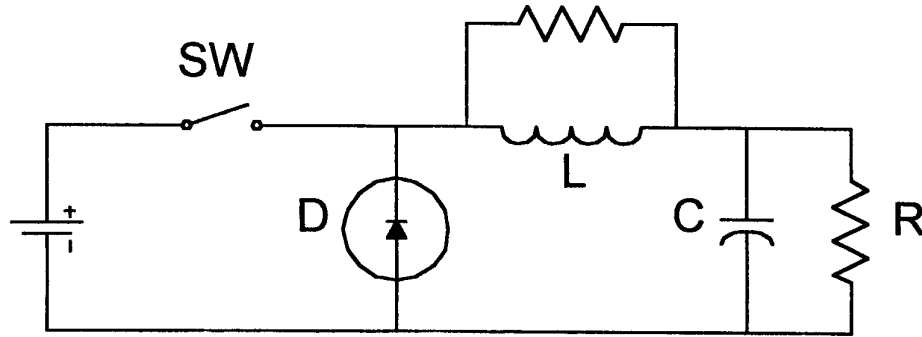
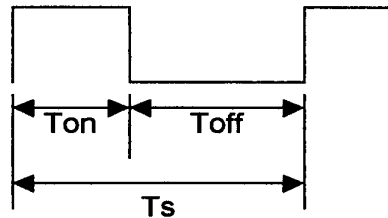


buck (step down)

העיקרון הבסיסי של ממירים מסוג זה, הוא העברת מנות אנרגיה. עלינו להקפיד לעשות זאת בקצב ובמינון נכון.



הגדרה - duty cycle



$$D_{on} = \frac{T_{on}}{T_s}$$

$$D_{off} = \frac{T_{off}}{T_s}$$

אנו עובדים בתדרים גבוהים $|1/\omega C| \ll R$

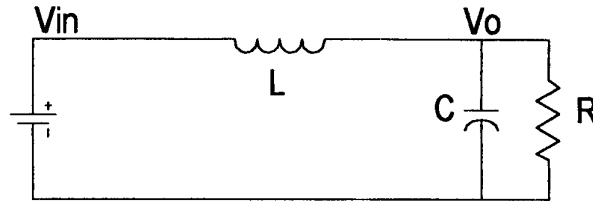
ולכן אם יתעורר זרם AC הוא יועבר דרך הקבל שבשבילו הוא כמעט קצר.

ניתוח המעגל

נתחיל כעת בניתוח ממיר ה BUCK בהתחשב בתכונות הסליל שידועות לנו

1. בזמן Ton

בזמן Ton המתג סגור ולכן על הדיודה נופל מתח הפוך ומכאן שהיא סגורה. לכן נוכל לצייר את המעגל בצורה הבאה:



אנו רואים כי על הדיודה נופל מתח ששווה ל $V_{in} - V_o$ בהנחה כי $V_{in} > V_o$ (ההנחה מתבססת על כך שזהו ממיר מוריד מתח)

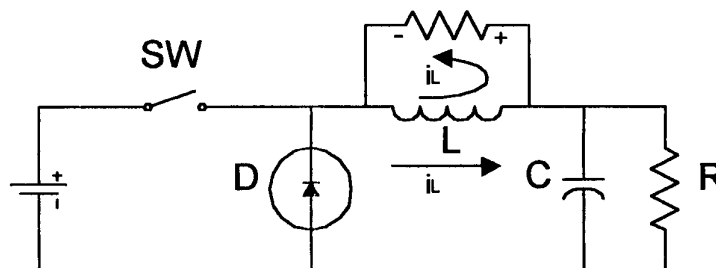
$$V_L = V_{in} - V_o \quad \text{כלומר}$$

במשך המחזור V_o קבוע לכן הזרם יעלה ליניארית

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V_L}{L} = \frac{V_{in} - V_o}{L}$$

2. בזמן Toff

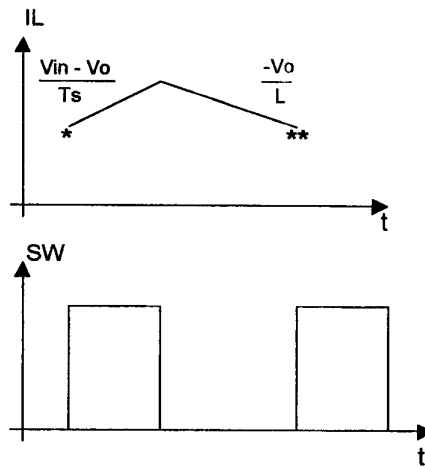
בזמן Toff המתג פתוח. נבדוק ראשית את הקוטביות של המתח על הסליל, לאחר פתיחת המתג, ע"י נגד דמיוני.



לפי הקוטביות שנוצרה בסליל עקב ניתוקו הדיודה תפתח, לכן המתח שייפול על הסליל יהיה $-V_o$ (בהזנחת מפל המתח על הדיודה) ולכן הזרם ירד ליניארית (V_o קבוע)

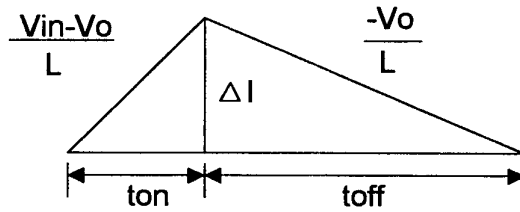
$$\frac{dI}{dt} = \frac{V}{L} = \frac{-V_o}{L}$$

ולכן הגרף שנקבל הוא



הזרם יהיה רציף ובנקודות (*) ו(**) הזרם יהיה שווה.

חישוב פונקציית התמסורת למצב היציב בשיטת ΔI :



ניתן לחשב את ΔI משני המשולשים :

$$\frac{V_{in} - V_o}{L} \cdot T_{on} = \Delta I = \frac{V_o}{L} \cdot T_{off}$$

$$V_{in} \cdot T_{on} - V_o \cdot T_{on} = V_o \cdot T_{off}$$

$$V_{in} \cdot T_{on} = V_o(T_{on} + T_{off})$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = \frac{T_{on}}{T_s} = D_{on}$$

הפסדי אנרגיה :

הפסדי האנרגיה בממיר זה נובעים מ :

א. התנגדויות אומיות של הסליל

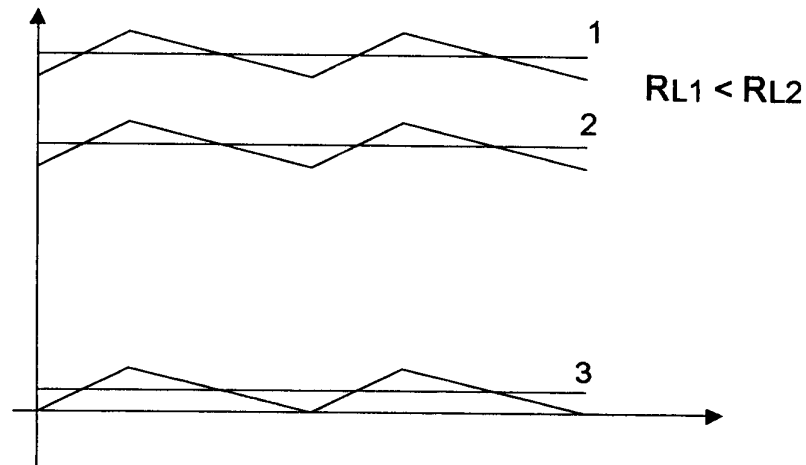
ב. מתג לא אידיאלי :במצב פתוח - נופל על המתג מתח גבוה וזורם דרכו זרם (בניגוד למתג אידיאלי בו במצב פתוח אין זרם).

במצב סגור - זורם זרם גדול וישנו מתח קטן (בניגוד למתג אידיאלי שעליו לא נופל מתח במצב סגור).

ג. זיודה לא אידיאלית:-- יש עליה מפל מתח וזורם דרכה זרם.

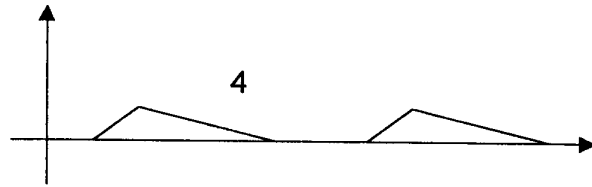
באופן עקרוני התהליך הוא תהליך ללא בזבוז אנרגיה (פעם הסליל אוגר אנרגיה, ופעם הוא משחרר). הבזבוז היחידי נובע מאי אידיאליות של הרכיבים, לכן אנו יכולים להגיע לנצילות מאוד גבוהה בתהליך זה. זאת בניגוד לשיטה הקלאסית של הטרנזיסטור בה היה חייב להפיל מתח על המייצב ע"מ לקבל מתח במוצא (זהו בזבוז אנרגיה עקרוני).

נניח כעת כי האלמנטים אידיאליים, ונתבונן שוב בפונקציה הזרם דרך הסליל



אם משנים את RL לגרף תישאר אותה צורה רק שהגרף כולו יעלה או ירד, דבר זה נובע מכך שרק הזרם במוצא ישתנה ואילו המתח יישאר אותו דבר. ומכאן שהשיפועים לא ישתנו משום שהם תלויים במתח. אם נקטין את הנגד, נצטרך יותר זרם DC לאותו מתח מוצא ולכן נקבל זרם ממוצע חדש, גבוה יותר. ולהפך, אם נגדיל את הנגד כל הגרף ירד למטה עד לנקודה בה השיפועים יגיעו לאפס.

עד לנקודה זו הזרם על הסליל היה רציף CCM * (3). אם נמשיך להעלות את ערך הנגד התמונה תרד ונגיע למצב של DCCM ** (4). הזרם במצב זה דועך בשל המתח ההפוך, מגיע לאפס ונעצר (בגלל הדיודה הוא לא יכול להמשיך לזרום הפוך)



*CCM - Continues Current Mode

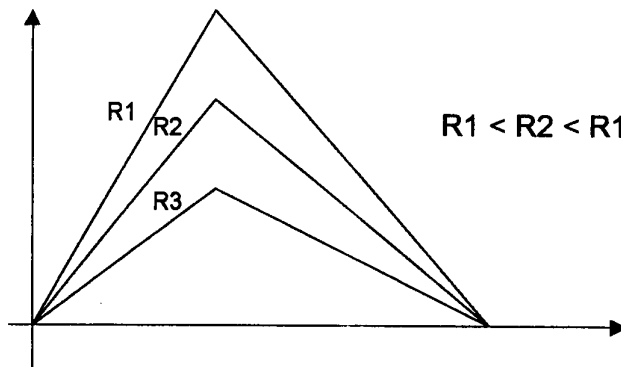
**DCCM - Discontinues Current Mode

הערות

1. במצב DCCM המשוואות שפיתחנו אינן טובות.
2. הסליל אוגר אנרגיה $LI^2/2$ והנגד RL מפזר אנרגיה. אם מגדילים את RL יורד כו IODC כי RL צריך לפזר אותה כמות אנרגיה.

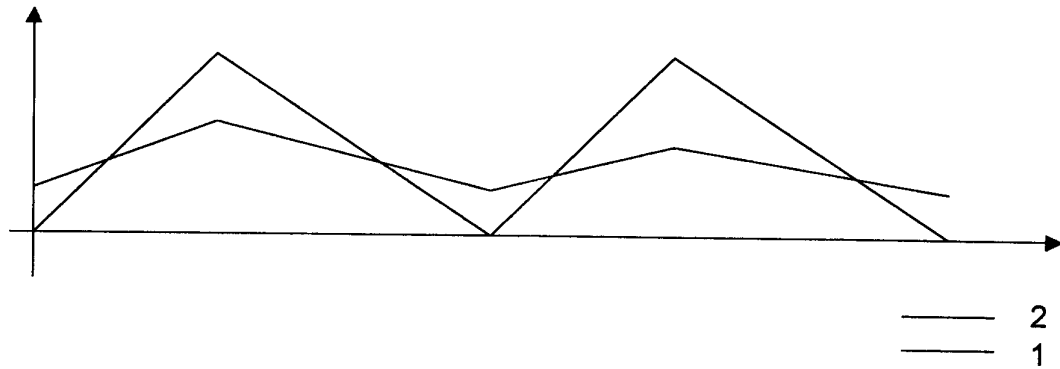
למה עם עליה של RL מתח המוצא עולה ?

כאשר מעלים RL זה בעצם כמו לטעון את הקבל מבלי לפרקו. V_o יעלה עד שהקבל יטען למתח הכניסה ואז בסגירת המתג $I_L=0$.



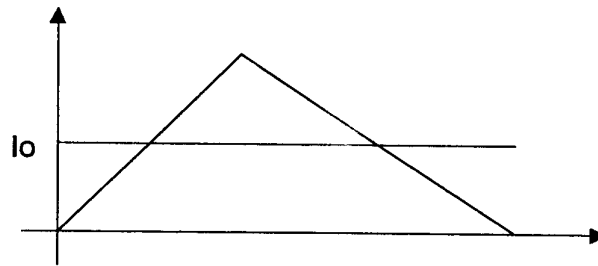
חישוב L_{min}

נניח שניקח את המצב הגבולי בין DCCM לבין CCM (1) ונגדיל את הסליל, נקבל את הצורה 2



כלומר מצב של CCM.
עבור כל מצב עבודה נתון יש L_{min} כך ש $L > L_{min}$
מבטיח CCM ו $L < L_{min}$ מכניס אותנו ל DCCM.

על מנת לחשב את L_{min} ניקח את המקרה הגבולי בין DCCM ובין CCM.



$$\Delta I = \frac{V_o}{L} T_{off}$$

$$I_o = \frac{\Delta I}{2} = \frac{V_o \cdot T_{off}}{2L}$$

$$\frac{T_{off}}{T_s} = D_{off} = 1 - D_{on}$$

$$L_{min} = \frac{V_o \cdot T_{off}}{2I_o} = \frac{R \cdot T_{off}}{2} = \frac{R_o \cdot T_{off}}{2}$$

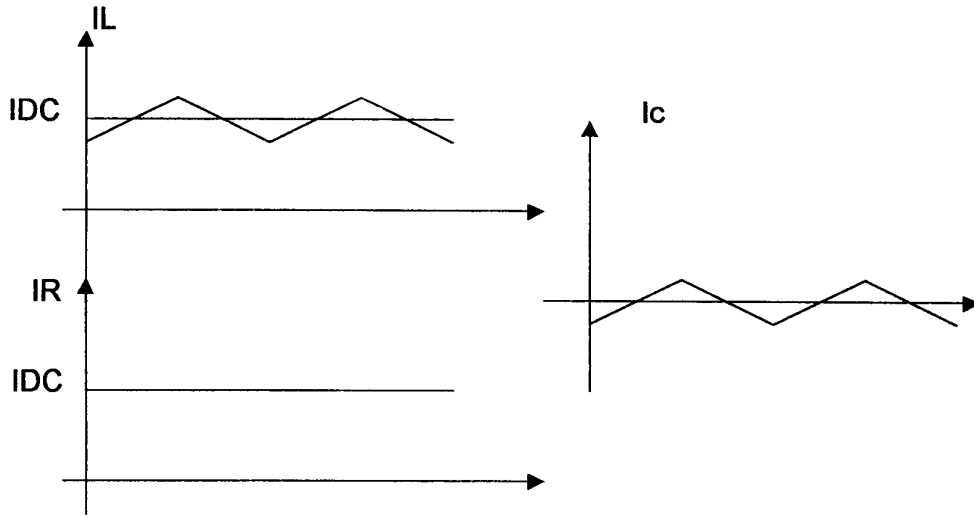
$$T_{off} = D_{off} \cdot T_s$$

$$T_{off} = \frac{D_{off}}{f_s}$$

$$L_{min} = \frac{R_o \cdot T_{off}}{2} = \frac{R_o \cdot D_{off}}{2f_s} = \frac{R_o(1 - D_{on})}{2f_s}$$

ז"א ככל ש f_s עולה L יורד .

הזרם דרך הקבל



הזרם דרך הקבל הוא בעל שיפועים "כמעט" ליניאריים, משום שאנו עובדים בקטעי זמן מאוד קטנים וניתן לומר כי הקבל נטען בצורה ליניארית, כמתואר באיור.

$$I_C = I_L + I_R$$

המטרה של הקבל היא לספוג את זרם ה-AC שעובר דרך הסליל ובדרך זו למנוע ממנו להגיע למוצא וע"י כך נקבל במוצא רק את זרם ה-DC.

דוגמא

נתון ממיר מסוג BUCK ועבורו ידועים הנתונים הבאים :

$$V_o = 5V$$

$$I_o = 10A$$

$$V_{in} = 10V$$

$$f = 100kHz$$

חשב את L_{min} .

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D = \frac{1}{2}$$

$$R_o = \frac{V_o}{I_o} = \frac{5}{10} = 0.5\Omega$$

$$L_{min} = \frac{0.5 \cdot 0.5}{2 \cdot 10^5} = 1.2\mu H$$

בד"כ אנו עובדים עם סלילים שגדולים פי 10 מהערך המינימלי האפשרי עבור CCM, ע"מ

שלא תהיה קירבה ל-DCCM.

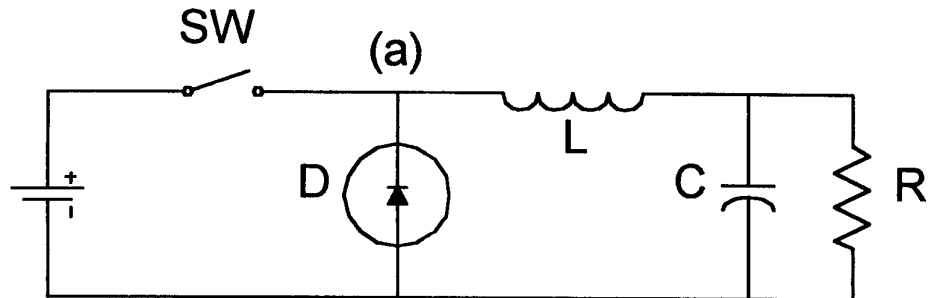
הערה

הגודל הפיסי של הסליל תלוי בערכו החשמלי, כלומר, גודלו הפיסי של סליל בעל השראות

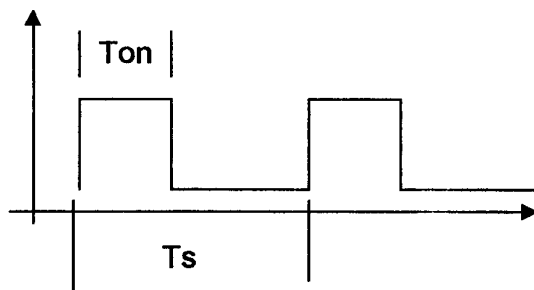
נמוכה יהיה קטן וזה יתרום למזעור (היחס בתדרים של 100-300 KHZ בין הגודל הפיסי לבין

הגודל החשמלי הוא ליניארי).

נסתכל על ממיר ה buck, אך הפעם נחשב את פונקציית התמסורת בדרך שונה.



אפשר לומר כי בנקודה (a) ישנו מתח מהצורה :



ניתן להסתכל על הממיר כעל מסנן, משום שאם נפרק את $V(a)$ לטור פורייה נראה כי המתח מורכב מהרבה הרמוניות ואילו במוצא ישנו מתח DC בלבד. הקבל מקצר תדרים גדולים לכן אפשר להסתכל על המתח הממוצע:

$$V_o = \frac{V_{in} \cdot T_{on}}{T_s} \quad \text{המתח הממוצע :}$$

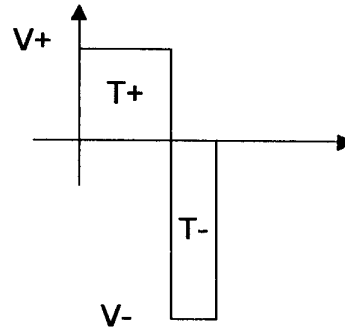
$$\frac{V_o}{V_{in}} = D_{on} \quad \text{ולכן}$$

מהשיקולים שדברנו עליהם, ברור שאם יש סליל ועל הסליל מופיעים מתח חיובי V_+ למשך זמן T_+ ו מתח שלילי למשך זמן T_- והמערכת נמצאת במצב היציב, אזי אינטגרל על המתח בכיוון אחד צריך להיות שווה לאינטגרל בכיוון השני לכן המתח הממוצע על הסליל הוא אפס.

$$L \frac{dI}{dt} = V$$

$$I = \frac{1}{L} \int_{t_1}^{t_2} V dt$$

$$|V_- \cdot t_-| = |V_+ \cdot t_+|$$

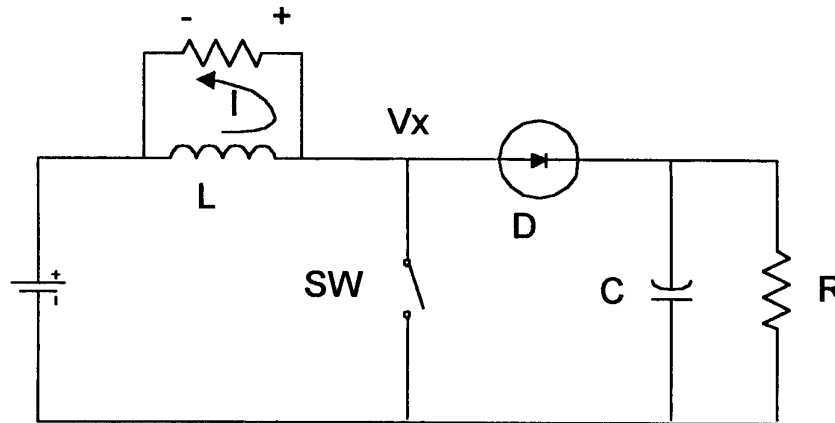


מסקנה

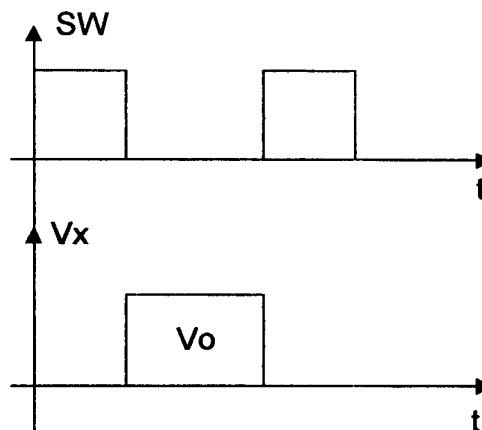
במערכת עם סליל במצב היציב המתח על הסליל הוא אפס. במקרה שהמתח על הסליל אינו אפס ייווצר dI/dt שיעלה את המתח, וזה אומר שאנו לא במצב היציב.

Boost

נתבונן כעת בממיר שונה מן ה buck, ממיר שמעלה מתח, כלומר מתח המוצא שלו גבוה ממתח הכניסה.



כאשר המתג סגור המתח ב V_x שווה לאפס ואילו כאשר המתג פתוח המתח ב- V_x שווה ל- V_o (בהזנחת מפל המתח על הדיודה).



ננתח את ממיר ה-boost בשני דרכים :
 דרך ראשונה לניתוח (ע"י ממוצע)

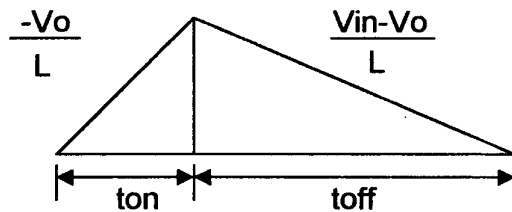
$$\frac{V_o \cdot T_{off}}{T_s} = V_o \cdot D_{off} = V_{in}$$

מתח ממוצע ב-Vx

ומכאן

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{D_{off}}$$

דרך שניה ע"י ΔI



$$\frac{V_{in}}{L} \cdot T_{on} = \frac{V_o - V_{in}}{L} \cdot T_{off}$$

$$V_{in}(T_{on} + T_{off}) = V_o \cdot T_{off}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{1}{D_{off}}$$

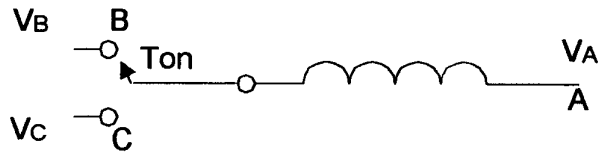
רואים כעת כי בממיר מסוג זה מקבלים במוצא מתחים יותר גבוהים מאשר בכניסה

ב-buck זרם המוצא רציף (עולה או יורד) ואילו זרם הכניסה אינו רציף
 ב-boost זרם המוצא לא רציף ואילו זרם הכניסה רציף ולכן Vripple במוצא כאן יהיה
 גדול יותר מהמקרה של ה-buck.

בכל המעגלים הללו ההפסדים נובעים מאלמנטים פרזיטים כאלה או אחרים שניתנים
 לשיעור, לכן הנצילות של מעגלים אלה מאד גבוהה בערך 95%-98%

סיכום

בבסיס של כל הטופולוגיות הנייל, כאשר אנו עובדים ב CCM ישנו מתג כפול

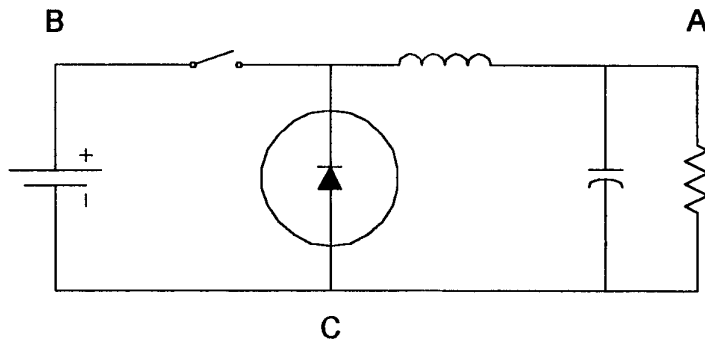


לכן נוכל לרשום נוסחה כללית שאינה תלויה בטופולוגיה

$$\Delta I = \frac{V_A - V_B}{L} T_{on} = \frac{V_A - V_C}{L} T_{off}$$

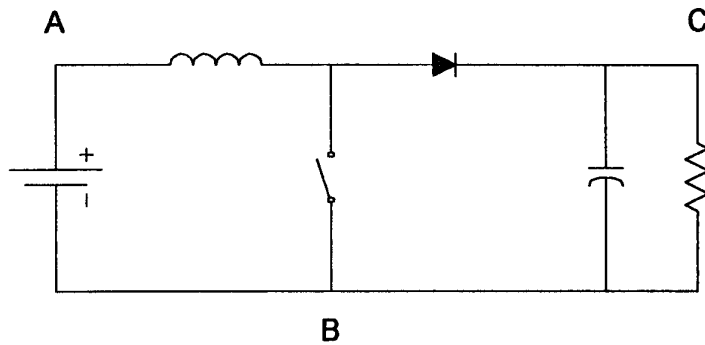
הנוסחה הזו תעבוד בכל המקרים הבאים :

טופולוגית Buck



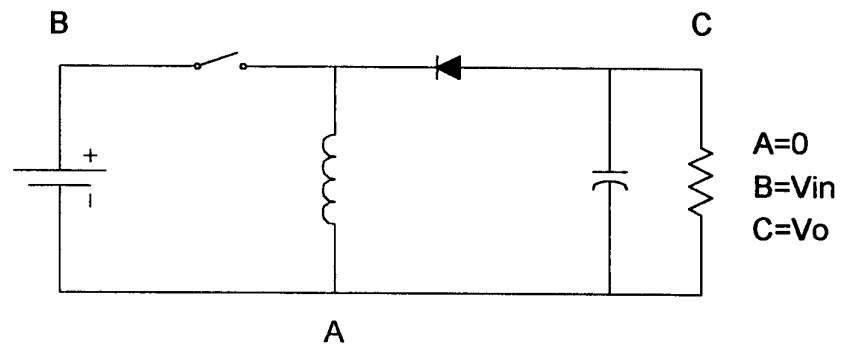
A=Vo
B=Vin
C=0

טופולוגית Boost



A=Vin
B=0
C=Vo

טופולוגיית Buck-Boost

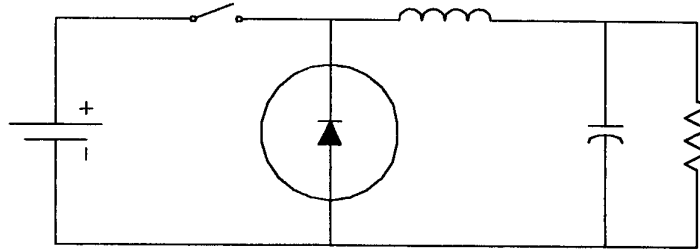


תכונות של Buck-Boost

כאשר המתג סגור ישנו זרם על הסליל, אחרי פתיחת המפסק הזרם זורם דרך הדיודה בכיוון כזה שזרם V_o הוא בכיוון הפוך מ V_{in} כלומר Buck-Boost הופך זרם.

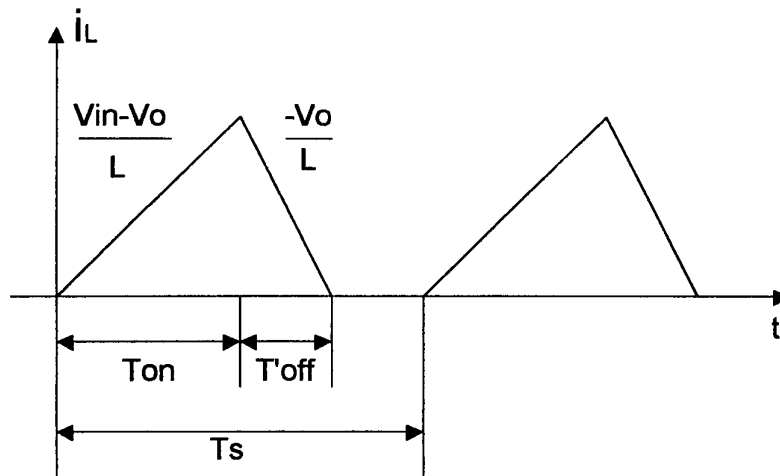
DCCM-Discontinious Current Mode

ניקח לדוגמא את ממיר ה-Buck



כאשר התנגדות המוצא גדלה רמת ה-DC של הזרם במוצא קטנה. אם נוריד את רמת ה-DC הזרם במוצא יהיה רציף עד נקודה בה הזרם בסליל יגיע לאפס ואם נמשיך להוריד את רמת ה-DC (ע"י הגדלת ההתנגדות) נגיע למצב של DCCM שבה זרם הסליל לא יהיה רציף

נפתח כעת את הנוסחאות עבור DCCM



נתחיל לבנות את הנוסחאות.

1. חישוב עפ"י ΔI

נשווה ΔI משני משולשים

$$I_{pk} = \frac{V_{in} - V_o}{L} T_{on} = \frac{V_o}{L} T'_{off}$$

לכן מקבלים ש :

$$\frac{T'_{off}}{T_{on}} = \frac{V_{in} - V_o}{V_o}$$

נשים לב כי אותם הנוסחאות היו נכונות גם לגבי CCM רק שכאן T'_{off} מוגדר אחרת

כמתואר באיור לעיל.

$$T'_{off} = T_{on} \left(\frac{V_{in} - V_o}{V_o} \right)$$

במקרה של CCM ע"מ למצוא את התמסורת הצבנו במקום D_{off}

$$D_{off} = 1 - D_{on}$$

אך כאן ישנו זמן לא ידוע T'_{off} ולכן לא נוכל לבצע את ההצבה הזו ולכן נפעל בדרך

הבאה :

דרך הסליל זורם אותו זרם ממוצע שעובר דרך נגד העומס כלומר :

$$I_o = \frac{V_o}{R_o} = I_L$$

הזרם הממוצע בסליל הוא

$$I_L = \frac{(T_{on} + T'_{off}) \cdot I_{pk}}{2T_s}$$

נציב T'_{off} ו I_{pk} ונקבל

$$I_L = \frac{T_{on} \left(1 + \frac{V_{in} - V_o}{V_o} \right) \cdot T_{on} \left(\frac{V_{in} - V_o}{L} \right)}{2T_s}$$

ניתן כעת למצוא את $V_o(V_{in})$ ולדעת את פונקציית התמסורת.
ניתן לראות כי פונקציית התמסורת ב DCCM מסובכת ומכילה הרבה גורמים פרט ל V_o ו V_{in} כגון התדר f_s .

ראינו שבסיס של כל הטופולוגיות נמצא סליל עם מתג כפול ב DCCM ישנו גם מצב אחר

:

1. מחובר ל V_{in} .
2. מחובר ל V_{out} .
3. אין שום זרם במתג.

הערה

מצב DCCM הוא מאוד לא רצוי, משום ב CCM אין כמעט תלות בעומס והמתח במוצא הוא כמעט קבוע לעומת מקרה בו אנו עובדים ב DCCM במתח המוצא ישן קפיצות. לכן משתדלים לעבוד ב CCM.