

## EFEITOS DA INSERÇÃO DE SVC E TCSC NA ESTABILIDADE ANGULAR TRANSITÓRIA E NA PROTEÇÃO CONTRA PERDA DE EXCITAÇÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS

J. P. G. S. Filho\*, I. P. Faria\*\*, Aurélio L. M. Coelho\*\*\*, Elcio F. Arruda\*\*\*\*, Gustavo P. Lopes\*\*\*\*\*

\**Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira Itabira – Brasil (e-mail: [jpedro@unifei.edu.br](mailto:jpedro@unifei.edu.br))*

\*\**Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira Itabira – Brasil (e-mail: [ivan.faria@unifei.edu](mailto:ivan.faria@unifei.edu))*

\*\*\**Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira Itabira – Brasil (e-mail: [aurelio.coelho@unifei.edu.br](mailto:aurelio.coelho@unifei.edu.br))*

\*\*\*\**Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira Itabira – Brasil (e-mail: [elcio.arruda@unifei.edu.br](mailto:elcio.arruda@unifei.edu.br))*

\*\*\*\*\**Instituto de Sistemas Elétricos e Energia, Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itajubá Itajubá – Brasil (e-mail: [gustavo@lat-efei.edu.br](mailto:gustavo@lat-efei.edu.br))*

---

Abstract: This work presents a methodology, based on the modeling of an electrical power system test created in the PSCAD/EMTDC simulation environment. The purpose is to evaluate, at first, the impacts that Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) and Static Var Compensator (SVC) cause in the transient angular stability of the system generators against disturbances, evaluating the rotor displacement of the synchronous generators under analysis. In a second moment, the behavior of the ANSI 40 protection function is evaluated for conditions of total and partial loss of excitation since this protection function uses the impedance information for its operation. The results indicate that the compensators can improve the transient angular stability of generators against disturbances. And about the behavior of the ANSI 40 function, a change in the time that the impedance trajectory reaches the protection zones was identified

Resumo: O presente trabalho realiza a modelagem de um sistema elétrico de potência (SEP), por meio do *software* PSCAD/EMTDC, na presença de dois elementos de compensação de reativos: o capacitor série controlado por tiristor (TCSC) e o compensador estático de reativos (SVC). O objetivo é avaliar, em um primeiro momento, os impactos que estes compensadores causam na estabilidade angular transitória dos geradores do sistema frente a perturbações, avaliando o deslocamento angular dos geradores síncronos em análise. Em um segundo momento, é avaliada o comportamento da função de proteção ANSI 40 para condições de perda total de excitação (PTE) e perda parcial de excitação (PPE), uma vez que esta função de proteção utiliza a informação da impedância do sistema para seu funcionamento. Os resultados indicam que os compensadores são capazes de melhorar a estabilidade angular transitória dos geradores frente a perturbações. No que tange ao comportamento da função ANSI 40, foi identificada uma mudança no tempo que a trajetória da impedância alcança as zonas de proteção.

*Keywords:* Thyristor Controlled Series Capacitor, Static Var Compensator, Angular Stability, Protection Synchronous Generator, Loss of Excitation.

*Palavras-chaves:* Capacitor Série Controlado por Tiristor, Compensador Estático de Reativos, Estabilidade Angular, Proteção de Geradores, Perda de Excitação.

---

### 1. INTRODUÇÃO

O sistema elétrico brasileiro é interligado, tornando possível a conexão da geração de energia proveniente de lugares afastados dos centros de carga. O controle dinâmico do fluxo de potência no sistema interligado brasileiro é feito pelo Operador Nacional do Sistema elétrico (ONS). Contudo, por possuir tamanho continental, a distância entre os polos de geração e os grandes centros de consumo é, em muitas das vezes, longa o suficiente para tornar o despacho não potencializado em seu máximo. Estudos relacionados a melhora de

despacho de energia pelo sistema tem sido o foco de pesquisas ao longo dos últimos anos como as de (lima, 2020), (Gomes, 2020) e (Andrade Amorim, Romero, & Mantovani, 2009).

Sabe-se que o fluxo de potência se torna limitado por alguns fatores. Pode-se destacar, dentre estes, a estabilidade, limites térmicos da rede de transmissão e eficiência na transmissão de grandes blocos de energia (Frontin, S. O. et al., 2013). Assim sendo, dispositivos relacionados a eletrônica de potência surgiram com intuito de aumentar os limites operacionais do sistema. Esses dispositivos são conhecidos como FACTS (*Flexible*

*Alternating Current Transmission Systems*), compensadores de reativos, que tem como princípio o controle da amplitude e ângulo da tensão e corrente no ponto ao qual está conectado (Hingorani, Gyugyi, & El-Hawary, 2000).

Os dispositivos FACTS podem ser divididos em quatro categorias: compensadores série, paralelos, série combinado e série-paralelo combinado (Hingorani, Gyugyi, & El-Hawary, 2000). O que os diferenciam são suas formas de controle e como o equipamento será acoplado no sistema. Todavia, tais dispositivos tendem a alterar variáveis como tensão e corrente do sistema afetando o modo como ele é visto por equipamentos como geradores e relés de proteção. Estudos como de (Furini & Araujo, 2008), (Wang & Truong, 2012) e (Mondal & Sengupta, 2014) mostram como a inserção de dispositivos FACTS na rede influenciam na estabilidade transitória de geradores perante a perturbações. Nesses estudos, pode ser visto que os controladores dos compensadores tendem a manter os níveis de tensão e corrente no ponto de acoplamento próximos de um valor requisitado para a compensação, auxiliando assim, o sistema na presença de perturbações.

Outros estudos como os de (Neves, 2020) e (Da Silveira, 2020) apresentam como a alteração das variáveis elétricas da rede podem impactar nos ajustes das funções de proteção em relés de proteção. Tais estudos mostram como o tempo de atuação da proteção foi impactado, sendo que em alguns casos as zonas de proteção pré-ajustadas tiveram atuação em sub ou sobre alcance. É visto que as funções ANSI 21 de proteção de distância utilizada em linhas de transmissão e ANSI 40 de proteção de sobre-excitação de geradores são comumente impactadas pela inserção de compensadores no sistema.

Dado esta problemática, este artigo tem por objetivo realizar uma análise dos impactos da utilização de FACTS no SEP (Sistema Elétrico de Potência). Foi abordado a utilização de dois tipos de compensadores sendo um deles o compensador série, conhecido como TCSC (*Thyristor Controlled Series Capacitor*) e o compensador paralelo SVC (*Static VAR Compensator*).

Para o desenvolvimento do trabalho, foi utilizado o software PDSCAD/EMTDC para a elaboração e simulação do sistema através da representação de seus componentes de potência, dentre eles os geradores, transformadores, linhas de transmissão (LTs), cargas e posteriormente a inserção dos compensadores TCSC e SVC. Com o sistema modelado, é analisado, em um primeiro momento, os efeitos que os compensadores causam no deslocamento angular dos geradores síncronos para curtos-circuitos monofásicos ocorridos nas linhas de transmissão, para diferentes tipos de carregamento.

Em um segundo momento, fazendo uso do mesmo sistema e condições de carregamento, foi feita a análise do comportamento da função ANSI 40 nas máquinas síncronas, mediante as condições de perda parcial de

excitação (PPE) e perda total de excitação (PTE), com a presença dos compensadores conectados ao sistema.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Thyristor Controlled Series Capacitor (TCSC)

O TCSC é um dispositivo FACT que tem como característica o controle do fluxo de potência no trecho instalado através da compensação da reatância da linha de transmissão. As compensações de reatância capacitiva e indutiva são possíveis pela seleção adequada dos valores do capacitor e indutor do dispositivo TCSC, e podem ser obtidas através da equação de reatância (1) (Kadia & Jamnani, 2012). Um TCSC consiste em um capacitor (C) em paralelo com um reator controlado por tiristor (TCR), que dado o ângulo de disparo nos tiristores é feita a variação de impedância do dispositivo. A Figura 1 apresenta um esquemático para este tipo de compensador.

$$X_{TCSC}(\alpha) = -X_C + C_1(2(\pi - \alpha) + \text{sen}(2(\pi - \alpha))) - C_2 \cos^2(\pi - \alpha)(\omega(\pi \tan(\omega(\pi - \alpha)) - \tan(\pi - \alpha)) - \tan(\pi - \alpha)) \quad (1)$$

Onde,

$$C_1 = \frac{X_C + X_{LC}}{\pi} \quad (2)$$

$$C_2 = \frac{4X_{LC}^2}{X_L \pi} \quad (3)$$

$$X_{LC} = \frac{X_C X_L}{X_C - X_L} \quad (4)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (5)$$

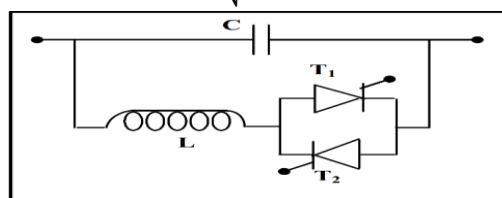


Fig. 1 Esquemático de um compensador TCSC (MEIKANDASIVAM, NEMA, & JAIN, 2011).

Nas equações (2) e (3), C1 e C2 são constantes definidas a partir de  $X_C$ , reatância capacitiva do TCSC, e  $X_{LC}$  reatância composta pela impedância capacitiva  $X_C$  e indutiva  $X_L$  do compensador como mostrado em (4), em (5)  $\omega$  é o fator indicativo do ponto de ressonância do sistema o qual sugere-se de acordo (S. Meikandasivam, 2008) ter um valor menor que 3. Ademais,  $\alpha$  é o ângulo de disparo do TCSC finalizando (1), sendo  $X_{TCSC}(\alpha)$  a reatância do compensador em função do ângulo de disparo nos tiristores.

A Figura 2 apresenta a característica da variação da impedância compensada em função do ângulo de disparo nos tiristores, enquanto (1) descreve esta curva. Nota-se que o TCSC apresenta 3 áreas de operação, a de

compensação indutiva a de ressonância e a de compensação capacitava.

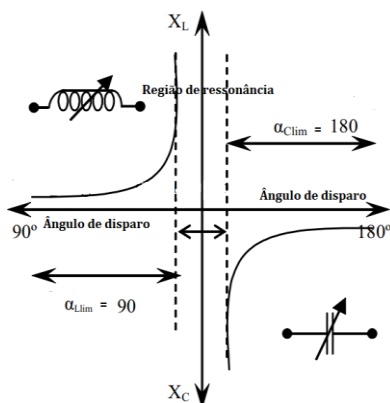


Fig. 2 Curva característica reatância X angulo de disparo. Adaptado de (MEIKANDASIVAM, NEMA, & JAIN, 2011).

## 2.2 Static Var Compensator (SVC)

O compensador estático de reativo propõe o controle rápido e contínuo da tensão no ponto de acoplamento com a rede. Tomando a Figura 3 como exemplo mediante a (6) (Frontin, S. O. et al., 2013) que define a potência ativa transmitida ( $P_{AB}$ ) entre duas unidades geradoras ideais conectadas por uma LT curta e sem perdas, pode-se exemplificar o modo com que o SVC altera os parâmetros da rede.

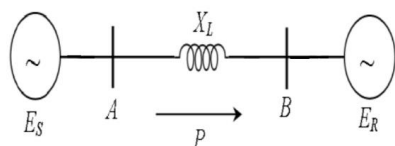


Fig. 3 Sistema de Transmissão CA. Adaptado de (Joshi & Kothari, 2014).

$$P_{AB} = \frac{V_A \cdot V_B}{X_L} \cdot \sin(\delta_A - \delta_B) \quad (6)$$

Verifica-se através de (6) que o SVC conectados em uma das barras da Figura 3 possibilita ampliar a potência transmitida através do controle da tensão, alterando o numerador da equação 6. Onde,  $V_A$  é a tensão no barramento A,  $V_B$  tensão no barramento B,  $X_L$  reatância série do trecho,  $\delta_A$  e  $\delta_B$  ângulo das tensões nos barramentos A e B respectivamente.

## 3.METODOLOGIA

### 3.1 Modelagem no Software PSCAD/EMTDC

Para realização das atividades, foi utilizado o sistema teste IEEE 9 barras modificado por (OPAL-RT, 2017) uma vez que este sistema é utilizado em diversos estudos na área de SEP. Com o arranjo deste sistema, tornou-se possível utilizar o software PSCAD/EMTDC

para modelagem e posteriormente simulação dos casos propostos no estudo. O sistema conta com 3 geradores síncronos de polos salientes, 3 transformadores, 6 LTs, 9 barras e 3 cargas, conforme a figura 4.

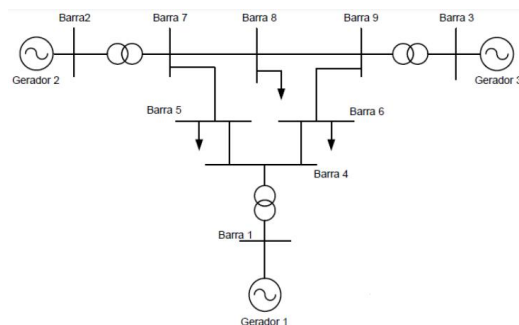


Fig. 4 Sistema teste IEEE 9 barras (Moreira, 2017).

Em relação ao compensador TCSC proposto, primeiramente utilizou-se a metodologia de (KADIA & JAMNANI, 2012) para a criação do TCSC uma vez que a biblioteca do software PSCAD não contempla um bloco pronto para este tipo compensador, diferentemente do SVC. Essa metodologia propõe um controlador PI em malha fechada, que a partir de um valor de impedância de referência é feita a comparação com o valor de leitura da impedância do trecho, criando um sinal de erro, fazendo com que o controlador emita em sua saída um valor de ângulo de disparo. O compensador proposto opera apenas para região capacitiva. Todavia, o dispositivo modelado tem a capacidade de compensar de 0 a 80% da impedância do trecho.

Definiu-se alocar o TCSC na LT entre as barras 8 e 9, próximo a barra 8, por conta de o fluxo de potência ser maior neste trecho. Vale salientar que a capacidade de operação deste TCSC proposto é baseada na escolha dos capacitores, indutores e tiristores utilizados. A compensação de impedância do trecho foi ajustada em 70%, por ser o fator comumente utilizado na prática de acordo (MEIKANDASIVAM, NEMA, & JAIN, 2011).

Quanto ao SVC, foi extraído o modelo utilizado da biblioteca do PSCAD/EMTDC, possuindo 200 MVA de potência. Por se tratar de um modelo pronto, os ganhos de malha foram definidos de acordo ao modelo exemplo, sendo parametrizado apenas a tensão de referência do controlador. Definiu-se então alocar o SVC na barra 8, para se ter um melhor efeito de comparação entre os compensadores.

Ademais, foram utilizados modelos de máquina síncronas, reguladores de tensão e turbinas disponibilizados na biblioteca do *software*, bem como seus controladores.

### 3.2 Eventos para Análise da Estabilidade Angular Transitória.

A proposta deste estudo é analisar a estabilidade angular do sistema proposto. Segundo (Kundur, Balu, &

Lauby, 1994) a estabilidade angular avalia a habilidade de um SEP manter suas unidades geradoras em sincronismo.

Para análise, definiram-se 3 casos de estudo apresentados na Tabela 1. Os casos foram compostos por diferentes tipos de carregamento no gerador conectado na barra 3. O distúrbio simulado foi um curto-circuito monofásico-terra (cc1Ø) no instante de 10 segundos de simulação. O curto-circuito tem duração de 30 ms, com abertura dos disjuntores da LT após esse período. Foi utilizado este valor de tempo pois, de acordo (D'AJUZ, 1985), os disjuntores devem ser capazes de abrirem em tempos tão curtos quanto 2 ciclos. Ademais, curto-circuito monofásico foi escolhido como evento por ser o considerado pelo ONS o melhor tipo de evento para caracterizar um distúrbio na LT (OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO - ONS, 2019).

**Tabela 1. Casos de simulações para análise de estabilidade angular dos geradores.**

Caso	Carregamento potência ativa G3 (p.u base de G3)	Evento	Local	Duração (ms)
1	0,45	cc1Ø	LT7-5	30
2	0,58	cc1Ø	LT7-5	30
3	0,8	cc1Ø	LT7-5	30

O gerador 1 foi adotado como referência angular. Logo, o ângulo ( $\delta_1$ ) é o ângulo referência do sistema. Contudo, foi analisado o deslocamento angular dos geradores 2 ( $\delta_{2,1}$ ) e 3 ( $\delta_{3,1}$ ) para os eventos supracitados na Tabela 1, sem compensadores, somente com TCSC e somente com SVC.

### 3.3 Ajuste da função de proteção ANSI 40.

Para o ajuste da função ANSI 40, utilizou-se como base os dados do gerador síncrono conectado a barra 3 uma vez que a proteção foi dimensionada para este equipamento, vide Tabela 2.

**Tabela 2. Dados do Gerador conectado a barra 3.**

Grandeza	Simbologia	Valor
Potência Nominal	$S_N$	125 MVA
Tensão Nominal	$V_N$	15,5 kV
Reatância de eixo direto	$X_d$	1,22 pu
Reatância Transitória de Eixo direto	$X'_d$	0,174 pu

Os relés de proteção em geral fazem suas atuações de proteção a partir da leitura de corrente e tensão fornecidas pelos TPs e TCs, por este motivo, a impedância avaliada na função ANSI 40 é em valores secundários, definida por (7).

$$Z_{sec} = Z_{pri} \cdot \frac{RTC}{RTP} \quad (7)$$

Onde,  $Z_{sec}$  é a impedância em valores secundários,  $Z_{pri}$  a impedância em valores primários, RTC a relação de transformação do TC e RTP a relação de transformação do TP.

### 3.4 Ajuste da Função de Proteção ANSI 40 com Offset Negativo

Nesse estudo, foi abordada a metodologia propostas por (Berdy, 1975), conhecida como duas zonas mho com offset negativo. O diâmetro da zona 1 de proteção (40Z1P) equivale a 1,0 p.u, enquanto a zona 2 (40Z2P) possui valor de diâmetro equivalente a  $X_d$ . O Offset negativo (40XD1 e 40XD2) é o mesmo para as duas zonas, correspondendo a metade do valor de  $X'_d$ . O tempo de atuação para essas zonas de proteção foi definido de acordo o praticado em aplicações reais, sendo esses instantâneo para zona 1, ou seja, 0 s e temporizado com um valor entre 0,5 s e 1 s para zona 2. Adotou-se então 1 segundo para zona 2 temporizada.

A Tabela 3 expõe os valores calculados para a parametrização das zonas de proteção, salienta-se que esses valores são correspondentes a proteção para o gerador conectado na barra 3.

**Tabela 3. Dados da parametrização para função de proteção ANSI 40 no software PSCAD.**

Parâmetro	Valor (Unidade)
40Z1P	23 ( $\Omega$ secundário)
40Z2P	28,06 ( $\Omega$ secundário)
40XD1	-2,001 ( $\Omega$ secundário)
40XD2	-2,001 ( $\Omega$ secundário)
Tempo de atuação Z1	0 s
Tempo de atuação Z2	1 s

### 3.5 Eventos para a Análise da Função ANSI 40

Para a análise dos impactos que os compensadores causam no comportamento da função de proteção ANSI 40, aplicada ao gerador conectado a barra 3 do sistema teste, foram definidos 6 casos de estudo apresentados na Tabela 4. Realizaram-se simulações variando as condições de despacho de potência do gerador 3 e o tipo de perda de excitação, sendo perda de extinção total (PTE,  $E_f = 0 p.u$ ) e perda de excitação parcial (PPE,  $E_f = 0,5 p.u$ ).

**Tabela 4. Casos para o estudo da função ANSI 40 na presença de compensadores.**

Caso	Carregamento potência ativa G3(p.u base de G3)	Tipo de perda de excitação
4	0,45	PTE
5	0,58	PTE
6	0,8	PTE
7	0,45	PPE
8	0,58	PPE
9	0,8	PPE

#### 4. RESULTADOS

##### 4.1 Análise da Estabilidade Angular Transitória

As Figuras 5 a 10 apresentam os resultados referentes aos geradores conectados a barra 2 ( $\delta_{2,1}$ ) e barra 3 ( $\delta_{3,1}$ ) para os casos 1 a 3, onde é aplicado um curto-circuito monofásico entre as barras 7 e 5, sendo este próximo a barra 7.

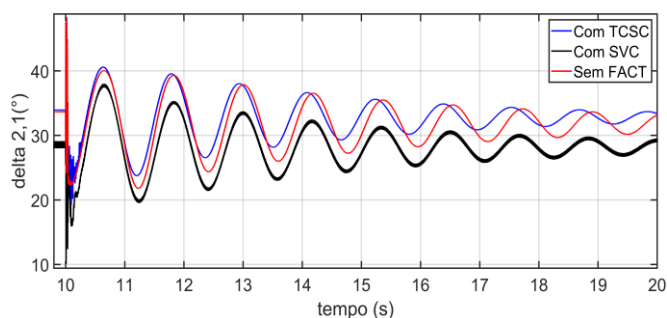


Fig. 5 Deslocamento angular do gerador 2 para o caso 1.

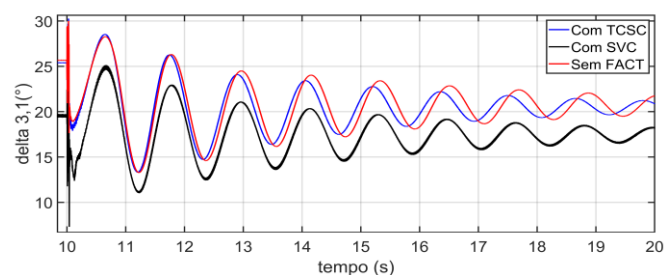


Fig. 6 Deslocamento angular do gerador 3 para o caso 1.

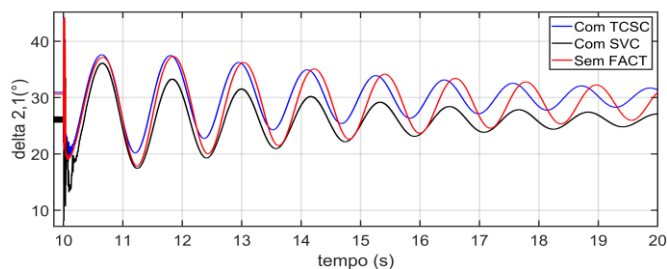


Fig. 7 Deslocamento angular do gerador 2 para o caso 2.

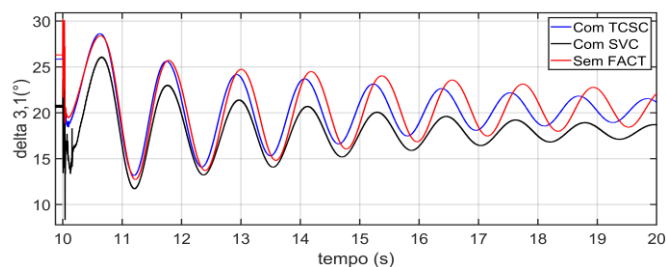


Fig. 8 Deslocamento angular gerador 3 para o caso 2.

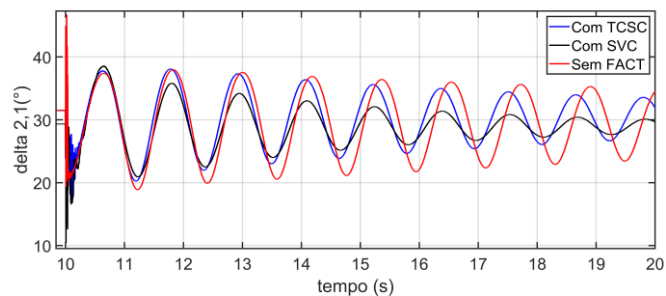


Fig. 9 Deslocamento angular gerador 2 para o caso 3.

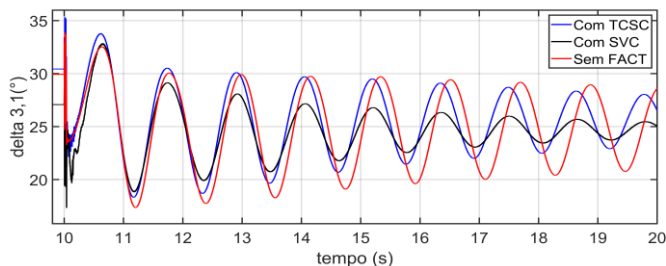


Fig. 10 Deslocamento angular gerador 3 para o caso 3.

Analisando as figuras, é visto que para todos os casos o sistema apresentou estabilidade angular transitória, entretanto, para simulações onde tem a presença dos compensadores a oscilação do deslocamento angular dos geradores apresentou menores excursões e maiores amortecimentos, evidenciando a eficácia do uso desses compensadores.

Todavia, comparando os casos, observa-se que o compensador SVC apresentou um impacto melhor na estabilidade dos geradores frente a perturbação, sendo que o TCSC apresentou a mesma excursão angular da simulação sem compensadores no período inicial pós-falta, porém tendo um maior amortecimento no decorrer da simulação.

##### 4.2 Análise da Proteção ANSI 40.

Por meio da simulação feita pelo estudo no software PSCAD/EMTDC tornou-se possível verificar a atuação da função de proteção ANSI 40 proposta por Berdy para os casos apresentados na Tabela 4. Os resultados de tempo de atuação e zonas de atuação para cada caso simulado estão dispostos na Tabela 5, referentes ao compensador TCSC, e na Tabela 6 referentes ao compensador SVC.

**Tabela 5** Dados obtidos na simulação referentes a atuação da função ANSI 40 com offset negativo, comparativo entre TCSC e sem TCSC no sistema.

CASO	TCSC	TRIP (Z1) (s)	START Z2 (s)	TRIP (Z2) (s)	TRIP DJ
4	ON	3,5855	2,34175	3,34175	Z2
	OFF	3,52725	2,27525	3,27525	Z2
5	ON	3,93775	2,92725	3,92725	Z2
	OFF	3,946	2,91175	3,91175	Z2
6	ON	3,99175	3,37525	4,37525	Z1

	OFF	4,05225	3,7725	4,37725	Z1
7	ON	3,59175	2,34175	3,34175	Z2
	OFF	3,52725	2,27525	3,27525	Z2
8	ON	3,93775	2,92725	3,92725	Z2
	OFF	3,946	2,91175	3,91175	Z2
9	ON	3,99175	3,3815	4,3815	Z1
	OFF	4,05225	3,37725	4,37725	Z1

**Tabela 6 Dados obtidos na simulação referentes a atuação da função ANSI 40 com offset negativo, comparativo entre SVC e sem SVC no sistema.**

CASO	SVC	TRIP (Z1) (s)	START Z2 (s)	TRIP (Z2) (s)	TRIP DJ
4	ON	4,31275	3,1595	4,1595	Z2
	OFF	3,52725	2,27525	3,27525	Z2
5	ON	4,5065	3,51375	4,51375	Z1
	OFF	3,946	2,91175	3,91175	Z2
6	ON	4,1105	3,445	4,445	Z1
	OFF	4,05225	3,37725	4,37725	Z1
7	ON	3,6595	3,1595	4,1595	Z1
	OFF	3,52725	2,27525	3,27525	Z2
8	ON	4,0138	3,51375	4,51375	Z2
	OFF	3,946	2,91175	3,91175	Z2
9	ON	3,945	3,445	4,445	Z1
	OFF	4,05225	3,37725	4,37725	Z1

Analisando os resultados expostos nas tabelas 5 e 6, é notado o impacto que os compensadores causam no tempo de atuação da funções de proteção. Todavia, apenas para o compensador SVC foi observado um sobre alcance de zona destacado em laranja.

De posse dos valores presentes nas Tabelas 5 e 6, é apresentada a Tabela 7 que contempla a diferença referente ao tempo que a trajetória da impedância alcança a zona 1 ( $\Delta Z1$ ) e a zona 2 ( $\Delta Z2$ ), e a diferença do tempo de disparo do disjuntor ( $\Delta disp. DJ$ ), considerando no sistema teste a presença somente do SVC, somente do TCSC e sem compensadores.

**Tabela 7 Diferença entre os tempos da trajetória da impedância alcançar as zonas de proteção, sem a presença de compensadores e na presença de compensadores.**

Compensador	Caso	$\Delta Z1$ (ms)	$\Delta Z2$ (ms)	$\Delta disp. DJ$ (ms)
TCSC	4	-58,25	66,5	66,5
	5	8,25	15,5	15,5
	6	60,5	-2	60,5
	7	-64,5	66,5	66,5
	8	8,25	15,5	15,5
	9	60,5	4,25	60,5
SVC	4	-785,5	-884,25	-884,25
	5	-560,5	-0,88425	-594,75
	6	-58,25	-0,602	-58,25
	7	-132,25	-0,06775	-384,25
	8	-67,8	-0,88425	-602
	9	107,25	-0,602	107,25

O sinal negativo em alguns valores expostos na Tabela 7 evidenciam um atraso na sensibilização da proteção para estes casos. Pode-se observar que para todos os casos, exceto para o caso 9, as simulações feitas com o sistema utilizando o SVC ocorreram com um atraso no disparo do disjuntor, diferentemente o ocorrido com as simulações com o TCSC. Na presença do compensador TCSC é visto que em todos os casos houveram uma maior sensibilização da atuação da proteção, sendo que houve um disparo mais rápido do disjuntor do que nas simulações sem o compensador. Não foram apresentados sub ou sobre alcance de atuação de zonas de proteção nesses casos. Quanto ao SVC é possível observar de maneira geral uma dessensibilização das zonas de proteção, ao qual pode alcançar um valor de 884,25 ms de atraso para atuação com a presença deste compensador, como evidenciado no caso 4 com PTE. Outro ponto é observado na Tabela 6, onde a simulação com a presença do compensador SVC apresentou atuação da zona 1 em sobre alcance, nos casos 5 e 7, como destacado em amarelo. A trajetória da impedância considerando o ajuste da função ANSI 40 proposta para os casos de PTE e PPE na presença de cada compensadores encontram-se nas Figuras 11 a 14.

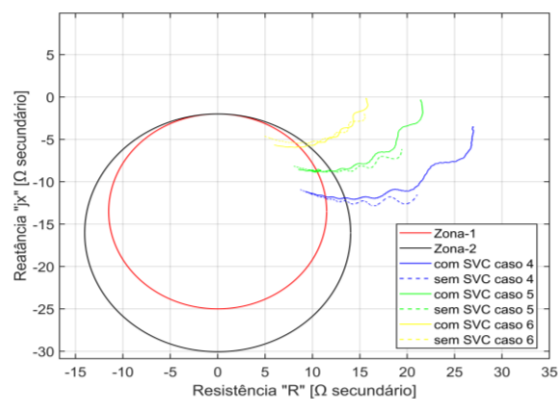


Fig. 11 Diagrama RX PTE casos com SVC.

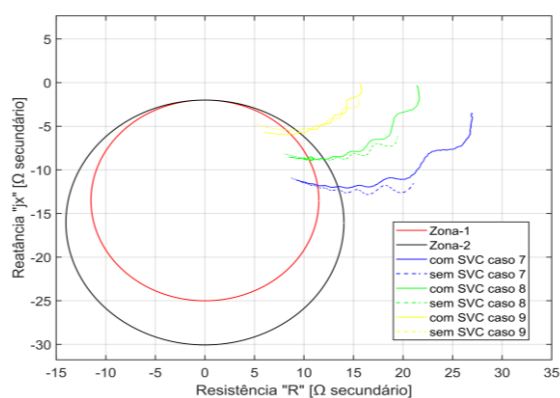


Fig. 12 Diagrama RX PPE casos com SVC.

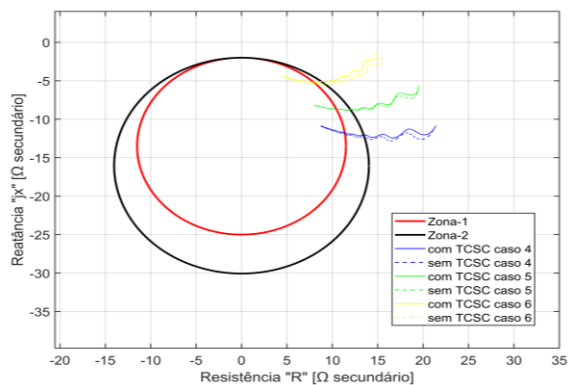


Fig. 13 Diagrama RX PTE para os casos com TCSC.

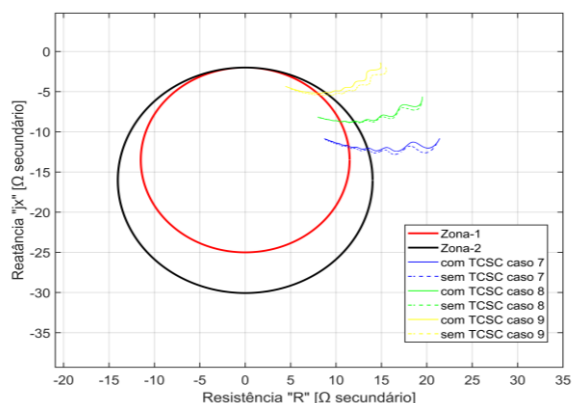


Fig. 14 Diagrama RX PPE para os casos com TCSC.

Observando as figuras expostas é possível verificar visualmente que há um deslocamento vertical da trajetória no eixo da reatância em todos os casos com os dois tipos de compensadores. Salienta-se que as Figuras expõem toda a trajetória da impedância até o final da simulação, logo, para os casos de atuação em zona 2 a impedância permaneceu em zona 2 por mais de um segundo, entretanto, alcançou a zona 1 após esse período e antes do final da simulação.

Por fim, é apresentado nas Figuras 15, 16 e 17 o comportamento das grandezas corrente, tensão, potência ativa e reativa nos terminais da máquina durante a perturbação, sendo esta para o caso 9. Salienta-se que o comportamento se manteve similar ao mesmo para os outros casos.

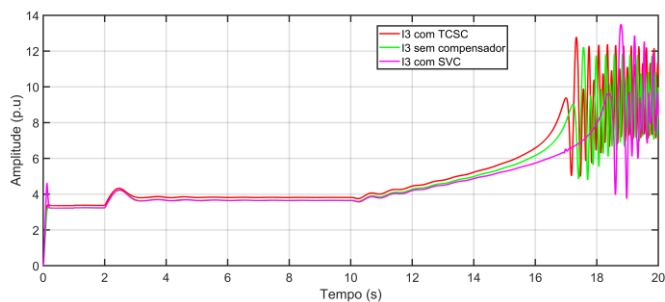


Fig. 15 Comportamento da corrente nos terminais da máquina para o caso 9.

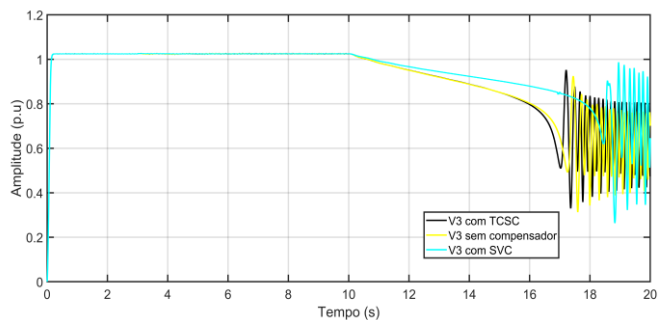


Fig. 16 Comportamento da tensão nos terminais da máquina para o caso 9.

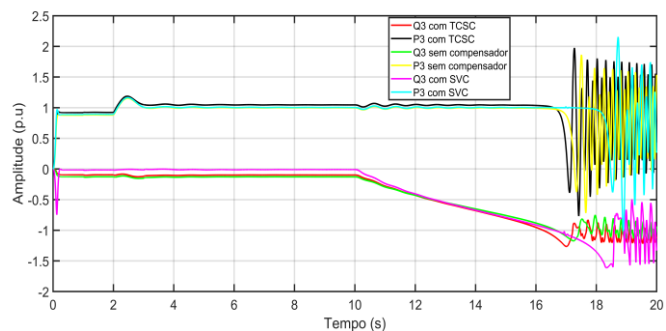


Fig. 17 Comportamento da potência ativa e reativa nos terminais da máquina para o caso 9.

É notado na Figura 15 que para a simulação na presença do SVC ouve uma menor taxa de aumento da corrente, quando comparado com a simulação na ausência de compensadores e na presença do TCSC. Todavia, na figura 16 é visto que na presença do SVC a tensão nos terminais da máquina perdeu um valor maior por alguns instantes a mais, quando comparado a simulação sem nenhum tipo de compensador e com o compensador TCSC. A figura 17 mostra que a potência ativa despatchada da máquina perdeu em estabilidade por alguns instantes a mais na presença do SVC quando comparado com as outras simulações.

## 5. CONCLUSÕES

Verificou-se através do presente estudo que a utilização de compensadores de reativos em linhas de transmissão melhoram significativamente a estabilidade transitórias dos geradores síncronos do sistema frente a perturbações. Viu-se que com o aumento do carregamento as excursões angulares dos geradores se tornaram maiores, contudo, o compensador SVC, não mostrou grandes oscilações na resposta transitória, quando comparado com os casos com TCSC e sem compensador. Assim sendo, o compensador SVC foi o que apresentou o melhor impacto na estabilidade angular do sistema frente a perturbação.

Na análise do comportamento da função de proteção ANSI 40 é visto de maneira geral, que quando o sistema teve a presença do compensador TCSC, a atuação da função de proteção e consequentemente disparo do

disjuntor ocorreram mais rapidamente, quando comparado com o caso na ausência de compensadores. A explicação deste fato pode ser obtida por meio da Figura 15, onde é visto que para o compensador TCSC foi obtido uma maior taxa de aumento da corrente quando comparado ao caso sem compensador, fato ocorrido entre o período de 14 a 16,5 segundos de simulação. Pela Figura 17 é visto também que na presença do TCSC, o sistema teve a sua instabilidade de potência ativa ligeiramente mais rápido do que o caso sem o compensador.

Já para o compensador SVC, houve, de maneira geral, um atraso na trajetória da impedância para sua zona de proteção e conseqüentemente um atraso no disparo do disjuntor. Tal fato ocorrido está relacionado pela menor taxa de decaimento da tensão e menor taxa de elevação da corrente, diferentemente do ocorrido com o TCSC.

Assim sendo, foi visto que os compensadores impactam diretamente a resposta da função ANSI 40, tornando necessário estudos para realizar a coordenação e seletividade desta proteção em sistemas que contam com estes dispositivos. Quanto a estabilidade angular do sistema, foi constatado que os compensadores promoveram um aumento do amortecimento das oscilações, sendo o SVC o com mais influência quando comparado ao TCSC.

#### REFERÊNCIAS

- Andrade Amorim, E., Romero, R. & Mantovani, J. R., 2009. Fluxo de potência ótimo descentralizado utilizando algoritmos evolutivos multiobjetivo. *Revista Controle & Automação/Vol.20*.
- Berdy, J., 1975. Loss of excitation protection for modern synchronous generators.. *IEEE Transactions*..
- Da Silveira, L. S. M. E. A., 2020. Análise dos efeitos da alocação de compensadores estáticos na resposta da função de proteção de impedância de linhas de transmissão. *Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos-SBSE*, v. 1, n. 1..
- D'AJUZ, A. e. a., 1985. *Equipamentos Elétricos: Especificação e Aplicação em Subestações de Corrente Alternada*. s.l.:s.n.
- Frontin, S. O. et al., 2013. Equipamentos de alta tensão-prospecção e hierarquização de inovações tecnológicas. *Finatec 1ª Edição, Brasília*.
- Furini, M. A. & Araujo, P. B. D., 2008. Melhora da estabilidade dinâmica de sistemas elétricos de potência multimáquinas usando o dispositivo facts" thyristor-controlled series capacitor-TCSC". *Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica*, v. 19, p. 214-225..
- Gomes, I. L. E. A., 2020. *Minimização de perdas de potência em sistemas de distribuição de energia elétrica utilizando um sistema imunológico artificial dedicado: Minimization of power losses in distribution systems using a dedicated artificial immune system*., s.l.: s.n.
- Hingorani, N. G., Gyugyi, L. & El-Hawary, M., 2000. Understanding FACTS: concepts and technology of flexible AC transmission systems. *Vol. 1, IEEE press New York*.
- Joshi, H. M. & Kothari, N. H., 2014. A review on series compensation of transmission lines and its impact on performance of transmission lines.. *Int J Eng Dev Res*, p. 72-76, 2014..
- Kadia, J. V. & Jamnani, J. G., 2012. Modelling and analysis of TCSC controller for enhancement of transmission network.. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, v. 2, n. 3, p. 223, 2012..
- Kundur, P., Balu, N. J. a. & Lauby, M. G., 1994. Power system stability and control, Vol. 7. *McGraw-hill New York*..
- Lima, G. R. S., 2020. Uma proposta para o despacho otimizado em geradores síncronos utilizando o algoritmo genético.. *Alocação de TCSC em linhas de transmissão congestionadas como forma de se garantir o fluxo de potência ótimo com restrição de segurança em condição de contingências N-1*..
- Meikandasivam, S., Nema, R. K. & Jain, S. K., 2011. Selection of TCSC parameters: Capacitor and inductor.. *In: India International Conference on Power Electronics 2010 (IICPE2010). IEEE, 2011. p. 1-5*..
- Mondal, D. & Sengupta, 2014. Nonlinear optimal TCSC control in comparison to PSO based conventional design in small signal stability enhancement.. *in: Proceedings of The 2014 International Conference on Control, Instrumentation, Energy and Communication (CIEC). IEEE, 2014. p. 264-268*..
- Moreira, T. G. E. A. 2017. Avaliação da Capacidade de Máxima Transferência de Potência em Sistemas Elétricos Interligados via Programação Linear Sequencial..
- Neves, F. C., 2020. Avaliação dos efeitos da inserção de compensador estático de reativos em estudos de proteção e estabilidade angular de sistemas multtinaquinas.
- OPAL-RT, 2017. IEEE 9 Bu System Example. *Disponível em: [https://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/images/Documents/Data/IEEE9\\_model\\_documentation\\_R0 .pdf](https://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/images/Documents/Data/IEEE9_model_documentation_R0.pdf)*. Acesso:06 jun.2020.
- Operador nacional do sistema elétrico - ONS, 2019. *Estudos de curto-circuito - volume 1*. s.l.:s.n.
- S. Meikandasivam, R. K. N. S. J., 2008. *Behavioral Study of TCSC Device - A MATLAB/SIMULINK Implementation*. s.l.:s.n.
- Wang, L. & Truong, D.-N., 2012. Stability enhancement of a power system with a PMSG-based and a DFIG-based offshore wind farm using a SVC with an adaptive-network-based fuzzy inference system. *IEEE transactions on industrial electronics*, v. 60, n. 7, p. 2799-2807.