



**XX SNPTEE
SEMINÁRIO NACIONAL
DE PRODUÇÃO E
TRANSMISSÃO DE
ENERGIA ELÉTRICA**

Versão 1.0
22 a 25 Novembro de 2009
Recife - PE

GRUPO V

**GRUPO DE ESTUDO DE PROTEÇÃO, MEDIÇÃO, CONTROLE E AUTOMAÇÃO
EM SISTEMAS DE POTÊNCIA - GPC**

**ANÁLISE DO DESEMPENHO DE UM MÉTODO DE PROTEÇÃO CONTRA A PERDA DE EXCITAÇÃO EM
GERADORES SÍNCRONOS QUE UTILIZA A TEORIA DOS CONJUNTOS NEBULOSOS**

Adriano P. de Moraes*

Ghendy Cardoso Jr.

Lenois Mariotto

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA – UFSM
Centro de Estudo em Energia e Meio Ambiente – CEEMA**

RESUMO: Este trabalho apresenta um método para prover a proteção contra a perda de excitação em geradores síncronos. A técnica proposta introduz os fundamentos clássicos da proteção contra a perda de excitação na teoria dos conjuntos nebulosos. A metodologia envolve as principais características de técnicas já existentes e utiliza regras de inferência baseadas na impedância aparente e tensão terminal. O método foi avaliado, por meio de dois tipos de simulações computacionais, ou seja: perda de excitação e oscilação estável de potência. Por fim, os resultados são comparados com outros dois métodos tradicionalmente aceitos na comunidade técnica e acadêmica.

PALAVRAS-CHAVE: Gerador síncrono; Proteção contra a perda de excitação; Teoria dos conjuntos nebulosos.

1.0 - INTRODUÇÃO

Geradores síncronos estão sujeitos aos mais diversos tipos de defeitos e condições anormais de operação. Embora a ocorrência de falhas em máquinas rotativas não seja muito freqüente, geralmente uma falta ou condição anormal no gerador implica em conseqüências desastrosas. Por isso, caso ocorra alguma anormalidade, os sistemas de proteção deverão ser seletivos e rápidos, de modo a isolar a máquina do sistema imediatamente. Entre os diversos tipos de defeitos no gerador síncrono está a Perda de Excitação (PE).

Com o objetivo de melhorar os requisitos de segurança e disponibilidade, a proteção contra a PE em geradores síncronos (função ANSI 40) vem sofrendo modificações. Antes de [1] apresentar seus estudos sobre esta proteção, eram utilizados relés de subcorrente e sobrecorrente CC aplicados no circuito de campo do gerador. A técnica de proteção contra a PE, proposta [1], faz uso de relés de distância do tipo mho. Embora mais seletivo que os relés de subcorrente e sobrecorrente CC, o método ainda apresenta falhas, podendo operar indevidamente durante Oscilações Estáveis de Potência (OEP). Devido a isto, na década de 70, muitos pesquisadores estudaram o assunto. Como resultados destas pesquisas, surgiram alguns métodos de proteção contra a PE que até hoje são utilizados [2].

A proteção contra a PE ainda apresenta alguns desafios a serem solucionados. Os métodos convencionais, baseados nos conceitos desenvolvidos em [1], podem operar indevidamente em algumas situações, como por exemplo, durante OEP, e assim, retirar a unidade geradora do sistema sem necessidade. O principal tipo de oscilação estável, que têm ocasionado a operação indevida dessa proteção são os curtos-circuitos que ocorrem eletricamente próximos da unidade geradora, quando a mesma está operando na região subexcitada.

Com um perfil inovador, este trabalho propõe uma metodologia de proteção contra a PE em geradores síncronos de modo a solucionar ou minimizar os problemas relacionados a esses esquemas de proteção. A técnica proposta está fundamentada nos conceitos clássicos da proteção contra a PE em geradores síncronos, e na Teoria dos Conjuntos Nebulosos. A metodologia utiliza regras de inferência baseadas na impedância aparente e tensão

* Rua Comissário Justo, 1486/406 – CEP 97010-110 – Santa Maria – RS – Brasil
e-mail: adriano@mail.ufsm.br

terminal durante a PE, OEP e operação normal. Deste modo, a principal contribuição do trabalho aqui proposto é o fato de apresentar e avaliar em termos de desempenho e aplicabilidade uma técnica de proteção contra a PE. Para tal, dois métodos convencionais de proteção contra a PE, comumente aceitos pela comunidade acadêmica e técnica, são utilizados como referência de comparação. O método proposto foi avaliado por meio de simulações computacionais de PE e OEP. Por possuírem ajustes que são função dos parâmetros do gerador a ser protegido (X_d e X'_d), foram realizados testes com três máquinas de parâmetros distintos.

2.0 - FUNDAMENTOS DA PERDA DE EXCITAÇÃO

Quando um gerador síncrono perde a excitação, o campo do rotor perde repentinamente sua força magnetomotriz – fmm, fazendo com que a potência ativa de saída da máquina diminua. Como resultado da queda de potência ativa terminal do gerador, o rotor começa a girar acima da velocidade síncrona, perdendo o acoplamento magnético com o estator. Desse modo, o gerador, que em condições normais operava como um síncrono passa a operar como um gerador de indução recebendo correntes reativas induzidas pelo sistema no corpo do rotor, enrolamentos amortecedores e enrolamentos de campo. A frequência das correntes induzidas no rotor pelo estator depende do escorregamento alcançado pela máquina. Estas correntes podem atingir a magnitude da ordem de 2 a 4 vezes a corrente nominal da máquina, gerando aquecimento excessivo no rotor [3].

Como, durante a PE, o gerador opera como um gerador de indução, ou seja, absorve a potência reativa do sistema, ocorre uma queda na tensão terminal do mesmo que poderá se alastrar para uma área maior se o sistema não for robusto o suficiente para atender a demanda de potência reativa que o gerador necessita para manter-se excitado. Em tais circunstâncias, o sistema elétrico de potência fica susceptível a perda de sincronismo.

Algumas máquinas suportam algum tempo sem excitação sem maiores danos, outras, no entanto não permitem sequer o tempo do operador avaliar o problema e determinar uma apropriada correção. Assim, o tempo que a máquina poderá operar sem seu sistema de excitação, pode ser tão curto como poucos segundos, ou até de vários minutos. Portanto, a proteção contra a PE deve ser rápida a fim de prevenir danos mais severos.

Além dos danos no gerador, também há que se considerarem os efeitos sobre o sistema de potência. A PE pode ocasionar problemas relacionados tanto a colapso de tensão como instabilidade angular.

3.0 - TEORIA DOS CONJUNTOS NEBULOSOS

A Teoria dos Conjuntos Nebulosos foi apresentada por [4] para simplificar problemas que eram impossíveis (ou muito difíceis) de se solucionar em termos de variáveis clássicas, mas que poderiam ser mais facilmente descritos em termos lingüísticos.

A Lógica Nebulosa dispõe de métodos que traduzem expressões verbais, vagas, imprecisas e qualitativas, comuns na comunicação humana, em valores numéricos. Deste modo, é possível converter a experiência humana em uma forma tratável computacionalmente. Um controlador nebuloso típico pode ser projetado para comportar-se conforme o raciocínio dedutivo, isto é, o processo que as pessoas utilizam para inferir conclusões baseadas em informações que elas já conhecem.

3.1 Definição de Conjuntos Nebulosos e Função de Pertinência

Um conjunto nebuloso não possui uma fronteira ou um limite preciso. A dicotomia entre pertencer e não pertencer não existe; o que existe é uma gradação de pertinência. A palavra pertinência é adequada, pois se refere a quanto pertinente é dizer se uma determinada sentença é verdade [5].

Dado o universo U de discurso e A um conjunto no sentido clássico, uma maneira usual de indicar que um determinado elemento “ x ” do universo pertence ao conjunto A é usar o símbolo \in e escrever $X \in A$. O conceito de pertinência pode ser descrito usando a função característica $X_A(x)$ cujos valores 1 (um) ou 0 (zero) indicam se x pertence a A ou não, respectivamente. Então se tem:

$$X_A(x) = \begin{cases} 1, & \text{se } x \in A \\ 0, & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (1)$$

Um conjunto nebuloso é obtido substituindo-se a função característica por uma nova função que permite valores em um conjunto mais geral. Um valor particular nesse conjunto descreve o quanto este elemento pertence ao conjunto. A função característica exprime exatamente o conceito de pertencer e não pertencer. Essa nova função, $\mu_A : U \rightarrow V$, que caracteriza o conjunto nebuloso chama-se função de pertinência, já que mede o quão pertinente é dizer que um elemento pertence a um conjunto. Normalmente toma-se $V = [0,1]$ como apresentado por [4]. O valor 0 (zero) corresponde a não pertencer e o valor 1 (um) a pertencer. Valores intermediários indicam uma pertinência parcial. [4] propôs uma caracterização mais ampla, generalizando a função característica de modo que ela pudesse assumir um número infinito de valores no intervalo $[0, 1]$.

4.0 - METODOLOGIA PROPOSTA

O esquema geral da técnica proposta é mostrado na Figura 1. Sinais de tensão e corrente, oriundos de TP e TC, respectivamente, são convertidos em valores *rms* por um algoritmo dedicado a esta função. Por meio desses

sinais o vetor impedância e a tensão terminal são calculados. O vetor impedância e a tensão terminal alimentam o sistema nebuloso, que por sua vez, envia uma saída defuzzificada para ser analisada por um algoritmo. Por fim, esse algoritmo decide entre enviar ou não um sinal de operação e/ou enviar um sinal de alarme. Os blocos: pré-processador, sistema de inferência e algoritmo de tomada de decisão são descritos a seguir.

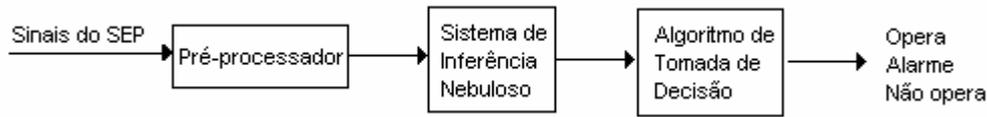


FIGURA 1- Esquema geral da técnica proposta.

4.1 Pré-processador

As variáveis, impedância aparente e tensão terminal, que eficientemente são utilizadas na proteção tradicional, também são utilizadas na nova proposta. O pré-processador calcula a impedância aparente vista pelos terminais do gerador e a tensão terminal, ambos em p.u. na base do gerador.

Ao invés de se utilizar a impedância aparente com origem em (0, 0), é calculado um vetor impedância em p.u. (\bar{Z}) com origem no centro de uma circunferência de diâmetro igual à X_d e *offset* $X_d/2$, semelhante a característica operacional de um relé mho ajustado conforme mostra a Figura 2.

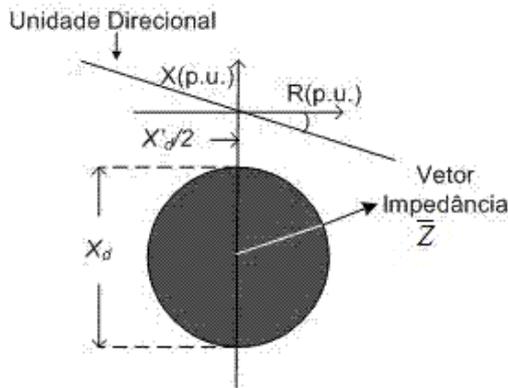


FIGURA 2 – Vetor Impedância (\bar{Z}).

- Se $\bar{Z} > X_d/2$ Então \rightarrow a impedância aparente se encontra fora da circunferência;
- Se $\bar{Z} < X_d/2$ Então \rightarrow a impedância aparente se encontra dentro da circunferência.

Uma unidade direcional é inserida para supervisionar a impedância aparente. Sendo assim, a máquina de inferência apenas recebe o vetor impedância e tensão se o fator de potência estiver abaixo do ajustado (Fator de Potência 0,974).

4.2 Máquina de Inferência

O sistema de inferência utilizado é mostrado na Figura 3. Cada entrada possui três Funções de Pertinência (FP), onde, $\mu_{ik}(X_i) \in \{\mu_{baixo}, \mu_{médio}, \mu_{alto}\}$. Os termos lingüísticos baixo, médio e alto são associados ao sinais de entrada 1 e 2. As FP \bar{Z} do são ajustadas para identificar três níveis: baixo, médio e alto, como mostra a Figura 4. O grau de pertinência na detecção do evento da PE, embora não representado na Figura 4, aumenta à medida que o valor de \bar{Z} diminui.

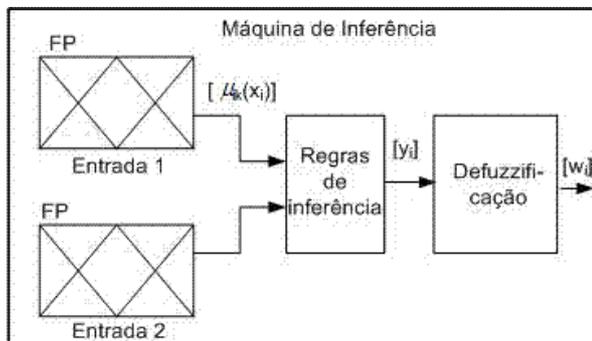


FIGURA 3 – Máquina de Inferência.

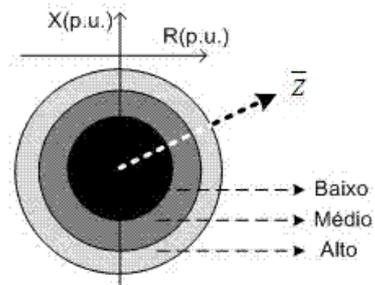


FIGURA 4 – Níveis de \bar{Z} .

A Tabela 1 e a Figura 5 mostram os parâmetros das FP para a entrada \bar{Z} . São elas:

- Baixo – ajustada para identificar baixos níveis de \bar{Z} , menor que $X_d/2$. Possui grau de pertinência máximo com valores menores ou iguais a $0,5(X_d/2)$.
- Médio – ajustada para identificar valores de \bar{Z} no intervalo de 50% acima e 50% abaixo de $X_d/2$.
- Alto – ajustada para reconhecer condições iniciais de PE e condições normais de operação. Seu grau de pertinência cresce à medida que o valor de \bar{Z} ultrapassa o valor de $X_d/2$.

TABELA 1 – Parâmetros das FP para a entrada \bar{Z}

| Entrada | A | B | C | D | E |
|-----------|---|--------------|---------|--------------|---|
| \bar{Z} | 0 | $0,5(X_d/2)$ | $X_d/2$ | $1,5(X_d/2)$ | * |

* duas vezes a máxima condição operacional

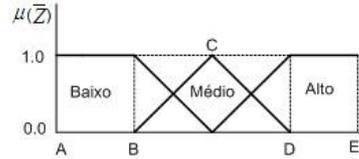


FIGURA 5 – FP da entrada \bar{Z} .

As FP da segunda variável de entrada, V_t , são trapezoidais e possuem parâmetros fundamentados em três situações:

- Baixo – Situação que corresponde à OEP. As oscilações de potência que ocasionam a operação indevida são distúrbios severos para o sistema. Tais distúrbios causam uma abrupta queda na tensão terminal. Devido a isto, esta FP é ajustada para identificar níveis de V_t baixos, inferior a 0,5 p.u.. A função possui grau de pertinência máximo quando V_t está baixo de 0,3 p.u.
- Médio – Corresponde a PE. A PE no gerador síncrono sempre vem acompanhada de um queda gradual de V_t . Geralmente este evento está bem caracterizado quando V_t se encontra entre 0,8 e 0,5 p.u. Logo, esta função possui grau de pertinência máximo nesta faixa de valor, mas começa a detectar a PE, com um grau de pertinência inferior, desde os valores operacionais de V_t . Com valores de V_t abaixo de 0,5 p.u., o grau de pertinência desta função começa diminuir, pois esse nível de V_t está mais associado a uma OEP.
- Alto – Corresponde a operação normal. Essa FP é ajustada para identificar as condições normais de operação. Seus ajustes estão na faixa de 0,9 p.u a 1,05 p.u., com grau de pertinência crescendo à medida que a tensão se aproxima de 1,05 p.u.. A partir de 1,05 p.u. a função possui o máximo grau de pertinência.

A Tabela 2 e a Figura 6 mostram os parâmetros das FP para a entrada V_t .

TABELA 2 – Parâmetros das FP para a entrada V_t

| Entrada | A | B | C | D | E | F | G |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|------|---|
| V_t | 0,0 | 0,3 | 0,5 | 0,8 | 0,9 | 1,05 | * |

* duas vezes a máxima condição operacional

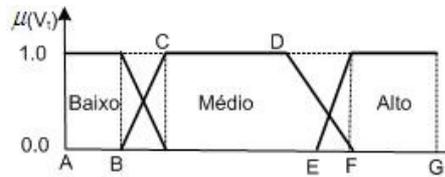


FIGURA 6 – FP da entrada V_t .

As FPs da saída são triangulares e possuem os seguintes termos lingüísticos:

- Não Opera: para identificar as condições normais de operação;
- Alarme: para identificar as condições iniciais de PE ou qualquer outra irregularidade envolvendo \bar{Z} ou V_t , como por exemplo, as oscilações estáveis de potência;
- Opera: para identificar os casos de PE.

A Tabela 3 e a Figura 7 mostram os parâmetros para a saída. Os termos X_1 e X_2 são parâmetros a serem inseridos no algoritmo e serão mostrados na seção 4.3.

TABELA 3 – Parâmetros das FP para a saída

| Entrada | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|---------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| V_t | 0,0 | 0,2 | 0,4 | 0,3 | 0,5 | 0,7 | 0,6 | 0,8 | 1,0 |

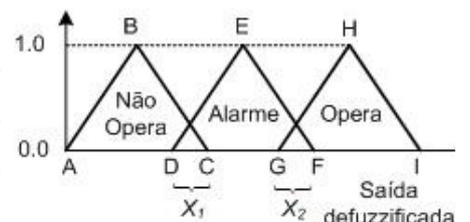


FIGURA 7 – FP da saída.

Com base no comportamento das duas entradas durante as situações de PE, OEP e operação normal foram elaboradas as seguintes regras, conforme a estrutura SE<condição> ENTÃO <consequência> (peso da informação):

- | | |
|--|---|
| (i) Se \bar{Z} é baixo e Vt é médio então Opera (1); | (iv) Se \bar{Z} é médio e Vt é médio então Opera (1); |
| (ii) Se \bar{Z} é médio e Vt é alto então Alarme (0,5); | (v) Se \bar{Z} é alto e Vt é médio então Alarme (1); |
| (iii) Se \bar{Z} é alto e Vt é alto então Não Opera (1); | (vi) Se \bar{Z} é baixo ou Vt é baixo então Alarme (0,5). |

4.3 Algoritmo de Tomada de Decisão

O valor w_i , saída defuzzificada, é então analisado pelo o algoritmo mostrado na Figura 8. Os resultados provenientes do sistema de potência que alimentam o pré-processador podem conter dados de pré-falta e pós-falta na mesma janela de dados. Por isso, parece ser razoável temporizar a tomada de decisão “opera” de modo que os valores *rms* apenas contenham dados confiáveis. Logo, o principal objetivo deste algoritmo é tomar a decisão e temporizar a operação da proteção.

Os parâmetros X_1 e X_2 , ajustados pelo engenheiro de proteção, são responsáveis pela sensibilidade do método. Eles correspondem a um valor pertencente aos intervalos D-C e G-F, respectivamente, mostrados na Figura 7. Quanto mais próximo de G o parâmetro X_2 estiver, mais sensível estará à proteção. O raciocínio análogo pode ser feito para o parâmetro X_1 .

No bloco 1 do algoritmo de tomada de decisão é realizada uma comparação dos valores de w_i , continuamente atualizados vindos da máquina de inferência, com o parâmetro X_1 . Se o w_i exceder o valor ajustado em X_1 , o sinal de alarme é emitido. O bloco 4 verifica se a saída w_i é maior que o parâmetro X_2 . Se isso for verificado, é inicializado uma temporização por meio do bloco 5 e o algoritmo irá alternar entre os blocos 6 e 7. Quando o critério do bloco 7 é atendido, o algoritmo envia o sinal de operação para o disjuntor. O tempo t_1 sugerido é o mesmo proposto para a menor zona da proteção tradicional, ou seja, entre 0,1 e 0,2s.

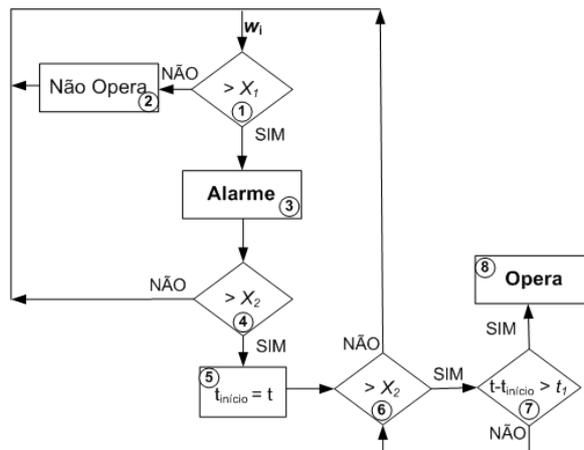


FIGURA 8 – Algoritmo para a tomada de decisão.

5.0 - MÉTODOS UTILIZADOS NA COMPARAÇÃO

5.1 Proteção Contra a PE com Ajuste Convencional

Os ajustes básicos da proteção proposta por [1], feitos no plano $R-X$, são o *offset*, sendo para tal recomendado utilizar a metade da reatância transitória de eixo direto $X'_{d/2}$. Para o diâmetro da característica de operação é recomendado um ajuste igual ao valor da reatância síncrona de eixo direto X_d . A Figura 9-(a) mostra a característica operacional proposta por [1].

O aumento no valor das reatâncias das máquinas motivou [6] a propor um novo ajuste para a proteção de [1]. Neste caso, são usadas duas zonas, sendo a primeira Z_1 com diâmetro igual a 1,0 p.u. na base do gerador, sem temporização adicional para sua atuação.

Por outro lado, a segunda zona Z_2 é ajustada com o diâmetro igual a X_d , e uma temporização adicional para sua atuação, sendo recomendado 0,5 até 0,6 segundos de retardo. As duas zonas apresentam o ajuste de *offset* igual ao proposto por [1], ou seja, $X'_{d/2}$. A característica operacional proposta por [6], no plano $R-X$ é apresentada na Figura 9-(b). Após [6] apresentar seu método, passou a se utilizar o ajuste de [1] para máquinas de reatância de eixo direto X_d de até 1,2 p.u. e o ajuste de [2] para máquinas de X_d maiores que 1,2 p.u..

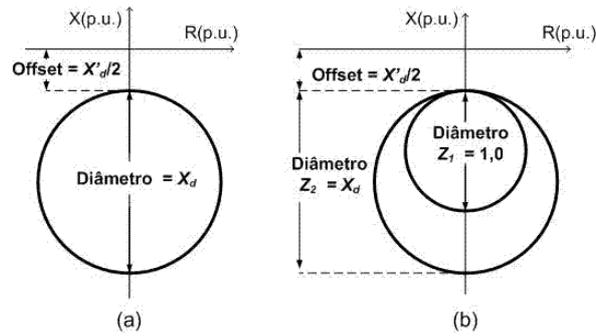


FIGURA 9 – Característica operacional no plano R - X da proteção proposta por: (a) – [1]. (b) – [6].

5.2 Característica Tomate/Lenticular

Para formar a característica tomate é necessário ajustar λ_A e τ_1 nas retas A e A', conforme mostra a Figura 10. Deste modo λ_A é tipicamente ajustado em 105% de $1/X_d$. O ajuste de τ_1 é feito de modo que a inclinação da reta A, esteja margeando o limite de estabilidade prático do gerador, o qual normalmente se encontra entre 60° e 80° .

Por meio do ajuste dos parâmetros λ_B e τ_2 nas retas B e B' como mostra a Figura 10 a característica lenticular é ajustada. O parâmetro λ_B é o valor onde o limite de estabilidade teórico do gerador aproximadamente cruza o eixo B e deverá ser sempre maior que 1 (um). O parâmetro τ_2 é ajustado entre 80° e 110° , para assegurar a operação para PE com carregamentos altos, já que nestas condições pode ocorrer a perda de sincronismo em um curto tempo e/ou danos mais severos no gerador e/ou sistema.

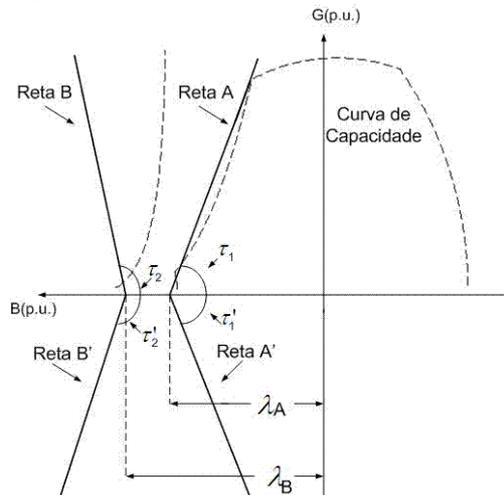


FIGURA 10 – Retas A, A', B e B' definidas em função da curva de capacidade no plano G - B .

Para detectar a PE no gerador e evitar operações indevidas têm-se os seguintes estágios de operação [7]:

- Primeiro estágio: Quando a impedância vista pelo relé atinge uma das retas A ou A' (tomate), e a tensão terminal da unidade está acima do limite inferior ajustado (entre 0,3 - 0,5 p.u.) e a tensão de campo abaixo do estabelecido (entre 0,6 - 0,4 p.u.), o temporizador (t_1) é inicializado. Após o tempo t_1 , ajustado entre 1,0 - 5,0 s, o sinal para a abertura disjuntor é enviado.
- Segundo estágio: Se a impedância atingir as curvas B e B' (lente), e a máquina estiver com uma tensão terminal maior que 30%, partirá o sinal de abertura do disjuntor após um retardo de tempo (entre 0,1 - 0,3 s).

6.0 - ANÁLISE COMPARATIVA

As técnicas de proteção contra a PE, anteriormente descritas, foram comparadas por meio de dois tipos de simulações computacionais, ou seja, PE e OEP, em um sistema teste com três barras (gerador, transformador, duas linhas em paralelo e equivalente do sistema). Três máquinas, de parâmetros distintos, foram utilizadas nas simulações a fim de se identificar possíveis diferenças no desempenho dos métodos. Tanto as simulações de PE quanto às de OEP, foram realizadas para diferentes pontos operacionais de cada máquina. Esses pontos, dados do sistema teste e os ajustes dos métodos são apresentados em [2].

6.1 Simulações com o Gerador 1 (G_1) $\rightarrow S = 80$ MVA; $X_d = 0,9$ p.u.

Nestas simulações não se utilizou o método de Berdy [3], pois para geradores com $X_d > 1,2$ p.u., como é o caso do G_1 , é recomendado o método de Mason [1]. Nas simulações com G_1 , os métodos obtiveram um excelente

desempenho nos dois eventos considerados, conforme mostra a Tabela 4. Nesta tabela é mostrada a porcentagem dos casos em que a proteção atuou.

TABELA 4 – Porcentagem dos casos em que a proteção atuou para o G_1

| Método | PE (%) | OEP (%) |
|-------------------|--------|---------|
| Mason | 100 | 0 |
| Tomate/Lenticular | 100 | 0 |
| Lógica Nebulosa | 100 | 0 |

Com relação ao tempo de operação da proteção, durante a PE, o método com base em Lógica Nebulosa foi mais rápido na maioria dos casos, sendo estes quase todos com carregamentos elevados. O método de Mason [1] foi o segundo mais rápido. A Figura 11 mostra o tempo de atuação da proteção contra a PE para o carregamento de $\bar{S} = (0,5 + j 0,4)$ p.u..

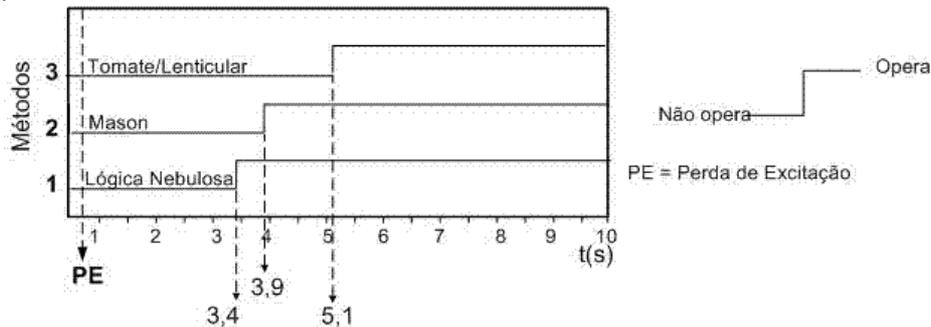


FIGURA 11 – Sinais de operação dos métodos durante uma PE.

6.2 Simulações com o Gerador 2 (G_2) $\rightarrow S = 390$ MVA; $X_d = 1,2$ p.u.

O método de Mason [1] não foi utilizado, pois o mesmo é recomendado para geradores com $X_d < 1,2$ p.u.. Nestes testes os métodos Tomate/Lenticular e o que utiliza a Lógica Nebulosa apresentaram os melhores desempenhos. Estes métodos identificaram a PE e atuaram em 100% dos casos como mostra a Tabela 5.

TABELA 5 – Porcentagem dos casos em que a proteção atuou para o G_2

| Método | PE (%) | OEP (%) |
|-------------------|--------|---------|
| Berdy | 95 | 20 |
| Tomate/Lenticular | 100 | 0 |
| Lógica Nebulosa | 100 | 0 |

Com relação ao tempo de atuação da proteção durante a PE, a Característica Tomate/Lenticular foi a mais eficiente em 75% dos casos, seguida da técnica com base na Lógica Nebulosa.

Nos casos das OEP, os métodos Característica Tomate/Lenticular e Lógica Nebulosa mostraram um desempenho 100% confiável como mostra a Tabela 5. A Figura 12 exibe os sinais de operação dos estágios da Característica Tomate/Lenticular e do Lógica Nebulosa para uma OEP com carregamento inicial do gerador em $\bar{S} = (0,3 - j 0,6)$ p.u., em que a proteção operou indevidamente em razão do método de Berdy [3].

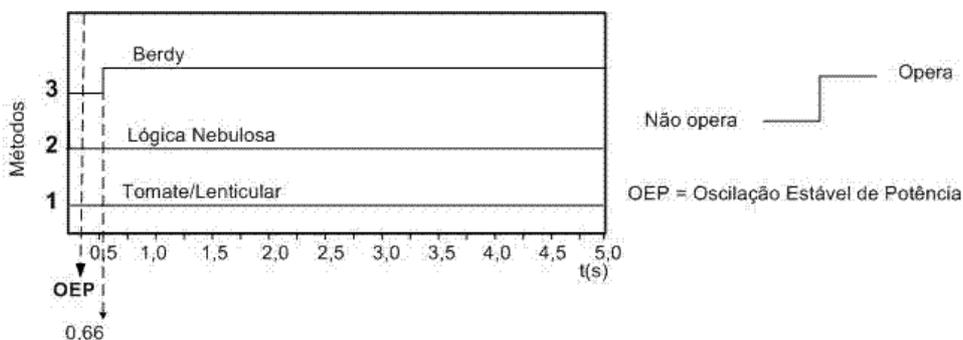


FIGURA 12 – Sinais de operação dos métodos durante uma OEP.

6.3 Simulações com o Gerador 3 (G_3) $\rightarrow S = 500$ MVA; $X_d = 1,6$ p.u.

O método Lógica Nebulosa manteve o excelente desempenho, seguido da Característica Tomate/Lenticular como mostra a Tabela 6. O método baseado em Lógica Nebulosa permitiu a operação da proteção durante a perda de

excitação em 100% dos casos e evitou a operação indevida da proteção em virtude das oscilações de potência em todos os casos.

TABELA 6 – Porcentagem dos casos em que a proteção atuou para o G_3

| Método | PE (%) | OEP (%) |
|-------------------|--------|---------|
| Berdy | 90 | 15 |
| Tomate/Lenticular | 95 | 0 |
| Lógica Nebulosa | 100 | 0 |

Com relação ao tempo de operação, em 85% dos casos a Lógica Nebulosa foi o que detectou mais rapidamente o evento da PE. A Figura 13 mostra o tempo de atuação da proteção contra a PE para um carregamento inicial em $\bar{S} = (0,3 + j0,5)$ p.u..

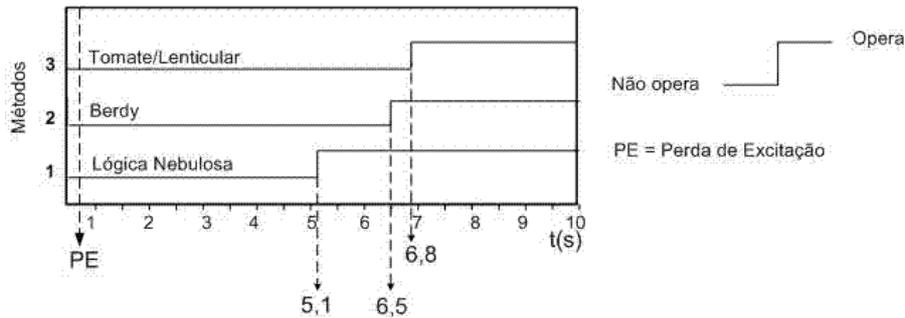


FIGURA 13 – Sinais de operação dos métodos durante uma PE.

7.0 - CONCLUSÕES

Esse artigo apresentou uma técnica inovadora que faz uso dos fundamentos da proteção contra a PE convencional, porém inserindo tais conceitos na Teoria dos Conjuntos Nebulosos. A metodologia envolve regras de inferência baseadas nas características da impedância aparente e tensão terminal durante a PE, OEP e operação normal. O método assegura confiabilidade e detecta a PE em um tempo inferior ou muito semelhante aos métodos convencionais. As possibilidades de operação indevida, causadas por distúrbios que provocam uma grande queda na V_t , foram reduzidas, pois os ajustes das FP se baseiam na característica dos eventos envolvidos. Além disso, as FP, utilizadas no método proposto, são ajustadas para começarem a identificar a PE desde as condições normais, com um grau de pertinência baixo, até valores pequenos de \bar{Z} e médios de V_t , característica do evento da PE. Tal fato proporciona uma velocidade de resposta rápida na detecção da PE.

Vale ressaltar, que o método com base em Lógica Nebulosa é fundamentado nas principais características apresentadas pelos métodos convencionais. Por esse motivo, a técnica mostrou-se muito eficiente. O método foi o único que operou corretamente para todos os carregamentos nos três casos considerados. Além disto, todas as oscilações estáveis de potência foram detectadas na forma de alarme. Essa última informação pode ser extremamente útil para o operador do sistema elétrico de potência.

A grande vantagem do método que utiliza a Teoria dos Conjuntos Nebulosos está no fato de que o desempenho do mesmo não foi influenciado pelos parâmetros do gerador, além de possuir ajustes simplificados. Na prática isto significa que o método pode ser utilizado em geradores de qualquer porte.

8.0 - BIBLIOGRAFIA

- [1] MASON, C. R. New Loss-of-Excitation Relay for Synchronous Generators. AIEE Transactions. Vol. 68, Part II, pp. 1240-1245, 1949.
- [2] Moraes, A. P., "AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DOS MÉTODOS DE PROTEÇÃO CONTRA A PERDA DE EXCITAÇÃO EM GERADORES SÍNCRONOS: Uma Contribuição Utilizando a Teoria dos Conjuntos Nebulosos", Dissertação de Mestrado, PPGEE/UFSM, Agosto de 2008.
- [3] ANDERSON, P. M. Power System Protection. Ed. IEEE Press Power Engineering Series - McGraw-Hill. 1999.
- [4] ZADEH, L. A. Fuzzy Sets. Information and Control, Vol. 8. New York: Academic Press, pp. 338-353, 1965.
- [5] BARRETO, J. M. Inteligência Artificial no Limiar do Século XXI – Abordagem Híbrida Simbólica Conexionista e Evolutiva. 3ª edição, Florianópolis, 2001.
- [6] BERDY, J. Loss of Excitation Protection for Modern Synchronous Generators. IEEE Transactions. Vol. 94, nº. 5, pp. 1457-1463, 1975.
- [7] LEITE, A. G.; SILVEIRA, P. M. Utilização da Proteção Contra a Perda de Excitação de Unidades Geradoras como Proteção Sistêmica: Curva Tomate. XIX Seminário Nacional de Produção e Transmissão de Energia Elétrica. Rio de Janeiro – RJ, Brasil, Outubro de 2007.