

Análise do Desempenho da Coordenação Entre a Proteção Contra Perda de Excitação e os Limitadores de Subexcitação e de Estabilidade em Regime Permanente.

Matheus M. da Silveira*. Aurélio L. M. Coelho**. Elcio F. Arruda***. Ivan P. Faria****

*Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG, Brasil (e-mail: mmunizsilveira@gmail.com).

** Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG, Brasil (e-mail: aurelio.coelho@unifei.edu.br).

*** Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG, Brasil (e-mail: elcio.arruda@unifei.edu.br).

****Universidade Federal de Itajubá, Itabira, MG, Brasil (e-mail: Ivan.faria@unifei.edu.br).

Abstract: This paper proposes to evaluate, through computer simulations, the performance of the excitation loss protection (ANSI 40) in synchronous generators coordinated with the voltage regulator underexcitation limiter (UEL) observing the limits imposed by the generator capability curve. and its steady state stability limit (SSSL). It was used a real model of synchronous generator applied in the Brazilian 9-Bar Test System, implemented in ANAREDE and ANATEM software. Using these software events were simulated that could cause the protection against loss of excitation to act. Thus, it was possible to observe the benefits of coordinating protection 40 with the under-excitation limiter, ensuring more effective protection, better sensitivity and thus contributing to greater reliability to the electrical system.

Resumo: O trabalho desenvolvido propõe avaliar, através de simulações computacionais, o desempenho da proteção contra perda de excitação (ANSI 40) em geradores síncronos coordenada com o limitador de subexcitação (UEL) do regulador de tensão, observando os limites impostos pela curva de capacidade do gerador e seu limite de estabilidade em regime permanente (do inglês *Steady State Stability Limit - SSSL*). Foi utilizado um modelo real de gerador síncrono aplicado no Sistema Teste Brasileiro de 9 Barras, implementados nos softwares ANAREDE e ANATEM. Utilizando estes softwares foram simulados eventos que poderiam causar a atuação da proteção contra perda de excitação. Sendo assim, foi possível observar os benefícios da coordenação da proteção 40 com o limitador de subexcitação, garantindo uma proteção mais efetiva, com melhor sensibilidade e, portanto, contribuindo com maior confiabilidade ao sistema elétrico.

Keywords: Generator Protection; ANSI 40; Loss of Excitation; Capability Curve; Underexcitation Limiter; Stability; Coordination;

Palavras-chaves: Proteção de Gerador; ANSI 40; Perda de Excitação; Curva de Capacidade; Limitador de Subexcitação; Estabilidade; Coordenação;

1. INTRODUÇÃO

Nos geradores de grande porte conectados ao Sistema Interligado Nacional (SIN) é fundamental que a proteção esteja coordenada e parametrizada de forma a atuar quando devido e com boa sensibilidade, pois falhas internas em seus componentes podem gerar danos irreversíveis à máquina. Além disso, a atuação indevida de uma das proteções de uma unidade geradora, pode causar indisponibilidade de operação e provocar agravamento de perturbações em algumas regiões do SIN, podendo tornar o sistema instável.

A perda de excitação em geradores síncronos é uma das condições indesejadas que deve ser evitada, pois pode causar, por exemplo, sobreaquecimento no rotor e no estator, podendo levar a máquina à perda de sincronismo e

comprometendo a estabilidade do sistema elétrico (Kindermann, 2008).

A proteção contra perda de excitação (função 40 na tabela ANSI) tem a função de realizar o desligamento da máquina antes que ocorra a perda total de excitação, evitando os vários problemas supracitados.

Há vários casos relatados de atuação indevida da proteção contra perda de excitação, como mencionado em (Lima, 2002 e Mozina, 2010). A maioria das atuações indevidas aconteceram em momentos em que a máquina estava trabalhando na região de subexcitação. É muito comum a máquina síncrona trabalhar subexcitada e isso não causa danos ao gerador, desde que os limites de sua curva de capacidade sejam respeitados (Montezuma, 2009).

Portanto, para garantir uma boa atuação da proteção contra perda de excitação, a proteção deve ser coordenada com o limitador de subexcitação (do inglês Underexcitation Limiter - UEL) do regulador automático de tensão (do inglês Automatic Voltage Regulator - AVR), que por sua vez, deve levar em conta o limite de estabilidade em regime permanente (do inglês Steady State Stability Limit - SSSL) da máquina e os limites mecânicos impostos pela curva de capacidade do gerador. Nesse contexto, o trabalho publicado por Mozina et al. (2007) apresentou relevantes contribuições no estado da arte deste tema.

Apesar deste tema ser recorrente ao longo dos anos em estudos de proteção de máquinas síncronas e seus controles associados, como abordado por Coelho (2016) e Paiva et al. (2018), este assunto ainda gera grandes discussões entre os agentes do setor elétrico, principalmente quando se trata do aproveitamento da capacidade operativa dos geradores e a supervisão da sua proteção de perda de excitação. Nesse sentido, este trabalho apresenta os métodos utilizados para realizar a coordenação da proteção ANSI 40 com os limitadores UEL, SSSL e limites da curva de capacidade do gerador. A coordenação foi realizada em um modelo computacional de gerador síncrono com parâmetros reais, implementados nos softwares do CEPTEL, ANAREDE e ANATEM, ambos em versão acadêmica, onde foram simulados casos que levariam o gerador a trabalhar na região de subexcitação e até mesmo perda total da excitação, a fim de avaliar o desempenho da proteção 40 antes e após os ajustes de coordenação realizados.

2. METODOLOGIA

Para fazer o estudo da proteção e posteriormente sua coordenação com os limitadores, foram utilizados os parâmetros reais de uma unidade geradora conectada ao SIN. Este gerador foi implementado no Sistema Teste Brasileiro de 9 Barras (STB-9Barras). Foram utilizados os softwares ANAREDE (Análise de Redes Elétricas) e ANATEM (Análise de Transitórios Eletromecânicos) para fazer a representação dos sistemas e simular situações de perda total e parcial da excitação do gerador.

O regulador automático de tensão (AVR), juntamente com o estabilizador de potência (PSS) e o limitador de subexcitação (UEL), foram implementados como controladores definidos por usuários (CDU) utilizando os modelos padrões definidos pelo *Standard IEEE* (2016).

A curva de capacidade e os limites UEL e SSSL foram plotados e ajustados juntamente com as duas zonas de proteção. Por fim, fez-se a análise da atuação da proteção com e sem o limitador UEL, propondo uma alteração na localização das zonas de proteção para ter uma melhor coordenação e sensibilidade. Cada uma dessas etapas é detalhada nas subseções seguintes.

2.1 Característica do Gerador

Para realizar a parametrização da proteção contra perda de excitação foram utilizados parâmetros reais de uma das

unidades geradoras de uma usina hidrelétrica conectada ao SIN.

A carta de capacidade deste gerador foi plotada no software MATLAB, com o intuito de facilitar o estudo e a implementação dos demais limitadores (SSSL e UEL). A Figura 1 apresenta as características de capacidade do gerador.

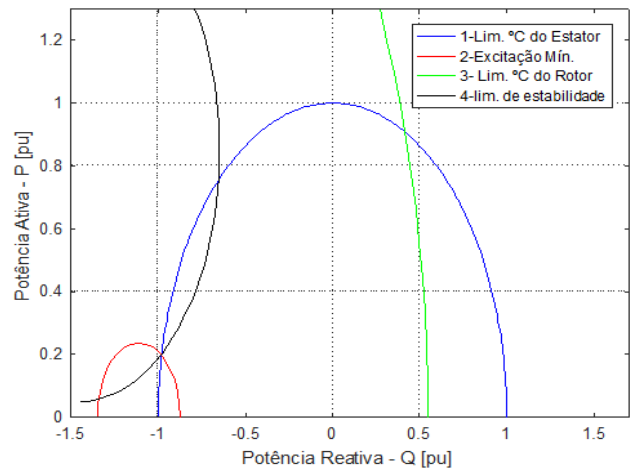


Fig. 1 Curva de capacidade do gerador síncrono.

Os parâmetros construtivos e nominais do gerador utilizado neste estudo são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Parâmetros do Gerador Síncrono

P_n [MVA]	FP [Ind]	F_n [Ind]	V_n [kV]
245	0,95	60	16
I_n [A]	X_d [pu]	X_q [pu]	$X'd$ [pu]
8841	1,20	0,70	0,30
X''_d [pu]	X_L [pu]	T'_{do} [seg]	T'_d [seg]
0,20	0,20	8,00	2,30
T''_d [seg]	T''_{qo} [seg]	H	-
0,10	0,22	3,42	-

2.2 Modelagem Computacional

O software ANAREDE foi utilizado neste trabalho para fazer a modelagem do sistema STB-9Barras, conforme Figura 2.

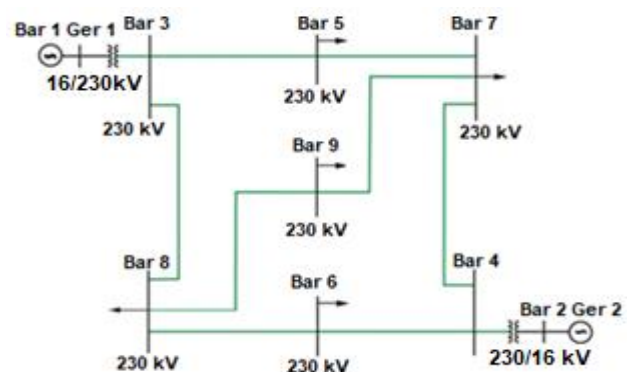


Fig. 2 Sistema teste brasileiro de 9 barras. (Alves, 2007)

O sistema STB-9Barras foi utilizado para análise de contingências (perda parcial de excitação, perda total de campo, degrau na referência do AVR), pois este sistema representa razoavelmente um sistema real e consegue gerar uma gama de resultados para simulações de contingências (Alves, 2007).

O gerador síncrono foi parametrizado com operação em 100% da capacidade de geração (230 MW) e na região sobre-excitada (35 MVar). Com a compilação do *software*, é gerado o fluxo de potência que é um dos parâmetros necessários para inicializar as simulações no ANATEM.

2.3 Controladores Definidos Pelo Usuário.

A implementação do AVR, do UEL e do PSS no ANATEM, foi feita por criação de CDUs no software CDUedit. Os CDUs foram criados pela alocação de blocos de controle utilizando valores típicos. O sistema de excitação utilizado foi baseado no modelo ST1A dos padrões sugeridos pela *Standard IEEE* (2016) para simulações computacionais e está apresentado na Figura 3.

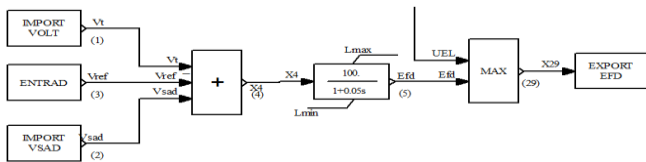


Fig. 3 Modelo CDU: Regulador de tensão.

O limitador UEL, implementado em CDU, é representado na Figura 4.

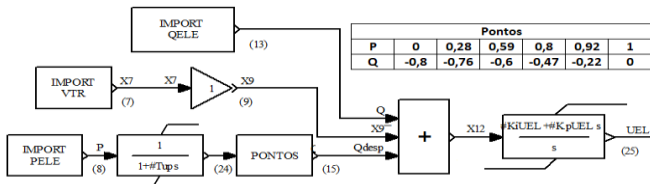


Fig. 4 Modelo CDU: Limitador UEL.

No modelo do limitador UEL, no bloco “Pontos”, são definidos os pontos no plano Q-P para limitar a operação do gerador dentro da zona permitida na curva de capacidade. A definição destes pontos de limitação foi baseada na característica de múltiplos segmentos de linha reta (IEEE 2016). Na representação no plano Q-P, essa curva limitadora deve ficar próxima da curva de limite prático de estabilidade estática, e dentro da curva de capacidade, pois como descrito anteriormente, ela é definida como a relação máxima de potência ativa versus potência reativa que mantém a máquina estável. Os pontos são apresentados na Figura 4.

2.4 Proteção ANSI 40.

Dentre as diversas filosofias de proteção existentes, foi utilizado o modelo apresentado por Berdy (1975), composto por duas zonas com *offset* negativo, sendo a segunda zona de

atuação temporizada para suportar oscilações estáveis de potência.

Para a parametrização das duas zonas de proteção da função ANSI 40, são necessárias as reatâncias síncronas e subtransitória de eixo direto, as quais são apresentadas na Tabela 1.

O diâmetro e offset da zona 1 (Z1) é calculada de acordo com (1) e (2), respectivamente.

$$\text{Diâmetro de Z1} = 1,0 \text{ [pu]} \quad (1)$$

$$\text{Offset de Z1} = -\frac{X'_d}{2} = -0,15 \text{ [pu]} \quad (2)$$

A zona 1 é uma região de atuação instantânea da proteção, uma vez que a trajetória da impedância tende a adentrar rapidamente esta zona quando de uma perda de excitação, principalmente quando o gerador estiver com elevado carregamento. Para a zona 2 o cálculo do diâmetro e do offset é feito de acordo com (3) e (4), respectivamente.

$$\text{Diâmetro de Z2} = X_d = 1,2 \text{ [pu]} \quad (3)$$

$$\text{Offset de Z2} = -\frac{X'_d}{2} = -0,15 \text{ [pu]} \quad (4)$$

Após a definição dos ajustes das duas zonas da função ANSI 40, as mesmas foram plotadas no plano R-X através de uma rotina implementada no Matlab, como mostra a Figura 5.

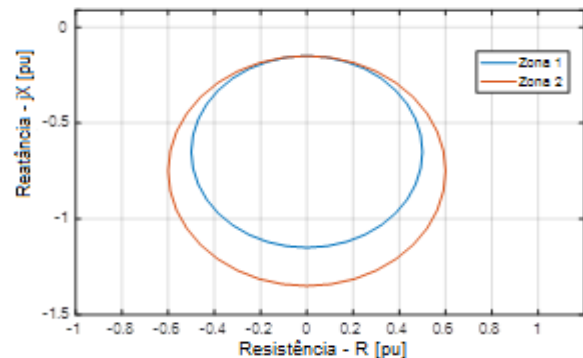


Fig. 5 Plano R-X: Representação da característica MHO.

Diferente de Z1, em Z2 é atribuída uma temporização para evitar que a proteção ANSI 40 da máquina opere desnecessariamente para pontos característicos de Oscilações Estáveis de Potência (OEP) e de baixo carregamento da máquina. Em tais condições, a impedância pode entrar na zona de proteção e sair da mesma em um tempo inferior a temporização da zona 2, sem expor a máquinas a desgastes operativos. É prática usual, a utilização de uma temporização entre 0,6 s e 1,5 s. Para este estudo, foi utilizado $T = 0,8$ s.

2.5 Implementação das Curvas dos Limitadores

2.5.1 Limitador SSSL.

O limitador SSSL, é traçado no plano Q-P a partir de pontos obtidos com a relação potência ativa e potência reativa quando o gerador opera no limite de estabilidade.

Como a potência ativa (P) e a tensão terminal (Vt) são dados conhecidos do sistema, através das relações dadas em (5) e (6) é possível encontrar os valores correspondentes de potência reativa (Q) e, assim, traçar a curva do SSSL (Anderson et al. 1953).

$$P = \frac{V_{bi}}{X_e} \sqrt{V_t^2 - \left(\frac{V_{bi} X_d}{X_d + X_e} \right)^2} \quad (5)$$

$$Q = \frac{1}{X_e} \left(V_t^2 - \frac{V_{bi}^2 X_d}{X_d + X_e} \right) \quad (6)$$

Onde,

V_{bi} : Tensão no barramento infinito;

X_e : Reatância equivalente do sistema;

X_d : Reatância síncrona de eixo direto;

As equações (5) e (6) formam um círculo no plano Q-P, que também pode ser construído com as equações (7) e (8), que representam o centro (C) e o raio (R) do círculo, respectivamente.

$$C = \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} - \frac{1}{X_d} \right) \quad (7)$$

$$R = \frac{V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_e} + \frac{1}{X_d} \right) \quad (8)$$

2.5.2 Limitador UEL.

O limitador UEL, no plano Q-P, deve ser alocado dentro da região operativa da curva de capacidade e bem próxima do limite de estabilidade prático da curva de capacidade.

O modelo de UEL usado neste trabalho é do tipo múltiplos seguimentos de linha reta. Como mostrado anteriormente na Figura 4, o controlador do UEL possui os pontos definidos no plano Q-P, em sua composição. Ainda na Figura 4 são mostrados os seis pontos que foram definidos para ajustar o limitador na curva de capacidade.

2.6 Sobreposições das Curvas nos Planos Q-P e R-X

Na Figura 6 é apresentado o plano Q-P, onde estão inseridas a curva de capacidade (CC), juntamente com os limites SSSL e UEL, definidos anteriormente.

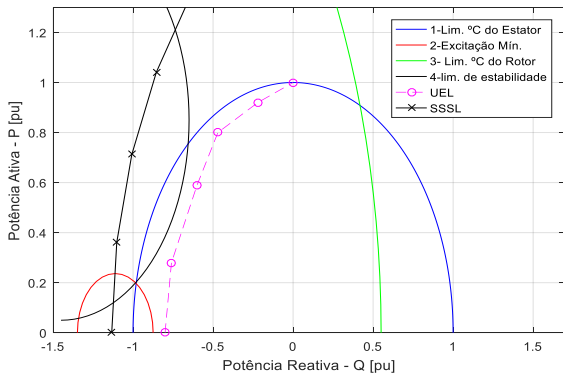


Fig. 6 Plano Q-P: Coordenação dos limitadores.

A fim de coordenar os limitadores com as zonas de proteção de perda de excitação, os limitadores também foram representados no plano R-X. Essa representação é possível de ser feita, convertendo diretamente os pontos traçados no plano Q-P em pontos no diagrama R-X utilizando (9) e (10).

$$R = \frac{PV_t^2}{P^2 + Q^2} \quad (9)$$

$$X = \frac{QV_t^2}{P^2 + Q^2} \quad (10)$$

Por (11) e (12) é possível converter de R-X para Q-P.

$$P = \frac{RV_t^2}{R^2 + X^2} \quad (11)$$

$$Q = \frac{XV_t^2}{R^2 + X^2} \quad (12)$$

A Figura 7 apresenta as curvas dos limitadores ajustadas e inseridas no plano R-X.

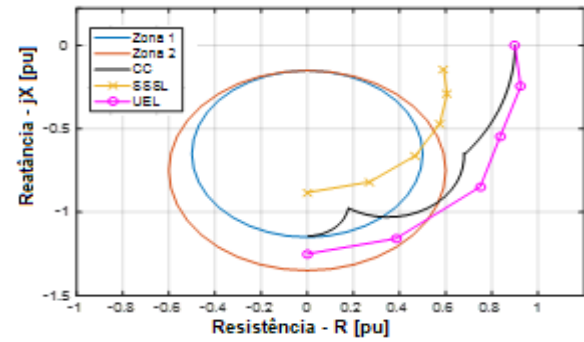


Fig. 7 Plano R-X: Representação dos limitadores.

3. RESULTADOS

3.1 Ajuste da Proteção

Para realizar a coordenação das zonas de proteção do relé ANSI 40 com as curvas dos limitadores, deve ser observado no plano Q-P os limites impostos pela curva de capacidade na região de subexcitação. Portanto, as duas zonas de proteção foram plotadas juntamente com os limitadores como mostra a Figura 8.

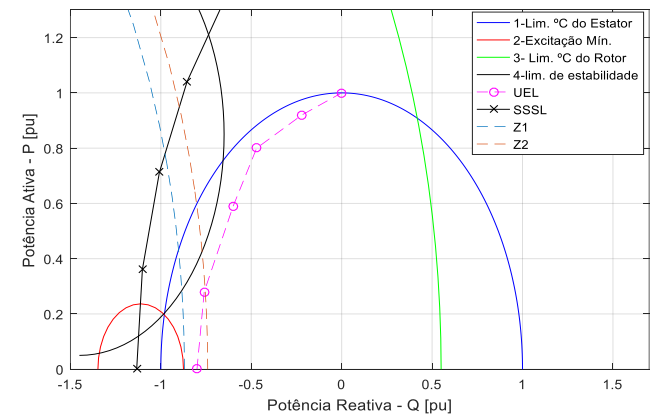


Fig. 8 Zonas de proteção com os limitadores antes do ajuste.

É notável na Figura 8 que as zonas estão antecedendo o limitador UEL. Dessa forma, é muito provável que haja uma atuação indevida da proteção, principalmente na região da zona 2 por não respeitar o limite UEL. Assim, as duas zonas foram ajustadas de modo que a zona 2 fique localizada após o UEL e próxima ao limite prático de estabilidade, e a zona 1 ajustada nos limites da capacidade, antecedendo o SSSL. Os ajustes das novas zonas propostas são apresentados nas Figuras 9 e 10.

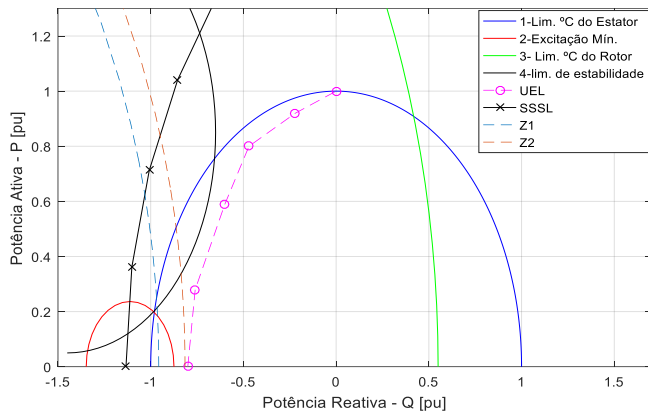


Fig. 9 Plano Q-P: Ajuste das zonas do relé ANSI 40.

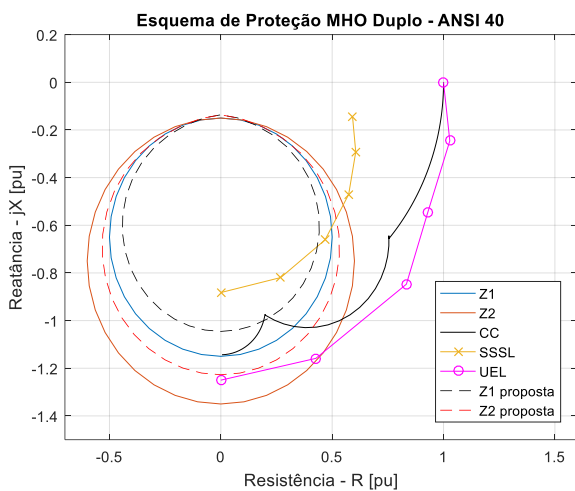


Fig. 10 Plano R-X: Ajuste das zonas do relé ANSI 40.

3.2 Análise da Coordenação

Alguns casos foram simulados no sistema STB-9barras implementado no software ANATEM, como explicado anteriormente, levando o gerador a regiões de subexcitação a fim de avaliar a coordenação e sensibilidade da proteção.

A) Caso 1 – Degrau de -7.5% no Vref do AVR

Com o intuito de simular uma condição de subexcitação, no primeiro caso foi aplicado um degraú de -7,5% na tensão de referência do AVR. Na Figura 11 é apresentada a trajetória da impedância com o limitador UEL ligado e desligado (representados por *UEL on* e *UEL off* na legenda da Figura 11, respectivamente).

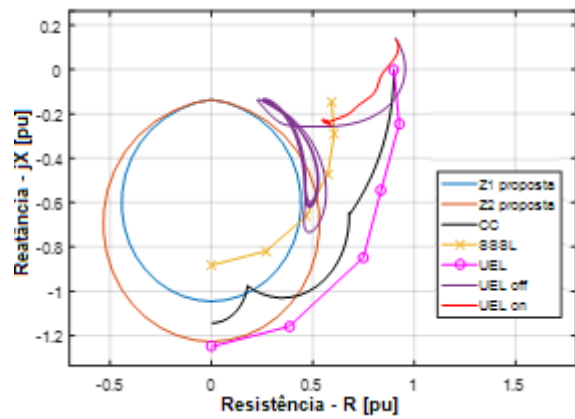


Fig. 11 Trajetória da impedância com degraú no Vref.

Com a variação da tensão de excitação para fazer com que a tensão terminal do gerador acompanhe a referência, no caso em que não é utilizado o UEL (*off*), a trajetória da impedância adentrou a característica ANSI 40 na zona 2. Enquanto na utilização do UEL (*on*), a trajetória da impedância se manteve afastada das zonas de proteção. Apesar da impedância ter sensibilizado a zona 2, esta não teria atuação para este caso, pois a impedância permaneceu em seu interior durante 0,5s, tempo menor do que o ajustado para o trip (0,8s).

B) Caso 2 – Perda Parcial de Excitação

Nesse caso foi aplicado, durante 5 segundos, um afundamento de 80% na tensão de referência do circuito de controle do campo do gerador, da mesma forma como conduzido no caso anterior.

Nas Figuras 12 e 13 são mostradas a trajetória da impedância para este evento. Na Figura 12 estão representadas as zonas de proteção antes do ajuste de coordenação. Observa-se que a impedância entra na zona 2 e permanece nesta região até o valor da tensão de campo ser reajustado para 1 p.u. Como o afundamento teve duração de 5 segundos e a impedância demorou 1,25s para chegar no ponto no interior da zona 2, isso equivale a dizer que a impedância ficou por 3,75s nessa região, indicando uma atuação do relé ANSI 40, mesmo com o limitador UEL habilitado (UEL on), mas sem a devida coordenação com esta proteção.

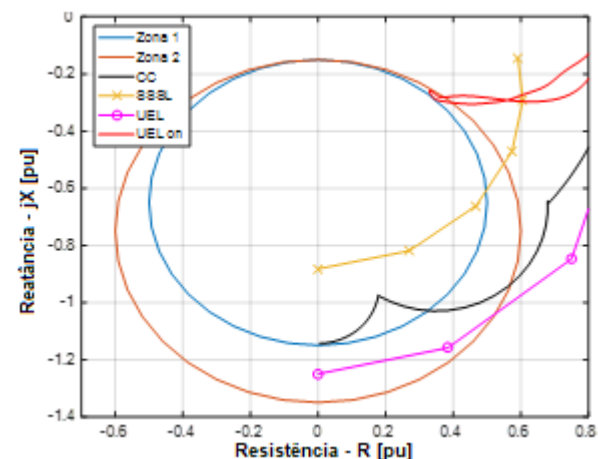


Fig. 12 Trajetória da impedância com proteção desajustadas.

A Figura 13 apresenta a mesma trajetória da impedância da Figura 12, porém agora representada junto às zonas de proteção propostas pela coordenação com os limitadores. Nota-se que a trajetória da impedância ficou bem próxima do limiar da proteção, mas não adentrou as zonas de proteção. Portanto, é permitido ao gerador uma maior região operativa, pois apesar da subexcitação, o gerador nesta região se mantém estável, não sendo necessário sua retirada do sistema. É importante notar que apesar da não atuação da proteção em zona 2, a trajetória da impedância (UEL on) chega a ultrapassar a curva do limite SSSL da máquina, podendo extrapolar seus limites operativos.

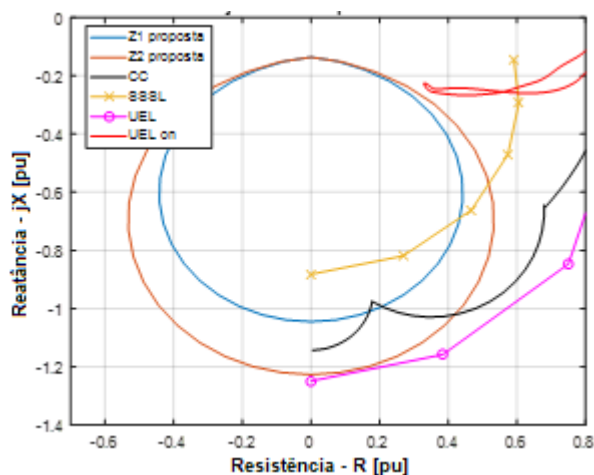


Fig. 13 Plano R-X: Trajetória da impedância com zonas de proteção ajustadas.

C) Caso 3 – Abertura de Disjuntor de Campo.

A fim de avaliar a resposta da proteção contra perda de excitação, em seu caso mais grave, foi feita a abertura da alimentação de campo, por simulação, e o resultado é mostrado na Figura 14.

A trajetória da impedância sai diretamente da região em que se encontrava, em condição normal, e vai diretamente para a zona 1 da proteção ANSI 40. Essa zona tem atuação instantânea. Garantindo uma rápida atuação da proteção da unidade geradora.

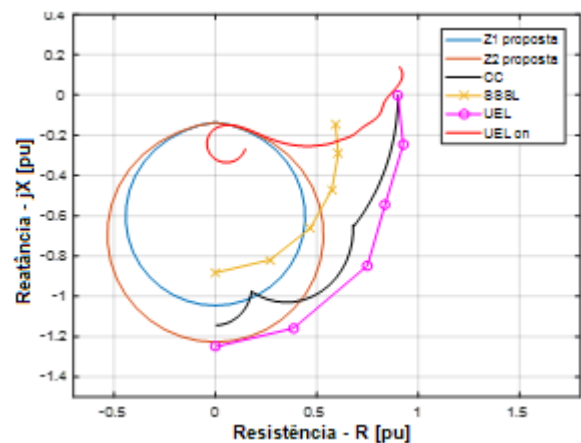


Fig. 14 Plano R-X: Trajetória da impedância para perda total de excitação.

4. CONCLUSÃO

Nos três casos estudados foram demonstradas algumas das principais situações que podem causar atuação da proteção de perda de excitação. No primeiro caso, a proteção não atuou indevidamente devido ao ajuste de tempo da zona de proteção. O segundo caso mostrou que o ajuste das zonas da proteção com o limitador de subexcitação foi eficiente para operar a máquina em uma região subexcitada, garantindo assim maiores regiões operativas do gerador, porém também mostrou que o limite SSSL foi ultrapassado, deixando a máquina em uma zona perigosa de operação. Nesse caso, uma análise utilizando características de proteção que englobam a impedância do sistema e o elemento direcional podem ser analisados futuramente para evitar atuações quando ocorre a ultrapassagem do limite SSSL. No terceiro caso, a atuação da proteção foi instantânea, como esperado, demonstrando a correta parametrização das zonas MHO do relé. Pelas análises é possível afirmar que a proteção e coordenação foram efetivas. Se aplicadas similarmente em sistemas reais, podem aumentar a confiabilidade do sistema quanto à diminuição de desligamentos por atuação indevida da proteção contra perda de excitação.

REFERÊNCIAS

- Alves, W.F. (2007). Proposição de sistemas-teste para análise computacional de sistemas de potência. 362, Dissertação – Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ.
- Anderson, H.C., Simmons H.O., and Woodrow, C.A. (1953). System stability limitations and generator loading. In *Electrical Engineering*, vol. 72, no. 5, pp. 417-417.
- Berdy, J. (1975). Loss of excitation protection for modern synchronous generators, *IEEE Trans. Power App. Syst.*, vol. PAS-94, no. 5, pp. 1457–1463.
- Coelho, A.L.M. (2016). Um Sistema Integrado de Testes de Funções de Proteção de Geradores Síncronos Associadas aos Limites de Excitação de um Modelo de AVR Implementado em Ambiente de Simulação Digital em Tempo Real. 150 f. Tese – UNIFEI, Itajubá.
- IEEE Standard 421.5 (2016). Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies. (Revision of IEEE Std 421.5-2005)
- Kindermman, G. (2008). Proteção de sistemas elétricos de potência. Vol. 3, 279p. Florianópolis – SC
- Lima, J.C.M. (2002). Aspectos de Proteção e controle do gerador síncrono subexcitado. Dissertação de Mestrado. PUC -MG. Belo Horizonte.
- Montezuma, L.R. (2009). Coordenação e seletividade das proteções de perda de excitação de gerador síncrono conectado ao sistema interligado nacional, Dissertação, Universidade Federal do Rio de Janeiro.
- Mozina, C.J., et al. (2007). Coordination of generator protection with generator excitation control and generator capability; *Working group J-5 of the rotating machinery subcommittee, power system relay committee, in Proc. IEEE/PES Gen. Meet.*, Tampa, FL, USA.
- Paiva, R.B., et al. (2018). Análise do Ajuste do Limitador de Subexcitação e Coordenação Efetiva com a Proteção de Perda de Excitação”, in XIV Seminário Técnico de Proteção e Controle - STPC, Foz do Iguaçu.