

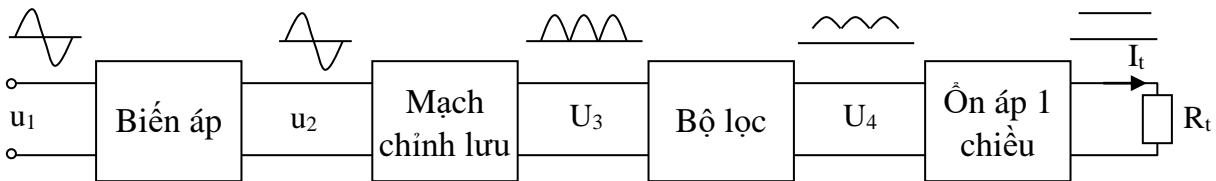
CHƯƠNG VI:

MẠCH CUNG CẤP NGUỒN

I. KHÁI NIỆM VỀ MẠCH CUNG CẤP NGUỒN.

Nhiệm vụ của mạch cung cấp là tạo ra năng lượng cần thiết để cung cấp cho các thiết bị điện hoặc điện tử làm việc. Thông thường nguồn năng lượng do nó tạo ra là nguồn điện áp một chiều lấy từ mạng điện xoay chiều hoặc từ pin, acquy.

Đại lượng vào và đại lượng ra của mạch cung cấp có thể là xoay chiều hoặc một chiều. Quan trọng hơn cả là nguồn cung cấp một chiều. Năng lượng một chiều đó được lấy từ nguồn xoay chiều của lưới điện thông qua một số quá trình biến đổi được thực hiện như sau:



- *Biến áp*: Để biến đổi điện áp xoay chiều U_1 thành điện áp xoay chiều U_2 có giá trị thích hợp với yêu cầu. Trong một số trường hợp có thể dùng trực tiếp U_1 không cần biến áp.
- *Mạch chỉnh lưu*: Có nhiệm vụ chuyển điện áp xoay chiều U_2 thành điện áp một chiều không bằng phẳng U_3 (có giá trị thay đổi nhấp nhô). Sự thay đổi này phụ thuộc vào từng dạng mạch chỉnh lưu.
- *Bộ lọc*: Có nhiệm vụ san bằng điện áp một chiều U_3 thành điện áp một chiều U_4 ít nhấp nhô hơn.
- *Bộ ổn áp (ổn dòng) một chiều*: Có nhiệm vụ ổn định điện áp (dòng điện) ở đầu ra của nó U_5 (I_t), khi U_4 thay đổi theo sự mất ổn định của U_4 (hay I_t). Trong nhiều trường hợp nếu không có yêu cầu cao thì không cần bộ ổn áp hay ổn dòng một chiều.

Các tham số cơ bản của một mạch cung cấp là mức điện áp và dòng điện ra, công suất ra cực đại, độ ổn định điện áp ra, điện trở trong, hệ số nhiệt của điện áp ra, mức gợn sóng ở đầu ra, khả năng chịu đựng ngắn mạch, dải nhiệt độ, kích thước và giá thành.

II. BIẾN ÁP NGUỒN VÀ CHỈNH LƯU.

Biến áp nguồn làm nhiệm vụ biến đổi điện áp xoay chiều của mạng điện thành điện áp xoay chiều có trị số cần thiết đối với mạch chỉnh lưu và ngăn cách mạch chỉnh lưu với mạng điện về một chiều.

Hầu hết các thiết bị điện tử hiện nay đều dùng linh kiện bán dẫn với mức điện áp một chiều cung cấp thấp, do đó biến áp thường dùng là biến áp hạ thế. Các sơ đồ chỉnh lưu thường dùng là sơ đồ chỉnh lưu nửa chu kỳ, chỉnh lưu hai nửa chu kỳ dùng diode.

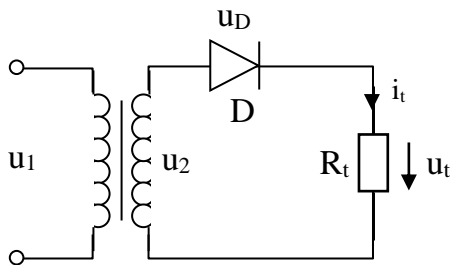
Yêu cầu đối với mạch chỉnh lưu là đạt được hiệu suất cao, ít phụ thuộc vào tải và độ gợn sóng điện áp ra nhỏ.

1. Mạch chỉnh lưu nửa chu kỳ.

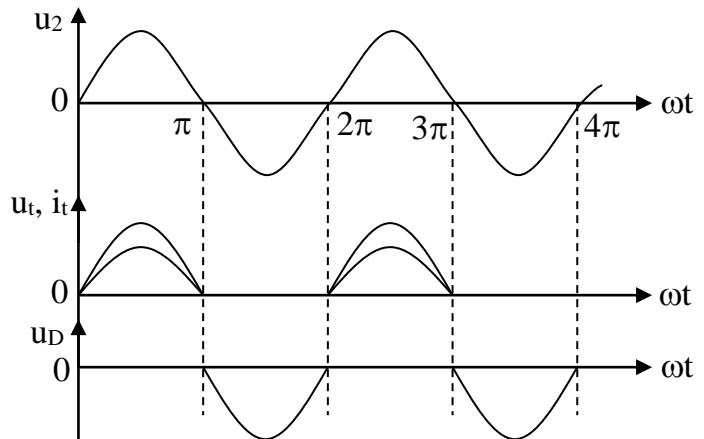
Mạch chỉnh lưu nửa chu kỳ chỉ sử dụng một diode để chỉnh lưu, diode chỉnh lưu có thể được mắc nối tiếp với cuộn dây thứ cấp biến áp hoặc mắc song song với biến áp. ở đây ta chỉ xét mạch chỉnh lưu dùng diode mắc nối tiếp, vì trong thực tế mạch chỉnh lưu dùng diode mắc song song ít khi được sử dụng.

1.1. Khi tải thuần trở.

a. Sơ đồ nguyên lý:



b. Đồ thị dòng điện và điện áp:



c. Nguyên lý làm việc:

Giả sử điện áp thứ cấp biến áp:

$$u_2 = \sqrt{2}U_2 \sin \omega t = U_{2m} \sin \omega t \quad (\text{V}).$$

+ $0 < \omega t < \pi$: Điện áp u_2 ở chu kỳ dương. Diode D mở cho dòng i chạy qua.

Khi dẫn điện, do điện trở thuận của diode $R_{th} \approx 0$ nên điện áp rơi trên diode rất nhỏ, nên có thể coi điện áp thứ cấp máy biến áp được đặt toàn bộ trên phụ tải và dòng điện qua phụ tải được xác định theo biểu thức:

$$i_t = i_2 = \frac{u_2}{R_t} = \frac{U_{2m}}{R_t} \sin \omega t = I_{2m} \sin \omega t$$

+ $\pi < \omega t < 2\pi$: Điện áp u_2 ở chu kỳ âm. Khi đó, diode D khoá nên không có dòng điện chạy qua. Điện áp rơi trên phụ tải bằng không và điện áp ngược đặt trên diode D bằng điện áp thứ cấp máy biến áp:

$$u_{ng} = u_2 = U_{2m} \sin \omega t$$

Như vậy, giá trị cực đại của dòng điện qua phụ tải là:

$$I_{t\max} = I_{2\max} = \frac{U_{2m}}{R_t}$$

Giá trị cực đại của điện áp ngược trên diode là: $U_{ng\max} = U_{2m}$

Giá trị trung bình trong một chu kỳ của điện áp trên phụ tải (thành phần một chiều của điện áp chỉnh lưu):

$$U_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_2 d\omega t = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t = \frac{U_{2m}}{\pi}$$

Giá trị trung bình của dòng điện chỉnh lưu:

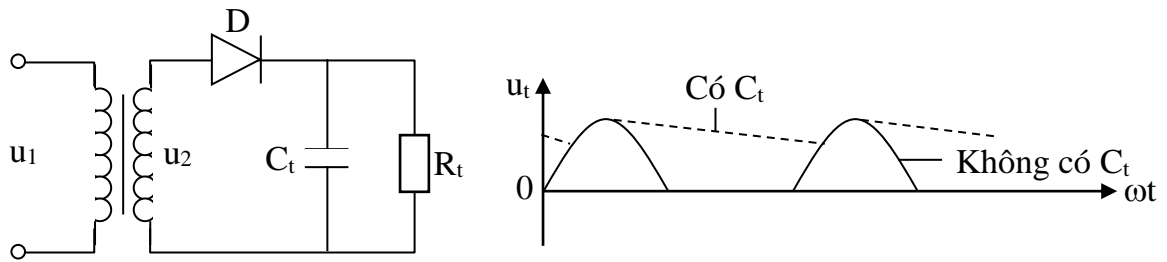
$$I_0 = \frac{U_0}{R} = \frac{U_{2m}}{\pi R_t} = \frac{I_{2m}}{\pi}$$

Giá trị hiệu dụng của dòng điện thứ cấp máy biến áp:

$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_2^2 d\omega t} = \frac{I_{2m}}{2} = \frac{\pi I_0}{2} \approx 1,57 I_0$$

1.2. Khi tải dung tính.

Trong sơ đồ trên, điện áp ra tải là một dãy xung hình sin. Để cung cấp cho các thiết bị điện tử, yêu cầu điện áp ra của bộ chỉnh lưu là điện áp một chiều tương đối bằng phẳng. Muốn vậy, phải mắc song song với tải tụ điện C_t .



Khi diode thông thì C_t nạp điện và tích trữ năng lượng, khi diode ngắt thì C_t phóng điện qua R_t . Bằng cách đó có thể giảm độ gợn sóng của điện áp ra.

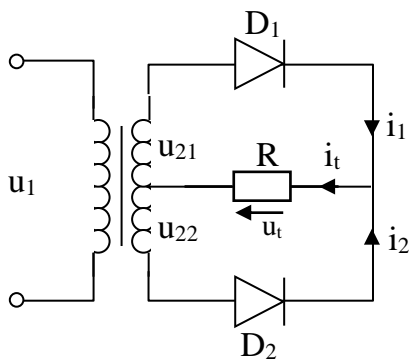
Khi điện trở tải R_t lớn thì C_t có thể được nạp tới giá trị đỉnh của điện áp xoay chiều: $u_t = U_{2m} - U_D$. Lúc này ta có mạch chỉnh lưu giá trị đỉnh. Điện áp trên diode: $u_D = u_2 - U_{2m}$ luôn luôn âm và đạt được giá trị đỉnh: $U_D = -2U_{2m}$.

Vậy trong trường hợp mạch có thêm điện dung tải thì điện áp ngược đặt lên diode là $-2U_{2m}$, lớn gấp đôi so với trường hợp không có C_t .

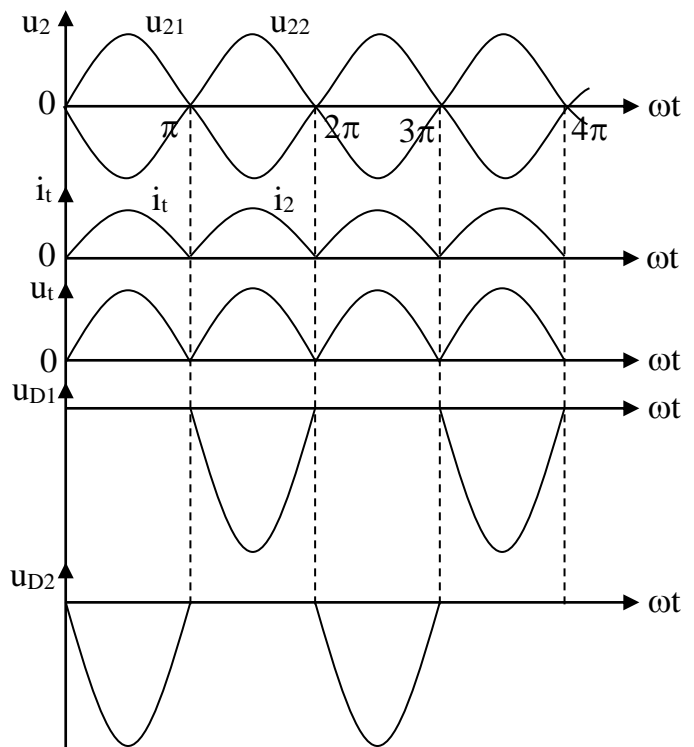
2. Mạch chỉnh lưu 2 nửa chu kỳ (Có điểm trung tính).

2.1. Khi tải thuần trở.

a. Sơ đồ nguyên lý:



b. Đồ thị dòng điện và điện áp:



c. Nguyên lý làm việc:

+ $0 < \omega t < \pi$: u_{21} ở chu kỳ dương.

u_{22} ở chu kỳ âm.

Diode D_1 phân cực thuận, diode D_2 phân cực nghịch nên diode D_1 mở cho dòng điện i_1 chạy qua và chạy qua phụ tải.

+ $\pi < \omega t < 2\pi$: u_{21} ở chu kỳ âm.

u_{22} ở chu kỳ dương.

Diode D_1 phân cực nghịch, diode D_2 phân cực thuận nên diode D_2 mở cho dòng điện i_2 chạy qua và chạy qua phụ tải.

Như vậy, tuy các diode chỉ dẫn dòng trong một nửa chu kỳ nhưng do sự làm việc của chúng có tính chất lần lượt và xen kẽ nhau nên dòng điện qua phụ tải chạy liên tục trong cả chu kỳ của điện áp xoay chiều.

Dòng điện qua phụ tải được xác định:

$$i_t = i_1 + i_2$$

Dòng điện i_t tạo nên trên phụ tải một điện áp u_t . Nếu bỏ qua điện áp rơi trên các diode khi các diode mở cho dòng điện chạy qua thì điện áp trên phụ tải u_t bằng điện áp trên các nửa cuộn thứ cấp máy biến áp khi các diode tương ứng với chúng mở.

Điện áp trung bình trên phụ tải:

$$\begin{aligned} U_0 &= \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} u_t d\omega t = \frac{1}{2\pi} \left[\int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t d\omega t + \int_{\pi}^{2\pi} U_{2m} \sin(\omega t + \pi) d\omega t \right] \\ &= \frac{U_{2m}}{\pi} \int_0^{\pi} \sin \omega t d\omega t = \frac{2U_{2m}}{\pi} \end{aligned}$$

Dòng điện trung bình qua phụ tải:

$$I_0 = \frac{U_0}{R} = \frac{2U_{2m}}{\pi R} = \frac{2I_{2m}}{\pi}$$

Dòng điện trung bình qua mỗi diode:

$$I_{Dtb} = \frac{I_0}{2} = \frac{I_{2m}}{\pi}$$

Dòng điện hiệu dụng trong cuộn thứ cấp máy biến áp:

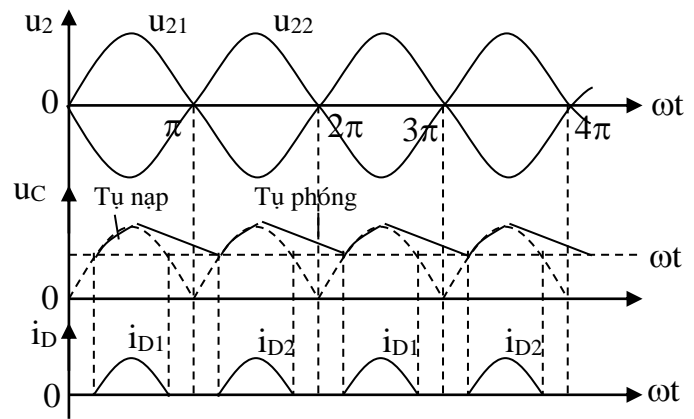
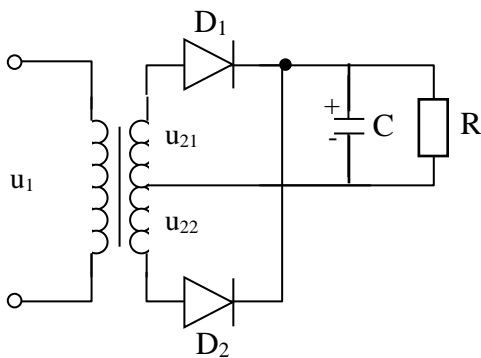
$$I_2 = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^\pi i_2^2 d\omega t} = \frac{I_{2m}}{2}$$

2.2. Khi tải dung tính.

Trong trường hợp mạch mắc tụ điện C song song với phụ tải:

- Sơ đồ nguyên lý:

- Đồ thị dòng điện và điện áp:



Do có tụ điện C với điện áp u_C có cực tính như hình vẽ, mà các diode D_1 và D_2 không thể mở toàn bộ khoảng thời gian các nửa chu kỳ dương của các điện áp thứ cấp u_{21} và u_{22} . Các diode này chỉ có thể mở trong một phần của các nửa chu kỳ dương của các điện áp thứ cấp tương ứng khi mà giá trị tức thời của các điện áp thứ cấp trong các nửa chu kỳ dương lớn hơn điện áp trên tụ u_C , vì khi đó điện áp anốt của diode chỉ có giá trị dương trong điều kiện đó.

Chế độ làm việc này của bộ chỉnh lưu là chế độ làm việc có sức điện động ngược, mà sức điện động ngược được hiểu là điện áp trên tụ u_C .

Trong các khoảng thời gian mà các diode D_1 và D_2 mở, tụ điện C được nạp điện.

Trong các khoảng thời gian mà các diode D_1 và D_2 bị khoá, tụ điện C phóng điện qua điện trở R.

Giá trị tức thời của dòng điện qua mỗi diode:

$$i_D = \frac{u_2 - U_0}{R} = \frac{U_{2m}}{R} (\cos \omega t - \cos \theta)$$

Trong đó: $U_0 = U_{2m} \cos \theta$: là điện áp trung bình trên tụ C.

θ : là góc ứng với một nửa thời gian dẫn điện của diode trong nửa chu kỳ.

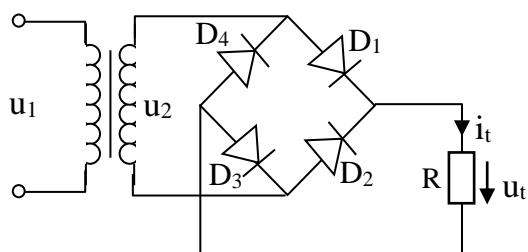
Điện áp ngược cực đại trên diode:

$$U_{ng\max} = U_{2m} + U_0 = U_{2m}(1 + \cos \theta)$$

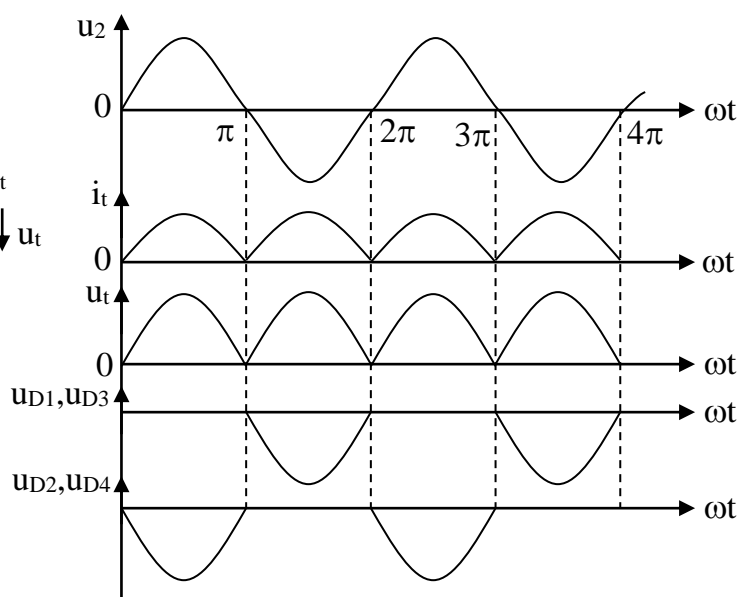
3. Mạch chỉnh lưu cầu.

3.1. Khi tải thuần trở.

a. Sơ đồ nguyên lý:



b. Đồ thị dòng điện và điện áp:



c. Nguyên lý làm việc:

+ $0 < \omega t < \pi$: u_2 ở nửa chu kỳ dương.

Diode D_1, D_3 phân cực thuận nên D_1, D_3 mở cho dòng điện i_1 chạy qua và qua phụ tải. Còn diode D_2, D_4 phân cực ngược nên D_2, D_4 khoá.

+ $\pi < \omega t < 2\pi$: u_2 ở nửa chu kỳ âm.

Diode D_2, D_4 phân cực thuận nên D_2, D_4 mở cho dòng điện i_2 chạy qua và qua phụ tải. Còn diode D_1, D_3 phân cực ngược nên D_1, D_3 khoá.

Dạng của dòng điện và điện áp trên phụ tải giống như ở bộ chỉnh lưu một pha hai nửa chu kỳ có điểm trung tính khi phụ tải thuần trở.

Điện áp trung bình trên phụ tải:

$$U_0 = \frac{U_{2m}}{\pi}$$

Dòng điện trung bình trên phụ tải:

$$I_0 = \frac{U_0}{R} = \frac{U_{2m}}{\pi R} = \frac{I_{2m}}{\pi}$$

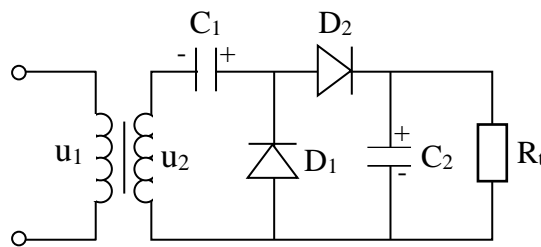
3.2. Khi tải dung tính:

Trong trường hợp, phụ tải của bộ chỉnh lưu này có tính chất điện dung thì dạng của dòng điện và điện áp trên tải cũng giống như ở bộ chỉnh lưu một pha hai nửa chu kỳ với phụ tải có tính chất điện dung.

4. Mạch chỉnh lưu bội áp.

Mạch bội áp được dùng trong những trường hợp đặc biệt như khi yêu cầu điện áp ra cao mà dòng tiêu thụ lại nhỏ (cỡ μA).

a. Sơ đồ mạch nhân đôi điện áp:

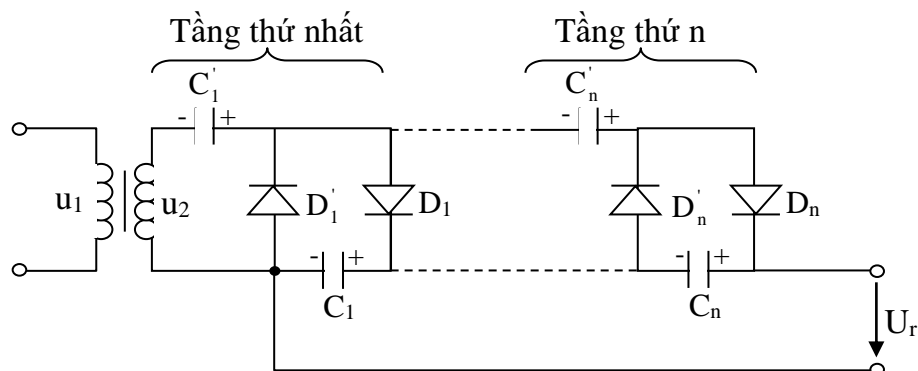


b. Nguyên lý làm việc:

Xét tại thời điểm u_2 ở nửa chu kỳ âm thì diode D_1 phân cực thuận, có dòng nạp cho tụ C_1 với mức điện áp $u_{C1} = u_2$. Ở nửa chu kỳ sau, u_2 đổi dấu, D_2 phân cực thuận có dòng nạp cho tụ C_2 với mức điện áp $u_{C2} = u_2 + u_{C1} = 2u_2$.

Đây chính là mức điện áp ra sau chỉnh lưu: $u_{R_t} = u_{C_2} = 2u_2$

Nếu dùng một tầng thì điện áp một chiều ở đầu ra gấp đôi trị số đỉnh của điện áp xoay chiều ở đầu vào. Vì vậy có n tầng như vậy thì điện áp ra tải: $U_r \leq 2nU_2$.



III. MẠCH ỒN ÁP VÀ ỒN DÒNG.

1. Mạch ổn áp.

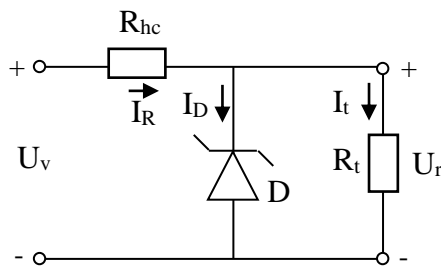
Do sự thay đổi của điện áp lưới xoay chiều, của điện trở phụ tải cũng như của điều kiện môi trường, các nguồn cung cấp thông thường không thể bảo đảm được độ ổn định cao cho các thiết bị điện trong quá trình làm việc.

Để bảo đảm mức độ ổn định yêu cầu của điện áp cung cấp, người ta sử dụng các bộ ổn áp xoay chiều có tác dụng ổn định tất cả các điện áp ra của nguồn cung cấp phía thứ cấp máy biến áp, và các bộ ổn áp một chiều vừa có tác dụng làm giảm những dao động của điện áp một chiều, vừa có tác dụng san phẳng sự đập mạch của điện áp chỉnh lưu.

1.1. Ổn áp kiểu tham số.

Ở bộ ổn áp này, sự ổn áp được thực hiện bằng cách mắc song song với phụ tải một dụng cụ điện tử mà điện áp giữa các cực của nó hầu như không thay đổi khi dòng điện qua nó biến thiên trong phạm vi cho phép. Do hoạt động của bộ ổn áp dựa vào tham số điện áp của dụng cụ điện tử như vậy nên nó được gọi là bộ ổn áp loại tham số, còn dụng cụ điện tử dùng trong bộ ổn áp được gọi là đèn ổn áp.

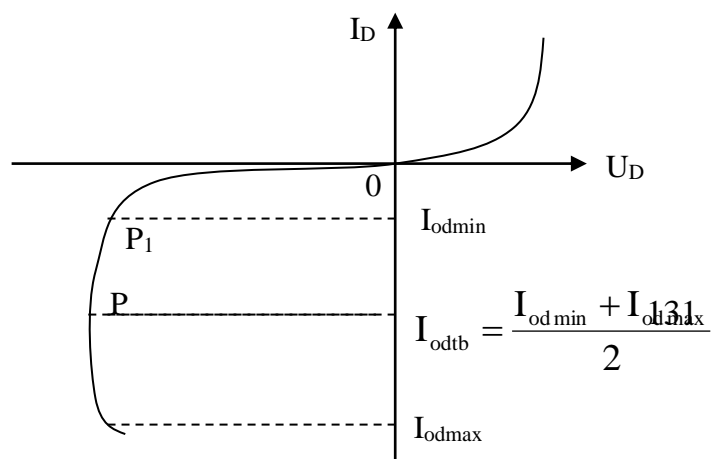
Sơ đồ nguyên lý của một bộ ổn áp tham số dùng đèn ổn áp Silic (diode Zener):



Để ổn định điện áp, ta dùng một đoạn trên nhánh ngược đặc tuyến Vôn-Ampe của đèn ổn áp silic, mà ở đó xảy ra sự đánh thủng tiếp giáp P-N và điện áp giữa 2 cực của đèn hầu như không phụ thuộc vào dòng điện qua đèn.

Đặc tuyến Vôn-Ampe của đèn ổn áp silic:

Đèn ổn áp được sử dụng phối hợp với 1 điện trở hạn chế R_{hc} mắc nối tiếp trong mạch cung cấp. Điện trở R_{hc} có tác dụng xác định điểm



làm việc P của đèn ổn áp nằm ở giữa vùng dòng điện làm việc, giới hạn bởi dòng I_{odmin} và dòng I_{odmax} .

Dòng điện chạy qua điện trở hạn chế:

$$I_R = I_D + I_t$$

Điện áp đầu ra của bộ ổn áp được xác định bằng biểu thức:

$$U_{ra} = U_{od} = U_v - I_R R_{hc}$$

Khi điện áp vào U_v giảm xuống một lượng ΔU_v khá lớn, trên đặc tuyến Von-Ampe của đèn ổn áp điểm làm việc sẽ chuyển từ $P \rightarrow P_1$. Trong khi điện áp trên đèn, điện áp trên phụ tải giảm xuống rất ít thì dòng điện qua đèn giảm xuống rất nhiều làm cho dòng điện qua điện trở hạn chế giảm nhiều. Do đó, sụt áp trên điện trở hạn chế giảm đi một lượng xấp xỉ bằng ΔU_v và điện áp trên đèn cũng như trên phụ tải hầu như không đổi.

Tương tự, khi điện áp vào tăng lên thì sụt áp trên điện trở hạn chế cũng tăng lên một lượng tương ứng, còn điện áp trên phụ tải được giữ hầu như không đổi.

Khi điện áp vào U_v không thay đổi, nếu điện trở phụ tải giảm xuống thì dòng điện phụ tải tăng lên, dòng điện qua đèn ổn áp giảm xuống, còn dòng điện qua điện trở hạn chế hầu như không thay đổi. Do đó, sụt áp trên điện trở hạn chế hầu như không đổi, làm cho điện áp trên phụ tải được ổn định.

Khi cần tăng chất lượng ổn định có thể mắc nối tiếp nhiều bộ ổn áp. Và đặc biệt, khi cần ổn định những điện áp thấp hơn điện áp ổn định của một đèn, ta có thể thay đèn ổn áp bằng diode chỉnh lưu silic mắc theo chiều thuận.

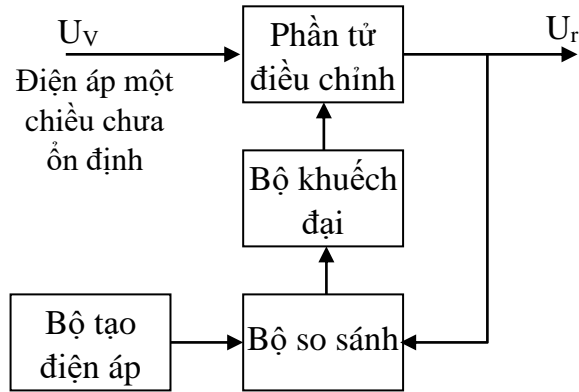
Các ưu và nhược điểm của ổn áp kiểu tham số:

- Ưu điểm: gọn nhẹ, đơn giản, giá thành hạ.
- Nhược điểm:
 - + Chất lượng ổn định thấp.
 - + Không thay đổi được mức điện áp ra theo yêu cầu.
 - + Phụ thuộc vào nhiệt độ (đối với đèn ổn áp).

1.2. Ổn áp loại bù (Phương pháp bù tuyến tính):

Để nâng cao chất lượng ổn định, mở rộng dải dòng điện trong mạch phụ tải cũng như để điều chỉnh được điện áp đầu ra theo yêu cầu, ta sử dụng bộ ổn áp phức tạp hơn so với bộ ổn áp tham số. Đó là bộ ổn áp loại bù hoặc ổn áp có hồi tiếp.

Nguyên tắc làm việc của các sơ đồ ổn định có hồi tiếp:

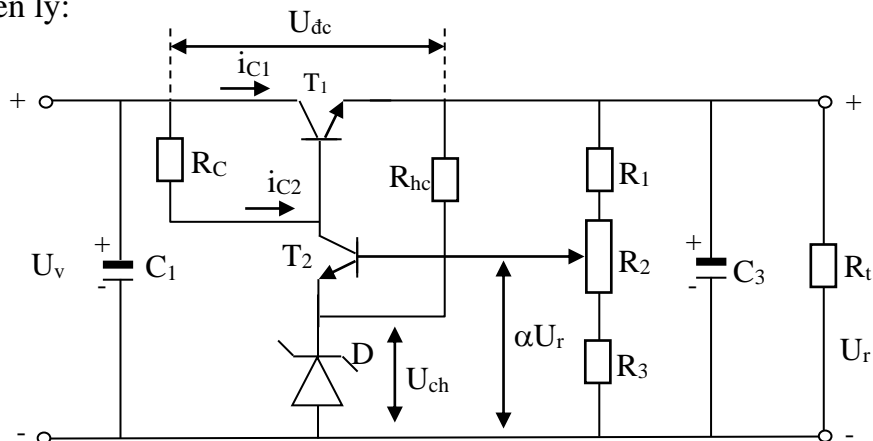


Trong các bộ ổn áp loại bù điện áp ra được so sánh với một điện áp chuẩn, khi điện áp ra lệch khỏi giá trị đã đặt thì nó được điều chỉnh để phục hồi lại giá trị ban đầu. Sự điều chỉnh được thực hiện nhờ một phần tử điều chỉnh, không chế điện áp sai lệch đã được khuếch đại. Mức độ chính xác của việc phục hồi giá trị đã đặt của điện áp ra phụ thuộc vào mức độ khuếch đại điện áp sai lệch.

Phần tử điều chỉnh có thể được mắc song song hoặc mắc nối tiếp với phụ tải. Tuy nhiên khi thay đổi cách mắc phần tử điều chỉnh thì nguyên lý làm việc của bộ ổn áp cũng thay đổi.

Ta xét bộ ổn áp loại bù mắc nối tiếp.

Sơ đồ nguyên lý:



Chức năng linh kiện:

- T₁: Đóng vai trò của phần tử điều chỉnh và được mắc nối tiếp với phụ tải.
- T₂: Đóng vai trò của bộ khuếch đại một chiều.
- R₁, R₂, R₃: Cầu phân áp cho T₂.

- R_C : Điện trở tải của bộ khuếch đại một chiều T_2 , đồng thời là điện trở để chọn điểm làm việc cho T_1 .
- R_{hc} : Điện trở hạn chế để hạn chế dòng điện qua diode ôn áp.
- C_1, C_3 : Tụ lọc và khử dao động ký sinh.
- C_2 : Tụ nâng cao chất lượng ổn định đối với các thành phần mất ổn định biến đổi chậm theo thời gian.
- R_2 : Là chiết áp dùng để thay đổi mức điện áp ra.
- α : Hệ số phản hồi.

Ta có:

$$U_r = U_v - U_{dc}$$

Khi điện áp vào U_v tăng lên, tức thời U_r tăng theo làm cho lượng điện áp phản hồi αU_r tăng. Điện áp so sánh $U_{BE2} = \alpha U_r - U_{ch}$ của T_2 tăng, làm cho dòng i_{C2} tăng kéo theo sự tăng của điện áp rơi trên điện trở R_C . Kết quả là điện áp U_{BE1} giảm, làm giảm dòng i_{C1} làm cho U_{dc} tăng lên. Do đó, mà điện áp ra lại được giảm về vị trí ban đầu.

Tương tự, xét cho trường hợp điện áp U_v giảm thì điện áp ra vẫn không đổi.

Khi điện áp vào không đổi mà điện trở phụ tải tăng lên, ngay lập tức điện áp ra tăng lên và mạch hoạt động tương tự như trên để đưa điện áp ra về trị số ban đầu.

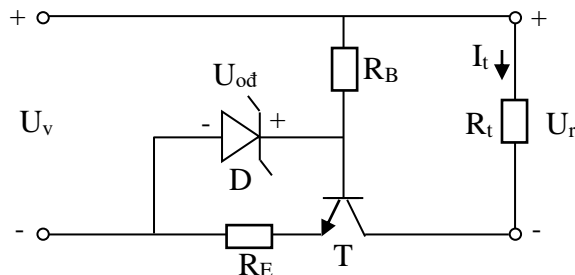
Thay đổi hệ số phản hồi α bằng chiết áp R_2 ta có thể thay đổi được điện áp ra trong các giới hạn đã đặt trước.

2. Mạch ổn dòng.

Trong những thiết bị điện tử có độ chính xác, độ ổn định cao, ngoài yêu cầu ổn định điện áp ra tải còn có yêu cầu ổn định dòng điện qua một mạch tải nào đó.

2.1. Ổn dòng dùng transistor.

Sơ đồ nguyên lý:



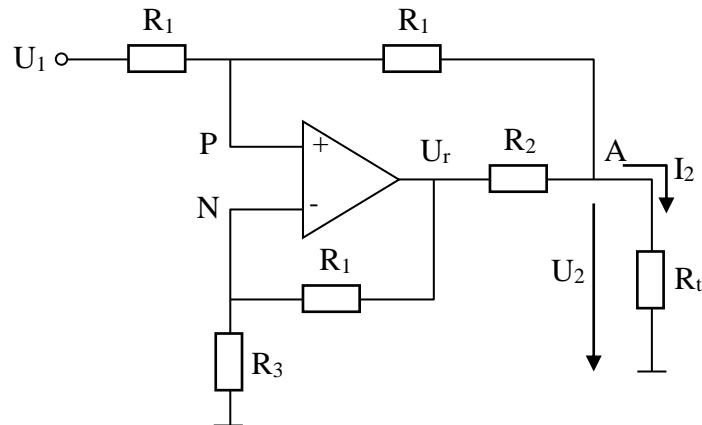
Transistor đóng vai trò của phần tử điều chỉnh.

Dòng điện I_t chạy qua phụ tải mắc nối tiếp với transistor không thay đổi.

Giả sử vì lý do nào đó mà dòng điện phụ tải I_t tăng lên thì ngay lúc đó điện áp rơi trên điện trở R_E tăng theo. Điện áp: $U_{BE} = U_{od} - U_{RE}$ giảm xuống. Do U_{BE} giảm mà transistor mở ít hơn trước nên dòng điện qua transistor, cũng là dòng điện qua phụ tải giảm về giá trị ban đầu.

2.2. Ổn dòng dùng khuếch đại thuật toán.

Sơ đồ nguyên lý:



Dòng điện I_2 ra tải không phụ thuộc vào điện áp ra U_2 mà chỉ được điều chỉnh bởi điện áp vào U_1 , nếu chọn $U_1 = U_{chuẩn}$ thì I_2 ổn định.

Trong đó:

$$R_3 = \frac{R_1^2}{R_1 + R_2}$$

Thật vậy:

- Tại nút P:

$$\frac{U_1 - U_P}{R_1} = \frac{U_P - U_2}{R_2} \Rightarrow U_P = \frac{U_1 + U_2}{2}$$

- Tại nút N:

$$\frac{U_r - U_N}{R_1} = \frac{U_N}{R_3}$$

Giả sử OA là lý tưởng, ta có: $K = \infty$

$$\Rightarrow U_d = U_P - U_N = 0 \Rightarrow U_P = U_N$$

$$\Rightarrow \frac{U_r}{R_1} = \frac{U_1 + U_2}{2} \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_3} \right) \Rightarrow U_r = \frac{U_1 + U_2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_3} \right)$$

- Tại nút N:

$$\frac{U_r - U_2}{R_2} + \frac{U_P - U_2}{R_1} = I_2$$

Thay U_P và U_r vào, ta có:

$$I_2 = \frac{\frac{U_1 + U_2}{2} \left(1 + \frac{R_1}{R_3} \right) - U_2}{R_2} + \frac{\frac{U_1 + U_2}{2} - U_2}{R_1}$$

$$\left(\frac{1}{2R_1} + \frac{R_1 + R_3}{2R_2R_3} \right) U_1 + \left(\frac{R_1 - R_3}{2R_2R_3} - \frac{1}{2R_1} \right) U_2$$

Với: $R_3 = \frac{R_1^2}{R_1 + R_2}$

Ta có:

$$I_2 = \frac{U_1}{R_1 // R_2}$$

Tức là I_2 không phụ thuộc vào U_2 .