

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Motor Induksi

Motor induksi, yang juga disebut motor asinkron, adalah motor yang paling banyak digunakan di industri (El-Sharkawi, 2019). Penamaan motor induksi berasal dari kenyataan bahwa motor ini bekerja berdasarkan induksi medan magnet stator ke rotor, di mana arus rotor tidak diperoleh dari sumber tertentu, tetapi merupakan arus yang terinduksi akibat adanya perbedaan relatif antara putaran rotor dengan medan putar yang dihasilkan oleh arus stator (Bagia & Parsa, 2018).

2.1.1 Prinsip Kerja

Prinsip kerja motor induksi erat kaitannya dengan Hukum Faraday dan Gaya Lorentz. Hukum Faraday menjelaskan bahwa konduktor yang memotong garis-garis medan magnet (fluks) yang konstan akan mengalami tegangan induksi. Sedangkan Gaya Lorentz menjelaskan bahwa apabila konduktor yang dialiri arus dan berada pada suatu medan magnet, maka pada konduktor tersebut akan timbul suatu gaya. Secara garis besar, prinsip kerja motor induksi tiga fasa dapat dijelaskan sebagai berikut:

- 1. Medan magnet berputar:** Ketika sumber tegangan tiga fasa diterapkan pada kumparan stator, arus tiga fasa yang mengalir dalam kumparan ini menghasilkan medan magnet berputar. Medan magnet berputar ini memiliki kecepatan sudut sinkron (n_s) (Mansour, 2020). Besarnya kecepatan sinkron (n_s) dapat dihitung menggunakan Persamaan 2.1 berikut:

$$n_s = \frac{120 \times f}{P} \quad (2.1)$$

Dimana:

n_s : Kecepatan sinkron (RPM)
 f : Frekuensi (Hz)
 P : Jumlah kutub magnet

2. **Induksi tegangan pada rotor:** Medan magnet berputar yang dihasilkan oleh stator memotong konduktor rotor, menyebabkan tegangan induksi pada belitan rotor sesuai dengan Hukum Faraday. Tegangan induksi ini menyebabkan arus mengalir dalam belitan rotor
3. **Arus rotor dan Gaya Lorentz:** Arus yang mengalir dalam belitan rotor menghasilkan medan magnet yang berinteraksi dengan medan magnet stator. Interaksi ini menghasilkan gaya pada konduktor rotor sesuai dengan Hukum Lorentz, yang mengakibatkan rotor berputar
4. **Slip:** Agar terjadi induksi tegangan pada rotor, rotor harus berputar dengan kecepatan yang lebih lambat dari medan magnet berputar stator. Perbedaan kecepatan ini disebut slip (s) (El-Sharkawi, 2019), yang dihitung dengan menggunakan Persamaan 2.2:

$$s = \frac{\Delta n}{n_s} = \frac{\Delta \omega}{\omega_s} = \frac{n_s - n_r}{n_s} = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \quad (2.2)$$

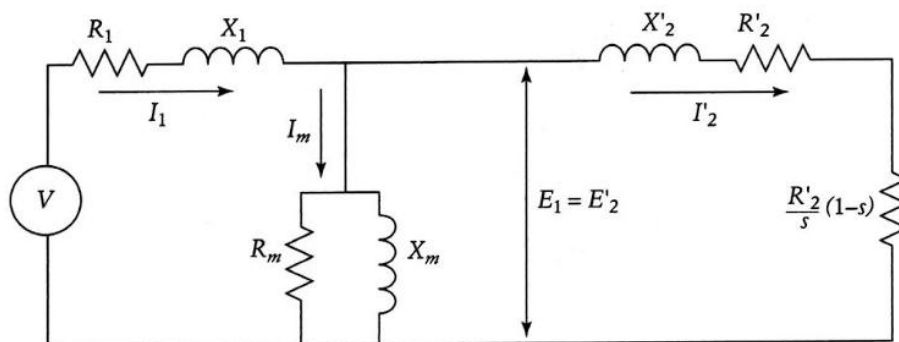
Dimana:

ω_s : Kecepatan sudut stator (rad/s)
 n_r : Kecepatan rotor (RPM)
 ω_r : Kecepatan sudut rotor (rad/s)

2.1.2 Rangkaian Ekuivalen

Rangkaian ekuivalen motor induksi tiga fasa membantu dalam memahami karakteristik dan performa motor induksi dengan lebih baik. Rangkaian ekuivalen ini merepresentasikan berbagai komponen dan rugi-rugi dalam motor, memungkinkan analisis yang lebih rinci mengenai arus, tegangan, dan daya dalam motor induksi. Rangkaian ekuivalen fasa tunggal sering digunakan untuk

menjelaskan motor induksi (El-Sharkawi, 2019). Rangkaian ekuivalen motor induksi seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 berikut:



Gambar 2.1 Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi

Sumber: (El-Sharkawi, 2019)

Dalam rangkaian ekuivalen ini, terdapat beberapa elemen penting yang merepresentasikan berbagai aspek dari motor induksi:

1. V adalah tegangan sumber pada terminal stator (V)
2. R_1, X_1 adalah tahanan stator yang merepresentasikan rugi-rugi resistif pada belitan stator (Ω) dan reaktansi induktif stator yang merepresentasikan reaktansi induktif pada belitan stator (Ω)
3. I_1, I_m, I'^2 adalah arus pada belitan stator (A), arus magnetisasi yang menghasilkan medan magnet pada stator (A), dan arus pada belitan rotor (A)
4. R_m, X_m adalah tahanan magnetisasi yang merepresentasikan rugi-rugi besi dalam inti stator (Ω) dan reaktansi magnetisasi yang merepresentasikan reaktansi dari fluks magnetik yang dihasilkan oleh stator (Ω)
5. E_1, E'^2 adalah tegangan induksi stator dan tegangan terinduksi pada rotor
6. R'^2, X'^2 adalah tahanan rotor yang diubah ke sisi stator, merepresentasikan rugi-rugi resistif pada belitan rotor (Ω) dan reaktansi rotor yang diubah ke sisi stator, merepresentasikan reaktansi induktif pada belitan rotor (Ω)

7. s adalah slip adalah perbedaan antara kecepatan sinkron medan magnet berputar dan kecepatan aktual rotor, yang dinyatakan sebagai fraksi dari kecepatan sinkron. Slip mempengaruhi arus dan torsi yang dihasilkan oleh motor

2.1.3 Konstruksi

Motor induksi yang ditunjukkan pada Gambar 2.2, pada dasarnya memiliki tiga bagian utama (Bagia & Parsa, 2018). Bagian-bagian tersebut adalah stator, celah udara dan rotor.

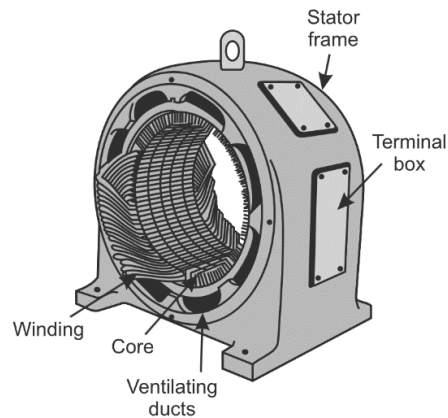


Gambar 2.2 Motor induksi
Sumber: (Bagia & Parsa, 2018)

Stator merupakan bagian yang diam dan memiliki kumparan yang dapat menginduksikan medan elektromagnetik pada kumparan rotor. Bagian-bagian utama stator yang ditunjukkan pada Gambar 2.3 antara lain:

1. *Motor housing/outer frame* merupakan bagian luar stator yang berfungsi untuk menopang *stator core* dan melindungi motor dari benturan mekanis
2. *Stator core* terbuat dari lapisan-lapisan tipis besi lunak dengan ketebalan bervariasi. Lapisan-lapisan ini ditumpuk dan dihubungkan bersama untuk meminimalkan histeresis dan rugi-rugi *eddy current*

3. *Stator winding* merupakan belitan tiga fasa yang ditempatkan pada inti stator. Keenam terminal belitan ini dihubungkan dalam terminal boks dan dapat dihubungkan secara bintang atau delta

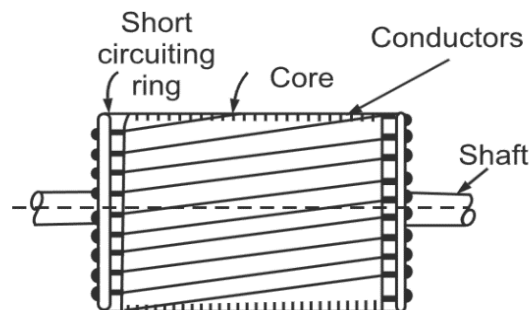


Gambar 2.3 Bagian-bagian stator
Sumber: (Mansour, 2020)

Celah udara merupakan ruang antara stator dan rotor yang menjadi tempat berpindahnya energi atau proses induksi dari stator ke rotor.

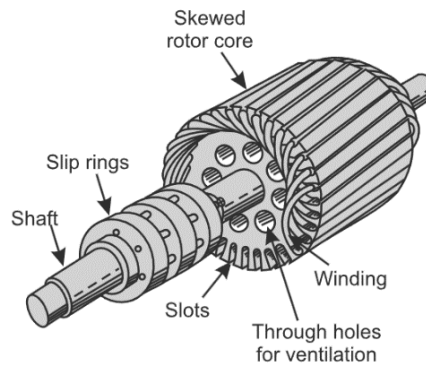
Rotor merupakan bagian yang bergerak (berputar) akibat adanya induksi magnet dari kumparan stator. Terdapat dua tipe rotor yaitu rotor sangkar (*squirrel cage rotor*) dan rotor belitan (*wound rotor*) (Mansour, 2020).

1. **Rotor sangkar (*squirrel cage rotor*):** Sebagian besar motor induksi yang digunakan di industri menggunakan rotor sangkar karena konstruksinya yang sederhana dan kokoh. Konstruksi jenis rotor ini ditunjukkan pada Gambar 2.4.



Gambar 2.4 Rotor sangkar
Sumber: (Mansour, 2020)

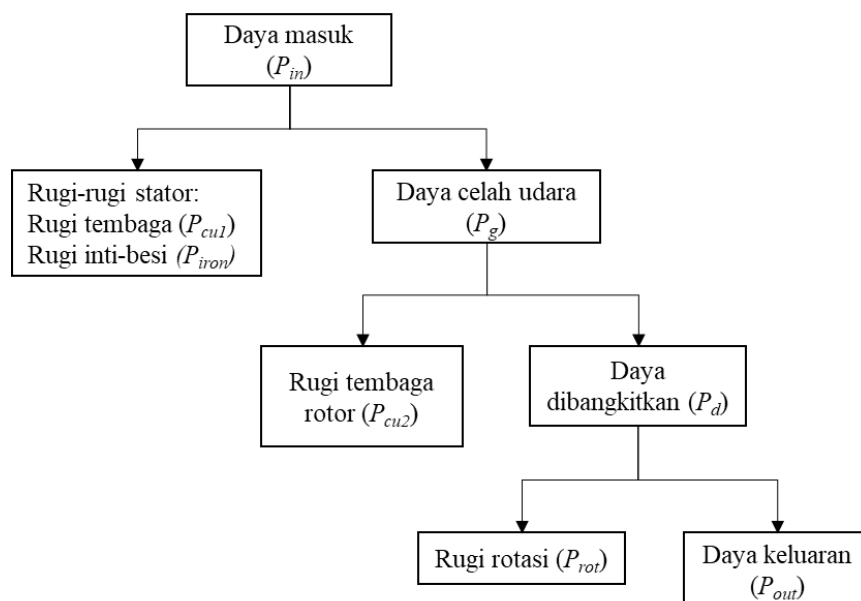
2. **Rotor belitan (*wound rotor*):** Terdiri dari belitan yang dimasukkan ke dalam alur-alur inti rotor. Ujung belitan dihubungkan dengan konfigurasi bintang dan ujung lainnya dihubungkan ke *slip ring* seperti terlihat pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Rotor belitan

Sumber: (Mansour, 2020)

2.1.4 Aliran Daya



Gambar 2.6 Aliran motor induksi

Sumber: (El-Sharkawi, 2019)

Aliran daya pada motor induksi ditunjukkan pada Gambar 2.6 (El-Sharkawi, 2019). Diagram ini menunjukkan daya suplai yang masuk ke stator (P_{in}), sebagian menjadi daya pada celah udara (P_g) dan sebagian menjadi rugi-rugi belitan tembaga

(P_{cu1}) dan inti besi (P_{iron}) pada stator. Daya celah udara (P_g) merupakan daya yang menginduksi fluks magnetik ke belitan rotor.

Pada belitan rotor, daya yang diinduksi dari celah udara (P_g) berubah menjadi rugi-rugi belitan tembaga pada rotor (P_{cu2}) dan daya yang dibangkitkan (P_d). Daya yang dibangkitkan (P_d), sebagian berubah menjadi rugi-rugi karena gesekan ketika berputar ($P_{rotational}$) dan sebagian berubah menjadi daya keluaran (P_{out}) yang digunakan untuk memutar rotor.

Daya input pada stator (P_{in}) dapat dinyatakan menggunakan Persamaan 2.3 berikut:

$$P_{in} = \sqrt{3} V I_1 \cos \varphi \quad (2.3)$$

Dimana:

P_{in} : Daya input
 V : Tegangan sumber (V)
 I_1 : Arus stator (A)
 $\cos \varphi$: Faktor daya

Rugi-rugi tembaga (P_{cu1}) dan rugi-rugi besi (P_{iron}) pada stator dapat dinyatakan menggunakan Persamaan 2.4 dan Persamaan 2.5 berikut:

$$P_{cu1} = 3 I_1^2 R_1 \quad (2.4)$$

$$P_{iron} = \frac{3 V^2}{R_m} \quad (2.5)$$

Dimana:

P_{cu1} : Rugi-rugi tembaga
 V : Tegangan sumber (V)
 I_1 : Arus stator (A)
 R_1 : Resistansi stator (Ω)
 R_m : Rugi-rugi besi pada stator (Ω)

Daya pada celah udara (P_g) dapat dinyatakan menggunakan Persamaan 2.6 dan Persamaan 2.6 berikut:

$$P_g = 3 E_2' I_2' \cos \varphi \quad (2.6)$$

Dimana:

- P_g : Daya pada celah udara
 E'_2 : Tegangan terinduksi pada rotor
 I'_2 : Arus rotor (A)
 $\cos \varphi$: Faktor daya

Rugi-rugi tembaga pada belitan rotor (P_{cu2}) dapat dinyatakan menggunakan

Persamaan 2.7 berikut:

$$P_{cu2} = 3(I'_2)^2 R'_2 = sP_g \quad (2.7)$$

Dimana:

- P_{cu2} : Rugi-rugi tembaga
 I'_2 : Arus rotor (A)
 R'_2 : Tahana pada rotor (Ω)

Daya yang dibangkitkan (P_d) dapat dinyatakan menggunakan Persamaan 2.8

berikut:

$$P_d = P_g - P_{cu2} = \frac{3(I'_2)^2 R'_2}{s} - (3(I'_2)^2 R'_2) = P_g(1 - s) \quad (2.8)$$

Dimana:

- E'_2 : Tegangan terinduksi pada rotor
 I'_2 : Arus rotor (A)
 R'_2 : Tahana pada rotor (Ω)
 s : Slip

Daya celah udara (P_g) dan daya yang dibangkitkan (P_d) dapat dinyatakan

dalam bentuk mekanis menggunakan Persamaan 2.9 dan Persamaan 2.10 berikut:

$$P_g = T_d \omega_s \quad (2.9)$$

$$P_d = T_d \omega_r \quad (2.10)$$

Dimana:

- T_d : Torsi yang dibangkitkan (N.m)
 ω_s : Kecepatan sudut sumber (rad/s)
 ω_r : Kecepatan sudut rotor (rad/s)

Daya keluaran (P_{out}) merupakan daya mekanis motor yang direduksi oleh rugi-rugi putaran motor, dapat dinyatakan menggunakan Persamaan 2.11 berikut:

$$P_{out} = T_m \omega_r \quad (2.11)$$

Dengan:

$$T_L < T_d$$

Dimana:

P_{out} : Daya keluaran (P_{out})

T_m : Torsi mekanis (N.m)

T_L : Beban mekanis (N.m)

Efisiensi motor dihitung menggunakan Persamaan 2.12 berikut:

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{in}} \times 100\% \quad (2.12)$$

Dimana:

η : Efisiensi motor induksi

2.1.5 Karakteristik (El-Sharkawi, 2019)

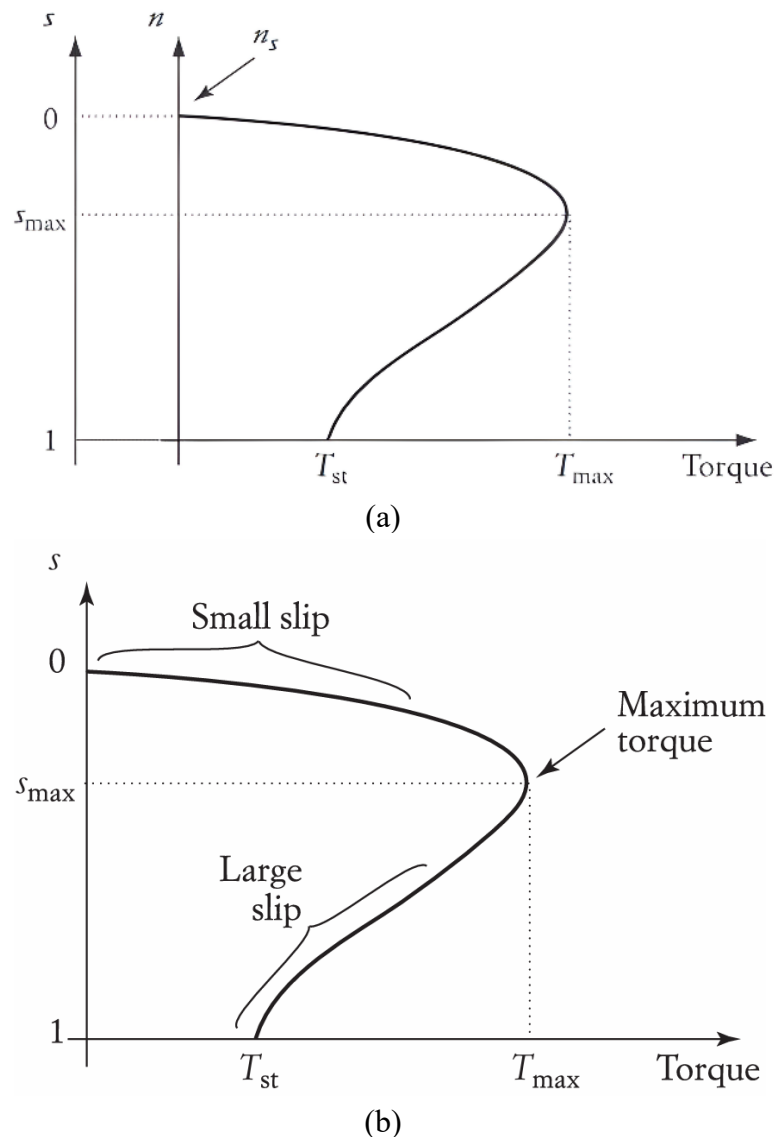
Berdasarkan rangkaian ekuivalen yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, kinerja motor induksi dapat dijelaskan melalui kurva karakteristik torsi-kecepatan seperti yang terlihat pada Gambar 2.7 (a). Kurva ini menggambarkan perilaku motor di berbagai kondisi operasi melalui empat parameter kunci:

1. **Torsi awal (T_{st}):** Dikenal juga sebagai *starting torque* atau *locked-rotor torque*, yaitu torsi yang dihasilkan motor saat kecepatan rotor nol ($n = 0$) atau saat slip bernilai satu ($s = 1$). Nilai T_{st} yang tinggi sangat krusial untuk aplikasi dengan inersia beban awal yang besar, seperti pada kompresor dan pompa.
2. **Torsi *pull-up*:** Merupakan nilai torsi minimum yang terjadi selama periode akselerasi motor dari keadaan diam menuju titik torsi maksimumnya. Torsi ini harus selalu lebih besar dari torsi beban untuk menjamin motor dapat berakselerasi dengan mulus tanpa mengalami *stalling* (berhenti) di tengah proses *strating*

3. **Torsi maksimum (T_{max}):** Sering disebut sebagai *breakdown torque* atau *pull-out torque*, adalah nilai torsi puncak yang dapat dibangkitkan motor. Jika beban mekanik melebihi nilai ini, motor akan kehilangan kecepatan secara drastis dan berhenti. Titik ini terjadi pada nilai slip tertentu yang disebut slip maksimum
4. **Kecepatan sinkron (n_s):** Merupakan kecepatan putaran medan magnet yang berputar dalam motor, dihitung berdasarkan frekuensi suplai dan jumlah kutub pada stator

Pada Gambar 2.7 (b) menunjukkan hubungan antara nilai slip (s) terhadap torsi yang dihasilkan motor. Gambar 2.7 (b) menjelaskan rentang operasi motor induksi sebagai penggerak, mulai dari kondisi diam (*standstill*, $s = 1$) hingga mendekati kecepatan sinkronnya ($s \sim 0$). Rentang operasi berdasarkan nilai slip (s) motor induksi adalah sebagai berikut:

- **Wilayah slip kecil:** Pada wilayah ini motor beroperasi pada beban nominalnya (biasanya $s < 5\%$). Pada kondisi ini, kecepatan rotor (n_r) sangat dekat dengan kecepatan sinkron (n_s)
- **Wilayah slip besar:** Pada wilayah ini terjadi pada rentang slip yang tinggi, mendekati $s = 1$, yaitu saat motor baru dinyalakan atau saat mengalami beban berlebih yang ekstrem hingga putaran melambat drastis
- **Titik Transisi pada Torsi Maksimum (T_{max}):** Titik pertemuan antara karakteristik linear (slip kecil) dan hiperbola (slip besar) disebut sebagai torsi maksimum atau *breakdown torque*. Jika beban mekanik memaksa motor beroperasi melewati titik ini (menuju slip yang lebih besar), motor akan masuk ke kondisi tidak stabil (*stalling*) karena torsi yang dihasilkan motor akan terus menurun sementara beban tetap atau bertambah.



Gambar 2.7 Karakteristik motor induksi (a) Karakteristik kecepatan, torsi, dan slip; (b) Wilayah operasi berdasarkan slip
Sumber: (El-Sharkawi, 2019)

2.1.6 Metode *Starting Direct On Line* (DOL)

Direct On Line (DOL) adalah metode pengasutan (*starting*) motor induksi tiga fasa yang paling sederhana, paling umum, dan paling murah [2]. Metode DOL bekerja dengan cara menghubungkan terminal stator motor induksi secara langsung ke suplai tegangan tiga fasa penuh. Proses ini biasanya dikendalikan oleh sebuah kontaktor magnetik yang diaktifkan oleh tombol. Ketika kontaktor menutup, motor langsung menerima tegangan penuh dan berakselerasi dari 0 RPM ke kecepatan

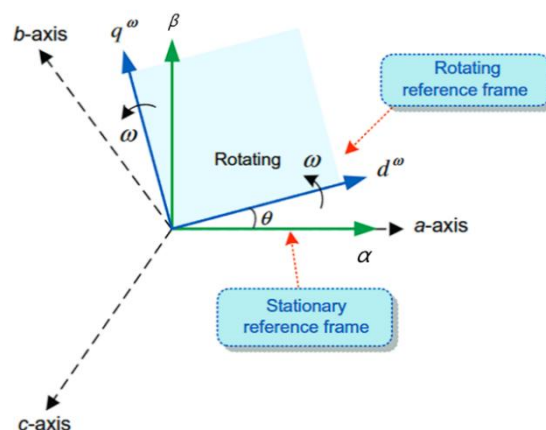
penuhnya, mengikuti kurva karakteristik torsi-kecepatan alaminya (seperti pada Gambar 2.7)

2.2 Reference Frame Transformation

Reference frame transformation atau transformasi kerangka acuan merupakan transformasi variabel tiga fasa (a-b-c) menjadi variabel dua fasa (d-q) yang ortogonal (Kim, 2017). Transformasi ini merupakan metode yang digunakan untuk melakukan analisis kondisi transient motor induksi (Lee et al., 1984).

Tujuan dari transformasi ini adalah untuk memudahkan proses analisis dan pemodelan motor induksi dengan mengurangi kompleksitas persamaan tiga fasa menjadi dua fasa (Krause et al., 2002). Model yang didasarkan pada transformasi ini terbukti dapat diandalkan dan akurat (Lee et al., 1984). Transformasi ini krusial dalam FOC karena mengubah sinyal AC sinusoidal yang rumit menjadi sinyal DC yang mudah dikontrol seperti pada motor arus searah.

Jenis-jenis *reference frame* (kerangka acuan) ditunjukkan pada Gambar 2.8(Kim, 2017):



Gambar 2.8 Sumbu pada *stationary reference frame* dan *synchronously rotating reference frame*

1. Kerangka acuan stasioner (*stationary reference frame*) notasi $\alpha - \beta$:

Digunakan ketika analisis memerlukan representasi langsung dari sinyal listrik

pada stator, terutama ketika motor induksi berada dalam kondisi dinamis seperti saat *start-up*.

2. **Kerangka acuan berputar sinkron (*synchronously rotating reference frame*) notasi d-q:** Digunakan untuk analisis yang lebih fokus pada pengendalian presisi tinggi dan efisiensi operasional, terutama dalam kondisi *steady-state* atau ketika motor beroperasi dekat dengan kecepatan sinkron.

Untuk melakukan transformasi kerangka acuan, digunakan beberapa persamaan matematis yang disebut Transformasi Clarke dan Transformasi Park

1. Secara matematis Transformasi Clarke dapat dinyatakan menggunakan Persamaan 2.13 berikut:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \\ f_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

Jika motor diasumsikan simetris, maka variabel $f_0 = 0$. Maka invers Persamaan 2.13 digunakan untuk mentransformasi kerangka acuan stasioner ($\alpha-\beta$) menjadi kerangka acuan tiga fasa ($a-b-c$), dinyatakan dengan Persamaan 2.14 berikut:

$$\begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Dimana:

- f : Variabel motor induksi (arus, tegangan, atau fluks)
- $(\alpha - \beta)$: Sumbu kerangka acuan stasioner
- $(a - b - c)$: Sumbu kerangka acuan 3 fasa

2. Transformasi Park dinyatakan dengan Persamaan 2.15 untuk mentransformasi kerangka acuan stasioner ($\alpha-\beta$) ke kerangka acuan berputar sinkron ($d - q$) dan untuk invers transformasi menggunakan Persamaan 2.16 berikut:

$$\begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} \quad (2.15)$$

Invers:

$$\begin{bmatrix} f_\alpha \\ f_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_d \\ f_q \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

Dimana:

f : Variabel motor induksi (arus, tegangan, atau fluks)

(d-q) : Sumbu kerangka acuan berputar

θ : Posisi sudut antara kerangka acuan berputar dan stasioner

2.3 Model Dinamis Motor Induksi

Model dinamis motor induksi merupakan persamaan matematis yang mampu merepresentasikan karakteristik dinamis dari motor induksi. Karena kompleksitasnya maka digunakan metode transformasi vektor untuk mengurangi kompleksitas model.

Berdasarkan pembahasan pada sub-bab 2.2, terdapat dua kerangka acuan dalam transformasi vektor yang dapat digunakan untuk menganalisis kinerja dinamis motor induksi. Persamaan matematis ini menggunakan kerangka acuan stasioner ($\alpha - \beta$) dan berputar sinkron (d-q).

2.3.1 Model Dinamis Kerangka Acuan Stasioner ($\alpha - \beta$)

Model dinamis mesin induksi dalam kerangka acuan stasioner ($\alpha - \beta$) mengurangi jumlah besaran yang perlu kita ketahui untuk menyimulasikan pengoperasian mesin (Belbali et al., 2023). Model dinamis motor induksi dalam kerangka acuan stasioner ($\alpha - \beta$) dinyatakan dengan persamaan-persamaan berikut (Belbali et al., 2023):

Persamaan tegangan stator dan rotor:

$$v_{s\alpha} = R_s \cdot i_{s\alpha} + p \cdot \lambda_{s\alpha} \quad (2.17)$$

$$v_{s\beta} = R_s \cdot i_{s\beta} + p \cdot \lambda_{s\beta} \quad (2.18)$$

$$v_{r\alpha} = 0 = R_r \cdot i_{r\alpha} + p \cdot \lambda_{r\alpha} + \omega_r \cdot \lambda_{r\beta} \quad (2.19)$$

$$v_{r\beta} = 0 = R_r \cdot i_{r\beta} + p \cdot \lambda_{r\beta} - \omega_r \cdot \lambda_{r\alpha} \quad (2.20)$$

Dengan p adalah *differential operator* ($\frac{d}{dt}$) dan $\omega_r = P \cdot \omega_m$

Persamaan fluks stator dan rotor:

$$\lambda_{s\alpha} = L_s \cdot i_{s\alpha} + L_m \cdot i_{r\alpha} \quad (2.21)$$

$$\lambda_{s\beta} = L_s \cdot i_{s\beta} + L_m \cdot i_{r\beta} \quad (2.22)$$

$$\lambda_{r\alpha} = L_r \cdot i_{r\alpha} + L_m \cdot i_{s\alpha} \quad (2.23)$$

$$\lambda_{r\beta} = L_r \cdot i_{r\beta} + L_m \cdot i_{s\beta} \quad (2.24)$$

Dimana:

$v_{s\alpha}, v_{s\beta}$: Tegangan stator sumbu $\alpha - \beta$

$v_{r\alpha}, v_{r\beta}$: Tegangan rotor sumbu $\alpha - \beta$

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$: Arus stator sumbu $\alpha - \beta$

$i_{r\alpha}, i_{r\beta}$: Arus rotor sumbu $\alpha - \beta$

$\lambda_{s\alpha}, \lambda_{s\beta}$: Fluks stator sumbu $\alpha - \beta$

$\lambda_{r\alpha}, \lambda_{r\beta}$: Fluks rotor sumbu $\alpha - \beta$

R_s : Resistansi stator (Ω)

R_r : Resistansi rotor (Ω)

L_s : Induktansi stator (H)

L_r : Induktansi rotor (H)

L_m : Induktansi mutual (H)

ω_r : Kecepatan putar rotor (RPM)

P : Jumlah kutub magnet

Persamaan torsi:

$$T_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{ar} \cdot i_{\beta s} - \lambda_{\beta r} \cdot i_{as}) \quad (2.25)$$

Dimana:

T_e : Torsi yang diproduksi

P : Jumlah kutub magnet

2.3.2 Model Dinamis Kerangka Acuan Berputar Sinkron (d-q)

Model dinamis motor induksi dalam kerangka acuan berputar sinkron (d-q)

digunakan untuk sistem *Field Oriented Control*. Model dinamis motor induksi

dalam kerangka acuan berputar sinkron dinyatakan dalam persamaan-persamaan berikut:

Persamaan tegangan:

$$v_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + p \cdot \lambda_{qs} + \omega_e \cdot \lambda_{ds} \quad (2.26)$$

$$v_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + p \cdot \lambda_{ds} + \omega_e \cdot \lambda_{qs} \quad (2.27)$$

$$v_{qr} = 0 = R_r \cdot i_{qr} + p \cdot \lambda_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \cdot \lambda_{dr} \quad (2.28)$$

$$v_{dr} = 0 = R_r \cdot i_{dr} + p \cdot \lambda_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \cdot \lambda_{qr} \quad (2.29)$$

Dengan p adalah *differential operator* ($\frac{d}{dt}$) dan $\omega_r = P \cdot \omega_m$

Persamaan fluks:

$$\lambda_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + L_m \cdot i_{qr} \quad (2.30)$$

$$\lambda_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + L_m \cdot i_{dr} \quad (2.31)$$

$$\lambda_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + L_m \cdot i_{qs} \quad (2.32)$$

$$\lambda_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + L_m \cdot i_{ds} \quad (2.33)$$

Dimana:

v_{qs}, v_{ds} : Tegangan stator sumbu $d - q$

v_{qr}, v_{dr} : Tegangan rotor sumbu $d - q$

i_{qs}, i_{ds} : Arus stator sumbu $d - q$

i_{qr}, i_{dr} : Arus rotor sumbu $d - q$

$\lambda_{qs}, \lambda_{ds}$: Fluks stator sumbu $d - q$

$\lambda_{qr}, \lambda_{dr}$: Fluks rotor sumbu $d - q$

R_s : Resistansi stator (Ω)

R_r : Resistansi rotor (Ω)

L_s : Induktansi stator (H)

L_r : Induktansi rotor (H)

L_m : Induktansi mutual (H)

ω_r : Kecepatan putar rotor (RPM)

ω_e : Kecepatan putar sinkron (RPM)

P : Jumlah kutub magnet

Persamaan torsi:

$$T_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} \cdot i_{qs} - \lambda_{qr} \cdot i_{ds}) \quad (2.34)$$

Dimana:

T_e : Torsi yang diproduksi

P : Jumlah kutub magnet

2.3.3 Model Dinamis Kecepatan Dan Torsi

Torsi yang diproduksi pada proses konversi energi motor induksi kemudian digunakan untuk menggerakkan beban mekanis, sesuai dengan Persamaan 2.35 berikut (Belbali et al., 2023):

$$T_m = T_L + fric. \omega_r + J.p. \omega_r \quad (2.35)$$

Dengan p adalah differential operator ($\frac{d}{dt}$)

Dimana:

T_m : Torsi mekanis

T_L : Beban mekanis

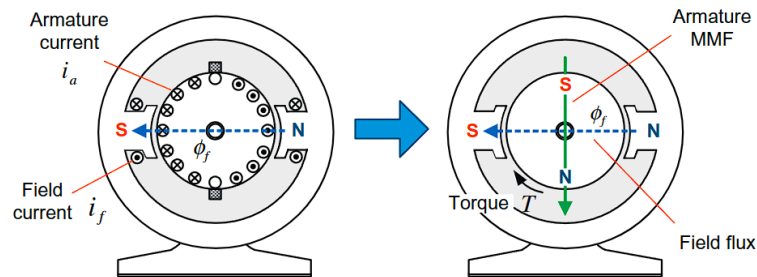
$fric$: Koefisien gesekan

ω_r : Kecepatan sudut rotor

J : Momen inersia

2.4 Field Oriented Control (FOC)

Field Oriented Control (FOC) atau disebut juga *Vector Control* merupakan metode pengendalian motor induksi yang meniru kemudahan pengendalian torsi pada motor DC eksitasi terpisah (Akin & Bhardwaj, 2013; Bose, 2002; Rashid, 2024). Tujuannya adalah untuk mencapai pengendalian torsi instan yang presisi, yang sangat dibutuhkan pada aplikasi berkinerja tinggi seperti lengan robot, lift, dan mesin CNC. (Kim, 2017).

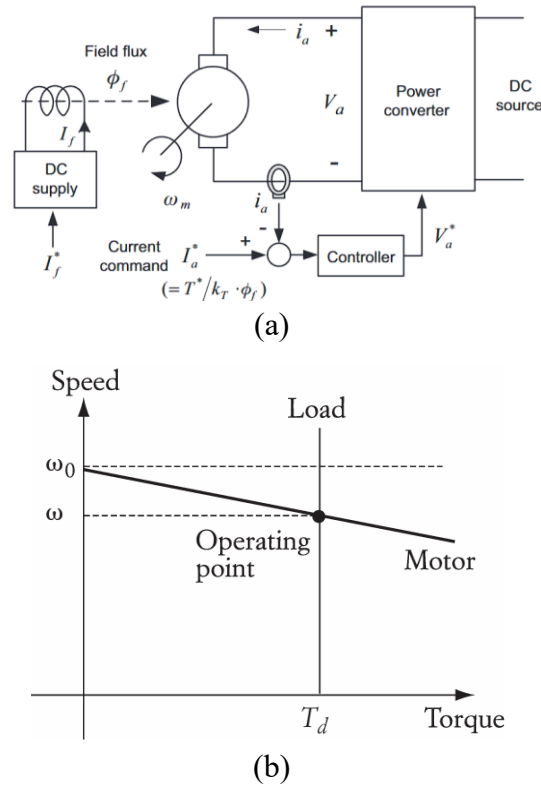


Gambar 2.9 Konstruksi motor DC eksitasi terpisah

Sumber: (Kim, 2017)

Pada motor DC eksitasi terpisah (Gambar 2.9), arus medan (i_f) yang menghasilkan fluks dan arus armatur (i_a) yang menghasilkan torsi secara alami

terpisah dan ortogonal (saling tegak lurus), sehingga torsi dapat dikendalikan secara langsung dengan mengatur i_a sambil menjaga fluks tetap konstan. (Akin & Bhardwaj, 2013; Bose, 2002; Rashid, 2024). Pengendalian motor DC eksitasi terpisah ditunjukkan pada Gambar 2.10 berikut:



Gambar 2.10 Motor DC eksitasi terpisah (a) Kendali torsi pada Motor DC eksitasi terpisah, (b) Karakteristik torsi dan kecepatan
Sumber: (Kim, 2017)

Persamaan torsi pada motor DC eksitasi terpisah ditunjukkan pada persamaan berikut (Kim, 2017):

$$T = k (\lambda_f i_a) \quad (2.36)$$

$$T = k (\lambda_f i_a) \sin \theta \quad (2.37)$$

Dimana:

T : Torsi
 k : Koefisien torsi
 λ_f : Fluks medan
 i_a : Arus armatur
 i_f : Arus eksitasi

θ : Sudut antara arus armatur dan fluks medan

Berdasarkan Persamaan 2.36 dan 2.37, dapat dijelaskan bahwa torsi dihasilkan dari perkalian arus armatur (i_a) dengan fluks medan (ψ_f), dan dipengaruhi sudut ($\sin \theta$) antara arus armatur (i_a) dan fluks medannya (ψ_f). Dengan menjaga nilai fluks medan (ψ_f) tetap konstan menggunakan arus eksitasi, maka torsi dapat dikendalikan menggunakan arus armatur (i_a) saja (Kim, 2017).

Karakteristik tersebut diperjelas pada Gambar 2.10 (b), yang menunjukkan bahwa motor DC eksitasi terpisah memiliki respons kecepatan yang sangat stabil. Kurva karakteristik memperlihatkan garis yang hampir horizontal, di mana kecepatan putar motor cenderung konstan dan hanya mengalami penurunan linier yang sangat kecil seiring dengan peningkatan torsi beban. Hubungan yang stabil antara kecepatan dan torsi inilah yang menjadi keunggulan utama motor DC.

Tujuan utama metode *Field Oriented Control* (FOC) adalah untuk mengadopsi karakteristik pengendalian torsi yang linier dan terpisah (*decoupled*) seperti pada motor DC eksitasi terpisah (Gambar 2.10) ke dalam motor induksi. Pada motor induksi konvensional, arus stator memiliki fungsi ganda yaitu menghasilkan fluks magnetik dan torsi secara bersamaan (*coupled*), yang menyebabkan pengendaliannya menjadi kompleks (Kim, 2017). Metode FOC mengatasi permasalahan ini dengan memanfaatkan transformasi matematis (Transformasi Clarke dan Park) untuk memproyeksikan arus stator tiga fasa (AC) menjadi dua komponen arus searah (DC) dalam kerangka acuan yang berputar sinkron dengan fluks rotor. Dua komponen arus ortogonal hasil transformasi tersebut adalah (Kim, 2017):

1. **Arus sumbu-d (i_{ds}):** Komponen arus yang searah dengan vektor fluks rotor, berfungsi untuk mengendalikan fluks medan magnet motor. Ini setara dengan arus medan (i_f) pada motor DC
2. **Arus sumbu-q (i_{qs}):** Komponen arus yang tegak lurus dengan vektor fluks rotor, berfungsi untuk mengendalikan torsi elektromagnetik motor. Ini setara dengan arus armatur (i_a) pada motor DC

Dengan memisahkan (*decoupling*) kedua komponen ini, motor induksi dapat dikendalikan seperti motor DC, di mana torsi dapat diatur secara cepat dan independen dari fluks. Berdasarkan cara untuk mengetahui sudut vektor fluks (θ_e) yang menjadi kunci proses transformasi, FOC dibagi menjadi dua jenis (Kim, 2017):

1. **Direct Field Oriented Control (DFOC):** Menggunakan sensor fluks (seperti *Hall-effect sensor*) untuk mengukur posisi fluks rotor secara langsung
2. **Indirect Field Oriented Control (IFOC):** Tidak mengukur fluks secara langsung, melainkan mengestimasi atau menghitung posisi sudut fluks (θ_e) berdasarkan kecepatan putar rotor (ω_r) yang diukur dan parameter motor lainnya. Karena tidak memerlukan sensor fluks yang mahal dan rapuh, metode IFOC lebih umum digunakan dalam aplikasi industri

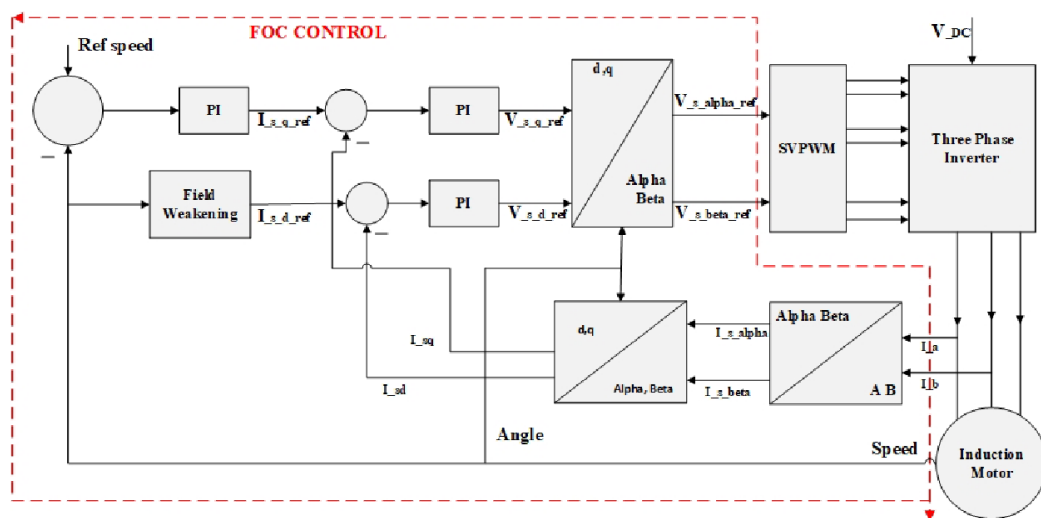
2.4.1 Indirect Field Oriented Control (IFOC)

Penelitian ini menggunakan metode *Indirect Field Oriented Control* (IFOC) karena kemudahan implementasi dan kinerjanya yang andal, terutama pada operasi kecepatan rendah. Inti dari metode IFOC adalah proses estimasi posisi sudut fluks rotor (θ_e) yang dihitung secara tidak langsung. Keakuratan estimasi sudut ini sangat menentukan keberhasilan pemisahan (*decoupling*) antara kontrol fluks dan torsi.

Posisi sudut ini dihitung dengan mengintegrasikan kecepatan sudut sinkron (ω_e) seperti ditunjukkan pada Persamaan 2.38.

$$\theta_e = \int \omega_e dt \quad (2.38)$$

Setelah posisi sudut fluks (θ_e) didapatkan, sistem IFOC dapat melakukan proses pengendalian. Secara garis besar, prinsip kerja IFOC yang diilustrasikan pada Gambar 2.11 dapat diuraikan melalui alur sinyal berikut:



Gambar 2.11 Blok diagram *Indirect Field Oriented Control* (IFOC)

Sumber: (Aman et al., 2017)

1. **Loop kontrol kecepatan:** Proses dimulai dengan membandingkan kecepatan referensi (Ref speed) dengan kecepatan aktual motor (Speed) yang didapat dari *encoder*. Selisih (*error*) kecepatan ini kemudian diproses oleh pengontrol PI kecepatan untuk menghasilkan referensi arus torsi ($I_{s_q_ref}$), yang menentukan seberapa besar torsi yang harus dihasilkan motor untuk mencapai kecepatan yang diinginkan
2. **Umpan balik dan transformasi arus:** Arus tiga fasa aktual dari motor (i_a, i_b, i_c) diukur dan diubah menjadi kerangka acuan stasioner ($\alpha - \beta$) melalui Transformasi Clarke. Kemudian, dengan menggunakan estimasi sudut fluks

(θ_e), arus ini diubah lagi menjadi kerangka acuan berputar ($d - q$) melalui Transformasi Park untuk mendapatkan nilai arus aktual i_{ds} dan i_{qs}

3. **Loop kontrol arus:** Dua pengontrol PI terpisah bekerja secara independen. Pengontrol arus q membandingkan $I_{s_q_ref}$ dengan i_{qs} aktual untuk menghasilkan referensi tegangan torsi ($V_{s_q_ref}$). Sementara itu, pengontrol arus d membandingkan $I_{s_d_ref}$ (yang umumnya konstan) dengan i_{ds} aktual untuk menghasilkan referensi tegangan fluks ($V_{s_d_ref}$)
4. **Transformasi balik dan modulasi:** Referensi tegangan ($V_{s_d_ref}$, $V_{s_q_ref}$) diubah kembali ke kerangka acuan stasioner ($\alpha - \beta$) melalui Inverse Transformasi Park. Hasilnya kemudian menjadi input bagi blok SVPWM untuk menghasilkan sinyal pulsa kendali bagi inverter tiga fasa, yang pada akhirnya menyuplai tegangan yang tepat ke motor induksi

2.4.2 Hubungan Arus Medan Stator (i_{ds}) Terhadap Fluks Medan Magnet (λ_{dr})

Dalam metode *Field Oriented Control* (FOC), salah satu prinsip utamanya adalah pemisahan (decoupling) kontrol fluks dan torsi, yang memungkinkan pengendalian fluks magnetik motor secara independen. Dengan kondisi *decoupling* fluks, di mana komponen fluks rotor sumbu q (λ_{qr}) diasumsikan nol ($\lambda_{qr} = 0$), persamaan tegangan rotor sumbu d (Persamaan 2.29) dapat disederhanakan menjadi Persamaan 2.39 berikut:

$$p.\lambda_{dr} = -R_r.i_{dr} \quad (2.39)$$

Dengan menggunakan persamaan fluks rotor sumbu d pada Persamaan 2.33 didapatkan Persamaan 2.40 berikut:

$$i_{dr} = \frac{\lambda_{dr}}{L_r} - \frac{L_m}{L_r} i_{ds} \quad (2.40)$$

Substitusi Persamaan 2.40 ke Persamaan 2.39, didapatkan Persamaan 2.41 berikut:

$$p \cdot \lambda_{dr} = -\frac{1}{T_r} \cdot \lambda_{dr} + \frac{L_m}{T_r} \cdot i_{ds} \quad (2.41)$$

$$\text{Dengan } T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

Jika nilai arus medan stator (i_{ds}) dijaga konstan (umumnya dilakukan untuk operasi motor induksi di bawah kecepatan nominal) (Kim, 2017), maka hubungan antara fluks rotor (λ_{dr}) dan arus medan stator (i_{ds}) menjadi linier, seperti yang ditunjukkan oleh Persamaan 2.42:

$$\lambda_{dr} = L_m i_{ds} \quad (2.42)$$

Berdasarkan Persamaan 2.41 dan 2.42, jelas bahwa dengan mengatur nilai arus medan stator (i_{ds}), fluks rotor (λ_{dr}) dapat dikendalikan. Pengendalian ini memungkinkan motor induksi memiliki karakteristik respons yang mirip dengan motor DC eksitasi terpisah, di mana fluks medan magnet dapat dipertahankan pada nilai referensi yang diinginkan.

2.4.3 Hubungan Arus Beban Stator (i_{qs}) Terhadap Torsi (T_e)

Arus beban sumbu q (i_{qs}) dalam sistem *Field Oriented Control* (FOC) memiliki peran krusial dalam pengendalian torsi yang dihasilkan motor induksi. Dengan menerapkan kondisi *decoupling* pada fluks, yaitu $\lambda_{qr} = 0$, persamaan torsi (Persamaan 2.34) dapat disederhanakan secara signifikan menjadi Persamaan 2.43 berikut:

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} \cdot i_{qs}) \quad (2.43)$$

Jika:

$$k = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r}$$

Maka:

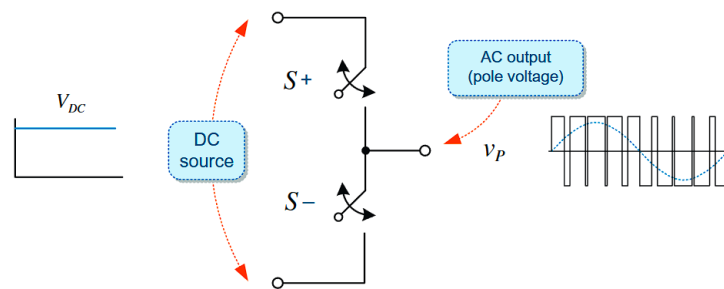
$$T_e = k \cdot \lambda_{dr} \cdot i_{qs} \quad (2.44)$$

Berdasarkan Persamaan 2.44, jika fluks rotor (λ_{dr}) dijaga konstan (dengan menjaga i_{ds} konstan seperti dijelaskan sebelumnya), maka torsi elektromagnetik (T_e) menjadi berbanding lurus dengan arus beban stator (i_{qs}). Oleh karena itu, persamaan ini menjadi landasan fundamental yang akan divalidasi dalam penelitian ini untuk membuktikan pengaruh langsung arus i_{qs} terhadap torsi yang dihasilkan motor.

2.5 Inverter

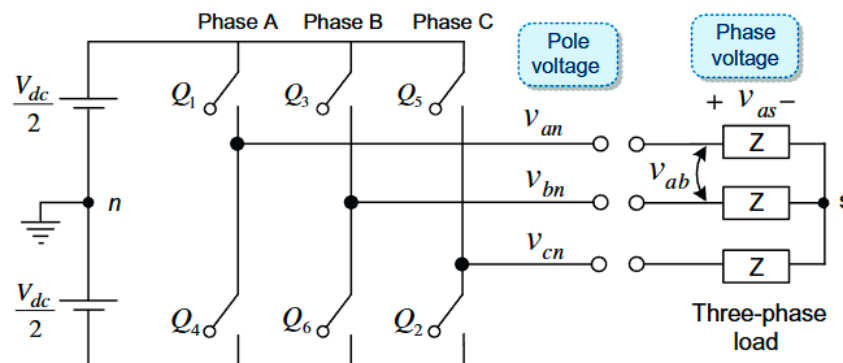
Inverter adalah peralatan elektronika daya yang mengubah daya arus searah (DC) menjadi daya AC (Kim, 2017; Rashid, 2024). Dalam sistem pengendalian motor seperti *Field Oriented Control* (FOC), inverter memegang peran krusial sebagai aktuator daya. Fungsinya adalah mengeksekusi perintah tegangan dari algoritma kontrol (yang dalam penelitian ini berbentuk sinyal SVPWM) dan mengubahnya menjadi tegangan AC tiga fasa dengan amplitudo dan frekuensi yang variabel untuk disuplai ke motor induksi.

Rangkaian dasar dari sebuah kaki inverter terdiri dari sepasang saklar semikonduktor (umumnya IGBT atau MOSFET) yang beroperasi secara komplementer, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.12. Ketika saklar atas (S+) menyala, saklar bawah (S-) mati, dan sebaliknya. Operasi *switching* berkecepatan tinggi inilah yang menghasilkan tegangan keluaran AC berbentuk pulsa.



Gambar 2.12 Rangkaian dasar inverter
Sumber: (Kim, 2017)

Untuk menggerakkan motor induksi tiga fasa, digunakan topologi inverter jembatan tiga fasa (*three-phase bridge inverter*), yang terdiri dari tiga buah rangkaian dasar (kaki inverter) yang dihubungkan secara paralel, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.13. Rangkaian ini memiliki enam saklar (Q1 hingga Q6) yang dikendalikan secara independen.



Gambar 2.13 Rangkaian inverter tiga fasa
Sumber: (Kim, 2017)

Dengan enam saklar, terdapat 8 kemungkinan kombinasi *switching* yang valid. Kombinasi-kombinasi ini menghasilkan enam vektor tegangan aktif yang berbeda dan dua vektor tegangan nol, seperti yang dirangkum pada Tabel 2.1. Sangat penting untuk memastikan bahwa dua saklar pada kaki inverter yang sama tidak pernah menyala secara bersamaan, karena akan menyebabkan hubung singkat pada sumber tegangan DC.

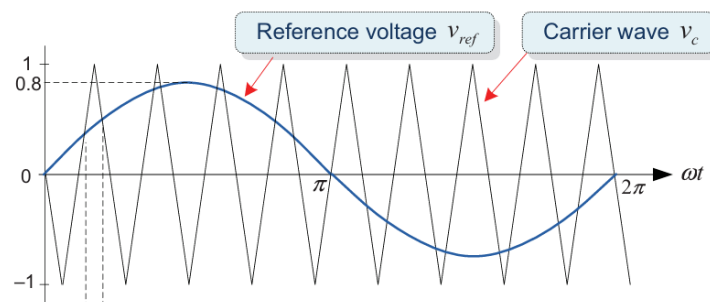
Tabel 2.1 Pola *switching* inverter 3 fasa

NO	Q_1	Q_3	Q_5	Q_4	Q_6	Q_2
1	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF
2	ON	OFF	OFF	OFF	ON	ON
3	ON	ON	OFF	OFF	OFF	ON
4	OFF	ON	OFF	ON	OFF	ON
5	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF
6	OFF	OFF	ON	ON	ON	OFF
7	ON	OFF	ON	OFF	ON	OFF
8	OFF	OFF	OFF	ON	ON	ON

Urutan dan durasi dari kedelapan status *switching* inilah yang diatur secara presisi oleh algoritma modulasi. Dalam penelitian ini, teknik *Space Vector Pulse Width Modulation* (SVPWM) digunakan untuk mengatur pola *switching* tersebut, yang akan dibahas secara mendalam pada sub-bab berikutnya.

2.6 Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM)

Sinusoidal Pulse Width Modulation (SPWM) adalah teknik PWM klasik dan yang paling umum digunakan [7]. Prinsip kerja SPWM sangat lugas. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.14,



Gambar 2.14 Prinsip kerja SPWM
Sumber: (Kim, 2017)

Berdasarkan pada Gambar 2.14, SPWM bekerja dengan cara membandingkan dua sinyal secara *real-time*:

- Sinyal referensi (modulasi): Sinyal sinusoidal (V_{ref}) pada frekuensi fundamental yang diinginkan (misalnya 50 Hz)

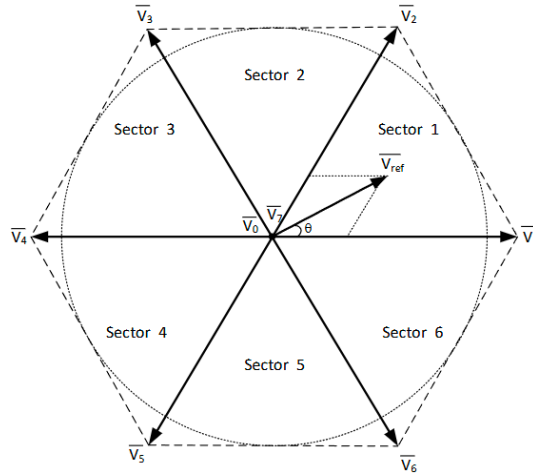
- Sinyal pembawa (*carrier*): Sinyal segitiga (V_c) pada frekuensi yang jauh lebih tinggi (frekuensi *switching*), misalnya 8 kHz

2.7 *Space Vector Pulse Width Modulator (SVPWM)*

Setelah algoritma FOC menentukan referensi tegangan yang dibutuhkan motor ($V\alpha_{ref}, V\beta_{ref}$), diperlukan sebuah mekanisme modulasi untuk menerjemahkan perintah tersebut menjadi sinyal *switching* nyata bagi inverter. Mekanisme ini dilakukan oleh *Pulse Width Modulator* (PWM). PWM adalah teknik untuk menghasilkan sinyal pulsa dengan periode *high* dan *low* yang dapat diatur. Persentase waktu *high* dalam satu periode disebut sebagai *duty cycle*, yang nilainya berbanding lurus dengan tegangan keluaran rata-rata.

Space Vector Pulse Width Modulator (SVPWM) adalah salah satu teknik yang dikembangkan dalam teknologi PWM. Dibandingkan dengan metode PWM sinusoidal konvensional (SPWM), SVPWM dipilih karena memiliki beberapa keunggulan signifikan: menghasilkan tegangan keluaran fundamental yang 15.5% lebih tinggi, distorsi harmonik (THD) yang lebih rendah pada arus beban, dan riak torsi yang lebih kecil pada motor (Kim, 2017).

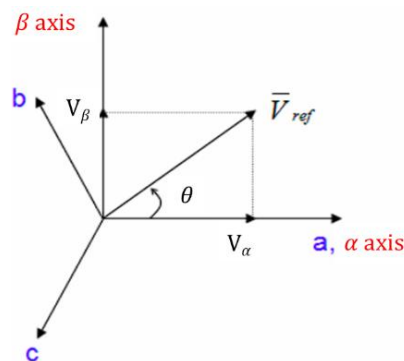
Prinsip dasar SVPWM adalah merepresentasikan tegangan tiga fasa yang diinginkan sebagai satu vektor tunggal yang berputar, yaitu vektor tegangan referensi (V_{ref}). Inverter tiga fasa memiliki delapan kemungkinan status *switching* (dirangkum pada Tabel 2.1), yang dapat direpresentasikan sebagai delapan vektor tegangan diskrit: enam vektor aktif (V_1 hingga V_6) yang membentuk heksagon, dan dua vektor nol (V_0 dan V_7) di pusat, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Representasi vektor tegangan keluaran
Sumber: (Doan et al., 2021)

Tujuan dari SVPWM adalah untuk menghasilkan tegangan rata-rata yang setara dengan V_{ref} dengan cara mengatur durasi dari dua vektor aktif yang berdekatan dan vektor nol dalam satu periode *switching* (T_s). Proses ini dilakukan melalui langkah-langkah sistematis berikut (Doan et al., 2021; Jung, 2005):

1. **Transformasi dan Penentuan V_{ref} dan Sudut (θ):** Transformasi kerangka acuan menjadi dasar dalam proses representasi vektor tegangan keluaran (V_0 - V_7). Pada metode SVPWM, kerangka acuan yang digunakan adalah kerangka acuan stasioner. Setelah proses Transformasi, dilakukan perhitungan nilai sudut (θ) dan $|\bar{V}_{ref}|$.



Gambar 2.16 Transformasi kerangka acuan stasioner
Sumber: (Jung, 2005)

Berdasarkan Gambar.16, nilai sudut (θ) dan V_{ref} dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{V_{\beta}}{V_{\alpha}} \right) \quad (2.45)$$

$$|\bar{V}_{ref}| = \sqrt{V_{\alpha}^2 + V_{\beta}^2} \quad (2.46)$$

2. **Penentuan sektor:** Berdasarkan nilai sudut θ , algoritma menentukan di sektor mana (antara 1 hingga 6) V_{ref} berada. Penentuan sektor ini krusial karena akan menentukan pasangan vektor aktif mana yang akan digunakan untuk pembentukan V_{ref} .
3. **Penentuan durasi waktu (T_1, T_2, T_0):** Setelah sektor diketahui, durasi waktu untuk mengaktifkan dua vektor aktif yang berdekatan (T_1, T_2) serta vektor nol (T_0) dihitung menggunakan Persamaan 2.47 sampai Persamaan 2.49. Perhitungan ini memastikan bahwa rata-rata tegangan yang dihasilkan selama satu periode *switching* setara dengan V_{ref} yang diinginkan, seperti diilustrasikan pada Gambar 2.17.

$$T_1 = T_s \cdot a \cdot \frac{\sin \left(\frac{n\pi}{3} - \theta \right)}{\sin \left(\frac{\pi}{3} \right)} \quad (2.47)$$

$$T_2 = T_s \cdot a \cdot \frac{\sin \left(\theta - \frac{(n-1)\pi}{3} \right)}{\sin \left(\frac{\pi}{3} \right)} \quad (2.48)$$

$$T_0 = T_s - (T_1 + T_2) \quad (2.49)$$

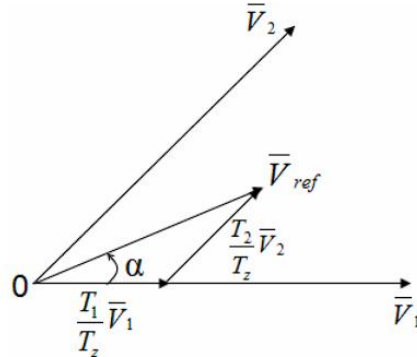
Dengan:

$$T_s = \frac{1}{f_s} \quad (2.50)$$

$$a = \frac{|\bar{V}_{ref}|}{\frac{2}{3} V_{DC}} \quad (2.51)$$

Dimana:

- n : sektor 1 sampai 6
 θ : sudut V_α dan V_β
 f_s : frekuensi *switching*
 a : indeks modulasi



Gambar 2.17 Pembentukan $\bar{V}_{ref}$ pada sektor 1

Sumber: (Jung, 2005)

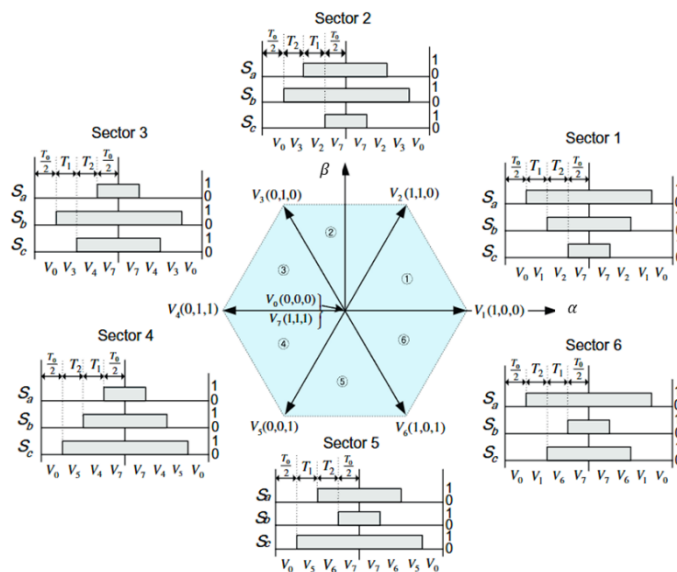
4. **Penentuan *duty cycle*:** Durasi waktu T_1, T_2 , dan T_0 diterjemahkan menjadi nilai *duty cycle* untuk keenam saklar inverter (Q1-Q6) berdasarkan sektor di mana V_{ref} berada. Hubungan antara sektor, durasi waktu, dan *duty cycle* untuk setiap saklar dirangkum pada Tabel 2.2 berikut:

Tabel 2.2 *Duty cycle* untuk setiap komponen *switching*

Sektor	Bagian atas (Q_1, Q_3, Q_5)	Bagian bawah (Q_4, Q_6, Q_2)
1	$Q_1 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$	$Q_4 = \frac{T_0}{2}$
	$Q_3 = T_2 + \frac{T_0}{2}$	$Q_6 = T_1 + \frac{T_0}{2}$
	$Q_5 = \frac{T_0}{2}$	$Q_2 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$
2	$Q_1 = T_1 + \frac{T_0}{2}$	$Q_4 = T_2 + \frac{T_0}{2}$
	$Q_3 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$	$Q_6 = \frac{T_0}{2}$
	$Q_5 = \frac{T_0}{2}$	$Q_2 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$
3	$Q_1 = \frac{T_0}{2}$	$Q_4 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$
	$Q_3 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$	$Q_6 = \frac{T_0}{2}$
	$Q_5 = T_2 + \frac{T_0}{2}$	$Q_2 = T_1 + \frac{T_0}{2}$

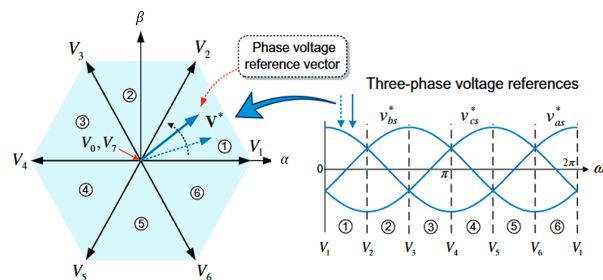
4	$Q_1 = \frac{T_0}{2}$	$Q_4 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$
	$Q_3 = T_1 + \frac{T_0}{2}$	$Q_6 = T_2 + \frac{T_0}{2}$
	$Q_5 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$	$Q_2 = \frac{T_0}{2}$
5	$Q_1 = T_2 + \frac{T_0}{2}$	$Q_4 = T_1 + \frac{T_0}{2}$
	$Q_3 = \frac{T_0}{2}$	$Q_6 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$
	$Q_5 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$	$Q_2 = \frac{T_0}{2}$
6	$Q_1 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$	$Q_4 = \frac{T_0}{2}$
	$Q_3 = \frac{T_0}{2}$	$Q_6 = T_1 + T_2 + \frac{T_0}{2}$
	$Q_5 = T_1 + \frac{T_0}{2}$	$Q_2 = T_2 + \frac{T_0}{2}$

Pola *switching* yang dihasilkan dari perhitungan *duty cycle* pada Tabel 2.3 dapat divisualisasikan seperti pada Gambar 2.18. Sinyal-sinyal pulsa inilah yang menjadi output akhir dari blok SVPWM dan dikirimkan ke gerbang (*gate*) IGBT pada inverter.



Gambar 2.18 Pola *switching* semua sektor
Sumber: (Kim, 2017)

Dengan demikian, SVPWM berfungsi sebagai jembatan cerdas antara perintah tegangan dari algoritma kontrol FOC dengan eksekusi fisik oleh inverter, memastikan motor menerima suplai tegangan yang paling efisien dan berkualitas tinggi sesuai dengan kebutuhan torsi dan kecepatan.



Gambar 2.19 Perbandingan perputaran vektor tegangan keluaran (V_{ref}) dengan keluaran tegangan tiga fasa
Sumber: (Kim, 2017)

Secara konseptual, Gambar 2.19 merangkum tujuan akhir dan fungsi utama dari blok SVPWM dalam sistem FOC. Gambar tersebut mengilustrasikan bagaimana perintah abstrak berupa vektor tegangan referensi (V_{ref}) yang berputar secara kontinyu—yang nilainya ditentukan oleh algoritma kontrol FOC—diterjemahkan secara presisi oleh modulator menjadi tegangan keluaran tiga fasa yang berbentuk sinusoidal. Hubungan antara vektor yang berputar dan gelombang sinus yang dihasilkan inilah yang membuktikan bahwa SVPWM berhasil menyediakan suplai tegangan ideal yang dibutuhkan motor untuk menghasilkan torsi dan kecepatan yang diinginkan.

2.8 Pengenalan Matlab Simulink

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah perangkat lunak yang sangat berguna dalam bidang teknik untuk memecahkan masalah, merancang sistem, dan menyimulasikan model. MATLAB menyediakan lingkungan bagi peneliti dan

insinyur untuk membuat model, mengembangkan algoritma, serta menganalisis data numerik dengan kemampuan pemrograman yang fleksibel (Hossain, 2022).

Sebagai pelengkap MATLAB, Simulink adalah platform yang memungkinkan pemodelan, desain, dan simulasi sistem dinamis menggunakan pendekatan berbasis blok diagram grafis (Hossain, 2022). Setiap blok dalam Simulink merepresentasikan sebuah fungsi atau komponen sistem, yang dapat dihubungkan untuk membangun model sistem yang kompleks. Keunggulan utama Simulink adalah kemampuannya untuk berinteraksi secara langsung dengan MATLAB, sehingga perilaku model dapat dianalisis dan disimulasikan secara bersamaan (MATLAB, 2024).

Salah satu fitur paling kuat dari ekosistem MATLAB dan Simulink adalah kemampuannya untuk menjembatani antara tahap simulasi dengan implementasi pada perangkat keras nyata, sebuah proses yang dikenal sebagai *Model-Based Design*. Fitur ini menjadi krusial dalam penelitian ini dan dimungkinkan oleh dua komponen utama:

1. ***Simulink Coder***: Fitur ini berfungsi sebagai penerjemah yang secara otomatis mengubah model grafis Simulink menjadi kode C atau C++ yang efisien dan portabel. Proses ini menghilangkan kebutuhan untuk menulis kode kontrol secara manual dari awal, sehingga secara signifikan mempercepat proses pengembangan dan mengurangi potensi *human error*.
2. ***Embedded Coder***: Merupakan ekstensi dari Simulink Coder yang menyediakan fungsionalitas lanjutan yang dioptimalkan untuk mikrokontroler target spesifik. Embedded Coder memungkinkan insinyur untuk melakukan konfigurasi perangkat keras (seperti pin I/O, ADC, dan timer), menghasilkan

kode yang sangat efisien dari segi memori dan kecepatan eksekusi, serta yang paling penting, mengelola proses "*Build and Deploy*". Proses inilah yang secara otomatis akan mengompilasi dan mengunggah kode yang dihasilkan langsung ke mikrokontroler dari dalam lingkungan Simulink.

Dengan memanfaatkan kedua fitur ini, alur kerja penelitian dapat dilakukan secara sistematis: merancang dan memvalidasi algoritma kontrol dalam lingkungan simulasi yang aman di Simulink, kemudian mengimplementasikan algoritma yang sama persis ke perangkat keras fisik dengan tingkat keyakinan yang tinggi.

2.9 Modul percobaan *Power Electronics and Drives* 300 W Lucas-Nuelle

Modul percobaan *Power Electronics and Drives* 300 W Lucas-Nuelle adalah perangkat yang dirancang untuk pendidikan dan penelitian dalam bidang teknik listrik, khususnya dalam studi dan penerapan metode kontrol motor. Modul ini memungkinkan simulasi dan eksperimen yang komprehensif dengan parameter parameter yang spesifik, sehingga memberikan peluang untuk penelitian yang mendalam dan validasi empiris. Pada modul ini juga memungkinkan untuk dilakukan pemodelan sistem dan integrasi dengan perangkat keras.

2.10 Penelitian Terkait

Beberapa penelitian yang terkait dengan *Field Oriented Control* (FOC) dan motor induksi dijelaskan pada Tabel 2.3 berikut:

Tabel 2.3 Penelitian terkait

No	Judul Penelitian	Identitas Peneliti	Pembahasan
1.	Pemodelan <i>Direct Field Oriented Control</i> (DFOC) Pada Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Phasa	Rizana Fauzi, Jumiyatun, Maryantho. Teknik Elektro, Fakultas Teknik,	Penelitian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink dengan cara melakukan pemodelan sistem dan pengujian untuk mendapatkan respons sistem

		Universitas Tadulako, 2019	yang dimodelkan. Sistem yang dimodelkan adalah <i>Direct Field Oriented Control</i> yang mana merupakan salah satu jenis metode FOC
2.	Analisis Pengaruh Arus Medan (<i>Id Current Axis</i>) Terhadap Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa Menggunakan Metode <i>Field Oriented Control</i> (FOC)	Indra Ferdiansya, Lucky Pradigta SR, Era Purwanto. Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, 2019	Penelitian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink dengan cara melakukan pemodelan sistem dan pengujian untuk mendapatkan pengaruh arus medan (<i>Id</i>) terhadap kecepatan motor induksi. Pengujian dilakukan dengan beberapa variasi arus medan (<i>Id</i>)
3.	Pengaturan Kecepatan Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Metode <i>Field Oriented Control</i> (FOC) Pada Mobil Listrik	Nibras Syarif Ramadhan, Indra Ferdiansyah, Era Purwanto. Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, 2021	Penelitian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink dengan cara melakukan pemodelan sistem dan pengujian untuk mendapatkan respons sistem yang dimodelkan. Nilai beban mekanik yang digunakan pada saat pengujian diasumsikan sebesar beban mekanik sebuah mobil listrik
4.	Simulasi Pengendalian Motor Induksi Menggunakan Metode <i>Field Oriented Control</i>	Aqilatur Rohmah, Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Lampung, 2021	Penelitian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink dengan cara melakukan pemodelan sistem dan pengujian untuk mendapatkan respons sistem yang dimodelkan. Analisis yang dilakukan juga berfokus terhadap nilai arus starting yang dihasilkan ketika menggunakan metode FOC
5.	Studi Pengaruh Arus Medan (<i>Iq Current Axis</i>) Terhadap Torsi Motor Induksi Tiga Fasa Menggunakan Metode <i>Field Oriented Control</i>	Neli Puspa, Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Borneo Tarakan, 2022	Penelitian dilakukan dengan cara simulasi menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink dengan cara melakukan pemodelan sistem dan pengujian untuk mendapatkan pengaruh arus beban (<i>Iq</i>) terhadap torsi yang dihasilkan. Pengujian dilakukan dengan beberapa variasi arus beban (<i>Iq</i>) dan beban mekanik motor induksi.

Berdasarkan Tabel 2.3 penelitian yang dilakukan oleh (Fauzi et al., 2019), melakukan pemodelan sistem *Direct Field Oriented Control* (DFOC) yang merupakan salah satu jenis *Field Oriented Control* (FOC). Sementara pada penelitian ini metode *Field Oriented Control* (FOC) yang digunakan adalah *Indirect Field Oriented Control* (IFOC). Kemudian pada penelitian (Puspa, 2022) yang menganalisis pengaruh arus beban (I_q) terhadap torsi motor induksi dan (Ferdiansyah, 2019) yang menganalisis pengaruh arus medan (I_d) terhadap kecepatan motor induksi. Penelitian (Ferdiansyah, 2019; Puspa, 2022) berfokus pada analisis pengaruh kedua arus tersebut (i_d dan i_q) terhadap kecepatan, torsi dan daya motor induksi dengan cara melakukan variasi arus medan (i_d) dan arus beban (i_q). Pemodelan unit dan sistem *Indirect Field Oriented Control* (IFOC) menggunakan perangkat lunak Matlab Simulink seperti yang dilakukan oleh (Rohmah, 2021) dan (Ramadhan et al., 2021). Meskipun simulasi mampu memverifikasi logika kendali secara ideal, ia sering kali tidak dapat menangkap fenomena fisik yang krusial seperti saturasi magnetik, *noise* pada pengukuran sensor, dan batasan tegangan inverter yang terjadi pada implementasi riil.

Penelitian ini hadir untuk mengisi kesenjangan (*gap*) tersebut dengan menawarkan pendekatan yang lebih komprehensif. Kebaruan utama dalam penelitian ini terletak pada implementasi sistem IFOC pada perangkat keras nyata (Lucas-Nuelle) untuk memvalidasi hasil simulasi. Selain itu, penelitian ini menyajikan perbandingan kinerja antara metode FOC dan metode konvensional DOL. Hal ini memberikan gambaran yang lebih utuh mengenai keunggulan dan batasan praktis dari penerapan metode FOC pada motor induksi.