



**XXIII SNPTTE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

FI/GGH/28
18 a 21 de Outubro de 2015
Foz do Iguaçu - PR

GRUPO - I

GRUPO DE ESTUDO DE GERAÇÃO HIDRÁULICA – GGH

SISTEMA DE EXCITAÇÃO EM 4 QUADRANTES NA OPERAÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS COMO COMPENSADORES SÍNCRONOS

**Kleitton Schmitt (*)
REIVAX**

**Nelson Zeni Júnior
REIVAX**

**João Carlos Possat Cardoso
FURNAS**

RESUMO

A operação da máquina síncrona de polos salientes como compensador pode ter retorno financeiro elevado pela implantação de sistema de excitação operando em 4 quadrantes, pois este viabiliza uma maior absorção de carga reativa, ampliando a curva de capacidade no quadrante de subexcitação.

Neste Informe Técnico serão analisados registros de campo colhidos durante o processo de inversão de polaridade da corrente de campo no compensador síncrono de 300 MVA instalado na Subestação Tijuco Preto, de propriedade de FURNAS.

Serão também avaliados os custos e a remuneração de serviços auxiliares para unidades de geração hidráulica que operem em modo compensador síncrono.

PALAVRAS-CHAVE

Conversor estático 4 quadrantes, Compensador Síncrono, Serviços Auxiliares, Sistemas de Excitação, Máquinas Síncronas de polos salientes.

1.0 - INTRODUÇÃO

A operação de geradores síncronos como compensadores cada vez mais é solicitada pelo Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS – de forma a preservar os reservatórios de água no período de baixa carga e continuar com as turbinas provendo inércia ao sistema interligado – SIN –, gerando potência reativa e contribuindo para o desempenho dinâmico do sistema. A operação de unidades geradoras em modo compensador pode trazer vantagens econômicas às empresas de geração, já que a geração de energia reativa é revertida em receita, sendo a tarifa definida pela Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL. Mantendo-se o gerador sem carga conectado ao sistema, também reduzem-se as possibilidades de falhas que podem ocorrer nos ciclos de partida e parada das máquinas, tempo de retorno ao modo de operação como gerador e redução do desgaste dos materiais responsáveis pela isolação do gerador em função da diminuição na variação de temperatura do gerador.

Nestas máquinas de polos salientes, a distância entre o centro do polo e o estator é bem inferior à distância entre o estator e o rotor no espaço entre 2 polos. Isto cria um torque de relutância. Em máquinas de polos lisos, onde estes estão “embutidos” no perímetro do rotor, isto não ocorre, ou seja, a saliência síncrona é desprezível. A existência deste torque de relutância permite que a máquina de polos salientes se mantenha sincronizada mesmo sem corrente de excitação (desde que o despacho de potência ativa seja de pequena monta), e que a corrente de campo aplicada possa ser negativa, desde que não se ultrapasse o equivalente ao torque de relutância.

O sistema de excitação em 4 quadrantes, consiste em duas pontes retificadoras de Graetz trifásicas conectadas em antiparalelo, ou seja, com polaridade inversa, permitindo o sentido da corrente nas direções direta (quadrante I) e reversa (quadrante III). No sistema a ser analisado, somente uma das pontes permanece em serviço, recebendo

pulsos de disparo. A ponte positiva corresponde à corrente de campo no sentido direto, podendo operar durante condições transitórias do sistema, ou até mesmo no caso de uma auto-excitação, com tensão de campo negativa (quadrante II). Da mesma forma, a ponte negativa pode operar transitoriamente com a tensão de campo positiva (quadrante IV), porém permanecendo com o sentido da corrente de campo reversa.

A dificuldade encontrada no processo de inversão de corrente utilizando pontes em antiparalelo é a detecção precisa da extinção total de corrente na ponte positiva, antes de liberar os pulsos de comando para a ponte negativa, e vice-versa. Uma comutação inadequada provoca curto-circuito nos conversores com a posterior abertura dos fusíveis do conversor negativo, de menor capacidade.

2.0 - DESCRIÇÃO DA SUBESTAÇÃO TIJUCO PRETO

A Subestação Tijuco Preto começou a funcionar em setembro de 1982. Sua função é interligar as regiões Sul e Sudeste do país, bem como disponibilizar energia elétrica proveniente de Itaipu aos estados de São Paulo e Rio de Janeiro, pela Linha de Transmissão Cachoeira Paulista/ Tijuco Preto, em 500 kV.

3.0 - DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO REIVAX

Conforme Manual do Usuário (1), o regulador RTX POWER é constituído por três pontes positivas e duas negativas, sendo cada ponte retificadora composta por seis tiristores, possibilitando retificação completa totalmente controlada. O equipamento possui redundância, onde duas pontes positivas possuem a capacidade de fornecer ao campo a corrente nominal em carga. Em caso de operação com ponte negativa, cada ponte possui capacidade de operar com a corrente nominal negativa do gerador. Desta forma, a condição em operação normal são duas pontes positivas ou uma negativa.

4.0 - LIMITE DE ESTABILIDADE EM MÁQUINAS SÍNCRONAS

Conforme Fitzgerald (2), em um motor síncrono de polos salientes, a potência tem duas componentes: a potência fundamental e a potência de relutância, conforme Figura 1. A primeira é função da tensão terminal e da fem de excitação. A segunda depende apenas da tensão terminal e da diferença entre as reatâncias de eixo direto X_d e de eixo em quadratura X_q , existindo também em uma máquina sem excitação no rotor, desde que $X_d \neq X_q$.

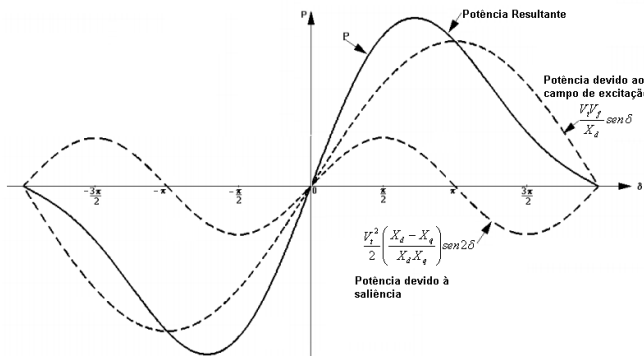


FIGURA 1 – Potência em função do ângulo de carga, para máquina síncrona de polos salientes.

$$P = \underbrace{\frac{V_t V_f}{X_d} \text{sen} \delta}_{\text{polos lisos}} + \underbrace{\frac{V_t^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \text{sen} 2\delta}_{\text{polos salientes}}$$

P = potência ativa

V_t = tensão terminal

V_f = força eletromotriz de excitação

X_d = reatância síncrona de eixo direto

X_q = reatância síncrona de eixo em quadratura

δ = ângulo de carga

EQUAÇÃO 1 – Potência ativa para polos lisos e polos salientes.

A existência deste torque de relutância permite que a máquina de polos salientes se mantenha sincronizada mesmo sem corrente de excitação (desde que o despacho de potência ativa seja de pequena monta). Em máquinas de polos lisos, o torque é dado somente pela componente da potência fundamental - dependente da fem de excitação, conforme a Equação 1.

Conforme J.A.F. Melo (3), o lugar geométrico correspondente à excitação zero é igual à circunferência com centro localizado no ponto Q_C , de acordo com a Figura 3 e conforme Equação 2, e raio dado pela Equação 3, entre as ordenadas dadas pela equação 4 e 5, onde Q é a potência reativa. O raio é zero para uma máquina de rotor cilíndrico, onde as reatâncias nos eixos direto e em quadratura são iguais.

$$Q_c = -\frac{V_t^2}{2} \left(\frac{X_d + X_q}{X_d X_q} \right)$$

EQUAÇÃO 2

$$\frac{V_t^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right)$$

EQUAÇÃO 3

$$Q_1 = -\frac{V_t^2}{X_d}$$

EQUAÇÃO 4

$$Q_2 = -\frac{V_t^2}{X_q}$$

EQUAÇÃO 5

O ponto na curva de capacidade, com potência ativa nula, onde a corrente de campo se anula é dado pela Equação 4. Por outro lado, se o sistema de excitação possui a capacidade de prover corrente negativa, é possível operar a máquina sincronizada até, teoricamente, atingir um segundo limite, desde que não se ultrapasse o equivalente ao torque de relutância, pela Equação 5.

Um aspecto importante é a possibilidade de operação permanente na “janela” entre Q1 e Q2, o que pode ser especialmente importante quando a máquina está em regiões que exigem uma grande capacidade de absorção de carga reativa. Isto vale bastante para compensadores síncronos, normalmente máquinas de polos salientes com rotação mais elevada que um gerador hidráulico, que acabam tendo reatâncias síncronas elevadas, fazendo com que a capacidade de absorção de reativos seja bem menor, em valores absolutos, que a capacidade de fornecimento de reativos. O projeto destes compensadores com reatâncias síncronas de eixo em quadratura não muito elevadas permite uma ampliação significativa da curva de capacidade, na zona de absorção de reativos.

Na Figura 2 estão indicados na curva de capacidade os limitadores do regulador de tensão do compensador síncrono da SE Tijuco Preto. O limitador de sub-excitação antecede à atuação do limitador de máxima corrente de campo negativa. Em caso de falha da transdução de potência, o limite de estabilidade deve ser garantido pelo limitador de máxima corrente de campo negativa.

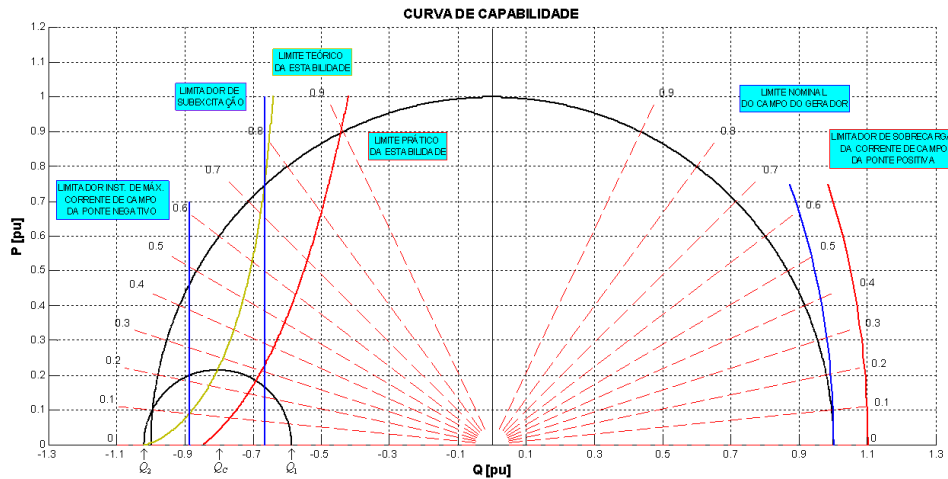


FIGURA 2 – Lugar geométrico correspondente à excitação zero na curva de capacidade

5.0 - OPERAÇÃO DO CONVERSOR ESTÁTICO EM 4 QUADRANTES

A FIGURA 33 apresenta a estrutura de potência utilizada durante a inversão da corrente nas pontes de tiristores. A polaridade da tensão apresentada sobre a carga Z será tomada como referência.

Os quadrantes envolvidos na operação desta estrutura podem ser vistos na FIGURA 4 4.

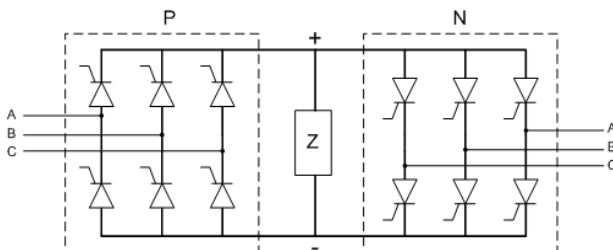


FIGURA 3 – Estrutura de potência.

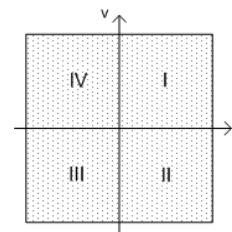


FIGURA 4 – Quadrantes de operação.

Inicialmente a corrente que circula na carga Z (campo do gerador) é proveniente da ponte positiva (P), que fornece à carga uma tensão positiva (primeiro quadrante). Ao final do processo a corrente circulará no sentido inverso, sendo fornecida pela ponte negativa (N) com uma tensão negativa sobre a carga (terceiro quadrante). A ilustração das duas etapas citadas pode ser vista na **Erro! Fonte de referência não encontrada.5**, que apresenta duas fases quaisquer durante a operação.

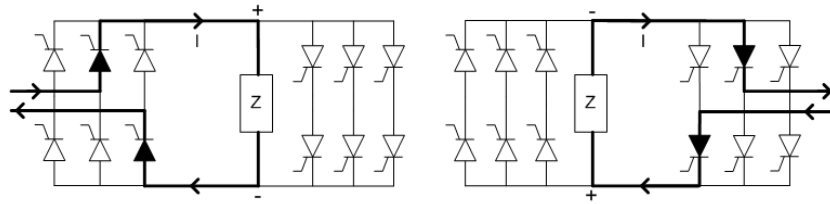


FIGURA 5 – Etapas de operação: primeiro e terceiro quadrantes respectivamente.

Durante a operação no primeiro quadrante, a ponte positiva permanece ativa enquanto os pulsos de comando dos tiristores da ponte negativa estão bloqueados. O mesmo ocorre durante o terceiro quadrante, agora com a ponte positiva bloqueada.

Os tiristores são interruptores que possuem a entrada em condução controlada, porém um bloqueio espontâneo (não-controlado). Na aplicação do campo da máquina síncrona, a carga tem característica indutiva, apresentando uma inércia de corrente que tende a se manter pelos tiristores que estiverem conduzindo no momento do bloqueio dos pulsos. Assim sendo, o simples fato de eliminar os pulsos de comando de uma ponte a tiristores não garante que por esta ponte não esteja circulando corrente.

Será feita uma breve análise do que acontece se os pulsos da ponte negativa forem liberados enquanto existir corrente na ponte positiva, ou vice-versa.

A FIGURA 66 ilustra uma situação em que o tiristor T_{6P} da ponte positiva (fase C) conduz uma pequena parcela de corrente enquanto o tiristor T_{1N} da ponte negativa (fase A) encontra-se polarizado diretamente, porém sem pulso de gatilho. É válido lembrar que esta é uma situação que ocorrerá em todo ciclo de operação.

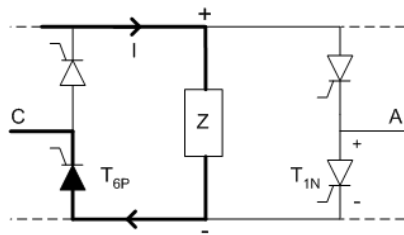


FIGURA 6 – Bloqueio dos pulsos de uma ponte a tiristores.

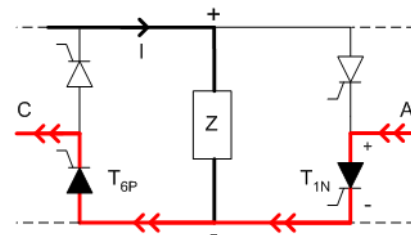


FIGURA 7 – Curto-circuito entre as fases A e C.

Se nesta situação o tiristor T_{1N} for comandado a conduzir, ocorrerá uma situação de curto-circuito entre as fases A e C. Como a fase A possui um nível de tensão superior ao da fase C (tiristor T_{1N} polarizado), a corrente circulará de A para C, provocando a abertura do fusível de um destes tiristores. A FIGURA 77 ilustra o curto bifásico.

Esta situação também poderá ocorrer entre A e B ou B e C simultaneamente, inclusive com os tiristores da parte superior das pontes.

6.0 - ENSAIOS DE CAMPO

6.1 Comutação de Conversores

6.1.1 Dinâmica do Limitador de Sub-Excitação - Inversão do sentido da corrente de campo por aplicação de degrau

Os registros das Figuras 8 e 9 foram adquiridos pela CPU de controle do regulador de tensão, no passo de 10ms. Os valores correspondentes a 1pu são 20KV para tensão terminal, 590Acc para a corrente de campo, 117Vcc para a tensão de campo e 300MVA_r para a potência reativa.

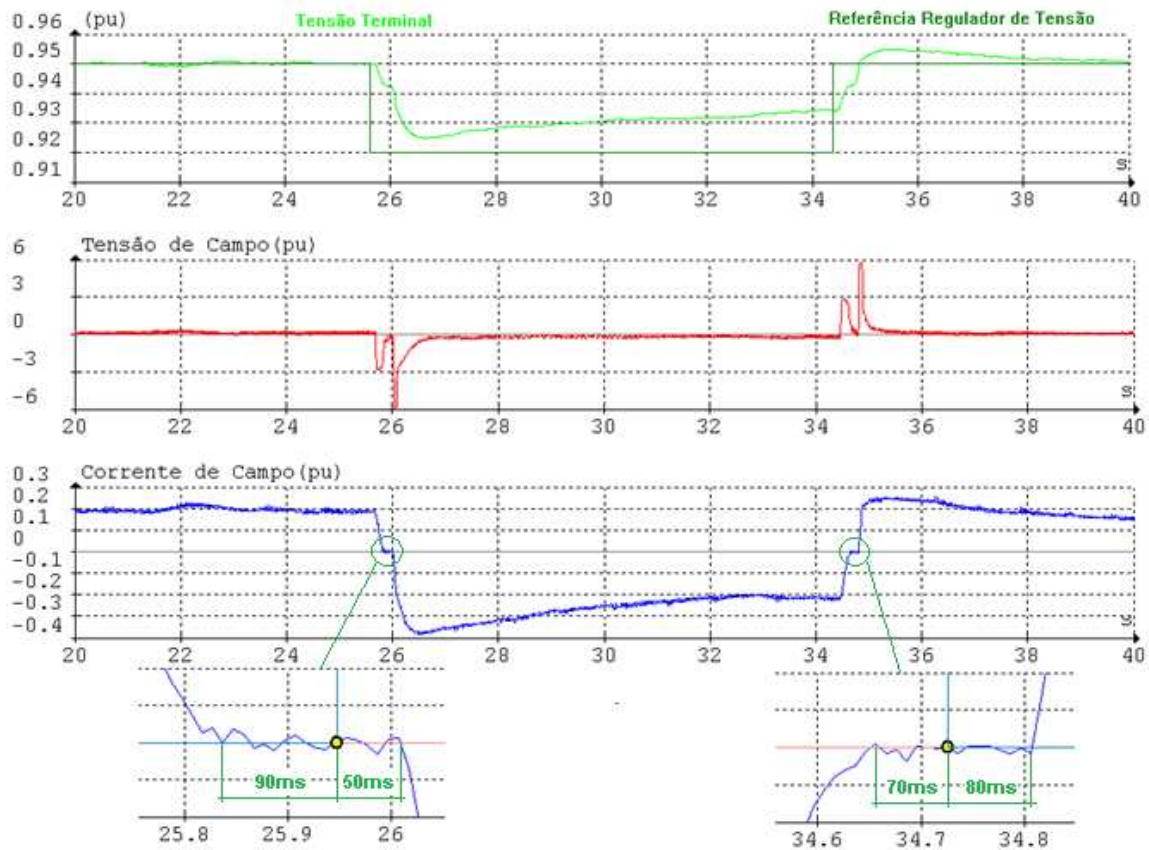
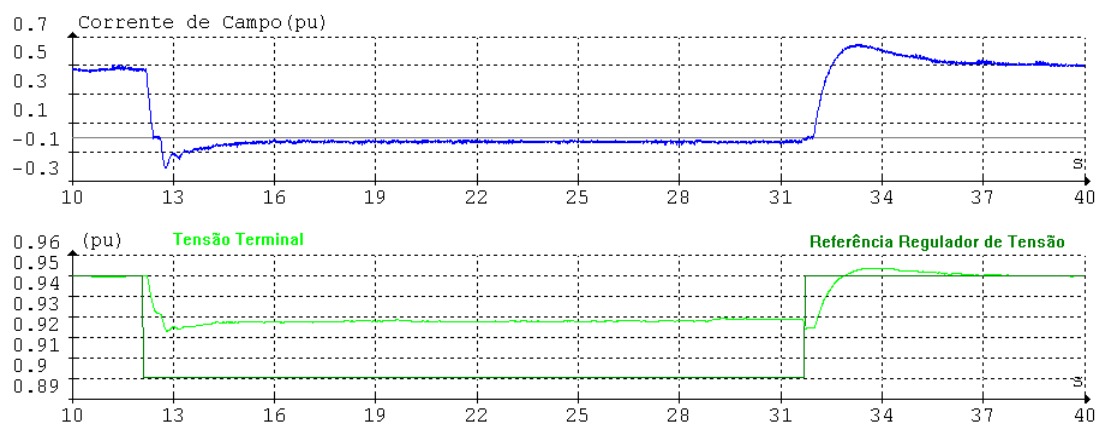


FIGURA 8 – Dinâmica do Limitador de Sub-Excitação.

Verifica-se a inversão do sentido da corrente de campo após a aplicação do degrau de -0.03pu , com a atuação do limitador de mínima excitação com a máquina operando com a ponte negativa.

No detalhe da corrente de campo no momento da inversão para ponte negativa, é possível verificar o tempo em que a corrente de campo permaneceu em zero, até a habilitação da ponte negativa, em torno de 90ms , e a efetivação da entrada da ponte negativa quando a corrente de campo sai de zero, após 50ms . Desta forma, o tempo total de comutação entre ponte positiva e negativa foi de 140ms .

6.1.2 Dinâmica do Limitador de Máxima Corrente de Campo Negativa



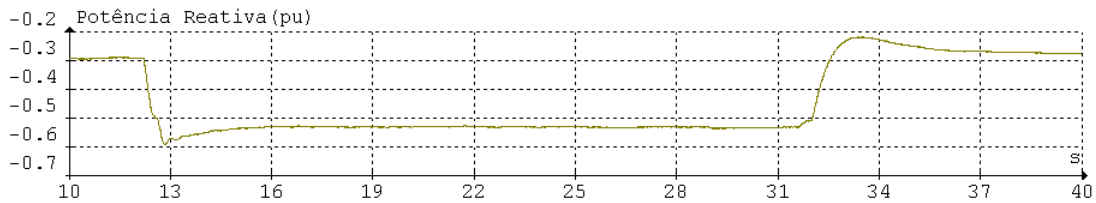


FIGURA 9 – Dinâmica do Limitador de Máxima Corrente de Campo Negativa.

A dinâmica do limitador de máxima corrente de campo negativo deve ser rápida, porém de forma estável, para atuar de maneira eficaz no distanciamento do ponto de operação em relação ao limite de estabilidade de maior potência reativa na curva de capacidade, dado pela Equação 5.

Na Figura 9 se verifica a atuação rápida e estável do limitador de máxima corrente de campo negativo para um degrau de -0,05pu na referência de tensão terminal.

6.1.3 Inversão do sentido da corrente de campo por aplicação de degrau - Análise de registro pelo Oscilógrafo NEC - RA2300 de 16 canais.

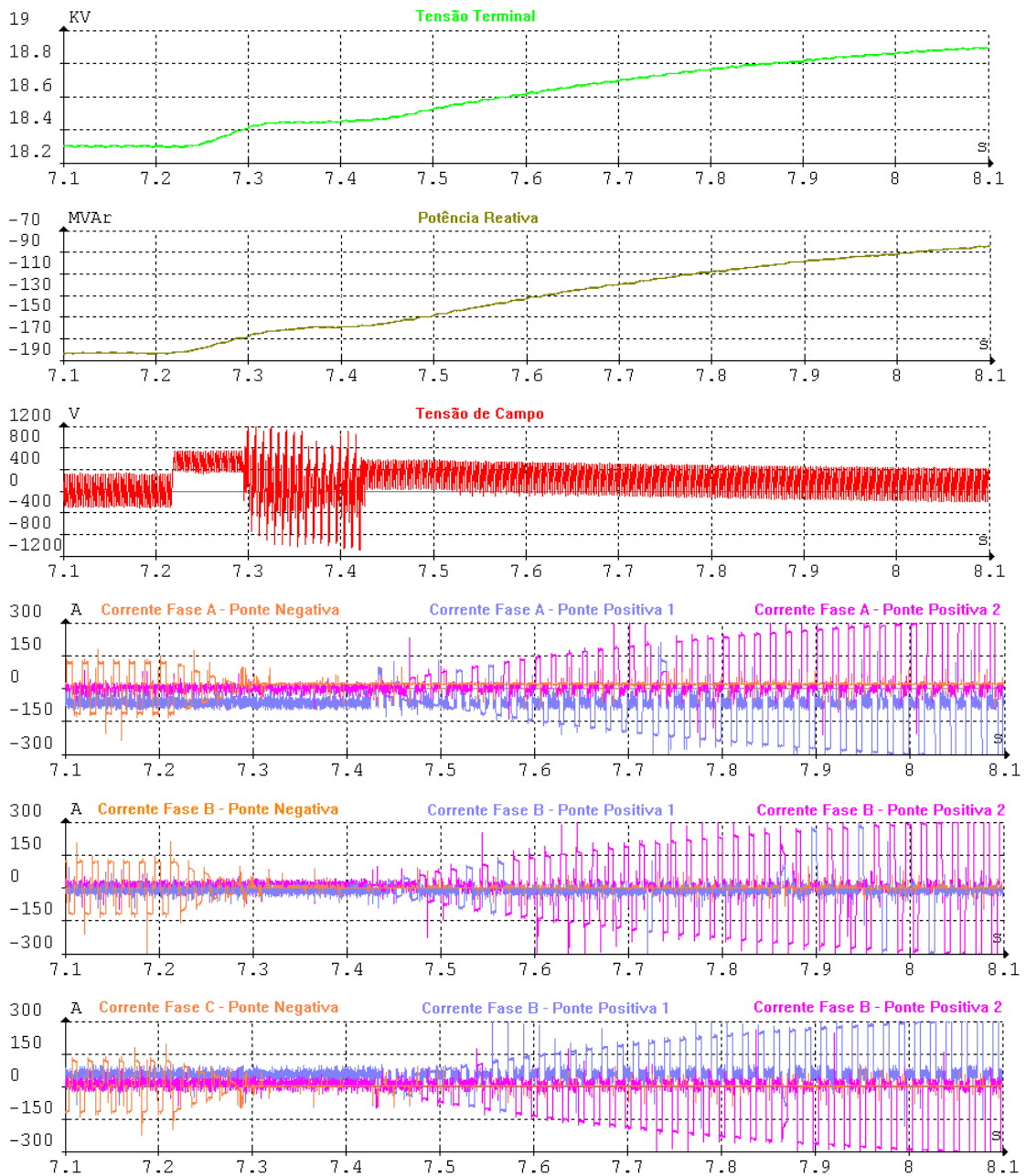


FIGURA 10 – Inversão do sentido da corrente de campo por aplicação de degrau.

Conforme descrito no item 3 deste Informe Técnico, a configuração mínima para operação das pontes do regulador de tensão RTX POWER em Tijuco Preto, é de duas pontes positivas e uma negativa. Na Figura 10 é verificado que a entrada em operação das duas pontes positivas em paralelo não ocorre de forma distribuída, com tiristores em paralelo suprindo toda a corrente, em função das diferenças nas características dos tiristores. Este efeito é anulado com o algoritmo de equalização de corrente na ponte, que atua de forma mais lenta que a malha de controle de tensão terminal do regulador. Na Figura 11 observa-se a atuação do algoritmo de equalização na operação da ponte negativa.

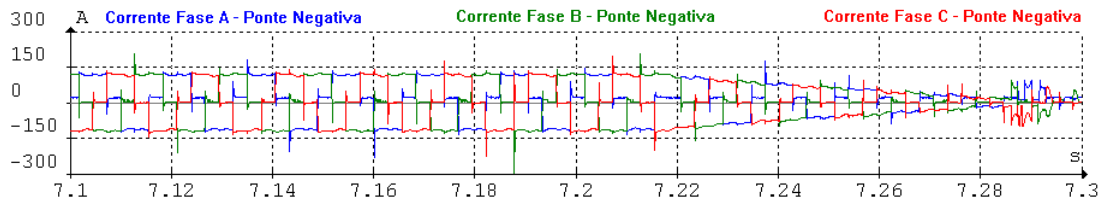


FIGURA 11 – Inversão do sentido da corrente de campo por aplicação de degrau

7.0 - AVALIAÇÃO DOS CUSTOS E REMUNERAÇÃO DE SERVIÇOS ANCILARES

Conforme Processo número 48500.005475/2014-91 da ANEEL, atualização da Tarifa de Serviços Ancilares - TSA, com vigência a partir de 10 de janeiro de 2015, de 25 de novembro de 2014, o valor vigente para remuneração de reativos em 2015 passou a ser de R\$ 5,65/MVAr-h, correspondente à variação do IPCA.

A Nota Técnica no 078/2003-SRG/ANEEL, de 17/12/2003, apresentou a metodologia de cálculo para determinação do valor e os períodos de reajuste da Tarifa de Serviços Ancilares – TSA, destinada a remunerar a prestação de suporte de reativos por unidades geradoras operando como compensador síncrono. Conforme demonstra a referida Nota Técnica, os custos a serem ressarcidos deverão ser baseados na energia reativa produzida, que resultou no valor calculado com base nos custos de operação e manutenção utilizados no cálculo da Tarifa de Energia de Otimização – TEO.

De acordo com a SRG (Nota Técnica no 078/2003-SRG/ANEEL), os custos adicionais incorridos para a geração de energia reativa por geradores operando como compensadores síncronos, com base em levantamentos efetuados junto aos próprios agentes provedores desse tipo de serviço, são da ordem de 5,94%.

Desta forma, na composição da TSA, atualmente constam os seguintes itens:

- a) Custo de operação e manutenção de usinas hidráulicas para geração incremental de energia, em R\$/MWh; e
- b) 1,0594 = fator do acréscimo de custo de operação e manutenção em usinas hidráulicas, devido à operação das unidades geradoras como compensador síncrono.

Em 29/8/2014 a ANEEL publicou no Diário Oficial da União a Consulta Pública nº 008/2014, sobre a revisão da Resolução Normativa nº 265, de 10 de junho de 2003, que trata da prestação e remuneração de serviços ancilares, e Resolução Normativa nº 330, de 26 de agosto de 2008, sobre adequação de instalações de centrais geradoras motivada por alteração na configuração do sistema elétrico.

Em resposta enviada por Furnas à Consulta Pública ANEEL nº 08/2014, foi sugerido inserir novo item sobre repotenciação de unidades geradoras existentes que implique na redefinição da potência originalmente projetada, através da adoção de avanços tecnológicos, de concepções mais modernas de projeto ou folgas existentes no projeto originalmente concebido que podem ser aproveitadas.

Em resposta a mesma Consulta Pública, a ABRAGE (Associação Brasileira das Empresas Geradoras de Energia Elétrica), relativo a compensação síncrona, colaborou como segue:

- A NT nº 385/2012-SRE/SRG/ANEEL, que contribuiu com subsídios para a fixação da tarifa inicial de geração, conclui que as variáveis relevantes para o estabelecimento dos custos operacionais de uma usina hidrelétrica são a potência instalada e o fator de capacidade.

8.0 - CONCLUSÕES

Conforme Nota Técnica ANEEL, nº 052/2014-SRG/ANEEL, a operação de unidades geradoras como compensador síncrono é o recurso que dispõe a unidade geradora, propiciando benefícios sistêmicos tais como suporte de reativos em regime dinâmico, agregação de inércia, elevação dos níveis de curto-circuito, eliminação de riscos de autoexcitação e sobretensões transitórias, além do controle de tensão em regime permanente.

Além disto, propicia benefícios em operações com cargas capacitivas elevadas, tais como subestações onde há (ou próximas de) terminais de elos de corrente contínua, ou necessidade de energização de linhas longas, em situações de recomposição ou até de operação normal do sistema.

Devido a estes valores para o Sistema Interligado, é essencial a revisão na forma de remuneração dos serviços ancilares, assim como indicado por Furnas à Consulta nº 08/2014 da ANEEL, com a análise de repotenciação das unidades geradoras através da adoção de avanços tecnológicos. Como indicado pela ABRAGE, os custos operacionais devem considerar a potência instalada e o fator de capacidade. Neste caso, leia-se fator de capacidade não só o máximo valor de potência reativa transmitida, mas também a capacidade em absorver reativo.

O uso dos conversores de 4 quadrantes é uma solução econômica para elevar a capacidade em absorver reativo, dependendo da diferença entre as reatâncias síncronas de eixo direto e em quadratura, podendo chegar, tipicamente, em valores até superiores a 50%. O investimento na aquisição de um cubículo adicional para operar com corrente negativa é próximo de 25% do valor do regulador.

9.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) MANUAL DO USUÁRIO, Reivax Automação e Controle. *RTX POWER – SISTEMA DE EXCITAÇÃO E REGULAÇÃO DE TENSÃO*. www.reivax.com.br.
- (2) FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C. Jr.; KUSKO, A. Máquinas Elétricas. McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1975.
- (3) J.A.F. Melo, Geradores síncronos: curvas de capacidade, Publicações técnicas CHESF, n.2, 1977.

10.0 - DADOS BIOGRÁFICOS

Autor de contato:



Nome: Kleiton Schmitt
 Local/Ano nascimento: Florianópolis/SC, 1978
 Formação: Engenharia Elétrica, 2002.
 Instituição de ensino: Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC.
 Experiência profissional: Atua desde 2002 na Reivax S/A como engenheiro. De 2002 à 2011 como engenheiro de campo, trabalhando com teste e comissionamento, e até a presente data como supervisor da equipe de SERVICE.

Autor 2:



Nome: Nelson Zeni Júnior
 Local/Ano nascimento: Porto Alegre/RS, 1954
 Formação: Engenharia Elétrica (UFRGS, 1977), Mestre em Controle de Sistemas de Potência (UFSC, 1987)
 Experiência profissional: Iniciou na CEEE em 1978 e trabalhou em estudos de sistemas de potência e em projetos de sistemas de controle especiais. Desde Janeiro de 1998 é sócio-diretor da REIVAX. Seus interesses de pesquisa incluem projeto de sistemas de controle aplicados a máquinas rotativas.

Autor 3:



Nome: João Carlos Possat Cardoso

Local/Ano nascimento: São Gonçalo/RJ, 1968

Formação: Engenharia Eletrônica, 1999

Instituição de ensino: Centro Federal de Educação Tecnológica - CEFET-RJ, Rio de Janeiro/RJ

Experiência profissional: Atua desde 2006 em Furnas como engenheiro de manutenção. De 2000 à 2006 como engenheiro na DSND Consub. Antes desse período como técnico em eletrônica.