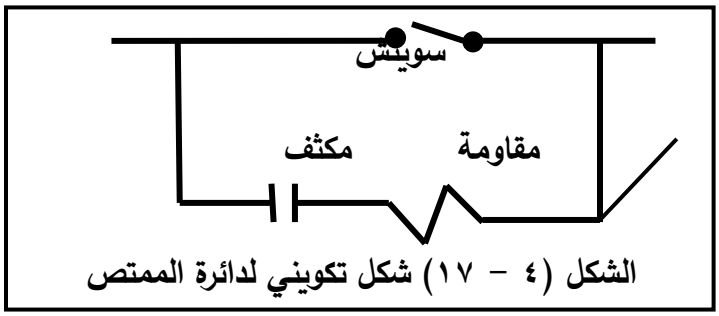
This file has been cleaned of potential threats.

To view the reconstructed contents, please SCROLL DOWN to next page.

- **الممتص** [٦٠]

يمكن تحفيز الثايرستور بمعدلات عالية في حالة انقطاع التيار الكهربائي بتوصيل دائرة امتصاص تتكون من مقاومة – مكثف بين طرفي الأنود والكاثود للحد من معدل تغير الجهد مع مرور الوقت.



الشكل (٤ – ١٧) شكل تكويني لدائرة الممتص

- **نقل الجهد العالي للتيار المستمر**

منذ تمكنت الثايريستورات الحديثة من تبديل الطاقة في نطاق الميجا وات، أصبحت صمامات الثايرستور تمثل القلب لتحويل التيار المباشر عالي الجهد إلى شكل من التيار المتردد في تطبيقات الطاقة العالية جدا، كلا من ثيروسترات تحفيز انتقال الكهرباء [٦١] **وثيروسترات انتقال الكهرباء بتشغيل الضوء** [٦٢]

---

٦٠ الممتص (snubber) جهاز يستخدم لقمع ظاهرة مثل الجهد العابر في الأنظمة الكهربائية، والضغط العابر في أنظمة السوائل أو القوة الزائدة أو الحركة السريعة في النظم الميكانيكية. وهي دائرة بسيطة (RC) تستخدم مقاومة صغيرة على التوالي مع مكثف صغير بين طرفي الأنود والكاثود للحد من معدل تغير الجهد مع مرور الوقت (dV/dt).

٦١ مفهوم تحفيز انتقال الكهرباء electrically triggered transmission (ETT)تصميم قوية وموثوق به مع تعقيدات قليلة يتميز الإبلاغ عن فشل الثايرستور خلال التشغيل – متطلبات صيانة منخفضة – الفاصل الزمني للصيانة المجدولة ٥ سنوات للمنشآت الحديثة – التكرار الكامل في حالة حدوث فشل مكون (النظام البصري، الإلكترونيات، أو الثايرستور) – أخطار قليلة لتخفيف حالات الفشل – تصميم الثايرستور قوية! الحل الفائقة لتحريك الثايرستور والحماية

٦٢ انتقال الكهرباء بتشغيل الضوء light–triggered (LTT) في المنشآت الجهد العالي (HVDC) ويتميز – تصميم بوابة الثايرستور بسيط بسبب الإشارة القوية من البوابة – خطوات المعالجة الرئيسية للركيزة – تغليف قياسي وسهولة الاختبار – حماية دقيقة من ارتفاع الجهد الخارجي – أعلى تصنيف للجهد ٨,٨ كيلو فولت . ومن العيوب الرئيسية تصميم البوابة معقد بسبب انخفاض الطاقة الضوئية – يحتاج الى ١٦ خطوة لمعالجة الشريحة – أسلوب التغليف والاختبار أكثر تعقيداً – تعتمد الحرارة الداخلية على الجهد الزائد للحماية – أعلى تصنيف للجهد ٨ كيلو فولت.

لا تزال الخيار الأساسي. يتم ترتيب الصمامات في مجموعات عادة معلقة في سقف مبنى الإرسال وتسمى قاعة الصمامات. يتم ترتيب الثايريستورات في دائرة جسر صمام ثنائي لتقليل التوافقيات يتم توصيلها على التوالي لتكوين محول ١٢ نبضة. يتم تبريد كل الثايرستورات بالمياه المقطرة، ويصبح الترتيب نموذج واحد من عدة وحدات متماثلة تشكل طبقة في مجموعة متعددة الطبقات تسمى صمامات رباعية، ثلاث صفوف مجهزة على الأرض أو معلقة في سقف قاعة الصمامات للنقل لمسافات طويلة.

الشكل (٤ – ١٨) قاعة صمامات الثايرستور المستخدمة لنقل الكهرباء لمسافات طويلة

- مقارنة بالعناصر الأخرى

الثايرستور مثل الصمام الثنائي حيث يتم التوصيل الكهربائي في اتجاه واحد. وهو مماثل لعنصر الترياك المكون من خمس طبقات ذو غلق ذاتي، رغم ذلك، يمكن أن يصبح غير قادر لأن الترياك يمكنه التشغيل في كلا الاتجاهين، يمكن أن تؤدي الأحمال النشطة [٦٣] إلى فشل حالة إيقاف التشغيل أثناء لحظة الصفر [١١] فولت فى دورة طاقة التيار المتردد. لهذا السبب يتطلب استخدام عناصر الترياك مع أحمال الموتور ذات الحث الحركية استخدام دائرة "ممتص" حول الترياك للتأكد أنه سيتم إيقاف التشغيل مع كل نصف دورة لموجة التيار الكهربائي.

---

٦٣ الأحمال النشطة (Reactive loads) إما أن تكون عناصر حث أو سعة (Inductive or Capacitive) عموما هي التي تعمل على التيار المتردد ولها أثر إجبار موجة الجهد وموجه التيار تصبح خارج نطاق الوجه مع بعضها البعض.

يمكن أن تستخدم صمامات مقومات السيلكون الخاضعة المعكوسة والمتصلة على التوازي بدلاً من الترياك؛ لأن كل مقوم من الاثنين له نصف دورة من الانحياز العكسي المطبق عليه، صمامات مقومات السيلكون الخاضعة على عكس الترياك حيث تتأكد من إيقاف التشغيل ويتطلب هذا الترتيب إضافة دائرتين منفصلتين من الدوائر النابضة المتطابقة. على الرغم من أن الثايريستورات تستخدم بشكل كبير في تقويم التيار المتردد الى التيار المباشر في نطاق الميجا وات في تطبيقات الطاقة المنخفضة والمتوسطة (من بضع عشرات لبضع مئات من الكيلو وات) تم استبدالها بعناصر أخرى بخصائص تبديل متفوقة مثل [٦٤] ترانزستور الطاقة موسفت أو الترانزستور ثنائي القطبية منخفض المقاومة. أحد المشاكل الرئيسية المرتبطة بمقومات السيلكون الخاضعة أنها ليست مفاتيح تحكم بالكامل. الثايرستور ذو بوابة إيقاف تشغيل [٦٥] وثايرستور التخفيف ببوابة متكاملة [٦٦] عنصران ينتميان الى الثايرستور لمعالجة السلبيات. في تطبيقات الترددات العالية فإن الثايرستور عنصر ضعيف بسبب تعدد مرات التبديل في ترانزستور ثنائي القطبية. من جهة أخرى عناصر الموسفت لها قدرة أسرع في التبديل حيث أنها أحادية القطبية في التوصيل حيث تتحمل الشحنات الأغلبية نقل التيار.

- أنماط الفشل

تحدد الشركات المصنعة للثايرستور منطقة آمنة لتحديد مستويات مقبولة من الجهد والتيار لدرجة حرارة تشغيل معينة. تتحدد هذه المنطقة جزئيا بمتطلبات عدم تجاوز الحد الأقصى المسموح به لطاقة البوابة، المحدد لزمن نبضة تشغيل معينة التي لا يمكن تجاوزها. كذلك

---

٦٤ ترانزستور الطاقة موسفت أو الترانزستور ثنائي القطبية منخفض المقاومة (Power MOSFETs or IGBTs)

٦٥ الثايرستور ذو بوابة إيقاف تشغيل (GTO) gate turn-off thyristor نوع خاص كعنصر شبه موصل للطاقة العالية الثايرستور ذو بوابة إيقاف تشغيل متعارض مع الثايرستور العادي، هي مفاتيح تحكم بالكامل التي يمكن تشغيل وإيقاف تشغيلها بواسطة طرف ثالث يسمى البوابة .

٦٦ الثايرستور تخفيف ببوابة متكاملة (IGCT) integrated gate-commutated thyristor عنصر أشباه الموصلات للطاقة، المستخدم لتحويل التيار الكهربائي في المعدات الصناعية. وينتمي الى عناصر الثايرستور ذو بوابة إيقاف تشغيل (GTO)

أنماط الفشل المعتادة بسبب تجاوز معدلات الجهد، والتيار أو القدرة، فإن الثايريستورات لها أنماط معينة للفشل، بما في ذلك:

١. تغير التيار مع الزمن للتشغيل – نجد معدل ارتفاع تيار التشغيل بعد التحفيز أعلى مما يمكن أن تدعمه سرعة الانتشار في منطقة التوصيل النشطة (عناصر مقومات السيلكون الخاضعة والترياك).

٢. التخفيف القصرى – يسبب الارتفاع العابر لتيار الانتعاش العكسي انخفاض في الجهد في منطقة الكاثود الفرعية التي تتجاوز جهد الانهيار العكسي لوصلة البوابة – الكاثود للصمام الثنائي (فقط في عناصر مقومات السيلكون الخاضعة).

٣. التبديل لحالة التشغيل مع تغير الجهد مع الزمن – يمكن أن يكون الثايرستور مهم دون محفز من البوابة إذا كان معدل ارتفاع الجهد من الأنود إلى الكاثود كبير للغاية.

- **الثايريستورات كربيد السيليكون**

في السنوات الأخيرة، طور بعض المصنعين الثايريستورات باستخدام كربيد السليكون كمواد أشباه الموصلات. لهذا النوع تطبيقات في بيئات مرتفعة درجات الحرارة، وهي قادرة على العمل في درجات حرارة تصل إلى ٣٥٠ درجة مئوية.

- **ثايرستور التوصيل أو التشغيل العكسي [٦٧]**

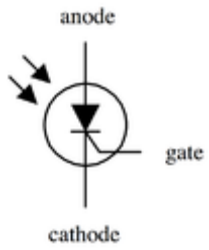
يتكون ثايرستور التوصيل العكسي من صمام ثنائي عكسي متكامل، غير قادر على منع العكس. لها مزايا حيث يجب أن يستخدم صمام العكس أو صمام حر العجلة. بسبب أن مقوم السيلكون الخاضع أو الصمام الثنائي لا يمكنهم التوصيل في نفس الوقت ولا ينتج عنهما حرارة في نفس الوقت ويمكن بسهولة أن يتم تكوينهما متكاملين ويمكن تبريدهما معا. يستخدم ثايرستور التوصيل العكسي غالبا في دوائر [٦٨] مغيّرات التردد والعواكس.

---

٦٧ ثايرستور التوصيل العكسي (RCT) (REVERSE CONDUCTING THYRISTORS) في العديد من المروحيات ودوائر العاكس، صمام ثنائي غير متوازي متصل نقوم سليكون خاضع للسماح بتدفق تيار عكسي بسبب حمل حثي وتحسين شروط التخفيف لتحويل الدائرة الى إيقاف التشغيل

٦٨ مغيّرات التردد والعواكس (.frequency changers and inverters)

- **الثايرستورات الضوئية**



الشكل (٤ – ١٩) الرمز الإلكتروني لمقوم السيلكون الخاضع النشط الضوئي

من مزايا الثايرستور الضوئي عدم التأثر بالإشارات الكهربائية التي يمكن أن تسبب عمليات خاطئة في البيئات الصاخبة كهربائياً. الثايرستور المتحفز بالضوء [١٧] ذو منطقة حساسة بصريا في البوابة، بداخلها الإشعاع الكهرومغناطيسي (عادة ما تكون الأشعة تحت الحمراء) مقترنة بألياف ضوئية حيث لا توجد إشارة إلكترونية توفر تحفيز الثايرستور ولذلك يستخدم الثايرستور المتحفز بالضوء في التطبيقات ذات الجهد العالي مثل نظم الجهد العالي للتيار المستمر. الثايرستور المتحفز بالضوء متوفر مع وصلة ذات الجهد المفرط للحماية الذي يحفز الثايرستور عند انحياز بالجهد الأمامي المرتفع؛ كما أنها ذات جهد انتعاش أمامي للحماية، ولكن ليس للأغراض التجارية. على الرغم من التبسيط في الدوائر الإلكترونية لصمامات الجهد العالي للتيار المستمر ما زالت تتطلب المزيد من بحوث الإلكترونيات البسيطة والتي لا تتوفر إلا عند عدد قليل من الشركات المصنعة. يشتمل نوعين من الثايرستور المتحفز بالضوء على مقوم سليكون ضوئي خاضع وعنصر تنشيط ضوئي [٦٩] . يعمل مقوم سليكون ضوئي خاضع كمفتاح يتحول الى وضع التشغيل عندما يتعرض للضوء مع استمرار تعرضه للضوء، عندما يغيب الضوء وفى حالة عدم إلغاء التغذية ولم يتم عكس قطبية الكاثود والأنود فإن مقوم

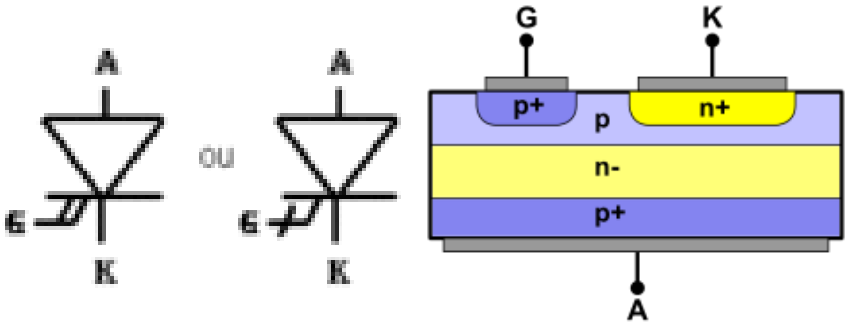
---

٦٩ مقوم سليكون ضوئي خاضع وعنصر تنشيط ضوئي (light–activated SCR (LASCR) and the light–activated TRIAC)

السليكون الضوئي الخاضع ما يزال في وضع التشغيل. وعنصر تنشيط ضوئي مشابهة لمقوم السليكون الضوئي الخاضع ماعدا أنه مصمم للتيار المتردد.

٤ – ٧ الثايرستور ذو بوابة تحويل [٧٠]

استخدمت عناصر الثايرستور لما يزيد عن عقدين في صناعة إلكترونيات الطاقة عند كل مستويات الطاقة.



الشكل (٤ – ٢٠) الرموز المهنية وهيكل الثايرستور ذو بوابة تحويل

ومع ذلك، تعاني من عيب من كونها عناصر شبه خاضعة للتحكم على الرغم من أنه يمكنها التبديل لوضع التشغيل بإدخال نبضة على طرف البوابة ولكن لإيقاف تشغيلها يتعرض تيار المصدر الى الانقطاع وهذا يثبت أنها غير مقبولة خاصة في دوائر التحويل من التيار المستمر الى التيار المتردد وأيضا من التيار المستمر الى التيار المستمر، حيث لا تصل قيمة تيار المنبع بطبيعة الحال الى الصفر. استخدمت دوائر التخفيف الضخمة والمكلفة لضمان التبديل المناسب لإيقاف تشغيل الثايرستور ونتيجة لذلك تم إحلال نوع ثايرستور تخفيف عاكس قسري في كافة دوائر التحويل من التيار المستمر الى التيار المتردد وأيضا في دوائر تحويل التيار المستمر الى التيار المستمر إلا أن سرعة التبديل بطيئة نسبيا والثايرستور ذو بوابة تحويل هو نوع خاص من عناصر أشباه الموصلات عالية الطاقة. يختلف عن الثايرستور العادي حيث يشتمل على مفتاح تحكم بالكامل يمكنه التبديل لحالتي التشغيل وإيقاف التشغيل بواسطة طرف ثالث (طرف البوابة) وقد عالج الثايرستور ذو "بوابة إيقاف" عيوب الثايرستور إلى حد كبير

---

٧٠ الثايرستور بوابة تحويل (Gate turn–off thyristor GTO)

وعلى الرغم من انضمامها في أواخر (١٩٧٣) الى مجموعة إلكترونيات الطاقة إلا أنها تطورت بسرعة وظهرت الثايرستورات عالية الطاقة التي تتحمل قيم كبيرة من الجهد حتى ٥٠٠٠ فولت وتيار حتى ٤٠٠٠ أمبير.

- وصف العنصر

الثايرستور ذو بوابة إيقاف مشابه الى الثايرستور العادي (مقومات السيلكون الخاضعة) من حيث أنهما من العناصر ذات تيار حاملات الشحنات الأقلية وهذا يعنى أنه عنصر ثنائي القطبية وهي مفاتيح تبديل لوضعي التشغيل وإيقاف التشغيل كاملة التحكم، الثايرستور العادي يمكنه التحويل الى حالة التشغيل ولا يمكنه إيقاف التشغيل. تختلف الثايرستورات ذات بوابة الإيقاف عن الثايرستور العادي في أنها مصممة للتبديل الى حالة إيقاف التشغيل. يتحقق وضع التشغيل بنبضة تيار موجب بين طرفي البوابة والكاثود كمسلك وصلة (ب ن)، سيكون هناك قيمة جهد صغيرة نسبيا بين الطرفين ويجب الإبقاء على قيمة تيار البوابة الموجب حتى بعد التحويل الى حالة التشغيل لتحسين الموثوقية. ولكن حتى بعد إلغاء إشارة البوابة، يظل الثايرستور في حالة تشغيل ولإيقاف تشغيل العنصر يحتاج الى:

١. بتدفق تيار سلبي عالي بكسب إيقاف تشغيل نموذجي في حدود ٤-٥ فولت خلال البوابة الذي يتسبب في عكس اتجاه تيار البوابة.
٢. تطبيق جهد عكسي على أطراف الثايرستور.
٣. بتدفق التيار الأمامي من خلال انخفاض التيار لقيمة تقل عن قيمة المنبع والمعروف باسم حفظ التيار.

وهكذا يسلك الثايرستور سلوك الصمام شبه الموصل الثنائي العادي بعد تشغيله. يتحقق وضع إيقاف التشغيل بنبضة "جهد سلبي" بين طرفي البوابة والكاثود تستخدم لحث جهد البوابة-الكاثود بقيمة حوالي ثلث إلى خمس قيمة التيار الأمامي الذي بدوره يحث التيار الأمامي في الانخفاض وسوف يقوم العنصر بإيقاف التشغيل والانتقال إلى تجميد وضع العنصر الذي يعاني من طول الفترة لإيقاف التشغيل، حيث بعد انخفاض التيار الأمامي هناك وقت طويل حيث

يستمر التيار المتبقي في التدفق حتى يتم إخراج كل الشحنات المتبقية من العنصر بعيداً وهذا يحافظ على الحد الأقصى لتردد التبديل إلى حوالي ١ كيلو هرتز. يمكن القول، أن زمن إيقاف تشغيل ثايرستور بوابة التحويل حوالي عشر مرات أسرع من الثايرستور مقوم السيلكون الخاضع، للمساعدة في عملية التبديل الى وضع إيقاف التشغيل. عادة يتكون ثايرستور بوابة التحويل من عدد كبير من خلايا الثايرستور الصغيرة (مئات أو آلاف) متصلة بالتوازي. تم تصنيع أنواع مختلفة من الثايرستور ذو بوابة إيقاف منها عناصر ذات إمكانية عرقلة عكسية مساوية لقيمة الانحياز الأمامي تسمى الثايرستورات ذات بوابة الإيقاف المتماثلة [٧١], ومع ذلك، فإن الأنواع الأكثر انتشارا من الثايرستورات ذات بوابة الإيقاف في السوق اليوم ليس لها جهد عكسي ملموس (٢٠- ٢٥ فولت) لإعاقة القدرة وتسمى الثايرستورات ذات بوابة الإيقاف الغير متماثلة [٧٢]. يتكون ثايرستور التوصيل من الجيل الثالث من شريحة ثايرستور متكاملة مع دايود حر للتغلب على التوازي [٧٣].

الجدول (٤ - ٣) مقارنة بين المعاملات لكل من الثايرستور العادي وثايرستور بوابة التحويل

الخواص (١٦٠٠ فولت و٣٥٠ أمبير)	الوصف	ثايرستور	ثايرستور بوابة تحويل
جهد منع التشغيل ($V_{T\ ON}$) فولت	انخفاض الجهد في حالة التشغيل	٥و١	٤و٣
زمن التشغيل (t_{on}) (ميكرو ثانية)	زمن التبديل الى وضع التشغيل	٨	٢
تيار البوابة (Ig_{on})	تيار البوابة لتحفيز التشغيل	٢٠٠ ميلي أمبير	٢ أمبير
زمن إيقاف التشغيل (t_{off}) (م٠ ثانية)	زمن التبديل الى إيقاف التشغيل	١٥٠	١٥

٧١ الثايرستورات ذات بوابة الإيقاف المتماثلة (symmetric GTOs)

٧٢ الثايرستورات ذات بوابة الإيقاف الغير المتماثلة (Asymmetric GTOs)

٧٣ ثايرستور التوصيل من الجيل الثالث من شريحة ثايرستور متكاملة مع دايود حر للتغلب على التوازي (Reverse conducting GTOs (RC-GTO) constitute the third family of GTOs. Here, a GTO is integrated with an anti-parallel freewheeling diode on to the same silicon wafer.)

❖ **ثايرستور ذو بوابة تحويل بوصلة (ب ن) إضافية [٧٤]**

هو ثايرستور بوصلة إضافية في منطقة الانحراف لإعادة تشكيل المجال وزيادة جهد المنع فى وضع إيقاف التشغيل ، بالمقارنة بهيكل (ب ن ب ن) للثايرتور التقليدي، فإن هيكل ثايرستور بوابة تحويل بوصلة (ب ن) إضافية على الشكل (ب ن – ب ن – ب ن).

- **الانحياز العكسي**

ثايرستور ذو بوابة التحويل متوفر بإمكانية منع الانحياز العكسي أو تمريره حيث تضاف قدرة عرقلة الانحياز العكسي الى انخفاض الجهد الأمامي بسبب الحاجة إلى وجود منطقة طويلة بكثافة تخدير خفيفة ويسمى ثايرستور ذو بوابة تحويل متناظرة [٧٥]. ثايرستور ذو بوابة التحويل الغير قادر على عرقلة جهد الانحياز العكسي يسمى ثايريستور ذو بوابة تحويل الغير متناظرة [٧٦] , عادة تصنيف عرقلة جهد الانحياز العكسي والانحياز الأمامي هي نفسها. التطبيقات النموذجية لثايرستور ذو بوابة تحويل متناظرة في دوائر مصادر تيار العواكس وهى أكثر انتشارا بالمقارنة بثايرستور ذو بوابة التحويل الغير متناظرة ولها قيم انهيار عكسي في نطاق عشرات الفولت وتستخدم الثايريستورات ذات بوابة التحويل الغير متناظرة حيث يستخدم صمام عكس التوصيل المتصل بالتوازي على سبيل المثال فى مصادر جهد العواكس أو حيث الانحياز العكسي لن يحدث مطلقا على سبيل المثال نظم تبديل إمدادات الطاقة أو مروحيات الجر للتيار المستمر [٧٧]. يمكن تصنيع الثايريستورات ذات بوابة التحويل مع صمام ثنائي التوصل العكسي في نفس الحزمة والتي تعرف بالثايريستورات ذات بوابة التحويل للتوصيل العكسي [٧٨].

---

٧٤ ثايرستور بوابة تحويل بوصلة (ب ن) إضافية ((distributed buffer gate turn-off thyristor (DB-GTO))

٧٥ ثايرستور ذو بوابة تحويل متناظرة (Symmetrical GTO thyristors, abbreviated S-GTO)

٧٦ ثايرستور ذو بوابة التحويل غير قادر على عرقلة الجهد الانحياز العكسي معروف باسم الثايريستورات ذات بوابة التحويل الغير متناظرة (asymmetrical GTO thyristors, abbreviated A-GTO)

٧٧ أنظمة مروحيات الجر للتيار المستمر (DC traction choppers) تعمل بالضغوط الخارجية الخارجة عن سيطرة المستخدم، الجدول الزمني للسيطرة انخفض إلى أقل من ٥٠% الوقت الأصلي المخصص

٧٨ الثايريستورات ذات بوابة التحويل للتوصيل العكسي (Reverse Conducting thyristors RCGTO)

- **منطقة التشغيل الآمنة**

خلافا للترانزستور ثنائي القطب ذو البوابة المعزولة، يتطلب الثايرستور ذو بوابة التحويل عناصر خارجية مثل دوائر امتصاص الحرارة [٦٠] لتشكيل التيارات اللازمة لوضعي التبديل للتشغيل وإيقاف التشغيل لمنع تدمير الثايرستور. يشتمل الثايرستور خلال فترة التشغيل على القيم الأكبر لتغير التيار مع الزمن للسماح لكامل الثايرستور للوصول إلى وضع التشغيل قبل انخفاض كل التيار. إذا تعدت هذه القيمة فإن المنطقة القريبة من البوابة سوف ترتفع درجة حرارتها بقيم كبيرة مما يجعلها تنصهر بسبب الارتفاع المفرط في التيار. يتم التحكم فى قيم تغير التيار مع الزمن بإضافة مفاعل ساترابل [٧٩] لتشغيل دائرة امتصاص الحرارة، بالرغم من قيم تغير التيار مع الزمن في وضع التشغيل أقل خطورة لقيود الثايرستور ذو بوابة التحويل عن الثايرستور العادي ويرجع هذا بسبب تكوين الثايرستور ذو بوابة التحويل الذي يتكون من العديد من خلايا ثايرستور صغيرة متصلة على التوازي. إعادة التحكم فى المفاعل ساترابل عادة يضع حد أدنى للشرط الزمنى لإيقاف التشغيل المطلوب للدائرة الأساسية للثايرستور ذو بوابة التحويل خلال وضع إيقاف التشغيل فإن الانحياز الأمامي للثايرستور يجب أن يكون محدود حتى اختفاء المتبقي من التيار. الحد الأقصى هو عادة حوالي ٢٠% من قيمة عرقلة الجهد الأمامي. إذا كان ارتفاع الجهد سريع جداً فى وضع إيقاف التشغيل لا يتوقف كل الثايرستور عن التشغيل وسيفشل الثايرستور ذو بوابة التحويل، وغالباً ينفجر، بسبب الجهد والتيار العالي المركز على جزء صغير من الثايرستور وبالتالي هناك ضرورة الى إضافة دوائر امتصاص الحرارة حول الثايرستور للحد من ارتفاع الجهد في وضع إيقاف التشغيل وإعادة التحكم في دائرة امتصاص الحرارة لتثبيت حد أدنى للزمن المناسب لدائرة الثايرستور ذو بوابة التحويل. تتم معالجة الحد الأدنى الزمنى لوضعي التشغيل وإيقاف التشغيل في الدوائر المروحية لموتور التيار المستمر باستخدام متغير تبديل التردد إلى أقل وأعلى قيم التشغيل وهذا يمكن ملاحظته في تطبيقات

---

٧٩ مفاعل ستثربل (saturable reactor) في الهندسة الكهربائية شكل خاص من محث حيث يمكن للقلب مغناطيسي يتشبع عمدا بالتيار الكهربائي المستمر في ملف السيطرة. بمجرد التشبع، ينخفض حث المفاعل ستثربل بشكل كبير. وهذا يقلل المفاعلة الحثية ويسمح بزيادة تدفق التيار المتردد.

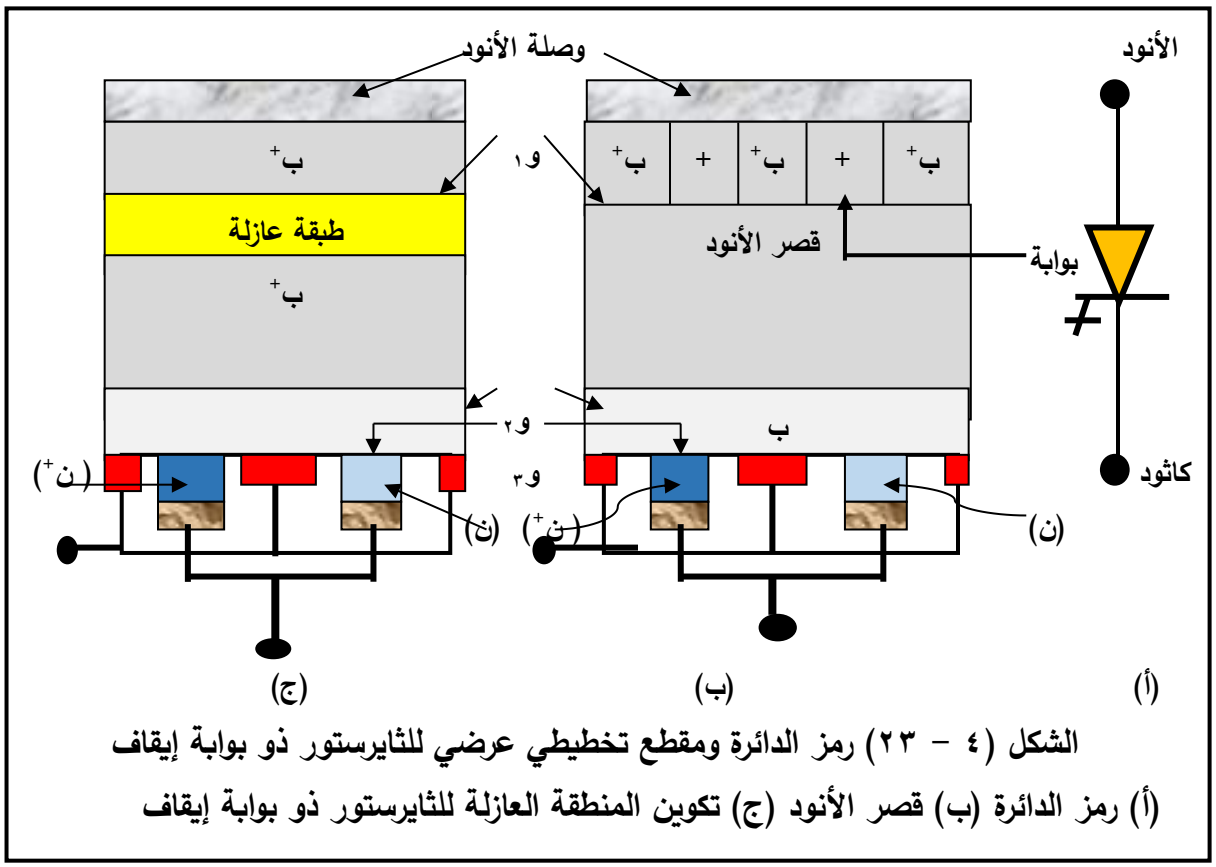
الجر حيث سيتم زيادة التردد كلما يبدأ تشغيل المحرك، ثم يبقى التردد ثابت على كل نطاقات السرعة، ثم ينخفض التردد إلى الصفر بأقصى سرعة.

٤ – ٨ الثايرستور ذو بوابة الإيقاف

يوضح الشكل (٤-٢١) رمز الدائرة ومقطعان تخطيطان مختلفين للثايرستور ذو بوابة إيقاف وهو يتكون من أربع طبقات (ب ن ب ن) بثلاث وصلات، للحصول على كفاءة باعث عالية في نهاية الكاثود، فيجب أن تكون طبقة الكاثود كثيفة التخدير (ن+) ونتيجة لذلك، فإن جهد الانهيار للوصلة (٣) منخفض (عادة ٢٠-٤٠ فولت). طبقة البوابة من النوعية (ب$^{-}$) يجب أن تكون كثافة التخدير فى هذه الطبقة منخفضة للحفاظ على كفاءة باعث جيدة ومن ناحية أخرى، يجب أن تكون المقاومة النوعية لهذه الطبقة منخفضة وبالتالي تتطلب مستوى منشطات عالية التركيز حتى يمكن الحصول على خواص إيقاف تشغيل جيدة ولذلك، يفضل أن تكون كثافة المنشطات في هذه الطبقة عالية ومنتظمة التوزيع [٨٠]. بالإضافة، للحصول على أكبر تيار إيقاف التشغيل، يجب أن تكون وصلة (البوابة – الكاثود) عالية التداخل. الثايرستور ذو بوابة إيقاف بقدرة ٣٠٠٠ أمبير يمكن أن يتكون من طبقات كاثود منفردة كل من قيمتها تصل الى ٣٠٠٠ أمبير ويتم الوصول اليها عن طريق نقطة توصيل واحدة. خصائص التصميم الأكثر شعبية يتكون من شرائح متعددة يتم ترتيبها مسبقاً في حلقات حول مركز الثايرستور. يحدد الحد الأقصى لإعاقة الجهد الأمامي للعنصر بمستوى كثافة المنشطات وسمك منطقة القاعدة من النوع (ن) ولمنع عدة كيلو فولت من الجهد الأمامي يجب أن يبقى مستوى منشطات هذه الطبقة منخفضا نسبيا بينما يكون سمك الطبقة كبير إلى حد كبير (بضع مئات ميكرون). بخلاف حد الجهد الأمامي الأقصى المسموح به أما المجال الكهربائي عند وصلة شبه الموصل (٢) يتجاوز القيمة الحرجة (الانهيار الجليدي) أو أن تكون طبقة القاعدة من النوع (ن) مستنفذه تماما، مما يتيح المجال الكهربائي تلامس إلكترود الأنود (استمرار الجهد). الوصلة بين القاعدة من النوع (ن) والأنود من النوع ب$^{+}$ الوصلة (١). يجب أن تكون طبقة الأنود من

٨٠ كثافة المنشطات في هذه الطبقة عالية منتظمة التوزيع (doping level of this layer is highly graded)

النوع ب$^{+}$ ذات كثافة عالية للحصول على خصائص تشغيل جيدة ومع ذلك، فإن قدرة إيقاف التشغيل لمثل هذا العنصر ضعيفة حيث أن الحد الأقصى للتيار ضعيف جدا وقيم فقد عالية وهناك نهجان أساسيان لحل هذه المشكلة:



الشكل (٤ – ٢٣) رمز الدائرة ومقطع تخطيطي عرضي للثايرستور ذو بوابة إيقاف

(أ) رمز الدائرة (ب) قصر الأنود (ج) تكوين المنطقة العازلة للثايرستور ذو بوابة إيقاف

في النهج الأول، يتم تكوين طبقات ذات كثافة تطعيم عالية من النوع (ن$^{+}$) داخل طبقة الأنود ذات كثافة تطعيم عالية من النوع (ب$^{+}$) ومنطقة الاتصال من نفس مادة الأنود ولذلك، فإن حركة الإلكترونات خلال القاعدة تصل مباشرة إلى منطقة اتصال الأنود دون أن تتسبب في حقن ثقوب من منطقة الأنود ذات كثافة التخدير العالية من النوع (ب$^{+}$). وهذا ما يعرف بأنود القصر الكلاسيكي فى تكوين الثايرستور ذو بوابة إيقاف كما هو موضح في الشكل (٤–٢١ب). بسبب وجود وصلات قصر الأنود تنخفض قدرة عرقلة الجهد العكسي للثايرستور ذو بوابة إيقاف الى قيمة جهد الانهيار العكسي للوصلة (٣) بحد أقصى ٢٠ الى ٤٠ فولت

بالإضافة عدد كبير من مناطق اتصال قصر الأنود تقلل من جودة وصلة الأنود وتقلل من خواص تشغيل العنصر ولذلك، يمكن اختيار كثافة مناطق قصر الأنود بعناية كحل وسط بين خواص التشغيل ووضع إيقاف التشغيل. من جهة أخرى. طبقة شبه موصل عازلة من النوع (ن) متوسطة التخدير جنبا إلى جنب بين القاعدة من نوع (ن) والأنود فإن هذه الطبقة العازلة ذات الكثافة العالية نسبيا تغير شكل نمط المجال الكهربائي في منطقة القاعدة من الشكل الثلاثي الى شكل منحرف وأيضا هذا التغير يساعد على خفض العرض بشكل كبير إلا أن الطبقة العازلة في قصر الأنود التقليدي في تكوين الثايرستور ذو بوابة إيقاف ستزيد من كفاءة مناطق اتصال الأنود ولذلك في تكوينات الهيكل الجديد فإن قصر الأنود بالإجمال يمكن الاستغناء تماما عنها بإدخال طبقة شبه موصل رقيقة من النوع (ب+) كأنها الأنود. يتم تصميم هذه الطبقة بما يسمح بعبور الإلكترونات باحتمال كبير دون تحفيز ثقب الحقن ويسمى هذا هيكل باعث شفاف كما هو موضح فى الشكل (٤ – ٢١ ج).

❖ مبدأ تشغيل الثايرستور ذو بوابة الإيقاف

الثايرستور ذو بوابة إيقاف ذو تكوين متجانس تماما مثل الثايرستور العادي من أشباه الموصلات (ب – ن – ب – ن) ويمكن توضيحه بطريقة مماثلة لمبدأ التشغيل الأساسي للثايرستور. الهيكل (ب – ن – ب – ن) للثايرستور ذو بوابة إيقاف يمكن اعتباره متكون من ترانزستور (ب – ن – ب) متصل بترانزستور ثانى (ن – ب – ن) كما هو موضح في الشكل (٢٢-٤) لهيكل الثايرستور ذو بوابة إيقاف المتكون من الترانزستورين يمكن استنباط:

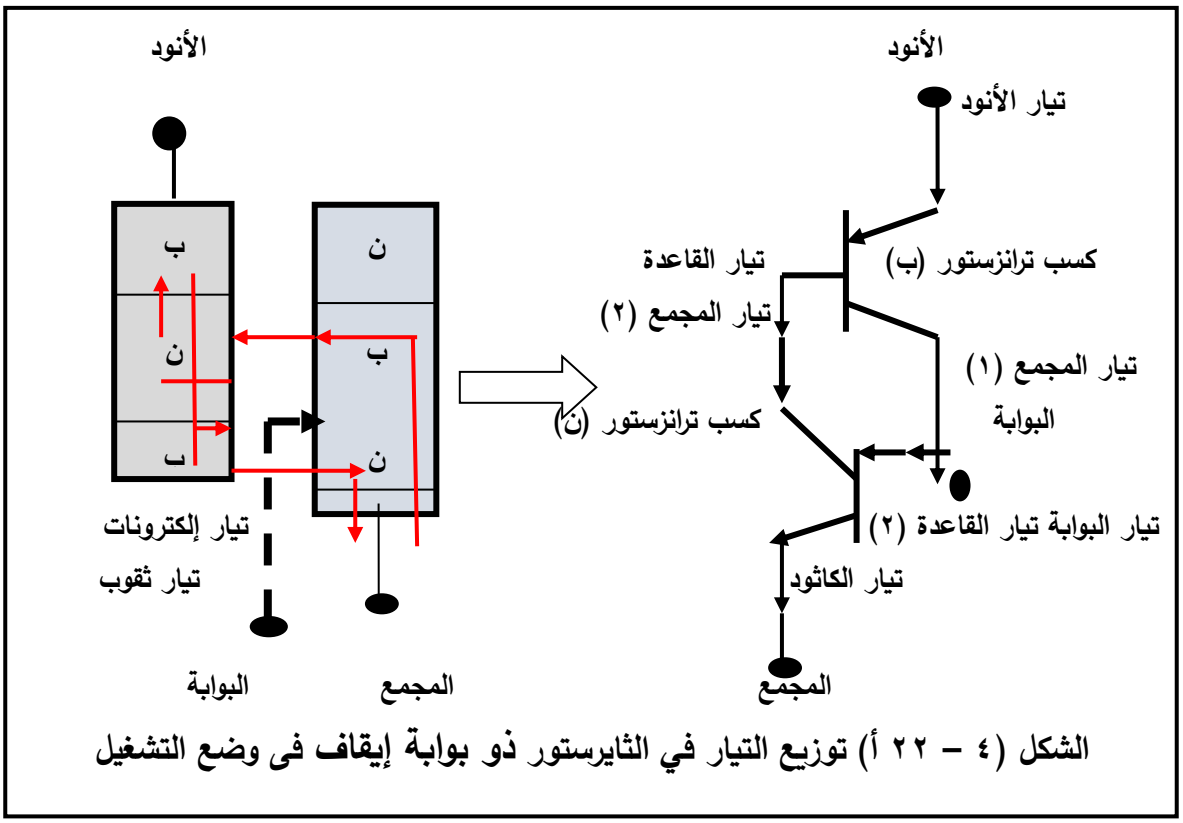
$$i_{C1} = \propto_P \ I_A + \ I_{CBO1}$$ المعادلة (٤-١)

$$i_{B1} = \ i_{C2} = \propto_n \ I_A + \ I_{CBO2}$$ المعادلة (٤-٢)

$$I_K = \ I_A \ + \ I_G \ \ and \ I_A = \ i_{B1} + \ i_{C1}$$ المعادلة (٤-٣)

بالجمع

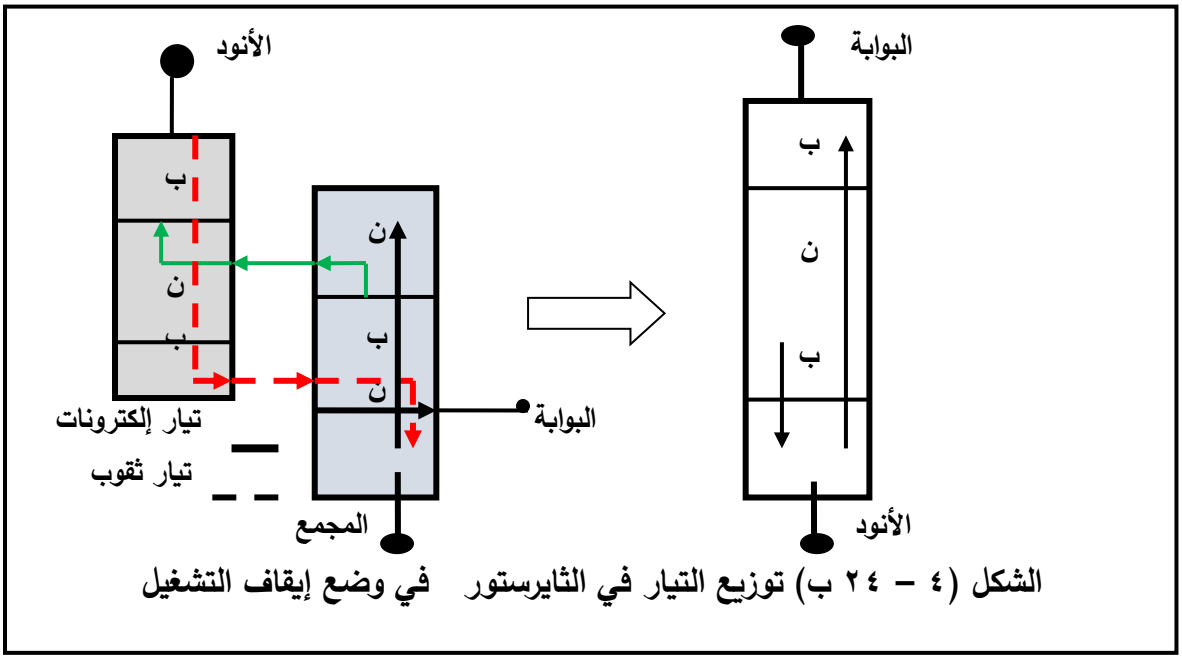
$$\mathbf{I_A} = \frac{\propto_{\mathbf{n}} \mathbf{I_G} + (\mathbf{i_{CBO1}} + \mathbf{i_{CBO2}})}{\mathbf{1} - (\boldsymbol{\alpha_n} + \boldsymbol{\alpha_p})}$$ المعادلة (٤-٤)



الشكل (٤ – ٢٢ أ) توزيع التيار في الثايرستور ذو بوابة إيقاف فى وضع التشغيل

بتطبيق جهد تغذية أمامي (V_{AK}) بين الأنود والكاثود أقل من أعلى جهد عائق، نجد أن كل من تيار (I_{CBO1}) والتيار (I_{CBO2}) قيم صغيرة٠ كذلك إذا كان تيار البوابة (I_G) يساوى صفر فإن تيار الأنود (I_A) أعلى قليلاً عن حاصل جمع ($I_{CBO1} + I_{CBO2}$) فإن كثافة شوائب التخدير ($\propto n$) و ($\propto p$) تحت هذا الشرط، هي قيم صغيرة وحاصل جمعهم أقل من الواحد ($\propto p$ $\propto n$ + 1 >>) والتي تعرف باسم نمط المنع الأمامي. لتبديل العنصر الى وضع التشغيل إما أن يرتفع جهد الأنود حتى يرتفع كل من التيار (I_{CBO1}) والتيار (I_{CBO2}) بعملية تضاعف قيم الانهيار الجليدي أو بحقن تيار للبوابة. كسب التيار (α) لترانزستورات السيلكون يزداد بسرعة كلما زاد تيار المنبع. لذلك، يمكن استخدام أي تقنية تؤدى الى زيادة لحظية لتيار المنبع لتشغيل العنصر. عادة، يتم بحقن تيار داخل منطقة القاعدة من النوع (ب) في اتجاه الاتصال الخارجي للبوابة، كلما اقترب حاصل جمع كسب التيار في كل من النوعان (ن) و(ب) كل على حدة الى الواحد ($\propto p$ $\propto n$ +)، يميل تيار الأنود الى قيم ما لا نهاية. فيزيائيا، كلما اقترب المقدار ($\propto p$ $\propto n$ +) من الواحد يتجه الى حالة التشبع. بمجرد الوصول الى حالة التشبع، يفترض

أن تكون جميع الوصلات لها تحيز أمامي وإجمالي انخفاض الجهد في العنصر يصبح تقريبا مساوياً للجهد في صمام ثنائي (ب ن) واحد. تيار الأنود مقيد فقط بالدائرة الخارجية بمجرد أن يتبدل العنصر الى وضع التشغيل بهذه الطريقة، فإن تيار البوابة الخارجي لم يعد مطلوب للحفاظ على وضع التشغيل، حيث أن عملية التجديد مكتفية ذاتيا. تحدث العودة إلى وضع المنع عندما يصبح تيار الأنود أقل من مستوى عقد التيار. لإيقاف تشغيل العنصر يتم توصيل جهد سالب على طرف البوابة بالنسبة الكاثود. الثقوب المحقونة من الأنود، والمسحوبة من القاعدة من النوع (ب) خلال منطقة الاتصال المعدنية الى طرف البوابة في الشكل (٤-٢٢ ب)٠ انخفاض الجهد الناتج في القاعدة من النوع (ب) أعلى منطقة الأنود من النوع (ن) تبدأ التغذية العكسية للوصلة (٣) وحقن الإلكترونات. تنشأ العملية في محيط القاعدة من النوع (ب) وشرائح المنبع من النوع (ن) وتنكمش منطقة حقن الإلكترونات ويتزاحم تيار الأنود بكثافة عالية في المناطق النائية من البوابة. هذه هي المرحلة الأكثر أهمية في عملية إيقاف تشغيل الثايرستور ذو بوابة إيقاف نظراً لمناطق درجات الحرارة المحلية العالية يمكن أن يسبب فشل العنصر ما لم يتم إخماد مسارات التيار بسرعة.



الشكل (٤ – ٢٤ ب) توزيع التيار في الثايرستور في وضع إيقاف التشغيل

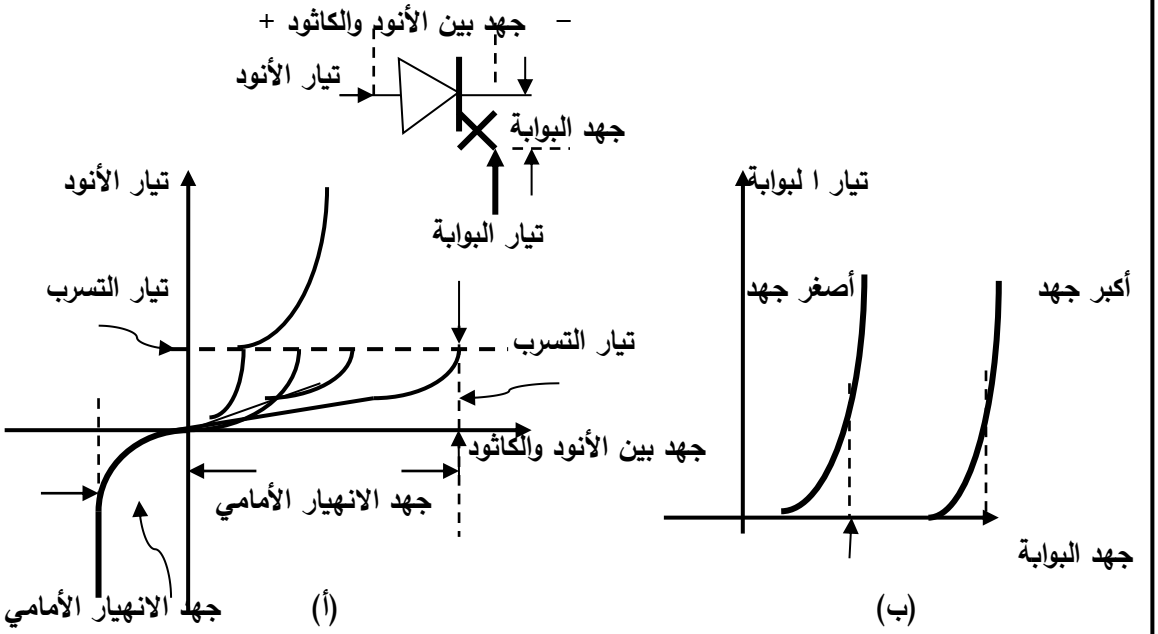
عندما تختفي آخر مسارات التيار، يتوقف حقن الإلكترونات تماما ويبدأ تكوين منطقة الاستنفاد في كل من الوصلة (٢) والوصلة (٣). عند هذه النقطة يبدأ الثايرستور مرة أخرى منع الانحياز الأمامي ومع ذلك، رغم أن تيار الكاثود لم يتوقف يستمر تدفق تيار الأنود الى البوابة، الشكل (٤ – ٢٢ ب) فإن حاملات الشحنات الزائدة فى منطقة القاعدة من النوع (ن) تنتشر في اتجاه الوصلة (١) ثم تتضاءل بقايا التيار بشكل مضاعف كلما انخفضت حاملات الشحنات الزائدة في القاعدة من النوع (ن) بالتلاحم وبمجرد اختفاء ذيل التيار يستعيد العنصر حالة الاستقرار لخصائص المنع. يساعد قصر الأنود أو الباعث الشفاف في تضاؤل ذيل التيار بشكل أسرع بتوفير مسار بديل للإلكترونات من القاعدة من النوع (ن) للوصول إلى وصلة الأنود دون التسبب في حقن ثقوب ملموسة من الأنود.

❖ الخصائص الديناميكية للثايرستور ذو بوابة إيقاف

- حالة استقرار الخرج وخصائص البوابة

هذه الخاصية في الربع الأول مماثلة جدا لتلك الخاصية في الثايرستور كما هو موضح في الشكل (٤ – ٢٣ أ) ٠ قيم إغلاق تيار الثايرستور ذو بوابة إيقاف أعلى من القيم المماثلة في الثايرستور. تسرب التيار الأمامي هو أيضا أعلى إلى حد كبير وفي الواقع، إذا كان تيار البوابة غير كافي لتشغيل الثايرستور ذو بوابة الإيقاف فهي تعمل كأنها جهد عالي وكسب منخفض للترانزستور مع تيار الأنود الكبير. تجدر الإشارة إلى أن الثايرستور ذو بوابة إيقاف يمكنه منع الجهد الأمامي فقط عندما تكون تغذية البوابة سالبة بالنسبة الى الكاثود خلال حالة المنع الأمامي، على الأقل، يجب أن تكون قيمة المقاومة المتصلة عبر طرفي البوابة – الكاثود قيمة مناسبة – زيادة قيمة هذه المقاومة يقلل منع الجهد الأمامي للثايرستور ذو بوابة إيقاف، الثايرستور ذو البوابة الغير متماثل له جهد انهيار عكسي صغير (من ٢٠ الى ٣٠ فولت) وقد يؤدي أن يعمل العنصر في مرحلة الانهيار الجليدي العكسي في ظل ظروف معينة. هذا الشرط غير خطير بالنسبة للثايرستور ذو بوابة إيقاف شريطة أن يكون زمن الانهيار والتيار بقيم

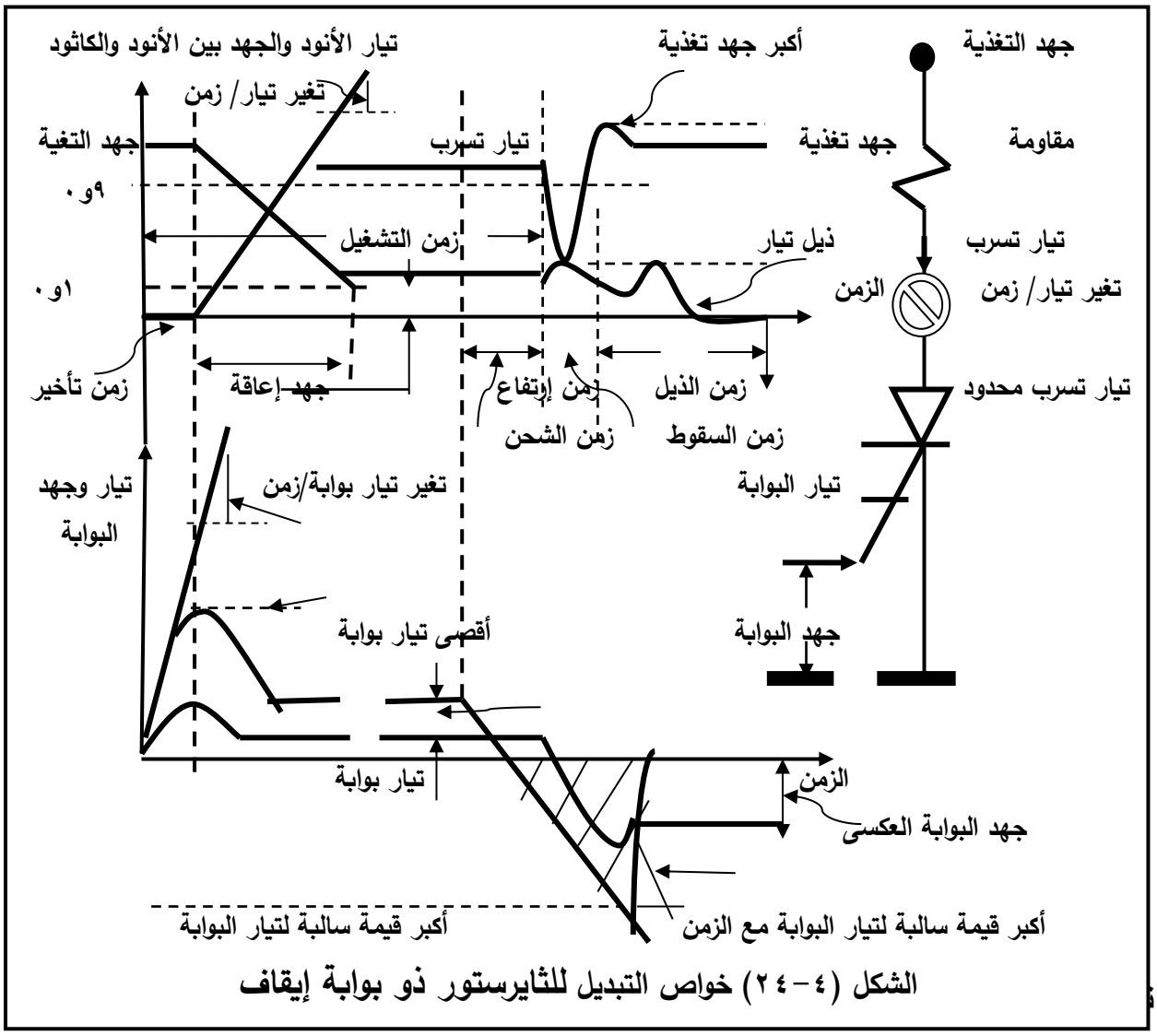
صغيرة. جهد البوابة خلال هذه الفترة يجب أن يبقى سالب ويوضح الشكل (٤-٢٣ ب) خصائص البوابة في الثايرستور ذو بوابة إيقاف. المنطقة بين المنحنيات الأدنى والأكبر تعكس اختلاف المعاملات بين الثايرستور ذو بوابة إيقاف الفردي.



الشكل (٤-٢٣) خصائص الثايرستور ذو بوابة إيقاف في حالة الاستقرار
(أ) خواص الخرج (ب) خواص البوابة

هذه الخصائص صالحة لتطبيقات التيار المستمر وتيار البوابة المتردد ذات التردد المنخفض ولكنها لا تعطي الجهد الصحيح عند تشغيل الثايرستور ذو بوابة إيقاف مع تغير التيار بالنسبة للزمن فى هذه الحالة جهد البوابة أعلى بكثير. يوضح الشكل (٤ -٢٤) خصائص التبديل للعنصر ويشير إلى دائرة تبديل لتحميل مقاوم للتيار المستمر والتي تظهر على الجانب الأيمن من الشكل ٠ عندما يكون العنصر في وضع إيقاف التشغيل فإن تيار الأنود يساوى صفر والجهد بين الأنود والكاثود يساوى جهد التغذية ($V_{AK} = V_d$). لتحويل العنصر الى وضع التشغيل، يتم حقن البوابة بنبضة تيار موجبة من خلال نقطة اتصال البوابة. يضمن تيار البوابة بقيم كبيرة أن يتم تشغيل كافة شرائح الكاثود في العنصر في وقت واحد وفي فترة زمنية قصيرة. هناك تأخير بين تطبيق نبضة البوابة والجهد الواقع على الأنود، ما يسمى دورة زمن تأخير

التشغيل (t_d) وبعد هذا الوقت يبدأ جهد الأنود في السقوط حين يبدأ تيار الأنود في الارتفاع نحو قيمه ثابتة (I_L) ضمن فاصل زمني (t_r) تصل قيمة التيار الى ١٠% من قيمته الأولى و ٩٠% من قيمته النهائية على التوالي ويسمى الفاصل الزمني (t_r) زمن ارتفاع التيار أو زمن سقوط الجهد.



الشكل (٤-٢٤) خواص التبديل للثايرستور ذو بوابة إيقاف

كل من زمن تأخير التشغيل (t_d) والحد الأقصى المسموح به لتغير التيار مع الزمن ($\partial i/\partial t$) يعتمد كثيرا على قيم تيار البوابة، القيم العالية لتيار البوابة (I_{gM}) وتغير تيار البوابة مع الزمن ($\partial ig/\partial t$) عند وضع التشغيل يقلل هذه الأوقات ويزيد الحد الأقصى المسموح به لتغير تيار

الأنود مع الزمن فى حالة التشغيل ($\partial ig/\partial t$). أثناء زمن تأخير التشغيل (t_d) والفاصل الزمني (t_r) فقط وبعد هذه الفترة الزمنية يصل جهد البوابة (V_G) وتيار البوابة (i_g) إلى قيمة ثابتة. الحد الأدنى للفترة الزمنية لوضع التشغيل (t_{ONmin}) مطلوب لتيار الأنود المتجانس للتوصيل في الثايرستور ذو بوابة إيقاف. هذا الوقت ضروري للعنصر حتى يتمكن من إيقاف تشغيل تيار الأنود ولإيقاف تشغيل العنصر يتم تغذية البوابة بجهد سالب بالنسبة الى الكاثود. ويبدأ التيار في الزيادة في الاتجاه السلبي ومع ذلك، جهد الأنود والتيار أو جهد البوابة لا يتغير بشكل ملحوظ من مستويات تشغيلها لفترة أخرى تسمى زمن التخزين (t_s). يزيد وقت التخزين مع تيار الأنود لإيقاف تشغيل وينخفض مع تغير تيار البوابة مع الزمن ($\partial_{igq}/\partial t$). خلال فترة التخزين يتحول تيار الحمل عند نهاية الكاثود تدريجيا إلى طرف البوابة، في نهاية زمن التخزين يصل تيار البوابة لأقصى قيمة سالبة (I_gQ). عند هذه النقطة تبدأ كل من الوصلات (٢) و(٣) في الثايرستور ذو بوابة إيقاف عرقلة الجهد ونتيجة لذلك، يبدأ جهد بين البوابة والكاثود والجهد بين الأنود والكاثود نحو الارتفاع الى قيمها النهائية بينما يبدأ تيار الأنود في التناقص نحو الصفر وفي نهاية زمن سقوط التيار (t_f) يصل تيار الأنود الى ١٠% من قيمته الأولية بعد كل من تيار الأنود وتيار البوابة – الأنود يبدأ في التدفق في شكل ذيل تيار لفترة زيادة. يستخدم العنصر عادة دائرة امتصاص (مقاومة ومكثف) ولذلك، لا يبدأ الجهد بين الأنود والكاثود (V_{AK}) في ارتفاع ملحوظ حتى نهاية زمن سقوط التيار (t_f) عند هذه النقطة يبدأ (V_{AK}) في الارتفاع بسرعة ويتعدى جهد تغذية (V_d) أقصى جهد تغذية (V_{dM}) بسبب رنين مكثف دائرة الممتص مع تغير التيار مع الزمن المحدد يحث الملف قبل أن يصل الى قيمته المستقرة عند جهد التغذية (V_d). يجب عدم تحفيز الثايرستور ذو بوابة إيقاف ضمن الحد الأدنى لفترة إيقاف التشغيل (دقيقة) لتجنب خطر الفشل نظراً لوضع التشغيل. الثايرستور ذو بوابة إيقاف له كسب منخفض في وضع إيقاف التشغيل في حدود ٤–٥.

❖ **دائرة تحفيز البوابة للثايرستور ذو بوابة إيقاف**

١. يجب أن تفي المهام التالية تحفيز البوابة للثايرستور ذو بوابة إيقاف:

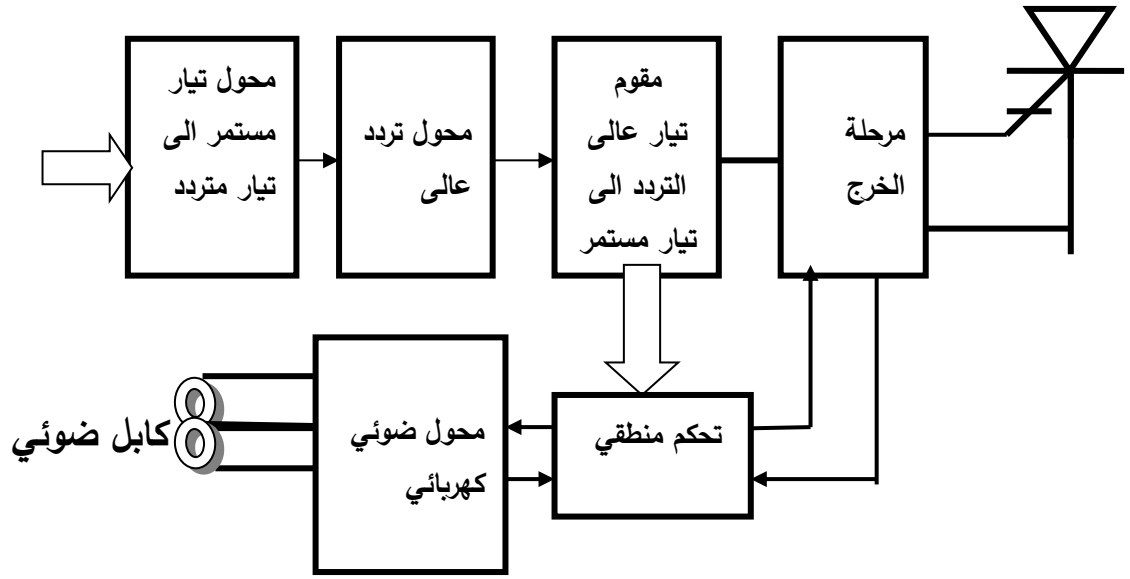
٢. يحول الثايرستور الى وضع التشغيل عن طريق نبضة تيار عالية (I_{GM})

٣. الحفاظ على التوصيل من خلال توفير تيار بوابة مستمر (I_G) ويعرف أيضا باسم تيار النافذة الخلفية.

٤. إيقاف تشغيل الثايرستور بنبضة تيار بوابة عالية سلبية.

٥. تعزيز وضع المنع للثايرستور ذو بوابة إيقاف بجهد بوابة سلبي.

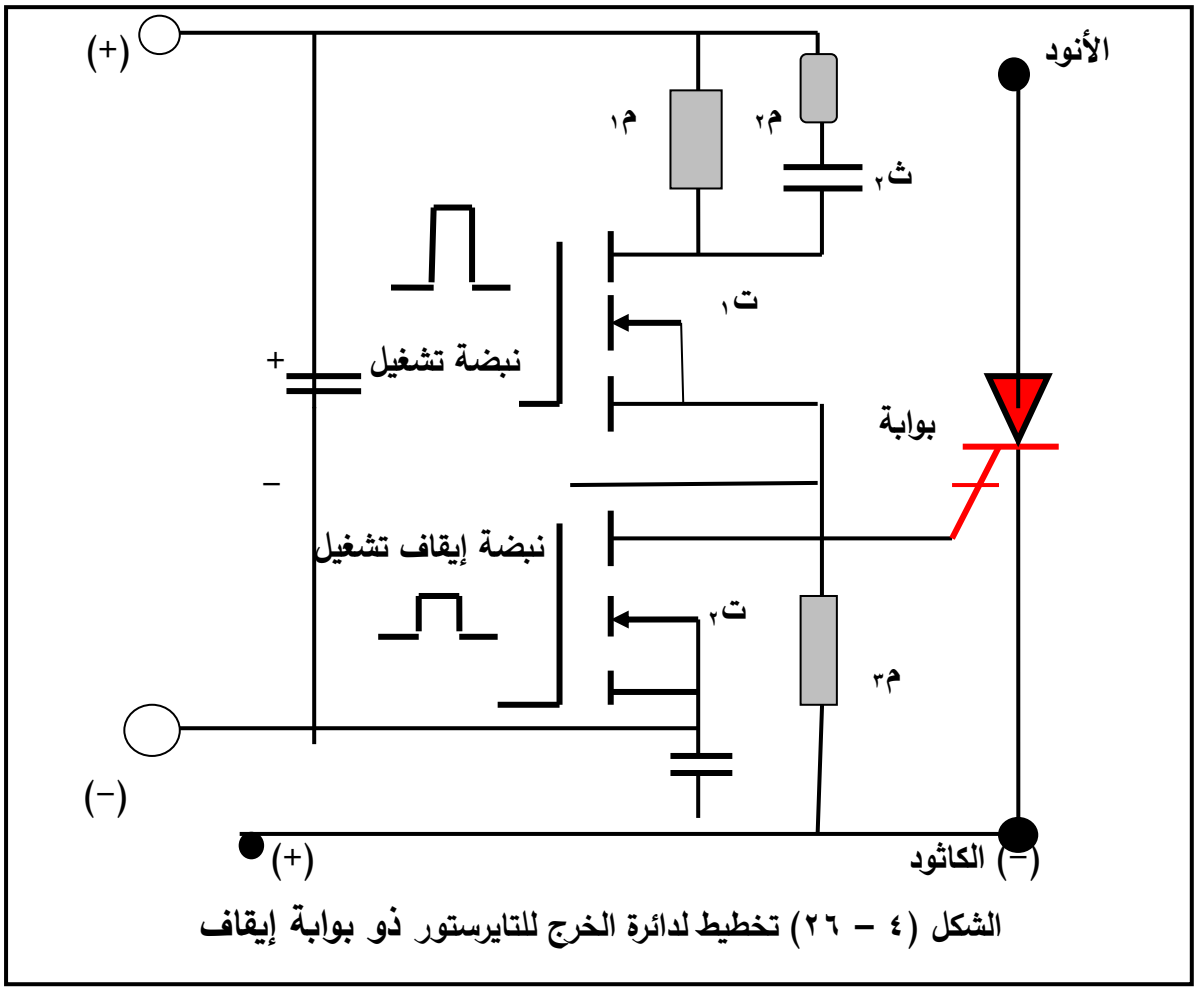
يوضح الشكل (٤-٢٥) ترتيب تحفيز البوابة النموذجي للثايرستور ذو بوابة إيقاف للطاقة العالية في الرسم التخطيطي بالشكل (٤-٢٦) فمن المفترض أن يكون هناك فرق في الجهد بعدة كيلو فولت بين عنصر التحكم الرئيسي ووحدات البوابة الفردية.



الشكل (٤ – ٢٥) شكل تخطيطي دائرة تحفيز بوابة للثايرستور ذو بوابة إيقاف

يتم توصيل نبضات التشغيل وإيقاف التشغيل للثايرستور ذو بوابة إيقاف الى وحدات البوابة الفردية من خلال كابلات ألياف ضوئية ويتم تحويل الإشارات الضوئية إلى إشارات كهربائية عن طريق محول كهربائي ضوئي. تنتج الإشارات الكهربائية من خلال وحدة تحكم منطقية إشارات التشغيل وإيقاف التشغيل لمرحلة الخرج بدورها ترسل تيار بوابة موجب وسلبي إلى الثايرستور

ذو بوابة إيقاف تبعاً لمتطلبات وحدة التحكم المنطقي التي تشرف على التوصيل للثايرستور ذو بوابة الإيقاف عن طريق رصد الجهد بين البوابة – الكاثود. يتم ترحيل أي خطأ إلى الوراء عبر كابلات الألياف البصرية لعنصر التحكم الرئيسي. إمدادات الطاقة لوحدات تحفيز البوابة مستمدة من إمدادات طاقة مشتركة من خلال وحدات (SMPS) تردد عالي ٠



الشكل (٤ – ٢٦) تخطيط لدائرة الخرج للتايرستور ذو بوابة إيقاف

يوضح الشكل (٤–٢٦) دائرة تطبيقية لمرحلة الخرج. يرسل مفتاح التبديل العلوي (ت١) نبضة بوابة موجبة لبوابة الثايرستور ذو بوابة الإيقاف. فى لحظة التبديل لوضع تشغيل للمفتاح (ت١) يسلك المكثف (ث٢) سلوك دائرة قصر كهربائية ويتحدد تيار البوابة الموجب بجمع المقاومتان (م١) و (م٢) على التوازي ومع ذلك، في حالة الاستقرار تحدد المقاومة (م١) قيمة تيار البوابة. يتم استخدام مفتاح التبديل في الأسفل (ت٢) لتغذية بوابة الثايرستور ذو بوابة

الإيقاف بجهد سالب بالنسبة الى الكاثود. حيث، يتدفق تيار بوابة سالب بقيمة كبيرة نسبيا خلال وضع إيقاف التشغيل، لم تستخدم مقاومة خارجية بالتوالي مع مفتاح التبديل (ت٢). بدلاً من ذلك، تستخدم في وضع التشغيل مقاومة مفتاح التبديل (ت٢) لهذا الغرض. في الممارسة العملية، يتم توصيل عدد كبير من مفاتيح التبديل بالتوازي للحصول على قيم التيار المطلوب لمفتاح التبديل (ت٢)، مقاومة بقيمة صغيرة (م٣) متصلة بين طرفي البوابة والكاثود للثايرستور ذو بوابة الإيقاف لضمان الحد الأدنى من جهد المنع الأمامي.

❖ تصنيف الثايرستور ذو بوابة إيقاف

- معدلات قيم الجهد والتيار فى حالة الاستقرار

(فدرم) وهو أقصى جهد أمامي متكرر [٨١] يمكن للثايرستور ذو بوابة إيقاف منعه في الاتجاه الأمامي، على افتراض خط التردد الموجي لجهد جيبي. من المهم ملاحظة أن الثايرستور ذو بوابة إيقاف يمكنه منع قيم الجهد فقط إذا تم تغذية البوابة بانحياز عكسي أو على الأقل متصل بالكاثود عن طريق مقاومة منخفضة القيمة. توفر الشركات المصنعة الثايرستور ذو بوابة إيقاف بجهد أمامي يتحمل السعة كدالة للجهد العكسي بين البوابة والكاثود (و/أو المقاومة) لقيم تغير أمامي للجهد مع الزمن.

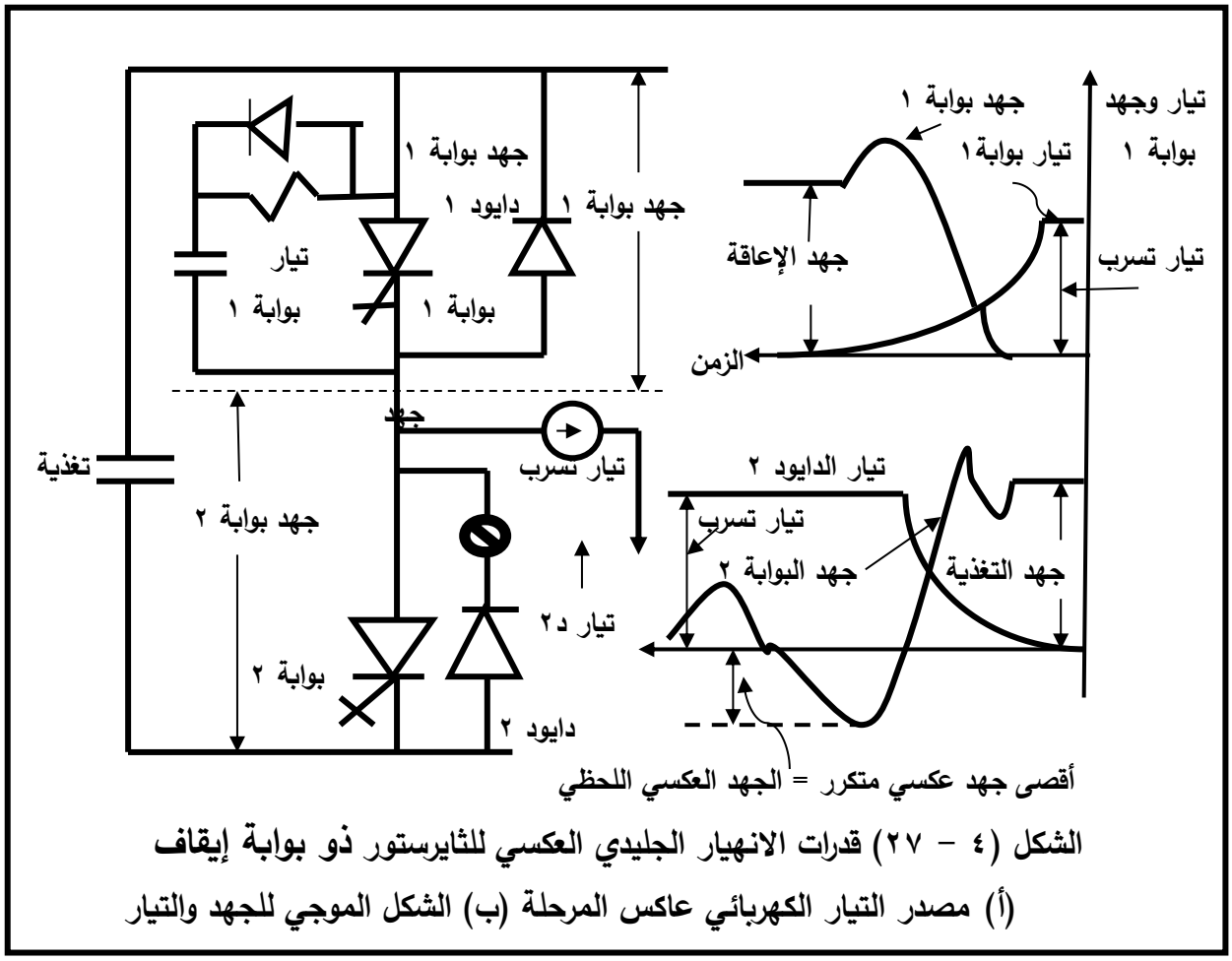
- (فررم) هو أقصى جهد عكسي متكرر [٨٢] يمكن أن يتحمله الثايرستور ذو بوابة إيقاف وقيمته في كل الثايرستورات ذو بوابة إيقاف الغير متماثلة من ٢٠ الى ٣٠ فولت، وبذلك يتحدد بجهد انهيار وصلة البوابة– الكاثود. نظراً لهيكل قصر الأنود في العنصر فإن وصلة الأنود – القاعدة الوصلة (١) لا تمنع أي من الجهد العكسي لا يشبه الانهيار الجليدي العكسي، قيم أقصى جهد عكسي متكرر يمكن أن تتعدى لفترة زمنية قليلة بدون تحطيم العنصر. الانهيار

---

٨١ أقصى جهد أمامي متكرر Maximum repetitive forward voltage = VDRM, the maximum amount of voltage the diode can withstand in forward–bias mode, in repeated pulses.

٨٢ أقصى الجهد عكسي متكرر Maximum repetitive reverse voltage = V_{RRM}, the maximum amount of voltage the diode can withstand in reverse–bias mode, in repeated pulses.

الجليدي العكسي [٨٣] له قدرات مفيدة للثايرستور ذو بوابة إيقاف في بعض الحالات كما هو موضح في الشكل (٤– ٢٧).



الشكل (٤ – ٢٧) قدرات الانهيار الجليدي العكسي للثايرستور ذو بوابة إيقاف
(أ) مصدر التيار الكهربائي عاكس المرحلة (ب) الشكل الموجي للجهد والتيار

- في مصدر الجهد عاكس المرحلة في الشكل (٤–٢٧ أ)، مثل الثايرستور ذو بوابة إيقاف تتحول البوابة (G1) الى وضع إيقاف التشغيل ويبدأ تيار البوابة (I_{G1}) في الانخفاض. يتم نقل الفرق بين تيار الحث وتيار البوابة ($I_L - I_{G1}$).

---

٨٣ الانهيار الجليدي العكسي Avalanche breakdown. It is a form ofelectric current multiplication that can allow very large currents within materials. It is a type of electron avalanche. The avalanche process occurs when carriers in the transition region are accelerated by the electric field to energies sufficient to create mobile or free electron–hole pairs via collisions with bound electrons.

• في جهد مصدر عاكس المرحلة في الشكل (٤ – ٢٧أ)، كلما تحولت البوابة (١) الى وضع إيقاف التشغيل يبدأ تيار البوابة (١) في التناقص. الفرق فى التيار بين تيار التسرب وتيار البوابة (١) ينتقل الى المكثف في دائرة امتصاص الحرارة للبوابة (١) ويبدأ الجهد على البوابة (١) في الزيادة. عندما يصبح مساوياً لجهد المصدر، فإن تغذية الصمام الثنائي (د٢) منحاز بجهد أمامي ومع ذلك، بسبب جهد الانتعاش الأمامي (V_{fr}) في الصمام الثنائي (د٢) يتعدى الجهد العكسي خلال البوابة (٢) قيم أقصى الجهد عكسي متكرر للبوابة (٢) وتدفعها الى الانهيار الجليدي العكسي – هذا الشرط ليس خطير للبوابة (٢) لتقدم زمن الانهيار مع تيار صغير (عادة حوالي ١٠ و١٠٠٠ ميكرو ثانية على التوالي). ومع ذلك، يجب أن يظل جهد البوابة سالب خلال هذا الوقت.

• جهد التيار المستمر: هو أقصى جهد للتيار المستمر يمكن أن يتحمله العنصر. تخطى هذا الجهد لا يؤدي مباشرة إلى فشل العنصر، ولكن احتمال فشل الإشعاع الكوني يزيد تدريجيا مع تطبيق الجهد.

• التيار المستمر هو متوسط الحد الأقصى والمتوسط التربيعي [٨٤] للتيار على التوالي المحددين في درجة حرارة معينة مع الافتراض نصف موجه جيبيه للتيار عند تردد القدرة.

• أقصى طفرة للتيار الأمامي[٨٥](I_{FSM}) هي قيمة الذروة القصوى لطفرة التيار المسموح بها لتردد القدرة نصف جيبيه الغير متكررة. يفترض تطبيق النبضة في لحظة عندما يكون الثايرستور ذو بوابة إيقاف قيد التشغيل عند أقصى درجة الحرارة. الجهد عبر العنصر بعد الزيادة يجب أن يكون صفراً.

• ($\int i2dt$) هو قيمة حد تكامل تيار الطفرة [٨٦] بافتراض نصف موجه جيبيه لطفرة التيار بشرط أن تكون درجة حرارة الوصلة عند قيمتها القصوى قبل الطفرة والجهد على العنصر يتبع الطفرة والمفترض أن تكون قيمته صفر. قيمة التيار عند درجة الحرارة (i2t) لفيوز لشبه

---

٨٤ متوسط الحد الأقصى والمتوسط التربيعي maximum average and RMS on state current (IFAVM and IFRMS)

٨٥ أقصى طفرة للتيار الأمامي (I_{FSM}) maximum surge current

٨٦ حد تكامل تيار الطفرة ($\int i2dt$) limiting value of the surge current integral

الموصل يجب أن تكون أقل من القيمة من أجل حماية الثايرستور ذو بوابة الإيقاف. تكامل التيار مع الزمن ($\int i\,dt$) كدالة لعرض نبضة الطفرة والتي توفرها الشركة المصنعة.

- (V_F) قيمة الجهد الأمامي اللحظي الواقع مقابل التيار الأمامي اللحظي عند درجات الحرارة المختلفة.
- (P_{av}): شكل الطول الموجي للتيار (على سبيل المثال. موجه جيبيه، موجه مربعة) رسم متوسط الطاقة المبددة كدالة لمتوسط التيار يتم توفيره من قبل الشركات المصنعة في درجات حرارة معينة.
- (I_H) تيار الحفظ للثايرستور ذو بوابة إيقاف، يعتبر هذا التيار (G_{TO1}) ذو قيمه مرتفعة بالمقارنة لتصنيف ثايرستور مشابه وقد تنشأ مشكلة خطيرة بسبب تباين تيار الأنود نظراً لأن العنصر قد لا يستجيب "في وقت مناسب ويمكن تجنب هذه المشكلة بتغذية تيار بشكل مستمر داخل البوابة خلال فترة تشغيل العنصر. ينبغي أن يكون تيار البوابة حوالي ٢٠% أعلى من التيار المحفز للبوابة (I_{GT}) عند أقل درجة حرارة متوقعة.
- ($\partial i/\partial t$ crit) الحد الأقصى للقيمة المسموح بها لمعدل تغير التيار الأمامي خلال وضع التشغيل. تعتمد هذه القيمة إلى حد كبير على قيمة ذروة تيار البوابة ومعدل الزيادة في تيار البوابة. يضمن تيار البوابة الكبير أن جميع قطاعات الكاثود في العنصر قد تحولت الى وضع التشغيل في وقت واحد، وخلال فترة زمنية قصيرة حيث لا تنشأ بقعة ساخنة محلية.
- قيم تغير تيار البوابة مع الزمن ($\partial i_g/\partial t$) وأقصى قيمة لتيار البوابة (I_{gM}) المحددة في شروط التشغيل والتي يجب أخذها في الاعتبار كأقل قيمة.

❖ مواصفات البوابة

- العلاقة بين جهد وتيار البوابة: سلوك التيار اللحظي كدالة لجهد البوابة صالحة لتطبيقات تيار البوابة المستمر وتطبيقات تيار البوابة المتردد منخفض الترددات. لم يحدد جهد البوابة عند التبديل الى وضع التشغيل من جهد الأنود العالي بزيادة التيار المرتفع بالنسبة للزمن ($\partial i/\partial t$) وبزيادة تيار البوابة المرتفع بالنسبة للزمن (∂ig / ∂t) في هذه الحالة جهد البوابة أعلى بكثير. عموما معاوقة وصلة الكاثود– بوابة للعنصر أقل بكثير من الثايرستور التقليدية.

• جهد وتيار البوابة (V_{gt}, I_{gt}): تيار تحفيز البوابة (I_{gt}) وجهد (V_{gt})، الجهد اللحظي لوصلة البوابة – الكاثود عند تدفق تيار تحفيز البوابة (I_{gt}) داخل البوابة. يعتمد تيار تحفيز البوابة (I_{gt}) على درجة حرارة الوصلة ويرتفع بسرعة مع تخفيض درجة الحرارة الوصلة. تيار تحفيز البوابة (I_{gt}) مجرد تحديد الحد الأدنى للتيار الخلفي اللازم لتشغيل الثايرستور ذو بوابة إيقاف عند تغير التيار مع الزمن ($\partial i/\partial t$) والحفاظ عليه في التوصيل.

• الجهد الأقصى العكسي المتكرر للبوابة (V_{grm}) يتجاوز الجهد الذي يدفع وصلة البوابة – الكاثود إلى الانهيار الجليدي.

• تيار الذروة العكسي المتكرر للبوابة (I_{grm}) عند الجهد الأقصى العكسي المتكرر للبوابة (V_{grm}) ودرجة الحرارة القصوى للوصلة ($T_{j\ max}$).

• التيار السالب الأعلى للبوابة في وضع إيقاف التشغيل (I_{gqm}) يجب تصميم وحدة بوابة لتوصيل هذا التيار تحت أي ظرف من الظروف وهو دالة لتيار الأنود في وضع إيقاف تشغيل، تيار البوابة المرتفع بالنسبة للزمن ($\partial i_g / \partial t$) خلال وضع إيقاف تشغيل ودرجة حرارة الوصلة.

❖ المواصفات ذات العلاقة بأداء التبديل

• يمكن تخفيض التأخير الزمنى لوضع التشغيل (t_d) وزمن هبوط جهد الأنود (t_r) كل بتغير تيار البوابة المرتفع مع الزمن ($\partial i_g / \partial t$) وأقصى تيار للبوابة ($I_{gM}$) لجهد الأنود في وضع التشغيل وتغير التيار مع الزمن ($\partial i/\partial t$)

• الحد الأدنى للزمن (t_{on} min) المطلوب للثايرستور ذو بوابة إيقاف لتكوين تيار أنود متجانس ضروري للعنصر ليتمكن من إيقاف تشغيل تيار الأنود.

• تحددها الشركات المصنعة طاقة التبديد (E_{ON}) أثناء كل عملية تشغيل كدالة لتيار تشغيل الأنود لأوضاع التشغيل المختلفة مع تغير التيار مع الزمن ($\partial i/\partial t$) وجهد تشغيل الأنود تقلل طاقة التبديد (E_{ON}) مع زيادة أقصى قيمة لتيار البوابة (I_{gM}).

• أكبر تيار أنود (I_{Fgqm}) يمكن يكرر وضع إيقاف التشغيل من خلال تيار بوابة سالب ويمكن زيادته عن طريق زيادة قيمة إيقاف تشغيل مكثف دائرة الممتص التي تحدد تغير الجهد مع الزمن ($\partial v/\partial t$) في وضع إيقاف التشغيل. تغير سالب كبير لتيار البوابة مع الزمن

($\partial i_g/\partial t$) أثناء وضع إيقاف التشغيل مما يحد ($\partial v/\partial t$) في تبديل إيقاف تشغيل العناصر وتساعد أيضا لزيادة أكبر تيار أنود (I_{Fgqm}).

- **زمن التخزين (t_S) يحدد الفترة بين بدء تيار البوابة السالب والانخفاض في تيار الأنود. القيمة العالية لتيار الأنود في وضع إيقاف التشغيل ودرجة حرارة الوصلة تتزايد فى حين أن تيار البوابة المرتفع السالب ($\partial i_g/\partial t$) أثناء إيقاف التشغيل يتناقص.**
- **زمن السقوط (t_f) تيار الأنود يمكن ألا يتأثر كثيرا بالتحكم في جهد البوابة.**
- **الحد الأدنى لزمن الإيقاف ($\min T_{off}$) قبل تحفيز الثايرستور ذو بوابة إيقاف مرة أخرى بتيار بوابة موجب. في حالة إعادة تحفيز العنصر أثناء زمن التحويل لوضع التشغيل يمكن أن يتسبب فى تحطيم العنصر.**
- **ترتفع طاقة التبديد خلال عملية إيقاف تشغيل (E_{off}) العنصر بزيادة تيار الأنود لإيقاف التشغيل ودرجة حرارة الوصلة في حين تنخفض مع إيقاف تشغيل سعة الممتص.**

التطبيقات:

التطبيقات الرئيسية في محركات السيارات متغيرة السرعة والعواكس عالية الطاقة والجر. تزايد إحلال ثايرستورات التخفيف ذات البوابة المتكاملة بدلا من الثايرستورات ذات بوابة التحويل التي ساهمت فى تطوير الثايرستورات ذات بوابة التحويل، وأيضا ترانزستورات ثنائية القطب ذات البوابة المعزولة.

٤– ٩ الثايرستورات ذو بوابة التخفيف المتكاملة (إيجكت) [٨٧]

الثايرستور ذو بوابة تخفيف متكامل أو (إيجكت) أحد العناصر العالية الطاقة المتقدمة لتحويل الطاقة التي لها معايير جديدة للأداء فيما يتعلق بالقدرة، والموثوقية، والسرعة، الكفاءة، التكلفة، الوزن والحجم. وعلى الرغم من هذه التحسينات المتتابعة الرئيسية على عدة اتجاهات، فإن الثايرستورات ذو بوابة التخفيف المتكاملة هي البارزة والمتاحة اليوم في قطاعات الإنتاج والتي تستخدم لتبديل التيار الكهربائي في المعدات الصناعية. وهي ذو علاقة بالثايرستور ذو بوابة أيقاف ويعتبر هذا العنصر مفتاح طاقة يمكن السيطرة عليه بشكل كامل، مما يعني أنه يمكنه التبديل على حد سواء في وضع التشغيل وإيقاف التشغيل من خلال طرف تحكم (البوابة). محرك البوابة متكامل إلكترونيا مع عنصر الثايرستور. السعي الدائم في عالم تحويل الطاقة لإيجاد تقنية تبديل مثالية مثل التحويل، بعبارات عامة له المتطلبات التالية:

- **تيار مرتفع لكل من قيم (إيقاف التشغيل – الجزر التربيعي – المتوسط – أكبر قيمة – الطفرات الناشئة)**
- **جهد مرتفع لكل من القيم (القصوى المتكررة – الطفرات – استمرارية التيار المستمر)**
- **سرعة التبديل وقصر زمن (التأخير للتشغيل وإيقاف التشغيل – للارتفاع والسقوط – للتشغيل وإيقاف التشغيل)**
- **قيم فقد قليلة (للتوصيل والتبديل)**
- **تردد عالي (لسرعة التبديل وفقد قليل للتبديل)**
- **موثوقية عالية (فشل عشوائي منخفض – الطاقة العالية ودورات درجة الحرارة – استقرار منع عالية، عدد عناصر قليلة)**
- **تكوين مدمج (عدد عناصر قليلة – فقد بسيط)**

السعي في تطبيق هذه المتطلبات لتصميم العناصر في مجالين اثنين هما:

مجال تكوين الترانزستور ومجال تكوين الثايرستور حيث يفضل الثايريستور لقيم الفقد المنخفض

---

٨٧ الثايرستور ذو بوابة تخفيف متكامل (IGCT) integrated gate–commutated thyristor

في التوصيل كما يفضل الترانزستور لقدراته على تطبيقات إيقاف التشغيل الوعرة. يستخدم العديد من العناصر، مقسمة على مجالات ويتم السعي للحصول على الأفضل من كلا الاتجاهين، استغلال الأداء الجيد للتشغيل في الثايريستورات، واستخدام خصائص الترانزستور فيما قبل المراحل الحرجة لإيقاف التحويل.

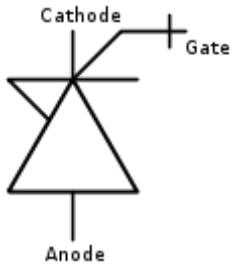
الجدول (٤ – ٤) العناصر المستنبطة من تكوين الهياكل في الترانزستور والثايرستور

الثايرستورات	الرمز	الترانزستورات
ثايرستور ذو بوابة إيقاف Gate Turn-Off Thyristor	GTO	ترانزستور ثنائي القطبية BIPOLAR TRANSISTOR
ثايرستور م أ س خاضع MOS-Controlled Thyristor	MCT	ترانزستور دارلينغتون DARLINGTON TRANSISTOR
ثايرستور خاضع بالمجال Field-Controlled Thyristor	FCT	ترانزستور م أ س المتأثر بالمجال MOSFET
ثايرستور م أ س إيقاف تشغيل MOS Turn-Off Thyristor	MTO	ترانزستور ثنائي القطبية معزول البوابة IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)
ثايرستور تبديل الباعث	EST	Emitter-Switched Thyristor
ثايرستور ذو بوابة إيقاف معزولة	IGTT	Insulated Gate Turn-off Thyristor
ثايرستور ذو بوابة معزولة	IGT	Insulated Gate Thyristo
ثايرستور ذو بوابة تخفيف	GCT	Gate-Commutated Thyristor
ثايرستور ذو بوابة تخفيف متكامل	IGCT	Integrated Gate-Commutated Thyristor

تهيمن هياكل الثايرستور كما هو موضح بالجدول في عدد العناصر بسبب قدرتها الكامنة فى توصيل التيارات الكبيرة مع حد أدنى من الفقد. ومع ذلك، حتى وقت قريب، يعتبر ثايرستور ذو بوابة الإيقاف المتنافس الخطير للتطبيقات عالية الطاقة مع دائرة امتصاص الحرارة، نظرا لقيم الفقد العالية في الترانزستور ثنائي القطبية معزول البوابة. بيد أن التطورات الأخيرة، أدت إلى تطوير عنصر يجمع بنجاح بين أفضل خصائص الثايرستور والترانزستور، مع الوفاء بمتطلبات إضافية من الإنتاجية والموثوقية العالية. ويستند الثايرستور ذو بوابة التخفيف لهيكل

ثايرستور ذو بوابة إيقاف الشبه موصل ودائرة البوابة ذات قيم حث منخفض مما يمكن إيقاف وصلة الباعث والمجمع "على الفور"، ومن ثم تحويل العنصر إلى ترانزستور ثنائي القطب في حالة إيقاف تشغيل.

❖ وصف الثايرستور ذو بوابة تخفيف متكامل



الشكل (٤ – ٢٨) الرمز الكهربائي للثايرستور ذو بوابة تخفيف متكامل

الثايرستور ذو بوابة التخفيف المتكامل (إيجكت) هو نوع خاص من الثايرستور شبيه بالثايرستور ذو بوابة الإيقاف يمكنهما التشغيل وإيقاف التشغيل بإشارة بوابة. يتميز بأقل فقد توصيل بالمقارنة بالثايرستور ذو بوابة الإيقاف، ويتحمل معدلات أعلى من تغيرات في الجهد المرتفع ($\partial v/\partial t$)، وبالتالي لا يتطلب عنصر امتصاص حرارة لمعظم التطبيقات. الهيكل التكويني مشابهة جداً لتكوين الثايرستور ذو بوابة الإيقاف. في الثايرستور ذو بوابة التخفيف المتكامل (إيجكت) فإن تيار البوابة فى وضع إيقاف التشغيل أكبر من تيار الأنود مما لا يستدعى حقن ناقلات شحنات أقلية من الوصلة (ب ن) الأدنى وتسريع زمن إيقاف التشغيل بمرات. تتضح الاختلافات الرئيسية في تقليل حجم الخلية، واتصال عالي للبوابة مع حث أقل بكثير في محرك البوابة ومحرك دائرة الاتصال. تيارات البوابة المرتفعة جدا والزيادة السريعة لتيار البوابة مع الزمن يعنى أن الأسلاك العادية لا يمكن استخدامها لتوصيل محرك بوابة العنصر. لوحة محرك الدائرة مدمجة مع مجموعة العناصر في حزمة متكاملة، يحيط محرك الدائرة العنصر ويستخدم موصل دائري كبير متصل بحافة العنصر، مساحة التوصيلات الكبيرة والمسافة القصيرة للأسلاك تقلل كل من قيم الحث ومقاومة التوصيلات. الثايرستور ذو بوابة التخفيف المتكامل (إيجكت) أسرع بكثير في زمن التحويل لإيقاف التشغيل بمرات بالمقارنة الثايرستور ذو بوابة الإيقاف مما

يتيح له أن يعمل عند ترددات عالية، تصل إلى عدة كيلو هرتز لفترات قصيرة جداً من الزمن بسبب ارتفاع الفقد في التبديل، فإن تردد التشغيل النموذجي يصل إلى ٥٠٠ هرتز.

❖ الانحياز العكسي

عناصر الثايرستور ذو بوابة التخفيف المتكامل متوفر مع أو بدون قدرة المنع العكسي. تضاف الى الجهد الأمامي الواقع بسبب الحاجة إلى وجود منطقة طويلة بقيم تخدير منخفضة من النوع (ب). العناصر القادرة على إعاقة الجهد العكسي معروفة بالعناصر المتناظرة [٨٨]، عادة، معدلات إعاقة الجهد العكسي وإعاقة الجهد الأمامي هي نفسها. التطبيق النموذجي للعناصر المتناظرة في تطبيقات مصادر التيار العاكس، العناصر الغير قادرة على عرقلة الجهد العكسي المعروفة باسم العناصر الغير متناظرة [٨٩]، عادة ما تكون قيم جهد الانهيار العكسي في حدود عشرات الفولت. تستخدم العناصر الغير متناظرة إما في تطبيقات عكس دايود التوصيل المتصل بالتوازي على سبيل المثال فى مصدر التيار الكهربائي العاكس أو حيث لا يحدث جهد عكسي (على سبيل المثال، في تحويل إمدادات الطاقة أو مروحيات الجر للتيار المستمر)٠ يمكن تصنيع العناصر الغير متناظرة مع صمام ثنائي توصيل عكسي في نفس الحزمة والمعروفة باسم دائرة رنين [٩٠] الثايرستور ذو بوابة تخفيف متكامل في التوصيل العكسي الثايرستور ذو بوابة تخفيف متكامل.

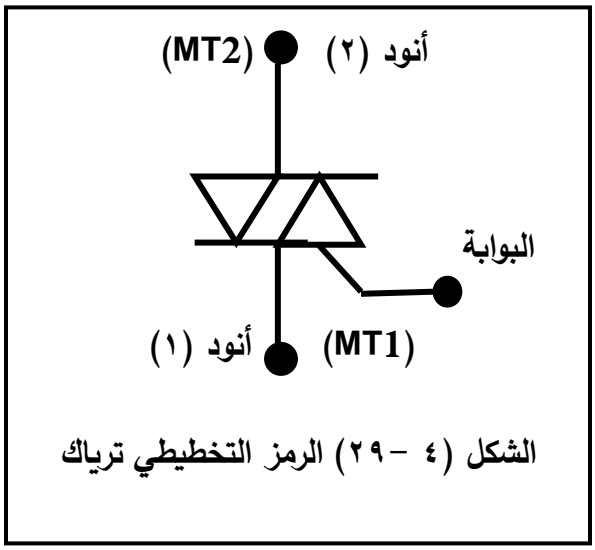
٤ – ١٠ عناصر الترياك

---

٨٨ الثايرستور ذو بوابة تخفيف متكامل المتناظرة (S–IGCT) symmetrical integrated gate–commutated thyristor

٨٩ الثايرستور ذو بوابة تخفيف متكامل الغير متناظرة (A–IGCT) asymmetrical integrated gate– commutated thyristor

٩٠ دائرة رنين الثايرستور ذو بوابة تخفيف متكامل .RC–IGCT, for reverse conducting IGCT



الشكل (٤ –٢٩) الرمز التخطيطي ترياك

مصطلح ترياك مستوحى من صمام ثلاثي للتيار المتردد، وهو علامة تجارية عامة للمكونات الإلكترونية ثلاثية الأطراف التي تقوم بتوصيل التيار في أي من الاتجاهين عند التشغيل واسمها المهني ثايرستور صمام ثلاثي ثنائي الاتجاه أو ثايرستور ثنائي الصمام الثلاثي وهو مماثل لمفتاح تتابع لقيم الجهد والتيار الصغيرة كما يمكنه التحكم بقيم أكبر من الجهد والتيار. يوضح الشكل (٤ – ٢٩) الرسم والرمز التوضيحي للترياك المستخدم في الدوائر الكهربائية حيث يوضح الأنود (١) والأنود (٢) والبوابة. الأنود (١) والأنود (٢) هما الأطراف الرئيسية (M_{T1}) و(M_{T2}) على التوالي. عناصر الترياك هي مجموعة فرعية من الثايرستور ذات علاقة بمقومات السيلكون الخاضعة أحادية الاتجاه وتقوم بتوصيل التيار في اتجاه واحد ولكنها تختلف عن الترياك حيث أنه ثنائي الاتجاه ويقوم بتوصيل التيار في كلا الاتجاهين وهناك اختلاف آخر وهو أنه يمكن تشغيل مقومات السيلكون الخاضعة بتيار موجب على بوابة العنصر ولكن يمكن تشغيل عناصر الترياك لكل من التيار الموجب والتيار السالب على البوابة، على الرغم من أن هناك بعض أنواع خاصة لا يمكن تشغيلها بواسطة أحد التيارين. يجب تطبيق جهد إيجابي على البوابة لتوليد تيار التشغيل لمقومات السيلكون الخاضعة ولكن بالنسبة لعناصر الترياك يمكن تطبيق أما جهد موجب أو سالب للبوابة وفي جميع الحالات الثلاث فإن انحياز الجهد والتيار تحدد قيمته منسوبة الى الطرف الرئيسي (M_{T1}). بمجرد تشغيلها، تبدأ مقومات

السيلكون الخاضعة والثايرستور في التوصيل الكهربائي حتى ولو توقف تيار البوابة حتى يتناقص التيار الرئيسي الى دون مستوى معين يسمى عقد التيار [٩١].

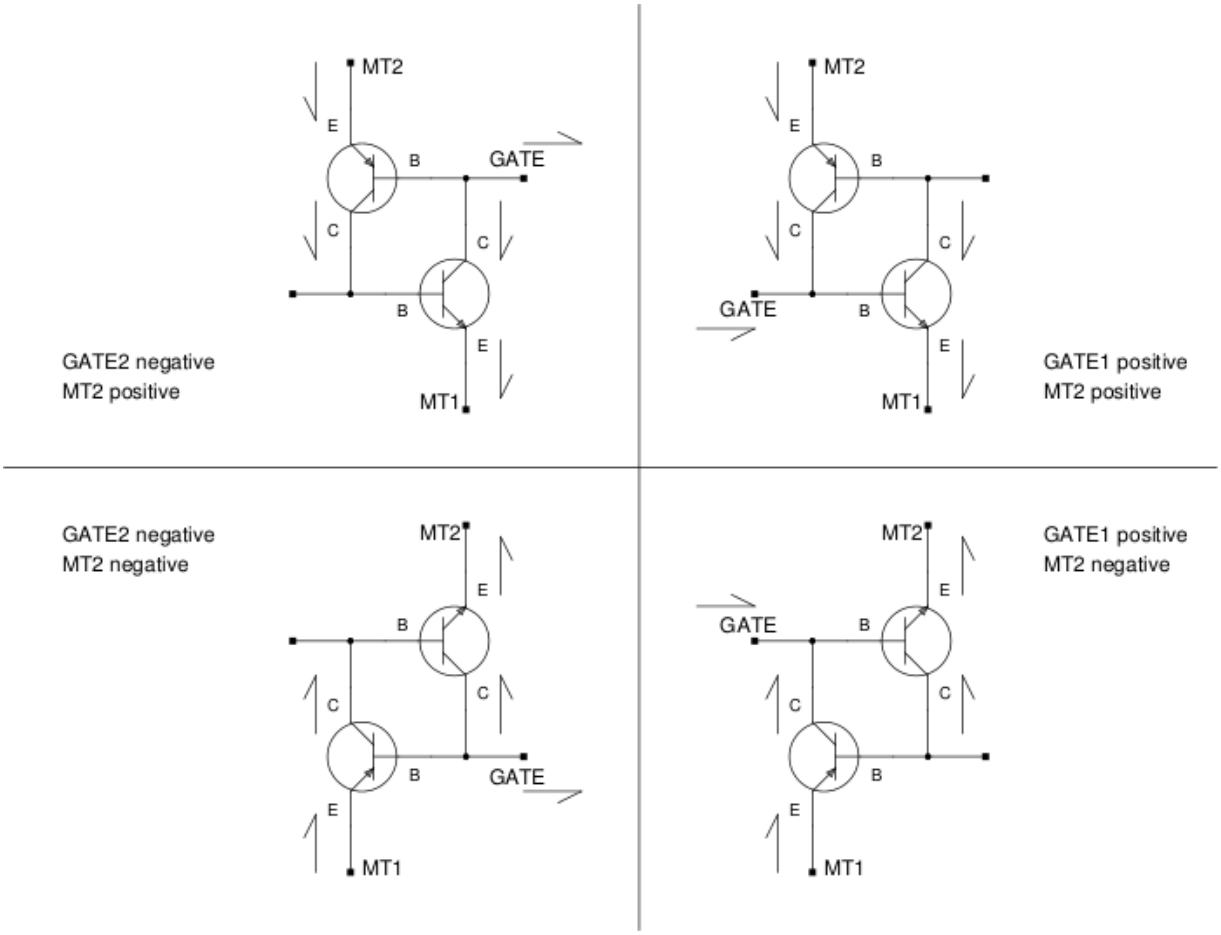
ثيرستورات ذات بوابة الإيقاف مشابهه لعناصر الترياك التي توفر المزيد من التحكم بإيقاف التشغيل عندما تتوقف إشارة البوابة. تمكن عناصر الترياك ثنائية الاتجاه مفاتيح تناوب التيار المتردد وبالإضافة إلى ذلك، فإن التشغيل بزاوية مرحلة خاضعة للتدقيق في الدائرة الرئيسية للتيار المتردد تسمح بالتحكم في تدفق متوسط التيار إلى الحمل (مرحلة التحكم). وهذا يستخدم عادة للتحكم في سرعة محركات التأثير والمخفتات [٩٢] والسيطرة على السخانات الكهربائية. لفهم كيفية عمل عناصر الترياك، يمكن الرجوع الى أسلوب التشغيل في كل من الأرباع الأربعة. الأرباع الأربعة موضحة في الشكل (٤ – ٣٢)، وتعتمد على جهد كل من البوابة وطرف التوصيل (M_{T2}) بالنسبة الى فولتية طرف التوصيل (M_{T1}). يشار الى أطراف التوصيل الرئيسية (M_{T1}) و(M_{T2}) الأنود (١) والأنود (٢) على التوالي وتعتمد الحساسية النسبية على الهيكل المادي لعنصر الترياك المستخدم، ولكن كقاعدة عامة، يعتبر الربع الأول هو الأكثر حساسية (على الأقل لتيار البوابة المطلوب)، والربع الرابع هو الأقل حساسية (لمعظم تيار البوابة المطلوب). فى الربع الأول والثاني فإن طرف التوصيل (M_{T2}) موجب ويتدفق التيار من (M_{T2}) الى (M_{T1}) من خلال الطبقات (ب – ن – ب – ن)، المنطقة (ن) المتصلة بطرف التوصيل (M_{T2}) لا تشارك إلى حد كبير في التشغيل، في الربع الثالث والرابع فإن طرف التوصيل (M_{T2}) سالب ويتدفق التيار من (M_{T1}) الى (M_{T2}) من خلال الطبقات (ب – ن – ب – ن). المنطقة (ن) المتصلة بطرف التوصيل (M_{T2}) فعالة ولكن المنطقة (ن) المتصلة بطرف التوصيل (M_{T1})

---

٩١ يشير مصطلح ((holding current فى الإلكترونيات إلى: الحد الأدنى للتيار الذي يجب أن يتدفق عبر الترياك من أجل البقاء في وضع التشغيل ويشار له بمصطلح عقد التيار.

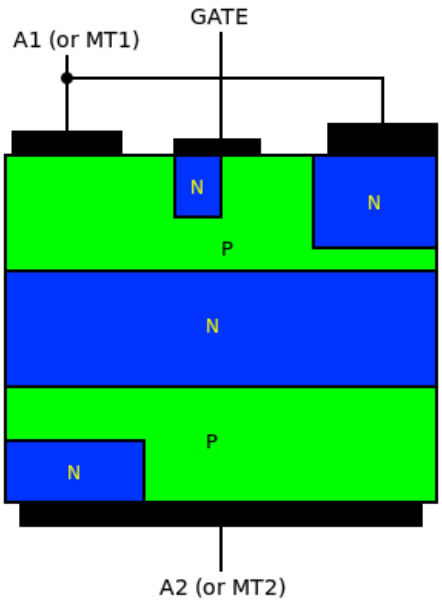
٩٢ المخفتات (Dimmers) عناصر تستخدم لخفض درجة سطوع الضوء. عن طريق التغيير الموجي للجهد المطبق على المصباح، فمن الممكن تخفيض كثافة الضوء الناتج

تشارك فقط في التشغيل الأولي، ولا تساهم في تدفق التيار. في معظم التطبيقات، يسرى تيار البوابة من طرف التوصيل (M_{T2}).



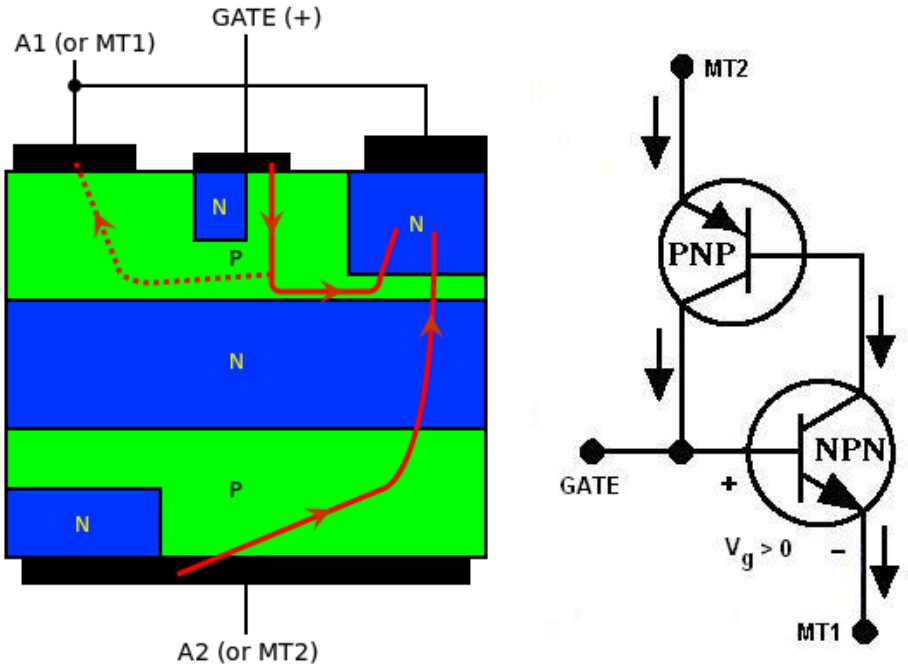
الشكل (٤ – ٣٠) أنماط التشغيل الأربعة

وبالتالي فإن الأرباع ١ و٣ هي أوضاع التشغيل فقط (كلا من البوابة وطرف التوصيل (M_{T2}) موجب أو سالب بالنسبة الى طرف التوصيل (M_{T1}). تعمل بعض التطبيقات الأخرى بتشغيل قطبية واحدة من دائرة متكاملة أو محرك دائرة رقمية في الأرباع ٢ و٣، عادة طرف التوصيل (M_{T1}) متصل بجهد موجب (مثل + ٥ فولت) ويتم توصيل البوابة بجهد صفر فولت (الأرض). يحدث تشغيل الربع الأول عندما تكون البوابة وطرف التوصيل (M_{T2}) بفولتية موجبة بالنسبة الى طرف التوصيل (M_{T1}).



الشكل (٤ – ٣١) تكوين الترياك الشبه موصل

يوضح الشكل (٤ – ٣٢) آلية تكوين الترياك – يتسبب تيار البوابة في تشغيل الترانزستور المكافئ (ن – ب – ن)، ويتحول التيار من قاعدة الترانزستور المكافئ (ب – ن – ب) والذي يقوم بتشغيله، يفقد جزء من تيار البوابة (الخط المنقط) خلال مسار المقاومة عبر منطقة السيلكون (ب) ويتدفق مباشرة فى طرف التوصيل (M_{T1}) بدون العبور خلال قاعدة الترانزستور (ن – ب – ن). في هذه الحالة، تتسبب حقن الثقوب في منطقة السيليكون (ب) فى تكدس الإلكترونات والثقوب ومناطق (ن) تحت طرف التوصيل (M_{T1}) ويتصرف مثل ترانزستور (ن – ب – ن)، الذي يتحول الى وضع التشغيل بسبب وجود تيار في قاعدة الترانزستور.

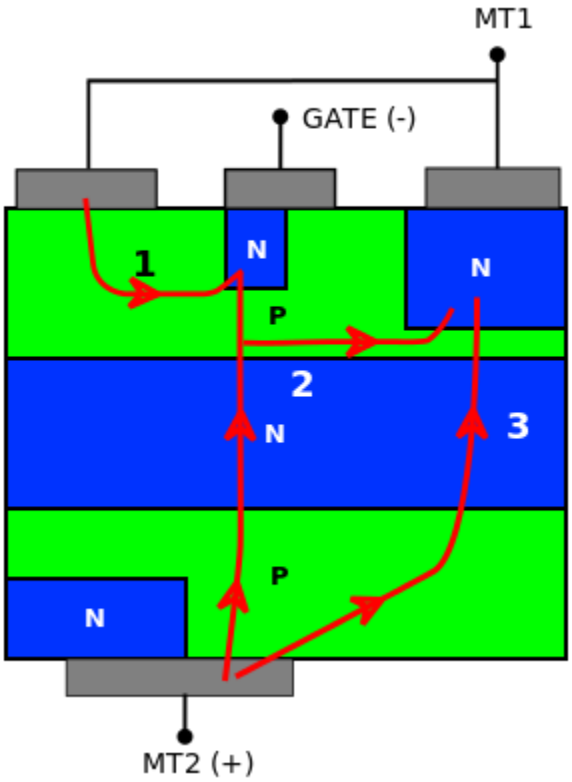


الشكل (٤ – ٣٢) تشغيل الربع الأول الشكل (٤ – ٣٣) الدائرة المكافئة لتشغيل التريك في الربع الأول

هذا، بدوره، يؤدي أن يسلك التيار خلال المناطق (ب – ن – ب) أعلى طرف التوصيل (M_{T2}) كأنه ترانزستور (ب – ن – ب)، الذي يتحول الى وضع التشغيل بسبب تحول قاعدة الترانزستور (ن) الى انحياز أمامي بالنسبة الى الباعث (طرف التوصيل M_{T2}) وهكذا، فإن مخطط التشغيل هو نفسه كأنه مقوم سيلكون خاضع. يوضح الشكل (٤ – ٣٣) الدائرة المكافئة. ومع ذلك، يختلف الهيكل عن مقومات السيلكون الخاضع على وجه الخصوص، يتدفق تيار صغير مباشرة من بوابة التريك الى طرف الوصلة (M_{T1}) من خلال منطقة السيليكون (ب) دون المرور عبر الوصلة (ب– ن) بين القاعدة وباعث الترانزستور المكافئ (ن – ب – ن). الشكل (٤ – ٣٣) يحتاج تيار بوابة الى قيم كبيرة حيث يحتاج التريك ليتحول الى وضع التشغيل بالمقارنة لمقومات السيلكون الخاضع (خط منقط) وبصفة عامة، هذا الربع هو الأكثر حساسية من الأربعة أرباع التشغيل. حيث أنه هو الربع الوحيد حيث يتم حقن تيار البوابة مباشرة الى قاعدة أحد الترانزستورات الرئيسية.

- **الربع الثاني**

يحدث تشغيل الربع الثاني عندما تكون البوابة ذات انحياز سالب وطرف الوصلة (M_{T2}) موجب بالنسبة الى طرف الوصلة (M_{T1}) .



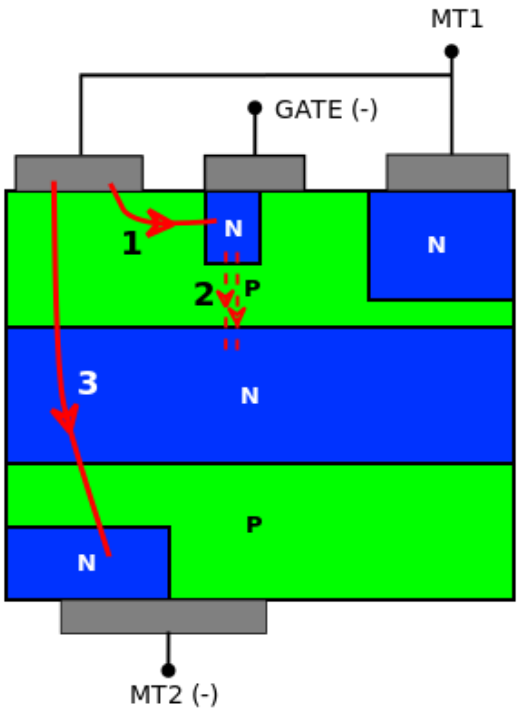
الشكل (٤ – ٣٤) آلية التشغيل في الربع الثاني

يوضح الشكل (٤ – ٣٤) آلية التشغيل ٠ وضع التشغيل في الترياك هو ثلاثة اتجاهات ويبدأ عندما يتدفق التيار من طرف الوصلة (M_{T1}) إلى البوابة من خلال الوصلة (ب – ن) تحت البوابة وهذا التبديل على بنية تشكيل المتكون من قبل لكل من الترانزستور (ن – ب – ن) والترانزستور (ب – ن – ب)، حيث البوابة مثل الكاثود (وضع التشغيل لهذا التكوين موضح بالرقم (١) في الشكل). كلما زاد التيار داخل البوابة فإن الجهد على الجانب الأيسر لمنطقة السيلكون (ب) تحت البوابة يرتفع في اتجاه طرف الوصلة (M_{T1}) حيث أن فرق الجهد بين البوابة وطرف الوصلة (M_{T2}) يميل الى الأسفل: وهذا يضع التيار بين الجانب الأيمن والجانب

الأيسر من منطقة السيليكون (ب) (المشار إليها بالرقم "٢" في الشكل)، الذي بدوره يقوم بتشغيل الترانزستور (ن – ب – ن) تحت طرف الوصلة M_{T1}، ونتيجة لذلك أيضا الترانزستور (ب – ن – ب) بين طرف الوصلة M_{T2} والجانب الأيمن العلوي لمنطقة السيليكون (ب). وفى النهاية فإن التكوين يعبر بالجزء الأكبر من التيار بنفس آلية التشغيل فى الربع الأول (المشار إليها بالرقم "٣" في الشكل ٤ – ٣٤).

- الربع الثالث

يحدث تشغيل الربع الثالث عندما تكون البوابة وطرف الوصلة (M_{T2}) ذو فولتية سالبة بالنسبة الى طرف الوصلة (M_{T1}) ويوضح الشكل (٤ – ٣٥) خطوط آلية التشغيل. تتم العملية في مجموعة خطوات مختلفة.



الشكل (٤ – ٣٥) آلية التشغيل في الربع الثالث

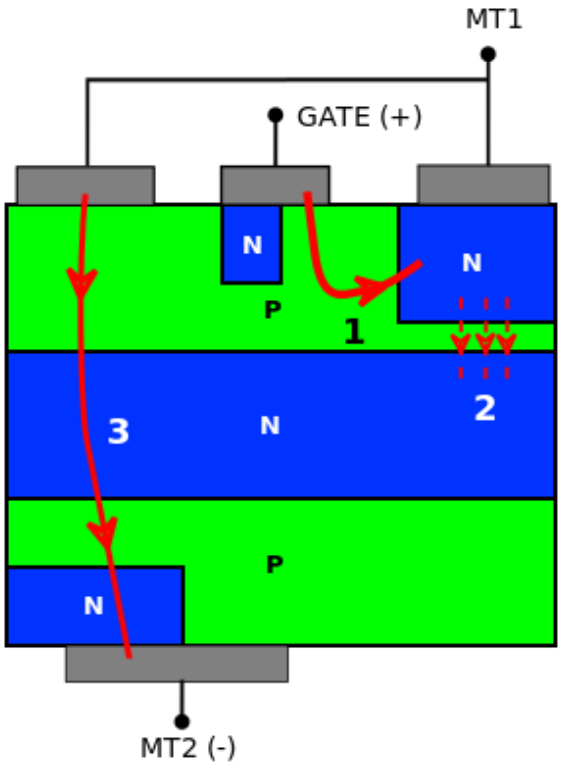
في المرحلة الأولى، الوصلة (ب – ن) بين طرف الاتصال (M_{T1}) وتصبح البوابة منحازة إلى الأمام (الخطوة ١) ويعنى حقن حاملات الشحنات الأقلية في الطبقتين المتصلين بالوصلة،

ويتم حقن الإلكترونات في الطبقة (ب) تحت البوابة، بعض من هذه الإلكترونات لا تتحد مع الثقوب وتهرب إلى أسفل المنطقة (ن) (الخطوة ٢) هذا بدوره يقلل من الجهد في المنطقة (ن)، وتتصرف كأنها قاعدة للترانزستور (ب – ن – ب) الذي يقوم بالتبديل الى وضع التشغيل (تشغيل الترانزستور دون تخفيض جهد القاعدة مباشرة ويسمى التحكم في البوابة عن بعد).

الطبقة السفلي (ب) تعمل كمجمع للترانزستور (ب – ن – ب) ويرتفع الجهد الى أقصاه، في الواقع، الطبقة (ب) تعمل أيضا كقاعدة الترانزستور (ن – ب – ن) الذي يتكون من الطبقات الثلاث الأخيرة بما يزيد قليلاً أعلى طرف الوصلة (M_{T2})، التي، بدورها، يتم تنشيطها. ولذلك، يظهر السهم الأحمر المسمى بالرقم "٣" في الشكل (٤ – ٣٥) مسار التوصيل النهائي للتيار.

- الربع الرابع:

يحدث تشغيل الربع الرابع عندما تكون البوابة ذات فولتية موجبة وطرف الوصلة (M_{T2}) ذو فولتية سالبة بالنسبة الى طرف الوصلة (M_{T1}). آلية التشغيل في هذا الربع مشابه لآلية التشغيل في الربع الثالث. يوضح الشكل (٤ – ٣٦) آلية استخدام التحكم في البوابة عن بعد، كلما يتدفق التيار من الطبقة (ب) تحت البوابة إلى داخل الطبقة (ن) تحت طرف الوصلة (M_{T1})، يتم حقن حاملات الشحنات الأقلية في شكل إلكترونات حرة الى داخل المنطقة (ب) ويتم تجميع بعضها بواسطة الوصلة السفلية (ن – ب) وتنتقل إلى المنطقة المجاورة للطبقة (ن) بدون اندماجها كما هو الحال في تشغيل الربع الثالث، يقل الجهد فى الطبقة (ن) ويتم تشغيل الترانزستور (ب – ن – ب) المتكون من الطبقة (ن) والطبقتين التاليتين لها. الطبقة (ب) السفلية تعمل كمجمع للترانزستور (ب – ن – ب) ويرتفع الجهد الى أقصاه– في الواقع، الطبقة (ب) تعمل أيضا كقاعدة للترانزستور (ن – ب – ن) الذي يتكون من الطبقات الثلاث الأخيرة بما يزيد قليلاً على طرف الوصلة (M_{T2})، التي، بدورها، يحدث التنشيط.



الشكل (٤ – ٣٦) آلية التشغيل في الربع الرابع

ولذلك، يظهر السهم المسمى "٣" في الشكل (٤ – ٣٦) موضحا مسار التوصيل النهائي للتيار. عموما، هذا الربع هو الأقل حساسية في الأربعة أرباع وبالإضافة إلى ذلك، بعض النماذج من عناصر التريك (أنواع المنطق والعناصر الممتصة) [٩٣] لا يمكن تشغيلها في هذا الربع ولكن يمكن تشغيلها في الثلاثة أرباع الأخرى. وهناك بعض العيوب يجب معرفتها عند استخدام تريك في دائرة كهربائية – منها تيار البوابة العائق، قطع التيار وعقد التيار. يبدأ التريك في إجراء التوصيل عندما يكون تدفق التيار داخل أو خارج البوابة كافي للتبديل الى وضع التشغيل لتشغيل الوصلات ذات الصلة في الربع الذي يتم فيه التشغيل. الحد الأدنى للتيار

---

٩٣ بعض النماذج عناصر التريك (أنواع المنطق والعناصر الممتصة) (logic level and snubberless types) لا يمكن تشغيلها في هذا الربع ولكن يمكن تشغيلها في الثلاثة أرباع الأخرى.

القادرً على القيام بذلك يسمى تيار عتبة البوابة العائق ويشار إليه عادة بواسطة (I_{GT}). في عناصر الترياك النموذجية، فإن قيم تيار عتبة البوابة العائق حوالي عدد من الميلي أمبير القليلة، ولكن يتعين أن يأخذ في الاعتبار أيضا أن:

- يعتمد تيار عتبة البوابة العائق (I_{GT}) على درجة الحرارة الناشئة بارتفاع التيارات العكسية في التقاطعات المحظورة وهذا يعني وجود ناقلات شحنات حرة أكثر في منطقة البوابة مما يقلل من تيار البوابة اللازم.
- يعتمد تيار عتبة البوابة العائق (I_{GT}) على الربع التي تتم فيه العملية، لأنه باختلاف ربع التشغيل يعني طرق مختلفة للتشغيل. كقاعدة عامة، الربع الأول هو الأكثر حساسية ويتطلب تيار أقل للتشغيل، بينما الربع الرابع هو الأقل حساسية.
- عندما يتم التبديل من وضع إيقاف التشغيل الى وضع التشغيل، يعتمد تيار عتبة البوابة العائق (I_{GT}) على جهد التغذية على طرفي التوصيل الأساسيين (M_{T1}) و(M_{T2}). الجهد المرتفع بين طرفي التوصيل (M_{T1}) و(M_{T2}) يسبب تيار عكسي أكبر في الوصلات المغلقة التي تتطلب تيار بوابة أقل مشابه لتشغيل درجات الحرارة المرتفعة. عموما، في أوراق البيانات، تعطى قيم تيار عتبة البوابة العائق (I_{GT}) لكل جهد محدد بين طرفي التوصيل (M_{T1}) و(M_{T2})٠ عندما يتوقف تيار البوابة، إذا كان التيار بين طرفي التوصيل الرئيسيين أكثر مما يسمى بتيار الغلق[٩٤]، يبقى الترياك في وضع التوصيل، وإلا قد يتوقف تشغيل الجهاز. تيار الغلق هو الحد الأدنى الذي يمكن أن يعوض عن تيار البوابة المفقود للحفاظ على الهيكل الداخلي للترياك مغلق. وتختلف قيمة هذا المعامل مع:
  - نبضة تيار البوابة (السعة والشكل والعرض)
  - درجة الحرارة

---

٩٤ غلق التيار (latching current) اسم آخر للتيار المشغل للبوابة – وهو الحد الأدنى للتيار المطلوب لبوابة مقوم السيلكون الخاضع لضمان التشغيل

- دائرة التحكم (المقاومات أو المكثفات بين البوابة وطرف التوصيل (M_{T1}) يزيد تيار الغلق نظراً لتسرب بعض التيار من البوابة قبل أن يساعد فى دورة التبديل الى وضع التشغيل للترياك.
- الربع الذي يتم فيه التشغيل

على وجه الخصوص، إذا كان عرض نبضة تيار البوابة كبير بما فيه الكفاية (حوالي عشرات ميكرو ثانية)، يستكمل الترياك عملية التشغيل عندما تتوقف إشارة البوابة ويصل تيار الغلق أدنى مستوى ويسمى عقد التيار [٩٥]. قيمة عقد التيار هو الحد الأدنى المطلوب لتتدفق التيار بين طرفي الوصلتين الرئيسيتين لتحافظ على إبقاء الترياك في وضع التشغيل عن بعد الذي حققه التخفيف في كل جزء من الهيكل الداخلي. في كراسة البيانات، يشار الى تيار الغلق بالرمز (I_L)، بينما يشار الى عقد التيار بالرمز (I_H) ٠ وقيمهم عادة حوالي بعض الميلي أمبير.

- العلاقة الساكنة بين الجهد والزمن:

التغير الكبير للجهد مع تغير الزمن ($\partial v/\partial t$) بين طرفي الوصلات (M_{T2}) و(M_{T1}) قد يبدل الترياك الى وضع التشغيل عندما يكون في وضع إيقاف التشغيل. القيم النموذجية الساكنة الحرجة لتغير الجهد مع تغير الزمن ($\partial v/\partial t$) في حدود فولت كل ميكرو ثانية. وضع التشغيل يرجع الى الاقتران بسعة طفيلية من طرف البوابة بطرف الوصلة (M_{T2})، مما يتيح وجود تيارات في البوابة استجابة لنسبة كبيرة من تغير الجهد الذي يتسبب في التغيير في الوصلة (M_{T2}). إحدى الطرق للتغلب على هذا القيد يتم بتصميم دائرة رنين (RC) أو شبكة امتصاص (RCL) مناسبة عن طريق وضع مقاومة أو مكثف صغير (أو كلاهما في نفس الوقت) بين طرفي

---

٩٥ الحفاظ على قيمة التيار Holding current is the minimum required current flowing between the two main terminals that keeps the device on after it has achieved commutation in every part of its internal structure.

الوصلتين، فإن تيار السعة المتولد خلال التدفقات العابرة خارج الترياك دون تشغيله بقراءة متأنية لكراسة التشغيل المقدمة من الشركة المصنعة واختبار نموذج العنصر لتصميم الشبكة الصحيحة. القيم النموذجية للمكثفات والمقاومات بين البوابة وطرف الوصلة (M_{T1}) يصل إلى ١٠٠ نانو فراد و١٠ أوم الى ١ كيلو أوم. عناصر الترياك العادية، باستثناء الأنواع منخفضة الطاقة يتم تسويقها كبوابة حساسة، هناك بالفعل مثل هذه المقاومة بنيت كحماية ضد قيم تغير زائفة ($\partial v/\partial t$) للتشغيل وهذا سوف يضع قناع على البوابة المفترض أنها تعمل كصمام ثنائي عند اختبار الترياك بجهاز قياس ميلي متر. في كراسة البيانات يشير التغير الساكن للجهد مع تغير الزمن ($\partial v/\partial t$) عادة بالشكل ($\partial v/\partial t$) وكما سبق الإشارة من قبل، فيما يتعلق بتحرك الترياك إلى وضع التشغيل من حالة إيقاف التشغيل نتيجة الى ارتفاع جهد حتى بدون تطبيق أي تيار في البوابة.

- العلاقة الحرجة بين التيار والزمن

معدل ارتفاع التيار بين طرفي الوصلات (M_{T2}) و(M_{T1}) (في أي من الاتجاهين) عندما يتم تشغيل الجهاز يمكن تدمير أو إتلاف الترياك حتى إذا كان زمن النبضة قصير جدا. والسبب أنه أثناء التخفيف، فإن الفقد فى الطاقة ليس موحد التوزيع في الترياك. عند التبديل لوضع التشغيل، يبدأ الترياك بتوصيل التيار قبل انتهاء التوصيل لينتشر عبر الوصلة الداخلية. يبدأ الترياك في توصيل التيار المفروض بالدائرة الخارجية بعد بعض نانو ثانية أو ميكرو ثانية ولكن التبديل الكامل للتشغيل فى كل الوصلة يحتاج وقتاً أطول بكثير، قد يسبب ارتفاع التيار بقع ساخنة محلية التي يمكن أن تضر بشكل دائم الترياك. في كراسة البيانات، يشار لهذا المعامل بالقيمة ($\partial I/\partial t$) وهو حوالي عشرات الأمبير لكل ميكرو ثانية.

- تخفيف تغير كل من الجهد والتيار مع الزمن

يتم تطبيق معدل تخفيف التغير الساكن للجهد مع تغير الزمن ($\partial v/\partial t$) عندما يتم تشغيل الترياك وتجري محاولات لإيقاف التشغيل مع حمل متفاعل جزئيا، مثل عنصر حث. التيار والجهد خارج المرحلة، حتى عندما ينخفض التيار الى أقل من قيمة انتظام التيار، يحاول

التريـاك التبديل الى وضع إيقاف التشغيل ولكن بسبب انحراف الوجه بين التيار والجهد، تحدث خطوة جهد مفاجئ بين طرفى الوصلتين الرئيسيتين، التي تقوم بتشغيل التريـاك مرة أخرى. يشار فى كراسة البيانات الى هذا المعامل يقيمه تغير الجهد الساكن مع الزمن ($\partial v/\partial t$) وعادة تتراوح قيمته عدد من الفولت لكل مايكرو ثانية٠ السبب فى كون قيم تخفيف التغير الساكن للجهد مع تغير الزمن ($\partial v/\partial t$) أقل من قيمة التغير الساكن للجهد مع تغير الزمن ($\partial v/\partial t$) يرجع الى محاولة التريـاك للتبديل قبل وضع إيقاف التشغيل، لا يزال هناك شحنات أقلية زائدة في الطبقات الداخلية نتيجة للتوصيل السابق. عندما يبدأ التريـاك في التبديل لإيقاف التشغيل، تغير هذه الشحنات الجهد الداخلي في المنطقة قرب البوابة وطرف الوصلة (M_{T1})، حيث أنه من الأسهل بالنسبة لتيار السعة بسبب التغير الساكن للجهد مع تغير الزمن ($\partial v/\partial t$) تبديل التريـاك الى وضع التشغيل مرة أخرى. عامل مهم آخر من خلال تخفيف الجهد للتبديل من وضع التشغيل الى وضع إيقاف التشغيل هو تغير التيار مع الزمن ($\partial I/\partial t$) من طرف الوصلة (M_{T1}) الى طرف الوصلة (M_{T2}). هذا مماثل للانتعاش في صمامات أشباه الموصلات الثنائية القياسية فإن التغير المرتفع للتيار مع الزمن ($\partial I/\partial t$) يتسبب في زيادة التيار العكسي في التريـاك لوجود مقاومات طفيلية، التيار العكسي المرتفع داخل الوصلات (ب – ن) يمكن أن تتسبب في انخفاض الجهد بين منطقة البوابة ومنطقة الوصلة (M_{T1}) التي قد تحافظ على التريـاك في حالة التشغيل. فى كراسة البيانات، يشار الى تخفيف تغير التيار مع تغير الزمن ($\partial I/\partial t$) عادة $(\partial I/\partial t)_c$ وقيمته حوالى عدد من الأمبير لكل ميكرو ثانية. تخفيف قيم التغير في الجهد الساكن مع الزمن ($\partial v/\partial t$) عامل مهم جدا عندما يستخدم التريـاك في توجيه الحمل بانحراف الوجه بين التيار والجهد، مثل حمل حثى. نفترض عند إيقاف المحث: عندما يصل التيار إلى الصفر، إذا لم يتم تغذية البوابة، يحاول التريـاك إيقاف التشغيل، ولكن هذا يسبب خطوة في الجهد بسبب تحول انحراف المرحلة المذكورة آنفا. إذا تم تجاوز قيم تخفيف تغير الجهد الساكن مع تغير الزمن ($\partial v/\partial t$) فإن التريـاك لا يقوم بإيقاف التشغيل.

❖ دوائر الامتصاص

عندما تستخدم للتحكم في الأحمال (الحثية أو السعوية)، يجب الحرص على التأكد من أن الترياك يتبدل الى وضع إيقاف التشغيل بشكل صحيح في نهاية كل نصف دورة للتيار المتردد في الدائرة الرئيسية. يمكن أن يكون الترياك حساس لتغيرات الجهد السريعة مع الزمن ($\partial v/\partial t$) بين طرف الوصلة (M_{T1}) وطرف الوصلة (M_{T2})، وبالتالي يحدث انحراف فى الوجه بين التيار والجهد بسبب الأحمال الحثية التى تؤدي إلى خطوة جهد يمكنها تبديل وضع الثايرستور بالخطأ. ٠ المحرك الكهربائي عادة هو حمل حثي يمد الطاقة دون اتصال– وتمثل معظم أجهزة التلفزيون وأجهزة الكمبيوتر أحمال سعوية ويمكن تجنب التبديل الى وضع التشغيل الغير مرغوب فيه باستخدام دائرة امتصاص (عادة من مقاومة/مكثف أو النوع المقاوم/مكثف/محث) بين طرف الوصلة (M_{T1}) و(M_{T2}). تستخدم دوائر الامتصاص لمنع حدوث تشغيل سابق لأوانه الناجم مثلاً عن طفرات الجهد في المصدر الرئيسي للإمداد بالتيار الكهربائي وبسبب التبديل لوضع التشغيل يتدفق التيار السعوي الداخلي في البوابة وكنتيجة لذلك يحدث تغيير كبير في الجهد الساكن مع الزمن ($\partial v/\partial t$) (أي تغيير سريع في الجهد) فإن مقاومة البوابة أو المكثف (أو كلاهما في نفس الوقت على التوازي) قد تكون متصلة بين البوابة وطرف الوصلة (M_{T1}) لتوفير مسار مقاومة منخفضة الى طرف الوصلة (M_{T1}) وكذلك منع أحداث تشغيل غير مرغوب فيه. هذا، ومع ذلك، يزداد تيار التشغيل المطلوب أو يضيف زمن الوصول بسبب شحن المكثف. من جهة أخرى، تساعد المقاومة بين البوابة وطرف الوصلة (M_{T1}) لسحب تيارات التسرب خارج الترياك، مما يؤدي إلى تحسين أداء ترياك في درجات الحرارة العالية، حيث أن الحد الأقصى المسموح به لتغيرات الجهد الساكن مع الزمن ($\partial v/\partial t$) يتناقص. قيم المقاومات أقل من ١ كيلو أوم وقيم المكثفات ١٠٠ نانو فراد مناسبة لهذا الغرض. على الرغم من أن التنغيم الدقيق ينبغي أن يتم على كل نوع ترياك مستخدم تتطلب القدرات الأعلى الى أحمال أكثر. يمكن استخدام عنصران مقومات السيلكون الخاضع متصلين معكوسين على التوازي بدلا من ترياك واحد حيث أن كل مقوم سيلكون خاضع له نصف دورة كاملة لعكس قطبية الجهد المطبق عليه، فإن التبديل لإيقاف تشغيل مقوم السيلكون الخاضع مؤكد، بغض النظر عما هي خواص

الحمل. ومع ذلك، بسبب البوابات المنفصلة، فإن التشغيل الصحيح لمقوم السيلكون الخاضع أكثر تعقيداً بالمقارنة بتشغيل الترياك. أيضا قد تفشل عناصر الترياك للتبديل لحالة تشغيل موثوق بها مع أحمال حثية في حالة انحراف وجه التيار الذي يتسبب فى تناقص تيار المصدر الى أقل من قيم إنتظام التيار عند زمن التشغيل. للتغلب على هذه المشكلة يمكن أن يستخدم تيار مباشر أو سلسلة من النبضات لتشغيل الترياك مرارا وتكرارا حتى يتحول الى وضع التشغيل. تستخدم عناصر الترياك منخفضة الطاقة في العديد من التطبيقات مثل مخفتات الضوء، والتحكم في السرعة للمراوح الكهربائية والمحركات الكهربائية الأخرى، وفي دوائر التحكم المحوسبة الحديثة للعديد من الأجهزة المنزلية الصغيرة والكبيرة.

الجدول (٤ – ٥) بعض المواصفات النموذجية للترياك

الرمز الفني	المعاملات	القيم النموذجية	الوحدات
V_{gt}	جهد عتبة البوابة العائق	٥و١	فولت
I_{gt}	تيار عتبة البوابة العائق	١٠ – ٥٠	ميلي أمبير
V_{drm}	ذروة الجهد الأمامي المتكررة	٦٠٠ – ٨٠٠	فولت
V_{rrm}	ذروة الجهد العكسي المتكررة	٦٠٠ – ٨٠٠	فولت
I_t	التيار التربيعي لوضع التشغيل	٤ – ٤٠	أمبير
I_{tsm}	ذروة تيار التشغيل الغير متكررة	١٠٠ – ٢٧٠	أمبير
V_t	الجهد الأمامي لوضع التشغيل	٥و١	فولت

❖ **الترياك ثلاثي الأرباع** [٩٦]

يعمل الترياك ثلاثي الأرباع في الربع الأول حتى الثالث ولا يعمل في الربع الرابع. هذه العناصر مصنوعة خصيصا لتحسين التخفيف، ويمكنها التحكم في كثير من الأحيان فى الأحمال الحثية بدون استخدام دائرة امتصاص. تم تسويق أول هذا النوع من شركة "أشباه الموصلات طومسون" (تسمى الآن شركة أشباه الموصلات طومسون للإلكترونيات الدقيقة) تحت اسم

٩٦ الترياك ثلاثي الأرباع Three–quadrant TRIAC يعمل فى الربع الأول حتى الثالث ولا يعمل في الربع الرابع.

"التيرنيستور [٩٧]. الإصدارات التي تباع تحت العلامة التجارية (سنوبرلس) والتي تعنى بدون دائرة امتصاص. بعض أنواع الترياك ثلاثي الأرباع يمكن أن يعمل بتيار بوابة صغير مدفوعا مباشرة بمكونات منطقية.

References

1. **"Si photodiodes | Hamamatsu Photonics". *www.hamamatsu.com*. Retrieved 2015-09-27.**
2. **''Laughton, M. A. (2003). "17. Power Semiconductor Devices". Electrical engineer's reference book. Newnes. pp. 25–27**
3. **Hastings, Alan (2005). The Art of Analog Layout (2nd ed.). Prentice Hall.**
4. **Christiansen, Donald; Alexander, Charles K. (2005); Standard Handbook of Electrical Engineering (5th ed.). McGraw-Hill**
5. **"ETT vs. LTT for HVDC". ABB Asea Brown Boveri. Retrieved 2014-01-24.**
6. **"HVDC Thyristor Valves". ABB Asea Brown Boveri. Archived from the original on January 22, 2009.**
7. **Hingorani, Narain G; Laszlo Gyugi (2011). Understanding FACTS. India: IEEE Press. p. 41.**
8. **"GTO Thyristors", Makoto Azuma and Mamora Kurata, Proceedings of the IEEE, Vol.76, No. 4, April 1988, pp 419-427.**
9. **M.D. Singh, K.B. Khanchandani, Power Electronics, Second Edition, Tata McGraw-Hill, New Delhi, 2007, pages 148-152**
10. ***"2N6071A/B Series Sensitive Gate Triacs" (PDF). Semiconductor Components Industries, LLC. Retrieved June 28, 2012.***

---

٩٧ ترياك التيرنيستور (Alternistor) مصمم خصيصا للتطبيقات المطلوبة لتبديل أحمال الحث العالية – المصطلح يشير إلى نوع خاص من الترياك الذي يحتوي على تصنيف عال جداً لتغير الجهد مع الزمن dv/dt، في معظم التطبيقات ليس هناك حاجة لدائرة امتصاص