

## GRUPO DE ESTUDO DE ANÁLISE E TÉCNICAS DE SISTEMAS DE POTÊNCIA - GAT

### CONSEQUÊNCIAS NO USO DO LIMITADOR DE SUBEXCITAÇÃO PARA LIMITAÇÃO DA CORRENTE ESTATÓRICA CONFORME A RESTRIÇÃO DE AQUECIMENTO DA ARMADURA

HENRIQUE AUGUSTO MENARIN(1); RAFAEL BERTOLINI DE PAIVA(2); LUCAS EDUARDO DE SOUZA(1);  
BRUNO MACIEL MACHADO(1)  
REIVAX(1); OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO ONS(2)

#### RESUMO

O limitador de subexcitação do regulador de tensão tem como objetivo principal limitar a operação do gerador na região de subexcitação. Com advento dos reguladores digitais, topologias mais elaboradas do limitador de subexcitação foram sendo criadas, entre elas, a possibilidade de ajustar a restrição deste limitador mediante uma tabela de pontos, o que induz algumas vezes ao ajuste visando a limitação da corrente estatórica. Esse trabalho trata das consequências estáticas e dinâmicas dos ajustes deste limitador visando a proteção do estator e as formas de minimizar os efeitos adversos desse tipo de estratégia.

#### PALAVRAS-CHAVE

Sistema de Excitação; Limitador de Subexcitação; Limitador de Corrente do Estator; Máquina Síncrona

#### 1.0 INTRODUÇÃO

O controle de excitação de uma Máquina Síncrona [MS] não se restringe apenas à manutenção da tensão terminal de acordo com a sua referência, mas tem como função, também, manter a MS dentro dos limites de operação segura definidos pela sua curva de capacidade através do uso de malhas de controle suplementares do Regulador de Tensão [RT], denominadas limitadores. Um destes limitadores é o de Subexcitação (UEL, da sigla em inglês), definido pela norma IEEE 421.5 [1], cujo objetivo é restringir a operação da MS em regiões de operação subexcitadas, evitando que seja ultrapassado o limite de estabilidade em que ocorre perda de sincronismo com o sistema.

Devido à possibilidade de ajuste da característica de limitação por meio de uma tabela de pontos (P,Q) na curva de capacidade, por vezes, o UEL acaba sendo utilizado para limitar também a corrente do estator, desempenhando uma função adicional que seria atribuída ao Limitador de Corrente do Estator (SCL, da sigla em inglês). Este tipo de configuração traz consequências à operação da unidade, geralmente desconhecidas pelo comissionador, pelo operador ou especialistas em estudos de modelagem do sistema elétrico. O objetivo deste trabalho é documentar e exemplificar os efeitos dessa abordagem, contribuindo para a compreensão de eventos que estejam associados a esse tipo de sintonia.

Este trabalho encontra-se organizado da seguinte maneira: na seção 2, apresenta-se o modelo do UEL2C conforme a IEEE 421.5-2016; na seção 3, discute-se sobre os critérios de ajuste do UEL; na seção 4, um comentário sobre o efeito da variação da tensão terminal sobre a característica de limitação definida pela tabela de pontos do UEL; os impactos do ajuste sobre o desempenho do sistema de excitação e da MS são discutidos na seção 5.

#### 2.0 ESTRUTURA DO UEL

Na Figura 1, é apresentado o modelo UEL2C [1]. Nessa topologia, a limitação operativa dada pelo UEL é definida por sua característica estática, que é ajustada a partir de uma tabela de pontos nos eixos P x Q (potência ativa por potência reativa); os blocos do limitador responsáveis por definir a característica estática de operação são destacados na Figura 2. Ressalta-se que a saída da tabela de pontos, que pode ser modulada pela tensão terminal, é equivalente à referência de potência reativa, utilizada na composição do erro do UEL junto com a leitura da potência reativa da MS. O erro é processado pela malha de controle do limitador, que determina a característica dinâmica.

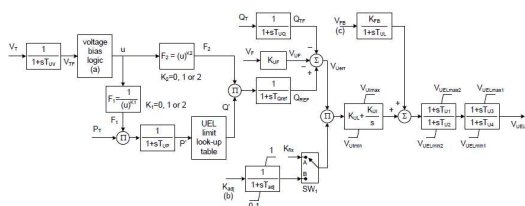


Figura 1 - Função de transferência do UEL2C [1].

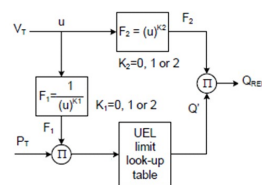
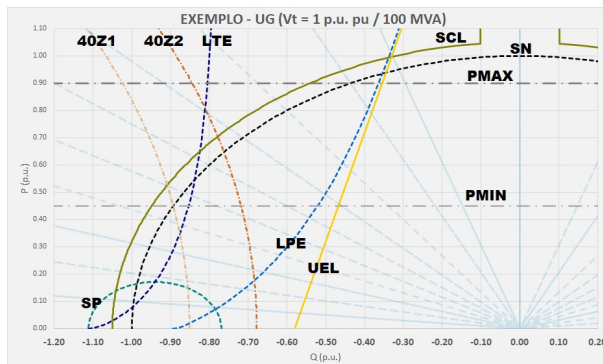


Figura 2 – Síntese da referência estática do UEL.

As constantes exponenciais  $K_1$  e  $K_2$  são parâmetros utilizados para modificar as características estáticas do limitador. A norma IEEE 421.5 [1] traz três configurações de ajuste desses parâmetros. Desta forma, pode-se fazer  $K_1 = K_2 = 0$ , caracterizando o UEL por uma curva do tipo potência, fazendo com que este não seja afetado pelo valor de tensão terminal do gerador ( $V_t$ ). Uma outra forma de parametrizar o dispositivo é fazendo  $K_1 = K_2 = 1$ , caracterizando o limitador a partir da corrente terminal do gerador ( $I_t$ ). Neste arranjo, o sinal de limitação do UEL passa a ser proporcional à  $V_t$ . Por fim, a norma apresenta uma terceira configuração, onde a limitação do UEL se torna proporcional a  $V_t^2$ . Para isso, faz-se a configuração  $K_1 = K_2 = 2$  caracterizada por limitar a subexcitação da máquina a partir das componentes real e reativa da impedância aparente vista a partir dos terminais do gerador. Podem ser utilizadas também variantes, por exemplo,  $K_1 = 0$  e  $K_2 = 2$ , uma possibilidade que também será explorada neste trabalho como “opção híbrida”.

### 3.0 CRITÉRIO DE AJUSTE E COORDENAÇÃO COM O RELÉ 40

A referência de atuação do UEL é normalmente ajustada a partir de segmentos de retas. No caso de geradores de polos salientes, é de praxe utilizar a curva prática de estabilidade para  $V_t = 1$  pu como uma referência para o ajuste desses segmentos de reta. Ressalta-se que o limite prático de estabilidade já é, por si só, uma referência conservadora para o ajuste do UEL. Na Figura 3, apresenta-se a curva de capacidade, com ênfase na região de subexcitação. Observa-se o ajuste do UEL mediante o uso de apenas uma reta.



#### Legenda:

UEL: Limitador de Subexcitação  
 SCL: Limitador de Corrente do Estator  
 40Z1: Proteção de perda de excitação zona 1  
 40Z2: Proteção de perda de excitação zona 2  
 LTE: Limite teórico de estabilidade  
 LPE: Limite prático de estabilidade  
 SN: Curva de potência nominal  
 SP: Saliência polar  
 PMAX: limite máximo operativo da turbina  
 PMIN: limite mínimo operativo da turbina

Figura 3 – Restrições da curva de capacidade na região de subexcitação da máquina síncrona.

É importante ressaltar o intervalo de coordenação com a proteção 40. No exemplo da Figura 3, o relé 40 foi sintonizado conforme a metodologia clássica de Berdy-Mason [2, 3].

Destaca-se que o relé 40 deve ser ajustado em primeiro lugar, visando a perda de excitação conforme os critérios clássicos, depois deve ser realizado o ajuste do UEL, visando o limite de estabilidade e a coordenação com o relé 40.

Paiva [4] apresentou uma metodologia para garantir a coordenação do UEL2C conforme o ajuste do fator  $K_2$  do UEL2C. Tal metodologia pode ser aplicada para outras estruturas de UEL, dependendo da sua característica (potência, corrente ou impedância). A Tabela 1 apresenta essa proposta que visa atender à coordenação estática do UEL com o ajuste do relé 40 conforme os ajustes de Mason-Berdy. A coordenação estática é dada pelo intervalo existente entre esses dispositivos. Ressalta-se, também, que a filosofia de ajuste da curva do UEL2C é dada para apenas dois pontos da tabela PQ do UEL, sendo um para  $P = 0,0$  pu e o outro para  $P = 1,0$  pu.

Tabela 1. Critério para a coordenação estática do UEL com o relé 40 ajustado conforme Mason-Berdy.

k2	Ajuste da Curva do UEL [4]		Ajuste do relé 40 [2, 3]	
0	$Q_{(P=0)} = -\left(\frac{Ref_{MIN}^2}{ X_{MAX} } + folga\right)$	$Q_{(P=1)} = Q_{(P=0)} + Inc$		<b>Zona 1:</b> Diâmetro = 1 pu Offset = $x'd/2$
1	$Q_{(P=0)} = -\left(\frac{Ref_{MIN}}{ X_{MAX} } + folga\right)$	$Q_{(P=1)} = Q_{(P=0)} + Inc$		<b>Zona 2:</b> Diâmetro = $x_d$ Offset = $x'd/2$
2	$Q_{(P=0)} = -\left(\frac{1}{ X_{MAX} } + folga\right)$	$Q_{(P=1)} = Q_{(P=0)} + Inc$		<b>Xmax</b> = $x'd + x_d$

onde:

- **Ref<sub>MIN</sub>** é a referência mínima da tensão terminal de operação da MS;
- **Folga** é o intervalo de coordenação estática entre o UEL e a 2ª zona da função 40. Sugere-se a adoção de uma **folga** mínima de **10%**. Esse valor poderá ser aumentado após uma análise da coordenação dinâmica. Pelo critério de ajuste do relé 40 [2, 3], esse intervalo de coordenação é garantido na condição de operação com tensão mínima no ponto dado a máxima potência reativa e fator de potência nulo;
- **X<sub>MAX</sub>**: equivalente ao valor da máxima reatância obtida na característica da 2ª zona; e

- **Inc.:** Valor do segundo ponto da curva PQ para  $P = 1$  pu. Paiva [4] sugere um valor mínimo de 10%, equivalente a um ângulo de  $84^\circ$ . Recomenda-se que seja utilizado um valor máximo de até 25%, equivalente a um ângulo de  $75^\circ$  na curva PQ.

#### 4.0 DESLOCAMENTO DA CURVA NO PLANO PQ

O exemplo abaixo ilustra a coordenação estática do UEL com o relé 40 para a tensão terminal nominal e a mínima tensão operativa. São apresentadas as curvas do UEL com o ajuste de  $K1 = K2 = 0$  (Figura 4) e com o ajuste  $K1 = K2 = 2$  (Figura 5). Os critérios de ajustes do UEL são aqueles apresentados na Tabela 1. Foi aplicada uma folga de 10% para a coordenação estática com o relé 40 e uma inclinação de  $75^\circ$  no ajuste da curva do UEL.

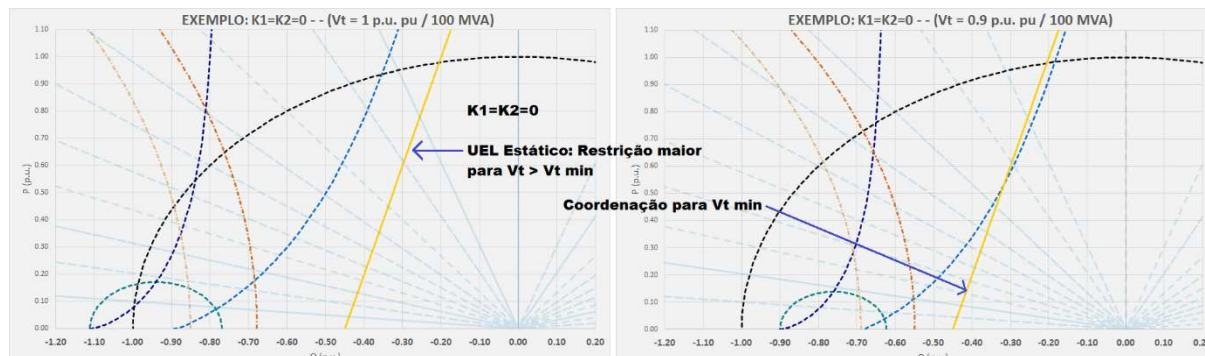


Figura 4. Coordenação do UEL com o relé 40 para  $K1 = K2 = 0$ .  $V_t = 100\%$  (esquerda) versus  $V_t = 90\%$  (direita).

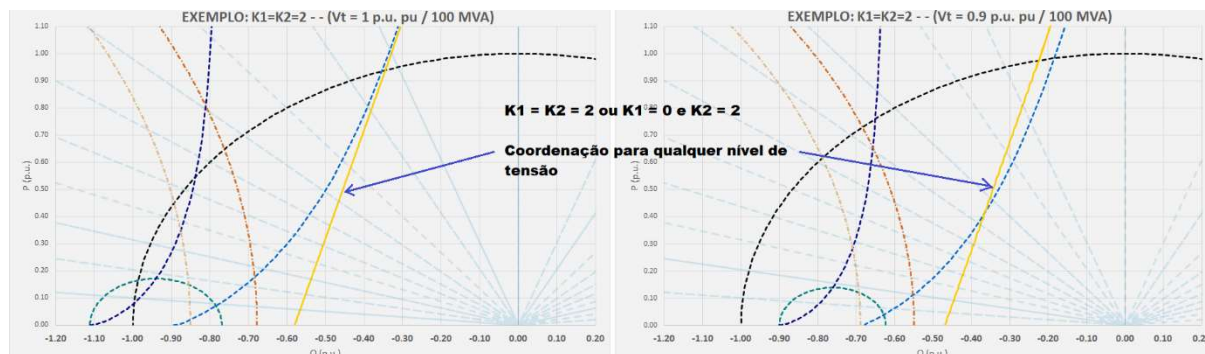


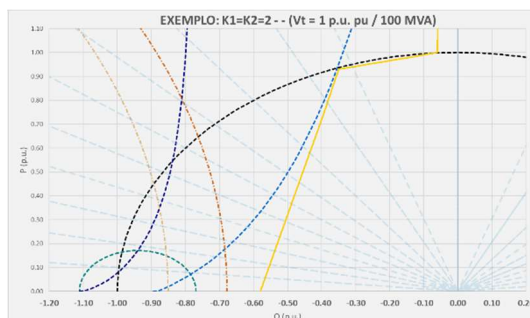
Figura 5. Coordenação do UEL com o relé 40 para  $K1 = K2 = 2$ .  $V_t = 100\%$  (esquerda) versus  $V_t = 90\%$  (direita).

Observa-se a importância de sempre avaliar a coordenação para o nível de tensão mínima operativa da MS. No caso do UEL com o fator  $K2$  nulo, há uma restrição operativa maior na região de subexcitação em relação ao ajuste para  $K2 = 2$  para a tensão terminal nominal. Caso a curva do UEL para  $K2$  nulo fosse ajustada de forma semelhante ao da curva do UEL para  $K2 = 2$ , haveria uma descoordenação quando a máquina operasse com a mínima tensão terminal. O fator  $K2 = 2$  permite explorar melhor os limites operativos da MS na região de subexcitação, preservando a coordenação estática com o relé 40, que é a característica correta de sintonia do UEL.

Vale ressaltar que os comportamentos do ajuste híbrido ( $K1=0$  e  $K2=2$ ) e do ajuste com  $K1=K2=2$  são similares quando se utiliza apenas dois pontos com uma inclinação superior a  $75^\circ$  no ajuste da curva do UEL. A principal discrepância é obtida quando se ajusta o UEL para proteger o estator, conforme será visto adiante.

#### 5.0 PROBLEMAS DO AJUSTE DO UEL VISANDO A PROTEÇÃO DO ESTATOR

A IEEE 421.5-2016 [1] especifica modelos para o SCL, que tem como função limitar a corrente terminal da MS, evitando seu sobreaquecimento. Devido a preferências metodológicas, este limitador muitas vezes não é habilitado no controle do RT, optando-se pelo UEL no desempenho dessa função, conforme ilustrado no exemplo dado da Figura 6.

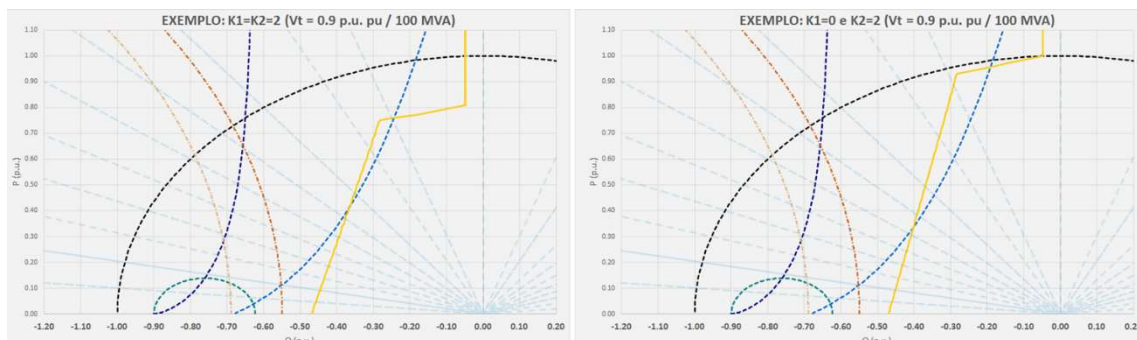


**Figura 6. Ajuste do UEL protegendo o estator.**

Tal estratégia peca ao impor uma limitação demasiadamente restritiva na região de subexcitação, além de prejudicar a ação desse limitador nessa região, como será analisado a seguir.

#### 5.1 UEL PROTEGENDO O ESTATOR - RESTRIÇÃO OPERATIVA

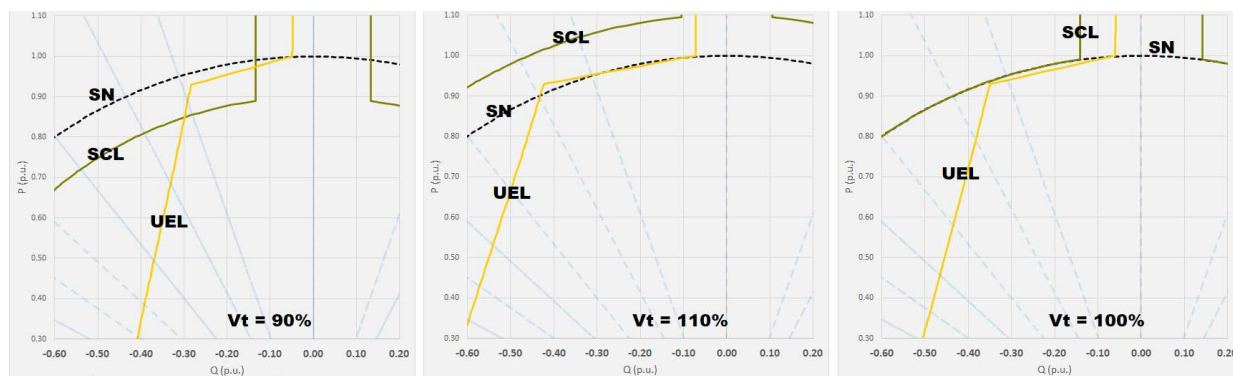
A “quebra” na curva da tabela PQ do UEL visando à proteção do estator, quando modulada pelo fator  $K1 = 2$ , restringe demasiadamente a operação subexcitada à medida que a tensão terminal é reduzida. Tal problema é apresentado na Figura 7, em que se compara a restrição operativa com a tensão reduzida de 90% com  $K1=K2=2$  e a opção híbrida.



**Figura 7. Curva de capacidade com  $V_t = 90\%$ . Comparação da Restrição do UEL com  $K1 = K2 = 2$  (esquerda) versus a opção híbrida (direita).**

Observa-se uma restrição exacerbada a partir de 75% da potência ativa no caso de  $K1 = K2 = 2$ , algo que não ocorre com a solução híbrida.

Mesmo o UEL na opção híbrida não garante o valor correto da corrente do estator em toda a faixa operativa do gerador. O exemplo abaixo ilustra o UEL ajustado protegendo o estator para a corrente terminal de 1pu comparado com o SCL ajustado para proteger o estator em 1pu.



**Figura 8. Curva de Capacidade - Comparação da opção híbrida do UEL com o SCL.**

O ajuste híbrido do UEL fica subdimensionado para tensão terminal  $< 100\%$  e sobre dimensionado para tensão terminal  $> 100\%$ . Ressalta-se que o UEL de impedância ( $K1=K2=2$ ) tem um comportamento contrário, ficando sobredimensionado para tensão terminal  $< 100\%$  e subdimensionado para tensão  $> 100\%$ , conforme a Figura 9.



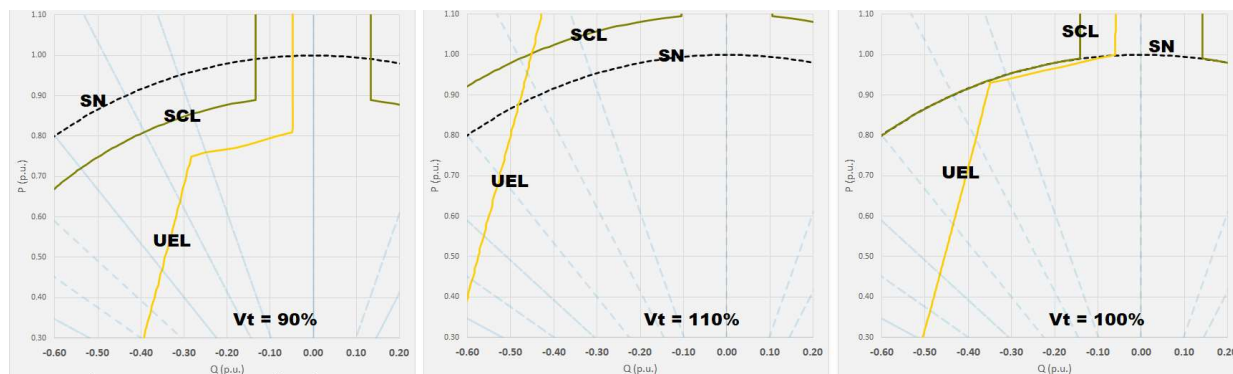


Figura 9. Curva de capacidade - Comparação do UEL de impedância (com  $K1 = K2 = 2$ ) versus o SCL.

Ou seja, nenhum dos dois ajustes é capaz de restringir de forma adequada o valor correto da corrente do estator como o SCL faz. Isso prejudica uma limitação adequada da corrente do estator e inviabiliza uma correta coordenação com a proteção térmica do estator (ANSI – 49). A única forma de se ter uma limitação de corrente estatórica por meio do UEL seria o ajuste do limite como corrente ( $K1=K2=1$ ), o que por sua vez prejudicaria a coordenação com o relé 40. Além disso, há um problema adicional na dinâmica da operação deste limitador quando ajustado dessa forma.

## 5.2 UEL PROTEGENDO O ESTATOR – PROBLEMA DINÂMICO

Quando se trata de limitar a corrente estatórica por meio do UEL, o último segmento da tabela de pontos passa a ser fundamental, uma vez que, neste contexto, este é ajustado de forma a tangenciar a curva do SCL. Portanto, para que tal aspecto seja alcançado, o último segmento deve ter um ângulo pequeno em relação ao eixo PQ. A consequência desse ajuste é que, para pequenas excursões da potência ativa, haverá grandes excursões na referência de potência de reativa para a atuação do limitador UEL.

Na Figura 10 é ilustrado esse problema, onde uma variação de 6% da potência ativa refletirá em uma variação de 25% na referência de potência reativa. Esta característica resultará em dinâmicas oscilatórias em regimes transitórios que podem até ser instáveis.

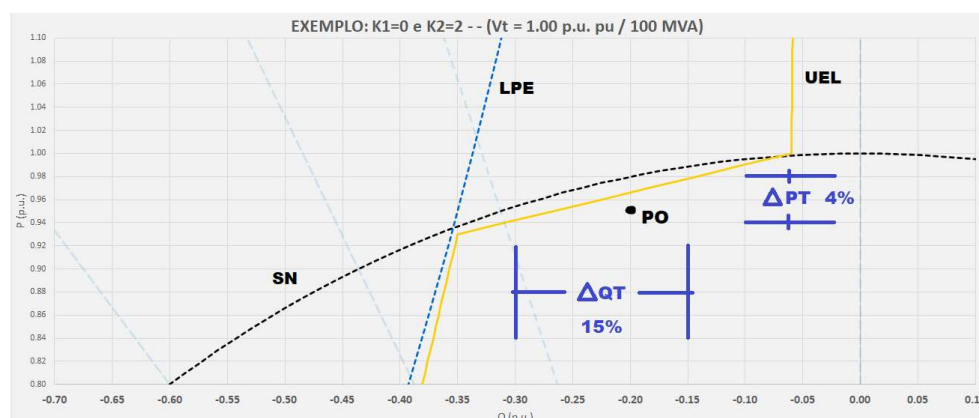


Figura 10. Problema do ajuste do UEL protegendo o estator – Variação da potência reativa em função da variação da potência ativa.

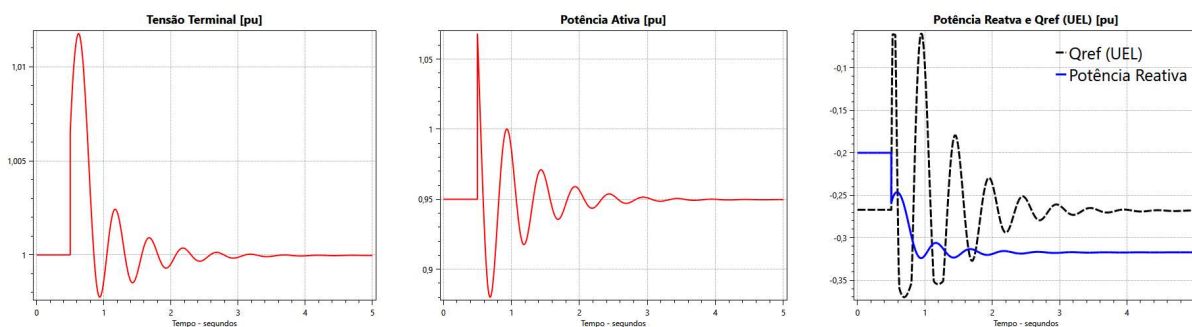
Para ilustrar e ajudar a descrever tal problema, apresentam-se algumas simulações da MS operando no ponto de operação  $P = 95\%$  e  $Q = -20\%$  (PO da Figura 10). A curva do UEL foi parametrizada conforme a Tabela 2:

Tabela 2 - Tabela de pontos do UEL para a simulação

P (pu)	Q (pu)
0	-0,58
0,93	-0,35
1	-0,05
2	-0,05

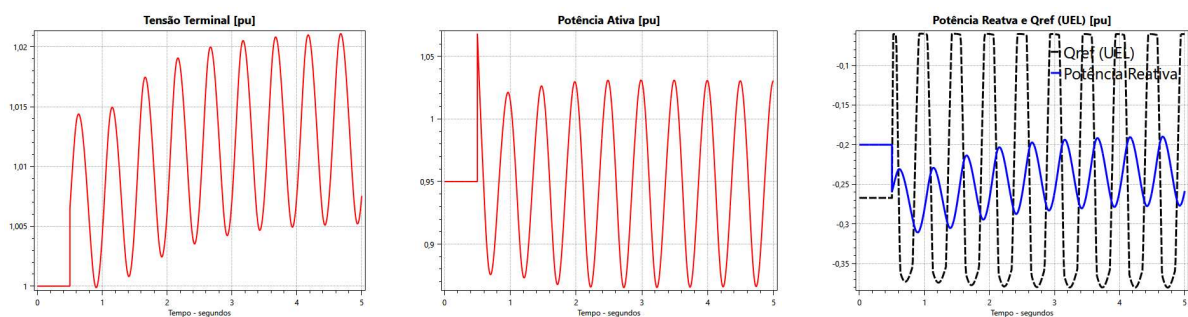
O evento simulado consiste em uma manobra típica da operação, que é o fechamento de uma linha de transmissão. O cenário simulado é da máquina versus barra infinita. Ressalta-se que a função estabilizadora, dada pelo PSS [1] do RT, encontra-se desabilitada.

A primeira simulação é dada para o UEL desabilitado. O objetivo é avaliar o comportamento da referência interna do UEL na saída do bloco tabela (Variável Qref da Figura 11).



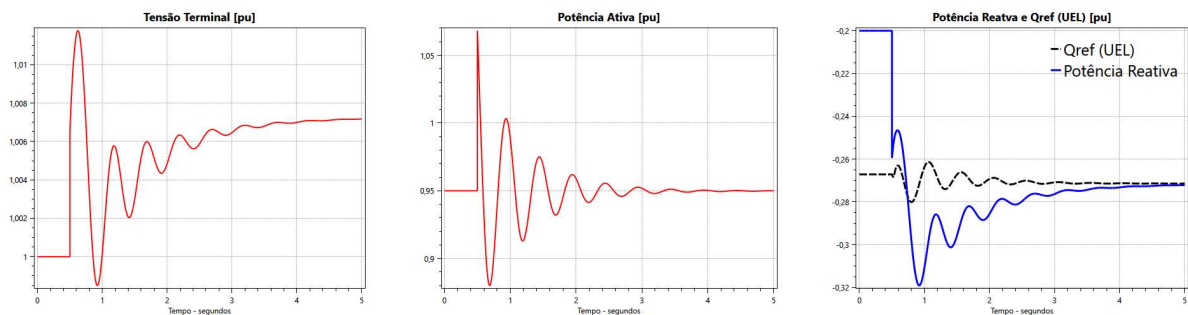
**Figura 11. Simulação com o UEL desabilitado. Análise de Qref (UEL).**

Observa-se que é um transitório amortecido, onde a unidade passa a absorver um pouco mais de reativo. É interessante observar a referência do UEL (Qref). É uma referência oscilatória que vai compor o erro que será usado pela malha de controle do UEL. É exatamente essa referência oscilatória a causa do problema da simulação da Figura 12, em que se apresenta o resultado quando o UEL é habilitado com o ajuste da curva protegendo o estator.



**Figura 12. Simulação com o UEL habilitado. Instabilidade devido a Qref (UEL).**

Ressalta-se que essa instabilidade é causada exclusivamente pelo ajuste da curva do UEL. Para demonstrar isso, apresenta-se uma alternativa para mitigar esse problema, que é aumentar o ajuste do filtro da medição de potência ativa do UEL (Parâmetro Tup – Figura 1). Na Figura 13 é ilustrado o resultado alterando apenas o filtro do Tup para 1 s.



**Figura 13. Simulação com o UEL habilitado com filtro de medição na potência ativa do UEL.**

Observa-se que a resposta foi estável ao filtrar a variável da potência ativa. A estratégia de ajustar a constante de tempo do filtro de medição da potência ativa é algo comum em diversos fabricantes de sistemas de excitação, que adotam valores da ordem de 1 segundo como padrão, independentemente da curva ajustada no UEL. Esse filtro é importante de sempre ser adotado com valores maiores que 1 segundo.

### 5.3 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO UEL PROTEGENDO O ESTATOR – TEMPOS DE RESPOSTA

O propósito do SCL é proteger o aquecimento do estator da MS que, por sua vez, aquece de forma lenta em um processo de sobrecarga. É comum que os SCL do RT possuam tempos de atuação e dinâmicas bem lentas, justamente para atender a esse propósito. A própria proteção ANSI-49, que coordena com o SCL, é uma proteção lenta de atuação. Já o UEL possui uma ação instantânea quando ocorre a ultrapassagem do seu limite de atuação. Ou seja, o UEL e SCL possuem características dinâmicas bem distintas, pois são objetivos diferentes conforme a concepção original desses limitadores.

A limitação instantânea da corrente do estator devido uma ação rápida do UEL, quando ajustado para tal finalidade, implica em uma restrição dinâmica adicional à operação da MS que, do ponto de vista sistêmico, não é interessante. Pois o sistema pode solicitar essa sobrecarga de forma transitória, e a MS poderia suprimir essa sobrecarga dentro dos limites operativos da própria MS. Caso essa sobrecarga permanecesse sustentada por um tempo elevado, o SCL traria a MS para um ponto de operação seguro, dentro da sua curva de capacidade, mas de forma lenta e coordenada com o relé 49. Ao impor uma correção instantânea pelo UEL na proteção do estator, o sistema de excitação impões um distúrbio adicional ao sistema de forma desnecessária. Outro ponto importante é que certos sistemas de excitação podem cortar a ação do estabilizador de sistemas de potência na atuação do UEL, prejudicando ainda mais a regulação de tensão.

## 6.0 CONCLUSÃO

O limitador de subexcitação deve ser utilizado visando apenas os limites de estabilidade do gerador. Quando necessário proteger o estator, deve-se habilitar o SCL para atender a esse objetivo. Conforme apresentado, há diversos efeitos indesejados ao ajustar o UEL visando à proteção do estator. Existe um problema dinâmico nessa estratégia, pois o ajuste do UEL implica numa referência oscilatória deste limitador quando ocorrerem distúrbios no sistema, podendo instabilizar o controle de tensão do gerador em certos casos. Foi apresentada uma solução simples para contornar esse problema dinâmico, mediante um ajuste elevado da constante de tempo do filtro de medição da potência ativa do UEL. Entretanto, tal estratégia não deve ser interpretada como solução para a aplicação do UEL para proteger o estator, pois há também o problema estático, pois o UEL não garante o valor exato da correção da corrente do estator para diferentes valores de tensão terminal, podendo causar uma restrição significativa e desnecessária do gerador na região de subexcitação. O limitador de corrente do estator está presente na maioria dos sistemas de excitação, sendo a melhor estratégia a ser usada para evitar uma sobrecarga no estator.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. IEEE Std 421.5-2016. IEEE Recommended Practice for Excitation System Models For Power System Stability Studies, 2016.
2. Mason, C. R. A New Loss of Excitation Relay for Synchronous Generators. AIEE Trans., vol. 68, pp. 1240-1245, 1949.
3. Berdy, J. Loss of Excitation Protection for Modern Synchronous Generator. IEEE Trans Power Apparatus and Systems, vol. 94, no. 5, 1457–1463, 1975.
4. PAIVA, Rafael Bertolini de. Influência dinâmica da máquina síncrona e do sistema de controle nas funções de proteção. UNIFEI, Março de 2019.





## DADOS BIOGRÁFICOS



Trabalha na REIVAX desde 2008 e é responsável pela pesquisa e desenvolvimento de sistemas de controle para geração de energia. Ele recebeu seu diploma de Mestre em Automação e Engenharia de Sistemas em 2013, com especialização na aplicação de estrutura de Controle Preditivo Modelo para sistemas de excitação e reguladores de turbina para usinas hidrelétricas. Ele se formou como Engenheiro de Controle e Automação em 2010.

### (2) RAFAEL BERTOLINI DE PAIVA

Graduado em Engenharia Elétrica pela UFSC, pós-graduado em Proteção de Sistemas Elétricos pela UNIFEI e mestre em Engenharia Elétrica pela UNIFEI. Atualmente, trabalha no Operador Nacional do Sistema Elétrico - ONS como Engenheiro de Estudos Elétricos. Suas áreas de atuação são: Análise de Transitórios Eletromecânicos, Análise da Estabilidade a Pequenos Sinais, Modelagem Matemática, Validação e Otimização de Controladores com ênfase nos sistemas de controle de tensão e de velocidade de usinas hidroelétricas, termoeletrônicas e de compensadores síncronos.

### (3) LUCAS EDUARDO DE SOUZA

Engenheiro eletricitista da REIVAX desde 2020, no setor de Estudos Especiais, atuando na área de ensaios de campo, modelagem e validação de modelos matemáticos de controladores, identificação de parâmetros de máquinas síncronas e simulações de transitórios eletromecânicos. Graduado em Engenharia Elétrica em 2020 pela UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina.

### (4) BRUNO MACIEL MACHADO

Bruno Maciel Machado é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) em 2021. Trabalha na REIVAX Automação e Controle desde 2019 com pesquisa e desenvolvimento de sistemas de controle e modelagem de sistemas elétricos para geração de energia.