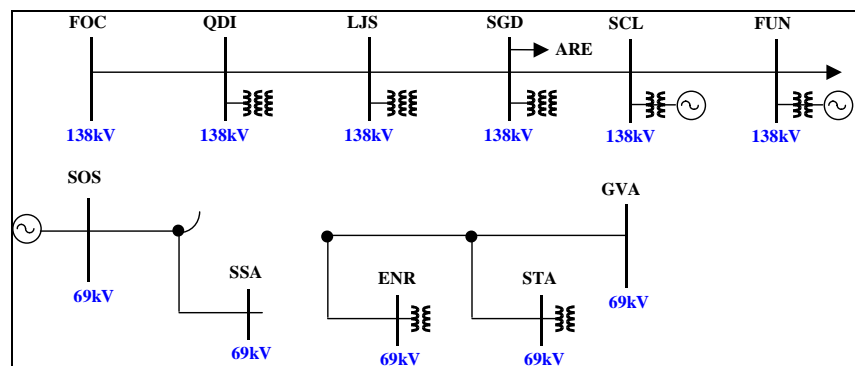


FIGURA 2 – CONFIGURAÇÃO FINAL DO MÉDIO IGUAÇU

Com a postergação das obras o subsistema da região foi levado à uma situação crítica. A solução emergencial foi a instalação de um auto-transformador 138/69kV – 41 MVA conectado à linha de transmissão Foz do Chopim – Quedas do Iguaçu 138kV, operando em 69kV. A figura 3 mostra esta configuração.

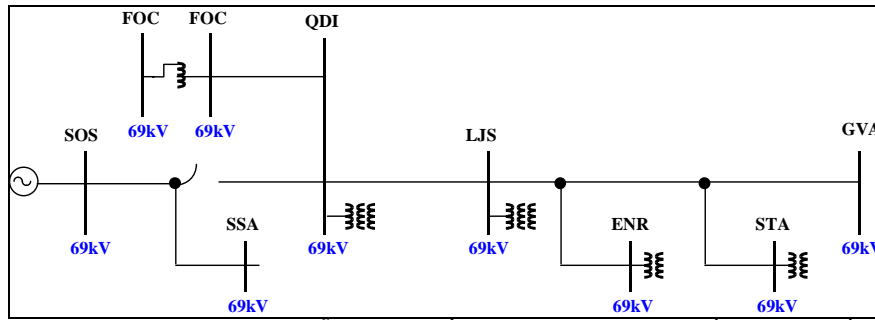


FIGURA 3 – CONFIGURAÇÃO PROVISÓRIA DO SISTEMA DO MÉDIO IGUAÇU

3.0 - HISTÓRICO

No dia 17/03/2004 foi realizada uma reunião na SE Foz do Chopim na qual decidiu-se pela solução mencionada anteriormente, com a instalação de um auto-transformador 138/69kV – 41MVA. Para esta decisão contava-se com a tecnologia da COPEL de painéis provisórios. Infelizmente tais painéis não poderiam ser utilizados pois estes painéis foram concebidos para substituição de proteções eletromecânicas. Inicialmente, não se contaria com disjuntor para o lado 69kV, e sim com apenas um esquema de transferência de disparo para a SE Quedas do Iguaçu. A proteção seria instalada no pátio da subestação. Até o dia 24/03/2004, toda a solução original havia sido alterada, tendo sido definido a instalação de disjuntor de 69kV, adicionalmente ao esquema de transferência de disparo, instalação de transformadores de corrente e potencial, construção de um painel a ser montado na casa de comando e definidos relés de proteção a serem utilizados, bem como toda a lógica da proteção. Em 07/04/2004 o projeto elétrico, elaborado pela equipe de manutenção da proteção local, havia sido concluído. A montagem do painel foi concluída em 23/04/2004, em um prazo reduzido ao extremo. A instalação do painel na subestação foi concluída em 25/06/2004 e, em decorrência de atrasos na execução do projeto eletromecânico, o lançamento de cablagem externa e comissionamento dos equipamentos foi concluído em 27/08/2004. O comissionamento da proteção se deu em um prazo de uma semana, com a energização do autotransformador com carga tendo se dado em 19/09/2004.

4.0 - A EVOLUÇÃO DA CONCEPÇÃO ORIGINAL

A concepção original previa a utilização de painéis móveis, com tecnologia desenvolvida pela COPEL. No entanto, tais painéis móveis não estavam adaptados para executar diversas funções de controle e, ainda que uma solução interessantíssima, tais painéis foram concebidos para facilitar a substituição de proteções eletromecânicas por relés numéricos. A figura 4 mostra um destes painéis móveis, na realidade um “rack” com um ou dois relés. Existia a necessidade de instalação de diversas chaves de comando local, bem como integração com a automação, não contempladas por esta tecnologia. Uma segunda idéia correspondia à instalação dos relés de proteção em um cubículo no pátio da subestação, que foi descartada por diversas dificuldades, inclusive de segurança pois a subestação Foz do Chopim era automatizada e não se teria um alarme adequado.



FIGURA 4 – PAINEL MÓVEL DESENVOLVIDO PELA COPEL

Na concepção original, foi decidido pela utilização de relés de proteção disponíveis na COPEL. Tais relés correspondiam a relés Schweitzer, tendo em vista a disponibilidade de relés reserva deste fabricante. Como o sistema de proteção deveria ser compacto, foi descartada a utilização de quatro ou mais relés, normalmente necessários. Também, na concepção original, não se previu instalação de disjuntor, TC's e TP's no lado 69kV, optando-se por apenas um esquema de transferência de disparo. Isto foi descartado pelas dificuldades inerentes a um esquema desta natureza, bem como à baixa confiabilidade deste esquema, dado que faltas internas ao transformador a ser instalado poderiam vir a não ser eliminadas. A figura 5 mostra o diagrama unifilar simplificado resultante.

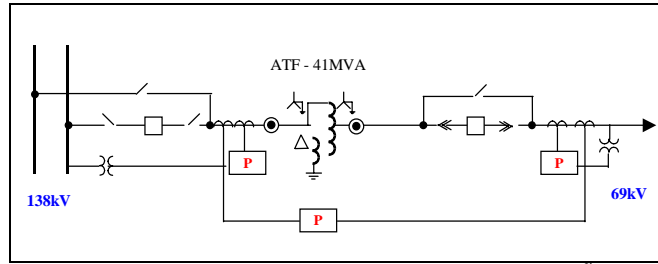


FIGURA 5 – DIAGRAMA UNIFILAR DA INSTALAÇÃO

5.0 - O PROCESSO PARA ELABORAÇÃO DO PROJETO ELÉTRICO

O processo definido para a elaboração do projeto elétrico baseou-se na premissa de que toda a lógica da proteção deveria ser estabelecida previamente, bem como em que apenas uma revisão seria efetuada. Outra premissa dizia respeito à simplificação do projeto padrão desenvolvido pela COPEL, tendo em vista que o sistema deveria ser compacto. Da mesma forma, foi estabelecido que a lógica necessária para a proteção seria sempre interna aos relés de proteção, evitando-se ao máximo a necessidade de instalação de relés auxiliares. Este projeto seria desenvolvido pela área de manutenção, com supervisão da área de estudos de proteção, com ampla discussão da lógica pretendida.

Também foi definida uma fronteira correspondente às entradas e saídas dos relés, liberando a área responsável pelo projeto para a execução deste, bem como a área responsável pela definição da parametrização para a execução deste serviço. Uma vez definida esta fronteira, nenhuma alteração posterior foi efetuada, permitindo uma elaboração segura e adequada de diagramas elementares, de fiação e de cablagem.

6.0 - A LÓGICA DA PROTEÇÃO

A figura 6 mostra as funções de proteção utilizadas. Observar que no relé SEL351-A, previsto para a proteção do circuito geral 138kV, funções direcionais com controle de tensão de sobrecorrente de fase e funções direcionais de sobrecorrente de neutro foram utilizadas e que as funções de sobrecorrente dos enrolamentos de 138 e 69kV existentes no relé SEL387-5 foram utilizadas. Observar, ainda, que a proteção do circuito Quedas do Iguaçu 69kV e do circuito geral 69kV do autotransformador 138/69kV- 41 MVA é constituída por um relé SEL311-C. Funções de falha de disjuntor, de verificação de sincronismo e de religamento automático também foram previstas.

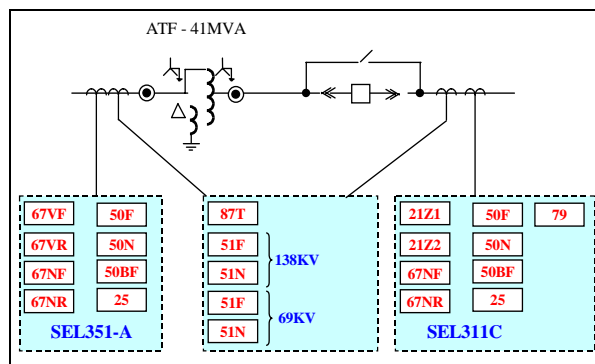


FIGURA 6 – FUNÇÕES DE PROTEÇÃO

No esquema aplicado, algumas características são relevantes e serão apresentadas nas próximas seções.

6.1 Utilização de proteção adaptativa

No esquema aplicado utilizou-se o conceito de proteção adaptativa, tendo em vista que um número reduzido de relés seria utilizado. Inicialmente o esquema que seria utilizado utilizaria a tecnologia de comunicação relé a relé, conforme mostra a figura 7.

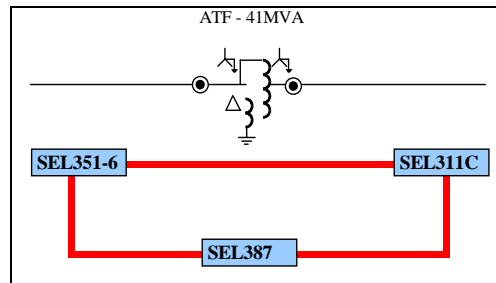


FIGURA 7 – ESQUEMA DE COMUNICAÇÃO RELÉ A RELÉ

O esquema apresentado permitiria inclusive a operação sem a proteção diferencial, no caso de falha desta, pois unidades direcionais disponíveis nos relés dos circuitos gerais 69kV e 138kV proveriam uma proteção diferencial. No caso de falha do relé do lado 138kV, o relé SEL387 e o relé SEL311C teriam grupos de ajustes comutados para atender à esta situação crítica. De forma análoga, é tratada a falha do relé SEL311C. Infelizmente, o relé que se dispunha para o circuito geral 138kV era um relé SEL351-A que não conta com a possibilidade de comunicação direta a relé. Ainda assim, um esquema de proteção adaptativa foi previsto, conforme mostra a figura 8, atendendo as contingências de falha dos relés dos circuitos gerais de 138kV e 69kV.

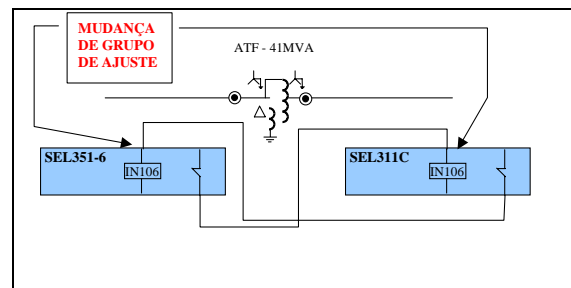


FIGURA 8 – PROTEÇÃO ADAPTATIVA

6.2 Utilização de funções direcionais com controle de tensão

Outra característica da solução implementada, foi a de se prever funções de sobrecorrente direcionais de fase com controle de tensão (67V) para as direções direta e reversa, bem como funções de sobrecorrente de neutro direcionais (67N) para as direções direta e reversa. A justificativa para este tipo de esquema decorre do fato de que para faltas entre fases, não é muitas vezes possível obter-se coordenação simultaneamente entre os circuitos gerais 138kV e 69kV. Por outro lado, como o lado 138kV constitui uma fonte forte e o lado 69kV constitui fonte fraca, faltas entre fases ou monofásicas, no lado 138kV teriam um tempo de eliminação de falta elevado. A figura 9 ilustra este problema.

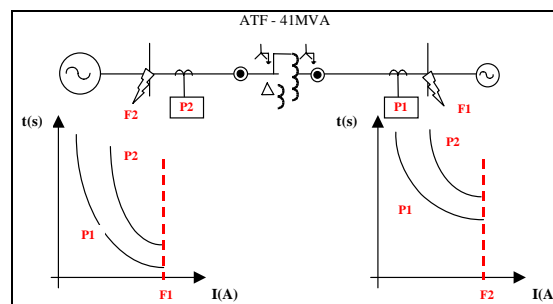


FIGURA 9 – O PROBLEMA DE PROTEÇÃO PARA AUTOTRANSFORMADORES

A solução proposta é mostrada na figura 10. Observe-se que com esta solução os tempos de eliminação de falta são reduzidos, bem como pode-se prover coordenação adequada para faltas no lado 138kV e 69kV simultaneamente.

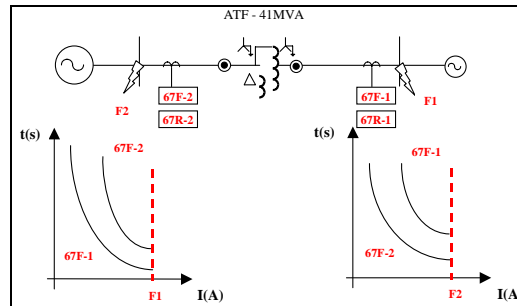


FIGURA 10 – SOLUÇÃO PROPOSTA

Embora o relé SEL351-A, previsto para a proteção do circuito geral 138kV, possua funções direcionais temporizadas que possam ser aplicadas na direção direta e reversa, infelizmente, o relé SEL311C, previsto também para a proteção do circuito geral 69kV não possui funções temporizadas de fase e neutro que permitissem utilização nas direções direta e reversa. O esquema foi adaptado para esta situação.

6.3 Utilização de funções de sobrecorrente da proteção diferencial

Tendo em vista que a proteção diferencial, constituída pelo relé SEL387-5, possui funções de sobrecorrente de fase e neutro para cada um dos enrolamentos, foram previstas funções de sobrecorrente de retaguarda para os relés do lado 138kV e 69kV, que atuam sobre os relés 94 de cada circuito geral 138kV e 69kV.

6.4 Esquema de falha de disjuntor e transferência de disparo

No lado 138kV, a proteção contra falha de disjuntor é executada no relé SEL351-A, utilizando as funções de sobrecorrente de fase e neutro existentes. Uma entrada digital, proveniente da proteção diferencial, foi também prevista para as faltas sem corrente.

Da mesma forma, para o lado 69kV a proteção contra falha de disjuntor é executada no relé SEL311C.

Foi previsto um esquema de transferência de disparo para o terminal remoto, quando do “bay-pass” do disjuntor do lado 69kV ou quando de falha do disjuntor 69kV. Um aspecto interessante é que apenas as funções de proteção do transformador provocam a transferência de disparo para o terminal remoto.

6.5 Esquema de religamento automático e supervisão de fechamento manual dos disjuntores

No lado 138kV, foi implementada uma supervisão de fechamento manual do disjuntor no relé SEL351-A, utilizando as tensões provenientes dos TP's de 138kV e 69kV. Da mesma forma, no lado 69kV foi implementada esta supervisão no relé SEL311C, bem como o comando de fechamento do disjuntor 69kV. Adicionalmente, utilizou-se a função de religamento automático neste relé, inicializada pelas funções de proteção de linha.

A figura 12 ilustra o esquema lógico utilizado no relé SEL311C para as funções descritas.

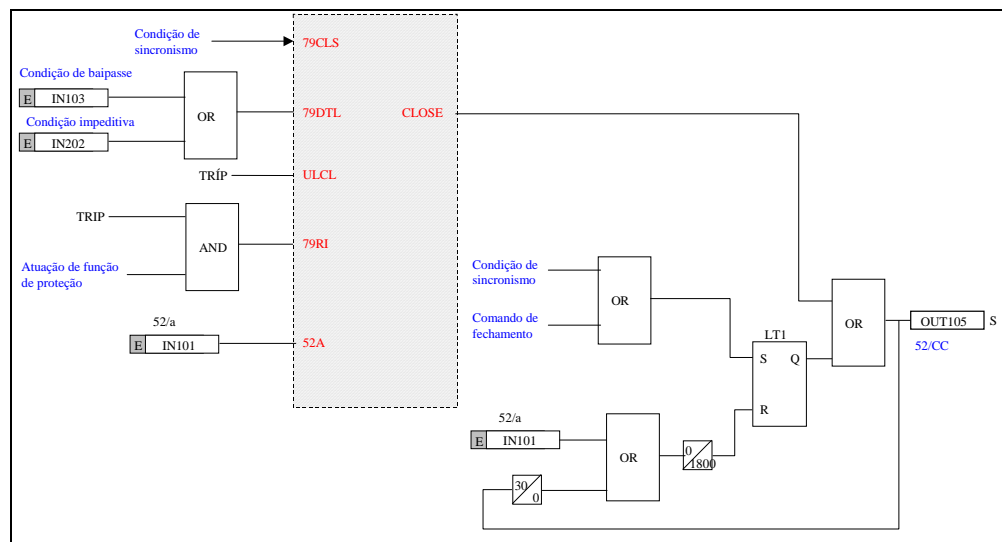


FIGURA 11 – FECHAMENTO MANUAL E RELIGAMENTO AUTOMÁTICO

6.6 Integração com automação, supervisão e sinalização

A proteção aplicada foi integrada à automação, inclusive com comandos, quando possível. Através dos relés de proteção são enviados para a automação, via protocolo DNP 3.0 atuação de funções de proteção, estado dos disjuntores 138kV e 69kV, estado do religamento automático, estado das chaves (43REM, 43R, 01/L, 43TE, 43TT, etc.), estado de cada corrente contínua, bem como atuação das proteções próprias do transformador. Foram disponibilizados comandos de abertura e fechamento do disjuntor 138kV, bloqueio e desbloqueio do religamento automático deste disjuntor e “reset” da chave de bloqueio 86T. Foi prevista também a supervisão da proteção instalada pelo registrador de perturbação digital existente na subestação Foz do Chopim.

Adicionalmente, previu-se a sinalização das funções de proteção configuradas através do “display” de cada um dos relés. A lógica implementada permite sinalização apenas quando efetivamente ocorrer um “trip” e o “reset” da sinalização de forma manual ou quando de novo “trip”.

6.7 Esquemas adicionais

Para reduzir o tempo de eliminação de falta, garantindo-se a integridade dos contatos dos relés de saída das proteções, contatos dos relés de proteção atuam em paralelo com os relés 94, tanto do lado 138kV como 69kV.

Tendo em vista que não foi possível implementar completamente o esquema pretendido com funções de sobrecorrente direcionais nas direções direta e reversa, foi projetada uma lógica adicional de forma que se tivesse proteção para faltas entre o disjuntor geral e os TC's do lado 138kV. Este esquema previu funções de sobrecorrente de fase e neutro de tempo definido, bastante sensíveis, que são ativadas quando em operação normal com abertura do disjuntor do lado 138kV, propiciando atuação no relé 94 do lado de 69kV. O esquema, durante manobras, tem uma lógica mais simples, que atua no relé 94 do circuito geral de 69kV quando de atuação da proteção do lado 138kV.

Um esquema similar foi aplicado também para o lado 69kV, fazendo com que no caso de faltas entre os TC's e o disjuntor do lado 69kV, tenha-se um tempo menor de eliminação de falta.

7.0 - RESULTADO FINAL

A figura 12 mostra o autotransformador 138/69kV – 41MVA instalado provisoriamente na subestação Foz do Chopim, bem como vista do painel construído. Observar que apenas neste painel está concentrada toda a proteção e comando referentes ao autotransformador instalado e o pequeno número de relés auxiliares instalados.



FIGURA 12 – INSTALAÇÃO FINAL

8.0 - COMISSIONAMENTO

O comissionamento dos relés e da lógica funcional foi realizado em um prazo reduzido. Consistiu em três etapas, a primeira delas com ensaios de “pickups”, características e temporizações de cada uma das funções habilitadas nos três relés; a segunda com ensaios de cada uma das lógicas implementadas, utilizando-se o registro sequencial de eventos dos próprios relés (SER) e uma terceira etapa com a aplicação de valores de faltas monofásicas, bifásicas e trifásicas de estado permanente calculadas através de um programa de curto-circuito. Escolheu-se faltas nas áreas de 138kV e 69kV, tanto nas linhas de transmissão adjacentes, como faltas internas à área da proteção diferencial. O comissionamento foi realizado em conjunto com a automação para a verificação dos diversos comandos e estados. O comissionamento foi executado utilizando-se fontes DOBLE e utilizando-se o “software” PROTEST, e as macros apropriadas. Para a aplicação das correntes e tensões de faltas utilizou-se a macro SSIMUL.

9.0 - CONCLUSÃO

Este artigo apresentou um esquema para a proteção de autotransformadores, utilizando a versatilidade dos relés numéricos atuais que podem permitir esquemas de proteção, mais compactos e eficientes do que as proteções convencionais, ainda assim, mais confiáveis e seguras, obtendo-se, com a tecnologia numérica, uma simplificação do projeto elétrico, tendo em vista que as lógicas internas aos relés de proteção forma amplamente utilizadas, reduzindo-se a fiação do painel.

10.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. SEL311C – Protection And Automation System. Instruction Manual. Pullmann, WA, USA, 2002;
- (2) SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. SEL351A – Distribution Protection System - Directional Overcurrent Relay – Reclosing Relay – Fault Locator – Integration Element Standard. Instruction Manual. Pullmann, WA, USA, 2001;
- (3) SCHWEITZER ENGINEERING LABORATORIES. SEL387-5 – Current Differential Relay – Overcurrent Relay – Data Recorder. Instruction Manual. Pullmann, WA, USA, 2002.