



## COMPENSADORES SÍNCRONOS INSTALADOS EM GRANDES PARQUES EÓLICOS CONTROLADOS POR SISTEMAS DE EXCITAÇÃO 4 QUADRANTES – DESAFIOS ENFRENTADOS NA SUBESTAÇÃO MARMELEIRO 2 DE 525KV

Cristiano Bühler

Alécio J. Grzybowski Jr

Adelson Alves Jr

Rômulo G. S. Ristow

Marcus V. Junklaus

João de Deus de A. B.

REIVAX S/A

ELETROSUL

COTESA

### Resumo

Em subestações coletoras próximas a grandes parques eólicos costuma se fazer necessário o controle local da tensão da barra através da injeção ou absorção de potência reativa. A instalação de compensadores síncronos tem se mostrado interessante em função de permitir variações contínuas e suaves de reativo, através de variações na excitação da máquina. Retificadores positivos e negativos podem ser instalados, garantindo maior amplitude de operação da máquina. Desafios durante a concepção, projeto, comissionamento, operação e manutenção se apresentaram, tanto na área de controle como de proteção, dados os requisitos impostos pela subestação operar no nível de tensão de 525 kV.

### Palavras chave

Geração eólica, compensador síncrono, sistemas de excitação, controle conjunto de tensão.

## 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para garantir a robustez necessária ao sistema de transmissão para escoar a energia do Complexo Eólico Campos Neutrais, considerado o maior da América Latina – empreendimento da Eletrosul e parceiros, com 583 MW de potência, implantado no extremo sul do Brasil – foram instalados na Subestação Marmeleiro 2, em Santa Vitória do Palmar (RS), dois compensadores síncronos rotativos de grande porte. Esses equipamentos permitem controle mais efetivo da tensão na rede, uma vez que a geração eólica tem a peculiaridade de ser intermitente.

Sistemas do tipo SVC (*Static VAR Compensator*), pertencentes à família de sistemas FACTS (*Flexible AC Transmission System*), também são utilizados no controle de tensão em sistemas de transmissão de grande porte. Apresentam resposta dinâmica quase instantânea, já que são baseados em sistemas tiristorizados acionando cargas capacitivas e indutivas, separadamente. Apresentam elevados custos para aquisição, comparativamente aos circuitos de bancos de capacitores e reatores chaveáveis. Pode-se dizer talvez que a principal vantagem de um compensador síncrono rotativo em relação a um SVC seja a inércia da máquina, o que colabora com a estabilidade do sistema, além de aumentar a capacidade de curto-circuito da barra onde é instalado.

A Figura 01 mostra o Complexo Eólico Campos Neutrais.



Figura 01 – Foto do Complexo Eólico Campos Neutrais, origem da energia transmitida pela TSLE.

## 1.1 A Subestação Marmeleiro

A Subestação Marmeleiro 2 é uma das três subestações construídas no Rio Grande do Sul sob responsabilidade da Transmissora Sul Litorânea de Energia (TSLE) – empresa constituída pela Eletrosul (51%) e Companhia Estadual de Geração e Transmissão de Energia Elétrica - CEEE-GT (49%). O sistema de transmissão inclui a implantação de quase 470 quilômetros de linhas em extra-alta tensão (525 kV), escoando a energia dos parques eólicos até o maior centro consumidor na região, que é a Região Metropolitana de Porto Alegre.

A subestação Marmeleiro 2 foi concebida junto ao Lote A do Leilão 005/2012-ANEEL. As especificações técnicas detalhadas estão apresentadas em [1].

Ressalta-se que a rede de transmissão projetada (linhas, transformadores, reatores e compensadores síncronos) foi uma solução de planejamento da transmissão, para atender cargas e viabilizar escoamento da geração eólica latente do sul do estado do Rio Grande do Sul. A Figura 02 apresenta um infográfico mostrando a integração dos parques eólicos ao sistema de transmissão da TSLE [2]. Um diagrama unifilar dos empreendimentos é mostrado na Figura 03 [1].



Figura 02 – Infograma - Integração dos parques eólicos ao sistema de transmissão da TSLE [2].

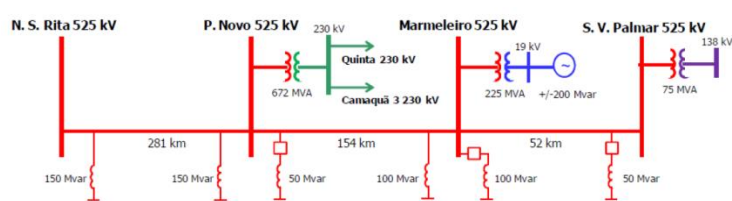


Figura 03 – Diagrama unifilar dos empreendimentos [1].

Dentre os requisitos básicos estabelecidos no contrato de concessão do empreendimento, os compensadores devem ter capacidade de absorção de reativos de -200 MVar. Para o atendimento a essa faixa de potência, foi acrescentada uma ponte retificadora negativa à excitatriz estática dos compensadores.

Em arranjos com dois compensadores conectados na mesma barra, caso de Marmeleiros 2, lógicas de controle conjunto foram implementadas para maior facilidade no controle de despacho (vide Figura 04). Essa implementação demandou esforço conjunto entre os envolvidos no projeto, além do ONS (o ONS opera a barra de 525 kV, e os setpoints são aplicados pela TSLE, através da Eletrosul, em Florianópolis/SC).

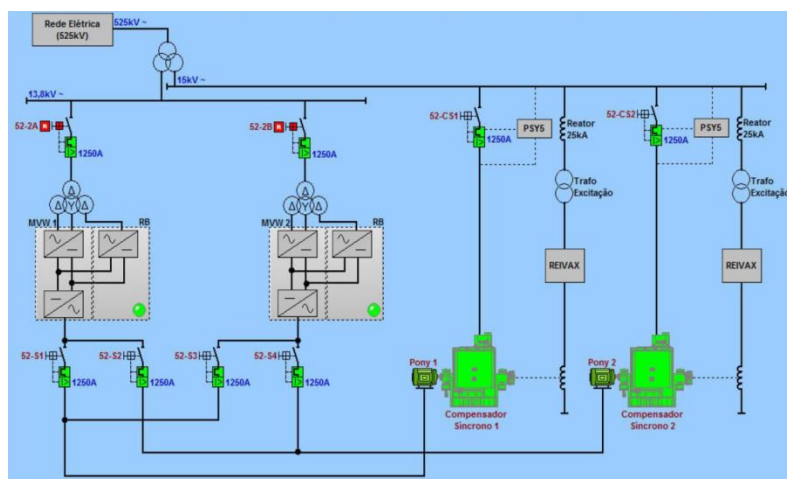


Figura 04 – Diagrama unifilar da SE Marmeleiro 2.

Uma visão geral da SE Marmeleiro 2 é apresentada na Figura 05.



Figura 05 – Vista geral da SE Marmeleiro 2.

## 1.2 A Máquina Síncrona e o Limite de Estabilidade [3]

Nas máquinas de polos salientes concebidas para operação como compensadores, a distância entre o centro do polo e o estator é bem inferior à distância entre o estator e o rotor no espaço entre dois 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. Em máquinas de polos lisos, o torque é dado somente pela componente da potência fundamental - dependente da f.e.m. de excitação, conforme a Equação 1.

Conforme Fitzgerald [4], em um motor síncrono de polos salientes, a potência tem duas componentes: a potência fundamental e a potência de relutância, conforme Figura 06. A primeira é função da tensão terminal e da f.e.m. 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  $X_d \neq X_q$ .

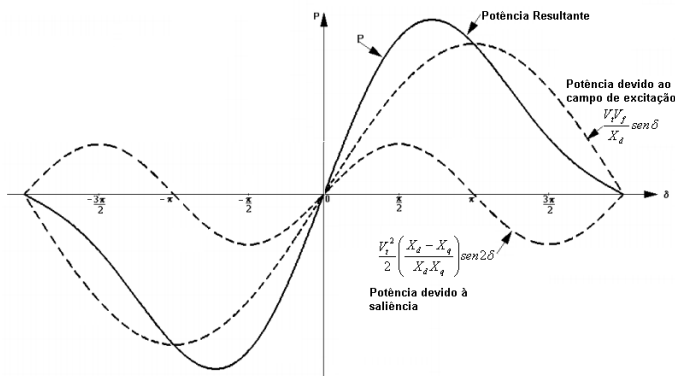


Figura 06 – Potência em função do ângulo de carga, para máquina síncrona de polos salientes.

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

$P$  = 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

$\delta$  = ângulo de carga

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

Conforme MELO [5], o lugar geométrico correspondente à excitação zero é igual à circunferência com centro localizado no ponto  $Q_c$ , de acordo com a Figura 06 e conforme Equação 2, e raio dado pela Equação 3, entre as ordenadas dadas pelas Equações 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  $Q_1$  e  $Q_2$ , 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 07 estão indicados na curva de capacidade os limitadores do regulador de tensão do compensador síncrono da SE Tijuco Preto, máquina de 300MVA que opera de maneira análoga às instaladas na SE Marmeleiro 2. Percebe-se que 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.

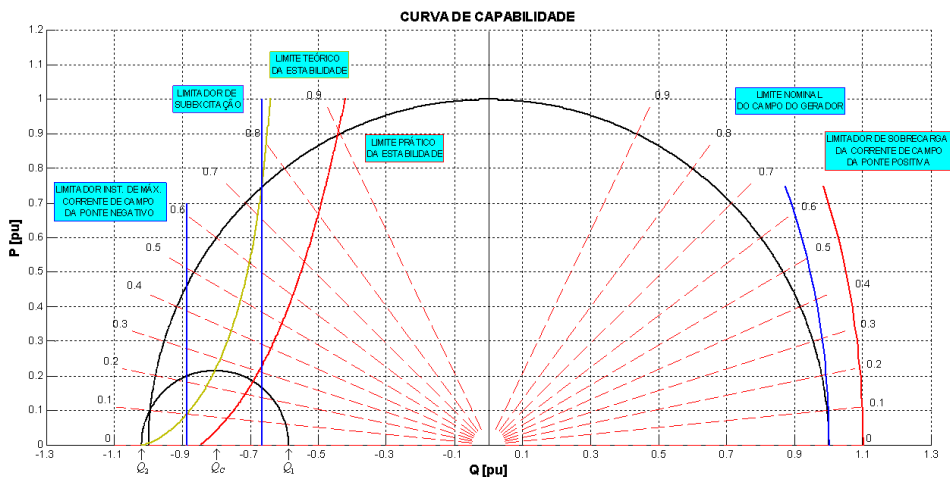


Figura 06 – Lugar geométrico correspondente à excitação nula na curva de capacidade.

Na Figura 07 está indicada a região de excitação nula bem como a região com excitação negativa dos compensadores da SE Marmeleiro 2.

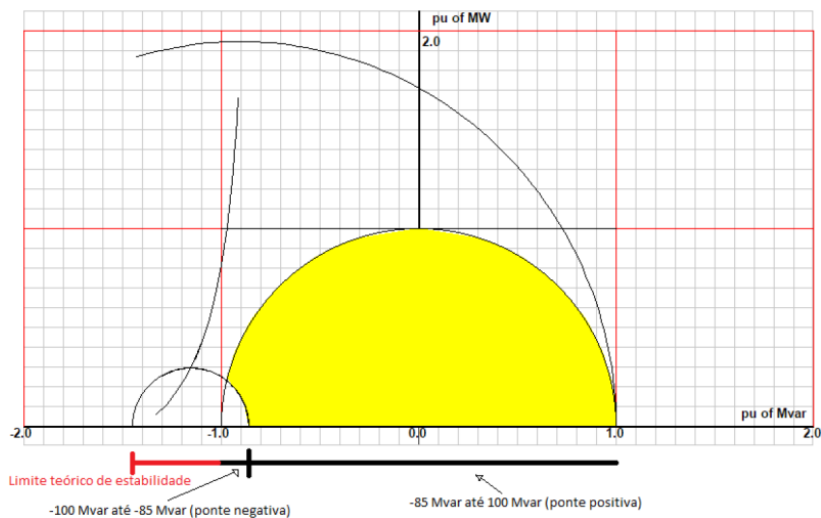


Figura 07 – Lugar geométrico correspondente à excitação nula na SE Marmeleiro 2.

Os compensadores síncronos rotativos são usados em grandes sistemas elétricos de geração e transmissão de energia. No caso dos empreendimentos do extremo sul gaúcho, os equipamentos são indispensáveis para manter os níveis de tensão do sistema sob controle e, ainda, elevar a potência de curto-circuito para permitir a correta operação da geração eólica.

Cada um dos dois compensadores síncronos instalados possui potência de 110 MVar, com dimensões físicas de 11 metros de comprimento e 7 metros de altura, pesando 310 toneladas. Na Figura 08 tem-se uma visão geral da máquina. Os parâmetros elétricos do compensador 2 estão apresentados na Tabela 01.

Tabela 01 – Parâmetros elétricos do compensador 2 da SE Marmeleiro 2 [6].

Frequência	60 Hz	$X''_d$	18%
Potência	100 MVA	$X_q$	69%
Tensão	15 kV	$X''_q$	20%
Polos	12	$X_2$	19%
H	2,88 s	$X_0$	9%
$I_{fd}$ base	700 A	$R_a$	0,14%
$X_d$	109%	$T'_{d0}$	7,69 s
$X'_d$	24%	$T''_{d0}$	57 ms





Figura 08 – Visão geral de um dos compensadores da SE Marmeleiro 2.

### 1.3 O Sistema de Excitação e a Operação em 4 Quadrantes

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. Na Figura 09 tem-se a vista frontal do sistema de excitação.

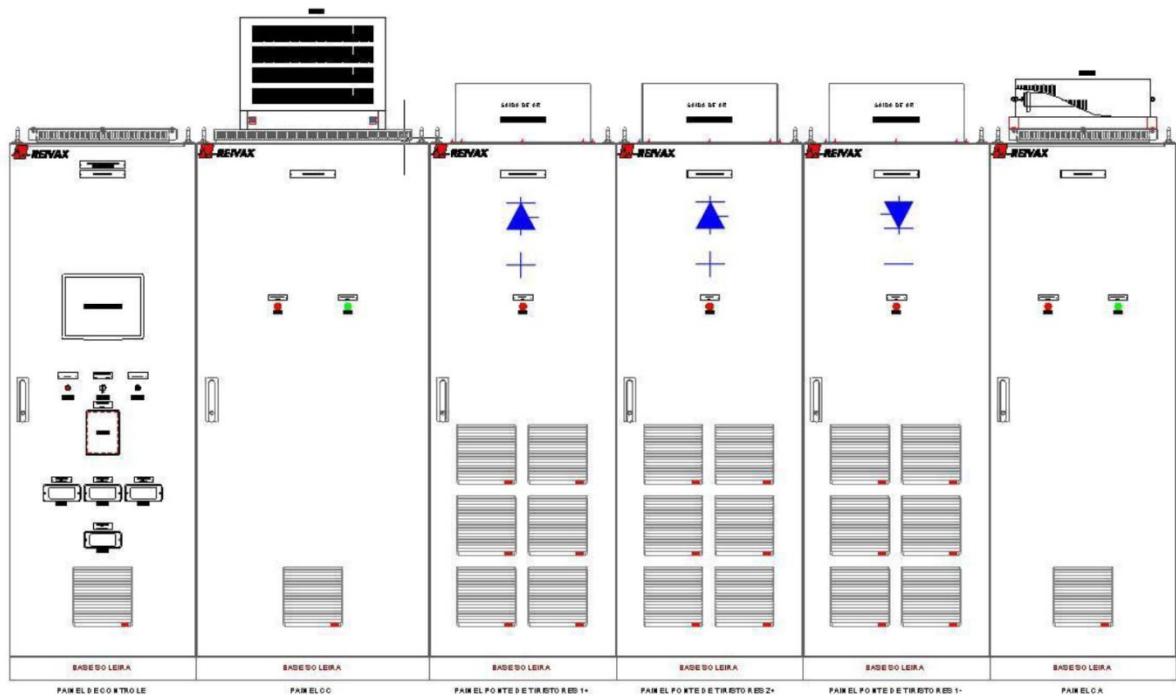


Figura 09 – Vista frontal do sistema de excitação de Marmeleiro 2 [7].

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.

A Figura 10 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 11.

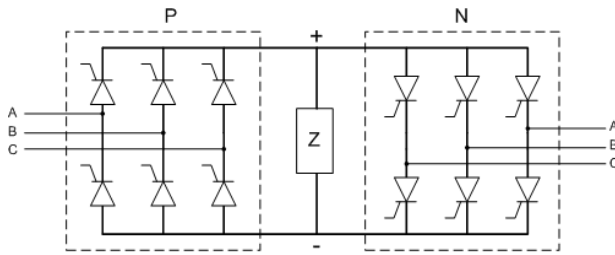


Figura 10 – Estrutura de potência.

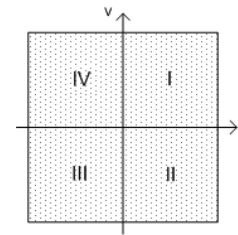


Figura 11 – Quadrantes de operação.

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 Figura 12, que apresenta duas fases quaisquer durante a operação.

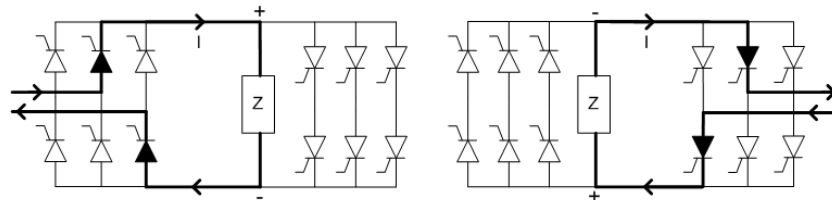


Figura 12 – Etapas de operação: primeiro e terceiro quadrantes respectivamente.

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 13 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.

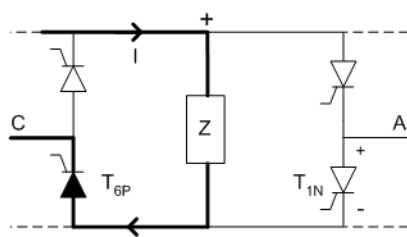


Figura 13 – Bloqueio dos pulsos de uma ponte a tiristores.

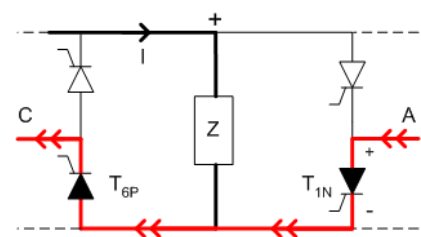


Figura 14 – Curto-circuito entre as fases A e C.

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 14 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.

Em relação à manutenção desse sistema, cuidados devem ser tomados durante a substituição de componentes estando a máquina em operação. Como qualquer outro regulador com redundância de controle, a substituição do PLC ou módulo de entradas e saídas é factível, já que demanda o trabalho com tensões reduzidas (até 125Vcc), além dos circuitos de TP e TC (vide Figura 15). Quando seja necessária a substituição de um elemento retificador, é possível sua substituição estando a máquina sincronizada ao sistema, no entanto, esse processo demandará maiores cuidados do mantenedor quanto aos procedimentos de segurança, detalhados no manual de operação e manutenção do RTX POWER [6].



Figura 15 – Vista em perspectiva do sistema de excitação de Marmeleiro 2.

#### 1.4 Controle Conjunto de Tensão [6]

Um regulador de tensão pode operar em conjunto com os demais reguladores de tensão de uma determinada central ou subestação, de maneira a controlar a tensão da barra e equilibrar a potência reativa total entre as máquinas. Este controle é realizado por uma malha externa à malha de controle individual de tensão de cada uma das máquinas, sendo conhecido como Controle Centralizado de Tensão ou *Joint Voltage Control*.

A SE Marmeleiro 2 deve atender operacionalmente a faixa de -200MVAR a 200MVAR sem restrições, sendo dividido em 100MVAR para cada compensador. Um diagrama de blocos simplificado do sistema é mostrado na Figura 16.



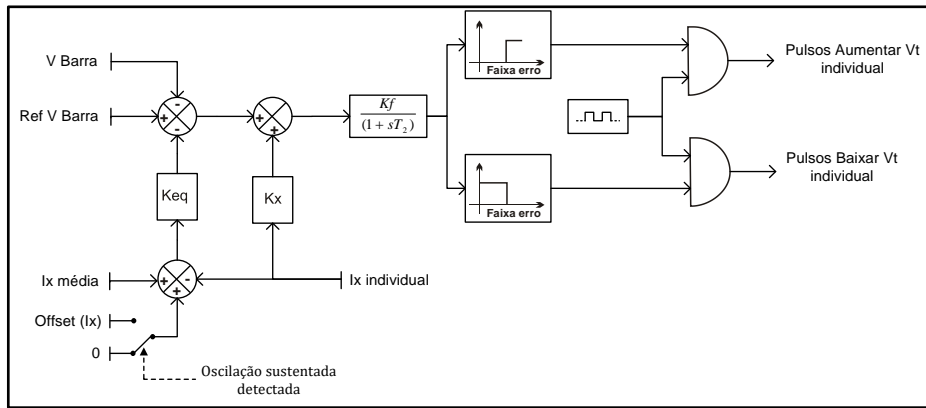


Figura 16 – Diagrama de blocos simplificado do *Joint Voltage Control* [8].

## 1.5 Proteção 64R

O circuito de excitação da máquina síncrona, que é composto pela excitatriz, cablagem, escovas (se tiver) e enrolamento de campo, opera isolado da terra. Deste modo, a ocorrência do primeiro defeito à terra não caracteriza um curto-circuito e, portanto, a máquina continua a operar normalmente. Se este defeito não for corrigido pela manutenção, existe o risco de um segundo defeito. Este segundo defeito pode ocorrer aleatoriamente em qualquer lugar do circuito de excitação [9].

Dependendo do ponto dos dois defeitos, a corrente de curto-circuito pode ser elevada, danificando severamente o gerador síncrono. A segunda falta à terra pode distorcer a distribuição do fluxo do campo e dar origem a grandes vibrações no rotor. Esta vibração é capaz de quebrar pedestais e fazer a excentricidade do eixo seja suficientemente grande a ponto de o rotor roçar no estator [10].

De acordo com a nomenclatura padronizada ANSI [11], o relé detector de contato à terra é chamado de 64. No caso específico do estator, o relé é chamado de 65E (estator) ou 64S (stator). No caso do campo, o relé é chamado de 64R (rotor) ou 64F (field).

A IEEE Std C37.102-2006 [12] apresenta cinco diferentes metodologias para detecção do primeiro defeito à terra no campo da máquina e circuito de excitação, inclusive em máquinas do tipo brushless. Esquemas da detecção de falta à terra usando uma fonte de corrente contínua e usando divisor de tensão resistivo são apresentados na Figura 17.

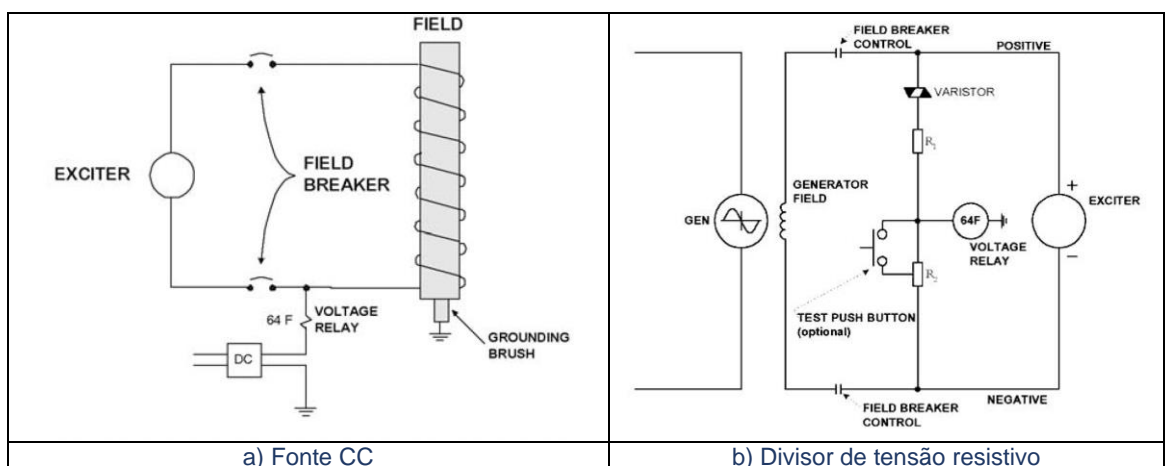


Figura 17 – Esquemas da proteção de defeitos à terra no rotor.

A empresa BENDER [13] fabrica relés de proteção 64F que operam segundo um novo método chamado AMPplus, que está se tornando comum, principalmente pelo preço do componente.

Diferentes fabricantes utilizam filosofias distintas para realizar a medição da impedância entre o enrolamento de campo da máquina e o terra. Independente da filosofia aplicada, o relé 64R costuma estar instalado junto ao cubículo do sistema de excitação, em função da facilidade na instalação junto aos barramentos de saída para o campo da máquina.

Um defeito comum nesse circuito, que causa a atuação do relé 64R, é a sujeira gerada pelo desgaste das escovas de carvão que são conectadas ao anel rotativo, que causa uma redução da capacidade isolante dos isoladores que prendem as escovas ao anel. Diante disso, podem existir fugas de corrente de campo para a terra pelo caminho formado sobre os isoladores, levando a proteção 64R à atuação. Obviamente essa atuação do relé 64R é devida, já que percebeu a redução da impedância entre o enrolamento de campo e a conexão à terra da máquina.

Outro problema comum é em relação ao tipo das escovas utilizadas, bem como do material utilizado na fabricação das mesmas. Caso exista um desgaste irregular dessas escovas, ou até um desgaste anormal do próprio anel (pista), poderá acontecer uma redução de impedância entre o campo e a terra em função da sujeira excessiva gerada pelo desgaste das escovas.

## **1.6 Método de Partida do Compensador Síncrono [14]**

Por tratar-se de um motor síncrono, não existe máquina primária (turbina) para acionar a máquina elétrica. No entanto, diferentes maneiras são utilizadas para o referido acionamento, sendo que as mais aplicadas são: motor auxiliar de partida (*Pony Motor*); inversor de frequência em média tensão (*Variable Frequency Driver – VFD*); e partida em tensão reduzida (Método Korndörfer).

Na subestação Marmeleiro 2, os dois compensadores síncronos estão equipados com método de partida baseado em *Pony Motor*, método no qual um motor auxiliar é temporariamente acoplado ao eixo, com propósito de elevar a rotação a um valor levemente acima da nominal. O *Pony Motor* é então desacoplado e o sincronismo com a rede se dá durante a desaceleração, através de sincronizador automático convencional (o mesmo aplicado aos geradores síncronos).

Durante a aceleração da máquina, o sistema de excitação, estando em controle manual, injeta um valor fixo de corrente (cerca de 300A) no campo da máquina, até que a mesma atinja a rotação nominal. Nesse instante, o sistema de excitação reduz a zero a corrente de campo, comuta para modo automático, e volta a excitar a máquina, elevando a tensão terminal ao valor nominal. Finalizado esse processo, a máquina está pronta para o sincronismo com a rede.

## **2 DESAFIOS ENFRENTADOS EM CAMPO**

### **2.1 Controle Conjunto de Tensão – Oscilação Sustentada, Afundamento no Serviço Auxiliar e Descolamento do Nível de Reativo entre Máquinas**

O pessoal de Operação e Manutenção relatou os seguintes problemas: 1) Afundamento da tensão CA de Serviços Auxiliares quando se operava na região de alta absorção de reativo; 2) Oscilação indesejada de potência reativa e tensão na barra de 500 kV quando se operava perto da região de -160 Mvar (região da comutação de pontes); 3) Descolamento indesejado da potência reativa entre CO1 e CO2 quando se operava perto da região de -160 Mvar (região de comutação de pontes), obrigando uma máquina operar no limitador de subexcitação e a outra mais folgada.

A região de operação onde a SE Marmeleiro 2 está inserida possui excesso de reativo natural, e também, a injeção de potência ativa e absorção de potência reativa pelos parques eólicos possui natureza estocástica, difícil de prever. Diante disto, os compensadores sempre operam na região subexcitada, com raras situações contrárias, e ainda considerando o período da

madrugada (nível de cargas mais baixas) durante o inverno, é alta a probabilidade de que seja exigido -150MVAR da subestação sendo distribuídos em -75MVAR para cada compensador.

O regulador de tensão é composto por três pontes de tiristores, sendo que duas pontes fornecem a corrente de campo no sentido positivo e a terceira ponte está projetada para fornecer no sentido negativo, ou seja, há inversão de polaridade no campo do compensador quando é feito o chaveamento entre pontes. Dito isto, toda inversão de polaridade no campo do compensador gerará uma pequena mas perceptível oscilação de reativos, sendo considerado um efeito natural de operação do regulador de tensão.

A inversão de polaridade no campo dos compensadores pode ocorrer quando o ONS solicita um determinado valor de tensão no barramento de 525kV. Para isso, o operador aplica um comando no controle centralizado de tensão da barra e os compensadores serão guiados a um novo ponto de operação, sendo possível a região em torno de -75MVAR onde os compensadores encontram-se com a corrente de campo aproximadamente em 0A, ou seja, existe a probabilidade de inversão na polaridade do campo para absorção de mais reativo.

A conclusão para o problema da oscilação sustentada por períodos demasiadamente longos é que, em função da necessidade de divisão igualitária de corrente reativa entre as máquinas, o controle centralizado mantém-se ativo enviando comandos para manter os dois compensadores na mesma potência reativa. Como os compensadores estão em condições susceptíveis à inversão de polaridade no campo, isto irá ocorrer indefinidamente até que saiam dessa região de operação, como pode ser observado na Figura 18 e na Figura 19.

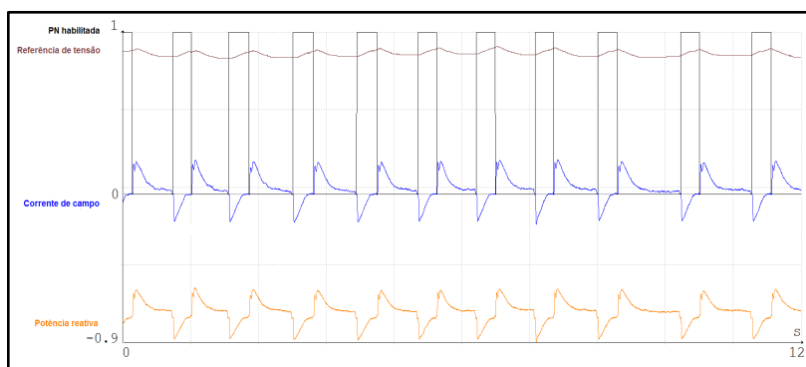


Figura 18 – Registro de uma oscilação sustentada.

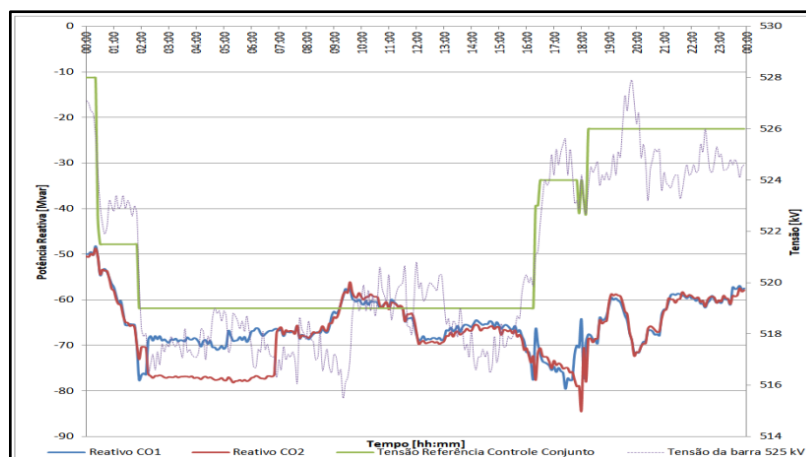


Figura 19 – Registro do descolamento do reativo do CO1 e CO2.

Foram realizadas modificações de lógica e de ajuste no software do sistema de excitação visando evitar o efeito observado. Em suma, foi incluído um bloco de zona morta e outro de histerese na saída da malha do controle centralizado. A Figura 20 apresenta a função lógica booleana implementada.

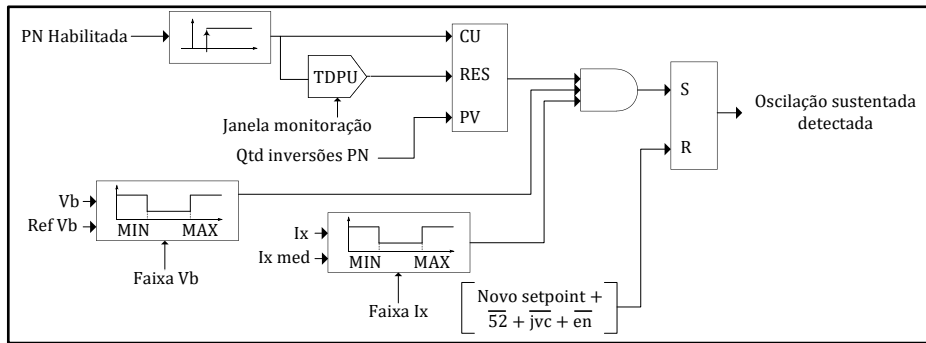


Figura 20 - Detecção de oscilação sustentada.

A tela para ajuste da lógica citada através da IHM do regulador é mostrada na Figura 21.

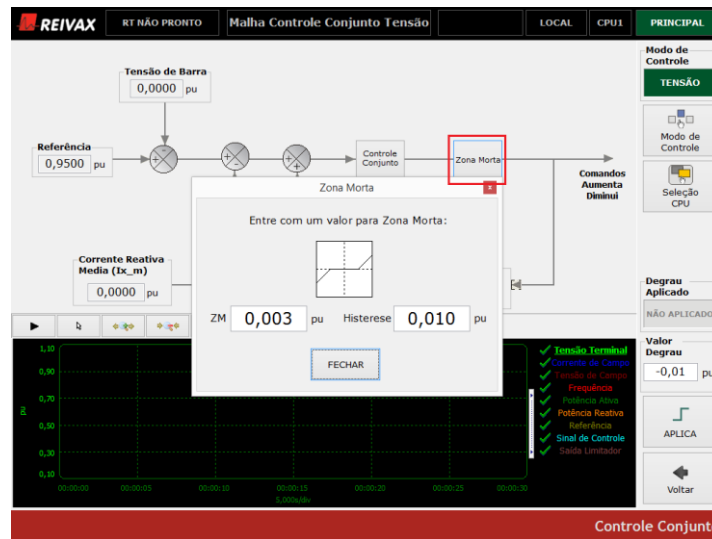


Figura 21 - Ajuste da histerese do bloco Zona Morta.

## 2.2 Atuação da Proteção 64R

Segundo relato da equipe de Operação e Manutenção [8], houve atuação do relé 64R em função de uma baixa isolamento na área dos anéis coletores/escovas de excitação devido ao acúmulo de sujeira provocada pelo desgaste irregular das escovas. Oscilografias do relé de proteção e do regulador de tensão (curva da corrente de campo) durante uma das ocorrências estão apresentadas na Figura 22.

Posteriormente, foi modificada a especificação das escovas, quando então foi minimizado o desgaste, não provocando novas atuações da proteção 64R [15]. A Figura 23 mostra os profissionais realizando ensaios de Megger e também limpeza nos anéis.

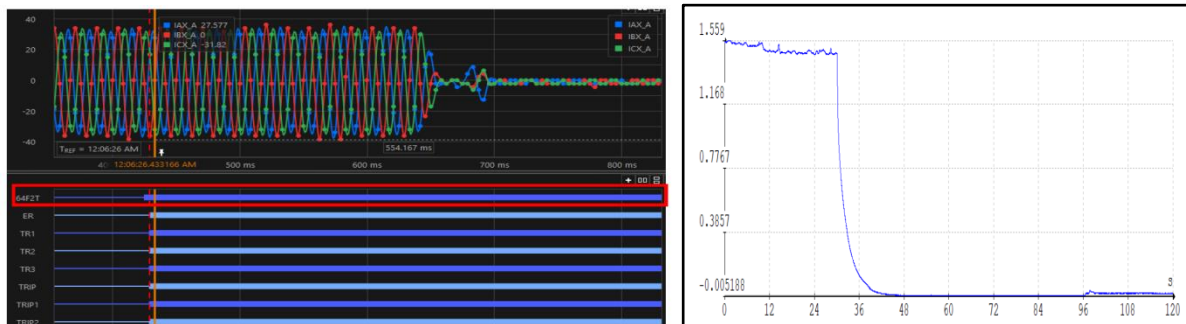


Figura 22 – Oscilografia do relé de proteção e da corrente de campo após desligamento do CO1.



Figura 23 – Ensaio e limpeza nos anéis.

### 2.3 Indução de Correntes de Sequência Negativa com Máquina Subexcitada [16]

Durante a operação da máquina na região de excitação muito baixa, inclusive com corrente de campo nula, ocorreu a queima do relé 64R. Após estudo detalhado do problema e simulações em ATP (*Alternative Transient Programs*), chegou-se à conclusão de que a máquina, durante operação subexcitada (-85 Mvar), estando a corrente de campo nula, um mínimo desbalanço entre fases do estator provoca o aparecimento de correntes de sequência negativa na máquina, fazendo surgir uma tensão de mais de 850V no campo da máquina. Como o relé 64R foi instalado nos terminais de saída para o campo da máquina, tal efeito provocou a queima do relé.

Após detectado e entendido o problema, o relé foi substituído por outro com maior isolamento, e o problema solucionado.

### 2.4 Curto-Circuito Trifásico na Saída da Máquina

Dias após a entrada em operação do compensador síncrono 1, houve a atuação da proteção de máquina, desligando a mesma do sistema. Após análise detalhada pela equipe de manutenção, percebeu-se que o defeito ocorrido foi um curto-circuito envolvendo as três fases do estator da máquina, causado pela redução da impedância entre o circuito energizado (barras) e a carcaça da máquina (tampa metálica).

Dias após a ocorrência, o fabricante modificou a parte construtiva da máquina, recuperou as partes danificadas pelo curto, e recomissionou a mesma, obtendo resultados satisfatórios.

## 3 CONCLUSÕES

Compensadores síncronos de grande porte instalados em subestações coletoras de grandes parques eólicos têm sido preferidos para controle de tensão de barra, por permitirem variações contínuas e suaves no reativo de saída, vantagem evidente frente aos bancos estáticos de reatores e capacitores, além de agregarem inércia ao sistema e elevarem o nível de curto.

Percebeu-se pelos casos apresentados que, mesmo apresentando vantagens em relação a sistemas alternativos para controle de tensão e reativos, trata-se de um sistema complexo, trazendo diversos desafios desde o projeto, instalação, comissionamento, operação e manutenção.

Superados os percalços enfrentados durante o início da operação comercial dos dois compensadores síncronos da SE Marmeleiro (tipicamente chamado de curva da banheira), os dois sistemas estão em operação comercial, sem restrições operativas.



## Referências

- [1] ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Anexo 6A – Lote A. LT OVA SANTA RITA – POVO NOVO – MARMELEIRO – SANTA VITÓRIA DO PALMAR – 525 kV. SE POVO NOVO – 525/230 kV SE SANTA VITÓRIA DO PALMAR – 525/138 kV – 75 MVA. Características e Requisitos Técnicos Básicos das Instalações de Transmissão. 2012.
- [2] TSLE – Transmissora Sul Litorânea de Energia S.A. Relatório Anual de Responsabilidade Socioambiental das Empresas de Energia Elétrica. 2018.
- [3] SCHMITT, K; ZENI, N; CARDOSO, J.C.P. Sistema de Excitação em 4 Quadrantes na Operação de Máquinas Síncronas como Compensadores Síncronos. XXIII SNPTEE – Foz do Iguaçu/PR. Outubro, 2015.
- [4] FITZGERALD, A.E.; KINGSLEY, C. Jr.; KUSKO, A. Máquinas Elétricas. McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1975.
- [5] MELO, J.A.F. Geradores síncronos: curvas de capacidade, Publicações técnicas CHESF, n.2, 1977.
- [6] RISTOW, R. G. S. Compensador Síncronos da SE Marmeleiro 2 – Particularidades. 2ª Reunião Técnico Gerencial com os Agentes do SIN na região Sul e MS. 12 e 13 de dezembro de 2017.
- [7] REIVAX S/A AUTOMAÇÃO E CONTROLE. RTX POWER – Manual do Usuário. 2013.
- [8] REIVAX S/A AUTOMAÇÃO E CONTROLE. RTX POWER – Relatório Técnico sobre o Controle Conjunto de Tensão. 2015.
- [9] KINDERMANN, Geraldo. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Volume 3. Edição do Autor. 2008.
- [10] DE MELLO, F. P. Proteção de Sistemas Elétricos de Potência. Curso de Engenharia em Sistemas Elétricos de Potência - Série P.T.I. – Convênio Eletrobrás/UFMS. 1983.
- [11] ANSI – Nomenclatura das funções de proteção elétrica. Disponível em: <https://selinc.com/pt/products/tables/ansi/>. Acesso em Março de 2020.
- [12] IEEE Std C37.102-2006. *IEEE Guide for AC Generator Protection*. IEEE Power Engineering Society. New York, 2007.
- [13] BENDER. IRDH275 Series. *Digital Ground Fault Monitor / Ground Detector for Ungrounded AC, DC, and AC/DC Systems*. Technical Bulletin. 2011.
- [14] REIVAX NEWS – Informativo REIVAX número 15. Artigo elaborado pelo Eng. GRZYBOWSKI, Alécio José. Julho de 2019.
- [15] COTESA – Relatório Técnico de Manutenção. Setembro/2018.
- [16] RISTOW, R. G. S. Análise Expedita – Induções Estator-Rotor nos Compensadores Síncronos da SE Marmeleiro 2 na condição operativa de corrente de campo nula. Relatório DEOP/SEACS 007/2018. 2018.