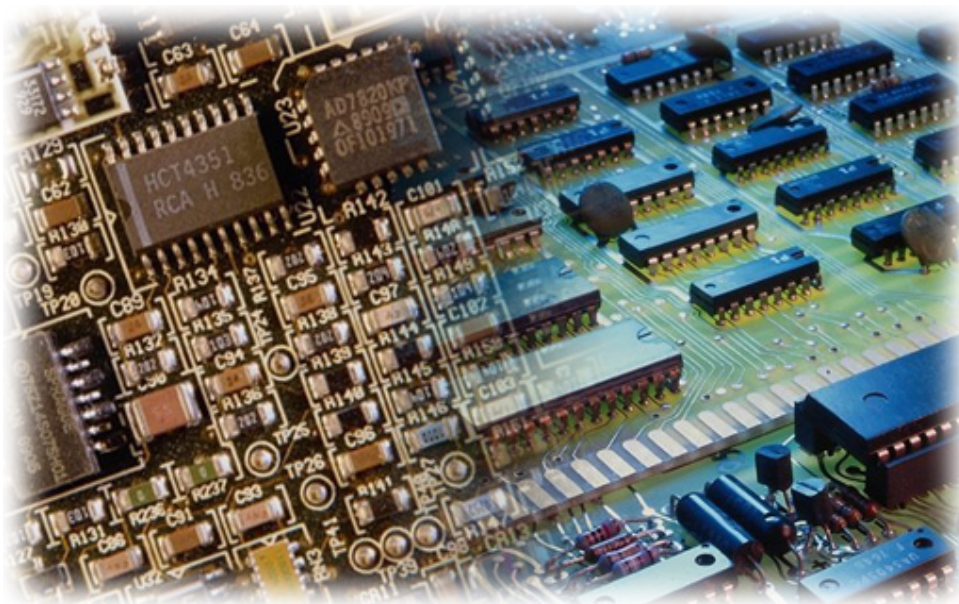


إلكترونيات صناعية وتحكم

إلكترونيات القوى

٢٤١ ك



الحمد لله وحده، والصلاة والسلام على من لا نبي بعده، محمد وعلى آله وصحبه، وبعد:

تسعى المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني لتأهيل الكوادر الوطنية المدربة القادرة على شغل الوظائف التقنية والفنية والمهنية المتوفرة في سوق العمل، ويأتي هذا الاهتمام نتيجة للتوجهات السديدة من لدن قادة هذا الوطن التي تصب في مجملها نحو إيجاد وطن متكامل يعتمد ذاتياً على موارده وعلى قوة شبابه المسلح بالعلم والإيمان من أجل الاستمرار قدماً في دفع عجلة التقدم التتموي، لتصل بعون الله تعالى لمصاف الدول المتقدمة صناعياً.

وقد خطت الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج خطوة إيجابية تتفق مع التجارب الدولية المتقدمة في بناء البرامج التدريبية، وفق أساليب علمية حديثة تحاكي متطلبات سوق العمل بكافة تخصصاته لتلبي متطلباته، وقد تمثلت هذه الخطوة في مشروع إعداد المعايير المهنية الوطنية الذي يمثل الركيزة الأساسية في بناء البرامج التدريبية، إذ تعتمد المعايير في بنائها على تشكيل لجان تخصصية تمثل سوق العمل والمؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني بحيث تتوافق الرؤية العلمية مع الواقع العملي الذي تفرضه متطلبات سوق العمل، لتخرج هذه اللجان في النهاية بنظرة متكاملة لبرنامج تدريبي أكثر التصاقاً بسوق العمل، وأكثر واقعية في تحقيق متطلباته الأساسية.

وتتناول هذه الحقيبة التدريبية " إلكترونيات القوى " لمتدربي قسم " إلكترونيات صناعية وتحكم " للكليات التقنية موضوعات حيوية تتناول كيفية اكتساب المهارات اللازمة لهذا التخصص.

والإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج وهي تضع بين يديك هذه الحقيبة التدريبية تأمل من الله عز وجل أن تسهم بشكل مباشر في تأصيل المهارات الضرورية اللازمة، بأسلوب مبسط يخلو من التعقيد، وبالاستعانة بالتطبيقات والأشكال التي تدعم عملية اكتساب هذه المهارات.

والله نسأل أن يوفق القائمين على إعدادها والمستفيدين منها لما يحبه ويرضاه، إنه سميع مجيب الدعاء.

الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

يمكن وصف علم إلكترونيات القوى بأنه العلم الذي يبحث في تطبيق عناصر إلكترونيات القوى المختلفة مثل الثايرستورات في جميع التطبيقات الصناعية والعملية المختلفة. تلعب إلكترونيات القوى دوراً رئيسياً في تقدم وتطبيقات التقنية ونتيجة للحاجة الماسة والمتزايدة للتحكم في معدات القوى الكهربائية والتي تزايدت بتطوير عناصر ودوائر القوى وطرق التحكم الخاصة بها والتي سوف تتزايد مع احتمال تطبيقها في أنظمة أخرى جديدة. قد تم التقدم الهائل في علم إلكترونيات القوى منذ نهاية الثمانينات وبداية التسعينات من القرن الماضي نتيجة للتقدم الهائل الذي قد حدث في المعالجات الدقيقة من حيث سرعتها الفائقة ومرونتها. حيث يمكن أن تتم عملية إغلاق وفصل معظم العناصر الإلكترونية المختلفة باستخدام هذه المعالجات الدقيقة حيث يؤدي استخدام هذه المعالجات إلى تقليل كبير للدوائر التماثلية المستخدمة لعمل التحكم المطلوب وأيضا لتقليل حجم الدوائر المستخدمة.

الهدف الرئيسي من إعداد هذا الكتاب هو جعل المادة العلمية الخاصة بإلكترونيات القوى تظهر بالنسبة للطالب التقني بصورة متيسرة وللمهتمين بمعرفة ودراسة هذا العلم كمرحلة يمكن أن ينطلقوا بعدها بالاستعانة بمراجع أخرى متقدمة. وقد تم الاهتمام في هذا الكتاب بدراسة بعض العناصر الإلكترونية والتي تكون وظيفتها عبارة عن مفاتيح لفصل وغلق الدوائر الإلكترونية وتطبيق هذه العناصر لعمل التحكم المطلوب لدوائر إلكترونيات القوى. يتكون هذا الكتاب من ٤ وحدات وهي كالتالي:

الوحدة الأولى:

تختص الوحدة الأولى بدراسة عناصر أشباه الموصلات المستخدمة بدوائر إلكترونيات القوى وقد تم التركيز على بعض العناصر كالثايرستور والترياك وقد تم أيضا دراسة بعض دوائر الإشعال الخاصة لقدح هذه العناصر الإلكترونية بجانب دراسة طرق الحماية اللازمة والمطلوبة لهذه العناصر.

الوحدة الثانية:

تم دراسة بعض دوائر الموحدات المحكومة أحادية الطور حيث تحول هذه الموحدات جهد المصدر المتناوب وله قيمة فعالة ثابتة إلى جهد مستمر متغير حيث يتم التحكم فيه عن طريق دوائر إشعال المفاتيح الإلكترونية المستخدمة في هذه الدوائر.

الوحدة الثالثة:

تم دراسة بعض مقاطعات التيار المستمر حيث تهدف هذه المقطعات إلى تحويل جهد المصدر الثابت المستمر إلى جهد مستمر متغير القيمة ويمكن التحكم فيه عن طريق التحكم في دوائر إشعال المفاتيح الإلكترونية المستخدمة في دوائر المقطعات وذلك بالتحكم في زمن فصل وغلق المفاتيح الإلكترونية.

الوحدة الرابعة:

تم دراسة بعض دوائر العواكس أحادية الطور حيث تستخدم هذه العواكس لتحويل جهد المصدر المستمر إلى جهد متناوب ثابت أو متغير القيمة حيث يتم التحكم في هذا الجهد عن طريق التحكم في زمن إغلاق وفصل المفاتيح الإلكترونية المستخدمة في هذه العواكس وأيضاً بالتحكم في قيمة التردد المطلوب لفصل وغلق هذه المفاتيح الإلكترونية.



المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

إلكترونيات القوى

عناصر إلكترونيات القوى

عناصر إلكترونيات القوى

الأهداف:

بعد انتهاء الطالب من دراسة هذه الوحدة يجب أن يكون الطالب ملماً بالتالي :

- تعريف الثايرستور
- عمل الثايرستور كموحد سيليكوني محكوم
- معرفة الخواص الإستاتيكية للثايرستور
- حماية الثايرستور
- دوائر الإشعال الأساسية الخاصة بالثايرستور
- عمل الترياك و الدياك وخواصهما الإستاتيكية

مقدمة:

تستعمل في دوائر إلكترونيات القوى عدة أنواع من عناصر أشباه موصلات نذكر منها:

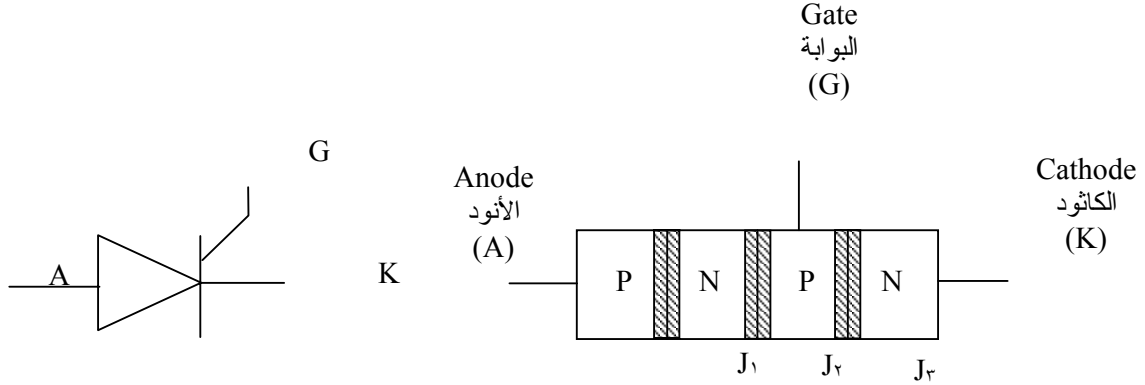
- الدايدود Diode
- ترانزستور الوصلة ثنائية القطبية BJT
- ترانزستور البوابة ثنائية القطبية IGBT
- الموسفت MOSFET
- ثايرستور Thyristor
- ترياك Triac
- دياك Diac
- ترانزستور وحيد الوصلة UJT.

سوف نتطرق في هذه الوحدة إلى دراسة بعض هذه العناصر و هي: الثايرستور، الترياك و الدياك حيث نتعرض أولاً إلى التركيب الفيزيائي لكل عنصر ثم شرح و رسم خواص كل عنصر و أخيراً شرح مختلف الطرق المستخدمة لإشعال الثايرستور و الترياك مع ذكر بعض التطبيقات العملية لهذه العناصر.

الثايرستور Thyristor:

يعتبر الثايرستور واحداً من أقدم عناصر أشباه الموصلات semiconductors حيث تم تصنيعه لأول مرة في عام ١٩٥٧ من طرف شركة أمريكية General Electrics و هو الأكثر استعمالاً في دوائر

إلكترونيات القوى. يتكون الثايرستور من أربع طبقات و له ثلاثة أطراف: الأنود أو المصعد (Anode (A)، الكاثود أو المهبط (Cathode (K) و البوابة (Gate (G) كما هو موضح في الشكل (١ - ١).



الشكل (١ - ١): تركيب و رمز الثايرستور

للتايرستور اسم آخر وهو موحد سيليكوني محكوم Silicon Controlled Rectifier (SCR). أما بالنسبة للرمز المستعمل للدلالة على الثايرستور فهو يشبه الرمز المستخدم للدايود ولكن له طرف إضافي يسمى البوابة. يدل اتجاه السهم في الرمز على اتجاه التيار المار من خلال الثايرستور عندما يكون في حالة التوصيل ON state.

حالات الثايرستور States of a thyristor:

للتايرستور حالتان: حالة الانحياز الأمامي Forward biased state و حالة الانحياز العكسي أو الخلفي Reverse biased state. يقال عن الثايرستور أنه في الحالة الأولى عندما يكون جهد أنوده أعلى من جهد كاثوده. أما في الحالة العكسية فيكون الثايرستور في الانحياز العكسي (الخلفي).

خواص الثايرستور الإستاتيكية Static Characteristic of a thyristor:

للحصول على خواص الثايرستور الإستاتيكية لا بد من دراسة سلوك الثايرستور في حالتي الانحياز الأمامي و الخلفي.

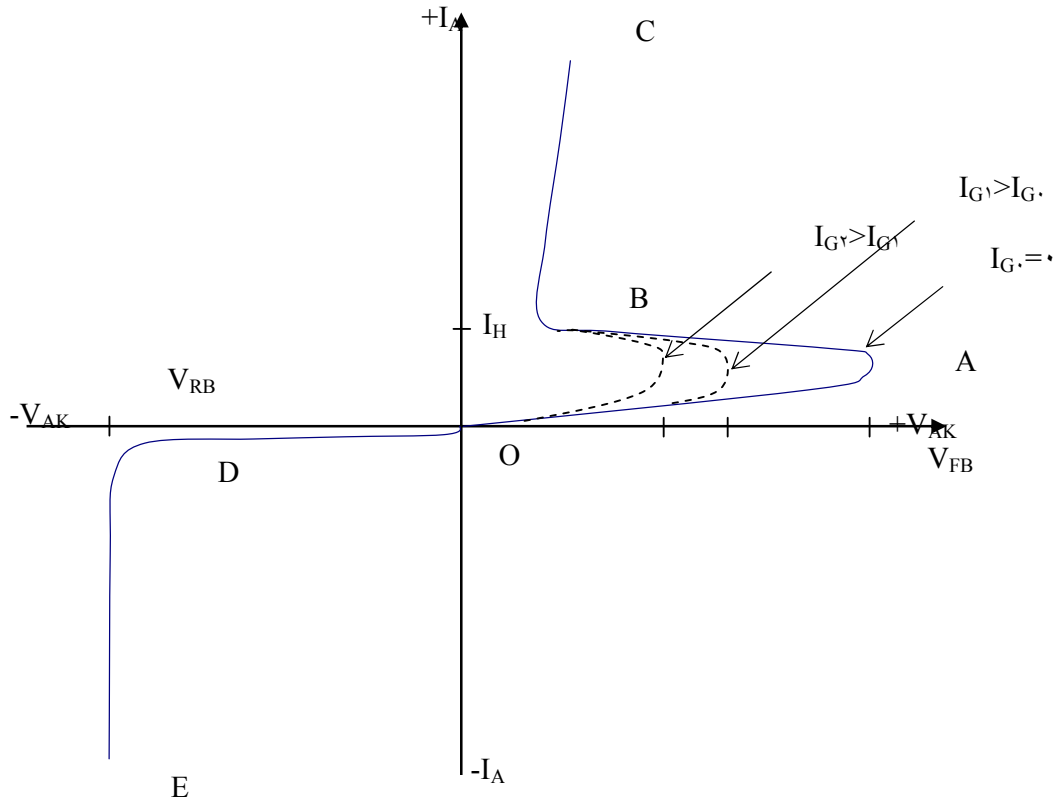
- ففي الحالة الأولى (الانحياز الأمامي) يكون جهد الأنود بالنسبة للكاثود موجباً و بالتالي تكون الوصلتان J_1 و J_2 في الانحياز الأمامي و الوصلة J_3 في الانحياز العكسي. تعيق الوصلة

الأخيرة مرور التيار من الأنود إلى الكاثود و تسمح لتيار صغير جداً بالمرور من خلال الثايرستور. يعرف هذا التيار بتيار التسريب الأمامي Forward leakage current، و يصبح الثايرستور عندئذ في حالة القطع الأمامي Forward Blocking (off) state (الجزء OA في الشكل (١- ٢)).

إذا ازداد جهد الأنود بالنسبة إلى جهد الكاثود إلى أن يصل إلى قيمة كبيرة جداً تدعى بقيمة جهد الانهيار الأمامي Forward Breakdown Voltage فإن الوصلة J_p تتكسر، و يحدث انخفاض مفاجئ في مقاومة الثايرستور حيث تصبح قيمتها صغيرة مما يؤدي إلى مرور التيار عبر الثايرستور من الأنود إلى الكاثود و بذلك نحصل على حالة التوصيل الأمامي On State (الجزء BC في الشكل (١- ٢)). تقل قيمة جهد الانهيار الأمامي والذي يحصل عنده انكسار الوصلة J_p مع زيادة تيار البوابة و بذلك يمكن القول على أن تطبيق النبضة في البوابة يسهل عملية إشعال الثايرستور. يجب الإشارة هنا إلى أنه بعدما يكون الثايرستور في حالة التوصيل ليس لدى البوابة أي تأثير على عمل الثايرستور أو بعبارة أخرى يستمر الثايرستور في التوصيل حتى ولو فصلنا البوابة. فالطريقة المستعملة لتوقيف الثايرستور عن العمل هي التقليل في التيار المار من خلال الثايرستور إلى أن يصل إلى قيمة أقل من قيمة تيار الإمساك 'I_H Holding current.

- أما في الحالة الثانية (الانحياز العكسي) يكون جهد الأنود بالنسبة للكاثود سالب وبالتالي تكون الوصلة J_p في الانحياز الأمامي و الوصلتان J_n و J_p في الانحياز العكسي. تقاوم الوصلتان الأخيرتان مرور التيار من الكاثود إلى الأنود و لا يمر سوى تيار صغير جداً يسمى بتيار التسريب العكسي Reverse leakage current ذي قيمة أقل بكثير من قيمة تيار التسريب الأمامي (الجزء OD في الشكل (١- ٢)).

- إذا ازداد جهد الكاثود بالنسبة للأنود بقيم موجبة إلى أن يصل إلى قيمة تدعى بقيمة جهد الانهيار العكسي يحصل انهيار الثايرستور Avalanche فيتلف و لا يعد صالحاً للاستعمال مرة أخرى (الجزء DE في الشكل (١- ٢)).

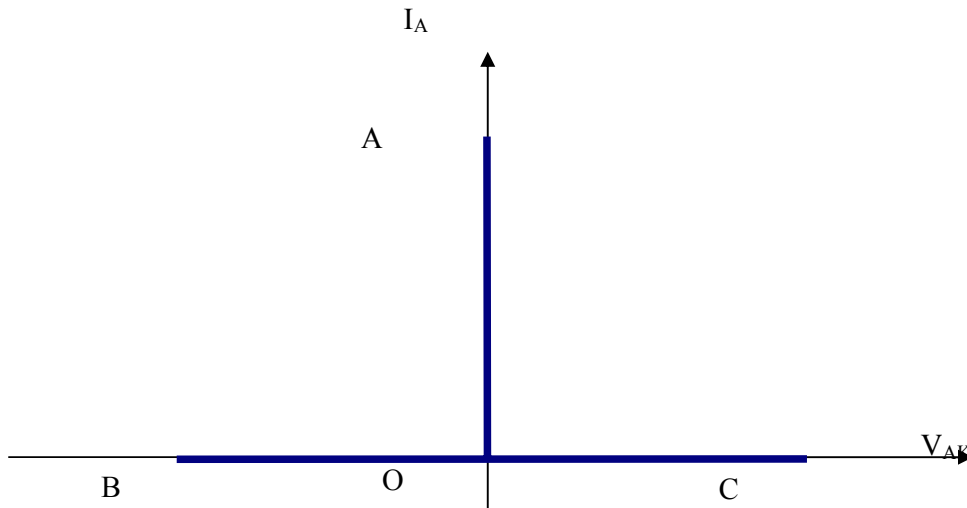


الشكل (١-٢): خواص الثايرستور الأستاتيكية

الخواص المثالية للثايرستور : Ideal characteristic of a thyristor

عندما يكون الثايرستور في حالة التوصيل يسلك سلوك مفتاح مغلق حيث يسمح للتيار بالمرور من الأنود إلى الكاثود (الاتجاه الموجب الافتراضي للتيار) و يصبح عندئذ الجهد على طرفيه مساوياً للصفر (الجزء OA في الشكل (١-٣)).

أما عندما يكون الثايرستور في حالة القطع فيعمل عمل مفتاح مفتوح حيث لا يسمح لأي تيار بالمرور. وبالتالي يمكن القول أنه ليس هناك تيار التسريب في الحالات المثالية. أما الجهد على طرفيه فيمكن أن يكون موجباً في حالة القطع الأمامي (الجزء OC في الشكل (١-٣)) أو سالباً في حالة القطع العكسي (الجزء OB في الشكل (١-٣)).



الشكل (١-٣): الخواص المثالية للثايرستور

طرق إشعال الثايرستور :Methods of triggering a thyristor

توجد أربع طرق يمكن بواسطتها تشغيل الثايرستور و جعله في حالة التوصيل، بعض هذه الطرق نظامية و مستعملة كثيراً في التطبيقات العملية و البعض الآخر غير نظامية و يجب تجنبها عند تصميم دوائر الإشعال.

الإشعال بالحرارة و الضوء :Thermal and light triggering

إن الزيادة في درجة حرارة الثايرستور أو تسلطه إلى حزمة ضوئية تؤدي إلى زيادة في عدد الإلكترونات و الفجوات مما يسبب إشعال الثايرستور. يجب تجنب طريقة تعرض الثايرستور إلى درجة حرارة عالية لأنها يمكن أن تسبب فساد العنصر. يعرف الثايرستور الذي يتم إشعاله عن طريق الضوء بالموحد السليكوني المحكوم المثار بالضوء Light Activated Silicon Controlled Rectifier (LASCR).

الإشعال بالجهد العالي High voltage triggering:

لقد ذكرنا سابقاً عند دراسة خواص الثايرستور أن عندما يصبح الجهد على طرفيه أكبر أو يساوي قيمة جهد الانهيار الأمامي يحصل تغير مفاجئ في مقاومة الثايرستور حيث تصبح قيمتها صغيرة ويسمح بمرور كل التيار من الأنود إلى الكاثود. يُنصح عملياً تطبيق نبضة على البوابة لتفادي استخدام جهود عالية لإشعال الثايرستور.

الإشعال بمعدل الجهد المسلط $\frac{dv}{dt}$ triggering:

لقد افترض حتى الآن أن الجهد المطبق على الثايرستور يزداد بالتدرج. و لو سمح لهذا التغير بالزيادة بصفة مفاجئة فهذا يؤدي إلى إشعال الثايرستور دون الحاجة إلى استخدام طرق القدح المعروفة الأخرى. إن هذا النوع من الإشعال ضار للثايرستور، و يمكن تجنبه بتحديد معدل تغير الجهد الأمامي $\frac{dv}{dt}$ الذي يتراوح بين ٢٠ و ٢٠٠ فولت لكل ميكرو ثانية في الثايرستورات الاعتيادية.

الإشعال بالبوابة Gate triggering:

عندما يكون الجهد على طرفي الثايرستور موجياً (المربع الأول من الخواص) يكتفي أن نمرر عبر البوابة تياراً ذا قيمة كافية عادةً ما بين ٠,١ إلى ٥٠ ميلي أمبير وذلك بتطبيق جهد موجب بين البوابة والكاثود لجعله موصل.

دوائر إشعال الثايرستور Firing circuits of a thyristor:

لكي تتجح عملية قدح الثايرستور لا بد أن تحقق دائرة الإشعال ما يلي:

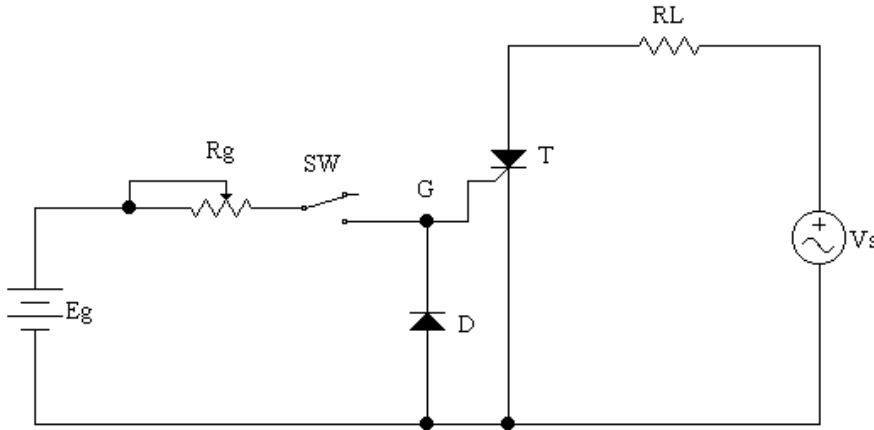
- أن تطبق بين البوابة و الكاثود نبضة ذات قيمة كافية و زمن الصعود قصير،
 - أن تنتج إشارة ذات عرض مناسب،
 - أن تطبق النبضة على البوابة عندما يكون الثايرستور في حالة الانحياز الأمامي فقط.
- تنقسم دوائر الإشعال المستعملة عادةً لقدح الثايرستورات إلى ثلاث أنواع وهي:

- دوائر الإشعال بالتيار المستمر
- دوائر الإشعال بالتيار المتردد

• دوائر الإشعال بالنبضات

دوائر الإشعال بالتيار المستمر DC firing circuits :

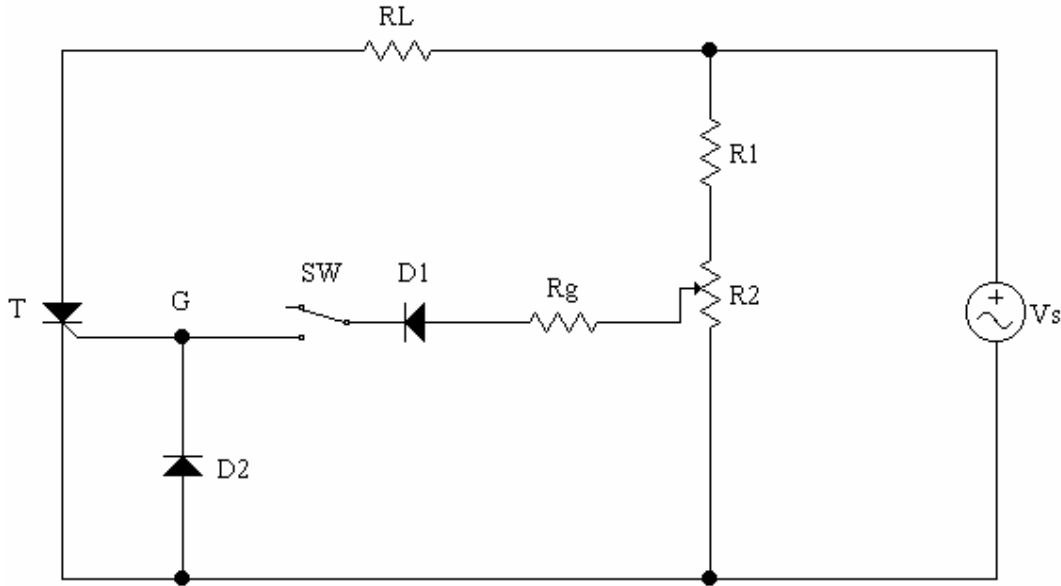
يوضح الشكل (١-٤) مثال عن دائرة الإشعال بالتيار المستمر فهي تتكون من مصدر مستمر E_g ، مقاومة متغيرة R_g و دايود D . لإشعال الثايرستور يغلق المفتاح SW فيمر تيار مستمر من المصدر إلى البوابة عبر المقاومة المتغيرة R_g . يعمل الدايود على حماية البوابة ضد أي جهد كهربائي عكسي. أما المقاومة المتغيرة فوظيفتها الأساسية هي التحكم في قيمة التيار المار في بوابة الثايرستور لتغيير زاوية الإشعال. والجدير بالذكر أن مثل هذا النوع من دوائر الإشعال تستهلك قدرة كهربائية مستمرة في دائرة البوابة مما يسبب طاقة مفقودة و عيب هذه الطريقة أيضاً أنها لا يمكن عزل دائرة الإشعال ذات القدرة المنخفضة عن الدائرة الرئيسية ذات القدرة العالية. و لهذه الأسباب لا تستخدم في التطبيقات الصناعية.



الشكل (١-٤): دائرة الإشعال بالتيار المستمر

دوائر الإشعال بالتيار المتردد AC firing circuits :

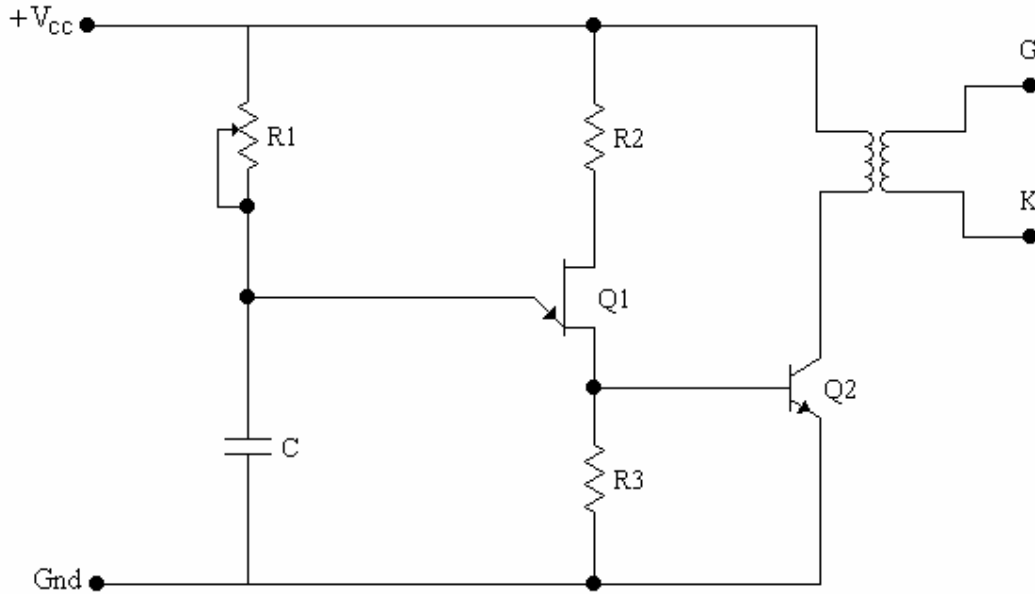
لتحكم في إشعال الثايرستورات المستعملة في دوائر القوى للتيار المتردد تستخدم نفس مصادر التغذية للحصول على إشارات القدرح. يبين الشكل (١-٥) مثال عن هذه الدوائر حيث تستعمل فيها المقاومتين R_1 و R_2 لتخفيض جهد الدخل المتردد إلى قيمة مناسبة لدائرة الإشعال بينما يقوم الدايود D بتوحيد الجهد على طرفي المقاومة R_2 لاستخدامها في تغذية بوابة الثايرستور. يتم التحكم في قيمة التيار المار بالبوابة بالتحكم في المقاومتين R_1 و R_2 . من عيوب هذه الدائرة نذكر عدم إمكانية عزل دائرة القدرة عن دائرة الإشعال و أقصى قيمة لزاوية الإشعال يمكن الحصول عليها بواسطة هذه الدائرة هي ٩٠ درجة. كل هذا يفسر أسباب عدم استخدامها في التطبيقات العملية.



الشكل (١-٥): دائرة الإشعال بالتيار المتردد

دوائر الإشعال بالنبضات Pulse triggering circuits:

لتخفيض القدرة المفقودة في بوابة الثايرستور تستعمل نبضة واحدة أو مجموعة من النبضات لإشعال الثايرستور. هذا يساعد على دقة تحديد لحظة الإشعال، كما يسمح أيضا بعزل الثايرستور عن دائرة الإشعال باستعمال محولات النبضة Pulse transformers. يوضح الشكل (١-٦) دائرة إشعال مذبذب الاسترخاء المكونة من ترانزستور وحيد الوصلة Q_1 مع مقاومة متغيرة R_1 و مكثف C وذلك لضبط القيمة الزمنية بين النبضات. يشحن المكثف عن طريق المقاومة المتغيرة R_1 حتى يصل الجهد على طرفيه إلى قيمة جهد الباعث العظمى V_p حيث ينهار الترانزستور وحيد الوصلة و بالتالي يمر تيار من خلال المقاومة R_1 مما يسبب بدوره توصيل لترانزستور Q_2 و توليد نبضات على الملف الثانوي لمحول النبضة.

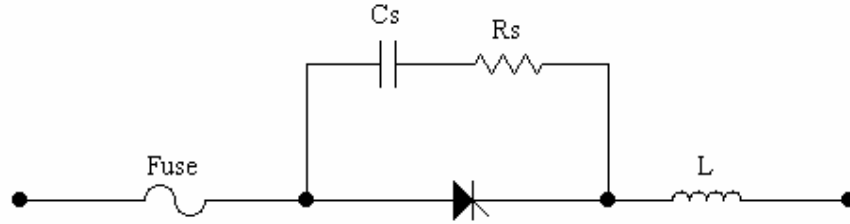


الشكل (١-٦): دائرة الإشعال بالنبضات

حماية الثايرستور Thyristor protection:

إن درجة حرارة الثايرستور تميل إلى الإرتفاع عند الزيادة السريعة في الجهد أو التيار مما يسبب فساد العنصر إن لم تُأخذ تدابير مسبقة لحمايته. تكون هذه الحالات العابرة في الجهد أو التيار عادةً ناتجة من عمليات قطع للتيار خاصة في الدوائر التي تحتوي على الملفات أو من فصل مصادر التغذية بسبب عوامل طبيعية كالرياح و الصواعق. يوضح الشكل (١-٧) الأنواع الثلاثة من الحماية المستخدمة في الثايرستور:

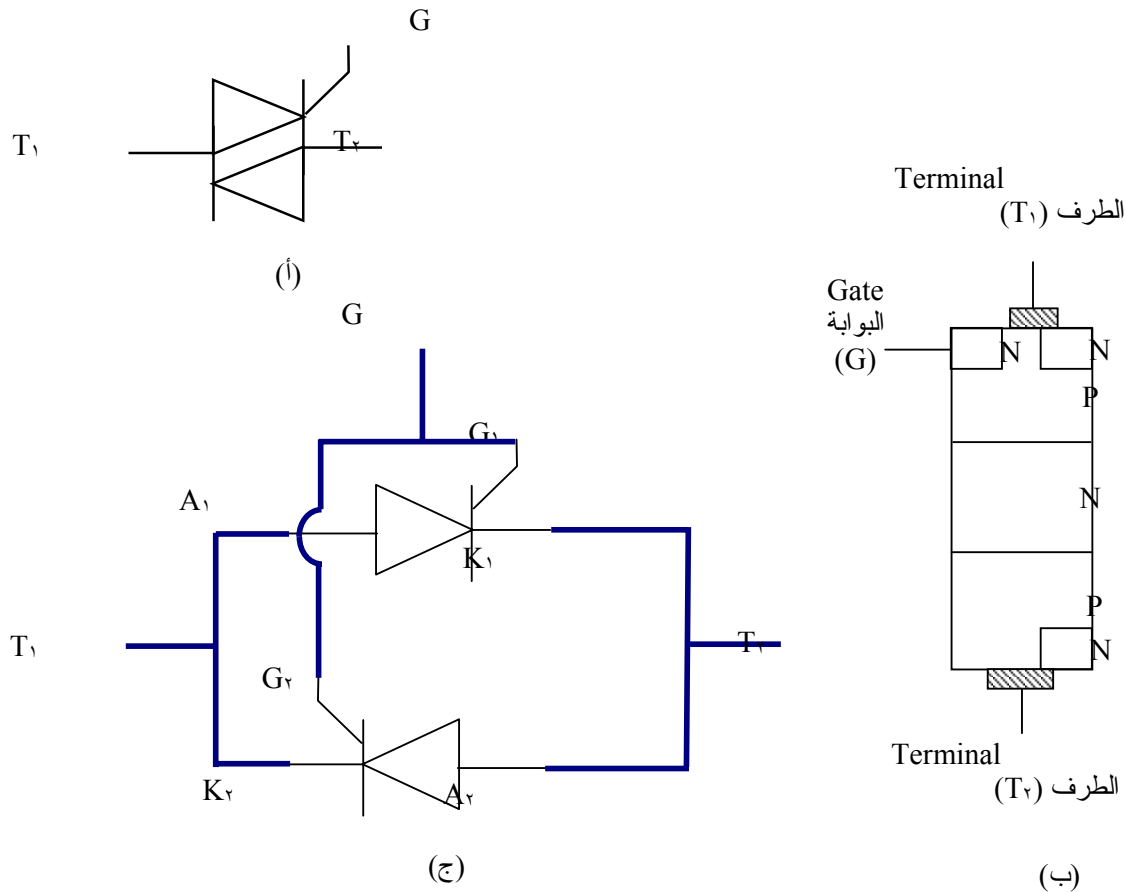
- الحماية ضد التيارات العالية باستعمال مصهر Fuse على التوالي مع الثايرستور. عند إختيار المصهر، يجب أن تكون القيمة المقننة للتيار المصهر أقل بقليل من القيمة العظمى للتيار الذي يتحمله الثايرستور.
- الحماية ضد التغيرات السريعة و المفاجئة في الجهد بتوصيل دائرة إمتصاص الصدمات Snubber circuit على التفرع مع الثايرستور. تتكون هذه الدائرة من مقاومة موصلة على التوالي مع مكثف.
- الحماية ضد التغيرات السريعة و المفاجئة في التيار باستخدام ملف على التوالي مع الثايرستور



الشكل (١-٧): دائرة حماية الثايرستور

الترياك Triac :

الترياك هو عنصر شبه موصل متعدد الطبقات و يكافئ ثايرستورين موصلين على التوازي وبشكل عكسي أو بعبارة أخرى أن أنود الثايرستور الأول موصل إلى كاثود الثايرستور الثاني و كاثود الثايرستور الأول موصل إلى أنود الثايرستور الثاني كما هو موضح في الشكل (١-٨).



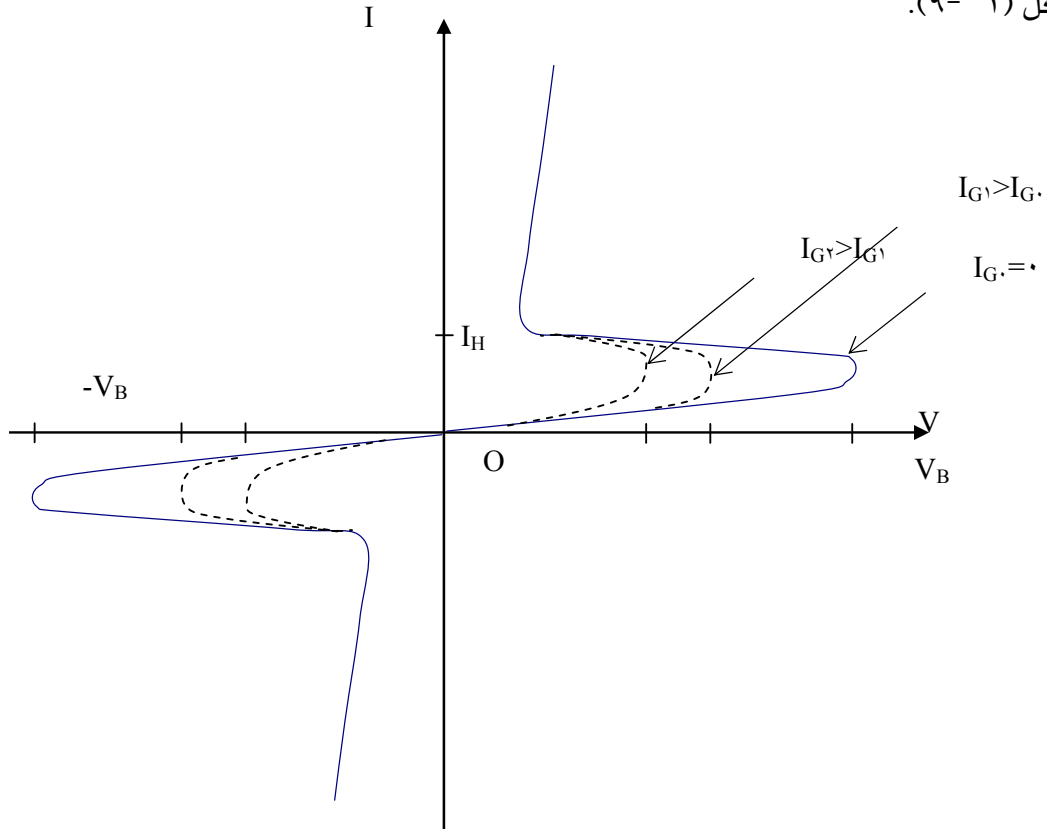
الشكل (١-٨): الترياك (أ) الرمز (ب) التركيب (ج) الدائرة المكافئة

يبين نفس الشكل التركيب الطبقي للترياك و الرمز الخاص به. يوصل الترياك التيار في كلا الاتجاهين:

- من الطرف T_1 إلى الطرف T_2 إذا كان جهد T_1 أعلى من جهد T_2 و طبقت إشارة الإشعال بين البوابة G و الطرف T_2 .
- من الطرف T_2 إلى الطرف T_1 إذا كان جهد T_2 أعلى من جهد T_1 و طبقت إشارة الإشعال بين البوابة G و الطرف T_1 .

يمكن إشعال الترياك أيضا بإشارة سالبة إلا أن حساسيته للإشارة الموجبة أفضل. يستخدم الترياك في عدة تطبيقات نذكر منها على سبيل المثال التحكم في سرعة محركات التأثيرية الثلاثية الأوجه و في الإضاءة و التسخين الكهربائي.

لسبب توصيل الترياك للتيار في كلا الاتجاهين و أنه يكافئ ثايرستورين موصلين على التفرع وبشكل عكسي فإن خواصه تشبه خواص الثايرستور في حالة الانحياز الأمامي كما هو مبين في الشكل (١-٩).



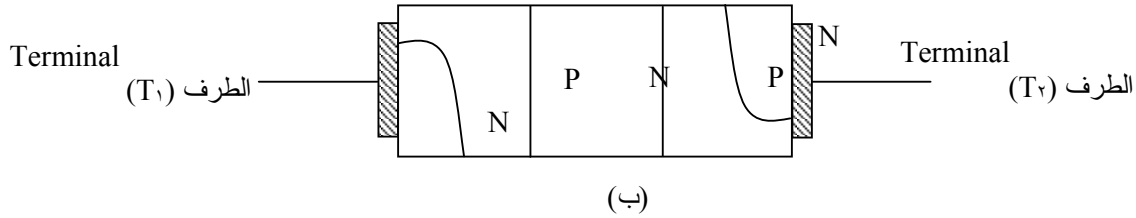
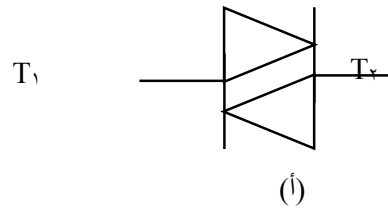
الشكل (١-٩): خواص الترياك

الدياك Diac:

الدياك عبارة عن ترياك بدون طرف ثالث للبوابة و يوصل التيار الكهربائي في كلا الاتجاهين:

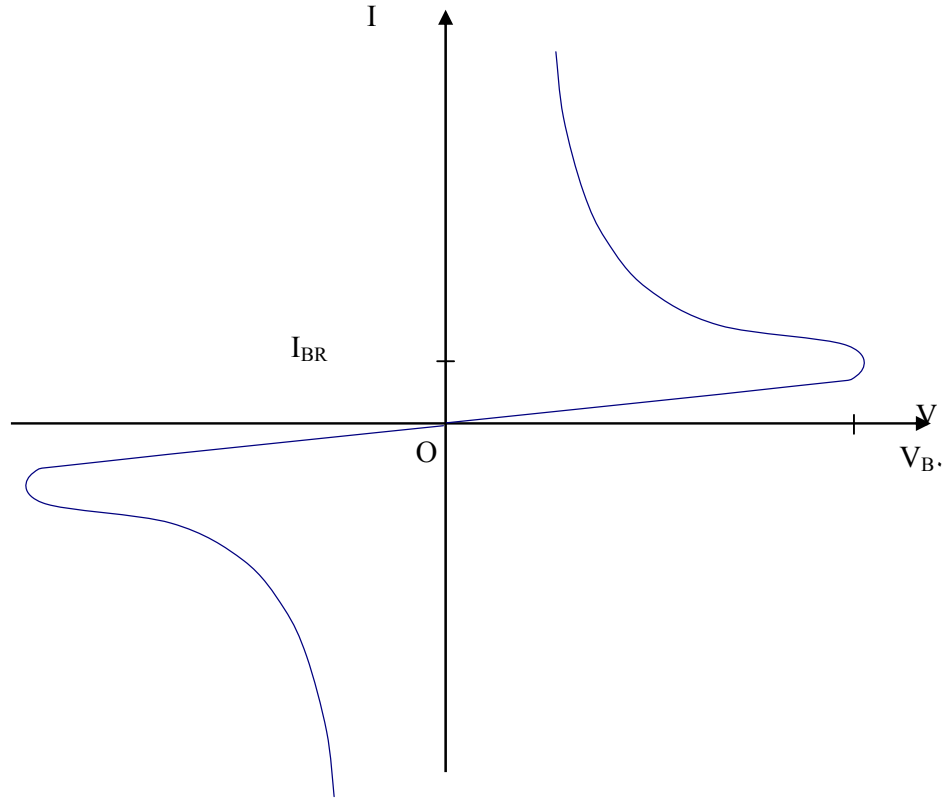
- من الطرف T_1 إلى الطرف T_2 عندما يكون جهد الطرف T_1 أعلى من جهد الطرف T_2 بقيمة مساوية على الأقل قيمة جهد الانهيار
- من الطرف T_2 إلى الطرف T_1 عندما يكون جهد الطرف T_2 أعلى من جهد الطرف T_1 بقيمة مساوية على الأقل قيمة جهد الانهيار.

يبين الشكل (١ - ١٠) الرمز و التركيب الطبقي الخاص بالدياك.



الشكل (١ - ١٠): الدياك (أ) الرمز (ب) التركيب

أما خواص الدياك الموضحة في الشكل (١ - ١١) فهي تشبه تماماً خواص الترياك عند إلغاء تيار البوابة I_G إلا أن قيمة جهد الانهيار أصغر. يستعمل الدياك في دوائر الإشعال للثايرستور و الترياك حيث يستفاد من قيمة جهد انهياره في تحديد زاوية الإشعال.



الشكل (١ - ١١): خواص الدياك

أسئلة:

- ١- ١ ما هو الثايرستور؟
- ١- ٢ ما هو الاسم البديل المستعمل للثايرستور؟
- ١- ٣ متى يكون الثايرستور في الانحياز الأمامي؟
- ١- ٤ متى يكون الثايرستور في الانحياز الخلفي؟
- ١- ٥ ما هي الشروط اللازم توفرها لإشعال الثايرستور؟
- ١- ٦ كيف يتم إيقاف الثايرستور عن التوصيل؟
- ١- ٧ اذكر مع الشرح الطرق المختلفة المستعملة لإشعال الثايرستور
- ١- ٨ كيف تتم حماية الثايرستور؟
- ١- ٩ متى يوصل الترياك التيار من الطرف T_1 إلى الطرف T_2 ؟
- ١- ١٠ ارسم الدائرة المكافئة للترياك
- ١- ١١ أذكر بعض تطبيقات عملية للترياك؟
- ١- ١٢ متى يوصل الدياك التيار من الطرف T_1 إلى الطرف T_2 ؟
- ١- ١٣ أذكر بعض تطبيقات عملية للدياك؟



إلكترونيات القوى

الموحدات المحكومة الأحادية الأوجه

الأهداف:

بعد انتهاء الطالب من دراسة هذه الوحدة لابد أن يكون الطالب ملماً وقادراً على تفسير التالي:

- مبدأ عمل موحد نصف موجة محكوم أحادي الوجه والمتصل بحمل مادي أو حمل حثي مستعينا بالموجات الخاصة بدائرة هذا الموحد
- مبدأ عمل موحد موجة كاملة محكوم كلياً والمتصل بالحمل المادي أو الحثي مستعينا بالموجات الخاصة بدائرة هذا الموحد
- مبدأ عمل موحد موجة كاملة نصف محكوم

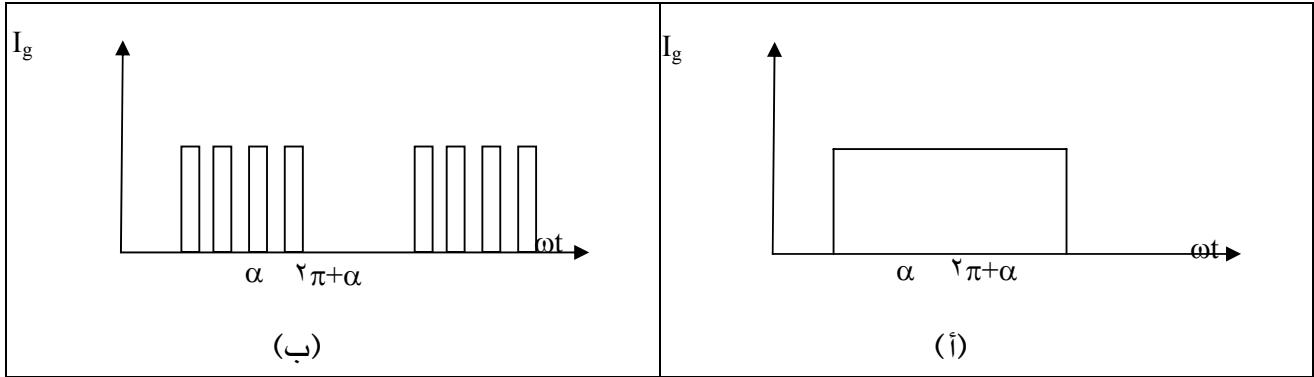
مقدمة:

سوف يتم دراسة بعض الدوائر الأساسية للمحركات المحكومة الأحادية الأوجه واللازمة لتحويل الجهد المتناوب إلى جهد مستمر. وسوف يتم دراسة تفصيلية للمحركات نصف موجة وموجة كاملة محكومة أحادية الأوجه والمتصلة بحمل مادي (R) أو حمل حثي (R-L). وسوف يتم الدراسة على أساس أن جميع هذه المحركات الأحادية الأوجه متصلة بمصدر جهد متناوب له موجة جيبية بقيمة V_m حيث إن V_m هي القيمة العظمى لهذا المصدر الجيبي.

الشروط اللازمة لتشغيل الثايرستور (الموحد السليكوني المحكوم):

كما سبق توضيحه في الباب السابق بأن الثايرستور (Thyristor) أو الموحد السليكوني المحكوم (SCR) لابد أن يتوافر له شرطان أساسيان حتى يتم إشعاله (قدحه) وهذان الشرطان يمكن تلخيصهما كالتالي:

١. لابد أن يكون جهد الأنود الخاص بالثايرستور أكبر من جهد الكاثود الخاص به وبالتالي يصبح فرق الجهد ما بين الأنود و الكاثود موجب حتى يبقى الثايرستور في وضع الانحياز الأمامي.
٢. لابد من وصول نبضة لبوابة الثايرستور بقيمة تيار بوابي كافٍ لإشعال الثايرستور وهذه النبضة ممكن أن تكون أحادية تتكرر كل دورة زمنية قيمتها 2π أو تكون هذه النبضة عبارة عن عدة نبضات مستمرة كافية لإشعال الثايرستور وتكرر كل فترة زمنية قيمتها 2π و الشكل (٢ - ١) يوضح شكل هذه النبضة وعادة لا يفضل وجود نبضة مستمرة كاملة عند طرف بوابة الثايرستور حتى لا يزيد الفقد الخاص بالثايرستور مما يؤدي إلى تقليل عمره الافتراضي.



الشكل (٢ - ١): علاقة تيار بوابة الثايرستور مع الزمن في حالة وجود: (أ) نبضة واحدة مستمرة عند طرف البوابة (ب) نبضات مستمرة عند طرف البوابة.

محولات نصف موجة محكومة أحادية الأوجه مع الحمل المادي

Single-Phase Half-Wave Controlled Rectifiers with a resistive load

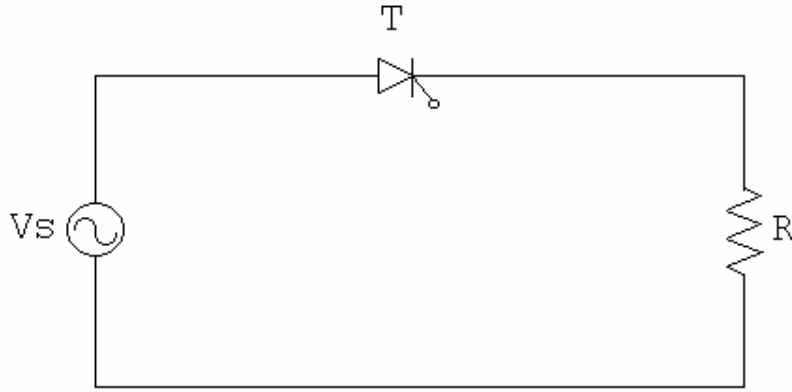
يبين الشكل (٢- ٢) دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بحمل مادي R. وعندما يكون الثايرستور في حالة الانحياز الأمامي أي خلال الفترة الموجبة (عبارة عن نصف دورة) لموجة مصدر الجهد فإن الثايرستور سيوصل أي أنه سيمرر التيار الكهربائي وذلك في حالة إعطاء بوابة الثايرستور النبضة اللازمة لإشعال الثايرستور وذلك خلال أي لحظة في الفترة الموجبة لموجة مصدر الجهد ولتكن (t_0) كما في الشكل (٢- ٣) سيمرر التيار خلال الحمل المادي (R) وذلك في حالة توصيل الثايرستور عند تلك اللحظة (t_0) وبالتالي سيكون شكل موجة جهد الخرج (V_0) على الحمل المادي هو نفسه شكل جهد المصدر الجيبي.

و ينعدم تيار الحمل 'R' عندما تكون ($t_0 = \pi$) حيث عند هذه اللحظة سيتحول الثايرستور من الانحياز الأمامي إلى الانحياز الخلفي وذلك لأن فرق الجهد بين طرفي الأنود و الكاثود للثايرستور سوف يصبح له قيمة سالبة و يصبح الثايرستور له مقاومة داخلية لانهائية تقريبا والتي تمنع مرور التيار الكهربائي في الدائرة خلال نصف الدورة السالب لموجة الجهد الجيبي وبالتالي يصبح جهد خرج الحمل 'R' له قيمة صفرية خلال هذه الفترة الزمنية. ويبدأ مرور التيار في الدائرة مرة أخرى بإعطاء الثايرستور النبضة اللازمة لإشعاله وذلك عند اللحظة الزمنية $t_0 = 2\pi$ ويبين الشكل (٢- ٣) شكل موجة المصدر الجيبي وموجة

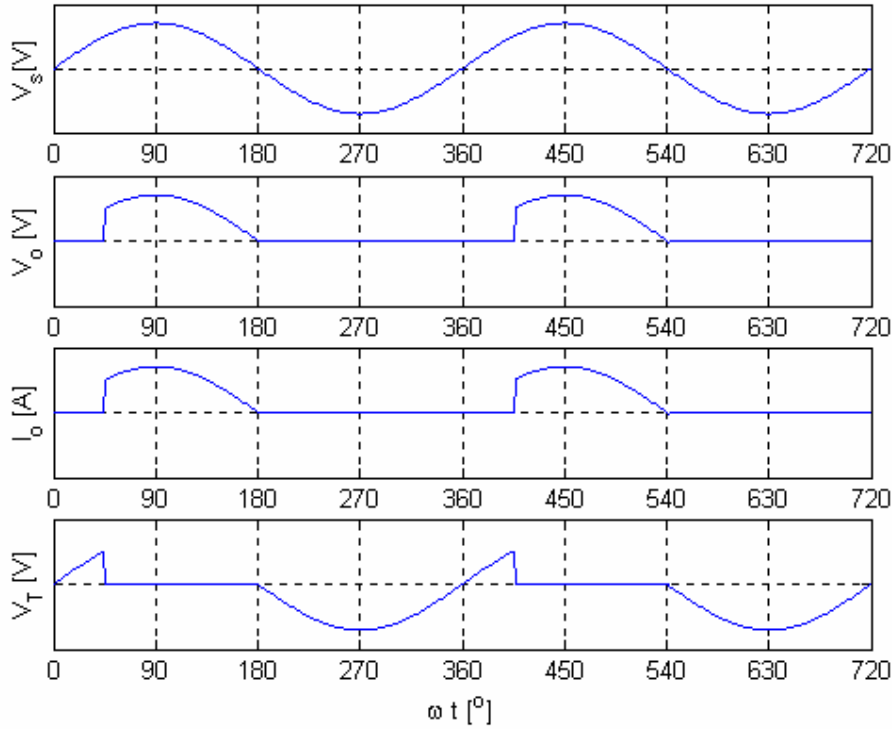
جهد الخرج (الحمل) v_o وموجة تيار الخرج i_o وموجة فرق الجهد بين طرفي الأنود و الكاثود للثايرستور v_T والنبضة اللازمة لإشعال الثايرستور ويمكن تلخيص عمل الدائرة خلال دورة كاملة كما يلي:

$$V_o = \begin{cases} 0 & , 0 < t < t_0 \\ V_m \sin \omega t & , t_0 < t < \pi / \omega \\ 0 & , \pi / \omega < t < 2\pi / \omega \end{cases}$$

حيث أن الفترة الزمنية من ٠ حتى t_0 تمثل الفترة الزمنية التي يمرر فيها الثايرستور التيار خلال نصف الدورة الموجبة للمصدر الجيبي علما بأن اللحظة الزمنية t_0 أو الزاوية ωt_0 تسمى بزاوية الإشعال α والفترة الزمنية من ωt_0 حتى π تسمى بزاوية التوصيل γ .



الشكل (٢- ٢): دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بحمل مادي 'R'.



الشكل (٢- ٣): موجات الجهد والتيار للدائرة المبينة بالشكل (٢- ٢).

القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج Average load voltage and current:

المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢- ٢) كآتي:

$$(٢- ١) \quad V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

حيث أن V_m هي القيمة العظمى لمصدر الجهد الجيبي المتناوب، و α هي قيمة زاوية إشعال الثايرستور.

ويمكن كتابة المعادلة الرياضية للقيمة المتوسطة لتيار الخرج كآتي:

$$(٢- ٢) \quad I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R}$$

ويمكن كتابة المعادلة (٢- ٢) بصيغة رياضية أخرى وذلك بعد تعويض المعادلة (٢- ١) في المعادلة (٢- ٢)

(٢):

$$(٢- ٣) \quad I_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi R} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

ويمكن أيضا كتابة معادلة القيمة المتوسطة لتيار الخرج بدلالة القيمة العظمى لتيار الحمل I_m كآتي:

$$(٢- ٤) \quad I_{o(avg)} = \frac{I_m}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

حيث أن I_m هي القيمة العظمى لتيار الخرج وقيمته V_m/R .

القيمة الفعالة لجهد و تيار الخرج R.M.S. value of the load voltage and current

يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة الفعالة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢- ٢) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = \frac{V_m}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (٢- ٥)$$

وأيضاً يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة الفعالة لتيار الخرج كالآتي:

$$I_{o(rms)} = \frac{I_m}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} \quad (٢- ٦)$$

ويتم التحكم في قيم جهد الخرج كما تعلمنا المعادلات السابقة عن طريق التحكم في قيمة زاوية الإشعال (α) للثايرستور وتؤدي زيادة قيمة الزاوية (α) إلى تقليل جهد الخرج وبالعكس يؤدي تقليل قيمة الزاوية (α) إلى زيادة قيمة جهد الخرج.

ويمكن الحصول على أكبر قيمة متوسطة لجهد الخرج (V_{do}) وذلك عند قيمة زاوية إشعال صفرية أي أن ($\alpha = 0$) وبالتعويض في المعادلة (٢- ١) نحصل على قيمة V_{do} كالآتي:

$$V_{do} = \frac{V_m}{\pi} \quad (٢- ٧)$$

نلاحظ بالنسبة للدائرة السابقة بأن موجة جهد الخرج V_0 عبارة دالة غير متصلة ولها توافقيات عالية وتحتوي على مركبات جهد متناوب ولا تمثل هذه الموجة الحالة المثالية المطلوبة للحصول على الجهد المستمر الثابت القيمة.

معامل القدرة الكهربائية (Power Factor)

يعرف معامل القدرة الكهربائي 'PF' للمصدر الكهربائي على أساس أنه عبارة عن قيمة القدرة الفعالة 'P' عند المصدر مقسوم على القدرة الظاهرية 'S' عند المصدر وتمثل معادلته كالتالي:

$$PF = \frac{P}{S} \quad (٢- ٨)$$

ويمكن كتابة قيم القدرة الفعالة والظاهرية عند المصدر في حالة الثايرستور المثالي والذي له طاقة صفرية مفقودة كالآتي

$$P = I_{rms}^2 R \quad (٢- ٩)$$

$$S = I_{rms} V_s \quad (٢- ١٠)$$

ويمكن استنتاج المعادلة العامة لمعامل القدرة الكهربائي وذلك بعد تعويض المعادلتين (٢-٩) و (٢-١٠) في المعادلة (٢-٨) كالآتي:

$$PF = \frac{I_{rms} R}{V_s} \quad (٢-١١)$$

ويمكن أيضا استنتاج معادلة معامل القدرة الكهربائي لدائرة موحد نصف موجة محكوم والمتصل بحمل مادي 'R' وذلك بعد تعويض المعادلة (٢-٦) في المعادلة (٢-١١) كالآتي:

$$PF = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)} \quad (٢-١٢)$$

مثال ٢-١:

يتغذى موحد نصف موجة محكوم أحادي الوجه من مصدر جهد جيبي متناوب قيمته الفعالة ١٢٠ V. إذا علمت بأن قيمة مقاومة الحمل المادي 10Ω ، فأوجد القيمة المتوسطة لجهد الحمل 'V_o' وقيمة قدرة الحمل 'P_L' عند زوايا الإشعاع التالية:

- (أ) $\alpha = 0^\circ$
 (ب) $\alpha = 45^\circ$
 (ج) $\alpha = 90^\circ$
 (د) $\alpha = 135^\circ$
 (هـ) $\alpha = 180^\circ$

الحل:

يتم أولاً تعيين القيمة العظمى لمصدر الجهد المتناوب 'V_m' كالآتي:

$$V_m = V_s \sqrt{2} = 120\sqrt{2} = 169.7 \text{ V}$$

يمكن تعيين قيمة جهد الحمل المتوسط 'V_{o(avg)}' وقدرة الحمل 'P_L' باستخدام المعادلات (٢-١) و (٢-٢) وهما كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

$$P_L = I_{rms}^2 R$$

(أ) عندما تكون زاوية الإشعاع $\alpha = 0^\circ$ سوف نحصل علي القيم التالية:

$$V_{o(avg)} = \frac{169.7}{2\pi} \cdot (1 + \cos 0^\circ) = 54 \text{ V}$$

$$I_{o(rms)} = \frac{V_m}{2R} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)} = \frac{169.7}{20} \sqrt{1 - 0} = 8.485 \text{ A}$$

$$P_L = I_{o(rms)}^2 R = 8.485^2 \cdot 10 = 720 \text{ W}$$

(ب) عندما تكون زاوية الإشعال $\alpha = 45^\circ$:

$$V_{o(avg)} = \frac{169.7}{2\pi} \cdot (1 + \cos 45^\circ) = 46.1 \text{ V}$$

$$I_{o(rms)} = \frac{169.7}{20} \sqrt{1 - \frac{45 \cdot \pi}{180} \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{\sin 90^\circ}{2\pi}} = 8.09 \text{ A}$$

$$\therefore P_L = 8.09^2 \cdot 10 = 654.55 \text{ W}$$

(ج) عندما تكون زاوية الإشعال $\alpha = 90^\circ$:

$$V_{o(avg)} = \frac{169.7}{2\pi} \cdot (1 + \cos 90^\circ) = 27 \text{ V}$$

$$I_{o(rms)} = \frac{169.7}{20} \sqrt{1 - \frac{90 \cdot \pi}{180} \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{\sin 180^\circ}{2\pi}} = 6 \text{ A}$$

$$\therefore P_L = 6^2 \cdot 10 = 360 \text{ W}$$

(د) عندما تكون زاوية الإشعال $\alpha = 135^\circ$:

$$V_{o(avg)} = \frac{169.7}{2\pi} \cdot (1 + \cos 135^\circ) = 7.91 \text{ V}$$

$$I_{o(rms)} = \frac{169.7}{20} \sqrt{1 - \frac{135 \cdot \pi}{180} \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{\sin 270^\circ}{2\pi}} = 2.56 \text{ A}$$

$$\therefore P_L = 2.56^2 \cdot 10 = 65.4 \text{ W}$$

(هـ) عندما تكون زاوية الإشعال $\alpha = 180^\circ$:

$$V_{o(avg)} = \frac{169.7}{2\pi} \cdot (1 + \cos 180^\circ) = 0 \text{ V}$$

$$I_{o(rms)} = \frac{169.7}{20} \sqrt{1 - \frac{180 \cdot \pi}{180} \cdot \frac{1}{\pi} + \frac{\sin 360^\circ}{2\pi}} = 0 \text{ A}$$

$$\therefore P_L = 0 \text{ W}$$

نستنتج من حل هذا المثال أن القيم المتوسطة لجهد و تيار الحمل من جهة وقدرة الحمل من جهة أخرى يتناقصان مع زيادة زاوية إشعال الثايرستور ' α ' ويمكن تلخيص نتائج المثال كما هو مبين بالجدول التالي:

α	٠	45°	90°	135°	180°
$V_{o(avg)}$ V	٥٤	٤٦,١	٢٧	٧,٩١	٠
P_L W	٧٢٠	٦٥٤,٦	٣٦٠	٦٥,٤	٠

مثال ٢- ٢:

يتغذى موحد نصف موجة محكوم أحادي الوجه من مصدر جهد جيبي متناوب قيمته الفعالة ١٢٠ V. إذا علمت بأن هذا الموحد متصل بحمل مادي قيمته 10Ω و إذا كانت زاوية إشعال الثايرستور α قيمتها 60° ، فعين:

- قدرة الحمل المادي المسحوبة من المصدر الكهربائي P_L .

- معامل القدرة الكهربائية للمصدر الكهربائي PF .

الحل:

- تعين القيمة العظمى لتيار الحمل I_m كالتالي:

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{120\sqrt{2}}{10} = 16.97 \text{ A}$$

- تعين قيمة قدرة الحمل المادي كالتالي:

$$P_L = I_{rms}^2 R$$

$$\therefore I_{o(rms)} = \frac{I_m}{2} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)}$$

$$\therefore P_L = \frac{I_m^2}{4} \cdot R \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right) = \frac{16.97^2}{4} \cdot 10 \cdot \left(1 - \frac{60}{\pi} \cdot \frac{\pi}{180} + \frac{\sin 120}{2\pi}\right) = 579 \text{ W}$$

- يعين معامل القدرة الكهربائية PF باستخدام المعادلة (٢- ١٢) كالتالي:

$$\therefore PF = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)}$$

$$\therefore PF = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{60}{\pi} \cdot \frac{\pi}{180} + \frac{\sin 120}{2\pi}\right)} = 0.634 \text{ Lag.}$$

مثال ٢- ٣:

يتصل موحد نصف موجة محكوم أحادي الوجه بمصدر جهد جيبي متناوب قيمته الفعالة ١٥٠ V وتردده ٦٠ Hz وحمل مادي قيمته 10Ω . إذا علمت بأن قيمة زاوية الإشعال α 30° ، فأوجد:

- القيمة العظمى لتيار الحمل I_m .

- القيمة المتوسطة لجهد الحمل $V_{o(avg)}$.

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل $I_{o(avg)}$.

- القيمة الفعالة لتيار الحمل $I_{o(rms)}$.

- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر P_L .

- زاوية التوصيل γ .

- تردد موجة الخرج 'f_o'.

- معامل القدرة الكهربية 'PF'.

الحل:

- القيمة العظمى لجهد المصدر 'V_m'

$$V_m = V_s \sqrt{2} = 150\sqrt{2} = 212 \text{ V}$$

- القيمة العظمى لتيار الحمل 'I_m'

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{212}{10} = 21.2 \text{ A}$$

- القيمة المتوسطة لجهد الخرج 'V_{o(avg)}'

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha) = \frac{212}{2\pi} \cdot (1 + \cos 30^\circ) = 63 \text{ V}$$

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل 'I_{o(avg)}'

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{63}{10} = 6.3 \text{ A}$$

- القيمة الفعالة لتيار الحمل 'I_{o(rms)}'

$$\therefore I_{o(rms)} = \frac{I_m}{2} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}} = \frac{21.2}{2} \sqrt{1 - \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\pi}{180} + \frac{\sin 60^\circ}{2\pi}} = 10.45 \text{ A}$$

- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر 'P_L'

$$P_L = I_{rms}^2 R = 10.45^2 \cdot 10 = 1092 \text{ W}$$

- زاوية التوصيل 'γ' في حالة وجود حمل مادي 'R'

$$\gamma = 180^\circ - \alpha = 180^\circ - 30^\circ = 150^\circ$$

حيث أن موجة الخرج (الحمل) تتكرر مرة واحدة كل دورة زمنية لدائرة هذا الموحد كما هو مبين

بالشكل (٢-٣). ففي هذه الحالة يكون تردد موجة الخرج 'f_o' هو نفسه تردد المصدر الكهربي:

$$f_o = f_s = 60 \text{ Hz}$$

- معامل القدرة الكهربية 'PF'

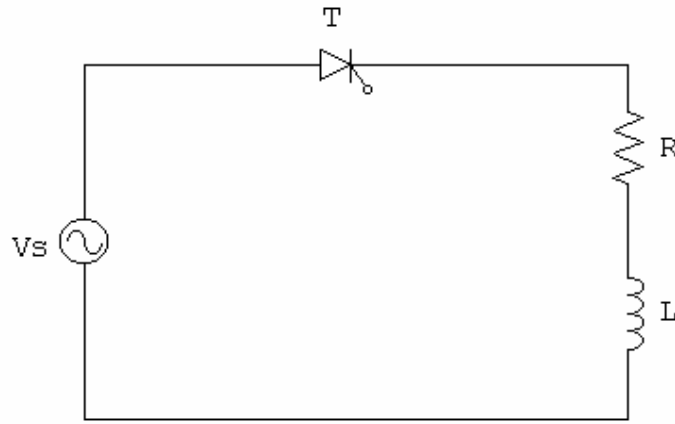
$$\therefore PF = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)}$$

$$\therefore PF = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot \left(1 - \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\pi}{180} + \frac{\sin 60^\circ}{2\pi}\right)} = 0.7 \text{ Lag.}$$

محولات نصف موجة محكومة أحادية الوجه مع الحمل الحثي

Single-Phase Half-Wave Controlled Rectifiers with an Inductive Load 'R-L'

يبين الشكل (٢-٤) دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بمصدر جهد جيبي متناوب وحمل حثي 'R-L' ويبين الشكل (٢-٥) كل من موجة جهد المصدر المتناوب v_s وموجة جهد الخرج v_o وموجة تيار الخرج i_o وموجة الجهد الناشئ على أطراف الثايرستور v_T .



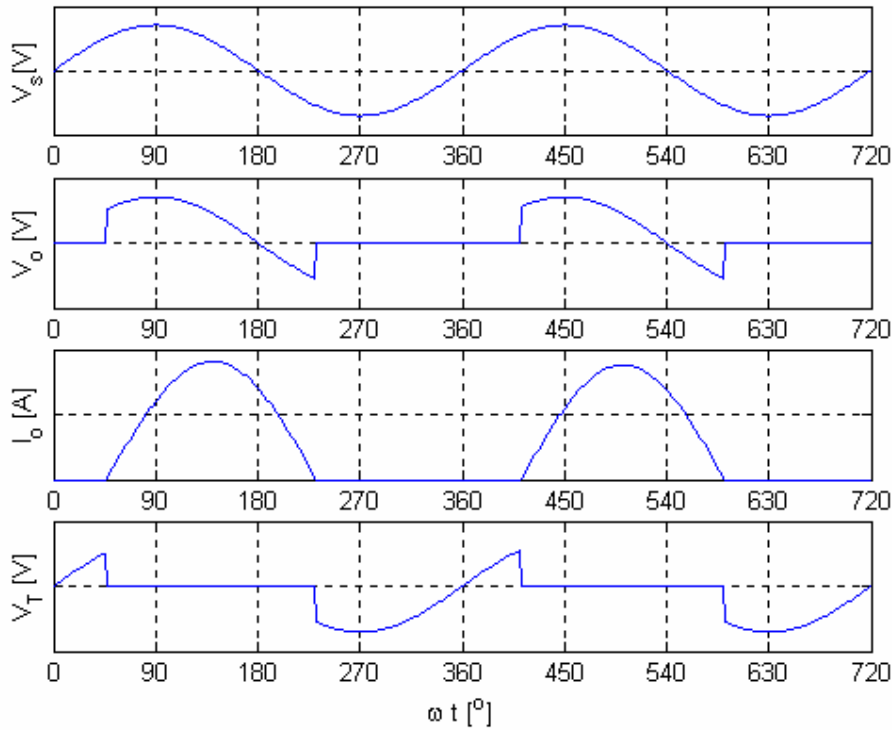
الشكل (٢-٤): دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بحمل حثي 'R-L'.

فكرة عمل الدائرة:

ويمكن أن نبين فكرة عمل الدائرة بالاستعانة بالشكل (٢-٥) كالتالي:

عندما يتم توصيل الثايرستور بمصدر الجهد المتناوب v_s وإعطاء نبضة كهربية كافية لإشعاله (قدحه) بزاوية إشعال α فإن الثايرستور سوف يتحول من وضع الانحياز الخلفي إلى وضع الانحياز الأمامي أي سوف يتحول من وضع الفتح إلى وضع الإغلاق وبالتالي فسوف يمرر الثايرستور التيار عند اللحظة $\omega t = \alpha$ بشرط أن تكون قيمة هذه الزاوية α أكبر من أو تساوي زاوية الحمل $\left(\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right)$ فعند هذه اللحظة يبدأ مرور التيار في الدائرة حيث يبدأ بقيمة صفرية ثم تزداد قيمته تدريجياً ثم يقل حتى يصل لقيمة صفرية مرة أخرى وذلك عند الزاوية β والتي تسمى بزاوية إطفاء الثايرستور (Extinction angle). وعادة ما تكون قيمة زاوية إطفاء الثايرستور في حالة هذه الدائرة أكبر من 180° ويفسر سبب ذلك إلى إنه عند مرور التيار في الملف الحثي فسوف ينشأ مجال مغناطيسي بداخله وعن طريق هذا المجال يتم تخزين طاقة مغناطيسية بداخله وهذه الطاقة المغناطيسية المخزنة بالملف تجبر الثايرستور على الاستمرار

في التوصيل وتعطيه فرصة أكبر لزيادة الفترة الزمنية التي يمرر فيها التيار ويتم انقطاع التيار عن الثايرستور عند الزاوية ' β ' والتي تزيد قيمتها عن 180° حيث يتم استرجاع هذه الطاقة إلى المصدر الكهربائي خلال الفترة الزمنية $\beta < \omega t < \pi$. ونتيجة لهذا فإن فرق الجهد بين أطراف الثايرستور ' V_T ' يكون موجب خلال الفترة الزمنية $\alpha < \omega t < \beta$ بينما قيمة جهد خرج الحمل يحتوي على قيم موجبة وقيم سالبة كما هو مبين بالشكل (٢-٥) وبالتالي تكون قيمته المتوسطة أقل من القيمة التي يمكن الحصول عليها في حالة وجود حمل مادي فقط 'R' حيث إن جهد الخرج له دائماً قيمة موجبة ولا يحتوي على أي قيمة سالبة.



الشكل (٢-٥): موجات الجهد والتيار للدائرة المبينة بالشكل (٢-٤)

القيمة المتوسطة لجهد وتيار الخرج:

يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل

(٢-٤) كالآتي:

$$(٢-١٣) \quad V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi} (\cos \alpha - \cos \beta)$$

ويمكن كتابة المعادلة الرياضية للقيمة المتوسطة لتيار الخرج كالآتي:

(٢-١٤)

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{V_m}{2\pi R} (\cos \alpha - \cos \beta)$$

حيث يمكن تعيين قيمة زاوية الإطفاء β ' بحل المعادلة الآتية جبرياً:

$$\sin(\beta - \alpha) = \sin(\alpha - \phi) \cdot e^{\frac{(\alpha - \beta)}{\tan \phi}}$$

حيث أن:

α هي زاوية إشعال الثايرستور

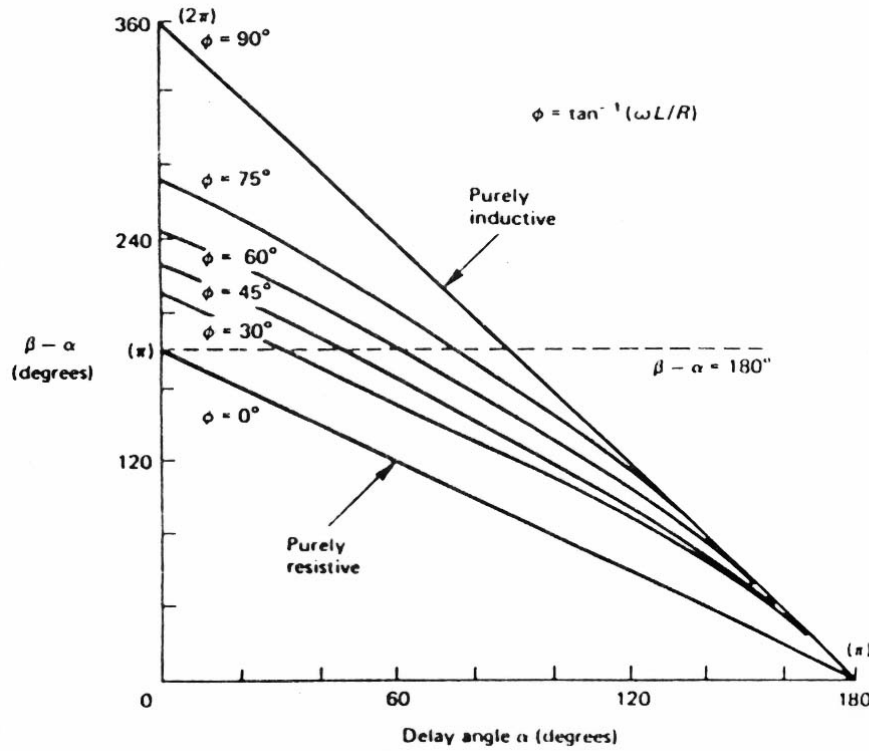
Φ هي زاوية الحمل ويمكن حسابها بمعرفة قيم الحمل الحثي $\left(\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{\omega L}{R} \right) \right)$

ويمكن أيضاً تعيين قيمة زاوية الإطفاء β ' مستخدماً الشكل (٢-٦) عند أي قيمة لزاوية إشعال الثايرستور α ' وزاوية الحمل Φ ' . ولتعيين قيمة β تحدد أولاً قيمة Φ عن طريق معرفة قيم الملف ثم بمعرفة قيمة α يمكن تعيين قيمة زاوية التوصيل γ ' ثم يتم تعيين قيمة β ($\beta = \gamma + \alpha$). نلاحظ من الشكل (٢-٦) بأن المنحنى المرسوم عند زاوية $\Phi = 0^\circ$ يمثل حالة الحمل المادي 'R' بينما عند زاوية $\Phi = 90^\circ$ يمثل حالة الحمل الحثي البحت (L).

تعريفات:

يمكن تلخيص بعض التعريفات المهمة كالتالي:

- زاوية إشعال الثايرستور α ' : هي الزاوية أو اللحظة الزمنية التي يبدأ عندها الثايرستور التوصيل وامرار التيار الكهربى وذلك في حالة وصول نبضة عند بوابة الثايرستور بتيار كافى.
- زاوية إطفاء الثايرستور β ' : هي الزاوية أو اللحظة الزمنية التي يتحول عندها الثايرستور من وضع التوصيل إلى وضع الفصل أي هي اللحظة التي سوف يصل عندها التيار المار في الثايرستور إلى القيمة الصفرية.
- زاوية توصيل الثايرستور γ ' : هي الفترة الزمنية التي يوصل فيها الثايرستور ويمرر التيار خلال فترة زمنية دورية واحدة.



الشكل (٢-٦) علاقة زاوية إشعال الثايرستور α' مع زاوية إطفاء β' عند قيم مختلفة لزاوية الحمل Φ'

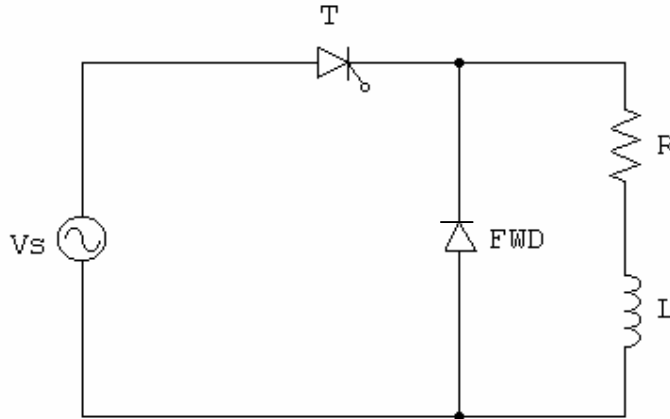
موحدات نصف موجة محكومة أحادي الوجه مع الحمل الحثي ودايود حذافة

Single-Phase Half-Wave Controlled Rectifiers with an Inductive Load and a Free-Wheeling Diode

كما تبين من الدراسة السابقة لموحدات نصف موجة محكومة أحادية الوجه والمتصلة بحمل حثي بأن موجة جهد الخرج تحتوي على قيم موجبة وقيم سالبة وهذا يؤدي إلى تقليل القيمة المتوسطة لجهد الخرج وإضافة لذلك أن موجة تيار الخرج تكون عبارة عن دالة غير متصلة ولها معامل تشويه عال ويمكن تحسين العيوب السابقة بإضافة دايود حذافة (Free-wheeling diode).

يبين الشكل (٢-٧) دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بمصدر جهد جيبي متناوب وحمل حثي 'R-L' و دايود حذافة ونلاحظ بأن توصيل أطراف هذا الدايود بحيث أن لا يوصل هذا الدايود خلال الفترة الزمنية التي يمرر فيها الثايرستور التيار الكهربائي وإذا تم تبديل أطراف هذا الدايود فسوف تنشأ

دائرة قصر (Short-circuit) مع المصدر الكهربائي ذو الموجة الجيبية ولهذا لا بد من توصيل أطراف الدايمود الحذافة كما هو مبين بالشكل (٢-٧).

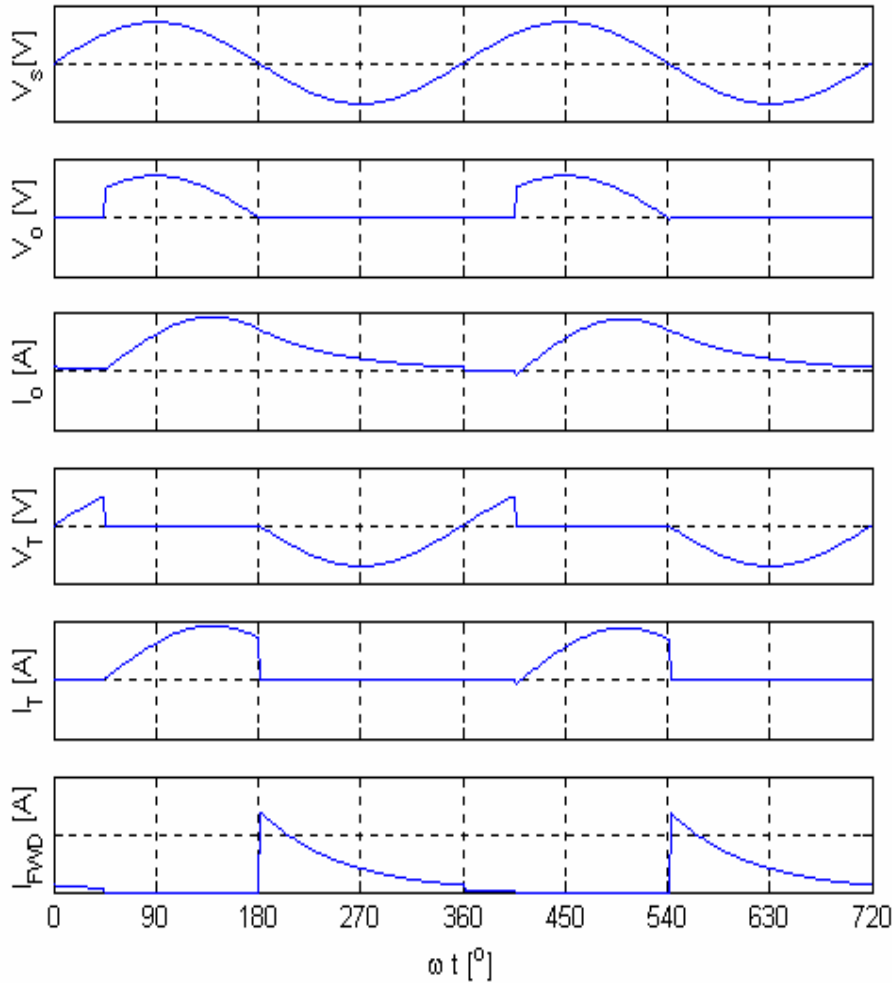


الشكل (٢-٧) دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بحمل حثي 'R-L' مع دايمود حذافة.

فكرة عمل الدائرة:

ويمكن شرح فكرة عمل الدائرة المبينة بالشكل (٢-٧) بالاستعانة بموجات هذه الدائرة والمبينة بالشكل (٢-٨) كالتالي. فكما سبق شرحه فإن الثايرستور لن يوصل ولن يمرر التيار إلا عندما يكون جهد الأنود الخاص به أكبر من جهد الكاثود الخاص به وأيضا لا بد من وصول نبضه لبوابة الثايرستور بتيار كافٍ وكافية لقدحه بزاوية إشعال α فإذا تحقق هذان الشرطان فسوف يوصل الثايرستور وسوف يمرر التيار كما هو مبين بالشكل (٢-٨). لن يمرر الثايرستور التيار خلال الفترة الزمنية $0 < \omega t < \alpha$ حيث لا توجد نبضة كهربية خلال هذه الفترة الزمنية وعند وصول هذه النبضة بزاوية إشعال α يبدأ الثايرستور التوصيل وتمرير عند اللحظة $\omega t = \alpha$ ويبدأ التيار بقيمة صفرية عند هذه اللحظة الزمنية ويزداد تدريجياً ثم يقل تدريجياً حتى يصل لقيمة صفرية مرة أخرى عند اللحظة الزمنية المساوية لزاوية إطفاء الثايرستور β . يمكن تقسيم الفترة الزمنية $\alpha < \omega t < \beta$ إلى فترتين زمنيتين وهما $\alpha < \omega t < \pi$ ، $\pi < \omega t < \beta$ فخلال الفترة الزمنية الأولى $\alpha < \omega t < \pi$ فإن الثايرستور سوف يمرر التيار خلال هذه الفترة خلال الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربائي الجيبية المتناوب v_s والحمل الحثي 'R-L' وبالتالي تصبح قيمة جهد الخرج v_o هي تقريباً قيمة جهد الدخل v_s أي أن $v_o = v_s$ ونتيجة لمرور تيار كهربائي في الحمل الحثي خلال هذه الفترة الزمنية فإن الملف سوف يخزن طاقة مغناطيسية خلال هذه الفترة الزمنية. نلاحظ من الشكل (٢-٨) أن جهد الخرج يصل لقيمة صفرية عند اللحظة $\omega t = \pi$ بالرغم

من وجود قيمة لتيار الحمل الحثي فعند هذه اللحظة الزمنية وخلاف الحالة السابقة (بدون الدايدود الحذافه) لا يمكن أن يصل لقيمة سالبة خلال الفترة الزمنية الثانية $\beta < \omega t < \pi$ حيث خلال هذه الفترة الزمنية يعمل الدايدود الحذافه ويمرر تيار الحمل الحثي من خلاله ويصبح الثايرستور في حالة الانحياز الخلفي خلال هذه الفترة الزمنية أي خلال هذه الفترة الزمنية فإن التيار يمر من خلال الدائرة المغلقة المكونة من الحمل الحثي و الدايدود الحذافه فقط ونلاحظ بأن التيار يمر خلال هذه الفترة الزمنية نتيجة الطاقة المغناطيسية المخزنة بالملف الحثي.



الشكل (٢- ٨): موجات الجهد والتيار للدائرة المبينة بالشكل (٢- ٧)

وظيفة الدايمود الحذافه:

مما سبق دراسته خلال الفقرة السابقة يمكن إيجاز وتوضيح وظيفة الدايمود الحذافة كالتالي: يمنع وجود أي جزء سالب بموجة جهد الخرج 'v_o' وبالتالي يؤدي ذلك لزيادة القيمة المتوسطة لجهد الخرج. يمكن التيار من التمرير خلال الحمل الحثي لفترة زمنية أطول وبالتالي يمكن أن يجعل تيار الحمل مستمر أي دالة متصلة وذلك تكون قيمة الممانعة لهذا الحمل الحثي كبيرة جدا بالنسبة لمقاومته المادية.

ونلاحظ بأن القيم المتوسطة لجهد و تيار الخرج يمكن التعبير عنهما باستخدام المعادلتين (٢ - ١)، (٢ - ٣) كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

$$I_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi R} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

مثال ٢ - ٤:

يتصل موحد نصف موجة محكوم أحادي الوجه بمصدر جهد جيبي متناوب جهده الفعال 150 V وتردده 60 Hz و حمل حثي مع دايمود حذافه. المقاومة المادية 'R' للحمل الحثي قيمتها 10 Ω و الممانعة الحثية 'ωL' له قيمتها 10 Ω. إذا علمت بأن زاوية إشعال الثايرستور قيمتها 30°، فأوجد القيمة المتوسطة لجهد و تيار الحمل.

الحل:

حيث أن القيم المتوسطة لجهد و تيار الخرج في حالتنا هذه يمكن التعبير عنهما بالمعادلات التالية:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

$$I_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi R} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

إذن يمكن تعيين القيم السابقة كالآتي

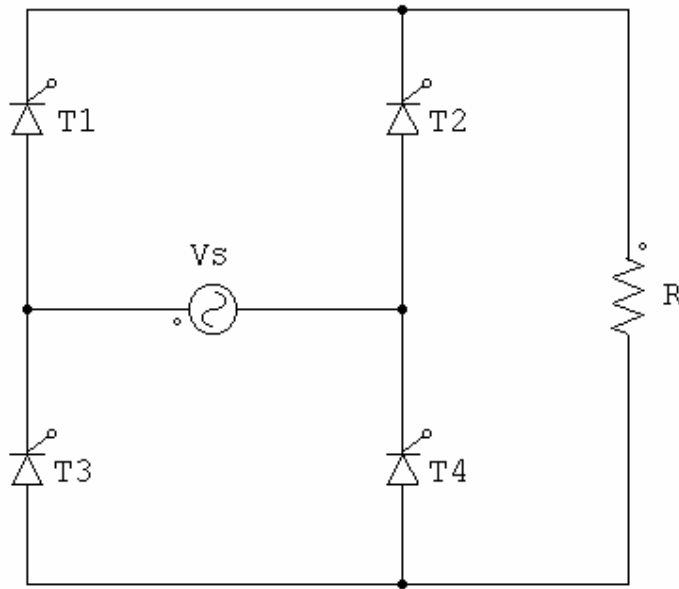
$$V_{o(avg)} = \frac{150\sqrt{2}}{2\pi} \cdot (1 + \cos 30^\circ) = 63 \text{ V}$$

$$I_{o(avg)} = \frac{63}{10} = 6.3 \text{ A}$$

موحدات موجة كاملة محكومة كلياً أحادية الوجه Single Phase Full-Wave Controlled Rectifier

الحمل المادي Resistive Load

يبين الشكل (٢-٩) دائرة موحد موجة كاملة محكوم كلياً أحادي الوجه، ويتصل هذا الموحد بمصدر جهد كهربائي جيبي جهده الفعال V_s وحمل مادي R . ويتكون هذا الموحد من عدد ٤ ثايرستورات كما هو موضح في الشكل (٢-٩).



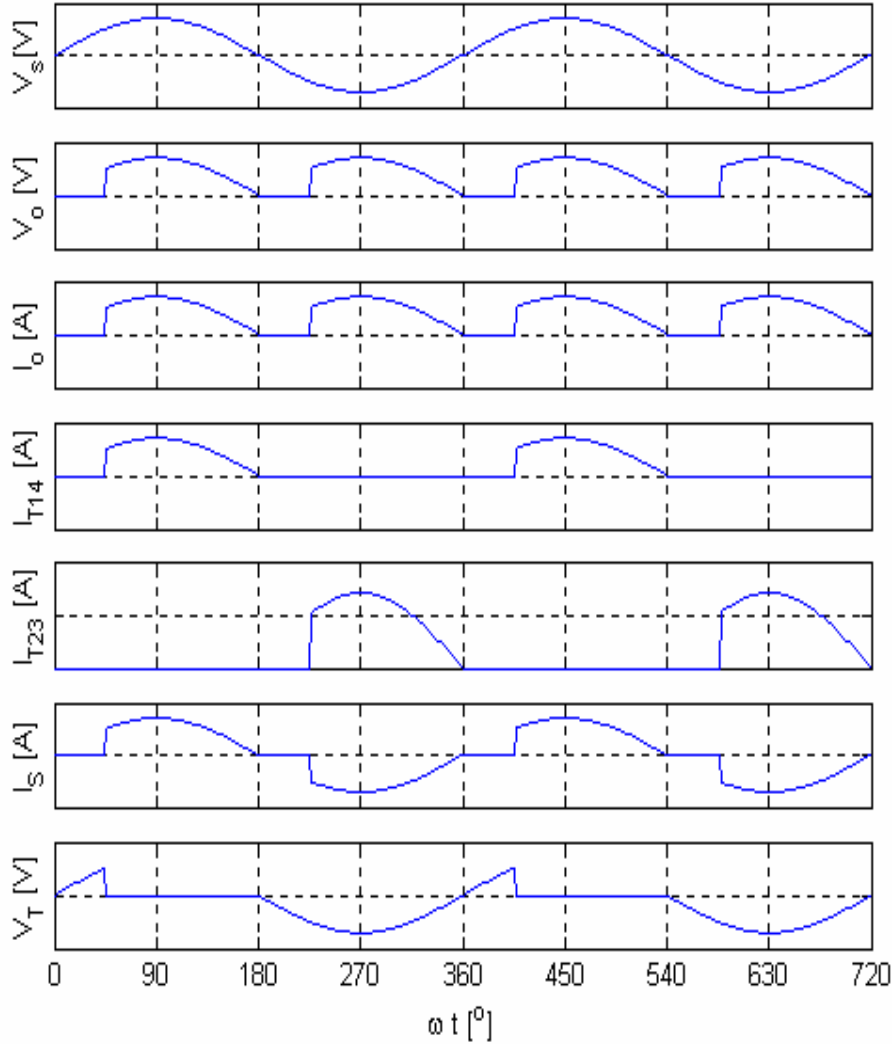
الشكل (٢-٩): دائرة موحد موجة كاملة محكوم كلياً أحادي الوجه متصل بحمل مادي R .

احتياطات واجب مراعاتها لعمل الدائرة:

تبنى فكرة عمل هذه الدائرة على أساس عدم توصيل أي زوج من الثايرستورات العلوية T_1, T_2 أو زوج الثايرستورات السفلية T_3, T_4 معاً في أي لحظة واحدة فسوف يؤدي ذلك إلى وجود دائرة قصر عند أطراف المصدر الكهربائي ذي الجهد الجيبي المتناوب ولهذا السبب فلا بد من توصيل عدد واحد فقط من الثايرستورات العلوية ليعمل مع ثايرستور آخر من الثايرستورات السفلية. ويمكن إعطاء نبضة للثايرستور T_1 ونبضة للثايرستور T_3 في حالتنا هذه خلال الفترة $0 \leq \omega t \leq \pi$ وإعطاء نبضة للثايرستور T_2 ونبضة للثايرستور T_4 في حالتنا هذه خلال الفترة $\pi \leq \omega t \leq 2\pi$ ولا بد من عزل كهربائي لبوابات كل ثايرستور عن طريق استخدام محولات النبضة 'Pulse Transformer' والعوازل الضوئية 'Opto-Coupler'.

فكرة عمل الدائرة:

يمكن شرح فكرة عمل الدائرة المبينة بالشكل (٢-٩) بالاستعانة بموجات هذه الدائرة والمبينة بالشكل (٢-١٠). يتم إعطاء نبضة لكلا من الثايرستور T_1 و الثايرستور T_2 بزاوية إشعال α وذلك خلال الفترة الزمنية لنصف الدورة الموجبة $\pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha$ وعند وصول هذه النبضات إلى بوابتي الثايرستوران T_1, T_2 بتيار كما في لإشعالهما فسوف يكون كل من هذين الثايرستورين في حالة انحياز أمامي حيث يكون جهد كل أنود خاص بأي ثايرستور أعلى من جهد الكاثود الخاص به وبالتالي سوف يوصل كلا من هذين الثايرستورين ويمر التيار عبر الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربائي V_s و الثايرستور T_1 والحمل المادي R و الثايرستور T_2 ويصبح جهد الخرج V_o والناشئ على أطراف الحمل المادي R له قيمة مساوية لجهد الدخل (المصدر الكهربائي) خلال هذه الفترة الزمنية. وخلال الجزء الآخر لدورة الجهد أي خلال نصف السالب لدورة الجهد يتم إشعال الثايرستورين T_2, T_1 أي إعطاء نبضات لأطراف البوابات الخاصة بهما عند زاوية إشعال قيمتها $\pi + \alpha$ فيتم مرور التيار عبر الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربائي الجيبي و الثايرستور T_2 و الحمل المادي R و الثايرستور T_1 و نلاحظ بأن الفرق بين زوايا إشعال الثايرستوران T_2, T_1 يكون قيمته 180° و أيضا يكون اتجاه سريان التيار الكهربائي دائما في الحمل في اتجاه واحد ويكون من أعلى إلى أسفل أي له قطبية واحدة وأن قيمة تيار الثايرستور T_1 هو نفسه قيمة تيار الثايرستور T_2 بينما قيمة تيار الثايرستور T_2 هو نفسه قيمة تيار الثايرستور T_1 ويكون شكل موجة الجهد على أطراف أي ثايرستور V_{AK} يكون جزء من موجة المصدر الكهربائي الجيبي ويكون أيضا شكل موجة تيار المصدر الكهربائي i_s جزء من موجة جيبيية تحتوي على أجزاء سالبة أجزاء موجبة أي عبارة عن موجة متناوبة بينما شكل موجة تيار الخرج i_o يكون لها قطبية موجبة واحدة أي موجة مستمرة حيث يسير التيار في الحمل في اتجاه واحد. وحيث أن كلا من موجتي جهد وتيار الحمل تتكرر كل فترة زمنية قيمتها π فيصبح بالتالي تردد هذه الموجات له قيمة تساوي ضعف تردد المصدر الجيبي المتناوب.



الشكل (٢ - ١٠): الموجات المصاحبة لدائرة موحد موجة كاملة محكوم كلياً أحادي الوجه متصل بحمل مادي 'R' .

القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج:

تكون القيمة المتوسطة لجهد الخرج للحمل الدائرة المبينة بالشكل (٢ - ٩) ضعف القيمة المتوسطة لجهد الخرج للحمل دائرة موحد نصف موجة محكوم والممثل بالدائرة المبينة بالشكل (٢ - ٢) وبالتالي تؤخذ القيمة المتوسطة لجهد الخرج للحمل في حالتنا هذه الصورة التالية:

$$(٢ - ١٥) \quad V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

وتصبح معادلة القيمة المتوسطة لتيار الخرج للحمل في الصورة التالية:

$$(٢- ١٦) \quad I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{V_m}{\pi R} (1 + \cos \alpha)$$

ويمكن كتابة المعادلة (٢- ١٦) بصورة أخرى كالتالي:

$$(٢- ١٧) \quad I_{o(avg)} = \frac{I_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

حيث أن:

V_m هي القيمة العظمى لجهد المصدر الكهربائي الجيبي

V_s هي القيمة الفعالة لجهد المصدر الكهربائي الجيبي

I_m هي القيمة العظمى لتيار الحمل الأقصى علما بأن I_m يمكن كتابته في الصورة التالية:

$$(٢- ١٨) \quad I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{V_s \sqrt{2}}{R}$$

القيمة الفعالة لجهد و تيار الخرج:

يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة الفعالة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل

(٢- ٩) كالاتي:

$$(٢- ١٩) \quad V_{o(rms)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

وأيضاً يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة الفعالة لتيار الخرج كالاتي:

$$(٢- ٢٠) \quad I_{o(rms)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

مثال ٢- ٥:

يتغذى موحد موجة كاملة محكوم كلياً أحادي الوجه من مصدر كهربائي له جهد جيبي قيمته الفعالة $150V$ وتردده 60 Hz ويتصل هذا الموحد بحمل مادي R قيمته $10\ \Omega$. إذا علمت بأن زاوية إشعال الثايرستور قيمتها 30° ، فأوجد:

- القيمة المتوسطة لجهد الحمل $V_{o(avg)}$.

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل $I_{o(avg)}$.

- قيمة تيار الحمل الأقصى I_m .

- القيمة الفعالة لتيار الحمل $I_{o(rms)}$.

- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر P_L .

- تردد موجة الخرج f_o .

- معامل القدرة الكهربية PF .

الحل:

- القيمة المتوسطة لجهد الخرج في حالتنا هذه يمكن حسابها بالمعادلة التالية:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha)$$

$$\therefore V_{o(avg)} = \frac{150\sqrt{2}}{\pi} \cdot (1 + \cos 30^\circ) = 126 \text{ V}$$

- القيمة المتوسطة لتيار الخرج في حالتنا هذه يمكن حسابها كالآتي:

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{126}{10} = 12.6 \text{ A}$$

- القيمة العظمى لتيار الخرج في حالتنا هذه يمكن حسابها كالآتي:

$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{150\sqrt{2}}{10} = 21.2 \text{ A}$$

- القيمة الفعالة لتيار الخرج في حالتنا هذه يمكن حسابها كالآتي:

$$I_{o(rms)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{\left(1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}\right)} = \frac{21.2}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{1 - \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\pi}{180} + \frac{\sin 60^\circ}{2\pi}} = 14.77 \text{ A}$$

- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر يمكن حسابها كالآتي:

$$P_L = I_{rms}^2 R = 14.77^2 \cdot 10 = 2182 \text{ W}$$

- حيث أن تردد موجة الخرج تساوي ضعف قيمة تردد المصدر الكهربائي الجيبي

$$\therefore f_o = 2f = 2 \cdot (60) = 120 \text{ Hz}$$

- يمكن حساب معامل القدرة الكهربائية كالآتي حيث إن القيمة الفعالة لتيار الخرج $I_{o(rms)}$ هي

القيمة الفعالة لتيار الدخل I_s ولذلك

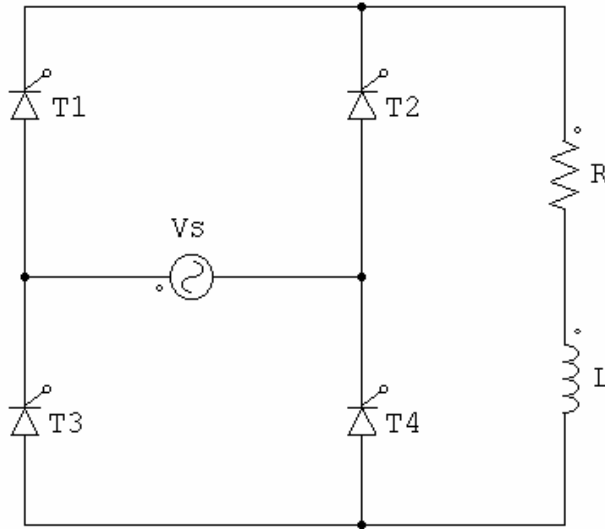
$$PF = \frac{I_{rms}^2 R}{V_s I_{rms}} = \frac{I_{rms} R}{V_s}$$

$$\therefore PF = \frac{14.77 \cdot (10)}{150} = 0.98 \text{ Lag.}$$

حالة الحمل الحثي 'R-L'

يبين الشكل (٢ - ١١) دائرة موحد موجة كاملة محكوم كلياً أحادي الأوجه ويتصل هذا الموحد

بمصدر جهد جيبي متناوب وحمل حثي (R-L).

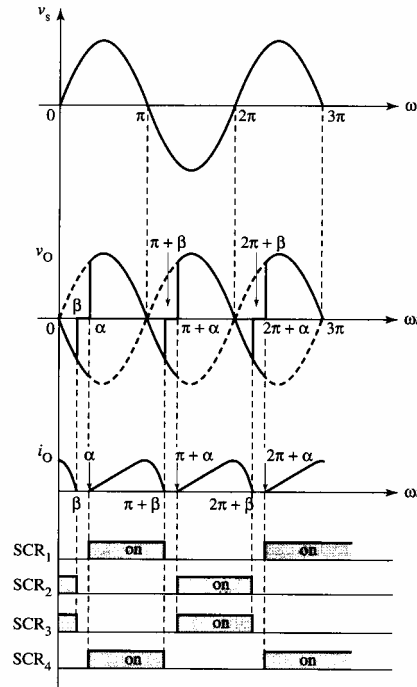


الشكل (٢ - ١١): دائرة موحد موجة كاملة محكوم كلياً أحادي الوجه متصل بحمل حثي 'R-L' .

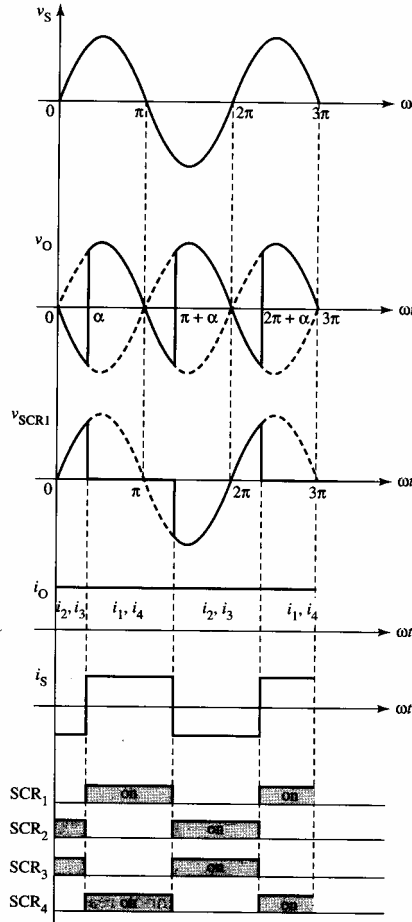
فكرة ومبدأ عمل الدائرة :

كما سبق شرحه في حالة عمل هذه الدائرة بحمل مادي فقط فإن كلا من الثايرستورين T_1, T_4 يوصلان التيار عند زاوية الإشعال أو اللحظة $\alpha = \omega t$ بينما الثايرستوران T_2, T_3 فسوف يوصلان التيار بدءاً من اللحظة أو الزاوية $\alpha + \pi = \omega t$ والشكل (٢ - ١٢) يبين الموجات الخاصة بدائرة هذا الموحد المتصل بحمل حثي. ونلاحظ من هذه الموجات بأنه عند وصول نبضات بزاوية إشعال α لكل من الثايرستورين T_1, T_4 فسوف يمر تيار ومبتدئ بقيمة صفرية في الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربائي V_s و الثايرستور T_1 والحمل الحثي و الثايرستور T_4 وتزداد قيمة هذا التيار حتى اللحظة الزمنية $\omega t = \pi$ و يكون له قيمة غير صفرية عند هذه اللحظة الزمنية يعكس الحالة السابقة لهذا الموحد والمتصل بحمل مادي R بينما جهد الخرج يصل قيمته عند هذه اللحظة إلى قيمة صفرية حيث إن جهد الخرج v_o هو نفسه جهد الدخل V_s ونتيجة للطاقة المغناطيسية المخزنة بالملف فإن التيار سوف يواصل المرور ولكن بقيمة تناقصية حتى تنعدم قيمته عند زاوية الإطفاء β ونلاحظ بأن كلا من الثايرستورين T_1, T_4 في حالة الانحياز الأمامي برغم من وجود قيم سالبة لجهد الخرج v_o خلال الفترة الزمنية $\pi < \omega t < \beta$ وهذا يعود إلى الطاقة المخزنة في الملف حيث إن الملف الحثي L دائماً ما يسبب جهد عكسي نتيجة لزيادة أو نقصان قيمة التيار. ونلاحظ من الشكل (٢ - ١٢) بأنه عند وصول نبضة لكل من الثايرستورين T_2, T_3 عند اللحظة الزمنية $\omega t = \pi + \alpha$ فإن كلا من هذين الثايرستورين سوف يصبح في حالة الانحياز الأمامي ويمر تيار في الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربائي V_s و الثايرستور T_2 والحمل الحثي و الثايرستور

T_r ويبدأ هذا التيار بقيمة صفرية ويزداد تدريجياً ثم يقل حتى يصل إلى قيمة صفرية مرة أخرى عند اللحظة الزمنية $\omega t = \pi + \beta$ ونلاحظ بأن تيار الخرج عبارة عن موجة مستمرة ودالة غير متصلة وهذا في حالة الحمل الحثي الذي له ممانعة حثية ωL قليلة بينما يكون شكل موجة هذا التيار عبارة عن دالة متصلة وخالية تقريبا من التموجات وذلك في حالة الحمل الحثي الذي له ممانعة حثية عالية جدا بالنسبة لمقاومته المادية حيث تزداد قيمة الطاقة المخزنة والموجودة بالملف بزيادة قيمة الممانعة الحثية للملف وشكلي (٢- ١٢)، (٢- ١٣) يبيننا شكل موجات هذه الدائرة وتأثير القيمة الحثية للملف. ونلاحظ من الشكل (٢- ١٢) بأن موجة تيار الخرج عبارة عن موجة تيار مستمر وتتكرر هذه الموجة كل فترة زمنية قيمتها 180° بينما موجة تيار الدخل أي موجة تيار المصدر الكهربائي i_s عبارة عن موجة متناوبة تتكرر كل فترة زمنية قيمتها 360° ونلاحظ أيضا من الشكل (٢- ١٣) بأن قيمة زاوية الإطفاء β قيمتها $\pi + \alpha$ في حالة الحمل الحثي الذي له ممانعة حثية عالية جدا وشكل موجة الدخل أو موجة المصدر الكهربائي عبارة عن موجة مستطيلة الشكل تقريبا بينما شكل موجة تيار الخرج عبارة عن موجة مستمرة خالية من أي تموجات أو مركبات تيار متردد.



الشكل (٢- ١٢): الموجات المصاحبة لدائرة موحد موجة كاملة محكوم كلياً أحادي الوجه متصل بحمل حثي 'R-L' ذي ممانعة حثية صغيرة.



الشكل (٢- ١٣): الموجات المصاحبة لدائرة موحد موجة كاملة محكوم كلياً أحادي الوجه متصل بحمل حثي ذي ممانعة حثية عالية جداً.

القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج:

يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢- ١١) وفي حالة الحمل الحثي القليل (حالة الدالة غير المتصلة) كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi} \cdot (\cos \alpha - \cos \beta) \quad (٢- ٢١)$$

بينما يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢- ١١) وفي حالة الحمل الحثي الكبير جداً (حالة الدالة المتصلة) والذي له ممانعة حثية الكبر بكثير من مقاومته المادية كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{2}{\pi} \cdot V_m \cos \alpha \quad (٢- ٢٢)$$

وحيث أن القيمة المتوسطة لتيار الخرج $I_{o(avg)}$ يساوي $V_{o(avg)}/R$

وبالتالي يمكن كتابة تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢- ١١) وفي حالة الحمل الحثي القليل (حالة الدالة غير المتصلة) كالآتي:

$$I_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi R} (\cos \alpha - \cos \beta) \quad (٢- ٢٣)$$

و أيضا يمكن كتابة تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢- ١١) وفي حالة الحمل الحثي العالي (حالة الدالة المتصلة) كالآتي:

$$I_{o(avg)} = \frac{2}{\pi R} V_m \cos \alpha \quad (٢- ٢٤)$$

نلاحظ من المعادلة (٢- ٢٢) بأن القيمة المتوسطة لجهد الخرج لها قيمة موجبة وذلك عند قرح الثايرستور بزواوية إشعال تقع ما بين 0° و 90° ويعمل الموحد كمحول للجهد المتناوب إلى جهد مستمر (rectifier) بينما عند قرح الثايرستور بزواوية إشعال تقع ما بين 90° و 180° تكون قيمة جهد الخرج المتوسطة لها قيمة سالبة ويعمل الموحد كمحول عكسي للتيار المستمر (inverter) و يتم خلال هذه الفترة الزمنية استرجاع بعض من القدرة الكهربائية إلى المصدر الكهربائي وعلى هذا الأساس يعمل موحد موجة كاملة أحادي الوجه والمتصل بحمل حثي كبير جدا في ربعين (٢-Quadrant) ويمكن استخدام هذه الأنواع من الموحدات للتحكم في سرعة محركات التيار المستمر والتحكم في اتجاه دورانها في اتجاهين متعاكسين وذلك عن طريق التحكم في قيمة زاوية إشعال الثايرستور.

الجهد الناتج على طرفي الثايرستور V_{AK} :

كما سبق شرحه مسبقا فعندما يكون الثايرستور T_1 فيكون الثايرستور T_2 مفصولاً (مفتوح) والعكس صحيح و لإيجاد فرق الجهد على طرفي أي منهما وليكن الثايرستور T_2 وذلك عندما يكون هذا الثايرستور مفصولاً بينما الثايرستور T_1 مغلق و لإيجاد قيمة فرق الجهد هذه فيمكننا إيجادها بأخذ الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربائي V_s و الثايرستور T_1 و الثايرستور T_2 وبتطبيق قانون كيرشوف على هذه الدائرة يمكننا الحصول على المعادلة التالية:

$$V_{T2} = V_s + V_{T1} \quad (٢- ٢٥)$$

ونتيجة لمرور التيار عبر الثايرستور T_1 فإن فرق الجهد عليه تقريبا له قيمة صفرية وبالتالي تصبح

$$V_{T2} = V_s \quad \text{أي أن } V_s \text{ يساوي قيمة جهد المصدر الكهربائي } V_s \text{ أي أن } V_{T2} = V_s.$$

مثال ٢ - ٦:

يتغذى موحد موجة كاملة محكوم من مصدر كهربى أحادى الوجه ذي جهد جيبي قيمته الفعالة 230V وتردده 60 Hz ويتصل هذا الموحد بحمل حثي ممانعته الحثية أكبر بكثير من مقاومته المادية $R \gg \omega L$ وقيمة مقاومته المادية $0.5\ \Omega$. أوجد قيمة زاوية إشعال الثايرستور عندما تكون القيمة المتوسطة لجهد الحمل 200 V .

الحل:

يمكن إيجاد قيمة زاوية إشعال الثايرستور في الحمل الحثي الذي له $R \gg \omega L$ مستخدماً المعادلة (٢-٢٢) كالآتي:

$$V_{o(\text{avg})} = \frac{2}{\pi} \cdot V_m \cos \alpha$$

$$\therefore 200 = \frac{2}{\pi} \cdot (230\sqrt{2}) \cdot \cos \alpha$$

$$\therefore \cos \alpha = 0.966 \qquad \therefore \alpha = 15^\circ$$

مثال ٢ - ٧:

يتغذى موحد موجة كاملة محكوم من مصدر كهربى أحادي الوجه له جهد جيبي قيمته الفعالة 120V وتردده 60 Hz ويتصل هذا الموحد بحمل حثي ممانعته الحثية أكبر بكثير من مقاومته المادية $R \gg \omega L$ وقيمة مقاومته المادية $10\ \Omega$. إذا علمت بأن قيمة زاوية إشعال الثايرستور 30° ، فأوجد:

- القيمة المتوسطة لجهد الحمل $V_{o(\text{avg})}$.
- القيمة المتوسطة لتيار الحمل $I_{o(\text{avg})}$.
- القيمة العظمى لتيار الحمل I_m .
- القيمة الفعالة لتيار الحمل $I_{o(\text{rms})}$.
- القيمة المتوسطة لتيار الخاص بكل ثايرستور $I_{o\text{Th}}$.
- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر P_L .
- معامل القدرة الكهربائية PF .

الحل:

- القيمة العظمى لجهد المصدر الكهربى والحمل V_m

$$V_m = V_s \sqrt{2} = 120\sqrt{2} = 170\text{ V}$$

- القيمة المتوسطة لجهد الخرج (الحمل)

$$V_{o(avg)} = \frac{2}{\pi} \cdot V_m \cos \alpha = \frac{2}{\pi} \cdot 170 \cdot \cos 30^\circ = 94 \text{ V}$$

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{94}{10} = 9.4 \text{ A}$$

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل في حالتنا هذه هي القيمة العظمى لتيار الحمل حيث إن شكل موجة الحمل لها قيمة ثابتة وبالتالي:

$$I_m = I_{o(avg)} = 9.4 \text{ A}$$

- القيمة الفعالة لتيار الحمل يساوي أيضا القيمة المتوسطة لتيار الحمل في حالتنا هذه وبالتالي:

$$I_{orms} = I_{o(avg)} = 9.4 \text{ A}$$

- حيث أن كل ثايرستور يوصل نصف دورة 180° كل دورة وبالتالي تكون القيمة المتوسطة لتيار أي ثايرستور تساوي نصف القيمة المتوسطة لتيار الحمل

$$I_{oTh} = \frac{1}{2} I_{o(avg)} = \frac{9.4}{2} = 4.7 \text{ A}$$

- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر

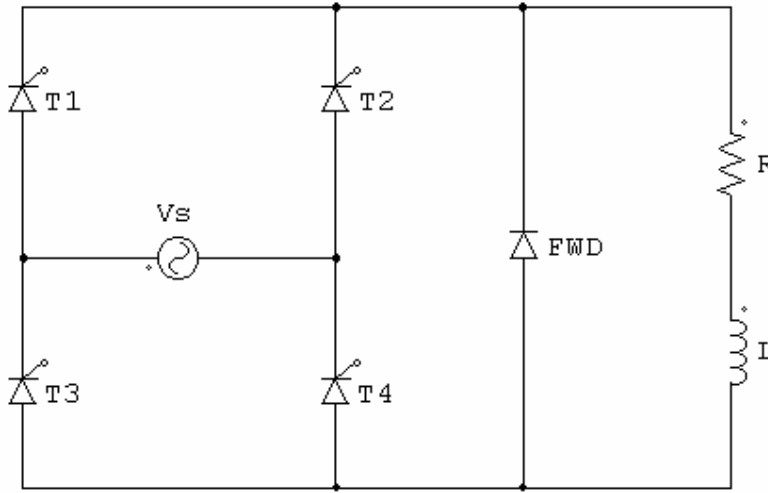
$$P_L = I_{orms}^2 R = 9.4^2 \cdot 10 = 883.3 \text{ W}$$

- حيث أن القيمة الفعالة لتيار الحمل هي نفسها القيمة المتوسطة لتيار الحمل وبالتالي يمكن تعيين معامل القدرة الكهربائية للمصدر الكهربائي كالآتي:

$$PF = \frac{I_{orms}^2 R}{V_s I_{orms}} = \frac{I_{orms} R}{V_s} = \frac{94}{120} = 0.78 \text{ Lag.}$$

حالة الحمل الحثي مع وجود دايود حدافه:

كما سبق دراسته من الدائرة السابقة والمبينة بالشكل (٢- ١١) بأن لها بعض المزايا وبعض العيوب وأهم ميزة للدائرة هو إمكانية التحكم في الخرج (الحمل) في اتجاهين ووجود قيمة سالبة في موجة جهد الخرج يعتبر من أهم عيوب الدائرة. وهذا الجزء السالب يؤدي إلى تقليل القيمة المتوسطة لجهد الخرج ويمكن التغلب على هذا العيب بوضع دايود حدافة على التوازي مع أطراف الحمل كما هو مبين بالدائرة الموضحة بالشكل (٢- ١٤) لإزالة هذا الجزء السالب من موجة خرج الجهد.



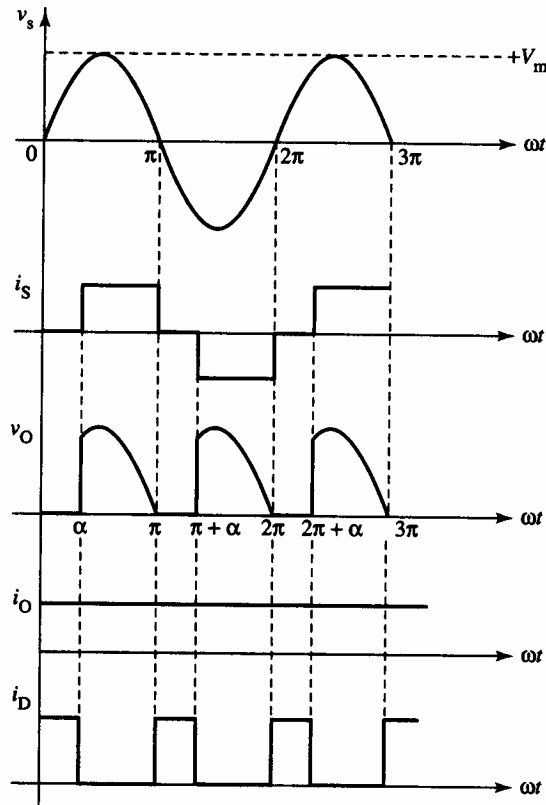
الشكل (٢- ١٤): دائرة موحد موجة كاملة محكوم كلياً أحادي الوجه متصل بحمل حثي و دايود حدافه.

فكرة ومبدأ عمل الدائرة

يمكن شرح مبدأ عمل الدائرة المبينة بالشكل (٢- ١٤) بالاستعانة بموجات الدائرة والمبينة بالشكل (٢- ١٥) وبفرض أن الدائرة متصلة بحمل حثي له ممانعة حثية اكبر بكثير من مقاومته المادية $R \ll \omega L$ وعلى أساس هذا الفرض فيمكن شرح الدائرة كالآتي:

عندما يتم إعطاء نبضة كهربية لبوابات كل من الثايرستورين T_1, T_3 فسوف يوصلان التيار عند زاوية الإشعال أو اللحظة α $\omega t = \alpha$ ويمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الكهربائي V_s و الثايرستور T_1 والحمل الحثي و الثايرستور T_3 ويستمر مرور هذا التيار بقيمة ثابتة حتى اللحظة الزمنية $\omega t = \pi$ ونلاحظ خلال هذه الفترة الزمنية $(\alpha \leq \omega t \leq \pi)$ بأن الدايدو الحدافه في وضع انحياز خلفي ولا يمر فيه أي تيار تقريباً. نلاحظ من موجتي خرج التيار والجهد بأن هذا التيار مازال له نفس القيمة حتى اللحظة $\omega t = \pi$ لوجود الحمل الحثي برغم من وصول قيمة جهد الخرج لقيمة صفرية عند هذه اللحظة الزمنية ونلاحظ أيضاً إزالة أي جزء سالب في موجة خرج الجهد نتيجة لوجود الدايدو الحدافه في الدائرة خلال الفترة الزمنية $(\pi \leq \omega t \leq \pi + \alpha)$ حيث يكون هذا الدايدو في وضع انحياز أمامي ويمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي و الدايدو الحدافه حيث يكون جميع الثايرستورات مغلقة خلال هذه الفترة الزمنية وتكون قيمة تيار المصدر الكهربائي i_s صفرية خلال هذه الفترة الزمنية بينما تكونا قيمة تيار الحمل لها نفس القيمة الثابتة للتيار خلال هذه الفترة الزمنية وعند اللحظة $\omega t + \pi$ سوف تأتي نبضة كهربية لكلا من بوابتي الثايرستوران T_2, T_4 ويمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من

المصدر الكهربائي و الثايرستور T_1 والحمل الحثي و الثايرستور T_2 محتفظا تيار الحمل بنفس قيمته السابقة بينما تكون قيمة جهد الحمل هي نفسها قيمة جهد المصدر ولكن بإشارة سالبة $v_o = -v_s$ ويستمر هذا الوضع حتى اللحظة $\omega t = 2\pi$ وعند هذه اللحظة سوف يتم توصيل الدايمود الحذافة مرة أخرى حتى اللحظة $\omega t = 2\pi + \alpha$ ويمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي و الدايمود الحذافة بنفس قيمة تيار الحمل السابقة بينما تكون قيمة جهد الحمل صفرية وقيمة تيار المصدر أيضا له قيمة صفرية خلال هذه الفترة الزمنية ثم يتكرر عمل الدائرة مرة أخرى عند إعطاء نبضة كهربية لبوابات كل من الثايرستورين T_1, T_2 . نلاحظ من الشكل (٢-١٥) بأن موجة تيار الحمل عبارة عن تيار له قيمة ثابتة وعلى شكل دالة متصلة بينما موجة تيار المصدر الكهربائي عبارة عن شكل موجة مربعة بقيمة ثابتة ولكن له دالة غير متصلة والفترات الزمنية التي لا يمر فيها تيار خلال المصدر سوف يمر فيها تيار في الدايمود الحذافة.



الشكل (٢-١٥): الموجات المصاحبة لدائرة موحد موجة كاملة محكوم كلياً أحادي الوجه متصل بحمل حثي له ممانعة حثية عالية جداً مع دايمود حذافة.

القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج:

بمقارنة موجتي جهد خرج الحمل بالشكلي (٢- ١٠)، (٢- ١٥) نلاحظ أنهما لهما نفس شكل الموجة وبالتالي يمكن تمثيل المعادلة الرياضية للقيمة المتوسطة لجهد الخرج في حالتنا هذه بنفس المعادلة الرياضية في حالة توصيل هذه الدائرة بحمل مادي فقط (معادلة (٢,١٥)) كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (٢- ٢٦)$$

وبالتالي تصبح معادلة القيمة المتوسطة لتيار الحمل

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{V_m}{\pi R} (1 + \cos \alpha) \quad (٢- ٢٧)$$

القيمة المتوسطة لتيار الدايمود الحذافه

حيث أن شكل موجة الدايمود الحذافه الشكل (٢- ١٥) هي جزء من موجة تيار الحمل وبالتالي يمكن كتابة معادلة القيمة المتوسطة لتيار للدايمود الحذافه في حالة وجود حمل حثي له ممانعة حثية كبيرة جداً بالنسبة إلى قيمة مقاومته المادية عن طريق حسابه في دورة زمنية كاملة أي كل 2π حيث يمر التيار خلال الدايمود الحذافه كل فترة زمنية تقدر بقيمة زاوية الإشعال α في كل دورة زمنية كاملة وبالتالي تصبح معادلة القيمة المتوسطة لتيار للدايمود الحذافه كالآتي:

$$I_{D(avg)} = I_{o(avg)} \cdot \frac{\alpha}{\pi} = \frac{\alpha V_m}{\pi^2 R} (1 + \cos \alpha) \quad (٢- ٢٨)$$

مثال ٢- ٨:

يتغذى موحد موجة كاملة محكوم من مصدر كهربى أحادي الوجه له جهد جيبي قيمته الفعالة $120V$ وتردده 60 Hz ويتصل هذا الموحد بحمل حثي ممانعته الحثية أكبر بكثير من مقاومته المادية $\omega L \gg R$ وقيمة مقاومته المادية 10Ω مع دايمود حذافه. إذا علمت بأن قيمة زاوية إشعال الثايرستور 30° ، فأوجد:

- القيمة المتوسطة لجهد الحمل V_o .
- القيمة المتوسطة لتيار الحمل $I_{o(avg)}$.
- القيمة العظمى لتيار الحمل I_m .
- القيمة الفعالة لتيار الحمل I_{orms} .
- القيمة المتوسطة لتيار المار بالدايمود الحذافه $I_{D(avg)}$.
- القيمة المتوسطة لتيار الخاص بكل ثايرستور I_{oTh} .

- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر 'P_L'.

- معامل القدرة الكهربية 'PF'.

الحل:

- القيمة العظمى لجهد المصدر الكهربائي والحمل 'V_m'

$$V_m = V_s \sqrt{2} = 120\sqrt{2} = 170 \text{ V}$$

- القيمة المتوسطة لجهد الخرج (الحمل)

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi} \cdot (1 + \cos \alpha) = \frac{170}{\pi} \cdot (1 + \cos 30^\circ) = 101 \text{ V}$$

- قيمة تيار الحمل المتوسط

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{101}{10} = 10.1 \text{ A}$$

- قيمة تيار الحمل المتوسط في حالتنا هذه هي قيمة تيار الحمل الأقصى حيث إن شكل موجة

الحمل لها قيمة ثابتة وبالتالي

$$I_m = I_{o(avg)} = 10.1 \text{ A}$$

- القيمة الفعالة لتيار الحمل هي نفس قيمة تيار الحمل المتوسط في حالتنا هذه

$$I_{orms} = I_{o(avg)} = 10.1 \text{ A}$$

- القيمة المتوسطة للدايود الحدافه

$$I_{D(avg)} = I_{o(avg)} \cdot \frac{\alpha}{\pi} = 10.1 \left(\frac{30}{180} \right) = 1.683 \text{ A}$$

- كل ثايرستور سوف يوصل كل ١٨٠° حيث إن زاوية إشعال الثايرستور تساوي ٣٠° وبالتالي

يمكن تعيين القيمة المتوسطة لتيار أي ثايرستور كالتالي

$$I_{oTh} = \frac{(\pi - \alpha)}{2\pi} \cdot I_{o(avg)} = \frac{150}{360} \cdot (10.1) = 4.21 \text{ A}$$

- القدرة المسحوبة من المصدر

$$P_L = I_{orms}^2 R = (10.1)^2 \cdot 10 = 1020 \text{ W}$$

- معامل القدرة الكهربية يعين كالآتي:

$$(I) \quad PF = \frac{P_L}{V_s I_{srms}} = \frac{1020}{120 I_{srms}}$$

حيث أن I_{s(rms)} هي القيمة الفعالة لتيار المصدر الكهربائي وتعين كالآتي:

$$(II) \quad I_{srms} = I_{o(avg)} \sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}} = 10.1 \sqrt{\frac{150}{180}} = 9.22 \text{ A}$$

بالتعويض من معادلة (II) في المعادلة (I) ينتج أن:

$$PF = \frac{1'020}{120 \cdot (9.22)} = 0.92 \text{ Lag.}$$

نلاحظ من نتائج هذا المثال والمثال السابق أن معامل القدرة الكهربائية في حالة وجود الدايدود الحذافة لموحد موجة كاملة محكومة كلياً يكون له قيمة أفضل من حالة عدم وجود الدايدود الحذافة برغم أن موجة تيار المصدر الكهربائي تكون على شكل دالة غير متصلة.

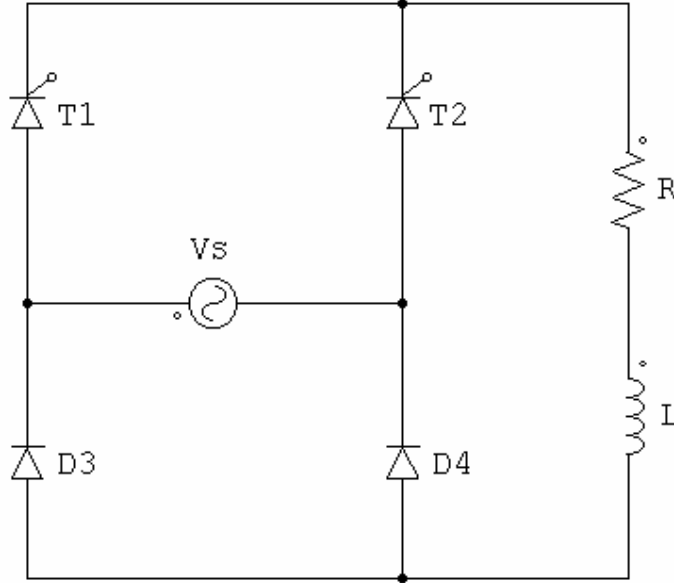
موحدات موجة كاملة نصف محكومة أحادية الوجه مع الحمل الحثي 'R-L'

Single-Phase Full-Wave Half-Controlled Rectifiers with an Inductive Load

كما تم شرحه مسبقاً في حالة موحد موجة كاملة محكوم كلياً فإن هذا الموحد يمكن أن يكون له قيمة موجبة أو قيمة سالبة لجهد الحمل المتوسط حيث عند عمله بقيمة موجبة لهذا الجهد فإن الموحد سوف يغذي القدرة الكهربائية من مصدر الجهد المتناوب إلى الحمل الموجود على أطراف خرج الموحد بينما عند عمله بقيمة سالبة لجهد الحمل المتوسط فإن الموحد سوف يعكس اتجاه القدرة أي يتم تحويل اتجاه القدرة من الحمل الموجود على أطراف خرج الموحد إلى مصدر الجهد المتناوب أي أن الموحد موجة كاملة المحكوم كلياً يمكن عمله في اتجاهين أو ربعين مختلفين ولكن في بعض التطبيقات العملية يتطلب اتجاه سريان وحيد للقدرة وتكون من مصدر الجهد المتناوب إلى الحمل الموجود على أطراف خرج الموحد ويمكن تسمية هذا النوع من الموحديات بالموحد الذي يعمل في ربع واحد (1-Quadrant) والشكل (٢-١٦) يبين شكلاً أساسياً من أشكال دائرة الموحد القنطري ونلاحظ أن شكل الدائرة المبينة بالشكل (٢-١٦) يختلف عن شكل الدائرة المبينة بالشكل (٢-١٠) حيث تم إحلال كلا من الثايرستوران T_1, T_2 بالديودان D_1, D_2 كما مبين بالشكل (٢-١٦).

مبدأ عمل دائرة موحد موجة كاملة نصف محكوم أحادي الوجه

يمكن شرح مبدأ عمل الدائرة بالاستعانة بموجات الدائرة والمبينة بالشكل (٢-١٧) وبفرض أن الدائرة متصلة بحمل حثي له ممانعة حثية أكبر بكثير من مقاومته المادية $R \ll \omega L$ وعلى أساس هذا الفرض فيمكن شرح الدائرة كالآتي:



شكل (٢-١٦): دائرة موحد موجة كاملة نصف محكوم أحادي الوجه متصل بحمل حثي 'R-L'.

عند إعطاء نبضة كهربية لبوابة الثايرستور T_1 بزاوية إشعال α في نصف الموجب لدورة جهد المصدر الجيبي المتناوب فسوف يوصل الثايرستور ويمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد المتناوب v_s' و الثايرستور T_1 والحمل الحثي و الدايمود D_4 ويستمر مرور التيار في الدائرة حتى اللحظة $\omega t = \pi$ أي أن التيار سوف يمر في هذه الدائرة خلال الفترة الزمنية $\alpha \leq \omega t \leq \pi$ ويكون تيار الخرج i_o' له نفس قيمة تيار المصدر الجيبي المتناوب i_s' خلال هذه الفترة الزمنية ويكون أيضا شكل موجة جهد الحمل لها نفس شكل موجة جهد المصدر الجيبي خلال هذه الفترة الزمنية ونلاحظ بأن قيمة جهد الحمل عند اللحظة $\omega t = \pi$ له قيمة صفرية ولا يمكن أن يصل قيمة جهد الحمل إلى قيمة سالبة بعد هذه اللحظة الزمنية حيث إن تيار الحمل i_o' سوف يتحول مروره من الدائرة السابقة إلى الدائرة المغلقة والمكونة من الثايرستور T_1' و الحمل الحثي و الدايمود D_3 ويستمر مرور هذا التيار في الحمل الحثي حتى اللحظة $\omega t = \pi + \alpha$ وتكون قيمة تيار المصدر الجيبي المتناوب يساوي قيمة صفرية خلال هذه الفترة الزمنية و أيضا قيمة جهد الخرج يساوي قيمة صفرية خلال هذه الفترة الزمنية وبالتالي يقوم كل من الثايرستور و الدايمود بعمل الدايمود الحذافة في الدائرة المبينة بالشكل (٢-١٤). وعند إعطاء نبضة كهربية لبوابة الثايرستور عند اللحظة فسوف يتحول مرور التيار من الدائرة المغلقة السابقة إلى الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد المتناوب v_s' و الثايرستور T_1' والحمل الحثي و الدايمود D_3 ويستمر مرور التيار في هذه الدائرة حتى اللحظة $\omega t = 2\pi$ أي أن التيار سوف يمر في هذه الدائرة خلال الفترة الزمنية $\pi + \alpha \leq \omega t \leq 2\pi$ وتكون

قيمة تيار الحمل خلال هذه الفترة مساوية لقيمة تيار المصدر الجيبي ولكن بقيمة سالبة حيث يمر تيار المصدر الجيبي في اتجاه عكسي وهذا أيضا ينطبق على جهد الحمل والذي له نفس قيمة جهد المصدر الجيبي ولكن بقيمة سالبة وخلال الفترة الزمنية $2\pi \leq \omega t \leq 2\pi + \alpha$ سوف يتحول مرور التيار من هذه الدائرة إلى الدائرة المغلقة والمكونة من الثايرستور T_1 والحمل الحثي و الداوود D_1 ونلاحظ بأن قيمة تيار المصدر الكهربي قيمته صفرية خلال هذه الفترة الزمنية وأن كلا من الثايرستور T_1 و الداوود D_1 يقوموا بعمل الداوود الحذافة في الدائرة المبينة بالشكل (٢- ١٤).

نلاحظ بأن تيار الحمل له قيمة ثابتة وتيار المصدر الجيبي المصدر له شكل موجة مربعة وأن موجة هذين التيارين يمكن الحصول عليهما باستخدام الدائرة المبينة بشكل (٢- ١٤) وبالتالي تكون هاتان الدائرتان متكافئتين.

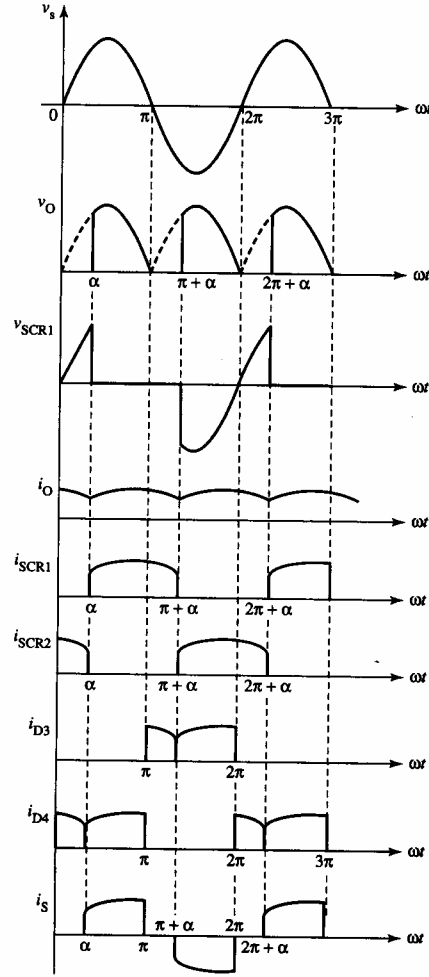
القيمة المتوسطة لجهد وتيار الحمل

حيث أن دائرة موحد موجة كاملة نصف محكوم والمبينة بشكل (٢- ١٦) تقوم بنفس وظيفة الدائرة المبينة بالشكل (٢- ١٤) وبالتالي تصبح معادلات القيمة المتوسطة لجهد وتيار الحمل هي نفس المعادلات (٢- ٢٦) ، (٢- ٢٧) للدائرة المبينة بالشكل (٢- ١٤) وهما:

$$(٢- ٢٩) \quad V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha)$$

وبالتالي تصبح معادلة القيمة المتوسطة لتيار الحمل

$$(٢- ٣٠) \quad I_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi R} (1 + \cos \alpha)$$



الشكل (٢- ١٧): الموجات المصاحبة لدائرة موحد قنطرة نصف محكوم كامل الموجة متصل بحمل حثي له ممانعة حثية عالية جدا.

مثال ٢- ٩:

ارسم شكل موجة الخرج v_o لدائرة موحد موجة كاملة نصف محكوم أحادي الوجه والمبينة بالشكل (٢- ١٦) الموجة من مصدر كهربى أحادى الوجه له جهد جيبي قيمته الفعالة $120V$ وتردده 60 Hz ويتصل هذا الموحد بحمل حثي ممانعته الحثية أكبر بكثير من مقاومته المادية $R \gg \omega L$ وقيمة مقاومته المادية 10Ω عندما تكون قيمة زاوية إشعال الثايرستور:

(أ) $\alpha = 0$.

(ب) $\alpha = 45^\circ$.

(ج) $\alpha = 90^\circ$.

(د) $\alpha = 135^\circ$.

الحل:

كما سبق شرحه وتفسيره بأن موجة خرج جهد الحمل لدائرة موحد موجة كاملة نصف محكوم أحادي الوجه تخلو من وجود أي جزء سالب سواء في حالة الحمل المادي أو الحمل الحثي وموجة جهد الحمل تكون محكومة عن طريق زاوية الإشعال α .

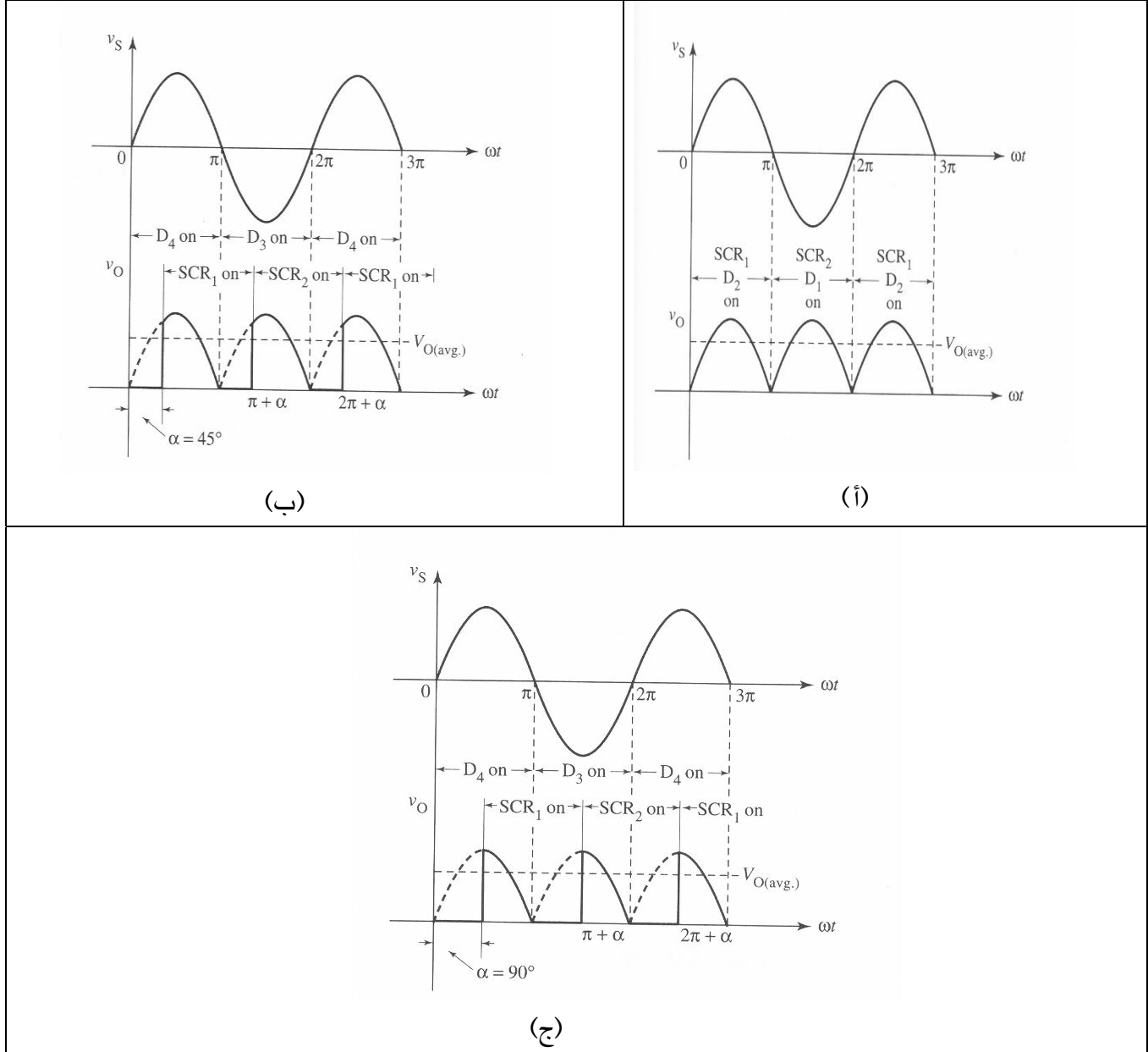
(أ) خلال نصف الموجة الموجب لموجة مصدر الجهد المتناوب يكون كلا من الثايرستور T_1 والدايود D_1 في حالة توصيل حيث يبدأ التوصيل عند زاوية الإشعال $\alpha = 0$ وتصبح قيمة جهد الخرج مساوية لقيمة جهد المصدر الجيبي وخلال النصف السالب لموجة مصدر الجهد المتناوب يكون كلا من الثايرستور T_2 والدايود D_2 في حالة توصيل وتصبح قيمة جهد الخرج مساوية لقيمة جهد المصدر الجيبي ولكن بقيمة سالبة وشكل (٢- ١٨) (أ) يبين كلا من موجتي جهد المصدر الجيبي v_s وجهد الخرج v_o .

(ب) عند قرح الثايرستور بزاوية الإشعال فإن كلا من الثايرستور T_1 والدايود D_1 سوف يوصلان ويبدأ التوصيل ابتداء من اللحظة $\omega = 45^\circ$ حتى اللحظة $\omega = \pi$ بينما خلال الفترة الزمنية $0 \leq \omega t \leq 45^\circ$ تصبح قيمة جهد الخرج له قيمة صفرية نتيجة لعدم وجود أي نبضة كهربية عند طرف بوابة الثايرستور T_1 وأيضاً تصبح قيمة جهد الخرج v_o له قيمة صفرية خلال الفترة الزمنية $0 \leq \omega t \leq 225^\circ$ حتى تأتي نبضة كهربية لبوابة الثايرستور T_2 وعندما تأتي هذه النبضة فإن كلا من الثايرستور T_2 والدايود D_2 سوف يوصلا وتصبح قيمة جهد الخرج هي نفسها قيمة جهد المصدر الجيبي المتناوب ولكن بإشارة سالبة وشكل (٢- ١٨) (ب) يبين كلا من موجتي جهد المصدر الجيبي v_s وجهد الخرج v_o .

(ج) كما شرحه بالتفصيل بالأجزاء (أ) و (ب) يمكن استنتاج موجة خرج الحمل كالتالي:

خلال الفترة الزمنية $0 \leq \omega t \leq 90^\circ$ تكون قيمة جهد الخرج لها صفرية وتكون قيمة هذا الجهد خلال الفترة الزمنية $90^\circ \leq \omega t \leq 180^\circ$ مساوية لقيمة جهد المصدر الجيبي المتناوب ويكون كل من الثايرستور T_1 والدايود D_1 في حالة توصيل للتيار الكهربى وأيضاً يصبح قيمة جهد الخرج له قيمة صفرية خلال الفترة الزمنية $180^\circ \leq \omega t \leq 270^\circ$ ثم يصبح له قيمة مساوية وبإشارة سالبة لقيمة جهد المصدر الكهربى الجيبي خلال الفترة الزمنية $270^\circ \leq \omega t \leq 360^\circ$ ويبين شكل (٢- ١٨) (ج) كلا من موجتي جهد المصدر الجيبي v_s وجهد الخرج v_o .

(د) كما شرحه بالتفصيل بالأجزاء (أ)، (ب) و (ج) يمكن استنتاج موجة خرج الحمل والشكل (٢- ١٨) (د) يبين كلا من موجتي جهد المصدر الجيبي 'v_s' وجهد الخرج 'v_o'.



شكل (٢- ١٨): موجة جهد المصدر الجيبي وموجة جهد الخرج لموحد قنطرة نصف محكوم كامل الموجة متصل بحمل حتى له ممانعة حثية عالية جدا.

أسئلة و تمارين :

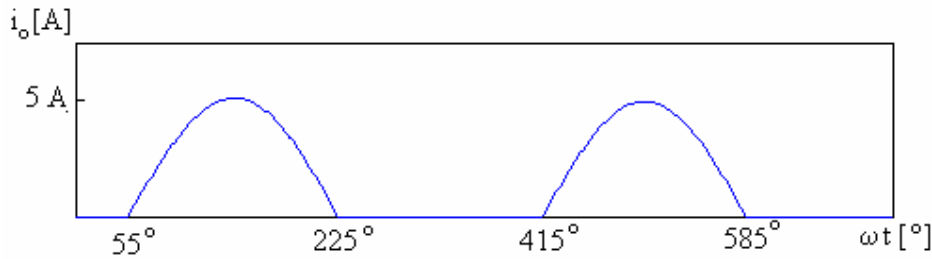
٢- ١ ارسم شكل موجات كل من جهد المصدر المتناوب ' v_s ' وجهد خرج الحمل ' v_o ' و تيار الحمل ' i_o ' و فرق الجهد عبر أطراف الثايرستور ' v_{AK} ' في حالة :

- أ - دائرة موحد نصف موجة محكوم أحادي الطور محمل بحمل مادي ' R '
 ب - دائرة موحد نصف موجة محكوم أحادي الطور محمل بحمل حثي في حالة وجود وعدم وجود الدايدود الحذافه.

٢- ٢ ارسم شكل للعلاقة المتوقعة لجهد الحمل المتوسط ' $V_{o(avg)}$ ' مع زاوية الإشعال ' α ' في حالة وجود دائرة موحد نصف موجة محكوم أحادي الطور محمل بحمل مادي بفرض القيمة الفعالة لجهد المصدر الكهربى $220V$.

٢- ٣ افترض أن موجة تيار الخرج (الحمل) ' i_o ' لدائرة موحد نصف موجة محكوم أحادي الطور هي تلك الموجة المبينة بالشكل التالي المبين. أوجد قيمة :

- أ - زاوية الإشعال ' α '
 ب - زاوية التوصيل ' γ '
 ج - زاوية الإطفاء ' β '.



٢- ٤ ما هي وظيفة الدايدود الحذافه المستخدم لدائرة الموحد نصف الموجة المحكوم أحاد الطور؟ هل يستخدم الدايدود الحذافه في حالة وجود الأحمال المادية؟ هل يستخدم هذا الدايدود الحذافه في حالة وجود أحمال حثية؟

٢- ٥ ما هو تأثير زيادة القيمة الحثية ' L ' للحمل في حالة المحولات القنطرية المحكومة أحادية الطور والمتصلة بأحمال حثية ؟ بين إجابتك مستعينا بموجات خرج التيار ' i_o '.

- ٢- ٦- اشرح مبدأ عمل الموحد القنطري المحكوم أحادي الطور والمتصل بحمل حثي له ممانعة حثية أكبر بكثير من مقاومته المادية ($\omega L \gg R$) في حالة :
- أ - عدم وجود دايود حدافه.
ب - وجود دايود حدافه.
- ٢- ٧- ارسم شكل موجة كل من جهد الحمل ' v_o ' وتيار الحمل ' i_o ' وتيار المصدر ' i_s ' للموحد القنطري كامل الموجة في حالة :
- أ - حمل مادي وزاوية إشعال ' 60° '.
ب - حمل حثي وزاوية إشعال ' 60° '.
- ٢- ٨- يتصل موحد محكوم كامل الموجة أحادي الطور بمصدر جهد متناوب جهده الفعال $220V$ وتردده $60Hz$ وحمل مادي مقاومته 50Ω . إذا علمت بأن زاوية إشعال قيمتها ' 60° ' فأوجد :
- أ - القيمة المتوسطة لتيار الحمل
ب - القيمة الفعالة لتيار الحمل
ج - القدرة المغذاة للحمل
د - معامل القدرة الكهربائية.
- ٢- ٩- يغذي موحد قنطري كامل الموجة أحادي الطور والمتصل بدايود حدافة حملاً حثياً له ممانعة حثية أكبر بكثير من مقاومته المادية. يتصل الموحد بمصدر جهد متناوب قيمته الفعالة $220V$ وتردده $60Hz$ وحمل مادي مقاومته 50Ω . إذا كانت قيمة زاوية الإشعال ' 60° ' فأوجد
- أ - القيمة المتوسطة لجهد الحمل
ب - القيمة المتوسطة لتيار الحمل
ج - القيمة الفعالة لتيار الحمل
د - القدرة المغذاة للحمل
هـ - التيار المتوسط للموحد السليكوني المحكوم (الثايرستور)
و - التيار المتوسط للدايود الحدافه.

- ٢- ١٠ يتصل موحد قنطري كامل الموجة محكوم أحادي الطور بحمل له ممانعة حثية أكبر بكثير من مقاومته المادية ومصدر جهد متناوب قيمته الفعالة $220V$ وتردده $60Hz$. إذا علمت بأن قيمة الحمل المادية 20Ω وقيمة زاوية الإشعال 60° . فأوجد قيمة:
- أ - تيار الثايرستور المتوسط
ب - أقصى تيار وأقصى جهد للثايرستور
ج - القدرة المغذاة للحمل



المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

إلكترونيات القوى

مقطعات التيار المستمر

مقطعات التيار المستمر

٢

الأهداف:

بعد انتهاء الطالب من دراسة هذه الوحدة لا بد أن يكون الطالب ملماً وقادراً على تفسير التالي:

- ما المقصود بمعنى مقطع تيار مستمر
- وصف مبدأ عمل مقطع التيار المستمر الرئيسية
- وصف مبدأ العمل الرئيسي لمقطع التيار المستمر والخافض للجهد
- مبدأ عمل مقطع التيار المستمر والخافض للجهد والمتصل بحمل مادي أو حمل حثي.

مقدمة:

علمنا من دراسة الوحدة السابقة بأن هناك العديد من الدوائر للموحدات المحكومة أحادية وثلاثية الأوجه وقد تم الاكتفاء بدراسة دوائر الموحدات المحكومة أحادية الوجه والهدف من استخدام هذه الموحدات هو تحويل مصادر الجهد المتناوب إلى جهد مستمر وتغيير قيمة الجهد المستمر عن طريق التحكم في قيمة زاوية إشعال الثايرستور وقد أمكن الحصول على جهد مستمر متغير عند أطراف الخرج والحمل وبالتالي يمكن أن نستفيد بهذا الجهد المتغير في التحكم في سرعة محركات التيار المستمر على سبيل المثال وأيضا يمكن استخدام هذه الموحدات كدوائر إلكترونية لشحن البطاريات. ويمكن التحكم أيضا في سرعات محركات التيار المستمر عن طريق استخدام بعض الأجهزة الإلكترونية والتي تسمى بمقطعات التيار المستمر حيث تحول هذه المقطعات الجهد المستمر الثابت القيمة إلى جهد مستمر متغير القيمة بترددات ثابتة أو ترددات متغيرة عن طريق التحكم في دورة التشغيل (duty cycle) وتتكون هذه المقطعات من عدد من الثايرستورات أو عدد من الترانزستورات. و تنقسم مقطعات التيار المستمر إلى نوعين أساسيين:

- مقطعات خافضة للجهد step-down (buck) choppers والتي تحول الجهد المستمر الثابت القيمة إلى جهد مستمر متغير القيمة وبقية اقل من جهد الدخل.
- مقطعات رافعة للجهد step-up (boost) chopper والغرض من هذه المقطعات هو الحصول على قيم جهد مستمر متغير له قيمة أكبر من قيمة الجهد المستمر الثابت.

مقطع التيار المستمر الأساسي : A Basic DC Chopper

يبين الشكل (٣- ١) مخططاً توضيحياً لمقطع التيار المستمر الرئيسي حيث يكون المفتاح الإلكتروني S متصلاً على التوالي مع مصدر جهد مستمر V_s وحمل مادي R. ويمكن أن يكون المفتاح الإلكتروني عبارة عن موحد سليكوني محكوم أي ثايرستور 'Thyristor' أو ترانزستور القوى 'Power Transistor' أو موسفت 'MOSFET' أو ترانزستور البوابة ثنائية القطبية 'Insulated Gate Bipolar Transistor' وهكذا.

ومن خلال هذا الفصل سوف نعتبر بأن جميع المفاتيح الإلكترونية 'switches' عبارة عن عناصر مثالية 'ideal' وأن هذه المفاتيح لها الخواص التالية:

- تكون قيمة المقاومة الداخلية لها صفرية وبالتالي فرق الجهد عليها يكون له أيضاً قيمة صفرية وذلك عندما تكون هذه المفاتيح مغلقة 'turn-on'.

- تكون قيمة المقاومة الداخلية لها كبيرة جداً أي لانهائية وذلك عندما تكون هذه المفاتيح مفصولة 'turn-off'.

- يكون زمن الإغلاق والفتح لهذه المفاتيح له قيمة صفرية.

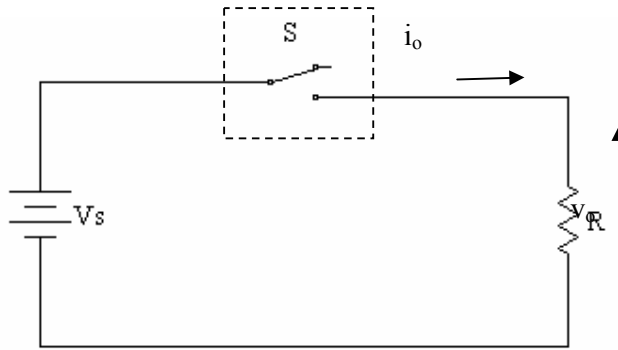
و بناءً على الافتراضات السابقة تكون قيمة الفقد 'power loss' لهذه المفاتيح لها قيمة صفرية وتصبح قيمة القدرة الداخلة المستمرة 'Input dc power' مساوية لقيمة القدرة الخارجة 'output dc power' أي أن:

(٣- ١)

$$V_s I_s = V_o I_o$$

حيث أن:

 V_s : هي قيمة جهد المصدر المستمر. V_o : هي القيمة المتوسطة لجهد الخرج "الحمل". I_s : هي القيمة المتوسطة لتيار المصدر الكهربائي. I_o : هي القيمة المتوسطة لتيار.



الشكل (٣-١): شكل توضيحي لمقطع تيار مستمر متصل بمقاومة مادية R.

دورة التشغيل Duty Cycle:

يمكن الحصول على القيمة المطلوبة لجهد الخرج المستمر عن طريق التحكم في زمن فصل 'T_{OFF}' وزمن الإغلاق 'T_{ON}' للمفتاح الإلكتروني حيث يتم التحكم في إغلاق وفتح المفتاح عن طريق إعطاء نبضة كهربية لدائرة التحكم الخاصة بهذا المفتاح ويبين الشكل (٣-٢) شكل النبضة المعطاة للمفتاح وتتبع هذه النبضة الطريقة المعروفة بطريقة تعديل عرض النبضة 'Pulse-Width Modulation' وتكون عرض النبضة 'T_{ON}' متغير في هذه الطريقة حيث إن هذا الزمن يمثل زمن إغلاق المفتاح الإلكتروني بينما الزمن الدوري 'T' لهذه النبضة ثابت ويمثل هذا الزمن زمن الفتح والإغلاق 'T_{ON} + T_{OFF}' للمفتاح الإلكتروني. وتعرف دورة التشغيل 'D' بأنها عبارة عن قيمة زمن إغلاق المفتاح الإلكتروني مقسوم على الزمن الدوري ويمكن كتابة الصيغة الرياضية لدورة التشغيل كالتالي:

$$D = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} = \frac{T_{ON}}{T} \quad (٣-٢)$$

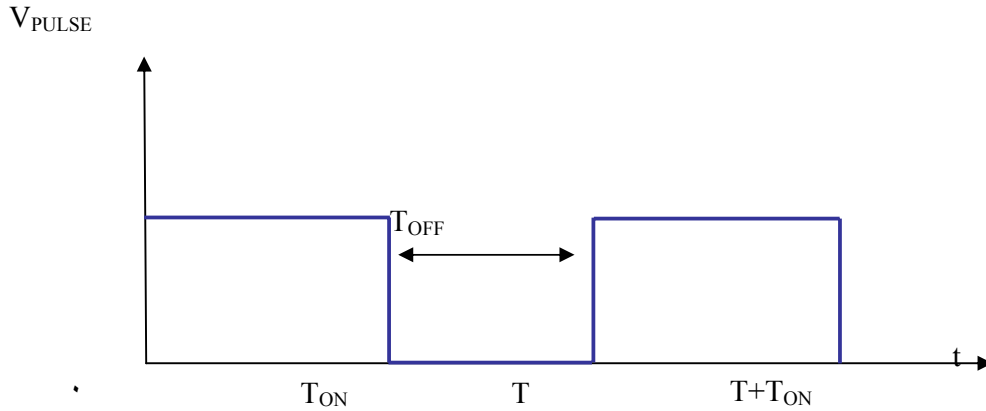
حيث أن:

D: هي نسبة القطع.

T: هي الزمن الدوري للمفتاح الإلكتروني.

T_{ON}: هي زمن إغلاق المفتاح الإلكتروني.

T_{OFF}: هي زمن فصل المفتاح الإلكتروني.



الشكل (٣-٢): نموذج لنبضة يعمل بطريقة تعديل عرض النبضة.

نلاحظ من المعادلة (٣-٢) بأن قيم دورة التشغيل تتراوح ما بين الصفر والواحد ($0 \leq D \leq 1$) حيث دورة التشغيل تساوي صفراً عندما زمن إغلاق المفتاح يساوي أيضاً صفراً وهذا يحدث عندما يكون المفتاح مفصولاً كلياً ودورة التشغيل تساوي الواحد عندما زمن فصل المفتاح يساوي أيضاً واحداً وهذا يحدث عندما يكون المفتاح مغلقاً كلياً. ويتم التحكم في زمن الإغلاق والفصل عن طريق التحكم في قيمة تيار القاعدة 'Base current' في حالة استخدام الترانزستورات كمفاتيح إلكترونية بينما يتم التحكم في قيمة هذه الأزمنة عن طريق التحكم في قيمة دورة التشغيل لنبضة البوابة في حالة استخدام الموسفت حيث عندما تكون جهد النبضة موجباً يكون الموسفت مغلقاً بينما لنبضة قيمتها صفرية يصبح الموسفت مفصول وعند استخدام الثايرستور في دوائر مقطعات التيار المستمر فلا بد من استخدام دائرة مساعدة (Auxiliary Circuit) أخرى لإطفاء (لفصل) الثايرستور وتسمى دائرة الإطفاء 'Commutation circuit'.

وسوف نفترض طوال دراستنا لمقطعات التيار المستمر بأن تكون المفاتيح الإلكترونية من نوعية الموسفت أو ترانزستور البوابة ثنائية القطبية والتي تتميز بأن فصل وغلق هذه المفاتيح يتم بطريقة ميسرة ولا تحتاج لدوائر مساعدة للإطفاء مثل دوائر مقطعات التيار المستمر والتي تستخدم الثايرستور ولكن لا يوجد حتى الآن البديل للثايرستور في حالات الأحمال التي لها قدرة عالية.

مبدأ عمل مقطع التيار المستمر الأساسي والمتصل بحمل مادي R

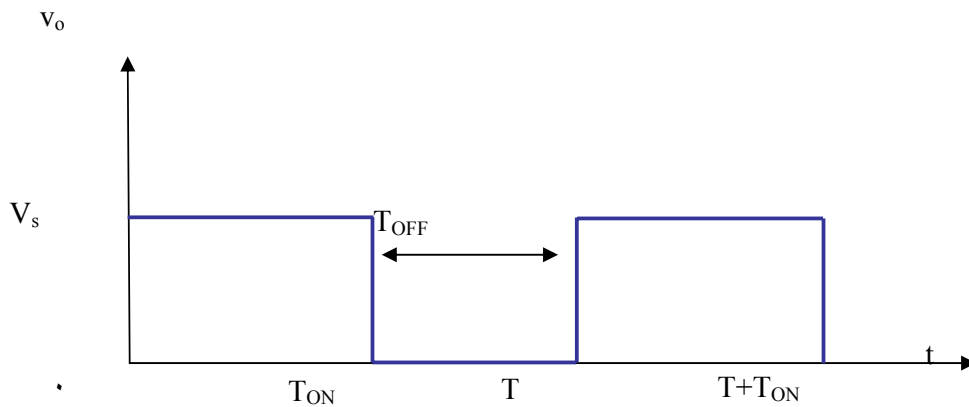
The Principle of Operation of a Basic DC Chopper Connected with a Resistive Load:

يمكن التحكم في قيمة جهد الخرج v_o لمقطع التيار المستمر والمبين بالشكل (٣- ١) بحيث تقع قيمته في المدى من صفر إلى قيمة جهد المصدر الكهربي V_s ($0 \leq v_o \leq V_s$) ويتم التحكم عن طريق التحكم في زمن فتح وغلق المفتاح الإلكتروني S أي يتم هذا التحكم عن طريق التحكم في دورة التشغيل. وتكون قيمة جهد الخرج v_o لمقطع التيار المستمر له قيمة صفرية وذلك عندما تكون قيمة دورة التشغيل لها قيمة صفرية بينما تكون قيمة جهد خرج المقطع v_o له قيمة مساوية لقيمة جهد المصدر الكهربي V_s وذلك عندما تكون قيمة دورة التشغيل لها قيمة الوحدة والشكل (٣- ٣) يوضح شكل موجة جهد الخرج v_o .

القيمة المتوسطة لجهد وتيار خرج مقطع التيار المستمر:

ويمكن إيجاد الصيغة الرياضية للقيمة المتوسطة لجهد الخرج V_o كالتالي:

$$(٣- ٣) \quad V_o = \frac{T_{ON}}{T_{ON} + T_{OFF}} \cdot V_s = \frac{T_{ON}}{T} \cdot V_s$$



الشكل (٣- ٣): موجة جهد خرج v_o لمقطع التيار المستمر.

بالتعويض من المعادلة (٣- ٢) في المعادلة (٣- ٣) يمكن الحصول على المعادلة التالية للقيمة

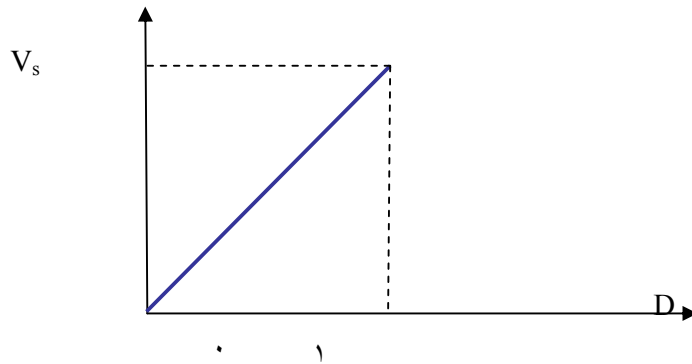
المتوسطة لجهد الخرج

$$(٣- ٤)$$

$$V_o = D V_s$$

ونلاحظ من المعادلة (٣-٤) أن العلاقة ما بين القيمة المتوسطة لجهد الخرج V_o ودورة التشغيل D عبارة عن علاقة خطية ويبين الشكل (٣-٤) العلاقة بينهما حيث تتراوح قيمة V_o ما بين الصفر وقيمة جهد المصدر V_s أي أن $0 \leq V_o \leq V_s$. ويمكن أيضا استنباط المعادلة الرياضية للقيمة المتوسطة لتيار الخرج I_o حيث شكل الموجة لتيار الخرج يكون مثل شكل الموجة المبينة بالشكل (٣-٣) حيث إن القيمة المتوسطة لتيار الخرج I_o عبارة عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج مقسوم على قيمة المقاومة المادية للحمل وبالتالي يمكن تمثيل المعادلة الرياضية لتيار الخرج كالتالي:

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{D}{R} \cdot V_s \quad (٣-٥)$$



الشكل (٣-٤): العلاقة بين القيمة المتوسطة لجهد الخرج V_o ودورة التشغيل D .

القيمة الفعالة لجهد و تيار خرج مقطع التيار المستمر:

ويمكن تمثيل المعادلات الرياضية لجهد الخرج الفعال $V_{o(rms)}$ و تيار الخرج الفعال $I_{o(rms)}$

كالتالي:

$$V_{o(rms)} = V_s \sqrt{D} \quad (٣-٦)$$

$$I_{o(rms)} = \frac{V_s}{R} \sqrt{D} = I_s \sqrt{D} \quad (٣-٧)$$

حيث أن: التيار I_s عبارة عن قيمة جهد المصدر الكهربائي مقسوم على قيمة المقاومة المادية R

قدرة مقطع التيار المستمر:

بافتراض أن مقطع التيار المستمر ليس له فقد أي أن المفاتيح الإلكترونية الخاصة بهذه المقطعات ليس بها فقد و تصبح قيمة القدرة الداخلة للمقطع 'P_i' هي نفسها قيمة قدرة الخرج 'P_o'. ويمكن أن نعبر عن قيمة القدرة الداخلة لمقطع التيار المستمر بالمعادلة الرياضية التالية:

$$P_i = D \frac{V_s^2}{R} \quad (٣- ٨)$$

طرق التقنية المختلفة لتغيير قيمة الجهد المتوسط لمقطعات التيار المستمر:

يمكن تغيير القيمة المتوسطة لجهد خرج مقطعات التيار المستمر عن طريق استخدام طرق التقنية

التالية:

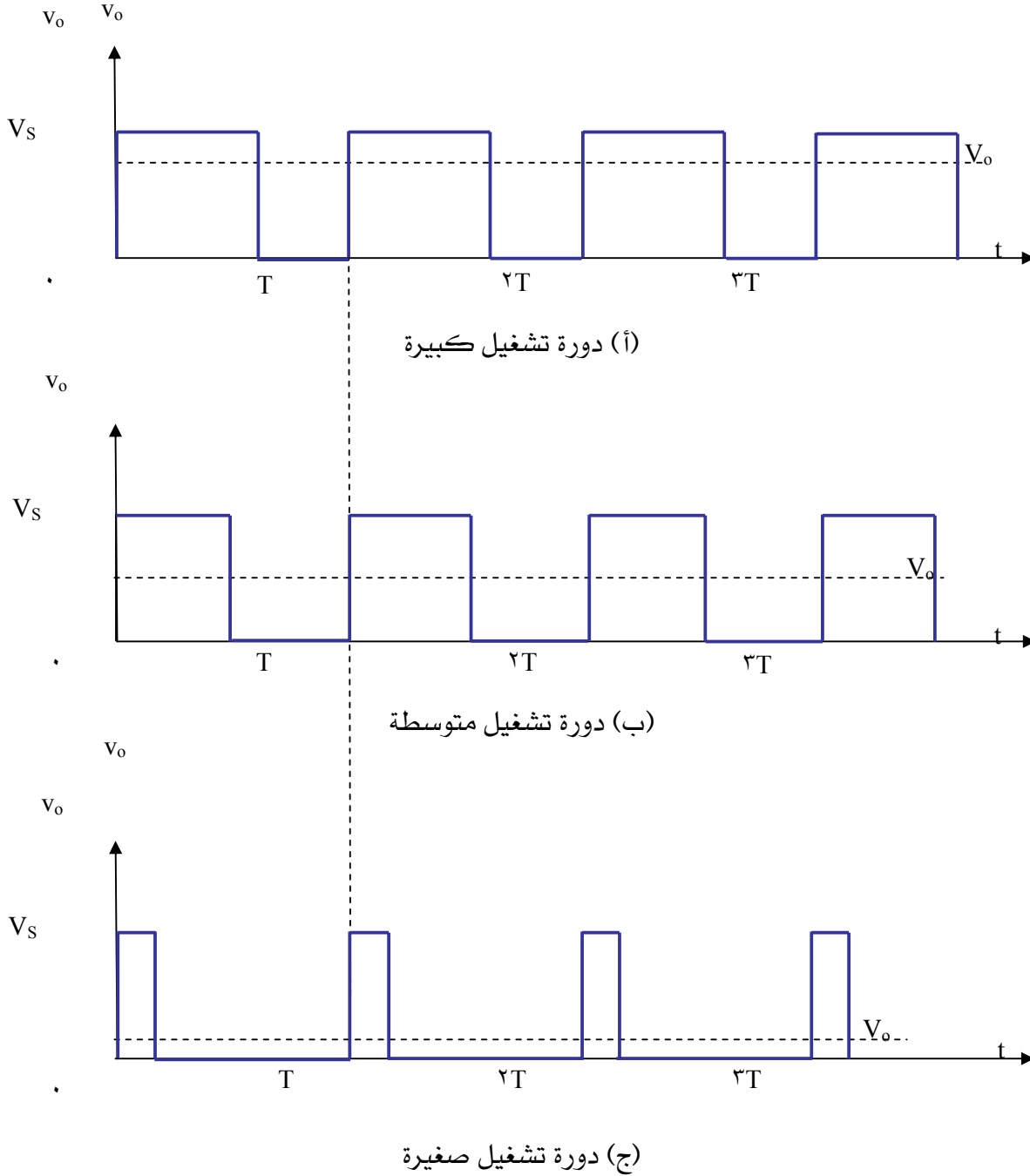
- طريقة تعديل عرض النبضة (Pulse-Width Modulation (PWM).

- طريقة تعديل تردد النبضة (Pulse-Frequency Modulation (PFM).

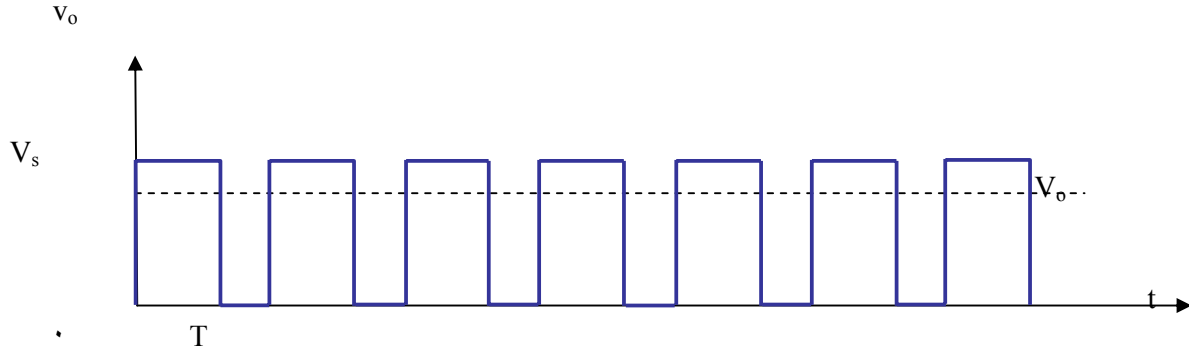
حيث يتم تغيير عرض النبض 'T_{ON}' في طريقة تعديل عرض النبضة 'PWM' مع ثبات قيمة الزمن الدوري للفصل والغلق 'T' ويبين الشكل (٣- ٥) موجات جهد الخرج لقيم مختلفة وتصاعديّة لدورة التشغيل بينما في طريقة تعديل تردد النبضة 'PFM' يتم المحافظة على قيمة ثابتة لزمان إغلاق المفتاح 'T_{ON}' بينما يتم تغيير قيمة الزمن الدوري 'T' أي تغيير تردد الفصل والغلق للمفتاح الإلكتروني ويبين الشكل (٣- ٦) موجات جهد الخرج لقيم مختلفة وتصاعديّة للزمن الدوري للفصل والغلق وفي هذه الحالة تقل القيمة المتوسطة لجهد الخرج بتقليل قيمة التردد. وتكون القيمة المتوسطة لجهد الخرج لمقطعات التيار المستمر لها قيمة صفرية عندما تكون دورة التشغيل تساوي صفرًا بينما تكون قيمة هذا الجهد مساوية لقيمة جهد المصدر الكهربائي وذلك عندما تكون قيمة دورة التشغيل قيمتها الوحدة وذلك سواء تم استخدام طريقة تعديل عرض النبضة 'PWM' أو طريقة تعديل تردد النبضة 'PFM'.

عندما يراد الحصول على قيمة متوسطة منخفضة لجهد الخرج باستخدام طريقة تعديل تردد النبضة 'PFM' فلا بد من تقليل قيمة تردد فصل وغلق المفتاح الإلكتروني 'S' الخاص بمقطع التيار المستمر وهذا يؤدي لتيار خرج له دالة غير متصلة وذلك في حالة وجود حمل حثي وهذا التيار يحتوي على تموجات عالية 'high current ripples' مما يؤدي إلى زيادة الفاقد بالحمل وتسخينه وعلى الجانب الآخر تزداد قيمة الفقد بالمفاتيح الإلكترونية نتيجة زيادة قيمة تردد الفصل والغلق لهذه المفاتيح.

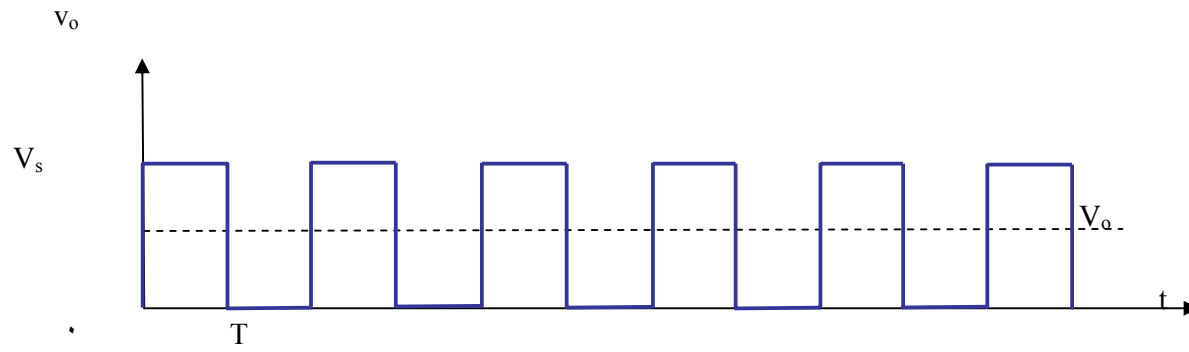
تتميز طريقة تعديل عرض النبضة "PWM" بأن التموجات الموجودة في موجة تيار خرج مقطع التيار المستمر تكون قليلة وهذا يؤدي إلى استخدام مرشحات 'filters' صغيرة الحجم و بالتالي إلى تقليل تكلفة هذه المرشحات.



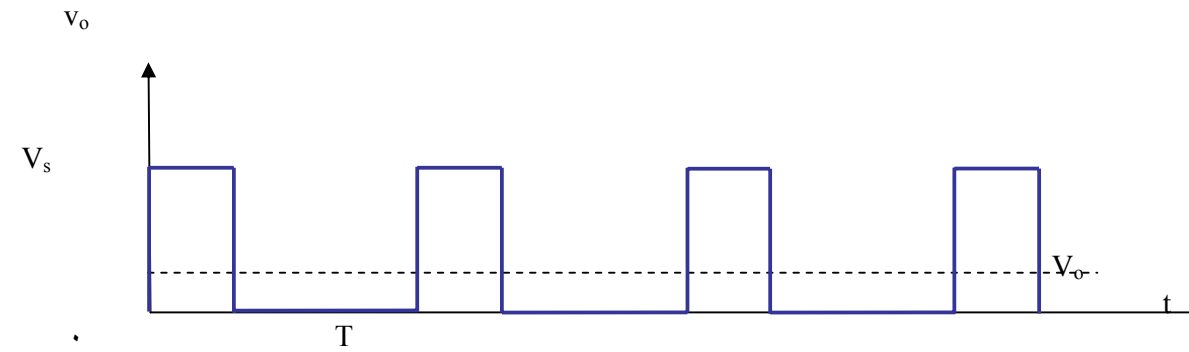
الشكل (٣-٥): موجات جهد الخرج v_o عند قيمة ثابتة لتردد الفصل والغلق.



(أ) تردد فصل و إغلاق عالي



(ب) تردد فصل و إغلاق متوسط



(ج) تردد فصل و إغلاق منخفض

الشكل (٣-٦): موجات جهد الخرج V_o لقيم مختلفة لترددات الفصل والغلق

مثال ٣ - ١:

يتغذى مقطع التيار المستمر المبين بالشكل (٣ - ١) من مصدر كهربي مستمر قيمة جهده $V = 220$ و يتصل هذا المقطع بحمل مادي قيمته 10Ω . إذا علمت بأن قيمة تردد الفصل والغلق للمفتاح الإلكتروني S' 1 KHz و قيمة دورة التشغيل تساوي 0.5 فأوجد:

- القيمة المتوسطة لجهد الخرج V_o' .
- القيمة الفعالة لجهد الخرج $V_{o(rms)}$.
- القدرة المسحوبة من المصدر الكهربي P_i' .

الحل:

- يمكن تعيين القيمة المتوسطة لجهد الخرج عن طريق استخدام المعادلة (٣ - ٤) كالآتي:

$$V_o = D V_s = 0.5(220) = 110 \text{ V}$$

- يمكن تعيين القيمة الفعالة لجهد الخرج عن طريق استخدام المعادلة (٣ - ٦) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = V_s \sqrt{D} = 220\sqrt{0.5} = 155.6 \text{ V}$$

- يمكن تعيين قيمة القدرة المسحوبة من المصدر الكهربي عن طريق استخدام المعادلة (٣ - ٨) كالآتي:

$$P_i = D \frac{V_s^2}{R} = 0.5 \frac{220^2}{10} = 2420 \text{ W}$$

مقطعات التيار المستمر الخافضة Step-Down (Buck) DC Choppers

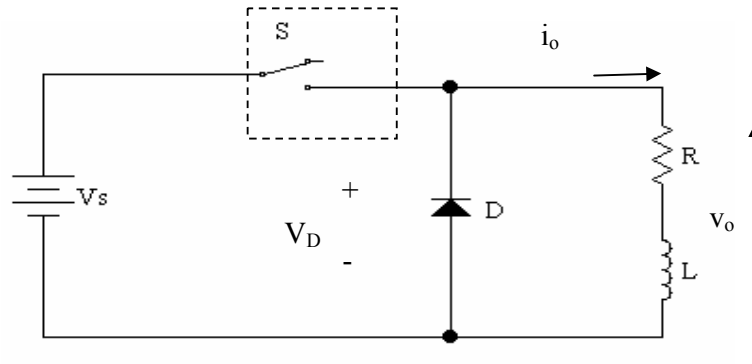
حالة الحمل الحثي Case of An Inductive Load

نلاحظ من دراستنا السابقة لمقطعات التيار المستمرة المحملة بأحمال مادية بأن موجة تيار الخرج لها عبارة عن موجة غير ناعمة حيث لها تموجان عالية. ولهذا السبب هذه النوعية من المقطعات لا تستخدم في الحياة العملية حيث تكون ملائمة فقط للأحمال المادية. وحيث تكون معظم الأحمال المستخدمة في الحياة العملية عبارة عن أحمال حثية فدائماً تتصل هذه الأحمال بدايودات حذافة بهدف الحصول على موجة ناعمة وخالية من التموجات. ويبين الشكل (٣ - ٧) حالة مقطع مستمر متصل بحمل حثي ودايود حذافة حيث تكون وظيفة الدايود الحذافة المحافظة على استمرارية التيار بالحمل الحثي بجانب حماية المفتاح الإلكتروني S' من معدل زيادة الجهد بالنسبة للزمن dv/dt' والدائرة المبينة بالشكل (٣ - ٧) (أ) تمثل دائرة لمقطع تيار مستمر منخفض وتستخدم هذه الدائرة كمقطع تيار مستمر لبعض الأحمال

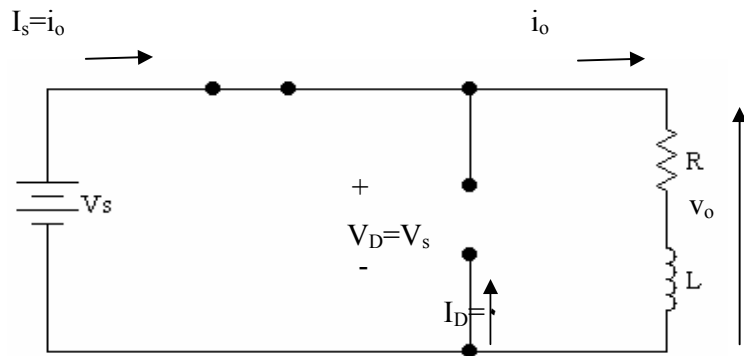
العملية كمحركات التيار المستمر حيث تكون موجة التيار لهذه الأحمال عبارة عن موجة خالية من التموجات وناعمة.

مبدأ عمل مقطعات التيار المستمر:

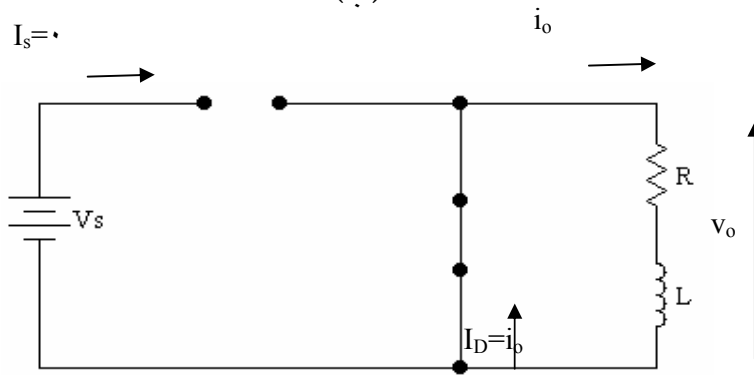
كما سبق ذكره في الفقرة السابقة فإن المفتاح الإلكتروني S يتم التحكم فيه عن طريق التحكم في قيمة دورة التشغيل أو في قيمة أزمنة فصل وغلق المفتاح للنبضة المبينة بالشكل (٣- ٢) حيث يتم إغلاق المفتاح 'S' عند إعطاء نبضة مرتفعة ويتم فصله عند إعطاء نبضة منخفضة. وعند إغلاق المفتاح S بالدائرة المبينة بالشكل (٣- ٧) (أ) بإعطاء نبضة عالية للمفتاح فإن الدايمود الحذافة D سوف يكون في حالة انحياز خلفي وبالتالي سوف يمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد الكهربائي المستمر 'V_s' والمفتاح S والحمل الحثي 'R-L' ويبقى الدايمود الحذافة مفصول وفي وضع انحياز خلفي طوال فترة إغلاق المفتاح ويبدأ التيار بقيمة صفرية في بداية الدورة الأولى لتشغيل الدائرة وتزداد قيمة التيار تدريجياً بطريقة أسية طوال فترة إغلاق المفتاح '0 ≤ t ≤ T_{ON}' وتكون قيمة جهد الحمل 'V_o' هو نفسه قيمة جهد المصدر الكهربائي خلال هذه الفترة والشكل (٣- ٧) (ب) يبين الدائرة المكافئة لهذه الحالة. ويتم فصل وقطع التيار عن المفتاح S بإعطاء نبضة منخفضة للمفتاح وذلك عند اللحظة الزمنية t = T_{ON} وعند هذه اللحظة سيتم مرور تيار الحمل من الدائرة المبينة بالشكل (٣- ٧) (ب) للدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي و الدايمود الحذافة والمبينة بالشكل (٣- ٧) (ج) خلال الفترة الزمنية لفصل المفتاح '0 ≤ t ≤ T_{OFF}' ويمر التيار في هذه الدائرة برغم أن قيمة جهد خرج الحمل له قيمة صفرية طوال هذه الفترة الزمنية نتيجة لوجود طاقة مغناطيسية بالملف والناجئة من مرور التيار بالحمل طوال الفترة السابقة والتي فيها المفتاح مغلق. ويبدأ مرور التيار في الدائرة المبينة بالشكل (٣- ٧) (ج) بنفس القيمة التي وصل إليها التيار في نهاية المرحلة الأولى للدائرة المبينة بالشكل (٣- ٧) (ب) وذلك عند اللحظة الزمنية ثم تبدأ قيمة التيار في التناقص بطريقة أسية ومحاولاً الوصول لقيمة صفرية طوال فترة فصل المفتاح '0 ≤ t ≤ T_{OFF}' ويكون المفتاح في وضع الانحياز الخلفي طوال هذه الفترة الزمنية. نلاحظ أن الهدف من وجود الدايمود الحذافة هو محاولة وجود مسار لتيار الحمل الحثي عند فصل المفتاح بجانب العمل على حماية المفتاح من معدل زيادة الجهد بالنسبة للزمن 'dv/dt'.



(أ)



(ب)



(ج)

الشكل (٣-٧): مقطع تيار مستمر متصل بحمل حتى ودوائره المكافئة في حالتي الفصل والغلق.

سوف ندرس في الفقرات التالية حالتي اتصال وعدم اتصال تيار الحمل أي حالتي تيار الحمل المستمر وغير المستمر وسوف تتم الدراسة على أساس بعض الافتراضات الصحيحة والتي تجعل التحليل الرياضي وكتابة المعادلات لهذه الحالات تكون بصورة أبسط مع ملاحظة أن الحل الحقيقي والحل التقريبي سوف يعطيان نفس النتائج تقريبا ونسبة الخطأ بينهما يمكن التجاوز عنها وبالتالي سوف نكتفي بالمعادلات التقريبية في الفقرات التالية.

صيغة التيار المتصل Continuous Current Mode:

عادة ما تكون موجة تيار الحمل للدائرة المبينة بالشكل (٣- ٧) (أ) أما موجة مستمرة أي عبارة عن دالة متصلة أو موجة غير مستمرة أي عبارة عن دالة غير متصلة وهذا يعتمد على عدة عوامل وأهمها كالتالي:

- قيمة ممانعة الملف الحثية بالنسبة لمقاومته المادية.

- قيمة دورة التشغيل.

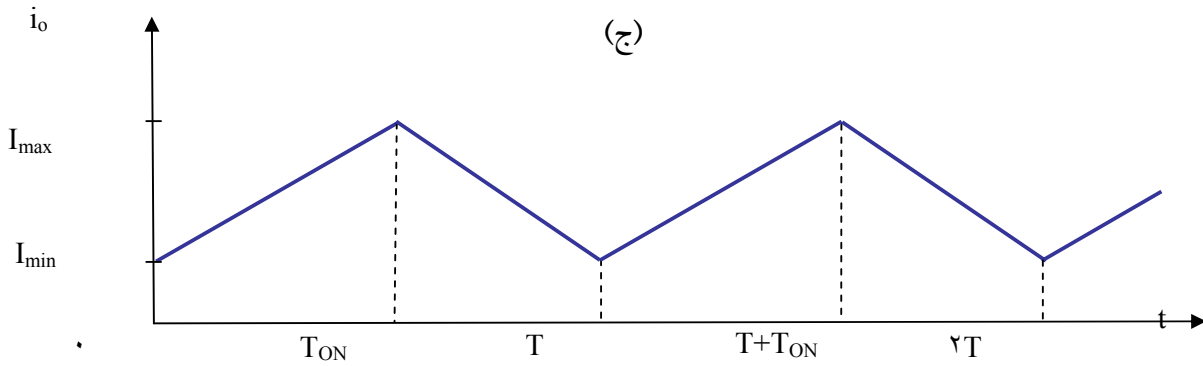
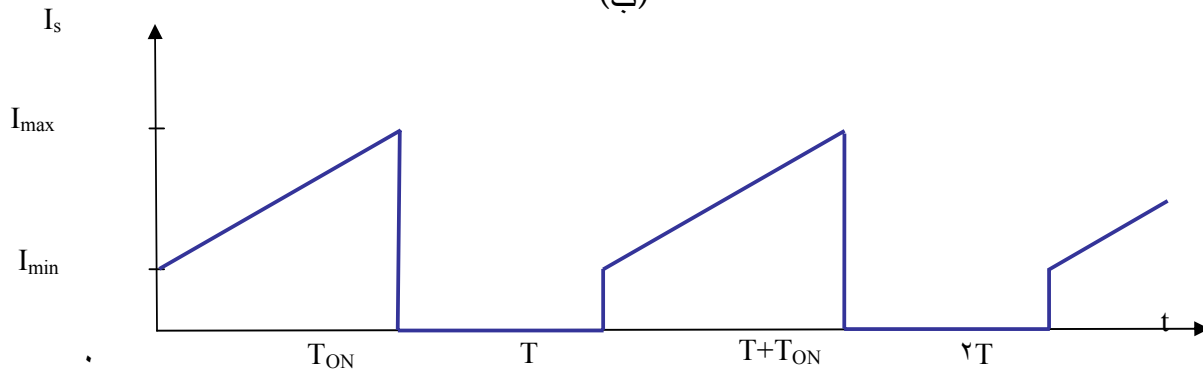
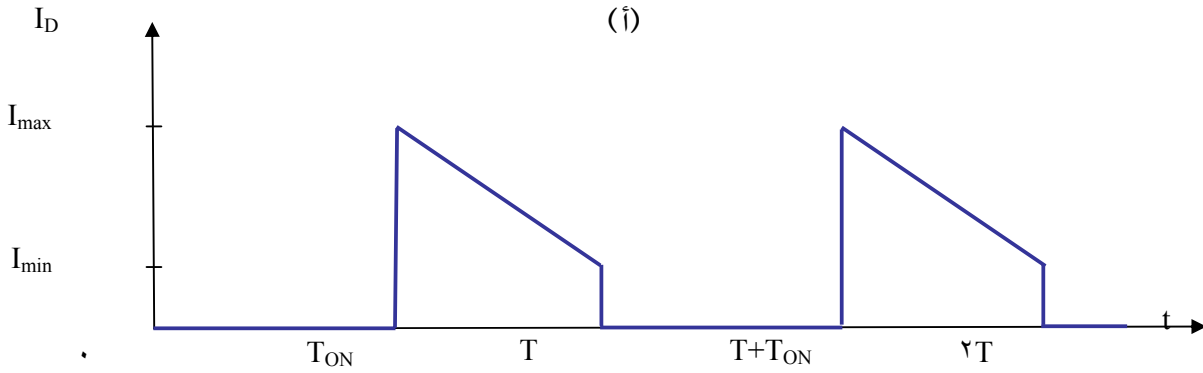
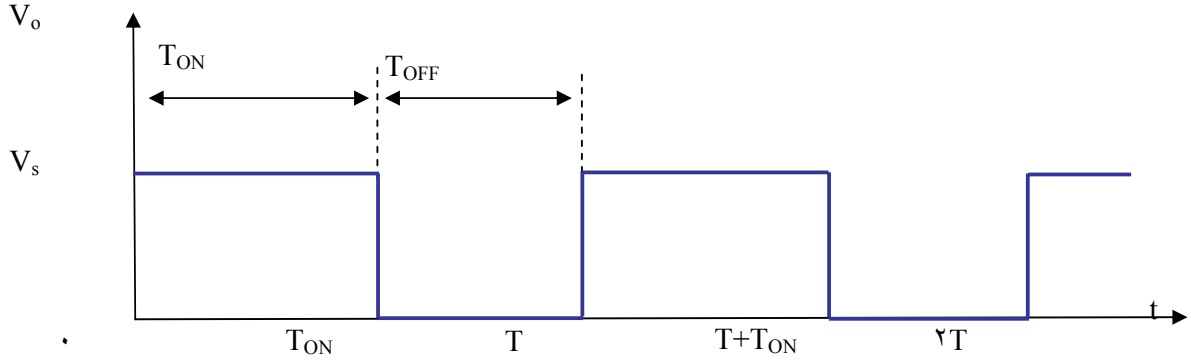
- قيم تردد فصل وغلق المفتاح 'S'.

ودائماً يكون الهدف المطلوب هو استمرارية موجة تيار الحمل بحيث تكون هذه الموجة ناعمة وخالية من أي تموجات. ولضمان استمرارية التيار غالباً ما يتم استخدام مرشح 'filter' بسيط يتكون من ملف حثي 'L' وكلما ازدادت قيمة هذا الملف الحثي أمكن الحصول على موجة لتيار الحمل ناعمة وخالية من أي تموجات وذلك عندما يعمل المفتاح بترددات فصل وغلق قليلة نسبياً بينما تكون قيمة هذا الملف الحثي الخاص بالمرشح له قيمة قليلة وذلك عند فصل وغلق المفتاح بترددات عالية إلى حد ما.

سوف نقوم في هذه الفقرة بدراسة تيار الحمل المستمر أي حالة تيار الحمل المتواصل والذي سوف يكون له موجة ناعمة وخالية تقريباً من التموجات أي لها بعض التموجات القليلة وسوف يبني هذا الفرض على أساس أن الملف الحثي له ثابت زمني 'τ' أكبر بكثير من الزمن الدوري للنبضة أي أن $L/R \gg \tau$ وبناء على هذا الفرض فإن تيار الحمل سوف يكون تقريباً على هيئة شكل خط مستقيم يتذبذب من قيمة صغرى I_{min} إلى قيمة عظمى I_{max} ثم إلى قيمة صغرى مرة أخرى وتتكرر شكل موجة هذا التيار كل دورة زمنية زمنية الدوري T. ويبين الشكل (٣- ٨) شكل الموجات للدائرة المبينة بالشكل (٣- ٧) لحالة تيار الحمل المتواصل ويبين الشكل (٣- ٨) (أ) موجة جهد الحمل ونلاحظ أن قيمتها تساوي قيمة جهد المصدر Vs طوال فترة إغلاق المفتاح S 'TON ≤ t ≤ T' وأن قيمتها تكون صفرية طوال فترة فصل المفتاح 'TON ≤ t ≤ T' وعمل الدايمود الحذافة وشكل ٣- ٨ (ب) يبين شكل موجة تيار الدايمود الحذافة وشكل ٣- ٨ (ج) يبين شكل موجة تيار المصدر 'is' والمار بالمفتاح S وشكل ٣- ٨ (ب) يبين شكل موجة تيار الحمل وبمقارنة الموجات بالأشكال ٣- ٨ (ب)، ٣- ٨ (ج)، ٣- ٨ (د) نلاحظ أن موجة تيار الدايمود الحذافة هي موجة تيار الحمل خلال الفترة الزمنية 'TON ≤ t ≤ T' بينما موجة تيار المصدر الكهربائي 'is' هي موجة تيار الحمل خلال الفترة الزمنية 'TON ≤ t ≤ T' وقد سبق تفسير هذا في الفقرة السابقة ويكون تيار الحمل له قيمة متوسطة كالتالي:

(٩- ٣)

$$I_o = I_L = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}$$



الشكل (٣- ٨): موجات دائرة مقطع تيار مستمر متصل بحمل حثي وتيار الحمل متصل. وأيضا يمكن إيجاد تيار الحمل المتوسط عن طريق معرفة جهد الحمل المتوسط كالتالي:

$$(٣- ١٠) \quad I_o = \frac{V_o}{R}$$

ومن المعادلة (٣- ٩)، (٣- ١٠) يمكن استنتاج المعادلة التالية:

$$(٣- ١١) \quad I_{\max} + I_{\min} = 2 \frac{V_o}{R}$$

ويمكن إيجاد قيم I_{\max} و I_{\min} بإيجاد معادلة أخرى تحتوى على هذين المتغيرين. ويتم ذلك بإيجاد معادلة الجهد على الملف الحثي الذي له ممانعة حثية أكبر بكثير من مقاومته المادية فتكون معادلة الجهد للملف كالتالي:

$$(٣- ١٢) \quad V_L = L \frac{di_o}{dt} = V_o$$

أو

$$\frac{di_o}{dt} = \frac{V_o}{L} = \frac{\Delta i_o}{\Delta t}$$

$$(٣- ١٣) \quad \therefore \Delta i_o = \frac{V_o}{L} \Delta t$$

حيث أن Δi_o هي القيمة القصوى لتموجات تيار الحمل وبالتالي تكون:

$$(٣- ١٤) \quad \Delta i_o = I_{\max} - I_{\min}$$

وتتحقق المعادلة السابقة خلال فترة فصل المفتاح وبالتالي تكون قيمة Δt كالتالي:

$$(٣- ١٥) \quad \Delta t = T_{OFF}$$

ومن المعادلتين (٣١٤)، (٣- ١٥) وبالتعويض في المعادلة (٣- ١٣) يمكن استنتاج المعادلة التالية:

$$(٣- ١٦) \quad I_{\max} - I_{\min} = \frac{V_o}{L} T_{OFF}$$

وبحل المعادلتين (٣- ١٦) و (٣- ١١) يمكن إيجاد قيمة كل من I_{\max} ، I_{\min}

$$(٣- ١٧) \quad I_{\max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2L} T_{OFF}$$

$$(٣- ١٨) \quad I_{\min} = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2L} T_{OFF}$$

وتصبح القيمة العظمى لتموجات تيار الحمل $I_{P-P} = \Delta i_o$ كالتالي:

$$(٣- ١٩) \quad I_{P-P} = I_{\max} - I_{\min}$$

$$(٣- ٢٠) \quad I_{P-P} = T_{OFF} \frac{V_o}{L}$$

ولإيجاد القيمة المتوسطة لتيار المفتاح S أو المصدر الكهربائي I_s و تيار الدايمود الحذافة I_D فيمكن إيجادهما عن طريق دورة التشغيل D كالتالي:

$$I_s = D I_o = \frac{T_{ON}}{T} I_o \quad (٣- ٢١)$$

$$I_D = (1-D) I_o = \frac{T_{OFF}}{T} I_o \quad (٣- ٢٢)$$

حيث أن I_o هي القيمة المتوسطة لتيار الحمل و I_D هي القيمة المتوسطة لتيار الدايمود الحذافة. وحيث أن موجة تيار المصدر الكهربائي I_s عبارة عن موجة تيار غير متواصل وهى عبارة عن نبضات تتكرر كل زمن دوري T ولتحسين شكل هذه الموجة يمكن وضع مرشح يتكون من مكثف على التوازي مع المصدر الكهربائي V_s وهذا المرشح سوف يعمل على استمرارية تيار المصدر الكهربائي.

صيغة التيار غير المتصل Discontinuous Current Mode:

نعلم أن تيار حمل مقطع التيار المستمر دالة في دورة التشغيل D وعند توصيل هذا المقطع بحمل حتى له ممانعة حثية قليلة فتيار الحمل سوف يتذبذب ما بين قيمتي صغرى وعظمى تبعاً لفصل وغلغ المفتاح الإلكتروني S . فعند إغلق المفتاح S تتزايد قيمة تيار الحمل تدريجياً بطريقة اسية طوال فترة إغلق المفتاح حيث يبدأ هذا التيار بقيمة صغرى ثم يزداد هذا التيار حتى يصل إلى قيمته العظمى عند نهاية فترة إغلق المفتاح. وعند فصل المفتاح S فسوف تتناقص تدريجياً قيمة تيار الحمل أيضاً بطريقة اسية حيث يبدأ التيار من قيمة عظمى ثم يبدأ التيار في التناقص حتى يصل إلى قيمته الصغرى ويمكن أن تصل قيمة تيار الحمل الصغرى إلى قيمة صفرية كلما تم تقليل قيمة دورة التشغيل ويقال في هذه الحالة بأن تيار حمل المقطع غير متواصل. يمكن أن تصل قيمة تيار الحمل الصفرية عند أي لحظة زمنية خلال لحظة فصل المفتاح أي خلال الفترة الزمنية $T_{ON} \leq t \leq T$.

يبين الشكل (٣- ٩) موجات الدائرة المبينة بالشكل (٣- ٧) لحالة تيار الحمل غير المتصل حيث يبين الشكل (٣- ٩) موجة جهد الخرج و موجات كل من تيارات الدايمود الحذافة و المصدر الكهربائي والحمل على فرض أن الثابت الزمني للملف τ له قيمة مساوية تقريباً لقيمة زمن إغلق المفتاح S أي الزمن T_{ON} . نلاحظ من الشكل (٣- ٩) موجة تيار الدايمود الحذافة هي موجة تيار الحمل خلال فترة فصل المفتاح S أي خلال الفترة الزمنية $T_{ON} \leq t \leq T$ وموجة تيار المصدر الكهربائي هي موجة تيار الحمل خلال فترة إغلق المفتاح S أي خلال الفترة الزمنية $0 \leq t \leq T_{ON}$.

ويفضل كما تم ذكره سابقاً بأن يكون تيار الحمل متصل ولتجنب حالة تيار حمل غير متصل فيمكن تحقيق ذلك عن طريق اختيار قيم مناسبة لتردد لفصل وغلغ المفتاح أو عن طريق اختيار قيم

مناسبة لقيمة الملف الحثية 'L'. ويمكن تحقيق استمرارية تيار الحمل عن طريق إيجاد اقل قيمة للملف الحثي بحيث لأي قيمة حثية تتجاوز هذه القيمة فسوف يكون تيار الحمل متصل. ويمكن الحصول على اقل قيمة للملف الحثي عن طريق وضع قيمة صفرية لتيار الحمل الأصغر 'I_{min}' بالمعادلة (٣- ١٨) وبالتالي:

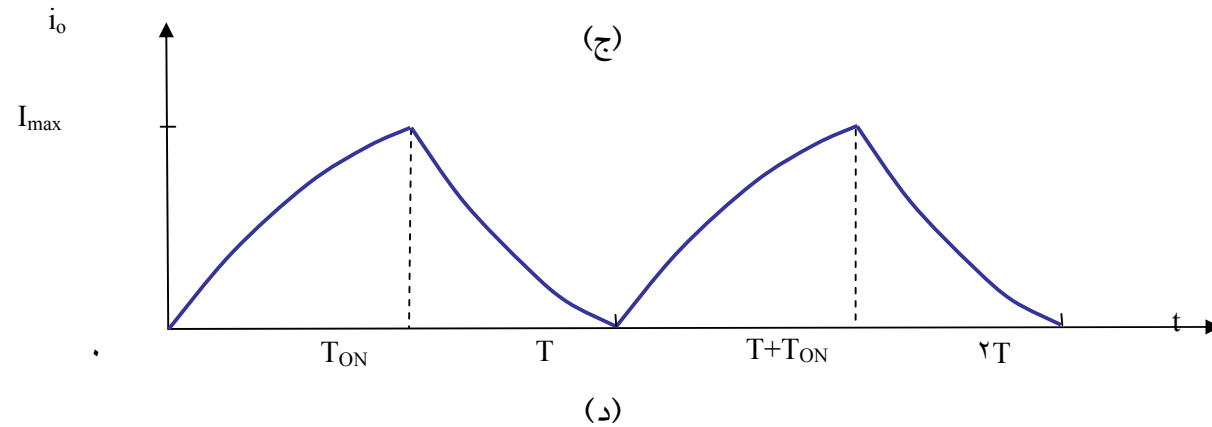
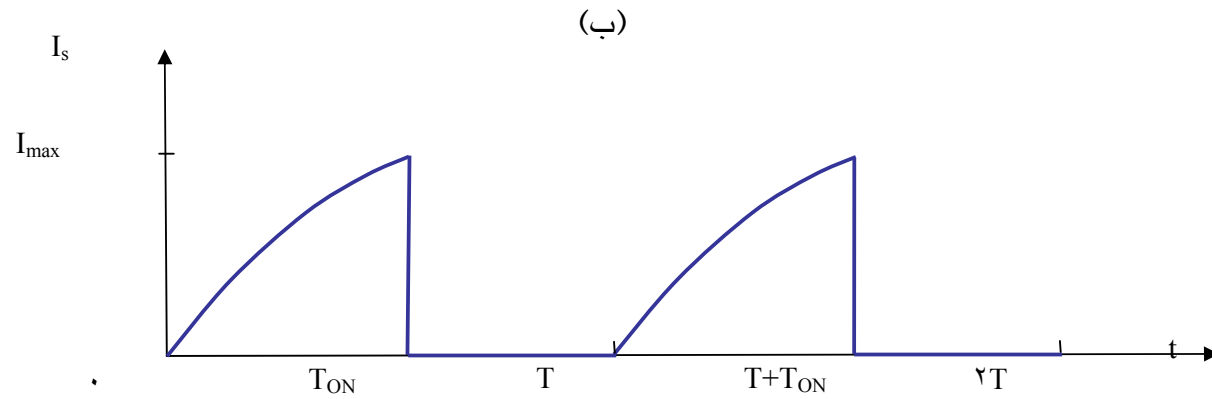
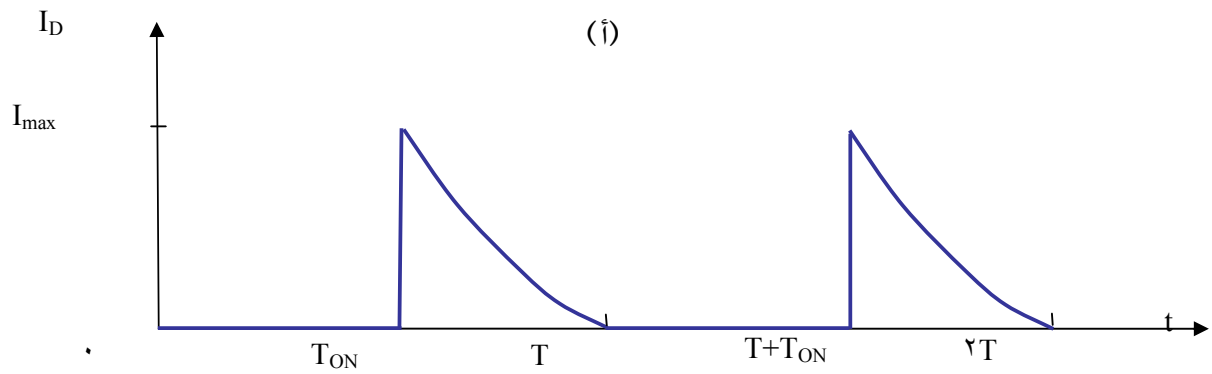
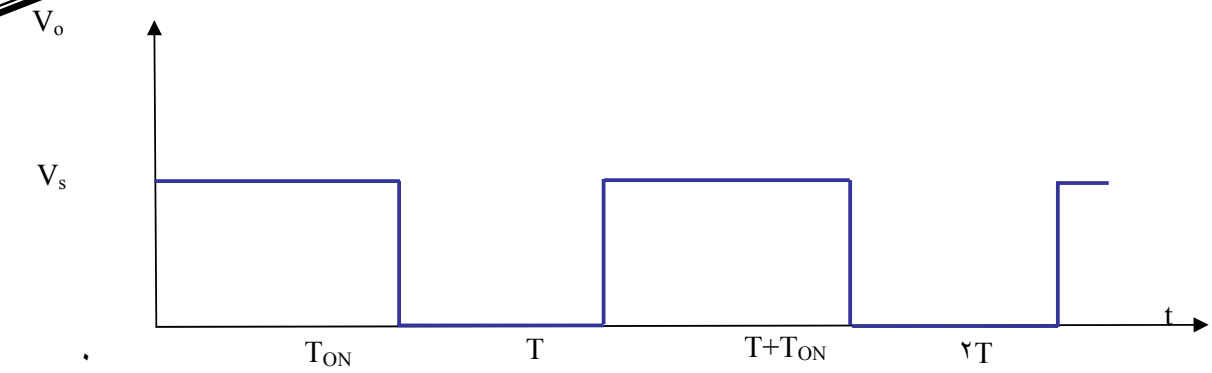
$$I_{\min} = 0 = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2L} T_{OFF}$$

$$\therefore \frac{V_o}{R} = T_{OFF} \frac{V_o}{2L}$$

أو

$$L = R \frac{T_{OFF}}{2} \quad (٢- ٢٣)$$

نلاحظ أن يمكن الحصول على موجة تيار حمل خالي من أي تموجات عن طريقة استعمال قيمة كبيرة جداً للملف الحثي ونظريا تكون هذه القيمة لانهائية.



الشكل (٣-٩): موجات دائرة مقطع تيار مستمر متصل بحمل حثي وتيار الحمل غير متصل.

مثال ٣ - ٢:

يتغذى مقطع تيار مستمر خافض للجهد والمبين بالشكل (٣- ٧) من مصدر جهد كهربي مستمر جهده $V = 100$ ويتصل هذا المقطع بحمل حثي قيمة مقاومته المادية $\Omega = 10$ وتكون القيمة الحثية للملف مساوية $mH = 50$. إذا علمت أن قيمة تردد الفصل والغلق للمفتاح S تساوي $KHz = 1$ وقيمة جهد الخرج (الحمل) تساوي $V = 50$ فأوجد:

- قيمة دورة التشغيل 'D'.
- قيمة زمن إغلاق المفتاح 'T_{ON}'.
- قيمة جهد الحمل الفعال 'V_{o(rms)}'.
- القيمة المتوسطة لتيار الحمل 'I_o'.
- القيمة الصغرى لتيار الحمل 'I_{min}' والقيمة العظمى له 'I_{max}'.
- قيمة تموجات تيار الحمل من القيمة الصغرى إلى القيمة العظمى 'I_{p-p}'.
- قيمة تموجات تيار الحمل من القيمة الصغرى إلى القيمة العظمى 'I_{p-p}' وذلك في حالة زيادة قيمة تردد الفصل والغلق للمفتاح لتصبح $KHz = 5$.
- قيمة تموجات تيار الحمل من القيمة الصغرى إلى القيمة العظمى 'I_{p-p}' وذلك في حالة زيادة قيمة الملف الحثية لتصبح $mH = 250$.

الحل:

- يمكن حساب قيمة دورة التشغيل باستخدام المعادلة (٣- ٤) كالآتي:

$$\therefore V_o = D V_s$$

$$\therefore D = \frac{V_o}{V_s} = \frac{50}{100} = 0.5$$

- يتم حساب زمن إغلاق المفتاح خلال الدورة الواحدة 'T_{ON}' باستخدام المعادلة (٣- ٢) كالآتي:

$$D = \frac{T_{ON}}{T} \quad \therefore T_{ON} = D T = \frac{D}{f}$$

$$\therefore T_{ON} = \frac{0.5}{1000} = 0.5 \text{ ms}$$

- يمكن أيضا حساب زمن فصل المفتاح خلال الدورة الواحدة 'T_{OFF}' كالآتي:

$$T_{OFF} = T - T_{ON} = 1 - 0.5 = 0.5 \text{ ms}$$

- يمكن إيجاد القيمة الفعالة لجهد الحمل باستخدام المعادلة (٣- ٦) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = V_s \sqrt{D} = 100 \sqrt{0.5} = 70.7 \text{ V}$$

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل:

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{50}{100} = 0.5 \text{ A}$$

- يمكن حساب القيمة العظمى والقيمة الصغرى باستخدام المعادلتين (٣-١٧) و (٣-١٨) كالآتي:

$$I_{\max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2L} T_{OFF} = \frac{50}{10} + \frac{50}{2*50} 0.5 = 5.25 \text{ A}$$

$$I_{\min} = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2L} T_{OFF} = \frac{50}{10} - \frac{50}{2*50} 0.5 = 4.75 \text{ A}$$

- يمكن حساب قيمة I_{P-P} كالآتي:

$$I_{P-P} = I_{\max} - I_{\min} = 5.25 - 4.75 = 0.5 \text{ A}$$

- لإيجاد قيمة I_{P-P} والمناظرة لتردد فصل وغلق المفتاح والذي قيمته ٥ KHZ وعند دورة تشغيل ٠,٥ فلا بد من إيجاد قيمه زمن فصل المفتاح كالآتي:

$$T_{OFF} = (1-D)T = \frac{(1-D)}{f}$$

$$\therefore T_{OFF} = \frac{(1-0.5)}{5*10^3} = 0.1 \text{ ms}$$

$$\therefore I_{\max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2L} T_{OFF} = \frac{50}{10} + \frac{50}{2*50} 0.1 = 5.05 \text{ A}$$

$$I_{\min} = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2L} T_{OFF} = \frac{50}{10} - \frac{50}{2*50} 0.1 = 4.95 \text{ A}$$

$$\therefore I_{P-P} = I_{\max} - I_{\min} = 5.05 - 4.95 = 0.1 \text{ A}$$

نلاحظ من نتائج هذا الجزء أن قيمة I_{P-P} قد تناقصت نتيجة لزيادة قيمة تردد فصل وغلق المفتاح

وبالتالي قد حدث تحسين للشكل الموجي والخاص بموجة الحمل.

- لإيجاد قيمة I_{P-P} والمناظرة لقيمته حثية ٢٥٠ mH و تردد فصل وغلق المفتاح قيمته ١ KHZ ودورة

تشغيل ٠,٥ فلا بد من إيجاد قيمه زمن فصل المفتاح كالآتي:

$$T_{OFF} = (1-D)T = \frac{(1-D)}{f}$$

$$\therefore T_{OFF} = \frac{(1-0.5)}{5*10^3} = 0.1 \text{ ms}$$

$$\therefore I_{\max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2L} T_{OFF} = \frac{50}{10} + \frac{50}{2*250} 0.5 = 5.05 \text{ A}$$

$$I_{\min} = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2L} T_{OFF} = \frac{50}{10} - \frac{50}{2*250} 0.5 = 4.95 \text{ A}$$

$$\therefore I_{P-P} = I_{\max} - I_{\min} = 5.05 - 4.95 = 0.1 \text{ A}$$

نلاحظ أيضا من نتائج هذا الجزء أن قيمة $I_{p.p}$ قد تناقصت نتيجة لزيادة القيمة الحثية للملف وبالتالي قد حدث تحسين للشكل الموجي والخاص بموجة الحمل. وبمقارنة النتائج التي قد تم الحصول عليها نجد أن نفس قيمة $I_{p.p}$ قد تم الحصول عليها حيث إن نسبة رفع تردد الفصل والغلق هي نفس نسبة رفع قيمة الملف الحثي.

مثال ٣ - ٣:

يتغذى مقطع تيار مستمر خافض للجهد والمبين بالشكل (٣- ٧) من مصدر جهد كهربائي مستمر جهده $V = 100$ ويتصل هذا المقطع بحمل حثي قيمة مقاومته المادية $\Omega = 10$ وقيمته الحثية $mH = 100$. إذا علمت بأن قيمة تردد الفصل والغلق للمفتاح S تساوي $KHz = 1$ وقيمة زمن إغلاق المفتاح الإلكتروني T_{ON} تساوي $ms = 0.5$ فأوجد:

- قيمة دورة التشغيل D .
- قيمة زمن فصل المفتاح T_{OFF} .
- القيمة المتوسطة لجهد الحمل V_o .
- القيمة المتوسطة لتيار الحمل I_o .
- القيمة الفعالة لجهد الحمل $V_{o(rms)}$.
- اقل قيمة للملف الحثي التي تجعل تيار الحمل متصل.

الحل:

- يمكن تعيين دورة التشغيل كالآتي:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{1 \cdot 10^3} = 1 \text{ ms}$$

$$D = \frac{T_{ON}}{T} = \frac{0.5}{1} = 0.5 \text{ ms}$$

- تعيين قيمة زمن فصل المفتاح كالآتي:

$$T_{OFF} = T - T_{ON} = 1 - 0.5 = 0.5 \text{ ms}$$

- يمكن تعيين القيمة المتوسطة لجهد الحمل كالآتي:

$$V_o = D V_s = 0.5 \cdot 100 = 50 \text{ V}$$

- يمكن تعيين القيمة المتوسطة لتيار الحمل كالآتي:

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{50}{10} = 5 \text{ A}$$

- يمكن تعيين القيمة الفعالة لجهد الحمل كالآتي:

$$V_{o(rms)} = V_s \sqrt{D} = 100 \sqrt{0.5} = 70.7 \text{ V}$$

- يمكن تعيين قيمة اقل قيمة للملف الحثي التي تجعل تيار الحمل متصل كالآتي:

$$L = \frac{T_{OFF}}{2} R = \frac{0.5}{2} * 10 = 2.5 \text{ ms}$$

مثال ٣ - ٤:

يتغذى مقطع تيار مستمر خافض للجهد والمبين بالشكل (٣- ٧) من مصدر جهد كهربي مستمر جهده $V = 200$ ويتصل هذا المقطع بحمل حثي قيمة مقاومته المادية $\Omega = 4$ وقيمته الحثية $mH = 0.500$. إذا علمت بأن القيمة المتوسطة لتيار الحمل $A = 20$ وقيمة تموجات تيار الحمل من القيمة الصغرى إلى القيمة العظمى $I_{p-p} = A$ وان هذا المقطع يعمل عند تردد فصل قيمته $Hz = 100$ وقيمة زمن إغلاق المفتاح الإلكتروني T_{ON} تساوي $ms = 4$ فأوجد:

- قيمة دورة التشغيل D .
- قيمة زمن فصل المفتاح T_{OFF} .
- القيمة المتوسطة لتيار المصدر الكهربي I_s .
- القيمة المتوسطة لتيار الدايمود الحذافة I_D .
- القيمة الصغرى لتيار الحمل I_{min} والقيمة العظمى له I_{max} .

الحل:

- يمكن تعيين دورة التشغيل كالآتي:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{100} = 10 \text{ ms}$$

$$D = \frac{T_{ON}}{T} = \frac{4}{10} = 0.4 \text{ ms}$$

- تعيين قيمة زمن فصل المفتاح كالآتي:

$$T_{OFF} = T - T_{ON} = 10 - 4 = 6 \text{ ms}$$

- يمكن تعيين القيمة المتوسطة لتيار المصدر الكهربي كالآتي:

$$I_s = D I_o = 0.4 * 20 = 8 \text{ A}$$

- يمكن تعيين قيمه تيار الدايمود الحذافة كالآتي:

$$I_D = (1 - D) I_o = (1 - 0.4) * 20 = 12 \text{ A}$$

- يمكن تعيين القيمة الصغرى لتيار الحمل 'I_{min}' والقيمة العظمى له 'I_{max}' كآتي:

$$I_{\max} = I_o + \frac{I_{p-p}}{2} = 20 + \frac{4}{2} = 22 \text{ A}$$

$$I_{\min} = I_o - \frac{I_{p-p}}{2} = 20 - \frac{4}{2} = 18 \text{ A}$$

قد تم حل هذا المثال على اعتبار أن موجة تيار الحمل تأخذ شكلاً خطياً حيث إن الثابت الزمني

'τ' للملف أكبر بكثير من الزمن الدوري لفصل وغلق المفتاح الإلكتروني 'T' علماً بأن

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{500}{4} = 125 \text{ ms and } T = 10 \text{ ms}$$

مثال ٣ - ٥:

يتغذى مقطع تيار مستمر خافض للجهد والمبين بالشكل (٣- ٧) من مصدر جهد كهربي مستمر جهده ٢٥V ويتصل هذا المقطع بحمل مادي قيمة مقاومته ٥ Ω. إذا علمت بأن قيمة تردد الفصل والغلق للمفتاح S تساوي ٤ KHz ؛ وجهد الحمل المتوسط قيمته ١٥ V فأوجد:

- قيمة دورة التشغيل 'D'.

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل 'I_o'.

- اقل قيمة للملف الحثي التي تجعل تيار الحمل متصل.

- القيمة الصغرى لتيار الحمل 'I_{min}' والقيمة العظمى له 'I_{max}'.

الحل:

- يمكن تعيين قيمه دورة التشغيل كآتي:

$$D = \frac{V_o}{V_s} = \frac{15}{25} = 0.6$$

- يمكن تعيين القيمة المتوسطة لتيار الحمل كآتي:

$$I_o = \frac{V_o}{R} = \frac{15}{5} = 3 \text{ A}$$

- يمكن تعيين اقل قيمة للملف الحثي التي تجعل تيار الحمل متصلاً كآتي:

$$T_{OFF} = (1-D)T = \frac{(1-D)}{f} = \frac{(1-0.6)}{4} = 0.1 \text{ ms}$$

$$L = \frac{T_{OFF}}{2} R = \frac{0.1}{2} * 5 = 0.25 \text{ mH}$$

- يمكن تعيين القيمة الصغرى والعظمى لتيار الحمل كالاتي:

$$I_{\max} = \frac{V_o}{R} + \frac{V_o}{2L} T_{OFF} = \frac{15}{5} + \frac{15}{2 * 0.25} * 0.1 = 3 + 3 = 6 \text{ A}$$

$$I_{\min} = \frac{V_o}{R} - \frac{V_o}{2L} T_{OFF} = 3 - 3 = 0$$

نلاحظ أن القيمة الصغرى لتيار الحمل تساوى صفرًا وهذه النتيجة متوقعة حيث تيار الحمل سوف يكون متواصلًا أي متصلًا عند أي قيمة حثية أكبر من التي قد تم الحصول عليها.

أسئلة و تمارين:

- ٣- ١ عرف ما المقصود بدورة التشغيل 'D'؟
- ٣- ٢ ماذا يعنى المصطلح المعروف بمقطع التيار المستمر؟
- ٣- ٣ ما هي التطبيقات العملية لمقطع التيار المستمر.
- ٣- ٤ اشرح مبدأ العمل الرئيسي لمقطع التيار المستمر والخافض للجهد.
- ٣- ٥ ما هي العوامل الرئيسية التي تجعل تيار خرج مقطع التيار المستمر متواصل.
- ٣- ٦ اشرح مبدأ عمل مقطع التيار المستمر والمتصل بحمل حثي في حالة :
 - أ - شكل موجي لتيار حمل متواصل
 - ب - شكل موجي لتيار حمل غير متواصل (متقطع).
- ٣- ٧ ما هو تأثير زيادة تردد إغلاق وفصل المفتاح الإلكتروني لمقطع التيار المستمر على شكل موجة تيار الخرج.
- ٣- ٨ يتصل مقطع جهد مستمر خافض للجهد بمصدر جهد مستمر قيمته ١١٠V وحمل مادي مقاومته 20Ω . إذا علمت بأن هذا المقطع يعمل بتردد قيمته ١KHz ودورة تشغيل ٠.٤ فأوجد :
 - أ - القيمة المتوسطة لجهد الخرج.
 - ب - القيمة الفعالة لتيار الخرج.
 - ج - القيمة الفعالة لجهد الخرج.
 - د - القيمة العظمى لتيار الخرج.
 - هـ - القدرة المغذاة للحمل.

٣- ٩- يتصل مقطع جهد مستمر خافض للجهد بمصدر جهد مستمر قيمته $100V$ وحمل مادي قيمته 5Ω وقيمة جهده $50V$. أوجد:

أ - قيمة دورة التشغيل.

ب - القيمة المتوسطة والفعالة لتيار الدخل (المصدر).

٣- ١٠- يعمل مقطع جهد مستمر خافض للجهد عند تردد قيمته $1KHz$ ويتصل هذا المقطع بمصدر جهد مستمر قيمته $110V$ وقيمة جهد الخرج المتوسط $75V$. أوجد قيمة أزمنة إغلاق وفصل المفتاح الإلكتروني للمقطع خلال دورة كاملة (T_{ON}, T_{OFF}).

٣- ١١- يتصل مقطع جهد مستمر خافض للجهد بمصدر جهد مستمر قيمته $110V$ وحمل حثي مقاومته المادية 8Ω وقيمته الحثية $4mH$. إذا علمت بأن هذا المقطع يعمل بتردد قيمته $1KHz$ ودورة تشغيل 0.4 وأنه يعمل بحيث يجعل تيار الحمل متواصل، فأوجد:

أ - القيمة المتوسطة لجهد وتيار الحمل.

ب - القيمة الفعالة لجهد الخرج.

ج - القيمة العظمى والصغرى لتيار الخرج.

د - القيمة العظمى للقيمة العظمى للتيار التموجي .

هـ - القيمة العظمى للقيمة العظمى عندما يزداد تردد المقطع إلى $5KHz$.

و - أقل قيمة حثية للملف تجعل تيار الحمل متواصل.



المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

إلكترونيات القوى

العواكس

العواكس

٤

الأهداف:

بعد انتهاء الطالب من دراسة هذه الوحدة_لابد أن يكون الطالب ملما وقادرا على تفسير التالي:

- المقصود بالعاكس
- تطبيقات العاكس العملية
- وصف مبدأ العمل الرئيسي لعاكس مصدر الجهد
- وصف مبدأ العمل الرئيسي لعاكس مصدر التيار
- مبدأ عمل العاكس القنطري والعاكس نصف القنطري للعواكس مصدر الجهد
- تفسير طرق التقنية المختلفة لعاكس الجهد
- وصف مبدأ عمل تعديل عرض النبضة
- وصف مبدأ عمل تعديل عرض النبضة الجيبي

مقدمة:

قد تم دراسة بعض دوائر الموحدات المحكومة أحادية الطور في الفصل الثاني و وظيفة هذه الموحدات هي تحويل الجهد الجيبي المتناوب ذات القيمة الفعالة الثابتة إلى جهد مستمر متغير القيمة ويتم التحكم في قيمته عن طريق التحكم في زاوية إشعال الثايرستور. وقد تم دراسة مقطعات التيار المستمر في الفصل الثالث ووظيفة هذه المقطعات هي الحصول على جهد خرج متغير القيمة من جهد دخل ثابت القيمة عن طريق استخدام دائرة إلكترونية تعمل كمفتاح وباستخدام هذه النوعية من المقطعات يمكن التحكم في سرعة المحرك المستمر على سبيل المثال والذي يتم تغذيته عن طريق جهد ثابت مستمر. وسوف يتم دراسة العواكس 'Inverters' في هذا الفصل ووظيفة هذا العاكس هو الحصول على جهد متناوب من جهد ثابت مستمر ويمكن التحكم في جهد وتردد خرج العاكس عن طريق التحكم في المفاتيح الإلكترونية والخاصة بهذه العواكس وعادة ما تكون هذه المفاتيح عبارة عن نبأض أو عناصر ذات الفصل والغلق المحكوم مثل الثايرستور والموسفت و IGBT ... وهكذا و تعتبر العواكس دوائر إستاتيكية حيث لا تحتوي دوائرها على أي أجزاء متحركة وتحويل هذه العواكس قدرة المصدر المستمر إلى قدرة مصدر متناوب بالجهد والتردد المطلوب. وعادة ما تكون موجة خرج العاكس على شكل موجة غير جيبيية لزمناً دوري معين و يوجد أنواع عديدة من العواكس حيث يتم تقسيم العواكس تبعاً إلى:

- عدد الأوجه المتكون منها العاكس
- نوعية أشباه الموصلات المستخدمة لبناء العاكس

- مبدأ عمل إطفاء أشباه الموصلات المستخدمة
- شكل موجات الخرج الخاصة بالعواكس

وسوف يتم مناقشة ودراسة النوعين الرئيسيين وهما:

١. مصدر الجهد العاكس 'Voltage Source Inverter (VSI)' ويتصف هذا المصدر بأن له جهد دخل ثابت مستمر.
 ٢. مصدر التيار العاكس 'Current Source Inverter (CSI)' ويتصف هذا المصدر بأن له تيار دخل ثابت مستمر.
- وعادة ما تكون العواكس أحادية أو ثلاثية الطور وسوف نكتفي بدراستنا في هذا الباب بالعواكس أحادية الطور.

التطبيقات الصناعية للعواكس

تستخدم العواكس في العديد من التطبيقات الصناعية المهمة مثل:

- التحكم في سرعة المحركات الحثية (induction motors) و المحركات المتزامنة (synchronous motors).
- التسخين بطريقة الحث (induction heating).
- مصادر التغذية الخاصة بالطائرات (aircraft power supplies).
- مصادر عدم انقطاع التيار (uninterruptible power supplies UPS).
- نقل القدرة المستمرة ذات الجهد الفائق (high-voltage DC transmission).
- مصادر التغذية الاحتياطية (standby power supplies).

وعادة ما يكون مصدر جهد الدخل للعاكس عبارة عن بطارية (battery) لها جهد ثابت مستمر أو عبارة عن خلية شمسية (solar cell) بينما تكون الأنواع الفعلية للعواكس لها جهود إما ٢٢٠ فولت بتردد ٦٠ هارترز أو ٢٢٠ فولت بتردد ٤٠٠ هارترز بينما للعواكس ثلاثية الطور ذات القدرة العالية تكون أنواع العواكس الفعلية إما ٢٢٠/٣٨٠ فولت بتردد ٥٠ هارترز أو ١٢٠/٢٠٨ فولت بتردد ٦٠ هارترز أو ١١٥/٢٠٠ فولت بتردد ٤٠٠ هارترز.

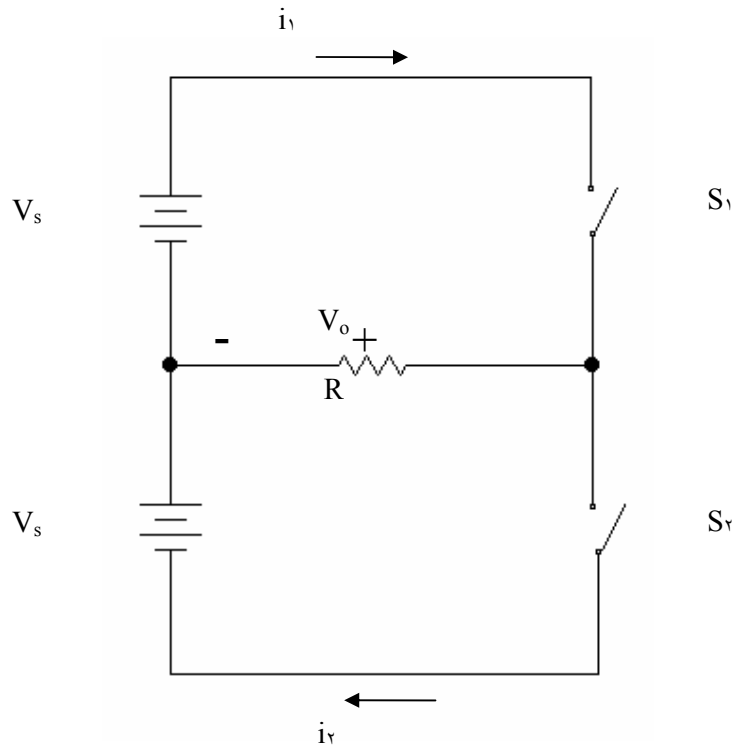
The Basic Inverter العاكس الرئيسي

حالة الحمل المادي R:

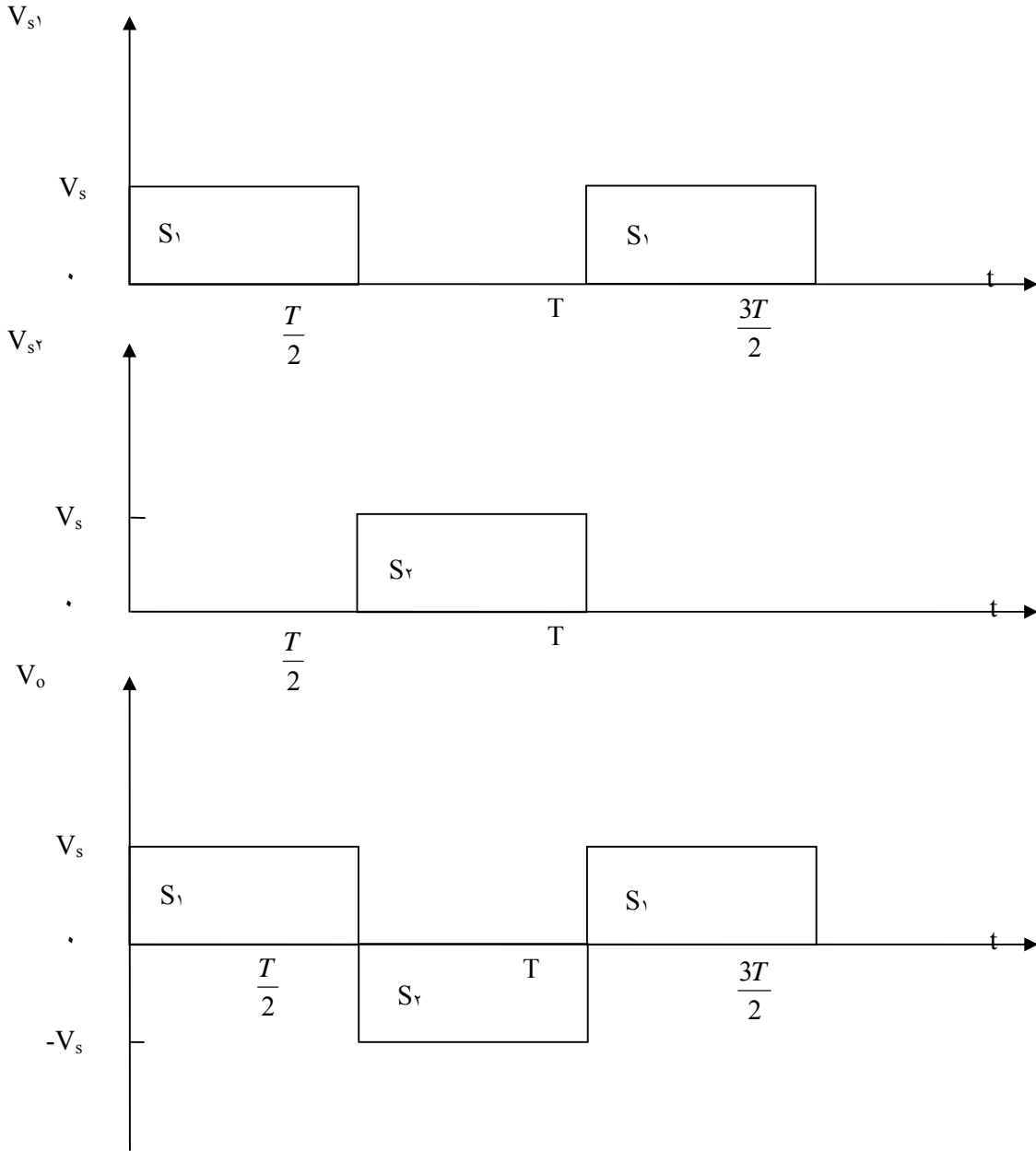
يبين الشكل (٤- ١) الدائرة الرئيسية لعاكس نصف قنطري أحادي الطور ويكون الهدف الرئيسي من استخدام هذه الدائرة هو توليد جهد متناوب أحادي الطور من مصدر جهد ثابت مستمر. تتكون الدائرة من عدد ٢ مفاتيح إلكترونية حيث يتم التحكم في غلقها وفتحها عن طريق نبضات بوابات هذه المفاتيح الآتية من دائرة الإشعال الخاصة بهما. وعادة يتم تصميم النبضات بحيث يتم إغلاق المفتاح S_1 بينما يكون المفتاح S_2 مفصول والعكس صحيح ولتحقيق هذا لا بد أن تكون النبضات الخاصة بالمفتاحين S_1 ، S_2 لها الموجات المبينة بالشكل (٤- ٢) بحيث عندما يكون جهد النبضة الخاصة بالمفتاح S_1 لها قيمة عالية تكون قيمة جهد النبضة الخاصة بالمفتاح S_2 لها قيمة منخفضة في نفس الفترة الزمنية والعكس صحيح وبالتالي يتم توصيل الحمل بمصدر الجهد الثابت المستمر V_s عن طريق المفتاحين S_1 ، S_2 كل منهما على حدة. فعندما يكون المفتاح S_1 مغلقاً يكون المفتاح S_2 مفصلاً وبالتالي تكون قيمة الجهد الناشئ على طرفي الحمل له قيمة جهد المصدر الثابت المستمر بينما عندما يتم إغلاق المفتاح S_2 وفتح المفتاح S_1 تكون قيمة الجهد الناشئ على طرفي الحمل له قيمة جهد المصدر الثابت المستمر وبإشارة سالبة في هذه الحالة وبالتالي يتم الحصول على موجة جهد متناوب و على هيئة شكل مستطيل زمنها الدوري 'T' و يبين الشكل (٤- ٢) موجة خرج العاكس و يمكن تعيين تردد موجة خرج العاكس 'f_o' عن طريق قيمة الزمن الدوري حيث أن:

(٤- ١)

$$f_o = \frac{1}{T} \text{ Hz}$$



الشكل (٤ - ١): الدائرة الرئيسية لعاكس نصف قنطري أحادي الطور متصل بحمل مادي R .



الشكل (٤-٢): موجتا نبضات المفتاحين S_1 و S_2 وجهد خرج العاكس نصف القنطري أحادي الطور

ويمكن التحكم في قيمة تردد جهد الخرج عن طريق التحكم في زمن فتح وغلق المفاتيح الإلكترونية S_1 ، S_2 . وعادة ما تكون موجة جهد الخرج المستطيلة للعاكس مناسبة لبعض التطبيقات غير المهمة بينما تكون موجة جهد خرج جيبي هي الموجة المثالية المطلوبة للعديد من التطبيقات.

ولجعل موجة خرج العاكس موجة جيبيية أو موجة أقرب للموجة الجيبية فيمكن تحقيق ذلك باستخدام طريقتين فالطريقة الأولى تتحقق بوضع مرشح 'filter' عند خرج العاكس وغالبا عند تصميم هذا المرشح يراعى أن هذا المرشح لا بد أن يتحمل قدرة خرج العاكس ولذلك يكون حجم هذا المرشح ضخماً تبعاً لحجم قدرة العاكس وبالتالي تكون تكلفة ووزن هذا المرشح كبيرة إلى حد ما وأيضاً كفاءة العاكس سوف تقل نتيجة للفاقد الموجود بالمرشح. والطريقة الثانية يمكن أن تتحقق باستخدام طريقة تعديل عرض النبضة 'PWM'.

وكما ذكر من قبل في الفصل السابق بأن هذه الطريقة تعتمد على فتح وفضل المفاتيح الإلكترونية وتعتمد على شكل النبضات الواصلة من دوائر إشعال هذه المفاتيح الإلكترونية وباستخدام هذه الطريقة يمكن تعديل شكل خرج العاكس وتحويله إلى أقرب موجة جيبيية.

مصدر الجهد العاكس (VSI) Voltage Source Inverter

يعتبر مصدر الجهد العاكس هو أكثر الأنواع السائدة والمستخدمه لأنواع العواكس ويكون مصدر تغذية الجهد المستمر له قيمة ثابتة و لا يعتمد على تيار الحمل المسحوب و يمكن الحصول على مصدر تغذية الجهد الثابت المستمر من مصدر مستقل مثل البطارية أو من موحد محكوم و يوضع عادة مكثف كبير السعة عبر مصدر التغذية المستمر للعاكس و وظيفة هذا المكثف المحافظة على عدم حدوث أي تغيير لقيمة مصدر التغذية المستمر للعاكس حيث شحن و تفريغ المكثف يحافظ على استقرار قيمة مصدر التغذية و يحول العاكس جهد التغذية المستمر إلى موجة مربعة متناوبة.

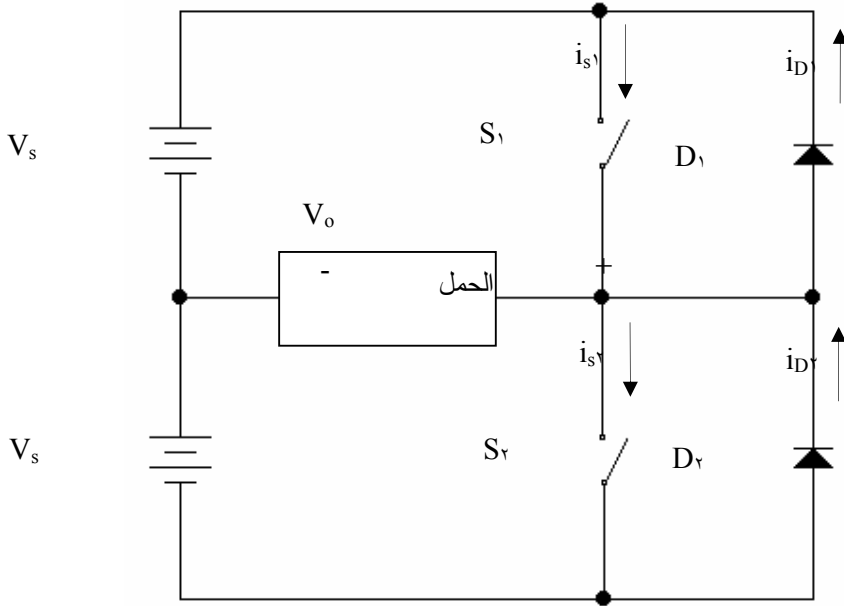
مصدر الجهد العاكس نصف القنطري أحادي الطور (VSI) Inverter ١-Phase Half-Bridge

يتم استخدام دائرة مصدر الجهد العاكس نصف القنطري في تطبيقات القدرة المتخصصة و يبين الشكل (٤- ٣) دائرة مصدر الجهد العاكس نصف القنطري أحادي الطور وتتكون هذه الدائرة من عدد ٢ مفاتيح إلكترونية S_1, S_2 و مصدرين تغذية جهد مستمر لهما نفس قيمة الجهد ' V_s ' وعدد ٢ دايود يقوموا بوظيفة الدايدو الحذافة و ذلك في حالة وجود حمل حتي. و يمكن أن تكون المفاتيح الإلكترونية المستخدمة عبارة عن ترنزستورات القوى أو الموسفت أو ثايرستورات بدوائر الإطفاء الخاصة بهم ... وهكذا.

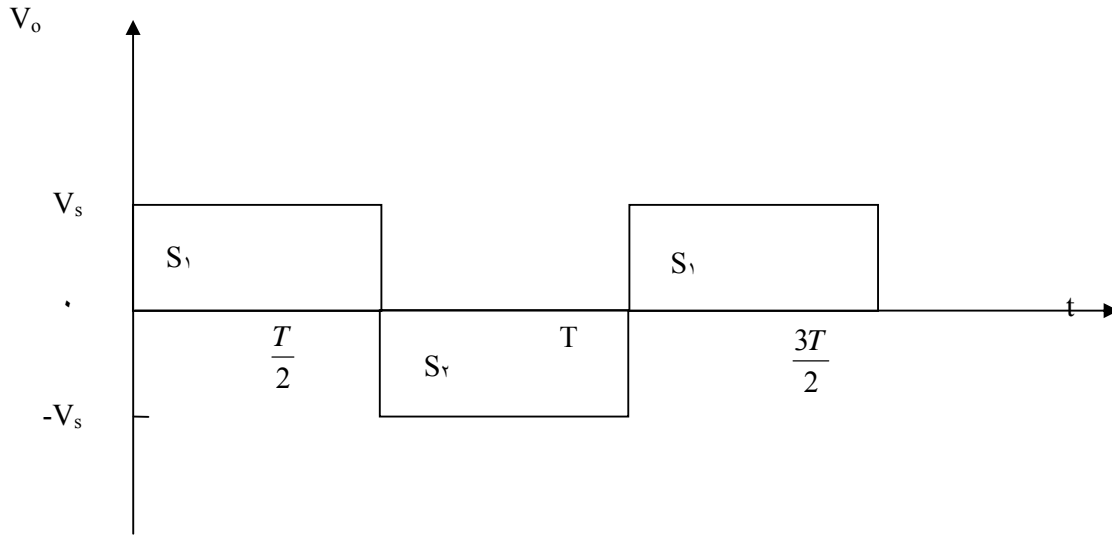
حالة الحمل المادي R Case of a Resistive Load R

يتم إغلاق و فصل المفاتيح الإلكترونية S_1, S_2 للدائرة المبينة بالشكل (٤-٣) في حالة وجود حمل مادي R بحيث عندما يتم إغلاق المفاتيح S_1 يكون المفاتيح S_2 مفصول و ذلك خلال الفترة الزمنية $0 \leq t \leq T/2$ وتكون قيمة جهد خرج الحمل المادي لها قيمة ثابتة قيمتها ' V_s ' حيث يمر التيار خلال الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد المستمر الثابت و الحمل المادي و المفاتيح S_1 و تكون قيمة تيار الخرج هي نفسها تيار الحمل و قيمته i_1 وعند إغلاق المفاتيح S_2 يكون المفاتيح S_1 مفصولاً خلال الفترة الزمنية $T/2 \leq t \leq T$ حيث يتم فصل المفاتيح S_1 عند اللحظة الزمنية $t = T/2$ و تكون قيمة جهد خرج الحمل المادي لها قيمة ثابتة ' $-V_s$ ' في هذه الفترة الزمنية حيث يمر التيار i_2 خلال الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد الثابت المستمر و الحمل المادي و المفاتيح S_2 و يكون اتجاه مرور التيار i_2 عكس مرور التيار i_1 و يبين الشكل (٤-٤) موجة جهد الخرج في حالة وجود حمل مادي R حيث إن هذه الموجة ترددها f و تكون قيمة هذا التردد $1/T$ و يمكن التحكم في قيمة تردد خرج العاكس بالتحكم في قيمة الزمن الدوري لموجة جهد الخرج.

ويجب مراعاة أن لا يحدث إغلاق لكل من المفاتيح الإلكترونية عند أي لحظة ما حيث سوف يحدث هذا دائرة قصر على أطراف مصدري الجهد الثابت ' V_s '.



الشكل (٤-٣): دائرة مصدر الجهد العاكس نصف القنطري أحادي الطور

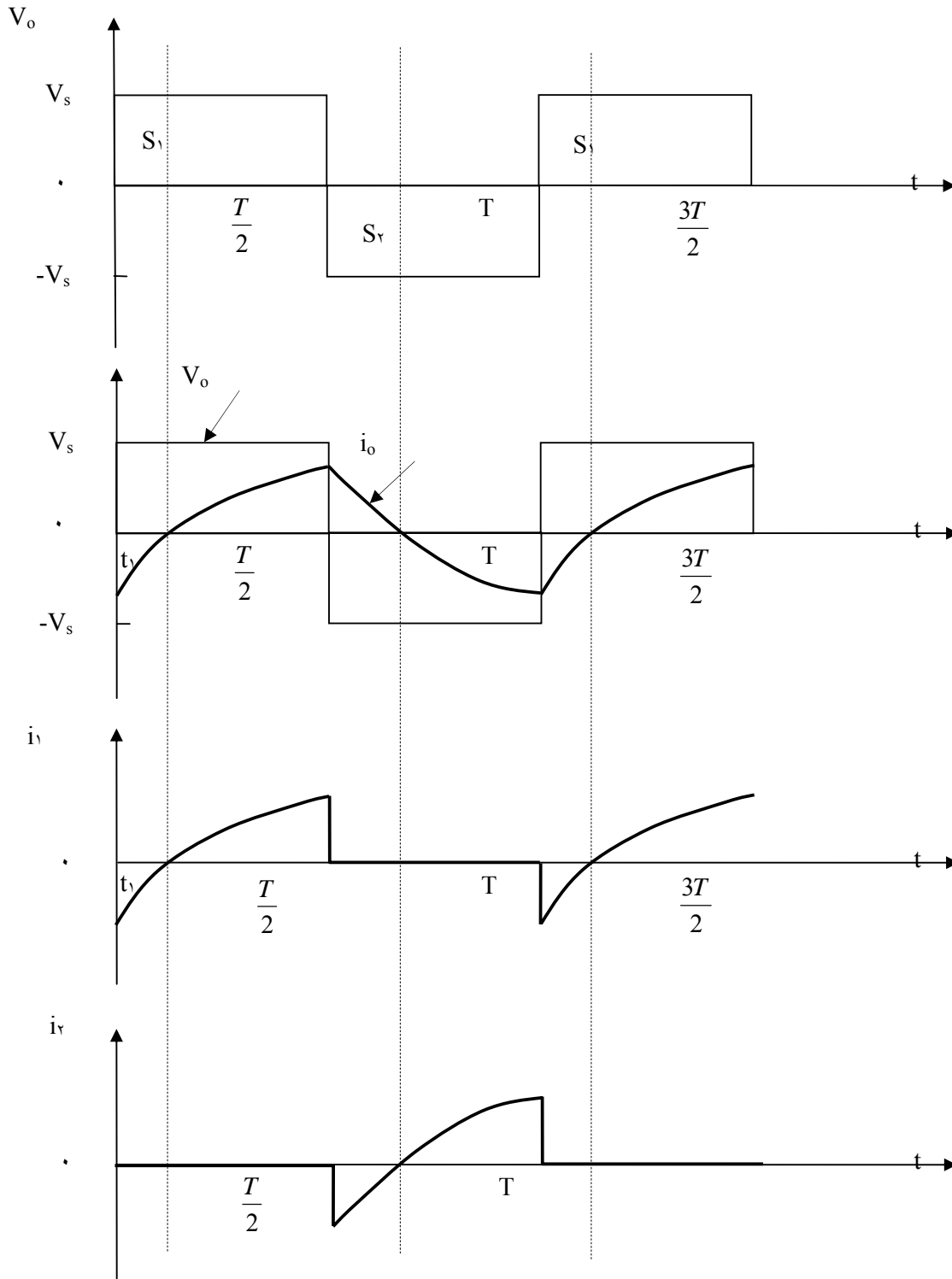


الشكل (٤-٤): موجة جهد خرج العاكس النصف القنطري أحادي الطور

حالة الحمل الحثي Case of an Inductive load

كما سبق دراسته في الفصول السابقة فإنه في حالة وجود أحمال حثية فإن تيار الخرج i_o لا يمكن أن يعكس اتجاهها عند نفس اللحظة التي يغير فيها جهد الخرج V_o قطبيته وفي تلك الحالة لابد من استخدام الداويد الحذافة و الذي يسمح بمرور تيار الحمل خلاله بنفس الاتجاه المار لتيار الخرج. و يبين الشكل (٤-٥) موجات كل من جهد الخرج و تيار الخرج بالإضافة إلى كل من تيار المصدرين. ويمكن إيجاز عمل هذه الحالة تحت حالة الحمل الحثي كالآتي:

خلال الفترة الزمنية $0 \leq t \leq T/2$ يكون جهد الخرج V_o موجب و بالتالي خلال هذه الفترة الزمنية يكون كل من المفتاح الإلكتروني S_1 أو الداويد الحذافة D_1 في حالة توصيل. يكون تيار الخرج i_o له قيمة سالبة نتيجة وجود الحمل الحثي و الذي يؤدي لتأخير تيار الحمل و خلال الفترة الزمنية $0 \leq t \leq t_1$ يمر التيار خلال الدائرة المغلقة و المكونة من الداويد الحذافة D_1 و الحمل الحثي و مصدر الجهد المستمر الثابت V_s بينما خلال الفترة الزمنية $t_1 \leq t \leq T/2$ يكون تيار الخرج موجياً و بالتالي يمر التيار خلال الدائرة المغلقة و المكونة من المفتاح الإلكتروني S_1 و مصدر الجهد الثابت المستمر و الحمل الحثي مع ملاحظة بأن النبضة اللازمة لفتح المفتاح S_1 سوف تعطى له خلال الفترة الزمنية $0 \leq t \leq T/2$ و لكن هذا المفتاح سوف يوصل فقط خلال الفترة الزمنية $t_1 \leq t \leq T/2$ حيث يكون تيار الخرج موجياً.



الشكل (٤-٥): موجات جهد و تيار الخرج و تيار المصدرين

كما سبق تفسيره و عند اللحظة الزمنية $t = T/2$ سوف يتم فصل المفتاح S_1 و بالتالي سوف يتحول تيار الخرج من الدائرة المغلقة و المكونة من الحمل و المفتاح S_1 و المصدر الثابت المستمر V_s إلى الدائرة

المكونة من الحمل و المصدر الثابت المستمر الموجود بأسفل و الدايمود الحذافة D_r و عند اللحظة الزمنية $t=t_r$ يتم فصل التيار عن الدايمود الحذافة D_r حيث التيار سوف يتحول إلى قيمة سالبة بعد هذه اللحظة و بالتالي سوف يوصل المفتاح S_r خلال الفترة الزمنية $t_r \leq t \leq T$ و يمر التيار خلال الدائرة المغلقة والمكونة من المصدر الثابت المستمر و الحمل الحثي و المفتاح S_r و نلاحظ أن المفتاح S_r معطى له نبضة خلال الفترة الزمنية $T/2 \leq t \leq T$ حتى يتم قدحه خلال هذه الفترة الزمنية و سوف يتكرر عمل الدائرة كل فترة زمنها الدوري T . يبين الشكل (٤- ٥) العناصر الإلكترونية الموصلة خلال الفترات الزمنية المختلفة و نلاحظ بأن تيار الخرج i_o يكون متأخر عن جهد الخرج حيث إن الحمل حثي و أيضا يتم توصيل الدايمودات الحذافة عندما يكون جهد و تيار الخرج لهما قطبية عكسية كما هو مبين بالشكل (٤- ٥) و يظهر الشكل تيارى مصادر التغذية الثابتة i_r و i_o و يمكن أيضا الحصول على هذين التيارين من موجة تيار الخرج i_o حيث يتم تغذية الحمل من الجزء العلوي لمصدر التغذية الثابت المستمر و ذلك خلال الفترة الزمنية الموجبة لجهد الخرج $0 \leq t \leq T/2$ بينما يتم تغذية هذا الحمل من الجزء السفلي لمصدر التغذية المستمر خلال الفترة الزمنية السالبة لجهد الخرج $T/2 \leq t \leq T$.

القيمة الفعالة لجهد خرج دائرة العاكس نصف القنطري أحادي الطور:

يمكن تمثيل القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس نصف القنطري أحادي الوجه رياضيا كالاتي:

$$V_o = V_s \quad (٤- ٢)$$

المركبة الأولى الفعالة لجهد الخرج $V_{1(rms)}$:

يمكن تمثيل القيمة اللحظية لجهد خرج دائرة العاكس والمبينة بالشكل (٤- ٣) باستخدام

متسلسلة فورييه رياضيا كالاتي:

$$V_{1(rms)} = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_s}{n\pi} \sin n\omega t \quad (٤- ٣)$$

حيث أن n هي رتبة التوافقيات و ω هي قيمة التردد الزاوي لجهد الخرج و وحدتها rad/s و يمكن تعيين

القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى لجهد خرج العاكس و التي لها $n = 1$ كالاتي:

$$V_{1(rms)} = \frac{4V_s}{\pi\sqrt{2}} = 0.9V_s \quad (٤- ٤)$$

مثال ٤ - ١:

تتصل دائرة عاكس نصف قنطري أحادي الطور والمبينة بشكل (٤ - ٣) بحمل مادي 'R' قيمته 2.4Ω ومصدر جهد ثابت مستمر V_s قيمته $24 V$. أوجد:

- القيمة الفعالة لجهد الخرج $V_{o(rms)}$.
- القيمة الفعالة لتيار الخرج $I_{o(rms)}$.
- القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى $V_{1(rms)}$.
- قدرة الخرج P_o .

الحل:

(أ) يمكن إيجاد القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس نصف القنطري باستخدام المعادلة (٤ - ٢) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = V_s = 24 \text{ V}$$

(ب) يمكن إيجاد القيمة الفعالة لتيار العاكس كالآتي:

$$I_{o(rms)} = \frac{V_{o(rms)}}{R} = \frac{24}{2.4} = 10 \text{ A}$$

(ج) يمكن أيضا استنتاج القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى باستخدام المعادلة (٤ - ٣) كالآتي:

$$V_{1(rms)} = 0.9V_s = 0.9 * 24 = 21.6 \text{ V}$$

(د) يمكن حساب قدرة الخرج كالآتي:

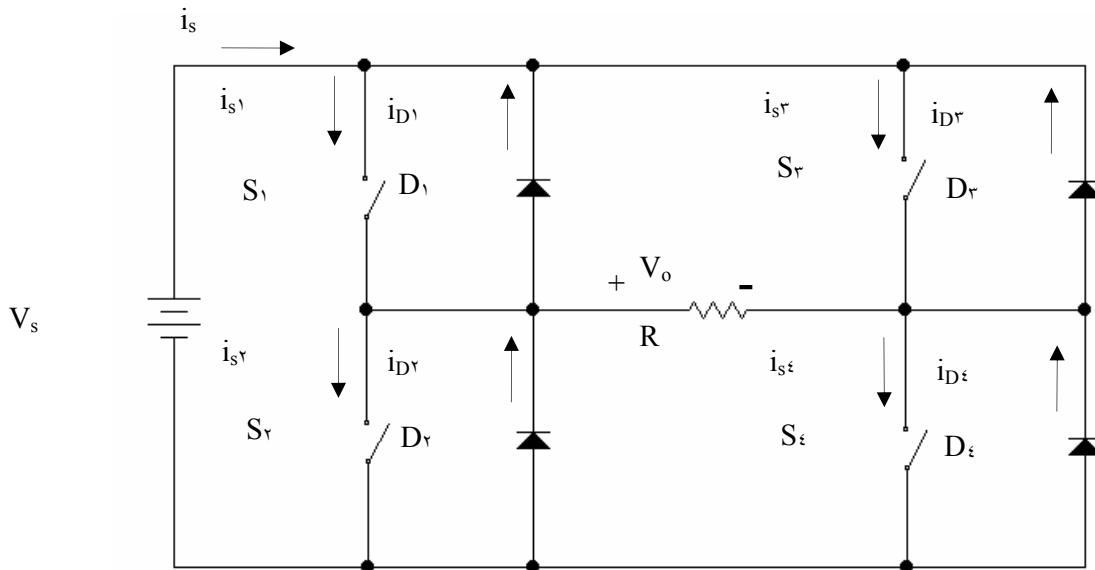
$$P_o = \frac{V_{o(rms)}^2}{R} = \frac{24^2}{2.4} = 240 \text{ W}$$

مصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور ١-Phase Voltage Source Bridge Inverter

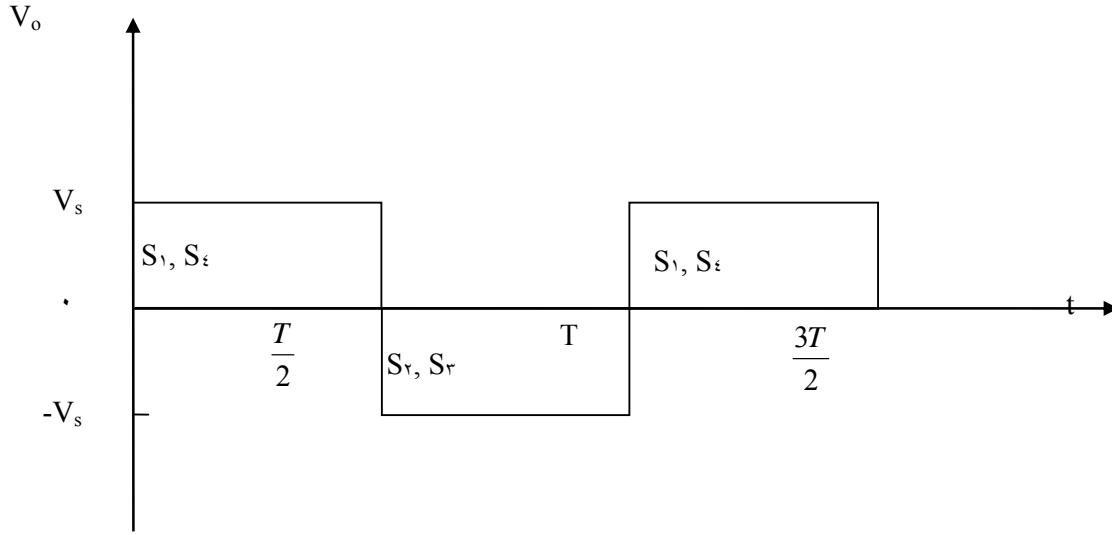
حالة الحمل المادي R

يمكن تكوين أو بناء دائرة مصدر الجهد العاكس القنطري أحادية الطور بإدماج دائرتي مصدر جهد عاكس نصف قنطري أحادي الطور وبين الشكل (٤ - ٦) الدائرة الأساسية لمصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور ويتطلب لبناء هذه الدائرة عدد ٤ مفاتيح إلكترونية وعدد ٤ دايودات حذافة و مصدر جهد ثابت مستمر. تكون قيمه جهد خرج دائرة العاكس ضعف قيمة جهد خرج دائرة العاكس نصف القنطري أحادي الطور. يتم إغلاق وفصل المفاتيح الإلكترونية لهذه الدائرة بطريقة قطرية

أي بمعنى عندما يتم إغلاق كل من المفتاحين S_1 و S_2 يكون كل من المفتاحين S_3 و S_4 مفصولين بينما عند إغلاق المفتاحين S_3 و S_4 يتم فصل المفتاحين S_1 و S_2 وهكذا وبالتالي سوف يوصل كل من المفتاحين S_1 و S_2 أو المفتاحين S_3 و S_4 فترة زمنية قيمتها نصف قيمة الزمن الدوري ' $T/2$ ' ويمكن إيجاز فكرة عمل الدائرة كالتالي: يتم إغلاق المفتاحين S_1 و S_2 خلال الفترة الزمنية $0 \leq t \leq T/2$ وذلك بإعطاء نبضات كافية لفتحهما من دائرة الإشعال الخاصة بهما وخلال هذه الفترة الزمنية يظل كل من المفتاحين S_3 و S_4 مفصولان وبالتالي سوف يمر التيار خلال الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد الثابت المستمر والحمل المادي والمفتاحان S_1 و S_2 وبالتالي تكون قيمة جهد الخرج ' V_o ' هي نفسها قيمة جهد المصدر الثابت المستمر ' V_s ' ويتم أيضا فصل المفتاحين S_1 و S_2 وإغلاق المفتاحين S_3 و S_4 خلال الفترة الزمنية $T/2 \leq t \leq T$ وخلال هذه الفترة الزمنية يمر التيار خلال الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد الثابت المستمر والحمل المادي والمفتاحين S_3 و S_4 ويكون مرور التيار في اتجاه عكسي لمروره في الفترة الزمنية السابقة وبالتالي تكون قيمة جهد الخرج هي نفسها قيمة جهد المصدر الثابت المستمر ولكن بإشارة سالبة أي تكون قيمتها ' $-V_o$ ' وبالتالي سوف تكون شكل موجة جهد الخرج والمبينة بالشكل (٤-٧) على هيئة موجة مربعة قيمتها العظمى V_s . ونلاحظ بأن تردد موجة جهد الخرج يمكن التحكم فيها بالتحكم في زمن وغلق المفاتيح الإلكترونية حيث إن تردد موجة الخرج ' f_o ' تعتمد قيمتها على قيمة الزمن الدوري ' T ' حيث إن $f_o = 1/T$.



الشكل (٤-٦): الدائرة الأساسية لمصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور والمتصل بحمل



الشكل (٤-٧): موجة جهد خرج مصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور

القيمة الفعالة لجهد دائرة العاكس القنطري أحادي الطور $V_{o(rms)}$:

يمكن تمثيل معادلة جهد الخرج الفعال لدائرة العاكس القنطري بالمعادلة (٤-٢) حيث إن موجة جهد خرج هذا العاكس لها نفس موجة دائرة العاكس نصف القنطري.

المركبة الأولى الفعالة لجهد خرج العاكس القنطري $V_{1(rms)}$:

كما سبق الإشارة إليه في الفقرة السابقة فيمكن تمثيل معادلتى القيمة اللحظية لجهد الخرج والقيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى لجهد الخرج والتي لها $n = 1$ بالمعادلات (٤-٣) و (٤-٤) على الترتيب.

مثال ٤-٢:

تتصل دائرة عاكس قنطري أحادي الطور والمبينة بالشكل (٤-٣) بحمل مادي 'R' قيمته 2.4Ω ومصدر جهد ثابت مستمر V_s قيمته $48 V$. أوجد:

- القيمة الفعالة لجهد الخرج $V_{o(rms)}$.
- القيمة الفعالة لتيار الخرج $I_{o(rms)}$.
- القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى $V_{1(rms)}$.
- قدرة الخرج P_o .

الحل:

بما أن الدائرة المستخدمة في هذا المثال مكافئة للدائرة المستخدمة في المثال السابق "مثال (٤- ١)" والقيمة المادية للحمل هي نفسها القيمة المستخدمة بالمثال السابق وقيمة جهد المصدر الثابت المستمر هي نفسها قيمة جهدي المصدران الثابتان المستمران بالمثال السابق وبالتالي يمكن استخدام نفس القوانين التي تم استخدامها بالمثال السابق في حل هذا المثال كالآتي:

(أ) يمكن إيجاد القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس نصف القنطري باستخدام المعادلة (٤- ٢) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = V_s = 48 \text{ V}$$

(ب) يمكن إيجاد القيمة الفعالة لتيار العاكس كالآتي:

$$I_{o(rms)} = \frac{V_{o(rms)}}{R} = \frac{48}{2.4} = 20 \text{ A}$$

(ج) يمكن أيضا استنتاج القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى باستخدام المعادلة (٤- ٣) كالآتي:

$$V_{1(rms)} = 0.9V_s = 0.9 * 48 = 43.2 \text{ V}$$

(د) يمكن حساب قدرة الخرج كالآتي

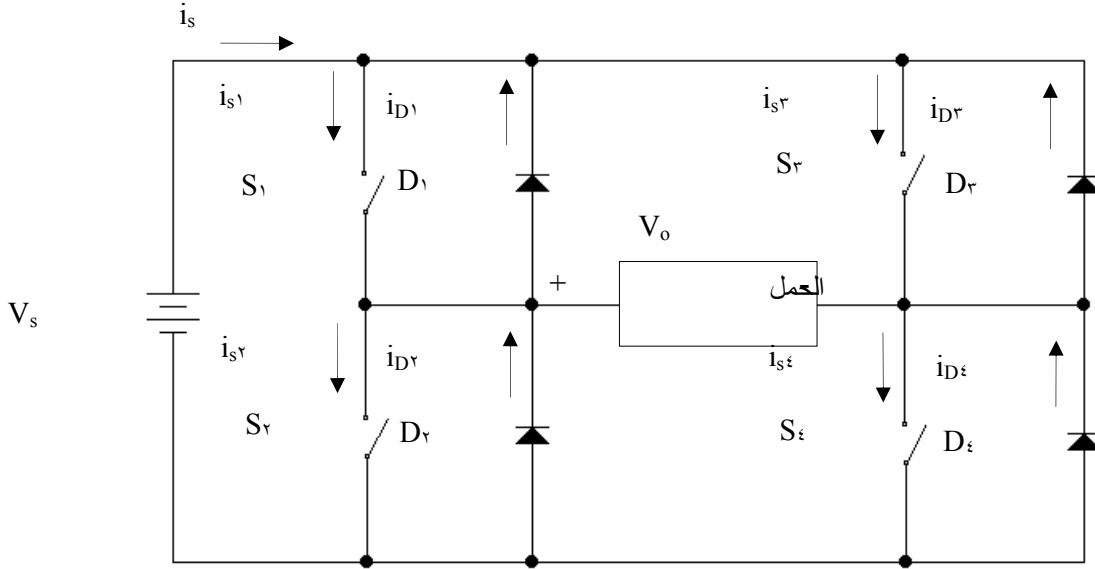
$$P_o = \frac{V_{o(rms)}^2}{R} = \frac{48^2}{2.4} = 960 \text{ W}$$

بمقارنة نتائج هذا المثال والمثال السابق نجد أن قيمة جهد خرج العاكس القنطري ضعف قيمة جهد خرج العاكس نصف القنطري و أيضا قيمة قدرة الحمل للعاكس المستخدم هنا قيمته ٤ أمثال قدرة الحمل للعاكس نصف القنطري وبالتالي يعتبر العاكس القنطري أفضل للقدرة العالية.

حالة الحمل الحثي 'R-L'

يبين الشكل (٤- ٨) دائرة مصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور والمتصل بحمل حثي 'R-L' ونلاحظ أن الدائرة المستخدمة هي نفس الدائرة المستخدمة بالشكل (٤- ٦) إلا أنه تم استبدال الحمل المادي 'R' بحمل حثي 'R-L' ويبين الشكل (٤- ٩) موجات كل من جهد الخرج 'V_o' و تيار الخرج i_o

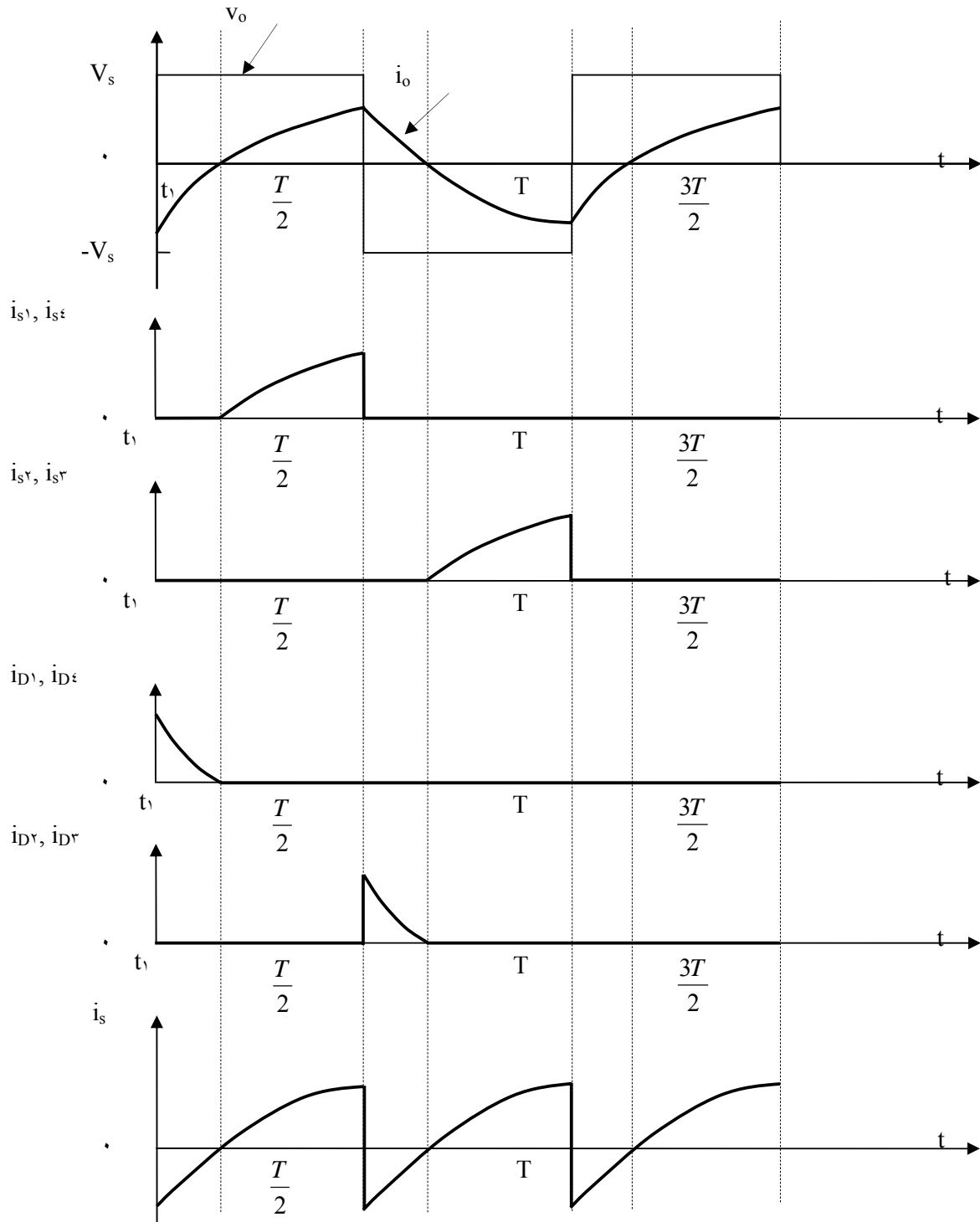
وتيارات المفاتيح الإلكترونية S_1, S_2, S_3, S_4 و تيارات الدايمودات الحداثة D_1, D_2, D_3, D_4 بالإضافة إلى تيار مصدر الجهد الثابت المستمر ' i_s ' ويمكن إيجاز مبدأ عمل الدائرة في حالة وجود الحمل الحثي كالآتي:



الشكل (٤- ٨): دائرة مصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور والمتصل بحمل حثي.

يكون تيار الخرج ' i_o ' والمبين بالشكل (٤- ٩) متأخراً عن جهد الخرج ' v_o ' بسبب وجود الحمل الحثي وبالتالي لا يمكن حدوث قرح للمفاتيح S_1, S_2 خلال الفترة الزمنية $0 \leq t \leq t_1$ حيث إن t_1 هي اللحظة الزمنية التي يكون عندها قيمة تيار الخرج صفراً وهذا بالرغم من إعطاء نبضة كافية لإشعالها عن طريق دوائر الإشعال الخاصة بهما ويعود السبب بأنه خلال هذه الفترة الزمنية سوف يكون كل من هذين المفاتيح في حالة انحياز خلفي وسوف يمر فيهما التيار ابتداءً من اللحظة الزمنية $t = t_1$ حتى اللحظة الزمنية $t = T/2$ وبالتالي خلال الفترة الزمنية $0 \leq t \leq t_1$ يمر التيار خلال الدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي و الدايمودين الحداثين D_1, D_2 ومصدر الجهد الثابت المستمر ' V_s ' ويمر التيار في الدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي و المفاتيح S_1, S_2 ومصدر الجهد الثابت المستمر خلال الفترة الزمنية $t_1 \leq t \leq T/2$ حيث سيكون هذان المفاتيح في حالة انحياز أمامي وتكون قيمة جهد الخرج ' V_o ' هي نفسها قيمة مصدر الجهد الثابت المستمر ' V_s ' خلال الفترة الزمنية $0 \leq t \leq T/2$ ونلاحظ نتيجة لوجود الحمل الحثي تكون قيمة تيار الخرج ' i_o ' له قيمة صفرية عند اللحظة الزمنية $t = t_1$ بينما تكون له قيمة لا صفرية عند اللحظة الزمنية $t = T/2$ وكما نعلم فإن تيار الخرج لا يمكن أن يتحول من قيمة لا صفرية

إلى قيمة صفرية عند اللحظة الزمنية $t = T/2$ لوجود الحمل الحثي وبالتالي سيتحول مسار تيار الخرج من الدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي والمفتاحين S_1, S_2 ومصدر الجهد الثابت المستمر إلى الدائرة المغلقة والمكونة من الحمل الحثي و الدايودين الحدافين D_1, D_2 ومصدر الجهد الثابت المستمر ' V_s ' خلال الفترة الزمنية $t_1 \leq t \leq T/2$ وتكون قيمة جهد الخرج هي نفسها قيمة جهد المصدر الثابت المستمر ولكن بإشارة سالبة أي أن $V_o = -V_s$ ويرجع سبب وجود تيار خرج خلال هذه الفترة الزمنية بسبب وجود طاقة مغناطيسية مخزنة بالملف الحثي وتصبح قيمة تيار الخرج ' i_o ' عند اللحظة الزمنية $t = t_1$ قيمة صفرية ونلاحظ أن كلا من المفتاحين S_1, S_2 يكون في حالة انحياز خلفي خلال الفترة الزمنية $T/2 \leq t \leq t_1$ بالرغم من وجود نبضات كافية لفتح هذين المفتاحين وهذه النبضات آتية من دوائر الإشعال الخاصة بهذه المفاتيح الإلكترونية و بالتالي سوف يعكس تيار الخرج ' i_o ' اتجاه في الفترة الزمنية $T \leq t \leq t_1$ و سوف يوصل كل من المفتاحين S_1, S_2 لوجود النبضة الكافية لفتح كل منهما و يمر التيار في الدائرة المغلقة و المكونة من الحمل الحثي و المفتاحين S_1, S_2 و مصدر الجهد الثابت المستمر ' V_s ' خلال هذه الفترة الزمنية و يكون أيضا قيمة جهد الخرج هي قيمة جهد المصدر و لكن بإشارة سالبة أي أن $V_o = -V_s$ نلاحظ بأن تيار الخرج قيمته ' I_{min} ' عند اللحظة الزمنية $t=0, t=T$ بينما يكون تيار الخرج قيمته ' I_{max} ' عند اللحظة الزمنية $t=T/2, t=3T/2$ حيث إن التيار I_{min} هي أقل قيمة يصل إليها تيار الخرج و في حالتنا هذه تكون القيمة المطلقة لكل من القيمة العظمى و القيمة الصغرى لتيار الخرج لها قيمة متساوية



الشكل (٤ - ٩): موجات جهد الخرج وتيار الخرج وتيارات الدايمودات الحذافة والمفاتيح الإلكترونية

والمصدر الثابت المستمر.

القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس القنطري:

حيث أن موجة جهد خرج العاكس القنطري لا تعتمد على طبيعة الحمل سواء حمل مادي أو حثي و تأخذ شكل الموجة المربعة و بالتالي يمكن التعبير عن القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس القنطري بالمعادلة (٤- ١).

القيمة اللحظية لتيار الخرج:

يمكن التعبير عن القيمة اللحظية لتيار خرج العاكس القنطري بالمعادلة التالية:

$$(٤- ٤) \quad i_o = \begin{cases} \frac{V_s + (I_{\min} - \frac{V_s}{R})e^{-t/\tau}}{R} & 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ -\frac{V_s + (I_{\max} + \frac{V_s}{R})e^{-(t + \frac{T}{2})/\tau}}{R} & \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases}$$

حيث أن: τ : هي قيمة الثابت الزمني للملف الحثي و قيمته L/R .

I_{\min} : هي القيمة الصغرى لتيار الخرج.

I_{\max} : هي القيمة العظمى لتيار الخرج.

علمًا بأن القيمة الصغرى لتيار الخرج هي نفس القيمة العظمى لتيار خرج العاكس القنطري و لكن بإشارة سالبة أي أن:

$$(٥- ٤) \quad I_{\min} = -I_{\max}$$

يمكن تعيين القيمة العظمى و الصغرى لتيار الخرج بالمعادلة التالية:

$$(٦- ٤) \quad I_{\max} = -I_{\min} = \frac{V_s}{R} \left[\frac{1 - e^{-T/2\tau}}{1 + e^{-T/2\tau}} \right]$$

مثال ٤- ٣:

تتصل دائرة عاكس قنطري أحادي الطور و المبينة بالشكل (٤- ٨) بحمل حثي 'R' قيمته المادية 10Ω و قيمة ملفه الحثي $L = 20 \text{ mH}$ و مصدر جهد ثابت مستمر 'V_s' قيمته 100 V . إذا علمت بأن تردد فصل و إغلاق المفاتيح الإلكترونية 60 Hz ، فأوجد معادلة تيار الخرج اللحظي:

الحل:

يمكن تعيين الزمن الدوري لجهد الخرج والثابت الزمني للملف الحثي كالآتي:

$$T = \frac{1}{f_o} = \frac{1}{60} = 0.0167 \text{ s}$$

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{0.025}{10} = 0.0025 \text{ s}$$

$$\therefore \frac{T}{2\tau} = \frac{0.0167}{2 * 0.0025} = 6.67$$

يمكن تعيين القيمة الصغرى و العظمى لتيار الخرج باستخدام المعادلة (٤- ٥) كالآتي:

$$I_{\max} = -I_{\min} = \frac{100}{10} \cdot \left[\frac{1 - e^{-6.67}}{1 + e^{-6.67}} \right] = 9.31 \text{ A}$$

وبالتالي يمكن تعيين معادلة تيار الخرج اللحظي باستخدام المعادلة (٤- ٤) كالآتي:

$$i_o(t) = \frac{-100}{10} + \left(-9.31 - \frac{100}{10}\right) e^{-t/0.0025}$$

$$= 10 - 19.31 e^{-t/0.0025} \quad 0 \leq t \leq \frac{1}{120}$$

$$i_o(t) = \frac{-100}{10} + \left(9.31 + \frac{100}{10}\right) e^{-(t - \frac{0.0167}{2})/0.0025}$$

$$= 10 + 19.31 e^{-(t - 0.00835)/0.0025} \quad \frac{1}{120} \leq t \leq \frac{1}{60}$$

طرق التحكم في جهد خرج العاكس Inverter Voltage Control Techniques

يتطلب التحكم في جهد خرج العاكس المتناوب في معظم التطبيقات الصناعية و يمكن تقسيم

الأنواع المختلفة في جهد العاكس إلى ثلاثة أنواع رئيسية وهم:

١. التحكم في قيمة جهد تغذية العاكس المستمر.
٢. التحكم في جهد خرج العاكس المتناوب.
٣. التحكم في طريقة فصل وغلق المفاتيح الإلكترونية للعاكس.

وتعتبر الطريقة الأولى هي أبسط أنواع التحكم في جهد خرج العاكس حيث إن جهد خرج العاكس يتناسب طردياً مع قيمة جهد الدخل المستمر للعاكس حيث يمكن التحكم في قيمة جهد دخل العاكس عن طريق استخدام مقطع تيار مستمر عند دخل العاكس بدلاً من البطاريات الثابتة الموجودة عند دخله وبالتحكم في أزمنة إغلاق و فصل هذه المفاتيح الإلكترونية لمقطع التيار المستمر يمكن التحكم في قيمة

دخل العاكس و يمكن أيضا التحكم في قيمة جهد خرج العاكس المتناوب عن طريق وضع منظم جهد متناوب بين خرج العاكس و الحمل و يمكن التحكم في قيمة جهد خرج العاكس بالتحكم في جهد هذا المنظم.

تعتبر الطريقة الثالثة هي أكثر الطرق الشائعة والمستخدمه في معظم التطبيقات العملية والصناعية وغالبا ما تسمى هذه الطريقة بطريقة تعديل عرض النبضة 'PWM' ويفضل استخدام هذه الطريقة حيث يمكن التحكم في موجة جهد خرج العاكس و الحصول على موجة خرج بأقل توافقيات ممكنة بهدف الحصول على أقرب موجة خرج جيبيه و يمكن إيجاز الأسلوب المتبع لطريقة تعديل عرض النبضة في الفقرة التالية.

تعديل عرض النبضة Pulse-Width Modulation PWM

تعتبر الطرق الثلاثة التالية أهم الطرق المستخدمة والمندرجة تحت مسمى تعديل عرض النبضة و هذه الطرق هم:

١. تعديل وحيد لعرض النبضة Single Pulse-Width Modulation.
٢. تعديل متضاعف لعرض النبضة Multiple Pulse-Width Modulation.
٣. تعديل جيبي لعرض النبضة Sinusoidal Pulse-Width Modulation.

تعديل وحيد لعرض النبضة

يتم التحكم في قيمة جهد خرج العاكس بالتحكم في عرض النبضة الوحيدة و الموجودة كل نصف دورة. يبين الشكل (٤- ١٠) جهد خرج العاكس و نبضات التحكم الخاصة بالمفتاحين الإلكترونيين S_1 , S_2 و الموجودين عند البوابة الخاصة بهما في حالة مصدر جهد عاكس قنطري أحادي الطور والمبين بالشكل (٤- ٦) حيث يتم توليد هذه النبضات عن طريق مقارنة موجة مستطيلة مرجعية قيمتها A_r بموجة مثلثية حاملة قيمتها A_c . يعين تردد الموجة المستطيلة المرجعية التردد الرئيسي (المركبة الأولى) لجهد خرج العاكس و بتغيير قيمة A_r من صفر إلى A_c يتم الحصول على نبضة عرضها δ والتي يمكن التحكم في عرض النبضة من صفر حتى 180° وتعرف نسبة A_r بالنسبة إلى A_c بمعامل التعديل 'Modulation Index' وقيمة هذا المعامل هي:

(٤- ٦)

$$M = \frac{A_r}{A_c}$$

وتكون القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس 'V_o' في هذه الحالة هي:

(٤- ٧)

$$V_o = V_s \sqrt{\frac{\delta}{\pi}}$$

حيث أن:

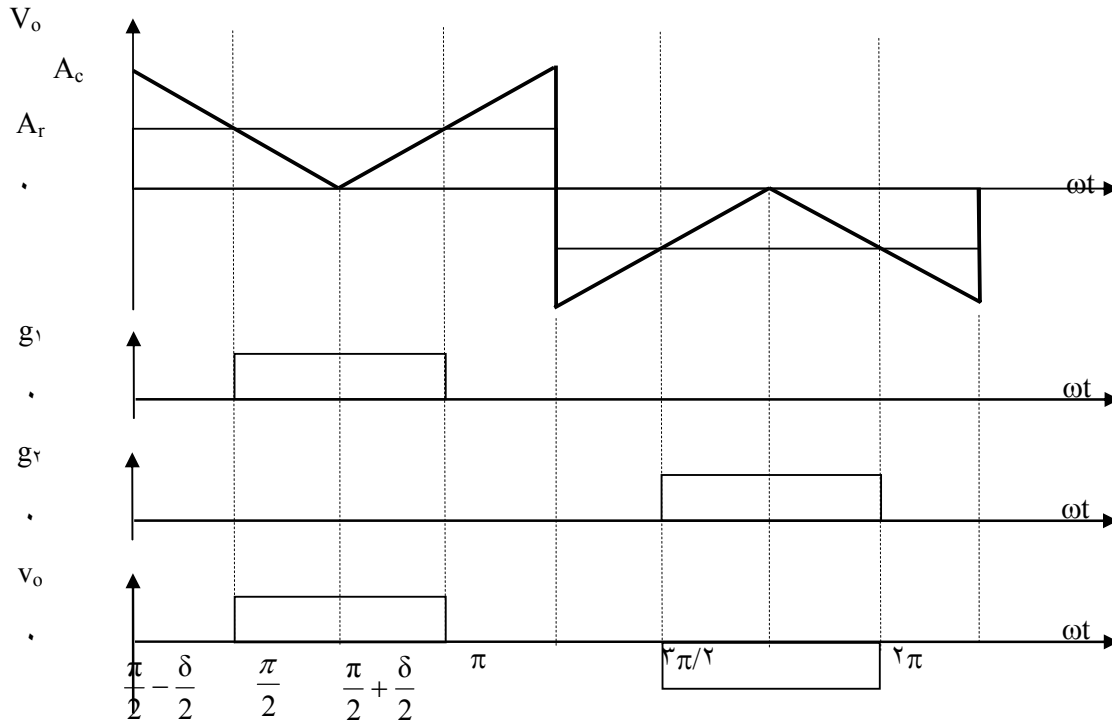
M: هي معامل التعديل.

V_s: هي قيمة جهد المصدر الثابت المستمر.

A_r: هي قيمة الموجة المستطيلة المرجعية.

A_c: هي قيمة الموجة المثثية الحاملة.

δ: هي قيمة عرض نبضة جهد الخرج.



الشكل (٤- ١٠): جهد خرج العاكس ونبضات التحكم الخاصة بالمفتاحين الإلكترونيين S₁, S₂

للعاكس قنطري أحادي الطور

تعديل متضاعف لعرض النبضة

يمكن تقليل التوافقيات المصحوبة مع موجة جهد خرج العاكس بزيادة عدد النبضات الموجودة في كل نصف دورة زمنية و يتم توليد النبضات للمفاتيح الإلكترونية عن طريق مقارنة موجة مستطيلة مرجعية بموجة مثلثية حاملة و تكون الموجة المستطيلة لها تردد قيمته f_0 و هذا التردد هو الذي يعين تردد خرج العاكس بينما الموجة المثلثية الحاملة لها تردد يحدد عدد النبضات الموجودة في كل نصف دورة زمنية عن طريق تردد الموجة الحاملة f_c . يبين الشكل (٤- ١١) الموجة المستطيلة المرجعية والموجة المثلثية الحاملة وموجة جهد خرج العاكس حيث إن عدد النبضات الموجودة كل نصف دورة يتم تعيينه من المعادلة التالية:

$$P = \frac{f_c}{2f_0} = \frac{m_f}{2}, \quad m_f = \frac{f_c}{f_0} \quad (٤- ٨)$$

حيث أن:

P : هي عدد النبضات الموجودة كل نصف دورة.

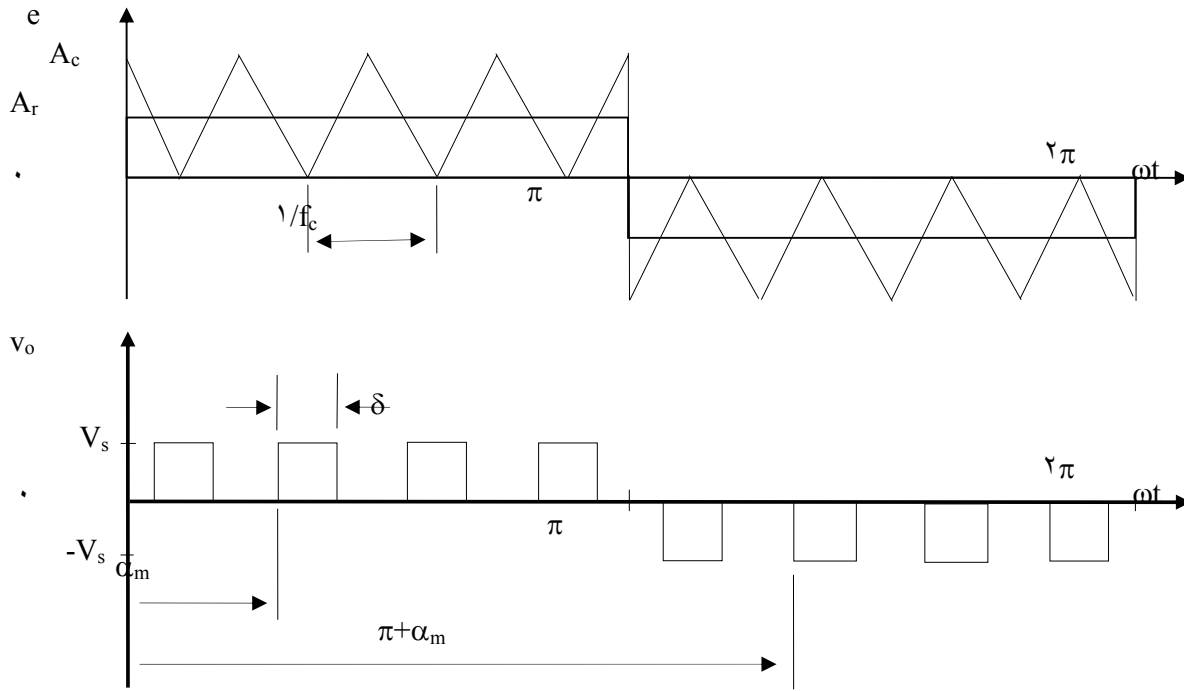
f_c : هي قيمة تردد الموجة المثلثية الحاملة.

f_0 : هي قيمة تردد الموجة المستطيلة المرجعية.

m_f : هي قيمة نسبة تعديل التردد.

و يمكن تغيير عرض النبضة بالتحكم في قيمة معامل التعديل M' و بالتحكم في قيمة M من صفر حتى ١ تتغير قيمة جهد خرج العاكس من صفر حتى V_s و تتغير قيمة عرض النبضة من صفر حتى π/P و تكون القيمة الفعالة لجهد خرج مصدر جهد العاكس القنطري أحادي الطور في هذه الحالة كالآتي:

$$V_o = V_s \sqrt{\frac{\delta P}{\pi}} \quad (٤- ٩)$$



الشكل (٤ - ١١): الموجة المستطيلة المرجعية والموجة المثلثية الحاملة وموجة جهد خرج العاكس

تعديل جيبي لعرض النبضة

يمكن الحصول على نبضات بعرض غير منتظم بدلا من النبضات المنتظمة و التي لها عرض ثابت المتولدة بطريقة تعديل متضاعف لعرض النبضات و ذلك باستخدام طريقة التعديل لجيبي لعرض النبضة. يكون عرض النبضة متناسبا مع قيمة الموجة الجيبية و يمكن تقليل التوافقيات و تحسين الشكل الموجي لجهد الخرج باستخدام هذه الطريقة. يبين الشكل (٤ - ١٢) نبضات المفتاحين S_1 و S_2 و التي يمكن الحصول عليها بمقارنة موجة جيبيية مرجعية ترددها f_0 بموجة مثلثية حاملة ترددها f_c و تستخدم غالبا هذه الطريقة في التطبيقات الصناعية و يحدد تردد الموجة الجيبية المرجعية تردد جهد خرج العاكس و تتحكم القيمة الجيبية القصوى في قيمة معامل التعديل M' و بالتالي يمكن التحكم في القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس V_o' و يبين أيضا الشكل (٤ - ١٢) القيمة اللحظية لجهد خرج العاكس. يمكن تعيين القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس بالمعادلة الآتية:

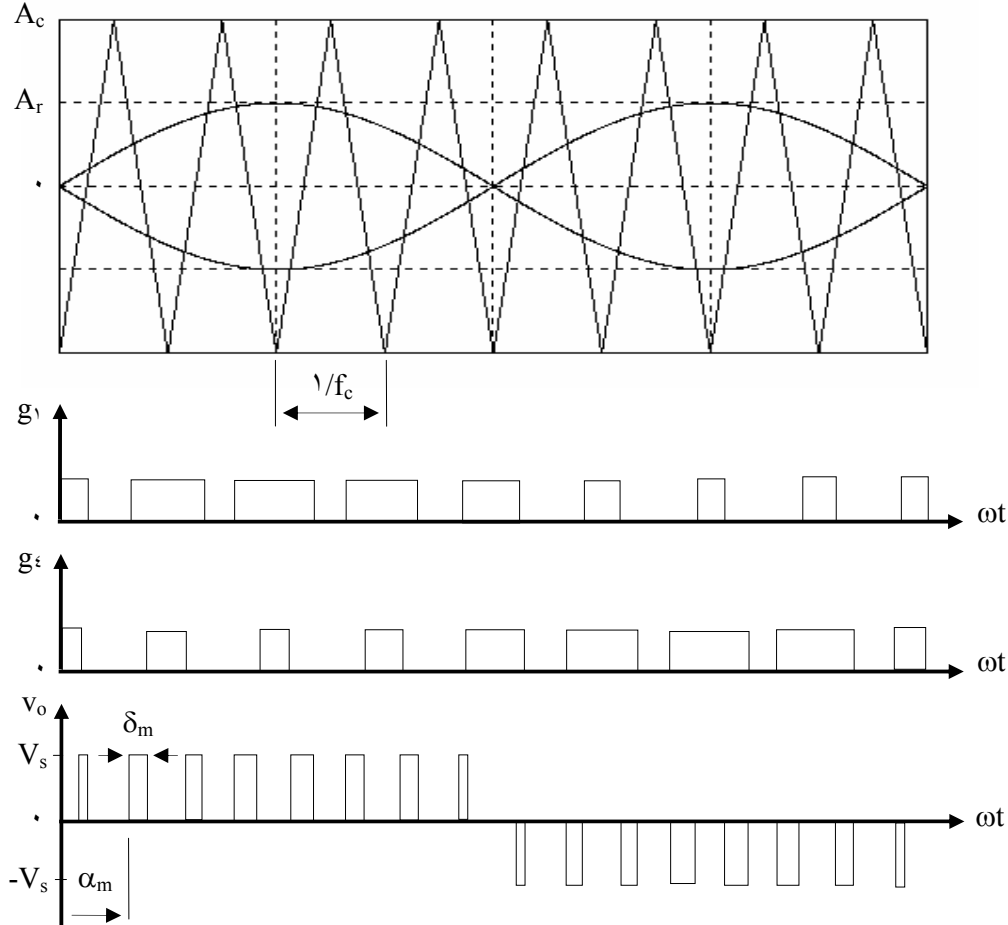
$$V_o = V_s \sqrt{\sum_{m=1}^p \frac{\delta_m}{\pi}}$$

حيث أن:

P : هي عدد النبضات الموجودة في نصف دورة.

δ_m : هي عرض النبضة والقابلة للنبضة رقم m .

V_s : هي قيمة الجهد الثابت المستمر.



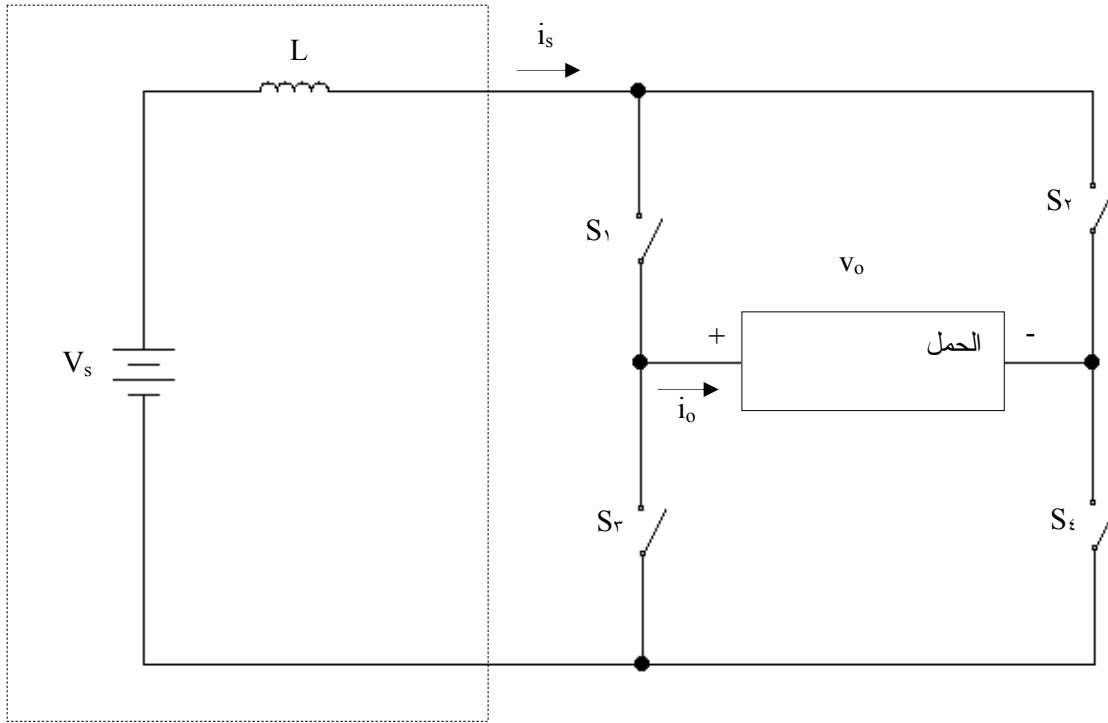
الشكل (٤-١٢): نبضات المفتاحين S_1 , S_2 والتي يمكن الحصول عليها بمقارن موجة جيبية مرجعية وموجة مثلثية حاملة وموجة جهد خرج العاكس.

مصدر التيار العاكس Current Source Inverter CSI

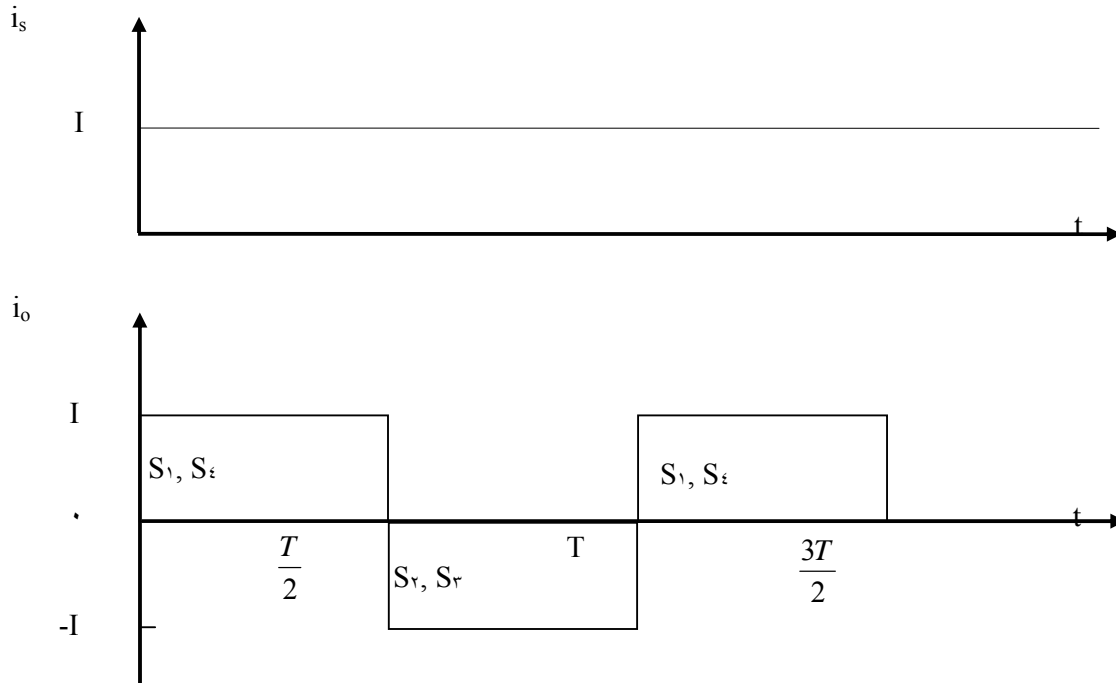
تتصل دائرة مصدر تيار العاكس بمصدر جهد ثابت مستمر وملف حثي وتكون قيمة تيار دخل العاكس أو تيار المصدر له قيمة ثابتة ولا بد من المحافظة على ثبات هذه القيمة مهما يحدث من تغير في جهد مصدر جهد الدخل المستمر. يمكن إنجاز هذا عمليا بجعل قيمة الملف الحثي له قيمة حثية كبيرة ويمكن بهذه الطريقة منع حدوث أي تغير مفاجئ في قيمة تيار دخل العاكس وبالتالي يتم المحافظة على القيمة الثابتة لتيار العاكس و يحول العاكس تيار الدخل الثابت إلى تيار خرج على هيئة موجة مستطيلة.

مصدر التيار العاكس القنطري أحادي الطور 1-Phase Current Source Bridge Inverter

يبين الشكل (٤-١٣) دائرة مصدر التيار العاكس القنطري أحادي الطور و نلاحظ بعدم وجود دايودات حذافة بدائرة العاكس حيث إن تيار دخل العاكس له قيمة ثابتة و يمكن إيجاز مبدأ عمل الدائرة كالتالي: يتم إعطاء نبضات لكل من المفتاحين S_1, S_2 خلال الفترة الزمنية $0 \leq t \leq T/2$ و نتيجة لوجود ملف حثي كبير متصل على التوالي مع مصدر الجهد الثابت المستمر يمر تيار ثابت القيمة خلال هذه الفترة الزمنية في الدائرة المغلقة والمكونة من مصدر الجهد المستمر و المتصل على التوالي مع الملف الحثي L والمفتاحين S_1, S_2 و الحمل (مادي أو حثي) يتم فصل المفتاحين S_1, S_2 في نهاية هذه الفترة الزمنية حتى اللحظة الزمنية T و يتم إعطاء نبضات في نفس الوقت لكلا من المفتاحين S_3, S_4 ويمر تيار خلال الدائرة المغلقة و المكونة من مصدر التيار الثابت و المفتاحين S_3, S_4 الحمل و نتيجة لمرور تيار له اتجاه عكسي في الحمل خلال هذه الفترة الزمنية و بالتالي يتم الحصول على موجة مستطيلة لتيار الحمل قيمتها I خلال الفترة الزمنية $0 \leq t \leq T/2$ و قيمتها $-I$ خلال الفترة الزمنية $T/2 \leq t \leq T$ و تتكرر شكل هذه الموجة كل فترة زمنية زمنية دورية T و يمكن التحكم في قيمة تردد تيار الخرج بالتحكم في قيمة الزمن الدوري T أي بالتحكم في زمن إغلاق و فصل المفاتيح الإلكترونية. يبين الشكل (٤-١٤) موجة كل من تيار دخل العاكس و تيار خرج العاكس.



الشكل (٤- ١٣): دائرة مصدر التيار العاكس القنطري أحادي الطور



الشكل (٤- ١٤): موجة كل من تيار دخل العاكس و تيار خرج العاكس

أسئلة و تمارين :

- ت - ما هي وظيفة العاكس؟
- ث - اذكر بعض التطبيقات المهمة للعواكس؟
- ج - ما هي الأنواع المختلفة للعواكس؟
- ح - ما هو مبدأ عمل العاكس؟
- خ - ما هي الفروق بين العواكس نصف القنطرية وكاملة القنطرة؟
- د - ما هي الطرق المختلفة للتحكم في جهد خرج العاكس؟
- ذ - ما هي الطرق الداخلية المختلفة للتحكم في جهد خرج العاكس؟
- ر - ما هو الهدف من استخدام طريقة التعديل المضاعف لعرض النبضة؟
- ز - ما هو الهدف من استخدام طريقة تعديل عرض النبضة الجيبي؟
- س - ما هي عيوب طريقة التحكم في جهد خرج العاكس باستخدام طريقة تعديل عرض النبضة؟
كيف يمكن التغلب على هذه العيوب؟
- ش - ما هو الفرق بين عاكس الجهد المستمر وعاكس التيار المستمر؟
- ص - يتصل عاكس نصف قنطري أحادي الطور بمصدر جهد مستمر قيمته $220V$ وحمل مادي قيمته 20Ω . أوجد:

أ- القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس ' V_0 '

ب- القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس والمناظر للمركبة الأولى ' V_1 '

ج- قيمة القدرة المغذاة للحمل.

٤- ١٣ أعد حل السؤال السابق (سؤال ٤ -١٢) عندما يكون العاكس قنطرياً كاملاً.



المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

إلكترونيات القوى

التحكم في المحرك المستمر

التحكم في المحرك المستمر

الأهداف:

بعد انتهاء الطالب من دراسة هذه الوحدة لابد أن يكون ملماً و مستوعباً التالي:

- طرق التحكم المختلفة في سرعة محركات التيار المستمر وبصفة خاصة سرعة محرك التيار المستمر ذو التغذية المنفصلة
- حساب سرعة محرك التيار المستمر في حالة اللا حمل والحمل
- علاقات الجهد المتوسط لمحرك التيار المستمر مع سرعته عند قيم مختلفة لزوايا إشعال الثايرستور
- علاقات الجهد لمحرك التيار المستمر مع سرعته عند قيم مختلفة لدورة تشغيل المقطع

مقدمة:

قد تم دراسة الموحدات المحكومة ومقطعات التيار المستمر والعواكس بالوحدات السابقة في هذا الكتاب وقد تم معرفة بعض عناصر القوى والتي تمثل الجزء الرئيس في بناء دوائرهم الإلكترونية.

سوف يتم بهذه الوحدة دراسة بعض التطبيقات العملية والصناعية للموحدات المحكومة ومقطعات التيار المستمر والعواكس مثل التحكم في سرعة المحركات المستمرة والمحركات الحثية.

تأتي عملية التحكم في سرعة التيار المستمر ذي التغذية المنفصلة في مقدمة التطبيقات العملية في استخدام الموحدات المحكومة سواء ذات الطور الواحد أو الأطوار الثلاثة . كما تأتي أهمية استخدام هذا النوع من المحركات لما تتميز به من سهولة التحكم فيها والمدى الواسع لهذا التحكم بالإضافة إلى سهولة كتابة النماذج الرياضية الخطية لها وكما هو معروف أن أسهل وأيسر الطرق للتحكم في سرعة محرك التيار المستمر هي التحكم في قيمة جهد عضو الاستنتاج V_a وكان ذلك يتطلب تغذية هذه المحركات من مولدات تيار مستمر ذو تغذية مختلفة للحصول على جهد مستمر متغير ولكن في الأعوام الثلاثين الماضية ومع تقدم وتطور هذه الموحدات المحكومة أمكن استبدال مولدات التيار المستمر الغالية الثمن بهذه الموحدات التي تعمل على التيار المتناوب أحادية وثلاثية الطور والتي يمكن الحصول منها على الجهد المستمر المتغير القيمة تبعا لزوايا الإشعال α .

وسنتعرض في الفقرات التالية للمعادلات الأساسية لمحرك التيار المستمر ذي التغذية المنفصلة مع هذه الموحدات المحكومة أحادية الطور ذات الموجة.

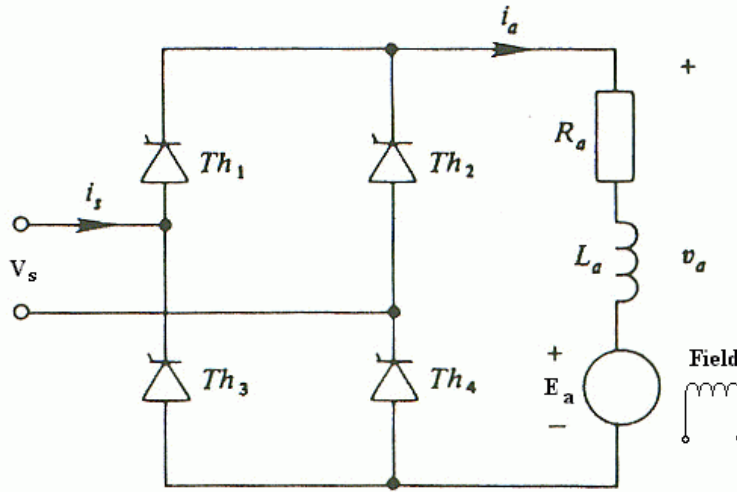
التحكم في سرعة محرك تيار مستمر باستخدام الموحدات المحكومة ذات الطور الواحد

Speed Control of a DC Motor Using single-Phase Controlled Rectifiers

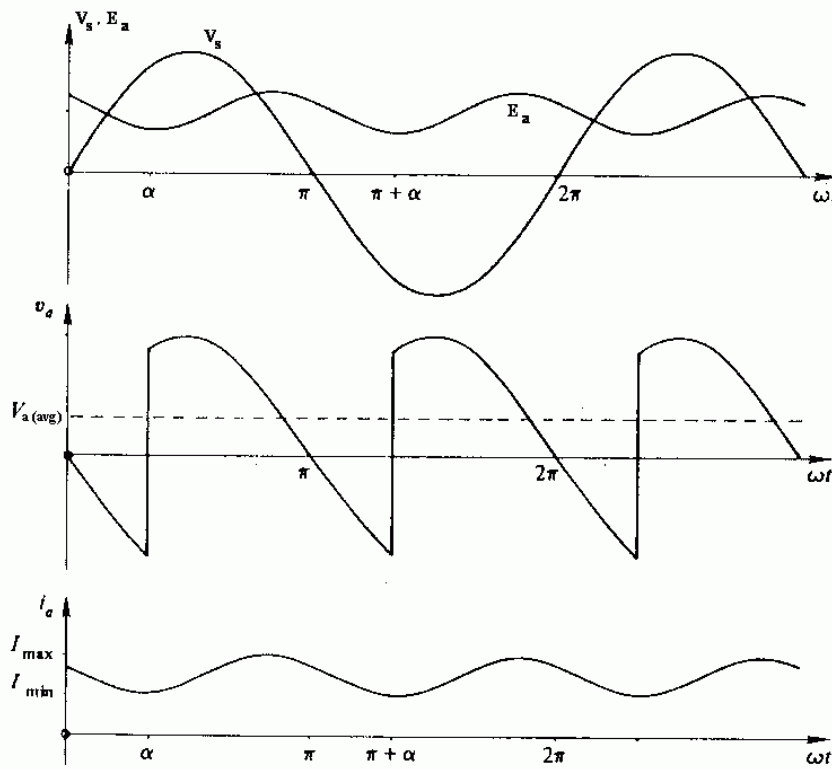
يبين الشكل (٥- ١) محرك تيار مستمر ذا التغذية المنفصلة والذي يتم تغذيته من مصدر تيار متناوب أحادي الطور مع استخدام موحد موجة كاملة محكوم. كما يبين شكل (٥- ٢) موجات الجهد V_a على أطراف المحرك والتيار المار به i_a ويلاحظ أنه نتيجة لوجود حث الملف L_a والطاقة الديناميكية في العضو الدوار بالمحرك فإن زاوية الإطفاء للثايرستور $\beta = \pi + \alpha$ وعليه فإن القيمة المتوسطة للجهد على أطراف المحرك باعتبار أن تياره متصل كما يلي:

$$V_a(\alpha) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} V_s \cos(\alpha) \quad (٥- ١)$$

وهذه المعادلة قد سبق الحصول عليها بالمعادلة (٢- ٢٢) ومن هذه المعادلة نجد أن قيمة جهد التيار المستمر دالة في زاوية الإشعال α والتي يمكن أن تتغير من $\alpha = 0$ حتى $\alpha = 180^\circ$ ومن هذه المعادلة نجد أن قيمة الجهد $V_a(\alpha)$ موجبة دائماً عندما تكون زاوية الإشعال أقل من 90° بينما تصبح قيمة هذا الجهد سالبة إذا كانت زاوية الإشعال أكبر من ذلك ($\alpha > 90^\circ$) ومعنى ذلك أن في الحالة الأخيرة يمكن عكس سرعة المحرك ليدور في الاتجاه العكسي أما إذا كانت $\alpha = 90^\circ$ فإن سرعة المحرك تصبح صفراً. نستنتج مما سبق بأنه يمكن التحكم في سرعة واتجاه دوران المحرك وذلك بالتحكم في قيمة زاوية الإشعال.



الشكل (٥- ١): محرك التيار المستمر ذو التغذية المنفصلة مع موحد موجة كاملة محكوم كلياً أحادي الوجه



الشكل (٥- ٢): موجة كل من جهد الدخل وجهد الخرج والتيار الخرج

يمكن كتابه العلاقات الرياضية لمحرك التيار المستمر ذي التغذية المنفصلة كالتالي:

$$(٥- ٢) \quad V_a = E_a + I_a R_a$$

$$(٥- ٣) \quad E_a = K \Phi \omega = K_b \omega$$

$$(٥- ٤) \quad T_a = K \Phi I_a = K_T I_a$$

حيث أن التغذية المنفصلة تعنى ثبوت التدفق المغناطيسي Φ وتكون القوة الدافعة الكهربائية E_a متناسبة مع سرعة المحرك ω حيث إن العلاقة بين هذه السرعة الزاوية وبين سرعة عدد اللفات لكل دقيقة N هي:

$$(٥- ٥) \quad \omega = \frac{2\pi N}{60}$$

وتكون قيمة الثابتين المتساويين K_b , K_T متوقفة على عدد الأقطاب P و التدفق المغناطيسي Φ وعدد الموصلات Z وعدد مسارات التوازي a أو معطاة بالعلاقة:

$$(٥- ٦) \quad K_b = K_T = \frac{PZ\phi}{2\pi a}$$

ويمكن إيجاد العلاقة بين سرعة المحرك ω وعزم المحرك T_a بمعلومية جهد المحرك المستمر $V_a(\alpha)$ وذلك بالتعويض في المعادلة (٥- ٢) بالمعادلتين (٥- ٣)، (٥- ٤) وتكون العلاقة بين سرعة وعزم المحرك كالتالي:

$$(٥- ٧) \quad \omega = \frac{V_a(\alpha)}{K_b} - \frac{R_a}{K_b K_T} T_a$$

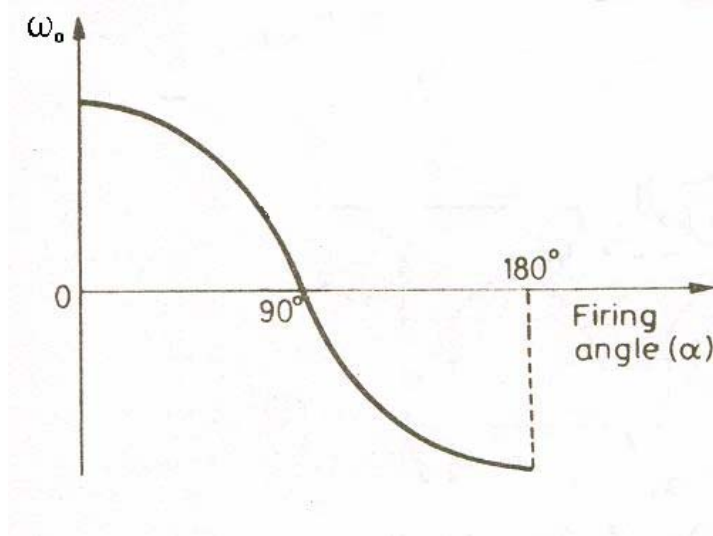
ويمكن الحصول على علاقة بين سرعة المحرك وزاوية الإشعال وذلك بالتعويض من المعادلة (٥- ١) في المعادلة (٥- ٧) وتكون العلاقة بينهما كالتالي:

$$(٥- ٨) \quad \omega = \frac{2\sqrt{2}V_s \cos(\alpha)}{\pi K_b} - \frac{R_a}{K_b K_T} T_a$$

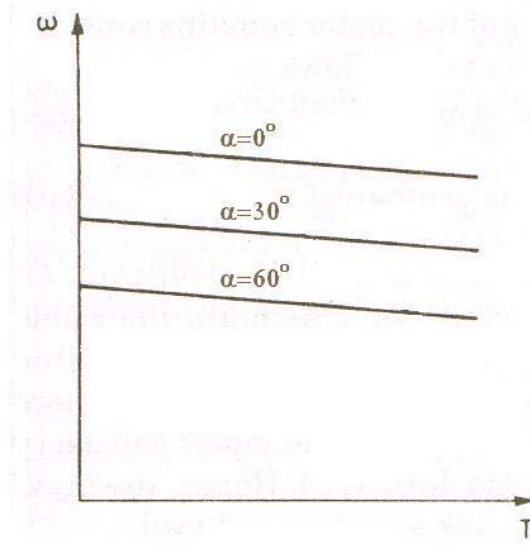
حيث أن العزم T_a (N.m) والسرعة الزاوية ω (Rad/Sec) وفي هذه المعادلة فإن الجزء الأيسر من الطرف الأيمن يمثل سرعة المحرك عند اللا حمل بينما الجزء الأيمن من هذا الطرف يمثل النقص في السرعة والنتاج من زيادة العزم على المحرك ويمكن تمثيل معادلة سرعة المحرك عند اللا حمل ω_0 كالتالي:

$$\omega = \frac{2\sqrt{2} V_s}{K_b} \cos(\alpha) \quad (5-9)$$

ويبين الشكل (5-3) العلاقة بين سرعة اللا حمل ω_0 للمحرك عند تغير زاوية الإشعال في المدى ما بين $\alpha=0$ حتى $\alpha=180^\circ$ ومنها نرى أن السرعة تعكس اتجاهها عندما تكون $\alpha > 90^\circ$ ويمكن أن يحدث ذلك عندما يتطلب عكس سرعة المحرك. كما يبين الشكل (5-4) العلاقة بين سرعة المحرك ω والعزم T_a عند زوايا مختلفة للإشعال وذلك باستخدام المعادلة (5-8). ومن الشكل (5-4) نرى أنه عند زيادة السرعة مع زيادة الحمل فيجب تصغير زاوية الإشعال α . ويلاحظ عند استخدام موحدات نصف محكومة مع دايودات حذافة فإن السرعة لا يمكن تغير اتجاه دورانها ويعمل المحرك في الربع الأول فقط حيث أنه في حالة الموحد المحكوم يعمل في المربعين الأول (الدوران الموجب) والرابع (الدوران السالب) كما هو موضح بالشكل (5-5).



الشكل (5-3): العلاقة بين سرعة اللا حمل ω_0 لمحرك التيار المستمر مع تغير زاوية الإشعال α



الشكل (٥ - ٤): العلاقة بين سرعة المحرك ω مع العزم عند زوايا إشعال مختلفة

(ب) موجة موحد كامل محكوم	(أ) موجة موحد نصف محكوم

الشكل (٥ - ٥): العلاقة بين الجهد والتيار المتوسط للمحرك في حالة موحد كامل محكوم ونصف محكوم

مثال (٥ - ١):

محرك تيار مستمر $V = 230$, $HP = 10$, $rpm = 1200$ ذو تغذية منفصلة سرعته يمكن التحكم فيها بواسطة موحد موجة كاملة محكوم ذو طور واحد كما هو مبين بالشكل (٥ - ١). تيار الحمل الكامل $I_a = 38 A$ والمقاومة $R_a = 0.3 \Omega$ وجهد المنبع $V_s = 260 V$. ثابت المحرك للجهد والعزم $K_b = K_T$ $= 1.74$ وباعتبار أن الحث للمحرك كاف لكي يكون التيار متصلاً فأوجد عند زاوية مقدارها $\alpha = 30^\circ$ ما يلي:

- أ - عزم المحرك عند الحمل الكامل
ب - سرعة المحرك عند الحمل الكامل
ج - معامل القدرة للمصدر.

الحل:

أ - يمكن إيجاد عزم المحرك باستخدام المعادلة (٥ - ٤) كما يأتي:

$$\begin{aligned} \therefore T_a &= K_T I_a \\ \therefore T_a &= 1.74 * 38 = 66.121 \text{ N.m} \end{aligned}$$

ب - يمكن إيجاد سرعة المحرك عند الحمل الكامل باستخدام المعادلة (٥ - ٨) كما يأتي:

$$\begin{aligned} \omega &= \frac{2\sqrt{2} V_s \cos(\alpha)}{\pi K_b} - \frac{R_a}{K_b K_T} T_a \\ \therefore \omega &= \frac{2\sqrt{2} 260}{1.74\pi} \cos(\alpha) - \frac{0.3}{1.74^2} 66.121 \\ &= 116.56 - 6.55 = 110 \text{ rad / sec} \end{aligned}$$

ويمكن إيجاد سرعة لفات المحرك باستخدام المعادلة (٥ - ٥) كالتالي:

$$\begin{aligned} \therefore \omega &= \frac{2\pi N}{60} \\ \therefore N &= \frac{60 \omega}{2\pi} = \frac{60 * 110}{2\pi} = 1051 \text{ rpm} \end{aligned}$$

ج - ويمكن إيجاد معامل القدرة الكهربية عند المصدر كالتالي:

$$PF = \frac{V_a I_a}{V_s I_s}$$

بما أن قيمة التيار المتوسط للمحرك يساوي تقريبا القيمة الفعالة لتيار المنبع حيث إن تيار المحرك تقريبا ثابت ومتصل وبالتالي يمكن تعيين قيمة معامل القدرة كالتالي:

$$V_a = \frac{2\sqrt{2}V_s}{\pi} \cos(\alpha) = \frac{2\sqrt{2} * 260}{\pi} \cos(30^\circ) = 202.82 \text{ V}$$

$$\therefore PF = \frac{V_a}{V_s} = \frac{202.82}{260} = 0.78$$

التحكم في سرعة محرك تيار مستمر باستخدام مقطعات التيار المستمر

Speed Control of A DC Motor Using DC Choppers

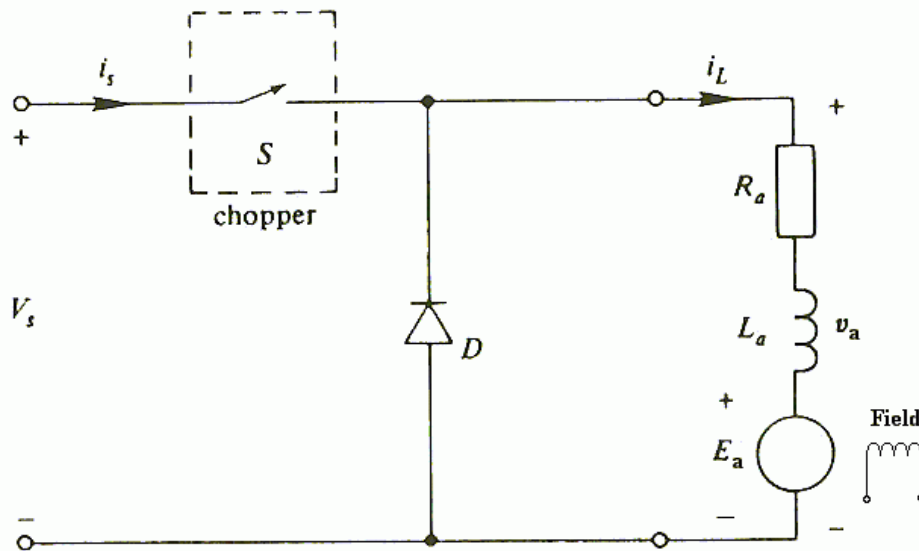
يمكن أيضاً التحكم في سرعة محرك التيار المستمر باستخدام مقطع تيار مستمر كما مبين بالشكل (٥- ٦) حيث يكون خرج المقطع هو الدخل للمحرك وكما سبق دراسته بالوحدة الثالثة أن جهد خرج المقطع يتم التحكم به عن طريق التحكم في دورة تشغيل المقطع وبالتالي يتم التحكم في سرعة المحرك. يمكن استخدام جميع المعادلات من المعادلة (٥- ٢) حتى المعادلة (٥- ٩) في حالتنا هذه وتستبدل المعادلة (٥- ١) بالمعادلة الخاصة بخرج جهد مقطع التيار المستمر وهي كالتالي:

$$(٥- ٩)$$

$$V_a = DV_s$$

حيث أن D هي دورة التشغيل.

يمكن أن يكون تيار المحرك متصلاً أو متقطعاً وذلك يعتمد على قيمة دورة التشغيل.



الشكل (٥- ٦): محرك التيار المستمر ذو التغذية المنفصلة مع مقطع تيار مستمر

مثال (٥-٢):

قاطع تيار مستمر يغذي محرك تيار مستمر من جهد مصدر جهد ثابت مستمر قيمته $V_s = 150$ V. إذا كانت ثوابت المحرك هي:

$$R_a = 0,5 \Omega, L_a = 10 \text{ mH}, K_b = 0,05 \text{ V/rpm}$$

أوجد قيمة تردد القاطع عندما يكون زمن التوصيل (T_{ON}) $1,6 \text{ ms}$ وذلك في حالة دوران المحرك بسرعة $N = 2000 \text{ rpm}$ مع ثبوت تيار المحرك بقيمة 40 A .

الحل:

يمكن حساب قيمة جهد خرج المقطع باستخدام المعادلتين (٥-٢), (٥-٣) كالتالي:

$$V_a = K_b N + R_a I_a$$

$$V_a = 0,05 * 2000 + 0,5 * 40 = 100 + 20 = 120 \text{ V}$$

يمكن أيضا حساب قيمة دورة التشغيل باستخدام المعادلة (٥-١٠) كالتالي:

$$D = \frac{V_a}{V_s} = \frac{120}{150} = 0,8$$

يمكن تعيين قيمة تردد القاطع كالتالي:

$$\therefore D = \frac{T_{ON}}{T} = f T_{ON}$$

$$\therefore f = \frac{D}{T_{ON}} = \frac{0,8}{1,6 * 10^{-3}} = 500 \text{ Hz}$$

أسئلة و تمارين :

٥- ١ اشرح كيفية التحكم في سرعة محرك التيار المستمر باستخدام الموححدات المحكومة كاملة الموجة أحادية الطور

٥- ٢ اشرح كيفية التحكم في سرعة محرك التيار المستمر باستخدام مقاطعات التيار المستمر الخافضة للجهد

٥- ٣ اشرح العلاقة بين سرعة محرك التيار المستمر ذي التغذية المنفصلة و جهده المتوسط في حالة وجود أو عدم وجود حمل

٥- ٤ محرك تيار مستمر $V = 240$, 10 kW , 1000 rpm ذو تغذية منفصلة سرعته يمكن التحكم فيها بواسطة موحد موجة كاملة محكوم ذي طور واحد كما هو مبين بالشكل (٥ - ١). تيار الحمل الكامل $I_a = 51.43 \text{ A}$ والمقاومة $R_a = 0.45 \Omega$ وجهد المنبع $V_s = 240 \text{ V}$. ثابت المحرك للجهد والعزم $K_b = K_T = 2$ وباعتبار أن الحث للمحرك كاف لكي يكون التيار متصلاً فأوجد عند زاوية مقدارها $\alpha = 20^\circ$ ما يلي:

- أ - عزم المحرك عند الحمل الكامل
- ب - سرعة المحرك عند الحمل الكامل
- ج - معامل القدرة للمصدر.

٥- ٥ قاطع تيار مستمر يغذي محرك تيار مستمر من جهد مصدر جهد ثابت مستمر قيمته $V_s = 220 \text{ V}$. إذا كانت ثوابت المحرك هي:

$$R_a = 0.2 \Omega, L_a = 15 \text{ mH}, K_b = 0.04 \text{ V/rpm}$$

أوجد قيمة تردد القاطع عندما يكون زمن التوصيل $(T_{ON}) = 1 \text{ ms}$ وذلك في حالة دوران المحرك بسرعة $N = 2000 \text{ rpm}$ مع ثبوت تيار المحرك بقيمة 25 A .

الإجابات

$\alpha=55^\circ, \gamma=160^\circ, \beta=210^\circ$	٣-٢
$V_o=148,6 \text{ V}, I_o=3,95 \text{ A}, P_o=778,8 \text{ W}, \text{PF}=0,9 \text{ lag}$	٨-٢
$V_o=148,6 \text{ V}, I_o=2,972 \text{ A}, I_{o(\text{rms})}=2,972 \text{ A}, P_o=441,6 \text{ W}, I_{\text{SCR}(\text{avg})}=0,99 \text{ A}, I_{\text{FWD}(\text{avg})}=0,99 \text{ A}$	٩-٢
$I_{\text{Th}(\text{avg})}=2,47 \text{ A}, I_{\text{Th}(\text{max})}=7,43 \text{ A}, V_{\text{Th}(\text{max})}=311 \text{ V}, P_o=110,4 \text{ W}$	١٠-٢
$44 \text{ V}, 2,2 \text{ A}, 69,6 \text{ V}, 0,0 \text{ A}, 242 \text{ W}$	٨-٣
$D=0,5, I_{s(\text{avg})}=1,0 \text{ A}, I_{s(\text{rms})}=14,14 \text{ A}$	٩-٣
$T_{\text{on}}=0,68 \text{ ms}, T_{\text{off}}=0,32 \text{ ms}$	١٠-٣
$44 \text{ V}, 0,0 \text{ A}, 69,6 \text{ V}, 0,0 \text{ A}, 2,2 \text{ A}, 3,3 \text{ A}, 6,16 \text{ A}, 4,84, 2,4 \text{ mH}$	١١-٣
$110 \text{ V}, 99 \text{ V}, 600 \text{ W}$	١٢-٤
$220 \text{ V}, 198 \text{ V}, 2420 \text{ W}$	١٣-٤
$102,86 \text{ N.m}, 860 \text{ rpm}, 0,85$	٤-٥
400 Hz	٥-٥

المراجع

- (١) Ashfaq Ahmed : “Power Electronics for Technology”, Prentice-Hall, ١٩٩٩.
- (٢) M. H. Rashid: “Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications”, Second Edition, Prentice-Hall, ١٩٩٣.
- (٣) David A. Bradley: “Power Electronics”, Second Edition, Nelson Thornes, ١٩٩٥.
- (٤) Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins: “Power Electronics: Converters, Applications, and Design”, Second Edition, John Wiley & Sons, ١٩٩٥.

المحتويات

٠	مقدمة عامة
١	الوحدة الأولى: عناصر إلكترونيات القوى
١	الأهداف
١	مقدمة
١	١- الثايرستور
٢	١- ١- حالات الثايرستور
٢	١- ٢- خواص الثايرستور
٤	١- ١- ٣ الخواص المثالية للثايرستور
٥	١- ١- ٤ طرق إشعال الثايرستور
٥	١- ١- ٤- ١ الإشعال بالحرارة و الضوء
٦	١- ١- ٤- ٢ الإشعال بالجهد العالي
٦	١- ١- ٤- ٣ الإشعال بمعدل الجهد المسلط
٦	١- ١- ٤- ٤ الإشعال بالبوابة
٦	١- ١- ٥ دوائر إشعال الثايرستور
٧	١- ١- ٥- ١ دوائر الإشعال بالتيار المستمر
٧	١- ١- ٥- ٢ دوائر الإشعال بالتيار المتردد
٨	١- ١- ٥- ٣ دوائر الإشعال بالنبضات
٩	١- ١- ٦ حماية الثايرستور
١٠	١- ٢- الترياك
١٢	١- ٣- الدياتك
١٤	أسئلة

الوحدة الثانية: الموحدات المحكومة الأحادية الأوجه ١٥

١٥	الأهداف
١٥	مقدمة
١٥	٢- ١- الشروط اللازمة لتشغيل الثايرستور (الموحد السليكوني المحكوم)
١٦	٢- ٢- موحدات نصف موجة محكومة أحادية الأوجه مع الحمل المادي
١٨	٢- ٢- ١- القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج
١٩	٢- ٢- ٢- القيمة الفعالة لجهد و تيار الخرج
١٩	٢- ٢- ٣- معامل القدرة الكهربية
٢٤	٢- ٣- ٣- موحدات نصف موجة محكومة أحادية الوجه مع الحمل الحثي
٢٤	٢- ٣- ١- فكرة عمل الدائرة
٢٥	٢- ٣- ٢- القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج
٢٦	٢- ٣- ٣- تعريفات
٢٧	٢- ٤- ٤- موحدات نصف موجة محكومة أحادي الوجه مع الحمل الحثي و دايدود حدافه
٢٨	٢- ٤- ١- فكرة عمل الدائرة
٣٠	٢- ٤- ٢- وظيفة الدايدود الحدافه
٣١	٢- ٥- ٥- موحدات موجة كاملة محكومة كلياً أحادية الوجه
٣٣	٢- ٥- ١- الحمل المادي
٣٣	٢- ٥- ١- ١- احتياطات واجب مراعاتها لعمل الدائرة
٣٤	٢- ٥- ١- ٢- فكرة عمل الدائرة
٣٥	٢- ٥- ١- ٣- القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج
٣٦	٢- ٥- ١- ٤- القيمة الفعالة لجهد و تيار الخرج
٣٧	٢- ٥- ١- ٥- حالة الحمل الحثي 'R-L'
٣٨	٢- ٥- ١- ٦- فكرة ومبدأ عمل الدائرة
٤٠	٢- ٥- ١- ٧- القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج
٤١	٢- ٥- ١- ٨- الجهد الناتج على طرفي الثايرستور V_{AK}
٤١	٢- ٥- ٢- حالة الحمل الحثي مع وجود دايدود حدافه
٤٢	٢- ٥- ٢- ١- فكرة ومبدأ عمل الدائرة

٤٤	٢- ٥- ٢- القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج	٤٤
٤٤	٢- ٥- ٣- القيمة المتوسطة لتيار الدايمود الحدافه	٤٤
٤٦	٦- ٦- ٢- موحداث موجة كاملة نصف محكومة أحادية الوجه مع الحمل الحثي 'R-L'	٤٦
٤٦	٢- ٦- ١- مبدأ عمل دائرة موحد موجة كاملة نصف محكوم أحادي الوجه	٤٦
٤٨	٢- ٦- ٢- القيمة المتوسطة لجهد وتيار الحمل	٤٨
٥٢	أسئلة و تمارين	٥٢
٥٥	الوحدة الثالثة: مقطعات التيار المستمر	٥٥
٥٥	الأهداف	٥٥
٥٥	مقدمة	٥٥
٥٦	٣- ١- مقطع التيار المستمر الأساسي	٥٦
٥٧	٣- ٢- دورة التشغيل	٥٧
٥٩	٣- ٣- مبدأ عمل مقطع التيار المستمر الأساسي والمتصل بحمل مادي R	٥٩
٥٩	٣- ٣- ١- القيمة المتوسطة لجهد و تيار خرج مقطع التيار المستمر	٥٩
٦٠	٣- ٣- ٢- القيمة الفعالة لجهد و تيار خرج مقطع التيار المستمر	٦٠
٦١	٣- ٣- ٣- قدرة مقطع التيار المستمر	٦١
٦١	٣- ٣- ٤- طرق التقنية المختلفة لتغيير قيمة الجهد المتوسط لمقطعات التيار المستمر	٦١
٦٤	٣- ٤- ٤- مقطعات التيار المستمر الخافضة	٦٤
٦٤	٣- ٤- ١- حالة الحمل الحثي	٦٤
٦٥	٣- ٤- ٢- مبدأ عمل مقطعات التيار المستمر	٦٥
٦٧	٣- ٤- ٣- صيغة التيار المتصل	٦٧
٧٠	٣- ٤- ٤- صيغة التيار الغير متصل	٧٠
٧٨	أسئلة و تمارين	٧٨

٨٠	الوحدة الرابعة: العواكس
٨٠	الأهداف
٨٠	مقدمة
٨١	٤- ١- التطبيقات الصناعية للعواكس
٨٢	٤- ٢- العاكس الرئيسي
٨٢	٤- ٢- ١- حالة الحمل المادي R
٨٥	٤- ٣- مصدر الجهد العاكس
٨٥	٤- ٣- ١- مصدر الجهد العاكس نصف القنطري أحادي الطور
٨٦	٤- ٣- ١- ١- حالة الحمل المادي
٨٧	٤- ٣- ١- ٢- حالة الحمل الحثي
٩٠	٤- ٣- ٢- مصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور
٩٠	٤- ٣- ٢- ١- حالة الحمل المادي R
٩٣	٤- ٣- ٢- ٢- حالة الحمل الحثي 'R-L'
٩٨	٤- ٤- طرق التحكم في جهد خرج العاكس
٩٩	٤- ٤- ١- تعديل عرض النبضة
٩٩	٤- ٤- ١- ١- تعديل وحيد لعرض النبضة
١٠١	٤- ٤- ١- ٢- تعديل متضاعف لعرض النبضة
١٠٢	٤- ٤- ١- ٣- تعديل جيبي لعرض النبضة
١٠٣	٤- ٥- مصدر التيار العاكس
١٠٤	٤- ٥- ١- مصدر التيار العاكس القنطري أحادي الطور
١٠٦	أسئلة و تمارين
١٠٧	الوحدة الخامسة: عناصر إلكترونيات القوى
١٠٧	الأهداف
١٠٧	مقدمة
	٥- ١- التحكم في سرعة محرك تيار مستمر باستخدام الموحدات المحكومة
١٠٨	ذات الطور الواحد
١١٤	٥- ٢- التحكم في سرعة محرك تيار مستمر باستخدام مقطعات التيار المستمر

١١٦	أسئلة و تمارين
١١٧	الإجابات
١١٨	المراجع

تقدر المؤسسة العامة للتعليم الفني والتدريب المهني الدعم

المالي المقدم من شركة بي آيه إي سيستمز (العمليات) المحدودة

GOTEVOT appreciates the financial support provided by BAE SYSTEMS

BAE SYSTEMS

المنارة للاستشارات

www.manaraa.com