المملكة العربية السعودية
المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني
الإدارة العامة لتصميم وتطوير المناهج

تخصص قوى كهربائية

إلكترونيات القوى

٢٠٨ كهر

طبعة ١٤٢٩ هـ

مقدمة

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

تسعى المؤسسة العامة للتدريب التقني والمهني 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 التنموي: 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 للتدريب التقني والمهني 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 تخصص " **قوى كهربائية** " في الكليات 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

تمهيد

يمكن وصف علم إلكترونيات القوى بأنه العلم الذي يبحث في تطبيق عناصر إلكترونيات القوى المختلفة مثل الثيرستورات 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.

بدأ 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 تشغيل 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 الرئيس من إعداد هذه الحقيبة التدريبية هو جعل المادة العلمية الخاصة بإلكترونيات القوى تظهر بالنسبة للمتدرب التقني بشكل مبسط وللمهتمين بمعرفة ودراسة هذا العلم كمرحلة أولية يمكن أن ينطلقوا بعدها بالاستعانة بمراجع أخرى متقدمة. وقد تم الاهتمام في هذا المقرر بدراسة بعض العناصر الإلكترونية والتي تكون وظيفتها عبارة عن مفاتيح لفصل وتوصيل الدوائر الإلكترونية واستخدام هذه العناصر لعمل التحكم المطلوب لدوائر إلكترونيات القوى.

تتكون هذة الحقيبة من ٥ وحدات وهي كالتالي:

الوحدة الأولى:

تختص الوحدة الأولى بدراسة عناصر اشباة الموصلات المستخدمة بدوائر إلكترونيات القوى وقد تم التركيز على بعض العناصر كدايود القوى والثيرستور وأنواعة المختلفة مشتملة الحديثة منها ودراسة بعض دوائر الإشعال الخاصة لقدح هذه العناصر الإلكترونية بجانب دراسة طرق الحماية اللازمة والمطلوبة لهذه العناصر. وقد تم أيضاً دراسة الأنواع المختلفة من ترانزستور القوى ومنحنيات الخواص لأنواعه المختلفة.

الوحدة الثانية:

تمت دراسة دوائر التوحيد وأنواعها. وقد تم التركيز على دوائر التوحيد أحادية الوجه غير المحكومة وكذلك المحكومة مع حمل مادي وحثي. بجانب دراسة تأثير تغير زاوية الإشعال على الجهد. وقد تمت

دراسة دوائر التوحيد ثلاثية الأوجه غير محكومة والمحكومة وكيفية استخدام دوائر التوحيد في شحن البطاريات.

الوحدة الثالثة:

تمت دراسة بعض دوائر حاكمات الجهد المتردد وفكرة العمل باستخدام التحكم في زاوية الوجه. وكيفية استخدام حاكمات الجهد المتردد للتحكم في شدة الإضاءة ودرجة الحرارة. إلى جانب دراسة حاكمات الجهد المتردد أحادي وثلاثي الأوجه واستخدامها كمعوض للقدرة غير الفعالة في الشبكة الكهربائية.

الوحدة الرابعة:

تمت دراسة فكرة عواكس القوى وبعض دوائر العواكس أحادية الوجه حيث تستخدم هذه العواكس لتحويل جهد المصدر المستمر إلى جهد متناوب ثابت أو متغير القيمة. وكذلك دراسة استخدام العاكس في أجهزة مصادر القوى غير القابلة للانقطاع (UPS) وكشافات الطوارئ.

الوحدة الخامسة:

تمت دراسة بعض التطبيقات العملية والصناعية الهامة في مجال القوى الكهربائية مثل خطوط نقل القوى بالتيار المستمر وكذلك التحكم في تغذية المجال في مولدات القوى الكهربائية.

إلكترونيات القوى

أشباه الموصلات المستخدمة في دوائر إلكترونيات القوى

الجدارة: الإلمام الشامل بأشباه الموصلات المستخدمة في دوائر إلكترونيات القوى.

الأهداف: عندما يكمل المتدرب هذه الوحدة يكون قد تمكن من تحقيق الأهداف والمهارات التالية:

- تعريف دايود القدرة.
- تعريف الثيرستور وأنواعة المختلفة مشتملة الحديثة منها.
- طرق الإشعال والحماية للثيرستور.
- ترانزستور القدرة وأنواعة المختلفة.
- منحنيات الخواص للعناصر الهامة.

الوقت المتوقع للتدريب: ٩ ساعات

الوسائل المساعدة:

- السبورة
- عرض باستخدام برنامج Power Point

متطلبات الجدارة: دراسة الحقيبة التدريبية لمقرر دوائر كهربائية- ٢.

١- ١ مقدمة :

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

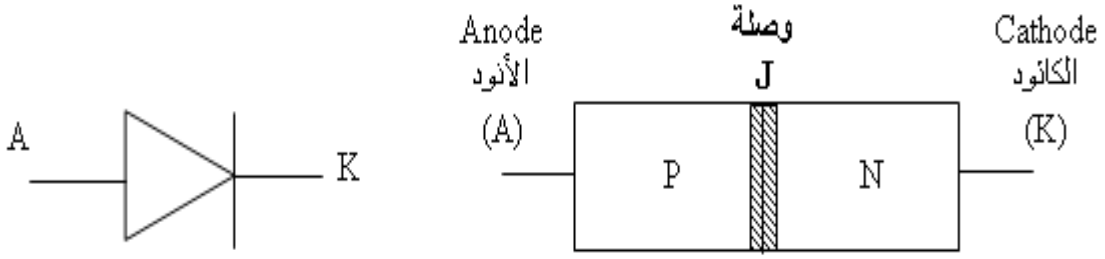
- o دايود القدرة Power Diode
- o الثيرستور Thyristor
- o ترانزستور الوصلة ثنائية القطبية BJT
- o ترانزستور تأثير المجال المعدني الأكسيدى ذو الوصلة (الموسفت) MOSFET
- o الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة IGBT

سوف نتطرق في هذه الوحدة إلى دراسة بعض هذه العناصر و هي: دايود القدرة والثيرستور وترانزستور القدرة. وسوف نتعرض أولاً إلى التركيب الفيزيائي لكل عنصر ثم شرح و رسم خواص كل عنصر وأخيرًا شرح مختلف الطرق المستخدمة لإشعال الثيرستور مع ذكر بعض التطبيقات العملية لهذه العناصر.

١- ٢ دايود القدرة Power Diodes :

يوجد نوعان رئيسان من دايود القدرة: نوع يستخدم في الأغراض العامة وهو رخيص الثمن ومتوافر بمقننات عالية من الجهد والتيار تصل إلى ثلاثة آلاف فولت وأكثر من ثلاثة آلاف أمبير ونوع سريع الاستعادة وهو غالي الثمن جداً ويستخدم في دوائر إلكترونيات القدرة ذات الترددات العالية للتوصيل والفصل إذ يمكنة أن يستعيد حالته في زمن لا يتعدى عدة ميكروثانية وهذا النوع متوافر بمقننات تصل إلى ثلاثة آلاف فولت وألف أمبير.

ويعد دايود القدرة أبسط نبائط أشباه الموصلات اذ يتكون من طبقتين من مادة السليكون أو الجرمانيوم أحدهما موجبة الشحنة (P) والآخرى سالبة الشحنة (N) . الشكل (١- ١) يبين تركيب دايود القدرة والرمز الذي يستخدم للدلالة عليه في الدوائر الإلكترونية. وكما هو موضح فإن الطرف المتصل بالجزء الموجب يسمى الأنود (Anode) بينما الطرف المتصل بالجزء السالب يسمى الكاثود (Cathode).



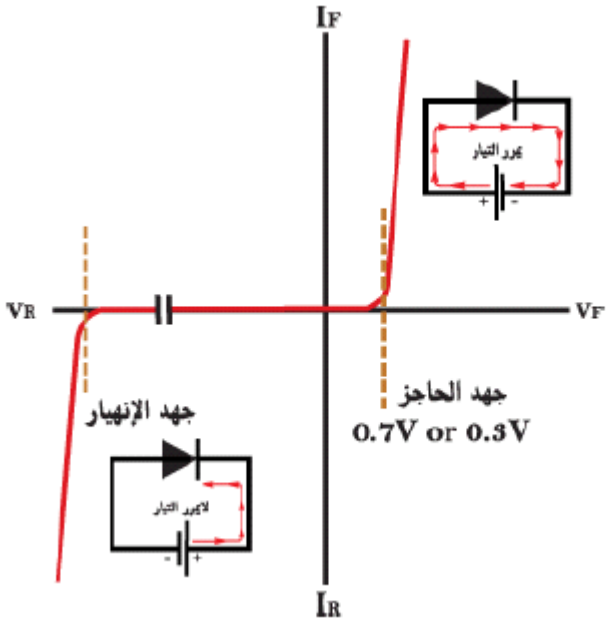
الشكل (١- ١) تركيب و رمز دايود القدرة

فاذا وصل الدايود في دائرة كهربائية بحيث يكون الطرف الموجب للبطارية متصل بالآنود والطرف السالب متصل بالكاثود فإن تيار كهربائي سوف يمر من الأنود إلى الكاثود ويكون الدايود في هذه الحالة في الانحياز الأمامي. أما اذا وصل الطرف الموجب للبطارية بالكاثود والطرف السالب للبطارية بالأنود فإن التيار الكهربائي المار يكون صغيراً جداً بحيث يمكن أهماله ويكون الدايود في حالة الانحياز العكسي. ونظراً لخاصية دايود القدرة في السماح للتيار بالمرور في اتجاه واحد فقط ودون أي إمكانية للتحكم الخارجي في التوصيل والتوصيل يصنف أحياناً بالموحد غير المحكوم.

- **الخواص الاستاتيكية للدايود**

يمثل منحنى الخواص الاستاتيكية للثنائي العلاقة بين التيار المار خلال الدايود وبين الجهد المطبق عليه سواء في حالة الانحياز الأمامي أو الانحياز العكسي. ويبين شكل (١- ٢) منحنى الخواص لثنائي من السيلكون (Si) . وكما هو موضح بالشكل فإن الدايود يوصل التيار عندما يكون التوصيل في الاتجاه الأمامي ولا يوصل تيار إذا كان التوصيل في الاتجاه العكسي (تيار صغير جداً يمكن إهماله) طالما كان الجهد المطبق على طرفيه أقل من جهد الانهيار V_{BR} (Breakdown voltage)..

يبين الجزء الأيمن من المنحنى الموضح بشكل (١- ٢) التغير الكبير في قيمة التيار الأمامي عند تغير الجهد الأمامي المطبق على الدايود ، حيث يكون التيار قليل القيمة عندما يكون الجهد المطبق على الدايود أقل من الجهد الحائل والذي تبلغ قيمته حوالي 0.7V في حالة الدايود المصنع من السيلكون أو 0.3V في حالة الدايود المصنع من الجرمانيوم. وعندما يزيد الجهد المطبق على الدايود عن الجهد الحائل فإن التيار يزيد زيادة كبيرة مع زيادة الجهد.



شكل (١- ٢) خواص دايود القدرة

الجزء الأيسر من منحنى الخواص يوضح أن التيار المار في الاتجاه العكسي يكون قريبا من الصفر طالما كان الجهد المطبق على الدايود أقل من جهد الانهيار، وعند وصول هذا الجهد إلى جهد الانهيار V_{BR} يزداد التيار زيادة كبيرة تؤدي غالبا إلى تدمير الدايود وقيمة هذا الجهديمكن معرفته من نشرة البيانات (data sheet) المعدة من الشركة المصنعة.

نلاحظ من شكل (١- ٢) استخدام مقياس رسم مختلف لكل من التيار الأمامي والتيار العكسي وذلك لأن التيار العكسي يكون دائما اقل من التيار الأمامي مئات أو آلاف المرات، كما نلاحظ أن قيمة تيار التشبع العكسي في حالة الدايود المصنوع من الجرمانيوم أكبر بضعفين إلى ثلاثة أضعاف منه للثنائي المصنع من السيليكون.

١- ٣ الثيرستور Thyristor:

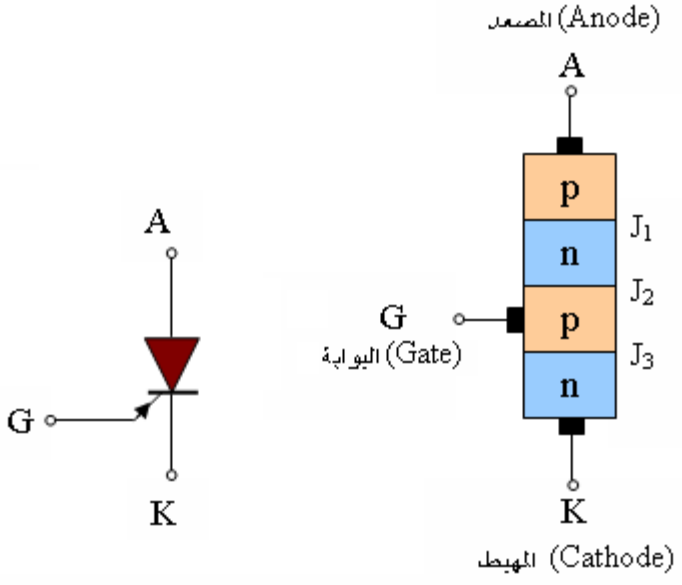
يعتبر الثيرستور واحداً من أقدم عناصر أشباه الموصلات semiconductors حيث تم تصنيعه لأول مرة في عام ١٩٥٧ من طرف شركة أمريكية General Electrics و هو الأكثر استعمالا في دوائر إلكترونيات القدرة. للثيرستور اسم آخر وهو موحد سليكوني محكوم Silicon Controlled Rectifier (SCR). أما بالنسبة للرمز المستعمل للدلالة على الثيرستور فهو يشبه الرمز المستخدم للدايود ولكن له

طرف إضافي يسمى البوابة. يدل اتجاه السهم في الرمز على اتجاه التيار المار من خلال الثيرستور عندما يكون في حالة التوصيل ON state.

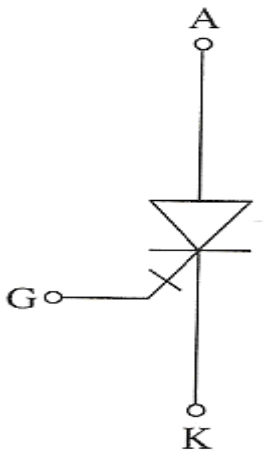
١- ٣- ١ أنواع الثيرستور المختلفة:

تشتمل عائلة الثيرستور على نبائط عديدة تتفق في أن لكل منها ثلاثة أطراف وتختلف في كيفية تحويلها من حالة الفصل (عدم التوصيل) إلى حالة التوصيل وكلها توصل التيار في اتجاه. تسمى الثلاثة أطراف للثيرستور الأنود أو المصعد Anode (A) ، الكاثود أو المهبط Cathode (K) و البوابة Gate (G). وعندما يكون الثيرستور في حالة توصيل فإن الجهد المفقود خلاله في الاتجاه الأمامي لا يتعدى ٢ فولت.

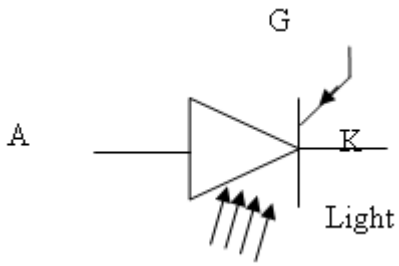
تتشابه الأنواع المختلفة للثيرستور في الخواص الإستاتيكية ولكنها تختلف في الرمز والمسمى. واشهر الانواع وأكثرها شيوعاً هو الموحد السليكونى المحكوم (SCR) وهو الذى يحمل الاسم (ثيرستور) دون اضافات ولهذا الثيرستور أنماط تختلف في سرعتى التوصيل والفصل. ولنفس المقننات فإن الثيرستور السريع أغلى من الثيرستور البطئ وشكل (١- ٣) يوضح الرمز والتركيب الداخلي لبعض أنواع الثيرستور.



١- الثيرستور (أ) التركيب (ب) الرمز



٢- الثيرستور ذو بوابة الاطفاء (GTO)



٣- الثيرستور المنشط بالضوء light activated SCR (LASER)

الشكل (١- ٣) الأنواع المختلفة للثيرستور

تقوم الشركات المنتجة لنبائط أشباه الموصلات بإعداد بطاقة بيانات لكل منتج يحدد فيها الشكل الخارجي والأطراف والأبعاد والمقننات وكذلك مقننات دائرة البوابة وزمن التوصيل وزمن الفصل ومعلومات آخرى كثيرة ، ولكي يمكن استخدام أي نوع استخداماً سليماً يجب الحصول على بطاقة البيانات الخاصة به من البائع. ينطبق ذلك على كل المنتجات الإلكترونية بما في ذلك الدوائر المتكاملة.

١- ٣- ١- ١ الموحد السليكوني المحكوم (SCR):

أشهر أنواع الثيرستور هو الموحد السليكوني المحكوم Silicon Controlled Rectifier (SCR). أما بالنسبة للرمز المستعمل للدلالة على الثيرستور فهو يشبه الرمز المستخدم للدايود ولكن له طرف إضافي يسمى البوابة. يدل اتجاه السهم في الرمز على اتجاه التيار المار من خلال الثيرستور عندما يكون في حالة التوصيل ON state.

للإنتقال إلى حالة التوصيل فإن الثيرستور يحتاج إلى توافر الشروط التالية:

أ- فرق جهد موجب بين الأنود والكاثود.

ب- تكون دائرة الحمل موصلة لكى تسمح بمرور تيار الأنود.

ج- تمرير نبضة تيار بقيمة مناسبة ولفترة ملائمة بدائرة البوابة.

وبعد أن يتحول الثيرستور إلى حالة التوصيل فإن دائرة البوابة لا يكون لها أى سيطرة على تيار الأنود وتتوقف قيمة تيار الأنود على معاوقة الدائرة وفرق الجهد وليس لها أى علاقة بقيمة تيار البوابة. ويتحول الثيرستور إلى حالة الفصل إذا وصل تيار الأنود إلى الصفر تقريباً واستمر كذلك لفترة زمنية لا تقل عن زمن الفصل الموضح ببطاقة البيانات.

يحتاج الثيرستور لكى يفصل إلى تقليل تيار الانود إلى الصفر تقريباً أما طبيعيا نتيجة لمرور تيار الدائرة بنقطة الصفر (اذا كان المصدر ذو موجة جيبية) أو باستخدام دوائر مساعدة لإجبار التيار على ذلك.

يتوافر الثيرستور بمقننات تصل إلى خمسة آلاف فولت وأربعة آلاف أمبير وتقل هذه المقننات كلما زادت إمكانية الثيرستور في التحكم.

- **الخواص الاستاتيكية للثيرستور (الموحد السليكوني المحكوم):**

للثيرستور حالتان: حالة الانحياز الأمامي Forward biased state و حالة الانحياز العكسي أو الخلفي Reverse biased state. يقال عن الثيرستور أنه في الحالة الأولى عندما يكون جهد الأنود أعلى من جهد الكاثود. أما في حالة الانحياز العكسي (الخلفي) يكون جهود الكاثود أعلى من جهد الأنود.

للحصول على خواص الثيرستور لابد من دراسة سلوكه في حالتي الانحياز الأمامي والانحياز العكسي في حالة الانحياز الأمامي حيث جهد المصعد موجب بالنسبة لجهد المهبط، تكون الوصلتان J_1 و J_3 في حالة انحياز أمامي بينما الوصلة J_2 في حالة انحياز عكسي وبالتالي لا تسمح الوصلة J_2 سوى بمرور تيار صغير جداً خلال الثيرستور ويكون اتجاهه من المصعد إلى المهبط، ويعرف بتيار التسرب الأمامي (Forward leakage current)، ويصبح الثيرستور عندئذ في حالة القطع الأمامي (Forward off state) (الجزء 0A في الشكل (١- ٤)).

بزيادة جهد المصعد بالنسبة لجهد المهبط إلى أن يصل إلى قيمة كبيرة جداً تسمى قيمة جهد الانهيار الأمامي (Forward breakdown voltage) ويرمز لها بالرمز V_{FB}، فإن الوصلة J_2 تنهار، ويحدث

انخفاض مفاجئ في مقاومة الثيرستور مما يؤدي إلى مرور التيار عبر الثيرستور من المصعد إلى المهبط. وبذلك نحصل على حالة التوصيل الأمامي (On state) (الجزء BC في الشكل (١- ٤)).

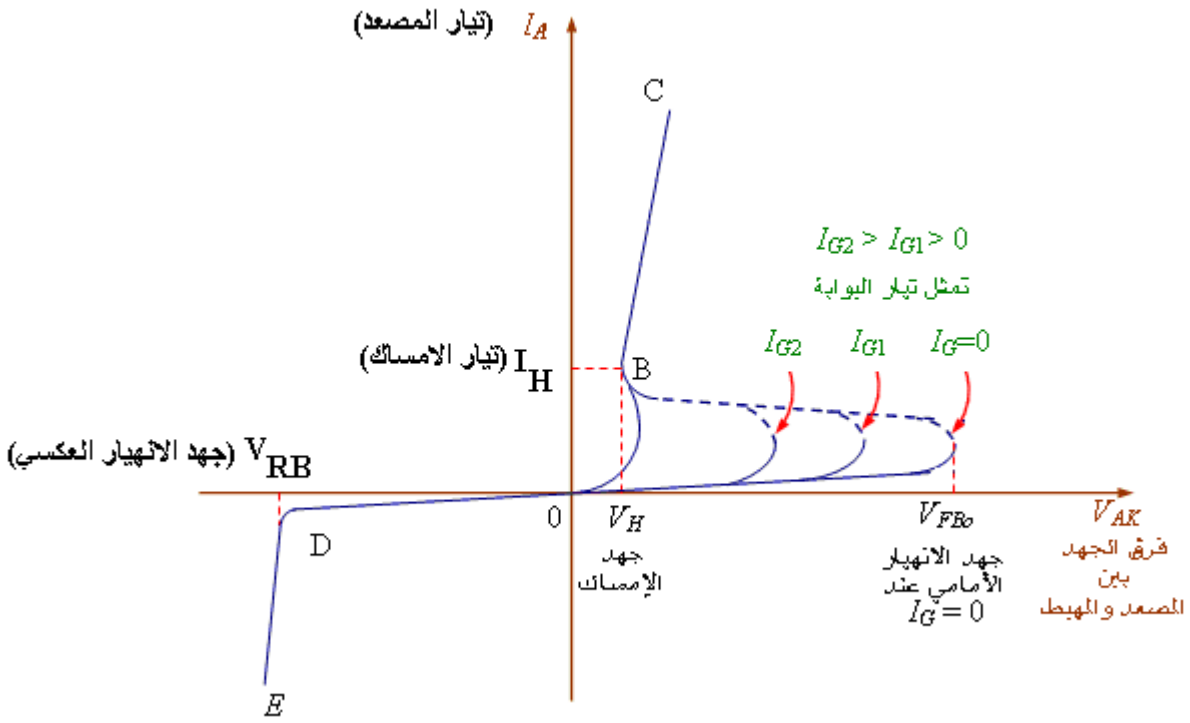
بما أن قيمة جهد الانهيار الأمامي التي تنهار عندها الوصلة J_2 تقل مع زيادة تيار البوابة فإنه يمكن التحكم في لحظة انهيار الوصلة J_2 بتطبيق نبضة على البوابة وهو ما يسمى بعملية إشعال أو قدح الثيرستور

مع زيادة التيار الداخل إلى البوابة إلى قيم كبيرة فإن جهد الانهيار الأمامي يقل كثيراً، ويصبح منحنى الخواص للثيرستور شبيهاً بمنحنى الخواص للثنائي العادي كما هو مبين بشكل (١- ٤)، وبالتالي فإن فائدة البوابة هي أنها عندما تغذى بتيار صغير نسبياً فإنها تحول الثيرستور من حالة القطع (off state) إلى حالة التوصيل (on state) دون أن يصل الجهد على طرفي الثيرستور إلى قيم عالية نسبياً. وتكون نسبة تيار المصعد المستمر إلى تيار البوابة اللازم لإشعال الثيرستور، لا تقل عادة عن عدة آلاف فمثلاً يمكن أن يكون تيار البوابة أقل من خمسة مللي أمبير وتكون هذه القيمة كافية لإشعال ثيرستور بتيار مصعد يساوي عشرة أمبير.

يجب الإشارة هنا إلى أنه بمجرد انتقال الثيرستور إلى حالة التوصيل فإن البوابة تفقد سيطرتها عليه، ويبقى في هذه الحالة مالم يقل الجهد على طرفيه عن جهد الإمساك V_H (Holding voltage) ، أو بالمقابل يقل تيار مصعده عن تيار الإمساك I_H (Holding current).

في حالة الانحياز العكسي فإن جهد المصعد يكون سالب بالنسبة لجهد المهبط وبالتالي تكون الوصلة J_2 في حالة انحياز أمامي بينما الوصلتين J_1 و J_3 في حالة انحياز عكسي ولذلك لا تسمح الوصلتين J_1 و J_3 سوى بمرور تيار صغير جداً من المهبط إلى المصعد ويسمى هذا التيار بتيار التسرب العكسي (Reverse leakage current) وهو ذو قيمة أقل بكثير من قيمة تيار التسرب الأمامي (الجزء 0D في الشكل (١- ٤)).

مع زيادة قيمة الجهد العكسي حتى تصل إلى قيمة جهد الانهيار العكسي V_{RB} (Reverse breakdown voltage) فإن الثيرستور ينهار مما يؤدي إلى تلفه وعدم صلاحيته للاستعمال مرة أخرى (الجزء DE في الشكل (١- ٤)).



شكل (١- ٤) الخواص الاستاتيكية للثيرستور

١- ٣- ١- ٢ الثيرستور ذو بوابة إطفاء Gate Turn-Off Thyristor (GTO)

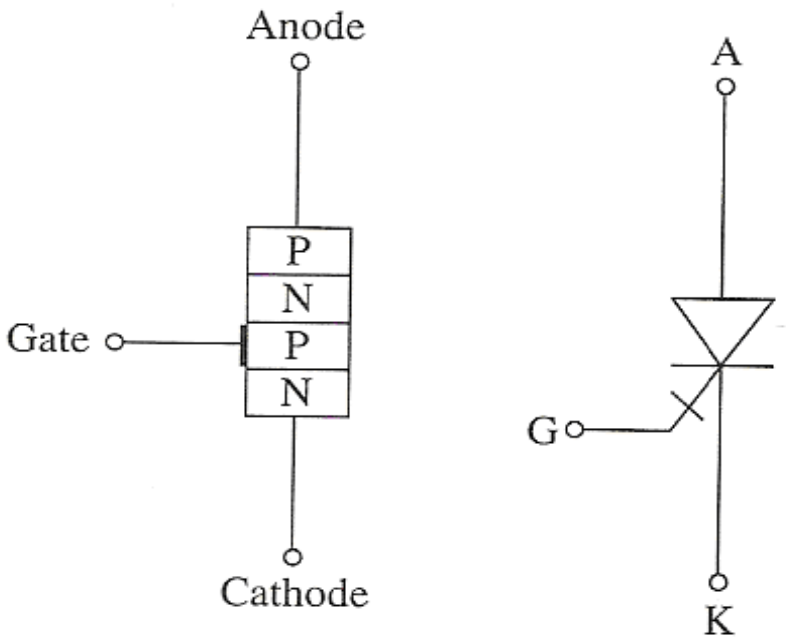
يوجد أنواع أخرى مهمة من عائلة الثيرستور والتى تعمل عند القدرات المطلوبة مثل الثيرستور ذو بوابة إطفاء GTO حيث يتم استخدام هذا الثيرستور فى حاله التحكم فى المحركات الكهربائية ومصادر عدم فصل التيار (UPS) ومعوضات القدرة اللافعالة الأستاتيكية ودوائر المقطعات بأنواعها والعواكس بمستويات قدرة كهربائية عالية.

يعتبر الثيرستور ذو بوابة الإطفاء مفتاح قدرة الكترونى يتم توصيله (تشغيله) مثل الثيرستور التقليدى عن طريق إشعاله بنبضة موجبة عند طرف بوابة الثيرستور بالإضافة لذلك يمكن إطفاء هذا الثيرستور عن طريق إمرار تيار سالب لبوابته (إشارة سالبة عند البوابة).

وهكذا يتم التحكم فى هذا الثيرستور عن طريق تيار البوابة فى حالتى توصيله أو فصله وبالتالى قد تم تحسين خواص الفصل والتوصيل لهذا الثيرستور. وبمقارنة هذا الثيرستور بقيم أزمنة التوصيل والفصل فيكون زمن توصيل هذا الثيرستور مساويا تقريبا لزمن توصيل الثيرستور التقليدى أما زمن فصل هذا الثيرستور يكون أقل كثيرا من زمن فصل الثيرستور التقليدى (SCR). ويتميز الثيرستور ذو بوابة

الإطفاء وهو في حاله وضع التوصيل قيمة تيار تسريبى أقل بينما قيمة فرق الجهد على طرفيه (V_{AK}) أكبر من الثيرستور التقليدى.

يبين شكل (١- ٥) رمز الثيرستور ذو بوابة الإطفاء والبنية الداخلية الخاصة به حيث تكون بنية هذا الثيرستور مثل الثيرستور التقليدى حيث يتكون الثيرستور من ثلاثة أطراف وهم الأنود (A) والكاثود (K) والبوابة (G) حيث يبين شكل (١- ٥ أ) الرمز المستخدم لهذا الثيرستور ويبين شكل (١- ٥ ب) البنية الداخلية لهذا الثيرستور. ولكى نجعل هذا الثيرستور فى وضع التوصيل يشترط أن يكون جهد الأنود (V_A) أكبر من جهد الكاثود (V_K) وأن تأتى نبضة موجبة عند طرف بوابة الثيرستور تجعل قيمة التيار المار بالأنود أكبر من قيمة I_L (تيار الإمساك). .ويمكن أن نجعل الثيرستور يتحول إلى وضع الفصل بإعطاء نبضة سالبة عند بوابة الثيرستور كافية لتجعله فى وضع عدم التوصيل.



(ب) (أ)

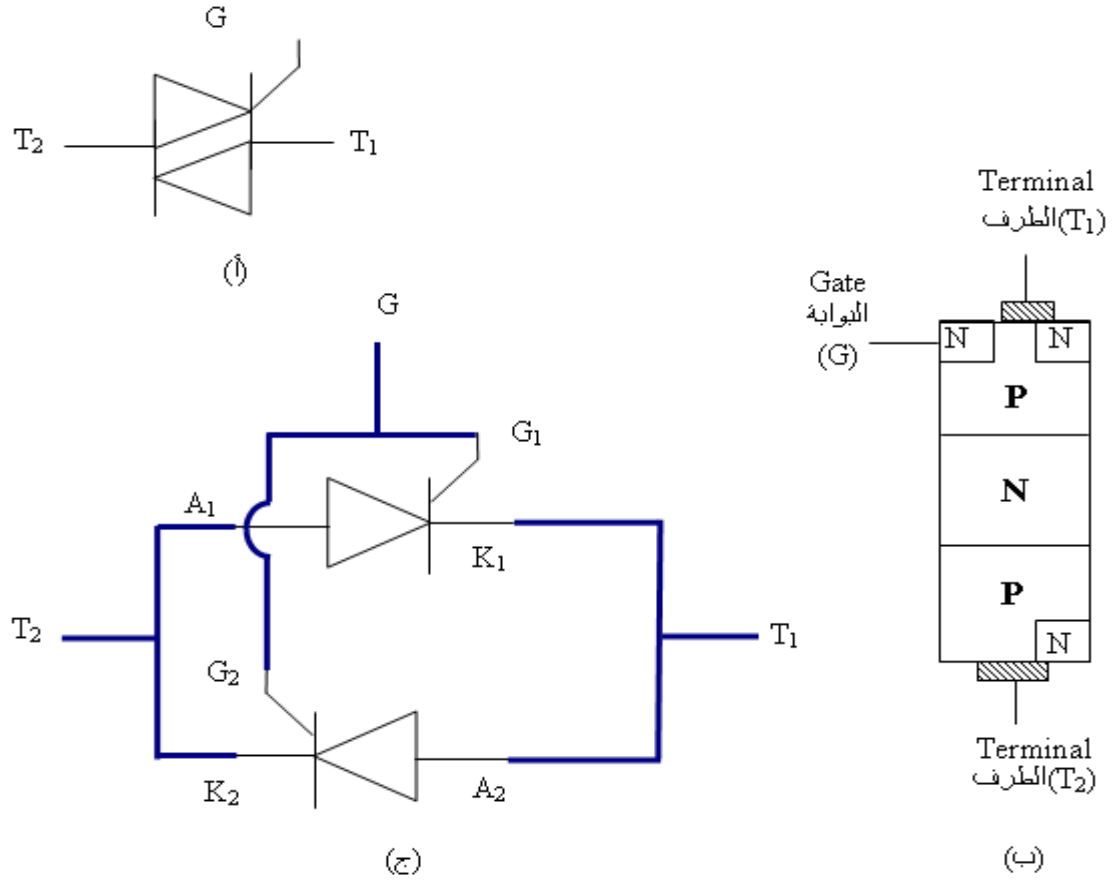
الشكل (١- ٥) الثيرستور ذو بوابة إطفاء (أ) الرمز (ب) التركيب الداخلي

١- ٤ التراياك Triac:

التراياك هو عنصر شبه موصل متعدد الطبقات و يكافئ ثيرستورين موصلين على التوازي وبشكل عكسي أو بعبارة أخرى أن أنود الثيرستور الأول موصل إلى كاثود الثيرستور الثاني و كاثود الثيرستور الأول موصل إلى أنود الثيرستور الثاني كما هو موضح في الشكل (١- ٦).

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_1.
- 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.

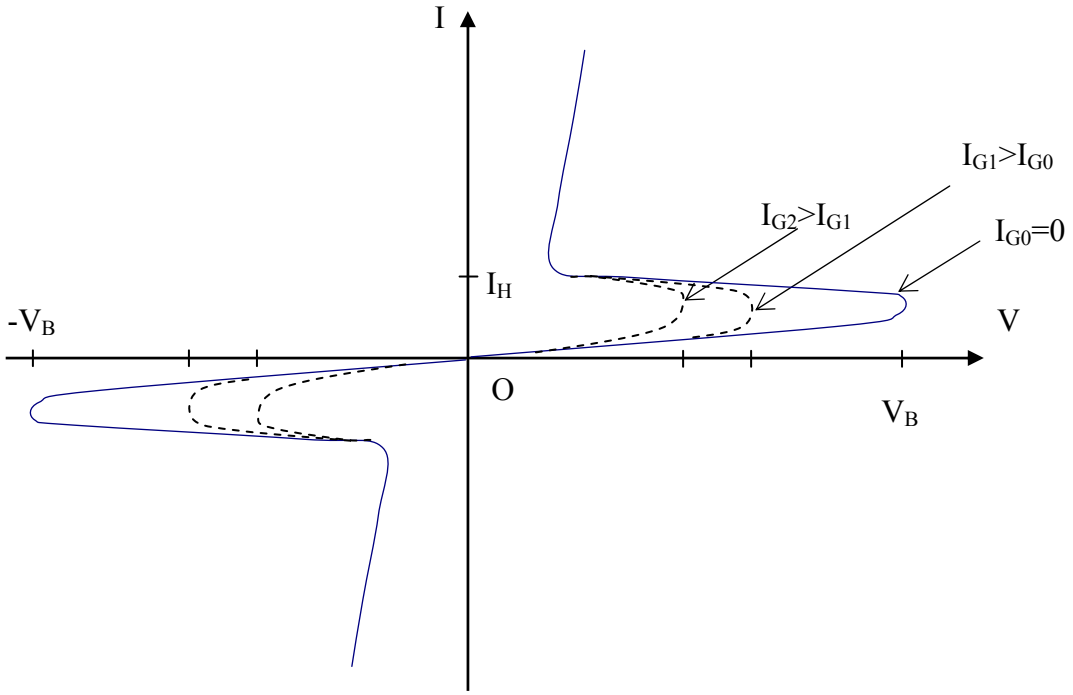


الشكل (١- ٦) الترياك (أ) الرمز (ب) التركيب (ج) الدائرة المكافئة

يمكن إشعال الترياك أيضا بإشارة سالبة إلا أن حساسيته للإشارة الموجبة أفضل. يستخدم الترياك في عدة تطبيقات صناعية نذكر منها على سبيل المثال التحكم في شدة الإضاءة والتحكم في درجة حرارة الأفران الكهربائية والتحكم في سرعة بعض أنواع المحركات التأثيرية.

- **الخواص الاستاتيكية للترياك**

بسبب توصيل الترياك للتيار في كلا الاتجاهين و أنه يكافئ ثيرستورين موصلين على التوازي وبشكل عكسي فإن خواصه تشبه خواص الثيرستور في حالة الانحياز الأمامي كما هو مبين في الشكل (١- ٧).



الشكل (١- ٧) خواص الترياك

١- ٥ طرق إشعال الثيرستور Methods of triggering a thyristor:

قد جرى العرف على تسمية نبضة تيار دائرة البوابة بنبضة الإشعال وتسمى الدائرة الإلكترونية التي تنتجها بدائرة الإشعال كما يقال أن الثيرستور قد اشتعل أى تحول إلى حالة التوصيل. توجد أربع طرق يمكن بواسطتها تشغيل الثيرستور و جعله في حالة التوصيل، بعض هذه الطرق نظامية و مستعملة كثيرًا في التطبيقات العملية و البعض الآخر غير نظامية وتستخدم في بعض التطبيقات الخاصة.

١- ٥- ١ الإشعال بالحرارة و الضوء Thermal and light triggering:

إن الزيادة في درجة حرارة الثيرستور أو تسليطه إلى حزمة ضوئية تؤدي إلى زيادة في عدد الإلكترونيات و الفجوات مما يسبب إشعال الثيرستور. يجب تجنب طريقة تعرض الثيرستور إلى درجة حرارة عالية لأنها يمكن أن تسبب تلف العنصر. يعرف الثيرستور الذي يتم إشعاله عن طريق الضوء

بالموحد السليكوني المحكوم المثار بالضوء Light Activated Silicon Controlled Rectifier (LASCR).

١- ٥- ٢ الإشعال بالجهد العالي High voltage triggering:

عندما يصبح الجهد على طرفي الثيرستور أكبر من أو يساوي قيمة جهد الانهيار الأمامي يحصل تغير مفاجئ في مقاومة الثيرستور حيث تصبح قيمتها صغيرة ويسمح بمرور كل التيار من الأنود إلى الكاثود ويصبح الثيرستور في حالة التوصيل. يُنصح عمليًا تطبيق نبضة على البوابة لتفادي تعريض الثيرستور جهود عالية لإشعاله.

١- ٥- ٣ الإشعال بمعدل الجهد المسلط triggering $\frac{dv}{dt}$:

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

١- ٥- ٤ الإشعال بالبوابة Gate triggering:

عندما يكون الجهد على طرفي الثيرستور موجباً (الربع الأول من الخواص) يكتفي أن نمرر عبر البوابة تياراً ذا قيمة كافية عادةً ما بين 10 إلى 50 ميلي أمبير لمدة كافية وذلك بتطبيق جهد موجب بين البوابة والكاثود لجعله موصل.

لكي تنجح عملية إشعال الثيرستور بالبوابة لابد أن تحقق دائرة الإشعال ما يلي:

أ- أن تطبق بين البوابة و الكاثود نبضة ذات قيمة كافية وعرض مناسب.

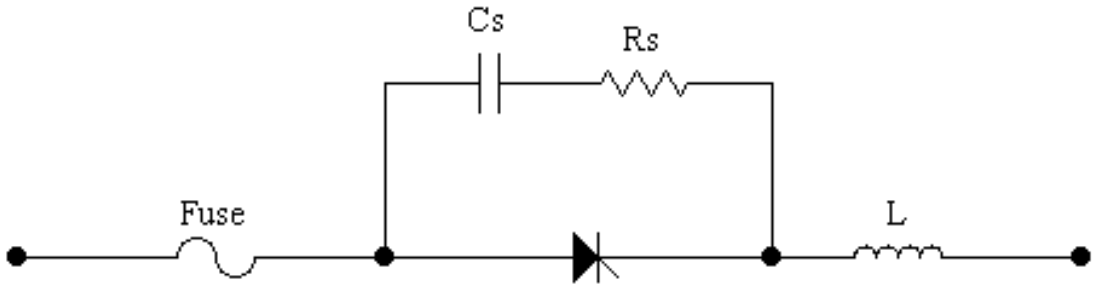
ب- أن توجد دائرة حمل كاملة لتسمح بمرور تيار بالثيرستور.

جـ- أن تطبق النبضة على البوابة عندما يكون الثيرستور في حالة الانحياز الأمامي.

١- ٦ حماية الثيرستور Thyristor protection :

إن درجة حرارة الثيرستور تميل إلى الإرتفاع عند زيادة التيار مما يسبب تلف العنصر إن لم تؤخذ 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- ٨) الأنواع الثلاثة من الحمايات المستخدمة في الثيرستور:

- الحماية ضد التيارات العالية باستعمال مصهر سريع fast acting fuse على التوالي مع الثيرستور. عند إختيار المصهر، يجب أن تكون القيمة المقننة للتيار المصهر أقل بقليل من القيمة العظمى للتيار الذي يتحمله الثيرستور.
- الحماية ضد التغيرات السريعة و المفاجئة في الجهد بتوصيل دائرة امتصاص الصدمات Snubber circuit على التوازي مع الثيرستور. تتكون هذه الدائرة من مقاومة موصلة على التوالي مع مكثف.
- الحماية ضد التغيرات السريعة و المفاجئة في التيار باستخدام ملف على التوالي مع الثيرستور.
- الحماية ضد ارتفاع درجة حراة الثيرستور باستخدام مبرد حراري heat sink.



الشكل (١- ٨) دائرة حماية الثيرستور

١- ٧ ترانزستور القدرة:

يتميز الترانزستور عن الثيرستور في أنه يوصل طالما تواجدت إشارة تيار القاعدة بقيمة مناسبة ويفصل اذا تلاشت هذه الإشارة. ولقد أدى التطور التكنولوجي في صناعة نبائط أشباه الموصلات إلى رفع مقننات الترانزستور إلى قيم عالية من الجهد والتيار جعلته يصلح للإستخدام في مجال إلكترونيات القدرة، وفي هذا المجال فإن الترانزستور يستخدم كمفتاح للتوصيل والفصل.

توجد أنواع مختلفة لترانزستورات القدرة تستخدم بكثرة فى مجال إلكترونيات القدرة مثل:

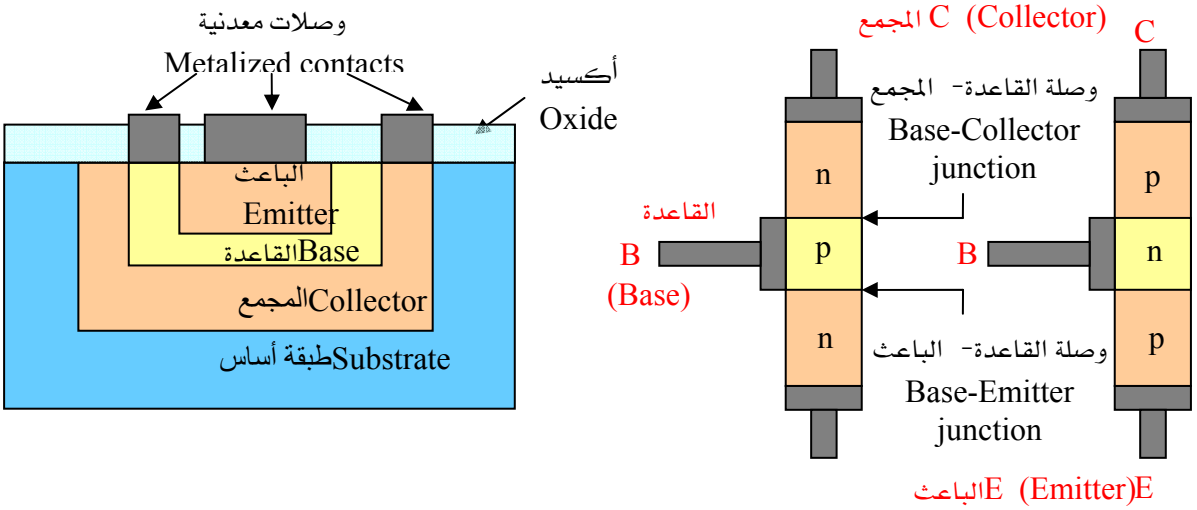
أ- ترانزستور الوصلة ثنائى القطبية BJT.

ب- ترانزستور تأثير المجال المعدني الأكسيدى ذو الوصلة MOSFET.

جـ- الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة IGBT.

١- ٧- ١ ترانزستور ثنائي القطبية (Bipolar Junction Transistor)

يتركب الترانزستور ثنائي القطبية من ثلاث مناطق من شبه الموصل المطعم مفصولة بوصلتين من النوع p-n كما هو مبين في الشكل(١- ٩ أ). وتسمى هذه المناطق بالباعث(Emitter) والقاعدة (Base) والمجمع(Collector)، ويوجد نوعان من الترانزستور ثنائي القطبية وهما npn و pnp والشكل (١- ٩ ب) يبين التمثيل للرموز الطبيعية لهذه الأنواع من الترانزستور.الوصلة pn التي تربط منطقة القاعدة ومنطقة الباعث تسمى وصلة القاعدة - الباعث (Base-Emitter Junction) والوصلة التي تربط منطقة القاعدة ومنطقة المجمع تسمى وصلة القاعدة- المجمع (Base-Collector Junction) كما هو مبين في شكل (١- ٩ ب)، ويرمز اختصاراً للمشع بالحرف E، وللمجمع بالحرف C، وكذلك القاعدة بالحرف B. ويبين شكل (١- ١٠) الرمز القياسي الذي يستخدم في الدوائر الإلكترونية لكل من ترانزستور npn وكذلك ترانزستور pnp.



(أ) (ب)

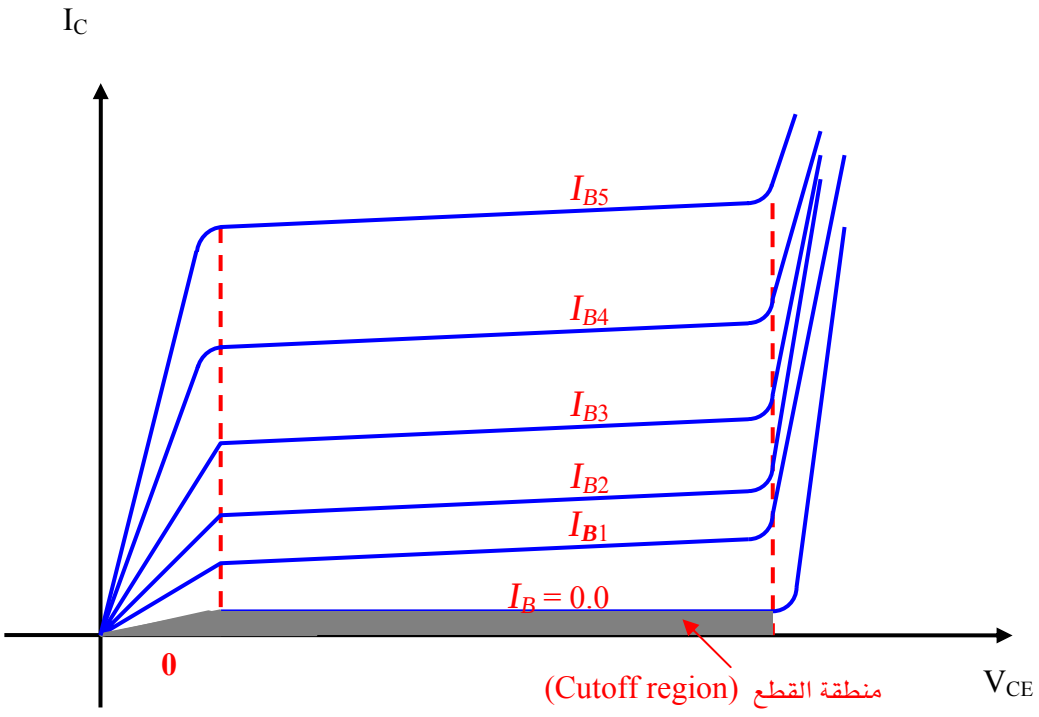
شكل (١- ٩) البناء الأساسى للترانزستور ثنائى القطبية.

شكل(١- ١٠) يوضح الرموز القياسية المستخدمة في الدوائر الإلكترونية.

- **منحنيات خواص لترانزستور ثنائي القطبية**

تمثل العلاقة بين تيار المجمع I_C وفرق الجهد بين المجمع والباعث V_{CB} عند قيم ثابتة لتيار القاعدة I_B.

- يمكن الحصول على مجموعة من منحنيات الخواص للترانزستور كما هو مبين بشكل(١- ١١) وذلك بتغيير قيمة تيار القاعدة عند قيم مختلفة.
- عندما يكون تيار القاعدة مساوياً الصفر يكون الترانزستور في هذه الحالة في منطقة القطع (Cutoff region) بالرغم من وجود تيار المجمع المتسرب الصغير جداً كما بشكل(١- ١١).

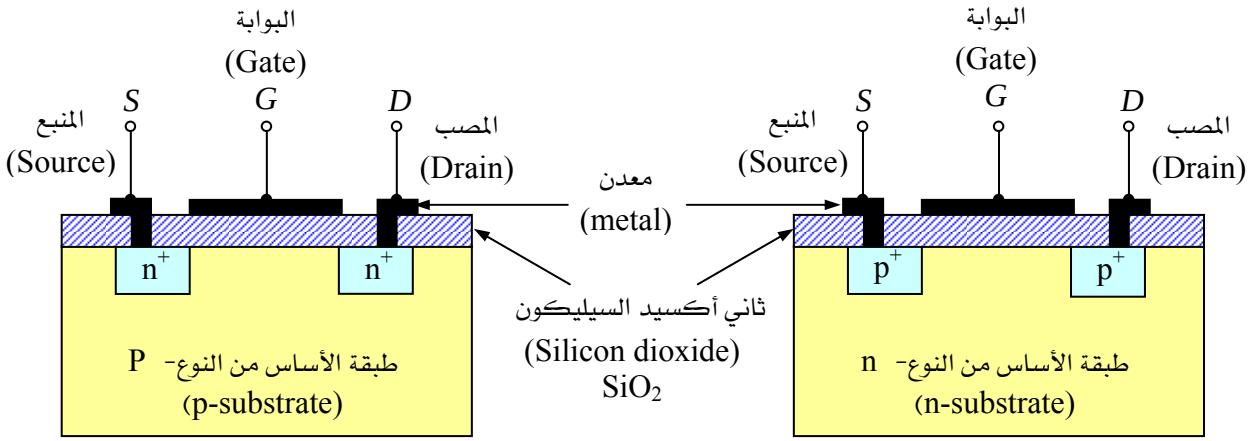


شكل(١- ١١) يوضح مجموعة من منحنيات خواص المجمع للترانزستور ثنائي القطبية.

١- ٧- ٢ ترانزستور تأثير المجال المعدني الاكسيدي شبه الموصل
Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor (MOSFET)

بالإضافة لتسميته ترانزستور تأثير المجال المعدني الاكسيدي شبه الموصل (MOSFET) يسمى أيضا ترانزستور تأثير المجال ذو البوابة المعزولة (Insulated Gate Field Effect Transistor) ويرمز له بالرمز IGFET. يمتاز هذا النوع على نرانزستور ثنائي القطبية BJT بأنه يعتمد على الجهد في تشغيله ولا يعتمد على التيار وبذلك لا يتأثر تشغيله بدرجة حرارة الوصله ويكون أكثر استقرارا في التشغيل وله مقاومة دخل كبيرة ($10^{10}\Omega$ - $10^{15}\Omega$) نظراً لوجود الطبقة العازلة المتمثلة في طبقة ثاني أكسيد السيليكون.

يتكون هذا النوع من الترانزستور من طبقة أساس (Substrate) من مادة شبه موصل ذات شوائب قليلة التركيز من النوع- n (في حالة القناة- P) أو النوع- p (في حالة القناة- n) بها منطقتان ذات شوائب من نوع معاكس لنوع طبقة الأساس وذات تركيز عالي يمثلان المنبع (Source) والمصرف (Drain) ويغطى السطح بطبقة رقيقة عازلة من مادة ثاني أكسيد السيليكون (SiO_2) ثم تغطى الطبقة العازلة بطبقة موصلة معدنية لتمثل البوابة (Gate). بالإضافة لوجود وصلات معدنية خارجية لكل من المصرف والمنبع كما هو مبين بشكل (١- ١٢).

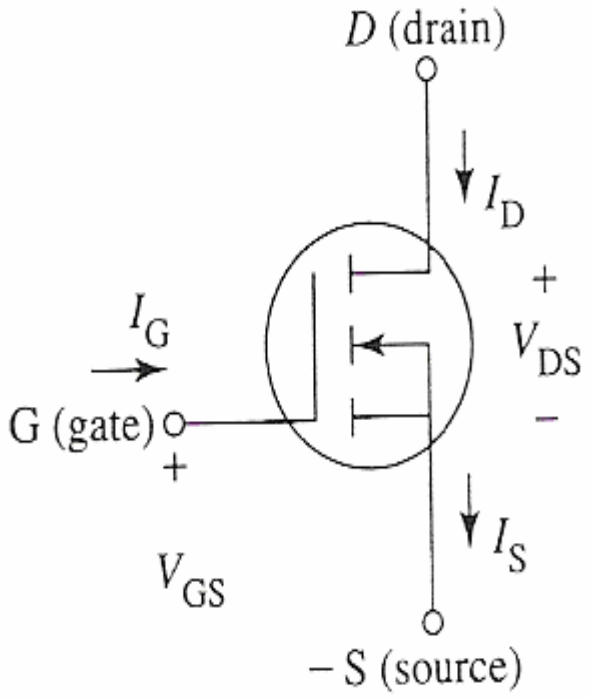


(ب) (أ)

شكل (١- ١٢) تركيب النوع التعزيزى لترانزستور MOSFET

(أ) ذو القناة- p (ب) ذو القناة- n

والشكل (١- ١٣) يبين الرموز المستخدمة لترانزستور MOSFET ذي القناة- n ويمكن استخدام نفس الرموز بالنسبة للترانزستور ذي القناة- p مع عكس اتجاه السهم المبين بكل رمز.

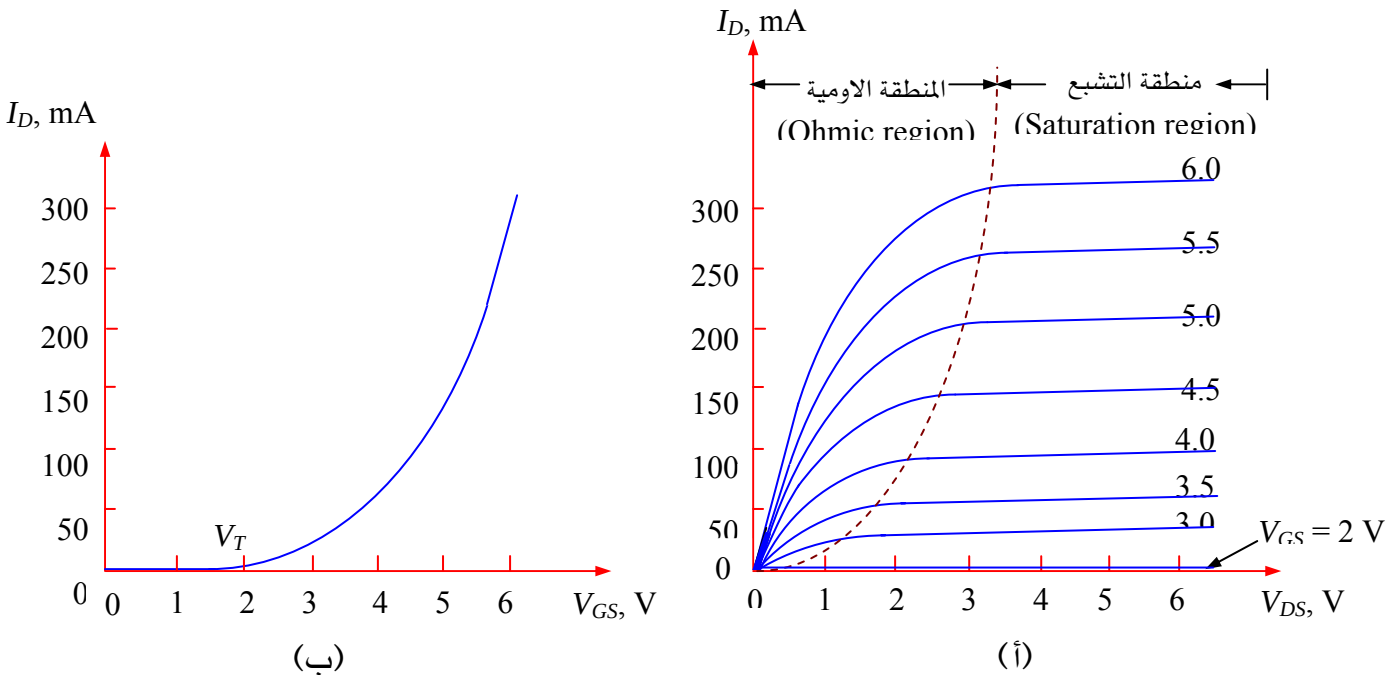


شكل (١- ١٣) رمز الموسفت ودائرته المكافئة ذو القناة السالبة n- channel

- **منحنيات خواص لترانزستور MOSFET**

شكل (١- ١٤) يبين منحنيات الخواص للنوع التعزيزى لترانزستور MOSFET ذي القناة- n. شكل (١- ١٤ أ) يوضح منحنيات خواص المصرف أو الخرج، ونلاحظ منها أنه كلما زادت قيمة الجهد V_{GS} فإن قيمة التيار I_D تثبت تقريباً عند قيم أقل للجهد V_{DS}. يبين شكل (١- ١٤ ب) منحنى التحويل ومنه نلاحظ أن قيمة التيار I_D تكون صغيرة جداً (بالنانو أمبير) إذا كانت قيمة جهد البوابة أقل من قيمة الجهد الفاصل، ولكن بعد الجهد الفاصل يزداد التيار بقيم كبيرة ولذلك يمكن استخدام هذا النوع من الترانزستور كمفتاح، حيث لا يمرر تيار كهربائي بقيم ملحوظة إلا إذا وصل الجهد إلى قيمة الجهد الفاصل.

منحنيات الخواص المبينة بالشكل (١- ١٤) تصلح للترانزستور ذي القناة- p مع عكس قطبية جميع الجهود والتيارات.



شكل (١- ١٤) منحنيات خواص لترانستور MOSFET ذو القناة- n

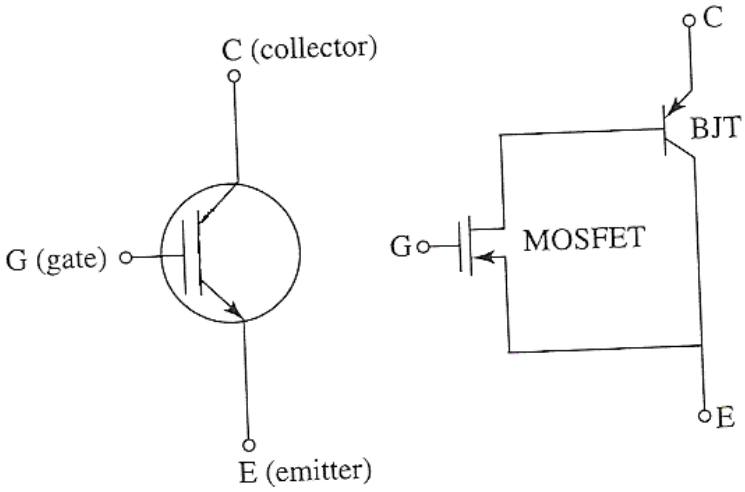
١- ٧- (أ) خواص المصرف أو الخرج (Drain or Output characteristics)

(ب) خواص التحويل (Transfer characteristic)

يتميز الترانزستور ثنائى القطبية ذو البوابة المعزوله IGBTs بأنه يجمع بعض صفات ترانزستور الوصلة ثنائية القطبية والموسفت حيث له خواص ترانزستور الوصلة ثنائى القطبية من حيث صغر قيمة فرق الجهد على طرفيه في حالة التوصيل وكبر فرق الجهد على طرفيه فى حالة الفصل وتكون دائرة إشعاله بسيطه وله مقاومه دخل عالية مثل الموسفت. يستخدم الترانزستور ثنائى القطبية ذو البوابة المعزوله فى حاله وجود أحمال ذات قدرات منخفضة أو متوسطة حيث أنه يتحمل تيار عالى وجهود متوسطة على سبيل المثال فالترانزستور ثنائى القطبية ذو البوابة المعزوله ذات النوعية CM1000HA فإنه مصمم عند قيمة مقننة للجهد وهى 1400V وقيمة مقننه للتيار وهى 1000A.

وقد تم احلال الترانزستور ذو البوابة المعزوله بدلا من الموسفت فى حاله تطبيقات الجهد العالى حيث تكون قيمة الفقد به صغيرة فى حاله التوصيل. ويعيب الترانزستور ذو البوابة المعزوله بأنه يعمل عند تردد فصل وتوصيل أقل من الموسفت ولكن قيمة هذا التردد أعلى منه لترانزستور ثنائى القطبية . لايتم استخدام دايود عكسى فى حاله الترانزستور ذو البوابة المعزولة ولكنه غالبا ما يستخدم فى حاله الموسفت حيث للموسفت يكون تحمله للجهد العكسى ضعيف وأقصى قيمة للجهد العكسى يمكنه تحملها أقل من 10V.

يبين شكل (١- ١٥) دائرة رمز الترانزستور ذو البوابة المعزوله ذات قناه سالبة N والتى تتكون من موسفت و ترانزستور ثنائى القطبية. يتكون ترانزستور ذو البوابة المعزوله من ثلاثة أطراف وهم المجمع (C) والباعث (E) والبوابة G ويكون مبدأ فكرة عمل هذا الترانز ستور مشابهة لعمل موسفت القدرة حيث للترانزستور ذو البوابة المعزوله لابد أن يكون جهد المجمع (C) موجب بالنسبة لجهد الباعث (E) ولابد من تغذية البوابة بنبضة ذات الجهد الموجب حتى يتم تحويله لوضع التشغيل (التوصيل) وبازاله هذه النبضة الموجبة من البوابة يتم تحويل الترانزستور ذو البوابة المعزوله لوضعية الفصل.

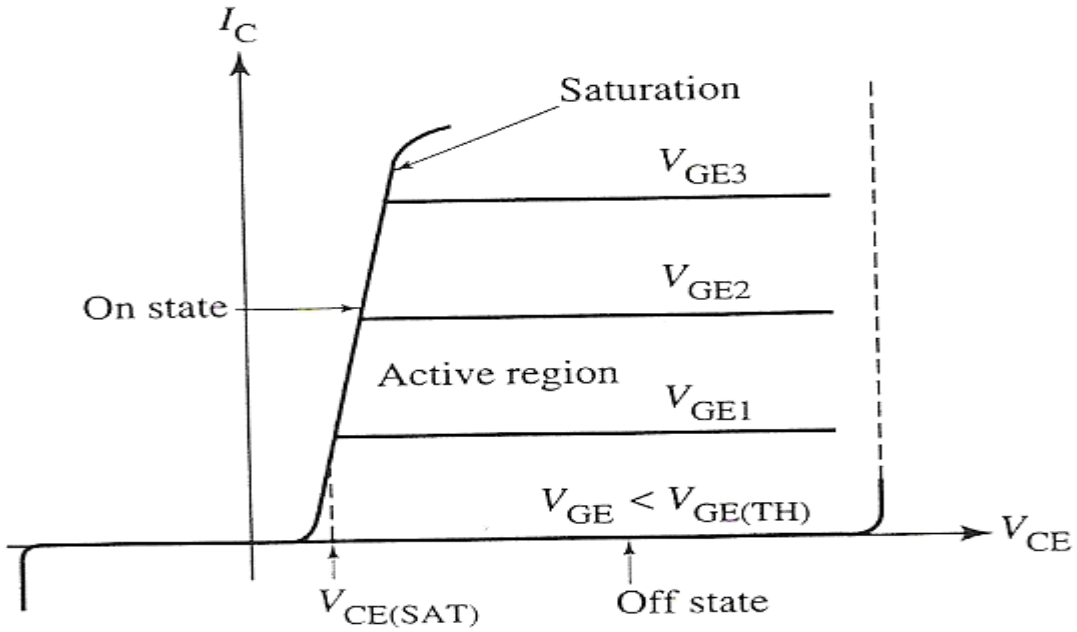


الشكل (١- ١٥) رمز الترانزستور ثنائي القطبية ذو البوابة المعزوله ودائرته المكافئة

- **الخواص الأستاتيكية لترانزستور ثنائى القطبية ذو البوابة المعزوله**

تمثل العلاقة بين تيار المجمع (I_C) وفرق الجهد بين طرفى المجمع والباعث V_{CE} الخواص الأستاتيكية لترانزستور ذو البوابة المعزوله كما هو مبين بشكل (١- ١٦) وتتأثر هذه العلاقة أو الخواص الأستاتيكية بقيمة الجهد المغذى على طرف البوابة (V_G) حيث يكون هذا الترانزستور فى وضع الفصل عند جعل قيمة جهد البوابة تصل لقيمة الصفر وفى هذه الحالة يكون قيمة التيار المار بالبوابة له قيمة صفرية وتكون قيمة الجهد بين طرفى المجمع والباعث V_{CE} هى قيمة المصدر الكهربى المتصل بالترانزستور وعند تغذية الترانزستور بنبضة جهد كافية لإشعاله حيث تأتى النبضة بين البوابة والباعث فإن الترانزستور سوف يتحول لوضع التوصيل ويسمح هذا الوضع بمرور التيار خلال المجمع I_C وتكون قيمة هذا التيار تعتمد على قيمة جهد المصدر ومقاومة الحمل المتصل بالترانزستور وتصل قيمة

فرق الجهد بين طرفى المجمع والباعث V_{CE} لقيمة صغيرة تقترب من الصفر و الترانزستور فى وضع التوصيل.



الشكل (١- ١٦) الخواص الأستاتيكية لترانزستور ذو البوابة المعزولة

١- ٨ أسئلة:

١- ١ ما هو الثيرستور؟

١- ٢ ما هو الاسم البديل المستعمل للثيرستور؟

١- ٣ متى يكون الثيرستور في الانحياز الأمامي؟

١- ٤ متى يكون الثيرستور في الانحياز العكسى؟

١- ٥ ما هي الشروط اللازم توفرها لإشعال الثيرستور؟

١- ٦ كيف يتم إيقاف الثيرستور عن التوصيل؟

١- ٧ اذكر مع الشرح الطرق المختلفة المستعملة لإشعال الثيرستور

١- ٨ كيف تتم حماية الثيرستور؟

١- ٩ ارسم الدائرة المكافئة للترياك

١- ١٠ اذكر بعض تطبيقات عملية للترياك؟

١- ١١ اذكر مميزات وعيوب الثيرستور.

١- ١٢ اذكر تطبيقات واستخدام الثيرستور.

١- ١٣ ماهى أهم الاستخدامات العملية لترانزستورات القدرة ؟

١- ١٤ ارسم الخواص الأستاتيكية الخاصة بترانزستور الوصلة ثنائى القطبية.

١- ١٥ ارسم الخواص الأستاتيكية الخاصة للموسفت.

١- ١٦ ارسم الدائرة المكافئة للترانزستور ثنائى القطبية ذو البوابة المعزولة.

١- ١٧ ارسم الخواص الأستاتيكية للترانزستور ثنائى القطبية ذو البوابة المعزولة.

١- ١٨ ما الفرق الأساسى لنبضة بوابة الثيرستور ونبضة بوابة الموسفت ؟

إلكترونيات القوى

دوائر التوحيد

الجدارة: الإلمام الشامل بدوائر التوحيد.

الأهداف: عندما يكمل المتدرب هذه الوحدة يكون قد تمكن من تحقيق الأهداف والمهارات التالية:

- بناء دوائر التوحيد لنصف موجة ولموجة كاملة بواسطة الدايودات.
- 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 كليًا والمتصل بالحمل المادي أو الحثي مستعينا بالموجات الخاصة بدائرة هذا الموحد
- مبدأ عمل موحدات نصف الموجة المحكومة ثلاثية الاوجه وايضا الموحدات القنطرية المحكومة ثلاثية الاوجه

الوقت المتوقع للتدريب: ٩ ساعات

الوسائل المساعدة:

- السبورة
- عرض باستخدام برنامج Power Point

متطلبات الجدارة: دراسة الحقيبة التدريبية لمقرر دوائر كهربائية- ٢.

٢- ١ مقدمة

نظراً لمقدرة الدايود على السماح للتيار بالمرور في اتجاه واحد ومنع مروره في الاتجاه العكسي، فإن الدايودات تستخدم كموحدات لاتجاه التيار في دوائر التوحيد الموجودة بمصادر القدرة ذات التيار المستمر والتي تعمل على مصادر الجهد المتردد.

وحيث إن مصدر القدرة ذو التيار المستمر يمثل جزء ضروري في كل الأنظمة الكهربائية، فإننا سوف نناقش في بداية هذه الوحدة المراحل الأساسية التي يتكون منها، ثم نتعرض بعد ذلك لكل مرحلة على حدة بالتفصيل.

كذلك سوف يتم دراسة بعض الدوائر الأساسية للموحدات المحكومة الأحادية الوجه وكذلك ثلاثية الأوجه واللازمة لتحويل الجهد المتردد إلى جهد مستمر. .سيتم عمل دراسة تفصيلية للموحدات نصف الموجة والموجة الكاملة المحكومة أحادية الأوجه والمتصلة بحمل مادي (R) أو حمل حثي (R-L) وسوف تتم الدراسة على أساس أن جميع هذه الموحدات الأحادية الوجه متصلة بمصدر جهد متناوب له موجة جيبية بقيمة عظمى V_m. وسوف تم عمل دراسة تفصيلية لدوائر الموحدات نصف الموجة المحكومة ثلاثية الاوجه وايضا الموحدات القنطرية المحكومة ثلاثية الاوجه والمتصلة بأحمال مادية.

٢- ٢ أنواع دوائر التوحيد

يستخدم دايود القدرة بكثرة في الدوائر الإلكترونية وله تطبيقات عديدة في مجال الهندسة الكهربائية بصفة عامة وتسمى مغيرات القدرة التي تحول التيار المتردد إلى مستمر بالموحدات، والموحدات التى تستخدم دايود القدرة يطلق عليها الموحدات غير المحكومة وذلك لأنها تعطي جهد خرج مستمر وثابت القيمة طالما كانت قيمة جهد الدخل ثابتة. وللحصول على جهد خرج يمكن التحكم فيه أو تغيير قيمته حسب الحاجة تستخدم الموحدات المحكومة أى الثيرستور أو الترانسستور والتى تستخدم بكثرة في التطبيقات الصناعية خاصة في نظم التسيير الكهربائي المتغيرة السرعة.

وكما هو الحال مع موحدات دايود القدرة غير المحكومة فإن الموحدات المحكومة تقسم إلى موحدات وجه واحد وثلاثة أوجه وكل من هذين النوعين إما أن يكون من النوع ذي نقطة المنتصف أو الحياد أي يحتاج إلى محول بينة وبين المصدر للحصول على هذه النقطة أو يكون على شكل قنطرة وتنقسم موحدات القنطرة المحكومة إلى موحدات محكومة كاملة وموحدات نصف محكومة ولكل منها تطبيقاته الصناعية.

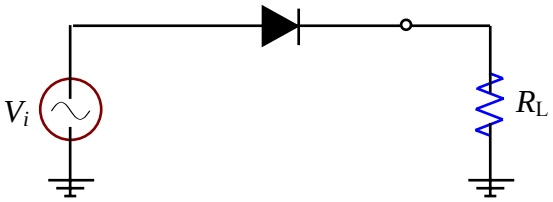
٢- ٣ الموحدات غير المحكومة

٢- ٣- ١ موحد نصف الموجة غير المحكوم The Half-Wave Rectifier

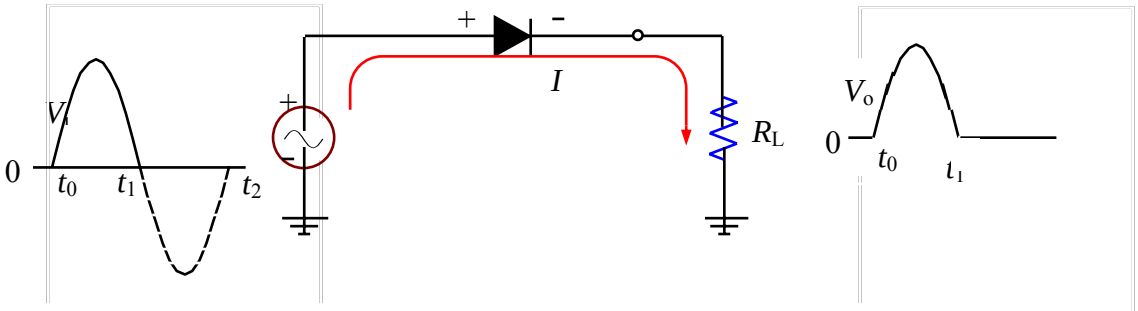
عملية التوحيد يقصد بها تحويل التيار المتردد إلى تيار موحد الاتجاه في صورة نبضات. شكل (٢- ١أ) يوضح دائرة موحد نصف موجة باستخدام ثنائي واحد، حيث يتصل طرف المصعد للثنائي بمصدر الجهد المتردد (ac voltage source) المراد توحيده ويتصل طرف المهبط بالحمل (load).

خلال النصف الموجب لموجة جهد الدخل يكون الدايود في حالة انحياز أمامي ويسمح للتيار بالمرور خلاله إلى الحمل. وفي حالة استخدام ثنائي مثالي (ideal diode) فإن قيمة الجهد المفقود على طرفي الدايود تساوي صفر، وبالتالي يكون الجهد الناتج على طرفي مقاومة الحمل مطابق تماما لشكل النصف الموجب لموجة جهد الدخل كما هو مبين بشكل (٢- ١ب).

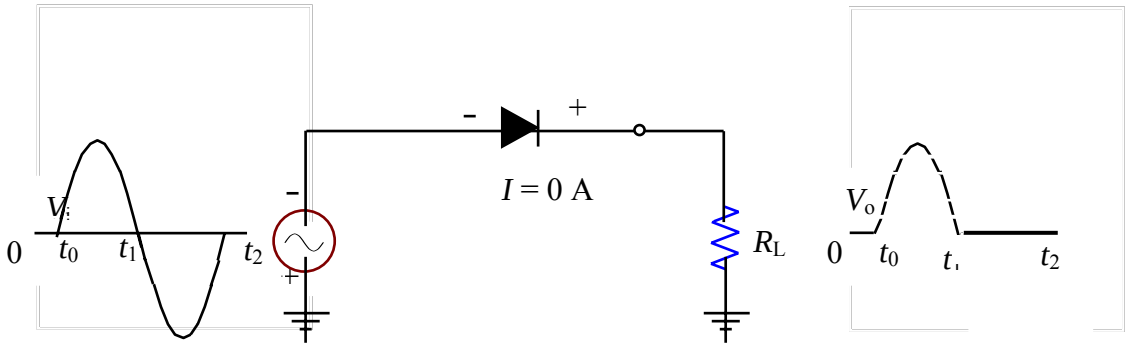
خلال النصف السالب لموجة جهد الدخل يكون الدايود في حالة انحياز عكسي ولا يسمح للتيار بالمرور خلاله، وبالتالي فإن قيمة الجهد الناتج على طرفي مقاومة الحمل **تساوي** صفر كما هو موضح بشكل (٢- ٢جـ). شكل (٢- ٢د) يوضح الخرج النهائي لموحد نصف الموجة.



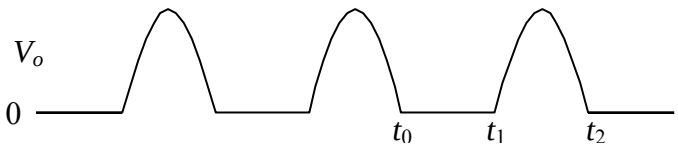
أ- دائرة موحد نصف موجة.



ب- عملية التوحيد خلال النصف الموجب لموجة جهد الدخل.



جـ عملية التوحيد خلال النصف السالب لموجة جهد الدخل.

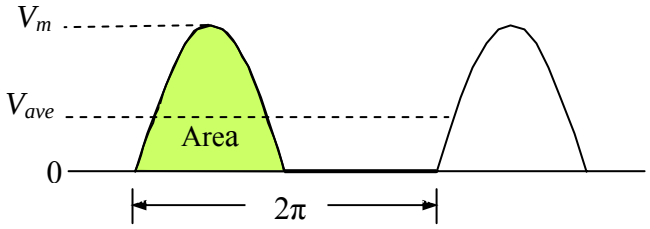


د- الخرج النهائي لموحد نصف الموجة.

شكل (٢- ١) عملية التوحيد باستخدام موحد نصف موجة.

القيمة المتوسطة لجهد الخرج لموحد نصف الموجة هي القيمة التي تقاس بواسطة جهاز قياس الجهد المستمر(dc voltmeter)، ورياضيا يمكن حسابها بقسمة المساحة تحت منحنى جهد الخرج الموحد خلال دورة كاملة على2π، كما هو موضح بشكل (٢- ٢). وبفرض أن القيمة العظمى (peak value) لجهد الخرج تساوي V_mفإن القيمة المتوسطة (average value) لجهد الخرج لموحد نصف الموجة ويرمز لها بالرمز V_{ave} تعطى بالعلاقة الآتية:

$$V_{ave} = \frac{Vm}{\pi} \qquad (٢-١)$$



شكل (٢- ٢) القيمة المتوسطة لجهد الخرج لموحد نصف الموجة.

مثال ٢- ١:

أوجد القيمة المتوسطة (V_{ave}) للجهد الموحد نصف موجة حيث أن Vm=50 V.

الحل:

$$V_{ave} = \frac{Vm}{\pi} = \frac{50}{3.14} = 15.9\text{V}$$

٢- ٣- ٢ موحدات الموجة الكاملة غير المحكومة (قنطرة التوحيد) Full-Wave Rectifiers

بالرغم من أن موحد نصف الموجة له بعض التطبيقات إلا أن استخدام موحد الموجة الكاملة أكثر انتشارا في مصادر القدرة ذي التيار المستمر، والفرق بين توحيد الموجة الكاملة وتوحيد نصف الموجة هو أن موحد الموجة الكاملة يسمح بمرور التيار في اتجاه واحد خلال الحمل على هيئة نبضات خلال نصفي موجة الدخل بينما يسمح موحد نصف الموجة بمرور التيار خلال النصف الموجب للموجة فقط، ونتيجة لذلك فإن تردد جهد الخرج في حالة توحيد الموجة الكاملة يساوي ضعف تردد جهد الدخل، حيث نحصل في الخرج على نبضة كاملة لكل نصف دورة لجهد الدخل كما هو موضح في شكل (٢- ٣).

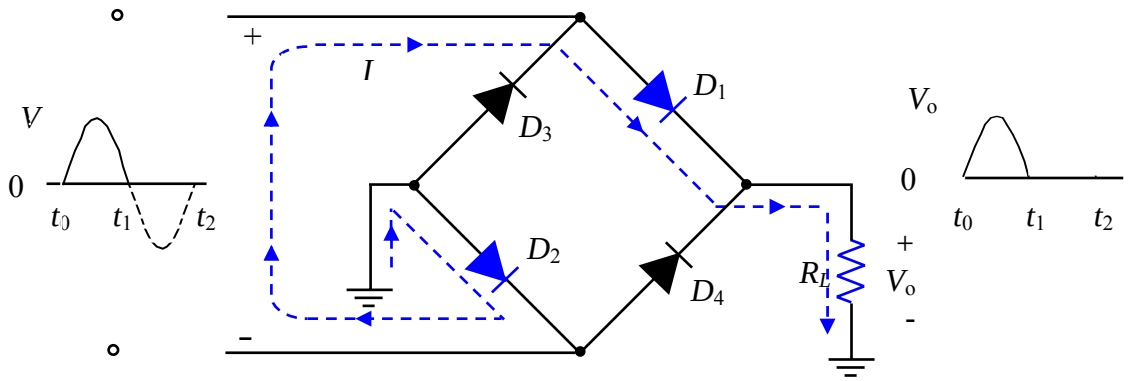
شكل (٢- ٣) توحيد موجة كاملة.

وحيث إن عدد النبضات الموجبة التي نحصل عليها من خرج موحد الموجة الكاملة يساوي ضعف عدد النبضات الموجبة التي نحصل عليها من خرج موحد نصف الموجة خلال نفس الفترة الزمنية، فإن القيمة المتوسطة لجهد الخرج (V_{ave}) في حالة موحد الموجة الكاملة تساوي ضعف القيمة التي نحصل عليها في حالة موحد نصف الموجة كما هو موضح بالعلاقة الآتية:

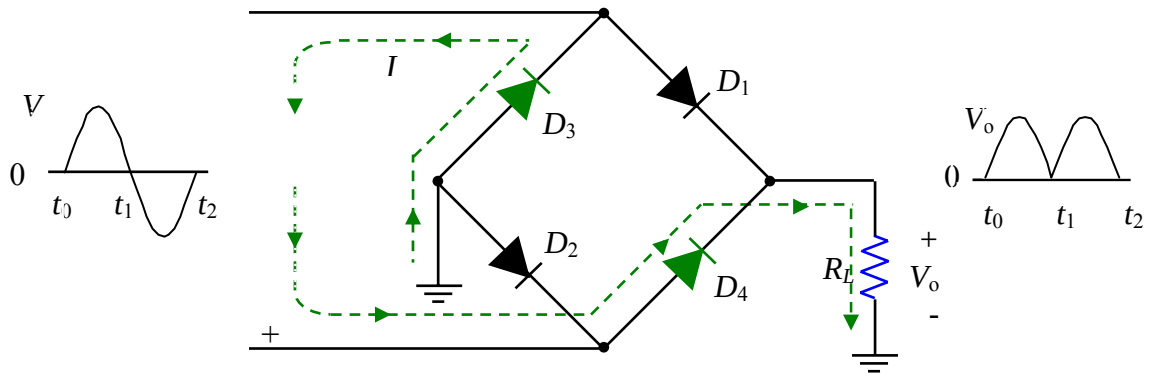
$$V_{ave} = \frac{2V_m}{\pi} \qquad (٢-٢)$$

في هذا النوع يتم استخدام أربعة ثنائيات موصلة كما في شكل (٢- ٤). خلال النصف الموجب لموجة جهد الدخل يكون كل من الدايود D_2 , D_1 في حالة انحياز أمامي بينما يكون كل من الدايود D_4 , D_3 في حالة انحياز عكسي، ولذا يمر التيار إلى الحمل عبر كل من الدايود D_2, D_1 خلال المسار المبين بشكل (٢- ٤أ).

خلال النصف السالب لموجة جهد الدخل يصبح كل من الدايود D_1 , D_2 في حالة انحياز عكسي بينما كل من الدايود D_3 , D_4 في حالة انحياز أمامي، ويمر التيار إلى الحمل عبر كل من الدايود D_3, D_4 خلال المسار المبين بشكل (٢- ٤ب).



أ- عملية التوحيد خلال النصف الموجب لموجة جهد الدخل.



ب- عملية التوحيد خلال النصف السالب لموجة جهد الدخل.

شكل (٢- ٤) عملية توحيد موجة كاملة باستخدام القنطرة.

وبالرجوع إلى شكل (٢- ٤) نلاحظ أن التيار المار في الحمل يكون في اتجاه واحد خلال نصفي الموجة لجهد الدخل وبالتالي فإن الجهد الناشئ على طرفي الحمل يكون موحد الاتجاه لموجة كاملة.

ونظراً لوجود ثنائيان (D_1 , D_2 أو D_3 , D_4) في حالة انحياز أمامي وموصلين على التوالي مع الحمل خلال نصفي موجة جهد الدخل، فإن قيمة جهد الخرج تساوي:

$$V_o = V_2 - 2V_B \qquad (٢- ٣)$$

حيث: $V_B = 0.7V$ في حالة الدايود السيليكوني و $V_B = 0$ في حالة الدايود المثالي.

٢- ٤ الموحدات المحكومة أحادية الوجه

٢- ٤- ١ موحدات نصف موجة محكومة أحادية الأوجه مع الحمل المادي

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

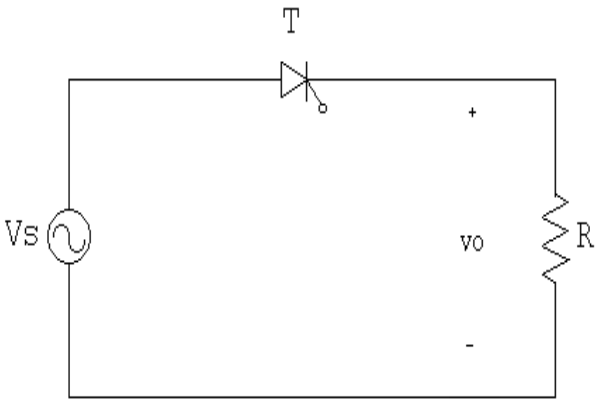
يبين الشكل (٢- ٥) دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بحمل مادي R. عندما يكون الثيرستور في حالة الانحياز الأمامي فإن الثيرستور سيوصل أي أنه سيمرر التيار الكهربائي وذلك في حالة إعطاء بوابة الثيرستور النبضة اللازمة لإشعال الثيرستور وذلك خلال أي لحظة في الفترة الموجبة لموجة مصدر الجهد ولتكن (t_o) كما في الشكل (٢- ٥). سيمر التيار خلال الحمل المادي (R) وذلك في

حالة توصيل الثيرستور عند تلك اللحظة (t_o) وبالتالي سيكون شكل موجة جهد الخرج (V_o) على الحمل المادي هو نفسه شكل جهد المصدر الجيبي.

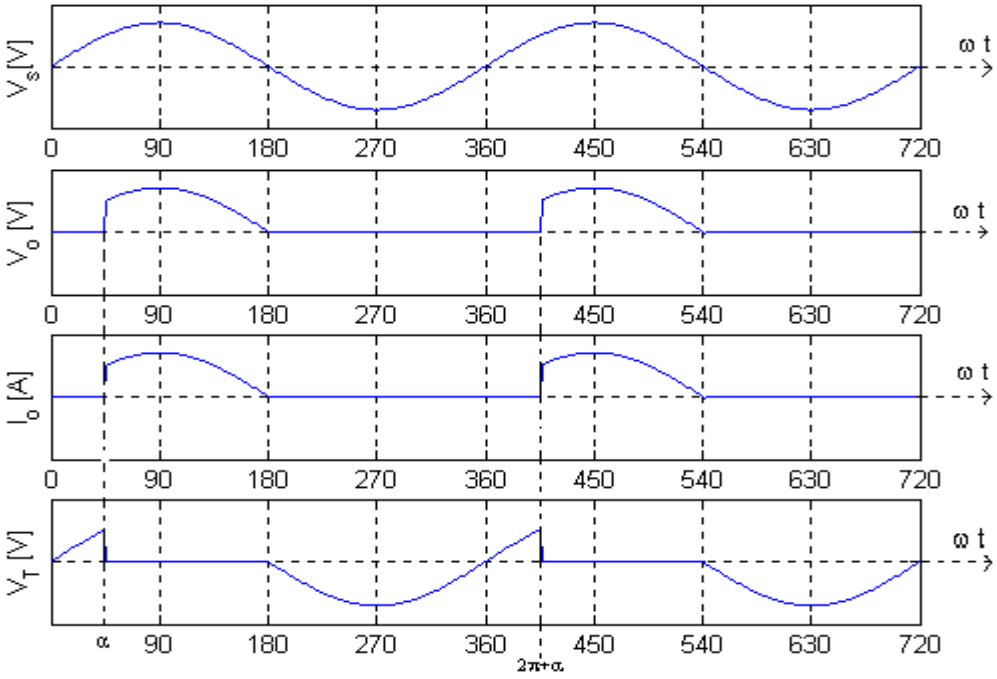
و ينعدم تيار الحمل 'R' عندما تكون ($\omega t = \pi$) حيث عند هذه اللحظة سيتحول الثيرستور من الانحياز الأمامي إلى الانحياز العكسي وبالتالي يصبح جهد خرج الحمل 'R' له قيمة صفرية خلال هذه الفترة الزمنية (). ويبدأ مرور التيار في الدائرة مرة أخرى بإعطاء الثيرستور النبضة اللازمة لإشعاله وذلك عند اللحظة الزمنية $t = t_o + 2\pi$ ويبين الشكل (٢- ٦) شكل موجة المصدر الجيبي وموجة جهد الخرج (الحمل) 'v_o' وموجة تيار الخرج 'i_o' وموجة فرق الجهد بين طرفي الأنود و الكاثود للثيرستور 'v_T' والنبضة اللازمة لإشعال الثيرستور ويمكن تلخيص عمل الدائرة خلال دورة كاملة كما يلي:

$$V_0 = \begin{cases} 0 & , \ 0 < t < t_0 \\ V_m \sin \omega t & , t_0 < t < \pi / \omega \\ 0 & , \ \pi / w < t < 2\pi / \omega \end{cases} \qquad (٢- ٤)$$

حيث إن الفترة الزمنية من 0 حتى t_o تمثل الفترة الزمنية التي يمرر فيها الثيرستور التيار خلال نصف الدورة الموجبة للمصدر الجيبي علما بأن اللحظة الزمنية t_o أو الزاوية ωt_o تسمى بزاوية الإشعال α والفترة الزمنية من ωt_o حتى π تسمى بزاوية التوصيلγ.



الشكل (٢- ٥) دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بحمل مادي 'R'.



الشكل (٢- ٦) موجات الجهد والتيار.

القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢- ٥) هي كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi}.(1+\cos\alpha) \qquad (٢-٥)$$

حيث إن V_m هي القيمة العظمى لمصدر الجهد الجيبي المتردد، و α هي قيمة زاوية إشعال الثيرستور.

ويمكن كتابة المعادلة الرياضية للقيمة المتوسطة لتيار الخرج كالآتي:

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{0(avg)}}{R} \qquad (٢- ٦)$$

يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة الفعالة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢-٢٠) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = \frac{V_m}{2}.\sqrt{(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})} \qquad (٢-٧)$$

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

$$I_{o(rms)} = \frac{I_m}{2}.\sqrt{(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})} \qquad (٢- ٨)$$

ويتم التحكم في قيم جهد الخرج كما تعلمنا المعادلات السابقة عن طريق التحكم في قيمة زاوية الإشعال(α) للثيرستور 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 (α =0) وبالتعويض في المعادلة (٢- ٥) نحصل على قيمة V_{do} كالآتي:

$$V_{do} = \frac{V_m}{\pi} \qquad (٢-٩)$$

نلاحظ بالنسبة للدائرة السابقة بأن موجة جهد الخرج Vo 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.

يعرف معامل القدرة الكهربائي 'pf' للمصدر الكهربائي على أنه قيمة القدرة الفعالة 'P' المسحوبة من المصدر مقسومة على القدرة الظاهرية 'S' عند المصدر وتمثل معادلته كالتالي:

$$PF = \frac{P}{S} \qquad (٢-١٠)$$

ويمكن استنتاج المعادلة العامة لمعامل القدرة كالآتي:

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

مثال ٢- ٢:

يتصل موحد نصف موجة محكوم أحادي الوجه بمصدر جهد جيبي متناوب قيمته الفعالة 150 V وتردده 60 Hz وحمل مادي قيمته 10 Ω. إذا علمت بأن قيمة زاوية الإشعال 'α' 30^o، 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'.
- معامل القدرة الكهربائية '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 '$V_{o(avg)}$'

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi}.(1+\cos\alpha) = \frac{212}{2\pi}.(1+\cos 30^0) = 63 \text{ V}$$

- 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 '$I_{o(rms)}$'

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

- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر 'P_L'

$$P_L = I_{rms}^2 R = 10.45^2.10 = 1092 \text{ W}$$

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

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

- معامل القدرة الكهربائية 'PF'

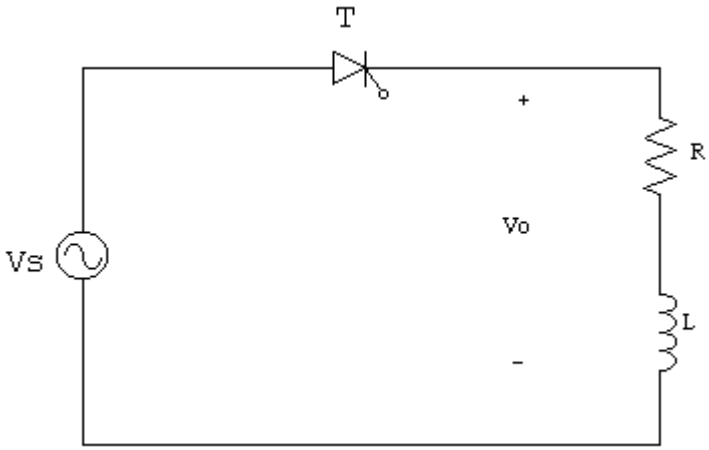
$$\because PF = \sqrt{\frac{1}{2}.(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})}$$

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

٢- ٤- ٢ موحدات نصف موجة محكومة أحادية الوجه مع الحمل الحثي

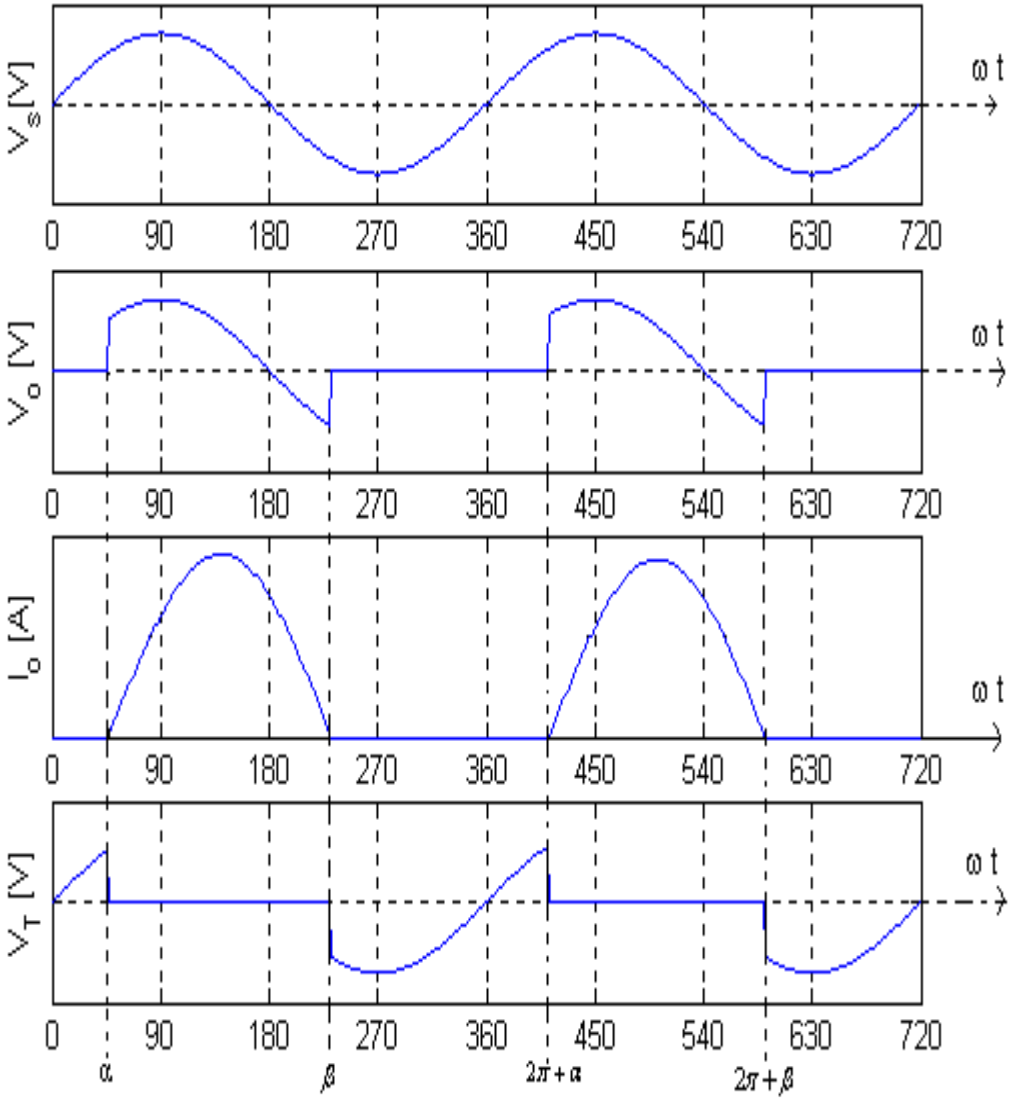
Single-Phase Half-Wave Controlled Rectifiers with an Inductive Load 'R-L'

يبين الشكل (٢- ٧) دائرة موحد نصف موجة محكوم متصل بمصدر جهد جيبي متناوب وحمل حثي 'R-L' ويبين الشكل (٢- ٨) كل من موجة جهد المصدر المتردد 'v_s' وموجة جهد الخرج 'v_o' وموجة تيار الخرج 'i_o' وموجة الجهد الناشئ على أطراف الثيرستور 'v_T'.



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

ويمكن أن نبين فكرة عمل الدائرة بالاستعانة بالشكل (٢- ٨). فعندما يتم توصيل الثيرستور بمصدر الجهد المتردد 'V_s' وإعطاء نبضة كهربائية كافية لإشعاله (قدحه) بزاوية إشعال 'α' فإن الثيرستور عند هذه اللحظة يبدأ مرور التيار في الدائرة حيث يبدأ بقيمة صفرية ثم تزداد قيمته تدريجيا ثم يقل حتى يصل لقيمة صفرية مرة أخرى وذلك عند الزاوية 'β' والتي تسمى بزاوية إطفاء الثيرستور (Extinction angle). وقيمة زاوية إطفاء الثيرستور في حالة هذه الدائرة أكبر من 180^o 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 المختزنة بالملف تجبر الثيرستور على بالاستمرار في التوصيل وتعطيه فرصة أكبر لزيادة الفترة الزمنية التي يمرر فيها التيار ويتم انقطاع التيار عن الثيرستور عند الزاوية 'β' والتي تزيد قيمتها عن 180^o. حيث يتم استرجاع هذه الطاقة إلى المصدر الكهربائي خلال الفترة الزمنية $\pi < \omega t < \beta$. ونتيجة لهذا فإن فرق الجهد بين أطراف الثيرستور 'v_T' يكون صفرخلال الفترة الزمنية $\alpha < \omega t < \beta$ بينما قيمة جهد خرج الحمل يحتوي على قيم موجبة وقيم سالبة كما هو مبين بالشكل (٢- ٢٣) . تكون قيمته المتوسطة أقل من القيمة التي يمكن الحصول عليها في حالة وجود حمل مادي فقط 'R' حيث إن جهد الخرج له دائما قيمة موجبة ولا يحتوي على أي قيمة سالبة.



الشكل (٢- ٨) موجات الجهد والتيار

يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢- ٨) كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{2\pi}.(\cos\alpha - \cos\beta) \qquad (٢- ١٢)$$

ويمكن كتابة المعادلة الرياضية للقيمة المتوسطة لتيار الخرج كالآتي:

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

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

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

حيث إن:

α هي زاوية إشعال الثيرستور

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

يمكن تلخيص بعض التعريفات المهمة كالتالي:

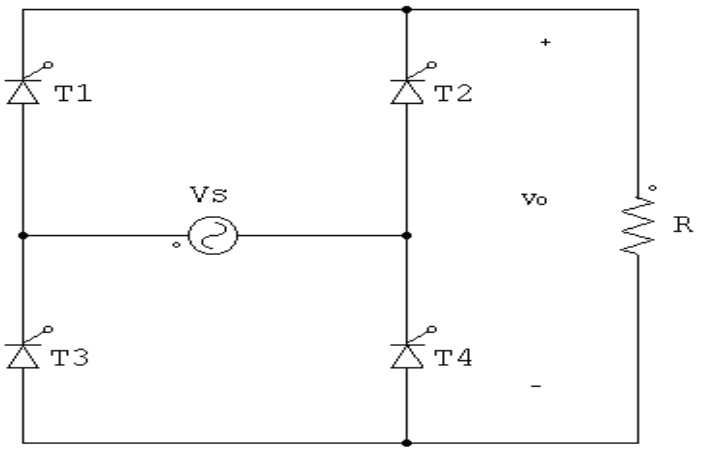
- **زاوية إشعال الثيرستور 'α'**: هي الزاوية أو اللحظة الزمنية التي يبدأ عندها الثيرستور التوصيل وإمرار التيار الكهربائي وذلك في حالة وصول نبضة عند بوابة الثيرستور بتيار كافي.
- **زاوية إطفاء الثيرستور 'β'**: هي الزاوية أو اللحظة الزمنية التي يصل عندها التيار المار في الحمل إلى القيمة الصفرية.
- **زاوية توصيل الثيرستور 'γ'**: هي الفترة الزمنية التي يوصل فيها الثيرستور ويمرر التيار خلال فترة زمنية دورية واحدة.

٢- ٤- ٣ موحدات موجة كاملة محكومة كليًا أحادية الوجه

Single Phase Full-Wave Controlled Rectifiers

٢- ٤- ٣- ١ الحمل المادي Resistive Load

يبين الشكل (٢- ١٠) دائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه، و يتصل هذا الموحد بمصدر جهد كهربي جيبي جهده الفعال 'Vs' وحمل مادي 'R'. ويتكون هذا الموحد من عدد ٤ ثيرستورات.



الشكل (٢- ١٠) دائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه متصل بحمل مادي 'R'.

- **فكرة عمل الدائرة:**

يمكن شرح فكرة عمل الدائرة المبينة بالشكل (٢- ١٠) بالاستعانة بموجات هذه الدائرة والمبينة بالشكل (٢- ١١). يتم إعطاء نبضة لكلا من الثيرستور T_1 و الثيرستور T_4 بزاوية إشعال 'α' وذلك خلال الفترة الزمنية لنصف الدورة الموجبة '$0 \leq \omega t \leq \pi$' وعند وصول هذه النبضات إلى بوابتي الثيرستوران T_1,T_4 بتيار كافٍ لإشعالهما فسوف يكون كل من هذين الثيرستورين في حالة انحياز أمامي حيث يكون جهد كل أنود خاص بأي ثيرستور أعلى من جهد الكاثود الخاص به وبالتالي سوف يوصل كلا من هذين الثيرستورين ويمر التيار عبر الدائرة الموصلة والمكونة من المصدر الكهربائي v_s والثيرستور T_1 والحمل المادي 'R' و الثيرستور T_4 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 الثيرستورين T_2,T_3 أي إعطاء نبضات لأطراف البوابات الخاصة بهما عند زاوية إشعال قيمتها $\alpha + \pi$ فيتم مرور التيار عبر الدائرة الموصلة والمكونة من المصدر الكهربائي الجيبي و الثيرستور T_2 و الحمل المادي 'R' و الثيرستور T_3 و نلاحظ بأن الفرق بين زوايا إشعال الثيرستوران T_4,T_1 الثيرستوران T_2,T_3 يكون قيمته 180^o 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 الثيرستور T_1 هو نفسه قيمة تيار الثيرستور T_4 بينما قيمة تيار الثيرستور T_2 هو نفسه قيمة تيار الثيرستور T_3 ويكون شكل موجة الجهد على أطراف أي ثيرستور 'v_{AK}' يكون جزء من موجة المصدر الكهربائي الجيبي ويكون أيضا شكل موجة تيار المصدر الكهربائي 'i_s' جزء من موجة جيبية تحتوي علي أجزاء سالبة وأجزاء 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 إن كلا من موجتي جهد وتيار الحمل تتكرر كل فترة زمنية قيمتها π فيصبح بالتالي تردد هذه الموجات له قيمة تساوي ضعف تردد المصدر الجيبي المتردد.

- **القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج:**

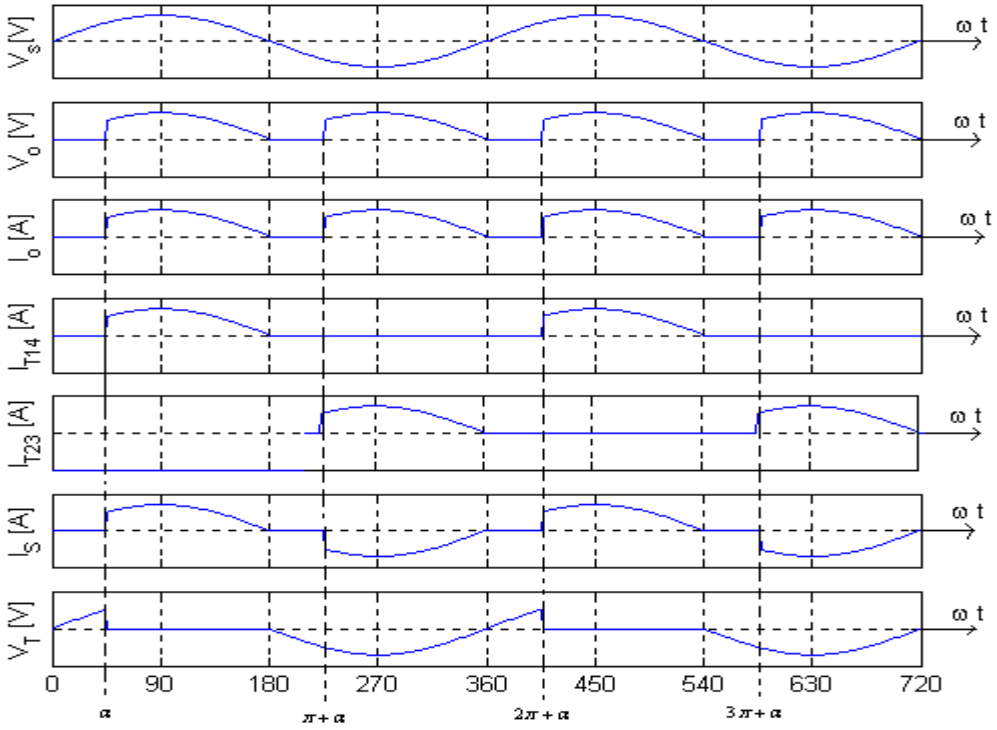
تكون القيمة المتوسطة لجهد الخرج للحمل الدائرة المبينة بالشكل (٢- ١٠) ضعف القيمة المتوسطة لجهد الخرج للحمل المادى فى دائرة موحد نصف موجة محكوم. وبالتالي تؤخذ القيمة المتوسطة لجهد الخرج للحمل في حالتنا هذه الصورة التالية:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi}.(1+\cos\alpha) \qquad (٢- ١٤)$$

وتصبح معادلة القيمة المتوسطة لتيار الخرج للحمل في الصورة التالية:

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{V_m}{\pi R}.(1+\cos\alpha) \qquad (٢-١٥)$$

حيث إن: V_m و V_s هي القيمة العظمى والفعالة لجهد المصدر الكهربائي الجيبي



الشكل (٢- ١١) الموجات المصاحبة لدائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه متصل بحمل مادي 'R' .

- **القيمة الفعالة لجهد و تيار الخرج:**

يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة الفعالة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢- ١٠) كالآتي:

$$V_{o(rms)} = \frac{V_m}{\sqrt{2}}.\sqrt{(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})} \qquad (٢-١٦)$$

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

$$I_{o(rms)} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}.\sqrt{(1-\frac{\alpha}{\pi}+\frac{\sin 2\alpha}{2\pi})} \qquad (٢-١٧)$$

مثال ٢- ٣:

يتغذى موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه من مصدر كهربي له جهد جيبي قيمته الفعالة 150V وتردده 60 Hz ويتصل هذا الموحد بحمل مادي 'R' قيمته 10 Ω. إذا علمت بأن زاوية إشعال الثيرستور قيمتها 30^o ، 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'.
- معامل القدرة الكهربائية 'PF'.

الحل:

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

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

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

- 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:

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

- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر يمكن حسابها كالآتي:

$$P_L = I_{orms}^2 R = 14.77^2.10 = 2182 \quad \text{W}$$

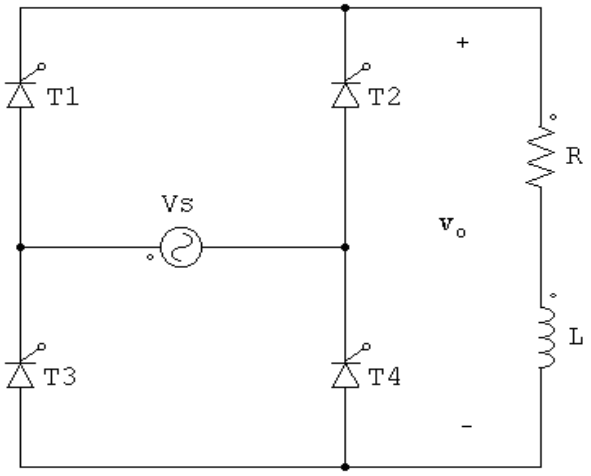
- يمكن حساب معامل القدرة الكهربائية كالآتي حيث إن القيمة الفعالة لتيار الخرج '$I_{o(rms)}$' هي القيمة الفعالة لتيار الدخل 'I_s' ولذلك

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

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

٢- ٤- ٣- ٢ حالة الحمل الحثي 'R-L'

يبين الشكل (٢- ١٢) دائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه ويتصل هذا الموحد بمصدر جهد جيبي متناوب وحمل حثي (R-L).

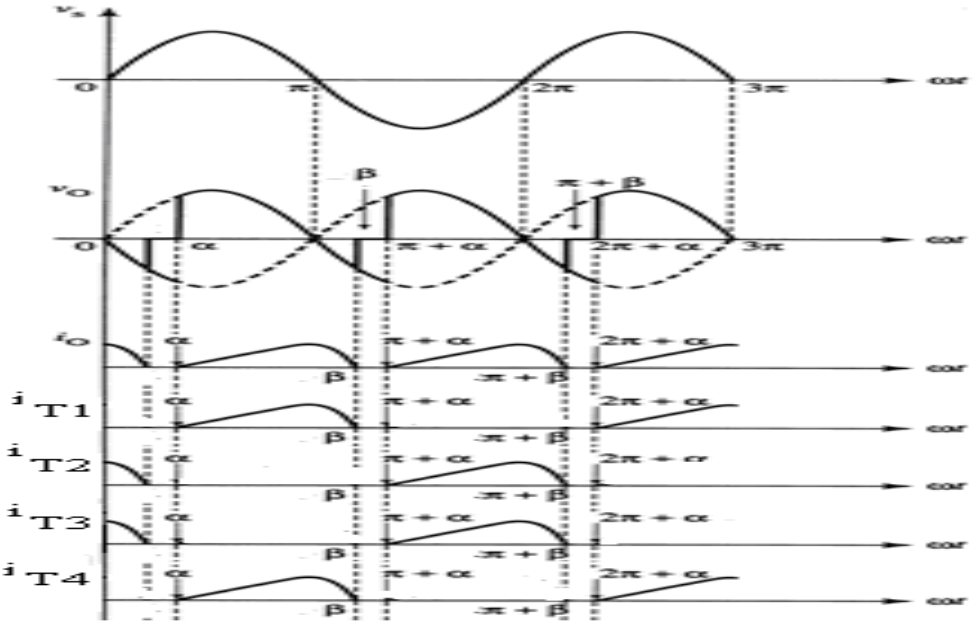


الشكل (٢- ١٢) دائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه متصل بحمل حثي 'R-L' .

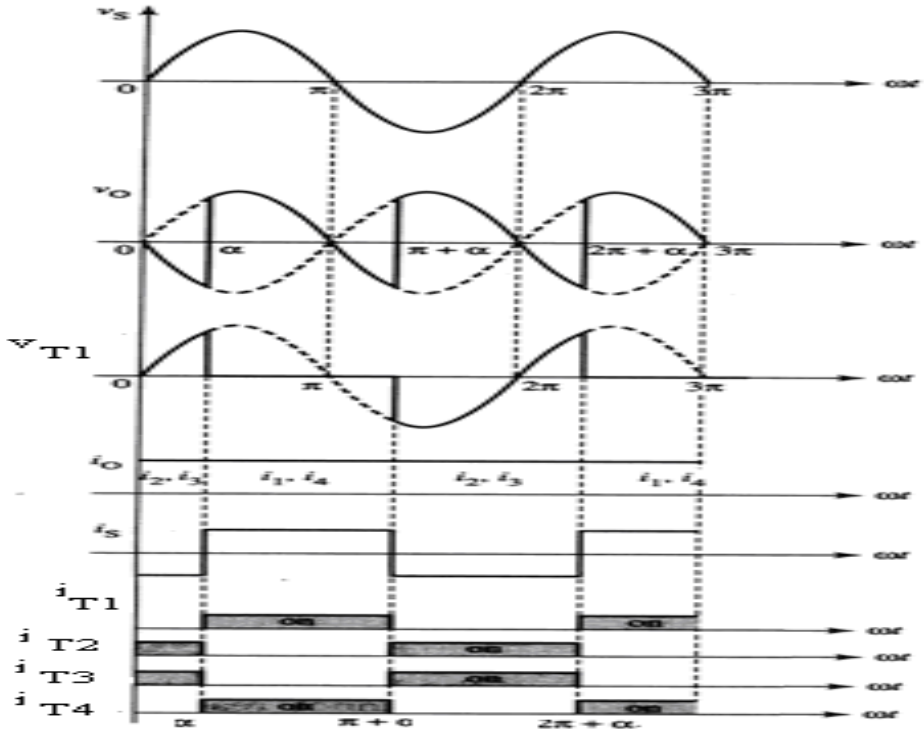
- **فكرة ومبدأ عمل الدائرة :**

كما سبق شرحه في حالة عمل هذه الدائرة بحمل مادي فقط فإن كلا من الثيرستورين T_1,T_4 يوصلان التيار عند زاوية الإشعال أو اللحظة $\omega t = \alpha$ بينما الثيرستوران T_2,T_3 فسوف يوصلا التيار بدءًا من اللحظة أو الزاوية $\omega t = \alpha + \pi$ والشكل (٢- ١٣) يبين الموجات الخاصة بدائرة هذا الموحد المتصل بحمل حثي. ونلاحظ من هذه الموجات بأنه عند وصول نبضات بزاوية إشعال α لكل من الثيرستورين T_1,T_4 فسوف يمر تيار ومبتدئاً بقيمة صفرية في الدائرة الموصلة والمكونة من المصدر الكهربائي 'v_s' الثيرستور T_1 والحمل الحثي و الثيرستور T_4 وتزداد قيمة هذا التيار حتى اللحظة الزمنية $\omega t = \pi$ و يكون له قيمة غير صفرية عند هذه اللحظة الزمنية بعكس 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 المختزنة بالملف فإن التيار سوف يواصل المرور ولكن بقيمة تناقصية حتى تنعدم قيمته عند زاوية الإطفاء 'β' ونلاحظ بأن كلا من الثيرستورين 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 المختزنة في الملف حيث إن الملف الحثي 'L' دائما ما يسبب جهد عكسي نتيجة لزيادة أو نقصان

قيمة التيار. ونلاحظ من الشكل (٢- ١٣) بأنه عند وصول نبضة لكل من الثيرستورين T_2, T_3 عند اللحظة الزمنية $\omega t = \pi + \alpha$ فإن كلا من هذين الثيرستورين سوف يصبح في حالة الانحياز الأمامي ويمر تيار في الدائرة الموصلة والمكونة من المصدر الكهربائي 'V_s' والثيرستور T_2 و الحمل الحثي والثيرستور T_3 ويبدأ هذا التيار بقيمة صفرية ويزداد تدريجيا 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 المختزنة والموجودة بالملف بزيادة قيمة الممانعة الحثية للملف. وشكلي (٢- ١٣)، (٢- ١٤) يبينا شكل موجات هذه الدائرة وتأثير القيمة الحثية للملف. ونلاحظ من الشكل (٢- ١٣) بأن موجة تيار الخرج عبارة عن موجة تيار مستمر وتتكرر هذه الموجة كل فترة زمنية قيمتها 180^o بينما موجة تيار الدخل أي موجة تيار المصدر الكهربائي 'i_s' عبارة عن موجة متناوبة تتكرر كل فترة زمنية قيمتها 360^o ونلاحظ أيضا من الشكل (٢- ١٤) بأن قيمة زاوية الإطفاء 'β' قيمتها $\pi + \alpha$ في حالة الحمل الحثي الذي له ممانعة حثية عالية جدا وشكل موجة تيار الدخل أو موجة تيار 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- ١٣) الموجات المصاحبة لدائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه متصل بحمل حثي 'R-L' ذي ممانعة حثية صغيرة.



الشكل (٢- ١٤) الموجات المصاحبة لدائرة موحد موجة كاملة محكوم كليًا أحادي الوجه متصل بحمل حثي ذي ممانعة حثية عالية جدا.

- **القيمة المتوسطة لجهد و تيار الخرج:**

يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢- ١٢) وفي حالة الحمل الحثي كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi}.(\cos\alpha - \cos\beta) \qquad (٢- ١٨)$$

والقيمة المتوسطة لتيار الخرج $I_{o(avg)}$ يساوي $V_{o(avg)}/R$

بينما يمكن تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢- ١٢) وفي حالة الحمل الحثي الكبير جدا (حالة الدالة المتصلة) والذي له ممانعة حثية أكبر بكثير من مقاومته المادية كالآتي:

$$V_{o(avg)} = \frac{2}{\pi}.V_m \cos\alpha \qquad (٢- ١٩)$$

وحيث إن 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- ١٢) وفي حالة الحمل الحثي القليل (حالة الدالة غير المتصلة) كالآتي:

$$I_{o(avg)} = \frac{V_m}{\pi R}.(\cos\alpha - \cos\beta) \qquad (٢- ٢٠)$$

و أيضا يمكن كتابة تمثيل المعادلة الرياضية والتي تعبر عن القيمة المتوسطة لجهد الخرج للدائرة المبينة بالشكل (٢- ١٢) وفي حالة الحمل الحثي العالي (حالة الدالة المتصلة) كالآتي:

$$I_{o(avg)} = \frac{2}{\pi R}.V_m \cos\alpha \qquad (٢١ - ٢)$$

نلاحظ من المعادلة (٢- ٣٤) بأن القيمة المتوسطة لجهد الخرج لها قيمة موجبة وذلك عند قدح الثيرستور بزاوية إشعال تقع ما بين 0 و90^o ويعمل الموحد كمحول للجهد المتردد إلى جهد مستمر (rectifier) بينما عند قدح الثيرستور بزاوية إشعال تقع ما بين 90^o و180^o تكون قيمة جهد الخرج المتوسطة لها قيمة سالبة.

مثال ٢- ١٣:

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

- القيمة المتوسطة لجهد الحمل'$V_{o(avg)}$'.
- القيمة المتوسطة لتيار الحمل '$I_{o(avg)}$'.
- القيمة العظمى لتيار الحمل 'I_m'.
- القيمة الفعالة لتيار الحمل '$I_{o(rms)}$'.
- القيمة المتوسطة لتيار الخاص بكل ثيرستور 'I_{oTh}'.
- قدرة الحمل المسحوبة من المصدر 'P_L'.
- معامل القدرة الكهربائية '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)

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

- القيمة المتوسطة لتيار الحمل

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{94}{10} = 9.6 \text{ A}$$

- 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 إن كل ثيرستور يوصل نصف دورة "180^o" كل دورة وبالتالي تكون القيمة المتوسطة لتيار أي ثيرستور 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

$$P_L = I_{orms}^2 R = 9.4^2.10 = 883.3 \text{ W}$$

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

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

٢- ٥ الموحدات غير المحكومة ثلاثية الأوجه

عرفنا مسبقاً أن أقصى جهد مستمر يمكن الحصول عليه من دوائر التوحيد أحادية الوجه ذي الموجة الكاملة يعادل $0.6366 \ V_m$ وإذا أردنا الحصول على جهود أعلى وبالتالي قدرات مرتفعة فيمكن استخدام دوائر توحيد ثلاثية الأوجه. وتنقسم دوائر التوحيد ثلاثية الأوجه إلى نوعين: دوائر توحيد نصف موجة ودوائر توحيد موجة كاملة. وعادة دوائر توحيد الموجة الكاملة تعطي جهد مستمر ضعف دوائر توحيد نصف الموجة.

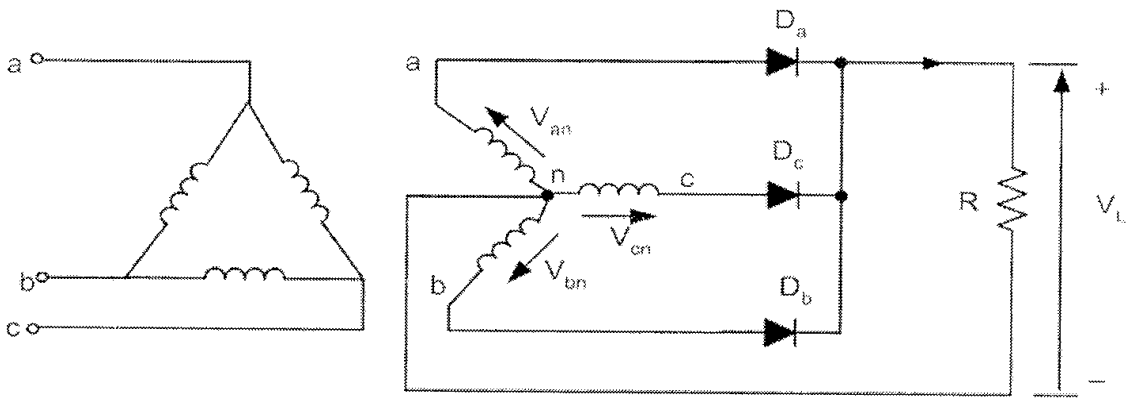
٢- ٥- ١ دوائر التوحيد نصف موجة ثلاثية الأوجه:

الشكل (٢- ١٥) يبين دائرة توحيد نصف موجة ثلاثية الأوجه، حيث يستخدم دايود مع كل وجه من الأوجه الثلاثة لمنبع الجهد ذا أربع أطراف. ويوصل الحمل بين النقطة المشتركة لخرج الدايودات الثلاثة ونقطة التعادل. الدايود D_a يوصل تيار في الفترة من $\pi/6$ إلى $5\pi/6$ وذلك عندما يكون جهد الوجه a أعلى من جهد الوجهين الآخرين، أيضاً يوصل الدايود D_b عندما يكون جهد الوجه b أعلى من جهد الوجهين الآخرين، وبالمثل يوصل الدايود D_c عندما يكون جهد الوجه c أعلى من جهد الوجهين الآخرين.

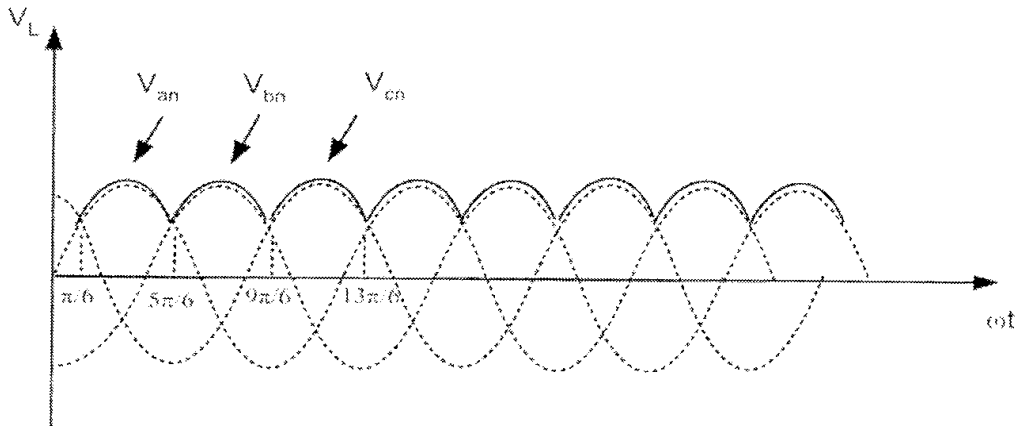
ويتضح من شكل موجات الخرج أن كل دايود يوصل 120 درجة ($2\pi/3$). ويمكن حساب القيمة المتوسطة لجهد الخرج من العلاقة التالية:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \mathrm{Vm} \qquad (٢٢ - ٢)$$

حيث إن Vm هي القيمة العظمى لجهد الوجه.



(a) circuit diagram



الشكل (٢- ١٥) دائرة توحيد نصف موجة ثلاثية الأوجه

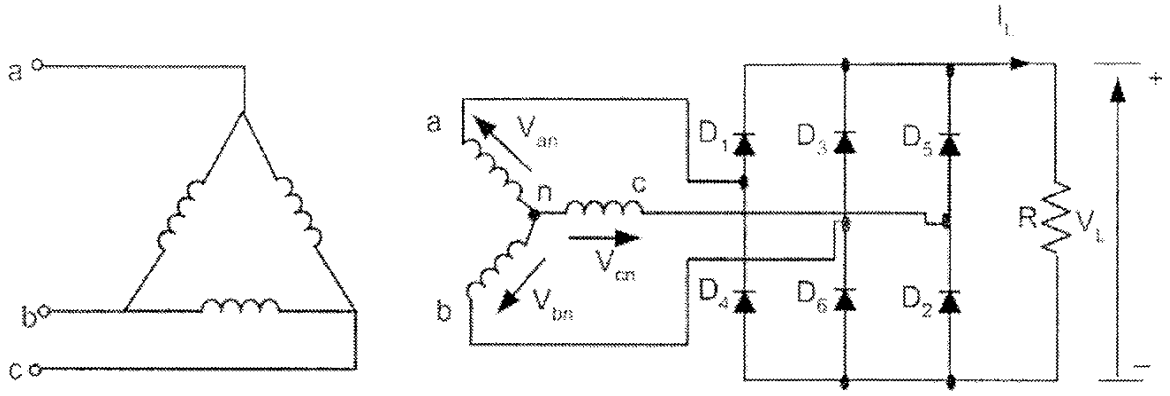
٢- ٥- ٢ دوائر التوحيد موجة كاملة ثلاثية الأوجه:

تستخدم دائرة توحيد ثلاثية الأوجه في معظم التطبيقات ذات القدرات المرتفعة حيث تعطي جهد وقدرة أعلى من دائرة توحيد نصف الموجه. وهي تعتبر دائرة توحيد موجه كاملة. ويبين شكل (٢- ١٦) ترتيب الدايودات لتشكل قنطرة توحيد ثلاثية الأوجه، ويكون توصيل التيار في الدايودات على حسب التتابع التالي:

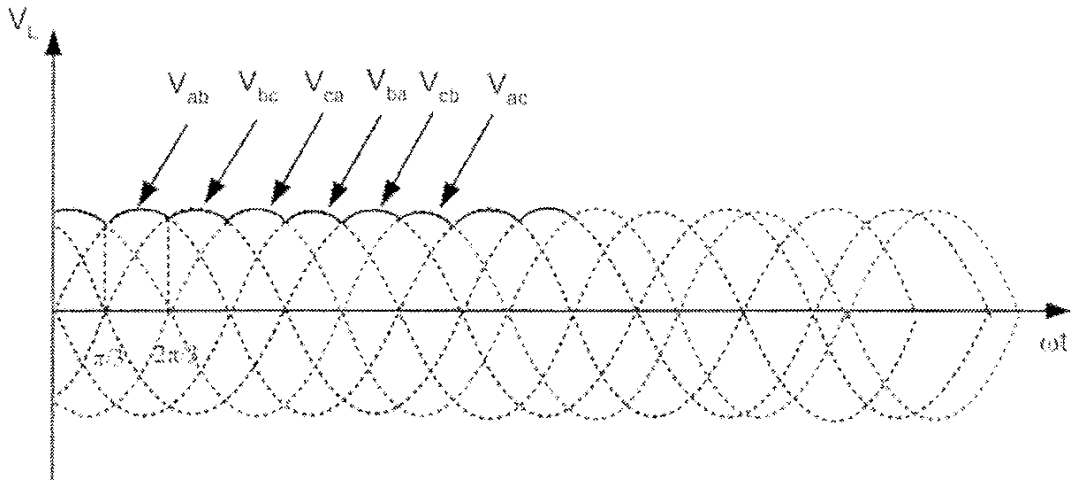
$$D_1D_2\ ,\ D_2D_3\ ,\ D_3D_4\ ,\ D_4D_5\ ,\ D_5D_6,\ D_6D_1$$

هذا ويمكن اعتبار القنطرة عبارة عن دائري توحيد نصف موجه متصلتين على التوالي وبذلك يكون الجهد الخارج من القنطرة عبارة عن دائري توحيد نصف الموجه وتعطي القيمة المتوسطة للجهد الخارج من القنطرة بالعلاقة التالية:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} \mathrm{V_m} \qquad (٢-٢٣)$$



(a) circuit diagram



الشكل (٢- ١٦) دائرة توحيد موجة كاملة ثلاثية الأوجه

٢- ٦ الموحدات المحكومة ثلاثية الأوجه Three phase controlled rectifiers

تم دراسة بعض أنواع دوائر الموحدات المحكومة أحادية الوجه والمتصل خرجها بإحمال مادية أو أحمال حثية حيث تتسم هذه الدوائر ببساطة التركيب ولكن يعيبها بإنها موحدات محدودة القدرة الكهربائية وإن موجات جهد خرج هذه الموحدات يصاحبها عادة تشوهات كبيرة ولذلك تحتاج هذه

الموحدات لمرشحات لازالة هذه التوافقيات علما بإن تصميم هذه المرشحات في حالة دوائر الموحدات أحادية الوجه غير بسيطة. يتم استخدام دوائر الموحدات ثلاثية الأوجه في حالة المنظومات ذات القدرات العالية والجهود العالية حيث يمكن الحصول منها على جهود خرج مستمرة عالية الجهد وتعمل بالقدرات المطلوبة عالية أو منخفضة القدرة بالإضافة إلى أن استخدام هذه الموحدات يقلل من التشويهات المصاحبة لموجات جهود الخرج المستمرة وبالتالي يسهل ازالة هذه التوافقيات عن طريق مرشح سهل التصميم.

تتصف دوائر الموحدات المحكومة ثلاثية الأوجه بإن لها بعض المزايا في حالة مقارنتها بدوائر الموحدات المحكومة أحادية الوجه والتي يمكن تلخيصها كالاتي:

- كبر جهود الخرج المستمر.
- التوافقيات المصاحبة لموجة جهد الخرج أقل وبالتالي موجة جهد الخرج أنعم.
- الكفاءة الكلية أكبر.

ولكن يعيب استخدام دوائر الموحدات المحكومة ثلاثية الأوجه أن تكلفتها أعلى وصعوبة تصميم دوائر الإشعال الخاصة بها نظرا لكثرة عدد الثيرستورات المستخدمة والمتصلة بكل وجه. تستخدم دوائر الموحدات المحكومة ثلاثية الأوجه عدد من الثيرستورات مختلفة باختلاف نوعية الدائرة المستخدمة حيث ربما تحتوي دائرة الموحد على عدد ثلاثة ثيرستورات أو ستة ثيرستورات أو اثني عشر ثيرستور أو أكثر. سوف نكتفي بدراسة دائرتين فقط من دوائر الموحدات المحكومة ثلاثية الأوجه والمتصل خرجها بأحمال مادية للتبسيط ولتوضيح فكرة عمل هذه الدوائر والدائرتان هما:

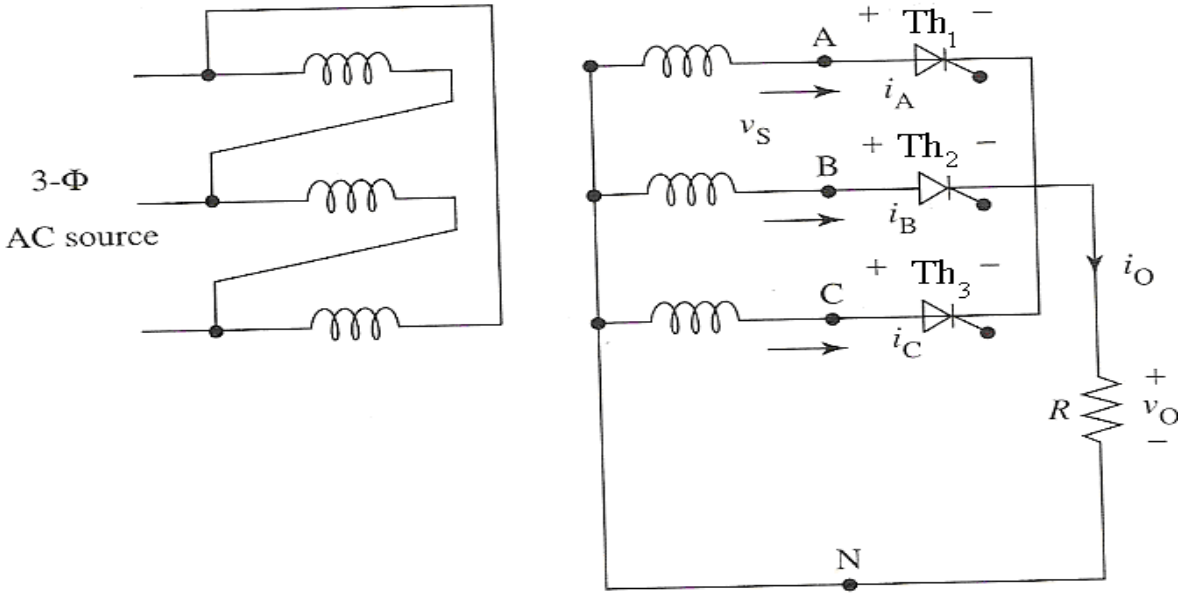
- دائرة موحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه.
- دائرة موحد موجة كاملة محكوم ثلاثي الأوجه.

٢- ٦- ١ موحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي

Three - phase half – wave controlled rectifier connected with a resistive load (R)

يبين شكل (٢- ١٧) دائرة موحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي R وتتكون دائرة الموحد من ثلاثة ثيرستورات كما موضح بالشكل وتسمى هذه الدائرة بدائرة الثلاث نبضات لإن نبضات موجة جهد الخرج (الحمل) المستمرة يكون ترددها ثلاثة أمثال تردد موجة جهد الدخل

ثلاثي الأوجه. موجات جهد الخرج V_o وتيار الخرج i_o ربما تكون متصلة أو غير متصلة تبعا لقيمة زاوية الإشعال فإذا وقعت قيمة زاوية الإشعال في المدى $\alpha < 30^o$ سوف نحصل على موجات خرج متصلة وإذا وقعت في المدى $30^o \le \alpha \le 150^o$ فسوف نحصل على موجات خرج غير متصلة كما سيتم التوضيح في الفقرات التالية.



الشكل (٢- ١٧) دائرة موحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي.

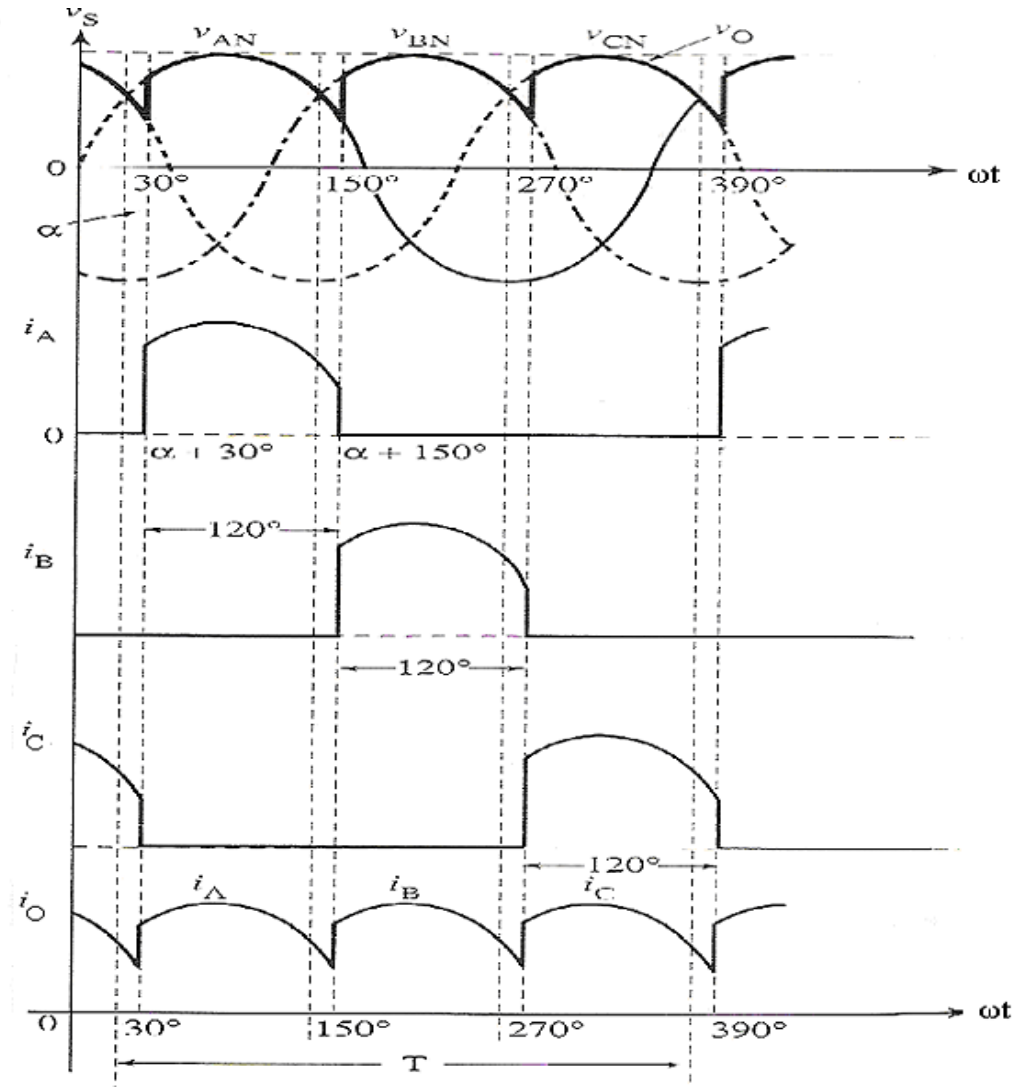
٢- ٦- ١- ١ حالة موجات خرج متصلة لموحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه متصل بحمل مادي

في هذه الفقرة سوف نوضح عمل دائرة موحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه والمتصل بحمل مادي والمبين بشكل (٢- ١٧) في حالة الحصول على موجات جهد خرج متصلة لجهد أو لتيار الخرج وهذا يعتمد على قيمة زاوية الإشعال α وتكون قيمة زاوية الإشعال واقعة في المدى $\alpha < 30^o$. يمكن توضيح عمل الدائرة كما يلي: يتلقى كل ثيرستور نبضة إشعال متزامنة مع جهد الوجه المتصل بهذا الثيرستور وتكون نبضات الإشعال الثلاثة للثيرستورات مزاحة (متأخرة) 120° كل منها عن الأخرى. بمعنى إذا تم إعطاء نبضة إشعال للثيرستور Th_1 عند اللحظة ωt_1 يتم إعطاء النبضة للثيرستور Th_2 عند اللحظة $\omega t = 120^o + \omega t_1$ وللثيرستور Th_3 عند اللحظة $\omega t = 240^o + \omega t_1$ ويتم قدح كل ثيرستور من الثيرستورات الثلاثة عندما يكون الثيرستور فى حاله انحياز أمامى. ففى حاله الثيرستور Th_1 يكون فى حالة انحياز أمامى خلال اللحظات الزمنية $\alpha \le \omega t \le \alpha + 120^o$ كما هو مبين بالشكل (٢- ١٨) وأيضا يظهر هذا الشكل أن الثيرستور Th_2 يكون فى حاله انحياز أمامى عند اللحظات $\alpha + 120^o \le \omega t \le \alpha + 240^o$ والثيرستور Th_3 $\alpha + 240^o \le \omega t \le \alpha + 360^o$ حيث يتم قياس زاوية الإشعال α إبتداء من اللحظة الزمنية

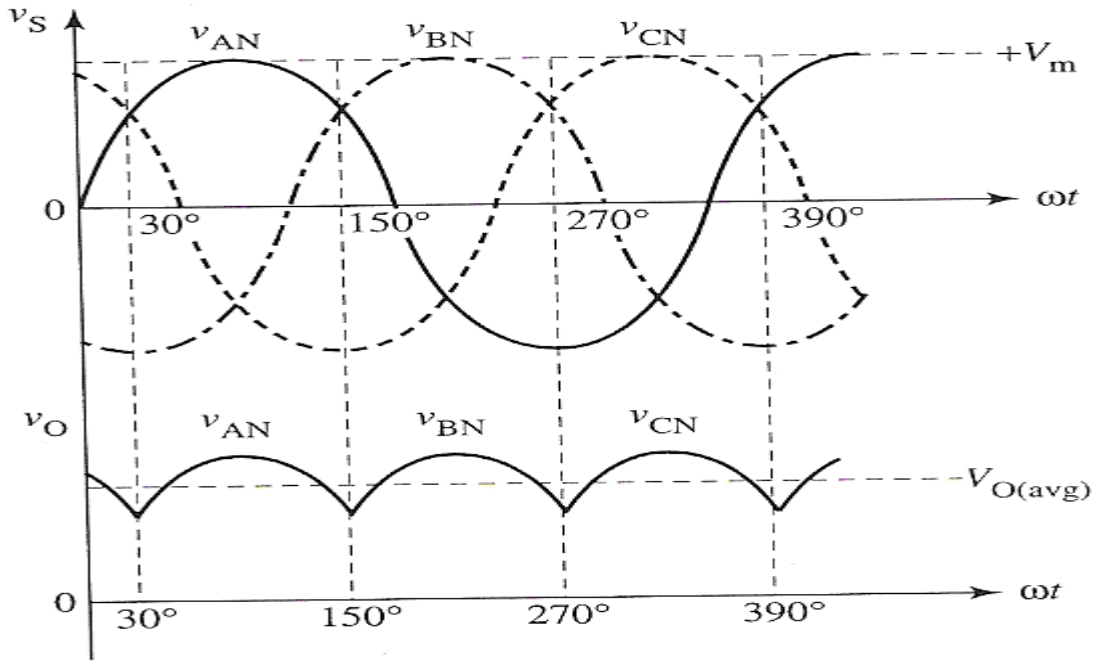
$\omega t = 30°$ $(\omega t')$ أي عند نقطة تقاطع المحور الصفري لموجة جهد الوجه A $(\omega t = 0)$ و تكون زاوية قدح (إشعال) الثيرستور Th_1 قيمتها α ثم يتم قدح الثيرستور Th_2 بزاوية إشعال متأخرة 120^o عن نبضة إشعال الثيرستور Th_1 ثم يتم قدح الثيرستور Th_3 بزاوية إشعال متأخرة 120^o عن نبضة إشعال الثيرستور Th_2 وبالتالي يتم إشعال كل ثيرستور بزاوية إشعال متأخرة عن الأخرى بزاوية قيمتها 120^o وتعمل الدائرة كدائرة موحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه. يبين شكل (٢- ١٨) شكل موجة جهد خرج الموحد v_o وموجات التيار المار بكل وجه من أوجه الموحد (i_A, i_B, i_C) وموجة تيار خرج الموحد i_o في حالة إشعال الثيرستور Th_1 بزاوية إشعال قيمتها α ونلاحظ من هذا الشكل بأن موجتي جهد الخرج وتيار الخرج (الحمل) عبارة عن موجة متصلة بينما موجة تيار كل وجه موجة تيار غير متصل وتتواجد خلال فترة زمنية قيمتها 120^o خلال الدورة الكاملة والتي قيمتها 360^o.

يبين الشكل (٢- ١٩) حالة إشعال للثيرستور Th_1 بزاوية إشعال قيمتها $\alpha = 0$ أي عند اللحظة الزمنية $\omega t = 30°$ $(\omega t')$ حيث تعمل الدائرة في هذه الحالة كدائرة موحد نصف موجة غير محكوم حيث خلال الفترة الزمنية $30° \le \omega t \le 150°$ تكون قيمة جهد الوجه A (v_{AN}) له قيمة موجبة أكبر من جهود الأوجه الاخرة ولهذا السبب يكون الثيرستور Th_1 في وضع انحياز أمامي ابتداء من لحظة الإشعال ويمر التيار خلاله وخلال الحمل R ومصدر الجهد v_{AN} بينما يكون باقي الثيرستورات وهما Th_2 و Th_3 في وضع انحياز عكسي وبالتالي لايمرفيهما أي تيار خلال هذه الفترة. ثم يتم إشعال الثيرستور Th_2 خلال الفترة الزمنية $150° \le \omega t \le 270°$ عند اللحظة الزمنية $\omega t = 150^o$ حيث نبضة اشعال كل ثيرستور تأتي متأخرة عن نبضة الثيرستور الآخرى بزاوية قيمتها 120^o وخلال هذه الفترة الزمنية تكون قيمة جهد الوجه B (v_{BN}) له أكبر قيمة جهد موجبة ولهذا السبب يكون الثيرستور Th_2 في وضع انحياز أمامي ابتداء من لحظة الإشعال ويمر التيار خلاله وخلال الحمل R ومصدر الجهد v_{BN} بينما يكون باقي الثيرستورات وهما Th_1 و Th_3 في وضع انحياز عكسي وبالتالي لايمرفيهما أي تيار خلال هذه الفترة. ثم يتم إشعال الثيرستور Th_3 خلال الفترة الزمنية $270° \le \omega t \le 390°$ عند اللحظة الزمنية $\omega t = 270^o$ وخلال هذه الفترة الزمنية تكون قيمة جهد الوجه C (v_{CN}) له أكبر قيمة جهد موجبة ولهذا السبب يكون الثيرستور Th_3 في وضع انحياز أمامي ابتداء من لحظة الإشعال ويمر التيار خلاله وخلال الحمل R ومصدر الجهد v_{CN} بينما يكون باقي الثيرستورات وهما Th_1 و Th_2 في وضع انحياز عكسي وبالتالي لايمرفيهما أي تيار خلال هذه الفترة. يتكرر عمل الدائرة كل 360^o حيث يتم إشعال الثيرستور Th1 عند اللحظة الزمنية $\omega t = 390^o$.

نلاحظ من الشكل (٢- ١٨) إن موجات جهد الخرج v_o وتيار الخرج i_o تكون دوال متصلة فى الزمن لقيم زوايا إشعال أقل من $30°$ $(\alpha < 30°)$ حيث يستمر الثيرستور Th_1 (المتصل بمصدر الجهد v_A) فى وضع التوصيل حتى وصول نبضة للثيرستور Th_2 (المتصل بمصدر الجهدv_B) تأتي هذه النبضة متأخرة 120^o ثم تأتي نبضة للثيرستور Th_3 (المتصل بمصدر الجهدv_C) متأخرة إيضا 120^o عن نبضة الثيرستور Th_2 ونلاحظ بإن قيم جهد الخرج v_o وتيار الخرج i_o لايصلا لإي قيمة صفرية وبالتالى تكون موجات v_o، i_o متصلة وبمقارنة شكل (٢- ١٨) وشكل (٢- ١٩) نجد أن القيمة المتوسطة لجهد الخرج لحالة زاوية الاشعال $\alpha < 30°$ لها قيمة أصغر من القيمة المتوسطة لجهد الخرج عند زاوية إشعال $\alpha = 0°$.
يمكن كتابة معادلات القيمة المتوسطة لجهد الخرج $V_{o(avg)}$ والقيمة المتوسطة لتيار الخرج $I_{o(avg)}$ كما يلي:



الشكل (٢- ١٨) موجات جهد وتيار الخرج وتيارات الثيرستورات لموحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل في حال الحصول على موجات خرج متصلة $\alpha < 30^o$.



الشكل (٢- ١٩) موجتي جهد وتيار الخرج لموحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي في حالة زاوية إشعال $\alpha = 0$.

$$V_{o(avg)} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} V_m \cos\alpha = 0.827 V_m \cos\alpha \qquad (٢-٢٤)$$

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi R} V_m \cos\alpha = 0.827 \frac{V_m}{R} \cos\alpha \qquad (٢-٢٥)$$

حيث إن V_m هي القيمة العظمي لجهد الوجه الواحد.

يمكن إيضا استنتاج قيمة كل من القيمة المتوسطة للتيار المار بالثيرستور $I_{Th(avg)}$ وقيمة أقصى جهد عكسي يتحملة الثيرستور $V_{Th(m)}$ كالآتي وذلك بالاستعانة بالشكل (٢- ١٨):

$$I_{Th(avg)} = \frac{I_{o(avg)}}{3} \qquad (٢-٢٦)$$

$$V_{Th(m)} = \sqrt{3} V_m = V_{L(m)} \qquad (٢-٢٧)$$

حيث إن $V_{L(m)}$ هي أقصى قيمة لجهد الخط (line voltage).

مثال ٢- ٥:

يتصل موحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه بمصدر جهد جيبي متناوب قيمته الفعالة 208 V (V_L) وتردده 60 Hz ويتصل خرج الموحد بحمل مادي قيمته 10 Ω. إذا علمت بأن قيمة زاوية الإشعال 'α' 20^o، فأوجد:

أ- القيمة العظمى لتيار الحمل 'I_m'.

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

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

د- القيمة العظمي لتيار الثيرستور '$I_{Th\,(m)}$'.

هـ- القيمة المتوسطة لتيار الثيرستور '$I_{Th\,(avg)}$'.

و- قيمة أقصى جهد عكسي يتحملة الثيرستور '$v_{Th\,(m)}$'.

الحل:

$$V_{phase} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120V$$

$$V_m = \sqrt{2}\,V_{phase} = \sqrt{2} * 120 = 170V$$

أ- $$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{170}{10} = 17\,A$$

ب- $$V_{o(avg)} = 0.827 V_m \cos\alpha = 0.827 * 170 * \cos 20^o = 132V$$

ج- $$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{132}{10} = 13.2\,A$$

د- $$I_{Th(m)} = I_m = 17\,A$$

هـ- $$I_{Th(avg)} = \frac{I_{o(avg)}}{3} = \frac{13.2}{3} = 4.4\,A$$

و- $$V_{Th(m)} = \sqrt{3}\,V_m = V_{L(m)} = \sqrt{2}\,V_L = 208\sqrt{2} = 294V$$

٢- ٦- ١- ٢ حالة موجات خرج غير متصلة لموحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه متصل بحمل مادي

في هذه الفقرة سوف نوضح عمل دائرة موحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه والمتصل بحمل مادي في حالة الحصول على موجات جهد خرج غير متصلة لجهد أو لتيار الخرج وهذا يعتمد على قيمة زاوية الإشعال α وتكون قيمة زاوية الإشعال واقعة في المدى $30° \le \alpha \le 150°$. يبين شكل (٢- ٢٠) موجات جهد الخرج وتيار الخرج وتيارات الثيرستورة المختلفة في حالة الحصول على موجات جهد وتيار خرج غير متصلة وبالاستعانة بالشكل (٢- ٢٠) يمكن شرح فكرة عمل الدائرة كالآتي: عندما يتم إشعال الثيرستور Th_1 بزاوية إشعال α تقع فى المدى $30° \le \alpha \le 150°$ يبدأ مرور التيار عبر هذا الثيرستور

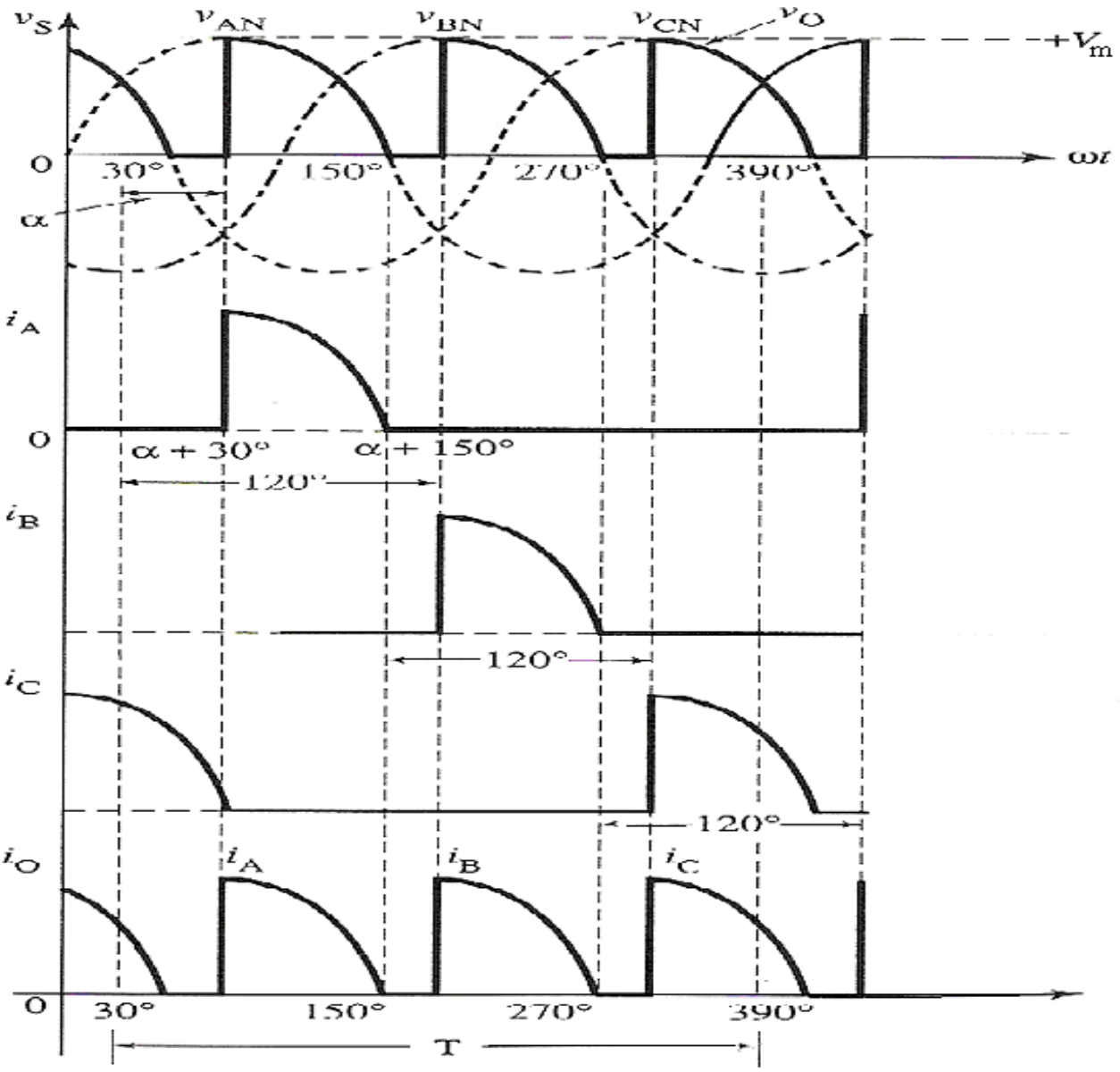
وجهد المصدر V_{AN} والحمل المادي R ويستمر مرور التيار حتى اللحظة الزمنية $\omega t' = 150^o$ وحيث فى حاله الأحمال المادية لا يمكن الحصول على قيم لحظية سالبة لجهد الخرج V_o وبالتالى خلال الفترة الزمنية للإشعال $30° \le \alpha \le 150°$ تكون هناك قيم لحظية موجبة لجهد الخرج V_o وتيار الخرج وقيم صفرية لهذه الموجات حيث تتواجد القيم الصفرية هذه خلال الفترة الزمنية $180° \le \omega t \le \alpha + 150°$ $(150^o \le \omega t' \le \alpha + 120^o)$ وخلال هذه الفترة يتحول الثيرستور Th_1 لوضع الفصل وبالتالي تكون كافة الثيرستورات Th_1 و Th_2 و Th_3 في حالة فصل ويستمر هذا الوضع حتى وصول نبضة للثيرستور Th_2 عند اللحظة الزمنية $\omega t = \alpha + 150^o$ $(\omega t' = \alpha + 120^o)$ فيتحول الثيرستور Th_2 لوضع التوصيل فقط ويصبح كل من Th_2 و Th_3 فى وضع الفصل ويمر التيار خلال الثيرستور Th_2 والحمل المادى R والمصدر V_{BN} ويكون تيار الخرج له قيم موجبة فقط خلال الفترة الزمنية $(\alpha + 120^o \le \omega t' \le 270^o)$ ثم خلال الفترة الزمنية $270^o \le \omega t' \le \alpha + 240^o$ يحتوي تيار الخرج على قيم صفرية وبالتالي تكون كافة الثيرستورات Th_1 و Th_2 و Th_3 في حالة فصل خلال هذه الفترة الزمنية ويستمر هذا الوضع حتى وصول نبضة للثيرستور Th_3 عند اللحظة الزمنية $\omega t = \alpha + 270^o$ $(\omega t' = \alpha + 240^o)$ فيتحول الثيرستور Th_3 لوضع التوصيل فقط ويصبح كل من Th_2 و Th_1 فى وضع الفصل ويمر التيار خلال الثيرستور Th_3 والحمل المادى R والمصدر V_{CN} ويكون تيار الخرج له قيم موجبة فقط خلال الفترة الزمنية $(\alpha + 240^o \le \omega t' \le 270^o)$ ثم خلال الفترة الزمنية $390^o \le \omega t' \le \alpha + 360^o$ يحتوي تيار الخرج على قيم صفرية وبالتالي تكون كافة الثيرستورات Th_1 و Th_2 و Th_3 في حالة فصل خلال هذه الفترة الزمنية وهكذا يتكرر الوضع بإعطاء نبضة جديدة للثيرستور Th_1.

مما سبق نجد أن قيم V_o ، i_o تتأثر بقيمة زاوية الإشعال α ويمكن كتابة معادلات القيمة المتوسطة لجهد الخرج $V_{o(avg)}$ والقيمة المتوسطة لتيار الخرج $I_{o(avg)}$ في حالة الحصول على موجات خرج غير متصلة $(30° \le \alpha \le 150°)$ كما يلي:

$$V_{o(avg)} = \frac{3Vm}{2\pi}\left[1+\cos(\alpha+30°)\right] = 0.477V_m\left[1+\cos(\alpha+30°)\right] \qquad (٢٨ - ٢)$$

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{0.477V_m}{R}\left[1+\cos(\alpha+30°)\right] \qquad (٢٩ - ٢)$$

ملاحظة هامة إذا وقعت زاوية الإشعال α فى المدى $150° \le \alpha \le 180°$ فإنه لن يحدث إشعال لكون الثيرستور في وضع انحياز عكسي.



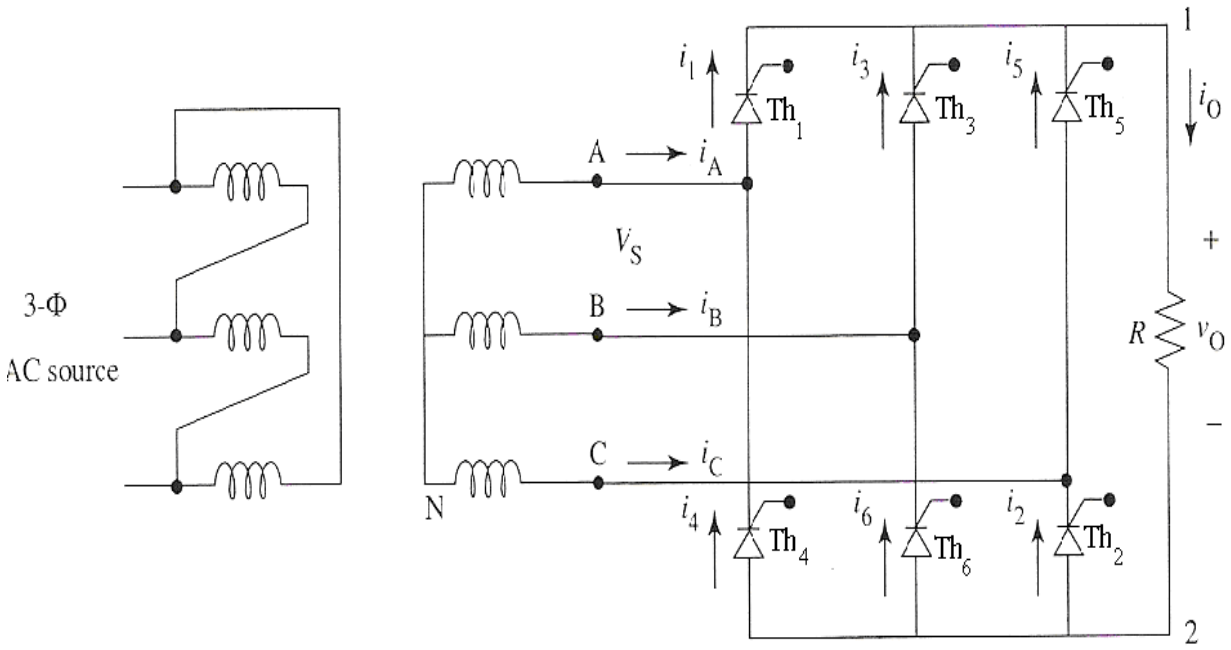
الشكل (٢- ٢٠) موجات جهد وتيار الخرج وتيارات الثيرستورات غير المتصلة لموحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي لزاوية إشعال $30° \le \alpha \le 150°$.

٢- ٦- ٢ موحد قنطري محكوم كامل الموجة ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي

Three - phase full– wave bridge - controlled rectifier connected with a resistive load (R)

يعتبر الموحد القنطري كامل الموجة المحكوم ثلاثي الأوجه من أكثر الموحدات المستخدمة في حالة القدرات العالية. يبين شكل (٢- ٢١) دائرة موحد قنطريكامل الموجة محكوم ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي R وتتكون دائرة الموحد من دائرتان لموحدات ثلاثة نبضات (موحدات نصف الموجة) المحكومة متصلة على التوالي. تسمي الثيرستورات Th_1 و Th_3 و Th_5 بالمجموعة الموجبة حيث يتم إشعال

هذه الثيرستورات خلال النصف الموجب لجهد المصدر. وبالمثل تسمي الثيرستورات Th_2 و Th_4 و Th_6 بالمجموعة السالبة حيث يتم إشعال هذه الثيرستورات خلال النصف السالب لجهد المصدر. لكي يمر التيار عبر المصدر والحمل فلابد أن يمر التيار خلال عدد إثنان ثيرستور وبالتالي لابد إن يتم قدح (إشعال) هذان الثيرستوران ولهذا السبب لابد من قدح كل ثيرستور بنبضتي إشعال متباعدة كل منهما عن الإخرى بقيمة 60^o كل دورة زمنية كاملة 360^o. عندما يتم توصيل ثيرستور موجود بالمجموعة الموجبة (المجموعة العليا) بثيرستور موجود بالمجموعة السالبة (المجموعة السفلي) ففي هذه الحالة سوف يتم تغذية الحمل بجهد قيمته جهد الخط (v_L) الخاص بجهد الوجهان المتصلان في هذه اللحظة مباشرة مع الحمل وعلى سبيل المثال إذا تم توصيل الثيرستوران Th_3 وTh_2 فسوف يتم تغذية الحمل في هذه الحالة بجهد الخط v_{BC}. كما سبق دراستة يتم التحكم في قيمة الجهد المتوسط للحمل $V_{o(avg)}$ وقيمة تيار الحمل المتوسط $I_{o(avg)}$ بالتحكم في قيمة زاوية الإشعال α.



الشكل (٢- ٢١) دائرة موحد قنطري كامل الموجة محكوم ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي.

يمكن توضيح عمل دائرة الموحد القنطري المحكوم ثلاثي الأوجه بإعتبار إن دائرة الموحد مكونة من مجموعتين متصلتين على التوالي لموحدات نصف الموجة المحكومة ثلاثية الأوجه (ثلاثية النبضات) حيث تكون كل مجموعة مزاحة عن المجموعة الاخري بقيمة 60^o وأسهل طريقة لتحليل الموجات هى الحصول على خرج كل مجموعة ثلاثية النبضات ثم جمع موجات كل مجموعة مع موجات المجموعة

الآخرى . إذا تم قدح الثيرستورات عند اللحظة التى تجعل كل ثيرستور فى وضع انحياز أمامي أى جهد الأنود موجب بالنسبة لجهد الكاثود فيتم توصيل الثيرستور تبعا لنبضته التى تجعله فى وضع التوصيل.

نلاحظ من شكل (٢- ٢١) بإن مجموعة الثيرستورات الموجبة متصلة بالنقطة 1 بينما مجموعة الثيرستورات السالبة متصلة بالنقطة 2 ويتم قياس زاوية الإشعال α من نقطة التقاء جهود الأوجه الموضحة بشكل (٢- ٢٢) حيث يتم قياس قيمة زاوية الإشعال α ابتداء من لحظة تقاطع جهدى المصدر V_{CN}, V_{AN} ويبين الشكل (٢- ٢٢) حاله الحصول على موجات جهد خرج للموحد القنطرى المحكوم ثلاثي الأوجه عند زاوية إشعال $\alpha=0°$ ويمكن توضيح الحصول على الموجات المبينة بالشكل (٢- ٢٢) كالتالى : لمجموعة الثيرستورات الموجبة نقوم أولا بدراسة الفترة من 0° حتى 120° ففى خلال هذه الفترة الزمنية يتم توصيل الثيرستور Th_1 بمصدر الجهد الذى له أكبر قيمة موجبة وفى هذه الحاله يكون هذا المصدر هو جهد مصدر الوجه V_{AN} وبالتالى يتحول الثيرستور لوضع التوصيل ويتم توصيل كل من النقطة 1 بالنقطة A وبنفس الطريقة خلال الفترة الزمنية من 120° حتى 240° يتحول الثيرستور Th_3 لوضع التوصيل ويتم توصيل النقطة 1 بالنقطة B وخلال الفترة الزمنية من 240° حتى 360° يتحول الثيرستور Th_5 لوضع التوصيل ويتم توصيل النقطة 1 بالنقطة C وتتكرر الدورة فى هذه الحالة وتكون القيمة العظمى للجهد v_{1N} يساوي القيمة العظمى لجهد كل وجه V_{AN} وV_{BN} و V_{CN}.

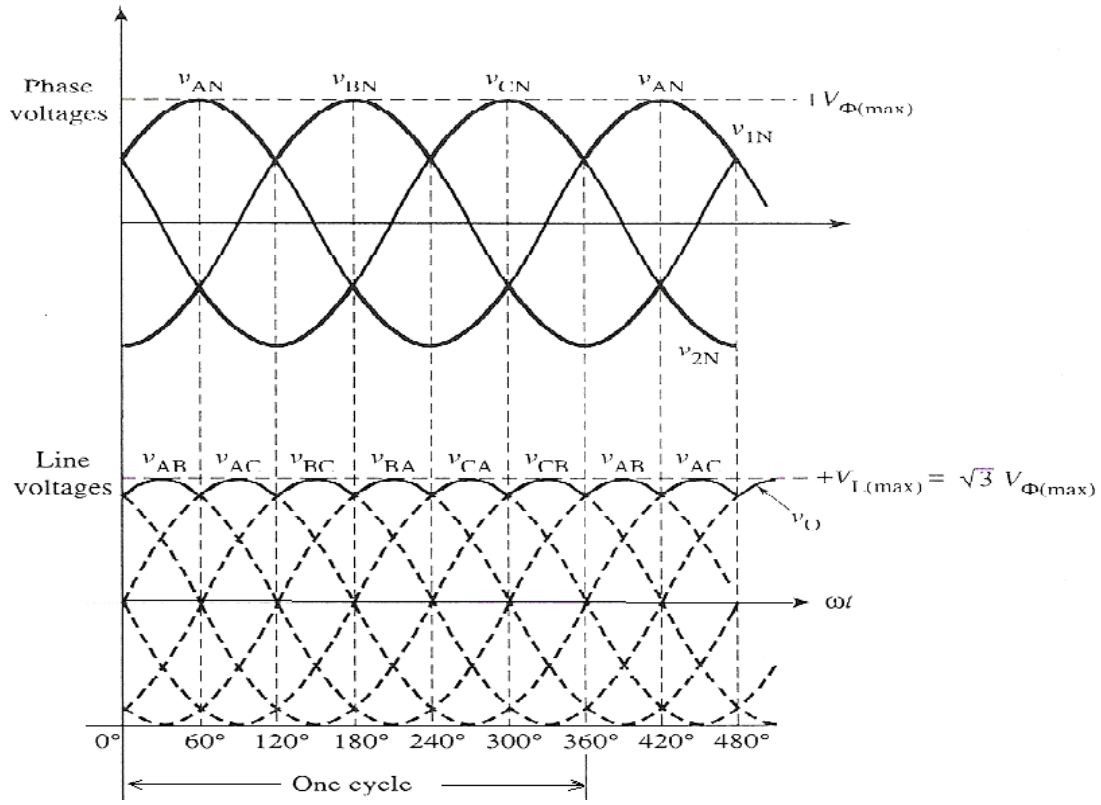
الفترة	جهد النقطة 1	جهد النقطة 2	جهد الخرج v_{12}
من 0^o إلى 60^o	A	B	AB
من 60^o إلى 120^o	A	C	AC
من 120^o إلى 180^o	B	C	BC
من 180^o إلى 240^o	B	A	BA
من 240^o إلى 300^o	C	A	CA
من 300^o إلى 360^o	C	B	CB
من 360^o إلى 420^o	A	B	AB

جدول (٢- ١)

ولمجموعة الموحدات السالبة والمتصلة بالنقطة 2 يتصل الثيرستور Th_4 بجهد المصدر الذي له أكبر قيمة جهد سالبة خلال الفترة الزمنية من ° 180 حتى °300 ويصل الثيرستور Th_4 النقطة 2 بالنقطة A وبالمثل خلال الفترة الزمنية من °300 حتى °420 أو (60^o) يصل الثيرستور Th_6 لوضع التوصيل ويتم توصيل النقطة2 بالنقطة B وبالمثل خلال الفترة الزمنية من 60^o حتى 180^o يتحول الثيرستور Th_2 لوضع

التوصيل ويتم توصيل النقطة 2 بالنقطة C وتكون القيمة العظمى لجهد النقطة 2 (v_{2N}) مساوية لأقصى قيمة سالبة لجهود الأوجه V_{AN} وV_{BN} و V_{CN}. يكون جهد الخرج v_o (v_{12}) عبارة عن $v_{1N} - v_{2N}$. يلخص الجدول (٢- ١) هذه اللحظات الزمنية والنتائج.

نلاحظ من الشكل (٢- ٢٢) أن موجة جهد الخرج أنعم من حالة دائرة موحد نصف الموجة المحكوم ثلاثي الأوجه وإن عدد النبضات الموجودة خلال دورة زمنية كاملة تحتوي على ست نبضات من نبضات جهود الدخل (جهود الخط) وبالتالي تكون قيمة تردد تشوهات جهد الخرج f_r مساوية لعدد ست مرات من قيمة تردد المصدر f. تكون قيمة جهد الخرج المتوسطة ضعف قيمة جهد الخرج المتوسط في حالة دائرة موحد نصف الموجة المحكوم ثلاثي الأوجه وخلال دورة زمنية كاملة يوصل كل ثيرستور 120^o ويفصل 240^o. يوجد دائما على الاقل ثيرستورين في وضع التوصيل في نفس الوقت وحسب تتابع الأوجه ABC يتم إشعال الثيرستورات حسب ترقيمتا $Th_6, Th_5, Th_4, Th_3, Th_2, Th_1$ وتكون نبضات هذه الثيرستورات متباعدة كل منها عن الأخرى.



الشكل (٢- ٢٢) جهد خرج موحد قنطري كامل الموجة محكوم ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي عندما $\alpha = 0^o$.

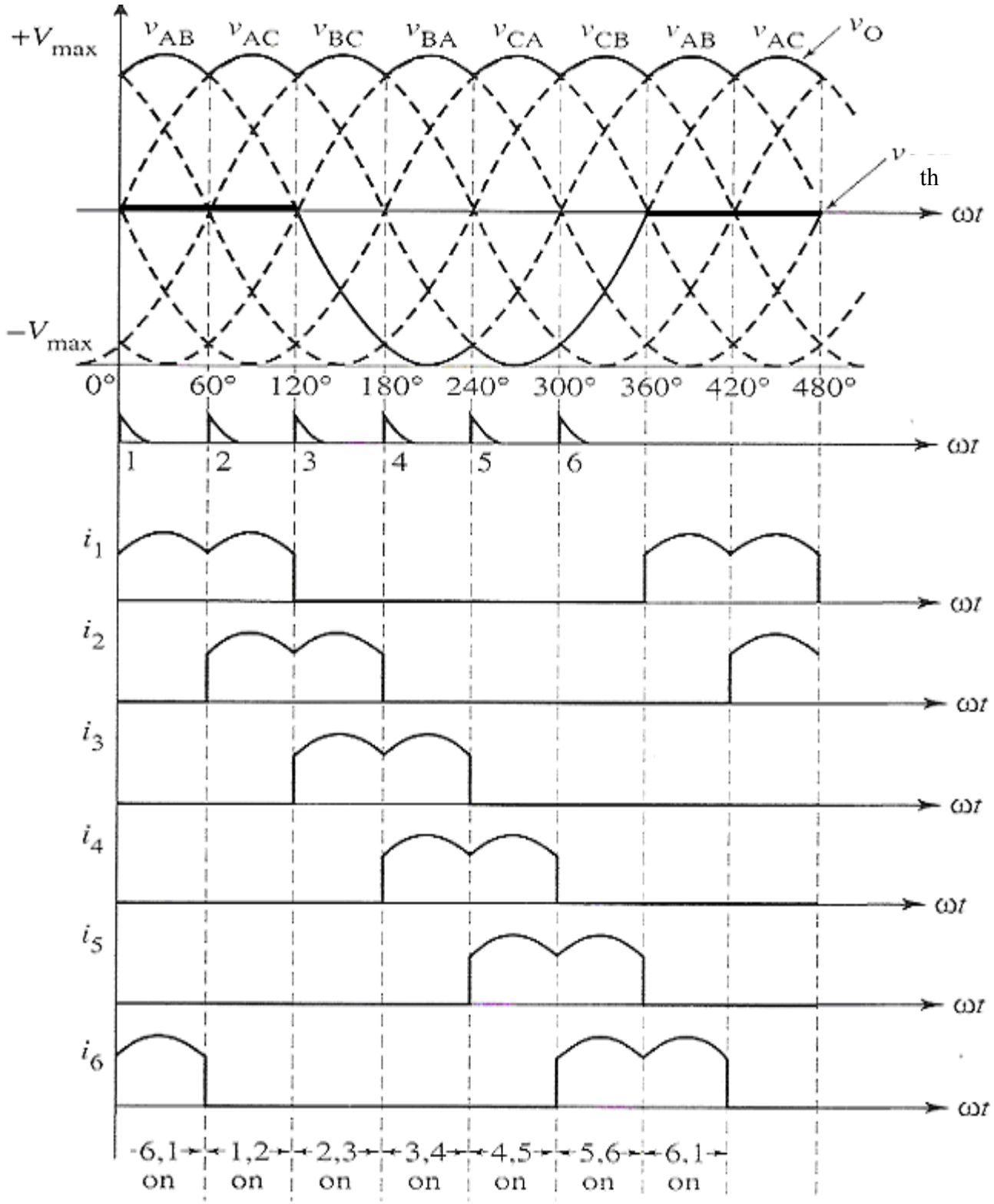
يمكن تعيين الجهد على الثيرستور بسهولة بالاستعانة بالجدول (٢- ١) وعلى سبيل المثال إذا أريد إيجاد قيمة الجهد على الثيرستور Th_1 ($v_{Th1} = v_{A1}$) ففي خلال الفترة الزمنية من 0^o حتي 120^o تكون قيمة v_{A1} حيث الثيرستور Th_1 في وضع التوصيل وخلال الفترة الزمنية من 120^o حتي 240^o تكون قيمة v_{A1} = v_{AB} حيث النقطة 1 متصلة بالنقطة B وخلال الفترة الزمنية من 240^o حتي 360^o تكون قيمة v_{A1} = v_{AC} حيث النقطة 1 متصلة بالنقطة C. يبين الجدول (٢- ٢) قيم الجهود عبر الثيرستورات خلال زمن دوري كامل.

v_{Th2}	v_{Th6}	v_{Th4}	v_{Th5}	v_{Th3}	v_{Th1}	الفترة
CB	0	AB	CA	BA	0	من 0^o إلى 60^o
0	BC	AC	CA	BA	0	من 60^o إلى 120^o
0	BC	AC	CB	0	AB	من 120^o إلى 180^o
CA	BA	0	CB	0	AB	من 180^o إلى 240^o
CA	BA	0	0	BC	AC	من 240^o إلى 300^o
CB	0	AB	0	BC	Ac	من 300^o إلى 360^o

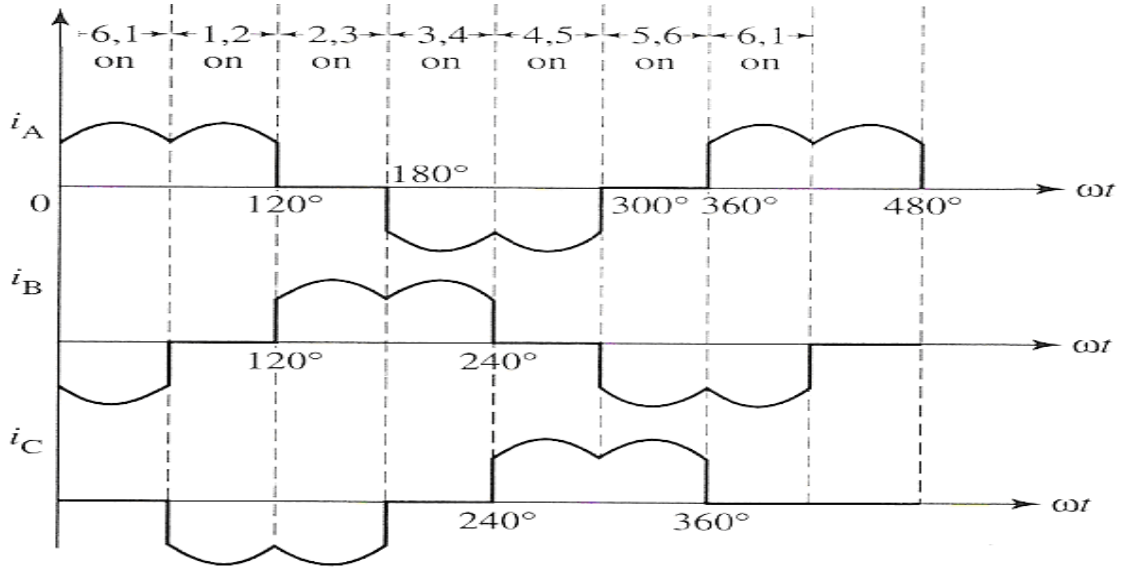
جدول (٢- ٢)

يبين الشكل (٢- ٢٣) موجة الجهد على الثيرستور v_{Th1} وموجات تيارات الثيرستورات حيث القيمة العظمى لجهد الثيرستور تساوي القيمة العظمى لجهد خط المصدر ($V_{L(m)}$) وتعتمد هذه القيمة على قيمة زاوية الإشعال α حيث قيمة زاوية الإشعال صفر ($\alpha = 0^o$) بالشكل (٢- ٢٣) وفي هذه الحالة تكون قيمة جهد الثيرستور خلال الفترة من 0^o حتي 120^o لها قيمة صفرية وتكون لها قيم غيرصفرية خلال باقي فترات الدورة الواحدة الكاملة كما هو واضح بهذا الشكل. يبين الشكل (٢- ٢٤) موجات تيارات المصدر i_A و i_B و i_C حيث يمكن الحصول على هذه الموجات بالاستعانة بالشكل (٢- ٢٣) حيث إن:

$$\begin{cases} i_A = i_1 - i_4 \\ i_B = i_3 - i_6 \\ i_C = i_5 - i_2 \end{cases} \qquad (٢- ٣٠)$$



الشكل (٢- ٢٣) موجة الجهد على الثيرستور V_{Th1} وموجات تيارات الثيرستورات لموحد قنطري كامل الموجة محكوم ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي عندما $\alpha = 0^o$.



الشكل (٢- ٢٤) موجات تيارات المصدر لموحد قنطري كامل الموجة محكوم ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي عندما $\alpha = 0^o$.

يمكن الحصول من دائرة الموحد القنطري المحكوم ثلاثي الأوجه على موجات جهد الخرج وتيار الخرج المتصلة وغير المتصلة وذلك يعتمد على قيمة زاوية الإشعال فعندما تقع قيمة زاوية الإشعال في المدى $0^o \le \alpha \le 60^o$ نحصل على موجات جهد وتيار خرج متصلة وإذا وقعت قيمة زاوية الإشعال في المدى $60^o < \alpha \le 120^o$ نحصل على موجات جهد وتيار خرج غير متصلة.

يمكن كتابة القيمة المتوسطة لجهد وتيار الخرج في حالة موجات خرج متصلة كالتالي حيث قيمة زاوية الإشعال في المدى $0^o \le \alpha \le 60^o$:

$$V_{o(avg)} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m \cos\alpha = 1.654 V_m \cos\alpha \qquad (٢- ٣١)$$

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi R} V_m \cos\alpha = 1.654 \frac{V_m}{R} \cos\alpha \qquad (٢- ٣٢)$$

حيث V_m هي القيمة العظمى لجهد مصدر الموجة ($V_{phase\,(m)}$).

ويمكن كتابة القيمة المتوسطة لجهد وتيار الخرج في حالة موجات خرج غير متصلة كالتالي حيث قيمة زاوية الإشعال في المدى $60^o < \alpha \le 120^o$:

$$V_{o(avg)} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_m [1 + \cos(\alpha + 60^o)] = 1.654\, V_m [1 + \cos(\alpha + 60^o)] \qquad (٢- ٣٣)$$

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = 1.654\, \frac{V_m}{R} [1 + \cos(\alpha + 60^o)] \qquad (٢- ٣٤)$$

مثال ٢- ٦:

يتصل موحد قنطري محكوم كامل الموجة ثلاثي الأوجه بمصدر جهد جيبي متناوب قيمته الفعالة 208 V (V_L) وتردده 60 Hz ويتصل خرج الموحد بحمل مادي قيمته 10 Ω. إذا علمت بأن قيمة زاوية الإشعال 'α' = 20^o، فأوجد:

أ- القيمة العظمى لتيار الحمل 'I_m'.

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

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

د- القيمة العظمى لتيار الثيرستور '$I_{Th\,(m)}$'.

هـ- القيمة المتوسطة لتيار الثيرستور '$I_{Th\,(avg)}$'.

و- قيمة أقصى جهد عكسي يتحمله الثيرستور '$V_{Th\,(m)}$'.

الحل:

سوف نستخدم المعادلات لحالة موجات جهد وتيار الخرج المتصلة حيث قيمة زاوية الإشعال $\alpha = 20^o$ واقعة في المدى $0^o \le \alpha \le 60^o$

$$V_{L(m)} = \sqrt{2}\,V_L = 208\sqrt{2} = 294.15V$$

$$V_{phase} = \frac{V_L}{\sqrt{3}} = \frac{208}{\sqrt{3}} = 120V$$

$$V_m = \sqrt{2}\,V_{phase} = \sqrt{2} * 120 = 170V$$

أ- $$I_m = \frac{V_{L(m)}}{R} = \frac{294.15}{10} = 29.419\,A$$

ب- $$V_{o(avg)} = 1.654 V_m \cos\alpha = 1.654 * 170 * \cos 20^o = 264V$$

ج- $$I_{o(avg)} = \frac{V_{o(avg)}}{R} = \frac{264}{10} = 26.4\,A$$

د- $$I_{Th(m)} = I_m = 29.419\,A$$

هـ- $$I_{Th(avg)} = \frac{I_{o(avg)}}{3} = \frac{26.4}{3} = 8.8\,A$$

و- $$V_{Th(m)} = \sqrt{3}\,V_m = V_{L(m)} = \sqrt{2}\,V_L = 208\sqrt{2} = 294.15V$$

٢- ٧ استخدام دوائر التوحيد في شحن البطاريات :

من أهم التطبيقات التي تستخدم فيها دوائر التوحيد استخدامها لشحن البطاريات. أيضا تستخدم دوائر التوحيد لشحن بطاريات أجهزة UPS وكذلك كشافات إنارة الطوارئ حيث يتم تحويل التيار المتردد إلى تيار مستمر لشحن هذه البطاريات.

يوضح شكل (٢- ٢٥) دائرة توحيد نصف موجه لشحن بطارية ذات جهد E. في الشكل يمرر الدايود تيار عندما يكون جهد الأنود أكبر من جهد الكاثود ، أى أنه عندما يكون جهد الملف الثانوي V_s أعلى من جهد البطارية E. وتكون فترة التوصيل من الزاوية α إلى الزاوية β ويمكن حساب الزاوية α والزاوية β كالتالي:

$$V_m \sin\alpha = \mathrm{E}$$

وهذه المعادلة تعطي قيمة الزاوية α كدالة في جهد البطارية وجهد المنبع.

$$\alpha = \sin^{-1}\frac{\mathrm{E}}{\mathrm{V_m}}$$

عندما يصبح جهد الملف الثانوي V_s أقل من جهد البطارية ، يفصل الدايود وذلك عند الزاوية β التي يمكن حسابها من العلاقة التالية:

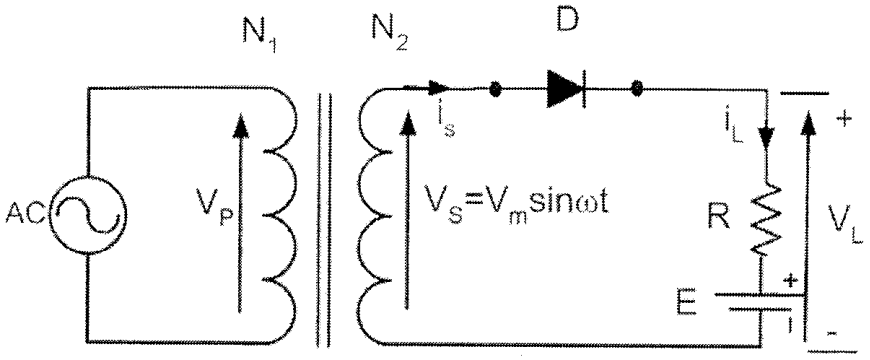
$$\beta = \pi - \alpha$$

وبذلك يمكن حساب تيار الشحن اللحظي من العلاقة التالية

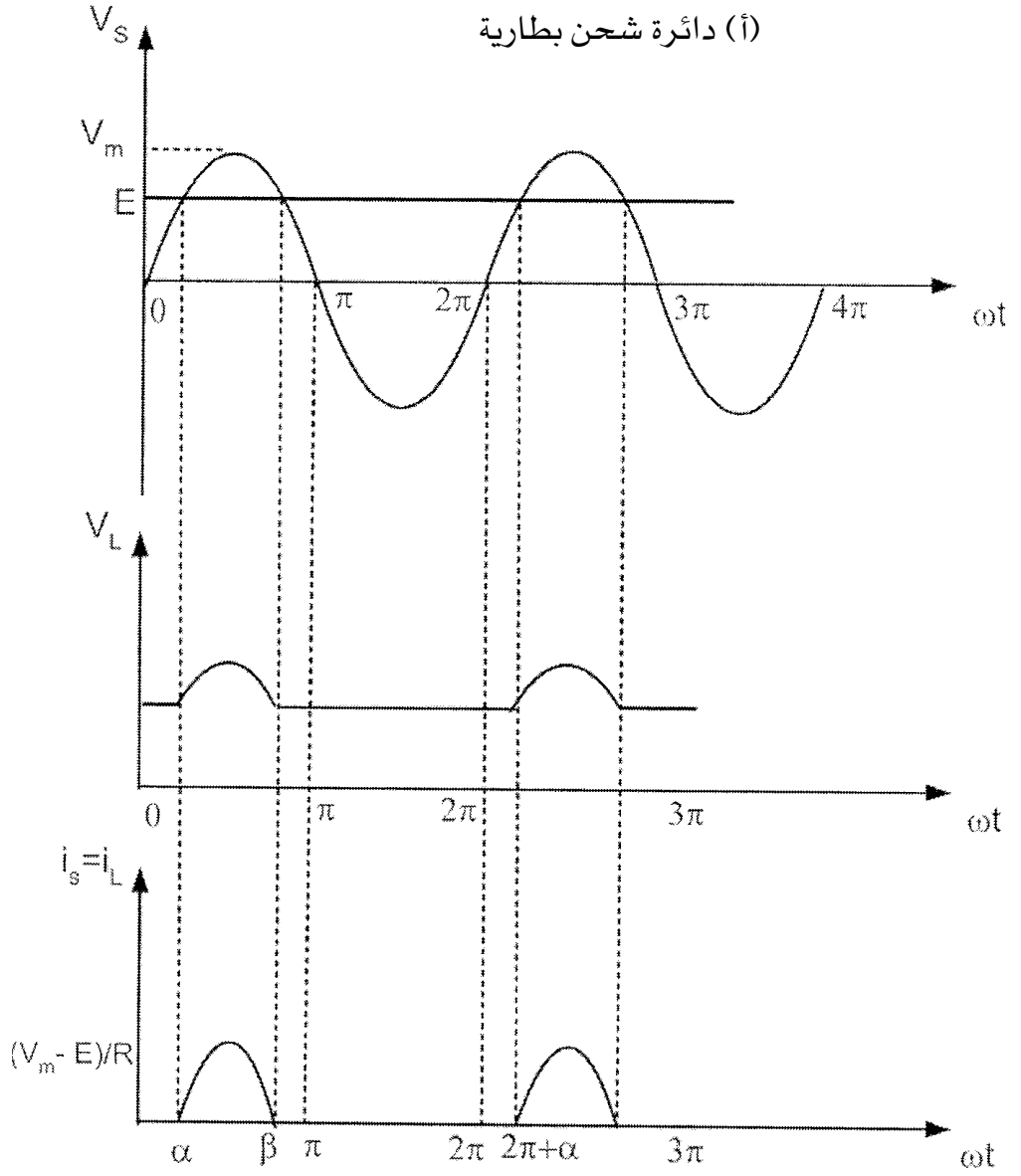
$$i_L = \frac{\mathrm{v_s} - E}{R} = \frac{\mathrm{V_m}\sin\omega t - E}{R} \qquad \text{for } \alpha < \omega t < \beta$$

حيث يمثل التيار i_L القيمة اللحظية لتيار الحمل ، ويمكن حساب القيمة المتوسطة لتيار الشحن (تيار الحمل) حسب المعادلة التالية:

$$I_{dc} = \frac{1}{2\pi R}\left(2\mathrm{V_m}\cos\alpha + 2E\alpha - \pi E\right)$$



(أ) دائرة شحن بطارية



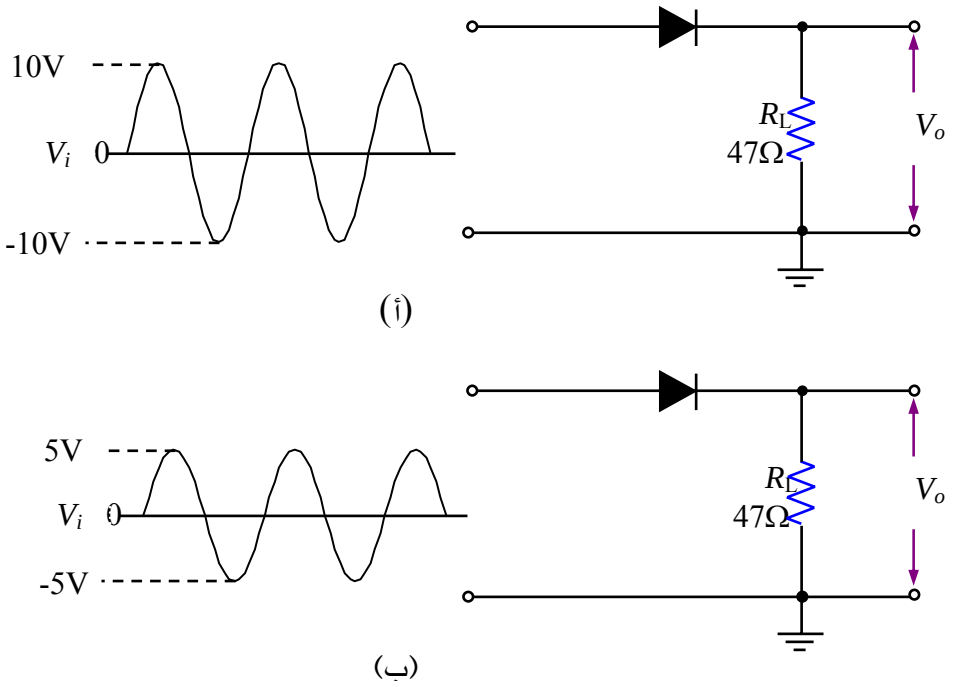
(ب) الشكل الموجي لجهد وتيار المصدر والحمل

الشكل (٢- ٢٥) دائرة شحن بطارية

٢- ٨ أسئلة وتمارين :

٢- ١ اذكر أنواع دوائر التوحيد؟

٢- ٢ ارسم جهد الخرج لكل من الدوائر المبينة بشكل (٢- ٢٦) موضحا قيمة الجهد؟



شكل (٢- ٢٦)

٢- ٣ ارسم شكل موجة كل من جهد الحمل 'v_o' وتيار الحمل 'i_o' وتيار المصدر 'i_s' للموحد القنطري كامل الموجة فى حالة :

أ- حمل مادي وزاوية إشعال '60°'.

ب- حمل حثي وزاوية إشعال '60°'.

٢- ٤ يتصل موحد محكوم كامل الموجة أحادي الطور بمصدر جهد متناوب جهده الفعال 220V وتردده 60Hz وحمل مادي مقاومته 50 Ω. 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- ٥ 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 20 Ω وقيمة زاوية الإشعال '60°'. فأوجد قيمة:

أ- تيار الثيرستور المتوسط

ب- أقصى تيار وأقصى جهد للثيرستور

ج- القدرة المغذاة للحمل

٢- ٦ يتصل موحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه بمصدر جهد جيبي متناوب قيمته الفعالة 208 V (V_L) وتردده 60 Hz ويتصل خرج الموحد بحمل مادي قيمته 10 Ω. إذا علمت بأن قيمة زاويةالإشعال 'α' 30^o، فأوجد:

أ- القيمة العظمى لتيار الحمل 'I_m'.

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

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

٢- ٧ يتصل موحد قنطري كامل الموجة محكوم ثلاثي الأوجه بمصدر جهد جيبي متناوب قيمته الفعالة 208 V (V_L) وتردده 60 Hz ويتصل خرج الموحد بحمل مادي قيمته 10 Ω. إذا علمت بأن قيمة زاوية الإشعال 'α' 60^o، فأوجد:

أ- القيمة العظمى لتيار الحمل 'I_m'.

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

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

٢- ٨ في شكل (٢- ٢٥) إذا كان جهد البطارية 12 فولت وسعتها 100 وات ساعة والقيمة المتوسطة لتيار الشحن ٥ أمبير وجهد المنبع 120 فولت ونسبة التحويل للمحول 2:1 احسب ما يلي:

أ- زاوية التوصيل للدايود

ب- قيمة مقاومة تحديد التيار

جـ- القدرة المقننة للمقاومة

د- زمن شحن البطارية

هـ- كفاءة دائرة التوحيد

و- أقصى جهد عكسي يتحمله الدايود.

إلكترونيات القوى

دوائر حاكمات الجهد المتردد

الجدارة: الإلمام الشامل بدوائر حاكمات الجهد المتردد .

الأهداف: عندما يكمل المتدرب هذه الوحدة يكون قد تمكن من تحقيق الأهداف والمهارات التالية:

- بعض دوائر حاكمات الجهد المتردد وفكرة العمل بإستخدام التحكم في زاوية الوجه.
- كيفية استخدام حاكمات الجهد المتردد للتحكم في شدة الإضاءة ودرجة الحرارة.
- دراسة حاكمات الجهد المتردد احادي وثلاثي الوجه واستخامها كمعوض للقدرة غير الفعالة في الشبكة الكهربائية.

الوقت المتوقع للتدريب: ٦ ساعات

الوسائل المساعدة:

- السبورة
- عرض باستخدام برنامج Power Point

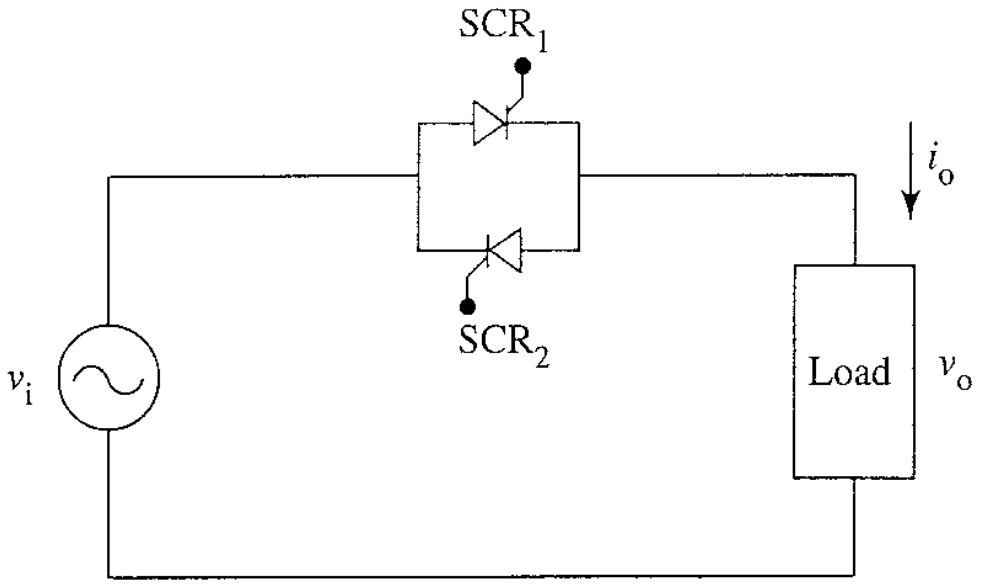
متطلبات الجدارة: دراسة الحقيبة التدريبية لمقرر دوائر كهربائية- ٢.

٣- ١ مقدمة:

يستخدم حاكم الجهد المتردد للحصول على جهد متردد متغير القيمة. يوصل حاكم الجهد المتردد بين المصدر والحمل وينتج جهداً متردداً على طرفي الحمل يمكن التحكم في قيمته ويسحب تيار متردداً من المصدر. يستخدم في تطبيقات عديدة أهمها التحكم في قدرة الأحمال ذات التأثير الحراري والتحكم في محركات التيار المتردد عن طريق التحكم في قيمة الجهد والمحولات ذات الرأس المتغير وكذلك تستعمل دوائر هذا الحاكم في أغراض متعددة منها دوائر معوضات القدرة غير الفعالة وتسمى المعوضات. إلى جانب استخدامها كملامسات لتوصيل وفصل دوائر التيار المتردد بدلاً من الملامسات الميكانيكية.

٣- ٢ فكرة عمل حاكم الجهد المتردد

تتكون دائرة هذا الحاكم كما هو موضح بالشكل (٣- ١) من مفتاح مزدوج الاتجاه والذي يمكن الحصول عليه بعدة طرق منها الحصول عليه باستخدام ثيرستورين موصلين بالتوازي المتضاد أو باستخدام ترياك أو دوائر مختلفة الأشكال باستخدام الدايود الثيرستور لتؤدي نفس الغرض. كما يمكن استخدام ترانزستور القدرة في التطبيقات ذات القدرات المنخفضة. والشكل التالي حاكم جهد أحادي الوجه. حيث يعتبر الهدف الأساسي لاستخدام حاكمات الجهد المتردد هو التحكم في القيمة الفعالة للجهد.



شكل (٣- ١) دائرة حاكم الجهد المتردد أحادي الوجه مع حمل مادي

٣- ٣ طرق التحكم في الخرج لحاكم الجهد المتردد :

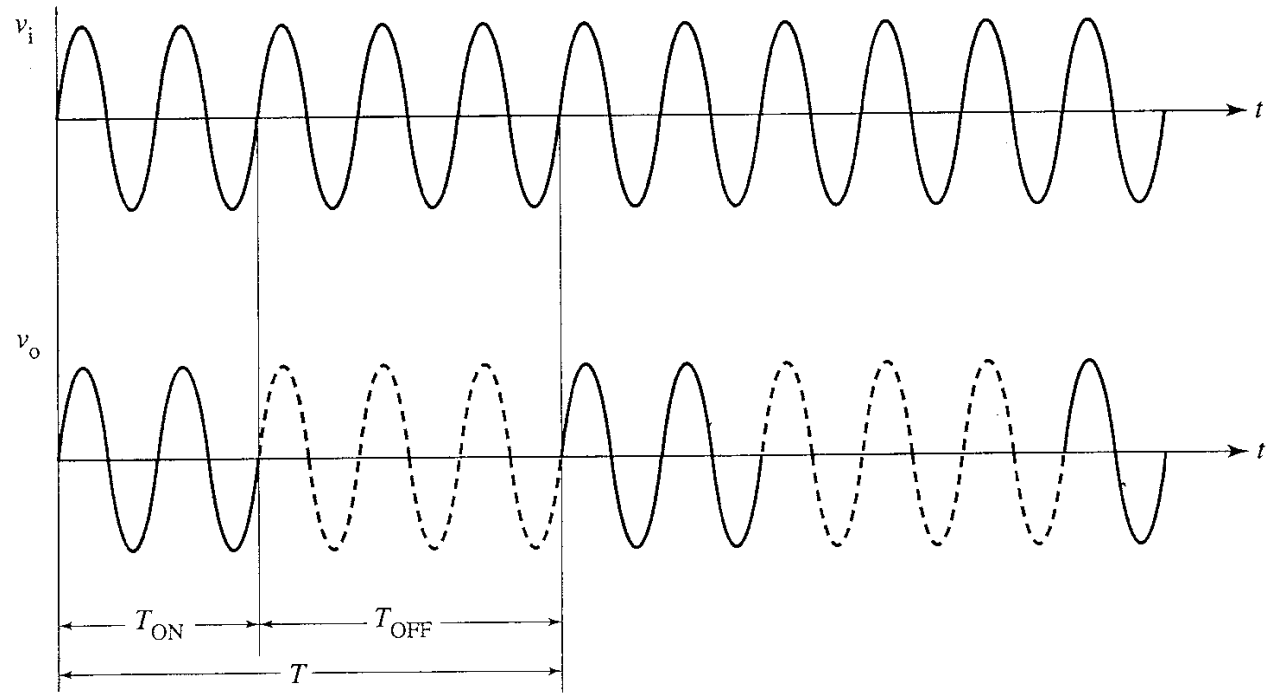
وبالتحكم الملائم في تشغيل المفاتيح المزدوجة الاتجاه بمعنى استخدام نبضات التشغيل الملائمة يمكننا الحصول على عدد من حالات التشغيل للتحكم في جهد الخرج. وتوجد طريقتان للتحكم في قيمة الجهد وهى كما يلي:

٣- ٣- ١ التحكم بالتشغيل والفصل ON-OFF Control :

وفي هذه الحالة يمكن التحكم في القدرة المستهلكة بالحمل بتوصيله مع المصدر لعدد من الدورات وفصله لعدد آخر من الدورات كما في شكل (٣- ٢). أي أن الحاكم في هذه الحالة يعمل كملامس ذو سرعة عالية (contactors).

فإذا كان الزمن الكلي لدورة التحكم يمثل بعدد T دورة فإن فترة التشغيل تمثل بعدد N دورة وتكون فترة الفصل (T-N) دورة ويمكن التحكم في الجهد المطبق على الحمل بتغير N أوT أو كليهما كالآتي:

- بتثبيت T وتغيير N.
- بتثبيت N وتغيير T.
- بتغيير كل من N , T بهدف الحصول على شروط أفضل لعملية التحكم.



شكل (٣-٢) موجات الجهد لحاكم الجهد المتردد وذلك للتحكم في فترات التشغيل والإيقاف

في الطريقة الأخيرة يتم تغيير كل من N , T بحيث تكون عملية التشغيل والفصل أسرع ما يمكن في نفس الوقت يتم إنجاز عملية التحكم المطلوبة. إذا كان الحمل عبارة عن مقاومة مادية فإن القدرة المسحوبة بالحمل يمكن حسابها كالآتي:

$$P = \frac{\text{maximum load power}}{T} \quad N = P_m \left(\frac{N}{T}\right) \qquad (١ \text{ -}٣)$$

حيث إن P_m هي قدرة الحمل في حالة التوصيل المستمر وهي نفسها قدرة الحمل أثناء فترة التشغيل

$$P_m = \frac{V_s^2}{R} = V_s I_s \qquad (٢ \text{ -}٣)$$

المعادلة رقم (٣- ١) توضح أن قدرة الحمل يمكن تغييرها بتغيير N أو T أو كليهما ولكن التغيير يكون متدرجاً. وعلى سبيل المثال إذا كانت P_m =١٠٠ وحدة و T=٢٠ دورة فبتغيير N تتغير قدرة الحمل في خطوات كل منها يعادل وحدات أي ٥٪ لأن التغيير يتم في أعداد صحيحة من الدورات. وفي مثل هذا النوع من التحكم فإن قياس القيمة الفعالة للتيار أو الجهد للحمل يتطلب معرفة N و T وذلك على مدى فترة زمنية طويلة كالآتي:

$$\begin{aligned} P &= P_m \left(\frac{N}{T}\right) = V_s I_s \left(\frac{N}{T}\right) \\ &= I_s^2 R \left(\frac{N}{T}\right) \\ &= I_{rms}^2 R \end{aligned}$$

$$\therefore \qquad I_{orms} = I_s \sqrt{\left(\frac{N}{T}\right)} \qquad (٣ \text{ -}٣)$$

$$\therefore \qquad V_{orms} = V_s \sqrt{\left(\frac{N}{T}\right)} \qquad (٤ \text{ -}٣)$$

حيث إن:

I هي القيمة الفعالة للتيار أثناء فترة التشغيل

R هي قيمة مقاومة الحمل

Vs جهد المصدر

Is تيار المصدر

Iorms القيمة الفعالة لتيار الحمل

Vorms القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل.

وفي حالة الحمل المحتوي على محاثة فإن قدرة الحمل تتأثر باللحظة التي تبدأ عندها فترة التشغيل بالإضافة إلى تأثير كل من T و N. ويرجع ذلك إلى تأثير محاثة الحمل على شكل موجة التيار الناتجة. وإذا أمكن ضبط لحظة بداية فترة التشغيل بحيث يتم تأخيرها عن بداية موجة الجهد بزاوية تماثل تقريباً زاوية معامل القدرة للحمل (ϕ) فإن التيار سيأخذ شكل الموجة الجيبية من البداية وفي هذه الحالة يمكن حساب قدرة الحمل كالأتي:

$$P = P_m \left(\frac{N}{T}\right) = (V_S I_S \cos\phi) \left(\frac{N}{T}\right) \qquad (٣-٥)$$

الميزة الأساسية لهذه الطريقة من طرق التحكم في قدرة الحمل هي أن التيار المسحوب من المصدر يكون على شكل موجة جيبيه أثناء فترات التشغيل وبالتالي يتم تجنب التوافقيات العالية التردد في موجة التيار.

مثال (٣- ١):

يستخدم حاكم جهد متردد لتغذية حمل مادي مقاومته 10 أوم وكانت القيمة الفعالة لجهد المصدر تعادل 127 فولت عند تردد 60 هرتز يتم تشغيل الثيرستورات لعدد 25 دورة وفصلها لعدد 75 دورة. احسب التالي:

- القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل
- القيمة الفعالة للتيار المار بالحمل
- القدرة المستهلكة في المقاومة
- معامل القدرة
- أقصى تيار يمر في الثيرستور

الحل:

T=25+75=100 دورة

- القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل

$$V_{orms} = V_S \sqrt{\left(\frac{N}{T}\right)} = 127 * \sqrt{\frac{25}{100}} = 63.5\ volt$$

- القيمة الفعالة التيار المار بالحمل

$$I_{orms} = \frac{V_{orms}}{R} = \frac{63.5}{10} = 6.35 Amp.$$

- القدرة المستهلكة في المقاومة

$$P_o = I_{orms}^2 R = (6.35)^2 X\, 10 = 403.225\ watt$$

- معامل القدرة

$$PF = \sqrt{\left(\frac{N}{T}\right)} = \sqrt{\frac{25}{100}} = \sqrt{0.25} = 0.5 \quad (lag)$$

- أقصى تيار يمر في الثيرستور

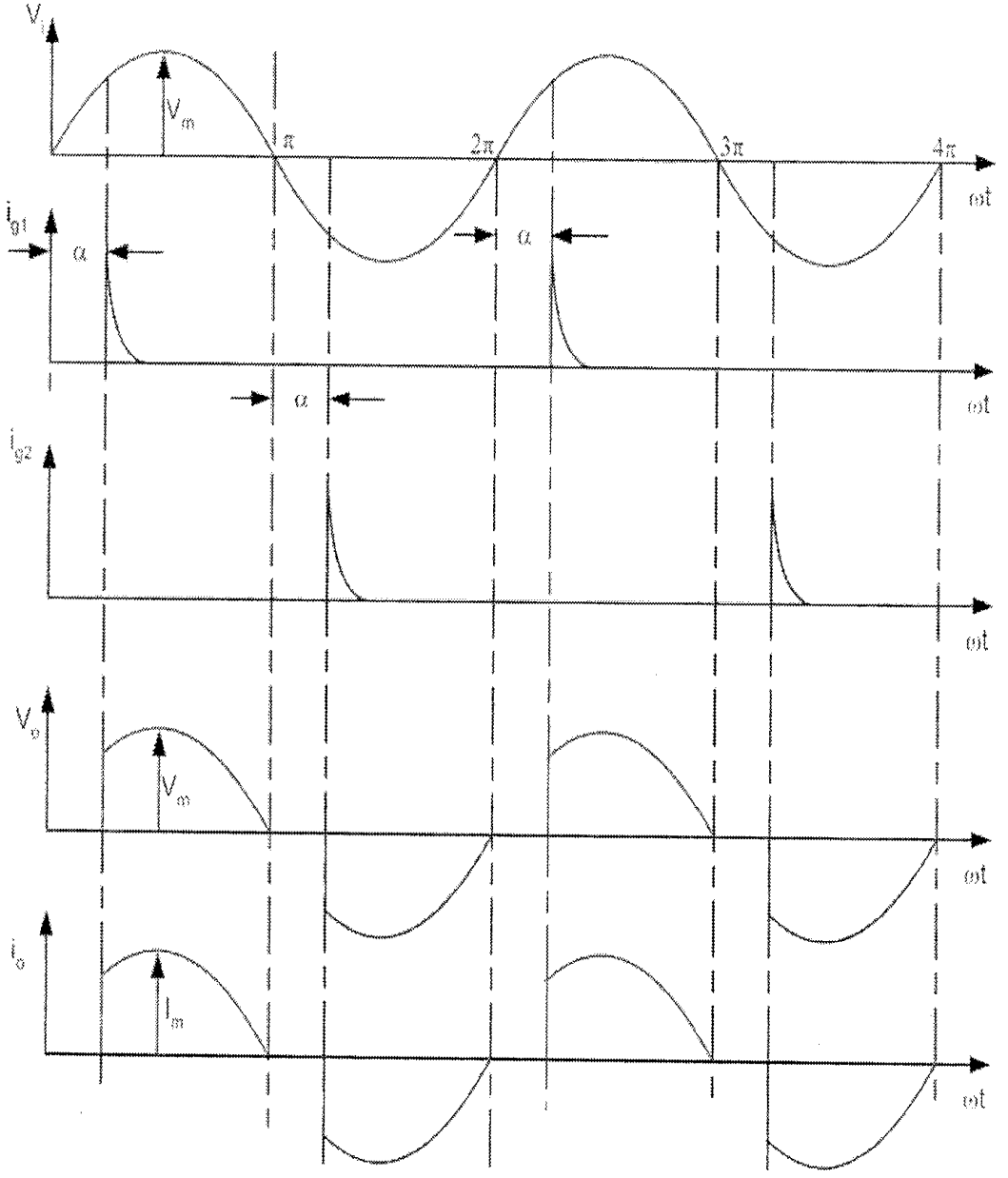
$$I_m = \frac{V_m}{R} = \frac{127\sqrt{2}}{10} = 17.96\ Amp.$$

٣- ٣- ٢ التحكم الوجهي (phase control) :

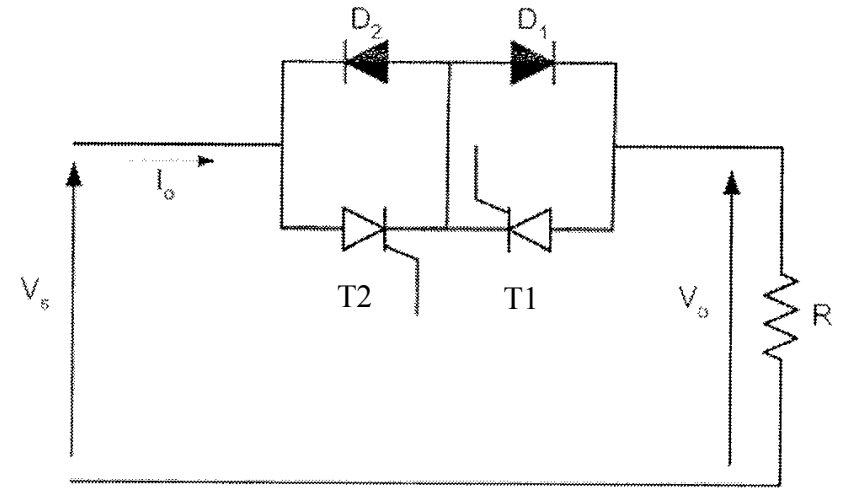
وفي هذه الحالة تعمل الثيرستورات كعملها في الموحدات لكنها تعمل على تغير قيمة زاوية الإشعال لكل من نصفي الموجة على حده. وهذه الطريقة أفضل من الطريقة السابقة من حيث التحليل الرياضي بالإضافة إلى الصعوبات الكثيرة في التطبيقات العملية الموجودة بالطريقة الأولى. ولذلك فإن طريقة التحكم الوجهي هي الأكثر انتشاراً حيث يتم التحكم في زاوية إشعال كلاً من T_1 و T_2 وتكون أشكال الموجات عند تغذية حمل مادي كما بالشكل (٣- ٣) وبتغيير قيمة زاوية الإشعال من صفر إلى ١٨٠ تتغير القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل من V_s إلى صفر.

ومن الأهمية أن تكون نبضات الإشعال للثيروستورات معزولة عن بعضها مما يؤدى إلى ارتفاع تكلفة دوائر الإشعال حيث نحتاج إلى دوائر عزل ويمكن التخلص من هذا العيب باستخدام الدائرة المبينة بالشكل (٣- ٤). حيث يتم توصيل دائرة الكاثود المشترك لكلا الثيرستو. في هذه الحالة يتم تشغيل

كلاً من D_1 و T_1 معاً في النصف الموجب من الموجه بينما يتم تشغيل كلاً من D_2 و T_2 معاً في النصف السالب من الموجه. ومن ثم فإننا في هذه الحالة نحتاج إلى دائرة عزل واحدة فقط. ومن عيوب هذه الدائرة هي زيادة المفاقيد نتيجة استخدام الدايودات وبالتالي انخفاض قيمة الكفاءة.



شكل (٣- ٣) موجات الجهد والتيار لحاكم الجهد المتردد أحادي الوجه مع حمل مادي وذلك للتحكم في زاوية الإشعال

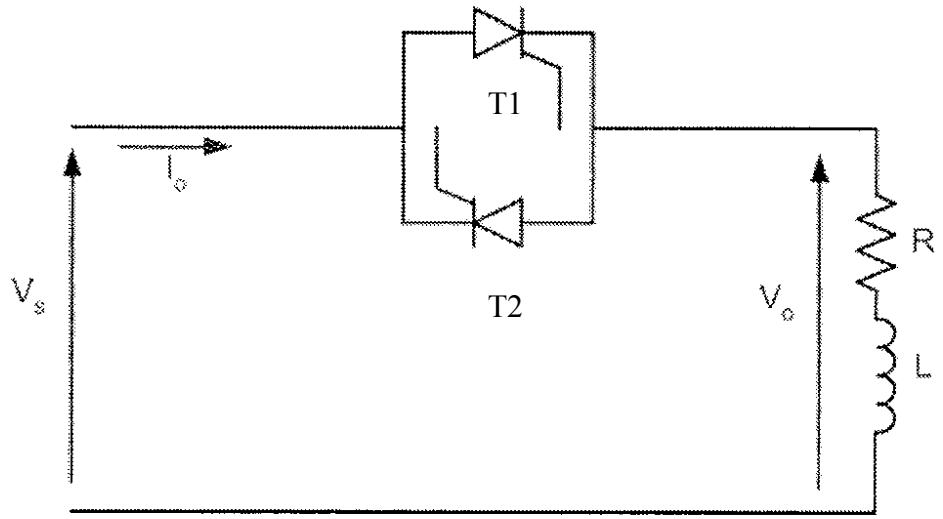


شكل (٣- ٤) دائرة حاكم الجهد المتردد باستخدام الكاثود المشترك

٣- ٤ حاكم الجهد المتردد أحادي الوجه مع حمل حثي:

(Single phase controller with inductive load)

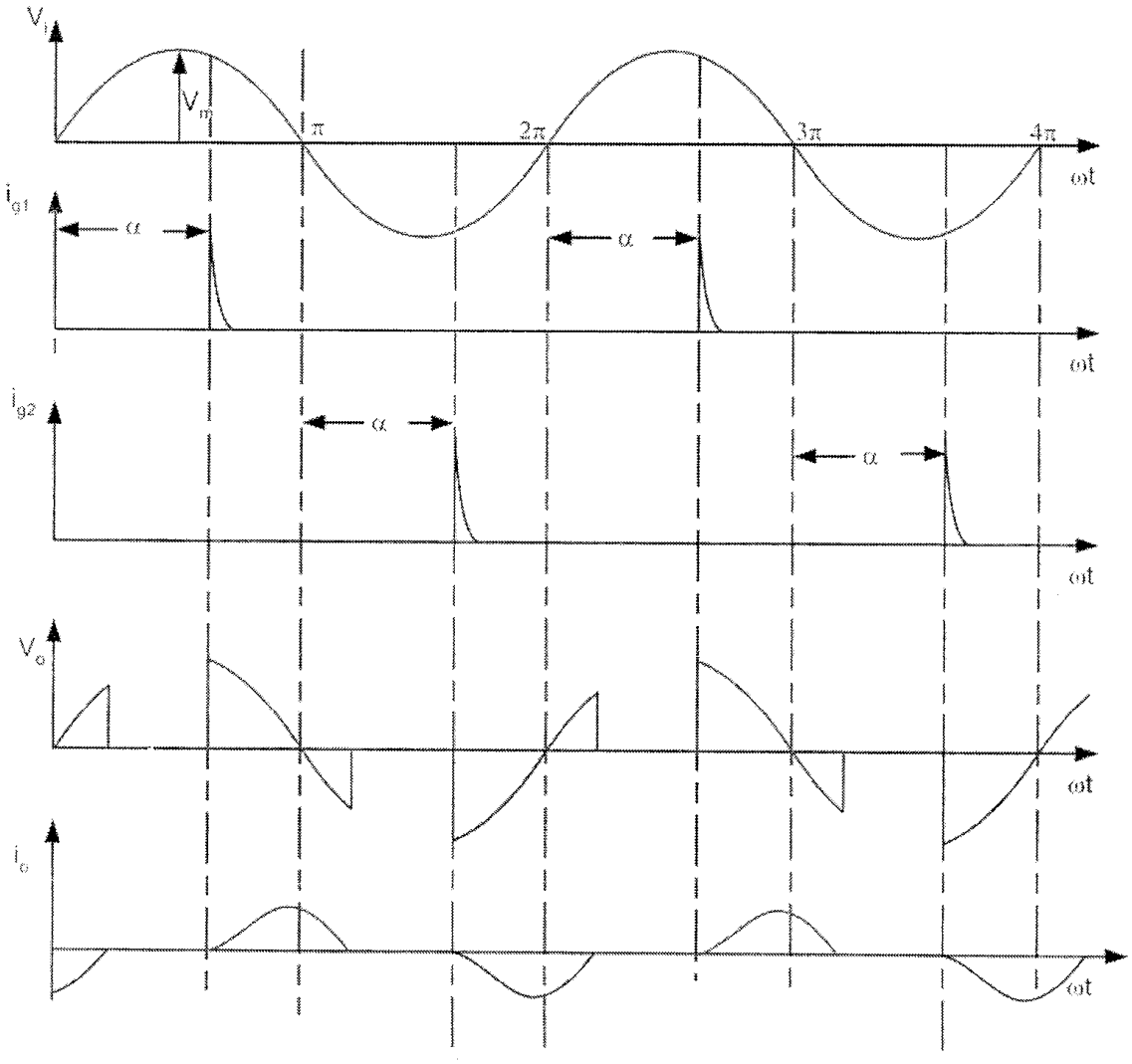
نظراً لأن معظم الأحمال في الحياة العملية تحتوي على أحمال حثيه فمن المناسب دراسة أداء حاكم الجهد المتردد عندما يكون الحمل حثي. الشكل (٣- ٥) يوضح دائرة لحاكم جهد متردد أحادي الوجه يستخدم لتغذية حمل مكون من مقاومة وملف. وتعتمد أشكال موجات الجهد والتيار في هذه الحالة على زاوية الإشعال وزاوية الطور للحمل ويمكن تقسيمها إلى حالتين نتناولهما فيما يلي:



شكل (٣- ٥) دائرة حاكم الجهد المتردد أحادي الوجه مع حمل حثي

الحالة الأولى: زاوية الإشعال α تكون أكبر من زاوية الطور ϕ وأقل من ١٨٠ درجة

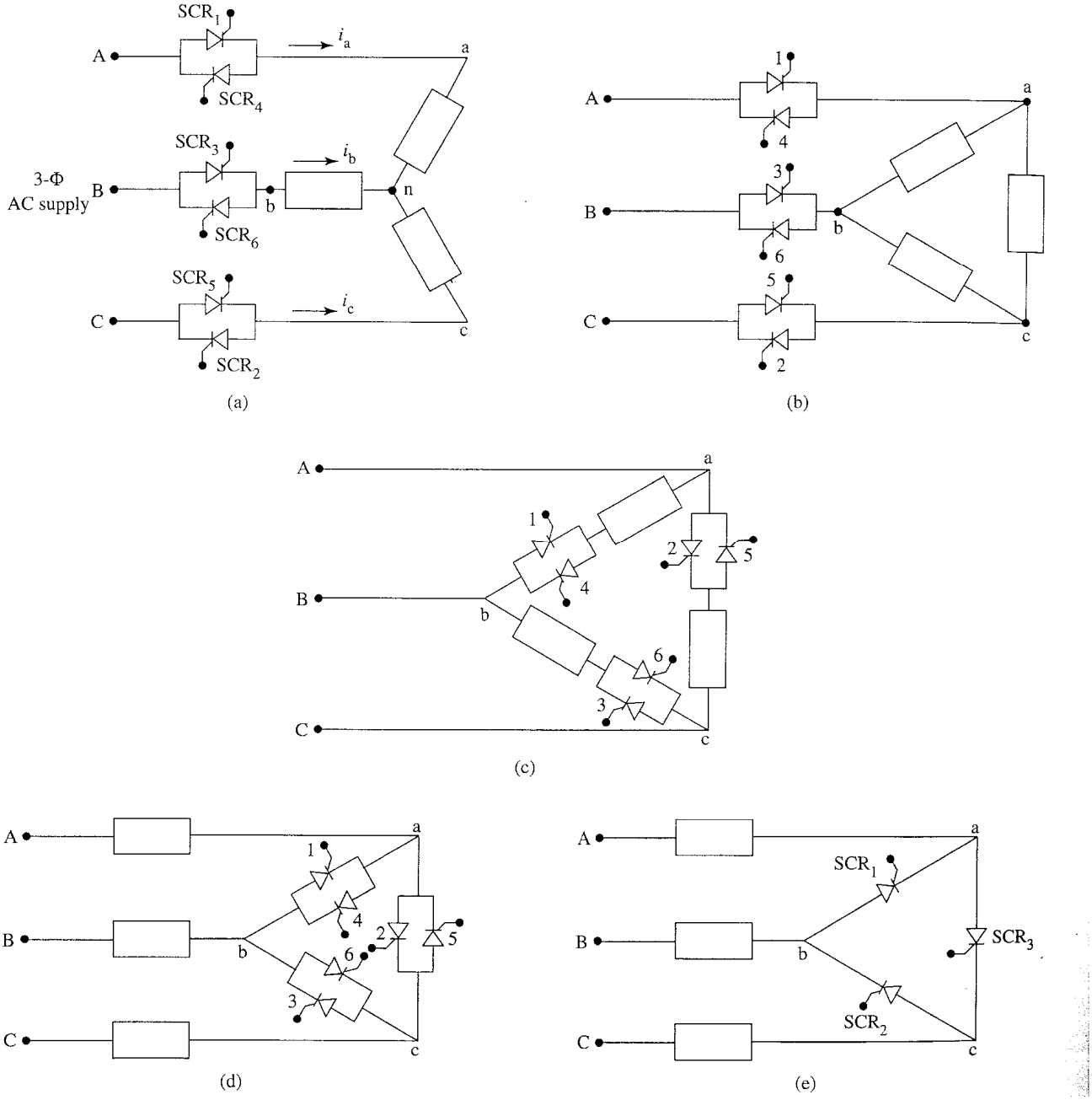
إذا فرض وتم إشعال الثيرستور T_1 عند زاوية α وذلك في النصف الموجب من الموجه ونتيجة لذلك فإن التيار سيمر من المصدر إلى الحمل وذلك من خلال الثيرستور T_1 ونتيجة لوجود الحمل الحثي فإن تيار الحمل لن يصل إلى صفر عند نهاية الموجة الجيبية وحتى مع بداية النصف السالب من الموجه ويستمر كذلك حتى يصل التيار المار في الثيرستور T_1 إلى الصفر. عندئذ يفصل الثيرستور T_1 ويكون الجهد على أطراف الحمل مساوياً للصفر ويستمر الوضع كذلك حتى يتم إشعال الثيرستور T_2 عند زاوية $\alpha + \pi$ ويتكرر ما حدث في النصف الموجب من الموجة مع النصف السالب وهكذا يكون التيار في هذه الحالة متقطع كما في شكل (٣- ٦) ويتم التحكم في قيمة الجهد الناتج من حاكم الجهد المتردد عن طريق زاوية الإشعال.



شكل (٣- ٦) موجات الجهد والتيار لدائرة حاكم الجهد المتردد لحمل حثي

الحالة الثانية: زاوية الإشعال α تكون أقل من زاوية الطور ϕ

وفي هذه الحالة يكون التيار والجهد جيبي متصل حيث يكون المصدر موصل إلى الحمل وذلك من خلال الثيرستور T_1 في الفترة α إلى $\phi+\pi$ ومن خلال الثيرستور T_2 في خلال الفترة $\phi+\pi$ إلى $\phi+2\pi$ وبذلك يفقد حاكم الجهد المتردد السيطرة على الجهد الناتج. ويمكن تقسيم حاكمات الجهد المتردد إلى حاكمات أحادية الوجه والتي سبق تناولها و حاكمات ثلاثية الوجه كما في شكل (٣- ٧).

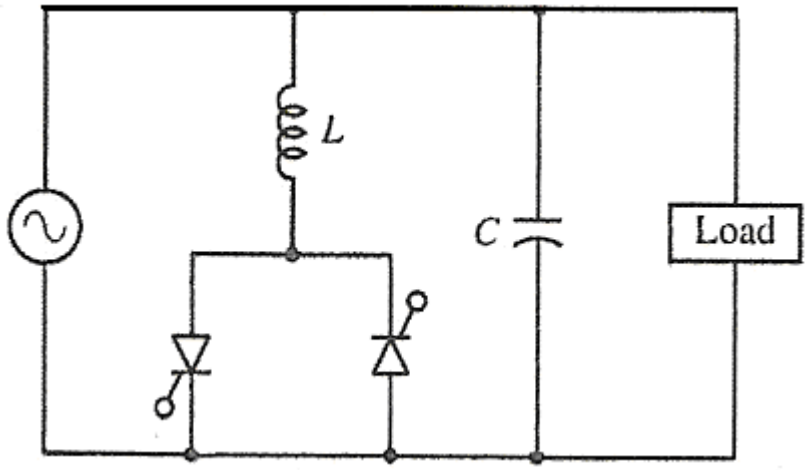


شكل (٣- ٧) دائرة حاكم الجهد المتردد ثلاثي الأوجه

٣- ٥ استخدام حاكم الجهد المتردد كمعوض للقدرة غير الفعالة في الشبكة الكهربائية :

يتم استخدام المكثفات على التوازى بهدف تحسين معامل القدرة. وعادة يتم استخدام مكثفات لتحسين معامل القدرة الكهربائية للأحمال الحثية وتتصل هذه المكثفات على التوازى مع أطراف الحمل الحثى. ويتم استخدام مكثفات ذات القيم الثابتة فى حالة الأحمال التى لها قدرة غير فعالة ثابتة وبالطبع لابد من حساب وتصميم هذه المكثفات للحصول على أحسن معامل قدرة كهربائية وإذا كانت القدرة غير فعالة للحمل متغيرة حسب الأحمال المتصلة ففى هذه الحاله يتم استخدام مكثفات متغيرة القيمة مثل استخدام المكثفات ذات الفصل والتوصيل السريع (switched-capacitors).

يبين شكل (٣ - ٨) إحدى تطبيقات متحكمات الجهد المتردد للحصول على معامل قدرة كهربائية قيمته الوحدة لقيم متغيرة للقدرات غير الفعالة. يستخدم المكثف لتحسين معامل القدرة مع إعطاء كمية ثابتة من القدرة غير الفعاله بينما يستخدم الملف المتصل على التوازى ليمتص القدرة غير الفعاله المتغيرة معتمدا على قيمة زاوية الإشعال α. يسمى هذا النوع المستخدم لتحسين معامل القدرة باسم متحكم القدرة غير الفعاله الإستاتيكى يمكن تقسيم هذا المتحكم لأنواع متعددة وسوف نكتفي بذكر النوعين التاليان وهما الملفات المحكومة بالثيرستور والمكثفات ذات المفاتيح بالثيرستور.

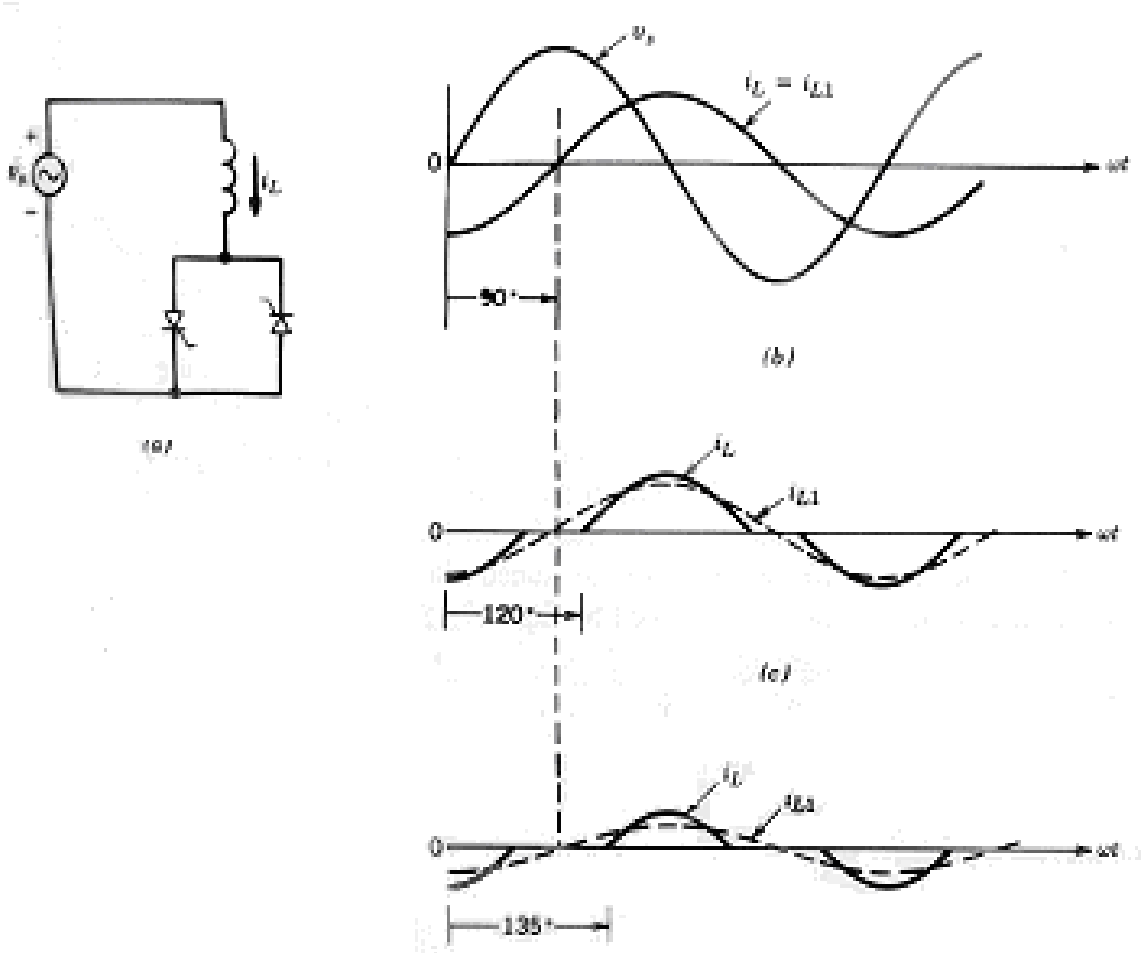


الشكل (٣- ٨) متحكم جهد المتردد المستخدم كمعوض للقدرة غير الفعالة.

٣- ٥- ١ ملفات محكومة بالثيرستور Thyristor-controlled inductors (TCIs)

يبين شكل(٢- ٩) دائرة ملف محكوم بالثيرستور أحادية الوجه حيث تتكون هذه الدائرة من ملف حثي متصل على التوالي مع عدد ٢ ثيرستورين متصلين عكسيا وعلى التوازي وذلك على بفرض أن

المقاومة الداخلية الخاصة بالملف مقاومة صفرية ويمثل شكل(٣- ٩) موجة كل من المصدر الكهربائي v_s والتيار المار بالملف i_L عند زوايا إشعال مختلفة (α=90° ,α=120° ,α=135°) ونلاحظ بأن المدى الذي يمكن فيه إشعال الثيرستور يقع ما بين 90° حتى 180° أى أن $90° \le \alpha \le 180°$.



الشكل (٣- ٩) دائرة ملف محكوم بالثيرستور أحادية الوجة وموجاتها.

وبلمحة سريعة للشكل (٣- ٩) يمكن أن نستنتج أن قيمة المركبة الأساسية للتيار المار بالملف تتغير بتغير قيمة زاوية الإشعال وأيضا قيمة القدرة غير الفعالة للدائرة تتغير بتغير قيمة زاوية الإشعال ولكن للدائرة السابقة عيبان رئيسان وهما:

أ- نتيجة لاستخدام دائرة تتكون من ملف له قيمة مكافئة متغيرة بتغير قيمة زاوية الإشعال فيكون دائما معامل القدرة الكهربائية لهذه الدائرة متأخر Lagging PF وكما نعلم بأنه غالبا ما تكون الأحمال الكهربائية المتصلة بالشبكة الكهربائية لها أيضا معامل قدرة متأخر وبالتالي سوف يؤدى ذلك

إلى تقليل معامل القدرة الكهربائية وليس إلى تحسينه وبالتالي غالبا ما تتصل دوائر الملفات المحكومة بالثيرستور مع عدد من المكثفات تتصل أيضا على التوازي مع طرفي الحمل الكهربائي وبالتالي تزداد قيمة التكلفة المادية.

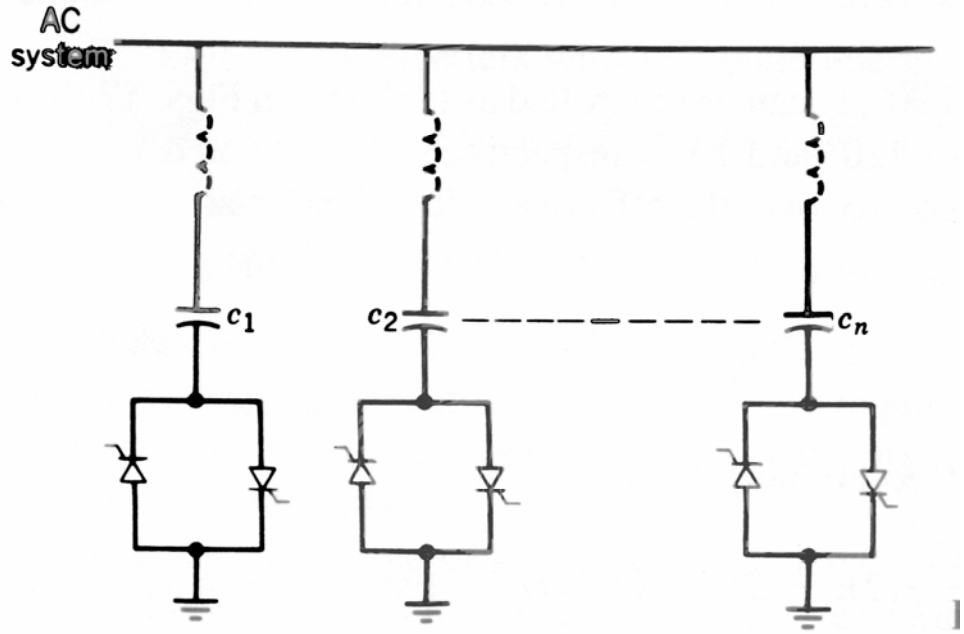
ب- دائما ما يكون شكل موجة التيار المار بالملف غير متصلة وذلك عند زاوية إشعال تقع في المدى $90° < \alpha \leq 180$ وبالتالي عند عمل التحليل الرياضي لهذه الموجة باستخدام سلسلة فوريير نجد بأن هذه الموجة تتكون من عدد من التوافقيات الفردية بجانب المركبة الأساسية وبالتالي يمكن أن يؤدى ذلك إلى زيادة أو تقليل التوافقيات المصاحبة لموجة الحمل الكهربائي اللاخطى.

٣- ٥- ٢ المكثفات ذات المفاتيح بالثيرستور Thyristor-Switched Capacitors (TSCs)

عادة ما يتم استخدام مجموعة من المكثفات للتحكم في قيمة القدرة الكهربائية غير الفعالة وبالتالي يمكن أن نصل إلى قيمة قدرة غيرفعالة لها قيمة صفرية وذلك بالتحكم في القيمة الكلية لقيمة المكثفات وللحصول على القيمة المطلوبة.

ويبين شكل (٣- ١٠) الدائرة الكهربائية للمكثفات ذات المفاتيح بالثيرستور أحادية الوجة ونلاحظ من الشكل بأن كل مكثف يتصل على التوالي مع ثيرستورين متصلين على التوازي ومتصلين اتصالا عكسيا وبالتحكم في قيمة زاوية إشعال الثيرستور وعدد المكثفات يمكننا الحصول على القيمة المطلوبة لتحسين قيمة معامل القدرة وجعله يصل إلى قيمة الوحدة وغالبا ما يتم إشعال الثيرستور عند قيمة قريبة من اللحظات التي يصل فيها قيمة الجهد الكهربائي للمصدر لقيمة عظمى وذلك للحد من الزيادة الهائلة للتيار المار بالمكثفات ولتلافي هذه الظاهرة يمكن وضع ملفات حثية متصلة على التوالي مع المكثفات كما هو مبين بشكل (٣- ١٠) وتتميز هذه الدائرة بأن معامل القدرة الكهربائية لها غالبا ما يكون متقدما Leading PF مما يؤدى إلى تحسين معامل القدرة الكهربائية للأحمال الكهربائية المستخدمة ولكن يعيب هذه الطريقة استخدام عدد كبير من المكثفات والثيرستورات مما يؤدى إلى صعوبة التحكم وزيادة التكلفة أيضا.

يمكن إزالة أي عدد من المكثفات عن الدائرة وذلك عن طريق فصل النبضة الإلكترونية لبوابة الثيرستور المطلوب فصله عن الدائرة وأيضا يمكن استخدام جميع المكثفات بالدائرة عن طريق توصيل النبضات الإلكترونية لبوابات جميع الثيرستورات الموجودة بالدائرة.



الشكل (٣- ١٠) الدائرة الكهربائية للمكثفات ذات المفاتيح بالثيرستور أحادية الوجه.

٣- ٦ أسئلة وتمارين:

٣- ١ اشرح فكرة عمل حاكم الجهد المتردد؟

٣- ٢ ما هي طرق التحكم في القيمة الفعالة للجهد لحاكم الجهد المتردد

٣- ٣ اشرح كيفية التحكم في القيمة الفعالة باستخدام فترات التشغيل والإيقاف

٣- ٤ ارسم دائرة حاكم الجهد المتردد ذو الكاثود المشترك ووضح أهم مميزاتها

٣- ٥ ارسم أشكال موجات الجهد والتيار لحاكم جهد متردد يغذي حمل مادي وحثي علماً بأن زاوية الطور للحمل أقل من زاوية الإشعال

٣- ٦ يستخدم حاكم جهد متردد لتغذية حمل مادي مقاومته 20 أوم وكانت القيمة الفعالة لجهد المصدر 220 فولت عند تردد 60 هرتز يتم تشغيل الثيرستورات لعدد n وفصلها لعدد m دورة احسب الآتي وذلك للحصول على تيار مقداره 6 أمبير:

- القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل
- النسب m و n
- القدرة المستهلكة في المقاومة
- معامل القدرة
- أقصى تيار يمر في الثيرستور

إلكترونيات القوى

عواكس القدرة

الجدارة: الإلمام الشامل بدوائر عواكس الجهد.

الأهداف: عندما يكمل المتدرب هذه الوحدة يكون قد تمكن من تحقيق الأهداف والمهارات التالية:

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

الوقت المتوقع للتدريب: ٩ ساعات

الوسائل المساعدة:

- السبورة
- عرض باستخدام برنامج Power Point

متطلبات الجدارة: دراسة الحقيبة التدريبية لمقرر دوائر كهربائية- ٢.

٤- ١ مقدمة :

قد تم دراسة بعض دوائر الموحدات المحكومة أحادية الطور في الوحدة الثانية و وظيفة هذه الموحدات هي تحويل الجهد الجيبي المتردد ذي القيمة الفعالة الثابتة إلى جهد مستمر متغير القيمة ويتم التحكم في قيمته عن طريق التحكم في زاوية إشعال الثيرستور.. وسوف يتم دراسة العواكس 'Inverters' في هذه الوحدة ووظيفة هذا العاكس هو الحصول على جهد متناوب من جهد ثابت مستمر ويمكن التحكم في جهد وتردد خرج العاكس عن طريق التحكم في فصل وتوصيل المفاتيح الإلكترونية الخاصة بهذه العواكس وعادة ما تكون هذه المفاتيح عبارة عن عناصر أشباة الموصلات المحكومة مثل الثيرستور والموسفت و IGBT ... .وهكذا و تعتبر العواكس دوائر إستاتيكية حيث لا تحتوي دوائرها على أي أجزاء متحركة وتحول هذه العواكس قدرة المصدر المستمر إلى قدرة مصدر متناوب بالجهد والتردد المطلوب. وعادة ما تكون موجة خرج العاكس على شكل موجة غير جيبية لزمن دوري معين و يوجد أنواع عديدة من العواكس حيث يتم تقسيم العواكس تبعا إلى:

- عدد أوجه العاكس.
- نوعية أشباه الموصلات المستخدمة لتصميم العاكس.
- كيفية توصيل وفصل أشباه الموصلات المستخدمة.
- شكل موجات الخرج الخاصة بالعواكس.

وسوف تتم مناقشة ودراسة النوعين الرئيسين وهما :

١. العاكس ذو مصدر الجهد الثابت 'Voltage Source Inverter (VSI)' ويتصف هذا المصدر بأن له جهد دخل ثابت مستمر.
٢. 'Current Source Inverter (CSI)' ويتصف هذا المصدر بأن له تيار دخل ثابت مستمر.

وعاده ما تكون العواكس أحادية أو ثلاثية الأوجه وسوف نكتفي بدراستنا في هذا الباب بالعواكس أحادية الوجه.

٤- ٢ 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).

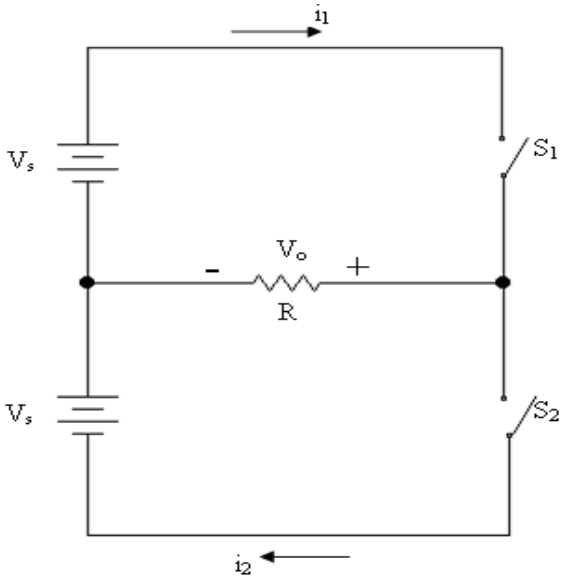
- مصادر التغذية الخاصة بالطائرات (aircraft power supplies).
- مصادر عدم انقطاع التيار (uninterruptible power supplies UPS).
- نقل القدرة المستمرة ذات الجهد الفائق (high-voltage DC transmission).
- مصادر التغذية الاحتياطية (standby power supplies).

وعادة ما يكون مصدر جهد الدخل للعاكس عبارة عن بطاريات (batteries) لها جهد ثابت مستمر أو عبارة عن خلايا شمسية (solar cells) . يكون خرج العواكس للأنواع التجارية لها جهود إما ٢٢٠ فولت بتردد ٥٠ أو٦٠ هرتز أو ٢٢٠ فولت بتردد ٤٠٠ هرتز بينما للعواكس ثلاثية الطور ذات القدرة العالية تكون أنواع العواكس الفعلية إما ٣٨٠/٢٢٠ فولت بتردد ٥٠ هرتز أو ٢٠٨/١٢٠ فولت بتردد ٦٠ هرتز أو ٢٠٠/١١٥ فولت بتردد ٤٠٠ هرتز.

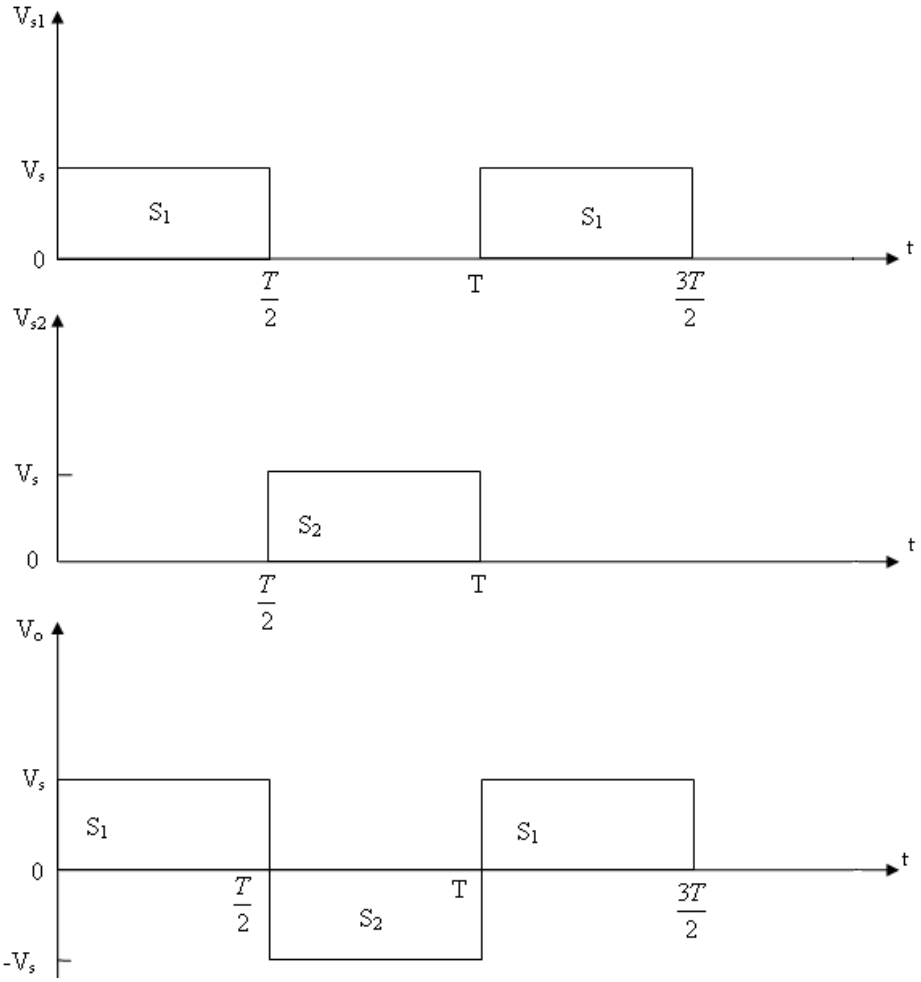
٤- ٣ أساسيات العاكس The Basics of Inverter

يبين الشكل (٤- ١) الدائرة الرئيسة لعاكس نصف قنطري أحادي الطور ويكون الهدف الرئيس 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 توصيلهما وفصلهما عن طريق نبضات بوابات هذه المفاتيح الآتية من دائرة الإشعال الخاصة بهما. وعادة يتم تصميم النبضات بحيث يتم توصيل المفتاح S_1 بينما يكون المفتاح S_2 مفصول والعكس صحيح و لتحقيق هذا لابد أن تكون النبضات الخاصة بالمفتاحين S_1 ، S_2 لها الموجات المبينة بالشكل (٤- ٢) و عندما يكون جهد النبضة الخاصة بالمفتاح S_1 لها قيمة عالية تكون قيمة جهد النبضة الخاصة بالمفتاح S2 لها قيمة منخفضة (تقريبا صفرية) في نفس الفترة الزمنية و العكس صحيح و بالتالي 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 موصلا يكون المفتاح S_2 مفصولاً و بالتالي تكون قيمة الجهد الناشئ على طرفي الحمل له قيمة جهد المصدر الثابت المستمر بينما عندما يتم توصيل المفتاح S_2 و فصل المفتاح S_1 تكون قيمة الجهد الناشئ على طرفي الحمل له قيمة جهد المصدر الثابت المستمر و بإشارة سالبة في هذه الحالة. و بالتالي 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 إن:

$$f_o = \frac{1}{T} \qquad \text{Hz} \qquad (٤- ١)$$



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



الشكل (٤- ٢) موجتا نبضات المفتاحين S1 ,S2 و جهد خرج العاكس نصف القنطري أحادي الطور

ويمكن التحكم في قيمة تردد جهد الخرج عن طريق التحكم في زمن توصيل وفصل المفاتيح الإلكترونية S_1، S_2 . وعادة ما تكون موجة خرج الجهد المستطيلة للعاكس مناسبة لبعض التطبيقات بينما تكون موجة جهد خرج جيبي هي الموجة المثالية المطلوبة للكثير من التطبيقات.

ولجعل موجة خرج العاكس موجة جيبية 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 يتحمل قدرة خرج العاكس ولذلك يكون حجم هذا المرشح ضخماً تبعا لحجم قدرة العاكس وبالتالي تكون تكلفة ووزن هذا المرشح كبيرة إلى حد ما وأيضا كفاءة العاكس سوف تقل نتيجة للفاقد الموجود بالمرشح. والطريقة الثانية يمكن أن تتحقق باستخدام طريقة تعديل عرض النبضة 'PWM'. هذه الطريقة تعتمد على فتح وفصل المفاتيح الإلكترونية وتعتمد على شكل النبضات الواصلة من دوائر التحكم في هذه المفاتيح الإلكترونية وباستخدام هذه الطريقة يمكن تعديل شكل خرج العاكس ليكون أقرب إلى موجة جيبية.

٤- ٤ العاكس ذو مصدر الجهد الثابت Voltage Source Inverter (VSI)

يعتبر العاكس ذو مصدر الجهد الثابت هو أكثر الأنواع السائدة والمستخدمة 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 إن شحن و تفريغ المكثف يحافظ على استقرار قيمة مصدر التغذية. و يحول العاكس جهد التغذية المستمر إلى موجة خرج مربعة متناوبة.

٤- ٤- ١ العاكس ذو مصدر الجهد الثابت نصف القنطري أحادى الطور

Single-Phase Half-Bridge Inverter (VSI)

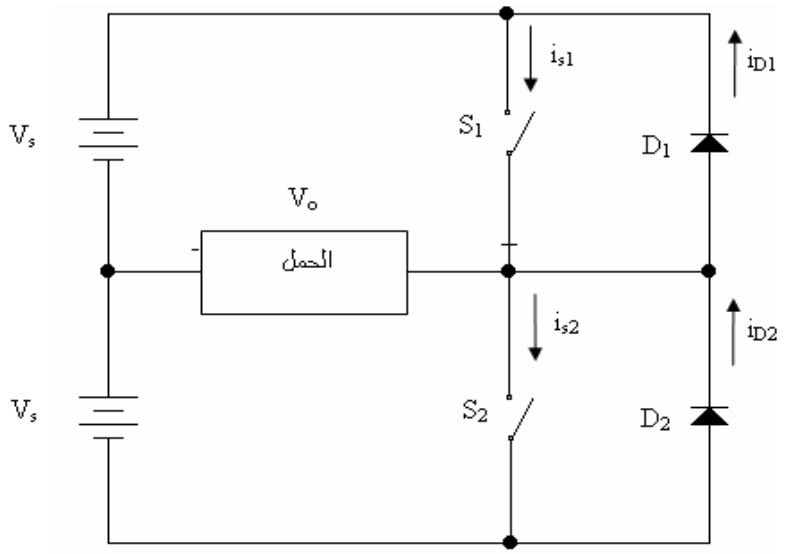
يتم استخدام دائرة العاكس ذو مصدر الجهد الثابت نصف القنطري في تطبيقات القدرة المتخصصة ويبين الشكل (٤- ٣) دائرة مصدر الجهد العاكس نصف القنطري أحادي الطور وتتكون هذه الدائرة من مفتاحين إلكترونيين S_1, S_2 و مصدرين تغذية جهد مستمر لهما نفس قيمة الجهد **'Vs'** وعدد ٢ دايود يقوما بوظيفة الدايود الحدافة و ذلك في حالة وجود حمل حثي. و يمكن أن تكون المفاتيح

الإلكترونية المستخدمة عبارة عن ترنزستورات القدرة أو الموسفت أو ثيرستورات بدوائر الإطفاء الخاصة بهم ... وهكذا.

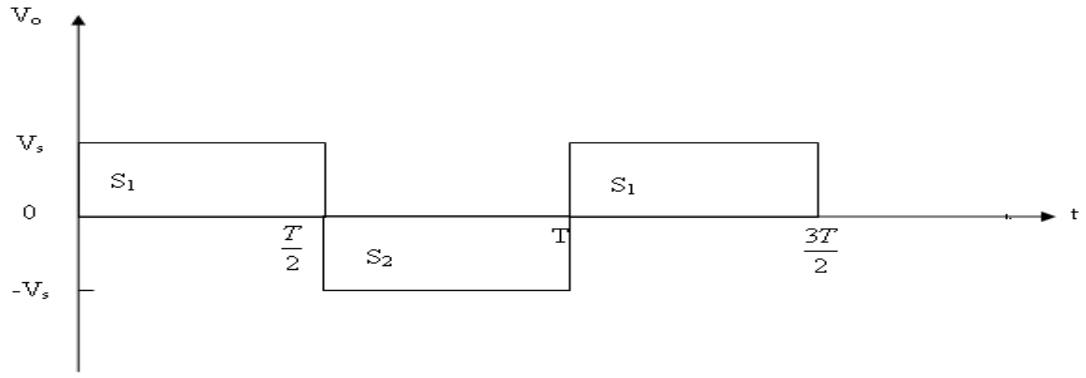
٤- ٤- ١- ١ حالة الحمل المادي Case of a Resistive Load R

يتم توصيل وفصل المفاتيح الإلكترونية S_1, S_2 للدائرة المبينة بالشكل (٤- ٣) في حالة وجود حمل مادي **R** بحيث عندما يتم توصيل المفتاح S_1 يكون المفتاح S_2 مفصول و ذلك خلال الفترة الزمنية $0 \le t \le T/2$ وتكون قيمة جهد خرج الحمل المادي لها قيمة ثابتة قيمتها $'V_s'$ حيث يمر التيار خلال الدائرة الموصلة والمكونة من مصدر الجهد المستمر الثابت و الحمل المادي و المفتاح S_1 و تكون قيمة تيار الخرج هي نفسها تيار الحمل وقيمته i_1 وعند توصيل المفتاح S_2 يكون المفتاح S_1 مفصولاً خلال الفترة الزمنية $T/2 \le t \le T$ حيث يتم فصل المفتاح 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 الموصلة والمكونة من مصدر الجهد الثابت المستمر و الحمل المادي و المفتاح 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 توصيل لكل من المفتاحين الإلكترونيين عند أي لحظة لكي لا يحدث قصر على أطراف مصدري الجهد الثابت **'Vs'**.



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



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

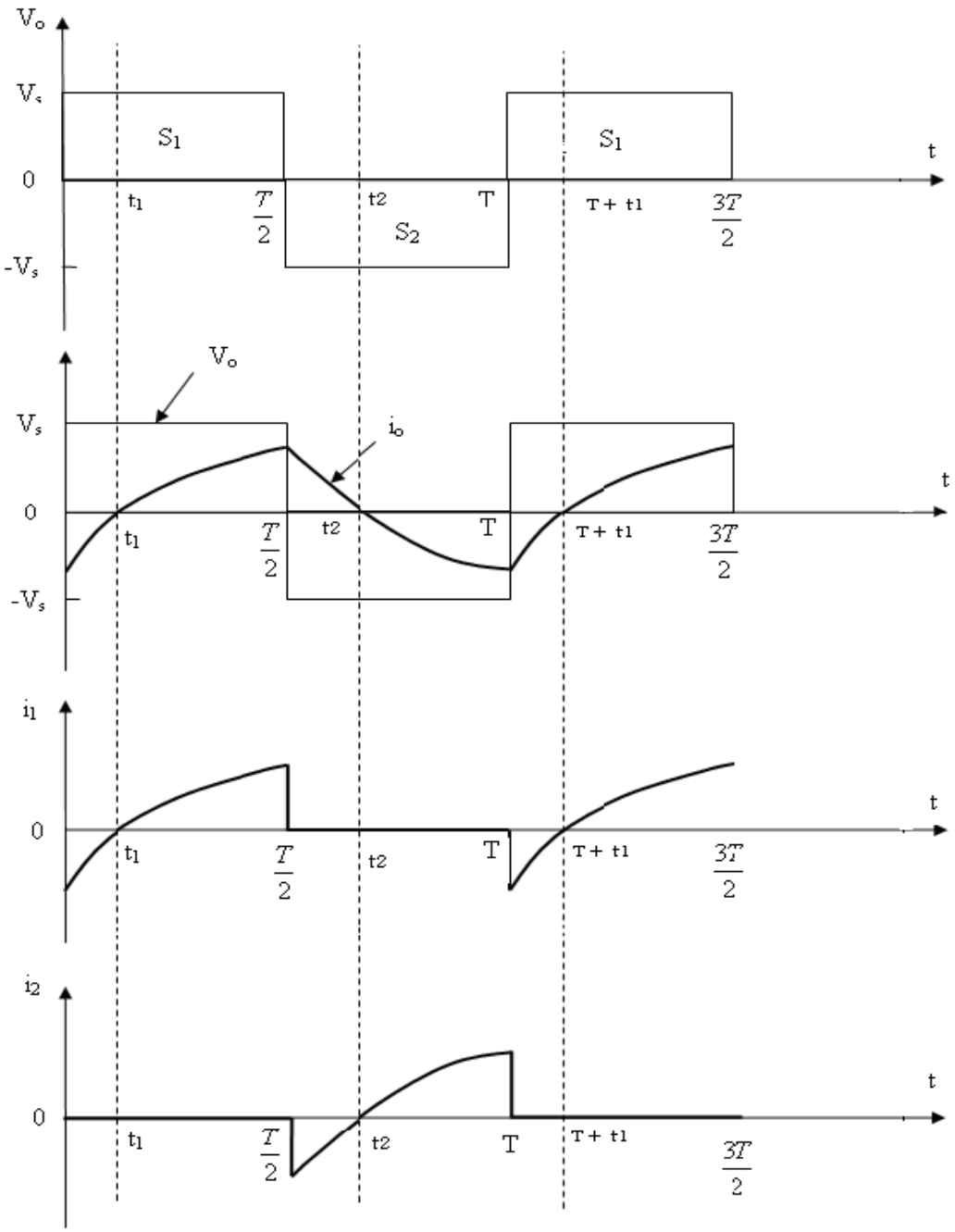
٤- ٤- ١- ٢ حالة الحمل الحثي Case of an Inductive load

كما سبق دراسته في الفصول السابقة فإنه في حالة وجود أحمال حثية فإن تيار الخرج $\mathbf{i_o}$ لا يمكن أن يعكس اتجاهه عند نفس اللحظة التي يغير فيها جهد الخرج $\mathbf{V_o}$ قطبيته وفى تلك الحالة لابد من استخدام الدايود الحدافة و الذي يسمح بمرور تيار الحمل خلاله بنفس الاتجاه المار لتيار الخرج. و يبين الشكل (٤- ٤) موجات كل من جهد الخرج و تيار الخرج بالإضافة إلى كل من تياري المصدرين. ويمكن إيجاز عمل هذه الحالة في حالة الحمل الحثي كالآتي:

خلال الفترة الزمنية $\mathbf{0 \le t \le T/2}$ يكون جهد الخرج V_o موجب و بالتالي يكون كل من المفتاح الإلكتروني $\mathbf{S_1}$ أو الدايود الحدافة D_1 في حالة توصيل. يكون تيار الخرج $\mathbf{i_o}$ له قيمة سالبة نتيجة وجود الحمل الحثي و الذي يؤدي لتأخير تيار الحمل. وخلال الفترة الزمنية $\mathbf{0 \le t \le t_1}$ يمر التيار خلال الدائرة الموصلة و المكونة من الدايود الحدافة D_1 والحمل الحثي و مصدر الجهد المستمر العلوي $\mathbf{V_S}$. بينما خلال الفترة الزمنية $\mathbf{t_1 \le t \le T/2}$ يكون تيار الخرج موجباً و بالتالي يمر التيار خلال الدائرة الموصلة و المكونة من المفتاح الإلكتروني $\mathbf{S_1}$ و مصدر الجهد الثابت المستمر العلوي و الحمل الحثي.

كما سبق تفسيره و عند اللحظة الزمنية $\mathbf{t = T/2}$ سوف يتم فصل المفتاح $\mathbf{S_1}$ و بالتالي سوف يتحول تيار الخرج من الدائرة الموصلة و المكونة من الحمل و المفتاح $\mathbf{S_1}$ و المصدر الثابت المستمر العلوي $\mathbf{V_S}$ إلى الدائرة المكونة من الحمل و المصدر الثابت المستمر الموجود بأسفل و الدايود الحدافة D_2 خلال الفنرة $\mathbf{T/2 \le t \le t_2}$. وعند اللحظة الزمنية $\mathbf{t=t_2}$ يتم فصل التيار عن الدايود الحدافة D_2 حيث التيار سوف يتحول إلى قيمة سالبة بعد هذه اللحظة و بالتالي سوف يوصل المفتاح $\mathbf{S_2}$ خلال الفترة الزمنية $\mathbf{t_2 \le t \le T}$ و يمر التيار خلال الدائرة الموصلة والمكونة من المصدر الثابت المستمر السفلي والحمل الحثي والمفتاح $\mathbf{S_2}$. سوف يتكرر عمل الدائرة كل فترة زمنها الدوري T. يبين الشكل (٤- ٥) أن تيار الخرج i_o يكون متأخر عن جهد الخرج حيث إن الحمل حثي. وأيضا يتم توصيل الدايودات

الحدافة عندما يكون جهد وتيار الخرج لهما قطبية عكسية كما هو مبين بالشكل (٤- ٥) ويظهر الشكل تياري مصادر التغذية الثابتة $\mathbf{i_1}$, $\mathbf{i_2}$. ويمكن 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 $\mathbf{0 \le t \le T/2}$ بينما يتم تغذية هذا الحمل من الجزء السفلي لمصدر التغذية المستمر خلال الفترة الزمنية السالبة لجهد الخرج $\mathbf{T/2 \le t \le T}$.



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

القيمة الفعالة لجهد خرج دائرة العاكس نصف القنطري أحادي الطور:

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

$$V_o = V_s \qquad (٤-٢)$$

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

يمكن تمثيل القيمة اللحظية لجهد خرج دائرة العاكس والمبينة بالشكل (٤- ٣) باستخدام متسلسلة فوريه رياضيا كالآتي:

$$V_{O\,1(rms)} = \sum_{n=1,3,5,\ldots}^{\infty} \frac{4\,V_S}{n\,\pi} \sin\ n\,\omega\,t \qquad (٤-٣)$$

حيث إن n هي رتبة التوافقيات و ω هي قيمة التردد الزاوي لجهد الخرج ووحدتها rad/s و يمكن تعيين القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى لجهد خرج العاكس و التي لها n = 1 كالآتي:

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

مثال ٤- ١:

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

(أ) القيمة الفعالة لجهد الخرج '$V_{o(rms)}$'.

(ب) القيمة الفعالة لتيار الخرج '$I_{o(rms)}$' .

(ج) القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى '$V_{1(rms)}$'.

(د) قدرة الخرج 'P_o'.

الحل:

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

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

(ب) يمكن إيجاد القيمة الفعالة لتيار العاكس كالآتي:

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

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

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

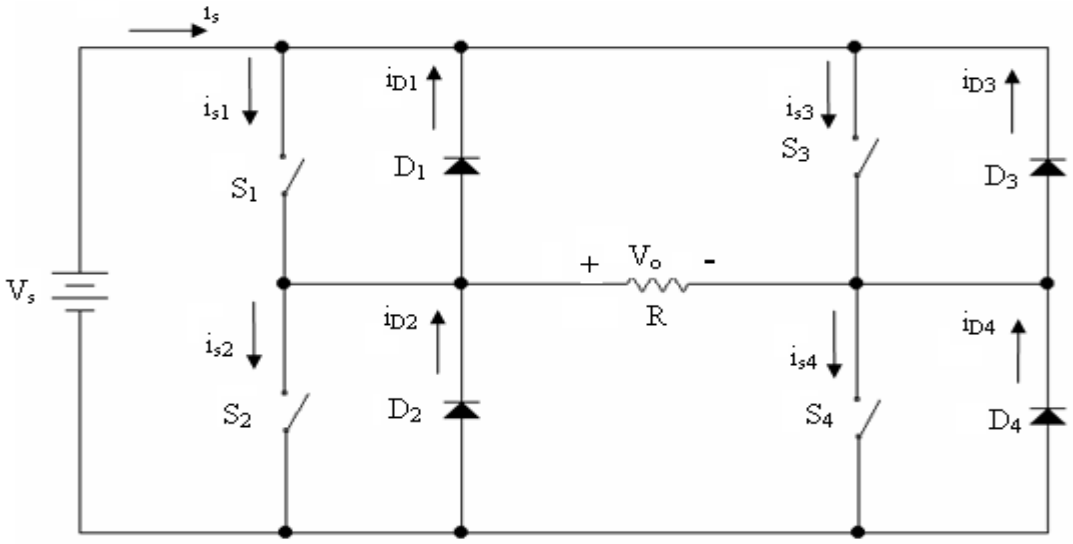
(د) يمكن حساب قدرة الخرج كالآتي:

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

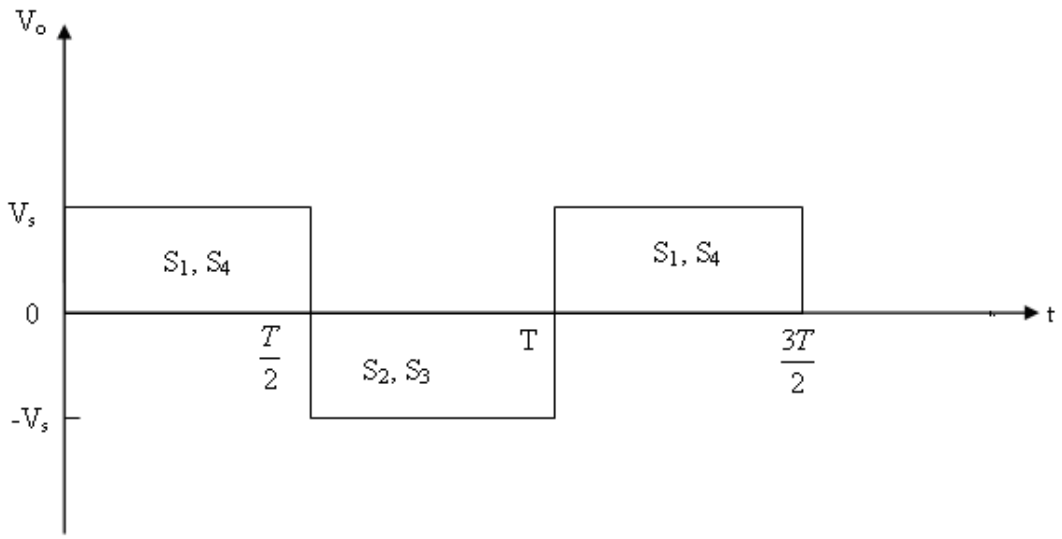
٤- ٤- ٢ مصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور Single Phase Voltage Source Bridge Inverter

٤- ٤- ٢- ١ حالة الحمل المادي R

يمكن تكوين أو بناء دائرة مصدر الجهد العاكس القنطري أحادية الطور بدمج دائرتي مصدر جهد عاكس نصف قنطري أحادي الطور ويبين 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 قيمة جهد خرج دائرة العاكس القنطري ضعف قيمة جهد خرج دائرة العاكس نصف القنطري أحادي الطور. يتم توصيل وفصل المفاتيح الإلكترونية لهذه الدائرة بطريقة قطرية أي بمعنى عندما يتم توصيل كل من المفتاحين S_1, S_4 يكون كل من المفتاحين S_2, S_3 مفصولين بينما عند توصيل المفتاحين S_2, S_3 يتم فصل المفتاحين S_1, S_4 وهكذا. وبالتالي سوف يوصل كل من المفتاحين S_1, S_4 أو المفتاحين S_2, S_3 فترة زمنية قيمتها نصف قيمة الزمن الدوري **'T/2'**. .ويمكن إيجاز فكرة عمل الدائرة كالتالي: يتم توصيل المفتاحين S_1, S_4 خلال الفترة الزمنية $0 \le t \le T/2$ وذلك بإعطاء نبضات كافية لقدحهما من دائرة الإشعال الخاصة بهما وخلال هذه الفترة الزمنية يظل كل من المفتاحين S_2,S_3 مفصولان وبالتالي سوف يمر التيار خلال الدائرة الموصلة والمكونة من مصدر الجهد الثابت المستمر والحمل المادي والمفتاحان S_1, S_4 وبالتالي تكون قيمة جهد الخرج **'V_o'** هي نفسها قيمة جهد المصدر الثابت المستمر **'V_s'** . ويتم أيضا فصل المفتاحين S_1, S_4 وتوصيل المفتاحين S_2, S_3 خلال الفترة الزمنية $T/2 \le t \le T$. وخلال هذه الفترة الزمنية يمر التيار خلال الدائرة الموصلة و المكونة من مصدر الجهد الثابت المستمر و الحمل المادي و المفتاحين S_2, S_3 و يكون مرور التيار في اتجاه عكسي لمروره في الفترة الزمنية السابقة. وتكون 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 فتح وتوصيل 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 و المتصل بمقاومة



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

القيمة الفعالة لجهد خرج 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 معادلتي 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 أحادى الطور والمبينة بالشكل (٤- ٦) بحمل مادي 'R' قيمته 2.4 Ω ومصدر جهد ثابت مستمر 'V_s' قيمته 48 V. أوجد:

(أ) القيمة الفعالة لجهد الخرج '$V_{o(rms)}$'.

(ب) القيمة الفعالة لتيار الخرج '$I_{o(rms)}$' .

(ج) القيمة الفعالة لمركبة التوافقيات الأولى '$V_{1(rms)}$'.

(د) 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 القنطري باستخدام المعادلة (٤- ٢) كالآتي:

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

(ب) يمكن ايجاد القيمة الفعالة لتيار العاكس كالآتي:

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

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

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

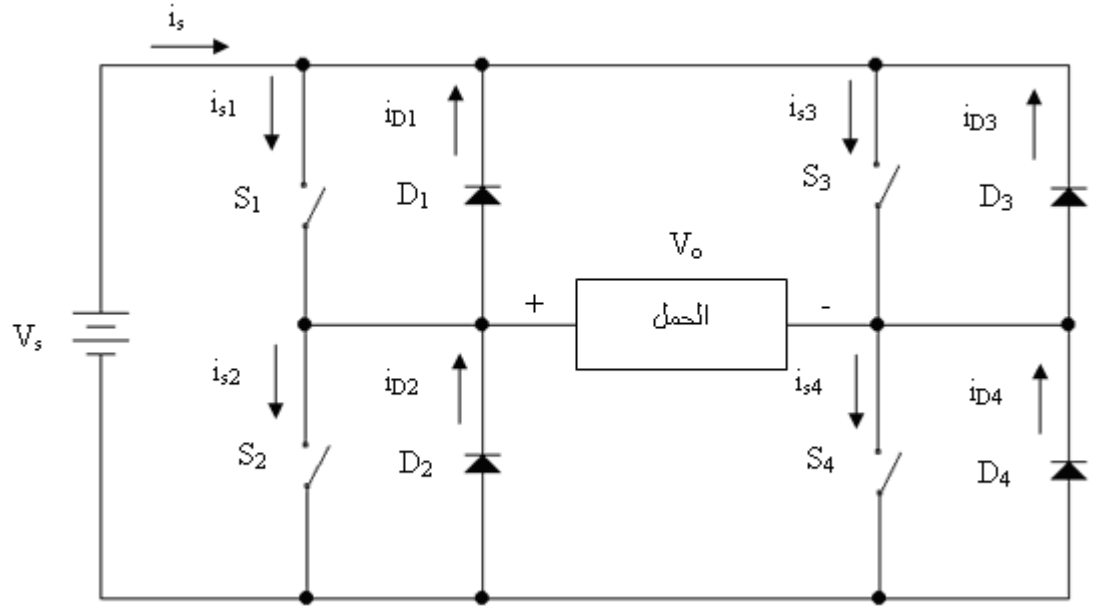
(د) يمكن حساب قدرة الخرج كالآتي

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

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

٤- ٤- ٢- ٢ حالة الحمل الحثي 'R-L'

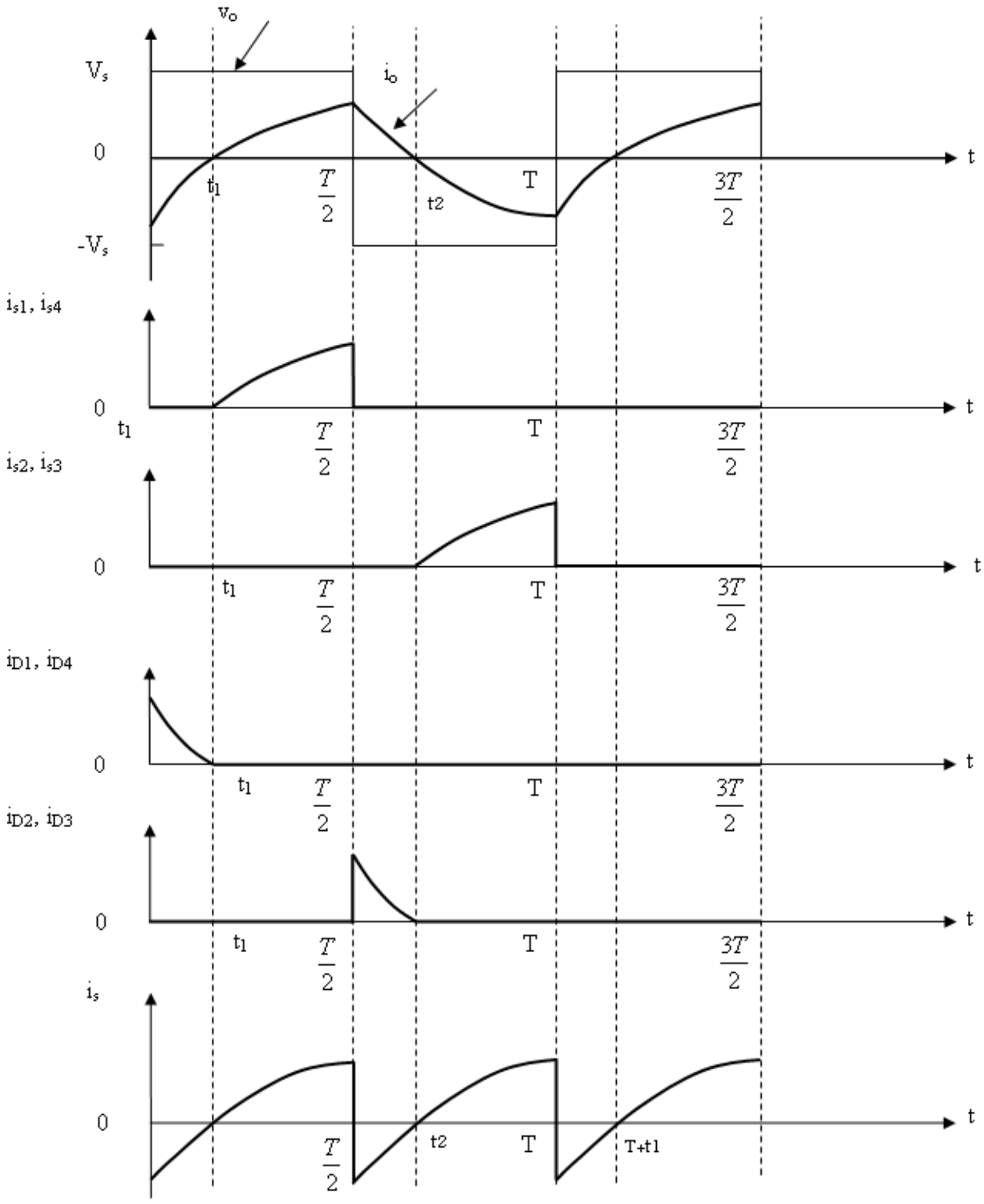
يبين الشكل (٤- ٨) دائرة مصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور والمتصل بحمل حثي 'R-L' ونلاحظ أن الدائرة المستخدمة هي نفس الدائرة المستخدمة بالشكل (٤- ٦) إلا أنه تم استبدال الحمل المادي 'R' بحمل حثي 'R-L' . ويبين الشكل (٤- ٩) موجات كل من جهد الخرج **v_o'** وتيار الخرج **i_o** وتيارات المفاتيح الإلكترونية S_1, S_2, S_3, S_4 و تيارات الدايودات الحدافة 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) متأخرا عن جهد الخرج 'v_o' بسبب وجود الحمل الحثي. وبالتالي لا يمكن حدوث قدح للمفتاحين S_1, S_4 خلال الفترة الزمنية $\mathbf{0 \le t \le t_1}$ حيث إن $\mathbf{t_1}$ هي اللحظة الزمنية التي يكون عندها قيمة تيار الخرج صفراً وهذا بالرغم من إعطاء نبضة كافية لإشعالهما. ويعود السبب بأنه خلال هذه الفترة الزمنية سوف يكون كل من هذين المفتاحين في حالة انحياز خلفي وسوف يمر فيهما التيار ابتداء من اللحظة الزمنية $t = t_1$ حتى اللحظة الزمنية $t = T/2$.

خلال الفترة الزمنية $\mathbf{0 \le t \le t_1}$ يمر التيار خلال الدائرة الموصلة والمكونة من الحمل الحثي و الدايودين الحدافين D_1, D_4 ومصدر الجهد الثابت المستمر $'V_s'$. ويمر التيار في الدائرة الموصلة والمكونة من الحمل الحثي و المفتاحين S_1, S_4 ومصدر الجهد الثابت المستمر خلال الفترة الزمنية $\mathbf{t_1 \le t \le T/2}$ حيث سيكون هذان المفتاحين في حالة انحياز أمامي وتكون قيمة جهد الخرج $'V_o'$ هي نفسها قيمة مصدر الجهد الثابت المستمر $'V_s'$ خلال الفترة الزمنية $\mathbf{0 \le t \le T/2}$. 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 الموصلة والمكونة من الحمل الحثي والمفتاحين S_1, S_4 ومصدر الجهد الثابت المستمر إلى الدائرة الموصلة والمكونة من الحمل الحثي و الدايودين الحدافين D_2, D_3 ومصدر الجهد الثابت المستمر $'V_s'$ خلال الفترة الزمنية $\mathbf{T/2 \le t \le t_2}$. 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 إلى وجود طاقة مغناطيسية مختزنة بالملف الحثي وتصبح قيمة تيار الخرج $'i_o'$ عند اللحظة الزمنية $t = t_2$ قيمة صفرية. ونلاحظ أن كلا من المفتاحين S_2, S_3 يكون في حالة انحياز خلفي خلال الفترة الزمنية $\mathbf{T/2 \le t \le t_2}$ بالرغم من وجود نبضات كافية لقدح هذين المفتاحين. وبالتالي سوف يعكس تيار الخرج $'i_o'$ اتجاهه في الفترة الزمنية $\mathbf{t_2 \le t \le T}$ و سوف يوصل كل من المفتاحين S_2, S_3 لوجود النبضة الكافية لقدح كل منهما و يمر التيار في الدائرة الموصلة و المكونة من الحمل الحثي و المفتاحين S_2, S_3 و مصدر الجهد الثابت المستمر $'V_s'$ خلال هذه الفترة الزمنية. ويكون 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 $t=T, t=0$ بينما يكون تيار الخرج قيمته $'I_{max}'$ عند اللحظة الزمنية $t=T/2, t=3\cdot T/2$ حيث إن التيار I_{min} هي أقل قيمة يصل إليها تيار الخرج و فى 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 الدايودات الحدافة والمفاتيح الإلكترونية والمصدر الثابت المستمر.

القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس القنطري:

حيث إن 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:

$$i_O = \begin{cases} \frac{V_S}{R} + (I_{\min} - \frac{V_S}{R}) e^{-t/\tau} & 0 \le t \le \frac{T}{2} \\ -\frac{V_S}{R} + (I_{\max} + \frac{V_S}{R}) e^{-(t-\frac{T}{2})/\tau} & \frac{T}{2} \le t \le T \end{cases} \qquad (٤-٤)$$

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:

$$I_{\min} = -I_{\max} \qquad (٤-٥)$$

يمكن تعيين القيمة العظمى و الصغرى لتيار الخرج بالمعادلة التالية:

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

مثال ٤- ٣:

تتصل دائرة عاكس قنطري أحادى الطور و المبينة بالشكل (٤- ٨) بحمل حثي 'R-L' قيمته المادية $R = 10\ \Omega$ و قيمة ملفه الحثي $L = 25$ mH و مصدر جهد ثابت مستمر 'V_s' قيمته 100 V. إذا علمت بأن تردد فصل وتوصيل 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 العظمي لتيار الخرج باستخدام المعادلة (٤- ٥) كالآتي:

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

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

$$i_o(t) = \frac{100}{10} + \left(-9.31 - \frac{100}{10}\right)e^{-t/0.0025} = 10 - 19.31e^{-t/0.0025} \qquad 0 \le t \le \frac{1}{120}$$

$$i_o(t) = -\frac{100}{10} + \left(9.31 + \frac{100}{10}\right)e^{-(t-\frac{0.0167}{2})/0.0025} = -10 + 19.31e^{-(t-0.00835)/0.0025} \qquad \frac{1}{120} \le t \le \frac{1}{60}$$

٤- ٥ طرق التحكم في جهد خرج العاكس Inverter Voltage Control Techniques

يتطلب التحكم في جهد خرج العاكس المتردد في معظم التطبيقات الصناعية و يمكن تقسيم الأنواع المختلفة للتحكم في جهد العاكس إلى نوعين رئيسين وهما:

١. التحكم في قيمة جهد تغذية المستمر العاكس.
٢. التحكم في جهد خرج العاكس المتردد.

حيث يتم التحكم في النوعان عن طريقة فصل وتوصيل المفاتيح الإلكترونية للعاكس.

وتعتبر الطريقة الأولى هي أبسط أنواع التحكم في جهد خرج العاكس حيث إن جهد خرج العاكس يتناسب طرديًا مع قيمة جهد الدخل المستمر للعاكس حيث يمكن التحكم في قيمة جهد دخل العاكس عن طريق استخدام مقطع تيار مستمر عند دخل العاكس بدلا من البطاريات الثابتة الموجودة عند دخله وبالتحكم في أزمنة توصيل و فصل هذه المفاتيح الإلكترونية لمقطع التيار المستمر يمكن التحكم في قيمة دخل العاكس و يمكن أيضا التحكم في قيمة جهد دخل العاكس عن طريق الموحدات المحكومة التي درسناها بالوحدة الثانية.

تعتبر الطريقة الثانية هي أكثر الطرق الشائعة والمستخدمة 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 موجة خرج أقرب إلى الموجة الجيبيه و يمكن إيجاز الأسلوب المتبع لطريقة تعديل عرض النبضة في الفقرة التالية.

٤- ٥- ١ 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.

٤- ٥- ١- ١ 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 الرئيس (المركبة الأولى) لجهد خرج العاكس و بتغيير قيمة A_r من صفر إلى A_c يتم الحصول على نبضة عرضها δ يمكن التحكم في عرضها من صفر حتى 180^o. وتعرف نسبة A_r بالنسبة إلى A_c بمعامل التعديل 'Modulation Index' وقيمة هذا المعامل هي:

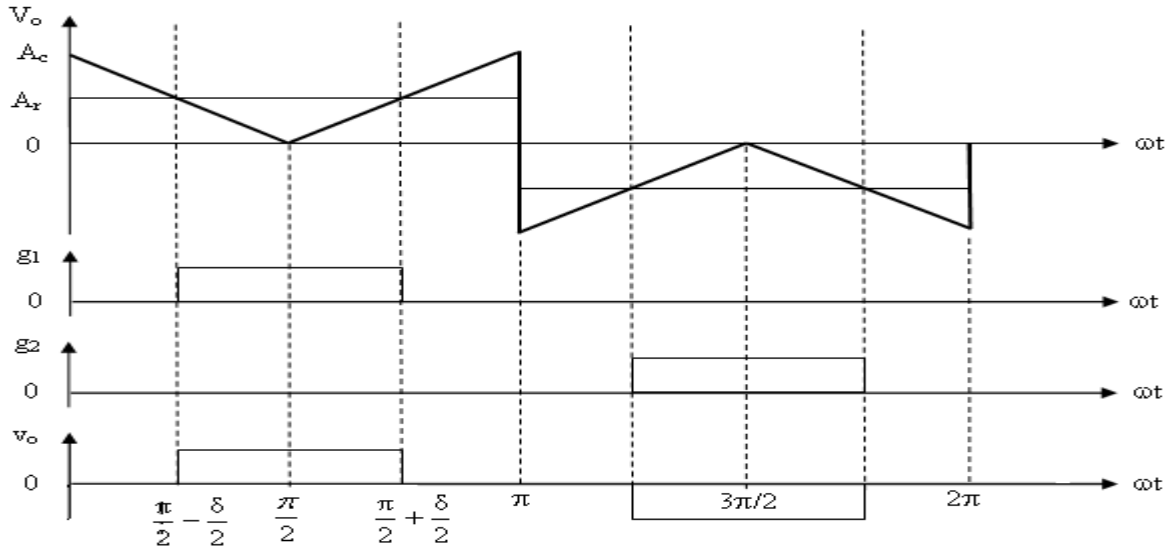
$$M = \frac{A_r}{A_c} \qquad (٤- ٦)$$

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

$$V_o = V_s\sqrt{\frac{\delta}{\pi}} \qquad (٤- ٧)$$

حيث إن:

M: هي معامل التعديل.
V_s: هي قيمة جهد المصدر الثابت المستمر.
A_r: هي قيمة الموجة المستطيلة المرجعية.
A_c: هي قيمة الموجة المثلثية الحاملة.
δ: هي قيمة عرض نبضة جهد الخرج.



الشكل (٤- ١٠) جهد خرج العاكس ونبضات التحكم الخاصة بالمفتاحين الإلكترونيين S2, S1 للعاكس قنطري أحادي الطور

٤- ٥- ١- ٢ 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_o 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:

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

حيث أن:

P: هي عدد النبضات الموجودة كل نصف دورة.

f_c: هي قيمة تردد الموجة المثلثية الحاملة.

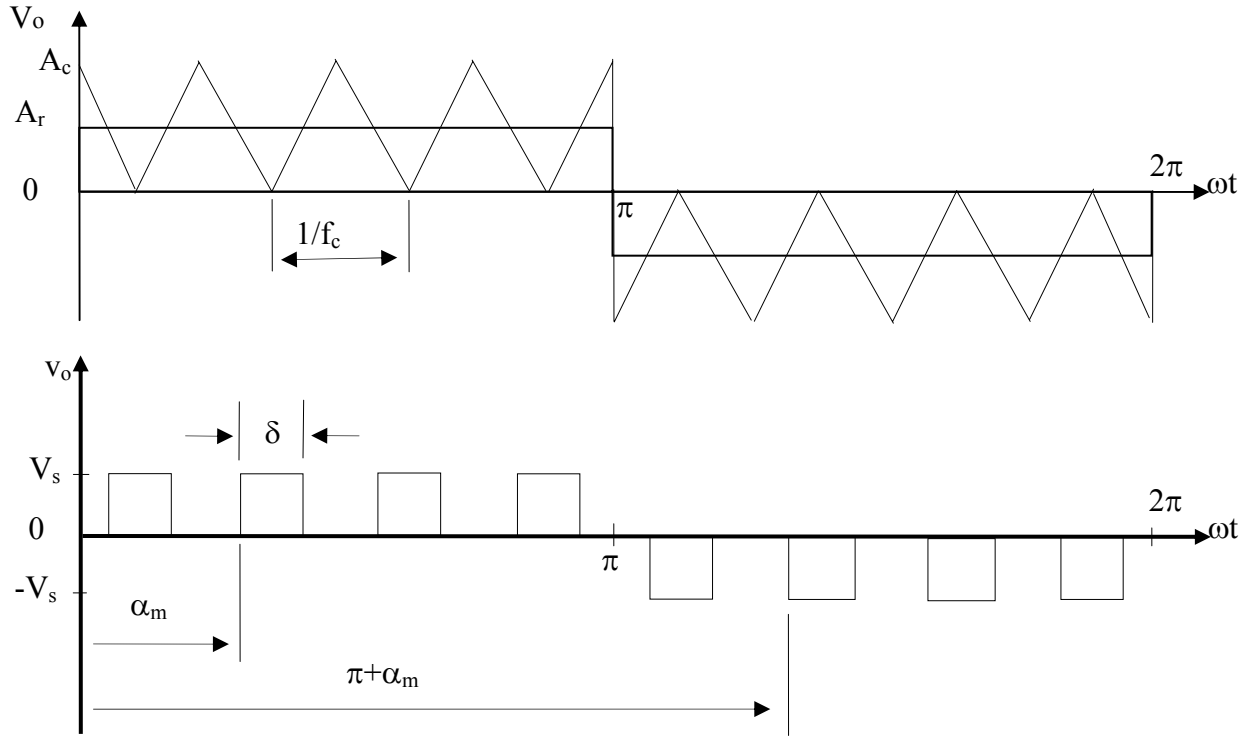
f_o: هي قيمة تردد الموجة المستطيلة المرجعية.

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:

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



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

٤- ٥- ١- ٣ 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 الجيبي 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, S_2 والتي يمكن الحصول عليها بمقارنة موجة جيبيه مرجعية ترددها f_o بموجة مثلثية حاملة ترددها f_c. وتستخدم 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'. ويبين 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 إن:

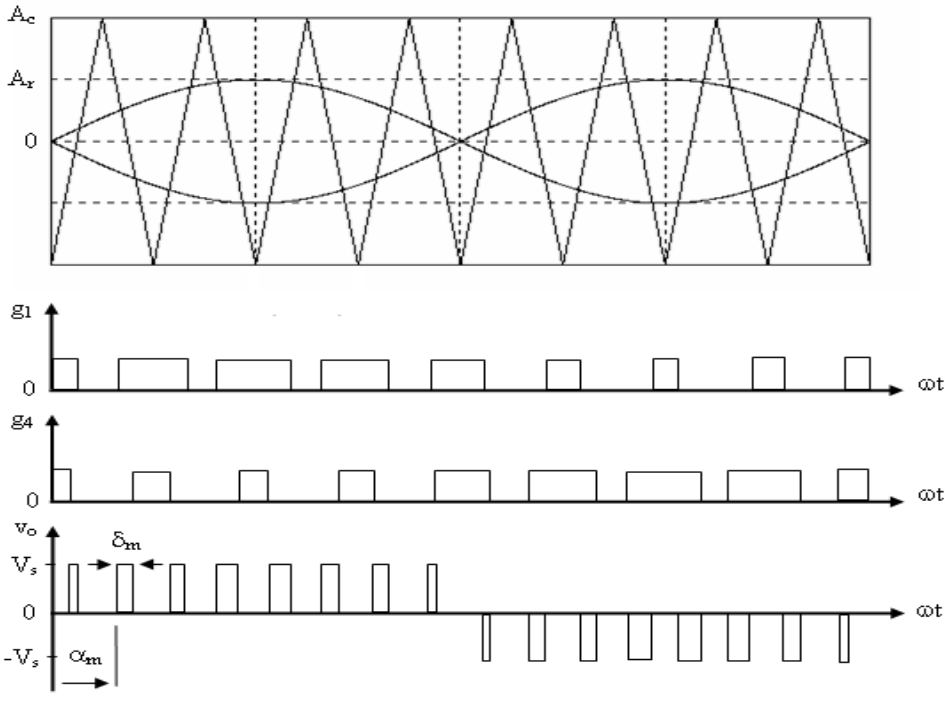
P: هي عدد النبضات الموجودة في نصف دورة.

δ_m : هي عرض النبضة والقابلة للنبضة رقم m.

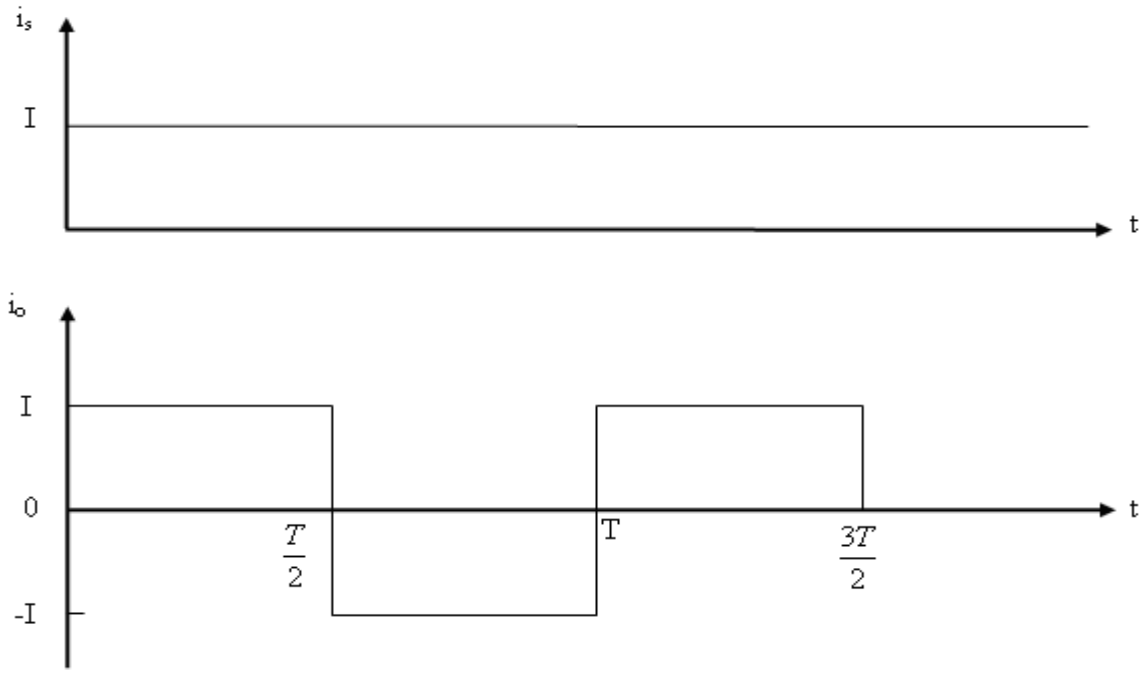
V_s: هي قيمة الجهد الثابت المستمر.

٤- ٦ العاكس ذو مصدر التيار الثابت Current Source Inverter CSI

تتصل دائرة العاكس ذو مصدر التيار الثابت بمصدر جهد ثابت مستمر وملف حثي و تكون قيمة تيار دخل العاكس أو تيار المصدر له قيمة ثابتة و لابد من المحافظة على ثبات هذه القيمة. يمكن إنجاز هذا عمليا بجعل الملف الحثي له قيمة حثية كبيرة ويمكن بهذه الطريقة منع حدوث أي تغير مفاجئ في قيمة تيار دخل العاكس و بالتالي يتم المحافظة على القيمة الثابتة لتيار العاكس و يحول العاكس تيار الدخل الثابت إلى تيار خرج على هيئة موجة مستطيلة. يبين الشكل (٤- ١٣) موجة كل من تيار دخل العاكس و تيار خرج العاكس والتي يمكن الحصول عليها إذا تم استخدام دائرة العاكس القنطري ذو مصدر التيار الثابت.



الشكل (٤- ١٢) نبضات المفتاحين S2, S1 والتي يمكن الحصول عليها بمقارن موجة جيبيه مرجعية وموجة مثلثية حاملة وموجة جهد خرج العاكس.

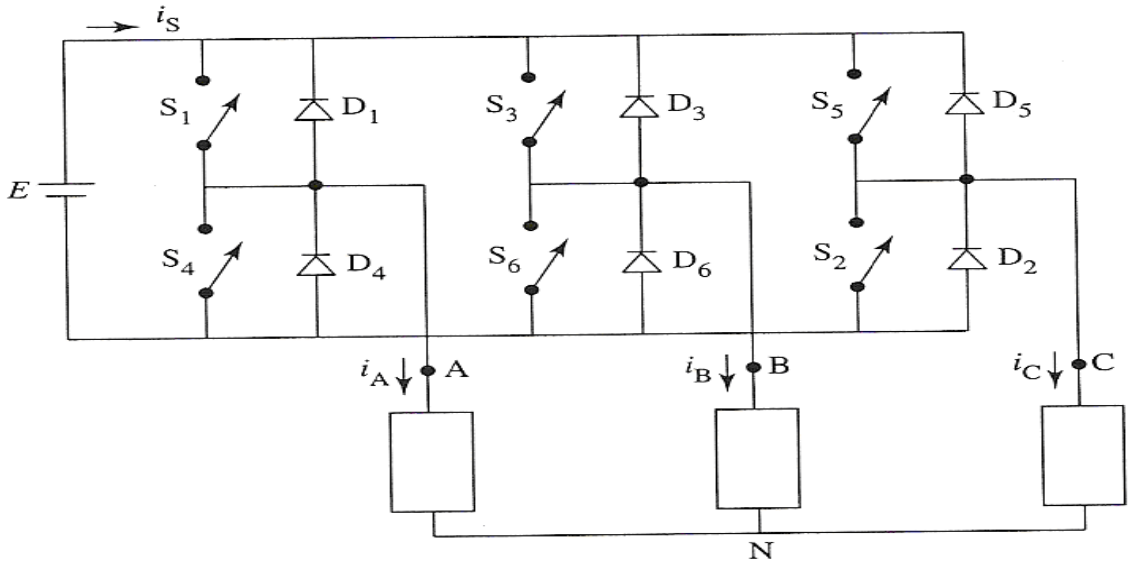


الشكل (٤- ١٣) موجة كل من تيار دخل العاكس و تيار خرج العاكس

٤- ٧ العاكس ثلاثي الأوجه ذو مصدر الجهد الثابت Three-phase VSI Inverter

٤- ٧- ١ المبدأ الرئيس لمصدر الجهد العاكس القنطرى ثلاثي الأوجه

يغير العاكس ثلاثي الأوجه جهد الدخل المستمر لجهد خرج متناوب ثلاثي الأوجه بتردد وجهد متغير. ويمكن الحصول على جهد الدخل المستمر من مصدر جهد مستمر أو من خرج دائرة موحد. يمكن أن تكون دائرة مصدر جهد العاكس القنطرى ثلاثي الأوجه من عدد ثلاثة عواكس نصف قنطرية أحادية الوجه ، يبين الشكل (٤- ١٤) الدائرة الرئيسة لدائرة العاكس القنطرى ثلاثي الأوجه وتتكون هذه الدائرة من عدد سته مفاتيح قدرة إلكترونية (مثل الموسفت أو الترانزستور ذو البوابة المعزوله) وعدد ستة دايودات حدافة. يتم توصيل وفصل هذه المفاتيح الإلكترونية بطريقة تكرارية كل زمن دورى كامل بالتتابع المناسب لكل وجه من الأوجه الثلاثية للحصول على موجة جهد الخرج المطلوبة. ويحدد تردد موجه جهد الخرج زمن الدورة الواحدة يوجد عدد من الطرق المستخدمة لأحداث الفصل والتوصيل تبعا للمفتاح المطلوب وترتيبه (تتابعه) فى الفتح والتوصيل تبعا لباقى المفاتيح الإلكترونية الثلاثية. ويوجد طريقتان أو اسلوبان أساسيان واللذان يتممان عملية الفصل والتوصيل بجميع المفاتيح الإلكترونية خلال الدورة. إحدى هذه الطرق معروفة بنوع التوصيل $120°$ والأخرى معروفة بنوع التوصيل $180°$.



الشكل (٤- ١٤) الدائرة الرئيسة لدائرة العاكس القنطرى ثلاثي الأوجه.

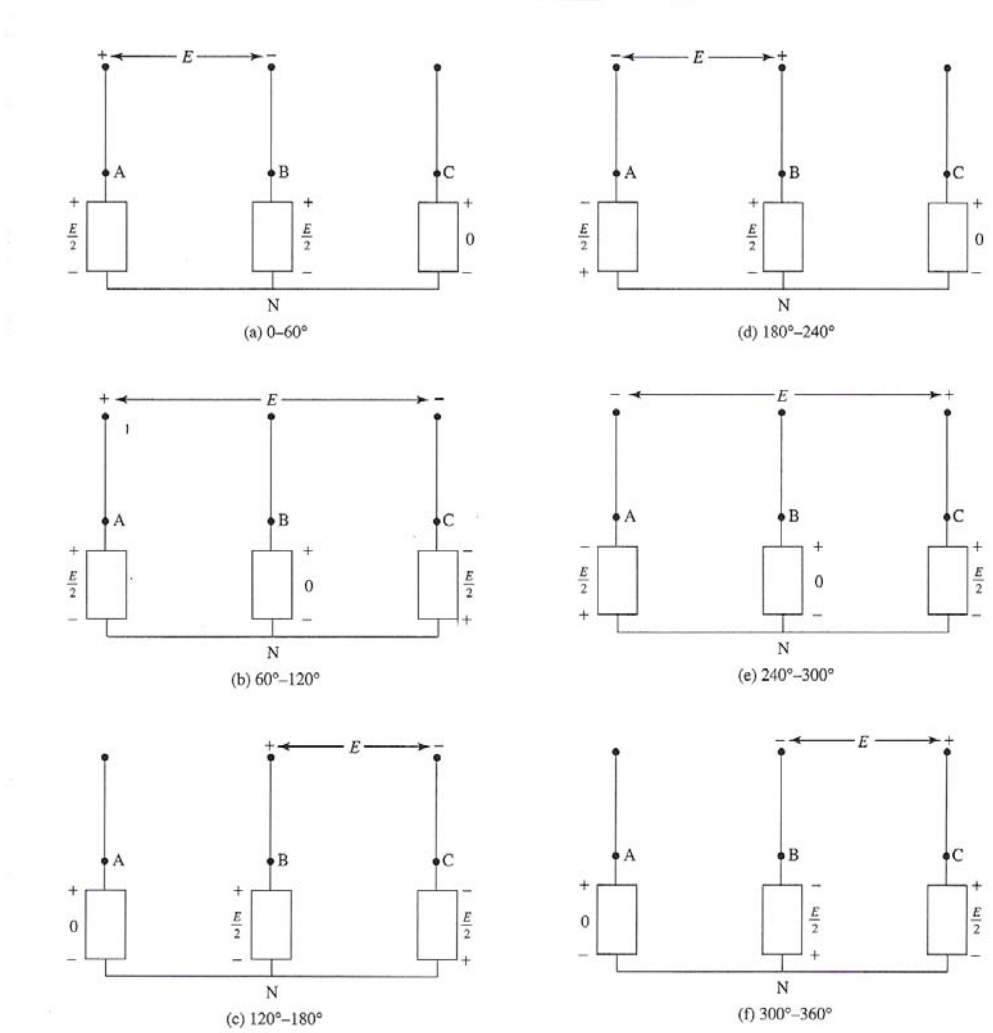
٤- ٧ - ٢ طريقة التوصيل 120°

يمكن توضيح هذه الطريقة من التوصيل لدائرة العاكس القنطرى الرئيس ثلاثي الأوجه والمبين بالشكل (٤- ١٤) والذى يمكن التحكم به كالآتى:

يتم التحكم فى العاكس القنطرى بحيث يتم توصيل كل مفتاح لفترة زمنية 120°. وفى هذه الحالة يتم توصيل مفتاحين عند أى لحظة أحد هذه المفاتيح موجود بالمجموعة الموجبة (S_5 ,S_3 ,S_1) والآخر بالمجموعة السالبة (S_6 ,S_4 ,S_2). وهذان المفتاحان الموصلان يوصلا طرفين من أطراف الحمل من الأطراف الثلاثة A, B, C بأطراف الجهد المستمر بينما يبقى الطرف الثالث من أطراف الحمل غير متصل . ويوجد ستة فترات فى الدورة الكاملة لدورة موجة جهد الخرج المتردد يتم ضبط فترات توصيل وفصل المفاتيح عند فترات زمنية 60° من موجة جهد الخرج بالتتابع الملائم للحصول على جهود الخرج v_{AB} و v_{BC} و v_{CA} بحيث تكون كل موجة من هذه الموجات مزاحه 120° عن الموجه الأخرى ولها نفس التردد حيث عدد مرات الفصل والتوصيل للمفاتيح الإلكترونية خلال دورة كاملة يحدد تردد هذه الموجات .

لمنع حدوث دائرة قصر (short circuit) على مصدر الجهد المستمر فلابد التأكد من عدم توصيل أى مفتاحين متواجدين على نفس الفرع (S_4,S_1) فى نفس الوقت وبالتالي يتم ترك فترة زمنية 60° من نهاية توصيل المفتاح S_1 وبداية توصيل المفتاح S_4 الموجودان بنفس الفرع . نفس الأمر يحدث حقيقية للمفتاحان S_3, S_6 وللمفتاحان S_5, S_2. يمكن تعيين جهود الأوجه عبر الحمل v_{CN} ,v_{BN},v_{AN}لكل فترات زمنية60° مختلفة بفرض أن الحمل وعلى شكل توصيل النجمة Y. يمكن

الحصول على هذه الجهود باعتبار إن الدائرة المكافئة لتركيبات الحمل والعاكس المختلفة لستة فترات زمنية مبينة بالشكل (٤- ١٥).



الشكل (٤- ١٥) الدوائر المكافئة للعاكس القنطرى ثلاثي الأوجه.

يمكن تلخيص النتائج كما بالجدول (٤- ١) حيث تتابع الفتح والتوصيل للمفاتيح يكون كالآتى المفتاحان S_1 و S_2 ثم المفتاحان S_2 و S_3 ثم المفتاحان S_3 و S_4 ثم المفتاحان S_4 و S_5 ثم المفتاحان S_5 و S_6 ثم S_1 .....

يبين الشكل (٤- ١٦) الجهود ثلاثية الأوجه V_{AN},V_{BN}, V_{CN} ومن هذه الموجات يمكن تعيين جهود الخط المختلفة كالآتي:

$$\begin{cases} v_{AB} = v_{AN} - v_{BN} \\ v_{BC} = v_{BN} - v_{CN} \\ v_{CA} = v_{CN} - v_{AN} \end{cases} \qquad (٤ - ١٠)$$

الفترة	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}
من 0^o إلى 60^o	موصل	مفصول	مفصول	مفصول	مفصول	موصل	+ E/2	-E/2	0
من 60^o إلى 120^o	موصل	موصل	مفصول	مفصول	مفصول	مفصول	+ E/2	0	-E/2
من 120^oإلى 180^o	مفصول	موصل	موصل	مفصول	مفصول	مفصول	0	+ E/2	-E/2
من 180^o إلى 240^o	مفصول	مفصول	موصل	موصل	مفصول	مفصول	-E/2	+ E/2	0
من 240^o إلى 300^o	مفصول	مفصول	مفصول	موصل	موصل	مفصول	-E/2	0	+ E/2
من 300^o إلى 360^o	مفصول	مفصول	مفصول	موصل	موصل	موصل	0	-E/2	+ E/2

جدول (٤- ١)

نلاحظ بأن الشكل (٤- ١٦) مستنتج على إساس أن الحمل المستخدم مادى وسوف تختلف هذه الموجات فى حالة استبدال الحمل المادى بحمل حثى R-L حيث الجهد الطرفى خلال فترة الفصل سوف يتأثر بسلوك التيار العابر.

يمكن كتابة معادلات جهود وتيارات الخرج الفعالة فى حاله الحمل المادى والذى يكون متصل على شكل نجمة .

$$Vph(rms) = \frac{E}{\sqrt{6}} \qquad (٤ - ١١)$$

$$V_{L(rms)} = \frac{E}{\sqrt{2}} \qquad (٤ - ١٢)$$

$$I_{O(rms)} = \frac{E}{\sqrt{6}R} \qquad (٤ - ١٣)$$

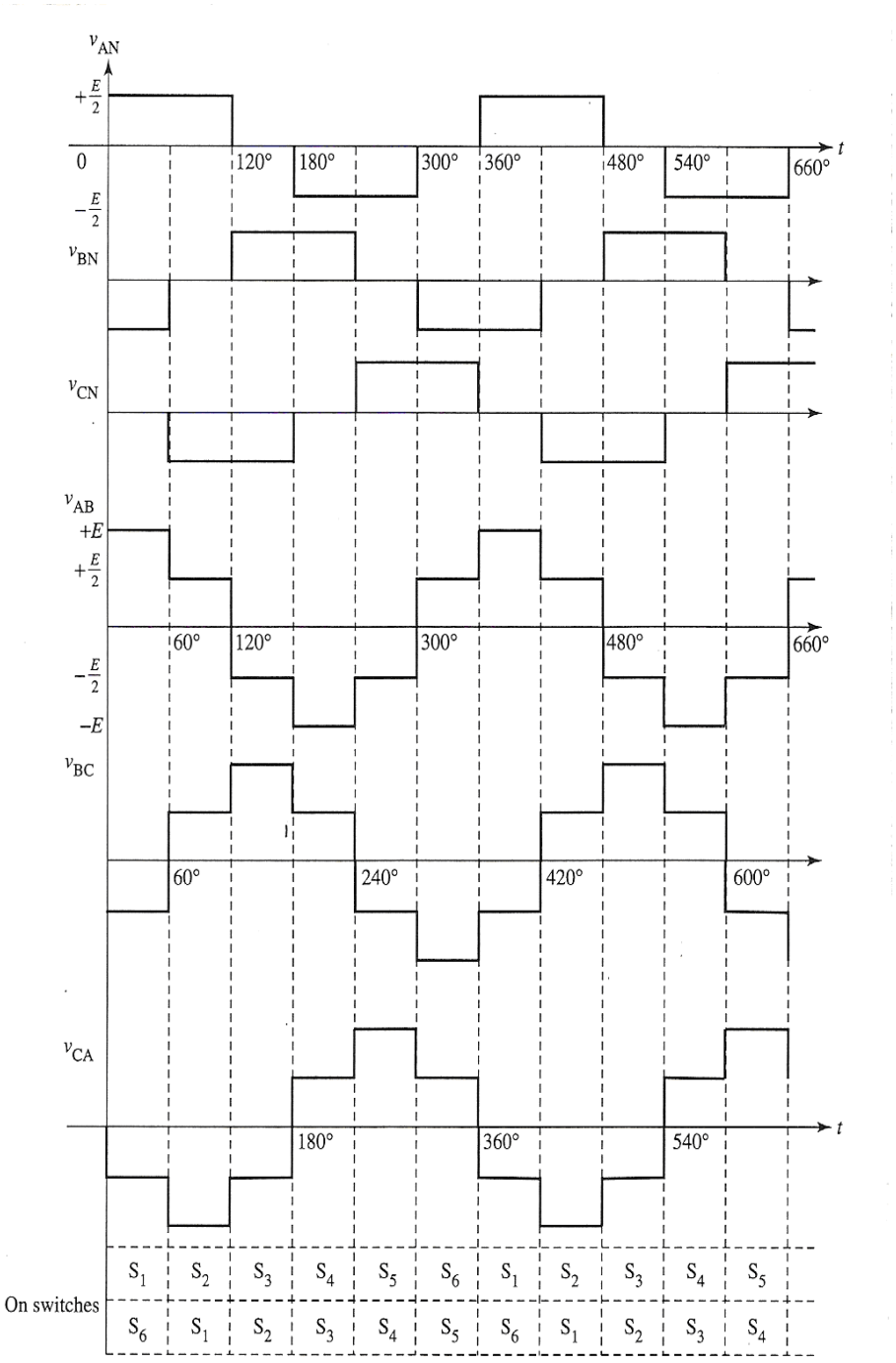
حيث إن E قيمة الجهد المستمر و $V_{ph(rms)}$ القيمة الفعالة لجهد الخرج للوجه الواحد و $V_{L(rms)}$ قيمة جهد الخرج الفعال $I_{o(rms)}$ و قيمة تيار الخرج الفعال ويمكن إيضا كتابة معادلة التيار الفعال للمفتاح الإلكتروني ومعادلة القدرة الكهر بية للخرج كالآتي:

$$I_{switch(rms)} = \frac{E}{2\sqrt{3}R} \qquad (٤ - ١٤)$$

$$P_O = \frac{E^2}{2R} \qquad (٤ - ١٥)$$

ويمكن إيضا كتابة معادلة الجهد العكسي المقنن للمفتاح $V_{switch(reverse)}$ كالآتي:

$$V_{switch(reverse)} = E \qquad (٤-١٦)$$



الشكل (٤- ١٦) موجات جهد دائرة العاكس ثلاثي الأوجه لنوع التوصيل °120.

مثال ٤- ٤:

يتصل دخل عاكس قنطري ثلاثي الأوجه بمصدر جهد مستمر قيمتة 500 V ويتصل خرج هذا العاكس بحمل مادي متصل على شكل نجمة Y قيمة المقاومة بكل وجة 10 Ω. لنوع التوصيل 120^o أوجد:

أ- القيمة الفعالة لتيار الخرج لكل وجة $I_{oph(rms)}$.

ب- القيمة الفعالة لتيار المفتاح الإلكتروني $I_{switch(rms)}$.

ج- القدرة المستهلكة للحمل P_o.

الحل:

أ- $$I_{oph(rms)} = \frac{E}{R\sqrt{6}} = \frac{500}{10\sqrt{6}} = 20.41\,A$$

ب- $$I_{switch(rms)} = \frac{E}{2\sqrt{3}\,R} = \frac{500}{20\sqrt{3}} = 14.43\,A$$

ج- $$P_O = \frac{E^2}{2R} = \frac{500^2}{2*10} = 12.5\,kW$$

٤- ٧- ٣ نوع التوصيل °180

يمكن توضيح هذه النوعية من التوصيل لدائرة العاكس القنطرى الرئيس ثلاثي الأوجه والمبين بالشكل (٤- ١٤) والذي تتم فيه عملية الفصل والتوصيل دون فترة توقف. ويمكن شرح طريقة عمل هذا النوع من التوصيل كالآتى: في هذا النوع من التوصيل يتم توصيل عدد مفتاحين من المجموعة الموجبة مع مفتاح واحد من المجموعة السالبة أو يتم العكس ويوصل كل مفتاح فترة زمنية قيمتها 180^o. ويجب تجنب توصيل أي مفتاحين موجودين على نفس الفرع من الأفرع الثلاثة في نفس الوقت. وأيضا يجب تجنب توصيل المفاتيح الثلاثة سواء الموجودين بالمجموعة الموجبة أو بالمجموعة السالبة في نفس الوقت وبتطبيق هذه القواعد السابقة يمكن توصيل ثلاثة مفاتيح عند لحظة زمنية معينة وليكن S_1 و S_3 و S_2 (مفتاح بالمجموعة الموجبة ومفتاحان بالمجموعة السالبة) وبعد فترة زمنية قيمتها 60^o يتم توصيل المفاتيح S_2 و S_3 و S_4 (4 -3- 2) وهكذا. يبين الجدول (٤- ٢) نموذج الفصل والتوصيل لستة فترات زمنية مختلفة قيمة كل فترة 60^o. وهذه الفترات الزمنية الستة تمثل دورة كاملة للخرج ويتم تحديد تردد الخرج تبعا لزمن هذه الفترات الزمنية. ويكون ترتيب التوصيل كالاتي : 3-2-1 و 4-3-2 و 5-4-3 و 6-5-4 و 1-6-5

و 6-1-2 ... نلاحظ كما هو مبين بالجدول (٤- ٢) إن كل مفتاح يوصل فترة زمنية قيمتها 180^o خلال الدورة الكاملة.

الفترة	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
من 0^o إلى 60^o	موصل	مفصول	مفصول	مفصول	موصل	موصل
من 60^o إلى 120^o	موصل	موصل	مفصول	مفصول	مفصول	موصل
من 120^oإلى 180^o	موصل	موصل	موصل	مفصول	مفصول	مفصول
من 180^o إلى 240^o	مفصول	موصل	موصل	موصل	مفصول	مفصول
من 240^o إلى 300^o	مفصول	مفصول	موصل	موصل	موصل	مفصول
من 300^o إلى 360^o	مفصول	مفصول	مفصول	موصل	موصل	موصل

جدول (٤- ٢)

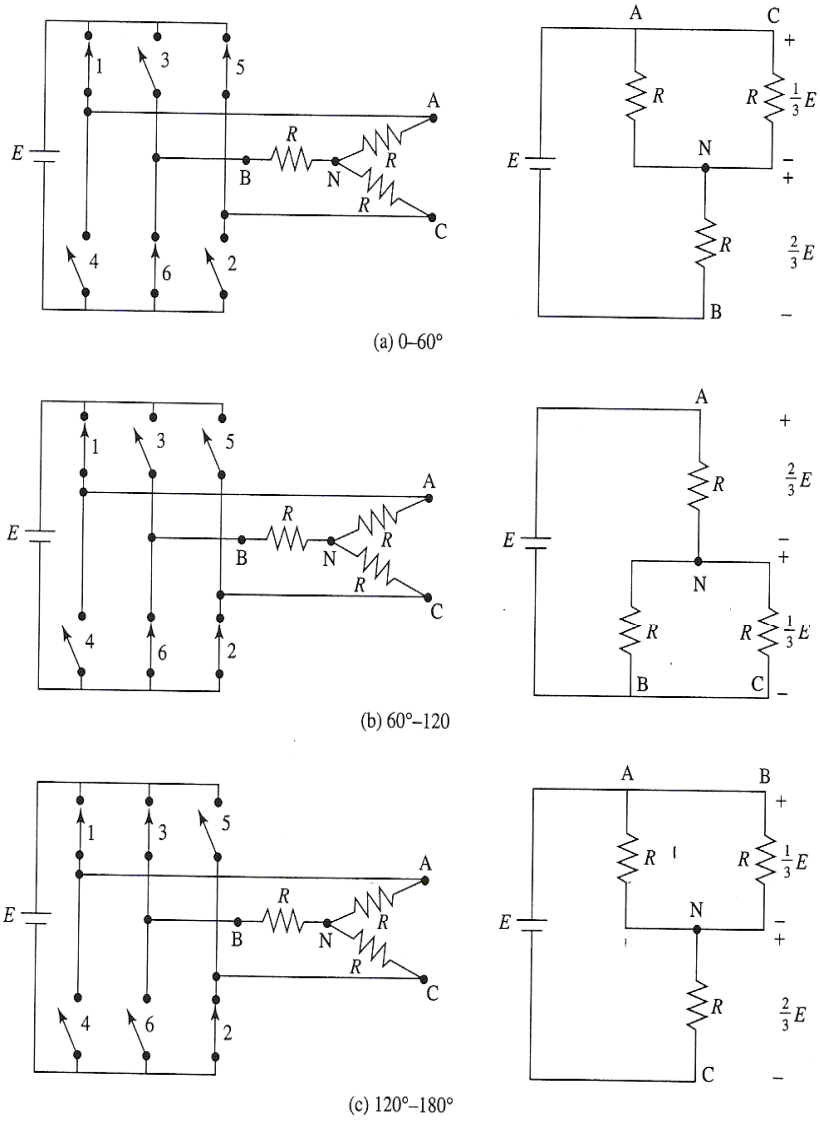
الآن يمكن استنتاج موجات جهد الخرج بافتراض توصيل حمل مادي متزن على شكل النجمة Y. ويمكن الحصول على جهود كل وجة (v_{ph}) للفترات الستة المختلفة (الفترة 60^o) بالاستعانة بالدائرة المكافئة لكل فترة والمبينة بالشكل (٤- ٢٠). ومن هذه الدوائر المكافئة والمبينة بهذا الشكل يمكن تعيين الجهود المصاحبة لكل وجه لأوجه الحمل. يبين الجدول (٤- ٣) ملخص قيم الجهود خلال دورة زمنية كاملة باستخدام نوع التوصيل 180^o.

الفترة	V_{AN}	V_{BN}	V_{CN}	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}
من 0^o إلى 60^o	+E/3	-2E/3	+E/3	+ E	-E	0
من 60^o إلى 120^o	+2E/3	-E/3	-E/3	+ E	0	-E
من 120^oإلى 180^o	+E/3	+E/3	-2E/3	0	+ E	-E
من 180^o إلى 240^o	-E/3	+2E/3	-E/3	-E	+ E	0
من 240^o إلى 300^o	-2E/3	+E/3	+E/3	-E	0	+ E
من 300^o إلى 360^o	-E/3	-E/3	+2E/3	0	-E	+ E

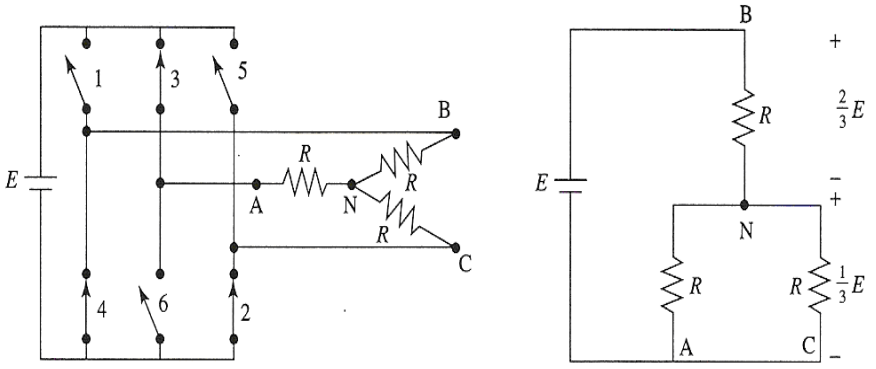
جدول (٤- ٣)

تكون موجات جهود كل وجة والمبينة بالشكل (٤- ٢١) متشابهة ولكن كل منها مرحل عن الآخر 120^o. ونلاحظ بأن هذه الجهود ليست على شكل موجات جيبية نقية ولكنها إلى حد ما قريبة لشكلها حيث إنها تحتوي على بعض التوافقيات والتى لابد من إزالتها للحصول على موجات جهد خرج

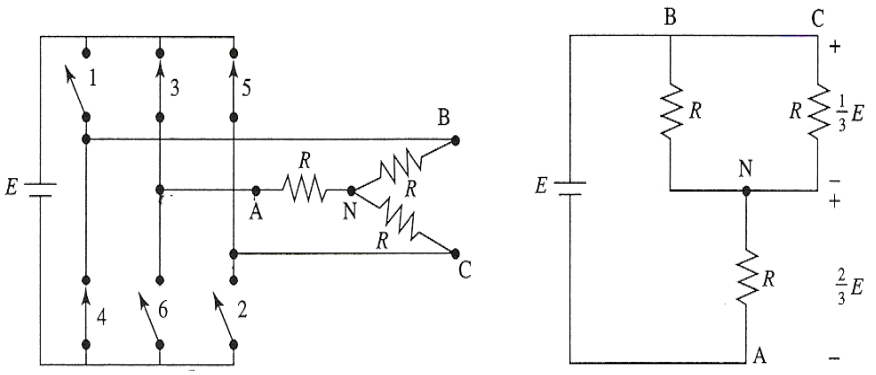
جيبية نقية . تتكون موجات جهود كل وجه من ست فترات غير متصله (قيمةكل منها $60°$) تبعا لفصل وتوصيل المفاتيح خلال الدورة الكاملة. يبين الجدول (٤- ٣) قيم جهود الخط خلال الفترات الستة المختلفة حيث يمكن الحصول على جهود الخط (V_L) باستخدام المعادلة (٤- ١٠). وموجات جهود الخط مبينة بالشكل (٤- ٢١). وكما هو واضح من هذا الشكل بأن هذه الجهود مزاح كل منها عن الآخر $120°$. بصفة رئيسة لا تعتمد قيم جهود كل وجه أو جهود الخط على خواص الحمل المتصل بخرج العاكس والذي ربما يكون حمل مادي أو حثي أو سعوي متزن أو غير متزن ونلاحظ بأنه إذا تم استخدام الحمل المادي فإن شكل موجات تيار الحمل تكون مثل شكل موجات جهود الأوجه في حال توصيل Y وتكون مثل شكل موجات جهود الخط في حالة التوصيل Δ.



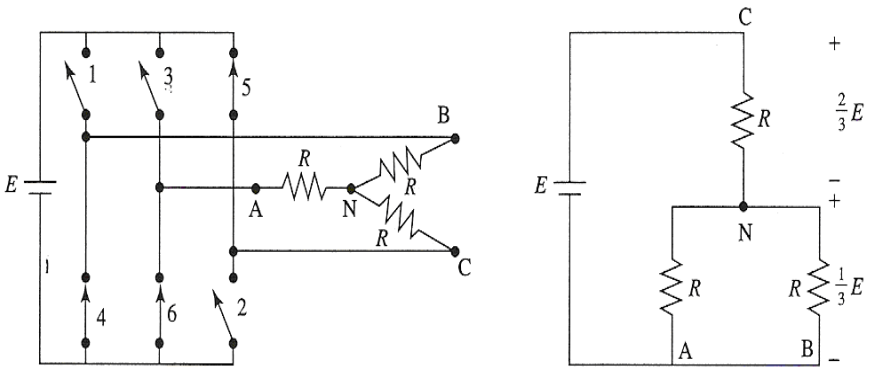
الشكل (٤- ٢٠) الدوائر المكافئة للعاكس القنطري ثلاثي الأوجه لنوع التوصيل 180^{o}.



(d) 180°–240°

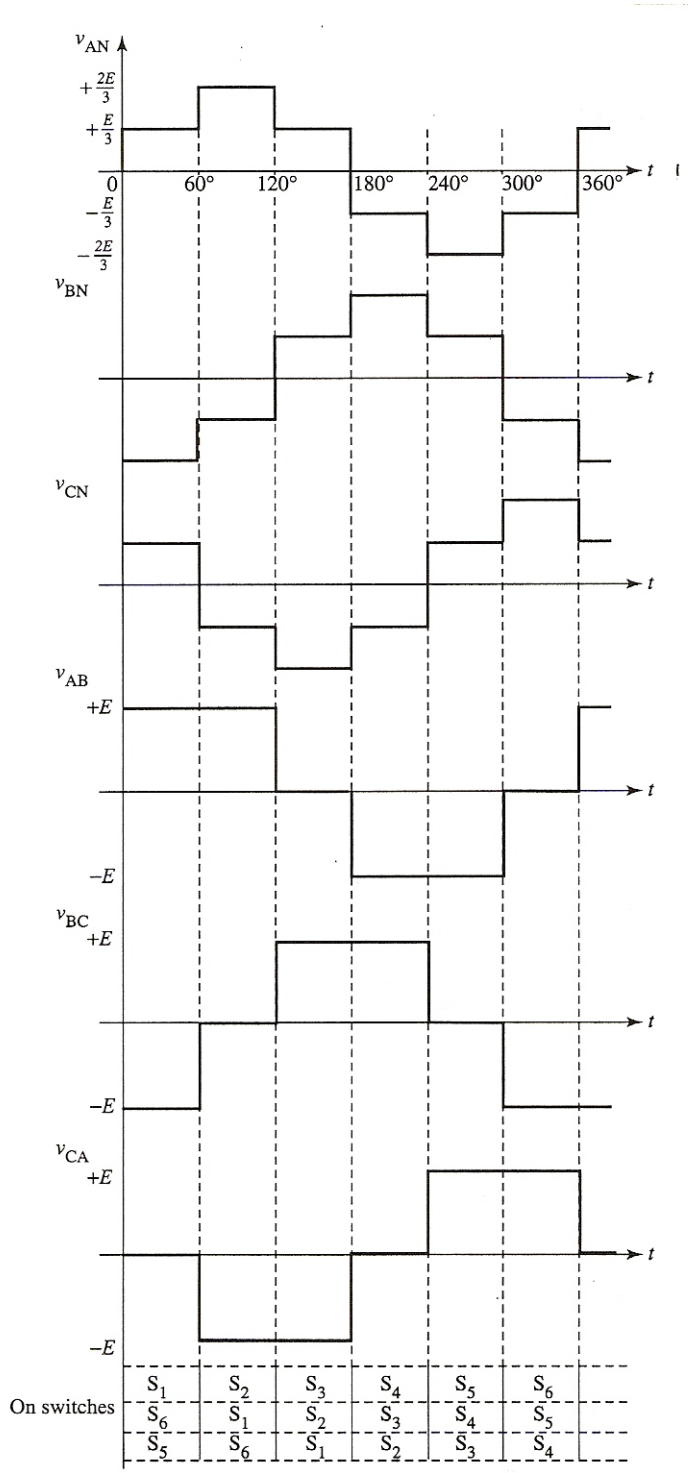


(e) 240–300°



(f) 300°–360°

تابع الشكل (٤- ٢٠) الدوائر المكافئة للعاكس القنطري ثلاثي الأوجه لنوع التوصيل 180^{o}.



الشكل (٤- ٢١) موجات جهود الخرج للعاكس القنطري ثلاثي الأوجه لنوع التوصيل 180^o.

لحالة الحمل المتزن وعلى شكل النجمة Y يمكن كتابة معادلة القدرة كالآتى:

$$P_O = \frac{2E^2}{3R} \qquad (٤- ١٦)$$

حيث R قيمة المقاومة لكل وجه من أوجه الحمل الثلاثة ونلاحظ بإن القدرة باستخدام نوعية التوصيل °180 قيمتها 1.33 من قيمة القدرة فى حالة نوع التوصيل °120.

معادلات القيمة الفعاله للتيار المار بأى مفتاح $I_{switch(rms)}$ والقيمة الفعالة لتيار الخرج $I_{o(rms)}$ يمكن كتابتها كالتالى :

$$I_{switch(rms)} = \frac{E}{3R} \qquad (١٧ - ٤)$$

$$I_{O(rms)} = \sqrt{2} I_{switch(rms)} \qquad (١٨ - ٤)$$

و قيمة الجهد $V_{switch(reverse)}$ يمكن كتابتها كالتالى:

$$V_{switch(rms)} = E \qquad (١٩ - ٤)$$

ويمكن كتابة معادلات القيمة الفعالة لجهود الخرج لكل وجه $V_{ph\ (rms)}$ والقيمة الفعالة لجهود الخط $V_{L(rms)}$ كالآتي:

$$V_{ph(rms)} = \frac{\sqrt{2}}{3} E \qquad (٢٠ - ٤)$$

$$V_{L(rms)} = \frac{\sqrt{2}E}{\sqrt{3}} \qquad (٢١ - ٤)$$

مثال (٤- ٥):

يتصل خرج عاكس قنطرى ثلاثي الأوجه بحمل مادى قيمته 10Ω لكل وجه وعلى شكل نجمة Y. ويتصل دخل العاكس بمصدر جهد مستمر قيمته 440V ويعمل العاكس بنوع التوصيل °180 .

أوجد:

أ- القدرة المستهلكة من الحمل P_o.

ب- تيار المصدر I_S.

ج- القيمة الفعالة لجهد الخرج لكل وجه $V_{ph(rms)}$.

د- القيمة الفعالة لجهد خط الخرج $V_{L(rms)}$.

الحل:

أ- $$P_O = \frac{2E^2}{3R} = \frac{2E^2}{3R} = \frac{2(440)^2}{2*10} = 12907W$$

ب- على فرض أن جميع المفاتيح الإلكترونية الموجودة بدائرة العاكس مفاتيح مثالية فإن القدرة المسحوبة من المصدر P_S سوف تساوي القدرة المستهلكة بالحمل P_o :

$$\therefore P_o = P_S = E\, I_S$$

$$\therefore I_S = \frac{P_o}{E} = \frac{12907}{440} = 29.33\, A$$

ج- $$V_{ph(rms)} = \frac{\sqrt{2}}{3} E = \frac{\sqrt{2}}{3} * 440 = 207.4V$$

د- $$V_{L(rms)} = \sqrt{3}\, V_{ph(rms)} = 207.4\sqrt{3} = 359.26V$$

٤- ٨ أمثلة على أستخدامات العواكس

- **مصادر عدم إنقطاع التيار** Uninterruptible power supplies (UPSs)

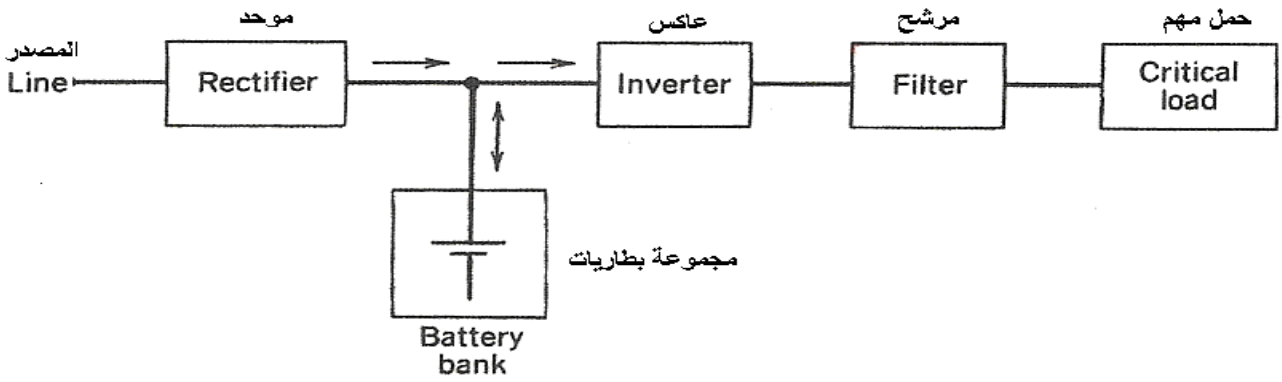
يتم استخدام أنظمة مصادر عدم انقطاع التيار (UPSs) للأحمال الحرجة (الأحمال المهمة) مثل أجهزة الحاسبات المستخدمة في التحكم في عمليات التحكم. ربما تحتاج الأجهزة الطبية و ما يناظرها من أهمية لأنظمة مصادر عدم انقطاع التيار وهذه الأنظمة تعمل كتأمين وحماية من انقطاع التيار لأى سبب من الاسباب. وأيضا تستخدم أنظمة عدم انقطاع التيار كمنظم للجهد أثناء الزيادة أو النقص المفاجئ للجهد. وتمتاز أنظمة عدم انقطاع التيار بإنها تعمل على تقليل المشاكل التى تنشأ من التوافقيات أو الحالات العابرة للجهد أو التيار.

استخدام العاكس في أنظمة عدم انقطاع التيار:

يبين الشكل (٤- ٢٤) مخطط صندوقي لنظام عدم انقطاع التيار ويمكن شرح وظيفة كل صندوق موجوج بالمخطط الصندوقي كالتالي:

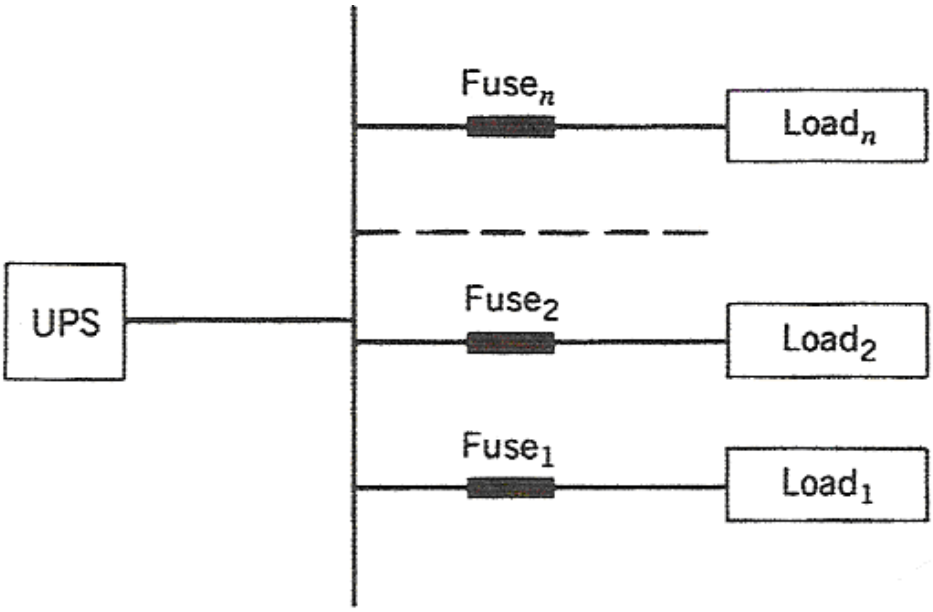
- يستخدم الموحد لتحويل جهد دخل المصدر الرئيس المتردد أحادي أو ثلاثي الأوجه إلى جهد خرج مستمر. ويقوم هذا الجهد بشحن مجموعة البطاريات أثناء الفترة الطبيعية (فترة عدم أنقطاع التيار) ويكون هذا الجهد المستمر بمثابة الدخل المطلوب لتشغيل دائرة العاكس كما هو مبين بالشكل (٤- ٢٤).
- يتم استخدام مجموعة البطاريات كجهد مستمر مطلوب لتشغيل العاكس أثناء لحظات أو أزمنة انقطاع التيار عن مصدر الجهد المتردد أحادي الوجه أو ثلاثي الأوجه علما بأنه يتم شحن هذه البطاريات في اللحظات الطبيعية والعادية.

- يستخدم العاكس للحصول على الجهد المتردد المطلوب لتشغيل الحمل المهم علما بأن خرج العاكس يتم توصيلة بالحمل الهام وغالبا ما يتم وضع مرشح بين خرج العكس ودخل الحمل الهام كما هو مبين بالشكل (٤- ٢٤).
- يتم استخدام هذا المرشح للحصول على موجة جهد جيبية شبه نقية وذلك عن طريق إزالة المرشح للتوافقيات الموجودة بموجة جهد خرج العاكس والمطلوب إزالتها.



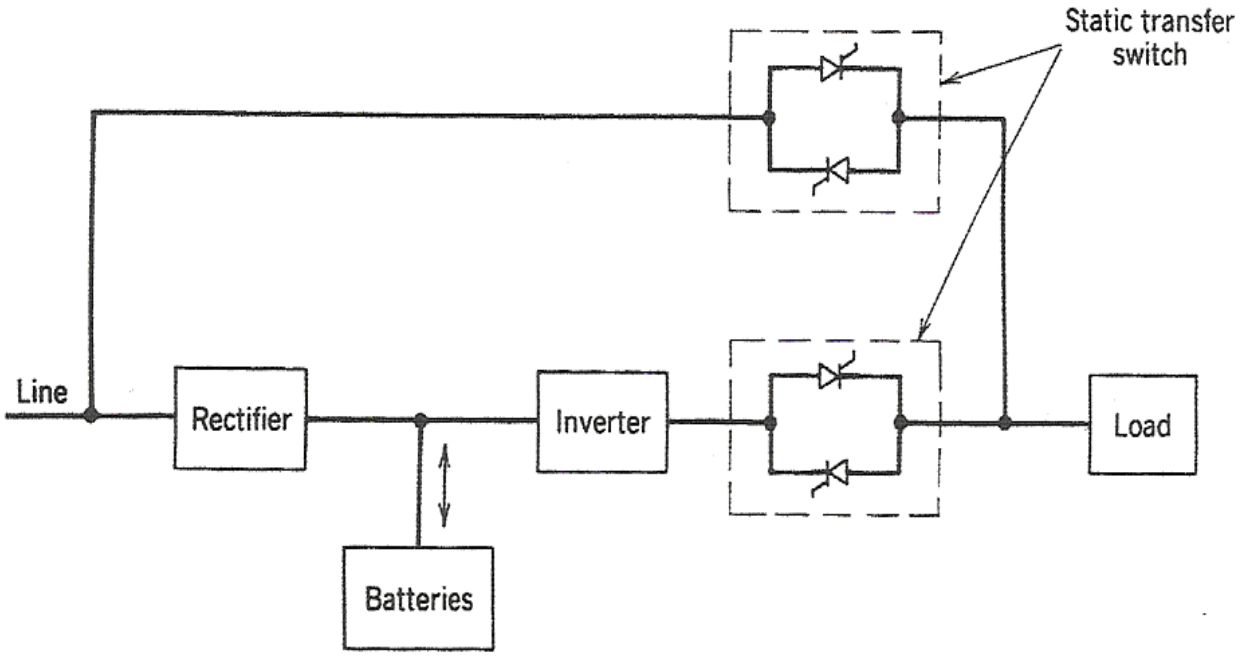
الشكل (٤- ٢٣) مخطط صندوقي لمصدر عدم أنقطاع التيار UPS.

يمكن استخدام مصدر عدم انقطاع التيار ذو القدرات ذات بضع الكيلو وات لتغذية مجموعة من الأحمال المتصلة على التوازي كما هو مبين بالشكل (٤- ٢٤) حيث تتم تغذية كل حمل بمصدر عدم انقطاع التيار عن طريق منصهر (فيوز).



الشكل(٤- ٢٤) تغذية عدة أحمال من مصدر عدم أنقطاع التيار.

يبين الشكل (٤- ٢٥) مفتاح النقل الاستاتيكي والذي يمكن استخدامه بدوائر أنظمة عدم انقطاع التيار. وفي الظروف الطبيعية يتم تغذية الحمل المهم عن طريق مفتاح النقل الاستاتيكي العلوي والمتصل مباشرة بمصدر دخل الجهد الرئيس وأثناء هذه الفترة الزمنية يتم شحن البطاريات الموجودة بمصدر عدم انقطاع التيار. وفي حالات انقطاع التيار عن مصدر الجهد الرئيس يتم تغذية الحمل بنقل الطاقة اللازمة له عن طريق مفتاح النقل الاستاتيكي والمتصل دخله بخرج العاكس حيث يتم تغذية العاكس أثناء هذه الفترة الزمنية من البطاريات الموجودة.



الشكل (٤- ٢٥) مصدر عدم انقطاع التيار متصل بالخط الاحتياطي للحمل الحرج.

٤- ٩ طرق تحسين موجة جهد خرج العاكس:

كما سبق دراسته بهذه الوحدة بأنه دائما موجة جهد خرج العاكس أحادي الوجه أو ثلاثي الأوجه ليس على شكل موجة جيبية نقية. وحيث إن خرج العاكس يتصل بأحمال مطلوب تشغيلها بمصدر جهد جيبى نقى. يمكن تحقيق هذا عن طريق الأسلوب المطلوب لفصل وتوصيل المفاتيح الإلكترونية الموجودة بدائرة العاكس مثل استخدام الأسلوب الذى تم شرحه وهو SPWM تعديل جيبى بعرض النبضة وهذا الأسلوب أو هذه الطرق التى تم ذكرها بطرق التحكم فى جهد خرج العاكس يؤدى استخدام مثل تلك الطرق إلى تقليل التوافقيات الموجودة بجهد الخرج وبالتالى تعمل على تحسين شكل موجة الخرج. ويمكن إزالة التوافقيات ذات الترددات الصغيرة بالنسبة لتردد موجة جهد الخرج ولكن يبقى وجود بعض

التوافقيات ذات الترددات العالية وغير المؤثرة على شكل موجة تيار الخرج وبالتالى يكون قد حدث تحسن لموجة جهد العاكس وأصبح قريب من شكل الموجة الجيبية.

كما يتم وضع مرشح بخرج دائرة العاكس وتصميمه سوف يكون سهل ويؤدى استخدام هذا المرشح إلى إزالة معظم التوافقيات الموجودة بجهد خرج العاكس وبالتالى يمكن الحصول على موجة جهد خرج شبه جيبية وهذا المطلوب تحقيقه.

٤- ١٠ أسئلة و تمارين:

٤- ١ ما هي وظيفة العاكس؟

٤- ٢ اذكر بعض التطبيقات المهمة للعواكس؟

٤- ٣ ما هي الأنواع المختلفة للعواكس؟

٤- ٤ ما هو مبدأ عمل العاكس؟

٤- ٥ ما هي الفروق بين العواكس نصف القنطرية وكاملة القنطرة؟

٤- ٦ ما هي الطرق المختلفة للتحكم في جهد خرج العاكس؟

٤- ٧ ما هي الطرق الداخلية المختلفة للتحكم في جهد خرج العاكس؟

٤- ٨ ما هو الهدف من استخدام طريقة التعديل المضاعف لعرض النبضة؟

٤- ٩ ما هو الهدف من استخدام طريقة تعديل عرض النبضة الجيبي؟

٤- ١٠ ما هي عيوب طريقة التحكم في جهد خرج العاكس باستخدام طريقة تعديل عرض النبضة؟ كيف يمكن التغلب على هذه العيوب؟

٤- ١١ يتصل عاكس نصف قنطري أحادى الطور بمصدر جهد مستمر قيمته 220V وحمل مادي قيمته 20Ω. أوجد:

أ- القيمة الفعالة لجهد خرج العاكس 'V_o'

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

ج- قيمة القدرة المغذاة للحمل.

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

٤- ١٣ أذكر أنواع التوصيل المستخدمة لمفاتيح العواكس القنطرية ثلاثية الأوجه.

٤- ١٤ يتصل دخل عاكس قنطري ثلاثي الأوجه بمصدر جهد مستمر قيمتة 400 V ويتصل خرج هذا العاكس بحمل مادي متصل على شكل نجمة Y قيمة المقاومة بكل وجة 20 Ω. لنوع التوصيل 120^o أوجد:

أ- القيمة الفعالة لتيار الخرج لكل وجه $I_{oph(rms)}$.

ب- القيمة الفعالة لتيار المفتاح الإلكتروني $I_{switch(rms)}$.

ج- القدرة المستهلكة للحمل P_o.

٤- ١٥ يتصل دخل عاكس قنطري ثلاثي الأوجه بمصدر جهد مستمر قيمته 400 V ويتصل خرج هذا العاكس بحمل مادي متصل على شكل دلتا Δ قيمة المقاومة بكل وجة 20 Ω ارسم تيار الخرج الثلاثة والتيارات المارة بالمفاتيح الستة في حالة نوع التوصيل 120^o.

٤- ١٦ يتصل خرج عاكس قنطرى ثلاثي الأوجه بحمل مادى قيمته 20Ω لكل وجه وعلى شكل نجمة Y. ويتصل دخل العاكس بمصدر جهد مستمر قيمته 220V ويعمل العاكس بنوع التوصيل 180° . ارسم موجات كل من تيارات الخرج وتيارات المفاتيح الستة.

٤- ١٧ يتصل خرج عاكس قنطرى ثلاثي الأوجه بحمل مادى قيمته 20Ω لكل وجه وعلى شكل دلتا Δ. ويتصل دخل العاكس بمصدر جهد مستمر قيمته 220V ويعمل العاكس بنوع التوصيل 180° . ارسم موجات جهود الخرج الثلاثة.

٤- ١٨ ما هي أهم استخدامات مصادر عدم انقطاع التيار (UPSs).

٤- ١٩ ارسم مخطط صندوقي يوضح المكونات الرئيسة لمصدر عدم انقطاع التيار مع شرح وظيفة كل مكون.

٤- ٢٠ وضح كيفية الحصول على موجة جهد خرج شبه جيبية من موجة خرج جهد العاكس.

إلكترونيات القوى

تطبيقات هامة في مجال القوى الكهربائية

الجدارة: الإلمام الشامل ببعض التطبيقات في مجال القوى الكهربائية.

الأهداف: عندما يكمل المتدرب هذه الوحدة يكون قد تمكن من تحقيق الأهداف والمهارات التالية:

- نظام نقل القدرة للجهد الفائق بخطوط التيار المستمر.
- مزايا وعيوب نقل القدرة بخطوط التيار المستمر.
- أنواع الموحدات المستخدمة عند نقل القدرة بخطوط التيار المستمر.
- عمل المحول (converter) كموحد أو كعاكس عند نقل القدرة بخطوط التيار المستمر.
- الربط بين نظم جهد متناوبة ومختلفة التردد وغير متزامنة.

الوقت المتوقع للتدريب: ٦ ساعات

الوسائل المساعدة:

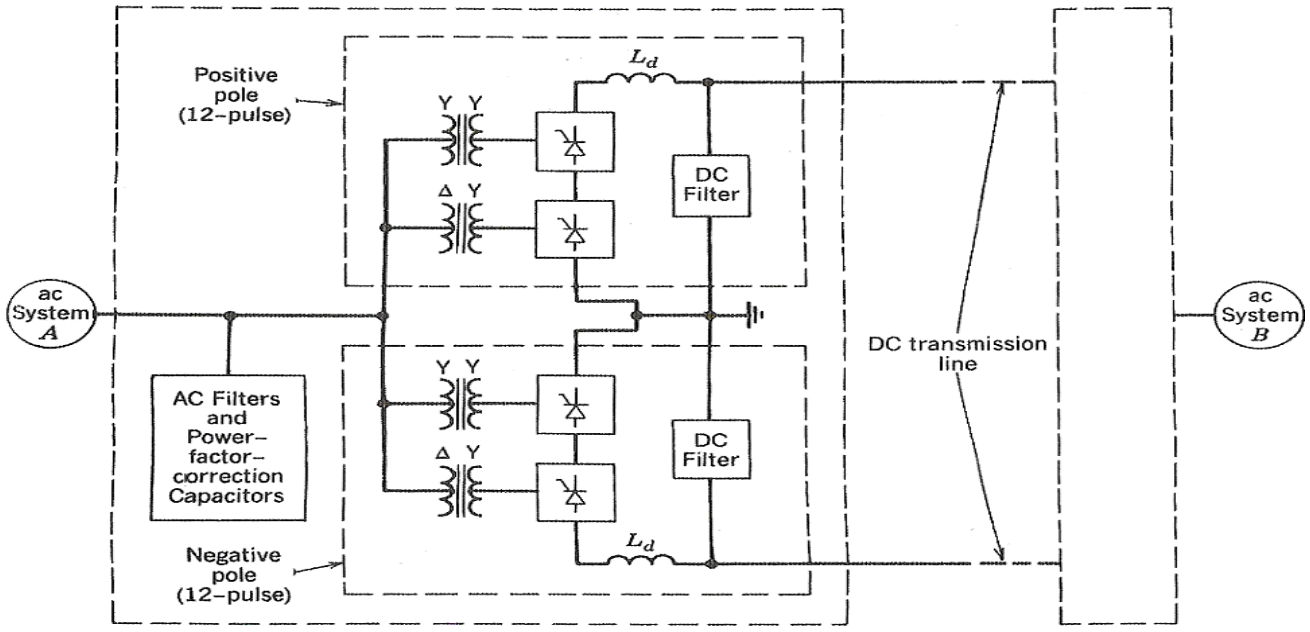
- السبورة
- عرض باستخدام برنامج Power Point

متطلبات الجدارة: دراسة الحقيبة التدريبية لمقرر دوائر كهربائية- ٢.

٥- ١ مقدمة

تولد المحطات الكهربائية القدرة بجهود وتيارات مترددة (متناوبة). يتم نقل هذه القدره لمراكز الأحمال باستخدام خطوط نقل ثلاثية الأوجه. ونقل الطاقة بالجهد الفائق المستمر له بعض المزايا الأخرى مثل تحسين الاستقرار العابر والاضمحلال الديناميكى لاهتزازات النظام الكهربى. يمكن من خلال نظام نقل القدرة بالتيار المستمر الربط ما بين نظامين متناوبين يعملا عند ترددات مختلفة وغير متزامنين. يبين شكل (٥- ١) شكل خط أحادي مطابق لنظام نقل القدرة بالجهد الفائق المستمر بين نظامين متناوبن. يشتمل كل نظام متناوب على محطة التوليد والأحمال الخاصه به ويمكن أن تسري القدرة عبر خطوط النقل فى اتجاهين متعاكسين إذا فرض أن القدرة تسري من النظام A للنظام B علما بأن جهد النظام A يقع فى المدى ما بين 69kV - 230kV ويتم رفع هذا الجهد من خلال محولات الرفع لمستويات جهود النقل. ثم يتم عمل توحيد لهذه الجهود باستخدام موحدات متصلة بالنظام A. تنقل هذه الجهود المستمرة خلال خطوط نقل فائقة الجهد. وعند نهاية هذه الخطوط يتم تحويل هذه الجهود المستمره فائقة الجهد إلى جهود متناوبة باستخدام عواكس متصلة بالنظام B. ثم يتم تخفيض هذه الجهود المتردده باستخدام محولات الخفض المتصلة بالنظام B . ثم تنقل هذه الجهود عبر خطوط نقل وتوزيع التيار المتردد لما هو مطلوب للنظام B.

ونلاحظ من الشكل (٥- ١) بأن كل موحد يتكون من قطب موجب وقطب سالب. وكل قطب يتكون من عدد 2 موحد قنطرى سداسى النبضة ويتصلان هذان الموحدان من خلال محولان على شكلا Y, Y-Y$_\Delta$- حتى يمكن الحصول على موحد خرجه 12 نبضة فى زمن دورى واحد. وعادة يكون من الضرورى استخدام مرشح لإزالة التوافقيات وتحسين معامل القدرة الكهربائية عند أطراف النظام المتردد A أو عند النظام المتردد B حيث يتم تحسين معامل القدرة باستخدام مجموعة مكثفات والذي يكون عادة متأخر نتيجة لوجود الأحمال الحثية بالنظام. وأيضا يتم استخدام مرشحات عند خرج دوائر الموحدات (دخل خطوط الجهد الفائق المستمر) للحصول على جهد مستمر ناعم خالى من التوافقيات وأيضا يتم استخدام ملفات حثية قيمتها L_d يتم توصيلها بمخارج الموحدات للحصول على تيار مستمر ناعم أى خال من التوافقيات ومما سبق يتضح وجود دوائر موحدات ودوائر عواكس متصل بخطوط الجهد الفائق المستمر والتى سوف يتم دراستها بالأجزاء التالية. .



الشكل (٥- ١) نظام لنقل القدرة للجهود الفائقة عن طريق خطوط التيار المستمر.

٥- ٢ موحدات الاثني عشرة نبضة Twelve-pulse rectifiers

يظهر الموحد القنطري سداسي النبضة ثلاثي الأوجه تحسن واضح في جودة جهد الخرج الموحد نسبة لجهد خرج الموحد أحادي الوجه. تكون توافقيات جهد الخرج صغيرة عند ترددات مضاعفة ستة مرات لتردد مصدر الجهد المتردد. يمكن تقليل هذه التوافقيات أكثر باستخدام عدد 2 موحد قنطري سادسي النبضة كما هو مبين بالشكل (٥- ٢) ويسمى هذا الشكل بموحد اثنتي عشرة نبضة. تتغذى إحدى الموحدات القنطرية من محول متصل على شكل Y-Y ويتغذى الموحد القنطري الآخر من خلال محول على شكل $Y-\Delta$ أو $\Delta-Y$. يكون الغرض من أستخدام المحول $Y-\Delta$ هو الحصول على موجات جهد مصدر مزاحة بزاوية قيمتها 30^o عن جهود المصدر الذي يغذي الموحد المتصل بالمحول Y-Y. وبالتالي يكون كل موحد قنطري من الاثنين يتم تغذيته بمصدر جهد مزحزح عن جهد الموحد الآخر بزاوية قيمتها 30^o. وأيضا تكون موجات كل موحد مزحزحة عن الأخرى بزاوية قيمتها 30^o ويكون جهد الخرج الكلي للموحدات هو مجموع جهود خرج الموحدان القنطريان وبالنسبة لزاويا إشعال الموحدان يكون كل منهما مثل الآخر ولكن بزاوية تأخير 30^o كل منهما عن الأخرى.

القيمة المتوسطة لجهد خرج الموحد ذو الاثنتي عشرة نبضة هي:

$$V_{o(avg)} = \frac{6}{\pi} V_{m(L-L)} \cos\alpha \qquad (٥ - ١)$$

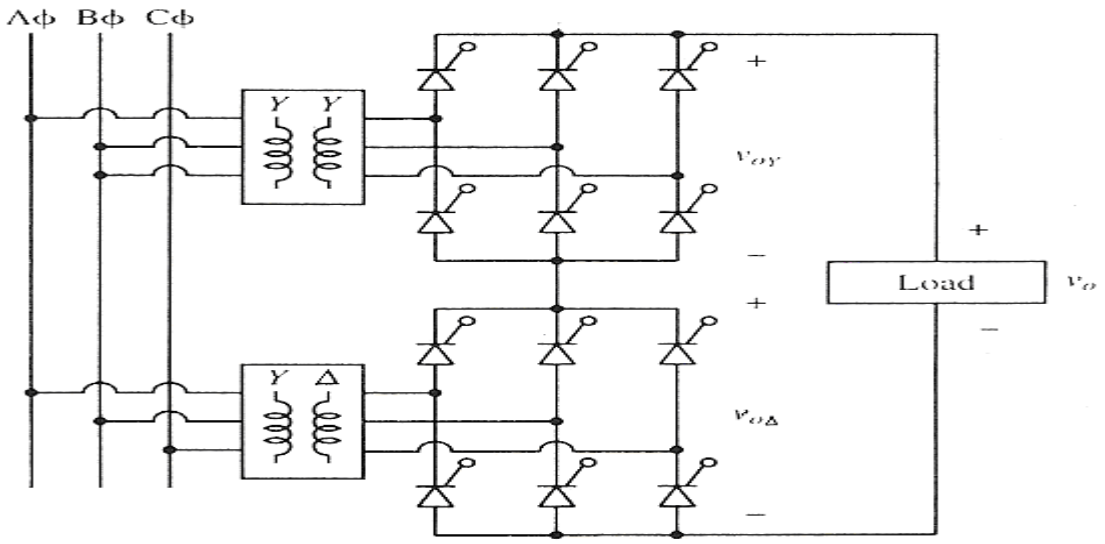
ولمراعاة تذبذب مصدر الجهد فإن القيمة القصوى لجهد الموحد ذات الاثنتي عشرة نبضة تحدث عند زاوية إشعال 15^o وهي:

$$V_{om} = 2V_{m(L-L)} \cos 15^o = 1.932 V_{m(L-L)} \qquad (٥ - ٢)$$

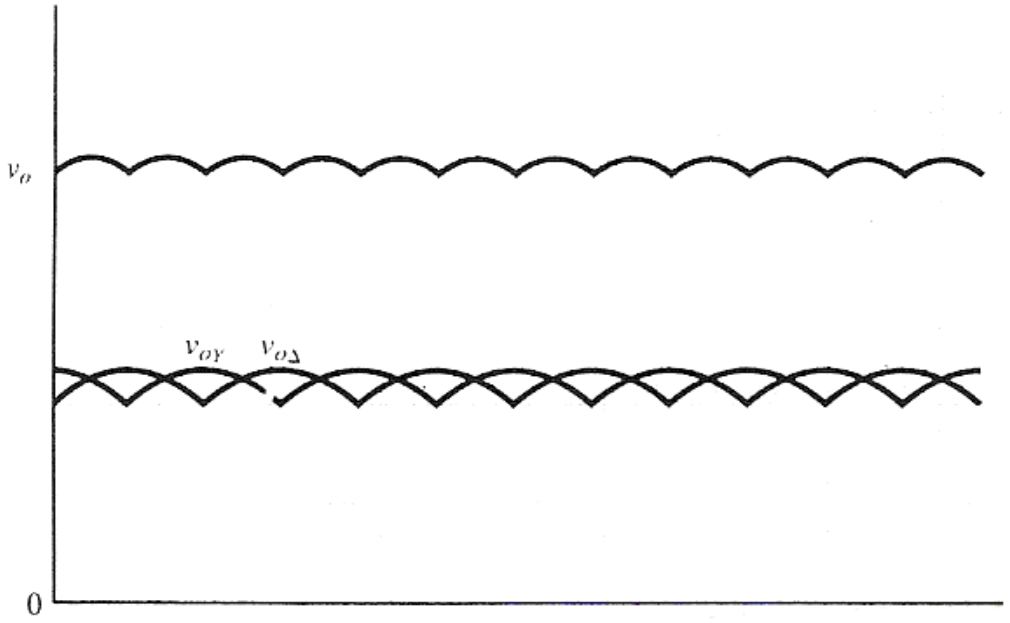
حيث $V_{m(L-L)}$ تمثل القيمة العظمى لجهد الخط.

يبين الشكل (٥- ٣) جهد خرج الموحد ذات الاثنتي عشرة نبضة عند زاوية إشعال قيمتها 0.

مما سبق نستنتج للشكل (٥- ٢) بأن الإنتقال بين مجموعة الثيرستورات الموجودة بالموحد القنطرى سداسى النبضة والمتصل بالمحول Y-Y وبين مجموعة الثيرستورات الموجودة بالموحد القنطرى سداسى النبضة والمتصل $\Delta - Y$ يحدث كل °30. وبالتالى عدد الإنتقالات الكلية خلال زمن دورى كامل لمصدر الجهد المتردد تبلغ 12. وتكون ترددات التوافقيات الموجودة بجهد الخرج الكلى 12 مرة أو مضاعفات العدد 12 بالنسبة لتردد المصدر المتردد. وتكون تكلفة المرشح المطلوبة لإزالة هذه التوافقيات أقل من تكلفه المرشح المطلوب لإزاله التوافقيات الموجودة بجهد خرج الموحد القنطرى سداسى النبضة.



الشكل (٥- ٢) موحد إثنتا عشرة نبضة ثلاثي الأوجه.



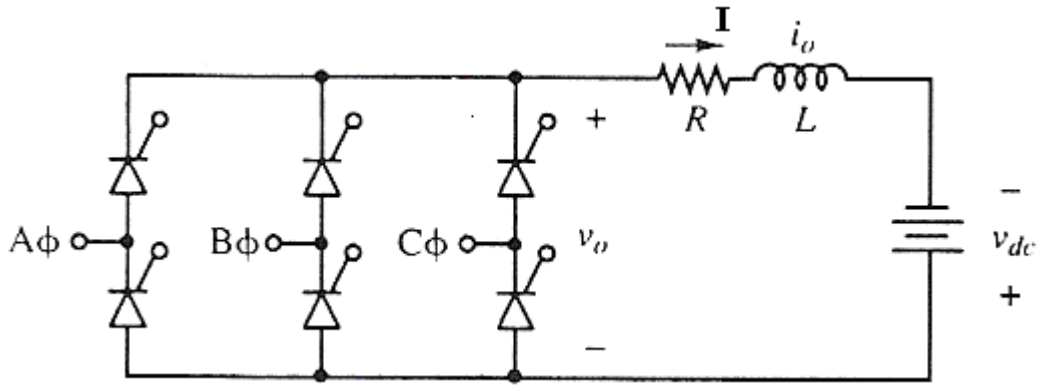
الشكل (٥- ٣) جهد خرج الموحد ذو إثنتي عشرة نبضة ثلاثي الأوجه عند زاوية إشعال $\alpha=0$.

٥- ٣ عمل الموحد ثلاثي الأوجه كعاكس:

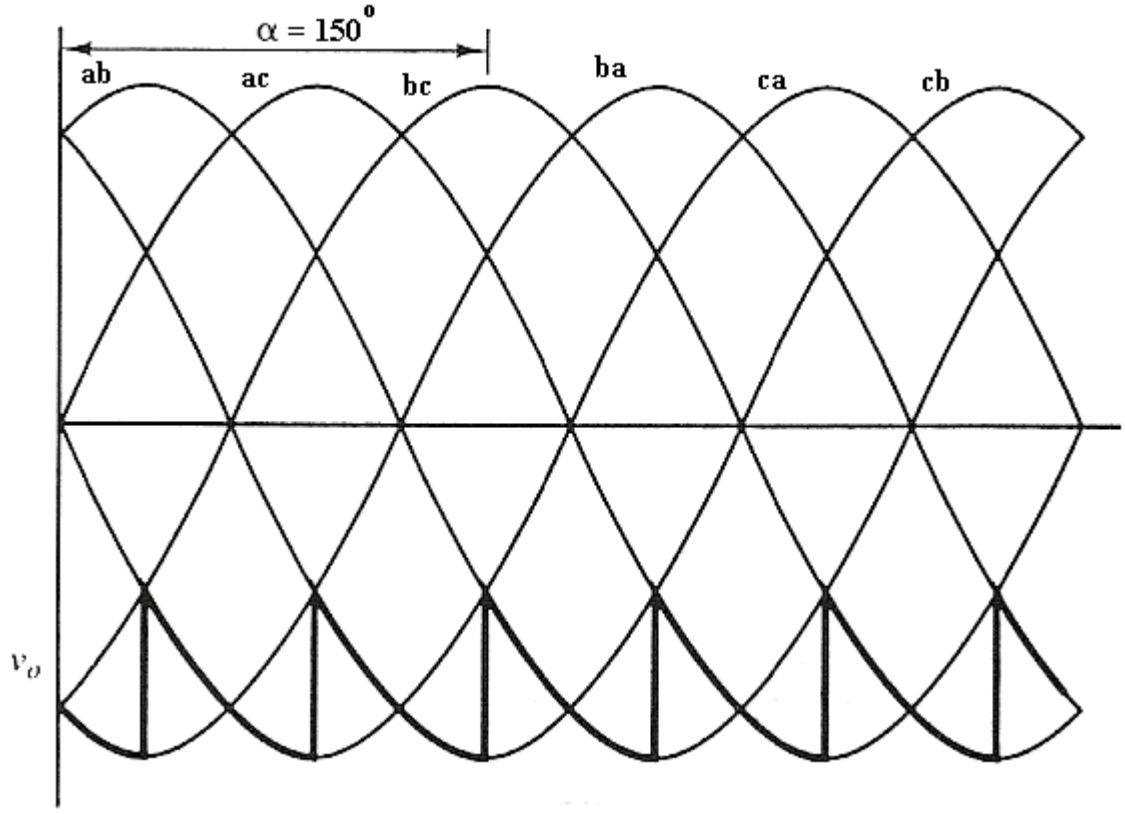
تركزت الدراسة السابقة على أساس أن الدوائر تعمل كموحدات وهذا يعنى سريان القدرة يكون من جهه مصدر الجهد المتردد لجهه خرج الجهد المستمر للموحد. ومن الممكن أيضا للموحد القنطرى ثلاثي الأوجه أن يعمل كعاكس بحيث يجعل اتجاه سريان القدرة من جهة الجهد المستمر لجهة مصدر الجهد المتردد. والدائرة التى تمكن الموحد أن يعمل كعاكس مبينة بالشكل (٥- ٤) ويتم فى هذه الحالة تغذية القدرة من خلال الجهد المستمر ويتم نقل القدرة من مصدر الجهد المستمر لجهه مصدر الجهد المتردد عبر الموحد والذى يمتص القدرة من الجهد المستمر ويمرره بدوره لجهة الجهد المتردد ويكون اتجاه سريان التيار المستمر كما هو موضح بالشكل (٥- ٤). ولابد أن يكون جهد خرج الموحد القنطرى فى هذه الحالة سالب القيمة ولكى يعمل الموحد كعاكس فلابد أن تكون قيم زوايا الإشعال أكبر من $90°$ وفى هذه الحالة سوف تتحقق القيم السالبة لجهد خرج الموحد (القيمة المتوسطة لجهد خرج الموحد) وبالتالى يمكن إيجاز عمل القنطرة كموحد أو كعاكس حسب قيم زوايا الإشعال بالإضافة إلى قطبية الجهد المستمر. وتكون القيمة المتوسطة لجهد الخرج $V_{o(avg)}$ أكبر من الصفر فى حالة إشعال الموحد بزوايا إشعال تقع فى المدى من 0 إلى $90°$ ($0<\alpha<90°$) وتعمل الدائرة كموحد وتكون القيمة المتوسطة لجهد الخرج $V_{o(avg)}$ سالبة فى حاله إشعال الموحد بزوايا إشعال تقع فى المدى من $90°$ حتى $180°$ ($90°<\alpha<180°$) وتعمل القنطرة فى هذه الحاله كعاكس. يبين الشكل (٥-

٥) موجه جهد الخرج الموحد المبين بالشكل (٥- ٤) عند زاوية إشعال $150°$ ويكون تيار الحمل متصل.
يمكن كتابة معادلة القيمة المتوسطة لجهد خرج $V_{o(avg)}$ الموحد القنطرى سداسى النبضة كالآتى :

$$V_{oavg} = \frac{3}{\pi} V_{m(L-L)} \cos\alpha \qquad (٥- ٣)$$



الشكل (٥- ٤) موحد قنطري سداسي النبضة ثلاثي الأوجه يعمل كعاكس.



الشكل (٥- ٥) جهد خرج الموحد القنطري سداسي النبضة عند زاوية إشعال $\alpha=150^o$.

مثال (٥- ١):

يتغذى الموحد القنطرى سداسى النبضة والمبين بالشكل (٥- ٤) من مصدر جهد متناوب قيمته جهد الخط الفعاله له 4160V. إذا علمت بأن قيمة زاوية الإشعال $120°$ وقيمة الجهد المستمر 3000V والقيمة المادية للحمل $R=2\Omega$ وبإفتراض أن القيمة الحثية للملف كبيرة جدا بالنسبة للمقاومة المادية ($\omega L >> R$) بحيث تجعل التيار المستمر له قيمة ثابتة. احسب قيمة القدرة المنقولة من المصدر المستمر لجهة مصدر الجهد المتردد.

الحل:

$$V_{m(L-L)} = \sqrt{2}V_{L-L} = 4160\sqrt{2} = 5883.13V$$

القيمة المتوسطة لجهد خرج الموحد القنطرى :

$$V_{o(avg)} = \frac{3}{\pi}V_{m(L-L)}\cos\alpha$$
$$= \frac{3}{\pi}5883.13\cos 120^o$$
$$= -2809\ V$$

القيمة المتوسطة لتيار الخرج :

$$I_{o(avg)} = \frac{V_{0avg+}V_{dc}}{R}$$
$$= \frac{-2809+3000}{2} = 95.5A$$

يعمل الموحد فى حالتنا هذه كعاكس لأن زاوية الإشعال قيمتها $120°$ وبالتالى تكون القدرة المتصة من الموحد القنطرى والمنتقلة راجعة إلى مصدر الجهد المتردد تحسب الآتى :

$$P_{ac} = -I_{o(avg)}V_{o(avg)}$$
$$= -(95.5)(-2809)$$
$$= 268.3KW$$

القدرة المفقودة بالمقاومة المادية :

$$P_R = I^2{}_{o(rms)}\ R = I^2{}_{o(avg)}R = (95.5)^2 2 = 18.2KW$$

القدرة المغذاه من الجهد المستمر

$$P_{dc} = I_{o(avg)}V_{dc} = (95.5)(3000) = 286.5KW$$

نلاحظ أن $P_{dc} = P_{ac} + P_R$

٥- ٤ نقل القدرة بالتيار المستمر DC power transmission

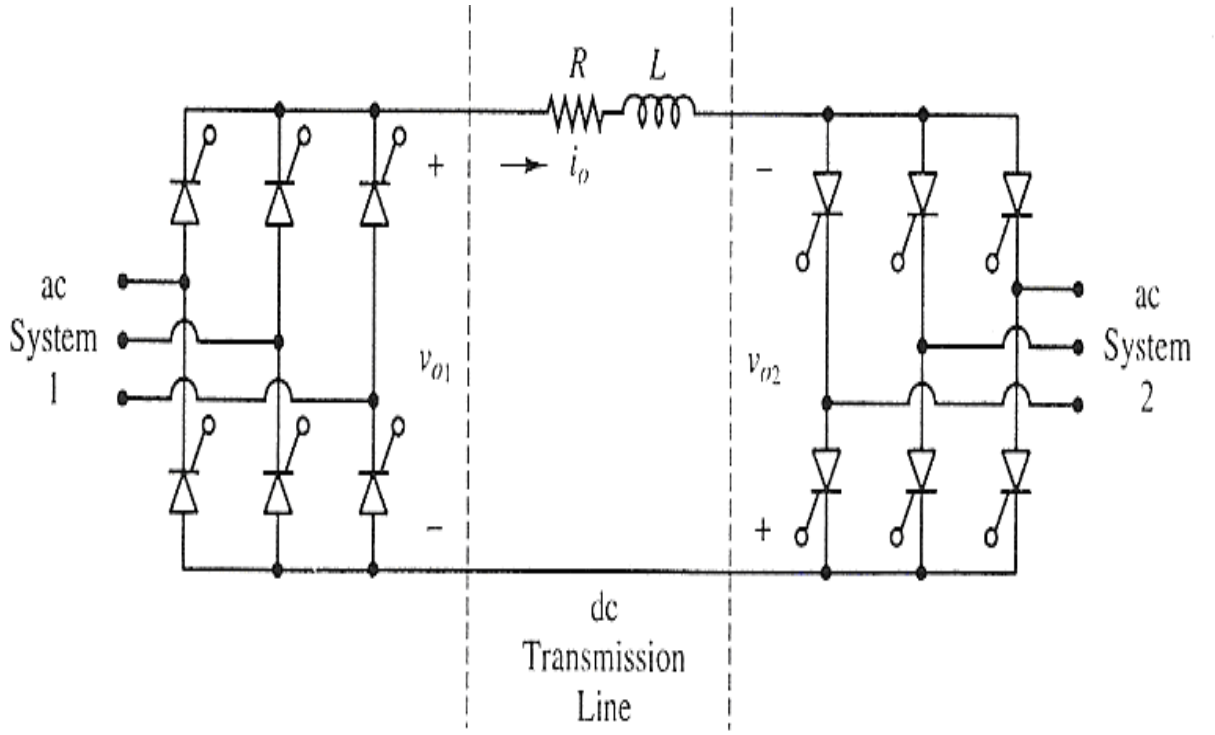
يمثل الموحد المحكوم ذو الاثني عشرة نبضة والمبين بشكل (٥- ٢) العنصر الرئيس لنقل القدرة بالتيار المستمر. تستخدم خطوط نقل التيار المستمر بصفة رئيسية لنقل القدرة الكهربائية عبر مسافات طويلة مثل خطوط نقل التيار المستمر والمستخدمة لربط الكهرباء مابين انجلترا وفرنسا خلال القناة البحرية والتى تربط بين البلدين . تستخدم خطوط التيار المستمر الحديثة الثيرستورات بدوائر الموحدات وسابقا كانت تستخدم هذه الخطوط موحدات القوس الزئبقى .

تتميز خطوط نقل القدرة بالتيار المستمر بالمزايا التالية بمقارنتها بخطوط نقل القدرة بالتيار المتردد:

- خطوط نقل التيار المستمر لها قيمة مفاعلة حثية صفرية بينما تكون قيمة المفاعلة الحثية كبيرة فى حالة خطوط نقل التيار المتردد وبالتالي تكون قيمة فرق الجهد أقل في حالة خطوط نقل التيار المستمر.
- تكون قيمة المفاعلة السعوية للمكثفات الموجودة بين الموصلات لها قيمة لانهائية (دائرة مفتوحة) فى حالة خطوط نقل القدرة بالتيار المستمر وبالتالى نتيجة لعدم مرور تيارات بهذه المكثفات تكون قيمة الفقد الموجودة فى حالة خطوط نقل القدرة بالتيار المستمر أقل من القدرة المفقودة في حاله نقل القدرة بالتيار المتردد.
- عدد الموصلات المطلوبة فى حاله نقل القدرة بالتيار المستمر أقل من نظيره فى حاله نقل القدرة بالتيار المتردد وبالتالي تكلفة الموصلات أقل في حالة خطوط نقل التيار المستمر.
- يتم التحكم فى القدرة المنقوله بالتحكم فى زاوية الإشعال فى حالة استخدام النقل بالتيار المستمر لوجود الموحدات القنطرية بينما لايتم التحكم فى القدرة المنقولة فى حاله النقل بالتيار المتردد على نظام التوليد والأحمال.
- يمكن أن تتغير القدرة خلال الاضطرابات على إحدى نظم التيار المتردد ناتجا زيادة فى استقرار النظام.
- يتم توصيل نظامين تيارين مترددين من غير حاجة أن يكونا متزامنين فى حاله نقل القدرة بالتيار المتردد أكثر من هذا نظامى التيار المتردد ليس فى حاجة أن يعملا عند نفس التردد فالنظام الذى يعمل عند تردد 50HZ بنظام آخر يعمل عند تردد 60HZ خلال الربط بخطوط التيار المستمر.

أما عيوب نقل القدرة بالتيار المستمر يمكن إيجازه فى تكلفة الموحدات والمرشحات المستخدمة ونظام التحكم المطلوب بالنهاية الطرفية لكل خط واللازم لربط نظام التيار المتردد.

يبين الشكل (٥- ٦) نظام بسيط لنقل القدرة بالتيار المستمر باستخدام قنطرة التوحيد المحكومة ثلاثية الأوجه والموجودة بنهايتى خط القدرة المستمر. حيث يكون لكل نظام تيار متناوب مصادر التوليد الخاصة به ويكون الغرض من خط قدرة التيار المستمر هو تمكين القدرة بأن تنتقل بالتبادل بين نظم التيار المتردد تبعا للاتجاه المطلوب لسريان القدرة. يكون اتجاه الثيرستورات بحيث تجعل التيار i_o موجب كما هو مبين بالخط للنظام (الشكل (٥- ٦)) حيث تعمل إحدى القناطر كموحد وتكون اتجاه القدرة من جهة مصدر التيار المتردد لجهة التيار المستمر وتعمل القنطرة الثانية كعاكس بحيث يكون اتجاه نقل القدرة من جهه التيار المستمر لجهة التيار المتردد ويمكن لأي من القنطرتين أن تعملا كموحد أو كعاكس ويعتمد هذا على قيمة زاوية إشعال كل موحد وبضبط زاوية الإشعال لكل قنطرة يتم التحكم فى سريان القدرة بين نظامي التيار المتردد خلال الربط بخط التيار المستمر.



الشكل (٥- ٦) نظام أساسي لنقل القدرة بخطوط التيار المستمر.

تكون القيمة الحثية لخط التيار المستمر هى القيمة الحثية لخط التيار المستمر مضاف إليها مجموعة خارجية من الملفات الحثية المتصلة مع بعضها على التوالى بغرض إزالة التوافقيات الموجودة بخطوط التيار المستمر. وتكون القيمة المادية للمقاومة R هى قيمة مقاومة الملفا ت الحثية لخط التيار المستمر وبالتالى يتم التحليل الرياضى لخط التيار المستمر باعتبار أن تيار الخط المستمر له قيمة ثابتة أى

أنه خالٍ من التوافقيات وأن الجهود المتوسطة عند أطراف القناطر هما V_{o2},V_{o1} وتكون قيم هذه الجهود موجبة إذا ما وقعت قيمة زاوية الإشعال فى المدى مابين 0 إلى $90°$ وتكون سالبة إذا ماوقعت هذه الزاوية فى المدى ما بين $90°$ إلى $180°$. وبالطبع تكون القنطرة التي تنقل القدرة لجهة القنطرة الأخرى هي القنطرة التي لها قيمة جهد موجب وتكون القنطرة التي تمتص هذه القدرة هو القنطرة التي لها قيم جهد سالبة.

بافتراض أن القنطرة رقم 1 (قنطرة1) تعمل كقنطرة والقنطرة رقم 2 (موحد 2) تعمل كعاكس (الشكل (٥- ٦)) فتكون الدائرة المكافئة لحسابات قدرة النظام المبين بالشكل (٥- ٦) هى الدائرة المبينة بالشكل (٥- ٧) وبالتالى يمكن حساب تيار خط القدرة المستمر تبعا للمعادلة:

$$I_O = \frac{V_{o1} + V_{o2}}{R} \qquad (٤-٥)$$

حيث القيمة المتوسطة لجهد خرج كل قنطرة يمكن أن يتم حسابه تبعا للمعادلات التالية:

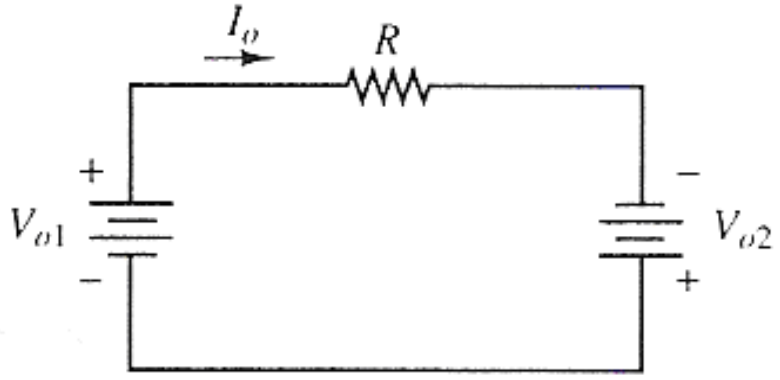
$$V_{o1} = \frac{3}{\pi} V_{m1(L-L)} \cos\alpha \qquad (٥ -٥)$$

$$V_{o2} = \frac{3}{\pi} V_{m2(L-L)} \cos\alpha \qquad (٦ -٥)$$

حيث يمكن حساب القيمة المتوسطة لخرج كل قنطرة تبعا للمعادلات الآتية:

$$P_1 = V_{o1}\, I_o \qquad (٧ -٥)$$

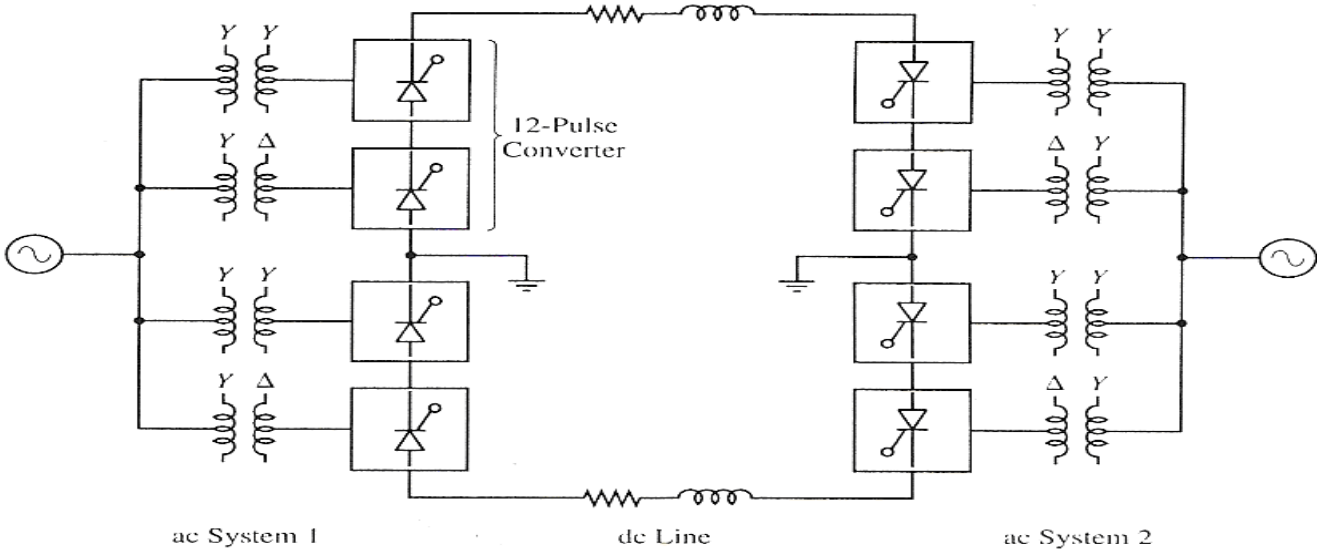
$$P_2 = V_{o2}\, I_o \qquad (٨ -٥)$$



الشكل (٥- ٧) الدائرة المكافئة للنظام الأساسي لنقل القدرة بخطوط التيار المستمر.

يبين الشكل (٥- ٨) شكل من الأشكال الشائعة لخط نقل التيار المستمر والمستخدمة قناطر إثنتي عشرة نبضة عند كل نهاية طرفية لخط نقل التيار المستمر وباستخدام هذا النظام تضمحل التوافقيات وتقل متطلبات المرشحات المطلوبة. وباستخدام عدد زوج من قناطر أثني عشرة نبضة عند كل نهاية طرفية لخط نقل التيار المستمر كما هو مبين بالشكل (٥- ٨) يمكننا العمل بنظام القطبية

الثنائي (bipolar) حيث يكون جهد إحدى خطوط التيار المستمر $+V_{dc}$ والخط الآخر يكون جهده $-V_{dc}$ وفي حالات الطوارئ يمكن تشغيل خط واحد بدلا من استخدام الخطين حيث يكون رجوع التيار المستمر عبر المسار الأرضي الموجود مع النظام.



الشكل (٥- ٨) نظام نقل القدرة بالتيار المستمر بأستخدام موحدات الاثني عشرة نبضة.

مثال (٥- ٢):

قيمة جهد الخط المتردد الفعال 230 kV عند كل موحد قنطري والمبين بالشكل (٥- ٦) لنظام نقل القدرة الرئيس وقيمة المقاومة الكلية لخط التيار المستمر 10 Ω وبافتراض أن القيمة الحثية لخط التيار المستمر كبيرة جدا بحيث تجعل التيار المار بخط التيار المستمر خالٍ من التوافقيات. إذا علمت بأن الهدف هو نقل قدرة قيمتها 100 MW لنظام التيار المتردد رقم 2 من نظام التيار المتردد رقم 1 عبر خط قدرة التيار المستمر. المطلوب:

أ- حساب قيم زاويا الإشعال للموحد والعاكس بفرض أن $V_{o2} = 200$ kV.

ب- تعيين قيمة التيار المستمر I_o.

ج- حساب القدرة المفقودة بخط قدرة التيار المستمر P_{loss}.

الحل:

أ- يمكن تصميم النظام المقترح بالقدرة المطلوب نقلها لنظام التيار المتردد رقم 2 بالاستعانة بالمعادلة (٥- ٤) حتى المعادلة (٥- ٨) كالآتي:

$$V_{m(L-L)} = \sqrt{2}\, V_{rms(L-L)} = 230\sqrt{2} = 325.27\, kV$$
$$P_2 = I_o\, V_{o2} = -100\, MW$$

حيث تعمل القنطرة 2 كعاكس والقنطرة 1 كموحد.

القيمة العظمى للجهد المستمر يتم حسابها عند قيم زاوية إشعال $\alpha = 0$ للمعادة (٥- ٥) أو المعادلة (٥- ٦) كالآتي:

$$V_{o\max} = \frac{3}{\pi} V_{m(L-L)} = \frac{3}{\pi} 325.27 = 310.6\, KV$$

وبالتالي تكون قيمة الجهد المستمر للموحدات أقل من قيمة $V_{0\max}(310.6kV)$ وبالتالي عند التصميم يمكن أخذ قيمة اعتبارية للجهد المستمر للقنطرة 2 ولتكن $V_{o2} = -200\, kV$ والإشارة السالبة تعني بأن هذا القنطرة يعمل كعاكس وتمتص القدرة الآتية من القنطرة 1. وبالتالي يمكن حساب زاوية إشعال القنطرة 2 كالآتي:

$$V_{o2} = \frac{3}{\pi} V_{m(L-L)} \cos\alpha_2 = -200\, KV$$
$$\therefore -200\, KV = V_{o\max} \cos\alpha_2$$
$$-200 = 310.6 \cos\alpha_2$$
$$\therefore \alpha_2 = \cos\left(-\frac{200}{310.6}\right) = 130^o$$

قيمة تيار خط القدرة المستمر I_o يمكن حسابه كالآتي:

$$P_2 = V_{o2}\, I_o$$
$$\therefore I_o = \frac{P_2}{V_{o2}} = \frac{100\, MW}{200\, KV} = 500\, A$$

يمكن حساب زاوية إشعال الموحد كالآتي:

$$V_{o1} = \frac{3}{\pi} V_{m(L-L)} \cos\alpha_1 = V_{o\max} \cos\alpha_1$$
$$\therefore \alpha_1 = \cos^{-1}\left(\frac{V_{o1}}{V_{o\max}}\right)$$
$$\because V_{o\max} = 310.6\, KV \quad , \quad V_{o1} = -V_{o2} + I_o R = 200\, Kv + 500(10)V = 205\, KV$$
$$\therefore \alpha_1 = \cos\left(\frac{205}{310.6}\right) = 48.7^o$$

ب- كما سبق بالفقرة (أ) فإن قيمة تيار خط القدرة المستمر I_o قيمته $500\, A$

ج- يمكن حساب قيمة القدرة المفقودة بخط القدرة المستمر P_{loss} كالآتي:

$$P_{loss} = I_{orms}^2 R = I_o^2 R = 500^2 * 10 = 2.5\,MW$$
$$\therefore P_1 = P_2 + P_{loss} = 200 + + 2.5 = 202.5\,MW$$

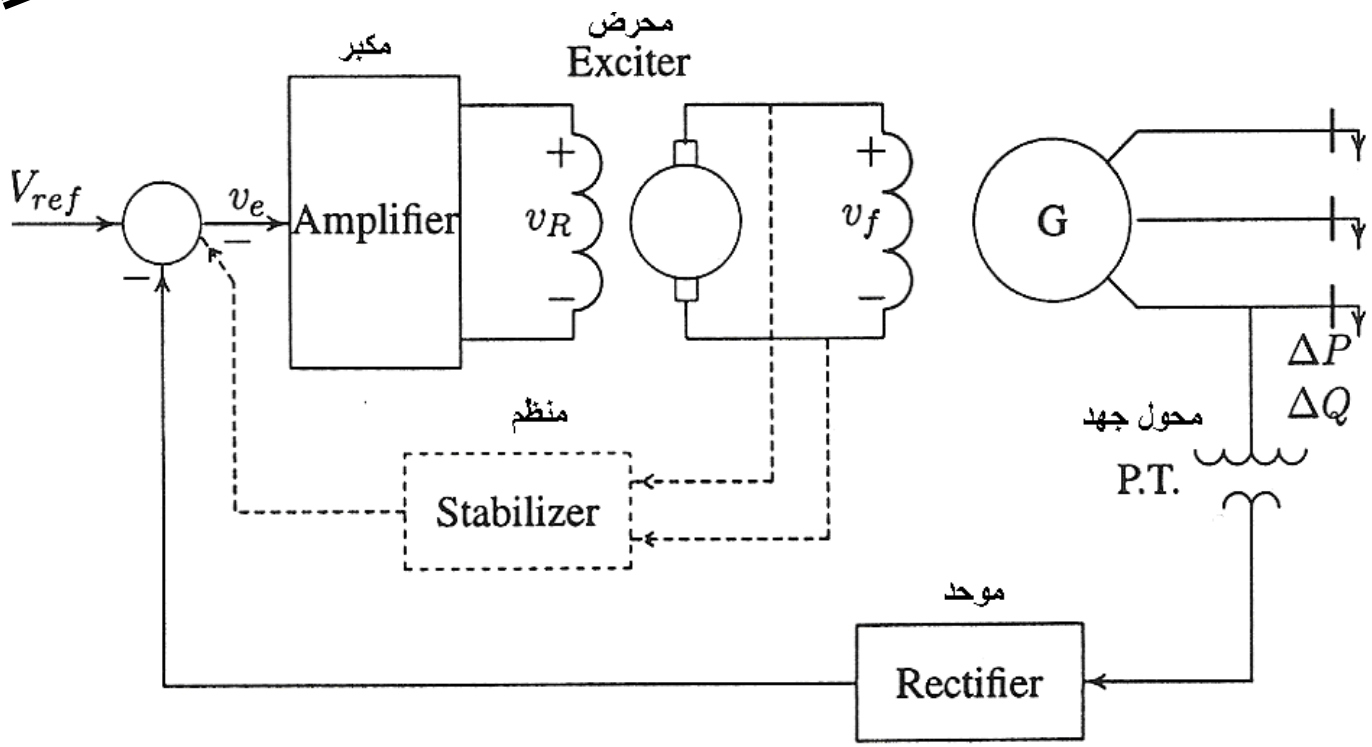
حيث إن P_1 تمثل القدرة الكلية عند القنطرة 1 والمنتقلة للقنطرة 2.

٥- ٥ تغذية مجال المولدات المتزامنة The field excitation of synchronous generator

يحافظ نظام تغذية المولد على قيمة الجهد الخارج من المولد ويتحكم في قيمة سريان القدرة اللافعالة. وللنظم القديمة لتغذية المولد ربما يتم التغذية من خلال حلقات التزحلق والفرش (brushes) باستخدام مولدات تيار مستمر مركبة على نفس عمود الدوران كما في حالة العضو الدوار للآلة المتزامنة. تستخدم نظم التغذية الحديثة مولدات تيار متردد مع موحدات دوارة والمعروفة باسم التغذية بدون الفرش(brushless). تتأثر قيمة جهد المولدات المتزامنة بالتغير الحادث لقيمة القدرة اللافعالة .

تتمثل مصادر القدرة اللافعالة في المولدات والمكثفات والملفات. يتم التحكم للقدرات اللافعالة للمولدات عن طريق تغذية المجال بالإضافة لإمكانية استخدام المكثفات ذات الفصل والتوصيل ومنظمات خفض الجهد ومعدات تحكم القدرة اللافعالة الاستاتيكية. تكون الوسائل الأولية للتحكم في القدرة اللافعالة للمولدات للتحكم في تغذية المولد باستخدام منظم الجهد التلقائي (AVR). .والغرض من استخدام هذا المنظم هو لإبقاء قيمة الجهد الطرفي للمولدات المتزامنة عند مستوى معين. يبين شكل (٥- ٩) شكل توضيحي بسيط لمنظم الجهد التلقائي .

يصحب أي زيادة للقدرة اللافعالة لحمل المولد انخفاض في قيمة الجهد الطرفية للمولد المتزامن. يتم استشعار قيمة الجهد من خلال محول جهد متصل بكل وجه من الأوجه الثلاثة. ويتم توحيد هذا الجهد ثم تتم مقارنة الجهد الموحد (الجهد المستمر) بإشارة مرجعية ذات الجهد المستمر. وتتحكم إشارة الخطأ المكبرة في المجال المغذي وتزيد من قيمة الجهد الطرفية وبالتالي تزداد قيمة تيار مجال المولد والذي ينتج بالتالي زيادة في القوة الكهرومغناطيسية (emf) المولدة وبالتالي تزداد قدرة التوليد الفعالة لقيمة اتزان جديدة وترفع قيمة الجهد الطرفية للقيمة المطلوبة.



الشكل (٥- ٩) شكل توضيحي بسيط لمنظم الجهد التلقائي

٥- ٦ أسئلة وتمارين:

٥- ١ هل يمكن ربط أو توصيل نظامين متناوبين مختلفين في التردد وغير متزامنين؟ كيف؟

٥- ٢ ما هي مزايا نقل القدرة باستخدام الجهد الفائق بالتيار المستمر؟

٥- ٣ لماذا يتم عادة استخدام الموحدات الاثنتي عشرة نبضة عند نقل القدرة للجهد الفائق بالتيار المستمر؟

٥- ٤ مالغرض من استخدام محولين على هيئة Y-Y, Y-Δ والمتصلة بالموحد الاثنى عشرة نبضة؟

٥- ٥ ارسم دائرة توضح النظام الأساسي لنقل القدرة بخطوط التيار المستمر والدائرة المكافئة لهذا النظام.

٥- ٦ كيف تعمل الموحدات كعواكس؟

٥- ٧ لماذا يتم استخدام نظام القطبية الثنائي (bipolar) عند نقل القدرة للجهد الفائق بالتيار المستمر؟

٥- ٨ كيف يمكن إزالة توافقيات الجهد والتيار عند أطراف خطوط نقل القدرة للجهد الفائق بالتيار المستمر؟

٥- ٩ يتغذى الموحد القنطرى سداسى النبضة والمبين بالشكل (٥- ٤) من مصدر جهد متناوب قيمته جهد الخط الفعاله له 4160V. إذا علمت بأن قيمة زاوية الإشعال 150° وقيمة الجهد المستمر 3000V والقيمة المادية للحمل R=1Ω وبافتراض أن القيمة الحثية للملف كبيرة جدا بالنسبة

للمقاومة المادية ($\omega L >> R$) بحيث تجعل التيار المستمر له قيمة ثابتة. احسب قيمة القدرة المتنقلة من المصدر المستمر لجهة مصدر الجهد المتردد.

٥- ١٠ قيمة جهد الخط المتردد الفعال 220 kV عند كل موحد قنطري والمبين بالشكل (٥- ٦) لنظام نقل القدرة الرئيس وقيمة المقاومة الكلية لخط التيار المستمر 6 Ω وبافتراض أن القيمة الحثية لخط التيار المستمر كبيرة جدا بحيث تجعل التيار المار بخط التيار المستمر خالٍ من التوافقيات. إذا علمت بأن الهدف هو نقل قدرة قيمتها 120 MW لنظام التيار المتردد رقم 2 من نظام التيار المتردد رقم 1 عبر خط قدرة التيار المستمر. المطلوب:

أ- حساب قيم زاويا الإشعال للموحد والعاكس بفرض أن $V_{o2} = 220$ kV..

ب- تعيين قيمة التيار المستمر I_o.

ج- حساب القدرة المفقودة بخط قدرة التيار المستمر P_{loss}.

المراجع

(1) Ashfaq Ahmed : "Power Electronics for Technology", Prentice-Hall, 1999.

(2) M. H. Rashid: "Power Electronics: Circuits, Devices, and Applications", Second Edition, Prentice-Hall, 1993.

(3) David A. Bradley: "Power Electronics", Second Edition, Nelson Thornes, 1995.

(4) Ned Mohan, Tore M. Undeland, and William P. Robbins: "Power Electronics: Converters, Applications, and Design", Second Edition, John Wiley & Sons, 1995.

المحتويات

الوحدة الأولى : أشباة الموصلات المستخدمة في دوائر إلكترونيات القوى

١- ١ مقدمة ٢
١- ٢ دايود القدرة ٢
١- ٣ الثيرستور ٤
١- ٣- ١ أنواع الثيرستور المختلفة ٥
١- ٣- ١- ١ الموحد السليكوني المحكوم ٦
١- ٣- ١- ٢ الثيرستور ذو بوابة إطفاء ٩
١- ٤ الترياك ١٠
١- ٥ طرق إشعال الثيرستور ١٢
١- ٥- ١ الإشعال بالحرارة و الضوء ١٢
١- ٥- ٢ الإشعال بالجهد العالي ١٣
١- ٥- ٣ الإشعال بمعدل الجهد المسلط ١٣
١- ٥- ٤ الإشعال بالبوابة ١٣
١- ٦ حماية الثيرستور ١٤
١- ٧ ترانزستور القدرة ١٥
١- ٧- ١ ترانزستور ثنائي القطبية ١٦
١- ٧- ٢ ترانزستور تأثير المجال المعدني الأكسيدي شبه الموصل ١٧
١- ٧- ٣ ترانزستورالثنائي ذو البوابة المعزولة ١٩
١- ٨ أسئلة ٢١

الوحدة الثانية : دوائر التوحيد

٢- ١ مقدمة ٢٤
٢- ٢ أنواع دوائر التوحيد ٢٤
٢- ٣ الموحدات غير المحكومة ٢٥
٢- ٣- ١ موحد نصف الموجة غير المحكوم ٢٥
٢- ٣- ٢ موحدات الموجة الكاملة غير المحكومة ٢٧

٢- ٤ الموحدات المحكومة أحادية الوجه ٢٩
٢- ٤- ١ موحدات نصف موجة محكومة أحادية الأوجه مع الحمل المادي ٢٩
٢- ٤- ٢ موحدات نصف موجة محكومة أحادية الوجه مع الحمل الحثي ٣٣
٢- ٤- ٣ موحدات موجة كاملة محكومة كليًا أحادية الوجه ٣٥
٢- ٤- ٣- ١ الحمل المادي ٣٥
٢- ٤- ٣- ٢ حالة الحمل الحثي 'R-L' ٣٩
٢- ٥ الموحدات غير المحكومة ثلاثية الأوجه ٤٣
٢- ٥- ١ دوائر التوحيد نصف موجة ثلاثية الأوجه ٤٣
٢- ٥- ٢ دوائر التوحيد موجة كاملة ثلاثية الأوجه ٤٤
٢- ٦ الموحدات المحكومة ثلاثية الأوجه ٤٥
٢- ٦- ١ موحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي ٤٦
٢- ٦- ١- ١ حالة موجات خرج متصلة لموحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه متصل بحمل مادي ٤٧
٢- ٦- ١- ٢ حالة موجات خرج غير متصلة لموحد نصف موجة محكوم ثلاثي الأوجه متصل بحمل مادي ٥١
٢- ٦- ٢ موحد قنطري محكوم كامل الموجة ثلاثي الأوجه ومتصل بحمل مادي ٥٣
٢- ٧ استخدام دوائر التوحيد في شحن البطاريات ٦١
٢- ٨ أسئلة و تمارين ٦٣

الوحدة الثالثة : دوائر حاكمات الجهد المتردد

٣- ١ مقدمة ٦٦
٣- ٢ فكرة عمل حاكم الجهد المتردد ٦٦
٣- ٣ طرق التحكم في الخرج لحاكم الجهد المتردد ٦٧
٣- ٣- ١ التحكم بالتشغيل والفصل ٦٧
٣- ٣- ٢ التحكم الوجهي ٧٠
٣- ٤ حاكم الجهد المتردد أحادي الوجه مع حمل حثي ٧٢
٣- ٥ استخدام حاكم الجهد المتردد كمعوض للقدرة غير الفعالة في الشبكة الكهربائية ٧٥

٣- ٥- ١ ملفات محكومة بالثيرستور ٧٥
٣- ٥- ٢ المكثفات ذات المفاتيح بالثيرستور ٧٧
٣- ٦ أسئلة وتمارين ٧٨

الوحدة الرابعة : عواكس القدرة

٤- ١ مقدمة ٨٠
٤- ٢ التطبيقات الصناعية للعواكس ٨٠
٤- ٣ أساسيات العاكس ٨١
٤- ٤ العاكس ذو مصدر الجهد الثابت ٨٣
٤- ٤- ١ مصدر الجهد العاكس نصف القنطري أحادي الطور ٨٣
٤- ٤- ١- ١ حالة الحمل المادي ٨٤
٤- ٤- ١- ٢ حالة الحمل الحثي ٨٥
٤- ٤- ٢ مصدر الجهد العاكس القنطري أحادي الطور ٨٨
٤- ٤- ٢- ١ حالة الحمل المادي R ٨٨
٤- ٤- ٢- ٢ حالة الحمل الحثي 'R-L ٩١
٤- ٥ طرق التحكم في جهد خرج العاكس ٩٥
٤- ٥- ١ تعديل عرض النبضة ٩٦
٤- ٥- ١- ١ تعديل وحيد لعرض النبضة ٩٦
٤- ٥- ١- ٢ تعديل متضاعف لعرض النبضة ٩٧
٤- ٥- ١- ٣ تعديل جيبي لعرض النبضة ٩٨
٤- ٦ العاكس ذو مصدر التيار العاكس ٩٩
٤- ٧ العاكس ثلاثي الأوجه ذو مصدر الجهد الثابت ١٠٠
٤- ٧- ١ المبدأ الرئيسى لمصدر الجهد العاكس القنطرى ثلاثي الأوجه ١٠٠
٤- ٧ - ٢ نوع التوصيل °120 ١٠١
٤- ٧- ٣ نوع التوصيل °180 ١٠٥
٤- ٨ أمثلة على استخدام العواكس (مصادر عدم انقطاع التيار) ١١١
٤- ٩ طرق تحسين موجة جهد خرج العاكس ١١٣

٤- ١٠ أسئلة و تمارين. ١١٤

الوحدة الخامسة : تطبيقات هامة في مجال القوى الكهربائية

٥- ١ مقدمة. ١١٧
٥- ٢ موحدات الاثنتا عشرة نبضة ١١٨
٥- ٣ عمل الموحد ثلاثي الأوجه كعاكس ١٢٠
٥- ٤ نقل القدرة بالتيار المستمر ١٢٣
٥- ٥ تغذية مجال المولدات المتزامنة ١٢٨
٥- ٦ أسئلة وتمارين ١٢٩