

CONSIDERAÇÕES PRÁTICAS SOBRE O AJUSTE DA FUNÇÃO DE SOBRETENSÃO DE MÁQUINAS SÍNCRONAS E A INFLUÊNCIA DO SISTEMA DE EXCITAÇÃO

RAFAEL B. DE PAIVA

Reivax Automação e Controle S/A
Rod. José Carlos Daux N° 600. Tecnópolis | CEP: 88030-904 | Florianópolis | SC | Brasil
Telefone: +55 (48) 3027-3700 | Fax: +55 (48) 3027-3735
rafael.paiva@reivax.com

PAULO M. DA SILVEIRA

Universidade Federal de Itajubá – UNIFEI | Instituto de Sistemas Elétricos e Energia – ISEE
Campus UNIFEI - Av. BPS, 1303 | CEP 37500-903 | Itajubá | MG | Brasil
Telefone: +55 (35) 3629-1785
pmsilveira@unifei.edu.br

Abstract — The overvoltage function is essential for protecting any synchronous machine. Quite often, its adjustment is usually standardized by using typical recommended values. However, synchronous machines load rejections, operating overexcited, can cause a very significant instantaneous voltage deviation in the subtransient period. This instantaneous voltage deviation can cause a misoperation in the overvoltage function. However, standardized recommended adjustments do not consider this type of phenomenon in adjusting this function. This subtransient voltage deviation is intrinsic to the synchronous machine characteristics, and because of that, the overvoltage function should not act in this type of event. The article presents the calculation of this voltage deviation. The result of this calculation is used as the tuning criterion for the overvoltage function setting. Simulation studies to analyze the influence of the excitation system are also introduced. A real case is exhibited showing the problem and the solution applied.

Keywords — Overvoltage, Generator Protection, Synchronous Machines, Excitation Systems, Relay Misoperation

Resumo — A função de sobretensão é básica para a proteção de qualquer máquina síncrona. Muitas vezes, seu ajuste costuma ser padronizado por meio da adoção de valores típicos. Todavia, uma rejeição de carga da máquina síncrona operando sobre-excitada pode causar uma sobretensão no período subtransitório. Essa sobretensão é capaz de sensibilizar a função de sobretensão instantânea e, conseqüentemente, causar a sua atuação indevida. Ajustes padronizados não consideram esse tipo de fenômeno na recomendação do ajuste desta função. Essa sobretensão subtransitória é intrínseca à máquina síncrona e a função de sobretensão não pode atuar nesse tipo de evento. O artigo apresenta o cálculo desta sobretensão que é utilizado como critério para o ajuste da função de sobretensão. Simulações para análise da influência do sistema de excitação também são apresentadas. Um caso real de campo de atuação indevida e a solução adotada são discutidos ao final.

Palavras-chave — Sobretensão, Proteção do Gerador, Máquinas Síncronas, Sistema de Excitação, Atuação Indevida do Sistema de Proteção

1 Introdução

São diversos os motivos que podem causar sobretensões em uma Máquina Síncrona (MS). Alguns relacionados a falhas do sistema de excitação, outros a distúrbios causados por surtos, faltas, desligamentos ou manobras.

A função de sobretensão (ANSI 59) opera como proteção principal na situação de uma falha do sistema de excitação. Porém, nas demais situações, em que a sobretensão ocorre devido a um distúrbio na rede, a função 59 deve operar como retaguarda das proteções adjacentes ou de outras funções da própria MS.

Normalmente são utilizados dois estágios da função 59 para proteção de uma MS: um temporizado – 59T e outro instantâneo – 59I.

O ajuste desses dois estágios costuma ser padronizado e não é de praxe haver uma análise mediante estudos de transitórios eletromecânicos. Todavia, durante uma Rejeição de Carga (RC) da MS operando sobre-

excitada, pode ocorrer a sensibilização da função 59I e, conseqüentemente, a sua atuação indevida.

Essa sobretensão surge no período subtransitório da MS. O sistema de excitação não tem influência durante esse período, mas, dependendo da ação do Regulador de Tensão (RT), do tipo da excitatriz e das características da MS, a sobretensão pode ser agravada no período transitório.

Um ajuste adequado da função 59I pode ser obtido por meio de cálculos matemáticos para verificação da máxima sobretensão subtransitória que pode aparecer em uma RC. Essa análise é investigada nas seções 2, 3 e 4 do trabalho. A seção 5 apresenta um método para ajuste da função 59I.

Simulações de transitórios eletromecânicos podem auxiliar o projetista de proteção quanto às margens a serem aplicadas, principalmente para os casos em que são utilizadas excitatrizes rotativas pelo sistema de excitação. A influência do sistema de excitação é analisada na seção 6. Por fim, a seção 7 apresenta um caso real de atuação indevida da função de sobretensão durante uma RC, e a seção 8 as conclusões do trabalho.

2 Cálculo da Sobretensão Subtransitória em uma Rejeição de Carga

A sobretensão no instante subtransitório ocorre em uma RC da MS operando na condição sobre-excitada. Essa sobretensão pode ser calculada por meio das equações elétricas do estator que regem o comportamento dinâmico da MS (F.P. De Mello, 1986).

Assumindo-se os parâmetros da MS em $x''d = x''q$ e $rs = 0$ e dado um despacho no instante $t0-$ por: Vt_{0-} , P_{0-} e Q_{0-} , obtém-se, nesse ponto de operação, as seguintes condições dadas pelo conjunto de equações abaixo.

$$I_{t_{0-}} = \frac{(P_{0-} + jQ_{0-})^*}{Vt_{0-}} \quad (1)$$

$$E\dot{q}_{0-} = Vt_{0-} + jxq * I_{t_{0-}} \quad (2)$$

$$Id_{0-} = |I_{t_{0-}}| * \sin(\angle E\dot{q}_{0-} - \angle I_{t_{0-}}) \quad (3)$$

$$Iq_{0-} = |I_{t_{0-}}| * \cos(\angle E\dot{q}_{0-} - \angle I_{t_{0-}}) \quad (4)$$

$$Vd_{0-} = Vt_{0-} * \sin(\angle E\dot{q}_{0-}) \quad (5)$$

$$Vq_{0-} = Vt_{0-} * \cos(\angle E\dot{q}_{0-}) \quad (6)$$

$$\varphi''d_{0-} = Vq_{0-} + x''d * Id_{0-} \quad (7)$$

$$\varphi''q_{0-} = Vd_{0-} - x''d * Iq_{0-} \quad (8)$$

Em que:

Vt = Tensão terminal do estator

It = Corrente terminal do estator

P = Potência ativa

Q = Potência reativa

Eq = Tensão interna de eixo em quadratura

Id = Corrente terminal de eixo direto

Iq = Corrente terminal de eixo em quadratura

Vd = Tensão terminal de eixo direto

Vq = Tensão terminal de eixo em quadratura

$\varphi''d$ = Fluxo subtransitório de eixo direto

$\varphi''q$ = Fluxo subtransitório de eixo em quadratura

A sobretensão subtransitória ocorre no instante $t0+$. O fluxo subtransitório de eixo direto e o de quadratura não sofrem uma variação instantânea de $t0-$ para $t0+$, assim sendo:

$$\varphi''d_{0+} = \varphi''d_{0-} \quad (9)$$

$$\varphi''q_{0+} = \varphi''q_{0-} \quad (10)$$

As tensões de eixo direto e de quadratura podem ser reescritas em função dos fluxos:

$$Vq_{0+} = \varphi''d_{0-} \quad (11)$$

$$Vd_{0+} = \varphi''q_{0-} \quad (12)$$

Logo:

$$Vq_{0+} = Vq_{0-} + x''d * Id_{0-} \quad (13)$$

$$Vd_{0+} = Vd_{0-} - x''d * Iq_{0-} \quad (14)$$

O delta da tensão terminal (ΔVt) é a diferença de Vt nos períodos $t0+$ e $t0-$:

$$\Delta Vt = \sqrt{Vq_{0+}^2 + Vd_{0+}^2} - \sqrt{Vq_{0-}^2 + Vd_{0-}^2} \quad (15)$$

Substituindo (14) → (15):

$$\Delta Vt = \sqrt{(Vq_{0-} + x''d * Id_{0-})^2 + (Vd_{0-} - x''d * Iq_{0-})^2} - \sqrt{(Vq_{0-})^2 + (Vd_{0-})^2} \quad (16)$$

A sobretensão subtransitória de Vt após a RC é dada por:

$$Vt_{0+} = Vt_{0-} + \Delta Vt \quad (17)$$

A função 59I deve ser ajustada de modo que não atue nos eventos de RC.

3 Exemplo de Cálculo da Sobretensão Subtransitória em uma RC

A magnitude da sobretensão no período subtransitório é calculada nos exemplos de RC para três tipos de MS (MS1, MS2 e MS3). Os parâmetros da MS estão declarados na Tabela 1. Somente os parâmetros xq e $x''d$ da MS são necessários para este cálculo.

Tabela 1. Parâmetros da MS

Parâmetro	MS1	MS2	MS3
xq	0,8	0,8	0,8
$x''d$	0,15	0,25	0,35

A reatância xq interfere na quantidade de corrente de eixo direto e quadratura que a unidade rejeita. Assim, manteve-se o mesmo valor de xq para todas as máquinas, sendo que apenas o parâmetro $x''d$ é diferente entre elas.

As equações (1) a (17) foram usadas em uma planilha Excel. Os resultados das RC em dois pontos de operação são apresentados na Tabela 2 e na Tabela 3.

Tabela 2. RC com FP = 0,0 e $Vt = 1,0$ pu

Despacho	Vt	P	Q
	1	0	0,6
Cálculo	MS1	MS2	MS3
Id_{0-}	0,600	0,600	0,600
Iq_{0-}	0,000	0,000	0,000
Vd_{0-}	0,000	0,000	0,000
Vq_{0-}	1,000	1,000	1,000
Vd_{0+}	0,000	0,000	0,000
Vq_{0+}	1,090	1,150	1,210
ΔVt	0,090	0,150	0,210
Vt_{0+}	1,090	1,150	1,210

Tabela 3. RC com FP=0,9 e $Vt = 1,05$ pu

Despacho	Vt	P	Q
	1,05	0,8	0,6
Cálculo	MS1	MS2	MS3
Id_{0-}	0,815	0,815	0,815
Iq_{0-}	0,492	0,492	0,492
Vd_{0-}	0,394	0,394	0,300
Vq_{0-}	0,973	0,973	0,973
Vd_{0+}	0,320	0,271	0,128
Vq_{0+}	1,096	1,177	1,259
ΔVt	0,091	0,158	0,247
Vt_{0+}	1,141	1,208	1,297

Nota-se que quanto maior for o parâmetro $x''d$ da MS, maior é a sobretensão, que também varia de acordo com o ponto de operação da unidade.

4 Cálculo da Máxima Sobretensão Subtransitória

A máxima sobretensão subtransitória ocorrerá com a MS operando sobre-excitada, com a tensão terminal no seu valor máximo permitido em regime (referência máxima do RT). Para saber qual é o valor de reativo máximo nesse ponto de operação, deve-se analisar a curva de capacidade delimitada pelo limitador térmico da máxima corrente de excitação do RT, também conhecido pela IEEE (IEEE 421.5, 2015) por *Over Excitation Limiter* (OEL).

Normalmente o ajuste do OEL térmico coincide com o limite térmico do rotor que, por sua vez, é determinado pela corrente de campo nominal da placa da MS. A corrente nominal de campo é dada nas condições nominais de potência ativa, reativa, de tensão terminal e de fator de potência. A curva do limite térmico obrigatoriamente cruza esse ponto nominal na curva de capacidade traçada para $V_t = 1$ pu. A variável equivalente à corrente de campo da MS é proporcional à variável da tensão interna de excitação, dada por E_i .

A Figura 1 é um exemplo de curva de capacidade que mostra o máximo de reativo com o qual a MS pode operar em regime na região de sobre-excitação, para $V_t = 1$ pu, pela atuação do OEL térmico do RT.

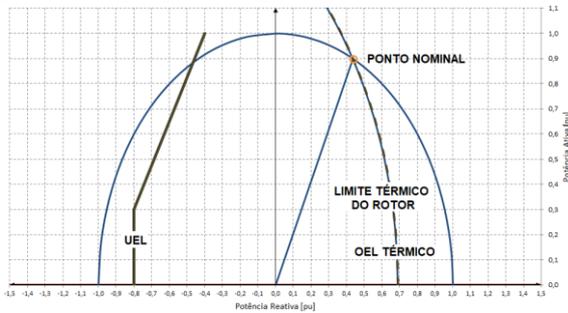


Figura 1. Curva de Capacidade: Aproximação do Limite Térmico do Rotor

As curvas do limite térmico do rotor e do OEL térmico, traçadas na curva de capacidade da Figura 1 acima, são uma representação teórica. Na prática, essa curva sofre a influência da saturação, que deve ser modelada para se obter o despacho correto. Caso contrário, o despacho ficará sobre dimensionado.

A representação da saturação de uma MS de polos salientes pode ser representada por uma função exponencial concentrada na variável da tensão interna do modelo da MS. Para a modelagem utilizada, a variável é a $E^{\prime}q$. Para se obter o valor de E_i , deve-se seguir os seguintes passos, pelos quais primeiro calcula-se a tensão $E^{\prime\prime}q$:

$$E^{\prime\prime}q_0 = Vq_0 + x^{\prime\prime}_d * Id_0 \quad (18)$$

A tensão $E^{\prime}q$ é dada pela equação 19.

$$E^{\prime}q_0 = E^{\prime\prime}q_0 + (x^{\prime}_d - x^{\prime\prime}_d) * Id_0 \quad (19)$$

A tensão interna E é calculada pela equação 20.

$$E_0 = E^{\prime}q_0 - (x_d - x^{\prime}_d) * Id_0 = Vq_0 + x_d * Id_0 \quad (20)$$

Por fim, o cálculo da tensão interna de excitação é dado pela fórmula 21.

$$E_{i_0} = E_0 + Ag * e^{Bg * (E^{\prime}q_0 - 0,8)} \quad (21)$$

Nota-se pela equação 21 que, se a saturação for desprezada, E_i é equivalente a E . Nessa situação, o limite térmico do rotor seria estático na curva de capacidade para qualquer nível de tensão terminal, o que não é verdade, conforme será analisado adiante.

Ressalta-se que Ag e Bg são parâmetros de saturação da MS, sendo obtidos no ensaio da curva característica de saturação em vazio. A Figura 2 ilustra um exemplo de curva de saturação e o método para se obter esses parâmetros por meio das fórmulas 22 e 23.

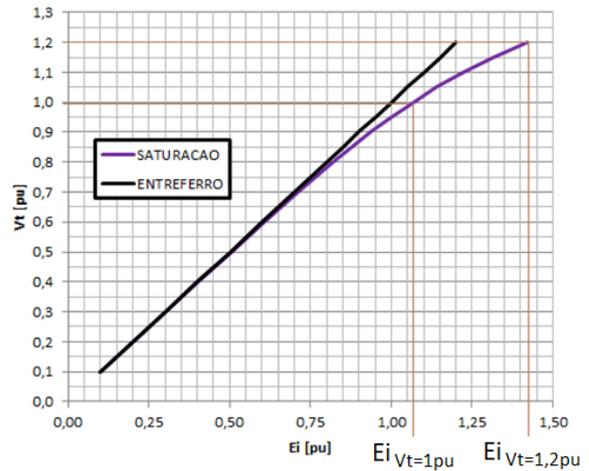


Figura 2. Exemplo de Curva de Saturação de uma MS

$$Ag = \frac{\left(\frac{E_{i_{V_t=1pu}} - 1}{E_{i_{V_t=1pu}}}\right)^2}{1,2 * \left(\frac{E_{i_{V_t=1,2pu}} - 1,2}{E_{i_{V_t=1,2pu}}}\right)} \quad (22)$$

$$Bg = 5 * \ln \left(\frac{1,2 * \left(\frac{E_{i_{V_t=1,2pu}} - 1,2}{E_{i_{V_t=1,2pu}}}\right)}{\left(\frac{E_{i_{V_t=1pu}} - 1}{E_{i_{V_t=1pu}}}\right)} \right) \quad (23)$$

Por fim, para se obter o despacho máximo de reativo no ponto de operação do OEL térmico são utilizadas as fórmulas 24 e 25 para o cálculo das potências ativa e reativa.

$$P = \frac{E * Vt}{xd} * \text{sen}(\delta) + \left(\frac{1}{xq} - \frac{1}{xd}\right) * \frac{Vt^2}{2} * \text{sen}(2 * \delta) \quad (24)$$

$$Q = \frac{E * Vt}{xd} * \text{cos}(\delta) - \left(\frac{1}{xq} + \frac{1}{xd}\right) * \frac{Vt^2}{2} + \left(\frac{1}{xq} - \frac{1}{xd}\right) * \frac{Vt^2}{2} * \text{cos}(2 * \delta) \quad (25)$$

4.1 Procedimento de Cálculo

Para o cálculo da máxima sobretensão, sugere-se o procedimento abaixo:

- I. Calcular E , E_i (equações 20 e 21) no ponto de operação nominal do gerador e o ângulo de carga (δ), que é equivalente ao ângulo de E_q da equação 2;

- II. Fixar V_t no seu valor máximo permitido em regime. Normalmente será um valor entre 1,05pu a 1,1pu;
- III. Calcular P e Q usando as fórmulas 24 e 25 partindo-se do δ e E calculados no passo I;
- IV. Calcular o valor de E_i para P e Q aplicando as fórmulas 1 a 8 e 18 a 21. Se o E_i calculado for igual ao E_i do passo 2, ir para o passo V, se não, aplicar um fator de redução em E nas fórmulas 24 e 25 até se obter o valor de E_i nominal;
- V. Verificar a sobretensão conforme a equação 17 para os valores de P e Q obtidos no passo IV;
- VI. Reduzir o valor de δ e repetir o procedimento a partir do Passo II até $\delta = 0$.

Com esse procedimento, é possível se obter a curva verdadeira da corrente do rotor no plano $P \times Q$ da curva de capacidade, assim como o valor da sobretensão para cada um desses pontos.

Para fins de ilustração, a Figura 3 apresenta a região de sobre-excitação de uma MS e os limites térmicos do rotor calculados usando as fórmulas apresentadas.

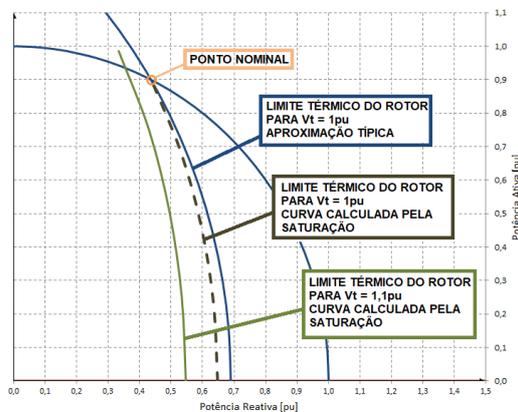


Figura 3. Curva de Capacidade: Cálculo do Limite Térmico do Rotor

Observa-se que a saturação restringe a região de operação sobre-excitada da MS. A curva em verde do limite térmico do rotor para $V_t = 1,1$ pu é a curva da qual se extrai os valores de P e Q para o cálculo da máxima sobretensão. Caso a saturação não seja considerada no equacionamento, a curva do limite térmico para $V_t = 1,1$ será exatamente a mesma curva do limite térmico do rotor para $V_t = 1$ pu, dada pela aproximação típica em azul.

5 Ajuste da Função 59I Considerando a Sobretensão Provocada pela Rejeição de Carga

O ajuste da função 59I deve ser maior que a máxima sobretensão calculada mais uma folga. A folga é importante, visto que, logo após a rejeição de carga, durante o período transitório, a MS tem sua tensão aumentada por mais alguns instantes até que o sistema de excitação atue. Essa dinâmica é analisada no item a seguir deste trabalho. Em alguns casos pode-se aplicar também uma pequena temporização para a função 59I.

Nesse contexto, o autor sugere, conforme a Tabela 4, alguns critérios para o ajuste da função 59I. Essas sugestões são dadas em função do tipo de excitatriz utilizada no sistema de excitação.

Tabela 4. Critérios para Ajuste da Função 59I

Excitatriz	Pick-up 59I + Folga	Temporização
Estática	$Máximo(V_{t_{0+}}) + 5\%$	1,0s
Estática	$Máximo(V_{t_{0+}}) + 10\%$	0,5s
Estática	$Máximo(V_{t_{0+}}) + 15\%$	0,0s
Rotativa	$Máximo(V_{t_{0+}}) + 5\%$	2,0s
Rotativa	$Máximo(V_{t_{0+}}) + 10\%$	1,0s
Rotativa	$Máximo(V_{t_{0+}}) + 15\%$	0,2s

Ressalta-se que, mesmo para os casos com pequeno $x''d$ que gerem uma baixa sobretensão subtransitória, há que se assumir sempre um valor mínimo de 125% para o ajuste da função 59I. Valores típicos estarão entre 130% a 150%.

6 Influência do Sistema de Excitação na Sobre-tensão no Transitório da Rejeição de Carga

O comportamento dinâmico no período transitório da MS após uma RC passa a ter influência do RT, da excitatriz e dos demais parâmetros da MS. Logo, a sobretensão é mitigada pela ação do RT em controle automático nesse período.

Para se analisar essa influência, é necessária a utilização de ferramentas computacionais para simulação dos efeitos dinâmicos.

A ferramenta utilizada para as simulações no presente trabalho foi o Matlab®. Foi realizada uma série de simulações para a análise do comportamento do sistema de excitação nas RC. Em todos os casos analisados, a MS modelada possuía as seguintes características:

$S_n = 100$ MVA; $V_n = 13,8$ kV; $FP_n = 0,85$; $x_d = 1$ pu; $x'_d = 0,3$ pu; $x''_d = 0,2$ pu; $x_q = 0,7$ pu; $x''_q = 0,2$ pu; $x_l = 0,12$ pu; $r_s = 0$; $T'_{do} = 5,0$ s; $T''_{do} = 0,05$ s; $T''_{qo} = 0,1$ s; $A_g = 0,018$; $B_g = 8,56$; $2H = 6,4$ s; $D = 0,1$ s.

6.1 Influência do Desempenho do Regulador de Tensão em Controle Automático na Rejeição de Carga

A primeira análise conduzida focou na comparação do desempenho de um RT com um ajuste de controle mais lento versus um ajuste com controle mais rápido. O controle do RT é do tipo Proporcional Integral (PI) com uma excitatriz estática, modelo ST4C (IEEE 421.5, 2015). O conversor de potência possui uma alimentação do tipo *bus-fed* e uma ponte de tioristor como semicondutor.

Na Figura 4 apresenta-se a resposta dinâmica de um degrau de 2% na referência de tensão do RT, da MS operando em vazio, para comparação do resultado do controle rápido versus lento.

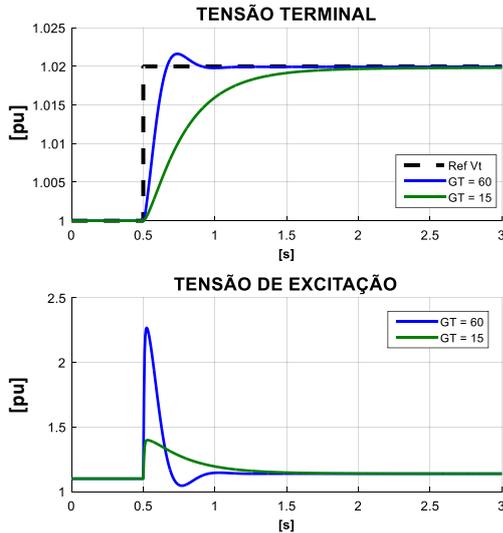


Figura 4. Desempenho do Degrau do RT Rápido versus RT Lento

Nota-se que o tempo de resposta é de 100ms para o RT rápido, que possui um Ganho Transitório (GT) de 60. O RT lento apresentou um tempo de resposta de 700ms para um GT de 15.

A Figura 5 apresenta o resultado da simulação de uma RC de 60% de reativo com FP nulo comparando-se o desempenho dos dois RT.

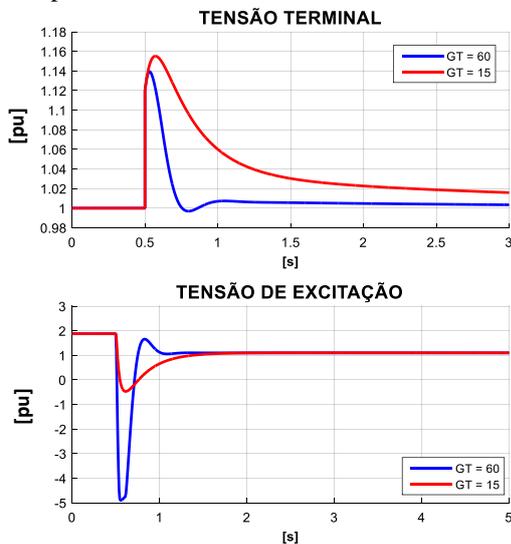


Figura 5. Desempenho da RC do RT Rápido versus RT Lento

Na Tabela 5 estão resumidos os principais resultados da simulação dessa RC.

Tabela 5. Resultado da RC. Desempenho do RT.

Parâmetro	Ganho Rápido	Ganho Lento
$V_{t_{0-}}$	100 %	100 %
$V_{t_{0+}}$	112 %	112 %
$t > V_{t_{0+}}$	0,08s	0,22s
Sobretensão	113,5 %	115,5 %

Obteve-se uma diminuição da sobretensão de 2% com um ajuste do controlador mais rápido. Porém, essa é uma análise muito relativa, uma vez que a comparação partiu de uma resposta muito lenta do RT.

Foi necessário aumentar o GT em quatro vezes para se obter um ganho marginal de 2%. Ou seja, o problema da sobretensão máxima nas RC não é agravado pela sintonia do controle de tensão.

Exceção ocorre somente se o controle de tensão do RT estiver muito ruim devido a problemas do equipamento ou a ajustes inadequados. No entanto, isso é facilmente detectado durante a fase de comissionamento do sistema de excitação ou por testes de desempenho.

6.2 Influência do Conversor de Potência: Tiristor versus IGBT

A influência da tecnologia utilizada no semicondutor do Conversor de Potência (CP) é analisada na simulação da Figura 6. Compara-se o resultado de uma RC de 60% de reativo com FP nulo de uma MS, com excitação do tipo estática, com um CP do tipo ponte de Tiristor versus um do tipo IGBT. O controle do RT é o mesmo para ambos os casos simulados e possui um GT equivalente de 60.

A diferença dinâmica entre essas duas tecnologias utilizadas nos CP está na capacidade de aplicação de uma tensão de excitação negativa.

O CP do tipo IGBT só opera com tensão de excitação positiva, visto que seu o funcionamento acontece por meio de um disparo do tipo PWM sobre uma tensão retificada de alimentação do próprio CP.

Por outro lado, o CP com ponte de tiristor opera tanto com tensão positiva como negativa, dependendo do ângulo de disparo que é aplicado aos tiristores. A capacidade de operação no quadrante negativo da tensão de excitação é conhecida pelo termo de *phase-back*.

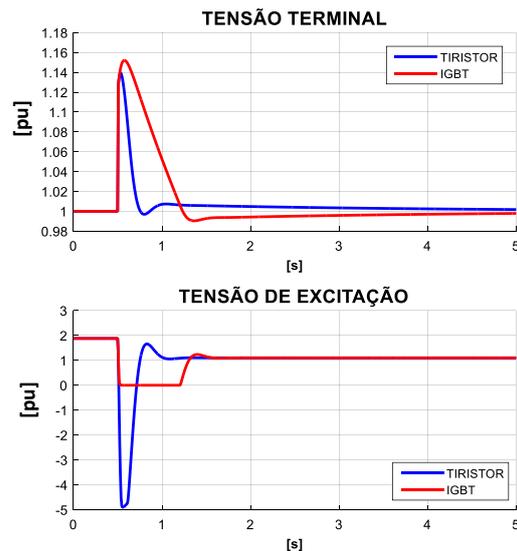


Figura 6. Desempenho da RC do RT com CP Tiristor x IGBT

Os principais resultados da simulação dessa RC estão resumidos na Tabela 6.

Tabela 6. Resultado da RC. Tiristor versus IGBT

Parâmetro	Tiristor	IGBT
$V_{t_{0-}}$	100 %	100 %
$V_{t_{0+}}$	112 %	112 %
$t > V_{t_{0+}}$	0,08s	0,23s
Sobretensão	113,5 %	115,0 %

O tempo de acomodação da tensão terminal é maior com o CP do tipo IGBT, mas observa-se que a troca do CP para tiristor agregou uma diminuição na sobretensão máxima de apenas 1,5%. É um ganho marginal que depende dos parâmetros da MS e do tipo de excitatriz, mas que não justifica a substituição de uma tecnologia por outra.

O CP do tipo IGBT é amplamente utilizado em MS de pequeno porte, típico de uma Pequena Central Hidrelétrica (PCH). A MS de uma PCH normalmente utiliza uma excitatriz rotativa do tipo *brushless* que, por sua vez, possui uma baixa corrente de excitação a plena carga. Para essa pequena corrente de excitação, o CP do tipo IGBT opera com mais precisão conforme a frequência de disparo do controle do RT. No caso dos tiristores, a corrente de ignição e manutenção é muito próxima da corrente a plena carga da excitatriz. Nesse caso, serão exigidos resistores de carga base para manutenção dos tiristores acesos, além de um CP customizado que pode onerar os custos com uma solução que não é padronizada e que não trará mais benefícios do ponto de vista da regulação.

6.3 Excitatriz Rotativa versus Excitatriz Estática

A última análise diz respeito ao impacto do tipo de excitatriz na tensão terminal durante uma RC. A simulação é feita pela comparação do desempenho de uma excitatriz estática com o de duas excitatrizes rotativas que, por sua vez, possuem uma constante de tempo (TE) de 0,3s (rápida) e 1,0s (lenta).

Ressalta-se que, na excitação do tipo rotativa, o RT necessita de uma compensação extra na sua estrutura de controle para compensar o atraso provocado pela excitatriz. Essa compensação é, tipicamente, uma estrutura de avanço de fase com o zero ajustado com um valor próximo da constante de tempo da excitatriz rotativa. Isso faz com que o GT do RT seja da ordem de cinco a dez vezes maior em relação ao GT do RT com uma excitatriz estática. No exemplo em questão, o GT das excitatrizes rotativas é oito vezes maior que o GT utilizado para o RT da excitatriz estática.

Na Figura 7 é apresentado o resultado da simulação, comparando-se o desempenho do tipo de excitatriz em uma RC de 60% de reativo com um FP nulo da MS. O semicondutor do CP utilizado é do tipo IGBT.

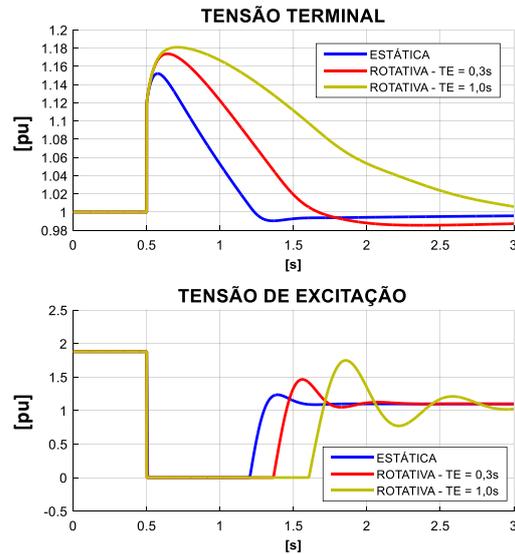


Figura 7. Desempenho da RC com Excitatriz Estática x Rotativa
Na Tabela 7 estão apresentados os resultados dessa simulação:

Tabela 7. Resultado da RC com Diferentes Excitatrizes

Parâmetro	Estática	Rotativa TE = 0,3s	Rotativa TE = 1,0s
$V_{t_{0-}}$	100%	100%	100%
$V_{t_{0+}}$	112%	112%	112%
$t > V_{t_{0+}}$	0,23s	0,51s	0,93s
Sobretensão	115%	117,4%	118,1%

O tempo de recuperação da tensão terminal e o valor da sobretensão são maiores com excitatriz rotativa. Esse valor de sobretensão é mais alto na medida em que a constante de tempo da excitatriz apresenta um valor mais elevado. Em virtude disso, sistemas de excitação do tipo rotativo necessitam de folga e temporização maiores para o *pick-up* da função 59I. É por isso que o critério de ajuste da função 59I, apresentado na Tabela 4, considera avaliar o tipo de excitatriz utilizado pelo sistema de excitação.

7 Exemplo de Campo – Atuação Indevida da Função 59I

7.1 Contexto do Caso

O caso apresentado é o da análise e solução da atuação indevida da função 59I que ocorria nos eventos de RC de uma MS de 1,0 MVA operando sobreexcitada. O sistema de excitação dessa unidade possui um CP do tipo IGBT e uma excitatriz rotativa.

Os ajustes utilizados para a função 59I da MS eram típicos, recomendados pelo próprio agente de geração, que os praticava rotineiramente na proteção de suas usinas, independentemente do porte, das características do gerador e/ou do sistema de excitação.

Por infortúnio dessa unidade em questão, a reatância x''_d era bastante elevada, sendo ela o fator causador da sobretensão que ocasionava as sucessivas atuações da função 59I.

Em virtude do desconhecimento, por parte do agente de geração, de que a proteção estava atuando indevidamente, a responsabilidade pela sobretensão era atribuída ao sistema de excitação.

Como se pode observar nas análises prévias, o sistema de excitação, em controle automático, não pode ser responsabilizado por uma atuação indevida da função 59I pelo sistema de proteção nas RC da MS que opera sobre-excitada.

Essas atuações sucessivas estavam causando diversos ônus, entre eles: indisponibilidade da geração, devido ao bloqueio da MS por uma atuação indevida da proteção; custos de alocação da equipe para investigação do problema; e transtornos com o fabricante do sistema de excitação, que recebia o ônus pela atuação indevida da função de proteção.

7.2 Causa da Atuação Indevida - Análise da Sobretensão no Período Subtransitário

Os registros de campo das **Figura 8** e **Figura 9** são de dois ensaios de RC sobrepostos. Em preto, está o ensaio com o desligamento do sistema de excitação pela atuação da função 59I e, em azul, o da RC após o reajuste da função 59I, sem que ela atuasse desligando o sistema de excitação.

Em ambos os casos, as RC foram realizadas em um ponto de operação próximo para fins de comparação dos registros.

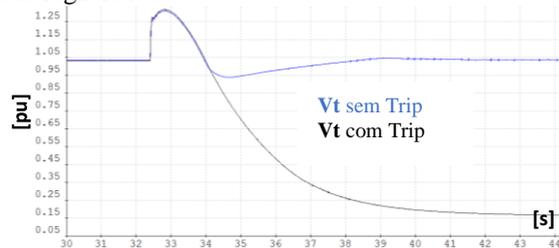


Figura 8. Tensão Terminal com Trip (Preto) e sem Trip (azul) pela Função 59I



Figura 9. Tensão de Excitação (Vex) com Trip (Preto) e sem Trip (Azul) pela Função 59I

Como se pode observar, tanto na situação em que ocorre o desligamento do sistema de excitação pelo Trip da função 59I como no caso em que a MS permanece em controle, a sobretensão é equivalente.

Essa sobretensão independe do sistema de excitação, ocorrendo exclusivamente pelo alto valor da impedância subtransitória da MS.

O atraso da excitatriz rotativa apenas prolonga essa sobretensão na recuperação da tensão terminal pelo controle de tensão.

A **Figura 10** é a aplicação de um *zoom* no período subtransitário para avaliação do salto que a tensão terminal dá logo após a RC que, nesse caso, é de 23%.



Figura 10. Zoom da Tensão Terminal – Análise do Período Subtransitário

O ajuste original da função 59I estava em 120% com uma temporização nula. Esse ajuste típico que o agente de geração aplicava em suas unidades geradoras era inviável para essa unidade em questão.

Na oscilografia da **Figura 11**, é possível observar que a atuação do 59I ocorre exatamente 13ms após a abertura do disjuntor, devido à sobretensão do período subtransitário da MS.

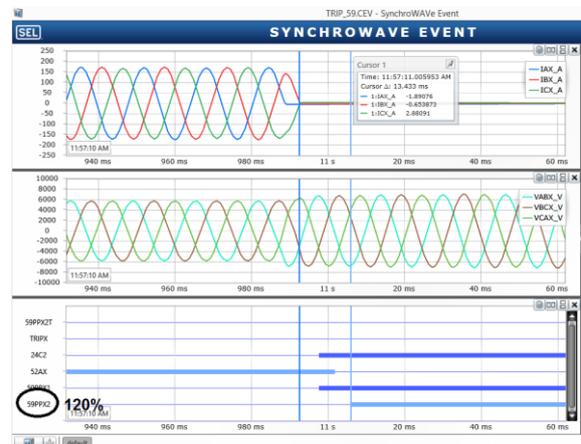


Figura 11. Oscilografia do TRIP pela Função 59I

7.3 Reajuste da Função 59I – Análise da Sobretensão no Período Transitório da Rejeição de Carga

Na oscilografia da **Figura 12** nota-se que, 400ms após a RC, a unidade atinge um valor máximo de sobretensão de 131%. Esse valor equivale a um acréscimo de 5% em relação ao valor da sobretensão causada no período subtransitário.

Esse incremento ocorre devido aos efeitos dinâmicos construtivos da MS, associados ao atraso da excitatriz, que prejudica a recuperação da tensão terminal pelo controle do RT.

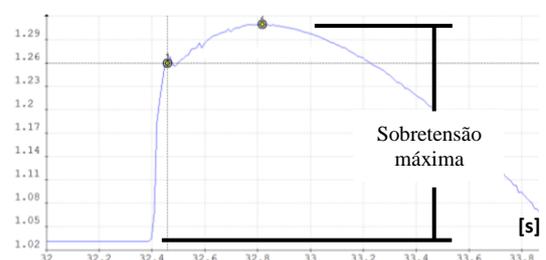


Figura 12. Tensão Terminal. Sobretensão Máxima da RC

Conforme analisado no decorrer do artigo, as ações práticas para minimizar essa sobretensão são desprezíveis. É possível obter-se um ganho marginal da ordem de 2% que não justifica qualquer esforço para alterações do RT ou do CP.

A única solução cabível é o reajuste da função 59I, que deve ser readequada para não atuar nos eventos de RC que originam essa sobretensão.

Observa-se pelo gráfico da Figura 13, entre os pontos 1 e 2 destacados, que a unidade permanece com uma tensão acima de 130% por 300ms. Portanto, um ajuste com um *pick-up* em 130% e uma temporização de 1s passariam a evitar as atuações indevidas da função 59I. Outros ajustes poderiam ser empregados, mas optou-se por um valor mais baixo e temporizado do *pick-up*.

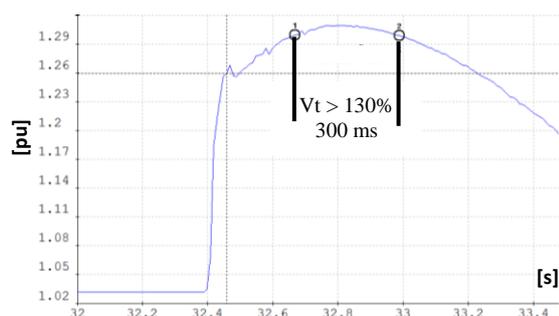


Figura 13. Tensão Terminal. Análise do Período Transitório

A Tabela 8 apresenta o ajuste original e o novo da função 59I.

Tabela 8. Reajuste da Função 59I

Parâmetro	Original	Novo
59I <i>Pick-up</i>	120%	130%
59I Temporização	0s	1,0s

8 Conclusão

A função 59 é básica para a proteção de qualquer MS. Seu ajuste costuma ser padronizado com valores típicos. Todavia, durante uma RC da MS operando sobreexcitada, pode ocorrer a sensibilização da função 59I e, conseqüentemente, a sua atuação indevida. Muitas vezes o ajuste típico não prevê esse tipo de situação.

A sobretensão, que aparece no período subtransitório, é uma característica intrínseca da MS. É a impedância subtransitória $x''d$, associada à carga rejeitada pela MS, que causa essa sobretensão.

A sobretensão nesses casos independe do sistema de excitação, do desempenho do RT e/ou da tecnologia do CP. Qualquer alteração no sistema de excitação tem impacto marginal no valor máximo da sobretensão observada no período transitório da RC.

A proteção 59I deve ser calculada para que não atue nos eventos de RC. Foi apresentada uma metodologia de cálculo que ajudará o projetista de proteção a definir o melhor ajuste para essa função, evitando-se, assim, possíveis desligamentos indevidos.

O esclarecimento e a solução desse tipo de problema também são fundamentais para evitar:

- Indisponibilidade da MS pelo bloqueio causado por uma atuação indevida do sistema de proteção;
- Custos de alocação de recursos para investigação e solução do problema;
- Transtornos com o fabricante do sistema de excitação que, muitas vezes, recebe o ônus pela atuação indevida da função de sobretensão.

Referências Bibliográficas

- F.P. De Mello, and L.N. Hannett, "Representation of saturation in synchronous machines", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWRS-1, No. 4, Nov. 1986, pp. 8-18.
- IEEE Std 421.5™-2015, "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies". IEEE, New York, 2015.
- IEEE Std C37.102-1995, IEEE Guide for AC Generator Protection, IEEE, New York, 1996.
- Mason, C. R. "The Art and Science of Protective Relaying", John Wiley & Sons, Inc., New York, London, Sydney, 1967.
- Elmore, W.A. "Protective Relaying Theory and Applications", Second Edition, Marcel Dekker, INC. New York, 2004.