

TÉCNICA DE CONTROLE VETORIAL PARA SINCRONIZAÇÃO COM A REDE ELÉTRICA E OPERAÇÃO DE UM GERADOR SÍNCRONO DE POLOS SALIENTES

Guilherme P. da S. Júnior*, Luã S. Cardoso[†], Ricardo L. de A. Ribeiro[‡], Thiago O. A. Rocha[§] e Cecílio M. S. Neto[¶]

*^{†‡§}Departamento de Engenharia Elétrica e Computação

Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)

[¶] Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Email: *gpsilvajr@gmail.com, [†]luansilvacardoso@yahoo.com.br, [‡]rlucio@ct.ufrn.br

[§]thiago.rocha@ct.ufrn.br, [¶]cecilio.martins@ufersa.edu.br

Resumo—Neste artigo é apresentado um estudo de um sistema elétrico que possui um gerador síncrono (GS) de polos salientes que emula uma usina hidrelétrica (UHE), utilizando uma técnica de controle vetorial para a sincronização do sistema com a rede elétrica. O GS é acoplado a uma máquina de corrente contínua que emula uma turbina hidráulica. Tanto o enrolamento de campo do GS como o de armadura da máquina CC são alimentados por VSI (do inglês, *Voltage Source Inverter*) que são acionados respectivamente pelo o regulador automático de tensão (do inglês, *Automatic Voltage Regulator - AVR*) e controle de velocidade. A validação da referida técnica de controle é viabilizada por meio de ensaios onde é analisada a sincronização da máquina com a rede elétrica e a dinâmica do sistema durante a incidência de um curto circuito trifásico. Os resultados obtidos, bem como, a sua discussão em condições transitórias e estacionárias demonstram a eficácia dos sistemas de controle.

Keywords – Sincronismo, Controle Vetorial, Gerador Síncrono, VSI, AVR.

I. INTRODUÇÃO

A matriz elétrica brasileira tem uma capacidade instalada de 160 GW, em que 64% corresponde a geração por usinas hidrelétricas (UHE) [1]. As UHE utilizam geradores síncronos (GS) de polos salientes com elevado número de polos, imprescindíveis na manutenção da estabilidade do sistema elétrico de potência (SEP) devido a sua inércia rotacional e a seus serviços ancilares [2].

As UHE operam em lugares remotos distantes dos grandes centros consumidores, para que possam manter a confiabilidade do SEP, sem que haja interrupções da geração, e que se mantenha a qualidade da energia gerada. Há a necessidade de que os GS trabalhem em sincronismo com o SEP.

Para que um GS esteja em sincronismo com o SEP, deve-se respeitar as condições: possuir a mesma sequência de fase, amplitudes, frequência das tensões dos terminais do gerador com a rede elétrica e que as tensões da rede elétrica e do GS estejam em fase [3]. Se houver uma diferença angular elevada entre as fases das tensões do GS e as da rede elétrica,

surgirá uma diferença de potencial atuando sobre dois pontos de uma mesma fase, resultando picos de correntes e variações do torque mecânico no eixo do GS [4][5].

A princípio o sincronismo do GS com a rede era realizado manualmente, onde o operador regulava as tensões e frequência do GS até se igualarem as da rede, por intermédio do sincronoscópio [6]. Para superar as limitações desse método, são implementados sistemas de controle da tensão e velocidade, havendo a sincronização automática sem interferência humana [6][7].

A implementação dos sistemas de controle no GS não só aumenta a eficiência na sincronização como é de suma importância na operabilidade do mesmo. O sistema de controle de velocidade está associado a turbina primária, enquanto que AVR (do inglês, *Automatic Voltage Regulator*) está relacionado com a tensão de excitação do GS. O controle da tensão de excitação do gerador síncrono é um dos mais importantes sistemas de controle do SEP [8].

Em [9] são utilizados controladores PI nos controles do AVR e da velocidade. Para obtenção do sincronismo, na malha de controle de velocidade utiliza-se um controlador mais externo, tendo como sinais de entrada as frequências da rede e do GS, adicionando um erro Δf cujo o intuito é zerar a defasagem entre as fases do GS e a rede. Já em [7] o defasamento nulo é obtido com a adição do erro $\Delta\delta$ dos ângulos de fase das tensões.

Para uma melhor operabilidade do GS, é proposto o uso de lógica Fuzzy no controle do AVR [10], além disso utiliza-se PSS (do inglês, *Power System Stabilizer*) na melhoria da estabilidade do sistema. O PSS é representado por uma malha de controle adicional inserida na referência de tensão do AVR e têm por função introduzir amortecimento adicional as oscilações eletromecânicas [11].

Para uma melhor atuação do AVR no controle do GS e com o avanço da tecnologia em eletrônica de potência, buscam-se substituir as excitatrizes rotativas acoplados ao eixo do GS,

por excitatrizes estáticas que utilizam VSI (do inglês, *Voltage Source Inverter*) [12]. As vantagens da utilização de VSI na alimentação da excitatriz são: a flexibilidade de controle, respostas mais rápidas e uma maior eficiência da manutenção da estabilidade do SEP [13].

Neste trabalho é apresentada uma técnica de controle vetorial para o sincronismo de um GS com a rede elétrica. Além disso, é analisado o comportamento do GS utilizando no sistema de excitação um conversor VSI no decorrer de um curto-circuito simétrico trifásico. Para validação da técnica de sincronismo e análise do comportamento do GS durante um curto-circuito simétrico trifásico são apresentados resultados experimentais. A plataforma experimental é descrita na seção 2; na seção 3 são apresentados os modelos do GS e motor de corrente contínua (MCC); na seção 4 são apresentados os resultados experimentais da sincronização do GS com a rede elétrica e a atuação do AVR durante o curto-circuito.

II. DESCRIÇÃO DO SISTEMA

A plataforma experimental proposta é composta por um sistema eletromecânico constituído por um motor de corrente contínua (MCC) de potência nominal 3 kW, acoplado a um GS de polos salientes de potência nominal 5 kVA. Este sistema é conectado a um ponto de acoplamento comum (PAC), no qual é conectado um banco de cargas (lineares e não lineares), um modelo de linha de transmissão (tipo T) e uma fonte primária, implementada por uma subestação abrigada, trifásica de 15 kVA. O enrolamento de campo do GS, bem como, a armadura do MCC são acionados por VSI. As estratégias de controle são executadas em um processador digital de sinais, DSP (*Digital Signal Processor*) TMS3320F28335. Na Figura 1 é apresentado o diagrama unifilar da plataforma experimental.

A conexão entre o GS e a rede é realizada pelo contactor de sincronismo (K_1), que conecta o GS a rede elétrica trifásica segundo uma estratégia de sincronização que é descrita a seguir. O modelo da linha de transmissão (LT) é composto por dois segmentos de 50 km, emulado por um indutor de indutância (l_s) e resistência (r_s).

III. MODELAGEM E ESTRATÉGIAS DE CONTROLE

Para viabilização da plataforma experimental para o desenvolvimento de estudos de técnicas de sincronização e análise de estabilidade é necessário implementar estratégias efetivas de controle. Por conta disso, nesta seção são apresentados os modelos dinâmicos e as estratégias de controle do MCC e do GS de polos salientes.

A. Estratégia de Controle do MCC

O MCC empregado neste trabalho é do tipo excitação separada. O seu enrolamento de campo é alimentado com tensão constante (v_e), o que resulta em um fluxo de excitação constante. O enrolamento de armadura é alimentado por uma fonte CC, controlável (v_a), implementada por VSI. O comportamento dinâmico do MCC pode ser descrito pelas estruturas de controle [15]:

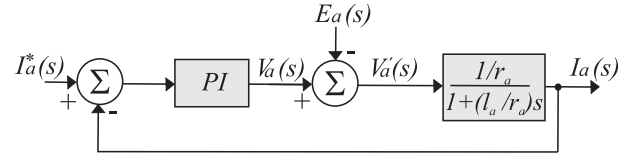


Figura 2. Estrutura de controle de corrente do MCC.

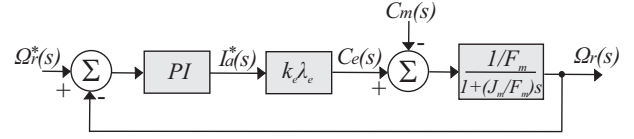


Figura 3. Estrutura de controle de velocidade do MCC.

No qual l_a e r_a representam a indutância e a resistência de armadura; $I_a(s)$ a corrente de armadura; $E_a(s)$ representa força contra-eletromotriz. Em que $C_{e,m}(s)$ o conjugado eletromecânico e carga; k_e representa constante da máquina; λ_e fluxo de excitação; J_m e F_m são os coeficientes de inércia e atrito.

A estratégia empregada para regulação do MCC emprega a estrutura em cascata, composta por três malhas de controle. A malha interna corresponde ao controle da corrente de armadura do MCC, a qual é apresentada na Figura 2. A malha intermediária (Figura 3) é responsável pelo controle da sua velocidade, no qual o conjugado eletromagnético (c_e) que pode ser imposto regulando-se a corrente de armadura (i_a) e, conseqüentemente, a velocidade pela imposição de conjugado. A malha externa é responsável pela regulação da fase das tensões geradas pela máquina síncrona.

A referida estrutura de controle permite a implementação de diferentes perfis de conjugado mecânico, emulando portanto, uma turbina hidráulica.

O controle em cascata apresentado na Figura 4 é utilizado assumindo que cada malha de controle possui uma constante de tempo diferente, o que torna possível utilizar a teoria de perturbações singulares [16] possuindo um desacoplamento temporal entre tais malhas de controle.

Antes da conexão do GS com a rede elétrica, o controle de velocidade do MCC tem a função de regular a frequência e sequência de fase das tensões do GS. Tais grandezas são reguladas utilizando as tensões da rede elétrica como referência. O diagrama de blocos do controle da MCC é apresentado na Figura 4. Os controladores utilizados nas malhas de controle são do tipo proporcional-integral (PI).

O controle das tensões nos terminais do GS é realizado com a atuação na tensão no enrolamento de campo do GS, no qual realiza a regulação da amplitude do vetor tensão do GS ($v_{dq,g}^e$) com o vetor tensão da rede ($v_{dq,b}^e$) no referencial síncrono. Com o controle de velocidade do MCC é realizado o controle da frequência das tensões geradas. A estratégia do controlador de fase do MCC utilizam as tensões do GS e da rede no referencial síncrono dq , compara os valores entre as tensões $v_{d,g}^e$ e $v_{d,b}^e$, gerando uma variação de velocidade de referência $\Delta\omega$ que acelera as máquinas até zerar a diferença entre as velocidades angulares dos vetores das tensões do GS

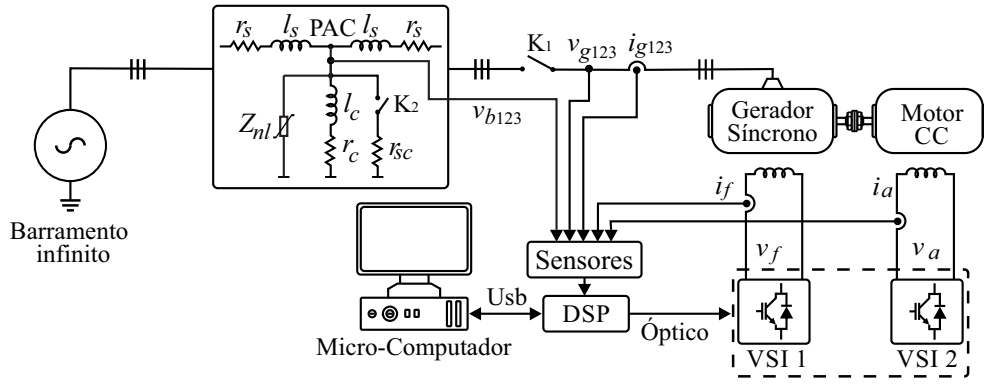


Figura 1. Diagrama Unifilar da Plataforma Experimental.

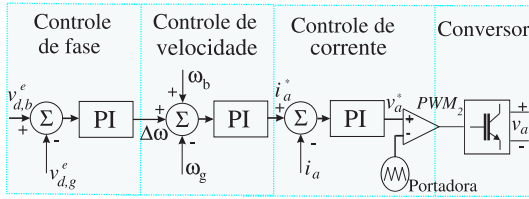


Figura 4. Malha de controle de velocidade do MCC.

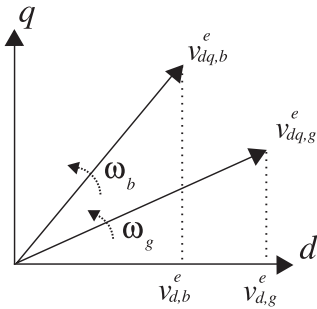


Figura 5. Eixos direto e em quadratura (Transf. Park) da tensão do GS e PAC.

(ω_g) e a rede (ω_b), conforme ilustrado na Figura 5. Este controlador deve ser dimensionado para ter atuação mais lenta que a atuação do controle de velocidade do MCC e o controle da tensão do GS.

B. Estratégia de Controle da Tensão Terminal do GS

O modelo do GS de polos salientes tem como base a estrutura convencional da máquina síncrona convencional, composta por: três enrolamentos no estator, bem como, dois tipos de enrolamentos no rotor, dois amortecedores, ambos curto-circuitados, e um enrolamento de campo alimentado por corrente contínua. Para cálculo dos parâmetros do AVR, utiliza-se o modelo dinâmico de pequenos sinais proposto por [18], descrito pela Figura 6.

Em que k_5 a k_8 são as constantes do modelo linearizado e H a constante de inércia do GS. Conforme a Equação 1 que representa o modelo eletromecânico do GS, a diferença entre torque mecânico $\Delta T_m(s)$ e torque elétrico ($\Delta T_e(s) =$

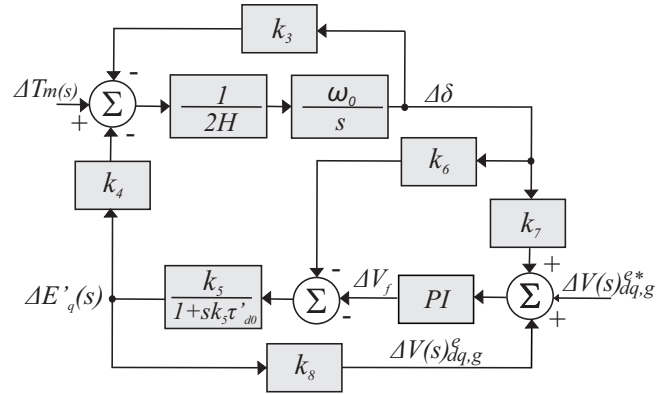


Figura 6. Diagrama de blocos do modelo linearizado do GS, incluindo o regulador automático de tensão (AVR).

$k_3\Delta\delta(s) + k_4\Delta E'_q(s)$) integrado por $1/2H$ resulta no ângulo de carga ($\Delta\delta(s)$), em que k_3 representa a variação do torque elétrico para uma variação no ângulo do rotor com fluxo constante no eixo direto e k_4 variação do torque elétrico para uma variação do fluxo concatenado no eixo direto, com ângulo do rotor constante.

$$\Delta\omega_0(s) = \frac{1}{2H}(\Delta T_m(s) - \Delta T_e(s)) \quad (1)$$

Na Equação 2 que representa o modelo elétrico do GS, a variação da tensão terminal ($\Delta V_{dq,g}^e(s)$) é proporcional a variação da tensão de excitação ($\Delta V_f(s)$) e o ângulo de carga.

$$\Delta V_{dq,g}^e(s) = G_{vg}(s)\Delta V_f(s) + G_{\Delta\delta}(s)\Delta\delta(s) \quad (2)$$

A alimentação do enrolamento de campo do GS é provida por um VSI acionado pelo AVR. A função é controlar a amplitude do vetor tensão nos terminais do GS, por imposição da tensão de campo ($V_f(s)$). Na Figura 6 é apresentado o diagrama de blocos do regulador de tensão empregado. O controlador utilizado é do tipo PI. Na malha de controle, o termo $G_{\Delta\delta}(s)\Delta\delta(s)$ é considerado como uma perturbação a ser compensada pelo controlador. Logo os ganhos do controlador são calculados a partir do desempenho requerido em

malha fechada levando em consideração a seguinte função de transferência.

$$G_{vg}(s) = \frac{k_5 k_8}{1 + s k_5 \tau_{d0}} \quad (3)$$

Onde k_5 representa o fator de impedância, k_8 a variação da tensão terminal ($\Delta v_{dq,g}(s)$) considerando o ângulo de carga (δ) constante e τ_{d0} representa a constante de tempo do enrolamento de campo com o gerador em vazio.

C. Projeto dos Controladores

Na Tabela I são apresentados os critérios de projeto dos controladores, utilizados para o controle de velocidade e do conjunto motor-gerador.

Tabela I
CRITÉRIOS DE PROJETOS PARA OS CONTROLADORES DO SISTEMA PROPOSTO

Controle da Velocidade do Rotor	
Tempo de assentamento	≤ 2 segundos
Sobrevalor	≤ 10 %
Controle da Corrente de Armadura	
Tempo de assentamento	≤ 100 milissegundos
Sobrevalor	≤ 20 %
Controle de Sincronização	
Tempo de assentamento	≤ 7 segundos

A técnica de projeto utilizada para o dimensionamento dos controladores é a de posicionamento de polos. Com base nos critérios apresentados na Tabela I, são determinados polinômios característicos adequados para cada malha de controle. Os cálculos dos parâmetros dos controladores são obtidos por meio da solução da equação Diofantina [17]. Os valores K_p e τ_i dos controladores das referidas estratégias de controle são apresentados na Tabela II.

Tabela II
PARÂMETROS DOS CONTROLADORES PI'S

PI's de Velocidade	
$K_p^\theta = 0,0001$	$\tau_i^\theta = 0,01$
$K_p^\omega = 0,01087$	$\tau_i^\omega = 0,15$
$K_p^I = 3,5$	$\tau_i^I = 0,07$
PI de Tensão do GS	
$K_V^V = 0,448$	$\tau_i^V = 0,001361$

IV. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nas Figuras 7 e 8 são apresentadas a plataforma experimental e o conjunto MCC-GS de polos salientes. Os parâmetros do MCC e do GS são representados nas Tabelas III e IV. A aquisição dos sinais de tensão, de corrente e da posição angular do eixo do conjunto motor-gerador são realizadas por uma interface de aquisição composta por seis sensores de tensão e cinco sensores de corrente do tipo LV-25P e LA-35NP e um encoder (E50S8-500-3-N-24, posição absoluta). A execução dos algoritmos de controle é realizado em um DSP, do tipo TMS320F28335.

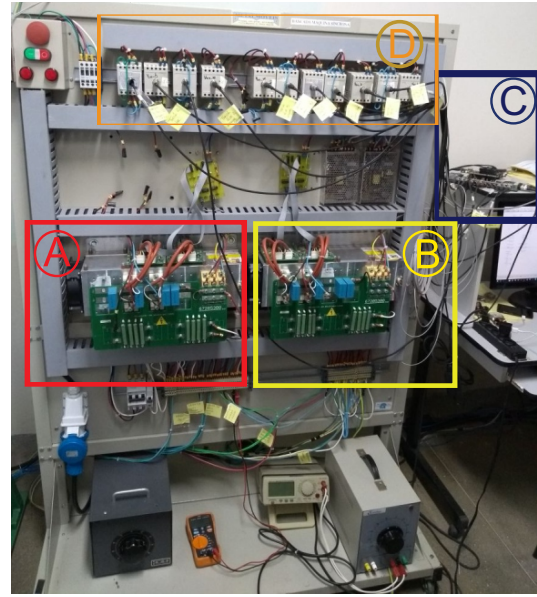


Figura 7. Plataforma experimental: A) representa o VSI para controle de v_f , B) representa o VSI para controle de v_a , C) TMS e D) sensores.

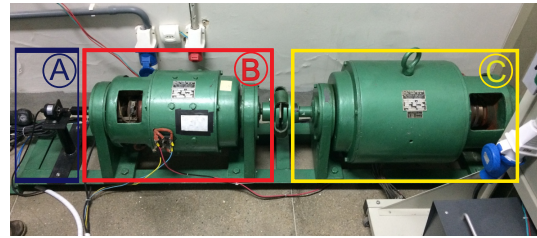


Figura 8. Plataforma experimental: A) encoder, B) motor de corrente contínua e C) gerador síncrono de polos salientes

A. Sincronismo do GS

Os resultados experimentais referentes a sincronização do GS com a rede elétrica utilizando técnicas de controle vetorial são apresentados nas Figuras 9 e 10. Inicialmente é realizado a partida no MCC e simultaneamente é excitado o campo do GS. Conforme Figuras 9 (a)-(c) o MCC é acelerado até atingir a velocidade nominal do GS, para isto é imposto ao MMC pelo VSI uma tensão armadura (v_a) controlável, conseqüentemente controla-se a corrente de armadura (i_a).

Durante a sincronização o regulador de tensão tem a função de igualar as amplitudes das tensões do GS com a do PAC. Baseado na Figura 10 (c), observa-se que inicialmente a tensão de excitação do GS tem um aumento abrupto, devido a ação rápida do VSI, até atingir a tensão de 100 V que representa a sua saturação. Após a sincronização, o nível de excitação é ajustado para garantir a igualdade nas amplitudes das tensões.

Utilizando a técnica de controle vetorial no sincronismo do GS na rede, em $t=3,9s$ garante que os vetores tensões da rede e do GS se alinham. Neste instante, o sistema de controle executado no DSP envia um sinal de comando para o contactor (K_f) (conforme Figura 1), que interconecta o GS a rede elétrica.

Tabela III
PARÂMETROS ELÉTRICOS DO MCC

Enrolamento de Campo		
$v_e = 220 \text{ V}$	$r_e = 392 \Omega$	$l_e = 32 \text{ mH}$
Enrolamento de Armadura		
$v_a = 220 \text{ V}$	$r_{acc} = 1,2 \Omega$	$l_{acc} = 126 \text{ mH}$
$P = 3 \text{ kW}$	$I_n = 13,5 \text{ A}$	$\omega_r = 1500 \text{ rpm}$

Tabela IV
PARÂMETROS DO GS

Rotor	$r_a = 1,8 \Omega$	$l_a = 324 \text{ mH}$
Estator	$r_f = 1,2 \Omega$	$l_f = 126 \text{ mH}$
$S_s = 5 \text{ kVA}$	$v_g = 220/127 \text{ V}$	$\omega_m = 600 \text{ rpm}$
$x_q = 31,6 \Omega$	$x_d = 50 \Omega$	$x'_d = 16,5 \Omega$
12 polos	$l_{md} = 117 \text{ mH}$	$l_{mq} = 69 \text{ mH}$

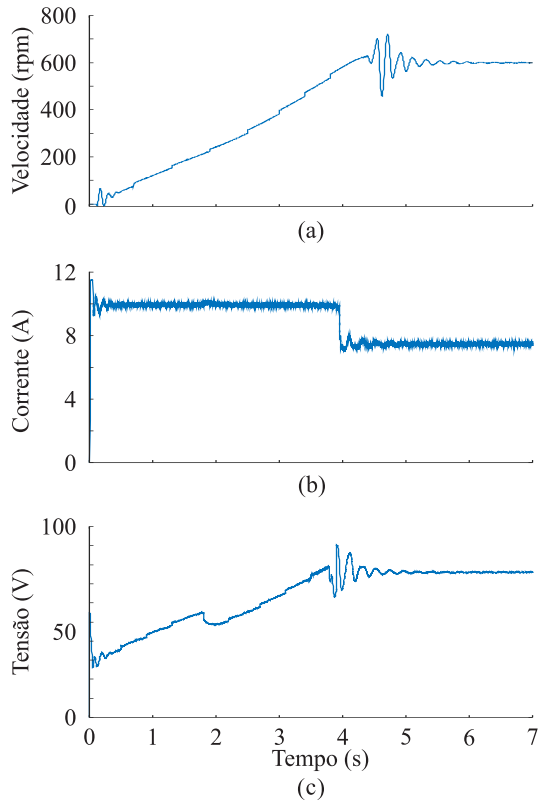


Figura 9. (a) velocidade mecânica do conjunto (ω_m); (b) corrente de armadura (i_a) do MCC e (c) valor referência da tensão de armadura (v_a) do MCC.

Nas Figuras 10 (a)-(b) são apresentadas as tensões do PAC e do GS da fase A e as tensões de linha do GS e do PAC. Logo, é possível observar que antes da sincronização, as tensões do GS e do PAC estão defasadas, a ação do controlador de fase atua para reduzir a diferença angular entre eles, até que haja o sincronismo no instante $t = 3,9\text{s}$.

B. Simulação de Curto-Circuito

Nas Figuras 11 e 12 são apresentados os resultados experimentais relativos ao ensaio de simulação de curto-circuito, com duração de 500ms. A referida simulação é implementada

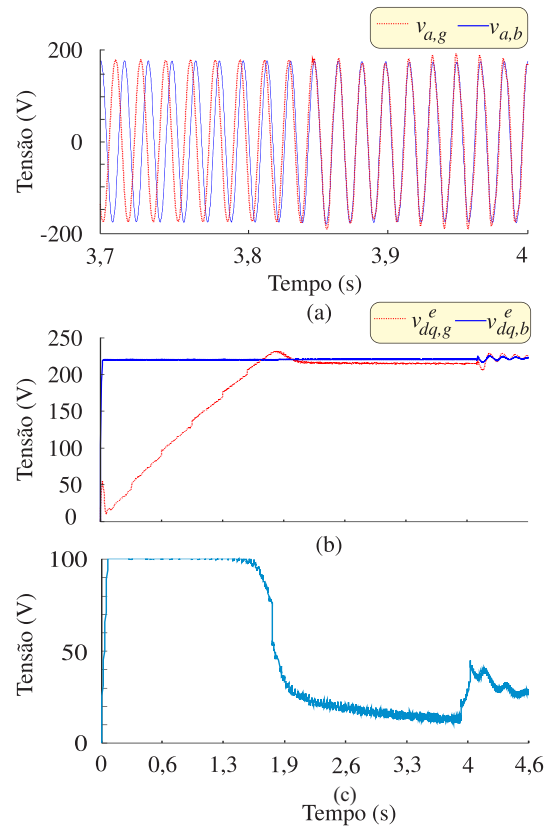


Figura 10. (a) tensão da fase A da rede (azul) e do GS (vermelho) durante a sincronização do GS a rede; (b) tensões de linha da rede ($v_{dq,b}^e$) e do GS ($v_{dq,g}^e$); (c) valor de referência da tensão de excitação (v_f) do GS.

interconectando-se uma carga resistiva trifásica ($r_{sc} = 5\Omega$) em paralelo com o banco de cargas existente no PAC. Esta interconexão é realizada pelo contactor (K_2), comandado de forma controlada pelo o DSP, conforme Figura 1.

Na Figura 11 (a) é apresentada o gráfico da frequência das tensões geradas pelo GS durante a ocorrência do curto circuito. No instante $t = 19,3\text{s}$, em que o curto-circuito é simulado, a frequência do GS apresentou uma oscilação de 3% da nominal, representando um pequeno transitório, mas não tirando o GS do sincronismo.

No instante que é provocado um curto-circuito ao sistema, há uma elevação de três vezes dos valores rms das correntes de fase do GS.

Na Figura 12 (a)-(b) são apresentadas as tensões do PAC e do GS da fase A e as tensões de linha no referencial síncrono, respectivamente. De acordo com a Figura 12 (b), durante a ocorrência de um curto circuito a tensão no PAC apresentou um redução de aproximadamente 10% do valor de regime. As tensões nos terminais do GS aumentaram devido a ação do regulador de tensão. Conforme é apresentado na Figura 12 (c), devido a ação rápida do VSI no enrolamento de campo do GS durante o curto-circuito a tensão de excitação aumenta bruscamente fazendo com que as tensões do GS mantenha na sua tensão nominal. Logo, após a retirada curto-circuito, as tensões da rede e do GS convergem para condição de regime

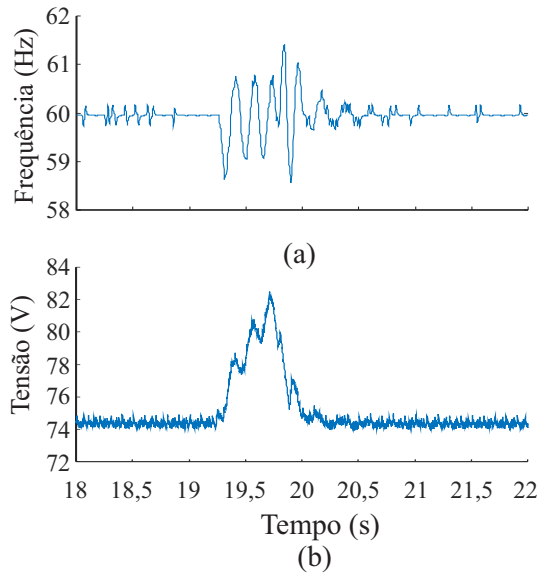


Figura 11. (a) frequência da tensão do GS; (b) valor de referência da tensão de armadura (v_a) do MMC.

permanente.

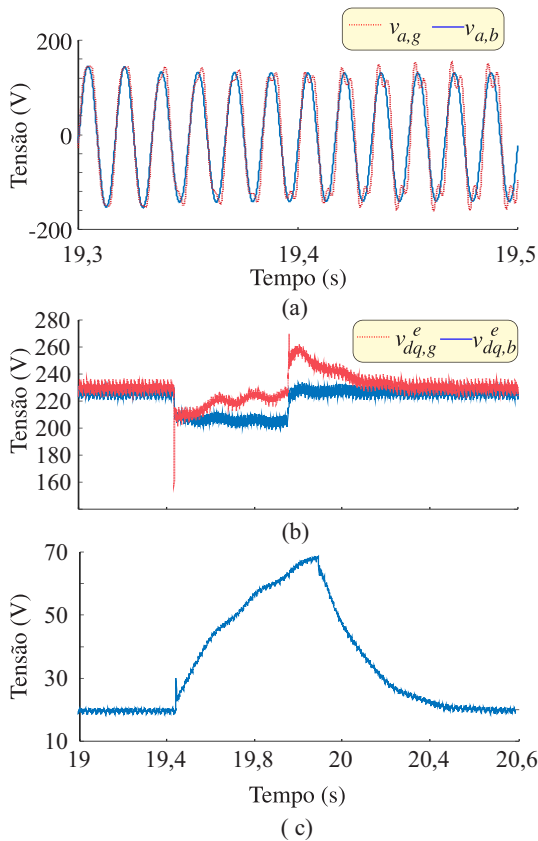


Figura 12. (a) tensão da fase A da rede (azul) e tensão da fase A do GS (vermelho) no instante do curto-circuito; (b) tensões de linha da rede ($v_{dq,b}^e$) e do GS ($v_{dq,g}^e$); (c) valor de referência da tensão de excitação (v_f) do GS.

V. CONCLUSÕES

Foi apresentado neste artigo o funcionamento de uma plataforma experimental que emula uma UHE conectado a rede elétrica, utilizando técnica de controle vetorial para entrada em sincronismo do GS a rede elétrica. Diferentemente dos sistemas tradicionais onde conversores tiristorizados são usados no acionamento de campo do GS, neste trabalho tal acionamento foi realizado com a utilização de um VSI.

Os resultados experimentais comprovam a eficácia da técnica de controle vetorial do GS no sincronismo com a rede, obtendo um sincronismo rápido e com pequenas oscilações de tensão e frequência. Ao desenvolver testes de comportamento na plataforma experimental sob condição de curto-circuito simétrico na rede, os resultados obtidos demonstram que os níveis das tensões e da frequência geradas se mantiveram em valores tolerados pela norma IEEE 1547-2018 [19]. Devido a ação rápida do VSI no controle da tensão do GS. Logo, valida as técnicas de controle e de operação implementadas, onde foram capazes de manter o sistema estável mesmo na ocorrência de distúrbios.

REFERÊNCIAS

- [1] ANEEL, Agência Nacional de Energia Elétrica, 2018.
- [2] S. Curi and D. Grob and F. Dörfler, *Control of low-inertia power grids: A model reduction approach*. IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control (CDC), 2017.
- [3] Irving I. Kosow, *Electric Machinery and Transformers*. Prentice-Hall Of India Pvt. Limited, 2009.
- [4] Ion Boldea, *The Electric Generators Handbook - Synchronous Generators*. Taylor e Francis Group, 2006.
- [5] IEEE, *Standard for Salient-Pole 50 Hz and 60 Hz Synchronous Generators and Generator/Motors for Hydraulic Turbine Applications Rated 5 MVA and Above*. Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2006.
- [6] W. M. Strang, *Generator Synchronizing Industry Survey Results IEEE Power System Relaying Committee Report*. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996.
- [7] N. C. Seeley, *Advances in Power Generator Control*. IEEE Industry Applications Magazine, 2014.
- [8] Paul M. Anderson, *Power System Control and Stability*. The Iowa State University Press Ames, 1980.
- [9] Tatiana Mariano Lessa Assis, *Automatic Reconnection From Intentional Islanding Based on Remote Sensing of Voltage and Frequency Signals*. IEEE Transaction on Smart Grid, 2012.
- [10] Damir Sumina, *Excitation control of a synchronous generator using fuzzy logic stabilizing controller*. ECPEA, 2005.
- [11] K. R. Padiyar, *Power System Dynamics: Stability and Control*. Hyderabad, 2008.
- [12] Prabha Kundur, *Power System Stability and Control*. McGraw-Hill, 2013.
- [13] Baorong Zhou, *Investigating the influence of types and parameters of excitation systems on the dynamic reactive power reserve of synchronous generators*. FSKD, 2015.
- [14] Mohammad Shahidehpour, *Power System Dynamics Stability and Control*. Mircea Eremia, 2013.
- [15] Werner Leonhard, *Control of Electrical Drives*. Springer, 2001.
- [16] H. K. Khalil, *Nonlinear Systems*. New Jersey: Prentice Hall, 2002.
- [17] T. de O. A. Rocha, *Contribuições para estratégia de controle aplicada à geração fotovoltaica interconectada à rede elétrica*. UFRN, 2015.
- [18] F. P. Demello and C. Concordia, *Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969.
- [19] IEEE 1547, *IEEE Standard for Interconnection and Interoperability of Distributed Energy Resources with Associated Electric Power Systems Interfaces*, 2017.