



Modelagem e Operação do Gerador Autoexcitado Modeling and Operation of the Self-Excited Generator

Henrique Rodrigues Santos¹, Gabriel Lourenço², Alessandro Goedel³,
Wesley Angelino de Souza⁴, Marcelo Favoretto Castoldi⁵

RESUMO

O processo de geração de energia elétrica desempenha um papel fundamental na sociedade moderna, fornecendo a base energética essencial para o funcionamento de diversos setores, incluindo o residencial, comercial, industrial e serviços, contribuindo assim para o desenvolvimento econômico e proporcionando conforto, segurança e qualidade de vida. O Gerador de Indução se destaca entre outras máquinas como uma opção atrativa de fonte de geração de energia elétrica, devido ao seu baixo custo, baixa manutenção e robustez. Neste trabalho, exploramos o Gerador de Indução Autoexcitado em aplicações remotas sob diferentes condições de carga resistiva. Investigamos o conceito da determinação da capacitância necessária para promover a autoexcitação, bem como sua parametrização, visando o desenvolvimento de um modelo computacional com a finalidade de comparação com os resultados experimentais. A pesquisa proporcionou o estudo sobre os parâmetros e processos necessários para o adequado funcionamento do Gerador de Indução autoexcitado, possibilitando um sistema de baixo custo de micro-geração de energia em lugares remotos.

PALAVRAS-CHAVE: Gerador de Indução; Autoexcitação; Operação Remota.

ABSTRACT

The process of electrical energy generation plays a fundamental role in modern society, providing the essential energy foundation for the operation of various sectors, including residential, commercial, industrial, and services, contributing to economic development and offering comfort, safety, and quality of life. Among various machines, the Self-Excited Induction Generator stands out as an attractive option for electrical energy generation due to its low cost, low maintenance, and robustness. In this study, we explored the Self-Excited Induction Generator in remote applications under different resistive load conditions. We investigated the concept of determining the required capacitance to promote self-excitation, as well as its parameterization, aiming to develop a computational model for comparison with experimental results. The research provided insights into the necessary parameters and processes for the proper operation of the self-excited induction generator, enabling a low-cost micro-generation system in remote areas.

KEYWORDS: Induction Generator; Self-Excitation; Remote Operation.

INTRODUÇÃO

O conceito geral de geração de energia elétrica envolve a conversão de uma forma de energia em eletricidade. Podem ser utilizadas diferentes fontes de energia, como os combustíveis fósseis (carvão, petróleo, gás natural), energia hidráulica, eólica, solar, nuclear, mecânica, entre outras.

Os geradores são equipamentos que funcionam com base no princípio da indução eletromagnética. Há o surgimento de uma tensão induzida em uma bobina a medida que ela tem movimento

¹ Bolsista PIVIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: henriquerodrigues@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 4305343955083927.

² Bolsista PIVIC. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: lourencog@alunos.utfpr.edu.br. ID Lattes: 1968347137016545.

³ Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: agoedel@utfpr.edu.br. ID Lattes: 1920650157123774.

⁴ Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: wesleyangelino@utfpr.edu.br. ID Lattes: 8594457321079718.

⁵ Docente no Departamento Acadêmico de Elétrica (DAELE). Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil. E-mail: marcastoldi@utfpr.edu.br. ID Lattes: 6178029384175205.

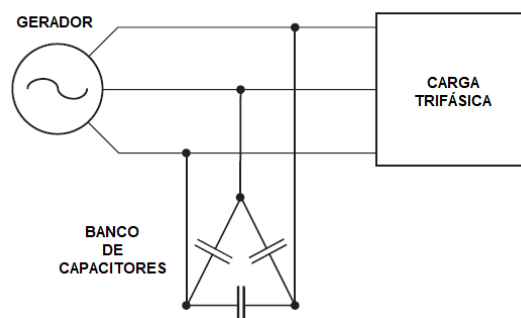


dentro de um campo magnético e conseqüentemente surge uma corrente caso seja um circuito fechado, possibilitando assim a alimentação de diferentes tipos de cargas (BARBI, 1985).

O Gerador de Indução (GI) sendo uma máquina de baixo custo, baixo índice de manutenção, disponibilidade, robustez e capacidade de geração de energia, acaba sendo uma oportunidade de estudo e aperfeiçoamento dos métodos utilizados para tal função, em especial em sistemas alternativos, como em operação remota.

O esquema para geração de energia na máquina de indução desconectado da rede elétrica ou em áreas remotas é ilustrado pela Figura 1. Nesta configuração uma máquina primária, responsável por fornecer energia mecânica rotacional ao GI é conectada ao eixo do mesmo e nos terminais do estator. Em paralelo com as cargas, são necessários capacitores responsáveis pela autoexcitação da máquina.

Figura 1 – Representação do Gerador de Indução Autoexcitado.



Fonte: Adaptado de (SIMÕES; FARRET, 2014).

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

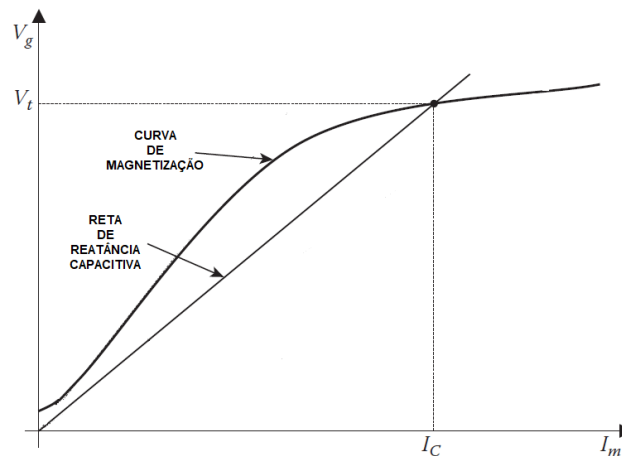
Para uma efetiva conversão eletromecânica de energia no GI é necessário um magnetismo residual em seu núcleo, que ao ser submetido a uma rotação surja uma tensão induzida nos terminais do estator. O magnetismo residual de uma máquina de indução vem de operações anteriores atuando como motor ou da ligação de baterias nos terminais do estator. Porém, este magnetismo é baixo, sendo assim as tensões induzidas tem valores baixos, impossibilitando a alimentação de cargas.

Em operações isoladas, um banco de capacitores deve ser conectado ao estator do GI, conforme mostrado na Figura 1, fornecendo os reativos necessários para aumentar a magnetização da máquina e promover a autoexcitação (CHAPMAN, 2013). Os capacitores implicam no avanço de fase da corrente de excitação responsável por produzir um fluxo magnético de mesmo sentido ao fluxo residual, aumentando a magnetização da máquina e conseqüentemente a tensão induzida nos terminais do gerador. Como consequência, tem-se a circulação de uma corrente crescente até a saturação do núcleo magnético de acordo com o ponto de operação escolhido e assim se explica o processo de autoexcitação do GI.

Nos capacitores, a relação entre tensão e corrente reflete a sua reatância, característica representada por uma reta. A mesma relação reflete também a reatância da máquina de indução, chamada curva de magnetização. O ponto de intersecção entre estas duas características, curva de magnetização da máquina de indução e reta de reatância capacitiva, nos traz a tensão a vazio nos terminais do GI (HOMRICH, 2013), representado na Figura 2.



Figura 2 – Curva de Magnetização da Máquina de Indução Trifásica



Fonte: Adaptado de (SIMÕES; FARRET, 2014).

Pode-se chegar no valor de capacitância necessária para promover a autoexcitação até o ponto de operação escolhido igualando a Equação 1, que descreve a reatância capacitiva à relação linear entre tensão e corrente descrita anteriormente, chegando na Equação 2.

$$X_c = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{V}{I} \quad (1)$$

$$C_{exc} = \frac{I}{2\pi fV} \quad (2)$$

Onde X_c é a reatância capacitiva, π a constante matemática, f a frequência elétrica, C a capacitância, V a tensão, I a corrente elétrica e C_{exc} a capacitância para excitação.

METODOLOGIA

Nesta seção, abordaremos os métodos utilizados ao longo do trabalho.

LEVANTAMENTO DA CURVA DE MAGNETIZAÇÃO

A curva de magnetização da máquina de indução trifásica é obtida variando gradualmente a tensão em seus terminais e medindo a corrente, até uma tensão aproximadamente 20% maior que sua tensão nominal (WU, 2009).

ENSAIOS DE PARAMETRIZAÇÃO

Serão realizados os ensaios a vazio, de rotor bloqueado e o ensaio CC descritos em (CHAPMAN, 2013), com o objetivo de chegar nos parâmetros da máquina de indução utilizada no trabalho, tendo em vista que será criado um modelo computacional posteriormente.

Primeiramente será realizado o ensaio CC, onde basicamente é aplicada uma tensão CC nos enrolamentos de estator da máquina de indução. Em corrente contínua a reatância dos enrolamentos é zero, portanto o fluxo de corrente é limitado apenas pela parte resistiva, podendo então ser determinado o valor de resistência do estator.



No ensaio de rotor bloqueado o mesmo é travado para que não possa se mover e uma tensão é aplicada até que a máquina atinja seu valor de corrente nominal e os valores de tensão, corrente e potência são medidos.

Já no ensaio a vazio são medidas as perdas rotacionais, pois estando livre para girar, o atrito e a ventilação são as únicas cargas no motor. Neste ensaio é aplicada a tensão nominal da máquina e são medidas a tensão, a corrente e a potencia.

SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Neste trabalho foi utilizado o *Matlab - Simulink* para simular computacionalmente o comportamento do Gerador de Indução Autoexcitado (GIAE). O elemento principal é o bloco da máquina de indução, que será configurado de acordo com os parâmetros adquiridos nos ensaios de parametrização. Como forma de acionamento do gerador será utilizado um modelo de Máquina de Corrente Contínua configurado como máquina primária. Nos terminais do estator, em paralelo com o bloco de cargas, são conectados os capacitores responsáveis pela auto excitação da máquina. O bloco de cargas será responsável por realizar comutações entre estado a vazio e com carga.

TESTES REALIZADOS

Como forma de obter e comprovar os resultados do trabalho, serão realizados o teste em ambiente computacional *Matlab - Simulink* através do modelo desenvolvido e o teste prático em bancada, desenvolvido no Laboratório de Sistemas Inteligentes (LSI) da UTFPR de Cornélio Procópio, utilizando como gerador o MIT da Weg 1 CV Linha Standart – IV polos – 60Hz 220/380V.

Em ambos os testes, computacional e prático, a máquina de indução será submetida a uma rotação acima de sua velocidade síncrona, com o auxílio de uma máquina auxiliar, para que entre em modo gerador e após isso será analisado seu comportamento à vazio, assim como ao serem inseridas cargas resistivas após o regime permanente do conjunto.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

CURVA DE MAGNETIZAÇÃO E CAPACITÂNCIA DE AUTOEXCITAÇÃO

Com o método descrito na seção anterior foi obtida a curva de magnetização da máquina ilustrada pela Figura 3. Após traçada a curva de magnetização da máquina de indução, é escolhido um ponto de operação de interesse e aplicado os valores de tensão e corrente na Equação 2. O ponto de operação escolhido foi 230 V e 3,3 A, chegando em uma capacitância de autoexcitação de aproximadamente 38 μF .

PARÂMETROS

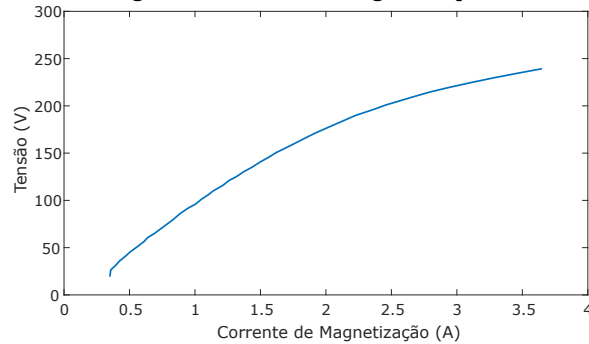
Com os ensaios de parametrização descritos na seção anterior foram obtidos os parâmetros necessários para a representação da máquina de indução através de um circuito equivalente, como pode ser visto na Figura 4.

MODELO COMPUTACIONAL

Seguindo os pontos descritos na seção anterior sobre a modelagem em software do GIAE, chegou-se no modelo representado na Figura 5, que será utilizado á fim de comparação com os resultados práticos.

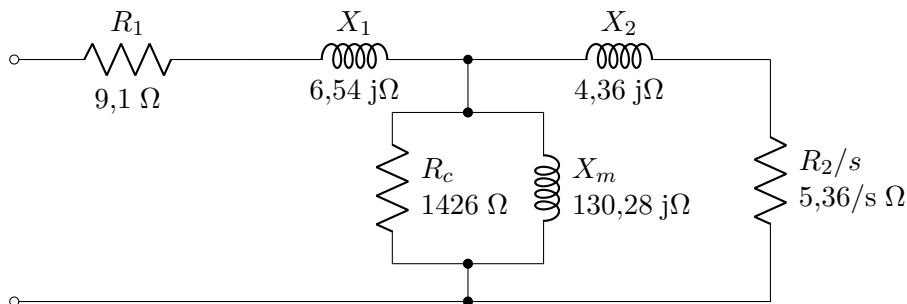


Figura 3 – Curva de Magnetização.



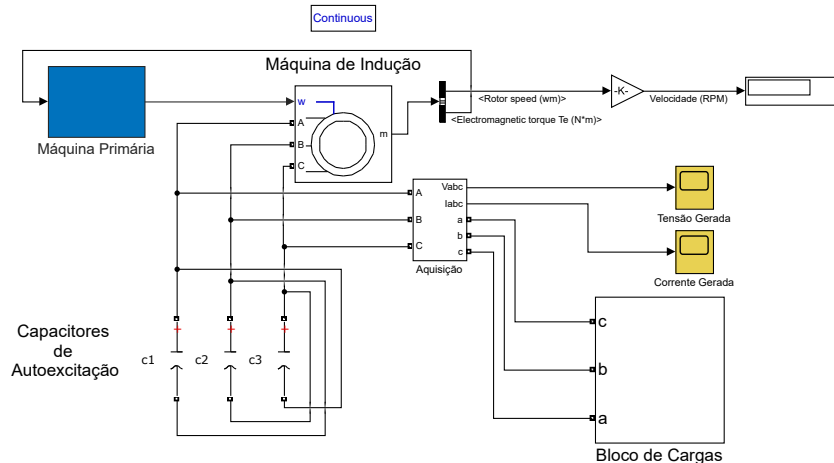
Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 4 – Circuito equivalente.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

Figura 5 – Modelo computacional desenvolvido.



Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

TESTES REALIZADOS

Os resultados obtidos no teste experimental e na simulação computacional estão expostos na Tabela 1. Foram medidas as tensões de linha, as correntes de linha e a frequência da tensão gerada nas situações a vazio e com carga resistiva disponíveis em laboratório e replicadas na simulação computacional. Vale salientar que para valores de carga menores que os utilizados neste trabalho a máquina perde a autoexcitação e a geração cai a zero.



XIII Seminário de Extensão e Inovação XXVIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da UTFPR

Ciência e Tecnologia na era da Inteligência Artificial: Desdobramentos no Ensino Pesquisa e Extensão
20 a 23 de novembro de 2023 - Campus Ponta Grossa, PR



Tabela 1 – Resultados

	Resistência de Carga (Ω)	Tensão $L_{1/2}$ (V)	Tensão $L_{2/3}$ (V)	Tensão $L_{3/1}$ (V)	Corrente L_1 (A)	Corrente L_2 (A)	Corrente L_3 (A)	Frequência (Hz)
Experimentais	∞	235,8	236,8	236	3,78	3,79	3,75	59,69
	366	188,7	189,2	188,8	3,06	3,04	2,91	56,10
	277,35	175,5	175,9	175,3	2,93	2,9	2,77	55,87
	265,35	167,8	168	168,2	2,85	2,82	2,69	55,7
	240,3	163,4	163,8	163,5	2,79	2,76	2,66	55,66
	221,7	160,1	160,8	160,4	2,77	2,75	2,63	55,61
183,6	147	147,2	147	2,65	2,62	2,5	55,57	
	Resistência de Carga (Ω)	Tensão $L_{1/2}$ (V)	Tensão $L_{2/3}$ (V)	Tensão $L_{3/1}$ (V)	Corrente L_1 (A)	Corrente L_2 (A)	Corrente L_3 (A)	Frequência (Hz)
Computacionais	∞	237,9	237,9	237,9	5,63	5,63	5,63	54,076
	366	186,39	186,39	186,39	4,37	4,37	4,37	52,856
	277,35	171,96	171,96	171,96	4,07	4,07	4,07	52,456
	265,35	169,49	169,49	169,49	4,02	4,02	4,02	52,380
	240,3	161,36	161,36	161,36	3,84	3,84	3,84	52,209
	221,7	154,07	154,07	154,07	3,69	3,69	3,69	52,062
183,6	125,29	125,29	125,29	3,05	3,05	3,05	51,721	

Fonte: Elaborado pelos autores (2023).

CONCLUSÃO

Este trabalho contribui para aplicações em operações remotas, onde o GIAE pode ser uma maneira eficaz de geração de energia elétrica.

Através dos ensaios de parametrização, foi possível representar a máquina de indução em um circuito equivalente e desenvolver o modelo computacional. Além disso, com a curva de magnetização foi determinada a capacitância necessária para a autoexcitação com precisão.

Por fim, são vistas algumas discrepâncias ao comparar os resultados práticos e computacionais. Tais discrepâncias se dão ao fato da complexidade da representação das condições reais do fenômeno de autoexcitação em simulações, realçando tanto a necessidade de se ajustar minuciosamente os parâmetros do conjunto do GIAE quanto a modelagem do sistema elétrico em condições reais.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Centro Integrado de Pesquisa em Controle e Automação - CIPECA e ao Laboratório de Sistemas Inteligentes - LSI da UTFPR campus Cornélio Procópio pela estrutura e acolhimento para desenvolvimento da pesquisa.

Conflito de interesse

Não há conflito de interesse.

REFERÊNCIAS

- BARBI, Ivo. **Teoria Fundamental do Motor de Indução**. [S.l.]: UFSC, 1985.
- CHAPMAN, Stephen J. **Fundamentos de Máquinas Elétricas (5º ed.)** [S.l.]: Mc Graw Hill, 2013.
- HOMRICH, Guilherme. **Regulação de tensão em Geradores de Indução**. 2013. F. 119. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- SIMÕES, Marcelo G.; FARRET, Felix A. **Modeling and Analysis with Induction Generators (3rd ed.)** [S.l.]: CRC Press, 2014.
- WU, Marcel. **Análise teórico-experimental do Gerador de Indução Trifásico diretamente conectado à rede de distribuição elétrica**. 2009. Mestrado em Ciências – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.