

## ١.٤ المبدلات التي تعمل في ربعين من إحدائيات التوتر والتيار ( العكسية )

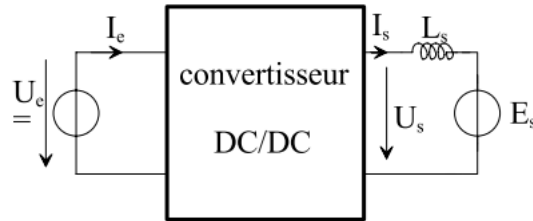
### ١.٤.١ مقدمة

في هذا الجزء من المقطعات سوف نعالج المقطعات التي تعمل في ربعين من إحدائيات التوتر والتيار. أي أن المقطع أو مبدل التيار المستمر إلى التيار المستمر عليه أن يعمل على تحويل القدرة من منبع توتر إلى منبع تيار، وحسب الشكل الذي يوضح الاحداثيات الأربعة للتوتر والتيار ، في داراتنا السابقة استخدمنا جسور التقويم المضاعفة Dual Converter للعمل في هذه الإحدائيات بحيث أن كل جسر يستطيع أن يعمل في ربعين، أي أن الجسر الثيرستوري يستطيع تقديم توتر موجب وتوتر سالب لدى تغيير زاوية الإزاحة بالطور من الصفر حتى ١٨٠. أي أن الجسر الثيرستوري يمكنه العمل كعاكس للتوتر مع المحافظة على اتجاه تيار وحيد. والربط المتعاكس للجسور يساهم في تأمين عكس مرور التيار في الحمل ذلك أنه يمكن أن يقدم من الجسر الموجب أو السالب حسب اتجاه تيار الحمل المطلوب. هنا في المقطعات العكسية، سنعمل على دراسة المقطع العكسي بالتيار، أي القادر على تقديم تيار موجب وتيار سالب، ولاحقاً سوف نعرض المقطعات العكسية بالتوتر أي القادرة على قلب قطبية التوتر مع المحافظة على اتجاه وحيد للتيار. ثم سنعالج المقطعات الجسرية التي يمكنها العمل في الإحدائيات الأربعة للتوتر والتيار والقادرة على منافسة المبدلات المضاعفة المشكلة من جسور تقويم ثيرستورية.

### ١.٤.٢ تمثيل المنابع الممكن استخدامها

قبل البدء بتوصيف وشرح بنية المقطع القادر على عكس التيار، علينا أن نعطي ونشرح طبيعة المنابع المستخدمة .:

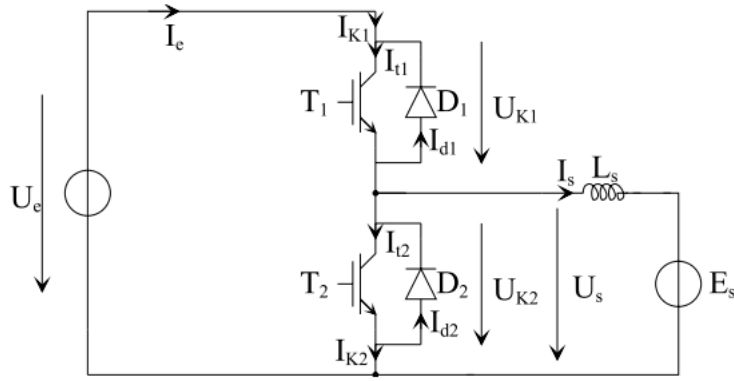
- لدينا منبع التوتر  $U_e$  والذي سوف نعتبره منبع توتر مثالي .
- لدينا منبع التيار  $I_s$  ، وكي يتمكن هذا المنبع من عكس التيار، سوف نعمل على اعتبار هذا المنبع مكون من حثية ( ملف ) وقوة محركية كهربائية Force électromotrice ، يمكن في الشكل ١.٤٩ تمثيل هذه المنابع .



الشكل ١.٤٩ المبدل تيار مستمر - تيار مستمر يعمل في ربعين

منبع التيار  $I_s$  مكون من حثية  $L_s$  موصلة على التسلسل مع منبع توتر  $E_s$ . وهذا المنبع قد يمثل بدقة محرك أو مولد التيار المستمر عندما ننظر إليه من جهة المتحرض. الحثية المبينة في الشكل تمثل مجموع حثية المتحرض وحثية الملف المضاف للتنعيم  $L_{issage}$ . مثل هذا الحمل قادر على عكس اتجاه التيار، من أجل حالة العمل كمحرك، وتغيير اتجاه التيار فيه يعني تغيير اتجاه العزم، وهذا يسمح بفرملة المحرك واسترداد القدرة منه، هذه العملية هامة جداً في عمليات الجر الكهربائي. بالمقابل، إذا كانت عملية الفرملة بواسطة استرداد القدرة هي الميزة المطلوبة من مثل هذا النظام العكسي بالتيار، فإنه من المستبعد عكس اتجاه دوران المحرك لأنه لا يمكن تغيير قطبية التوتر في هذا النوع من المبدلات.

### ١.٤.٣ بنية المبدل



الشكل ١.٥٣ بنية المبدل العكسي للتيار

خواص العمل المطلوبة من القاطع في هذا المبدل هي إمكانية العمل عند قطبية توتر واحدة واتجاهين للتيار، الترانزستور يوفر العمل عند قطبية واحدة للتوتر والتيار، إضافة الديود باتجاه معاكس يوفر إمكانية عكس التيار. وسنوضح فيما يلي آلية جريان القدرة والتبديل للقواطع :

### جريان القدرة بين المنابع والتبديل

جريان القدرة بين منبع التوتر ومنبع التيار يرتبط مباشرة بإشارة التيار  $I_s$ . توجد حالتين لتحقيق ذلك وقد تم تمثيلهما في الشكل ١.٥٣ :

- حالة كون تيار الحمل  $I_s > 0$  موجب فرضاً، تحليل الشكل ١.٥٣ يظهر أنه في هذه الحالة يمر التيار فقط في العنصرين  $T_1$  و  $D_2$ ، عندما يسمح لهما بالعمل. وبالنظر لإشارة أو اتجاه التيار  $I_s$  فإن العنصرين  $T_2$  و  $D_1$  لا يمكنهما العمل. هذا يعني أن

القدرة في هذه الحالة تتدفق من منبع التوتر  $U_e$  باتجاه منبع التيار  $I_s$  إذا باتجاه منبع التوتر  $E_s$ .

• في حالة كون  $I_s < 0$  : العناصر  $T_2$  و  $D_1$  هي فقط الموصلة والتي تسمح بمرور التيار. بالمقابل، تبعاً لاتجاه التيار  $I_s$  العناصر  $T_1$  و  $D_2$  في حالة حجز لا يمكنها العمل. القدرة في هذه الحالة تتدفق من منبع التيار  $I_s$ ، أي من منبع التوتر  $E_s$  باتجاه منبع التوتر  $U_e$ . (استعادة القدرة إلى المنبع)

• إذا رمزنا للقدرة المتبادلة بالرمز  $\mathcal{E}$  وعليه يمكن القول :

• إذا كانت  $\mathcal{E} > 0$  يتم جريان القدرة من المنبع  $U_e$  باتجاه المنبع  $E_s$ .

• إذا كانت  $\mathcal{E} < 0$  يتم جريان القدرة من المنبع  $E_s$  باتجاه المنبع  $U_e$ .

استناداً للمعلومات التي تم عرضها أعلاه، ننع أن المقطع العكسي بالتيار الموضح بالشكل ١.٥٣ هو نتيجة دمج مقطعين غير عكسيين بالتيار، وتشغيل أي منهما يعتمد على اتجاه التيار المراد تمريره أي اتجاه القدرة  $\mathcal{E}$  المراد تبادلها. في الشكل ١.٥٤ تم تمثيل المقطعات تبعاً لإشارة القدرة المتبادلة .

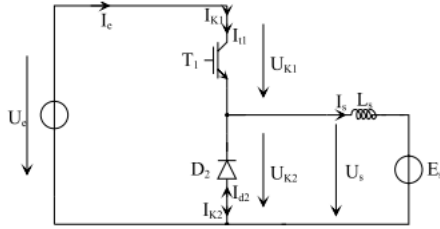


Fig. 1.54(a)  
 $I_s > 0 \implies \mathcal{E} > 0$

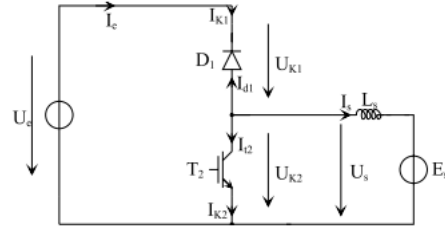


Fig. 1.54(b)  
 $I_s < 0 \implies \mathcal{E} < 0$

الشكل ١.٥٤ عمل كل مبدل من المبدلات تبعاً لاتجاه القدرة المتبادلة

• الشكل ١.٥٤ a يبدو لنا وكأنه مقطع خافض للتوتر Buck، وعليه فإن دراسة المقطع العكسي بالتيار يمكن تلخيصه استناداً لعمل المقطع غير العكسي بالتيار عندما يكون التيار  $I_s$  موجباً ( $\mathcal{E}$  أو القدرة موجبة).

• الشكل ١.٥٤ b يبدو لنا وكأنه مقطع رافع للتوتر Boost. ودراسة المقطع العكسي بالتيار يمكن تلخيصه استناداً لمبدأ عمل المقطع الرفع للتوتر عندما يكون التيار  $I_s$  سالباً (القدرة سالبة  $\mathcal{E}$ ).

بالتعريف يمكن القول أن التركيب الذي يسمح بعكس اتجاه التيار للمقطع الخافض للتوتر Buck غير العكسي بالتيار هو المقطع الرافع للتوتر Boost. والتركيب الذي يسمح بعكس اتجاه التيار للمقطع الرافع للتوتر Boost غير العكسي بالتيار، هو المقطع الخافض للتوتر Buck. وعملية الدمج لهذين المقطعين تعطي المقطع العكسي بالتيار .

إذا كان منبع التوتر  $E_s$  السابق، عبارة عن محرك تيار مستمر، والقيمة  $E_s$  تمثل القوة المحركة الكهربائية العكسية لهذا المحرك، فإن تشغيل المقطع الخافض للتوتر يعمل على إقلاع المحرك وبدء الدوران ثم يمكن تثبيت السرعة والحفاظ على قوة محركية كهربائية موجبة واستمرار تيار موجب خلال تلك الفترة، والاستطاعة المتوسطة اللحظية تساوي :

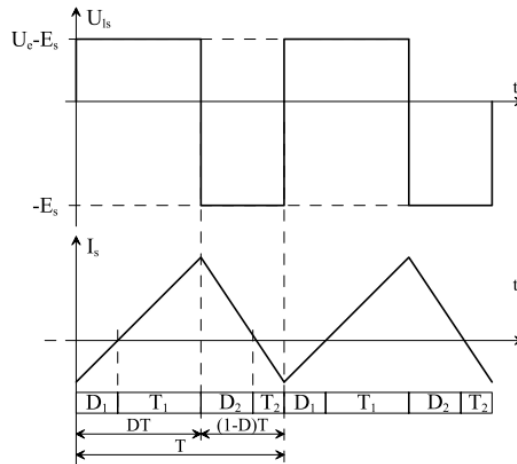
$$P_s = E_s I_s \quad (1.94)$$

كما يمكن التحكم بقيادة المبدل العمل على استرجاع القدرة من المحرك وحفظها بالمنبع  $U_e$ ، بحيث ينعكس اتجاه التيار ويبقى التوتر موجباً والقدرة تصبح سالبة، قادمة من متحرض المحرك باتجاه المنبع  $U_e$ . وهو ما يتم بتشغيل المقطع الرافع للتوتر Boost. للتوسع في هذا المفهوم يمكن النظر للشكل ١.٥٧ :

نعتبر أن بداية التشغيل كانت لحظة توصيل القاطع  $T_1$ ، حيث أن القاطع  $T_2$  يتم توجيه القيادة لنقله لحالة الحجز. التوتر العكسي على القاطع  $T_1$  يكون معدوماً، مساوي للصفر، بينما التوتر العكسي على الديود  $D_2$  يساوي  $(U_{k2} = U_e)$  أي أنه في حالة حجز قسري. التوتر على طرفي الحثية  $L_s$  يمكن عندئذ تعريفه بالعلاقة :

$$U_{L_s} = L_s \frac{dI_s}{dt} = U_e - E_s \quad (1.96)$$

بما أن  $U_e > E_s$  فإن التيار  $I_s$  سيتزايد وهو موجب .



الشكل ١.٥٧ تتابع توصيل القواطع في المقطع العكسي للتيار

عندما ينتقل القاطع  $T_1$  لحالة الحجز، فإن استمرارية مرور التيار يتم تأمينها عبر قاطع آخر. ونظراً لكون إشارة التيار  $I_s$  موجبة فإن الديود  $D_1$  والقاطع  $T_2$  لا يمكنهما تمرير هذا التيار الموجب، والديود  $D_2$  هو القادر على تمرير التيار وينتقل للتوصيل الطبيعي. خلال فترة توصيل الديود  $D_2$  يكون التوتر العكسي  $U_{k2}$  عليه معدوماً، ويصبح التوتر العكسي  $U_{k1}$  مساوياً للتوتر  $U_e$  ويكون التوتر على الملف عندئذ تابع للعلاقة :

$$(١.٩٧) \quad U_{Is} = L_s \frac{dI_s}{dt} = - E_s$$

التوتر  $E_s$  موجب، وهو مرحلة تناقص التيار بدءاً من قيمة موجبة. ويستمر حتى انعدام التيار  $I_s$ . في حال نقل القاطع  $T_2$  للتوصيل خلال فترة توصيل العنصر  $D_2$ ، يبقى التوتر العكسي على  $T_2$  معدوماً بالرغم من انتقال الديود  $D_2$  للحجز عند انقطاع التيار  $I_s$ . العلاقة الناظمة للتوتر على الملف  $U_{LS}$  يبقى دون تغيير ويعطى بالعلاقة :

$$(١.٩٨) \quad U_{Ls} = L_s \frac{dI_s}{dt} = - E_s$$

بما أن التوتر  $E_s$  موجباً، يتابع التيار  $I_s$  تناقصه، ويصبح بالتالي سالباً. هذا الطور الذي يتم فيه تناقص التيار مع اعتبار  $I_s < 0$  يستمر طالما أن القاطع  $T_2$  في حالة توصيل. عندما نقود القاطع  $T_2$  لحالة الفصل، استمرارية التيار يتم تأمينها من قبل الديود  $D_1$ . خلال ذلك التوتر العكسي  $U_{k1}$  على الديود  $D_1$  يكون معدوماً والتوتر العكسي  $U_{k2} = U_e$ ، وعليه فإن التوتر على الملف يعطى بالعلاقة :

$$(١.٩٩) \quad U_{Ls} = L_s \frac{dI_s}{dt} = U_e - E_s$$

بما أن  $U_e > E_s$  فإن التيار  $I_s$  سيبدأ بالتزايد بدءاً من قيمة سالبة، تستمر هذه الفترة حتى انتهاء انعدام التيار  $I_s$ ، ويستمر بالتزايد لينتقل للقيم الموجبة .

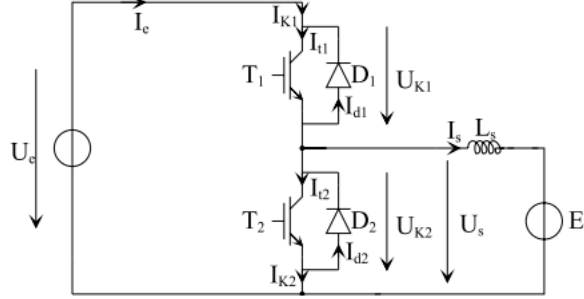
#### ١.٤.٤ العلاقات الناظمة للمقطع العكسي بالتيار

دراسة العلاقات الأساسية الناظمة للمبدل العكسي بالتيار ستكون مبسطة نظراً لعدم وجود حالات حرجة في التشغيل والتشغيل عند تيار متقطع أو حرج غير موجودة. لذا سوف نقصر على دراسة الحالة المستقرة الدائمة غير العابرة والعمل على :

- وضع العلاقات الناظمة بين توتر الخرج المتوسط للمبدل وتوتر التغذية.

- وضع العلاقة الناظمة لتيار الخرج المتوسط للمبدل وتيار التغذية، وكذلك دراسة تعرجات تيار الخرج  $I_s$ .

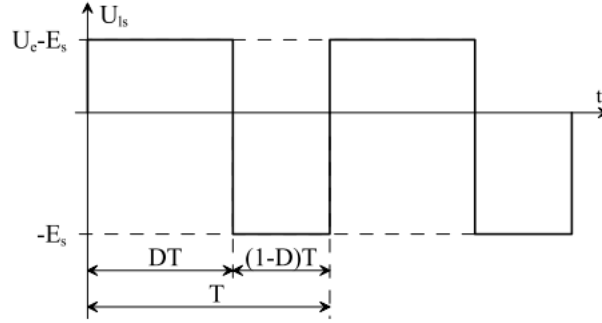
في الشكل ١.٥٨ نذكر بدارة المبدل العكسي للتيار .



الشكل ١.٥٨ دارة المبدل العكسي للتيار

#### ١.٤.٤.١ التوتر المتوسط في خرج المبدل العكسي

كي نحدد العلاقة بين توتر الخرج المتوسط للمبدل وتوتر التغذية، سوف نعود لمتابعة شكل التوتر  $U_{Ls}$  على الملف  $L_s$ .



الشكل ١.٥٩ التوتر على طرفي الحثية  $L_s$

إذا كان  $D$  عامل الدور، النسبة بين الزمن الذي يكون فيه التوتر العكسي  $U_{K1}$  معدوماً ودور التبديل للمبدل  $T$  وعليه:

$$(1.100) \quad D = \frac{t(U_{K1}=0)}{T}$$

التوتر على الملف يساوي تبعاً لفترات التشغيل:

- $(U_c - E_s)$  عندما يكون التوتر العكسي  $U_{K1}$  معدوماً. يستمر ذلك طوال الفترة  $DT$ .
- $(-E_s)$  عندما يكون التوتر العكسي  $U_{K2}$  معدوماً. يستمر ذلك طوال الفترة  $(1-D)T$ .

التوتر المتوسط  $\langle U_{Ls} \rangle$  على طرفي الملف  $L_s$  يركب تبعاً للعلاقة :

$$(1.101) \quad \langle U_{Ls} \rangle = \frac{1}{T} [ (U_e - E_s)DT - E_s(1 - D)T ]$$

في الحالة المستقرة ، التوتر المتوسط خلال الدور يساوي الصفر مما يعني أن القيمة المتوسطة  $\langle U_{Ls} \rangle$  للتوتر  $U_s$  ستعطي بالعلاقة :

$$(1.102) \quad \langle U_{Ls} \rangle = E_s$$

وعليه يكون لدينا :

$$(1.103) \quad \frac{E_s}{U_e} = \frac{\langle U_{Ls} \rangle}{U_e} = D$$

هذه العلاقة مشابهة للعلاقة الناظمة للمقطع الخافض للتوتر Buck. عامل الدور  $D$  يتغير من القيمة صفر ولغاية الواحد . وعليه فإن توتر الخرج للمبدل سيتغير نظرياً من القيمة صفر للقيمة  $U_e$ . ولا يمكن بأي حال أن يكون سالباً. كما أنه يمتاز عن المقطع الخافض بأنه لا يمر بوضعية التشغيل ذات التيار المنقطع ( باعتبار عناصر القطع مثالية ).

#### ١.٤.٤.٢ تيار الدخل المتوسط للمبدل

كي نعرف العلاقة بين القيم المتوسطة لتيارات الخرج والدخل سوف نعرف حالات للتيارات  $I_s$  ،  $I_e$  والتي توافق حالات التشغيل التالية :

- حالة العمل كمقطع خافض Buck ،  $I_s > 0$  .
- حالة العمل كمقطع رافع Boost ،  $I_s < 0$  .
- حالة العمل عند تيار حمل  $I_s$  متغير الإشارة خلال الدور  $T$  للمبدل .

لا بد من الإشارة أنه في أي فترة أو مرحلة من التشغيل القيمة المتوسطة  $\langle I_e \rangle$  للتيار  $I_e$  في دخل المبدل يعرف دائماً بالعلاقة التالية :

$$(1.105) \quad \langle I_e \rangle = \frac{1}{T} \langle I_s \rangle D T$$

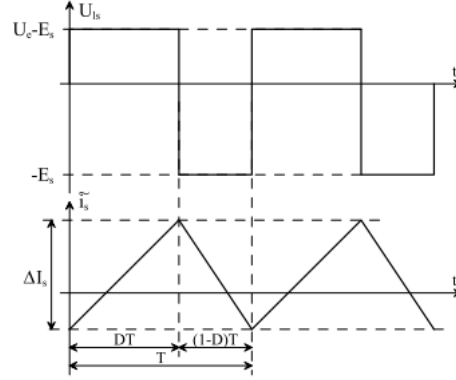
$$(1.106) \quad \frac{\langle I_e \rangle}{\langle I_s \rangle} = D \quad \text{بناءً عليه يكون لدينا :}$$

#### ١.٤.٤.٣ تعرجات تيار الخرج

كما في جميع مبدلات التيار المستمر – تيار مستمر (DC-DC) ، قيمة الممانعة  $L_s$  تحدد قيم تعرجات تيار الحمل  $\tilde{I}_s$  حول القيمة المتوسطة لتيار الحمل  $I_s$ . الشكل ١.٦٢ يبين تغيرات التيار  $\tilde{I}_s$ .

العلاقة بين التيار  $I_s$  والتوتر  $U_{LS}$  على طرفي الممانعة  $L_s$  ، بإهمال مقاومة الملف ، يمكن التعبير عنه بالعلاقة التالية :

$$(1.107) \quad U_{LS} = L_s \frac{\Delta I_s}{\Delta t}$$



الشكل ١.٦٢ تعرجات تيار الحمل  $I_s$

خلال الفترة  $DT$  من الدور ، يمكن كتابة :

$$(1.108) \quad U_e - E_s = L_s \frac{\Delta I_s}{\Delta t}$$

$$\Delta I_s = \frac{(U_e - E_s)}{L_s f} D$$

وبالنظر للعلاقة ١.١٠٣ بالتعويض أعلاه نجد :

$$(1.109) \quad \Delta I_s = \frac{U_e}{L_s f} (1 - D) D$$

هذه العلاقة تشبه بشكل كامل العلاقة الخاصة بتعرجات التيار في المقطع الخافض Buck .  
تعرجات التيار  $I_s$  تصل القيمة العظمى عند عامل دور  $D = 0.5$  ، وعليه من الضروري تقدير قيمة الحثية بدقة لدى العمل عند عامل دور أكبر من ذلك.

### مثال (1)

لدينا دائرة المقطع الخافض – الرافع Buck- Boost Converter

باعتبار أن :  $dv/dt = c, di/dt = c$

إذا علمت أن فترة توصيل القاطع هي  $T_{ON} = D.T$  ، وفترة الحجز هي  $T_{OFF} = (1-D)T$  ، المطلوب كتابة معادلات التيار التي تمر في المفاعلة وتعريج التيار وتيار الديود ، قيمة المفاعلة الأصغر ، حساب قيمة السعة اللازمة للحصول على عامل تعريج محدد للجهد .



## الحل:

لدينا خلال دور كامل هبوط التوتر الوسطي على المفاعلة يساوي الصفر أي خلال الزمن  $T$  لدينا :

$$v_L = \int_0^{DT} v_L dt = \int_0^{t_{on}} v_L dt + \int_0^{t_{off}} v_L dt = 0$$
$$V_g DT + (-V_0)(1-DT) = 0$$

$$V_0 = \frac{D}{1-D} V_g$$

$$V_g I_g = V_0 I_0 = \frac{D V_g}{1-D} I_0$$

$$\Rightarrow I_g = \frac{D}{1-D} I_0$$

في هذا المقطع لدينا

$$I_L = I_g + I_0$$

تعطى تغيرات التيار المار في المفاعلة بالمعادلة:

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} V_g \times DT$$

وعليه

$$I_{L,max} = I_L + \frac{1}{2} \Delta i_L$$

$$I_{L,min} = I_L - \frac{1}{2} \Delta i_L$$

يمكن حساب قيمة تيار المفاعلة الوسطي من العلاقة:

$$I_D = I_0 = (1-D)I_L \Rightarrow I_L = \frac{I_0}{1-D} = \frac{V_0}{(1-D)R}$$

إن التوتر الهابط على المكثفة يتغير أي أن هبوط التوتر  $\Delta v_0$  يمكن الحصول عليها من خلال التيار المار في السعة  $i_C$  حيث

$$\Delta v_0 = \Delta v_C = \frac{1}{C} \int i_C dt$$

أي المساحة المحصورة تحت موجة تيار السعة على المفاعلة مقسوماً على قيمة المفاعلة L أي

$$\Delta v_0 = \frac{1}{C} \times \frac{V_0}{R} \times DT \Rightarrow \frac{\Delta v_0}{V_0} \% = \frac{1}{CR} DT \% = \frac{D}{CRf} \%$$

الحد الفاصل بين شروط استمرار التيار بالمرور وحدوث انقطاع في التيار يمكن تحديده وذلك عندما تصبح قيمة تيار المفاعلة مساوية للصفر نهاية الدور أي

$$I_L = \frac{1}{2} \Delta i_L$$

في هذا المقطع لدينا

$$I_D = I_0(1 - D)I_L = \frac{V_0}{R} \Rightarrow$$

$$\Delta i_L = \frac{1}{L} V_g DT = \frac{1}{L} V_0(1 - D)T$$

يمكن من خلال المعادلة السابقة تحديد القيم الحدية الصغرى لتيار الحمل والمفاعلة وتردد عمل المقطع كمايلي:

$$I_L = \frac{1}{2} \Delta i_L$$

$$I_0 = (1 - D)I_L \Rightarrow$$

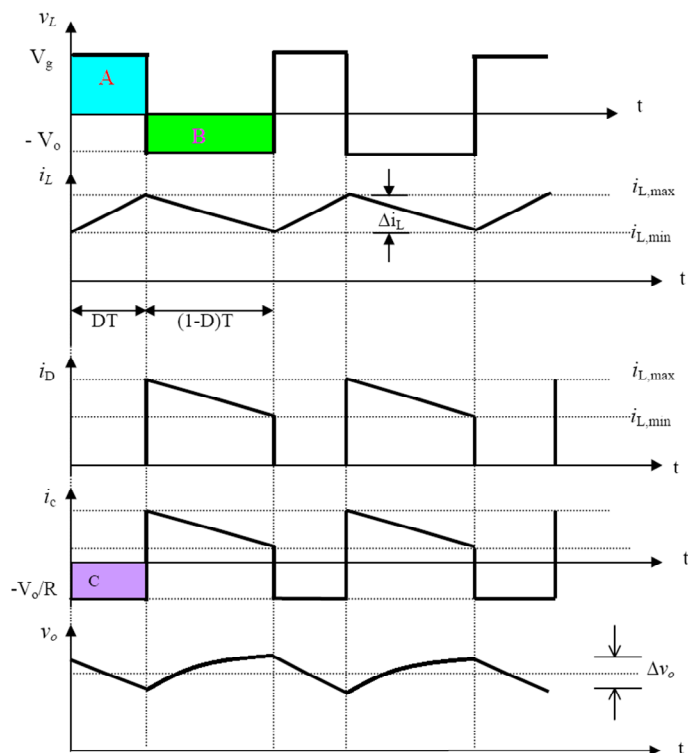
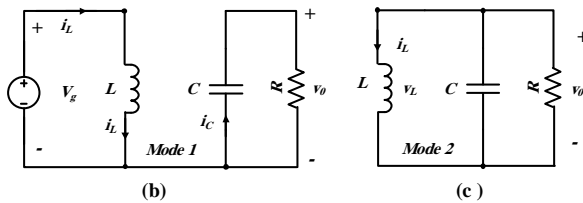
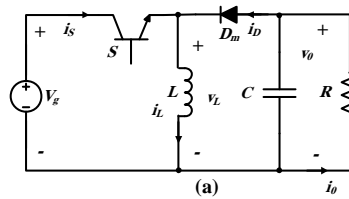
$$I_L = \frac{I_0}{(1 - D)}$$

$$\frac{I_0}{(1-D)} = \frac{1}{2L} V_0 (1-D) T$$

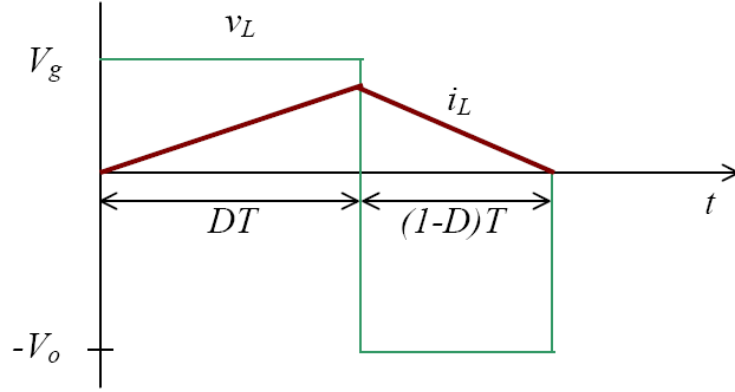
$$\Rightarrow I_{0,\min} = \frac{1}{2L} V_0 (1-D)^2 T$$

$$I_L = \frac{1}{2} \Delta i_L$$

$$\frac{V_0}{(1-D)R} = \frac{1}{2L} V_0 (1-D) T$$



الشكل (60) - دائرة الاستطاعة. - الدارات المكافئة. - التوترات والتيارات



التيار الحدي كتابع لعامل الدور. (61) الشكل

$$\Rightarrow L_{\min} = \frac{(1-d)^2 T \times R}{2} = \frac{(1-D)^2 R}{2f}$$

$$\Rightarrow f_{\min} = \frac{(1-D)^2 \times R}{2L}$$

$$\Rightarrow R_{\min} = \frac{2Lf}{(1-D)^2}$$

علماً أن حساب أي من القيم السابقة يتم عندما يكون هناك قيمة مجهولة فقط.

إن تعريج التيار يحسب كمايلي:

$$CR\% = \frac{\Delta i_L}{I_L}$$

$$\frac{V_o}{(1-D)R} = \frac{1}{L} V_o (1-D)T$$

$$\Rightarrow CR\% = \frac{R}{Lf} (1-D)^2$$