

ANÁLISE DAS INFLUÊNCIAS DE VARIAÇÕES NOS GANHOS E CONSTANTES DE TEMPO EM UM REGULADOR DE FATOR DE POTÊNCIA UTILIZANDO O ATP-EMTP

M.J.B.B. Davi, J.R.C de Almeida, C. B. dos Santos, F. A. M. Moura

Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Departamento de Engenharia Elétrica, Uberaba- Minas Gerais, moisesjr20@hotmail.com, julianaramosca@hotmail.com, caio.borgess@hotmail.com, fabricao@eletrica.ufm.edu.br

Resumo – O objetivo deste trabalho consiste em analisar a influência dos ganhos e constantes de tempo em um regulador de fator de potência. Este regulador foi modelado utilizando-se da rotina TACS do “ATP-EMTP – Alternative Transients Program”. Tal regulador será conectado a uma máquina síncrona de um produtor independente e, posteriormente, serão observados os comportamentos da velocidade da máquina em regime permanente, tensão eficaz no PAC (ponto de acoplamento comum) e o fator de potência no PAC. Por fim, serão realizadas as devidas conclusões sobre a influência dos ganhos e constantes de tempo para o regulador de fator de potência, buscando um sistema que se comporte da forma mais estável possível, levando-se em consideração as normas relacionadas à inserção de geradores distribuídos no sistema elétrico.

Palavras-Chave – Geração distribuída, Regulador de Fator de Potência, Sistemas de Controle de excitação, Estabilidade Transitória, Geração Independente, Sistema de Distribuição de Energia.

ANALYSIS OF THE INFLUENCES OF CHANGES IN GAINS AND TIME CONSTANTS IN A POWER FACTOR REGULATOR USING THE ATP-EMTP

Abstract - The objective of this document is to carry out analysis of the influence of the gains and time constants in a control system of a Power Factor Regulator that was modeled using the TACS routine “EMTP – ATP – Alternative Transients Program”. This regulator will be connected in a synchronous machine of an independent power producer, and later, the behavior of machine speed, the effective voltage in system and power factor will be observed at the PCC (common coupling point). Finally, be certain the influence of gains and time constants for the power factor regulator, seeking a system that behaves more stable as possible, taking into consideration the rules related to the insertion of a distributed generator in power system.

Keywords – Distributed generation, Power Factor Regulator, Excitation Control Systems, Transient Stability, Independent Power Generation, Power Distribution System.

I. NOMENCLATURA

- K_a ganho do regulador.
- K_e constante de excitação relacionada com a auto-excitação do campo.
- K_f ganho de tempo do circuito estabilizante do regulador.
- T_a constante de tempo amplificada do regulador.
- T_r constante de tempo do filtro de entrada do regulador.
- T_e constante de tempo da excitatriz.
- T_f constante de tempo do estabilizador do regulador.
- E_f tensão de campo (pu).
- S_n potência aparente nominal.
- U_n tensão nominal.
- R_a resistência de armadura (pu).
- x_L reatância de dispersão da armadura (pu).
- x_d reatância de eixo direto (pu).
- x_q reatância de eixo de quadratura (pu).
- x'_d reatância transitória de eixo direto (pu).
- x'_q reatância transitória de eixo de quadratura (pu).
- x''_d reatância subtransitória de eixo direto (pu).
- x''_q reatância subtransitória de eixo de quadratura (pu).
- x_o reatância de sequência zero (pu).
- T'_{d0} constante de tempo de curto-circuito, transitória de eixo direto (s).
- T'_{q0} constante de tempo de curto-circuito, transitório de eixo de quadratura (s).
- T''_{d0} constante de tempo de curto-circuito, subtransitória de eixo direto (s).
- T''_{q0} constante de tempo de curto-circuito, subtransitória de eixo de quadratura (s).
- H = momento de inércia (10^6 Kg.m²).
- P = número de polos.
- f = frequência (Hz).
- ω = velocidade síncrona em (rad/s).
- G = ganho do flyball.
- T_{fb} = constante de tempo do flyball.
- T_1 = primeira constante de tempo do sistema de controle.
- T_2 = segunda constante de tempo do sistema de controle.
- T_3 = terceira constante de tempo do sistema de controle.
- T_4 = constante de tempo de partida da água (turbina hidráulica).
- T_5 = constante de tempo da turbina (hidráulica ou térmica).

II. INTRODUÇÃO

Constata-se que devido à reestruturação do setor energético brasileiro, no que tange as formas e fontes de geração de energia elétrica, há uma sensível preocupação com a geração distribuída nos últimos anos.



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

Além do considerável aumento da geração proveniente das usinas de álcool e açúcar, observa-se também uma tendência de crescimento da geração independente diretamente conectada ao sistema elétrico nacional. Grande parte desses geradores está operando de forma paralela ao sistema de uma concessionária de energia local no nível de média ou baixa tensão.

Com isso, surge a necessidade de se entender e estudar melhor as influências dessa tendência nas redes de distribuição de energia elétrica. Dentre as principais análises, destaca-se o monitoramento dos níveis de tensão e fator de potência no ponto de acoplamento comum, após a inserção do gerador independente.

Para que se tenha um maior controle de tais níveis citados anteriormente, são utilizados alguns tipos de reguladores de excitação da máquina síncrona, sendo necessário também o controle de todos os parâmetros desses reguladores para que o sistema não atinja instabilidade ou funcione de uma maneira não esperada.

Mediante as discussões anteriormente apresentadas, com foco principal na busca de alternativas para as problemáticas que a reestruturação no sistema elétrico pode apresentar, neste artigo serão analisados os parâmetros de um regulador de fator de potência e suas influências na velocidade da máquina síncrona, fator de potência e nível de tensão eficaz no PAC diante da inserção de uma unidade de geração distribuída.

III. MODELAGEM DO SISTEMA

A. Regulador de Fator de Potência

Os reguladores de fator de potência, nada mais são que reguladores que agem a fim de manter um valor pré-determinado de fator de potência, ou potência reativa, nos terminais da máquina síncrona. É importante ressaltar que, em períodos transitórios, este regulador não fornece o aumento de excitação necessário para responder a uma queda de tensão no sistema, papel este que fica para os reguladores de tensão [1].

Apesar de terem funcionalidades distintas, ou seja, as grandezas medidas serem diferentes, os reguladores de tensão e fator de potência são bastante similares. Com isso, pode-se utilizar dos modelos de reguladores de tensão para representar os reguladores de fator de potência, lembrando-se que a grandeza medida passa de tensão para fator de potência ou potência reativa. A Figura 1 mostra o modelo de regulador chamado tipo I, que é um dos mais completos e recomendado pelo IEEE, este que será utilizado neste trabalho [2].

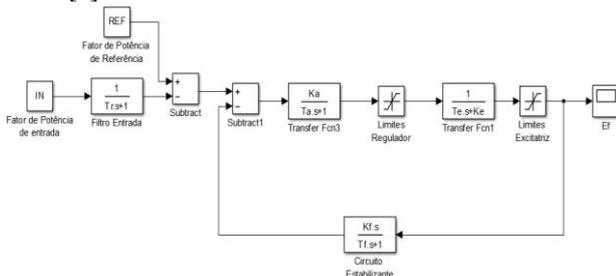


Fig. 1. Modelo de um Regulador de Fator de Potência.

B. Regulador de Velocidade

O regulador de velocidade foi implementado com base em um modelo simples do IEEE, que é frequentemente utilizado em estudos de estabilidade transitória e dinâmica [2]. Tem-se então na Figura 2 o modelo do regulador de velocidade utilizado, este que já está associado a uma turbina a vapor (se $T4=0$) ou a uma turbina hidráulica (se $T4 \neq 0$).

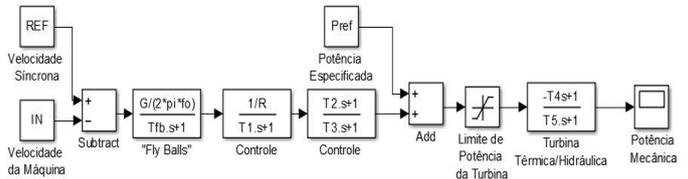


Fig. 2. Modelo de um Regulador de Velocidade

C. Sistema Elétrico

A Figura 3 mostra o diagrama unifilar do sistema utilizado para a conexão do regulador de fator de potência e posterior obtenção dos resultados. Tal diagrama representa de forma satisfatória, uma condição de geração independente conectada a um sistema maior (concessionária)[3].

Para representar o produtor independente foram utilizados dois geradores síncronos (máquinas primárias são turbinas a vapor), uma carga elétrica estática e uma motriz, internas ao sistema independente. Com isso, estes geradores internos podem, além de atender suas cargas, também fornecer energia para a rede de distribuição.

Como pode ser visto na Figura 3, a rede de distribuição é composta por uma fonte de tensão ideal (barramento infinito), que está conectada a um transformador T1 pela barra 1. Este transformador T1 está ligado a duas linhas de distribuição de energia, cuja tensão é de 13,8 kV pela barra 2. Na barra 2, há um banco trifásico de capacitores e uma carga trifásica. As linhas que saem da barra 2, terminam na barra 3, onde se conectam então ao transformador T2. Assim como na barra 2, na barra 3 também são conectados um banco trifásico de capacitores e uma carga trifásica. Este transformador T2 é utilizado na conexão entre a concessionária e o sistema independente, este que é conectado a barra 4 onde estão seus geradores. Ainda na barra 4, há outro transformador T3, que se liga a barra 5, onde se tem as cargas do sistema independente. Todos os parâmetros das máquinas síncronas do produtor independente constam na Tabela 1 e resalta-se que tais valores foram obtidos diretamente da fabricante WEG.

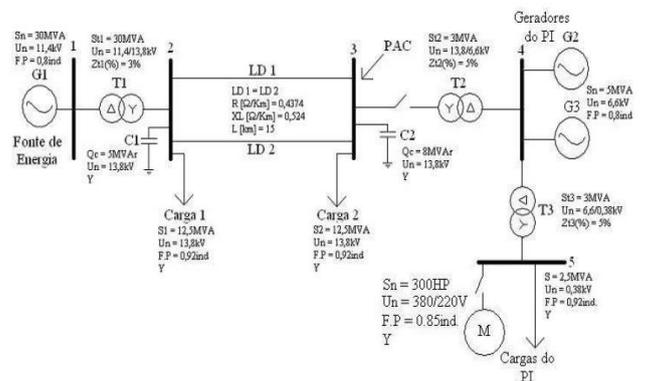


Fig. 3. Diagrama unifilar do Sistema Elétrico simulado.

Tabela I – Parâmetros das Máquinas Síncronas do Produtor Independente

$S_n = 5 \text{ MVA}$	$x_0 = 0,046 \text{ pu}$
$U_n = 6,6 \text{ kV}$	$T'_{do} = 1,754 \text{ s}$
$R_a = 0,004 \text{ pu}$	$T''_{do} = 0 \text{ s}$
$x_L = 0,1 \text{ pu}$	$T'_{do} = 0,019 \text{ s}$
$x_d = 1,8 \text{ pu}$	$T''_{do} = 0,164 \text{ s}$
$x_q = 1,793 \text{ pu}$	$H_2 = 1 \text{ s}; H_3 = 2 \text{ s}$
$x'_d = 0,166 \text{ pu}$	$P = 4 \text{ polos}$
$x'_q = 0,98 \text{ pu}$	$f = 60 \text{ Hz}$
$x''_d = 0,119 \text{ pu}$	$\omega = 188,5 \text{ rad/s}$
$x''_q = 0,17 \text{ pu}$	

IV. ESTUDOS DE CASO

Ressalta-se que em [4] são realizados estudos similares aos deste trabalho, porém são analisados parâmetros de um regulador de tensão.

No estudo em questão, será observada a influência dos parâmetros do estabilizador (K_f e T_f), da excitatriz (T_e) e do regulador (K_a e T_a). Ressaltando que os valores iniciais de cada parâmetro são mostrados na Tabela 2 [9], e tais valores serão variados um a um, por uma faixa determinada pelo autor (com o estudo prévio dos melhores valores a serem simulados) e com isso, as devidas análises poderão ser feitas. Ressalta-se que o ganho da excitatriz (K_e) não será analisado, pois a influência deste é a mesma do ganho do regulador (K_a), portanto, basta fazer simulações com um deles.

Tabela II – Valores iniciais para os parâmetros do Regulador de Fator de Potência

Parâmetro	Valor	Parâmetro	Valor
K_a	500	T_a	0,1
K_f	0,8	T_f	0,1
K_e	1	T_e	0,05
Limite Mínimo Regulador	0	Limite máximo Regulador	1,6
Limite Mínimo Excitatriz	0	Limite Máximo Excitatriz	500

A. Influência dos Parâmetros na Tensão Eficaz do PAC.

Para uma melhor análise dos resultados, é necessária uma maior preocupação com a qualidade da energia que está sendo gerada para a rede de distribuição. Portanto, sob a luz do Módulo 8 do PRODIST – ANEEL [5], e também de alguns requisitos técnicos de concessionárias brasileiras [6] [7] [8], conclui-se que a tensão eficaz no ponto de acoplamento comum, deve estar compreendida entre 0,95 e 1,05 pu. Já que neste caso a tensão eficaz base é de aproximadamente 7.967,4V, esta deve compreender valores entre 7.569V e 8.365,8V para que as normas técnicas sejam satisfeitas.

Com isso, se possibilita uma melhor análise de cada parâmetro do Regulador.

1) Parâmetro “ K_a ”

Pela Figura 4, percebe-se que em termos de “overshoot” e tempo de estabilização, não há uma influência considerável do ganho K_a . Porém, em se tratando de magnitude de tensão eficaz em regime permanente, este parâmetro tem uma influência proporcional, ou seja, ao aumentá-lo há também um aumento na tensão eficaz.

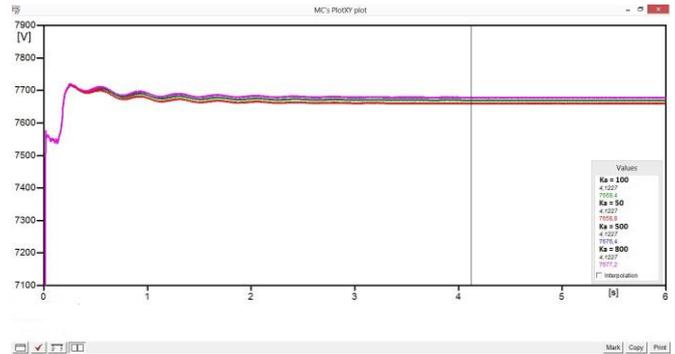


Fig. 4. Comportamento de Tensão Eficaz no PAC com variação do parâmetro “ K_a ”.

2) Parâmetro “ T_a ”

A Figura 5 mostra que a influência da constante de tempo é similar à influência do ganho K_a , pois esta também só altera significativamente a magnitude de tensão eficaz em regime permanente.

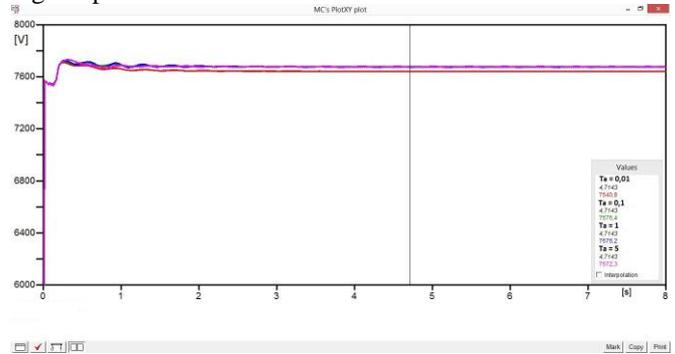


Fig. 5. Comportamento de Tensão Eficaz no PAC com variação do parâmetro “ T_a ”.

3) Parâmetro “ K_f ”

Um fato interessante a ser notado na Figura 6, é que a variação do ganho “ K_f ” influencia diretamente no tempo de estabilização da tensão eficaz, pois à medida que se aumenta este ganho, tem-se como resultado um tempo de estabilização da tensão mais rápido (no caso de $K_f=0,08$ não houve estabilização completa da tensão). Além disso, é possível notar também que o “overshoot” de tensão é maior para valores menores desse ganho.

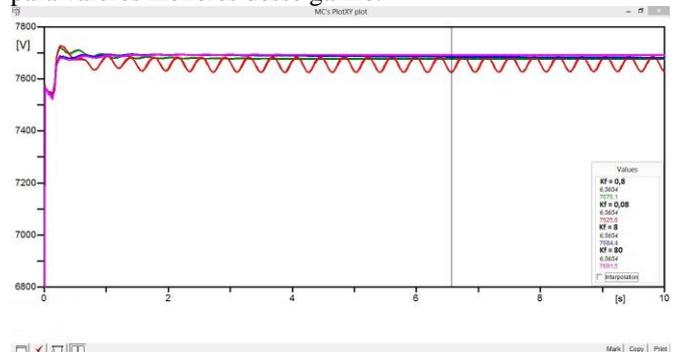


Fig. 6. Comportamento de Tensão Eficaz no PAC com variação do parâmetro “ K_f ”.

4) Parâmetro “ T_f ”

Através da observação da Figura 7, nota-se que a constante de tempo T_f tem influência parecida com a do

ganho K_f (em termos de tempo de estabilização), porém neste caso à medida que se aumenta a constante T_f temos um tempo de estabilização maior e conseqüentemente uma maior instabilidade na tensão eficaz no PAC.

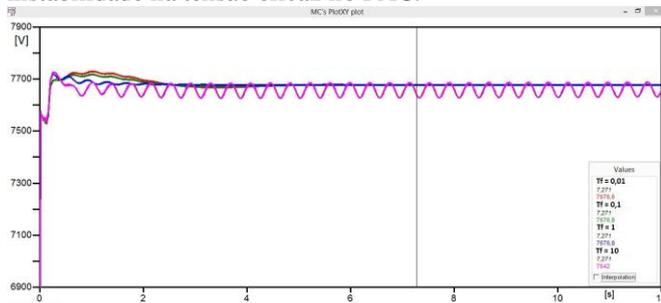


Fig. 7. Comportamento de Tensão Eficaz no PAC com variação do parâmetro “ T_f ”.

5) Parâmetro “ T_e ”

Com o comportamento mostrado na Figura 8, conclui-se que a influência da constante de tempo T_e é puramente ligada ao “overshoot” da resposta de tensão eficaz, já que quanto mais se diminui o valor da constante, mais o “overshoot” da resposta em tensão eficaz cresce.

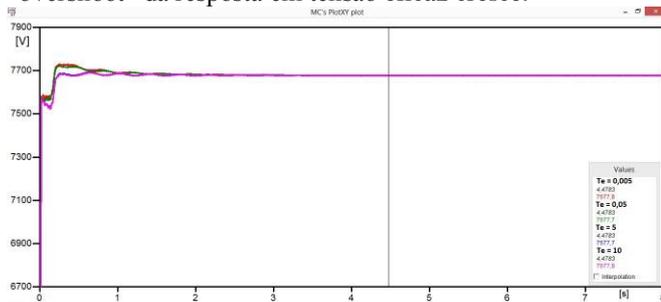


Fig. 8. Comportamento de Tensão Eficaz no PAC com variação do parâmetro “ T_e ”.

B. Influência dos parâmetros no Fator de Potência do PAC.

Mais precisamente, na norma técnica em [5], é contemplado sobre os limites permitidos para o fator de potência no ponto de acoplamento comum. Neste caso estes limites devem estar compreendidos entre 0,92 e 1 indutivo ou 1 e 0,92 capacitivo. Neste caso, colocou-se como fator de potência de referência o valor de 0,95 indutivo.

Com esses dados, pode-se realizar então o estudo da influência de cada parâmetro do Regulador.

1) Parâmetro “ K_a ”

A Figura 9 mostra que o ganho K_a tem papel fundamental na magnitude do fator de potência em regime permanente, visto que a medida que se aumenta este ganho há também um aumento no fator de potência no PAC em regime permanente. Por outro lado, considerando “overshoot” e tempo de estabilização, tal parâmetro não é muito significativo.

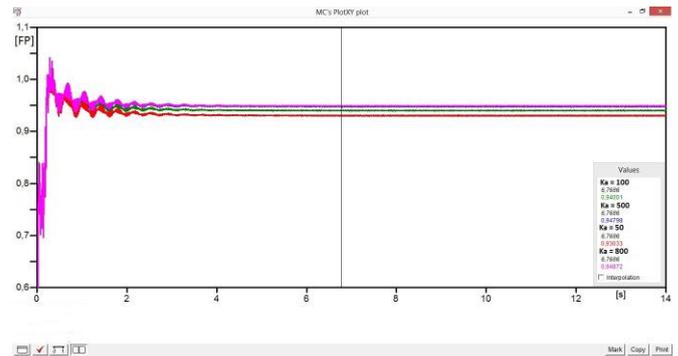


Fig. 9. Comportamento do Fator de Potência no PAC com variação do parâmetro “ K_a ”.

2) Parâmetro “ T_a ”

A influência da constante de tempo T_a é bastante similar a do ganho K_a , já que esta também modifica consideravelmente o fator de potência em regime permanente, ou seja, à medida que se diminui o valor dessa constante, valores menores de fator de potência serão observados no PAC. Isso pode ser observado através da Figura 10. Entretanto, é visto que este valor também tem influência em termos de “overshoot” e tempo de estabilização, já que quanto maior a constante de tempo, maior o “overshoot” e tempo de estabilização da resposta.

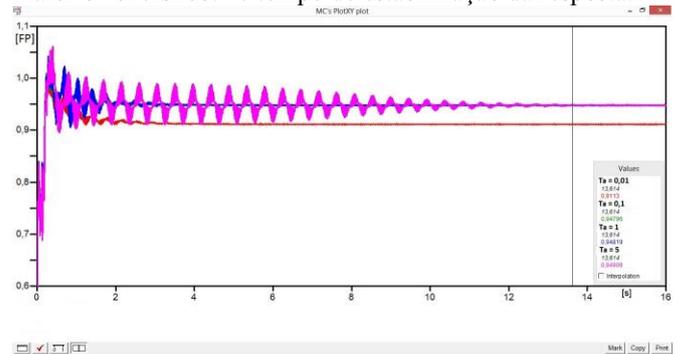


Fig. 10. Comportamento do Fator de Potência no PAC com variação do parâmetro “ T_a ”.

3) Parâmetro “ K_f ”

Pela Figura 11, vê-se que além da notável influência em magnitude de fator de potência em regime permanente, o ganho K_f também influencia bastante na estabilidade do controle deste fator de potência, visto que para valores muito pequenos deste ganho (por exemplo $K_f = 0,08$) o controle entra em instabilidade, ou seja, oscila continuamente.

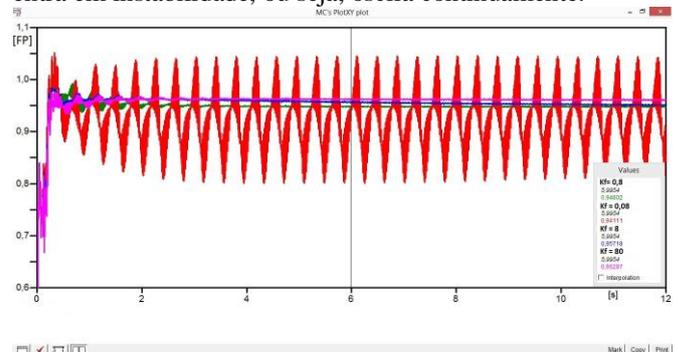


Fig. 11. Comportamento do Fator de Potência no PAC com variação do parâmetro “ K_f ”.

4) Parâmetro “Tf”

A influência dessa constante de tempo é bastante parecida com a do ganho Kf, visto que pela Figura 12, esta constante também influencia na estabilidade de controle do sistema. Porém, para este parâmetro, fica evidente uma influência também em termos de “overshoot”, pois conforme se aumenta o valor da constante o “overshoot” decresce e aliado a esse decréscimo tem-se um aumento da instabilidade do controle.

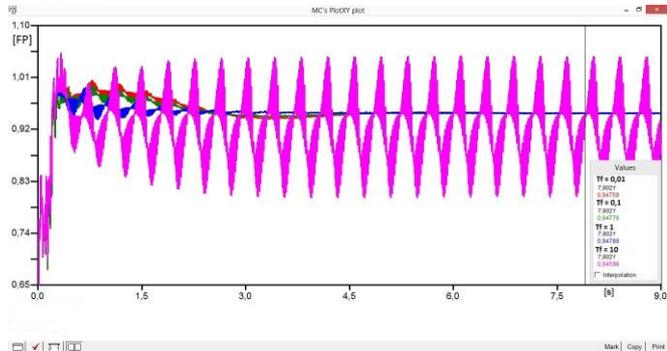


Fig. 12. Comportamento do Fator de Potência no PAC com variação do parâmetro “Tf”.

5) Parâmetro “Te”

Com o comportamento mostrado na Figura 13, pode-se dizer que a influência da constante de tempo Te é ligada somente ao “overshoot” da resposta, já que as magnitudes e tempos de estabilização são bastante similares para todos os diferentes valores simulados. Com isso, conclui-se que quanto menor o valor deste parâmetro, maior será o “overshoot” observado.

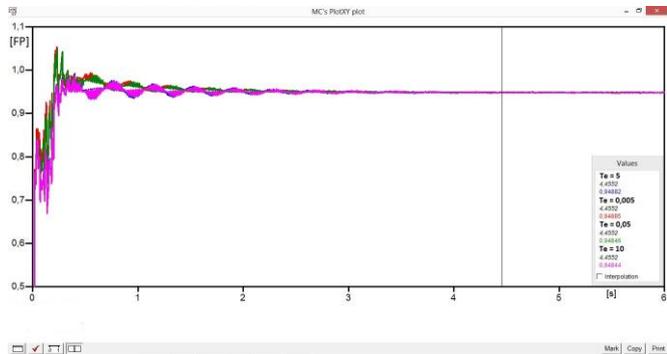


Fig. 13. Comportamento do Fator de Potência no PAC com variação do parâmetro “Te”.

C. Influência dos Parâmetros na Velocidade da Máquina Síncrona.

Com a presença do Regulador de Velocidade conectado a máquina síncrona, espera-se obter valores muito próximos a 188,5 rad/s (60 Hz) em regime permanente. Portanto, a não ser que os parâmetros do Regulador de Fator de Potência influenciem para que haja instabilidade total da velocidade da máquina, o que será estudado neste ponto do artigo terá principal foco no regime transitório de operação da máquina síncrona, em termos de “overshoot” e tempo de estabilização da resposta de velocidade.

Vale ressaltar também, relacionado à qualidade da energia, que a variação de frequência permitida na rede varia entre 59,5 Hz (186,92 rad/s) e 60,5 Hz (190,06 rad/s) [5].

Além disso, tais variações na velocidade de rotação da máquina síncrona, podem resultar em danos no equipamento caso tenham grande duração [10].

1) Parâmetro “Ka”

Pela análise da Figura 14, facilmente se conclui que o ganho Ka tem influência exclusivamente no “overshoot” da resposta de velocidade da máquina síncrona, porém tal influência é quase desprezível. Em se tratando de tempo de estabilização da resposta, nota-se que este parâmetro não traz influência alguma.

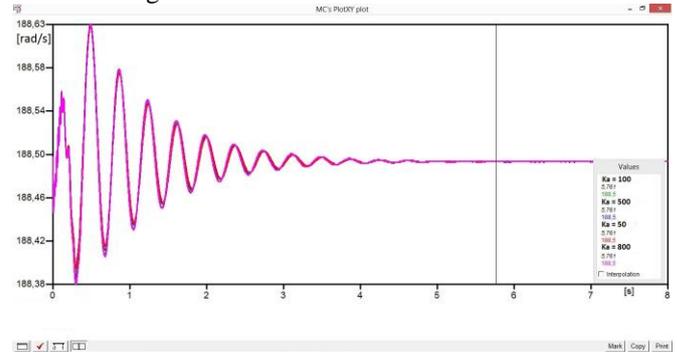


Fig. 14. Comportamento da velocidade da máquina síncrona com variação do parâmetro “Ka”.

2) Parâmetro “Ta”

Neste caso, analisando a Figura 15, observa-se que a diminuição da constante de tempo Ta, resulta em uma diminuição drástica no “overshoot” da resposta de velocidade. Além disso, é notável que para valores de constante maiores que 1, há um aumento considerável no tempo de estabilização da velocidade da máquina.

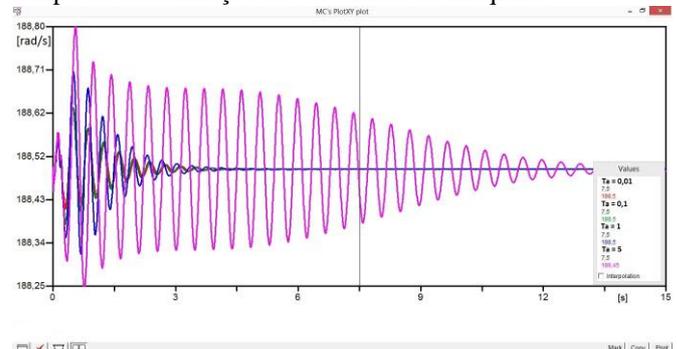


Fig. 15. Comportamento da velocidade da máquina síncrona com variação do parâmetro “Ta”.

3) Parâmetro “Kf”

Pela Figura 16, se tem que a variação da constante de tempo Kf, influencia significativamente no “overshoot” da resposta de velocidade, já que aumentando-se o valor da constante há uma diminuição deste “overshoot”. Uma observação importante vista nessa simulação, é que caso este parâmetro tenha valores muito pequenos, a máquina poderá entrar em instabilidade (como foi visto com Kf = 0,08) e com isso possíveis danos podem ser causados à máquina utilizada.

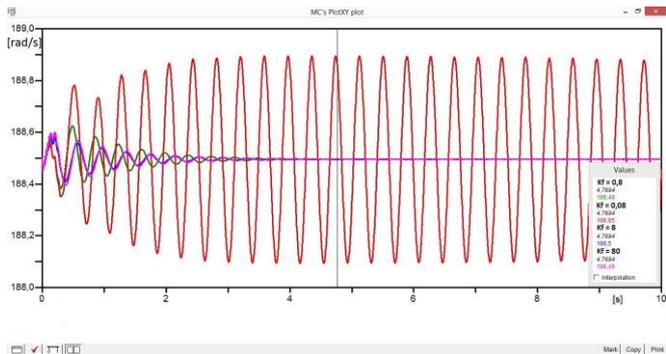


Fig. 16. Comportamento da velocidade da máquina síncrona com variação do parâmetro “Kf”.

4) Parâmetro “Tf”

Com análise da Figura 17, conclui-se que a influência da constante de tempo Tf é bastante similar a influência do ganho Kf, porém são inversas. Já que neste caso quando se aumenta muito Tf, o sistema tende à instabilidade e com valores pequenos para este parâmetro, temos respostas com menor “overshoot”.

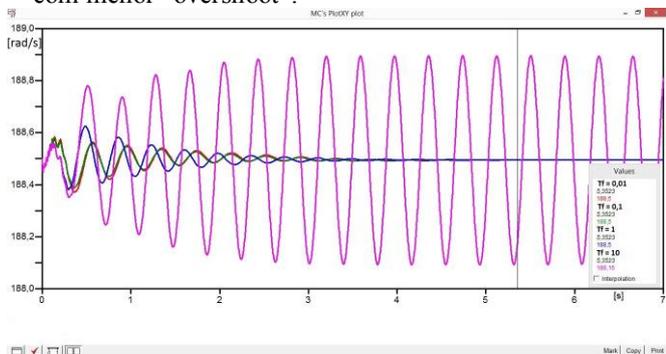


Fig. 17. Comportamento da velocidade da máquina síncrona com variação do parâmetro “Tf”.

5) Parâmetro “Te”

Pelas simulações demonstradas na Figura 18, este parâmetro teve significativas influências tanto no “overshoot” da resposta como no tempo de estabilização, já que se constatam menores tempos de estabilização e “overshoot” para valores menores da constante de tempo Te.

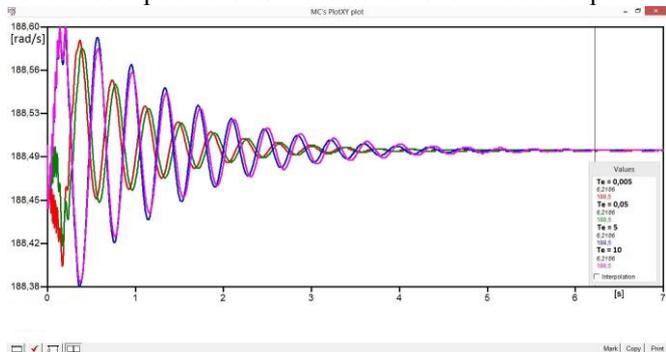


Fig. 18. Comportamento da velocidade da máquina síncrona com variação do parâmetro “Te”.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresenta de forma sucinta, as influências causadas por cada um dos principais parâmetros do modelo de Regulador de Fator de Potência utilizado. Com isso, o estudo aqui realizado demonstra a necessidade de se proceder

a um projeto eficiente e eficaz para uma melhor parametrização, dos controladores da máquina síncrona, diante do sistema elétrico apresentado.

Percebe-se também que para alguns dos valores simulados, houve a infração de normas técnicas no que tange a qualidade da energia no PAC, principalmente em se tratando de fator de potência. Deste fato, retira-se a importância de estudos como o aqui apresentado.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] IEEE Std. 421.5-2005, IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies, 2005.
- [2] G. C. Guimarães, Computer Methods for Transient Stability Analysis of Isolated Power Generation Systems with Special Reference to Prime Mover and Induction Motor Modelling, PhD Thesis, University of Aberdeen, 1990.
- [3] F. A. M. Moura, Geração Distribuída – Impactos e Contribuições para a Qualidade da Energia Elétrica e Dinâmica dos Sistemas Elétricos – Uma Análise através do ATP-EMTP, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, 2011.
- [4] L. M. Peres, Estudos do Desempenho Dinâmico de Geradores Síncronos de Produtores Independentes em Sistemas de Geração Distribuída via ATPDraw, Tese de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, 2013.
- [5] PRODIST – “Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional, Módulo 8, Qualidade de Energia Elétrica”, 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/area.cfm?idarea=82>. Acesso em 06/05/2014.
- [6] CEMIG – “Requisitos para a conexão de Acessantes Produtores de Energia Elétrica ao Sistema de Distribuição Cemig – Conexão em Média Tensão”, 2011. Disponível em: http://www.cemig.com.br/pt-br/atendimento/Documents/Norma_Acesso%20MT_Cemig_final_TDAT_p.pdf. Acesso em 15/05/2014.
- [7] COPEL – “Requisitor Técnicos para a conexão de geração em paralelo com o sistema elétrico da COPEL”, 2006. Disponível em: [http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/requisitos_tecnicos_para_acessante_de_geracao/\\$FILE/Requisitos_Tecnicos_Acessante_Geracao.pdf](http://www.copel.com/hpcopel/root/sitearquivos2.nsf/arquivos/requisitos_tecnicos_para_acessante_de_geracao/$FILE/Requisitos_Tecnicos_Acessante_Geracao.pdf). Acesso em: 25/05/2014.
- [8] CEMAT – “Requisitos para acesso e conexão de geração distribuída ao sistema de distribuição da CEMAT”, 2013. Disponível em: <http://www.cemat.com.br/files/2012/06/NTE-042-CONEXÃO-DE-GERAÇÃO-DISTRIBUÍDA-EM-MÉDIA-TENSÃO-2a-edição-1.pdf>. Acesso em: 01/05/2014.
- [9] M. Resener; R. H. Salim and A.S.Bretas, Avaliação do Impacto dos Controladores de Excitação na Estabilidade Transitória de Geradores Síncronos conectados em Sistemas de Distribuição.
- [10] F. A. M. Moura, J. R. Camacho, L. R. Chaves and G. C. Guimarães, Grid Integration of Renewable Sources in the Distribution Network: Na Analysis Through ATP-EMTP, 2007.