الباب الأول

التحكم الالكترونى فى محركات التيار المستمر

التحكم الالكترونى فى محركات التيار المستمر

١ / ١ - أشباه الموصلات :

لقد اتجهت الشركات المصنعة على استخدام أشباه الموصلات بدلاً من الرليهات الكهرومغناطيسية EMR'S فى التحكم فى الآلات الكهربية بصفة عامة، حيث الأداء الأفضل، والسعر المنخفض، وإمكانية التحكم فى سرعة المحركات وبدئها فى آن واحد.

وسوف نتناول فى هذه الفقرة بإيجاز أهم أشباه الموصلات المستخدمة فى التحكم فى الآلات الكهربية.

١ / ١ / ١ - الثنائيات (الموحدات) (Diodes (Rectifiers :

يتكون الثنائى من وصلة ثنائية P - N مصنوعة من أشباه الموصلات مثل السليكون Si أو الجرمانيوم Ge ويتواجد الثنائى عادة فى الأسواق على شكل اسطوانة مرسوم عليها شريط ملون على أحد جانبيها للدلالة على مكان المادة N (السالبة) والتى تمثل المهبط Cathode، أما الجانب الآخر فيمثل المادة P (الموجبة) والتى تمثل المصعد Anode.

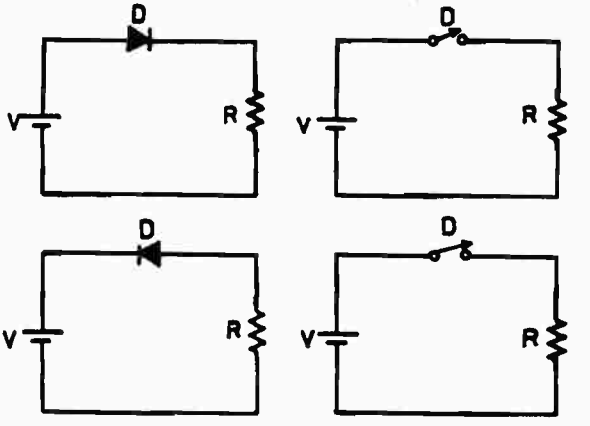
وفيما يلى رمز الثنائى :

ويعتبر الثنائى فى الوضع الطبيعى كمفتاح مفتوح، وحتى يعمل الثنائى كمفتاح مغلق يجب تعريضه لانحياز أمامى Forward bias، أى تعريض مصعده لجهد موجب، وتعريض مهبطه لجهد سالب، ويكون اتجاه مرور التيار من المصعد إلى المهبط ويقال : إن الثنائى فى حالة وصل (ON).

أما إذا تعرض الثنائى لانحياز عكسى Reverse bias، أى تعرض مهبطه لجهد موجب بالنسبة لجهد المصعد يمر تيار تسرب صغير جداً Leakage current، ويعمل

الثنائى فى هذه الحالة كمفتاح مفتوح، ويقال: إن الثنائى فى حالة قطع off.

والشكل (١ - ١) يبين طريقة عمل الثنائى.



الشكل (١ - ١)

والجدير بالذكر أن ثنائى الجرمانيوم يتحول لحالة الوصل عندما يكون فرق الجهد بين مصعده ومهبطه أكبر من 0.3V، ويكون فقد الجهد فيه 0.3V تقريباً، أما ثنائي السليكون فيتحول لحالة الوصل عندما يكون فرق الجهد بين مصعده ومهبطه أكبر من 0.6V، ويكون فقد الجهد فيه 0.6V تقريباً. علماً بأن الثنائى السليكونى هو السائد تقريباً فى الأسواق لأنه الأكثر استقراراً فى درجات الحرارة العالية، وتستخدم الثنائيات على نطاق واسع فى دوائر التوحيد Rectification circiuts.

ويندرج تحت عائلة الثنائيات ثنائيات خاصة تعرف بثنائيات الزينر، وهى ثنائيات سليكونية، لها خواص تسمح بإمرار جهد مستمر ثابت فى الانحياز العكسى، وهى تشبه الثنائيات العادية فى الشكل.

فعندما يتعرض ثنائى الزينر لانحياز أمامى يعمل كثنائى عادى، ويتحول لحالة الوصل، ويمر التيار الكهربى، ويكون فرق الجهد بين مصعده (A) ومهبطه (K) مساوياً V 0.7 : 0.6 تقريباً. وعند تعريض ثنائى الزينر لانحياز عكسى فإن ثنائى الزينر يكون فى حالة قطع فى البداية، وبمجرد زيادة فرق الجهد بين مهبطه ومصعده عن جهد انهياره يتحول الثنائى لحالة الوصل، وبالتالى يعمل ثنائى الزينر فى هذه

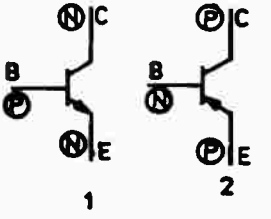
الحالة كمنظم للجهد للمحافظة على الجهد بين مهبطه ومصعده لا يتجاوز جهد الزينر للثنائى.

وفيما يلى رمز ثنائى الزينر:

١ / ١ / ٢ - الترانزستور Transistor:

للترانزستور ثلاثة أرجل وهى: القاعدة (B) Base، والباعث (E) Emitter، والمجمع (C) Collector، ويصنع الترانزستور من ثلاث طبقات من أشباه الموصلات، وهذه الطبقات بعضها سالب N، وبعضها موجب P. وتقسم الترانزستورات حسب قطبية هذه الطبقات إلى تزانزستورات PNP، وتتألف من طبقتين سالبتين N وطبقة موجبة P، وترانزستورات PNP، وتتألف من طبقتين موجبتين P وطبقة سالبة N.

وفيما يلى رموز هذه الترانزستورات:



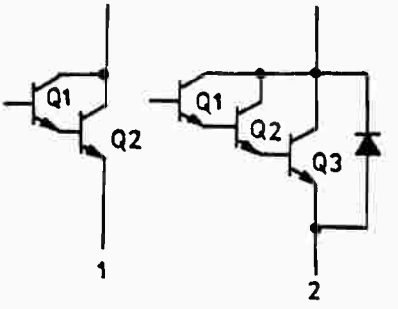
ويعتبر الترانزستور فى حالة قطع طبيعى، أى أن تيار مجمعه يساوى صفراً. وعند تعريض القاعدة والباعث لانحياز أمامى وتعريض المجمع والقاعدة لانحياز عكسى يتحول الترانزستور لحالة الوصل، فمثلا: بالنسبة للترانزستورNPN عندما يكون جهد القاعدة أكبر من جهد الباعث، وعندما يكون جهد المجمع أعلى من جهد القاعدة، يتحول الترانزستور لحالة الوصل. والعكس بالعكس بالنسبة لترانزستور PNP.

وعادة يستخدم الترانزستور كمفتاح فى دوائر التحكم فى المحركات، فعندما يكون تيار القاعدة صفراً فإن الترانزستور يكون فى حالة قطع Cut off، وعند مرور تيار قاعدة كاف يتحول الترانزستور لحالة الوصل الكامل Fully on ويمر تيار كبير فى

المجمع، وعادة فإن فرق الجهد الفعلى بين مجمع وباعث الترانزستور يساوى (0.2:0.4 V) عند حالة الوصل الكامل، وعادة تعرف النسبة بين تيار المجمع وتيار القاعدة للترانزستور بمعامل الكسب للترانزستور ويرمز له β، حيث إن :

$$\beta = \frac{I_C}{I_B} \rightarrow 1.1$$

والجدير بالذكر أن قيمة معامل الكسب β تتفاوت من ترانزستور لآخر حسب تصميمه، وهى تساوى فى المتوسط 100، ويمكن زيادة معامل كسب β للترانزستورات بتوصيل الترانزستورات معاً كما يلى :



ويكون الكسب الكلى فى هذه الحالة مساوياً حاصل ضرب كسب الترانزستورات المنفردة، وتسمى هذه التوصيلة دارلنجتون، وتوجد ترانزستورات تحتوى على هذه التوصيلة داخل قالب واحد، ولها ثلاثة أرجل فقط وتسمى ترانزستورات دارلنجتون، ويصل تيار مجمعها 300A، وتتحمل فرق جهد على أطرافها (المجمع – الباعث) عندما تكون فى حالة قطع يصل إلى 1000V .

١ / ١ / ٣ - ترانزستور تأثير المجال معدن أكسيد شبه الموصل Mosfet :

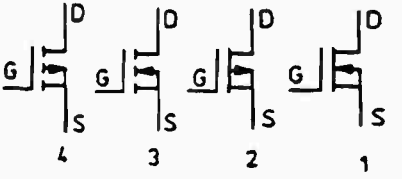
يوجد نوعان من ترانزستورات Mosfet، وهما :

١ – نوع النضوب Depletion type .

٢ – نوع التعزيز Enhancement type .

ولكليهما ثلاثة أرجل، وهى المصرف Drain (D)، والمصدر أو المنبع Source (S)، والبوابة Gate (G) . وتصنع هذه الترانزستورات من قناة موجبة P أو قناة سالبة N .

وفيما يلى رموز ترانزستورات Mosfet : فالرمز 1 لترانزستور نوع النضوب بقناة N. والرمز 2 لترانزستور نوع النضوب بقناة P. والرمز 3 لترانزستور نوع التعزيز بقناة N. والرمز 4 لتزانزستور نوع التعزيز بقناة P.



والفرق بين ترانزستور Mosfet نوع النضوب ونوع التعزيز فى قطبيه فرق الجهد بين البواية والمصدر V_{GS} والذى يعمل عنده كلاهما، فيعمل ترانزستور النضوب بقناة N عندما يكون فرق الجهد V_{GS} بالموجب أو السالب، ويزداد تيار المصرف I_D بزيادة فرق الجهد عند القطبية الموجبة، ويقل بزيادة الجهد عند القطبية السالبة؛ لذلك يمكن اعتباره ترانزستور فى حالة توصيل طبيعى. ويعمل ترانزستور التعزيز بقناة N عندما تكون قطبية فرق الجهد V_{GS} بالموجب فقط، ويزداد تيار المصرف I_D بزيادة فرق الجهد V_{GS} ويقل بنقصانه، ويكون الترانزستور فى حالة قطع عندما يكون V_{GS} مساوياً الصفر.

والجدير بالذكر أن ترانزستور Mosfet نوع التعزيز هو أغلب أنواع ترانزستورات Mosfet انتشاراً.

ولقد استطاعت ترانزستورات Mosfet التغلب على مشكلة كبيرة موجودة فى الترانزستورات العادية، وهى كبر تيار تشغيلها، فمثلا: يبلغ تيار التشغيل (تيار القاعدة) I_B لترانزستور دارلنجتون معامل كسبه 100 وتيار مجمعه حوالى 3A، فى حين أن تيار بوابة ترانزستورات Mosfet عادة تكون بالميكرو أمبير.

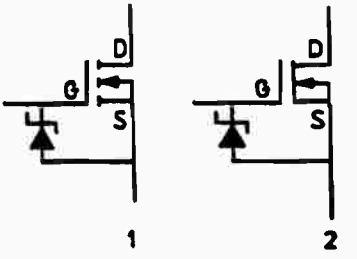
والجدير بالذكر أن ترانزستورات Mosfet يتم التحكم فيها بالتحكم فى فرق الجهد بين البوابة والمصدر V_{GS}، وليس بالتحكم فى شدة تيار البوابة I_G. وتتميز ترانزستورات Mosfet عن الترانزستورات العادية بالسرعة العالية، وإمكانية توصيل

أكثر من ترانزستور Mosfet بالتوازى معاً لزيادة سعة التيار، وهذ بالطبع لا يمكن تحقيقه مع الترانزستورات العادية، الأمر الذى دفع المصممين للاتجاه لترانزستورات Mosfet نوع التعزيز فى التحكم فى القدرة.

وتوجد أنواع من ترانزستورات Mosfet تعمل عند جهود تصل إلى 650V وتيارات تصل إلى 100A. ويعاب على ترانزستورات Mosfet حساسيتها العالية التى قد تؤدى لتلفها قبل استخدامها إذا لم تستخدم بحذر، حيث تنهار عند انتقال الشحنات الكهرو إستاتيكية إلى أرجلها من الأجسام الخارجية بفعل الاحتكاك.

والجدير بالذكر أن معظم الأنواع الجديدة من ترانزستورات Mosfet الموجودة بالأسواق تحتوى على ثنائى زينر بين البوابة والمصدر لمنع ارتفاع V_{GS} لقيم غير آمنة، وبالتالى تحمى الترانزستور من الجهود العابرة بالدائرة وكذلك عند النقل والتداول.

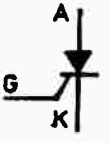
وفيما يلى رموز ترانزستورات Mosfet التى تحتوى على ثنائى زينر: فالرمز 1 لترانزستور Mosfet نوع التعزيز. والرمز 2 لترانزستور Mosfet نوع النضوب وكلاهما بقناة N.



١ / ١ / ٤ - الموحد السليكونى المحكوم (الثايرستور) SCR:

للثايرستور ثلاثة أرجل، وهى: المصعد Anode (A)، والمهبط Cathode (K)، والبوابة Gate (G).

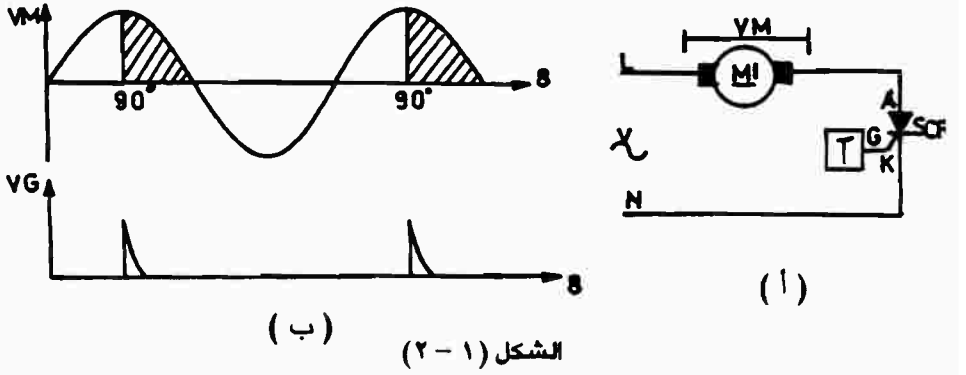
وفيما يلى رمز الثايرستور:



ويعمل الثايرستور كثنائى إذا كان منحازاً أمامياً ووصلت إشارة جهد موجبة بين البوابة والمهبط؛ لذلك سمى بموحد السليكون المحكوم SCR. ويشترط فى إشارة الجهد اللازمة لإشعال الثايرستور (تحول الثايرستور لحالة الوصل) أن يكون زمنها كاف للإشعال، ويجب ألا يقل عن 10μS، وأن يكون تيار البوابة I_G الناتج من تسليط إشارة الجهد V_{GK} كاف لإحداث إشعال عند قيمة فرق الجهد بين المصعد والمهبط V_{AK}، ويرمز جهد البوابة الأدنى اللازم لإشعال الثايرستور V_{GT} وتيار البوابة الأدنى اللازم لإشعال الثايرستور I_{GT}.

والشكل (١ – ٢) يبين دائرة تحكم فى سرعة محرك تيار مستمر بمغناطيس دائم (الشكل أ)، وكذلك موجة الجهد على أطراف المحرك ونبضات إشعال الثايرستور (الشكل ب)، ويلاحظ أن نبضات الإشعال تصل لبوابة الثايرستور عندما تكون زاوية الإشعال مساوية $\alpha = 90^0$، ويكون الجهد على أطراف المحرك هو الجزء المهشر فقط، أما باقى الموجة الموحدة فتكون على أطراف الثايرستور.

ويعمل الثايرستور تماماً كموحد، حيث يمنع وصول نصف الموجة السالب للمحرك، ويلاحظ أنه كلما زادت زاوية الإشعال قل فرق الجهد على أطراف المحرك، ويصبح فرق الجهد على أطراف المحرك مساوياً الصفر عندما تكون زاوية الإشعال مساوية $\alpha = 180^0$.



(ب) (أ)

الشكل (١ – ٢)

والجدير بالذكر أن إطفاء الثايرستور (تحوله لحالة القطع Cut off) تعتبر من المشاكل الرئيسية التى نتعرض لها فى دوائر الثايرستور، حيث يبقى الثايرستور فى حالة وصل ON، طالما أن تيار المصعد I_A أكبر من قيمة معينة تسمى بتيار الإمساك.

وهناك عدة طرق لإطفاء الثايرستور نذكر منها :

١ – استخدام الثايرستور فى دوائر التيار المتردد، حيث يحدث للثايرستور إطفاء ذاتى عند مرور نصف الموجة الموجبة بالصفر.

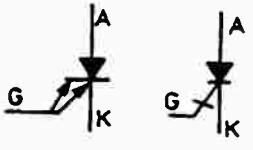
٢ – استخدام مفتاح يدوى أو الكترونى بالتوازى مع الثايرستور، فبمجرد غلق المفتاح يتحول الثايرستور لحالة القطع.

٣ – توصيل مكثف مشحون بالتوازى مع الثايرستور بطريقة تجعل الثايرستور يتعرض لجهد معاكس بين المصعد والمهبط فيقل تيار المصعد عن تيار الإمساك فيتحول لحالة القطع.

١ / ١ / ٥ – الثايرستور ذو بوابة الإطفاء GTO :

تعد صفة الإمساك للثايرستور SCR من أهم المشاكل التى نتعرض لها فى دوائر الثايرستورات، حيث يظل الثايرستور فى حالة وصل إلى أن ينخفض تيار المصعد I_A عن تيار الإمساك، أما GTO فيمكن إشعاله وإطفاؤه فى أى لحظة، فعند وصول نبضة جهد موجبة للبوابة يشتعل GTO، وعند وصول نبضة جهد سالبة للبوابة ينطفئ GTO:

وفيما يلى رمز :GTO



ويلاحظ أن GTO له ثلاثة أرجل تماماً مثل الثايرستور المعتاد.

وفيما يلى مميزات GTO:

١ – له سرعة وصل وفصل كبيرة جداً مقارنة بالثايرستور المعتاد، خصوصاً عند الترددات التى تصل إلى 10KHZ.

٢ – يمكن إشعاله بتيار بوابة حوالى عدة عشرات من الملى أمبيرات، ويمكن

إطفاؤه بتيار حوالى عدة مئات من الملى أمبيرات.

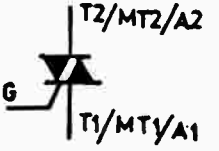
ويعاب على GTO ارتفاع فقد الجهد بين مصعده ومهبطه عند تحوله لحالة الوصل، فيصل فقد الجهد بين المصعد والمهبط إلى 3:4V، فى حين يتراوح فقد الجهد بين مصعد ومهبط الثايرستور المعتاد ما بين 1:2V.

ويطلق أحياناً على GTO مفتاح بوابة التحكم، ويرمز له بالرمز (GCS).

١ / ١ / ٦ - التريك Triac :

ينتمى التريك لعائلة الثايرستور، عدا أنه يتميز عن الثايرستور بأنه يسمح بمرور التيار فى الاتجاهين. وللتريك ثلاثة أطراف وهى: المصعد الأول ويرمز له A_1 أو T_1 أو MT_1 ، والمصعد الثانى ويرمز له A_2 أو T_2 أو MT_2، والبوابة ويرمز لها G.

وفيما يلى رمز التريك:



ويتحول التريك لحالة الوصل ON عند وصول فرق الجهد بين المصعدين A_2 وA_1 لجهد الانهيار الفوقى أو عند وصول نبضة جهد للبوابة، وذلك عند تحقق أحد الحالات التالية:

١ - عندما تكون قطبية كل من G وT_2 موجبة، فتصل نبضة جهد موجبة للبوابة، ويرمز لهذه الحالة +I.

٢ - عندما تكون قطبية T_2 موجبة وقطبية G سالبة، فتصل نبضة جهد سالبة للبوابة، ويرمز لهذه الحالة -I.

٣ - عندما تكون قطبية T_2 سالبة وقطبية G موجبة، فتصل نبضة جهد سالبة للبوابة، ويرمز لهذه الحالة +III.

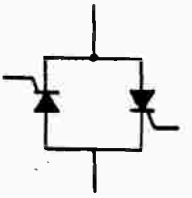
٤ - عندما تكون قطبية T_2 سالبة وقطبية G سالبة أيضاً، فتصل نبضة جهد سالبة

للبوابة، ويرمز لهذه الحالة III-.

والجدير بالذكر أن حساسية التريك تكون أكبر ما يمكن عند الحالة III- و I+، وتقل الحساسية نوعاً ما فى الحالة I-، وتكون حساسية التريك أقل ما يمكن فى الحالة III+.

وهناك حدود لاستخدام التريك فى التحكم فى الآلات الكهربية، وذلك لأن الحد الأقصى للجهد العكسى للترياكات يساوى 1000V وتيارها الأقصى 200A، كما أن تركيب التريك الداخلى يجعله مناسباً عند الترددات 50:60HZ. فى حين أن الثايرستور SCR يستخدم عند ترددات تصل إلى 600HZ وكذلك عند الجهود والترددات الفائقة؛ لذلك يمكن استخدام عدد 2 ثايرستور موصلين خلفاً لخلف، بحيث يكافئان تريك واحد عند عدم توفر تريك يتحمل الجهود والتيارات المطلوبة.

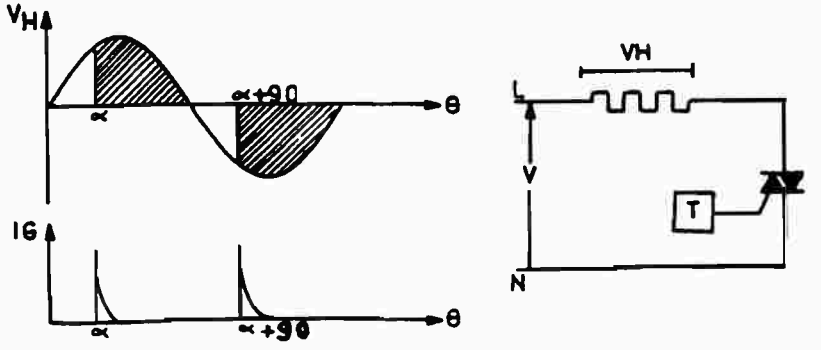
والشكل (١ – ٣) يبين طريقة توصيل ثايرستورين معاً للحصول على مكافئ لتريك.



الشكل (١ – ٣)

ولا تختلف زاوية إشعال التريك α عن زاوية إشعال الثايرستور. والشكل (١ – ٤) يبين دائرة تريك تتحكم فى سخان كهربى وشكل موجه الجهد على أطراف السخان V_H وكذلك نبضات إشعال التريك، حيث إن T تعنى دائرة إشعال التريك، ويلاحظ أن نبضات الإشعال تصل لبوابة التريك فى نصف الموجة الموجب، وكذلك النصف السالب، كما أن التريك يمرر تيار فى الاتجاهين.

والجدير بالذكر أنه كلما ازدادت زاوية الإشعال قل الجهد المسلط على الحمل V_H (الجزء المهشر)، وعندما تكون زاوية الإشعال α تساوى 180^0 فإن الجهد المسلط على الحمل V_H سيساوى صفراً، وعندما تكون α مساوية 0^0 فإن V_H سيكون أكبر ما يمكن.



الشكل (١ - ٤)

١ / ١ / ٧ - الالكترونيات الضوئية:

إن جميع أشباه الموصلات تتفاعل مع الضوء لحد ما، مما دفع المصممين لتصميم بعض العناصر الالكترونية الضوئية، تعمل كحساسات للضوء أو باعثات للضوء، وسوف نتناول بعضها بشكل موجز فى هذه الفقرة.

١ - الثنائى الباعث للضوء LED:

وهو يشبه لحد كبير لمبة صغيرة بألوان مختلفة، وهو يستخدم للإشارة، وعادة لا ينبعث الضوء من الثنائى الباعث للضوء حتى يصبح جهد الانحياز الأمامى أكبر من 2V ، أما عند الانحياز العكسى فإن ثنائى LED لا يضئ. وتوجد عدة أنواع من الثنائيات الباعثة للضوء حسب تيارها، فالأولى تسمى منخفضة القدرة وتيارها (5mA)، والثانية قياسية وتيارها (10mA)، والثالثة عالية القدرة وتيارها (20mA).

٢ - الترانزستور الضوئى Photo transistor:

وهو يشبه الترانزستور العادى، عدا أن له سطحاً زجاجياً يسمح بسقوط الشعاع الضوئى على وصلة الترانزستور، فإذا عرض الترانزستور الضوئى للضوء فإن تيار المجمع سوف يزداد بزيادة شدة الشعاع الضوئى الساقط.

٣ - الثايرستور الضوئى (LASCR):

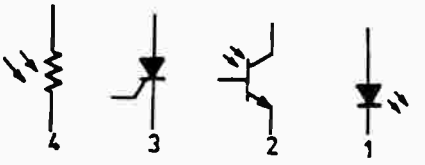
وهو يشبه الثايرستور العادى فى عمله، عدا أنه يحتوى على سطح زجاجى يسمح بسقوط الشعاع الضوئى على وصلته، ويعمل (LASCR) كعنصر إمساك،

فبمجرد سقوط شعاع ضوئى عليه يحدث إشعال له، ولا يمكن إطفاؤه إلا بتقليل تيار المصعد عن تيار الإمساك له.

٤ - المقاومة الضوئية LDR:

وهى تصنع من مواد شبه موصلة مثل سيلنيد الكادميوم، وتغطى بالسيراميك، وتوضع داخل غلاف زجاجى وتتغير مقاومة LDR عند تعرضها لشعاع ضوئى، فتقل المقاومة من عدة ميجا أوم إلى عدة كيلو أوم.

وفيما يلى رموز كل من الثنائى المشع للضوء LED (الرمز 1)، والترانزستور الضوئى (الرمز 2)، والثايرستور الضوئى (الرمز 3)، والمقاومة الضوئية (الرمز 4).

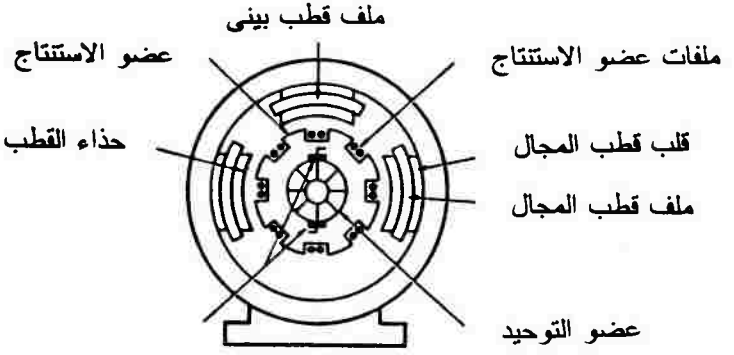


١ / ٢ - محركات التيار المستمر ذات المجال الملفوف:

لوقت قريب كان محرك التيار المستمر هو الحصان الأسود فى الصناعة، ويرجع هذا لسهولة التحكم فى سرعته وخواصه الممتازة وإمكانية الحصول على مدى واسع من السرعات.

ويعاب على محركات التيار المستمر ارتفاع سعرها وكبر حجمها وحاجتها المستمرة للصيانة، مقارنة بالمحركات الاستنتاجية ذات القفص السنجابى. كما أنها تحتاج لمصدر تيار مستمر، الأمر الذى يستدعى وجود دوائر توحيد لتحويل التيار المتردد لتيار مستمر.

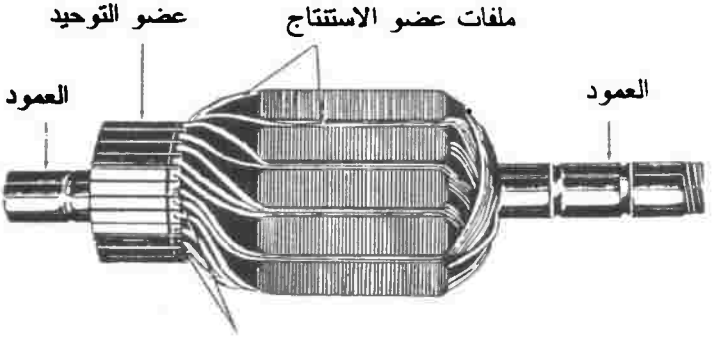
والشكل (١ - ٥) يعرض قطاعاً أمامياً لمحرك تيار مستمر بقطبين Two Poles.



الشكل (١ – ٥)

ويتركب المحرك من عضو ثابت Stator يحمل الأقطاب المغناطيسية الرئيسية Main Poles، والتى تنتج المجال المغناطيسى المطلوب، والأقطاب البينية **Inter** Poles، والتى تعمل على تقليل الشرر الذى يحدث عند الفرش الكربونية أثناء دوران المحرك، وعضو دوار يحمل الملفات الكهربية للمحرك، ويسمى بعضو الاستنتاج Armature.

والشكل (١ – ٦) يعرض المسقط الأفقى لعضو الاستنتاج.



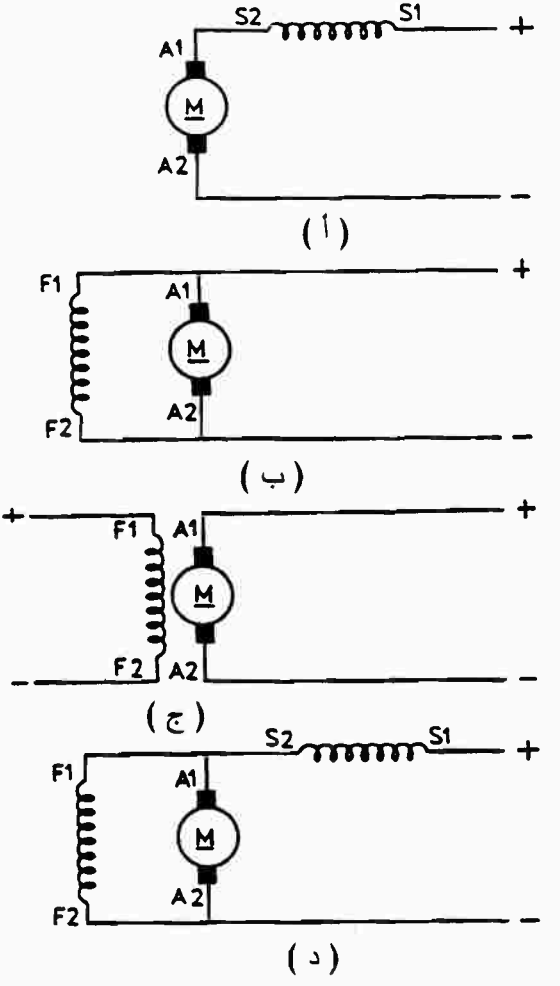
الشكل (١ – ٦)

ويلاحظ أن عضو الاستنتاج يتكون من قلب مغناطيسى اسطوانى مصنوع من رقائق من الصلب السليكونى المعزولة عن بعضها، ويحتوى على مجارى طولية تحتوى على الملفات الكهربية، ويثبت فى القلب المغناطيسى عضو توحيد Commutator مقسم إلى لامات طولية، وتوصل أطراف الملفات مع هذه اللامات بطريقة معينة أثناء التصنيع.

والجدير بالذكر أنه عند تجميع محرك التيار المستمر يثبت على عضو التوحيد فرش كربونية تنزلق على عضو التوحيد، ويتم تغذية المحرك من خلالها بالتيار الكهربى، وتوضع كل فرشة داخل حامل فرش مثبت على العضو الثابت، ويتم دفع الفرشة تجاه عضو التوحيد بواسطة يايات موضوعة داخل حامل الفرش.

ويمكن تقسيم محركات التيار المستمر ذات المجال الملفوف تبعاً لطريقة توصيل ملفات المجال Field كما بالشكل (١ – ٧) إلى:

١ – محرك توالى Series Motor (الشكل أ).



الشكل (١ – ٧)

٢ – محرك توازى Shunt Motor (الشكل ب) .

٣ – محرك تغذية منفصلة Separately Excited Motor (الشكل جـ) .

٤ – محرك مركب Compound Motor (الشكل د) .

والجدير بالذكر أن A_2 وA_1 هى أطراف عضو الاستنتاج، أما S_2 وS_1 فهى أطراف ملف التوالى المثبت على الأقطاب الرئيسية، أما F_2 وF_1 فهى أطراف ملف التوازى والمثبت أيضاً على الأقطاب الرئيسية .

١ / ٣ – نظرية عمل محركات التيار المستمر :

يدور محرك التيار المستمر نتيجة للتفاعل بين المجال المغناطيسى الناتج عن مرور التيار الكهربى فى عضو الاستنتاج والمجال المغناطيسى الرئيسى للمحرك، سواء كان مجال توالٍ أو توازٍ... إلخ. فعند دوران عضو الاستنتاج تنزلق الفرش على عضو التوحيد، وبالتالى يصل التيار الكهربى لملفات عضو الاستنتاج الواحد تلو الآخر. وحتى نستوعب نظرية عمل محركات التيار المستمر ينبغى علينا أن نفهم مبدأ القوة الدافعة الكهربية العكسية E المتولدة عند دوران المحرك، فعند وصول التيار الكهربى للمحرك، وعندما يكون المحرك فى حالة الثبات، يمر تيار كهربى فى ملفات عضو الاستنتاج يساوى .

$$I_s = \frac{E_o}{R_a} \quad \rightarrow \quad 1.2$$

حيث إن

I_s تيار البدء .

E_o جهد المصدر المستمر .

R_a مقاومة عضو الاستنتاج .

وبمجرد دوران المحرك، ونتيجة لتفاعل المجالات المغناطيسية داخل المحرك، تتولد قوة دافعة كهربية عكسية على أطراف ملفات عضو الاستنتاج E، وبالتالى يصبح التيار المار فى المحرك فى هذه الحالة يساوى .

$$I_o = \frac{E_o - E}{R_a} \quad \rightarrow \quad 1.3$$

والجدير بالذكر أن تيار البدء I_s قد يساوى ست مرات من تيار المحرك عند الحمل الكامل I_o.

والمعادلة 1.4 تبين العلاقة بين القوة الدافعة الكهربية العكسية E وسرعة المحرك N وتيار المجال:

$$E = K_e I_f N \rightarrow 1.4$$

حيث إن: Ke ثابت القوة الدافعة الكهربية الخثية العكسية

أما عزم محرك التيار المستمر فنحصل عليه من المعادلة 1.5:

$$T = K_e I_f I_o \rightarrow 1.5$$

حيث إن:

K_t ثابت العزم.

I_f تيار المجال.

I_o هو تيار عضو الاستنتاج.

والجدير بالذكر أنه يمكن عكس حركة محركات التيار المستمر بعكس أطراف المجال الرئيسى، مع تثبيت أطراف عضو الاستنتاج أو العكس.

١ / ٤ - التحكم الالكترونى فى محركات التيار المستمر:

يمكن التحكم فى سرعة محركات التيار المستمر باستخدام:

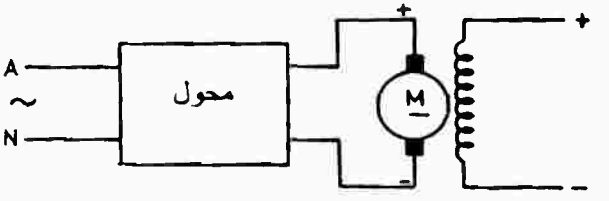
١ - محولات تيار مستمر محكومة Converters: تقوم بتحويل التيار المتردد لتيار مستمر مع إمكانية التحكم فى جهد التيار المستمر، وهى تنقسم لنوعين: محولات أحادية الوجه، ومحولات ثلاثية الوجه.

٢ - مقطعات تيار مستمر DC choppers: وتقوم بتقطيع التيار المستمر الداخل

عليها بطرق مختلفة لتغيير القيمة المتوسطة للجهد المستمر الخارج منها .

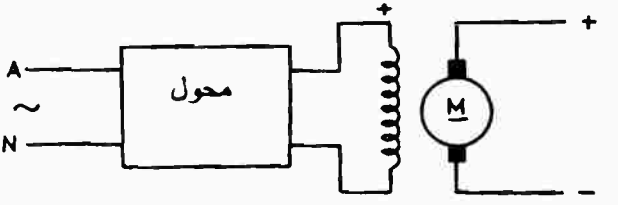
وهناك طريقتان متبعتان للتحكم فى سرعة محركات التيار المستمر :

الأولى: بالتحكم فى جهد عضو الاستنتاج، فى حين أن جهد المجال يظل ثابتاً كما هو واضح بالشكل (١ – ٨) . وفى هذه الحالة نحصل على عزم ثابت مع تغير السرعة .



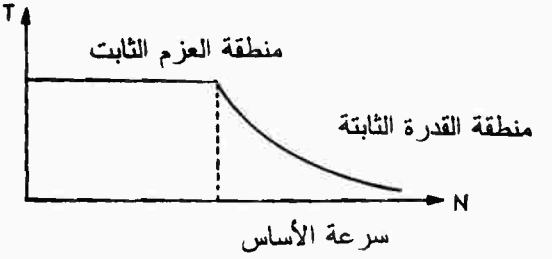
الشكل (١ – ٨)

والثانية: بالتحكم فى جهد ملف المجال مع تثبيت جهد عضو الاستنتاج كما بالشكل (١ – ٩) . وفى هذه الحالة نحصل على قدرة ثابتة مع انخفاض العزم عند زيادة السرعة .



الشكل (١ – ٩)

والشكل (١ – ١٠) يبين العلاقة بين السرعة والعزم لأجهزة التحكم الالكترونية فى سرعة محركات التيار المستمر DC Drives. ويلاحظ أنها تحتوى على منطقتين مختلفتين، المنطقة الأولى تسمى منطقة ثبات العزم مع تغير السرعة، ونحصل عليها بتغيير جهد عضو الاستنتاج مع ثبات جهد المجال. والثانية تسمى منطقة ثبات القدرة، ويكون العزم فيها متغيرا بتغير السرعة، ونحصل عليها بتثبيت جهد عضو الاستنتاج، وتغيير جهد المجال، ومنطقة التقاء المنطقتين تعطى سرعة الأساس Base Speed، ونحصل عليها عند تعريض المجال وعضو الاستنتاج للجهود المقننة.



الشكل (١ – ١٠)

١ / ٥ محولات التيار المستمر DC Converters

تستخدم محولات التيار المستمر المحكومة بكثرة فى التحكم فى سرعة محركات التيار المستمر من مصدر تيار متردد أحادى الوجه أو ثلاثى الوجه، أما خرج هذه المحولات فيكون جهدا مستمرا، ويمكن تغيير القيمة المتوسطة لهذا الجهد بالتحكم فى زاوية إشعال الثايرستورات المستخدمة فى بناء هذه المحولات، وتستخدم هذه المحولات فى أنظمة تحكم ذات حلقة مفتوحة ، وأنظمة ذات حلقة مغلقة، فى التحكم فى سرعة محركات التيار المستمر.

ويمكن تقسيم هذه المحولات من حيث نوع دخلها إلى:

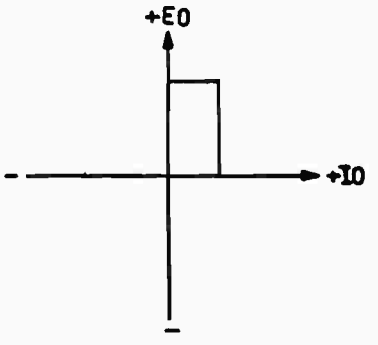
١ – محولات قنطرة بوجه واحد Single Phase bridge Converters.

٢ – محولات قنطرة ثلاثية الأوجه 3phase bridge converters.

ويمكن تقسيم محولات التيار المستمر حسب عدد الثايرستورات المستخدمة فى بنائها إلى:

١- محولات بثايرستور واحد.

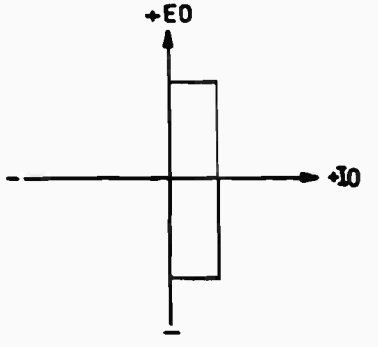
٢- محولات بعدة ثايرستورات، والتى يمكن تقسيمها حسب نظرية عملها إلى:



الشكل (١ - ١١)

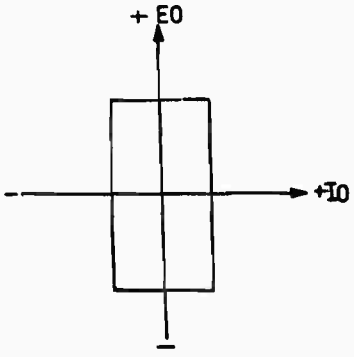
أ - محولات نصف محكومة - Semi Converters، ويكون خرج هذه المحولات جهدا مستمرا له قطبية موجبة E_O وتيار موجب I_O، كما بالشكل (١ - ١١) لذلك فإن هذه المحولات تعمل فى الربع الأول، حيث تنتقل القدرة الكهربية من المصدر إلى المحرك، وتتراوح قدرة المحركات التى يتم التحكم فيها بمحولات نصف محكومة ما بين 15: 150 HP.

ب - محولات بتحكم كامل -Full Converters، ويكون خرج هذه المحولات جهدا مستمرا له قطبية موجبة أو سالبة، وتيار له قطبية موجبة فقط، لذلك فإن هذه المحولات تعمل فى الربع الأول أو الرابع. ففى الربع الأول تنتقل القدرة الكهربية من المصدر الكهربى إلى المحرك فيدور المحرك، وفى الربع الرابع تنتقل القدرة الكهربية من المحرك إلى المصدر، ويتصرف المحرك كمولد فتحدث له فرملة وتتراوح قدرة المحركات التى يتم التحكم فيها بمحولات بتحكم كامل ما بين 100: 150 HP.



الشكل (١ - ١٢)

جـ - محولات مزدوجة Dual Converters: وخرج هذه المحولات جهد مستمر، له قطبية موجبة أو سالبة وتيار له قطبية موجبة أو سالبة؛ لذلك فإن هذا المحول يعمل فى أحد الأرباع الأربعة، كما هو مبين بالشكل



الشكل (١ – ١٣)

(١–١٣). ففى الربع الأول والثالث تنتقل القدرة الكهربية من المصدر للمحرك ويدور المحرك فى اتجاه أو عكس اتجاه عقارب الساعة.

وفى الربع الثانى أو الربع الرابع تنتقل القدرة الكهربية من المحرك للمصدر الكهربى، ويعمل المحرك كمولد، وتحدث فرملة للمحرك، سواء كان يدور فى اتجاه عقارب الساعة أو يدور فى عكس اتجاه عقارب الساعة. وتتراوح قدرة المحركات التى تعمل بهذه المحولات (200: 2000 HP).

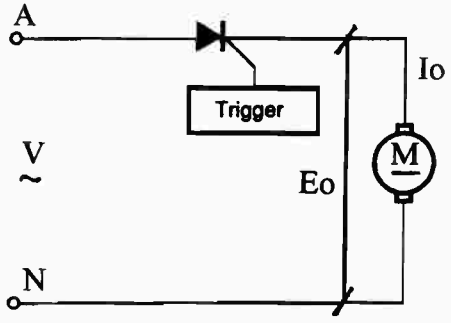
١ / ٦ – محولات الوجه الواحد:

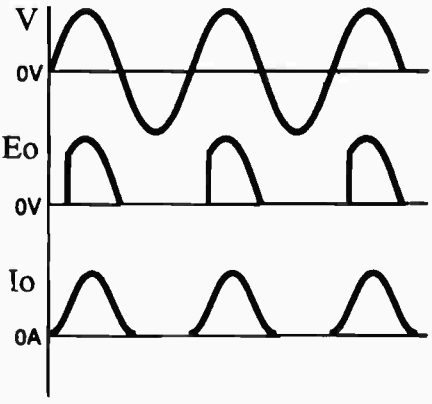
١ / ٦ / ١ – محولات التيار المستمر ذات الثايرستور الواحد:

إن أبسط طرق التحكم فى سرعة محركات التيار المستمر استخدام ثايرستور واحد.

ففى الشكل (١ – ١٤) دائرة لمنظم سرعة محرك تيار مستمر نصف موجة، ويلاحظ من منحنى موجة الجهد والتيار أنه عندما يتحول الثايرستور لحالة القطع لا يمر تيار فى الدائرة، ويؤدى تقطع مرور التيار فى الدائرة إلى تغير شديد فى السرعة والعزم.

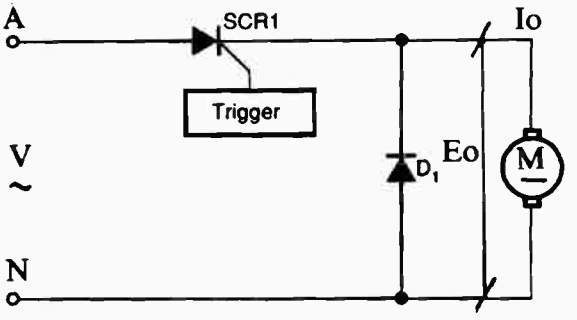
ويمكن تقليل تقطع مرور التيار فى الدائرة، بإضافة ثنائى حدافة Free Whelling Diode، كما هو موضح

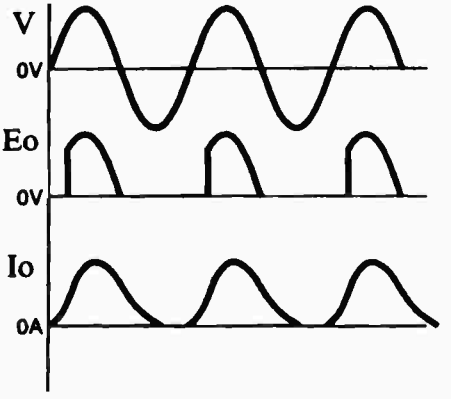




الشكل (١ – ١٤)

بالشكل (١ – ١٥)، حيث يتحول ثنائى الحدافة D_1 للتوصيل عندما يكون الثايرستور SCR_1 فى حالة قطع وأيضاً يقوم ثنائى الحدافه D_1 بحماية الثايرستور SCR_1 من الانهيار نتيجة للقفزات السريعة التى تحدث عند تحول الثايرستور لحالة القطع، ويمكن معرفة الفرق بعد إضافة ثنائى الحدافة D_1 عن ذى قبل بمقارنة الشكل (١ – ١٥) مع الشكل (١ – ١٤).



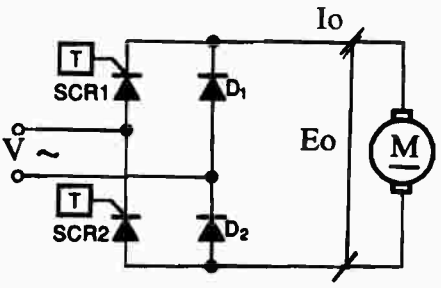


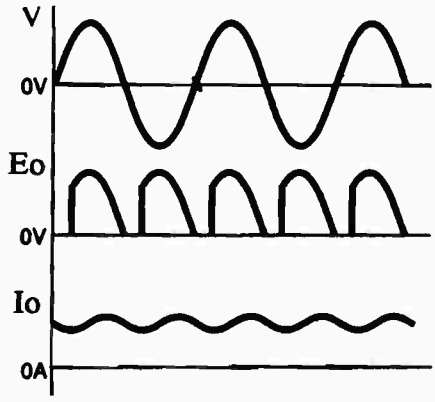
الشكل (١ – ١٥)

والجدير بالذكر أنه كلما صغرت زاوية إشعال الثايرستور ازداد الجهد المتوسط على أطراف المحرك E_O، وبالتالى زادت سرعة المحرك، والعكس بالعكس.

١ / ٦ / ٢ - محولات القنطرة الأحادية الوجه:

أولا: محولات القنطرة النصف محكومة:





الشكل (١ - ١٦)

الشكل (١ - ١٦) يعرض أحد المحولات النصف محكومة الأحادية الوجه، وهى تحتوى على قنطرة توحيد تتكون من عدد 2 ثايرستور وعدد 2 ثنائى، وهذه الدائرة تعطى تحكما أفضل من المحولات ذات الثايرستور الواحد، حيث يمكن التحكم فى نصفى الموجه السالب والموجب بواسطة الثايرستورات. فعندما يصبح جهد المصدر موجبا فإن SCR_1 يصبح منحازا أماميًا، وعند وصول نبضة إشعال من دائرة الإشعال T الخاصة به يشتعل الثايرستور SCR_1، ويمر التيار من طرف الجهد الموجب للمصدر خلال SCR_1، وصولاً للمحرك، ويعود لطرف الجهد السالب للمصدر من خلال الثنائى D_2. وفى نصف الموجة السالب يكون SCR_2 منحازا أماميًا، وعند وصول نبضة إشعال من دائرة الإشعالُ T الخاصة به يشتعل الثايرستور SCR_2، فيمر التيار الكهربى من طرف الجهد الموجب للمصدر خلال SCR_2، وصولاً للمحرك، ويعود لطرف الجهد السالب للمصدر من خلال الثنائى D_1.

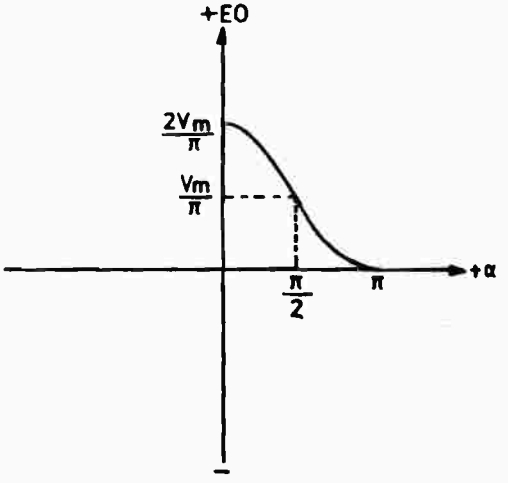
والجدير بالذكر أن الثنائيات D_1, D_2 تعمل كثنائيات حدافة توصل أثناء قطع الثايرستورات SCR_1, SCR_2.

وبالحساب وجد أن العلاقة بين الجهد المتوسط على أطراف المحرك E_O وزاوية إشعال الثايرستورات α كما يلى.

$$E_O = \frac{V_m}{\pi} (1 + \text{Cos } \alpha)$$

$$\rightarrow 1.5$$

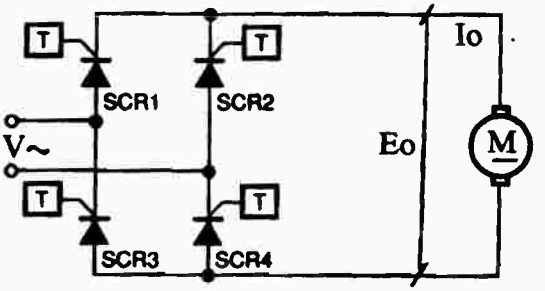
حيث إن V_m أقصى قيمة لجهد المصدر المتردد. والشكل (١ – ١٧) يبين العلاقة بين E_O والزاوية α. وتستخدم هذه المحولات مع المحركات التى تصل قدرتها إلى 25 HP.

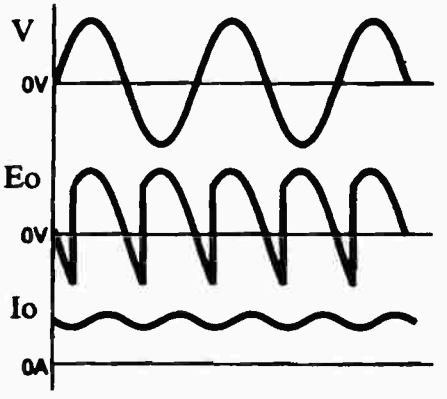


الشكل (١ – ١٧)

ثانيا: محولات القنطرة ذات التحكم الكامل:

الشكل (١ – ١٨) يعرض أحد محولات القنطرة ذات التحكم الكامل الأحادية الوجه، وهى تحتوى على أربع ثايرستورات موضوعة داخل قنطرة وجه واحد، ولهذه الدائرة خاصية غير موجودة فى الدوائر السابقة، وهى خاصية إعادة القدرة من المحرك للمصدر مرة أخرى لعمل فرملة للمحرك،





الشكل (١ – ١٨)

وتسمى هذه الطريقة فرملة إعادة التوليد Regenerative braking، حيث يتم إشعال كل اثنين من الثايرستورات معًا، فيتم إشعال SCR_1, SCR_3 فى نصف الموجه الموجب، وإشعال SCR_2, SCR_4، فى نصف الموجة السالب.

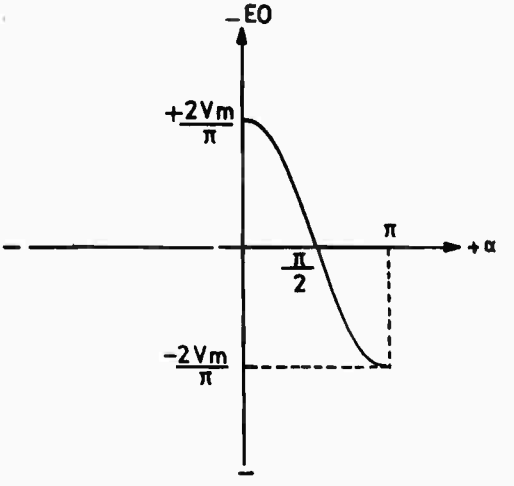
وبالحسابات وجد أن العلاقة بين الجهد المتوسط على أطراف المحرك E_O وزاوية الاشعال α للمحول الكامل كما يلى:

$$E_O = \frac{2V_m}{\pi} (\cos \alpha) \rightarrow 1.6$$

حيث إن V_m أقصى قيمة لجهد المصدر المتردد. والشكل (١ – ١٩) يبين العلاقة بين E_O والزاوية α.

وفيما يلى شرح للعلاقة بين E_O والزاوية α:

١ – عندما تكون زاوية الإشعال α أقل من 90° يكون كل من الجهد المتوسط E_O والتيار المتوسط I_O موجبان، فيعمل المحرك فى الربع الأول ويدور فى اتجاه عقارب الساعة.

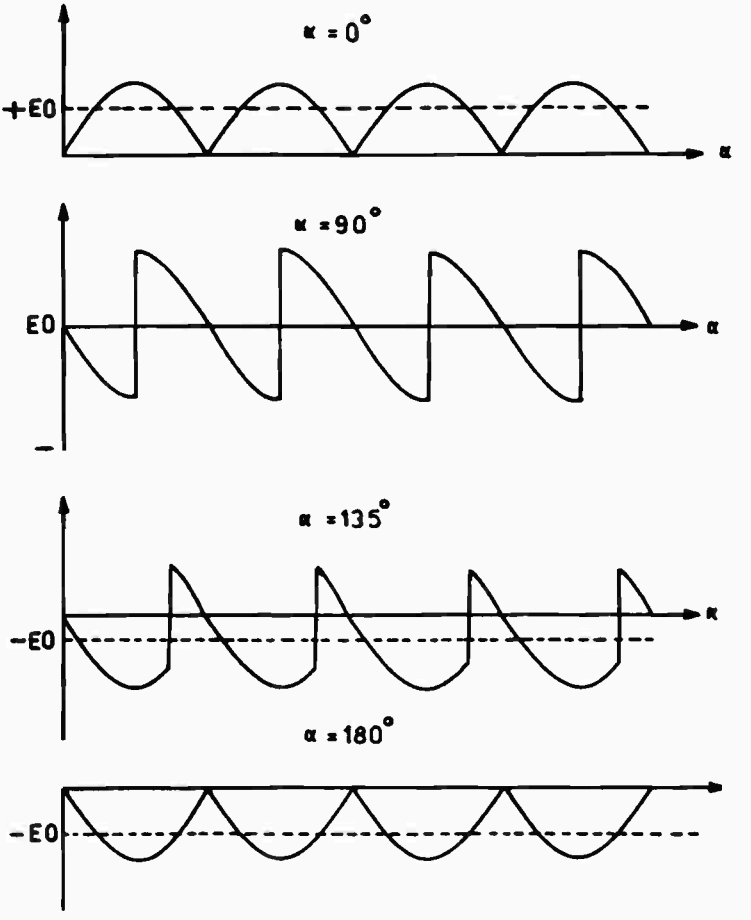


الشكل (١ – ١٩)

٢ – عندما تكون زاوية الإشعال α مساوية 90° فإن الجهد المتوسط E_O يساوى صفرًا، ويتوقف المحرك.

٣ – عندما تكون زاوية الإشعال أكبر من 90° يكون الجهد المتوسط E_O بالسالب، وبالتالى يتصرف المحرك كما لو كان مولداً، وتنتقل القدرة الكهربية من المحرك للمصدر المتردد، ويعمل المحرك فى الربع الرابع، ويحدث فرملة للمحرك.

والشكل (١ – ٢٠) يبين شكل موجة الجهد V على أطراف المحرك عند قيم مختلفة لزوايا الإشعال.

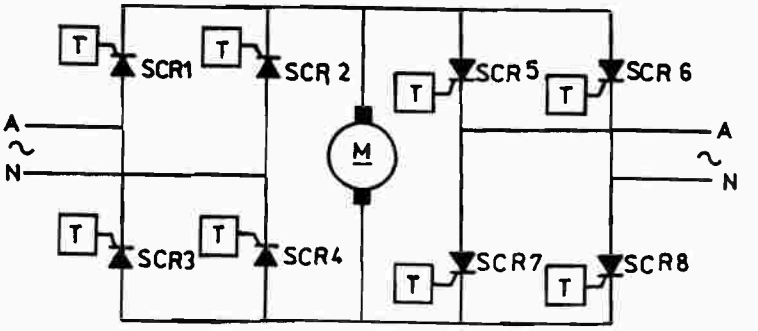


الشكل (١ – ٢٠)

ثالثًا: محولات القنطرة المزدوجة: –

تستخدم محولات القنطرة الأحادية الوجه المزدوجة فى التحكم فى سرعة المحركات المستمرة فى كلا الاتجاهين، وكذلك فرملتها فى كلا الاتجاهين، وهى تتكون من محولين كاملين متصلين خلفًا لخلف، كما هو مبين بالشكل (١ – ٢١).

وبهذه الطريقة يمكن للمحرك العمل فى الأرباع الأربعة.



الشكل (١ – ٢١)

شرح طريقة عمل المحول المزدوج:

١ – أثناء توقف المحرك يجب أن يكون خرج المحولين الكاملين متساويا ومتعاكسا، وبالتالى يكون محصلتهما صفراً. وهذا يتحقق بجعل مجموع زوايا إشعالهما يساوى 180°، فإذا كانت زاوية إشعال المحول الكامل الخاص بالدوران جهة اليمين 70° مثلاً، فيجب أن تكون زاوية إشعال المحول الخاص بالدوران جهة اليسار 110°.

٢ – يجب منع وصول نبضات الإشعال للمحول الخاص بالدوران جهة اليسار عند دوران المحرك جهة اليمين، والعكس بالعكس.

٣ – لعكس اتجاه المحرك من اتجاه اليمين مثلا إلي اتجاه اليسار نتبع الآتى:

أ – يفرمل المحرك، وذلك بجعل زاوية إشعال محول اليمين أكبر من 90°.

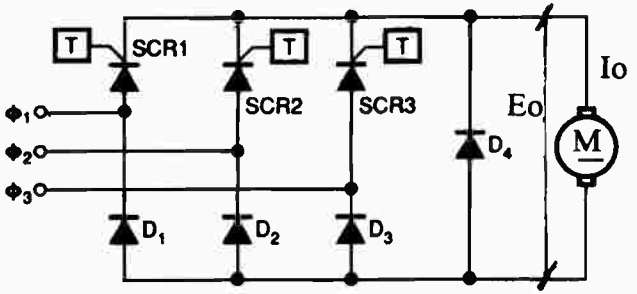
ب – بمجرد توقف المحرك تمنع نبضات إشعال محول اليمين من الوصول.

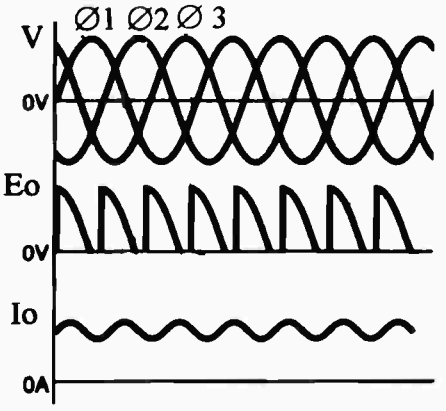
حـ – يسمح لنبضات إشعال محول اليسار من الوصول، مع التحكم في زاوية الإشعال تبعا للسرعة المطلوبة.

١ / ٧ – محولات التيار المستمر ثلاثية الأوجه :

١ / ٧ / ١ – محولات القنطرة الثلاثية الأوجه النصف محكومة :

الشكل (١–٢٢) يعرض محولا ثلاثي الأوجه نصف محكوم، وهو يحتوي على قنطرة توحيد ثلاثية الأوجه تتألف من ثلاثة ثنائية D_3 , D_2 , D_1 وثلاثة ثايرستورات SCR_3, SCR_2, SCR_1





الشكل (١ - ٢٢)

والجدول (١ - ١) يبين الثنائيات والثايرستورات المنحازة أماميًا في الفترات المختلفة خلال دورة كاملة.

الجدول (١-١)

0: 60°	60: 120	120: 180	180: 240	240: 300	300: 360
SCR_1	SCR_1	SCR_2	SCR_2	SCR_3	SCR_3
D_2	D_3	D_3	D_1	D_1	D_2

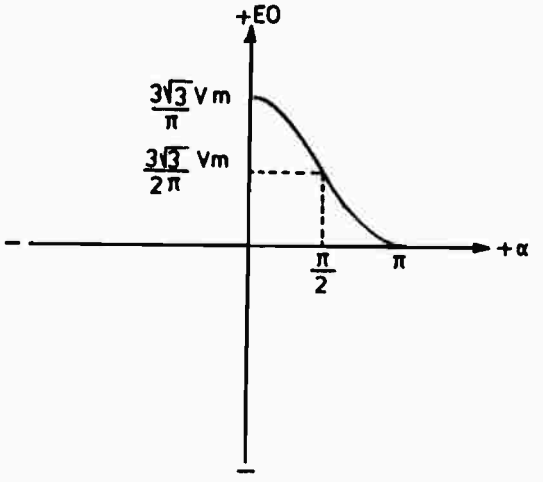
والجدير بالذكر أن العلاقة بين الجهد المتوسط علي أطراف المحرك E_O وزاوية الإشعال α كما يلي :

$$E_O = \frac{3\sqrt{3}\,Vm}{2\pi}(1 + \cos\alpha) \rightarrow 1.7$$

حيث إن :

Vm هي اقصي قيمة لجهد الوجه للمصدر الثلاثى الأوجه .

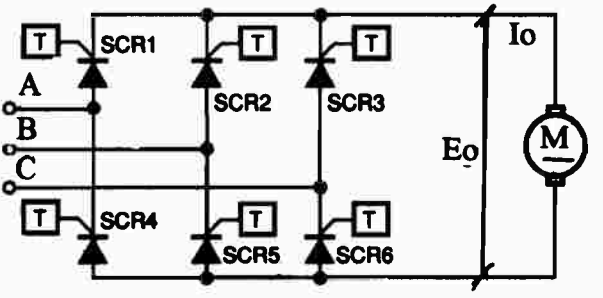
والشكل (١-٢٣) يبين العلاقة بين E_O وزاوية الإشعال α، ويلاحظ أن المحرك له جهد متوسط موجب على أطرافه مهما كانت قيمة α، وبالتالى يعمل المحرك فى الربع الأول ويدور فى اتجاه عقارب الساعة تمامًا، كما هو الحال فى المحولات النصف محكومة الأحادية الوجه . وتتراوح قدرة المحركات العاملة بمحولات القنطرة الثلاثية الأوجه النصف محكومة (10: 150 HP).



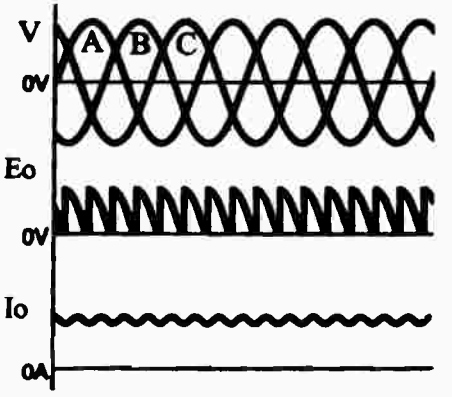
الشكل (١ - ٢٣)

١ / ٧ / ٢ - محولات القنطرة الثلاثية الأوجه ذات التحكم الكامل :

الشكل (١ - ٢٤) يعرض دائرة محول ذات تحكم كامل ثلاثى الأوجه، وهو يحتوى على قنطرة ثلاثية الأوجه مؤلفة من ست ثايرستورات .



الشكل (١ - ٢٤)



تابع الشكل (١ – ٢٤)

والجدول (١ – ٢) يبين الثايروستورات المنحازة أماميًا فى الفترات المختلفة خلال دورة كاملة.

الجدول (١ – ٢)

0 : 60	60 : 120	120 : 180	180 : 240	240 : 300	300 : 360
SCR_1	SCR_1	SCR_2	SCR_2	SCR_3	SCR_3
SCR_5	SCR_6	SCR_6	SCR_4	SCR_4	SCR_5

والجدير بالذكر أن العلاقة بين الجهد المتوسط على أطراف المحرك E_O وزاوية الإشعال α كما يلى:

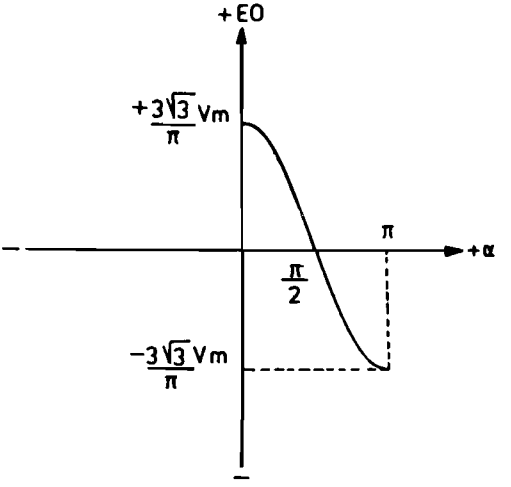
$$E_O = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos \alpha \rightarrow 1,8$$

والشكل (١ – ٢٥) يبين العلاقة بين E_O وزاوية الإشعال α.

ولا يختلف أداء المحرك فى حالة المحول الثلاثى الأوجه ذات التحكم الكامل عن أداء المحرك فى حالة المحول الأحادى الوجه ذى المحول الكامل.

ولمزيد من التفاصيل ارجع للفقرة (١ / ٦ / ٢) القنطرة الثلاثية الأوجه ذات

التحكم الكامل H_P 2500 :100.



الشكل (١ – ٢٥)

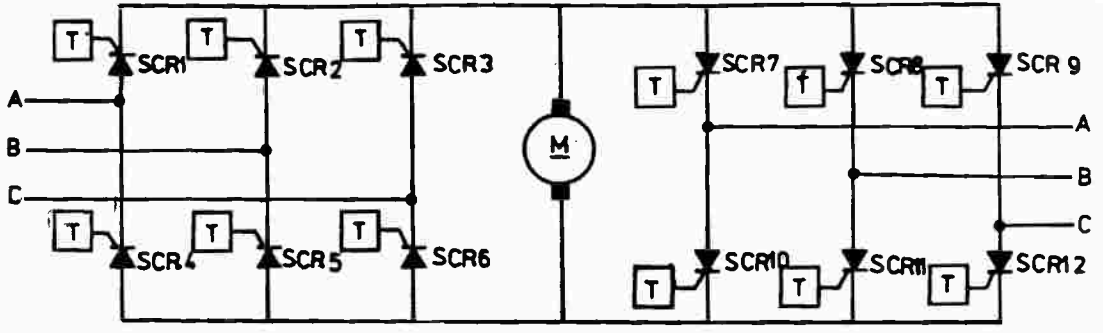
١ / ٧ / ٣ – محولات القنطرة الثلاثية الأوجه المزدوجة :

الشكل (١ – ٢٦) يعرض دائرة محول قنطرة ثلاثى الوجه مزدوج، حيث يستخدم للتحكم فى سرعة محركات التيار المستمر التى تصل قدرتها إلى ميجاوات فى اتجاهين، وكذلك فرملتها فى الاتجاهين. ويلاحظ أنها تتكون من محولى قنطرة ثلاثية الوجه بتحكم كامل.

والجدير بالذكر أنه بالنسبة لمحولات القنطرة الثلاثية الوجه والمزدوجة المثالية، فإنه عندما يكون مجموع زوايا إشعال كلا المحولين يساوى 180°، فإن الجهد المحصل على أطراف المحرك سيساوى صفراً، وينتج عن ذلك، توقف للمحرك.

ولكن بالنسبة لمحولات القنطرة الثلاثية الوجه والمزدوجة الغير مثالية، فإنه حتى ولو كان مجموع زوايا إشعال المحولين يساوى 180°، فإن الجهد المحصل لن يساوى صفراً نتيجة للذبذبات الموجودة على خرج المحولين، وبالتالى يعمل هذا الفرق فى الجهد على إمرار تيار بين المحولين؛ لذلك يجب التحكم فى هذا التيار الدائر Circulating Current، ويوجد طريقتان مختلفتان للتحكم فى المحولات المزدوجة الأحادية الوجه والثلاثية الوجه، وهما كما يلى :

١ – العمل بدون تيار دوار، وذلك بجعل أحد المحولين فى حالة وصل والآخر فى حالة قطع.

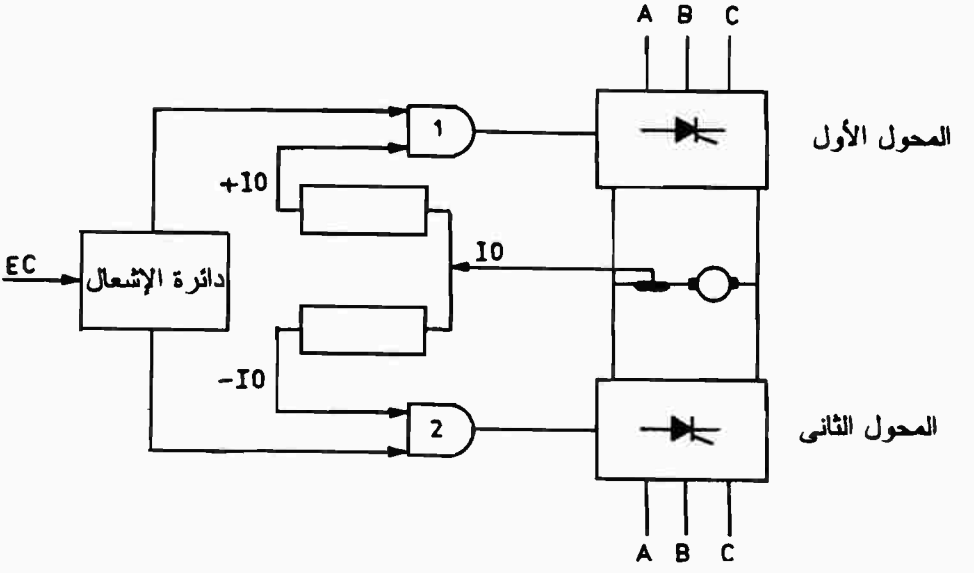

T
SCR1
SCR2
SCR3
A
B
C
SCR4
SCR5
SCR6
M
SCR7
SCR8
SCR 9
SCR10
SCR11
SCR12

الشكل (١ – ٢٦)

٢ – العمل بتيار دوار مع تحديد التيار الدوار باستخدام ملفات خنق Reactors توصل بين أطراف التيار المستمر للمحولين.

أولا: المحولات المزدوجة بدون تيار دوار:-

يمكن منع مرور التيار الدوار بالطريقة الموضحة بالشكل (١ – ٢٧)



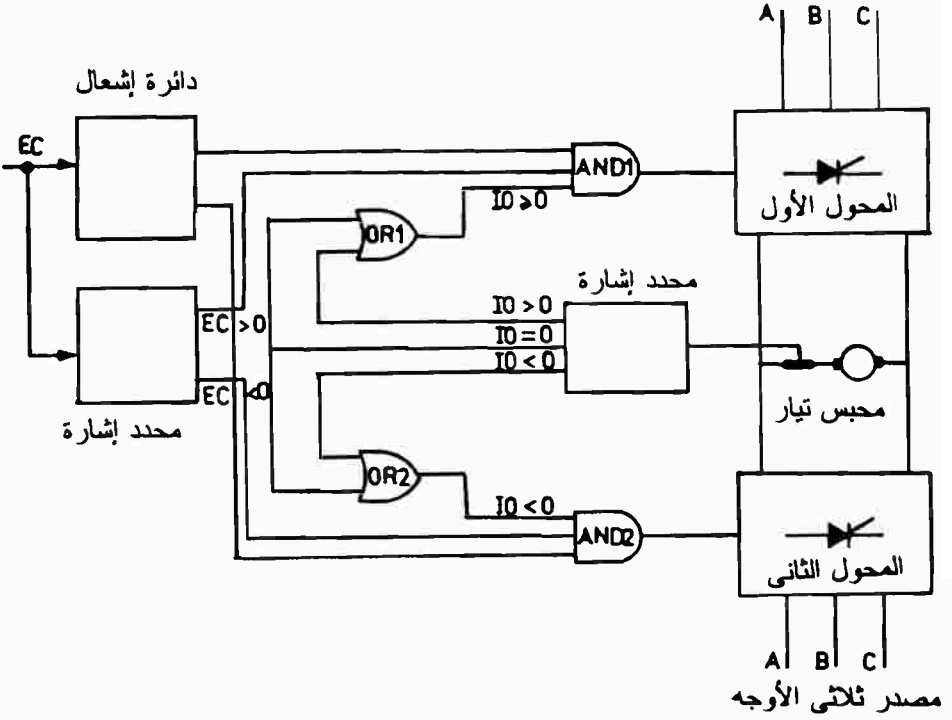
الشكل (١ – ٢٧)

فإذا كان تيار المحرك I_O بالموجب فإنه يسمح لنبضات الإشعال بالوصول للمحول الأول، وإذا كان تيار المحرك بالسالب فإنه يسمح لنبضات الإشعال بالوصول للمحول الثانى.

والشكل (١ – ٢٨) يعرض طريقة أخرى لعمل المحول وذلك تبعًا لإشارة كل من الجهد والتيار.

فإذا كانت E_C (جهد التحكم فى دائرة الإشعال والقادم من المنظمات الالكترونية) مساوية للصفر فإن إشارات الإشعال لن تصل لكلا المحولين الكاملين، وإذا كانت $E_C > 0$ وتيار المحرك يساوى صفراً أو موجبًا فإن المحول الأول يصل له نبضات الإشعال. وإذا كان $E_C < 0$ وتيار المحرك صفراً أو بالسالب تصل نبضات

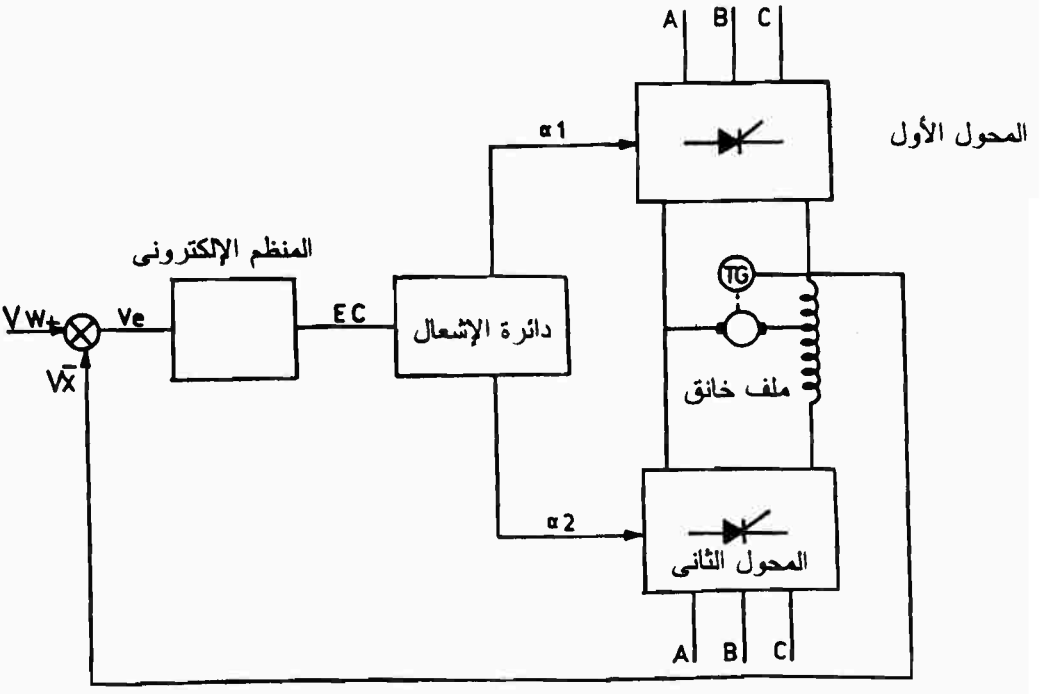
الإشعال للمحول 2. وعادة فإن التيار المار فى المحرك يكون متقطعًا وغير مستمر، كما أنه عندما يكون خرج المحول الأول أكبر من القوة الدافعة الكهربية العكسية للمحرك، وتم تحويل نبضات الإشعال من المحول الأول إلى المحول الثانى، فإن ذلك يؤدى لمرور تيار عابر Transient Current، ويمكن تحديد هذه التيارات إما بترك فترة زمنية عند الانتقال من محول لآخر أو بضبط خرج المحول الداخل حتى يتلاءم مع الجهد الفعلى على أطراف المحرك.



الشكل (١ – ٢٨)

ثانيا: المحولات المزدوجة بتيار دوار:

الشكل (١ – ٢٩) يعرض المخطط الصندوقى لمحول مزدوج بتيار دوار فى دائرة تحكم مغلقة.



الشكل (١ – ٢٩)

١ – نظرية عمل هذا المحول :

١ – عند الدوران الطبيعي للمحرك جهة عقارب الساعة : يكون جهد التحكم فى دائرة الإشعال E_C موجباً فيعمل المحول الأول على تغذية المحرك بالتيار الكهربى فى حين يحمل المحول الثانى التيار الدوار ويكون فى حالة قطع **OFF**.

٢ – عند زيادة سرعة المحرك عن السرعة المطلوبة : يحدث أحياناً زيادة سرعة المحرك عن السرعة المطلوبة والمقابلة لجهد المرجع V_W بفعل ظروف تشغيل معينة، على سبيل المثال : عند انخفاض حبل ونش بحمل ثقيل فى اتجاه الجاذبية الأرضية، أو عند حركة عربة كهربية على منحدر.

وبالتالى فإن الجهد المقابل للسرعة V_X سوف يكون أكبر من جهد المرجع V_W، وبالتالى يصبح جهد الخطأ والذى يساوى :

$$V_e = V_W - V_X \rightarrow 1.9$$

بالسالب، فتقل قيمة جهد التحكم E_C وتتأخر زاوية إشعال المحول الأول α_1 فيقل تيار المحرك للصفر، ويستمر تناقص E_C حتى يصبح جهد المحرك أكبر من جهد المحول 1، فينعكس اتجاه التيار فى المحرك ويعمل كمولد، فيحدث فرملة للمحرك وصولا للسرعة المطلوبة. وفى هذه الحالة تصبح قيمة V_e (جهد الخطأ) بالموجب ونعود للحالة الطبيعية للتشغيل، وبهذه الطريقة تعود سرعة المحرك للسرعة المطلوبة.

٣ - عكس اتجاه دوران المحرك: لعكس اتجاه دوران المحرك يجب عكس قطبية جهد المرجع V_W ولكن اتجاه المحرك لن ينعكس لحظياً، حيث تصبح إشارة الخطأ والتى تساوى:

$$V_e = V_W - V_X$$

بالسالب، فيقل جهد التحكم E_C، وتتأخر زاوية إشعال المحول الأول $\alpha 1$ فيقل تيار المحرك للصفر، ويستمر تناقص E_C حتى يصبح جهد المحرك أكبر من جهد المحول 1 فينعكس اتجاه التيار فى المحرك، ويعمل كمولد فيحدث فرملة للمحرك وتنخفض سرعة المحرك وصولاً للصفر، وتبدأ زوايا إشعال المحول الثانى α_2 فى التزايد فيدور المحرك فى عكس اتجاه عقارب الساعة وصولاً للسرعة المطلوبة والمقابلة لجهد المرجع V_W.

وتستخدم دائرة تحكم فى التيار أحياناً لمنع تعدى تيار المحرك للتيار المقنن، وذلك من أجل الحماية.

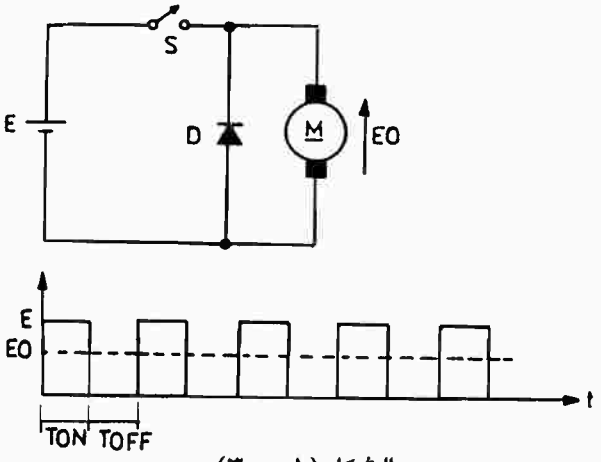
والجدول (١ - ٣) يعقد مقارنة بين المحولات المزدوجة بتيار دوار ومثيلتها بدون تيار دوار.

الجدول (١ - ٣)

محولات مزدوجة بدون تيار دوار	محولات مزدوجة بتيار دوار
- تحتاج أحياناً لملفات Reactors لجعل تيار المحرك مستمراً وغير متقطع.	- تحتاج دائماً لملفات وهذا يكون مكلفاً.
- الكفاءة عالية.	- الكفاءة منخفضة.
- تيار المحرك عادة يكون متقطعاً.	- تيار المحرك عادة يكون مستمراً.
- تحتاج لدوائر تحكم رقمية معقدة.	- بسيطة فى التنفيذ
- الاستجابة بطيئة لوجود تقطع فى التيار.	- الاستجابة سريعة.

١ / ٨ – مقطعات التيار المستمر DC Choppers :

تقوم المقطعات بتحويل جهد مستمر ثابت القيمة إلى جهد مستمر متغير القيمة. والشكل (١ – ٣٠) يوضح فكرة عمل المقطعات.



الشكل (١ – ٣٠)

ويتكون المقطع من مصدر جهد مستمر، ومفتاح الكترونى يقوم بتقطيع الجهد المستمر، وثنائى حدافة D. ويتحول المفتاح S لحالة الوصل والفصل لتقليل القيمة المتوسطة للجهد على أطراف المحرك E_O. وخلال الزمن الذى يكون فيه المفتاح S مغلق ON يصل التيار الكهربى للمحرك من مصدر الجهد المستمر عبر المفتاح S، وعندما يكون المفتاح S مفتوح OFF يمر التيار الكهربى فى كل من ملفات المحرك وثنائى الحدافة، نتيجة لتوليد قوة دافعة كهربية حثية عند انقطاع التيار الكهربى عن المحرك على أطرافه، وتعرف القيمة المتوسطة للجهد على أطراف المحرك بالمعادلة التالية:

$$E_O = E \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \quad \rightarrow 1.10$$

حيث إن:

E_O هى القيمة المتوسطة للجهد المسلط على المحرك.

E هى جهد المصدر المستمر.

T_{ON} هو زمن بقاء المفتاح مغلقاً.

T_{OFF}هو زمن بقاء المفتاح مفتوحاً.

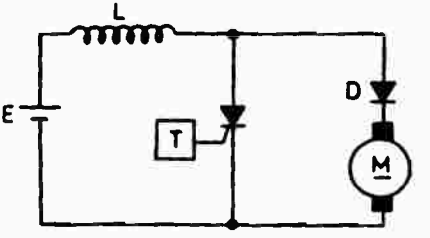
وعند تساوى T_{ON} مع T_{OFF} يصبح:

$$E_O = \frac{1}{2} E$$

وتعرف طريقة تغيير الجهد المتوسط بتغيير زمن الوصل T_{ON} وزمن الفصل T_{OFF} مع ثبات زمن الدورات (أى بثبات التردد) بالتضمين بنبضات متغيرة العرض PWM. وهذه الطريقة من أكثر الطرق المعروفة فى التحكم فى الجهد، وهناك طريقة ثانية تعرف بطريقة التضمين بنبضات متغيرة التردد PFM، حيث يثبت زمن الوصل T_{ON} مع تغير زمن القطع T_{OFF} وبالتالى يتغير التردد.

ويتراوح تردد المقطعات ما بين (H_Z 2500 : 500)، وتستخدم المقطعات على نطاق واسع فى الصناعة فى النقل مثل روافع الشوكة Fork lift والأوناش الكهربية والسيارات العاملة بالبطاريات وفى مجالات أخرى مثل القاطرات الكهربية.

ويطلق على المقطعات التى تحدثنا عنها بالمقطعات الخافضة Step-down choppers، حيث إن القيمة المتوسطة للجهد على أطراف المحرك تكون أقل من جهد المصدر. وهناك نوع آخر من المقطعات يسمى بالمقطعات الرافعة Step up choppers. والشكل (١ - ٣١) يبين نموذجاً لأحد المقطعات الرافعة.



الشكل (١ - ٣١)

فعند تحول المفتاح (الثايرستور) لحالة الوصل تنتقل القدرة الكهربية من المصدر لتخزن فى الملف L، وعندما يتحول المفتاح (الثايرستور) لحالة القطع تنتقل القدرة الكهربية من المصدر والملف لتغذية المحرك فيزداد جهد المحرك عن جهد المصدر.

وتوجد أنواع مختلفة من المقطعات حسب نوعية أشباه الموصلات المستخدمة فيها مثل:

١ – المقطعات الثايرستورية.

٢ – المقطعات الترانزستورية.

٣ – مقطعات Mosfet.

٤ – مقطعات الثايرستورات ذات بوابة الإطفاء GTO.

١ / ٩ – المقطعات الثايرستورية Thyristor choppers:

تنقسم المقطعات الثايرستورية حسب طريقة إطفاء ثايرستوراتها الرئيسة إلى :

١ – إطفاء بالحمل Load Commutation، حيث يحدث إطفاء للثايروستور نتيجة لانخفاض تيار الحمل المار فيه للصفر أو عند تحول مسار التيار المار فى الثايروستور لمسار آخر بالدائرة.

٢ – إطفاء جبرى Forced commutation، ففى الإطفاء الجبرى فإن تيار الثايرستور يجبر لكى يصبح صفراً وذلك لتحويله لحالة الفصل، وهناك طريقتان لتحقيق ذلك وهما:

أ – إطفاء بالجهد Voltage commutation: ويتحقق ذلك بعمل انحياز عكسى للثايروستور بواسطة مكثف مشحون.

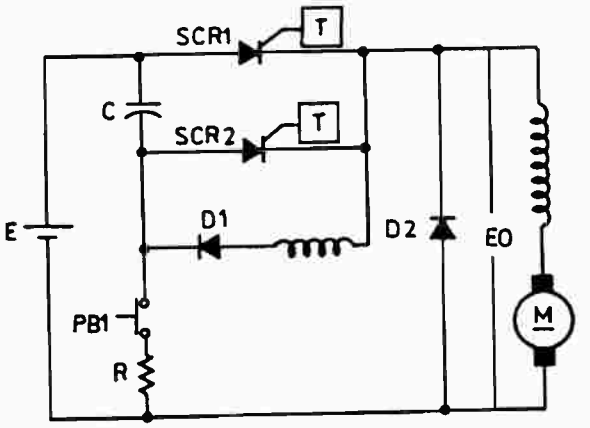
ب – إطفاء بالتيار Current commutation: ويتحقق ذلك بحقن تيار فى الاتجاه العكسى للثايرستور، وعندما يصبح التيار المار بالثايرستور مساوياً الصفر يتحول الثايروستور لحالة الفصل.

١ / ٩ / ١ – الإطفاء الجبرى بالجهد:

الشكل (١ – ٣٢) يعرض دائرة مقطع ثايروستورى يعمل بإطفاء جبرى بالجهد، وتستخدم هذه الدائرة على نطاق واسع فى الصناعة.

ولبدء تشغيل الدائرة يجب شحن المكثف C بإحدى الطريقتين التاليتين، وهما:

أ – بالضغط على الضاغط PB_1 فيشحن المكثف C خلال المسار E ثم C، ثم PB_1، ثم R. ويصبح اللوح العلوى للمكثف بشحنة موجبة.



الشكل (١ – ٣٢)

ب – بوصول نبضة إشعال للثايروستور SCR_2 أولاً فيحدث شحن للمكثف C خلال المسار E، ثم C، ثم SCR_2، ثم المحرك، وبمجرد تمام شحن المكثف C ينقطع مرور تيار الشحن فيتحول الثايرستور SCR_2 لحالة القطع.

وعند وصول نبضة إشعال للثايرستور SCR_1 فإن التيار يمر فى مسارين، الأول يمر تيار الحمل عبر SCR_1 وصولاً للمحرك، والثانى تيار الإطفاء ويمر خلال المسار C ثم SCR_1، ثم L ثم D_1 فتنعكس الشحنة على المكثف C، ويقوم الثنائى D_1 بمنع تفريغ المكثف C فى المحرك، ويصبح اللوح السفلى للمكثف موجباً واللوح العلوى سالباً.

وعند وصول نبضة إشعال للثايرستور SCR_2 فإن المكثف C يصبح موصلا بالتوازى مع الثايرستور SCR_2، فيحدث انحياز عكسى للثايرستور SCR_2 فيتحول لحالة القطع، وبعد ذلك فإن المكثف C يمرر تيار للمحرك فى المسار E ثم C، ثم SCR_2، وصولاً للمحرك، وبمجرد تمام شحن المكثف فى الاتجاه المعاكس، حيث يصبح اللوح العلوى موجباً واللوح السفلى سالباً فيتحول الثايرستور SCR_2 لحالة القطع لانعدام مرور التيار فى المكثف، وهذا يحدث عندما يكون الجهد على أطراف المكثف مساوياً لجهد المصدر ويحدث مرور لتيار المحرك عبر ثنائى الحدافة D_2. حينئذ تصل نبضة إشعال للثايرستور SCR_2 وتتكرر دورة التشغيل.

ويعاب على هذه الدائرة ضرورة شحن المكثف C فى البداية، إما بالضغط على الضاغط PB_1 أو بتصميم دائرة منطقة تسمح بإشعال الثايرستور SCR_2 أولاً. وأيضاً قد يصل الجهد على أطراف المحرك ضعف جهد المصدر لحظياً أثناء عملية إطفاء الثايرستور SCR_1. وتستخدم المعادلات التالية لحساب قيمة المكثف C والملف L:

$$C = \frac{2I_S T_{oFF}}{E} \rightarrow 1.11$$

$$C\left(\frac{E}{I_S}\right)^2 \lesssim L \lesssim \frac{0.01T^2}{\pi^2 C} \rightarrow 1.12$$

حيث إن:

I_S تيار البدء للمحرك.

T_{OFF} زمن تحول الثايرستور لحالة القطع.

E جهد المصدر.

T هو مقلوب تردد وصل وفصل المقطع (الزمن الدورى للمقطع).

فمثلاً: إذا كان:

$$I_S = 100A\ T_{OFF} = 20\ \mu S,\ E = 100V,\ F = 400\ HZ$$

فإن:

$$C = \frac{100 \times 40 \times 10^{-6}}{100} = 40\ \mu F$$

$$L \lesssim \frac{0.01\ (2.5 \times 10^{-3})}{\pi^2\ (40 \times 10^{-6})}$$

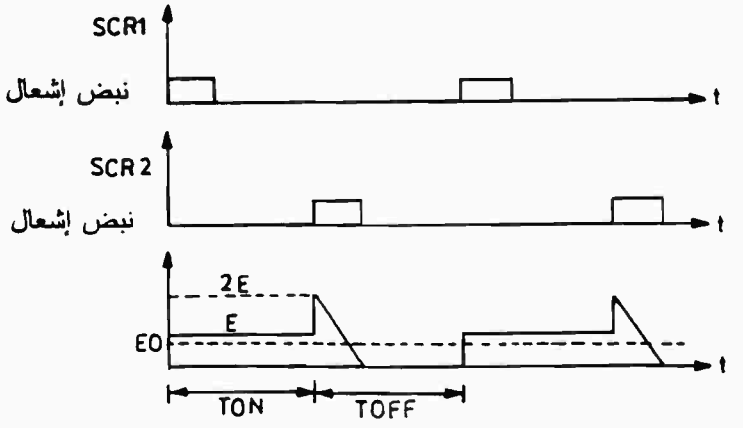
$$L \lesssim 158.5\ \mu H$$

$$L \gtrsim 40 \times 10^{-6} \left(\frac{100}{100}\right)^2$$

$$L \gtrsim 40 \mu H$$

فيمكن اختيار L مساوية 40 µH.

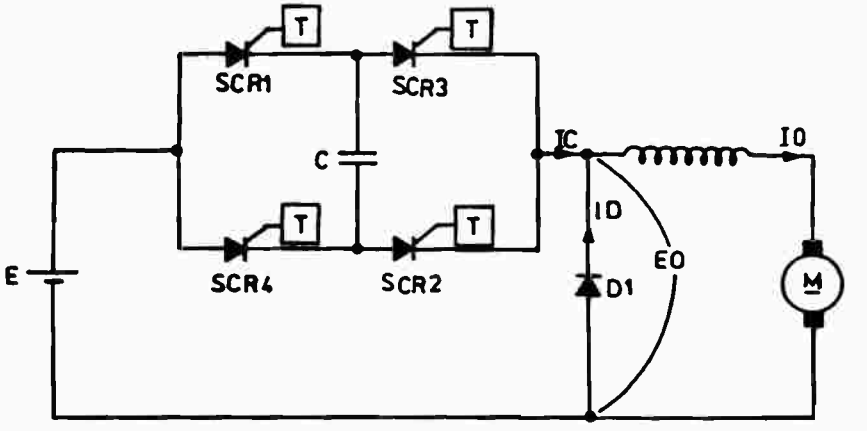
والشكل (١-٣٣) يعرض شكل نبضات الإشعال وموجة الجهد على أطراف المحرك لهذا المقطع الذى نحن بصدده .



الشكل (١-٣٣)

الإطفاء بالحمل Load Commutation

الشكل (١-٣٤) يعرض دائرة لمقطع ثايرستورى يستخدم طريقة الإطفاء بالحمل لإطفاء الثايرستورات الرئيسة



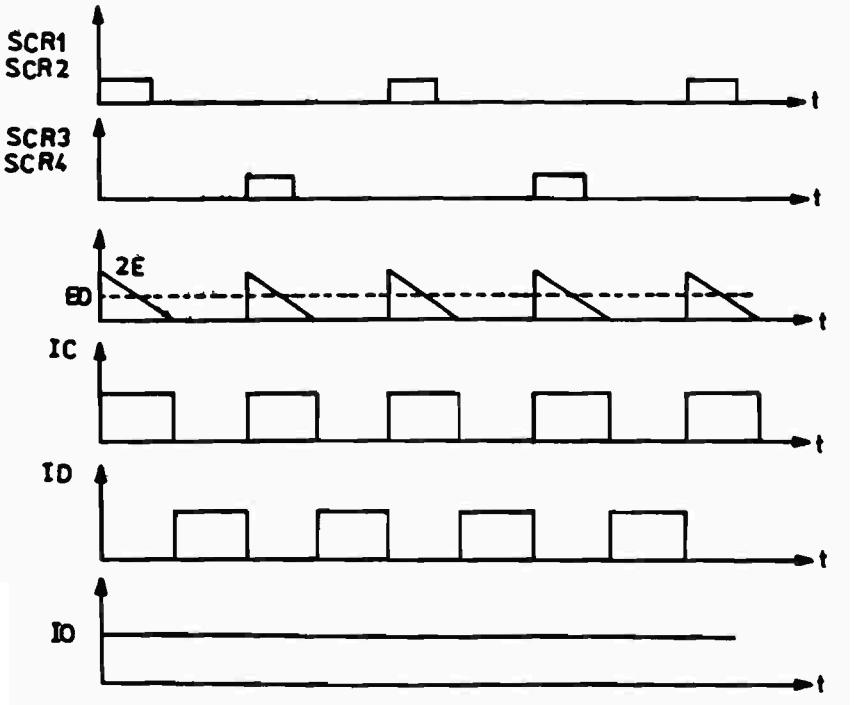
الشكل (١-٣٤)

ففى البداية تصل نبضة إشعال إلى الثايرستورات الرئيسية SCR_2 , SCR_1 فيمر التيار الكهربى عبر المسار E ثم SCR_1، ثم SCR_2 وصولاً للمحرك فيشحن المكثف C بشحنة موجبة وعندما يصبح جهد المكثف C مساويًا لجهد المصدر E ينقطع مرور التيار الكهربى عبر الثايرستورات SCR_2 , SCR_1 ويتحولان لحالة القطع، ويتغير مسار التيار المار بالمحرك فيمر عبر المحرك وثنائى الحدافه D_1، وعند وصول نبضات إشعال لكل من SCR_4, SCR_3 يتغير مسار تيار المحرك فيمر فى المسار E ثم SCR_4 ثم C ثم SCR_3 وصولاً للمحرك، فيصبح الجهد المسلط على المحرك مساويًا 2E، ثم ينخفض الجهد المسلط على المحرك نتيجة لتفريغ شحنة المكثف ليصبح مساويًا E، وبعد ذلك يشحن المكثف بشحنة سالبة، وعندما يصبح الجهد على أطراف المكثف مساويًا E – يتوقف مرور التيار فى هذا المسار وتتحول الثايرستورات SCR_4, SCR_3 لحالة القطع، ويتغير مسار تيار المحرك فيمر عبر المحرك وثنائى الحدافة D_1، وعند وصول نبضات إشعال لكل من SCR_2, SCR_1 يتغير مسار تيار المحرك فيمر التيار الكهربى فى المسار E ثم SCR_1 ثمC ثم SCR_2 وصولاً للمحرك، ويصبح جهد المحرك مساويًا 2E، ثم يقل الجهد على أطراف المحرك مع تفريغ المكثف C، وعندما يحدث تفريغ كامل للمكثف C يبدأ المكثف بالشحن بشحنة موجبة، وعندما يصبح الجهد على أطراف المكثف مساويًا E+ يتوقف مرور التيار ويبدأ مرور التيار فى المحرك بواسطة ثنائى الحدافة، وهكذا.

والشكل (١–٣٥) يبين نبضات إشعال الثايرستورات وموجة الجهد على أطراف المحرك وموجة تيار المكثف I_C وتيار ثنائى الحدافه I_D وتيار المحرك I_O.

ويلاحظ أن العلاقة بين تيار المكثف I_C، وتيار ثنائى الحدافه، I_D وتيار المحرك I_O كما يلى:

$$I_O = I_C + I_D \rightarrow 1.13$$



الشكل (١-٣٥)

والجدير بالذكر أن سعة المكثف C نحصل عليها من المعادلة التالية :

$$C = \frac{I}{2\,EF} \rightarrow 1{,}14$$

حيث إن :

I أقصى قيمة لتيار المحرك .

E جهد المصدر المستمر.

EF أقصى تردد للمقطع.

فإذا كان : $I = 100\ A$ $E = 100\ V$ $F = 5\ KHZ$

$$C = \frac{100}{2 \times 100 \times 5000} = 100\ \mu f$$

المقطعات الترانزستورية Transistor Choppers

الشكل (١-٣٦) يعرض مقطع ترانزستورى بسيط، حيث يتم التحكم فى وصل وفصل الترانزستور مع تغيير زمن الوصل والفصل، أى يعمل بالتضمين بنبضات متغيرة العرض PWM.

ويقوم ثنائى الحدافة D بالسماح بمرور تيار فى المحرك أثناء تحول الترانزستور لحالة القطع، وهذا واضح من شكل الموجات فى الشكل ذاته.

والجدير بالذكر أن العلاقة بين تيار المحرك I_O، وتيار ثنائى الحدافة I_D. وتيار مجمع الترانزستور I_C كالآتى

$$I_O = I_D + I_C$$

كما أن موجة الجهد على أطراف المحرك هى المتمم لموجة الجهد بين مجمع وباعث الترانزستور V_{CE}.

وعادة تستخدم ترانزستورات دارلنجتون للتحكم فى سرعة محركات التيار المستمر ذات القدرات العالية.

وتستخدم الدائرة السابقة لتشغيل محرك تيار مستمر يدور فى اتجاه واحد، ولا تعطى إمكانية لفرملة المحرك، أى أن هذا المقطع يعمل فى الربع الأول فقط.

والشكل (١-٣٧) يبين مقطع ترانزستورى يتحكم فى محرك تيار مستمر، يمكن إدراته فى اتجاهين، وكذلك إيقافه بفرملة فى كلا الاتجاهين، ويسمى هذا المقطع بقنطرة H.

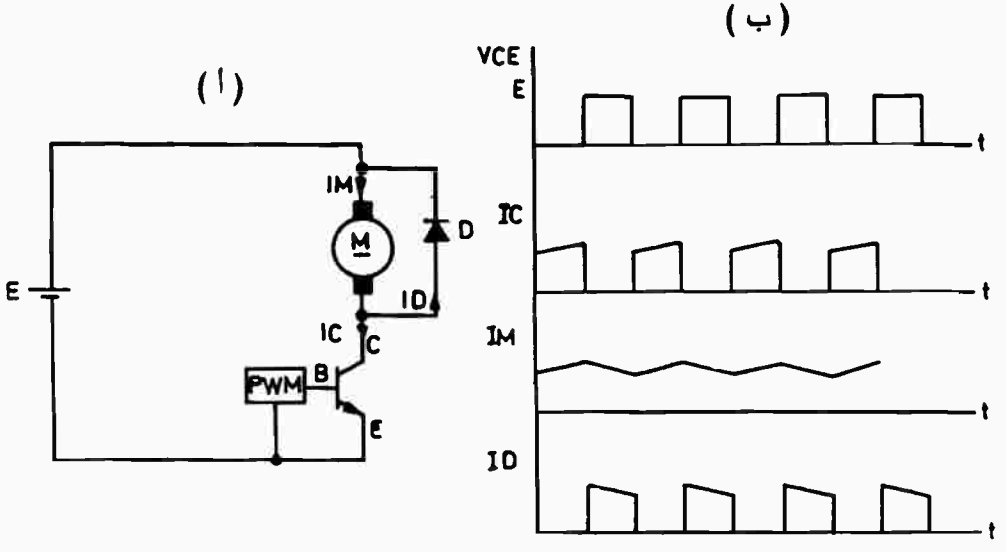
حيث إن :

الموجة 1 : موجة تيار المحرك عند الدوران فى اتجاه عقارب الساعة.

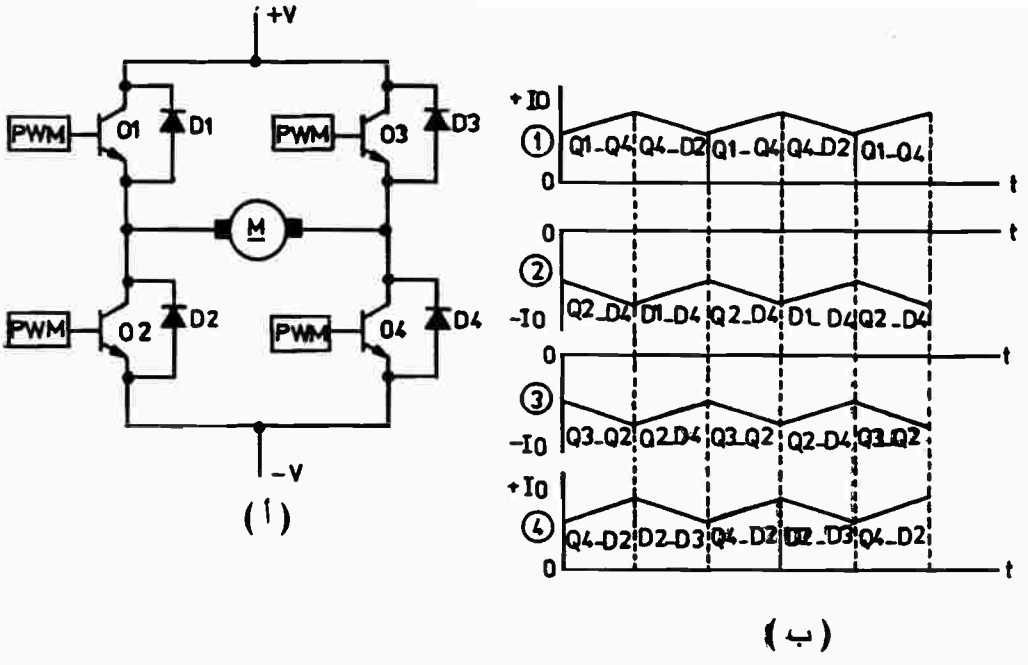
الموجة 2 : موجة تيار المحرك عند فرملته أثناء دورانه فى اتجاه عقارب الساعة.

الموجة 3 : موجة تيار المحرك عند الدوران عكس اتجاه عقارب الساعة.

الموجة 4 : موجة تيار المحرك عند فرملته أثناء دورانه فى عكس اتجاه عقارب الساعة.



الشكل (١ - ٣٦)


+V
PWM
Q1
D1
PWM
Q3
D3
M
PWM
Q2
D2
PWM
Q4
D4
-V
(أ)
+ID
①
Q1-Q4
Q4-D2
Q1-Q4
Q4-D2
Q1-Q4
0
t
②
Q2-D4
D1-D4
Q2-D4
D1-D4
Q2-D4
-I0
③
Q3-Q2
Q2-D4
Q3-Q2
Q2-D4
Q3-Q2
④
Q4-D2
D2-D3
Q4-D2
D2-D3
Q4-D2
+I0
(ب)

الشكل (١ - ٣٧)

ويكون المحرك المستخدم فى هذه الدائرة إما بمغناطيس دائم أو بتغذية منفصلة. ولإدارة المحرك فى اتجاه عقارب الساعة CW فإن الترانزستورات Q_4 , Q_1 يتحولان لحالة الوصل، وبمجرد وصول تيار المحرك I_O لقيمته العظمى فإن Q_1 يتحول لحالة الفصل حتى يسمح للتيار بالعبور فى ثنائى الحدافة D_2 والترانزستور Q_4 بعد ذلك يتحول Q_1 لحالة الوصل مرة أخرى، وتتكرر دورة التشغيل.

ولفرملة المحرك عند دورانه فى اتجاه عقارب الساعة فإن كلاً من Q_4 , Q_1 يتحولان لحالة الفصل، ثم يتحول Q_2 لحالة الوصل، وبالتالى يمر تيار المحرك عبر Q_2 ، D_4 مما يؤدى لانعكاس اتجاه مرور التيار فى المحرك.

ويمكن إعادة القدرة للمصدر مرة أخرى وذلك بتحويل Q_2 لحالة الفصل، فتنتقل القدرة الكهربية من المحرك عبر D_1 للمصدر، ثم تحويل Q_2 لحالة الوصل مرة أخرى، وهكذا حتى يحدث فرملة للمحرك.

ولإدارة المحرك فى عكس اتجاه عقارب الساعة فإن الترانزستورين Q_2 , Q_3 يتحولان لحالة الوصل وبمجرد وصول تيار المحرك Io لقيمته العظمى فإن Q_3 يتحول لحالة الفصل حتى يسمح للتيار بالعبور فى ثنائى الحدافة D_4 والترانزستور Q_2، ثم بعد ذلك يتحول Q_3 لحالة الوصل مرة أخرى وتتكرر دورة التشغيل.

ولفرملة المحرك عند دورانه فى عكس اتجاه عقارب الساعة، فإن كلاً من Q_3 , Q_2 يتحولان لحالة الفصل، ثم يتحول Q_4 لحالة الوصل، وبالتالى يمر تيار المحرك عبر Q_4 و D_2 مما يؤدى لانعكاس اتجاه مرور التيار فى المحرك، ويمكن إعادة القدرة للمصدر مرة أخرى وذلك بتحويل Q_4 لحالة الفصل فتنتقل القدرة الكهربية من المحرك عبر D_3 للمصدر، ثم تحويل Q_4 لحالة الوصل مرة أخرى، وهكذا حتى تحدث فرملة للمحرك.

١ / ١١ - مقطعات Mosfet:

لقد انتشرت مقطعات Mosfet بشكل ملحوظ فى الصناعة، ويرجع ذلك للأسباب التالية:

١- ترانزستور Mosfet يتم التحكم فيه بإشارة جهد وليس بإشارة تيار، حيث يحتاج لتيار صغير جداً لتشغيله، مما يؤدى لصغر حجم دائرة التحكم فيه.

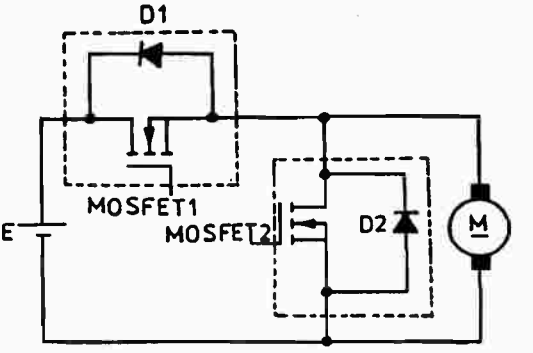
٢- البوابة G معزولة عن المصدر S.

٣- يمكن توصيل أكثر من ترانزستور Mosfet بالتوازى معًا لزيادة سعة التيار، الأمر الذى لا يمكن تحقيقه مع الثايرستورات SCR والترانزستورات العادية، وبالتالى يمكن توصيل عدة ترانزستورات Mosfet على التوازى للوصول بتيارات تصل إلى مئات الأمبيرات.

٤- يمكن أن يعمل Mosfet عند ترددات عالية مقارنة بالثايرستور والترانزستور العادى، مما يساعد على الاستغناء عن ملف مجال التوازى اللازم استخدامه مع المحركات التى تعمل بالمقطعات الثايرستورية والمقطعات الترانزستورية لتنعيم خرجها، نظرًا لانخفاض ترددها.

والشكل (١ - ٣٨) يعرض مقطع Mosfet، يعمل فى ربعين، الأول والرابع، ويتحكم فى محرك بمجال توازى أو مجال يغذى خارجيًا أو بمغناطيس دائم.

وحتى يدور المحرك فى اتجاه عقارب الساعة فإن Mosfet 1 يكون فى حالة ON، فى حين يكون Mosfet 2 فى حالة Off، ويعمل D_2 كثنائى حدافة أثناء فصل Mosfet 1.



الشكل (١ - ٣٨)

وحتى يفرمل المحرك فإن Mosfet 2 يكون فى حالة ON، فى حين يكون Mosfet 1 فى حالة OFF، ويعمل D_1 فى هذه الحالة كثنائى حدافة أثناء فصل Mosfet 2.

١ / ١٢ بادئات الحركة لمحركات التيار المستمر.

١ / ١٢ / ١ بادئ حركة بمقاومات بدء:

الشكل (١-٣٩) يعرض دائرة بادئ حركة لمحرك تيار مستمر بدون استخدام مقاومات بدء.

فعند غلق المفتاح S_1 يتحول TH_1 لحالة الوصل، ويمر التيار فى المحرك مروراً بالمقاومات R_4 ,R_3 ,R_2، ويشحن المكثف C_3، فى حين يمر تيار المجال Field بمجرد غلق القاطع الرئيسى Q_1.

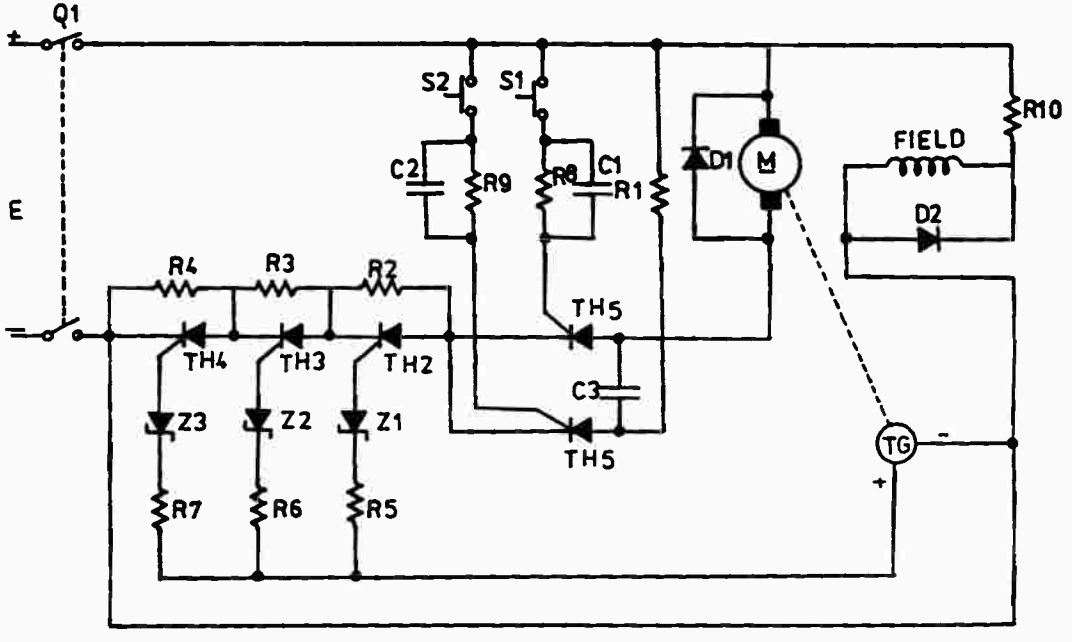
وعند زيادة سرعة المحرك تزداد القوة الدافعة الكهربية العكسية المتولدة على أطراف المحرك، فيقل التيار المار فى المحرك ويزداد جهد مولد التاكو TG وعند وصول جهده لجهد انهيار ثنائى الزينر Z_1 يحدث إشعال للثايرستور TH_2، فيحدث قصر على المقاومة R_2، فيزداد الجهد المسلط على المحرك، ويزداد تيار المحرك، وتباعًا يزداد عزم المحرك وسرعته.

ونتيجة لزيادة سرعة مولد التاكو TG وعند وصوله لجهد انهيار ثنائى الزينر Z_2 يشتعل الثايرستور TH_3، فيحدث قصر على المقاومة R_3 فيزداد التيار، ثم العزم ثم السرعة، ويحدث انهيار لثنائى الزينر Z_3 فيشتعل الثايرستور TH_4 ، ويحدث قصر على المقاومة R_4، وبالتالى تكون جميع المقاومات قد خرجت من دائرة المحرك ليصبح جهد المحرك مساويًا لجهد المصدر.

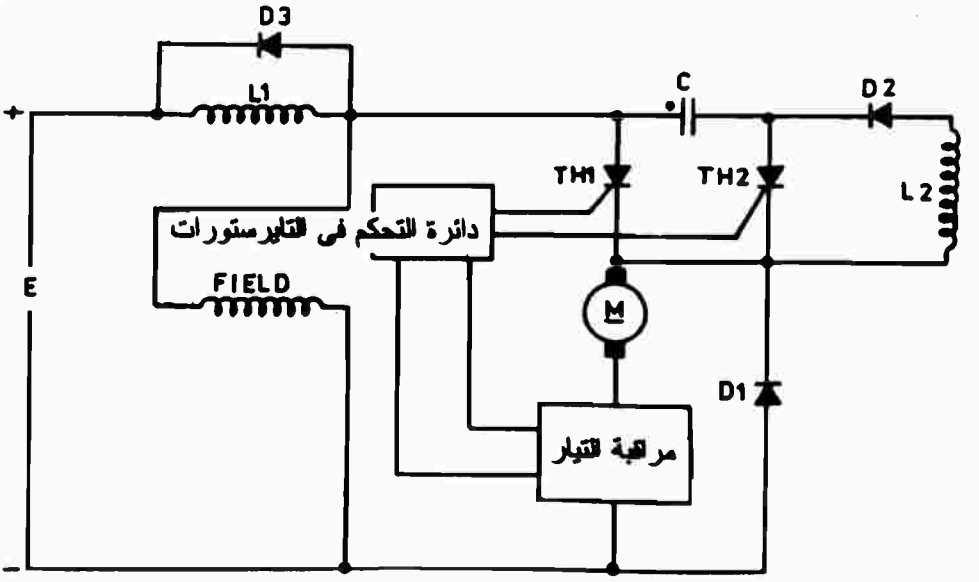
والجدير بالذكر أن ثنائيات الزينر Z_1, Z_2, Z_3 تختار بحيث تعمل عند ($\frac{3}{4}$ و $\frac{1}{2}$ و $\frac{1}{3}$) السرعة الكاملة للمحرك، وتختار المقاومات (R_2, R_3, R_4) لتحديد التيار المار فى المحرك عند البدء، ولإيقاف المحرك يتم الضغط على الضاغط S_2 فيتحول TH_5 لحالة الوصل، فيقوم المكثف C_3 بتفريغ شحنته ليحدث انحياز عكسى للثايرستور TH_1، فيتحول لحالة القطع وينقطع مرور التيار فى الدائرة، فتتحول الثايرستورات TH_2 , TH_3 , TH_4 , TH_5 لحالة القطع، ويتوقف المحرك.

١ / ١٢ / ٢- بادئ حركة بدون مقاومات بدء:

الشكل (١-٤٠) يعرض دائرة بادئ حركة محرك تيار مستمر بدون مقاومات بدء


Q1
+
E
−
S2
S1
C2
R9
R8
C1
R1
D1
M
FIELD
R10
D2
R4
R3
R2
TH5
TH4
TH3
TH2
C3
Z3
Z2
Z1
TH5
TG
-
+
R7
R6
R5

الشكل (١ – ٣٩)



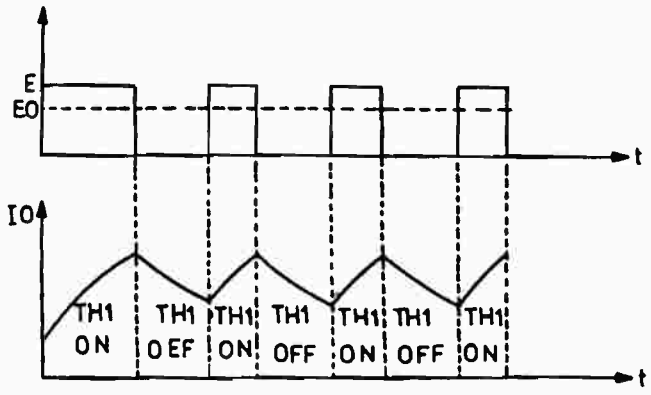
الشكل (١-٤٠)

ففى البداية تقوم دائرة التحكم فى إشعال الثايرستورات بإشعال TH_2 فيتحول لحالة الوصل ويشحن المكثف C، ويكون اللوح الموجب هو اللوح المشار عليه بنقطة. وبمجرد أن يشحن المكثف C فإن TH_2 ينطفئ طبيعيًا لانقطاع مرور التيار الكهربى فيه، ثم بعد ذلك تصل إشارة إشعال للثايرستور TH_1 فيمر التيار الكهربى فى الدائرة، وفى نفس الوقت يفرغ المكثف C شحنته خلال TH_1، وتكتمل الدائرة بواسطة L_2, P_2، وذلك نتيجة لطبيعة التذبذب لهذه الدائرة بواسطة L_2,C، ويشحن المكثف بشحنة معاكسة، ويقوم الثنائى D_2 بتحقيق ذلك، ويكون الجهد عند اللوح المشار عليه بنقطة E+ وعند اللوح الآخر 2E+. وعند زيادة تيار عضو الاستنتاج للحدود القصوى المسموح بها تصل إشارة إلى TH_2 فيتحول لحالة الوصل، ويحدث تفريغ للمكثف C خلال TH_2، فيحدث انهيار عكسى للثايرستور TH_1، ويتحول لحالة القطع، وتتكرر دورة التشغيل عند انخفاض التيار فى الدائرة للقيمة المطلوبة.

والجدير بالذكر أن هذه الدائرة يمكن أن تتحكم فى سرعة المحرك فى نفس الوقت، وذلك بعمل TH_1 كمقطع يتحكم فى الجهد المتوسط على أطراف المحرك، ويعمل L_1

على تقليل معدل التغير فى تيار المحرك، وبالتالى يحمى TH_1، فى حين يعمل الثنائى D_1 على إمرار تيار المحرك أثناء تحول TH_1 لحالة القطع.

والشكل (١-٤١) يبين العلاقة بين جهد أطراف المحرك، والزمن، وتيار المحرك المقابل مع الزمن.



الشكل (١-٤١)