

15.07.2009



CCPS

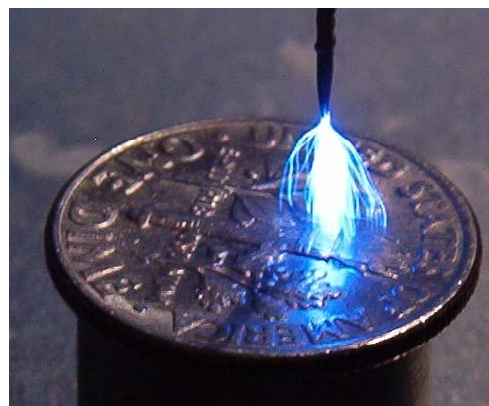
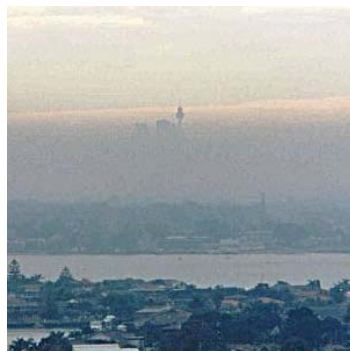
Capacitor Charging Power Supplies

כתב: איל רוטמן

מדוע מטעני קבלים?



- יישומים רבים דורשים פולסים קצרים בהספק גבוה הניתנים ליישום בעזרת פריקה מהירה של קבל.
- ערכים אופייניים - מאות עד אלפי Watt בממוצע והספקים שיאיים של מאות KWatt ויותר בפריקת קבל.



■ יישומים לדוגמא:

- לייזרים פולסיים.
- מנורות Flash.
- טיפול בזיהום אוויר.
- סטריליזצית נוזלים.
- Railguns.

קושי ביישום עם ממירים סטנדרטיים

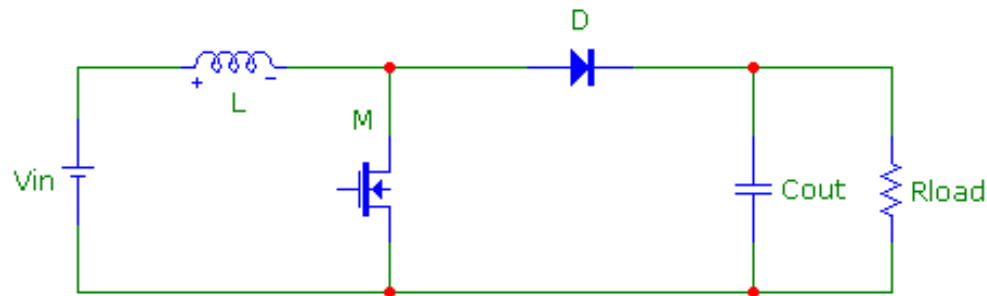
■ ממירים סטנדרטיים

- עומס קבוע.
- דרישות מתח מוצא ברור וקבוע.
- קושי במתן מתח מוצא גבוה (למשל boost).

■ מטעני קבלים

- עומסים מקצר עד נתק.
- תחום מתחי מוצא רחב - קצר עד מתח גבוה מאוד.
- אספקת אנרגיה קבועה לעומס קיבולי בכל מצב הטעינה.

קושי עמידה בדרישות Boost - CCPS



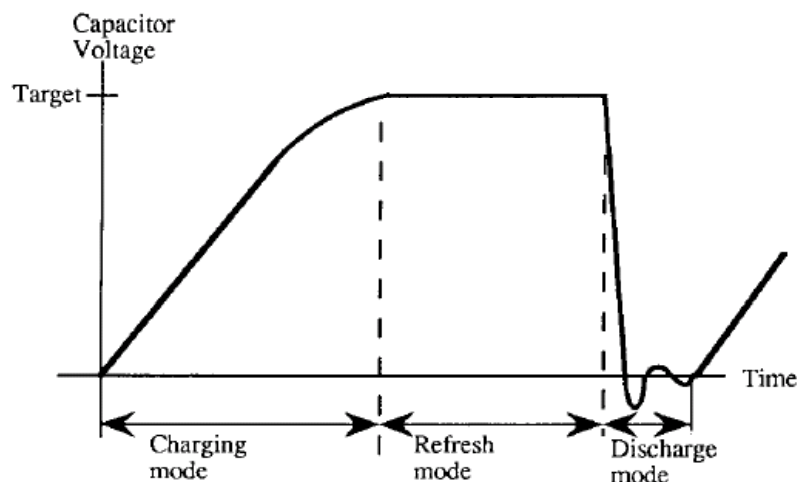
ממיר Boost סטנדרטי

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D_{on}} \quad \text{תמסורת CCM}$$

התמודדות עם דרישות CCPS

- **עומס קצר-זרם** ממוצע ברכיבי הממיר גבוה מאוד.
- **מתח מוצא גבוה** – D ישאף למקסימום. קושי ביישום הבקרה, נגד פרזיטי של הסליל מגביל את מתח המוצא אליו ניתן להגיע. **עומס**
- **נתק** – נדרש זרם מוצא אפסי (לכפר על זליגה) ולכן D ישאף למינימום, גם כן קושי בבקרה.

מחזור פעולה של CCPS

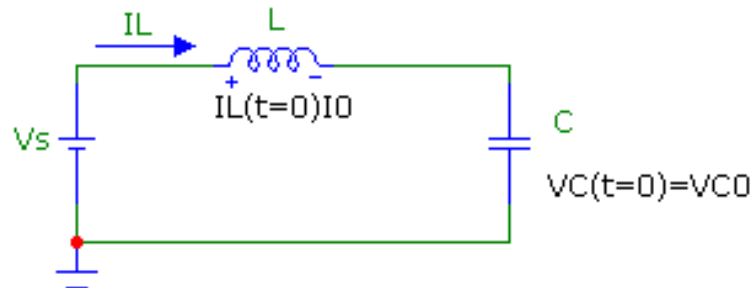


מתח קבל מוצא במחזור פעולה

שלבים

1. טעינת הקבל למתח היעד.
 2. תחזוקת מתח ע"י אספקת אנרגיה פולסית או רציפה.
 3. פריקת הקבל על עומס.
- בזמן הטעינה השפעת העומס מנוטרלת ובמהלך הפריקה פעולת הממיר מנוטרלת.
 - PRF נע בין 0.01Hz עבור קבלים גדולים ל-15KHz ויותר.

רקע למטענים רזוננטיים



נתון מעגל

תנאי התחלה

$$I_L(t=0) = I_0, V_C(t=0) = V_{C0}$$

הגדרת הבעיה

$$\begin{cases} \frac{V_s}{L} \cdot \delta(t) = \frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{1}{LC} \cdot i_L \\ i_L(t=0) = I_0 \\ V_C(t=0) = V_{C0} \end{cases}$$

בעזרת איזון הלמים

$$\left(\frac{di_L}{dt}(t=0^+) - \frac{di_L}{dt}(t=0^-) \right) + \frac{1}{LC} \int_0^+ i_L(t) dt = \frac{V_s}{L}$$

נמיר לבעיה

$$\begin{cases} 0 = \frac{d^2 i_L}{dt^2} + \frac{1}{LC} \cdot i_L \\ i_L(t=0) = I_0 \\ \frac{di_L}{dt}(t=0) = \frac{V_s - V_{C0}}{L} \end{cases}$$

רקע למטענים רזוננטיים

פיתרון

$$I_L(t) = I_0 \cos(\omega t) + \frac{(V_{in} - V_{C0})}{Z_0} \sin(\omega t)$$

$$V_C(t) = V_{C0} + \frac{1}{C\omega} \left(I_0 \sin(\omega t) + \frac{(V_{in} - V_{C0})}{Z_0} (1 - \cos(\omega t)) \right)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

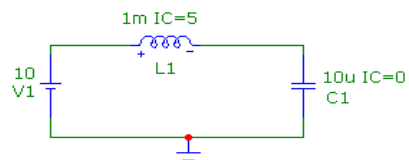
זמן הגעה למתח קבל מקסימאלי

$$t_{\max 1} = \frac{1}{\omega} \left(a \tan \left(-\frac{I_0 Z_0}{V_{in} - V_{C0}} \right) + \pi \right)$$

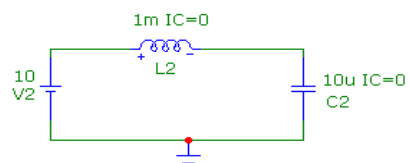
מסקנה אם הזרם ההתחלתי בסליל אפס, מתח הקבל הוא המתח ההתחלתי בתוספת פעמיים ההפרש ההתחלתי $V_{C,\max} = V_{C0} + 2(V_{in} - V_0 - V_{C0})$ כיוון ש $\frac{1}{Z_0 C \omega} = 1$

מסקנה ככל שהזרם ההתחלתי גדול יותר כך זמן טעינת הקבל קצר יותר והמתח המקסימאלי על הקבל גדול יותר, עולה על פעמיים ההפרש ההתחלתי.

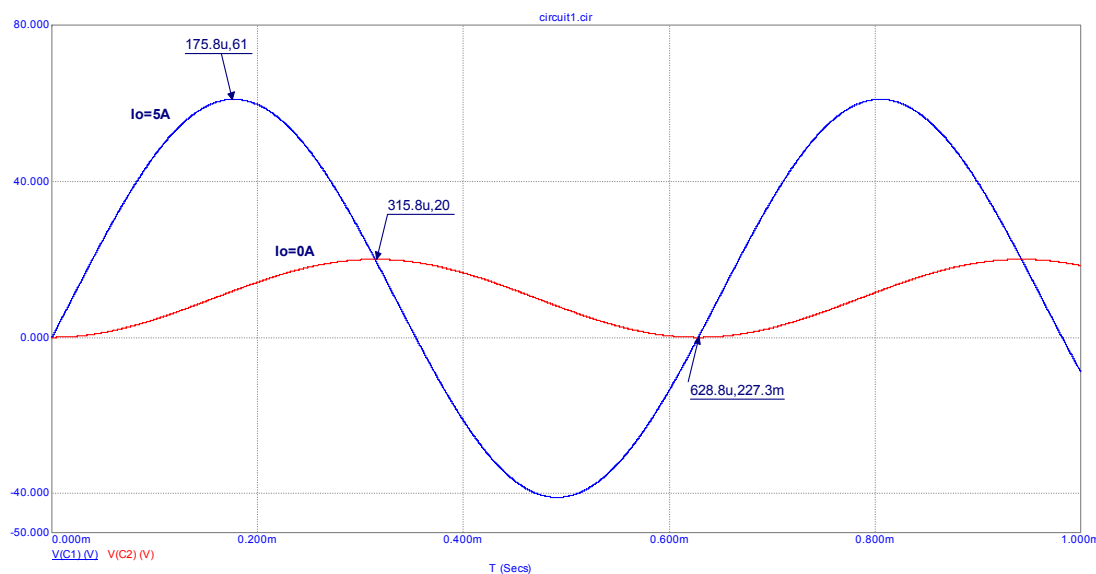
רקע מטענים רזוננטיים המחשה בסימולציה



זרם התחלתי 5A

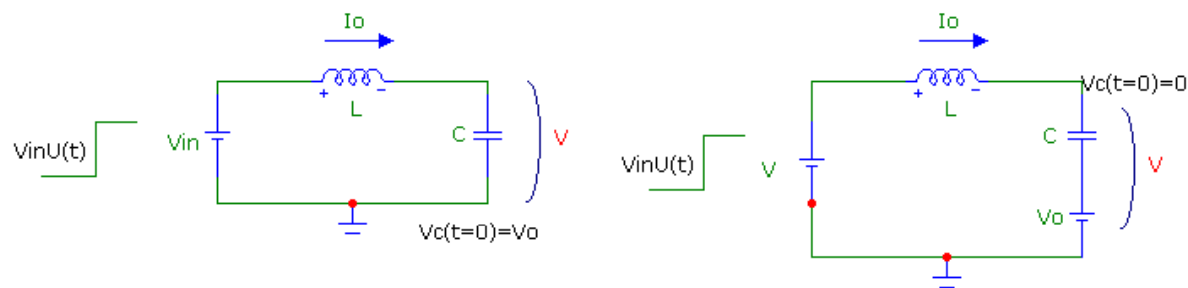


זרם התחלתי אפס



תוצאות סימולציה

רקע לשיקוף קבל מוצא



נתונים שני מעגלים

טענה – פתרונם זהה

$$i_L(t) = I_0 \cos(\omega t) + (V_{in} - V_{C0}) \sqrt{\frac{C}{L}} \sin(\omega t)$$

$$V(t) = V_{C0} + \frac{I_0}{\omega C} \sin(\omega t) + (V_{in} - V_{C0})(1 - \cos(\omega t))$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

פיתרון



טופולוגיות מטעני קבלים במצגת

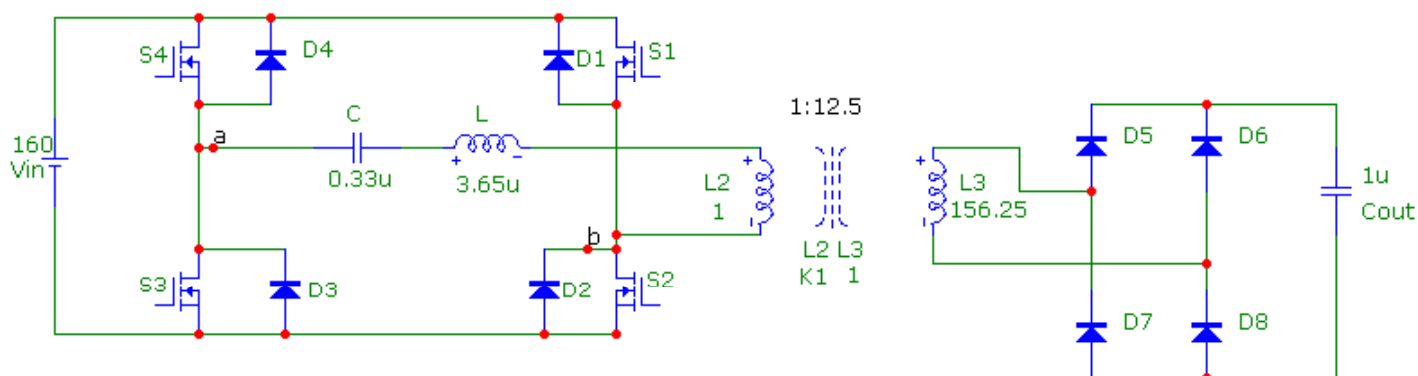
- מטען רזוננטי טורי.

- מטען המבוסס על ממיר Ward.

- מטען DCM Flyback.

מטען קבלים רזוננטי

מעגל מייצג



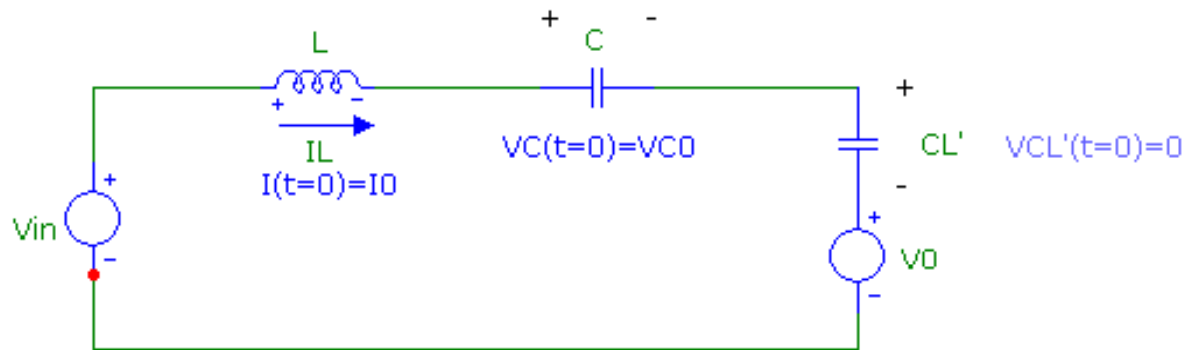
עקרונות פעולה כלליים

• פעולת הטעינה מונה **4 מצבים בסיסיים** (2 טעינה ו-2 פריקה) התלויים בכיווניות מתח הכניסה ובכיוון הזרם המתפתח במעגל הרזוננס.

- ניתוח חשמלי של מצב הטעינה מחולק **לשלושה תחומים**:
 - מתח מוצא נמוך.
 - מתח מוצא בינוני עד גבוה.
 - מצב refresh – המתח ביעדו.

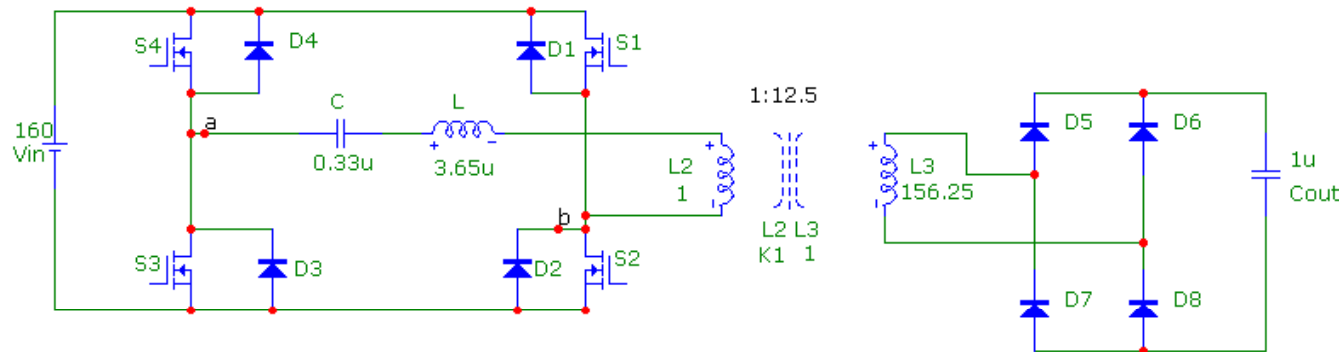
• בקרת זמן "חס" קבוע (ZCS), תדר משתנה.

מעגל תמורה כללי והגדרת כיוונים חיוביים



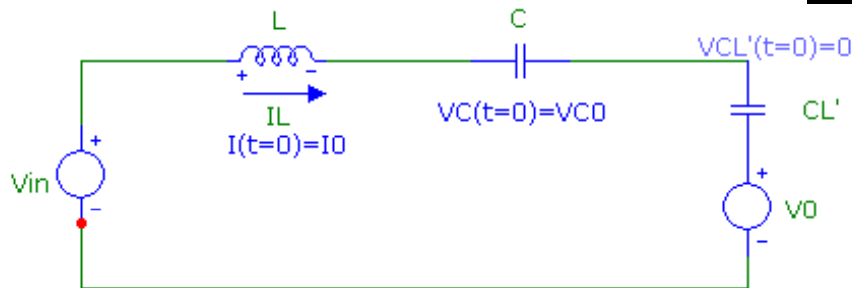
מעגל התמורה

מעגל הממיר ממנו נגזר מעגל התמורה



ארבעת מצבי הפעולה

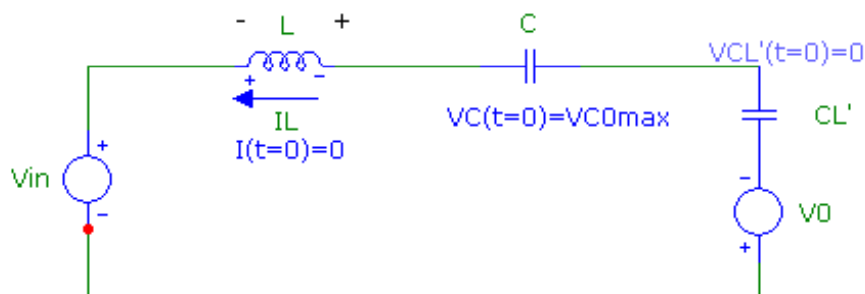
מצב 1 – טעינת קבל הרזוננס למתח חיובי מקסימאלי.



התחלה כניסת S2, S4 להולכה.
סיום הגעת זרם חיובי לאפס.
ת"ה זרם סליל חיובי, מתח קבל שלילי.
צד משני דiodות D5, D8 מוליכות.

אורך המצב $t_{\max} < \frac{T}{2}$

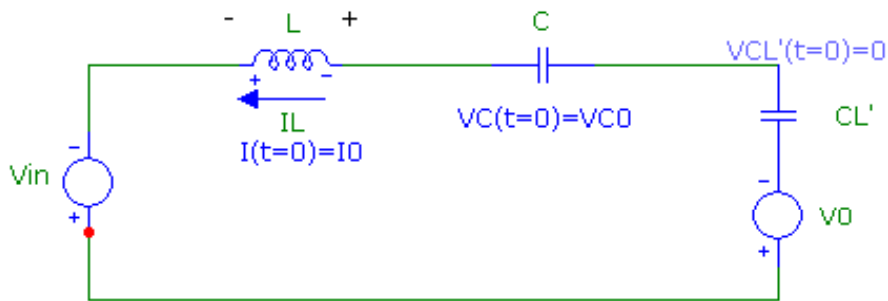
מצב 2 – פריקת קבל הרזוננס ומתן ת"ה לטעינה שלילית (מצב 3).



התחלה כניסת D2, D4 להולכה עקב תחילת זרם שלילי.
סיום הגעת זרם שלילי לאפס או כניסת S1, S3 להולכה.
ת"ה זרם אפס, מתח קבל חיובי מקסימאלי.
צד משני דiodות D6, D7 מוליכות.

ארבעת מצבי הפעולה - המשך

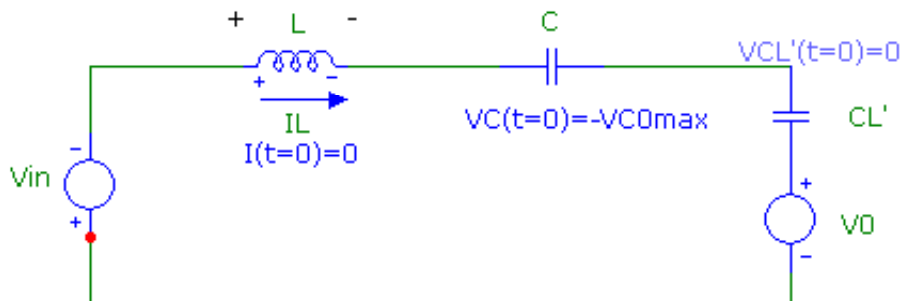
מצב 3 – טעינת קבל הרזוננס למתח שלילי מקסימאלי.



התחלה כניסת S1,S3 להולכה.
סיום הגעת זרם שלילי לאפס.
ת"ה זרם סליל שלילי, מתח קבל חיובי.
צד משני דיודות D6,D7 מוליכות.

אורך המצב $t_{\max} < \frac{T}{2}$

מצב 4 – פריקת קבל הרזוננס ומתן ת"ה לטעינה חיובית (מצב 1).



התחלה כניסת D1,D3 להולכה עקב תחילת זרם חיובי.
סיום הגעת זרם חיובי לאפס או כניסת S1,S4 להולכה.
ת"ה זרם אפס, מתח קבל שלילי מקסימאלי.
צד משני דיודות D5,D8 מוליכות.

טעינה במתח מוצא נמוך

- הנחה - מתח המוצא המשוקף אינו משפיע על פעולת המעגל.
- זרם במעגל הרזוננס מוגבל ע"י האימפדנס האופייני Z_0 וע"י מצבי פריקה מלאים. ערכו המקסימאלי $I_{Lmax} = \frac{V_{in}}{Z_0}$.
- כל מצב אורך $T/2$. ניתן מרווח זמן נוסף בין מחזור טעינה פריקה של קבל הרזוננס למניעת עליית הזרם.

משוואות מייצגות

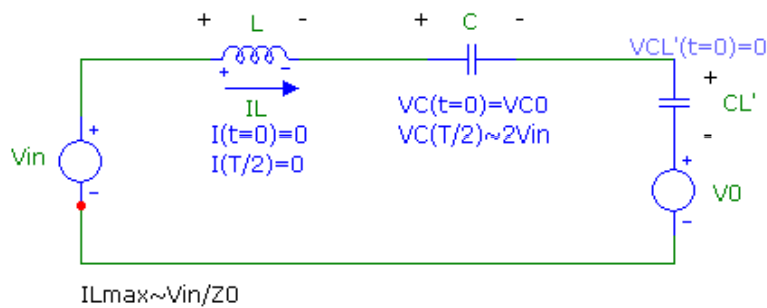
$$I_L(t) = \frac{V_{in}}{Z_0} \sin(\omega t)$$

$$V_C(t) = V_{C0} + V_{in} (1 - \cos(\omega t))$$

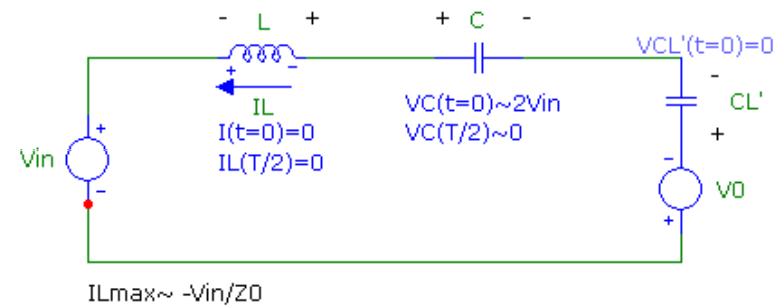
$$V_{C_L}(t) = V_0 + \underbrace{\frac{C}{C_L} (V_{in} (1 - \cos(\omega t)))}_{V_{C_L}}$$

טעינה במתח מוצא נמוך - מצבים

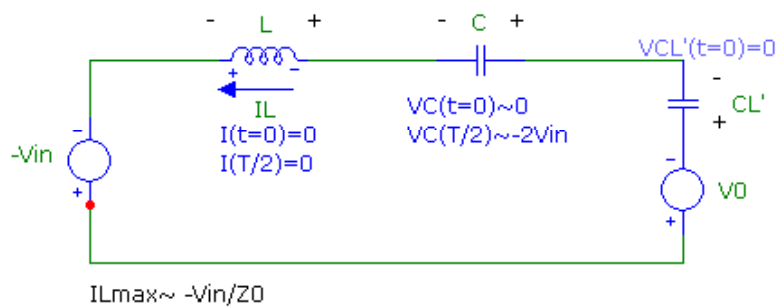
mode 1



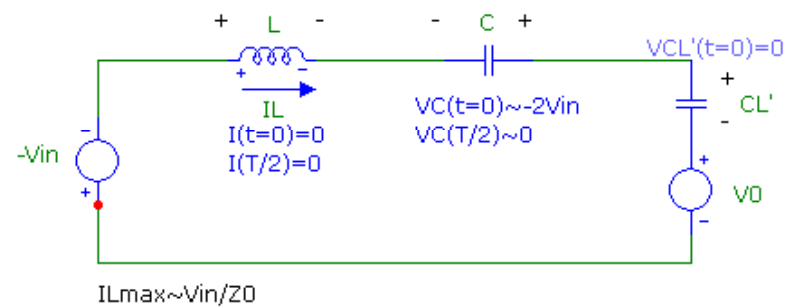
mode 2



mode 3



mode 4



טעינה במתח מוצא נמוך - סימולציה

ערכי סימולציה

$$V_{in} = 160V$$

$$f = 145KHz$$

$$C_r = 0.33\mu F$$

$$T = 6.9\mu sec$$

$$L_r = 3.65\mu H \text{ leakage}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_r}{C_r}} = 3.33\Omega$$

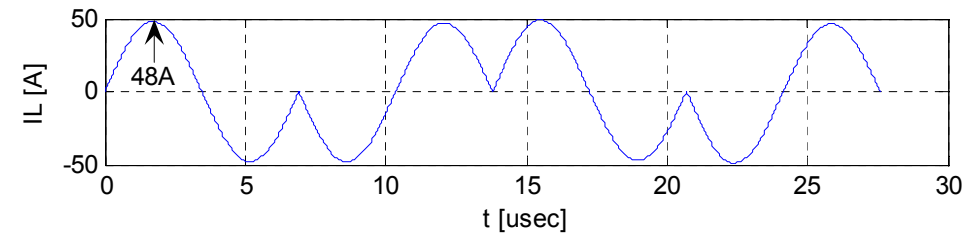
$$C_o = 1\mu F$$

$$C_L' = n^2 C_o = 156.25\mu F$$

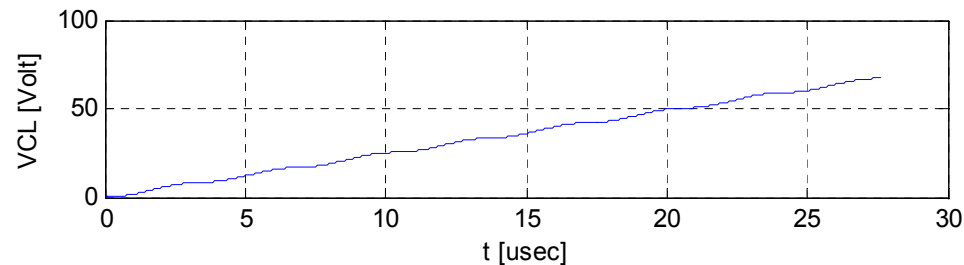
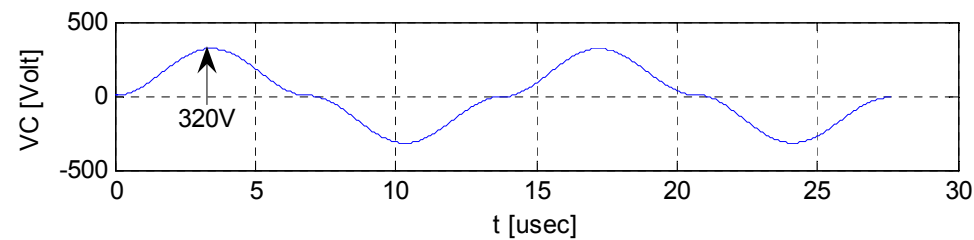
$$1:n = 22:275 = 1:12.5$$

תוצאות

$$I_{max} = \frac{V_{in}}{Z_0} = \frac{160}{3.33}$$



$$V_{C_{max}} = 2V_{in}$$



טעינה במתח מוצא בינוני - גבוה

- **בעיה** - מתח המוצא המשוקף מקזז את המתח ההתחלתי על הסליל בכל מצב פעולה. הזרמים יקטנו והטעינה תתארך.
- **פיתרון** – עליה בתדר כך שמצבי הפריקה אינם מתבצעים במלואם ובכך מייצרים תנאי התחלה של זרם ומתח התורמים לשימור הזרם. קצב הטעינה אינו קטן.

משוואות מייצגות

$$I_L(t) = I_0 \cos(\omega t) + \frac{(V_{in} - V_0 - V_{C0})}{Z_0} \sin(\omega t)$$

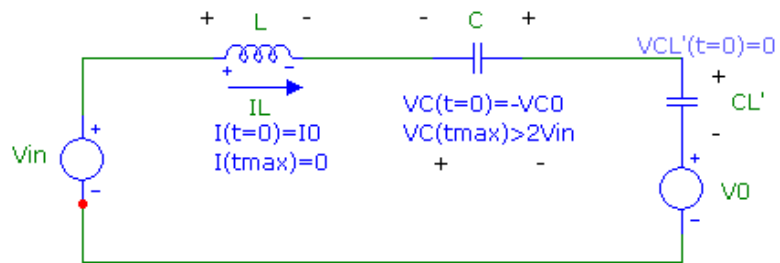
$$V_C(t) = V_{C0} + \frac{1}{C\omega} \left(I_0 \sin(\omega t) + \frac{(V_{in} - V_0 - V_{C0})}{Z_0} (1 - \cos(\omega t)) \right)$$

$$V_{C_L}(t) = V_0 + \underbrace{\frac{1}{C_L\omega} \left(I_0 \sin(\omega t) + \frac{(V_{in} - V_0 - V_{C0})}{Z_0} (1 - \cos(\omega t)) \right)}_{V_{C_L}}$$

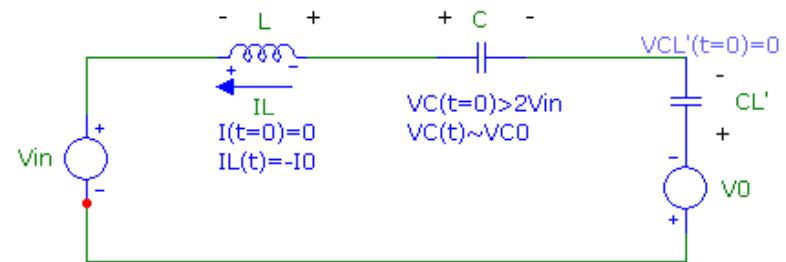
טעינה במתח מוצא בינוני – גבוה

מצבי פעולה

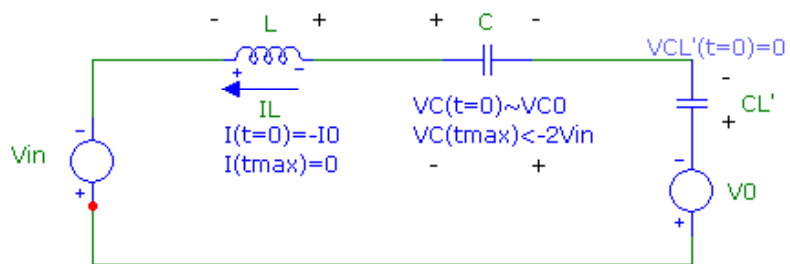
mode 1



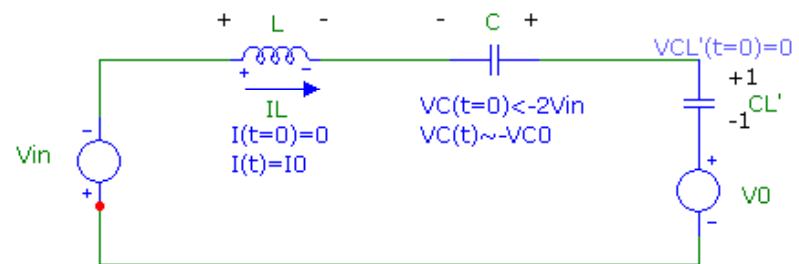
mode 2



mode 3



mode 4



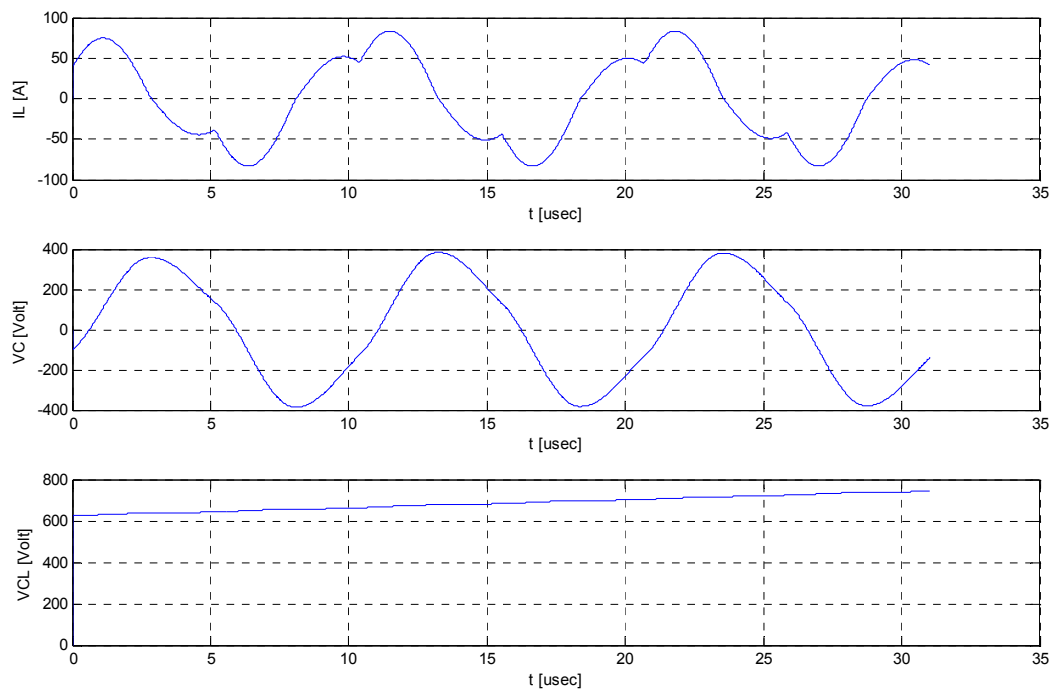
טעינה במתח מוצא בינוני – גבוה

סימולציה

תנאי התחלה

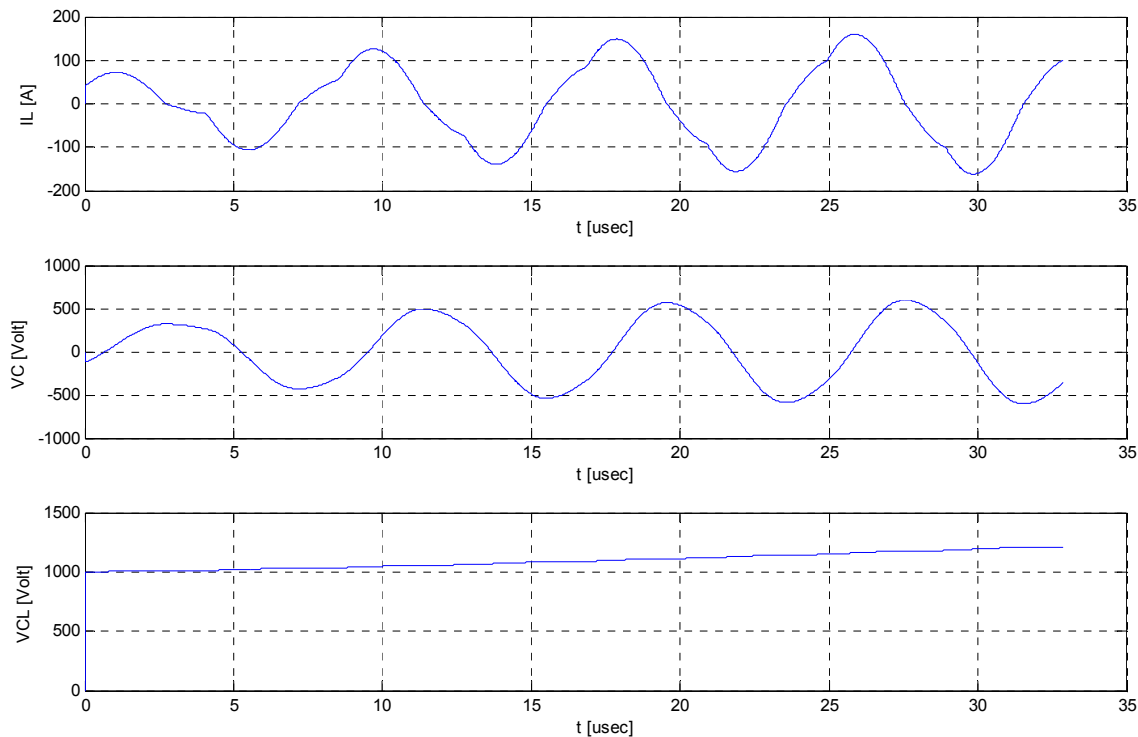
$I_0=40A$
 $V_C0=-100V$
 $V_0=50V$

תוצאות

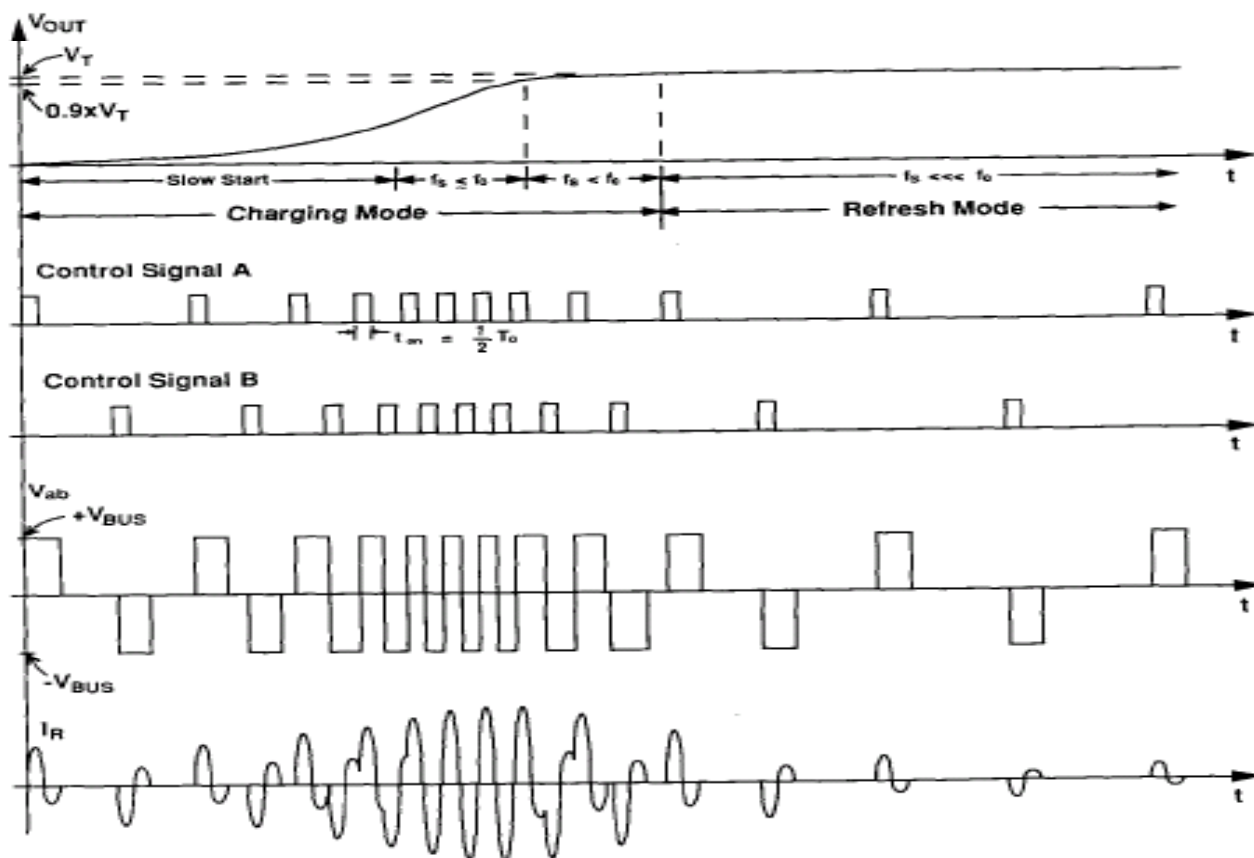


טעינה במתח מוצא גבוה

- עם עלית מתחי המוצא יש לקזז עוד יותר את זמני מצבי הפריקה. הקיזוז מבטיח תנאי מתח התחלה גבוהים עוד יותר על קבל הרזוננס בתחילת מצבי הטעינה ובכך קצב הטעינה אינו נפגע.
- צורות הגלים במתח גבוה בקירוב סינוסואידליות.

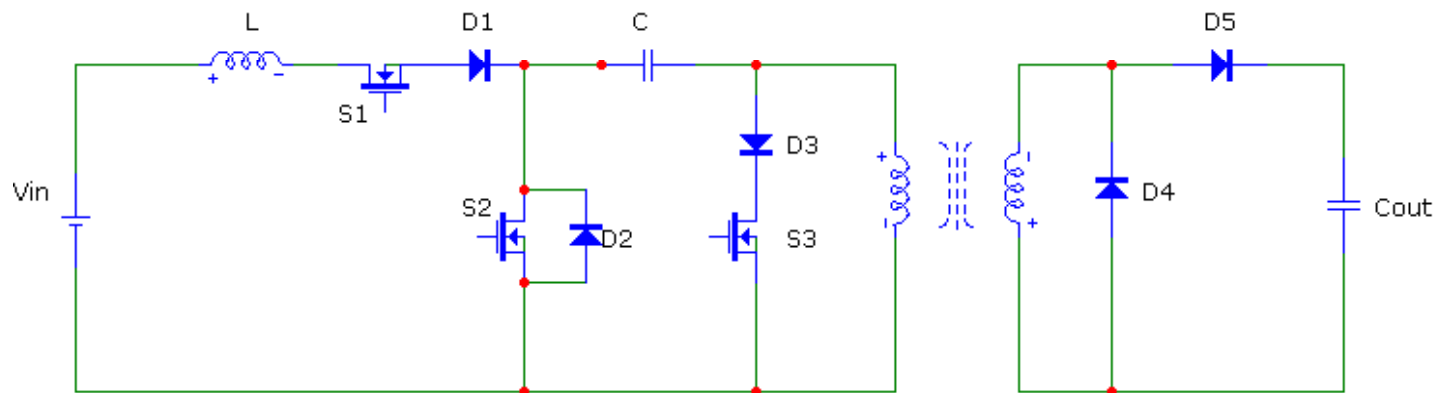


תוצאות מעגל מעשי



מטען קבלים מסוג Ward Converter

מעגל הממיר



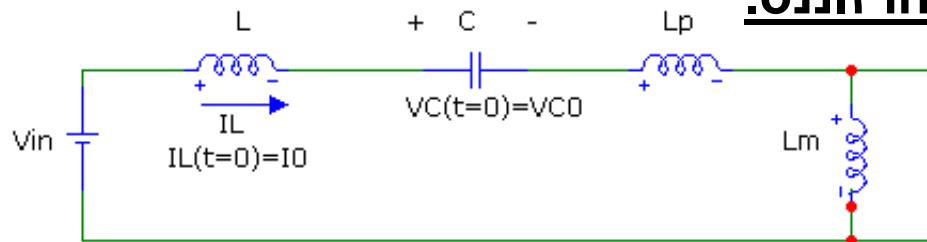
- בקרת זמן "חס" קבוע ותדר קבוע.
- שלושה מתגים.
- ZCS בכל המתגים.

מצבי פעולה Ward

מצב 0 – טעינת סליל הרזוננס.

- מתרחש פעם בודדת בתחילת הטעינה. מתחיל עם סגירת S1, S2 ומסתיים עם פתיחת S2.
- כאשר המצב חוזר על עצמו קיים זרם נוסף דרך D2, C, Lp.

מצב 1 – טעינה חלקית וקצרה של קבל הרזוננס.



$$I_L(t) = I_0 \cos(\omega t) + \frac{(V_{in} - V_{C0})}{Z_0} \sin(\omega t)$$

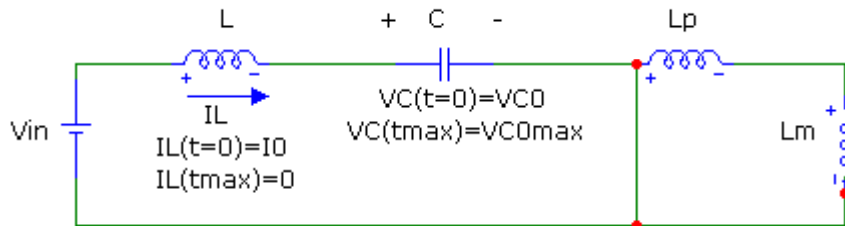
$$V_C(t) = V_{C0} + \frac{1}{C\omega} \left(I_0 \sin(\omega t) + \frac{(V_{in} - V_{C0})}{Z_0} (1 - \cos(\omega t)) \right)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{(L + L_p)C}}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L + L_p}{C}}$$

פתחת S2	התחלה
סגירת S3	סיום
זרם סליל חיובי	ת"ה
מתח קבל חיובי	
D4 מקצרת את	
השראות המגנט	צד משני

מצבי פעולה Ward

מצב 2 – המשך טעינת קבל הרזוננס.



סגירת S3
 הגעה לזרם סליל אפס.
 זרם סליל חיובי
 מתח קבל חיובי
 מקוצר

התחלה
 סיום
 ת"ה

צד משני

פיתרון המעגל

$$I_L(t) = I_0 \cos(\omega t) + \frac{(V_{in} - V_{C0})}{Z_0} \sin(\omega t)$$

$$V_C(t) = V_{C0} + \frac{1}{C\omega} \left(I_0 \sin(\omega t) + \frac{(V_{in} - V_{C0})}{Z_0} (1 - \cos(\omega t)) \right)$$

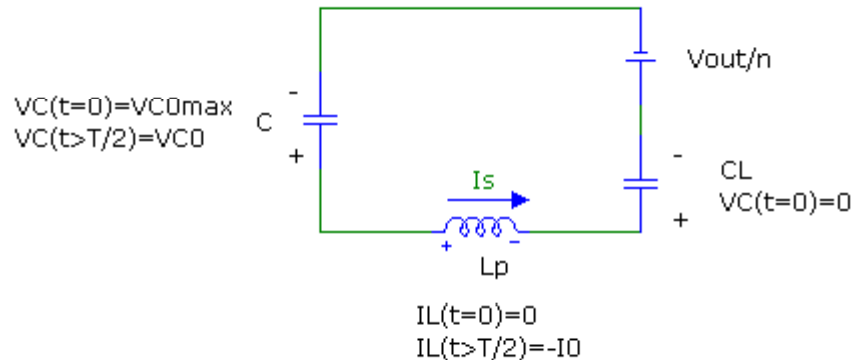
$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

$$t_{\max 1} = \frac{1}{\omega} \left(a \tan \left(-\frac{I_0 Z_0}{V_{in} - V_{C0}} \right) + \pi \right)$$

זמן הגעה למתח מקסימאלי

•דיודות D1,D3 מפסיקות להוליך כאשר הזרם מגיע לאפס, לכן ניתן לפתוח מתגים S1,S3
 ב-Soft Switching.

מצבי פעולה Ward



מצב 3 – טעינת קבל מוצא

סגירת S2	התחלה
סגירת S1	סיום
זרם סליל אפס	ת"ה
מתח קבל מקסימאלי חיובי	
D5 מוליכה וקבל המוצא משוקף	צד משני
לראשוני	

פיתרון המעגל

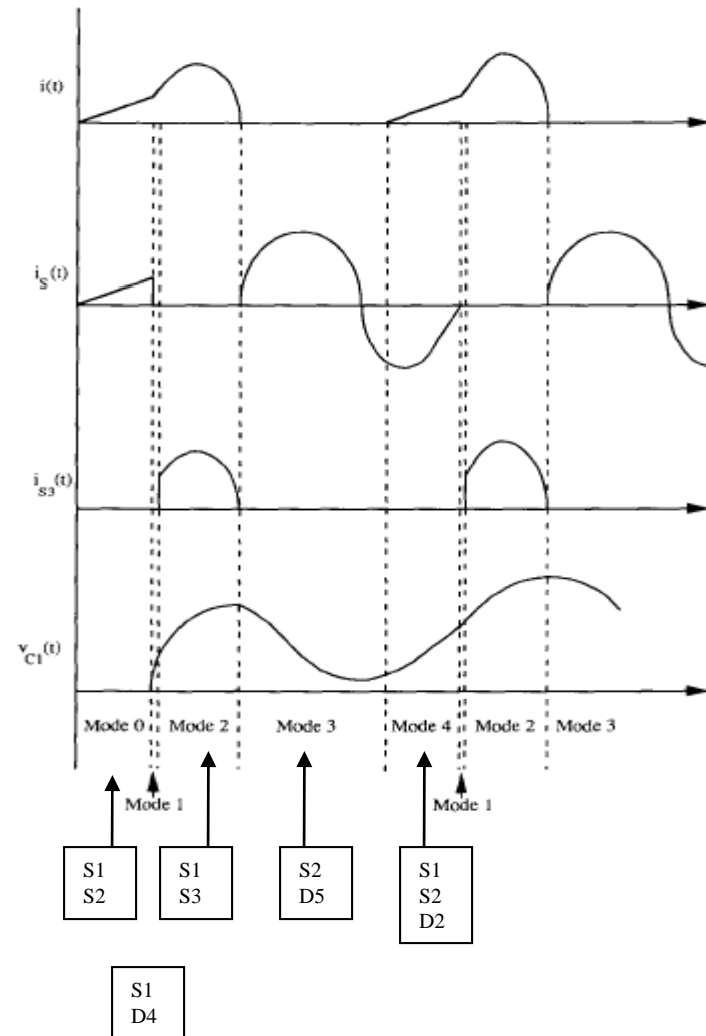
$$I_L(t) = \frac{(V_{C0} - V_{out}/n)}{Z_0} \sin(\omega t)$$

$$V_C(t) = V_{C0} - (V_{C0} - V_{out}/n)(1 - \cos(\omega t))$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_p C}}, \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L_p}{C}}$$

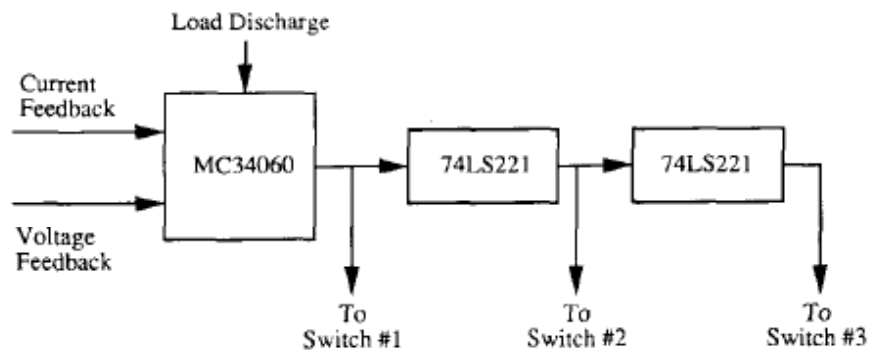
- קבל המוצא מוכפל ביחס הליפופים בריבוע תוך שיקוף לראשוני. הקבל האקויוולנטי גדול משמעותית מהקבל הרזוננטי ולכן אינו משפיע על תדר האוסילציות.
- במצב זה מתפתחים זרמים גבוהים כי האימפדנס האופייני קטן.
- כאשר הזרם הופך שלילי הוא מוליך דרך D2.

תוצאות מעשיות ממיר *ward*

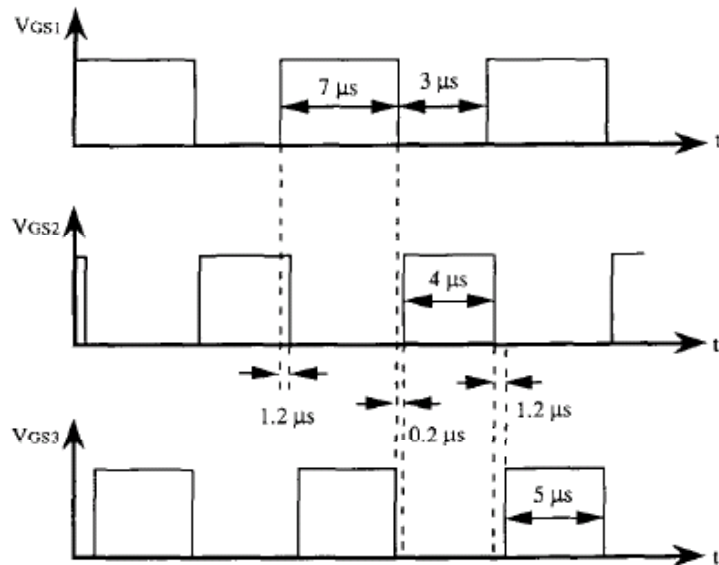


בקרת ממיר ward

בקרה סכימת בלוקים

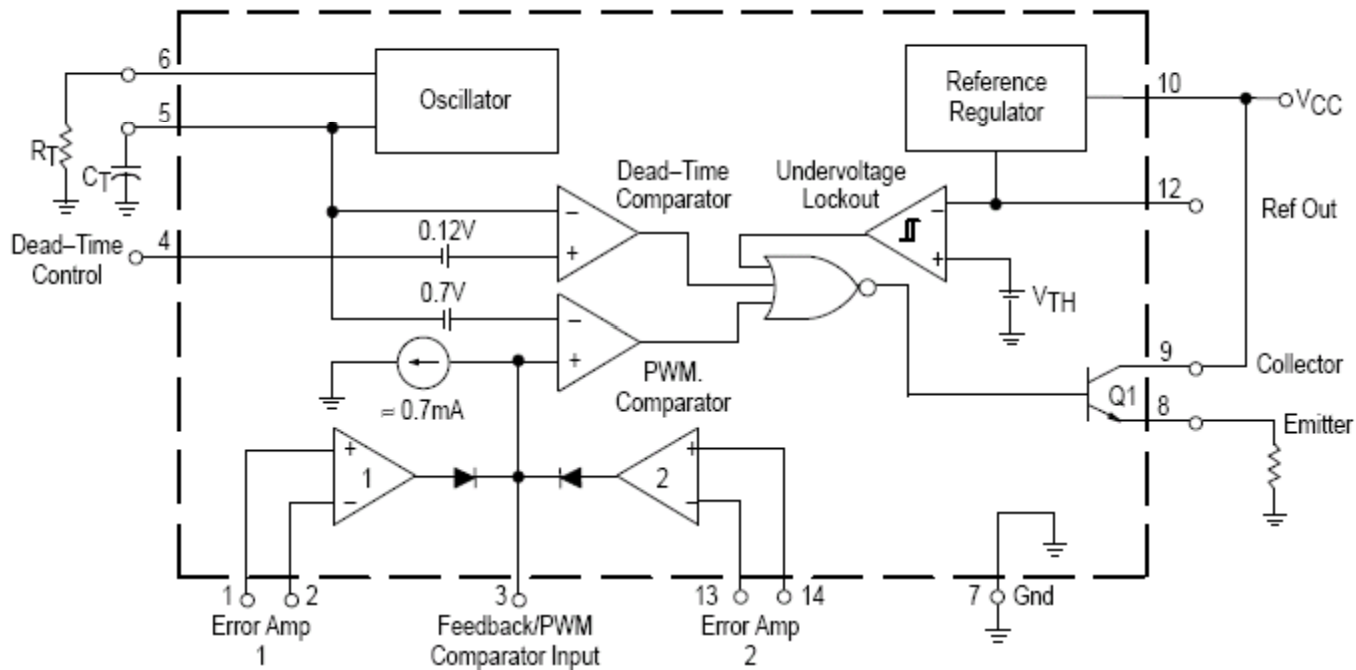


בקרת המתגים



PWM-MC34060A

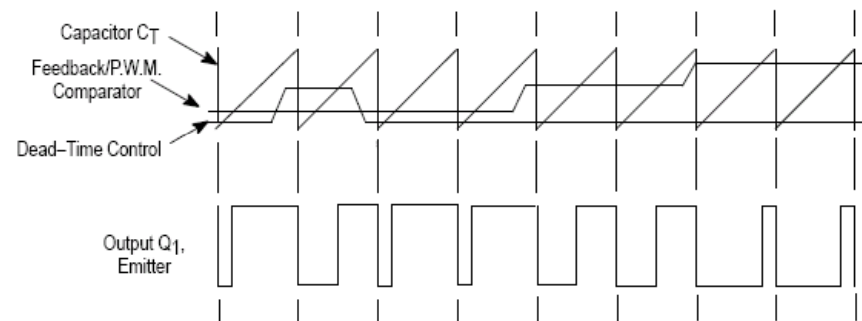
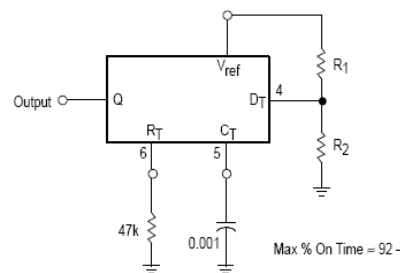
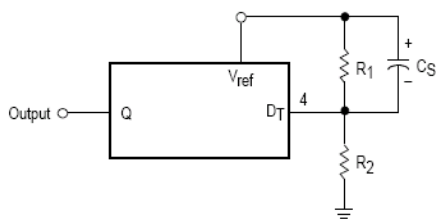
דיאגרמת בלוקים



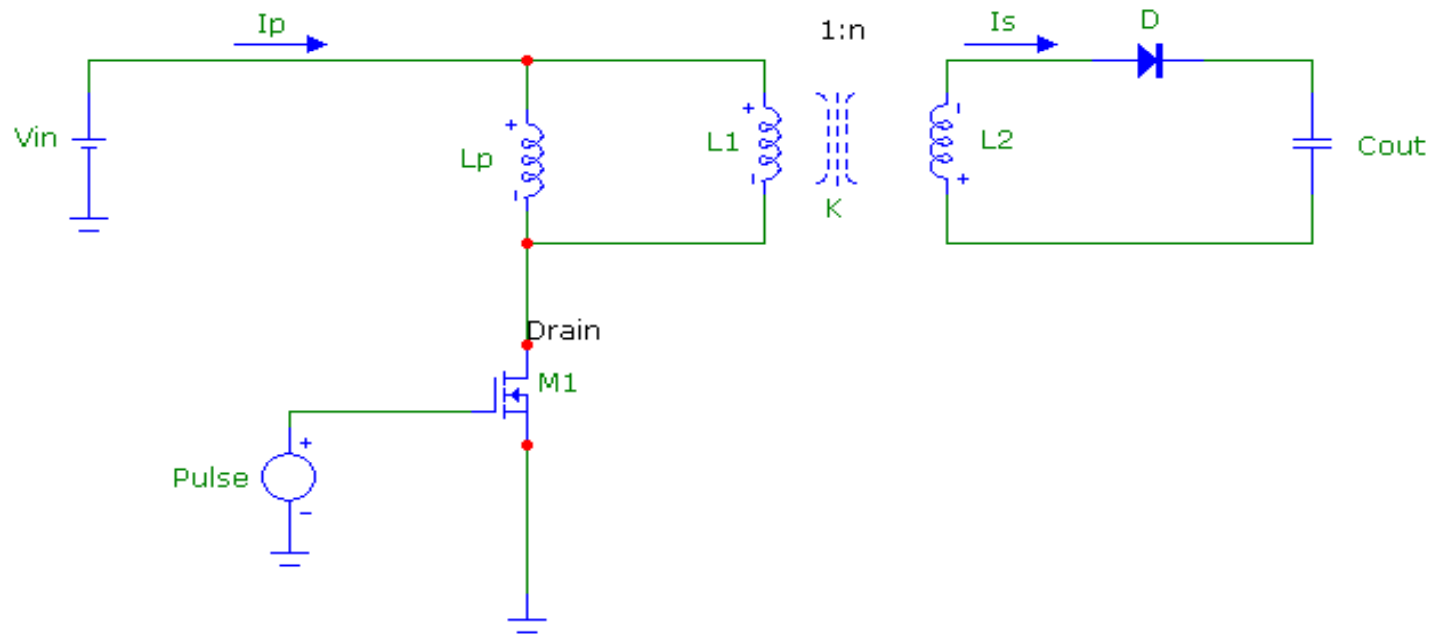
Soft Start

קביעת רוחב פולס

שליטה על רוחב פולס מוצא



מטען קבלים מסוג Flyback



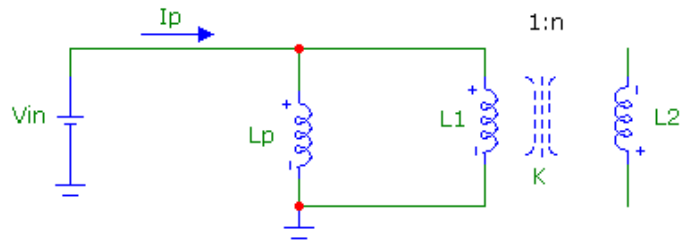
מעגל מייצג

- מתג בודד
- סלילים אוגרי אנרגיה מצומדים (לא שנאי)
- דיודת מתח גבוה

Flyback – מצבי פעולה DCM

מתג ב-"on", זרם בראשוני

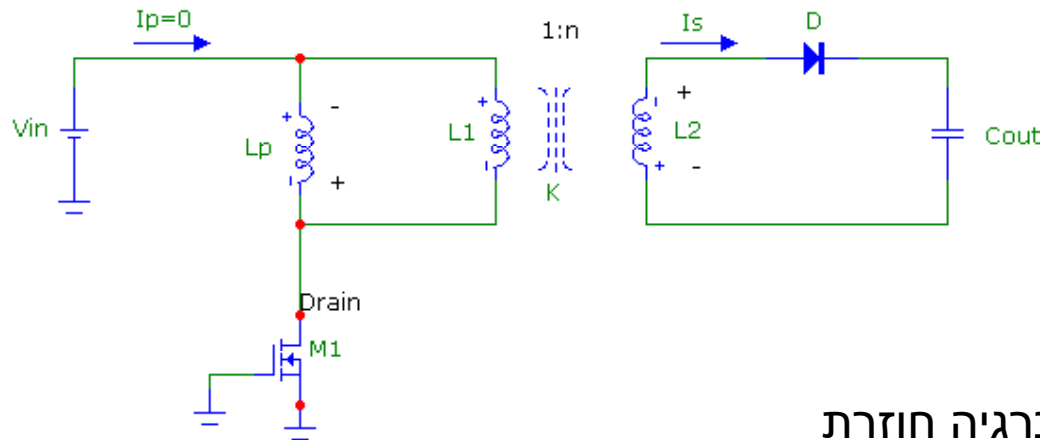
$$I_{p\max} = \frac{V_{in}}{L_p} t_{on} = \frac{V_{in}}{L_p} TD_{on}$$



- מיתוג Hard Switching מ-"on" ל-"off" גורר מאמץ מתח על המתג עקב אנרגיה שנאגרה בהשראות הפיזור.
- מאמץ מתח על הדיודה $V_D = -(nV_{in} + V_{out})$

מתג ב-"off", זרם במשני

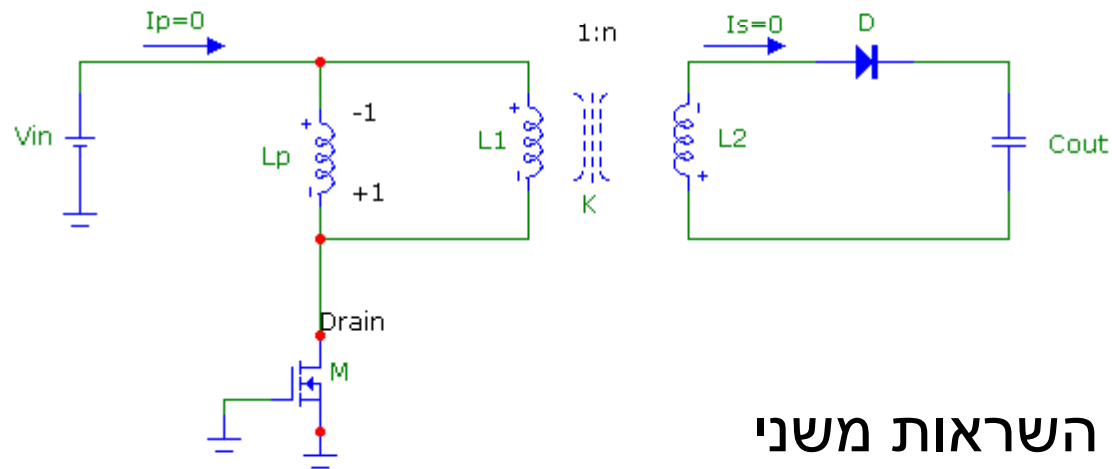
$$t_{off} = \frac{I_{p\max}}{n} \frac{L_s}{V_{out}} = \frac{nL_p I_{p\max}}{V_{out}}$$



- מאמץ מתח על המתג $V_{Drain} = V_{in} + \frac{V_{out}}{n}$

- בסיום פריקת מנת האנרגיה, ישנה אנרגיה חוזרת עקב trr של הדיודה. הבעיה מחריפה עם עליה במתח המוצא.

Flyback – מצבי פעולה DCM



מתג ב-"off", זרמים אפס

- מצב DCM בלבד.
- קיימות תנודות בין השראות משני לבין קיבול דיודה המשוקפות לראשוני.

Flyback כמטען קבל בהספק נמוך

$$\left. \begin{array}{l} C_{out} = 1\mu F \\ V_{out} = 1000V \\ t_r = 1.25msec \end{array} \right\} E_{out} = 0.5J \left\} P_{out} = 400Watt$$

$$f_{sw} \square 100KHz$$

$$V_{in} = 100V$$

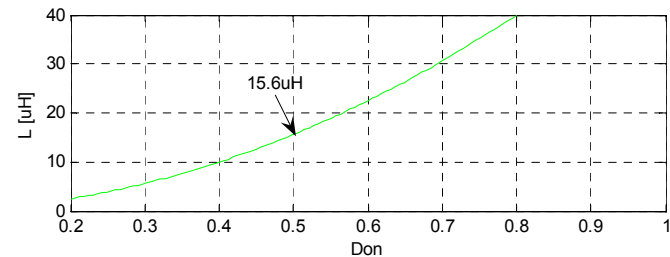
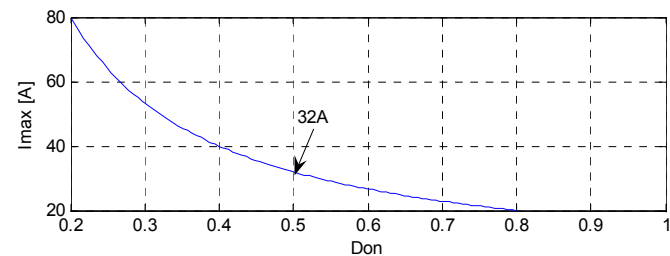
ממיר דוגמת טעינה

$$\Delta E = 8mJ, V_{in}, T \rightarrow \left\{ \begin{array}{l} I_{max} = \frac{2\Delta E}{V_{in}TD_{on}} \\ L_p = \frac{2\Delta E}{I_{max}^2} \end{array} \right.$$

נבחר D=0.5 ונקבל

$$\boxed{\begin{array}{l} I_{max} = 32A \\ L_p = 15.6\mu H \end{array}}$$

ממיר flyback עבור נתונים זהים



Flyback כמטען קבל בהספק נמוך

■ חסרונות בולטים:

- במתח מוצא 1000V מנת האנרגיה אינה יכולה להתפרק במלואה. קצב הטעינה יהיה נמוך משמעותית מממיר .ward.
- מתבצע Hard Switching לזרם השיאי בראשוני.
- מנת האנרגיה 8mJ גדולה ונדרשת ליבה מגנטית גדולה פיזית היכולה לעמוד גם בפיזור ההספק.

- מסקנה – Flyback אינו מתחרה של ward או של המטען הרזוננטי בהספקים גבוהים. ניתן להשתמש בו בהספקים נמוכים כאשר מנת האנרגיה קטנה.

Flyback – מסקנות

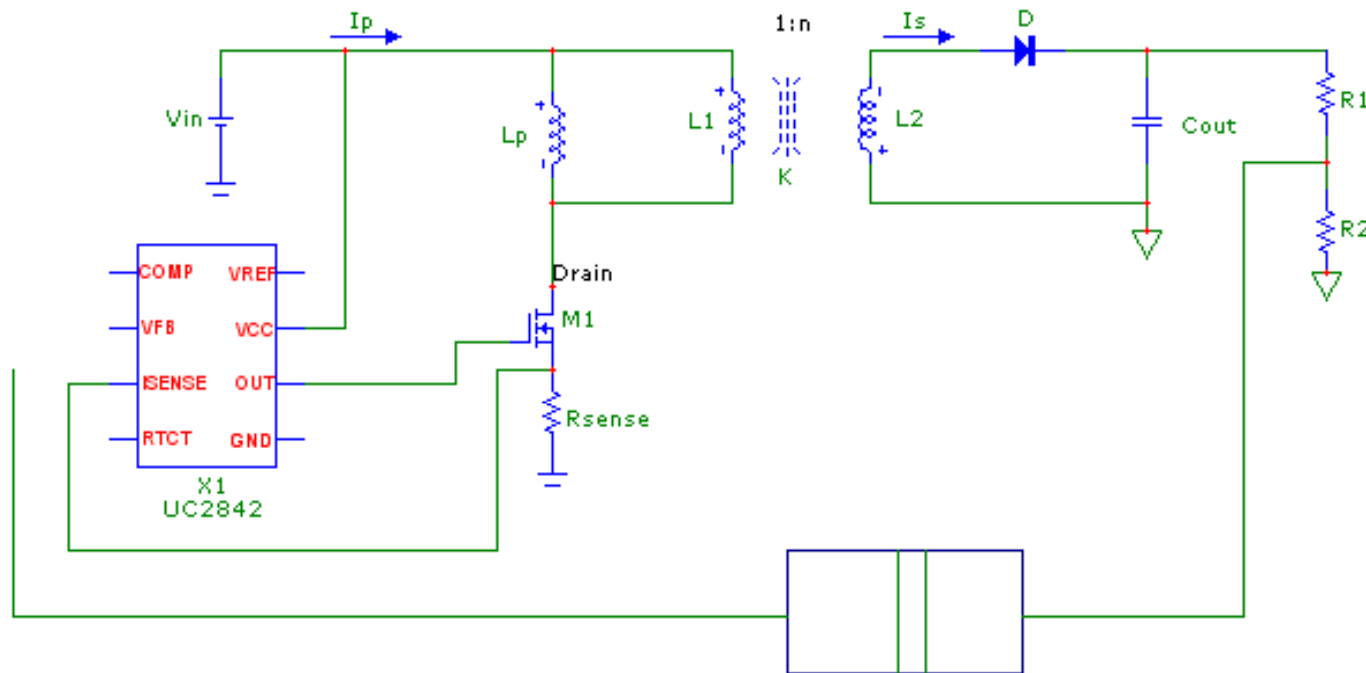
■ יתרונות

- טופולוגיה פשוטה, נוחה לבקרה. מתג בודד.
- ניתן להגיע ממתחי כניסה נמוכים למתחי יציאה גבוהים מאוד ללא הגבלות מלבד מאמצי מתח ותופעות פרזיטיות.

■ חסרונות

- נצילות נמוכה – Hard Switching, הפסדי פיזור בליבה.
- קושי בטעינה במתחי מוצא נמוכים. פיתרון Soft Start מאריך את זמן הטעינה.
- אין הגבלה אינהרנטית על מתח המוצא. חוג הבקרה הוא המגביל היחיד.
- מאמצי מתח גדולים על המתג והדיודה עם עליית מתח המוצא.

DCM – Flyback בקרת

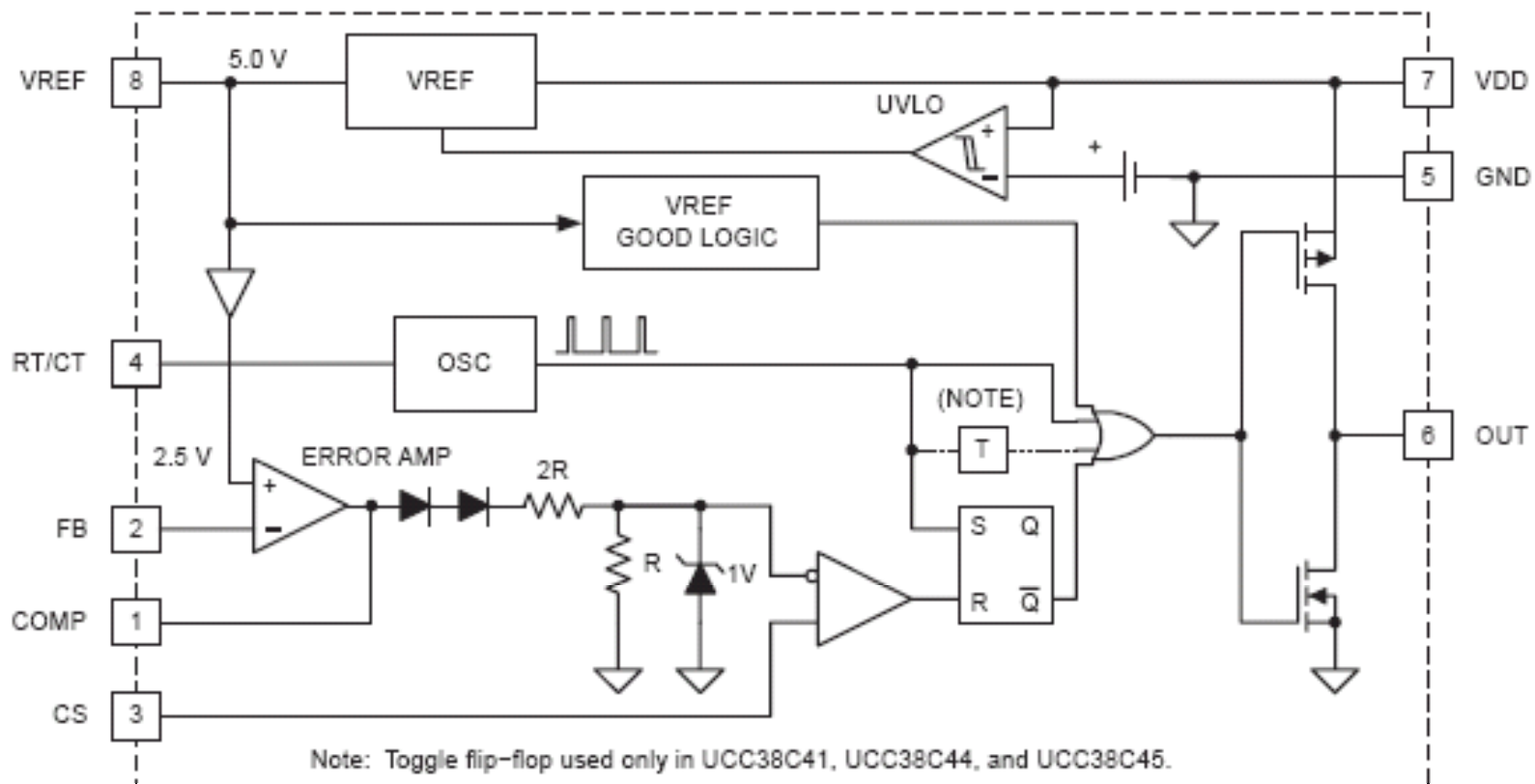


בקרת

- חישת זרם שיא בכל מחזור כדי לבקר את גודל מנת האנרגיה האגורה.
- בקרת מתח היעד במוצא.

UCC28C42 - PWM

של חברת TI



סיכום

- **נצילות**: מטענים רזוננטים נצילים יותר ממטען ה-flyback. flyback להספק נמוך. בעוד ממירים רזוננטים טובים גם להספק גבוה.
- **טעינה למתח גבוה**: לממיר flyback אין הגבלת מתח מובנית בטפולוגית הממיר בעוד לממירים רזוננטים מתח הכניסה מגביל.
- **מהירות הטעינה ועבודה ב-PRF**: ממירים רזוננטים טוענים מהר יותר עדיפים בעבודה ב-PRF עקב הנצילות הגבוהה.
- **מאמץ על רכיבים בפעולת הממיר**: קיים בכל הטופולוגיות.
- **קושי/ קלות בבקרת הממיר**: ward, מטען רזוננטי, flyback.



מקורות

- “A Capacitor-Charging Power Supply Using a Series-Resonant Topology, Constant On Time/Variable Frequency Control, and Zero-Current Switching”.
Aaron C. Lippincott and Robert M. Nelms.
- “A Capacitor Charging Power Supply Utilizing a Ward Converter”.
R. M. Nelms, Joe E. Schatz.
- “Simulation of Capacitor Charging Power Supplies”.
S. R. Newton R. M. Nelms
- “HIGH VOLTAGE RESONANT MODULAR CAPACITOR CHARGER SYSTEMS WITH ENERGY DOSAGE”
M. Wolf , A. Pokryvailo
- “CONTROL ALGORITHMS AND CIRCUIT DESIGNS FOR OPTIMALLY FLYBACKCHARGING AN ENERGY-STORAGE CAPACITOR (E.G., FOR A FLASH LAMP”
Nathan O. Sokal, Richard Red1