

Chuyên đề: Hiện tượng tự cảm và Năng lượng từ trường

Chuyên đề này cung cấp một cái nhìn tổng quan và chi tiết về hiện tượng tự cảm, một hiện tượng vật lý quan trọng liên quan đến sự biến thiên của dòng điện trong mạch, và năng lượng được tích trữ trong từ trường do dòng điện đó sinh ra.

I. Từ thông riêng của một mạch kín

1. Định nghĩa

Khi có dòng điện cường độ i chạy trong một mạch kín (C), dòng điện này gây ra một từ trường. Từ trường này lại gây ra một từ thông qua diện tích giới hạn bởi mạch (C). Từ thông này được gọi là **từ thông riêng** của mạch.

2. Công thức

Từ thông riêng qua mạch kín tỉ lệ thuận với cường độ dòng điện chạy trong mạch.

$$\Phi = L.i$$

- Φ : Từ thông riêng (Wb - Vebe)
- i : Cường độ dòng điện trong mạch (A - Ampe)
- L : Độ tự cảm (hay hệ số tự cảm) của mạch (H - Henry)

3. Ví dụ minh họa

1. **Ví dụ 1:** Một ống dây có độ tự cảm $L = 0,5 \text{ H}$. Khi có dòng điện $i = 2 \text{ A}$ chạy qua, hãy tính từ thông riêng của ống dây.

Giải: Áp dụng công thức $\Phi = L.i = 0,5 * 2 = 1 \text{ Wb}$.

2. **Ví dụ 2:** Một mạch điện có từ thông riêng là $0,02 \text{ Wb}$ khi dòng điện qua nó là 4 A . Tính độ tự cảm của mạch.

Giải: Từ công thức $\Phi = L.i$, suy ra $L = \Phi / i = 0,02 / 4 = 0,005 \text{ H} = 5 \text{ mH}$.

II. Hiện tượng tự cảm

1. Định nghĩa

Hiện tượng tự cảm là hiện tượng cảm ứng điện từ xảy ra trong một mạch có dòng điện mà sự biến thiên của từ thông qua mạch được gây ra bởi sự biến thiên của chính cường độ dòng điện trong mạch đó.

2. Giải thích hiện tượng

Khi cường độ dòng điện i trong mạch biến thiên (tăng hoặc giảm), từ thông riêng Φ qua mạch cũng biến thiên theo. Theo định luật cảm ứng điện từ, sự biến thiên từ thông này làm xuất hiện trong mạch một suất điện động cảm ứng. Suất điện động này được gọi là suất điện động tự cảm.

- Khi **i tăng** $\rightarrow \Phi$ tăng $\rightarrow$ xuất hiện suất điện động tự cảm **e_{tc}** có chiều chống lại sự tăng của dòng điện (ngược chiều dòng điện chính).
- Khi **i giảm** $\rightarrow \Phi$ giảm $\rightarrow$ xuất hiện suất điện động tự cảm **e_{tc}** có chiều chống lại sự giảm của dòng điện (cùng chiều dòng điện chính).

Như vậy, hiện tượng tự cảm có tác dụng làm cho dòng điện trong mạch biến thiên chậm hơn.

3. Ví dụ thực tế

1. **Ví dụ 1 (Đóng mạch):** Mắc nối tiếp một bóng đèn, một cuộn cảm có độ tự cảm lớn và một công tắc vào nguồn điện. Khi đóng công tắc, ta thấy đèn sáng lên từ từ chứ không sáng ngay lập tức. Nguyên nhân là do khi dòng điện tăng đột ngột, suất điện động tự cảm sinh ra chống lại sự tăng này, làm dòng điện tăng chậm hơn.
2. **Ví dụ 2 (Ngắt mạch):** Trong mạch điện trên, khi ta ngắt công tắc, dòng điện giảm đột ngột về 0. Suất điện động tự cảm sinh ra rất lớn, có chiều chống lại sự giảm của dòng điện (cùng chiều dòng điện cũ). Suất điện động này có thể gây ra tia lửa điện ở hai đầu công tắc.

III. Suất điện động tự cảm

1. Định nghĩa

Suất điện động tự cảm là suất điện động cảm ứng xuất hiện trong mạch khi dòng điện qua mạch biến thiên. Độ lớn của suất điện động tự cảm tỉ lệ với tốc độ biến thiên của cường độ dòng điện trong mạch.

2. Biểu thức suất điện động tự cảm

$$e_{tc} = -L * (\Delta i / \Delta t)$$

- **e_{tc} :** Suất điện động tự cảm (V - Vôn)
- **L :** Độ tự cảm của mạch (H - Henry)

- Δi : Độ biến thiên cường độ dòng điện (A)
- Δt : Khoảng thời gian xảy ra biến thiên (s)
- $\Delta i / \Delta t$: Tốc độ biến thiên của cường độ dòng điện (A/s)
- Dấu "-" biểu thị định luật Lenz: suất điện động tự cảm luôn có xu hướng chống lại nguyên nhân sinh ra nó.

3. Ví dụ minh họa

1. **Ví dụ 1:** Một cuộn cảm có $L = 50 \text{ mH} = 0,05 \text{ H}$. Dòng điện qua nó tăng đều từ 0 A đến 4 A trong thời gian 0,2 s. Tính độ lớn suất điện động tự cảm.

Giải: Tốc độ biến thiên dòng điện: $\Delta i / \Delta t = (4 - 0) / 0,2 = 20 \text{ A/s}$.

Độ lớn suất điện động tự cảm: $|e_{tc}| = L * |\Delta i / \Delta t| = 0,05 * 20 = 1 \text{ V}$.

2. **Ví dụ 2:** Dòng điện trong một ống dây có độ tự cảm 0,2 H giảm đều từ 5 A xuống còn 1 A trong 0,1 s. Suất điện động tự cảm xuất hiện trong ống dây là bao nhiêu?

Giải: $\Delta i = 1 - 5 = -4 \text{ A}$.

$e_{tc} = -L * (\Delta i / \Delta t) = -0,2 * (-4 / 0,1) = -0,2 * (-40) = 8 \text{ V}$. Dấu dương cho thấy e_{tc} cùng chiều dòng điện, chống lại sự giảm.

IV. Hệ số tự cảm (Độ tự cảm) của ống dây

1. Định nghĩa và Đơn vị

Độ tự cảm L là một đại lượng đặc trưng cho khả năng chống lại sự biến thiên dòng điện của một mạch điện. Nó chỉ phụ thuộc vào cấu tạo (hình dạng, kích thước) và môi trường xung quanh mạch điện (đặc tính từ của lõi), không phụ thuộc vào dòng điện qua nó.

Đơn vị của độ tự cảm trong hệ SI là **Henry (H)**. $1 \text{ H} = 1 \text{ Wb/A}$.

2. Công thức tính hệ số tự cảm của ống dây thẳng (solenoid)

Đối với một ống dây hình trụ có chiều dài **l** , tiết diện **S** , gồm **N** vòng dây, đặt trong không khí (hoặc chân không):

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} * (N^2/l) * S$$

Nếu ống dây có lõi làm bằng vật liệu từ có độ từ thẩm **μ** :

$$L = 4\pi \cdot 10^{-7} * \mu * (N^2/l) * S$$

- **N** : Số vòng dây
- **l** : Chiều dài ống dây (m)
- **S** : Tiết diện của một vòng dây (m^2)
- **μ** : Độ từ thẩm của lõi ($\mu \geq 1$, với không khí $\mu \approx 1$)

3. Ví dụ minh họa

1. **Ví dụ 1:** Một ống dây dài 50 cm (0,5 m), tiết diện 10 cm^2 (10^{-3} m^2), gồm 1000 vòng dây, đặt trong không khí. Tính độ tự cảm của ống dây.

Giải: $L = 4\pi \cdot 10^{-7} * (1000^2 / 0,5) * 10^{-3} \approx 2,51 \cdot 10^{-3} \text{ H} = 2,51 \text{ mH}$.

2. **Ví dụ 2:** Nếu luồn vào lòng ống dây ở ví dụ 1 một lõi sắt có độ từ thẩm $\mu = 2000$ thì độ tự cảm mới là bao nhiêu?

Giải: $L' = \mu * L = 2000 * 2,51 \cdot 10^{-3} = 5,02 \text{ H}$.

V. Năng lượng từ trường của ống dây

1. Định nghĩa

Khi có dòng điện chạy qua ống dây, trong lòng ống dây tồn tại một từ trường. Từ trường này tích trữ một năng lượng gọi là **năng lượng từ trường**. Năng lượng này được tạo ra bởi công của nguồn điện để chống lại suất điện động tự cảm khi thiết lập dòng điện.

2. Công thức tính năng lượng từ trường

$$W = (1/2) * L * i^2$$

- **W**: Năng lượng từ trường (J - Joule)
- **L**: Độ tự cảm của ống dây (H)
- **i**: Cường độ dòng điện tức thời qua ống dây (A)

3. Mật độ năng lượng từ trường

Năng lượng từ trường không tập trung ở dòng điện mà phân bố trong không gian có từ trường. Mật độ năng lượng từ trường (năng lượng trên một đơn vị thể tích) tại một điểm trong từ trường đều của ống dây được tính bằng công thức:

$$w = W / V = B^2 / (8\pi \cdot 10^{-7})$$

- **w**: Mật độ năng lượng từ trường (J/m³)
- **W**: Năng lượng từ trường (J)
- **V = S.l**: Thể tích không gian bên trong ống dây (m³)
- **B**: Cảm ứng từ bên trong ống dây (T - Tesla)

4. Ví dụ minh họa

1. **Ví dụ 1:** Một cuộn cảm có $L = 0,2 \text{ H}$, có dòng điện 10 A chạy qua. Tính năng lượng từ trường tích trữ trong cuộn cảm.

Giải: $W = (1/2) * L * i^2 = 0,5 * 0,2 * 10^2 = 10 \text{ J}.$

2. **Ví dụ 2:** Tính mật độ năng lượng từ trường bên trong một ống dây có cảm ứng từ $B = 0,5 \text{ T}$.

Giải: $w = B^2 / (8\pi \cdot 10^{-7}) = 0,5^2 / (8\pi \cdot 10^{-7}) \approx 99472 \text{ J/m}^3.$