

CHƯƠNG 1: CÁC PHẦN TỬ BÁN DẪN CÔNG SUẤT CƠ BẢN

MỤC TIÊU CỦA CHƯƠNG

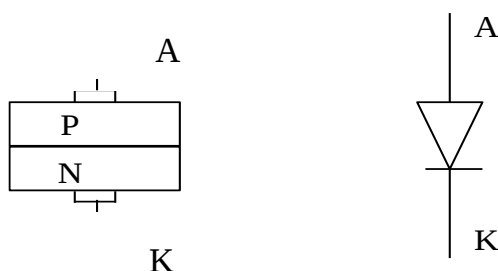
Cung cấp cho sinh viên kiến thức cơ bản về các phần tử bán dẫn công suất sử dụng trong các mạch điện tử công suất như: cấu tạo, ký hiệu, nguyên lý làm việc, đặc tính V-A, các thông số kỹ thuật và ứng dụng các phần tử bán dẫn công suất.

1.1. ĐIOT CÔNG SUẤT

2.1.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

Điôt (Diode) được tạo thành bằng việc ghép hai phiên bán dẫn p – n và tạo nên một vùng chuyển tiếp (một lớp tiếp giáp) ký hiệu là J.

Điôt có 2 điện cực, một điện cực nối ra từ bán dẫn loại p được gọi là Anot (Anode), ký hiệu là A, điện cực còn lại nối ra từ bán dẫn n được gọi là katot (Kathode hoặc Cathode) và ký hiệu là K. Ký hiệu biểu diễn điôt được minh họa trên hình 1.1b.



Hình 1.1: Cấu tạo (a) và ký hiệu (b) của điôt

Điện áp trên điôt được quy ước với chiều dương hướng từ A sang K và ký hiệu là u_D , khi $u_D > 0$ ta nói điện áp trên điôt là thuận (hay điôt được đặt điện áp thuận), ngược lại khi $u_D < 0$ ta nói điện áp trên điôt là ngược (hay điôt chịu điện áp ngược). Dòng điện qua điôt được quy ước cùng chiều với điện áp và ký hiệu i_D .

Đặc tính Vôn – ampe (V-A) của điôt là mối quan hệ giữa dòng điện và điện áp trên điôt $i_D(u_D)$, thể hiện bằng đồ thị hình 1.2.

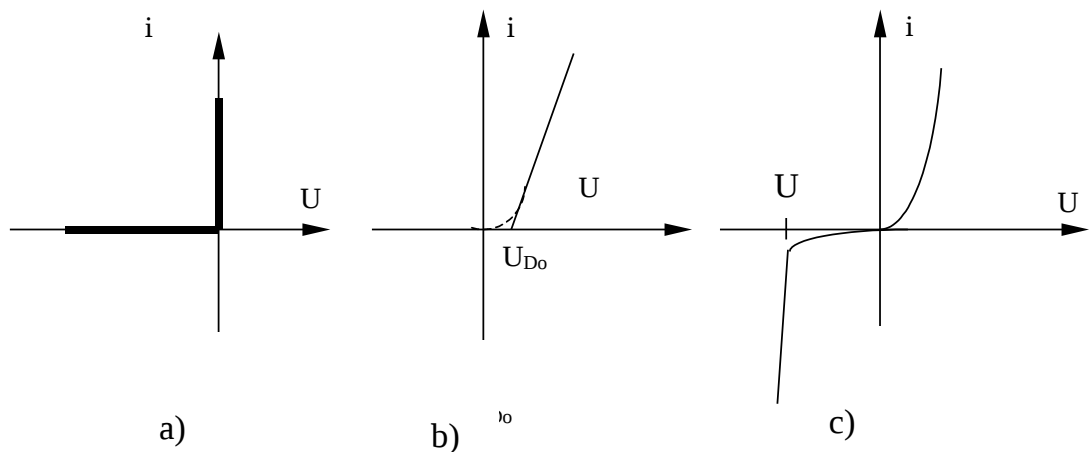
Đặc tính gồm hai phần: đặc tính thuận trong góc phần tư thứ I, tương ứng với $u_{AK} > 0$. Đặc tính ngược trong góc phần tư thứ III, tương ứng $u_{AK} < 0$. Trên đường đặc tính thuận, nếu điện áp anot – katot tăng dần từ 0 đến khi vượt qua ngưỡng điện áp U_{D0} ($0,6V \div 0,7V$), dòng

có thể chảy qua diot. Dòng điện i_D có thể thay đổi rất lớn, nhưng điện áp rơi trên diot u_{AK} thì hầu như ít thay đổi. Như vậy, đặc tính thuận của diot đặc trưng bởi tính chất có điện trở tương đương nhỏ.

Trên đường đặc tính ngược, nếu điện áp u_{AK} tăng dần từ 0 đến giá trị $U_{ng,max}$, gọi là điện áp ngược lớn nhất, thì dòng qua diot vẫn có giá trị rất nhỏ, gọi là dòng rò, nghĩa là diot cản trở dòng chạy qua theo chiều ngược. Cho đến khi u_{AK} đạt đến giá trị $U_{ng,max}$ thì xảy ra hiện tượng dòng qua diot tăng đột ngột, tính chất cản trở dòng điện ngược của diot bị phá vỡ. Quá trình này không có tính đảo ngược, nghĩa là nếu ta lại giảm điện áp trên anốt – katốt thì dòng điện vẫn không giảm. Ta nói diot bị đánh thủng. Trong thực tế, để đơn giản cho việc tính toán, người ta thường dùng đặc tính khi dẫn dòng tuyến tính hóa của diot như được biểu diễn trên hình 1.2b.

2.1.2. Đặc tính V-A

Đặc tính V-A của các diot thực tế sẽ khác nhau, phụ thuộc vào dòng điện cho phép chạy qua diot và điện áp ngược lớn nhất mà diot có thể chịu được. Tuy nhiên để phân tích sơ đồ các bộ biến đổi thì một đặc tính lý tưởng cho trên hình 1.2a được sử dụng nhiều hơn cả. Theo đặc tính lý tưởng, diot có thể cho phép một dòng điện lớn bất kỳ chạy qua với sụt áp trên nó bằng 0 và chịu được điện áp ngược lớn bất kỳ với dòng rò bằng 0. Nghĩa là theo đặc tính lý tưởng, diot có điện trở tương đương khi dẫn bằng 0 và khi khóa bằng ∞ .



Hình 1.2: Đặc tính V-A của một diot

(a) Đặc tính lý tưởng; (b) Đặc tính tuyến tính hóa; (c) Đặc tính thực tế

2.1.3. Các tham số cơ bản

Khi lựa chọn và kiểm tra diot ta thường phải dựa vào một số tham số cơ bản mà nhà sản xuất đưa ra:

- Điện áp ngược cực đại: $U_{ng,max}$ là điện áp ngược cực đại cho phép đặt vào diot mà không làm hỏng diot.

- Dòng điện thuận định mức: Là giá trị trung bình hoặc hiệu dụng lớn nhất cho phép của dòng điện qua diot mà diot vẫn đảm bảo hoạt động bình thường.

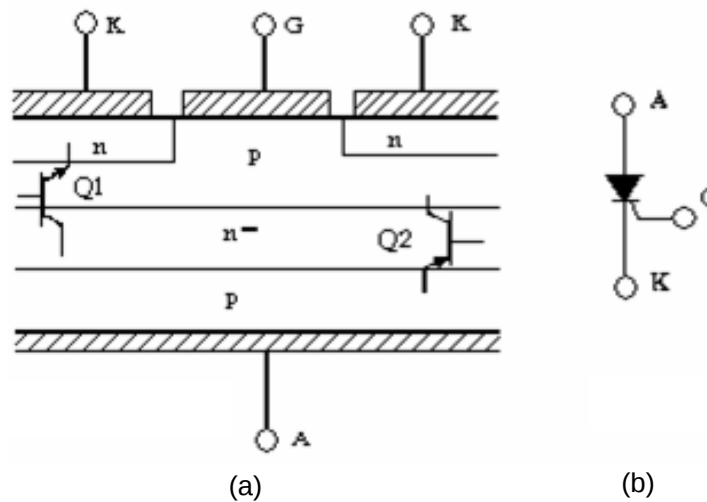
- Sụt điện áp thuận trên diot (Δu_D): là giá trị điện áp thuận trên diot khi diot làm việc ở trạng thái mở (dẫn dòng) với dòng điện bằng giá trị định mức.

Ngoài ra, tùy thuộc vào loại diot mà còn có một số tham số khác.

1.2. THYRISTOR

2.2.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

Thyristor là phần tử bán dẫn cấu tạo từ bốn lớp bán dẫn p-n-p-n tạo thành 3 lớp tiếp giáp J_1, J_2, J_3 . Thyristor có nhiều loại khác nhau nhưng về cơ bản đều có ba điện cực là: Anot (A), Katot (K), cực điều khiển (G – Gate), loại thyristor thông dụng nhất (loại điều khiển theo katot) được biểu diễn trên hình 1.3. Sau đây chỉ nghiên cứu đặc tính loại thyristor này.



Hình 1.3: Cấu tạo và ký hiệu thyristor

(a) Cấu tạo thyristor (b) Ký hiệu

Nguồn điện áp cấp cho mạch anot và katot của thyristor (u_{AK}), nguồn điện áp cung cấp cho cực điều khiển thyristor (u_{dk}), điện áp giữa A và K của thyristor ký hiệu là u_T , dòng qua mạch A-K của thyristor ký hiệu là i_T , dòng điện đi vào cực điều khiển của thyristor ký hiệu là i_{dk} .

1. Trường hợp khi không có dòng điện điều khiển ($i_{dk} = i_G = 0$)

Khi dòng vào cực điều khiển của thyristor bằng 0 hay khi hở mạch cực điều khiển thyristor sẽ cản trở dòng điện ứng với cả hai trường hợp phân cực điện áp giữa anot – katot. Khi điện áp $u_{AK} < 0$ theo cấu tạo bán dẫn của thyristor hai tiếp giáp J_1, J_3 đều phân cực ngược, lớp J_2 phân cực thuận, như vậy thyristor sẽ giống như hai diot mắc nối tiếp bị phân cực ngược. Qua thyristor sẽ chỉ có một dòng điện rất nhỏ chạy qua, gọi là dòng rò. Khi u_{AK} tăng đạt đến một giá trị điện áp lớn nhất là $u_{ng,max}$ sẽ xảy ra hiện tượng thyristor bị đánh thủng, dòng điện có thể

tăng lên rất lớn. Giống như ở đoạn đặc tính ngược của điốt trong quá trình bị đánh thủng là quá trình không thể đảo ngược được nghĩa là nếu có giảm điện áp U_{AK} xuống dưới mức $U_{ng,max}$ thì dòng điện cũng giảm được về mức dòng rò. Thyristor đã bị hỏng.

Khi tăng điện áp A-K theo chiều thuận $U_{AK} > 0$, lúc đây cũng chỉ có một dòng điện rất nhỏ chạy qua, gọi là dòng rò. Điện trở tương đương mạch A-K vẫn có giá trị rất lớn. Khi đó tiếp giáp J_1 và J_3 phân cực thuận, J_2 phân cực ngược. Cho đến khi U_{AK} tăng đạt giá trị điện áp thuận lớn nhất ($U_{th,max}$), sẽ xảy ra hiện tượng điện trở tương đương mạch A-K đột ngột giảm, dòng điện chạy qua thyristor sẽ chỉ bị giới hạn bởi điện trở mạch ngoài. Nếu khi đó dòng điện qua thyristor có giá trị lớn hơn một mức dòng điện tối thiểu, gọi là dòng duy trì (I_{dt}) thì khi đó thyristor sẽ dẫn dòng trên đường đặc tính thuận, giống như đường đặc tính thuận ở điốt. Đoạn đặc tính thuận được đặc trưng bởi tính chất dòng có thể có giá trị lớn nhưng điện áp rơi trên anot và katot thì nhỏ và hầu như không phụ thuộc vào giá trị của dòng điện.

2. Trường hợp có dòng điện vào cực điều khiển ($I_G > 0$)

Nếu có dòng điều khiển đưa vào giữa cực điều khiển và katot, quá trình chuyển điểm làm việc trên đường đặc tính thuận sẽ xảy ra sớm hơn, trước khi điện áp thuận đạt đến giá trị lớn nhất, $U_{th,max}$. Điều này được mô tả trên hình 1.4 bằng những đường nét đứt, ứng với các giá trị dòng điều khiển khác nhau $I_{G1}, I_{G2}, I_{G3}, \dots$. Nói chung nếu dòng điều khiển lớn hơn thì điểm chuyển đặc tính làm việc sẽ xảy ra với U_{AK} nhỏ hơn.

Tình hình xảy ra trên đường đặc tính ngược sẽ không có gì khác so với trường hợp dòng điều khiển bằng 0.

Thyristor có đặc tính như điốt, nghĩa là chỉ cho phép dòng chạy qua theo một chiều, từ Anot đến Katot và cản trở dòng điện chạy theo chiều ngược lại. Tuy nhiên khác với điốt, để thyristor có thể dẫn dòng ngoài điều kiện phải có điện áp $U_{AK} > 0$ còn cần thêm một số điều kiện khác. Do đó thyristor được coi là phần tử bán dẫn có điều khiển để phân biệt với điốt là phần tử không điều khiển được.

3. Mở thyristor

Khi được phân cực thuận, $U_{AK} > 0$, thyristor có thể mở bằng hai cách:

Thứ nhất: có thể tăng điện áp anot-katot cho đến khi đạt đến giá trị điện áp thuận lớn nhất, $U_{th,max}$. Khi đó điện trở tương đương trong mạch anot-katot sẽ giảm đột ngột và dòng qua thyristor hoàn toàn do mạch ngoài xác định. Phương pháp này trong thực tế không được áp dụng do nguyên nhân mở không mong muốn và không phải lúc nào cũng có thể tăng được điện áp đến giá trị $U_{th,max}$. Vả lại như vậy sẽ xảy ra trường hợp thyristor tự mở ra dưới tác dụng của các xung điện áp tại một thời điểm ngẫu nhiên, không định trước.

Phương pháp thứ hai, phương pháp được áp dụng thực tế, là đưa một xung dòng điện có giá trị nhất định vào cực điều khiển và katot. Xung dòng điện điều khiển sẽ chuyển trạng thái

của thyristor từ trở kháng cao sang trở kháng thấp ở mức điện áp anot-katot nhỏ. Khi đó nếu dòng qua anot-katot lớn hơn một giá trị nhất định, gọi là dòng duy trì (I_{dt}) thì thyristor sẽ tiếp tục ở trong trạng thái mở dẫn dòng mà không cần đến sự tồn tại của xung điều khiển nữa. Điều này có nghĩa là có thể điều khiển các thyristor bằng các xung dòng có độ rộng xung nhất định, do đó công suất của mạch điều khiển có thể là rất nhỏ, so với công suất của mạch lực mà thyristor là một phần tử đóng cắt, khống chế dòng điện.

4. Khóa thyristor

Một thyristor đang dẫn dòng sẽ trở về trạng thái khóa (điện trở tương đương mạch anot-katot tăng cao) nếu dòng điện giảm xuống, nhỏ hơn giá trị dòng duy trì, I_{dt} . Tuy nhiên để thyristor vẫn ở trạng thái khóa, với trở kháng cao, khi điện áp anot-katot lại dương ($U_{AK} > 0$) cần phải có một thời gian nhất định để các lớp tiếp giáp phục hồi hoàn toàn tính chất cản trở dòng điện của mình.

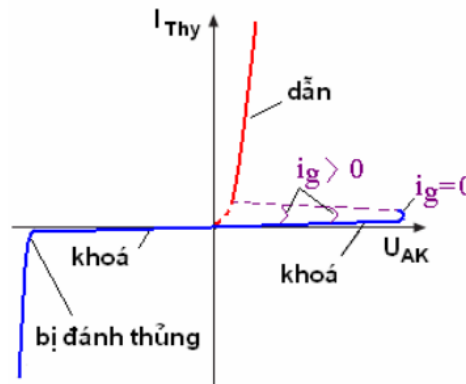
Khi thyristor dẫn dòng theo chiều thuận, $U_{AK} > 0$, hai lớp tiếp giáp J_1, J_3 phân cực thuận, các điện tích đi qua hai lớp này dễ dàng và lớp đầy lớp tiếp giáp J_2 đang bị phân cực ngược. Vì vậy mà dòng điện có thể chảy qua ba lớp tiếp giáp J_1, J_2, J_3 . Để khóa thyristor lại cần giảm dòng anot-katot về dưới mức dòng duy trì (I_{dt}) bằng cách hoặc là đổi chiều dòng điện hoặc áp một điện áp ngược lên giữa anot-katot của thyristor. Sau khi dòng về bằng không phải đặt một điện áp ngược lên anot-katot ($U_{AK} < 0$) trong một khoảng thời gian tối thiểu, gọi là thời gian phục hồi t_k (tài liệu tiếng anh ký hiệu là t_{off}), thì sau đó thyristor mới có thể cản trở dòng điện theo cả hai chiều. Trong thời gian phục hồi có một dòng điện ngược chạy giữa anot và katot. Dòng điện ngược này di tản các điện tích ra khỏi tiếp giáp J_2 và nạp điện cho tụ điện tương đương của hai tiếp giáp J_1 và J_3 được phục hồi. Thời gian phục hồi phụ thuộc vào lượng điện tích cần được di tản ra ngoài cấu trúc bán dẫn của thyristor và nạp điện cho tiếp giáp J_1, J_3 đến điện áp ngược tại thời điểm đó.

Thời gian phục hồi (t_k) là một trong những thông số quan trọng của thyristor. Thời gian phục hồi xác định dải tần số làm việc của thyristor. Thời gian t_k có giá trị cỡ $5 \div 10 \mu s$ đối với các thyristor có tần số đóng cắt cao, $50 \div 200 \mu s$ đối với các thyristor có tần số đóng cắt thấp.

2.2.2. đặc tính V – A

Đặc tính V-A của thyristor gồm 2 phần (hình 1.4).

- Phần thứ nhất nằm trong góc phần tư thứ I là đặc tính nhánh thuận tương ứng với trường hợp điện áp $u_{AK} > 0$
- Phần thứ hai nằm trong góc phần tư thứ III, gọi là đặc tính nhánh ngược, tương ứng với trường hợp điện áp $u_{AK} < 0$.



Hình 1.4: Đặc tính Vôn – Ampe (V-A) của thyristor

2.2.3. Các thông số cơ bản

a) Giá trị dòng trung bình cho phép chạy qua thyristor (I_{tb})

Đây là giá trị lớn nhất của dòng trung bình cho phép chạy qua thyristor với điều kiện nhiệt độ cấu trúc tinh thể bán dẫn của thyristor không vượt quá 1 giá trị cho phép cho phép chạy qua thì còn phụ thuộc vào các điều kiện làm mát và nhiệt độ môi trường. Thyristor có thể được gắn lên các bộ tản nhiệt tiêu chuẩn và làm mát tự nhiên. Ngoài ra thyristor có thể phải được làm mát cưỡng bức nhờ quạt gió hoặc dùng chất lỏng để tải nhiệt lượng tỏa ra nhanh hơn. Vấn đề làm mát van bán dẫn sẽ được đề cập ở phần sau, có thể lựa chọn dòng điện theo các phương án sau:

- Làm mát tự nhiên: dòng sử dụng cho phép đến 1/3 giá trị (I_{tb})
- Làm mát cưỡng bức bằng quạt gió: dòng sử dụng bằng 2/3 giá trị (I_{tb})
- Làm mát cưỡng bức bằng nước: có thể sử dụng 100% giá trị (I_{tb})

b) Điện áp ngược lớn nhất cho phép ($U_{ng.max}$)

Đây là giá trị lớn nhất của điện áp cho phép đặt lên thyristor theo chiều ngược mà không làm hỏng thyristor. Do khi bộ biến đổi lòng việc thường xuyên xuất hiện các xung quá điện áp không mong muốn, vì vậy, để đảm bảo an toàn khi lựa chọn van theo điều kiện điện áp cần tính đến một độ dự trữ nhất định thường phải chọn $U_{ng.max}$ ít nhất bằng 1,5 đến 2,5 lần giá trị lớn nhất của điện áp ngược tính toán theo sơ đồ bộ biến đổi.

c) Điện áp thuận lớn nhất cho phép ($U_{Tng.max}$)

Đây là giá trị điện áp lớn nhất cho phép đặt lên thyristor theo chiều thuận mà không làm mở nó khi không có tín hiệu điều khiển, thường thì điện áp thuận lớn nhất cho phép cũng xấp xỉ điện áp ngược lớn nhất cho phép.

d) Thời gian khôi phục tính chất điều khiển của thyristor (t_k)

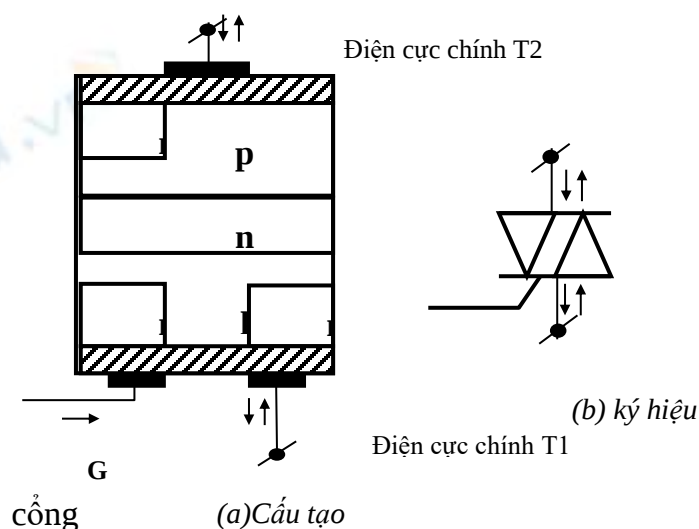
Đây là thời gian tối thiểu tính từ lúc dòng điện thuận qua thyristor giảm về bằng không đến thời điểm có thể đặt điện áp thuận lên thyristor với một tốc độ tăng cho phép mà không

làm cho thyristor tự mở lại (khi không có tín hiệu điều khiển). Thời gian khôi phục tính chất điều khiển (còn được gọi là thời gian khôi phục tính chất khóa hay thời gian khóa) của thyristor phụ thuộc vào điều kiện khóa van. Nếu khóa van bằng phương pháp đặt điện áp ngược lên van thì t_k sẽ giảm so với phương pháp khóa khác.

1.3. TRIAC

2.3.1. Cấu trúc và nguyên lý hoạt động

Triac là phần tử bán dẫn có cấu trúc bán dẫn gồm năm lớp tạo nên cấu trúc p – n – p – n như ở thyristor theo cả hai chiều giữa các cực MT1 và MT2 như được thể hiện trên hình Anh có ký hiệu trên sơ đồ như trên nó có thể dẫn dòng theo cả 2 chiều từ m T1 sang T2 và ngược lại về nguyên tắc chia có thể coi là tương đương với 2 thyristor đấu song song ngược như trên hình 1.5a. Triac có ký hiệu trên sơ đồ như trên 1.5b, nó có thể dẫn dòng theo cả 2 chiều từ MT1 sang MT2 và ngược lại. Về nguyên tắc, triac có thể coi là tương đương với 2 thyristor đấu song song ngược.



Hình 1.5: Triac

Đối với triac người ta không dùng thuật ngữ anot và katot. Mà dùng thuật ngữ “đầu nối” B_1 và B_2 . Về hình dáng bề ngoài, triac giống một thyristor => phải căn cứ vào mã hiệu để phân biệt.

Có 4 tổ hợp điện thế có thể mở triac cho dòng chảy qua:

B_2	G
+	+
+	-
-	-
-	+

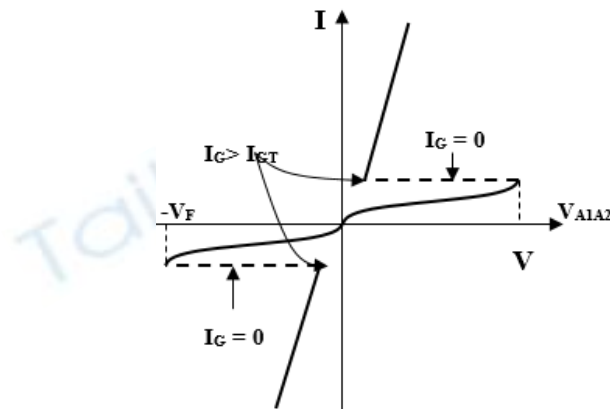
Trường hợp $B_2(+)$, $G(+)$ thyristor T mở cho dòng chảy qua như một thyristor thông thường.

Trường hợp $B_2(-)$ $G(-)$, các điện tử từ N_3 phóng vào P_2 .

Phần lớn bị trường nội tại E_1 hút vào khiến cho barie này giảm thấp gần như toàn bộ điện áp ngoài được đặt lên J_2 , khiến cho barie này cao lên. Nếu điện áp ngoài đủ lớn làm cho barie này cao đến mức hút vào những điện tích thiểu số và làm động năng của chúng đủ lớn để bẻ gãy các liên kết của các nguyên tử Si trong vùng. Kết quả là một phản ứng dây chuyền T' mở cho dòng chảy qua.

2.3.2. Đặc tính V-A

Đặc tính vôn - ampe của triac bao gồm hai đoạn đặc tính đối xứng nhau và nằm ở góc phần tư thứ I và thứ III, mỗi đoạn đều giống như đặc tính nhánh thuận của một thyristor và được biểu diễn như trên hình 1.6.



Hình 1.6: Đặc tính V-A của triac

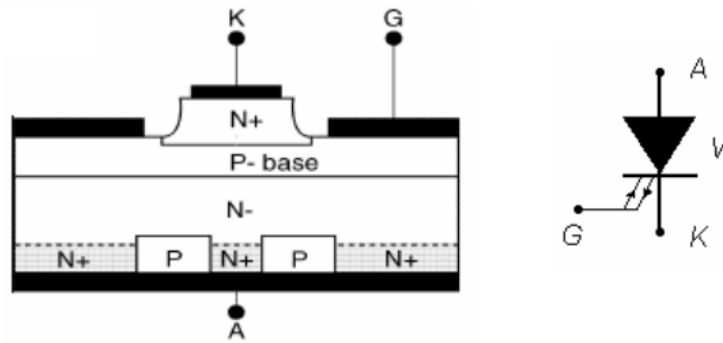
Triac có thể điều khiển mở bằng cả xung dòng điều khiển dương (dòng đi vào cực điều khiển) hoặc âm (dòng đi ra khỏi cực điều khiển). Lấy cực MT1 làm chuẩn, trường hợp MT2 dương thì G dương và MT2 âm thì G âm được sử dụng nhiều nhất.

Triac đặc biệt hữu ích trong các ứng dụng điều chỉnh điện áp xoay chiều hoặc các bộ đóng cắt (công tắc tơ) không tiếp điểm.

1.4. THYRISTOR ĐIỀU KHIỂN HOÀN TOÀN, GTO

2.4.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

Những thyristor điều khiển khóa được bằng tín hiệu điều khiển còn được gọi là thyristor hai tác động hay thyristor điều khiển hoàn toàn (GTO – Gate Turn Off), là các thyristor có khả năng điều khiển mở và khóa được bằng tín hiệu điều khiển cấp vào cực G. Sử dụng loại thyristor này có thể chủ động cả thời điểm mở và khóa nhờ tín hiệu điều khiển. Việc ứng dụng các GTO đã phát huy ưu điểm cơ bản của các phần tử bán dẫn, đó là khả năng đóng cắt dòng điện lớn nhưng lại được điều khiển bởi các tín hiệu điện công suất nhỏ.



Hình 1.7: Cấu tạo và ký hiệu của GTO

Cấu trúc bán dẫn của GTO phức tạp hơn thyristor như được chỉ ra trên hình 1.7a. Ký hiệu của GTO được minh họa trên hình 1.7b, nó cũng chỉ rõ đặc tính điều khiển là dòng điện đi vào cực điều khiển để mở GTO, còn dòng đi ra khỏi cực điều khiển dùng để di chuyển các điện tích ra khỏi cấu trúc bán dẫn của nó, để khóa GTO lại.

Trong cấu trúc bán dẫn của GTO, lớp p của anốt được bổ sung các lớp lớp n⁺, dấu “+” ở bên cạnh chỉ ra rằng mật độ các điện tích tương ứng ứng, các lỗ trống hoặc điện tử được làm giàu thêm với mục đích làm giảm điện trở khi dẫn của các vùng này. Cực điều khiển vẫn được nối vào lớp p thứ ba nhưng được chia nhỏ ra và phân bố đều so với lớp n⁺ của katot.

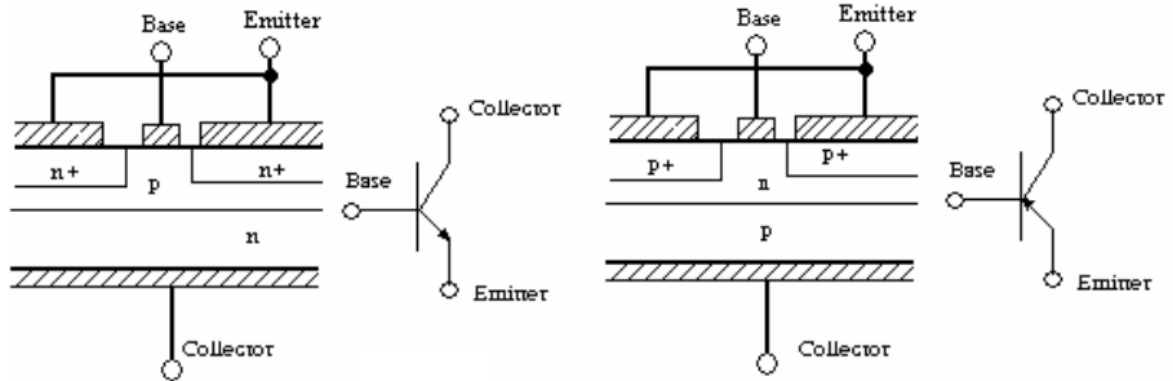
Khi chưa có dòng điều khiển, nếu anốt có điện áp dương hơn so với katot thì toàn bộ điện áp sẽ rơi trên tiếp giáp J₂ ở giữa giống như trong cấu trúc của thyristor. Tuy nhiên nếu katot có điện áp dương hơn so với anốt thì tiếp giáp p⁺ - n ở sát anốt sẽ bị đánh thủng ngay ở điện áp rất thấp, nghĩa là GTO không thể chịu được điện áp ngược

GTO được điều khiển mở bằng cách cho dòng vào cực điều khiển, giống như ở thyristor thường. Tuy nhiên do cấu trúc bán dẫn khác nhau nên dòng duy trì ở GTO cao hơn ở thyristor thường, do đó dòng điều khiển phải có biên độ lớn hơn và thời gian dài hơn để dòng qua GTO kịp vượt qua giá trị dòng duy trì. Giống như ở thyristor thường, sau khi GTO đã mở thì dòng điều khiển không còn tác dụng. Như vậy có thể mở GTO bằng các xung ngắn, với công suất không đáng kể.

Để khóa GTO phải có một xung dòng đi ra khỏi cực điều khiển. Khi van đang dẫn dòng, tiếp giáp J₂ chứa một số lượng lớn các điện tích sinh ra do tác dụng của hiệu ứng bắn phá “vũ bão” tạo nên vùng dẫn điện, cho phép các điện tử di chuyển từ katot (vùng n⁺ đến anốt (vùng p⁺) tạo nên dòng anốt. Bằng cách lấy đi một số lượng lớn các điện tích qua cực điều khiển, vùng dẫn điện sẽ bị co hẹp và bị ép về phía vùng n⁺ của anốt và vùng n⁺ của katot. Kết quả là dòng anốt sẽ bị giảm cho đến khi bằng 0. Dòng điều khiển được duy trì một thời gian ngắn để GTO phục hồi tính chất khóa.

1.5. TRANSISTOR CÔNG SUẤT, BJT (Bipolar Junction Transistor)

2.5.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

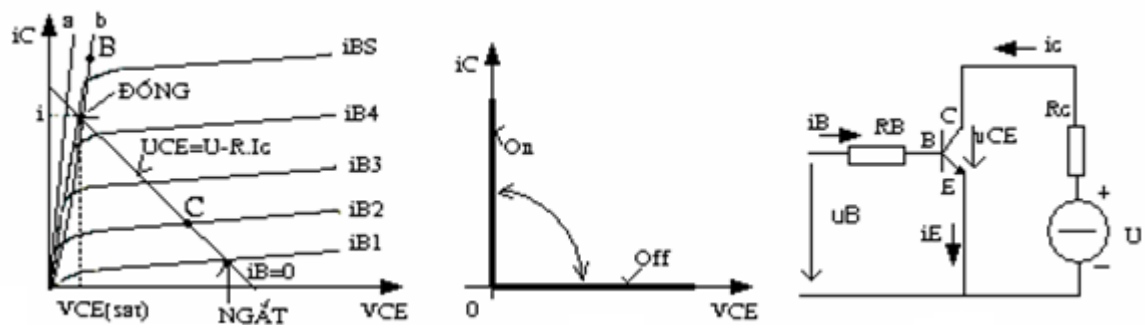


Hình 1.8: Cấu tạo BJT

Transistor có hai lớp p-n, dựa theo cấu tạo lớp này ta phân biệt hai loại: transistor p-n-p (transistor thuận) và transistor n-p-n (transistor ngược). Cấu trúc này thường được gọi là BJT - Bipolar Junction Transistor, vì dòng điện chạy trong cấu trúc này bao gồm cả hai loại điện tích âm và dương (Bipolar nghĩa là hai cực tính). Transistor có ba cực: cực gốc (Base), ký hiệu là B; cực góp (Collector), ký hiệu là C; cực phát (Emitter) ký hiệu là E.

Trong lĩnh vực điện tử công suất, transistor BJT được sử dụng như công tắc (khóa) đóng ngắt các mạch điện và phần lớn được mắc theo dạng mạch có chung emitter.

Trên điện cực B, E là điện áp điều khiển u_{BE} . Các điện cực C, E được sử dụng làm công tắc đóng mở mạch công suất. Điện thế điều khiển phải tác dụng tạo ra dòng i_B đủ lớn để điện áp giữa cổng CE đạt giá trị bằng zero ($u_{CE} \rightarrow 0$).



Hình 1.9: Đặc tính V-A ngõ ra của transistor mắc chung cực emitter

2.5.2. Đặc tính V-A

Đặc tính ngõ ra (output characteristic): Hình 1.9 biểu diễn quan hệ của các đại lượng ngõ ra $I_C = f(U_{CE})$. Thông số biến thiên là dòng kích i_B . Các đặc tính ngõ ra được vẽ cho các giá trị khác nhau của i_B trong vùng 1 của hệ tọa độ. Trong vùng tọa độ này còn vẽ đường thẳng biểu diễn đặc tính tải $U_{CE} = U - R \cdot I_C$. Giao điểm của đường thẳng này và đặc tính ngõ ra (ứng với trị thiết lập i_B) sẽ xác định điểm làm việc gồm dòng I_C và điện thế u_{CE} . Trong vùng chứa các đặc tính ngõ ra, ta phân biệt vùng nghịch, vùng bão hòa và vùng tích cực.

Vùng nghịch: đặc tính ra với thông số $i_B = 0$ nằm trong vùng này. Transistor ở chế độ ngắt. Dòng collector i_{CO} có giá trị nhỏ không đáng kể đi qua transistor và tải. Khi

$u_{BE} < 0$, không có dòng điện kích, transistor ở trạng thái ngắt và độ lớn dòng i_{CO} giảm nhỏ hơn nữa. Tuy nhiên, khả năng chịu áp ngược của lớp cổng emitter khá nhỏ. Do đó, cần hạn chế điện áp âm trên BE để nó không vượt quá giá trị cho phép.

Vùng bão hòa: nằm giữa đường thẳng giới hạn a và giới hạn bão hòa b. Đường thẳng giới hạn a xác định điện thế u_{CE} nhỏ nhất có thể đạt được ứng với giá trị i_C cho trước. Giới hạn bão hòa là đường thẳng xác định ranh giới của các trạng thái $u_{CB} = 0$ và $u_{CB} > 0$. Nếu như điểm làm việc nằm trong vùng bão hòa (xem điểm ĐÓNG), transistor sẽ đóng, dòng i_C dẫn và điện thế u_{CE} đạt giá trị u_{CESAT} nhỏ không đáng kể (khoảng 1-2 V) và như vậy, khi thực hiện tăng dòng điện kích $I_B > I_{BSAT}$, dòng điện qua collector hầu như không thay đổi. Điện thế u_{CESAT} gọi là điện thế bão hòa và ta nói rằng transistor ở trạng thái bão hòa.

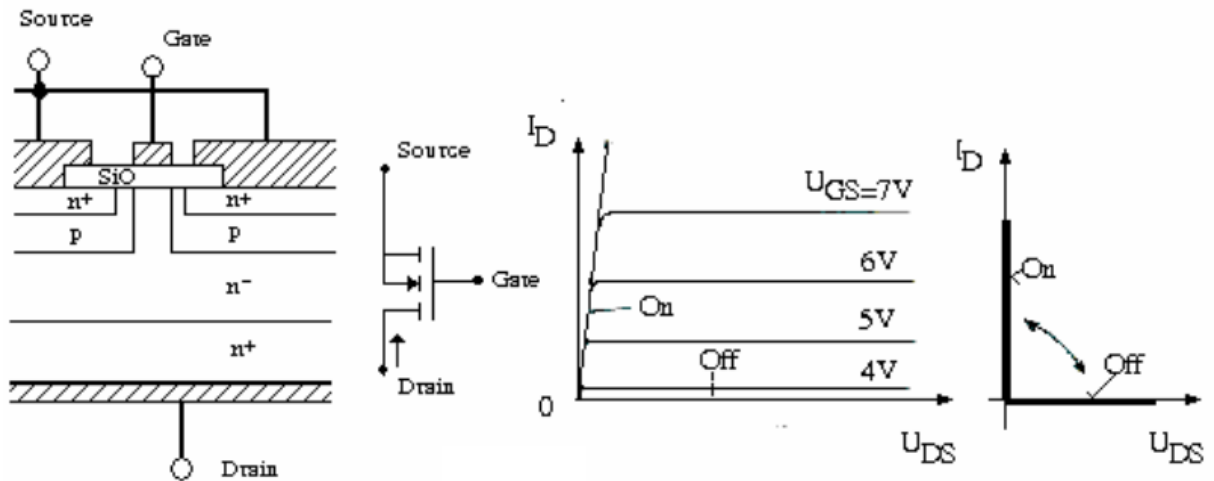
Vùng tích cực: là vùng mà transistor hoạt động ở chế độ khuếch đại tín hiệu, tương ứng với các giá trị làm việc $u_{CE} > u_{CESAT}$ và dòng $i_C > I_{CO}$. Mỗi quan hệ giữa hai đại lượng u_{CE} và I_C phụ thuộc vào tải và dòng i_B . Khi transistor làm việc như một công tắc đóng mở (switching), điểm làm việc của nó sẽ không nằm trong vùng này.

1.6. TRANSISTOR TRƯỜNG, MOSFET (Metal - Oxide - Semiconductor Field - Effect Tranzitor)

2.6.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

Khác với cấu trúc BJT, MOSFET có cấu trúc bán dẫn cho phép điều khiển bằng điện áp với dòng điều khiển cực nhỏ. Hình 1.10 a, b thể hiện cấu trúc và ký hiệu của một MOSFET kênh dẫn kiểu n. Trong đó G là cực điều khiển được cách ly hoàn toàn với cấu trúc bán dẫn còn lại bởi lớp điện môi cực mỏng nhưng có độ cách điện cực lớn Dioxit Silic (SiO_2). Hai cực còn lại là cực nguồn (S) và cực máng (D). Cực máng đón các hạt mang điện. Nếu kênh dẫn là n thì các hạt mang điện sẽ là các điện tử (electron), do đó cực tính điện áp của cực máng sẽ là dương so với cực nguồn. Trên ký hiệu, phần chấm gạch giữa D và S thể hiện trong điều kiện chưa có tín hiệu điều khiển thì không có một kênh dẫn thực sự nối giữa D và S.

Cấu trúc bán dẫn của MOSFET kênh dẫn kiểu p cũng tương tự nhưng các lớp bán dẫn sẽ có kiểu dẫn điện ngược lại. Tuy nhiên đa số các MOSFET công suất là loại có kênh dẫn kiểu n.



Hình 1.10: MOSFET kênh n

Hình 1.10 mô tả sự tạo thành kênh dẫn trong cấu trúc bán dẫn của MOSFET. Trong chế độ làm việc bình thường $u_{DS} > 0$, giả sử điện áp giữa cực điều khiển và cực nguồn bằng không $u_{GS} = 0$, khi đó kênh dẫn sẽ không hoàn toàn xuất hiện. Giữa cực nguồn và cực máng sẽ là tiếp giáp p – n⁻ phân cực ngược. Điện áp u_{DS} sẽ hoàn toàn rơi trên vùng nghèo điện tích của tiếp giáp này (hình 1.10a).

Nếu điện áp điều khiển âm $u_{GS} < 0$, thì vùng bề mặt tiếp giáp cực điều khiển sẽ tích tụ các lỗ p, do đó dòng điện giữa cực nguồn và cực máng sẽ không xuất hiện. Khi điện áp điều khiển dương $u_{GS} > 0$, và đủ lớn, bề mặt tiếp giáp cực điều khiển sẽ tích tụ các điện tử, và một kênh dẫn thực sự đã hình thành (hình 1.10b). Như vậy trong cấu trúc bán dẫn của MOSFET, các phần tử mang điện là các điện tử, giống như của lớp n tạo nên cực máng, nên MOSFET được gọi là phần tử với các hạt mang điện cơ bản, khác với cấu trúc của BJT, IGBT, THYRISTOR là các phần tử với các hạt mang điện phi cơ bản. Dòng điện giữa cực máng và cực nguồn bây giờ phụ thuộc vào điện áp u_{DS} .

Từ cấu trúc bán dẫn của MOSFET (hình 1.10a), có thể thấy rằng giữa cực máng và cực nguồn tồn tại một tiếp giáp p – n⁻, tương đương với một điốt ngược nối giữa D và S. Trong các sơ đồ của các bộ biến đổi, để trao đổi năng lượng giữa tải và nguồn thường cần có các điốt mắc song song với các van bán dẫn. Như vậy, ưu điểm của MOSFET là đã có sẵn một điốt nội tại.

2.6.2. Đặc tính V-A

Khi $U_{GS} < 3V$ MOSFET ở trạng thái khóa.

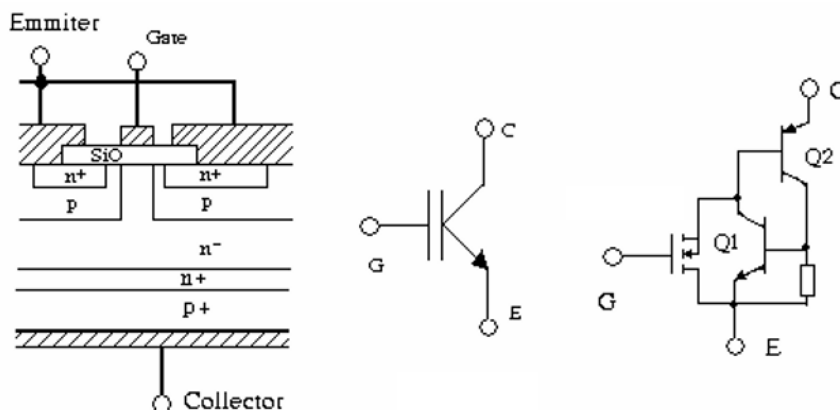
Khi U_{GS} cỡ 5-7V MOSFET ở trạng thái dẫn

Để hoạt động ở chế độ đóng cắt MOSFET được mở bằng điện áp cỡ 12-15V

1.7. TRANSISTOR CÓ CỰC ĐIỀU KHIỂN CÁCH LY, IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*)

2.7.1. Cấu tạo và nguyên lý hoạt động

IGBT có ký hiệu, mạch điện tương đương vẽ trên hình 1.12.



Hình 1.12: Cấu tạo và ký hiệu IGBT

IGBT là transistor công suất hiện đại, kích thước gọn nhẹ. Nó có khả năng chịu được điện áp và dòng điện lớn cũng như tạo nên độ sụt áp vừa phải khi dẫn điện.

IGBT có phần tử MOS với cổng cách điện được tích hợp trong cấu trúc của nó. Giống như thyristor và GTO, nó có cấu tạo gồm hai transistor. Việc điều khiển đóng và ngắt IGBT được thực hiện nhờ phần tử MOSFET đầu nối giữa hai cực transistor n-p-n.

Việc kích dẫn IGBT được thực hiện bằng xung điện áp đưa vào cổng kích G. Đặc tính V-A của IGBT có dạng tương tự như đặc tính V-A của MOSFET.

Khi tác dụng lên cổng G điện thế dương so với emitter để kích đóng IGBT, các hạt mang điện loại n được kéo vào kênh p gần cổng G làm giàu điện tích mạch cổng p của transistor npn và làm cho transistor này dẫn điện. Điều này sẽ làm IGBT dẫn điện. Việc ngắt IGBT có thể thực hiện bằng cách khóa điện thế cấp cho cổng kích để ngắt kênh dẫn p. Mạch kích của IGBT vì thế rất đơn giản.

Ưu điểm của IGBT là khả năng đóng ngắt nhanh, làm nó được sử dụng trong các bộ biến đổi điều chế độ rộng xung tần số cao. Mặc khác, với cấu tạo của một transistor, IGBT có độ sụt áp khi dẫn điện lớn hơn so với các linh kiện thuộc dạng thyristor như GTO. Tuy nhiên, IGBT hiện chiếm vị trí quan trọng trong công nghiệp với hoạt động trong phạm vi công suất đến 10MW hoặc cao hơn nữa.

So với thyristor, thời gian đáp ứng đóng và ngắt IGBT rất nhanh, khoảng một vài μs và khả năng chịu tải đến 4,5kV-2.000A. Hiện nay công nghệ chế tạo IGBT đang được đặc biệt phát triển để đạt đến mức điện áp vài ngàn Volt (6kV) và dòng điện vài ngàn Ampe.

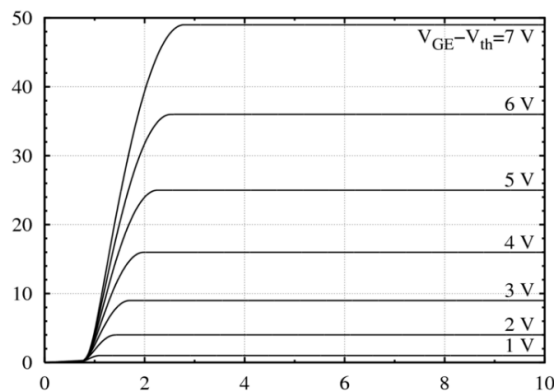
IGBT có khả năng hoạt động tốt không cần đến mạch bảo vệ. Trong trường hợp đặc biệt, có thể sử dụng mạch bảo vệ của MOSFET áp dụng cho IGBT.

Modul IGBT thông minh (Intelligent Power Modul): được chế tạo bởi công nghệ tích hợp cao. Trên modul chứa đựng phần tử IGBT, mạch kích lái, mạch bảo vệ, cảm biến dòng điện. Các modul này đạt độ tin cậy rất cao.

Mạch kích IGBT được thiết kế tương tự như mạch kích cho MOSFET. Do giá thành IGBT cao, và đặc biệt cho công suất lớn, mạch kích lái IGBT được chế tạo dưới dạng IC công nghiệp. Các IC này có khả năng tự bảo vệ chống quá tải, ngắn mạch, được chế tạo tích hợp dạng modul riêng (1,2,4,6 driver) hoặc tích hợp trên cả modul bán dẫn hình thành dạng complex (bao gồm mạch lái, IGBT và mạch bảo vệ).

2.7.2. Đặc tính V-A

Đặc tính V-A của IGBT có dạng tương tự như đặc tính của MOSFET



Hình 1.13: Đặc tính V-A của IGBT

CÂU HỎI HƯỚNG DẪN ÔN TẬP VÀ THẢO LUẬN

1. Điện tử công suất là gì?
2. Có mấy kiểu thyristor khác nhau?
3. Các điều kiện để mở thyristor?
4. Làm thế nào để khóa một thyristor đang dẫn dòng?
5. Sự khác biệt giữa thyristor và triac là gì?
6. Đặc trưng điều khiển của GTO?
7. Thời gian mở, thời gian khóa và thời gian khôi phục tính chất điều khiển của thyristor?
8. Sự khác nhau về tính chất điều khiển của GTO và thyristor?
9. So sánh về đặc tính điều khiển của BJT và MOSFET?
10. Các tính chất cơ bản của IGB?

CHƯƠNG 2: CHỈNH LƯU ĐIỀU KHIỂN

(Bộ biến đổi xoay chiều – một chiều sử dụng thyristor)

MỤC TIÊU CỦA CHƯƠNG

Cung cấp cho sinh viên kiến thức cơ bản về các bộ chỉnh lưu sử dụng thyristor với các phụ tải khác nhau, từ đó vẽ được dạng sóng đầu ra của bộ chỉnh lưu, biết cách tính toán thông số và tính chọn các van trong các sơ đồ chỉnh lưu.

2.1. KHÁI NIỆM CHUNG

Trong kỹ thuật điện rất nhiều trường hợp yêu cầu phải biến đổi một nguồn điện áp xoay chiều thành điện áp một chiều và điều chỉnh được giá trị của điện áp một chiều đầu ra. Để thực hiện việc này người ta có nhiều cách khác nhau, ví dụ như dùng tổ hợp động cơ - máy phát, dùng bộ biến đổi một phần ứng, dùng chỉnh lưu, v.v. Nhưng phổ biến nhất và có hiệu suất cao nhất là sử dụng các sơ đồ chỉnh lưu bằng các dụng cụ bán dẫn. Các sơ đồ chỉnh lưu (các bộ biến đổi xoay chiều-một chiều) là các bộ biến đổi ứng dụng tính chất dẫn dòng một chiều của các dụng cụ điện tử hoặc bán dẫn để biến đổi điện áp xoay chiều thành điện áp một chiều một cách trực tiếp. Hiện nay các dụng cụ điện tử hầu như không còn được sử dụng trong các sơ đồ chỉnh lưu vì kích thước lớn, hiệu suất thấp. Dụng cụ sử dụng chủ yếu trong các sơ đồ chỉnh lưu hiện nay là các thyristor và các diốt bán dẫn. Các sơ đồ chỉnh lưu có nhiều dạng khác nhau và được ứng dụng cho nhiều mục đích khác nhau, ví dụ như dùng để điều chỉnh tốc độ động cơ một chiều; cung cấp điện áp một chiều cho thiết bị mạ điện, điện phân; cung cấp điện áp một chiều cho các thiết bị điều khiển, các đèn phát trung tần và cao tần, v.v. Các sơ đồ chỉnh lưu được sử dụng từ công suất rất nhỏ đến công suất rất lớn.

2.2. SƠ ĐỒ NỐI DÂY VÀ NGUYÊN LÝ LÀM VIỆC

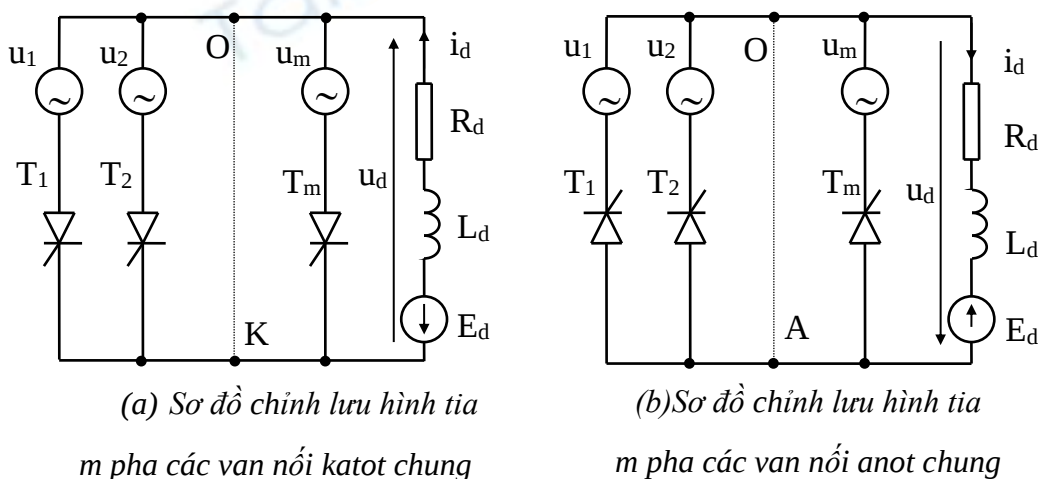
2.2.1. Sơ đồ nối dây

Có hai loại sơ đồ nối dây các bộ chỉnh lưu là : Sơ đồ nối dây hình tia và sơ đồ nối dây hình cầu.

2.2.1.1. Sơ đồ nối dây hình tia

Hình 2.1 là các sơ đồ chỉnh lưu hình tia tổng quát. Hình 2.1a là sơ đồ chỉnh lưu hình tia m pha các van nối katot chung, còn hình 2.1b là sơ đồ chỉnh lưu hình tia m pha các van nối anot chung. Trong các sơ đồ này:

- $u_1, u_2, \dots, u_m$ là hệ thống điện áp xoay chiều (thường là hình sin) m pha.
- $T_1, T_2, \dots, T_m$ là m van chỉnh lưu có điều khiển (thyristor), trong các sơ đồ chỉnh lưu không điều khiển thì các van là điôt.
- L_d, R_d, E_d là điện trở, điện cảm, s.đ.đ. phụ tải một chiều.
- u_d, i_d là điện áp và dòng điện chỉnh lưu tức thời trên phụ tải một chiều, chiều qui ước của i_d lấy trùng với chiều thực của dòng qua tải, còn chiều qui ước của u_d lấy trùng với chiều qui ước của dòng tải i_d .
- Điểm O là trung tính nguồn xoay chiều



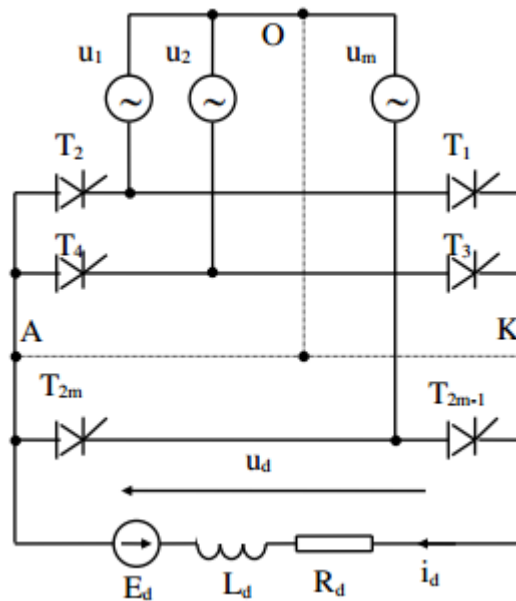
Hình 2.1: Sơ đồ chỉnh lưu hình tia m pha

Đặc điểm chung của các sơ đồ chỉnh lưu hình tia là:

- Số van chỉnh lưu bằng số pha nguồn xoay chiều
- Các van có một điện cực cùng tên nối chung, điện cực còn lại nối với nguồn xoay chiều. Nếu điện cực nối chung là katot thì sơ đồ được gọi là sơ đồ katot chung, còn nếu điện cực nối chung là anot ta có sơ đồ anot chung. Điểm nối chung của các van là một trong hai điện cực của điện áp chỉnh lưu. Hệ thống điện áp nguồn xoay chiều m pha phải có điểm trung tính, trung tính nguồn là điện cực còn lại của điện áp chỉnh lưu.

2.2.1.2. Sơ đồ nối dây hình cầu

Hình 2.2 là các sơ đồ chỉnh lưu mắc theo sơ đồ cầu. Hình 2.2 là sơ đồ dạng tổng quát với số pha $m \geq 3$



Hình 2.2: Sơ đồ chỉnh lưu hình cầu m pha

Các phần tử trên các sơ đồ :

- $u_1, u_2, \dots, u_m$ là hệ thống điện áp xoay chiều (thường là hình sin) m pha, u là điện áp xoay chiều một pha.

- $T_1, T_2, \dots, T_{2m}$ là các van chỉnh lưu có điều khiển (thyristor).

- R_d, L_d, E_d là điện trở, điện cảm, s.đ.đ. phụ tải (E_d còn được gọi là s.đ.đ. ngược hay sức phản điện động).

- u_d, i_d là điện áp và dòng tải tức thời, qui ước chiều giống như sơ đồ hình tia.

Các đặc điểm chung của sơ đồ chỉnh lưu hình cầu m pha:

- Số van chỉnh lưu trong sơ đồ bằng 2 lần số pha, trong đó có m van có katôt nối chung được gọi là nhóm van katôt chung và trên sơ đồ ta ký hiệu bởi chỉ số lẻ, m van còn lại có anôt nối chung nên được gọi là nhóm van anôt chung và trên sơ đồ ta ký hiệu bằng chỉ số chẵn.

- Mỗi pha nguồn xoay chiều nối với 2 van, một ở nhóm katôt chung và một ở nhóm anôt chung.

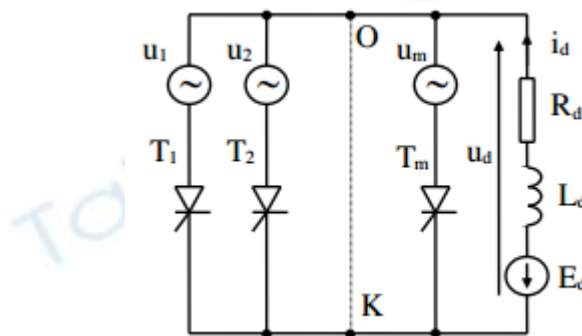
- Điểm nối chung của các van nhóm katôt chung (K), nhóm van anôt chung (A) là 2 điện cực của điện áp ra.

2.2.2. Nguyên lý làm việc

2.2.2.1. Nguyên lý làm việc của sơ đồ chỉnh lưu hình tia

a. Trường hợp sơ đồ chỉnh lưu là không điều khiển

Để đơn giản cho việc nghiên cứu nguyên lý làm việc của sơ đồ chỉnh lưu, trước tiên ta xét với sơ đồ không điều khiển và nghiên cứu loại sơ đồ các van nối katôt chung (hình 2.1a). Trong sơ đồ này ta đã thay các thyristor ở sơ đồ hình 2.1a bằng các điôt từ D_1 đến D_m .



Hình 2.3a: Sơ đồ chỉnh lưu hình tia m pha không điều khiển

Qua nghiên cứu người ta nhận thấy rằng: Ở chế độ dòng qua tải là liên tục và bỏ qua quá trình chuyển mạch thì ở một thời điểm bất kỳ khi bộ chỉnh lưu đang làm việc trong sơ đồ luôn có một van dẫn dòng, đó là van nối với pha có điện áp dương nhất. Mặt khác như đã biết với hệ thống điện áp xoay chiều m pha thì trong thời gian một chu kỳ nguồn mỗi pha sẽ lần lượt dương nhất trong khoảng thời gian bằng $1/m$ chu kỳ, do vậy mà mỗi van trong sơ đồ sẽ dẫn dòng một khoảng bằng $1/m$ chu kỳ trong thời gian một chu kỳ nguồn.

Ta giả thiết rằng sụt điện áp trên điôt hoặc tiristor mở (dẫn dòng) bằng không. Như vậy thời điểm mà điện áp trên van bằng không và có xu hướng chuyển sang dương là thời điểm van (điôt) bắt đầu mở, thời điểm mà điôt trong sơ đồ chỉnh lưu bắt đầu mở được gọi là thời điểm mở tự nhiên đối với van trong sơ đồ chỉnh lưu.

Thời điểm mở tự nhiên đối với van trong sơ đồ chỉnh lưu các van nối katôt chung chậm sau thời điểm điện áp của pha nối van bằng không và bắt đầu chuyển sang dương một góc độ điện bằng ψ_0 , với ψ_0 được xác định như sau:

$$\psi_0 = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \quad (2.1)$$

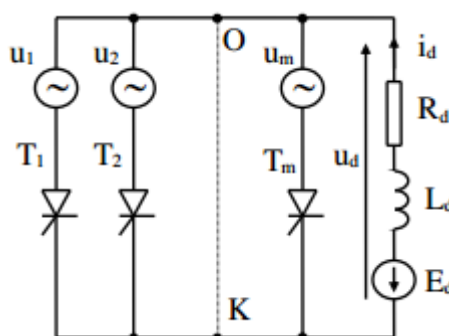
Mỗi điôt trong sơ đồ bắt đầu mở tại thời điểm mở tự nhiên và sẽ khoá tại thời điểm mở tự nhiên của van tiếp theo. Điện áp chỉnh lưu sẽ lặp lại m lần giống nhau trong một chu kỳ nguồn xoay chiều.

Trường hợp sơ đồ chỉnh lưu hình tia m pha các van nối anôt chung, khi sơ đồ làm việc ở chế độ dòng liên tục và bỏ qua chuyển mạch thì tại một thời điểm bất kỳ trong sơ đồ có một van mắc với pha có điện áp âm nhất dẫn dòng. Thời điểm mở tự nhiên đối các van trong sơ đồ này chậm sau thời điểm điện áp của pha mắc với van bằng không và bắt đầu chuyển sang âm một góc độ điện cũng bằng ψ_0 .

b. Trường hợp chỉnh lưu có điều khiển

Trong trường hợp này các van chỉnh lưu là các thyristor ($T_1, T_2, \dots, T_m$). Như đã biết, để một thyristor có thể chuyển từ trạng thái khoá sang trạng mở thì cần phải có đủ hai điều kiện :

- Điện áp giữa anôt và katôt phải dương (thuận)
- Có tín hiệu điều khiển đặt vào điện cực điều khiển và katôt của van (nói tắt là có tín hiệu điều khiển).



Hình 2.3b: Sơ đồ chỉnh lưu hình tia m pha có điều khiển

Do đặc điểm vừa nêu mà trong sơ đồ này ta có thể điều khiển được thời điểm mở của các van trong một giới hạn nhất định. Cụ thể là: trong khoảng thời gian van có điều kiện mở

thứ nhất là có điện áp thuận (từ thời điểm mở tự nhiên đối với van cho đến sau thời điểm này một nửa chu kỳ), ta cần mở van ở thời điểm nào thì ta truyền tín hiệu điều khiển đến van ở thời điểm đó và điều này được thực hiện với tất cả các van trong sơ đồ. Như vậy nếu ta truyền tín hiệu điều khiển đến van chậm sau thời điểm mở tự nhiên một góc độ điện bằng α thì tất cả các van trong sơ đồ sẽ mở chậm so với thời điểm mở tự nhiên một góc độ điện là α và đường cong điện áp chỉnh lưu trên phụ tải một chiều sẽ khác so với sơ đồ chỉnh lưu không điều khiển (các van mở tại thời điểm mở tự nhiên đối với van), do vậy giá trị trung bình (thành phần một chiều) của điện áp chỉnh lưu sẽ thay đổi. Mặt khác khi thay đổi giá trị của α thì dạng và giá trị trung bình của điện áp chỉnh lưu cũng thay đổi theo. Vậy ta có thể thay đổi được thành phần một chiều của điện áp trên tải nhờ thay đổi thời điểm mở van, tức là thay đổi giá trị góc α . Trong sơ đồ chỉnh lưu thì giá trị góc mở chậm của van α được gọi là **góc điều khiển** của sơ đồ chỉnh lưu. Từ các điều kiện mở của van đã nêu trên ta thấy rằng: muốn van mở được khi có tín hiệu điều khiển thì thời điểm truyền tín hiệu điều khiển đến van phải nằm trong khoảng điện áp trên van là thuận, có nghĩa rằng: $180^\circ > \alpha \geq 0^\circ$. Trường hợp sơ đồ làm việc với $\alpha = 0^\circ$ tương đương với trường hợp sơ đồ chỉnh lưu không điều khiển.

Sự làm việc của sơ đồ chỉnh lưu hình tia m pha các van nối anôt chung cũng hoàn toàn tương tự, chỉ khác là thời điểm mở tự nhiên của các van trong sơ đồ này xác định khác với sơ đồ các van nối katôt chung.

2.2.2.2. Nguyên lý làm việc sơ đồ cầu

a. Trường hợp sơ đồ không điều khiển

Từ kết cấu của sơ đồ chỉnh lưu hình cầu ta có nhận xét:

Để có dòng qua phụ tải thì trong sơ đồ phải có ít nhất 2 van cùng dẫn dòng, một van ở nhóm katôt chung còn van kia ở nhóm anôt chung. Vậy, với giả thiết là sơ đồ làm việc ở chế độ dòng liên tục và bỏ qua quá trình chuyển mạch thì khi bộ chỉnh lưu cầu m pha làm việc, ở một thời điểm bất kỳ trong sơ đồ luôn có 2 van dẫn dòng: một van ở nhóm katôt chung nối với pha đang có điện áp dương nhất và một van ở nhóm anôt chung nối với pha đang có điện áp âm nhất. Thời điểm mở tự nhiên đối các van nhóm katôt chung xác định giống như các van trong sơ đồ chỉnh lưu hình tia cùng số pha các van nối katôt chung, còn thời điểm mở tự nhiên đối với các van nhóm anôt