

CHƯƠNG 4: QUY HOẠCH MẠNG ĐIỆN

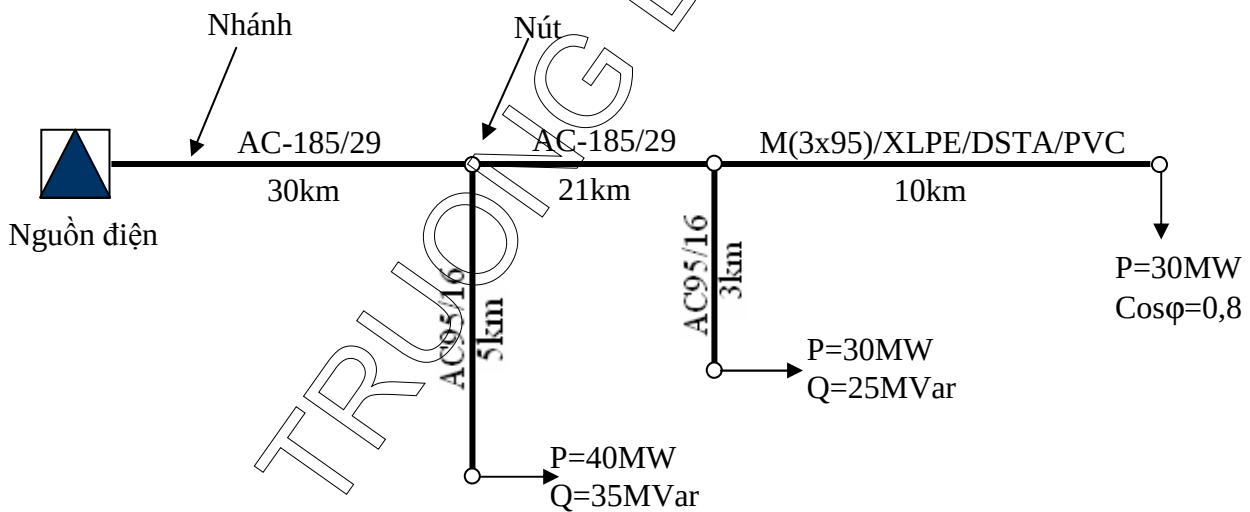
4.1. Khái quát về mạng điện

4.1.1. Sơ đồ nguyên lý (sơ đồ một sợi)

Sơ đồ nguyên lý là sơ đồ thể hiện phương thức kết nối nguồn điện với phụ tải. Trong thực tế cung cấp điện cho từng phụ tải thì mạch điện 3 pha không bao giờ đối xứng, còn trong quy hoạch cấp điện có số lượng phụ tải lớn thì mức độ không đối xứng rất bé nên có thể coi là phụ tải đối xứng và dòng điện cũng như công suất trên 3 pha bằng nhau. Do đó để đơn giản, sơ đồ nguyên lý của hệ thống điện 3 pha thường được vẽ bằng sơ đồ 1 pha gọi là sơ đồ một sợi (*single line*).

Trong đồ án quy hoạch cấp điện, hệ thống đường dây điện 3 pha được thể hiện bằng sơ đồ nguyên lý kiểu 1 nét. Một đường nét liền nối giữa nguồn điện với phụ tải ta hiểu ngay đó là đường dây tải điện 3 pha. Phía trên mỗi đường dây đều ghi chủng loại dây (nhôm, đồng, cáp trần, cáp ngầm,...) còn phía dưới ghi chiều dài tuyến dây (km).

Riêng phụ tải điện thì vẫn ghi giá trị 3 pha trên sơ đồ. Trong các chương trước ta biết mỗi phụ tải được đặc trưng bằng tam giác công suất, do đó trên sơ đồ nguyên lý chỉ cần ghi 2 giá trị của tam giác công suất thì phụ tải hoàn toàn xác định. Ví dụ ở hình dưới có 2 phụ tải cho 2 tham số là P , Q còn một phụ tải cho 2 tham số P và $\cos\varphi$.



Định nghĩa nhánh, nút trên sơ đồ nguyên lý

Nhánh là một phần của mạch điện (thể hiện trên sơ đồ nguyên lý) trên đó chỉ có 1 dòng điện chạy qua.

Nút là nơi gặp nhau của 2 nhánh trở lên. Ví dụ ở hình vẽ trên ta có tất cả 2 nút. Tại một nút công suất luôn luôn được bảo toàn, tức là tổng công suất đi vào nút phải bằng tổng công suất đi ra khỏi nút.

Khái niệm nhánh và nút có ý nghĩa cực kỳ quan trọng trong tính toán thiết kế đường dây tải điện. Nhờ sơ đồ nguyên lý ta mới tính toán được dòng điện chạy trong các nhánh, tổn thất điện áp, công suất tổn hao do truyền tải điện,....

4.1.2. Các tham số cơ bản của mạch điện

a) Điện trở R của dây dẫn điện

Điện trở trên đường dây tải điện là phần tử chuyển hóa năng lượng điện thành nhiệt năng tỏa ra môi trường xung quanh. Đây là năng lượng tiêu phí vô ích do đó R có giá trị càng nhỏ càng tốt



Đơn vị điện trở là Ω (đọc là Ôm theo tiếng Hy Lạp). Ngoài ra trong tính toán người ta còn đưa ra khái niệm *điện dẫn* $\gamma = \frac{1}{R}$, đơn vị là Siemens, ký hiệu S.

Trong thực tế dây dẫn thường dùng là dây đồng, dây nhôm hoặc dây nhôm lõi thép. Dây đồng và dây nhôm chỉ dùng cho các khoảng cột bé do khả năng chịu kéo rất kém. Với khoảng cột lớn người ta dùng dây nhôm lõi thép, trong đó phần bọc ngoài bằng nhôm dùng để dẫn điện còn phần ruột bằng thép để tăng cường chịu lực cho dây. Một số trường hợp đặc biệt khi khoảng cột rất lớn ($> 800\text{m}$) thì các loại dây trên không đảm bảo chịu lực được thì buộc phải dùng dây thép. Điện trở suất một số loại vật liệu:

Bạc $\rho = 16,5 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}}$	Vàng $\rho = 22 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}}$	Đồng đỏ $\rho = 27 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}}$
Nhôm $\rho = 31,5 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}}$	Kẽm $\rho = 64,5 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}}$	Thép $\rho = 250 \frac{\Omega \cdot \text{mm}^2}{\text{km}}$

Với đường dây tải điện, điện trở không tập trung ở một chỗ mà phân bố rải dọc chiều dài đường dây nên khó khăn cho việc tính toán. Để đơn giản người ta giả thiết điện trở tập trung trên một đoạn đường dây bằng một giá trị R duy nhất.

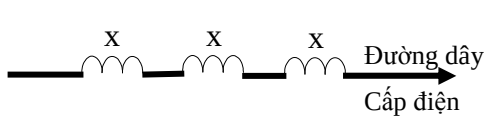
Để tính toán điện trở của dây dẫn người ta dùng công thức $R = \rho \frac{l}{S}$ trong đó ρ là điện trở suất, l là chiều dài, S là tiết diện. Tuy nhiên công thức này trong thực tế người ta không sử dụng do việc đo tiết diện S có sai số lớn.

Trong thực hành người ta tính điện trở của dây dẫn thông qua công thức $R = r_0 \cdot l$, trong đó r_0 là điện trở trên một đơn vị chiều dài (Ω/km), l là chiều dài dây dẫn (km). Tính theo công thức này rất chính xác do việc đo chiều dài chính xác. Riêng giá trị r_0 được lập thành bảng tra ứng với từng loại dây và thông thường catalogue của nhà chế tạo đều cung cấp.

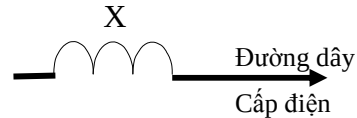
b) Điện kháng X của dây dẫn điện

Khi có dòng điện xoay chiều hình sin chạy qua dây dẫn, ngoài điện trở R còn có điện kháng X gây ra sự cản trở dòng điện. Điện kháng X trong mạch điện do phần tử điện cảm L gây ra. Điện kháng X trong mạch điện có ý nghĩa giống như điện trở R .

Điện kháng X không tiêu thụ năng lượng điện mà chỉ là phần tử tích lũy năng lượng trong $1/2$ chu kỳ còn ở $1/2$ chu kỳ tiếp theo (khi đó dòng điện đã đổi chiều) thì nó xả năng lượng trả lại lưới điện. Chu kỳ nạp / phóng năng lượng là 50 lần trong 1 giây.



Điện kháng phân bố dọc đường dây



Điện kháng tập trung tương đương

Đơn vị điện kháng giống điện trở là Ω .

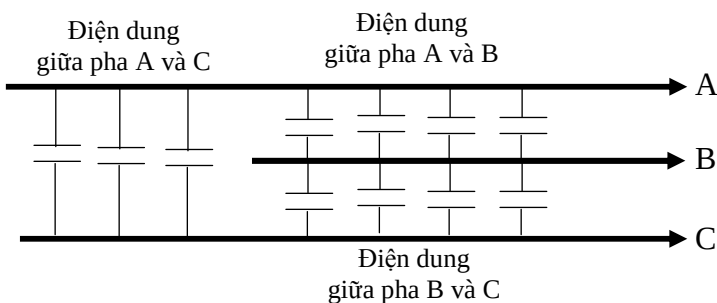
Với đường dây tải điện, điện kháng không tập trung ở một chỗ mà phân bố rải dọc chiều dài đường dây nên khó khăn cho việc tính toán. Để đơn giản người ta giả thiết điện kháng tập trung trên một đoạn đường dây bằng một giá trị X duy nhất.

Cần lưu ý là: dù dây dẫn điện là một sợi thẳng, không quấn xoắn lò xo thì vẫn tồn tại điện kháng X như là một thuộc tính mà không có cách nào loại bỏ nó được. Với lưới điện từ 1kV trở lên thì giá trị X khá lớn, do đó trong tính toán phải kể đến giá trị này. Với lưới điện <1kV (lưới điện hạ thế) khi tính toán chỉ cần xét đến R và có thể bỏ qua ảnh hưởng của L .

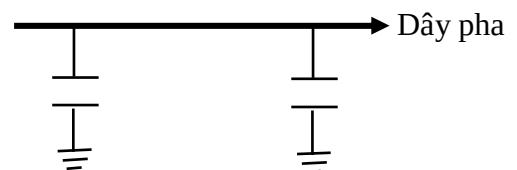
Để tính điện kháng người ta dùng công thức $X = x_0 \cdot l$, trong đó x_0 là điện trở trên một đơn vị chiều dài (Ω/km), l là chiều dài dây dẫn (km). Giá trị x_0 được lập thành bảng tra ứng với từng loại dây và cách bố trí dây. Trong catalogue của nhà chế tạo hoặc các sổ tay thiết kế điện đều cung cấp giá trị x_0 . Trong tính toán gần đúng với đường dây điện lắp trên không có thể lấy $x_0 \approx 0,4 \Omega/\text{km}$.

c) Điện dẫn phản kháng của dây dẫn điện

Giữa dây dẫn điện và mặt đất dọc theo đường dây trên không được coi là 2 bản cực của một tụ điện nên giữa chúng luôn tồn tại một giá trị điện dung C . Giữa các dây dẫn với nhau (giữa các pha) cũng được coi là 2 bản cực của một tụ điện nên giữa chúng cũng có một trị số điện dung nào đó. Giá trị điện dung giữa dây dẫn và đất thường rất bé nên trong tính toán bỏ qua giá trị này và sai số < 5% nên chấp nhận được, chỉ tính phần điện dung giữa các pha với nhau.



Điện dung phân bố dọc đường dây



Điện dung tương đương 2 đầu đường dây

Điện dung C cũng phân bố dọc đường dây tải điện và có một đặc điểm rất đặc biệt là ngay cả khi không có phụ tải thì dòng điện vẫn chạy qua điện dung (giá trị này rất bé). Để đơn giản cho việc tính toán người ta giả thiết các điện dung này tập trung về đầu đường dây 1/2 giá trị và tập trung về cuối đường dây 1/2 giá trị.

Điện dung C cũng là một phần tử không tiêu thụ điện năng mà chỉ tích lũy điện năng dưới dạng điện trường ở chu kỳ dương của dòng điện hình sin, khi dòng điện đổi chiều thì năng lượng này sẽ phóng ra trả lại lưới điện.

Trong tính toán đường dây tải điện người ta đưa ra khái niệm *điện dẫn phản kháng B*. Điện dẫn phản kháng có đơn vị của điện dẫn là Siemens (nghịch đảo của điện trở) và tính theo công thức:

$$B = b_0 \cdot l$$

Trong đó l là chiều dài đường dây (km), b_0 là điện dẫn phản kháng trên 1 km đường dây (tra trong các bảng tra).

Công suất phản kháng do điện dung sinh ra trên đường dây tải điện:

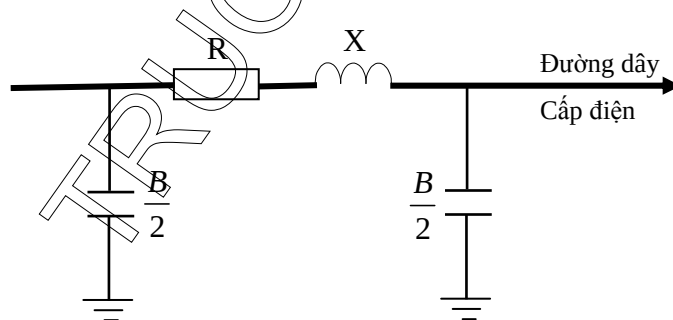
$$Q_C = U^2 \cdot B = U^2 \cdot b_0 \cdot l$$

Giá trị điện dung C chỉ được tính toán khi đường dây trên không điện áp từ 110 kV trở lên hoặc đường dây trên không 35 kV có chiều dài ≥ 30 km hoặc đường cáp điện ngầm 3 pha điện áp 22 kV trở lên.

4.1.3. Sơ đồ thay thế đường dây tải điện

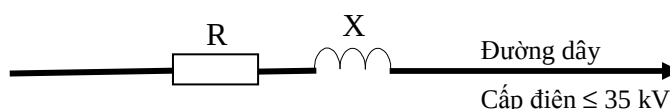
Trong tính toán đường dây tải điện thường dùng sơ đồ thay thế với các tham số R, X, B tập trung kiểu hình chữ Π .

- Với mạng điện ≥ 35 kV có chiều dài ≥ 30 km, mạng điện ≥ 110 kV có chiều dài bất kỳ và đường cáp ngầm 3 pha ≥ 22 kV thì sơ đồ thay thế có đầy đủ các thành phần R, X, B.



- Với đường dây 500 kV, sơ đồ hình Π chỉ sử dụng được khi chiều dài đường dây tải điện < 300 km, nếu lớn hơn thì phải sử dụng lý thuyết khác để tính toán (lý thuyết đường dây dài) mà trong bài giảng này không đề cập đến.

- Với mạng điện 35 kV có chiều dài < 30 km, mạng điện < 35 kV có chiều dài bất kỳ và đường cáp ngầm 3 pha < 22 kV thì ta bỏ qua thành phần điện dẫn phản kháng B, khi đó sơ đồ chỉ còn lại R, X gọi là *sơ đồ thay thế đường thẳng*.



Ví dụ: Xác định các tham số của đường dây trên không điện áp 110 kV dài 100 km dùng dây nhôm lõi thép AC-150.

Giải: Tra bảng với dây AC-150 ta có $r_0=0,21\Omega/\text{km}$, $x_0=0,41\Omega/\text{km}$ và $b_0=2,74.10^{-6}/\Omega.\text{km}$

Từ đó ta tính được các tham số của đường dây tải điện:

$$R = r_0.l = 0,21.100 = 21 \Omega.$$

$$X = x_0.l = 0,41.100 = 41 \Omega.$$

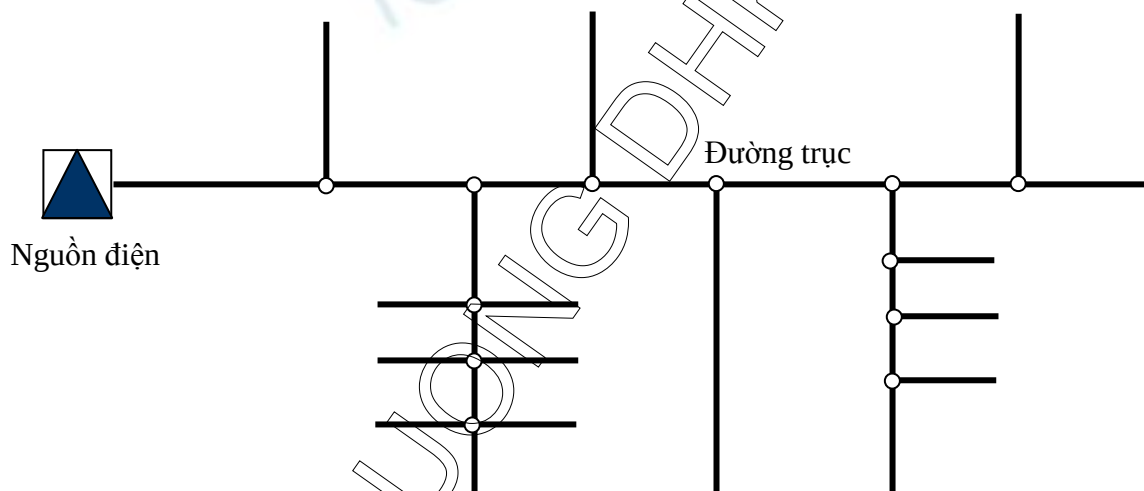
$$B = b_0.l = 2,74.10^{-6}.100 = 274.10^{-6} \text{ S}$$

4.1.4. Cấu trúc mạng điện:

Tùy vào tầm quan trọng của hộ tiêu thụ và kinh phí đầu tư mà mạng điện có thể được xây dựng với các cấu trúc khác nhau:

a) Mạng điện hình tia:

Mạng điện này chỉ nhận điện từ 1 nguồn điện duy nhất. Các đường dây điện xuất phát từ nguồn điện gọi là đường trục. Các đường dây điện đầu nối vào đường trục gọi là đường nhánh. Đường nhánh có tiết diện bé hơn đường trục.

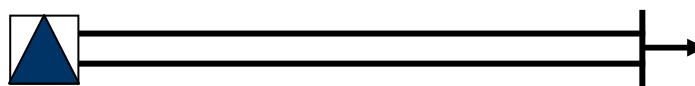


Mạng điện kiểu hình tia

Đây là mạng điện có độ tin cậy rất kém, giá thành đầu tư cũng thấp do đó được dùng cho khu vực nông thôn, các phụ tải ở xa nguồn điện và các phụ tải không quan trọng.

Để nâng cao độ tin cậy cho loại mạng điện này thì ở đầu mỗi nhánh rẽ mà có nhiều hộ tiêu thụ người ta phải đặt thiết bị tự động cắt khi có sự cố trên nhánh rẽ đó. Với các nhánh rẽ có ít hộ tiêu thụ thì xác suất sự cố thấp nên không cần đặt thiết bị tự động cắt sự cố.

Một biện pháp khác để nâng cao độ tin cậy cho loại mạng điện này là sử dụng đường dây mạch kép. Khi đó xác suất xảy ra sự cố đồng thời cả 2 mạch 1 lúc là rất thấp. Để tiết kiệm đất đai dành cho hành lang đường dây điện, 2 mạch thường bố trí chung trên 1 cột.



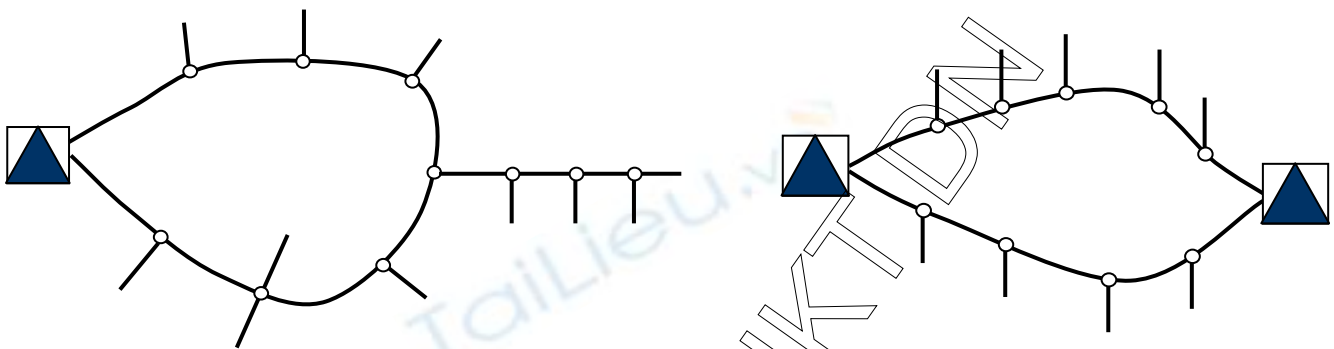
Mạng điện dùng đường dây kép

b) Mạng điện đường vòng:

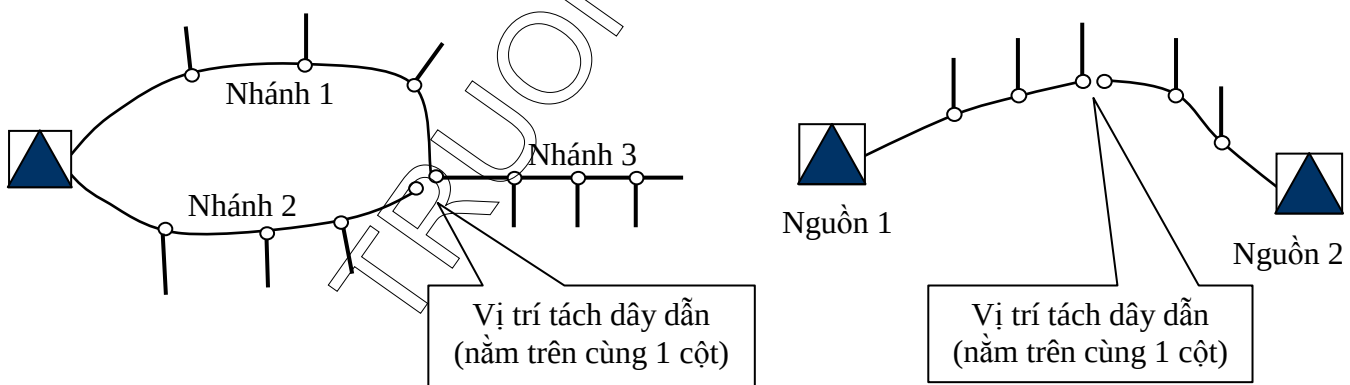
Mạng điện vòng là loại mạng điện có thể nhận điện từ 2 nguồn điện khác nhau trở lên. Đây là mạng điện có độ tin cậy cao, vận hành linh hoạt nhưng đầu tư rất tốn kém. Loại mạng điện này dùng để cấp điện cho các phụ tải quan trọng, các phụ tải thành phố.

Nhược điểm lớn nhất của mạng điện đường vòng là vận hành rất phức tạp, chi phí thiết bị vận hành, bảo vệ, đóng cắt rất đắt tiền. Chính vì vậy người ta chia làm 2 loại:

+ Mạng điện đường vòng vận hành kín: thường dùng cho cấp điện áp từ 110 kV trở lên. Các mạng điện này luôn luôn được trang bị hệ thống tự động hóa ở mức cao: tự động bảo vệ, tự động hòa đồng bộ,....



+ Mạng điện đường vòng vận hành hở: dùng cho cấp điện áp dưới 35 kV trong thành phố, thị xã, thị trấn. Mạng điện này có kết cấu lưới điện hình vòng kín nhưng vận hành kiểu hở (thực chất là vận hành hình tia). Ví dụ ở hình vẽ bên trái, bình thường nhánh 3 nhận điện từ nhánh 1, khi nhánh 1 sửa chữa thì nhánh 3 chuyển sang đầu nối với nhánh 2 (công việc này thực hiện bằng thủ công, mất khoảng 15-60 phút, kể cả thời gian di chuyển trên đường của người công nhân)



Hình_ Mạng điện kín vận hành hở

Trong mạng điện kín vận hành hở người ta không thể nối kín mạch khi vận hành vì điện áp tại điểm cuối các nhánh sẽ khác nhau (do tổn thất điện áp trên nhánh khác nhau). Để nối kín với nhau ta bắt buộc phải trang bị thêm thiết bị vận hành tự động, tự phát hiện thời điểm mà các nhánh có cùng điện áp và cùng tần số để nối chúng với nhau gọi là *hòa đồng bộ*. Do thiết bị tự động rất đắt tiền, vận hành quá phức tạp, đòi hỏi chuyên môn cao nên trong lưới điện từ 35 kV trở xuống ở đô thị người ta chỉ cho vận hành hở.

c) Cấu trúc điển hình mạng điện khu vực đô thị

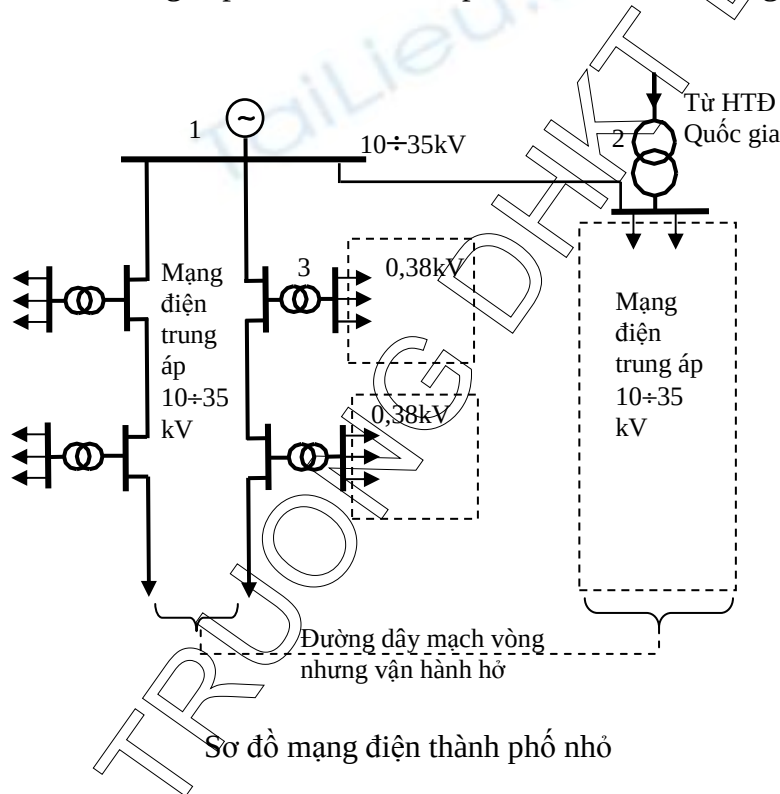
c1) Sơ đồ cung cấp điện cho thành phố nhỏ hoặc cho một khu phố, một khu dân cư,...

Điện năng được cung cấp từ nhà máy điện điezen của địa phương (1) và từ hệ thống điện quốc gia thông qua các trạm biến áp 110/(10÷35) kV (2). Mạng điện (10-35)kV đủ cấp cho thành phố do đó trạm biến áp 110kV được bố trí ngoài thành phố.

Việc phân phối điện năng đến các hộ dùng điện được thực hiện thông qua mạng phân phối trung áp 10÷ 35 kV và mạng điện hạ áp với sự tham gia của các trạm biến áp phân phối (10÷35)/0,4 kV (3).

Mạng điện phân phối trung áp được xây dựng theo sơ đồ mạch vòng kín nhưng vận hành hở. Các trạm biến áp phân phối có nhiệm vụ cung cấp điện cho mạng hạ áp 0,4 kV. Đối với các hộ dùng điện công nghiệp có thể cấp điện bởi các trạm biến áp riêng.

Đặc trưng của sơ đồ cung cấp điện cho thành phố nhỏ là chỉ sử dụng một cấp điện áp cao áp (10÷35kV).

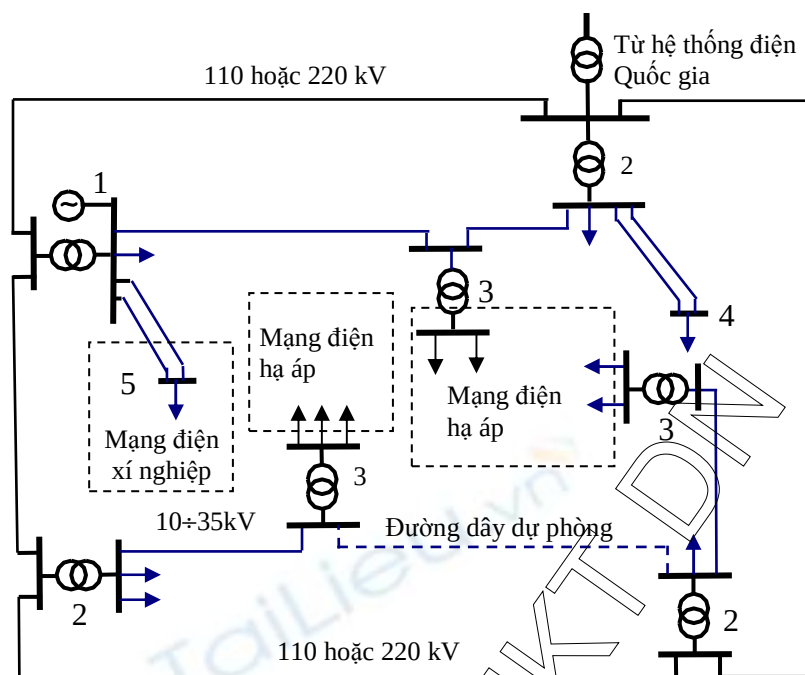


c2) Sơ đồ cung cấp điện cho thành phố trung bình

Với loại thành phố này thì một cấp điện áp trung áp (10-35) không đủ cấp điện mà phải dùng tới điện áp 110-220 kV dẫn sâu vào trung tâm thành phố.

Mạng điện gồm nhà máy điện điezen của địa phương (1) và trạm biến áp 110/(10-35)kV(2) được cấp điện từ hệ thống điện Quốc gia. Mạng điện cung cấp 110÷ 220 kV được thiết kế theo kiểu mạch vòng bao trùm toàn bộ thành phố và vận hành kín . Mạng điện này có vai trò không chỉ cung cấp điện cho thành phố mà còn duy trì sự liên hệ giữa mạng điện thành phố với hệ thống quốc gia.

Các trạm biến áp phân phối (3) $10\div35/0,4$ kV cung cấp cho các hộ dùng điện thông qua mạng điện hạ áp 0,38 kV.



Sơ đồ mạng điện thành phố trung bình

1 – Nhà máy điện địa phương; 2 – Trạm biến áp 110/(1-35)kV; 3 – Trạm biến áp phân phối

Mạng điện (10-35)kV vẫn có cấu tạo mạch vòng nhưng vận hành hở để dự phòng lẫn nhau. Một số cụm công nghiệp, khu công nghiệp trong thành phố yêu cầu dùng điện (10-35)kV thì được trang bị đường dây và trạm trung thế riêng (4,5).

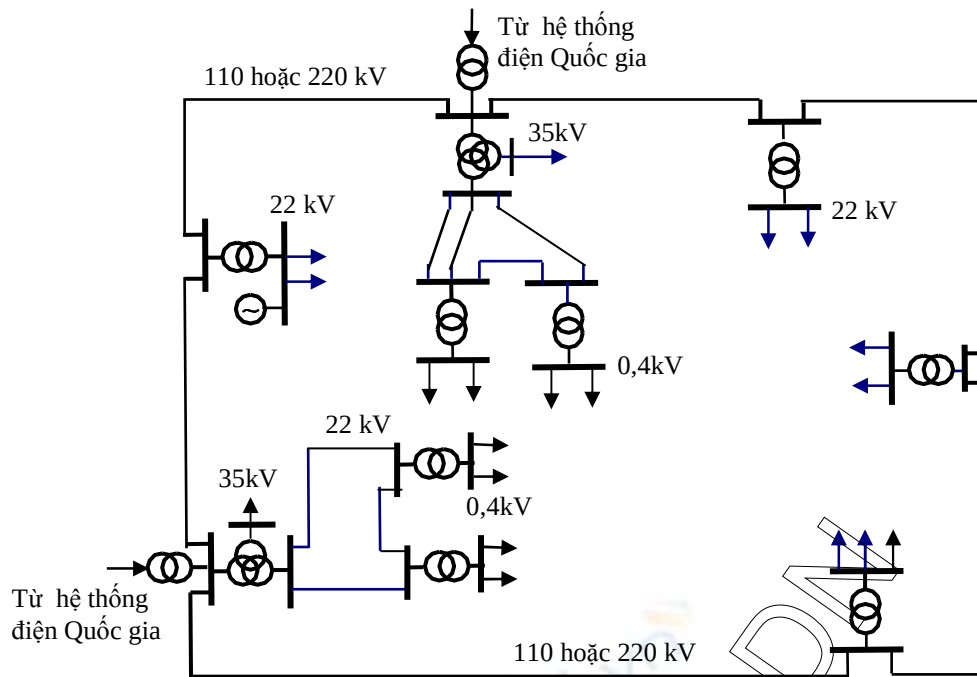
Đặc trưng của sơ đồ là có hai cấp điện áp cao áp (110-220) và (10-35)kV.

c3) Sơ đồ cung cấp điện cho thành phố lớn

Cấp điện áp (10÷35) kV gồm nhiều mạng con (10-35) kV. Mỗi mạng con cấp cho một khu vực của thành phố và cấu tạo dạng mạch vòng.

Mạng điện 110 hoặc 220 kV được xây dựng theo sơ đồ mạch vòng vận hành kín, dẫn sâu vào trung tâm thành phố.

Đặc điểm của sơ đồ cung cấp điện cho các thành phố lớn là số lượng và công suất của nguồn cung cấp từ hệ thống điện Quốc gia nhiều hơn.



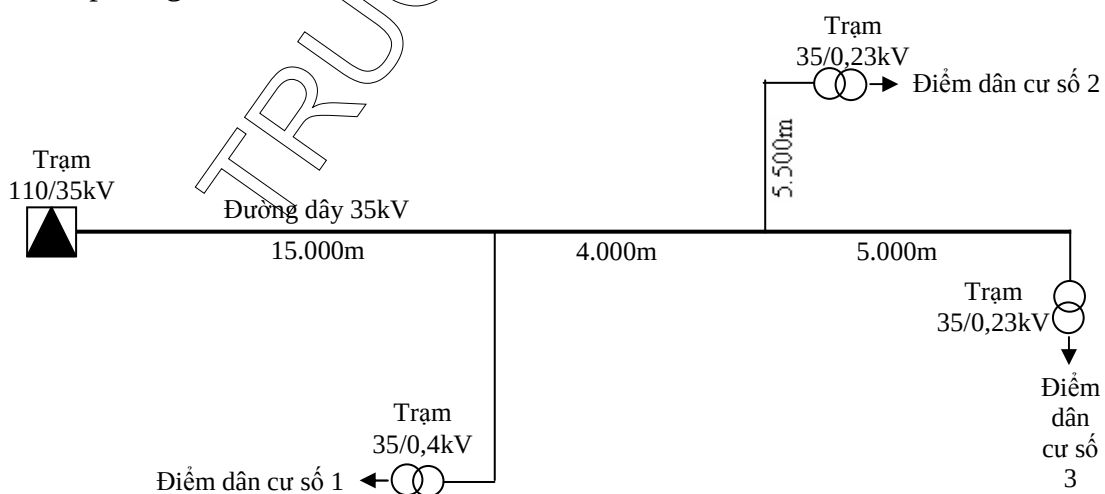
Sơ đồ mạng điện thành phố lớn

d) Cấu trúc điển hình mạng điện khu vực nông thôn

Khu vực nông thôn được cấp điện từ cấp trung áp (10-35)kV. Lưới phân phối có cấu trúc dạng hình tia, một đường trục, không có dự phòng.

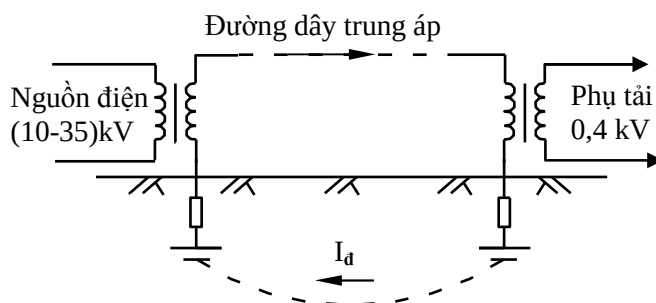
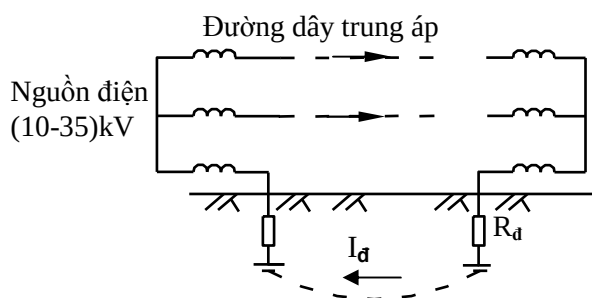
Trạm biến áp phân phối điện cho các hộ tiêu thụ có 2 loại 35/0,23kV để cấp cho phụ tải 1 pha, loại 35/0,4kV nếu điểm dân cư có cả phụ tải 3 pha.

Tất cả các tuyến dây đều là đường dây trên không. Các trạm biến áp dùng kiểu cột. Trạm biến áp thường đặt ở trung tâm điểm dân cư để dễ quản lý vận hành. Mỗi điểm dân cư chỉ đặt một trạm biến áp công suất bé.



Khoảng cách các điểm dân cư khá xa nên đường dây dài, để tiết kiệm chi phí xây dựng, dây dẫn đường trục có thể là 2 pha hoặc 1 pha. Ở các loại mạng điện này người ta sử dụng đất làm một dây dẫn. Để có thể truyền dẫn điện trong đất cần phải xây dựng ở trạm phát và trạm thu các hệ thống tiếp địa khá tốn tiền, do đó phải so sánh lựa chọn phương án dẫn điện 3 pha và 1 pha

bên nào lợi thì mới quyết định. Dòng điện được truyền từ trạm biến áp đến phụ tải và trở về qua hệ thống tiếp địa.



4.2. Nội dung tính toán mạng điện trong quy hoạch cấp điện

Sau khi xác định được vị trí các hộ tiêu thụ, vị trí các trạm biến áp, người làm quy hoạch cấp điện phải thực hiện các công việc tính toán liên quan đến quy hoạch mạng điện với các nội dung sau:

- Vạch ra các phương án cấp điện nhằm kết nối nguồn điện với các phụ tải. Xem xét chọn ra 2-3 phương án tốt nhất để tiến hành tính toán và so sánh về kinh tế - kỹ thuật.
- Lập sơ đồ nguyên lý (sơ đồ một sợi) để tính toán các thông số kỹ thuật điện.
- Tính dòng điện cho phép theo điều kiện khí hậu thực tế tại nơi lập quy hoạch.
- Xác định loại dây dẫn điện (cáp ngầm, cáp bọc, dây trần) và tiết diện của chúng.
- Tính tổn thất công suất truyền tải trên mạng điện.
- Tính tổn thất điện áp trên đường dây để xác định bán kính cấp điện.
- Lập khối lượng dự kiến đầu tư.
- So sánh về mặt kinh tế - kỹ thuật các phương án và chọn ra phương án tối ưu.
- Khái toán vốn đầu tư và dự kiến các nguồn vốn (vốn vay, vốn tự có,...) cũng như tiến độ thực hiện quy hoạch theo phương án chọn.

Với bài giảng này chỉ đề cập đến việc tính toán các thông số kỹ thuật điện. Việc tính toán các nội dung khác như hiện quả dự án, chi phí lãi vay,... được trình bày trong các môn học khác.

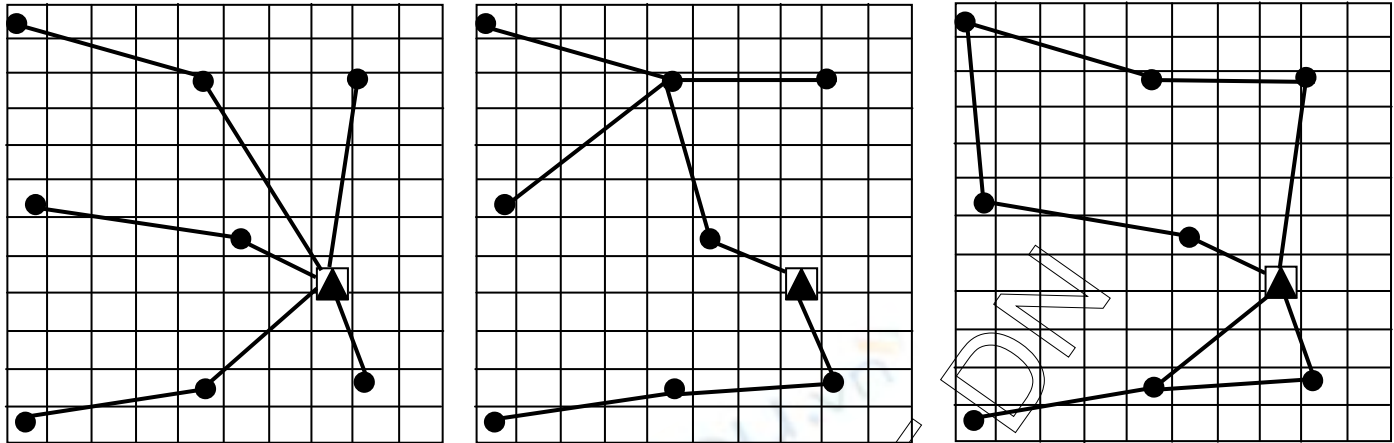
4.3. Chọn phương án cấp điện:

Vạch phương án cung cấp điện là bài toán khó trong quy hoạch cấp điện, đòi hỏi phải thỏa mãn nhiều tiêu chí như đảm bảo chất lượng điện, giảm giá thành đầu tư, giảm chi phí quản lý, vận hành tin cậy,....

Để tìm được phương án tối ưu thường phải đưa ra một số phương án để so sánh. Trong thực tế, nhiệm vụ này là nhiệm vụ mà người làm quy hoạch hay mắc sai lầm nhất. Sai lầm hay gặp phải là đề xuất các phương án để so sánh không có tính cạnh tranh. Ví dụ so sánh phương án có vốn đầu tư nhỏ, chi phí vận hành thấp với phương án có vốn đầu tư lớn, chi phí vận hành cao là một sự so sánh khập khiễng.

Với vị trí các hộ tiêu thụ cho trước, nguồn điện cho trước có thể đưa ra hàng trăm (thậm chí hàng ngàn) phương án cung cấp điện, tuy nhiên cần phải chọn lọc ra một số phương án có tính

khả thi và tính cạnh tranh nhất. Để làm được việc đó cần phải có sự phân tích sơ bộ một cách đa dạng dưới nhiều khía cạnh như tiêu chuẩn kỹ thuật, chất lượng điện, độ tin cậy, tính đơn giản, thuận tiện trong vận hành,... và như vậy đòi hỏi người làm quy hoạch không những phải am hiểu về kỹ thuật điện mà còn phải có kinh nghiệm thực tế và kiến thức ở nhiều chuyên môn khác nhau.



Một số phương án cấp điện ứng với vị trí nguồn điện và phụ tải cho trước
 ▲ Trạm biến áp ● Hộ tiêu thụ □ Mỗi ô lưới có kích thước 100x100m

Sau khi chọn được một số phương án cung cấp điện phải tiến hành phân tích chúng để tìm ra phương án tốt nhất về kinh tế - kỹ thuật gọi là *phương án tối ưu*.

Ngày nay đã có nhiều tác giả nghiên cứu về vấn đề chọn phương án tối ưu và đều có chung một mục tiêu là làm cho chi phí qui đổi của đường dây là cực tiểu. Nhưng mỗi một phương pháp có hình thức thể hiện riêng với mức độ chính xác khác nhau.

Trong bài giảng này giới thiệu sơ bộ một số phương pháp chọn phương án tối ưu mà không đi sâu vào tính toán cụ thể.

4.3.1. Chọn phương án tối ưu theo chi phí qui đổi nhỏ nhất:

Trong số các phương án cấp điện đưa ra xem xét thì phương án tối ưu là phương án thỏa mãn hàm mục tiêu sau:

$$Z_i = (a_{tc} + k_{kh})V_i + g_{\Delta A_i} \Rightarrow \text{Min}$$

Các điều kiện ràng buộc

$$U_i \geq U_{\min}$$

$$I_{ij} \leq I_{cpij}$$

$$\Delta U_{\max} \leq 5\%$$

Trong đó

Z_i - chi phí truyền tải và phân phối điện năng của phương án thứ i

a_{tc} : hệ số tiêu chuẩn thu hồi vốn đầu tư (với công trình điện lấy $a_{tc} = 0,125$)

k_{kh} : hệ số khấu hao và chi phí quản lý, vận hành của phương án thứ i

V_i : vốn đầu tư của phương án thứ i

$g_{\Delta Ai}$: phí tổn (bằng tiền) về tổn thất điện năng trên đường dây

I_{ij} là dòng điện chạy trên nhánh ij

I_{cpij} là dòng điện cho phép của dây dẫn chạy trên nhánh ij

Trong thực tế quy hoạch cấp điện thường tìm phương án có $Z_{\min}$ trong số các phương án đề xuất. Sau đó tiến hành tính toán chế độ lưới điện để kiểm tra các điều kiện ràng buộc ($U \geq U_{\min}$, $I_{ij} < I_{cpij}$, $\Delta U_{\max} \leq 5\%$) chứ không kiểm tra ràng buộc này trong quá trình tìm $Z_{\min}$.

Trong trường hợp không thỏa mãn điều kiện này thì phải sử dụng các biện pháp bổ sung sao cho thỏa mãn điều kiện ràng buộc hoặc chọn phương án khác để tính toán.

*** Ưu điểm của phương pháp:**

+ Tính toán đơn giản, tận dụng được kinh nghiệm của người thiết kế, thời gian giải có thể được rút ngắn đáng kể nhờ máy tính điện tử.

+ Phương pháp này được sử dụng phổ biến hiện nay.

*** Nhược điểm:**

+ Lời giải chỉ phù hợp với những mạng điện có những phụ tải không yêu cầu cao về độ tin cậy cung cấp điện (hộ loại 3).

4.3.2. Chọn phương án tối ưu theo hệ số phương án

Mục đích của phương pháp này là sử dụng hệ số phương án K_{ij} để xác định sơ đồ nối điện tối ưu. Giả thiết khu vực quy hoạch có n hộ tiêu thụ được cấp điện từ một trạm biến áp. Vị trí trạm biến áp và vị trí n phụ tải đã xác định được trên bản đồ. Ta cần xác định phương thức kết nối phụ tải với nguồn điện tốt nhất.

Lập hàm mục tiêu kết nối dây điện từ điểm i đến điểm j :

$$K_{ij} = (1 + \lambda)l_{ij} + 0,5\lambda^2 L_{0i} \Rightarrow \text{Min}$$

Trong đó:

λ - hệ số chọn bất kỳ có giá trị $0 \div \infty$.

l_{ij} - khoảng cách từ nguồn nối i đến phụ tải thứ j

L_{0i} - khoảng cách từ trạm biến áp đến nguồn nối i

Nguồn nối i chính là vị trí phụ tải thứ i đã được kết nối đến trạm biến áp trong quá trình tìm phương án kết nối trước đó.

Đầu tiên phải tìm ra phương án kết nối tất cả n phụ tải ứng với $\lambda=0$ qua các bước sau:

Bước 1:

Cho $i=0$ có nghĩa là ở bước đầu tiên chỉ có một nguồn nối là trạm biến áp.

Các hàm mục tiêu trở thành $K_{0j} = (1 + \lambda)l_{0j} + 0,5\lambda^2 L_{00} = (1 + \lambda)l_{0j} \Rightarrow \text{Min}$

Tất cả n phụ tải đều có khả năng nối đến trạm biến áp do đó ta tính được giá trị $K_{01}, K_{02}, \dots, K_{0n}$. Tìm giá trị nhỏ nhất trong các giá trị này, ví dụ được K_{02} . Khi đó ta xác lập được một đường dây nối từ trạm biến áp đến phụ tải số 2. Từ phụ tải 2 bây giờ ta có thể cấp điện đến các

phụ tải còn lại, do đó nó trở thành một nguồn nối. Như vậy ta xem như có 2 nguồn cấp điện là trạm biến áp và điểm phụ tải 2 (nguồn nối).

Bước 2:

Cho $i=2$ (phụ tải trở thành nguồn nối ở bước 1) và lúc này có 2 nguồn nối để cấp cho các phụ tải là trạm biến áp và phụ tải 2. Các hàm mục tiêu nối dây điện từ nguồn nối 2 đến các phụ tải còn lại là:

$$K_{2j} = (1 + \lambda)l_{2j} + 0,5\lambda^2.L_{02} \Rightarrow \text{Min}$$

Trong đó $j \neq 2$ vì 2 đã trở thành nguồn, không còn là phụ tải nữa.

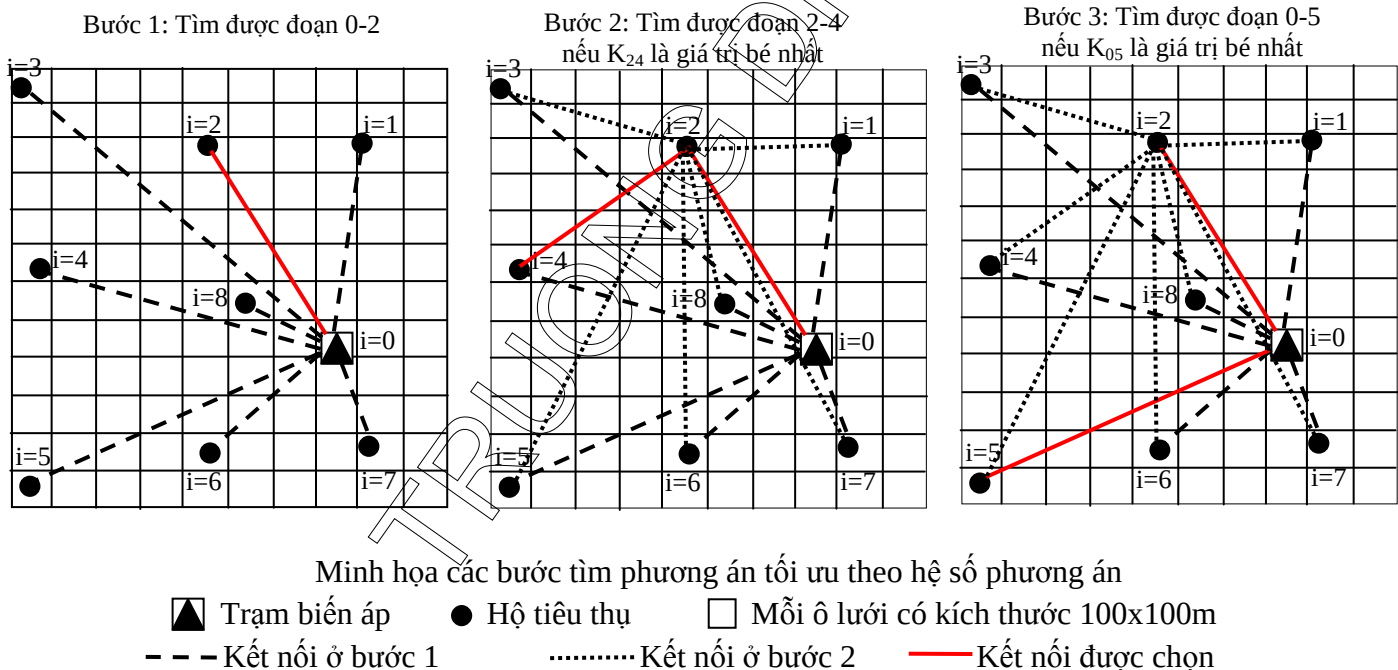
Ta tiến hành xác định $(n-1)$ giá trị $K_{21}, K_{23}, K_{24}, \dots, K_{2n}$ là các giá trị tính toán khi $(n-1)$ phụ tải đầu nối vào nguồn nối 2.

Ta tìm giá trị nhỏ nhất trong tập hợp các giá trị vừa tìm ra và các giá trị còn lại ở bước 1. Có nghĩa là tìm giá trị min trong tập hợp $\{K_{21}, K_{23}, K_{24}, \dots, K_{2n}; K_{01}, K_{03}, K_{04}, \dots, K_{0n}\}$.

+ Ví dụ nếu K_{24} nhỏ nhất thì ta xác lập được đường dây nối từ phụ tải 2 đến phụ tải 4, tức là phụ tải 4 không nối trực tiếp đến trạm biến áp.

+ Ví dụ nếu K_{05} nhỏ nhất thì ta xác lập được đường dây nối phụ tải 5 đến trạm biến áp

Bước 3,...: Từ bước 3 trở đi ta tiếp tục làm tương tự cho đến khi tất cả các phụ tải đều trở thành nguồn nối, tức là sơ đồ đã phủ kín đến các phụ tải thì dừng lại.



Bước cuối: Tính chi phí truyền tải điện năng trên từng đoạn dây Z_{ij} và tổng chi phí truyền tải của phương án $Z_0 = \sum Z_{ij}$

Bây giờ ta quay lại từ bước 1 và tính toán để chọn phương án nối dây khác bằng cách cho $\lambda=1, 2, \dots$ hoặc có thể cho bằng số lẻ $\lambda=1, 1-1, 2-2, \dots$. Việc chọn giá trị λ phải có sự điều khiển của người tính toán thì mới tìm được lời giải tối ưu.

Ví dụ cho $\lambda=0, 1, 2$ ta có Z_0, Z_1, Z_2 So sánh nếu $Z_0 > Z_1$ và $Z_1 < Z_2$ thì Z_1 là sơ đồ nối điện

tối ưu. Nếu không ta lấy giá trị λ tăng lên bằng 2, 3 . . . và tính toán tương tự. Cứ như vậy khi tính đến $Z_i > Z_{i-1}$ thì ta được sơ đồ nối điện tối ưu với $Z_{i-1} = Z_{\min}$.

- * Ưu điểm : Kết quả tìm được khá tin cậy
- * Nhược điểm : Tính toán khá phức tạp, khối lượng tính toán lớn.

4.3.3. Chọn phương án tối ưu theo phương pháp tối ưu từng bước

Việc cung cấp điện cho một phụ tải bất kỳ đòi hỏi chi phí xây dựng đường dây tải điện mới, ngoài ra nếu điểm đầu điện là mạng điện có sẵn thì sẽ phát sinh thêm những chi phí trong mạng điện có sẵn này (tăng chi phí quản lý, bảo dưỡng, tăng tổn thất điện,...). Ứng dụng nguyên tắc này người ta đưa ra phương pháp chọn phương án nối dây điện theo kiểu tối ưu từng bước.

Cách làm của phương pháp này là cứ mỗi lần thiết lập được một đường dây kết nối giữa nguồn điện với phụ tải điện ta coi đó như mạng điện hiện có. Khi xét các phụ tải còn lại để kết nối vào mạng điện đã thiết lập ta coi như nối vào mạng điện hiện có. Mô tả cụ thể như sau:

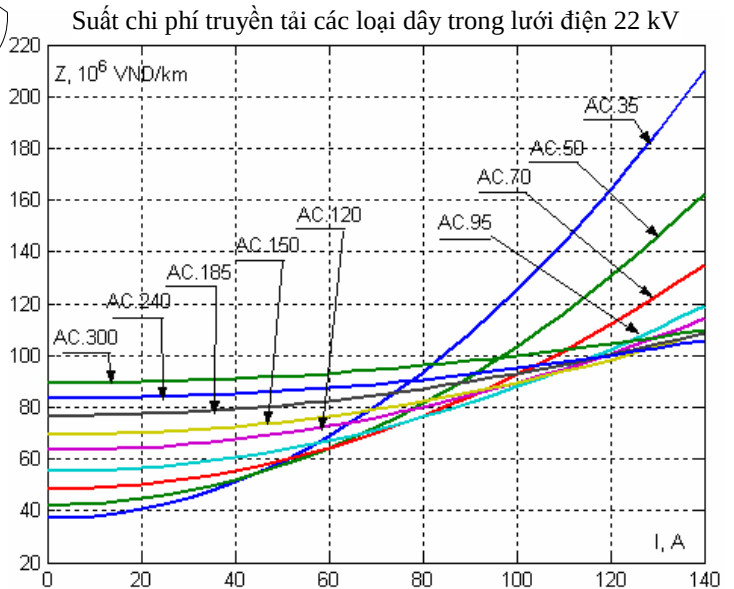
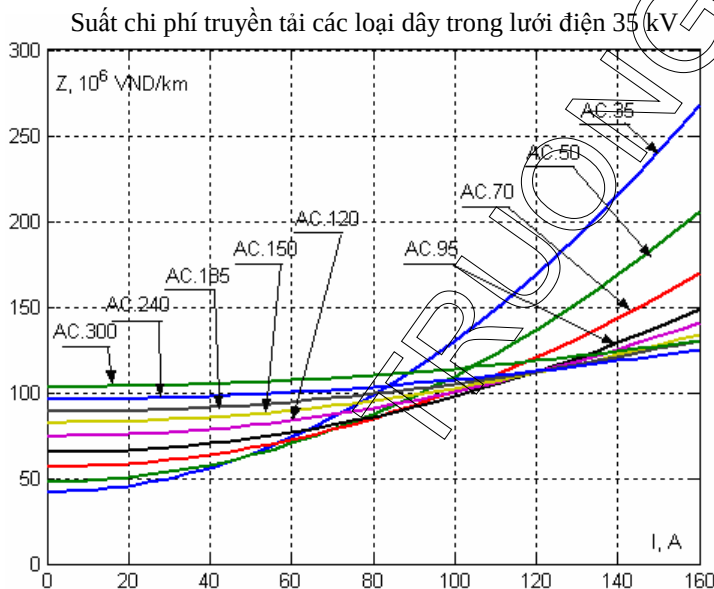
Việc nối phụ tải j vào điểm phụ tải i hiện có thì chi phí truyền tải điện năng Z_1 từ i đến j xác định theo biểu thức:

$$Z_1 = c_j \cdot l_{ij}$$

Trong đó:

c_j - Suất chi phí truyền tải điện năng cấp cho phụ tải j (tra bảng hoặc đường cong)

l_{ij} -Khoảng cách thẳng giữa điểm i và điểm j .



Khi điểm phụ tải j được đầu vào mạng điện đã thiết lập trước đó (mạng điện hiện có) thì phụ tải trong mạng điện này sẽ tăng hơn so với trước đó, bởi vậy sẽ phát sinh thêm chi phí truyền tải điện năng, lượng chi phí này được xác định theo biểu thức:

$$Z_2 = (c_{i+j} - c_i) L_{oi} ;$$

Trong đó:

c_{i+j} - Suất chi phí truyền tải của mạng điện sau khi đầu nối j vào

c_i - Suất chi phí truyền tải của mạng điện khi chưa đầu nối j vào

L_{oi} - Là chiều dài (tính dọc theo dây điện) từ trạm biến áp đến điểm đầu điện i .

Các giá trị suất chi phí truyền tải c_i, c_{i+j}, c_j được cho sẵn trong các sổ tay thiết kế (hoặc có thể tự xây dựng) dưới dạng các đường cong chi phí phụ thuộc vào dòng điện truyền tải, loại dây dẫn, tiết diện dây dẫn. Ví dụ các biểu đồ sau:

Để xác định suất chi phí truyền tải của đường dây ta chỉ việc dựa vào giá trị dòng điện dòng kẻ một đường thẳng vuông góc với trục hoành, tung độ của điểm gặp nhau giữa đường thẳng này với đường cong đầu tiên sẽ chính là giá trị chi phí cần tìm, đồng thời xác định được tiết diện dây dẫn cần sử dụng.

Như vậy tổng chi phí tính toán cần thiết để đấu nối phụ tải j vào điểm phụ tải i sao cho vẫn tối ưu về kinh tế - kỹ thuật là:

$$Z_{ij} = Z_1 + Z_2 = c_j \cdot l_{ij} + (c_{i+j} - c_i) L_{oi} \Rightarrow \text{Min}$$

Bài toán xây dựng sơ đồ nối điện tối ưu mô tả ở trên được thực hiện theo từng bước nối tối ưu. Các bước tính được lặp lại nhiều lần phụ thuộc vào số lượng điểm tải. Trình tự xây dựng sơ đồ như sau:

+ Xác định khoảng cách giữa các điểm tải theo biểu thức

$$l_{ij} = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

Khoảng cách l_{ij} cũng có thể đo trực tiếp trên thực địa hoặc đo trên bản đồ theo tỷ lệ xích.

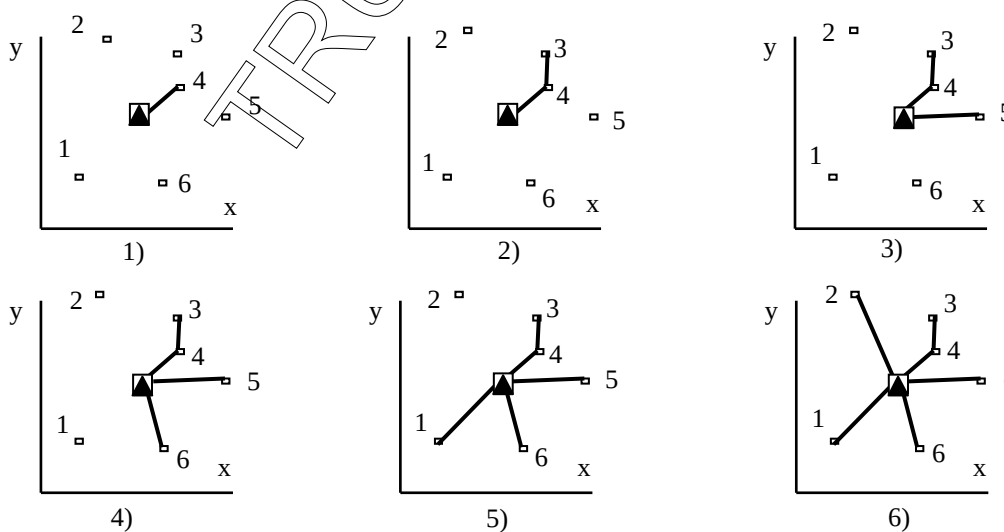
+ Theo biểu đồ suất chi phí truyền tải xác định các giá trị c_i và tiết diện dây dẫn điện.

+ Tính các giá trị $Z_{ij} = Z_{oj}$ ở bước đầu tiên ứng với nguồn điện là trạm biến áp.

+ Chọn giá trị nhỏ nhất trong số các giá trị Z_{oj} vừa xác định, giả sử $Z_{04} = \min$, ta nối điểm 4 với nguồn 0, lúc này điểm tải 4 trở thành nguồn nối.

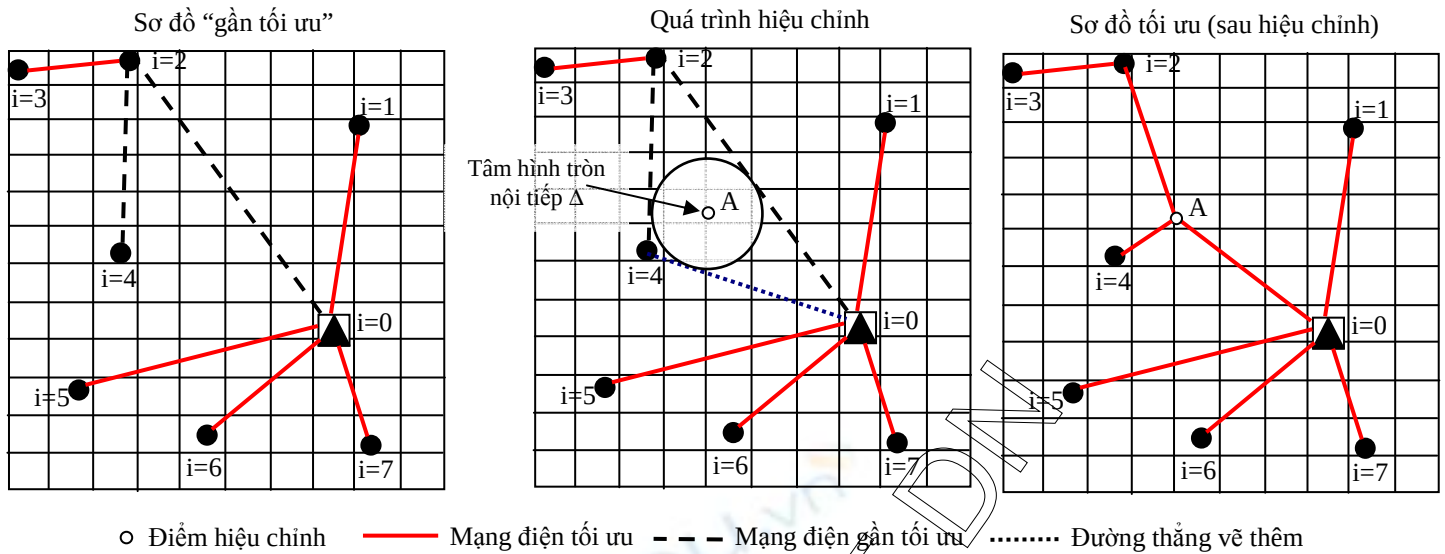
+ Tiếp theo lấy điểm 4 làm gốc xác định các giá trị Z_{4j} đối với các phụ tải còn lại. Chọn giá trị nhỏ nhất trong số các giá trị Z_{4j} và Z_{0j} còn lại ở bước trước, giả sử trong số đó Z_{43} nhỏ nhất ta nối điểm 3 với gốc 4.

+ Tiếp tục xác định các giá trị Z_{3j} . Bài toán được lặp lại như vậy cho đến khi tất cả các phụ tải đều được nối vào mạng. Sơ đồ nhận được sau khi kết thúc là sơ đồ gần tối ưu. Quá trình mô tả bằng các hình vẽ minh họa sau đây:



Trình tự xây dựng sơ đồ nối điện tối ưu (từ bước 1 đến bước 6).

Sơ đồ nhận được mới chỉ “gần tối ưu” do có thể xuất hiện các góc nhọn (theo hướng nhìn từ nguồn) mà ta có thể hiệu chỉnh sao cho chiều dài đường dây tải điện ngắn hơn trong khi không làm mất đi tính tối ưu về kinh tế - kỹ thuật.



Cách làm như sau: tìm tâm đường tròn nội tiếp tam giác có góc cần hiệu chỉnh và nối tâm hình tròn này với các đỉnh của tam giác. Ví dụ các hình vẽ trên ta có tam giác 024 cần hiệu chỉnh. Điểm phụ A là tâm hình tròn nội tiếp tam giác, ta nối A với các đỉnh 024 thì chiều dài sau khi hiệu chỉnh là $A0+A2+A4$ bé hơn chiều dài trước khi hiệu chỉnh là $02+24$.

Như vậy sơ đồ tìm được vừa tối ưu dưới góc độ chi phí truyền tải điện năng vừa tối ưu dưới góc độ hình học..

4.4. Mặt bằng bố trí tuyến đường dây tải điện

Mặt bằng bố trí tuyến đường dây tải điện chính là sơ đồ nguyên lý của mạng điện trên thực địa. Bố trí tuyến dây có tính chất quan trọng ảnh hưởng đến giá thành đầu tư công trình. Đặc biệt với đô thị do nguồn lực đất đai khá đắt đỏ thì việc bố trí tuyến dây ngắn nhất, tiết kiệm nhất thì vô cùng quan trọng. Điều này ảnh hưởng lớn công tác đền bù, có thể đẩy nhanh hoặc làm chậm tiến độ công trình. Không thể xây dựng một lý thuyết chung về việc bố trí tuyến đường dây vì còn phải phụ thuộc vào điều kiện địa hình, địa chất và công trình hạ tầng kỹ thuật hiện có của khu vực quy hoạch để bố trí. Điều này đòi hỏi nhiều ở kinh nghiệm và trách nhiệm của người làm quy hoạch trong việc điều tra, thu thập và phân tích số liệu. Ở đây xin nêu ra một số nguyên tắc bố trí tuyến dây cần phải lưu ý:

a) Nguyên tắc chung:

- + Đảm bảo hành lang tuyến dây điện
- + Không cắt qua khu dân cư đông đúc, hạn chế cắt qua khu dân cư khác.
- + Tìm hướng đi sao cho mức đền bù thấp nhất, hạn chế di chuyển nhà dân.
- + Tuyệt đối tránh các khu di tích lịch sử, danh lam thắng cảnh,....

b) Yêu cầu riêng cho khu vực đô thị

- + Tuyến dây điện bố đi dọc theo hè phố
- + Các cột điện phải trồng ngay giữa ranh giới của 2 lô đất.
- + Tránh các công trình hạ tầng kỹ thuật hiện có như điện, thông tin, mương thoát nước,... đã xây dựng trước đó.
- + Những đoạn vỉa hè uốn cong nên dùng cáp ngầm, hạn chế đường dây trên không vì khả năng dây điện tiến sát vào ban công nhà dân gây mất an toàn.
- + Trên một tuyến đường chỉ bố trí dây điện đi một bên đường.
- + Tốt nhất nên dùng cáp ngầm cho cả mạng điện cao áp và mạng điện hạ áp vừa mỹ quan, vừa đảm bảo an toàn (tuy nhiên giá thành đắt nên cần phải xem xét chọn lựa phương án).
- + Nếu không dùng cáp ngầm được thì dùng dây điện bọc đi trên không: vừa giảm được hành lang đường điện vừa an toàn.
- + Tuyệt đối không dùng dây dẫn điện trần.
- + Nên kết hợp nhiều đường dây trên một tuyến dây để tiết kiệm hành lang. Ví dụ trên một vỉa hè có thể bố trí 2 đường dây 22 kV và 1 đường dây 0,4 kV đi chung cột
- + Tất cả các cột đều dùng loại từ 12 m trở lên để dự phòng phát triển phụ tải có thể lắp thêm 1 tuyến dây nữa.
- + Các tuyến phố có vỉa hè hẹp phải bố trí tuyến dây ra lòng đường bằng cách dùng xà đỡ dây kiểu lệch 1 bên cột.
- + Không dùng dây néo cột. Các vị trí góc chịu lực lớn (như ngã 3, ngã tư đường phố) dùng 2 cột bê tông ghép lại hoặc dùng cột sắt.

c) Yêu cầu riêng cho khu vực nông thôn

Khu vực nông thôn việc bố trí tuyến dây có phần dễ dàng hơn do đất đai còn khá nhiều. Tuy nhiên ta cũng không nên lạm dụng vấn đề này mà xem nhẹ việc tìm ra phương án tốt nhất.

- + Nên bố trí tuyến đi men theo đường giao thông liên thôn, liên xã hoặc đường mòn để thuận lợi cho sửa chữa.
- + Tránh cắt nhà dân, hạn chế đi qua rừng cây có giá trị kinh tế và cây lâu năm như quế, cao su,....
- + Giảm đến mức thấp nhất số lần bẻ góc (số lần đổi hướng) đường dây.
- + Tránh đổi hướng dây ngay trên mép sông, nơi dễ sạt lở, xói mòn hay địa chất yếu.
- + Tránh đi qua khu vực phức tạp về địa hình như núi cao, khe vực sâu, địa hình chia cắt mạnh,... vì khi thi công cũng như vận hành rất khó khăn.

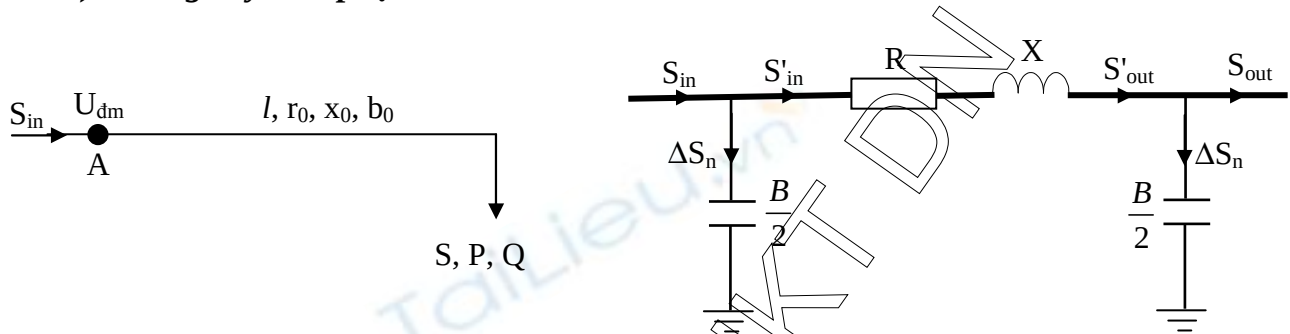
4.5. Tổn thất công suất và điện năng trên đường dây tải điện

Tổn thất công suất có vai trò quan trọng trong tính toán quy hoạch cấp điện. Dựa vào tổn thất ta xác định được mạng điện vận hành có kinh tế không, vốn đầu tư có mang lại hiệu quả không,...

Trong chương 2 ta đã biết, để xác định được công suất nguồn điện cấp cho khu vực quy hoạch, ngoài số liệu công suất các hộ tiêu thụ còn phải biết giá trị công suất tổn hao trên mạng điện truyền tải. Nếu công suất nguồn điện tính toán chỉ bằng tổng công suất phụ tải thì không chính xác mà phải gồm cả công suất tổn thất trên mạng điện.

4.5.1. Tổn thất công suất đường dây có sơ đồ thay thế hình II

a) Đường dây có 1 phụ tải:



Xét một đường dây tải điện nhận điện tại nút A có điện áp định mức U_{dm} , độ dài l , các tham số r_0, x_0, b_0 . Mô hình tính toán của đường dây này như hình bên phải. Đường dây nhận công suất (S_{in}, P_{in}, Q_{in}) từ nguồn điện, sau khi đi qua R, X, B nó bị tổn hao công suất và cấp đến phụ tải công suất $S_{out}=S, P_{out}=P, Q_{out}=Q$. Ta cần tính toán lượng công suất tổn hao qua đường dây tải điện.

Theo lý thuyết mạng điện, tổn thất công suất dọc trên đường dây bao gồm tổn thất công suất tác dụng trên R , tổn thất công suất phản kháng trên X . Tính các tổn thất công suất này một cách chính xác tương đối phức tạp, do đó trong công tác quy hoạch cấp điện có thể tính gần đúng như sau:

$$\Delta P_d = \frac{P_{out}'^2 + Q_{out}'^2}{U_{dm}^2} \cdot R \quad \Delta Q_d = \frac{P_{out}'^2 + Q_{out}'^2}{U_{dm}^2} \cdot X \quad \Delta S_d = \sqrt{\Delta P_d^2 + \Delta Q_d^2}$$

Trong đó:

$$P'_{out} = P \quad Q'_{out} = Q + \Delta Q_n = Q - U_{dm}^2 \cdot \frac{B}{2}$$

Tổn thất ngang trên đường dây chính là tổn thất công suất phản kháng trên điện dẫn phản kháng B của đường dây. Tổn thất này được chia làm 2 nửa ở 2 đầu của đường dây và tính theo công thức gần đúng sau:

$$\Delta P_n = 0 \quad \Delta S_n = \Delta Q_n = -U_{dm}^2 \cdot \frac{B}{2}$$

Sở dĩ có dấu âm phía trước biểu thức vì công suất trên điện dung C ngược với công suất trên điện cảm L .

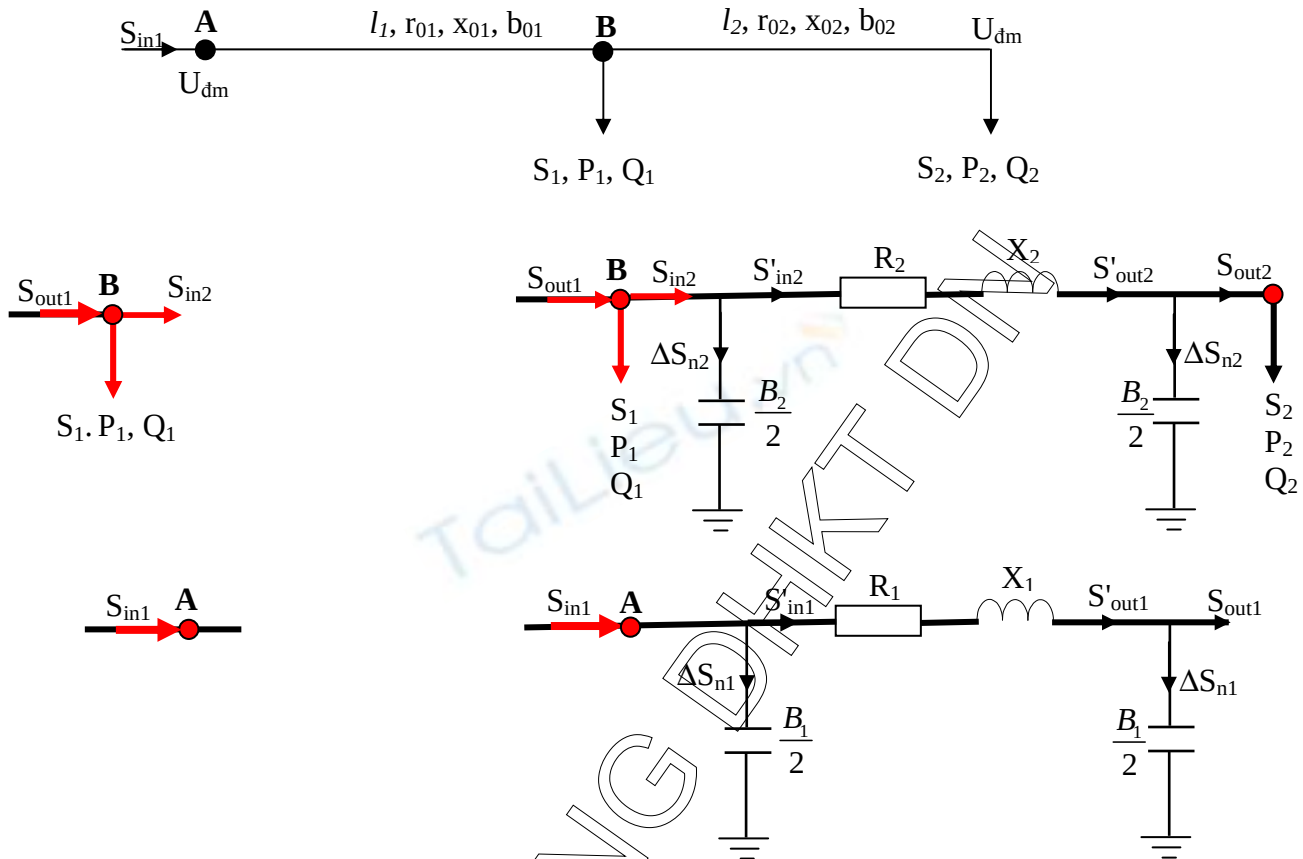
Như vậy ta có tam giác tổn thất công suất khi truyền tải qua dây dẫn là:

$$\Delta P = \Delta P_d$$

$$\Delta Q = \Delta Q_d + 2.\Delta Q_n = \frac{P_{out}'^2 + Q_{out}'^2}{U_{dm}^2} . X - 2U_{dm}^2 . \frac{B}{2}$$

$$\Delta S = \sqrt{\Delta P^2 + \Delta Q^2}$$

b) Đường dây có từ 2 phụ tải trở lên:



Ta tính theo nguyên tắc tính dồn từ điểm cuối của đường dây tải điện về điểm đầu, trong đó các công suất được thu về chung 1 điểm nút. Tính lần lượt từng đường dây một và mỗi đường dây được thay thế bằng một sơ đồ hình II. Ở đây ta chỉ minh họa 2 đoạn đường dây có 2 phụ tải.

Đường dây 2 được thay thế bằng sơ đồ hình II như trên hình vẽ.

+ Tính tổn thất trên đoạn dây 2:

$$P'_{out2} = P_2 \quad Q'_{out2} = Q_2 + \Delta Q_{n2} = Q_2 - U_{dm}^2 . \frac{B_2}{2}$$

$$\Delta P_{d2} = \frac{P_{out2}'^2 + Q_{out2}'^2}{U_{dm}^2} . R_2 \quad \Delta Q_{d2} = \frac{P_{out2}'^2 + Q_{out2}'^2}{U_{dm}^2} . X_2$$

$$P'_{in2} = P'_{out2} + \Delta P_{d2} \quad Q'_{in2} = Q'_{out2} + \Delta Q_{d2}$$

$$P_{in2} = P'_{in2} \quad Q_{in2} = Q'_{in2} + \Delta Q_{n2} = Q'_{in2} - U_{dm}^2 . \frac{B_2}{2}$$

Như vậy ta có tổn thất công suất trên đoạn 2 là:

$$\Delta P_2 = P_{in2} - P_{out2}$$

$$\Delta Q_2 = Q_{in2} - Q_{out2}$$

+ Sau khi tính xong đoạn 2 ta lại tiếp tục tính cho đoạn dây 1. Ta vẫn dùng sơ đồ hình II cho đoạn dây 1, riêng phụ tải cuối đoạn dây 1 được thay thế bằng S_{out1} .

Tiếp tục tính tổn thất trên đoạn dây 1:

$$P_{out1} = P_1 + P_{in2}$$

$$Q_{out1} = Q_1 + Q_{in2}$$

$$P'_{out1} = P_{out1}$$

$$Q'_{out1} = Q_{out1} + \Delta Q_{n1} = Q_{out1} - U_{dm}^2 \cdot \frac{B_1}{2}$$

$$\Delta P_{d1} = \frac{P_{out1}'^2 + Q_{out1}'^2}{U_{dm}^2} \cdot R_1$$

$$\Delta Q_{d1} = \frac{P_{out1}'^2 + Q_{out1}'^2}{U_{dm}^2} \cdot X_1$$

$$P'_{in1} = P'_{out1} + \Delta P_{d1}$$

$$Q'_{in1} = Q'_{out1} + \Delta Q_{d1}$$

$$P_{in1} = P'_{in1}$$

$$Q_{in1} = Q'_{in1} + \Delta Q_{n1} = Q'_{in1} - U_{dm}^2 \cdot \frac{B_1}{2}$$

Như vậy ta có tổn thất công suất trên đoạn 1 là:

$$\Delta P_1 = P_{in1} - P_{out1}$$

$$\Delta Q_1 = Q_{in1} - Q_{out1}$$

+ Như vậy tổn thất công suất trên mạng này là:

$$\Delta P = \Delta P_1 + \Delta P_2$$

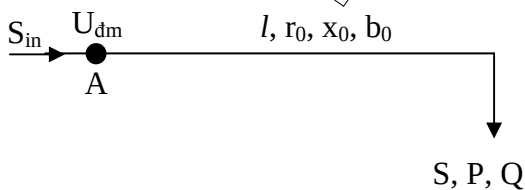
$$\Delta Q = \Delta Q_1 + \Delta Q_2$$

$$\Delta S = \sqrt{\Delta P^2 + \Delta Q^2}$$

4.5.2. Tổn thất công suất đường dây có sơ đồ thay thế đường thẳng:

Sơ đồ thay thế lúc này không còn nhánh rẽ ngang mà chỉ còn trục dọc, tức là chỉ còn R, X. Quá trình tính toán ta bỏ qua các giá trị do điện dẫn phản kháng sinh ra.

a) Đường dây có 1 phụ tải



$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U_{dm}^2} \cdot R$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U_{dm}^2} \cdot X$$

$$\Delta S = \sqrt{\Delta P^2 + \Delta Q^2}$$

b) Đường dây có 2 phụ tải trở lên