Avaliação do aumento da capacidade operativa de compensadores síncronos através da excitação negativa e efeitos na estabilidade e proteção de perda de excitação

Júlio César Ribeiro Silva*. Hiago Guimarães Silva*. Aurélio Luiz Magalhães Coelho*

** Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá - Campus de Itabira, Itabira -MG (e-mail: d2020016861@unifei.edu.br, hi.agoguimaraes12@hotmail.com, aurelio.coelho@unifei.edu.br)*

Abstract: The synchronous compensator is equipment widely used to control the consumption or absorption of reactive energy from the electrical network, which results in the optimization of the system's operational capacity. To increase its operating range, it is possible to operate underexcited in the region of minimum excitation of the machine, through negative excitation. The operation of the synchronous machine in this region places it close to the practical stability limit, where disturbances in the system can compromise the angular stability of the machine. In this context, this work presents computational simulations to evaluate the increase in the operating range of the synchronous machine, exploring the effects on angular stability in conditions of disturbances in the system. Subsequently, the minimum excitation limiter and the protection against loss of excitation are adjusted, in coordination with the limiter, to evaluate the effects on this protection. The results obtained show the possibility of operation in the underexcited region of the machine, in which the underexcitation limiter performs the control action in a coordinated manner with the loss of excitation protection.

Resumo: O compensador síncrono é um equipamento amplamente utilizada para se realizar o controle do consumo ou absorção de energia reativa da rede elétrica, o que resulta na otimização da capacidade operativa do sistema. Buscando-se aumentar a sua faixa de operativa, é possível operar de forma subexcitada na região de mínima excitação da máquina, por meio da excitação negativa. O funcionamento da máquina síncrona nessa região o deixa próximo ao limite de estabilidade prático, em que perturbações no sistema podem comprometer a estabilidade angular da máquina. Nesse contexto, esse trabalho apresenta simulações computacionais para avaliar o aumento da faixa operativa da máquina síncrona, explorando os efeitos na estabilidade angular em condições de distúrbios no sistema. Posteriormente, realiza-se o ajuste do limitador de mínima excitação e da proteção contra perda de excitação, de maneira coordenada com o limitador, a fim de avaliar os efeitos nesta proteção. Os resultados obtidos mostram a possibilidade de operação na região subexcitada da máquina, em que o limitador de subexcitação realiza a ação de controle de forma coordenada com a proteção de perda de excitação.

Keywords: Loss of excitation protection; Synchronous compensator; Negative excitation; Underexcitation limiter.

Palavras-chaves: Proteção de perda de excitação; Compensador síncrono; Excitação negativa; Limitador de subexcitação.

1. INTRODUÇÃO

A operação de geradores síncronos de usinas hidrelétricas como compensadores síncronos (máquina síncrona sem carga acoplada ao eixo) tem sido aplicada no Brasil para: baixos níveis em reservatórios de água; solicitação de baixa carga; para compensar potência reativa e níveis de tensão; e adicionar inércia aos sistemas com recursos eólicos e solares (Silva, 2020). Visando levar a máquina a trabalhar no seu limite de capacidade operacional, dentro dos limites definidos na sua curva de capabilidade, é possível optar pela operação do compensador síncrono dentro da região de relutância desta curva, a partir da utilização de excitação negativa. Para isso, é necessário aplicar uma corrente de campo no sentido oposto ao original para operar dentro desta região. Assim, é possível aumentar a faixa de operação subexcitada dos compensadores síncronos. Entretanto, a operação da máquina subexcitada, que fornece a capacidade de absorção de energia reativa, através da excitação negativa, pode levar o compensador a operar em uma região próxima ao seu limite de estabilidade, em que perturbações no sistema pode levar a condições desfavoráveis a estabilidade e proteção da máquina.

Nesse contexto, a operação segura de compensadores síncronos subexcitados, através da excitação negativa, a proteção contra perda de excitação (ANSI 40) e o limitador de subexcitação (do inglês *Underexcitaiton Limiter* - UEL) da malha do regulador automático de tensão (do inglês *Automatic Voltage Regulator* - AVR) devem estar coordenadas. Assim, este trabalho possui o foco em avaliar o aumento da faixa operativa subexcitada de compensadores síncronos com excitação negativa, através da verificação da estabilidade para

distúrbios sistêmicos e sugerir ajustes para a proteção ANSI 40 com o limitador UEL.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Compensador síncrono

O compensador síncrono é um motor síncrono que opera sem carga acoplada em seu eixo. O compensador é responsável pelo consumo ou injeção de energia reativa na rede através do ajuste do fator de potência. A correção do fator de potência é realizada por meio da alteração da corrente de campo da máquina síncrona, assim é possível operar com a máquina sobrexcitada e subexcitada A operação do compensador subexcitado ocorre para corrente de campo menor que a corrente de armadura mínima, que intercorre para o fator de potência unitário, assim a máquina irá consumir potência reativa da rede, ou seja, ela irá possuir fator de potência atrasado (Chapman, 2013). A excitação negativa permite ampliar a compacidade da máquina síncrono subexcitada em absorver reativo da rede elétrica, com isso, tem-se a possibilidade de utilizar a região relutância do compensador síncrono de polos salientes. Assim, a inversão da corrente de campo é realizada por meio da ponte de tiristores com atuação em quatro quadrantes, para sistemas com excitação estática (Schmitt et. al, 2015).

2.2 Regulador automático de tensão - AVR

O AVR tem a função do controle da corrente de campo do compensador síncrono. A topologia do AVR utilizada neste estudo consiste na adaptação do modelo proposto no padrão IEEE Std. 421 (IEEE, 2021), em que consiste na somatória das demais malhas de controle presentes na máquina, como limitador de mínima excitação, limitador de máxima excitação etc., no qual esses sinais são somados e subtraídos do sinal de referência (ReftVt) e o resultado (VR) obtido é enviado a ponte de tiristores de modo que aumente ou reduza a corrente de excitação. A Fig. 2 mostra a malha de controle do AVR utilizada neste estudo.

2.3 Limitador de mínima excitação

O limitador de mínima excitação é responsável por conter a operação da máquina síncrona com excitação insuficiente que gere risco a sua estabilidade ou exceder o limite de sobreaquecimento nos externos da armadura do estator. O limitador UEL também permite que a proteção ANSI 40 não atue de forma indevida em condições satisfatórias de funcionamento na região subexcitada. Por conseguinte, a coordenação entre o limitador de mínima excitação e proteção contra perda de excitação é fundamental para garantir a operação segura da máquina (Coelho, 2016), (Silva, 2022). O limitador UEL utilizado na máquina estudada é exibido na Fig. 3. Esta define o limite de subexcitação (vUEL) por meio do sinal de potência reativa (QTERM), da potência ativa (PTERM) e da tensão terminal (VTR). A característica do UEL é tipo somatório de pontos.

2.4 Proteção contra perda de excitação

A perda de excitação do compensador síncrono se dá com a perda do campo magnético produzido no enrolamento de campo, localizado no rotor da máquina. Esta condição ocorre com a redução parcial ou total da corrente contínua (CC) no circuito de campo, que se dá por abertura indevida do disjuntor do circuito de campo, curto-circuito no enrolamento de excitação, falha na alimentação do sistema de excitação ou no regulador de tensão (Coelho, 2016). Como consequência a queda de tensão interna da máquina, o ângulo da potência entregue sofre uma redução, logo o rotor começa a acelerar para velocidade acima da nominal, o que resulta na perda do acoplamento magnético entre o estator e o rotor. Mason (1949) e Berdy (1975) desenvolveram as primeiras metodologias de proteção contra perda de excitação, no qual utiliza-se as zonas de atuação no plano R-X. Dessa forma, a parametrização leva em consideração a reatância de eixo direto e a reatância subtransitoria da máquina síncrona.

Neste estudo a proteção contra perda de excitação tomate/lenticular é realizada no plano de admitâncias G-B, com base na curva de capabilidade da máquina que é plotada no plano P-Q – vide Fig. 1. As zonas de atuação são definidas no plano de admitâncias, por meio de semirretas com origem no eixo de susceptância, na posição ajustada do parâmetro (λ) e inclinação (τ). Esta metodologia pode ser empregada com utilização do offset. Caso este não seja utilizado ao se realizar a transformada do plano G-B para o plano R-X, ele deixará de assumir a forma de reta e terá uma característica circular (Morais, 2009). Para formar as zonas de proteção é necessário o ajuste dos parâmetros da distância (λ) e inclinação (τ) das retas A, A', B e B'. A característica de tomate é realizada através dos ajustes λA e τA nas retas A e A'. Já a característica lenticular é formada por meio dos ajustes λB e τB, vide Fig 1. A operação da máquina próxima do limite de estabilidade prático (LEP) é um indicativo da perda de excitação, porém não uma certeza. Com isso, há coordenação da característica tomate com o LEP, em que intercepta o eixo B com tensão terminal de 1 pu. A visualização da área de atuação dessa metodologia é transposta para o plano R-X conforme ilustrado na Fig. 1, em que as retas B e B' forma a característica lenticular e a união das retas A e A' a característica de tomate (Morais, 2009).

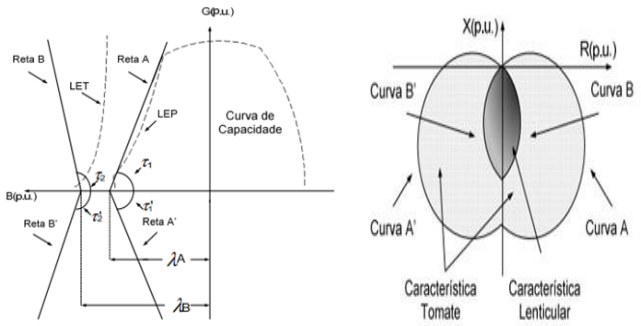

Fig. 1 Retas A, A', B, B, λ e τ definidas com base na curva de capacidade (à esquerda) e característica tomate/lenticular no plano R-X (Morais, 2009).

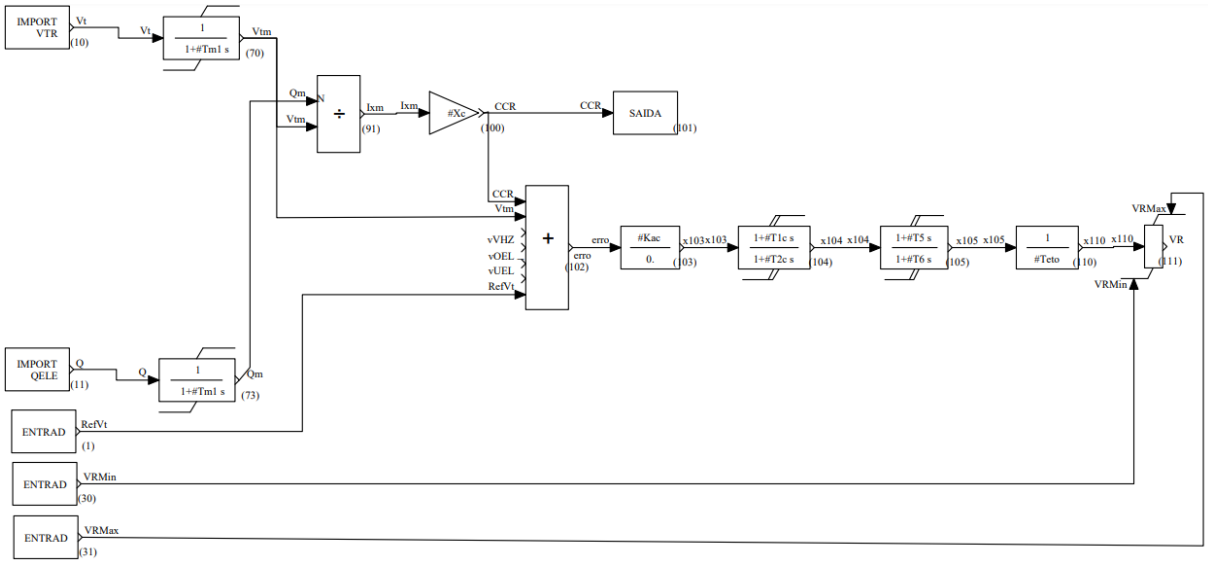

Fig.2 Malha de controle do AVR utilizada.

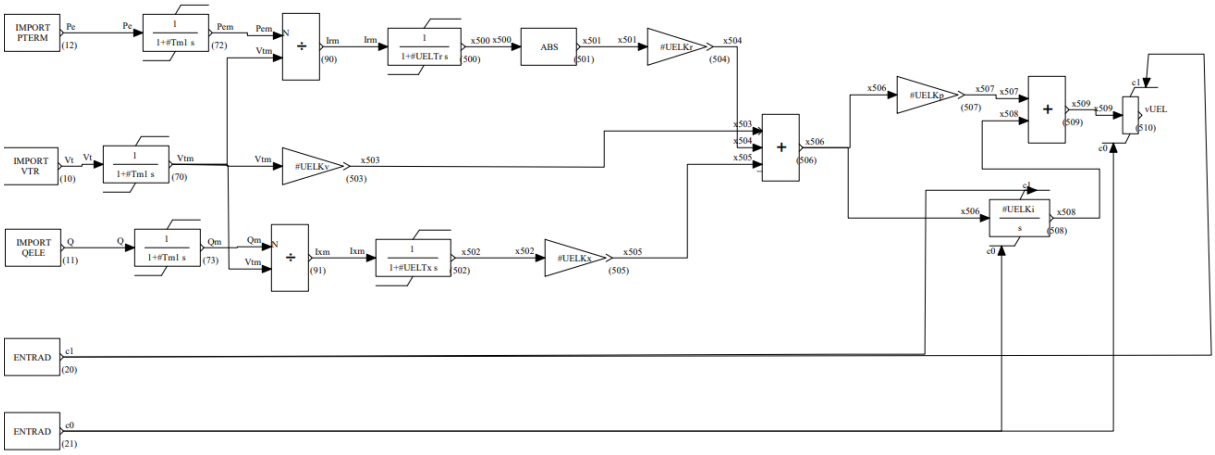

Fig.3 Malha de controle do UEL utilizada.

3. MODELAGEM E PREPARAÇÃO DA SIMULAÇÃO

3.1 O Sistema Teste – STB 33 barras

O sistema elétrico utilizado para se realizar a proposta deste estudo foi o sistema teste brasileiro (STB) 33 barras, também denominado de sistema Sul – vide Fig. 4.

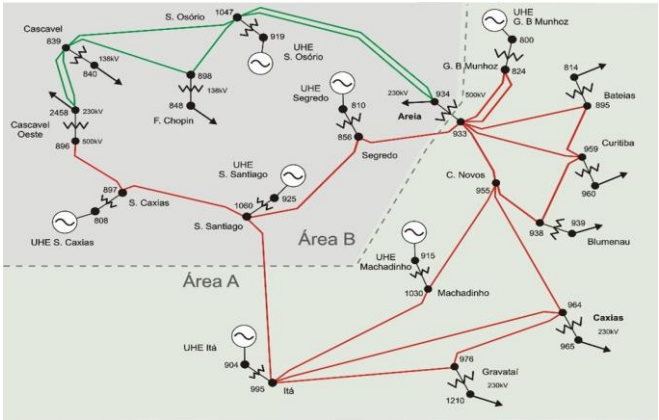

Fig. 4 Diagrama unifilar do sistema teste STB 33 barras.

O sistema STB 33 barras é uma representação da malha de 500 kV da região Sul do Brasil ligado a um trecho de 230 kV. Este sistema foi divido em duas regiões A e B, em que são interligadas através de um transformador e duas linhas de transmissão. Os dados deste sistema constam em Alves (2007), o qual foi modelado aqui nos softwares ANAREDE e ANATEM.

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

3.2 Modelagem do sistema testes STB 33 barras

Após a conexão do compensador síncrono ao sistema STB 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 (V_θ) e as demais UHE's como barras do tipo PV. As barras de

carga foram adotadas como PQ. Já o barramento terminal do compensador síncrono como do tipo PQ.

No *software* ANATEM foram considerados os valores padrões dos parâmetros dos sistemas de excitação e das malhas de controle do sistema STB 33 barras, conforme (Alves, 2007). Os parâmetros utilizados para os parâmetros do AVR e o UEL das Figuras 2 e 3 estão nas Tabelas 1 e 2, respectivamente.

Tabela 1. Dados das constantes da malha do AVR

Ganho proporcional	#Kac	200
Compensação de fase	#T1c	1,5
Compensação de atraso	#T2c	2,8
Compensação de fase	#T5	0,2
Compensação de atraso	#T6	0,1
Compensação de corrente reativa	#Xc	0,03
Compensação da tensão de teto	#Teto	21,4
Limite máximo do controle	#VRMax	0,9848
Limite máximo do controle	#VRMin	-0,8660

Tabela 2. Dados das constantes da malha do UEL

Filtro adicional da corrente ativa	#UELTr	1,0
Filtro adicional da corrente reativa	#UELTx	0,1
Ajuste da referência	#UELKv	1,0
Ajuste da referência	#UELKr	0,0
Ajuste da referência	#UELKx	1,484
Ganho proporcional do controlador	#UELKp	0,005
Ganho integral do controlador	#UELKi	0,02
Constante	C1	1
Constante	C0	0

3.3 Estudo da tensão de operação

A tensão de operação do compensador síncrono é definida através da análise do ponto de operação na curva de capabilidade. Para aumentar a faixa operativa na região de relutância da máquina, com excitação negativa, aumenta-se a tensão terminal, já que este aumento desloca a curva de capabilidade para esquerda. Foi definido a tensão de operação para uma faixa de 1,0 a 1,1 pu, no barramento de 500kV, uma vez que tensões menores favorece a instabilidade de tensão.

3.4 Estudo da estabilidade angular

O estudo 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 a perturbações como curto-circuito trifásico em linhas de transmissão de energia, remoção de unidades geradoras e inserção de cargas. A Tabela 3 mostra as contingências aplicadas.

Tabela 3. Contingências aplicadas no estudo de estabilidade

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

Nos estudos de falta foi considerado o tempo de atuação da proteção da linha de transmissão de 100 ms para retirada dela do sistema, conforme especificado no submódulo 2.3 da ONS em 2022. Aplicou-se as faltas trifásicas em 50% do comprimento da linha de transmissão.

3.5 Limitador UEL e Proteção ANSI 40

O limitador UEL utilizado, vide Fig. 3, possui característica de uma linha reta em que não foi possível realizar a coordenação com o Limite de Estabilidade Prática (LEP). Entretanto a coordenação com o LEP no ponto de operação é realizada. Para a proteção contra perda de excitação utilizou-se o método tomate/lenticular – vide Fig. 1, assim definiu-se a parametrização das retas no plano P-Q junto com a curva de capabilidade da máquina. A proteção ANSI 40 foi definida com coordenação com limitador de mínima excitação e com LEP. Foi realizada a conversão destes limites do plano PQ para o plano RX para se visualizar as zonas de proteção. A obtenção dos parâmetros λ_A e λ_B da Fig. 1 (à esquerda) tiveram como base 25% e 35% do inverso da reatância de eixo direto da máquina síncrona, respectivamente, conforme sugerido em (Morais, 2009). Para a inclinação da reta τ_A é recomendado a utilização de valores de 60º a 80º e para τ_B o valor de 80º a 110º (Morais, 2009). Aplicou-se a contingência de perda de excitação (*Total Loss of Excitation* – TLOE), tensão de campo igual a zero, com o UEL e posteriormente para a falha na atuação do UEL

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Aumento da faixa operativa

Este estudo foi realizado para tensão de 1 p.u. e 1,1 p.u. no barramento de 500kV. Realizado a simulação no ANAREDE para essas duas condições de tensão no barramento de conexão obteve-se os dados presentes na Tabela 3.

Tabela 3. Dados da malha UEL

Tensão no barramento de conexão [p.u]	1,0	1,1
Tensão terminal da máquina [p.u]	0,933	1,04

Com os valores da tensão terminal plotou-se a curva de capabilidade do compensador síncrono, conforme ilustrado na Fig. 5. Através da curva de capabilidade pode se concluir que o aumento da faixa operativa ocorre para tensão terminal do compensador síncrono de 1,040 p.u., já que a tensão tem influência direta na curva capabilidade. Também se observa que na operação em 1,040 p.u. de tensão no compensador síncrono o ponto “Q2” é de -149,400 Mvar já na operação em 0,933 pu o ponto “Q1” é de 120,225 Mvar. Logo, operar com a máquina síncrona na tensão de maior magnitude possibilita a operação na área de excitação negativa com potencias maiores.

4.2 Estudo de estabilidade angular

O estudo da estabilidade angular foi realizado por meio do *software* ANATEM, no ponto operativo de 1,04 p.u de tensão

terminal do compensador síncrono e a absorção de 165 Mvar, em que resultou na operação próxima o limite de estabilidade prático, veja Fig. 6. Dessa forma, simulou-se o sistema para as contingências da Tabela 3.

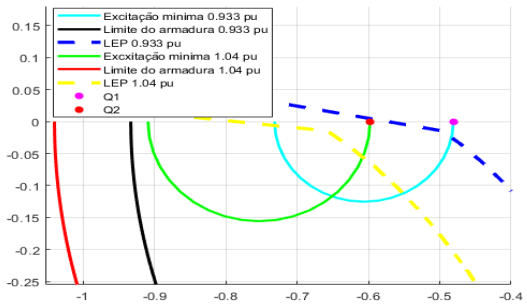

Fig. 5 Curva de capabilidade para tensões 0,933 e 1,040 p.u.

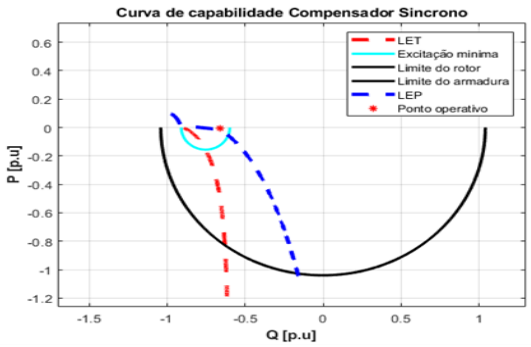

Fig. 6 Ponto operativo do compensador síncrono.

Realizado a ocorrência de faltas trifásicas nas linhas de transmissão, vide Figs. 7 e 8, verificou-se maior oscilação do ângulo de carga da máquina, no qual chegou a atingir valores próximos a -55º. Já para retirada da usina hidrelétrica de Machadinho, vide Fig. 9, percebe-se uma variação menor que para as faltas trifásicas nas linhas de transmissão. Dessa maneira, pode-se concluir que o ponto de operação é estável, uma vez que não houve perda da estabilidade angular para os distúrbios sistêmicos.

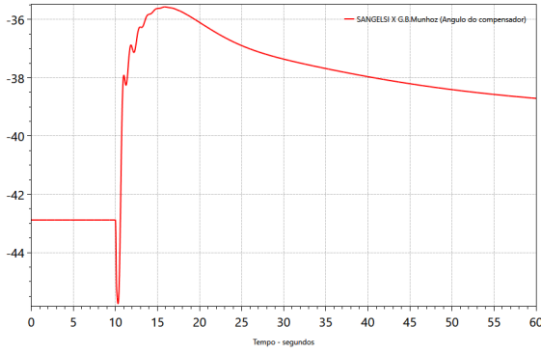

Fig. 7 Falta trifásica na linha de transmissão Campos Novos – Caxias.

4.3 Limitador UEL e Proteção ANSI 40

Como citado no item 3.5 o modelo do limitador de mínima excitação possui coordenação com limite de estabilidade prático no ponto de operação do compensador síncrono. Nesse contexto, como o compensador síncrono possui o baixo consumo de potência ativa em regime permanente a falta de coordenação com LEP para altos valores de consumo de potência ativa não irá interferir.

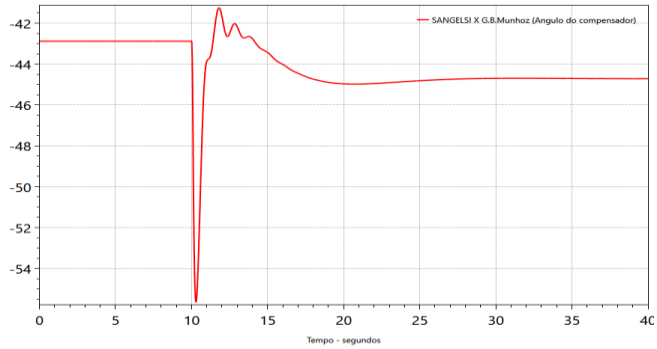

Fig. 8 Falta trifásica na linha de transmissão Campos Novos – Machadinho.

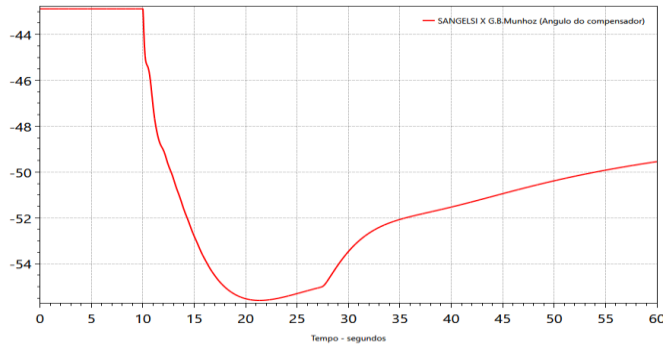

Fig. 9 Retirada da UHE de Machadinho.

Os ajustes das zonas de proteção 1 e 2 foram parametrizadas conforme a Tabela 4.

Tabela 4. Ajustes dos parâmetros das zonas 1 e 2 da proteção contra perda de excitação – vide Fig. 1.

λ_1 (pu)	0,6906
τ_1 (º)	62
λ_2 (pu)	0,7459
τ_2 (º)	71

A Fig. 10 ilustra a curva de capabilidade do compensador síncrono com o as zonas de proteção 1 e 2 contra perda de excitação e a coordenação com UEL para o ponto operativo de 1,04 p.u com -165MvAr.

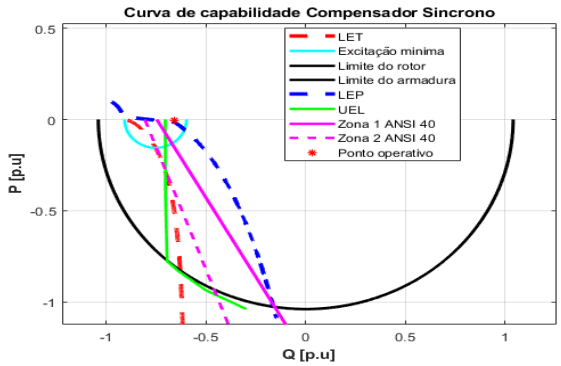

Fig. 10 Curva de capabilidade do compensador síncrono.

A validação da proteção contra perda de excitação proposta e a sua coordenação com o limitador de mínima excitação realizou-se a simulação de perda total de campo (TLOE), ou seja, tensão de campo sendo nula, e para os eventos da Tabela 4. Dessa forma, é realizado a conversão para o plano R-X da proteção contra perda de excitação, os limites de estabilidades teórico (LET) e prático (LEP) e o limitador de mínima excitação.

A Fig. 11 exibe a trajetória da impedância (em amarelo) para uma perda total de excitação (TLOE) do compensador síncrono para o ponto operativo citado, com a atuação do limitador UEL. A Fig. 12 ilustra, também no plano R-X, o comportamento para uma perda de excitação com falha no limitador UEL.

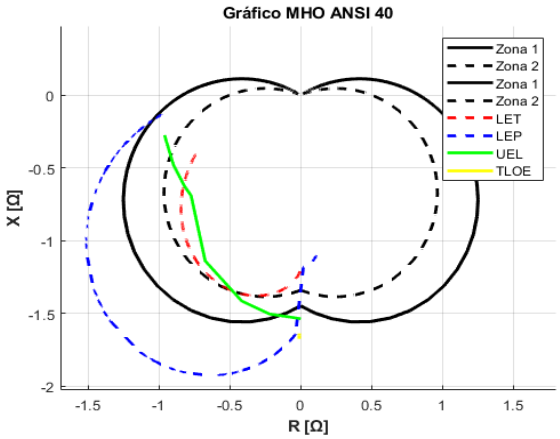

Fig. 11 Trajetória da impedância no plano R-X para evento de perda de excitação com atuação do UEL.

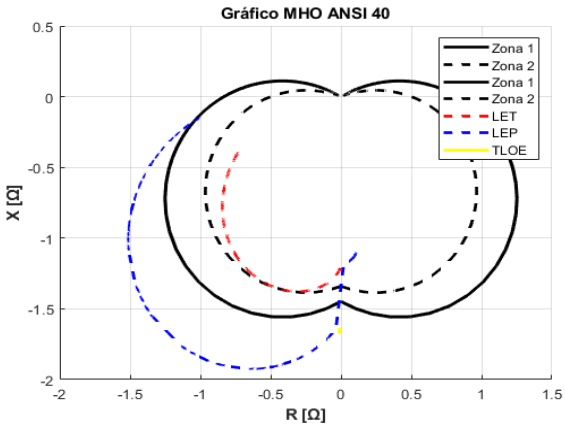

Fig. 12 Trajetória da impedância no plano R-X para evento de perda de excitação com falha no UEL.

No plano R-X é possível notar que em ambos os cenários a trajetória da impedância para perda de campo não é suficiente para sensibilizar as zonas de proteção ANSI 40, já que é realizada o ajuste para permitir o funcionamento da máquina na região de mínima excitação. Porém para a condição de perda de campo, tem-se que a tensão de campo possui o valor zero e com isso a corrente de campo é nula o que resulta em um ponto operativo, no plano P-Q, fora da região de relutância. Devido a existência do torque de relutância que permite a máquina síncrono fique em sincronismo na ausência da corrente de campo, desde que se mantenha o pequeno consumo de potência ativa.

As Fig 13 a 15 mostram as contingências da Tabela 3 vista no plano R-X com as zonas 1 e 2 do relé de proteção contra perda de excitação. É possível notar o ponto inicial da trajetória da impedância vista pelos terminais do relé através da indicação do ponto em vermelho e o ponto final da trajetória de impedância o ponto em magenta.

As Figuras 13 e 14 são respectivamente para aplicação da falta trifásica em 50% do comprimento da linha de transmissão, sendo a contingência 1 a falta trifásica na linha entre Campos Novos – Caxias e a contingência 2 a falta trifásica na linha de transmissão entra Campos Novos – Machadinho. Pode-se observar que em ambas as oscilações de potência há a sensibilização das zonas de proteção, com a entrada da impedância na zona lenticular ocorre a atuação instantânea da proteção.

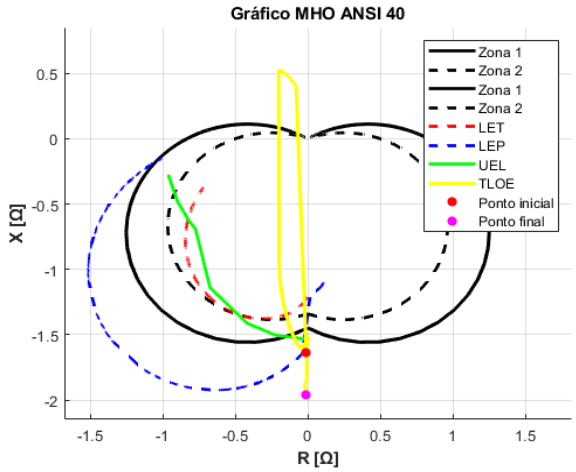

Fig. 13 Trajetória da impedância no plano R-X para contingência 1.

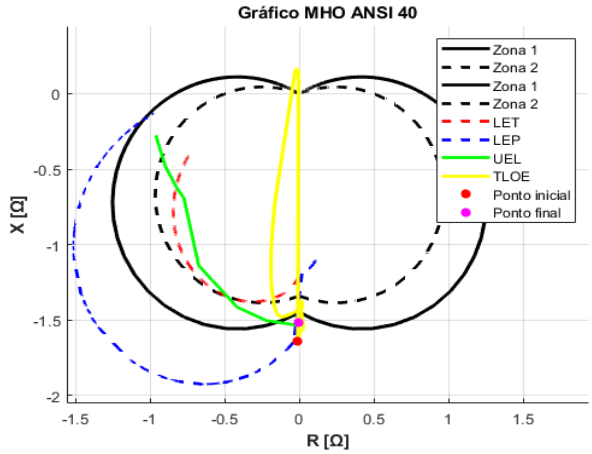

Fig. 14 Trajetória da impedância no plano R-X para contingência 2.

Já na contingência 3, vide Fig. 15, que consiste na retirada da UHE de Machadinho, nota-se a oscilação de potência vista pelo relé, e a sensibilização da zona 1 temporizada com 0,5s. Entretanto não a atuação da proteção, uma vez que o tempo em que trajetória da impedância permanece na região lenticular é

aproximadamente 0,01s sendo inferior ao temporizador ajustado nessa área.

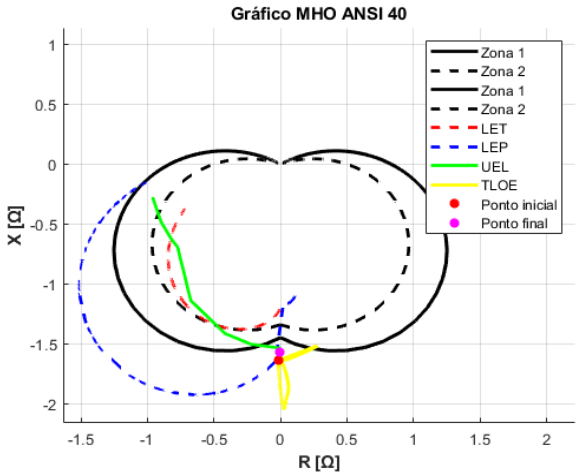

Fig. 15 Trajetória da impedância no plano R-X para contingência 3.

5. 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

Os autores gostariam de agradecer à UNIFEI e CNPq pelas bolsas concedidas durante a execução desta pesquisa, e à FAPEMIG pelo financiamento deste trabalho através do projeto APQ-02893-18.

REFERÊNCIAS

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

Berdy, J. Loss of excitation protection for modern synchronous generators. IEEE Trans. on PAS, vol. 94, Nº. 5, pp. 1457-1463, 1975.

Chapman, S. J. Fundamentos de máquinas elétricas. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013. 684 p. ISBN 978-85-8055-207-2.

Coelho, A. L. M. Um sistema integrado de testes de funções de proteção de geradores síncronos associadas aos limites de excitação de um modelo de AVR implementado em ambiente de simulação digital em tempo real. 2016. 150 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2016.

IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines (2021). In *IEEE Std 421.1-2021 (Revision of IEEE Std 421.1-2007)*, vol., no., pp.1-45, doi: 10.1109/IEEESTD.2022.9737077.

LIMA, J. C. M. Aspectos de proteção e controle do gerador síncrono subexcitado. 2002. 131 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2002.

Leite, G; Silveira P. M. 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.

Mason, C. R. A new loss-of-excitation relay for synchronous generators, AIEE Trans., vol.68, pp. 1240-1245, 1949.

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

MOTA, R. B. Estudo sobre o funcionamento e operação de geradores como compensadores síncronos, interligados ao SIN, na UHE - barra grande. Disponível em chrome-https://www.unifacvest.edu.br/assets/uploads/files/arquivos/17ab8-mota,-r.-b.-estudo-sobre-o-funcionamento-e-operacao-de-geradores-como-compensadores-sincronos-interligados-ao-sin-na-uhe-barra-grande.-tcc,-2019..pdf

ONS (2022). Critério de metodologia para estudos. Submódulo 2.3. Rio de Janeiro, Brasil.

Schmitt, K.; Zeni Júnior, N.; Cardoso, J. C. P. Sistema de excitação em 4 quadrantes na operação de máquinas síncronas como compensadores síncronos. Florianópolis: Reivax S/A, 2015.

Silva, H. G. 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.

Silva, P. H. P. Contribuições para o estudo do compensador síncrono baseado em máquina de indução duplamente alimentada. Tese (doutorado em engenharia elétrica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.