

BÀI GIẢNG KỸ THUẬT ĐIỆN CAO ÁP

CHƯƠNG 10 : QUÁ ĐIỆN ÁP THAO TÁC

- 10.1. Đặc điểm của quá điện áp thao tác
- 10.2. Quá điện áp khi đóng đường dây không tải
- 10.3. Quá điện áp khi có tự động đóng lại
- 10.4. Quá điện áp khi cắt bộ tụ điện và đường dây không tải
- 10.5. Quá điện áp khi cắt dòng điện lớn
- 10.6. Quá điện áp gây nên khi cắt mạch có dòng điện cảm bé
- 10.7. Quá điện áp khi chạm đất chập chờn
- 10.8. Hạn chế quá điện áp thao tác



◆ *Khái niệm*

- *Lưới điện cao áp có chứa các điện dung và điện cảm tập trung và phân bố, do vậy chúng là các mạch dao động.*
- *Trong các chế độ truyền tải công suất bình thường, tính chất giao động không xuất hiện.*
- *Một trong những nguyên nhân xuất hiện giao động trong năng lượng điện từ tích lũy trong các phần tử phản kháng đó là các thao tác theo kế hoạch hoặc sự cố.*
 - ✓ *Thao tác đóng cắt một lưới điện, thực chất là làm thay đổi trạng thái của lưới điện chuyển từ điều kiện tồn tại trước khi thao tác sang trạng thái khác xuất hiện sau khi thao tác.*
 - ✓ *Mỗi thao tác sẽ gây ra quá trình quá độ, thường kèm theo xuất hiện quá điện áp có thể gây nguy hiểm cho cách điện. Trong số các thao tác thì trước hết phải kể đến thao tác cắt các đường dây không tải gây nên hiện tượng hồ quang cháy lại trên các cực của máy cắt, cắt đường dây ở chế độ vận tốc không đồng bộ của máy phát, tự động đóng lại và một loạt các thao tác khác.*



- *Biên độ quá điện áp thao tác có thể phân tích thành hai thành phần : thành phần quá độ xếp chồng lên thành phần điện áp làm việc.*
- *Giá trị lớn nhất của quá điện áp phụ thuộc vào nhiều yếu tố, trong đó sơ đồ lưới điện, đặc tính của máy cắt đóng vai trò qua trọng. Ngoài các loại quá điện áp thao tác xuất hiện trong quá trình quá độ kkhí thao tác các thiết bị đóng cắt (máy cắt, dao cách ly,...) còn có loại quá điện áp do quá trình quá độ xảy ra khi cách điện của đường dây bị phóng điện gây hồ quang ổn định tại nơi ngắn mạch chạm đất một pha trong lưới điện trung tính cách điện hoặc trung tính nối đất qua cuộn dập hồ quang (quá trình liên tiếp dập tắt và cháy lại của hồ quang tại chỗ chạm đất là một dạng thao tác).*



■ *Quá điện áp thao tác có thể chia thành các dạng :*

✓ *quá điện áp pha tác động lên cách điện đối với đất*

✓ *quá điện áp dây tác động lên cách điện của giữa các pha*

✓ *quá điện áp xuất hiện giữa các tiếp điểm của thiết bị đóng cắt (máy cắt, dao cách ly).*

■ *C, c d¹ng qu, @iÖn , p néi bé ph¶i @-íc h¹n chÖ @Ó @¶m b¶o an toµn cho thiÖt b¶. C¬ sã kinh tÖ vµ kü thuËt cũa c, c biÖn ph, p b¶o vÖ chng qu, @iÖn , p bao hµm c¶ viÖc @, nh gi, thiÖt h¹i thng k^a do nh÷ng h-háng, ngõng cung cÊp @iÖn vµ sã ch÷a...*



◆ *Quá điện áp xuất hiện do thao tác đóng cắt - mét sự kiện ngẫu nhiên*

✓ *Quá điện áp xuất hiện do thao tác đóng cắt. Vậy xác suất xuất hiện quá điện áp này bằng bao nhiêu trong một khoảng thời gian nhất định*

✓ *Nếu coi sự xuất hiện QĐA như là một sự kiện ngẫu nhiên, chúng ta có thể đánh giá xác suất xuất hiện quá điện áp theo kinh nghiệm vận hành theo định luật Poisson.*

✓ *Để có cơ sở đánh giá, ta giả thiết xác suất thực hiện nhiều hơn hai, ba và nhiều hơn các sự kiện $P_{t,\Delta t}(i)$, ($i=1, 2, 3...$) trong một khoảng thời gian Δt đủ nhỏ là tương đối bé so với xác suất xuất hiện một sự kiện $P_{t,\Delta t}(1)$.*

$$P_{t,\Delta t}(1) \gg P_{t,\Delta t}(i) \quad i = 1, 2, 3, \dots$$

✓ *Điều kiện này tương ứng với sự kiện rất rời rạc. Trong toán học chúng ta gọi nó là sự kiện thông thường và có thể viết*

$$P_{t,\Delta t}(0) + P_{t,\Delta t}(1) \approx 1$$

✓ *$P_{t,\Delta t}(0)$ và $P_{t,\Delta t}(1)$ tương ứng là xác suất không xuất hiện hoặc xuất hiện một sự kiện trong khoảng thời gian $t + \Delta t$*

✓ *Trị số trung bình của số sự kiện xảy ra trong khoảng thời gian này*

$$0 \cdot P_{t,\Delta t}(0) + 1 \cdot P_{t,\Delta t}(1) + 2 \cdot P_{t,\Delta t}(2) + \dots + m P_{t,\Delta t}(m) + \dots \approx P_{t,\Delta t}(1)$$



✓ Số sự kiện trung bình xảy ra trong khoảng thời gian Δt bằng $P_{t,\Delta t}(1)/\Delta t$. Giới hạn của tỉ số này được gọi là cường độ sự kiện

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{P_{t,\Delta t}(1)}{\Delta t}$$

✓ Nếu $\lambda(t) = \lambda = \text{const}$ dòng các sự kiện được gọi là cố định. Trong trường hợp này xác suất xuất hiện sự kiện trong khoảng thời gian $(t, t + \tau)$ chỉ phụ thuộc vào khoảng thời gian τ mà không phụ thuộc vào t

✓ Xét hai khoảng thời gian $(0, \tau)$ và $(t, \tau + \Delta\tau)$ với $\Delta\tau$ đủ nhỏ. Khi đó xác suất trong khoảng thời gian $(0, \tau + \Delta\tau)$ không xuất hiện một sự kiện nào bằng

$$P_{\tau, \Delta\tau}(0) = P_{\tau}(0)P_{\Delta\tau}(0) = P_{\tau}(0)[1 - P_{\Delta\tau}(1)]$$

✓ Chuyển $P_{\tau, \Delta\tau}(0)$ sang về trái, chia cả hai vế cho và tìm giới hạn khi $\Delta\tau \rightarrow 0$

$$\frac{dP_{\tau}(0)}{d\tau} = \lambda P_{\tau}(0)$$

✓ Lấy tích phân phương trình trên đây với điều kiện ban đầu $P_{t=0}(0) = 1$

$$P_{\tau}(0) = e^{-\lambda\tau}$$

✓ Xác suất thực hiện một sự kiện trong khoảng thời gian $(0, \tau + \Delta\tau)$ bằng

$$P_{0, \tau + \Delta\tau}(1) = P_{\tau}(1)P_{\Delta\tau}(0) + P_{\Delta\tau}(1)P_{\tau}(0) = P_{\tau}(1)[1 - P_{\Delta\tau}(1)] + P_{\Delta\tau}(1)P_{\tau}(0)$$



✓ Chuyển $P_{\tau}(1)$ sang về trái, chia cả hai vế cho và tìm giới hạn khi $\Delta\tau \rightarrow 0$ ta có

$$P_{\tau}(0) = e^{-\lambda\tau}$$

✓ Lấy tích phân phương trình trên đây với điều kiện ban đầu $P_{t=0}(1)=0$ sẽ được

$$P_{0,\tau+\Delta\tau}(1) = P_{\tau t}(1)P_{\Delta\tau}(0) + P_{\Delta\tau t}(1)P_{\tau}(0) = P_{\tau t}(1)[1 - P_{\Delta\tau}(1)] + P_{\Delta\tau t}(1)P_{\tau}(0)$$

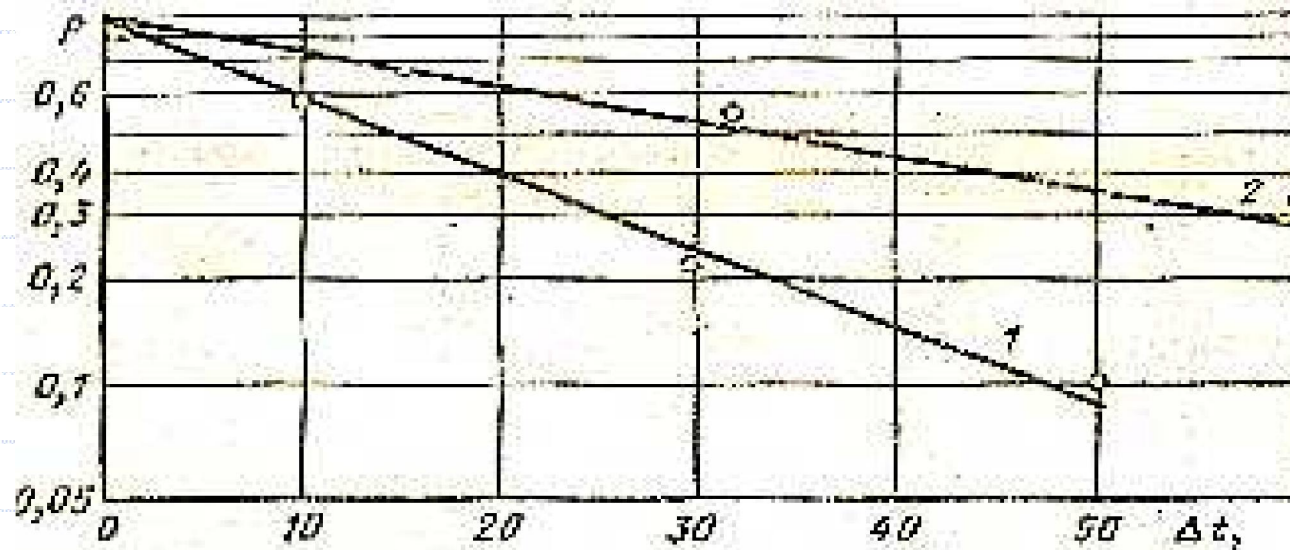
✓ Đây chính là xác suất xuất hiện một lần quá điện áp trong khoảng thời gian $(0, \tau)$.

$$\frac{dP_{\tau}(1)}{d\tau} = -\lambda P_{\tau}(1) + \lambda P_{\tau}(0) = -\lambda P_{\tau}(1) + \lambda e^{-\lambda\tau}$$

✓ Phân bố $P_{\tau}(0) = e^{-\lambda\tau}$ có thể xem như phân bố khoảng thời gian giữa các lần xuất hiện quá điện áp kế tiếp

$$P_{\tau}(1) = \lambda\tau e^{-\lambda\tau}$$

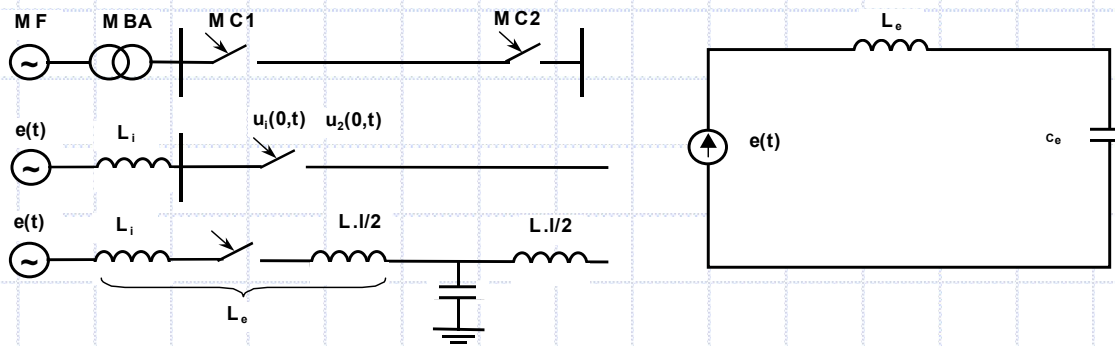
- ✓ Đây chính là xác suất xuất hiện một lần quá điện áp trong khoảng thời gian $(0, \tau)$.
- ✓ Phân bố $P\tau(0) = e^{-\lambda\tau d}$ có thể xem như phân bố khoảng thời gian giữa các lần xuất hiện quá điện áp kế tiếp.





♦ **Quá độ điện áp khi đóng đường dây không tải**

✓ Quá trình quá độ xuất hiện khi đóng đường dây không tải vào thanh góp của nhà máy điện hoặc trạm biến áp có thể thấy khi xem xét sơ đồ hình vẽ



Thao tác phổ biến nhất là đóng đường dây không tải bằng máy cắt MC1 sau đó để hoà đồng bộ với hệ thống bằng máy cắt MC2. Sau khi máy cắt MC1 đóng xuất hiện quá trình quá độ trên đường dây. Đường dây không tải chiều dài l. Thay thế nhà máy điện hoặc hệ thống cùng máy biến áp bằng nguồn sức điện động xoay chiều có điện cảm bằng Li.

✓ Điện áp lớn nhất xuất hiện tại cuối đường dây này. Có thể xác định trị số của quá điện áp này nếu biết đường cong điện áp quá độ u(l,t).

✓ Phương trình điện áp và dòng điện cho đường dây dài với các tham số rải R, L, G và C dưới dạng toán tử có dạng

$$\begin{cases} -\frac{dU(p)}{dx} = (R + pL)I(p) \\ -\frac{dI(p)}{dx} = (G + pC)U(p) \end{cases} \quad \longrightarrow \quad \frac{d^2U(p)}{dx^2} = \gamma(p)U(p)$$

$$\gamma(p) = \sqrt{(R + pL)(G + pC)}$$



Nghiệm của phương trình trên có dạng

$$\begin{cases} U(p, x) = A(p)e^{-\gamma(p)x} + B(p)e^{\gamma(p)x} \\ I(p, x) = \frac{A(p)}{Z_c(p)}e^{-\gamma(p)x} + \frac{B(p)}{Z_c(p)}e^{\gamma(p)x} \\ Z_c(p) = \sqrt{\frac{R + pL}{G + pC}} \end{cases}$$

Các hằng số $A(p)$ và $B(p)$ xác định từ điều kiện ban đầu

điện áp và dòng điện trên đường dây có thể biểu diễn dưới dạng tổng của hai sóng chạy từ hai đầu đường dây

sóng từ đầu tới cuối đường dây (sóng tới)

sóng ngược từ cuối đường dây trở về

nếu ta đóng nguồn xoay chiều $e(t) = Em \sin(\omega t + \varphi)$ vào đường dây hở mạch qua điện cảm Li

sóng lan truyền dọc theo đường dây từ đầu và bị suy yếu một ít về phía cuối đường dây và tại đó sóng sẽ phản xạ ngược trở về cùng với dấu với sóng tới. Sóng phản xạ trở về đến đầu đường dây, tiếp tục bị phản xạ ngược lại từ điện cảm Li về cuối đường dây..

Tóm lại các sóng tới trừ sóng đầu tiên và các sóng phản xạ đều xuất hiện do hiện tượng phản xạ nhiều lần từ hai đầu đường dây



Xem xét quá trình chuyển động liên tiếp của sóng trên đường dây tại các điểm nút và bằng cách cộng sóng tới và sóng phản xạ chúng ta có thể xác định điện áp cực đại tại điểm bất kỳ trên đường dây, trong đó có điểm cuối cùng đường dây ($x=l$).

Với các đường dây ngắn được đóng vào nguồn có sức điện động lớn (thời gian truyền sóng và hằng số thời gian nhỏ hơn rất nhiều nửa chu kỳ điện áp tần số công nghiệp), điện áp lớn nhất xuất hiện sau lần truyền sóng thứ nhất với điều kiện là đường dây được đóng vào nguồn tại thời điểm gần giá trị đỉnh của sức điện động nguồn.

Trong trường hợp tổng quát điện áp đạt giá trị đỉnh sau một số lần truyền sóng, nghĩa là sau khi cộng tổng một số sóng tới và sóng phản xạ. Các công thức tính toán theo sơ đồ một pha không có khó khăn lớn nhưng tương đối dài dòng.

Nhược điểm của phương pháp này là trước khi xây dựng đường diễn biến của quá trình quá độ không thể biết trước dạng của nó và thời điểm đạt giá trị cực đại. Mặc dù phương pháp này phản ánh tin cậy quá trình vật lý, nhưng nó không thuyết phục vì không cho phép nhìn nhận một cách tổng thể vấn đề.



Nếu chúng ta thể hiện các hằng số $A(p)$ và $B(p)$ qua điện áp và dòng điện tại các điểm nhất định, ví dụ như ở cuối đường dây $U(p,l)$ và $I(p,l)$.

$$\begin{cases} U(p,x) = U(p,l)ch\gamma(p)(l-x) + Z_c(p)I(p,l)sh\gamma(p)(l-x) \\ I(p,x) = \frac{U(p,l)}{Z_c(p)}sh\gamma(p)(l-x) + I(p,l)ch\gamma(p)(l-x) \end{cases}$$

Hệ phương trình trên cần có thêm các điều kiện ban đầu.

Với trường hợp đường dây hở mạch

$$I(p,l) = 0; \quad I(p,0) = \frac{U(p,l)}{Z_c(p)}sh\gamma(p)l$$

$$U(p,l) = U(p,l)ch\gamma(p)l$$

$$E(p) = U(p,0) + pL_i I(p,0)$$

Z_c gọi là tổng trở sóng của đường dây.

$E(p)$ là ảnh của sức điện động của nguồn

Giải các phương trình trên, ta có điện áp này dưới dạng toán tử $u(l,p) = \frac{E(p)}{chp\tau + pTshp\tau}$

Nếu đóng nguồn vào thời điểm sức điện động e có giá trị cực đại ($\varphi=90^\circ$)

$$u(l,p) = \frac{E_m}{p} \frac{p^2}{p^2 + \omega^2} \frac{1}{chp\tau + pTshp\tau} = \frac{E_m}{p} \frac{H(p)}{F(p)}$$

Sử dụng triển khai, ta tìm được gốc

$$u(l,t) = A_{od} \cos \omega t - \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta_k t} \cos \omega_k t$$

ω_k là tần số góc của những giao động riêng



A_{od} là biên độ của thành phần cưỡng bức xác định bởi

$$A_{od} = \frac{E_m}{\cos \omega \tau - \omega \tau \sin \omega \tau}$$

A_k là biên độ của thành phần tự do xác định bởi

$$A_k = E_m \frac{\omega_k^2}{\omega_k^2 - \omega^2} \frac{2}{\cos \omega_k \tau + \frac{\omega_k \tau}{\sin \omega_k \tau}}$$

δk- hệ số tắt dần của hài bậc k

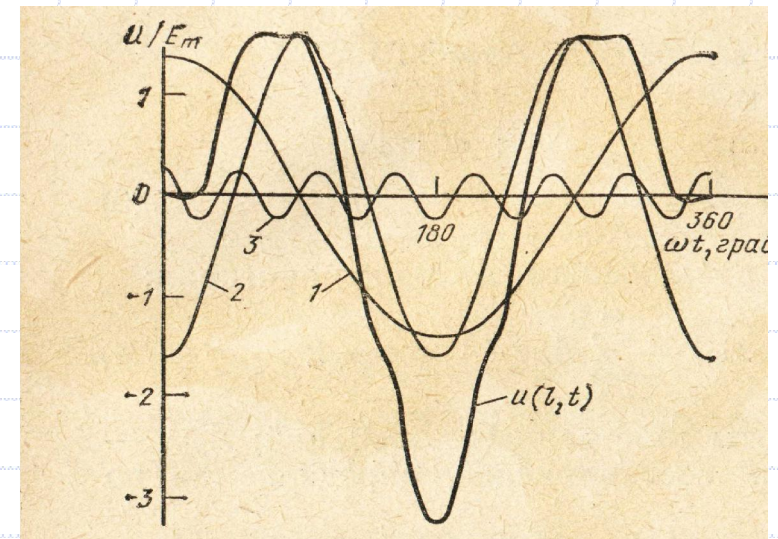
Biên độ của các giao động tự do hình thành một chuỗi đôi dấu, mỗi số hạng sau sẽ giảm dần khi số thứ tự k tăng

$$A_{od} - A_1 + A_2 - A_3 + A_4 + \dots = 0$$

A₁ > A_{od}, nghĩa là biên độ thành phần giao động thứ nhất lớn hơn biên độ của giao động cưỡng bức khác với trường hợp mạch giao động một tần số A₁ = A_{od}

Đường cong điện áp u(l,t) ở cuối đường dây hở mạch và các thành của nó

- 1 - thành phần cưỡng bức;*
- 2- sóng hài bậc nhất (ωl/ω=2);*
- 3- sóng hài bậc hai (ωl/ω=6,9).*
với Li/Zc=0,29, l=500km).



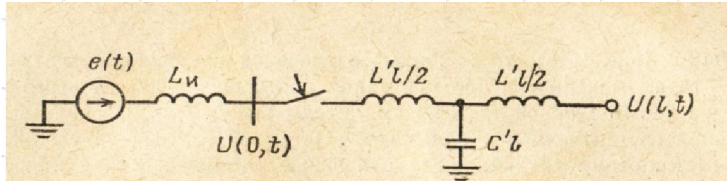


giá trị lớn nhất của thành phần cưỡng bức và hai thành phần tự do đầu tiên trùng nhau vào thời điểm $t = \pi/\omega$

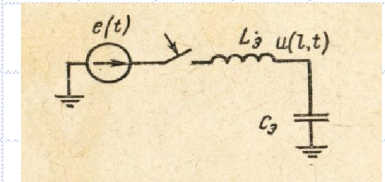
$$U_{\max} = A_{od} - A_1 + A_2 \quad \text{Hệ số kích động}$$

$$K = \frac{U_{\max}}{A_{od}} \approx 1 + \frac{A_1 + A_2}{A_{od}} > 2$$

Đặc điểm của quá trình quá độ có thể chỉ ra nếu chúng ta biến đổi sơ đồ thay thế hình T như trên hình vẽ



Ta biến đổi sơ đồ thành một mạch giao động gồm điện cảm L_e nối tiếp với điện dung C_e



với các đường dây chiều dài không lớn có thể coi

$$L_e = L_i + L_{dd} / 2 = L_i + L' \cdot l / 2$$

$$C_e = C_{dd} = C' \cdot l$$

l là chiều dài đường dây

Điện áp ở cuối đường dây trùng với điện áp trên điện dung C bao gồm thành phần cưỡng bức và thành phần giao động tự do thứ nhất

$$u(l,t) = u_{od} + u_{td} = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \left\{ \sin(\omega t + \varphi) - \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2} e^{-\delta t} \sin(\omega_1 t + \varphi_1) \right\}$$

$$\varphi_1 = \arctg \left(\frac{\omega_1}{\omega} \operatorname{tg} \varphi \right)$$

$$\omega_1 = 1 / \sqrt{L_e / C_e}$$

ω là tần số của nguồn

tần số của giao động tự do

$\delta = R / 2L_e$ là hệ số tắt dần



Như vậy, điện áp lớn nhất ở cuối đường dây xác định chủ yếu bởi góc đóng φ và tần số giao động ω_1 . Các thông số này quyết định biên độ của giao động tự do

$$A = E_m \frac{\omega_1^2}{\omega_1^2 - \omega^2} \sqrt{\sin^2 \omega t + \left(\frac{\omega}{\omega_1} \cos \varphi \right)^2}$$

Trong thực tế tỉ số tần số giao động thứ nhất có thể lớn hơn tần số công nghiệp $\omega_1 / \omega > 1$

với $\omega_1 / \omega > 1$ biên độ của thành phần tự do có trị số lớn nhất với góc đóng gần 90° hoặc 270°

Đối với các đường dây tải điện SCA (500 kV) để tăng khả năng tải của đường dây người ta sử dụng đầu nối tiếp điện dung để bù cảm kháng của đường dây (thiết bị bù ngang).

Với các đường dây này tỉ số $\omega_1 / \omega < 1$

Nếu $\omega_1 / \omega < 1$ biên độ thành phần tự do có trị số lớn nhất với góc đóng gần 0° hoặc 180°

Xem xét đường cong quá độ trong một số trường hợp riêng

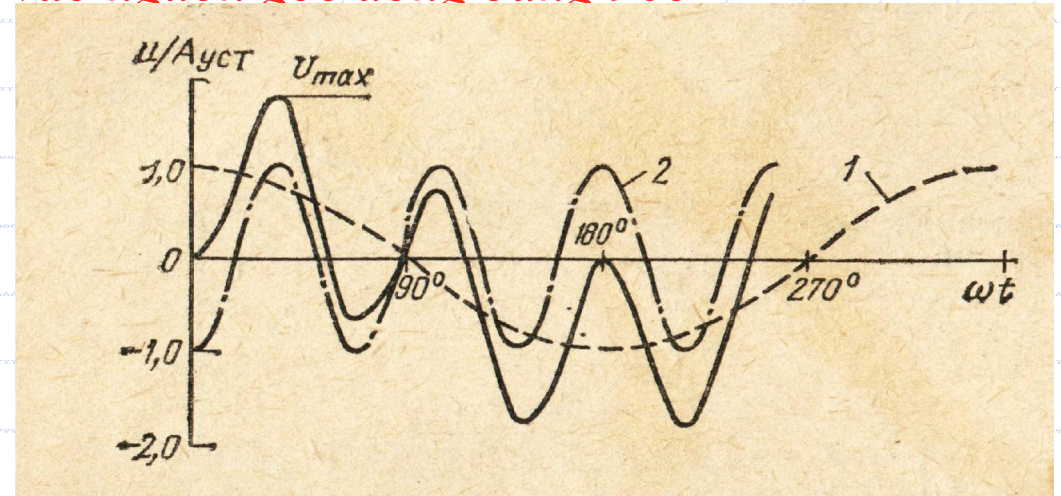


Trường hợp : đóng đường dây không tải vào nguồn góc đóng bằng 90°

$$\omega_1 / \omega = 5$$

1 : thành phần cưỡng bức

2- thành phần tự do

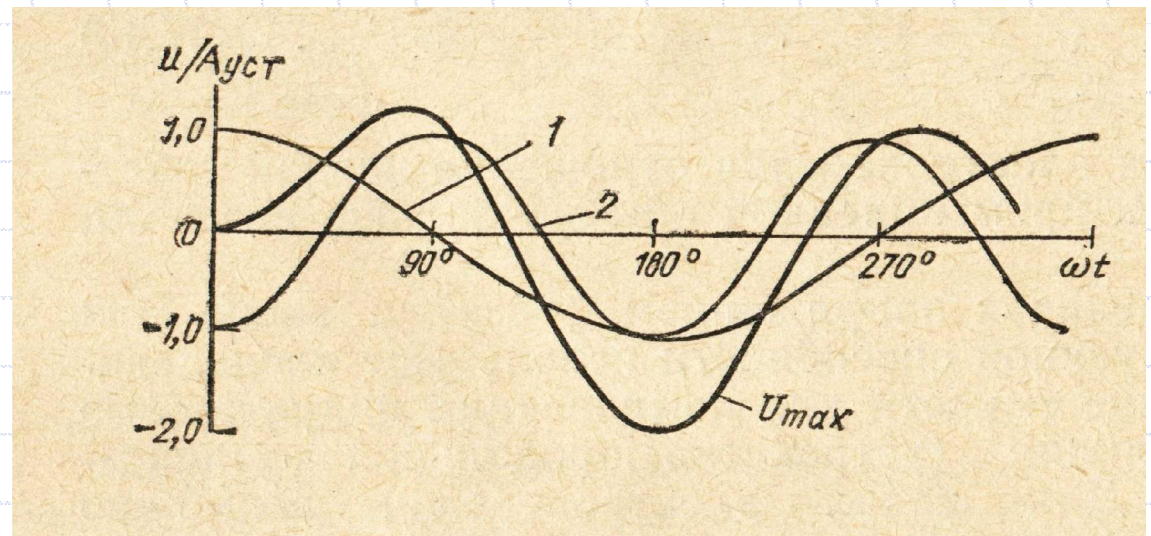


Điện áp quá độ đạt trị số cực đại trong nửa chu kỳ giao động tự do đầu tiên. Vào thời điểm đó điện áp của chế độ cưỡng bức chưa kịp thay đổi đáng kể

$$\omega_1 / \omega = 2$$

1 : thành phần cưỡng bức

2- thành phần tự do



trị số lớn nhất vào đỉnh thứ hai

trường hợp $(\omega_1 / \omega = 0,5)$

điện áp có giá trị cực đại khi góc đóng $\varphi=0$

Điện áp trong quá trình quá độ đạt giá trị cực đại tại đỉnh thứ hai

trường hợp $\omega_1 = \omega$ *trong thực tế rất hiếm*

Đó là trường hợp cộng hưởng tần số công nghiệp

Điện áp trong mạch giao động viết bởi biểu thức

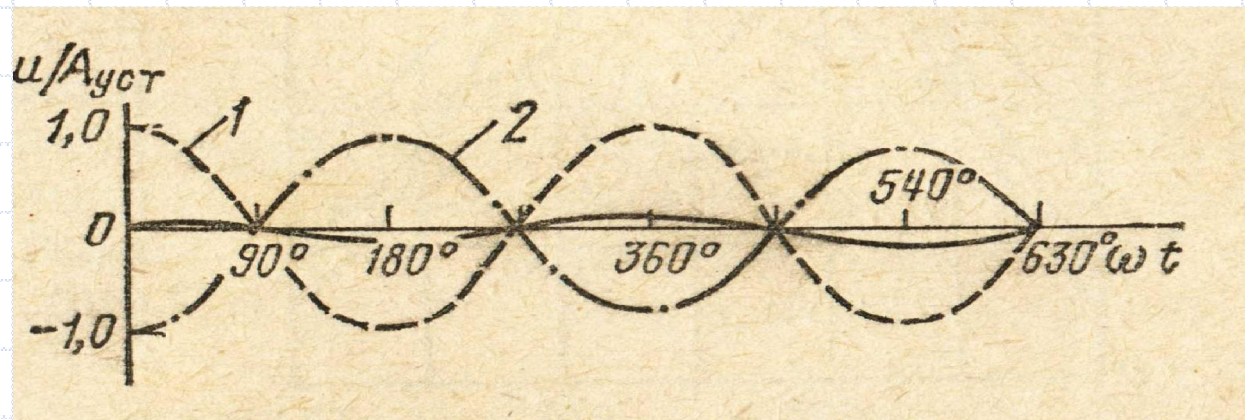
$$u(l,t) = E_m \frac{\omega L_e}{R} (1 - e^{-\delta t}) \sin(\omega_1 t + \varphi_1)$$

Điện áp tăng từ từ và đạt giá trị lớn nhất của thành phần cưỡng bức

$$E_m \frac{\omega L_e}{R} = (10 \div 20) E_m$$

1 : thành phần cưỡng bức

2- thành phần tự do





Các đặc điểm đã xét đối với quá trình quá độ trong mạch giao động đơn giản vẫn không đổi đối với đường dây, trên đó sẽ có vô số hài giao động tự do

Với nguồn $e(t) = E_m \sin(\omega t + \varphi)$, điện áp ở cuối đường dây

$$u(l, t) = A_{od} \sin(\omega t + \varphi) - \sum_{k=1}^{\infty} A_k e^{-\delta_k t} \sqrt{\sin^2 \varphi + \left(\frac{\omega}{\omega_k} \cos \varphi\right)^2} \sin(\omega_k t + \varphi_k) \quad \varphi_k = \arctg\left(\frac{\omega_k}{\omega} \operatorname{tg} \varphi\right)$$

Tính hệ số tắt dần δ_k rất khó

Theo kết quả đo trên các đường dây 500 kV trị số trung bình δ_k vào khoảng 30 s^{-1} tức là vào khoảng $0,1 \text{ l/độ}$, có nghĩa là biên độ các giao động tự do giảm khoảng 45% sau một chu kỳ điện áp tần số công nghiệp

Hệ số kích động (hệ số quá áp) phụ thuộc vào góc pha đóng đường dây

Góc đóng càng xa 90° biên độ các giao động riêng càng bé

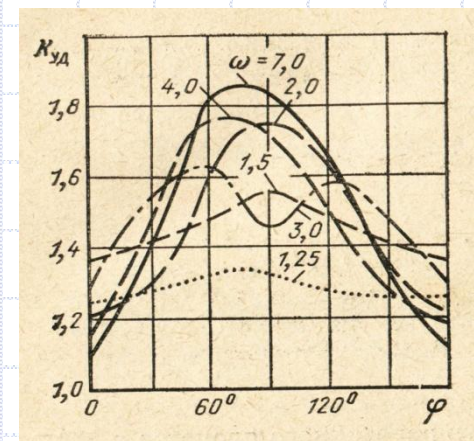
Tần số các giao động riêng càng gần tần số của nguồn, trùng lặp các điểm cực đại A_{od} và A_k càng chậm

Trong trường hợp này hệ số tắt dần có vai trò quan trọng

Phụ thuộc hệ số kích động vào góc pha đóng đường dây ($\delta = 30 \text{ l/s}$)

Trên hình vẽ $\omega = \omega_l / 314$ trong mạch giao động đơn

giản





◆ *Quá điện áp khi có tự động đóng lại*

Việc sử dụng thiết bị tự động đóng lại (TĐL) dựa trên cơ sở là

80-90% các sự cố của đường dây trên không là các sự cố thoáng qua : giới hạn dưới (~80%) thường gặp trong các lưới điện 6-110 kV còn giới hạn trên thường gặp đối với các đường dây trên không từ 220 kV trở lên

Những hư hỏng thoáng qua thường xảy ra do

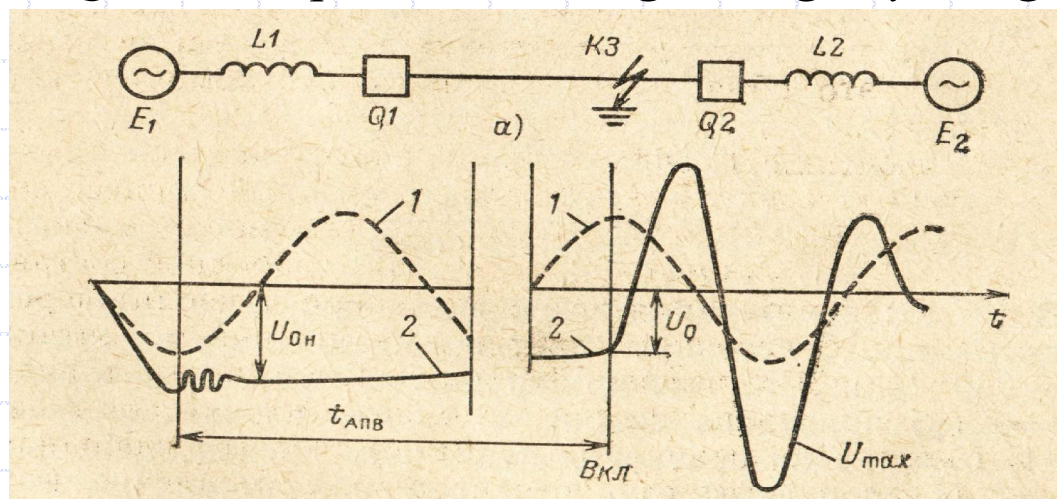
sử bị phóng điện bề mặt do sét đánh

do gió mạnh làm dây dẫn chạm nhau hoặc phóng điện trong không khí đến các vật bên cạnh

Khoảng 10-20% các trường hợp hư hỏng còn lại là sự cố duy trì hoặc bán duy trì.

Như vậy đa số các trường hợp hư hỏng trên các đường dây tải điện trên không nếu sau khi cắt máy cắt ở hai đầu đường dây một khoảng thời gian đủ để cho môi trường chỗ hư hỏng phục hồi tính chất cách điện ta đóng trở lại thì đường dây có thể tiếp tục làm việc bình thường, nhanh chóng khôi phục cung cấp điện, giữ vững chế độ đồng bộ và ổn định của hệ thống

Quá trình quá độ khi đóng đường dây bằng tự động đóng lại



a) sơ đồ;

b) đường cong điện áp :

1 - sức điện động nguồn;

2 - điện áp của đường dây

Chu trình TĐL có thể chia ra các giai đoạn sau

cắt đường bằng máy cắt $Q2$ gần với điểm sự cố ngắn mạch, đường dây chuyển sang chế độ cung cấp điện từ một phía

cắt pha không bị sự cố bằng máy cắt $Q1$, làm gián đoạn dòng điện dung khi nó đi qua trị số không tương ứng với thời điểm điện áp đạt giá trị cực đại trên các pha này

đóng lại đường dây hở mạch bằng máy cắt $Q1$

đóng máy cắt $Q2$ và khôi phục sơ đồ làm việc bình thường