جامعة المنارة
قسم هندسة الميكاترونكس

الكترونيات الطاقة
Power Electronic

الدكتور المهندس
علاء الدين أحمد حسام الدين

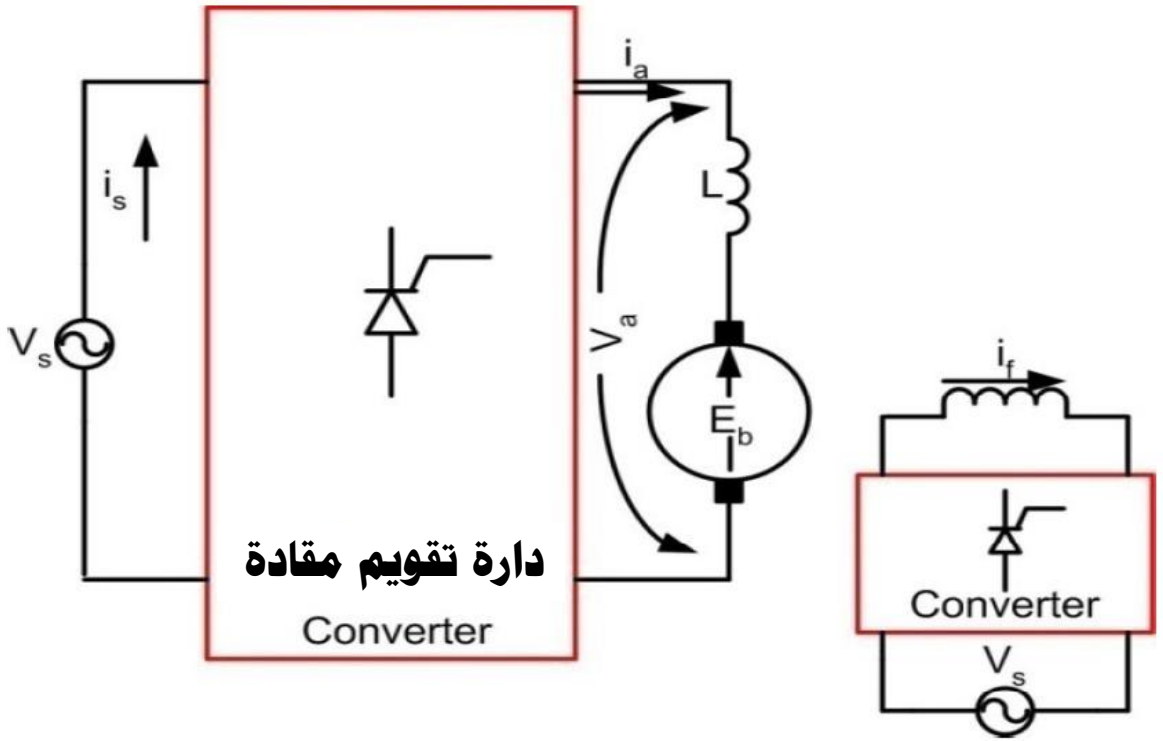
9

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.

تطبيقات:

تستخدم دارات التقويم المقادة بكثرة في مختلف التطبيقات الصناعية بهدف التحكم بأداء وسرعة محركات التيار المستمر، ويتم ذلك بتحويل التيار المتناوب إلى تيار مستمر ذي جهد يمكن التحكم بقيمته، ويتم ذلك باستخدام عناصر التقويم المقاومة (الثايرستورات)، حيث يتم التحكم في جهد الخرج بتغيير قيمة زاوية إشعال الثايرستور.



يبين الشكل الدارة الأساسية لكيفية استخدام دارات التقويم المقادة للتحكم بمحرك تيار مستمر ذي تهييج مستقل.

يتم وصل دارتي تقويم إحداها في دارة التهييج، والأخرى في دارة المتحرض، ويعتمد اختيار نوعها على نوع منبع التغذية المتوافر وعلى استطاعة المحرك بالإضافة إلى طبيعة الحمل.

تتم عملية التحكم بسرعة محركات التيار المستمر عملياً بطريقتين:

التحكم بجهد المتحرض:

حيث تتناسب السرعة طرداً مع جهد المتحرض، وتتميز بمجال التحكم الواسع من o إلى السرعة الإسمية n_n، ويتم تنفيذ ذلك عملياً بالتحكم بزاوية إشعال الثايرستورات في دارة التقويم الموصولة بين المنبع والمتحرض. فعندما يراد زيادة السرعة يجب زيادة جهد المتحرض، أي تقليل زاوية الإشعال في دارة المتحرض، وعندما يراد تقليل السرعة يجب تقليل جهد المتحرض، وبالتالي زيادة زاوية الإشعال.

التحكم بتيار التهييج:

حيث تتناسب السرعة عكساً مع تيار التهييج، وتتميز بإمكانية الحصول على سرعات أكبر من السرعة الاسمية، ويتم تنفيذ ذلك عملياً بالتحكم بزاوية إشعال الثايرستورات في دارة التقويم الموصولة بين المنبع ودارة التهييج، فعندما يراد زيادة السرعة يجب تقليل تيار التهييج، ويتم ذلك بخفض جهد التهييج، أي زيادة زاوية الإشعال في دارة التهييج، وعندما يراد تقليل السرعة يجب زيادة تيار التهييج، أي زيادة جهد التهييج، وبالتالي خفض زاوية الإشعال.

محرك تيار مستمر ذي تهييج مستقل استطاعته 2.5 hp، يتم تغذيته من دارة تقويم أحادية الطور مقادة موجة كاملة، من خلال منبع تغذية متناوب قيمته 220V بتردد 50Hz، فإذا علمت أن قيمة التيار الاسمي للمحرك 10A عند السرعة الاسمية n_n=1500 rpm وقيمة مقاومة ملفات المتحرض 0.2Ω المطلوب إيجاد:

1. زاوية الإشعال عند السرعة الاسمية.
2. زاوية الإشعال عند سرعة 500 rpm.

يمكن كتابة المعادلات التالية لمحرك التيار المستمر ذو التهييج المستقل:

$$V_a = E_a + I_a \cdot R_a$$

$$E_a = K \cdot \omega \qquad T = K \cdot I_a \qquad \omega = \frac{2\pi \times n}{60}$$

القيمة المتوسطة للجهد الخارج من دارة التقويم المقادة:

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

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

$$\omega = \frac{2\pi \times n}{60} = \frac{2\pi \times 1500}{60} = 157\ rad/sec$$

حساب زاوية الإشعال عند السرعة الإسمية:

$$T = \frac{P}{\omega} = \frac{2.5 \times 746}{157} = 11.88 N.m$$

$$K = \frac{T}{I_a} = \frac{11.88}{10} = 1.188$$

$$E_a = K \cdot \omega = 1.188 \times 157 = 186.5V$$

$$V_a = E_a + I_a \cdot R_a = 186.5 + 10 \times 0.2 = 188.5V$$

بما أن جهد الخرج لدارة التقويم هو نفسه الجهد على أقطاب المتحرض فإن $V_{av}=V_a$، وبالتالي:

$$\cos(\alpha) = \frac{V_{av} \times \pi}{2 \times V_m} = \frac{188.5 \times \pi}{2 \times 311} = 0.95 \Rightarrow \alpha = 18.19^o$$

حساب زاوية الإشعال عند السرعة 500 rpm:

$$E_{a1} = K \cdot \omega_1 = 1.188 \times \frac{2\pi \times 500}{60} = 62.2V$$

$$V_{a1} = E_{a1} + I_a \cdot R_a = 62.2 + 10 \times 0.2 = 64.2V$$

$$\cos(\alpha) = \frac{V_{av} \times \pi}{2 \times V_m} = \frac{64.2 \times \pi}{2 \times 311} = 0.32 \Rightarrow \alpha = 71^o$$

جَامعة
المَنارة
MANARA UNIVERSITY

مقطعات التيار المستمر

DC Choppers

تعد المقطعات إحدى تجهيزات إلكترونيات القدرة الكهربائية التي تؤمن منبع تغذية بالتيار المستمر قابل للتحكم.

يختلف مبدأ عمل المقطعات عن المبدلات بعدة نقاط أساسية منها:

- ❖ يعتمد مبدأ عمل المبدلات الثايرستورية التي تعمل كدارات تقويم على التنظيم الزاوي (α) لنبضات التحكم على ثايرستورات المبدلة، بينما يعتمد مبدأ عمل المقطعات على التنظيم النبضي العرضاني (Pulse-Width Modulation - PWM)، أو على التنظيم الترددي (Pulse-Frequency Modulation –PFM) لعمليات تبديل (فصل ووصل) المفاتيح الإلكترونية.
- ❖ لا تتطلب المبدلات الثايرستورية مفاتيح إلكترونية يمكن التحكم بلحظة إطفائها (فصلها)، بينما تتطلب المقطعات مفاتيح إلكترونية يمكن التحكم بلحظة إطفائها (فصلها) نتيجة اعتمادها على مبدأ التنظيم النبضي العرضاني لعمليات تبديل المفاتيح الإلكترونية.
- ❖ يتم تغذية المبدلات بمنابع جهود متناوبة أحادية أو ثلاثية الأطوار، بينما يتم تغذية المقطعات بمنابع جهود مستمرة ثابتة يمكن تحقيقها باستخدام دارات التقويم التي تم شرحها سابقاً.

❖ تستخدم مقطعات التيار المستمر للتحكم بتغذية التجهيزات الكهربائية التي تعمل على التيار المستمر، وذلك عن طريق تحويل الجهد المستمر الثابت إلى جهد مستمر متغير.

❖ تستخدم المقطعات بشكل واسع للتحكم بقوة السحب لمحركات السيارات الكهربائية وللحافلات ذات الحامل المتحرك (trolley cars) ولوسائل النقل في المناجم.

❖ تمتاز التجهيزات الكهربائية التي تستخدم المقطعات بإمكانية تأمين التحكم بالتسارع بشكل سلس وبكفاءة عالية وباستجابة ديناميكية سريعة، كما تمتاز بإمكانية إعادة الطاقة إلى المنبع في أنظمة العمل الخاصة بحيث تؤدي إلى توفير الطاقة في أنظمة النقل ذات التوقف المتكرر.

❖ تصنف مقطعات التيار المستمر بشكل عام إلى مقطعات خافضة ورافعة.

ترانزستور القدرة Power Transistor:

يستخدم الترانزستور بكثرة الآن في كثير من تطبيقات الكترونيات القدرة، حيث يمكن أن يصبح بديلاً للثايرستور لما يتميز به من مقدرة على الفصل والوصل من خلال تيار القاعدة، وذلك على عكس الثايرستور الذي يحتاج إلى دارة مساعدة لكي يفصل التيار. ومع التطور التكنولوجي في صناعة أشباه النواقل، تم تصنيع الترانزستور بقيم جهود وتيارات اسمية عالية، وبذلك أصبح منافساً قوياً للثايرستور الذي يتميز بهذه الميزة، وفي معظم تطبيقات الترانزستور في دارات الكترونيات القدرة فإنه يستخدم كمفتاح وصل وفصل، ويوجد ثلاثة أنواع رئيسة للترانزستور في دارات الكترونيات القدرة، وهي:

1. الترانزستور الثنائي القطبية (Bipolar Junction Transistor-BJT)
2. ترانزستور تأثير المجال ذو البوابة المعزولة (Metal-Oxide-Semiconductor Filed Effect Transistor-MOSFET)
3. الترانزستور الثنائي القطبية ذو البوابة المعزولة (Insulated Gate Bipolar Junction Transistor-IGBT)

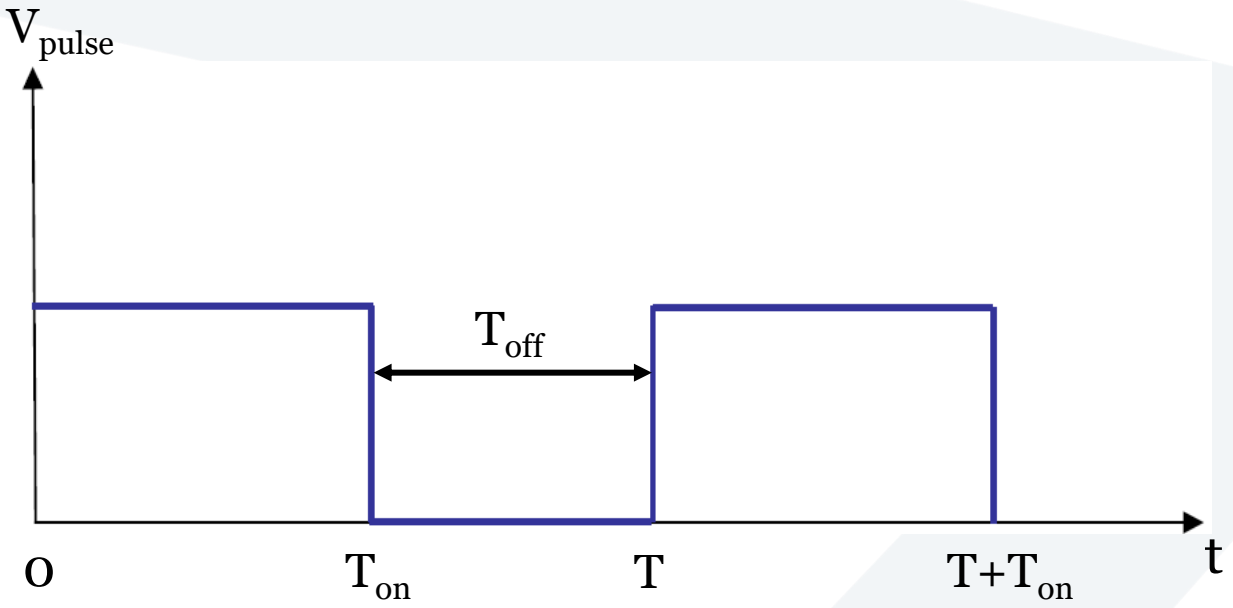
وجدنا مما سبق أن هدف دارات التقويم المقادة الأحادية الطور والثلاثية الأطوار هو تحويل منابع الجهد المتناوب إلى جهد مستمر مقاد القيمة عن طريق التحكم بقيمة زاوية الإشعال للثايرستور، وقد أمكن الحصول على جهد مستمر متغير على الخرج (على أقطاب الحمل)، وبالتالي يمكن أن نستفيد بهذا الجهد المتغير في التحكم بسرعة محركات التيار المستمر مثلاً، وأيضاً يمكن استخدام هذه الدارات لشحن البطاريات.

يمكن أيضاً التحكم بسرعة محركات التيار المستمر عن طريق استخدام العناصر الإلكترونية التي تسمى مقطعات التيار المستمر، حيث تحول هذه المقطعات الجهد المستمر الثابت القيمة إلى جهد مستمر متغير القيمة عن طريق التحكم بدور التشغيل (Duty cycle)، وتتكون هذه المقطعات من عدد من الثايرستورات أو الترانزستورات.

تستخدم مقطعات التيار المستمر على نطاق واسع في التطبيقات الصناعية، مثل القطارات الكهربائية، والسيارات الكهربائية، وآلات الرفع والجر ..... وغيرها، وتلعب مقطعات التيار المستمر دوراً مهما للتحكم في السرعة أو عمل الفرملة بإعادة التوليد.

دور التشغيل Duty Cycle:

يمكن الحصول على القيمة المطلوبة لجهد الخرج المستمر عن طريق التحكم بزمن الفصل T_{off} وزمن الإغلاق T_{on} للمفتاح الإلكتروني (الترانزستور مثلاً)، حيث يتم التحكم في إغلاق وفتح المفتاح عن طريق إعطاء نبضة كهربائية لإدارة التحكم الخاصة بهذا المفتاح، كما في الشكل، الذي يظهر نموذج لنبضة التحكم بالمفتاح الإلكتروني.



دور التشغيل D هو النسبة بين زمن إغلاق المفتاح الإلكتروني T_{on} (زمن التشغيل)، وزمن دور نبضة التحكم T (الزمن الكلي)، وتكتب الصيغة الرياضية لدور التشغيل بالعلاقة:

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T}$$

D – دور التشغيل.

T_{on} – زمن إغلاق المفتاح الإلكتروني (زمن تشغيل الدارة، أو زمن التوصيل).

T_{off} – زمن فصل المفتاح الإلكتروني (زمن فصل الدارة).

T – زمن الدور (الزمن الكلي).

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T}$$

نلاحظ من المعادلة أن قيم دور التشغيل تتراوح ضمن المجال $0 \leq D \leq 1$، حيث يكون دور التشغيل مساوٍ (0) عندما يكون زمن إغلاق المفتاح T_{on} يساوي (0) ، وهذا يحدث عندما يكون المفتاح **مفصولاً كلياً**، ودور التشغيل يساوي (1) عندما يكون زمن فصل المفتاح T_{off} يساوي (0)، وهذا يحدث عندما يكون المفتاح **مغلق كلياً**.

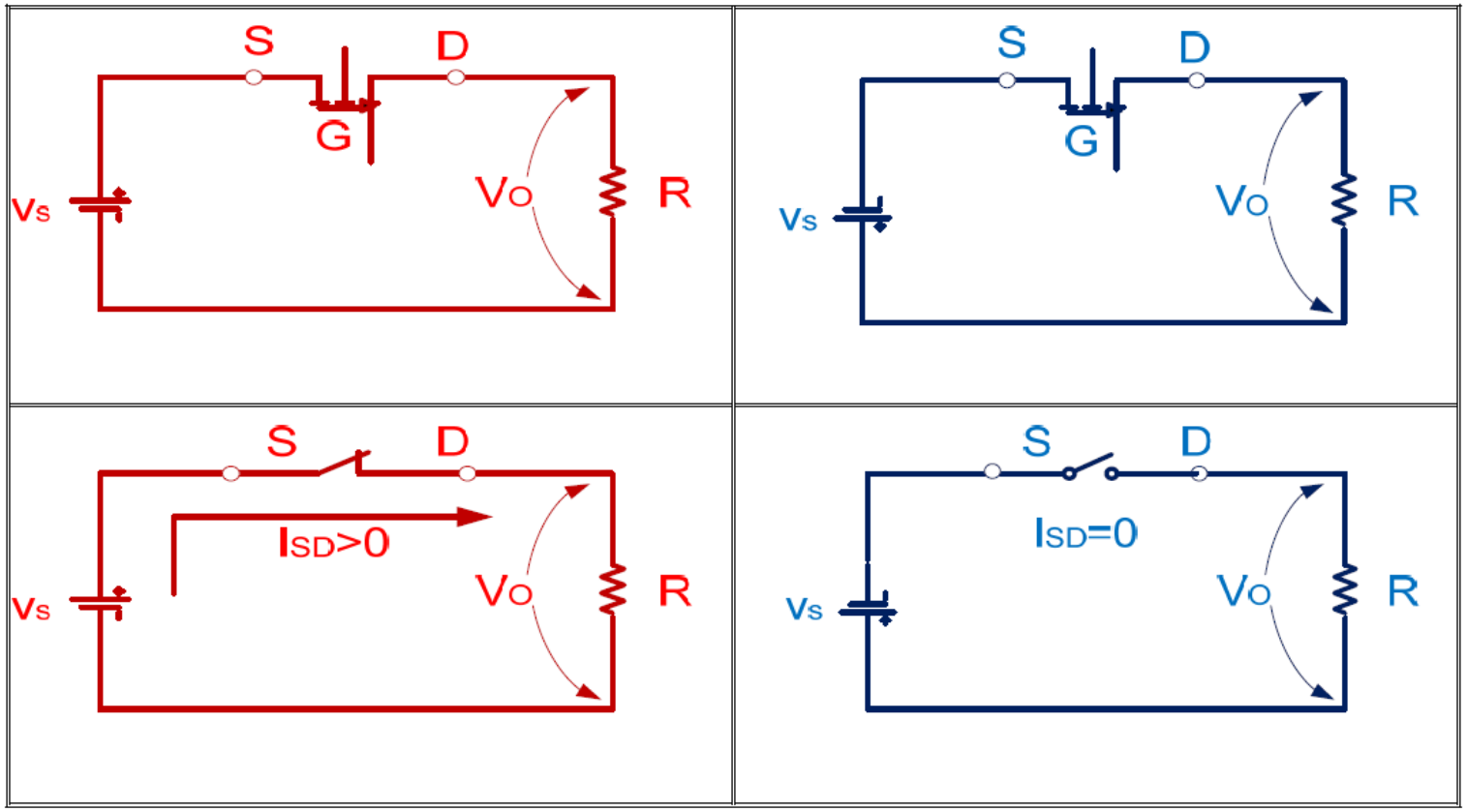
يتم التحكم بزمن الإغلاق والفصل عن طريق التحكم بقيمة تيار القاعدة (Base current) عند استخدام الترانزستورات كمفاتيح الكترونية، بينما يتم التحكم في قيمة هذه الأزمنة عن طريق التحكم بقيمة دور التشغيل لنبضة البوابة في حال استخدام MOSFET حيث عندما يكون جهد النبضة موجباً يكون MOSFET مغلقاً، وعندما تكون قيمة النبضة (0) ويصبح MOSFET مفصولاً.

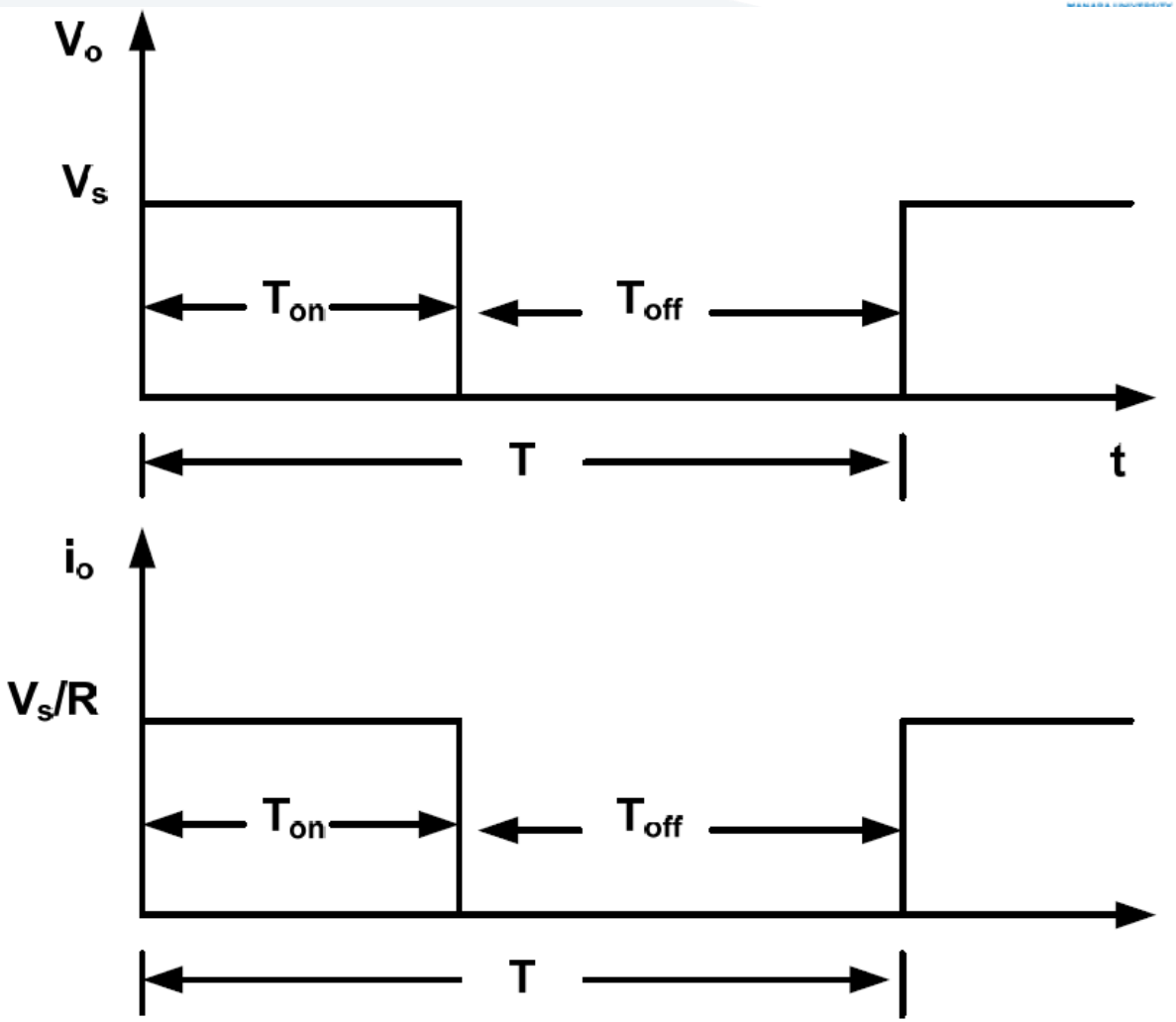
عند استخدام الثايرستور في دارات مقطعات التيار المستمر لا بد من استخدام دارة مساعدة أخرى (Auxiliary Circuit) لإطفاء (**فصل**) الثايرستور، وتسمى دارة الإطفاء (**التبديل**) (Commutation Circuit).

خلال دراستنا للمقطعات سنفترض أن المفاتيح الإلكترونية هي إما MOSFET أو ترانزستور البوابة ثنائية القطبية، والتي تتميز بأن فصل وإغلاق هذه المفاتيح يتم بطريقة ميسرة ولا تحتاج لدارات مساعدة للإطفاء كحالة وجود الثايرستور في دارة المقطع، وهذا الأمر ممكن، إلا عندما تكون الأحمال عالية الاستطاعة، عندها لا يوجد بديل عن الثايرستور.

نظرية عمل مقطعات التيار المستمر:

يمكن فهم فكرة عمل مقطع التيار المستمر باستخدام الدارة المبينة بالشكل، والمكونة من حمل أومي (مقاومة)، ومفتاح، ومنبع جهد مستمر.





عند توصيل المفتاح لمدة زمنية T_{on} فإن جهد المنبع سيظهر على الحمل، وإذا تم فصل المفتاح لمدة زمنية T_{off} فإن جهد الحمل سيكون مساوياً للصفر، وبالتالي تكون أشكال موجات الجهد والتيار كما في الشكل، حيث:

- V_S – جهد المنبع.
- T_{on} – زمن التوصل.
- T_{off} – زمن الفصل.
- T – الزمن الكلي.

يمكن حساب القيمة المتوسطة للجهد على الحمل من العلاقة:

$$V_{av} = \frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} V_S \cdot dt = \frac{T_{on}}{T} \times V_S = D \times V_S$$

حيث: $D = \frac{T_{on}}{T}$ هي دور (نسبة) التشغيل (Duty cycle) (ثابت فترة التوصيل للمقطّع).

وتكون الاستطاعة المستهلكة في المقاومة P_o مساوية للاستطاعة المسحوبة من المنبع P_S على اعتبار أن ضياعات الجهد على المقطّع يكون مساوياً للصفر عندما يكون في حالة توصيل ON، ويمكن حساب هذه الاستطاعة كما يلي:

$$P_S = P_0 = \frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} V_S \cdot i_0 \cdot dt = \frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} \frac{V_S^2}{R} \cdot dt = \frac{T_{on}}{T} \times \frac{V_S^2}{R} = D \times \frac{V_S^2}{R}$$

وتكون كفاءة المقطع في هذه الحالة 100%.

القيمة المتوسطة لتيار الحمل:

$$I_{av} = \frac{V_{av}}{R} = D \times \frac{V_S}{R}$$

ويمكن حساب القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل من العلاقة:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} V_S^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{T_{on}}{T}} \times V_S = \sqrt{D} \times V_S$$

يتضح من العلاقة الأخيرة أنه يمكن التحكم في الجهد عن طريق التحكم بنسبة تشغيل المقطّع، ولكن يجب الأخذ بالحسبان أن يكون تردد المقطع عالياً، ويتراوح بين 500Hz إلى 2500Hz، لذا يجب أن يكون المفتاح الالكتروني المستخدم سريع الاستجابة ويسهل التحكم في عملية الإغلاق والفتح (MOSFET , IGBT , BJT , GTO ...).

عناصر الكترونيات الطاقة التي تستخدم كمقطّعات يكون عليها ضياع صغير في الجهد يتراوح بين 0.5V و 2V، ولكن هذا الضياع تم اهماله في استنتاج معادلات القيمة المتوسطة والفعالة للتيار والجهد، أما إذا أخذنا الضياع بالحسبان فإن القيمة المتوسطة للجهد على أطراف الحمل تكون كما يلي:

$$V_{av} = \frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} V_0 \cdot dt = \frac{T_{on}}{T} \times (V_S - V_d) = D \times (V_S - V_d)$$

حيث V_d هو الضياع في الجهد على أطراف المقطّع عندما يكون في حالة توصيل.

ويمكن في هذه الحالة حساب القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل من العلاقة:

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} (V_S - V_d)^2 \cdot dt} = \sqrt{\frac{T_{on}}{T}} \times (V_S - V_d) = \sqrt{D} \times (V_S - V_d)$$

وتحسب الاستطاعة المسحوبة من المنبع كما يلي:

$$P_S = \frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} V_S \cdot i_0 \cdot dt = \frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} \frac{V_S \times (V_S - V_d)}{R} \cdot dt = \frac{T_{on}}{T} \times \frac{V_S \times (V_S - V_d)}{R} = D \times \frac{V_S \times (V_S - V_d)}{R}$$

بينما تكون الاستطاعة المستهلكة في الحمل هي:

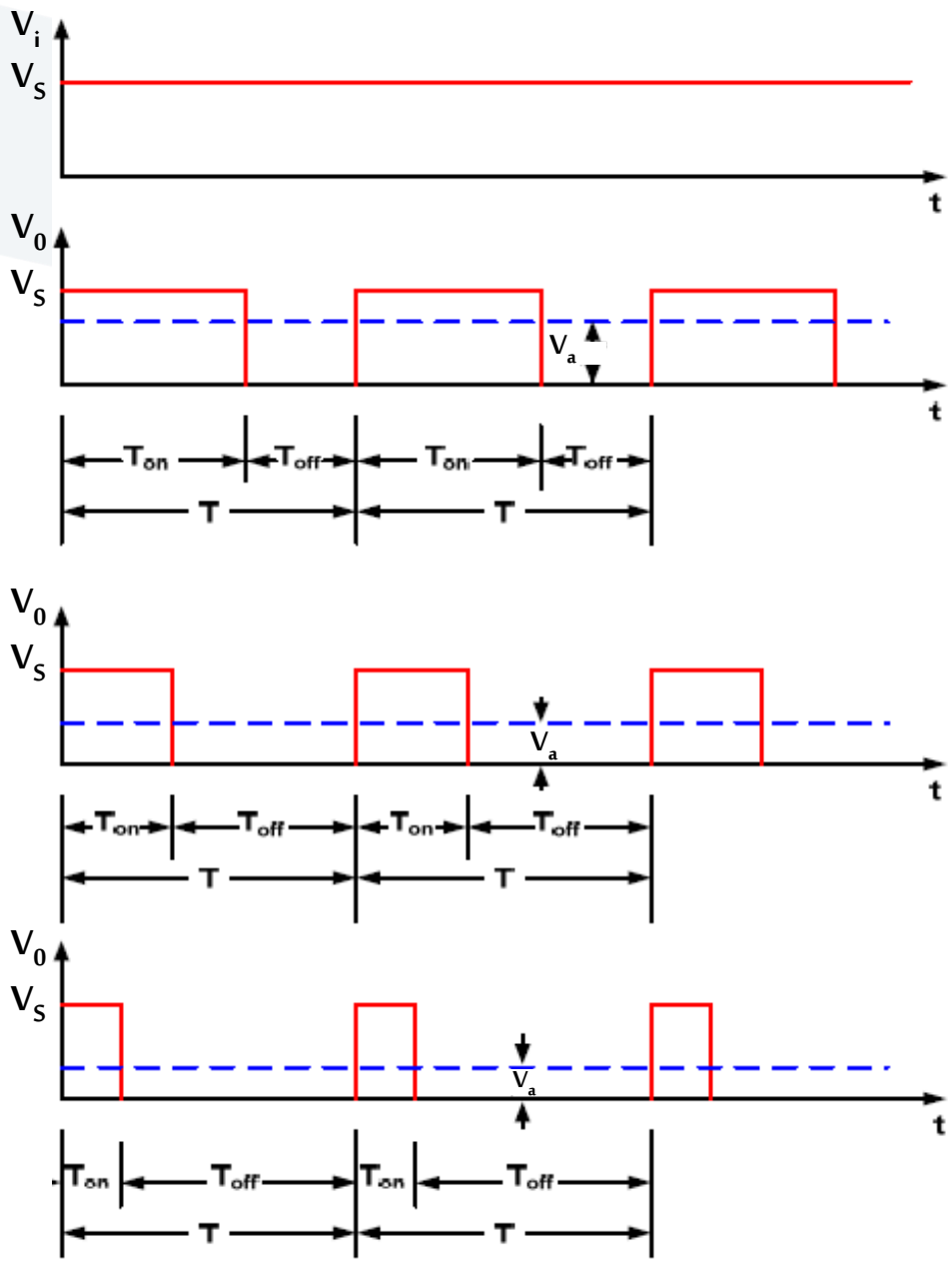
$$P_0 = \frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} V_0 \cdot i_0 \cdot dt = \frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} \frac{(V_S - V_d)^2}{R} \cdot dt = \frac{T_{on}}{T} \times \frac{(V_S - V_d)^2}{R} = D \times \frac{(V_S - V_d)^2}{R}$$

طرق التحكم بمقطعات التيار المستمر:

مما سبق يتضح لنا أن مقطّع التيار المستمر يمكن استخدامه للتحكم في القدرة الكهربائية للتطبيقات الصناعية المختلفة، مع ملاحظة إمكانية التحكم بالقيمة المتوسطة للجهد بتغيير نسبة التشغيل التي يمكن التحكم بها بطريقتين هما:

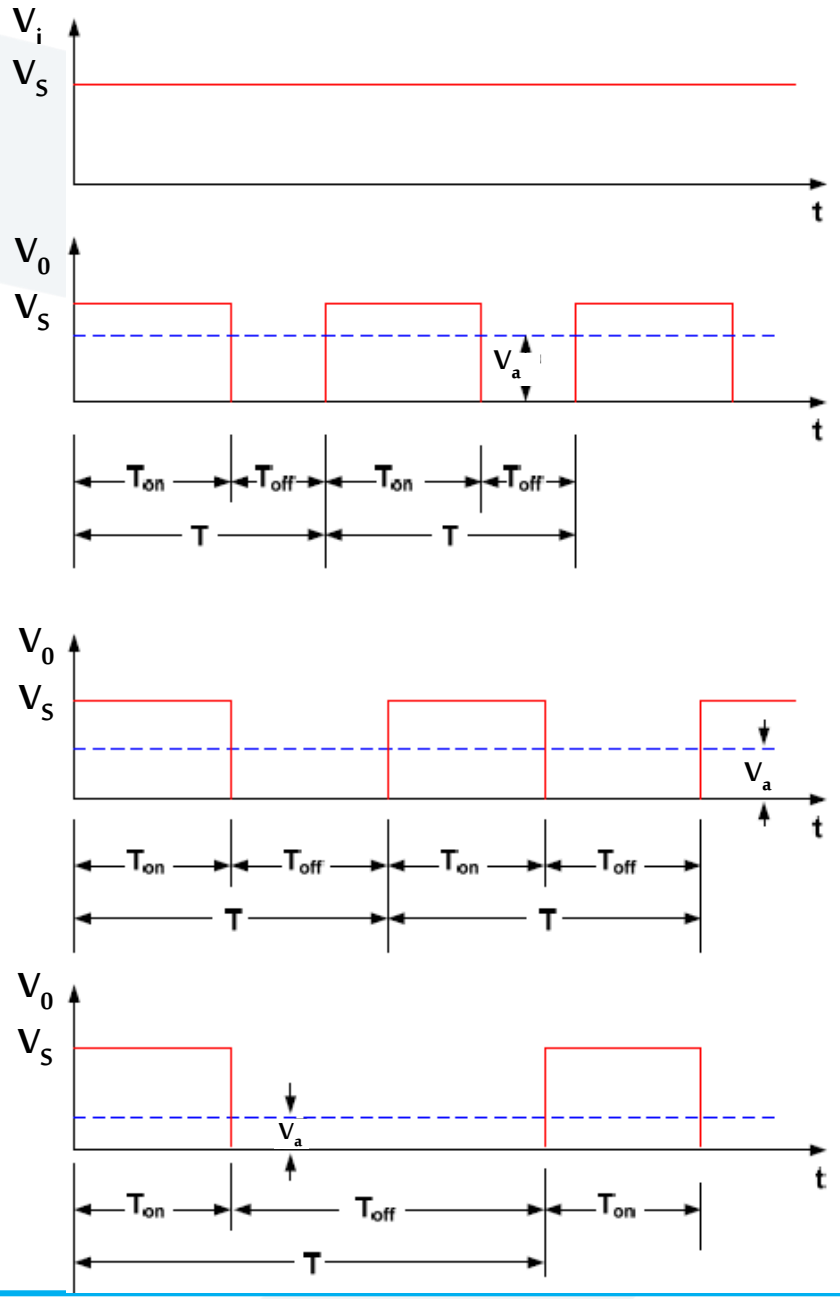
1. بتعديل عرض النبضة (Pulse-Width Modulation - PWM).

2. بتعديل تردد النبضة (Pulse-Frequency Modulation –PFM).



1. بتعديل عرض النبضة (PWM):

حيث يتم التحكم في جهد الخرج بتغيير فترة التوصيل T_{on} مع المحافظة على زمن الدور T ثابتاً، أي ثبات تردد فتح وإغلاق المقطّع.



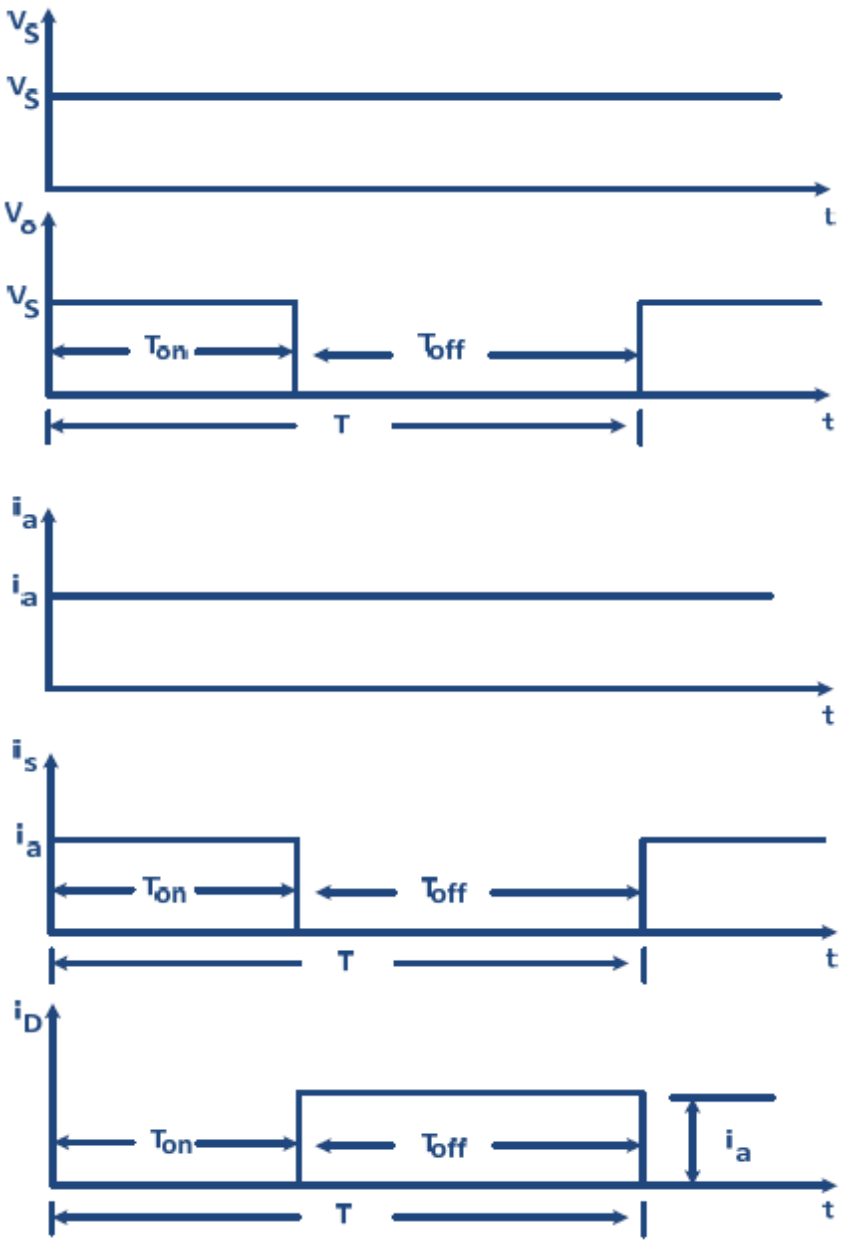
2. بتعديل تردد النبضة (PFM).

حيث يتم التحكم في جهد الخرج بتغيير زمن الدور T مع المحافظة على زمن التوصيل T_{on} ثابتاً، أي بتغيير تردد فتح وإغلاق المقطّع.

أنواع مقطعات التيار المستمر:

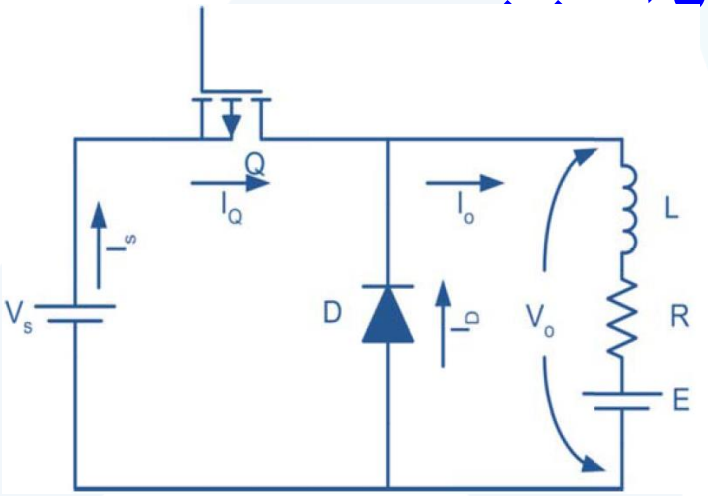
تقسم مقطعات التيار حسب استخدامها إلى نوعين أساسيين:

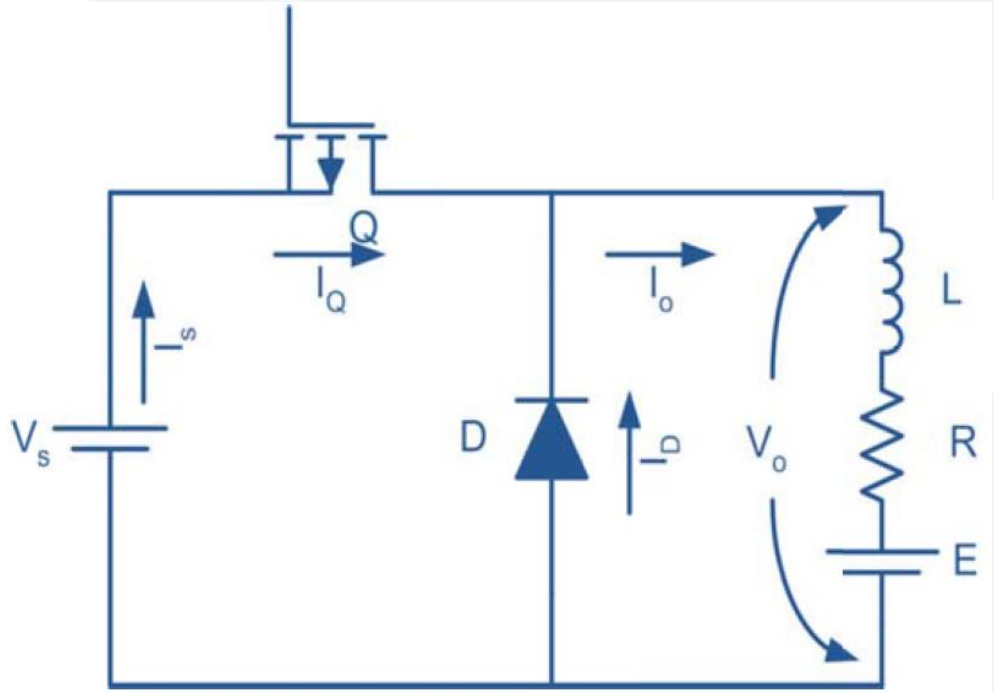
- **مقطعات خافضة للجهد step-down (buck) DC choppers. والتي تحول الجهد المستمر الثابت القيمة إلى جهد مستمر متغير القيمة، وبقيمة أقل من جهد المنبع.**
- **مقطعات رافعة للجهد step-up (boost) DC choppers. والتي تستخدم للحصول على قيم جهد مستمر متغير له قيمة أكبر من جهد المنبع.**



❖ **المقطعات الخافضة للجهد step-down DC choppers.**

وتسمى مقطعات التسلسل، في هذه الحالة تكون القيمة المتوسطة للجهد على أطراف الحمل أقل من جهد المنبع، أي أن نسبة التشغيل (دور التشغيل) أقل من (1). يبين الشكل مقطعاً خافضاً باستخدام MOSFET لتغذية حمل مكون من مقاومة وملف وبطارية، مع أشكال موجات الجهد والتيار في الدارة بالأخذ بالحسبان أن تحريضية الملف عالية، بحيث يكون تيار الحمل متواصلاً وخالياً من التذبذبات.





يعتمد عمل المقطع على عنصر MOSFET فإذا كان في حالة On يمر التيار من المنبع إلى الحمل من خلال MOSFET ويعود مرة أخرى إلى المنبع، ولكن يبقى جزء منه مخزن في الملف.

أما إذا كان MOSFET (Q) في حالة Off فإن التيار المخزن في الملف يفرغ عن طريق دايود المسار الحر D والمقاومة، ويستمر ذلك حتى يتم تشغيل MOSFET (Q) مرة أخرى، وفي هذه الحالة تكون نسبة التشغيل أقل من (1)، ويكون الجهد المتوسط على أطراف الحمل هو:

$$V_{av} = \frac{1}{T}\int_0^{T_{on}} V_S \cdot dt = \frac{T_{on}}{T} \times V_S = D \times V_S$$

مقطّع تيار مستمر من النوع الخافض، يتم بواسطته التحكم بالجهد المطبق على حمل مادي مقاومته 15Ω، وكان جهد المنبع 300V ، وتردد المقطّع 1kHz، ونسبة تشغيله 60%. فإذا كانت قيمة ضياعات الجهد على المقطع في حالة توصيله 2V. المطلوب حساب ما يلي:

1. الزمن الدوري، وزمن التشغيل، وزمن الفصل.
2. القيمة المتوسطة للجهد على أطراف الحمل.
3. القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل.
4. الاستطاعة المستهلكة في المقاومة.
5. الاستطاعة المستجرة من المنبع.
6. مردود المقطع.

الحل:

المعطيات: $R=15\Omega\ ,\ V_S=300V\ ,\ D=0.6\ ,\ f=1kHz$

1. **الزمن الدوري.**

$$T=\frac{1}{f}=\frac{1}{1000}=0.001[sec]=1[ms].$$

زمن التشغيل.

$$D=\frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}}=\frac{T_{on}}{T}\Rightarrow T_{on}=D\times T=0.6\times 0.001=0.0006[sec]=0.6[ms]$$

زمن الفصل. $T_{off}=(1-D)\times T=(1-0.6)\times 0.001=0.0004[sec]=0.4[ms]$

2. **القيمة المتوسطة للجهد على أطراف الحمل.**

$$V_{av}=D\times(V_S-V_d)=0.6\times(300-2)=178.8V$$

3. القيمة الفعالة للجهد على أطراف الحمل.

$$V_{rms} = \sqrt{D} \times (V_S - V_d) = \sqrt{0.6} \times (300 - 2) = 230.83V$$

4. الاستطاعة المستهلكة في المقاومة.

$$P_0 = D \times \frac{(V_S - V_d)^2}{R} = 0.6 \times \frac{(300 - 2)^2}{15} = 3552.16W$$

5. الاستطاعة المستجرة من المنبع.

$$P_S = D \times \frac{V_S \times (V_S - V_d)}{R} = 0.6 \times \frac{300 \times (300 - 2)}{15} = 3576W$$

6. مردود المقطّع.

$$\eta\% = \frac{P_0}{P_S} = \frac{3552.16}{3576} \times 100 = 99.33\%$$

مقطع خافض يعمل بجهد دخل $V_s=220V$ يغذي حمولة أومية $R=10\Omega$ ويعمل بتردد $f=1KHz$ وبثابت فترة توصيل للمقطع $D=0.5$، وذلك بفرض أن هبوط الجهد على العنصر الإلكتروني للمقطع يعادل $2V$. المطلوب حساب:

1. القيمة المتوسطة لجهد الخرج (V_{av}).
2. القيمة الفعّالة لجهد الخرج (V_{rms}).
3. مردود المقطع.
4. مقاومة الدخل للمقطّع (R_{in}).

1. القيمة المتوسطة لجهد الخرج (V_{av}).

$$V_{av} = D \times (V_S - V_d) = 0.5 \times (220 - 2) = 109V$$

2. القيمة الفعالة لجهد الخرج (V_{rms}).

$$V_{rms} = \sqrt{D} \times (V_S - V_d) = \sqrt{0.5} \times (220 - 2) = 154.15V$$

3. مردود المقطّع.

استطاعة الخرج:

$$P_0 = D \times \frac{(V_S - V_d)^2}{R} = 0.5 \times \frac{(220 - 2)^2}{10} = 2376.2W$$

استطاعة الدخل:

$$P_S = D \times \frac{V_S \times (V_S - V_d)}{R} = 0.5 \times \frac{220 \times (220 - 2)}{10} = 2398W$$

$$\eta\% = \frac{P_0}{P_S} = \frac{2376.2}{2398} \times 100 = 99.09\%$$

4. مقاومة الدخل للمقطّع (R_{in}).

$$R_i = \frac{10}{0.5} = 20\Omega$$