CƠ BẢN VỀ BIẾN ĐỔI NĂNG LƯỢNG ĐIỆN CƠ

(tham khảo)

I. Các nguyên lí của quá trình biến đổi điện cơ

I.1. Lực và moment trong hệ các mạch từ

Định luật Lorentz: $\vec{F} = q\left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}\right)$

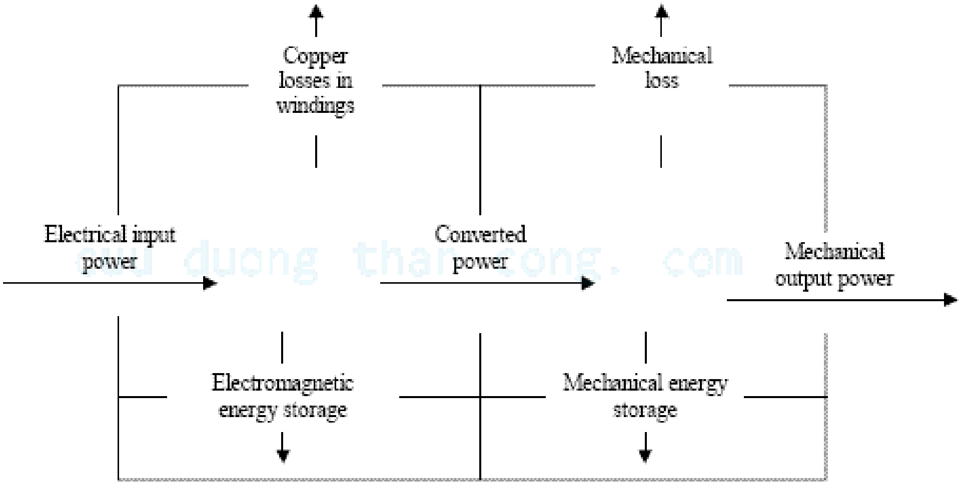
Nếu chỉ có từ trường: $\vec{F} = q.\vec{v} \times \vec{B}$

Mà $q = I.t$

Nên $\vec{F}_e = I\left(\vec{l} \times \vec{B}\right)$

I.2. Cân bằng năng lượng

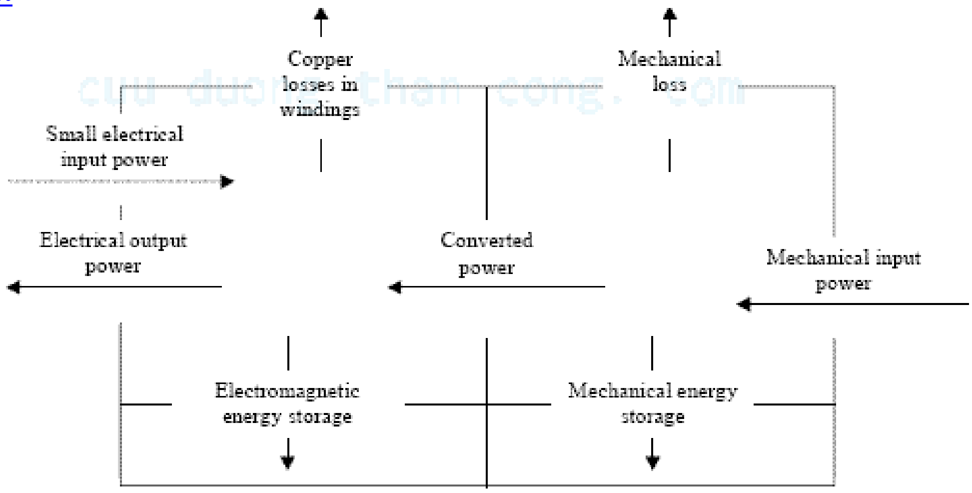
Động cơ



$$p_e = p_{Cu} + \frac{dW_e}{dt} + p_c$$

$$p_c = p_{loss-mech} + \frac{dW_m}{dt} + p_m$$

Máy phát



$$p_m = p_{loss-mech} + \frac{dW_m}{dt} + p_c$$
$$p_c = p_{Cu} + \frac{dW_e}{dt} + p_{e1} - p_{e2}$$
$$p_c = t_e\omega_m$$

❖ Nếu bỏ qua tổn hao:

$$dW_{elec} - dW_{mech} = dW_e$$

Năng lượng điện (e.i) – Cơ năng (p_c) = Năng lượng từ trường tích lũy (W_e).

$$e.i - p_c = \frac{dW_e}{dt}$$

Hay
$$i\frac{d\psi}{dt} - p_c = \frac{dW_e}{dt}$$

Theo (hình 0.3 trang 12, hình 0.7 trang 16):

$$e.i - p_c = \frac{dW_e}{dt}$$

Với $e = \dfrac{d\psi}{dt}$

Và $p_c = f_e\dfrac{dx}{dt}$

thì:
$$i\frac{d\psi}{dt} - f_e\frac{dx}{dt} = \frac{dW_e}{dt}$$

hay
$$\boxed{id\psi - f_e dx = dW_e}$$

Ví dụ 0.2 trang 16.

I.3. Năng lượng và lực từ trong hệ một nguồn kích từ

Chuyển động thẳng: $p_c = f_e\dfrac{dx}{dt} = \dfrac{dW_{mech}}{dt} \Rightarrow f_e = \dfrac{dW_{mech}}{dx}$

Chuyển động quay: $p_c = t_e\dfrac{d\theta}{dt} = t_e\omega = \dfrac{dW_{mech}}{dt} \Rightarrow t_e = \dfrac{dW_{mech}}{d\theta}$

❖ Năng lượng từ trường tích lũy trong cuộn dây (We):

$$\boxed{id\psi - f_e dx = dW_e}$$

Nếu mạch từ tuyến tính, $\boxed{\psi = L(x)i}$, nên W_e chỉ phụ thuộc vào ψ và x.

$$W_e(\psi_0, x_0) = \int_0^{\psi_0, x_0} dW_e(\psi, x) = \int_0^{0, x_0} dW_e(0, x) + \int_0^{\psi_0, x_0} dW_e(\psi, x_0)$$

Mà khi $\psi = 0$ thì $f_e = 0$ nên $dW_e(0, x) = 0$

$$\Rightarrow W_e = \int_0^{\psi_0} i(\psi, x_0) d\psi = \int_0^{\psi_0} \frac{\psi}{L(x_0)} d\psi = \frac{1}{2} \frac{1}{L(x_0)} \psi_0^2$$

$$\boxed{W_e = \frac{1}{2} \frac{1}{L(x\ )} \psi^2}$$

Vì $F = NI = \Phi R_m = N\frac{\Psi}{L} = N\frac{N\Phi}{L}$

Nên $L = \dfrac{N^2}{R_m}$ với $R_m = \mu \dfrac{\delta}{S_\delta}$

Ví dụ 0.2 trang 16:

$$W_e = \frac{1}{2} L(x) i^2 = \frac{i^2}{2} N^2 \mu \frac{S_\delta}{\delta} = \frac{i^2}{2} \frac{N^2 \mu}{\delta} (d - x) l$$

Ví dụ: Tính lực tác động lên piston ở ví dụ này?

❖ Có thể tính năng lượng tích lũy trong từ trường bằng:

$$W_e = \int_V \left(\int_0^{B_0} H dB \right) dV$$

Nếu mạch từ tuyến tính, $B = \mu H$:

$$W_e = \int_V \left(\frac{1}{2} \frac{B}{\mu^2} \right) dV$$

I.4. Tính toán lực từ: Đồng năng lượng

Định nghĩa: Đồng năng lượng

$$\boxed{W_e^{'}(i, x) = i\psi - W_e(\psi, x)}$$

$$\Rightarrow \quad dW_e'(i,x) = d(i\psi) - dW_e(\psi,x) = \frac{\partial W_e'(i,x)}{\partial i}di + \frac{\partial W_e'(i,x)}{\partial x}dx$$

Trong đó:

$$d(i\psi) = id\psi + \psi di$$

Và $\boxed{id\psi - f_e dx = dW_e(\psi,x)}$

$$\Rightarrow \quad \psi di + f_e dx = \frac{\partial W_e'(i,x)}{\partial i}di + \frac{\partial W_e'(i,x)}{\partial x}dx$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{\psi = \frac{\partial W_e'(i,x)}{\partial i}}$$

$$\Rightarrow \quad \boxed{f_e = \frac{\partial W_e'(i,x)}{\partial x}}$$

và $\boxed{t_e = \frac{\partial W_e'(i,x)}{\partial \theta}}$

Với hệ thống tuyến tính, có thể tính **đồng năng lượng**:

$$W_e'(i_0,x_0) = \int_0^{i_0} \psi(i,x_0)di = \int_0^{i_0} L(x_0)idi = \frac{1}{2}L(x_0)i_0^2$$

$$\boxed{W_e' = \frac{1}{2}L(x)i^2}$$

Ví dụ: Tính lực tác động lên piston ở ví dụ 0.2 trang 16 theo đồng năng lượng?

Khi mạch từ tuyến tính, ψ và i tỷ lệ:

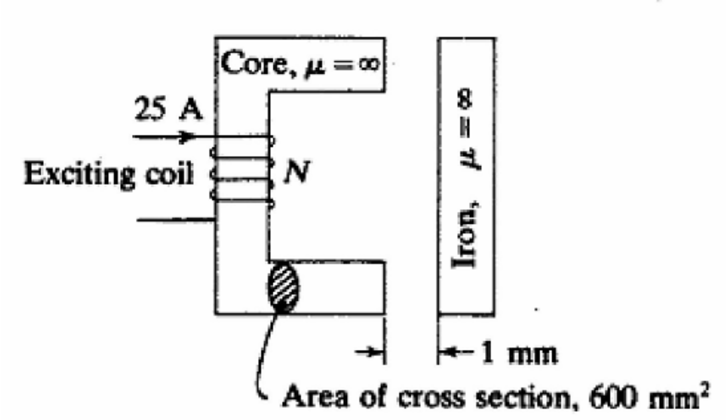
$$W_e' = \int_V \left(\int_0^{H_0} BdH \right) dV$$

Nếu mạch từ tuyến tính, $B = \mu H$:

$$W_e' = \int_V \left(\frac{1}{2}\mu H^2 \right) dV$$

Chú ý, theo định nghĩa: $\boxed{W_e + W_e' = \psi i}$
kể cả khi mạch từ không tuyến tính (hình 0.8).

Ví dụ: Tính lực tác động lên nắp mạch từ biết N = 100?



I.5. Lực và moment trong hệ các mạch từ có nam châm vĩnh cửu

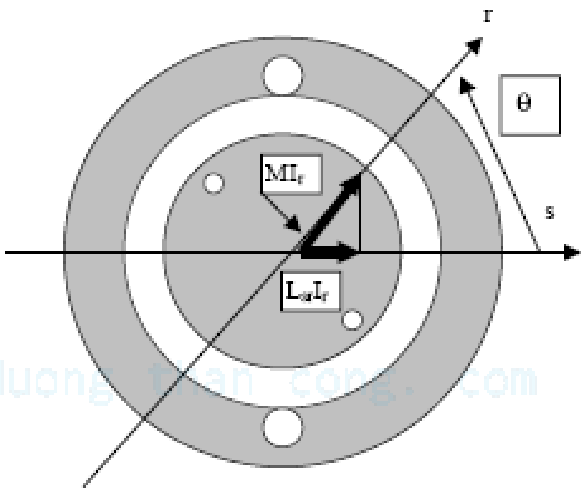
$$W_e^{'}(i,x) = i\psi - W_e(\psi,x) = W_e(\psi,x)$$

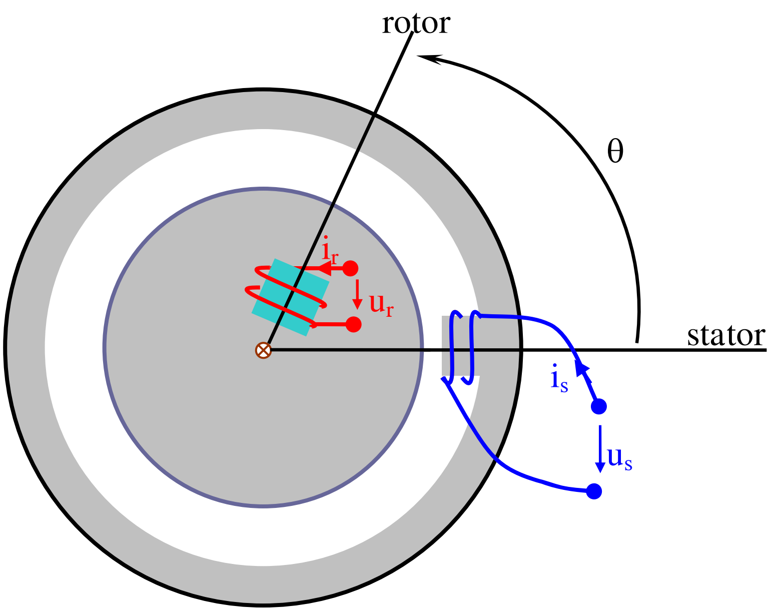
Với $$W_e^{'}(i_f = 0,x) = \int_{I_{f0}}^{0} \psi(i_f,x)di_f$$

Trong đó I_{f0} là dòng điện chạy trong cuộn dây giả tưởng tạo ra từ trường vừa đủ khử từ trường NCVC.

I.6. Năng lượng và lực từ trong hệ nhiều nguồn kích từ

Ví dụ: Máy điện có 2 cuộn dây, mạch từ tuyến tính (chế độ động cơ):





Cách 1: Tính cho 2 cuộn dây:

$$p_{in} = p_{elec} = p_{Cu} + \frac{dW_e}{dt} + p_c$$

$$p_c = p_{loss\_m} + \frac{dW_m}{dt} + p_{out}$$

$$u_s(t) = R_s i_s(t) - e_s(t) = R_s i_s(t) + \frac{d\psi_s(t)}{dt} \qquad \psi_s = L_s i_s + L_{sr} i_r$$

$$u_r(t) = R_r i_r(t) - e_r(t) = R_r i_s(t) + \frac{d\psi_r(t)}{dt} \qquad \psi_r = L_{rs} i_s + L_r i_r$$

$$p_{in} = u_s i_s + u_r i_r$$

$$p_{Cu} = R_s i_s^2 + R_r i_r^2$$

$$W_{es} = \frac{1}{2}\psi_s i_s = \frac{1}{2}\left(L_s i_s^2 + L_{sr} i_r i_s\right)$$

$$W_{er} = \frac{1}{2}\psi_r i_r = \frac{1}{2}\left(L_{sr} i_r i_s + L_r i_r^2\right)$$

$$\boxed{W_e = \frac{1}{2}\psi_s i_s + \frac{1}{2}\psi_r i_r = \frac{1}{2}L_s i_s^2 + \frac{1}{2}L_r i_r^2 + L_{sr} i_r i_s = W_e'}$$

$$u_s i_s = R_s i_s^2 + \frac{d\psi_s}{dt} i_s \qquad \psi_s = L_s i_s + L_{sr} i_r$$

$$u_r i_r = R_r i_r^2 + \frac{d\psi_r}{dt} i_r \qquad \psi_r = L_{rs} i_s + L_r i_r$$

$$p_{in} = u_s i_s + u_r i_r = p_{Cu} + \frac{d\psi_s}{dt} i_s + \frac{d\psi_r}{dt} i_r = p_{Cu} + \frac{dW_e}{dt} + p_c$$

$$\Rightarrow \quad \frac{dW_e}{dt} + p_c = \frac{d\psi_s}{dt} i_s + \frac{d\psi_r}{dt} i_r$$

Trong khi: $W_e = \frac{1}{2}\psi_s i_s + \frac{1}{2}\psi_r i_r$

$$\Rightarrow \quad \frac{d(W_e)}{dt} = \frac{1}{2}\frac{d\psi_s}{dt} i_s + \frac{1}{2}\psi_s \frac{di_s}{dt} + \frac{1}{2}\frac{d\psi_r}{dt} i_r + \frac{1}{2}\psi_r \frac{di_r}{dt}$$

$$\Rightarrow \quad p_c = \frac{1}{2}\frac{d\psi_s}{dt} i_s - \frac{1}{2}\psi_s \frac{di_s}{dt} + \frac{1}{2}\frac{d\psi_r}{dt} i_r - \frac{1}{2}\psi_r \frac{di_r}{dt}$$

$$\Leftrightarrow \quad p_c = \frac{1}{2}\frac{d(L_s i_s + L_{sr} i_r)}{dt} i_s - \frac{1}{2}(L_s i_s + L_{sr} i_r)\frac{di_s}{dt} + \frac{1}{2}\frac{d(L_{rs} i_s + L_r i_r)}{dt} i_r - \frac{1}{2}(L_{rs} i_s + L_r i_r)\frac{di_r}{dt}$$

$$\Leftrightarrow \quad \begin{aligned} 2p_c dt &= d(L_s i_s + L_{sr} i_r) i_s - (L_s i_s + L_{sr} i_r) di_s \\ &\quad + d(L_{rs} i_s + L_r i_r) i_r - (L_{rs} i_s + L_r i_r) di_r \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \quad \begin{aligned} 2p_c &= \frac{dL_s}{dt} i_s^2 + L_s i_s \frac{di_s}{dt} + \frac{dL_{sr}}{dt} i_s i_r + L_{sr} i_s \frac{di_r}{dt} - L_s i_s \frac{di_s}{dt} - L_{sr} i_r \frac{di_s}{dt} \\ &\quad + \frac{dL_{rs}}{dt} i_s i_r + L_{rs} i_r \frac{di_s}{dt} + \frac{dL_r}{dt} i_r^2 + L_r i_r \frac{di_r}{dt} - L_{rs} i_s \frac{di_r}{dt} - L_r i_r \frac{di_r}{dt} \end{aligned}$$

$$\Leftrightarrow \quad 2p_c = \frac{dL_s}{dt} i_s^2 + \frac{dL_{sr}}{dt} i_s i_r + \frac{dL_{rs}}{dt} i_s i_r + \frac{dL_r}{dt} i_r^2$$

$$\Leftrightarrow \quad p_c = \frac{1}{2}\frac{dL_s}{dt} i_s^2 + \frac{dL_{rs}}{dt} i_s i_r + \frac{1}{2}\frac{dL_r}{dt} i_r^2$$

$$\Leftrightarrow \quad \boxed{p_c = \frac{1}{2}\frac{dL_s}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} i_s^2 + \frac{1}{2}\frac{dL_r}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} i_r^2 + \frac{dL_{rs}}{d\theta}\frac{d\theta}{dt} i_s i_r} \qquad \omega = \frac{d\theta}{dt}$$

$$\Leftrightarrow \quad p_c = \left[\frac{1}{2}\frac{dL_s}{d\theta} i_s^2 + \frac{1}{2}\frac{dL_r}{d\theta} i_r^2 + \frac{dL_{rs}}{d\theta} i_s i_r\right]\omega$$

$$\Leftrightarrow \quad \boxed{t_e = \frac{p_c}{\omega} = \frac{1}{2}\frac{dL_s}{d\theta} i_s^2 + \frac{1}{2}\frac{dL_r}{d\theta} i_r^2 + \frac{dL_{rs}}{d\theta} i_s i_r}$$

$$t_e = \left(\frac{1}{2}\frac{dL_s}{d\theta} i_s^2 + \frac{1}{2}\frac{dL_r}{d\theta} i_r^2\right) + \left(\frac{dL_{rs}}{d\theta} i_s i_r\right) = T_e^{\text{reluctance}} + T_e^{\text{fundamental}} = T_e^{\text{tu tro}} + T_e^{\text{co ban}}$$

Động cơ rotor cực từ ẩn: $T_e^{\text{reluctance}} = \frac{1}{2}\frac{dL_s}{d\theta} i_s^2 + \frac{1}{2}\frac{dL_r}{d\theta} i_r^2 = 0$

$$T_e^{\text{fundamental}} = \frac{dL_{rs}}{d\theta} i_s i_r$$

Có thể viết: $p_c = \frac{1}{2}\underline{i}^T \frac{d\underline{L}}{dt}\underline{i}$

$t_e = \frac{1}{2}\underline{i}^T \frac{d\underline{L}}{d\theta}\underline{i}$ với:

$\underline{i} = \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix} \qquad \underline{L} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{rs} & L_r \end{bmatrix}$

Ví dụ: Thử tính t_e theo đồng năng lượng: $\boxed{t_e = \frac{\partial W_e'(i_s, i_r, x)}{\partial \theta}}$

Cách 2: Tính cho 2 cuộn dây dưới dạng ma trận (tổng quát):

$$p_{in} = p_{elec} = p_{Cu} + \frac{dW_e}{dt} + p_c$$

$$p_c = p_{loss\_m} + \frac{dW_m}{dt} + p_{out}$$

$$u_s(t) = R_s i_s(t) - e_s(t) = R_s i_s(t) + \frac{d\psi_s(t)}{dt} \qquad \psi_s = L_s i_s + L_{sr} i_r$$

$$u_r(t) = R_r i_r(t) - e_r(t) = R_r i_s(t) + \frac{d\psi_r(t)}{dt} \qquad \psi_r = L_{rs} i_s + L_r i_r$$

Với: $\underline{u} = \begin{bmatrix} u_s \\ u_r \end{bmatrix} \qquad \underline{i} = \begin{bmatrix} i_s \\ i_r \end{bmatrix}$

$$\underline{R} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix} \qquad \underline{L} = \begin{bmatrix} L_s & L_{sr} \\ L_{rs} & L_r \end{bmatrix} \qquad \underline{\psi} = \begin{bmatrix} \psi_s \\ \psi_r \end{bmatrix} = \underline{L}\underline{i}$$

$$\underline{u} = \underline{R}\underline{i}_s + \frac{d\underline{\psi}}{dt}$$

$$p_{Cu} = R_s i_s^2 + R_r i_r^2 = \underline{i}^T \underline{R}\underline{i}$$

$$p_{in} = u_s i_s + u_r i_r = \underline{i}^T \underline{u}$$

$$p_{in} = \underline{i}^T \left(\underline{R}\underline{i}_s + \frac{d\underline{\psi}}{dt} \right) = \underline{i}^T \underline{R}\underline{i}_s + \underline{i}^T \frac{d\underline{\psi}}{dt} = p_{Cu} + \underline{i}^T \frac{d\underline{\psi}}{dt}$$

mà $p_{in} = p_{Cu} + \frac{dW_e}{dt} + p_c$

nên $\frac{dW_e}{dt} + p_c = \underline{i}^T \frac{d\underline{\psi}}{dt}$

$$W_{es} = \frac{1}{2}\psi_s i_s = \frac{1}{2}\left(L_s i_s^2 + L_{sr} i_r i_s\right)$$

$$W_{er} = \frac{1}{2}\psi_r i_r = \frac{1}{2}\left(L_{sr} i_r i_s + L_r i_r^2\right)$$

$$W_e = \frac{1}{2}\psi_s i_s + \frac{1}{2}\psi_r i_r = \frac{1}{2}L_s i_s^2 + \frac{1}{2}L_r i_r^2 + L_{sr} i_r i_s = \frac{1}{2}\underline{i}^T \underline{L}\underline{i} = \frac{1}{2}\underline{i}^T \underline{\psi}$$

$$\Rightarrow \frac{dW_e}{dt} = \frac{1}{2}\frac{d\underline{i}^T}{dt}\underline{\psi} + \frac{1}{2}\underline{i}^T \frac{d\underline{\psi}}{dt}$$

vậy: $$p_c = \underline{i}^T \frac{d\underline{\psi}}{dt} - \left(\frac{1}{2}\frac{d\underline{i}^T}{dt}\underline{\psi} + \frac{1}{2}\underline{i}^T \frac{d\underline{\psi}}{dt}\right) = \underline{i}^T \frac{d\underline{\psi}}{dt} - \frac{1}{2}\frac{d\underline{i}^T}{dt}\underline{\psi}$$

$$p_c = \underline{i}^T \frac{d(\underline{L}\underline{i})}{dt} - \frac{1}{2}\frac{d\underline{i}^T}{dt}(\underline{L}\underline{i}) = \underline{i}^T \frac{d\underline{L}}{dt}\underline{i} + \underline{i}^T \underline{L}\frac{d\underline{i}}{dt} - \frac{1}{2}\frac{d\underline{i}^T}{dt}\underline{L}\underline{i}$$

vì: $$\underline{i}^T \underline{L}\frac{d\underline{i}}{dt} = \frac{1}{2}\frac{d\underline{i}^T}{dt}\underline{L}\underline{i}$$

$$\Rightarrow \boxed{p_c = \frac{1}{2}\underline{i}^T \frac{d\underline{L}}{dt}\underline{i}}$$

$$\Rightarrow \boxed{t_e = \frac{p_c}{\omega} = \frac{1}{2}\underline{i}^T \frac{d\underline{L}}{d\theta}\underline{i}}$$