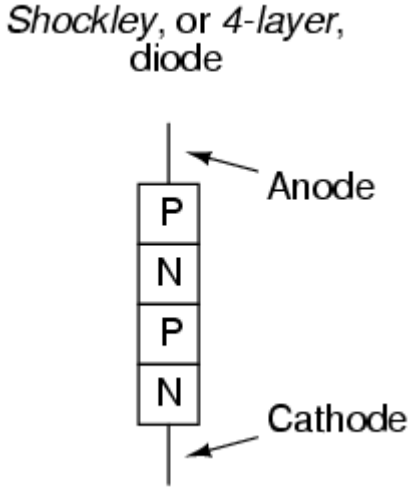
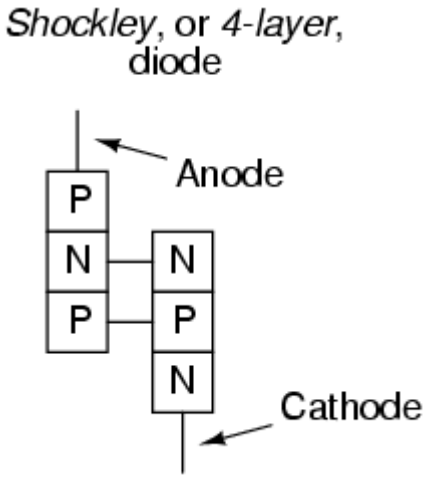
الثايرستور

بداية إكتشافنا للثايرستور كانت بابتكار موحد مكون من أربع طبقات PNPN diode أو كما يطلق عليه Shockley diode نسبة لإسم مخترعه "وليم شوكلى William Shockley" - وهو مختلف تماما عن موحد شوتكى Schottky diode وهو الموحد المكون من طبقتين والمعروف بسرعة العالية عند إستخدامه كمفتاح -

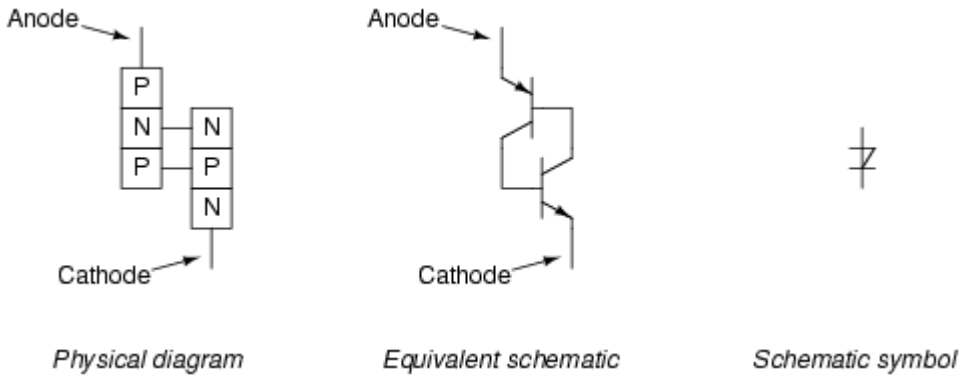
وشكل موحد الشوكلى كما نراه فى معظم المراجع يظهر كساندويتش من أربع طبقات P-N-P-N



وهذا الشكل للأسف لا يمكن للمشاهد من خلاله تصور ميكانيكية العمل لهذا الموحد لذا فإنه يمكننا تخيله على الشكل التالى :

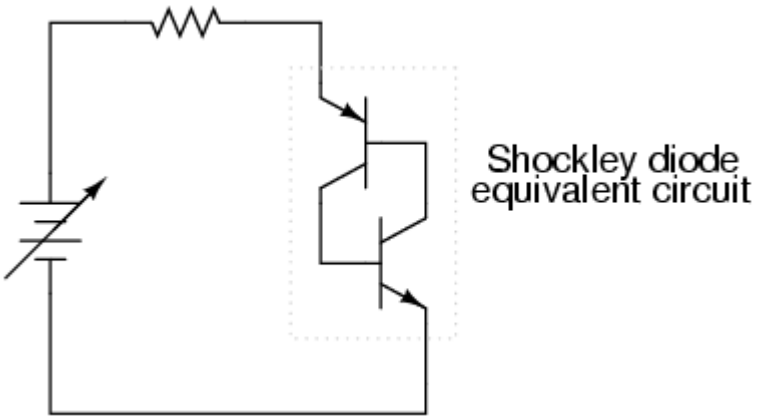


والشكل السابق يظهر لنا بأن هذا الموحد الشوكلى يتكون ضمنيا من ترانزستورات two bipolar transistors أحدهما من نوع NPN والأخر من نوع PNP . وبذلك يمكن تبسيط الرسم إلى :



Physical diagram *Equivalent schematic* *Schematic symbol*

والأن دعنا نصل هذا الشوكلى بمصد تغذية مستمر



بالطبع . عندما لا يكون هناك جهد يغذى الدارة فإنه لا وجود للتيار فيها

وحتى عندما نبدأ بزيادة الجهد فإن التيار لن يمر بالدرة لأن الترانزستوران غير قادران على العمل (كلاهما فى حالة الفطع cutoff mode)

وطبعا فإن الترانزستور يمكنه الخروج من حالة القطع تلك والعمل كمفتاح مغلق عندما يمر تيارا مناسبا فى وصلة القاعدة.

وهذا لم يحدث فى دارتنا هذه لأن الترانزستور العلوى تغذى قاعدته من الترانزستور السفلى والترانزستور السفلى تغذى قاعدته من الترانزستور العلوى.

أى لن يعمل أى من الترانزستوران دون أن يعمل الآخر قبلا !!!!!! ولكن كيف يعمل إذا هذا الموحد ؟

الإجابة تكمن فى معرفة الفرق بين عمل الترانزستور الحقيقى (المباع فى الأسواق) والترانزستور المثالى (المصمم على الورق). فالترانستور المثالى لن يمرر تيارا بين الوصلتين باعث-مجمع دون وجود تيارا على قاعدته.

أما الترانزستور الحقيقى تنهار وصلة الباعث-المجمع عند زيادة فرق الجهد عليها عن حد معين.

لذا فإن الشوكلى دايود (بتصوره كترانزستوران) سيعمل إذا زاد فرق الجهد الموضوع بين مصعده Anode ومهبطه Cathode حتى ينهار أحد الترانزستوران.

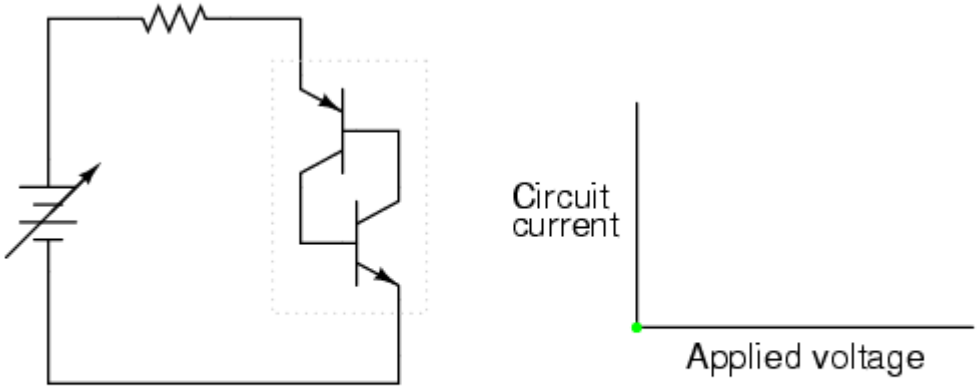
وعندما يحدث ذلك (إنهيار أحد الترانزستوران موصلا التيار بين وصلتى المجمع-الباعث) فإن القاعدة للترانزستور الأخر ستغذى بتيار مناسب سيكفى لعمله كمفتاح مغلق.

وهكذا دواليك .. سيظل كلا من الترانزستوران يدفع الأخر للعمل موفرا له تيار القاعدة المناسب.

والسؤال الأن : كيف يمكننا إيقافهما عن العمل مرة أخرى ؟ (جعلهما فى الحالة off)

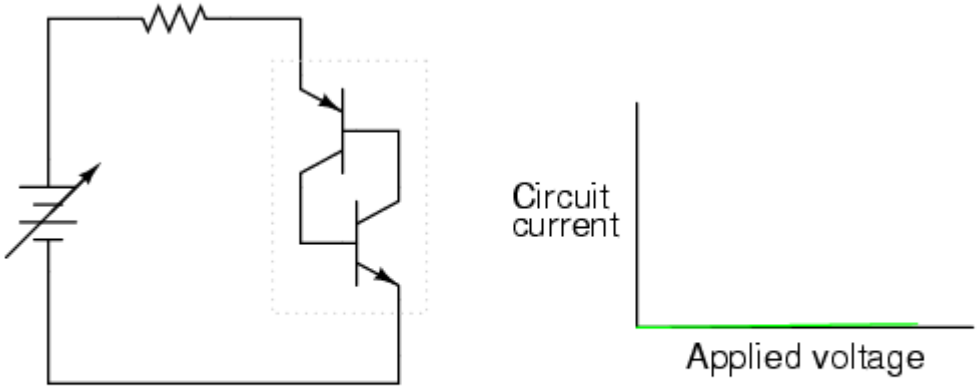
وللإجابة على هذا السؤال دعونا نرسم العلاقة بين الجهد V والتيار I المارات خلال موحد الشوكلى عند تغيير جهد المصدر.

1- عندما لا يوجد دخل سيكون كلا من الجهد والتيار = 0



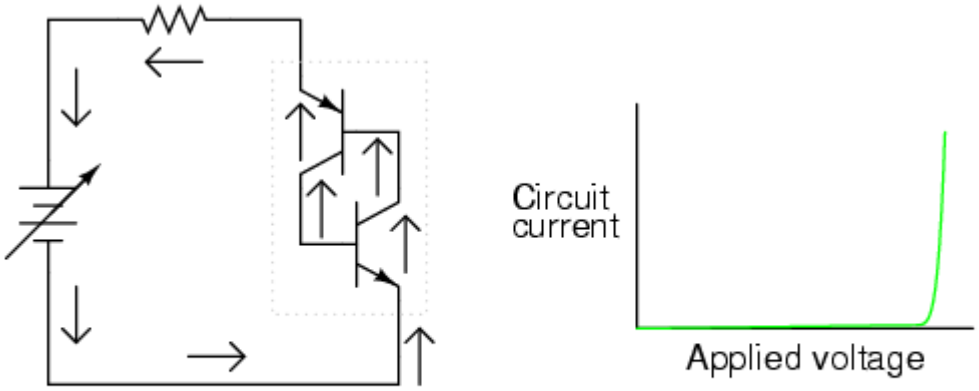
Zero applied voltage; zero current

2- بزيادة الجهد من القيمة (صفر) حتى ما قبل جهد الإنهيار سيظل التيار المار فى الدارة مساويا للصفر تقريبا .



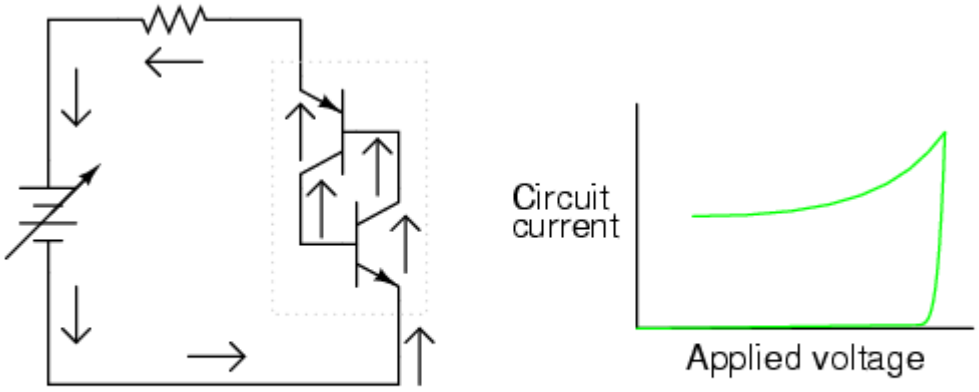
Some voltage applied, still no appreciable current

3- عند زيادة الجهد إلى جهد الإنهيار سيبدأ الترازستوران بالعمل ليزيد التيار المار فى الدارة إلى حده الأقصى (حيث أن الشوكلى فى يمثل مفتاح مغلق ON).



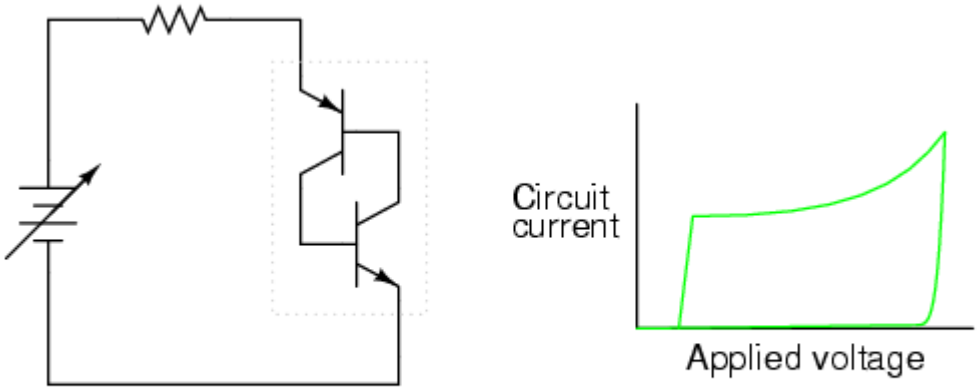
Transistors now fully conducting

ويظل كلا من الترانزستوران يدفع الأخر للعمل بتغذية قاعدته بتيار مناسب (لاحظ التغذية العكسية الموجبة فى هذه الحالة) حتى ولو تم إنقاص جهد التغذية



Current maintained even when voltage is reduced

4- ولكن : لو أصبح جهد التغذية صغيرا جدا بحيث لن يستطع التيار المأخوذ منه (والمار فى الوصلة باعث-مجمع فى أحد الترانزستوران) تغذية القاعدة للترانزستور الأخر . فإن الموحد شوكلى سيترك حالة الغلق ON إلى حالى الفتح OFF .



If the voltage drops too low, both transistors shut off

ولعلك ترى هذا المنحنى المغلق لأول مرة والذى يسمى منحنى ال hysteretic حيث يزيد أحد المتغيرين ويقل مع زيادة الأخر ويكون طريق العودة مختلفا عن طريق الذهاب.

ومن الشرح السابق يتضح لنا بأن موحد الشوكلى يمثل مفتاح له حالتين فقط وهما الفتح OFF والغلق ON وهكذا كل عائلة الثايرستورات .

ومن المصطلحات التى ستقابلك كثيرا عندما ستقرأ عن الشوكلى أو الثايرستور :

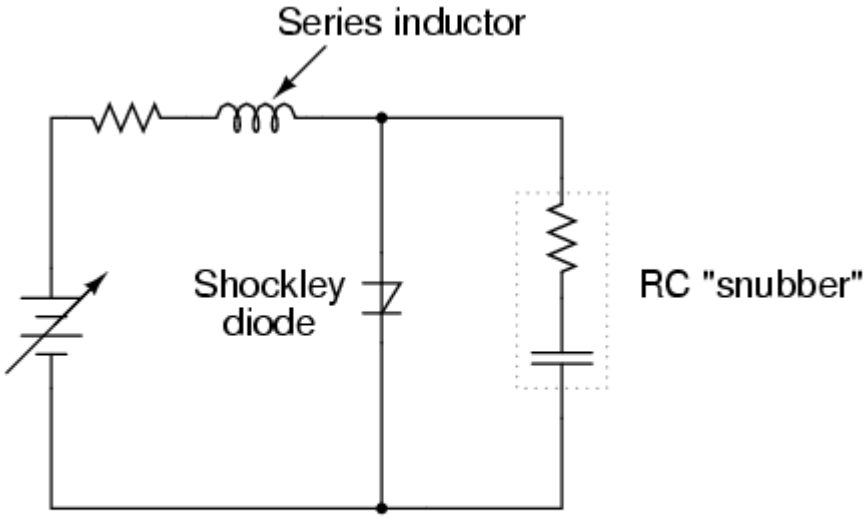
1- "latched" أو حالة الإمساك وهذه الكلمة تصف حالة الغلق ON فى الشوكلى خاصة أو فى الثايرستورات عامة وتعنى بأن الشوكلى سيظل فى حالة الغلق مادمنا وضعناه فيها.

2- "Firing" وهى كلمة تصف بداية الحالة "Latch" -حالة الإغلاق- والتى ستتحقق عندما يزيد الجهد المسلط على الشوكلى عن جهد الإنهيار للترانزستور.

ومن الجدير بالإشارة أيضا بأنه توجد طريقة أخرى لجعل الشوكلى يبدأ فى حالة الإغلاق ON وذلك بزيادة الجهد عليه بصورة مفاجئة فى زمن قصير وذلك بسبب وجود مكثف فى الدائرة المكافئة للشوكلى (يطلق عليه المكثف الطفيلى) والذى يمكنه توفير تيار كافى عند التفريغ لعمل الشوكلى .

وهذه الطريقة تعتبر غير مرغوب فيها لأنها تسبب عمل الشوكلى عند حدوث أى علو غير متوقع فى الجهد وخاصة عند فتح وغلق مصد التغذية فى الدارة .

ولذا فإننا يمكننا تجنب مساوىء هذه الخاصية بفلترة الترددات العالية (الناتجة عن التغير المفاجىء للجهد) بالمرشح الموضح فى الشكل التالى :



Both the series inductor and the parallel resistor-capacitor "snubber" circuit help minimize the Shockley diode's exposure to excessively rising voltages.

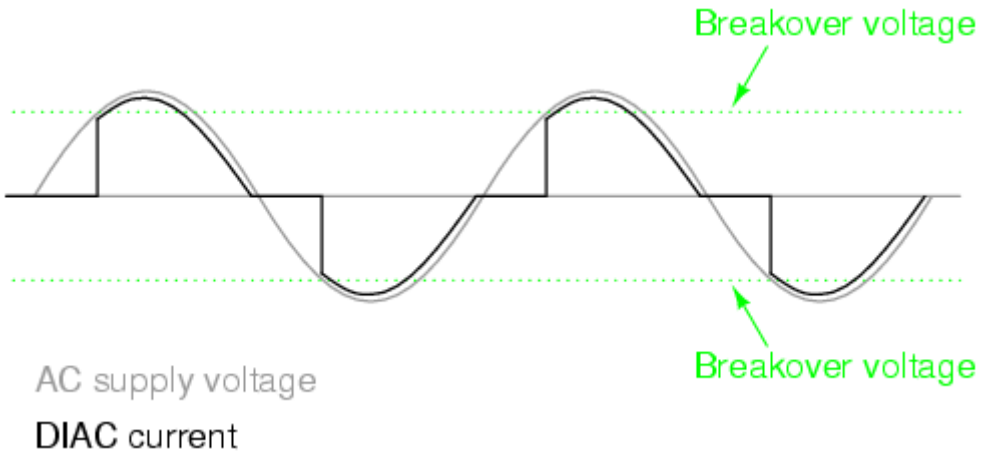
ومن فكرة الشوكلى ظهر عنصر جديد يسمى الدياك DIAC. وظهر الدياك للحاجة لمفتاح مزدوج الإتجاه Bidirectional حيث أن الشوكلى يعتبر مفتاح وحيد الإتجاه Unidirectional .

والدياك عبارة عن وحدتين من الشوكلى متصلين على التوازى وباتجاهين مختلفين :

DIAC equivalent circuit *DIAC schematic symbol*

والدياك يعمل تماما مثل الشوكلى عندما يعمل فى دوائر التيار المستمر DC . أما فى حالة التيار المتردد AC فإن الأمر يختلف حيث أن التيار المتردد يغير إتجاهه كل نصف دورة . ولن يظل الدياك فى حالة الLatch أكثر من نصف دورة للتيار المتردد .

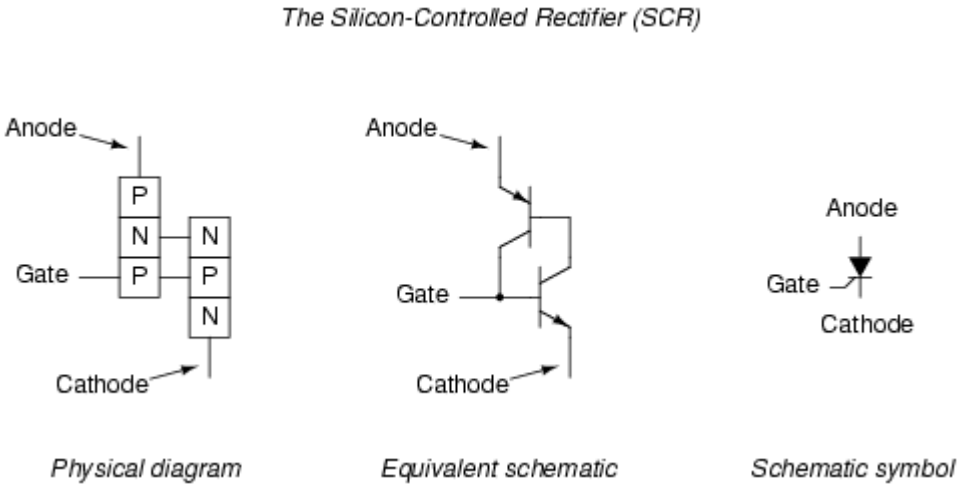
وإذا كان الدياك Latched (مفتاح مغلق) فإنه سيظل ذلك فقط عندما يستطيع الجهد الموجود عليه توفير التيار المناسب ليمر خلاله . وعندما يعكس التيار إتجاهه فإن أحد الموحدين (الشوكلى) سيفتح والأخر سيغلق عند توفر الشروط المناسبة ليكون الخرج فى الصورة التالية :



ملاحظة : لن تجد الدياك وحيدا فى الدوائر العملية ولكنه سيكون مقترنا بأحد الثيروسترات

مقوم التحكم السليكونى Silicon-Controlled Rectifier The أو SCR :

وهو الشكل الذى يظهر به الشوكلى فى معظم الدارات العملية حيث تم إضافة طرف ثالث له يسمى gate



ولو ترك هذا الطرف الثالث دون توصيله فى الدارة disconnected فإن العنصر SCR يعمل كموحد شوكلى (كما سبق شرحه) .

ولكن الطرف المضاف Gate على قاعدة أحد الترانزستورين يمكن إستخدامه للمساعدة فى بدأ حالة الغلق Latching وذلك بوضع جهد صغير بينه وبين الكاثود مما يوفر تيارا لقاعدة الترانزستور السفلى يدفعه للعمل كمفتاح مغلق ليغذى قاعدة الترانزستور العلوى وتبدأ حلقة التشغيل .

وهذا الفعل (وضع جهد صغير على الgate لدفع الثايرستور لحالة الLatch) يسمى triggering أو Firing

وتلك الطريقة هى الغالب إستعمالها فى الدارات العملية حيث يتم إختيار الSCrs بجهد إنهيار كبير جدا لا يمكن توفيره من مصدر التغذية فى الدارة وبذلك لا يمكن دفعه للعمل فى حالة ON إلا عن طريق الطرف الثالث Gate .

أما عن إيقاف الثايرستور SCR عن العمل فإن لذلك عدة طرق منها :

1- عمل دارة قطع Circuit Short بين طرفى الكاثود والبوابة Gate

2- أو بإدخال نبضة ذات جهد سالب إلى البوابة reverse-triggering (بالمقارنة بجهد الكاثود)

ولعلك تتسائل كيف يقف الثايرستور عن العمل بالطريقتين السابقتين ؟ ولماذا لا يدفع أحد الترانزستوران (الذى فى حالة ON) الترانزستور الأخر الذى تم إيقافه عن العمل بعد أن نزيل النبضة السالبة أو حالة القطع ؟

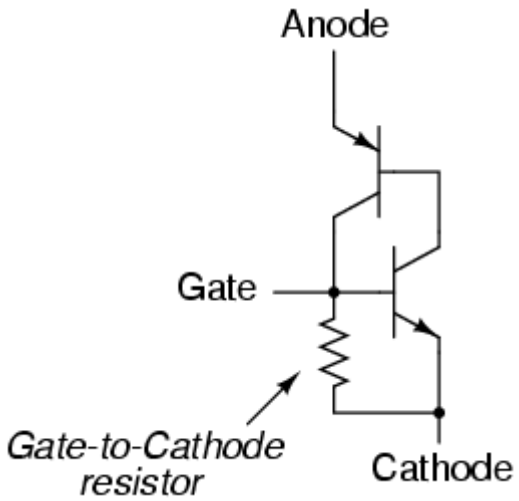
وذلك صحيح إذا كان الترانزستوران متشابهان تماما . ولكن الحقيقة أنه تم صنع ترانزستوران مختلفان فى معمل التكبير B وهذا المعامل هو الذى يحدد مدى تأثير تيار القاعدة فى حالة الترانزستور .

فإذا تم إختيار B للترانزستور الأسفل والذى هو من نوع NPN بحيث تكون أكبر بكثير من مثيلتها فى الترانزستور الأخر PNP سيكون للترانزستور الNPN تأثير أكبر فى التحكم فى حالة الفتح والغلق الكلية.

وهذا النوع من الثايرستورات يسمى Gate-Controlled Switch أو GCS .

أما إذا كنت تتسائل عن كيفية قياس صلاحية الثايرستور من عدمها . وفكرت فى قياس الوصلة بوابة-كاثود على إنها وصلة N-P (كالدايود العادى) فبذلك جزء من الخطأ وخصوصا فى الثايرستوات الكبيرة والتى تستخدم مع الجهود العالية .

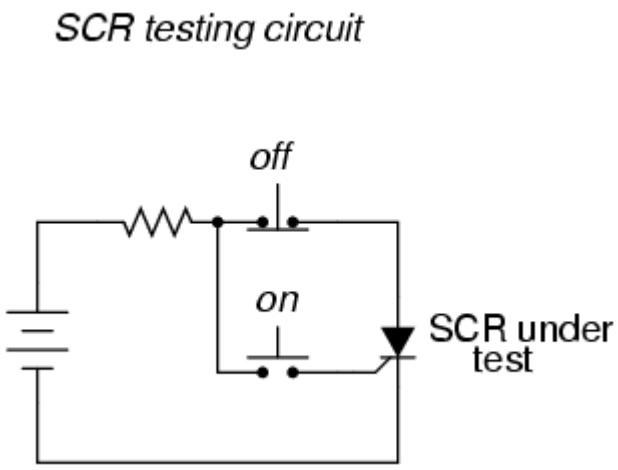
حيث تضاف مقاومة بين طرفى الوصلة (بوابة-كاثود) أثناء صناعة الثايرستور.



وهذه المقاومة فائدتها جعل الثايرستور أقل تأثرا بالنبضات الخاطئة التى ربما تصله عن طريق شرارة كهربية أو ضوضاء كهربية أو تفريغ لشحنة إستاتيكية . وكما ذكرنا فهذه المقاومة (فى الثايرستورات الكبيرة فقط ستمنعنا من قياس الوصلة Gate-Cathode على أنها دايود عادى) .

أما الثايرستورات التى لا تحتوى هذه المقاومة (غالبا التى تعمل فى دارات ذات جهود صغيرة) تسمى sensitive gate SCRs وذلك لحساسيتها للإشعال Triggered بجهود صغيرة جدا.

والدارة العملية المستخدمة لقياس ال SCR هى كالتالى :



بمجرد غلق المفتاح (الموجود فى حالة فتح طبيعيا Normally opened) يصل لطرف البوابة تيار يكفى لجعل التيار يمر بين الكاثود والأنود . وعندما نترك هذا المفتاح released فإن الثايرستور سيظل فى حالة العمل latched وسيظل التيار يمر بالدارة.

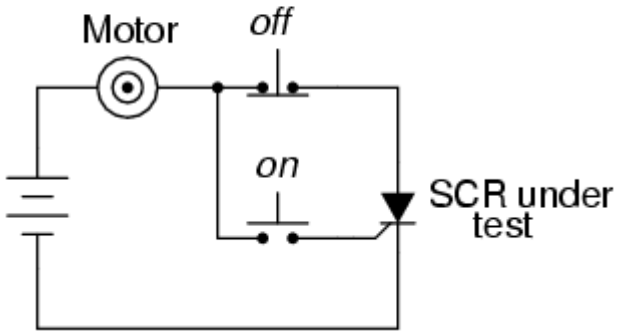
وبالضغط على المفتاح (الموجود فى حالة غلق طبيعيا Normally closed) فإن التيار سيتوقف عن المرور فى الدارة مجبرا الثايرستور على الدخول فى حالة فتح OFF .

إذا لم يستطع الثايرستور الدخول فى حالة العمل Latched بعد ضغط المفتاح (الموجود فى حالة فتح طبيعيا Normally opened) فذلك لا يعنى بالضرورة عطل بالثايرستور ولكن ربما المقاومة (أو الحمل) كبيرة مما يجعلها لا تستطيع إمرار تيار كافى لبدأ عملية الإشعال.

والتيار اللازم لبدأ عملية الإشعال Firing يسمى holding current وهو فى الأغلب يقع بين 1 ملي أمبير إلى 50 ملى أمبير أو أكبر للثايرستورات الأكبر.

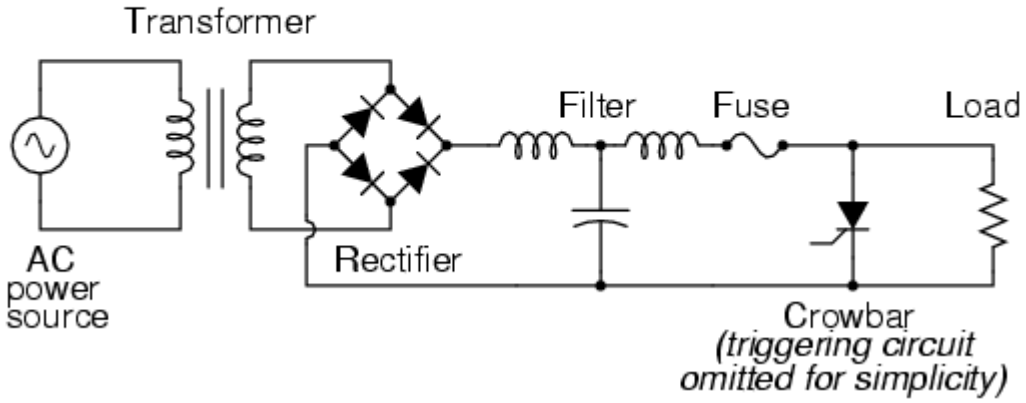
وأحد الإستخدامات للثايرستور هو إستخدامة كمفتاح On/Off كما فى الدارة التالية (للتحكم فى محرك كهربى) :

DC motor start/stop control circuit



وفى تطبيق عملى أخر يستخدم الثايرستور كعتلة crowbar للحماية من الجهد الزائد وخصوصا فى دارات مصادر التغذية المستمرة DC . حيث يقوم بعمل دارة قطع Short Circuit فى حالة زيادة الجهد عن مستواه الطبيعى فيمنعه من الوصول للحمل وإيقاع الضرر به .

Crowbar as used in an AC-DC power supply

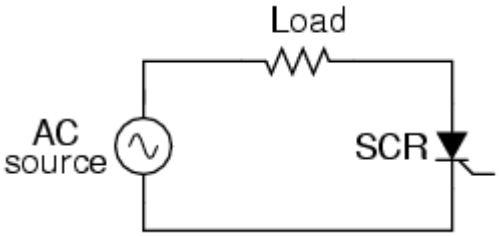


ويوضع قبل الثايرستور منصهر Fuse لحماية الثايرستور ودارة التغذية من التيار فى حالة القطع Short Circuit.

أما عن البوابة Gate (والتى لم توضح الدارة المتصلة بها فى الرسم السابق للتسهيل) فإن الدارة المتصلة بها تقوم بتغذية الثايرستور بنبضة فى حالة إرتفاع الجهد عن الحد المسموح وعندها يصبح الثايرستور كوصلة سلكية Circuit Short بين طرفى الدارة مانعا التيار من المرور فى بقية الدارة (الحمل).

وبالطبع فإن الثايرستور SCR هو عنصرا وحيد الإتجاه Unidirectional ولاستخدامه فى دارات التيار المتردد AC فإننا نستخدم زوج من الثايرستورات ولكن بالإضافة إلى شرط الوصول لجهد الإنهيار (كما سبق التوضيح فى حالة الشوكلى دايود) يجب أن توفر نبضة على البوابة gate كلما أردنا من الثايرستور العمل وتوصيل التيار عبر طرفيه الكاثود و الأنود

وإليك هذا المثال : حيث وصل الثايرستور فى دارة تيار متردد للتحكم فى القدرة الواصلة للحمل

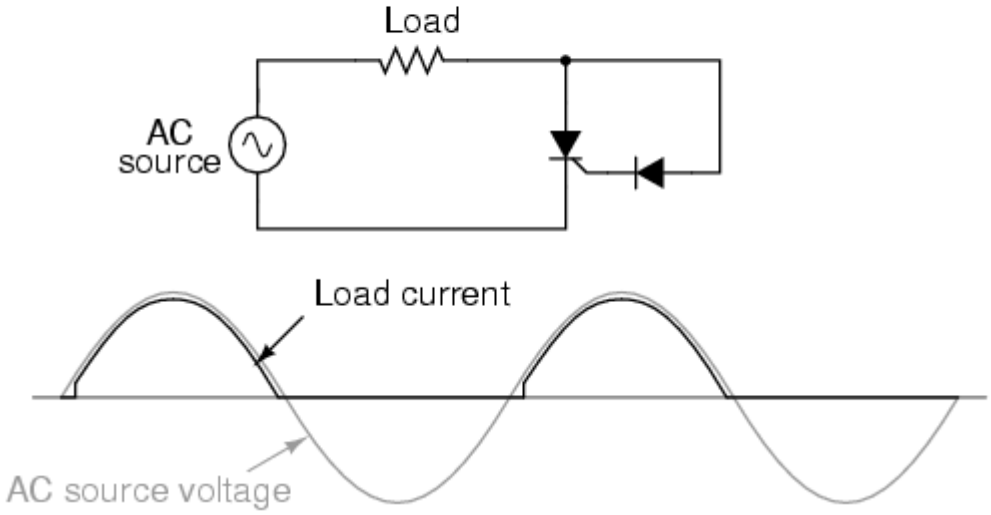


ولأن الثايرستور عنصرا وحيد الإتجاه (يوصل فى طريق ذو إتجاه واحد) فإنه فى أحسن حال سيوفر نصف القدرة التى يعطبها المصدر للحمل .

إذا لم توضع نبضة على بوابة الثايرستور أو لم يصل الجهد المسلط على طرفيه (الكاثود والأنود) إلى جهد الإنهيار فإنه لن يعمل .

وبتوصيل طرف البوابة gate بالأنود عن طريق موحد diode (لمنع التيار من المرور بالعكس فى حالة وجود مقاومة داخلية -كما ذكر من قبل- داخل الثايرستور) فإن ذلك سيجعل الثايرستور يعمل فى بداية كل نصف موجة موجبة.

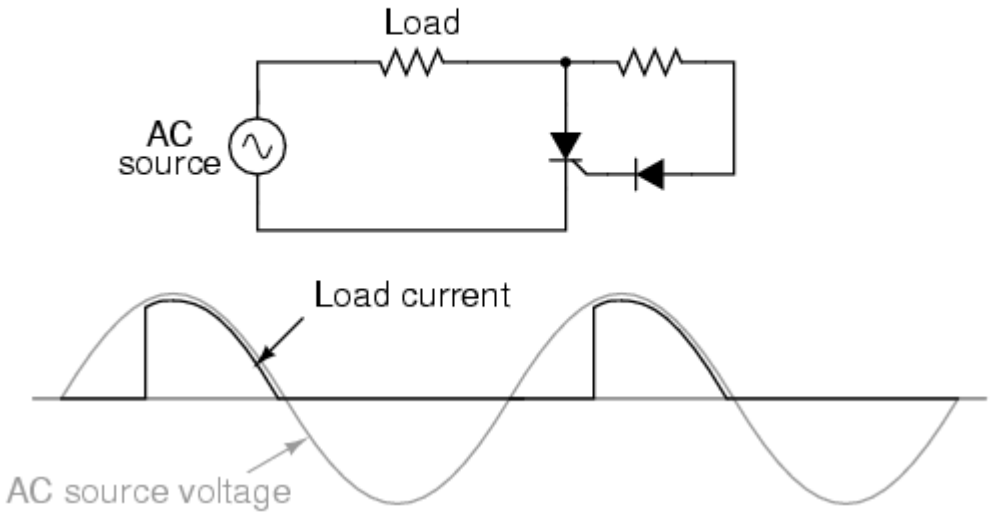
Gate connected directly to anode through a diode; nearly complete half-wave current through load



وبإمكاننا عمل تأخير لتلك النبضة بوضع مقاومة فى دارة البوابة مما يزيد من قيمة الجهد اللازمة حتى يحدث إشعال للثايرستور .

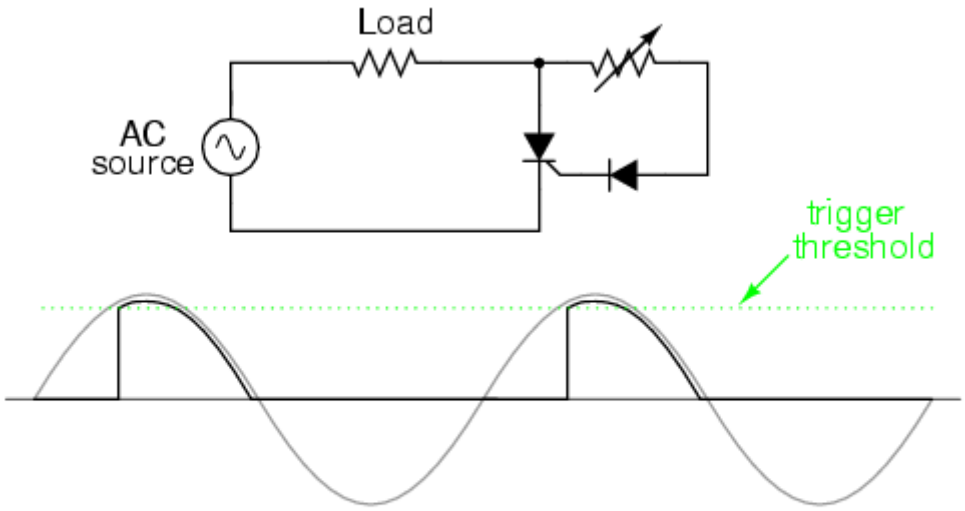
وستكون النتيجة على الشكل التالى :

Resistance inserted in gate circuit;
less than half-wave current through load



وبطريقة التأخير تلك يتم التحكم فى زاوية القطع للموجة الجيبية المدعومة من المصدر مما يمكننا من التحكم فى القيمة المتوسطة للقدرة average power الواصلة للحمل .

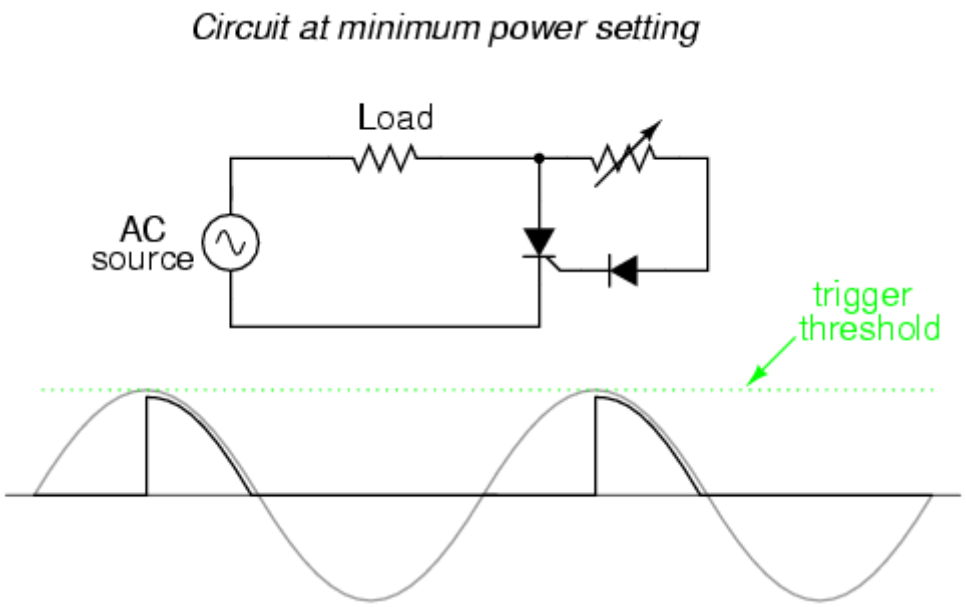
وبوضع مقاومة متغيرة بدلا من المقاومة الثابتة يمكننا التحكم فى زاوية القطع (وبالتالى متوسط القدرة على الحمل).



Increasing the resistance raises the threshold level,
causing less power to be delivered to the load.

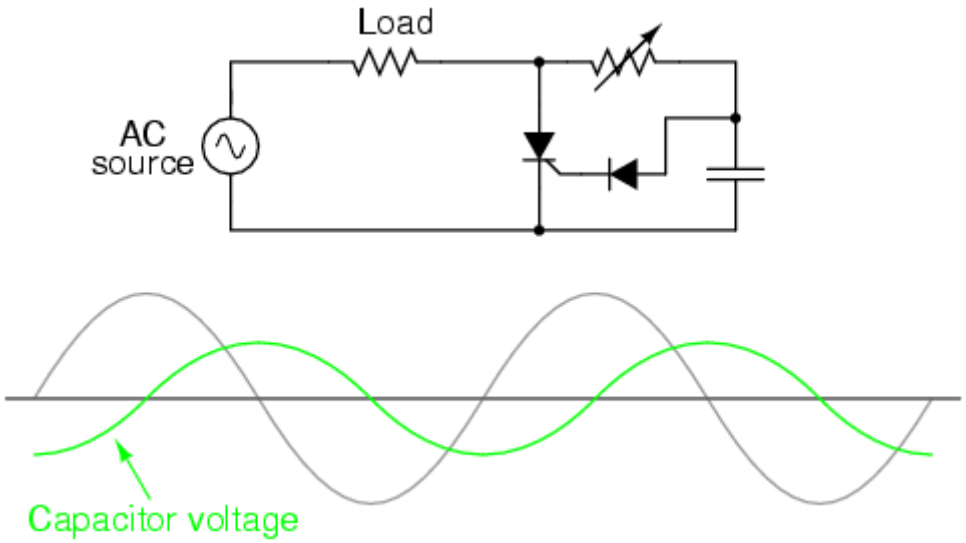
Decreasing the resistance lowers the threshold level,
causing more power to be delivered to the load.

وللأسف فإن هذا النوع من التحكم له حد مسموح به (عند التعامل مع التيار المتردد) وهو النصف الأول لنصف الموجة الموجب فقط .



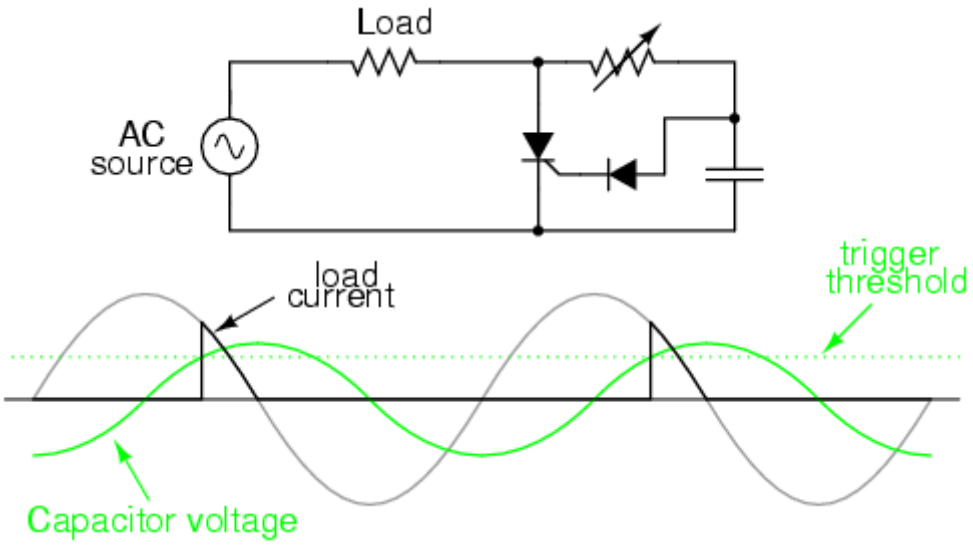
ولكن برفع الـtrigger threshold أكثر من ذلك (وضع تأخير أكبر بمقاومة أكبر) فإن ذلك لن يحدث أى إشعال للثايرستور ولن يصبح هناك خرج واصل للحمل .

ولكن هناك حل ذكى لهذه المشكلة وذلك بإضافة مكثف (مرحل للطور phase-shifting) للدارة



الجهد المرسوم باللون الأخضر يمثل الجهد الموجود على المكثف . (لتوضيح عملية ترحيل الطور تم وضع المقاومة بقيمة كبيرة بحيث لن يحدث إشعال للثايرستور كما سبق) وسيتم شحن المكثف بذلك التيار البسيط المار فى المقاومة (والذى لا يكفى لإشعال الثايرستور) مما ينتج عنه ذلك الجهد المرحل فى الطور (عن طور منبع التغذية) بقيمة تتراوح من 0 إلى 90 درجة.

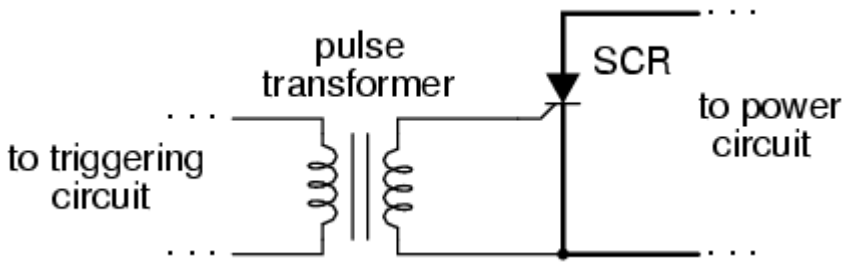
وعندم يصل ذلك الترحيل phase-shifting إلى قيمة مناسبة سيبدأ المكثف فى التفريغ ليدعم تيار المقاومة البسيط لإشعال الثايرستور وتشغيله.



ولكن الدارة السابقة نظرية إلى حد كبير حيث (فى الحقيقة) يتشوه المنحنى الممثل للجهد على المكثف عندما يدخل الثايرستور فى مرحلة العمل Latched ولن يكون جيبى الشكل تماما .

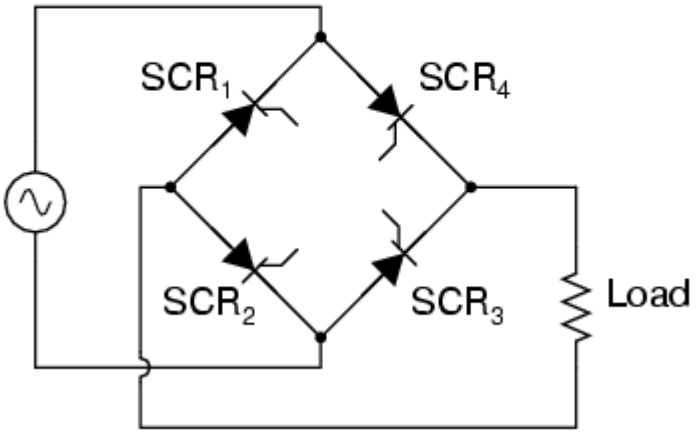
رغم أن الدارات السابقة لإشعال الثايرستور كافية وقابلة للعمل فى الدارات البسيطة كالتحكم فى مصباح أو محرك صناعى كبير إلا أنه يمكن إشعالها fired بدارات أكثر تعقيدا تحقيقا لمطالب بعض التطبيقات .

فأحيانا يستخدم محول نبضى pulse transformer لعزل دارة الإشعال عن البوابة والكاثود



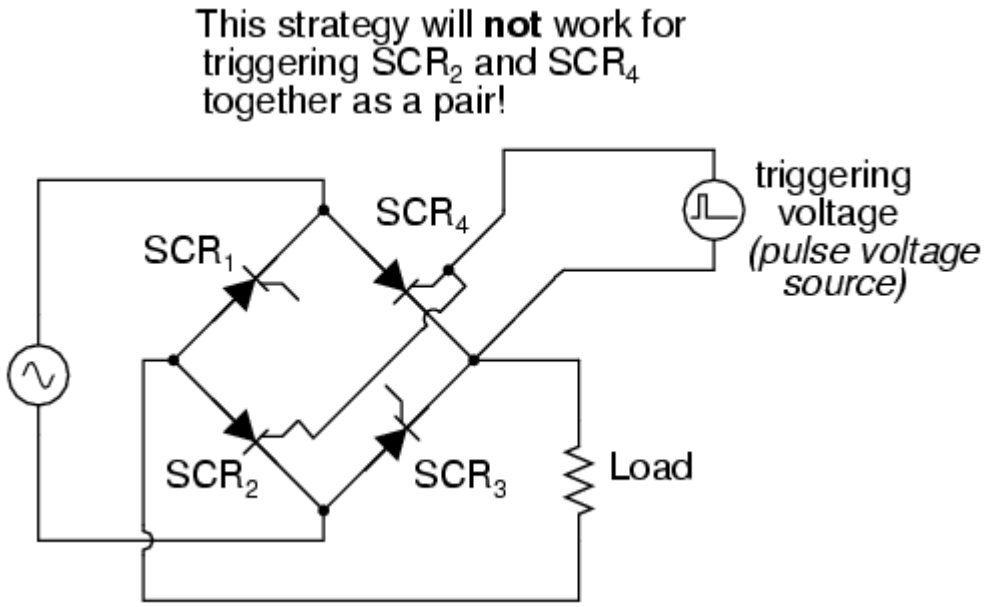
أيضا عند إستخدام عدة ثايروسترات فى دارة وحادة ولكنهم ليسوا مشتركين فى مقطة كاثود واحدة فإن ذلك يجعل وصلهم بدارة إشعال واحدة أكثر صعوبة . كما فى الدارة التالية (وهى دارة تستخدم لتوحيد التيار المتردد توحيدا متحكم به rectifier controlled bridge).

Controlled bridge rectifier

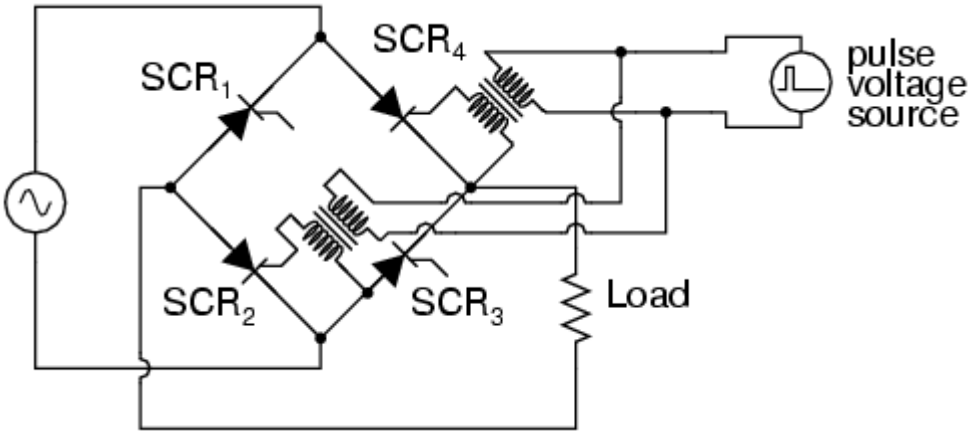


وكما هو معروف فإن الدايودات الأربع أو الثايروسترات الأربع (فى حالتنا) يجب أن يعملوا كأزواج . فالثايرستور SCR1 يجب أن يشعل بالتزامن مع SCR3 وهكذا الحال مع SCR2 و SCR4

وكما هو الواضح فإن كلا من الزوجين لا يشتركان فى كاثود واحد وذلك سيجعل من طريقة الإشعال الموجودة فى الشكل التالى فاشلة .

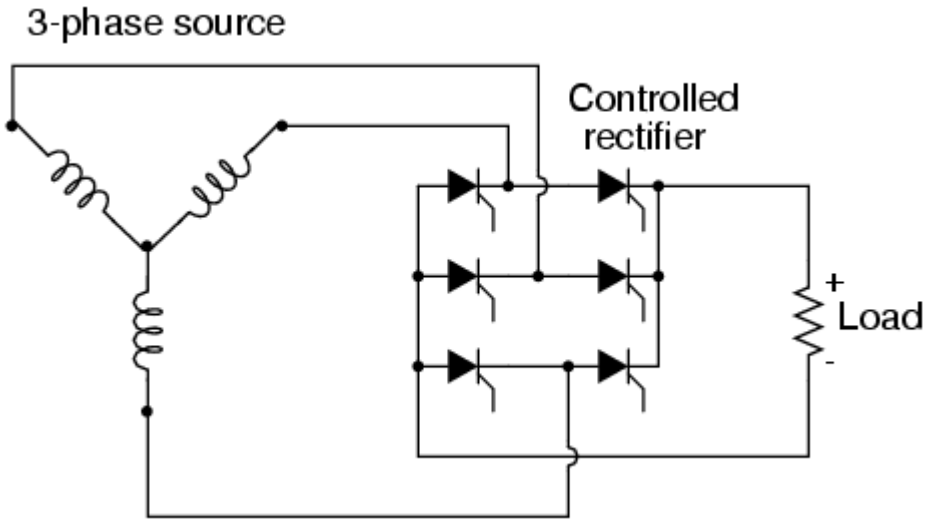


والطريقة التاجحة فى هذه الحالة تكون باستخدام محولات نبضية كالأتى :



لاحظ أنه للتسهيل تم حذف دارات الإشعال للثايروستورين SR1 وSR3 .

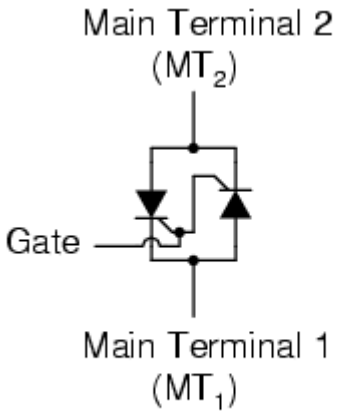
والموحد ذو التحكم السابق bridge rectifier Controlled لايقتصر إستخدامه على دارات الطور الأحادى single-phase ولكنه يستخدم بكثرة فى دارات التحكم الصناعى (ثلاثة أطوار three-phase) وفيها تكون دارة التوحيد الثيروستورية (ببساطة)



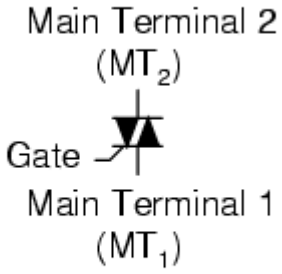
بالطبع تم حذف دارات الإشعال والمحولات النبضية للتسهيل.

الترياك TRIAC :

لأن الثيرستورات SCRs أحادية الإتجاه فهى تستخدم فى دارات التحكم التى تعمل بالتيار المستمر. ولكن بوضع زوج منها بطريقة معاكسة (مثلما فعلنا مع الدياك سابقا) سيتكون لدينا عنصرا جديدا يسمى الترياك TRIAC

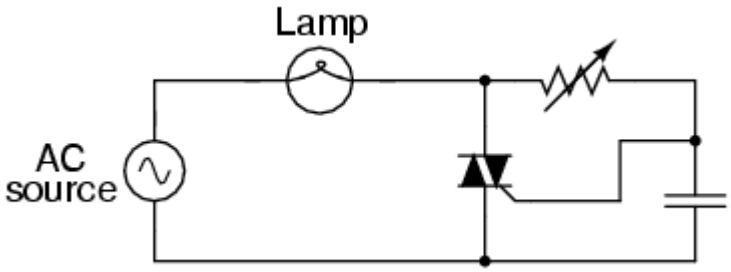


TRIAC equivalent circuit



TRIAC schematic symbol

وهذا العنصر الجديد قادر على التعامل مع نصفى الموجة المترددة AC (كما حدث مع الدياك) . ولكننا نلاحظ أن الثيرستور SCR يستخدم بكثرة فى دارات التحكم (مثل دارات التحكم فى المحركات) بينما يستخدم الترياك كعنصر فى التطبيقات التى لا تتطلب قدرات عالية عند عملها مثل التحكم فى المصابيح الصغيرة لتغيير شدة الإضاءة كما بالشكل التالى :

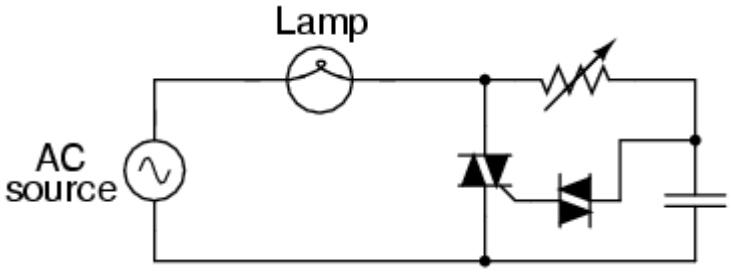


وطبعا الجزء المكون من المقاومة المتغيرة والمكثف هو الذى يحدد الزاوية التى يحدث عندها التشغيل (مما يحدد متوسط الجهد الذى سيشغل المصباح)

والترياك له سمعة سيئة فى الدارات العملية حيث أن جهد الإشعال فى النصف الموجب يختلف عن جهد الإشعال للنصف السالب فى معظم الأحيان . وخاصية عدم التماثل فى جهد الإشعال تعتبر غير مرغوب فيها لأنها تنتج توافقيات harmonics (ترددات) غير مرغوب فيها .

ولأننا نسعى دائما لتقليل تلك التوافقيات الغير مرغوب فيها فإن استخدام ثيرستور مفرد يكون أفضل فى دارات التحكم المعقدة والتى تعمل فى قدرات عالية .

ولجعل تيار الترياك أكثر تماثلية (وأقل فى التوافقيات الغير مرغوبة) نستخدم عنصرا لضبط توقيت الإشعال (وهو فى الدارة التالية الدياك DIAC):

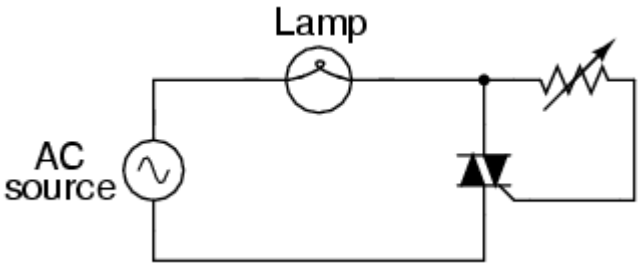


إستعمال الدياك سيجعل التيار المار فى الدارة أكثر تماثلية بين نصفي الموجة السالب والموجب وذلك لأن الدياك سيمنع أى وصول للتيار إلى بوابة التريك حتى يصل إلى جهد الإنهيار اللازم لتشغيله.

ورغم أن التريك يعمل كمفتاح ثنائى الإتجاه إلا أنه لا يمكن عكسه فى الدارة (أى لا يمكن تبديل الطرفين 1و 2).

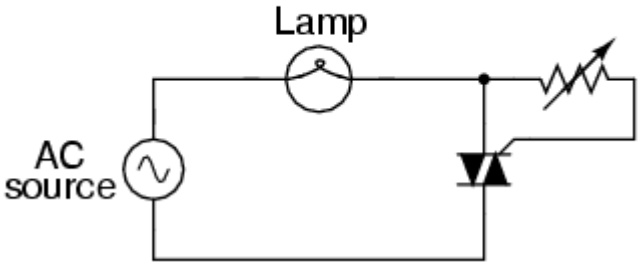
ولإثبات ذلك يمكن تنفيذ الدارتين التاليتين (والتى حذف فيهما المكثف المرحل للطور والدياك للتسهيل)

1- الدارة التالية تعمل رغم ضعف القدرة على التحكم بها (لبساطة دارة الإشعال)



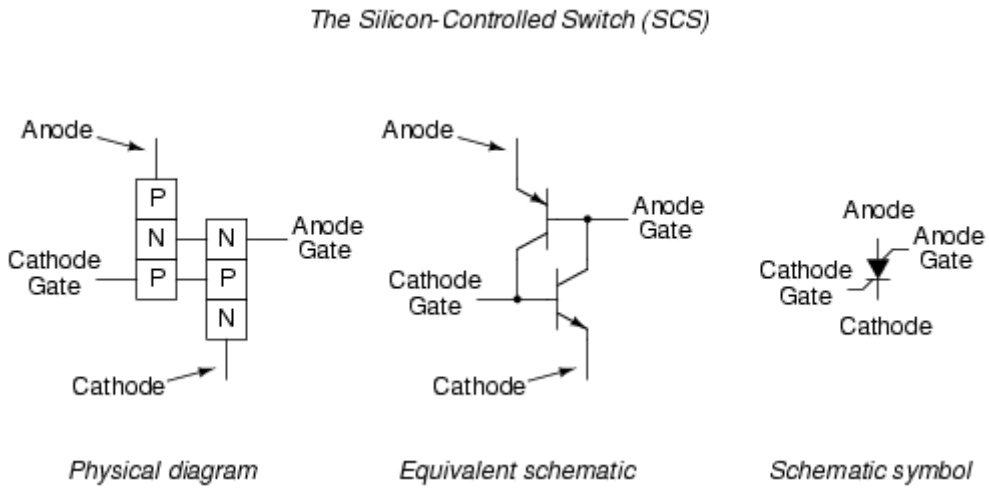
2- عند عكس إتجاه التريك فإن الإزاحة التى كانت تتم بواسطة المقاومة الكهربية لن يصبح لها معنى ولن يعمل التريك .

*This circuit **will not work**!*



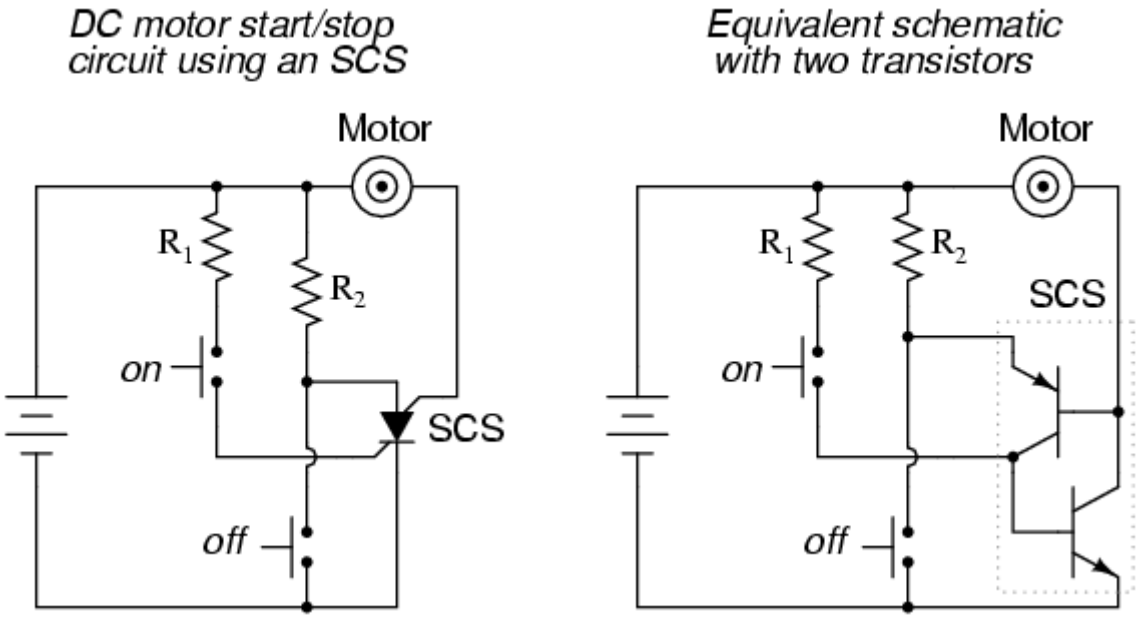
مفتاح التحكم السيكونى Silicon-Controlled Switch The أو SCS :

بإضافة طرف أخر إلى نموذج الثايرستور (عند قاعدة الترانزستور العلوى) سينتج لنا عنصرا جديدا هو SCS



والطرف المضاف يوفر قدرات إضافية للتحكم فى هذا العنصر .

لاحظ الدارتين التاليتين :



عندما نضغط على المفتاح المكتوب عليه ON فإن ذلك سيضع جهدا على الوصلة بوابة الكاثود-الكاثود مما يدفع الثيرستور للعمل وإمرار التيار بين الأنود والكاثود عبر المقاومة R2 ومن ناحية أخرى سيمر تيار خلال المحرك مما يجعله يعمل.

وطبعا يمكن إيقاف المحرك بفصل منبع التغذية (تعرف تلك الطريقة بnatural commutation) .
وأيضا يوفر لنا ال SCS طريقة أخرى لإيقافه عن العمل وهى forced commutation وذلك بتوصيل الأنود بالكاثود وهذا ما يفعله المفتاح OFF .