

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1 Motor Servo Magnet Permanen

Motor Servo adalah motor yang digunakan untuk mengendalikan posisi atau kecepatan dalam sistem kontrol loop tertutup. Fungsi motor servo adalah untuk memutar rentang kecepatan yang luas dan juga untuk melakukan instruksi posisi dan kecepatan kontrol yang diberikan. Motor servo DC dan AC digunakan dalam aplikasi karena struktur mesinnya secara umum adalah sama. Pada kondisi daya rendah dan kecepatan variabel, motor Servo AC lebih disukai dalam sistem kontrol karena kemampuan kontrolnya. Selain itu, aplikasi motor Servo AC dapat ditemukan dalam teknologi pengangkutan, percetakan, pengolahan kayu, industri tekstil, industri plastik, industri makanan dan pengemasan, pabrik pengemasan dan pengisian, dan peralatan mesin. Ada dua jenis motor Servo AC yang tersedia yaitu asinkron sangkar tupai dan sinkron magnet permanen (Wali et al., 2020).

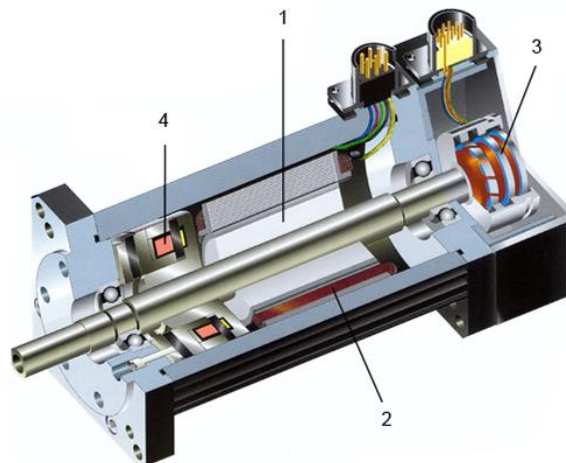
Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM) adalah jenis motor listrik yang memiliki rotor dengan magnet permanen yang terpasang di permukaan, dengan stator 3-fasa yang mirip dengan motor induksi. Medan magnet pada celah udara motor PMSM dihasilkan oleh magnet permanen di rotor, sehingga medan magnet rotor bersifat tetap. PMSM dikenal karena ukurannya yang kecil, efisiensi tinggi, performa unggul, dan mekanisme tanpa gigi (*gearless*) (W. S. Jung et al., 2023). Terdapat dua tipe utama dari PMSM, yaitu *Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor* (SPMSM) dan *Interior Permanent Magnet Synchronous Motor* (IPMSM). Keduanya memiliki perbedaan karakteristik, seperti kemampuan SPMSM untuk menggunakan murni torsi magnetik, sementara

IPMSM mampu memanfaatkan torsi reluktansi, yang meningkatkan kepadatan daya (W. S. Jung et al., 2023a)

2.1.1 Konstruksi

Motor servo eksitasi medan permanen, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1, pada dasarnya memiliki empat bagian utama . Bagian-bagian utama yang ditunjukkan pada Gambar 2.1 antara lain:

- 1) Rotor Magnet Permanen: Ini adalah bagian yang berputar dari motor. Rotor terbuat dari magnet permanen yang menghasilkan medan magnet. Medan magnet inilah yang berinteraksi dengan medan magnet yang dihasilkan oleh stator untuk menghasilkan torsi.
- 2) Belitan Stator: Bagian ini adalah bagian yang tidak bergerak dari motor. Belitan stator membawa arus listrik yang menghasilkan medan magnet yang berputar. Interaksi antara medan magnet stator dan rotor inilah yang menyebabkan rotor berputar.
- 3) Encoder Posisi: Komponen ini berfungsi untuk mengukur posisi sudut rotor. Encoder mengirimkan sinyal listrik yang sesuai dengan posisi rotor ke pengendali motor. Sinyal ini digunakan oleh pengendali untuk mengatur kecepatan dan posisi motor.
- 4) Rem Elektromagnetik: Komponen ini digunakan untuk menghentikan motor dengan cepat. Ketika arus listrik dialirkan ke kumparan rem, maka akan timbul gaya magnet yang menarik piringan rem sehingga motor berhenti berputar.

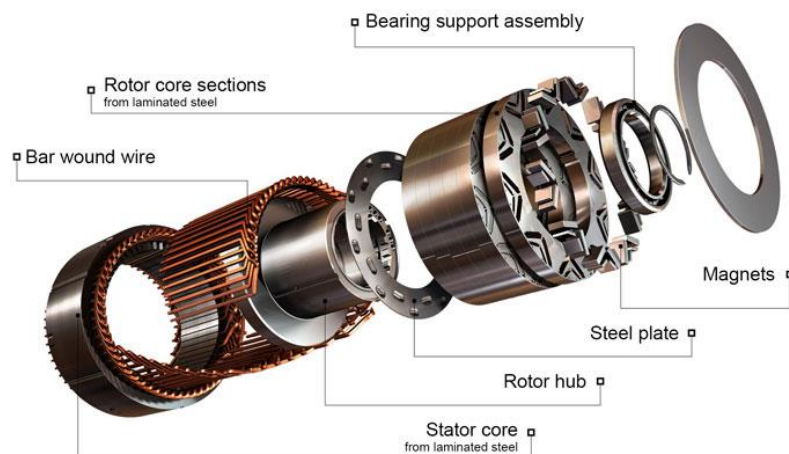


Gambar 2. 1 Konstruksi Motor Servo
Sumber: (Linnertz,2024)

PMSM adalah jenis motor listrik yang memiliki rotor dengan magnet permanen yang terpasang di permukaan, dengan stator 3-fasa yang mirip dengan motor induksi. Medan magnet pada celah udara motor PMSM dihasilkan oleh magnet permanen di rotor, sehingga medan magnet rotor bersifat tetap (Semiconductor, 2006). Adapun konstruksi bagian dalam motor sinkron dengan magnet permanen dapat dilihat pada Gambar 2.2, dengan bagian-bagiannya antara lain sebagai berikut:

- 1) Cangkang Stator (*Stator Frame*): Bagian luar stator yang berfungsi sebagai kerangka penahan komponen-komponen stator lainnya. Biasanya terbuat dari bahan besi tuang atau baja lembaran untuk memberikan kekuatan mekanis dan konduktivitas magnetik yang baik.
- 2) Inti Stator (*Stator Core*): Terbuat dari tumpukan laminasi baja tipis yang diisolasi satu sama lain. Laminasi ini berfungsi untuk mengurangi kehilangan daya akibat *eddy current* dan histeresis.

- 3) *Alur Stator (Stator Slots)*: Rongga-rongga pada inti stator yang digunakan untuk meletakkan kumparan stator. Bentuk dan ukuran alur stator dirancang untuk memaksimalkan efisiensi fluks magnetik dan mengurangi kebisingan.
- 4) *Kumparan Stator (Bar wound wire)*: Konduktor yang dililitkan pada alur stator untuk menghasilkan medan magnet.
- 5) *Magnet permanen*: Magnet yang tertanam di dalam rotor. Magnet ini menghasilkan medan magnet yang berinteraksi dengan medan magnet yang dihasilkan oleh stator.
- 6) *Rotor core*: Inti rotor yang terbuat dari laminasi baja tipis untuk mengurangi kerugian akibat arus eddy.
- 7) *Shaft*: Poros rotor yang terhubung dengan beban yang akan digerakkan.
- 8) *Bearing support assembly*: Bagian yang menopang rotor agar dapat berputar dengan bebas.

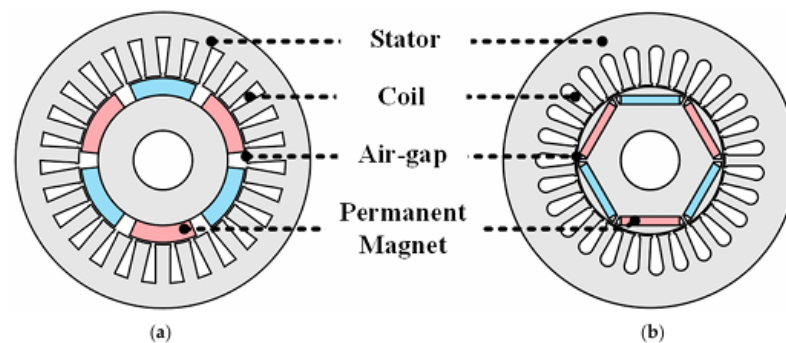


Gambar 2. 2 Interior Permanen Magnet Synchronous Motor
Sumber: about-motor.com

PMSM secara umum diklasifikasikan menjadi motor sinkron magnet permanen yang dipasang di permukaan (SPMSM) dan motor sinkron magnet permanen interior (IPMSM). SPMSM terdiri dari desain sirkuit magnetik

sederhana, responss cepat, karakteristik torsi-arus linier, dan kecepatan-tegangan, dan operasi kecepatan konstan. SPMSM hanya mengadopsi torsi magnetik; namun, IPMSM memiliki kepadatan daya yang tinggi karena dapat memanfaatkan torsi reluktansi yang dihasilkan oleh perbedaan induktansi sumbu d dan q (W. Jung et al., 2023).

Model SPMSM dan IPMSM dapat dilihat pada gambar 2.3



Gambar 2. 3 (a) SPMSM, (b) IPMSM
Sumber:(Jung et al., 2023)

2.1.2 Prinsip Kerja

Motor Servo AC dengan eksitasi medan permanen bekerja berdasarkan prinsip motor sinkron magnet permanen (PMSM), di mana medan magnet yang dihasilkan oleh magnet permanen pada rotor berinteraksi dengan medan magnet yang dihasilkan oleh arus pada stator. Berbeda dengan motor AC biasa yang menggunakan kumparan eksitasi untuk menghasilkan medan magnet, motor ini menggunakan magnet permanen pada rotor, sehingga lebih efisien dalam hal penggunaan energi dan desain kontrol. Secara garis besar, prinsip kerja motor servo magnet permanen dijelaskan sebagai berikut:

1. **Stator:** Stator motor Servo AC terdiri dari kumparan 3 fasa yang terhubung ke sumber tegangan AC. Ketika arus mengalir melalui kumparan stator, medan

magnet yang berputar dihasilkan di sekitar stator. Medan ini berinteraksi dengan medan magnet permanen rotor.

2. Rotor dengan Medan Permanen: Rotor dilengkapi dengan magnet permanen yang menghasilkan medan magnet tetap. Ketika medan magnet yang berputar dari stator menarik medan magnet permanen pada rotor, rotor akan mulai bergerak secara sinkron dengan medan stator.
3. Kecepatan Sinkron: Kecepatan putaran rotor sebanding dengan frekuensi arus yang diberikan pada stator. Dalam keadaan ideal, rotor akan selalu berputar pada kecepatan sinkron dengan medan magnet stator karena adanya kekuatan tarik magnetis antara medan permanen rotor dan medan yang berputar dari stator.
4. Kontrol Torsi dan Kecepatan: Torsi yang dihasilkan pada motor Servo AC ini dikontrol oleh arus stator, sedangkan kecepatan motor dikontrol melalui frekuensi tegangan AC yang diberikan pada stator. Pengendalian yang presisi dapat dicapai melalui teknik *Field-Oriented Control* (FOC) yang memisahkan komponen arus menjadi dua bagian: satu untuk mengendalikan torsi (i_q) dan satu lagi untuk mengendalikan fluks (i_d).

2.1.3 Karakteristik

Torsi (T): Torsi yang dihasilkan oleh motor Servo AC sebanding dengan arus pada sumbu q (i_q):

$$T = K_t \cdot i_q \quad (2.1)$$

Dimana:

T : Torsi (N·m)

K_t : Konstanta torsi (N·m/A)

i_q : Arus q-axis (A)

$$\begin{aligned} u_{SA} &= V \cos(\omega_e \cdot t) \\ u_{SB} &= V \cos\left(\omega_e \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_{SC} &= V \cos\left(\omega_e \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (2.4)$$

Kecepatan (ω): Kecepatan rotor motor dapat dinyatakan sebagai:

$$\omega = \frac{\{V_{ref}\}}{\{K_e\}} \quad (2.2)$$

ω : Kecepatan rotor (rad/s)

V_{ref} : Tegangan referensi (V)

K_e : Konstanta kecepatan (rad/s/V)

2.2 Model Dinamis PMSM

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

Model matematis PMSM dapat dirancang untuk mode waktu operasi terus-menerus. Dalam kerangka berputar, model PMSM terdiri dari dua dinamika. Yaitu:

1) Dinamika listrik dan 2) Dinamika mekanis (Thangarajan & Soundarrajan, 2020)

2.2.1 Dinamika Listrik

Untuk menciptakan fluks stator yang berputar, tegangan fasa yang umum diterapkan menghadirkan pergeseran fasa listrik sebesar 120° dari satu ke yang lain yang memperhitungkan sudut mekanis 120° antara kumparan.

Persamaan 2.4 menggambarkan tegangan pada masing-masing fasa (A, B, dan C) dalam sistem tiga fasa. Sistem tiga fasa adalah jenis sistem tenaga listrik yang umum digunakan karena efisiensi dan fleksibilitasnya.

Dimana:

V : Tegangan maksimum

ω : Frekuensi sudut ($\frac{rad}{s}$)

t : Waktu

$\cos$: Fungsi kosinus (untuk menggambarkan sifat sinusoidal dari tegangan AC)

Perbedaan Fase adalah Perbedaan antara ketiga formula terletak pada bagian dalam fungsi kosinus. Bagian ini menunjukkan pergeseran fase antara masing-masing fasa. Pergeseran fase ini sebesar 120 derajat atau $2\pi/3$ radian.

Persamaan 2.4 menunjukkan bahwa tegangan pada setiap fasa dalam sistem tiga fasa merupakan gelombang sinus yang berosilasi dengan waktu. Perbedaan fase antara ketiga gelombang ini menyebabkan putaran medan magnet yang dihasilkan oleh kumparan stator motor listrik tiga fasa. Putaran medan magnet inilah yang kemudian menggerakkan rotor motor. Medan magnet putar inilah yang menginduksi tegangan pada rotor dan menghasilkan torsi yang menggerakkan motor.

Persamaan Listrik satu fasa dapat dituliskan sebagai berikut:

$$u = Z \cdot i = Ri + \frac{d\Psi}{dt} = Ri + \frac{d}{dt}(Li + \Psi_m(\theta)) \quad (2.5)$$

Dimana:

Ψ_m sesuai dengan amplitudo fluks magnet alami magnet permanen

Persamaan;

$$\frac{d}{dt}\Psi_m(\theta) \quad (2.6)$$

sesuai dengan back EMF (tegangan induksi) dan juga dapat ditulis:

$$\frac{d\Psi_m(\theta)}{d\theta} \cdot \omega_e \quad (2.7)$$

Dimana:

ω_e sebanding dengan kecepatan Listrik

Persamaan 2.5 merupakan representasi matematis dari tegangan yang diinduksi pada suatu belitan dalam motor listrik, khususnya dalam konteks motor Servo AC. Persamaan ini menggambarkan hubungan antara tegangan yang diberikan, arus yang mengalir, dan fluks magnetik dalam motor.

Dimana:

$Z \cdot i$: Tegangan total yang diberikan pada belitan motor.

Z adalah impedansi total belitan (gabungan resistansi dan reaktansi), dan i adalah arus yang mengalir melalui belitan.

Ri : Tegangan jatuh pada resistansi belitan.

$\frac{d\Psi}{dt}$: Perubahan fluks magnetik terhadap waktu. Fluks magnetik ini diinduksi oleh arus yang mengalir dalam belitan dan interaksi dengan medan magnet yang ada.

$\Psi_m(\theta)$: Fluks magnetik akibat magnetisasi permanen atau medan magnet yang dihasilkan oleh sumber eksternal. θ di sini mewakili posisi rotor.

$\frac{d}{dt}(Li + \Psi_m(\theta))$: Turunan waktu dari fluks total dalam belitan, yang merupakan jumlah dari fluks akibat arus induksi (Li) dan fluks magnetisasi permanen ($\Psi_m(\theta)$).

Persamaan ini pada dasarnya menyatakan bahwa tegangan yang diberikan pada belitan motor harus sama dengan jumlah tegangan jatuh pada resistansi belitan dan tegangan yang diinduksi akibat perubahan fluks magnetik. Tegangan induksi ini muncul karena perubahan fluks magnetik yang memotong belitan, sesuai dengan hukum induksi elektromagnetik Faraday.

Jika mesin diasumsikan sinusoidal, tegangan induksi memiliki bentuk berikut:

$$\begin{aligned} \bar{E} = \begin{bmatrix} E_a(\theta) \\ E_b(\theta) \\ E_c(\theta) \end{bmatrix} &= -\omega_c \cdot \Psi_m \begin{bmatrix} \sin(\theta_e) \\ \sin\left(\theta_e - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \sin\left(\theta_e - \frac{4\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (2.8) \\ &= \omega_e \cdot \Psi_m \cdot [K(\theta_e)] \end{aligned}$$

Sebagian daya listrik yang disalurkan ke motor diubah menjadi rugi-rugi Joule, sebagian lagi menjadi energi yang tersimpan dalam medan magnet, dan sebagian lagi diubah menjadi energi mekanik (produksi torsi).

Dimana:

E : Tegangan induksi yang dihasilkan dalam belitan motor. Ini adalah tegangan yang timbul akibat perubahan fluks magnetik yang memotong belitan.

$E(\theta)$: Amplitudo maksimum dari tegangan induksi, yang bergantung pada posisi rotor (θ).

ω : Kecepatan sudut mekanik rotor.

Ψ_m : Fluks magnetik maksimum yang dihasilkan oleh medan magnet permanen atau medan magnet yang dihasilkan oleh sumber eksternal.

θ : Posisi sudut rotor.

$K(\theta)$: Konstanta yang berkaitan dengan bentuk gelombang tegangan induksi dan geometri motor.

Persamaan 2.8 menyatakan bahwa tegangan induksi dalam motor AC adalah sinusoidal dan amplitudonya bergantung pada kecepatan rotor, fluks magnetik, dan posisi rotor. Fase dari tegangan induksi juga bergantung pada posisi rotor, yang diwakili oleh sudut $\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right)$.

Dalam PMSM, torsi dinyatakan sebagai berikut:

$$T_e = p \cdot [I_s]^t \cdot \Psi_m \cdot [K(\theta_e)] \quad (2.9)$$

Dapat dibuktikan bahwa metode terbaik untuk menghasilkan torsi konstan adalah dengan menggerakkan motor sinusoidal dengan arus sinusoidal.

$$T_e = p\Psi_m(I_a \cdot K_a(\theta) + I_b \cdot K_b(\theta) + I_c \cdot K_c(\theta)) \quad (2.10)$$

Jika,

$$I_{SA} = I_s \sin(\omega_e \cdot t)$$

$$I_{SB} = I_s \sin\left(\omega_e \cdot t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$I_{SC} = I_s \sin\left(\omega_e \cdot t - \frac{4\pi}{3}\right)$$

Maka,

$$\begin{aligned} T_e &= p \cdot \Psi_m \cdot I_s \left(\sin^2(\omega t) + \sin^2\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \right. \\ &\quad \left. + \sin^2\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \right) = \frac{3}{2} p \cdot \Psi_m \cdot I_s \end{aligned} \quad (2.11)$$

Dimana:

T_e : Torsi elektromekanik

P : Jumlah pasangan kutub

I_s : Arus stator

Ψ_m : Fluks magnetik

I_a, I_b, I_c : Arus fasa

Persamaan 2.11 menunjukkan hubungan umum antara torsi, jumlah pasangan kutub, fluks magnetik, dan arus pada masing-masing fasa. Arus pada masing-masing fasa dinyatakan dalam bentuk sinusoida, karena pada motor AC, arus yang mengalir bersifat sinusoidal. Persamaan disederhanakan dengan menggabungkan ketiga komponen arus. Hasil akhirnya menunjukkan bahwa torsi sebanding dengan jumlah pasangan kutub, fluks magnetik, dan besar arus efektif.

Hal ini menunjukkan bahwa Field Oriented Control (FOC) memungkinkan kontrol permintaan torsi secara terus-menerus tanpa riak jika diberi arus sinusoidal 3 fasa.

2.2.2 Dinamika Mekanis

Torsi yang dihasilkan oleh proses konversi energi kemudian digunakan untuk menggerakkan beban mekanis. Ekspresinya terkait dengan parameter mekanis melalui hukum dasar dinamika sebagai berikut:

$$\sum \bar{T} = J \frac{d\omega}{dt} \quad (2.12)$$

$\sum \tau$: Jumlah total torsi (momen gaya) yang bekerja pada sistem.

J : Momen inersia dari sistem. Momen inersia adalah ukuran kelembaman suatu benda terhadap perubahan kecepatan sudut. Semakin besar momen inersia, semakin sulit untuk mengubah kecepatan sudut benda tersebut.

$\frac{d\omega}{dt}$: Percepatan sudut

Persamaan 2.12 menyatakan bahwa jumlah total torsi yang bekerja pada suatu sistem sama dengan hasil kali momen inersia sistem dengan percepatan sudutnya. Artinya, semakin besar torsi yang diberikan pada suatu benda, semakin besar pula percepatan sudut yang dihasilkan, dengan mempertimbangkan momen inersia benda tersebut.

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + K_d \omega_m + T_l = T_e \quad (2.13)$$

Dimana:

ω_m : Kecepatan sudut mekanik.

K_d : Koefisien redaman. Koefisien ini memperhitungkan gaya gesekan atau redaman yang melawan gerakan rotasi.

T_l : Torsi beban. Ini adalah torsi yang dihasilkan oleh beban yang terhubung pada poros motor.

T_e : Torsi elektromekanik. Ini adalah torsi yang dihasilkan oleh motor.

Persamaan 2.13 menggambarkan dinamika rotasi suatu sistem yang lebih lengkap, dengan mempertimbangkan gaya gesekan dan torsi beban. Persamaan ini menyatakan bahwa torsi yang dihasilkan oleh motor (T_e) harus sama dengan jumlah torsi yang digunakan untuk mempercepat massa yang berputar ($J * \frac{d\omega_m}{dt}$), mengatasi gaya gesekan ($K_d * \omega_m$), dan mengatasi torsi beban (T_l).

2.3 Vektor Ruang (Space Vector)

Konsep vektor ruang digunakan untuk mempresentasikan besaran listrik tiga fasa dalam bentuk vektor. Model yang digunakan untuk desain kontrol vektor dapat dipahami dengan menggunakan teori vektor ruang. Besaran motor 3-fase

(seperti tegangan, arus, fluks magnetik, dll.) dinyatakan dalam vektor ruang kompleks. Model seperti itu berlaku untuk setiap variasi tegangan dan arus sesaat dan menggambarkan kinerja mesin secara memadai baik dalam operasi kondisi tetap maupun sementara. Vektor ruang kompleks dapat dijelaskan hanya dengan menggunakan dua sumbu ortogonal, sehingga motor dapat dianggap sebagai mesin dua fase. Menggunakan model motor 2 fase mengurangi jumlah persamaan dan menyederhanakan desain kontrol. Asumsikan i_{sa} , i_{sb} , dan i_{sc} , arus saluran-ke-netral dari mesin simetris, seimbang pada setiap saat.

$$I_{sa} + I_{sb} + I_{sc} = 0 \quad (2.14)$$

Persamaan 2.14 menyatakan hukum Kirchhoff arus pada suatu simpul dalam sistem tiga fasa. Artinya, jumlah arus yang masuk ke suatu titik sama dengan jumlah arus yang keluar dari titik tersebut. Dalam konteks motor AC tiga fasa, ini berarti bahwa jumlah arus yang mengalir pada ketiga fasa (a,b,c) sama dengan nol.

Persamaan vektor ruang arus stator sebagai berikut:

$$\bar{I}_s = k(I_{sa} + aI_{sb} + a^2I_{sc}) \quad (2.15)$$

Persamaan 2.15 mempresentasikan transformasi dari koordinat sistem tiga fasa (a,b,c) ke sistem koordinat dua fasa (α, β). Transformasi ini dikenal sebagai transformasi Clarke. Tujuannya adalah untuk menyederhanakan analisis sistem tiga fasa menjadi bentuk yang lebih sederhana, yaitu dalam bentuk vektor.

Dimana: α dan α^2 adalah operator spasial

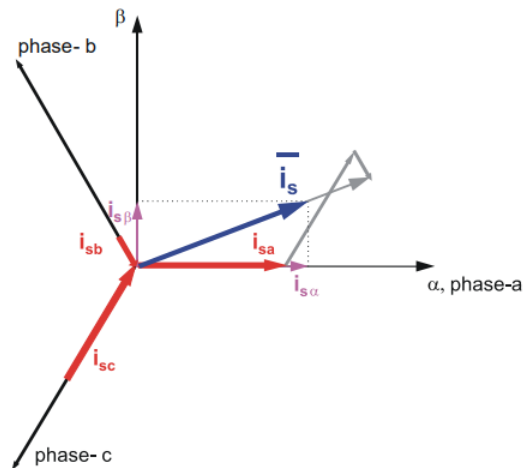
$$\alpha = e^{j2\pi/3} \quad (2.16)$$

$$\alpha^2 = e^{j4\pi/3} \quad (2.17)$$

k adalah konstanta transformasi, dipilih sebagai $k = \frac{2}{3}$. Konstanta ini untuk menormalkan amplitude vektor arus dalam sistem koordinat α - β .

Operator α dan α^2 digunakan untuk menggeser fasa dari setiap komponen arus sebesar 120 derajat. Hal ini sesuai dengan sifat dari sistem tiga fasa yang memiliki pergeseran fasa 120 derajat antara masing-masing fasanya.

Gambar 2.4 menunjukkan proyeksi vektor ruang arus stator.



Gambar 2. 4 Proyeksi vector ruang arus stator
Sumber:(Semiconductor, 2006)

Penjelasan Elemen Gambar:

- 1) Sumbu α dan β : Ini adalah sumbu yang digunakan dalam transformasi Clarke, yang mengubah sistem tiga fasa menjadi sistem dua fasa. Sumbu α umumnya sejajar dengan sumbu fasa a, sedangkan sumbu β berada pada sudut 90 derajat dari sumbu α .
- 2) Vektor i_s : Ini adalah vektor arus stator. Vektor ini mewakili jumlah total arus yang mengalir dalam stator mesin listrik (biasanya motor induksi atau sinkron).
- 3) Vektor i_{sa} , i_{sb} , i_{sc} : Ini adalah proyeksi vektor arus stator pada masing-masing sumbu fasa (a, b, dan c). Vektor-vektor ini menunjukkan besarnya arus yang mengalir pada setiap fasa.
- 4) Fase a, b, dan c: Ini adalah ketiga fasa dalam sistem tiga fasa. Masing-masing fasa memiliki beda fase 120 derajat satu sama lain.

Vektor ruang yang didefinisikan oleh Persamaan 2.15 dapat dinyatakan dengan menggunakan teori dua sumbu. Bagian riil dari vektor ruang sama dengan nilai sesaat dari komponen arus stator sumbu langsung, yaitu i_α ; bagian imajineranya sama dengan komponen arus stator sumbu kuadratur, yaitu $i_{\alpha\beta}$. Dengan demikian, vektor ruang arus stator dalam kerangka acuan stasioner yang melekat pada stator dapat dinyatakan sebagai:

$$\bar{I}_s = I_{s\alpha} + jI_{s\beta} \quad (2.18)$$

Persamaan 2.18 menyatakan bahwa arus stator I_s dapat diuraikan menjadi dua komponen ortogonal (tegak lurus):

Dimana:

$I_{s\alpha}$: Komponen arus stator pada sumbu α . Ini merepresentasikan komponen arus yang sefase dengan sumbu referensi α .

$I_{s\beta}$: Komponen arus stator pada sumbu β . Ini merepresentasikan komponen arus yang tertinggal 90 derajat dari sumbu referensi α .

j : Bilangan imajiner, digunakan untuk menunjukkan pergeseran fase sebesar 90 derajat.

Persamaan ini mengubah representasi arus stator dari sistem tiga fasa menjadi sistem dua fasa (α - β). Ini sering digunakan dalam analisis motor listrik untuk menyederhanakan perhitungan dan visualisasi.

Pada mesin 3 fasa simetris, arus stator sumbu langsung dan kuadratur $i_{s\alpha}$ dan $i_{s\beta}$ adalah komponen arus fase kuadratur putar (2 fasa), yang diubah dari arus stator 3 fasa aktual sebagai berikut:

$$I_{s\alpha} = k \left(i_{sa} - \frac{1}{2} i_{sb} - \frac{1}{2} i_{sc} \right) \quad (2.19)$$

$$I_{s\beta} = \kappa \frac{\sqrt{3}}{2} (I_{sb} - i_{sc}) \quad (2.20)$$

Dimana:

$k = \frac{2}{3}$ adalah konstanta

$I_{s\alpha}$: Komponen arus stator pada sumbu α .

$I_{s\beta}$: Komponen arus stator pada sumbu β .

i_a, i_b, i_c : Arus fasa a, b, dan c pada sistem tiga fasa.

Persamaan 2.19 digunakan untuk menghitung komponen arus α ($I_{s\alpha}$).

Komponen α ini mewakili komponen arus yang sefase dengan sumbu referensi α .

Persamaan 2.20 digunakan untuk menghitung komponen arus β ($I_{s\beta}$). Komponen β ini mewakili komponen arus yang tertinggal 90 derajat dari sumbu referensi α .

Vektor ruang dari besaran motor lainnya (tegangan, arus, fluks magnetik, dsb.) dapat didefinisikan dengan cara yang sama seperti vektor ruang arus stator. Untuk deskripsi PMSM, mesin celah udara halus 3 fase simetris dengan belitan yang terdistribusi secara sinusoidal dipertimbangkan. Persamaan tegangan stator dalam bentuk sesaat kemudian dapat dinyatakan sebagai:

$$u_{SA} = R_S i_{SA} + \frac{d}{dt} \Psi_{SA} \quad (2.21)$$

$$u_{SB} = R_S i_{SB} + \frac{d}{dt} \Psi_{SB} \quad (2.22)$$

$$u_{SC} = R_S i_{SC} + \frac{d}{dt} \Psi_{SC} \quad (2.23)$$

Dimana:

u_{SA}, u_{SB} dan u_{SC} adalah nilai sesaat dari tegangan stator

i_{SA}, i_{SB} dan i_{SC} adalah nilai sesaat dari arus stator

Ψ_{SA} , Ψ_{SB} , Ψ_{SC} adalah nilai sesaat dari hubungan fluks stator, Ψ_{SA} berhubungan dengan fase SA , Ψ_{SB} berhubungan dengan SB , dan Ψ_{SC} berhubungan dengan SC . $d\Psi_{sa}/dt$, $d\Psi_{sb}/dt$, $d\Psi_{sc}/dt$ adalah Turunan waktu dari fluks magnet masing-masing fasa, yang mewakili tegangan induksi yang timbul akibat perubahan fluks magnet.

Secara sederhana, persamaan-persamaan ini menyatakan bahwa tegangan yang diberikan pada suatu fasa stator sama dengan jumlah tegangan jatuh pada resistansi fasa dan tegangan induksi yang disebabkan oleh perubahan fluks magnet. Tegangan Jatuh pada Resistansi: $R_S I_{SA}$ (dan seterusnya untuk fasa b dan c) mewakili tegangan yang habis akibat adanya resistansi pada belitan stator.

Istilah $\frac{d\Psi_{sa}}{dt}$ (dan seterusnya) mewakili tegangan yang diinduksi pada belitan stator akibat perubahan fluks magnet. Sesuai dengan hukum induksi Faraday, perubahan fluks magnet akan menghasilkan gaya gerak listrik (GGL) induksi.

Bentuk diferensial memungkinkan kita untuk menganalisis perilaku sistem secara dinamis, artinya bagaimana sistem meresponss perubahan kondisi (misalnya, perubahan beban, tegangan sumber).

Karena banyaknya persamaan dalam bentuk sesaat (Persamaan 2.21, Persamaan 2.22, dan Persamaan 2.23), lebih praktis untuk menulis ulang persamaan sesaat menggunakan teori dua sumbu (transformasi Clarke). PMSM dapat dinyatakan sebagai:

$$u_{S\alpha} = R_S I_{S\alpha} + \frac{d}{dt} \Psi_{S\alpha} \quad (2.24)$$

$$u_{S\beta} = R_S I_{S\beta} + \frac{d}{dt} \Psi_{S\beta} \quad (2.25)$$

$$\Psi_{S\alpha} = L_S I_{S\alpha} + \Psi_M \cos(\Theta_r) \quad (2.26)$$

$$\Psi_{s\beta} = L_{s\beta} i_{s\beta} + \Psi_M \sin(\Theta_r) \quad (2.27)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} \left[\frac{3}{2} p (\Psi_{s\alpha} i_{s\beta} - \Psi_{s\beta} i_{s\alpha}) - T_L \right] \quad (2.28)$$

Dimana:

α, β : Sistem koordinat ortogonal stator

$u_{s\alpha, \beta}$: Tegangan stator

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

$\Psi_{s\alpha, \beta}$: Fluks magnet stator

Ψ_M : Fluks magnet rotor

R_S : Resistansi fasa stator

L_S : Induktansi fasa stator

ω/ω_F : Kecepatan rotor listrik/kecepatan medan

p : Jumlah kutub per fasa

J : Inersia

T_L : Torsi beban

Θ_r : Posisi rotor dalam sistem koordinat a,b

Persamaan 2.24 hingga Persamaan 2.28 merepresentasikan model PMSM dalam rangka stasioner α, β yang dipasang pada stator. Persamaan 2.24 dan 2.25 adalah persamaan tegangan untuk fasa a dan b dari stator motor. Persamaan ini menyatakan bahwa tegangan yang diberikan pada suatu fasa sama dengan jumlah tegangan jatuh pada resistansi fasa dan tegangan induksi yang disebabkan oleh perubahan fluks magnet.

Persamaan 2.26 dan 2.27 menghubungkan fluks magnet stator dengan arus stator dan fluks magnetik yang dihasilkan oleh medan magnet putar. Persamaan ini menunjukkan bahwa fluks magnet total pada suatu fasa terdiri dari dua komponen:

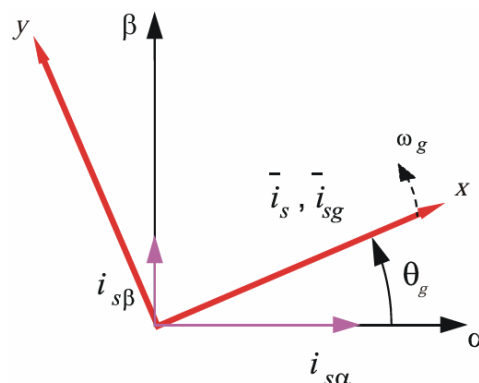
fluks yang dihasilkan oleh arus pada fasa itu sendiri dan fluks yang dihasilkan oleh medan magnet putar.

Persamaan 2.28 menggambarkan persamaan gerak mekanis rotor. Persamaan ini menunjukkan hubungan antara perubahan kecepatan sudut rotor, torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh interaksi antara fluks stator dan rotor, dan torsi beban.

Selain kerangka Acuan stasioner yang terpasang pada stator, persamaan vektor ruang tegangan model motor dapat diformulasikan dalam kerangka Acuan umum, yang berputar pada kecepatan umum, ω_g .

Jika: kerangka Acuan umum digunakan dengan sumbu langsung dan kuadratur x,y yang berputar pada kecepatan sesaat umum $\omega_g = \frac{d\theta_g}{dt}$, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 di mana: θ_g adalah sudut antara sumbu langsung kerangka Acuan stasioner (α) yang terpasang pada stator dan sumbu nyata (x) kerangka Acuan umum, maka: Persamaan 2.29 mendefinisikan vektor ruang arus stator dalam kerangka Acuan umum:

$$\bar{i}_{sg} = \bar{i}_{se} e^{-j\theta_g} = i_{sx} + j i_{sy} \quad (2.29)$$



Gambar 2. 5 Aplikasi Kerangka Acuan Umum

Sumber:(Semiconductor, 2006)

Persamaan 2.29 menggambarkan transformasi dari koordinat stator (s) ke koordinat sinkron (sg) dalam analisis mesin listrik, khususnya motor induksi dan motor sinkron. Berikut penjelasan secara rinci:

$\bar{I}_{sg}$: Arus stator dalam koordinat sinkron. Ini adalah representasi dari arus stator yang diproyeksikan ke kerangka acuan yang berputar dengan kecepatan sinkron.

$\bar{I}_{se}$: Arus stator dalam koordinat stator. Ini adalah arus stator yang diukur dalam kerangka acuan stator yang diam.

$e^{-j\theta_s}$: Operasi rotasi kompleks. θ_s adalah sudut antara sumbu α dari koordinat stator dan sumbu α dari koordinat sinkron. Operasi ini memutar vektor arus stator sejauh θ_s dalam arah berlawanan jarum jam.

i_x, i_y : Komponen arus stator dalam sumbu α dan β dari koordinat sinkron.

Persamaan 2.29 menunjukkan bagaimana kita dapat mengubah representasi arus stator dari kerangka acuan yang diam (stator) ke kerangka acuan yang berputar (sinkron). Transformasi ini sangat berguna dalam analisis dan pengendalian motor induksi karena menyederhanakan persamaan dan memberikan pemahaman yang lebih baik tentang interaksi antara stator dan rotor. Gambar 2.5 memberikan representasi visual dari transformasi yang dijelaskan dalam persamaan 2.25.

Dimana:

Sumbu α dan β : Sumbu-sumbu dalam koordinat stator.

Sumbu x dan y : Sumbu-sumbu dalam koordinat sinkron.

$\bar{I}_{se}$: Vektor arus stator dalam koordinat stator.

$\bar{I}_{sg}$: Vektor arus stator dalam koordinat sinkron.

θ_s : Sudut antara sumbu α dan x.

Gambar 2.5 menunjukkan bahwa vektor arus stator ($\bar{I}_{se}$) diputar sejauh θ_s untuk mendapatkan vektor arus stator dalam koordinat sinkron ($\bar{I}_{sg}$).

Vektor ruang tegangan rotor dan hubungan fluks rotor dalam kerangka Acuan umum dapat dinyatakan dengan cara yang sama. Persamaan tegangan model motor dalam kerangka Acuan umum dapat dinyatakan dengan transformasi kuantitas motor dari satu kerangka Acuan ke kerangka Acuan umum. Model PMSM sering digunakan dalam algoritma kontrol vektor. Tujuan kontrol vektor adalah untuk mengimplementasikan skema kontrol yang menghasilkan kinerja dinamis tinggi dan serupa dengan yang digunakan untuk mengontrol mesin DC. Untuk mencapai hal ini, kerangka Acuan dapat disejajarkan dengan vektor ruang hubungan fluks stator, vektor ruang hubungan fluks rotor, atau vektor ruang magnetisasi.

Kerangka Acuan yang paling populer adalah kerangka Acuan yang melekat pada vektor ruang hubungan fluks rotor, dengan sumbu direct (d) dan sumbu quadrature (q). Setelah transformasi menjadi koordinat d-q, model motor sebagai berikut:

$$u_{sd} = R_{s1}i_{sd} + \frac{d}{dt}\Psi_{sd} - \omega_F\Psi_{sq} \quad (2.30)$$

$$u_{sq} = R_{s1}i_{sq} + \frac{d}{dt}\Psi_{sq} + \omega_F\Psi_{sd} \quad (2.31)$$

$$\Psi_{sd} = L_{s1}i_{sd} + \Psi_M \quad (2.32)$$

$$\Psi_{sq} = L_{s1}i_{sq} \quad (2.33)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} \left[\frac{3}{2} p (\Psi_{sd}i_{sq} - \Psi_{sq}i_{sd}) - T_L \right] \quad (2.34)$$

Persamaan 2.30 dan 2.31 adalah persamaan tegangan untuk sumbu α (sa) dan sumbu β (sq) dari stator dalam koordinat sinkron. Persamaan ini menyatakan

bahwa tegangan yang diberikan pada suatu sumbu sama dengan jumlah tegangan jatuh pada resistansi sumbu, tegangan induksi akibat perubahan fluks magnet, dan tegangan induksi akibat gerakan relatif antara stator dan rotor.

Persamaan 2.32 dan 2.33 menghubungkan fluks magnet stator dengan arus stator. Persamaan ini menunjukkan bahwa fluks magnet total pada suatu sumbu terdiri dari dua komponen: fluks yang dihasilkan oleh arus pada sumbu itu sendiri dan fluks yang dihasilkan oleh medan magnet putar.

Persamaan 2.34 menggambarkan persamaan gerak mekanis rotor. Persamaan ini menunjukkan hubungan antara perubahan kecepatan sudut rotor, torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh interaksi antara fluks stator dan rotor, dan torsi beban.

Di bawah kecepatan dasar, $isd = 0$, sehingga Persamaan 2.30 dapat disederhanakan menjadi bentuk berikut:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} \left[\frac{3}{2} p (\Psi_M I_{sq}) - T_L \right] \quad (2.35)$$

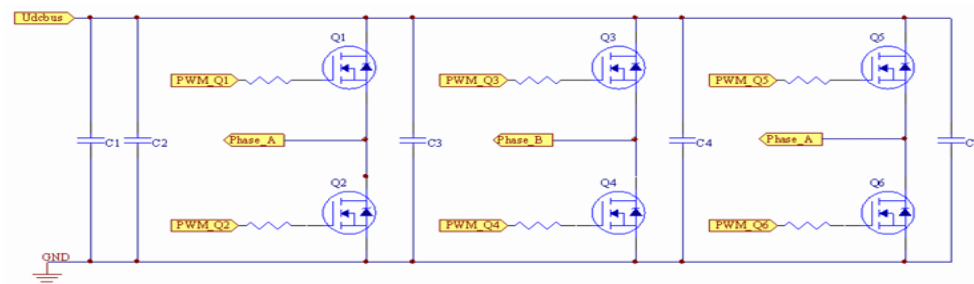
Seperti yang ditunjukkan Persamaan 2.35, torsi bergantung dan hanya dapat dikontrol secara langsung oleh arus isq . Persamaan ini secara sederhana menyatakan bahwa perubahan kecepatan sudut rotor sebanding dengan selisih antara torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh motor dan torsi beban.

Istilah $\frac{3}{2} p (\Psi_M I_{sq})$ mewakili torsi elektromagnetik yang dihasilkan oleh interaksi antara fluks magnet rotor (Ψ_m) dan komponen arus stator pada sumbu q (isq). Torsi ini adalah gaya pendorong yang menyebabkan rotor berputar. Torsi Beban (T_L) adalah torsi yang melawan pergerakan rotor, seperti gesekan, gaya gravitasi, atau torsi yang dibutuhkan untuk menggerakkan beban. Jadi, jika torsi elektromagnetik

lebih besar dari torsi beban, rotor akan mempercepat. Sebaliknya, jika torsi beban lebih besar, rotor akan melambat.

2.4 Kontrol Digital PMSM

Dalam aplikasi kecepatan yang dapat disesuaikan, Motor Sinkron Magnet Permanen (PMSM) ditenagai oleh inverter. Inverter mengubah daya DC menjadi daya AC pada frekuensi dan amplitudo yang diperlukan.



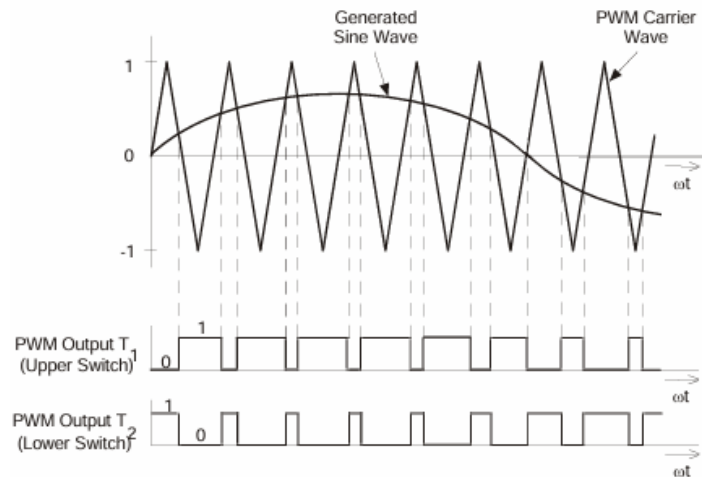
Gambar 2. 6 Inverter 3 Fasa
Sumber: (Semiconductor,2006)

Inverter 3 fasa yang umum diilustrasikan pada Gambar 2.6. Inverter terdiri dari tiga unit setengah jembatan tempat sakelar atas dan bawah dikontrol secara komplementer, artinya saat sakelar atas dihidupkan, sakelar bawah harus dimatikan, dan sebaliknya. Karena waktu mati perangkat daya lebih lama daripada waktu nyala, beberapa waktu mati harus disisipkan di antara waktu saat satu transistor setengah jembatan dimatikan, dan perangkat komplementernya dihidupkan. Tegangan keluaran dibuat oleh Modulasi Lebar Pulsa (PWM) menggunakan tabel pencarian atau teknik Modulasi Lebar Pulsa Vektor Ruang (SVPWM).

2.4.1 Teknik PWM

Teknik PWM ditunjukkan pada Gambar 2.7, di mana gelombang pembawa segitiga sama kaki dibandingkan dengan gelombang modulasi sinus frekuensi fundamental, dan titik perpotongan alami menentukan titik pengalihan perangkat

daya inverter setengah jembatan. Gelombang tegangan 3 fase digeser 120° satu sama lain dan, dengan demikian, motor 3 fase dapat disuplai.

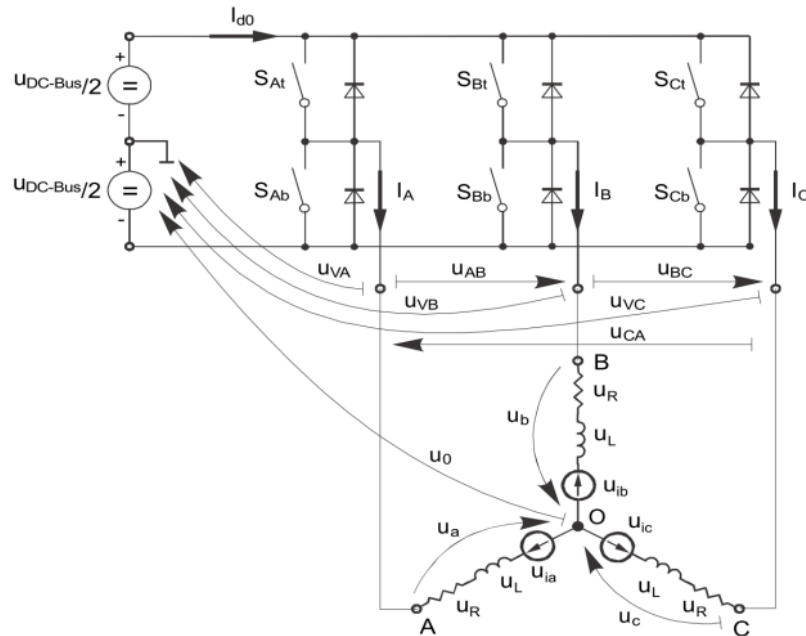


Gambar 2. 7 Modulasi Lebar Pulsa
Sumber: (Semiconductor, 2006)

2.4.2 Space Vector Pulse Width Modulator (SVPWM)

Space Vector Pulse Width Modulator (SVPWM) merupakan penggabungan dari pengaturan vektor kecepatan motor dengan PWM (Pulse Width Modulation) yang digunakan sebagai pengatur amplitudo tegangan dan frekuensi (Hutabalian and Hamzah 2016). Dalam prosesnya, sumber tiga fasa direpresentasikan dalam bidang 2D sebagai vektor, kemudian dilakukan transformasi kerangka acuan dan dilakukan pemetaan setiap status switching sebagai vektor.

Prinsip dasar Teknik Modulasi Vektor Ruang standar (SVPWM) dapat dijelaskan dengan bantuan diagram skema tahap daya yang ditunjukkan pada Gambar 2.8.



Gambar 2. 8 Diagram Skema Tahap Daya
Sumber: (Semiconductors, 2021)

Sakelar atas dan bawah bekerja dalam mode komplementer; yaitu, jika sakelar atas, "SA_t", AKTIF, maka sakelar bawah yang sesuai, "SA_b", NONAKTIF, dan sebaliknya. Karena nilai 1 ditetapkan untuk status AKTIF sakelar atas dan nilai 0 ditetapkan untuk status AKTIF sakelar bawah, vektor pengalihan, $[a, b, c]^T$, dapat ditetapkan. Pembuatan vektor semacam itu memungkinkan penetapan numerik semua status pengalihan yang mungkin. Tegangan antarfasa kemudian dapat dinyatakan dalam bentuk status berikut:

$$\begin{bmatrix} U_{AB} \\ U_{BC} \\ U_{CA} \end{bmatrix} = U_{DC\ BUS} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.36)$$

Di mana:

$U_{DC\ BUS}$ adalah tegangan sesaat yang diukur pada $U_{DC\ BUS}$

Dengan asumsi bahwa motor tersebut simetris ideal, maka persamaan matriks yang menyatakan tegangan fasa motor dapat ditulis:

$$\begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \frac{U_{DCBUS}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.37)$$

Dalam konfigurasi tahap daya 3-Fase, yang ditunjukkan pada Gambar 2.7, delapan status pengalihan (vektor), yang dirinci pada Gambar 2.8, dimungkinkan. Status ini, bersama dengan tegangan saluran ke saluran dan fase keluaran sesaat yang dihasilkan, tercantum dalam Tabel 2.1

Tabel 2. 1 Pola Switching dan Tegangan Seketika Line-to-Line

a	b	c	U_a	U_b	U_c	U_B	U_{BC}	U_{CA}	Vektor r
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0000
1	0	0	$2U_{DCBUS}/3$	$-U_{DCBUS}/3$	$-U_{DCBUS}/3$	$-U_{DCBUS}/3$	0	$-U_{DCBUS}/3$	U0
1	1	0	$U_{DCBUS}/3$	$U_{DCBUS}/3$	$-2U_{DCBUS}/3$	0	$U_{DCBUS}/3$	$-U_{DCBUS}/3$	U60
0	1	0	$-U_{DCBUS}/3$	$2U_{DCBUS}/3$	$-U_{DCBUS}/3$	$-U_{DCBUS}/3$	$U_{DCBUS}/3$	0	U120
0	1	1	$-2U_{DCBUS}/3$	$U_{DCBUS}/3$	$U_{DCBUS}/3$	$-U_{DCBUS}/3$	0	$U_{DCBUS}/3$	U240
0	0	1	$-U_{DCBUS}/3$	$-U_{DCBUS}/3$	$2U_{DCBUS}/3$	0	$-U_{DCBUS}/3$	$U_{DCBUS}/3$	U300
1	0	1	$U_{DCBUS}/3$	$-2U_{DCBUS}/3$	$U_{DCBUS}/3$	$U_{DCBUS}/3$	$-U_{DCBUS}/3$	0	U360

1	1	1	0	0	0	0	0	0	0111
---	---	---	---	---	---	---	---	---	------

Besaran komponen *direct-α* dan *quadrature-β* dari sistem koordinat ortogonal 2-fase, yang menggambarkan tegangan stator 3-fase, dinyatakan dengan Transformasi Clarke, yang disusun dalam bentuk matriks.

$$\begin{bmatrix} U_\alpha \\ U_\beta \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} \quad (2.38)$$

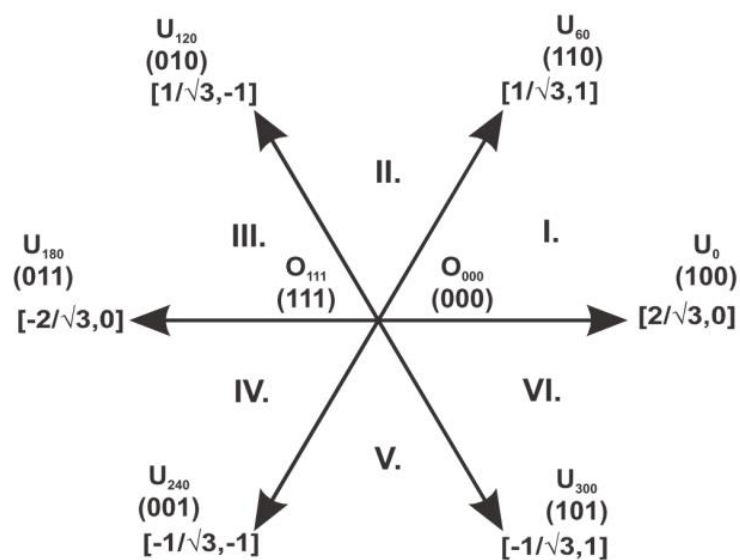
Tegangan stator 3-fase, U_a , U_b , dan U_c , diubah melalui Transformasi Clarke menjadi kuantitas komponen *direct-α* dan *quadrature-β* dari sistem koordinat ortogonal 2-fase. Hasil transformasi tercantum dalam Tabel 2.2

Tabel 2. 2 Pola Peralihan, Vektor Ruang dan Komponen Tegangan α , β

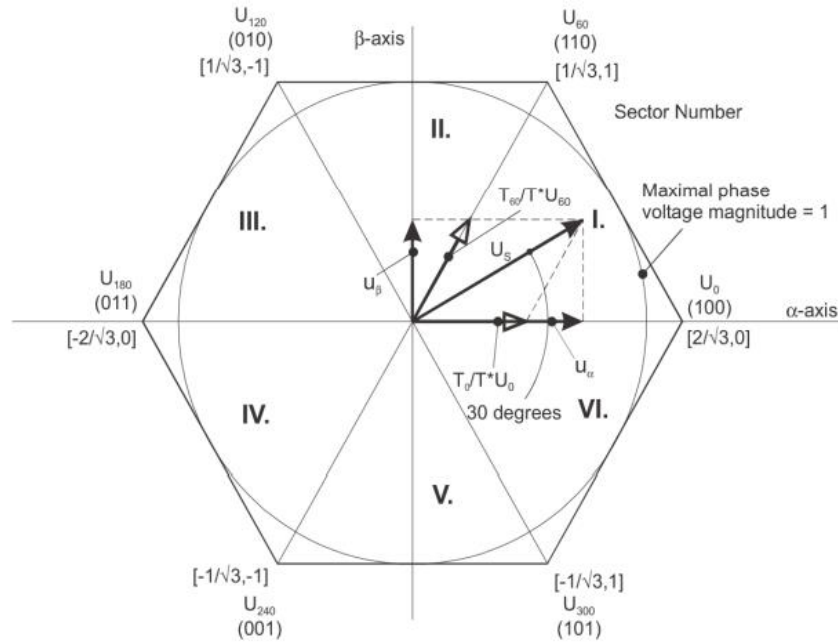
A	B	C	U_α	U_β	Vektor
0	0	0	0	0	O000
1	0	0	$2UDC_{Bus}/3$	0	U0
1	1	0	$UDC_{Bus}/3$	$UDC_{Bus}/\sqrt{3}$	U60
0	1	0	$-UDC_{Bus}/3$	$UDC_{Bus}/\sqrt{3}$	U120
0	1	1	$-2UDC_{Bus}/3$	0	U240
0	0	1	$-UDC_{Bus}/3$	$-UDC_{Bus}/\sqrt{3}$	U300

1	0	1	UDCBus/3	UDCBus/3	U360
1	1	1	0	0	O111

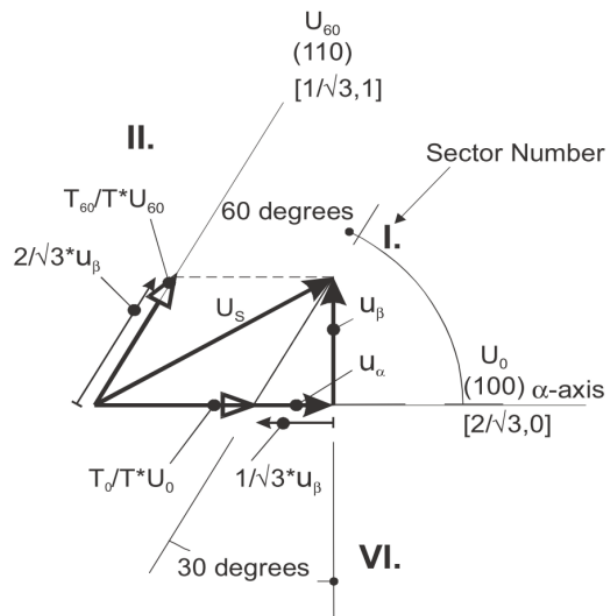
Gambar 2.9 secara grafis menggambarkan kemungkinan status peralihan dasar (vektor). Jelas bahwa ada enam vektor bukan nol, U_0 , U_{60} , U_{120} , U_{180} , U_{240} , U_{300} , dan dua vektor nol, O_{111} , O_{000} , yang tersedia untuk peralihan. Oleh karena itu, prinsip Modulasi Vektor Ruang standar terletak pada penerapan status peralihan yang tepat untuk waktu tertentu, sehingga menghasilkan vektor tegangan yang identik dengan vektor referensi.



Gambar 2. 9 Vektor Ruang Dasar dari Teknik Modulasi Vektor Ruang
Sumber: (Semiconductor, 2006)



Gambar 2. 10 Proyeksi Vektor Tegangan Referensi di Sektor I
Sumber: (Semiconductor,2006)



Gambar 2. 11 Detail Proyeksi Vektor Tegangan Referensi di Sektor I
Sumber:(Semiconductor, 2006)

Mengacu pada teori SVM PWM, tujuan dari Modulasi Vektor Ruang Standar adalah perkiraan vektor tegangan stator referensi, U_s , dengan kombinasi pola peralihan yang tepat yang terdiri dari vektor ruang dasar. Tujuan ini ditunjukkan pada Gambar 2.10 dan Gambar 2.11. Vektor tegangan referensi stator, U_s , dimajukan fasenya sebesar 30° dari *direct- α* dan dengan demikian dapat dihasilkan dengan kombinasi yang tepat dari status peralihan dasar yang berdekatan U_0 dan U_{60} .

Angka-angka ini juga menunjukkan komponen *direct- α* dan *quadrature- β* yang dihasilkan untuk vektor ruang dasar U_0 dan U_{60} . Dalam kasus ini, vektor tegangan stator referensi, U_s , terletak di Sektor I dan, seperti yang disebutkan sebelumnya, dapat dihasilkan dengan rasio *duty cycle* yang sesuai dari status peralihan dasar U_{60} dan U_0 . Persamaan utama yang berkaitan dengan lokasi vektor ini adalah:

$$T = T_{60} + T_0 + T_{null} \quad (2.39)$$

$$U_s = \frac{T_{60}}{T} \cdot U_{60} + \frac{T_0}{T} \cdot U_0$$

di mana:

T_{60} dan T_0 adalah rasio siklus tugas masing-masing yang mana vektor ruang dasar U_{60} dan U_0 harus diterapkan dalam periode waktu T .

T_{null} adalah jangka waktu di mana vektor nol O_{000} dan O_{111} diterapkan.

Rasio *Duty Cycle* dapat dihitung dengan Persamaan 40:

$$\begin{aligned} u_\beta &= \frac{T_{60}}{T} \cdot |U_{60}| \cdot \sin 60^\circ \\ u_\alpha &= \frac{T_0}{T} \cdot |U_0| + \frac{u_\beta}{\tan 60^\circ} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Dengan mempertimbangkan bahwa besaran vektor ruang dasar yang dinormalkan adalah $|U_{60}| = |U_0| = 2/\sqrt{3}$ dan dengan substitusi ekspresi trigonometri $\sin 60^\circ$ dan $\tan 60^\circ$ dengan besaran $2/\sqrt{3}$ dan $\sqrt{3}$, Persamaan 2.39 dan Persamaan 2.40 dapat disusun ulang untuk rasio *duty cycle* $\frac{T_{60}}{T}$ dan $\frac{T_0}{T}$ yang tidak diketahui.

$$\begin{aligned}\frac{T_{60}}{T} &= u_\beta \\ \frac{T_0}{T} &= \frac{1}{2} \cdot (\sqrt{3} \cdot u_\alpha - u_\beta)\end{aligned}\tag{2.41}$$

Sektor II digambarkan pada Gambar 2.13. Dalam kasus khusus ini, vektor tegangan stator referensi, U_S , dihasilkan oleh rasio *duty cycle* yang sesuai dari status *switching* dasar, U_{60} dan U_{120} . Persamaan dasar yang menggambarkan sektor ini adalah:

$$T = T_{120} + T_{60} + T_{\text{null}}\tag{2.42}$$

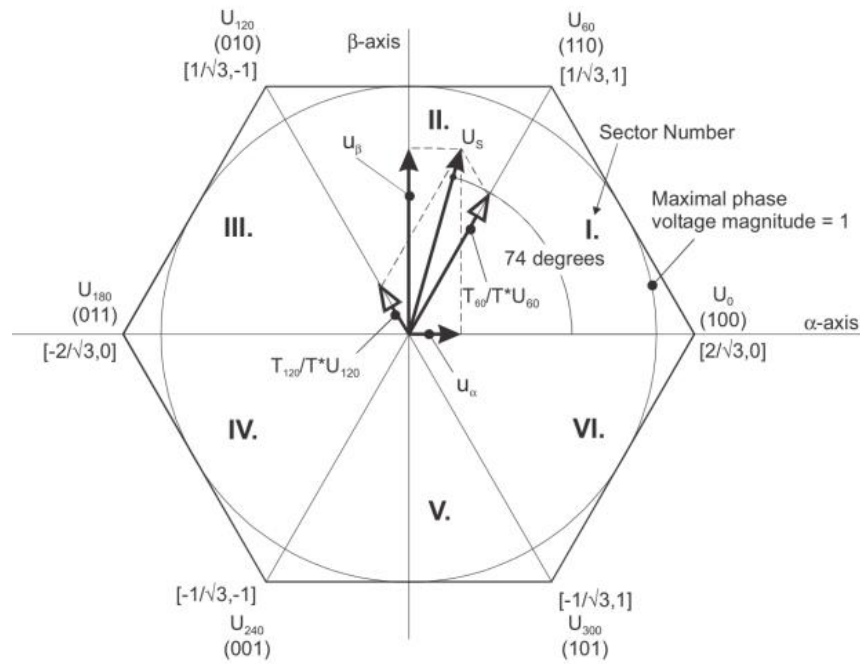
$$U_S = \frac{T_{120}}{T} \cdot U_{120} + \frac{T_{60}}{T} \cdot U_{60}$$

Di mana:

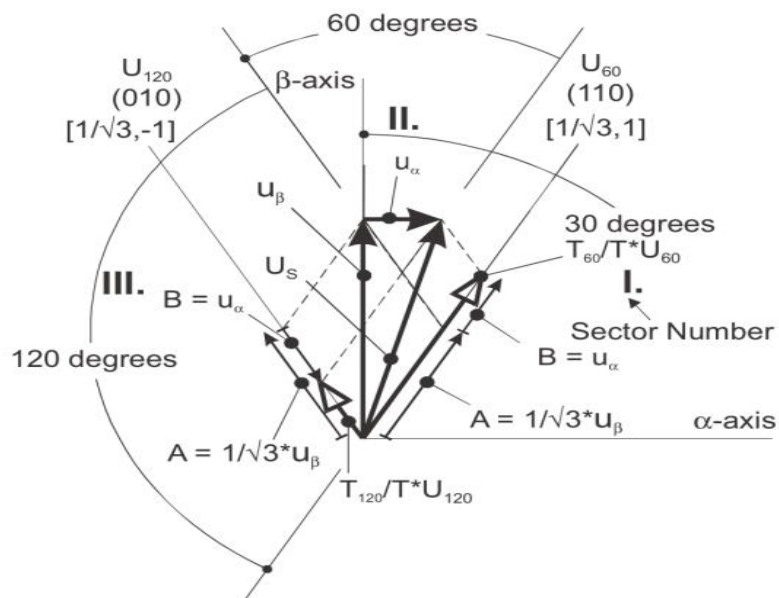
T_{120} dan T_{60} adalah rasio *duty cycle* masing-masing yang mana vektor ruang dasar U_{120} dan U_{60} harus diterapkan dalam periode waktu T . T_{null} adalah jangka waktu di mana vektor nol O_{000} dan O_{111} diterapkan.

Rasio siklus tugas yang dihasilkan ini dibentuk dari komponen tambahan yang disebut “A” dan “B”

Representasi grafis komponen tambahan ditunjukkan pada Gambar 2.13



Gambar 2. 12 Proyeksi Vektor Tegangan Referensi di Sektor II
Sumber:(Semiconductor, 2006)



Gambar 2. 13 Detail Proyeksi Vektor Tegangan
Referensi di Sektor II
Sumber:(Semiconductor, 2006)

Persamaan yang menggambarkan komponen durasi waktu tambahan tersebut adalah:

$$\frac{\sin 30^\circ}{\sin 120^\circ} = \frac{A}{u_\beta} \quad (2.43)$$

$$\frac{\sin 60^\circ}{\sin 60^\circ} = \frac{B}{u_\alpha} \quad (2.44)$$

Persamaan 2.43 dan Persamaan 2.44 telah dibentuk menggunakan Aturan Sinus. Persamaan ini dapat disusun ulang untuk perhitungan komponen durasi waktu tambahan “A” dan “B”. Hal ini dilakukan hanya dengan mensubstitusi suku trigonometri $\sin 30^\circ$, $\sin 120^\circ$, dan $\sin 60^\circ$ dengan representasi numeriknya masing-masing $1/2$, $\sqrt{3}/2$, dan $1/\sqrt{3}$.

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot u_\beta \\ B &= u_\alpha \end{aligned} \quad (2.45)$$

Rasio *duty cycle* yang dihasilkan, T_{120}/T dan T_{60}/T , kemudian dinyatakan dalam komponen durasi waktu tambahan yang ditentukan oleh Persamaan 46:

$$\begin{aligned} \frac{T_{120}}{T} \cdot |U_{120}| &= A - B \\ \frac{T_{60}}{T} \cdot |U_{60}| &= A + B \end{aligned} \quad (2.46)$$

Dengan bantuan persamaan-persamaan ini dan juga mempertimbangkan besaran vektor ruang dasar yang dinormalkan menjadi $|U_{120}| = |U_{60}| = 2/\sqrt{3}$, persamaan yang dinyatakan untuk rasio *duty cycle* vektor ruang dasar yang tidak diketahui T_{120}/T dan T_{60}/T dapat ditulis:

$$\frac{T_{120}}{T} = \frac{1}{2} \cdot (u_\beta - \sqrt{3} \cdot u_\alpha) \quad (2.47)$$

$$\frac{T_{60}}{T} = \frac{1}{2} \cdot (u_\beta + \sqrt{3} \cdot u_\alpha) \quad (2.48)$$

Rasio siklus tugas di sektor yang tersisa dapat diperoleh dengan menggunakan pendekatan yang sama. Persamaan yang dihasilkan akan serupa dengan yang diperoleh untuk Sektor I dan Sektor II.

Definisi berikut menggambarkan rasio *duty cycle* vektor ruang dasar untuk semua sektor:

- Tiga variabel bantu:

$$— X = u\beta$$

$$— Y = \frac{1}{2}(u\beta + \sqrt{3} \cdot u\alpha)$$

$$— Z = \frac{1}{2}(u\beta - \sqrt{3} \cdot u\alpha)$$

- Dua ekspresi:

$$— t_1$$

$$— t_2$$

yang secara umum menggambarkan rasio *duty cycle* vektor ruang dasar di sektor masing-masing. Misalnya, t_1 dan t_2 menggambarkan rasio *duty cycle* vektor ruang dasar U60 dan U0 untuk sektor pertama; t_1 dan t_2 menggambarkan rasio *duty cycle* vektor ruang dasar U120 dan U60 untuk sektor kedua, dan seterusnya.

Untuk setiap sektor, ekspresi t_1 dan t_2 tercantum dalam Tabel 3 dalam bentuk variabel bantu X, Y, dan Z.

Tabel 2. 3 Penentuan Ekspresi t_1 dan t_2 untuk Semua Sektor

Sectors	U0, U60	U60, U120	U120, U180	U180, U240	U240, U300	U300, U0
t_1	X	Z	-Y	-X	-Z	Y

$t2 \quad -Z \quad Y \quad X \quad Z \quad -Y \quad -X$

Untuk penentuan variabel bantu X, Y, dan Z, diperlukan nomor sektor. Informasi ini dapat diperoleh dengan beberapa metode. Satu pendekatan memerlukan penggunaan Transformasi Clark Terbalik yang dimodifikasi untuk mengubah komponen *direct- α* dan *quadrature- β* menjadi kuantitas 3 fase seimbang, u_{ref1} , u_{ref2} , dan u_{ref3} , yang digunakan untuk perhitungan langsung nomor sektor, yang akan ditunjukkan pada Gambar 15 dan Gambar 16.

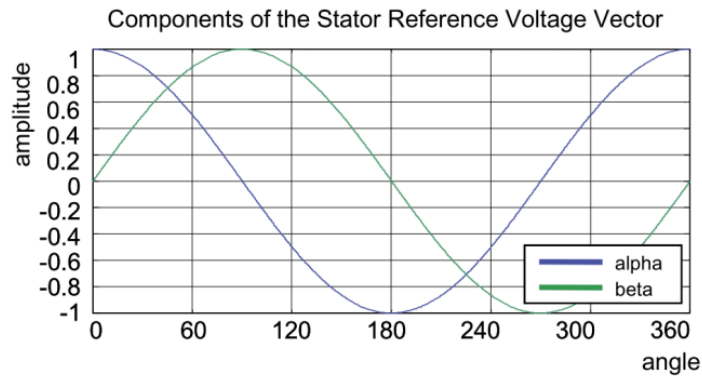
$$u_{ref1} = u_\beta \quad (2.49)$$

$$u_{ref2} = \frac{-u_\beta + \sqrt{3} \cdot u_\alpha}{2} \quad (2.50)$$

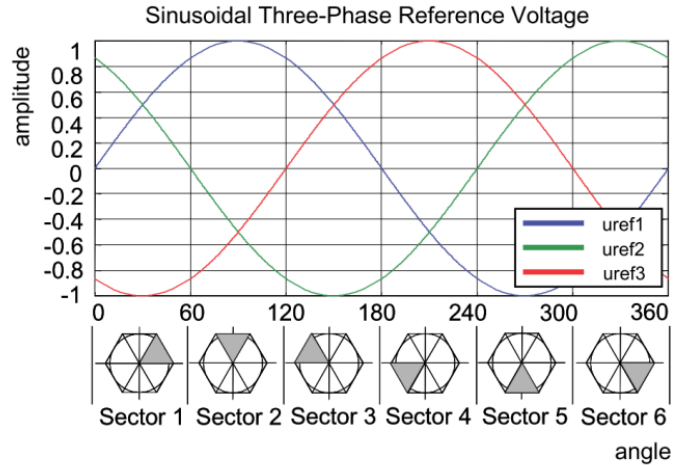
$$u_{ref3} = \frac{-u_\beta - \sqrt{3} \cdot u_\alpha}{2} \quad (2.51)$$

Transformasi Clark Terbalik yang dimodifikasi memproyeksikan komponen kuadratur- u_β ke U_{ref1} , seperti yang ditunjukkan pada Gambar 15 dan Gambar 16; tegangan yang dihasilkan oleh Transformasi Clark Terbalik konvensional memproyeksikan komponen *direct- u_α* ke U_{ref1} .

Gambar 15 menggambarkan komponen *direct- u_α* dan kuadratur- u_β dari vektor tegangan referensi stator US yang dihitung dengan persamaan $u_\alpha = \cos \vartheta$ dan $u_\beta = \sin \vartheta$, masing-masing.

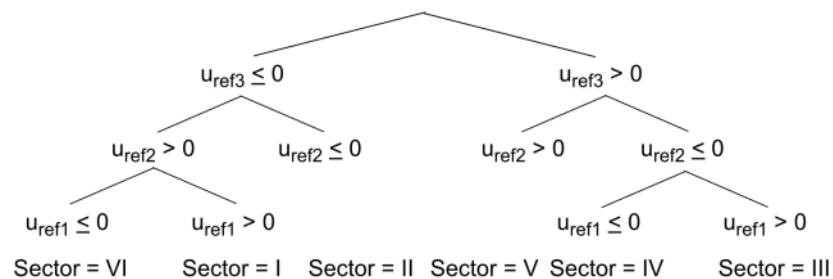


Gambar 2. 15 Komponen Direct- u_α dan Quadrature- u_β dari Tegangan Referensi Stator
Sumber: (Semiconductor, 2006)



Gambar 2. 14 Tegangan Referensi U_{ref1} , u_{ref2} dan u_{ref3}
Sumber: (Semiconductor, 2006)

Identifikasi Sektor, yang ditunjukkan pada Gambar 2.17, dapat menjadi solusi numerik dari pendekatan yang ditunjukkan pada Gambar 2.16



Gambar 2. 16 Identifikasi Nomor Sektor
Sumber: (Semiconductor, 2006)

Perlu diperhatikan bahwa, dalam kasus terburuk, diperlukan tiga perbandingan sederhana untuk mengidentifikasi secara tepat sektor vektor tegangan referensi stator. Misalnya, jika vektor tegangan referensi stator berada sesuai dengan yang ditunjukkan pada Gambar 2.10, vektor tegangan referensi stator mengalami fase maju 30° dari sumbu langsung, yang menghasilkan kuantitas positif u_{ref1} dan u_{ref2} dan kuantitas negatif u_{ref3} ; lihat Gambar 2.17. Jika kuantitas ini

digunakan sebagai masukan ke Pohon Identifikasi Sektor, hasil dari perbandingan tersebut akan menjadi Sektor I. Dengan menggunakan pendekatan yang sama, mengidentifikasi Sektor II, jika vektor tegangan referensi stator berada seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13. Variabel t_1 , t_2 , dan t_3 , yang mewakili rasio *duty cycle switching* dari masing-masing sistem 3 fase, ditemukan melalui persamaan berikut:

$$t_1 = \frac{T - t_1 - t_2}{2} \quad (2.52)$$

$$t_2 = t_1 + t_1 \quad (2.53)$$

$$t_3 = t_2 + t_2 \quad (2.54)$$

di mana:

T adalah periode pengalihan

t_1 dan t_2 adalah rasio *duty cycle* vektor ruang dasar, diberikan untuk sektor masing-masing

Tabel 2.3 dan Persamaan 2.52, Persamaan 2.53, dan Persamaan 2.54 khusus hanya untuk teknik Modulasi Vektor Ruang standar; akibatnya, teknik Modulasi Vektor Ruang lainnya akan memerlukan persamaan yang berbeda. Langkah berikutnya adalah menetapkan rasio *duty cycle* yang benar, t_1 , t_2 , dan t_3 , ke masing-masing fase motor. Ini adalah tugas sederhana, yang diselesaikan dengan mempertimbangkan posisi vektor tegangan referensi stator; lihat Tabel 2.4

Tabel 2. 4 Penugasan Rasio Duty cycle pada Fase Motor yang Sesuai

Sectors	U0, U60	U60, U120	U120, U180	U180, U240	U240, U300	U300, U0
---------	------------	--------------	---------------	---------------	---------------	-------------

pwm_a	t3	t2	t1	t1	t2	t3
pwm_b	t2	t3	t3	t2	t1	t1
pwm_c	t1	t1	t2	t3	t3	t2

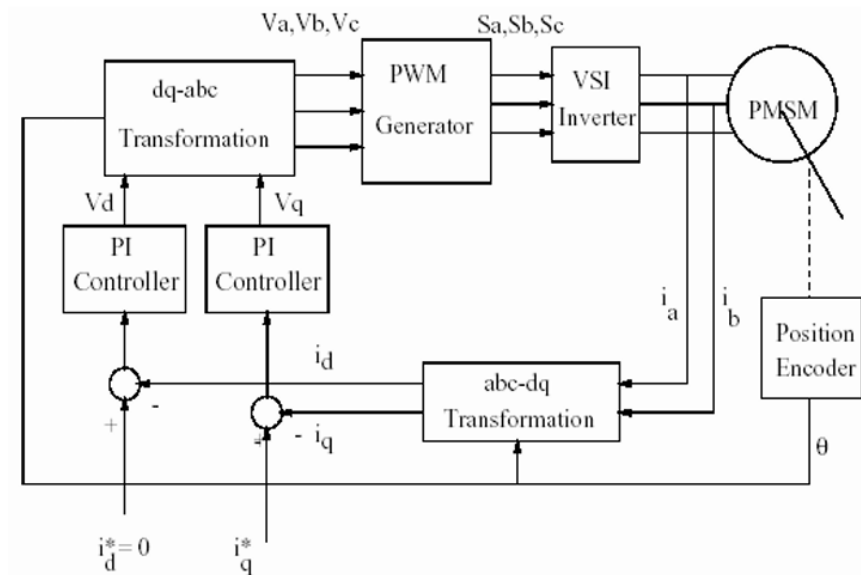
Perangkat daya yang paling populer untuk aplikasi kontrol motor adalah MOSFET Daya dan IGBT. MOSFET Daya adalah transistor yang dikontrol tegangan. MOSFET ini dirancang untuk operasi frekuensi tinggi dan memiliki penurunan tegangan yang rendah, sehingga memiliki kerugian daya yang rendah. Namun, sensitivitas suhu saturasi membatasi aplikasi MOSFET dalam aplikasi daya tinggi. Transistor bipolar gerbang terisolasi (IGBT) adalah transistor bipolar yang dikontrol oleh MOSFET pada basisnya. IGBT membutuhkan arus penggerak yang rendah, memiliki waktu pengalihan yang cepat, dan cocok untuk frekuensi pengalihan yang tinggi. Kerugiannya adalah penurunan tegangan transistor bipolar yang lebih tinggi, yang menyebabkan kerugian konduksi yang lebih tinggi.

2.5 Kontrol Vektor

Kontrol vektor merupakan metode elegan untuk mengontrol Motor Sinkron Magnet Permanen (PMSM), di mana teori berorientasi medan mengontrol vektor ruang fluks magnetik, arus, dan tegangan. Dimungkinkan untuk menyiapkan sistem koordinat untuk menguraikan vektor menjadi fungsi pembangkit medan magnetik dan fungsi pembangkit torsi. Struktur pengontrol motor (pengontrol kontrol vektor) kemudian hampir sama dengan motor DC eksitasi terpisah, yang menyederhanakan kontrol PMSM. Teknik kontrol vektor ini dikembangkan secara khusus untuk mencapai kinerja dinamis yang serupa pada PMSM. Dalam metode ini, fungsi pembangkit medan dan pembangkit torsi arus stator harus dipecah untuk dapat

mengontrol fluks magnetik dan torsi secara terpisah. Untuk melakukannya, sistem koordinat putar harus dihubungkan ke medan magnetik rotor; sistem ini secara umum disebut "sistem koordinat d-q".

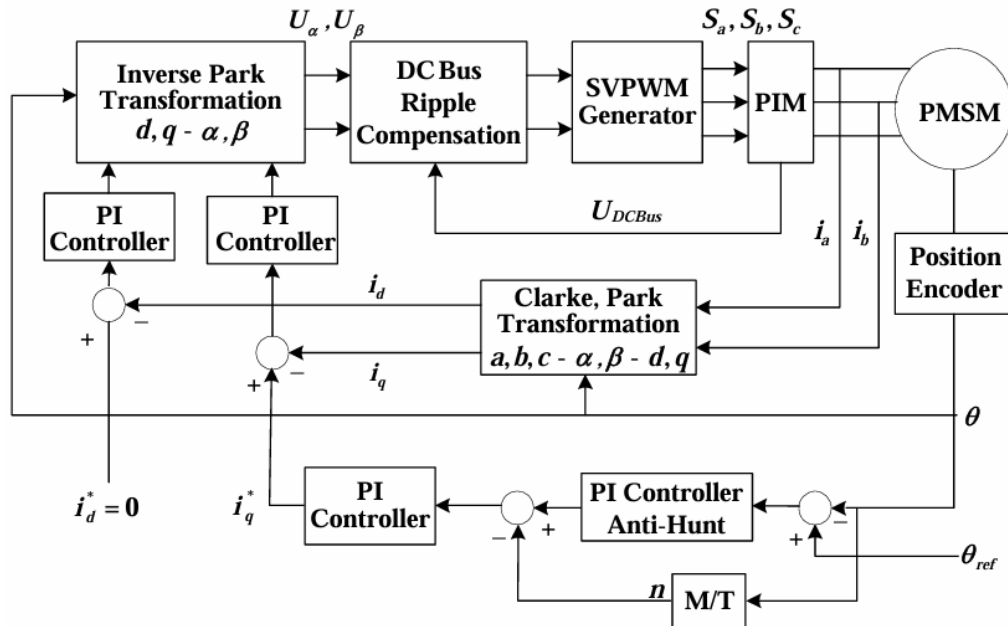
2.5.1 Diagram Blok



Gambar 2. 17 Diagram Blok Kontrol Vektor
Sumber: (Semiconductor, 2006)

Gambar 2.18 menunjukkan modul perangkat lunak dan perangkat keras aplikasi. Berikut ini adalah deskripsi terperinci dari kedua aspek tersebut. i_a dan i_b diukur dengan sensor arus. Transformasi Clarke diterapkan untuk menentukan proyeksi arus stator dalam rangka non-rotasi dua koordinat. Transformasi koordinat Park kemudian diterapkan untuk memperoleh proyeksi ini dalam rangka berputar d, q. Proyeksi arus fase stator d, q kemudian dibandingkan dengan nilai referensi i_q dan i_d (diatur ke 0) dan dikoreksi dengan menggunakan pengontrol arus PI. Output pengontrol arus dilewatkan melalui transformasi Park terbalik dan vektor tegangan stator baru diterapkan ke motor menggunakan teknik Modulasi Vektor Ruang.

2.5.2 Kontrol Servo Motor Sinkron PM



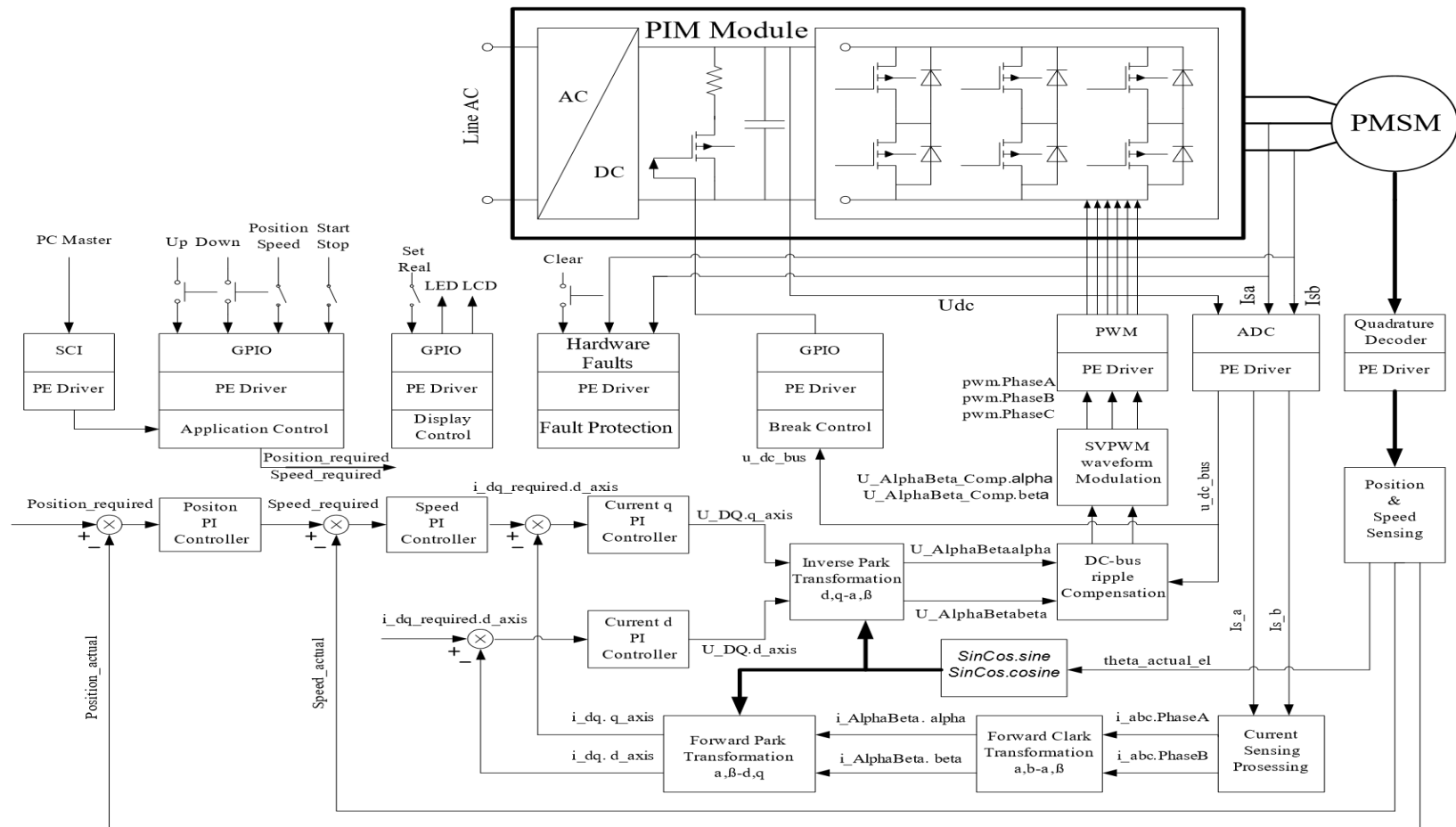
Gambar 2. 18 Skema Kontrol Servo PMSM
Sumber: (Semiconductor, 2006)

Skema kontrol servo PMSM diilustrasikan pada Gambar 2.19. Kontroler memiliki loop dalam pengaturan arus menggunakan kontrol vektor dan loop luar pengaturan kecepatan dan posisi hibrida. Ide utama kontrol servo adalah:

1. Hitung kesalahan posisi dari posisi yang diperlukan dan posisi aktual, yang dikembalikan oleh program interupsi posisi. Setelah pemrosesan Anti-Hunt, kontroler PI posisi menghasilkan kecepatan yang diperlukan oleh kesalahan posisi.
2. Hitung kesalahan kecepatan dari kecepatan yang diinginkan dan kecepatan aktual sebagai input dari kontroler PI kecepatan. Output dari kontroler PI kecepatan adalah komponen arus yang diinginkan.

3. Hitung arus aktual dalam sistem koordinat d, q . Kontroler PI arus membandingkan arus yang diperlukan untuk menghasilkan tegangan output yang diinginkan.
4. Digabungkan dengan algoritma eliminasi riak tegangan DCBus, SVPWM kemudian menghasilkan sinyal PWM untuk menggerakkan motor servo

Sistem Servo Motor Sinkron AC Magnet Permanen



Gambar 2. 19 Skema Kontrol Sistem Servo PMSM

Sumber: (Semiconductor, 2006)

2.6 Field Oriented Control

Fluks magnetik dan torsi yang menghasilkan arus pada motor DC bersifat ortogonal dan dapat disesuaikan secara individual, menurut teori kontrol berorientasi medan. Arus ini menciptakan gaya magnetik yang juga ortogonal. Torsi yang dihasilkan dihitung menggunakan persamaan berikut.(Chavan et al., 2023)

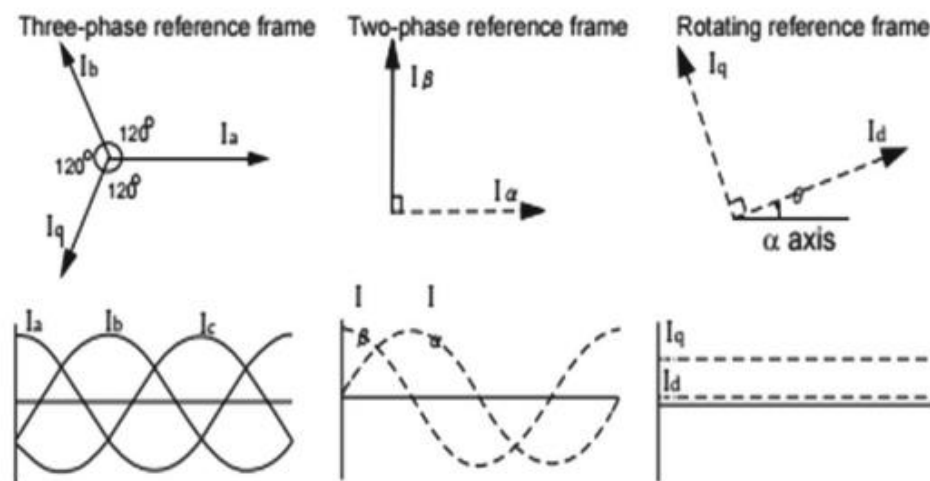
$$T_e = K_a . I_f . I_a \quad (2.55)$$

di mana I_f adalah fluks magnetik dan I_a adalah arus jangkar. Akibatnya, fluks magnetik hanya dihubungkan ke arus dalam belitan stator. Namun, jika fluks magnetik tetap konstan, arus jangkar umumnya digunakan untuk mengatur torsi. Akibatnya, mesin DC dikatakan memiliki kontrol torsi dan fluks yang berbeda atau independen. Medan stator dan rotor dari mesin AC tidak saling tegak lurus. Arus stator akan menjadi satu-satunya arus yang akan diatur. Field Oriented Control adalah teknik untuk mencapai kontrol torsi dan fluks magnetik yang dipisahkan dengan mengubah kuantitas arus stator (arus fasa) dalam sistem koordinat tetap menjadi faktor arus yang dapat digunakan untuk mengatur torsi dan fluks magnetik. Dalam sistem koordinat stasioner, menghasilkan torsi dan fluks magnetik. Sistem koordinat rotasi. FOC memiliki keuntungan sebagai berikut: Mengubah model AC yang rumit dan terhubung menjadi lingkungan langsung yang sederhana, Torsi tinggi dan arus awal yang rendah, presisi yang lebih baik, dan rentang kecepatan yang besar untuk melemahkan medan. Tiga kerangka Acuan digunakan dalam pendekatan FOC, dan transformasi satu-ke-satu diinginkan(Chavan et al., 2023).

1. Kerangka Acuan stator a, b, c, di mana a, b, dan c adalah koplanar dan dipisahkan oleh 120°

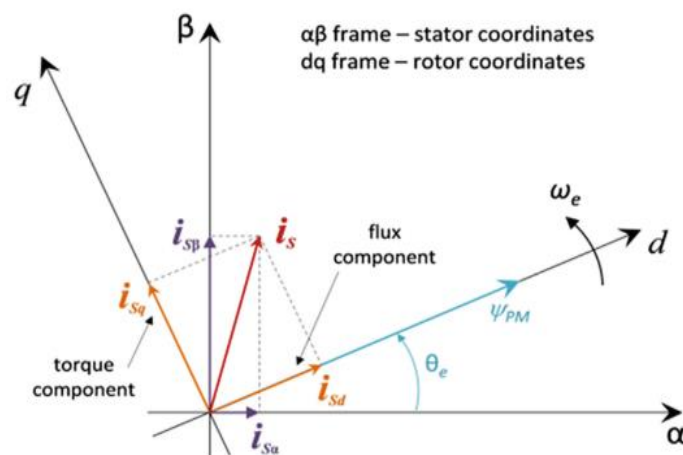
2. Kerangka ortogonal α - β adalah kerangka yang berada pada bidang yang sama dengan kerangka stator tetapi memiliki sudut 90° antara kedua sumbu, bukan sudut 120° . Sumbu di dalam kerangka pengganti sejajar dengan sumbu lain.
3. d-q, di kutub utara dan selatan atau sepanjang vektor fluks magnetik rotor, sumbu d sejajar 90° dengan sumbu α , dan sumbu q sejajar 90° dengan sumbu d.

Transformasi yang digunakan untuk membagi arus stator menjadi komponen-komponen penghasil torsi, I_q dan fluks, I_d ditunjukkan pada Gambar 2.21. Representasi vektor gabungan dari semua nilai yang berubah ditunjukkan pada Gambar 2.22. Ketika regulator PI mengendalikan faktor-faktor penghasil torsi dan fluks, keluaran yang dikendalikan tegangan juga diubah kembali (diubah secara terbalik) ke sistem referensi stator..



Gambar 2. 20 Kerangka Acuan tiga fasa (b) Kerangka Acuan dua fasa (c) Kerangka Acuan berputar

Sumber:(Chavan et al., 2023)



Gambar 2. 21 Orientasi kerangka Acuan stasioner stator dan rotasi rotor, dengan komponen arus diubah ke dalam kedua kerangka acuan
Sumber:(Chavan et al., 2023)

Gambar 2.21 menunjukkan kerangka koordinat $\alpha\beta$ dan dq yang digunakan dalam analisis dan kontrol motor sinkron magnet permanen (PMSM). Berikut adalah penjelasan detail mengenai elemen-elemen dalam gambar:

1. Kerangka $\alpha\beta$ (Stator)

Kerangka $\alpha\beta$ atau kerangka stator ini adalah referensi tetap pada stator, tempat komponen-komponen arus diukur sesuai dengan posisi stator. Komponen arus yang terkait dengan kerangka ini diberi label sebagai $i_{s\alpha}$ dan $i_{s\beta}$ yang mewakili komponen arus dalam arah sumbu α dan β .

2. Kerangka dq (Rotor)

Kerangka dq atau kerangka rotor ini berputar bersama rotor, yang memungkinkan pemisahan arus menjadi komponen torsi (*torque*) dan fluks. Ini merupakan kerangka yang sering digunakan dalam metode kontrol Field-Oriented Control (FOC). Komponen arus yang terkait dengan kerangka ini adalah i_d (komponen fluks) dan i_q (komponen torsi).

3. Arus Stator (i_s)

Vektor i_s adalah arus stator total, yang terdiri dari dua komponen: $i_{s\alpha}$ dan $i_{s\beta}$ dalam kerangka stator, serta i_{sd} dan i_{sq} dalam kerangka rotor. i_s memiliki proyeksi pada sumbu α dan β dalam kerangka stator, yang berhubungan dengan arus $i_{s\alpha}$ dan $i_{s\beta}$. Dalam kerangka rotor, i_s diproyeksikan pada sumbu d dan q yang berputar bersama rotor, menghasilkan komponen i_{sd} dan i_{sq} .

4. Komponen Fluks dan Torsi

Fluks (i_{sd}): Ini adalah komponen arus pada sumbu d dalam kerangka rotor, yang terkait dengan fluks magnetik pada motor. Pengendalian komponen ini mempengaruhi fluks medan di sekitar rotor. Komponen Torsi (i_{sq}): Ini adalah komponen arus pada sumbu q yang berkaitan dengan torsi. Pengendalian komponen ini memungkinkan kontrol langsung terhadap torsi yang dihasilkan oleh motor.

5. Ψ_{PM}

Vektor Ψ_{PM} menunjukkan fluks magnet permanen yang dihasilkan oleh rotor magnet permanen dalam arah sumbu d . Ini adalah fluks yang dihasilkan oleh magnet permanen di rotor dan menjadi dasar untuk menghasilkan torsi ketika berinteraksi dengan komponen arus q .

6. Sudut Rotor (θ_e)

Sudut θ_e menunjukkan sudut antara kerangka $\alpha\beta$ (stator) dan dq (rotor), yang berubah seiring dengan posisi rotor. Pengendalian torsi sering kali melibatkan pemantauan sudut ini untuk memastikan bahwa komponen torsi i_{sq} dapat dioptimalkan.

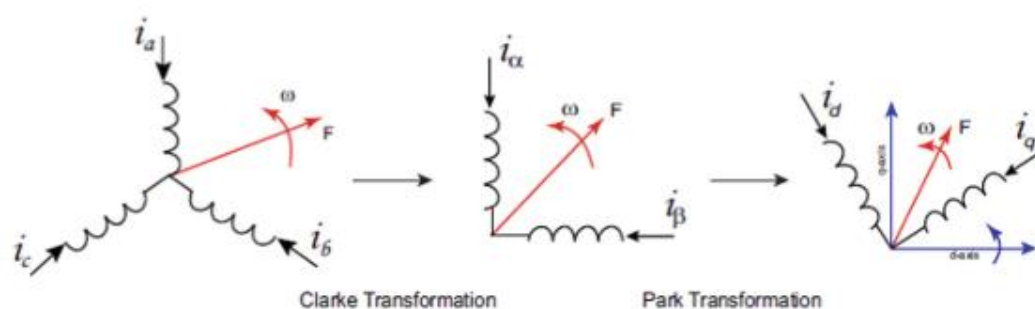
7. Kecepatan Rotor (ω_e):

ω_e adalah kecepatan sudut rotor dalam kerangka dq . Ini menunjukkan kecepatan rotasi medan magnet rotor, yang sering kali sama dengan kecepatan rotor

pada motor PMSM. Pengendalian kecepatan ini penting untuk menjaga kinerja motor yang stabil dan akurat.

2.6.1 Transformasi

Komponen I_q dan I_d dipasang pada rangka putar di FOC. Akibatnya, arus stator yang diamati harus diubah ke sistem referensi rotor dq berputar dua sumbu dari sistem referensi stator tiga fase yang berubah terhadap waktu. Ada dua cara untuk mencapai hal ini yang ditunjukkan pada Gambar 2.23. Transformasi Clarke adalah transformasi dari rangka referensi tiga fase 120° ke rangka referensi ortogonal dua sumbu. Transformasi Park adalah transformasi dari rangka referensi ortogonal 2 sumbu ke rangka referensi berputar 2 sumbu.

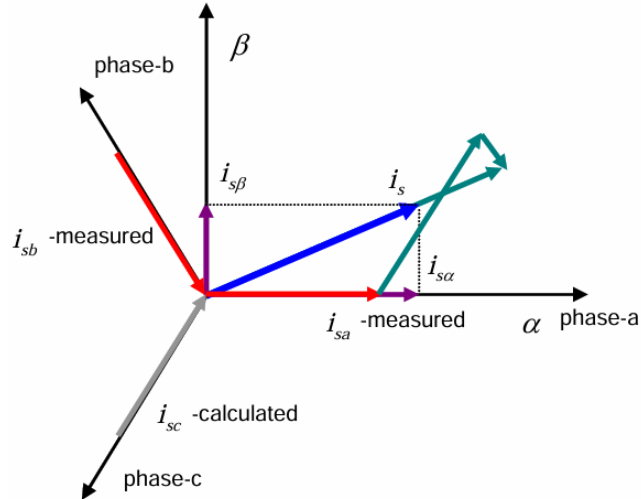


Gambar 2. 22 Transformasi maju
Sumber: (Chavan et al, 2023)

2.6.2 Transformasi Clarke

Komponen tegangan dalam sistem koordinat rotasi kini disediakan oleh keluaran pengontrol PI. Akibatnya, bentuk gelombang tegangan referensi harus didorong ke dalam sistem koordinat statis menggunakan kebalikan dari metode sebelumnya. Transformasi park terbalik digunakan untuk mengubah nilai dalam sistem koordinat berputar menjadi sistem koordinat statis ortogonal 2 sumbu. Persamaan berikut menggambarkan transformasi Park terbalik:

Gambar 2.24 menunjukkan bagaimana sistem 3 fase diubah menjadi sistem 2 fase.



Gambar 2. 23 Transformasi Clarke
Sumber:(Semiconductor, 2006)

Untuk mentransfer representasi grafis ke bahasa matematika:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = K \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} \quad (2.56)$$

Dalam kebanyakan kasus, sistem 3 fase bersifat simetris, yang berarti jumlah kuantitas fase selalu nol.

$$\alpha = K \left(a - \frac{1}{2}b - \frac{1}{2}c \right) = |a + b + c = 0| = K \frac{3}{2}a \quad (2.57)$$

Konstanta “K” dapat dipilih secara bebas dan direkomendasikan untuk menyamakan kuantitas α - dan kuantitas fase-a.

Maka:

$$\alpha = a \Rightarrow K = \frac{2}{3} \quad (2.58)$$

Transformasi Clarke-Park dapat didefinisikan sepenuhnya:

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix} = |a + b + c = 0| \\
 &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a \\ b \\ c \end{bmatrix}
 \end{aligned} \tag{2.59}$$

2.6.3 Transformasi dari Koordinat α, β ke d-q

Kontrol vektor dilakukan sepenuhnya dalam sistem koordinat d-q untuk membuat kontrol motor sinkron PM menjadi elegan dan mudah. Tentu saja, ini memerlukan transformasi di kedua arah dan tindakan kontrol harus diubah kembali ke sisi motor. Pertama, buat sistem koordinat d-q:

$$\Psi_M = \sqrt{\Psi_{M\alpha}^2 + \Psi_{M\beta}^2} \tag{2.60}$$

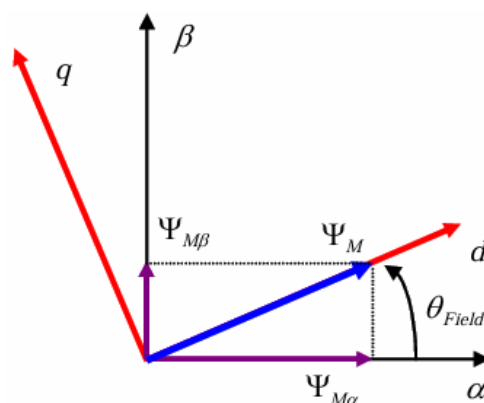
$$\sin \theta_{\text{Field}} = \frac{\Psi_{M\beta}}{\Psi_M} \tag{2.61}$$

$$\cos \theta_{\text{Field}} = \frac{\Psi_{M\alpha}}{\Psi_M} \tag{2.62}$$

Kemudian ubah dari koordinat α, β ke d-q:

$$\begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{\text{Field}} & \sin \theta_{\text{Field}} \\ -\sin \theta_{\text{Field}} & \cos \theta_{\text{Field}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} \tag{2.63}$$

Gambar 35 mengilustrasikan transformasi ini.



Gambar 2. 24 Menetapkan Sistem Koordinat d-q (Transformasi Park)

Sumber: (Semiconductor, 2006)

Transformasi terbalik (Inverse Park) (dari d-q ke α , β) adalah:

$$\begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{Field} & -\sin \theta_{Field} \\ \sin \theta_{Field} & \cos \theta_{Field} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} d \\ q \end{bmatrix} \quad (2.64)$$

2.7 Pengenalan Matlab Simulink

MATLAB, yang berarti *Matrix Laboratory*, adalah alat komputasi yang banyak digunakan oleh para profesional di bidang Teknik Elektro (EE), Teknik Komputer (CE), dan banyak bidang lainnya. MATLAB terdiri dari dua bagian yang saling terkait. Bagian pertama adalah bahasa pemrograman, yang hanya terdiri dari beberapa konstruksi pemrograman dasar. Bagian kedua adalah pustaka sejumlah besar program bawaan, yang disebut fungsi, yang menjalankan operasi yang umumnya diperlukan di banyak bidang teknik dan sains. Karena alasan ini, MATLAB akan meningkatkan produktivitas akademik dan profesional mahasiswa teknik. MATLAB dapat bekerja dengan berbagai tipe data, termasuk bilangan bulat, bilangan riil, bilangan kompleks, karakter, dan variabel logika, yang semuanya dapat diatur menjadi array dan struktur lainnya. MATLAB adalah sistem interaktif, tempat hasil antara dapat diakses saat program dikembangkan. Anda dapat mengembangkan solusi masalah untuk aplikasi dalam program MATLAB lainnya.

Salah satu fiturnya yang luar biasa adalah kemampuan untuk menghasilkan berbagai keluaran grafik dua dan tiga dimensi yang dapat diekspor ke dalam dokumen. Selain itu, MATLAB menyediakan tutorial, demonstrasi, dan dokumentasi bawaan dan daring yang ekstensif untuk membantu Anda mempelajari pemrograman MATLAB (Priemer, 2013).

2.8 Penelitian Terkait

Beberapa penelitian yang terkait dengan Field Oriented Control (FOC) dan Motor Servo AC PMSM dijelaskan pada Tabel 2.5 berikut:

Tabel 2. 5 Penelitian Terkait

No.	Judul Penelitian	Identitas Penelitian	Pembahasan
1.	Analysis and Comparison of Permanent Magnet Synchronous Motors According to Rotor Type under the Same Design Specifications	Woo-Sung Jung, Hoon-Ki Lee, Young-Keun Lee, Su-Min Kim, Jeong In Lee, Jang-Young Choi. Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Republic of Korea. 2023.	Penelitian ini membahas perbandingan antara motor sinkron magnet permanen permukaan (Surface Mounted Permanent Magnet Synchronous Motors, SPMSM) dan motor sinkron magnet permanen interior (Interior Permanent Magnet Synchronous Motors, IPMSM). Fokus utama penelitian ini adalah untuk menganalisis performa kedua

			jenis motor tersebut dari segi karakteristik elektromagnetik dalam aplikasi pada sistem kompresor kendaraan listrik.
2.	A Review on the AC Servomotor Control Systems	Abdul Wali Abdul Ali , Fatin Asmida Abdul Razak and Nasri Hayima. Centre for Electric Energy and Automation (CEEAA) Faculty of Engineering, Multimedia University, Cyberjaya, Malaysia. 2020.	Penelitian ini membahas berbagai teknik kontrol untuk servomotor AC, termasuk kontrol posisi, kecepatan, dan torsi. Penelitian ini menyoroti berbagai pendekatan pengendalian dalam menghadapi beban statis dan dinamis serta menekankan masalah-masalah umum seperti osilasi, kesalahan respons langkah, dan sensitivitas terhadap variasi parameter.
3.	Field Oriented Control Technique for PMSM	Prakash. L. Chavan,Devendra Gowda,and Sanjeev K. Nayak. KIT's College of Engineering	Penelitian ini membahas tentang teknik <i>Field-Oriented Control</i> (FOC) untuk motor sinkron magnet permanen (PMSM). Metode FOC bertujuan untuk

		Kolhapur, Shivaji University Kolhapur, Kolhapur, Maharashtra, India. 2023.	mengendalikan vektor torsi dan kecepatan pada PMSM dengan memisahkan kontrol antara torsi dan fluks magnetik, yang dihasilkan melalui transformasi koordinat (Park dan Clarke). Penelitian ini juga mencakup simulasi menggunakan kontrol vektor untuk mengatur arus fase dan menghasilkan torsi yang efisien. Hasil simulasi menunjukkan bahwa kontrol FOC mampu meningkatkan performa PMSM, dengan pengendalian torsi yang efektif dan responss dinamis yang baik tanpa overshoot pada torsi atau kecepatan.
4.	Performance comparison of permanent magnet	K. Thangarajan , A. Soundarrajan Department of Electrical &	Penelitian ini membahas perbandingan performa berbagai pengendali prediktif untuk motor sinkron magnet

	synchronous motor (PMSM) drive with delay compensated predictive controllers	Electronics Engg. PSG College of Technology, Coimbatore. 2020.	permanen (PMSM), khususnya dalam mengurangi riak torsi, harmonik, dan kebisingan akustik. Tiga jenis pengendali utama yang dianalisis adalah <i>Space Vector Pulse Width Modulation</i> (SVPWM), <i>Model Predictive Control</i> (MPC), dan <i>Dead-Beat Predictive Controller</i> (DBPC). Penelitian ini melakukan simulasi dan validasi eksperimental untuk ketiga pengendali tersebut, menggunakan platform MATLAB Simulink dan pengujian di laboratorium. Hasil menunjukkan bahwa pengendali DBPC memiliki responss cepat, riak torsi rendah, dan kebisingan akustik yang minimal, sehingga cocok untuk aplikasi performa tinggi.
--	---	---	--

5.	PMSM Field-Oriented Control with Independent Speed and Flux Controllers for Continuous Operation under Open-Circuit Fault at Light Load Conditions	Haneen Ghanayem , Mohammad Alathamneh and R. M. Nelms Electrical and Computer Engineering Department, Auburn University.2024.	Penelitian ini mengembangkan teknik <i>Field-Oriented Control</i> (FOC) untuk mengendalikan motor sinkron magnet permanen (PMSM) yang beroperasi di bawah kondisi gangguan open-circuit fault (OCF) pada beban ringan. Kontrol ini memanfaatkan pengendali kecepatan dan fluks yang terpisah untuk mempertahankan operasi motor yang stabil saat terjadi OCF, tanpa memerlukan estimator torsi/fluks atau sistem penguncian fase. Pengujian dilakukan melalui simulasi MATLAB/Simulink dan eksperimen perangkat keras. Hasil menunjukkan bahwa pendekatan kontrol ini mampu menjaga kinerja motor secara konsisten di bawah
----	--	--	---

			berbagai kondisi, seperti variasi kecepatan, fluks, dan torsi beban.
--	--	--	--

Penelitian ini menyoroti kurangnya kajian empiris yang mendalam mengenai Dinamika karakteristik torsi dan kecepatan pada motor Servo AC dengan eksitasi medan permanen pada kondisi beban dan arus yang bervariasi dan juga pengaruh perubahan arus terhadap hubungan torsi dan kecepatan dalam kondisi operasi nyata, yang lebih sedikit dieksplorasi dalam penelitian sebelumnya.

Penelitian ini berfokus pada pengujian empiris yang lebih luas menggunakan modul percobaan *Power Electronics and Drives 300 W Lucas-Nuelle*, yang mencakup pengukuran langsung melalui simulasi dan eksperimen laboratorium dan pemodelan sistem dinamis secara langsung pada motor Servo AC dengan menggunakan Matlab Simulink R2023b dan pengontrol PI yang mengasumsikan linearitas sistem, sebuah pendekatan yang kurang diakomodasi dalam penelitian terkait sebelumnya yang lebih menekankan simulasi berbasis *software* tanpa pengujian langsung di perangkat keras.

Penelitian ini membedakan diri dengan cara menganalisis secara mendalam efek variasi beban dan arus pada karakteristik torsi dan kecepatan motor, yang tidak banyak disoroti dalam penelitian lain yang lebih fokus pada teknik kontrol tanpa variasi beban yang nyata. Selain itu, penelitian ini menggunakan modul perangkat keras dan perangkat lunak untuk melakukan pengujian langsung dan perbandingan antara hasil simulasi dan hasil laboratorium, yang memungkinkan validasi empiris lebih akurat dibandingkan simulasi murni pada penelitian sebelumnya.