



# Biến đổi năng lượng điện cơ

-Mạch từ

-Hồ cảm



## Giới thiệu

- Lý thuyết điện từ là cơ sở cho việc giải thích về hoạt động của các hệ thống điện và điện cơ.
- Các phương trình của Maxwell

$$\oint_C \underline{H} \cdot d\underline{l} = \int_S \underline{J}_f \cdot \underline{n} da \quad \text{Ampere's law}$$

$$\oint_C \underline{E} \cdot d\underline{l} = - \int_S \frac{\partial \underline{B}}{\partial t} \cdot \underline{n} da \quad \text{Faraday's law}$$

$$\oint_S \underline{J}_f \cdot \underline{n} da = 0 \quad \text{Conservation of charge}$$

$$\oint_S \underline{B} \cdot \underline{n} da = 0 \quad \text{Gauss's law}$$



## Mạch từ

➤ Mạch từ hình tròn có  $N$  vòng, bán kính trong  $r_0$  và bán kính ngoài  $r_1$ . Bán kính trung bình  $r = (r_0 + r_1) / 2$ , giả sử cường độ từ trường  $H_c$  là đều trong lõi. Dùng định luật vòng Ampere, ta có  $H_c(2\pi r) = Ni$ . Hoặc,

$$H_c l_c = Ni$$

Trong đó  $l_c = 2\pi r$  là chiều dài trung bình của mạch từ. Gọi  $B$  là mật độ từ thông (hoặc từ cảm) trong lõi

$$B_c = \mu H_c = \mu \frac{Ni}{l_c} \text{ (Wb)/m}^2$$





## Mạch từ (tt)

Từ thông

$$\phi_c = B_c A_c = \frac{\mu Ni}{l_c} A_c = \frac{Ni}{l_c / \mu A_c} \text{ Wb}$$

Trong đó  $\mu$  là độ thẩm từ của vật liệu,  $A_c$  là tiết diện ngang của lõi.

Gọi  $Ni$  là sức từ động (mmf), từ trở khi đó được tính:

$$\frac{Ni}{\phi_c} = \frac{mmf}{flux} = \frac{l_c}{\mu A_c} = R \text{ (At/Wb hay 1/H)}$$

$P = 1/R$  là từ dẫn. Từ thông móc vòng được định nghĩa là  $\lambda = N\phi_c = PN^2i$ .

Độ tự cảm  $L$  của cuộn dây  $L = \frac{\lambda}{i} = PN^2 = \frac{N^2}{R}$



## Mạch từ (tt)

- Sự tương đồng giữa mạch điện và mạch từ

$mmf \Leftrightarrow voltage$

$flux \Leftrightarrow current$

$reluctance \Leftrightarrow resistance$

$permeance \Leftrightarrow conductance$

- Lõi xuyên có khe hở không khí (không tính từ thông tản): Cường độ từ trường  $H$  giống nhau ở cả khe hở và lõi.  $l_g$  – chiều dài khe hở,  $l_c$  – chiều dài trung bình của lõi. Dọc theo đường sức trung bình  $c$  có

$$Ni = H_g l_g + H_c l_c = \frac{B_g}{\mu_0} l_g + \frac{B_c}{\mu_r \mu_0} l_c$$

Trong đó  $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  H/m là độ thẩm từ của không khí, và  $\mu_r$  là độ thẩm từ tương đối của vật liệu lõi.



## Mạch từ (tt)

Áp dụng định luật Gauss tại bề mặt kín  $s$  bao quanh một cực từ,  $B_g A_g = B_c A_c$ . Khi bỏ qua từ thông tản,  $A_g = A_c$ . Vì vậy,  $B_g = B_c$ . Chia sức từ động mmf cho từ thông để tính từ trở tương đương

$$\frac{Ni}{\phi} = \frac{l_g}{\mu_0 A_g} + \frac{l_c}{\mu A_c} = R_g + R_c$$

Trong đó  $R_g$  và  $R_c$  là từ trở của khe hở và lõi. Hai từ trở này mắc nối tiếp trong mạch từ tương đương.

➤ Nếu xét có từ thông tản tại cực từ, không phải tất cả từ thông đều đi trong không gian giới hạn giữa hai cực từ. Lúc này,  $A_g > A_c$ , lúc này việc tính toán sẽ được dựa vào kinh nghiệm,

$$A_c = ab, A_g = (a + l_g)(b + l_g)$$



## Ví dụ

- Vd. 3.1: Tìm số cần thiết để tạo ra một mật độ từ thông cho trước.  
Khe hở không khí và chiều dài lõi đã biết.

$$R_c = \frac{0.06}{(10^4)(4\pi \times 10^{-7})(10^{-4})} = 47.7 \times 10^3 \text{ At/Wb}$$

$$R_g = \frac{0.001}{(4\pi \times 10^{-7})(1.1 \times 10^{-4})} = 7.23 \times 10^6 \text{ At/Wb}$$

$$\phi = B_g A_g = (0.5)(1.1 \times 10^{-4}) = 5.5 \times 10^{-4} \text{ Wb}$$

Vì vậy,

$$Ni = (R_c + R_g)\phi = (47.7 + 7230) \times 10^3 \times 5.5 \times 10^{-5} = 400 \text{ At}$$



## Ví dụ (tt)

➤ Vd. 3.2: Tìm từ thông qua các cuộn dây. Tất cả các khe hở có cùng chiều dài và tiết diện. Độ thẩm từ của lõi là vô cùng, bỏ qua từ thông tản.

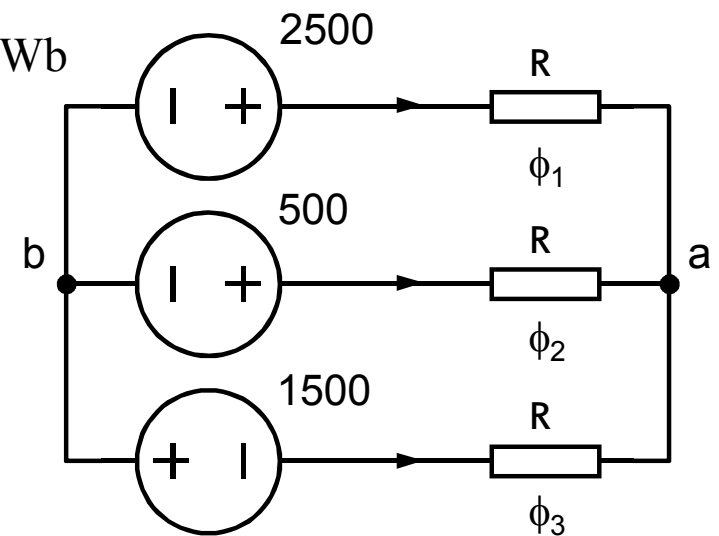
$$R_1 = R_2 = R_3 = R = \frac{(0.1 \times 10^{-2})}{(4\pi \times 10^{-7})(4 \times 10^{-4})} = 1.989 \times 10^6 \text{ At/Wb}$$

Gọi sức từ động giữa a và b là F

$$\frac{2500 - F}{R} + \frac{500 - F}{R} - \frac{F + 1500}{R} = 0$$

Ta có,

$$F = 500, \phi_1 = 10^{-3} \text{ Wb}, \phi_2 = 0, \phi_3 = -10^{-3} \text{ Wb}$$







## Bài tập

- BT 1: Một mạch từ hình tròn, đường sức trung bình có bán kính 500mm, mật độ từ thông làm việc trong khe hở là  $0.6 \text{ Wb/m}^2$ , cuộn dây quấn trên mạch từ có 100 vòng. Một khe hở không khí 2mm được tạo ra. Cho bề sâu  $a = 20 \text{ mm}$ . Bỏ qua từ trở của lõi.
  - a) Tìm dòng điện kích từ cần thiết
  - b) Tìm độ tự cảm của cuộn dây



## Hỗ cảm

- Hỗ cảm là thông số liên hệ giữa điện áp cảm ứng trong một cuộn dây và dòng điện biến thiên trong một cuộn dây khác.
- Xét 2 cuộn dây quấn trên cùng một lõi từ, cuộn 1 được kích từ trong khi cuộn 2 hở mạch. Từ thông tổng móc vòng cuộn 1 là

$$\phi_{11} = \phi_{l1} + \phi_{21}$$

Trong đó  $\phi_{l1}$  (được gọi là từ thông rò) chỉ móc vòng cuộn 1; trong khi  $\phi_{21}$  là từ thông tương hỗ móc vòng cả 2 cuộn, cũng là từ thông móc vòng cuộn 2 do dòng điện trong cuộn 1. Chú ý thứ tự số trong kí hiệu phía dưới.

- Vì cuộn 2 hở mạch, từ thông móc vòng của nó là

$$\lambda_2 = N_2 \phi_{21}$$



## Hỗ cảm (tt)

➤  $\phi_{21}$  tỉ lệ tuyến tính với dòng điện  $i_1$ , vì vậy  $\lambda_2 = N_2 \phi_{21} = M_{21} i_1$

➤ Điện áp cảm ứng  $v_2$  (do sự thay đổi của từ thông móc vòng) được tính bởi

$$v_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = M_{21} \frac{di_1}{dt}$$

$M_{21}$  được gọi là hỗ cảm giữa các cuộn. Tương tự, điện áp cảm ứng  $v_1$  trong cuộn 1 cũng được tính như sau.

$\phi_{11}$  tỉ lệ với  $i_1$ , nên  $\lambda_1 = N_1 \phi_{11} = L_1 i_1$ , do đó

$$v_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt}$$

Với  $L_1$  là độ tự cảm của cuộn 1.



## Hỗ cảm (tt)

- Xét trường hợp cuộn 1 hở mạch và cuộn 2 được kích từ. Làm tương tự ta được các điện áp cảm ứng.

$$\phi_{22} = \phi_{l2} + \phi_{12} \quad \lambda_1 = N_1 \phi_{12} = M_{12} i_2 \quad v_1 = \frac{d\lambda_1}{dt} = M_{12} \frac{di_2}{dt}$$

$$\lambda_2 = N_2 \phi_{22} = L_2 i_2 \quad v_2 = \frac{d\lambda_2}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt}$$

Trong đó  $L_2$  là độ tự cảm của cuộn 2.

- Xét từ khía cạnh năng lượng, có thể thấy rằng  $M_{21} = M_{12} = M$ .
- Cuối cùng, xét trường hợp cả 2 cuộn đều được kích từ.

$$\phi_1 = \phi_{l1} + \phi_{21} + \phi_{12} = \phi_{11} + \phi_{12} \quad \phi_2 = \phi_{21} + \phi_{l2} + \phi_{12} = \phi_{21} + \phi_{22}$$



## Hỗ cảm (tt)

➤ Chú ý rằng  $M_{21} = M_{12} = M$

$$\lambda_1 = N_1\phi_{11} + N_1\phi_{12} = L_1i_1 + Mi_2 \quad \lambda_2 = N_2\phi_{21} + N_2\phi_{22} = Mi_1 + L_2i_2$$

➤ Các điện áp cảm ứng

$$v_1 = L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} \quad v_2 = M \frac{di_1}{dt} + L_2 \frac{di_2}{dt}$$

➤ Hệ số liên kết giữa 2 cuộn được định nghĩa  $k = \frac{M}{\sqrt{L_1L_2}}$

➤ Có thể thấy rằng  $0 \leq k \leq 1$ , hay,  $0 \leq M \leq \sqrt{L_1L_2}$

➤ Phần lớn máy biến áp lõi không khí có  $k < 0.5$ , trong khi MBA lõi thép có  $k > 0.5$ , có thể lên tới 1.



## Ví dụ

➤ VD. 3.4: Cho từ trở của 3 khe hở không khí trong mạch từ. Vẽ mạch tương đương, tính các từ thông móc vòng và độ tự cảm.

$$N_1 i_1 = R_3 (\phi_1 - \phi_2) + R_1 \phi_1 \quad N_2 i_2 = R_2 \phi_2 - R_3 (\phi_1 - \phi_2)$$
$$100 i_1 = (5 \phi_1 - 2 \phi_2) \times 10^6 \quad 100 i_2 = (-2 \phi_1 + 4 \phi_2) \times 10^6$$

Giải các phương trình trên để tính  $\phi_1$  và  $\phi_2$

$$\phi_1 = (25 i_1 + 12.5 i_2) \times 10^{-6} \quad \phi_2 = (12.5 i_1 + 31.25 i_2) \times 10^{-6}$$

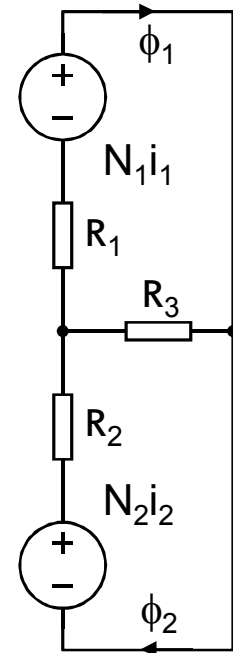
Từ  $\lambda_1 = N_1 \phi_1 = (25 i_1 + 12.5 i_2) \times 10^{-4}$

$$\lambda_2 = N_2 \phi_2 = (12.5 i_1 + 31.25 i_2) \times 10^{-4}$$

Có thể thấy rằng  $L_1 = 25 \times 10^{-4} \text{ H} = 2.5 \text{ mH}$

$$L_2 = 31.25 \times 10^{-4} \text{ H} = 3.125 \text{ mH}$$

$$M = 12.5 \times 10^{-4} \text{ H} = 1.25 \text{ mH}$$





## Cực tính

- Định luật Lenz: điện áp cảm ứng có chiều sao cho từ thông do nó sinh ra ngược chiều với từ thông sinh ra nó.
- Dấu của điện áp cảm ứng được quy ước bởi quy ước đặt dấu chấm: dòng điện  $i$  đi vào cổng đặt dấu chấm (không có dấu chấm) của một cuộn dây sẽ cảm ứng ra một điện áp  $Mdi/dt$  với cực dương tại phía đầu có dấu chấm (không có dấu chấm) của cuộn dây.
- Có hai bài toán: (1) cho cấu tạo cuộn dây, xác định nơi đặt dấu chấm. (2) cho trước cổng đặt dấu chấm, sử dụng để xây dựng các phương trình.



## Xác định đầu đặt dấu chấm

### ➤ Các bước:

- Chọn một đầu của cuộn dây để đặt dấu chấm.
- Giả sử một dòng điện chạy vào đầu đặt dấu chấm và xác định từ thông đi vào lõi.
- Chọn một đầu của cuộn thứ 2 có dòng điện đi vào nó.
- Xác định chiều từ thông tạo bởi dòng điện này.
- So sánh chiều của hai từ thông, nếu chúng cùng chiều thì dấu chấm thứ hai sẽ được đặt ở đầu mà dòng điện đi vào.
- Nếu hai từ thông ngược chiều, dấu chấm thứ 2 sẽ được đặt ở đầu mà dòng điện đi ra.



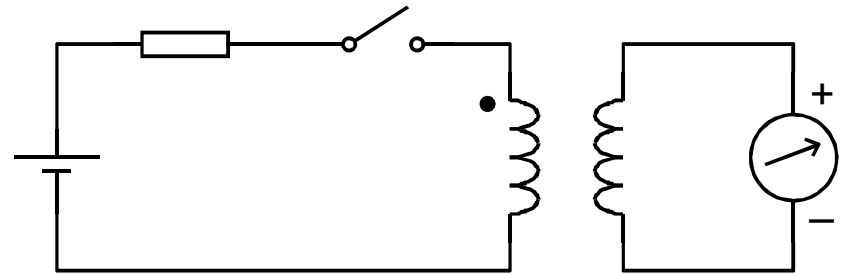


## Xác định đầu đặt dấu chấm bằng thực nghiệm

- Với thiết bị như MBA, ta không biết được cuộn dây được quấn ra sao, vì thế cần phải dùng các biện pháp thực nghiệm:

Một nguồn DC được dùng để kích từ cho một cuộn dây của MBA.

Đặt dấu chấm trên đầu có cực dương mà nguồn DC đặt vào.



Đóng công tắc: Nếu kim volt kế giạt lên → dấu chấm ở cuộn 2 đặt ở đầu nối với cực + của volt kế. Nếu kim giạt xuống → dấu chấm đặt ở đầu nối với cực – của volt kế.



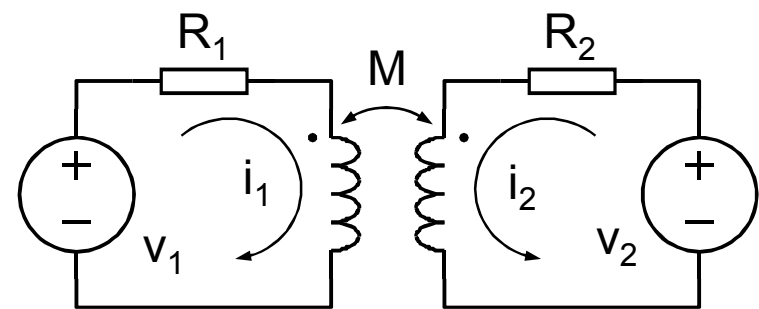
## Các phương trình với hồ cảm giữa các cuộn dây

➤ Cho hai cuộn dây có xác định dấu chấm, viết phương trình của các vòng mạch.

Chọn chiều cho các dòng điện.

*Qui ước: Nếu dòng điện đi vào đầu có dấu chấm (không dấu chấm), điện áp cảm ứng trong cuộn kia có cực dương tại đầu có dấu chấm (không dấu chấm). Dòng đi ra tại đầu có dấu chấm (không dấu chấm), điện áp cảm ứng tại đầu có dấu chấm (không dấu chấm) là âm.*

$$v_1 = i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt}$$
$$v_2 = i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt}$$



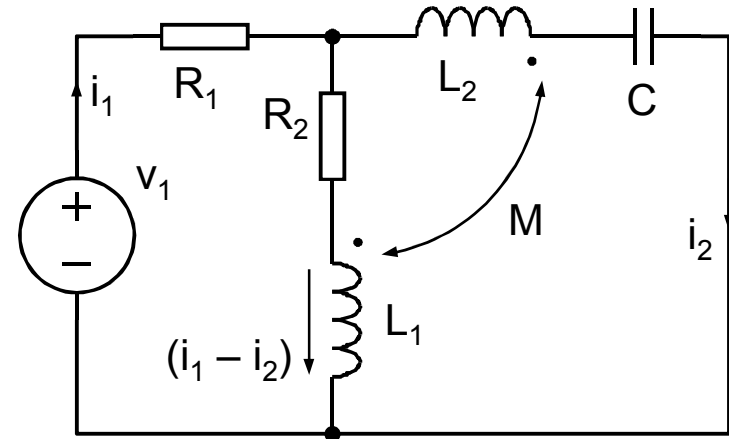


## Ví dụ

➤ VD 3.6: Viết các phương trình mạch vòng.

Giả sử điện áp của tụ điện là 0 lúc ban đầu

$$v_1 = i_1 R_1 + (i_1 - i_2) R_2 + L_1 \frac{d}{dt} (i_1 - i_2) - M \frac{di_2}{dt}$$



$$0 = \frac{1}{C} \int_0^t i_2 dt + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{d}{dt} (i_1 - i_2) + L_1 \frac{d}{dt} (i_2 - i_1) + M \frac{di_2}{dt} + (i_2 - i_1) R_2$$



## Bài tập

➤ Bài tập 3.15.