

Influência da inserção do dispositivo STATCOM na proteção contra perda de excitação de geradores: Uma contribuição utilizando a lógica fuzzy

Victor M. P. Dutra*, Aurélio L. M. Coelho*, Francisco R. A. C. Baracho **,
Ivan P. Faria*, Elcio F. Arruda *

**Instituto de Ciências Tecnológicas, Universidade Federal de Itajubá – Campus de Itabira Itabira, Brasil (e-mail: victor96miguel@gmail.com, aurelio.coelho@unifei.edu.br, ivan.faria@unifei.edu.br, elcio.arruda@unifei.edu.br)*

***Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, Universidade Federal de Ouro Preto – Campus de João Monlevade João Monlevade, Brasil (e-mail: f_baracho@ufop.edu.br)*

Abstract: Brazil is a country with continental dimensions and has a power generation system interconnected with all regions, through transmission lines (TLs), allowing supply for its all-consumption centers. However, building new TLs may be unfeasible in an environmental and financial sense. With the advancement of power electronics, FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems) devices were created, which are based on series or parallel reactive compensation in the network, allowing flexibility in system operation, with lower transmission losses and better stability. However, the insertion of such devices may cause the maloperation of synchronous generators protection. In this sense, this work presents the effects of inserting one FACTS model (STATCOM - *Static Synchronous Compensator*), in relation to the protection system against the loss of excitation of synchronous generators. To identify and improve the protection response against loss of excitation, it is proposed to use a fuzzy classifier, which has its effectiveness compared to the traditional scheme that uses the impedance characteristic.

Resumo: O Brasil é um país com dimensões continentais e possui um sistema de geração de energia interligado em todas suas regiões, através de linhas de transmissão (LTs), permitindo um atendimento a todos seus centros de consumo. Entretanto, construir novas LTs pode ser inviável no sentido ambiental e financeiro. Com o avanço da eletrônica de potência, os dispositivos FACTS (*Flexible Alternating Current Transmission Systems*) foram criados, os quais se baseiam em compensação série ou paralela de reativos na rede, permitindo uma flexibilização na operação do sistema, com menores perdas de transmissão e melhor estabilidade. Porém, a inserção de tais dispositivos pode afetar a proteção de geradores síncronos. Neste sentido, este trabalho apresenta os efeitos da inserção de um modelo de dispositivo FACTS (STATCOM - *Static Synchronous Compensator*), em relação ao sistema de proteção contra a perda de excitação de geradores síncronos. A fim de identificar e melhorar a resposta da proteção contra perda de excitação, propõe-se a utilização de um classificador fuzzy, o qual tem sua efetividade comparada com o esquema de tradicional que utiliza a característica de impedância.

Keywords: FACTS, Fuzzy Logic, Loss of Excitation, STATCOM, Synchronous Generator.

Palavras-chaves: FACTS, Lógica Fuzzy, Perda de Excitação, STATCOM, Gerador Síncrono.

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, a principal forma de geração de energia é através de usinas hidrelétricas (UHÉs), que tem como seu principal ativo os geradores síncronos. Embora as máquinas síncronas não estejam entre os equipamentos do Sistema Elétrico de Potência (SEP) com maior incidência de falhas, o gerador pode estar sujeito a diversos tipos de defeitos, como curtos-circuitos e condições operativas anormais. Tais falhas podem resultar na necessidade de conserto ou substituição do equipamento, causando enormes prejuízos no que tange a vida útil do ativo, na continuidade e na qualidade de fornecimento. Por isso, caso ocorra alguma anormalidade, os sistemas de proteção deverão ser seletivos e rápidos, de modo a isolar a máquina do restante do sistema. Nesse contexto é necessário o uso de esquemas de proteção confiáveis, que, segundo Jamali (2008), devem reduzir o tempo de exposição do gerador às correntes de

defeito, minimizando os danos da falta e o risco de troca ou manutenção corretiva do gerador; desligar o menor trecho possível e reduzir o tempo de reparo e manter o sistema disponível para atender contratos de fornecimento de energia.

Segundo os trabalhos de Jamali (2008), Aziz (2016) e Moraes, (2010), os métodos de proteção convencionais aplicados para a função ANSI 40 podem ter um mal desempenho para oscilações estáveis de potência (OEP), provocando atuações indevidas de seu esquema de proteção.

Outro ponto, seria que, com o avanço da eletrônica de potência e a necessidade de melhorar os níveis de tensão e potência reativa que fluem pelas LTs, sem maiores investimentos em novas construções de LTs, a inserção dos dispositivos FACTS se tornaram uma prática comum. Dentre os benefícios desses dispositivos para o SEP podem ser citados: ampliação da capacidade de transmissão de LTs já existentes; controle do

fluxo de potência por caminhos mais adequados; estabilização eficiente de oscilações angulares e de tensão; integração entre sistemas de corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA), entre outros.

No entanto, alterar as variáveis do sistema como tensão e corrente podem afetar o comportamento das funções de proteção que têm como princípio de operação a medição da impedância, como por exemplo a função de distância (ANSI 21) aplicada em proteção de LTs e a proteção contra perda de excitação (ANSI 40) aplicada na proteção de geradores síncronos para detectar a perda de excitação.

Segundo Neves (2020), a proteção contra perda de excitação de geradores síncronos, a alocação dos dispositivos FACTS em LTs poderá provocar atraso de tempo da atuação do relé de proteção, levando a máquina a ficar maior tempo exposta nas condições de falta que são prejudiciais para sua vida útil, como relatado nos estudos de Elsamahy (2013), Yaghoobi (2014), Mati (2017) e Ghorbani (2016).

Em estudos como o de Raman (2012), demonstra-se como o dispositivo STATCOM influencia na detecção de falta pelo relé de distância (ANSI 21) e apresenta um esquema de proteção aplicando a lógica Fuzzy, que entrega uma melhor detecção na localização das faltas. No estudo de Elsamahy (2013), mostra a consequência da inserção do STATCOM no sistema, com relação a proteção contra perda de excitação de hidrogeradores. Já no estudo de Morais (2010), demonstra-se um esquema de proteção contra perda de excitação de geradores síncronos aplicando a lógica fuzzy, entregando uma atuação mais rápida e confiável da proteção.

Neste sentido, a fim de identificar e melhorar a resposta da proteção contra perda de excitação, para máquinas conectadas a LTs com dispositivos FACTS, propõe-se a utilização de um classificador fuzzy, o qual tem sua efetividade comparada com o esquema tradicional contra perda de excitação, que utiliza a característica mho deslocada no plano R-X. Para isso, foram realizadas simulações computacionais para modelagem do sistema e geração dos casos no PSCAD e posteriormente para tratamento dos sinais no MATLAB.

2. FUNDAMENTOS BÁSICOS PARA COMPREENSÃO DO TRABALHO

A seguir, algumas subseções são apresentadas com conceitos básicos necessários para compreensão do trabalho realizado.

2.1 Compensador Síncrono Estático - STATCOM

Os compensadores *shunt* tem como objetivo injetar potência reativa de acordo com as necessidades do sistema, e contribuindo para manter as tensões em níveis adequados, aumentando a capacidade de transferência de potência das linhas de transmissão e proporcionando uma maior estabilidade para o sistema quando da presença de perturbações (Silva, 2008).

Diante disso, o Compensador Síncrono Estático (STATCOM) é um dispositivo inversor que usa tiristores GTO e energia CC armazenada em um capacitor para gerar uma tensão síncrona

trifásica em seus terminais de saída. O STATCOM opera como uma fonte de potência reativa com conexão shunt, acoplada à linha de transmissão através de um transformador, podendo ser visto como uma fonte de tensão alternada, conectada em série a uma reatância de acoplamento com a característica da tensão de saída, conforme abordado em Santos (2003)

De acordo com (Dutra, 2021), no esquema de ligação do STATCOM o próprio inversor tem a capacidade de manter o capacitor carregado no nível de tensão apropriado, de modo a efetuar o controle de potência reativa do SEP, no ponto onde o STATCOM está conectado. Esta operação é realizada tornando a tensão de saída do inversor adiantada de um pequeno ângulo em relação à tensão do SEP. Com isso, o inversor absorve uma pequena quantidade de potência necessária para a reposição de perdas dos elementos semicondutores e para a manutenção da tensão do capacitor CC em um nível adequado. Este mesmo mecanismo de controle é usado para aumentar ou diminuir a tensão do capacitor, e com isso, controlar a amplitude da tensão de saída do inversor para efetuar a troca de potência reativa com o SEP.

2.2 Proteção Contra Perda de Excitação (ANSI 40)

É necessário que o sistema de proteção seja bem projetado para que na eventualidade de perturbações no sistema o equipamento seja retirado de operação, reduzindo possíveis danos que possam ser causados ao mesmo (Chapman, 2013). E um dos possíveis defeitos na máquina, é a perda de excitação, que ocorre quando o campo magnético dos enrolamentos do rotor sofre uma redução súbita, o que pode ser causado por: desligamento acidental do disjuntor de campo, ocorrência de um curto-circuito no campo da máquina, falha no regulador de tensão e mau contato nas escovas da excitatriz.

O gerador continua a fornecer potência ativa ao sistema durante certo período e após perder sua excitação, para manter este suprimento de potência ativa, o rotor acelera aumentando seu ângulo de carga. Porém, a perda do acoplamento magnético pode ocasionar a perda de sincronismo da máquina. Além disso, o gerador passa a absorver potência reativa do sistema acarretando uma queda da tensão nas barras vizinhas, passando a funcionar como um gerador de indução até que o ângulo do rotor atinja o limite de estabilidade teórico, tornando o gerador incapaz de transmitir toda a energia mecânica para o sistema elétrico (Coelho, 2016).

Então, este trabalho apresenta a metodologia proposta por Berdy (1975), com duas zonas mho de offset negativo, sendo esse offset de valor igual a metade da reatância transitória ($\frac{X'd}{2}$) do gerador protegido. Com o intuito de obter melhores respostas com relação a oscilações estáveis de potência (OEP), implementa-se uma temporização de 0,5 segundos para a Zona 2. O diâmetro da zona 1 é dado pelo valor de 1 p.u. e o diâmetro do da segunda zona com valor da reatância de eixo direto da máquina (X_d).

Já a metodologia proposta em IEEE (2006), define duas zonas mho de proteção com elemento direcional, sendo a primeira zona de proteção com *offset* negativo, e a segunda com *offset*

positivo baseado na reatância equivalente do sistema (X_s), visto a partir dos terminais do gerador protegido. Essa abordagem visa a proteção do gerador para uma condição de perda parcial e perda total de excitação considerando variáveis além do gerador, como pode ser visto em Dutra (2021).

2.3 Lógica Fuzzy para esquema de proteção

O conceito da lógica fuzzy foi apresentado por Zadeh (1965) para solucionar problemas lógicos impossíveis de ser solucionado de forma convencional. Dispõe de uma metodologia de tradução de expressões verbais, imprecisas e qualitativas para valores numéricos, convertendo uma experiência em uma forma tratável computacionalmente (Shankar, 2015). Uma característica da Lógica Fuzzy, de acordo com Barreto (1999), é que ela não possui um limite preciso, o que realmente a descreve corretamente é uma gradação de pertinência, pois procura-se saber quão pertinente uma determinada sentença, ou seja, quanto mais próximo do valor determinado de conjunto, maior será o valor da função pertinência, e não entregando apenas um valor de pertence ou não pertence a um conjunto.

Um determinado elemento pode pertencer a mais de um conjunto nebuloso, com diferentes graus de pertinência, o que representa aspectos fundamentais de todas as ações teóricas e práticas de sistemas nebulosos. A quantidade de funções pertinências em um universo é escolhido com base na experiência e natureza do processo a ser controlado, sendo mais usuais as funções pertinências triangulares e trapezoidais. A Lógica Fuzzy possui basicamente três etapas: fuzzificação, regras de inferência e defuzzificação (Barreto, 1999).

A fuzzificação é o mapeamento das entradas, em maioria valores numéricos reais, para o domínio nebuloso, classificando o valor da variável de entrada através da função de pertinência para obter os correspondentes termos e graus de pertinência (Morais, 2010).

A máquina de inferência nebulosa interpreta o processo de fuzzificação, em termos linguísticos e graus de pertinência, por meio de regras e gera uma saída nebulosa, sendo que cada regra possui um peso com valores de 0 a 1. E na defuzzificação, o valor da variável linguística de saída inferida pelas regras é traduzido em um valor numérico, obtendo um único valor representante dos valores inferidos. Assim, a defuzzificação traduz a saída de domínio nebuloso para o domínio numérico discreto, sendo os métodos mais utilizados são dos valores máximos ou no centro de área da função de pertinência resultante, denominados de Centro-da-área e Centro-do-Máximo.

3. METODOLOGIA

3.1 Modelagem no PSCAD/EMTDC

O primeiro ponto deste trabalho foi realizar a modelagem do sistema elétrico de potência, através do software PSCAD/EMTDC, aplicando o sistema de teste IEEE 9 barras

de Bérard (2020), sendo um sistema amplamente utilizado em SEPs relacionados ao tema, sendo composto por 3 geradores síncronos de polos salientes, 3 transformadores, 6 LTs, 9 barras e 3 cargas.

Definiu-se a alocação do STATCOM no barramento 8, que possui uma das cargas, a fim de manter o mais constante possível a tensão em tal barramento, sendo o STATCOM modelado de acordo com o trabalho de Zheng (2011), com um capacitor do barramento CC de 280 μ F, 6 GTOs, um transformador estrela-triângulo de 230kV/125kV, com o limite de 300 MVar capacitivo ou indutivo com um controlador PI (Proporcional Integral) com os ganhos de K_p de 2,2 e K_i de 0,45.

Também foram utilizados modelos de máquinas síncronas disponibilizados na biblioteca do PSCAD/EMTDC, assim como seus controles. Para a máquina primária e regulador de velocidade, utilizou-se um componente da biblioteca que modela a turbina e o controle de velocidade denominado IEEE tipo 2. Já para o controle de excitação utilizou-se o componente que modela o sistema de excitação do tipo AC1A, sem executar alterações nos parâmetros de controle, definidos por IEEE (2016), sendo visto toda a modelagem do sistema pelo Apêndice A.

A fim de avaliar os impactos do STATCOM com relação a proteção ANSI 40, foi aplicada uma perda de excitação completa ($E_f=0$ p.u) e uma perda de excitação parcial ($E_f=0,4$ p.u), avaliando o tempo do sinal de atuação dos três esquemas propostos (duplo offset negativo, offset positivo e a lógica fuzzy) com e sem o dispositivo FACTS, ligado ao barramento 8 do sistema.

3.2 Ajuste da Função de Proteção ANSI 40 Offset Negativo

Para o ajuste das zonas de proteção, utilizou-se como base os dados do gerador síncrono conectado a barra 2 do sistema em estudo de acordo com OPAL-RT (2017), com Potência Nominal de 270 MVA, Tensão Nominal de 18 kV, Reatância de Eixo Direto de 1,7 p.u e Reatância Transitória de Eixo Direto de 0,256 p.u

Levou-se em consideração o RTC e o RTP com relações de transformação unitária, logo a impedância medida no primário, é igual no secundário, sendo as bases do sistema iguais ao nominal dos geradores. Portanto o esquema de proteção de duas zonas com offset negativo possui os seguintes valores mostrados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros das zonas de proteção offset negativo.

Parâmetro	Valor (Unidade)
Diâmetro Zona 1	1,2 (Ω secundários)
Diâmetro Zona 2	2,04 (Ω secundários)
Offset Zona 1	-0,1536 (Ω secundário)
Offset Zona 2	-0,1536 (Ω secundário)
Delay Zona 1	0,0 (segundo)
Delay Zona 2	0,5 (segundo)

3.3 Ajuste da Função de Proteção ANSI 40 Offset Positivo

Nesta característica, considera-se os diâmetros da zona 1 e 2 definidos através das equações (1) e (2), respectivamente.

$$\text{Diâmetro } Z_1 = 1,1X_d - X'd_2 \text{ } [\Omega \text{ secundários}] \quad (1)$$

$$\text{Diâmetro } Z_2 = 1,1X_d + X'd_2 + X_t + X_{Sist} \text{ } [\Omega \text{ secundários}] \quad (2)$$

Sendo X_t a reatância de dispersão do transformador acoplado ao gerador protegido e X_{Sist} a reatância vista da barra ao qual o transformador está conectado, considerando a maior fonte de potência desconectada do SEP em estudo Mozina, C. J. et al (2008).

Para a parametrização, utilizou-se o valor do transformador elevador do gerador 2, ligado na barra 7, cujo valor é dado por 0,0626 p.u. A fim de determinar o X_{Sist} , retirou-se o gerador ligado ao barramento 1, determinando a reatância vista pela barra 7, referenciado com as grandezas do gerador 2, resultando em 1,4302[Ω].

O *offset* da zona 1 é negativo de valor correspondente a metade do valor de $X'd$, com atuação instantânea, o *offset* na zona 2 é positivo e considera as características do sistema, com a sua amplitude definida por X_s , sendo esta variável a soma de X_t com X_{Sist} . O elemento direcional, foi selecionado em -20° , delimitando a sensibilidade da zona 2, junto com uma temporização de 1 segundo para atuação, sendo os parâmetros apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Parâmetros das zonas de proteção de offset positivo.

Parâmetro	Valor (Unidade)
Diâmetro Zona 1	2,0905 (Ω secundários)
Diâmetro Zona 2	3,6742 (Ω secundários)
Offset Zona 1	-0,1536 (Ω secundário)
Offset Zona 2	1,4302 (Ω secundários)
Delay Zona 1	0,0 (segundo)
Delay Zona 2	1 (segundo)
Elemento direcional	-20 (graus)

3.4 Estudo da Oscilação Estável de Potência

Para realizar o estudo de oscilações estáveis de potência, realizou-se um curto-circuito trifásico na saída do transformador elevador (no barramento 7) com um tempo de 150ms, durante o tempo de simulação de 7 segundos, e variando o carregamento do gerador (potências ativas e reativas despachadas). Realiza-se a análise dos esquemas de proteção de duplo offset negativo, offset positivo e pelo método da lógica fuzzy, sendo cada caso de despacho representado abaixo com seu valor em p.u de base de 270MVA, sendo o valor nominal do gerador:

- Caso 1: 0,541-j0,402 (p.u)
- Caso 2: 0,460-j0,075 (p.u)
- Caso 3: 0,562-j0,467 (p.u)
- Caso 4: 0,625+j0,167 (p.u)

Para demonstrar que as oscilações foram de fato estáveis, e que o relé ANSI 40 não deveria operar, analisou-se o seguinte: as grandezas elétricas do gerador, como corrente e tensão de excitação e tensão e corrente terminais, estabilizavam em um valor após a falta a curva de estabilidade teórica no plano P-Q, através das equações (3) e (4), pegando os pontos de máxima transferência de potência ativa para cada tensão do gerador, e o comportamento do despacho de potência durante a falta.

$$P_{3\phi} = \frac{E_q \cdot V_L}{X_d} \sin \delta + \frac{V_L^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\delta \quad (3)$$

$$Q_{3\phi} = \frac{E_q \cdot V_L}{X_d} \cos \delta + \frac{V_L^2}{2 \cdot X_d \cdot X_q} (X_d + X_q) - (X_d - X_q) \cos 2\delta \quad (4)$$

3.5 Esquema Utilizado para a Logica Fuzzy

A lógica utilizada neste estudo se baseia no estudo Moraes (2010), podendo ser vista na Fig. 1 e Tabela 3, mostrando os parâmetros de saída, onde há os termos X_1 e X_2 , sendo parâmetros inseridos no algoritmo de saída, denominados sensibilidade de alarme e operação.

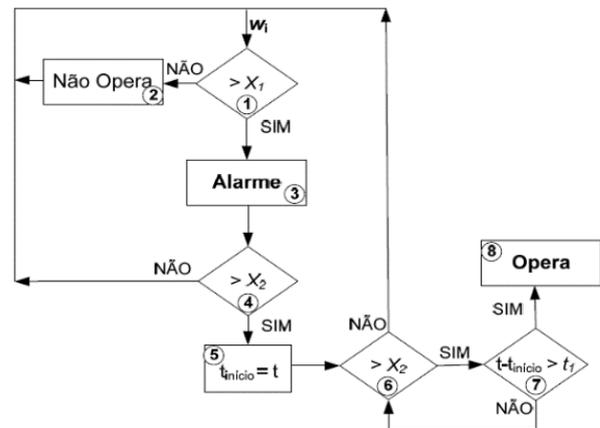


Fig. 1 Algoritmo para tomada de decisão da lógica fuzzy.
Fonte: Dutra (2021).

Após aplicado as regras de inferência, é passado na função de pertinência de saída, proporcionando um valor de saída defuzzificada. Logo após, de adquirido o valor da saída defuzzificada (w_i), que é comparado com o parâmetro X_1 , sendo o valor de sensibilidade de alarme, que foi definido em 0,35, caso o valor da saída defuzzificada seja maior, entra em modo de alarme, porém não irá retirar o gerador de operação. Logo após a operação de alarme, a lógica irá comparar com o parâmetro X_2 , sendo o limite de sensibilidade de operação, definido como 0,65, quando a saída defuzzificada ultrapassar esse limite, entrará em um loop de contagem. Se w_i for maior que X_2 durante um tempo de t_1 , o relé irá operar, retirando o gerador de operação com o sistema. Neste nosso estudo, considerou-se um tempo de 0,2 segundos, sendo visto na Fig. 1.

4. RESULTADOS

4.1 Perda de Excitação Completa

A resposta do relé de proteção ANSI 40 com esquema de duplo offset negativo, pode ser visto na Fig. 2. Observa-se na Fig. 2 duas zonas de proteção, sendo possível analisar a trajetória da impedância no diagrama R-X, visto que com a presença do dispositivo STATCOM, ocorre uma diferença na trajetória, proporcionando um atraso para atingir a zona 1 de atuação instantânea. Sem o dispositivo FACTS no sistema, o relé atuou no tempo de 9,804 segundos de simulação, já com a presença do STATCOM atuou com o tempo de 10,345 segundos, proporcionando um atraso de atuação de 541 ms.

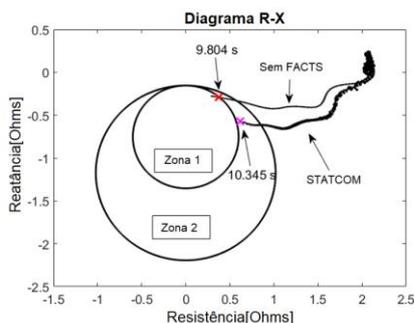


Fig. 2 Perda de excitação completa offset negativo.

Com o offset positivo, que pode ser visto pela Fig. 3, devido ao STATCOM proporcionar esse desvio na trajetória da impedância mensurada, o relé entra na contagem do delay da Zona 2 antes, em comparado a um sistema sem FACTS, o relé então, entrega o sinal de trip ainda na zona 2, com seu tempo de atuação será mais rápido do que um sistema sem os dispositivos FACTS, sendo muito bom para o sistema onde o gerador será retirado de operação em 200 ms de antecedência, onde com o STATCOM, ele operou no tempo de 9,4 segundos, e sem o dispositivo, ele opera no tempo de 9,6 segundos.

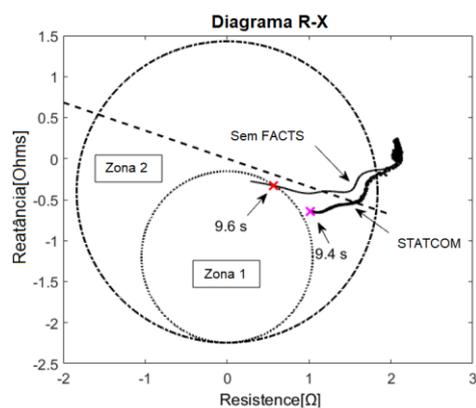


Fig. 3 Perda excitação completa utilizando a técnica de offset positivo.

Na Fig. 4, pode-se ver a trajetória do módulo da impedância medida, com seu valor em $\Omega_{primário}$, e a tensão terminal da máquina, com seu valor em p.u., com a base de valor nominal de 18kV, e a resposta defuzzificada da lógica fuzzy, sem a presença do STATCOM, quando resultar em 0,5 significa que a proteção está em fase de alarme, porém não ocorre a atuação do relé de proteção. Entretanto quando resulta

no valor 1, significa que o relé irá atuar e deixar o gerador fora de operação. Pode ser visto na Fig. 4, que após a falta, os valores de tensão de terminal e impedância vão reduzindo, proporcionando que o sistema uma resposta de alarme do relé de proteção a partir do tempo de 7,6 segundos, e logo após no tempo 9,08 segundos de simulação o relé opera, retirando a máquina síncrona de operação.

A Fig. 5 apresenta a resposta da lógica Fuzzy com a presença do dispositivo FACTS, mostrando que devido a compensação shunt realizada, há o atraso da redução dos valores de impedância e da tensão terminal, conseqüentemente, há um atraso na atuação do sinal de trip do relé, chegando ao tempo de 9.72 segundos de atuação e um sinal de alarme em 7.92 segundos, entretanto mesmo com o atraso na atuação, obteve uma resposta mais rápida de atuação em comparado com a técnica de duplo offset negativo por um tempo de 625 ms

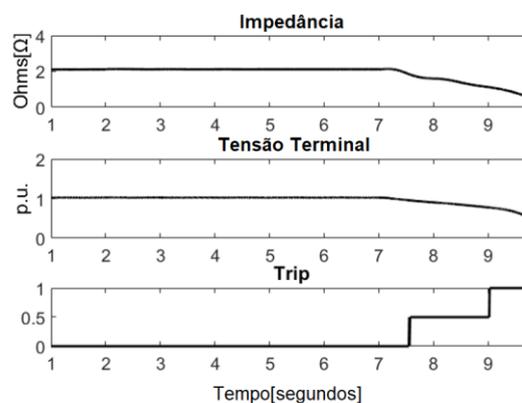


Fig. 4 Perda completa de excitação utilizando a lógica fuzzy sem STATCOM.

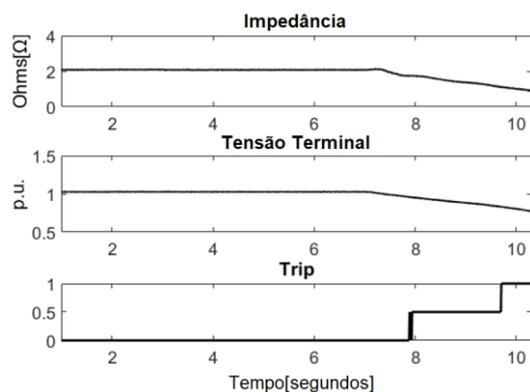


Fig. 5 Perda de excitação completa Lógica Fuzzy com STATCOM.

A partir das simulações realizadas, foi montado a Tabela 3, que mostra o tempo de atuação de cada esquema de proteção, após ser aplicado a perda de excitação completa da máquina, para o caso do sistema com e sem o dispositivo FACTS

Tabela 3. Tempo de atuação dos esquemas para perda completa de excitação

	Berdy	Positivo	Fuzzy
S/FACTS	2,804 s	2,601 s	2,08 s
STATCOM	3,345 s	2,404 s	2,72 s

4.2 Perda Parcial de Excitação

Na Fig. 6, observa-se que para a perda parcial da tensão de excitação da máquina, utilizando a técnica de duplo offset negativo, com o dispositivo STATCOM, o relé chega a atuar no tempo de 11,52 segundos, 730 ms de atraso do que sem o dispositivo FACTS, que chegou a atuar em 10,79 segundos, fazendo gerar resultado no sinal de trip através da zona 2.

Já utilizando o esquema de proteção de offset positivo com o elemento direcional, o relé entrega um adiantamento em sua atuação, em p.u, com o dispositivo STATCOM, atuou com 9,88 segundos de simulação, porém, sem o dispositivo, ele atuou com 10,25 segundos, um atraso de aproximadamente 370 ms, em relação a medição sem o STATCOM inserido no sistema, podendo ser visto através da Fig. 7.

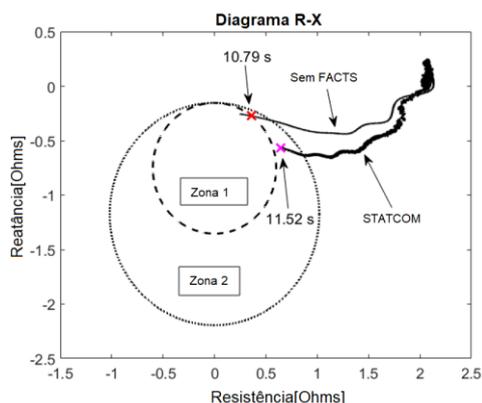


Fig. 6 Perda parcial de excitação utilizando a técnica offset negativo.

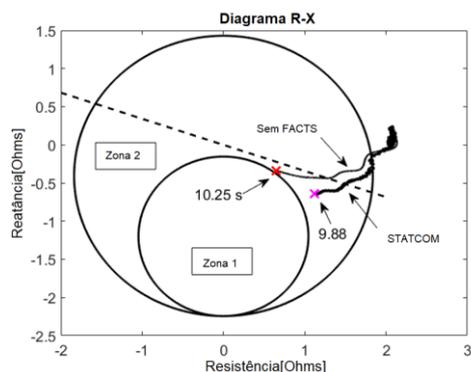


Fig. 7 Perda Parcial da Excitação utilizando a técnica de offset positivo.

Na perda de excitação parcial utilizando o esquema de lógica fuzzy, sem a presença do STATCOM o relé entrou em estado de alarme no tempo de 7,7 segundos

de simulação, e no tempo de 9,66 segundos de simulação o relé entrega seu sinal de trip, abrindo o disjuntor e retirando o gerador de operação. Ou seja, chega a atuar em um tempo de 590 ms mais rápido que o sistema de offset positivo e 1,13 segundos, mais rápido que utilizando a técnica de duplo offset negativo, apresentado na Fig. 8.

Aplicando a lógica fuzzy, com a inserção do STATCOM, é visto na Fig. 9 que o relé entrega um sinal de alarme no tempo de 7,91 segundos, e no tempo de 9,96 segundos ele resulta no sinal de trip de atuação, retirando o gerador síncrono de operação, 1,56 segundo mais rápido do que a técnica de duplo offset negativo, e 80 ms atrasado, em relação a técnica de offset positivo.

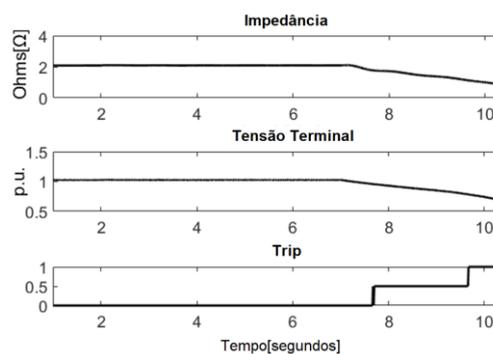


Fig. 8 Perda Parcial da Excitação utilizando a Lógica Fuzzy sem a presença do STATCOM.

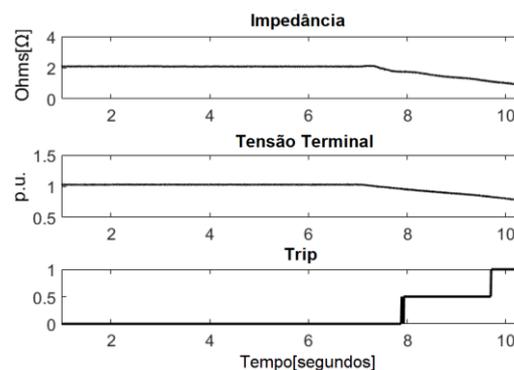


Fig. 9 Perda parcial de excitação utilizando a lógica fuzzy com STATCOM.

A partir das simulações realizadas, foi montado a Tabela 4, que mostra o tempo de atuação, de cada esquema de proteção, após ser aplicado a perda de excitação completa da máquina.

Tabela 4. Tempo de atuação do relé após a perda de excitação parcial

	Berdy	Positivo	Fuzzy
S/FACTS	3,79 s	3,25 s	2,66 s
STATCOM	4,52 s	2,88 s	2,96 s

4.3 Oscilação Estável de Potência

Para oscilação estável de potência, é visto que os esquemas de proteção utilizando as zonas mho, entregaram um sinal de atuação indevido para determinados tipos de carregamento – vide Fig. 10.

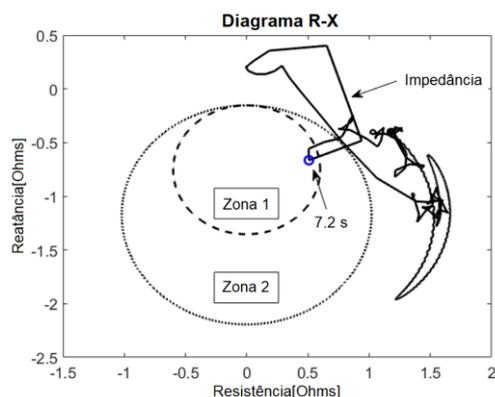


Fig. 10 Oscilação estável de potência offset negativo caso 1.

A Fig. 10 mostra a trajetória da medição do relé quando acontece o distúrbio, sendo visto que esse trip indevido é ocasionado por ultrapassar a zona de atuação instantânea no tempo de 7,2 segundos de simulação, 200 ms após a falta e o gerador com o carregamento de (0,562 - j0,467p.u) na base de 270MVA.

Já na Fig. 11, é visto a resposta do esquema de proteção utilizando a lógica fuzzy aplicando o mesmo carregamento no gerador, mostrando que o esquema de proteção entra apenas em situação de alarme, porém ele não atua retirando o gerador de operação com a impedância e a tensão terminal da máquina conseguem estabilizar após a falta.

Também foi analisado o comportamento da trajetória do despacho de potência pelo gerador, visto na Fig. 12, em relação a curva de capacidade da máquina, delimitado pelo valor de limite de estabilidade teórico, averiguando que não chega a ultrapassá-lo, consequentemente, a máquina não perderá a estabilidade após a falta. Também é apresentado na Fig 12 o limite de estabilidade teórico (LET), limite de corrente de armadura (LCA), limite de mínima excitação (LME) e a potência despachada (PD).

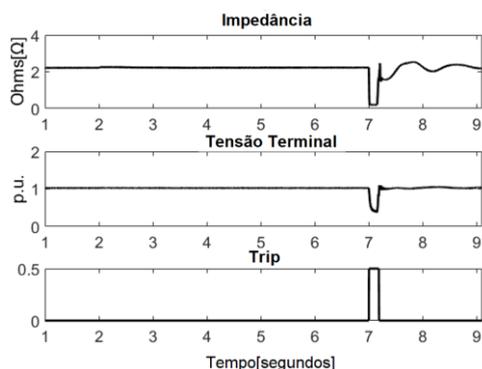


Fig. 11 Oscilação estável de potência utilizando a lógica Fuzzy para o Caso 1

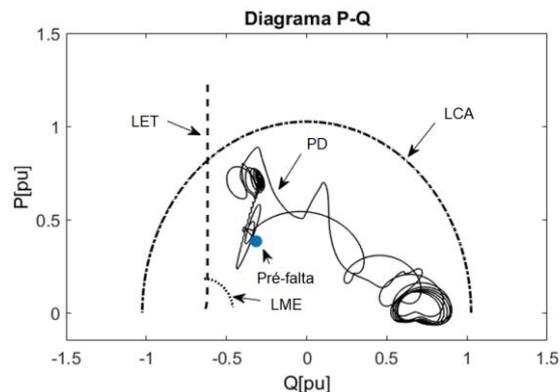


Fig. 12 Comportamento do despacho de potência do gerador operando a oscilação estável de potência

Com isso, construiu-se a Tabela 5, com a resposta de atuação de cada caso de carregamento do gerador, mostrando que não ocorreu atuação incorreta por conta da oscilação estável de potência para a lógica fuzzy.

Tabela 5. Atuação do relé de proteção para cada caso simulado

Caso	Berdy	Positivo	Fuzzy
Caso 1	Atuou	Atuou	Não atuou
Caso 2	Não atuou	Não atuou	Não atuou
Caso 3	Atuou	Atuou	Não atuou
Caso 4	Não atuou	Não atuou	Não atuou

5. CONCLUSÃO

Portanto, verificou-se a inserção do dispositivo STATCOM em um barramento na linha de transmissão, ocasiona a alteração da resposta dos geradores síncronos quando submetidos a distúrbios. Consequentemente, durante a atuação de um relé contra a perda de excitação, o dispositivo FACTS ocasiona o deslocamento da trajetória da medição de impedância. Utilizando a metodologia proposta por Mason e Berdy, ocorre um significativo atraso no disparo do relé para retirada da máquina de atuação, entretanto utilizando a metodologia de segunda zona com offset positivo e elemento direcional, o relé conseguiu uma atuação mais rápida com a presença do STATCOM do que sem a presença do dispositivo. Utilizando a estratégia com a lógica fuzzy, o relé apresenta um tempo de atuação mais rápido do que a estratégia de duplo offset negativo em todos os casos, entretanto ao comparar com a estratégia de offset positivo, apresentou um pequeno atraso na atuação do sinal de trip da proteção. Analisando um distúrbio que provoca uma oscilação estável de potência, a técnica utilizando a lógica fuzzy apresentou um excelente resultado, em que não entregou sinal de trip em nenhum caso de carregamento. Já com as técnicas convencionais, observou-se uma atuação indevida em determinado carregamento, pela trajetória passar pela zona instantânea durante poucos segundos, ocasionando o disparo indevido do relé de proteção. Contudo, esse problema poderia ser resolvido com um delay na zona 1 do esquema de proteção, entretanto,

isso ocasionaria um atraso na atuação para oscilações instáveis de potência.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNIFEI, CAPES, CNPq e FAPEMIG por financiarem parcialmente este trabalho.

REFERÊNCIAS

- Aziz, M., (2016). Detecting the Loss of Excitation in Hydro Generators Using a Neuro-Fuzzy Technique. s.l., s.n.
- Barreto, J. M.,(1999). Inteligência Artificial no Limiar do Século XXI. Florianópolis: PPP edições, v. 97,, s.n.
- Bérard, J., (2020). IEEE 9 Bus System Example. 2013. Disponível em: <http://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/images/Documents/Data/IEEE9_model_documentation_R0.pdf>. Acesso em: 5 de julho.. s.l., s.n.
- Berdy, J., (1975). Loss of excitation protection for modern synchronous generators. s.l., s.n.
- Carrasco, R. V., (2009). Avaliação do desempenho de esquemas de proteção de máquina síncrona contra perda de excitação. s.l., s.n.
- Chapman, S. J., (2013). Fundamentos de Máquinas Elétricas. sul., AMGH Editora.
- Coelho, A. L. M., (2016). Um sistema Integrado de testes de Função de Proteção de Geradores Síncronos Associados aos Limites de Excitação de um Modelo de AVR Implementado em Ambiente de Simulação Digital em Tempo Real. s.l., s.n.
- Dutra, V. M. P. et al (2021). STATCOM Influence on the Loss of Excitation Protection Performance of Synchronous Generators: A Contribution Using the Fuzzy Logic. 2021 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS).
- Elsamahy, M. S. O. F. a. T. S., (2013). Impact of midpoint STATCOM on generator loss of excitation protection. s.l., s.n.
- G.M.Ribeiro, (2001). Tutorial IEEE de proteção de geradores síncronos. Belo Horizonte, s.n.
- Ghorbani, A., Mozafari, B. & Soleymani, S. R. A. M., (2016). Impact of STATCOM and SSSC on synchronous generator LOE protection. s.l., s.n.
- IEEE, 2016. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. New York, s.n.
- Kinderman, G., (2008). Proteção de sistemas elétricos de potência. s.l., s.n.
- L.Gyugyi,(2000). Understanding FACTS:Concepts and Technology". s.l., IEEE press.
- Mati, A. a. B. H., (2017). Impact of STATCOM on Generator Positive-Offset mho element Loss of Excitation Protection. s.l., s.n.
- Morais, A. P. d.,(2010). An innovative loss-of excitation protection based on the fuzzy interference mechanism. s.l., s.n.
- Neves, F. C., (2020). Avaliação dos efeitos da inserção de compensador estático de reativos em estudo de proteção e estabilidade angular de sistemasmultimáquinas. s.l., s.n.
- OPAL-RT, (2017). Disponível em: <https://www.kios.ucy.ac.cy/testsystems/images/documen>ts/Data/IEEE9_model_documentation_R0.pdf. Acesso:06 jun.2020. s.l., s.n.
- Raman, S. R. G. a. A. J., (2012). An adaptive fuzzy mho relay for phase backup protection with infeed from STATCOM. s.l., s.n.
- S.Jamali, A. e. H., (2008). Measured impedance y distance relay for inter phase faults with TCSC on a doule circuit line. s.l., s.n.
- Santos, C. H. R. R., (2003). Influência do STATCOM na estabilidade de sistemas elétricos de potência. s.l., s.n.
- Shankar, R. T. e. C. S. P., (2015). Enhancement of transient stability and dynamic power flow control using Thyristor Controlled Series Capacitor. s.l., s.n
- Silva, D. D., (2008). Modelagem de equipamentos FACTS de segunda geração no problmea de fluxo de potência ótimo. s.l., s.n.
- Yaghobi, H., (2014). Impact of static synchronous compensator on flux-based synchronous generator loss of excitation protection. s.l., s.n.
- Zadeh, L. A., (1965). Fuzzy sets. s.l., v. 8, n. 3, p. 338-353.
- Zheng, S., Tang, H. & Fang, S., (2011). Research on D-STATCOM with direct current control strategy and its PSCAD/EMTDC simulation. s.l., s.n.

APÊNDICE A

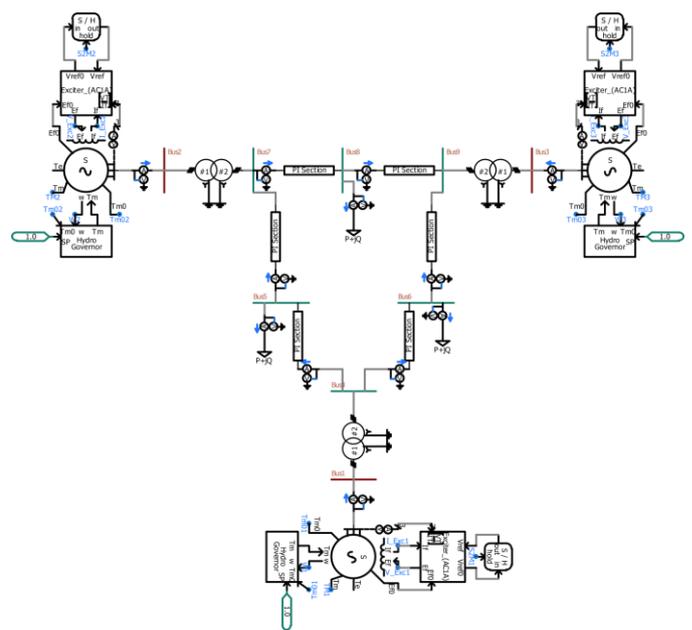


Fig. 13 Sistema IEEE 9 barras modelado no PSCAD/EMTDC.