



Grupo de Estudo de Desempenho de Sistemas Elétricos-GDS

METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO DE DEFEITOS MONOFÁSICOS COM O ANATEM CONSIDERANDO AS VARIÇÕES DE TENSÃO NAS TRÊS FASES

JOSÉ SANDRO VALENÇA DO NASCIMENTO FILHO(1); ÁLVARO JOSÉ PESSOA RAMOS(1); RODRIGO BEZERRA VALENÇA(1); RAISSA SOUTO ALMEIDA(1); DÉIBSON JOSÉ GOMES DE SENA(1); ANDESA(1);

RESUMO

A representação monofásica da rede através da sequência positiva, como utilizada nos programas de simulação dinâmica, representa uma limitação a ser considerada em inúmeros eventos dos modernos sistemas onde se instalam crescentemente dispositivos de controles rápidos e complexos baseados na eletrônica de potência. Compensadores estáticos e inúmeros tipos de conversores associados à geração eólica e solar apresentam em geral, esquemas de controle que atuam com base nas tensões das três fases de forma independente. Em casos de defeitos monofásicos, quando a tensão na fase defeituosa se torna abaixo de um certo valor, ocorrerá a ativação de funções especiais de controle que resultarão, por exemplo, em zerar a geração de potência reativa (em alguns casos, de geração eólica ou solar, a geração de potência ativa também se torna nula). Este comportamento do equipamento real não é reproduzido na simulação com o ANATEM que só monitora a tensão de sequência positiva. Em áreas do sistema com grandes concentrações de compensadores estáticos e conversores de geração eólica e solar, os resultados de simulações de defeitos monofásicos com o ANATEM envolvem erros consideráveis comprometendo a confiabilidade das análises.

Este trabalho mostra casos exemplos deste problema e analisa eventuais possíveis procedimentos a serem implementados no programa ANATEM. Obviamente, a viabilidade e a seleção da melhor metodologia para este objetivo deverão ser analisadas e definidas pela equipe de desenvolvimento do ANATEM do CEPEL.

PALAVRAS-CHAVE

Compensador Estático (CE); Central de Geração Eólica (CGE), Usina Fotovoltaica (UFV); Low Voltage Ride Through (LVRT), Esquema de Subtensão (ESUB).

1.0 - INTRODUÇÃO

Os programas digitais para simulação de transitórios eletromecânicos surgiram ainda na década de 60 com os primeiros computadores digitais. Como se sabe, nas simulações dinâmicas a representação da rede é fasorial utilizando-se basicamente a modelagem dos fluxos de potência. Nos primeiros programas de simulação, referidos na época como “programa de estabilidade”, a representação da dinâmica das máquinas síncronas se limitava a equação diferencial do equilíbrio eletromecânico do rotor, conhecida como a “equação de swing”. Este modelo foi utilizado durante algum tempo principalmente para a análise da estabilidade transitória, ou seja, a verificação da perda da estabilidade das máquinas frente a defeitos no sistema. Concomitante com o desenvolvimento dos computadores digitais, foram sendo implementados modelos mais detalhados das máquinas síncronas e dos seus controladores tais como os controles da excitação e velocidade.

No Brasil, os primeiros estudos dinâmicos (aqui referido como os transitórios eletromecânicos) surgiram no início da década de 70 com o uso de um programa de estabilidade adquirido da empresa Philadelphia Electric Company –EUA (PECO) conhecido com o nome de TRANSTAB. Neste programa já era possível se implementar modelos de controladores das máquinas síncronas a semelhança de um simulador digital denominado CSMP desenvolvido pela IBM. No SNPTEE de 1977, foi apresentado um artigo que descrevia a implantação do modelo (modelo IV, IEEE) de máquinas síncronas de quinta ordem que incluía a representação dos efeitos dos enrolamentos amortecedores. Iniciava-se então, um período de grande evolução da modelagem no TRANSTAB que passou a ser denominado TRANSDIR. Ainda na década de 90, foi desenvolvido pelo CEPEL o programa genuinamente brasileiro para simulação de transitórios eletromecânicos, conhecido com o nome “ANATEM”. Ao longo de todos estes anos foram desenvolvidos e aperfeiçoados vários modelos, de HVDC, SVC, eólicas, etc. Podemos afirmar hoje, que o ANATEM é um programa de simulação moderno que utiliza algoritmos numéricos poderosos e recursos amplos de modelos, atendendo, portanto, aos crescentes desafios da atual complexidade do Sistema Interligado Nacional – SIN.

Entretanto, o ANATEM, bem como outros programas internacionais, são programas que representam a rede monofasicamente e são apropriados para simulação de eventos equilibrados. Uma ferramenta de simulação dinâmica trifásica ainda não é considerada viável para estudos rotineiros dada a sua complexidade. No conhecimento dos autores, atualmente apenas o programa DigSilent da Power Factory tem recursos para simulação dinâmica de eventos desequilibrados, possibilitando a simulação dinâmica considerando as três fases de forma independente. Pelo menos, por enquanto, não consideramos que justificaria o uso de um simulador dinâmico trifásico para os estudos de rotina, embora isto possa vir a ocorrer no futuro em função da evolução tecnológica dos sistemas elétricos.

Como se sabe, a simulação de defeitos monofásicos é o procedimento usual dos estudos dinâmicos da Rede Básica em conformidade com os Procedimentos de Rede. Como a maioria dos programas de estabilidade, o ANATEM, adota representação de uma única fase onde a sequência positiva da rede é considerada. Assim, as tensões do sistema calculadas pelo ANATEM, principalmente no ponto do defeito monofásico, são as tensões de sequência positiva. Como as tensões voltam a ser equilibradas muito rapidamente após a eliminação do defeito, considera-se que os erros decorrentes desta simplificação têm impactos limitados nos resultados da simulação como um todo, principalmente no que diz respeito às oscilações de potência ativa e rotóricas das máquinas síncronas. Esta limitação sempre foi aceita como razoável dado que, historicamente, os programas de estabilidade tinham o objetivo primordial de se verificar se ocorria ou não perda de sincronismo ou a existência de oscilações pouco amortecidas. O que anteriormente era tratado como um “programa de estabilidade”, atualmente se utiliza o ANATEM de forma mais ampla, como simulador de transitórios eletromecânicos. Assim sendo, as simulações objetivam a avaliação das tensões, da atuação das proteções, esquemas de controle especiais (SEP) e demais análises de desempenho. Com a implantação de modelos de equipamentos e controladores com base em eletrônica de potência, tais como compensadores estáticos – CE, HVDC, aerogeradores e inversores solares, a representação convencional de defeitos monofásicos pode levar a erros relevantes devido a lógicas de controle destes dispositivos baseados nas tensões das três fases.

Em síntese, nos CE as denominadas lógicas de subtensão atuam independente para cada fase, ou seja, se a tensão em qualquer uma das três fases ficar abaixo de um certo valor haverá atuação com o controle comandando o CE para o ponto de geração nula de potência reativa. Como os modelos de CE no ANATEM não capturam as tensões de cada fase independentemente, mas a de sequência positiva, a lógica de subtensão que atua no equipamento real, não atuará no modelo. Quando não atua num defeito monofásico, o CE tenta regular a falsa tensão levando o CE para o limite capacitivo, quando no equipamento real o mesmo é levado para o ponto de geração nula. Os erros decorrentes durante o defeito são, portanto, significativos.

As gerações eólicas e solares também contam com lógicas de atuação em casos de subtensão. Quando a tensão em qualquer fase se torna abaixo de um certo valor (85%, por exemplo) o controle do aerogerador ou inversor solar entra no modo denominado “LVRT – Low Voltage Ride Through”. Neste modo, o aerogerador ou inversor solar poderá injetar potência reativa máxima ou nula, zerar a potência ativa, etc. No ANATEM, como não se visualiza as tensões de cada fase individualmente, este modo operativo não será ativado em muitos casos de defeitos monofásicos.

Os aspectos acima se tornam muito importantes em áreas de grande concentração de instalações eólicas e solares. Neste trabalho utilizamos como ilustração o sistema da área da Bahia onde se concentram eólicas (CGE) e solares (UFV) além dos CE Sapeaçu (CE SPE), Morro do Chapéu (CE MDC) e Gentio do Ouro (CE GDO).

2.0 - SISTEMA ESTUDADO

A Figura 1 apresenta o diagrama unifilar simplificado do sistema analisado com o objetivo de mostrar as condições de defeitos monofásicos nas quais a simulação dinâmica com o ANATEM não leva a atuação das lógicas de subtenção dos CE nem das lógicas LVRT dos parques eólicos e solares. Este diagrama unifilar é uma simplificação do sistema real da Rede Básica na área do estado da Bahia envolvendo 3 compensadores estáticos – CE, nas subestações – SE Sapeaçu (CE SPE), Morro do Chapéu (CE MDC) e Gentio do Ouro (CE GDO). Embora existam outras inúmeras plantas de eólicas e solares, foram representadas apenas uma central de geração eólica equivalente na SE Campo Largo (CLARG1EOL) e uma planta de geração solar equivalente na SE M. Chap-BA230.

2.1 CE de Sapeaçu, Morro do Chapéu e Gentio do Ouro

O CE de Sapeaçu é conectado no barramento 230kV da SE Sapeaçu e tem nominais -150Mvar(indutivo) a +250Mvar(capacitivo). O CE Morro do Chapéu é conectado ao barramento 500kV da SE de mesmo nome e tem nominais -100Mvar a +200Mvar. O CE Gentio do Ouro é conectado no barramento 500kV desta SE e tem nominais -100Mvar a +200Mvar.

Todos os CE descritos acima têm ativado lógicas de subtenção que atuam forçando o CE para o ponto de operação de potência reativa nula sempre que qualquer uma das tensões fase – terra (VA, VB ou VC) se torne menor do que $V_{SUB}=0,70pu$ por 5ms. O bloqueio é desabilitado quando a tensão em todas as fases (lógica tipo “AND”) fica acima do valor $V_{RES}=0,75pu$. Estes ajustes são valores tipicamente usados no sistema real embora possam não ser necessariamente os valores reais atuais destes CE.

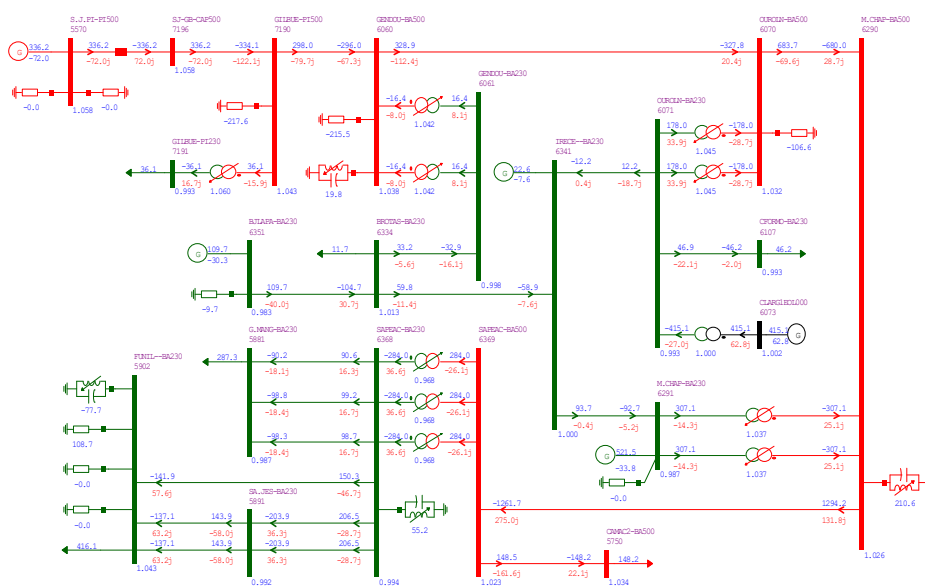


FIGURA 1 – Diagrama Unifilar Simplificado do Sistema Teste.

2.2 CGE Campo Largo e UFV Morro do Chapéu

A CGE Campo Largo aqui considerada representa um conjunto de Centrais de Geração Eólico (CGE) cuja potência escoia via a SE Ourolândia 230kV enquanto a UFV Morro do Chapéu representa um conjunto de usinas fotovoltaicas (UFV) que se conectam na SE Morro do Chapéu II 230kV. Esta CGE (CGE CLA) e UFV (UFV MDC) são equivalentes de plantas reais. No presente estudo, foram utilizados os modelos de aerogerador e inversor solar reais em operação no sistema. Para a CGE CLA e UFV MDC foram considerados os valores usuais na prática de 0,85pu para ativar o modo LVRT e 0,90pu para desativar.

2.3 Simulação de Curto-Circuito Monofásico

2.3.1 Simulação no ANAFAS

Foi simulado com o programa de curto-circuito ANAFAS um curto-circuito fase-terra (monofásico) no barramento da SE Morro do Chapéu II 230kV. A Tabela 1 mostra os valores de tensão nas três fases para este evento. Considerando-se os valores de bloqueio e reset dos CE (0,70pu e 0,75pu) e de LVRT das CGE e UFV (0,85pu e 0,90pu) verifica-se da Tabela 1 que apenas o CE SPE não terá bloqueio durante o defeito monofásico em Morro do Chapéu II 230kV. Existe pois, discordância nas decisões dos CE MDC e CE GDO além da CGE CLA, cujos bloqueios atuarão no equipamento real e não deverá atuar nas simulações do ANATEM. Estas conclusões serão verificadas nos itens seguintes através da simulação deste evento no ANATEM.

Tabela 1 – Tensões por fase em “pu” para defeito monofásico em M. Chapéu II 230 kV com o programa ANAFAS.

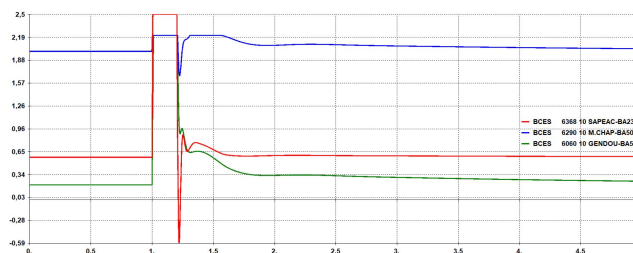
BARRAMENTO	V+	VA	VB	VC
Morro do Chapéu II 230kV	0,674	0,0000	0,9462	0,9645
Sapeaçu 230kV	0,942	0,8302	0,9717	0,9680
M. do Chapéu II 500kV	0,757	0,2289	0,9587	0,9812
C. Largo 230kV	0,941	0,7974	0,9529	0,9654
Gentio do Ouro 500kV	0,872	0,6516	0,9380	0,9353

Tabela 2 – Atuação do esquema de subtensão (ESUB) dos CE(0,70pu/0,75pu) ou LVRT(0,85pu/0,90pu) das CGE/UFV.

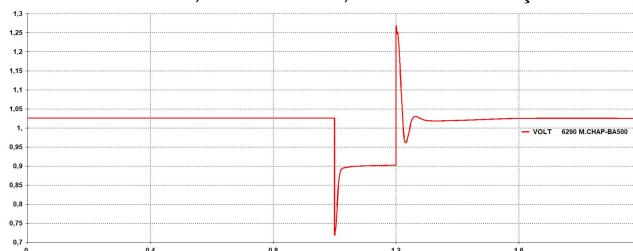
DISPOSITIVO	Atuação SUB/LVRT	
	ANATEM	ANAFAS.
CE SPE (230kV)	Não	Não
CE MDC (500kV)	Não	Sim
CE GDO (500kV)	Não	Sim
CGE CLA (230kV)	Não	Sim
UFV MDC (230kV)	Sim	Sim

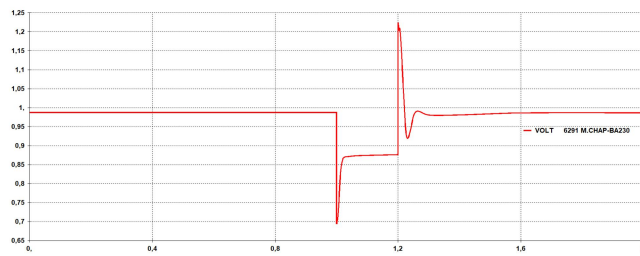
2.3.2 Simulação com o ANATEM

A Figura 2 mostra os resultados do ANATEM da aplicação de curto-circuito monofásico no barramento M. Chapéu II 230kV. As tensões em M. Chapéu II 230kV e 500kV no instante imediatamente após a aplicação do defeito são aproximadamente àquelas de sequência positiva estimadas pelo ANAFAS (Tabela 1) que não resultam (na simulação) em atuação do esquema de subtensão dos CE nem da lógica LVRT da CGE CLA. Observa-se na Figura 2 que o controle dos CE levam os mesmos para os limites capacitivos tentando controlar a tensão.



(a) Susceptâncias dos CE SPE, MDC e GDO, todos sem atuação do esquema de subtensão.





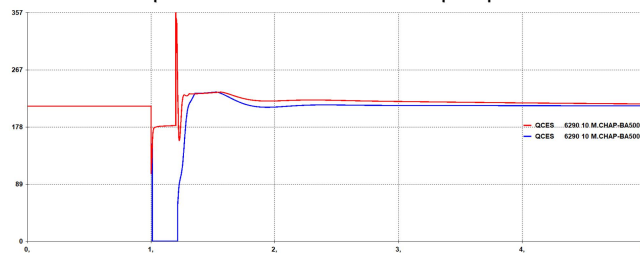
(b) Tensões em M. Chapéu II 230kV e 500kV.

Figura 2 – Aplicação de curto-circuito monofásico na SE Morro do Chapéu II 230 kV.

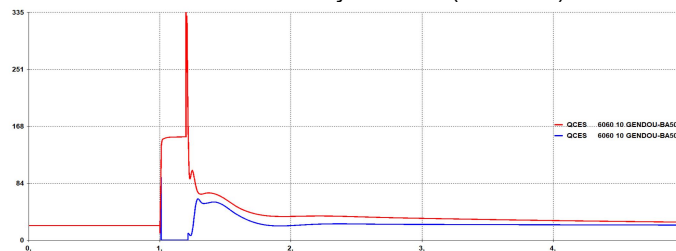
2.3.3 Análise do Desempenho do Sistema

No caso simulado de curto-circuito monofásico, a não atuação do esquema de subtensão (ESUB) dos CE MDC e GDO significa que ambos CE injetam potência reativa máxima na simulação diferente da situação real dos CE que serão bloqueados e fixados em zero Mvar durante o defeito. A Figura 3 mostra os resultados da simulação do curto-circuito monofásico em Morro do Chapéu II 230kV com o modelo atualmente utilizado, que denominaremos como modelo normal, dos CE no ANATEM (curvas vermelhas) e com um modelo especialmente preparado para considerar a atuação do ESUB conforme resultados obtidos do ANAFAS mostrados na Tabela 1, o que denominaremos como Modelo Forçado (MF). As curvas azuis representam pois, o resultado do ANATEM onde os ESUB dos CE atuam corretamente de acordo com o que efetivamente ocorreriam no equipamento real. Observa-se que o CE MDC injeta 178Mvar e o CE GDO injeta 160Mvar totalizando uma injeção de 338Mvar que na realidade não ocorre (deve ser nula) no CE real. A injeção incorreta de reativo dos CE eleva incorretamente as tensões na área de influência durante o curto provocando atuações indevidas de outros dispositivos do sistema. A Figura 3 mostra respostas distintas da potência reativa da UFV MDC com diferença de 100Mvar aproximadamente. Esta diferença deve-se ao fato de que sem a correta atuação dos ESUB dos CE MDC e GDO a tensão em M. Do Chapéu II 230kV durante o curto é incorretamente mais elevada evitando-se a atuação do esquema LVRT da UFV. Em síntese, verificamos que a incorreta não atuação dos ESUB “contamina” as tensões na vizinhança provocando desempenhos incorretos de dispositivos como CGE e UFV que têm esquemas de atuação LVRT.

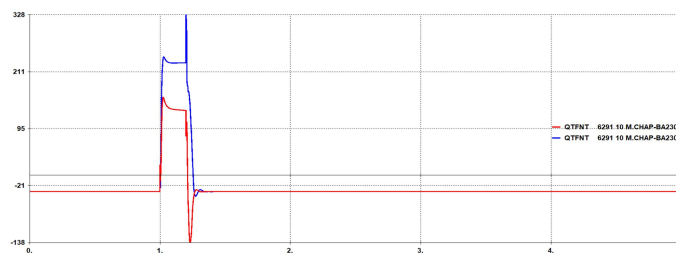
Depreendemos portanto, da necessidade de se reperesentarem corretamente o desempenho de CE, CGE e UFV em áreas de grandes concentrações destes dispositivos como em algumas áreas da região Nordeste do Brasil. Este trabalho apresenta um eventual possível procedimento a ser implantado no ANATEM para o caso de simulações onde os fatores acima mencionados sejam relevantes. Naturalmente, este procedimento é apenas uma mera sugestão consciente de que apenas o CEPEL, desenvolvedora e mantenedora do ANATEM, poderá efetivamente avaliar a viabilidade deste procedimento ou de outro qualquer com este objetivo.



(a) Potência reativa do CE MDC: sem atuação ESUB (vermelho) e com atuação ESUB (azul).



(b) Potência reativa do CE GDO: sem atuação ESUB (vermelho) e com atuação ESUB (azul).



(c) Potência reativa do UFV MDC: sem atuação ESUB (vermelho) e com atuação ESUB (azul).

Figura 3 – Resultados sem atuação forçada do ESUB e LVRT (vermelho) e com atuação forçada (azul).

3.0 - PROCEDIMENTO PROPOSTO

Como se sabe, as tensões calculadas no ANATEM durante a simulação de um curto-circuito não representam as tensões reais do sistema que se encontra em condições de desequilíbrio. Como dito anteriormente, as lógicas de ESUB e LVRT dos dispositivos reais se baseiam nas tensões da cada fase independentemente. Por exemplo, um curto-circuito monofásico franco no barramento de um CE, a tensão do ANATEM será da ordem de 70% e não haverá atuação na simulação se o ajuste do ESUB for inferior a este valor apesar de que a tensão na fase “A” será nula.

O cálculo das tensões nas três fases dentro do ciclo de cálculo do ANATEM pareceu-nos praticamente inviável. Portanto, a ideia seria calcular previamente as tensões das fase com o ANAFAS e “saber” antes da simulação quais esquemas de ESUB ou LVRT atuaria ou não para o curto-circuito monofásico em um determinado barramento. Para isto, seria desenvolvido uma rotina com base no programa de curto-circuito ANAFAS que nomeamos “ANAFAS0” como semelhança ao conhecido existente “ANAT0”. O ANAFAS0 geraria uma matriz de indicadores atuação de ESUB e LVRT de curto-circuito monofásico. A Figura 4 ilustra o procedimento onde as entradas seriam:

- AR => áreas para as quais seriam determinados os indicadores
- BDI => lista de barras de dispositivos (barras onde se conectam CE, UFV e CGE)
- BCC=> barras onde serão simulados os curtos-circuitos monofásicos
- ADI => dados de ajustes de ESUB e LVRT dos dispositivos
- MCC1F => matriz de indicadores de atuação.

A matriz MCC1F será uma matriz de “zeros” e “uns” indicando que curto-circuito monofásico na barra correspondente a linha da matriz resultará em atuação do dispositivo na barra correspondente a coluna. Obviamente, a diagonal principal de MCC1F será de elementos “um” pois curto-circuito monofásico na barra do dispositivo causará tensão nula na fase defeituosa e seguramente atuará o ESUB ou LVRT. A rotina ANAFAS0 deveria ser processada antes de iniciar um estudo usando o caso base do ANAFAS correspondente aos mesmos horizontes e cenários dos casos bases do ANAREDE que serviram de base para o ANATEM.

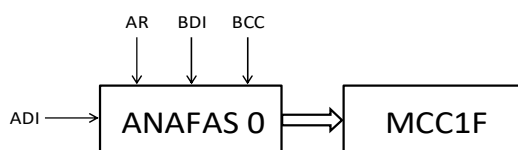


Figura 4 – Procedimento para montagem da matriz de indicadores de curto-circuito monofásico.

Outro procedimento que exige implementações no programa ANATEM diz respeito aos recurso para que as “CDU” dos dispositivos acessem as informações necessárias. Uma ideia inicial poderia ser algo como ilustrado na Figura 5. Deveriam ser “importados” do arquivo de simulação do ANATEM, extensão “.STB”, a identificação dos barramentos onde existem dispositivos tipo CE, CGE ou UFV modelados no caso estudado. Estes dispositivos são modelados como CE (comando DCER) ou fonte de corrente (comando DFNT).

No arquivo de processamento “.STB” deverão também serem importados as informações constantes do comando “DEVT” que seriam a identificação (número) do barramento onde se simula o curto-circuito e os tempos de aplicação (TACC) e eliminação do defeito (TECC). Nas simulações realizadas e aqui apresentadas este procedimento foi utilizado de forma “manual” pelo usuário com resultado satisfatório.

A etapa final será adaptar as CDU dos CE e CGE/UFV para este processo o que foi feito de forma muito simples e eficiente. No período do defeito (entre TACC e TECC) a tensão importada da rede pela CDU é substituída pelo valor zero o que causa a atuação do ESUB/LVRT para qualquer ajuste. Após a eliminação do defeito ($t > TECC$) a tensão utilizada na CDU volta a ser a tensão importada da rede o que é adequado pois o sistema volta a ser equilibrado instantaneamente (com as premissas do ANATEM).

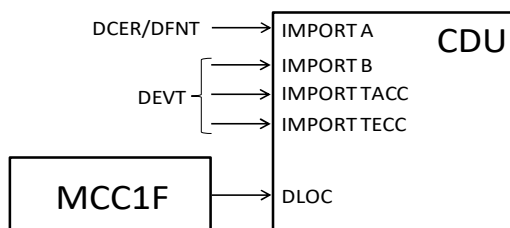


Figura 5 – Procedimento para montagem da matriz de indicadores de curto-circuito monofásico.

A Figura 6 mostra, a título de ilustração, as tensões em Morro do Chapéu II 500kV nos casos simulados sem atuação do ESUB dos CE e com a atuação correta destes esquemas usando o procedimento descrito anteriormente. No instante imediatamente após a remoção do defeito, as tensões voltam a ser as calculadas pelo ANATEM na solução de rede, porém com valores diferentes pois nestes casos os CE estavam nos limites capacitivos (sem atuação ESUB) e fixados em zero no caso de atuação forçada.

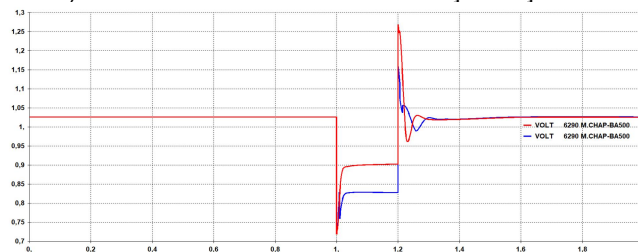


Figura 6 – Tensões em M. Chapéu II 500kV sem atuação ESUB (vermelho) e com atuação forçada (azul).

4.0 - CONCLUSÃO

Este trabalho mostra que em sistemas com Compensadores Estáticos (CE) e grande concentração de centrais de geração eólica (CGE) e Usinas Fotovoltaicas (UFV), a tensão calculada pelo ANATEM durante curtos-circuitos monofásicos são utilizadas pelas lógicas de subtensão dos CE e de LVRT pelas CGE e UFV de forma incorreta, em geral não ocorrendo atuação quando de fato, no equipamento real, ocorre a atuação.

Os erros cometidos podem ser significativos nas áreas de grande concentração de Compensadores Estáticos, Centrais de Geração Eólica e Usinas Fotovoltaicas pois os erros se disseminam pelo sistema podendo afetar as tensões da área de influência e comprometendo o desempenho dos demais dispositivos dinamicamente ativo na circunvizinhança.

Entretanto, a implementação destes procedimentos no ANATEM representa maior complexidade para o usuário de forma que deverá ser avaliada a sua real necessidade frente aos benefícios a serem alcançados considerando os efeitos dos erros cometidos sobre a segurança e confiabilidade das simulações do ANATEM na sua forma usual. A equipe de desenvolvimento e manutenção do ANATEM no CEPEL terá as condições de avaliar as dificuldades desta implementação. Por outro lado, a real necessidade de implementação destes recursos no ANATEM deverá ser comprovada ou não com base principalmente na experiência de simulações na área do Nordeste, onde se encontram em operação muitos CE e grandes concentrações de eólicas e de usinas solares.

5.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

(1) Manual do ANATEM

(2) Procedimentos de Rede - Submódulo 23

(3) Manual do ANAFAS

6.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



José Sandro V. do N. Filho, nascido em 03/02/1987 na cidade do Recife, Graduado pela Escola de Engenharia da UPE em 2009 e Mestrado pela Universidade Federal de Pernambuco em 2019. Exerce o cargo de Engenheiro Analista de Sistema de Energia Elétrica na ANDESA desde 2010.



Álvaro J. P. Ramos, nascido em 15/02/1951 em Recife, Graduado pela Escola de Engenharia da UFPE em 1973 e Mestrado pela Escola Federal de Engenharia de Itajubá em 1975. Foi chefe da Divisão de Estudos Elétricos Especiais da Operação da CHESF (1988-1998) e atualmente é diretor da ANDESA empresa de consultoria fundada em 1998.



Rodrigo B. Valença, nascido em 02/03/1987 na cidade do Recife, Graduado pela Escola de Engenharia da UPE em 2009 e Mestrado pela Universidade Federal de Pernambuco em 2018. Exerce o cargo de Engenheiro Analista de Sistema de Energia Elétrica na ANDESA desde 2010.



Raissa S. Almeida, nascida em 30/07/1990 na cidade do Recife, Graduada pela Escola Federal de Pernambuco em 2014. Exerce o cargo de Engenheiro Analista de Sistema de Energia Elétrica na ANDESA desde 2014.



Dêibson J. G. de Sena, nascido em 24/03/1981 na cidade do Cabo de Santo Agostinho, Graduado pela Escola de Engenharia da UPE em 2007 e Mestrado pela Universidade Federal de Pernambuco em 2013. Exerce o cargo de Engenheiro Analista de Sistema de Energia Elétrica na ANDESA desde 2008 e Professor do Centro Universitário – WYDEN UNIFBV desde 2018.