

GRUPO DE ESTUDO DE SUBESTAÇÕES E EQUIPAMENTOS DE ALTA TENSÃO - GSE

EXPERIÊNCIA NO RETROFIT DE IEDs PARA CHAVEAMENTO CONTROLADO DE DISJUNTORES

FABIO DE LOLLO(1);FERNANDA LOPES DA CUNHA(1);ARTHUR AUGUSTO PEREIRA CRUZ(2)
SEL(1);TRANSMISSORA ALIANÇA DE ENERGIA ELETRICA S/A(2)

RESUMO

Manobras de equipamentos no sistema de potência causam transitórios relacionados a sobretensões e sobrecorrentes, que podem trazer diversos problemas a outros equipamentos, redução da qualidade de energia ou levar à perda da estabilidade do sistema elétrico. É apresentado um estudo de caso de retrofit, com a substituição do IED de chaveamento controlado de disjuntores (método usado para minimizar os transitórios de manobras). São incluídas as fases de parametrização (inclui validação através de ensaio de RTDS) e a avaliação dos resultados obtidos em campo. É observado que o novo controlador não precisou ser do mesmo fabricante do disjuntor, o que trouxe maior flexibilidade ao processo.

PALAVRAS-CHAVE

Transitório; Chaveamento controlado; Retrofit; TAESA; RTDS.

1.0 INTRODUÇÃO

O conceito de manobras controladas por ponto da onda não é novo, desde o fim da década de 60 já era possível encontrar estudos relacionados ao benefício de se utilizar essa forma de controle para operações no sistema. O nível de transitório em uma manobra depende diretamente do ponto da onda de tensão ou corrente em que essa manobra ocorre. Resumidamente a utilização de sincronizadores diminui exponencialmente o nível de transitório de manobras no sistema, simplesmente controlando o instante em que cada fase será aberta ou fechada (para energização ou desenergização, respectivamente, de um equipamento).

Porém, quando os primeiros estudos surgiram não existia tecnologia com capacidade suficiente para realizar tal manobra de forma confiável. Para se ter uma ideia dos intervalos de tempo envolvidos, em um sistema com frequência de 60Hz, 4ms representa uma variação de aproximadamente 90° no ângulo de fase, o que pode significar a saída de um valor instantâneo zero para o valor máximo, conforme é representado na figura 1. Ou seja, para que esse conceito seja aplicado são necessários equipamentos estáveis e de alta precisão.

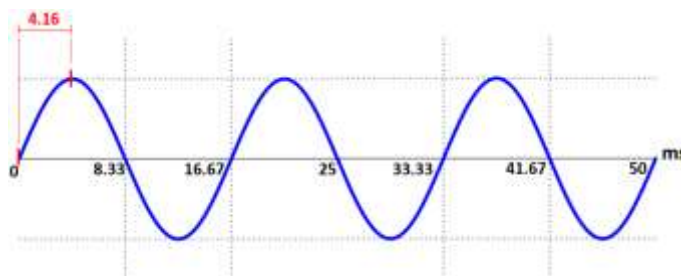


Figura 1 - Representação de 90° em ms sistema em 60Hz

Com o surgimento de novas tecnologias e dos relés digitais o que antes era apenas uma teoria passou a ser uma realidade palpável. Os dispositivos eletrônicos inteligentes (IEDs) conseguem uma precisão nas saídas digitais da ordem de microssegundos, tornando os sincronizadores uma solução vantajosa e possível.

Atualmente o ONS exige que as concessionárias utilizem alguma forma de controle para minimizar os transitórios de manobras no sistema interligado nacional (SIN) a fim de se evitar ou reduzir impactos para o sistema interligado,

especialmente para o chaveamento de transformadores de potência, reatores e bancos de capacitores. Nesse sentido a Transmissora Aliança de Energia (TAESA) adquiriu novos IEDs sincronizadores, em substituição aos existentes que tiveram sua vida útil ultrapassada, para fazer a abertura controlada de bancos de reatores em algumas de suas subestações.

Este artigo tem como objetivo descrever as etapas do retrofit dos painéis de controle de reatores em subestações da TAESA, além de analisar os resultados obtidos no comissionamento. Observa-se que o fabricante dos equipamentos de manobra e dos novos IEDs são diferentes, mesmo assim os resultados obtidos foram bastante satisfatórios.

2.0 - MANOBRA CONTROLADA EM BANCO DE REATORES

O primeiro passo para configuração de um sincronizador é a definição do ponto ideal de operação e para isso é preciso estudar o equipamento que será controlado. Os pontos variam entre indutores e capacitores que são opostos e transformadores que precisam controlar a influência do fluxo remanescente após a desenergização do equipamento e a indução das fases, além de variarem com a forma de conexão das fases nesses equipamentos (Y-Y; Y-D; Y-Y-D etc.).

Hoje existem diversos estudos na área de estabilidade que utilizam equações diferenciais e softwares de simulação para calcular e definir o melhor momento para realização das manobras em cada tipo de equipamento sendo recomendado consultar alguns deles para realizar a definição. No caso do projeto para TAESA foram utilizados os valores para banco de reatores apresentados no artigo "*Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits*".

Para diminuir o transitório durante o chaveamento de um reator o melhor ponto seria o de menor corrente no circuito (cruzamento por zero da corrente), ou seja, em um pico de tensão já que em um indutor a tensão está adiantada 90° da corrente.

É necessário ressaltar que esse valor é referente a bancos monofásicos, assim quando tratamos de equipamentos trifásicos a indução nas fases adjacentes e o desbalanço causado pela manobra das fases em momentos distintos deve ser levada em consideração. Para os reatores a ideia é que a manobra ocorra nos picos de tensão das três fases em sequência, dessa forma há duas opções de sequência possíveis: N, P, N, ou P, N, P (P - Positivo / N - Negativo), figuras 2 e 3, respectivamente. O resultado para as duas sequências é o mesmo, o importante é que essas manobras devem ocorrer no mesmo ciclo.

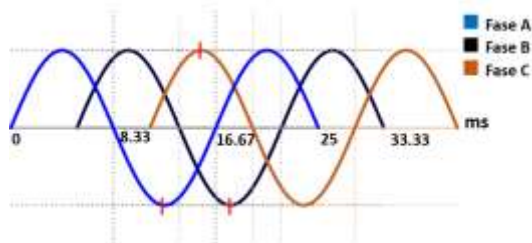


Figura 2 - Posição ideal de manobra para bancos de reatores sequência N-P-N

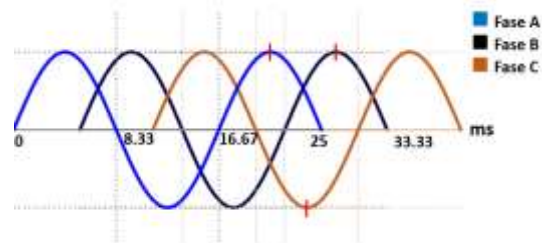


Figura 3- Posição ideal de manobra para bancos de reatores sequência P-N-P

A seguir estão os resultados de algumas simulações realizadas no RTDS com bancos de reatores em um sistema de 500kV sem amortecimento.

A figura 4 mostra a forma de onda da abertura do banco em um pico de corrente ou zero de tensão, conforme citado acima esse seria o pior cenário de operação para um banco de reatores, é possível observar um pico de tensão no momento da abertura em cada uma das fases, como o sistema simulado não possuía amortecimento essa tensão chega a 60 vezes o valor de operação nominal do sistema nas três fases.

Na figura 5 foi realizado novamente o teste anterior para o mesmo sistema, porém o momento de ocorrência da manobra foi alterado para o zero de corrente, ou pico de tensão. É clara a mudança no transitório do circuito, nas fases preta e vermelha a manobra ocorre exatamente sobre o pico de tensão então o transitório é praticamente nulo, a fase azul atrasa aproximadamente 1ms devido a margem de erro da saída digital utilizada em teste, esse atraso resulta em um transitório que ainda assim tem o valor máximo 4 vezes menor que o valor de pico no teste anterior.

A figura 6, apresenta o comparativo dos dois gráficos de tensão. As tensões do primeiro teste estão em Vermelho, Verde e Azul e do segundo teste estão em Amarelo, Roxo e Laranja.

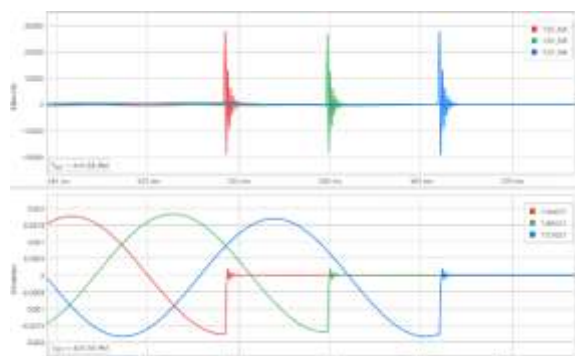


Figura 4 - Abertura Controlada no pico da corrente

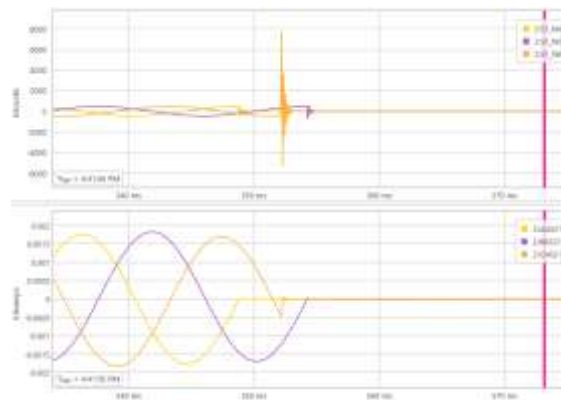


Figura 5 - Abertura controlada no zero da corrente

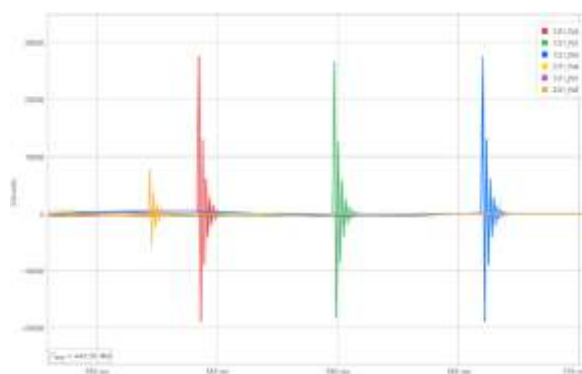


Figura 6 - Comparativo entre a abertura controlada no ponto de máximo e mínimo transitório

Em um cenário ideal desconsiderando atrasos no envio do comando e no tempo de operação do disjuntor, ou seja, com a manobra ocorrendo exatamente no ponto desejado o transitório de operação deve ser nulo.

A figura 7 mostra o teste de fechamento do banco de reatores do sistema simulado. Para o fechamento do banco a maior preocupação é com relação ao offset DC da corrente no banco durante a manobra. Nesse primeiro caso o fechamento foi realizado no ponto de pico da corrente, ou zero da tensão.

Na figura 8 o teste foi realizado no mesmo sistema, porém com o ponto de fechamento deslocado para o zero de corrente ou pico de tensão. Nesse caso o offset é praticamente nulo e de decaimento relativamente mais rápido que o anterior, minimizando o transitório no sistema.

A figura 9, apresenta o comparativo entre o maior offset dos dois casos que ocorreu na fase A, o primeiro encontra-se em vermelho e o segundo em amarelo.

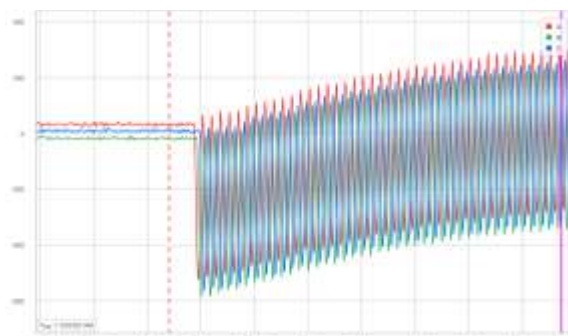


Figura 7- Fechamento controlado no pico da corrente

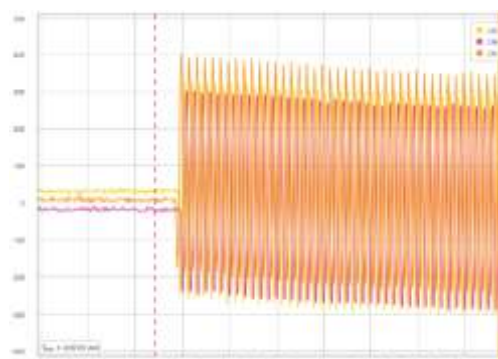


Figura 8- Fechamento controlado no zero da corrente

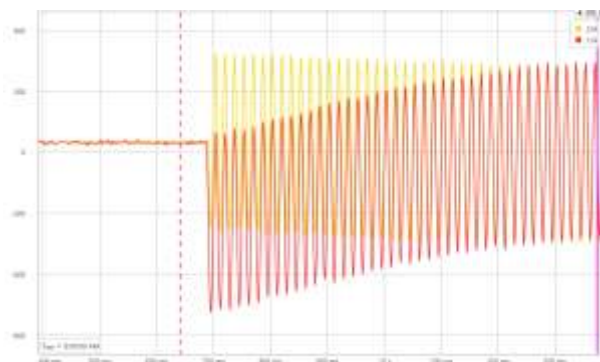


Figura 9 - Comparativo entre o fechamento controlado no ponto de máximo e mínimo transitório

3.0 - REQUISITOS PARA UTILIZAÇÃO DO CHAVEAMENTO CONTROLADO

Pelo exposto nos itens anteriores é possível afirmar que a utilização desse método exige algumas qualidades específicas para os equipamentos envolvidos no processo como velocidade e precisão, nesse sentido alguns dos requisitos para implementação desse tipo de solução passam por dois pontos fundamentais:

- **Tempo de manobra do disjuntor**

Quando é enviado um sinal de comando para o disjuntor ele não opera imediatamente, ele leva um tempo para receber o sinal elétrico, operar mecanicamente seus contatos e extinguir o arco, o somatório desses tempos que deve ser compensado. A figura 10 ilustra como um tempo de operação de 40ms, por exemplo, influencia no ponto final de operação do disjuntor se o comando é enviado na passagem por zero.

A figura 11 mostra como é feita a compensação, nesse caso o controlador atrasa a operação em 1.67ms, para que após o tempo do disjuntor a manobra ocorra de fato na passagem por zero.

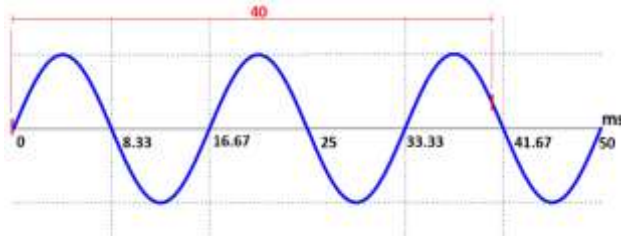


Figura 10 - Influência no ponto da onda do tempo do disjuntor

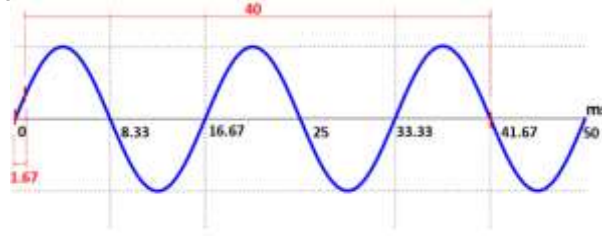


Figura 11- Compensação do tempo de manobra do disjuntor

Sempre será necessária uma compensação para o tempo que o disjuntor leva para extinguir o arco na sua câmara, porém é preciso que esse tempo seja o mais estável possível permitindo realizar a compensação. Se a operação do disjuntor em questão oscila entre valores de forma aleatória, é inviável realizar o controle da manobra visto que não é possível prever o comportamento do mesmo.

- **Disjuntor com manobra por fase**

Um outro ponto de atenção seria necessidade de utilização de um disjuntor que realize manobras monofásicas, pois em disjuntores trifásicos só é possível escolher o ponto de atuação de uma das fases, as outras duas irão acompanhar a manobra no ponto em que estiverem que nem sempre é o de menor transitório para elas.

A figura 12 exemplifica essa questão, observe que nessa imagem o ponto escolhido para manobra foi a passagem por zero da fase A em 16.67 ms, se a operação do disjuntor é trifásica obrigatoriamente a manobra para as fases B e C deverão ocorrer nos pontos 120° e 240° respectivamente.

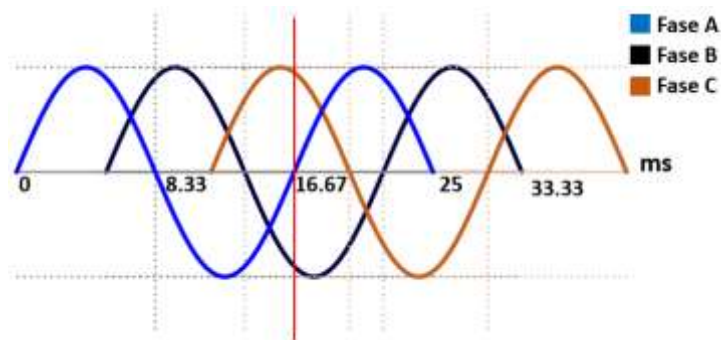


Figura 12 - Manobra trifásica do disjuntor

A não utilização de um disjuntor com manobras por fase não inviabiliza a solução como o item anterior, ainda é possível diminuir os transitórios escolhendo-se o momento correto, porém certamente o resultado é menos preciso restando uma quantidade considerável de transitório no sistema.

4.0 - PONTOS DE ATENÇÃO

Dois fatores que também devem ser levados em consideração quando utiliza-se esse tipo de solução são: a influência de fatores externos que não inviabilizam a solução, porém estão incluídos nos erros associados a sua utilização e o referencial de tensão que será utilizado na implementação.

- **Influência de fatores externos**

Outros fatores que também influenciam no tempo de operação do disjuntor e podem entrar na compensação são os valores de temperatura ambiente e tensão na bobina.

Os valores de temperatura influenciam diretamente na pressão do gás que pode interferir no tempo de extinção do arco pelo disjuntor, a figura 13 mostra a influência da temperatura no tempo de operação do disjuntor. Observe que ele fica mais significativo em temperaturas baixas e volta a crescer ao passar dos 30°.

Em geral, essa característica é específica de cada equipamento e a curva deve ser fornecida pelo fabricante do disjuntor.

Segundo a mesma linha os valores de tensão na bobina influenciam conforme figura 14.

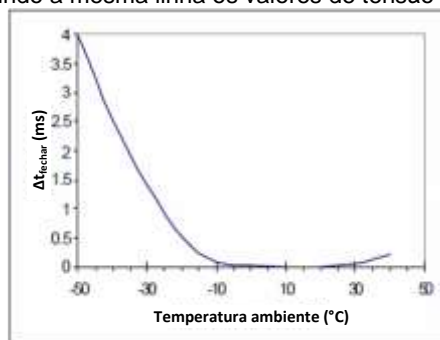


Figura 13 - Influência da temperatura ambiente no tempo de operação do disjuntor

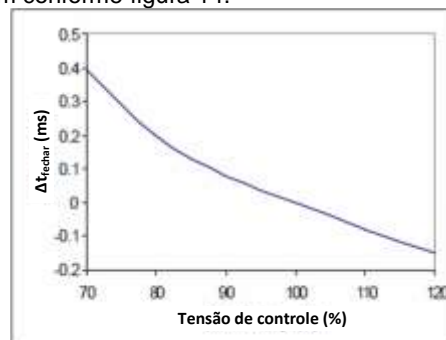


Figura 14 - Influência da tensão na bobina no tempo de operação do disjuntor

- **Referência de tensão**

Com as informações expostas neste artigo é possível perceber que toda a parametrização do IED é feita através dos cálculos de tempo e ângulo da onda e nesse sentido uma informação extremamente importante para realizar a configuração desses controladores é o referencial desses ângulos. O controlador utilizado tem como referência a tensão que recebe na fase A e utiliza esse valor para a partir daí realizar a manobra das outras fases. No projeto em questão foi disponibilizado apenas um sinal de tensão da fase B do sistema, então todos os valores de tempo tiveram de ser adequados a nova referência.

5.0 - APLICAÇÃO E RESULTADOS

No total foram instalados oito sincronizadores em cinco diferentes subestações da TAESA, são elas: SE Colinas em Colinas do Tocantins - TO; SE Itacaiunas em Marabá -PA; SE Ribeiro Gonçalves em Ribeiro Gonçalves - PI; SE São João do Piauí em São João do Piauí - PI; SE Sobradinho em Sobradinho - BA.

Os sincronizadores estão sendo utilizados para realizar o controle da abertura de bancos de reatores das barras de 500kV dessas subestações. Os disjuntores utilizados atendiam a todos os requisitos expostos anteriormente e além das compensações do tempo do disjuntor está sendo utilizada a compensação por tensão na bobina.

Foi autorizada a realização de mais de um teste de operação real para os sincronizadores, assim era possível analisar a oscilografia da primeira manobra e caso fosse necessário realizar algum ajuste e verificar novamente operação do controlador. O momento de realização desses testes foi alinhado com a ONS.

O IED recebe a tensão da fase B que ele usa como referência para determinar o ponto de operação das outras fases e a corrente das três fases do sistema. O controlador não recebe as tensões da barra dos reatores, apenas da barra de alimentação do sistema, dessa forma não foi possível fazer o registro em oscilografia do transitório do sistema durante as manobras, é possível através dos registros, porém, verificar o ponto da onda de tensão e corrente em que ocorreu a manobra certificando o funcionamento correto do sincronizador.

A seguir encontram-se os resultados do teste real de duas subestações Itacaiunas e Colinas. Na primeira o teste real indicou que a parametrização estava correta e não foi necessário mudança de parâmetros, com o sincronizador entrando em operação logo em seguida, na segunda foi necessária a realização de mais de um teste para acertar o ponto adequado antes de liberar o IED para operação.

• SE Itacaiunas

As figuras 15 e 16 apresentam os resultados do ponto de manobra do teste de abertura do banco de reatores da SE Itacaiunas.

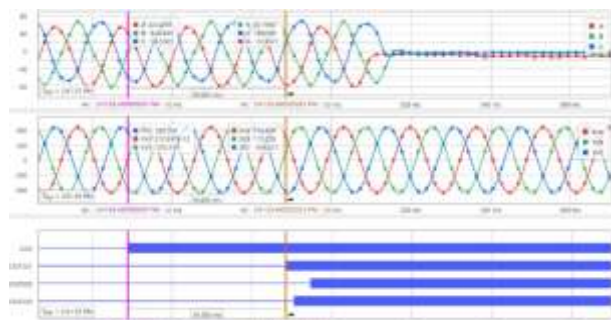


Figura 15- Manobra de abertura do banco de reatores da SE Itacaiunas TAESA

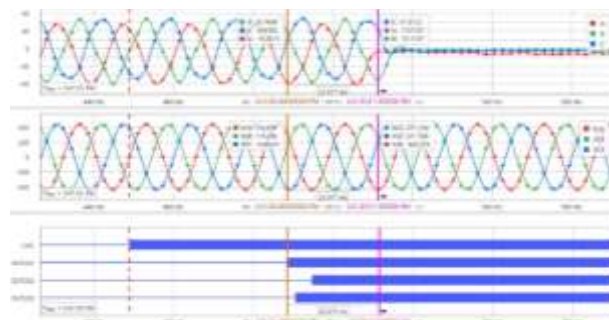


Figura 16- Manobra de abertura do banco de reatores da SE Itacaiunas TAESA

A variável COC inicia o controle de abertura do banco de reatores e parte a oscilografia. Observe que ela inicia o controle após a passagem por zero da tensão XVA em um ponto próximo do pico da corrente da fase A, o IED só envia o comando de abertura através da saída digital OUT201 39.5 ms depois, figura 15. Após o acionamento da saída o disjuntor demora 22.9 ms para finalizar a abertura que ocorre exatamente em no pico da tensão XVA, figura 16.

O tempo que o IED atrasa o envio do comando equivale as compensações que estão sendo feitas pela referência que está feita na fase B + Compensação por tempo do disjuntor + Compensação por tensão da bateria. Nesse caso a abertura ocorreu na sequência A-C-B, em um pico Negativo - Positivo - Negativo respectivamente, realizando a manobra das três fases no mesmo ciclo.

• SE Colinas

Primeira manobra

As figuras 17 e 18 apresentam os resultados do ponto de manobra do primeiro teste de abertura do banco de reatores da SE Colinas.

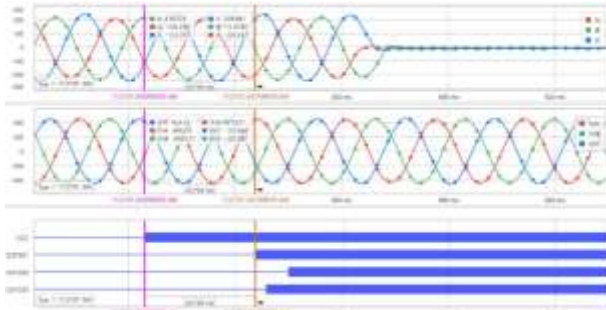


Figura 17- Manobra de abertura do banco de reatores da SE Colinas TAESA

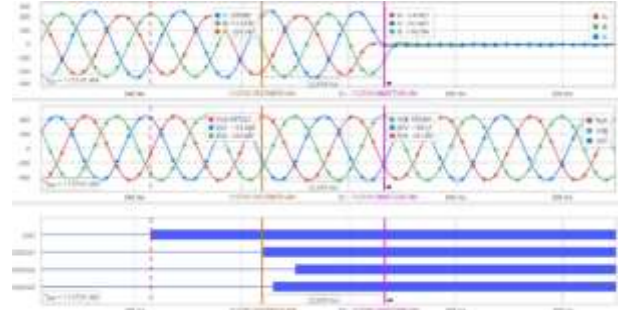


Figura 18 - Manobra de abertura do banco de reatores da SE Colinas TAESA

A variável COC inicia a controle de abertura do banco de reatores e parte a oscilografia. Observe que ela inicia o controle após a passagem por zero da tensão XVA, porém este ponto, apesar de próximo, não representa um pico de corrente como no caso anterior, isso ocorreu pois o disjuntor em questão não está alimentando apenas esta carga, dessa forma como o comportamento da carga não é apenas indutivo a corrente não está atrasada exatamente 90° da tensão. O IED só envia o comando de abertura através da saída digital OUT201 para a fase A 20.79 ms depois do comando, figura 17 e após o acionamento da saída o disjuntor demora 22.9 ms para finalizar a abertura que ocorre em um ponto aleatório entre o cruzamento por zero e o pico negativo de tensão da fase A, figura 18.

Nesse caso a manobra não ocorreu no ponto desejado, devido a característica da carga que não era puramente indutiva como o banco. Após a análise dessas oscilografias foi realizada a correção do valor parametrizado ajustando-se a carga e visando menor transitório para o banco de reatores, então foi realizada a segunda manobra.

Segunda Manobra

As figuras 19 e 20 apresentam os resultados do ponto de manobra do segundo teste de abertura do banco de reatores da SE Colinas.

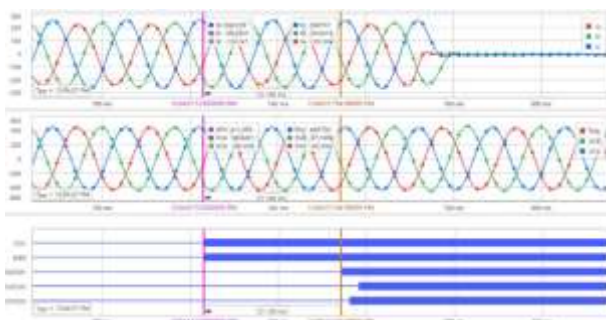


Figura 19 - Manobra de abertura do banco de reatores da SE Colinas TAESA

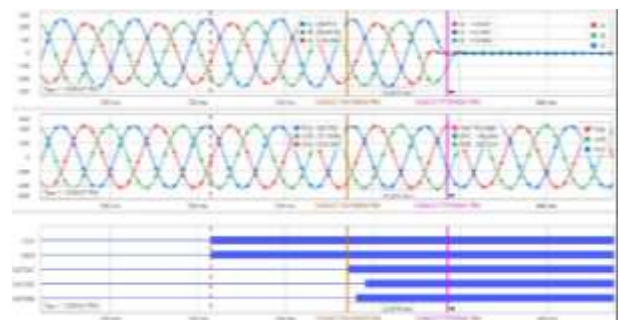


Figura 20 - Manobra de abertura do banco de reatores da SE Colinas TAESA

Novamente a variável COC inicia a controle de abertura do banco de reatores e parte a oscilografia. O IED envia o comando de abertura através da saída digital OUT201 para a fase A 31.2 ms depois, figura 19. Após o acionamento da saída o disjuntor demora os mesmos 22.9 ms para finalizar a abertura que ocorre próximo ao pico da tensão XVA, figura 20.

6.0 - CONCLUSÕES

Como os disjuntores utilizados já estavam em campo há alguns anos não foi possível utilizar a compensação por temperatura ambiente, pois não foi possível parametrizar a curva do disjuntor que era desconhecida, mas para as temperaturas da região o erro não será significativo, conforme o gráfico apresentado.

Foi necessária mais de uma manobra apenas nos casos em que havia uma carga alimentada em conjunto com o banco de reatores e para os casos em que o tempo de manobra do disjuntor não correspondia ao valor em registro.

Os resultados dos testes de comissionamento foram satisfatórios e foi possível diminuir significativamente os transitórios de manobra desses equipamentos. A utilização de disjuntores que atendem os requisitos citados nesse artigo foi fundamental para esses resultados.

7.0 - REFERÊNCIAS

- [1] COLCLASER Jr., R.G., WAGNER, C.L., DONOHUE, E. P. "Multistep Resistor Control of Switching Surges". IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. pas-88, n.7, Julho 1969.
- [2] RENÉ S., LOU V.S., MIRSAID K., DAVID P., ANTON. J., "Switching in Electrical Transmission and distribution Systems", 2015.
- [3] BENMOUYAL G., FISCHER N., TAYLOR D., TALBOTT-WILLIAMS M., CHOWDHURY R. "Uma Abordagem Unificada para Chaveamento Controlado de Equipamentos de Potência". 44th Annual Western Protective Relay Conference, Outubro 2017, Traduzido para o português em agosto de 2019.
- [4] GOLDSWORTHY D., ROSEBURG T., TZIOUVARAS D., POPE J. "Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers: Application Examples and Benefits". 34th Annual Western Protective Relay Conference, Outubro 2007.
- [5] LIMA, P. S., OLIVEIRA, C. D., & ROCHA, G. "Controle de Manobras de Alta e Extra Alta Tensão - Benefícios, Desafios e Soluções, Novembro de 2019.
- [6] VALERO, P. M. "Análise Comparativa de Técnicas de Controle de Sobreensões Transitórias nas Manobras de Energização e Religamento de Linhas de Transmissão, Julho de 2007.
- [7] CIGRÉ WORKING GROUP A3.07 "Controlled Switching of HVAC Circuit Breakers Planning, Specification and Testing of Controlled Switching Systems, Dezembro de 2004.
- [8] Manual de instruções do SEL-352, disponível em: www.selinc.com

8.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

(1) FABIO DE LOLLO

Fabio de Lollo: graduado em Engenharia Elétrica (UNESP), especialista em Proteção e Automação de Sistemas Elétricos (UNIFEI e INATEL) e especialista em Gestão de Negócios (Fundação Dom Cabral). Atuou por 16 anos na área de projetos e de estudos de proteção antes de se juntar à SEL em 2013. Inicialmente atuou como Engenheiro Sênior com ênfase em Proteção, posteriormente como coordenador de Projetos e Estudos Elétricos. Atualmente, além das atividades como Engenheiro Especialista de SEP, que engloba a definição de soluções técnicas, gestão técnica de projetos e elaboração de estudos de proteção, supervisiona uma equipe de Engenheiros de Comissionamento.

(2) FERNANDA LOPES DA CUNHA

Fernanda Cunha: graduada em Engenharia elétrica, com ênfase em sistemas elétricos de potência, pela Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI). Ingressou na SEL em 2019 como estagiária no departamento de engenharia e serviços, atualmente atua como Engenheira de projetos com foco em comissionamento no mesmo departamento, sendo responsável pelo desenvolvimento de ajustes e lógicas para proteção de sistemas elétricos e testes de aceitação de fábrica e campo.

(3) ARTHUR AUGUSTO PEREIRA CRUZ

Graduado em Engenharia Elétrica pela UFJF e pós-graduado em Automação de Subestações e Gestão de Projetos. Possui mais de dez anos de experiência, tendo iniciado a sua carreira como técnico em mecânica de manutenção. Trabalhou com o comissionamento de usinas e subestação e atualmente é Engenheiro de Transmissão Sênior na Gerência Executiva de Engenharia de Transmissão da TAESA onde trabalha com comissionamento de novos projetos, análise de ocorrências e estudos de engenharia em geral.