

Grupo de Estudo de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência (GAT)

## RELATÓRIO ESPECIAL PRÉVIO

ANTONIO RICARDO DE MATTOS TENORIO - ONS  
MANFREDO VELOSO BORGES CORREIA LIMA - CHESF  
GLAUCO NERY TARANTO - COPPE

### 1.0 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Na edição do XXIV SNPTEE (2017) o Grupo de Estudo (4) de Análise e Técnicas de Sistemas de Potência - GAT - teve seu corpo de relatores composto por Antonio Ricardo M. Tenório (ONS), Manoel Correia Lima (Chesf) e Glauco N. Taranto (UFRJ/Coppe). No GAT foram submetidos 106 resumos, os quais foram analisados cuidadosamente pelos seus três relatores, que atribuem notas aos mesmos. Após se computar as médias de cada resumo, é produzida uma lista ordenada de forma decrescente das referidas médias. Esta lista é encaminhada para o Comitê Técnico que tem a incumbência de selecionar os 36 resumos aprovados, baseada na avaliação dos relatores e outros aspectos a serem considerados.

Dos 36 resumos aprovados, 33 Informes Técnicos (ITs) foram enviados e aceitos pela Relatoria, representando um não-comparecimento de 8% dos resumos aprovados. Este índice é menor que o verificado na edição anterior (especificamente no GAT).

Um dos assuntos mais recorrentes abordados nos ITs é o da transmissão em corrente contínua (HVDC), tratado em 11 trabalhos. Em 15 ITs discute-se questões relativas a modelagem, ferramental e metodologia. Destacam-se também assuntos relativos a sincrofasores, em 3 ITs, e assuntos diversos relacionados a estabilidade transitório e dinâmica, de tensão e fontes renováveis (eólica e fotovoltaicas).

### 2.0 CLASSIFICAÇÃO DOS INFORMES TÉCNICOS

Os ITs recebidos foram analisados pelos relatores do GAT, que posteriormente produziram o Relatório Especial Prévio - REP – composto por breve relato do perfil dos ITs aprovados, perguntas e comentários aos autores dos ITs e a grade de programação do GAT.

Os 33 ITs a serem apresentados na sessão do GAT do próximo SNPTEE estão distribuídos da seguinte forma entre os 5 temas Preferenciais:

- Tema Preferencial 1 (Métodos, modelos e ferramentas): 15 ITs;
- Tema Preferencial 2 (Dinâmica de sistemas de potência): 2 ITs;
- Tema Preferencial 3 (Controle aplicado a sistemas de potência): 4 ITs;
- Tema Preferencial 4 (Análise de desempenho): 9 ITs;
- Tema Preferencial 5 (Grandes perturbações no SIN): 2 ITs;
- Tema Preferencial 6 (Métodos e critérios probabilísticos): não houve ITs.

#### 2.1 447 - Métodos, modelos e ferramentas para estudos de sistemas de potência envolvendo:

- 913 - O novo Programa Computacional ANAHVDC para Simulação dos Múltiplos elos HVDC do SIN considerando transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos
- 775 - SIMULAÇÃO DE CONVERSORES MMC EM PROGRAMAS DE ESTABILIDADE ELETROMECAÂNICA
- 169 - Desenvolvimento e Validação do Modelo do Bipolo 1 do Sistema de Transmissão HVDC de Belo Monte para o Programa ANATEM
- 3 - Utilização de Reator de Bloqueio Série em Compensadores Estáticos de Potência Reativa: Uma Nova Abordagem para Redução de Perdas e Requisitos de Filtragem
- 1048 - STATCOM Híbrido - Alternativa Viável aos Compensadores Estáticos no Cenário Brasileiro
- 354 - Simulação e análise linear em alta frequência de sistemas contendo elos HVDC.
- 692 - DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIVALENTE DINÂMICO NO PSCAD E RTDS PARA OS ESTUDOS DO BIPOLO 2 DE BELO MONTE
- 877 - Utilização de Ferramenta para Cálculo Automático de Margem de Transmissão em Estudos para Leilões de Energia
- 1034 - AVALIAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO DE CONVERSORES DE AEROGERADORES FULL CONVERTER EM ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS
- 1057 - Ferramentas para Ajuste Automático das Lógicas do Sistema Especial de Proteção Associado ao Sistema de Transmissão de 765kV
- 468 - Aplicação de Equivalentes Dinâmicos na Rede Elétrica Brasileira e na Avaliação de Regiões de Segurança
- 1424 - Novos Desenvolvimentos do Programa Anatem Aplicados à Modelagem Detalhada de Controladores HVDC
- 1359 - Monitoramento da constante inercial de SEE utilizando sincrofasores

#### 2.2 448 - Dinâmica de sistemas de potência:

- 1075 - Amortecimento de oscilações eletromecânicas utilizando estabilizadores em elos HVDC considerando sistemas Multi-Infed
- 222 - Validação do algoritmo de estimação de estados aplicados a análise de estabilidade dinâmica com o cálculo de autovalores do programa PACDyn
- 650 - Controle da Potência Reativa de Geração Eólica Para Melhoria da Margem de Estabilidade de Tensão
- 313 - OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA E DE QUEDA BRUTA - ANÁLISE DE EVENTOS VERIFICADOS ENTRE JANEIRO E MARÇO DE 2017 NA USINA HIDRELÉTRICA SANTO ANTONIO
- 1049 - Simulação eficiente de controladores definidos pelo usuário utilizando compilação em tempo real
- 1120 - Melhoria do Controle de Frequência do Sistema Interligado Nacional em Cenários com Massiva Geração Eólica via Aplicação de Recursos de Inércia Sintética e Sistemas de Armazenamento de Energia
- 1054 - Identificação de parâmetros e estimação de estados dinâmicos da máquina síncrona por meio de dados de PMU e simulação dinâmica híbrida
- 1091 - Análise de Desempenho de Simulações no Programa Anatem com Passo de Integração Variável Aplicado ao Método de Solução Trapezoidal Implícito Alternado
- 1196 - Problema da Síntese da Velocidade no Estabilizador de Sistemas de Potência
- 706 - METODOLOGIA PARA AJUSTE E COMPARAÇÃO ENTRE PSS2B E PSS4B: APLICAÇÃO DOS ESTABILIZADORES EM UM SISTEMA TESTE BRASILEIRO DE 33 BARRAS

- 4 - NOVA FORMULAÇÃO PARA SEGURANÇA ROBUSTA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA VIA FUNÇÕES MULTIOBJETIVO CONSIDERANDO INCERTEZAS
- 1332 - Desempenho do Sistema de Transmissão e Distribuição devido a Geração Solar Fotovoltaica em Larga-Escala : Estabilidade x Controle de Tensão

#### 2.3 449 - Controle aplicado a sistemas de potência, considerando novas técnicas:

- 1239 - Controle Emergencial de Potência em um link CCAT.
- 696 - Simulação e Análise de uma rede CCAT baseada em conversores comutados pela rede CA (LCC).
- 361 - PROJETO E ANÁLISE DE CONTROLE ÓTIMO APLICADO NO CONTROLE AUTOMÁTICO DE GERAÇÃO CONSIDERANDO SISTEMAS INTERLIGADOS.

#### 2.4 450 - Análise do desempenho de sistemas de potência considerando:

- 916 - METODOLOGIA PARA ESTUDO DE SISTEMAS HVDC MULTI-INFEED
- 1208 - Maritime Link - O Primeiro Sistema de Transmissão Bipolar CCAT-VSC do Mundo
- 527 - UM BANCO DE ENSAIOS COMBINANDO TESTES DE HIL E A COMPARAÇÃO EM TEMPO REAL ENTRE A REALIDADE E UM MODELO QUASI-CLOSED-LOOP DE UMA UNIDADE GERADORA
- 713 - Impacto de Centrais Geradoras Fotovoltaicas nos Modos de Oscilação e na Estabilidade Transitória do SIN
- 1158 - Identificação de falhas de comutação em elos de corrente contínua modelados por fasores dinâmicos

#### 2.5 451 - Grandes perturbações no SIN:

- 542 - Revisão do Esquema de Separação Automática de Unidades Geradoras para a ANDE (ESAUPA), realizando simulações sequenciais de forma automática e adaptativa, por meio dos aplicativos ANAREDE e ANATEM

#### 2.6 452 - Métodos e critérios probabilísticos aplicados à operação de sistemas de potência:

#### 2.7 453 - Armazenamento de energia (Storage):

- 149 - ANÁLISE TRANSITÓRIA DA CONEXÃO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TRANSPORTÁVEL EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

### 3.0 RELATÓRIO SOBRE OS INFORMES TÉCNICOS

#### 3.1 - O novo Programa Computacional ANAHVDC para Simulação dos Múltiplos elos HVDC do SIN considerando transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos

Sergio Gomes Jr.(1); LEONARDO PINTO DE ALMEIDA(2); FABRÍCIO LUCAS LIRIO(3); THIAGO JOSE MASSERAN ANTUNES PARREIRAS(4); LUCIANO DE OLIVEIRA DANIEL(5); TIAGO SANTANA DO AMARAL(6); THIAGO JOSÉ BARBOSA DA ROCHA(5); RODRIGO GODIM DE AZEVEDO(7); - CEPEL(1);CEPEL(2);CEPEL(3);CEPEL(4);UFF(5);CEPEL(6);CEPEL(7);

Neste artigo, será abordado o desenvolvimento do novo programa computacional ANAHVDC para simulação de múltiplos elos de corrente contínua considerando transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos. Serão apresentadas as principais características do programa em sua atual fase de desenvolvimento, principais aplicações vislumbradas, as previsões de desenvolvimentos futuros, além de resultados de simulação, validações e testes de desempenho.

Perguntas e respostas:

A) Os autores vislumbram a expansão da ferramenta para ser utilizada em estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra, por exemplo, energização e religamento de linhas de transmissão (monopolar e tripolar), energização de transformadores, rejeição de carga?

O foco do AnaHVDC é o desempenho dinâmico de elos HVDC considerando os transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos simultaneamente com uma modelagem completa do SIN incluindo todo o sistema de controle. Dentro deste objetivo está sendo realizada a modelagem trifásica do sistema com vistas à simulação de curto-circuito fase-terra, já havendo resultados preliminares coincidentes com o ATP e PSCAD. Inicialmente não havia previsão de inclusão no AnaHVDC de modelos de para-raios ou magnetização de transformadores, uma vez que as tensões em eventos de curto-circuito ficariam na maior parte da simulação abaixo do nível suficiente para entrar na faixa de operação destas não linearidades. No entanto considerando religamentos, seja monopolar ou tripolar, estas não linearidades passam a ter efeito no transitório após o religamento e seria desejável considerar a simulação do ciclo completo de religamento, uma vez que a dinâmica do sistema e dos múltiplos elos HVDC serão influenciadas por este tipo de transitório. Estudou-se então o problema e verificou-se que é perfeitamente possível a modelagem da magnetização de transformadores, para-raios, dispersão de polos de disjuntores, abertura dos disjuntores na passagem da corrente por zero ou com alguma margem definida. No entanto, estes novos recursos do programa não foram contemplados no texto original do artigo. Estes modelos permitirão então a aplicação do AnaHVDC também em estudos de transitórios eletromagnéticos de manobra, de forma geral. A única restrição neste caso é a não consideração do desbalanço inicial de uma rede e a presença de harmônicos não característicos. Embora fundamentalmente a metodologia utilizada no AnaHVDC não seja restritiva, para manter a facilidade de aproveitar o ponto de operação do ANAREDE e otimizar o desempenho computacional, necessários para a análise do SIN completo, considera-se a rede antes do distúrbio como equilibrada.

B) Do ponto de vista de sistemas de controle as tensões e correntes trifásicas dos links de HVDC, equipamentos FACTS e mesmo geradores e compensadores síncronos, são convertidos de valores trifásicos para um sinal CC. Esta conversão não é igual para todos equipamentos. Alguns utilizam transformações alfa/beta, dq, o mesmo valor de pico quadrático. Desta forma, como os autores pretendem fazer a conversão da medição CA/CC que no programa ANATEM não é necessária pelo fato do programa utilizar internamente cálculo em pu ao invés de grandezas físicas? Seria possível automatizar este processo, após a leitura dos dados dos controles do ANATEM?

A metodologia de fasores dinâmicos não impede o uso de valores instantâneos quando conveniente. É perfeitamente possível a utilização de conversões de valores instantâneos para fasoriais, como usualmente utilizado nos sistemas de controle no ATP ou PSCAD, de diferentes formas, utilizando diferentes equacionamentos. Os autores acreditam que na modelagem do sistema de controle possam ser disponibilizados diferentes macroblocos para medição, da mesma forma como é feito no PSCAD que podem ser inseridos no formato da entrada de dados dos Controladores Definidos pelo Usuário (CDU) dos programas ANATEM e PacDyn. Na modelagem eletromecânica, estes macroblocos podem ser tratados de forma simplificada.

C) As comparações mostradas no artigo são bastante concordantes, mesmo quando só se consideram os fasores relativos à fundamental. Como será feita a modelagem dos fasores das componentes harmônicas? Será considerado até uma determinada ordem harmônica? Será possível especificar as componentes desejadas pelo usuário? Favor comentar este processo de inclusão dos fasores dinâmicos das harmônicas.

No algoritmo de solução do AnaHVDC é utilizado um processo iterativo alternado onde a rede de transmissão linear (linhas, transformadores, compensação reativa, etc) e os modelos de equipamentos não lineares (máquinas, FACTS e elos HVDC com o sistema de controle) são resolvidos um em sequência ao outro, até a convergência. Neste processo, a diferença é que ao considerar harmônicos, haverá várias redes de transmissão a serem resolvidas, uma para cada harmônico. Portanto, a consideração de harmônicos traz um aumento da carga computacional, mas que é perfeitamente paralelizável. Na premissa de sistema inicialmente equilibrado, pode-se considerar apenas os harmônicos característicos, tornando o programa mais eficiente. Pretende-se deixar a carga do usuário a escolha da ordem harmônica máxima a ser considerada na simulação, embora no futuro possa se buscar formas de automatizar esta escolha, da mesma forma que no caso do passo de integração.

#### 3.2 - SIMULAÇÃO DE CONVERSORES MMC EM PROGRAMAS DE ESTABILIDADE ELETROMECÂNICA

MILON PEREIRA DA SILVA(1); FABRÍCIO LUCAS LIRIO(2); SERGIO GOMES JUNIOR(1); - UFF(1);CEPEL(2);

Este artigo descreve dois modelos para representação de Conversores Modulares Multinível (MMC) em simulações de transitórios. O primeiro modelo apresentado é voltado para simulação de transitórios eletromagnéticos (Modelagem I) e baseia-se na partição da matriz de admitância do sistema e na obtenção de um equivalente de Thévenin variante no tempo para a parte do MMC. Este trabalho apresenta também uma modelagem do MMC utilizando fasores dinâmicos (Modelagem II) voltada para simulação de transitórios eletromecânicos. Este modelo é baseado em um modelo MMC não linear inicialmente proposto em coordenadas dq. O modelo proposto neste artigo faz uso de fasores dinâmicos de sequência positiva considerando as componentes contínuas, de primeiro e segundo harmônicos dos fasores. A eficácia das duas representações (modelagem I e II) foi demonstrada pela simulação pela comparação de resultados de um sistema de transmissão HVDC baseado em VSC-MMC.

Perguntas e respostas:

A) Os autores poderiam comentar o porquê da limitação até o fasor dinâmico de segundo harmônico? Seria apenas para garantir que as correntes de circulação de segunda ordem harmônica sejam bem representadas?

As correntes de circulação são compostas principalmente por componentes harmônicas de segunda ordem, logo a representação do fasor dinâmico nesta frequência é fundamental para que o comportamento dinâmico do equipamento. As demais componentes harmônicas podem ser desprezadas sem prejudicar a aplicação do modelo em estudos de estabilidade eletromecânica, conforme observado na literatura técnica, como em Dragan Jovic, "Circulating current suppression control dynamics and impact on MMC converter dynamics".

B) Como ficaria a concordância das modelagens se somente a componente dc e a fundamental fossem modeladas no matlab quando comparada com a modelagem no PSCAD?

Algumas variáveis do modelo, como a corrente circulante, apresentam em regime permanente componentes de segundo harmônico significativas. Se o fasor dinâmico deste harmônico não é incluído na modelagem, a dinâmica devido à interação deste com as componentes harmônicas das demais variáveis não ocorre, o que resulta na redução do nível de concordância quando comparada com a modelagem PSCAD.

C) Quais as dificuldades de se estender a modelagem de fasores dinâmicos a componentes harmônicas de ordem mais elevada?

Inicialmente podemos identificar algumas dificuldades em realizar a modelagem de fasores dinâmicos para componentes harmônicas de ordem mais elevada, destacamos: - Para cada componente harmônica incluída na modelagem é necessário a inclusão de duas equações (componentes real e imaginária do fasor dinâmico), aumentando as dimensões das matrizes utilizadas no processo de solução. - Por consequência do aumento das dimensões das matrizes, o tempo necessário para simulação também sofreria um acréscimo. - Como a multiplicação de variáveis no domínio do tempo implica na interação entre harmônicos de frequência diferentes, o aumento do número de harmônicos considerados necessita da expansão da regra de formação da interação harmônica, que no artigo envolve apenas o valor DC, a frequência fundamental e o segundo harmônico. O trecho da matriz que representa a interação é uma matriz cheia (reduzida esparsidade), o que também contribui para o aumento do esforço computacional de solução. Obviamente, o aumento da quantidade de harmônicos na representação por fasores dinâmicos proporciona aumento da precisão. No entanto, o número de harmônicos utilizado no artigo é o ideal, considerando as aplicações do modelo e o esforço computacional necessário.

### 3.3 - Desenvolvimento e Validação do Modelo do Bipolo 1 do Sistema de Transmissão HVDC de Belo Monte para o Programa ANATEM

FERNANDO CATTAN JUSAN(1); VENILTON RODRIGUES DE OLIVEIRA(2); SAULO JOSÉ DA SILVA FILHO(2); EDUARDO DE MEDEIROS BRANDI(3); - FCE(1);JE(2);BMTE(3);

Este informe apresenta o desenvolvimento e os resultados de validação de um modelo de simulação digital do sistema de controle e proteção DC do Bipolo 1 do sistema de transmissão HVDC de Belo Monte (Xingu - Estreito) para o programa ANATEM, do CEPEL. O modelo foi desenvolvido através de "Controles Definidos pelo Usuário" (CDU), organizados de forma hierárquica e modular, e possui elevado grau de detalhamento e automatismo. Com isso, praticamente elimina-se a necessidade de intervenções manuais pelo usuário para representar ações que são executadas automaticamente pelo sistema de controle. O modelo foi desenvolvido com base em um modelo conceitual desenvolvido pelo fabricante para o programa PSCAD. Algumas funções não presentes no modelo PSCAD foram desenvolvidas a partir de relatórios técnicos e descritivos funcionais disponibilizados pelo fabricante. Os testes de validação demonstram a precisão do modelo e sua aplicabilidade em estudos de planejamento e de operação do sistema.

Perguntas e respostas:

A) Foi comentado que o modelo ANATEM foi desenvolvido a partir de um modelo conceitual para o programa PSCAD. Como esse modelo PSCAD conceitual foi validado com o comportamento real do equipamento em campo?

O modelo PSCAD conceitual foi validado tomando como referência um modelo PSCAD detalhado desenvolvido pelo fabricante. O modelo detalhado, por sua vez, foi validado com base em testes realizados no RTDS utilizando réplicas do sistema de controle e proteção e frente a testes reais no campo.

B) Em relação as funções de chaveamento de filtros AC Filter Control, no caso de uma ação rápida de runup do Bipolo demanda, por exemplo, devido ao bloqueio de um dos polos do outro Bipolo, o runup pode não ser realizado em função de não poderem ser conectados mais filtros devido a ter sido atingida a máxima tensão para conexão de filtros estabelecida pelo fabricante como de 535 kV, abaixo portanto, da máxima tensão operativa de 550 kV. Vale ressaltar que o aumento da potência CC transmitida reduz naturalmente a tensão CA. Qual seria então a proposta do fabricante para solucionar esse problema e realizar o runup, conforme edital, reduzindo assim o impacto sistêmico do distúrbio.

Este assunto está no momento sendo discutido entre BMTE e ONS para se encontrar uma solução apropriada e não tem relação direta com este informe. Do ponto de vista do modelo desenvolvido, a função VLC é a responsável pela inibição da conexão de filtros a partir de um determinado nível de tensão CA e está representada no modelo. Por outro lado, o limite de corrente DC devido à insuficiência de filtragem não está modelado. Assim, caso a situação descrita na pergunta seja verificada durante a simulação, o modelo irá detectar a tensão elevada e não irá conectar mais filtros, uma vez que a função VLC é hierarquicamente superior às funções HPC e U-control/Q-control. Mas o Runup será executado normalmente. Se a tensão cair abaixo do nível ?connect inhibit? após o Runup, os filtros poderão então ser conectados normalmente. Ao realizar um estudo, o usuário deve ter conhecimento desta limitação do modelo, a qual está devidamente descrita no Manual do Usuário.

C) Em relação aos SEPs implantados por meio de CDU, como será feita a migração dos mesmos para a XRTE (Bipolo 2 de Belo Monte) e modelo do Bipolo 2 nos programas ANATEM, além os ambientes PSCAD/RSCAD/RTDS, uma vez que a mesma que é responsável, com a entrada em operação do Bipolo 2, por esses esquemas?

O modelo do SEP desenvolvido e apresentado neste informe se aplica apenas à operação do Bipolo 1, em conformidade com a descrição apresentada nos estudos pré-operacionais desenvolvidos pelo ONS. Com a entrada do Bipolo 2, as funções originalmente realizadas pelo SEP do Bipolo 1 passarão a ser feitas pelo Controle Mestre do Bipolo 2, considerando as devidas adaptações e inclusão de novas funções. Da mesma forma, os modelos em CDU referentes às ações do SEP deverão ser desenvolvidos pela XRTE, que poderá aproveitar ou não os modelos existentes.

### 3.4 - Utilização de Reator de Bloqueio Série em Compensadores Estáticos de Potência Reativa: Uma Nova Abordagem para Redução de Perdas e Requisitos de Filtragem

MANFREDO CORREIA LIMA(1); - CHESF(1);

A operação de Compensadores Estáticos de Potência Reativa (CEs) produz harmônicos devido ao controle da sua corrente, que depende do ângulo de disparo das suas válvulas de tiristores. No caso apresentado neste Informe Técnico (IT), o CE Tauá (-45 a 90 Mvar, 230kV), tais harmônicos são reduzidos em parte através da instalação de um reator de bloqueio série no seu setor de média tensão. Utilizando-se uma modelagem detalhada desenvolvida em ATP/TACS, são apresentadas simulações de aplicação de faltas nas proximidades do CE Tauá, efetuando-se a comparação entre tais resultados e testes Hardware-in-the-Loop (HIL) realizados em RTDS, ressaltando-se a correspondência entre ambos. A eficácia do reator de bloqueio série para redução de harmônicos e perdas do compensador é também destacada.

Perguntas e respostas:

A) O autor menciona ressonâncias entre o SVC Tauá e a rede elétrica relacionadas às harmônicas de ordem 11, 13 e superiores. Tais ressonâncias não são comumente encontradas em sistemas de transmissão e pode denotar uma modelagem da rede inapropriada. Dito isto, como a rede de transmissão foi modelada em termos de estudos de Z(w)? Foram representados a variação dos parâmetros com a frequência?

A determinação das impedâncias harmônicas em função da frequência Z(w) para o dimensionamento dos elementos do circuito principal do SVC Tauá foi realizada com base nos seguintes procedimentos e critérios: 1-Configurações da rede elétrica utilizadas: cargas leve, média e pesada; 2-Anos horizonte considerados: 2014, 2015 e 2016, obtidos através do site do ONS; 3-Parâmetros dos elementos da rede (linhas, trafos e geradores) corrigidos com a expressão  $FC = a \cdot h^{(\exp \alpha)} b \cdot h^{(\exp \beta)}$ , onde os parâmetros a, b, c, alpha e beta são aqueles sugeridos pelo CEPEL para utilização do Programa HARMZS; 4-Todas as cargas consideradas desligadas; 5-Consideradas a condição normal de operação da rede elétrica, com seus n elementos disponíveis e a condição (n-1) de indisponibilidade, levando em conta até a quarta vizinhança da SE Tauá 230kV, resultando em um total de 1498 contingências; 6-Foram determinados os LGs formados por setores circulares definidos a partir de raios e ângulos máximos e mínimos das impedâncias harmônicas vistas do PAC (SE Tauá 230kV); 7-Impedâncias harmônicas calculadas considerando 60h - 5Hz, 60h e 60h 5Hz, sendo h a ordem harmônica, compreendida entre 2 e 50;

B) Quando o autor menciona que as perdas foram reduzidas devido ao acréscimo de reator série entre o TCR e os TSCs, a comparação feita seria com o SVC com um filtro adicional de harmônicos? Porque na realidade o reator série passa a dissipar mais energia, para dissintonizar/afastar o TCR da rede elétrica. Favor esclarecer.

As perdas totais calculadas para o SVC Tauá considerando a utilização do reator de bloqueio série são apresentadas na Tabela 1 do IT, destacando-se o atendimento aos limites da SPEC. Foi constatado que a utilização da solução baseada em filtros shunt de ordem superior ou igual à décima primeira para o atendimento aos requisitos de harmonic performance e harmonic ratings provocaria elevação das perdas do SVC, inviabilizando o atendimento aos critérios da SPEC, além de elevar os custos do projeto e produzir redução nos índices de disponibilidade, devido à elevação do número de componentes. Desta forma, a utilização do reator de bloqueio série juntamente com filtros shunt de quinta e sétima harmônicas apresentou-se como a solução mais adequada para o projeto do SVC Tauá.

C) A literatura internacional aponta como uma operação difícil para relações potência de curto-circuito da rede no PAC/potência capacitiva do SVC (QSV/SCC) menores que 3, sendo viável algo entre 2,5 e 3, com problemas nos controles. O autor informa que a relação QSV/SCC do SVC Tauá em condição degradada pode atingir 2 (ano de 2015, rede degradada), ou seja, a potência capacitiva do SVC é metade da potência de curto. Como seria tal operação na prática, pois em termos aproximados uma excursão na faixa capacitiva poderia levar uma variação de tensão no PAC de 50%?

Nas estimativas de SCR mencionadas no IT foi utilizada a faixa completa de potência reativa do SVC Tauá (90 45 = 135Mvar). Considerando os níveis de curto máximo (725MVA) e mínimo (267MVA) que constam na SPEC, tem-se valores de SCR da ordem de 5,37 (725MVA) e 1,97 (267MVA). Por outro lado, a definição dos valores máximo e mínimo de ganho aplicados pelo otimizador de ganho (KGC) foi feita conforme a seguir: KGC máximo = (SCL máximo / Mvar capacitivo do SVC) = 725/90 = 8,0566 pu KGC mínimo = (SCL mínimo / Mvar capacitivo do SVC) = 267/90 = 2,9667 pu A esta faixa de ganhos é aplicado um ganho fixo de 0,36 para a malha PI resultando na seguinte faixa de ganhos para a malha principal de controle do SVC Tauá: Ganho máximo = 8,0566 x 0,36 = 2,9004 pu Ganho mínimo = 2,9667 x 0,36 = 1,0680 pu Estes valores são de forma segura inferiores aos obtidos considerando-se a faixa total de 135Mvar do SVC Tauá (5,37 ? 725MVA) e (1,97 ? 267MVA), o que em princípio produz a desejada operação estável ao referido equipamento. Durante os FAT, foram realizados testes em RTDS de resposta ao degra do SVC Tauá, considerando os níveis máximo e mínimo de curto-circuito no PAC. Os resultados obtidos atestam operação estável com o atendimento aos parâmetros de performance especificados (PO ? 30%, TR ? 33ms, TS ? 100ms). Tais resultados foram ratificados nos testes de aplicação de grandes perturbações (faltas equilibradas e desequilibradas na área de influência do SVC Tauá).

### 3.5 - STATCOM Híbrido - Alternativa Viável aos Compensadores Estáticos no Cenário Brasileiro

MARCIO MAGALHAES DE OLIVEIRA(1); MIKAEL HALONEN(1); - ABB AB(1);

Este trabalho tem por objetivo mostrar a possibilidade da topologia denominada STATCOM Híbrido, membro da família FACTS, combinando a configuração estado-da-arte do conversor de tensão de um STATCOM e ramos tradicionalmente conhecidas de um compensador estático. Este compensador híbrido pode cumprir com os requisitos técnicos incluídos no Anexo 6 dos editais da ANEEL, normalmente especificados para compensadores estáticos, podendo ser uma alternativa a estes. O STATCOM Híbrido apresenta baixa emissão de harmônicos, baixas perdas em 0 Mvar, alta disponibilidade e outros aspectos técnicos vantajosos discutidos ao longo do artigo.

Perguntas e respostas:

A) Os autores afirmam que há uma penetração cada vez maior da tecnologia STATCOM em termos internacionais, utilizando IGBT ou IGCT. Como se encontra o estado da arte de STATCOM baseado em IGCT? Há uma experiência operativa que possa indicar a substituição do IGBT por IGCT? Quais seriam os benefícios?

Desde a primeira aplicação comercial do dispositivo IGCT em 1997, mais de 250 000 unidades IGCT foram instaladas pela ABB. A maioria ainda opera em aplicações exigentes e críticas para a manutenção de sua disponibilidade e confiabilidade, como: - acionamentos de motores em média tensão - conversores de frequência que conectam o sistema

de alimentação de ferrovias à rede - conversores de frequência em aplicações de energia eólica - STATCOM baseados no conversor de três níveis ?double-twin? Como a frequência de comutação de cada semicondutor é reduzida em um conversor multinível (MMC), o IGCT torna-se adequado para seu uso em STATCOM's baseados em MMC. Em particular, o desenvolvimento do IGCT de condução reversa (RC-IGCT) é adequado para aplicações STATCOM baseados em MMC. Os desenvolvimentos mais recentes da tecnologia de semicondutores IGCT podem ser encontrados em [https://new.abb.com/semiconductors/integrated-gate-commutated-thyristors-\(igct\)](https://new.abb.com/semiconductors/integrated-gate-commutated-thyristors-(igct)). Não há indicação de que o IGCT irá substituir os IGBTs em todas as aplicações, mas como o IGCT tem provado ser um dispositivo confiável, a escolha da tecnologia de semicondutores em um STATCOM / STATCOM Híbrido baseados em MMC deve ser deixada ao fornecedor do equipamento, de acordo com seus critérios de otimização para uma determinada faixa de potência reativa e aplicação. As vantagens técnicas do IGCT em relação aos IGBTs industriais são: ? Menores perdas de condução (semelhante aos tiristores) ? Alta capacidade de corrente de pico ? Perdas insignificantes de ?turn-on? devido à limitação externa de di/dt ? Desenho à prova de explosão devido ao circuito limitador di/dt, desenho robusto do encapsulamento e circuito de ?by-pass? ? Modo de falha ao curto-circuito (?Short-Circuit Failure Mode?: SCFM) garantido, tal qual um tiristor.

B) Há países com territórios grandes e, portanto, rede elétrica extensas como as redes brasileiras, por exemplo: China e Índia. Os STATCOMs usados nestes países são especificados com um ciclo de sobrecarga indutiva severa com a preconizada pelos Procedimentos de Rede do ONS, isto é, sobretensões de 1,8 pu por 50 ms e 1,4 ms por 200 ms, 1,3 pu por 1 s, etc? O fabricante já forneceu algum STATCOM híbrido com um ciclo de sobrecarga compatível com o acima citado? Qual a experiência operativa?

Algumas especificações de concessionárias da Índia exigem uma capacidade de suportar uma sobretensão de 2,0 p.u. por 1-2 ciclos. O Canadá é outro país com longas linhas de transmissão de alta tensão contendo capacitores em série, reatores de linha e derivação que podem resultar em superposição de frequências harmônicas à fundamental, levando a severos requisitos de sobretensão. Na Europa e nos EUA, os requisitos são menos severos (no máximo 1,4 - 1,5 p.u.) e não temos observado problemas operacionais associados a sobretensões nestes sistemas. Em nossa opinião, a especificação técnica deve fornecer valores realistas operativos do sistema de potência que devam ser cumpridos pela solução técnica do compensador e não o contrário, ou seja, a tecnologia do compensador não deve direcionar os requisitos sistêmicos (por exemplo, critérios de sub- e sobretensões, desempenho harmônico e tempo de resposta) e operativos (por exemplo perdas e disponibilidade). Além disso, a especificação técnica do compensador deve fornecer as seguintes informações sobre o ciclo de sobretensão: - Ser claro quanto ao fato de o requisito ser aplicável considerando os módulos semicondutores redundantes fora de serviço e que o conversor de tensão deve operar com capacidade indutiva total (nenhum bloqueio do conversor permitido) durante o ciclo. - O ponto de operação inicial do compensador antes do início do ciclo de sobretensão deve ser informado. Deve-se enfatizar que a instalação de para-raios para reduzir as sobretensões no lado MV do STATCOM / STATCOM Híbrido deve ser cuidadosamente avaliada, pois requer coordenação com outros para-raios (por exemplo, para-raios da válvula do TSC). Além disso, se o para-raios conduzir quando submetido a sobretensões, o mesmo causará distorções na forma de onda de tensão no barramento de média tensão, as quais deverão ser toleradas pelo sistema de controle e disparo da válvula. A situação é mais crítica para um STATCOM do que para um SVC (ou STATCOM Híbrido com uma rama TSR), quando o disparo protetivo da válvula TCR (ou TSR) pode ser utilizado eliminando-se estresses de bloqueio à alta tensão. Do ponto de vista do projeto do conversor de tensão, uma sobretensão temporária pode carregar ainda mais os capacitores CC distribuídos nos diversos módulos do conversor através dos diodos de ?free-wheeling?. Dependendo do projeto, a tensão CC pode aumentar além da capacidade de tensão da Área Operacional Segura (SOA) do IGBT / IGCT, o que resultaria em um disparo (?trip?) do compensador por sobretensão CC. Um STATCOM Híbrido (-250 / 400 Mvar em 400 kV) com requisito de suportabilidade à sobretensão de 1,4 p.u. por 2 segundos encontra-se em fase de comissionamento. Os testes de aceitação de fábrica do sistema de controle em um simulador em tempo real mostraram que estratégias de controle avançadas, por exemplo, bloqueio rápido do TSC e ações rápidas no controle do conversor, são necessárias para o STATCOM Híbrido operar durante a sobretensão, ajudando o sistema com máxima absorção de potência reativa possível.

C) No ciclo de sobrecarga citado as sobretensões de 1,8 pu durante 50 ms/1,4 pu por 200ms deverão ser suportadas pelo conversor VSC. Isto deverá aumentar o custo do conversor VSC quando comparado com aplicações que somente requerem 1,3 pu por 1 s. Qual o aumento de preço em média de um conversor VSC especificado para os Procedimentos de Rede do ONS e para uma sobretensão de 1,3 pu por 1 s? Qual a diferença de preços entre um SVC e um STATCOM baseado em MMC, em média?

É fato que um número maior de módulos (pontes H) conectados em série é necessário a princípio para garantir a suportabilidade do conversor a uma sobretensão de 1,8 p.u. No entanto, o aumento dos custos deve ser ponderado para todo o compensador. Por exemplo, uma reatância mais alta do transformador (> 20%) ajudaria a reduzir a sobretensão observada pelo conversor quando operado em modo indutivo e, portanto, o número de módulos adicionais no projeto do conversor VSC poderia ser reduzido. Por outro lado, esta maior reatância aumentaria os custos do transformador e as perdas em carga (problemáticas se as perdas forem capitalizadas). Um STATCOM Híbrido contendo uma rama TSR fornecendo um aumento na faixa indutiva em condução plena da válvula de tiristores ajudaria a reduzir a sobretensão e por conseguinte o impacto da mesma no conversor seria menor. A diferença de preço entre um STATCOM e um SVC dependerá de vários fatores, sem esquecer que o STATCOM é um compensador simétrico. Nas especificações da ANEEL, duas ramos TCR e duas ramos TSC são requeridas como parte da configuração mínima do SVC. Como a maioria dos SVCs brasileiros são assimétricos e com maior faixa capacitiva, estes compensadores poderiam ser certamente construídos como STATCOMs Híbridos com um VSC e um TSC. Este desenho poderia atender a todos os requisitos técnicos do edital e alcançar altos índices de disponibilidade e confiabilidade como SVCs convencionais. Considerando as vantagens do STATCOM de uma menor área ocupada e menores custos civis e de instalação, os custos totais dos STATCOMs / STATCOMs Híbridos baseados em MMC atingiriam níveis semelhantes ao de um SVC. Os custos operacionais globais mais baixos do STATCOM ao longo de seu ciclo de vida são mais visíveis, ainda mais considerando a capitalização de perdas em baixa potência (em torno de 0 Mvar), o que é muito comum em todo o mundo, mas não é aplicado na especificação da ANEEL. Como o STATCOM possui menos componentes que um SVC de alta potência com muitas ramos tiristorizadas e filtros harmônicos, sua manutenção é mais simples. No mercado brasileiro, a maior vantagem do STATCOM/STATCOM Híbrido seria sua alta robustez em relação aos setores de impedância harmônica da rede para diferentes anos, cenários e contingências, não apenas do ponto de vista de desempenho harmônico, mas também considerando o fato que as harmônicas de fundo (?background harmonics?) têm um menor impacto no desenho do STATCOM quando comparado ao SVC.

### 3.6 - Simulação e análise linear em alta frequência de sistemas contendo elos HVDC.

THIAGO JOSE MASSERAN ANTUNES PARREIRAS(1); SERGIO GOMES JUNIOR(1); RODRIGO GODIM DE AZEVEDO(2); - CEPTEL(1);UFF(2);

Neste artigo, será apresentado o desenvolvimento de um modelo linearizado de Elos HVDC que considera dinâmicas de altas frequências e sua implementação no programa computacional PacDyn, desenvolvido pelo CEPTEL. O modelo foi elaborado através da utilização dos conceitos de funções de chaveamento e de fasores dinâmicos, que vêm sendo usados na modelagem de equipamentos FACTS. Além disso, serão realizados estudos de sistemas, contendo esses equipamentos, no PacDyn, visando a mitigação de possíveis problemas de oscilação entre os polos de Elos HVDC. Também será realizada uma validação desse modelo através de comparações entre resultados obtidos com os programas PacDyn e PSCAD.

Perguntas e respostas:

A) Os autores indicam no paper que a modelagem no PacDyn do controle do elo foi realizada utilizando as funções de chaveamento e fasor dinâmico, considerando somente a componente fundamental. Qual seriam os obstáculos técnicos para estender esta análise a harmônicos de mais alta ordem?

Os autores consideraram apenas a componente fundamental dos fasores dinâmicos utilizados na modelagem de elos HVDC por uma questão de simplicidade de desenvolvimento e de implementação computacional, mas não há obstáculos críticos para que se estenda esse modelo de tal forma que se possa considerar componentes harmônicas na modelagem desse tipo de equipamento. Para isso, é necessária uma implementação computacional um pouco mais complexa, que terá que ser realizada de forma genérica para que se possa considerar qualquer ordem harmônica. Até o momento, os autores continuaram usando somente a componente fundamental, porque esse modelo apresentou resultados bastante interessantes. Por isso, os autores entenderam que não era necessário aumentar a complexidade do modelo de elo HVDC, uma vez que esse modelo simplificado apresentou bons resultados. A única dificuldade existente para considerar harmônicos de ordem mais alta é a forma como o PacDyn modela a rede elétrica em si, que atualmente só é modelada através de sua componente fundamental. Para mudar essa modelagem, seria necessária uma mudança profunda no código do programa PacDyn, para que se pudesse considerar harmônicos na rede elétrica. Mas a consideração de harmônicos no modelo desenvolvido para elos HVDC é possível de ser realizada sem maiores complicações.

B) A tabela 4 mostra modos de oscilação (relacionadas à PLL) com frequências entre 160 e 450 Hz e fator de amortecimento inferiores a 5%. Seria possível melhorar o projeto do controle/sistema de sincronização e disparo para aumentar os amortecimentos (>5% por exemplo)? Favor comentar.

Por se tratar de modos de oscilação relacionados à dinâmica dos PLLs utilizados nos conversores do elo HVDC do sistema, esse problema de baixo amortecimento poderia ser solucionado através do ajuste dos ganhos proporcional e integral dos próprios PLLs. Esse problema não foi analisado no artigo, porque o objetivo dos autores era mostrar as diferenças existentes entre as modelagens tradicional e de alta frequência, para deixar clara a importância de se utilizar o modelo que foi desenvolvido no trabalho. Nesse artigo, focou-se principalmente nos ajustes dos sistemas de controle dos retificadores do elo HVDC, que eram responsáveis por controlar a corrente CC desse equipamento. Deve ser notado que, apesar do baixo amortecimento apresentado, esses modos da dinâmica dos PLLs não apresentavam uma alta observabilidade na corrente CC do elo HVDC e, por isso, esse problema não foi explorado nesse trabalho.

C) Como os autores veem à extensão do presente trabalho aos conversores fonte de tensão (VSC) para conversores HVDC do tipo MMC?

A utilização de conversores fonte de corrente (LCC) foi realizada por se tratar de um tipo de conversor mais tradicional, com maior utilização no SIN. Entretanto, a metodologia utilizada pelos autores no trabalho que originou esse artigo poderia ser aproveitada para a modelagem de elos HVDC que utilizem conversores do tipo MMC (conversores VSC). Para isso, bastaria achar as funções de chaveamento que representem bem as relações entre as tensões e correntes CA e CC em conversores VSC e realizar a modelagem matemática dessas funções de chaveamento através da utilização de fasores dinâmicos. Então, a modelagem de conversores VSC certamente é uma continuação bastante plausível para o trabalho que foi apresentado nesse artigo.

### 3.7 - DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIVALENTE DINÂMICO NO PSCAD E RTDS PARA OS ESTUDOS DO BIPOLO 2 DE BELO MONTE

VENILTON RODRIGUES DE OLIVEIRA(1); SAULO JOSÉ DA SILVA FILHO(1); MARCELO MENDONÇA GONÇALVES(1); VICTOR ARGEMIL TEIXEIRA(2); - JE(1);SGBH(2);

O Bipolo 2 de Belo Monte faz parte de uma solução proposta pela EPF para a ampliação da interconexão Norte-Sul no sistema interligado brasileiro, escoamento da usina de Belo Monte e reforços no Sistema Interligado Nacional (SIN) que consiste em dois polos CCAT trabalhando em ±800 kV, 4000 MW, para conectar a subestação Xingu 500 kV e Terminal Rio 500 kV. Entretanto, a rede elétrica projetada para a entrada em operação não foi concluída a tempo, com isto, a avaliação de desempenho dinâmico do Bipolo 2 de Belo Monte ficou comprometida. Sendo necessário desenvolver um novo sistema equivalente para os estudos dinâmicos no PSCAD e também no RTDS com a rede de operação para a entrada deste equipamento. Portanto, este artigo tem por objetivo apresentar as etapas do desenvolvimento do modelo da rede elétrica equivalente para os estudos de desempenho dinâmico do Bipolo 2 de Belo Monte para o PSCAD e RTDS.

Perguntas e respostas:

A) Qual o critério utilizado para a definição das redes elétricas retidas das Figura 1 e 2?

A rede retida do sistema seguiu o critério definido para os estudos de transitório de no mínimo duas barras a partir da barra de conexão dos Elos CCAT. No sistema Norte foi utilizado o critério de no mínimo 300 km e no caso do sistema Sudeste foi representada uma rede para incluir todos os Elos CCAT desta região. Também foi utilizada como critério a máxima capacidade de representação do RTDS para a definição da rede retida.

B) A tabela 1 apresenta a comparação dos equivalentes em termos de potência de curto-circuito calculadas nas diferentes ferramentas. Na coluna ANAFAS, as correntes apresentadas foram calculadas com a rede completa ou com o equivalente calculado? Caso tenha o equivalente tenha sido utilizado, favor comentar, pois a comparação fidedigna deveria ter sido com a rede completa no ANAFAS.

Pensando nas limitações do RTDS quanto aos números de ramos, foi definido em conjunto com o ONS e a Transmissora a premissa de eliminar as impedâncias de transferências (que surgem no processo de cálculo da rede equivalente) com valor maior que 50%. Fazendo isso, a rede equivalente no ANAFAS, agora referência para as redes modeladas no PSCAD e RTDS, já apresenta um percentual de 5% nas correntes de curto-circuito em relação ao sistema completo. Com relação as tabelas de comparação foi utilizado o caso do sistema equivalente como referência para a comparação com os valores do PSCAD e do RTDS. Ressalta-se que as diferenças das correntes de curto-circuito se justificam devido ao fato do programa ANAFAS estipular em todas as barras os valores de tensão igual a 1 pu e ângulo 0, algo que não é simples fazer no programa PSCAD/RTDS, que apresenta variação de tensão (efeito capacitivo) e ângulo entre as barras do sistema.

C) Qual o critério utilizado para definir os geradores modelados dinamicamente na área retida?

Todos os geradores da rede retida foram modelados e validados com o ANATEM, sendo modelado no PSCAD e no RTDS o gerador, o RT, os limitadores, o PSS e o RV. Sendo eles: UHE Belo Monte; UHE Tucuruí 1 e 2; UTE Angra 1 e 2; UTE Baixada Fluminense; UTE Gov. Leonel Brizola (TemoRio); UTE Mario Lago; UTE Norte Fluminense; UHE Furnas; UHE Mascarenhas de Moraes; CS Grajaú e CS Ibiúna. Também foram modeladas máquinas equivalentes em barras próximas aos Elos CCAT para manter a dinâmica do sistema equivalente próxima ao sistema completo.

### 3.8 - Utilização de Ferramenta para Cálculo Automático de Margem de Transmissão em Estudos para Leilões de Energia

RENAN PINTO FERNANDES(1); PAULA OLIVEIRA LA GATTA(2); FLAVIO RODRIGO DE MIRANDA ALVES(3); LEONARDO PINTO DE ALMEIDA(4); ROSEANE DE SOUZA NUNES(5); ANDRE BIANCO(5); ELIBIA TERESA MOREIRA COLAÇO(5); ELDER GERALDO SALES DE SANTANNA(5); ALEXANDRE DANTAS FONSECA DOS ANJOS(5); ADRIANO DE SOUZA(5); CLEBER JACUNIAK MAZON(5); - CEPEL(1);CEPEL(2);CEPEL(3);CEPEL(4);ONS(5);

A Margem de Transmissão (MT) é utilizada, desde 2013, pelo Ministério de Minas e Energia como um dos critérios de classificação de lances em Leilões de Energia. Em 2018, o CEPEL entregou ao Operador Nacional do Sistema a primeira versão de uma ferramenta de cálculo automático de MT, integrada ao programa Anarede. Este artigo apresenta os desenvolvimentos de uma etapa de pré-processamento dos dados de entrada e a utilização de contingências múltiplas de circuitos, recentemente incorporados à ferramenta e validados utilizando-se um caso real do sistema brasileiro referente ao Leilão A-4 2018 na região do estado de São Paulo.

Perguntas e respostas:

A) Poderiam os autores fornecer maiores detalhes sobre a possibilidade do emprego da computação paralela em ambiente Windows mencionada nas conclusões do artigo como uma possibilidade de trabalhos futuros relacionados à metodologia aqui apresentada?

A metodologia de cálculo de margem de transmissão apresenta diversas etapas independentes entre si, como por exemplo a aplicação das contingências, a etapa de cálculo de margem de barramento candidato para rede completa e as avaliações das permutações nas etapas de subárea e área. Assim, a metodologia apresenta grande potencial para emprego de computação paralela, o que poderia agilizar consideravelmente o cálculo. Quanto à utilização de estratégias de paralelização, poderia ser utilizada qualquer plataforma, Windows ou Linux. A referência à computação paralela em ambiente Windows decorre do fato de que essa é a plataforma de trabalho utilizada pelas equipes que trabalham no cálculo da margem de transmissão. Assim, é natural que qualquer esforço no sentido de utilizar processamento paralelo tenha esta plataforma como objetivo inicial.

B) Poderiam os autores fornecer maiores esclarecimentos relativos à definição do passo de geração e do passo de geração mínima no processo de avaliação das margens de transmissão?

O Passo de Geração e o Passo de Geração Mínima são utilizados para definir o quanto a potência ativa será incrementada ao longo do processo de cálculo da margem de transmissão. O valor do Passo de Geração define a velocidade com que a potência ativa será variada, de modo que passos maiores tornam o cálculo mais rápido, porém com maior possibilidade de problemas de não-convergência, devido à grande variação de ponto de operação a cada passo do processo. Já o Passo Mínimo representa o menor incremento de potência aceitável, durante o processo de divisão sucessiva de passo de geração, evitando que a metodologia execute um número excessivo de iterações com valores pequenos. Em geral, adota-se os valores de 50 MW, 20 MW ou 10 MW para o Passo de Geração e um passo mínimo de 10 MW ou 5 MW para o Passo Mínimo. Além disso, o Passo de Geração possui valor padrão de 20 MW e valor mínimo aceitável de 10 MW, enquanto que o Passo Mínimo possui valor padrão de 5 MW e valor mínimo aceitável de 1 MW. Os valores mínimos aceitáveis foram implementados para evitar um esforço computacional excessivo.

C) Os autores poderiam adiantar quais seriam potenciais novas melhorias e funcionalidades previstas para implementação na ferramenta apresentada para avaliação de margens de transmissão?

Dentre as potenciais melhorias e novas funcionalidades destacam-se: a implementação de uma faixa de potência reativa para as barras de geração pertencentes às subestações, permitindo uma maior flexibilidade na montagem das subestações; a implementação de um percentual de elevação de subestações independente para a etapa de subárea; implementação de plotagem automática de curvas de parâmetros do sistema (ex: curvas de tensão e fluxos) ao longo do processo de incremento de geração. Essa melhorias já estão implementadas na versão atual do programa. Além disso está em avaliação o aperfeiçoamento da metodologia, no sentido de implementar uma estratégia de definição automática de subárea e área a partir dos dados de barramentos candidatos definidos pelo usuário.

### 3.9 - AVALIAÇÃO DA REPRESENTAÇÃO DE CONVERSORES DE AEROGERADORES FULL CONVERTER EM ESTUDOS DE TRANSITÓRIOS ELETROMAGNÉTICOS

RODRIGO BEZERRA VALENÇA(1); ALVARO JOSE PESSOA RAMOS(1); JOSE SANDRO VALENÇA DO NASCIMENTO FILHO(1); DEIBSON JOSE GOMES DE SENA(1); CARMEM LUCIA TAVARES(1); RAISSA(1); - ANDESA(1);

A modelagem de parques eólicos em estudos de transitórios eletromagnéticos no sistema elétrico brasileiro apresenta grandes desafios devido a quantidade de parques eólicos em operação, notadamente na região Nordeste do Brasil onde existe uma grande concentração de parques eólicos em subestações próximas. Um exemplo disso é a região de João Câmara, onde na subestação de João Câmara III está prevista a conexão de 1,4GW de geração eólica. A maioria dos parques eólicos em operação na região Nordeste é composta por aerogeradores dos tipos DFIG e Full Converter. Os aerogeradores DFIG possuem o estator da máquina assíncrona, diretamente conectado a rede, e o rotor interligado a rede através de um conversor, que geralmente possui 30% da potência total do aerogerador. O aerogerador do tipo Full-converter se conecta a rede através de um conversor com a mesma potência nominal do gerador. A representação destes inúmeros conversores em estudos de transitórios eletromagnéticos se mostra um desafio adicional devido a grande quantidade de elementos necessários à representação das pontes IGBT, como chaves controladas e diodos em antiparalelo, além da representação da lógica PWM dentro modelo que ocasiona uma carga adicional de tempo de processamento. Assim, frequentemente são utilizados modelos agregados de parques eólicos, onde se utiliza apenas um aerogerador para reproduzir o desempenho de todo o parque eólico e um modelo equivalente da rede de média tensão com o objetivo de reduzir o esforço computacional da representação dos inúmeros circuitos de conexão na realização de estudos de transitórios eletromagnéticos. O presente trabalho se propõe a avaliar os impactos de diferentes representações dos conversores nas simulações de transitórios eletromagnéticos utilizando o programa ATP. Será utilizada a representação de um parque eólico composto por 14 aerogeradores Full-Converter em detalhes, ou seja, todos os conversores representados individualmente por suas chaves de comutação, pulsos, lógica PWM, barramento DC, Chopper e filtros AC, esta será considerada como representação BASE. Serão avaliadas duas representações alternativas para os conversores: A) Representação dos conversores por uma tensão controlada, que é exatamente a tensão de referência entregue pelo controle. Nesta representação, a tensão aplicada não irá possuir nenhum conteúdo harmônico por não ser resultado de comutação de chaves. Com esta representação, espera-se ter uma grande redução no tempo de processamento, mas sendo necessário avaliar o impacto desta representação nos resultados obtidos em relação à representação BASE. B) Representação dos conversores por tensão controlada, que é calculada através das equações matemáticas do conversor, onde os estados das chaves definem as tensões a serem aplicadas. Nesta representação, não existe um conversor representado detalhadamente no programa ATP, a tensão resultante tende a ser a mesma do conversor real, mas desprezando-se as quedas de tensão das chaves e tempo morto na simulação. Com esta representação espera-se aliar uma representação mais fiel a representação BASE, mas com tempo de processamento reduzido. A avaliação das simulações terá foco no impacto à rede básica e serão concentradas nos barramentos de 150kV e 31,5kV do parque eólico. Serão avaliadas tensões e correntes destes barramentos com o parque eólico gerando potência máxima. As simulações de energização de transformadores e afundamento de tensão serão realizadas para comparar as alternativas. Com o objetivo de realizar uma avaliação quantitativa das grandezas simuladas será utilizado o desvio médio quadrático como figura de mérito de avaliação das representações. O trabalho proposto poderá mostrar uma avaliação bastante ampla da representação de conversores em estudos de transitórios eletromagnéticos utilizando o programa ATP com foco nos impactos na rede básica.

Perguntas e respostas:

A) Poderiam os autores fornecer informações adicionais sobre como foi obtida a equação (1) do item 2.2?

A expressão é resultado da análise do circuito do conversor VSC com chaves ideais. A referida demonstração foi adicionada na apresentação do IT.

B) Foram avaliadas três formas de representação dos aerogeradores Full Converter: a primeira completa, denominada BASE e as duas outras, A e B, com as simplificações descritas no artigo. Pode-se aos autores, com base nos resultados apresentados, comentar em que situações seria mais vantajoso ou conveniente utilizar cada uma das representações apresentadas para os aerogeradores (Completa, A ou B)?

Diante das análises realizadas, a representação A utilizando fonte de tensão é adequada para simulações quando se deseja avaliar o impacto na rede básica. Caso se deseje avaliar o impacto de eventos na rede de média tensão, poderá ser necessário utilizar a representação B ou mesmo a BASE para se ter uma avaliação mais fiel.

C) As análises efetuadas para comparar a performance das representações utilizadas para os aerogeradores Full Converter foram feitas com base no cálculo do desvio médio quadrático dos sinais de tensão e corrente. Poderiam os autores comentar a respeito da influência de tais representações na resposta transitória dos referidos aerogeradores durante a ocorrência de grandes distúrbios na rede básica?

O trabalho se concentrou nas simulações mais comuns na etapa de estudos pré-operacionais de parques eólicos. Nestas análises, a representação simplificada apresentou bons resultados, assim não se imagina que esta representação seja inadequada durante grandes distúrbios na rede. Apesar disso, como grandes distúrbios não fizeram parte do escopo do IT, é importante avaliar este tipo de evento em trabalhos futuros para se afirmar com mais propriedade.

### 3.10 - Ferramentas para Ajuste Automático das Lógicas do Sistema Especial de Proteção Associado ao Sistema de Transmissão de 765kV

JHENNYFER CAROLINE DA SILVA(1); ANDRÉ PAGANI TOCHETTO(1); ROBSON ALMIR DE OLIVEIRA(1); - IB(1);

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema automático destinado ao ajuste das lógicas do Sistema Especial de Proteção associado ao sistema de transmissão de 765 kV e à Itaipu 60 Hz (SEP 765 kV), que pode ser dividido em dois subsistemas. O primeiro subsistema realiza o ajuste automático do fluxo de potência do sistema elétrico brasileiro, alterando a geração em Itaipu 60 Hz (GIPU), o fluxo para o sudeste via sistema de 765 kV (FSE) e o perfil de tensão no sistema de transmissão de 765 kV. O segundo subsistema realiza simulações dinâmicas de um conjunto de contingências pré-selecionadas e avalia se o desempenho do sistema elétrico atende a critérios pré-definidos. O sistema automático foi implementado utilizando Matlab e realiza as simulações de maneira integrada com o Anarede e o Anatem, buscando automatizar os processos de simulação e análise realizados em estudos de estabilidade eletromecânica.

Perguntas e respostas:

A) A partir do diagrama da Figura 2, poderiam os autores fornecer maiores detalhes sobre como se dá a interação entre os programas MATLAB, ANAREDE e ANATEM para determinação das referências que levam à atuação do SEP do sistema de 750kV?

Primeiramente é fornecido os dados de entrada através do software Matlab, em que o usuário final insere os dados no sistema com o auxílio de uma interface gráfica (GUI). Nesta tela o usuário irá fornecer os parâmetros de entrada tanto para o ajuste do fluxo de potência como para as simulações dinâmicas. Dentro do código em que é implementado a GUI, existem subrotinas que são responsáveis por realizar a execução dos aplicativos Anarede e Anatem, e através dos relatórios de saída desses aplicativos, coletar os dados para fazer as devidas alterações ou análise dos resultados. As alterações, como no caso do fluxo de potência, ou análises, como no caso das análises dinâmicas, são realizadas através do Matlab, realizando-se a importação (ou alteração) dos arquivos gerados por esses aplicativos, tais como: .PWF, .PLT e .OUT.

B) Quais os critérios usados para definir o conjunto de barras onde são calculadas as variações de geração nas Regiões Sul e Sudeste do SIN-BR, com o objetivo de calcular o erro definido através da equação (2)?

Foi realizada uma análise de sensibilidade das usinas do sul e sudeste, com o intuito de verificar quais usinas exerciam maior influência sob o fluxo FSE, a partir daí observou-se que as usinas de maior porte possuem maior influência nesse fluxo. Dessa forma, foram escolhidas as usinas de maior porte de cada região a fim de realizar um controle mais efetivo do fluxo FSE.

C) A qual programa (ANATEM ou MATLAB) é fornecida a lista de contingências definida pelo usuário para a realização das simulações de transitórios eletromecânicos e como deve ser fornecida esta lista?

A lista é fornecida através da interface gráfica (GUI) no Matlab, e deve ser fornecida em formato de texto com os nomes correspondentes das lógicas separados por vírgula, no campo disponível para o preenchimento das lógicas a serem analisadas. Exemplo: 1IATP, 2IATP.

### 3.11 - Aplicação de Equivalentes Dinâmicos na Rede Elétrica Brasileira e na Avaliação de Regiões de Segurança

RODRIGO VILLELA DE FARIA(1); ARMANDO MARTINS LEITE DA SILVA(2); JORGE LUIZ DE ARAUJO JARDIM(3); LUCAS RAMALHO DE LIMA(4); - ONS(1);PUC-Rio(2);HPPA(3);UNIFEI(4);

Tendo em vista a expansão do Sistema Interligado Nacional (SIN), a crescente inserção de elos CC e a elevada participação de fontes renováveis, especialmente eólica, é esperado um aumento do número e da complexidade dos modelos para simulações dinâmicas. Portanto, é de extrema relevância a obtenção de soluções computacionais viáveis que permitam resolver esses problemas, tanto para utilização online como para o planejamento da operação. Serão apresentadas duas aplicações de equivalentes dinâmicos no SIN. Na primeira, utiliza-se uma rede reduzida do SIN para atendimento aos estados do Acre e Rondônia, incluindo o cálculo de regiões de segurança. Na segunda, mais geral, reduz-se partes do SIN considerando o bloqueio total do Bipolo Xingu-Estremo.

Perguntas e respostas:

A) Encontra-se no IT, como sendo um dos obstáculos para aplicação de equivalente dinâmico, a seguinte frase: "o uso de modelos fora dos padrões dos pacotes de simulação dinâmica". Os autores poderiam elaborar um pouco mais sobre esta frase?

O processo de obtenção de bons equivalentes dinâmicos pode ser bastante custoso em termos computacionais e de homem-hora. Assim, é importante que não sejam criadas novas dificuldades no processo de redução da rede para o bom aproveitamento do equivalente. Neste sentido, modelos equivalentes que possam ser representados em diferentes programas de simulação (e.g., PSSE, Anarede/Anatem, Organon, PSCAD, etc.), permitem maior flexibilidade e análises mais abrangentes com base no mesmo equivalente.

B) Mesmo com a etapa de agregação de modelos ser baseada no modelo clássico de geradores, a mesma poderia agregar os modelos dos reguladores de velocidade, especialmente em estudos cujo foco seja o comportamento da frequência. Os autores acham que possa haver casos em que seria importante cada modelo clássico ter associado um modelo equivalente de RV?

Sim. Embora não esteja como opção disponível ao usuário na versão atual, uma alternativa para inclusão de um RV equivalente está embutida no código e dependendo de mais testes para efetivação. Tendo em mente que cada equivalente dinâmico deve ser construído com base em necessidades específicas, a representação de um modelo equivalente de RV nos geradores agrupados seria importante em casos onde a rede interna seja submetida a perturbações que levem a variações de frequência significativas, sendo esta a grandeza em destaque no estudo, e que a contribuição dos geradores na rede externa seja preponderante à resposta dos geradores da rede interna, já mantidos com seus modelos completos.

C) Conforme relatado pelos próprios autores, o tema sobre equivalentes estáticos e dinâmicos datam da década de 70, ou seja, é um assunto antigo. Ainda não há um consenso de metodologia a ser utilizada, particularmente no caso dos equivalentes dinâmicos. Os autores acreditam que a metodologia proposta por eles veio para dar um ponto final ao assunto?

A metodologia apresentada consiste numa valiosa contribuição para o tema, através de uma nova abordagem tanto na definição de agrupamentos de geradores, quanto no cálculo dos seus parâmetros equivalentes, permitindo a utilização de uma metodologia flexível, reproduzível e iterativa que permite excelentes resultados, como mostrado no IT. Não há, no entanto, a pretensão de ser "um ponto final" no desenvolvimento de um tema tão complexo e extenso como este, estando a própria metodologia apresentada sujeita a novos desenvolvimentos e melhorias. Cabe notar que embora o tema esteja sendo discutido há muitas décadas, a disponibilidade de tais recursos em programas comerciais é rara.

### 3.12 - Novos Desenvolvimentos do Programa Anatem Aplicados à Modelagem Detalhada de Controladores HVDC

FABRICIO LUCAS LIRIO(1); FERNANDO CATTAN JUSAN(2); Nãcolas Abreu Rocha Leite Netto(3); Lúgia Rolim da Silva(4); - CEPEL(1);Furnas(2);CEPEL(3);CEPEL(4);

O aproveitamento de fontes de geração em locais distantes dos grandes centros consumidores tem proporcionado um aumento do número de projetos para transmissão em corrente contínua. O comportamento do sistema receptor em corrente alternada por sua vez, encontra-se cada vez mais influenciado pela dinâmica associada à transmissão em corrente contínua. Na simulação de estabilidade eletromecânica de redes elétricas, a representação detalhada dos conversores e sistemas de controle associados é de suma importância para confiabilidade dos resultados obtidos. Neste informe serão apresentados novos recursos do Programa Anatem voltados para representação detalhada de controles de elos de corrente contínua em simulações dinâmicas.

Perguntas e respostas:

A) Poderiam os autores fornecer um panorama relativo à continuação dos trabalhos apresentados neste IT, no que diz respeito à implementação de novos recursos de modelagem de controles no ANATEM?

O desenvolvimento programa Anatem tem o objetivo de fornecer continuamente novos recursos que proporcionem o aumento do detalhamento e precisão da representação dos sistemas de controle. Estes desenvolvimentos podem ser divididos em duas frentes. A primeira consiste na criação de subtipos para os blocos IMPORT e EXPORT que atuem sobre os elementos da rede elétrica. Portanto sempre que for identificado um elemento cujo estado operativo possa ser alterado por um sistema de controle (Controlador Definido pelo Usuário ? CDU), será implementado um novo subtipo, por exemplo: subtipo STAPFC (estado da falha de comutação). A segunda abordagem trata da criação de novos blocos, cuja finalidade principal é a simplificação de representação de estruturas de controle complexas e predefinidas. Esta frente de desenvolvimento está continuamente em busca de estruturas de controle que possam ser simplificadas pela criação de novos blocos.

B) A modelagem de aerogeradores e de compensadores estáticos baseados em conversores VSC estaria no foco do desenvolvimento destes novos recursos?

A modelagem de aerogeradores e compensadores estáticos, devido a sua complexidade, constituem atividades independentes dentro do Projeto do Programa Anatem. O aprimoramento de modelos de aerogeradores depende do apoio de fabricantes e ONS para que o produto resultante desta implementação possa ser utilizado nos estudos elétricos como uma representação simplificada, porém garantindo as características de cada fabricante e a precisão dos resultados. Diversos estudos e pesquisas foram feitas no Projeto Anatem visando o desenvolvimento não apenas de conversores estáticos baseados em VSC (STATCOM), mas também transmissão em corrente contínua utilizando conversores fonte de tensão (HVDC ? VSC). O Programa Anatem já possui um modelo de STATCOM e as implementações futuras pretendem estender este modelo para conversores MMC (Modular Multilevel Converter) e transmissão HVDC-VSC, por meio de desenvolvimentos que envolvem também o Programa Anarede.

C) A partir de que versão do ANATEM os recursos apresentados neste IT encontram-se disponíveis para utilização? Quais dos eventos apresentados na simulação descrita no item 4.0 não poderiam ser representados de forma automática sem a utilização das melhorias objeto do trabalho?

Todos os recursos utilizados neste Informe Técnicos estão disponíveis da versão 11.6.2 do Programa Anatem de Maio de 2019. Os eventos apresentado no Informe Técnico que anteriormente não poderiam ser representados de forma automática são o corte de geração (Figura 8c), a correção da impedância do transformador elevador (Figura 8d) e o chaveamento de filtros CA (Figura 8f). A mudança de tapes conversores é um recurso disponível em versões anteriores do Programa Anatem.

### 3.13 - Monitoramento da constante inercial de SEE utilizando sincrofasores

LUCAS LUGNANI FERNANDES(1); DANIEL DOTTA(1); - UNICAMP(1);

A estabilidade de frequência do sistema se tornou preocupante para operadores com o aumento de plantas solares e eólicas conectadas aos Sistemas de Energia Elétrica (SEE). A grande penetração destas fontes reduz a inércia do sistema que naturalmente reage às perturbações de desbalanço de potência. Neste cenário, um método capaz de estimar a constante de inércia, da perspectiva de um dado barramento, é de importância prática. Uma nova metodologia para avaliar automaticamente a constante inercial utilizando o modelo autorregressivo média móvel entrada exógena (ARMAX, em inglês) é apresentada e demonstrada para um gerador síncrono sujeito a perturbações severas utilizando medidas de sincrofasores. A metodologia proposta pode ser dividida em três partes: i) Seleção da janela de evento, que inclui identificação do início do distúrbio, bem como da resposta inercial; ii) Um modelo ARMAX para estimar a constante de inércia percebida por uma determinada barra; iii) Validação do modelo.

Perguntas e respostas:

A) A Equação (2) que foi utilizada como base de identificação das constantes de inércia das máquinas é uma equação em malha aberta. Entretanto, a metodologia é feita com o sistema operando com todas as malhas de controle em malha fechada. Os autores acreditam, então, que a identificação é imune a essa aparente inconsistência? Uma vez que os baixos valores de erros apresentados na Tabela 1 levam a esta conclusão? Por que os autores não consideraram os reguladores de velocidade nas simulações?

O objetivo desse trabalho é estimar a constante inercial das unidades geradoras de um sistema teste de 68 barras do IEEE apresentado em [1] com modelos completos de geradores (sexta ordem) e com reguladores de tensão e estabilizadores industriais. O desafio é extrair a constante de inércia da unidade geradora, considerando a complexidade do modelo do gerador e das diversas malhas de controle envolvidas, utilizando somente dados de medição sincrofasorial (sem sinais de probe). A resposta dinâmica da unidade geradora é composta pelo conjunto das contribuições individuais de cada componente desse sistema seguindo a suas constantes de tempo. Do ponto de vista de teoria de identificação, deve-se estabelecer um modelo paramétrico capaz de capturar a dinâmica de interesse. A definição desse modelo dependerá fundamentalmente do conjunto de dados disponível para a identificação do modelo proposto. Modelos complexos envolvendo diferentes malhas de controle necessitarão de um conjunto de grandezas mais abrangente. Modelos menores e mais simples, como o da Equação (2), necessitam de um conjunto de grandezas reduzido. Por definição [2], a resposta inercial pode ser

observada exclusivamente das demais dinâmicas da unidade geradora logo após uma perturbação. Isso permite a utilização do modelo simplificado, representado pela Equação (2), restrito a um conjunto de dados limitados a alguns ciclos após o distúrbio. Como apresentado na Tabela 1 essa suposição é válida considerando os erros de estimação obtidos. Sendo um primeiro trabalho na área de estimação de inércia o objetivo foi o de mostrar que a abordagem é válida para uma unidade geradora com malhas de controle de tensão industriais. Logo nesse primeiro momento o regular de velocidade não foi considerado. No entanto, o presente método já foi aplicado em simulações e dados reais do sistema elétrico Norte-Americano onde o regulador de velocidade foi considerado e serão apresentados em trabalho futuro. [1] Canizares, C., Fernandes, T., Geraldi, E., Gerin-Lajoie, L., Gibbard, M., Hiskens, I., Kersulis, J., Kuiava, R., Lima, L., DeMarco, F. and Martins, N., 2016. Benchmark models for the analysis and control of small-signal oscillatory dynamics in power systems. IEEE Transactions on Power Systems, 32(1), pp.715-722. [2] Anderson, P.M. and Fouad, A.A., 2008. Power system control and stability. John Wiley

B) A aproximação dada pela Equação (12) não é, de uma maneira geral, sempre válida. Ela depende da localização da perturbação, do nível de curto-circuito da barra de geração, entre outros fatores. Como o artigo só apresenta resultados para um sistema teste, os autores testaram a metodologia em outros casos com os mesmos bons resultados?

De fato, a equação (12) não pode ser generalizada para todo distúrbio e localização da falta. Como mencionado na questão anterior o método foi aplicado para simulações adicionais, incluindo perturbações próximas ao ponto de medição, e em casos reais e os resultados foram satisfatórios.

C) Este revisor vê algum interesse prático na estimativa da constante de inércia agregada do sistema, onde a utilização das PMUs se faz de fato necessária. Entretanto, os resultados apresentados mostram a identificação de constantes de inércias por barra de geração. Os autores poderiam comentar esta percepção deste revisor? Da forma que os resultados foram apresentados, há de fato necessidade de se utilizar PMUs?

O objetivo fim dessa linha de pesquisa é realizar a estimação da inércia agregada do sistema. No entanto, como primeiro trabalho, busca-se validar a aplicação do método proposto em sistemas menores como o caso da unidade geradora. Se os resultados não fossem promissores para sistema simples a aplicação do método para estimação da inércia agregada poderia ser comprometida. Busca-se também, para o futuro, a aplicação desse método para dispositivos de geração com inversores para o melhor entendimento da capacidade destes em melhorar a resposta inercial dos sistemas elétricos. Finalmente, o revisor afirma que esse tipo de estimação não necessitaria do uso de PMUs. No entanto, a utilização de dados de PMUs possibilita uma estimação rápida e direta no centro de operação, sem necessidade de transmissão e processamento de dados adicionais.

### 3.14 - Amortecimento de oscilações eletromecânicas utilizando estabilizadores em elos HVDC considerando sistemas Multi-Infed

VITOR ANTUNES(1); Aguinaldo Silveira e Silva(2); - UFSC(1);UFSC(2);

Neste artigo são analisadas oscilações eletromecânicas existentes em SEP com característica Multi-Infed. Projetos de controladores são propostos para aumentar o amortecimento dessas oscilações. Requisitos de robustez levando em conta interações entre conversores, são considerados. O nível de interação é quantificado pelo índice MIIF. As técnicas de análises e projeto propostas são aplicadas em um sistema teste proposto. Os controladores projetados são aplicados aos conversores visando o aumento de amortecimento, usando três técnicas de projeto que são avaliadas segundo diferentes níveis de interação entre os elos.

Perguntas e respostas:

A) O autor conclui que o controle projetado através da minimização da norma H-infinito é o mais robusto. Mas isto é amplamente conhecido na literatura sobre controles robustos para diferentes condições operativas. O que o autor quis demonstrar ao comparar três métodos de ajustes de controles e concluir que o H-infinito é o mais robusto?

B) O autor afirma na conclusão: "através da elaboração de 3 cenários, comprovou-se que existe uma relação da interação com a impedância de acoplamento de elos HVDC." Entretanto, isto está explicitamente entendido na própria definição do fator MIIF. Favor comentar.

C) Os resultados mostrados pelos autores seriam muito impactados se um terceiro link fosse adicionado, com uma configuração de mais um inversor na região de multi-inefeed?

### 3.15 - Validação do algoritmo de estimação de estados aplicados a análise de estabilidade dinâmica com o cálculo de autovalores do programa PACDYN

ZULMAR SOARES MACHADO JUNIOR(1); GABRIEL DE VASCONCELOS ENG(1); - UNIFE(1);

O aumento do monitoramento das grandezas elétricas como forma de prevenção contra oscilações e perfis instáveis de regime implica no aumento de dados a serem analisados. Na atualidade, sistemas de potência em operação estão passando por evolução na medida em que novas tecnologias são agregadas e passam a influenciar na dinâmica da rede já existente. Este trabalho tem como objetivo apresentar uma metodologia a ser aplicada para avaliar a estabilidade angular à pequenas oscilações, conhecida como Decomposição em Modos Dinâmicos. Esta será comparada com o Método Prony, que é tradicionalmente conhecida por estimar autovalores de sistemas dinâmicos. Para realização dos testes, são considerados dois casos para simulação e, em cada um, são realizadas comparações entre seus desempenhos em relação aos resultados obtidos por meio do programa computacional PacDYN. Para os testes será utilizado um sistema equivalente Sul-Sudeste-MatoGrosso de 107 barras.

Perguntas e respostas:

A) Considerando que o PacdYN é uma ferramenta madura e de uso já consolidado no Setor Elétrico Brasileiro, além de ser compatível com programas de uso bastante difundido como o ANAREDE e o ANATEM, poderiam os autores destacar em quais condições o uso do DMD apresenta vantagens relativas ao emprego do PacdYN?

O algoritmo de decomposição, utilizado neste trabalho, realiza uma estimação de estados de um dado sistema dinâmico. Em geral, não se conhece os valores dos estados dinâmicos do sistema, mas apenas suas respostas temporais, sendo assim, o presente trabalho realizou uma validação do Método DMD, utilizando para tanto, o cálculo de autovalores do PacDYN com o objetivo de medir a capacidade do algoritmo de decomposição na captura dos autovalores do sistema.

B) Pode-se aos autores comentar sobre o desempenho do método DMD para sistemas com elevado número de componentes.

O presente trabalho utilizou um sistema teste para realizar a validação do algoritmo de decomposição, sendo portanto, considerado um sistema pequeno. Testes com elevado número de componentes não foram realizados, pois dispunha-se apenas de uma versão acadêmica do programa PACDYN, o que limitou a análise de desempenho do método. Entretanto, considerando a robustez do algoritmo de decomposição, e levando em consideração que em todos os testes realizados (Com, ou sem, ruído nos sinais) foi possível verificar que o método de decomposição se apresentou robusto, obtendo os autovalores eletromecânicos com menor amortecimento. Este resultado é muito relevante, uma vez que obteve-se sempre os autovalores necessários para a análise de estados. Com isto, espera-se que o desempenho computacional para elevado número de componentes esteja dentro de valores admissíveis.

C) Poderiam os autores relatar sobre o atual estágio dos trabalhos com o objetivo de cumprir as metas estabelecidas no último parágrafo das conclusões do informe técnico?

As metas estabelecidas no último parágrafo do trabalho se referem a melhoria e aprimoramento da metodologia para receber valores proveniente de PMUs e melhorar o método PRONY no seu tratamento para múltiplos sinais de entrada e de saída. Os estágios deste desenvolvimento ainda se encontram muito prematuros que permitam realizar qualquer conclusão, considerando que muitas adequações necessitam ainda serem devidamente implementadas. A expectativa é que se encontre resultados mais precisos entre o método DMD e o método Prony considerando múltiplos sinais de entrada e saída. Já, com relação ao uso de sinais provenientes das PMUs, é esperado que o método DMD capture apenas os autovalores relevantes e com menores coeficientes de amortecimento, o que promove rapidez de análise sem perda de precisão.

### 3.16 - Controle da Potência Reativa de Geração Eólica Para Melhoria da Margem de Estabilidade de Tensão

LIVIA MARIA ALBURGUETTI(1); AHDA PIONKOSKI GRILO PAVANI(2); RODRIGO DE ANDRADE RAMOS(3); ARTUR BOHNEN PIARDI(4); - AKKA(1);UFABC(2);USP(3);FPTI(4);

Este informe propõe o emprego da potência reativa de parques eólicos como controle preventivo para eliminação da criticidade, do ponto de vista da margem de estabilidade de tensão (MET), de um conjunto de contingências de interesse. É adotado um método de seleção e coordenação de controles que utiliza um índice de eficácia que considera disponibilidade, eficiência e custo operacional dos controles. Os resultados obtidos mostram que o uso da potência reativa de parques eólicos pode ser muito eficaz para garantir que o sistema opere mesmo em condições de contingência, com uma MET que atenda a restrições de segurança.

Perguntas e respostas:

A) Quais seriam, no entender dos autores, os principais desafios a serem superados para a implantação da metodologia proposta a um sistema elétrico de potência de grande porte como o SIN, que conta com elevados níveis de geração eólica instalados principalmente na região NE?

A metodologia utilizada pode ser facilmente implementada em rotinas nos softwares de simulação utilizados em cada país. Por não ser baseada em métodos de otimização e utilizar análise de fluxo de potência, a metodologia não demanda um grande esforço computacional. É fato que o número de dados a processar, que seriam basicamente as variáveis: quantidade de contingências e quantidade de controles preventivos disponíveis no sistema elétrico, pode acarretar em um incremento de esforço computacional. Porém, diante do observado para o sistema teste de IEEE 118 barras com o processamento de 160 contingências e aplicação de 12 controles realizada em poucos segundos, os autores não acreditam que se encontrará grandes desafios em implementar a metodologia para grandes sistemas como o sistema brasileiro. Vale ressaltar que o processamento requerido pelo método pode ser feito de forma paralela e distribuída, o que contribui para a percepção de que o tempo computacional não será um problema. Inclusive, vislumbra-se aplicar a metodologia futuramente em uma rede teste do sistema brasileiro.

B) Os compensadores estáticos (SVCs) injetam no SIN montantes de potência reativa continuamente variada entre os seus limites indutivos e capacitivos para manter a sua tensão terminal no valor de referência ajustado pelo operador. Por outro lado, conforme mostrado na Figura 1.b, a potência reativa disponível para melhoria da MET é reduzida conforme aumenta a potência ativa gerada pelo parque eólico. Como fazer face a esta limitação, dentro da metodologia proposta no artigo?

Os autores não entendem essa característica como uma limitação da metodologia proposta, mas sim uma característica inerente de parques eólicos. Por outro lado, caso os parques eólicos sejam despachados de forma a preservar sua possibilidade de fornecimento de potência reativa, a metodologia proposta viabiliza a análise do uso dessa potência reativa para melhorar a margem de estabilidade do sistema e, em alguns casos, pode evitar a instalação de outros dispositivos de compensação de potência reativa. Dessa forma, a metodologia permite justamente verificar se apenas o uso do controle da potência reativa dos parques eólicos é eficaz para manter a margem de estabilidade dentro dos limites estipulados.

C) Qual seria, no entender dos autores, uma forma de estabelecer incentivos relativos ao emprego da capacidade de potência reativa dos parques eólicos para melhoria da MET mencionados nas conclusões do artigo?

Os autores entendem que os operadores do sistema já vem incorporando incentivos para a participação das centrais eólicas no controle de tensão do sistema. No Brasil, por exemplo, o ONS já demanda que as centrais de geração eólica possam operar fornecendo potência reativa dentro de limites estipulados. A metodologia proposta daria suporte

aos operadores para identificar o valor adequado de contribuição de potência reativa da eólica considerando a lista de contingências.

### 3.17 - OSCILAÇÃO DE POTÊNCIA ATIVA E DE QUEDA BRUTA - ANÁLISE DE EVENTOS VERIFICADOS ENTRE JANEIRO E MARÇO DE 2017 NA USINA HIDRELÉTRICA SANTO ANTONIO

ANDRÉ FLAVIO SCHIANTE DOS SANTOS(1); BRUNO MARQUES DO NASCIMENTO(2); SEBASTIAO SANTOS ALVES JUNIOR(3); - SAESA(1);SAESA(2);SAESA(3);

Os níveis de montante e de jusante de um barramento hidrelétrico são parâmetros determinantes para o funcionamento de uma turbina hidráulica, pois estes influenciam diretamente na pressão de trabalho destas máquinas hidráulicas[1][2][3][4]. O presente trabalho abordará um fenômeno observado na UHE Santo Antônio, no ano de 2017, onde os níveis de montante e de jusante do barramento apresentaram um comportamento oscilatório. Tais oscilações hidráulicas alteraram as potências das turbinas, em consequência os reguladores de velocidade reagiram às variações de potência e frequência. Conforme será abordado posteriormente, as respostas apresentaram defasagem entre máquinas, causando uma oscilação de potência entre as próprias unidades geradoras da UHE Santo Antônio.

Perguntas e respostas:

A) O artigo relata um fenômeno oscilatório intrigante de baixíssima frequência ocorrido inúmeras vezes na UHE Santo Antônio, mas não apresenta uma razão conclusiva do fenômeno. Os autores relatam que as oscilações não foram observadas na UHE Jirau. Os autores saberiam dizer por que o fenômeno ficou restrito à UHE Santo Antônio?

Obrigado pela pergunta, como informado no artigo, não conseguimos mapear as causas que levavam ao início do processo oscilatório o que dificulta uma análise do motivo pelo qual o evento ficou restrito à SAE. O que sabemos, e vivemos, é que embora sejam semelhantes e que as vezes erroneamente comparados como idênticos, os projetos hidráulicos e condições operacionais das duas usinas são substancialmente diferentes. Estas diferenças pode explicar a ocorrência do fenômeno na SAE e não em Jirau.

B) A natureza do fenômeno detectado é exclusivamente de natureza hidráulica? Ou o ponto de operação elétrico das unidades geradoras tem influência também?

Obrigado pela pergunta. Como informado no artigo não tivemos condições de avaliar o fenômeno completamente, no entanto, as características de baixíssimas frequências das oscilações nos remete à comportamento prioritariamente mecânicos, ademais, a solução encontrada, também de caráter mecânico, se mostrou, até o momento, eficaz.

C) Na solução do problema os autores relatam o "congelamento" no SDSC. O que seria o SDSC? O tempo de 15 minutos para o cálculo da média dos valores de queda foi obtido por tentativa-e-erro? Outros tempos foram tentados?

Obrigado pela pergunta. SDSC Sistema Digital de Supervisão e Controle, painel responsável pela supervisão e controle da unidade geradora. O tempo de 15 minutos foi utilizado com o intuito de que a média feita tivesse amostragem de pelo menos dois ciclos completos da oscilação, diminuindo assim os efeitos de "borda" nos cálculos. A característica da oscilação (com período ligeiramente instável) não permitia fixar a média em períodos "casados" com o período da oscilação. Uma solução também proposta e talvez mais indicada para o fenômeno seriam as médias móveis, no entanto, as ferramentas disponíveis no SDSC não eram tão acessíveis para este desenvolvimento além de o resultado com média comum ter se mostrado eficaz.

### 3.18 - Simulação eficiente de controladores definidos pelo usuário utilizando compilação em tempo real

THIAGO JOSÉ BARBOSA DA ROCHA(1); TIAGO SANTANA DO AMARAL(2); SERGIO GOMES JUNIOR(2); LEONARDO PINTO DE ALMEIDA(2); LUIZ ANTONIO ALVES DE OLIVEIRA(2); - UFF(1);CEPEL(2);

Este artigo tem como objetivo apresentar uma nova metodologia otimizada desenvolvida para simulação de Controladores Definidos pelo Usuário (CDU). Enquanto essa simulação é realizada pelo ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos) a partir da interpretação do arquivo CDU, o novo método proposto consiste na geração de um arquivo compilado em C, resultando em aumento de eficiência computacional. O tempo de simulação é reduzido ainda mais a partir da implementação de processamento em paralelo no momento da execução do código C gerado.

Perguntas e respostas:

A) A linha de pesquisa apresentada neste artigo muda significativamente um longo histórico de desenvolvimento no software ANATEM. Qual foi o fator preponderante que levou o CEPEL a tomar uma decisão como esta? O tempo de simular o SIN está proibitivo?

O principal motivador para a utilização da metodologia de CDU compilado foi o desenvolvimento do novo programa computacional do CEPEL, o AnaHVDC, que tem como principal objetivo a simulação trifásica de múltiplos elos HVDC, considerando a identificação e a simulação de falhas de comutação, contemplando os transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos simultaneamente e uma modelagem completa do SIN, incluindo os CDUs. Como o custo de desenvolvimento do CDU para o AnaHVDC seria elevado, buscou-se pesquisar outras abordagens, chegando-se à proposta do artigo, já implementada. Mesmo que a solução também tenha implicado alto custo de desenvolvimento, a solução adotada é mais eficiente, trazendo ganhos. Um dos fundamentos do AnaHVDC é a otimização do desempenho, uma vez que o passo de integração é muito pequeno. Se a solução interpretada realizada pelo Anatem fosse integrada ao AnaHVDC, seria criado um gargalo de tempo, comprometendo todo o esforço de otimização do restante do programa. Tão importante quanto a aplicação do CDU compilado no AnaHVDC é a sua utilização integrada ao Anatem. Embora o tempo de simulação do SIN não esteja proibitivo, há uma preocupação em tornar o Anatem mais eficiente, até para perspectivas futuras de simulação em tempo real. Portanto, aconteceu uma confluência de fatores que impulsionaram a criação do CDU compilado: a necessidade de haver um "solver" de CDUs no AnaHVDC, a otimização dessa solução no Anatem e ainda a possibilidade de integrar uma solução eficiente de CDUs a outros programas. Ressalta-se que do ponto de vista do usuário, esta alteração é transparente, uma vez que o formato de dados não se altera, assim como a possibilidade de utilização do CDUEdit.

B) Qual é a previsão de tempo para que esse desenvolvimento esteja completo no ANATEM e pronto para ser utilizado no dia-a-dia dos usuários? Os usuários do novo ANATEM deverão ter compiladores C instalados em suas máquinas, quando criarem novos controladores por CDU?

A base de dados do Anatem, distribuída e mantida pelo ONS e pela EPE, possui um elevado grau de maturidade, o que confere ao Anatem maior confiabilidade e robustez dos controles. Por este motivo, inicialmente, pretende-se utilizar o CDU compilado exclusivamente no AnaHVDC. Somente depois de um período de depuração de erros, inerente a novos desenvolvimentos, é que o CDU compilado será integrado ao Anatem, não estando ainda no planejamento de atividades do projeto. Não é necessário que o usuário possua um compilador C instalado em sua máquina. Em relação ao banco de dados do SIN no Anatem, pode-se distribuí-lo em duas versões: uma versão texto (arquivo CDU)), como é feito atualmente, e outra compilada (arquivo DLL). Adicionalmente, para novos CDUs, trabalha-se com a possibilidade de contar com um compilador C embutido no próprio programa, utilizando um serviço WEB para compilação por demanda. De qualquer modo, o usuário continuaria utilizando o arquivo CDU no formato texto ou no CDUEdit.

C) Os autores acreditam que a ordem de grandeza dos ganhos de desempenho computacional apresentados no artigo, se manterão quando implantados no próprio ANATEM? O que poderia eventualmente prejudicar este desempenho computacional?

É necessário observar três aspectos principais na futura integração do CDU compilado com o Anatem. O primeiro se refere ao overhead envolvido na chamada do CDU compilado pelo Anatem. Estima-se que esse overhead seja suficientemente pequeno de modo a não impactar na ordem de grandeza dos ganhos computacionais envolvidos. O segundo aspecto é relativo a possibilidade de lançamento de diversas threads pelo CDU compilado, processo que precisa ser gerenciado pelo próprio Anatem. Isso pode gerar perdas mais significativas. Outro ponto a ser considerado é que os testes foram realizados sem a presença dos blocos "import" e "export". Nesse caso, cada thread gerada é independente uma da outra. Com a implementação desses blocos, cria-se uma interdependência entre os CDUs. Dessa forma, as threads precisam atuar de forma coordenada. Essa coordenação também recairia sobre o Anatem, o que cria uma terceira forma de perda. Considerando-se que os ganhos de eficiência implicaram uma redução de tempo de mais de 90%, ainda que haja perdas diversas espera-se que o ganho ainda seja significativo.

### 3.19 - Melhoria do Controle de Frequência do Sistema Interligado Nacional em Cenários com Massiva Geração Eólica via Aplicação de Recursos de Inércia Sintética e Sistemas de Armazenamento de Energia

JARDEL CUNHA CAMELO(1); FABRICIO ANDRADE MOURINHO(2); PEDRO HENRIQUE LOURENÇO DOS SANTOS(3); IGOR DE OLIVEIRA BARRETO(4); Tatiana Mariano Lessa Assis(5); - ONS(1);ONS(2);ONS(3);ONS(4);COPPE(5);

Esse trabalho tem como objetivo avaliar o efeito da elevada inserção de geração eólica no controle da frequência de sistemas de potência, considerando diferentes recursos de controle. Inicialmente, um sistema didático é utilizado para avaliações preliminares, onde a geração síncrona convencional é parcialmente substituída pela geração eólica. São utilizados como recurso de controle a inércia sintética dos aerogeradores, sistemas de armazenamento de energia, compensadores síncronos e o reajuste do estatismo das máquinas convencionais. Posteriormente, essas avaliações são estendidas ao Sistema Interligado Nacional, com foco na região Nordeste, sendo simulado o ilhamento desse subsistema em uma condição de baixa inércia.

Perguntas e respostas:

A) De uma maneira geral, os autores não quiseram se posicionar claramente a favor de ou contra a uma ou outra tecnologia. Entretanto, nas soluções em que se utilizou o armazenamento de energia, os montantes foram significativos. Gostariamos de saber a opinião dos autores se a utilização do armazenamento seria uma solução com boa relação custo/benefício, e qual seria a forma recomendada deste armazenamento?

Não foram realizadas avaliações de custo que substancie uma resposta adequada, porém com o aumento de fontes não convencionais o armazenamento se torna um componente importante para recompor alguns parâmetros de requisitos sistêmicos que são deteriorados com a redução de inércia que acompanha a mudança da matriz. Com relação à forma de armazenamento foram utilizados modelos que emulam o desempenho de baterias conectadas via inversores do tipo fonte de tensão (VSC), que possibilitam uma injeção de potência com elevada taxa de variação e baixa constante de tempo.

B) Dos resultados apresentados no IT fica evidente a não adequabilidade da atual estratégia do ERAC nos casos estudados. A partir de qual percentual de penetração de fontes conectadas via inversores (FCVI), a estratégia do ERAC deverá ser revista? Os autores acham que no futuro o ERAC talvez tenha que ter ajustes em função do montante de FCVI conectada?

A redução da inércia aumenta as taxas de variações de frequência, aumentando a necessidade de um corte de carga mais próximo ao desbalanço de potência ocorrido, de forma a minimizar variações prejudiciais ao desempenho sistêmico. Uma possível solução seria o ERAC adaptativo, contudo, para definir o percentual em que essa solução representaria vantagens que justifiquem o esforço elevado para implantação desse sistema, seria necessário um estudo detalhado e específico.

C) Dada a experiência adquirida, os autores aconselhariam a instalação de compensadores síncronos no SIN ou não?

Recomendamos, tendo em vista os benefícios dos equipamentos de compensação síncronos, principalmente na atual consolidação de um cenário de elevação das fontes conectadas via conversores, que implicam em redução da inércia global do SIN.

### 3.20 - Identificação de parâmetros e estimação de estados dinâmicos da máquina síncrona por meio de dados de PMU e simulação dinâmica híbrida

VALMOR ZIMMER(1); ILDEMAR CASSANA DECKER(1); AGUINALDO SILVEIRA E SILVA(1); - UFSC(1);



Neste informe técnico apresenta-se o desenvolvimento de uma metodologia capaz de identificar os parâmetros e de estimar os estados dinâmicos da máquina síncrona usando dados de medição sincronizada de fasores e simulação dinâmica híbrida. A metodologia considera que tanto os parâmetros como as condições iniciais dos estados diferenciais são considerados parâmetros a serem estimados, o que produz um problema de otimização não-linear. As estimativas iniciais dos parâmetros e as condições iniciais são utilizadas na solução da simulação dinâmica híbrida, que evolui no tempo os estados algébricos e diferenciais do modelo da máquina. A metodologia é aplicada em estudos de simulação e em casos reais provenientes da UHE de Itaipu.

Perguntas e respostas:

A) A metodologia proposta trabalha com dados de condições ambiente e eventuais perturbações no sistema. Isto significa que as malhas de controle e regulação estão fechadas. Entretanto, os parâmetros dos controladores não foram considerados incertos no processo de estimação. Eles deveriam ser considerados? Isso pode ser uma possível explicação para as diferenças apresentadas na Tabela 2?

Como a metodologia utiliza a tensão de campo como medida, as informações relativas aos modelos e aos parâmetros da malha de controle de tensão estão incluídas na tensão de campo. Entretanto, a metodologia considera a potência mecânica como constante durante todo o período da simulação dinâmica híbrida e tal hipótese pode influenciar nos parâmetros estimados.

B) Nos resultados apresentados na Tabela 2 há diferenças consideráveis. Isso cria uma insegurança dupla, ou seja, desconfia-se dos dados de placa e dos resultados da metodologia. Nas conclusões do IT os autores dizem que há necessidade de investigações adicionais. Quais seriam essas investigações?

As investigações adicionais consistem no uso da metodologia em mais casos reais e a análise de erros provenientes da medição (PMU, TCs, TPs e demais transdutores).

C) A metodologia proposta necessariamente precisa de PMU?

Foi utilizado esta tabela pois expressa mais nitidamente os limites dos níveis de poluição. Esta tabela é encontrada em trabalhos publicados. Para que a névoa não atrapalhasse a captação da imagem, a câmera teve seu foco ajustado manualmente para captar a radiação UV no isolador antes da câmara estar preenchida de névoa. O tubo de saída de névoa foi posicionado na parte superior da câmara para compensar a perda de névoa. Não foi feita nenhuma correlação com a corrente de fuga.

### 3.21 - Análise de Desempenho de Simulações no Programa Anatem com Passo de Integração Variável Aplicado ao Método de Solução Trapezoidal Implícito Alternado

LIGIA ROLIM DA SILVA(1); Nicolas Abreu Rocha Leite Netto(2); Paulo Pereira Machado Jr.(3); Sergio Gomes Jr.(4); Fabricio Lucas Lirio(5); - CEPEL(1);CEPEL(2);UFF(3);CEPEL(4);CEPEL(5);

Os passos de integração utilizados nas simulações de transitórios eletromecânicos no programa Anatem são tradicionalmente mantidos fixos ao longo da simulação e, em casos específicos, são reduzidos manualmente pelo usuário no período de aplicação de distúrbios ou intervalos de difícil convergência. A determinação do passo de integração a ser utilizado sempre esteve a critério do usuário, sem a flexibilidade de ser ajustado automaticamente ao longo da execução para tornar o desempenho computacional mais eficiente. Em vista disso, foi implementada no programa Anatem uma metodologia de solução do sistema alternado de equações algébricas e diferenciais com passo de integração variável, visando melhoria de desempenho sem o comprometimento da precisão dos resultados da simulação. Neste trabalho serão apresentados detalhes da implementação desta metodologia, bem como a análise de desempenho do Anatem com este novo recurso. Serão comparados resultados de simulações dinâmicas de casos de pequeno porte e do Sistema Interligado Nacional com passo fixo e variável, considerando diferentes topologias e contingências.

Perguntas e respostas:

A) O caso em que o desempenho computacional se mostrou significativo, o caso de 14 barras na simulação de 5000 s, é um caso de simulação não usual de longo-prazo. Nos outros casos apresentados de maior porte, não há uma consistência do ganho de desempenho computacional. Nas novas versões do Anatem, o passo de integração variável passa a ser default?

O passo de integração variável não será default nas próximas versões do Anatem e para a sua utilização deverá ser habilitado por meio da opção de execução PVAR. Apesar da simulação de longo-prazo do caso de 14 barras não ser usual para análises de transitórios eletromecânicos, ela foi explorada neste trabalho apenas para permitir a obtenção de tempos totais de simulação mais significativos em relação ao desvio padrão e às margens de erro associadas. Devido à simulação do caso de pequeno porte ser de mais fácil convergência em comparação ao caso de grande porte, ocorrem menos chaveamentos de passo de integração ao longo da simulação e, tais chaveamentos pesam consideravelmente no desempenho computacional. As simulações realizadas em sistemas de pequeno porte revelaram o potencial do algoritmo em propiciar ganho de desempenho em comparação à simulação com passo fixo, ao mesmo tempo em que é garantida a precisão dos resultados. Em diversas simulações de casos do SIN, o algoritmo de passo variável apresentou desempenho superior em casos de fácil convergência e resultados mais precisos em casos de difícil convergência. Por isso, nas simulações de casos de grande porte o desempenho computacional ora mostrou-se superior com passo variável, ora superior com passo fixo. Assim, mesmo quando não foi verificado ganho de desempenho, verificou-se o aumento da robustez das simulações, ao garantir o chaveamento do passo de integração nos instantes necessários, melhorando a precisão dos resultados e possibilitando explorar passos maiores em trechos com dinâmica mais assentada.

B) Na comparação entre simulações apresentada na Fig.2 ocorre uma oscilação numérica na simulação de passo fixo de 1ms. Como saber, de uma maneira geral, se o ocorrido é uma instabilidade numérica ou uma instabilidade do sistema?

De forma geral, a instabilidade numérica ocorre tipicamente com a característica de variar como uma onda triangular entre passos de integração consecutivos em torno de um valor médio. Por outro lado, uma característica de instabilidade do sistema costuma apresentar resposta no domínio do tempo crescente e/ou oscilatória.

C) A Fig.3(b) mostra a variação do passo de integração dos três métodos analisados. No caso da simulação PVAR 2, aparece um aumento seguido de uma redução e um outro aumento do passo de integração. Dado que só houve uma perturbação no caso, qual seria uma possível explicação para este comportamento apresentado pelo método PVAR 2?

Esse comportamento é decorrente do fato de que o primeiro aumento do passo de integração foi sustentado durante um período e, posteriormente, resultou em um aumento gradual do erro de extrapolação quadrática superando a constante TOLM, acarretando violação do critério de erro máximo de extrapolação quadrática e redução do passo de integração. Assim, a redução subsequente do passo de integração ocorreu no sentido de garantir a precisão dos resultados. Após essa redução, ocorreram sucessivas tentativas de aumento do passo, e cada tentativa malsucedida levou ao retorno do passo de integração inferior e à uma nova contagem da latência de aumento de passo, para que só após cada período de latência, pudesse ser realizada uma nova tentativa de aumento de passo. Por isso, só foi possível retornar ao passo de integração superior após o atendimento de todos os critérios de aumento de passo e após todos os períodos de latência que seguiram as tentativas malsucedidas.

### 3.22 - Problema da Síntese da Velocidade no Estabilizador de Sistemas de Potência

LUCAS MANSO DA SILVA(1); RAFAEL BERTOLINI DE PAIVA(1); NELSON ZENI JUNIOR(1); HENRIQUE AUGUSTO MENARIN(1); - REIVAX(1);

A estrutura dominante de Estabilizadores de Sistemas de Potência (ESP) em sistemas de excitação é a PSS2C, conhecida como "estabilizador da integral da potência acelerante". As duas variáveis utilizadas pelo PSS2C são a potência elétrica e a velocidade do rotor. Entretanto, diferentemente da potência elétrica, a velocidade do rotor não é uma variável medida, mas sim emulada. A síntese da velocidade apresenta resultados satisfatórios para as máquinas de polos salientes, porém, para as de polos lisos, o comportamento observado não é tão satisfatório. O artigo trata do impacto deste problema no ESP e o seu reflexo nos estudos de transitórios.

Perguntas e respostas:

A) Determinados modelos padrões de máquinas síncronas não representam os efeitos subtransitórios, se limitando até os efeitos transitórios. Qual parâmetro os autores recomendariam utilizar na síntese da velocidade do rotor nestes casos?

De acordo com a IEEE 1110-2002, "For large-disturbance rotor-angle stability analysis, particularly for generators with high-initial response excitation systems, magnetic saturation effects should be accurately represented at flux levels corresponding to normal operation all the way up to the highest values experienced with the excitation at its ceiling. It is particularly important to represent the dynamics of the field circuit, as it has a significant influence on the effectiveness of excitation system in enhancing large-disturbance rotor-angle stability. For small-disturbance rotor-angle stability analysis, accurate representation of the field circuit as well as the rotor damper circuits is important." Ainda, a norma encontra-se atualizada conforme as atuais capacidades dos softwares de estudos de estabilidade: "Power system operating studies should be based on the best available generator models. Preferably, these should be derived from appropriate tests on the generators. State-of-the-art computing tools for on-line dynamic security assessment are capable of simulating in real-time large interconnected power systems with generators and other devices modeled in detail". A mesma norma estabelece requisitos para estudos de estabilidade do ângulo do rotor, "An accurate knowledge of the magnitude and phase of  $L_d(s)$  and  $sG(s)$  over a frequency range from 0.1 Hz to 10 Hz is useful in determining the representation of the field circuit". Ora, a dinâmica subtransitória é menor de 10 Hz para a maior parte das máquinas síncronas do sistema interligado e, portanto, não deve ser desprezada. Tome-se como exemplo as duas unidades apresentadas no trabalho: UTE Aracária ( $T_{\text{w}} = 0,042$  s) e UHE Itaipu ( $T_{\text{w}} = 0,090$  s). Para a UTE Aracária, a dinâmica subtransitória do eixo direto passa a atuar a partir da frequência  $1/T_{\text{w}} = 23,8$  rad/s = 3,79 Hz. Poderia-se argumentar que essa frequência já não é de tanto interesse para o PSS, mas é certamente uma frequência ainda muito menor que o limite de 10 Hz estabelecido por norma, além de que os modos torsionais de máquinas de polos lisos podem ser de interesse nos estudos de estabilidade e eles se encontram acima dessa frequência. Para a UHE Itaipu, a dinâmica subtransitória é ainda mais relevante: a reatância subtransitória do eixo direto começa a atuar a partir de  $1/T_{\text{w}} = 11,1$  rad/s = 1,77 Hz. Esta dinâmica evidentemente não pode ser desprezada em estudos de estabilidade voltados para análise do PSS, pois certamente interfere na simulação das oscilações de modo local. Por outro lado, as dinâmicas subtransitórias podem visivelmente ser descartadas, uma vez que as constantes de tempo em geral não ultrapassam os 10 ms (15,9 Hz). A maioria dos programas de transitórios eletromecânicos levam em consideração os efeitos da saliência subtransitória na simulação da máquina síncrona. O objetivo da representação da estimação da velocidade do rotor tem como objetivo reproduzir ensaios de campo e buscar melhores ajustes dos controladores. Para isso, deve-se utilizar modelos completos, onde representa-se a os efeitos dos enrolamentos amortecedores da máquina síncrona.

B) Por que na estrutura do PSS analisado no IT há dois blocos wash-out em série na entrada da velocidade sintetizada? Não bastaria apenas um dos blocos?

Segue-se as boas práticas adquiridas pelos autores em décadas de experiência de campo e também dos grupos de trabalho no assunto, reunida na IEEE 421.5-2016. O uso de apenas um washout não eliminaria eficientemente as variações extremamente lentas ocorridas em dinâmicas de minutos de operação, e seria necessário usar constantes de tempo que provocariam atenuação indesejada em modos de oscilação lentos como inter-área e inter-tie.

C) Na Figura 14 observa-se uma discrepância entre as curvas entre os instantes de tempo de 2 e 3 segundos, conforme mencionado pelos autores. Apesar desta diferença, os autores recomendam a utilização da reatância subtransitória de eixo-q na síntese da velocidade. Essa diferença maior nos instantes iniciais após a perturbação, observada na Figura 14 em comparação com a Figura 13, não é tão importante?

Não, porque o sinal de velocidade emulado possui alta coerência de fase e magnitude com a velocidade real do rotor.

### 3.23 - METODOLOGIA PARA AJUSTE E COMPARAÇÃO ENTRE PSS2B E PSS4B: APLICAÇÃO DOS ESTABILIZADORES EM UM SISTEMA TESTE BRASILEIRO DE 33 BARRAS

IVAN PAULO DE FARIA(1); Felipe Rodrigo Ribeiro de Oliveira(2); Aurélio Luiz Magalhães Coelho(3); - UNIFEI - Campus Itabira(1);UNIFEI - Campus Itabira(2);UNIFEI - Campus Itabira(3);

Os estabilizadores de sistemas de potência (PSS) são empregados para atenuar oscilações em baixa frequência e consequentemente melhorar a estabilidade de sistemas. Neste trabalho, são apresentados procedimentos para ajuste tanto de estabilizadores do tipo PSS2B quanto do tipo PSS4B. Os resultados mostraram que o uso do estabilizador de banda única (PSS2B) nos geradores de um sistema equivalente de 33 barras apresentou resultados satisfatórios. Porém, ao alterar a característica do sistema, novas frequências de oscilações surgiram e foram pouco amortecidas pelo PSS2B. Neste caso, a utilização do estabilizador multibanda (PSS4B) trouxe melhores resultados, validando assim as técnicas apresentadas.

Perguntas e respostas:

A) Não é usual, em projetos de PSS, se utilizar a função de transferência entrada: tensão de referência do AVR, e saída: tensão terminal. Por que os autores a escolheram?

Na fase inicial do trabalho, diversos métodos de ajustes foram aplicados para avaliação dos resultados de cada um. O método definido por Mota [5], que utiliza a função de transferência mencionada, foi o mais satisfatório para as situações analisadas, ao se levar em conta principalmente os resultados obtidos e a facilidade para aplicação por parte de comissionadores.

B) Qual é o porquê da subcompensação de 10 a 20 graus que foi utilizada no projeto dos blocos lead-lag?

No trabalho, foi utilizado o método de compensação de fase, que procura medir a defasagem entre a referência do regulador de tensão e o torque elétrico da máquina. Como tal medição não é possível em campo, assume-se que o comportamento da fase entre a tensão terminal da máquina e o setpoint da malha do AVR é semelhante ao comportamento da fase entre o torque elétrico e o setpoint do AVR. Entretanto, as aproximações adotadas por este método levam a pequenos erros? no ajuste dos parâmetros dos blocos de avanço-atraso. Tais erros? são atenuados através das subcompensações. A referência [15] cita que esta subcompensação deve ser de 0 e 30 graus. O valor mais preciso, é possível ser obtido durante o comissionamento da máquina.

C) Na Tabela 1 da Seção 4.1 observa-se que o caso analisado não apresenta problemas de amortecimento, mesmo quando se desliga o PSS de Machadinho. Os autores fizeram análises em outros sistemas? Na Seção 4.2 os resíduos apresentados correspondem a qual função de transferência?

Realmente caso o sistema utilizado fosse mais instável, a análise da atuação do PSS poderia ser realizada de melhor forma. Espera-se que o comportamento dos estabilizadores no sistema utilizado se reflita para sistemas mais críticos. De toda forma, como trabalhos futuros, demais cenários serão considerados para contribuição da validação do mesmo. Na seção 4.2 os resíduos apresentados são dos polos mais críticos da função de transferência cuja entrada é o sinal de referência do regulador de tensão e a saída é a tensão terminal dos geradores em estudo. Estes resíduos correspondem numericamente à derivada da variação dos polos analisados, para uma realimentação na malha de controle por um ganho infinitesimal.

### 3.24 - NOVA FORMULAÇÃO PARA SEGURANÇA ROBUSTA DE SISTEMAS DE POTÊNCIA VIA FUNÇÕES MULTIOBJETIVO CONSIDERANDO INCERTEZAS

MARCUS THEODOR SCHILLING(1); CARLOS ALBERTO DA SILVA NETO(2); MARCELOS GROETAERS DOS SANTOS(2); - UFF(1);ONS(2);

Este artigo propõe uma nova formulação flexível englobando diversos enfoques relativos ao problema conceitual da otimização da segurança de sistemas de potência. Essa estratégia, expressa na forma de taxionomia, pode ser convenientemente estendida, passando a incluir tópicos adicionais, tornando-se útil para o desenvolvimento de um protótipo computacional para análise avançada da segurança de sistemas de potência. Para ilustrar a potencialidade da proposta, duas soluções originais [1] envolvendo a otimização da segurança são aqui apresentadas: a primeira trata de uma formulação multiobjetivo inédita [2] e a segunda revela o uso de um novo indicador de segurança considerando diversas incertezas probabilísticas.

Perguntas e respostas:

A) O trabalho menciona a disponibilização de um programa para que os usuários tenham soluções customizadas entre técnicas e modelos para a avaliação da segurança dinâmica determinística ou estocástica. Esse programa já está disponível? É um programa comercial? Como adquiri-lo?

O protótipo foi desenvolvido no âmbito dos doutoramentos dos autores Carlos Alberto da Silva Neto, Marcelos Groetaers dos Santos e Amélia Yukie Takahata. A disponibilidade do programa pode ser pesquisada através de contato direto com o autor Dr. Carlos Neto.

B) Os autores mencionam que quatro técnicas de otimização baseada em meta-heurísticas foram avaliadas, e que por questões de economia se reduziram a apenas duas. Como as quatro iniciais foram escolhidas, uma vez, que existe uma miríade de técnicas de meta-heurísticas? E pedimos que elaborem mais na questão econômica.

As quatro técnicas iniciais foram escolhidas apenas pela disponibilidade de experiência prévia de uso, relativa facilidade de implementação e adequada eficiência de processamento (economia de tempo e recursos). A posterior concentração da pesquisa sobre apenas duas técnicas ocorreu pela nítida superioridade computacional das mesmas sobre as demais. Os autores recomendam que as outras diversas técnicas existentes sejam minuciosamente testadas. A economia visada foca essencialmente no balanço equilibrado da precisão numérica versus tempo de computação necessário. Nesse tipo de análise a velocidade de processamento é fundamental, principalmente se o ambiente de trabalho for em tempo real. Achamos de interesse ressaltar que tivemos resultados muito satisfatórios com a metaheurística baseada no comportamento de enxames.

C) Um dos problemas avaliados numericamente no IT e dito como original (Problema #8 da Tabela 1), envolve o clássico problema de estabilidade a pequenas perturbações. Por que os autores utilizaram uma solução via simulação no tempo, ao invés do cálculo de autovalores? Uma vez que a análise de amortecimento sistêmico via cálculo de autovalores é uma solução com suficiência matemática.

O problema é dito original porque até o momento da divulgação pública da técnica desenvolvida não tinha sido detectada, na ampla literatura técnica pesquisada, nenhuma solução compatibilizando as duas funções objetivo antagonizadas tratadas (maximização de fluxos em interligações e minimização de oscilações de tensão em barramento) em presença de grandes distúrbios, através de uma simulação eletromecânica completa de todos os fenômenos dinâmicos relevantes. Os autores discordam frontalmente da afirmação do inquiridor quando este afirma que o problema # 8 da Tabela 1 é um clássico problema de estabilidade a pequenas perturbações. Definitivamente não é. As perturbações aplicadas são curtos-circuitos diversos, rejeições da cargas, aberturas de linhas, transformadores e outros equipamentos, inhamentos e perdas de blocos de geração. Nada portanto que possa ser analisado convenientemente pela técnica limitada, aproximada e possivelmente obsoleta, baseada em uso de auto-valores. Por este motivo é enfatizado que o protótipo é inteiramente baseado numa simulação eletromecânica completa no tempo, modelando rigorosamente toda a dinâmica de interesse, oriunda das grandes perturbações ( e não apenas o tratamento local de reguladores de tensão e estabilizadores). Aliás, esta é uma das principais contribuições da proposta apresentada em termos de precisão e rigor de simulação, compatível com um tempo de processamento suficiente para aplicações em tempo real. Os autores concordam que a solução via cálculo de autovalores pode até esboçar uma suficiência matemática, cuja utilidade e importância são meramente acadêmicas, mas inexistentes para problemas reais.

### 3.25 - Desempenho do Sistema de Transmissão e Distribuição devido a Geração Solar Fotovoltaica em Larga-Escala : Estabilidade x Controle de Tensão

HELIO VALGAS(1); ROBERTO GIUDICE(1); CARLOS FRANÇA(1); PEDRO VAQUER(2); FERNANDO PERAL(2); ROBERTO DEVIENNE(2); - ENERGY CHOICE(1);SOLATIO ENERGIA(2);

No Brasil, ainda não existe um mercado financeiro para geração síncrona e/ou não-síncrona para recuperar os custos de fornecimento das necessidades de serviços anclares ao SIN-Sistema Interligado Nacional. Condições climáticas muito vantajosas, sem restrições ambientais, em conjunto com um crescimento contínuo do mercado, permitiriam o desenvolvimento de fontes baseadas em inversores, reduzindo a presença de fontes síncronas cuja viabilidade se tornou mais complexa e passou a exigir tempos de captação mais longos. Essa nova composição de fontes geradoras está limitando a disponibilidade de serviços anclares e aumentando o risco de falhas potenciais em relação ao fornecimento de energia. Para prevenir e gerenciar este efeito, a inclusão de geração não-síncrona deve cumprir uma série de requisitos técnicos que foram estabelecidos e estão sujeitos à comprovação de sua eficácia técnica, a fim de assegurar e manter a operação segura e confiável do SIN. Esse processo constitui o chamado "Parecer de Acesso", (emitido pelo ONS), que define os requisitos de viabilidade técnica e operacional para cada nova conexão de geração não-síncrona (usinas fotovoltaicas e eólicas). Este artigo foca suas análises na investigação dos principais impactos da geração solar fotovoltaica, UFV, sobre o desempenho do sistema de potência existente, levando em consideração os diferentes níveis de penetração nas redes de transmissão e distribuição. Modelos de energia solar fotovoltaica de estado permanente constante são considerados, nomeadamente, em grandes empreendimentos centralizados com capacidades de regulação de tensão, avaliando-se as tensões e o desempenho de controle de potência reativa. Por outro lado, este trabalho não abrange o desempenho da geração solar fotovoltaica distribuída (D-UFV), uma vez que, geralmente, elas não possuem controle automático de tensão habilitado. Paper, referência [1], apresenta uma análise detalhada do efeito D-UFV do ponto de vista de "system loadability" e "voltage stability". Na primeira parte do presente documento, são apresentadas as principais características do SIN, incluindo a topologia de rede atual e a futura expansão da transmissão, a topologia da subestação (SE): Pirapora 2 (500/345/138 kV) e uma Rede de Distribuição (138 kV), às quais, respectivamente, 321 MW e 62 MW de UFV estão conectadas, além dos requisitos técnicos do ONS-Operador Nacional do Sistema Elétrico. A segunda parte apresenta os estudos que suportam o "Parecer de Acesso" e seus resultados, além de melhorias associadas aos impactos dos serviços anclares das UFVs. Detalhamento dos conceitos de Torques Síncronizantes e Amortecedores são apresentados nos quais destacam-se as diferenças do que é possível obter-se com o controle de tensão dos Inversores (máquinas "estáticas") e o controle de tensão de máquinas "rotativas", afetadas pela ação do PSS-Power System Stabilizer. A terceira parte discute breves percepções sobre a coordenação ONS-COD. Finalmente, na quarta parte, são apresentadas as principais conclusões e observações, em particular, apontando a crescente complexidade e os desafios causados pela inserção de geração não síncrona em larga escala na Rede de Transmissão e Distribuição, com atenção especial à Estabilidade x Controle de Tensão x Monitoramento e Coordenação Operativa.

Perguntas e respostas:

A) Poderiam os autores fornecer maiores detalhes sobre o requisito de conexão denominado "Capacidade de Potência Reativa no Ponto de Acoplamento Comum" e quais os eventuais impactos deste requisito na redução da potência ativa gerada pela UFV?

Conforme os critérios estabelecidos pelos "Requisitos (ONS) de Fator de Potência para as Usinas Solares, na versão de 01/01/2017, do Submódulo 3.6 - Requisitos Técnicos Mínimos para a Conexão às Instalações de Transmissão", a instalação deve proporcionar os recursos necessários para operar com fator de potência indutivo ou capacitivo em qualquer ponto da área indicada na figura 5 abaixo. Figura 5 - Faixa de fornecimento/absorção de reativo no ponto de conexão [ONS] Nas condições em que não haja produção de potência ativa, a central de geração fotovoltaica deverá ser capaz de proporcionar a geração reativa necessária para anular o efeito capacitivo de suas instalações na conexão com a rede de transmissão. A central de geração deve ser capaz de operar entre 0,90 e 1,10 p.u. da tensão nominal por período de tempo ilimitado. Em condições normais de operação, a potência reativa no ponto de conexão da central de geração deve ser garantida numa dada faixa operativa de tensões, conforme a característica definida na figura 6 a seguir. Figura 6 - Requisito para atendimento ao fator de potência [ONS]

B) Poderiam os autores fornecer esclarecimentos a respeito da capacidade de sobrecarga das UFVs utilizadas no trabalho, justificando o uso de 118% da capacidade nominal mencionado no item 2.1.3 do IT sem perda de vida útil para os referidos elementos?

Para essas análises, as Curvas de Capacidade dos Inversores, conforme as Figuras seguintes, foram montadas a partir dos dados técnicos fornecidos pelo fabricante. Curvas P-Q - Inversor a 35°C Curvas P-Q - Inversor a 50°C FIGURA 8 ? Curvas P-Q ? Inversor a 90/100/110 % de Tensão De acordo com as curvas da Figura 8, em condições normais

de operação (30.0 MWca cada UFV, 1.000 kWca cada inversor) com tensão nominal (1.00 pu) e temperatura de 35 °C, cada UFV pode operar com fator de potência entre 0,95 indutivo e 0,95 capacitivo, isto é, capaz de absorver / gerar um total em torno de -9,86Mvar / 9,86Mvar (-328,7kvar / 328,7 kvar, por inversor), para tensão entre 0,90 pu e 1,10 pu.

C) O uso da função Q-night permite que a potência reativa injetada pela UFV na rede AC seja variada de forma contínua para auxiliar no controle da sua tensão terminal, enquanto a utilização de reator shunt permite apenas o controle discreto da sua potência reativa indutiva. Neste contexto, poderiam os autores comentar o efeito das duas estratégias no atendimento aos requisitos do ONS no caso estudado?

? A função "Q-at-Night" pode ser habilitada através do sistema SCADA, que permite que cada inversor selecionado absorva até 1,0 Mvar sem potência ativa). Neste modo de operação, o consumo do inversor é em torno de 22,0 kW (2,2% da potência nominal), devido às perdas elétricas de ?atilhamento? mais 0,7 kW com a operação de stand-by do inversor. ? Na condição "Q-at-Night", esta função pode ser habilitada em todos os 11 inversores Pirapora e Vazante, com capacidade de absorver até 11,0 Mvar e um consumo total de cerca de 250 kW. ? Do ponto de vista puramente técnico e operacional, ambas as soluções (reator ?shunt? ou função "Q-at-Night") atendem aos requisitos do ONS. ? Considerando o custo de compra de energia da rede interligada, em ?Q-at-Night?, em torno de US\$95,00 / MWh, impostos incluídos, (preço de 2015); considerando 12 horas / noite, 365 noites / ano, o consumo de inversores é de cerca de 1,1 GWh / ano. Assim, o custo anual da operação ?Q-at-Night? está em torno de US\$104.500,00 (primeiro ano). Para operação comercial das UFVs, durante 20 (vinte) anos, com o mencionado custo de compra de energia (sem correção de preço), esse custo acumulado pode chegar a cerca de US\$2.000.000,00 para a operação ?vintage Q-at-Night?. ? Então, o que seria melhor nessa condição operativa? Para a decisão, deve-se levar em conta o custo de um reator de derivação, mais os custos do O

### 3.26 - Controle Emergencial de Potência em um link CCAT.

FELIPE ALVES SOBRINHO(1); CLAUDIO OLIVEIRA(1); RODRIGO PERES(1); - ABB(1);

Em sistemas elétricos de transmissão cada vez mais complexos, os operadores necessitam de ferramentas confiáveis para garantir a confiabilidade e estabilidade da rede. Nesse cenário, sistemas de transmissão CCAT são ferramentas poderosas na estabilização do sistema após distúrbios dada a rápida resposta de seu controle que pode ser configurado, durante os estudos de planejamento ou operação, para intervir em situações pré-definidas em. Este informe técnico apresenta o Controle Emergencial de Potência desenvolvido pela ABB e mostra algumas formas em que ele pode ser usado.

Perguntas e respostas:

A) Os autores afirmam que a estação conversora que requer o controle emergencial de potência torna-se, imediatamente após o distúrbio, a estação mestre (controle da potência DC). Há requisitos especiais de comunicação entre conversoras para o uso do EPC?

B) O conceito de EPC é amplo e em teoria pode ser utilizada em HVDC VSC e LCC. Quais os projetos comerciais que já utilizam esta funcionalidade de controle?

C) O que diferencia o tradicional POD, conhecido em diversas aplicações de HVDC, do EPC descrito no paper?

### 3.27 - Simulação e Análise de uma rede CCAT baseada em conversores comutados pela rede CA (LCC).

TREVOR DOBBIN(1); SERGIO DO ESPIRITO SANTO(2); - Furnas(1);Furnas(2);

Este informe técnico apresenta os resultados de simulações no PSCAD para um grid CC composto por 4 conversores HVDC LCC. O trabalho foi originalmente desenvolvido por solicitação do grupo de trabalho WG B4-72 - DC Grid Benchmark Models for System Studies - do CIGRE. São apresentados os aspectos básicos e premissas do sistema de transmissão simulado e os sistemas de controle e proteção modelados. Posteriormente são mostrados os resultados de desempenho perante um conjunto de defeitos aplicados no sistema elétrico através de simulações realizadas utilizando um programa de transitórios eletromagnéticos, i.e., resposta a falta monofásica e trifásica no lado inversor e falta CC no meio da linha.

Perguntas e respostas:

A) A transmissão em HVDC em sistemas elétricos de potência no SIN empregando a tecnologia LCC até o momento vem sendo utilizada para o transporte de grandes blocos de potência ponto a ponto. Neste contexto, pede-se aos autores comentar sobre a viabilidade de aplicação de DC grids no SIN e sobre as condições nas quais esta alternativa seria viável.

A viabilidade técnica de um DC grid com LCC foi justamente o foco deste trabalho. O resultado obtido abre a possibilidade de se ter, no futuro, um ou mais Grids CC no Brasil, já que temos diversos Elos CC com esta tecnologia que poderiam ser interligados formando uma rede. Entretanto, isto é algo para o longo prazo. Além disto, há de se analisar os possíveis ganhos advindos com estas ligações e a necessidade de implementá-las, já que o grid CC traz um aumento considerável de complexidade técnica e numerosos sistemas de controle são necessários para garantir a transmissão adequada, ou seja, avaliar as vantagens e desvantagens. Apenas como exemplo, poderia se ter um grid interligando as atuais estações conversoras dos bipolos existentes, Ibiúna/Araraquara e Estreito/Terminal Rio. Para interligar níveis de tensão diferentes seria necessário um estudo muito mais detalhado. Logicamente, para se ter este grid, estudos detalhados precisariam ser realizados. Na verdade, este trabalho é apenas o início de uma longa jornada para alcançarmos a segurança necessária para os órgãos responsáveis considerarem esta solução como uma das alternativas possíveis. Mas este passo inicial mostrou que isto pode ser possível e com isto existe um mundo de possibilidades. Todavia o caminho ainda é longo e difícil. Os autores ressaltam que qualquer avaliação de implementação em um sistema real deve ser realizada por uma equipe específica para tal, em função das inúmeras questões técnicas envolvidas, além de aspectos sociais, políticos, estratégicos e econômicos.

B) Quais são, no entender dos autores, os principais desafios a serem superados para a implantação do esquema DC grid apresentado em termos de proteções DC?

Uma das dificuldades técnicas, talvez a maior, em grids CC com linhas aéreas é como interromper um curto-circuito na linha CC. Para tal existe a necessidade de disjuntores CC em redes de conversores VSC ou a utilização de topologia mais sofisticada e cara (full-bridge, por exemplo). Entretanto redes com conversores LCC possuem a capacidade de controle rápido da corrente CC e com isto conseguem interromper a corrente de curto através de ações de controle. Um ponto interessante é que, enquanto na transmissão ponto-a-ponto uma falta na linha CC ou um problema em um polo interrompe a transmissão de potência, em um grid CC a potência continua sendo transmitida pelo grid, sendo interrompida apenas no elemento defeituoso. É semelhante ao que ocorre em um grid CA. Um cuidado que precisa ser tomado é que o distúrbio não pode causar sobrecarga nas linhas remanescentes nem um desequilíbrio excessivo da potência transmitida, acima do que é suportável pelos conversores remanescentes, o que poderia levar ao colapso do grid CC. As proteções e os controles dos diversos componentes do grid CC precisam estar bem ajustados para evitar esta situação. É uma situação nova em termos de transmissão CC e, naturalmente, envolve riscos.

C) No que se refere à robustez dos sistemas de controle requerida para melhorar o desempenho da rede DC formada por conversores LCC, quais seriam os principais pontos a serem explorados visando a continuidade dos trabalhos apresentados neste artigo?

Há várias frentes de exploração nesse tema. Embora não seja o foco central do IT, o GRID CC LCC possui diversas camadas de interações dinâmicas separadas por suas constantes de tempo. Dessa forma, é razoável elaborar diversas camadas de controle. Na sua camada mais elementar, controles de conversor e disparo de válvulas, se mostrou necessária a implementação de sistemas de controle mais elaborados como limitadores de ângulo de disparo variáveis conforme o estado de operação e sistema. Ainda nesta, mas em sua parte menos elementar, há ainda espaço para discussão em torno do uso do controle puro de corrente ou uso conjunto de controle de gama/tensão com o "current compound" e combinações destas. Acreditamos que para cada configuração e sistemas diferentes o uso de uma combinação será mais eficaz que outro. Neste trabalho se analisou apenas uma configuração de fluxo de carga, pretendemos analisar outras configurações e inclusive a reversão do fluxo de potência, esta por si só já seria uma frente interessante. Os autores acreditam que há margem para aprimoramento dos controladores de potência e melhor sintonia destes, inclusive o uso de resets pós falta e outras estruturas dessa natureza. Uma possibilidade é avaliar o uso de estatismos P-V para aprimorar a região de atração do ponto de operação desejado. Ainda nessa temática, não é consenso ainda, embora desejado, analisar o papel que um controle hierárquico superior (?master control?, ?station control?, etc.) deve assumir para aprimorar o desempenho dinâmico e a segurança da operação. Além destes, ainda há a possibilidade de utilizar técnicas de inteligência artificial e otimização para obter controladores otimizados, assim como o uso de controladores mais elaborados, tais como: escalonamentos de ganhos, controladores não lineares, etc. Estes atraem muito interesse acadêmico e de fato podem apresentar grandes benefícios, entretanto a aplicação industrial ainda é tímida. Há de se ressaltar que estão surgindo no B4 muitos grupos de estudo de GRIDs CC com estrutura híbrida, ou seja, o uso de LCC e VSC, além de outros conversores CC/CC. Esse campo é muito vasto e parece ser uma área despertando crescente interesse.

### 3.28 - PROJETO E ANÁLISE DE CONTROLE ÓTIMO APLICADO NO CONTROLE AUTOMÁTICO DE GERAÇÃO CONSIDERANDO SISTEMAS INTERLIGADOS.

CONRADO GABRIEL SODRE ALVES DE MORAES(1); YAN BERTAGNOLLI DE CARVALHO(2); RAPHAEL AUGUSTO DE SOUZA BENEDITO(3); RAFAEL FONTES SOUTO(4); Gabriela Rosalee Weigert(5); - UTFPR(1);UTFPR(2);UTFPR(3);UTFPR(4);UTFPR(5);

Atualmente, a estabilidade de frequência configura-se como um dos maiores desafios para os operadores de sistemas elétricos interligados. Consequentemente, torna-se mais difícil e complexo o ajuste do Controle Automático de Geração (CAG) para estabilizar a frequência da rede. Neste trabalho, o foco consiste na aplicação de técnicas de controle ótimo, especificamente o Regulador Linear Quadrático (LQR), para o problema de estabilidade de frequência. A partir da modelagem matemática dos elementos de controle e do desenvolvimento do projeto do LQR, serão realizadas simulações computacionais através do programa ANATEM do CEPEL, com o objetivo de observar o desempenho dinâmico do sistema.

Perguntas e respostas:

A) No projeto denominado "LQR Projeto 1" pondera-se mais o desvio de frequência em relação às demais variáveis de estado. Entretanto, é integrante analisar a Fig.3(a) e perceber que a resposta do sistema com o Projeto 1 é a única que apresenta um erro de regime permanente na frequência. Os autores poderiam elaborar mais sobre o que parece ser uma inconsistência?

No projeto 1 onde contempla-se com uma ponderação de maior peso da matriz Q para o desvio de frequência, o comportamento da curva de resposta da frequência é compatível com as premissas de projeto do controlador LQR, cujo objetivo principal era a eliminação do desvio de frequência e não do erro em regime permanente. O que de fato ocorre no caso do projeto 1, bem como em todos os cenários mostrados nas curvas da figura 3 a, é que ao analisar o comportamento das curvas, percebe-se que todas as curvas de frequência dos sistemas se estabilizam após certo período de tempo (valor da frequência se torna constante), isso demonstra que os desvios de frequência foram zerados, caso contrário, a curva tenderia a imprimir um trajeto crescente ou decrescente no tempo infinito. A correção do erro de frequência em regime permanente, que restaura o valor da frequência (estabilizada) ao valor nominal do sistema (60Hz) é exercida por outro mecanismo de controle auxiliar que não foi o foco do Projeto 1.

B) Nos resultados dos casos com duas áreas de controle o desvio do intercâmbio entre as áreas é anulado em regime permanente. Este relator não conseguiu achar uma razão do porquê deste comportamento, uma vez que na modelagem apresentada a variável associada ao intercâmbio não aparece de forma explícita. Os autores poderiam comentar mais sobre este resultado?

O projeto do LQR no nosso modelo simplificado contempla igualar a variação de potência de entrada mecânica  $\Delta P_m$  com a variação de potência de saída  $\Delta P_d$   $\Delta P_{tie}$ . De modo que a Área de Controle 1 fica responsável por assumir toda essa carga em regime permanente, e que o fluxo na Tie line volte ao valor inicial levando seu desvio à para zero.

C) O fato dos autores terem escolhido uma técnica baseada na realimentação de estados não inviabilizaria sua utilização nas aplicações reais em sistemas de energia elétrica de grande porte?

O atual estado de maturação da tecnologia na área de instrumentação permite realizar o monitoramento destas variáveis com maior precisão, também é possível viabilizar a aplicação do controlador LQR através do emprego de filtros estocásticos (Filtros de Kalman), utilizados para estimar os estados de um sistema substituindo a necessidade de medições em tempo real das variáveis de estado.

### 3.29 - METODOLOGIA PARA ESTUDO DE SISTEMAS HVDC MULTI-INFEED

ANTÔNIO RICARDO C. DIAS DE CARVALHO(1); FABIOLA FERREIRA CLEMENTE VELIZ(2); LEONARDO PINTO DE ALMEIDA(3); ROGERIO MAGALHAES DE AZEVEDO(4); WO WEI PING(5); André Bianco(6); Bruno da Cruz Sessa(6); Dalton O.C. Brasil(7); Fernando Machado Silva(6); Maria José C. Ximenes(6); Simone Bezerra Chaves Garcia(6); - CEPEL(1);CEPEL(2);CEPEL(3);CEPEL(4);CEPEL(5);ONS(6);Consultor(7);

A configuração DC Multi-infeed compreende a operação conjunta de elos CCAT, ganhando importância quando há proximidade elétrica entre os conversores. Um importante aspecto é a possibilidade de ocorrência de falhas de comutação simultâneas nestes conversores, ocasionando uma interrupção momentânea da injeção de potência, podendo incorrer em graves consequências para a estabilidade do sistema. No caso brasileiro, o montante transportado para a região Sudeste por estes elos chegará na casa dos 20 GW. O presente artigo apresenta uma metodologia para estudo da estabilidade de sistemas DC Multi-infeed, através do uso combinado de programa de transitórios eletromagnéticos com programa de estabilidade eletromecânica

Perguntas e respostas:

A) A presente metodologia apresentada no artigo foi utilizada pelo ONS nos seus estudos? Caso afirmativo, poderia citar quais as principais constatações e medidas mitigadoras recomendadas?

A metodologia proposta envolve a manipulação de modelos e dados elétricos por intermédio de ferramentas de fluxo de potência, curto-circuito, estabilidade eletromecânica e transitórios eletromagnéticos, tendo a aplicação piloto demonstrado que a fluência na articulação dessas ferramentas constitui-se em um fator crítico de sucesso para a perenização do uso da metodologia nos processos rotineiros do ONS. No sentido de favorecer a articulação entre ferramentas, o Operador vem desde o início de 2018 envidando esforços para a unificação das bases de dados de fluxo de potência e curto-circuito nos ambientes de estudo de planejamento de curto e médio prazos. Para o início do ano de 2020 é prevista a publicação da primeira versão das bases de dados com representação comum para instalações de rede básica, fronteira e usinas com despacho centralizado. A gestão de dados e configurações da rede a partir dessa primeira versão de base unificada será realizada de modo estruturado por intermédio do SIGER, recentemente desenvolvido pelo CEPEL. Paralelamente ao esforço de unificação das bases de dados, o ONS tem realizado estudos no horizonte de curto prazo com aplicação parcial da metodologia proposta. Embora ainda não seja possível a produção sistemática de equivalentes de rede para posterior simulação de uma ampla gama de cenários com PSCAD, já são realizadas análises para determinação das condições de inércia mínima nas regiões SE/CO com vistas a preservar a operação segura do SIN em eventos de falha de comutação em dois ou mais elos de CCAT conectados a essa região. Nessa aplicação, os tempos de falha de comutação (ou interrupção de potência) são determinados por simulações PSCAD a partir de um sistema equivalente semelhante ao apresentado no IT e representados nas simulações do desempenho dinâmico com o ANATEM.

B) Os modelos utilizados nas simulações apresentadas no artigo foram modelos desenvolvidos pelos fabricantes ou genéricos? Observa-se que os sistemas de sincronização e disparo dos bipolos de HVDC reais tem especificidades que por vezes fazem que dois bipolos em paralelo (mesma barra inversora) apresentem comportamento distintos perante o mesmo distúrbio. Por exemplo, uma falta remota pode causar a falha de comutação em um bipolo, mas não no outro em paralelo.

Os modelos utilizados para os elos CCAT do Madeira e de Belo Monte são genéricos, baseados naqueles utilizados durante os estudos do Relatório R2 dos troncos CCAT de Belo Monte. Quanto ao elo CCAT de Itaipu, foi empregado um modelo com a mesma filosofia do sistema de controle da planta. É fato que numa análise desta natureza é preponderante a utilização dos modelos reais dos elos CCAT. Entretanto, o trabalho foi conduzido no sentido de consolidar e apresentar a metodologia em si, do ponto de vista qualitativo, sem a preocupação que os resultados obtidos viessem a reproduzir exatamente o comportamento do Sistema Interligado. Validada a metodologia, o ONS poderá utilizar os modelos reais, fornecidos pelos fabricantes.

C) Foram mostrados nos artigos sempre falhas de comutação nas duas pontes de 6 pulsos simultaneamente. Observações de ocorrências mostram que muitas vezes as falhas de comutação não ocorrem simultaneamente nas duas pontes de 6 pulsos (superior e inferior), ocorrendo em instantes distintos em uma mesma perturbação. Foram verificadas falhas de comutação não simultâneas entre as duas pontes nos casos simulados?

A Figura 6 do artigo ilustra exatamente um caso em que isto ocorreu, ou seja, falha de comutação não simultânea. Entretanto, do ponto de vista do objetivo da metodologia, qual seja, a identificação do intervalo de tempo em que ocorre a interrupção da injeção de potência CC na rede receptora, isto não se mostra significativo para fins da simulação na ferramenta de transitórios eletromecânicos e na avaliação do impacto na dinâmica da rede

### 3.30 - Maritime Link - O Primeiro Sistema de Transmissão Bipolar CCAT-VSC do Mundo

FELIPE ALVES SOBRINHO(1); PETER LUNDBERG(2); - ABB(1);ABB(2);

O elo CCAT de Maritime, no Canadá, é o primeiro bipolo no mundo a usar conversoras fonte de tensão (VSC). Em operação desde o ano de 2018, esta interligação conecta a ilha de Newfoundland à província de Nova Escócia. Esse artigo mostra conclusões interessantes dos estudos realizados durante a fase de projeto e como a conversora evita o corte de carga durante contingências.

Perguntas e respostas:

A) Este projeto admitiu alguma sobrecarga no polo são, na perda de um polo?

B) A Figura 6 mostra um tempo de restart de aproximadamente 700 ms. Este tempo foi especificado ou é o menor tempo possível para esta aplicação?

C) O trabalho não descreveu o eletrodo de retorno do Bipolo VSC Maritime link. Trata-se de um eletrodo de terra ou marítimo?

### 3.31 - UM BANCO DE ENSAIOS COMBINANDO TESTES DE HIL E A COMPARAÇÃO EM TEMPO REAL ENTRE A REALIDADE E UM MODELO QUASI-CLOSED-LOOP DE UMA UNIDADE GERADORA

MARCELA RIBEIRO GONÇALVES DA TRINDADE(1); MARC LANGEVIN(2); Amine Bahjaoui(3); - OPAL-RT(1);OPAL-RT(2);OPAL-RT(3);

Modelos digitais de unidades geradoras e seus controladores são necessários para realizar estudos de estabilidade de sistemas de energia elétrica. Os modelos dinâmicos dos geradores são geralmente suficientemente precisos, uma vez que são fornecidos pelos fabricantes e validados no comissionamento. No entanto, os modelos de motores primários, sistemas de excitação e seus controladores podem estar longe da realidade, pois muitas vezes se baseiam em suposições teóricas e não são totalmente validados por testes de campo. Para a validação do modelo do sistema de excitação, a comunicação com as PMUs (Unidades de Medição de Fase) permite uma comparação correta dos comportamentos de potência ativa e reativa. Não é incomum que os AVR (Regulador Automático de Tensão) e PSS (Circuito Estabilizador de Potência) não se comportem como esperado devido a defeitos, envelhecimento e/ou modificações de configuração não reveladas. As PMUs podem fornecer informações precisas sobre a energia elétrica, mas não revelarão muito sobre a precisão dos modelos de regulador de velocidade e turbina. Em um artigo anterior [3], descrevemos um novo banco de provas equipado com um simulador em tempo real, e uma versão combinando recursos de monitoramento e testes locais está em desenvolvimento. A ideia é comparar permanentemente os comportamentos dinâmicos de um hidrogerador e seus componentes auxiliares com seus modelos. Como discrepâncias não desprezíveis entre a realidade e a simulação em tempo real são observadas, seja durante flutuações de estado estacionário normais ou após distúrbios do sistema de potência, uma mensagem é enviada para a sala de controle e/ou para o centro de despacho. Em seguida, os testes locais podem ser rapidamente realizados sem desconectar a unidade simplesmente chaveando o recurso de monitoramento da bancada para a funcionalidade de teste local. Para turbinas hidráulicas e reguladores de velocidade, testes de malha fechada usando o simulador em tempo real integrado para HIL (Hardware-in-the-Loop) permitem emular o comportamento dinâmico da unidade testada como se ela estivesse operando em modo ilhado, mesmo que esteja sincronizada e transmitindo energia para a rede principal. Neste novo artigo, usamos resultados de simulação em tempo real para comparar a simulação dinâmica em tempo real com comportamentos reais. O processamento foi feito usando o OPAL-RT RT-LAB. Em [3], o processamento foi feito off-line usando o Matlab Simulink® e o Matlab Simscape®. Seções 1 e 2 reproduzem parte do artigo anterior.

Perguntas e respostas:

A) Qual é o real benefício do uso da simulação em tempo real quando comparado com registros típicos realizados com PMUs?

As informações estarão disponíveis imediatamente. A simulação em tempo real permite detectar o erro de modelagem. Sem essa informação, há uma forte probabilidade de que uma simulação off-line não seja de fato realizada.

B) Caso seja identificada instabilidade na operação em modo ilhado, como proceder se se tratar de uma instabilidade real e não um caso de limitação da metodologia? (Ver página 5 do artigo).

Injetando-se o sinal de frequência/velocidade real no modelo do regulador de velocidade e o sinal de velocidade real no modelo PSS, ao invés de injetar o sinal de frequência/velocidade calculado a partir do desequilíbrio entre o torque mecânico e o torque elétrico.

C) Poderiam os autores esclarecer por que foi feita uma comparação entre um modelo com  $K_p = 100$  e um sistema real com  $K_p = 20$ ? (ver página 7 do artigo).

Na verdade, queríamos comparar a simulação supondo que o PSS esteja ligado, quando na verdade está desligado. Quando o PSS está desligado, o ganho proporcional do AVR é geralmente reduzido, com o efeito de uma queda de tensão mais lenta, especialmente no caso de uma falha perto da usina.

### 3.32 - Impacto de Centrais Geradoras Fotovoltaicas nos Modos de Oscilação e na Estabilidade Transitória do SIN

DANIEL HAUSER(1); GLAUCO NERY TARANTO(1); - UFRJ(1);

Este artigo estuda o impacto de usinas fotovoltaicas (UFV) na dinâmica e controle de sistemas de potência. Com base em um sistema duas áreas e em um caso real de planejamento do ONS são inseridas UFVs e analisados seus efeitos nos modos de oscilação bem como na estabilidade transitória. O modelo dinâmico da General Electric,

disponível na base de dados do ONS, é escolhido para as simulações. Também são investigados os efeitos da estratégia de voltage ride through dos inversores na estabilidade transitória dos sistemas. Destaca-se que no SIN são explorados cenários de até 50% de penetração no Nordeste.

Perguntas e respostas:

A) Nas simulações com representação de duas áreas (Figura 10), observa-se que durante a falta, a geração PV continua injetando potência reativa capacitiva no sistema e na sua eliminação, ocorre um pico de sobretensão de cerca de 1,18 pu na barra de conexão com a rede, com um controle de tensão satisfatório nos instantes subsequentes à eliminação da falta até ser atingido o regime permanente pós falta. Pergunta-se se neste cenário, para reduzir o pico de sobretensão que ocorre na eliminação da falta, seria viável forçar a PV a operar em 0 Mvar durante a falta, liberando-a para injetar potência reativa capacitiva após a sua eliminação apenas quando a tensão terminal da PV se recuperar acima de um patamar previamente definido.

Sim, é possível. Este caso está ilustrado pelas curvas de cor amarela da figura 10. Trata-se do caso VRT P que se refere à estratégia de controle do inversor com prioridade de potência ativa. Quando o inversor opera neste modo, no momento de um grande desvio de tensão, a injeção de potência ativa é priorizada em detrimento de sua potência reativa que se torna nula durante o curto-circuito. Uma vez extinto o curto-circuito o inversor volta a injetar normalmente potência ativa e reativa na rede.

B) Com base nos resultados obtidos com a rede completa (Figura 14), pede-se aos autores complementar a resposta à questão de número 1. É possível afirmar que o Q priority apresenta-se como a melhor alternativa de controle no que diz respeito à resposta dinâmica da PV a grandes perturbações?

Sim, porém com algumas ressalvas. Conforme está ilustrado na figura 15 é possível notar que no modo Q priority há uma recuperação de tensão muito rápida durante o defeito, no entanto, após o curto-circuito são observadas sobretensões consideráveis, sobretudo em cenários de penetração solar elevada. As curvas amarelas nos gráficos das figuras 15 (a) e (b) mostram a tensão terminal da usina fotovoltaica ultrapassando o envelope (curva pontilhada cinza) referente ao requisito mínimo de voltage ride through exigido pelo ONS. Por consequência, a UFV estaria autorizada pelo ONS a se desconectar da rede elétrica. Cabe ressaltar que a real capacidade da usina fotovoltaica de suportar tais sobretensões vai depender das características de seus inversores. Evidentemente que inversores mais modernos possuem maior capacidade de sobretensão do que o mínimo exigido pelos Procedimentos de Rede. Dessa maneira, seria interessante investigar em trabalhos futuros a ocorrência destas sobretensões pós-falta no modo Q priority em um programa de simulação de transitórios eletromagnéticos a fim de capturar a dinâmica mais detalhada dos inversores.

C) Pede-se aos autores comentar até que ponto a escolha de um modelo específico para a representação da planta PV como foi feito neste trabalho pode influenciar os resultados das simulações.

Para estudos de transitórios eletromecânicos o modelo específico da planta PV é um modelo RMS de sequência positiva em que a usina fotovoltaica é representada como um gerador agregado injetando corrente na rede elétrica. Deve-se ter em mente que uma parte dos fenômenos transitórios do inversor não são capturados nos programas de estabilidade eletromecânica como o ANATEM por serem muito rápidos para o passo de integração de milissegundos. Assim, deve ser entendido que o modelo específico de UFV para o ANATEM considera certas simplificações, que são válidas para o escopo do programa, de modo a viabilizar a análise de usinas fotovoltaicas em grandes sistemas interligados. De todo modo, vale frisar que a atual representação dinâmica de UFVs adotada em diversos modelos de fabricantes foi desenvolvida por meio do esforço conjunto da comunidade científica e da indústria, onde destaca-se a força tarefa do WECC - Western Electricity Coordinating Council, considerado o atual benchmark de modelo genérico de UFV. Dito isto, foi observado a partir dos resultados deste trabalho que na análise de pequenos sinais no PACDYN os modos de oscilação interárea são afetados pela inclusão de uma modelagem específica da UFV. Notou-se que este modelo específico afeta os modos interárea tornando-os mais amortecidos. Dessa maneira, percebe-se que, do ponto de vista do amortecimento dos modos interárea, sem considerar o modelo específico da UFV os resultados são mais conservativos.

### 3.33 - Identificação de falhas de comutação em elos de corrente contínua modelados por fasores dinâmicos

LEONARDO PINTO DE ALMEIDA(1); SERGIO GOMES JR(1); THIAGO JOSE MASSERAN ANTUNES PARREIRAS(1); RODRIGO GODIM DE AZEVEDO(1); - CEPEL(1);

A utilização de fasores dinâmicos na simulação de elos de corrente contínua possui uma série de vantagens em relação ao método convencional de simulação, como a possibilidade de inicialização automática de modelos, análise linear integrada e aproveitamento de dados de estudos de estabilidade eletromecânica. Uma das dificuldades, no entanto, é a identificação precisa de falhas de comutação. Este artigo apresenta um novo método de identificação de falhas de comutação, baseada na reconstrução das tensões das válvulas por integração numérica. São apresentados resultados que comprovam a eficácia do método proposto, a partir de validações com o programa computacional PSCAD.

Perguntas e respostas:

A) Os autores entendem ser viável a construção de um modelo de elo de HVDC para o programa ANAHVDC que contemple a simulação deste elo na condição de falha de comutação? Em caso positivo, quais os desafios a serem superados para implementar a referida modelagem?

Sim. Neste artigo mostramos ser viável a identificação da falha de comutação a partir da obtenção das curvas de tensão e corrente na válvula através da tensão CA, da corrente CC e do ângulo de disparo calculados por um modelo de Elo HVDC utilizando a metodologia de fasores dinâmicos à frequência fundamental. Até o momento não existe uma integração do modelo do Elo com a identificação da falha de comutação, ou seja, é um processo em malha aberta. São vislumbrados dois principais desafios para a obtenção do modelo final de Elo HVDC por fasores dinâmicos que contemple o fenômeno da falha de comutação. 1) a definição de novas funções de chaveamento, de corrente e tensão, que levem em consideração as falhas de comutação, fechando a malha entre o modelo do Elo HVDC e o modelo de identificação destas falhas. Ou seja, na identificação de uma falha de comutação deve existir uma troca de função de chaveamento no modelo do Elo HVDC. Segundo alguns artigos presentes na literatura, essas novas funções de chaveamento, que representam a operação do Elo HVDC em falha de comutação, podem ser obtidas através de combinações lineares específicas entre as funções de chaveamento utilizadas para representar a condição normal de operação desses equipamentos. 2) a incorporação de componentes harmônicos no modelo do Elo HVDC. Com isso o tempo de ocorrência da falha de comutação poderá ser obtido de forma mais precisa.

B) Poderiam os autores comentar sobre o desenvolvimento da próxima pesquisa mencionada na conclusão do artigo, que pretende tornar possível a simulação de múltiplas falhas de comutação em múltiplos conversores?

Como próximo desenvolvimento está sendo realizada a integração do modelo do Elo HVDC por fasores dinâmicos com o modelo de identificação de falhas de comutação. O modelo do Elo HVDC é baseado em funções de chaveamento de tensão e corrente, as quais são responsáveis por relacionar as grandezas CA e CC do Elo. Para a integração dos dois modelos é necessária a definição de novas funções de chaveamento que levem em consideração o fenômeno da falha de comutação. Após uma falha de comutação a configuração das válvulas em condução é alterada, sendo necessária uma nova função de chaveamento que contemple esta situação. Com esta integração entre os modelos e a incorporação de componentes harmônicos no modelo do Elo HVDC será possível a simulação de múltiplas falhas de comutação em múltiplos conversores.

C) Alguns elos de HVDC possuem malhas de controle adicionais que elevam temporariamente o ângulo gama em situações onde existe elevada a probabilidade da ocorrência de falha de comutação (por exemplo, GAMA QUICK). No entender dos autores, seria viável a representação deste recurso na metodologia proposta no artigo?

Sim. A malha de controle de gamma quick poderá ser representada no modelo do Elo HVDC por fasores dinâmicos através da funcionalidade de Controle Definido pelo Usuário (CDU) da mesma forma como é feito hoje no programa ANATEM. Além desta malha de controle, as demais malhas de controle de um Elo HVDC, assim como as malhas de controle de unidades geradoras, como reguladores de tensão, reguladores de velocidade e sinais estabilizadores, poderão ser representadas por CDUs na metodologia proposta. A metodologia de fasores dinâmicos permitirá ao programa ANAHVDC considerar a modelagem completa do Sistema Interligado Nacional (SIN), com todos os componentes representados em um estudo de estabilidade eletromecânica e considerando ainda os transitórios eletromagnéticos. Permitirá ainda uma inicialização automática, análoga à do programa ANATEM, utilizando como partida o arquivo de fluxo de potência do programa ANAREDE, aproveitando os dados dinâmicos do banco de dados do programa ANATEM mantido pelo ONS e EPE.

### 3.34 - Revisão do Esquema de Separação Automática de Unidades Geradoras para a ANDE (ESAUPA), realizando simulações sequenciais de forma automática e adaptativa, por meio dos aplicativos ANAREDE e ANATEM

JHONATAN ANDRADE DOS SANTOS(1); ALFREDO JAVIER MEZGER SZOSTAK(1); ANDRÉ PAGANI TOCHETTO(1); ROBSON ALMIR DE OLIVEIRA(1); - IB(1);

Este trabalho apresenta o estudo de revisão do Esquema Automático de Separação de Unidades Para a ANDE (ESAUPA) dado o incremento da carga da ANDE registrado nos últimos anos. Nesta revisão uma metodologia para a realização de simulações de forma sequencial, automática e adaptativa foi empregada, a fim de viabilizar a análise do problema, em função da explosão combinatória associado ao número de variáveis. Nesta tarefa foram empregados os aplicativos ANAREDE e ANATEM para avaliação do desempenho do sistema elétrico de potência, e o aplicativo MATLAB para o gerenciamento das simulações sequenciais e o tratamento dos resultados obtidos.

Perguntas e respostas:

A) O artigo menciona que foram feitas mais de 25 mil simulações dinâmicas. Essas simulações foram feitas ininterruptamente? Qual foi o tempo computacional gasto? Em qual hardware?

As simulações foram realizadas de forma ininterrupta em termos do ANAREDE e do ANATEM. Em um primeiro momento foram construídos todos os casos em ANAREDE, o que levou algo em torno de 2 dias. Foram realizadas as devidas verificações via FormCepel e posteriormente foram realizadas as simulações no ANATEM de forma ininterrupta, o que levou algo em torno de 7 dias. Seria possível realizar as duas etapas de forma ininterrupta, mas optamos pela verificação intermediária. Com relação ao Hardware, foi utilizado um i7-4785T 2.20GHz com 8GB de memória RAM.

B) Dê-nos um pouco mais de detalhes do arcabouço computacional montado. As versões do Anarede e do Anatem utilizadas são versões convencionais ou necessitam de uma versão customizada para serem utilizadas em "batch mode"? Qual foi a função do Matlab utilizada neste arcabouço?

As versões de ambos os aplicativos são as versões convencionais. O primeiro desafio para a implementação foi a busca com comandos DOS que permitissem a execução de instruções neste aplicativos nestas condições. O cerne da execução do está neste ponto: execução de comandos DOS. Feito isso, o MATLAB foi utilizado na construção dos cartões com as instruções de modificação das grandezas elétricas, na leitura e processamento dos resultados obtidos e na estruturação das pastas e organização dos arquivos. No MATLAB podem ser utilizadas as funções "DOS" ou "SYSTEM", as quais executam comandos DOS. De fato, nenhuma função complexa do MATLAB foi utilizada. Por conta disso, estamos migrando a programação realizada no MATLAB para Python.

C) Nas simulações de Anatem, qual foi o critério de parada das simulações? Qual o percentual de casos não convergentes no Anarede?

Para a realização de simulações no ANATEM é necessária a indicação do tempo que será simulado antes partir a simulação. Se o caso simulado não alcance o tempo de simulação especificado, o caso é classificado como REPROVADO, pois houve algum problema de convergência durante a simulação. Deste ponto de vista não há critério de parada. Do ponto de vista da metodologia como um todo, também não há um critério de parada, pois a execução dos casos é feita seguindo uma lista pré-definida. A adaptabilidade da metodologia proposta está na avaliação de qual o número de máquinas é necessário separar e quais esquemas são necessários habilitar. De qualquer maneira, a metodologia desenvolvida é muito flexível. Podem ser empregados critérios de parada para a busca de condições limites de operação por exemplo. Com relação a convergência dos casos no ANAREDE, a cada iteração do ajuste dos casos de fluxo de potência foram aplicadas modificações pequenas, de modo que as variações de potência de uma iteração para outra fosse muito suave. Operando desta forma não foram encontrados problemas de convergência nos casos do ANAREDE. De qualquer maneira, antes

da realização das simulações no ANATEM, os casos do ANAREDE foram verificados via FormCepel tanto do ponto de vista da convergência quanto do ponto de vista do atendimento das condições elétricas pré-estabelecidas. Caso alguma problema de convergência fosse encontrado, este caso poderia ser ajustado manualmente, antes das simulações dinâmicas no ANATEM.

### 3.35 - ANÁLISE TRANSITÓRIA DA CONEXÃO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA TRANSPORTÁVEL EM UM SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

ANTONIO EDUARDO CEOLIN MOMESSO(1); PEDRO HENRIQUE AQUINO BARRA(1); GABRIELA PESSOA CAMPOS(1); PEDRO INACIO DE NASCIMENTO E BARBALHO(1); MARIO OLESKOVICZ(1); DENIS VINICIUS COURY(1); EDUARDO NOBUHIRO ASADA(1); JOSE CARLOS DE MELO VIEIRA JUNIOR(1); VITOR TORQUATO ARIOLI(2); GLAUCIO ROBERTO TESSMER HAX(2); MAURICIO BICZKOWSKI(3); - USP(1);CPQD(2);COPEL DIS(3);

Este artigo apresenta a análise do transitório proveniente da conexão de um Sistema de Armazenamento de Energia via Baterias (SAEB) transportável (1 MW/1 MWh) no sistema elétrico de distribuição teste do IEEE de 34 barras. Os componentes considerados no SAEB são: conversor CC-CC; inversor; filtro; e transformador de acoplamento. Por meio de modelos e simulações realizadas no software PSCAD/EMTDC, os estudos realizados englobam: simulações de taxas de carga e descarga do SAEB; operação nos quatro quadrantes; operação anti-ilhamento; contribuição do sistema para os curto-circuitos; energização e desenergização súbita do SAEB; e entrada e saída de blocos de cargas.

Perguntas e respostas:

A) O trabalho não apresenta a descrição do controlador do conversor DC-AC. Favor comentar as características do controlador.

O controle do conversor DC-CA pode ser dividido em duas malhas, a externa e a interna. A malha interna é responsável pelo controle da corrente terminal do conversor e a externa é responsável pelo controle de potências ativa e reativa. Vale ressaltar que foram utilizados controladores proporcionais-integrativos, portanto, as correntes e tensões utilizadas no controle do conversor, sendo estas senoidais e trifásicas, foram submetidas à transformação de Park. Assim, as informações de magnitude e fase desses sinais podem ser caracterizadas em um espaço vetorial que é compreendido por dois eixos, o em quadratura e o direto. De posse da corrente terminal de eixo em quadratura e direto, é possível controlar a potência ativa de forma independente da reativa.

B) A Figura 5 apresenta a resposta do SAEB na operação em diferentes quadrantes. A estratégia e ajuste do controlador do conversor DC-CA não poderiam alterar de forma significativa as respostas transitórias apresentadas?

A estratégia e ajuste do controlador do conversor DC-CA podem impactar sim as respostas transitórias apresentadas. Por isso, é interessante a simulação prévia da resposta desses conversores de grande porte, antes de instalá-los em uma rede elétrica.

C) Qual o tempo de vida útil de um SAEB como o apresentado no paper?

A vida útil esperada do SAEB seria entre 10 e 15 anos. Este projeto, em específico, possui uma vida útil mínima de 10 anos.

### 4.0 TÓPICOS PARA DEBATE

A experiência e perspectivas do uso do HVDC no sistema de transmissão brasileiro.

Uso de Sincrofasores no SIN.

Penetração de Usinas Eólicas e Fotovoltaicas no SIN.

Melhoria do amortecimento de oscilações eletromecânicas no SIN por uso de sinal adicional ou elos de HVDC.

### 5.0 CONSTATAÇÕES FINAIS 1

Os sistemas HVDC continuam a despertar o interesse do Setor Elétrico Brasileiro. A prova disto é o grande número de ITs de excelente nível técnico e ferramentas computacionais novas, exemplo a técnica de Fasores Dinâmicos e metodologia para estudos de

### 6.0 CONSTATAÇÕES FINAIS 2

Os Compensadores Estáticos do tipo STATCOM híbridos já despontam com capacidade de atender aos editais dos leilões brasileiros. Os STATCOMs apresentam vantagens quando comparadas com os CERs (Compensadores Estáticos de Reativos) notadamente quanto aos tempos de res

### 7.0 CONSTATAÇÕES FINAIS 3

Desperta preocupação o impacto do crescimento da geração eólica e fotovoltaica na estabilidade do SIN. Por ser uma geração conectada à rede via inversores, ficam evidenciados os impactos no controle de frequência, e na estabilidade de ten