

Tổng hợp kiến thức về Năng lượng từ trường của ống dây

Khi có dòng điện chạy qua một ống dây (cuộn cảm), bên trong và xung quanh ống dây sẽ xuất hiện một từ trường. Từ trường này tích trữ một dạng năng lượng gọi là năng lượng từ trường. Bài viết này sẽ tổng hợp đầy đủ các kiến thức liên quan đến chủ đề này.

I. Hiện tượng tự cảm - Nền tảng của năng lượng từ trường

Để hiểu về năng lượng từ trường, trước hết cần nắm vững hiện tượng tự cảm.

1. Định nghĩa

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

2. Suất điện động tự cảm

Khi dòng điện trong mạch biến thiên, từ thông riêng của mạch cũng biến thiên, làm xuất hiện một suất điện động cảm ứng gọi là suất điện động tự cảm. Suất điện động tự cảm có tác dụng chống lại sự biến thiên của dòng điện gây ra nó.

- Nếu dòng điện tăng, suất điện động tự cảm có chiều chống lại sự tăng đó (ngược chiều dòng điện).

- Nếu dòng điện giảm, suất điện động tự cảm có chiều chống lại sự giảm đó (cùng chiều dòng điện).

Công thức suất điện động tự cảm:

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

Trong đó:

- e_{tc} : Suất điện động tự cảm (V - Volt).
- L : Độ tự cảm của cuộn dây (H - Henry).
- ΔI : Độ biến thiên cường độ dòng điện (A - Ampe).
- Δt : Khoảng thời gian xảy ra biến thiên (s - giây).
- Dấu "-" thể hiện định luật Lenz, cho biết suất điện động tự cảm luôn chống lại nguyên nhân sinh ra nó.

II. Năng lượng từ trường của ống dây

1. Khái niệm năng lượng từ trường

Khi ta nối một ống dây vào nguồn điện, dòng điện trong ống dây không tăng lên đến giá trị ổn định ngay lập tức mà tăng dần từ 0. Nguyên nhân là do suất điện động tự cảm xuất hiện chống lại sự tăng của dòng điện. Nguồn điện phải thực hiện một công để thắng lại suất điện động tự cảm này và thiết lập dòng điện trong mạch.

Công mà nguồn điện sinh ra được chuyển hóa thành năng lượng tích trữ trong ống dây dưới dạng năng lượng của từ trường. Năng lượng này được gọi là **năng lượng từ trường**.

2. Công thức tính năng lượng từ trường

Năng lượng từ trường (W) của một ống dây có độ tự cảm L khi có dòng điện I chạy qua được tính bằng công thức:

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

Trong đó:

- **W**: Năng lượng từ trường (J - Joule).
- **L**: Độ tự cảm của ống dây (H - Henry).
- **I**: Cường độ dòng điện chạy qua ống dây tại thời điểm xét (A - Ampe).

Ví dụ minh họa:

1. **Ví dụ 1:** Một cuộn cảm có độ tự cảm $L = 0,5$ H. Khi có dòng điện cường độ 4 A chạy qua, năng lượng từ trường tích trữ trong cuộn cảm là bao nhiêu?

Lời giải:

Áp dụng công thức $W = \frac{1}{2}LI^2$:

$$W = \frac{1}{2} * 0,5 * (4)^2 = \frac{1}{2} * 0,5 * 16 = 4 \text{ J.}$$

Vậy năng lượng từ trường tích trữ trong cuộn cảm là 4 J.

2. **Ví dụ 2:** Một ống dây tích trữ một năng lượng từ trường là 25 mJ khi có dòng điện 2 A chạy qua. Tính độ tự cảm của ống dây.

Lời giải:

Đổi đơn vị: $W = 25 \text{ mJ} = 25 * 10^{-3} \text{ J.}$

Từ công thức $W = \frac{1}{2}LI^2$, suy ra $L = 2W / I^2$.

$$L = (2 * 25 * 10^{-3}) / (2)^2 = (50 * 10^{-3}) / 4 = 12,5 * 10^{-3} \text{ H} = 12,5 \text{ mH.}$$

Vậy độ tự cảm của ống dây là 12,5 mH.

III. Mật độ năng lượng từ trường

1. Khái niệm

Năng lượng từ trường không tập trung tại một điểm mà được phân bố trong toàn bộ không gian có từ trường. Để đặc trưng cho sự phân bố năng lượng này, người ta đưa ra khái niệm **mật độ năng lượng từ trường**.

Mật độ năng lượng từ trường (w) tại một điểm là năng lượng từ trường trong một đơn vị thể tích tại điểm đó.

2. Công thức tính mật độ năng lượng từ trường

Đối với từ trường đều bên trong một ống dây, mật độ năng lượng từ trường được tính bằng công thức:

$$w = W / V = B^2 / (2 * \mu_0 * \mu)$$

Trong đó:

- **w**: Mật độ năng lượng từ trường (J/m^3).
- **W**: Tổng năng lượng từ trường trong ống dây (J).
- **V**: Thể tích của không gian bên trong ống dây (m^3). $V = S * l$ (với S là tiết diện, l là chiều dài ống dây).
- **B**: Cảm ứng từ bên trong ống dây (T - Tesla).
- **μ_0** : Hằng số từ thẩm của chân không, $\mu_0 = 4\pi * 10^{-7}$ (T·m/A).

- μ : Độ từ thẩm tỉ đối của môi trường (vật liệu lõi). Với không khí hoặc chân không, $\mu \approx 1$.

Ví dụ minh họa:

1. **Ví dụ 1:** Tính mật độ năng lượng của một từ trường đều có cảm ứng từ $B = 0,2 \text{ T}$ trong không khí.

Lời giải:

Trong không khí, $\mu = 1$.

Áp dụng công thức $w = B^2 / (2\mu_0\mu)$:

$$w = (0,2)^2 / (2 * 4\pi * 10^{-7} * 1) = 0,04 / (8\pi * 10^{-7}) \approx 15915 \text{ J/m}^3.$$

2. **Ví dụ 2:** Một ống dây dài 50 cm, tiết diện 10 cm^2 , có 1000 vòng dây, không có lõi sắt ($\mu=1$). Cho dòng điện 5 A chạy qua ống dây. Tính năng lượng và mật độ năng lượng từ trường bên trong ống dây.

Lời giải:

Đổi đơn vị: $l = 50 \text{ cm} = 0,5 \text{ m}$; $S = 10 \text{ cm}^2 = 10 * 10^{-4} \text{ m}^2$.

- Số vòng dây trên một đơn vị chiều dài: $n = N / l = 1000 / 0,5 = 2000$ vòng/m.

- Cảm ứng từ trong lòng ống dây: $B = \mu_0\mu n I = (4\pi * 10^{-7}) * 1 * 2000 * 5 = 0,004\pi \text{ T} \approx 0,01257 \text{ T}$.

- Độ tự cảm của ống dây: $L = \mu_0\mu n^2 V = \mu_0\mu n^2 (S * l) = (4\pi * 10^{-7}) * 1 * (2000)^2 * (10 * 10^{-4} * 0,5) \approx 0,0025 \text{ H}$.

- Năng lượng từ trường: $W = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} * 0,0025 * (5)^2 = 0,03125 \text{ J}$.

- Thể tích lòng ống dây: $V = S * l = (10 * 10^{-4}) * 0,5 = 5 * 10^{-4} \text{ m}^3$.

- Mật độ năng lượng từ trường: $w = W / V = 0,03125 / (5 * 10^{-4}) = 62,5 \text{ J/m}^3$.

(Kiểm tra lại bằng công thức $w = B^2 / (2\mu_0\mu)$: $w = (0,004\pi)^2 / (2 * 4\pi * 10^{-7}) \approx 62,8 \text{ J/m}^3$. Sai số nhỏ do làm tròn trong quá trình tính toán).

IV. So sánh Năng lượng từ trường và Năng lượng điện trường

Năng lượng từ trường (trong cuộn cảm) và năng lượng điện trường (trong tụ điện) là hai dạng năng lượng cơ bản của trường điện từ. Chúng có nhiều điểm tương đồng.

Đặc điểm	Năng lượng từ trường (Cuộn cảm)	Năng lượng điện trường (Tụ điện)
Linh kiện lưu trữ	Cuộn cảm (ống dây)	Tụ điện
Điều kiện xuất hiện	Có dòng điện chạy qua	Có hiệu điện thế giữa hai bản tụ
Công thức năng lượng	$W = (1/2)LI^2$	$W = (1/2)CU^2 = (1/2)Q^2/C$
Dạng tồn tại	Năng lượng của từ trường	Năng lượng của điện trường
Công thức mật độ năng lượng	$w = B^2 / (2\mu_0\mu)$	$w = (\epsilon_0\epsilon E^2) / 2$

V. Ứng dụng của năng lượng từ trường

Năng lượng từ trường và các linh kiện lưu trữ nó (cuộn cảm) có rất nhiều ứng dụng trong thực tế:

- **Mạch lọc điện tử:** Cuộn cảm được dùng kết hợp với tụ điện để tạo ra các mạch lọc tần số, chỉ cho phép một dải tần số nhất định đi qua.
- **Mạch dao động:** Mạch LC (cuộn cảm - tụ điện) là thành phần cơ bản của các mạch dao động, tạo ra sóng điện từ trong các thiết bị thu phát sóng như radio, điện thoại.
- **Máy biến áp:** Hoạt động dựa trên hiện tượng cảm ứng điện từ, dùng để thay đổi hiệu điện thế xoay chiều.
- **Nam châm điện:** Tích trữ năng lượng từ trường để tạo ra lực từ mạnh, ứng dụng trong cần cẩu điện, phanh điện từ, rơ-le.
- **Lưu trữ năng lượng:** Các cuộn cảm siêu dẫn có thể lưu trữ một lượng năng lượng điện rất lớn dưới dạng năng lượng từ trường.