جامعة المنارة
قسم هندسة الميكاترونكس

الكترونيات الطاقة
Power Electronic

الدكتور المهندس
علاء الدين أحمد حسام الدين

8

مفردات المقرر

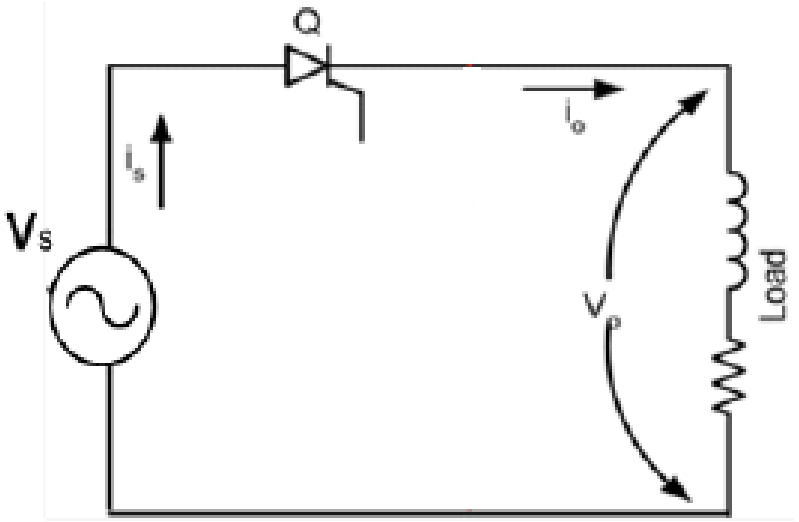
- مقدمة.
- عناصر الكترونيات القدرة، وخصائصها.
- عمل دارات المبدلات أحادية الطور على حمولة اومية.
- عمل دارات المبدلات أحادية الطور على حمولة تحريضية.
- عمل دارات المبدلات ثلاثية الأطوار على حمولة اومية.
- عمل دارات المبدلات ثلاثية الأطوار على حمولة تحريضية.
- مقطعات التيار المستمر/ مقطعات التقوية - التضعيف
- القالبات أحادية الطور Single- Phase Inverters.
- القالبات ثلاثية الأطوار Three-Phase Inverter.
- طرق التعديل المستخدمة في تنظيم جهد خرج القالبات.
- المبدلات الترددية الستاتيكية.
- حماية أنظمة القدرة وأجهزة عدم انقطاع التغذية UPS.

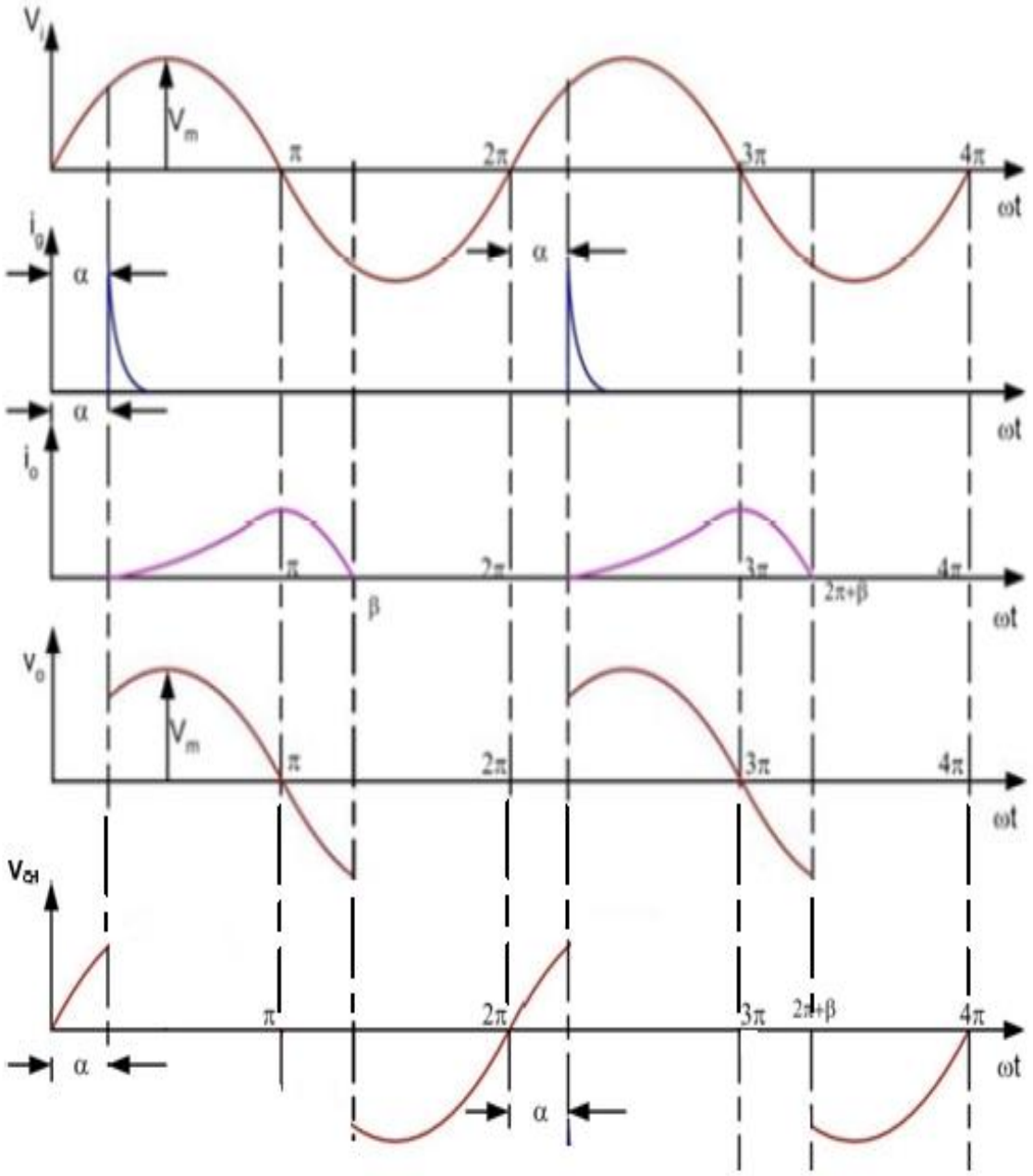
2. دارة تقويم أحادية الطور مقادة نصف موجة مع حمل أومي-تحريضي:

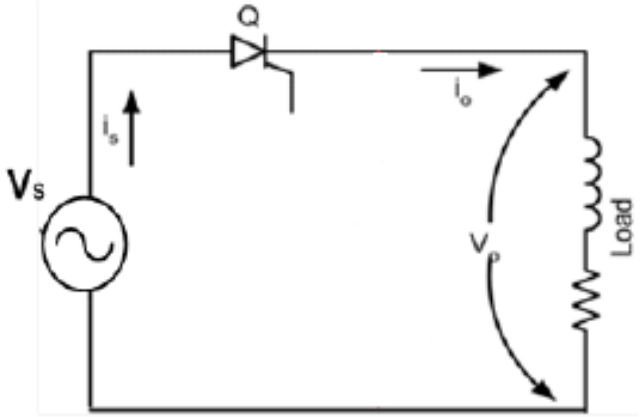
معظم الأحمال الموجودة في التطبيقات الصناعية المختلفة كالمحركات الكهربائية تحتوي على حمل (أومي-تحريضي)، ولذلك لا بد من دراسة تأثير الأحمال التجريضية على أداء المقومات المقادة.

يبين الشكل دارة تقويم أحادي الطور نصف موجة مع حمل مكون من مقاومة ووشيعة (مفاعلة تحريضية).

الوشائع (الملفات) عناصر تخزن الطاقة أثناء تزايد تيار المنبع، وتفرغها عندما يتناقص هذا التيار أو عند انقطاعه.



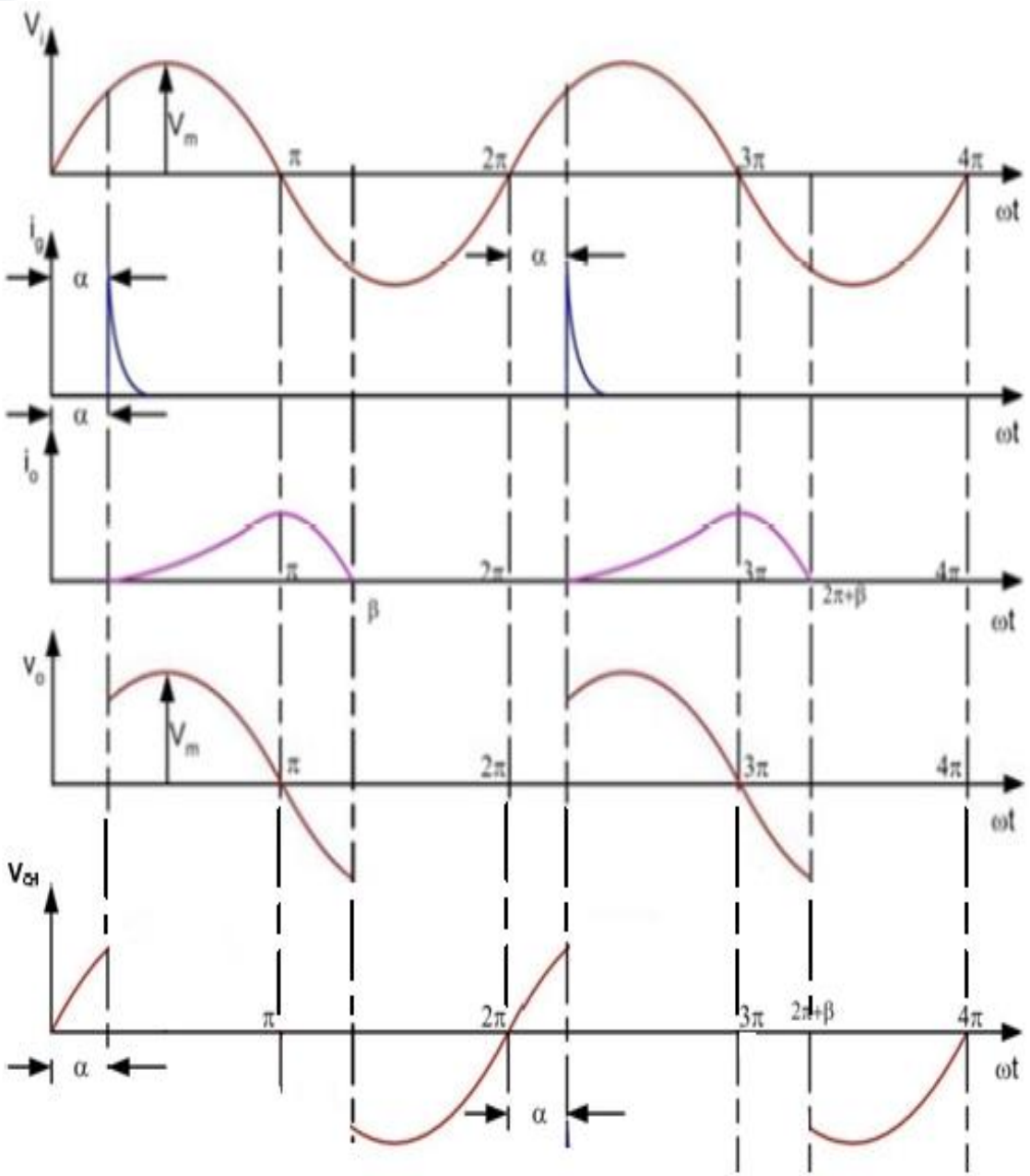




يبين الشكل أشكال موجات التيار والجهد الناتجة عن استخدام هذه الدارة.

أثر الحمل التحريضي على تيار الخرج: عندما يتم إشعال الثايرستور لا يتغير التيار (زيادة أو نقصاناً) لحظياً مع تغير الجهد، كما هو الحال في حالة الحمل الأومي، بل يتأخر عن الجهد، بسبب وجود الملف الذي يقاوم هذا التغيير.

أثر الحمل التحريضي على جهد الخرج: عندما يبدأ جهد المنبع المتناوب بالتناقص تنعكس قطبية الملف ويبدأ بتفريغ الطاقة المخزنة، ويستمر ذلك حتى بعد ان يصل جهد المنبع للصفر، لذلك لا يحدث إخماد للثايرستور، مما سيؤدي إلى ظهور جزء سالب من موجة جهد المنبع على أطراف الحمل(خرج الدارة)، مما يخفض قيمة الجهد المستمر الناتج على الخرج بسبب وجود جزء سالب من الموجة فالمحصلة تكون أقل من قيمة جهد الدخل)، ويستمر الوضع كذلك حتى يصل التيار المار في الثايرستور إلى الصفر عند الزاوية β (زاوية إطفاء الثايرستور) والتي تتحدد قيمتها بناء على قيمة كل من المقاومة والتحريضية. .



يمكن إيجاد القيمة المتوسطة للجهد المستمر المطبق على الحمل V_{av}، وذلك بإيجاد تكامل شكل موجة الخرج في الفترة الزمنية من 0 إلى 2π كما يلي:

$$V_{av} = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\beta} V_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d(\omega t)$$

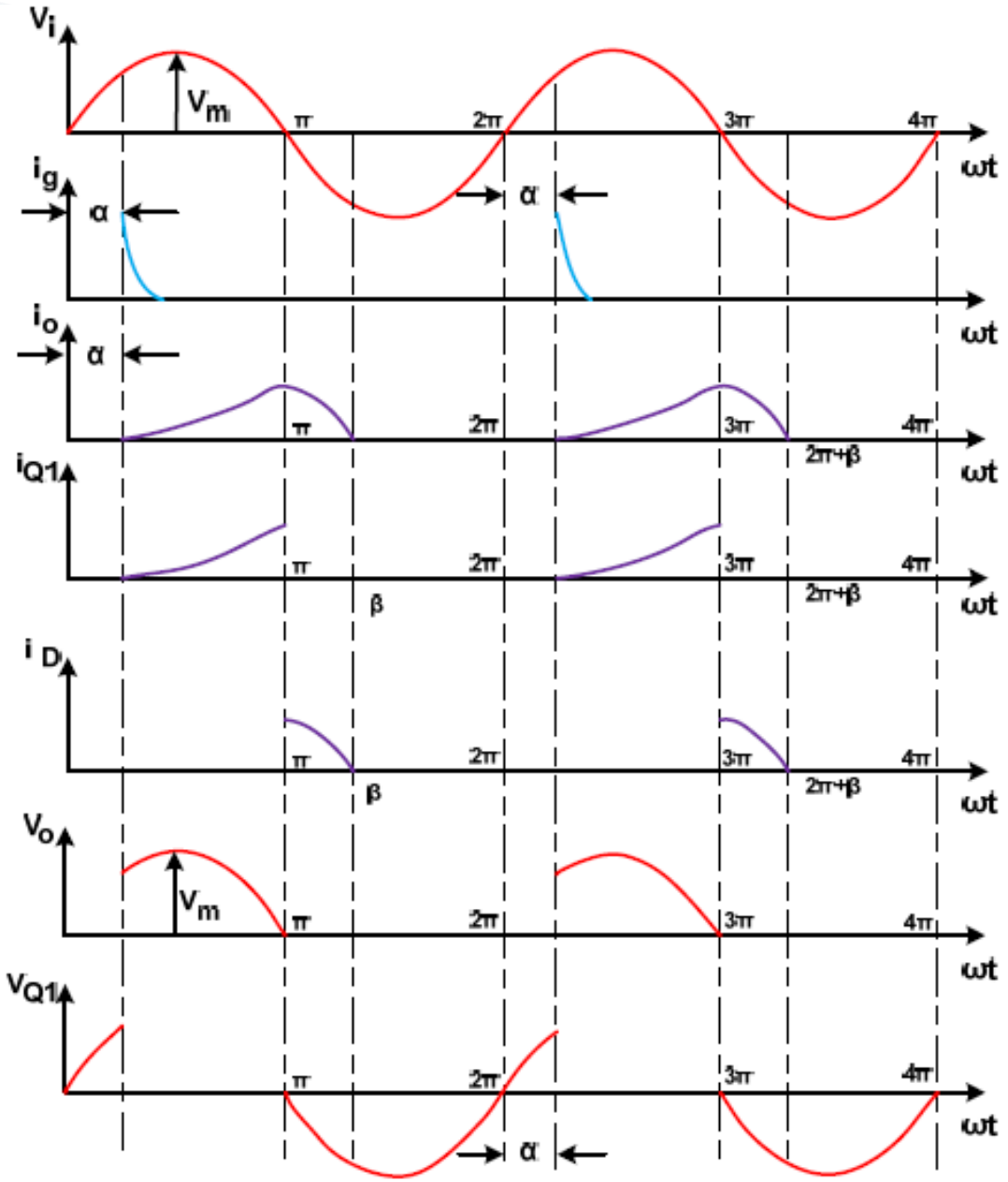
$$V_{av} = \frac{V_m}{2\pi}(\cos(\alpha) - \cos(\beta)\ \ , \beta > \pi$$

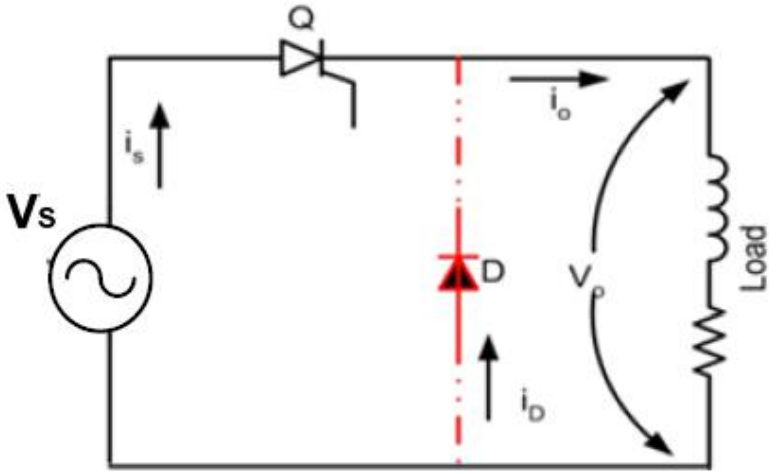
حيث β زاوية إخماد الثايرستور، أو بمعنى أدق هي الزاوية التي يصل فيها تيار الحمل إلى الصفر.

القيمة المتوسطة لتيار الحمل :

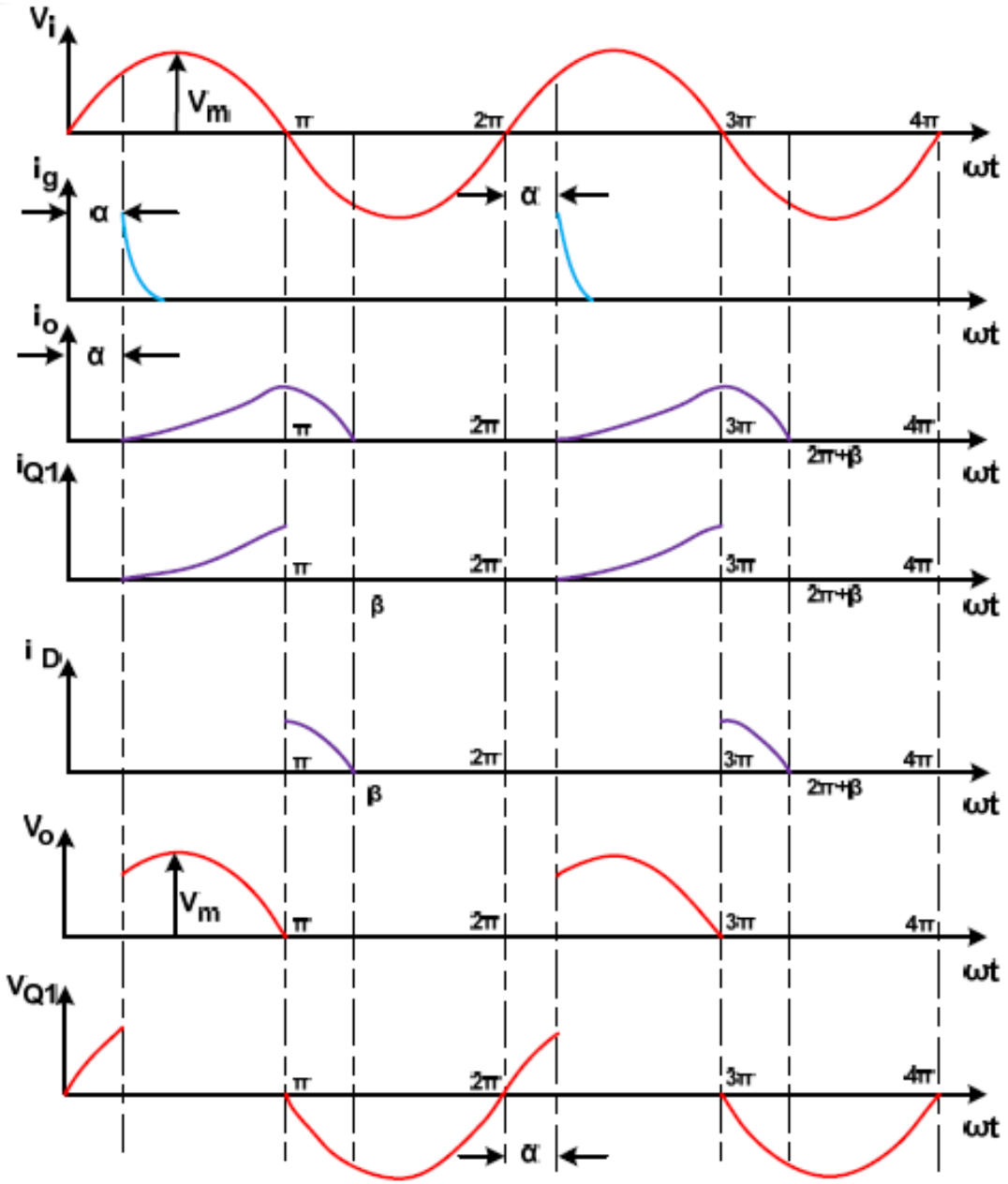
$$I_{av} = \frac{V_{av}}{R}$$

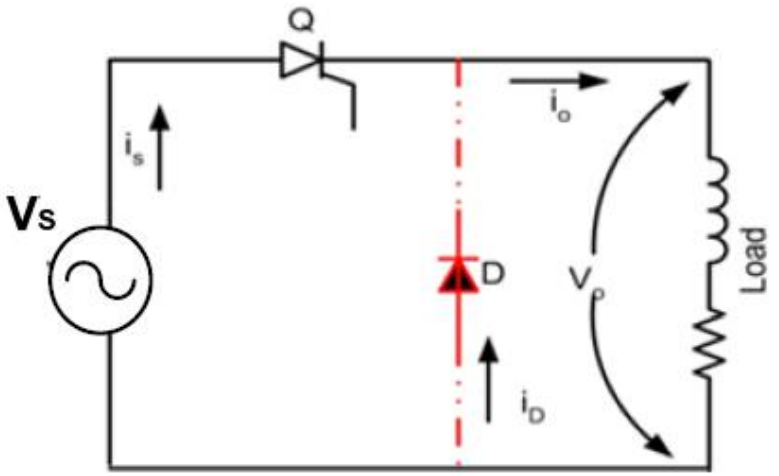
$$I_{av} = \frac{V_m}{2\pi R}(\cos(\alpha) - \cos(\beta)$$





يمكن إلغاء الأثر التحريضي السلبي باستخدام دايود على التفرع مع الحمل يسمى دايود المسار الحر D (Freewheeling diode) للتخلص من الجزء السالب من الجهد ويساعد ذلك على تقليل عدم الاتصال في موجة التيار المار بالحمل، حيث سيمر في الثايرستور المناظر للجزء الموجب من موجة الجهد في الفترة من α إلى π ويمر في دايود المسار الحر الجزء المناظر للجزء السالب من موجة الجهد في الفترة من π إلى β كما هو واضح في الشكل، حيث تظهر أشكال موجات التيارات والجهود لدارة التقويم في حالة استخدام دايود المسار الحر، ويمكن ملاحظة أن التيار مازال يعاني من عدم الاتصال، لذلك فإن معظم التطبيقات تستخدم أحياناً ملف تنعيم مع الحمل، ومع ذلك فإن دارة التقويم هذه قليلة الاستخدام في الصناعة..





في هذه الحالة يكون الجهد المتوسط هو نفسه في حال وجود حمل أومي فقط.

$$V_{dc} = V_0 = \frac{1}{2\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_m \cdot \sin\omega t \cdot d(\omega t)$$

$$V_{dc} = V_0 = \frac{V_m}{2\pi} \cdot (1 + \cos\alpha)$$

القيمة المتوسطة لتيار الحمل :

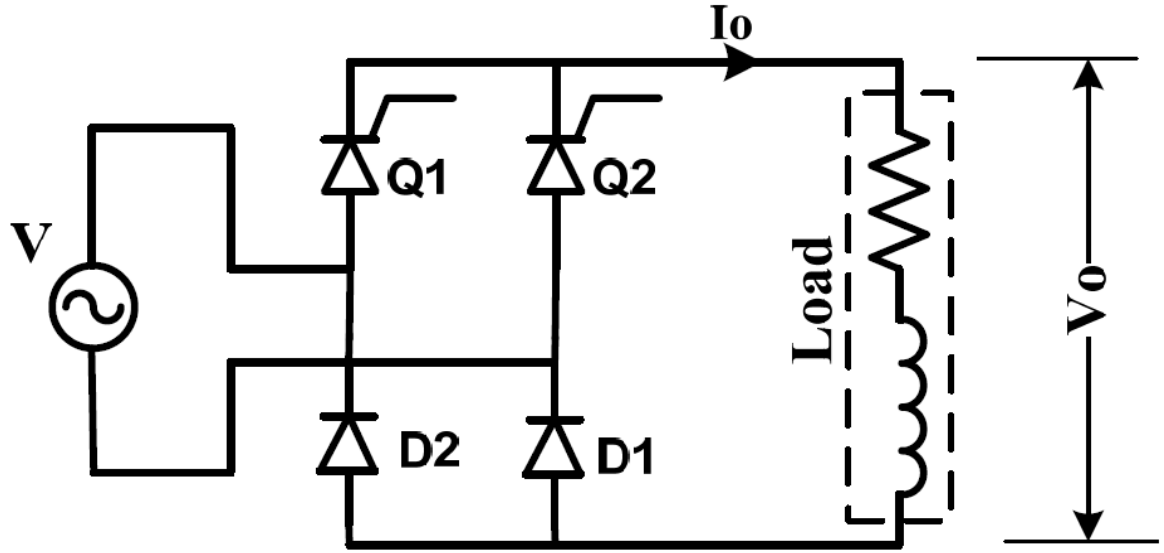
$$I_{av} = \frac{V_{av}}{R}$$

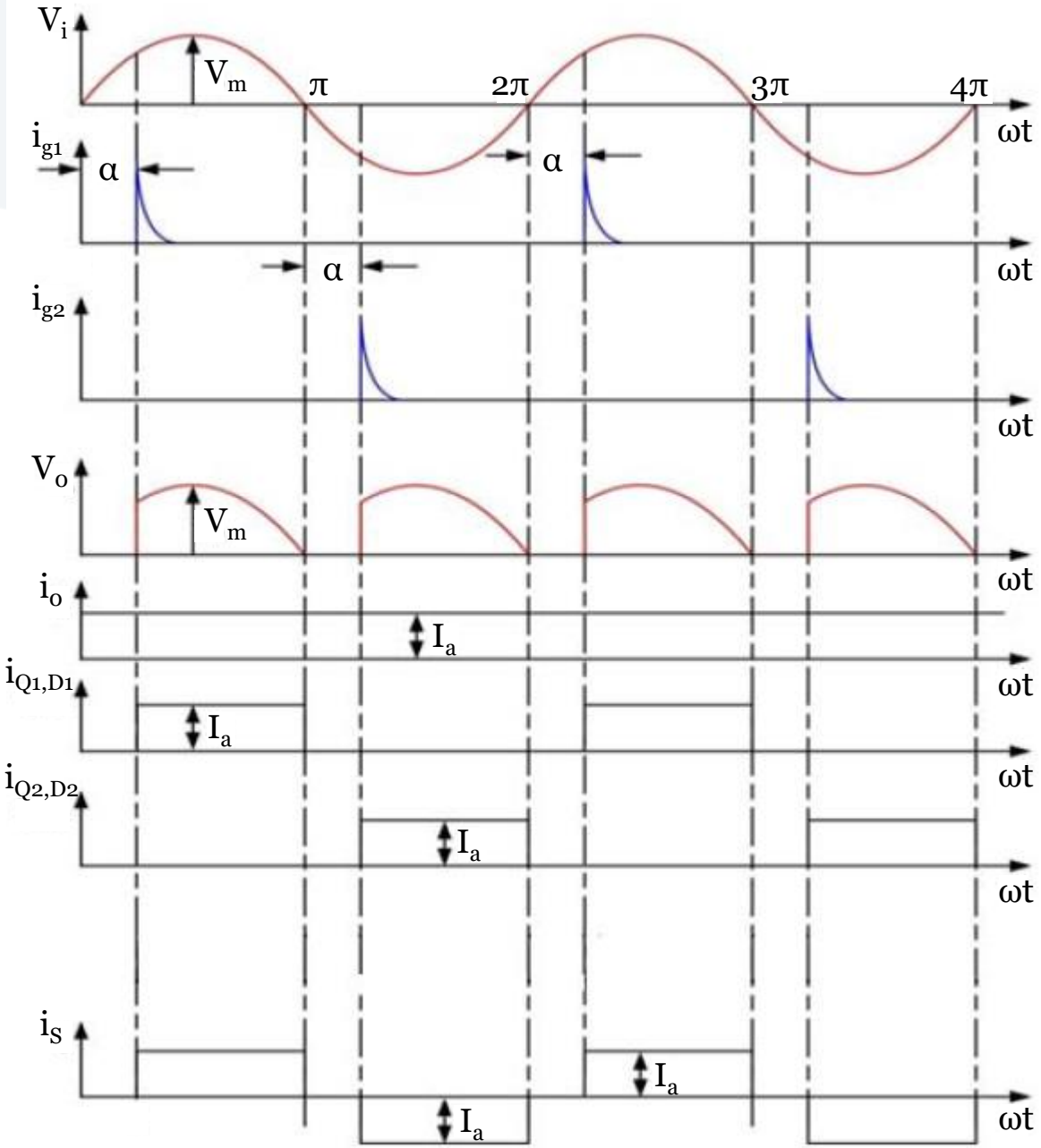
وبما أن معظم التطبيقات الصناعية تحتوي على أحمال أومية وتحريضية، وتحتاج دائماً تيار متصل، فسيتم الاكتفاء لاحقاً بدراسة دارات التقويم المقادة للأحمال ذات التحريضية العالية.

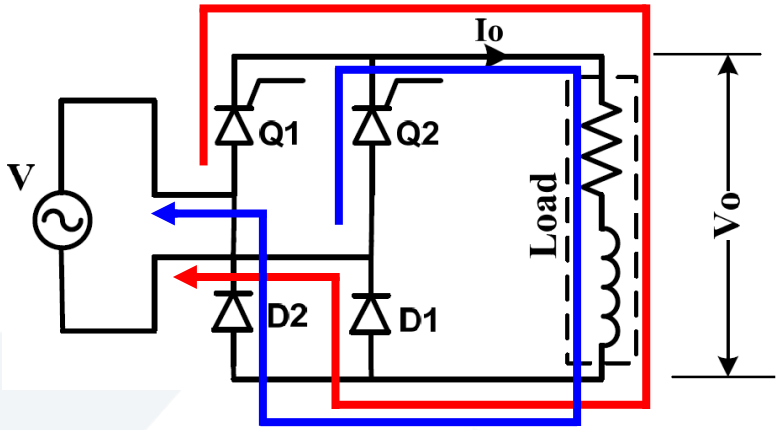
3. دارة تقويم أحادية الطور نصف مقادة موجة كاملة :

تتكون دارة التقويم نصف المقادة من جسر يحتوي على أربعة عناصر تقويم هي ثايرستوران Q1 , Q2، وديودان D1 , D2، كما في الشكل.

سنقوم بالدراسة على حالة حمولة مكونة من مقاومة أومية ووشيعة ذات مفاعلة تحريضية عالية القيمة.







خلال النصف الموجب من موجة منبع التغذية يتم قدح الثايرستور Q1 عند الزاوية α ويمر التيار من خلاله إلى الحمل مروراً بالدايود D1، ثم يعود مرة أخرى إلى المنبع، ويستمر ذلك حتى يصل جهد الدخل إلى القيمة صفر عند الزاوية $\omega t=\pi$.

أما خلال الفترة الزمنية $2\pi>\omega t>\pi+\alpha$ فيتم إشعال الثايرستور Q2 عند زاوية $(\pi+\alpha)$، ويمر التيار من خلاله إلى الحمل مروراً بالدايود D2 ثم يعود إلى المنبع ويستمر ذلك حتى يصل جهد الدخل إلى القيمة صفر عند $\omega t=2\pi$.

يتكرر ذلك مع كل دور، وتكون أشكال موجات الجهد والتيار كما في الشكل مع الأخذ بالحسبان أن قيمة تحريضية الوشيعة عالية.

يمكن إيجاد القيمة المتوسطة للجهد المستمر الناتج، والمطبق على الحمل V_{av} من عملية التقويم، وذلك بإيجاد تكامل شكل موجة الحمل جهد الخرج V_o خلال الفترة الزمنية (o-π) كما يلي:

$$V_{av} = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi}(1 + \cos(\alpha))$$

يمكن حساب القيمة المتوسطة لتيار الحمل بالعلاقة:

$$I_{av} = \frac{V_{av}}{R} = \frac{V_m}{\pi R}(1 + \cos(\alpha))$$

$$V_{av} = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi} V_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{V_m}{\pi}(1 + \cos(\alpha))$$

نلاحظ من علاقة القيمة المتوسطة للجهد المستمر المطبق على الحمل V_{av} أنه يمكن التحكم بقيمته عن طريق التحكم بقيمة زاوية القدح (الإشعال) α، ومن الواضح أيضاً أن جهد الخرج لدارة التقويم هذه يكون موجباً دائماً، وكذلك تيار الحمل، ولذلك تستخدم دارة التقويم هذه في التطبيقات التي لا تحتاج إلى عكس اتجاه الجهد والتيار (One quadrant).

دارة تقويم أحادية الطور موجة كاملة نصف مقادة، تغذى من منبع تغذية متناوب قيمته 220V بتردد 50Hz، وذلك لتغذية حمولة أومية قيمتها 10Ω. ومفاعلة تحريضية عالية تكفي لتحقيق استمرارية التيار وخالياً من التذبذبات. المطلوب إيجاد:

1. تيار الحمل إذا كانت زاوية الإشعال 60^o.
2. زاوية الإشعال اللازمة للحصول على جهد مقداره 150V.
3. أقصى قيمة للجهد على أطراف الحمل.

1. تيار الحمل إذا كانت زاوية القدح 60^o.

$$V_m = \sqrt{2} \cdot V_{rms} = \sqrt{2} \times 220 = 311\ V$$

$$V_{av} = \frac{V_m}{\pi}(1 + \cos(\alpha)) = \frac{311}{\pi}(1 + \cos(60^o)) = 148.5\ V$$

$$I_{av} = \frac{V_{av}}{R} = \frac{148.5}{10} = 14.85\ A$$

2. زاوية الإشعال اللازمة للحصول على جهد مقداره 150V.

$$150 = \frac{311}{\pi}(1 + \cos(\alpha)) \Rightarrow \alpha = 59^{o}$$

3. أقصى قيمة للجهد على أطراف الحمل.

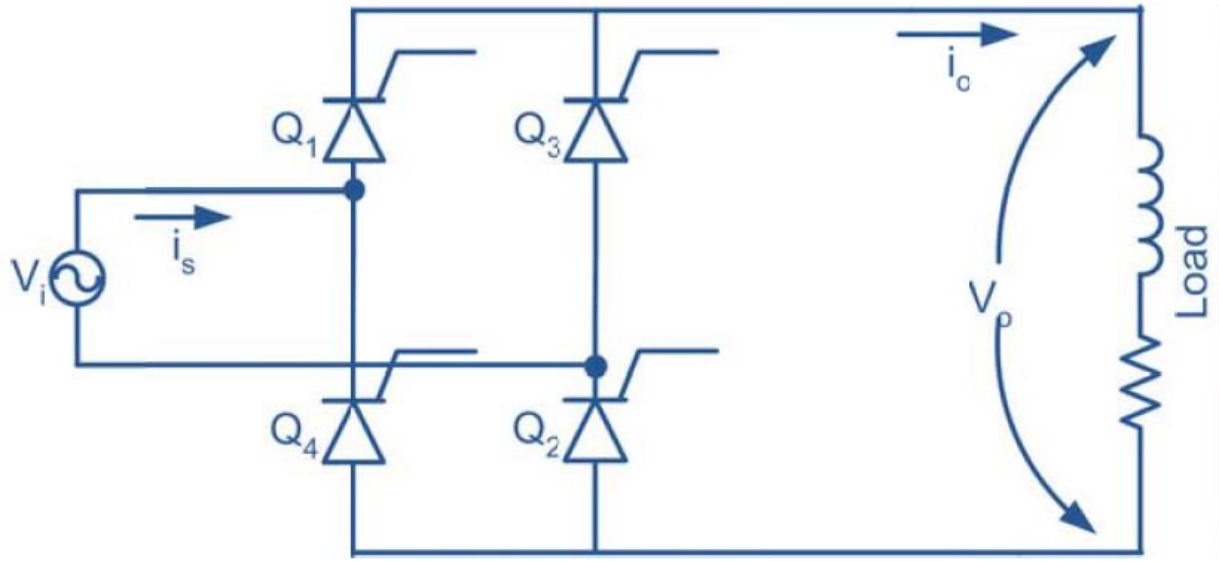
للحصول على أقصى قيمة للجهد على أطراف الحمل يجب أن تكون زاوية الإشعال مساوية للصفر.

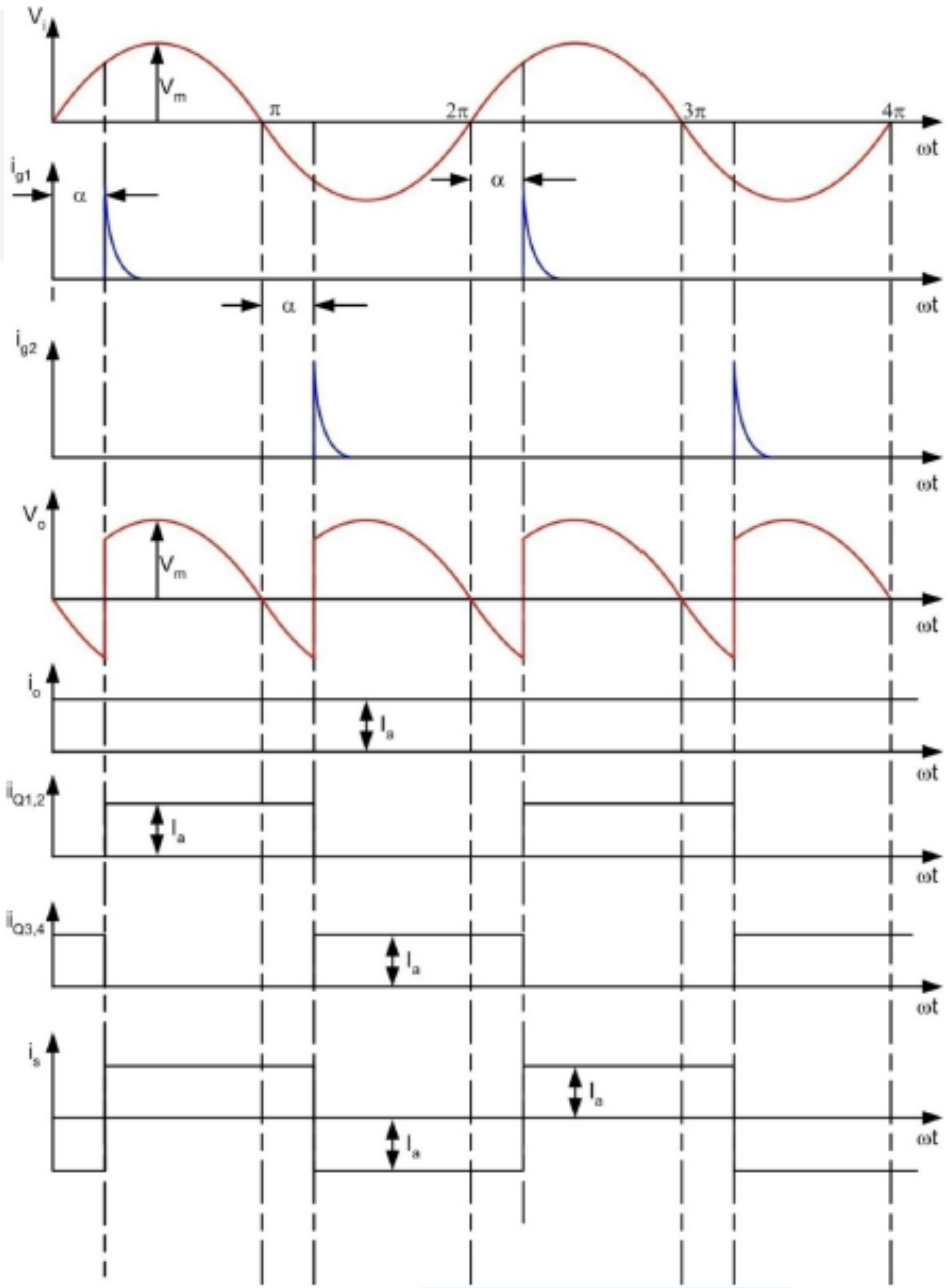
$$V_{av(max)} = \frac{V_m}{\pi}(1 + \cos(\alpha)) = \frac{311}{\pi}(1 + \cos(0^{o})) = 198\,V$$

4. دارة تقويم أحادية الطور مقادة موجة كاملة:

تتكون دارة تقويم موجة كاملة مقادة من جسر يحتوي على أربعة عناصر تقويم هي جميعها ثايرستورات Q1 , Q2 , Q3 , Q4، كما في الشكل.

سنقوم بالدراسة على حالة حمولة ذات مفاعلة تحريضية عالية القيمة من أجل تحقيق استمرارية تيار الحمل وزيادة القيمة المتوسطة (المستمرة) للتيار وتخفيض عامل التموج RF.





خلال النصف الموجب من موجة منبع التغذية يكون كل من الثايرستور Q1 و Q2 بحالة انحياز أمامي، لذلك عندما يتم اشعالهما عند زاوية α يمر تيار كهربائي من المنبع إلى الحمل عبر الثايرستورات Q1 , Q2، ونتيجة لتحريضية الحمل فإن التيار يستمر في المرور في كل من Q1 , Q2 حتى بعد أن تزيد قيمة ωt عن π رغم أن جهد المنبع قد أصبح سالباً، ويستمر ذلك حتى يتم إشعال الثايرستور Q3 , Q4 عند زاوية (π+ α)، ويمر التيار من خلالهما إلى الحمل ويستمر ذلك حتى يتم إشعال كل من الثايرستور Q1 , Q2 مرة أخرى عند زاوية (2π+ α)، ويتكرر ذلك مع كل دورة وعلى ذلك تكون أشكال موجات الجهد والتيار كما في الشكل.

يمكن إيجاد القيمة المتوسطة للجهد المستمر الناتج V_{av} من عملية التقويم وذلك بإيجاد تكامل شكل موجة جهد الخرج خلال الفترة الزمنية من α إلى $(\pi+\alpha)$ كما يلي:

$$V_{av} = \frac{1}{\pi}\int_{\alpha}^{\pi+\alpha} V_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{2 \times V_m \times \cos(\alpha)}{\pi}$$

يمكن حساب القيمة المتوسطة لتيار الحمل بالعلاقة:

$$I_{av} = \frac{V_{av}}{R} = \frac{2 \times V_m \times \cos(\alpha)}{\pi \times R}$$

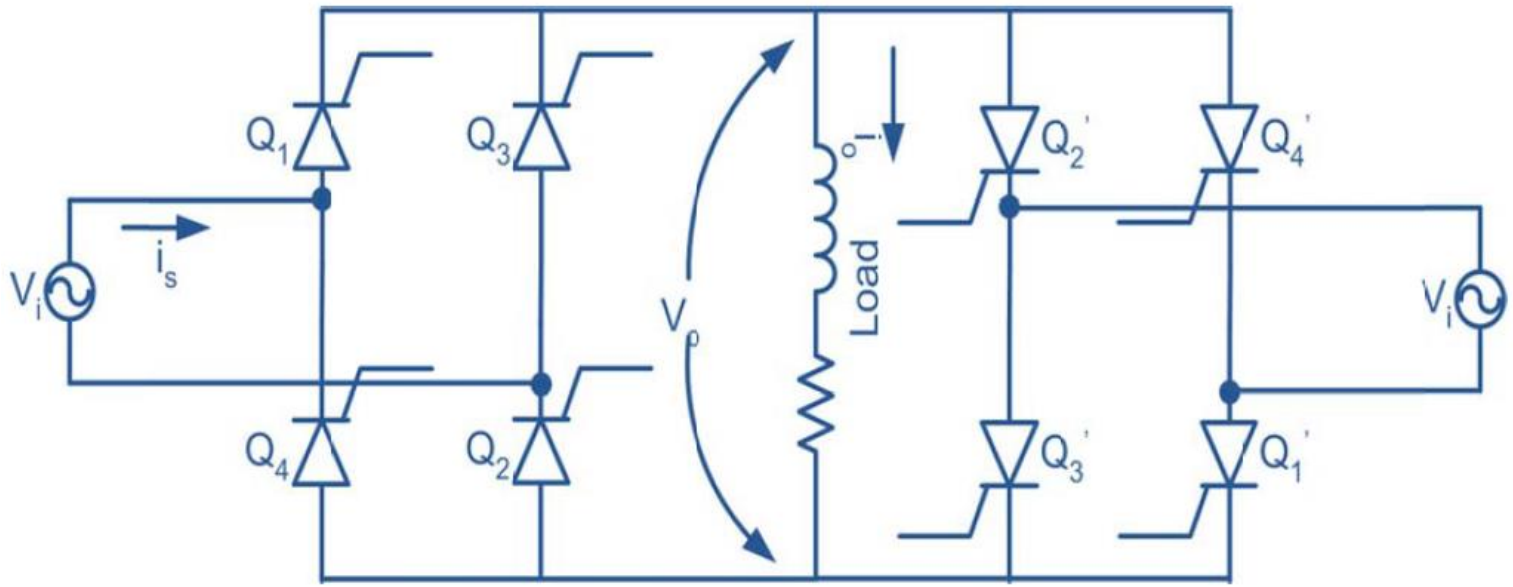
نلاحظ من المعادلة الأخيرة إمكانية التحكم بالجهد من خلال التحكم بقيمة زاوية الإشعال α، كما أن جهد الخرج لدارة التقويم يمكن أن يكون موجباً أو سالباً حسب قيمة زاوية الإشعال، فإذا كانت زاوية الإشعال أقل من 90^o يكون الجهد موجباً، بينما يكون سالباً إذا كانت زاوية الإشعال أكبر من 90^o، أما تيار الحمل فيكون دائماً موجباً، لذا تستخدم دارة التقويم هذه في التطبيقات التي تحتاج إلى عكس اتجاه الجهد (Two quadrant).

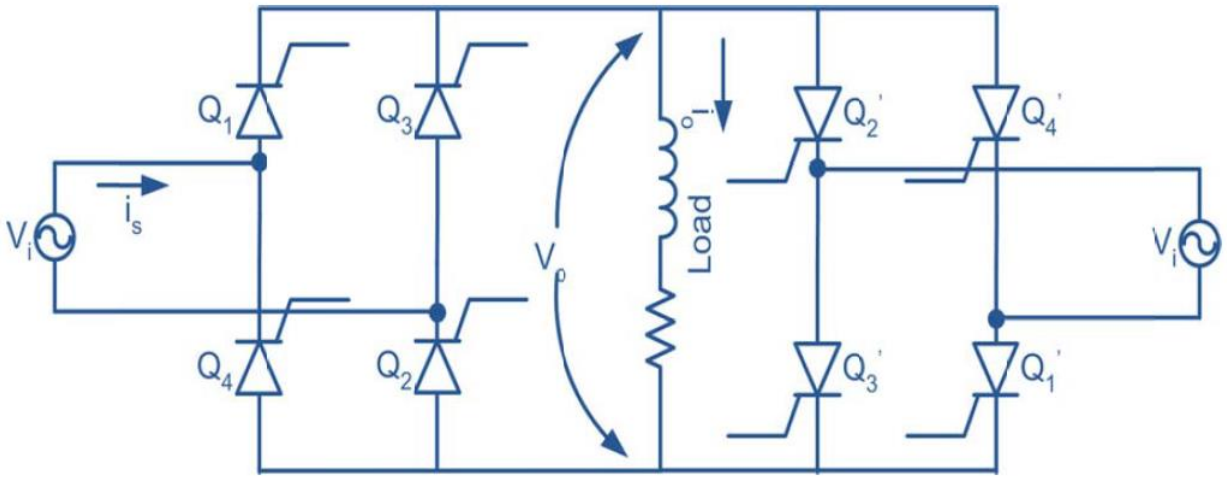
دارة تقويم مقادة أحادية الطور موجة كاملة، تغذى من منبع تغذية متناوب قيمته 220V بترددٍ 50Hz، وذلك لتغذية حمولة أومية قيمتها 12Ω. ومفاعلة تحريضية عالية تكفي ليكون التيار متصلاً وخالياً من التذبذبات. المطلوب إيجاد:

1. تيار الحمل إذا كانت زاوية الإشعال 60^{o}.
2. الاستطاعة المسحوبة من المنبع P_{in}.
3. الاستطاعة المستردة إلى المنبع عند نفس التيار السابق إذا تغيرت زاوية الإشعال لتكون 120^{o}.

5. دارة تقويم أحادية الطور مزدوجة مقادة:

تتكون هذه الدارة من جسرين يتم توصيلهما متعاكسين كما في الشكل، حتى نتمكن من عكس الجهد على أطراف الحمل وكذلك عكس التيار المار في الحمل، وتستخدم هذه الدارة بكثرة في التطبيقات الصناعية التي تحتاج إلى محركات متغيرة السرعة عالية الاستطاعة.





عند تشغيل دارة التقويم الأولى المكونة من الثايرستورات Q1 , Q2 , Q3 , Q4، يكون الجهد على أطراف الحمولة:

$$V_{av1} = \frac{2 \times V_m \times \cos(\alpha_{a2})}{\pi}$$

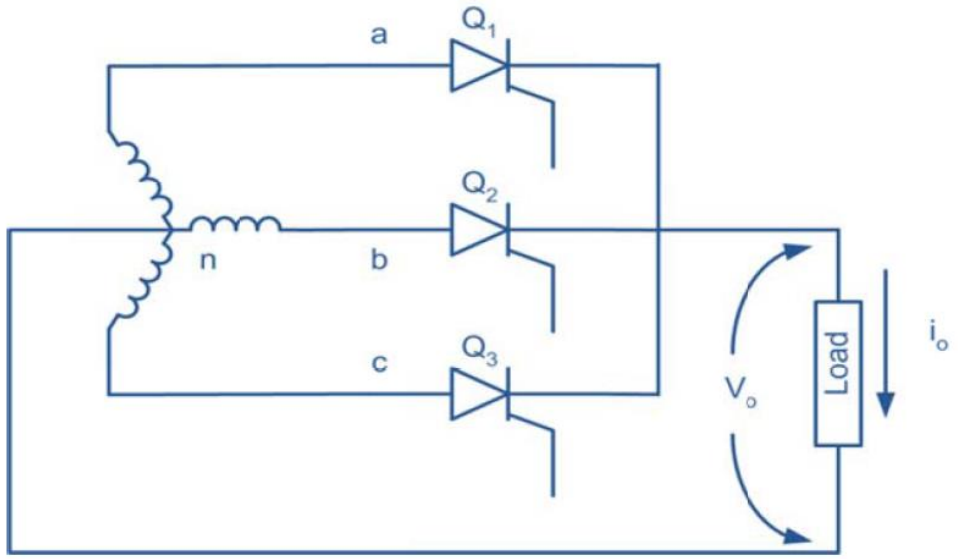
ولعكس اتجاه الجهد على الحمل يجب فصل دارة التقويم الأولى وتشغيل الثانية المكونة من الثايرستورات Q′1 , Q′2 , Q′3 , Q′4 ، ويكون الجهد على أطراف الحمولة:

$$V_{av2} = \frac{2 \times V_m \times \cos(\alpha_{a2})}{\pi}$$

6. دارة تقويم ثلاثية الطور مقادة نصف موجة:

تستخدم دارات التقويم المقادة الثلاثية الأطوار بكثرة في التطبيقات الصناعية لعدة أسباب، منها الاستطاعة العالية بالمقارنة مع الدارات الأحادية الطور، كما أن تردد التذبذبات في موجة الخرج يكون عالياً، ولذلك فإن عملية تنعيم تيار الحمل تكون أبسط وأفضل مقارنة بتلك المستخدمة مع الدارات الأحادية الطور.

تتكون دارة التقويم الثلاثية الأطوار نصف الموجة من ثلاثة ثايرستورات Q1 , Q2 , Q3 يتم توصيلها بين المنبع والحمولة المكونة من مقاومة أومية ووشيعة ذات تحريضية عالية القيمة كما في الشكل.

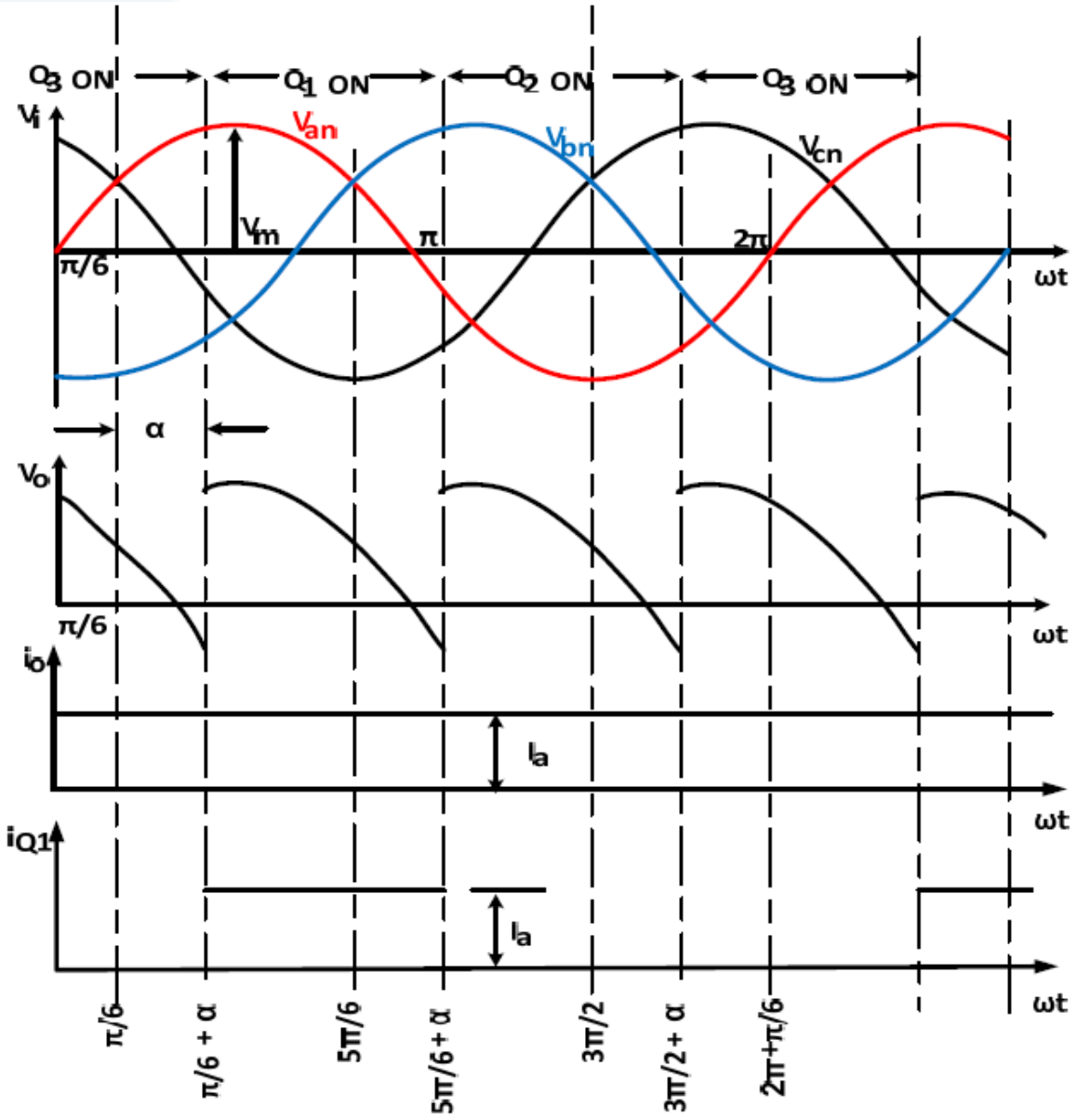


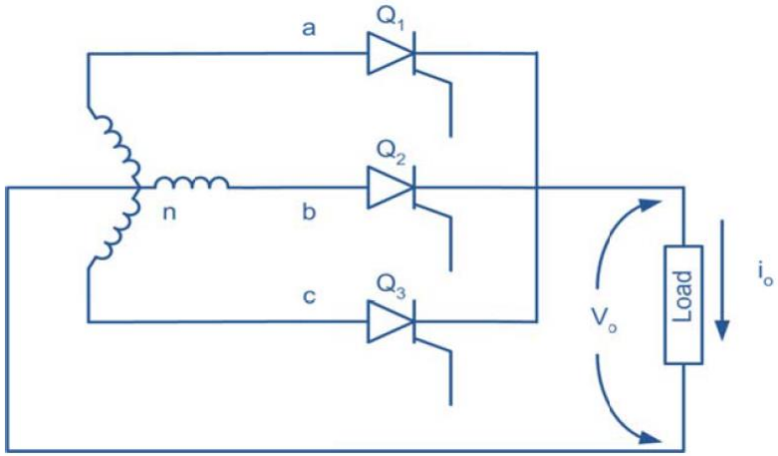
تكتب معادلات جهد المنبع الثلاثي الأطوار بالشكل:

$$V_{an} = V_m \cdot \sin(\omega t)$$

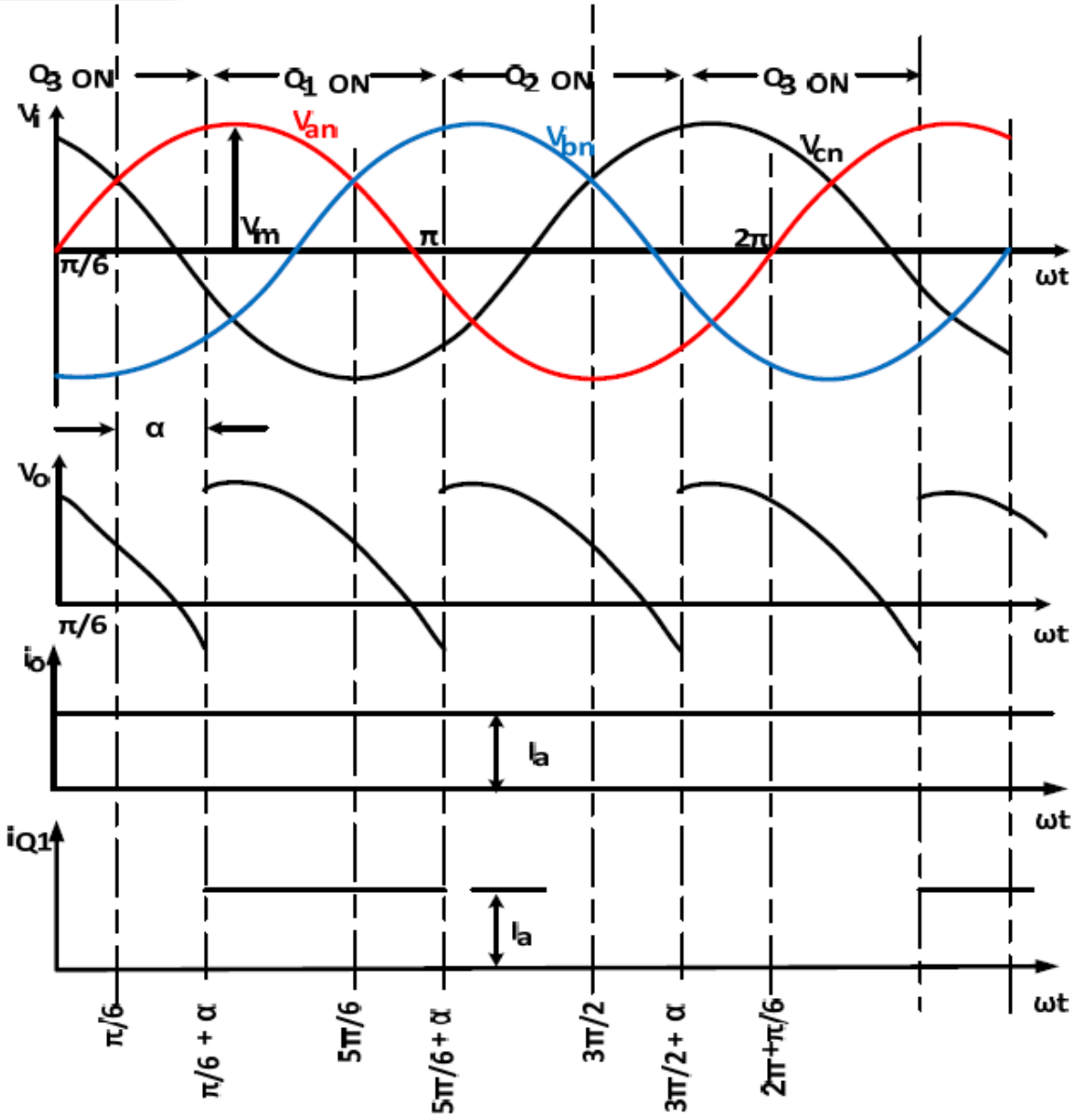
$$V_{bn} = V_m \cdot \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

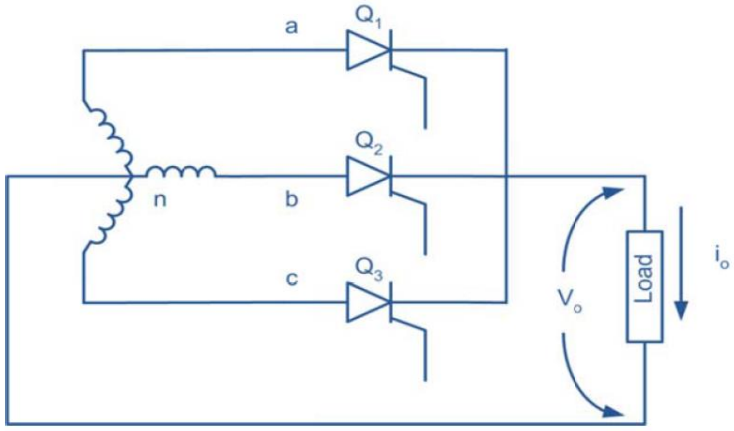
$$V_{cn} = V_m \cdot \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$



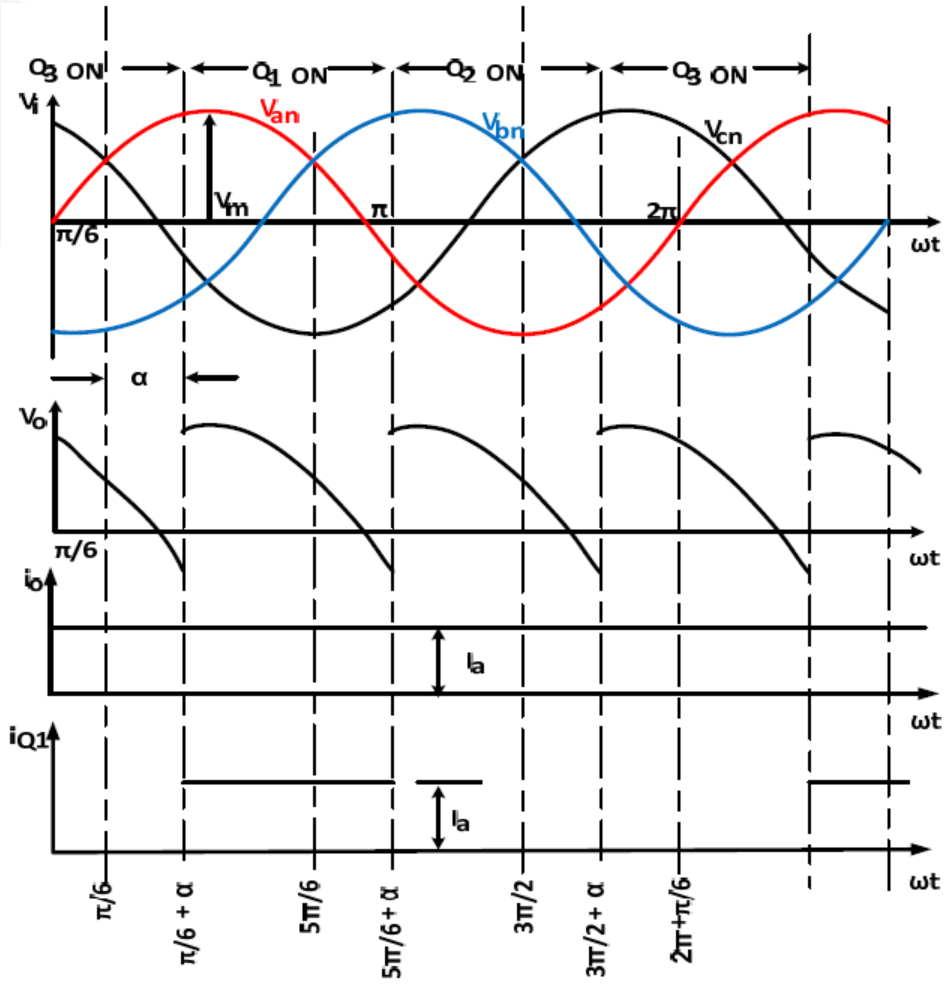


نلاحظ من خلال موجات جهد المنبع أن الثايرستور Q1 يكون بحالة انحياز أمامي خلال الفترة $(\pi/6<\omega t<5\pi/6)$، وبالتالي يمكن إشعاله خلال هذه الفترة الزمنية، بينما يكون الثايرستور Q2 منحاز أمامياً خلال الفترة الزمنية $(5\pi/6<\omega t<3\pi/2)$، ويمكن إشعاله خلال هذه الفترة، أما الثايرستور Q3 فيكون منحاز أمامياً خلال الفترة الزمنية $(3\pi/2<\omega t<2\pi+3\pi/2)$، ويمكن إشعاله خلال هذه الفترة.





عندما يكون الثايرستور Q1 بحالة انحياز أمامي، ويتم إشعاله عند ($\omega t = \pi/6 + \alpha$)، فسينتج عن ذلك ظهور الجهد V_{an} على الحمل، ويستمر الوضع كذلك حتى يتم إشعال الثايرستور Q2 عند ($\omega t = 5\pi/6 + \alpha$)، حيث ينتج عن ذلك جهد عكسي على Q1 يؤدي إلى إطفائه، ويظهر على الحمل الجهد V_{bn}، ويستمر الوضع كذلك حتى يتم إشعال الثايرستور Q3 عند ($\omega t = 3\pi/2 + \alpha$)، حيث ينتج عن ذلك جهد عكسي على Q2 يؤدي إلى إطفائه، ويظهر على الحمل الجهد V_{cn}.



نلاحظ من المنحنيات أن عدد التذبذبات في موجة جهد الخرج (المطبق على الحمل) هو أقل منها بالمقارنة بدارة التقويم الأحادية الطور، ويمكن حساب القيمة المتوسطة لهذا الجهد بإجراء التكامل لشكل موجته خلال الفترة من $\pi/6 + \alpha$ إلى $5\pi/6 + \alpha$، فنحصل على العلاقة:

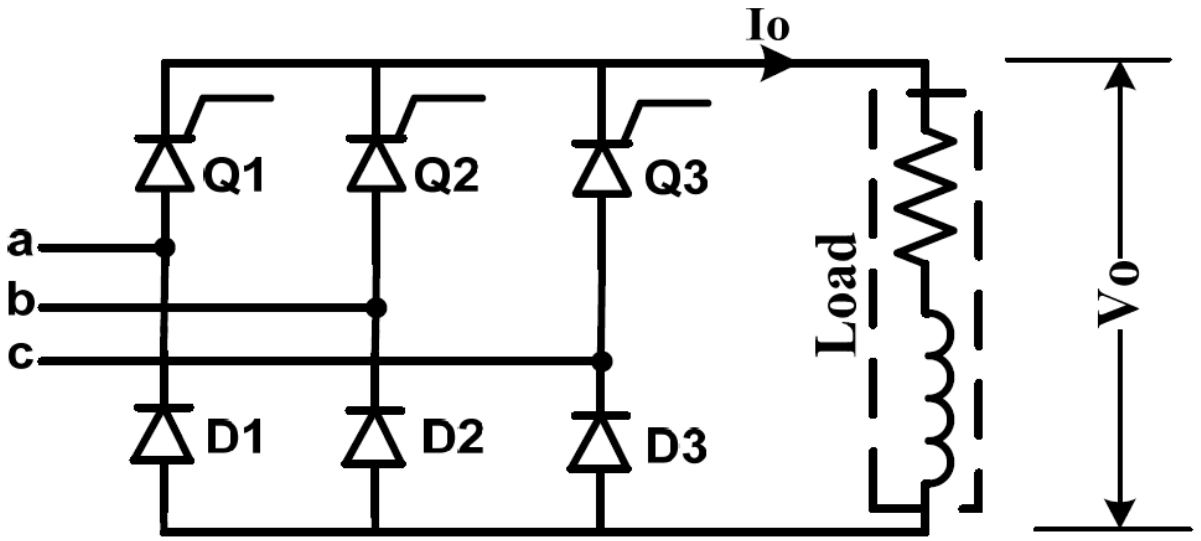
$$V_{av} = \frac{3}{2\pi}\int_{\alpha+\frac{\pi}{6}}^{\alpha+\frac{5\pi}{6}} V_m \cdot \sin(\omega t) \cdot d(\omega t) = \frac{3 \times \sqrt{3} \times V_m \times \cos(\alpha)}{2\pi}$$

دارة تقويم مقادة ثلاثية الأطوار نصف موجة، تستخدم لتغذيةِ حمولة مكونة من مقاومة أومية قيمتها 10Ω، ومفاعلة تحريضية عالية تكفي ليكون التيار متصلاً وخالياً من التذبذبات. فإذا علمت منبع التغذية موصول بشكل Y وجهده 220V بتردد 50Hz، المطلوب:

1. حساب القيمة المتوسطة لجهد وتيار الحمل إذا كانت زاوية الإشعال 30^o.
2. حساب القيمة المتوسطة لجهد وتيار الحمل إذا كانت زاوية الإشعال 60^o.
3. حساب القيمة المتوسطة لجهد وتيار الحمل إذا كانت زاوية الإشعال 120^o.
4. حساب أقصى قيمة للجهد المتوسط على أطراف الحمل.

6. دارة تقويم ثلاثية الطور نصف مقادة موجة كاملة:

تتكون هذه الدارة من ثلاثة ثايرستورات وثلاثة دايودات توزع على شكل جسر كما في الشكل.



تستخدم دارة التقويم الثلاثية نصف المقادة للموجة الكاملة في التطبيقات الصناعية التي تحتاج إلى جهد موجب وتيار موجب أيضاً (One Quadrant)، لكنها ذات استطاعة أكبر من دارة نصف الموجه حيث تستخدم في التطبيقات التي تصل استطاعاتها إلى حوالي 120kW. ويلاحظ أن عامل الاستطاعة لهذه الدارة يقل بزيادة زاوية الإشعال، لكنه أعلى من عامل الاستطاعة لدارة التقويم الثلاثية الأطوار نصف الموجة، ويكون الجهد المتوسط الناتج من الدارة، بوجود حمل مكون من مقاومة أومية ووشيعة ذات ممانعة تحريضية عالية القيمة كما في المعادلة:

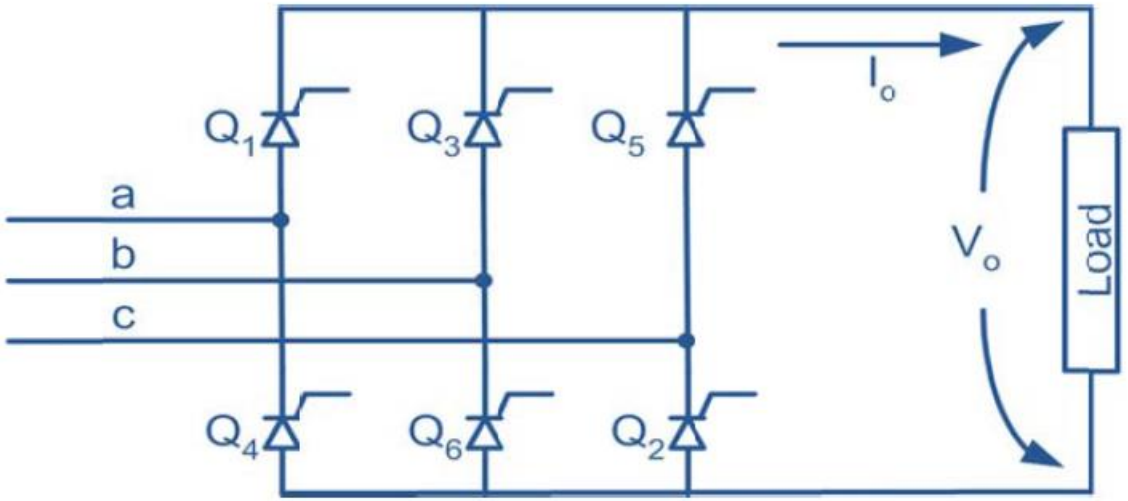
$$V_{av} = \frac{3 \times \sqrt{3} \times V_m}{2\pi} (1 + \cos(\alpha))$$

دارة تقويم نصف مقادة ثلاثية الأطوار موجة كاملة، تستخدم لتغذيةِ حمولة مكونة من مقاومة أومية قيمتها 10Ω، ومفاعلة تحريضية عالية تكفي ليكون التيار متصلاً وخالياً من التذبذبات. فإذا علمت منبع التغذية موصول بشكل Y وجهده 220V بتردد 50Hz، المطلوب:

1. حساب القيمة المتوسطة لجهد وتيار الحمل إذا كانت زاوية الإشعال 45^o.
2. حساب القيمة المتوسطة لجهد الحمل إذا كانت زاوية الإشعال 75^o.
3. حساب القيمة المتوسطة لجهد الحمل إذا كانت زاوية الإشعال 135^o.
4. حساب أقصى قيمة للجهد المتوسط على أطراف الحمل.
5. زاوية الإشعال اللازمة للحصول على تيار مقداره 6A.

7. دارة تقويم ثلاثية الطور مقادة موجة كاملة:

تتكون هذه الدارة من ستة ثايرستورات توزع على شكل جسر كما في الشكل.



تستخدم هذه الدارة في التطبيقات التي تحتاج إلى جهد موجب أو سالب حسب قيمة زاوية الإشعال وتيار موجب فقط (Two Quadrant)، ويكون الجهد المتوسط الناتج وفق المعادلة:

$$V_{av} = \frac{3 \times \sqrt{3} \times V_m \times \cos(\alpha)}{\pi}$$

دارة تقويم مقادة ثلاثية الأطوار موجة كاملة، تستخدم لتغذية حمولة مكونةٍ من مقاومة أومية قيمتها 10Ω، ومفاعلة تحريضية عالية تكفي ليكون التيار متصلاً وخالياً من التذبذبات. فإذا علمت أن منبع التغذية موصول بشكل Y وجهده 220V بتردد 50Hz، المطلوب:

1. حساب تيار الحمل إذا كانت زاوية الإشعال 45^{o}.
2. حساب الاستطاعة المستجرة من المنبع P_{in}.
3. حساب القيمة المستردة إلى المنبع عند نفس التيار السابق إذا تغيرت زاوية الإشعال لتكون 135^{o}.

8. دارة تقويم مقادة ثلاثية الأطوار مزدوجة:

تتكون هذه الدارة من جسرين يتم توصيلهما متعاكسين كما في الشكل، حتى نتمكن من عكس الجهد على أطراف الحمل وكذلك عكس التيار المار في الحمل، وتستخدم هذه الدارة بكثرة في التطبيقات الصناعية مع المحركات المتغيرة السرعة وعالية الاستطاعة.