



Grupo de Estudo de Proteção, Medição, Controle e Automação em Sistemas de Potência-GPC

Impacto no Desempenho da Proteção Contra a Perda de Excitação em Geradores Síncronos na Presença de um Compensador Síncrono Estático

MAIRON GALLAS*; ADRIANO PERES DE MORAIS; ALDAIR WONTROBA; GHENDY CARDOSO JUNIOR; UFSM;

RESUMO

Este trabalho traz uma avaliação do impacto no desempenho de quatro diferentes métodos de proteção contra perda de excitação em geradores síncronos na presença de um STATCOM. Com o objetivo de identificar o desempenho de cada método, simulações com perda de 60% da tensão de excitação do campo foram realizadas no sistema IEEE 9 Barras. Com isso foi possível perceber que três dos métodos sofrem uma maior influência na detecção da perda de excitação na presença do STATCOM, tornando-os mais lentos ou algumas vezes não conseguindo detectar o problema, enquanto um dos métodos não sofre grande influência.

PALAVRAS-CHAVE

Proteção, Statcom, FACTS, Gerador

1.0 - INTRODUÇÃO

A estabilidade do sistema elétrico de potência tem sido uma grande preocupação de engenheiros eletricitistas. Geradores síncronos possuem um papel significativo neste quesito. Estas máquinas são amplamente utilizadas em usinas hidrelétricas e sua falha pode causar sérios danos à máquina, interrupção do fornecimento de energia elétrica e perda econômica. Desta forma, deseja-se que o mesmo permaneça em operação continuamente e que seja retirado de operação somente nos casos de manutenção programada ou na ocorrência de atuação de uma proteção que exija a sua desconexão com o Sistema Elétrico de Potência (SEP). Embora a probabilidade de defeitos neste tipo de máquina serem baixas, uma falta ou condição anormal de operação podem acarretar sérios danos a máquina ou ainda ao sistema elétrico inteiro. Curto-circuito nos enrolamentos do estator ou no enrolamento de campo, sobreaquecimento dos enrolamentos, desequilíbrio de fases, instabilidade, motorização, sobre excitação, sub/sobre velocidade, e de principal interesse a este trabalho a Perda de Excitação (PE), são algumas das condições anormais à qual o gerador síncrono está sujeito.

Dada a relevância do gerador de energia elétrica e os altos custos associados, justifica-se a preocupação e a necessidade do uso de sistemas de proteção seletivos, rápidos e confiáveis no intuito de isolar e proteger a máquina, ou ainda, reduzir os possíveis danos e minimizar o tempo de reparo e seu custo envolvido.

A proteção contra perda de excitação é uma função de proteção necessária para geradores síncronos de qualquer tamanho. As primeiras proteções contra este tipo de defeito utilizavam relés de subcorrente e/ou subtensão de campo, logo mais evoluíram para relés direcionais de potência reativa [1]. Com o aumento do número de geradores em operação e relatos de operações indevidas das proteções até então desenvolvidas, sente-se a necessidade de desenvolver novos métodos de proteções contra a PE em geradores síncronos. Mason [2] em 1949 introduz o uso da medição da impedância aparente na proteção contra a PE, sugerindo o uso de um relé de distância tipo mho. Alguns anos depois, em 1975, Berdy [3] apresenta uma nova configuração de proteção baseada na metodologia

proposta por Mason. A configuração sugere o uso de uma nova zona de proteção com alcance maior e o uso de temporização para diminuir os casos de atuação indevida apresentados pela configuração utilizada por Mason.

Com o grande avanço tecnológico, metodologias que necessitam de maior poder computacional acabam sendo propostas, dentre estas pode-se citar, Redes Neurais Artificiais [4], algoritmos de Árvores de decisão [5], lógica Fuzzy [6], combinações de sinais da taxa de variação de tensão e potência reativa [7] e ainda, diferentes características operacionais de relé de distância como quadrangular [8], tomate/lente [9]. Métodos como estes possuem bons resultados na detecção contra perda de excitação, entretanto podem ser considerados de difícil parametrização, pois necessitam de um grande número de simulações. Recentemente diferentes autores propõem métodos onde não se necessita que parâmetros sejam informados pelo usuário para detecção da perda de excitação. Em [10] é proposto uma metodologia que faz uso da taxa de variação da resistência elétrica, onde o usuário não necessita de nenhuma intervenção, já em [11] faz o uso da taxa de variação de potência reativa para detectar a PE.

Preocupados com o crescimento do sistema de energia e afim de aumentar a transferência de energia e melhorar a utilização da capacidade do sistema de potência, à aplicação de dispositivos FACTS, como o STATCOM, tem sido utilizado nos últimos anos. Recentemente foi reportado que os controladores FACTS têm impactos adversos no desempenho dos relés de proteção de distância em linhas de transmissão [12] e [13]. Os resultados desses estudos mostram que os controladores FACTS de ponto intermediário podem afetar os relés de distância com relação à medição de impedância (sobrealcance / subalcance), seleção de fase e tempos de operação. Assim, sabendo que a proteção tradicional contra perda de excitação proposta por [2] e [3] utiliza o caminho da impedância aparente e o conceito igualmente utilizado na proteção de distância em linhas de transmissão, fazem que estudos relacionados à performance da proteção contra PE na presença de dispositivos FACTS torne-se um ponto relevante à esta proteção. Desta forma trabalhos como [14]–[16] estudam a performance de algoritmos tradicionais na proteção contra perda de excitação na presença deste dispositivo. Assim, como demais métodos propostos na literatura que não utilizam formas tradicionais de proteção para detecção da PE não foram avaliados, este trabalho tem como objetivo principal, avaliar o impacto do STATCOM em quatro diferentes metodologias para proteção contra a perda de excitação e destacar o comportamento dos métodos frente a este dispositivo.

2.0 - FUNDAMENTOS DA PERDA DE EXCITAÇÃO

A função básica de um sistema de excitação é fornecer corrente contínua para o enrolamento de campo da máquina síncrona a fim de estabelecer e manter, em faixa adequada, sua tensão interna procurando garantir que a esta se mantenha em sincronismo com o sistema de potência onde está conectada. Quando o gerador síncrono perde a excitação ou em casos extremos de subexcitação, este passa a operar como um gerador de indução, com velocidade acima da velocidade síncrona.

Nessa situação a máquina passa a absorver potência reativa do sistema a fim de manter-se excitada, além disto, o acoplamento da máquina com o sistema de potência acaba ficando fraco, como resultado, a máquina pode perder o sincronismo com o sistema, mesmo que inexista qualquer distúrbio, como curto-circuito, perda de carga, chaveamento de linhas de transmissão, etc. Este efeito pode ser visto na Figura (1).

A absorção excessiva de reativos do sistema após a perda de excitação pode provocar danos térmicos ao enrolamento estático. Este aquecimento é causado pelos níveis elevados de corrente circulante no estator devido a corrente reativa drenada do sistema elétrico e da redução da tensão terminal da máquina. Os efeitos de perda de excitação da unidade geradora também podem ser analisados nos planos de potência P-Q, impedâncias R-X e admitância G-B. Este tipo de representação permite uma análise conjunta da característica de perda de excitação, das proteções, do limitador de subexcitação e dos limites operativos [17].

Durante a perda de excitação do gerador, a elevada absorção de potência reativa do sistema faz com que a trajetória da impedância aparente saia, eventualmente de um ponto de operação na região sobre excitada, para o quadrante referente a região de subexcitação. A Figura (2). demonstra o deslocamento traçado pela impedância aparente medida nos terminais do gerador após a perda de excitação parcial (Figura 2 - a) e total (Figura 2 - b), considerando três diferentes carregamentos.

Analisando as Figuras (1) e (2) é possível perceber que perdas de excitações parciais possuem características que dificultam sua detecção comparada a perdas de excitações totais. Isto se deve ao fato, que a perda parcial possui constantes de tempo maiores, desta forma, deixando o comportamento das constantes elétricas mais lento.

O tempo que a máquina poderá operar sem seu sistema de excitação, pode ser tão curto como poucos segundos, ou até de vários minutos. Logo, as condições operativas das unidades geradoras durante este tipo de evento deverão ser monitoradas levando em consideração a curva de capacidade e outros dados fornecidos pelos fabricantes.

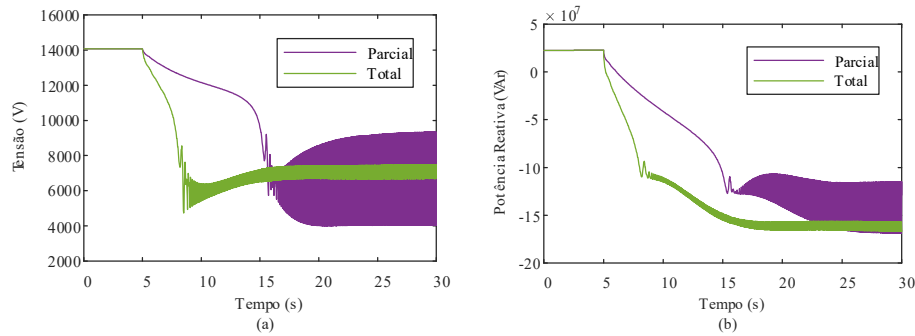


Figura 1 – (a) – Comportamento típico da tensão elétrica, (b) – potência reativa, durante perda de excitação parcial e total.

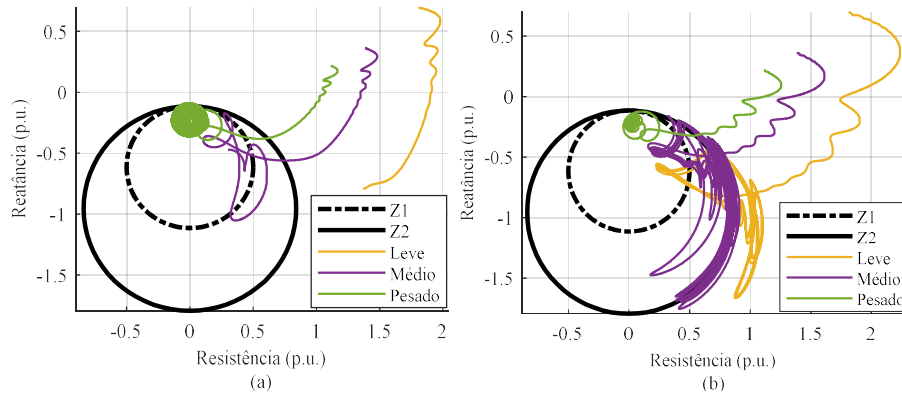


Figura 2 – (a) – Comportamento típico impedância aparente durante PEP, (b) Comportamento típico impedância aparente durante PET.

3.0 - REVISÃO DAS METODOLOGIAS DE PROTEÇÃO CONTRA PERDA DE EXCITAÇÃO

A proteção contra a perda de excitação é normalmente projetada de modo a disparar o disjuntor principal do gerador e o disjuntor de campo e parar a máquina primária. Apesar de existirem vários métodos de proteção contra a perda de excitação propostos na literatura, na prática, somente são utilizados os mais conhecidos e/ou com maior facilidade de ajuste. Este trabalho tem como proposta estudar 4 diferentes metodologias empregadas na literatura.

3.1 Aplicação de Relés de Distância na Proteção Contra a Perda de Excitação

A proteção contra falta de excitação mais utilizada atualmente é composta por relés de distância tipo mho que consiste de um relé de distância monofásico, com offset, polarizado para monitorar a impedância vista dos terminais do gerador e ângulo de máximo torque igual a -90° .

Através de um sistema simplificado com duas fontes geradoras (Figura 4), é possível analisar a impedância vista pelo relé conectado nos terminais da máquina.

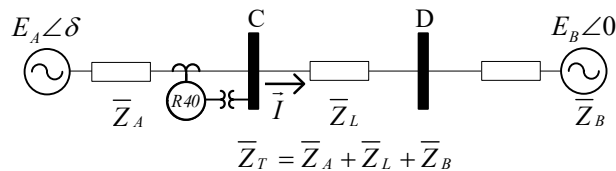


Figura 3 – Sistema estudado para medida da impedância aparente.

O relé é conectado nos terminais do gerador A, ou seja, na barra C, onde, \vec{E}_A é a tensão interna da máquina A e \vec{E}_B a do equivalente B. A defasagem angular é representada por δ . O fasor da corrente \vec{I} é dado pela Equação (1) e o fasor da tensão na barra C pela Equação (2).

$$\vec{I} = \frac{E_A \angle \delta - E_B \angle 0}{\vec{Z}_T} \quad (1)$$

$$\bar{E}_C = \frac{\bar{E}_A - \bar{Z}_A \bar{I}}{\bar{Z}_T} \quad (2)$$

Desta forma a impedância vista pelo relé na barra C é:

$$\bar{Z}_C = \frac{\bar{E}_C}{\bar{I}} = \frac{\bar{E}_A - \bar{Z}_A \bar{I}}{\bar{I}} = -\bar{Z}_A + \bar{Z}_T \frac{E_A \angle \delta}{E_A \angle \delta - E_B \angle 0} \quad (3)$$

Caso a tensão interna da máquina \bar{E}_A caia a zero, a impedância vista pelo relé corresponderá somente a parcela da impedância do gerador conforme a Equação (3), ou seja $-\bar{Z}_A$.

3.2 Método de Berdy

Em 1949 Mason propõe uma proteção baseada na característica da impedância aparente, logo após em 1975, Berdy apresenta novos ajustes para esta técnica. O método proposto por Berdy faz uso de duas zonas de proteções, uma zona instantânea (Z_1), ajustada tipicamente com diâmetro de 1,0 p.u. na base de gerador e outra zona (Z_2), ajustada com diâmetro igual ao valor da reatância síncrona do eixo direto (X_d) da máquina. Ambas as zonas de proteção possuem *offset* negativo igual à metade da reatância transitória de eixo direto ($X'_d/2$) da máquina. Devido a relatos de detecção indevida durante oscilações estáveis de potência o autor propõe o uso de temporizações para Z_2 na ordem de 0,5 até 0,6 segundos [3].

Como mencionado anteriormente carregamentos elevados possuem características mais rápidas no deslocamento da impedância aparente. Desta forma Z_1 tem como objetivo detectar estas condições mais severas, e conseguinte a Z_2 tem como objetivo atuar para carregamentos mais leves, utilizando da temporização devido ao seu maior alcance desta forma, diminuindo a chance de ocorrência de uma operação indevida. A Figura 4 - (a). apresenta a característica operacional no plano R-X, proposta por [3].

3.3 Método do Offset Positivo

Esta combinação proporciona proteção para quase todas as condições de perda de excitação [18], este faz uso da combinação de relés de admitância com unidades de subtenção e uma unidade direcional. O método presente na referencia [19], tem como principal característica a coordenação da Z_2 com o Limite de Estabilidade Prático (LEP) e o Limite de Excitação Mínima (LEM) da máquina. Desta forma sugere-se alcance da Z_1 com diâmetro de 1,1 vezes o valor da reatância síncrona de eixo direto (X_d) menos o *offset* que pode ser considerado metade da reatância transitória de eixo direto da máquina.

Já para Z_2 , normalmente utiliza-se 10% do LEP, com isso, *offset* pode ser considerado como a reatância equivalente vista nos terminais do gerador (X_T) e diâmetro como 1,1 vezes X_d mais *offset*. A Figura 4 - (b). demonstra a característica da proteção vista no plano R-X.

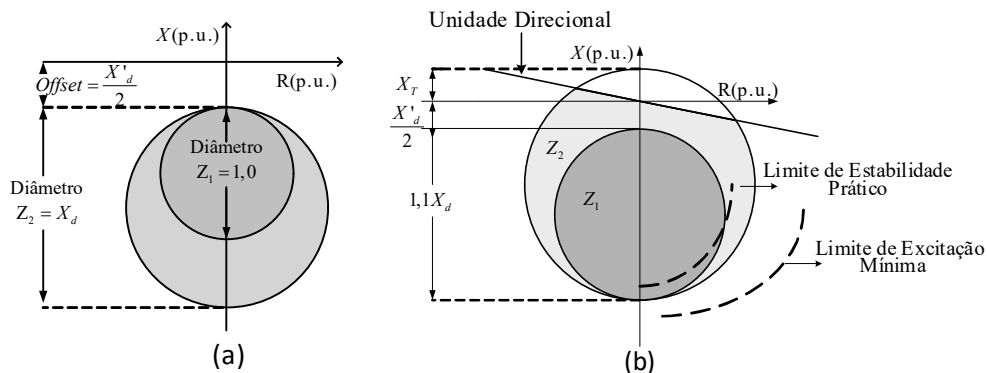


Figura 4 – (a) Característica operacional do método proposto por Berdy; (b) – Característica operacional do método de *Offset* Positivo.

3.4 Método de Mahamedi

Mahamedi [10] em 2015, propõem um método em que busca explorar a taxa de variação da resistência elétrica vista nos terminais da máquina. Do mesmo modo que os métodos mencionados anterior, baseia-se nas mudanças na impedância vista pelo relé quando a perda de excitação ocorre

O método consiste em diferenciar a perda de excitação da oscilação de potência pelo tempo em que a magnitude da taxa de variação da resistência elétrica ficará com valor negativo. O autor considera que o maior tempo que uma

oscilação de potência permaneceria com sua taxa de variação da resistência elétrica com valores negativos seja uma oscilação de 0,3 Hz. Segundo análises realizadas no trabalho meio ciclo desta frequência seriam necessários para distinguir a PE de oscilação estável de potência. Assim:

$$t = \frac{1}{0,3} = \frac{3,333}{2} = 1,67s \quad (4)$$

O fluxograma da Figura 5 demonstra o algoritmo do método proposto por [10].

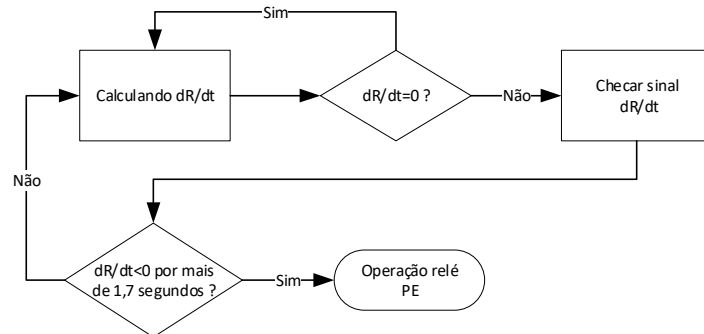


Figura 5 – Fluxograma do método proposto por Mahamedi.

3.5 Método de Amini

A método proposto por [7], utiliza a combinação da taxa de variação da tensão terminal e a taxa de variação da potência reativa para criar uma terceira variável utilizada como sinal para detecção da PE. Esta variável pode ser vista na Equação (5).

$$LOEI = 10^5 \times [Q^k - Q^{(k-1)}] \times [V_t^{(k)} - V_t^{(k-1)}] \quad (5)$$

Durante a PEP, as variáveis tensão terminal e potência reativa possuem tendência de diminuir. Assim, a multiplicação da taxa de variação destes dois sinais possuirá valor positivo, entretanto durante uma oscilação de potência ou mesmo retirada de uma carga do sistema de potência esta combinação de sinais possuirá valores negativos. Com base no comportamento destas duas variáveis e utilizando este novo sinal, cria-se a lógica de proteção vista na Figura 6.

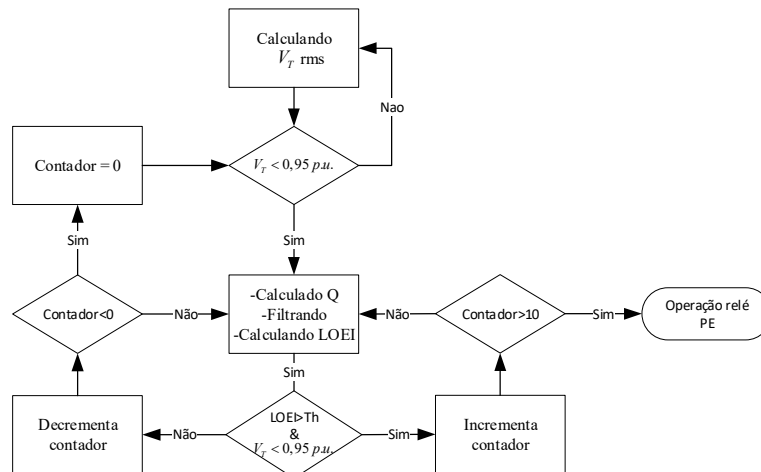


Figura 6 – Fluxograma do método proposto por Amini.

A técnica necessita de diversas simulações para configurar o valor mínimo de *threshold* (Th) necessário para diferenciar oscilação de potência e perda de excitação e para não encontrar problemas com pequenas variações faz uso de uma taxa de amostragem de 10 Hz.

4.0 - COMPENSADOR SÍNCRONO ESTÁTICO

O Compensador Síncrono Estático (STATCOM) é um dispositivo de derivação da família FACTS (Flexible AC Transmission Systems) que usa eletrônica de potência para controlar o fluxo de potência e melhorar a estabilidade

transitória em redes elétricas. O STATCOM regula a tensão elétrica em seu terminal controlando a quantidade de energia reativa injetada ou absorvida pelo sistema de energia. Quando a tensão do sistema é baixa, o STATCOM gera energia reativa (STATCOM capacitivo). Quando a tensão do sistema é alta, absorve energia reativa (STATCOM indutivo). O sistema de controle consiste em um phase-locked loop (PLL), sistemas de medição, regulador de tensão AC e um regulador de tensão DC e um loop de regulação de corrente interna que consiste em um regulador de corrente.

A Figura 7 ilustra o mesmo sistema analisado na seção 3.0, porém com um STATCOM instalado no ponto F. Desta forma com a Equação (8) é possível analisar a impedância medida pelo relé na presença deste dispositivo.

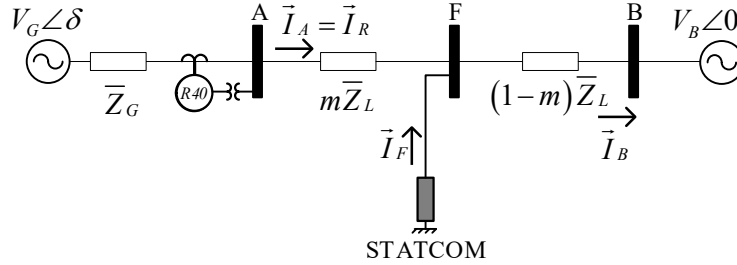


Figura 7 – Sistema estudado para medida da impedância aparente com STATCOM.

$$\bar{Z}_{\text{Relé}} = \frac{\bar{V}_R}{\bar{I}_R} = \frac{\bar{V}_G - \bar{Z}_G \bar{I}_R}{\bar{I}_R} = \frac{V_G \angle \delta}{\bar{I}_R} - \bar{Z}_G \quad (6)$$

$$\bar{I}_R = \frac{V_G \angle \delta - V_T \angle 0 + (m-1) \bar{Z}_L \bar{I}_F}{\bar{Z}_G + \bar{Z}_L} \quad (7)$$

$$\bar{Z}_{\text{Relé}} = \frac{V_G \angle \delta}{\frac{V_G \angle \delta - V_T \angle 0 + (m-1) \bar{Z}_L \bar{I}_F}{\bar{Z}_G + \bar{Z}_L}} - \bar{Z}_G \quad (8)$$

Percebe-se que durante perda de excitações onde ocorra a total perda do campo, onde \bar{V}_G é zero, a impedância vista pelo relé será de $-\bar{Z}_G$, da mesma forma que anteriormente na seção 3.0, porém para PE parciais esta impedância terá valores diferentes o que pode influenciar diretamente nas características dos métodos estudados.

5.0 - PERFORMANCE DAS PROTEÇÕES NA PRESENÇA DO STATCOM

5.1 Sistema Estudado

Para comparar e avaliar as técnicas de proteções contra perda de excitação foram realizadas simulações computacionais utilizando o software Simulink Matlab®, o sistema escolhido para ser modelado foi o IEEE 9 Barras. Um STATCOM de $\pm 200\text{MVA}$ foi inserido no meio da linha entre as Barras 8 e 9 para compreender sua influência nas proteções a serem estudadas. O sistema modelado pode ser visto na Figura (8).

Já que as metodologias sofrem influência em função do carregamento, foram escolhidos nove pontos de carregamentos diferentes em função da tensão de operação 1,02 p.u., 1,0 p.u. e 0,98 p.u., com carregamentos de potência ativa de 0,5 p.u., 0,7 p.u. e 0,9 p.u.. O gerador G3 é escolhido para sofrer a PE, este possui 128 MVA e tensão de 13,8 kV. Como mencionado na seção 2.0 e 4.0, o impacto do STATCOM na impedância medida pelo relé será na presença de perdas de excitação parcial, ainda perdas parciais possuem características mais lenta o que torna mais difícil sua detecção. Desta forma, decidiu-se estudar o impacto da perda de excitação de 60% da tensão do campo de excitação.

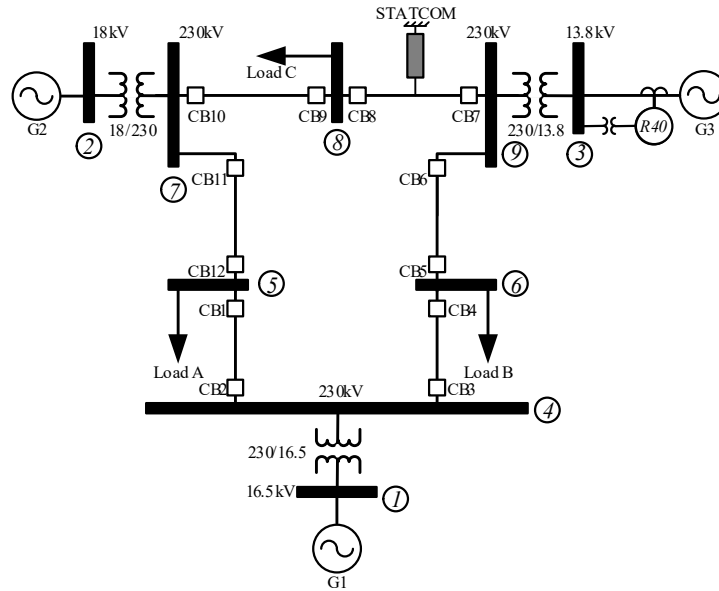


Figura 8 – Sistema IEEE 9 barras modificado.

5.1 Resultado das Simulações

Para analisar a influência do STATCOM nas metodologias estudadas, nove diferentes simulações sem o uso do STATCOM e com a presença do dispositivo são apresentadas. Os resultados de tempo de detecção dos métodos na presença de perda de excitação parcial de 60% do campo pode ser visto nas Tabelas (1) e (2).

Analisando os resultados apresentados na Tabela (1), é possível perceber que os métodos baseados no caminho da impedância aparente possuem maior dificuldade de detecção para baixos carregamentos. Já o método proposto por Mahamedi apresenta os melhores resultados não sofrendo muita influência quanto ao ponto operacional do gerador. O método proposto por Amini somente atuou corretamente para altos carregamentos.

Na Tabela (3) é possível analisar a diferença de tempo de atuação das metodologias estudadas. Considera-se uma resposta mais lenta na atuação, quando valores de tempo encontrados forem maiores na presença do STATCOM, desta forma a diferença terá valores positivos. Para ressaltar casos onde a metodologia deixou de atuar usou-se a simbologia ∞ .

Tabela 1 – Tempos de detecção da perda de excitação parcial de 60% sem o uso do STATCOM.

SEM STATCOM						
	Berdy		Offset Positivo		Amini	Mahamedi
Casos	TripZ1 (s)	TripZ2 (s)	TripZ1 (s)	TripZ2 (s)	Trip (s)	Trip (s)
Vt = 1,02 P = 0,5	-	-	-	-	-	8,760
Vt = 1,02 P = 0,7	26,517	21,655	21,138	23,206	-	8,765
Vt = 1,02 P = 0,9	14,544	13,074	12,852	11,890	16,0	8,752
Vt = 1,0 P = 0,5	-	-	-	-	-	8,267
Vt = 1,0 P = 0,7	20,121	16,416	16,009	19,045	-	8,291
Vt = 1,0 P = 0,9	12,581	11,436	11,239	11,241	13,900	8,293
Vt = 0,98 P = 0,5	-	24,539	23,548	-	-	7,776
Vt = 0,98 P = 0,7	16,257	13,283	12,956	16,154	-	8,291
Vt = 0,98 P = 0,9	11,113	10,153	9,968	10,610	12,30	8,293

Tabela 2 – Tempos de detecção da perda de excitação parcial de 60% com o uso do STATCOM.

COM STATCOM						
	Berdy		Offset Positivo		Amini	Mahamedi
Casos	TripZ1 (s)	TripZ2 (s)	TripZ1 (s)	TripZ2 (s)	Trip (s)	Trip (s)
Vt = 1,02 P = 0,5	-	-	-	-	-	8,265
Vt = 1,02 P = 0,7	29,333	22,524	21,886	-	-	8,718
Vt = 1,02 P = 0,9	16,381	13,963	13,682	17,845	-	8,729
Vt = 1,0 P = 0,5	-	-	-	-	-	7,770
Vt = 1,0 P = 0,7	21,577	16,824	16,371	26,158	-	8,261
Vt = 1,0 P = 0,9	14,006	12,016	11,768	15,601	-	8,732
Vt = 0,98 P = 0,5	-	24,185	23,127	-	-	7,760
Vt = 0,98 P = 0,7	17,267	13,569	13,202	-	-	8,266
Vt = 0,98 P = 0,9	12,206	10,505	10,279	13,874	16,100	8,275

Tabela 3 – Diferença de tempo de detecção na presença do STATCOM.

	Berdy		Offset Positivo		Amini	Mahamedi
Casos	TripZ1 Diferença (s)	TripZ2 Diferença (s)	TripZ1 Diferença (s)	TripZ2 Diferença (s)	Trip Diferença (s)	Trip Diferença (s)
Vt = 1,02 P = 0,5	-	-	-	-	-	-0,49
Vt = 1,02 P = 0,7	2,82	0,87	0,75	∞	-	-0,05
Vt = 1,02 P = 0,9	1,84	0,89	0,83	5,95	∞	-0,02
Vt = 1,0 P = 0,5	-	-	-	-	-	-0,50
Vt = 1,0 P = 0,7	1,46	0,41	0,36	7,11	-	-0,03
Vt = 1,0 P = 0,9	1,42	0,58	0,53	4,36	∞	0,44
Vt = 0,98 P = 0,5	-	-0,35	-0,42	-	-	-0,02
Vt = 0,98 P = 0,7	1,01	0,29	0,25	∞	-	-0,03
Vt = 0,98 P = 0,9	1,09	0,35	0,31	5,99	3,80	-0,02

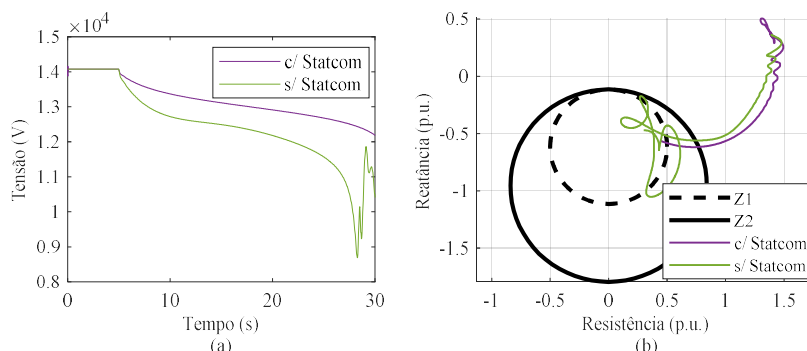


Figura 9 – (a) – Impacto do STATCOM na tensão elétrica ; (b) – Impacto do STATCOM na impedância aparente.

O uso do STATCOM no sistema estudado afetou diretamente os métodos de Berdy e Offset Positivo, onde a maioria dos casos acabou deixando sua resposta mais lenta. Já o método proposto por Amini acabou não atuando em alguns casos, isto se deve ao fato do método utilizar um *trigger* de subtensão e como o STATCOM funciona como um regulador de tensão no ponto instalado este acaba piorando muito a performance do método. O método

proposto por Mahamedi, por utilizar um *trip* por temporização acaba não sofrendo grandes impactos. A Figura (9-a) representa a tensão elétrica e a Figura (9-b) representa a impedância aparente medida sem o uso do STATCOM e com o dispositivo respectivamente para o caso $V_t = 1,02$ e $P = 0,7$ p.u..

6.0 - CONCLUSÃO

Neste artigo foi apresentada uma análise do desempenho de quatro métodos de proteção na presença de um compensador síncrono estático (STATCOM). Nele foram apresentados resultados de simulações para perda de 60% da tensão de campo da máquina estudada. Esta análise permite perceber que a presença do STATCOM acaba interferindo no desempenho de três dos métodos estudados. Desta forma a partir deste trabalho é possível perceber que os métodos utilizados atualmente em relés necessitam de diferentes abordagens para proteção na presença do STATCOM.

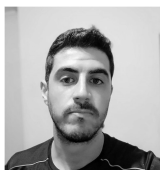
7.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] G. C. Crossman, H. F. Lindemuth, and R. L. Webb, "Loss-of-Field Protection for Generators," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 61, no. 5, pp. 261–265, 1942.
- [2] C. R. Mason, "A New Loss-of-Excitation Relay for Synchronous Generators," *Trans. Am. Inst. Electr. Eng.*, vol. 68, no. 2, pp. 1240–1245, 1949.
- [3] J. Berdy, "LOSS OF EXCITATION PROTECTION FOR MODERN SYNCHRONOUS GENERATORS," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 94, no. 5, pp. 1457–1463, 1975.
- [4] A. M. Sharaf and T. T. Lie, "NEURAL NETWORK PATTERN CLASSIFICATIONS OF TRANSIENT STABILITY AND LOSS OF EXCITATION FOR SYNCHRONOUS GENERATOR," *IEEE Int. Conf. Neural Networks. IEEE World Congr. Comput. Intell.*, pp. 2916–2921, 1994.
- [5] T. Amraee, "Loss-of-field detection in synchronous generators using decision tree technique," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 7, no. 9, pp. 943–954, Sep. 2013.
- [6] A. P. Morais, G. Cardoso, and L. Mariotto, "An Innovative Loss-of-Excitation Protection Based on the Fuzzy Inference Mechanism," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 25, no. 4, pp. 2197–2204, 2010.
- [7] M. Amini, M. Davarpanah, and M. Sanaye-Pasand, "A Novel Approach to Detect the Synchronous Generator Loss of Excitation," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 3, pp. 1429–1438, 2015.
- [8] S. R. Tambay and Y. G. Paithankar, "A New Adaptive Loss of Excitation Relay Augmented by Rate of Change of Reactance," *IEEE Power Eng. Soc. Gen. Meet.*, 2005.
- [9] A. G. Leite and P. M. Silveira, "UTILIZAÇÃO DA PROTEÇÃO CONTRA PERDA DE EXCITAÇÃO DE UNIDADES GERADORAS COMO PROTEÇÃO SISTÊMICA: CURVA TOMATE," in *SEMINÁRIO NACIONAL DE PRODUÇÃO E TRANSMISSÃO DE ENERGIA ELÉTRICA*, 2007.
- [10] B. Mahamedi, J. Zhu, and S. Hashemi, "A Setting-Free Approach to Detecting Loss of Excitation in Synchronous Generators," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. PP, no. 99, 2015.
- [11] N. Noroozi, Y. Alinejad-Beromi, and H. Yaghobi, "Fast approach to detect generator loss of excitation based on reactive power variation," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 13, no. 4, pp. 453–460, 2019.
- [12] F. A. Albasri, T. S. Sidhu, and R. K. Varma, "Performance Comparison of Distance Protection Schemes for Shunt-FACTS Compensated Transmission Lines," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 22, no. 4, pp. 2116–2125, 2007.
- [13] T. S. Sidhu, R. K. Varma, P. K. Gangadharan, F. A. Albasri, and G. R. Ortiz, "Performance of distance relays on shunt-FACTS compensated transmission lines," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 20, no. 3, pp. 1837–1845, 2005.
- [14] A. Ghorbani, S. Soleymani, and B. Mozafari, "A PMU-Based LOE Protection of Synchronous Generator in the Presence of GIPFC," vol. 8977, no. c, pp. 1–8, 2015.
- [15] H. Yaghobi, "Impact of static synchronous compensator on flux-based synchronous generator loss of excitation protection," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 9, pp. 874–883, 2015.
- [16] H. Yaghobi, "A New Adaptive Impedance-Based LOE Protection of Synchronous Generator in the Presence of STATCOM," vol. 32, no. 6, pp. 2489–2499, 2017.
- [17] L. R. Montezuma, "CORDENAÇÃO E SELETIVIDADE DAS PROTEÇÕES DE PERDA DE EXCITAÇÃO DE GERADOR SÍNCRONO CONECTADO AO SISTEMA INTERLIGADO NACIONAL," UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2015.
- [18] A. P. Morais, "AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MÉTODOS DE PROTEÇÃO CONTRA A PERDA DE EXCITAÇÃO EM GERADORES SÍNCRONOS: Uma Contribuição Utilizando a Teoria dos Conjuntos Nebulosos," Universidade Federal de Santa Maria, 2008.
- [19] *IEEE Std C37.102TM: IEEE guide for ac generator protection*, Feb. 2006.

8.0 - AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES/PROEX) - Código de Financiamento 001.

9.0 - DADOS BIOGRÁFICOS



MAIRON GALLAS, graduado (2017) em engenharia elétrica pela universidade federal de santa maria (UFSM). Atualmente é aluno de mestrado do programa de pós-graduação em engenharia elétrica da UFSM. Suas áreas de interesse são sistemas elétricos de potência, proteção de sistemas elétricos e técnicas de inteligência artificial aplicadas a sistemas elétricos.