إعداد : احمد زهار

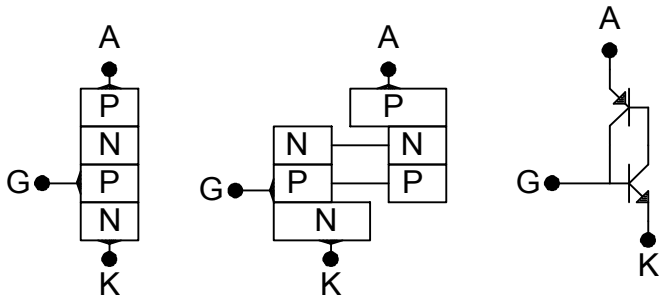
الترستور و التريالكThyristor & Triac

1. ال SCR

1.1 تشابه ترانزستورين بالبنية PNPN

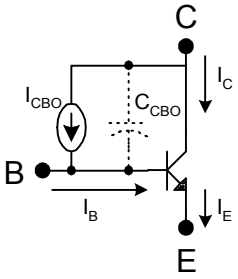
توجد عناصر متكونة من أشباه الموصلات ذات البنية PNPN، هذه العناصر تسمى الترستور، واكترها شهرة هي SCR (Silicon Controled Rectifier) لاحظ الشكل 1-على اليسار-

لفهم العمل نقصم تركيبة شبه الموصل لاحظ الشكل 1 –الوسط- لنحصل على ما يعادل اثنان من الترانزيستور الشكل 1 –على اليمين-



الشكل 1

الشكل 2 اسفله تذكير لمعادلات الترانزيستور مع اعتبار التيار I_{CBO} وتمثيل المكثف C_{CBO}



الشكل 2

$$I_E = (\beta + 1)(I_B + I_{CBO}) \qquad \textbf{(1)}$$

$$I_C = \beta I_B + (\beta + 1) I_{CBO} \qquad \textbf{(2)}$$

$$I_B = I_E - I_C \qquad \textbf{(3)}$$

لمعرفة التيار المار في أنود SCR (الشكل 3)، يكفي جمع التيارات التالية:

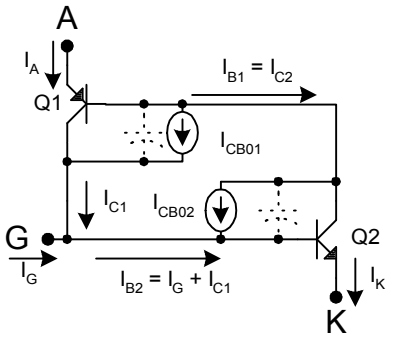
$$I_A = I_{C1} + I_{B1} \quad \textbf{(4)}$$

حسب الشكل 3

$$I_{B1} = I_{C2} \quad \textbf{(5)}$$

$$I_{B2} = I_G + I_{C1} \quad \textbf{(6)}$$

A : Anode الأنود
K :Cathode الكاتود
G : Gate الزناد



الشكل 3

نقوم **بالتعويض المناسب*** للمعادلات (2)، (5) و (6) فنحصل على علاقة التيار في الانود

$$I_A = \frac{\beta_2(\beta_1+1)I_E + (\beta_1+1)(\beta_2+1)(I_{CBo1} + I_{CBo2})}{1-\beta_1\beta_2} \quad \textbf{(7)}$$

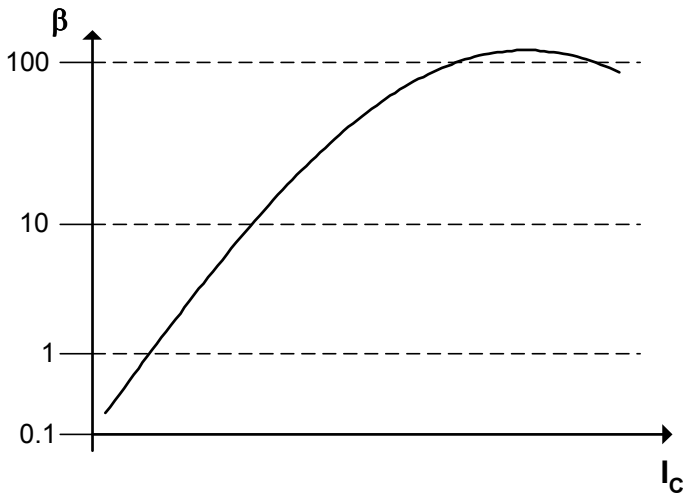
1.2 **إشعال** SCR (Amorçage)

نفترض أن $I_G=0$ أن توتر الأنود U_A موجب. تيار قاعدة الترانزستوران هو مجموع تيارا التسرب $I_{CBO1}+I_{CBO2}$،

المبيان I_C بدلالة β في الشكل 4 يبن أن I_C ضعيف جدا، ف β قد تكون اقل 1 عندما يكون تيار القاعدة غير مكون من تيارات التسريب في حرارة عادية،

المعادلة (7) تصبح : $I_A \cong I_{CBo1} + I_{CBo2}$ **(8)**

التيريستور في حالة عدم التوصيل رغم الاستقطاب المباشر



الشكل 4

1.3 إشعال بتيار الزناد I_G

إذا أعطينا تيارا في الزناد يعني تيارا في قاعدة الترانزيستورQ_2 ، هذا الأخير سيضخم I_{C2} كذلك سيكبر β_2، هذا التيار هو تيار قاعدة الترانزيستور Q_1 الذي سيضخمه بدوره مع زيادة في β_1. تيار المجمع Q_1 يعود إلى قاعدة Q_2 ويضخم من جديد.

إذن نحصل على حلقة ضد-رد الفعل موجبة لان الظاهرة ظاهرة جمعية و بالتالي فهو يبقى مشتعلا

معامل التضخيم $\beta_1\beta_2$ في الحلقة المفتوحة هو و الواضح في بسط (7)، اذا كانت قيمته قريبة من 1 فان تيار الأنود يزداد

الترستور يصبح موصلا فنقول انه مشتعل. إذا لم تكن أية مقاومة تحد من تيار الأنود الترستور قد يتلف

هذه الطريقة هي الأفضل لأننا نتحكم ب I_G.

1.4 طرق التشغيل

إن طريقة تشغيل الترستور و التريك تعتمد على أن يصبح تيار الزناد I_G اكبر من تيار التشغيل I_{GT}.

يمكن عمل ذلك ب :

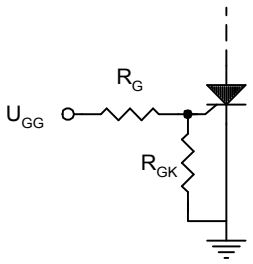
- تيار مستمر في الزناد
- إشارة تيار في الزناد
- عدد لا متناهي من إشارات التيار في الزناد

1.5دور المقاومة زنادـكاتود

إن المصنعين ينصحون دائما بوضع R_{GK}، بين الزناد و الكاتود وذلك لتمثيل المقاومة

R_S «Shorted Emitter»

دور هذه المقاومة هو عدم جعل الترستور حساس و ذلك بتمرير تيار منن المجمع داخلي PNP حول الوصلة (junction) قاعدة - المرسل لNPN .



الشكل 5 مقاومة R_{GK}

1.6تشغيل بواسطة توتر الانهيار avalanche

هذه الطريقة تعتمد علي رفع التوتر U_A إلى أن يدخل احد الترانزستورات في الانهيار.التيار الناتج يسمح بان يتوجه $\beta_1\beta_2$ نحو 1 و بالتالي يحصل مفعول تجميعية التضخيم.

هذه الطريقة غير فعالة حيت توجد تسامحات غير متحكم بها في توترات الانهيار في نفس العائلة.

1.7تشغيل بواسطة التوتر du / dt

إذا كبر U_A سريعا، المكثفان سيتصرفان كدارة قصيرة بين القاعدتين و ذلك سيسمح بوجود معبر توصيل بين الوصلات القاعدة – المرسل للترانزستورين.

تيار القاعدة عند أصل ظاهرة توليد التشغيل هو:

$$I_{B1} = I_{B2} = \left(C_{CBo1} + C_{CBO2}\right)\frac{dU_A}{dt} \qquad \textbf{(9)}$$

في التطبيق العملي هذا النوع من التشغيل يسمى تشغيل بواسطة du / dt، وهذا يحصل عند محاولة توقيف إلي كبح الترستور. عند هذه اللحظة I_A ينعدم و كذلك توتر المستقبِل R_L و يرتفع U_A إلى حد قيمة توتر التغذية ، ولكن هذا التشغيل غير مرغوب فيه.

1.8تشغيل عن طريق الحرارة

إن رفع حرارة الترستور ترفع من قيمة I_{CBO1} و I_{CBO2} و بالتالي قد يصبح تيار مجموعهما كافي لبدا ظاهرة ضد-رد الفعل الموجبة. هذا سلبي لأنه يشتغل دون أن نأمره.

1.9التشغيل بواسطة الطاقة الشمسية

يوجد نوع photothyristor يسمى LASCR (Light Activated SCR)،هذا الأخير يشتغل تحت التأثير الضوئي الموجه نحو الزناد (قاعدة Q_2) من خلال فتحة توجد في المركب، و ذلك بتحويل طاقة الفوطون photon إلى أزواج إلكترون-ثقب تستعمل كتيار للزناد.

1.10 كبح الترستور

كبح الترستور يتم إذا صغُر تيار الأنود مقارنتا مع تيار الدعم(maintain) (Holding Current) I_H . في هذه الحالة المعامل $\beta_1\beta_2$ يصبح اصغر من 1 و بالتالي الترستور يعود إلى حالة الكبح (أي التوقف عن التشغيل) في الاستقطاب المباشر.

يمكن استقطاب مؤقتا الترستور بالعكس و ذلك حتى يصبح I_A اصغر من I_H. عندما نعيد استقطابه مباشرة فانه يكبح.

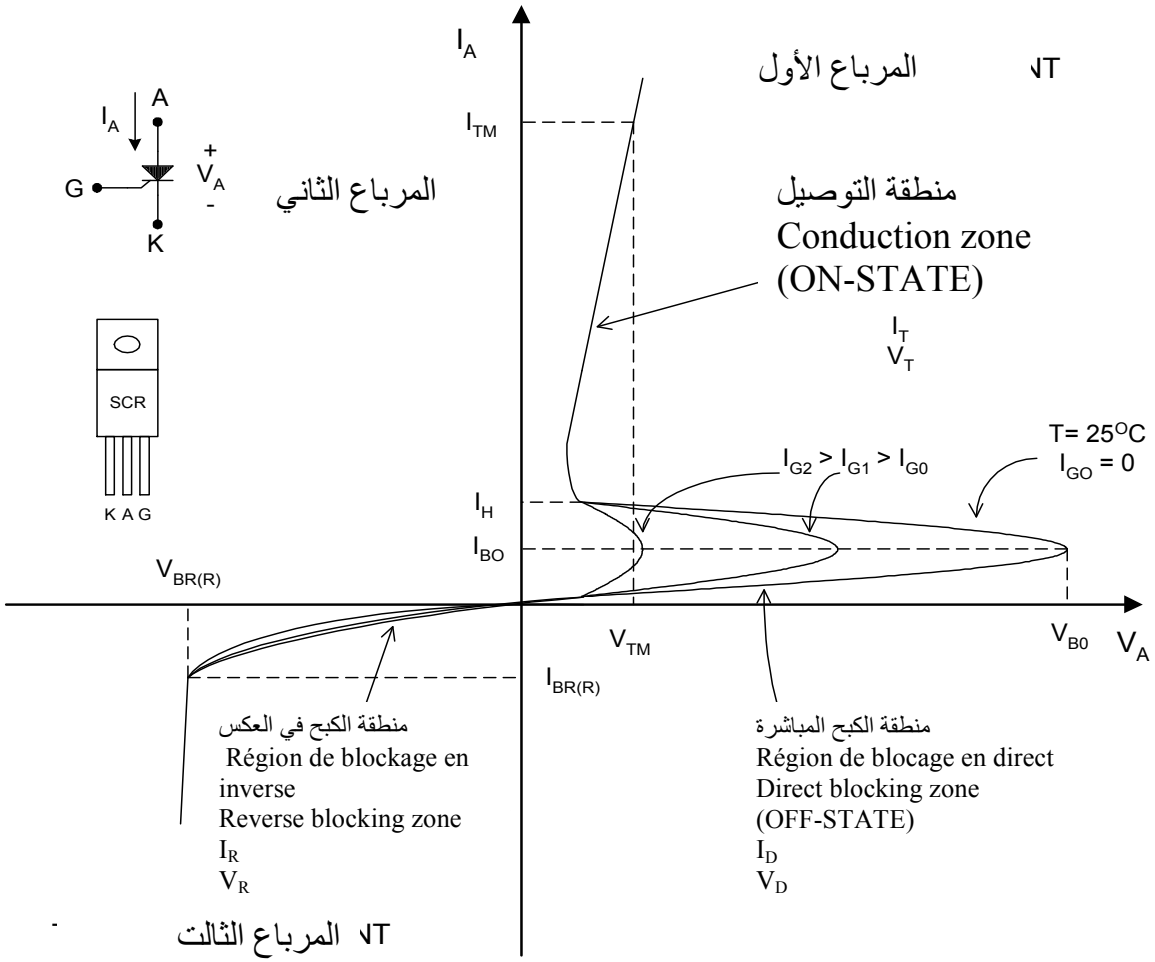
1.11 مبيان الخصائص I_A-U_A و رموز للترستور

الشكل 6 يحتوي على الرمز و مبيان I_A-U_A الخاص ب C106.

بتيار زناد منعدم، الترستور يمكنه منع توتر جد مرتفع مقارنتا مع U_{BO}. لكن التشغيل بالتوتر يحدث و بالتالي فانه يمر إلى حالة التمرير (عكس الكبح)، تياره يرتفع و توتره يصغر لأنه يصبح مشبع. إذا صغر I_A مقارنتا مع I_H فان الترستور يعود إلى الكبح.

بعكس الترستور فبإمكانه منع توتر مرتفع مقارنتا مع $U_{(BR)}R$ ليدخل الانهيار في كديود مقوم.

من مرادفات الترستور: المقوم المتحكم به، لان كلما كبر تيار الزناد صغر U_{BO} إلى أن ينعدم. بهذه الطريقة يتم فعل التشغيل بواسطة الزناد.



الشكل 6 :مبيان ل I_A-U_A الخاص ب C106

خاصيات C106:

منطقة الكبح بالعكس

تيار الانهيار:$I_{(BR)}R > 1mA$
توتر الانهيار: $U_{(BR)}R$ اكبر من:
100V في المركب C106 A
200V في المركب C106 B
300V في المركب C106 C
400V في المركب C106 D

منطقة التوصيل

التيار المباشر القصوى: $I_{TM}=5amp$
التوتر المباشر القصوى: $U_{TM}=1.7V$
تيار الدعم $I_H=5mA$ الأقصى

التشغيل

تيار التشغيل: $I_{GT}=200\mu A$ الأقصى.
توتر التشغيل: $U_{GT}=1V$ الأقصى.

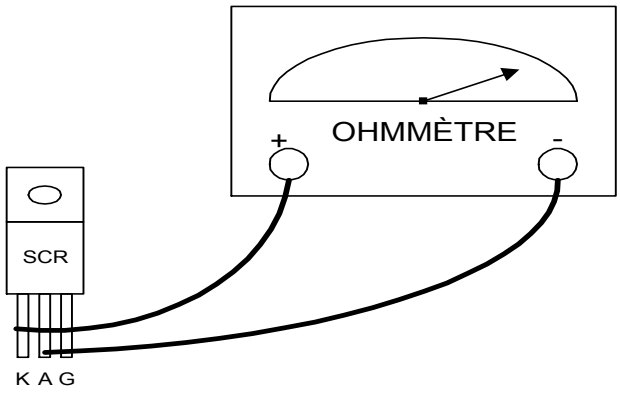
منطقة الكبح المباشرة

تيار الرجوع: $I_Bo > 400\mu A$
توتر الرجوع U_Bo اكبر من:
100V في المركب C106 A
200V في المركب C106 B
300V في المركب C106 C
400V في المركب C106 D
توتر الرجوع : Breakover Voltage

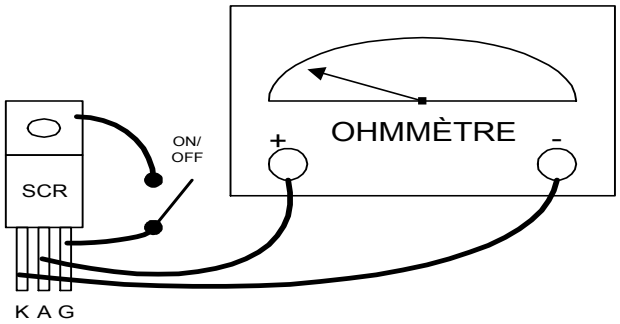
1.12 كشف الترستور بواسطة الأوم-متر

انه لمن الممكن كشف ترستور القدرة الضعيفة بواسطة الأوم متر، و هذا يتطلب للتشغيل أن يكون I_{GT} بمقدار مئات الميكروأمبير على الأكثر. الشكل أسفله a يبن أن المقاومة بين الأنود و الكاتود لترستور مكبوح أي متوقف كبيرة جدا، في حين في الشكل الذي أسفله b نقوم بدارة قصيرة بين الزناد و الأنود، إذا كان الأمبيرمتر قادر على إعطاء $I_G > I_{GT}$ و $U_G > U_{GT}$، فان الترستور سيشتغل و تصبح المقاومة بين الأنود و الكاتود صغيرة جدا. في حالة عزل الزناد فان الترستور يبقى مشتغلا إذا كان التيار I_A المولد من طرف الأمبيرمتر اكبر من تيار الدعم I_H. في حالة العكس فانه يعود إلى حالة الكبح.

نستنتج أن هذا الاختبار ليس دائما مفيد (في حالة عدم اشتغاله). ينصح في هذه الحالة باستعمال الترستور دارة بسيطة قبل الإستنتاج



a)



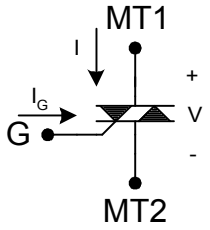
b)

فحص الترستور

2. الثْرِياك TRIAC

2.1الرمز

إذا أردت أن تتحكم في تيار متناوب و ذلك بان تتحكم في النوبة الموجبة و السالبة فيجب أن تستعمل الثْرِياك



رمز الترياك

2.2طرق التشغيل

الثْرِياك يمكن تشغيله بأربعة طرق:

- المرباع الأول : MT2 موجب بالنسبة ل MT1 و I_G موجب.
- المرباع الثاني : MT2 موجب بالنسبة ل MT1 و I_G سالب.
- المرباع الثالث : MT2 سالب بالنسبة ل MT1 و I_G موجب.

- المرباع الرابع : MT2 سالب بالنسبة ل MT1 و I_G سالب.

2.3عائلة الترستور

الترستورات المتحكمة في نقل الطاقة في مستقبِل هم: SCR، LASCR، LAS، amplifying gate SCR، GCS و الترياك TRIAC

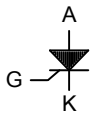
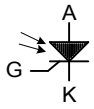
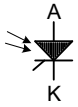
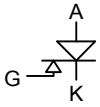
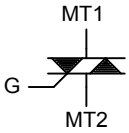
الجدول 1 أسفله يفصل بعض الأنواع. نلاحظ أن يمكن أن يتحكم به بإشارة ضوئية على إشارة ضوئية على عكس LAS الذي لا يشتغل إلا بإشارة ضوئية (لاحظ الرمزين جيدا) .أما بخصوص amplifying gate SCR، فهو يحتوي على ترستور داخلي ضعيف القدرة إلى جانب الترستور الأساسي و ذلك لخلق إشارة في الزناد قوية وسريعة جدا حتى يتسني للترستور الكلي ان يتقبل ارتفاع سريع لتيار الأنود.

أل GCS هو نوع الترستور قادر على أن يكبح بواسطة إشارة سلبية في الزناد. و ذلك لإخراج تيار من الزناد. الطريقة سهلة لكن صعبة في حالات القدرات المرتفعة عموما.

على عكس الترستور ذات الاتجاهات الواحدة لأنها تمنع التوترات المعكوسة، TRIAC هو ترستور ذو اتجاهين يمكن أن يشتغل في المنحى المباشر أو العكسي. TRIAC هو المركب المناسب للتحكم بالقدرة خلال النوبة الموجبة و السالب. التردد الذي يستعمل فيه هو 400Hz (تردد الإشارة الداخلة مثلا 50Hz 220V) و توجد ترستورات قادرة علي أن تعمل حتى 30kHz.

2.4ترستور القدرة

الجدول 1 ترستورات القدرة

الاسم	الرمز
SCR (Silicon Controled Rectifier) Triode thyristor Reverse blocking	
LASCR (Light Activated SCR) Triode thyristor Reverse blocking	
LAS (Light Activated Switch) Diode thyristor Reverse blocking	
Amplifying Gate SCR Reverse blocking	
GCS (Gate Controled Switch) GTO (Gate Turn off Switch) او Reverse blocking	
TRIAC Bidirectional Triode thyristor	

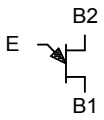
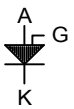
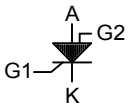
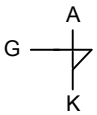
2.5الترستورات ضعيفة القدرة و ذات الاشتغال

الجدول 2 يفصل مُركبات من عائلة الترستور التي تستعمل لتشغيل ترستورات القدرة. ما عدا TUJ، TUJC و DIAC NPN لأنهم ليسو حقا ترستورات و لصنعهم من التركيب PNPN. مع تشابه الخاصيات I-U مع الترستور.

هذه اختصارات لترستورات التشغيل:

- Shockley diode : ترستور بدون زناد الذي يشتغل بتوتر الانهيار فقط.
- PUT : ترستور ذو زناد انودي ، مع مقاومتان خارجيتان يتصرف ك TUJ.
- LAPUT : PUT اوبطوالكترونيك optoélectronic.
- SCS : ترستور ذو قدرة ضعيفة ذو زنادين.
- LASCS : ترستور اوبطوالكترونيك optoélectronic.
- SUS: ترستور ذو زناد انودي حيت أن توتر يُنقص و يُعدل بدايود زينر zener diode.
- DIAC PNPN : ترياك بدون زناد حيت انه يشتغل بتوتر الانهيار.

الجدول 2

الإسم	الرمز
TUJ (Transistor Unijonction)	
TUJC Transistor Unijonction Complémentaire	
Diode Shockley	
PUT Programmable Unijonction Transistor	
SCS Silicon Controled Switch	
SUS Silicon Unilateral Switch	
DIAC (NPN type) ST2	

الجدول 2

الإسم	الرمز
DIAC Bidirectional Diode Thyristor	

3. خاصيات الأنود

3.1تقديم

مراحل الاستبدال commutation(أي المرور من المنع إلى التوصيل) أربعة:

1- بداية التشغيل (turn-on).

2- حالة التوصيل (on state).

3- بداية الكبح (turn-off).

4- حالة الكبح (off state).

في حالة on state، أهم الخصائص المعتبرة هي التيار القصوى، تيار الدعم I_H و الطاقة الضائعة.

في حالة off state، يجب الأخذ بعين الاعتبار التوتر القصوى الذي يمكن تحمله في المنحى الموجب، انه هو توتر الرجوع « Breakover Voltage » U_{BO}. و في المنحى السالب فهو توتر الانهيار(R) U_{BR}

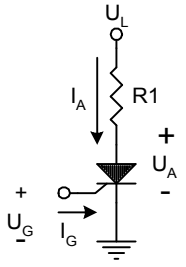
Ton (turn-on-time) هو زمن الإغلاق

Toff (turn-off-time) هو زمن الإنفتاح

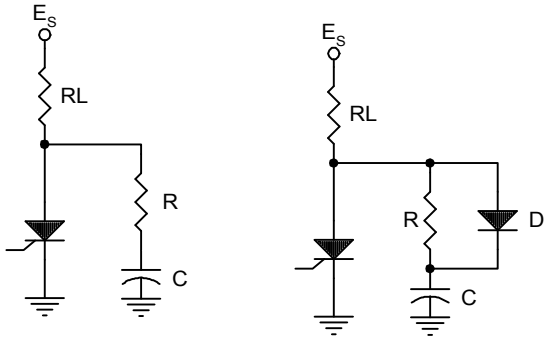
3.2تشغيل بواسطة du/dt

لاحظ الشكل أسفله.

عندما يكون التوتر U_L مطبق، الترستور يجب أن يبقى مكبوحا، فإذا زاد توتر الأنود du/dt على قيمة قصوى فان الترستور يشتغل بسبب تيارات المكثفات القاعدة-المجمع.



لتجنب هذا النوع من التشغيل او الظواهر الغير المرغوب فيها، يجب حد du/dt بدارة RC، انظر أسفل

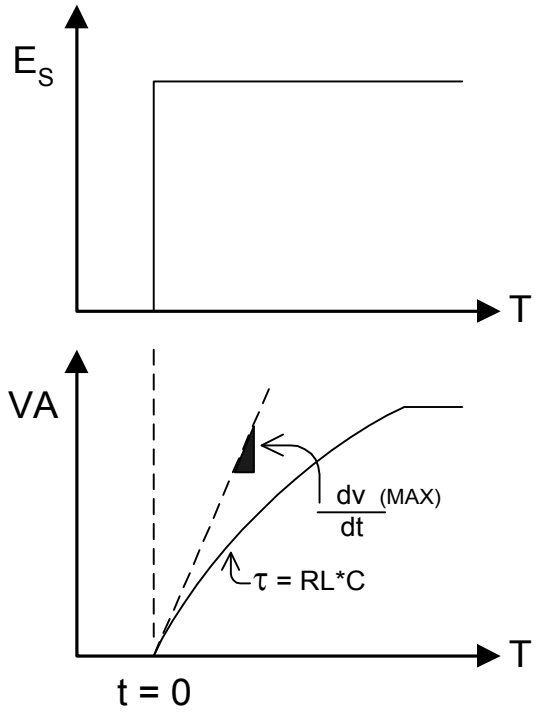


دارة الوقاية من **du/dt**

المقاومة R المركبة على التوالي المكثف C مع تحد من تيار الأنود عند التشغيل. هذا التيار متكون تيار RC و تيار تفريغ C الذي يكون جد مرتفع في R. قيمة R ما بين 10Ω و 100Ω.

اذا كانت R اكبر من R_L فان وضع دايود على التوازي واجب حتى يكون توتر الأنود هو نفسه توتر المكثف عندما يكبر Es.

لتحديد C، نعتبر أن موجة مربعة كاملة (ما الكمال إلا لله) كالشكل أسفله. ميل الموجة الأسية (expon.) للتوتر U_A في قيمته القصوى عند t=0. و لكي لا يشتغل الترستور ب dv/dt يجب أن يكون dv/dt (قصويا) محددا ب C و اصغر من dv/dt القصوية المحددة من طرف المصنع.



تصرف دارة الوقاية من dv/dt

$$\frac{du}{\mathrm{dt}}(\text{القصوى}) \le \frac{\mathrm{du}}{\mathrm{dt}}(\text{المحددة من طرف المصنع}) \qquad \textbf{(10)}$$

حيث أن (القصوى) du/dt متناسبة مع تيار الأصل ل C عند t=0، حسب:

$$I(initial) = C\frac{du}{dt}(\max.) \qquad \textbf{(11)}$$

بتركيب المعادلتين (10) و (11) نحصل على:

$$\frac{I(in.)}{C} = \frac{du}{dt}(\max.) \le \frac{du}{dt}(crit.)$$

نستنتج منه : $$C \ge \frac{I(in.)}{\frac{du}{dt}(crit.)} \qquad \textbf{(12)}$$

$$C \ge \frac{Es}{R_L \frac{du}{dt}(crit.)} \qquad \textbf{(13)}$$

دارة الوقاية تمكن كذلك من توفير تيار في الأنود اكبر من تيار الدعم I_H عندما يكون المستقبلinductif

المصنع ينصح بعدم جعل الترستور حساس و ذلك بإضافة مقاومة الزناد R_{GK}. لكي يتحمل dv/dt كبيرة جدا.

في المركب C106 و مع R_{GK}=1k، فان du/dt تكون قصوية محدد من طرف المصنع بحوالي 8V/µs.

3.3ظاهرة التدمير بواسطة di/dt

عند كل بداية تشغيل تضيع قدرة لحظية، هذه القدرة مهملة أمام القدرة الضائعة أتناء التوصيل (on state). إذا كان التيار شديدا جدا قد يتدمر (destruction) الترستور بتأثير di/dt.

بسبب بنيته الفيزيائية و خصوصا عرض الوصلة (junction) زناد-كاتود (gate-cathode)، و هذه الأخيرة تتجه نحو استقطاب غير موحد مع تطبيق تيار في الزناد. الشحن المحملة عن طريق I_G تعاني كثيرا للوصول الوصلة التي بدورها تبعد عن الكترود الزناد بسبب المقاومة المجانبة لمنطقة الزناد.

إذا كان هناك تيار في الانود قبل أن تستقطب الوصلة بتوحد (مع I_G) فهو يتجمع في الكريستال. إذا كان تزايد هذا التيار di/dt يصل إلى قيمة غير مرغوبة، فان الحرارة المحلية الناتجة قادرة على تدمير الترستور، حتى لو كانت هناك حسابات للقدرات المتوسطة و القدرات الذروة موفرة للحماية.

هناك حلان للابتكار ضد هذا المشكل:

الأولى هي بان يتم توفير إشارات قوية و سريعة إلى الزناد مع الحفاظ على مقدور طاقة داخلي في الزناد، بهذه الطريقة يتم التقليل من وقت الاستقطاب الموحد.

إن مُركبات التشغيل هي القادرة على توفير مثل هذا، و بالخصوص PUT.

يوجد كذلك Amplifying Gate SCR خصيصا للتطبيقات حيت di/dt كبيرة، هذا النوع من الترستور ذو قدرة عالية يحتوي ترستور على مرافق داخلي يساعده في توفير إشارة جد قوية.

الثانية هي بان يتم ربط مشبعة على التوالي مع المُستقبِل لمنع التيار لحظيا خلال بداية استقطاب موحد لوصلة الزناد

مثلا في المركب C106 فان di/dt يجب ان يبقى اقل من 50A/µs.

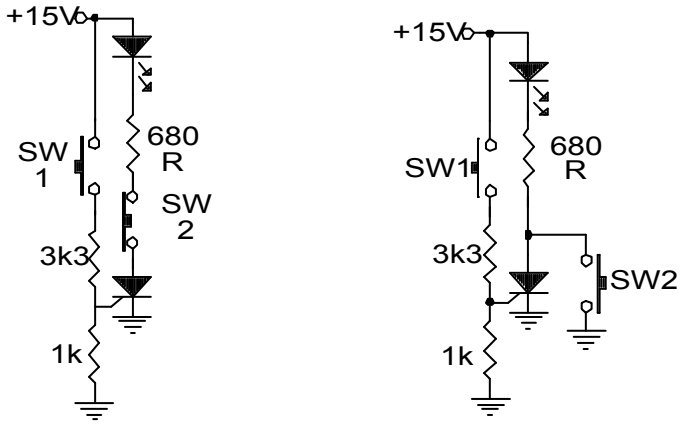
3.4طرق الكبح

هناك طريقتين للكبح :الاستبدال (commutation) بواسطة قاطع تيار و الاستبدال المفروض(forced)، هاتين الطريقتين تعتمدان على جعل تيار الأنود اصغر من تيار الدعم I_H.

الاستبدال بواسطة قاطع تيار، الشكل أسفله. في التركيبين ندعم SW1 مغلق خلال وقت اكبر من Ton للترستور، هذا الأخير يشتغل ويضيء DEL. لكبحه لا يكفي إلا فتح SW2 خلال وقت اكبر من Toff للترستور.

المُستقبِل لا تصله التغذية عند فتح SW2 في الدارة على اليسار.

المُستقبِل لا تصله التغذية عند ترك (فهو يفتح) SW2 في الدارة على اليمين.



الكبح بواسطة قاطع تيار

لاحظ انه عند فتح SW2 يحصل في الدارتين dv/dt.

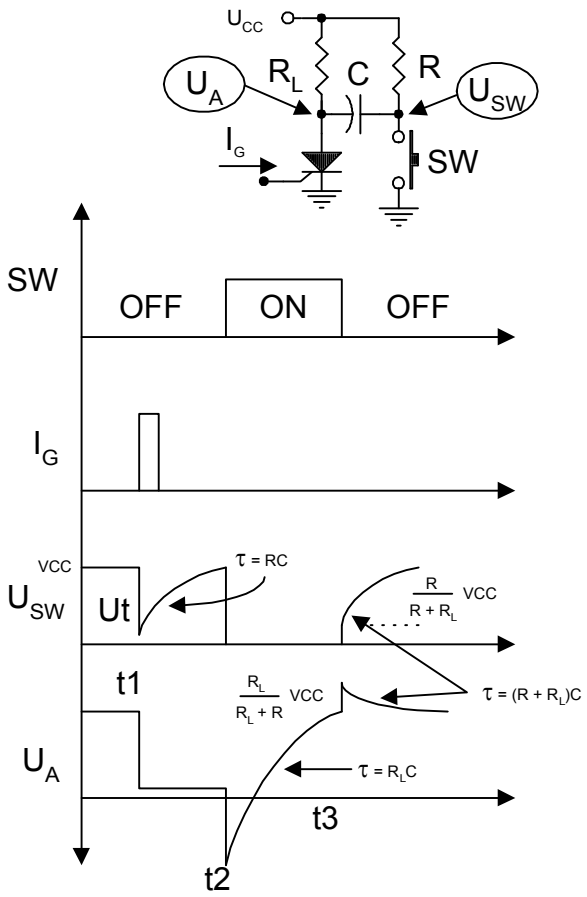
الاستبدال المفروض، هناك طرق عديدة نذكر منها الاستبدال المفروض بمكثف و الاستبدال المفروض بمولد متناوب.

الشكل أسفله يعطي دارة كبح بواسطة مكثف.

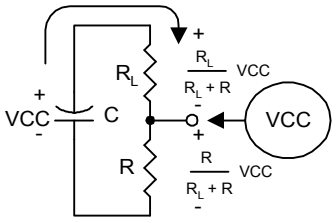
في الأول الترستور مكبوح و المكثف مفرغ. عند إشغال تيار الزناد للترستور عند اللحظة t1، فان توتر الأنود ينقص من Ucc إلى Ut و يشحن المكثف عن طريق R. بعد 5τ (τ ثابتة الزمن)،التوتر بين قطبي المكثف يصبح Ucc-Ut. عند t2، نضغط SW لكبح الترستور.

شكل الموجة Usw يمر من Ucc إلى 0. المكثف يُجْبِر توتر الأنود على النقصان من Ucc إلى (Ucc-Ut).

من هذه اللحظة المكثف يشحن بالعكس عن طريق R_L إلى قيمة Ucc. و عند ترك SW عند t3، توتر الأنود يصبح اكبر من التغذية لان C يفرغ شحنته عن طريق R_L+R لاحظ الشكل أسفل (أسفل).



الكبح بطريقة الاستبدال المفروضة بواسطة مكثف



دارة التفريغ عند t3.

لكبح أكيد يجب أن يدعم C جهد الأنود بان يبقى سلبيا خلال زمن Tc على الأقل يساوي Toff المحدد من طرف المصنع. يحسب الزمن الخاص لكي يصل المكثف قيمة Uc عندما يشحن من Ei (توتر أولي) إلى Ef (توتر نهائي) كالتالي:

$$t = \tau \ln\left(\frac{Ef - Ei}{Ef - Uc}\right) \qquad \textbf{(14)}$$

بتطبيق هذه العلاقة في دارتنا، شرط الاستبدال (الأكيد) في الترستور يكتب كالتالي:

$$Tc = R_L C \ln\left(\frac{Ucc - \left[-(Ucc - Ut)\right]}{Ucc - 0}\right) \geq Toff$$

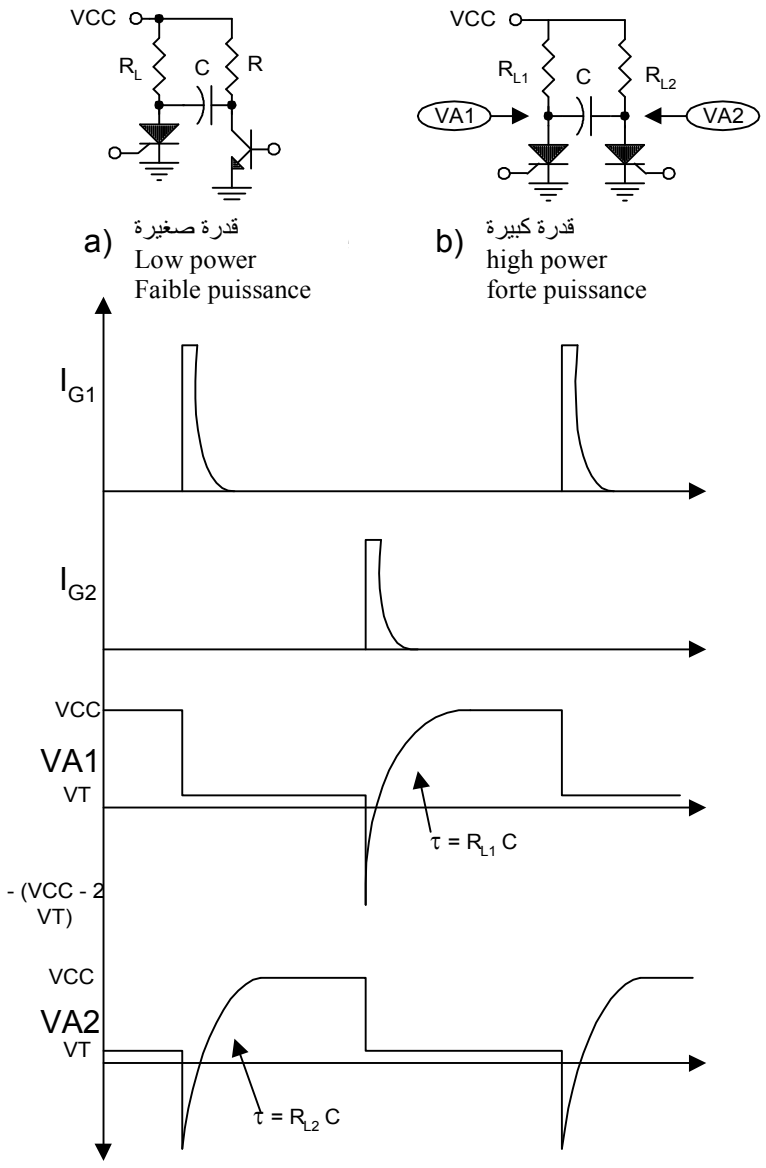
$$R_L C \ln\left(\frac{2Ucc - Ut}{Ucc}\right) \geq Toff$$

$$C \geq \frac{Toff}{R_L \ln\left(\frac{2Ucc - Ut}{Ucc}\right)} \qquad \textbf{(15)}$$

في اغلب الحالات، Ut مهمل و المعادلة **(15)** تصبح:

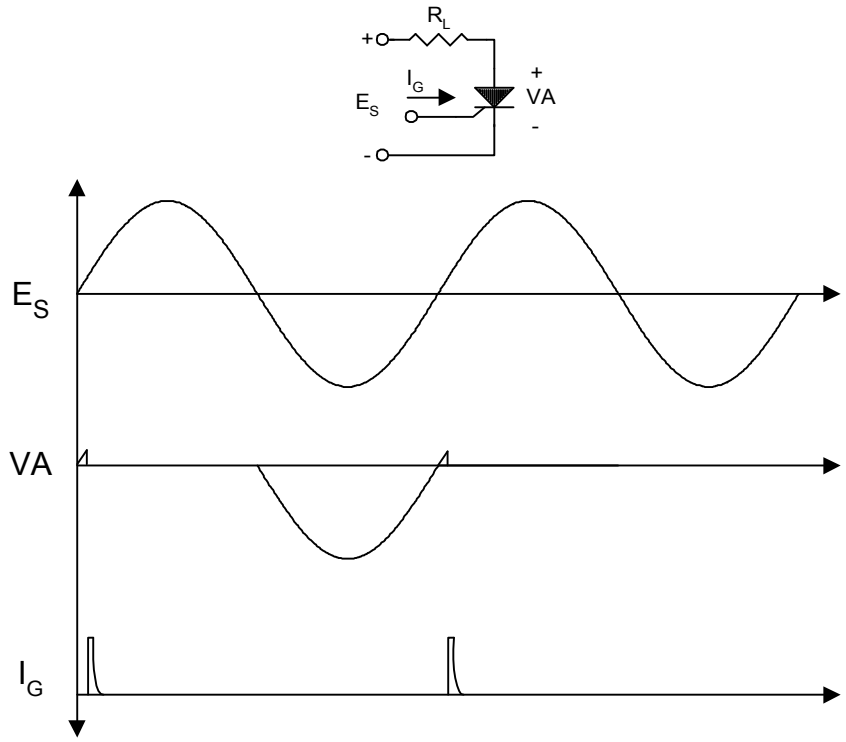
$$C \geq \frac{Toff}{R_L \ln 2} \qquad \textbf{(16)}$$

الشكل أسفله يوضح، إن القاطع SW يمكن تعويضه بقاطع الكتروني كالترانزستور و الترستور. شكل الموجة (الدارة على اليسار) مشابه في الدارة في الشكل أعلاه.



الدارة العملية للاستبدال المفروض بواسطة مكثف

تقنية الاستبدال المفروض بمولد متناوب لا يتطلب دارة الكبح، كما يوضحه شكل الموجات في الشكل أسفله، عند كل نوبة سالبة، الترستور يكبح ، إذا أردنا تشغيل هذا الأخير يجب استعمال إحدى طرق التشغيل المدروسة في المؤلف و ذلك خلال النوبة الموجبة.



الاستبدال بمولد متناوب

التأثير: **<u>الانهيار</u>** ، يمكن أن يقع في داخل شبه-موصل أو عازل صلب، سائل أو في الحلة الغازية عندما يكون المجال الكهربائي داخل المادة كافٍ لتسريع الالكترونات إلى أن تصطدم بالذرات،فتتحرر الكترونات أخرى : عدد الالكترونات الحرة يزداد بسرعة كبيرة لأن الالكترونات الحرة الجديدة تحرر الكترونات أخرى جديدة، في ظاهرة مشابهة لانهيار جليدي. هذه الظاهرة تستعمل في عدة مركبات الكترونية مثل دايود زينر ،photodiode ، و ترنزيستور ذو تاثير الانهيار، و حتى الأنابيب الغازية.

*:substitutions appropriées الكلمة فرنسية وهي اخر كلمة تمت ترجمتها من طرف رجاء الأزعر فشكر و حب خالص لها من اعماق القلب.