

## UMA PROPOSTA DE AUMENTO DA CAPACIDADE OPERATIVA DE COMPENSADORES SÍNCRONOS ATRAVÉS DA EXCITAÇÃO NEGATIVA E EFEITOS NA PROTEÇÃO DE PERDA DE EXCITAÇÃO.

Júlio César Ribeiro Silva<sup>1</sup> (IC), Aurélio Luiz Magalhães (PQ)<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá – Campus Itabira.

**Palavras-chave:** Proteção ANSI 40. Compensador síncrono. Excitação negativa.

### Introdução

A operação da máquina subexcitada fornece a capacidade de absorção de energia reativa, entretanto, em máquinas de polos salientes, essa capacidade pode ser aumentada com a operação do compensador síncrono na região de relutância da curva de capacidade, o que se faz necessário utilizar a excitação negativa. A excitação negativa leva o compensador a operar em uma região próxima ao limite de estabilidade prático em que perturbações na frequência do sistema pode levar a condições desfavoráveis a estabilidade angular.

Nesse contexto, para possuir a operação segura de compensadores síncronos subexcitados com excitação negativa a proteção contra perda de excitação ANSI 40 e o limitador de subexcitação (*UEL*) da malha do regulador automático de tensão (*AVR*) devem estar coordenadas. Com isso, analisa-se o limite operativo da máquina nessa condição e verifica-se o desempenho da proteção contra perda de excitação e a atuação do regulador de velocidade para evitar que a máquina ultrapasse o limite de estabilidade prático.

O presente trabalho possui o foco em avaliar o aumento da faixa operativa subexcitada de compensadores síncronos com excitação negativa, através da verificação da estabilidade angular para distúrbios sistêmicos e sugerir ajustes para a proteção ANSI 40 com o limitador *UEL*.

### Metodologia

O sistema escolhido para se realizar a análise com a inserção do compensador síncrono foi o sistema teste brasileiro 33 barras (STB-33), também é denominado de sistema Sul, modelado por Alves (2007) no *software* ANAREDE. O sistema é uma representação da malha de 500 kV da região Sul do Brasil ligado a um trecho de 230 kV. Este sistema foi dividido em duas regiões A e B, em que são interligadas através de um transformador e duas linhas de transmissão.

O compensador síncrono a ser avaliado possui a capacidade de 250 MVA, com tensão nominal de 13,8 kV conectado ao sistema através do transformador elevador de 13,8 – 500 kV. O compensador síncrono possui o consumo de 1MW. O compensador síncrono foi

conectado ao STB-33 na subestação de Campos Novos, por meio do transformador elevador conectado ao barramento de 500 kV.

Após a conexão do compensador síncrono ao sistema teste brasileiro 33 barras na subestação de Campos Novos, realizou-se o estudo do fluxo de potência no *software* ANAREDE para definição dos pontos operativos no sistema. Nesse cenário, adotou-se a UHE Governador Bento Munhoz como a referência do sistema e as demais UHE's como barras do tipo PV, as barras de carga foi adotado como PQ e o barramento terminal do compensador síncrono adotou-se como PQ. No ANATEM considerou-se os sistemas de excitação, as malhas de controle já definidos no STB-33 para UHE. Realizou-se o estudo para tensão de operação do compensador síncrono através da curva de capacidade, no qual para se aumentar a zona de relutância é necessário aumentar a tensão terminal.

O estudo de estabilidade angular é realizado no ponto de operação mais crítico do compensador síncrono na região de excitação mínima. De modo que possa se assegurar o pleno funcionamento da máquina síncrona frente para as contingências apresentadas na tabela 1.

Tabela 1 – Contingências aplicadas no estudo de estabilidade angular.

Caso	Contingência
1	Falta trifásica na linha de transmissão Campos Novos – Caxias
2	Falta trifásica na linha de transmissão Campos Novos – Machadin
3	Retirada da UHE de Machadin

O limitador de subexcitação utilizado possui a característica de uma linha reta, o que permitiu realizar a coordenação com o ponto de operação. Para a proteção contra perda de excitação utilizou-se o método tomate/lenticular, visto as análises realizadas por Mota (2009), em que se parametrizou as retas no plano P-Q da curva de capacidade da máquina síncrona com coordenação com o *UEL* e o limite estabilidade teórico. Posteriormente, realizou-se a conversão do plano P-Q para o plano R-X, a fim de se visualizar o gráfico mho e

a trajetória da impedância. Para validar o *UEL* e proteção contra perda de excitação aplicou-se as contingências da tabela 1 e o caso de perda de excitação total.

### Resultados e discussão

O estudo da tensão de operação do compensador síncrono foi realizado através do ANAREDE para as condições de 1 pu e 1,1 pu no barramento de conexão. Assim, a tensão terminal da máquina foi 0,933 pu e 1,04pu, respectivamente. A figura 1 ilustra a curva de capacidade do compensador síncrono para as duas condições. É possível notar que no ponto “Q2” tem-se 149,40 MVar enquanto no ponto “Q1” 120,225 MVar. Com isso, o aumento da região de relutância da máquina ocorre com a tensão terminal de 1,04 pu.

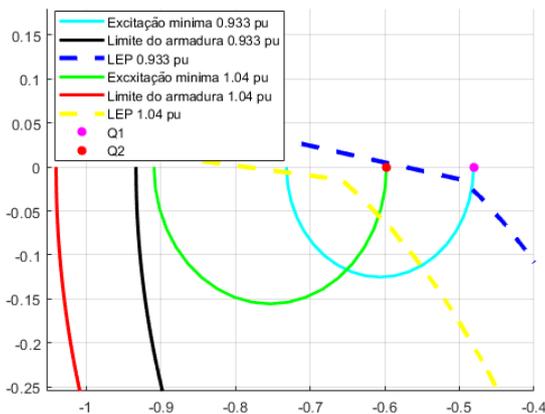


Figura 1 – Curva de capacidade para tensões de 0,933 e 1,04 pu. Fonte: Autor, 2023

No estudo de estabilidade angular realizou-se as simulações das contingências da tabela 1 para o ponto operativo de 1,04 pu com -165 MVar. Inicialmente, tem que os distúrbios decorrentes das faltas trifásicas aplicadas nas linhas de transmissões, em 50% do seu comprimento, resultou-se nas maiores variações instantâneas do ângulo de carga, no qual o ângulo atinge valores próximos a  $-36^\circ$  para o caso 1, como visto na Figura 2, e  $-55^\circ$  para o caso 2, exposto na Figura 3. Já para retirada da unidade geradora ocorre a variação do ângulo de carga próximo a  $55^\circ$  de maneira mais lenta, tendo um tempo de estabilização do ângulo da máquina maior, como observado na Figura 4. As figuras 2,3 e 4 ilustram o comportamento do ângulo de carga para as contingências simuladas no ANATEM. Nas contingências simuladas pode-se validar a estabilidade do ponto operativo, uma vez que não houve perda de estabilidade angular da máquina.

O limitador *UEL* utilizado apresenta coordenação com

limite de estabilidade prático do compensador síncrono. Nesse contexto, como o compensador opera a vazio a descoordenação do *UEL* com o limite de estabilidade prático não irá interferir.

A parametrização das zonas de proteção se deu pelas equações 1 e 2 para o plano P-Q. Obteve-se os valores de  $\lambda_1 = 0,6906$  pu,  $\tau_1 = 62^\circ$ ,  $\lambda_2 = 0,7459$  pu,  $\tau_2 = 71^\circ$ .

$$\lambda_1 = 1,25 \cdot \frac{1}{x_d} \quad (1)$$

$$\lambda_2 = 1,35 \cdot \frac{1}{x_d} \quad (2)$$

A figura 5 ilustra a operação do compensador síncrono com 1,04 pu de tensão terminal com -165 MVar na presença do limitador *UEL* e da proteção ANSI 40 no plano P-Q.

Para validar a proteção contra perda de excitação e o limitador de mínima excitação é realizado a simulação de perda de campo, tensão de excitação nula. A figura 6 ilustra o gráfico mho para perda de campo e a figura 7 o gráfico mho para falha do limitador *UEL*.

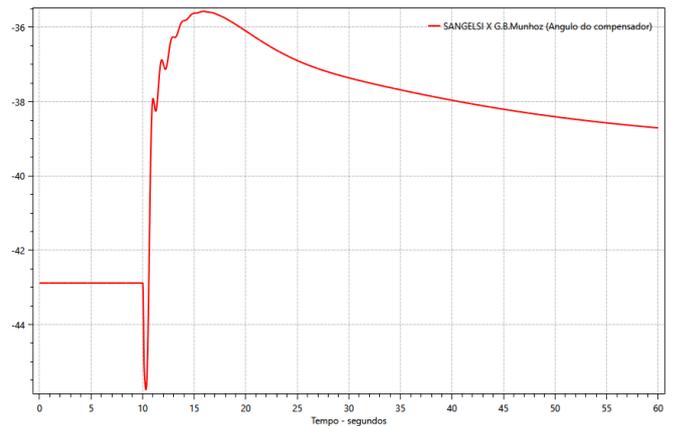


Figura 2 – Estabilidade angular para contingência 1. Fonte: Autor, 2023

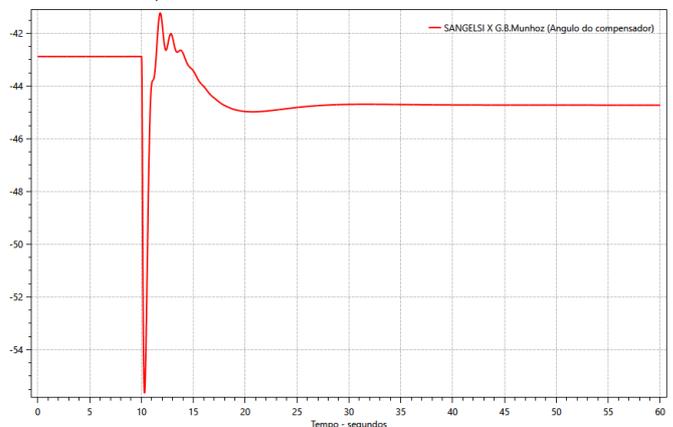


Figura 3 – Estabilidade angular para contingência 2. Fonte: Autor, 2023

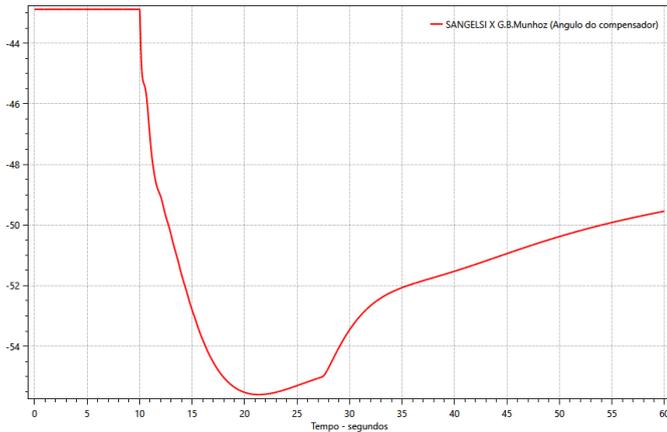


Figura 4 – Estabilidade angular para contingência 3.  
 Fonte: Autor, 2023

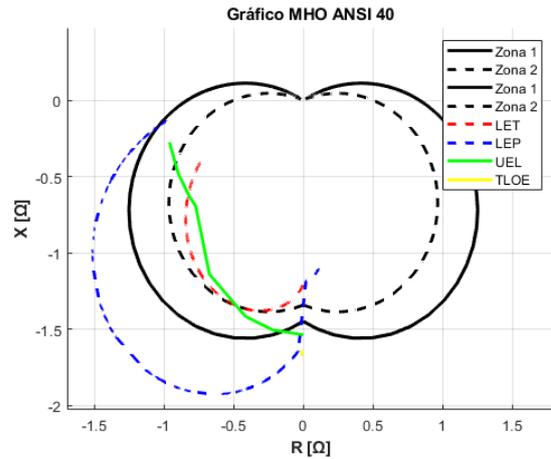


Figura 6 – Gráfico mho para evento de perda de excitação. Fonte: Autor, 2023

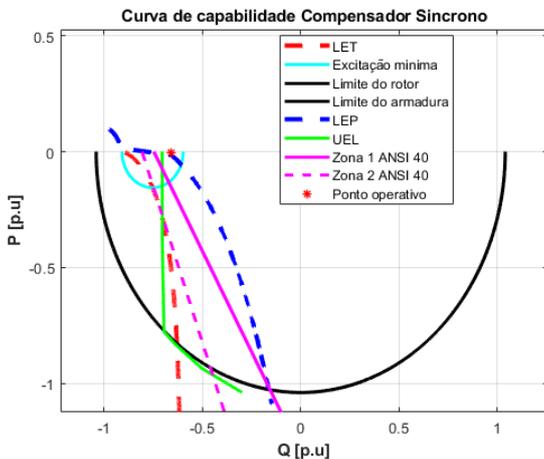


Figura 5 – Curva de capacidade do compensador síncrono no ponto operativo. Fonte: Autor, 2023

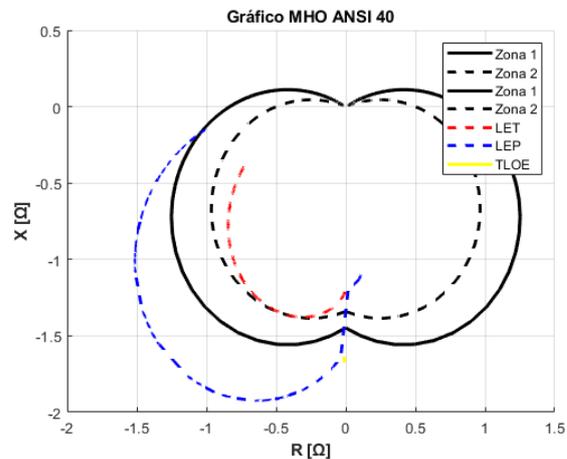


Figura 7 – Gráfico mho para evento de perda de excitação com falho no UEL. Fonte: Autor, 2023

Nas figuras 6 e 7 é possível visualizar a trajetória da impedância para a perda de excitação e que o evento não é suficiente para sensibilizar as zonas de proteção. Isso ocorre devido a presença do torque de relutância que permite a máquina manter o sincronismo na ausência da tensão de excitação, desde que opere com baixo consumo de potência ativa.

Nas figuras 8 a 11 tem-se os testes da proteção para as contingências da tabela 1, sendo o ponto vermelho o ponto inicial e o ponto em magenta o ponto final da trajetória. Nas contingências 1 e 2, figuras 8 e 9, percebe-se um comportamento similar da trajetória da impedância no qual as oscilações de potência adentram a segunda zona de proteção que possui atuação instantânea.

Na contingência 3, figura 10, é possível ver a sensibilização da primeira zona de proteção que é temporizada para atuação em 2 segundos. Entretanto, não há atuação da proteção já que o tempo de permanência da trajetória da impedância é de 0,01 segundos.

Na figura 11, é realizada simulação da contingência 3 sem a presença do UEL para avaliar atuação do limitador. Contudo, nota-se uma trajetória da impedância semelhante a com a presença do limitador, esse evento não é suficiente para sensibilizar a proteção e nem atuação da malha do limitador

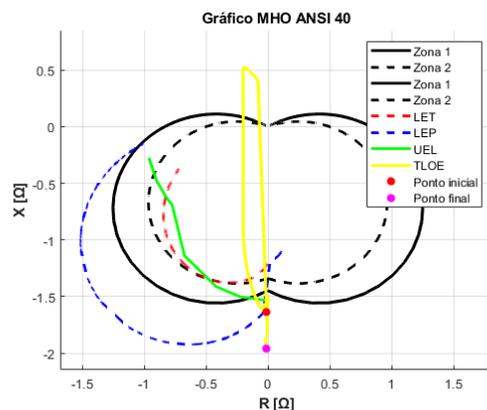


Figura 8 – Gráfico mho para contingência 1.  
Fonte: Autor, 2023.

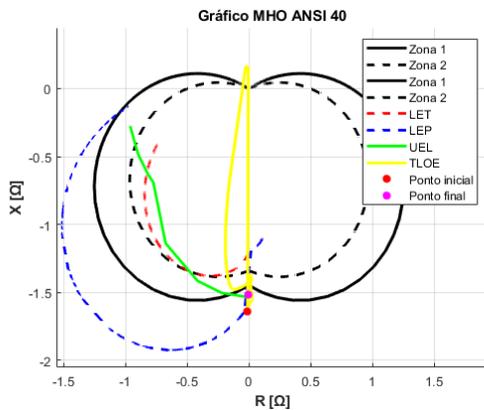


Figura 9 – Gráfico mho para contingência 2. Fonte: Autor, 2023

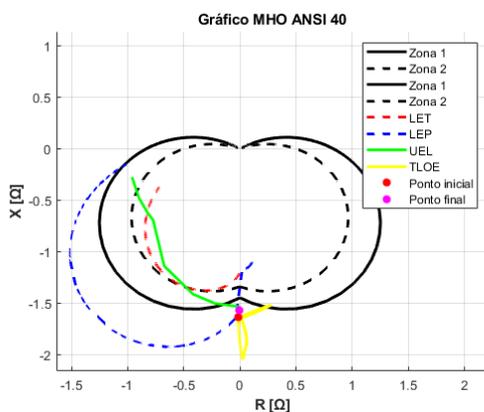


Figura 10 – Gráfico mho para contingência 3. Fonte: Autor, 2023.

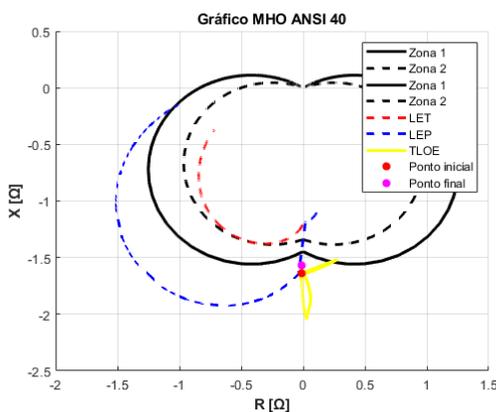


Figura 11 – Gráfico mho para contingência 3 na ausência do UEL. Fonte: Autor, 2023.

### Conclusões

Neste trabalho pode-se verificar a operação do compensador síncrono na região de relutância com excitação negativa, em que se constatou um aumento na capacidade operativa de na absorção de energia reativa em -29,175 MVar, para tensão de 1,1 pu no barramento de conexão da máquina ao sistema.

No estudo de estabilidade angular para o ponto operativo

obteve-se uma variação do ângulo de carga, o que corresponde ao enfraquecimento do acoplamento magnético entre o rotor e o estator da máquina síncrona. A operação na área de relutância com excitação negativa se mostrou estável já que não houve perda de estabilidade. Os ajustes realizados no UEL e da proteção ANSI 40 se mostraram coordenados nos casos simulados. Nos eventos de curto-circuito trifásico na linha de transmissão que se conectam na subestação de Campos Novos, teve-se comportamento similar no qual a oscilação de potência provoca a atuação instantânea da proteção, já que a trajetória de impedância adentra a segunda zona. Na retirada da UHE realizou-se as simulações em condições normais de operação e sem o UEL, nesse cenário observou-se que o evento não é suficiente para compensador síncrono perder a estabilidade. Na ocorrência de perda total de campo verificou-se que para a operação com o limitador de subexcitação e para falha do mesmo, que a trajetória de impedância se comporta de forma similar e não sensibiliza a proteção ANSI 40, já que o ponto operativo é deslocado para fora da zona de relutância.

### Agradecimentos

Neste momento significativo em minha jornada acadêmica, gostaria de expressar minha gratidão a todas as pessoas, especialmente aos meus pais, a UNIFEI e a CNPq que contribuíram para a realização deste trabalho. Primeiramente, quero agradecer a meu orientador Aurélio Luiz Magalhães Coelho e o Hiago Guimaraes Silva pela orientação excepcional, paciência e apoio ao longo deste processo.

### Referências

Morais, A. P. Avaliação do desempenho dos métodos de proteção contra perda de excitação em geradores síncronos. Revista Controle e Automação, vol. 5, no. 4, 2009.

Alves, W. F. Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência. Dissertação de Mestrado. UFF. Niterói, Rio de Janeiro, 2007.

SILVA, Hiago Guimarães. Uma proposta de aumento da capacidade operativa de compensadores síncronos através da excitação negativa e efeitos na estabilidade e na proteção de perda de excitação. 2022. 12 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Unifei, Itabira, 2022.

G. Leite, P. M. Silveira, utilização da proteção contra perda de unidades geradoras como proteção sistêmica: curva tomate, XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica (SNPTEE), Rio de Janeiro, outubro de 2007.