



**OPTIMALISASI DESAIN *INTERIOR PERMANENT MAGNET*
SYNCHRONOUS MOTOR UNTUK MENGURANGI RIAK
TORSI MELALUI PENDEKATAN SIMULASI**

SKRIPSI

AUDITYA FARHA

1910314025

UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAKARTA

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO

2023



**OPTIMALISASI DESAIN *INTERIOR PERMANENT MAGNET*
SYNCHRONOUS MOTOR UNTUK MENGURANGI RIAK
TORSI MELALUI PENDEKATAN SIMULASI**

SKRIPSI

**Diajukan Sebagai Salah Satu Syarat Untuk Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik**

AUDITYA FARHA

1910314025

UNIVERSITAS PEMBANGUNAN NASIONAL VETERAN JAKARTA

FAKULTAS TEKNIK

PROGRAM STUDI S1 TEKNIK ELEKTRO

2023

HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI

Skripsi diajukan oleh :

Nama : Auditya Farha

NRP : 1910314025

Program Studi : Teknik Elektro

Judul Skripsi : Optimalisasi Desain *Interior Permanent Magnet Synchronous Motor* Untuk Mengurangi Riak Torsi Melalui Pendekatan Simulasi

Telah berhasil dipertahankan dihadapan Tim Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta.



Dr. Henry B. H. Sitorus, S.T., M.T.
Penguji Utama



Achmad Zuchriadi P., S.T., M.T.
Penguji Lembaga



Ferdyanto, S.T., M.T.
Penguji I (Pembimbing)



Dr. Henry B. H. Sitorus, S.T., M.T.
Dekan Fakultas Teknik



Achmad Zuchriadi P., S.T., M.T.
Ka. Prodi Teknik Elektro

Ditetapkan di : Jakarta

Tanggal Ujian : 29 Maret 2023

HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING

OPTIMALISASI DESAIN *INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR* UNTUK MENGURANGI RIAK TORSI MELALUI PENDEKATAN SIMULASI

Auditya Farha
NIM 1910314025

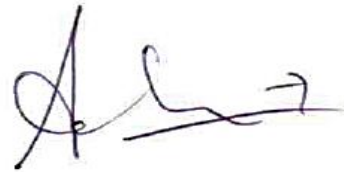
Disetujui Oleh

Pembimbing I



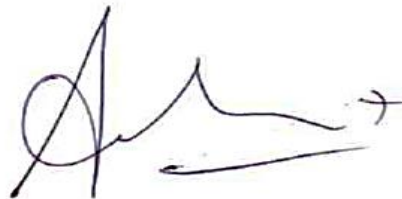
Ferdyanto, S.T., M.T.

Pembimbing II



Achmad Zuchriadi P., S.T., M.T.

Mengetahui,
Ketua Program Studi Teknik Elektro
Fakultas Teknik
Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta



Achmad Zuchriadi P., S.T., M.T.

HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS

Skripsi ini merupakan hasil karya sendiri dan semua sumber yang dikutip maupun dirujuk telah saya nyatakan benar.

Nama : Auditya Farha

NIM : 1910314025

Program Studi : Teknik Elektro

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan saya ini maka saya bersedia dituntut dan diproses sesuai dengan ketentuan yang berlaku.

Jakarta, 29 Maret 2023

Yang menyatakan,



Auditya Farha

HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI SKRIPSI UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS

Sebagai civitas akademik Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Auditya Farha
NIM : 191031425
Program Studi : Teknik Elektro

Demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta. Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non Exclusive Royalti Free Right*) atas karya ilmiah saya yang berjudul:

OPTIMALISASI DESAIN *INTERIOR PERMANENT MAGNET* *SYNCHRONOUS MOTOR* UNTUK MENGURANGI RIAK TORSI MELALUI PENDEKATAN SIMULASI

Beserta perangkat yang ada (jika diperlukan) dengan Hak Bebas Royalti ini, Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta berhak menyimpan, mengalih media/formatkan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat dan mempublikasikan Skripsi saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik hak cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di: Jakarta

Pada tanggal: 29 April 2023

Yang menyatakan,



Auditya Farha

OPTIMALISASI DESAIN *INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR* UNTUK MENGURANGI RIAK TORSI MELALUI PENDEKATAN SIMULASI

Auditya Farha

ABSTRAK

Motor listrik merupakan mesin elektromekanik yang biasa digunakan dalam bidang industri dan produk otomotif. *Interior permanent magnet synchronous motor* adalah motor listrik tipe sinkron dengan magnet permanen yang sering digunakan pada mesin kendaraan listrik. Namun, salah satu karakteristik motor listrik dengan permanen magnet adalah keberadaan riak torsi yang memberi masalah saat motor beroperasi. Penelitian ini dilakukan untuk mengoptimalkan riak torsi yang ada pada desain eksisting. Optimalisasi diterapkan pada desain eksisting dengan kondisi awal riak torsi sebesar 42.58%. Optimalisasi dilakukan dengan melakukan modifikasi pada parameter celah udara, sudut magnet, tebal magnet dan lebar *slot opening*. Proses optimalisasi dilakukan melalui simulasi *software* berbasis *finite element method* dengan menggunakan metode taguchi untuk mereduksi banyak percobaan konfigurasi faktor desain dari 625 menjadi 25 percobaan. Melalui *analysis of mean* dan *analysis of variance* proses optimalisasi menghasilkan penurunan riak torsi sebesar 9.71% dan peningkatan efisiensi sebesar 0.14%. Desain IPMSM yang telah teroptimalkan memiliki riak torsi dan efisiensi masing-masing sebesar 32.87% dan 96.97% pada kecepatan operasional motor 13500 rpm. Selain itu nilai torsi nominal menurun sebesar 13.9 Nm.

Kata kunci: *finite element method*, IPMSM, optimalisasi, riak torsi, taguchi.

OPTIMALISASI DESAIN INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR UNTUK MENGURANGI RIAK TORSI MELALUI PENDEKATAN SIMULASI

Auditya Farha

ABSTRACT

Electric motors are electromechanical machines that are widely used in various fields such as industry and automotive. Interior permanent magnet synchronous motor is one type of synchronous type electric motor with a permanent magnet which is often used in electric vehicle. However, one of the characteristics of electric motors with permanent magnets is the presence of torque ripple which gives problems when the motor is operating. This research was conducted to optimize the torsional ripples that exist in the existing design. Optimization is applied to the existing design with an initial condition of torque ripple of 42.58%. Optimization is done by modifying the parameters of the air gap, magnet angle, magnet thickness and slot opening. The optimization process was carried out through software simulation with finite element method using the taguchi method to reduce number experiments from 625 to 25 trials. Through analysis of mean and analysis of variance, the optimization process produces a reduction in torque ripple of 9.71% and increased 0.14% of efficiency. The optimized IPMSM design has torque ripple and efficiency of 32.87% and 96.97% respectively at a motor operating speed of 13500 rpm. In addition, the nominal torque value decreased by 13.9 Nm.

Keywords: *finite element method, IPMSM, optimization, ripple torque, taguchi.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kepada Allah SWT atas rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyusun skripsi ini dengan baik serta tanpa kendala yang berarti. Penyusunan skripsi ini dilakukan sebagai syarat akademis yang wajib dipenuhi dalam kurikulum program studi Teknik Elektro Universitas Pembangunan Nasional Veteran Jakarta. Adapun judul dari penelitian ini yaitu Optimalisasi Desain *Interior Permanent Magnet Synchronous Motor* untuk Mengurangi Riak Torsi melalui Pendekatan Simulasi. Tujuan penelitian ini adalah untuk mendapatkan modifikasi desain motor listrik tipe *interior permanent magnet synchronous motor* dalam upaya meminimalisir riak torsi dengan mempertimbangkan nilai efisiensi dan torsi.

Dalam proses pembuatan skripsi ini penulis banyak mendapatkan bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Oleh karena itu, pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada Bapak Ferdyanto S.T., M.T. selaku dosen pembimbing satu saya dan Bapak Achmad Zuchriadi, S.T., M.T., CEC. selaku dosen pembimbing kedua. Walaupun penulis sudah berupaya semaksimal mungkin, penulis menyadari masih terdapat kekurangan dalam penyusunan skripsi ini. Oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang bersifat membangun. Semoga hasil dari penelitian ini dapat berguna bagi pembaca maupun penulis di kemudian hari. Akhir kata penulis mengucapkan terima kasih.

Jakarta, 29 Maret 2023

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
HALAMAN PENGESAHAN PENGUJI	ii
HALAMAN PENGESAHAN PEMBIMBING	iii
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN PUBLIKASI.....	v
ABSTRAK	vi
<i>ABSTRACT</i>	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR TABEL.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
BAB 1 PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan Penelitian	4
1.3 Rumusan Masalah.....	4
1.4 Batasan Masalah	4
1.5 Sistematika Penulisan	4
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Motor Listrik.....	6
2.1.1 Stator	7
2.1.2 Rotor.....	8
2.2 <i>Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM)</i>	10
2.3 Torsi pada IPMSM.....	12
2.4 Riak torsi (<i>ripple torque</i>)	14
2.5 Pengurangan Riak Torsi.....	14

2.5.1	Lebar Celah Udara (<i>air gap</i>)	14
2.5.2	Sudut Magnet	15
2.5.3	Ketebalan Magnet	16
2.5.4	Lebar <i>Slot Opening</i> Stator	16
2.6	<i>Finite Element Method</i>	17
2.7	<i>Taguchi Method</i>	17
2.7.1	<i>Analysis of Mean</i>	17
2.7.2	<i>Analysis of Variance</i>	18
2.8	Penelitian Terkait	18
BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN.....		21
3.1	Kerangka Pikir	21
3.1.1	Identifikasi dan Perumusan Masalah.....	21
3.1.2	Studi Literatur	21
3.1.3	Pengumpulan Data	22
3.1.4	Simulasi Faktor Desain	22
3.1.5	Proses Optimalisasi	24
3.1.6	Analisis Hasil	25
3.1.7	Kesimpulan dan Saran.....	25
3.2	Perangkat Penelitian	25
3.2.1	Perangkat keras.....	25
3.2.2	Perangkat Lunak.....	25
3.3	Tempat Penelitian	26
3.4	Jadwal Penelitian	26
BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN.....		27
4.1	Hasil Simulasi Motor <i>Initial Design</i>	27
4.2	Simulasi Faktor Desain	31

4.3	Proses Optimalisasi.....	34
4.3.1	<i>Analysis of Means</i>	34
4.3.2	<i>Analysis of Variance</i>	41
4.3.3	Pemilihan Faktor Desain	45
4.4	Hasil Optimalisasi.....	47
BAB 5 PENUTUP		52
5.1	Kesimpulan	52
5.2	Saran	52

DAFTAR PUSTAKA
RIWAYAT HIDUP
LAMPIRAN

DAFTAR TABEL

Tabel 2. 1 Penelitian terdahulu.....	19
Tabel 3. 1 Parameter IPMSM Toyota Prius 2010	22
Tabel 3. 2 Orthogonal arrays L25 [32].....	23
Tabel 3. 3 Variabel faktor desain	24
Tabel 3. 4 Jadwal penelitian.....	26
Tabel 4. 1 Hasil simulasi motor initial design.....	27
Tabel 4. 2 Konfigurasi variabel dalam orthogonal array	31
Tabel 4. 3 Hasil simulasi faktor desain pada orthogonal array	32
Tabel 4. 4 Pengelompokkan ANOM berdasarkan variabel	34
Tabel 4. 5 ANOM variabel A pada riak torsi.....	35
Tabel 4. 6 ANOM variabel B pada riak torsi	35
Tabel 4. 7 ANOM variabel C pada riak torsi	35
Tabel 4. 8 ANOM variabel D pada riak torsi.....	35
Tabel 4. 9 ANOM pada riak torsi.....	36
Tabel 4. 10 ANOM variabel A pada torsi nominal.....	37
Tabel 4. 11 ANOM variabel B pada torsi nominal	37
Tabel 4. 12 ANOM variabel C pada torsi nominal	37
Tabel 4. 13 ANOM variabel D pada torsi nominal.....	37
Tabel 4. 14 ANOM pada torsi nominal.....	38
Tabel 4. 15 ANOM variabel A pada efisiensi.....	39
Tabel 4. 16 ANOM variabel B pada efisiensi	39
Tabel 4. 17 ANOM variabel C pada efisiensi.....	39
Tabel 4. 18 ANOM variabel D pada efisiensi.....	39
Tabel 4. 19 ANOM pada efisiensi.....	40
Tabel 4. 20 Sum of square [A] pada riak torsi	41
Tabel 4. 21 Sum of square [A] pada torsi nominal	41
Tabel 4. 22 Sum of square [A] pada efisiensi	41
Tabel 4. 23 Sum of square [B] pada riak torsi	42
Tabel 4. 24 Sum of square [B] pada torsi nominal	42
Tabel 4. 25 Sum of square [B] pada efisiensi	42
Tabel 4. 26 Sum of square [C] pada riak torsi	42

Tabel 4. 27 Sum of square [C] pada torsi nominal	42
Tabel 4. 28 Sum of square [C] pada efisiensi	43
Tabel 4. 29 Sum of square [D] pada riak torsi	43
Tabel 4. 30 Sum of square [D] pada torsi nominal	43
Tabel 4. 31 Sum of square [D] pada efisiensi	43
Tabel 4. 32 Analysis of variance pada ketiga parameter output	44
Tabel 4. 33 Hasil optimalisasi 1	46
Tabel 4. 34 Hasil optimalisasi 2	46
Tabel 4. 35 Hasil simulasi desain optimalisasi	47
Tabel 4. 36 Parameter IPMSM setelah optimalisasi	50

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Toyota Prius 2010	3
Gambar 2. 1 Konstruksi motor listrik	6
Gambar 2. 2 Struktur stator.....	7
Gambar 2. 3 Rotor sangkar tupai (squirrel cage)	8
Gambar 2. 4 (a) Spoke type PMSM (b) IPMSM (c) Surface mounted PMSM	9
Gambar 2. 5 V-shape rotor IPMSM.....	10
Gambar 2. 6 Ilustrasi 2D IPMSM	11
Gambar 2. 7 Resultan torsi pada IPMSM	12
Gambar 2. 8 Sumbu d & q	13
Gambar 2. 9 Ilustrasi celah udara (air gap).....	15
Gambar 2. 10 Parameter konfigurasi magnet permanen	15
Gambar 2. 11 Parameter desain slot stator.....	16
Gambar 3. 1 Flowchart penelitian.....	21
Gambar 4. 1 Rangkaian ekuivalen IPMSM Prius 2010	27
Gambar 4. 2 Memilih tipe motor pada software Ansys	28
Gambar 4. 3 Desain komputasi IPMSM Prius 2010.....	28
Gambar 4. 4 Desain 2D dan penerapan finite element method.....	29
Gambar 4. 5 Desain 3D IPMSM Prius 2010.....	29
Gambar 4. 6 Pengaturan time step	30
Gambar 4. 7 Torsi IPMSM Prius 2010 @13500 rpm	31
Gambar 4. 8 Grafik ANOM riak torsi.....	36
Gambar 4. 9 Grafik ANOM torsi nominal	38
Gambar 4. 10 Grafik ANOM efisiensi.....	40
Gambar 4. 11 Persentase pengaruh perubahan faktor desain pada riak torsi.....	44
Gambar 4. 12 Persentase pengaruh perubahan faktor desain pada torsi nominal .	44
Gambar 4. 13 Persentase pengaruh perubahan faktor desain pada efisiensi.....	45
Gambar 4. 14 Perbandingan riak torsi desain original dan optimalisasi.....	47
Gambar 4. 15 Perbandingan torsi nominal desain original dan optimalisasi.....	48
Gambar 4. 16 Perbandingan efisiensi desain original dan optimalisasi	48
Gambar 4. 17 Riak torsi pada setiap kecepatan	49
Gambar 4. 18 Torsi nominal pada setiap kecepatan	49

Gambar 4. 19 Desain 2D IPMSM optimalisasi.....	50
Gambar 4. 20 Desain 3D IPMSM optimalisasi.....	51