

# DESEMPENHO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DA EXCITAÇÃO ESTÁTICO DE GERADORES SÍNCRONOS DIANTE DE CARGA INDUTIVA

F. B. Silva\*, W. E. Vanço\*, F. A. S. Gonçalves\*, C. A. Bissochi Jr\*, L. M. Neto\*, A. M. A. Barbosa\*,  
T. L. Oliveira\*\* e G. C. Guimarães\*\*

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Elétrica

\*Núcleo de Máquinas e Aterramentos Elétricas, Uberlândia – MG

\*\*Núcleo de Dinâmica de Sistemas Elétricos, Uberlândia – MG

fbentosilva@hotmail.com, wagner\_vanco@hotmail.com, felipeadrianosg@gmail.com, bissochi.jr@gmail.com, lmn@ufu.br, alessandro.araujo@cemig.com.br, thaleslima.ufu@gmail.com, gcaixetag@yahoo.com.br

**Resumo** - Este trabalho tem como objetivo analisar o desempenho de um sistema de controle da excitação estático utilizado em um gerador síncrono de 2 kVA alimentando carga indutiva. O estudo leva em conta o afundamento de tensão e o tempo gasto para se alcançar a tensão nominal do gerador síncrono partindo diretamente motores de indução de 1, 2 e de 3 cv e para um carga estática indutiva de 1,5 kVAR.

**Palavras-Chave** - Afundamento de Tensão, Cargas Indutivas, Gerador Síncrono, Sistema de Excitação Estático, Tempo de Recuperação

## PERFORMANCE OF A STATIC EXCITATION CONTROL SYSTEM OF SYNCHRONOUS GENERATORS UNDER INDUCTIVE LOAD

**Abstract** - This work aims to analyze the performance of a static excitation control system used in a synchronous generator of 2 kVA feeding inductive load. The study takes into account the voltage dip and the time required to achieve the rated voltage (recovery Time) of the synchronous generator when induction motors of 1, 2 and 3 cv are directly started with an inductive load of 1,5 kVAR.

**Keywords** - Inductive Loads, Recovery Time, Static Excitation System, Synchronous Generator, Voltage Dip

### NOMENCLATURA

|            |                                      |
|------------|--------------------------------------|
| AVR        | Automatic Voltage Regulator          |
| CA/CC      | Corrente alternada/Corrente contínua |
| SP         | Setpoint                             |
| VP         | Variável do Processo                 |
| PWM        | Pulse Width Modulated                |
| DUTY CYCLE | Ciclo de Trabalho                    |



XIII CEEL - ISSN 2178-8308  
12 a 16 de Outubro de 2015  
Universidade Federal de Uberlândia - UFU  
Uberlândia - Minas Gerais - Brasil

*MOSFET* Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

## I. INTRODUÇÃO

Os primeiros sistemas de controle da excitação eram coordenados por operadores para que o sistema de geração atingisse a tensão terminal desejada e suprisse a potência reativa exigida pela carga conectada à rede. Quando os primeiros controladores automáticos foram aplicados ao sistema de excitação, estes eram lentos e praticamente só serviam para auxiliar o operador (controlador manual). No começo de 1920 os controladores de excitação ganharam visibilidade com aplicações para pequenos sinais e estabilidade transitória, atraindo mais pesquisas por excitatrizes e reguladores de tensão mais rápidos. Os sistemas de controle da excitação mais modernos são capazes de obter respostas praticamente instantâneas, respeitando os limites de operação dos geradores [1].

Os sistemas de controle da excitação dos geradores síncronos, conectados à rede, têm um papel importante no aumento da estabilidade do sistema elétrico de potência e da qualidade de energia e para os geradores síncronos isolados no controle adequado da tensão terminal da máquina. Através dos reguladores automáticos de tensão, do inglês (AVR), a tensão terminal no gerador síncrono é controlada. O AVR, a partir de uma tensão de referência e da medição da tensão terminal, fornece um sinal de controle para a excitatriz, controlando a corrente ou a tensão de excitação nos enrolamentos de campo do gerador [2].

## II. REGULADOR DE TENSÃO (CONTROLE DA EXCITAÇÃO)

O sistema de excitação, ou excitatriz, de uma máquina síncrona é responsável por fornecer corrente contínua para o enrolamento de campo, e associado a um sistema de controle, é possível controlar a tensão terminal e a potência reativa fornecida pelo gerador síncrono. Ainda, o controlador pode garantir que algumas condições de funcionamento não sejam atingidas, protegendo o sistema de geração e outros equipamentos ligados a ele [1].

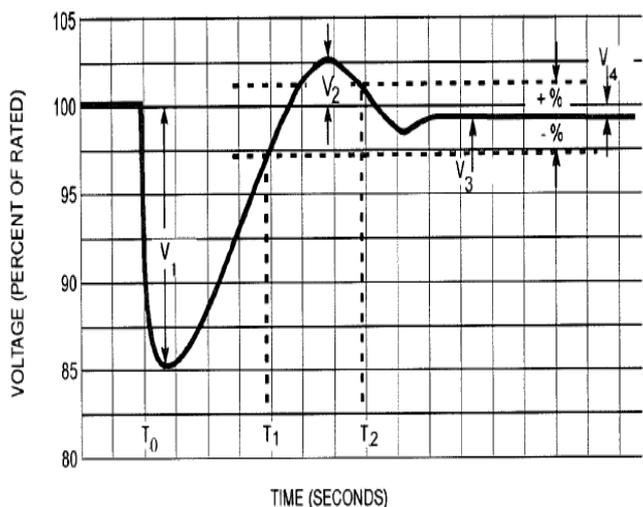
Do ponto de vista do sistema de potência, a principal função de um regulador de tensão é controlar a tensão terminal da máquina síncrona (gerador) pelo ajuste de sua excitação (corrente de campo). Em outras palavras, o regulador deve acompanhar a tensão do gerador durante todo o tempo e em qualquer condição de carga agindo no sentido de manter esta tensão dentro de limites pré-definidos. Em

consequência disso, pode-se dizer que o regulador de tensão também controla a potência reativa gerada e o fator de potência da máquina desde que estes fatores são dependentes do nível de excitação do gerador [3].

Quando um gerador síncrono é submetido a uma mudança repentina de carga haverá uma variação de sua tensão de saída. Uma das funções do sistema regulador de excitação é detectar esta mudança na tensão de saída e variar a excitação de campo o quanto for necessário para restaurar a tensão terminal [4]. O desvio máximo transitório na tensão de saída que ocorre é em função de:

- A magnitude, fator de potência e taxa de variação da carga aplicada;
- O tempo de resposta de tensão e da capacidade do sistema regulador da excitação.
- A velocidade da máquina primária em função do tempo após a mudança repentina de carga.

A Figura 1 apresenta a variação da tensão no tempo em decorrência de uma mudança repentina de carga, onde há a atuação de um regulador de tensão. Esta figura também apresenta alguns termos importantes na análise de um afundamento de tensão e performance do regulador [4].



- |   |   |
|---|---|
| $V_1$ = Voltage dip                         | $T_0$ = Point at which load is applied                          |
| $V_2$ = Maximum transient voltage overshoot | $T_1$ = Time to recover to a specified band                     |
| $V_3$ = Recovery voltage                    | $T_2$ = Time to recover to and remain within the specified band |
| $V_4$ = Steady-state regulator              |   |

Fig. 1 - Variação da tensão no tempo em decorrência de uma mudança repentina de carga [4].

Pela Figura 1, tem-se a seguinte definições dos seguintes termos:

#### A. Transient Voltage Regulation

Regulação de tensão transitória é o desvio máximo de tensão que ocorre em resultado de uma mudança repentina de carga, podendo ser um aumento de tensão ou uma queda de tensão e é normalmente expresso em porcentagem da tensão nominal.

#### B. Voltage Dip

Afundamento de tensão é a regulação de tensão transitória que ocorre em resultado de um aumento repentino na carga. É normalmente expresso como uma porcentagem da tensão nominal.

#### C. Transient Voltage Overshoot

Ultrapassagem da tensão transitória é a superação máxima de tensão acima da tensão nominal que ocorre como resultado de uma resposta do sistema de excitação para um aumento repentino na carga. Este termo é expresso como uma porcentagem da tensão nominal.

#### D. Steady-State Voltage Regulation

Regulação de tensão em regime permanente é o desvio de tensão que ocorre como resultado da mudança de carga depois que todos transitórios devido a esta mudança já tenham cessados. Este termo é normalmente expresso como uma porcentagem da tensão nominal.

#### E. Recovery Voltage

Tensão de recuperação é a tensão máxima obtida para uma condição de carga especificada. A tensão de recuperação é normalmente expressa como uma porcentagem da tensão nominal. Para cargas que excedem o valor nominal, a tensão de recuperação é limitada pela saturação e o limite de excitação de campo.

#### F. Recovery Time

O tempo de recuperação é o intervalo de tempo necessário para a tensão de saída voltar a uma condição específica após uma mudança súbita de carga.

### III. SISTEMA DE EXCITAÇÃO ESTÁTICO

Todos os componentes neste sistema são estáticos ou estacionários. Estes utilizam transformadores associados com conversores CA/CC (que podem ser controlados (pontes de tiristores) ou não (ponte de diodos)) para fornecer a corrente contínua requerida pelo campo do gerador através de anéis deslizantes. O suprimento de potência para os retificadores estáticos provém do gerador principal (ou um barramento auxiliar da estação) através de um transformador (que abaixa a tensão para um nível apropriado), ou provém, em alguns casos, de enrolamentos auxiliares no gerador [3]. A Figura 2 apresenta o diagrama de um sistema de excitação estático simplificado, apenas para título de exemplo.

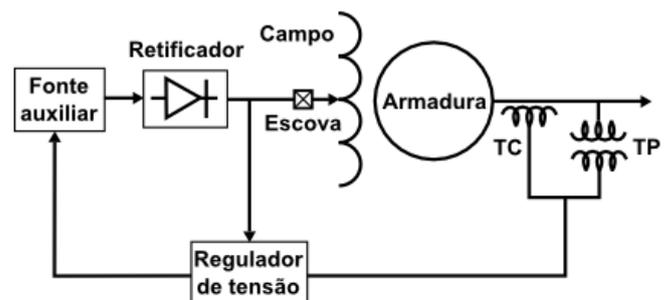


Fig. 2 - Diagrama de ligação do sistema de excitação estático [5].

Como o sistema de excitação estático não possui partes girantes, sua resposta é mais rápida do que a dos outros dois tipos (excitação CC e excitação CA), contribuindo para a melhoria da estabilidade transitória do gerador síncrono [3].

### A. Princípio de funcionamento do sistema de excitação estático utilizado

O sistema de excitação utilizado foi baseado no sistema de excitação estático com algumas particularidades, e o seu diagrama simplificado de ligação é apresentado na Figura 3.

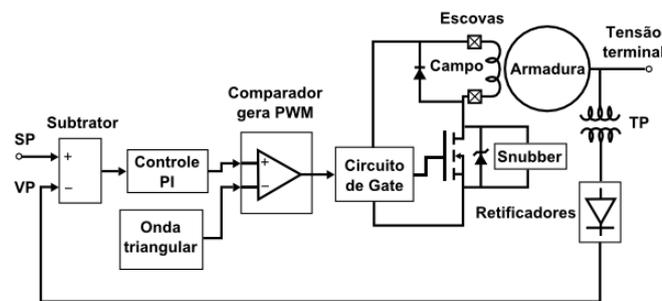


Fig. 3 – Diagrama simplificado de ligação do sistema utilizado para o controle da excitação [5].

Na Figura 3 a tensão terminal é medida por um conjunto de transformadores de potencial com objetivo de abaixar seu valor que é então retificado e chamado de VP (Variável do Processo). Ela é comparada em um circuito *subtrator* com um nível de tensão de referência SP (*Setpoint*, ajustável de acordo com a necessidade da ligação terminal do gerador síncrono), que é a tensão nominal do gerador síncrono convertida em um nível contínuo de tensão. Deste bloco sai um sinal de erro que é levado a um controlador PI. A saída do bloco do controlador PI é levada ao circuito somador inversor. Saindo deste circuito com um nível contínuo positivo de tensão, este sinal é comparado com uma onda triangular de 1,16 kHz em um circuito comparador, gerando assim um PWM. A Figura 4 apresenta a imagem da onda triangular para gerar o PWM.

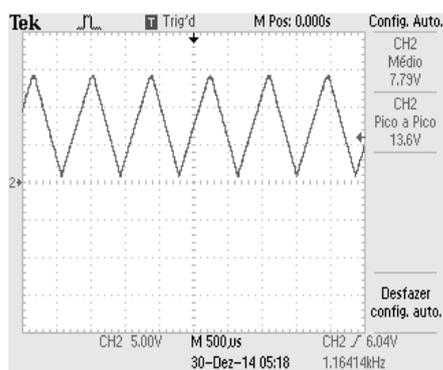


Fig. 4 - Onda triangular utilizada para gerar o PWM [5].

Este sinal PWM é levado a um *drive* (circuito de disparo), que fornece sinal ao *gate* do Mosfet IRFP264N, que chaveia uma tensão média no campo do gerador, gerando a tensão terminal que realimenta a malha de controle até a tensão estabilizar em torno de 220 V de linha devido a atuação do controlador PI. A Figura 5 apresenta uma imagem do PWM gerado.

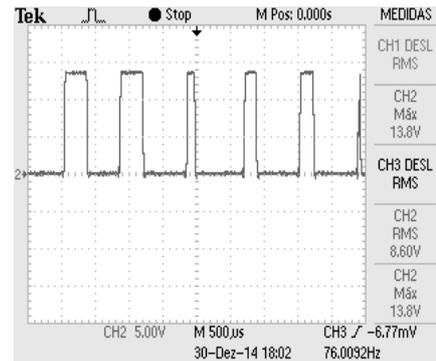


Fig. 5 - PWM gerado para acionar o Mosfet IRFP264N [5].

Assim o campo do gerador síncrono é ligado a uma fonte de tensão contínua (presente no drive) e ao dreno do mosfet. A fonte tem uma amplitude de 180 V, o controle gera automaticamente um PWM com “duty cycle” de 30 a 85 %, que são os valores mínimo e máximo do amplificador, que fornecem uma tensão média de 54 a 153 V contínua no campo, estes valores representam os níveis mínimo e máximo de tensão de campo para gerarem uma tensão terminal de linha em torno de 220 V, com a máquina a vazio (54 V no campo) e com o gerador fornecendo seu reativo máximo diante de um carregamento altamente indutivo (153 V no campo).

## IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Foi realizado um conjunto de testes experimentais com o gerador síncrono isolado, com intuito de registrar os transitórios na tensão provocados pela partida dos motores de indução e do chaveamento do reator trifásico, assim obtendo os dados para analisar o desempenho do sistema de excitação estático. Foi utilizado um osciloscópio digital TPS2024B da Tektronix para aquisição dos sinais de tensão e corrente, e estes sinais foram utilizados para as plotagens gráficas através do *software* MatLab®.

### A. Dados do gerador síncrono

O sistema de geração é constituído de um gerador síncrono trifásico, conectado em duplo estrela (ligação estrela em paralelo) (YY) que possibilita obter uma tensão de 230 V de linha (mas mantida em torno de 220 V pela atuação do sistema de excitação), e como máquina primária (fonte supridora de potência mecânica) um motor de corrente contínua de 4 hp de potência.

A Tabela I apresenta os dados de placa do gerador síncrono.

Tabela I – Dados de placa do gerador síncrono trifásico.

| Parâmetros               | Valores                                  |
|--------------------------|--|
| Potência                 | 2 [kVA]                                  |
| Tensões de ligação       | 230/133 [V] – YY/ΔΔ<br>460/266 [V] – Y/Δ |
| Corrente nominal         | 5/8,8 [A]<br>2,4/4,4 [A]                 |
| Polos/Rotação            | 4/1800 [rpm]                             |
| Fator de potência        | 0,80                                     |
| Frequência               | 60 [Hz]                                  |
| Corrente de campo máxima | 0,6 [A]                                  |

### B. Dados dos motores de indução e da carga indutiva

As cargas utilizadas nos testes são constituídas de motores de indução conectados na ligação  $\Delta$ , com os dados de placa apresentados respectivamente na Tabela II, enquanto que a Tabela III apresenta os dados da carga indutiva também conectada em  $\Delta$ .

Tabela II – Dados de placa dos motores de indução.

| Parâmetros         | Valores            |                    |                    |
|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Potência           | 1 [cv]             | 2 [cv]             | 3 [cv]             |
| Tensões de ligação | 220 [V] – $\Delta$ | 220 [V] – $\Delta$ | 220 [V] – $\Delta$ |
| Corrente nominal   | 3,6 [A]            | 6,9 [A]            | 8,57 [A]           |
| $I_p/I_n$          | 6,1                | 6,8                | 6,8                |
| Polos/Rotação      | 4/1730 [rpm]       | 4/1720 [rpm]       | 4/1710 [rpm]       |
| Fator de potência  | 0,76               | 0,78               | 0,85               |
| Frequência         | 60 [Hz]            | 60 [Hz]            | 60 [Hz]            |
| Rendimento         | 70,6 [%]           | 77,6 [%]           | 79,3 [%]           |
| Categoria          | N                  | N                  | N                  |

Tabela III – Dados da carga indutiva.

| Tipo             | Tensões de ligação (V) | Corrente nominal (A) | Potência (kVAr) | Fator de Potência |
|------------------|------------------------|----------------------|-----------------|-------------------|
| Reator trifásico | 220 – $\Delta$         | 3,99                 | 1,5             | 0,2215            |

### C. Partida dos motores de indução

#### 1) Motor de indução de 1 cv

As formas de onda da tensão e da corrente durante a partida direta do motor de indução de 1 cv estão apresentadas na Figura 6 (a) e (b).

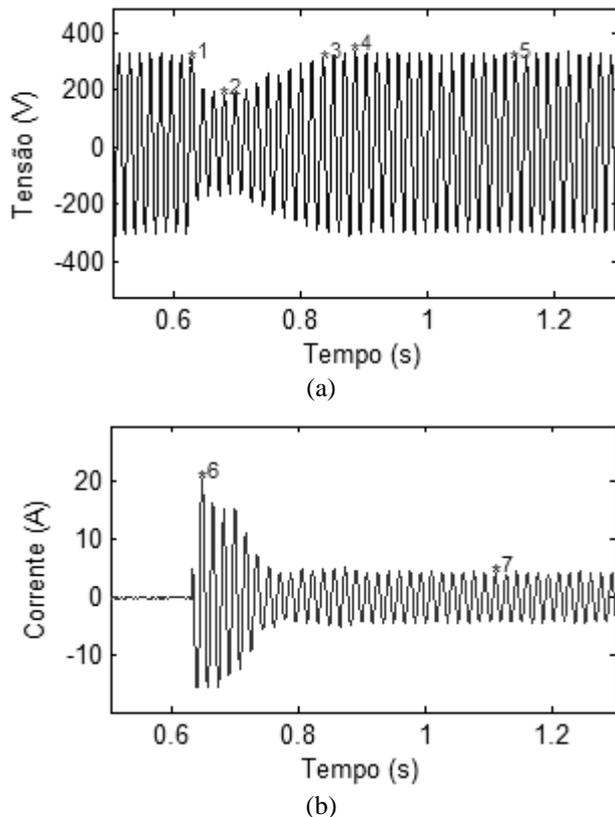


Fig. 6 – Partida direta do motor de indução de 1cv; (a) Forma de onda da tensão; (b) Forma de onda da corrente.

#### 2) Motor de indução de 2 cv

As formas de onda da tensão e da corrente durante a partida direta do motor de indução de 2 cv estão apresentadas na Figura 7 (a) e (b).

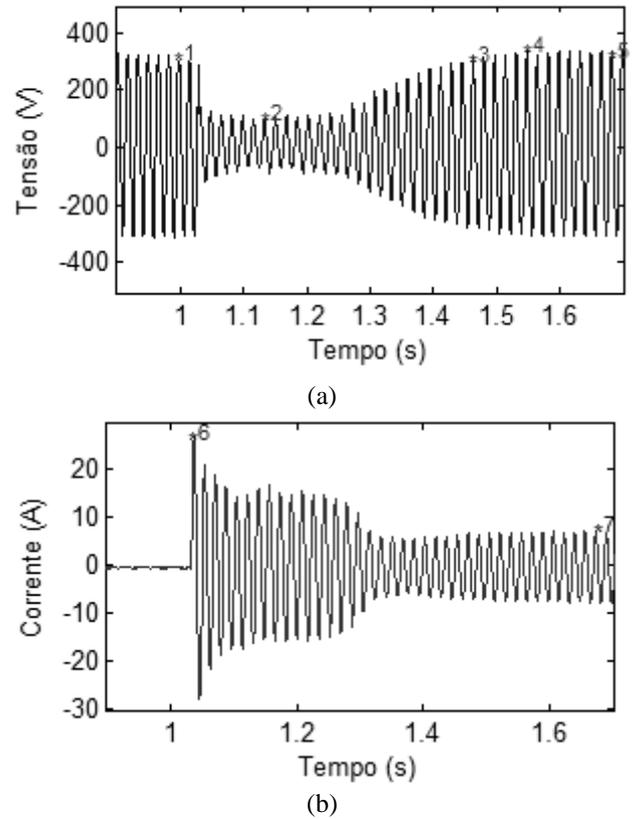
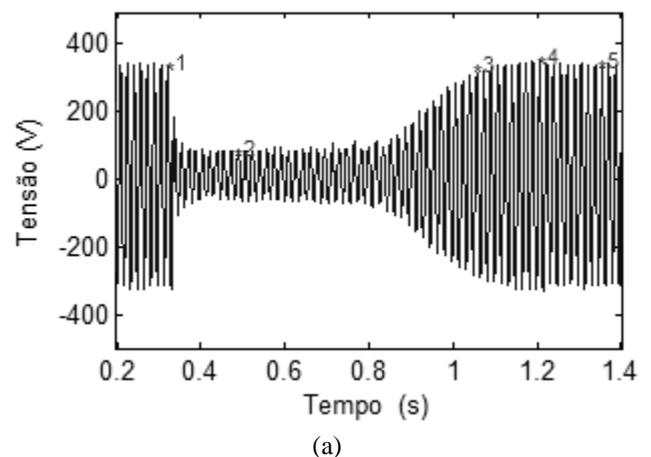


Fig. 7 – Partida direta do motor de indução de 2 cv; (a) Forma de onda da tensão; (b) Forma de onda da corrente.

#### 3) Motor de indução de 3 cv

As formas de onda da tensão e da corrente durante a partida direta do motor de indução de 3 cv estão apresentadas na Figura 8 (a) e (b).



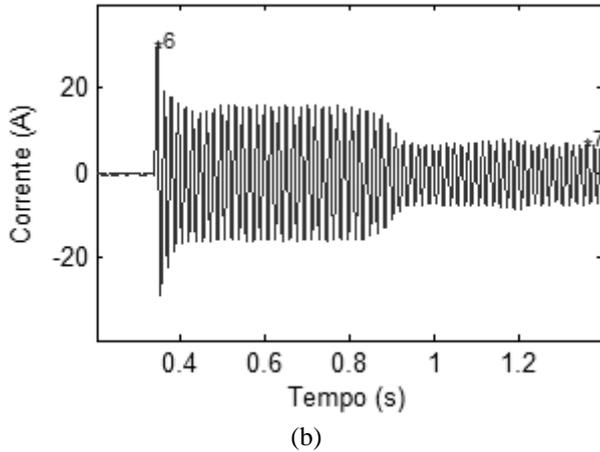


Fig. 8 – Partida direta do motor de indução de 3 cv; (a) Forma de onda da tensão; (b) Forma de onda da corrente.

#### D. Carga indutiva (reator trifásico)

As formas de onda da tensão e da corrente durante o chaveamento do reator trifásico estão apresentadas na Figura 9 (a) e (b).

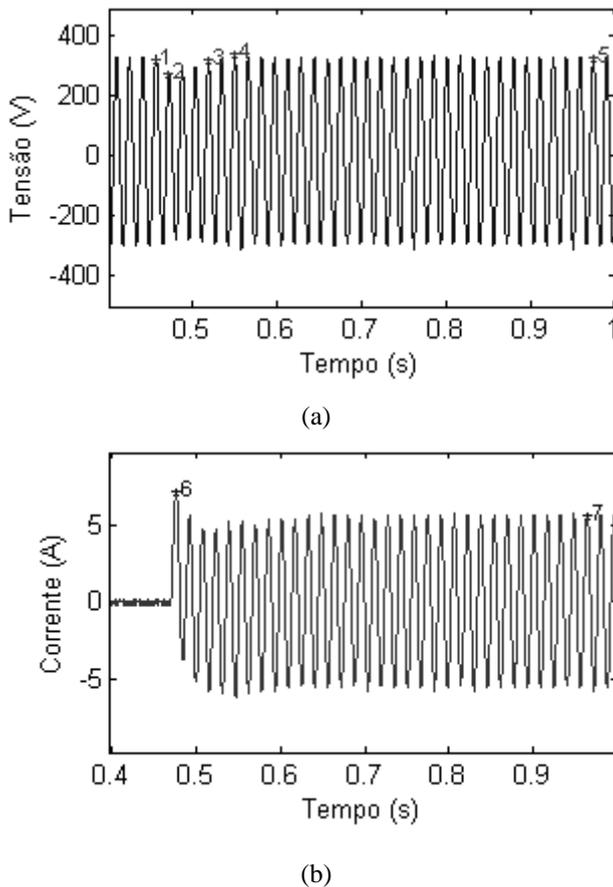


Fig. 9 – Chaveamento do reator trifásico de 1,5 kVAr; (a) Forma de onda da tensão; (b) Forma de onda da corrente.

#### E. Análise dos resultados

Analisando as Figuras 6, 7, 8 e 9 levanta-se a Tabela IV, que apresenta as coordenadas dos pontos, que contém as variáveis tempo e os valores de pico para a tensão e a corrente.

Tabela IV – Coordenadas dos pontos, valores de tempo e valores de pico para a tensão e a corrente.

| Figura | Coordenadas dos pontos |        |        |         |        |         |        |
|--------|------------------------|--------|--------|---------|--------|---------|--------|
|        | 1                      | 2      | 3      | 4       | 5      | 6       | 7      |
| 6      | 0,627 s                | 0,66 s | 0,83 s | 0,886 s | 1,12 s | 0,648 s | 1,1 s  |
|        | 312 V                  | 192 V  | 312 V  | 336 V   | 311 V  | 20,6 A  | 4,2 A  |
| 7      | 1,0 s                  | 1,13 s | 1,46 s | 1,54 s  | 1,68 s | 1,04 s  | 1,67 s |
|        | 313,6 V                | 104 V  | 311 V  | 329 V   | 312 V  | 26,4 A  | 7,2 A  |
| 8      | 0,322 s                | 0,49 s | 1,05 s | 1,2 s   | 1,35 s | 0,34 s  | 1,36 s |
|        | 312 V                  | 80 V   | 311 V  | 330 V   | 312 V  | 30,4 A  | 6,4 A  |
| 9      | 0,457 s                | 0,47 s | 0,52 s | 0,55 s  | 0,97 s | 0,477 s | 0,96 s |
|        | 312,7 V                | 280 V  | 311 V  | 325 V   | 312 V  | 7,4 A   | 5,6 A  |

Através dos dados apresentados na Tabela IV é possível calcular os termos utilizados na análise do desempenho do sistema excitação, e assim levantar a Tabela V.

Tabela V – Termos utilizados na análise do desempenho do sistema excitação.

| Figura  | Termos          |                                 |                                     |                      |                   |
|---------|-----------------|---------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-------------------|
|         | Voltage dip (%) | Transient Voltage Overshoot (%) | Steady-state Voltage Regulation (%) | Recovery Voltage (%) | Recovery Time (s) |
| 6 - (a) | 38,46           | 7,69                            | 0,32                                | 99,68                | 0,203             |
| 7 - (a) | 66,83           | 4,68                            | 0,51                                | 99,50                | 0,46              |
| 8 - (a) | 74,36           | 5,77                            | 0                                   | 100,00               | 0,728             |
| 9 - (a) | 10,45           | 3,93                            | 0,22                                | 99,77                | 0,063             |

Analisando a Tabela V, observa-se que durante a partida dos motores de indução trifásicos ocorrem os maiores valores percentuais de afundamentos de tensão. Além disso, as correntes apresentam elevados valores após a partida, sendo altamente indutivas com baixo fator de potência, ou seja, elas drenam um elevado valor de potência reativa do gerador síncrono. Algo que não se consegue compensar apenas com a atuação do regulador de tensão, pois a corrente de excitação do gerador já está no limite máximo, não conseguindo fornecer mais potência reativa, levando ao afundamento de tensão. Em casos extremos o gerador síncrono nem consegue suprir a potência de partida destes motores. Isso pode levar a um superdimensionamento do gerador síncrono para viabilizar a partida, ou quando há a possibilidade, são utilizados equipamentos que auxiliam na partida, tais como a chave estrela triângulo, a chave compensadora e o Soft-Starter. A ABNT NBR 17094-2:2008 [6] indica os valores máximos da potência aparente demandada na partida em função da potência nominal do motor, conforme é apresentado na Tabela VI.

Tabela VI – Valores máximos de potência aparente com rotor bloqueado (Sp), para motores categoria N e H, expressos pela razão para a potência de saída nominal (Pn) [6].

| FAIXA DE POTÊNCIA<br>kW | Sp/Pn<br>kVA/kW |
|-------------------------|-----------------|
| $P_n \leq 0,4$          | 22              |
| $0,4 < P_n \leq 0,63$   | 19              |
| $0,63 < P_n \leq 1,0$   | 17              |
| $1,0 < P_n \leq 1,8$    | 15              |
| $1,8 < P_n \leq 4,0$    | 14              |
| $4,0 < P_n \leq 6,3$    | 13              |
| $6,3 < P_n \leq 25$     | 12              |
| $25 < P_n \leq 63$      | 11              |
| $63 < P_n \leq 630$     | 10              |
| $630 < P_n \leq 1600$   | 9               |

Conforme a Tabela VI, para os motores utilizados nos testes experimentais, aqueles de 1, 2 e 3 cv, estes podem demandar uma potência aparente da ordem de até 12,5, 22 e 30 kVA na partida direta. Como foi utilizado um gerador síncrono de apenas 2 kVA para partir diretamente estes motores, os valores dos afundamento de tensão (Voltage Dip) foram elevados com um tempo de duração (Recovery Time) maior, devido principalmente à limitação de potência do gerador utilizado, não sendo por influência do sistema de excitação. Mesmo para estas condições adversas de funcionamento do gerador síncrono, o sistema de excitação utilizado conseguiu imprimir uma excitação que garantiu praticamente a restauração da tensão nominal (Recovery Voltage) após o transitório de partida dos três motores, com baixo Transient Voltage Overshoot.

Já para o chaveamento do reator trifásico de 1,5 kVAr, todos os termos apresentados na Tabela V foram satisfatórios, mostrando um bom desempenho do sistema de excitação, mesmo quando a carga aplicada possui um baixo fator de potência e classe de potência próxima do carregamento nominal do gerador síncrono.

## V. CONCLUSÕES

O presente trabalho apresentou um estudo do desempenho de um sistema de controle da excitação estático utilizado em geradores síncronos diante de cargas indutivas. O sistema de excitação foi levado ao seu limite máximo de operação, durante os transitórios de partida dos motores de indução e em condição menos extrema no chaveamento do reator trifásico, o que possibilitou a análise dos termos que envolve o desempenho deste sistema.

Constata-se que a magnitude, o fator de potência e taxa de variação da carga aplicada contribuem para aumentar o afundamento de tensão e o tempo de permanência deste afundamento, mais ainda quando somado à baixa potência do gerador síncrono e sua incapacidade de fornecer potência reativa suficiente com o valor de potência consumida durante a partida de cargas motoras. Mesmo assim, o sistema de excitação utilizado conseguiu detectar esta mudança na tensão de saída e variou a excitação de campo o necessário para restaurar a tensão terminal para todos os casos analisados.

Assim, verifica-se que o sistema de excitação utilizado no gerador síncrono obteve um bom desempenho perante cargas totalmente indutivas, e possivelmente também terá caso seja utilizado para cargas com fatores de potência mais elevados.

## REFERÊNCIAS

- [1] Kundur, P. *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [2] Neves, R. V. A. *Controle de Tensão Terminal e Potência Reativa de um Grupo Motor Gerador Diesel Conectado à Rede de Distribuição*. Dissertação de Mestrado, Programa de Engenharia Elétrica da Universidade de São Carlos, 2013.
- [3] Guimarães, G. C. *Apostila do Curso de Dinâmica de Sistemas Elétricos, Parte I. Modelagem de uma Máquina Síncrona e seus Controles para Estudos de Estabilidade Transitória*. UFU, Uberlândia, MG, 2008.
- [4] NEMA. *National Electrical Manufacturers Association. Motors and Generators*. 1300 North 17th Street, Suite 1752. Rosslyn, VA 22209, Washington, USA, 2011.
- [5] Silva, F. B. *Atenuação do Afundamento de Tensão em Geradores Síncronos Isolados Quando Submetidos a Partida Direta de Motores de Indução*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, 2015.
- [6] ABNT, *Associação Brasileira de Normas Técnicas*. ABNT NBR 17094-2:2008 - *Máquinas Elétricas Girantes - Motores de Indução, Parte 1: Trifásicos*. Avenida Treze de Maio, 13 - 28º andar 20031-901 - Rio de Janeiro - RJ: ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.