

# VẬN HÀNH VÀ ĐIỀU KHIỂN HỆ THỐNG ĐIỆN

## Chương 5 Điều khiển điện áp trong hệ thống điện

# 1. Giới thiệu chung

Để điều chỉnh điện áp phải điều chỉnh công suất phản kháng của nguồn điện và các nguồn công suất phản kháng khác.

Vì điện áp có tính chất khu vực nên việc điều chỉnh điện áp cũng phải phân cấp và phân tán.

**\*Điều kiện cần** để có thể điều chỉnh được điện áp là:

- Đủ công suất phản kháng.
- Công suất phản kháng này phải được phân bố hợp lý từng khu vực của hệ thống.

**\* Điều kiện đủ** để có thể điều chỉnh được điện áp là nguồn công suất phản kháng phải điều khiển được trong phạm vi cần thiết.

*Có thể điều chỉnh điện áp bằng các cách:*

- Điều chỉnh công suất phản kháng của nhà máy điện;
- Đặt các tụ bù
- Phân bố lại dòng công suất phản kháng ...

## **\* Các phương tiện điều chỉnh điện áp:**

- Điều chỉnh kích từ máy phát điện.
- Điều chỉnh dưới tải hệ số biến áp (đầu phân áp) ở máy biến áp tăng áp và ở máy biến áp giảm áp theo thời gian.
- Điều chỉnh điện áp ở các máy biến áp hỗ trợ chuyên dùng để điều chỉnh điện áp.

- Điều chỉnh công suất phản kháng của các nguồn công suất phản kháng đặt trên lưới gồm có:

\* Nguồn điều khiển công suất (SVC – Static Voltage Compensator),

\* Tụ điện,

\* Kháng điện điều chỉnh hữu cấp.

## Chú ý:

- Điều chỉnh điện áp ở cấp trung và hạ áp nhằm đảm bảo chất lượng điện năng
- Ở cấp cao hơn nhằm giảm tổn thất công suất và tạo điều kiện thuận lợi cho điều chỉnh điện áp ở lưới phân phối.

## \* Ảnh hưởng của sự thay đổi điện áp:

- Khi điện áp ở các nút tải xuống quá thấp  $(70-80\%)U_{đm}$  sẽ có nguy cơ xảy ra hiện tượng suy áp.
- Điện áp tự động tụt xuống do công suất phản kháng yêu cầu của phụ tải tăng đột ngột.
- Giống như hiện tượng suy tần, hiện tượng suy áp rất nguy hiểm và có thể làm tan rã hệ thống .



## 2. Sự biến đổi điện áp trên lưới điện

- Tổn thất điện áp trên lưới hệ thống được tính như sau:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{PR + QX}{U^2} \quad (5.1)$$

Trên lưới hệ thống  $X \gg R$  nên ta có thể viết:

$$\frac{\Delta U}{U} = \frac{QX}{U^2} \quad (5.2)$$

- Ta thấy điện áp trên lưới hệ thống phụ thuộc chủ yếu vào dòng công suất phản kháng,  $Q$  và sơ đồ lưới điện,  $X$ .

Như vậy, bù công suất phản kháng:

\* Một mặt làm giảm tổn thất điện áp do làm giảm,  $QX$  tức là làm tăng mức điện áp.

\* Một mặt làm giảm tổn thất công suất tác dụng do giảm  $R(Q^2/U^2)$  trên lưới điện.

## **Có hai loại biến thiên điện áp trên lưới hệ thống:**

- \* Biến đổi chậm gây ra bởi sự biến đổi tự nhiên của phụ tải theo thời gian.**
- \* Biến đổi nhanh.**

**\* Biến đổi nhanh do nhiều nguyên nhân khác nhau:**

- Sự dao động điều hòa hoặc ngẫu nhiên của phụ tải,
- Sự biến đổi sơ đồ lưới điện
- Hoạt động của bảo vệ rơ le và các thiết bị tự động hóa
- Khởi động hay dừng tổ máy phát.

### **3. Mục tiêu của điều chỉnh điện áp trên lưới điện:**

- Giữ vững điện áp trong mọi tình huống vận hành bình thường cũng như sự cố, trong phạm vi cho phép và được xác định bởi các giới hạn trên và dưới.

Các giới hạn này được xác định như sau:

- **Giới hạn trên** xác định bởi khả năng chịu áp của cách điện và hoạt động bình thường của các thiết bị phân phối cao và siêu cao áp.
- Nếu điện áp tăng cao sẽ làm già hóa nhanh cách điện và làm cho thiết bị hoạt động không chính xác.

- **Giới hạn dưới** xác định bởi điều kiện an toàn hệ thống, tránh quá tải đường dây và máy biến áp (trong lưới điện khi,  $P$  là hằng số thì nếu  $U$  giảm  $I$  sẽ tăng gây quá tải), tránh gây mất ổn định điện áp (hiện tượng suy áp).

Các giới hạn trên đây gọi là **giới hạn kỹ thuật** hay điều kiện kỹ thuật. Nói chung, trong lưới điện 220 (kV) trở lên, điện áp chỉ được phép dao động trong giới hạn  $\pm 5\%$  so với  $U_{dm}$ .

Với mức giới hạn này thì việc điều chỉnh dưới tải ở các máy biến áp khu vực và trung gian sẽ thuận lợi.



- Trong giới hạn kỹ thuật cho phép, giữ mức điện áp sao cho tổn thất công suất tác dụng nhỏ nhất, đây là **điều kiện kinh tế**.

- Nói chung, thì trong điều kiện tổn thất vàng quang nhỏ (do thiết kế hoặc do thời tiết tốt), mức điện áp nên được giữ ở mức cao nhất có thể thì,  $\Delta P$  sẽ nhỏ.

- Nói tóm lại, điện áp trên lưới hệ thống được điều chỉnh theo **điều kiện an toàn và kinh tế**.

## 4. Phương thức điều chỉnh điện áp:

*Cũng giống như hệ thống điều chỉnh tần số, hệ thống điều chỉnh điện áp được chia làm ba cấp:*

**1. Điều chỉnh sơ cấp** là quá trình đáp ứng nhanh và tức thời các biến đổi điện áp nhanh và ngẫu nhiên bằng tác động của các thiết bị điều chỉnh điện áp máy phát và các máy bù tĩnh.

- Trong trường hợp điện áp biến đổi lớn thì các bộ tự động điều áp dưới tải ở các máy biến áp cũng tham gia vào quá trình điều chỉnh.
- Điều chỉnh sơ cấp thực hiện tự động trong thời gian rất nhanh.
- Điều chỉnh sơ cấp nhằm mục đích giữ điện áp lưới điện ở mức an toàn, tránh nguy cơ suy áp trong chế độ bình thường và nhất là khi sự cố.

**2. Điều chỉnh thứ cấp** để đối phó với các biến đổi chậm và có biên độ lớn của điện áp.

Điều chỉnh thứ cấp hiệu chỉnh lại các giá trị điện áp chỉ định của các thiết bị điều chỉnh sơ cấp của các máy phát và các bộ tụ bù có điều khiển tự động trong miền nó đảm nhận.

Quá trình này kết thúc trong vòng 3 phút.

**3. Điều chỉnh cấp 3** điều hòa mức điện áp giữa các miền điều chỉnh cấp 2, tối ưu hóa mức điện áp của hệ thống điện theo tiêu chuẩn kinh tế và an toàn. Quá trình này có thể thực hiện bằng tay hoặc tự động.

Ba cấp điều chỉnh điện áp trên được phân biệt theo **thời gian** và trong **không gian**.

- Theo **thời gian** để tránh mất ổn định của quá trình điều chỉnh.
- Trong **không gian** để có thể chiếu cố ưu tiên các yêu cầu khu vực.

## 5. Hệ thống điều chỉnh điện áp cấp 2

- Nguyên tắc cơ bản của điều chỉnh cấp 2 là chia lưới hệ thống thành các miền điều chỉnh riêng biệt.
- Trong từng miền, các nguồn công suất phản kháng (nhà máy điện, bộ tụ bù, kháng điện) được điều chỉnh tự động và phối hợp để giữ vững mức điện áp của miền.

Nhiệm vụ của điều chỉnh này được thực hiện bằng cách giữ điện áp ở nút hoa tiêu (nút kiểm tra) luôn bằng giá trị chỉ định được xác định theo yêu cầu của hệ thống điện trong từng khoảng thời gian vận hành.



## **Nút hoa tiêu được chọn theo các điều kiện sau:**

- \* Nút hoa tiêu phải là nút đặc trưng cho miền, sự biến đổi điện áp ở nút hoa tiêu phải tương quan với sự biến đổi điện áp toàn miền.
- \* Điều kiện này được thỏa mãn nếu khoảng cách từ nút hoa tiêu đến các nút còn lại trong miền là nhỏ.

\* Mỗi miền phải bao gồm các tổ máy phát có khả năng cung cấp đủ công suất phản kháng cho yêu cầu của miền.

\* Khoảng cách điện giữa nút hoa tiêu của miền và các miền lân cận phải đủ lớn để các miền không ảnh hưởng đến nhau. Điều kiện này nhằm đảm bảo tính độc lập giữa các miền.

- Điện áp trên nút hoa tiêu,  $U_p$  được đo và chuyển về bộ điều khiển miền 10 giây một lần đặt tại trung tâm điều độ miền.
- Tại đây nó được so sánh với điện áp chỉ định,  $U_c$  và tạo tín hiệu ra  $N$ , là lệnh điều khiển của miền và được gọi là mức của miền:

$$N = \alpha \int_0^1 \frac{U_c - U_p}{U_{dm}} dt + \beta \frac{U_c - U_p}{U_{dm}} \quad (5.3)$$

*Trong đó*

$U_C$  : điện áp chỉ định cần giữ

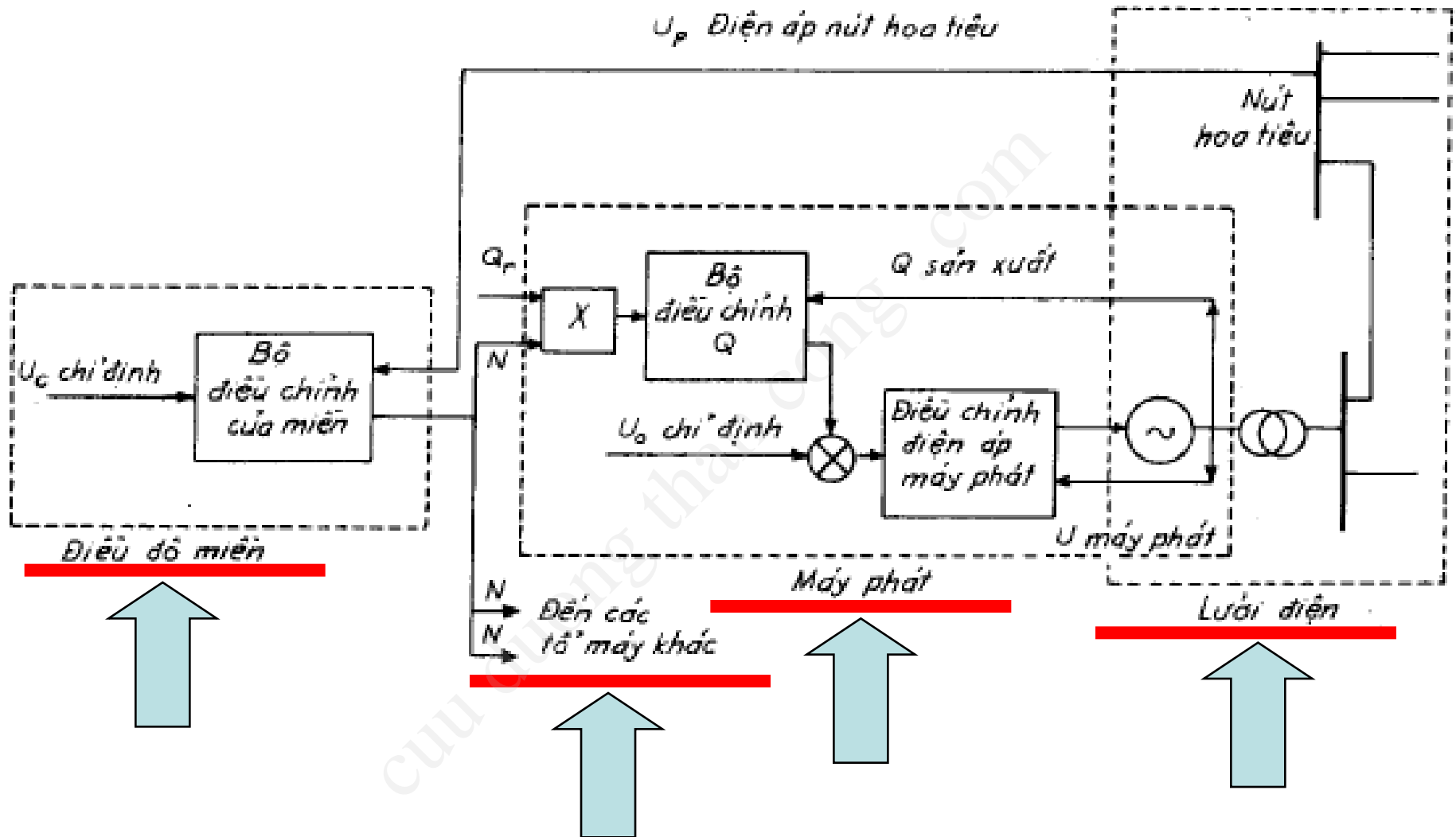
$U_P$ : điện áp tức thời đo được ở nút hoa tiêu

$U'_P$ : điện áp nút hoa tiêu được lọc qua 3 mẫu liên tiếp

$\alpha$ : có giá trị sao cho  $10(s) \leq 1/\alpha \leq 20(s)$

$\beta$ : được chọn sao cho  $\beta/\alpha = 40$

$U_0$ : điện áp chỉ định ở stator máy phát



## Sơ đồ nguyên lý hệ thống điều chỉnh cấp 2

Mức  $N$  thể hiện nhu cầu công suất phản kháng của miền:

\* Nếu  $N > 0$  thì có nghĩa là thiếu công suất phản kháng, cần phải tăng công suất phản kháng phát của các tổ máy.

\* Nếu  $N < 0$  thì ngược lại các tổ máy cần phải tiêu thụ công suất phản kháng.

N được truyền đến bộ điều chỉnh công suất phản kháng của từng tổ máy phát điện theo đường dây liên lạc.

Trước khi đi vào bộ điều chỉnh miền, N được nhân với hệ số tham gia của tổ máy  $Q_r$ , hệ số này bằng khoảng 1,4 lần công suất phản kháng định mức của tổ máy.

- Sự sai khác giữa  $N.Q_r$  và công suất phản kháng đang phát của tổ máy Q được sử dụng để hiệu chỉnh giá trị chỉ định  $U_0$  của bộ điều chỉnh kích từ
- Tín hiệu điều chỉnh được đưa vào bộ điều chỉnh kích từ sao cho đáp ứng được tốc độ biến đổi trung bình của dòng kích từ là  $1,5\% I_{kđm}$ .



## **Miền điều chỉnh điện áp và nút hoa tiêu được xác định như sau:**

\* Trước hết tính công suất ngắn mạch cho mọi nút, những nút có công suất ngắn mạch lớn nhất là nút có khả năng làm nút hoa tiêu.

- Sau đó giải tích lưới điện, trong mỗi lần giải tích đặt nguồn điện áp vào một trong những nút có khả năng
- Lưới còn lại được thay bằng tổng trở cố định.
- Tính tổn thất điện áp giữa nút hoa tiêu và các nút còn lại.
- Sau khi tính lần lượt cho tất cả các nút hoa tiêu, nghiên cứu tổn thất điện áp đã tính có thể xác định cho mỗi nút một nút hoa tiêu gần nhất.

- Từ đó xác định được miền điều chỉnh điện áp và nút hoa tiêu.

Miền này bao gồm các nút có chung nút hoa tiêu gần nhất.

## 7. Mô hình tính toán điều chỉnh tối ưu điện áp trong vận hành HTĐ:

Hàm mục tiêu:

- Mục tiêu là giảm thiểu tổn thất công suất tác dụng trong hệ thống điện.
- Tổn thất công suất trên lưới hệ thống được thể hiện như sau:

$$\Delta P = \sum I^2 R$$

(lấy cho tất cả các đường dây)

- Nếu nhánh (đường dây) k có nút đầu là i, nút cuối là j thì:

$$P_{ji} = U_j^2 g_{ij} - U_i U_j g_{ij} \cos \theta_{ij} - b_{ij} \sin \theta_{ij}$$

$$Q_{ij} = -U_i^2 b_{ij0} + b_{ij} U_i U_j \sin \theta_{ij} - b_{ij} \cos \theta_{ij}$$

-Tổng thất công suất tác dụng trên nhánh  $k$  là tổng đại số của công suất  $P_{ij}$  và  $P_{ji}$ :

$$\Delta P_{ij} = P_{ij} + P_{ji} = U_i^2 g_{ij} + U_j^2 g_{ij} - 2U_i U_j g_{ij} \cos \theta_{ij}$$

$$\Delta P_{ij} = G_k \left( U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij} \right)$$

$G_k = g_{ij}$  là phần thực của tổng dẫn của đường dây  $k$

- Tổng tổn thất công suất tác dụng của hệ thống là tổng tổn thất công suất tác dụng của tất cả các đường dây:

$$P_L = \sum_k G_k U_i^2 + U_j^2 - 2U_i U_j \cos \theta_{ij} -$$

Hoặc viết cách khác:

$$P_L = \sum_i \sum_j g_{ij} U_i^2 - U_i U_j \cos \theta_{ij} -$$

**Với:**

*i lấy cho tất cả các nút kể cả nút cân bằng;  
j lấy cho tất cả các nút nhưng khác i*

## \* Các biến điều khiển:

- Tổn thất công suất tác dụng phụ thuộc vào:

- \* Phân bố công suất phản kháng trên lưới hệ thống.



- Phân bố công suất phản kháng phụ thuộc vào:

\* công suất phản kháng của các bộ tụ bù  $Q_{Ci}$

\* điện áp các nhà máy điện  $U_{gi}$

\* hệ số biến áp của các máy biến áp điều áp dưới tải  $T_i$

\* phân bố công suất tác dụng

Các biến này tác động đến:

- điện áp các nút tải  $U_i$

- góc pha  $\theta_{ij}$

→ làm cho tổn thất công suất tác dụng thay đổi.

Sự tác động này thông qua hệ phương trình cân bằng công suất nút của hệ thống điện

Trong đó: trong một chế độ

- điện áp nguồn được cho trước và tạo thành các nút

P-V

- hệ số biến áp được thể hiện trong ma trận tổng dẫn,

- công suất bù thể hiện trong phụ tải nút.

## **\* Các ràng buộc:**

Các ràng buộc là cân bằng công suất tác dụng và công suất phản kháng trong toàn hệ thống điện.

## \* Các giới hạn:

Đó là các giới hạn của các biến điều khiển  $Q_{Ci}$ ,  $U_{gi}$ ,  $T_i$ , giới hạn của điện áp các nút, giới hạn dòng điện trên các đường dây, giới hạn ổn định tĩnh ...

Ta thấy rằng bài toán này không phải là dễ giải, nhất là cho các hệ thống điện phức tạp có nhiều cấp điện áp, nhiều mạch vòng.

- Bài toán tối ưu hóa tổn thất công suất tác dụng phải được giải sau khi đã giải bài toán phân bố tối ưu công suất trên hệ thống điện.
- Sau đó khi giải bài toán tối ưu hóa tổn thất công suất tác dụng với giả thiết: góc pha của điện áp không đổi, công suất tác dụng nút không đổi.
- Hai bài toán này được giải liên tiếp theo vòng kín cho đến khi kết quả hội tụ.

# Điều chỉnh điện áp máy phát và phân phối công suất phản kháng

- Hệ thống kích từ máy phát có nhiệm vụ duy trì điện áp máy phát và dòng công suất phản kháng.
- Hệ thống kích từ cổ điện được cấp điện thông qua vòng trượt và chổi than từ máy phát điện, do gắn cùng trục với rôto của máy phát điện đồng bộ.

Đối với hệ thống kích từ hiện đại thông thường sử dụng máy phát điện AC với bộ chỉnh lưu quay và được gọi là hệ thống kích từ không chổi than.

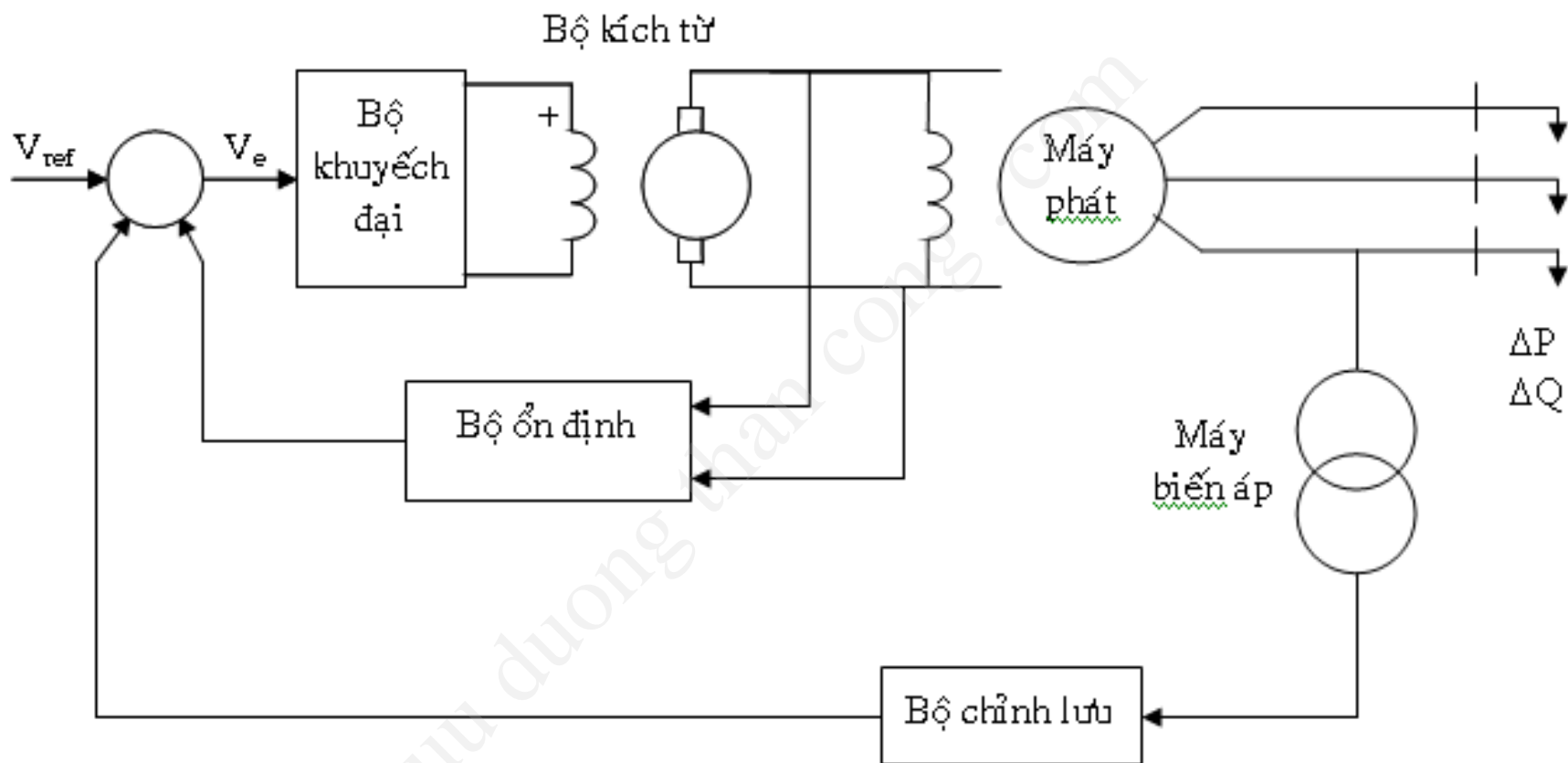


- Như chúng ta đã biết, một sự thay đổi về công suất thực sẽ ảnh hưởng nghiêm trọng đến tần số, trái lại một sự thay đổi về công suất phản kháng chỉ ảnh hưởng đến biên độ điện áp.

- Sự tác động qua lại giữa việc điều khiển điện áp và tần số thì rất yếu nên ta sẽ phân tích việc điều khiển điện áp riêng biệt với phân tích điều khiển tần số.

Một trong những biện pháp của việc điều khiển công suất phản kháng là điều khiển hệ thống kích từ máy phát dùng **thiết bị tự động điều chỉnh điện áp** (Automatic Voltage Regulator – AVR).

Vai trò của thiết bị tự động điều chỉnh điện áp là **giữ biên độ điện áp đầu cực của máy phát ở giá trị định mức**. Sơ đồ của một thiết bị tự động điều chỉnh điện áp được đơn giản hoá ở hình sau.



Sơ đồ đơn giản hóa của thiết bị tự động điều chỉnh điện áp (AVR)

- Khi tải công suất phản kháng của máy phát tăng lên sẽ kèm theo sự giảm biên độ điện áp đầu cực.
- Biên độ điện áp được cảm nhận thông qua một máy biến điện thế trên một pha. Điện áp này được chỉnh lưu và so sánh với tín hiệu đặt DC.

- Bộ khuyếch đại tín hiệu sai lệch điều khiển từ trường của bộ kích từ và làm tăng điện áp đầu cực của bộ kích từ.
- Vì vậy, dòng điện kích từ máy sẽ được tăng lên và kết quả là làm tăng sức điện động không tải của máy phát.
- Sự phát công suất phản kháng được tăng lên đến một điểm cân bằng mới, tăng điện áp đầu cực đến một giá trị mong muốn.

# Mô hình của bộ khuếch đại

Bộ khuếch đại của hệ thống kích từ có thể là bộ khuếch đại từ, bộ khuếch đại quay hoặc bộ khuếch đại điện tử hiện đại. Bộ khuếch đại được đặc trưng bởi một độ lợi,  $K_A$  và một hằng số thời gian,  $\tau_A$  và hàm truyền đạt là:

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1 + \tau_A s}$$

- Các giá trị đặc trưng của  $K_A$  nằm trong khoảng từ **10 đến 400**.
- Hằng số thời gian của bộ khuếch đại,  $\tau_A$  thì rất nhỏ, nằm trong khoảng từ **0,02 đến 0,1** và thường được bỏ qua.

# Mô hình của bộ kích từ

Có rất nhiều hệ thống kích từ khác nhau.

Tuy nhiên, các hệ thống kích từ hiện đại thường sử dụng nguồn điện AC thông qua bộ chỉnh lưu vi điện tử như SCR.



Một mô hình tiêu biểu của bộ kích từ hiện đại là mô hình tuyến tính được đưa vào tính toán với một hằng số thời gian chính và bỏ qua sự bảo hòa hay sự không tuyến tính khác. Ở dạng đơn giản nhất, hàm truyền đạt của một bộ kích từ hiện đại có thể được đặc trưng bởi một hằng số **thời gian**  $\tau_E$  và một **độ lợi**  $K_E$ , nghĩa là:

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s}$$

Hằng số thời gian của các bộ kích từ hiện đại rất nhỏ.

# Mô hình của máy phát

- Sức điện động không tải của máy điện động bộ là một hàm của đường cong từ hóa máy điện và điện áp đầu cực phụ thuộc vào tải của máy phát.
- Trong mô hình tuyến tính, hàm truyền đạt liên hệ giữa điện áp đầu cực máy phát và điện áp kích từ có thể được biểu diễn bởi một độ lợi  $K_G$  và hằng số thời gian  $\tau_G$ , khi ấy:

$$\frac{V_t(s)}{V_F(s)} = \frac{K_G}{1 + \tau_G s}$$

- Các hằng số này phụ thuộc vào tải
- $K_G$  có giá trị từ 0,7 đến 1
- $\tau_G$  có giá trị nằm trong khoảng từ 1,0 đến 2,0 giây từ lúc tải định mức đến khi không tải.

# Mô hình của bộ cảm biến

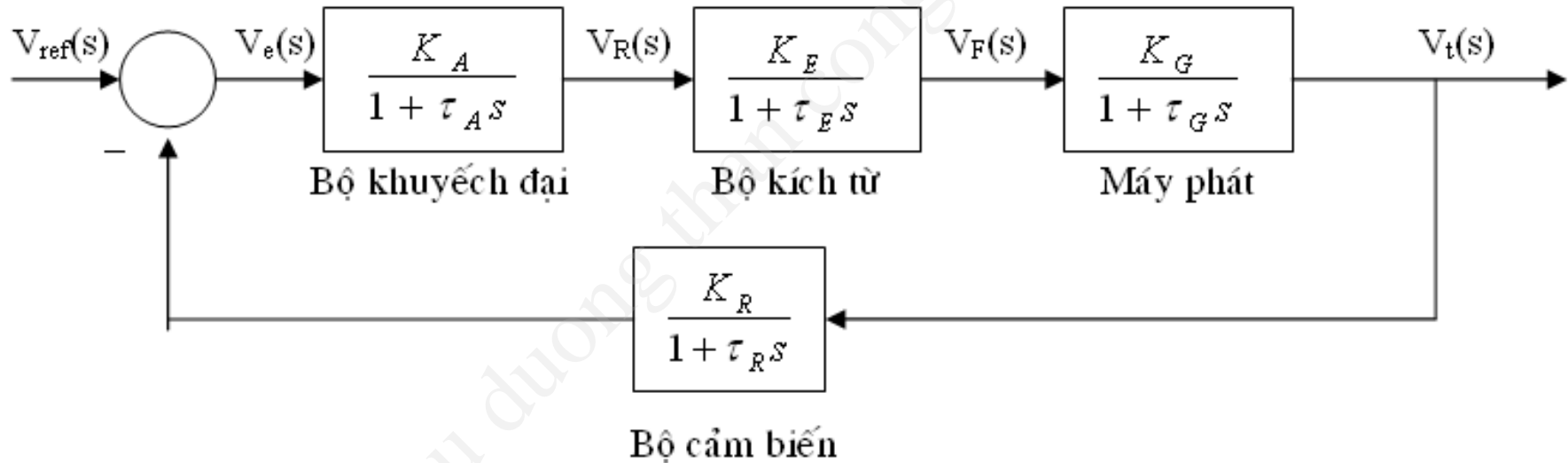
Điện áp được cảm biến thông qua một máy biến điện áp và nó được chỉnh lưu thông qua một cầu chỉnh lưu.

Bộ cảm biến được mô hình bởi một hàm truyền bậc nhất đơn giản, xác định bởi:

$$\frac{V_t(s)}{V(s)} = \frac{K_R}{1 + \tau_R s}$$

$\tau_R$  có giá trị rất nhỏ và chúng ta có thể giả sử rằng  $\tau_R$  có giá trị nằm trong khoảng từ **0,01 đến 0,06 giây**.

Sử dụng mô hình trên ta có một sơ đồ khối của hệ thống tự động điều chỉnh điện áp (AVR) như sau:



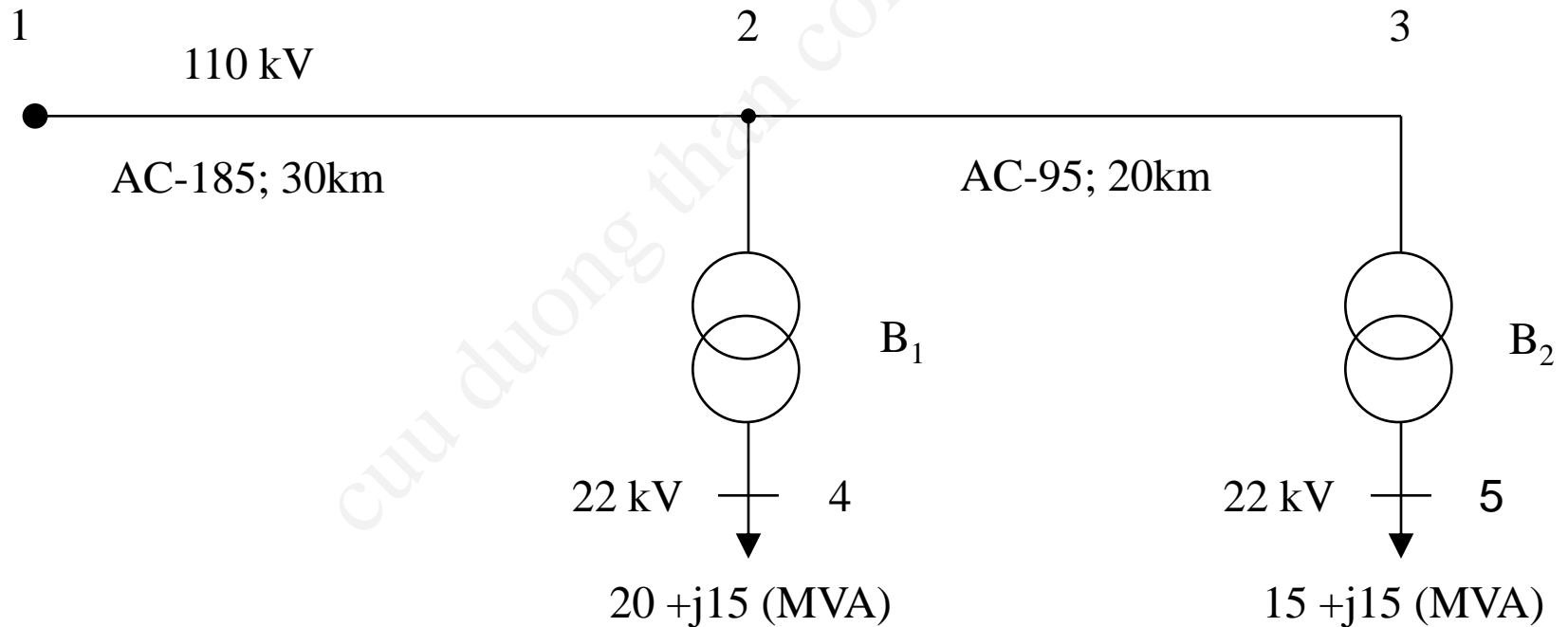
Sơ đồ khối đơn giản của  
thiết bị tự động điều chỉnh điện áp (AVR)

Hàm truyền vòng kín thể hiện mối quan hệ giữa điện áp đầu cực máy phát  $V_t(s)$  và điện áp chuẩn  $V_{ref}(s)$  là:

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G K_R (1 + \tau_R s)}{(1 + \tau_A s)(1 + \tau_E s)(1 + \tau_G s)(1 + \tau_R s) + K_A K_E K_G K_R}$$

## 8. Bài tập

**Bài 1:** Cho một mạng điện 110 kV với các chiều dài đường dây và công suất phụ tải như hình vẽ:





- \* Dây dẫn AC – 185:  $r_0 = 0,17 \text{ } (\Omega/\text{km})$
- \* Dây dẫn AC – 95:  $r_0 = 0,33 \text{ } (\Omega/\text{km})$
- \* Máy biến áp B<sub>1</sub> 110/22 (kV); 31,5 (MVA);  $\Delta P_N = 200 \text{ (kW)}$
- \* Máy biến áp B<sub>2</sub> 110/22 (kV); 20 (MVA);  $\Delta P_N = 163 \text{ (kW)}$
- \* Thời gian tổn thất công suất cực đại:  $\tau_{max} = 5500 \text{ (giờ/năm)}$

Tiền đầu tư tụ điện 22 kV: 5000 (\$/MVar)

Tiền điện năng tổn thất: 50 (\$/MWh)

Tổn thất công suất tương đối trong tụ bù:  $\Delta P^* = 0,005$

$$a_{vh} + a_{tc} = 0,225$$

$$T = 8760 \text{ (giờ/năm)}$$

Xác định dung lượng bù tại các nút 4 và 5 nhằm giảm tổn thất điện năng.

Gợi ý:

$$R_B = \frac{\Delta P_n U_{dm}^2}{S_{dm}^2} 10^3$$

$R_B$  ( $\Omega$ )

$\Delta P_n$  (kW)

$U_{dm}$  (kV)

$S_{dm}$  (kVA)

$$\Delta P = \frac{Q^2}{U^2} R$$

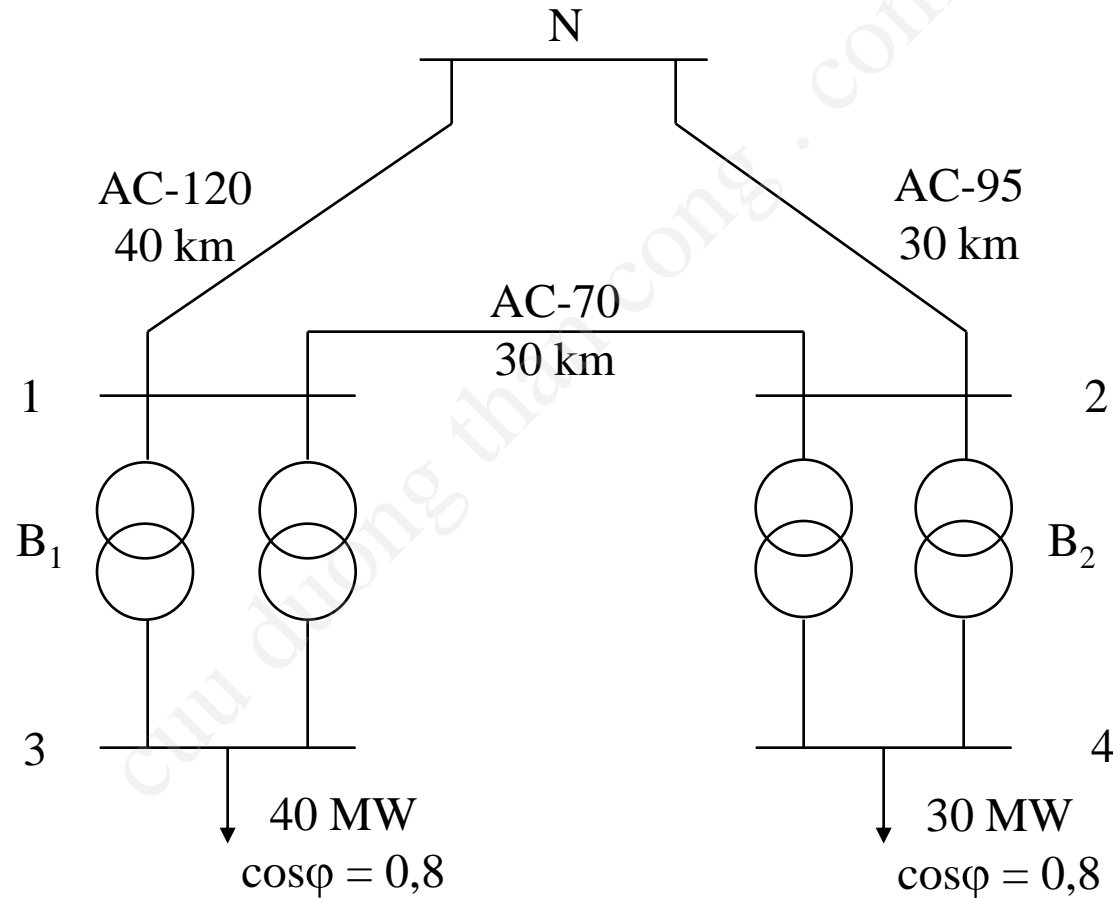
$\Delta P$  (MW)

$Q$  (MVA<sub>r</sub>)

$R$  ( $\Omega$ )

$U_{dm}$  (kV)

**Bài 2:** Cho một mạng điện 110 kV với các chiều dài đường dây và công suất phụ tải như hình vẽ:



- \* Dây dẫn AC – 120:  $r_0 = 0,27 \text{ (}\Omega/\text{km)}$
- \* Dây dẫn AC – 95:  $r_0 = 0,33 \text{ (}\Omega/\text{km)}$
- \* Dây dẫn AC – 70:  $r_0 = 0,46 \text{ (}\Omega/\text{km)}$
- \* Máy biến áp B<sub>1</sub> 110/22 (kV); 31,5 (MVA);  $\Delta P_N = 180 \text{ (kW)}$
- \* Máy biến áp B<sub>2</sub> 110/22 (kV); 20 (MVA);  $\Delta P_N = 160 \text{ (kW)}$
- \* Thời gian tổn thất công suất cực đại:  $\tau_{max} = 5000 \text{ (giờ/năm)}$

- \* Tiền đầu tư tụ điện 22 (kV): 5000 (\$/MVar)
- \* Tiền điện năng tổn thất: 50 (\$/MWh)
- \* Tổn thất công suất tương đối trong tụ bù:  $\Delta P^* = 0,005$
- \*  $a_{vh} + a_{tc} = 0,225$
- \*  $T = 8760$  (giờ/năm)

Xác định dung lượng bù tại các nút 3 và 4 nhằm giảm tổn thất điện năng.