Lecture 6

جَـامعة
المَـنارة
MANARA UNIVERSITY

مقطعات التيار المستمر

D.C choppers

١.مبدأ عمل المقطعات الخافضة

:(Principle of step – down DC Choppers)

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

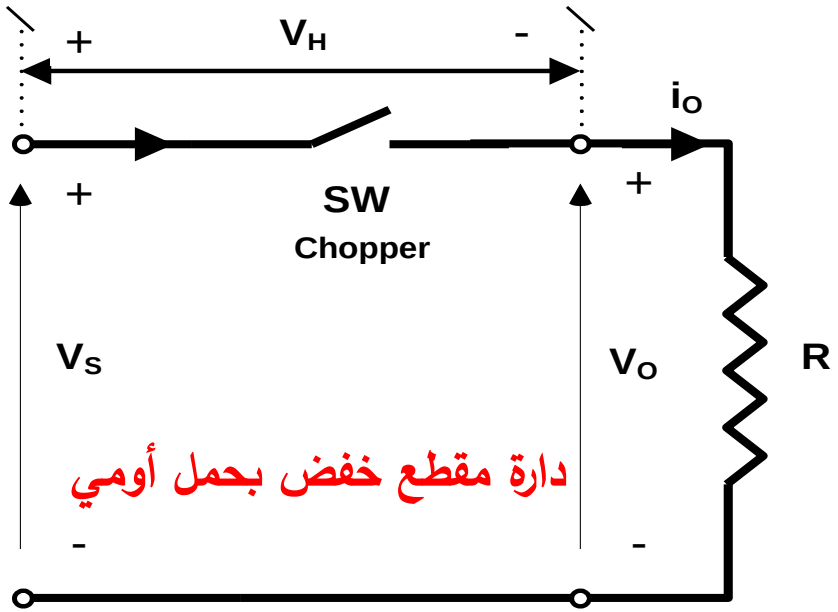
☜ يختلف مبدأ عمل المقطعات عن المبدلات بعدة نقاط أساسية نذكر منها النقاط التالية:

- ✓ يعتمد مبدأ عمل المبدلات الثايرستورية التي تعمل كدارات تقويم على التنظيم الزاوي لنبضات التحكم على ثايرستورات المبدلة (α)، بينما يعتمد مبدأ عمل المقطعات على التنظيم النبضي العرضاني (Pulse- Width- Modulation) 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 سابقا.

- 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.

١. مبدأ عمل المقطعات الخافضة
(Principle of step – down DC Choppers):



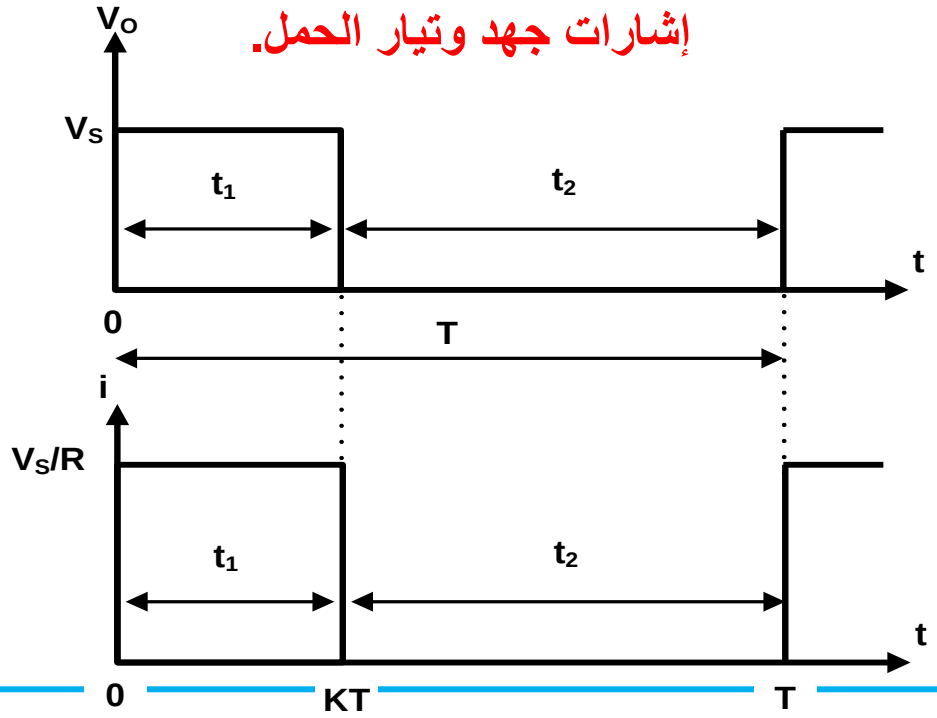
دارة مقطع خفض بحمل أومي

- يبين الشكل الدارة المكافئة لمقطع خفض بحمل أومي (R).
- بتوصيل المفتاح (SW) لزمن مقداره t_1 يظهر جهد الدخل Vs على الحمل، وبفصل المفتاح (SW) في اللحظة t_1 يصبح جهد الحمل مساوياً للصفر.

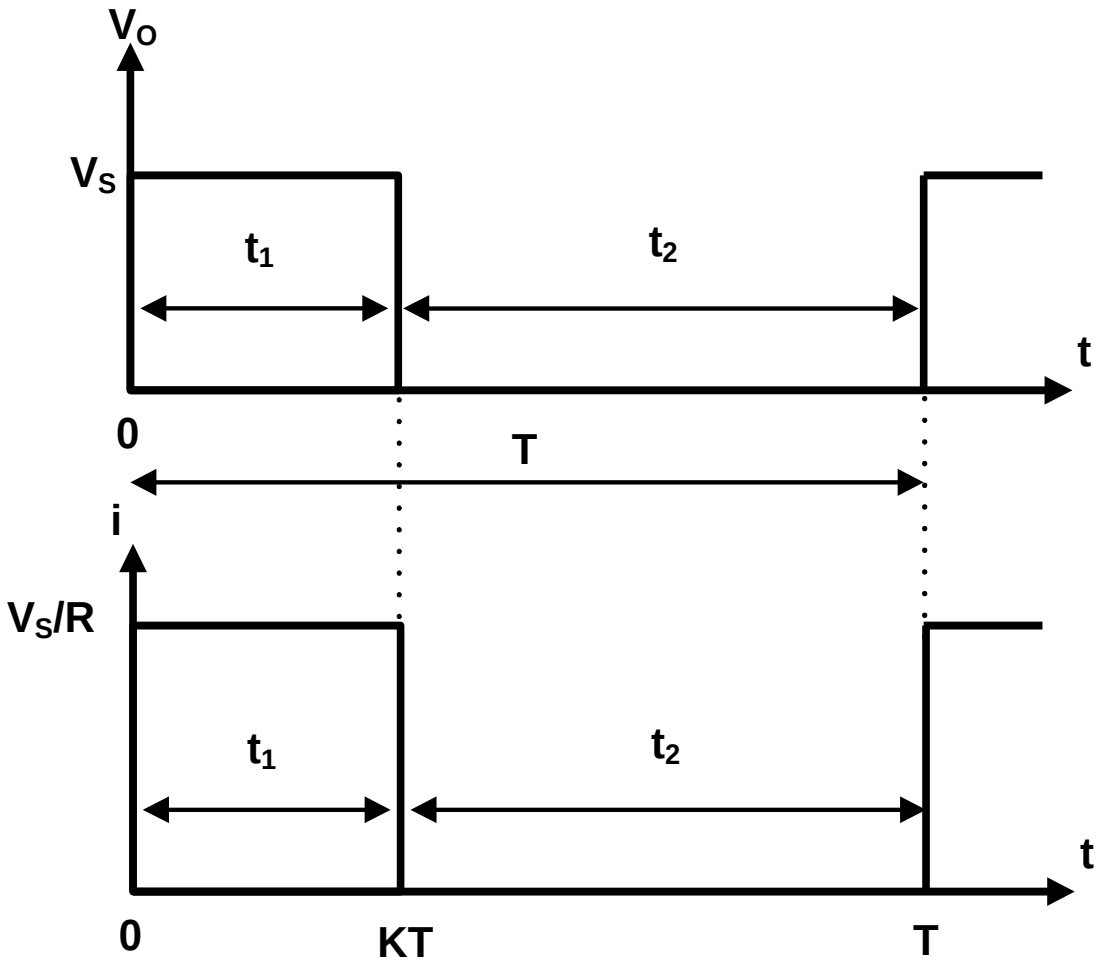
يمثل المفتاح (SW) في دارة المقطع بأحد العناصر الإلكترونية التالية:

- ✓ ترانزستور قدرة (B J T).
- ✓ ترانزستور قدرة (MOSFET).
- ✓ ثايرستور فصل GTO (Gate- turn – off Thyristor).
- ✓ ثايرستور بتبديل قسري (Forced commutated Thyristor).

إشارات جهد وتيار الحمل.



- يتراوح هبوط الجهد على هذه العناصر الإلكترونية من 0.5 إلى 2 فولت، وسوف نهمل هبوطات الجهد على العناصر الإلكترونية.



- تعطى القيمة المتوسطة لجهد الخرج في المقطعات الخافضة ذات الحمولة الأومية بالعلاقة:

$$V_a = \frac{1}{T}\int_0^{t_1} V_S.\,dt = \frac{t_1}{T}V_S = f.\,t_1.\,V_S = K.\,V_S$$

- والقيمة المتوسطة لتيار الحمل:

$$I_a = \frac{V_a}{R} = K.\frac{V_s}{R}$$

حيث: $T = \frac{1}{f}$ يمثل زمن دورة العمل للمقطع،

$K = \frac{t_1}{T}$: يمثل ثابت فترة التوصيل للمقطع.

- تتحدد القيمة الفعالة لإشارة جهد الخرج بالعلاقة:

$$V_O = \sqrt{\left(\frac{1}{T}\int_0^{K.T} {V_S}^2.\,dt\right)} = \sqrt{K}.\,V_S$$

- بإهمال هبوطات الجهد على العناصر الإلكترونية، فإن استطاعة الدخل للمقطع تكون مساوية لاستطاعة الخرج وتعطى بالعلاقة:

$$P = \frac{\text{مربع القيمة الفعالة لجهد الخرج}}{R} \qquad P = \frac{1}{T}\int_0^{K.T} V_S.\frac{V_S}{R}\,dt = K.\frac{{V_S}^2}{R}$$

- تتحدد مقاومة الدخل R_i للمقطع بنسبة القيمة المتوسطة لجهد الدخل (V_s) الى القيمة المتوسطة لتيار الدخل I_a

$$R_i = \frac{V_S}{I_a} = \frac{V_S.R}{K.V_S} = \frac{R}{K}$$

- نستنتج أنه يمكننا التحكم بالقيمة المتوسطة لجهد الخرج (V_a) عن طريق تغيير عامل التوصيل للمقطع (K) من الصفر إلى الواحد وذلك عن طريق تغيير قيم العوامل t_1،T.

عمليا هناك طريقتان للتحكم بالقيمة المتوسطة لجهد الخرج (V_a) عن طريق تغيير الثابت K وهما:

– العمل بتردد ثابت (Constant- frequency operation):

- يتم التحكم بقيمة V_a لهذه الحالة عن طريق تغيير زمن التوصيل t_1 والحفاظ على قيمة T ثابتا. يعرف هذا النوع من التحكم بالتعديل العرضاني (Pulse- Width- Modulation).

– العمل بتردد متغير(variable- Frequency operation):

- يتم التحكم بقيمة Va لهذه الحالة عن طريق تغيير زمن دورة العمل للمقطع (T) والحفاظ على قيمة زمن الوصل (t1) أو قيمة زمن الفصل (t2).
- إن تصميم المرشحات لهذا النوع من المقطعات يكون معقداً نظراً لظهور توافقيات بترددات لا يمكن التنبؤ بها.

تطبيق:

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

المطلوب تحيد ما يلي:

١. القيمة المتوسطة لجهد الخرج (V_a).

٢. القيمة الفعالة لجهد الخرج (V_0).

٣. مردود المقطع.

٤. مقاومة الدخل للمقطع (R_i).

الحل:

١. القيمة المتوسطة لجهد الخرج (V_a).

$$V_a = 0.5\,(220-2) = 109\ V$$

٢. القيمة الفعالة لجهد الخرج (V0).

$$V_0 = \sqrt{0.5}\,(220-2) = 154,15\ V$$

٣. مردود المقطع: تتحدد استطاعة الخرج بالعلاقة:

$$P_o = \frac{1}{T}\int_0^{K.T} \frac{(V_S-2)^2}{R}\,dt = K\frac{(V_S-2)^2}{R} = 0,5\frac{(220-2)^2}{10} = 2376,2\ W$$

وتتحدد استطاعة الدخل بالعلاقة:

$$P_i = \frac{1}{T}\int_0^{K.T} V_S.i.\,dt = K\frac{V_S(V_S-2)}{R} = 0,5.220\frac{(220-2)}{10} = 2398\ W$$

مردود المقطع:

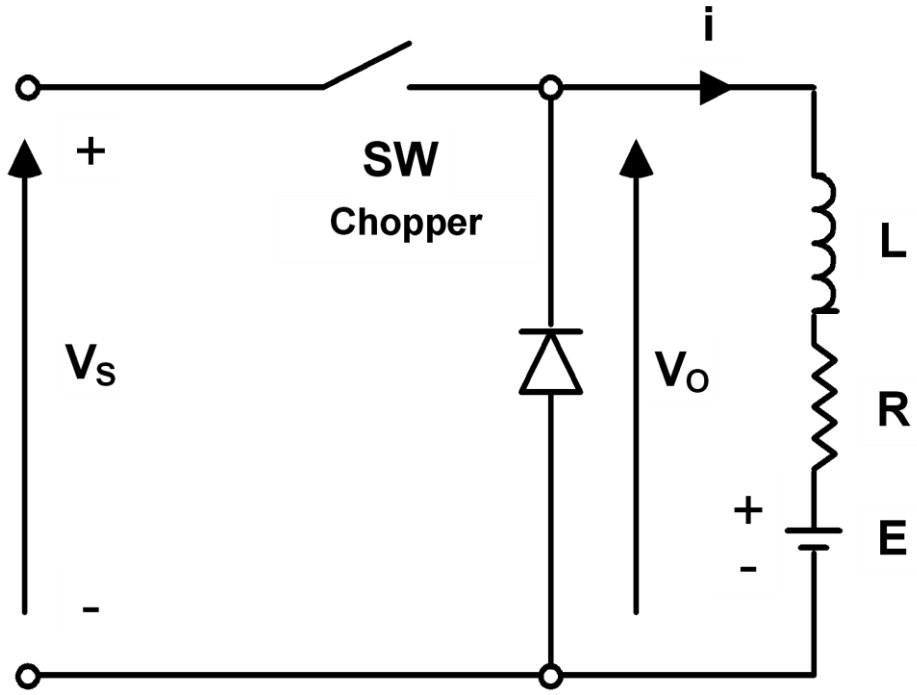
$$\eta = \frac{P_0}{P_i} = \frac{2376,2}{2398} = 99,09\%$$

٤. مقاومة الدخل للمقطع:

$$R_i = \frac{10}{0,5} = 20\Omega$$

Step- down choppers with (R.L Load)

✓نظام عمل المقطعات الخافضة على أحمال مختلطة (تحريضية أومية) R.L



الدارة المكافئة لمقطع خافض مع حمل R.L وقوة محركة كهربائية عكسية (E) .

- يبين الشكل الدارة المكافئة لمقطع خافض مع حمل R.L وقوة محركة كهربائية عكسية (E) .
- نحدد نظام عمل المقطع بدراسة حالتي الفصل والوصل :

– الحالة الأولى (حالة الوصل للمقطع) ($0 < t < t1$).

✓تكتب المعادلة التفاضلية لهذه الحالة بالعلاقة التالية:

$$V_S = R.i_1 + L\frac{di_1}{dt} + E$$

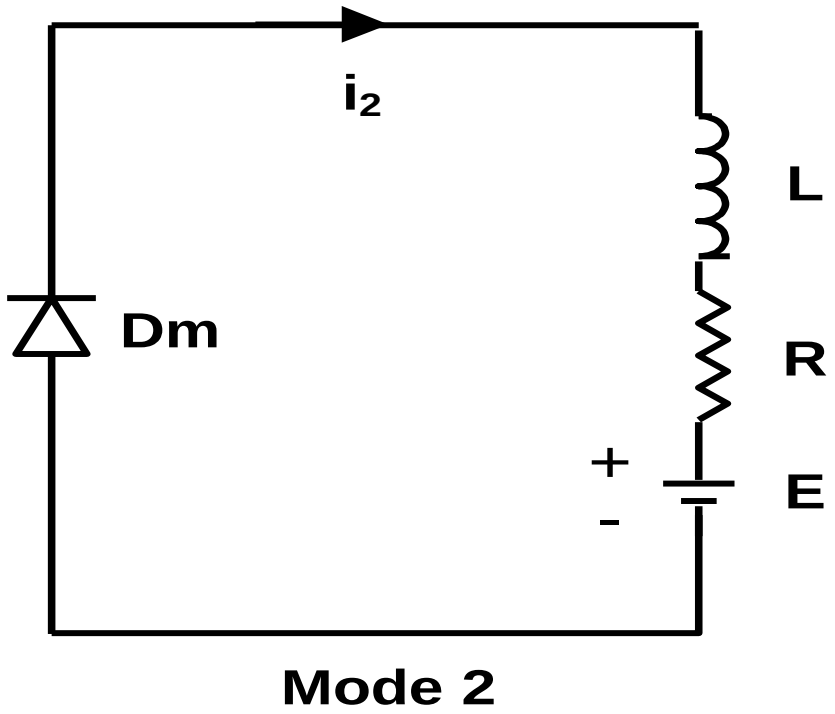
✓حل المعادلة التفاضلية باستخدام الشرط $(i_{1(t=0)} = I_1)$ يكون كما يلي:

$$i_{1(t)} = I_1 e^{-\frac{t.R}{L}} + \frac{V_S - E}{R}\left(1 - e^{-\frac{t.R}{L}}\right)$$

✓تتحدد قيمة التيار بنهاية هذه الحالة بتعويض t=t1

$$I_2 = i_{1(t=t_1=KT)}$$

- الحالة الثانية (حالة الفصل للمقطع)



Mode 2

✓ في هذه الحالة يغلق التيار مساره في الحمل عن طريق الديود الحر (Dm).

✓ تكتب المعادلة التفاضلية لتيار الحمل في هذه الحالة بالعلاقة التالية:

$$0 = \mathbf{R}.\mathbf{i}_2 + \mathbf{L}\frac{\mathbf{di}_2}{\mathbf{dt}} + \mathbf{E}$$

✓ بحل المعادلة التفاضلية واستخدام الشرط $\mathbf{i}_{2(t=0)} = \mathbf{I}_2$

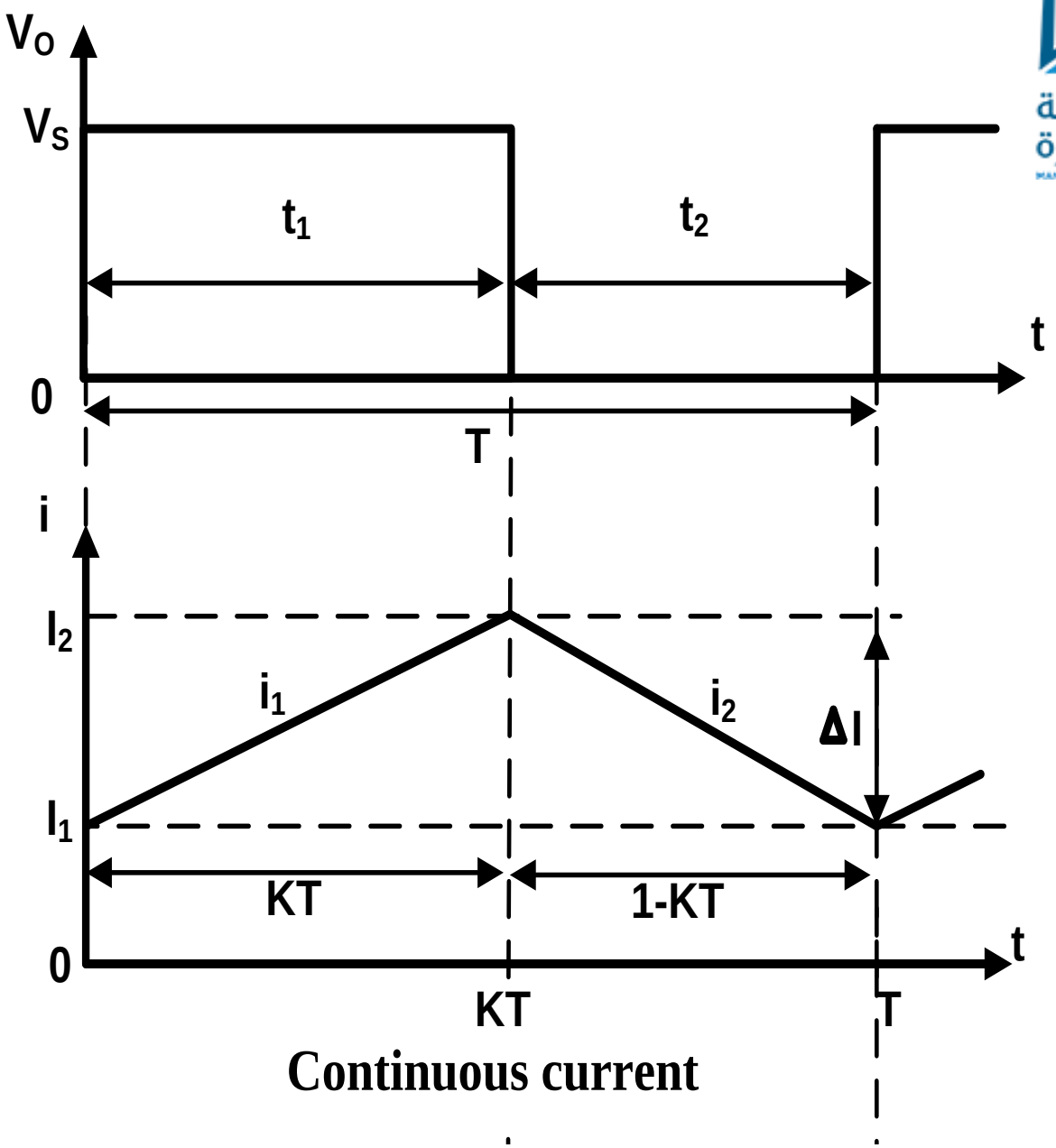
✓ نستنتج علاقة تيار الحمل في الحالة الثانية :

$$\mathbf{i}_{2(t)} = \mathbf{I}_2 \mathbf{e}^{-t\frac{R}{L}} - \frac{E}{R}\left(1 - \mathbf{e}^{-\frac{t.R}{L}}\right)$$

✓ تتحدد قيمة التيار بنهاية هذه الحالة ($t=t_2$) بالعلاقة :

$$\mathbf{I}_1 = \mathbf{I}_3 = \mathbf{i}_{2[t=t2=(1-K)T]}$$

الدارة المكافئة للمقطع في حالة الفصل ($t_1<t<T$).



- يبين الشكل أشكال إشارات جهد وتيار الخرج الخطي في الحالات التي يكون فيها تيار الحمل غير متقطعا.
- يتحدد مجال تغير تيار الحمل بالعلاقة:

$$\Delta I = I_2 - I_1$$

حيث:

$$I_2 = I_1 e^{-\frac{k.T.R}{L}} + \frac{V_S - E}{R}\left(1 - e^{-\frac{k.T.R}{L}}\right)$$

$$I_1 = I_3 = I_2 e^{-(1-k)\frac{T.R}{L}} - \frac{E}{R}\left(1 - e^{-(1-k)\frac{T.R}{L}}\right)$$

$$\Delta I = \frac{V_S}{R}\,\frac{1 - e^{-\frac{k.T.R}{L}} + e^{-\frac{T.R}{L}} - e^{-(1-k)\frac{T.R}{L}}}{1 - e^{-\frac{T.R}{L}}}$$

- لتحديد التغير الأعظمي لتيار الحمل نقوم باشتقاق علاقة ΔI بالنسبة لـ K ومساواتها بالصفر

$$\frac{d(\Delta I)}{dK} = 0 \;\; ; \; e^{-\frac{k.T.R}{L}} e^{-(1-k)\frac{T.R}{L}} = 0$$

- أي أن مجال تغير تيار الحمل يكون أعظمياً إذا كانت K =0.5.
- بتعويض K =0.5 نستنتج قيمة المجال الأعظمي لتغير تيار الحمولة

$$\Delta I_{max} = \frac{V_S}{R} \tanh \frac{R}{4.f.L}$$

- إذا كانت $4.f.L \gg R$ فإن:

$$\tanh \frac{R}{4.f.L} = \frac{R}{4.f.L}$$

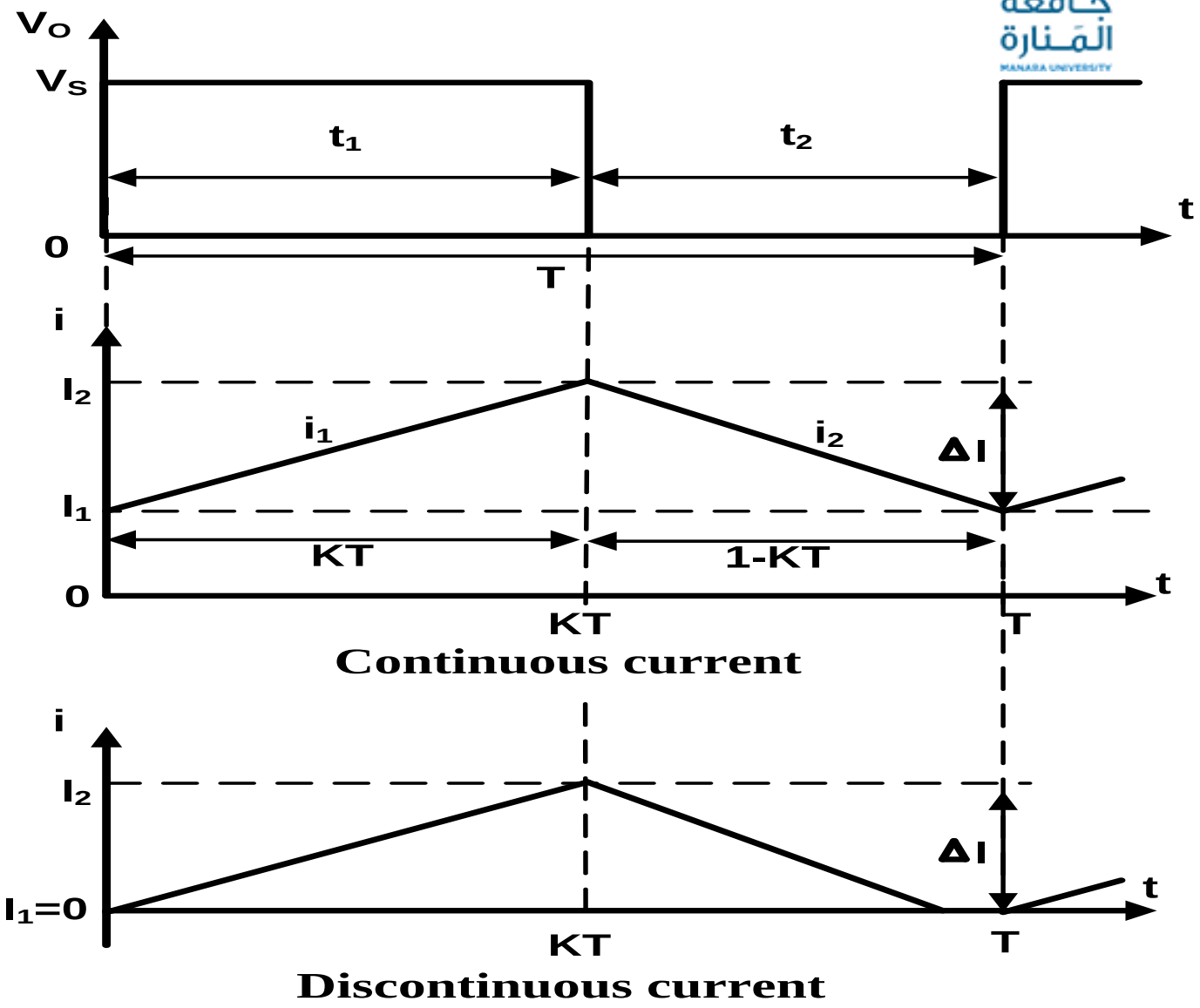
$$\Delta I_{max} = \frac{V_S}{4.f.L}$$

- عند العمل بأزمنة قطع (t2) كبيرة وبترددات قطع وجهود خرج صغيرة يكون تيار الحمل متقطعا (I1=I3=0) وتصبح معادلة التيار i1 (t) كما يلي:

$$i_{1(t)} = \frac{V_S - E}{R}\left[1 - e^{-\left(\frac{R}{L}\right)t}\right]$$

- يتحدد زمن الفصل الأعظمي الذي يفصل بين حالة العمل بتيار مستمر غير متقطع ومتقطع بالشرط التالي:

$$t_{2max} = \frac{L}{R} \ln\left(1 + \frac{R.I_2}{E}\right)$$



يبين الشكل إشارة تيار الحمل عندما يكون متقطعا $t_2 \geq t_{2max}$.

☜نستنتج مما سبق أن تيار الحمل يأخذ شكلاً متقطعاً إذا كان $t_2 \geq t_{2max}$ ويكون غير متقطع إذا تحقق الشرط $t_2 < t_{2max}$.

تطبيق :

مقطع خافض بجهد دخل VS=220 V يغذي حمولة مختلطة $R = 5\ \Omega$ و L=7.5mH ويعمل بتردد f=1kHz
وبثابت فترة توصيل للمقطع K=0.5 و E=0.

والمطلوب:

١. تحديد القيمة الصغرى والعظمى لتيار الحمل (I_2, I_1).
٢. تحديد المجال الأعظمي لتغير التيار (ΔI_{max}).
٣. تحديد القيمة المتوسطة لتيار الحمل (I_a).
٤. تحديد القيمة الفعالة لتيار الحمل (I_0).
٥. تحديد مقاومة الدخل (R_i).
٦. تحديد القيمة الفعالة لتيار المقطع.

الحل:

١. نحدد القيمة العظمى لتيار الحمل من المعادلة

$$I_2 = 0.7165\, I_1 + 12.473$$

ونحدد القيمة الأصغرية لتيار الحمل من المعادلة

$$I_1 = I_3 = 0.7165\, I2$$

بحل المعادلتين نجد: $I_2 = 25.63\, A \;\; ; \;\; I_1 = 18.37 \;\; (A)$

٢. نستنتج المجال الأعظمي لتغير تيار الحمل من العلاقة التالية:

$$\Delta I_{max} = I_2 - I_1 = 7,26 \;\; (A)$$

وباستخدام العلاقة التقريبية نجد أن:

$$\Delta \mathbf{I_{max}} = \frac{\mathbf{V_S}}{\mathbf{4.f.L}} = 7,33 \;\; (\mathbf{A})$$

٣. القيمة المتوسطة لتيار الحمولة يمكن تحديدها بشكل تقريبي كما يلي:

$$I_a = \frac{I_1 + I_2}{2} = \frac{25,63 + 18,37}{2} = 22(A)$$

٤. القيمة الفعالة لتيار الحمولة:

$$I_0 = \sqrt{\left[\frac{1}{K.T}\int_0^{K.T} i_1^2.dt\right]} = \sqrt{I_1^2 + \frac{(I_2 - I_1)^2}{3} + I_1(I_2 - I_1)} = 22,1(A)$$

٥. لتحديد مقاومة الدخل للمنبع نقوم بإيجاد القيمة المتوسطة لتيار المنبع $I_s = K.I_a = 0,5.22 = 11(A)$

وبالتالي تكون مقاومة الدخل: $R_i = \frac{V_S}{I_S} = \frac{220}{11} = 20(\Omega)$

٦. القيمة الفعالة لتيار المقطع:

$$I_R = \sqrt{\left[\frac{1}{T}\int_0^{K.T} i_1^2.dt\right]} = \sqrt{K}.\sqrt{I_1^2 + \frac{(I_2 - I_1)^2}{3} + I_1(I_2 - I_1)} = \sqrt{K}I_0 = 15,63\ (A)$$

تطبيق:

إذا كان حمل المقطع الخافض مساوياً R=0.25Ω وغذي بجهد V_s=550V وبفرض أن E=0(V) والقيمة المتوسطة لتيار الحمل Ia=200A ويعمل هذا المقطع بتردد f=250 Hz. والمطلوب تحديد قيمة المحارضة L للحمل حتى يكون مجال تغير التيار الاعظمي يعادل % 10 من Ia.

الحل:

نكتب المعادلة التفاضلية للجهد على المحارضة L بالعلاقة التالية:

$$U_L = L\frac{di}{dt} = V_S - I_a.R = V_S - K.V_S = V_S(1-K)$$

إذا كانت تغيرات الحمل خطية فإن:

$$dt = \Delta t = t_1 = KT \quad ، \quad di = \Delta i$$

بالتعويض في علاقة U_L نجد:

$$\Delta i = \frac{V_S(1-K)}{L}K.T = \frac{200.10}{100} = 20\ (A)$$

يتحدد المجال الاعظمي لتغير التيار بالشرط التالي:

$$\frac{\mathbf{d}(\Delta \mathbf{i})}{\mathbf{dk}} = \mathbf{0} \gg \mathbf{K} = \mathbf{0.5}$$

بتعويض K=0.5 في العلاقة $\Delta \mathbf{i}$ نستنتج قيمة محارضة الملف L والتي تتحد بالعلاقة التالية:

$$\boldsymbol{L} = \frac{\mathbf{V_S}(\mathbf{1} - \mathbf{K})}{\Delta \mathbf{i}} \mathbf{K.T} = \frac{\mathbf{550.0, 5.0, 5.0, 004}}{\mathbf{20}} = \mathbf{27, 5}\ (\boldsymbol{mH})$$