PINNeAPPle

RELATÓRIO DE ESTUDO · EXEMPLO PÚBLICO

Máquina síncrona de ímãs torque calculado por duas rotas

O mesmo torque por Maxwell e por coenergia — e a otimização topológica do rotor que só vale quando as duas concordam.

0,09%

entre Maxwell e coenergia no ponto de projeto

16,70 Nm

de torque a γ = 0° na máquina de 4 polos

$4{,}6 \cdot 10^{-8}$

de erro máximo na checagem de gradiente

Documento ELE-01 · versão 1.0 · 2026
Caso de demonstração: dimensões, materiais e coeficientes ilustrativos
FEM 2D A_z · duas rotas independentes de torque
PINNeAPPle · LAIS & YAN LTDA · pinneapple-labs.github.io

Uma máquina síncrona de ímãs superficiais em 2-D: cogging, torque contra ângulo de corrente, força contra-eletromotriz e perdas. O torque é calculado duas vezes, por rotas independentes, e as duas são impressas lado a lado.

GRANDEZA	VALOR
Polos / ranhuras	2 pares de polos · 24 ranhuras
Comprimento axial · entreferro	50 mm · 1 mm
Ímã	Br = 1,2 T, montagem superficial
Discretização angular	360 posições · FEM 2D no potencial vetor A_z
Custo	cerca de 2 min por execução

Por que duas rotas. Maxwell (tensão na superfície) e coenergia (diferença de energia entre duas posições) usam contas diferentes sobre o mesmo campo. Se as duas concordam, o campo está resolvido o suficiente para o torque; se divergem, o problema costuma ser a malha ou a discretização angular — e o número não deveria sair.

PONTO	MAXWELL (NM)	COENERGIA (NM)	DIFERENÇA
γ = −30°	14,7285	14,7452	0,11%
γ = 0° (projeto)	16,6967	16,7113	0,087%
γ = +30°	14,2502	14,2537	0,024%

No ponto de projeto as duas rotas ficam a **0,087%** uma da outra — muito abaixo do que qualquer decisão de projeto distingue.

Nos pontos de torque pequeno, a discordância relativa cresce: nos instantes de cogging ela chega a **2,6%** (0,3391 contra 0,3302 Nm). Não é contradição: é a mesma diferença absoluta pesando mais sobre um número pequeno, e é por isso que a checagem precisa ser lida em valor absoluto também.

> **Regra da casa.** Duas rotas independentes não provam que o resultado está certo — provam que ele está consistente. A prova contra o real continua sendo ensaio, e este relatório não tem um.

GRANDEZA	VALOR	OBSERVAÇÃO
Cogging pico-a-pico	0,7447 Nm	período de 15° (360/24 ranhuras)
Torque médio a 1.500 rpm	16,05 Nm	ponto de operação avaliado
Fluxo de ímã (pico)	0,1871 Wb	por fase
FCEM a 1.500 rpm	51,66 V de pico · 40,36 V RMS	senoidal
Perdas no ferro do estator	9,70 W	a 50 Hz
Perdas no ferro do rotor	0,021 W	praticamente nulas
Correntes de Foucault no ímã	0,172 W	a 50 Hz

O cogging de 0,74 Nm pico-a-pico contra 16,7 Nm de torque nominal é 4,5% de ondulação — o número que decide se a máquina precisa de skew ou de passo fracionário.

Sobre a mesma formulação, uma otimização topológica do rotor de relutância: 1.410 variáveis de projeto em 5.640 elementos, gradiente conferido por diferenças finitas com erro relativo máximo de $\mathbf{4{,}6\cdot10^{-8}}$.

RESULTADO	VALOR
Rotor maciço (referência)	≈ 0 Nm ($-2{,}4\cdot10^{-11}$)
Rotor otimizado, modelo linear	38,10 Nm de torque médio
Rotor otimizado, modelo não linear	13,44 Nm de torque médio
Torque por coenergia a 5°	47,07 Nm
Iterações · tempo	120 · 215 s
Fração de volume	0,500

A diferença que muda a decisão. O mesmo desenho entrega **38,1 Nm** no modelo linear e **13,4 Nm** com saturação — um fator de 2,8. O número linear é útil para explorar o espaço de projeto; não é número de máquina.

ITEM	O QUE O RELATÓRIO DIZ
Dimensões e materiais	ilustrativos; não é uma máquina comercial
FEM 2D	sem efeitos de extremidade, skew nem excentricidade
Saturação	só no modelo não linear; o linear superestima o torque em 2,8×
Térmico	fora do escopo: as perdas são calculadas, não acopladas
Cogging	de um conjunto de posições do rotor, não de uma varredura fina
Validação	sem ensaio de bancada; a checagem é entre duas rotas numéricas

Por que publicar um caso sem ensaio. Porque a consistência interna é verificável e útil: um projeto que não passa na checagem Maxwell × coenergia tem um problema antes de chegar ao banco. O que este relatório não faz é chamar consistência de validação.

0,087%
entre as duas rotas de torque

4,5%
de ondulação de cogging

38,1 Nm
no rotor otimizado (linear)

13,4 Nm
no mesmo rotor, com saturação

O que dá para decidir com este estudo

Comparar topologias de rotor, escolher o ponto de corrente e dimensionar o ímã, com a checagem de consistência no lugar. Para comprar ou certificar uma máquina, falta ensaio e falta térmico.

Proveniência

O QUE	ONDE
Resultado completo	`PINNeAPPle/examples/motor_magnetics/results/spm_summary.json`
Script	`examples/motor_magnetics/01_spm_cogging_and_torque.py`
Otimização do rotor	`examples/topology_optimization/results/reluctance_rotor_summary.json`

Este é um relatório de exemplo, com dados de demonstração. Um estudo para a sua máquina segue a mesma estrutura: duas rotas de torque, a diferença entre elas publicada, e a página do que não foi validado.