

Relatório

Homework 01 - Análise das Perdas Magnéticas de uma Máquina de Indução Pentafásica Empregando o Método dos Elementos Finitos e Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments*)

Eduardo C. Braga ¹

¹ Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica - UFRGS; eduardo.braga@ufrgs.br

Submetido à disciplina ELE 301-Projeto e Análise de Dados Experimentais.

1. Introdução

As perdas magnéticas em máquinas elétricas de indução são objeto de estudo, uma vez que ao minimizá-las é possível obter um maior rendimento. As máquinas de indução pentafásicas, embora utilizadas em aplicações industriais em menor quantidade se comparada às trifásicas, apresentam algumas vantagens que justificam seu estudo, desenvolvimento e utilização, como maior robustez devido a operação em falta de uma das fases, uma maior relação torque/volume comparado a uma máquina trifásica de mesmo tamanho e menor torque de pulsação [1].

As etapas de projeto e análise de máquinas elétricas, trivialmente, utilizam simulações computacionais empregando o método dos elementos finitos devido a facilidade de, avaliar o impacto das alterações de parâmetros no desempenho da máquina, obtenção da distribuição do campo magnético nas partes ferromagnéticas e também como alternativa a métodos experimentais que demandariam altos custos e dificuldades na obtenção das medidas de alguns parâmetros. De modo a obter uma análise mais adequada dos fatores que influenciam as perdas magnéticas na máquina pentafásica, em conjunto com a simulação computacional é utilizado a técnica de planejamento de experimentos.

O planejamento de experimentos é uma técnica utilizada para se planejar experimentos, com intuito de se obter os fatores que são influentes sobre determinadas grandezas assim como suas interações, de forma a se obter uma relação de significância ou não entre os fatores do experimento. A utilização conjunta de simulação computacional e planejamento de experimentos possibilita uma maior assertividade na tomada de decisões no processo de modelagem, simulação e análise, diminuindo o número de variáveis a serem parametrizadas e consequentemente o tempo de simulação.

Desta forma, é realizada uma análise de três fatores controláveis que podem influenciar na variável de resposta (perdas magnéticas, mais especificamente as perdas magnéticas nos dentes e na coroa do estator). Os fatores controláveis são: (1) Comprimento do Entreferro, (2) Passo do Enrolamento e (3) Número de Ranhuras do Estator.

2. Materiais e Métodos

2.1. Modelo da máquina pentafásica em software de elementos finitos

A máquina de indução pentafásica utilizada neste trabalho possui potência de 5,5 kW e 4 pólos, demais características e dimensões principais podem ser encontrados em [1]. As principais etapas para a modelagem da máquina no software de elementos finitos (FEMM 4.2) consistem em: desenhar a geometria, definir os materiais, circuitos, condições de contorno e gerar a malha, este conjunto de

etapas consistem no pré-processamento, após isto a máquina é simulada e são gerados os resultados para análise, como por exemplo a distribuição das linhas de fluxo magnético conforme apresentadas na Figura 1.

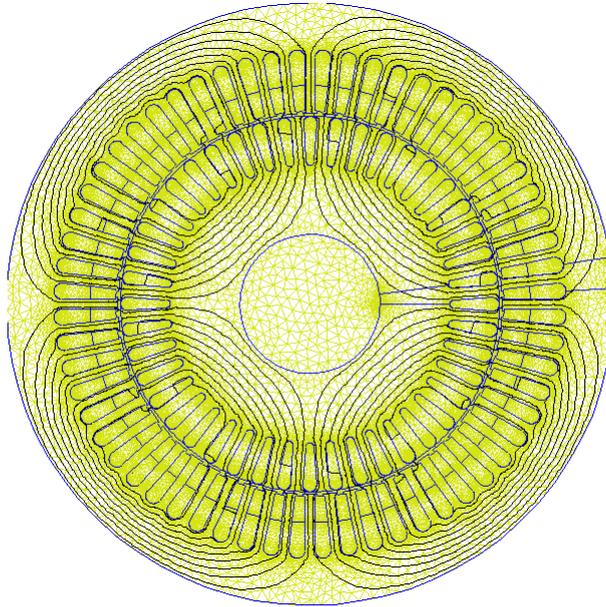


Figura 1. Modelo da máquina de indução pentafásica com distribuição do campo e discretização através de uma malha de elementos triangulares.

Através da etapa de pós-processamento do software são obtidos os valores de fluxo nos dentes e na coroa do estator, para posterior cálculo das perdas magnéticas conforme modelo matemático.

2.2. Modelagem matemática das perdas

As perdas magnéticas são estimadas através da utilização de três termos analíticos, que são as perdas por histerese, as perdas por correntes parasitas e as perdas anômalas. Obtido os valores do fluxo em cada dente e em seções da coroa do estator são aplicados as equações para o cálculo das perdas por correntes parasitas, histerese e anômalas, conforme equações 1, 2 e 3, respectivamente [2].

$$P_e = \frac{\sigma d^2}{12T} \int_0^T \left(\frac{dB(t)}{dt} \right)^2 dt \quad (1)$$

$$P_h = K_h f B_m^\beta \quad (2)$$

$$P_a = K_a \frac{1}{T} \int_0^T \left| \frac{dB(t)}{dt} \right|^{\frac{3}{2}} dt \quad (3)$$

Os valores obtidos de cada equação são somados resultando em uma perda magnética total, i.e., a variável de resposta.

2.3. Determinação dos parâmetros do experimento

Os fatores controláveis considerados importantes para análise das perdas magnéticas são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Fatores controláveis e respectivos níveis.

	Fatores	Níveis		
A	Comprimento do Entreferro (mm)	0,4	0,6	0,8
B	Passo do Enrolamento (ranhuras)	9	12	15
C	Número de Ranhuras do Estator	40	60	80
VR	Perdas Magnéticas (W/kg)			

Foram fixados três níveis para cada fator controlável, considerando um projeto de experimentos do tipo fatorial completo. São realizados 4 repetições para cada variável de resposta obtida, de forma aleatória. Por se tratar de um experimento baseado em simulação computacional, o fator não controlável é o refinamento da malha em diferentes regiões da geometria do modelo, uma vez que, este parâmetro é subjetivo à avaliação do projetista. Sendo assim, as regiões onde se aplicou uma maior discretização da geometria (refinamento da malha) foram mantidas constantes para minimizar o erro experimental.

As Tabelas 02, 03 e 04 apresentam a matriz experimental do projeto fatorial completo para os seguintes fatores controláveis: comprimento do entreferro, passo de enrolamento e número de ranhuras do estator, respectivamente.

Tabela 2. Matriz experimental fator controlável A.

Comprimento do Entreferro				
Tratamentos	0,4	0,6	0,8	
Repetições	X _{1,1}	X _{1,2}	X _{1,3}	Total Geral
	X _{2,1}	X _{2,2}	X _{2,3}	
	X _{3,1}	X _{3,2}	X _{3,3}	
	X _{4,1}	X _{4,2}	X _{4,3}	
Tratamentos Totais	T.1	T.2	T.3	T..
Total de Ensaios	N.1	N.2	N.3	N..
Média dos Tratamentos	$\bar{Y}.1$	$\bar{Y}.2$	$\bar{Y}.3$	$\bar{Y}..$

Tabela 3. Matriz experimental fator controlável B.

Passo do Enrolamento				
Tratamentos	9	12	15	Total Geral
Repetições	X _{1,1}	X _{1,2}	X _{1,3}	
	X _{2,1}	X _{2,2}	X _{2,3}	
	X _{3,1}	X _{3,2}	X _{3,3}	
	X _{4,1}	X _{4,2}	X _{4,3}	
Tratamentos Totais	T.1	T.2	T.3	T..
Total de Ensaio	N.1	N.2	N.3	N..
Média dos Tratamentos	$\bar{Y}.1$	$\bar{Y}.2$	$\bar{Y}.3$	$\bar{Y}..$

Tabela 4. Matriz experimental fator controlável C.

Número de Ranhuras do Estator				
Tratamentos	40	60	80	Total Geral
Repetições	X _{1,1}	X _{1,2}	X _{1,3}	
	X _{2,1}	X _{2,2}	X _{2,3}	
	X _{3,1}	X _{3,2}	X _{3,3}	
	X _{4,1}	X _{4,2}	X _{4,3}	
Tratamentos Totais	T.1	T.2	T.3	T..
Total de Ensaio	N.1	N.2	N.3	N..
Média dos Tratamentos	$\bar{Y}.1$	$\bar{Y}.2$	$\bar{Y}.3$	$\bar{Y}..$

Portanto, com base nos dados experimentais obtidos das Tabelas 2, 3 e 4 é possível realizar uma ANOVA e através de um teste de hipótese validar a intene...

Referências

1. PEREIRA, L. A., et al. Performance Comparison of Five Phase and Three Phase Induction Machines under Steady State including Losses and Saturation. IEEE Xplorer, 3036-3041, 2013.
2. PEREIRA, L. A., et al. Magnetic Losses Of Five Phase Induction Machines With Optimized Airgap Induction Waveform. XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2742-2748, 2010.