SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA

GPC 06
14 a 17 Outubro de 2007
Rio de Janeiro - RJ

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

ANÁLISE DOS PROBLEMAS CAUSADOS PELA RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA (RSS) EM SISTEMAS DE POTÊNCIA COM COMPENSAÇÃO SÉRIE FIXA: O EXEMPLO DO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DO ESTADO DO MATO GROSSO

André Luiz Pereira de Oliveira *

SIEMENS Ltda.

RESUMO

A utilização de Compensação Série Fixa é comumente conhecida por prover muitos benefícios para o aumento da capacidade de transmissão de linhas de transmissão, assim como melhorar a estabilidade do sistema. Entretanto, a presença de capacitores em série em um sistema de potência pode resultar na ocorrência do fenômento da Ressonância Subsíncrona. O presente informe técnico apresentará os estudos e as conclusões referentes ao Sistema de Proteção das Compensações Séries Fixas (CSF) instaladas no Sistema de Transmissão de Energia Elétrica da ELETRORTE no Estado do Mato Grosso (Subestação Barra do Peixe 230 kV), tendo como principal objeto de análise o fenômeno de Ressonância Subsíncrona (RSS).

PALAVRAS-CHAVE

Ressonância Subsíncrona (RSS), Compensação Série Fixa (CSF), Proteção Sistêmica, Sistemas de Transmissão.

1.0 - INTRODUÇÃO

A utilização de Compensação Série Fixa (CSF) em Linhas de Transmissão longas e médias tem se mostrado um meio eficiente, econômico e poderoso para aumentar a capacidade de transmissão de energia. Seu uso, no entanto, tem sido limitado devido aos problemas relativos à interação entre sistemas compensados por capacitores série e eixos turbina-gerador de máquinas térmicas.

O temível e danoso impacto do fenômeno da Ressonância Subsíncrona (RSS) foi pela primeira vez notificada devido aos danos em 02 (dois) geradores na planta de Mojave (Califórnia, Estados Unidos da América) em 09 de Dezembro de 1970 e em 26 de Outubro de 1971 [1]. A partir destes eventos, esforços consideráveis têm sido realizados para analisar e buscar maneiras de prevenir futuros acontecimentos deste fenômeno.

A motivação para a realização do estudo e da análise apresentados neste trabalho é a instalação de 03 (três) Compensações Séries Fixas na Subestação Barra do Peixe 230 kV (ELETRONORTE). Estas possuem o objetivo de aumentar a capacidade de transmissão de energia e melhorar a estabilidade nas Linhas de Transmissão em 230 kV entre as Subestações Barra do Peixe – Rondonópolis (217 km) e Barra do Peixe – Rio Verde (241 km) [2].

Devido ao grande número de Compensações Séries Fixas no Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso, particularmente nas Subestações de 230 kV de Rondonópolis (ELETRONORTE), Barra do Peixe (ELETRONORTE), Rio Verde (FURNAS) e Itumbiara (FURNAS), houve a preocupação de que, para as gerações conectadas a este sistema, ocorresse o surgimento do fenômeno da Ressonância Subsíncrona. O trabalho apresentará portanto a análise e avaliação para cada uma das gerações conectadas ao Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso com relação a possibilidade de ocorrência da Ressonância Subsíncrona devido à instalação das novas Compensações Séries Fixas da SE Barra do Peixe 230 kV.

(*) Av. Mutinga, 3.800 – 2˚ Andar - Pirituba – CEP 05110-901 - São Paulo - SP – Brasil
Tel: (+55 11) 3908-2867 – Fax: (+55 11) 3908-2786 – Email: andreluiz.oliveira@siemens.com

2.0 - UTILIZAÇÃO DA COMPENSAÇÃO SÉRIE FIXA EM SISTEMAS DE POTÊNCIA

A utilização da Compensação Série Fixa (CSF) em Sistemas de Potência é definida através de avaliações técnicas e econômicas. Nos sistemas de transmissão, quando temos uma linha de comprimento muito longo torna-se muito difícil a transmissão de potência através desta, visto que os parâmetros indutivos vão exercer cada vez mais influência na estabilidade desta transmissão (especialmente para altos carregamentos de potência no sistema) [3]. Com o objetivo de mitigar este problema, melhorar a estabilidade e a tensão nas Linhas de Transmissão (LT) vários artifícios têm sido utilizados para o aumento da transmissão de potência, sendo o uso da CSF o mais utilizado atualmente.

A CSF consiste da utilização de bancos de capacitores em série com a LT com o objetivo de reduzir a reatância indutiva total da linha, visto que esta aumenta proporcionalmente com o comprimento da linha e diminui o nível de potência que pode ser transmitido. Apesar da utilização da CSF aumentar o fluxo de potência ativa na LT, esta também pode gerar problemas para o sistema.

As principais vantagens da utilização da CSF são:

- Aumento da capacidade de transmissão de potência no sistema;
- Aumento do limite de estabilidade transitória do sistema;
- Redução na necessidade de controle de tensão no sistema devido à redução da reatância série;
- Possibilidade de melhor distribuição do fluxo de potência entre as LTs, conseqüentemente reduzindo as perdas globais do sistema.

Porém, a utilização da CSF pode acarretar em problemas como:

- Possibilidade de atuação indevida da proteção existente da LT onde a CSF for instalada e nas LTs adjacentes, devido aos efeitos na medição da impedância pelos relés de proteção;
- Possibilidade do aparecimento do fenômeno da Ressonância Subsíncrona (RSS) devido ao fato da freqüência elétrica entre as reatâncias indutivas do sistema e reatância capacitiva da CSF em certas circunstâncias aproximar-se do complemento de uma das freqüências eletromecânicas do rotor no conjunto turbina-gerador-excitatriz. Esta possibilidade de RSS é maior em geradores síncronos de usinas termoelétricas [4].

3.0 - O FENÔMENO DA RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA (RSS)

O fenômeno da Ressonância Subsíncrona (RSS) é definido como uma condição elétrica do sistema de potência em que a rede elétrica troca significante energia com o conjunto turbina-gerador em uma ou mais freqüências naturais do sistema combinado, abaixo da freqüência síncrona e subseqüente a um distúrbio, tendo como condição inicial o equilíbrio [5].

A instalação da Compensação Série Fixa (CSF) em um sistema de transmissão traz, entre outras conseqüências, o surgimento de pelo menos uma freqüência natural associada ao circuito cujo valor situa-se abaixo da freqüência síncrona. Condições especiais de operação do sistema de transmissão podem acarretar trocas de energia indesejáveis envolvendo o conjunto turbina-gerador de uma usina em uma ou mais freqüências naturais, caracterizando o fenômeno da RSS.

O Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) nos Submódulos 2.3 [6] e 4.6 [7] apresenta os requisitos necessários e os critérios para a aplicação das CSF em sistemas de transmissão, onde com relação à RSS apresenta:

- As CSF não deverão excitar modos de RSS, ou, caso excite, deverá atuar satisfatoriamente no sentido de mitigar os modos de RSS pré-existentes;
- As CSF não deverão provocar o surgimento de fenômeno de RSS na região onde será instalado.

O risco da ocorrência do fenômeno da RSS está na fadiga ou rompimento do eixo do rotor das máquinas. A RSS não apresenta risco aos equipamentos estáticos do sistema de transmissão, como as CSF. Desta forma, estes equipamentos não precisam de proteção contra a ocorrência de RSS. A proteção contra o fenômeno da RSS, corretamente instalada em algum ponto do sistema ou nas próprias máquinas de geração, poderá ser suficiente para a proteção dos eixos turbina-geradores.

4.0 - O SISTEMA DE TRANSMISSÃO DO ESTADO DO MATO GROSSO

O Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso (ELETRONORTE), foi analisado em sua configuração atual (ano de 2007) e futura (ano de 2014). Nestas configurações utiliza-se uma modelagem detalhada nos níveis de tensão de 500 kV e 230 kV, sendo que o sistema externo é modelado por meio de equivalentes Thevénin, com as potências calculadas com o uso de programas específicos para esta finalidade [8].

A Figura 1 apresenta a Configuração 2007 e a Figura 2 apresenta a Configuração 2014, ambas ressaltando na cor vermelha as linhas de transmissão onde as Compensações Séries Fixas da SE Barra do Peixe 230 kV foram instaladas.

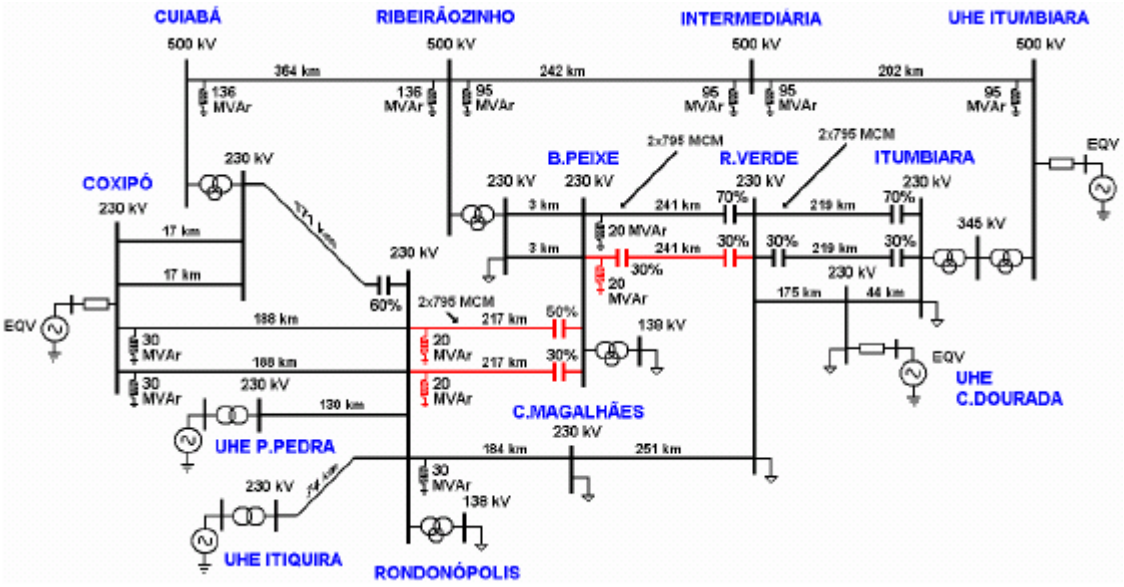

Figura 1 – Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso na Configuração 2007

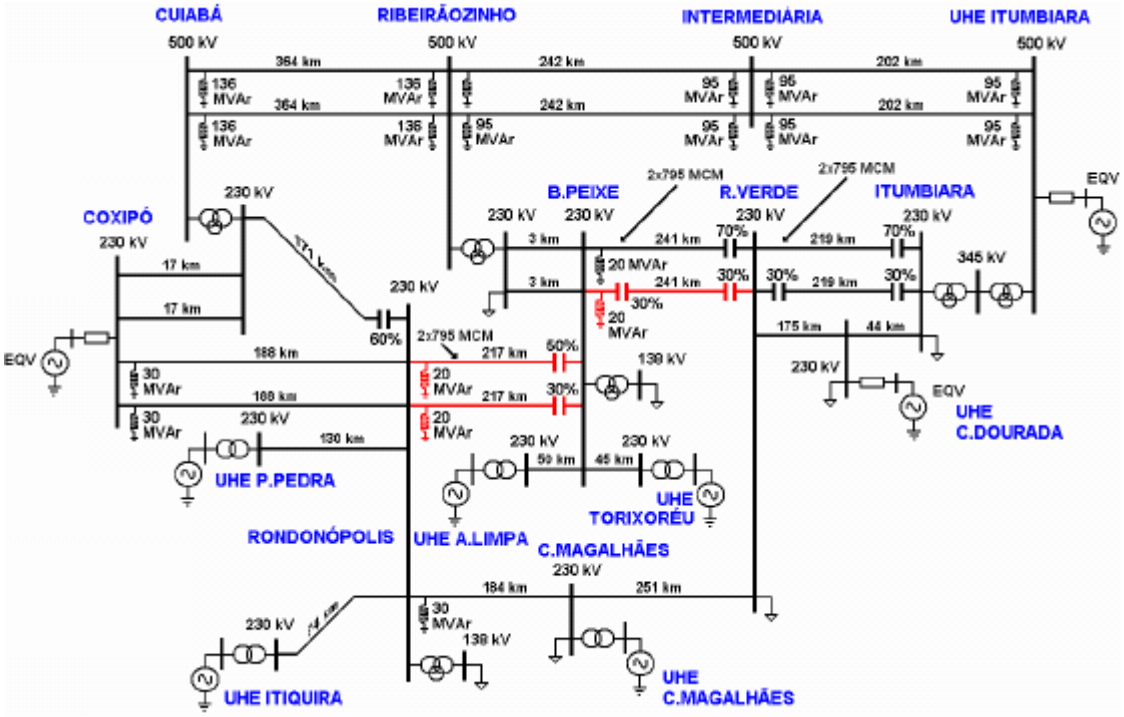

Figura 2 – Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso na Configuração 2014

A Configuração 2014 é basicamente a mesma que a Configuração 2007, porém apresentando as seguintes modificações mais importantes no Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso [8]:

- Novo Circuito de Transmissão em 500 kV entre as Subestações de Cuiabá – Ribeirãozinho – Intermediária e UHE Itumbiara (aproximadamente 808 km de extensão);
- Inserção da UHE A. Limpa (13.8 kV, 170 MVA) interligada à SE Barra do Peixe 230 kV;
- Inserção da UHE Torixoréu (13.8 kV, 102 MVA) interligada à SE Barra do Peixe 230 kV;
- Inserção da UHE C. Magalhães (13.8 kV, 72 MVA) interligada à SE C. Magalhães 230 kV.

5.0 - AS COMPENSAÇÕES SÉRIES FIXAS DA SE BARRA DO PEIXE 230 KV

A SE Barra do Peixe 230 kV está localizada no município de Ribeirãozinho, estado do Mato Grosso, próxima a divisa com o estado de Goiás. A mesma faz parte do Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso, interligando as Linhas de Transmissão 230 kV de Rondonópolis (ELETRONORTE) de 217 km de extensão com as Linhas de Transmissão 230 kV de Rio Verde (FURNAS) com 241 km de extensão e Linhas de Transmissão 230 kV de Ribeirãozinho (ELETRONORTE) de apenas 3 km de extensão.

No ano de 2006 foram iniciados os projetos para implantação de 03 (três) Compensações Séries Fixas (CSF) na SE Barra do Peixe 230 kV, com as características técnicas básicas descritas nos sub-itens 4.1 a 4.3 a seguir [9]. A energização das CSFs ocorreram em Junho de 2007.

4.1 Linha de Transmissão 230 kV Barra do Peixe – Rondonópolis – Circuito 1

● Comprimento da Linha de Transmissão:	217	km
● Grau de Compensação:	30	%
● Potência Reativa Nominal:	34,6	MVAr
● Corrente Nominal:	600	A
● Impedância Nominal:	32,08	Ω

4.2 Linha de Transmissão 230 kV Barra do Peixe – Rondonópolis – Circuito 2

● Comprimento da Linha de Transmissão:	217	km
● Grau de Compensação:	50	%
● Potência Reativa Nominal:	119,8	MVAr
● Corrente Nominal:	1.100	A
● Impedância Nominal:	33,01	Ω

4.3 Linha de Transmissão 230 kV Barra do Peixe – Rio Verde – Circuito 1

● Comprimento da Linha de Transmissão:	241	km
● Grau de Compensação:	30	%
● Potência Reativa Nominal:	37,2	MVAr
● Corrente Nominal:	600	A
● Impedância Nominal:	34,41	Ω

6.0 - A FERRAMENTA DE ANÁLISE PSS™ NETOMAC

O programa PSS™ NETOMAC *Professional Network Planning Software* foi desenvolvido pela SIEMENS AG como uma ferramenta única de análise de sistemas de potência, cobrindo praticamente todas as áreas de interesse. O mesmo permite a interconexão entre elementos de transmissão, geradores, sistemas de transmissão em corrente contínua (HVDC) e vários tipos de dispositivos FACTS (*Flexible AC Transmission Systems*) como Compensações Séries Fixas, Compensadores Estáticos, etc., incluindo uma representação do sistema de controle destes dispositivos. O programa PSS™ NETOMAC é capaz de simular quase todos os tipos possíveis de fenômenos transitórios eletromecânicos e eletromagnéticos a partir da mesma interface [10].

Estudos no domínio do tempo podem ser realizados obtendo-se seus valores instantâneos (similar ao EMTP) ou em seus valores RMS. Os valores instantâneos são preferencialmente utilizados para o cálculo de fenômenos transitórios rápidos como propagação de formas de onda, tensão de restabelecimento transitórias e também ressonância subsíncrona. O programa PSS™ NETOMAC foi desenvolvido para permitir a simulação de eixos de unidades turbinas-geradores de grande massa integradas a sitemas elétricos de transmissão.

O programa PSS™ NETOMAC também possui um módulo de análise de freqüência. Além da análise dos valores resultantes, o programa é capaz de produzir faixas de freqüência de redes passivas ou inserir pequenas perturbações no domínio da freqüência. Esta técnica pode ser geralmente aplicada a qualquer constante elétrica de amortecimento (T_D) de redes ativas de interesse, podendo estas serem constituídas de máquinas, controladores e outros elementos ativos e passivos, como sistemas de transmissão em corrente contínua, compensações séries e estáticas, etc.

7.0 - ANÁLISE DA OCORRÊNCIA DA RESSONÂNCIA SUBSÍNCRONA NO SISTEMA DE TRANSMISSÃO DO ESTADO DO MATO GROSSO DEVIDO À INSTALAÇÃO DAS COMPENSAÇÕES SÉRIES FIXAS NA SE BARRA DO PEIXE 230 KV

Uma abordagem normalmente utilizada para avaliação do risco de Ressonância Subsíncrona (RSS) é a realização de um estudo detalhado do impacto em cada uma das gerações do sistema, verificando assim qual destas apresenta possibilidade de ocorrência de RSS [11]. No caso de um risco a uma geração ser encontrado, somente um estudo detalhado responderá:

- Sob quais situações e circunstâncias de operação do sistema a RSS ocorre;
- Se a RSS que pode ocorrer é capaz de causar fadiga ou dano permanente ao eixo do rotor da máquina;
- Quais medidas de proteção são necessárias para prevenir a ocorrência do fenômeno da RSS.

Neste Informe Técnico é apresentada a análise da ocorrência do fenômeno da RSS no Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso.

7.1 Método de Estudo – Varredura em Freqüência

Existem várias técnicas de investigação, análise e prevenção do fenômeno da Ressonância Subsíncrona (RSS), como por exemplo: análise por autovalores, análise no domínio da freqüência, análise no domínio do tempo e a análise por varredura em freqüência. Entre estas técnicas, a análise por varredura em freqüência foi a utilizada para a análise da RSS no Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso [11].

A análise por varredura em freqüência é amplamente utilizada para investigação de RSS. Esta avalia a dependência da impedância da rede passiva em relação a freqüência, na faixa de interesse de freqüência do ponto de vista de cada gerador investigado, com todos os parâmetros representados pelas impedâncias subtransitórias (X_d''). Se existe uma freqüência onde a reatância é zero e a resistência é muito baixa, oscilações auto-sustentadas podem ser geradas no sistema.

O método também provê informações com relação a possíveis problemas com interação torsional e torques transitórios. Problemas de interação torsional ou torques transitórios podem ocorrer se existir uma ressonância série no sistema e uma reatância mínima que for próxima as freqüências torsionais do rotor da máquina. A ressonância série é identificada quando a dependência da reatância em relação a freqüência torna-se positiva conforme a freqüência no sistema aumenta.

7.2 Gerações Analisadas no Estudo

A análise foi realizada para cada geração nas usinas interligadas ao Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso. Apesar de existirem praticamente somente turbinas hidráulicas nas gerações do sistema, a geração da cidade de Cuiabá – MT possui em sua planta turbinas a gás e a vapor em ciclo combinado. A Tabela I apresenta as gerações analisadas no estudo.

Tabela I – Gerações Analisadas no Estudo de Ressonância Subsíncrona

Descrição das Gerações	Tensão [kV]	Potência Gerada [MVA]	Reatância Subtransitória [%]
Cuiabá 1	16,0 kV	186 MVA	X_d'' = 11,7 %
Cuiabá 2	16,0 kV	216 MVA	X_d'' = 13,5 %
Itiquira 1	13,8 kV	33,8 MVA	X_d'' = 20,0 %
Itiquira 2	13,8 kV	52,9 MVA	X_d'' = 20,0 %
P. Pedra	13,8 kV	61,8 MVA	X_d'' = 20,0 %
Torixoréu	13,8 kV	102,0 MVA	X_d'' = 20,0 %
A. Limpa	13,8 kV	170,0 MVA	X_d'' = 20,0 %

7.3 Simulações Realizadas no Estudo

Foram realizadas simulações de contingências simples e duplas no Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso, apresentadas na Tabelas II [11].

A Tabela II apresenta a simulação do Caso Base para análise da Ressonância Subsíncrona (RSS) no Sistema de Transmissão, onde nenhuma contingência no sistema é identificada. Este caso serve de base comparativa aos demais, pois este apresenta a operação normal do Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso. Além do Caso Base, todas as simulações de contingências simples e duplas do Sistema de Transmissão nas tensões de 230 kV e 500 kV são apresentadas nesta mesma Tabela II.

O objetivo de desconectarmos a Linha de Transmissão 500 kV nas contingências duplas é de evitar o desvio (*bypass*) das Compensações Séries Fixas de 230 kV devido a problemas no Sistema de Transmissão de 500 kV do Estado do Mato Grosso [11].

Tabela II – Contingências Simples e Duplas Analisadas no Estudo de Ressonância Subsíncrona

Números das Simulações	**Contingência Analisada em relação a Ressonância Subsíncrona**
Caso 0	Caso Base (Sem a Ocorrência de Contingências no Sistema de Transmissão)
Casos 1, 2 e 3	LT 500 kV SE Intermediária – UHE Itumbiara / LT 500 kV SE Ribeirãozinho – SE Intermediária / LT 500 kV SE Cuiabá – SE Ribeirãozinho
Casos 4 e 5	LT 230 kV SE Rio Verde – SE Itumbiara (2 x CSFs com GC de 30%) / LT 230 kV SE Rio Verde – SE Itumbiara (1 x CSFs com GC de 70%)
Casos 6 e 7	LT 230 kV UHE C. Dourada – SE Itumbiara / LT 230 kV SE Rio Verde – UHE C. Dourada
Casos 8 e 9	LT 230 kV SE Barra do Peixe – SE Rio Verde (2 x CSFs com GC de 30%) / LT 230 kV SE Barra do Peixe – SE Rio Verde (1 x CSFs com GC de 70%)
Casos 10 e 11	LT 230 kV SE Ribeirãozinho – B. Peixe C1 / LT 230 kV SE Ribeirãozinho – B. Peixe C2
Casos 12 e 13	LT 230 kV SE Rondonópolis - Barra do Peixe (1 x CSFs com GC de 30%) / LT 230 kV SE Rondonópolis - Barra do Peixe (1 x CSFs com GC de 50%)
Casos 14 e 15	LT 230 kV SE C. Magalhães – SE R.Verde / LT 230 kV SE Rond. – SE C. Magalhães
Caso 16	LT 230 kV SE Cuiabá – SE Rondonópolis (1 x CSFs com GC de 60%)
Casos 17 e 18	LT 230 kV SE Coxipó – SE Cuiabá C1 / LT 230 kV SE Coxipó – SE Cuiabá C2
Casos 19 e 20	LT 230 kV SE Coxipó – SE Rondonópolis C1 / LT 230 kV SE Coxipó – SE Rondonópolis C2
Casos 21 e 22	LT 230 kV UHE P. Pedra – SE Rondonópolis / LT 230 kV UHE Itiquira – SE Rondonópolis
Caso 23	LT 500 kV SE Intermediária - UHE Itumbiara e LT 500 kV SE Ribeirãozinho - SE intermediaria
Caso 24	LT 500 kV SE Intermediária - UHE Itumbiara e LT 500 kV SE Cuiabá - SE Ribeirãozinho
Caso 25	LT 500 kV SE Intermediária - UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Rio Verde - SE Itumbiara (2 x CSFs com GC de 30%)
Caso 26	LT 500 kV SE Intermediária - UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Rio Verde - SE Itumbiara (1 x CSFs com GC de 70%)
Caso 27	LT 500 kV SE Intermediária - UHE Itumbiara e LT 230 kV UHE C. Dourada - SE Itumbiara
Caso 28	LT 500 kV SE Intermediária - UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Rio Verde - UHE C. Dourada
Caso 29	LT 500 kV SE Intermediária - UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Barra do Peixe - SE Rio Verde (2 x CSFs com GC de 30%)
Caso 30	LT 500 kV SE Intermediária - UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Barra do Peixe - SE Rio Verde (1 x CSFs com GC de 70%)
Caso 31	LT 500 kV SE Intermediária - UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Ribeirãozinho - SE B. Peixe C1
Caso 32	LT 500 kV SE Intermediária – UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Ribeirãozinho - SE B. Peixe C2
Caso 33	LT 500 kV SE Intermediária – UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Rondonópolis – SE Barra do Peixe C1 (1 x CSFs com GC de 30%)
Caso 34	LT 500 kV SE Intermediária – UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Rondonópolis – SE Barra do Peixe C2 (1 x CSFs com GC de 50%)
Caso 35	LT 500 kV SE Intermediária - UHE Itumbiara e LT 230 kV SE C. Magalhães - SE Rio Verde
Caso 36	LT 500 kV SE Intermediária - UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Rondonópolis – SE C. Magalhães
Caso 37	LT 500 kV SE Intermediária – UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Cuiabá – Rondonópolis (1 x CSFs com GC de 60%)
Casos 38 e 39	LT 500 kV SE Intermediária – UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Coxipó – SE Cuiabá C1 e C2
Casos 40 e 41	LT 500 kV SE Intermediária – UHE Itumbiara e LT 230 kV SE Coxipó – SE Rond. C1 e C2
Caso 42	LT 500 kV SE Intermediária – UHE Itumbiara e LT 230 kV UHE P. Pedra – SE Rondonópolis
Caso 43	LT 500 kV SE Intermediária – UHE Itumbiara e LT 230 kV UHE Itiquira – SE Rondonópolis

7.4 Resultados das Simulações Realizadas no Estudo com Relação as Gerações de Ciclo Combinado de Cuiabá

Nas simulações das Gerações de Ciclo Combinado de Cuiabá para a maioria das contingências é observado um afundamento na faixa de 52 Hz. Isto é o indicativo de uma possível ressonância série, a qual corresponderia a uma excitação no eixo do rotor na freqüência de 8 Hz. Esta freqüência está relativamente próxima à freqüência natural do rotor desta máquina (13,07 Hz). Entretanto, o amortecimento resistivo da rede é relativamente alto (por exemplo, o afundamento não é tão grande para forçar o cruzamento por zero), e também o amortecimento do eixo contribui para um amortecimento de maneira que a Ressonância Subsíncrona (RSS) não seria desenvolvida.

A causa do afundamento na varredura em freqüência e possível ressonância série pode ser atribuída a presença da Compensação Série Fixa (CSF) com Grau de Compensação (GC) de 60% presente na Linha de Transmissão (LT) entre a SE Cuiabá e SE Rondonópolis. Nas contingências em que esta LT está fora do sistem, o afundamento na varredura em freqüência desaparece (Caso 16). Como o afundamento não se altera em tamanho nem freqüência nos outros casos simulados, é possivel concluir que esta condição de ressonância é devido a presença desta CSF com GC de 60% na LT mencionada, não havendo influência das CSFs da SE Barra do Peixe.

Alguns dos casos simulados demonstram um segundo afundamento da faixa de 110 Hz a 120 Hz, o que corresponderia a uma excitação no eixo do rotor em 50 Hz a 60 Hz. Entretanto, não existe freqüência natural do rotor desta máquina que corresponderia à mesma, de maneira que uma possível ressonância nesta freqüência pode ser considerada inofensiva com relação à RSS.

7.5 Resultados das Simulações Realizadas no Estudo com Relação às Gerações de Itiquira

Nas simulações das Gerações de Itiquira não ocorreram afundamentos significativos. O mais notável ocorreu entrre 100 Hz e 110 Hz nos Casos 1, 2, 26, 27 e 28, todas relacionadas às contingências na região da SE Itumbiara. Entretanto a influência das Compensações Séries Fixas é ainda menor (nenhum cruzamento pelo zero) e o amortecimento da rede é relativamente alto, de maneira que condições de ressonância são muito improváveis. Além disso, Ressonâncias Subsíncronas no eixo do rotor das turbinas hidráulicas são muito difícieis de ocorrerem graças aos tamanhos dos eixos, assim como devido ao amortecimento das próprias máquinas.

Uma peculiaridade é o Caso 22, no qual as gerações estão desconectadas do sistema devido a contingência da Linha de Transmissão 230 kV SE Itiquira e SE Rondonópolis. A impedância que surge na interação entre os geradores pode ser desconsiderada com relação a Ressonância Subsíncrona (RSS). Assim, não é esperado que as Gerações Hidráulicas de Itiquira sofrerão do fenômeno da RSS devido as Compensações Séries Fixas da SE Barra do Peixe.

7.6 Resultados das Simulações Realizadas no Estudo com Relação à Geração de P. Pedra

Nas simulações da Geração de P. Pedra vários afundamentos significativos podem ser verificados nas freqüências de 18 Hz, 40 Hz e 110 Hz. Isto é uma indicação da influência das várias Compensações Séries Fixas (CSFs) nestas gerações, podendo ser atribuída a presença das CSFs nas Linhas de Transmissão 230 kV da SE Rondonópolis. Entretanto a influência das CSFs é relativamente pequena (nehum cruzamento pelo zero) e o amortecimento da rede é relativamente alto, de maneira que condições de ressonância são muito improváveis. Além disso, Ressonâncias Subsíncronas (RSS) no eixo do rotor das turbinas hidráulicas são muito difícieis de ocorrerem graças aos tamanhos dos eixos, assim como devido ao amortecimento das próprias máquinas.

O Caso 21 não foi considerado para estas gerações, pois ocorreria a desconexão destas do sistema e assim a condição de RSS não seria possível. Assim, não é esperado que a Geração Hidráulica de P. Pedra sofrerá do fenômeno da RSS devido às Compensações Séries Fixas da SE Barra do Peixe.

7.7 Resultados das Simulações Realizadas no Estudo com Relação à Geração de Torixoréu

A Geração de Torixoréu está planejada para a Configuração de 2014. Nas simulações vários afundamentos significativos podem ser verificados, porém os tamanhos são insignificantes com relação ao risco de ocorrência de Ressonância Subsíncrona (RSS). Assim, não é esperado que a Geração Hidráulica de Torixoréu sofrerá do fenômeno da RSS devido às Compensações Séries Fixas da SE Barra do Peixe.

7.8 Resultados das Simulações Realizadas no Estudo com Relação a Geração de A. Limpa

A Geração de A. Limpa está planejada para a Configuração de 2014. Assim como para a Geração de Torixoréu, nas simulações vários afundamentos significativos podem ser verificados, porém os tamanhos são insignificantes com relação ao risco de ocorrência de Ressonância Subsíncrona (RSS). Assim, não é esperado que a Geração Hidráulica de Torixoréu sofrerá do fenômeno da RSS devido às Compensações Séries Fixas da SE Barra do Peixe.

8.0 - CONCLUSÃO

O fenômeno da Ressonância Subsíncrona (RSS) constitui-se em preocupação natural sempre que se cogita a utilização de Compensação Série Fixa (CSF) em Linhas de Transmissão (LT), principalmente quando unidades geradoras termelétricas estão presentes. Pode-se destacar que a Ressonância Subsíncrona não apresenta risco propriamente dito para os equipamentos elétricos passivos instalados no sistema de potência como as próprias Compensações Séries Fixas ou outros equipamentos FACTS. Isto faz com que este tipo de equipamento não apresente proteção contra a ação do fenômeno Ressonância Subsíncrona.

A necessidade porém da implementação de proteção contra a ocorrência da Ressonância Subsíncrona, assim como sua viabilidade técnica deve ser cuidadosamente avaliada, pois este fenômeno é de grande complexidade e suas características dependem diretamente da topologia do sistema elétrico e das suas condições operacionais. Um sistema de proteção contra a ocorrência da Ressonância Subsíncrona que garanta uma ampla segurança para o conjunto turbina-gerador em todas as faixas de possibilidades nem sempre é possível.

Os estudos e análises realizadas para o Sistema de Transmissão do Estado do Mato Grosso (ELETRONORTE), nas Configurações de 2007 e de 2014 indicaram que a instalação das 03 (três) Compensações Séries Fixas na SE Barra do Peixe 230 kV não oferecem riscos para os geradores elétricos investigados. Da mesma forma, o Sistema de Proteção e Controle das Compensações Séries Fixas não necessitou ser provido com a função de proteção contra Ressonância Subsíncrona.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] D. N. Walker, C. E. J. Bowler, D. A. Hodges, “Results of Subsynchronous Resonance Test at Mohave”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. 94, N^{o} 5, pp 1878-1889,* Oct/1975.

[2] ELETRONORTE – Centrais Elétricas do Norte do Brasil S.A., “BAP-091-30000-EP-R05 - SE Barra do Peixe – Compensação Série Fixa 242 kV – 35, 37 e 120 MVAr – Especificação Técnica”, – Superintendência da Expansão da Transmissão, Brasília - DF - Brasil, 2005.

[3] C. A. L. P. Tavares, “Ressonância Subsíncrona e Outras Formas de Instabilidade Eletromecânica”, *Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro,* Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 2005.

[4] L. A. P. Peres, “Capacitores Série em Linhas de Transmissão: Análise Preventiva de Ressonância Subsíncrona”, *1^{a} Edição, – Universidade Estadual do Rio de Janeiro,* Rio de Janeiro-RJ, Brasil, 1997.

[5] IEEE Subsynchronous Resonance Working Group, “Terms, Definitions and Symbols for Subsynchronous Oscillations”, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS 104, N^{o} 6, pp 1326-1334, Dec*/1985.

[6] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, “Submodulo 2.3 - Requisitos Mínimos para Subestações e Equipamentos Associados – Rev.01”, *Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS*, Brasil, 2002.

[7] Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS, “Submodulo 4.6 – Critérios para Determinação das Ampliações e Reforços na Rede Básica – Rev.0”, *Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS*, Brasil, 2000.

[8] Norte Sul Engenharia, “Sistema de Transmissão do Mato Grosso – Estudo de Dimensionamento das Compensações Séries Fixas de Barra do Peixe 230 kV – Dados e Parâmetros Elétricos”, ELETRONORTE, Brasília - DF - Brasil, 2006.

[9] G. Thumm, L. Kirshner, “Barra do Peixe Fixed Series Compensation – Basic Design Report – ELETRONORTE - Brazil”, *Power Transmission and Distribution – Reactive Power Compensation – PTD H 166*, Erlangen - Germany, 2006.

[10] SIEMENS AG, “PSS™ NETOMAC Professional Network Planning Software – Instruction Manual”, *Power Transmission and Distribution Service – Power Technologies International – PTD SE PTI*, Erlangen - Germany, 2002.

[11] S. Henschel, G. Khun, M. Moraes, A. L. P. de Oliveira, “Subsynchronous Resonance Studies for the Barra do Peixe Power System – ELETRONORTE - Brazil”, *Power Transmission and Distribution Service – Power Technologies International – PTD SE PTI*, Erlangen - Germany, 2006.

10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

André Luiz Pereira de Oliveira nasceu em São José do Rio Preto/SP em 1978. Engenheiro Eletricista pela EFEI - Escola Federal de Engenharia de Itajubá (Itajubá - MG) desde 2001. Obteve os títulos de Especialista em Proteção de Sistemas Elétricos e Mestre em Ciências (*MSc*) pela Universidade Federal de Itajubá (Itajubá - MG) em 2003 e 2006 respectivamente. Certificado pelo *Project Management Institute® - PMI®* dos Estados Unidos da América (USA) como *Project Management Professional (PMP®)* em 2004. Trabalha desde 2001 na SIEMENS Ltda. na área PTD H (*Power Transmission and Distribution – High Voltage*) como *Project Manager (PM)*. É responsável pelo fornecimento “*turn-key*” de Subestações de Alta Tensão e Sistemas de Compensação de Reativos gerenciando contratos com empresas industriais e concessionárias do setor elétrico.