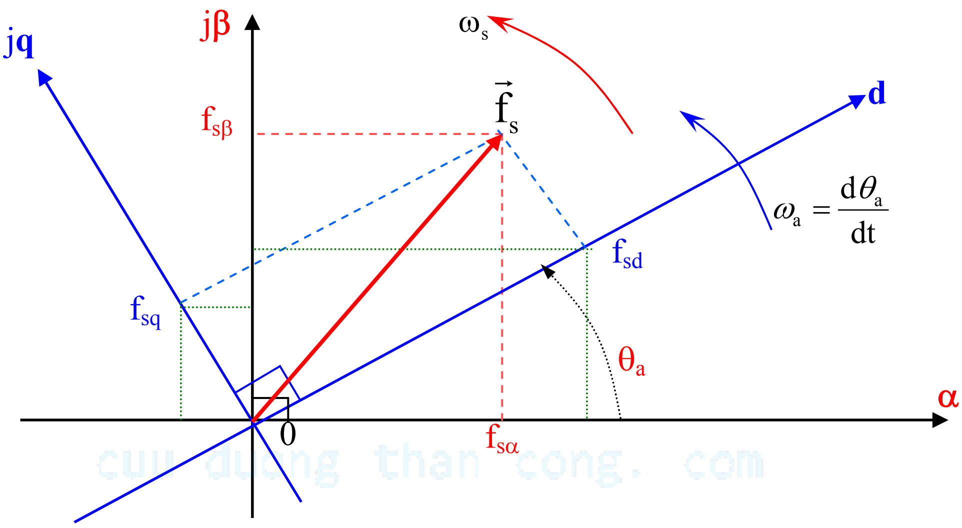
Chương 2: HỆ QUI CHIẾU QUAY

I. Hệ qui chiếu quay

Trong mặt phẳng của hệ tọa độ αβ, xét thêm một hệ tọa độ thứ 2 có trục hoành d và trục tung q, hệ tọa độ thứ 2 này có chung điểm gốc và nằm lệch đi một góc θ_s so với hệ tọa độ stator (hệ tọa độ αβ). Trong đó, $\omega_a = \frac{d\theta_a}{dt}$ quay tròn quanh gốc tọa độ chung, góc $\theta_a = \omega_a t + \omega_{a0}$. Khi đó sẽ tồn tại hai tọa độ cho một vector trong không gian tương ứng với hai hệ tọa độ này. Hình vẽ sau sẽ mô tả mối liên hệ của hai tọa độ này.



Hình 2.1: Chuyển hệ toạ độ cho vector không gian $\vec{u}_s$ từ hệ tọa độ αβ sang hệ tọa độ dq và ngược lại.

Từ hình 1.5 dễ dàng rút ra các công thức về mối liên hệ của hai tọa độ của một vector ứng với hai hệ tọa độ αβ và dq. Hay thực hiện biến đổi đại số:

$$\boxed{\begin{cases} f_{s\alpha} = f_{sd}\cos\theta_a - f_{sq}\sin\theta_a & (1.10a) \\ f_{s\beta} = f_{sd}\sin\theta_a + f_{sq}\cos\theta_a & (1.10b) \end{cases}}$$

Theo pt (1.9a) thì: $\vec{f}_s^{\alpha\beta} = \vec{f}_{s\alpha} + j\vec{f}_{s\beta}$ (1.11)

và tương tự thì: $\vec{f}_s^{dq} = \vec{f}_{sd} + j\vec{f}_{sq}$ (1.12)

Ví dụ 2.1: Chứng minh $\vec{f}_s^{\alpha\beta} = \vec{f}_s^{dq} e^{j\theta_a}$

Khi thay hệ pt (1.10) vào pt (1.11) sẽ được:

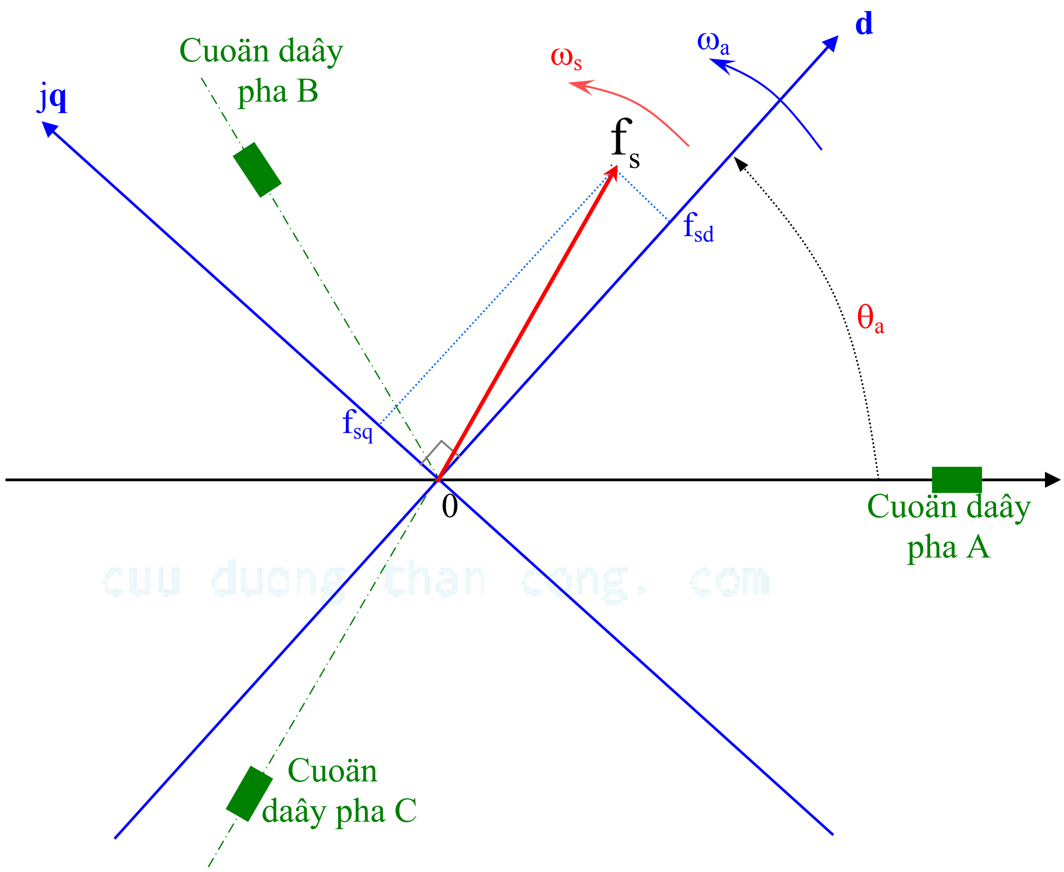
$$\vec{f}_s^{\alpha\beta} = (f_{sd}\cos\theta_a - f_{sq}\sin\theta_a) + j(f_{sd}\sin\theta_a + f_{sq}\cos\theta_a)$$
$$= (f_{sd} + jf_{sq})(\cos\theta_a + j\sin\theta_a) = \vec{f}_s^{dq} e^{j\theta_a} \quad (1.13)$$

Hay $\boxed{\vec{f}_s^{\alpha\beta} = \vec{f}_s^{dq} e^{j\theta_a}} \Leftrightarrow \boxed{\vec{f}_s^{dq} = \vec{f}_s^{\alpha\beta} e^{-j\theta_a}}$ (1.14)

Ví dụ 2.2: Tính f_{sd} và f_{sq} theo $f_{s\alpha}$, $f_{s\beta}$ và θ_a.

Thay pt (1.11) vào pt (1.14), thu được phương trình:

$$\boxed{\begin{cases} f_{sd} = f_{s\alpha}\cos\theta_a + f_{s\beta}\sin\theta_a & (1.15a) \\ f_{sq} = -\, f_{s\alpha}\sin\theta_a + f_{s\beta}\cos\theta_a & (1.15b) \end{cases}}$$



Hình 2.2: Hệ tọa độ quay

$$[A_s] = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta_s & \cos(\theta_s - 2\pi/3) & \cos(\theta_s + 2\pi/3) \\ -\sin\theta_s & -\sin(\theta_s - 2\pi/3) & -\sin(\theta_s + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

$$[A_r] = \frac{2}{3}\begin{bmatrix} \cos\theta_r & \cos(\theta_r - 2\pi/3) & \cos(\theta_r + 2\pi/3) \\ -\sin\theta_r & -\sin(\theta_r - 2\pi/3) & -\sin(\theta_r + 2\pi/3) \\ 1/2 & 1/2 & 1/2 \end{bmatrix}$$

$$[\underline{v}_{dqs}] = [\underline{A}_s][\underline{v}_{abc}] \qquad [\underline{v}_{dqr}] = [\underline{A}_r][\underline{v}_{ABC}] \qquad [\underline{\psi}_{dqs}] = [\underline{A}_s][\underline{\psi}_{abc}]$$

$$[\underline{i}_{dqs}] = [\underline{A}_s][\underline{i}_{abc}] \qquad [\underline{i}_{dqr}] = [\underline{A}_r][\underline{i}_{ABC}] \qquad [\underline{\psi}_{dqr}] = [\underline{A}_r][\underline{\psi}_{ABC}]$$

$$[\underline{v}_{dqs}] = \begin{bmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \\ v_{os} \end{bmatrix} \qquad [\underline{i}_{dqs}] = \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{os} \end{bmatrix} \qquad [\underline{v}_{dqr}] = \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \\ v_{or} \end{bmatrix} \qquad [\underline{i}_{dqr}] = \begin{bmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{or} \end{bmatrix}$$

$$\boxed{\begin{aligned} f_{ds} &= \frac{2}{3}\left[f_a \cos\theta_s + f_b \cos(\theta_s - 2\pi/3) + f_c \cos(\theta_s + 2\pi/3)\right] \\ f_{qs} &= -\frac{2}{3}\left[f_a \sin\theta_s + f_b \sin(\theta_s - 2\pi/3) + f_c \sin(\theta_s + 2\pi/3)\right] \end{aligned}}$$

$$\boxed{\begin{aligned} f_a &= f_{ds} \cos\theta_s - f_{qs} \sin\theta_s \\ f_b &= f_{ds} \cos(\theta_s - 2\pi/3) - f_{qs} \sin(\theta_s - 2\pi/3) \\ f_c &= f_{ds} \cos(\theta_s + 2\pi/3) - f_{qs} \sin(\theta_s + 2\pi/3) \end{aligned}}$$

$$f_{\alpha s} = (2/3)(f_a - 0.5 f_b - 0.5 f_c)$$

$$f_{\beta s} = -(2/3)(-f_b \sqrt{3}/2 + f_c \sqrt{3}/2)$$

$$f_a = f_{\alpha s}$$

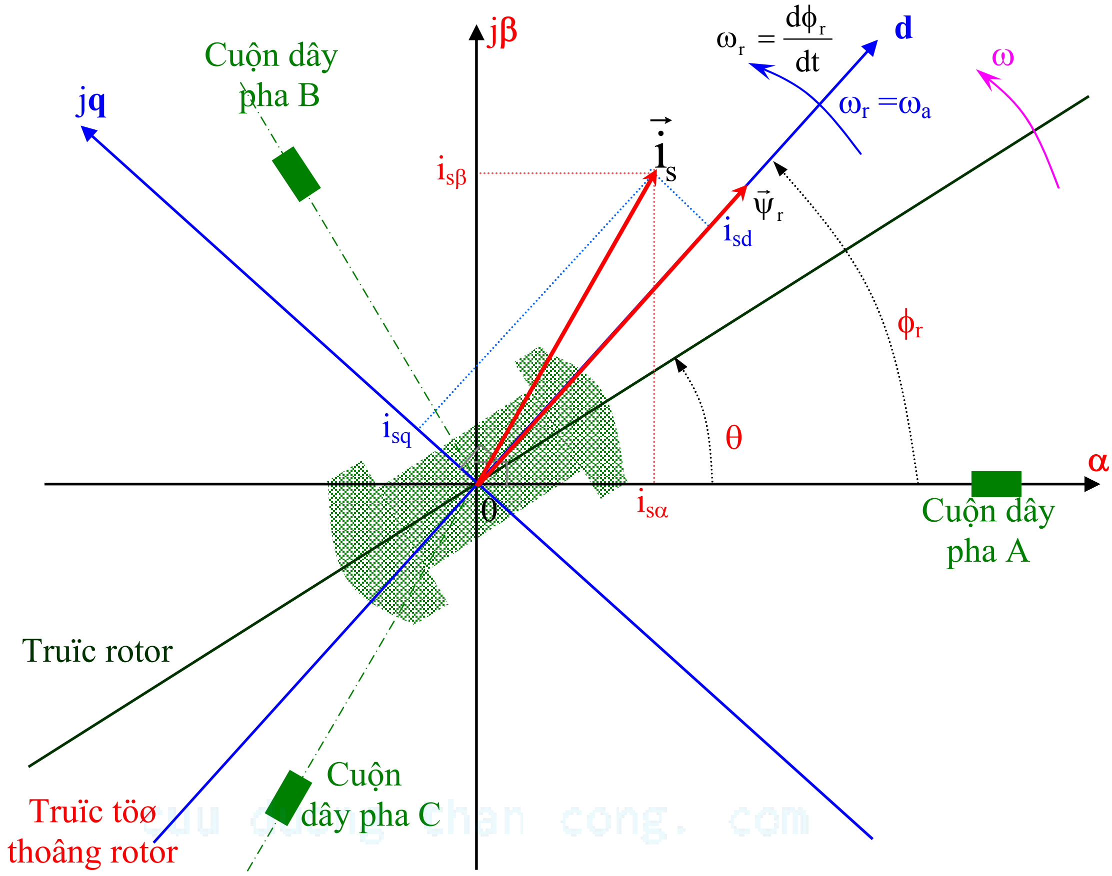
$$f_b = -0.5 f_{\alpha s} + f_{\beta s}\sqrt{3}/2$$

$$f_c = -0.5 f_{\alpha s} - f_{\beta s}\sqrt{3}/2$$

❖ XÉT KHI $\omega_a = 0$

II. Biễu diễn các vector không gian trên hệ tọa độ từ thông rotor

Mục này trình bày cách biểu diễn các vector không gian của động cơ không đồng bộ (ĐCKĐB) ba pha trên hệ tọa độ từ thông rotor. Giả thiết một ĐCKĐB ba pha đang quay với tốc độ góc $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ (tốc độ quay của rotor so với stator đứng yên), với θ là góc hợp bởi trục rotor với trục chuẩn stator (qui định trục cuộn dây pha A, chính là trục α trong hệ tọa độ αβ).



Hình 2.3: Biểu diễn vector không gian $\vec{i}_s$ trên hệ toạ độ từ thông rotor, còn gọi là hệ toạ độ dq.

Trong hình 1.6 biểu diễn cả hai vector dòng stator $\vec{i}_s$ và vector từ thông rotor $\vec{\psi}_r$. Vector từ thông rotor $\vec{\psi}_r$ quay với tốc độ góc $\omega_a = \omega_r = \frac{d\phi_r}{dt} \approx \omega_s = 2\pi f_s$ (tốc độ quay của từ thông rotor so với stator đứng yên). Trong đó, f_s là tần số của mạch điện stator và ϕ_r là góc của trục d so với trục chuẩn stator (trục α).

Độ chênh lệch giữa ω_s và ω (giả thiết số đôi cực của động cơ là p=1) sẽ tạo nên dòng điện rotor với tần số f_{sl}, dòng điện này cũng có thể được biễu diễn dưới dạng vector $\vec{i}_r$ quay với tốc độ góc $\omega_{sl} = 2\pi f_{sl}$, ($\omega_{sl} = \omega_s - \omega \approx \omega_r - \omega$) so với vector từ thông rotor $\vec{\psi}_r$.

Trong mục này ta xây dựng một hệ trục tọa độ mới có hướng trục hoành (trục d) trùng với trục của vector từ thông rotor $\vec{\psi}_r$ và có gốc trùng với gốc của hệ tọa độ αβ, hệ tọa độ này được gọi là hệ tọa độ từ thông rotor, hay còn gọi là hệ tọa dq. Hệ tọa độ dq quay quanh điểm gốc chung với tốc độ góc $\omega_r \approx \omega_s$, và hợp với hệ tọa độ αβ một góc ϕ_r.

Vậy tùy theo quan sát trên hệ tọa độ nào, một vector trong không gian sẽ có một tọa độ tương ứng. Qui định chỉ số trên bên phải của ký hiệu vector để nhận biết vector đang được quan sát từ hệ tọa độ nào:

- s: tọa độ αβ (stator coordinates).
- f: tọa độ dq (field coordinates).

Như trong hình 1.6, vector $\vec{i}_s$ sẽ được viết thành:

- $\vec{i}_s^{\,s}$: vector dòng stator quan sát trên hệ tọa độ αβ.
- $\vec{i}_s^{\,f}$: vector dòng stator quan sát trên hệ tọa độ dq.

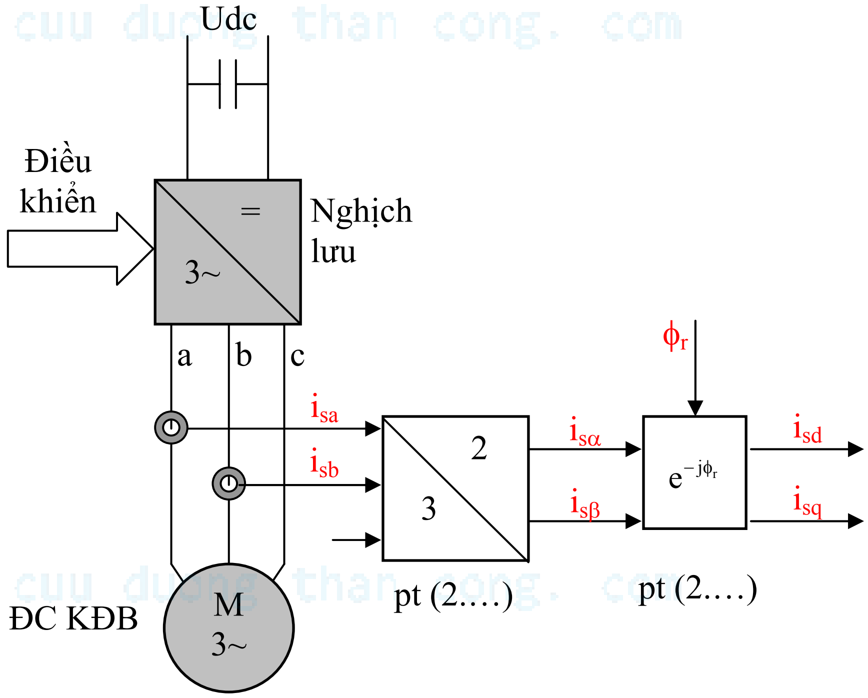
Theo pt (1.8a) và pt (1.11) thì:

$$\begin{cases} \vec{i}_s^{\,s} = i_{s\alpha} + j\, i_{s\beta} & (1.16a) \\ \vec{i}_s^{\,f} = i_{sd} + j\, i_{sq} & (1.16b) \end{cases}$$

Nếu biết được góc ϕ_r thì sẽ xác định được mối liên hệ:

$$\begin{cases} \vec{i}_s^{\,s} = \vec{i}_s^{\,f} e^{j\phi_r} & (1.17a) \\ \vec{i}_s^{\,f} = \vec{i}_s^{\,s} e^{-j\phi_r} & (1.17b) \end{cases}$$

Theo hệ pt (???) và pt (1.17b) thì có thể tính được vector dòng stator thông qua các giá trị dòng i_a và i_b đo được (hình 1.7).



Hình 2.4: Thu thập giá trị thực của vector dòng stator trên hệ tọa độ dq.

Tương tự như đối với vector dòng stator, có thể biểu diễn các vector khác của ĐCKĐB trên hệ tọa độ dq:

$$\begin{cases} \vec{i}_s^{\,f} = i_{sd} + j\, i_{sq} & (1.18a) \\ \vec{u}_s^{\,f} = u_{sd} + j\, i_{sq} & (1.18b) \\ \vec{i}_r^{\,f} = i_{rd} + j\, i_{rq} & (1.18c) \\ \vec{\psi}_s^{\,f} = \psi_{sd} + j\psi_{sq} & (1.18d) \\ \vec{\psi}_r^{\,f} = \psi_{rd} + j\psi_{rq} & (1.18e) \end{cases}$$

Tuy nhiên, để tính được i_{sd} và i_{sq} thì phải xác định được góc ϕ_r, góc ϕ_r được xác định thông qua $\omega_r = \omega + \omega_{sl}$. Trong thực tế chỉ có ω là có thể đo được, trong khi (tốc độ trượt) $\omega_{sl} = 2\pi f_{sl}$ với f_{sl} là tần số của mạch điện rotor (lồng sóc) không đo được. Vì vậy phương pháp điều khiển ĐCKĐB ba pha dựa trên các mô tả trên hệ tọa dộ dq bắt buộc phải xây dựng phương pháp tính ω_r chính xác. Chú ý khi xây dựng mô hình tính toán trong hệ tọa độ dq, do không thể tính tuyệt đối chính xác góc ϕ_r nên vẫn giữ lại ψ_{rq} (ψ_{rq}=0) để đảm bảo tính khách quan trong khi quan sát.

III. Ưu điểm của việc mô tả động cơ không đồng bộ ba pha trên hệ tọa độ từ thông rotor

Trong hệ tọa độ từ thông rotor (hệ tọa độ dq), các vector dòng stator $\vec{i}_s^{\,f}$ và vector từ thông rotor $\vec{\psi}_r^{\,f}$, cùng với hệ tọa độ dq quanh (gần) đồng bộ với nhau với tốc độ ω_r quanh điểm gốc, do đó các phần tử của vector $\vec{i}_s^{\,f}$ (i_{sd} và i_{sq}) là các đại lượng một chiều. Trong chế độ xác lập, các giá trị này gần như không đổi; trong quá trình quá độ, các giá trị này có thể biến theo theo một thuật toán điều khiển đã được định trước.

Hơn nữa, trong hệ tọa độ dq, ψ_{rq}=0 do vuông góc với vector $\vec{\psi}_r^{\,f}$ (trùng với trục d) nên $\left|\vec{\psi}_r^{\,f}\right|$=$\psi_{rd}$. (1.19)

Đối với ĐCKĐB 3 pha, trong hệ tọa độ dq, **từ thông** và **mômen quay** được biểu diễn theo các phần tử của vector dòng stator:

$$\begin{cases} \psi_{rd} = \dfrac{L_m}{1+T_r s} i_{sd} & (1.20a) \\ T_e = \dfrac{3}{2}\dfrac{L_m}{L_r} p \psi_{rd} i_{sq} = T_L - \dfrac{J}{P}\dfrac{d\omega}{dt} & (1.20b) \end{cases}$$

(Hai phương trình trên sẽ được chứng minh trong chương sau).

với: T_e momen quay (momen điện) của động cơ
L_r điện cảm rotor
L_m hỗ cảm giữa stator và rotor
p số đôi cực của động cơ
T_r hằng số thời gian của rotor

s toán tử Laplace

Phương trình (1.20a) cho thấy có thể điều khiển từ thông rotor $\psi_{rd} = |\vec{\psi}_r|$ thông qua điều khiển dòng stator i_{sd}. Đặc biệt mối quan hệ giữa hai đại lượng này là mối quan hệ trễ bậc nhất với thời hằng T_r.

Nếu thành công trong việc áp đặt nhanh và chính xác dòng i_{sd} để điều khiển ổn định từ thông ψ_{rd} tại mọi điểm làm việc của động cơ. Và thành công trong việc áp đặt nhanh và chính xác dòng i_{sq}, và theo pt (1.20b) thì có thể coi $\mathbf{i_{sq}}$ là đại lượng điều khiển của momen T_e của động cơ.

Bằng việc mô tả ĐCKĐB ba pha trên hệ tọa độ từ thông rotor, không còn quan tâm đến từng dòng điện pha riêng lẻ nữa, mà là toàn bộ vector không gian dòng stator của động cơ. Khi đó vector $\vec{i}_s$ sẽ cung cấp hai thành phần: $\mathbf{i_{sd}}$ để điều khiển từ thông rotor $|\vec{\psi}_r|$**,** $\mathbf{i_{sq}}$ để điều khiển momen quay $\mathbf{T_e}$**,** từ đó có thể điều khiển tốc độ của động cơ.

$$\begin{cases} i_{sd} \rightarrow |\vec{\psi}_r| & (1.21a) \\ i_{sq} \rightarrow T_e \rightarrow \omega & (1.21b) \end{cases}$$

Khi đó, phương pháp mô tả ĐCKĐB ba pha tương quan giống như đối với động cơ một chiều. Cho phép xây dựng hệ thống điều chỉnh truyền động ĐCKĐB ba pha tương tự như trường hợp sử dụng động cơ điện một chiều. Điều khiển tốc độ ĐCKĐB ba pha ω thông qua điều khiển hai phần tử của dòng điện $\vec{i}_s$ là i_{sd} và i_{sq}.

Bài tập 2.1. Chứng minh:

$$\omega_r = \frac{\psi_{\alpha r}\dfrac{d\psi_{\beta r}}{dt} - \psi_{\beta r}\dfrac{d\psi_{\alpha r}}{dt}}{\psi_{\alpha r}^2 + \psi_{\beta r}^2}$$