

## Analisis Pemodelan Dinamik Motor Sinkron Tiga Fasa pada Percobaan Tegangan Tidak Seimbang

Reynaldo Rizkika Putra<sup>1\*)</sup>, Paulus Setiawan<sup>2)</sup>, Bambang Sudibya<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Prodi Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri

<sup>2)</sup> Prodi Aeronautika, Fakultas Teknologi Kedirgantaraan  
Institut Teknologi Dirgantara Adisutjipto, Yogyakarta

\* email: reynaldoputra71@gmail.com

### Abstract

*The problem that often arises lately in electrical motors is the occurrence of voltage imbalances. Unbalanced voltage is an unequal voltage value in a three-phase voltage system contained in an electric power system. On the basis of these problems, it is necessary to conduct research that can analyze the dynamics of the performance of synchronous motors. The frame of reference theory is used to analyze the performance of both synchronous and induction motors. This study implements the modeling of the transformation on the natural axis abc and the transformation on the dq0 axis of the stator and rotor variables in the coordinates of the reference frame. The results of this study indicate that the voltage imbalance from 1% to 5% at the electromagnetic torque has decreased from 8.5 Nm to 6 Nm, the stator current in one phase has increased from 44.2 amperes to 45.2 amperes, the motor rotation speed has decreased from 1820 rpm to 1570 rpm, motor output power decreased from 25550.05 watts to 18968.45 watts, and power efficiency decreased from 98.24% to 82.43%.*

*Keywords — Synchronounous Motor, abc Axis, dq Axis, Direct Quadrature, Steady State.*

### 1. Pendahuluan

Motor listrik sudah menjadi kebutuhan kita sehari-hari untuk menggerakkan peralatan dan mesin yang membantu pekerjaan. Dalam dunia industri motor listrik kadang kala disebut kuda kerjanya industri, diperkirakan bahwa motor-motor menggunakan sekitar 70% beban listrik total di industri [1].

Dalam operasinya motor sinkron mengalami perubahan perilaku yang disebabkan penurunan tegangan akibat diberi beban akibatnya tegangan tidak seimbang (tegangan yang tidak sama antar fasanya), meningkatnya arus dan rugi motor sinkron serta berkurangnya tingkat efisiensi motor sinkron sebelum mencapai keadaan mantap atau *steady state* [2].

Dari permasalahan inilah perlu dilakukan analisis pemodelan dinamik motor sinkron tiga fasa untuk melihat perilaku dinamik motor sinkron tiga fasa menggunakan perangkat lunak Matlab dengan harapan dapat mengurangi terjadinya jatuh tegangan pada motor sinkron tiga fasa dengan menggunakan metode transformasi *direct quadrature* metode transformasi yang mengubah dari sistem tiga fasa *abc* ke bentuk sistem dua fasa dengan konfigurasi *dq0* dengan tujuan agar lebih memudahkan perhitungan parameter persamaan diferensial pada sudut  $90^\circ$  [2]. Hasil penelitian ini adalah untuk mengetahui karakteristik dari tegangan stator, arus stator dan rotor, kecepatan putaran rotor, torsi elektromagnetik, daya masukan motor, daya keluaran motor, dan efisiensi saat terjadi ketidakseimbangan tegangan [3].

## 2. Metode Penelitian

### 2.1 Tahapan Penelitian

Tahapan pada penelitian ini terbagi menjadi dua tahapan.

#### 1. Pemodelan Dinamik Persamaan Numeris Motor Sinkron

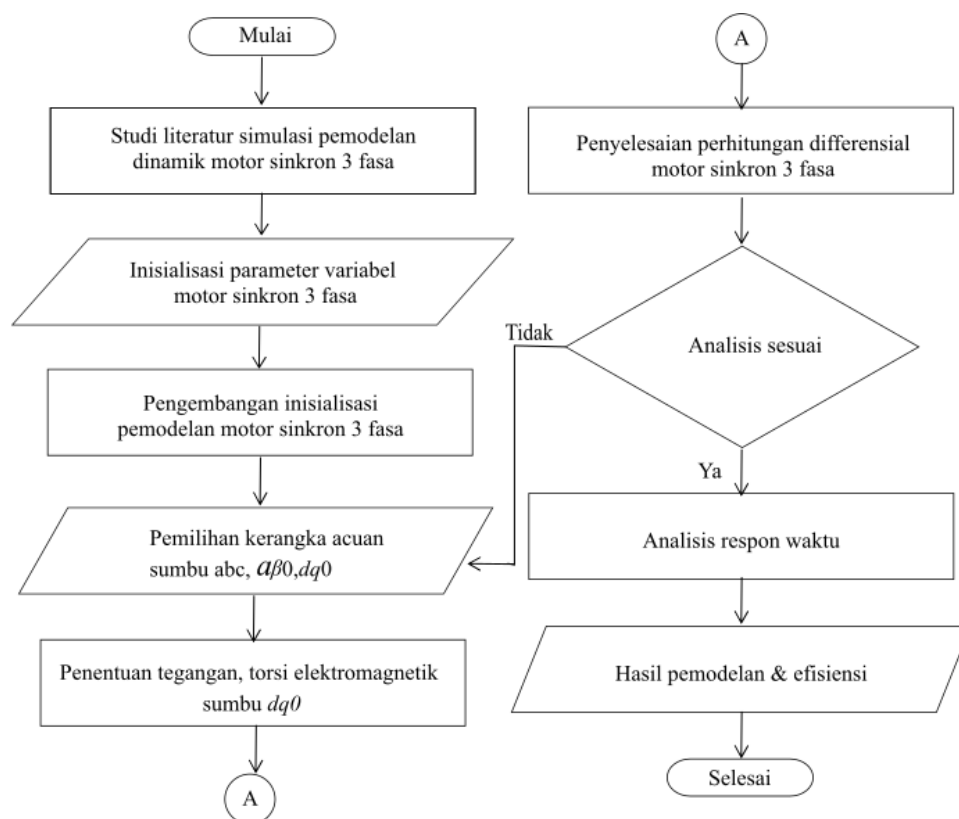
Pada tahap ini, dilakukan pemodelan dinamik rangkaian simulasi sesuai dengan persamaan numeris motor sinkron tiga fasa untuk melihat perilaku dinamik motor sinkron tiga fasa ketika terjadinya ketidakseimbangan tegangan secara mendadak.

#### 2. Analisis Hasil Simulasi Pemodelan Dinamik Motor Sinkron

Pada tahap ini akan dilakukan analisis hasil simulasi pemodelan dinamik motor sinkron tiga fasa yakni analisis terhadap penurunan nilai tegangan, perubahan nilai arus, penurunan nilai kecepatan putar rotor (rpm), perubahan nilai torsi serta penurunan nilai pada tingkat efisiensi motor sinkron tiga fasa yang ditunjukkan oleh hasil grafik ketika terjadinya ketidakseimbangan tegangan secara mendadak.

### 2.2 Diagram Alir Penelitian

Diagram alir penelitian merupakan tahap rangkaian yang dilakukan sebagai landasan penelitian guna merealisasikan apa yang menjadi tujuan penelitian tersebut. Dimulai studi masalah, proses analisis penelitian hingga hasil proses analisis masalah. Diagram alir penelitian pada penelitian ini dapat dilihat Gambar 1.

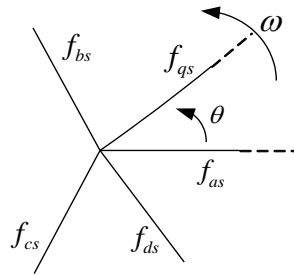


Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dimulai dengan studi literatur. Kemudian dilakukan inisialisasi parameter-parameter untuk simulasi pengembangan pemodelan dinamik motor sinkron tiga fasa. Kemudian setelah dilakukan inisialisasi adalah pemilihan kerangka acuan sumbu  $abc$ ,  $dq0$ . Setelah semua variabel kerangka acuan sesuai dengan rencana analisis pemodelan dinamik motor sinkron tiga fasa, maka dilanjutkan dengan penyelesaian perhitungan diferensial variabel-variabel pada kerangka acuan pemodelan motor sinkron tiga fasa.

### 2.3 Persamaan Sumbu Koordinat Transformasi *Park*

Persamaan motor sinkron yang telah dilakukan perumusan pemodelan memiliki persamaan diferensial yang sangat banyak yang kemudian akan sangat sulit untuk diselesaikan perumusannya karena akan melibatkan sangat banyak persamaan diferensial yang bergantung pada sudut ( $90^0$ ) [1]. Persamaan tersebut perlu disederhanakan kembali dengan menggunakan metode persamaan transformasi *Park*. Transformasi *Park* berfungsi mengubah variabel-variabel dari sumbu koordinat *abc*  $120^0$  ke dalam sumbu koordinat *dq*  $90^0$  [3]. Transformasi ini dapat dilukiskan sebagai hubungan trigonometri antara variabel-variabel dalam sumbu koordinat *abc* dengan variabel dalam sumbu koordinat *dq*. Skema transformasi tersebut dapat dilihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Skema Transformasi *Park*

Pada Gambar 2 dapat dituliskan persamaan matematis frekuensi putaran dari transformasi *Park*.

$$(f_{abcs})^T = [f_{as} \quad f_{bs} \quad f_{cs}] \quad (1)$$

$$(f_{abcr})^T = [f_{ar} \quad f_{br} \quad f_{cr}] \quad (2)$$

Keterangan :

$f_{as}$  = Frekuensi sumbu a pada stator (hertz)

$f_{bs}$  = Frekuensi sumbu b pada stator (hertz)

$f_{cs}$  = Frekuensi sumbu c pada stator (hertz)

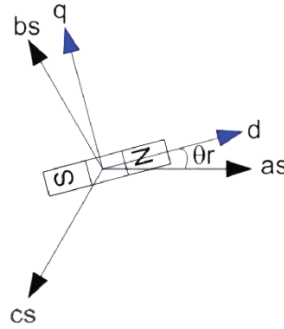
$f_{ds}$  = Frekuensi sumbu d pada stator (hertz)

$f_{qs}$  = Frekuensi sumbu q pada stator (hertz)

$\omega$  = Kecepatan sudut (rad/sekon)

$\theta$  = Posisi sudut antar sumbu (rad)

Berikut merupakan implementasi dari bingkai referensi pemodelan berbasis Transformasi *Park* yang ditunjukkan pada Gambar 3.

Gambar 3. Bingkai Referensi Pemodelan Transformasi *Park*

Keterangan :

- $as$  = Koordinat sumbu  $a$  pada stator
- $bs$  = Koordinat sumbu  $b$  pada stator
- $cs$  = Koordinat sumbu  $c$  pada stator
- $d$  = Koordinat sumbu  $d$  pada stator
- $q$  = Koordinat sumbu  $q$  pada stator
- $\theta_r$  = Posisi sudut antar sumbu (rad)

Berdasarkan Gambar 3, dapat diturunkan persamaan rumus transformasi *Park*.

$$f_{dq} = T_{park} \cdot f_{abc} \quad (3)$$

Keterangan :

- $f_{dq}$  = Frekuensi sumbu dq pada stator (hertz)
- $f_{abc}$  = Frekuensi sumbu abc pada stator (hertz)
- $T_{park}$  = Transformasi *Park*

Di mana Persamaan 3 dapat diturunkan persamaan matriks berikut.

$$T_{Park} = \begin{bmatrix} \cos \theta_e & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta_e & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

## 2.4 Pemodelan Persamaan Transformasi Tegangan

Analisis pemodelan dinamik motor sinkron tiga fasa ini dilakukan bertujuan untuk mengetahui karakteristik motor sinkron tiga fasa yang sering mengalami perubahan-perubahan perilaku yang berupa tegangan tidak seimbang dalam kondisi transien (peralihan) sebelum mencapai keadaan *steady state*.

Untuk menganalisis transformasi dari koordinat  $abc$  (3 dimensi)  $120^\circ$  ke dalam kerangka acuan sumbu koordinat *direct quadrature* (2 dimensi)  $90^\circ$  [4] digunakan Persamaan (5) dan (6).

$$v_{abcs} = r_s i_{abcs} + p \lambda_{abcs} \quad (5)$$

$$v_{abcr} = r_r i_{abcr} + p \lambda_{abcr} \quad (6)$$

Keterangan :

$V_{abcs}$  = Tegangan kumparan stator sumbu abc (volt)

$r_s$  = Resistansi kumparan stator (ohm)

$i_{abcs}$  = Arus kumparan stator sumbu abc (ampere)

$\lambda_{abcs}$  = Fluks kumparan stator sumbu abc (weber)

$V_{abcr}$  = Tegangan kumparan rotor sumbu abc (volt)

$r_r$  = Resistansi kumparan rotor (ohm)

$i_{abcr}$  = Arus kumparan rotor sumbu abc (ampere)

$\lambda_{abcr}$  = Fluks kumparan rotor sumbu abc (weber)

$p$  = Kutub

Untuk dapat menganalisis tegangan pada sumbu *direct* ( $d$ ) dan sumbu *quadrature* ( $q$ ) maka dapat dituliskan persamaan diferensial sebagaimana Persamaan (7).

$$v_q = r_s \cdot i_q + \frac{d}{dt} \lambda_q + \omega_e \lambda_d \quad (7)$$

$$v_d = r_s \cdot i_d + \frac{d}{dt} \lambda_d + \omega_e \lambda_q \quad (8)$$

Keterangan :

$v_q$  = Tegangan sumbu q (volt)

$v_d$  = Tegangan sumbu d (volt)

## 2.5 Pemodelan Persamaan Transformasi Fluks

Setelah dilakukannya pemodelan transformasi tegangan, untuk dapat mengetahui nilai perubahan pada fluks magnet perlu didefinisikan persamaan transformasi fluks oleh Persamaan (9).

$$\lambda_q = L_q \cdot i_q \quad (9)$$

$$\lambda_d = L_d \cdot i_d + \lambda_f \quad (10)$$

Keterangan :

$\lambda_q$  = Fluks lingkup sumbu q (weber)

$L_q$  = Induktansi sumbu q (henry)

$i_q$  = Arus sumbu q (ampere)

$\lambda_d$  = Fluks lingkup sumbu d (weber)

$L_d$  = Induktansi sumbu d (henry)

$i_d$  = Arus sumbu d (ampere)

$\lambda_f$  = Fluks lingkup rotor konstan (weber)

## 2.6 Pemodelan Persamaan Transformasi Arus

Untuk mencari nilai arus pada sumbu *direct* ( $i_d$ ) dan nilai arus pada sumbu *quadrature* ( $i_q$ ) di dalam lingkup stator ini dapat didefinisikan oleh Persamaan (11) dan (12).

$$i_d = \frac{1}{s} \left( -\frac{r_s}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} \cdot \frac{p}{2} \omega_m \cdot i_q + \frac{v_d}{L_d} \right) \quad (11)$$

Keterangan :

$L_d$  = Induktansi sumbu d (henry)

$L_q$  = Induktansi sumbu q (henry)

$i_q$  = Arus sumbu q (ampere)

$r_s$  = Jari-jari stator (cm)

$i_d$  = Arus sumbu d (ampere)

$\omega_m$  = Kecepatan sudut (rad/sekon)

$$i_q = \frac{1}{s} \left( -\frac{r_s}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} \cdot \frac{p}{2} \omega_m \cdot i_d - \frac{1}{L_q} \cdot \frac{p}{2} \omega_m \cdot \lambda_f + \frac{v_q}{L_q} \right) \quad (12)$$

Keterangan :

$\lambda_f$  = Fluks lingkup rotor konstan (weber)

$v_q$  = Tegangan sumbu q (volt)

$s$  = Lingkup domain stator

## 2.7 Pemodelan Persamaan Kecepatan Putar Rotor, Torsi

Persamaan kecepatan putaran rotor (rpm) dan torsi dalam kerangka acuan dapat didefinisikan oleh Persamaan (14) dan (15).

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_{load} - B \cdot \omega_m) \quad (13)$$

$$\omega_m = \frac{1}{sJ} (T_e - T_{load} - B \cdot \omega_m) \quad (14)$$

$$T_e = J \cdot \frac{d\omega_r}{dt} + B \cdot \omega_m + T_{load} \quad (15)$$

Keterangan :

$T_e$  = Torsi elektromagnetik (N.m)

$T_{load}$  = Beban torsi (N.m)

$B$  = Viscous Damping Coefficient (N.m.s)

$\omega_m$  = Kecepatan sudut (rad/sekon)

$J$  = Momen inersia (Kg.m<sup>2</sup>)

Inverse tegangan dari sumbu dq dikembalikan lagi ke sumbu abc agar dapat dihitung besarnya daya yang keluar setelah dilakukan penyederhanaan persamaan differensial dituliskan dalam kerangka acuan Persamaan (16) sampai (19) [5].

$$V_{abcs} = T_s^{-1} \cdot V_{qd0s} \quad (16)$$

$$I_a = I \cdot \sin(\omega_e t) \quad (17)$$

$$I_b = I \cdot \sin\left(\omega_e t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad (18)$$

$$I_c = I \cdot \sin\left(\omega_e t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad (19)$$

Keterangan :

$i_a$  = Arus sumbu a (ampere)

$i_b$  = Arus sumbu b (ampere)

$i_c$  = Arus sumbu c (ampere)

$\omega_e$  = Kecepatan sudut (rad/sekon)

$t$  = Waktu (sekon)

$V_{abcs}$  = Tegangan kumparan stator sumbu abc (volt)

## 2.8 Daya Motor Sinkron dan Efisiensi

Untuk mendapatkan nilai daya masukan motor sinkron melalui perhitungan matematis, nilai arus yang digunakan adalah nilai arus pada fasa yang terjadi penurunan nilai akibat ketidakseimbangan tegangan yakni arus pada fasa c [6].

Untuk mencari nilai daya masukan dapat menggunakan rumus Persamaan (20) [7].

$$P_{in} = V \cdot I \cdot \sqrt{3} \cdot \cos\phi \quad (20)$$

Keterangan :

$P_{in}$  = Daya masukan (watt)

$I$  = Beban torsi (ampere)

$V$  = Tegangan (volt)

Untuk mencari nilai daya keluaran dari motor sinkron tiga fasa dapat ditentukan terlebih dahulu daya mekanik motor sinkron tiga fasa menggunakan persamaan (21) dan rugi-rugi panas (*Heatloss*) pada sumbu *abc* ini digunakan rumus pada Persamaan (22).

$$P_{mek} = T \times n \quad (21)$$

$$Heatloss = R \cdot (I)^2 \quad (22)$$

Dari hasil perhitungan Persamaan (21) dan (22), maka dapat ditentukan daya keluaran motor sinkron tiga fasa [8] .

$$P_{output} = P_{mekanik} + Heatloss \quad (23)$$

Keterangan :

$P_{mek}$  = Daya mekanik (watt)

$T$  = Beban torsi (N.m)

$n$  = Kecepatan putaran motor (rpm)

$R$  = Daya mekanik (ohm)

*Heatloss* = Rugi-rugi panas

## 2.9 Parameter Inisialisasi Pemodelan

Untuk memodelkan analisis dinamik motor sinkron tiga fasa, maka dibutuhkan parameter komponen sebagai penyusunnya dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Inisialisasi parameter variabel

No	Parameter variabel rangkaian	Nilai / Jumlah
1.	Jumlah kutub (P)	4 Kutub
2.	Induktansi sumbu <i>direct</i> ( $L_d$ )	0.0057 Henry
3.	Induktansi sumbu <i>quadrature</i> ( $L_q$ )	0.0125 Henry
4.	Resistansi / hambatan arus ( $R_c$ )	416 ohm
5.	Resistansi / hambatan tegangan ( $R_s$ )	5 ohm
6.	Frekuensi stator ( $f_s$ )	60 Hertz
7.	Momen inersia ( $J$ )	0.0001584
8.	Beban torsi ( $T_L$ )	10 Nm
9.	Jumlah fasa	3 fasa
10.	Tegangan tanpa beban per fasa ( $V_L$ )	230 volt
11.	Tegangan puncak ke puncak ( $V_{pp}$ )	1000 volt
12.	<i>Viscous Damping Coefficient</i> ( $B$ )	0 N.m.s
13.	Kerapatan fluks ( $\lambda_{af}$ )	0,123 Weber
14.	Daya masukan ( $P_{in}$ )	1,34 HP = 1000 Watt
15.	Faktor Daya ( $\cos\phi$ )	0,88

Untuk mencari efisiensi dari motor sinkron tiga fasa ini digunakan rumus pada Persamaan (24) [6].

$$\eta = \frac{P_{keluaran}}{P_{masukan}} \times 100\% \quad (24)$$

Keterangan :

$P_{masukan}$  = Daya masukan (watt)

$P_{keluaran}$  = Daya keluaran (watt)

## 2.10 Pengertian Tegangan tidak Seimbang

Tegangan tak seimbang adalah tegangan pada motor sinkron 3 fasa yang memiliki nilai amplitudo yang tidak sama pada ketiganya pada suatu waktu yang mungkin terjadi disebabkan oleh impedansi, tipe beban atau jumlah beban yang memiliki nilai kapasitas berbeda antara fasa satu dengan fasa lainnya [5]. Hal ini dapat terjadi pada sistem distribusi tenaga listrik di mana saja dan dapat menimbulkan masalah serius khususnya pada motor listrik. Besarnya ketidakseimbangan dapat dihitung dengan Persamaan (24) [9].

$$(\%) = \frac{\text{Deviasi maksimum}(V_{ab}V_{bc}V_{ca}) \text{ dari rata-rata}}{\text{rata-rata dari}(V_{ab}V_{bc}V_{ca})} \times 100\% \quad (24)$$

Keterangan :

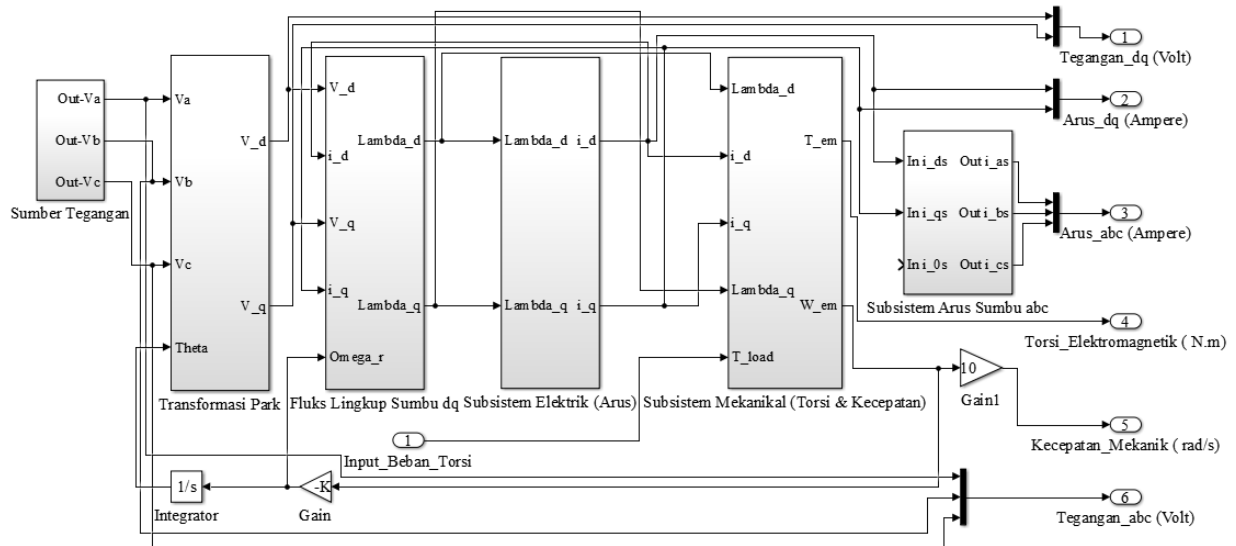
Deviasi maksimum = selisih tegangan rata-rata dengan tegangan fasa terendah



### 3. Hasil Penelitian dan Pembahasan

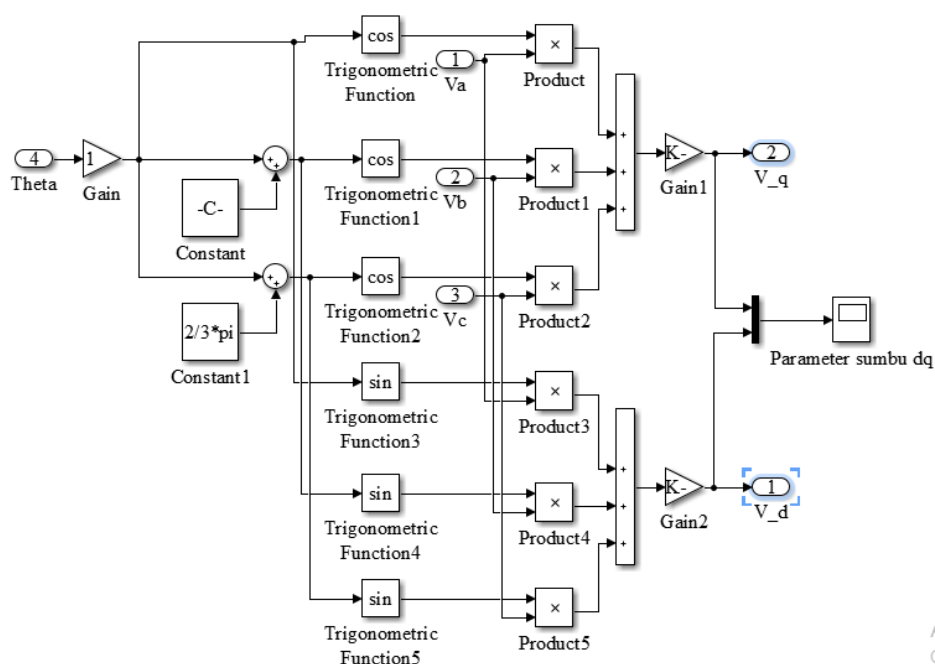
#### 3.1 Rancangan Sistem

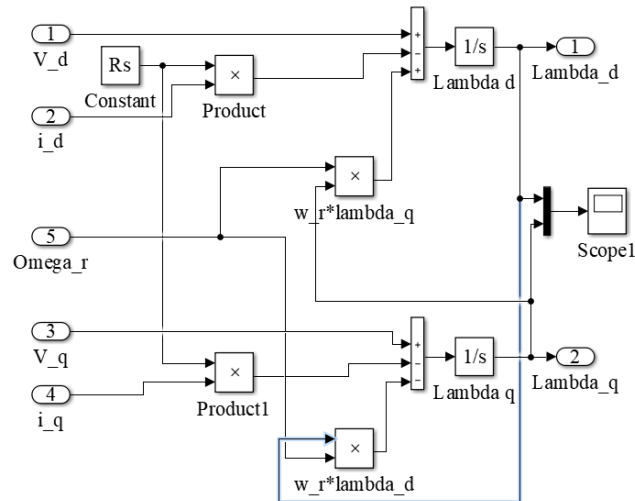
Setelah pengumpulan data yang mendukung penelitian dengan mengacu Persamaan (1) – (20), maka dilakukan perancangan pembuatan simulasi pada *simulink* Matlab berdasarkan diagram blok pada Gambar 4.



Gambar 4. Blok Subsistem Pemodelan Dinamik Motor Sinkron

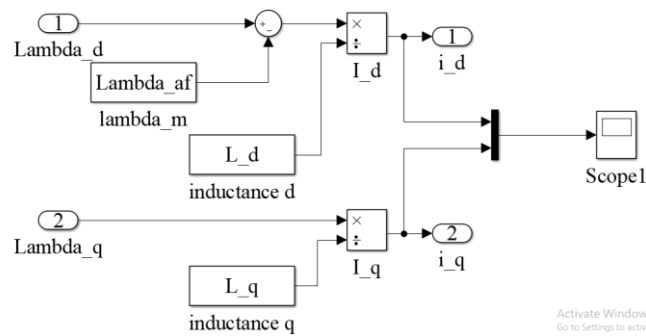
Pada penelitian ini, pemodelan dinamik dimulai dengan merancang simulasi tegangan tiga fasa yang sesuai dengan persamaan (5) - (6) kemudian ditransformasikan menjadi tegangan dua fasa (sumbu  $dq0$ ) untuk menyederhanakan persamaan-persamaan differensial sesuai dengan persamaan (7) – (8) [6]. Untuk implementasi rangkaian akan ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5 Implementasi Subsistem Transformasi *Park*

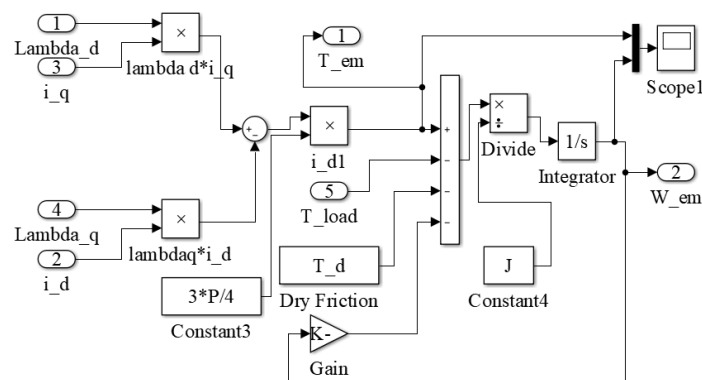
Gambar 6 Implementasi Subsistem Fluks Lingkup pada Rotor

Pada Gambar 6, merupakan blok Simulink implementasi fluks lingkup rotor  $\lambda_d$   $\lambda_q$  sesuai dengan persamaan (8) – (9) [10].

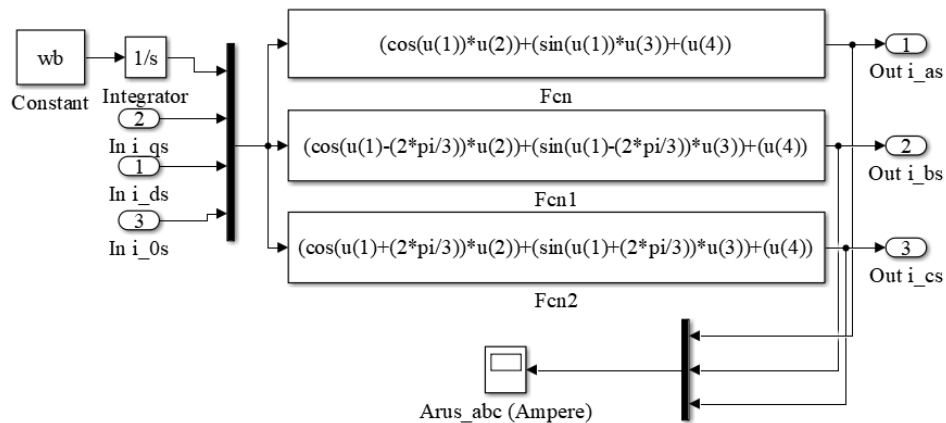


Gambar 7 Implementasi Subsistem Arus Stator

Pada Gambar 7, merupakan blok Simulink implementasi untuk mengetahui karakteristik arus  $i_d$   $i_q$  mengacu pada persamaan (11) – (12) [10].

Gambar 8 Implementasi Subsistem Torsi pada Sumbu *dq*

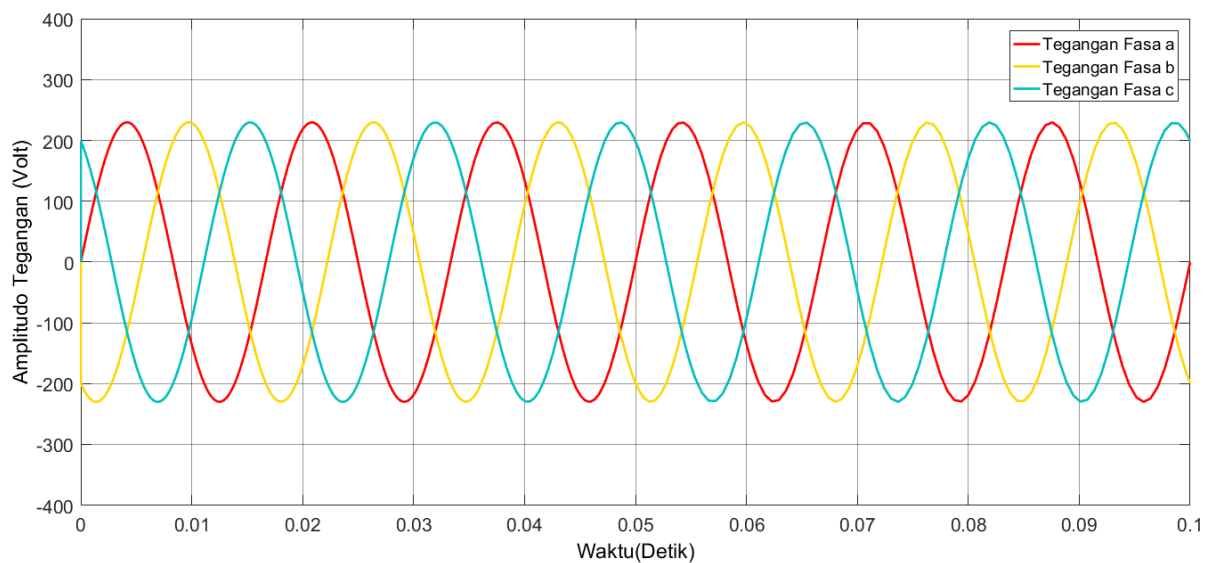
Pada Gambar 8, merupakan blok Simulink implementasi menghasilkan nilai torsi ( $T_e$ ) dengan mengacu pada persamaan (15) dan kecepatan putaran rotor ( $\omega_m$ ) mengacu persamaan (14) [10].

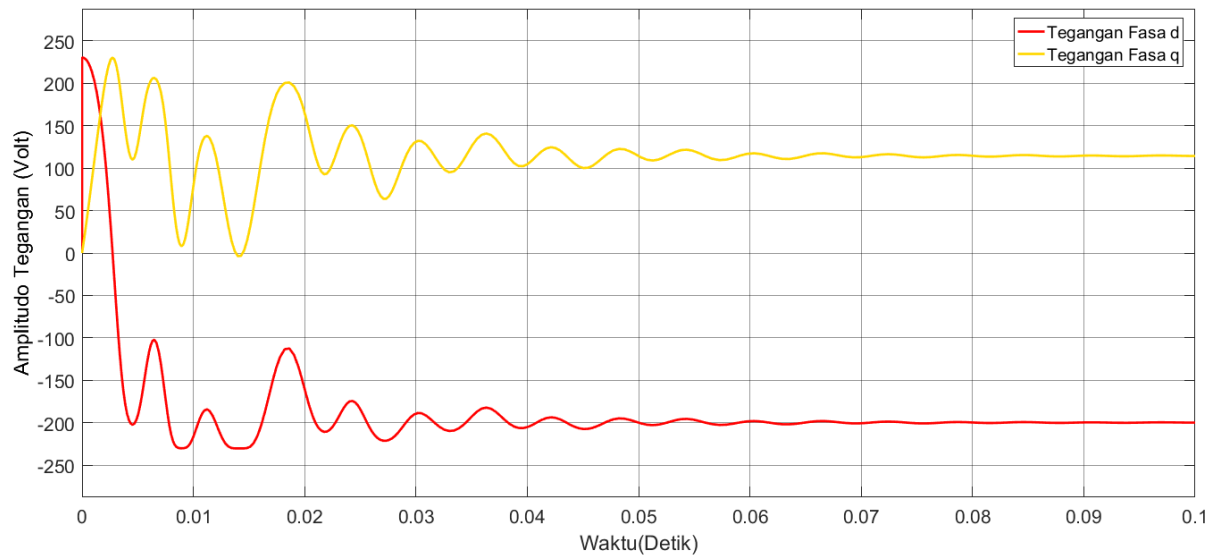
Gambar 9 Implementasi Subsistem *Invers* Transformasi Arus

Pada Gambar 9, merupakan blok Simulink implementasi invers tegangan dari sumbu  $dq$   $90^\circ$  kembali menjadi sumbu  $abc$   $120^\circ$  sesuai dengan persamaan (17) – (19).

### 3.2 Karakteristik Tegangan Stator

Tegangan masukan pada motor sinkron ini merupakan tegangan tiga fasa sebesar 230 volt, namun untuk dapat memudahkan proses analisis keluaran pemodelannya maka dilakukan transformasi pemodelan dari tiga fasa ( $120^\circ$ ) menjadi dua fasa ( $90^\circ$ ) [3] seperti yang ditunjukkan Gambar 10 dan Gambar 11.

Gambar 10. Karakteristik Tegangan Tiga Fasa  $abc$

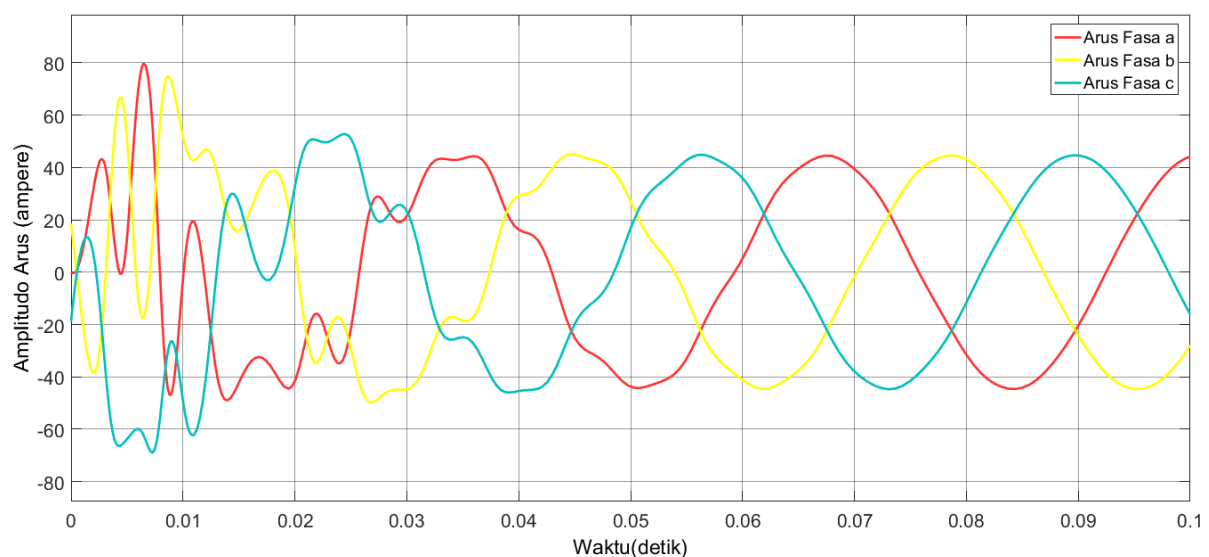


Gambar 11. Karakteristik Tegangan Dua Fasa  $dq$

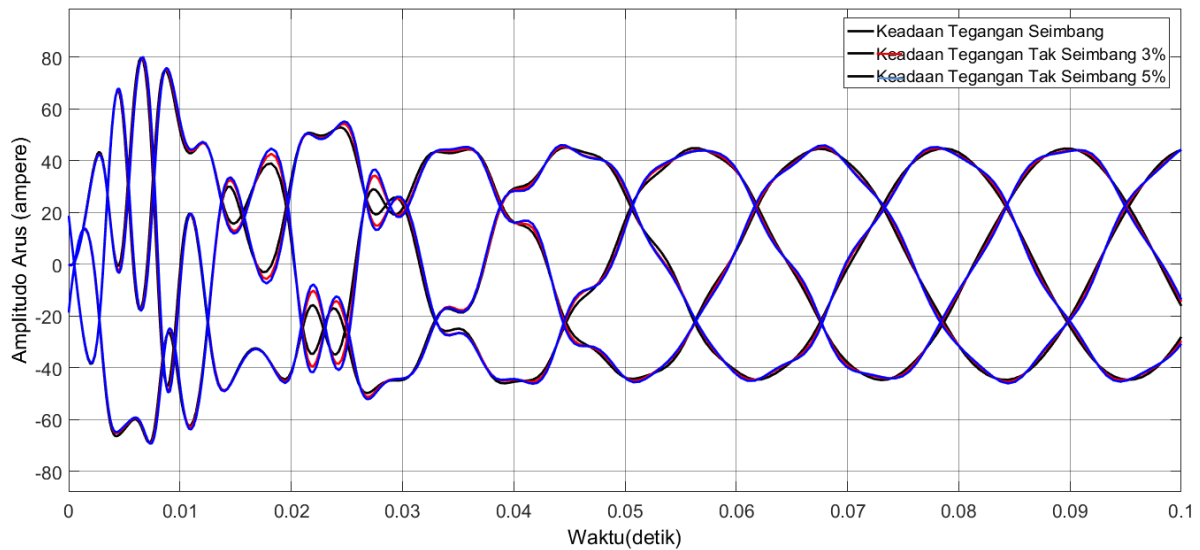
Pada Gambar 11, fasa  $d$  mempunyai nilai maksimum 227,59 volt kemudian mengalami kondisi mantap (*steady state*) pada rentang waktu 0,06 detik. Pada fasa  $q$  mempunyai nilai maksimum 229,74 volt kemudian mengalami kondisi mantap (*steady state*) pada rentang waktu 0,06 detik.

### 3.3 Karakteristik Arus Stator

Arus stator pada saat pengasutan (*starting*) sampai dengan kondisi *steady state* ditunjukkan pada Gambar 12.

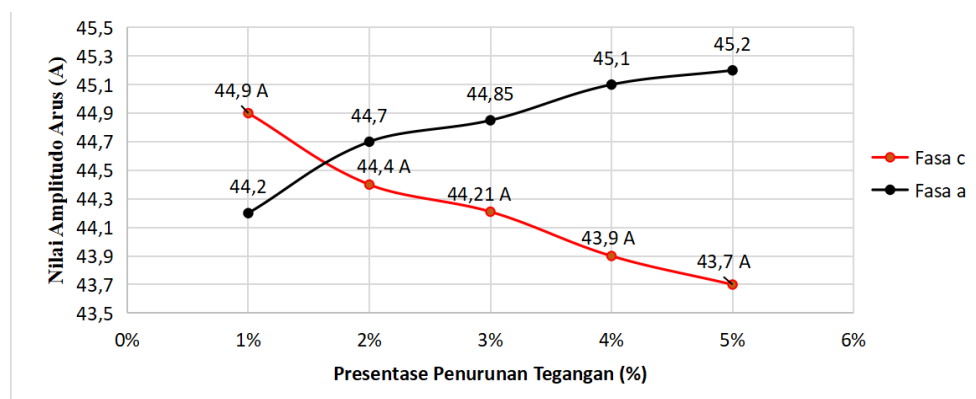


Gambar 12. Karakteristik Arus Sumbu  $abc$  Tiga Fasa



Gambar 13. Karakteristik Arus Saat Ketidakseimbangan Tegangan

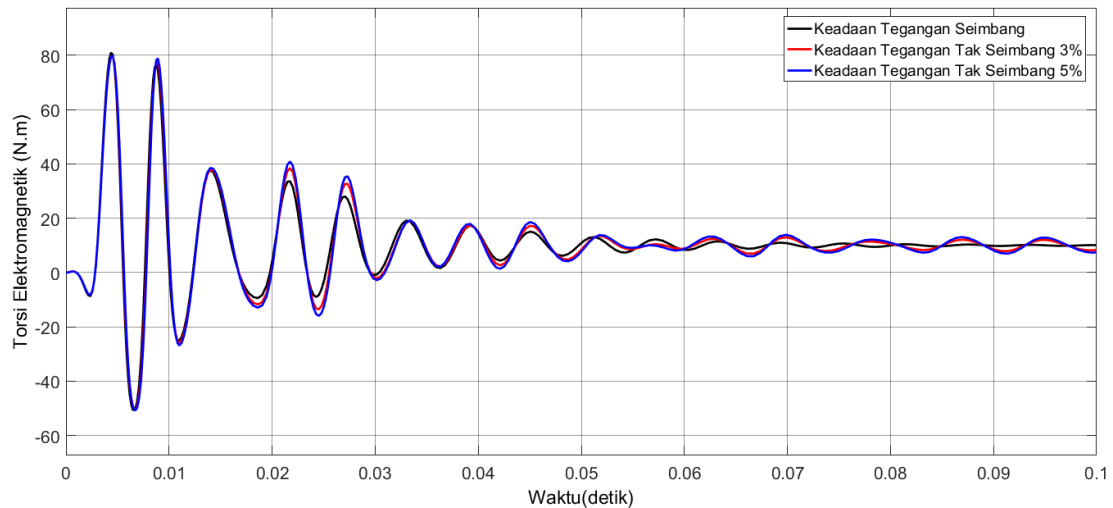
Pada Gambar 13, arus stator mengalami perubahan perilaku pada salah satu fasanya karena mengalami ketidakseimbangan tegangan sebesar 3% sampai 5%. Pada fasa *a* dan fasa *b* mengalami kenaikan arus stator sebesar 3% sebesar 44,85 A dan 45,56 A kemudian 5% sebesar 45,20 A dan 45,95 A namun pada salah satu fasa yakni fasa *c* terjadi ketidakseimbangan tegangan sebesar 3% sampai 5% dari 44,21 A menjadi 43,70 A. Lebih jelasnya akan ditunjukkan Gambar 14.



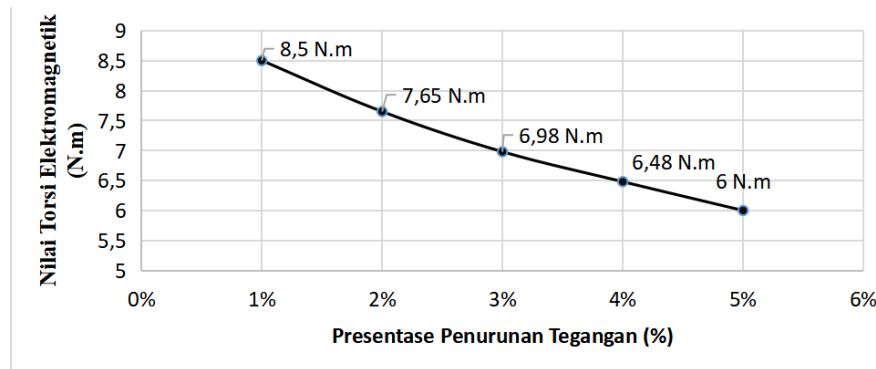
Gambar 14. Karakteristik Arus Fasa *a* dan Fasa *c* Saat Ketidakseimbangan Tegangan

### 3.4 Karakteristik Torsi dan Kecepatan Putar Rotor

Pada saat tegangan seimbang, nilai maksimum torsi pada motor sinkron sebesar 80 N.m dengan rentang waktu 0,07 detik untuk mencapai keadaan *steady state*. Kemudian mengalami ketidakseimbangan sebesar 3% sebesar 6,98 N.m sampai dengan 5% menjadi 6 N.m. Torsi mengalami penurunan nilai torsi dan akan menimbulkan efek pemanasan pada rotor motor sinkron. Seperti yang ditunjukkan Gambar 15 dan kurva Gambar 16.

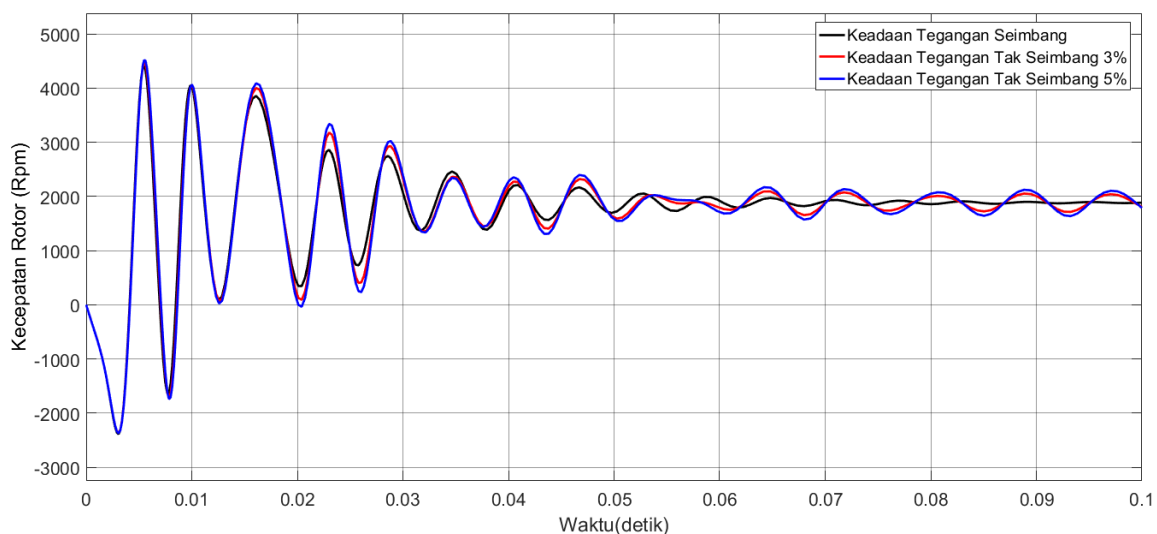


Gambar 15. Karakteristik Torsi saat Ketidakseimbangan Tegangan

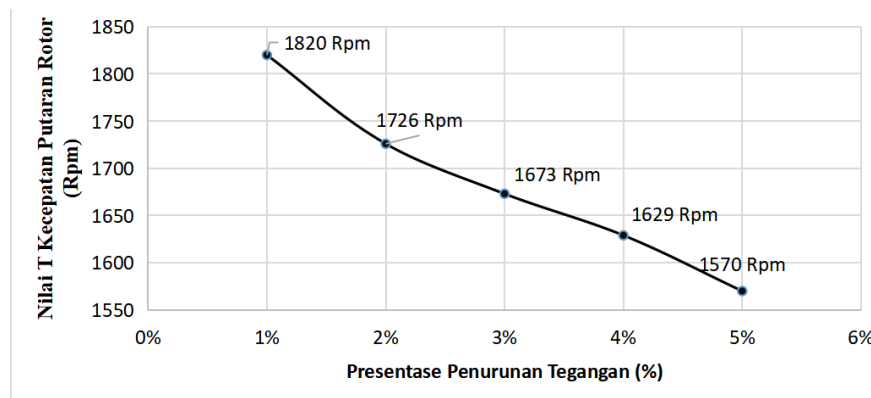


Gambar 16. Kurva Karakteristik Torsi saat Ketidakseimbangan Tegangan

Pada saat tegangan seimbang, nilai maksimum kecepatan putaran rotor (rpm) pada motor sinkron sebesar 4407 rpm dengan rentang waktu 0,07 detik untuk mencapai keadaan *steady state*. Kemudian mengalami ketidakseimbangan sebesar 3% sebesar 1673 rpm sampai dengan 5% menjadi 1570 rpm. Gambar 17 dan Gambar 18 memperlihatkan penurunan nilai kecepatan putaran rotor (rpm) saat terjadi ketidakseimbangan tegangan sebesar 1% sampai 5%.



Gambar 17. Karakteristik Kecepatan Putaran Rotor saat Ketidakseimbangan Tegangan



Gambar 18. Kurva Karakteristik Kecepatan Rotor saat Ketidakseimbangan Tegangan

### 3.5 Karakteristik Daya dan Efisiensi Daya Motor Sinkron

Untuk mendapatkan nilai daya masukan melalui perhitungan matematis, digunakan rumus persamaan (20). Hasil perhitungan penurunan nilai daya masukan yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Nilai Penurunan Daya Masukan

Presentase penurunan tegangan	Nilai daya masukan (watt)
1%	26005,9 W
2%	25131,92 W
3%	24436,88 W
4%	23693,13 W
5%	23009,94 W

Untuk mencari nilai daya keluaran dari motor sinkron tiga fasa ini digunakan rumus pada persamaan 21-23 yang telah dituliskan pada bagian 2 metodologi penelitian. Hasil perhitungan penurunan nilai daya keluaran yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 3.

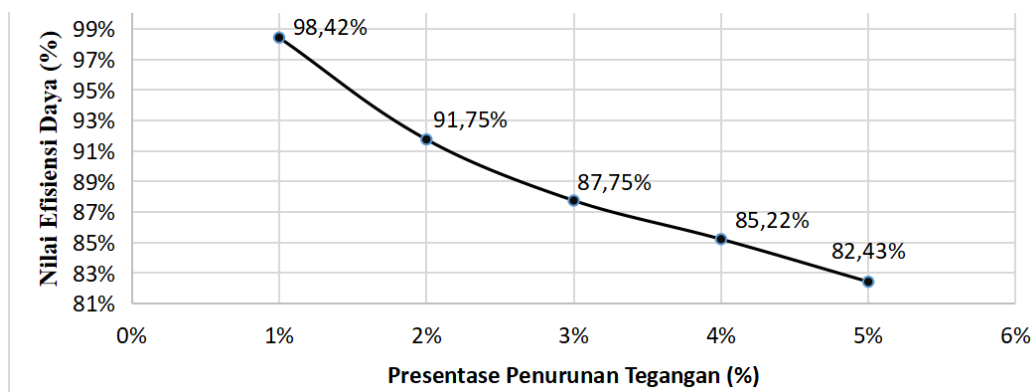
Tabel 3. Nilai Penurunan Daya Keluaran

Presentase penurunan tegangan	Nilai daya keluaran (watt)
1%	25550,05 W
2%	23060,70 W
3%	21445,74 W
4%	20191,97 W
5%	18968,45 W

Untuk mencari efisiensi dari motor sinkron tiga fasa ini digunakan rumus pada persamaan 24 yang telah dituliskan pada bagian 2 metodologi penelitian. Setelah didapatkan hasil perhitungan penurunan nilai daya masukan dan daya keluarannya, maka nilai penurunan efisiensi dapat ditentukan yang akan ditunjukkan Tabel 4 dan Gambar 18.

Tabel 4. Nilai Efisiensi Daya

Presentase penurunan tegangan	Nilai daya masukan (watt)	Nilai daya keluaran (watt)	Nilai Efisiensi (%)
1%	26005,9 W	25550,05 W	98,24 %
2%	25131,92 W	23060,70 W	91,75 %
3%	24436,88 W	21445,74 W	87,75 %
4%	23693,13 W	20191,97 W	85,22 %
5%	23009,94 W	18968,45 W	82,43 %



Gambar 19. Kurva Efisiensi Terhadap Ketidakseimbangan Tegangan

Berdasarkan Gambar 19, jatuh tegangan sebesar 1 % efisiensi motor sinkron tiga fasa sebesar 98,24 % dan jatuh tegangan sebesar 5 % efisiensi motor sinkron tiga fasa sebesar 82,43 % semakin besar jatuh tegangan (penurunan tegangan) maka arus pada masing-masing fasa akan semakin naik akibatnya motor akan mengalami pemanasan menunjukkan daya motor yang semakin turun dan efisiensi motor sinkron tiga fasa akan semakin kecil.

#### 4. Kesimpulan

Semakin besar penurunan tegangan, maka arus pada masing-masing fasa akan semakin naik akibatnya motor akan mengalami pemanasan dan menunjukkan daya motor yang semakin turun dan efisiensi motor sinkron tiga fasa akan semakin kecil. Pada saat terjadi ketidakseimbangan tegangan dari 1% sampai 5%, karakteristik arus stator pada salah satu fasa dapat mengalami kenaikan dari 44,2 ampere menjadi sebesar 45,2 ampere. Hal ini dapat mengakibatkan efek pemanasan yang tidak merata pada ketiga fasa tersebut. Pada torsi elektromagnetik mengalami penurunan dari 8,5 N.m menjadi 6 N.m, kecepatan putaran motor menurun dari 1820 rpm menjadi 1570 rpm, daya keluaran motor menurun dari 25550,05 watt menjadi 18968,45 watt, dan efisiensi daya menurun dari 98,24 % menjadi 82,43%.

#### Daftar Pustaka

- [1] Krause, P. C., Wasynczuk, O., Sudhoff, S. D., & Pekarek, S. (2002). *Analysis of electric machinery and drive systems*, New York: IEEE press, 2(2), 152-156.
- [2] Khotari, D. P., Nagrath, I. J. (1985). *Electrical Machines*. New Delhi: McGrawHill companies, 131-136.
- [3] Setiawan, P. (2019). Analisis Pengaruh Tegangan Tidak Seimbang Pada Kinerja Motor Induksi Menggunakan Metode Transformasi Direct Quadrature. *AVITEC*, 1(1), 15-28.



- [4] Ghazali, A. R. (2011). *Metode Perhitungan Efisiensi Motor Induksi yang Sedang Beroperasi*. Universitas Indonesia.
- [5] Sendro, Parisro. (2011). *Analisis Pengaruh Jatuh Tegangan Terhadap Kerja Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Matlab*. Universitas Sumatera Utara.
- [6] Satria, Alvon. (2017). *Perbaikan Faktor Daya Menggunakan Motor Sinkron dengan Menggunakan Metode Fuzzy Logic Control*. Universitas Riau.
- [7] Krishnan, R. (2001). *Electric motor drives: modeling, analysis and control*. Prentice Hall, 243-244.
- [8] Pillay, P., & Krishnan, R. (1988). *Modeling of permanent magnet motor drives*, *IEEE trans. ind. Electronics*, 35, 303-307.
- [9] Ting, J., Tan, Y., Wu, G., & Shumao, W. (2009). Simulation of pmsm vector control system based on matlab/simulink. in *Proc. International Conference Measuring Technology and Mechatronics Automation (iCMTMA09)* (pp. 343-346). IEEE.
- [10] Singh, J., Singh, B., Singh, S. P., Chaurasia, R., & Sachan, S. (2012). Performance investigation of permanent magnet synchronous motor drive using vector controlled technique. in *Proc. 2nd International Conference on Power, Control and Embedded Systems (JCPCES)* (pp. 1-11). IEEE.