תרגול - ממירי מתח ממותגים
חזרה על ניתוח ממירים במשטר עבודה CCM

בתרגול זה נראה דוגמא לניתוח ממיר Buck העובד במשטר עבודה CCM.

באופן כללי, הנחות עבודה ב - CCM:

- המתחים והזרמים במערכת הם גלים מחזוריים עם מחזור T_s (זוהי ההגדרה של מצב יציב בממיר ממותג).
- למחזור יש שני חלקים שבכל אחד מהם מצב מתגים מסוים. משך החלק הראשון במחזור הוא DT_s, ומשך החלק השני במחזור הוא $(1-D)T_s = D'T_s$.
- מתקיימים הקשרים הבאים בין האותות הזמניים והממוצעים שלהם על מחזור:

$$\int_0^{T_s} x(\tau)d\tau = T_s X = \int_0^{T_s} X d\tau$$

$$\int_0^{DT_s} x(\tau)d\tau \approx DT_s X = \int_0^{DT_s} X d\tau$$

$$\int_{DT_s}^{T_s} x(\tau)d\tau \approx D'T_s X = \int_{DT_s}^{T_s} X d\tau$$

עקרונות הניתוח ב - CCM:

- **בחירת משתנים.** כל רכיב פאסיבי (סליל או קבל) מתואר ע"י משתנה אחד:
  - סלילים מתוארים ע"י <u>הזרם הממוצע</u> לאורך מחזור:

$$I_i = \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} i_i(\tau)d\tau$$

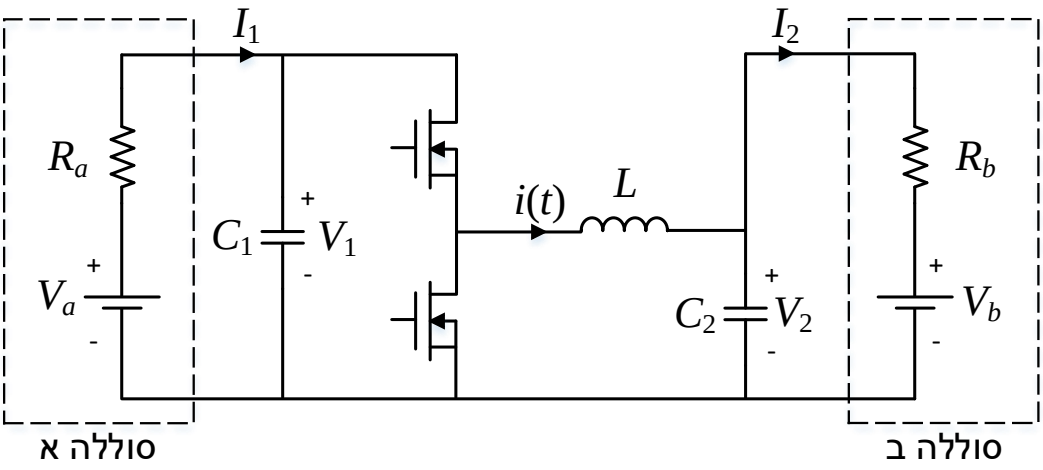
  - קבלים מתוארים ע"י <u>המתח הממוצע</u> לאורך מחזור:

$$V_i = \frac{1}{T_s}\int_0^{T_s} v_i(\tau)d\tau$$

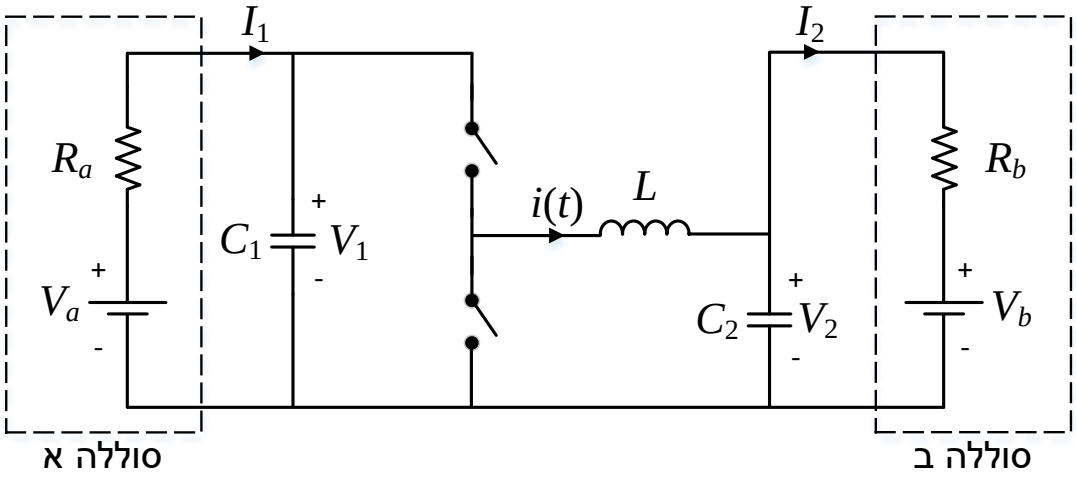
- **ממוצע המתח על סליל (לאורך מחזור) הוא אפס.**
- **ממוצע הזרם בקבל (לאורך מחזור) הוא אפס.**

דוגמא – ממיר Buck במשטר עבודה CCM

ממיר מסוג Buck משמש להעברת אנרגיה בין שתי סוללות, כפי שמתואר באיור הבא:



נייצג את הטרנזיסטורים בשאלה זו כמתגים אידיאליים:



- המתחים V_a, V_b נתונים, ונניח כי $V_a > V_b$.
- זמן המחזור הוא T_s.
- הממיר עובד במשטר עבודה CCM:
  - בחלק הראשון של המחזור הטרנזיסטור העליון מוליך. משך חלק זה הוא DT_s .
  - בחלק השני של המחזור הטרנזיסטור התחתון מוליך. משך חלק זה הוא $(1-D)T_s = D'T_s$
- נניח שהקבלים C_1 ו - C_2 "גדולים מאוד", כך שהמתחים V_1 ו - V_2 קבועים בקירוב.

<u>סעיף א</u>

חשב את:

- הזרם הממוצע בסליל (I),
- הזרמים I_1, I_2 ,
- והמתחים V_1, V_2

כפונקציה של D .

<u>פתרון סעיף א</u>

על גבי הסליל, המתח הממוצע לאורך מחזור חייב להתאפס:

$$\int_0^{DT_s}\left(V_1-V_2\right)dt+\int_{DT_s}^{T_s}\left(0-V_2\right)dt=0$$

$$DT_s\left(V_1-V_2\right)+D'T_s\left(-V_2\right)=0 \qquad (1)$$

$$D\left(V_1-V_2\right)+D'\left(-V_2\right)=0$$

נשתמש בזהות $D+D'=1$ ונקבל

$$DV_1-V_2=0 \qquad (2)$$

$$V_2=DV_1$$

על גבי הקבל C_1 , הזרם הממוצע לאורך מחזור חייב להתאפס:

$$\int_0^{DT_s}\left(I_1-i(t)\right)dt+\int_{DT_s}^{T_s}\left(I_1-0\right)dt=0 \qquad (3)$$

נחליף "בתוך האינטגרל" את $i(t)$ בערך הממוצע שלו I, ונקבל

$$\int_0^{DT_s}\left(I_1-I\right)dt+\int_{DT_s}^{T_s}\left(I_1-0\right)dt=0 \qquad (4)$$

$$D\left(I_1-I\right)+D'I_1=0$$

שוב נשתמש בזהות $D+D'=1$:

$$I_1-DI=0 \qquad (5)$$

$$I_1=DI$$

על גבי הקבל C_2, הזרם הממוצע לאורך מחזור חייב להתאפס:

$$\int_0^{T_s}\left(i(t)-I_2\right)dt=0 \qquad (6)$$

נחליף "בתוך האינטגרל" את $i(t)$ בערך הממוצע שלו I, ונקבל

$$\int_0^{T_s}(I-I_2)dt=0$$
$$I_2=I \tag{7}$$

בנוסף, בכניסה ובמוצא:

$$V_a-V_1=I_1R_a$$
$$V_b-V_2=-I_2R_b \tag{8}$$

קיבלנו חמש משוואות בחמישה נעלמים:

$$V_2=DV_1$$
$$I_1=DI$$
$$I_2=I$$
$$V_a-V_1=I_1R_a$$
$$V_b-V_2=-I_2R_b \tag{9}$$

כאשר הנעלמים הם I,I_1,I_2,V_1,V_2 .

ע"י מספר הצבות פשוטות מתקבלות שתי משוואות בשני נעלמים:

$$V_a-V_1=DIR_a$$
$$V_b-DV_1=-IR_b \tag{10}$$

שפתרונן הוא

$$I=\frac{DV_a-V_b}{D^2R_a+R_b}$$
$$V_1=\frac{V_aR_b+DR_aV_b}{D^2R_a+R_b} \tag{11}$$

ובנוסף

$$V_2=DV_1$$
$$I_1=DI$$
$$I_2=I \tag{12}$$

סעיף ב

מהו ההספק בכניסה ובמוצא של הממיר?

$$P_1 = V_1 I_1$$
$$P_2 = V_2 I_2 \tag{13}$$

פתרון סעיף ב

נציב את הביטויים שקיבלנו בסעיף הקודם.

בכניסה לממיר:

$$P_1 = V_1 I_1 = \left(\frac{V_a R_b + D R_a V_b}{D^2 R_a + R_b} \right) \left(D \frac{D V_a - V_b}{D^2 R_a + R_b} \right)$$
$$= \frac{D\left(D V_a - V_b\right)\left(V_a R_b + D R_a V_b\right)}{\left(D^2 R_a + R_b\right)^2} \tag{14}$$

ובמוצא הממיר:

$$P_2 = V_2 I_2 = \left(D \frac{V_a R_b + D R_a V_b}{D^2 R_a + R_b} \right) \left(\frac{D V_a - V_b}{D^2 R_a + R_b} \right)$$
$$= \frac{D\left(D V_a - V_b\right)\left(V_a R_b + D R_a V_b\right)}{\left(D^2 R_a + R_b\right)^2} \tag{15}$$

ע"י כוונון של ה – duty-cycle ניתן לשלוט על זרימת האנרגיה בין הסוללות.

סעיף ג

הראה שהממיר חסר הפסדים.

פתרון סעיף ג

הממיר חסר הפסדים מכיוון שהרכיבים המרכיבים אותו משמרים הספק (קבלים, סלילים, מתגים אידיאליים).

לחילופין, ניתן לראות מהמשוואות ש $P_1 = P_2$.

סעיף ד

מהו התחום של D שעבורו האנרגיה זורמת מסוללה א' לסוללה ב' ?

פתרון סעיף ד

נפתור $P_1 > 0$ ונקבל

$$DV_a - V_b > 0$$
$$D > V_b / V_a \tag{16}$$

<u>סעיף ה</u>

נניח שההספק זורם מסוללה א' לסוללה ב', ונגדיר:

הספק הטעינה:

$$P_{\text{chg}} = V_b I_2 \tag{17}$$

נצילות הטעינה:

$$\eta_{\text{chg}} = \frac{V_b I_2}{V_a I_1} \tag{18}$$

- בהינתן P_{chg}, מהו η_{chg} ?

רשום את התשובה כפונקציה של המתחים V_a, V_b וההתנגדות R_b, וללא תלות ב - D .

- שרטט את הפונקציה $\eta_{\text{chg}}\left(P_{chg}\right)$.

לשם פשטות, נניח בסעיף זה כי $R_a = 0$.

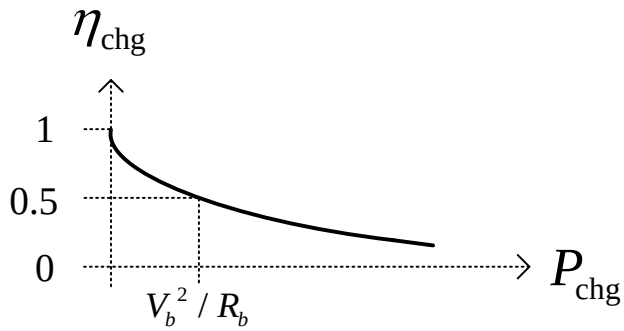
<u>פתרון סעיף ה</u>

נציב את הביטויים של I_1 ו - I_2 וגם $R_a = 0$ ונקבל

$$P_{\text{chg}} = V_b I_2 = V_b I = \frac{V_b\left(DV_a - V_b\right)}{R_b}$$
$$\eta_{\text{chg}} = \frac{V_b I_2}{V_a I_1} = \frac{V_b I}{V_a D I} = \frac{V_b}{DV_a} \tag{19}$$

נבצע מספר פעולות אלגבריות על מנת לבטל את D ונקבל

$$\eta_{\text{chg}} = \frac{1}{1 + \frac{R_b}{V_b^{\,2}} P_{\text{chg}}} \tag{20}$$



- ככל שטוענים את הסוללה בהספק גבוה יותר, כך הנצילות נמוכה יותר.
- אפשר לקבל נצילות המתקרבת ל – 100 %, כאשר הספק הטעינה שואף לאפס (כלומר, זמן הטעינה של הסוללה מתארך לאינסוף).