

BÀI GIẢNG KỸ THUẬT ĐIỆN CAO ÁP

CHƯƠNG 11 : QUÁ ĐIỆN ÁP XÁC LẬP

11.1. Tăng điện áp ở cuối đường dây hở mạch

11.2. Quá điện áp xác lập khi ngắn mạch

11.3. Cộng hưởng và cộng hưởng sắt

11.3. Quá điện áp tần số công nghiệp trong chế độ không đủ pha

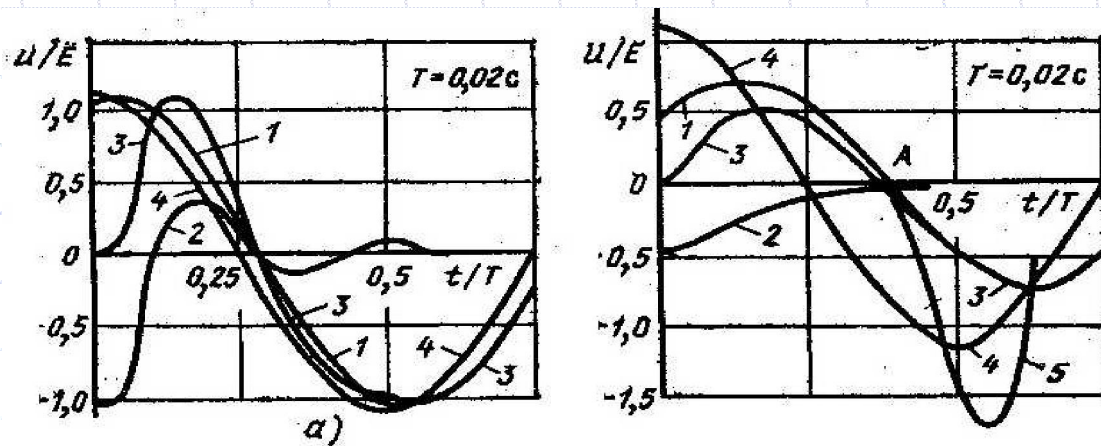
11.5. ảnh hưởng sự bão hòa của máy biến áp đến tăng điện áp trong mạng trung tính nối đất.

11.6. Sóng hài trong truyền tải điện.

11.3.5. Phương pháp bảo vệ chống quá điện áp cộng hưởng sắt



Sau khi nối điện trở lại xuất hiện quá trình quá độ. Cường độ của giao động này càng yếu nếu khác biệt giữa điện áp xác lập khi đóng điện trở và khi không có nó càng nhỏ. Điều kiện này thoả mãn nếu như với $|Z|$ là mô đun tổng trở đầu vào của đường dây.



Quá trình quá độ khi đóng đường dây bằng máy cắt có ghép điện trở son

A : Thời điểm đóng điện trở son

Với $R=Z$ (hình a) thành phần tự do của quá trình quá độ từ việc đóng tiếp điểm 2 tắt dần trong một nửa chu kỳ tần số công nghiệp (đường 2) và trên đường dây điện áp ổn định (đường 3) về cơ bản khác rất ít so với điện áp ở chế độ xác lập sau khi đóng tiếp điểm 1 (đường 4) Vì vậy quá trình quá độ trong giai đoạn 2 thể hiện yếu và do vậy quá điện áp khi đóng tiếp điểm chính sẽ không xuất hiện

Trên hình b cho thấy quá trình quá độ khi tăng điện trở R bằng $5Z$. Khi đóng tiếp điểm phụ, nghĩa là đóng điện trở R (giai đoạn đầu của quá trình quá độ), điện áp giao động không tuần hoàn và không tăng cao. Điện áp trên đường dây (đường 3) giảm về biên độ và dịch chuyển pha góc 45° so với điện áp (đường 4) sau khi nối điện trở. Vì vậy sau khi đóng tiếp điểm chính xuất hiện quá điện áp (đường 5) với biên độ bằng thành phần tự do xác định bởi hiệu điện áp giữa hai đường 3 và 4 vào thời điểm trước khi đóng (giai đoạn 2 của quá trình quá độ). Giai đoạn này sẽ làm xuất hiện quá điện áp



Từ đây suy ra là để hạn chế quá điện áp khi đóng đường dây không tải cần sử dụng điện trở son có trị số không lớn hơn tổng trở sóng của đường dây. Điện trở này cũng có hiệu quả hạn chế quá điện áp khi cắt ngắn mạch không đối xứng hoặc chế độ không đồng bộ, bởi vì quá trình đóng và cắt trong hai trường hợp này tương tự nhau

◆ *Cắt đường dây không tải*

Trường hợp tối ưu khi cắt đường dây không tải là khi không xuất hiện hồ quang cháy lại. Vì vậy nhiệm vụ của điện trở son không phải dập được thành phần giao động tự do khi hồ quang cháy lại, mà là việc giảm điện áp phục hồi đến trị số không gây cháy lại của hồ quang

Có thể đạt được điều này nếu chọn R gần bằng mô đun tổng trở đầu vào của đường dây, tức là cần tạo điều kiện giao động phi chu kỳ. Lúc này có thể bỏ qua ảnh hưởng của điện cảm bên trong của nguồn, và do đó cũng không cần tính điện áp do hiệu ứng điện dung của đường dây

Nếu đường dây không có kháng, có thể thay thế một cách gần đúng bằng điện dung tập trung ($|Z|=Xđv=XC$).



Điện áp trên đường dây sau khi tách tiếp điểm chính có thể viết dưới dạng

$$U_C = E \left[\frac{X_C}{\sqrt{R^2 + X_C^2}} \cos \left(\omega t + \arctg \frac{R}{X_C} \right) + \frac{R^2}{R^2 + X_C^2} e^{-\frac{t}{R.C}} \right]$$

Quá trình quá độ khi cắt đường dây không tải

sơ đồ đường dây;

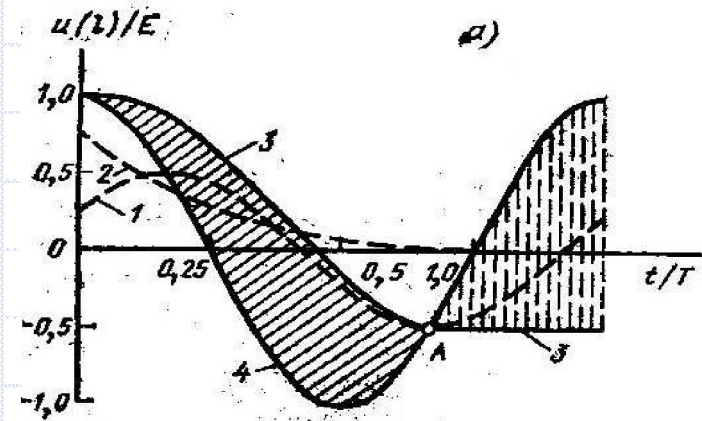
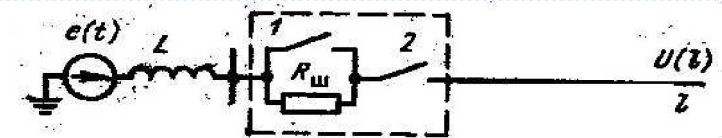
đường cong điện áp với $R=3X_C$;

1 - thành phần cưỡng bức;

2 - thành phần tự do

3-điện áp xác lập;

4- sức điện động của nguồn



Hiệu giữa điện áp tổng (đường 3) và sức điện động của nguồn (đường 4) chính là điện áp khôi phục trên các tiếp điểm chính của máy cắt. vào thời điểm A, khi dòng điện đường dây qua trị số không, điện áp của đường dây có giá trị lớn nhất, tiếp điểm phụ được tách ra, trên đường dây còn điện áp không đổi. Phần gạch chéo bằng nét đậm là điện áp khôi phục giữa các tiếp điểm chính, còn phần gạch bằng nét đứt là điện áp xuất hiện trên tiếp điểm phụ của máy cắt



Nếu tăng trị số điện trở son R, điện áp phục hồi trên các tiếp điểm chính tăng nhưng lại làm giảm điện áp trên tiếp điểm phụ. Với $R=(2,5-3)Xđv$ điện áp phục hồi ở cả hai giai đoạn đều gần như nhau. Nhưng tiếp điểm phụ cắt dòng điện bé hơn tiếp điểm chính. Nên khoảng khe hở giữa các tiếp điểm phụ có điều kiện thuận lợi hơn để phục hồi cách điện. Vì vậy điện trở son tối ưu bằng 1,5 đến 2 lần Xđv. Với đường dây 200 km, điện trở này vào khoảng 3000-4000 Ω . Trong thực tế người ta sử dụng điện trở $R = 3000 \Omega$

Biện pháp hạn chế quá điện áp có hiệu quả khi đóng đường dây hoặc tự động đóng lại là điều khiển thời điểm đóng máy cắt. Trị số quá điện áp phụ thuộc vào thời điểm đóng cắt đã được xem xét ở phần đầu chương. Nó có trị số bé nhất nếu đóng máy cắt vào thời điểm điện áp trên tiếp điểm của nó bé nhất.

Khả năng điều khiển thời điểm đóng máy cắt của các loại máy cắt cao áp phụ thuộc rất nhiều vào kết cấu của loại máy cắt, và một phần vào cơ cấu điều khiển

♦ **Tình trạng áp ở cuối R-êng dọc hệ m¹ch**

Trong chế độ đồng bộ hoặc đột ngột sa thải phụ tải đường dây còn lại hở mạch được nối với nguồn sức điện động hình sin

Đóng đường dây hở mạch vào nguồn sức điện động hình sin

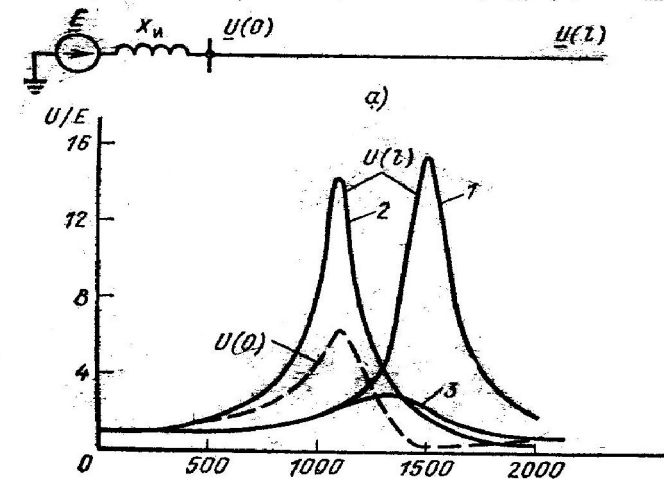
sơ đồ;

đường cong điện áp;

1 - $X_i=0$;

2 - $X_i=0,5Z$;

3 - $X_i=0$ có xét đến ảnh hưởng vàng quang



Do dòng điện ở cuối đường dây bằng 0, điện áp và dòng điện ở đầu đường dây liên hệ với điện áp ở đầu đường dây bởi biểu thức sau

$$\begin{cases} \underline{U}(0) = \underline{U}(l) \operatorname{ch} \underline{\gamma} l \\ \underline{I}(0) = \frac{\underline{U}(l)}{Z} \operatorname{ch} \underline{\gamma} l \end{cases}$$

l là hằng số lan truyền

Nếu bỏ qua vàng quang của dây dẫn

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R' + j\omega L') j\omega C'} = j\omega \sqrt{L' C'} \sqrt{1 + \frac{R'}{j\omega L'}}$$

R', L', C' là điện trở tác dụng, điện cảm và điện dung của một đơn vị chiều dài đường dây (thông thường tính cho 1 km chiều dài).



đối với các đường dây trên không $R' \ll j\omega L'$

$$\begin{aligned} \underline{\gamma} &= j\omega \sqrt{L'C'} \sqrt{1 + \frac{R'}{j\omega L'}} \approx j\omega \sqrt{L'C'} \left(1 + \frac{R'}{j2\omega L'} \right) \\ &= \frac{R'}{2\sqrt{\frac{L'}{C'}}} + j\omega \sqrt{L'C'} = \alpha + j\beta \end{aligned}$$

α phụ thuộc vào tần số

$\beta = \omega/c = 1,05 \cdot 10^{-3}$ là hệ số thay đổi pha

Tổng trở sóng của đường dây Z bằng

$$\underline{Z} = \sqrt{\frac{(R' + j\omega L')}{j\omega C'}} \approx \sqrt{\frac{L'}{C'}} \left(1 + \frac{R'}{j2\omega L'} \right)$$

Nếu sơ đồ đường dây cách xa điều kiện cộng hưởng thì điện trở R' ít ảnh hưởng đến tần số ω của nguồn

$$\begin{cases} \underline{U}(0) = \underline{U}(l) \cos \beta l \\ \underline{I}(0) = \frac{\underline{U}(l)}{\underline{Z}} \sin \beta l \end{cases}$$

Tỉ số điện áp ở cuối đường dây và điện áp ở đầu đường dây được gọi là hệ số truyền tải

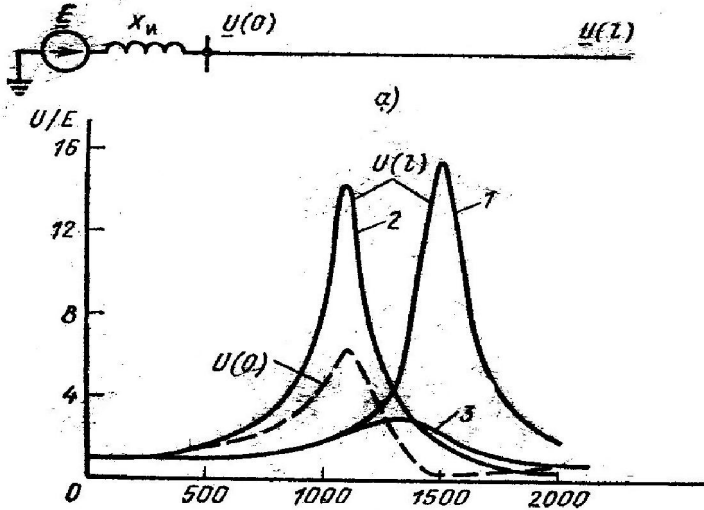
$$\underline{K} = \frac{\underline{U}(l)}{\underline{U}(0)} = \frac{1}{\cosh \underline{\gamma} l} = \frac{1}{\cosh \alpha l \cos \beta l + j \sinh \alpha l \sin \beta l}$$

Bởi vì : $\alpha l \ll 1$; $\cosh \alpha l \approx 1$; $\sinh \alpha l \approx \alpha l$ nên

$$\underline{K} = \frac{1}{\cos \beta l + j \frac{\alpha}{\beta} \beta l \sin \beta l}$$



đồ thị $U(l)$ vào chiều dài đường dây l với giả thiết là $U(0)=E$



Đường cong chỉ rõ tính chất cộng hưởng của đường dây

$$T_1 = \frac{2\pi}{\omega_1} = \frac{4l}{c} = 4\sqrt{L'C'}l = \frac{4\beta l}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega}$$

Cộng hưởng xuất hiện khi $\beta l = \pi/2$.

Với tần số $f=50$ Hz,
cộng hưởng xuất hiện khi chiều dài đường dây bằng 1500 km
tần số giao động riêng bằng tần số giao động của nguồn

tính điện áp ở cuối đường dây cộng hưởng cần xét thêm điện trở R'

$$\underline{U}(l) = \frac{\underline{U}(0)}{\frac{\pi}{2\beta}} = \frac{2}{\pi} \frac{\underline{U}(0)}{\frac{R'}{2\sqrt{\frac{L'}{C'}}} \frac{1}{\sqrt{L'C'}}}$$

$$= \frac{4}{\pi} \frac{\omega L'}{R'} \underline{U}(0) = \frac{4}{\pi} Q \underline{U}(0)$$

Tổng trở đầu vào của đường dây hở mạch

$$\underline{Z}_{dv} = Z \frac{\underline{U}(l) \cos \beta l}{j \underline{U}(l) \sin \beta l} = -jZ \cot \beta l$$

Với $\beta l < \pi/2$, chiều dài đường dây nhỏ hơn 1500 km. tổng trở đầu vào mang tính chất dung



Đối với các đường dây ngắn điện áp đến 220 kV

(đường dây ngắn βl bé, $\cos \beta l \approx 1$; $\sin \beta l \approx \beta l$)

$$\underline{Z}_{dv} = Z \frac{\underline{U}(l) \cos \beta l}{j \underline{U}(l) \sin \beta l} = -j \frac{Z}{\beta l} = -j \sqrt{\frac{L'}{C'}} \frac{1}{\omega \sqrt{L' C'} l} = -j \frac{1}{\omega C' l}$$

Có nghĩa là những đường dây ngắn có thể thay thế bằng các điện dung tập trung

Các đường dây có chiều dài từ 200-300 km, $\cos \beta l \approx 1 - \frac{(\beta l)^2}{2}$

$$\sin \beta l \approx \beta l$$

do đó

$$\underline{Z}_{dv} = -jZ \frac{1 - (\beta l)^2}{\beta l} = -j \left(\frac{\omega L' l}{2} \frac{1}{\omega C' l} \right) \quad \text{Biểu thức này ứng với sơ đồ thay thế hình T}$$

Chiều dài đường dây càng lớn, sai số của sơ đồ thay thế hình T càng lớn vì vậy phải dùng sơ đồ thay thế với các tham số phân bố rải của đường dây dài



Nếu nguồn có điện trở trong bằng X_i , điện áp tại đầu đường dây bằng

$$\underline{U}(0) = \underline{E} \frac{-jX_{dv}}{jX_i - jX_{dv}} = \underline{E} \frac{jX_{dv}}{jX_{dv} - jX_i}$$

Điện áp ở cuối đường dây bằng

$$\underline{U}(l) = K \underline{U}(0)$$

đường cong quan hệ $U(0)$ và $U(l)$ phụ thuộc vào chiều dài đường dây được xây dựng với $X_i=0,5Z$ (đường 2). Điểm cộng hưởng dịch chuyển về phía chiều dài đường dây ngắn hơn so với trường hợp $X_i=0$ bởi vì điện cảm của đường dây được bổ sung thêm điện cảm của nguồn

Các đường cong tương tự có thể xây dựng với chiều dài đường dây không đổi nhưng điện cảm của nguồn thay đổi, tương ứng với các trường hợp khi thay đổi số lượng tổ máy phát của nhà máy

Các đường cong và các phương trình trên đây cho thấy là trong trường hợp đường dây dài hở mạch nối với nguồn có điện trở trong X_i có thể làm tăng điện áp do dòng điện dung của đường dây đi qua điện cảm của nguồn [$U(0) > E$] và điện cảm của đường dây [$U(l) > U(0)$]



Hiệu ứng này được gọi là hiệu ứng điện dung được thể hiện rõ nhất với đối với các đường dây siêu cao áp có chiều dài lớn. Cộng hưởng là một trường hợp đặc biệt của hiệu ứng này. Cộng hưởng xuất hiện khi $X_i = X_{dv}$ nghĩa là khi điện trở đầu vào của đường dây có tính chất dung bằng điện kháng của nguồn, tần số giao động của giao động riêng bằng của nguồn

- ◆ **ảnh hưởng của vầng quang**

Điện áp tăng cao trên đường dây có thể dẫn đến hiện tượng phóng điện vầng quang. Vầng quang xuất hiện được thể hiện trên sơ đồ thay thế đường dây bởi điện dẫn tác dụng G' và điện dung phụ $\Delta C'$. Hai thông số này phụ thuộc vào điện áp $U(x)$ của đường dây tại một điểm nào đó

Vì tổn hao do vầng quang, đường cong điện áp có đỉnh thấp hơn so với trường hợp vầng quang không xuất hiện với đỉnh bằng từ $(3-3,5)E$, dịch chuyển về phía chiều dài đường dây ngắn do điện dung phụ tăng

Trong các tính toán, trị số G' và $\Delta C'$ có thể tính gần đúng bằng

$$\begin{cases} \frac{G'}{\omega C'} = \eta \left(1 - \frac{U_{vq}}{U} \right) \\ \frac{\Delta C'}{\omega C'} = \theta \left(\frac{U}{U_{vq}} - 1 \right) \end{cases}$$



U_{vq} là điện áp xuất hiện vầng quang; η và θ là các hệ số phụ thuộc vào số dây dẫn trong một pha, chúng giảm khi số lượng dây phân pha tăng : $\eta=0,7-0,35$ và $\theta=0,22-0,11$

Đối với các đường dây độ dài không lớn lắm (300 - 600 km), điện áp dọc đường dây thay đổi không nhiều, G' và $\Delta C'$ có thể coi là không đổi trên toàn bộ chiều dài đường dây, có nghĩa là có thể coi đường dây có vầng quang như một đường dây với điện dẫn và điện dung không đổi

Hệ số lan truyền trong trường hợp này bằng

$$\begin{aligned} \underline{\gamma} &= \sqrt{(R' + j\omega L') [G' + j\omega (C' + \Delta C')]} \\ &= j\omega \sqrt{L' (C' + \Delta C')} \sqrt{\left(1 + \frac{R'}{j\omega L'}\right) \left[\frac{G'}{j\xi (C' + \Delta C')}\right]} \\ &\approx \alpha \frac{\beta_{vq}}{\beta} + \varepsilon_{vq} + j\beta_{vq} \end{aligned}$$

β_{vq} là hệ số thay đổi pha của đường dây có vầng quang

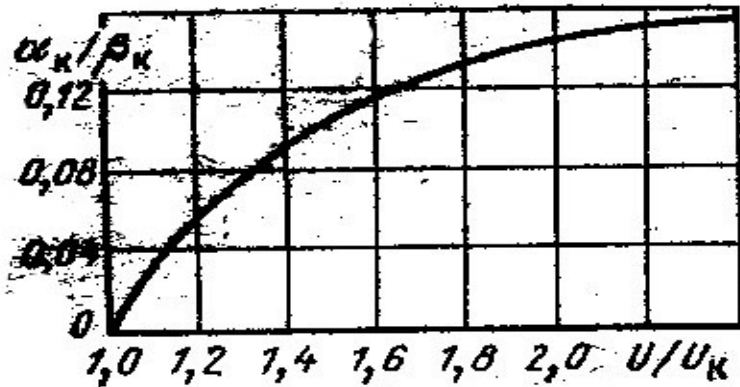
$$\beta_{vq} = \beta \sqrt{1 + L' \frac{\Delta C'}{C'}}$$

Hệ số tắt dần bổ sung

$$\alpha_{vq} = \frac{G'}{2\omega (C' + \Delta C')}$$



Từ các công thức trên ta xác định được quan hệ $\beta_{vq}/\alpha_{vq}=f(U/U_k)$



Quan hệ β_{vq}/α_{vq} với điện áp ứng với $\eta=0,7 ; \theta=0,22$

Điện áp ở cuối đường dây hở mạch nối với nguồn công suất vô cùng lớn có điện trở trong bằng không đạt giá trị cực đại khi $\beta kl = \pi/2$ nghĩa là với chiều dài đường dây $l < 1500$ km và có thể tìm bằng cách giải kết hợp 2 phương trình

phương trình thứ nhất tương tự biểu thức 11-9 dạng

$$U(l) = \frac{2}{\pi} \frac{E}{\frac{\alpha}{\beta} + \frac{\alpha_{vq}}{\beta_{vq}}}$$

phương trình thứ hai dưới dạng đồ thị như trên hình vẽ

Điện áp U trên hình vẽ được hiểu là giá trị tính toán $U_{tt} = kU(l)$

$$U_{tt} = U(l) \left(\frac{\sin \frac{\beta_{vq}}{2}}{\frac{\beta_{vq}}{2}} \right)^2$$

Ví dụ $\beta kl = \pi/2 ; U_{tt} = 0,81U(l)$.



Trình tự tính toán như sau

cho trước các trị số khác nhau điện áp ở cuối đường dây $U(l)$

theo điện áp xuất hiện vàng quang (phụ thuộc vào kết cấu dây dẫn) xác định tỉ số $kU(l)/U_k$

tìm E ứng với mỗi trị số $U(l)$

xây dựng đường cong quan hệ $U(l)=f(E)$ và tìm $U(l)$ theo giá trị của E

Sau khi tìm được điện áp ở cuối đường dây có thể tính gia tăng điện dung

thay U bằng U_{tt} , tính được β_{vq} và chiều dài đường dây xuất hiện cộng hưởng

$$l = \frac{2}{\pi} \frac{1}{\beta_{vq}}$$

Trị số cực đại điện áp cộng hưởng trong sơ đồ chứa điện cảm của nguồn không khác nhiều so với trường hợp nguồn có điện trở trong bằng không. Trong trường hợp vàng quang, kết quả nhận được cho các đường cong ít nhọn hơn so khi không có vàng quang. Trị số đỉnh cực đại khi có vàng quang vào khoảng $3E$ và dịch chuyển về phía chiều dài đường dây bé do hiệu ứng điện dung gia tăng (đường 3)



Chính hiệu ứng điện dung là nguyên nhân tăng không nhiều điện áp trong vùng trước cộng hưởng. Mặc dù trong vùng cộng hưởng ảnh hưởng của vàng quang rất lớn nhưng nó không thể hạn chế quá điện áp đến giá trị an toàn cho cách điện. Còn trong vùng trước cộng hưởng thì vàng quang không tồn tại ngay cả ở điện áp gần mức cách điện của đường dây



◆ 11.1.2. ảnh hưởng của kháng bù dọc

Đường dây hở mạch là nguồn công suất phản kháng. Dòng điện dung ở phía đầu đường dây có thể đi qua cuộn dây của máy phát điện ở nhà máy điện có thể gây những hậu quả tai hại vì máy phát làm việc ở chế độ tiêu thụ công suất phản kháng trở nên kém ổn định hơn. Vì vậy ở thanh góp điện áp cao của nhà máy và các trạm biến áp xuất phát người ta thường đặt các kháng điện bù dọc; kháng điện ở thanh góp của hệ thống nhận điện về nguyên tắc ở chế độ bình thường là không cần thiết. ở đầu cuối hở mạch của các đường dây dài trung bình (đến 300-400 km), tổn thất điện áp dọc đường dây thường không lớn lắm và có thể hạn chế bằng lắp đặt các kháng điện ở thanh góp của nhà máy. Trên các đường dây truyền tải có chiều dài lớn ở đầu đường dây tập trung khoảng 20-40% tổng công suất lắp đặt của kháng điện. Phần còn lại được đặt tại một điểm hoặc một số điểm khác trên đường dây tại các trạm đóng cắt hoặc các trạm biến áp. Trong chế độ vận hành đầy tải, một phần hoặc toàn bộ kháng điện có thể được cắt ra.

Cần xem xét vai trò của kháng điện trong chế độ đóng nguồn từ một phía, có thể xuất hiện do sự cố hoặc đóng cắt vận hành ví dụ như khi hoà đồng bộ. Sự khác biệt giữa chế độ sau sự cố và chế độ hoà đồng bộ là hoà đồng bộ được tiến hành trong điều kiện được chuẩn bị trước đảm bảo chế độ tối ưu điện áp (giảm kích thích máy phát, đặt tỉ số biến của máy biến áp bé nhất), trong khi đó chế độ sau sự cố thường là trước đó ở chế độ đầy tải, các kháng điện có thể được cắt ra. Còn kích từ của máy phát và tỉ số biến của máy biến áp có thể có giá trị lớn nhất



a) Kháng điện đặt ở đầu đường dây

Kháng điện đặt ở đầu đường dây không ảnh hưởng đến đặc điểm phân bố điện áp dọc đường dây và hệ số truyền tải nhưng làm tăng trở đầu vào của đường dây vì nó bù một phần dòng điện dung của đường dây mà khi không có kháng đi qua điện cảm trong của nguồn

Tổng trở đầu vào của đường dây có kháng đặt ở đầu xác định theo biểu thức

$$\underline{Z}_{dv} = \frac{(-jZctg \beta l)jX_p}{jX_p - jZctg \beta l} = -\frac{jZctg \beta l}{1 - qctg \beta l} \quad \text{với } q = Z/X_p$$

Hệ số truyền tải $K = 1/\cos(\beta l)$.

Nếu bù toàn bộ dòng điện dung của đường dây (mẫu số của phân số bằng không) cần công suất của kháng $q = tg\beta l$. Trị số này rất lớn vì thế nên trong thực tế bù toàn phần dòng điện dung không được sử dụng



b) Kháng điện đặt ở cuối đường dây

Kháng điện đặt ở cuối đường dây làm tăng hệ số truyền tải $K = \frac{1}{\cos \beta l (1 + q \operatorname{tg} \beta l)}$

nếu thay $1/q = X_p/Z = \operatorname{tg} \varphi_e$ $K = \frac{1}{\cos \beta l + \operatorname{ctg} \varphi_e \sin \beta l} = \frac{\sin \varphi_e}{\sin (\beta l + \varphi_e)}$

ý nghĩa vật lý đơn giản có thể gán cho biểu thức trên nếu tính tổng trở đầu vào của đường dây hở mạch với chiều dài sóng φ_e bằng $jZ \operatorname{tg} \varphi_e$. Khi này kháng điện có thể coi như đường dây ngắn mạch với điện kháng X_p và chiều dài sóng φ_e , còn toàn bộ đường dây với kháng điện ở cuối như là đường dây ngắn mạch với chiều dài sóng bằng $\beta l + \varphi_e$

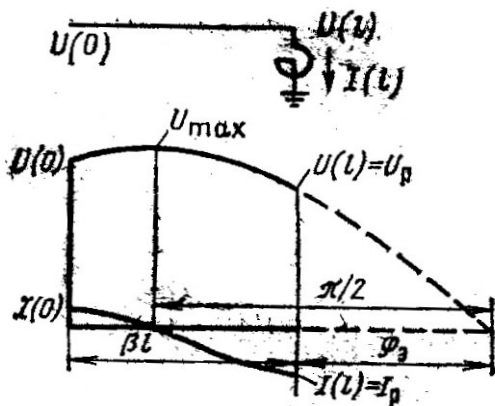
phân bố điện áp $\underline{U}(x)$ dọc theo đường dây $\underline{U}(x) = \underline{U}(0) \frac{\sin [\beta(l-x) + \varphi_e]}{\sin (\beta l + \varphi_e)}$

x khoảng cách tính từ cuối đường dây

Điện áp dọc theo đường dây có trị số lớn nhất tại điểm

$$\sin [\beta(l-x) + \varphi_e] = 1 \Rightarrow \beta(l-x) = \pi / 2 - \varphi_e$$

$$\underline{U}_{\max} = \underline{U}(0) \frac{1}{\sin (\beta l + \varphi_e)}$$





Điện áp ở đoạn phía đầu đường dây tăng cao có nghĩa là dòng điện dung đi qua đường dây giảm dần đến trị số không tại điểm ứng với U_{max} sau đó dòng điện trở thành dòng điện cảm do đó gây sụt áp trên đường dây

Tổng trở đầu vào của đường dây khi đặt kháng ở cuối đường dây

$$\underline{Z}_{dv} = (-jZc \operatorname{tg} \beta l) \frac{1 + q \operatorname{ctg} \beta l}{1 - q \operatorname{ctg} \beta l}$$

có trị số lớn hơn so với trường hợp đặt kháng ở đầu đường dây, cho dù điều kiện bù toàn phần dòng điện dung trong cả hai trường hợp đều cần công suất của kháng như nhau

công suất kháng để điện áp ở hai đầu đường dây bằng nhau ($K=1$)

$$\sin \varphi_e = \sin (\beta l + \varphi_e) \Rightarrow \beta l + \varphi_e = \pi - \varphi_e \Rightarrow \varphi_e = \frac{\pi}{2} - \beta l \quad \longrightarrow \quad q = \operatorname{ctg} \varphi_e = \operatorname{tg} \frac{\beta l}{2}$$

Trong trường hợp này, tổng trở đầu vào của đường dây bằng

$$\underline{Z}_{dv} = jZ \operatorname{tg} \left(\beta l - \frac{\pi}{2} - \frac{\beta l}{2} \right) = -jZ \operatorname{ctg} \left(\frac{\beta l}{2} \right)$$

c) Kháng điện đặt ở giữa đường dây

Nếu kháng đặt giữa đường dây, hệ số truyền tải nhỏ hơn trường hợp đặt kháng ở cuối đường dây

$$K = \frac{1}{\cos \beta l \left[1 + \frac{q \operatorname{tg} \beta l}{2} \right]}$$

Để có thể xây dựng được đường cong phân bố điện áp dọc theo đường dây cần xác định tổng trở đầu vào của đoạn đường dây hở mạch với kháng

$$\underline{Z}_{dv2} = -jZ \frac{\operatorname{ctg} \frac{\beta l}{2}}{1 - q \operatorname{ctg} \frac{\beta l}{2}} = \pm jX_{dv2}$$

Tổng trở đầu vào có thể xem như điện trở đầu vào của đường dây hở mạch hoặc đường dây ngắn mạch tùy thuộc vào dấu của nó

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X_{dv2}}{Z}$$

a) kháng công suất lớn; b) kháng công suất bé

