

TÍNH TOÁN TỔN THẤT TRONG HỆ THỐNG CUNG CẤP ĐIỆN

1 MỤC ĐÍCH, Ý NGHĨA VÀ CƠ SỞ TÍNH TOÁN MẠNG ĐIỆN

1.1. Mục đích và ý nghĩa của việc tính toán mạng điện

Trong mạng điện, điện năng từ nhà máy sản xuất được cung cấp đến các tải tiêu thụ nhờ khâu truyền tải bao gồm hệ thống dây dẫn và các máy biến áp. Quá trình chuyển tải công suất của dòng điện trên đường dây dẫn điện đến nơi tiêu thụ bị chi phối bởi hiệu ứng nhiệt Joule và hiện tượng ion hóa môi trường gây ra các tổn thất công suất tác dụng, công suất phản kháng, tổn thất phóng điện vầng quang và hơn cả là tổn thất điện năng. Những tổn thất này xuất hiện trong mọi trạng thái làm việc của mạng điện, bao gồm trạng thái quá độ điện từ (*transient*), trạng thái xác lập (*steady*) và trạng thái sự cố (*fault*). Tuy nhiên, phạm vi của giáo trình này chỉ xét các tổn thất của mạng điện ở **trạng thái xác lập** (*steady state*), tức trạng thái làm việc mà các thông số mạng không đổi hoặc thay đổi không đáng kể, nhằm đơn giản hóa các tính toán nhưng vẫn bảo đảm kết quả sai số trong phạm vi cho phép đối với công tác thiết kế và quản lý lưới điện.

Mục đích của việc nghiên cứu tính toán mạng điện (ở trạng thái xác lập) là nhằm xác định các trị số điện áp tại tất cả các nút mạng, trị số dòng điện và trào lưu công suất chuyển tải trên các nhánh của mạng. Việc tính toán và giải bài toán mạch điện giúp ta xác định được các tổn thất xảy ra trong các phần tử mạng điện, làm cơ sở cho việc lựa chọn các thiết bị dùng điện, lựa chọn dây dẫn và cáp điện, các máy biến áp, các thiết bị điều chỉnh điện áp, thiết bị bù công suất kháng nhằm tăng khả năng truyền tải của đường dây... Điều này mang một ý nghĩa kinh tế-kỹ thuật vô cùng to lớn, là căn cứ đánh giá chất lượng điện cung cấp, là cơ sở đề ra các biện pháp làm giảm thiểu các tổn thất, hạ giá thành điện năng.

1.2. Cơ sở tính toán mạng điện

Mạng lưới điện gồm hai phần tử cơ bản cấu thành là *đường dây* và *máy biến áp*, các thông số mạng điện tại các nút, các nhánh khác nhau biến đổi vô cùng phức tạp rất khó khăn cho việc tính toán, vì vậy, để công tác tính toán mạng điện trở nên dễ dàng và thuận tiện, cần phải dựa trên một số nguyên tắc kỹ thuật để đơn giản hóa. Ví dụ như khi tính toán mạng điện ba pha ở chế độ làm việc đối xứng thì chỉ cần tính toán cho một pha, hơn nữa, chế độ đối xứng gần như không có dòng điện chạy qua dây trung tính nên ở đó không có tổn thất điện áp và tổn thất công suất, vì vậy dây trung tính xem như không tồn tại và việc tính toán mạng điện trở nên đơn giản rất nhiều khi đưa về tính toán trên các sơ đồ một dây (đơn tuyến). Tương tự, có thể thiết lập sơ đồ tính toán cho các máy biến áp.

Như vậy, từ những kết nối vật lý của các phần tử lưới điện trong thực tế, trên cơ sở toán học và lý thuyết mạch điện, người ta xây dựng nên các *mô hình toán* với những ký hiệu

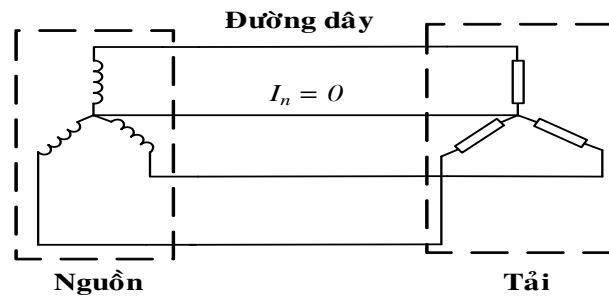
và phép tính đã được đơn giản hóa nhằm giảm thiểu khối lượng tính toán mà vẫn thu được những kết quả tương đương, đó chính là việc thiết lập các *sơ đồ thay thế*.

2 MÔ HÌNH TOÁN HỌC CỦA MẠNG ĐIỆN VÀ SƠ ĐỒ THAY THẾ CỦA CÁC PHẦN TỬ MẠNG ĐIỆN

2.1. Mô hình toán và các thông số cơ bản của đường dây

a) Mô hình toán đường dây

Xét đường dây tải điện của mạng lưới điện ba pha như hình 4.1.



Hình 4.1. Đường dây ba pha

Ở chế độ làm việc đối xứng, điện áp đầu nguồn bằng nhau về biên độ.

$$U_{An}=U_{Bn}=U_{Cn}=U_{ph} \quad (4.1)$$

Phụ tải ba pha là đối xứng nên dòng điện chạy trong dây trung tính bằng 0 ($I_n = 0$). Dòng điện ba pha bằng nhau về biên độ.

$$I_A=I_B=I_C=I \quad (4.2)$$

Do đó điện áp trên tải là bằng nhau về biên độ, tổn thất điện áp và tổn thất công suất là như trên các pha là như nhau.

Công suất tác dụng trên một pha

$$P_{ph}=U_{ph}I\cos\varphi \quad (4.3)$$

Công suất tác dụng ba pha

$$P=3P_{ph}=3U_{ph}I\cos\varphi \quad (4.4)$$

Nếu thay $U_{ph}=\frac{U}{\sqrt{3}}$ vào công thức (4.4)

$$P=\sqrt{3}UI\cos\varphi \quad (4.5)$$

Với U là điện áp dây.

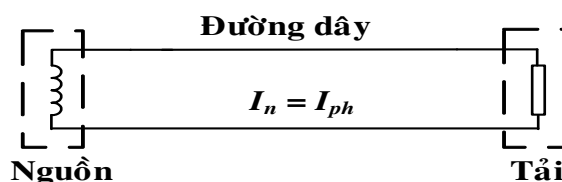
Tính toán tương tự công suất phản kháng ba pha

$$Q_{ph}=U_{ph}I\sin\varphi \quad (4.6)$$

Hoặc

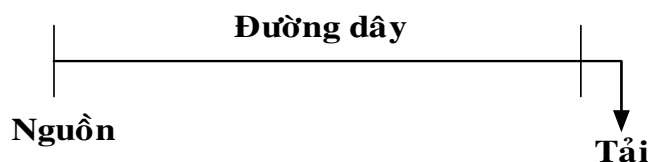
$$Q=\sqrt{3}UI\sin\varphi \quad (4.7)$$

Vậy khi mạng điện đối xứng chỉ cần tính toán cho một pha, sơ đồ thay thế của mạng điện chỉ cần biểu diễn một pha (hình 4.2).



Hình 4.2. Đường dây một pha

Ở chế độ đối xứng hầu như không có dòng điện chạy qua dây trung tính, do đó không có tổn thất điện áp và tổn thất công suất trên dây trung tính. Sơ đồ thay thế tính toán của mạng điện được đơn giản hóa thành sơ đồ đơn tuyến (một dây) như hình 4.3.



Hình 4.3. Sơ đồ đơn tuyến đường dây

b) Các thông số cơ bản của đường dây

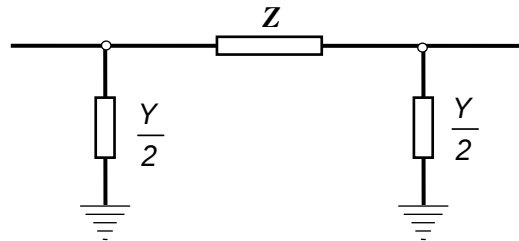
Thông số dây dẫn đặc trưng cho các quá trình vật lý xảy ra trong dây dẫn khi có dòng điện xoay chiều chạy qua như sau:

- Khi có dòng điện xoay chiều chạy qua, do hiệu ứng Joule, dây dẫn bị phát nóng, một phần công suất bị thất thoát do chuyển thành nhiệt trên điện trở tác dụng của dây dẫn, đặc trưng bởi thông số *điện trở tác dụng* trên một đơn vị chiều dài dây dẫn r_0 (Ω/km).
- Dòng điện xoay chiều sinh ra từ trường trong từng dây dẫn và hồ cảm giữa các dây dẫn. Từ trường này gây ra tổn thất công suất phản kháng và tổn thất điện áp trên dây dẫn, thể hiện bởi *điện kháng tác dụng* trên một đơn vị chiều dài dây dẫn x_0 (Ω/km).
- Điện áp xoay chiều đặt trên dây dẫn gây ra điện trường giữa các dây dẫn cũng như giữa dây dẫn và đất. Điện trường này sinh ra điện dung có tác dụng triệt tiêu một phần dòng điện cảm của tải chạy qua dây dẫn và được đặc trưng bởi *điện dung tác dụng* trên một đơn vị chiều dài dây dẫn b_0 ($1/\Omega\text{km}$) hoặc thể hiện dưới dạng *công suất phản kháng dung tính* trên một đơn vị chiều dài dây dẫn Q_c (KAVr/km hay KVAR/km). Giá trị b_0 và Q_c chỉ được quan tâm đến khi điện áp của đường dây lớn hơn 110KV.
- Khi điện áp cao đặt trên đường dây sẽ gây ra cường độ điện trường lớn *trên bề mặt* dây dẫn. Nếu giá trị đường trường này có giá trị vượt quá giá trị giới hạn thì sẽ gây ion hóa lớp không khí xung quanh dây dẫn hình thành sự phóng điện trong không khí gọi là sự phóng điện vầng quang hay *vầng quang điện*. Ngoài ra điện áp cao còn làm xuất hiện dòng điện rò qua các chất điện môi hoặc sứ cách điện. Cả hai hiện tượng trên đều được đặc trưng bởi đại lượng *điện dẫn tác dụng* trên một đơn vị chiều dài dây g_0 ($1/\Omega\text{km}$). Thông số g_0 chỉ được xét đến khi điện áp đường dây lớn hơn 250KV.
- Các thông số r_0 , x_0 , g_0 và b_0 được gọi là các thông số cơ bản của đường dây và thường được tra trong các sổ tay dây dẫn.

2.2. Sơ đồ thay thế của các phần tử mạng điện

a) Sơ đồ thay thế đường dây trên không và cáp điện

Các thông số mạng lưới điện được rải đều trên suốt chiều dài đường dây do đó việc tính toán rất khó khăn. Tuy nhiên, mạng điện xí nghiệp chỉ được cấp điện từ các đường dây trung áp và hạ áp với chiều dài không quá lớn, do đó để đơn giản hóa trong tính toán, xem như các hiệu ứng bề mặt, hiệu ứng khoảng cách là không đáng kể. Khi đó điện trở của dây dẫn lấy bằng giá trị *điện trở một chiều* tương đương. Để mô tả các quá trình năng lượng xảy ra trong quá trình truyền tải, người ta thường dùng sơ đồ thay thế hình II như sau:



Hình 4.4. Sơ đồ thay thế đường dây hình II

Z : Tổng trở đường dây biểu thị *tổn thất công suất* tác dụng và công suất phản kháng trên đường dây.

Y : Tổng dẫn đường dây đặc trưng *tổn thất năng lượng* dọc theo đường dây (thông số rải) là tổn thất do dòng điện rò qua sứ hoặc qua cách điện và tổn thất vầng quang điện.

$$Y = G + jB$$

G, B : Điện dẫn tác dụng và điện dẫn phản kháng. Trong đó G đặc trưng cho tổn thất công suất tác dụng do có sự xuất hiện dòng rò, B phản ánh hiện tượng phóng điện vầng quang (tổn thất vầng quang), đặc trưng cho lượng công suất phản kháng sinh ra bởi điện dung hình thành giữa dây dẫn với đất và điện dung ký sinh giữa các dây dẫn với nhau.

$$Z = R + jX = (r_0 + jx_0).l \quad (4.8)$$

$$Y = G + jB = (g_0 + jb_0).l \quad (4.9)$$

Trong đó: r_0, x_0 : Điện trở tác dụng và phản kháng trên 1 đơn vị chiều dài dây, Ω/km .

g_0, b_0 : Điện dẫn tác dụng và phản kháng trên một đơn vị chiều dài dây, km/Ω .

* Xác định Z :

r_0 tra bảng ứng với nhiệt độ tiêu chuẩn là 20°C . Nếu nhiệt độ môi trường nơi lắp đặt khác 20°C , cần phải hiệu chỉnh theo công thức:

$$r_{0\theta} = r_0 [1 + \alpha(\theta - 20)] \quad (4.10)$$

$\alpha = 0,004$ khi vật liệu làm dây dẫn là kim loại màu.

$\alpha = 0,0045$ khi dây dẫn làm bằng thép.

r_0 có thể được xác định theo công thức liên quan đến vật liệu và kích cỡ dây:

$$r_0 = \frac{\rho}{F} \quad (4.11)$$

F : Thiết diện dây dẫn, mm^2 .

ρ : Điện trở suất của vật liệu làm dây, $\Omega\text{mm}^2/\text{km}$.

$$\rho_{Al} = 31,5 \ \Omega\text{mm}^2/\text{km}.$$

$$\rho_{Cu} = 18,8 \ \Omega\text{mm}^2/\text{km}.$$

r_0 đối với dây dẫn bằng thép, không chỉ phụ thuộc vào thiết diện mà còn phụ thuộc vào dòng điện chạy trong dây nên không thể tính được bằng các công thức cụ thể mà phải tra bảng hoặc tra đồ thị đường cong.

x_0 xác định theo nguyên lý kỹ thuật điện thì khi đó điện kháng 1 pha của đường dây tải điện 3 pha được xác định theo công thức:

$$x_0 = \omega \left(4,6 \log \frac{2.D_{tb}}{d} + 0,5.\mu \right) \cdot 10^{-4}, \ \Omega/\text{km}. \quad (4.12)$$

Trong đó: $\omega = 2\pi f$: Tần số góc của dòng điện xoay chiều, rad.

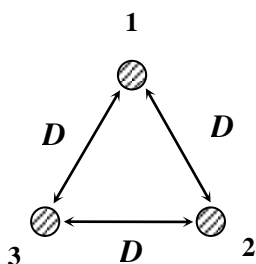
D_{tb} : Khoảng cách trung bình hình học giữa các dây dẫn, mm.

d : Đường kính dây dẫn, mm.

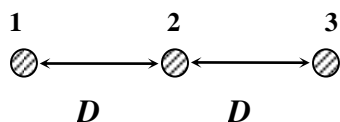
μ : Hệ số dẫn từ tương đối của vật liệu làm dây dẫn. Với kim loại màu khi tải dòng xoay chiều tần số 50 Hz thì: $\mu = 1$

Khi đó:
$$x_0 = 0,144 \log \frac{2.D_{tb}}{d} + 0,016, \ \Omega/\text{km}. \quad (4.13)$$

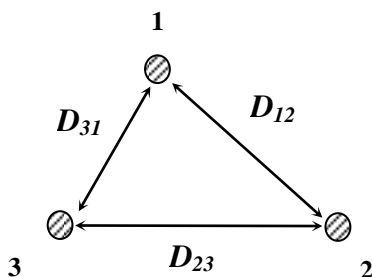
Xác định D_{tb} theo vị trí tương đối giữa các dây dẫn như sau:



$$D_{tb} = D \quad (4.14)$$



$$D_{tb} = D\sqrt[3]{2} = 1,26D \quad (4.15)$$



$$D_{tb} = \sqrt[3]{D_{12}D_{23}D_{31}} \quad (4.16)$$

Hình 4.5. Các trường hợp tính toán khoảng cách giữa các pha dây dẫn

x_0 xác định như sau trong trường hợp dây dẫn làm bằng thép có hệ số dẫn từ khá lớn $\mu \gg 1$ và biến thiên theo cường độ từ trường $\mu=f(I)$:

$$x_0 = x'_0 + x''_0 \quad (4.17)$$

$x'_0 = 0,144 \log \frac{2.D_{tb}}{d}$: Thành phần cảm kháng gây bởi hồ cảm giữa các dây.

$x''_0 = 2\pi f . 0,5 \mu . 10^{-4}$: Thành phần cảm kháng liên quan đến tự cảm nội bộ của dây dẫn.

x''_0 được tra bảng hoặc trên đồ thị đường cong.

*** Xác định Y:**

Vì lượng điện năng tổn thất do dòng rò qua sứ và điện môi trên cáp điện là rất nhỏ (khi U nhỏ) nên có thể bỏ qua (bỏ qua thành phần G). G chỉ đáng kể với đường dây có $U \geq 220$ kV. Như vậy trong thành phần của tổng dẫn chỉ còn B .

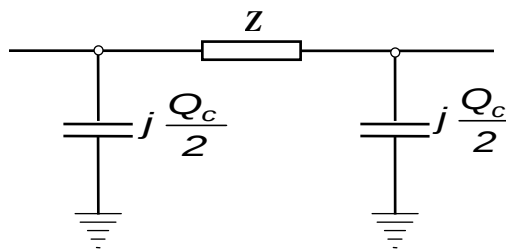
Điện dẫn phản kháng của 1 km đường dây phụ thuộc vào đường kính dây, khoảng cách giữa các pha và được xác định bằng biểu thức sau:

$$b_0 = \frac{7,58}{\log \frac{2D_{tb}}{d}} . 10^{-6}, 1/\Omega \text{km} \quad (4.18)$$

Trong thực tế b_0 được tính sẵn trong các bảng tra (theo F, D_{tb}). Riêng với đường cáp còn phụ thuộc vào cách điện và phải tra trong các tài liệu riêng. Từ tham số này ta xác định được lượng công suất phản kháng phát sinh ra do dung dẫn của đường dây như sau:

$$Q_c = U^2 . b_0 . l = U^2 B, \text{ KVAR} \quad (4.19)$$

Thực tế chỉ quan tâm đến b_0 và Q_c khi $U > 20$ kV và mạng cáp hoặc mạng đường dây trên không có điện áp $U > 35$ kV



Hình 4.6. Sơ đồ thay thế đường dây hình II với giá trị dung dẫn tính được

b) Sơ đồ thay thế máy biến áp

Trong hệ thống cung cấp điện thì máy biến áp ba pha cách ly là chủng loại thông dụng nhất. Bốn thông số cơ bản khi tính toán quá trình truyền tải năng lượng xảy ra trên máy biến áp là điện trở R_B , điện kháng X_B , điện dẫn G_B và cảm dẫn (điện dẫn cảm kháng) B_B .

$$R_B = r_1 + r'_2 \quad (4.20)$$

$$X_B = x_1 + x'_2 \quad (4.21)$$

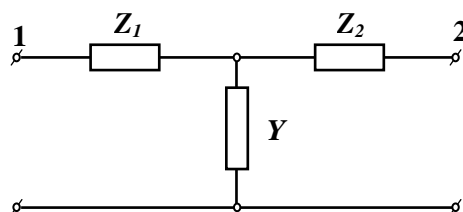
Với r'_2 và x'_2 là điện trở và cảm kháng của cuộn thứ cấp đã quy về sơ cấp.

Những tổn thất phát sinh trong quá trình vận hành của máy biến áp đó là:

- Tổn thất công suất trên tổng trở $Z_B = R_B + jX_B$ bao gồm tổn thất công suất tác dụng dưới dạng nhiệt trên dây quấn do hiệu ứng Joule và tổn thất công suất phản kháng do từ thông tản trên hai cuộn dây cũng như tản ra bên ngoài không khí.
- Tổn thất công suất trên tổng dẫn $Y_B = G_B + jB_B$ bao gồm tổn thất công suất làm phát nóng lõi thép do dòng điện xoáy Foucault gây ra và tổn hao sắt từ ... Các tổn thất trong lõi thép của máy biến áp hầu như không phụ thuộc vào phụ tải và có giá trị bằng lúc không tải.

* **Sơ đồ thay thế máy biến áp hai cuộn dây:**

- **Sơ đồ hình T**



Hình 4.7. Sơ đồ thay thế máy biến áp hình T

Z_1 : Tổng trở dây quấn sơ cấp $Z_1 = r_1 + jx_1$

Z_2 : Tổng trở dây quấn thứ cấp (đã quy về sơ cấp): $Z_2 = Z'_2 = r'_2 + jx'_2$.

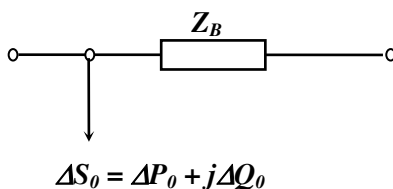
Y : Tổng dẫn đặc trưng cho các tổn hao từ hóa xảy ra trên lõi thép

$$\text{Khi đó:} \quad Z_B = Z_1 + Z'_2 = (r_1 + r'_2) + j(x_1 + x'_2) = R_B + jX_B \quad (4.22)$$

$$Y_B = Y = G_B + jB_B \quad (4.23)$$

- **Sơ đồ hình Γ**

Là loại sơ đồ được sử dụng phổ biến trong tính toán máy biến áp của mạng điện xí nghiệp. Trong đó các tổn thất không đổi (hoặc ít thay đổi) được xem như một *phụ tải* nối trực tiếp.



Hình 4.8. Sơ đồ thay thế máy biến áp hình Γ

$$\text{Với:} \quad Z_B = Z_1 + Z'_2 = (r_1 + r'_2) + j(x_1 + x'_2) = R_B + jX_B \quad (4.24)$$

$$\Delta S_0 = \Delta P_0 + j\Delta Q_0 = \Delta P_{Fe} + j\Delta Q_{Fe} \quad (4.25)$$

$$\Delta S_B = \Delta S_0 + \Delta S_{Cu} = \Delta P_B + j\Delta Q_B \quad (4.26)$$

Việc xác định các thông số của sơ đồ thay thế máy biến áp dựa vào các giá trị cho trước:

ΔP_{Cu} hay ΔP_N : Tổn thất công suất tác dụng trên dây quấn khi tải định mức, giá trị này có được từ thí nghiệm ngắn mạch trên máy biến áp.

ΔP_{Fe} hay ΔP_0 : Tổn thất công suất tác dụng trong lõi thép của máy biến áp, còn gọi là tổn thất không tải của máy biến áp (từ thí nghiệm không tải của máy biến áp).

$u_N\%$: Điện áp ngắn mạch phần trăm (%) so với U_{dm} .

$I_0\%$: Dòng điện không tải phần trăm (%) so với I_{dm} .

Tổn thất công suất ngắn mạch của máy biến áp:

$$\Delta P_N = 3I_{dm}^2 R_B = \frac{S_{dm}^2}{U_{dm}^2} R_B \quad (4.27)$$

Điện trở máy biến áp:

$$R_B = \frac{\Delta P_N U_{dm}^2}{S_{dm}^2} \quad (4.28)$$

Điện trở máy biến áp tính trong hệ đơn vị có tên:

$$R_B = \frac{\Delta P_N U_{dm}^2 10^3}{S_{dm}^2}, \Omega \quad (4.29)$$

ΔP_N : Tổn thất ngắn mạch của máy biến áp, KW

U_{dm} : Điện áp định mức của máy biến áp, KV

S_{dm} : Công suất (dung lượng) định mức của máy biến áp, KVA

Trong máy biến áp, trị số X_B lớn hơn rất nhiều so với R_B ($X_B \gg R_B$), do đó có thể bỏ qua giá trị điện áp rơi trên điện trở R_B . Điện áp ngắn mạch phần trăm của máy biến áp tính bởi:

$$U_N \% = \frac{I_{dm} X_B 10^2}{\frac{U_{dm}}{\sqrt{3}}} \quad (4.30)$$

Điện kháng của máy biến áp tính trong hệ đơn vị có tên:

$$X_B = \frac{U_N \% U_{dm}^2 10}{S_{dm}}, \Omega \quad (4.31)$$

Tổng dẫn của máy biến áp được xác định theo các tổn thất không tải:

$$\Delta P_0 \approx U_{dm}^2 G_B, \text{ KW} \quad (4.32)$$

$$\Delta Q_0 \approx U_{dm}^2 B_B, \text{ KVAR} \quad (4.33)$$

Điện dẫn và cảm dẫn của máy biến áp:

$$G_B = \frac{\Delta P_0}{U_{dm}^2 10^3}, S \quad (4.34)$$

$$B_B = \frac{\Delta Q_0}{U_{dm}^2 10^3} = \frac{I_0 \% S_{dm}}{100 U_{dm}^2 10^3}, S \quad (4.35)$$

Trong máy biến áp thì tổn thất công suất phản kháng không tải lớn hơn tổn thất công suất tác dụng không tải rất nhiều $\Delta Q_0 \gg \Delta P_0$. do đó dòng điện không tải phần trăm được tính bởi

$$I_0 \% = \frac{I_0}{I_{dm}} 100 = \frac{\sqrt{3} I_0 U_{dm}}{\sqrt{3} I_{dm} U_{dm}} 100 = \frac{\Delta S_0}{S_{dm}} 100 \quad (4.36)$$

$$I_0 \% \approx \frac{\Delta Q_0}{S_{dm}} 100 \quad (4.37)$$

Tổn thất công suất phản kháng không tải:

$$\Delta Q_0 \approx \frac{I_0 \% S_{dm}}{100}, \text{KVAR} \quad (4.38)$$

Xác định R_B

Xuất phát từ thí nghiệm ngắn mạch máy biến áp:

$$\Delta P_{Cu} = 3 I_{dm}^2 R_B, \text{ kW} \quad (4.39)$$

$$\Delta P_{Cu} \cdot U_{dm}^2 = 3 I_{dm}^2 \cdot U_{dm}^2 R_B \quad (4.40)$$

Do: $S_{dmB} = \sqrt{3} \cdot U_{dm} \cdot I_{dm}$, kVA)

Nên:

$$R_B = \frac{\Delta P_{Cu} \cdot U_{dm}^2}{S_{dm}^2} \cdot 10^3, \Omega \quad (4.41)$$

Cũng từ thí nghiệm ngắn mạch máy biến áp ta có:

$$u_N \% = \frac{U_N}{U_{dm} / \sqrt{3}} \cdot 100 = \frac{I_{dm} \cdot Z_B}{U_{dm} / \sqrt{3}} \cdot 100 \quad (4.42)$$

Xác định X_B

Trên thực tế vì $x_B \gg r_B$ nên có thể lấy gần đúng $x_B \approx z_B$, khi đó:

$$x_B \approx \frac{u_N \% \cdot U_{dm}}{\sqrt{3} I_{dm} \cdot 100} = \frac{u_N \% \cdot U_{dm}^2}{S_{dm} \cdot 100}, \Omega \quad (4.43)$$

$$x_B \approx \frac{u_N \% \cdot U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot 10, \Omega \quad (4.44)$$

Lưu ý đơn vị tính toán trong các công thức: R_B [Ω], ΔP_{Cu} [kW], x_B [Ω], U_{dm} [kV], S_{dm} [kVA]

+ Trường hợp máy biến áp công suất nhỏ ($S_{dm} < 1000$ kVA) thì giá trị R_B là đáng kể khi đó:

$$x_B = \sqrt{Z_B^2 - R_B^2} = \sqrt{\left(\frac{u_N \% \cdot U_{dm}^2}{S_{dm}} \cdot 10 \right)^2 - \left(\frac{\Delta P_{Cu} \cdot U_{dm}^2}{S_{dm}^2} \cdot 10^3 \right)^2}, \Omega \quad (4.45)$$

Xác định ΔQ_{Fe} (hay ΔQ_0)

Căn cứ vào $I_0\%$ (từ thí nghiệm không tải máy biến áp)

$$I_0\% = \frac{I_0}{I_{dm}} \cdot 100 = \frac{I_0}{\frac{S_{dm}}{\sqrt{3}U_{dm}}} \cdot 100 = \frac{S_0}{S_{dm}} \cdot 100, A \quad (4.46)$$

Với S_0 là công suất không tải $S_0 = \Delta P_{Fe} + j\Delta Q_{Fe}$. Thực tế vì $\Delta Q_{Fe} \gg \Delta P_{Fe}$, nên có thể lấy:

$$\Delta Q_{fe} \approx S_0 = \frac{I_0\% \cdot S_{dm}}{100}, \text{ KVAR} \quad (4.47)$$

Ví dụ 1: Xác định các thông số trong sơ đồ thay thế của máy biến áp hai cuộn dây có các giá trị định mức sau: 10/0.4KV; $S_{dm}=630\text{KVA}$; $\Delta P_0=1,65 \text{ KW}$; $\Delta P_n=8,5\text{KW}$; $u_N\%=5,5$; $I_0\%=3$.

Giải

Điện trở tác dụng của máy biến áp:

$$R_B = \frac{\Delta P_N U_{dm}^2 10^3}{S_{dm}^2} = \frac{8,5 \cdot 10^2 \cdot 10^3}{630^2} = 2,14, \Omega$$

Điện kháng tác dụng của máy biến áp:

$$X_B = \frac{U_N\% U_{dm}^2 10}{S_{dm}} = \frac{5,5 \cdot 10^2 \cdot 10}{630} = 8,73 \Omega$$

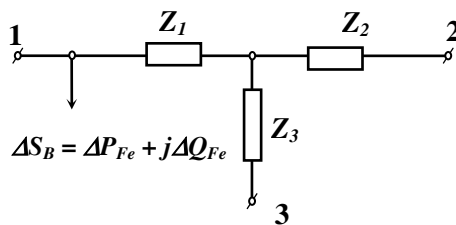
Điện dẫn tác dụng của máy biến áp:

$$G_B = \frac{\Delta P_0}{U_{dm}^2 10^3} = \frac{1,65}{10^2 \cdot 10^3} = 1,65 \cdot 10^{-5}, S$$

Điện dẫn cảm kháng (cảm dẫn) của máy biến áp:

$$B_B = \frac{\Delta Q_0}{U_{dm}^2 10^3} = \frac{I_0\% S_{dm}}{100 U_{dm}^2 10^3} = \frac{3 \cdot 630}{10^5 \cdot 10^2} = 1,89 \cdot 10^{-4}, S$$

b) Sơ đồ thay thế máy biến áp ba cuộn dây



Hình 4.9. Sơ đồ thay thế máy biến áp ba cuộn dây

Z_1, Z_2, Z_3 : Giá trị tổng trở các cuộn dây đã quy đổi về cùng một cấp điện áp.

Đối với máy 3 cuộn dây, nhà chế tạo thường cho biết các thông số định mức: $S_{dm}, U_{1dm}, U_{2dm}, U_{3dm}, I_0\%, \Delta P_0$, và các thông số ngắn mạch: $\Delta P_{12}, \Delta P_{23}, \Delta P_{13}, U_{12}, U_{23}, U_{13}$ (tổn thất ngắn mạch và điện áp ngắn mạch)

Trong đó $\Delta P_{12}, U_{12}$ có được khi cho ngắn mạch cuộn 2, hở mạch cuộn 3, đặt điện áp vào cuộn 1 cho đến khi dòng điện trong cuộn 1 và 2 đạt định mức thì dừng lại. Khi đó:

$$\Delta P_{12} = \Delta P_1 + \Delta P_2$$

$$U_{12} = U_1 + U_2$$

Tương tự có ΔP_{23} , U_{23} bằng cách ngắn mạch cuộn 3, hở mạch cuộn 1, đặt điện áp vào cuộn 2 cho đến khi dòng điện trong cuộn 2 và 3 đạt định mức.

$$\Delta P_{23} = \Delta P_2 + \Delta P_3$$

$$U_{23} = U_2 + U_3$$

Và cũng với cách tương tự để có ΔP_{13} , U_{13}

$$\Delta P_{13} = \Delta P_1 + \Delta P_3$$

$$U_{13} = U_1 + U_3$$

Giải hệ 6 phương trình trên tìm được:

$$\Delta P_1 = 1/2(\Delta P_{12} + \Delta P_{13} + \Delta P_{23})$$

$$\Delta P_2 = \Delta P_{12} - \Delta P_1$$

$$\Delta P_3 = \Delta P_{13} - \Delta P_1$$

$$U_1 = 1/2(U_{12} + U_{13} + U_{23})$$

$$U_2 = U_{12} - U_1$$

$$U_3 = U_{13} - U_1$$

Sau khi đã có tổn thất ngắn mạch và điện áp ngắn mạch riêng cho từng cuộn dây thì việc xác định tổng trở của từng cuộn dây có thể tính toán như máy biến áp 2 cuộn dây.

3 TÍNH TOÁN TỔN THẤT ĐIỆN ÁP TRONG MẠNG CUNG CẤP ĐIỆN

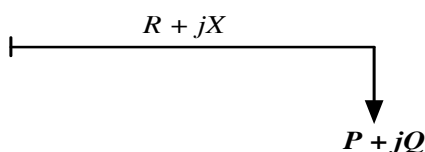
Cấp điện áp của hệ thống cung cấp điện xí nghiệp thường là cấp điện áp thấp, đường dây tương đối ngắn, do đó, trong tính toán tổn thất điện áp cần có các giả thiết sau:

- Xem điện dung đường dây là không đáng kể.
- Xem hiệu ứng mặt ngoài, hiệu ứng ở gần là không đáng kể.
- Điện trở dây dẫn chính bằng điện trở của dây dẫn khi dẫn dòng điện một chiều có cường độ bằng cường độ hiệu dụng của dòng xoay chiều đang xét.

3.1. Tổn thất điện áp trên đường dây ba pha

a) Tổn thất điện áp trên đường dây một phụ tải tập trung

Xét đường dây như hình vẽ:



Hình 4.10. Đường dây có phụ tải tập trung ở cuối đường dây

Tổn thất điện áp tính theo điện áp pha

$$\Delta U_{ph} = IZ = I(R\cos\varphi + jX\sin\varphi) \quad (4.48)$$

Tổn thất điện áp tính theo điện áp dây

$$\Delta U_d = \sqrt{3} I (R \cos \varphi + jX \sin \varphi) \quad (4.49)$$

Với :
$$I = \frac{S}{\sqrt{3} U_{dm}} \quad (4.50)$$

Thế (4.50) vào (4.49), tổn thất điện áp trên đường dây được xác định như sau:

$$\Delta U = \frac{PR + QX}{U_{dm}}, V \quad (4.51)$$

Trong đó

P : Công suất phụ tải tác dụng phụ tải, KW.

Q : Công suất phụ tải phản kháng phụ tải, KVA.

R : Điện trở đường dây, Ω .

X : Điện kháng đường dây, Ω .

U_{dm} : Điện áp định mức đường dây, KV.

Tổn thất điện áp ΔU tính theo phần trăm

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{dm}} 100 = \frac{PR + QX}{U_{dm}^2} \frac{100}{1000} = \frac{PR + QX}{10 U_{dm}^2} \quad (4.52)$$

Tổn thất điện áp phần trăm tính toán phải nhỏ hơn hoặc bằng tổn thất điện áp phần trăm cho phép ($\Delta U_{cp}\%$)

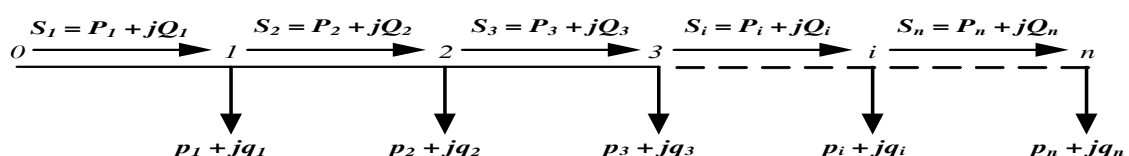
- Tổn thất điện áp cho phép đối với mạng chiếu sáng (chiếu sáng công nghiệp và chiếu sáng công sở, đèn pha) : $\Delta U_{cp} = -2,5\% \div +5\%$
- Tổn thất điện áp cho phép đối với phụ tải là động cơ: $\Delta U_{cp} = -5\% \div +10\%$
- Tổn thất điện áp cho phép đối với các loại phụ tải còn lại là: $\Delta U_{cp} = \pm 5\%$

Khi điện áp tăng cao vượt quá trị số cho phép, tuổi thọ của các thiết bị dùng điện giảm nhanh, đặc biệt là các thiết bị chiếu sáng. Khi điện áp suy giảm dưới mức cho phép, các thiết bị dùng điện giảm công suất, và dễ nhận thấy nhất cũng là các thiết bị chiếu sáng, thể hiện qua khả năng phát quang. Nhìn chung, khi điện áp tăng cao hoặc giảm thấp đều gây nên các phát nóng phụ cho thiết bị dùng điện, giảm tuổi thọ và công suất làm việc, nặng nề hơn có thể làm đình trệ hoạt động của dây chuyền, gây ra hàng loạt phế phẩm.

b) Tổn thất điện áp trên đường dây nhiều phụ tải tập trung (đường dây liên thông)

*** Tổn thất điện áp tính theo trào lưu công suất chạy trên đường dây**

Xét đường dây nhiều phụ tải liên thông trên sơ đồ sau:



Hình 4.11. Đường dây nhiều phụ tải liên thông

$$\Delta U = \frac{1}{U_{dm}} \sum_{i=1}^n (P_i r_i + Q_i x_i), V \quad (4.53)$$

Tính theo phần trăm

$$\Delta U\% = \frac{100}{1000 U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n (P_i r_i + Q_i x_i) = \frac{1}{10 U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n (P_i r_i + Q_i x_i) \quad (4.54)$$

Trong đó:

U_{dm} : Điện áp định mức đường dây, KV

r_i : Điện trở của đoạn đường dây thứ i , Ω

x_i : Điện kháng của đoạn đường dây thứ i , Ω

P_i : Công suất tác dụng chạy trên đoạn đường dây thứ i , KW

Q_i : Công suất phản kháng chạy trên đoạn đường dây thứ i , KVAR

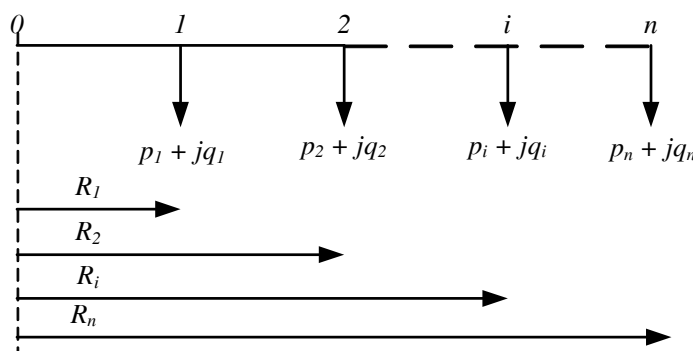
* Tổn thất điện áp tính theo công suất phụ tải

Tổn thất điện áp tính theo công suất phụ tải

$$\Delta U = \frac{1}{U_{dm}} \sum_{i=1}^n (p_i R_i + q_i X_i), V \quad (4.55)$$

Tính theo phần trăm

$$\Delta U\% = \frac{100}{1000 U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n (p_i R_i + q_i X_i) = \frac{1}{10 U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n (p_i R_i + q_i X_i) \quad (4.56)$$



Hình 4.12. Đường dây nhiều phụ tải

Trong đó

R_i : Điện trở tính từ đầu đường dây đến phụ tải thứ i , Ω .

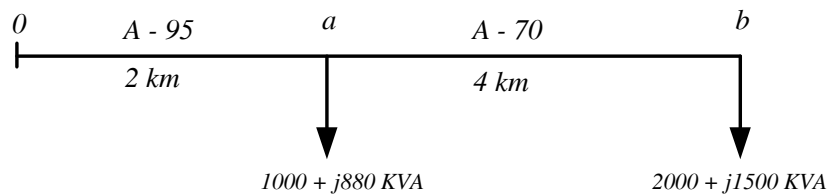
X_i : Điện kháng tính từ đầu đường dây đến phụ tải thứ i , Ω .

p_i : Công suất tác dụng của phụ tải thứ i , KW

q_i : Công suất phản kháng của phụ tải thứ i , KVAR

Ví dụ 2: Xác định tổn thất điện áp trên toàn đường dây và phần trăm điện áp tổn thất, biết lưới điện cung cấp có điện áp định mức 10KV, thông số các đoạn đường dây và các

phụ tải cho trên hình vẽ, trong đó dây dẫn A-95 ($r_0=0,34\Omega/\text{km}$, $x_0=0,35\Omega/\text{km}$), dây dẫn A-70 ($r_0=0,45\Omega/\text{km}$, $x_0=0,36\Omega/\text{km}$).



Giải

Tổn thất điện áp trên đoạn đường dây ab

Điện trở và điện kháng đoạn đường dây 0a:

$$r_{0a} = r_0 l_{0a} = 0,34.2 = 0,68\Omega$$

$$x_{0a} = x_0 l_{0a} = 0,35.2 = 0,70\Omega$$

Điện trở và điện kháng đoạn đường dây ab:

$$r_{ab} = r_0 l_{ab} = 0,45.4 = 1,8\Omega$$

$$x_{ab} = x_0 l_{ab} = 0,36.4 = 1,44\Omega$$

$$\Delta U = \frac{1}{U_{dm}} \sum_{i=1}^n (P_i r_i + Q_i x_i)$$

$$\Delta U = \frac{3000.0,68 + 2000.1,8}{10} + \frac{2380.0,7 + 1500.1,44}{10} = 946,6V$$

Tổn thất điện áp trên đoạn đường dây 0a

Điện trở và điện kháng đoạn đường dây 0a:

$$R_{0a} = r_0 l_{0a} = 0,34.2 = 0,68\Omega$$

$$X_{0a} = x_0 l_{0a} = 0,35.2 = 0,70\Omega$$

Điện trở và điện kháng đoạn đường dây 0b:

$$R_{ab} = r_0 l_{0a} + r_0 l_{ab} = 0,68 + 1,8 = 2,48\Omega$$

$$X_{ab} = x_0 l_{0a} + x_0 l_{ab} = 0,70 + 1,44 = 2,14\Omega$$

Tổn thất điện áp trên toàn đường dây 0ab

$$\Delta U = \frac{1}{U_{dm}} \sum_{i=1}^n (p_i R_i + q_i X_i)$$

$$\Delta U = \frac{1000.0,68 + 2000.2,48}{10} + \frac{880.0,7 + 1500.2,12}{10} = 946,6V$$

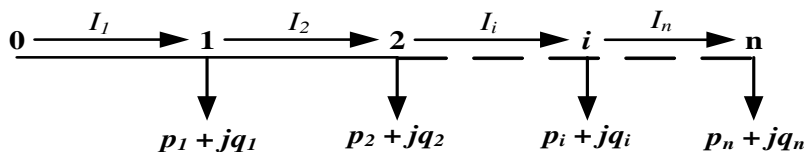
Phần trăm tổn thất điện áp trên toàn đường dây

$$\Delta U\% = \frac{\Delta U}{U_{dm}} 100 = \frac{0,946}{10} 100 = 9,46\%$$

*** Tổn thất điện áp tính theo dòng điện truyền tải**

Tổn thất điện áp tính theo dòng điện trên đường dây:

$$\Delta U = \sqrt{3} \sum_{i=1}^n (I_i r_i + I_i x_i), V \quad (4.57)$$



Hình 4.13. Tổn thất điện áp tính theo dòng điện trên đường dây

Phần trăm tổn thất điện áp

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 100}{U_{dm}} \sum_{i=1}^n (I_i r_i + I_i x_i) \quad (4.58)$$

Trong đó

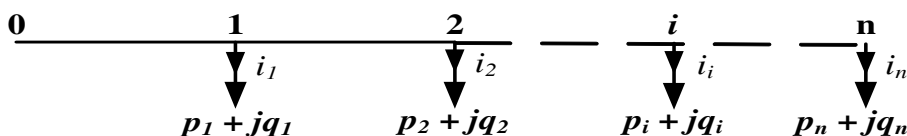
I_i : Dòng điện chạy trên đường dây thứ i , A

r_i : Điện trở của đoạn dây thứ i , Ω

x_i : Điện kháng của đoạn dây thứ i , Ω

Tổn thất điện áp tính theo dòng điện phụ tải:

$$\Delta U = \sqrt{3} \sum_{i=1}^n (i_i R_i + i_i X_i), V \quad (4.59)$$



Hình 4.14. Tổn thất điện áp tính theo dòng điện phụ tải

Phần trăm tổn thất điện áp

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 100}{U_{dm}} \sum_{i=1}^n (I_i r_i + I_i x_i) \quad (4.60)$$

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3} \cdot 100}{U_{dm}} \sum_{i=1}^n (i_i R_i + i_i X_i) \quad (4.61)$$

Trong đó:

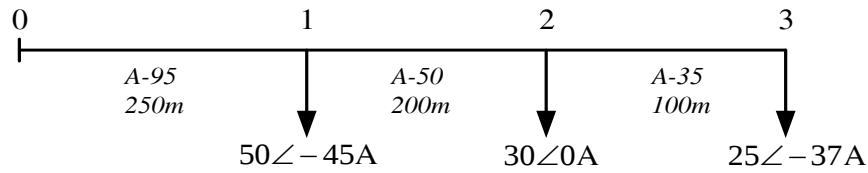
i_i : Dòng điện của phụ tải thứ i , A

R_i : Điện trở tính từ đầu đường dây đến phụ tải thứ i , Ω

X_i : Điện kháng tính từ đầu đường dây đến phụ tải thứ i , Ω

Ví dụ 3: Tính toán tổn thất điện áp đường dây ba pha 380V trên không, dây nhôm lõi thép, khoảng cách giữa các pha là 0,4m, thông số dây dẫn trên mỗi đoạn như sau: dây A–

95 ($r_0=0,33\Omega/\text{km}$, $x_0=0,274\Omega/\text{km}$), dây A-50 ($r_0=0,63\Omega/\text{km}$, $x_0=0,279\Omega/\text{km}$), dây A-33 ($r_0=0,91\Omega/\text{km}$, $x_0=0,308\Omega/\text{km}$)



Giải

Thành phần dòng điện tác dụng và phản kháng tại các phụ tải:

$$i_{a1} = i \cos(-45^\circ) = 50 \cos(-45^\circ) = 35 \text{ A} \quad i_{r1} = i \sin(-45^\circ) = 50 \sin(-45^\circ) = -35 \text{ A}$$

$$i_{a2} = i \cos(0^\circ) = 30 \cos(0^\circ) = 30 \text{ A} \quad i_{r2} = i \sin(0^\circ) = 30 \sin(0^\circ) = 0 \text{ A}$$

$$i_{a3} = i \cos(-37^\circ) = 25 \cos(-37^\circ) = 20 \text{ A} \quad i_{r3} = i \sin(-37^\circ) = 25 \sin(-37^\circ) = -15 \text{ A}$$

Dòng điện phụ tải:

$$i_1 = 35 - j35 \text{ A}$$

$$i_2 = 30 - j0 \text{ A}$$

$$i_3 = 20 - j15 \text{ A}$$

Dòng điện chạy trên từng đoạn dây:

$$I_1 = i_1 + i_2 + i_3 = (35 - j35) + (30 - j0) + (20 - j15) = 85 - j50 \text{ A}$$

$$I_2 = i_2 + i_3 = (30 - j0) + (20 - j15) = 50 - j15 \text{ A}$$

$$I_3 = 20 - j15 \text{ A}$$

Tổn thất điện áp:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \sqrt{3} \sum_{i=1}^n (I_i r_i + I_p x_i) \\ &= \sqrt{3} [(85 \cdot 0,33 + 50 \cdot 0,274) 0,25 + (50 \cdot 0,63 + 15 \cdot 0,297) 0,2 + (20 \cdot 0,91 + 15 \cdot 0,308) 0,1] \\ &= 34,4 \text{ V} \end{aligned}$$

Phần trăm tổn thất điện áp:

$$\Delta U \% = \frac{\Delta U}{U_{dm}} 100 = \frac{34,4}{380} 100 = 9$$

* Các trường hợp đặc biệt:

- Tổn thất điện áp trên đường dây đồng chất và có thiết diện đồng nhất:

$$\Delta U = \frac{1}{U_{dm}} (r_0 \sum_{i=1}^n P_i l_i + x_0 \sum_{i=1}^n Q_i l_i), \text{ V} \quad (4.62)$$

Hoặc:

$$\Delta U = \frac{1}{U_{dm}} (r_0 \sum_{i=1}^n p_i L_i + x_0 \sum_{i=1}^n q_i L_i), \text{ V} \quad (4.63)$$

Phần trăm tổn thất điện áp:

$$\Delta U\% = \frac{\sqrt{3}100}{1000U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n i_i L_i (r_0 \cos \varphi_{tb} + x_0 \sin \varphi_{tb}) \quad (4.64)$$

Hoặc:

$$\Delta U\% = \frac{1}{10U_{dm}^2} (r_0 \cos \varphi_{tb} + x_0 \sin \varphi_{tb}) \sum_{i=1}^n i_i L_i \quad (4.65)$$

Với:

$$i_i = \frac{p_i}{\sqrt{3}U_{dm} \cos \varphi_{tb}} \quad (4.66)$$

$$\cos \varphi_{tb} = \frac{p_1 \cos \varphi_1 + p_2 \cos \varphi_2 + \dots + p_n \cos \varphi_n}{p_1 + p_2 + \dots + p_n} \quad (4.67)$$

- *Tổn thất điện áp trên đường dây có phụ tải thuần trở (dàn dây tóc, lò điện trở,...) có hệ số công suất $\cos \varphi = 1$, đường dây cáp mạng điện áp thấp có $r_0 \gg x_0$:*

$$\Delta U\% = \frac{1}{10U_{dm}^2} r_0 \sum_{i=1}^n p_i L_i \quad (4.68)$$

Trong đó

U_{dm} : Điện áp định mức đường dây, KV

p_i : Công suất tác dụng phụ tải thứ i , KW

L_i : Chiều dài đoạn dây thứ i , m

r_0 : Điện trở tác dụng của đường dây, Ω/km

Đặt $\sum_{i=1}^n p_i L_i = M$, KWm, với M là moment phụ tải. Vậy tổn thất điện áp trên đường dây được tính như sau:

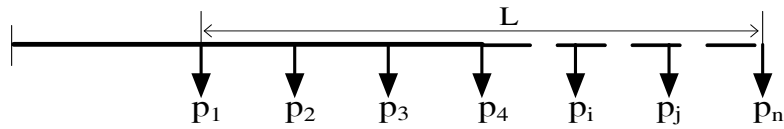
$$\Delta U\% = \frac{1}{10U_{dm}^2} r_0 M \quad (4.69)$$

c) *Tổn thất điện áp trên đường dây có phụ tải phân bố đều*

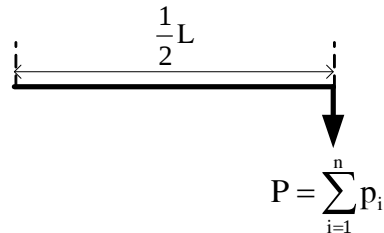
Khái niệm “*đường dây có phụ tải phân bố đều*” hay “*đường dây có thông số rải*” thường dùng để chỉ các đường dây hạ áp cung cấp điện cho các phụ tải sinh hoạt có công suất xấp xỉ nhau (khu dân cư, chung cư, phố thương mại,...), phân bố dọc theo chiều dài đường dây với những khoảng cách khá gần nhau, vì vậy việc tính toán tổn thất điện áp không cần thiết phải tính cụ thể từng phụ tải trên từng đoạn đường dây vì tương đối phức tạp.

Thông qua một số bước biến đổi công thức toán học, có thể quy tất cả các phụ tải phân bố đều trên đường dây về *một phụ tải tập trung tại trung điểm của đường dây* với công suất bằng tổng công suất các phụ tải.

*** Đường dây có phụ tải phân bố đều liên tục**



Hình 4.15a. Đường dây có phụ tải phân bố đều



Hình 4.15b. Sơ đồ thay thế tương đương của đường dây có phụ tải phân bố đều

Moment phụ tải tương đương trên đường dây:

$$M_{td} = PL \quad (4.70)$$

Trong đó:

M_{td} : Moment phụ tải tương đương, KW.m

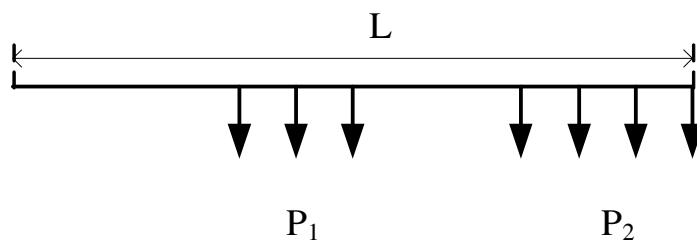
P : Tổng công suất tác dụng các phụ tải, KW

L : Chiều dài đường dây tính từ đầu đường dây đến điểm phân bố tổng phụ tải, m

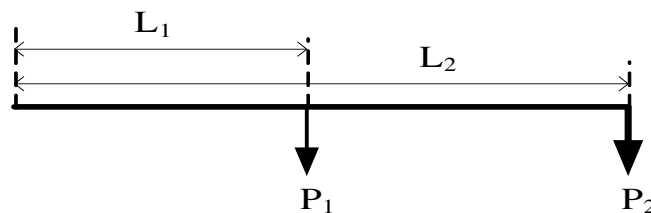
Tổn thất điện áp tính theo phần trăm

$$\Delta U\% = \frac{1}{10U_{dm}^2} r_0 M_{td} \quad (4.71)$$

* Đường dây có phụ tải phân bố (rời rạc)



Hình 4.16a. Đường dây có phụ tải phân bố rời rạc



Hình 4.16b. Sơ đồ thay thế tương đương

Moment phụ tải tương đương trên đường dây:

$$M_{td} = P_1 L_1 + P_2 L_2 \quad (4.72)$$

Phần trăm tổn thất điện áp:

$$\Delta U\% = \frac{1}{10U_{dm}^2} r_0 M_{td} \quad (4.73)$$

3.2 Tổn thất điện áp trong mạng chiếu sáng (1 pha)

Tổn thất điện áp đối với đường dây chiếu sáng 1 pha chỉ sử dụng đèn dây tóc được xác định bởi:

$$\Delta U\% = \frac{1}{10U_{dm}^2} r_0 \sum_{i=1}^n p_i L_i \quad (4.74)$$

Do đèn dây tóc có hệ số công suất $\cos\varphi$ xấp xỉ 1. Nếu thay $r_0 = \frac{1}{\gamma F}$, trong đó $\gamma = \frac{1}{\rho}$ là điện dẫn suất của vật liệu làm dây dẫn ($\gamma_{cu} = 53$, $\gamma_{Al} = 32$), F là thiết diện của dây dẫn, mm^2 , công thức (4.74) được viết lại:

$$\Delta U\% = \frac{100}{1000\gamma \frac{U_{dm}^2}{1000^2}} \frac{M}{F} = \frac{100.1000}{\gamma U_{dm}^2} \frac{M}{F} \quad (4.75)$$

Trong đó:

$$M = \sum_{i=1}^n p_i L_i : \text{Moment phụ tải, KWm}$$

U_{dm} : Điện áp định mức mạng điện, V

Đặt: $C = \frac{\gamma U_{dm}^2}{100.1000}$ và $\Delta U\% = [\Delta U\%]_{cp}$ tổn thất điện áp cho phép, đối với mạng chiếu sáng $[\Delta U\%]_{cp} = 2,5\%$.

Thiết diện dây dẫn trong mạng chiếu sáng phải thoả điều kiện tổn thất điện áp và được tính như sau:

$$F = \frac{M}{C[\Delta U\%]_{cp}}, mm^2 \quad (4.76)$$

Hệ số C ứng với các mạng điện có cấu trúc khác nhau được cho trong bảng tra:

Bảng 4.1: Bảng tra hệ số C theo cấu trúc mạng điện

Điện áp định mức lưới (V)	Cấu trúc của mạng lưới điện	Công thức tính hệ số C	Hệ số C khi dây dẫn	
			Đồng	Nhôm
220/380V	Ba pha có dây trung tính	$\frac{\gamma U_{dm}^2}{100.1000}$	77	46
220/380V	Hai pha có dây trung tính	$\frac{\gamma U_{dm}^2}{2,25.100.1000}$	34	20

36V	Hai dây xoay chiều hoặc một chiều	$\frac{\gamma U_{\text{dmph}}^2}{2.100.1000}$	0,34	0,21
24V			0,153	0,092
12V			0,038	0,023

Ví dụ 4: Xác định tổn thất điện áp của đường dây ba pha 380V trên không. Toàn bộ là dây nhôm đồng chất, thiết diện 10mm², $r_0=3,14\Omega/\text{km}$, $x_0=0,4\Omega/\text{km}$, cấp điện cho các phụ tải có công suất tác dụng lần lượt là 10 KW; 5 KW; 2,5KW. Biết khoảng cách từ nguồn đến các phụ tải này lần lượt là 50m, 80m, 120m và hệ số công suất của các phụ tải là bằng nhau là 0,8.

Giải

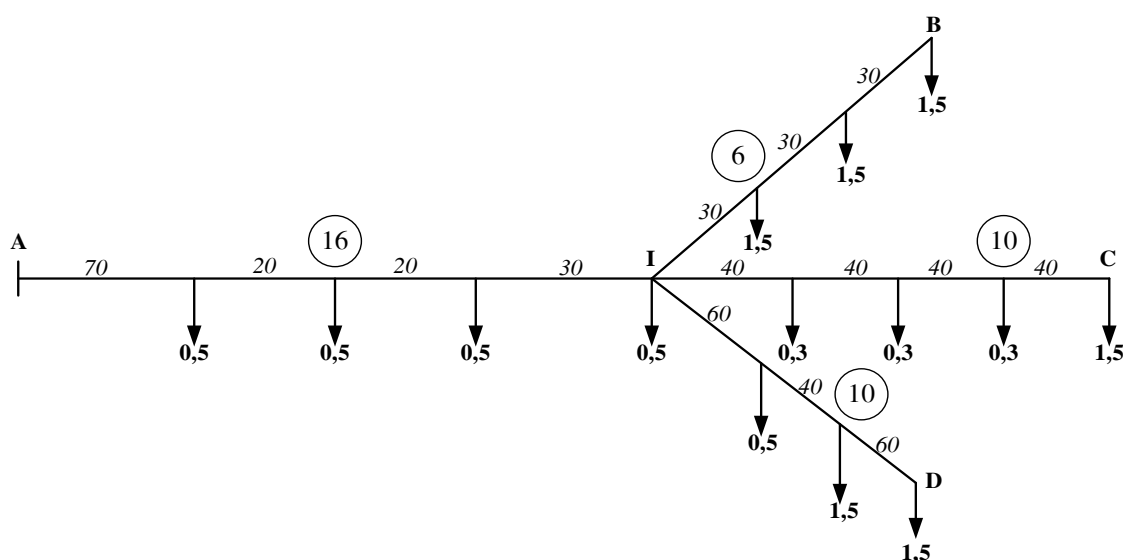
Do dây dẫn là đồng nhất nên áp dụng công thức

$$\Delta U\% = \frac{10^5}{U_{\text{dm}}^2} (r_0 \cos \varphi_{\text{tb}} + x_0 \sin \varphi_{\text{tb}}) \sum_{i=1}^n p_i L_i$$

Phần trăm tổn thất điện áp:

$$\Delta U\% = \frac{10^5}{380^2} (3,14.0,8 + 0,4.0,6) (10.0,005 + 0,008 + 2,5) = 11,43$$

Ví dụ 5: Đường dây chiếu sáng có điện áp định mức 220/380V như hình vẽ. Đơn vị công suất phụ tải cho bằng KW, chiều dài tính bằng mét, tiết diện mm², dây dẫn đồng. Tìm phần trăm tổn thất điện áp lớn nhất trên toàn đường dây.



Giải

Phần trăm tổn thất điện áp:

$$\Delta U\% = \frac{M}{CF}$$

với $C = 77$ (tra bảng)

Phần trăm tổn thất điện áp trên các đoạn dây:

$$\Delta U\%_{A-I} = \frac{0,5.70 + 0,5.90 + 0,5.110 + 10,9.140}{77.16} = 1,35$$

$$\Delta U\%_{I-B} = \frac{1,5.30 + 1,5.60 + 1,5.90}{77.6} = 0,58$$

$$\Delta U\%_{I-C} = \frac{0,3.40 + 0,3.80 + 0,3.120 + 1,5.160}{77.10} = 0,4$$

$$\Delta U\%_{I-D} = \frac{0,5.60 + 1,5.100 + 1,5.60}{77.10} = 0,35$$

Phần trăm tổn thất điện áp lớn nhất là trên đoạn A–B

$$\Delta U\%_{A-B} = 1,35 + 0,58 = 1,93$$

Ví dụ 6: Một phụ tải công nghiệp có tổng công suất là $420 + j495 \text{ KVA}$, được cấp điện bởi đường dây trên không dài 30Km, dây dẫn loại M–35, điện áp định mức $U_{dm} = 22 \text{ KV}$. Hãy kiểm tra tổn thất điện áp trên đường dây, biết rằng dây M–35 có các thông số $r_0 = 0,54 \Omega/\text{km}$ và $x_0 = 0,366 \Omega/\text{km}$

Giải

Điện trở, điện kháng đường dây:

$$R = r_0 l = 0,54.30 = 16,2 \Omega$$

$$X = x_0 l = 0,366.30 = 10,98 \Omega$$

Tổn thất điện áp:

$$\Delta U\% = \frac{PR + QX}{U_{dm}^2} \frac{100}{1000} = \frac{420.16,2 + 495.10,98}{22^2} \frac{100}{1000} = 2,5$$

Phần trăm tổn thất điện áp trên đường dây:

$$\Delta U\% = 2,5\% < [\Delta U\%]_{cp} = 5\%.$$

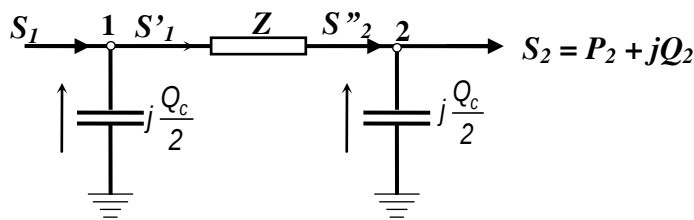
Tổn điện áp trên đường dây nằm trong giới hạn cho phép.

4 TÍNH TOÁN TỔN THẤT CÔNG SUẤT TRONG MẠNG CUNG CẤP ĐIỆN

4.1. Tổn thất công suất trên đường dây

a) Đường dây mạng cung cấp (đường dây cao áp):

Trong tính toán đường dây, đối với mạng 110kV và một số trường hợp ở mạng 220kV, người ta dùng sơ đồ thay thế hình II, trong đó có thể bỏ qua thành phần điện dẫn tác dụng G của đường dây và chỉ xét đến thành phần điện dẫn phản kháng $Y = jB$ do dung dẫn đường dây gây ra, Y thường được thay thế bằng phụ tải phản kháng $-jQ_c$.



Hình 4.17. Sơ đồ thay thế hình II để tính tổn thất công suất trên đường dây

Do:
$$\Delta S = 3.I_{dm}^2.Z, \text{ với: } I = \frac{S}{\sqrt{3}U}$$

$$\Delta S = \frac{S^2}{U^2}.Z \quad (4.77)$$

Công suất cuối đường dây:

$$S_2'' = \dot{S}_2 - j \frac{Q_{c2}}{2} = P_2 + j(Q_2 + \frac{Q_{c2}}{2}) \quad (4.78)$$

Tổn thất công suất có thể xác định theo công suất ở cuối đường dây:

$$\Delta \dot{S} = \Delta P + j\Delta Q = \left(\frac{S_2''}{U_2} \right)^2 .Z = \frac{S_2''^2}{U_2^2} .R + j. \frac{S_2''^2}{U_2^2} .X \quad (4.79)$$

Công suất đầu đường dây:

$$S_1' = S_2'' + \Delta \dot{S} \quad (4.80)$$

Tổn thất công suất có thể xác định theo công suất ở đầu đường dây:

$$\Delta \dot{S} = \Delta P + j\Delta Q = \left(\frac{S_1'}{U_1} \right)^2 .Z = \frac{S_1'^2}{U_1^2} .R + j. \frac{S_1'^2}{U_1^2} .X \quad (4.81)$$

Khi đó công suất cuối đường dây:

$$\dot{S}_2'' = \dot{S}_1' - \Delta \dot{S} \quad (4.82)$$

Công suất vào ở đầu đường dây:

$$\dot{S}_1 = \dot{S}_1' - j \frac{Q_{c1}}{2} \quad (4.83)$$

Giá trị phụ tải phản kháng của đường dây tính theo điện dẫn phản kháng như sau:

$$\frac{Q_{c1}}{2} = U_1^2 . \frac{B}{2} \quad (4.84)$$

$$\frac{Q_{c2}}{2} = U_2^2 . \frac{B}{2} \quad (4.85)$$

b) Đường dây mạng phân phối:

Khi tính toán đường dây mạng phân phối (15, 22, 35kV) có thể bỏ qua cả giá trị điện dẫn Y trên sơ đồ thay thế. Để xác định tổn thất công suất, có thể bỏ qua sự chênh lệch điện áp giữa các điểm đầu và cuối đường dây (tức xem $U_2 = U_1 = U_{dm}$), bỏ qua chênh lệch công suất giữa điểm đầu và điểm cuối đường dây (tức $S' = S'' = S_1 = S_2$) để thuận tiện và đơn giản hóa các tính toán khi xác định trào lưu công suất trên từng đoạn đường dây. Ví dụ để tính trào lưu công suất chạy trên đoạn 23 và đoạn 01 trong mạng điện biểu diễn như trên sơ đồ dưới đây:

- Trào lưu công suất trên đoạn 23 (phân phối cho 3 nút mạng 3, 10, 11):

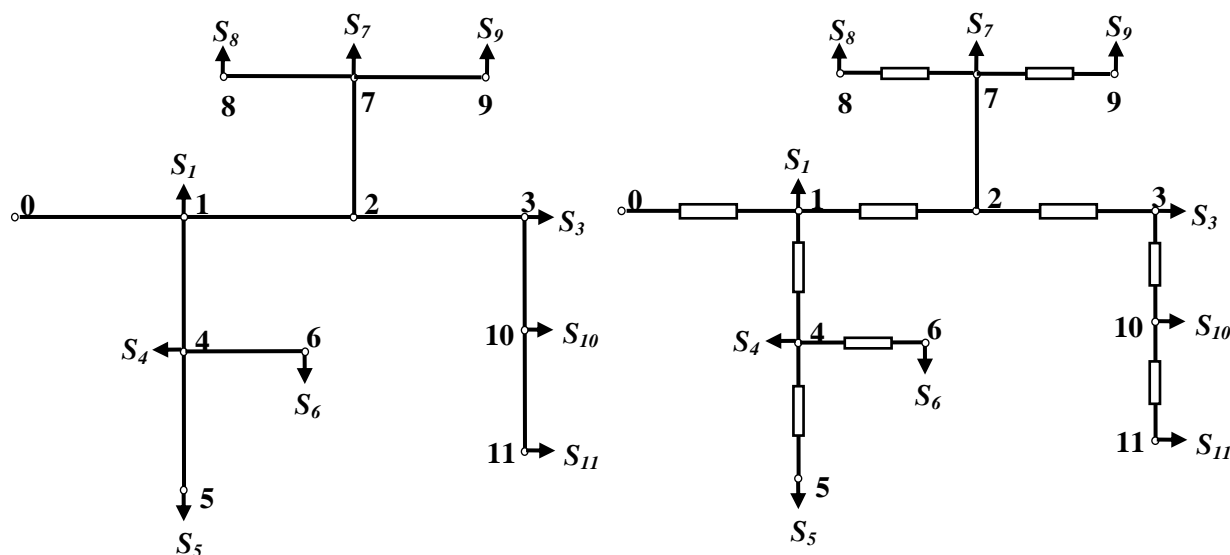
$$S_{23} = S_3 + S_{10} + S_{11} \quad (4.86)$$

- Trào lưu công suất trên đoạn 01 (phân phối cho toàn bộ các nút có trong mạng):

$$S_{01} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (4.87)$$

Và khi tính tổn thất công suất trên một phần tử bất kỳ giữa 2 nút i và j nào đó của mạng phân phối, dùng công thức sau:

$$\Delta S_{ij} = \Delta P_{ij} + \Delta Q_{ij} = \left(\frac{S_{ij}}{U_{dm}} \right)^2 \cdot (R_{ij} + jX_{ij}) \quad (4.88)$$



Hình 4.18. Trào lưu công suất trên các đoạn mạch của một mạng phân phối nhiều nút

- Trào lưu công suất trên đoạn 23 (phân phối cho 3 nút mạng 3, 10, 11):

$$S_{23} = S_3 + S_{10} + S_{11} \quad (4.89)$$

- Trào lưu công suất trên đoạn 01 (phân phối cho toàn bộ các nút có trong mạng):

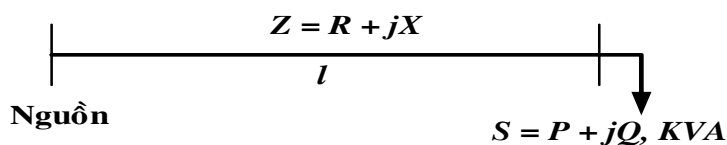
$$S_{01} = \sum_{i=1}^n S_i \quad (4.90)$$

Và khi tính tổn thất công suất trên một phần tử bất kỳ giữa 2 nút i và j nào đó của mạng phân phối, dùng công thức sau:

$$\Delta S_{ij} = \Delta P_{ij} + \Delta Q_{ij} = \left(\frac{S_{ij}}{U_{dm}} \right)^2 \cdot (R_{ij} + jX_{ij}) \quad (4.91)$$

* Đường dây có phụ tải tập trung

Mạng điện có phụ tải tập trung ở cuối đường dây, với điện áp định mức đường dây là U_{dm} (KV), tổng trở của đường dây Z (Ω) và công suất phụ tải S (KVA).



Hình 4.19. Đường dây có phụ tải tập trung.

Tổn thất công suất tác dụng trên đường dây

$$\text{Đường dây một pha:} \quad \Delta P = I^2 R \quad (4.92)$$

$$\text{Đường dây ba pha:} \quad \Delta P = 3I^2 R \quad (4.93)$$

Công suất ba pha của mạng điện

$$S = \sqrt{3} UI \quad (4.94)$$

Với:

U : Điện áp dây của mạng điện, KV

I : Dòng điện dây, A

S : Công suất ba pha, KVA

Dòng điện chạy trên đường dây

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U} \quad (4.95)$$

Tổn thất công suất tác dụng đường dây ba pha

$$\Delta P = 3I^2 R = 3 \left(\frac{S}{\sqrt{3}U} \right)^2 R \quad (4.96)$$

$$\Delta P = \frac{S^2}{U^2} R \quad (4.97)$$

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} R, W \quad (4.98)$$

Tổn thất công suất phản kháng

$$\Delta Q = 3I^2 X = 3 \left(\frac{S}{\sqrt{3}U} \right)^2 X \quad (4.99)$$

$$\Delta Q = \frac{S^2}{U^2} X \quad (4.100)$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} X, VAR \quad (4.101)$$

Tổn thất công suất toàn phần của mạng điện

$$\Delta S = \Delta P + j\Delta Q = \frac{S^2}{U^2} (R + jX), VA \quad (4.102)$$

$$\Delta S = \left[\frac{P^2 + Q^2}{U_{dm}^2} \right] (R + jX), VA \quad (4.103)$$

Trong đó:

R : Điện trở tác dụng đường dây, Ω

X : Điện kháng tác dụng đường dây, Ω

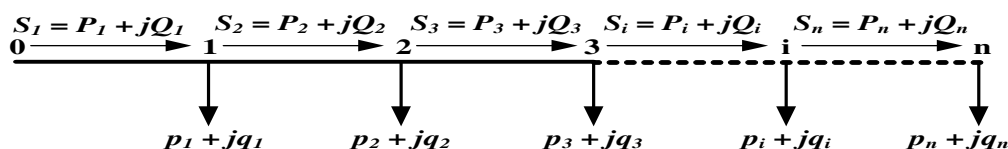
P : Công suất phụ tải tác dụng, KW

Q : Công suất phụ tải phản kháng, KVAR

U : Điện áp định mức đường dây, KV

*** Đường dây nhiều phụ tải tập trung (đường dây liên thông)**

Đường dây nhiều phụ tải tập trung (đường dây liên thông) biểu diễn như sơ đồ sau:



Hình 4.20. Đường dây nhiều phụ tải.

$p_i + jq_i$: Công suất phụ tải thứ i , KVA

$P_i + jQ_i$: Công suất truyền tải trên đoạn dây thứ i , KVA

R_i, X_i : Điện trở điện kháng đoạn dây thứ i , Ω

$$P_i + jQ_i = \sum_{i=1}^n p_i + jq_i$$

Tổn thất công suất tác dụng trên đường dây

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2 + \dots + \Delta P_n = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \quad (4.104)$$

Tổn thất công suất phản kháng

$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2 + \dots + \Delta Q_n = \sum_{i=1}^n \Delta Q_i \quad (4.105)$$

Với

$$\Delta P_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_{dm}^2} R_i : \text{Tổn thất công suất tác dụng trên đoạn đường dây thứ } i, W$$

$$\Delta Q_i = \frac{P_i^2 + Q_i^2}{U_{dm}^2} X_i : \text{Tổn thất công suất phản kháng trên đoạn đường dây thứ } i, VAR$$

Tổng quát, tổn thất công suất tác dụng và phản kháng trên toàn đường dây

$$\Delta P = \frac{1}{U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) R_i, W \quad (4.106)$$

$$\Delta P = \frac{1}{U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n S_i^2 R_i, W \quad (4.107)$$

$$\Delta Q = \frac{1}{U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) X_i, VAR \quad (4.108)$$

$$\Delta Q = \frac{1}{U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n S_i^2 X_i, VAR \quad (4.109)$$

Tổn thất công suất toàn phần trên đường dây

$$\Delta S = \Delta P + j\Delta Q \quad (4.110)$$

$$\Delta S = \frac{1}{U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) R_i + j \frac{1}{U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) X_i \quad (4.111)$$

$$\Delta S = \frac{1}{U_{dm}^2} \left[\sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) R_i + j \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) X_i \right] \quad (4.112)$$

$$\Delta S = \frac{1}{U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n S_i^2 Z_i \quad (4.113)$$

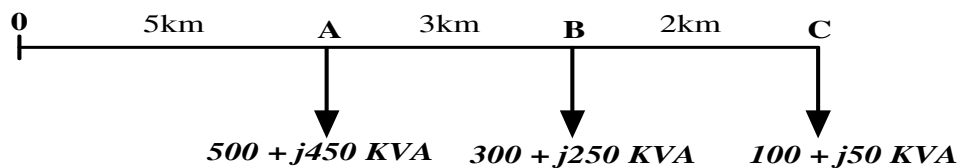
Trường hợp đặc biệt đường dây đồng chất và có cùng tiết diện:

$$\Delta S = \frac{1}{U_{dm}^2} \left[R \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) + jX \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) \right] \quad (4.114)$$

$$\Delta S = \frac{Z}{U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) = \frac{Z}{U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n S_i^2 \quad (4.115)$$

Với: $Z = r_0 l + jx_0 l$ là tổng trở đường dây.

Ví dụ 7: Tính các tổn thất công suất tác dụng, công suất phản kháng của một mạng cung cấp điện nhiều phụ tải có các số liệu đường dây và phụ tải cho trên hình vẽ sau. Biết điện áp định mức mạng điện là 10KV, đường dây có thiết diện đều nhau và có các thông số $r_0 = 0,3\Omega/\text{km}$, $x_0 = 0,45\Omega/\text{km}$ trên toàn mạng.



Giải

Tổn thất công suất tác dụng trên đường dây:

$$\Delta P = \frac{1}{U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) R_i, W$$

$$\Delta P = \frac{(900^2 + 750^2)1,5 + (400^2 + 300^2)0,9 + (100^2 + 50^2)0,6}{10^2} = 22905W = 22,9KW$$

Tổn thất công suất phản kháng trên đường dây:

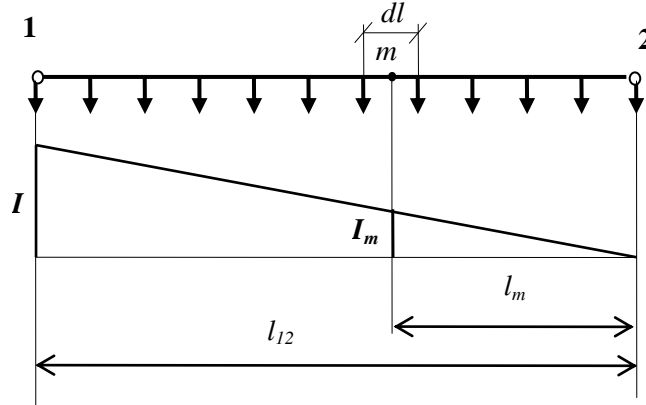
$$\Delta Q = \frac{1}{U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n (P_i^2 + Q_i^2) X_i, VAR$$

$$\Delta Q = \frac{(900^2 + 750^2)2,25 + (400^2 + 300^2)1,35 + (100^2 + 50^2)0,9}{10^2}$$

$$\Delta Q = 34360VAR = 34,36KVAR$$

c) Đường dây có phụ tải phân bố đều:

Khi đường dây phân phối có các phụ tải công suất gần như nhau và phân bố đều dọc theo chiều dài đường dây gọi là đường dây có phụ tải phân bố đều. Trong thực tế, mạng phân phối cho các thành phố, mạng cung cấp cho khu vực dân cư, khu tập thể, mạng điện phân xưởng có kết cấu dạng thanh dẫn,... đều được xem như mạng có phụ tải phân bố đều. Khi tính toán mạng có phụ tải phân bố đều, cần giả thiết dòng điện biến thiên dọc chiều dài đường dây theo quy luật đường thẳng và các dây dẫn có tiết diện đều.



Hình 4.21. Đường dây có phụ tải phân bố đều

Tại điểm m bất kỳ của mạng điện, có cường độ dòng điện là I_m tính bởi:

$$I_m = \frac{I \cdot l_m}{l_{12}} \quad (4.116)$$

Gọi $d\Delta P$ là tổn thất công suất trên đoạn đường dây chiều dài dl có chứa điểm m , khi đó:

$$d\Delta P = 3 \cdot dr \cdot I_m^2 \quad (4.117)$$

Với:

$$dr = r_0 \cdot dl$$

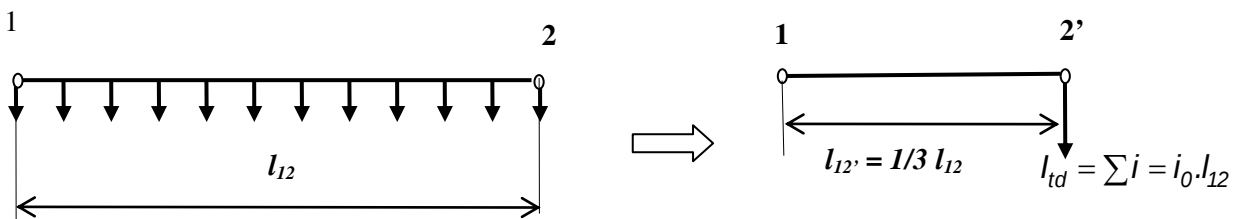
$$d\Delta P = 3 \cdot r_0 \cdot dl \cdot I_m^2 = 3 \cdot \left(\frac{I \cdot l_m}{l_{12}} \right)^2 \cdot r_0 \cdot dl$$

$$\Delta P = \int_0^{l_{12}} \frac{3 \cdot r_0}{l_{12}^2} I^2 l_m^2 dl = r_0 l_{12} \cdot I^2 = R_{12} I^2 \quad (4.118)$$

Trong trường hợp phụ tải P tập trung ở cuối đường dây, tổn thất công suất là:

$$\Delta P = 3 \cdot r_0 \cdot l_{12} \cdot I^2 = 3 \cdot R_{12} I^2$$

Vậy, tổn thất công suất khi phụ tải phân bố đều trên đường dây l chỉ bằng 1/3 tổn thất công suất khi phụ tải tập trung ở cuối đường dây.



Hình 4.22. Sơ đồ thay thế để tính tổn thất công suất đường dây có phụ tải phân bố đều

Ví dụ 8: Tính tổn thất công suất của đường dây ba pha 0,4KV, chiều dài $l=100$ m có phụ tải phân bố đều dọc theo đường dây. Biết công suất phụ tải tác dụng trên một đơn vị chiều dài đường dây là $p_0 = 0.15$ KW/m, hệ số công suất $\cos \varphi = 1,0$, điện trở tác dụng của đường dây là $r_0 = 1,27 \Omega/\text{km}$.

Giải

Điện trở của đường dây:

$$R = r_0 l = 1,27 \cdot 0,1 = 0,127 \Omega$$

Tổng công suất phụ tải tác dụng của đường dây:

$$P = p_0 l = 0,15 \cdot 100 = 15 \text{ KW}$$

Tổn thất công suất trên đường dây:

$$\Delta P = I^2 R = \frac{P^2}{3U^2} R = \frac{15000^2}{3 \cdot 380^2} 0,127 = 65,96 \text{ W}$$

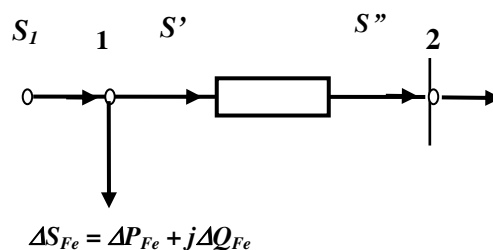
4.2. Tổn thất công suất biến áp

Có 2 trường hợp tính tổn thất công suất biến áp: tổn thất trong từng máy biến áp và tổn thất trong trạm biến áp.

Đối với máy biến áp hay trạm biến áp nói chung, ngoài tổn thất công suất trên các cuộn dây sơ và thứ cấp (tổn thất đồng P_{cu}) tức tổn thất khi mang tải, còn phải tính đến tổn thất xảy ra trên lõi thép (tổn thất sắt P_{Fe}) tức tổn thất không tải.

a) Tổn thất công suất trong máy biến áp

* **Máy biến áp 2 cuộn dây:**



Hình 4.23. Sơ đồ thay thế để tính tổn thất công suất trên máy biến áp 2 cuộn dây

Tổn thất công suất trên 2 cuộn dây là tổn thất trên tổng trở trên máy biến áp Z_B .

$$\Delta S_{cu} = \Delta P_{cu} + j\Delta Q_{cu} = \left(\frac{S''}{U_2} \right)^2 R_B + j \left(\frac{S''}{U_2} \right)^2 X_B \quad (4.119)$$

Trong đó: $S'' = S_2$ công suất của phụ tải.

Tổn thất công suất trong máy biến áp:

$$\Delta S_B = \Delta S_{Fe} + \Delta S_{cu} = \left[\Delta P_{Fe} + \left(\frac{S''}{U_2} \right)^2 R_B \right] + j \left[\Delta Q_{Fe} + \left(\frac{S''}{U_2} \right)^2 X_B \right] \quad (4.120)$$

Công suất đầu vào máy biến áp là:

$$S_I = \Delta S_{Fe} + S' = \Delta S_B + S_2 \quad (4.121)$$

Trong thực tế có thể xác định tổn thất công suất trên các cuộn dây theo các thông số cho trước của máy biến áp:

$$R_B = \frac{\Delta P_N \cdot U_{dm}^2}{S_{dm}^2}, \quad X_B = \sqrt{Z_B^2 - R_B^2}$$

Trong đó:

$$Z_B = \frac{U_N \% \cdot U_{dm}^2}{S_{dm}}$$

$$X_B = \sqrt{\left(\frac{U_N \% \cdot U_{dm}^2}{S_{dm}}\right)^2 - \left(\frac{\Delta P_N \cdot U_{dm}^2}{S_{dm}^2}\right)^2} = \frac{U_{dm}^2}{S_{dm}^2} \sqrt{(U_N \% \cdot S_{dm})^2 - \Delta P_N^2} \quad (4.122)$$

Lấy gần đúng $U_2 = U_{dm}$, khi đó:

$$\Delta P_{Cu} = \left(\frac{S''}{S_{dm}}\right)^2 \Delta P_N \quad (4.123)$$

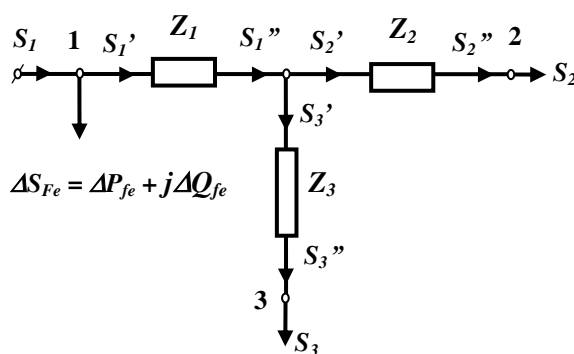
$$\Delta Q_{Cu} = \left(\frac{S''}{S_{dm}}\right)^2 \cdot \sqrt{U_N^2 \% \cdot S_{dm}^2 - \Delta P_N^2} = \left(\frac{S''}{S_{dm}}\right)^2 \cdot \Delta Q_N \quad (4.124)$$

$$\Delta S_B = \left[\Delta P_{fe} + \Delta P_N \cdot \left(\frac{S''}{S_{dm}}\right)^2 \right] + j \left[\Delta Q_{fe} + \Delta Q_N \cdot \left(\frac{S''}{S_{dm}}\right)^2 \right] \quad (4.125)$$

Lưu ý: Trong các công thức trên, tổng trở và điện áp phải quy đổi về cùng một cấp điện áp. Trong nhiều trường hợp khi chưa biết U_2 cũng có thể lấy gần đúng $U_2 = U_{dm}$.

*** Máy biến áp 3 cuộn dây:**

Đối với máy biến áp 3 cuộn dây, việc tính toán tổn thất trong dây quấn trên từng cuộn dây hoàn toàn tương tự như máy biến áp 2 cuộn dây



Hình 4.24. Sơ đồ thay thế để tính tổn thất công suất trên máy biến áp 3 cuộn dây

Công thức tổng quát tính tổn thất công suất trên các cuộn dây:

$$\Delta \dot{S}_i = \left(\frac{S_i''}{U_{dmi}} \right)^2 \cdot (R_i + jX_i) \quad (4.126)$$

Tổn thất công suất trên máy biến áp

$$\Delta S_B = \Delta S_{Fe} + \sum_{i=1}^3 \Delta S_i \quad (4.127)$$

Công suất đầu vào:

$$\dot{S}_1 = \dot{S}_i + \Delta S_{Fe} = S_2 + \dot{S}_3 + \Delta \dot{S}_B \quad (4.128)$$

b) Tổn thất công suất trong trạm biến áp

* Trạm một máy biến áp

Tổn thất công suất tác dụng và tổn thất công suất phản kháng trong trạm 1 máy biến áp

$$\Delta P_{MBA} = \Delta P_0 + \Delta P_N \left(\frac{S_{pt}}{S_{dm}} \right)^2, \text{ KW} \quad (4.129)$$

$$\Delta Q_{MBA} = \Delta Q_0 + \Delta Q_N \left(\frac{S_{pt}}{S_{dm}} \right)^2, \text{ KVAR} \quad (4.130)$$

Trong đó

ΔP_0 : Tổn thất công suất tác dụng không tải máy biến áp, KW

ΔP_N : Tổn thất công suất tác dụng ngắn mạch máy biến áp, KW

ΔQ_0 : Tổn thất công suất phản kháng không tải máy biến áp, KVAR

ΔQ_N : Tổn thất công suất phản kháng ngắn mạch máy biến áp, KVAR

Với

$$\Delta Q_0 = \frac{I_0 \% \cdot S_{dm}}{100}, \text{ KVAR} \quad (4.131)$$

$$\Delta Q_N = \frac{U_N \% \cdot S_{dm}}{100}, \text{ KVAR} \quad (4.132)$$

Trong đó

$I_0\%$: Dòng không tải phần trăm, A

$U_N\%$: Điện áp ngắn mạch phần trăm

S_{pt} : Công suất phụ tải (thường lấy bằng phụ tải tính toán S_{tt}), KVA

S_{dm} : Dung lượng định mức máy biến áp, KVA

Với $I_0\%$, $U_N\%$ được tra trong lý lịch máy.

Trong tính toán sơ bộ có thể sử dụng công thức sau:

$$\Delta P_{MBA} = (0,02 \div 0,025) S_{dm} \quad (4.133)$$

$$\Delta Q_{MBA} = (0,105 \div 0,125) S_{dm} \quad (4.134)$$

Tổn thất công suất trong máy biến áp

$$\Delta S_{MBA} = \Delta P_{MBA} + j \Delta Q_{MBA}, \text{ KVA} \quad (4.135)$$

Hệ số tải của máy biến áp

$$k_t = \frac{S_{pt}}{S_{dmMBA}} = \frac{I_{pt}}{I_{dmpt}} \quad (4.136)$$

Trong đó

S_{pt} : Công suất phụ tải, KVA

S_{dmMBA} : Dung lượng máy biến áp, KVA

I_{pt} : Dòng điện phụ tải, A

I_{dmMBA} : dòng điện định mức máy biến áp, A

* Trạm nhiều máy biến áp làm việc song song

Giả sử có n máy biến áp làm việc song song có dung lượng như nhau thì tổn thất công suất tác dụng và công suất phản kháng được xác định như:

$$\Delta P_{nMBA//} = n \Delta P_0 + \frac{\Delta P_N}{n} \left(\frac{S_{pt}}{S_{dm}} \right)^2 \quad (4.137)$$

$$\Delta Q_{nMBA//} = n \Delta Q_0 + \frac{\Delta Q_N}{n} \left(\frac{S_{pt}}{S_{dm}} \right)^2 \quad (4.138)$$

Trong đó

ΔP_0 : Tổn thất công suất tác dụng không tải của máy biến áp, KW

ΔQ_0 : Tổn thất công suất phản kháng không tải của máy biến áp, KVAR

S_{pt} : Công suất phụ tải, KVA

S_{dm} : Dung lượng định mức máy biến áp, KVA

Tổn thất công suất của n máy biến áp làm việc song song

$$\Delta S_n = \Delta P_n + j \Delta Q_n \quad (4.139)$$

5 TÍNH TOÁN TỔN THẤT ĐIỆN NĂNG TRONG MẠNG CUNG CẤP ĐIỆN

5.1. Điện năng và tổn thất điện năng trên đường dây

Công suất tác dụng của dòng điện được truyền tải và tiêu thụ bởi phụ tải trong một khoảng thời gian nhất định được gọi là điện năng tiêu thụ, ký hiệu A , đơn vị là KWh hay MWh.

Đối với những mạng điện công suất tiêu thụ P trên phụ tải có giá trị không đổi trong suốt thời gian khảo sát T giờ, điện năng A được xác định bởi công thức:

$$A = P \cdot T \quad (4.140)$$

Trên thực tế, công suất phụ tải luôn biến thiên giá trị theo thời gian, do đó điện năng tiêu thụ trên phụ tải trong khoảng thời gian T giờ được tính bởi:

$$A = \int_0^T P(t) dt \quad (4.141)$$

Phần điện năng bị thất thoát trong quá trình truyền tải được gọi là tổn thất điện năng, ký hiệu ΔA , cũng có đơn vị là KWh hay MWh.

Khi công suất tiêu thụ của phụ tải không đổi:

$$\Delta A = \Delta P \cdot T \quad (4.142)$$

Khi công suất tiêu thụ của phụ tải thay đổi:

$$\Delta A = \int_0^T \Delta P(t) dt \quad (4.143)$$

a) Khái niệm T_{max} và τ

T_{max} : Là thời gian mà giả thiết mạng điện luôn vận hành với công suất cực đại P_{max} thì sẽ tiêu thụ một lượng điện năng đúng bằng lượng điện năng tiêu thụ trên thực tế trong thời gian một năm.

Như vậy: $A = P_{max} \cdot T_{max}$, KWh

Hay: $T_{max} = A / P_{max}$ KWh (4.144)

τ : Là khoảng thời gian giả thiết mạng điện luôn vận hành công suất cực đại P_{max} thì sẽ gây ra một lượng tổn thất điện năng đúng bằng lượng tổn thất điện năng tiêu hao trên thực tế trong thời gian một năm.

$$\Delta A_{dd} = \Delta P_{max} \cdot \tau, \text{ KWh} \quad (4.145)$$

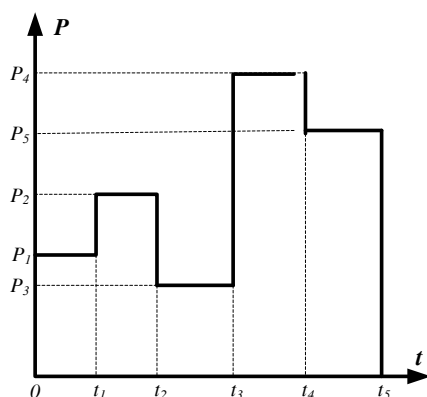
Trong đó:

T_{max} : Thời gian tiêu thụ công suất lớn nhất, h

τ : Thời gian chịu tổn thất công suất lớn nhất, h

b) Phương pháp xác định T_{max} và τ

Giả sử đồ thị phụ tải có dạng bậc thang như hình vẽ



T_{max} được xác định như sau:

$$T_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n p_i t_i}{p_{max}} \quad (4.146)$$

Nếu đồ thị biểu diễn tung độ là $S(\text{KVA})$, hoành độ là $t(\text{h})$. Thì T_{max} được tính như sau:

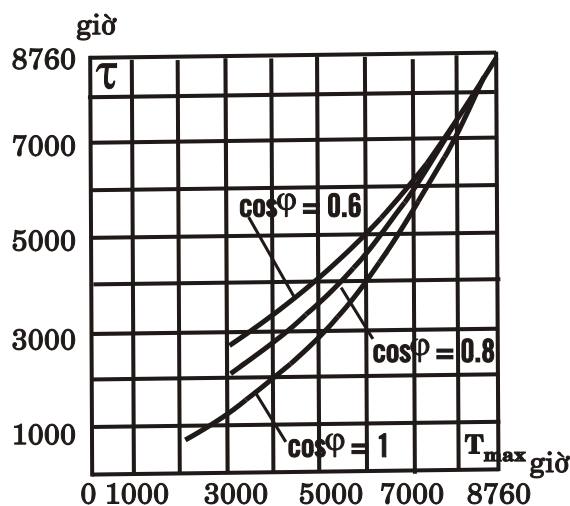
$$T_{max} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i t_i}{S_{max}} \quad (4.147)$$

Giá trị T_{max} còn có thể chọn theo bảng 4.2

Bảng 4.2: Chọn T_{max} theo số ca làm việc

Số ca làm việc	$T_{max} (\text{h})$
1 ca	1500 – 2000
2 ca	3000 – 4500
3 ca	5000 – 7000

τ là hàm theo T_{max} và $\cos\varphi$, $\tau = f(T_{max}, \cos\varphi)$. τ có thể xác định theo đồ thị biểu diễn đường cong liên hệ hình 4.25



Hình 4.25. Đồ thị đường cong xác định T_{max}

Trong tính toán τ có thể xác định theo công thức kinh nghiệm của Kezevits:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{max}}{10^4} \right)^2 8760 = \left(0,124 + T_{max} 10^{-4} \right)^2 8760 \quad (4.148)$$

Công thức này cho giá trị gần đúng và sai số càng nhỏ khi T_{max} có giá trị càng lớn.

Ngoài ra τ có thể lấy giá trị theo số ca làm việc như sau:

Khi làm việc 1 ca $\tau = 1500 \div 2000 \text{h}$.

Khi làm việc 2 ca $\tau = 2500 \div 3500 \text{h}$.

Khi làm việc 3 ca $\tau = 4000 \div 5000 \text{h}$.

Ví dụ 9: Một tuyến đường dây cấp điện trong thành phố, chiều dài 2km, có phụ tải phân bố đều với giá trị $I_0 = 0,3 \text{A/m}$, dây dẫn suốt tuyến là dây A-95 lõi nhôm, thiết diện 95mm^2 , có $r_0 = 0,33 \Omega/\text{km}$.

Hãy xác định tổn thất điện năng trên tuyến đường dây, biết $T_{\max} = 3000 \text{h}$ cho toàn bộ phụ tải

Giải

Tổn thất điện năng được tính như sau : $\Delta A = \Delta P_{\text{đmax}} \tau$

Trong đó:

$$\Delta P_{\text{đmax}} = I^2 R$$

$$I = I_0 l = 0,3 \cdot 2 \cdot 10^3 = 600 \text{ A}$$

$$\Delta P_{\text{đđ}} = 600^2 \cdot 0,33 \cdot 2 = 237600 \text{ W} = 237,6 \text{ KW}$$

τ được tính theo công thức Kezevits

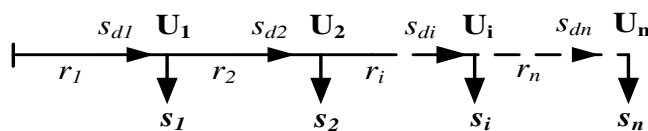
$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{\max}}{10^4} \right)^2 8760 = \left(0,124 + \frac{3000}{10^4} \right)^2 8760 = 1575 \text{h}$$

Tổn thất điện năng trên tuyến đường dây trong thời gian 1 năm

$$\Delta A = 237,6 \cdot 1575 = 374220 \text{ KWh}$$

5.2. Đường dây nhiều phụ tải tập trung (đường dây liên thông)

Xét đường dây có nhiều phụ tải tập trung. Biết công suất và điện áp tại các nút phụ tải. Tổn thất điện năng trên đường dây được xác định như sau:



Hình 4.26. Đường dây nhiều phụ tải

$$\Delta A = \left[\frac{S_{d1}}{U_1} \right]^2 r_1 \tau_1 + \left[\frac{S_{d2}}{U_2} \right]^2 r_2 \tau_2 + \dots + \left[\frac{S_{di}}{U_i} \right]^2 r_i \tau_i + \dots + \left[\frac{S_{dn}}{U_n} \right]^2 r_n \tau_n \quad (4.149)$$

Nếu các phụ tải có cùng $T_{\max}$ và $\cos \varphi$ thì tổn thất điện năng được tính như sau:

$$\Delta A = \tau \left(\left[\frac{S_{d1}}{U_1} \right]^2 r_1 + \left[\frac{S_{d2}}{U_2} \right]^2 r_2 + \dots + \left[\frac{S_{di}}{U_i} \right]^2 r_i + \dots + \left[\frac{S_{dn}}{U_n} \right]^2 r_n \right) \quad (4.150)$$

Nếu các phụ tải có cùng $T_{\max}$ nhưng $\cos \varphi$ không quá sai khác nhau (dưới 5%) thì tổn thất điện năng được xác định như sau:

$$\Delta A = \frac{\tau_{tb}}{U_{dm}^2} (S_{d1}^2 r_1 + S_{d2}^2 r_2 + S_{d3}^2 r_3 + \dots + S_{dn}^2 r_n) = \frac{\tau_{tb}}{U_{dm}^2} \sum_{i=1}^n S_{di}^2 r_i \quad (4.151)$$

Trong đó τ_{tb} được tính bằng cách tra đường cong căn cứ vào các giá trị $\cos \varphi_{tb}$ và $T_{max tb}$. Công thức xác định $\cos \varphi_{tb}$ và $T_{max tb}$ như sau:

$$\cos \varphi_{tb} = \frac{S_1 \cos \varphi_1 + S_2 \cos \varphi_2 + \dots + S_n \cos \varphi_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n} \quad (4.152)$$

$$T_{max tb} = \frac{P_1 T_{max 1} + P_2 T_{max 2} + \dots + P_n T_{max n}}{T_{max 1} + T_{max 2} + \dots + T_{max n}} \quad (4.153)$$

5.3. Tổn thất điện năng trong máy biến áp

a) Trạm một máy biến áp

Trường hợp không có đồ thị phụ tải, chỉ có giá trị công suất phụ tải S và thời gian sử dụng công suất lớn nhất τ . Tổn thất điện năng trong máy biến áp được tính như sau:

$$\Delta A_{MBA} = \Delta P_0 t + \Delta P_N \left(\frac{S_{pt}}{S_{dm}} \right)^2 \tau \quad (4.154)$$

Trong đó:

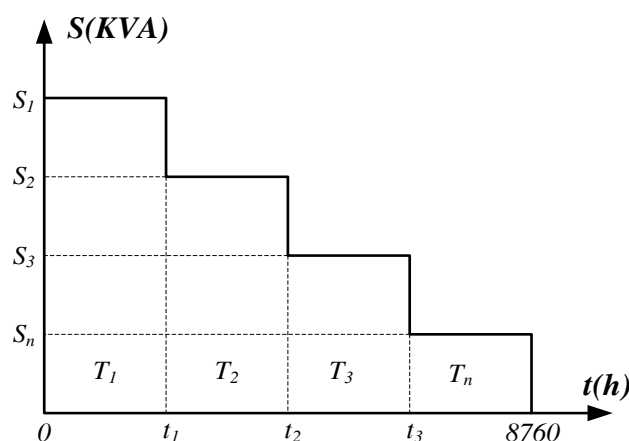
t : Thời gian thực tế vận hành máy biến áp, h

τ : Thời gian tổn thất công suất lớn nhất của máy biến áp, h

$\Delta P_0, \Delta P_N$: Tổn thất không tải và tổn thất ngắn mạch

S_{pt}, S_{dm} : Công suất phụ tải và công suất định mức máy biến áp, KVA

Trường hợp biết đồ thị phụ tải. Tổn thất điện năng trong máy biến áp được tính tương ứng với các thông số cụ thể cho trên đồ thị phụ tải



$$\Delta A_{MBA} = 8760 \cdot \Delta P_0 + \Delta P_N \left(\frac{S_{pt1}}{S_{dm}} \right)^2 T_1 + \Delta P_N \left(\frac{S_{pt2}}{S_{dm}} \right)^2 T_2 + \dots + \Delta P_N \left(\frac{S_{ptn}}{S_{dm}} \right)^2 T_n \quad (4.155)$$

Hoặc:

$$\Delta A_{MBA} = \Delta A_0 + \Delta P_N \left(\frac{S_{pt1}}{S_{dm}} \right)^2 T_1 + \Delta P_N \left(\frac{S_{pt2}}{S_{dm}} \right)^2 T_2 + \dots + \Delta P_N \left(\frac{S_{ptn}}{S_{dm}} \right)^2 T_n \quad (4.156)$$

Nếu đồ thị phụ tải có n cấp: Để giảm tổn thất điện năng bằng cách thay đổi số lượng máy biến áp làm việc tùy theo mức phụ tải và tổn thất điện năng trạm biến áp trong một năm được tính theo như sau:

$$\Delta A_{MBA} = \Delta P_0 \sum_{i=1}^n t_i + \Delta P_N \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_{pti}}{S_{dm}} \right)^2 \frac{t_i}{n_i} \quad (4.157)$$

Với:

$$\Delta P_{Cu} = \Delta P_N = \Delta P_k$$

Trong đó n_i là số lượng máy biến áp tham gia làm việc.

b) Trạm nhiều máy biến áp

*** Trường hợp công suất các máy biến áp giống nhau**

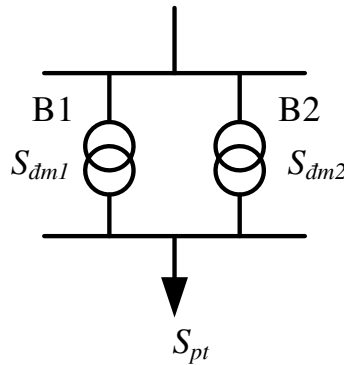
$$\Delta A_{MBAss} = n \Delta P_0 t + \frac{\Delta P_N}{n} \left(\frac{S_{pt \max}}{S_{dm}} \right)^2 \tau \quad (4.158)$$

Trong đó n là số máy biến áp tham gia làm việc.

*** Trường hợp công suất các máy biến áp khác nhau**

Trường hợp này các máy biến áp phải cùng $U_N\%$ để đảm bảo điều kiện ghép làm việc song song. Khi đó phụ tải phân bố đều từng máy xem như tỉ lệ với công suất định mức của máy.

Xét trạm biến áp có hai máy biến áp như hình 4.27, trong đó máy biến áp B_1 có công suất định mức S_{dm1} và máy biến áp B_2 có công suất định mức là S_{dm2} và công suất phụ tải là S .



Hình 4.27. Trạm biến áp gồm hai máy vận hành song song

Công suất phụ tải phân bố cho mỗi máy:

$$S_{pt1} = \frac{S_{dm1}}{S_{dm1} + S_{dm2}} S_{pt} \quad (4.159)$$

$$S_{pt2} = \frac{S_{dm2}}{S_{dm1} + S_{dm2}} S_{pt} \quad (4.160)$$

Tổn thất điện năng trong mỗi máy biến áp:

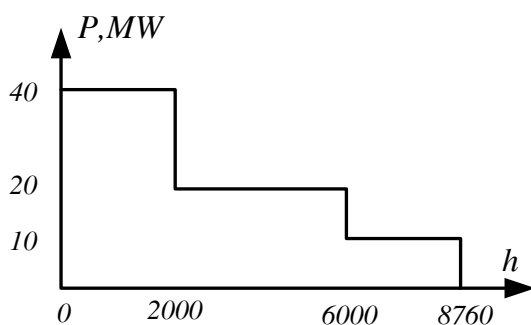
$$\Delta A_{MBA1} = \Delta P_{01} t + \Delta P_{N1} \left(\frac{S_{pt1}}{S_{dm1}} \right)^2 \tau \quad (4.161)$$

$$\Delta A_{MBA2} = \Delta P_{02}t + \Delta P_N \left(\frac{S_{pt2}}{S_{dm2}} \right)^2 \tau \quad (4.162)$$

Tổn thất điện năng trong trạm biến áp:

$$\Delta A_{MBA} = \Delta A_{MBA1} + \Delta A_{MBA2} \quad (4.163)$$

Ví dụ 10: Một trạm hạ áp gồm hai máy biến áp có thông số giống nhau: 110/11KV–31.500KVA $\Delta P_N=20KW$, $\Delta P_0=86KW$, $U_N\%=10,5\%$, $I_0\%=2,7\%$, cấp điện cho một phụ tải có đồ thị như hình vẽ. Khi phụ tải có giá trị từ 50% trở xuống chỉ cho một máy biến áp làm việc. Biết hệ số công suất của phụ tải $\cos\varphi=0,8$ không thay đổi trong suốt năm. Xác định tổn thất điện năng trên trạm hạ áp trong thời gian 1 năm.



Giải

Khi phụ tải $P_1=40MW$, vận hành hai máy trong $t_1=2000$ h

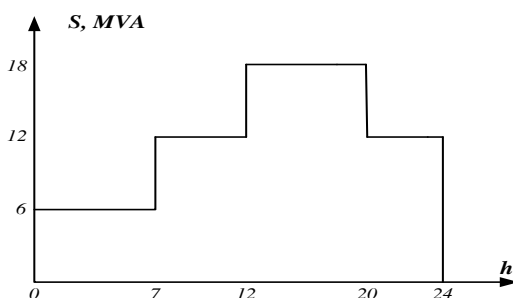
Khi phụ tải $P_2=20MW$, vận hành một máy trong $t_2=4000$ h

Khi phụ tải $P_3=10MW$, vận hành một máy trong $t_3=2760$ h

Tổn thất điện năng trên trạm trong một năm:

$$\begin{aligned} \Delta A &= \Delta P_0 \sum_{i=1}^n n_i t_i + \Delta P_N \sum_{i=1}^n \frac{1}{n_i} \left(\frac{S_i}{S_{dm}} \right)^2 t_i \\ \Delta A &= 86[(2.200) + (1.400) + (1.2760)] + \\ &+ 200 \left[\frac{1}{2} \left(\frac{40}{0,8.31,5} \right)^2 200 + \frac{1}{1} \left(\frac{20}{0,8.31,5} \right)^2 4000 + \frac{1}{1} \left(\frac{10}{0,8.31,5} \right)^2 2760 \right] = 2021000KWh \end{aligned}$$

Ví dụ 11: Trạm biến áp có ba máy biến áp kiểu TMH–6300KVA vận hành song song cấp điện cho một phụ tải có đồ thị phụ tải ngày đêm như hình vẽ. Xác định tổn thất điện năng trong năm trong trạm, biết $T_{max}=4000h/năm$, $\Delta P_0=9,4KW$ và $\Delta P_N=46,5KW$.



Giải

Khi $S_1 = 6$ MVA ứng với $t_1 = 7$ giờ, $S_1 < S_{dmB}$: vận hành một máy.

Khi $S_2 = 12$ MVA ứng với $t_2 = 9$ giờ, $S_{dmB} < S_2 < 2 \times S_{dmB}$: vận hành hai máy.

khi $S_3 = 18$ MVA ứng với $t_3 = 8$ giờ, $2 \times S_{dmB} < S_3 < 3 \times S_{dmB}$: vận hành ba máy.

Tổn thất điện năng trong trạm biến áp:

$$\Delta A = \Delta P_0 \sum_{i=1}^3 n_i t_i + \Delta P_N \sum_{i=1}^n \left(\frac{S_i}{S_{dm}} \right)^2 \frac{t_i}{n_i}$$

$$\Delta A = 9,4 \left[(1.7) + (2.9) + (3.8) \right] + 46,5 \left[\left(\frac{6}{6,3} \right)^2 \frac{7}{1} + \left(\frac{12}{6,3} \right)^2 \frac{9}{2} + \left(\frac{18}{6,3} \right)^2 \frac{8}{3} \right]$$

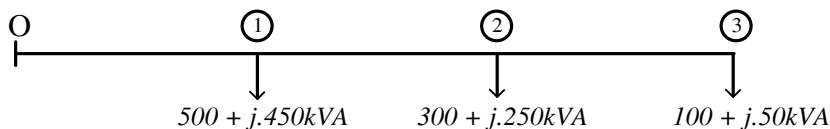
$$\Delta A = 2527,267 \text{ KWh}$$

Tổn thất điện năng trên trạm biến áp trong thời gian một năm:

$$\Delta A_n = 365 \Delta A = 365.2527,267 = 922452,455 \text{ KWh}$$

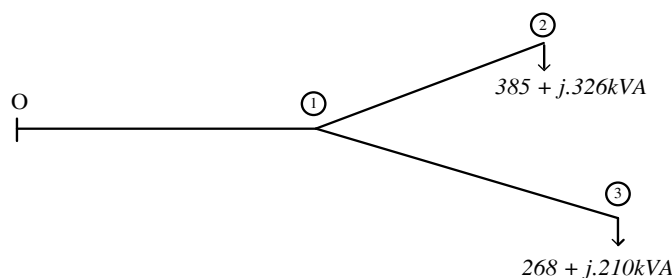
ÔN TẬP CHƯƠNG IV

4.1. Tính toán và kiểm tra tổn thất điện áp trên từng đoạn và trên toàn đường dây 15KV cho bởi sơ đồ sau:



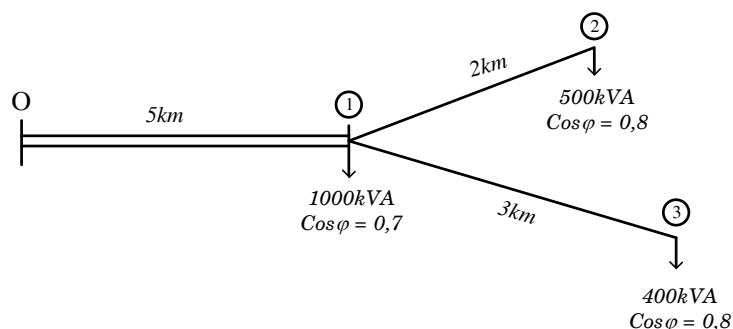
Đoạn dây	Chiều dài (km)	Điện trở (Ω/km)	Điện kháng (Ω/km)
01	5	0,35	0,45
12	3	0,3	0,4
23	2	0,45	0,5

4.2. Kiểm tra tổn thất điện áp lớn nhất trên đường dây phân nhánh 22KV có sơ đồ sau:

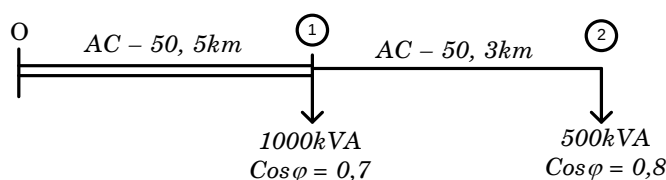


Đoạn đường dây	01	12	23
$l(km)$	15	12	21
$r_0 (\Omega/km)$	0,46	0,65	0,85
$x_0 (\Omega/km)$	0,40	0,40	0,40

4.3. Đường dây 15KV cấp điện cho 3 phụ tải có sơ đồ sau. Cho biết thông số đường dây trên toàn mạng là như nhau và là $r_0=0,64\Omega/Km$, $x_0=0,4\Omega/Km$. Hãy xác định tổn thất công suất trên toàn đường dây.



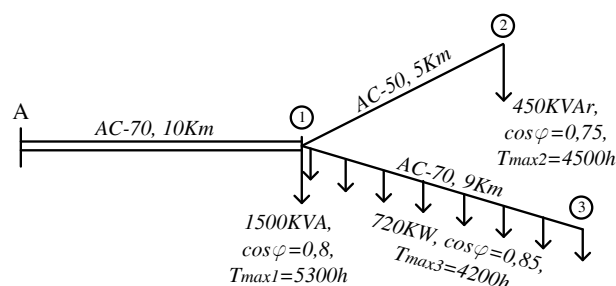
4.4. Đường dây 15KV cấp điện cho hai phụ tải có các thông số cho trên sơ đồ sau:



Yêu cầu:

- Kiểm tra tổn thất điện áp trên toàn đường dây trong hai trường hợp:
 - Vận hành bình thường
 - Vận hành khi có sự cố đứt một dây trên lộ kép O1. Biết rằng thông số dây AC-50 là $r_0=0,64\Omega/Km$, $x_0=0,4\Omega/Km$
- Xác định giá trị điện áp U_2 và U_0 , biết rằng $U_1=15,25KV$.

4.5. Đường dây phân nhánh 15KV cấp điện cho các phụ tải có sơ đồ sau:



Cho biết thông số cáp AC trên từng đoạn đường dây lần lượt: AC-70 là $r_0=0,46\Omega/\text{Km}$, $x_0=0,44\Omega/\text{Km}$, $b_0=2,48.10^{-6} \text{ 1}/\Omega.\text{Km}$ và AC-50 là $r_0=0,64\Omega/\text{Km}$, $x_0=0,39\Omega/\text{Km}$, $b_0=2,23.10^{-6} \text{ 1}/\Omega.\text{Km}$.

- Xác định tổn thất công suất toàn phần trên từng đoạn và trên toàn đường dây.
- Tính toán tổn thất điện năng trên toàn đường dây trong thời gian một năm.

4.6. Một trạm biến áp một máy 15/0,4KV – 1000KVA có các thông số sau:

$$\Delta P_0=5\text{KW}, \Delta P_N=12\text{KW}, I_0\%=3\%, U_N\%=5\%$$

Cấp điện cho 1 phụ tải có công suất 800KVA, $\cos\varphi=0,6$

Hãy tính toán tổn thất công suất trong trạm biến áp khi làm việc.

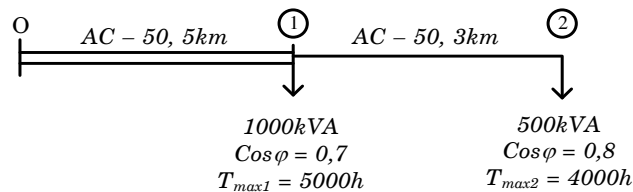
4.7. Một trạm biến áp gồm hai máy biến áp 1000KVA – 22/0,4KV, thông số mỗi máy biến áp là giống nhau như sau:

$$\Delta P_0=1,57\text{KW}, \Delta P_N=9,5\text{KW}, I_0\%=1,32\%, U_N\%=5\%$$

Cấp điện cho 1 phụ tải 1500KVA, $\cos\varphi = 0,9$

Yêu cầu xác định tổn thất công suất trong trạm biến áp.

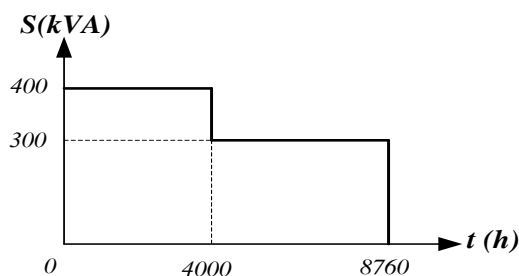
4.8. Đường dây 15KV cấp điện cho hai phụ tải có các thông số cho trên sơ đồ sau.



Yêu cầu:

Tính toán chi phí cho tổn thất điện năng trong thời gian 1 năm, biết rằng giá tiền phải trả cho 1KWh điện là 1700 đồng. Cho thông số dây AC-50 là $r_0=0,64\Omega/\text{Km}$, $x_0=0,4\Omega/\text{Km}$.

4.9. Một trạm biến áp xí nghiệp gồm 1 máy biến áp 500KVA, 15/0,4KV có các thông số là $\Delta P_0=0,94(\text{KW})$, $\Delta P_N=5,21 (\text{KW})$, $I_0\%=0,95\%$, $U_N\%=5\%$. Cấp điện cho phụ tải có đồ thị phụ tải sau đây:



Yêu cầu xác định chi phí tổn hao điện năng trong một năm của trạm biến áp, biết rằng giá tiền phải trả cho 1KWh điện là 1500 đồng.