

MÉTODOS NUMÉRICOS PARA RESOLVER SISTEMAS DE EQUAÇÕES ALGÉBRICAS QUE MODELAM PROBLEMAS DE AEROGERADORES EÓLICOS

Pauline Noemia dos Santos¹, Adina Rocha dos Santos² e Rinaldo Vieira da Silva Júnior³

¹Instituto Federal de Alagoas, Palmeira dos Índios - AL, pns1@aluno.ifal.edu.br

²Instituto Federal de Alagoas, Palmeira dos Índios - AL, adina.santos@ifal.edu.br

³Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo - AL, rinaldo.silva@ceca.ufal.br

Resumo

O estudo aplicou o método de Newton-Raphson na resolução de equações não lineares que modelam o comportamento de aerogeradores eólicos durante afundamentos de tensão. Com base no Teorema de Thévenin, deduziu-se a relação do torque eletromagnético em função da resistência externa do rotor, permitindo determinar iterativamente o valor ideal dessa resistência. As simulações realizadas no GeoGebra confirmaram a precisão, estabilidade e rápida convergência do método, evidenciando sua eficácia no controle da suportabilidade dos geradores.

Palavras-chave: *Método de Newton-Raphson; Aerogeradores; Sistemas Elétricos.*

Introdução

A energia eólica tem crescido rapidamente no Brasil, representando cerca de 15% da matriz elétrica nacional, com mais de 31 GW de capacidade instalada, principalmente no Nordeste (JORNAL DA USP, 2023; ABEEÓLICA, 2024). Esse avanço decorre das condições climáticas favoráveis e de políticas de incentivo à geração renovável.

Um dos principais desafios do setor é garantir a estabilidade da rede elétrica durante afundamentos de tensão. Para isso, os aerogeradores precisam atender a critérios de suportabilidade e controle de potência, modelados por equações não lineares de difícil solução analítica.

Neste contexto, este estudo aplica o método de Newton-Raphson para resolver essas equações e determinar o torque eletromagnético em função da resistência externa do rotor, buscando melhorar a eficiência e estabilidade dos sistemas eólicos.

Objetivos

Geral: Aplicar métodos numéricos para resolver equações não lineares que modelam a suportabilidade de aerogeradores eólicos, visando melhorar sua eficiência.

Específicos:

- i) Aplicar o método de Newton-Raphson para determinação da resistência externa ótima;
- ii) Modelar o torque eletromagnético em função da resistência externa;
- iii) Validar os resultados obtidos por meio de simulações e representações gráficas no software GeoGebra.

Metodologia

O estudo foi dividido em três etapas: (i) revisão bibliográfica sobre o método de Newton-Raphson e modelagem de máquinas assíncronas; (ii) dedução matemática do torque eletromagnético com base no Teorema de Thévenin; (iii) simulações numéricas e análise gráfica no software GeoGebra. Para validar os cálculos, foram utilizados parâmetros de máquinas elétricas presentes na literatura e tabelas de especificações de aerogeradores.

As equações fundamentais aplicadas foram:

Iteração do método de Newton-Raphson:

$$X_{n+1} = X_n - \frac{f(X_n)}{f'(X_n)} \quad (\text{eq.1})$$

Torque eletromagnético da máquina assíncrona:

$$T_{em} = \frac{3P \cdot V_{th}^2 \cdot \frac{R_2}{2s}}{2 \cdot \omega_{sin} \cdot [(R_{th} + \frac{R_2}{s})^2 + (X_{th} + X_2)^2]} \quad (\text{eq.2})$$

Função do torque desejado:

$$f(R_{ext}) = T_e(R_{ext}) - T_{desejado} = 0 \quad (\text{eq.3})$$

Cálculo Iterativo da Resistência Externa:

$$R_{ext}^{(n+1)} = R_{ext}^n - \frac{T_e R_{ext}^n - T_{desejado}}{\frac{dT_e}{dR_{ext}}} \quad (\text{eq.4})$$

Para deduzir a equação do torque eletromagnético de uma máquina assíncrona de rotor bobinado, utiliza-se o **circuito equivalente por fase**. Esse modelo permite representar as resistências e reatâncias do estator, do rotor e do ramo de magnetização, possibilitando a simplificação do sistema por meio do Teorema de Thévenin. A partir dessa representação, pode-se formular matematicamente o torque em função da resistência externa aplicada ao rotor, conforme apresentado.

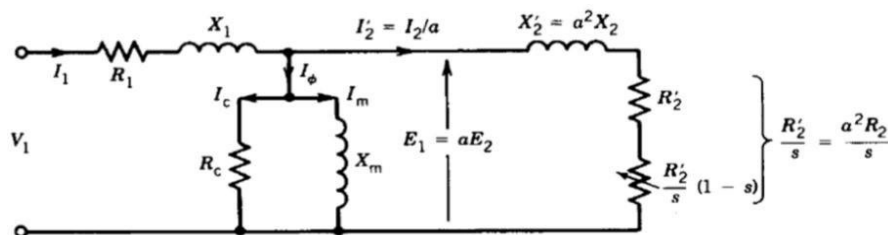


Fig. 1: Circuito equivalente a uma fase de uma máquina assíncrona.

Modelagem do problema

Durante afundamentos de tensão, os geradores de indução com rotor bobinado enfrentam dificuldades relacionadas à estabilidade do sistema, como aumento da corrente e do torque eletromagnético, que podem levar ao desligamento por sobrevelocidade. Para reduzir esse efeito, o artigo propõe o controle dinâmico da resistência externa R^{ext} conectada ao rotor, com a finalidade de manter o torque dentro de níveis seguros.

Tab.1: ESPECIFICAÇÕES DO GERADOR UTILIZADO.

DADOS DO GERADOR ELÉTRICO	
Potência Nominal	500hp
Tensão Nominal (V)	2300 V
Torque Nominal (T)	1980 N.m
Número de Pólos (P)	4
Resistência do Estator (R_1)	0.262 Ω
Reatância do Estator (X_1)	1.206 Ω
Reatância do Rotor (X_2)	1.206 Ω
Reatância de Magnetização (X_m)	54.02 Ω
Resistência do Rotor ()	0.187 Ω

Resultados

O método de Newton-Raphson mostrou-se eficiente para resolver a equação não linear do torque em função da resistência externa do rotor, convergindo em quatro iterações para $R_{ext} \approx 0,7887\Omega$. Esse valor garantiu o torque nominal de 1980 N·m, comprovando a precisão e estabilidade do método. O gráfico gerado no GeoGebra evidenciou o comportamento crescente do torque até o ponto ótimo, confirmando a aplicabilidade do método no controle da suportabilidade de aerogeradores durante afundamentos de tensão.

Como trabalhos futuros, propõe-se aplicar outros métodos numéricos e ampliar os testes para diferentes condições de operação.

Agradecimentos

Este trabalho foi desenvolvido no âmbito do PIBIC/CNPq-Af (Edital 05/2024 PRPPI/IFAL), sob orientação da Profa. Dra. Adina Rocha dos Santos. Agradecemos ao CNPq pelo financiamento e ao IFAL pelo apoio institucional.

Referências

BURDEN, R. L.; FAIRES, J. D. Análise Numérica. 3ª edição, Cengage Learning: 2016.

CORTE, A. L.; AMORIM, A. E. A.; SIMONETTI, D. S. L. Projeto de gerador de afundamentos de tensão aplicado a geradores eólicos. Archives, v. 1, n. 1, 2019. CBA 2018.

COTA, E. F.; BASTOS, A. F.; PEREIRA, A. H. Aplicação do Método de Newton-Raphson no Controle da Resistência Externa de Geradores Eólicos Durante Afundamentos de Tensão. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos: Goiás, 2012.

JORNAL DA USP. 2023. Energia eólica no Brasil é relevante e tem potencial de crescimento. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/radio-usp/>>.