



**XXIV SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA**

CB/GPC/20

22 a 25 de outubro de 2017
Curitiba - PR

GRUPO - V

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

**PROTEÇÃO PARA FECHAMENTO ACIDENTAL DE PARALELO
ENTRE SISTEMAS ELÉTRICOS FORA DE SINCRONISMO**

**Patrícia Poloni (*)
ITAIPU BINACIONAL**

**André P. Tochetto
ITAIPU BINACIONAL**

**Robson A. de Oliveira
ITAIPU BINACIONAL**

RESUMO

A operação de sistemas em paralelo no setor de 50Hz da Usina Hidrelétrica de Itaipu consta da separação de alguns geradores para atender o sistema elétrico paraguaio (SIN-PY) e outros para o sistema brasileiro. Em 29/01/2012 ocorreu o fechamento acidental de paralelo entre esses sistemas devido a falha em uma fase de um disjuntor. Como consequência houve a explosão do disjuntor, resultando em curto-circuito e desligamento de parte do SIN-PY. A análise da perturbação mostrou que as proteções instaladas (21 e 87) não eliminariam o problema, justificando necessidade de desenvolvimento de uma proteção visando evitar danos aos equipamentos e sistemas.

PALAVRAS-CHAVE

Fechamento acidental de paralelo, Proteção, Sincronismo.

1.0 - INTRODUÇÃO

É comum que diferentes Sistemas de Energia Elétrica operem de forma interligada, em sincronismo, com o objetivo de permitir o intercâmbio energético entre sistemas e aumentar a confiabilidade do atendimento às cargas. Quando dois sistemas separados são colocados para operar em paralelo há a necessidade de que esse fechamento de paralelo seja controlado e que os sistemas estejam compatíveis em termos de frequência, tensão e defasagem angular [1]. Diferença desses parâmetros entre os sistemas no momento do fechamento de paralelo pode resultar em grandes variações nos sistemas, incluído o desligamento de equipamentos. Das três grandezas observadas num fechamento de paralelo, a diferença angular é a que resulta em maiores variações de corrente e que pode causar maiores danos aos equipamentos [8].

A usina de Itaipu 50Hz possui dez unidades geradoras de 700MW e opera alimentando o Sistema Interligado Nacional Paraguaio (SIN-PY), através de linhas de 220kV e 500kV, e o Sistema Interligado Nacional Brasileiro (SIN-BR) através do Elo CC de Furnas. Normalmente os dois sistemas operam interligados e uma série de Sistemas Especiais de Proteção (SEP) garantem a segurança dessa operação. Quando algum desses esquemas não está disponível, é necessário que Itaipu 50Hz opere de forma separada, com algumas unidades geradoras alimentando exclusivamente o SIN-PY e outras unidades alimentando exclusivamente o SIN-BR. Nessa condição formam-se dois sistemas totalmente separados, não sincronizados.

Em 29/01/2012 Itaipu 50Hz operava nessa condição, separada em dois sistemas fora de sincronismo, quando ocorreu o fechamento acidental de paralelo. Na perturbação, parte do sistema foi desligado pela atuação da proteção de distância de uma das linhas, o que não eliminou o paralelo entre os sistemas. Após mais alguns segundos houve explosão do disjuntor defeituoso, o que acarretou em curto-circuito e abertura da interligação de Itaipu 50Hz com o SIN-PY. Essas características mostram que o fechamento acidental de paralelo pode acarretar em impactos severos nos sistemas envolvidos e que as proteções existentes não são capazes de proteger os equipamentos e o sistema

contra esse tipo de problema. Diante disto, sentiu-se a necessidade de desenvolver uma proteção que atue em casos semelhantes.

Outro caso de fechamento de paralelo fora das condições de sincronismo foi a perturbação ocorrida em Itaipu 50Hz no dia 30/08/2014, quando uma unidade geradora estava sendo sincronizada, e por um problema com o relé de check de sincronismo, seus disjuntores foram fechados quando as tensões estavam com uma diferença angular de aproximadamente 144 graus. Nessa condição a unidade geradora foi desligada em aproximadamente 140ms pela atuação da proteção diferencial de terra do transformador elevador da unidade (87TRG), que não é necessariamente ajustada para atuar nesse tipo de evento. Desta forma, o objetivo deste trabalho é estabelecer a detecção do fechamento acidental de paralelo para realizar o desligamento seletivo de equipamentos, reduzindo o impacto da ocorrência aos equipamentos e aos sistemas elétricos envolvidos.

2.0 - ANÁLISE DO FECHAMENTO ACIDENTAL DE PARALELO EM ITAIPU 50HZ

No dia 29/01/2012 Itaipu 50Hz operava de forma separada, conforme mostra a Figura 1, com dois sistemas independentes, fora de sincronismo:

- Sistema 1: Duas unidades geradoras alimentando exclusivamente o SIN-PY (950MW) através de uma barra da SE-MD. A conexão entre Itaipu 50Hz e a SE-MD era feita por apenas uma linha (LT IPU-MD 1);
- Sistema 2: Sete unidades geradoras alimentando exclusivamente o Elo CC de Furnas 50Hz (3100MW) por meio de linhas que conectam diretamente Itaipu 50Hz com a subestação STFI de Furnas (LI IPU 50Hz-FI 1 e 2) e linhas que conectam Itaipu 50Hz a Furnas via SE-MD (LT IPU-MD 2, LI MD-FI 1 e LI MD-FI 2).

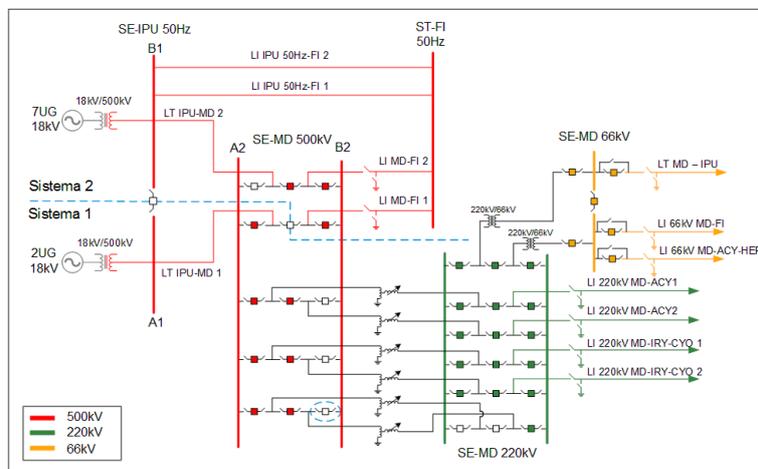


FIGURA 1 – Setor 50Hz de Itaipu na época em que ocorreu a perturbação.

Nesta condição ocorreu uma perturbação em Itaipu 50Hz, decorrente do fechamento acidental da fase R de um disjuntor de 500kV da SE-MD (destaque na Figura 1). O fechamento ocorreu por defeito no próprio disjuntor, que no momento da abertura não abriu totalmente os pólos da fase R, diminuindo a suportabilidade do isolamento. Após certo período de operação, houve o rompimento da isolação e conseqüentemente o fechamento da fase do disjuntor entre os dois sistemas que estavam fora de sincronismo.

A Figura 2 mostra alguns registros de oscilografia do evento, que incluem as correntes em linhas dos dois sistemas, Figura 2 (a) e as tensões em barras dos dois sistemas, Figura 2 (b).

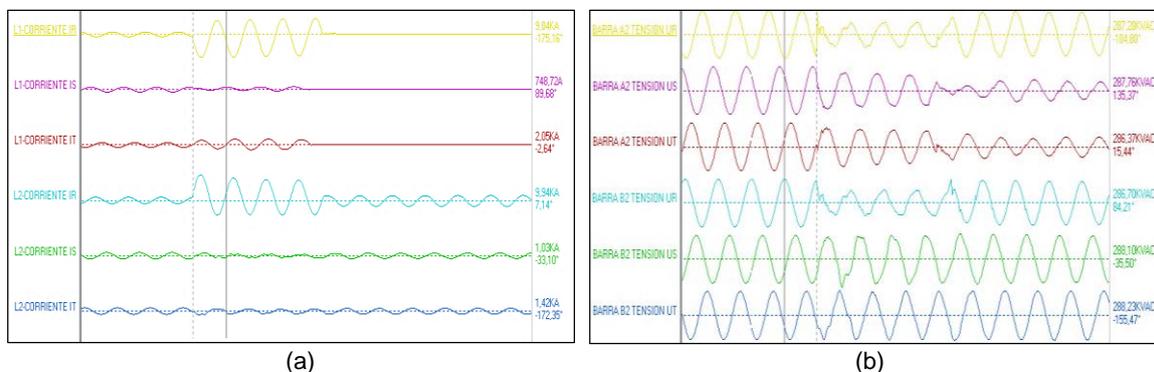


FIGURA 2 – Registros de oscilografia das (a) correntes nas linhas LT IPU-MD 1 (L1) e LT IPU-MD 2 (L2), e das (b) tensões nas barras A2 e B2.

É possível observar que o fechamento de paralelo resultou em correntes elevadas na fase R, da ordem de 10kA, cerca de oito vezes a corrente pré-fechamento (1,13kA), e com diferença de 180° entre si. Ainda na Figura 2 é possível observar que antes do fechamento as tensões nas barras dos dois sistemas estavam com defasagem de 180° entre si e, após o fechamento, a tensão na barra A2, do Sistema 1, tende a acompanhar a tensão da barra B2, do Sistema 2, eliminando a defasagem das tensões. O aumento da corrente e a redução da tensão levaram à atuação da proteção de distância da LT IPU-MD 1 (Sistema 1) em aproximadamente 80ms após o fechamento, resultando no desligamento das duas unidades geradoras que alimentavam o SIN-PY. Ainda assim, o SIN-PY permaneceu alimentado pela fase R do disjuntor defeituoso. Após aproximadamente 20 segundos, devido à corrente que ainda circulava pelo disjuntor, ocorreu sua explosão, o que resultou em um curto-circuito na barra B2 da SE-MD 500kV, eliminado pela proteção de barra. Com essa sequência de eventos, o intercâmbio de Itaipu 50Hz com o SIN-PY foi totalmente interrompido.

Somente a proteção de distância de uma das linhas foi sensibilizada pela ocorrência do fechamento do paralelo, o que indica a necessidade de uma análise mais aprofundada sobre o comportamento das funções de proteção diante desse tipo de evento. Na sequência serão analisadas as proteções diferenciais (87) e de distância (21) instaladas nas linhas e barras de Itaipu 50Hz.

2.1 Proteção Diferencial Itaipu 50Hz

Na Figura 3 está ilustrado, de maneira simplificada, o esquema da proteção diferencial (87) para a LT IPU-MD 1 e para a barra B2 diante do fechamento do paralelo por meio do fechamento do disjuntor da SE-MD 500kV. Na época da perturbação em análise, não havia proteção diferencial instalada nas linhas entre Itaipu 50Hz e a SE-MD, que eram protegidas principalmente pela proteção de distância. Ainda em 2012 houve a atualização tecnológica das proteções de linha, quando foi incluída a proteção diferencial.

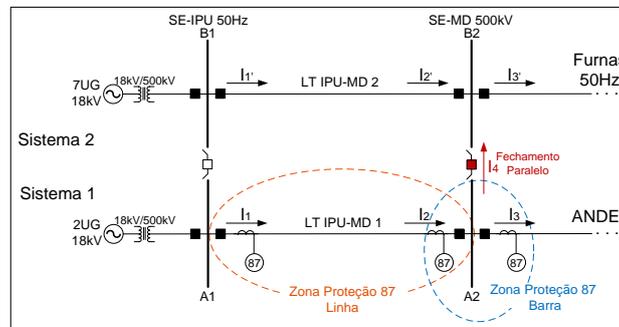


FIGURA 3 - Condição da proteção 87, fechamento de paralelo Itaipu 50Hz.

De forma simplificada, para que haja a atuação da proteção diferencial da linha ou da barra é necessário que exista uma corrente diferencial, ou seja, que o somatório das correntes que entram e saem de cada um dos equipamentos seja diferente de zero. Apenas observando a Figura 3 e considerando o fechamento de paralelo, é possível avaliar que não haveria atuação de proteção diferencial, já que o somatório das correntes dentro de cada zona de proteção continua a ser zero.

Foram realizadas simulações do evento de fechamento de paralelo, constatando que não há atuação das proteções diferenciais. Mais especificamente, já que não ocorreu falha dentro da LT IPU-MD 1 os valores de correntes em ambos os terminais deste equipamento são iguais, o que impede a atuação do relé diferencial. Similarmente, na barra A2 o somatório das correntes na barra é bem próximo de zero após o fechamento, o que justifica a não atuação da proteção diferencial.

2.2 Proteção de Distância em Itaipu 50Hz

A proteção de distância (21) das linhas entre Itaipu 50Hz e a SE-MD conta com duas zonas de impedância parametrizadas, conforme Figura 4. A Zona 1 (Z_1) está ajustada para um alcance de 70% da impedância da linha. A Zona 2 (Z_2) está ajustada para um sobrealce de 120% da impedância da linha e temporização de 500ms.

As proteções de distância foram modeladas em ATP (*Alternative Transients Program*), sendo utilizados os dados e ajustes das novas proteções instaladas após a modernização. Foram realizadas simulações do fechamento de paralelo entre os sistemas, sendo os resultados mostrados na Figura 5.

Na Figura 5 (a) observa-se que a impedância vista pela proteção de distância da LT IPU-MD 1, no terminal da SE-IPU, cruza a característica da segunda zona passando muito próximo da característica da primeira zona. Na condição atual das proteções, não haveria desligamento da linha já que a primeira zona está bloqueada e a impedância não permanece tempo suficiente dentro da segunda zona para causar sua atuação. No dia do evento analisado houve a atuação da primeira zona da proteção de distância, o que se considera aceitável levando em conta que a proteção era diferente e que a linha é muito curta.

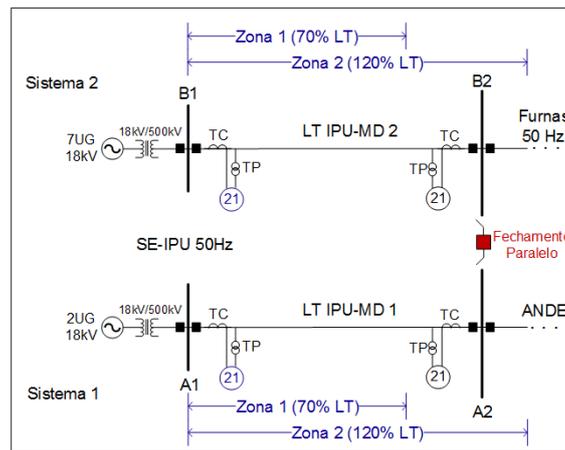


FIGURA 4 - Zonas de proteção relé 21 LT IPU-MD 2.

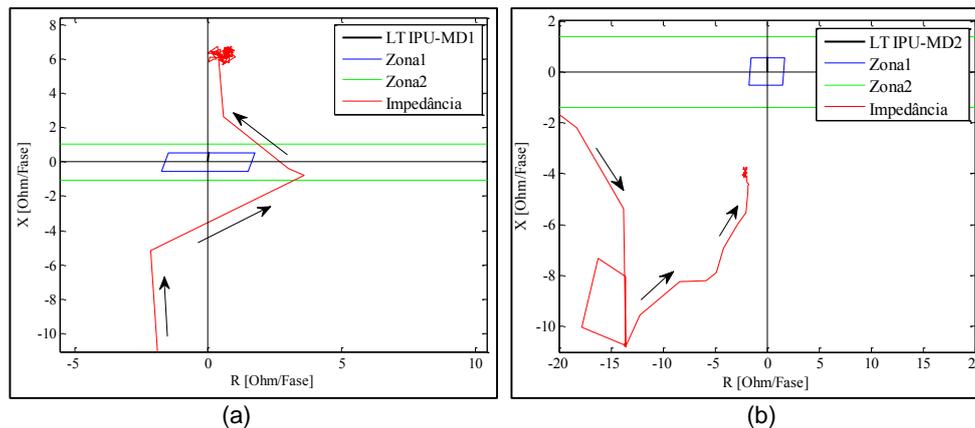


FIGURA 5 - Diagrama de impedâncias (a) LT IPU-MD 1 e (b) LT IPU-MD 2, do terminal SE-IPU, quando do fechamento de paralelo Itaipu 50Hz.

Entretanto, na Figura 5 (b) observa-se que a impedância vista pela proteção de distância da LT IPU-MD 2, no terminal da SE-IPU 50Hz, não chega a entrar na característica da segunda zona. Essa diferença de comportamento se explica pela diferença de tamanho entre os Sistemas 1 e 2. Como o Sistema 2 é muito maior que o Sistema 1, o fechamento de paralelo fora de sincronismo faz com que o Sistema 1 seja arrastado pelo Sistema 2, resultando na inversão das suas tensões e na inversão no sentido do fluxo de potência. Desta forma, as proteções de distância da LT IPU-MD 2 não percebem o evento e a proteção de distância da LT IPU-MD 1, no terminal da SE-IPU, percebe um evento a frente.

2.3 Análise do Desempenho das Proteções

As principais proteções dos equipamentos envolvidos no caso de um fechamento acidental de paralelo fora de sincronismo não são capazes de identificar adequadamente o problema, o que é aceitável, já que essas proteções não foram implementadas e ajustadas com esse objetivo. Ainda que a proteção de um determinado equipamento possa ser capaz de identificar o evento, o desligamento desse equipamento pode não eliminar o paralelo.

No caso observado em Itaipu, o desligamento da LT IPU-MD 1 (Sistema 1) resultou no desligamento das duas unidades geradoras de alimentavam o SIN-PY, que passou a ser parcialmente alimentado pela fase do disjuntor em falha. Esse desligamento eliminou as altas correntes geradas pelo fechamento do paralelo, porém o disjuntor continuou com corrente na fase R. A permanência dessa corrente acarretou na explosão do disjuntor, o que causou um curto-circuito e a abertura total a interconexão de Itaipu 50Hz com o SIN-PY

No caso da perturbação envolvendo o sincronismo de uma unidade geradora no dia 30.8.2014, o fechamento do paralelo fora de condições de sincronismo fez surgir correntes na unidade geradora de $322kA_{PICO}$ e $195kA_{RMS}$, equivalentes a sete vezes a corrente nominal e cerca de duas vezes a corrente de curto circuito. Verificações de manutenção na unidade geradora mostraram que ocorreu deformação dos barramentos do enrolamento amortecedor, quebra de calços de fixação e vazamento em conexões hidráulicas. Caso a proteção 87TRG não tivesse comandado o desligamento da unidade geradora, haveria provavelmente a atuação da proteção de subexcitação (40), temporizada em 2s, o que com certeza aumentaria os danos causados à unidade geradora.

3.0 - PROTEÇÃO PARA FECHAMENTO ACIDENTAL DE PARALELO

Visto que independentemente da atuação da proteção de distância de uma das linhas para o caso da perturbação em Itaipu, o paralelo não foi eliminado e houve a explosão do disjuntor. Assim sendo, nota-se a necessidade de estabelecer uma metodologia que detecte o fechamento de paralelo e atue com o intuito de reduzir os impactos aos sistemas e equipamentos envolvidos.

3.1 Proposta de Detecção de Fechamento Acidental de Paralelo

A defasagem angular entre as tensões dos sistemas não sincronizados é o principal fator de influência nos níveis de corrente que irão surgir após o fechamento do paralelo, o decréscimo acentuado dessa diferença angular, após o fechamento do paralelo, pode ser usado para identificar o paralelismo. Além disso, o surgimento de correntes elevadas também é um indicativo de fechamento de paralelo entre sistemas não sincronizados.

Na Figura 6 está apresentada a metodologia proposta para a detecção do fechamento de paralelo entre sistemas fora de sincronismo. Basicamente, a proteção detectaria o fechamento de paralelo pela identificação de um decaimento da defasagem angular entre as tensões dos sistemas, associado a uma elevação de corrente.

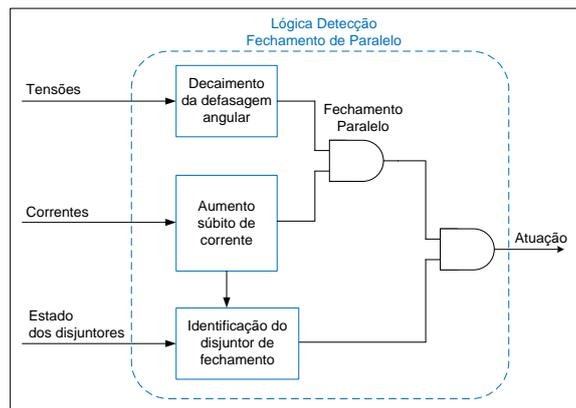


FIGURA 6 - Metodologia para detecção de paralelismo fora de sincronismo.

Além de identificar a ocorrência do fechamento de paralelo, também é preciso identificar o equipamento no qual ocorreu o fechamento, para que seja possível adotar ações corretivas. Esta identificação demanda o conhecimento do estado dos disjuntores envolvidos, sendo que o disjuntor de fechamento pode ser identificado como o disjuntor previamente aberto no qual se detecte a presença de corrente circulante. Em um sistema real, seriam monitoradas as tensões e correntes dos equipamentos dentro de uma determinada região de proteção, bem como o estado dos disjuntores envolvidos. Na Figura 7 está apresentado um exemplo de sistema genérico, supondo que a região a ser protegida seja a Subestação A.

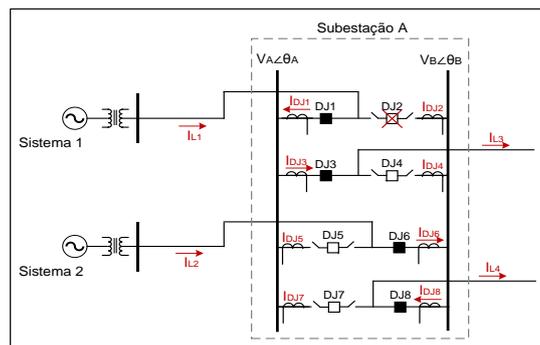


FIGURA 7 - Grandezas monitoradas pela proteção em um sistema simplificado.

A proteção faria os seguintes monitoramentos:

- Ângulo das tensões θ_A e θ_B , para identificar o decaimento da defasagem angular;
- Correntes I_{DJ1} a I_{DJ8} , para identificar o aumento de corrente; e
- Estado dos disjuntores, para identificar o disjuntor responsável pelo fechamento acidental.

No caso da Figura 7, considerando o fechamento acidental do disjuntor em destaque DJ2, a proteção faria a detecção pelo decaimento da defasagem das tensões associada ao aumento da corrente I_{DJ2} em um disjuntor previamente aberto. O estado do disjuntor posteriormente ao fechamento não deve ser levado em consideração, já que o

equipamento com problema pode gerar alguma indicação incorreta. Nas seções subsequentes serão apresentadas propostas de ajuste e aplicação da proteção para o sistema de Itaipu 50Hz.

3.2 Ajuste da Proteção para Fechamento Acidental de Paralelo

A metodologia proposta exige basicamente o ajuste de dois parâmetros na proteção para o fechamento acidental de paralelo. O primeiro é a defasagem angular mínima existente antes do evento para que se considere um fechamento fora de sincronismo. O segundo é o nível mínimo de corrente de fechamento de paralelo para permitir que a proteção atue.

As correntes de fechamento são proporcionais à defasagem angular entre os dois sistemas e pode-se dizer que seus ajustes sejam equivalentes. No entanto, neste trabalho optou-se por manter as duas condições, sendo o ajuste de ângulo utilizado para identificar um fechamento fora de sincronismo e o ajuste de corrente mínima para evitar uma atuação acidental da proteção.

Desta forma, foram realizadas simulações em ATP do fechamento de paralelo entre os sistemas da usina de Itaipu 50Hz, variando a defasagem angular entre os dois sistemas de 0° a 180° , com o intuito de analisar o valor de ângulo a ser ajustado. Os valores de correntes que surgem no fechamento do paralelo foram então comparados com a corrente nominal e com a corrente de curto-circuito dos sistemas.

A corrente nominal do sistema foi considerada como sendo a corrente nominal do equipamento que suporta a menor corrente. Desta forma, no caso de Itaipu 50Hz, a corrente nominal dos disjuntores da SE-MD (4000A). As correntes de curto-circuito foram verificadas via simulações, sendo que para o Sistema 1 foi verificado $I_{CC1} = 6500A$ e para o Sistema 2 foi verificado $I_{CC2} = 19400A$.

Na figura 8 (a) está apresentada a curva que estabelece a relação entre a corrente do disjuntor de fechamento, I_{12} , com a corrente nominal do disjuntor, I_{nom} . Entretanto, na Figura 8 (b) tem-se a corrente de curto-circuito dos Sistemas 1 e 2 respectivamente, para o fechamento de paralelo com defasagem angular de 0° a 180° .

Como o Sistema 1 é menor que o Sistema 2 e, conseqüentemente, a corrente de curto-circuito no Sistema 1 é menor do que no Sistema 2, nota-se na Figura 8-a que a relação I_{12}/I_{CC1} pode chegar a 1,5 p.u., ou seja, a corrente de fechamento de paralelo pode chegar a 1,5 vezes a corrente de curto circuito do Sistema 1. Também se observa que com defasagem de cerca de 80 graus, a corrente de fechamento de paralelo já é igual a corrente de curto-circuito e aproximadamente 1,6 vezes a corrente nominal do Sistema 1.

No caso do Sistema 2, Figura 8 (b), observa-se que a relação I_{12}/I_{CC2} não ultrapassa 0,5p.u., ou seja, a corrente a que o Sistema 2 é submetido diante do fechamento de paralelo não ultrapassa 50% da corrente de curto-circuito do sistema. Entretanto, a relação I_{12}/I_{nom} é significativamente elevada, visto que em 70 graus de defasagem angular, a corrente de fechamento alcança 1,5p.u. da corrente nominal do disjuntor.

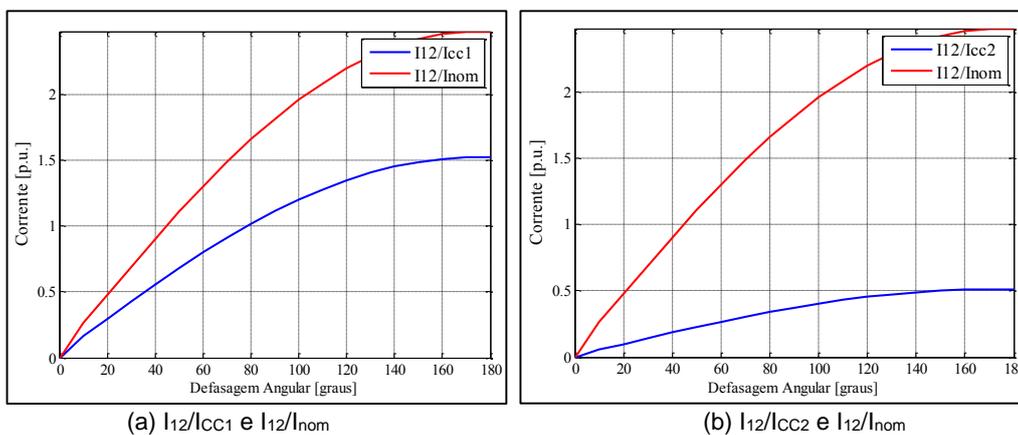


FIGURA 8 – Curvas das correntes de fechamento de paralelo nos Sistemas (a) 1 e (b) 2

Para se definir o ajuste de diferença angular mínima para a proteção proposta é necessário definir a maior corrente suportada pelos equipamentos e pelo sistema, isto na condição de fechamento de paralelo fora de sincronismo. Neste trabalho utilizou-se como critério ajustar a proteção para que atue quando as correntes que surgirem forem iguais ou superiores a 1 p.u. da corrente de curto-circuito ou superiores a 1,5 p.u. da corrente nominal, em qualquer um dos sistemas, sendo adotado critério que resultar em um menor ângulo de ajuste.

Desta forma, observando-se as curvas da Figura 8, é possível determinar o ajuste de diferença angular para a proteção como sendo de 70 graus, condição em que o fechamento acidental de paralelo resulta em correntes de 1,5 p.u. da corrente nominal dos dois sistemas. Nessa condição, as correntes que surgem são iguais a 0,9 p.u. da

corrente de curto-circuito do Sistema 1. Adicionalmente também se estipula o valor mínimo da corrente de fechamento como sendo de 1 p.u. da corrente nominal dos sistemas.

3.3 Atuação da Proteção para Fechamento Acidental de Paralelo

A solução proposta neste trabalho é que a proteção de detecção de fechamento acidental de paralelo atue na proteção contra de falha de disjuntor (86BF) do disjuntor que ocasionou o fechamento acidental de paralelo. O acionamento do 86BF de um disjuntor resulta na abertura de todos os disjuntores adjacentes que se encontram fechados. No caso de o disjuntor associado a uma linha, além do comando de abertura dos disjuntores adjacentes locais, o 86BF comanda o envio de sinal de abertura para o terminal remoto da linha.

No caso da perturbação registrada em Itaipu, a atuação da proteção proposta comandaria a o desarme do 86BF do disjuntor que causou o fechamento, vide Figura 1, o que resultaria no desligamento da barra B2 da SE-MD, no desligamento de um transformador 500/220kV da SE-MD e no desligamento de uma linha entre a SE-MD e a ST-FI.

O desligamento desses três equipamentos eliminaria a corrente circulando pelo disjuntor, mantendo os sistemas operando separados, sem causar a interrupção do intercâmbio entre Itaipu e o SIN-PY, além de evitar a explosão do disjuntor. Dependendo da condição de operação, poderia haver sobrecarga em algum dos equipamentos que permaneceram ligados, porém essa questão é tratada com a adoção de ações operativas pelas equipes de operação em tempo real.

No entanto, a condição da usina de Itaipu da Figura 1 consta da antiga configuração do sistema. Atualmente a SE-MD possui duas barras seccionadas com quatro linhas entre Itaipu 50Hz e a SE-MD e quatro linhas entre a SE-MD e a ST-FI, seis transformadores 500kV/220kV, além de uma linha de 500kV alimentando o SIN-PY, conforme apresentado na Figura 9. Na configuração atual, quando necessário operar com unidades geradoras para atendimento exclusivo ao SIN-PY, a separação é feita com a abertura dos disjuntores interligadores das barras da SE-MD. Adicionalmente, as LI MD-FI 1 e 2 permanecem isoladas na SE-MD via seccionadoras.

Portanto, no caso de um fechamento acidental de paralelo via disjuntores acopladores de barra e atuação da proteção proposta, o desarme do 86BF comandaria o desligamento do conjunto de barras A1/A2 ou B1/B2, dependendo do disjuntor responsável pelo fechamento. Esse desligamento de barra eliminaria o paralelismo entre os sistemas sem afetar os intercâmbios e também sem risco de sobrecarga nos demais equipamentos. No caso da perturbação associada à unidade geradora em 2014, a atuação da proteção proposta também eliminaria o problema pela abertura dos disjuntores adjacentes e pelo desligamento da unidade geradora.

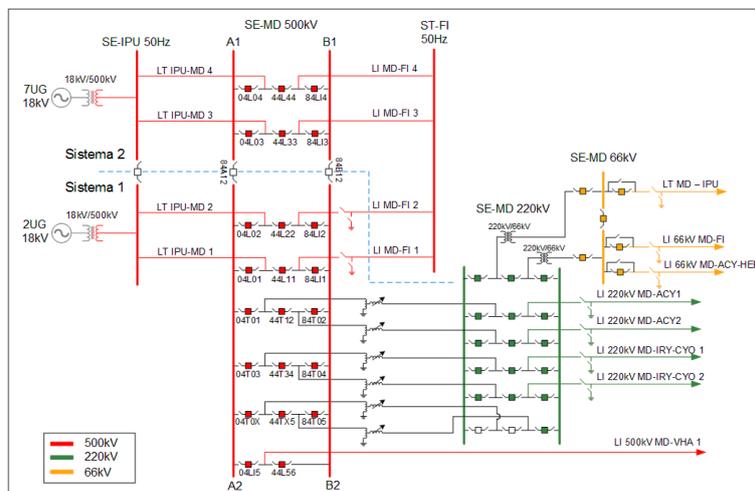


FIGURA 9 – Setor 50Hz de Itaipu atualmente.

3.4 Considerações Sobre a Implementação da Proteção para Fechamento Acidental de Paralelo

Os requisitos para a aplicação desta proteção em sistemas reais são a medição dos ângulos das tensões para monitoramento da defasagem angular, a medição das correntes em diferentes pontos do sistema, bem como o conhecimento do estado dos disjuntores envolvidos. Uma opção seria a implementação desta lógica na proteção de barra. Isto porque esta proteção já monitora as correntes e os estados dos disjuntores das barras e pode atuar nos bloqueios contra falha de disjuntor. Seria necessário incluir apenas o monitoramento dos ângulos das tensões para calcular a diferença angular da tensão nas barras. Outra opção viável seria utilizar a proteção de barra sem nenhuma modificação, conectada a um novo IED (*Intelligent Electronic Device*) que realizaria as funções da nova proteção, incluindo a medição dos ângulos das tensões. A Figura 10 mostra uma possibilidade de arquitetura a ser utilizada.

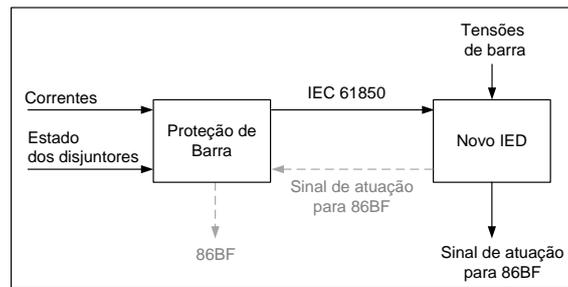


FIGURA 10 - Arquitetura da proteção contra fechamento acidental de paralelo.

Nessa opção, a proteção da barra enviaria as informações de corrente e estados dos disjuntores para o novo IED através do protocolo IEC 61850. O novo IED monitoraria todas as grandezas, processaria a lógica e enviaria o comando para atuação dos 86BF. De forma alternativa, conforme pontilhado na Figura 10, o sinal de atuação do novo IED poderia ser enviado novamente para a proteção de barra, e esta comandaria a atuação dos 86BF, de forma a utilizar o caminho já existente.

4.0 - CONCLUSÕES

Alguns sistemas têm necessidade de operar divididos, com as partes fora de sincronismo. Nessa condição, pode ocorrer o fechamento acidental de paralelo fora de sincronismo, o que pode acarretar em impactos severos para os sistemas e equipamentos envolvidos, como no caso do evento ocorrido em Itaipu 50Hz. As proteções tradicionais existentes não são capazes de identificar e eliminar o problema adequadamente, o que motivou a realização do trabalho.

De forma geral, o trabalho propõe uma metodologia para a detecção de fechamento acidental de paralelo baseando-se nas medidas de corrente e ângulos das tensões dos sistemas envolvidos. O fechamento do paralelo fora de sincronismo é detectado quando a defasagem entre os sistemas se reduz a valor que tende a zero e as correntes alcançam valores maiores que os determinados por fatores previamente estabelecidos. O ajuste da proteção parte da análise das curvas que relacionam as correntes de fechamento de paralelo com as correntes de curto-circuito dos sistemas e com a corrente nominal dos equipamentos. Assim, é possível estabelecer um valor de defasagem angular a partir do qual o fechamento fora de sincronismo resulta em níveis de corrente próximas aos níveis de corrente de curto-circuito ou valores superiores às correntes nominais dos equipamentos.

Para que haja seletividade na atuação dessa proteção é necessário também o conhecimento dos estados dos disjuntores presentes nos sistemas. Isto porque, partindo da condição dos disjuntores e das correntes medidas, aquele no qual ocorreu o fechamento pode ser identificado. A partir disto, propõe-se a atuação no 86BF do disjuntor identificado, de forma a eliminar o paralelismo entre os sistemas e evitar maiores danos aos equipamentos. No caso da perturbação registrada em Itaipu, a atuação da proteção proposta evitaria a explosão do disjuntor bem como a interrupção do intercâmbio com o SIN-PY.

Por fim, o trabalho também apresenta algumas possibilidades de implementação do esquema de proteção proposto, como por exemplo, a implementação da lógica de detecção de fechamento de paralelo na proteção de barra, sendo necessário incluir apenas o monitoramento dos ângulos das tensões para calcular a diferença angular entre os sistemas. Outra opção seria utilizar a proteção de barra existente.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Andrade, S. R. C. Sistemas De Medição Fasorial Sincronizada: Aplicações Para Melhoria Da Operação De Sistemas Elétricos De Potência. Belo Horizonte: Universidade Federal De Minas Gerais, 2008.
- [2] D'ajuz, Ary Et Al. Transitórios Elétricos E Coordenação De Isolamento—Aplicação Em Sistemas De Potência De Alta Tensão. Universidade Federal Fluminense, 1987.
- [3] D'ajuz, Ary Et Al. Equipamentos Elétricos: Especificação E Aplicação Em Subestação De Alta Tensão. Rio De Janeiro, Furnas, 1985.
- [4] Kundur, Prabha. Power System Stability And Control. New York: Mcgraw-Hill, 1994.
- [5] Phadke, Arun G.; Thorp, John Samuel. Synchronized Phasor Measurements And Their Applications. Springer Science & Business Media, 2008.
- [6] Silva, Márcio Melquíades Et Al. Programas Computacionais Para Estudos De Harmônicos Em Sistemas Elétricos, 2012.
- [7] Silveira, José G. Et Al. Sistema Para Seleção Automática De Grupos De Ajustes De Relés De Proteção Do Sistema Elétrico. In: Xviii Congresso Brasileiro De Automática. 2010.
- [8] Stringer, Norman T. Voltage Considerations During Generator Synchronizing. In: Industry Applications Conference, 1998. Thirty-Third Ias Annual Meeting. The 1998 Ieee. Ieee, 1998. P. 2348-2353

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



Patrícia Poloni (poloni.patricia@hotmail.com). Nasceu em 1995 na cidade de Barracão, estado do Paraná. Ingressou no curso de Engenharia Elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná em 2012. Entre 2013 e 2016 foi bolsista de projeto de Pesquisa e Desenvolvimento do Laboratório de Automação e Simulação de Sistemas Elétricos, localizado no Parque Tecnológico de Itaipu. Durante, o projeto desenvolveu pesquisas na área de geração distribuída e detecção de faltas em sistemas de transmissão. Foi estagiária da Itaipu Binacional entre 2016 e 2017, onde desenvolveu o presente trabalho. Em março de 2017 graduou-se em Engenharia Elétrica.

André Pagani Tochetto (pagani@itaipu.gov.br). Nasceu em 1983 na cidade de Francisco Beltrão, estado do Paraná. Recebeu diploma de graduação em engenharia elétrica pela Universidade Estadual do Oeste do Paraná (2005) e diploma de pós-graduação (2011) e mestrado (2014) pela Universidade Federal de Itajubá. Está cursando, desde 2016, o programa de doutorado também na Universidade Federal de Itajubá. Trabalha na Itaipu Binacional desde 2006, inicialmente na área de operação do sistema em tempo real. Em 2009 passou a trabalhar na área de estudos elétricos e normas, envolvido com análise de perturbações, realização estudos elétricos e elaboração de procedimentos operativos.

Robson Almir de Oliveira: Natural de Itajubá, MG. Graduou-se em Engenharia Elétrica em 1997 e conclui o mestrado em sistemas elétricos de potência em 2001, ambos pela UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá). Está cursando, desde 2017, o programa de doutorado da Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos. Trabalha na Itaipu Binacional desde 2000 na divisão de estudos elétricos e normas, envolvendo-se principalmente com a realização de estudos elétricos, incluindo a análise de sistemas elétricos em regime permanente, dinâmico e transitório, sistemas de proteção e controle (sistemas Scada/EMS, CAG, CAT, regulação primária de tensão e velocidade). Também é professor assistente da UNIOESTE desde 2002, ministrando aulas de Proteção, Operação e Estabilidade de sistemas elétricos de potência.