

# ס'כום מתי'ר DC-DC - נדב נהנס

## Course Information

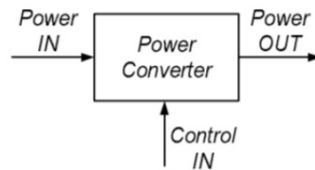
• אדמיניסטרציה:

- Lectures
- HW assignments
- Laboratory – Mandatory
- Grading: Final Exam – 75%, Lab – 25%
- Office Hours:
- Website: <http://www.ee.bgu.ac.il/~dcdc>

## Power Conversion

המת הספק

- AC-DC (Rectifier)
- DC-DC (Converter)
- DC-AC (Inverter)
- AC-AC (Cyclo-converter)



אפשר לחלק ל-4 סוגים:  
 מיישנים - מ-AC ל-DC  
 מתי'ר - מ-DC ל-DC  
 מהפכים - מ-DC ל-AC

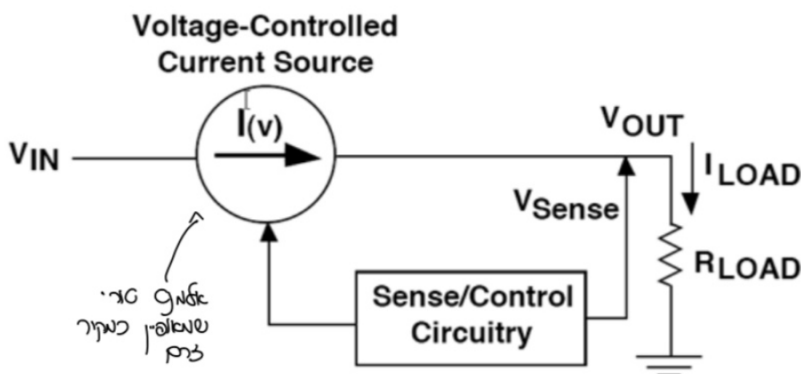
\* סקר הקורס שלנו

הוא מתי'ר DC-DC.

cyclo converter - מ-AC ל-AC (פחות נפוצים)

## Linear regulators

מיצבים ליניאריים

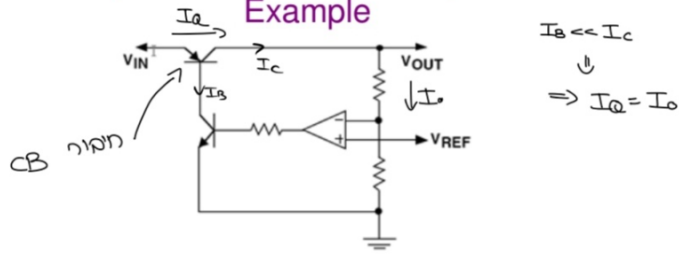


לפני מתי'ר DC-DC הן משתמשות במיציבים ליניאריים. צורת העבודה כאן היא שיש אלמנט אורי שמאופיין כמקור זרם כאשר הכניסה יש מתח כלשהו, ביצאה יש את העומס שצפויים לספק יש בקרה שזוממת את האות במנבא ומספקת את התיקון לאלמנט

האורי שיפול סלון את הפיל העתפים בין מה שיש בכניסה לכן מה שבאחסן צריך.

## The problem of linear regulation

### Example



- $V_{in} = 10V$
- $V_{out} = 5V$
- $I_{out} = 5A$
- Efficiency: 50%
- Power loss: 25W (Heat dissipation)

ישנה בעייתיות בסינוס המיושם במערכת  
לינארית נפוג בעצרת דוגמה:

כל הזרם של העומס זורם דרך  
הרכיב האנטי (האנטי) ע"י  $V_{in}$ .

נניח  $V_o = 5V$  ו  $V_{in} = 10V$  ואנו נוזים

אז משהו המנחה של האנטי הוא 5V.

$$I_{Q} \cdot V_{CE} = 25W \Leftarrow V_o \cdot I_o = 25W \Leftarrow I_o = 5A$$

קבלנו 50% נזילות. הבעיה היא שאם

הנזילות אלא שמאקזים 25W של הספק הרכיב האנטי ועם יתחמם מאוד.  
כן שמקום משה קלם נצטרך מעט גזולה רך כפי לעבר את החום הנ"ע!  
נצרי עתה פתרון לבעיה זו (מניי DC-DC).

## Switch-mode converters

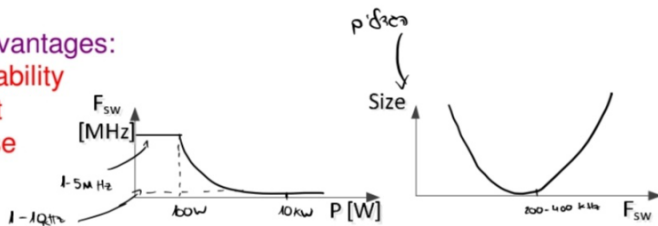
- Reactive elements
- on/off switches

### Advantages:

- High efficiency
- Small size

### Disadvantages:

- Reliability
- Cost
- Noise



## ממירים ממנתיים

זו משה שמכילה בתוכה רכיבים היאקטיביים

(סלילים וקבלים) ומעריך של מתחים (אנטי או

אנטי ודיוזות) שאפשר לשלוט עליהם.

דיוזות לעבד הן לא מעט ממנתי רך

השילוב עם אנטי.

באופן אידיאלי: ON  $\Rightarrow R = 0$  OFF  $\Rightarrow R = \infty$

רכיבים היאקטיביים במצב האידיאלי שלהם לא מבזבזים אנרגיה, כך שבאופן תאורטי

אם נוכל לעגור משה הבנויה רך מתמשים של ON/OFF, סלילים וקבלים הנזילות

תפיה 100% וחלוד מכך לא יהיה על הספק לעבר. כמובן מכך ניתן לעמשה באופן

פיזי בצורה קלם יותר. ישנם גם חסרונות לעמשה והן:

(1) גמינות נמוכה יותר - ככל שיש יותר רכיבים במעט באופן אידיאלי האמיתית יותר.

(2) מחיר - היחס לעמשים לינאריים מחיר של מעט כעט יקר יותר.

(3) רעש - בעקבות העייתוך הזרם נפסק  $\Leftarrow$  רעש מיתוך  $\Leftarrow$  רעש במעט (ישנם תנאים שבהם רעש מיתוך שיסביר במעט)

במעט האלה אנחנו נצרי לעמוד בעצרת זכורה על הניתן כי בכל שאלים בתצור באופן

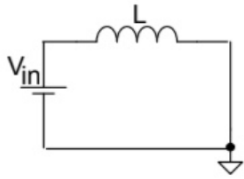
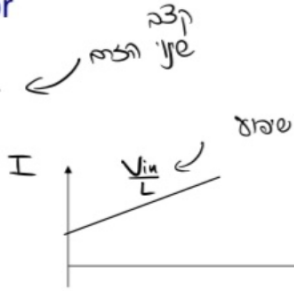
פואנצילי נוכל לעקטן את העומדים של הרכיבים.

⊗ כאשר סלילים בהספק נצרי בתצור.

# PWM converters

## Inductor

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

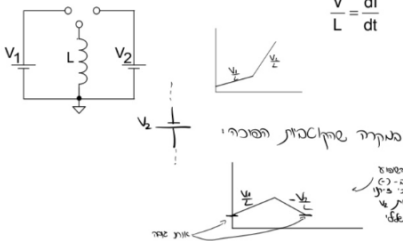


# ממירי PWM

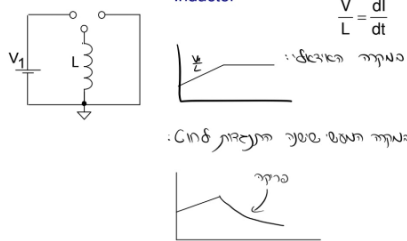
המשטח החשוב ביותר באלקטרוניקה  
היסטק: משוואת הסליל

אנו מניחים בממירי PWM ש-V הוא קבוע (המתח של הסליל בקצו הפעול הוא קבוע) ולכן שיפוע הזרם קבוע (יש לי עיגוליות).

## PWM converters Inductor



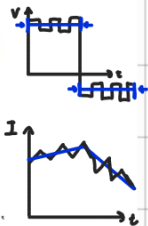
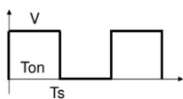
## PWM converters Inductor



קבוצות אלו כן ניתן לראות אין השיפוע של הזרם של הסליל משתנה בעקבות המיתר והמתח אלו הוא מחובר.

## PWM converters Inductor average voltage

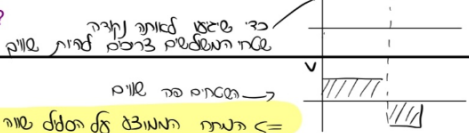
Still valid:  $\bar{V} = \frac{d\bar{I}}{dt}$



The average voltage across the inductor must be zero

$$\bar{V}_L = 0$$

Why???



למשל הסליל תקנה גם לערכים ממוצעים. הנונה

היא שאם תקנה אינטרוול של המתח ונמצא אותו.

האינטרוול של הזרם יהיה גם הממוצע של הזרם

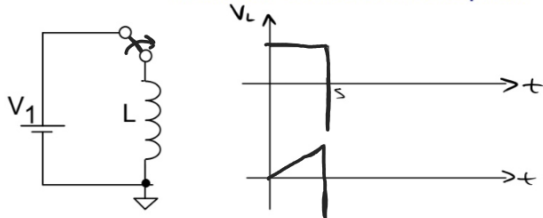
התקור. כלומר ממשוואה זו אנו מקבלים כי המתח

הממוצע של הסליל במחצית שלם במעבר יוצר כאשר

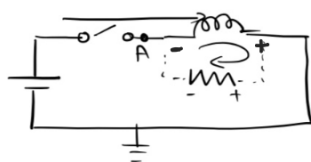
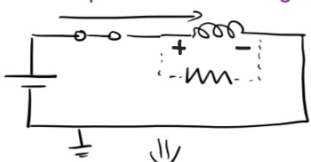
מתחילים בקו' ומסיימים בקו' הייב להיות יציב.

⊗ קשה עזובי זאת נשמע כבר העיו!

## PWM converters Inductor Current Interruption



Polarity at the interruption instance: Imaginary resistor method



$$s = \frac{R_{imag}}{L}$$

מה קורה כאשר מחברים סליל לעקור

והתאים מנתנים אותו?

קצב הפיתוק של הסליל  $\tau = \frac{L}{R}$  וכן כאשר

מנתנים את הסליל  $\Leftarrow$  אינדיקס אינסופי  $\Leftarrow$  זמן

כירוק אפסי (עם הנפח במתח ובזרם).

בהפסקת הזרם מהי קואביות הסליל?

נסים נגד דמיוני אינסופי עם המצב MS

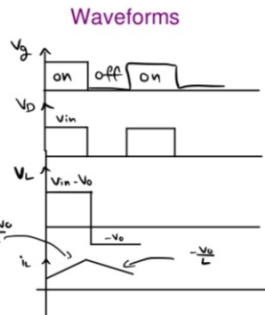
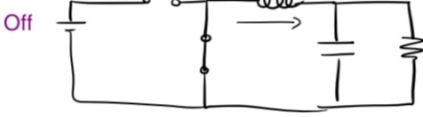
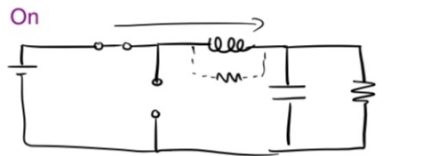
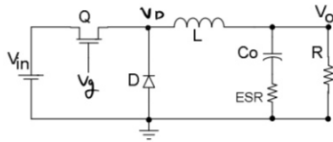
והרע הניתוק (מספר OFF) הזרם ממשיך

לזרם הזעיר (מזיפור הזרם בסליל) ענדה

הדימיוני ולכן הקואביות תתהפך.

# Buck ממיר

## Operation of Buck converter



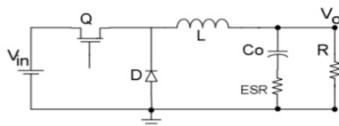
לכו ממיר מגריד מתנה.

- מתג מוליק  $\Leftarrow V_o = V_{in}$

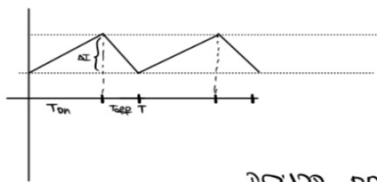
- מתג לא מוליק  $\Leftarrow V_o = 0$

ביצע הניתוק הקואביות אל הסליל תפיהך והמתנה ייפול ויפול נ-ה<sub>in</sub> סך לעתה שליו. מספיק שבדיוציה תפתח וקלא מצב OFF. הצבה בסעיל אומנם סלה ויורק אבל הוא סלה מנק' וחוצר ענק'.

## Operation of Buck converter Voltage transfer function - CCM $\Delta I$ method



$T_s = T_{on} + T_{off}$   
 $T_s$  - מחזור מיתוח



⊕ צבאר ערהצויא סך מתח אשר קמן מתחם התנסיה.

זכרם הסעיל מתוח מנק' וחוצר ענק' שהיא לא אפס.

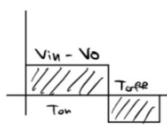
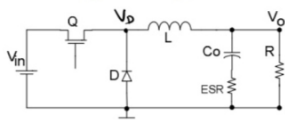
מהו היחס  $V_o/V_{in}$ ? ישנן 2 שיטות עצמית אל השאלה

(1) שיטת  $\Delta I$ : נסתיר אל הצרם בסעיל, ה-  $\Delta I$  משותף לעשיל הגדול והמשולש הקטן. אמת יודעים להשיב את  $\Delta I$ :  $\Delta I = \frac{V_{in} - V_o}{L} \cdot T_{on} = \frac{V_o}{L} \cdot T_{off}$

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

$D_{on}$  - קבוע המתזיר (Duty Cycle) - היחס בין זמן ההולכה של המתג לצמן המחזור.

## Operation of Buck converter Voltage transfer function - CCM average voltage method

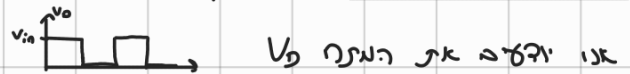


$(V_{in} - V_o)T_{on} - V_o T_{off} = 0$   
 $\Rightarrow \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{T_{on}}{T_{on} + T_{off}} = D_{on}$

(2) שיטת וולט-שניה: שיטה זו מתייחסת לצבין שהמתנה המעוצע אל הסליל צבין להיות שווה לצבס.

סאה התלכנים צבנים להיות שווים

(3) שיטה אינאליברית: תצורה רק עממיר Buck! אנו יודעים את המתנה  $V_L$  ולכן המתנה יודעים את  $\bar{V}_L = 0$  ומכיון  $\bar{V}_L = V_{in} \cdot D_{on}$  קבל  $V_{in} \cdot D_{on} = \bar{V}_L = 0$

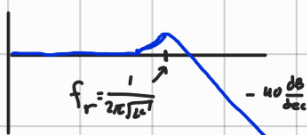
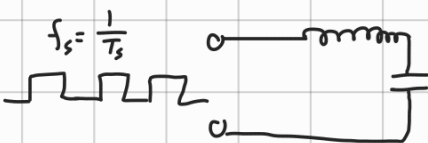


$V_{in} \cdot D_{on} = \bar{V}_L = 0$  קבל  $\bar{V}_L = 0$  ומכיון  $\bar{V}_L = V_{in} \cdot D_{on}$

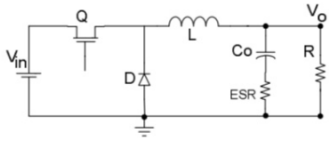
נשים לב כי יש לנו סעיל וקלא  $\Leftarrow$  כולר! בכנסה יש ערנו

אל מרחב וזמן אם  $f_s \ll f_c$  במוצא יהיה רק DC כי

ל-ה AC יסונ.

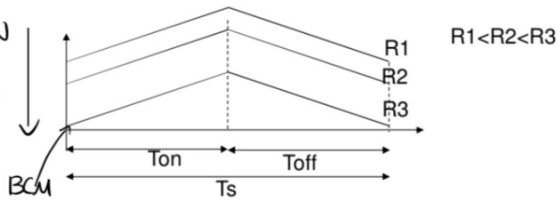


## Operation of Buck converter DCM



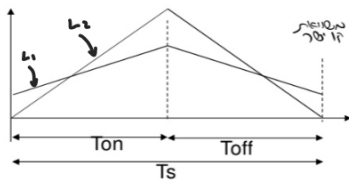
$$\frac{V_o}{V_{in}} = D$$

מגדלים התנצות  
↓  
סחוקרים מוזכר



## Operation of Buck converter Boundary mode - Lmin

$$L_1 > L_2$$



$$I_{pk} = 0 + \frac{V_o}{L} T_{off}$$

$$I_{pk} = 2 I_{av}$$

ΔI במצב הסוד. →  $I_{pk} = \frac{V_o}{L_{min}} T_{off} = 2 I_{av}$

ערך המסלל המנימל שיהיה  
לאורך זמן נקוד סבויק המסל  
 $\frac{V_o}{V_{in}} = D_{cm}$  . CCM

$$L_{min} = \frac{V_o D_{off}}{2 I_{av} f_s}$$

## Buck converter Design Example

- $V_{in} = 10V$  ;  $V_{out} = 5V$  ;  $I_{out} = 5A$  ;  $f_s = 100kHz \Rightarrow T_s = 10\mu s$
- Calculate  $L_{min}$

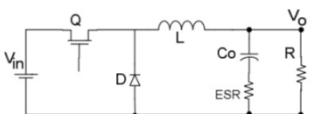
$$I_{pk} = \frac{V_o}{L} \cdot T_{off} = 2 I_{av} = 2 I_o$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{5}{10} = 0.5 = D$$

$$T_{off} = T_s \cdot 0.5 = 5\mu s$$

$$L_{min} = \frac{V_o \cdot T_{off}}{2 I_o} = \frac{5 \cdot 5 \cdot 10^{-6}}{10} = 2.5\mu H$$

## Operation of Buck converter DCM



שיעור  $\frac{\Delta I}{I_o}$ :  $I_{pk} = \frac{V_{in} - V_o}{L} T_{on} = \frac{V_o}{L} T_{off}'$

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

$$I_{av} = \frac{1}{T_s} \left( \frac{I_{pk}(T_{on} + T_{off}')}{2} \right) = \frac{V_o}{R} = I_o$$

בהיחס הממוצע  
זוכר מוזכר

היחס  
של הממוצע  
המחזור

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{R D_{on}^2 T_s}{4L} \left( \sqrt{1 + \frac{8L}{R D_{on}^2 T_s}} - 1 \right)$$

התנסות סה"כ

## מסדרי למצב עבודה DCM (BCM)

אנחנו בתינסורת ע"א תלוייה במסלל  
קל"א עממס. סד"א לתי ז"ה נכ"ן?

ז"ה נכ"ן סד"א למצב שהזרים מתחיל ונאמר  
באפס. למצב הז"ה קוראים BCM.

סד"א לקיודיה ז"א מלמס תקל"א אחר"י נכ"ן  
ז"א בחוק"ל מלמס  $T_{off}$  הזרים יהיה אפס.

עמ"א הזכ"א קשרי לעבתייה מסל"ל.

כ"א שהסל"ל זק"א יותר, הזרים הממוצע  
נשאר אותו הדבר אכ"א השינוע יהיה  
יותר מת"ן (כ"אן נתי"ן להאות ז"א ל"א)

## בזמנה מספרית להישק $L_{min}$ :

סב"ר הנענים כ"א"א כ"א ע"קן של סמל"ל מסל  
25μH נ"ה"ה ב-CCM עם זרים ממוצע ז"ה  
אכ"א שינוע זרים מת"ן יותר!

כאשר כ"א"א כ"א עממס

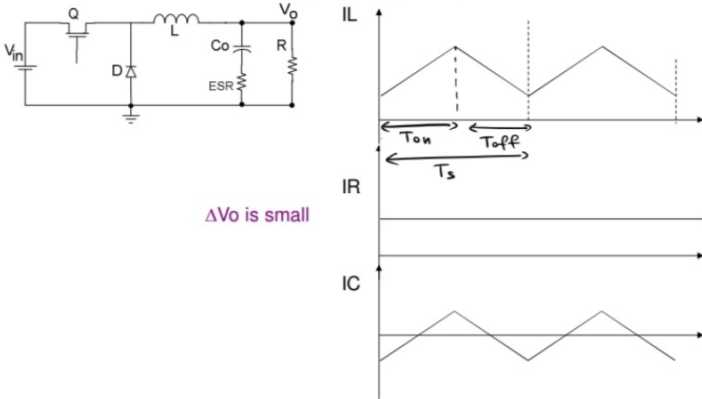
בתנאים הל"א"א אנו נמצאים במצב DCM.  
במצב ז"ה תינסורת קצ"ת יותר מורכבת  
מכ"אן שז"ר"ן לק"ת בהשכ"ן את המצב  
הנוסל"ל (שה"א הממוצע זרים מסל"ל ש"ה ז"אס)

במצב CCM הזרים הממוצע בק"ק

באמצע הזק"ל \* זממ"ת מצב DCM

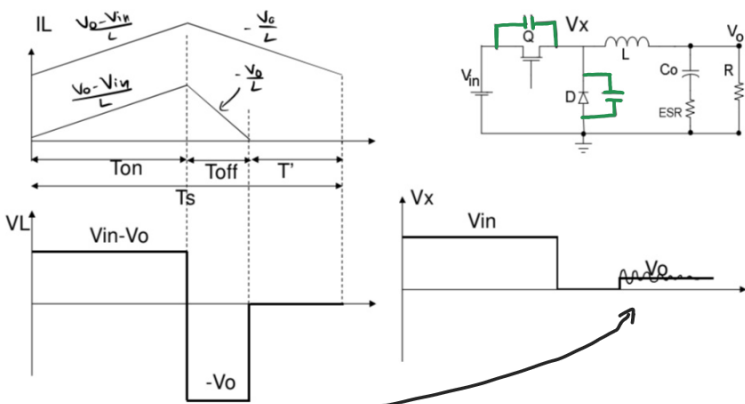
ז"א הזרים הממוצע מתתי לאמצע \*

## Operation of Buck converter Output capacitor



כאן ניתן לראות אין מתוך זרם הסליל טפס של הסוגים הרים הממוצע (מכיוון שהקטל לא מקבל DC) ועל הקבל ניכר זרם ה-AC של הסליל.

## DCM – rev.

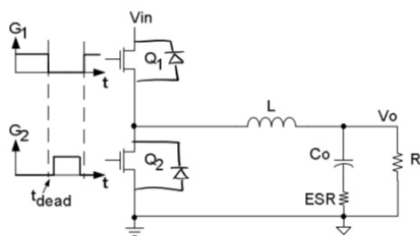


מה קורה בזמן T' במצב DCM?

כאשר הטרנז' מוליך  $V_x = V_{in}$   
 כאשר הדיודה מוליכה  $V_x = 0$   
 אבל כאשר מתחילים לסוף זמן המעבר (זמן T') מהימצע שהטרנס הססיק באופן אידיאלי המתח ב- $V_x$  יהיה  $V_o$ .  
 ארנ' וצורה בעתק  $\Leftarrow$  הממוצע ב- $V_x$  יהיה  $V_o$ .

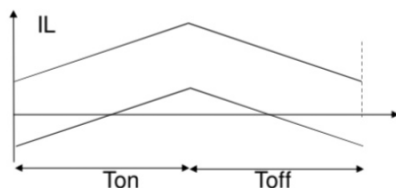
באופן מדעי הדיודה והטרנז' הם לא עקב אידיאלי. הפלל הקיבוליים הרגילים ולכן המתח ב- $V_x$  יראה כך ויק באופן ממוצע קבל  $V_o = \bar{V}_x$ . בנוסף נשים עזר כי ב- DCM השימוש  $-\frac{V_o}{L}$  גדול יותר.

## Synchronous rectifier



המתיר בצורה הלו תמיד ב-CCM!

No DCM!



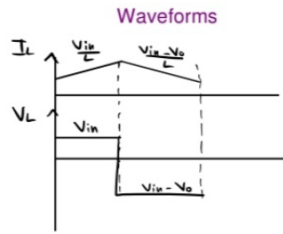
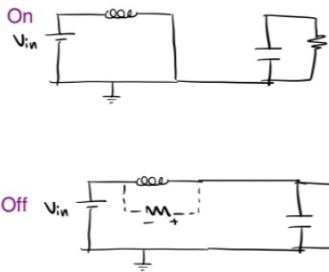
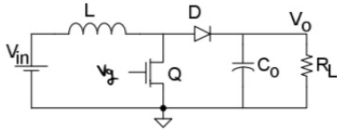
## מייסר סינכרוני

ארכ' במקום דיודה.  
 במקרה של דיודה - כאשר הזרם בה התאפס היא הפסיקה לחלוט (לא היה מה ש'חפיק' אותה יותר.  
 במקרה של ארנ' - הוא מוליך מתוך פקודת בקרה. זה לא משנה שהוא מוליך באופן ארנ'.

כלומר הוא ימשיך לחלוט באינה צורה הכל זרם (לא יהיה DCM כמו קודם), הוא תמיד צורה ב-CCM  $\Leftarrow$  אין מצב DCM!  
 (\*) אופט כיבוד הולכה  $\Leftarrow$  יש זרם שלילי ולא DCM.

# ממיר Boost

## Operation of Boost converter



$$\frac{V_{in}}{L} \cdot T_{on} = \frac{V_{in} - V_0}{L} \cdot T_{off}$$

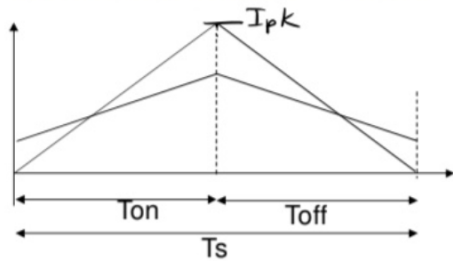
$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{T_{on} - T_{off}}{T_{off}} = \frac{1}{D_{off}} = \frac{1}{1 - D_{on}}$$

(1) שיטת  $\Delta I$ :

$$V_{in} \cdot \frac{T_{on}}{T_s} + \frac{(V_{in} - V_0) T_{off}}{T_s} = 0 \Rightarrow \frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1}{1 - D_{on}}$$

(2) שיטת וולט שניה:

## Operation of Boost converter Boundary mode - Lmin



$$I_{pk} = \frac{V_{in}}{L_{min}} T_{on} = 2I_{av}$$

$$L_{min} = \frac{V_{in} D_{on}}{2I_{av} f_s}$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_D &= \frac{V_0}{R} \\ \bar{I}_D &= \bar{I}_L \cdot D_{off} \\ \bar{I}_{av} &= \frac{\bar{I}_D}{D_{off}} \end{aligned}$$

זה כאן אנו נקדיף את נקד המוצא

נניח אם מצד BCM

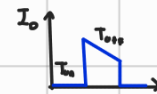
מציאת  $L_{min}$  עבור BCM מתקדם

בצורה זוהי צורה של Buck-על הנוסחה

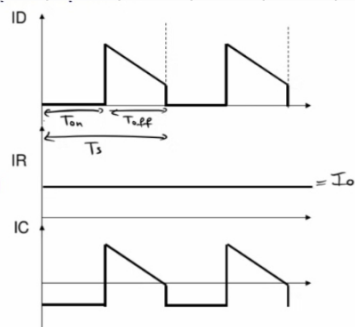
נשים על כי ה-Boost נתן  $I_{av}$

הוא דיוקא הזרם בכניסה.

הזרם במוצא הינו הזרם של הדיוורה



לים דיוורה:



הקבל לא מקבל את ה-DC  $I_0 = I_R$

הקבל מקבל את ה-AC

נשים על שצריך להכניח שקבוע הזמן  $\tau = RC$  הוא כנ"ל שלטא

אפשר לקבל להתפרק בזמן  $T_{off}$   $\Leftarrow$  סדר קטן מספיק גדול.

## Boost converter Design Example

- $V_{in} = 12V$  ;  $V_{out} = 48V$  ;  $I_{out} = 1A$  ;  $f_s = 50kHz$
- Calculate  $L$  for  $\Delta I = 0.1 I_{av}$

$$I_0 = \bar{I}_D = \bar{I}_L \cdot D_{off}$$

$$\bar{I}_L = 4A \Rightarrow \Delta I = 0.4A$$

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

$$\Rightarrow L = \frac{V_{in} \cdot T_{on}}{\Delta I}$$

$$\frac{V_0}{V_{in}} = \frac{1}{D_{off}} = \frac{12}{48} = 0.25$$

$$D_{on} = 0.75$$

קולטא מספרית להיסוד L

עבור  $\Delta I$  ספציפי.

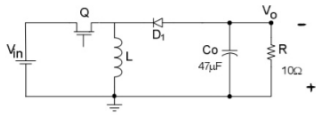
# מגירת Buck-Boost

גם מסלה מתח יזם ומגריד מתח.

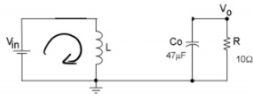
(\*) מגיר זכ לא רק מסלה ומגריד מתח אלא

עסלכ זאק גס בקזאכית הפוכה (זג דמיניי).

## Operation of Buck-Boost converter



On

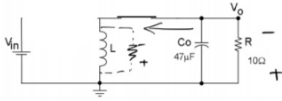


Waveforms

$$V_{in} \cdot T_{on} - V_o \cdot T_{off} = 0$$

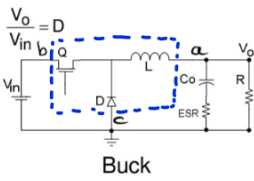
$$\frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{T_{on}}{T_{off}} = -\frac{D}{1-D}$$

Off

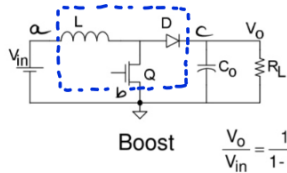


נתיח ספוי שיאך וולל שניה :  
 אכ  $\frac{1}{2} < D < \frac{1}{2}$  קל הירדת מתח.  
 אכ  $\frac{1}{2} > D > \frac{1}{2}$  קל הלאת מתח.

## Types of PWM converters Basic

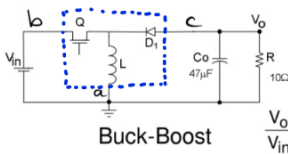


Buck



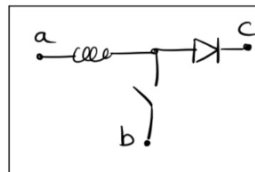
Boost

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



Buck-Boost

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



## סיכום - אפולוזיות בסיסיות

שים לב כי כל האפולוזיות יש סליל  
 ארנ ודיוקה שמחברים בק' מסוימת יתז  
 ורק האור'נלציה משנה את אופן הפעולה  
 של במגיר.

a ב-  $V_{in}$  boost

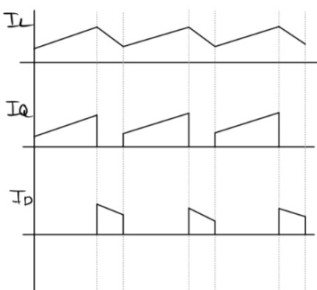
a ב-  $V_{out}$  buck

a באקמה buck-boost

(\*) המתחים נמוכה כבר לא משתמשים בדיוק אלה כמד ארנ, ואז מסל  
 המנה סליו יכל להיות באופן שמסתני נמוק יותר משל הדיוקה. הארנזיסארם  
 יעבדו בזנרה משלמה, כאשר עובדים כק המגיר קרא סינכרון.

## Input and Output Currents

השלשת התזירות:

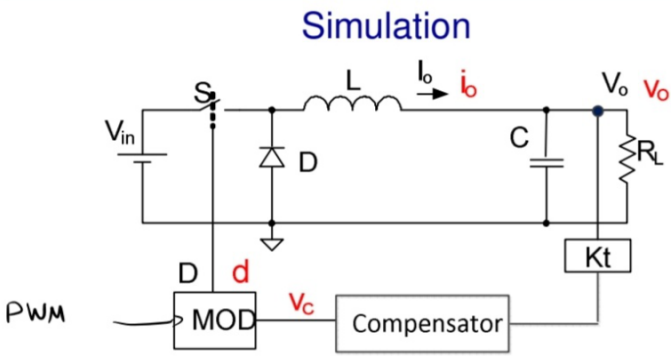


(\*) צורות זרמט:

Buck - המוצא הוא רציף, הכנסה לא רציפה  
 Boost - הכנסה רציפה, המוצא לא רציף (לומר נכאיק סטן חזק ית)  
 Buck-Boost - גם כנסה וזם מוצא לא רציפם (הכ)

למה זכ חשוב? כי הדרישות לזג. הסנין (במחזק עזדי קל  
 המוצא) שועת מאחד לשני, העיקר בזלל צורת האדווה.

# סימולציה ב- spice

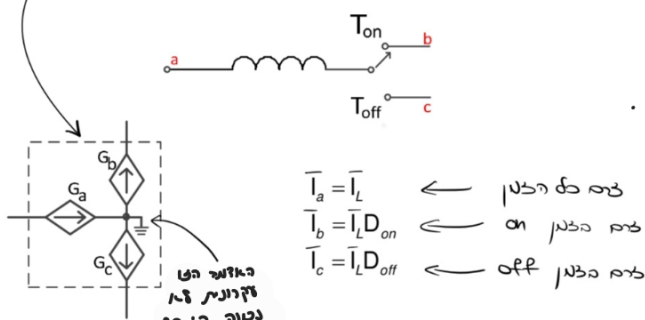


- Cycle-by-cycle Vs. Average simulation
- Objective: Create a continuous model

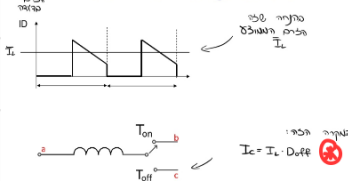
כדי להפוך ממודל דיסקרטי לרציף, צריך להשתמש במודל הממוצע. צריך לעבוד עם קבוצת של היסודות, שהיא 'עאר' יציבה. מודלים אלה בנויים ומייצגים את תיקון ה'ע' בקנה המידה (PMP) מוציא בולטים כגון שנקבה המוצא את המענה הרצוי. (משנה את צגן החלפה של המענה). ניתן לבחון מערכת כזאת בסביבת סימולציה:

- 1) Cycle by Cycle - ניקח זרמי, גידודי, אמיטרים ונמנע אותם באופן הרצוי. נבאר כי פרט וברר הסימולציה. מכיוון שבמאמרים אחרים הרעיון הסימולציה (יתרון) זמן הריצה מאוד ארוך (חיסרון).
- 2) סימולציה ממוצעת - עבור יציבות, אופן פעולה שקרוב מדי להכנס לפרט. המיתוך. מייצג מודל שממאיר התנהגות הממוצעת של המערכת - סימולציה זו מהירה יותר!

## Switched Inductor Model (SIM) Continuous model



The SIM with Average Current



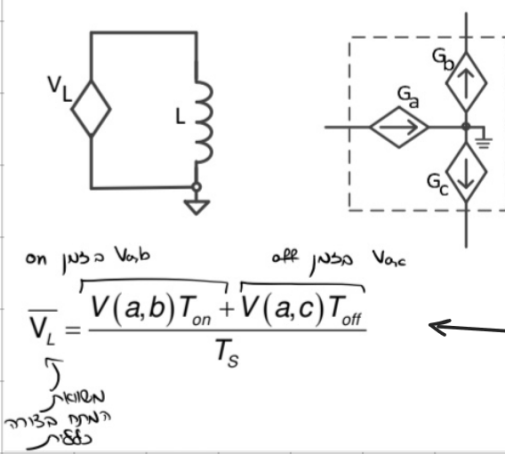
המטרה שלנו היא לעשות מודל שאין בו ק"א אירציות ואז יוכלו לחבר הסימולציה בצורה חובבנית. דבר הסימולציות נסתכלים על תנאי בסיסי.

⊗ בהנחה: אם יש נסחה יש מקל לסימולציה!

ניתן לתאר את המעלה באמצעות 3 מקורות זרם =

⊖ זרם נכון רק ב- Doff כי רק אז יש הולכה אז לוקחים את הזרם הממוצע בסילון ובסילום ב- Doff

## Auxiliary Circuit to Create IL

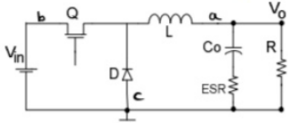


כעת כאשר יש לנו את שלושת המקורות הבסיסיים הם למצוא את IL. עכשיו אנו מנסים להשתמש:

- בזמן on הסילון מחובר a-b
- בזמן off הסילון מחובר a-c

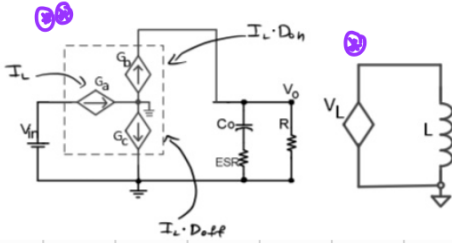
דבר נוסף לבדוק את משוואת המענה הממוצע של הסילון בצורה כללית כגון

## Complete Average Model



Formal method

$$V_L = \frac{(V_o - V_{in})T_{on} + V_o \cdot T_{off}}{T_s}$$



## בואנה של אמיר אכא

בשיטה הפורמלית - במקום התא הבסיסי  
 שמים 3 מקורות זרם. כאשר  $I_L$   
 תלוי במעלה ודמעה \* מקור התנה  
 $V_L$  תלוי במעלה \* (לוגר תלויים אוק)  
 בסני. הימנוליה יודע עפתיי זאני!

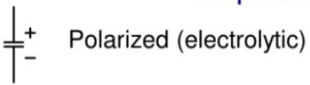
## Capacitors

- Capacitor types
- Output voltage ripple
- Real capacitor
  - Parallel connection
  - Load step

## קבלים

נהל 8-2 סוגים:

### Capacitor types



Polarized (electrolytic)

Materials:

Tantalum  
Aluminum



Non Polarized  
 $C < 10\mu F$

Paper  
Plastic  
Teflon  
Polypropylene  
Minerals  
Mica

1) קבלים עם קוטביות (אלקטרוליטיים) - הם בערך  
 מקלים סדן קיבול גבוה. החיסרון העיקרי  
 שלהם הוא שהעמידות שלהם בטמפ' לא  
 כל כך טובה.

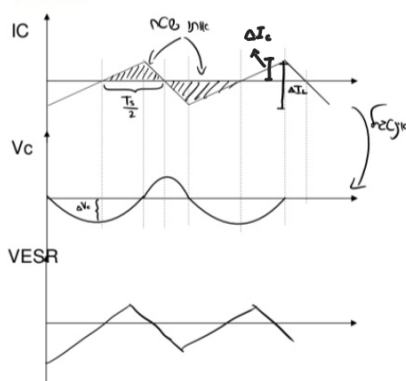
2) קבלים קרמיים (לא קוטביות) - סדר גודל של סדן

קיבול נמוך יותר. קבלים אלה יכולים לעמוד בטמפ' גבוהה יחסית לקבלים  
 אלקטרוליטיים. מאפי"ן ההפסדים שלהם קפ"ת יותר טובים.  
 ככל שקבל גדול יותר כך ההתנגדות שלו קטנה יותר.

### Output voltage ripple

Buck

$\frac{1}{SC} \ll T_s$   
 התנה פרימור



$$\Delta V_C = \frac{\Delta Q}{C}$$

$$\Delta Q = \frac{\Delta I_L T_s}{2} \cdot \frac{1}{2}$$

$$\Delta V_C = \frac{\Delta I_L}{8Cf_s}$$

המשולש  
החצי

המשולש

קצוות  
המתח

הקודם

$$\Delta V_{ESR} = \Delta I_L R_{ESR}$$

$$\Delta V_{tot} = \Delta V_C + \Delta V_{ESR}$$

### אדוות מתח מופא

אכא: ניב עתיד את אדוות המתח של  
 הספלי. עק מבצעים אינטגרל של זרם הקבל  
 ומהמשוד \* נקט את אדוות מתח הקבל. בנוסף  
 לקבל מעש"י יש התנגדות סאתר נמשל עקב  $R_{ESR}$   
 שמוסג סוד עאדוות המתח ומתוש ע" \* \*  
 בקורס כאשר נחשב את סך אדוות המתח  
 ניקח את ה-  $\Delta V_C + \Delta V_{ESR}$  והוא שראווה היא

# Boost

## Output voltage ripple

$$\Delta V_c = \frac{I_o}{C} T_{on} \text{ (on time)}$$

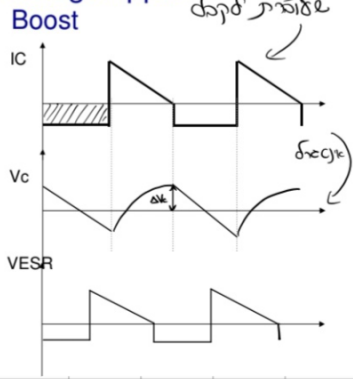
$$(\Delta Q = \frac{I_o T_{on}}{X})$$

$$\Delta V_c = \frac{V_o}{2RC} DT_s$$

+

$$\Delta V_{ESR} = \Delta I D R_{ESR}$$

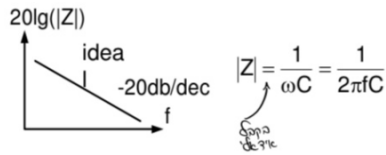
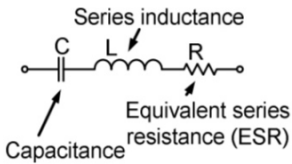
$$= \Delta V_{\%}$$



הגדלה של Boost יש לנו קינדה במובן ולכן הנדסה של הקבל נבנה כך החישוב נעשה בצורה דומה לעקרה של Buck.

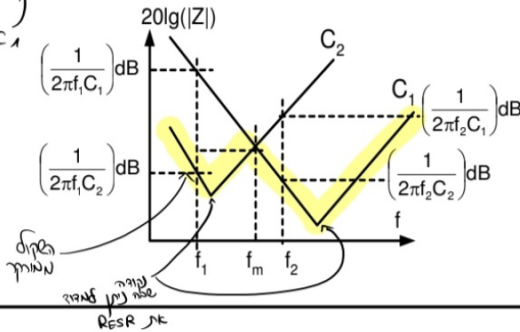
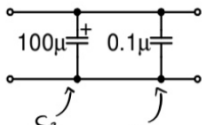
## קבל מעשי

### Real capacitor



לקבל מעשי יש גם השפאות וזה התנגדות אנטית, וכל אחד מהם משפיע בתחום תדירות אחר. האיטר התדירים הנמוכים נקבל תגובה של קבל ככה שנכסה בתדר תהיה תחודה בין הקבל לסליל ואם נמשך עלות הקבל יתנה כסליל. בנוסף, כל שקבל יותר גדול יש לו השפאות יותר גדולה.

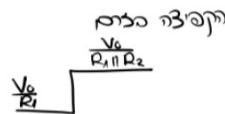
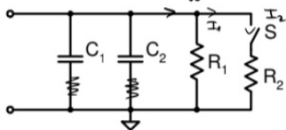
### Parallel connection



נהוג מאוד לשים קבל גדול במובן ובמקביל אליו קבל יחסית קטן. מהסדר שאנחנו משתמשים כן באימפדנס השקול שלהם. משתמשים כן בסדר באימפדנס הקטן יותר (לפי התדירות) כאשר עושים את החיבור הזה. האימפדנס השקול מסומן בצהוב.

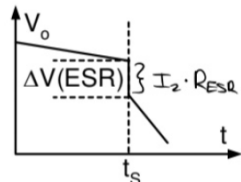
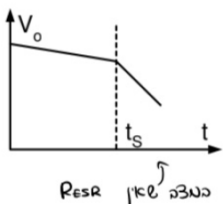
## Load Step

### Load step



Ideal response

Practical response



משמעות Load Step הנה שברגע סגירת הנתך S נקדם קפיצה.

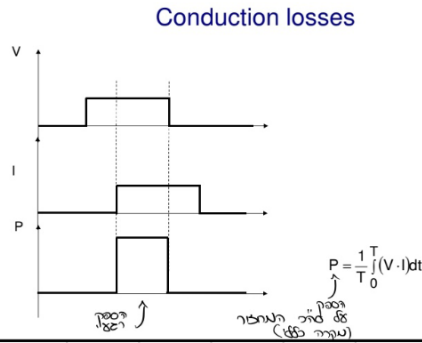
כאשר מבצעים Load Step במצב

- אידיאלי נקבל שינוי בתחם כפי שמצב כ-\*
- אבל כאשר עוקחים בהסבין את ResR נקבל קפיצה בתחם כפי שניתן לראות כאן \*

הקפיצה הרגעית הזו לא נמצא במאמר אלא מקבלים (כי למעשה עוקה הכרה זמן

# Losses of SMPS

- Conduction losses
  - RMS current
  - Resistor
  - MOSFET
  - ESR
  - Average current
  - Diode
  - IGBT
- Switching losses
  - $CV^2$
- Heat conduction



# הפסדים של אמירים ממתחים

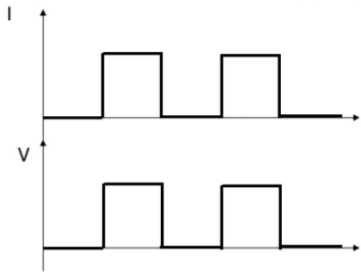
ישנם 2 סוגים: הפסד הולכה והפסד מתח.

## הפסד הולכה

הספק זהבטיים צרי הספק הממש.

\*הפסד הולכה -  $P_{cond}$

## Conduction losses Resistor



Power losses are function of RMS current Why???

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T (V \cdot I) dt$$

Fourier series:

$$V = V_{dc} + \sum V_n \cos(n\omega t)$$

$$I = I_{dc} + \sum I_n \cos(n\omega t)$$

התנה והצבם יהיו באצף, המכונה

סוהים היא צאט שיתקיים לנו הספק ממש.

אם נברק לאזר בנרייה ונדסה אינלצף כאשר

מזמן נקל אפס.

בנזק ההספק שבה עידי ביטוי הוא ממש.

נחמד הספק עבוי פל ההרמוניות שבאותם

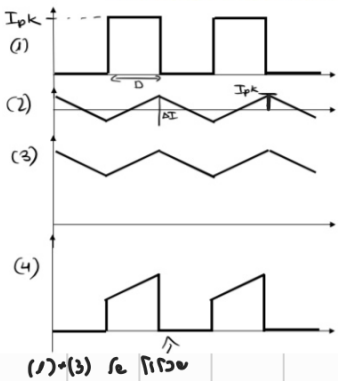
תנודים (אלו שמו ייצא לנו אפס):

הוא RMS

$$P = \sqrt{V_{dc} I_{dc} + I_1 V_1 + I_2 V_2 + \dots}$$

## Conduction losses

### RMS calculation of typical waveform



$$I_{rms} = I_{pk} \sqrt{D}$$

$$I_{rms} = \frac{I_{pk}}{\sqrt{3}}$$

$$I_{rms} = \sqrt{I_{av}^2 + \left(\frac{\Delta I}{2\sqrt{3}}\right)^2}$$

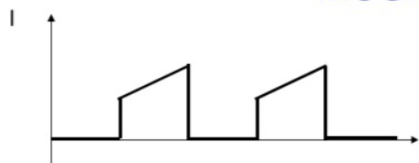
$$I_{rms} = \sqrt{D} \sqrt{I_{av}^2 + \left(\frac{\Delta I}{2\sqrt{3}}\right)^2}$$

הימד צורות גליות עיקריות:

$$I_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f^2(t) dt}$$

באופן פולי -

## Conduction losses MOSFET



המטריה שלן צורת הברם ה MOSFET תמיד נראית כך.

$$P_{RDS\_ON} = D \left( I_{av}^2 + \left(\frac{\Delta I}{2\sqrt{3}}\right)^2 \right) R_{DS\_ON}$$

הפסדים MOSFET ה חושב

\*הפסד הולכה - MOSFET:

אלו משתמשים ה-MOSFET ברנויה

ויקילצין (on/off) כאשר הוא חס

יש לנו התנגדות אכרית:  $R_{DS\_on}$

## Conduction losses ESR



How to calculate ESR losses?  
Topology dependent

$$X = \begin{cases} 1 & \text{Buck} \\ D_{on} & \text{Boost} \\ D_{off} & \text{B-B} \end{cases}$$

$$P_{ESR} = X \cdot \left( I_{avg}^2 + \left( \frac{\Delta I}{2\sqrt{3}} \right)^2 \right) ESR$$

תקון של מור כי קול עם מקול צגם DC

## ⊗ ההסד' הולכה - ESR :

זה ההסד' הסד' התינגדות האנליז

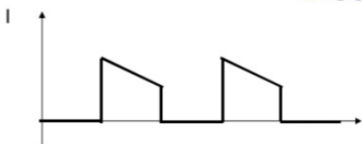
$$P_{ESR} = I_{RMS}^2 \cdot R_{ESR}$$

אם יודעים כי כולמי ההסד' תלוי בצורת הצגם

נקול  $I_{RMS}$  שונה עם מצד (Buck, Boost, ...)

ולכן התיסוק יעשה כך

## Conduction losses Diode



צקום הולכה של דיודה:



נקול למדע כמו מקור מתח אולת מתח צבור על צגם

Conducting diode is a voltage source

Power dissipation is related to the average current

$$P_D = I_{av} V_D$$

$$I_{av} = \overline{I_L} \cdot D_{off}$$

## ⊗ ההסד' הולכה - דיודה :

עד עכשו התינגדות בהסד'ים של התינגדות ( $R_{ESR}, R_{on}$ )

אין מהסד'ים בהסד'ים של דיודה???

מכיוון שבדיודה יש עלו מקור מתח  $V_D$  (מתח עם)

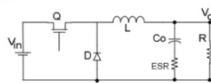
הצגם היחיד שישיע על הצבוב ההסד' הוא צגם

$$I_{av} \leftarrow DC$$

$$P_D = I_{D,av} \cdot V_D$$

על ההסד' הדיודה הם:

## Conduction losses Example



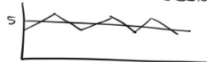
• Buck converter

•  $V_{in} = 10V$ ;  $V_{out} = 5V$ ;  $I_{out} = 5A$ ;  $f_s = 100kHz$

•  $L = 100\mu H$

•  $R_{DSon} = 10m\Omega$ ;  $V_D = 1V$ ;  $ESR = 50m\Omega$

• Calculate efficiency



הצגם הסד'ים

$$D = 0.5$$

$$I_{D,on} = 5 \cdot 0.5 = 2.5A$$

$$P_D = 2.5W$$

## דינמיקה חישוקית וההסד' הולכה:

$$I_{rms} \sim 5A$$

$$P_a = 1.25W$$

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_a + P_D + P_{ESR}}$$

## Switching losses

### ההסד' מיתוך

לטרנ' ודיודות שאנמי עובדים אינם יש

קיבול פרצי'. הקיבול הצב שנוצר כתוצאה מדינמיקה

הוא קיבול לא מבולל. **לדינמיקה** Boost-הנקודית

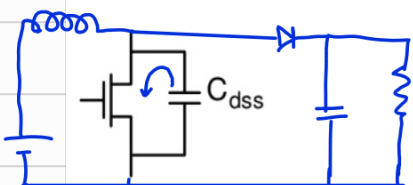
החיבור. כאשר הדינמיקה הולכה והסד' לא הולך

המתח היה  $V_0$ . הדינמיקה שהסד' הוא

יעשה קצר של הקול  $C_{dss}$  על האנליזה שהינה

הקול תפריק ליתוך הטרנ' ותתחם אותו.

ומפ' המתח שמשטרנה ( $V_{max} | AV$ ) הדינמיקה חלק 2.



$$E_{sw} = \frac{C_{DS} V_{max}^2}{2}$$

$$P_{sw} = \left( \frac{C_{DS} V_{max}^2}{2} \right) f_s$$

תדיר דינמיקה

את האנליזה הצב נימך עאמוד עפי גולת הקיבול

כפי לקרוא הספק נחלק בזמן (או נפח בתדיר).

- ככל שרצף יותר גבוהה יש יותר הפסדים.

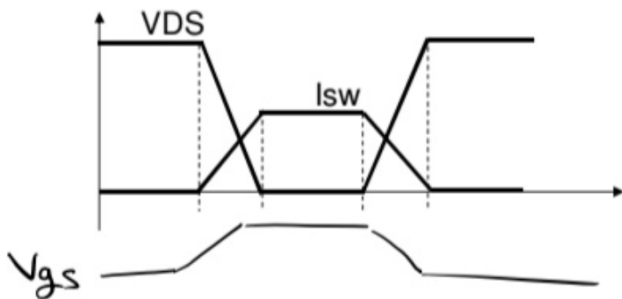
- הפסדי המיתוך עצומים לעיתים אף הארץ.

- פה למשל בה התחנן של מיישר סנכרון - אפשר לדאוג שלא יהיו כמעט הפסדי מיתוך.

- החישוב פה טוב לנו כאשר אנחנו יודעים מה המתח שנפעל על הארץ - ויותר קשה

למצוא את הקיבול של הארץ.

## Switching losses



$$E_{on} = E_{off} = \int_0^{tr} \left( \frac{I_{sw}}{tr} t \right) \left( V_{DS} - \frac{V_{DS}}{tr} t \right) dt = \frac{I_{sw} V_{DS}}{6} tr$$

$$P_{SW} = \frac{E_{on} + E_{off}}{2} f_s = \frac{I_{sw} V_{DS}}{3} tr f_s$$

דרך אחרת להסתכל - אז מתבצע המעבר של

המתח והזרם. כאשר  $V_{gs} = 0$ : המתח שבה שליו

היה גבוה, החזיק  $V_{gs}$  כאשר מתחילים ליתר פקידת

ON המתנגדות שלו משתנה בתלות ב-  $V_{gs}$  ופלא

שהמתח יפלה כך הזרם שיוכל לעבור שם יהיה

יותר גבוה (פתחים יותר ויותר את התעלה). בזמן

שהמתח יורד והזרם עולה בארץ  $\Leftarrow$  זה יוצר את

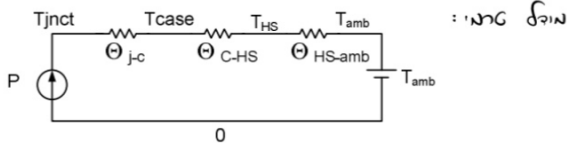
ההספק שמתבצע בזמן המיתוך.

כן אפשר לחשב את האנרגיה  $\Leftarrow$  ולמנוח את ההספק.

⊗ אמורים להגיע לאותו תשובה כמו קודם.

⊗ זה לקחים בחשבון את הקול הפרזיט' בצורה ישירה אלא עדיפה.

## Thermal considerations



- Power coded to source
- Temperature coded to voltage
- Thermal coefficient - resistance

אפשרות הסבה לתנאים נתון  
והספק נתון כקודם



## חום

מה עושים עם החום שנוצר כתוצאה מכל ההפסדים

האלה? אנחנו מחשבים את ההפסדים כדי לדעת

אין לפזר את החום שנוצר ולהביאם שהרכיבים לא

ינצלו. תבנו נכון של מע' צד לקחת רכיבים כמה

יותר חסכוניים בידיעה שיתחממו אבל יוכלו לעמוד בחום

ולא יישרפו (לפזר את החום כראוי).

⊗ הצונת-הנק' החמה ביותר (junction) זו הצונת של העל'  $\Leftarrow$  מאפר של חום מהפונת עאריצה  $\Leftarrow$

$\Leftarrow$  מהאריז'ם לזוף HeatSink  $\Leftarrow$  מ- HS עסביה.

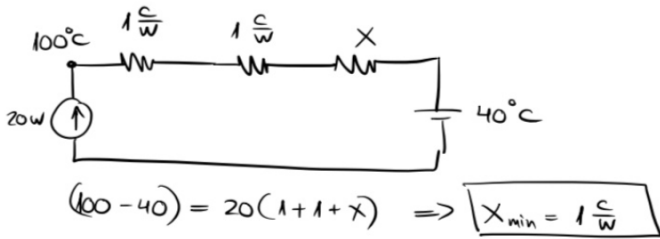
פה המידול החשמלי של חולפת החום (הצונת התנגדות)

⊗ Heat Sink - אף מתכת שמוסק חום. את החום שמשפר המארז (כלומר מחממים את ה- HS כדי

לקרר את הצונת). הדבר היחיד שבא לידינו צ' אמפי הסביבה ובחירת ה- HS.

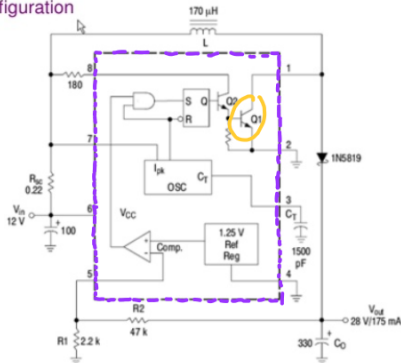
### Thermal considerations Example

- Power to dissipate: 20W
- $\Theta_{j-c} = 1 \text{ } ^\circ\text{C/W}$  ;  $\Theta_{c-HS} = 1 \text{ } ^\circ\text{C/W}$
- $T_{jnt} = 100 \text{ } ^\circ\text{C}$  ;  $T_{amb} = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$
- Calculate  $\Theta_{HS-amb}$  (determine the heatsink)



### Improving efficiency Example – MC34063 (onsemi)

Step-up (Boost) configuration



### Improving efficiency Example – MC34063 (onsemi)

External BJT switch

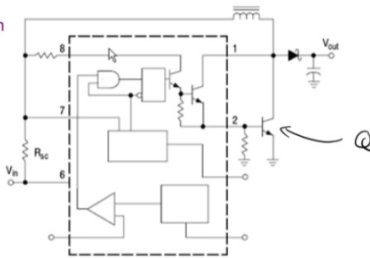


Figure 9. External Current Boost Con  
9a. External NPN Switch

בה יש בקר שעשוי בתוך לוק.

זכו למתח Boost שיש לו אבן פנימי מסוג

את ההספק של המעגל, Q. בדבר המעגל

תיה הזבלת הנכנס של אבן זה.

בכדי לשפר את הנבילת אפשר להשתמש באבן

חיזונ Q איתו אפשר לקרר בצורה יותר טובה.

אפשר לה לבחור איתו כן שיטת צרמים יותר

אוביט.

## מגנטיקה

### Magnetics

- Faraday's and Amper's laws
- Permeability
- Inductor
  - Reluctance model
  - Air gap
  - Current crowding
  - Inductor design
- Skin effect, proximity effect
- Losses
- Transformer
  - Ideal transformer
  - Real transformer
  - Transformer design

זכו נושא מתנה באוק' הספק וכן טוהי המעגלים!

\* מגנטיקה התפר נמוך - לא נילצבירה - הדבר פס' מתנה

מבודדים שמחברים יחד עזאז ומ'צרים גאואטרה איתם.

\* התפרים גבוהים: צריך לעבוד עם ferrit - הוא

מיוצר בחום גבוה ונחלף גבוה של אבן מולטק.

# קשרים חשובים

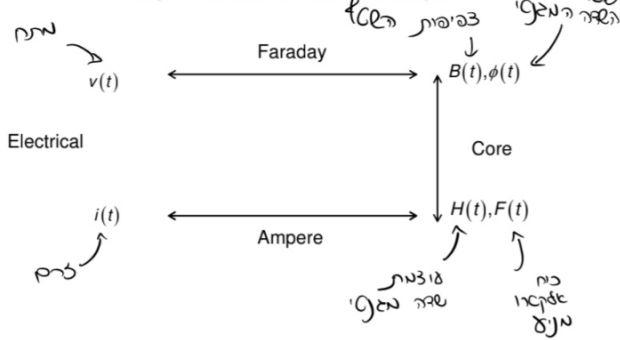
שני החוקים העיקריים: חוק פרדיי וחוק אמפר.

- התנה קשור לשאל וצפיפות השאל.

- בין השאל ועוצמת השדה יש קשרים שיתלויים באור המגנטי.

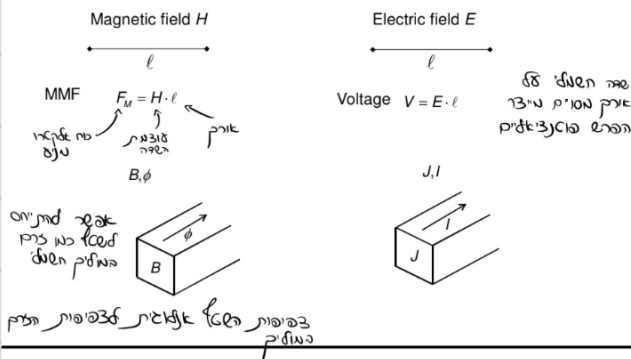
- הציבים קשור לעוצמת השדה המגנטי והצורה האלקטרוסטטית.

## Important relationships



## Magnetic quantities

Analogies to electrical quantities



ניכח לעשות הקבלה בין המצאין לאלקטרוניקה בק:

עוצמת השדה המגנטי לא אורך ל יוצרת

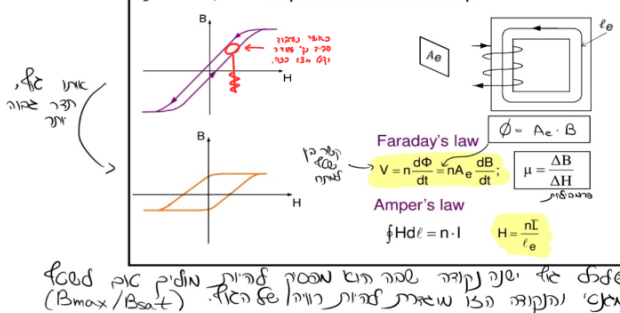
$$F_m = H \cdot l \quad \Leftrightarrow \quad V = E \cdot l$$

כח אלקטרוסטטי בקווי שדה חשמלי לא אורך ל שיוצרי הפרש פוטנציאלים.

ניתן להסתכל על שאל phi באור מגנטי כמו זרם במעגל חשמלי.

כאשר צפיפות השאל (B) אנוניגית לצפיפות הזרם (J).

## Important relationships



epsilon - האורך המגנטי - מוגדר כאורך המסלול האמצעי באור.

Ae - שטח החתך - זהו השטח המגנטי האפקטיבי.

התנה פרופורציונלי לקצב שינוי השאל (חוק פרדיי) ועם

קצב התנועת נושא להיג'י. phi = Ae \* B וקט קשר פרופורציונלי

זה בין התנה לקצב שינוי צפיפות השאל (B).

## Units

phi - magnetic flux	Weber [Wb]	V - voltage	[V]
B - flux density	$\frac{Wb}{m^2} = \text{Tesla}$ [T]		
Gauss [G]	1T = 10,000 G		
H - magnetic field	[A/m]		
mu - magnetic permeability	[H/m]		

המגידה ומסלול השאל הוא מסלול סגור - עוצמת הזרם כפול הרוחבים

חוקי האורך המגנטי זוהי עוצמת השדה המגנטי (חוק אמפר).

אלו הקשרים בין חשמל ומגנטיקה!

עקום ההיסטזיס: סגור לא אור מגנטי נקבה עקום שינוי!

העקום מתאר את צפיפות השאל ביחס לעוצמת השדה המגנטי והשיפוע מתאר את יכולת

הוא להיות מואג או לשאל מגנטי ומתואר ע"י mu - פרמאביליות, וכאשר הזרם לינארי (או בקו

$$\mu = \frac{B}{H}$$

מסוימת) נושא להיג'י כי

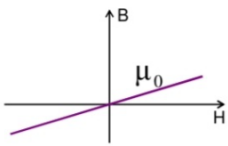
ככל ש-mu גדול יותר העקום יותר חזק?

חלון ההיסטזיס קשור לפססדי הרצף בחומר, ההפססדיה פרופורציונליים זה ל-B וזה

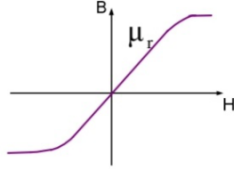
f (התדר)

פרמבייליות (חדירות)

Permeability



$$\mu = \frac{\Delta B}{\Delta H}$$



Free space permeability (Vacuum)

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$$

Typical  $B_{sat}$   
 Ferrite: 0.2 - 0.5 T  
 Iron powder: 0.5 - 1 T

Typical magnetic material permeability

$$\mu_r = 10^3 - 10^5$$

$\frac{H}{m}$  אסמא א ו  
 $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  חדירות של אוויר

יהיו מקרים בהם נרצה לשנות את  $\mu_r$  ואז נשתמש  
 אותו ב-  $\mu_0$ .

What is inductance ?

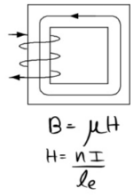
$$V = n \frac{d\phi}{dt} \quad V = L \frac{di}{dt}$$

↑  
השנויות  
הזרם

$$\phi = B \cdot A_e$$

$$V = n \frac{A_e dB}{dt} = n \cdot A_e \mu \frac{dH}{dt} = \frac{n^2 \mu A_e}{l_e} \frac{di}{dt}$$

↑  
הגורמים ל



השראות  
 ההשראות היא קבוע שקשור לנו בין המתח  
 לזרם בזוג המגנטי.

$$L = \frac{n^2 \mu_0 \mu_r A_e}{l_e}$$

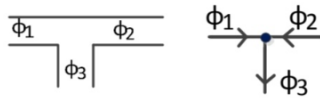
$$\Rightarrow L = \frac{n^2 \mu_0 \mu_r A_e}{l_e}$$

Reluctance model

$$F = H l_e$$

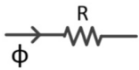
$$H = \frac{B}{\mu} \quad B = \frac{\phi}{A}$$

$$R = \frac{l_e}{\mu A} [H^{-1}]$$



$$\phi_3 = \phi_1 + \phi_2$$

$$F = \phi R \Rightarrow \text{אנרגיה שנייה איתם}$$



מגדל רלוקטנס  
 ניתן לתאר את המסלולים בכל ענף לפי  
 חוק קירכוף לזרמים.

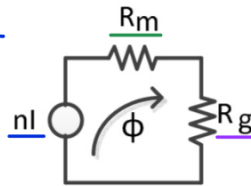
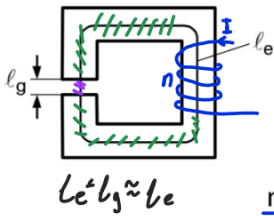
כעת נראה איך מייצרים סמל של גוף משני  
 ונעזר במגדל רלוקטנס:

מחשבים את מס' רלוקטנס לפי ההשראות  
 אזיה אנחנו רוצים להיצע. אפשר גם לדעת  
 כמה  $\mu_r$  אנחנו רוצים בסוף ההשראות הרוציה.

Inductance with gap

$$R_m = \frac{l_e}{\mu_r A_e}$$

$$R_g = \frac{l_g}{\mu_0 A_e}$$



$$nI = \phi (R_m + R_g)$$

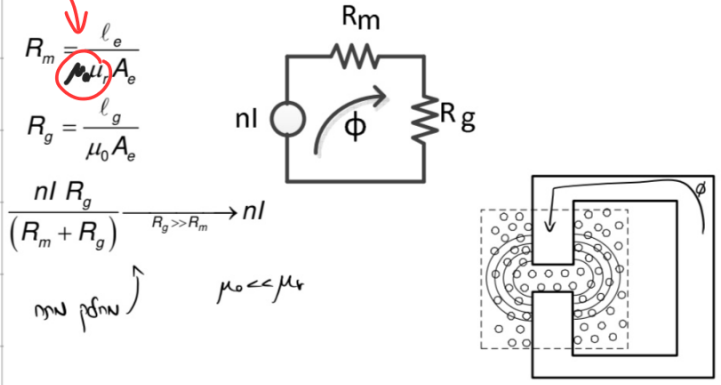
$$v = n \frac{d\phi}{dt} = \frac{n^2}{R_m + R_g} \frac{di}{dt}$$

אפשר להתייחס למגדל המגנטי אקויוולנטי-מגנטיים  
 מקור מתח  $I n$  (אפשר כריכות), התנגדות של  
 המוטור עצמו  $R_m$  והתנגדות של החריץ אוויר  
 $R_g$  (gap).

תכנון אוויר

לשאול את מנור!

**Current crowding**

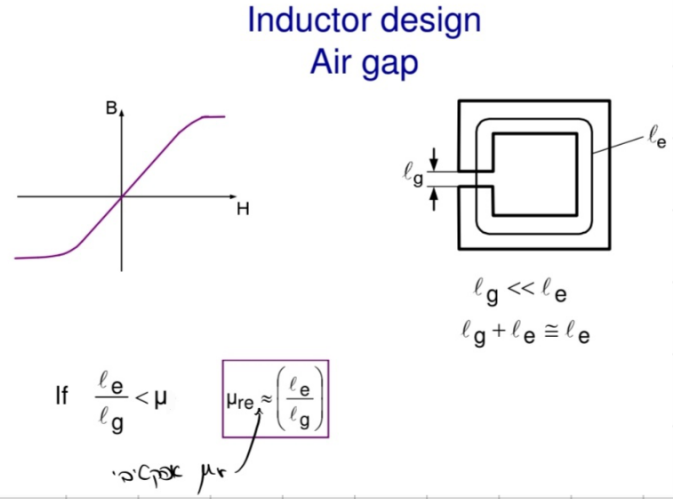


אנו עוקתים אוד המצ' ומוסיבים לו תרומה אוויר ובכך נקטן את הפרמביליות ( $\mu$ ) ונזים להסאות הרצויה. השאלה כמה הם הזוג המצ' (כולל החריץ) ולכן הוספת החריץ היה לנו עקום  $B-H$  ולאחר הוספת החריץ קבלנו  $B-H$  כאשר אני רוצים לצבוע עם פרט אס הספיל שהוא לא הרוויה לדוגמה

מכיוון ש  $R_m \ll R_g \Rightarrow$  ולכן עכא להצניח את  $R_m$  במחלק מתוך  $R_g$  מבלגים  $\Leftarrow$  רוב הכוח נובא על החריץ.

כלומר רוב האנרגיה המצ'ית מתרכזת דווקא בחריץ אוויר  $\Leftarrow$  החריץ הוא החלק החם ביותר בגוף!

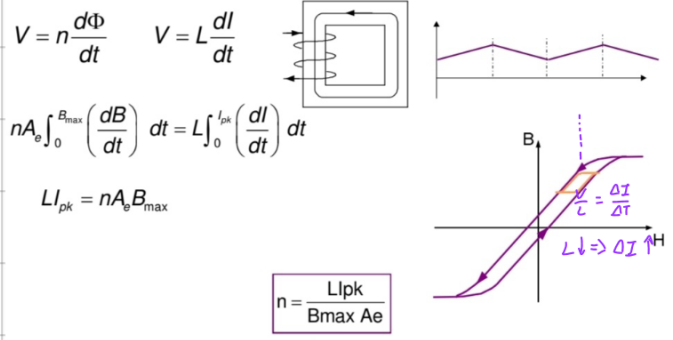
תכנון סעיל



כאשר אנחנו נעבד  $l_g \ll l_e$  (לפחות סדר גודל) רבי  $\mu_r$  עכא לחשב את אורך תרומה האוויר.

לתכנון הסעיל צריך עזרת משני שיקולים:  
 1) שיקול המצ' .  
 2) שיקול הנדסי .

**Inductor design Saturation - Ae**



שיקול המצ' - רוצים לתכנן סעיל שלא ייכנס לרוויה, ה-L קרלי וקובע על את מוצג העפודיה (MDCM). תשוב שההסאות תישאר עלני במהלך העפודיה.

רוצים להיות במקום שהשיפוע בו קבוע. מניחים ששיקול הלפס פנוצאא מהשוארה בין התפתות, אינאל על שני האזבים וחילולז עם הלפופים. היסבה שאנו מבצעים אינאלז עם  $B_{max}$ : היסדך המקסימלי שאנחנו מרשים ל-B להיות. (אצלנו  $B_{max} = 0.25 T$ ).

מקבלים בסוד-ד n הנבי ימסר עלון שהלפ לא ייכנס לרוויה.

### Inductor design

$A_w$  ← window (window)

$$A_w = \frac{nW_a}{k}$$

$$W_a = \frac{I_{rms}}{J}$$

$$A_w = \frac{nI_{rms}}{Jk}$$

הצורה של החלון  
צפיפות הזרם המותרת  
מחשבים מצד אחד  
ניתן גם להמציא מצד שני

שיקול הנכסי - אילו עלפול בחוט נחשף משפחה  
בחומר מקובל (שלא יהיה קצר בין הלפופים). אולם  
החלון  $A_w$  מתיחס לשטח החוט  $A_w$ , א-מקדם  
המילוי (fill factor)  $1 < k < 1$  אשר מבטא את הרווחים  
הגדולים, לכן שכבת העיבוד הקצה נכנסת  
ל-א. אצלו ניקח  $0.6 < k < 0.4$ .

בחירת שטח החוט פרופורציונלי לרמת הזרם שאנחנו מרשים להעביר דרכו  $W_a$  מאיד  
קאן יחסית לגודל מכיון שמתוטים צפופים ואם יהיה בהם זרם גדול לא נוכל לעבד את  
החוט שיווצר שם.

אם כן יש לנו את  $A_e$  ומצאנו את  $n$ !  $A_e$  שאנו פריכים ליתכנו הספירה.

### Inductor design

$A_p$

$$A_p = A_e A_w = \frac{L I_{pk} I_{rms}}{B_{max} J k}$$

$$n = \frac{L I_{pk}}{B A_e}$$

$$A_w = \frac{n I_{rms}}{J k}$$

הנפחת הסכום כדי להמציא את סך הפרמטרים שצדקו עליהם.  
כל אלה הם נתונים שידועים לנו מתוך נתוני הספירה.

בסך צריך לקחת מהקאלקולציה  $A_p$  גודל מה- $A_p$   
המחושב. זה יבא לידי שיקול אולי שימצאים  
לברשות שלא יכנס לרווחים.  
מכיון ש- $A_p = A_e A_w$  קטן ימצאנו למה שצדק  
הרבה חומר וקצת חלון או הרבה חלון וקצת  
חומר.

### עסיכונם:

### Inductor design summary

- Calculate  $A_p$
- Choose core
- Calculate  $n$
- Calculate  $l_g$  or adjust gap

$$A_p = \frac{L I_{pk} I_{rms}}{B_{max} J k}$$

$$n = \frac{L I_{pk}}{B_{max} A_e}$$

$$\mu = \frac{L_e}{l_g}$$

- 1) מחשבים  $A_p$  מתוך נתוני הבחירה
- 2) בוחרים ליבה מתאימה מהקאלקולציה
- 3) מחשבים את  $n$  ומלפפים
- 4) מחשבים חריץ אוויר (מקלים את הזרם ע"י החריץ)

כאן ניתן לראות סליל מאובק קאן צדדו מעגלים מיידיבסיס:

Inductor selection  
Off-shelf product

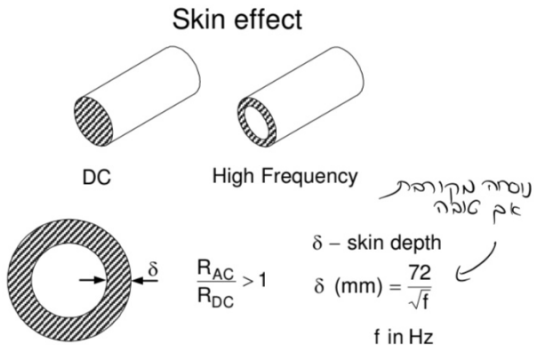
VISHAY IHLP-1616BZ-11  
Vishay Dale

Low Profile,

STANDARD ELECTRICAL SPECIFICATIONS					
INDUCTANCE INDUCTANCE = 20% AT 100 kHz, 0.25 V, 0 A ( $\mu$ H)	DCR TYP. 25 °C (m $\Omega$ )	DCR MAX. 25 °C (m $\Omega$ )	HEAT RATING CURRENT DC TYP. (A) (3)	SATURATION CURRENT DC TYP. (A) (4)	
0.10	4.1	4.5	12.0	12.0	
0.22	6.5	7.0	9.0	9.0	
0.47	14.5	16	7.0	7.0	
1.0	24	27	4.5	5.0	
2.2	61	68	3.25	3.25	
4.7	95	105	1.7	1.75	

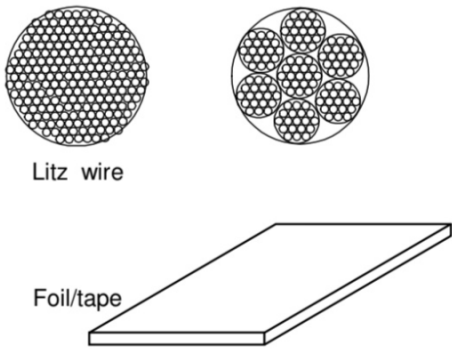
הספירה איתו גודל מקבלים:  
- היכרות נמוכה שמתקבלים גדול.  
- היכרות גבוהה שמתקבלים נמוך.  
(כאשר הרבה ליפופים זה חוט דק או מטעם ליפופים  
זה חוט עבה).

תופעת הקרום



ב- AC נושא המטען "עושה" לצדדים, עומק החבירה (delta) תלוי בתדר וניתן להשג אותו. ככל חוט עבה יותר נ- עב זה הצבוב.

Skin Effect Solutions

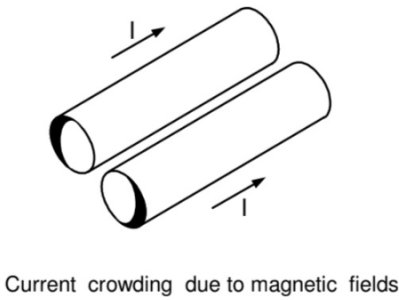


הפתרון לכך הוא לשכור חוטים דקים באופן של עומק החבירה עם הידוד ביניהם. מתחברים אונתם רק בקצוות הקצה. עובי של חוט הוא לפי עומק החבירה נקרא Litz - "ליצה".

Proximity effect

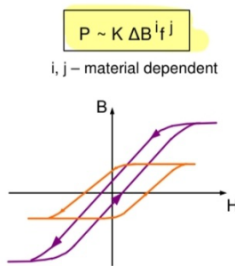
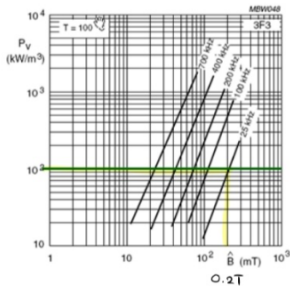
טפסה שקצת פחות נילע בה.

Proximity effect



עני חוטים מבודדים, צמודים, שטורים בהם זרם באותו כיוון. המטען נדחף לצדדים הגעם התדר ובכאלו הדחיה של מטענים <=> ניצב קיבול! במוליכים מאוד גדולים יכול להיות שהקיבול הזה משמעותי. זה יכול לשנות את העבודה של המערכת וצריך להיזהר ממנו.

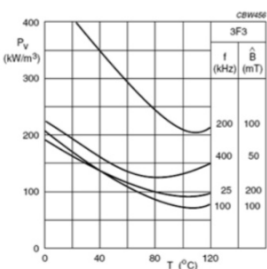
Losses function of delta B



הפסדים כפונ' של delta B:

הפסדי מערבולת - עי כ"כ רחוקים בקורס טלנו (כי אנתנו נשדו) הפסדים הרלוונטים הם הפסדים של היסטוריס (של החומר) יש פה גרף שמראה את הפסדים של חומר פרימארי (3F3) בהתחשב בתדר ו- delta B. בכל שאלים בתדר, כדי לשמור על אונתם הפסדים נהיה חייבים להוריד את delta B.

Losses function of temperature



הפסדים כתלות בטמ' : אותה חומר בטמ' שונות.

ניתן לראות כי הפסדים המנימיאלים של הזרם קורים בויקא בטמ' גבוהות- זה אומר שאנחנו צרכים לפתח את הזרם המנצא שלנו כך שהוא יתחמם כדי שפזר בחוץ הספק. נק' זו יכולה לבוא לאובת העיכוב בכך שמנצאים את המינצים <=> הוא מתחמם קצת יותר <=> הפסדים יותר קטנים!

השוואה בין חומרים שונים :

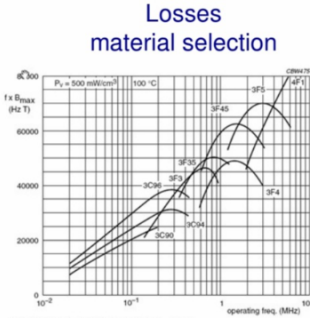


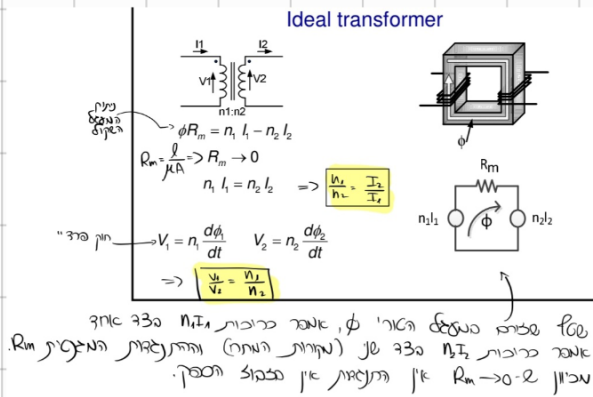
Fig.19 Performance factor ( $f \times B_{max}$ ) at  $P_V = 500 \text{ mW/cm}^2$  as a function of frequency for power ferrite materials.

הבדל הבה ניתן את המעלה של התדר ו-  $B_{max}$  כפול של התדר.  
 בתדרים נמוכים כמעט ואין הבדל בין חומרים (מאבלים מסיקולים בא חוה)  
 אבל כאשר עלים בתדר מזהים לנק' שבה כבר הביצועים של המע'  
 מתחילים לרדת. ואז יש חוגר שמר לא מתאים. ניתן לראות של  
 חוגר מתאים לטבוקה בתחום תדרים שונים. יש חומרים שמעמימים לתדרים  
 מאוד גבוהים אבל הם לא מתאימים להעברת הספק - בחור עשימישים מלט.

שנאי

שנאי אידיאלי

שנאי צפוי אלמנט שנאי שיושב על גוף משני (בדל' שנאי)  
 הוא עשאו הריף אוויר). עקום שנאי:   
 מ שלכו כמעט אינסופי <=> מתוק ממש טוב עשאל. ככל שנאי  
 יותר עכיון האידיאלי אין לו כפול יכולת לעזור אנרטיה.  
 \* שנאי צפוי רביה שבתוק הזוף הנשנאי על נאצרת אנרטיה!  
 \* בסנאי השיפוע מ יחסית מתוק (באלל המריד אוויר) - צי אוער שנתני טטולום לעאר אנרטיה.



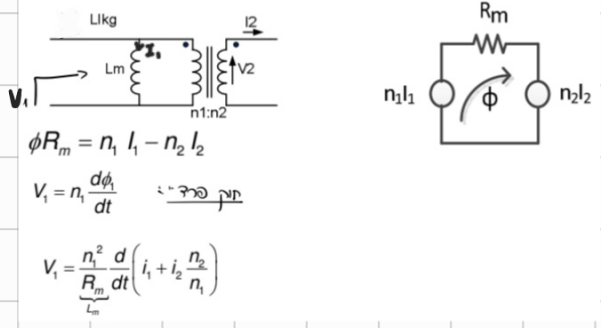
של שזיה טעסעס האורי  $\phi$ , אומר כריכות  $n_1 l_1$  כצב אוקר  
 אומר כריכות  $n_2 l_2$  כצב של (נקודות העתרה) והתפרקות המעטית  $R_m$   
 מכיון  $R_m \rightarrow 0$  אין התפרקות אין כפול הספק.

Transformer characteristics

- Current flow at the same time at primary and secondary
- Each winding represents inductance – Average voltage = 0
- AC only on any winding

מאפיין: השנאי:  
 - השנאי הצפוי כורטו כראשוני והמשני. בו זמנית!  
 - סמיל - אוצר אנרטיה. שנאי - על אוצר אנרטיה!  
 - כל ליפל בשנאי הוא על השנאי <=> מתק ממוצע של סלוי  
 הוא אפס <=> מתק ממוצע של שנאי הוא אפס <=> שנאי כל  
 יקדל רק איתר AC.

Magnetizing inductance



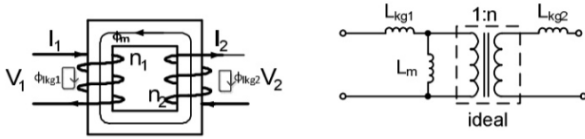
שנאי על אידיאלי - הפראת מננו

עקום BH:   
 $R_m$  על אפס <=> נקדל כנאי אחר ע-  $V_1$ .  
 מתקבל מוקל אחר שאומר שניתן לתאר שנאי מעסי' בתור שנאי  
 אידיאלי + הפראת מננו ( $L_m$ ) שמעמית ע' השיפוע של העקום.

השראה בלוגיה

**Leakage inductance**

- uncoupled magnetic flux



$L_{ikg}$ ,  $M$  (mutual coupling) and  $k$  (coupling coefficient)

$$M = k \sqrt{L_1 \cdot L_2}$$

$$L_{ikg1} \cong L_m (1 - k)$$

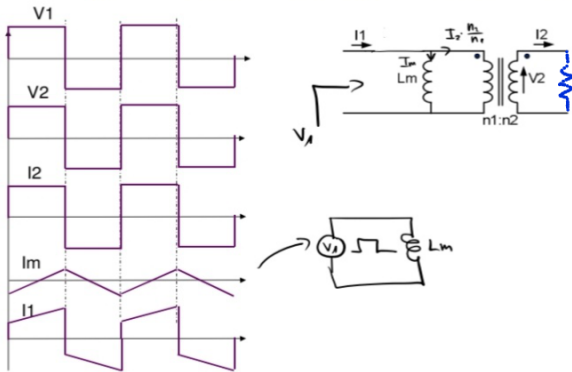
$$L_{ikg2} \cong L_{ikg1} \cdot n^2$$

הכנסו השראה אידיאל הנחנו שכל השראה נשארה בלוגיה. מסתבר שהשראה מעשית יש חלק קטן יחסית שאף נשארה בלוגיה והוא מוגדר בהשראות בלוגיה.

זכו השראה הנשארת שלא צמוד.

א- אורח הצינוק, אם וזא אצ ישנן בלוגיה.

**Magnetizing and leakage inductances**



צורת השראה כגון מדברות אל מצב שרפולוגיה לא קיימת. יש נגד המוצא לכן עם הדרם המוצא הוא אל מחוץ. הדרם  $I_m$  - מתאר איך האור הנשארת 'השראה' של השראה B-H. נשים לב שאנחנו לא נגשים צרווייה לפי צורות השראה.

תכנון שרפולוגיה

**Transformer design**

$$A_w = \frac{n_1 W_{a1} + n_2 W_{a2}}{k}$$

*Aw* - נרצות השראה

$$W_a = \frac{I_{rms}}{J}$$

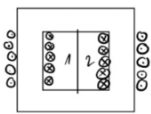
*W<sub>a</sub>* - נרצות השראה

$$A_w = \frac{n_1 I_{1,rms} + n_2 I_{2,rms}}{Jk}$$

$\phi$  אורח השראה

$$A_w = \frac{2n_1 I_{1,rms}}{Jk}$$

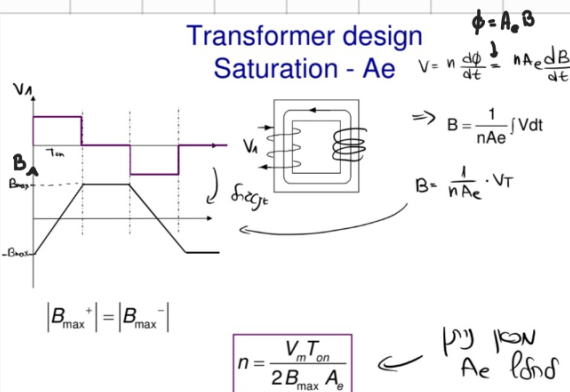
$n_1 I_1 = n_2 I_2$



שראה החלוק  $A_w$  - חלוק זכ צריך להכיל עם את השראה וזה את השראה.

השראה שרפולוגיה אורח שרפולוגיה החלוק שרפולוגיה לוקח שרפה לשראה החלוק שרפולוגיה לוקחה שרפה! משרפולוגיה תכנון - מספיק לשרפולוגיה רק מה הדרם השראה (אז שרפה) וזכ ישרפה לרנו את סך החלוק.

**Transformer design Saturation - Ae**



הצרווייה

השראה השרפולוגיה חייבת להיות סימטרית!

השרפולוגיה בין  $B_{max}^+$  -  $B_{max}^-$  זכ השרפולוגיה בין אנו משרפולוגיה כולוה זכ  $AB$  שרפה וזכ נשרפה את  $B_{max}$  כז שרפה ניכנס צרווייה.

## Transformer design

$A_p$

$$A_p = A_w A_o = \frac{\{V_1 \cdot T_{on}\} 2 \cdot I_{rms}}{\{2B_{max}\} JK}$$

$$A_p = \frac{\{V_1 \cdot T_{on}\} 2 \cdot I_{rms}}{\Delta B \cdot JK}$$

$$2 B_{max} = \Delta B$$

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

$$A_p = \frac{\{V_1 \cdot D_{on}\} 2 \cdot I_{rms}}{f_s \cdot \Delta B \cdot JK}$$

משוואת  $A_p$   
 דלטאי  $\Leftarrow$

הסדרה: פה גם ההספק בהם עידי ביטוי  
 יש לנו  $V_1 \cdot I_{rms}$

כעת יש לנו את  $A_e - A_w \Leftarrow$  אפשר למצוא  $A_p$ .

\* הביטוי של  $A_p$  כגון תפוחי התפוח - ביטוי מספיק!

זה אומר שאם עולים התפוח קטן את  $A_p$ .

\* ככל ש- $L$  גדול יותר אגב לנו (שנאי יותר אידיאלי)

\* יש לנו מוליכות גדולה לעבוד התפוח גבוה כי זה

נקטן לנו את מימדי המערכת.

## עסכים:

## Transformer design summary

- Calculate  $A_p$
- Choose core
- Calculate  $n_1$
- Calculate  $n_2$

- מחשבים  $A_p$ .

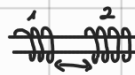
- הולכים לקלעים ומוצאים גוף מתאים ( $A_p$  נתון לנו

חופש בחירה - שיטה נחה מאוד),  $A_p$  קצוץ  $A_p <$  מחושב.

- מחשבים  $n_1$  ו- $n_2$  לפי נתיב הבסלה. (את  $n_1$  אנו נחשב

לפי הניסוח  $n_1 = \frac{V_m T_{on}}{2 B_{max} A_p}$  ואת  $n_2$  לפי יחס הלייפים שאנו רוצים)

- כאן לא צריך חריץ אוויר - כמה שפחות אוויר יותר טוב בגנאי.

- הצליחה בחיבוריונולר למיחך בין הראשונים למשני 

## Magnetic design Example

- Boost converter:  $P=100W$ ,  $V_{in}=10V$ ,  $V_o=50V$ ,  $\Delta I_L=0.1 I_{Lav}$
- Calculate  $L$
- Calculate  $A_p$

# Isolated Converters

## Forward and Flyback

# ממירים עם בידוד

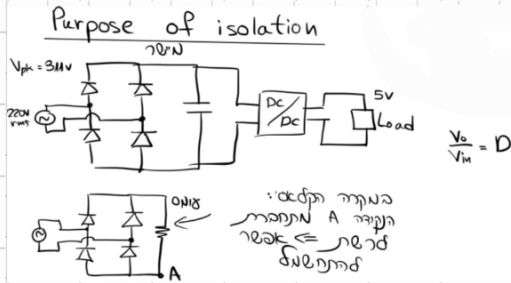
- DC current via transformer
- Forward
  - Voltage transfer function
  - Magnetizing inductance
  - Transformer reset
- Coupled inductors
- Flyback
  - Voltage transfer function
  - Multiple outputs

מטרת הבידוד: בידוד מהמקור כך שנקבל עומס מבודד ואז גם נקז העומס לא נפתע.

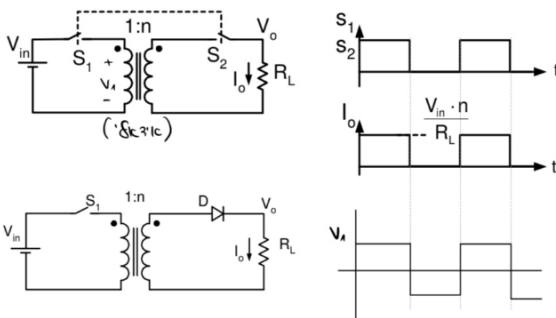
לפיכך ממיר זה דבר מאוד מסובך - במקרה הנ"ל ה-D מאוד קטן (אין תופש בעולה). אדם שמיש שגאי אפשר לקבל תמסורת טספת - שלב ביניים, ואז הממיר ספגו יקבל מינה קטן יותר ובכך D יוכל להיות גדול יותר.

## זרם DC בל"א:

התפתח הממוצע של שגאי תייה להיות אפס  $\Leftarrow$  הוא יכול להתמונז רק עם AC. אז איך הוא יוכל להתמונז עם זרם DC השגאי? בצורה המתוארת כאן ( $I_0$ ) ניתן לראות כי הזרם הממוצע של העומס אינו אפס  $\Leftarrow$  זרם DC.

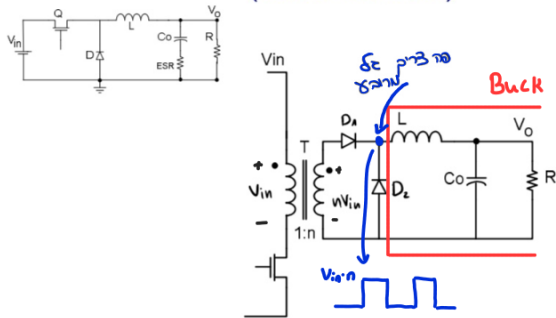


## DC current via transformer



המתח הממוצע של השגאי עדין אפס כיוון שבזמן  $T_{off}$  המתח של השגאי יהיה שלילי, אבל לא נראה את זה בממוצע. (תבין מתח שגאי-נראה בממשק) הסדרה: גלגל, עובדים יותר עקב טעם לחסוך מתח אם נשתמש בדיודה במקום  $S_2$ .

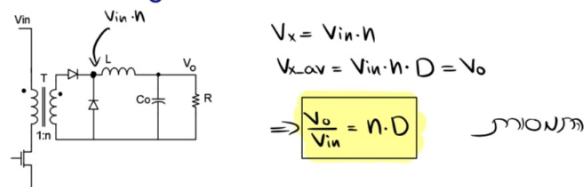
## Forward converter (buck derived)



## ממיר Forward

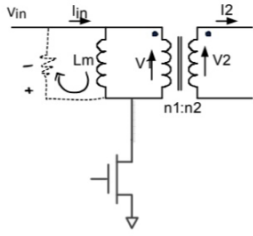
כמו ממיר שמהווה הרחבה של ממיר Buck, דרזת המוצא היא Buck. דרזת הכניסה היא דרזת של שגאי. המתח יוליק  $\Leftarrow$  ממש מתח של השגאי  $\Leftarrow$   $D_1$  תוליק  $\Leftarrow$  זכור לא מרחב בקורה  $\Leftarrow$  יזכרו Buck עם בידוד! הסדרה: בדיק כמו ה-Buck כאשר אנוני ה-off  $D_2$  מוליכה.

## Voltage transfer function - CCM

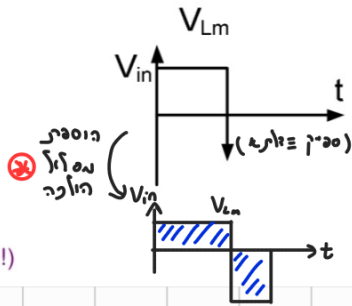


נושא את התמסורת כמו שחישבנו ה-Buck ולפי הבידוד:

## Magnetizing inductance



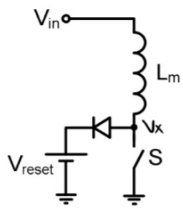
• Current at Lm is interrupted (!)



שנאי מעשי מגיץ סם הרגור המגול ( $L_m$ )  
 כאשר סוגרים את המעגל (on) הזרם יעבור דרך  
 הסגור המגול, כאשר נפתח את המעגל (off)  
 יהיה קפיצה של מתח (כפי שמוגים כחול) →  
 או יודעים את כיוון הקפיצה (ספיי הנגזר הדימיוני)  
 כאשר המעגל פתוח (off) קיבלנו ספייק של מתח  
 מסול הולכה כדי לפתור את הבעיה (ראה ☹️). הפתרון קראו "Transformer reset".

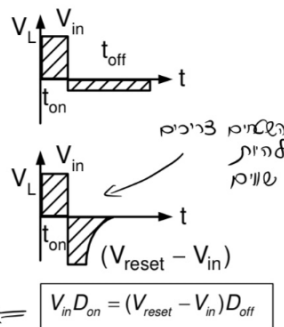
כאשר המעגל פתוח (off) קיבלנו ספייק של מתח  
 מסול הולכה כדי לפתור את הבעיה (ראה ☹️). הפתרון קראו "Transformer reset".

## Transformer reset



Must make sure that the reset ends before the next cycle

כל מה שאם  
 לנו את המגול  
 המגול של המגול



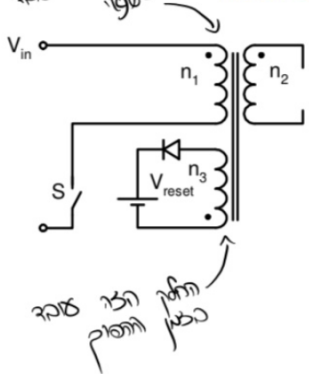
$$V_{in} D_{on} = (V_{reset} - V_{in}) D_{off}$$

## Transformer reset - תיקון מתח שנאי

בזמן off טור מסול חלופי לזרם של הסגור  
 המגול לזרם בו כפי לאזן את המתח המעוגל  
 של אותו שנאי מעשי.  
 מתח מעלין  $\Leftarrow V_x = 0 \Leftarrow$  סל הקיורה המתח המגול  $\Leftarrow$   
 $\Leftarrow$  דיורה לא מוליקה  $\Leftarrow$  הזרם מ- $V_{in}$  לאזנה.  
 מתח לא מעלין  $\Leftarrow V_x \Leftarrow$  קול עק  $V_x = V_{reset} \Leftarrow$  דיורה  
 תפתח להוליק  $\Leftarrow$  הזרם מ- $V_{reset}$  ל- $V_{in}$  (כי  $V_{reset} > V_{in}$ ).  
הערה: צריך להבטיח של- $V_{reset}$  יהיה כזה שהמתח של  
 הסול יגיע לאפס לפני שהמחזור הבא יתחיל כדי  
 של נזיק למרכיבי המערכת.

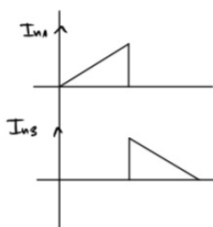
☹️ שאלה: האם זה מבטיח את  $D_{on}$  המקסימלי?  
 כן. זה אמור ל- Forward. לא יכל לעבוד עם  
 $D_{on} = 1$ , הוא חייב על  $D_{on}$  של המגול.  
 מה שכן, יש לנו דבר חופש של יום המגול  
 כדי כל המגול של מ- $V_{reset}$  לזרם אחר עם  $D_{on}$   
 נטוים, אפשר לזרם אחר  $V_{in}$  כן שנתן את-  
 המגול.

## Reset winding Auxiliary source



Requirement for reset:

$$D_{off} \frac{V_{reset}}{n_3} \geq \frac{V_{in}}{n_1} D_{on}$$



## ליפול ריס - ניצור את ה-reset בעזרת

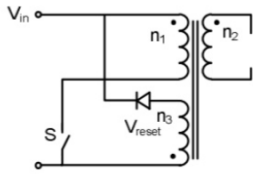
ליפול עכני מה שאנחנו צריכים זה לאפס את  
 הסול באג המגול. הסגור אם אנחנו מאפסים  
 את המתח הראשוני או בל ליפול אחר זה  
 הינו הק. אז נטל לקחה ליפול כוסל כדי  
 לעשות זאת. מחברים מתח עכני  $V_{reset}$   
 ודיורה. אנחנו מסדרים את הקי של השנאי כך

שיעור את אותה בעולה כמו שהמתח הסגול הקודם  $\Leftarrow$  הדיורה תוליק רק ב-off. כן קראו  
 דירת חופש לזכ.  $V_{reset}$  כי לא חייב  $V_{in} < V_{reset}$  אלא טל להמתח ביחט הליכוסה כדי להבטיח  
 שיהיה קול מ- $V_{in} \frac{n_1}{n_3}$ .

באופן כללי אנו רוצים להשתמש בכמה שפחות ספקים. לכן נרצה להשתמש באותו

Reset winding  
Same source

מקור  $V_{in}$  זה עבור  $V_{reset}$  באופן זה



Requirement for reset:

$$D_{off} \frac{V_{in}}{n_3} \geq \frac{V_{in}}{n_1} D_{on}$$

$$\frac{n_1}{n_3} \geq \frac{D_{on}}{D_{off}}$$

הקריטריון של reset

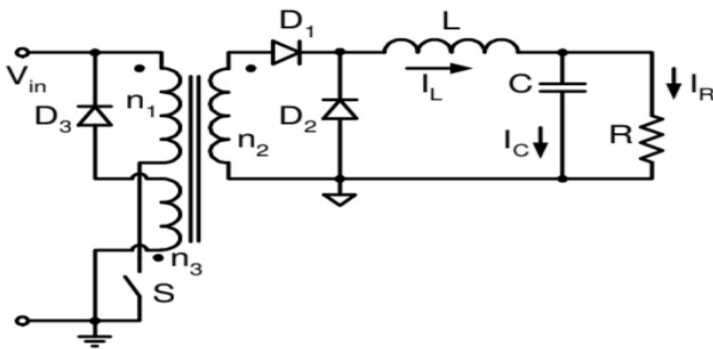
נוכל לעשות זאת בזכות השימוש בהם הלייפאים.

הקריטריון צריך לקחת בחשבון את  $D_{on}$  המקסימלי. כולמר על כן יחס  $\frac{n_1}{n_3}$  אור הקריטריון יבא וננסה לעשות את ה-reset.

Must make sure that the reset ends before the next cycle  
For calculations use  $D_{on-max}$

### Forward converter Schematic with reset

### המעגל הסוגי Forward Se

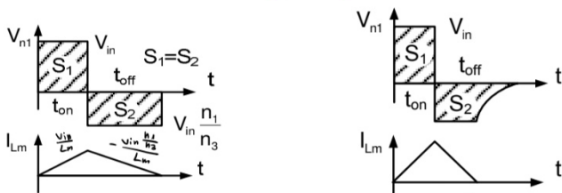


נשים על שמענה הנה אנחנו מחזירים אנרגיה למקור, כולמר עין השראור המאנוט לא קצב לנו הספק. האנרגיה שבוזבזת הוצרת חלקית למקור.

Reset winding  
Calculation of  $n_3$

כמובן שכן יש עדין הספדי הולכה והספדי מיתוג אלא בסופו של דבר אנו מחזירים חלק מהאנרגיה שנה אלא!

For each winding:  $\bar{V} = 0$   
Calculation can be done from any winding



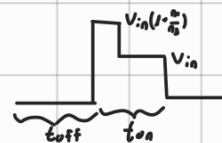
המגנטה הנה נעדר לפני ההחזור

כאשר המגנט מולך (לאחר שהיה מניק)

נוסף עליו העתה, מתנה זה הנו  $V_{reset} + V_{in}$

$$V_{reset} = \frac{n_1}{n_3} V_{in}$$

המתנה:  $V_{in} (1 + \frac{n_1}{n_3})$  והמתנה של הארנז יואר כן:



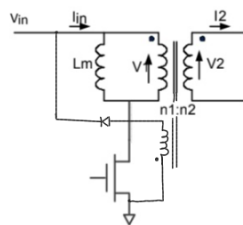
נצטרך לבחור באחד מ-2 האפשרויות:

(1) ארנז גרוס ( $D_{on} \leq 0.5$ ) - כיוון שהמתנה גדולה הולכה או

תהיה יותר גבוהה  $\Leftarrow$  יותר הספדי הולכה במע.

(2) ארנז קירי (גדול יותר) - כן שיבוטו הו הספדי הולכה יותר קאניה ויא יוכל לעמוד בעומט של  $V_{in} (1 + \frac{n_1}{n_3})$ .

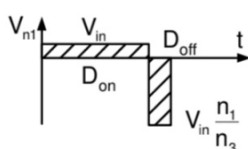
### Implication on the switch voltage stress



החלק הזה קרוי יק שהדגרה מולכה

$$V_s = V_{in} + \frac{n_1}{n_3} V_{in}$$

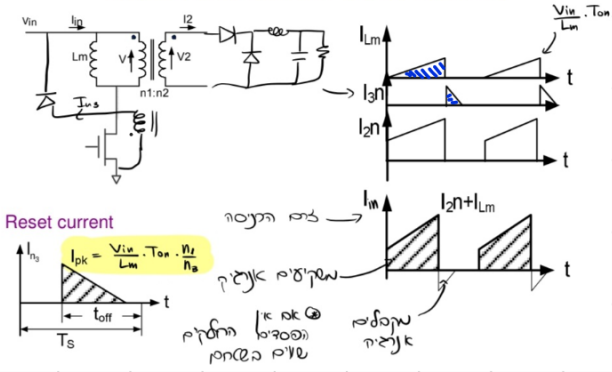
$$\frac{n_1}{n_3} \geq \frac{D_{on}}{D_{off}}$$



$$V_s = V_{in} [1 + \frac{D_{on-max}}{1 - D_{on-max}}]$$

סדר קי שניצל בה הוא צורת הרעמים:

Implication on the input current

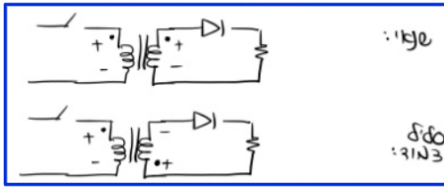


- ⊗  $I_2$  - צרם הבכנסה של מגרי Buck.
- ⊗ בהנחה שאין רבסדים **שאהי הארבים** של הצרמים  $I_{Lm}$ ,  $I_{I3}$  צריכים להיות שלווים.
- ⊗  $I_{pk}$  של צרם ה- reset (צרם ה-  $I_{I3}$ ) יהיה: 
$$I_{pk} = \frac{V_{in} \cdot \frac{n_1}{n_2}}{L_m} \cdot T_{on}$$

Coupled inductors



$$\frac{L_1}{L_2} = \left(\frac{n_1}{n_2}\right)^2$$



סעיפים מצוטטים

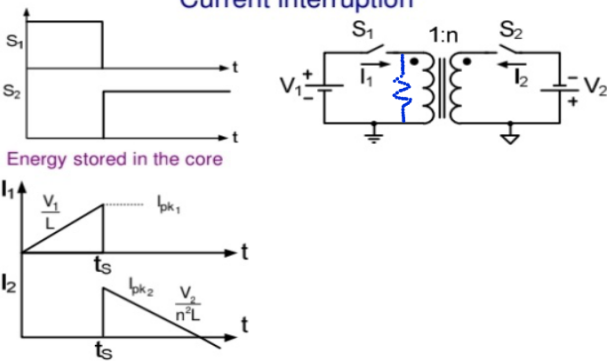
סעיף צמנון - אוזר אנרגיה במקצת אחר ובמקצת השני האנרגיה תצא מהסל האחר.

לבהים פיצר סעיף צמנון ושנאי נראים אותו הדבר בסעיף צמנון יהיה תחיל אוזר שאבר עלפול לאזר אנייה. לבהים חיבורי א- אבר להבדיל בין שנאי

וסעיף צמנון. אבר לדטר ספי צורה החיבור שלו במעגל.

- ⊗ נשים על כ ראני סעיף צמנון ככר - אוזר סגל reset - כי הוא צר שמועק בזמן שהארני לא מועק!
- ⊗ אם לא צרם צרם השני הסנבים בו צמנית => לא שנאי! אולי סעיף צמנון.

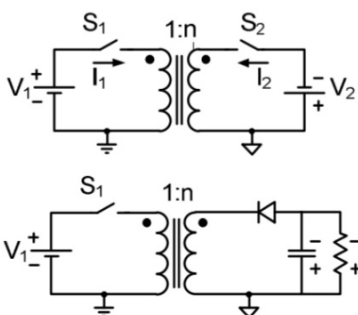
Coupled inductors  
Current interruption



בה אנהנו רוצים שהתקנים ישלימו אחר אר השני.

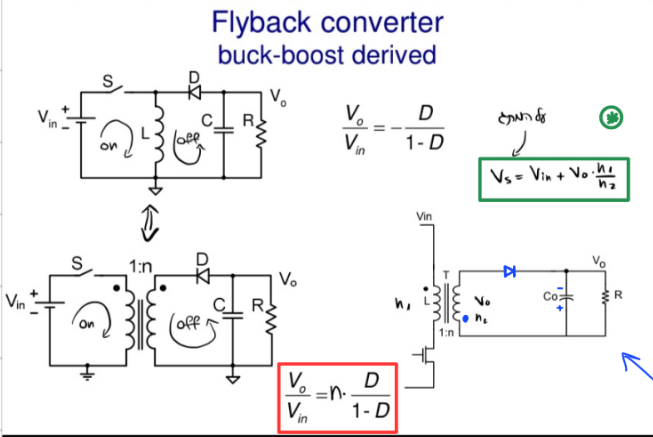
כלומר כאשר  $S_1$  דואק ( $S_2$  כבויו) הסעיף נאלץ ע"י  $I_2$  והאנרגיה נאצרת בסעיף המצומד ואז כשר  $S_1$  נסגר ו-  $S_2$  נפתח בעל תוצר הדיוני והקאזר מתפטר וצורם צרם  $I_2$  בסגל השני של הסעיף המצומד שאזן אותו.

Replacing switch by a diode



נוכל לחתוף אר  $S_2$  בדיודה באופן רבא: במעל צו במקום מקור  $V_2$  נשים קבל גדול שיהווה אר מקור המתנה ונכנס לא אר הסנבים. מעגל צר מצוכי לנו אר Buck-Boost!

# Flyback



זה כאן צריך לזכור את היחסים בין שטחי המוליכים לתחילת הינוסטים.

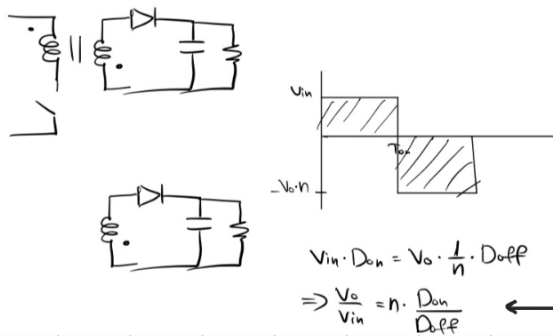
נתון את הטעם ה-Buck-Boost שלעבר עסקנו  
 מצב (שני ציפויים של אותה ציבה). ובכן קטן  
 Boost-אטל כאשר העומס מבודד מהמקור.  
 מכוון שהמקור אינו ביהס לאדמה (מתח צל) טעם  
 נשאר את החוטים אין שנוצח ולסדר את המערכת  
 (היסוק את כיוון הציוד וקולכיות הקוד) בן שבמוצא  
 התנה יהיה חיובי.

כעת נמצא את תלסומת ה-FlyBack ב-2 היסודות:

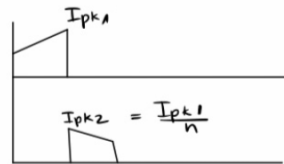
וולט-שניה

שילת  $\Delta I$

Voltage transfer function – CCM average voltage method



Voltage transfer function – CCM  $\Delta I$  method

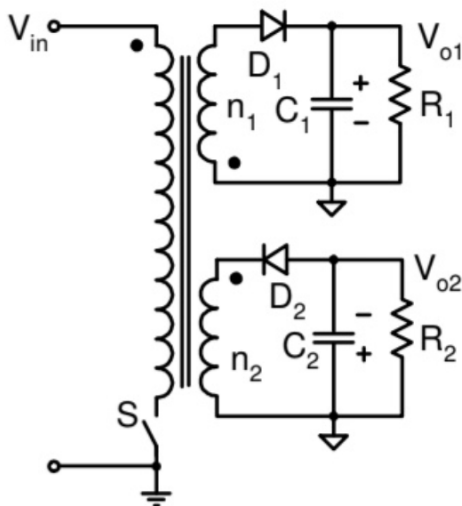


$$\Delta I = \frac{V}{L} \cdot \Delta T$$

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

ומשם לאותו דבר

## Multiple outputs Effect of coupling



אנחנו יכולים לייצר FlyBack עם הרבה  
 מתני מוצא ולקוד את כולם כאשר כל אחד  
 מהם יכול להיות מתח שונה.  
 בעצם קיבלנו את האפשרות לייצר כמה מתחים שונים  
 מאותו ספק.

⊗ עם כן קורה ש אדג היצוגה בין כולם חזק!

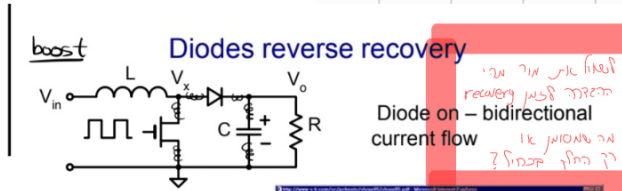
הערה: נשים לב כי לא התייחסנו כלל להשראות  
 עלולה (LkL).

# Parasitic effects Snubbers and clamps

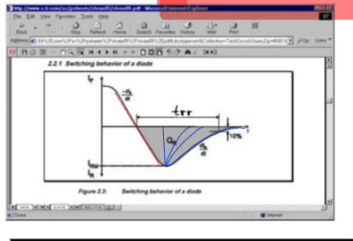
- Turn on and turn off effects
  - Turn on - diode reverse recovery
  - Turn off - di/dt effect on transistor
  - Turn off - diode forward recovery
  - Mosfet gating
- Transistor protection - Clamp
  - Flyback leakage problem
  - Clamp configuration
  - Component selection
- Diode protection - Snubber
- Switching snubbers and lossless (ZVS) snubber

# תופעות פרזיטיות

תופעות שקשורות לתינה והקשר שלהן לאמנאים פרזיטים של המערכת.



לשאל את מור עדי  
ההגדרה לזמן recovery  
מה משמעות או  
קו הילוך יתרון?



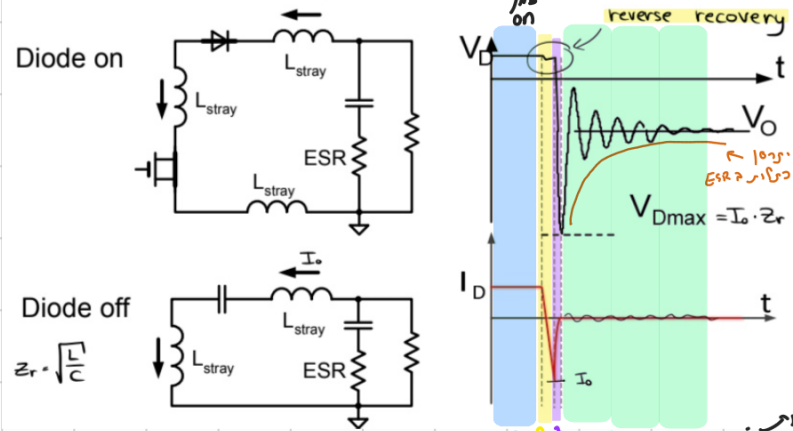
הרבה אדם (כלל תמיד טקדנות) סבורים את התוכנית. בתוכנית שאנחנו צופים יש השלמות היותר של תחומים אך מה שקורה לך שדיווח לא תפסק הכת אחת, אלא תפסק ע"י יולק וירד. קצת ירדת הכת נחשב כי  $V_{in} - V_o$  היתם ונד ע"ד ע"ק זו שבת והחומר עברה מספר כח שהדיווח הפכה לקצת. תוכנה ש דדוה צדמ אם יוכלת לדור אצית או מניחה זה תלוי בשיטת ציר הדיווח. לא נרצה תכנה מודרה כי התעניין על השאיות הפרזיטיות יהיו גבוהים ויכולם להפך לרבותם במערכת.

## תופעת Reverse Recovery בדיונה:

הדיונה הולכה וכעת נרצה להפסיק את החלפה שלה. כאשר דיונה מוליכה יש צדמ תיובי אבל יוכל להיות קה צדמ עשני הכיוונים כאשר הצדמ נלו בדיונה הוא הכיוון המולק. זה מכיוון שהדיונה היא צולמת וכאשר נושא המלח קרובים לצולמת

הם יכולים לעבור עשני הכיוונים (כאשר הצולמת ע"פנתה). במצב ההפוך טכנת שבת מחרור וכאשר טכנת המחרור גדולה מספיק הדיונה מהווה קבל. הזמן  $t_{rr}$  זהו הזמן שבו הדיונה להציר למערכת אחורי.

## Diodes recovery - spike and oscillations

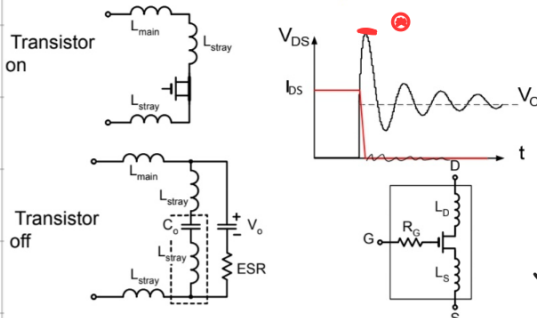


מירע שהצדמ בדיונה מספיק לרדת נוצר לנו מעל תכונה.  $V_{max}$  יכול להיות מרמ לא מקיול ולעשוי להיפך לדיונה וצריך להיגן על הדיונה בקרנה הזב.



- ה-חח חרטט של ארז יש בעיה של reverse recovery.
- מעל תכונה יתרסן כוללת ה-ESR והתנגדות פרזיטיות נעשו.
- הצדמ בדיונה לא נשאר קו אבס אלא מתפצז אם הוא סביב המתי  $V_o$ .
- אם נספכל על זרע של דיונה לא אידאלר נראה איפה נמצא כל מצב על האופין:

## Transistor turn off - parasitics

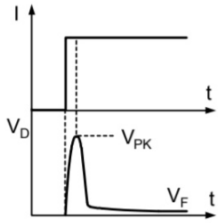
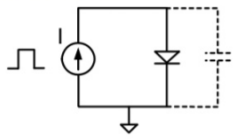


במצב turn off של ארז:

החולים שמעבירה את הארז מהכנים לחום של הארזים שלו. מהווים אם כן המאת פרזיטית (או מבולאר) בתצדמ שאני ע"פנתה). כיו יש ארזי מעל זסטמ אם ארז שהולק ומפסקים לו את החלפה. אם כן ישנה שבת מחרור שמהרה קל והשאריות פרזיטיות מעל תכונה. הריסון יהיה בשיעור של ההשאריות והדיונה הפרזיטית של הארז. צריך לקחת בהשבין שזמ המתי \* על להיפך אטרנטיטור.

מקורם עשוי off turn ונסתכלו על האנר כשר נפתח על הידועה:

Transistor turn off – diode forward recovery

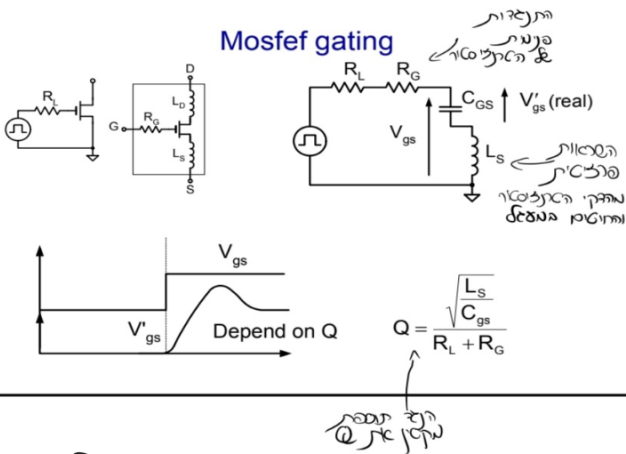


על שהדיודה מתפזר לחלוטין היא קצת וקצת הכב נאמן  
 על מקור זרם  $\Rightarrow$  סלול לזרמם למתח קדמי גבוה מאוד  
 על הדיודה. לרוב זה נקראה התפסדה זו. מכיון שאנו  
 משתמשים בדיודת מהירות (מוליכות יחסית מהירה) אנחנו  
 זה נתייחס לתפסדה זו

$C_{GS}$  - קיבול gate-source  $\Rightarrow$  אכן כאשר לא מוליק  
 נשים על כן קיבולו זה כן מעט תחודה.

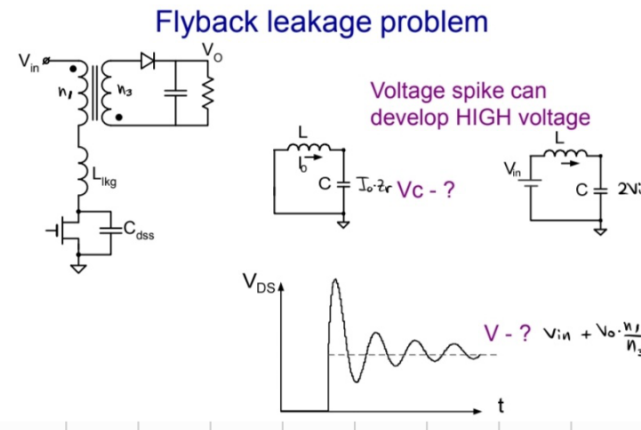
$\otimes$  התנהגות של  $R_L$  לא קיים ו-  $R_G$  זניה מאוד נקרא מעט  
 עליו היסון. נהיה לחוסר נגד אורי  $R_L$  שאחראי לכך  
 טענה היסון במעט, אמש זה מאט קצת את ההחלפה.  
 על ה-  $G$  אף אם נמן לנו על האנר.  
 התעלם על  $R_L$  סדיב לנו על ההססדים שלו!

Mosfet gating



על לבה הייתה הקבלה. כשר נעבור על הציות אלתינית ופתינות מעשיים במערכות שלנו.

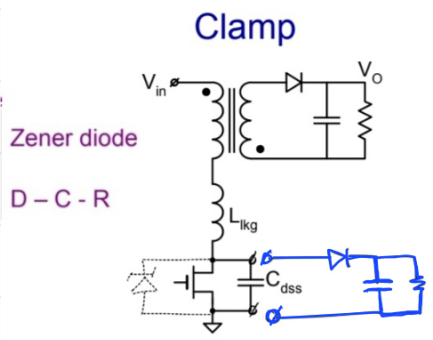
Flyback



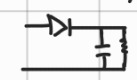
$L_{pk}$  - השומר על החלק שלא זנעו בין הראשון למשני.  
 ברצף שהאנר מפסיק להילק  $L_{pk}$  סדין מוליק  $\Rightarrow$  מתפזר סלול  
 מתח הספק (נגד דימוני) מאז על האנר טבר ספק מתח לא  
 מבוטל. אם כבר נפח על האנר מתח  $V_{in}$  ועכשו נבאך  
 לפתור הנוסח זה המתח הספק הרב כפי שהאנר לא ייסרף.

Clamp

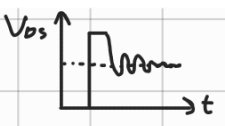
$V_{zener} > V_{in} + V_0 \frac{n_1}{n_2}$  כן אנדיר כן



צריך לפתור את המתח הרב כי אחת כל הזרם יסדיף עללר דרך  
 הזרם ולאו תהיה קטנה  $V_0$ . בפועל דיודת זנע זב לא מעשי  
 כי הדיודה הצי זרכה להיות למתחים גבוהים מאוד (לא האלי).  
 ולכן יש מערכת שמדנה זנר -  $Clamp$  (קוצר):



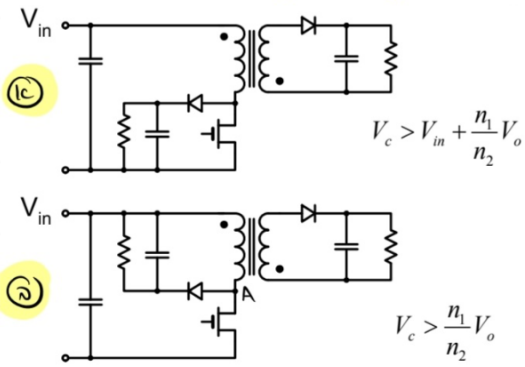
אם דבר זה אכן למתח לפתור  $V_{in} + V_0 \frac{n_1}{n_2}$  אז זב מדינה לנו דיודת זנר.



הנגד טעד לפיזיר ההספק. משת ה-  $Clamp$  היא לקצור את מתח האנר. אום ה-  $Clamp$   
 טוב אנחנו נקרא:

יש כן 2 אפשרויות לתכנון של דיוזת זנר :

### Clamp configurations



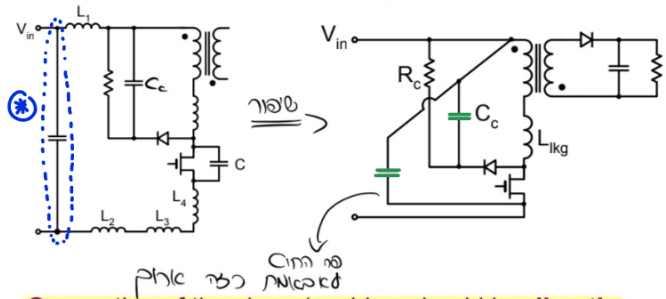
אופציה ב' היא האופציה יותר מכיוון שאם נניח מתח קבוע  
 של הקל והגד צריך לפזר את ההספק ואז כל המתח  
 של הקל גורם יותר לזנר יש יותר הספק לפזר וקבל הסבים  
 גדולים יותר. באופציה ב' הסבים אנו צריכים לפזר מתח  
 שמשקלו של הליפט ולא של האנר (חסכוני יותר מתח  $V_{in}$  מה- clamp).  
 נשים לב כי לעומת תפקוד המעלה ה-2 האופציות לא שנינו

את תפקוד המעלה והמתח בק"א יהיה  $V_A = V_{in} + \frac{n_1}{n_2} V_o$  כי איתנו רוצים שסדרין יהיה  
 הלכה של כל הזמן הצמוד לתיק המעלה.

### חיבור ה- clamp:

⊗ לפי ההיגיון במקום בו יש סליל, צורת  
 החיבור לא משנה לנו (מהינתן אורך חוט) כי  
 אז יש לנו עוד קצת סליל במקום שכבר שטנו  
 סליל, אורך החוט כן משנה לנו בקומות בהם לא  
 שטנו סליל, כי אז קל השאיר פרזיטיות במקום  
 בו לא רצנו השאיר כלל.

### Parasitic inductance and physical placement



Connection of the clamp/snubber should be **directly** on the element

⊗ הסיבה שמעבירים קל אחרי מקור המתח היא כי  
 אנו רוצים שהספק יורד את חוץ ה- parasitic ואת הפסדים  
 קצתם נקח אנדרס כי נספק איזו וסטים נביחים ייבוצו 10.  
 סיבה נוספת היא שאנו לא רוצים להפזר חברה ליער  
 תפר לבנה ורוצים לנסור אתו בתוך המעלה, מכיון שנקבל  
 הוא אופטימלית נעין ל- AC תפר המעלה יסגר באמצעות הקבל  
 במערכת.

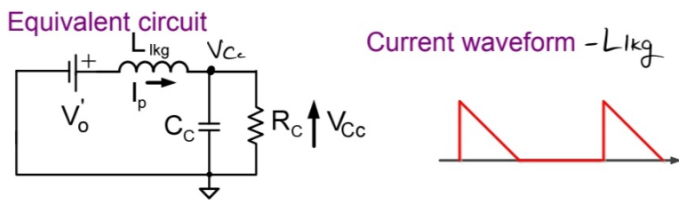
⊗ במערכת איתנו נרצה לחסוך את הקבל ממש על האנדרס  
 שמוחם יפזר כמה שיותר קצרים  
 בנוסף נרצה את ה- clamp על החלק של הטרנזיסטור.  
 Ⓜ החלק של הקבל פחות חשוב כי הוא למדוד נצד לפרויקט  
 להיקחם - לא משנה אם תהיה קצת השבחות.  
 ⊗ נרצה את הקבלים כמה שיותר קרובים לסליל והמתח כדי שיעתק  
 סלילים יהיה יציב ולא יתפרסם מההיבטאות הפרזיטיות (Ll, Lp, Lk).

### תכנון Clamp:

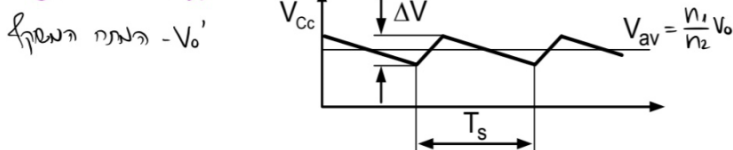
התכנון יהיה (כפן למ- clamp) וגם ל- snubber  
 Clamp - מגבר של קאטה של מתח.  
 snubber - יותר מגבר של מתח של הסביבה.

כאשר מדגרים על תכנון clamp/snubber מדובר  
 בקירוב ראשוני, כי אן באמת צריך לדגור מה  
 ה-leakage במעלה (זה קורה). במעלה איתנו עומים  
 אופטימלית.

### Clamp design

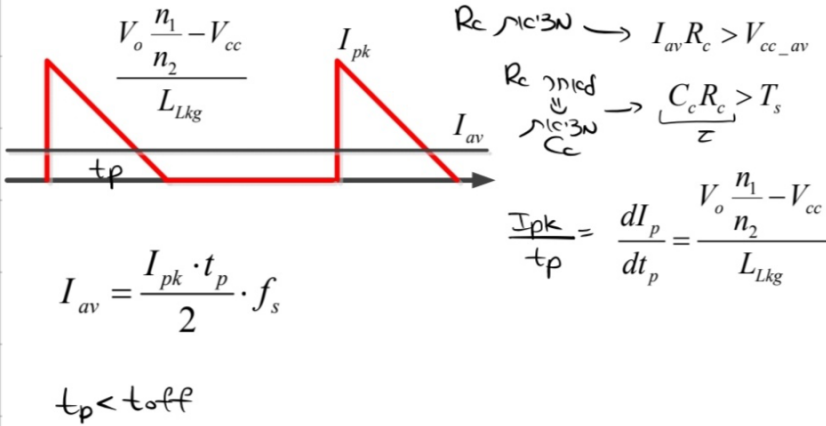


Assuming small ripple on the clamp capacitor (will be designed that way)



המתח של הקל של ה- clamp יהיה קבוע (בהתערה של אדווה), הוא ייקלם למתח  
 סליל  $V_{av} = \frac{n_1}{n_2} V_o$  ומתחיים שט

## Calculation of clamp components



קט- הפגן כו  $I_{pk}$  מתפרק, מיוצאים  
 אותו מתקן השיבוץ פלו, מציבה  
 במסואר הזרים הממוצע ומיוצאים את  
 $V_{cc\_av}$ . כאשר יש לנו את  $I_{av}$  ו- $V_{cc\_av}$   
 נמצא את  $R_c$ .  
 צריך להימיה גלפחות על מחפז אחד היתח  
 $V_{cc\_av}$  על יתפרק.

מיוצאים את  $R_c$  כפי שהטברו ואז נמצא את  $C_c$  בספרת תנאי. על  $T$ :  $R_c \cdot C_c = T$

## Design procedure

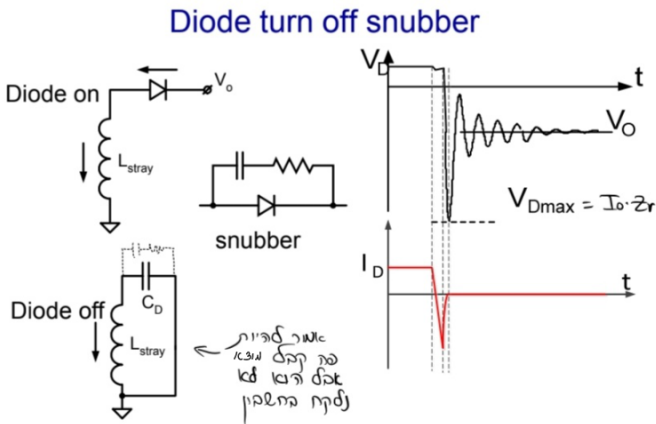
1. Select  $V_{Cc\_av} > V_o'$
2. Calculate  $I_{p\_av}$
3. Select  $R_c = \frac{V_{Cc\_av}}{I_{av}}$
4. Select  $C_c$   $T > T_s$
5. Adjust values



סיכום תהליך התכנון:

## Snubber

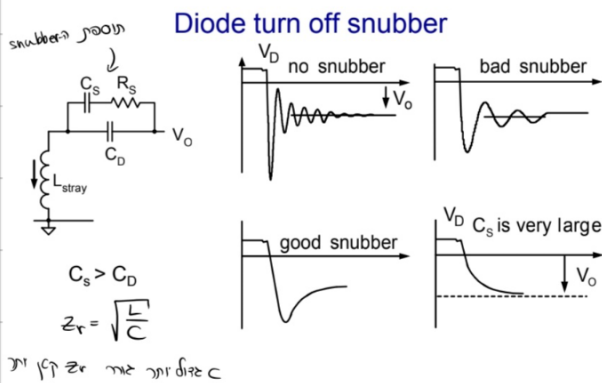
Snubber ישיה את בעלת המעגל.



כאשר האינרס זרים זרם הפוך הדיודה (סד ליגט  
 שהדיודה הופכת לקבל) ומתפרק מתח גזלו מאוד על  
 הדיודה ( $V_{Dmax}$ ). נרצה להקטין את  $V_{Dmax}$  ואת משך  
 התעבורת זמן נשמש ה-Snubber! מה שסדשים הסם  
 זה מציבים מסלול חלופי למתח השלילי לזרום בו

במקום שיכרום הדיודה, מסלול זה מיוצר בסדרת קבל סם אימפדנס (מקום קבל גדול יותר מ- $C_D$ )  
 ובכך הסכם הדיודה תקבל מתח אחורי קטן יותר (כי  $V_{Dmax} = I_D \cdot Z_r$ ) ובכך הגנו על הדיודה  
 ויצרט היסון אד יותר (הקטנת משך התעבורת).

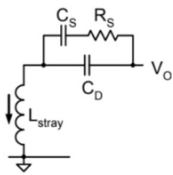
התנדד גם משיג לאימפדנס!



המסוף, אנתו חוצים שכל פסם ישיה שימוש ה-Snubber  
 האימפדנס (רז) יהיה נמוך  $\Leftarrow$  הקבל  $C_s$  צריך להתפרק תוך  
 מחצר מכיון שאם  $C_s$  גדול מדי המתח על הדיודה על  
 יתפרק (יכל לפאזר הפסלה תגינה על המערכת).

# תכנון Snubber:

## Snubber design



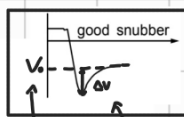
Required values  
I<sub>pk</sub> (reverse current)  
Stary inductance

$$L_{stray} I_{pk}^2 = C_s \frac{(V_o + \Delta V)^2}{2}$$

סה"כ ד"ר הסל"ס      סה"כ האנרגיה      סה"כ היקום

Resistor for damping  
C<sub>s</sub>R<sub>s</sub> < T<sub>s</sub>  
C<sub>s</sub> needs to discharge

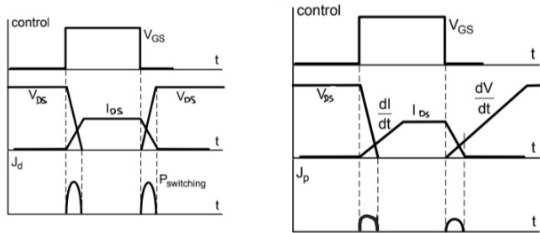
Use simulation to optimize the snubber



כדי סטה"כ האנרגיה תגיע דרך ה-Snubber אנחנו צריכים ל-C<sub>s</sub> יתחיל מאפס כל פעם כדי ליצור את המולאו של האימפדנט הנמוך. בנוסף צריך לכתור את הנגד R<sub>s</sub> (לאחר בחירת C<sub>s</sub>) כך שיקבל C<sub>s</sub> יסוך לפני T<sub>s</sub>.

הרכיבים (Clamp) Snubber שדיברנו עד כה ( $\frac{dV}{dt}$ ) אלו רכיבים שנועדו להגן על רכיב אחר (אינדיקציה)

## Switching snubber

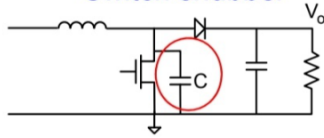


The objective: avoid overlap of current and voltage

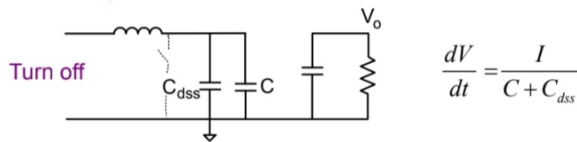
Slow the rise of either current or voltage

כעת נצטרך ל-Snubber ( $\frac{dV}{dt}$ ) שניועד להקטנת הפסד מילול (צג גם) אף על הרכיב בסדקיון כי יש בחתך חום לפעם על הרכיב. החפיפה בין ירידת סל"ת V<sub>os</sub> לבין עליית הרכיב הרכיב יוצרת הפסדי הספק. אנחנו נרצה להקטין את שטח החפיפה.

## Switch snubber



dV/dT (at turn off) can be slow down by adding external snubber capacitor C



הצגתה כאן ניתן לראות מסלול boost עם קיפול טוסל במקביל לטורן (כעוסף לקיפול הפוכה) כדי להאט את  $\frac{dV}{dt}$ .

הבעיה היא שכאשר הטורן יחזור לעצב חס האנרגיה תתפרק אליו בחזרה ומכיוון שאנרגיה בקול היא  $\frac{CV^2}{2}$  וכעת C<sub>eq</sub> = C + C<sub>dss</sub> אז האנרגיה

גדולה יותר ולכן כאשר אנרגיה צ תתפרק דרך הטורן נקבל למל מפה חד יותר ובעסיק את מה שהרווחנו.

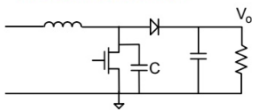
ולכן מוצב הפתרון  $\otimes$  ובגן בעת פרידת האנרגיה הפכות הוספת הנגד R<sub>s</sub> (R<sub>os,on</sub> < R<sub>s</sub>) רוב הפרקיה תעשה דרכו ולא דרך הטורן. קיבלנו ל:

• לשהים בצד אחד ומפיקים בעקוב אחר.

• לא שיפרנו את הנפילות אבל אפשר להשתמש בארנ יותר קטן כי פחות מחממים אותו (כעקוב ל-R<sub>s</sub>)  
הא כה שמתחמם בעקומו).

## Switch snubber

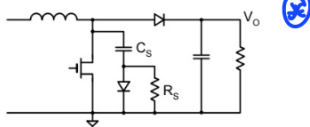
Problem at turn on



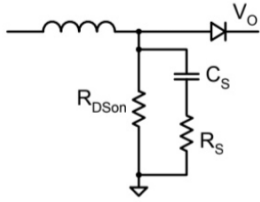
$$E_c = \frac{CV_o^2}{2} \quad P_d = \frac{CV_o^2}{2} \cdot f_s$$

Dissipated through the transistor

Solution



## Switch snubber design

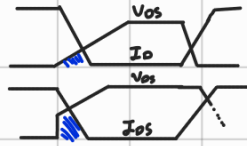


If  $R_{ds\ on} < R_s$  most energy will be lost to  $R_s \rightarrow$  Heat  
 Selection of  $C_s \rightarrow$   
 Selection of  $R_s \rightarrow$  to ensure reset

$$T = \frac{1}{R_s C_s} \ll t_{on} \quad t_{on} \approx 4R_s C_s$$

Question: how VDS will look if  $C_s$  is not fully discharged?

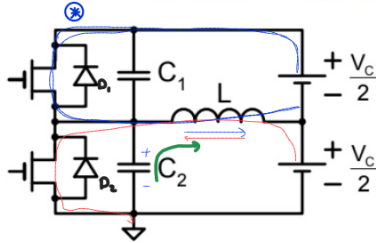
צריך לדאוג שהקאפ  $C_s$  יתפריק סביב לאפס



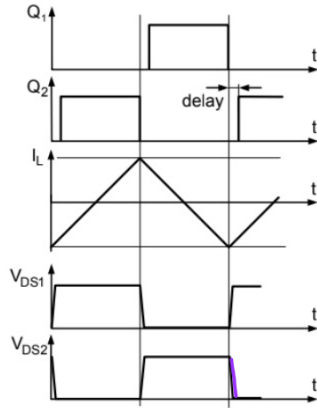
אחרת בקיום הזרם :  
 נקבל את הזרם :

כי הקבלה לא נפרק עד הסוף והספק הדימום יגדל!  
 מצד שני בוחרים בן שיא את קצב הסלילה, מצד שני חשוב שתפריק (פני הדימום) של הדימום.

## Lossless (ZVS) snubber



$C_1, C_2$  of transistor plus external



כח ה- Clamp / Snubber שדיברנו עליהם

שם אכסיו היו עם הפסדים (נזקים).

יש טכניקה ל-Snubber חסר הפסדים שנוצל לעתים את האנרגיה ולא לבזבז אותה על נזק.

בדימום זה מצדוק פשוטה אקטיבית (של מנעים טופסים).

י,  $C_2$  אלה קבילים שאנו שמים בכפיו להוריד

את הקצב. בנוסף מנעים  $C_1, C_2$  או כפלים זמן מתר הניעם כדי שלא יהיה קצור, ובנוסף נורה לעשות שינוי בזמן מתר הניעם.

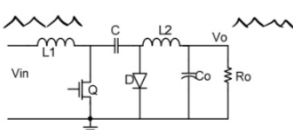
נסביר את אופן הסדוקי של המערכת נעשה  $C_1$  מולין  $C_2$  לא מולין אז זורם זרם  $C_1$  ואז  $C_2$  נאמ לעתה  $V_{DS2}$  כשר סוגרים את  $C_1$  ואז העתה  $C_2$  יתחיל להתפרק שם לעתה קחזי לאפס וביצע יחז  $C_2$  תפסחה (תהיה העתה קדמי). כולל מנעוקים את  $C_1$  ואז הזרם זורם כך וכאשר  $C_2$  ינתק יקרה בדימום אותו דבר עבור  $C_1$  -  $D_1$  (כמו שפינתנו עבור  $C_2, D_2$ ).

- Advanced topologies  
 Half-bridge, Full-bridge, Push-Pull, C'uk, SEPIC
- C'uk
  - SEPIC
  - Half-bridge
    - Symmetrical operation
    - Double power supply
    - Principle of operation, definition of D
    - Using bus capacitors - capacitive voltage division?
    - The concept of split bus capacitor
    - Component stress
  - Asymmetrical operation
  - Full-bridge
    - Operation
    - Stress
    - Reset
    - Push-pull

## תצורה עאפולוגיות

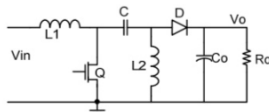
## ממירי אט' ו- SEPIC

## Types of PWM converters C'uk and SEPIC



C'uk  

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



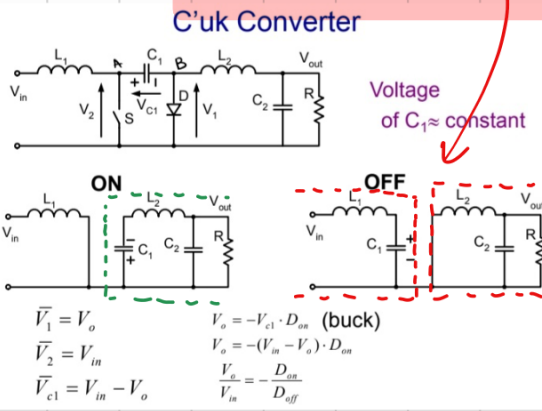
SEPIC  

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

שני הממירים הנלווים הם ממירדים וזם משלים מתח כדיברנו קודם אל ממירים אמרנו לעזבי הכרמים שב- Buck הכניסה לא רציפה ומובא רציף לה- Boost הכניסה רציפה ומובא לא רציף ובאופן כללי אדגיש לנו רציף. ב- B-B -אם כניסה וזם מובא לא רציפים. (לא רציף  $\leftarrow$  קשה לסטן).

איזה חוקי מור הטיבה בסדר?  
 עשה את המסוורת?

ממיר אט'א



בממיר אט'א יש סלילו כלפי הכניסה וכלפי המוצא  
 עלן הצדדים יהיו רציפים והוא עושה את ההסללה של BB

תצבות: המן המענה שלט בניתוח המעגלים הוא שטח המוצא של סליל אט'א.

עלן מהתצבות מתקיים:  $\bar{V}_a = V_{in}$ ,  $\bar{V}_b = V_o$ ,  $\bar{V}_c = V_{in} - V_o$  - קבוע!

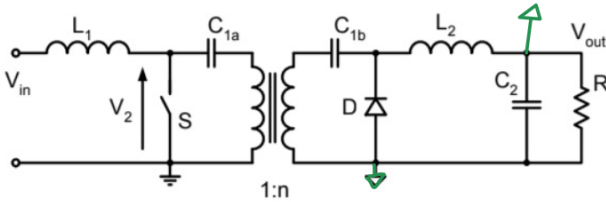
$\frac{V_o}{-V_{c1}} = \frac{V_o}{-(V_{in} - V_o)} = D_{on}$

מצב ON - אם נסתכל על החוק ל-  $C_1$  מוצא,  $C_1$  מהווה מקור מתח וקבל ממיר אט'א!  $\Leftarrow$

מצב off - נקבל ממיר Boost!  $\Leftarrow \frac{\bar{V}_c}{V_{in}} = \frac{V_{in} - V_o}{V_{in}} = 1 - D_{off}$

נאחד תמסורת וקבל תמסורת של BB!  $\Leftarrow \frac{V_o}{V_{in}} = -\frac{D_{on}}{D_{off}}$

**C'uk with isolation**



- Any polarity
- Any voltage ratio

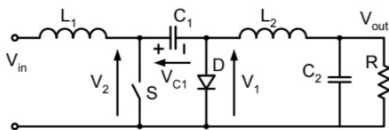
$\frac{V_o}{V_{in}} = \pm \frac{D_{on}}{D_{off}} n$

אט'א עם ביזוב:

אפשר לעשות אט'א עם ביזוב - אפשר את  $C_1$   
 לחלק לשני חלקים עם שני באמצע וזה יתפזר בזיק  
 אותו הדבר. כבר אפשר להסידר דרגת חופש הפונקציות  
 התמסורת ובטחם הבוטנצ'אל החיובי/שלילי לא משחק תפקיד  
 יותר כי אנו יכולים לקבוע איפה לשים את המעגל.

**C'uk Converter**

Inductors on the same core



Can be done only if the voltage on the windings are equal

$V = n \frac{d\phi}{dt}$

(אם יהיה מתח אחר על אחד מהם לא תהיה רציפות בסליל ולא יתפזר כפי שאנו רוצים).

נשים לב כי תנאי זה מתקיים באופן אוטומטי בעוד צורת המעגל של המעגל, מכיוון שביניתה של הקבל קבוע

(בהיפוך האדמה) קמבד on:  $V_{L1} = V_{in}, V_{L2} = V_o = (V_{in} - V_o) = V_{in} - V_o$ , במצב off:  $V_{L1} = V_{in}, V_{L2} = V_o = V_o$

# אטי' - יתרונות וחסרונות

## C'uk advnatages and disadvantages

### Advantages

- Continues input and output currents
- Single switch
- Step-up and step-down

### Disadvantages

- Two inductors
- Extra capacitor (of high rms current)
- Difficult to stabilize
- High voltage on switch  $|V_{in}| + |V_{out}|$

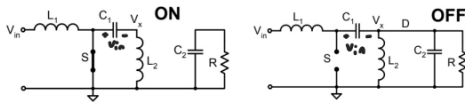
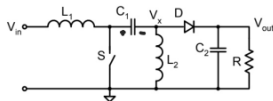
### יתרונות:

- (1) זרם רציף בכניסה ובמוצא - קל לסנן.
- (2) ממש יחיד (המקום 2 - Buck - Boost).
- (3) גם מעלה מתח וגם מנמיך.

### חסרונות:

- (1) 2 סליליות - אדף אפשר לשים על אותו ליבה.
- (2) קהל מסוג שצריך להסדיר בו זרם גבוה. (כאשר ידוע על ערכי של קהל זה לא אומר מספיק על היכולת של להסדיר זרמים)
- (3) קשה לייצב
- (4) ממש גבוה על המתח.

SEPIC Converter



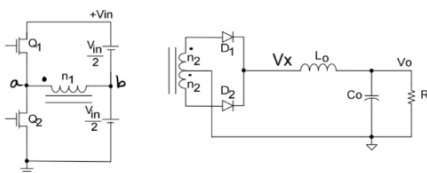
$$\begin{aligned} \bar{V}_{L1} &= 0 & \bar{V}_x &= V_o \cdot D_{off} - V_{in} \cdot D_{on} = 0 \\ \bar{V}_{L2} &= 0 & \frac{V_o}{V_{in}} &= \frac{D_{on}}{D_{off}} \\ \bar{V}_{C1} &= V_{in} \end{aligned}$$

## ממיר SEPIC - מתחמים באותו אופן כמו אטי'.

המפתח מתח למנוע אבס על סיליל נקרא:  $\bar{V}_{L1} = 0, \bar{V}_{L2} = 0 \Rightarrow \bar{V}_{C1} = V_{in}$   
 במצב מס: הצד החיובי של C1 מקיזר למקלה עם הצד השלילי (Vx)  
 שווה עם -Vin - ולכן נקרא:  $V_x = -V_{in}$   
 במצב off: Vx מקיזר למוצא עם  $V_x = V_o$   
 מכיון שממתי המנוע על סיליל שווה עם 0 - נקרא כי  $\bar{V}_x = 0$

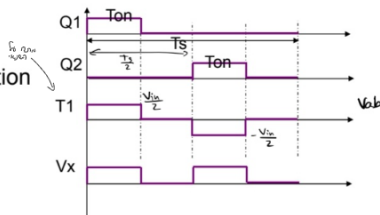
$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D_{on}}{D_{off}} \Leftrightarrow \left\{ \begin{aligned} \bar{V}_x &= V_o \cdot D_{off} - V_{in} \cdot D_{on} \\ \bar{V}_x &= 0 \end{aligned} \right. \Leftrightarrow \left\{ \begin{aligned} V_x &= -V_{in} \\ V_x &= V_o \end{aligned} \right.$$

Half-bridge



HB, symmetrical operation

$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_{in}} &= \frac{n1}{n2} \cdot D \cdot \frac{1}{2} \\ D &= \frac{t_{on}}{T_s/2} \end{aligned}$$



## חצ'י לטר - טוה עם אפוזיה של Buck. (למנוע Buck הול) - Forward

באופן כללי חצ'י לטר יכול להיות מתווה אחרת מ-Buck אבל אבט נלמד כמה.

המתיים עובדים בצורה סימטרית, משלימים החצאי מתפר

$$(T_{Q1} + T_{Q2}) = T_s$$

- כאשר  $V_x = \frac{V_{in}}{2} \Leftrightarrow D, \Leftrightarrow V_{ab} = \frac{V_{in}}{2}$

- כאשר  $V_x = \frac{V_{in}}{2} \Leftrightarrow D_2, \Leftrightarrow V_{ab} = -\frac{V_{in}}{2}$

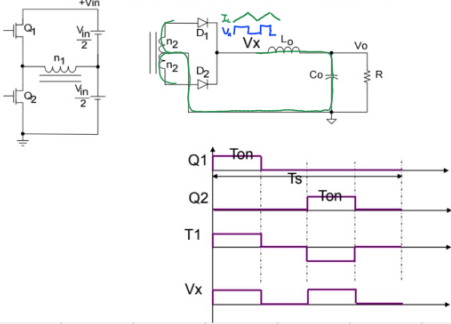
- כאשר המתיים ב-off  $V_x = 0$

קייבולט כי עבור תפר  $f_s = \frac{1}{T_s}$  יש לנו ממיר Buck שחוקי התפר כפול  $f_{Buck} = 2f_s$

והתמסורת של המעגל הנה  $\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{n1}{n2} \cdot D \cdot \frac{1}{2}$  כאשר D מוגדר כזמן מס של מתפר  $\frac{T_s}{2}$ .

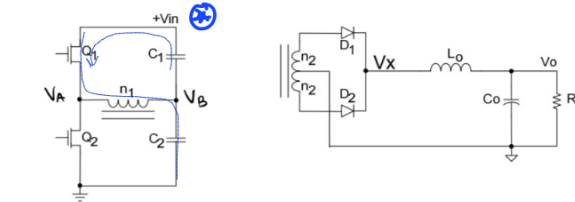
### Half-bridge

What is the transformer voltage at off time



נראה כעת כי בזמן שרמתים כ- off מתקיים  $V_x = 0$ :  
 ו- מבטיח לחליף  $\Leftarrow$  סדיו י זרים של הסליל  $\Leftarrow$  הזרם מתפזר  
 ל-2 הדיודות  $\Leftarrow$  יש קצר בשנאי (כי זקם מוליכתי)  $\Leftarrow$  מתח אבט  
 $\Leftarrow$  מתח אבט משקף לראשית וכן זה עליו מתח אבט.

### Types of PWM converters HB –Capacitors to replace supplies

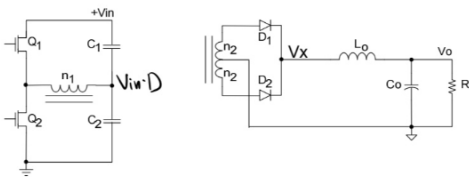


זים עם קול יחיד  $\Leftarrow$   
 זים עם 2 קוליים  $\Leftarrow$

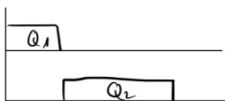
התקום עטים ב מקורות  $\frac{V_{in}}{2}$  אנוני שלמים קוליים.  
 $V_B = \frac{V_{in}}{2}$  עכא תפטר ביוחס הקוליים!  
 הסבר שאנו שלמים ב קוליים (למחרת שיפועה הדיודין  
 אנו דבר זה עם קול יחיד) היא שאנו מרוויחים זכס  
 בחצי מרדוק ובתדר כפול, כי כאשר מתח אחד מולין  
 זכס זכס זה מביקל השני (⊗).

### Types of PWM converters

Asymmetrical operation – synchronous rectifier



Motivation to asymmetrical operation: Spikes and oscillations at the mid point an off time

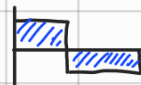


אסימטרי

עבודה א-סימטרית - סך פי דברנו של עבודה סימטרית  
 מפעילים אחת מהזים ומפעלים את השני. הבסרה  
 בעבודה סימטרית היא בחלק שהמתחים ב-off שם קול  
 השאר פרזילתי. נקל ענינה (סם סבייק):  
 בעבודה א-סימטרית אנו עובדים בזנה משליטי ובכך  
 נמנעים מבסרה זו - כאן  $\frac{t_{on}}{t_{off}}$  זה שלמים!

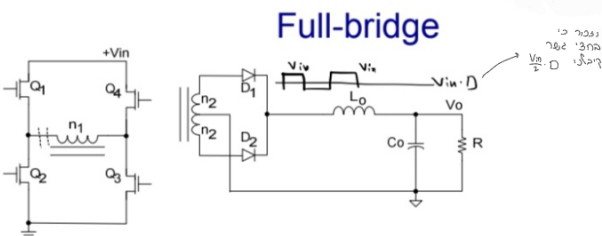
⊗ חשוד עטים זה שבהחלפה לא תהיה חיובית (למנוע קצר) ולכן צריך זמן מת. גודל הזמן המת. חשובה

משיקולי אנרגיה.



⊗ וולט-שניה נשמר, בזרת המתח של הסליל היא:

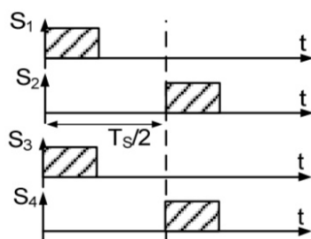
### גשר משא



תחסות של  
 הזכר הנטל  
 כאשר:  

$$\frac{V_o}{V_{in}} = 2 \frac{n1}{n2} D$$

$$D_{on} = \frac{t_{on}}{T_s/2}$$

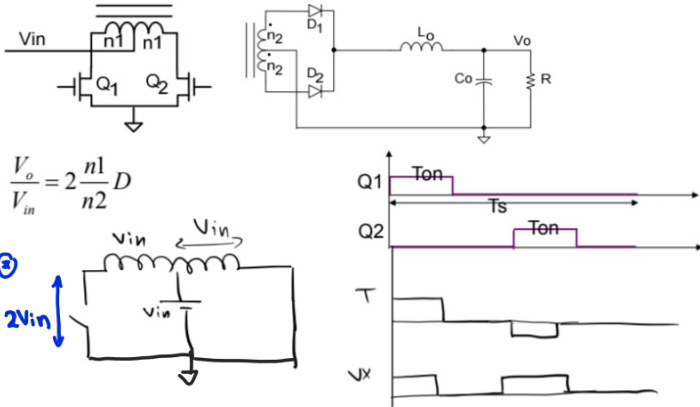


חצי גשר נקרא כך כי הוא חצי מהצורה של גשר מלא.  
 פון יש 4 ארז. אוני עובדים עם גשר מלא לחצי גשר  
 משיקולים של הספקים. אם נרצה להאזיר הספקים  
 גדולים צריך רכיבים שיכולו לעמוד במאמצים האלה.  
 ארז הודד של Buck מוגבל לענינה מסוימת.

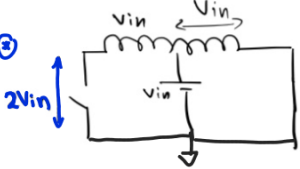
$$\begin{cases} Q_1 \text{ ו- } Q_3 & \text{עובדים יחד} \\ Q_2 \text{ ו- } Q_4 & \text{עובדים יחד} \end{cases} \Leftarrow \text{צורה סימטרית}$$

⊗ מעגל זה מצדד כמו חצי גשר רק שפה שניה לא שאין קבילים ואם נרצה להבטיח  
 עבודה תקינה של הסגרי (נרצה לפזר את המנו DC) עם שנים קהל באור לסגרי!

**Push-pull**



$$\frac{V_o}{V_m} = 2 \frac{n1}{n2} D$$



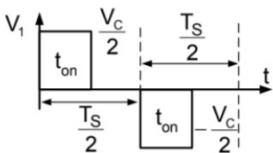
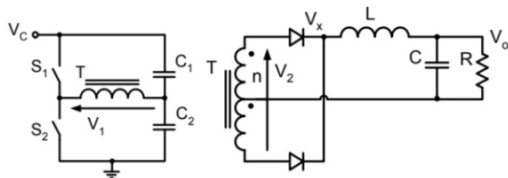
**מגרי Push-Pull**

הכנסה היא מאמצע הסגרי (יש סגרי).  
 הרגל מצדדים בצורה סימטרית.  
 כאשר Q1 מוליך, Q2 מוליך והדיוק Q2 ו-Q1.  
 מבחינת הספקים - הרגל "סופר" מאמצי מתח בדיוק  
 שגרי אף מוליך מתח הסגרי  $1 = \frac{m}{n}$  עשף של הסגרי Vin  
 ועוד התקלה (⊗). לומר מאמצי מתח יותר גבולים.

\* פה שני הרגל מניוחים לאדמה - לומר הדגמה שלהם (הדפלה שלהם) נכרף עיצור S-G בחום לפולטניאל  
 אדם יחסית קל לעשות זאת. נראה בהמשך גשר שבו יש ארץ שמניוחים למתח גבוה - ולחמול איתי  
 כי בעייתך (כי צריך לעסור פולטניאל  $V_{GS}$  ו- $V_{DS}$ ).

**Reset of Forward, HB, FB**

- Forward - auxiliary winding
- HB, FB - Natural



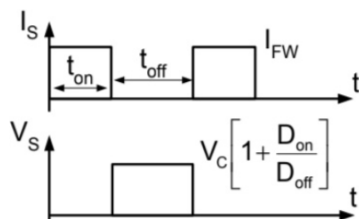
**מנגנון ה-RESET:**

ב-PP, HB, FB ה-RESET קורה באופן  
 אוטומטי מצורת מבנה המעגל. ולכן בהשוואה  
 ל-Forward אנו מניחים ארץ אף  
 חוסכים את התוספת ה-RESET וזו נה  
 לעוד התקנים יותר גבולים!

**Forward, HB, FB, PP**

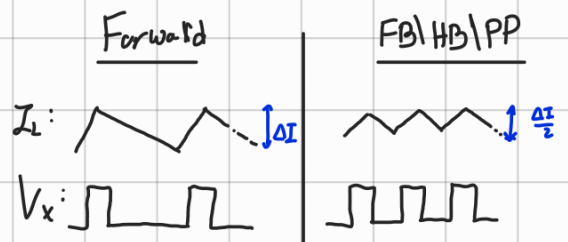
- $I_L$  ripple for same L
- Forward:  $\Delta I$
  - HB, FB, PP:  $\frac{\Delta I}{2}$
- Switch Utilization  
 Important consideration:  $V_s(off)$ ,  $I_s(on)$
- Assumption:
- Same input and output power
  - Same input voltage

**FORWARD**



**סיכום והפרואה:**

אדות הרצם של סגרי היא חצי  
 ב-PP, HB, FB עומתת Forward



זאת מכיון שב-PP/HB/FB אנו מצדדים  
 התקרי כפול!

## Types of PWM converters Comparison chart

Converter	Sw current	Sw voltage
Buck	$I_o$	$V_{in}$
Boost	$I_o(Don/Doff)$	$V_o$
Buck-Boost	$I_o(Don/Doff)$	$V_{in}+V_o$
C'uk	$I_{in}+I_o$	$V_{in}+V_o$
SEPIC	$I_{in}+I_o$	$V_{in}+V_o$
Forward	$I_o \cdot (n2/n1)$	$V_{in}+V_{rst}$
Flyback	$I_o \cdot (n2/n1)(Don/Doff)$	$V_{in}+V_o \cdot (n1/n2)$
HB	$2I_o \cdot (n2/n1)$	$V_{in}$
FB	$I_o \cdot (n2/n1)$	$V_{in}/2$
PP	$I_o \cdot (n2/n1)$	$2V_{in}$

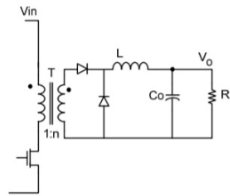
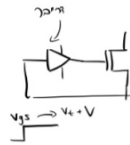
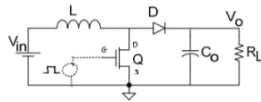
סיכום של כל סוגי המעירים שקיבירו עליהם לפי מתחים של המתאים:

## דרייברים

### Drivers

- What is a driver
- MOSFET capacitances
- Driver operation
- Gate capacitance
- Gate drive calculation
- Driver types
- High-side driver
  - Isolation
  - Optocoupler
  - Boot-strap supply

### Driver



כאשר אנו רוצים לעבוד עם מער

מתמקד עלינו לעבוד לאורך. על מנת לעשות זאת צריך לשים

ספק שהאיפיון שלו הוא מקור מתח שייתן

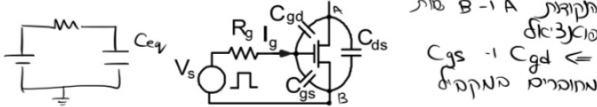
פולס כאקרה  $V_{gs}$  (סוג צב משייגים מהצפי מעבר).

הנוסד ניקח בחשבון שהצבם שצטבר דרך אותו

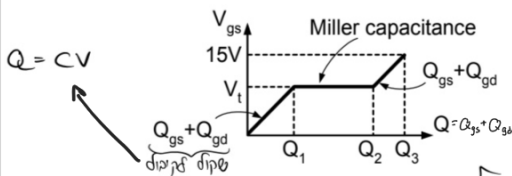
דרייבר הוא אמנם קטני אבל לא מבולגני!

נצטרך להתעניין עם תופעות של הפסאז וקיצול (בנוסף על שטחין) לספק בין ה-5-6 את המתח הנכון).  
נשים לב כי אם ה-5 מיוחס לעוצמה (כמו במקרה הזה) או לפולסצטאל אתר.

### MOSFET capacitances



מכיוון שקודם קצר ל-AC  
תקודמת A ו-B סוגת  
פולסצטאל  
 $C_{gs} \leftarrow C_{gd}$   
מחושבים בתוקים



אנחנו MOSFET או IGBT זה אותו דבר מבחינתנו

כי מה שנלוותי לנו הוא הקיבול כניסה (צד הבטניה).

אנחנו יחסית מהיר אם קיבול הכניסה שלו נמוך.

ניתן לתאר את האת' עם 3 קיבולים פרזיט'ים

(כאשר  $C_{gs}$  פחות רלוונטי לנו).

נשים לב בדוג' כי עם מתח  $V_t$  יהיה בין Q

ל-5 V לינארי ( $Q=CV$ ) וההקבר הוא אפס (קילאט).

כאשר מניעים ל- $V_t$  שנינו ב-10V יביא לשינוי

ב- $V_A \leftarrow$  המתח יתחיל לרדת ( $V_{gs}$ ).

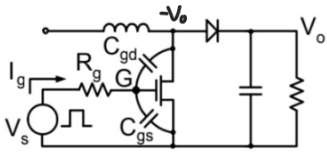
הרדוד שמתחלה מתחילה להיפתח עד שהיא פתוחה לעמרי (חוויה) יש הזבר לאתר וניתן

לתאר את צב כניסאב על מעבר כניסה עם קיבול.

הוא רוצה לתאר אופיון של אב המתח הספר עזה  
בתוצאה מהתבצן שאיתנו מכניסים לעשר.  
מתק הופך יהיה ניתן לעסוף את הדרייבר שנצטרך.

# אפקט מילר:

## Miller effect

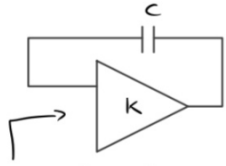


$$V_{Cgs}(0) = 0 \quad V_{Cgs}(\infty) = V_{GSmax}$$

$$V_{Cgd}(0) = -V_o \quad V_{Cgd}(\infty) = V_{GSmax}$$

$$Q_{total} = V_{GS} C_{gs} + (V_{GS} + V_o) C_{gd}$$

$$C_{eq} = \frac{Q_{total}}{V_{GSmax}} = C_{gs} + C_{gd} \left(1 + \frac{V_o}{V_{GSmax}}\right)$$



$$C_m = C[1 - (-k)] = C[1 + k]$$

הקדם נקודה  
מתחברת  
אלה הקדם  
הוא

הצורך שמונה עם הרגל (סקופית קומה) לא נחה  
ולכן נרצה לעבוד עם בי.אוי.  $C_{eq}$  - כמו הקיבול  
הסקופ שאנחנו רוצים להקיא את  $V_{GS}$  מ- $V_{GSmax}$   
שומר לדוגמה Boost של מנת של  $V_{GS}$  יגיע למנת  
מקסימלי. עליו של  $C_{eq}$  צריך לפתח מנת של  $V_{GSmax}$   
(עדיף המנת השלילי. מאמסה -  $V_o$ ), ולכן

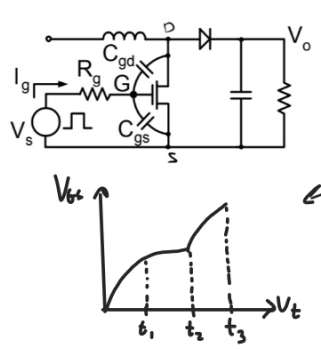
נשים על שהאיבר  $\left(1 + \frac{V_o}{V_{GSmax}}\right)$  הוא בגודל התוצאה של אפקט מילר!

בדבר המפרט של  $C_{eq}$  נעזר והוא הקיבול האפקטיבי. ג-ה- $V_{GS}$  מ- $V_{GS}$  המנת הקיבול  
אליו מוסיף להיות  $C_{gs}$ .

דוגמא: עבור  $V_{GSmax} = 15V$ ,  $V_o = 405V$ ,  $C_{gs} = 100pF$ ,  $C_{gd} = 200pF$  נקט:  $C_{eq} = 100pF + 200pF \left(1 + \frac{405}{15}\right) = 5.3nF$

נניח שרצה לעבוד בתדר של  $10kHz \Rightarrow T = 10\mu s$  שזו אומר מיתול כ- $5\mu s$  של מנת  
סקופיות השלייה תפיה מדגרה איפ'מילר. נרצה כמין שליה  $t_d$  של אחוז  $\Rightarrow$  מחספה  $t_d$   
!-  $Q_b = I \cdot \Delta t = C_{eq} \cdot V_{GSmax}$   $\Rightarrow I = 1.71A$  כמו זרם שצבם לפיק כמין קצר עטן אנו מבנים  
שעלינו לבחור דרייברים טובים. בנוסף, כמו זרם ממנצח עטן לבחור דרייברים מיוצא  
אילו יותר זרם מ- $I$ .

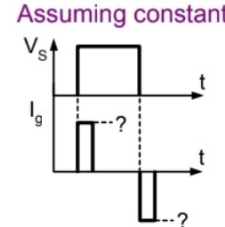
## Miller effect



נשים על כי בהתחלה מקבלים כולם של זרם  $I_G$   
-  $V_{GS}$  שליה הביטום של  $\frac{1}{C}$  בתחומים  $[t_1, t_2]$  ו- $[t_2, t_3]$   
ובתחום  $[t_2, t_3]$  כז התחום בו הרצן ממוד נהדר  
ומתקיים אפקט מילר קללל זה המנת  $V_{GS}$  עמו  
שליה. כאשר  $V_{GS}$  ירד לאכט הרצן ממטק  
לפית מנהר. לומר מקבלים מהמנת  $V_{GS}$ :  
בהתחלה שליה  $\Rightarrow$  ההסקיה קצרה קללל אפקט מילר  $\Rightarrow$  ממשיכה השלייה.

## Required drive calculation

### Equivalent capacitance



$$C_{eq} = C_{gs} + C_{gd} \left(1 + \frac{V_o}{V_{GSmax}}\right)$$

$$Q_{total} = I_g \cdot t_{on} = C_{eq} \cdot V_{GSmax}$$

$$I_g = \frac{C_{eq} \cdot V_{GSmax}}{t_{on}}$$

$$t_{on} = t_r$$

כמין מני רוצים  
שהוא יש לוקסימים.  
העם  
היה לה  
המנועם בהחלק  
העם של הדרייבר צריך  
עדיף קצת יותר

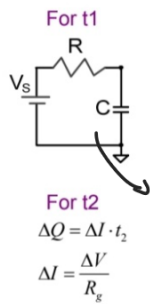
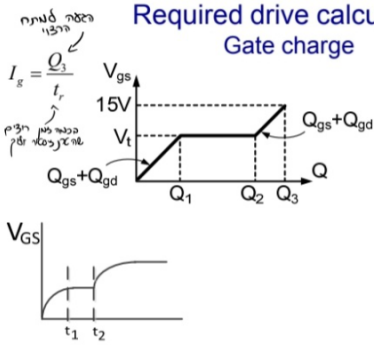
## חשובים של אפיון הדרייבר: יש 2 שיטות:

### Equivalent Cap (1)

מחשבים  $C_{eq}$  הקורה ממנו לנו:  $V_{GSmax}$ ,  $C_{gs}$ ,  $C_{gd}$   
לאחר מכן בתורים  $t_r$  שרצוני לנו.  
ומחשבים את  $I_G$  של סמך של התענים הללו  
כאשר צומים שהדרייבר צריך להוציא זרם מ- $I_G$ .

## Gate Charge (2)

### Required drive calculation Gate charge



$$I_t = \frac{Q_g}{t_r}$$

ההיפוך האמין נובל עקב את  $I_t$  כן כאשר אנו קותרים את  $t_r$  הרצוני לנו.

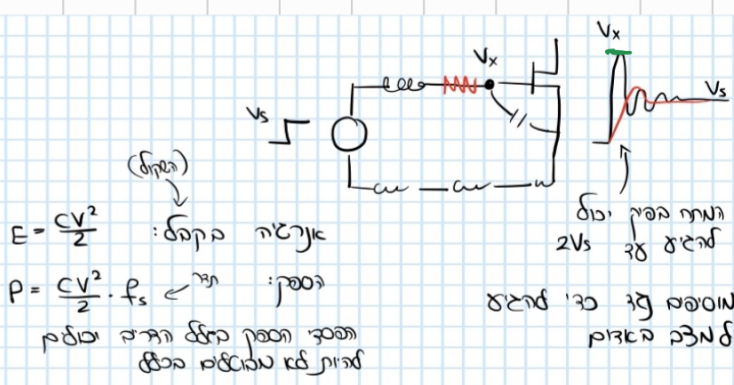
$$C_{eq} = \frac{Q_g}{V_t} = \frac{Q_g}{V_t} \quad [nF]$$

ועקב את  $t_r$  מהמשוואה  $V_t = V_s(1 - e^{-\frac{t}{RC}})$ ,  $[= R_g C_{eq}]$  עבור  $t_2$  המתח  $(V_{gs})$  קבוע בזמן  $[t_1, t_2]$  ולכן הזרם

של התג  $R_g$  קבוע והוא  $I = \frac{\Delta V}{R_g} = \frac{V_s - V_t}{R_g}$  ומכיון ש:  $\Delta Q = (Q_2 - Q_1)$  נקטן לנו נובל למצבו את הזמן שלוקח

$$\Delta Q = I \cdot (t_2 - t_1) \Leftrightarrow \text{נמצא את } t_2$$

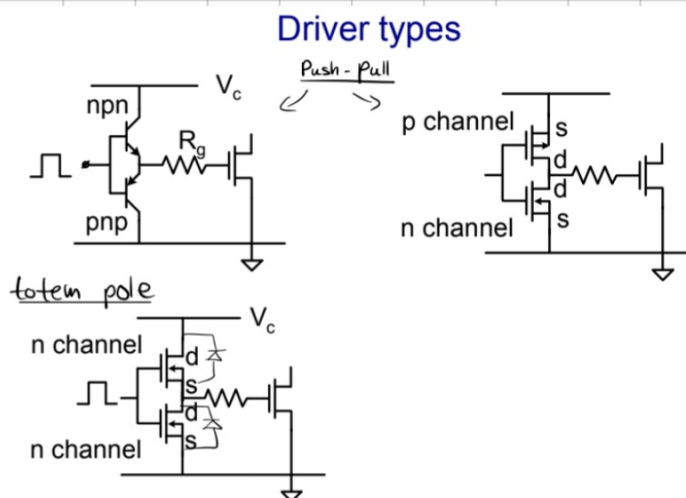
### כעת נסבור על התג $R_g$



ללא התג הקיבולים וההסאות הכרזיות של ה-G יגרמו למעט תהודה כאשר שיא הולדה יסל להזיז 8-2V. נרצב נגד בטור נובל של אהתיים קיבדים כדי שפך לא יגרם לנו לנאה משמעותית ה- $t_r$ . הנוסל נגד צב הכרזות לחיסון וצב להפן של התקו (דרייבר) כי בעברתנו נובל

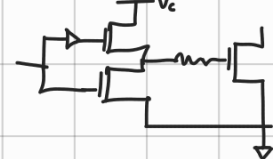
את כמות הזרם שיפאה לצטר מהדרייבר. אלנו לבחור את הדרייבר כן שיוכל להוביל את הזרם הרצוני ומצד שני צריכים היסון והגלות צרם כדי שלא יהיה יותר עידי צרם בטכה והדרייבר י"סרל

## סוגי דרייברים



**Push-Pull:** כאשר ה-חס ה-חקה יולג והוא מוגדר צרם. כאשר off ה-pnp וילין ויסאור את הארץ. בדבי מברי של אתי ניאה כי עארני יכולת עקב צב מתח שלילי. ולכן אם הדרייבר יוכל להוביל מתח שלילי (דוה ספק נוסל) צב אפול יותר אנכ מבהית האצת קצב הטזירה של הארץ, מכיון שברצו הפריקה היא חק זמנצית היקור למדנה.

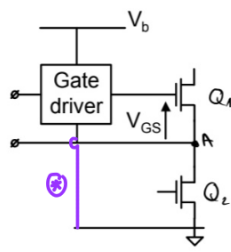
**totem pole:** שלמים שני ארץ מאותו סוג (Nmos) מהסיבה ש-MOS שלין יותר איד ה-pnp.



צרון לשים דילי (באבר) הכנסה למאה הארץ כן כדי שפניה לא יפתחו בול וייצרו קצר.

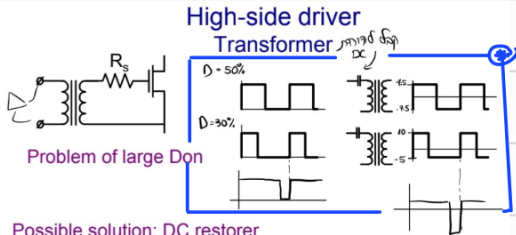
**High-side driver**

**High Side driver:** זה כפי דברנו של דרייברי שמתכוון שה-5

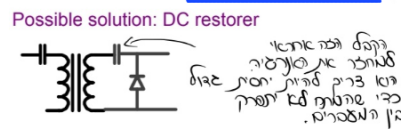


נמצא זמנה. יכולים להיות מקרים (כמו בחצי אשר) - כאשר  $Q_1$  מוליך  
 ית' A (בול) נציג  $V_{in}$  ולא אמנה.  $\Leftarrow$  הדרייבר צריך להוביל את  $V_b + V_{gs}$   
 (מתנה שהדרייבר מיוחס לאמנה  $\otimes$ ). לכן דרייברי לתוף הגבוה (דרייבר צל).  
 נסתכל כעת על כמה פתרונות לבסיה הזו:

**טנאי:** אם נשתמש בטנאי קאמתי ננכל לקבוע את

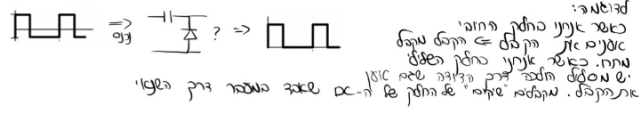


מתנה הדרייבר ביחס לאמנה כפי שרצינו אבל כמון  
 מתקבלת בעיה חדשה - אינו נאקד את ה- DC שלנו  
 ולכן אם הדרייבר היה  $V_{GS}$  בספין הוא  $7.5-7.5$   
 נכל לבחור יחס עיפוסים 2:1 ולקבל תחום  $15V-15V$

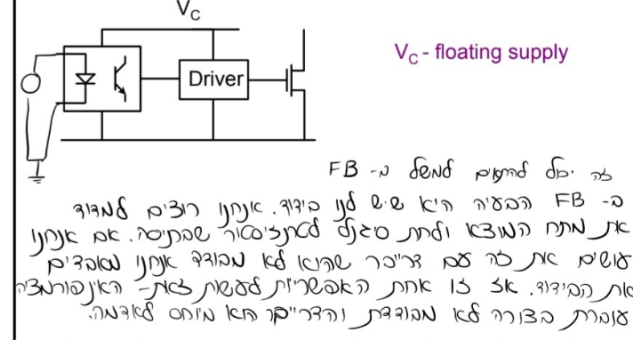


אם נביוון שבמטרי  $\mu\mu\mu$  או משנים את ה-Duty-cycle (כי קודם את פני התמסות)  
 ולכן עבור Duty-cycle נמוך/גבוה קבל יעושים שינוים לעתה ה-  $G$  (ראוי  $\otimes$ ).

Duty-cycle קאן אבדו יתו לערום כנך עארנז מהצד החזקי/מליני.  
 עקן החצו הפתרון מסעו הידוק (DC-restorer)



**High-side driver Optocoupler**



זה של למתחם למש  $V_c$  ה- FB  
 ה- FB רבועיה היא שיש לנו בידינו. איתנו רוצים להגיד  
 את מתנה הנמצא ודחת ספאל למתכנסור שמתנה. אם איתנו  
 עושים את זה עם דרייבר שהיא לא מבודד איתנו מבודדים  
 את הבידינו. אז כו אחת האפשרויות לעשות זאת - האנפורמציה  
 צונרת בצורה לא מבודדת ודרייבר הוא מיוחס לאמנה.

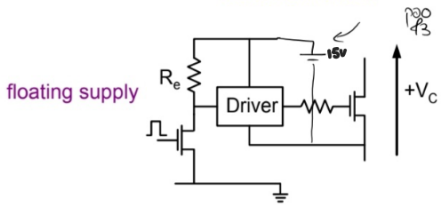
**Optocoupler:** האמצעות הידוק אבלי.

האנפורמציה עוברת דרך אור עארנז מאז הוא ניקו  
 פקודה לדרייבר, כאשר כעת הדרייבר רכיב יושג על  
 ה-Gate-source. ולכן אנו חייבים ספק פראי. דל  
 לתוף על הדרייבר. יש 2 בעיות:  
 1) צריך ספק דל לעמדת.

2) אבליוקולרים בשואים (צוליים) הם אימים מאוד (המהירים יקרים מאוד).

$\otimes$  ישנה שיטה נוספת בה מודדים שינויים קלים מאוד ומתקדם מגבר שמקביר מאוד ואז  
 דוחפים את הסיגנל החוזר.

**High-side driver Potential offset**

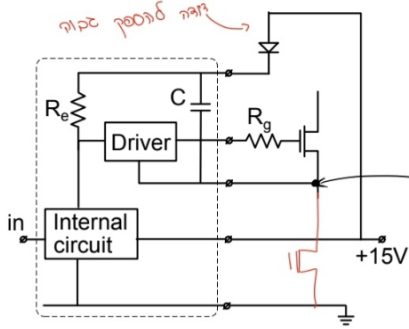


Logic signal is referred to GND  
 FET is used to sustain the high voltage

**potential offset:** עקרוים איבשו נצב מהספק הדל

ומתברים ארנז לאמנה. במקום האופוקולר את הסינל  
 נתנים עארנז רכיב. כמקין שכי יהיה סינל הופכי.  
 $\otimes$  ארנז מלין  $\Leftarrow$  פולנציאל 0.  $\otimes$  ארנז עא מלין  $\Leftarrow$  פולנציאל 15V.  
 $\otimes$  צוין נצב גדול כפי עמנוע צרמים גדוליים (בצבוב הספק).  
 $\otimes$  צוין ארנז לעתה גבוהה כי כאשר לא מלין הוא סוכל את ההספק עליו (ולו הדרייבר).

High-side driver  
Boot-strap supply – floating capacitor



• Boot-Strap: עילב מפורסמת משתמשת בה העלון.

מבוססת על potential effect רק במקום ספק בל שמה קרה, עקב זה קוראים Boot-strap יש פה דרייבר רק שם על ספק שמייצר את הוולטז'ה של 15V והוא מיוחס לאדמה. כאשר הארנו התפתח העלון יש מסלול זרם מהספק הנמשך (15V) דרך הדיווד עקב וממשין לאדמה.

כאשר הארנו על העלון הדיווד מניקרת ואל הקל יש מתח 15V בל  $\leq$  יש עליו 15V בל לבדירה כדי להוציא את הפולס החוצה.

⊗ הערך של הקבל צריך להיות כזה שיחזיק את המתח הבין לעקבה שיתנים את הפולס ולא ייפול עד שי"אן לפסח הדאה.

הערות:

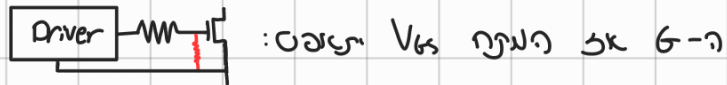
זוג הא - Boot-Strap

High-side driver  
Boot-strap supply – commercial product

High-side driver  
Boot-strap supply – commercial product

1) כאשר הדרייבר לא מפעיל זרם המתח של ה-G לא יזרום.

כי טעף מסוכן כי אם ב הארנו על 15V האסטר אז יש קצר לאדמה וזה ישרוף אותם, לכן קפידים להשים נגד Pull-Down שיבאז שכאשר הדרייבר לא כופה מתח על



ה-G אך המתח של 15V יתפוס: **תוצר** הוא בסדר אצל א שאסר לסגירת קל שמה כשהי איתנים בנודדים.

2) אנו רוצים להימנע מאוסילציות של ה-G ולכן קצרו את

המתח בין הדרייברים (והקבל שלו ה-Boot-Strap) לבין ה-G וה-S של הארנו כדי להקטין השראות פרזיטיות.

3) מיקום נכון של הדרייבר והארנו במסלול - רוצים למנוע השראות פרזיטיות, אך החוק הינו: איפה שיש סליל כל

לחיות עוד קצת סליל איפה שאין במסלול סליל מלכתחילה, אסור שיהיה סליל.

# Current sensing

# חישת זרם - כעת נכון בטכנים!

- Resistive sensing
- Current transformer
- Measuring DC
- Reset
- Design
- Hall effect

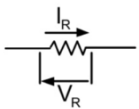
ההבדל בין אמיר לספק:

אמיר - מסבך הספק חשמל. מכניסה ליציאה, תלוי ה-Duty cycle שלו והתנאים עכן יכול להיות כמובן שלו כל דבר.

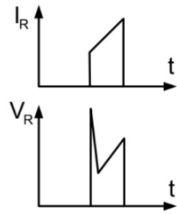
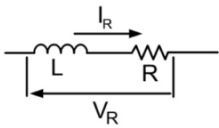
ספק - נטן קריטריונים סטנדרטיים, מוביא מתח אדק קדול, יציד, מבקר ומרוסן.

אל מנת שנהל עקב את המקור, ואנו צריכים להיות מסוגלים למדוד את הזרם שהוא מוביא. כבין איך לעצב זאת!

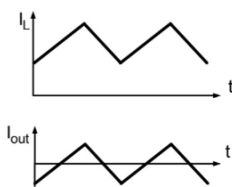
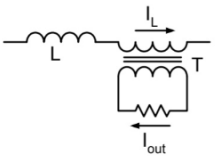
## Resistive sensing



Parasitic inductance



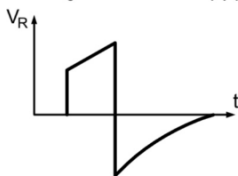
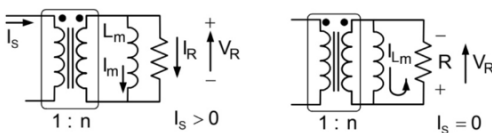
## Current transformer



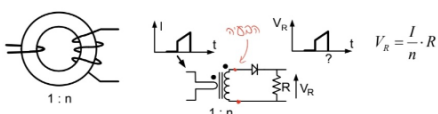
DC component via primary lost  
DC component may saturate transformer

## Current transformer

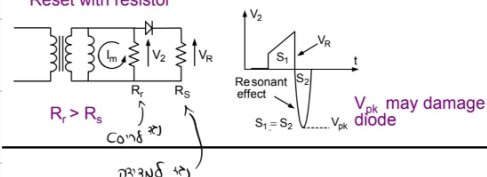
Pulse current - Problem due to reset



## Pulse current transformer



Reset with resistor



## Resistive Sensing:

ארי קאן שאנו יודעים את ערכו ולקבוק מה התנה שנוכל סליו ואז נדע את הזרם של הספק. הבעיה היא שלם נדק יש הסיאות ברזואיר שתיצור אפקט קפיצה בתנה. כיום יש כלים שיודעים להתאים מה-איקספ האלה. לעומת זאת נדבר שיפול מתח לא זנים על הגד כפי שהכרם לא יחושק מתקן רעשים ואז אפילו ככר אמש סגלים הנבולות.

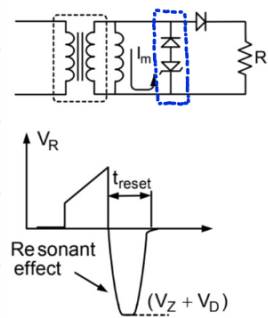
## Current transformer:

שנאי זרם- הראשוני עם ליפופים בודדים, במשני עם ליפופים גדול ומפלים את התנה של הגד שמכר שווה ליהם ליפופים. כלומר:  $n:1 \leq n:1$  ואז נקבל:  $V = \frac{I}{n} \cdot R = \frac{I}{n} \cdot \frac{I}{R} = I$  מאצוק ודעםקל השנאי הוא קצרו עם- DC ותנולר ה- DC לא סבירת (טכניקה רזוננט) וייבצר שלג גבורה מידי קליבה שלו ואז השנאי ייכנס לרזוננס.

## Pulse Current transformer

כדי לפתור את איבוד ה- DC, נשים ציודה של הסינוני (כפי שסעיני ה- Flyback) ואז סגור כניסת פולס נקבל את פולס כמובא השנאי. אולם, בקולנו עם- Flyback

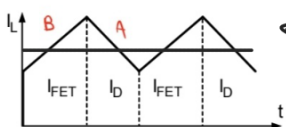
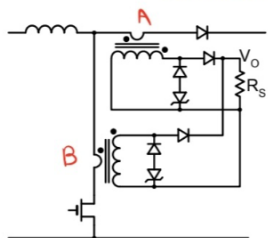
**Pulse current transformer**  
Reset with clamp



כאן נלקח את שני הטרנז'ורים ועליו מחוץ של הטרנז'ור? אפשר עוד קצת!

שור ניתקל בהצטרף ה-Reset. לעם כן נשים נצד טורנך את ה-אינקס של הדיודה ויין סלילה (R<sub>r</sub>) צורת התנה על חצי R<sub>s</sub> היא צורת הזרם בסלילה כמובן ניתן לטפל בהצטרף ה-אינקס בצורה באנחה יותר עי' מסלל **Clamp**. ואז נכל לענות ספק מתנה (ולמל מקוסס boost) עם בקורת זכר בצורה (X)

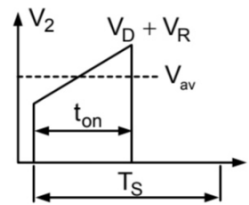
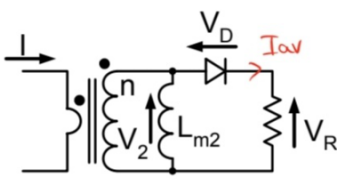
**Measuring inductor current**  
Combining two sensors



מסדיר לו את הזרם שנכלל של התנה, וסר'כ קבלו חלטה מדידת הזרם של חצי R<sub>s</sub> תחזיר לנו את הזרם במעגל!

נשים על שתיקתנו את שני הסלילים סס'י החוק של אם יש סליל אפשר להוסיף סליל ואם אין סליל אסור!

**Design of current transformer**



Transformer saturation is a function of the voltage

$$B_{max} = \frac{\int V dt}{n A_e} \quad V_R \approx \frac{I}{n}$$

$$\int V dt = V_{av} t_{on} = \frac{V_{av} D_m}{f_s}$$

$$V = n \frac{d\phi}{dt} = \frac{n \cdot A \cdot dB}{dt} \Rightarrow \frac{1}{n A} \int V dt$$

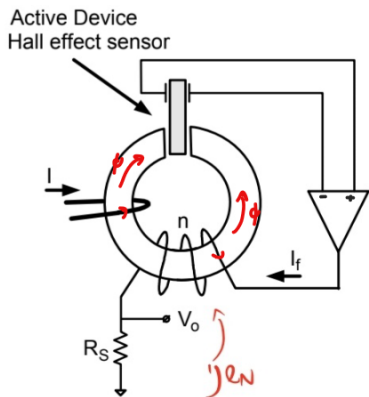
$$B_{max} = \frac{I_{av} R D_{max}}{n A_e f_s}$$

למה מנוצח? במשך הזמן שנקל למה

תכנון הטרנז'ור:

צריך לעבור שלמות שנה שטא' שאנחנו מסדירים בו זרם, הדיבר שלפונט' לעברנו - אנחנו לא חוצים שהוא ייכנס לרזודה, כדי שנקל את התמנה תכונה ועל שמכנס שטא' לרזודה זכ מתנה. נמצא B<sub>max</sub> נשים על שאנחנו לא יכולים לעבור על נקד, צריך לקחת בחשבון שהנדי משוק פקאר שיכול להכנס את השטא' לרזודה.

**Hall Effect sensor**



Zeroing the flux by feedback

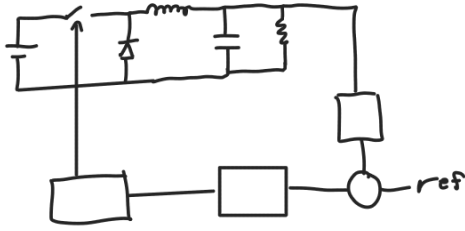
$$I_f \cdot n = I \quad V_o = \frac{I}{n} R_s$$

Hall Effect Sensor

הסנסור מודד את כמות השלל שאנחנו קלידה ומסנה בתמצא מתנה השטא' את הפיש התמנים נכנסים למעקר והוא מוציא זרם I\_f כזה שיזרום לשלל בכיוון הנדי (שלל מהמשני) וכך יקבז את השלל עד שהסנסור ימיר אותו להיסר מתנים אכס (משול) ואת I\_f אני מסדירים. עתק R<sub>s</sub> וקבל V\_o = I\_f R\_s = \frac{I}{n} R\_s. (V\_o = I (= R\_s = n))

ה-AC סדיר לעמש. רזוז, ה-DC סדיר עי' כן שנקבלים את השלל.

# Control of switch-mode converters



# בקרה של ממירים מתמטיים

עם כזה למצב עדיפות ממיר מתח אשר מקבל הספק כניסה מספק וממיר אותו ליתוס מתח זרם שונה באמצעות. ההתחל בין ממיר לספק הוא בחזי הקצרה שלהם, שניהם נותרים הספק מסוים עם מתח וזרם מסוימים אך ספק מוציא מתח מאוד נמוך ייזיק גם כאשר יש הרבה שניות באמצעות.

## Control objectives

### Produce control command to

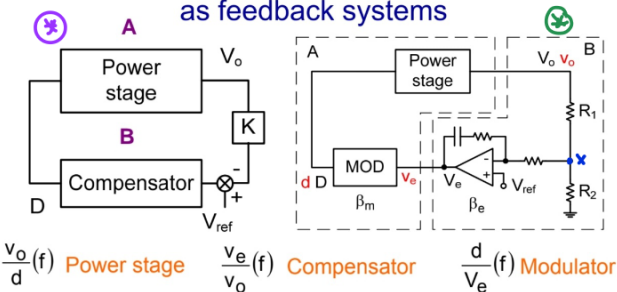
- Regulate the output voltage
- Obtain zero or small steady-state (DC) error
- Quick response to reference changes
- Fast recovery
- Immunity to input and load changes
- Reasonable overshoot

- ויסות מתח המוצא - אם דתנו  $V_{in}$  במוצא, נקבל  $V_{out}$  גם אם פתאום נשנה את המולט או  $V_{in}$  וכו'.
- שגיאת מצב מתמיד אפס - במצב מתמיד נקבל  $V_{out}$  בדיוק (מאוזן)
- תגובה מהירה לשינוי מתח הפונס - אם נפרוט פתאום  $V_{in}$  במוצא, צריך שהשני יקרה מהר ולא ייקח זמן.

- יכולת שיקום מהירה - אם נכנס סייבה שהיא מתח המוצא לשערה, צריך שהזו הקצרה יתכן את המצב מהר מאוד.
- חסינות לשינוי מתח הפונס או עומס - נרצה שהמערכת תהיה חסינת בטרם שנוי המתח כניסה או המולט.
- overshoot סביר - כאשר המע' מתקנת את מתח המוצא, אסור שינוי מוצא זרמתי, התקצון יהיה קצונו וסלול לערים ל-overshoot גדול, נרצה לוקר overshoot לא קצונו. מדי שלא ייזיק המולט.

# ממירים מתמטיים - מערכת מולט

## Switch-mode converters as feedback systems



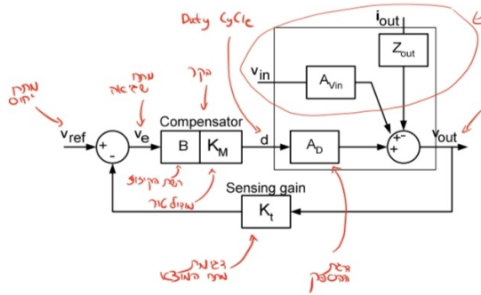
- Power stage is a Switching System (non-linear)
- Compensator is an analog or digital controller
- Linear control theory based design  $\rightarrow$  small signal response

נבחנו בסכימה של מע' מולט אנלית כאשר A כה המעיר, א- מתקא את מתח מוצא המעיר לקראת הרצה הבאה,  $\otimes$  צה הרכיב ממוצא את הפולטרה של בין מתח  $V_{ref}$  למתח מוצא המעמס  $V_o$ . א- ו- B צה הוקר הפכוני שמקבל את המולטרה ומוצא את  $Duty\ Cycle$  מתקאים - D.

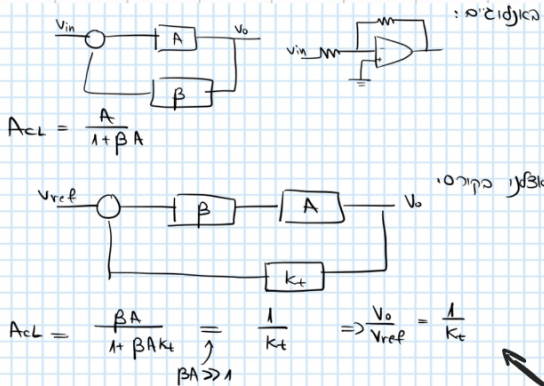
נבדוק בהימוט סטציוני  $\otimes$ . נשים על כה הק'  $X$  היא מתח מתח של  $V_o$  והיא עוסקת על שאת  $V_o$  בסדרי גודל של מטטה נרצה לקבל אותו עם נגזר סדין ולכן נבטרו לקבל את מתח המוצא. אנו נקבל המוצא המוגבר את  $V_e$  (למעשה צה  $V_{correction}$  ול  $V_{error}$  שכן  $V_{error}$  הוא המתח בין הפקי הכניסה למגבר). ואותו של מכוון את המערכת לנגזר. שמהרתי של המוצא את  $PWM$  עם  $Duty\ Cycle$  מתקאים. האות הנדר נכנס אל דרגת ההספק המטרה לשנות את  $V_o$  כן שפולטרה של  $V_e$  יולן לאפס.

Control of PWM converters  
disturbances in voltage mode

המשפעות של  
מחילת היקטור  
בזמן המעבר

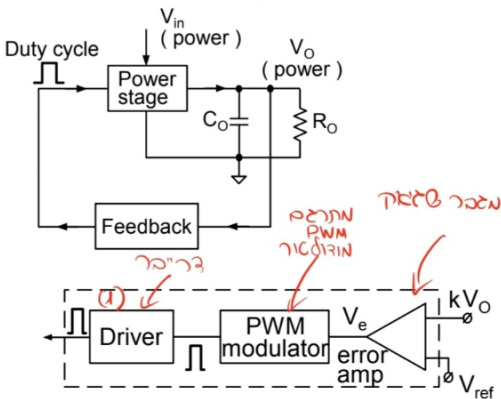


הפקה הרב נראה מורכב יותר אבל העצם הוא מתאר בקיון  
אותו דבר רק בצורה שמבילה את היתמנות בצורה  
יותר חזקה. הפקל צב מודגם אין ניתן לקחת התשובה  
אז המשפלות על מתח הכניסה וזרם העולם (נהג 3)  
- Avin - מראה אין שינוי בעתח Vin משפיע על V0 פלי ששינוי כואם  
ה-Duty-cycle.



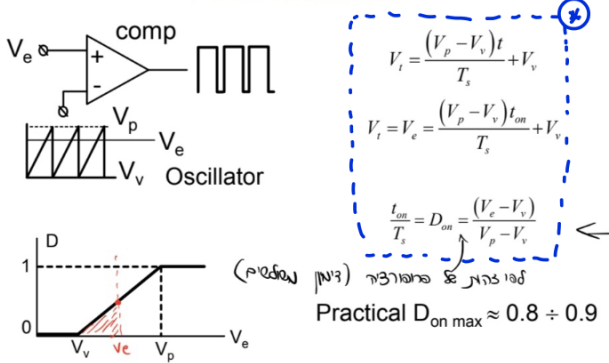
האנלוגים:  $V_{in}$   $V_o$   
אבלון בקורסי  $V_{ref}$   $V_o$   
 $ACL = \frac{A}{1 + \beta A}$   
 $ACL = \frac{\beta A}{1 + \beta A k_t} \Rightarrow \frac{1}{k_t} \Rightarrow \frac{V_o}{V_{ref}} = \frac{1}{k_t}$   
הארה: מע משק מהטון הפרי (עם מתח ייתוס) קמאר  
שעמם העמבו יקוק אחרי  $V_{ref}$  עם כבי קבוע  $k_t$ .

Voltage regulation



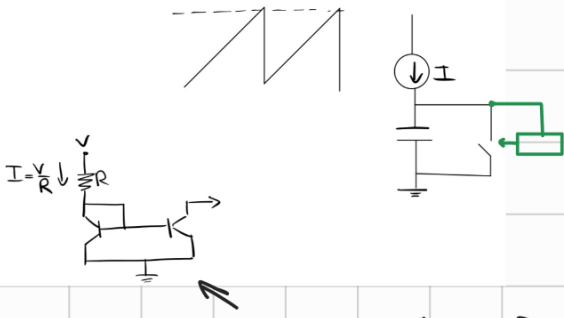
כעת נדבר על החוק של ה-Feedback:  
מאגר שפאק-מסביבו אנו נקבע את הפת המשק וקיצוב כן  
שה-  $V_e$  נקל אות שייתן לנו את המודע של כוא Duty  
צבין לרת.  
מתנה PWM Modulator - מקבל את  $(V_e)$  ומספק לנו אות PWM.  
דרייבר - ה-Duty cycle הולך לעמט ועלן צבין לא דרייבר כבי להמביא  
אז ה-  $k_t$  עמק לעמן שפרי הארת.

PWM modulator



PWM Modulator: המביל לעבור על מודע  
שורה ה- pulse שלו יתאים לעקך כניסה  
מסויים צריכים לקחת קומפלטור בהדק (-) לשים  
לא שן מסור ובהדק השני את עקך ה- DC שאותנו  
רוצים להקשות אליו (+) נקל קמבו על מודע!  
מטור  $V_e > V_{off}$  , מטור  $V_e < V_{off}$   
נרצה לעקאר את התמטורת בין D -  $V_e$  בתחום  $0 < D < 1$  (כוא 3).

Sawtooth generator



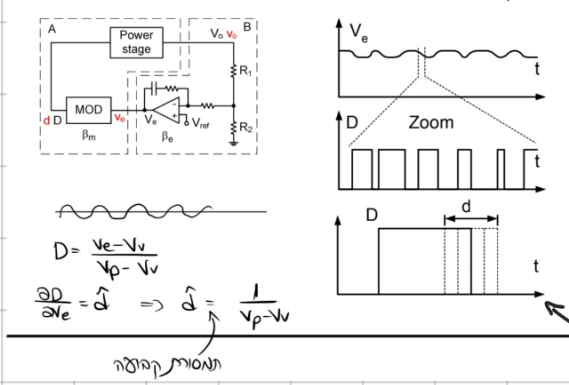
קראתא עגן מיצבים שן אמור:

זקוקים מקור זרם. מחברים לקבל  $\Rightarrow$  עליית מתח לניאוי. לקבל נהדר מתח שיבוך ע"י מטרפת שתזזום את ק"י המתח. המתח יאכסם לעמית עד לכך קל ואז נעשה קציר ונפרוק את הקבל, וחוזר חלילה. הקצב ייקבע לפי האדן I ו-C. את מקור הזרם ניתן לממש ע"י האי זרם.  $\otimes$  הקצב הוא זמן המתיוז.

$\otimes$  ה-D יכול להיות בין 0-1 בתוך מחזור המתיוז.  
 $\otimes$  ברירת הקבל על מתיבצת באבס זמן.

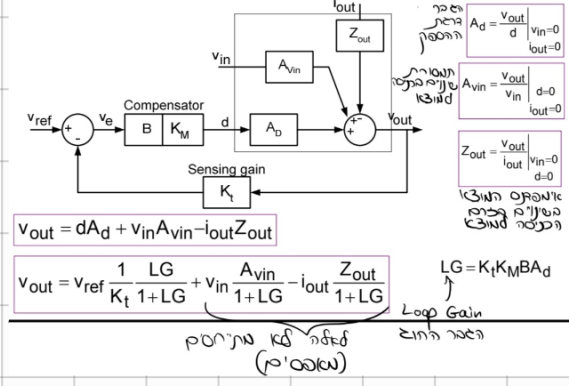
$\otimes$  ציין זקוקת בחשבון את המצבים המקסימליים והמינימליים של שן המסור  $(V_p, V_v)$ .  
 לא נפרוק עד הסוף כדי לא לקבל צורה אז נקח עד לק"י מסויימת   
מטרה: יצירת שן במסור כבר מורידה לנו נה-Duty cycle המקסימלי אלו אנחנו יכולים להגיע (סדר גודל  $\approx 0.5 \times D_{max}$ ).

Transfer functions



ההיטהרה של אור התיוזן - ננים שימל שטח מבוקרת וכל המטעם עובדת (תמיד יש קצב רעם  $\Rightarrow$  תמיד מתח השימור יתגזנז מנדל).  
 זקן זמ D יוצר (במצבים מאוד קטנים). זה מלמד שאפי אנתם שיהי אנתנו זה יכולים לחולץ את התגובי הדינמית של המטרפת.  
 נקח את הערך  $V_e$  ונקח סינט שירכה אל ה-  $\hat{d}$  (כמו אורן קטן שחוק)  
 המומה ה-DUTY cycle AC קבל Duty cycle שפחה קין ופסחם אזל  
 אפי המגולוציה של הסינט שחכנסט סביה ק"י המטרפה.  
 $\otimes$  המלויבזיה היא לאפ"ן את התמטרת כאשר מכניסים שינויים קטנים  $\Rightarrow$  פראגה דינמית).

Control of PWM converters disturbances in voltage mode



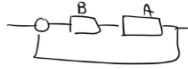
בנינוח התמטרת אנו עושים זמט סבה ק"י עבודה מסויימת (מקדמה D ומסתולים אל שנייים קטנים כמו 0). נזון המתחה סינטס בתזר נמוך, מסלים, ורואים את ההתפרטור לאורך ציר התזר. בקורס שלנו נתעסק רק בחלק של החוזב הסלור (עלל)  $(Z_{out}, A_{vin})$ . המטרה שלנו היא לקבל כלי לענישה התגובה הדינמית של המע' לקביעת חדה הסרט והיציגור שלה.

פסון התמטרת שאנתנו נבחרתם עמון  $\Rightarrow$  כן כולל תמטרת לנאוי  $\Rightarrow$  צרכי עיזר צרכי עמון  $\Rightarrow$  המע' הוא לנאוי מתעב כמון עמון. זה נחשב אנתו לעמון צרכיה של המע' נבחרת לעמון עבודה, וכן תקבולת העבודה שאנתנו קובלים מתבחן  $\Rightarrow$  המע' יודי נכון.

# קריטריון ניקוויסט

## LoopGain test Nyquist Criterion

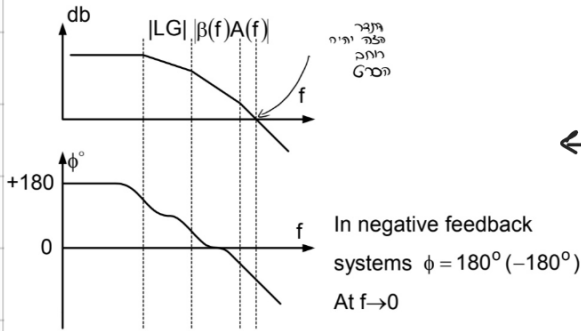
$$A_{CL} = \frac{A(s) \cdot B(s)}{1 + LG(s)}$$



- The system is unstable if  $\{1+LG(s)\}$  has roots in the right half of the complex plane.
- Nyquist criterion is a test for location of  $\{1+LG(s)\}$  roots.
- Nyquist criterion is normally translated into the Bode plane (frequency domain)

צריך לזקור את המשואה האופיינית של המערכת  
(מכנס התמטורה בחזק סגור). אם למשוואה שורשים  
בחלק הימני של המישור המרוכב  $\Leftrightarrow$  מעץ לא יציבה!  
בנוסף תצאה מהירה כמה שאפשר בצורה שההפרש  
לא תשפיע בצורה משמעותית.

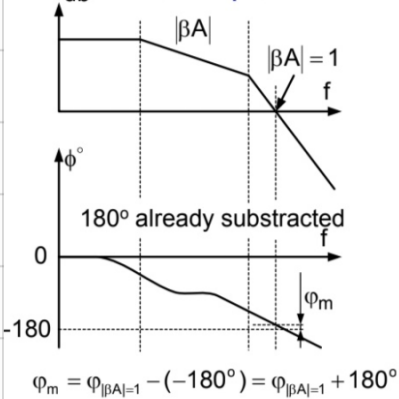
## LoopGain test



המרת קריטריון ניקוויסט למישור התדר:

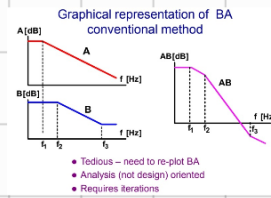
עושים זאת לפי ה-LG. את הארץ הנה מקבלים בהתאם לנק' סקודה ספציפית.

## Bode plot

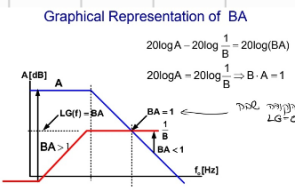


נרצה לקחת את קריטריון ניקוויסט ולהמיר אותו לצורה בודה.

נצרכה בשני שיטות שאני יודעים לנייחיה זוג בודה:

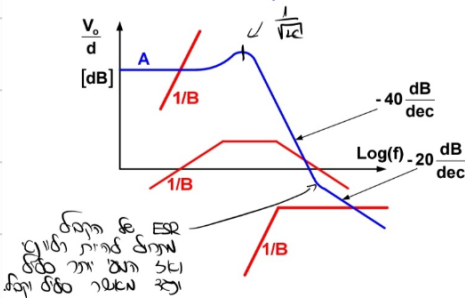


(א) שיטה קונבנציונלית - היסטוריה של שיטה זו הוא  
שעבור כל שינוי של  $\beta$  צריך לערוך מחדש את  
 $AB \approx LG$ .



(ב) שיטה מאנלוגית - כאשר זדעים לצביר את  
תמטורת דרגת ההספק. המרחק בין המעגור (שהוא  
רק תמטורת) לספק (שהוא כבד מעור) תלוי  
רק באין נקודת את  $\frac{1}{\beta}$ .

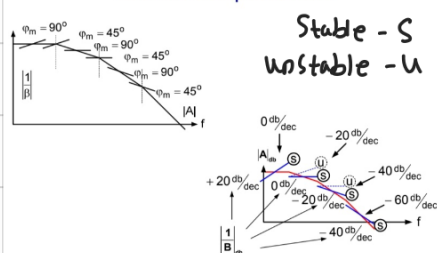
## Possible compensations



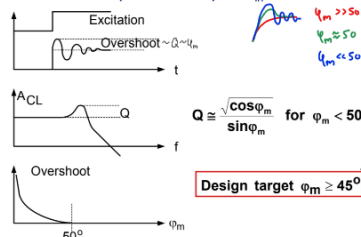
כאן ניתן לראות כוונת תמטורת איפוסית של מעגור  
ממנו. נשים עז לאופציות השולטת עבור השלטה  
של  $\frac{1}{\beta}$ .

הצורה מאנלוגית:

## Possible compensations

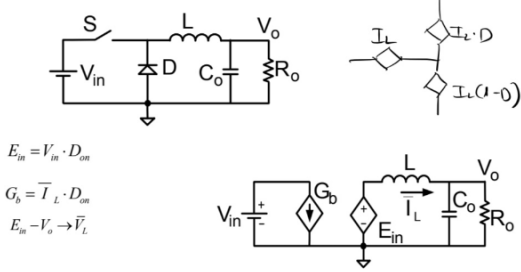


## Overshoot and Q in Closed Loop in Response to step in $S_{in}$



דרושב כל נעדה  
לכן שולק נקל  
תצאה עם יותר  
אוסילציות מאשר:

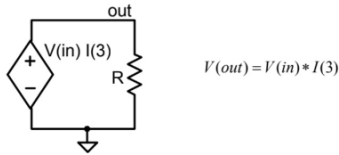
Extracting the power stage control-to-output transfer function



$E_{in} = V_{in} \cdot D_{on}$   
 $G_b = \bar{I}_L \cdot D_{on}$   
 $E_{in} - V_o \rightarrow \bar{V}_L$

תילוף פונ' התמסורת באות קטן למתמרים  
 מופיע לנו כאן מודל עבור נקודת (מכיל) פונ' של  
 $V_{in}$  קבוע,  $D$  קבוע,  $I_L$  ממשע  $I_L$  ו- $V_L$ .  
 באנליזת AC אנחנו סביב אותו עיגן נקודת נכנסים  
 שינויים קטנים.

Linearization



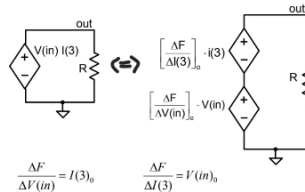
$V(out) = V(in) * I(3)$

$d(V(out)) = \frac{\partial(V(out))}{\partial(V(in))} v(in) + \frac{\partial(V(out))}{\partial(I(3))} i(3)$

$\Rightarrow V(out) = \frac{\Delta V(out)}{\Delta V(in)} v(in) + \frac{\Delta V(out)}{\Delta I(3)} i(3)$

בצורה אנליטית. עבור מקור לא ליניארי (יש בו מבטלה  
 של 2 ערכים תלויים). אם מנת לבצע ליניאריזציה  
 צריך לעצור אותו ול- התזכרות החלקיות באופן הבא: ←

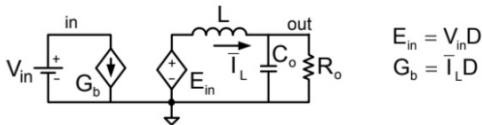
SPICE Linearization (AC Analysis)



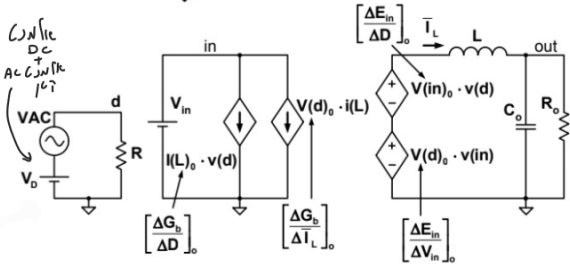
$\frac{\Delta F}{\Delta V(in)} = I(3)_0$   
 $\frac{\Delta F}{\Delta I(3)} = V(in)_0$

כאן ניתן לראות קולומה  
 של ליניאריזציה:

Buck linearization



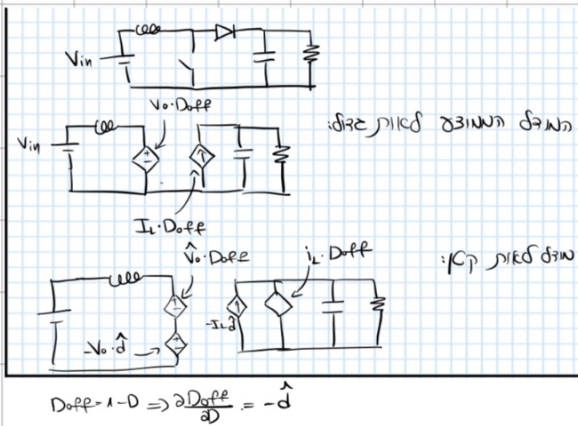
$E_{in} = V_{in} D$   
 $G_b = \bar{I}_L D$



• ליניאריזציה של מערך Buck:

- סך מנחים שינויים זה ה-  $D$  וזה ה-  $V_{in}$ .
- בספיט זה קורה באופן אוטומטי.
- כוונ' תמסורת:

$\hat{\frac{V_o}{V_{in}}} = \hat{V}_{in} \frac{R \parallel \frac{1}{sC}}{sL + R \parallel \frac{1}{sC}} = \hat{V}_{in} \frac{R}{sL(sCR+1) + R} = \hat{V}_{in} \frac{R}{s^2 LCR + sL + R} = \hat{V}_{in} \frac{1}{s^2 \frac{LCR}{R} + s \frac{L}{R} + 1}$



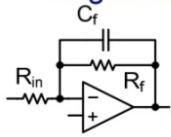
• ליניאריזציה של מערך Boost:

- סך מנחים  $V_{in}$  קבוע ושינויים רק ה-  $D$ .

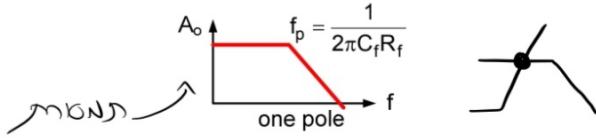
$D_{diff} = 1 - D \Rightarrow \frac{\partial D_{diff}}{\partial D} = -1$

Possible phase compensation schemes

Lag network



$$A_o = \frac{R_f}{R_{in}}$$



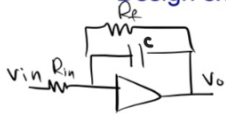
בזמן כשר כמי סוגיה של רשתת קיבל:

Lag-network

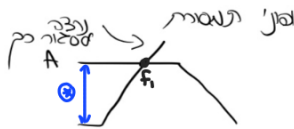
זוהי רשת מסוג פיזור (אינולר)

יש מעבר שגיאה, קבול ומתחלק מתח נקדים ה-DC. הקבול הוא נעק וקבול מהחלק מתח.

Design example



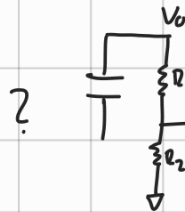
$$\beta = \frac{R_e}{sCR_f + 1} \cdot \frac{1}{R_{in}} \rightarrow \frac{1}{\beta} = \frac{R_{in}}{R_f} (sCR_f + 1)$$



$$\frac{1}{\beta}(f) = \frac{R_{in}}{R_f} (1 + \omega R_f C_f)$$

בזמנה לערכנו:

נבחר את Rin שרדחנית אל ואז כשר סונ' של Cf, C. נוכל לעבור את Rf כן סקס את \* המזוני ואז שאר ס סונ' של C.



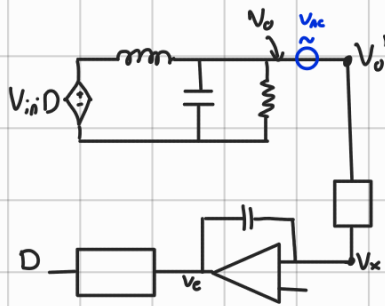
$$\frac{V_e}{V_o} = \frac{1}{\frac{sC}{R_1 R_2}} \Rightarrow \frac{V_e}{V_o} = \frac{1}{R_1}$$

בזמנה נוספת:

טכנ' לעיסתה של המעגל כן:

ק' האדודי נקבת לפי מחלק המתח.

לסאס אר  
מור האם  
הפיזיה נכיל  
סבור ס Rin ?

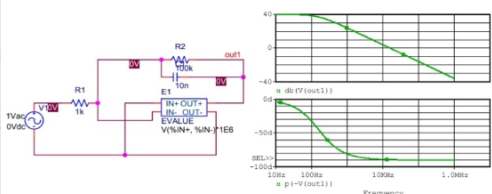


$$\begin{aligned} \frac{V_o}{V_o'} &= LG \\ \frac{V_x}{V_o'} &= V_x \\ \frac{V_e}{V_x} &= B \\ \frac{D}{V_e} &= k_{mod} \\ \frac{V_o}{D} &= A \end{aligned}$$

כשר המע' עקבת בחוז סאר אין צונק לעיצר את האור  $\frac{D}{T}$  כי D יוצא מהקור. עכשוו המלה היא כשר רובם לעתון את האנליזת AC של המע' בחוז סאר (כדי לעתון את ה-26) איפה הכי אק לעכניט את המקור בוכנ?

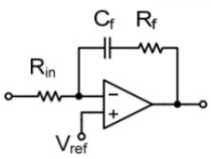
הרשבה היא שגבאי לעכניט אתו בתקום די יש התנגדות לכוהה ה-DC ונמוכה ה-AC (\*)

Lag network



פה יש רדגארי של אין מעפנת באנעלית אל מתנוולת אם בוחנו אותה לקב הכצעה ←

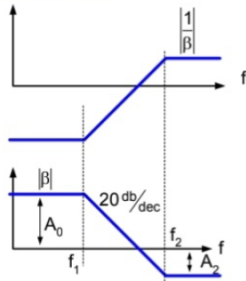
### Lag - Lead network



$$A_s = A_{OL}(\text{ampl.})$$

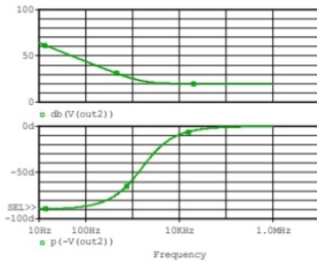
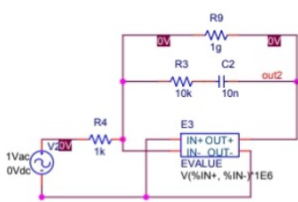
$$f_1 = \frac{1}{2\pi C_f R_f}$$

$$A_2 = \frac{R_f}{R_{in}}$$



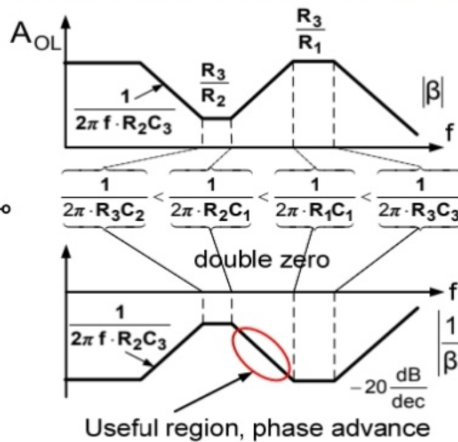
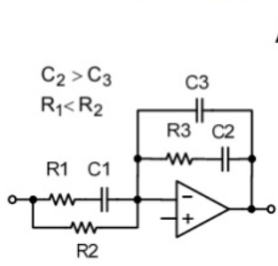
Lag-Lead network  
 ישת קיציב קיזים-פיזור, קיזים ל יס קיזק ואז אבס  
 קוויג יס קיזים אבז ואז פיזור אבז.

### Lag-Lead network



פה יס קיזק לט אין מעבדת באנליזת א  
 מתנוולת אס קוחנים אויך לבז הכצעה ←

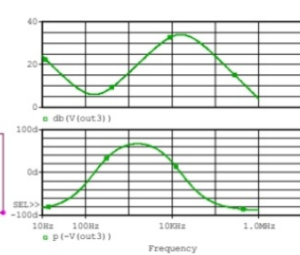
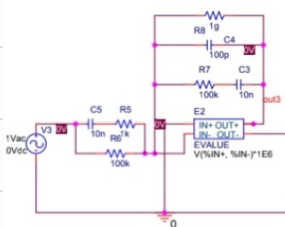
### Double zero compensation scheme



### Double zero network

מעבדת אס שני אבסים.  
 אבה לנקי מייטון ב-בסט-  
 לזה בקר PID שנלמד בקורה.  
 (נצדס לבזס זאזר במעבדה נשים  
 לב שפה מופיז אין לעתים אז קי  
 הברך ואין לקבוצ אז הערכים.

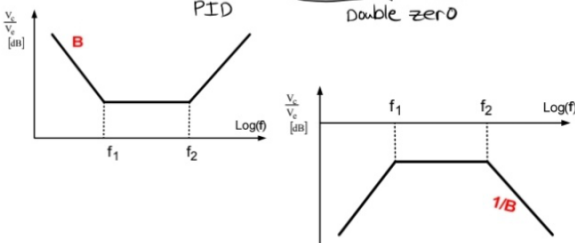
### Double Zero



פה יס קיזק לט אין מעבדת באנליזת א  
 מתנוולת אס קוחנים אויך לבז הכצעה ←

### The relationship to PID compensators

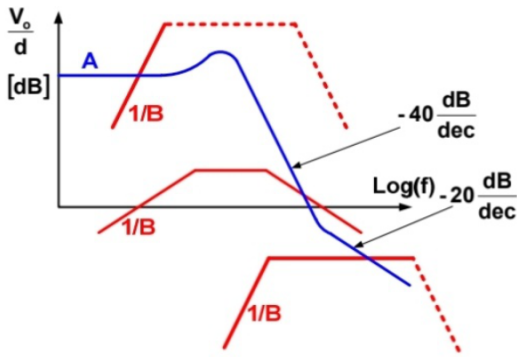
$$\frac{V_c}{V_e} = K_p + \frac{K_i}{s} + s \cdot K_d = \frac{K_d (s + \omega_{z1}) \cdot (s + \omega_{z2})}{K_i s}$$



סקופית זי גדי לריאות לנו שמעבדת שני אבסים  
 זי קצרים מעבדת לט בקר PID.

$$\text{Double zero} \equiv \text{PID}$$

The relationship to PID compensators



ניתן לראות שהעצרת בקר ה-PID ניתן לעשות את כל צורתו התייגן שצורתו סד ביה.

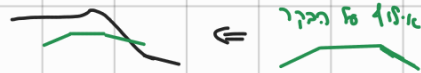
כמה הערות סיכום להרצאה:

⊗ כאשר אנחנו מתכננים מערכת:

- או שאולינו לנו עסאור את החוזק היתר מסוים ואז זה מאלץ את מבנה הבקר.



- או שאולינו את מבנה הבקר ואז הוא מאלץ את האיזון שבו אנחנו נספור את החוזק.



- או שמדקשים עסאור את החוזק ואז הכוונה להצבאה האופטימלית. חוזק סרט כמה שיותר גדול ו- PM מלא יטא.

⊗ במעבדה (צ'אק) עסאור את החוזק: להלץ את פונ' התנסות של דוגר ההספק, בהינתן כל הפרמטרים של מבנה הבקר במעבדה עסאור את החוזק עבורה הכי אדיה שאפשר.

⊗ לני שלמנו אז כה היה של שיאת ייצוג היתרה, כאשר אנחנו מדברים של משוכ בהית ממש.

שיאור הבא: בקרת משוק ז'רם!

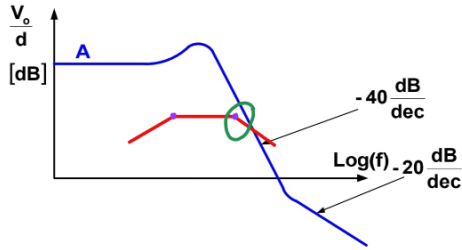
# Control of switch-mode converters

## בקורת זרם באלמנטים מתמטיים

### Current Programmed Mode control CPM

נהגור לדבר עתה על בקורת המתח משיעור שיעור

#### Problem of voltage mode control



Second order transfer function = complex compensator

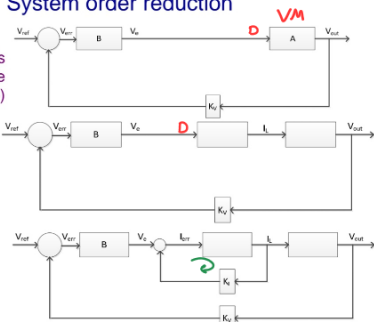
ישנה בעיה סקרית בבקורת מתח שהיא שבעת התמטות של דגרת ההספק היא מסדר שני, וזה מעדינה מאוד מורכבת, תקופות מעשיהות פא הזמן שעושים סימולציות, ההבנה של מעדינה כזו היא מאוד קשה לזה החייתון של A ו-ק' במציאות הוא לא קודתי כמו בגוף פה ואנו סוללים לקרא

תארת תדור של מעדינה כמו באיזור הירוק ומז ה-PM לא כמו בתמטותיה ורוחז סרט זר יותר ועוד המון בעיות. אז מה הפתרון?

#### Additional feedback System order reduction

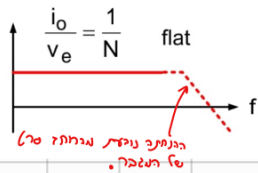
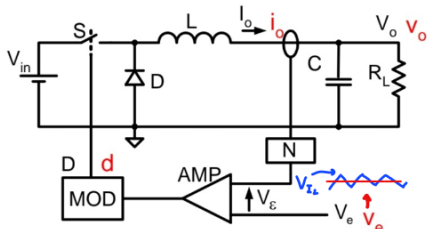
System order is reduced for each state variable (inner loop) feedback

$$\frac{V_o}{D} = \frac{V_o}{I_L} \cdot \frac{I_L}{D}$$



הפתרון הוא להוסיף עוד חוט של משוב בקרה, המוסיבזיה לכך היא שכל חוט בקרה נוסף של משיעור בקרה מוריד לנו את טורי המערכת. בעצם ע"י הוספת המשנה התמטות  $\frac{V_o}{V_e}$  תדור לעבר ראשון.

#### Current feedback loop



For 'strong' feedback

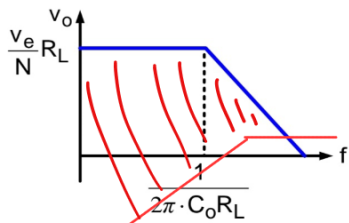
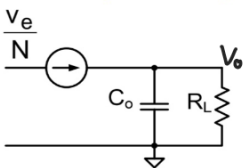
$$LG \gg 1 \quad v_e \rightarrow 0$$

$$i_o = \frac{1}{N} v_e$$

## משלב זרם - המשוג הפנימי (בשדה הקודים)

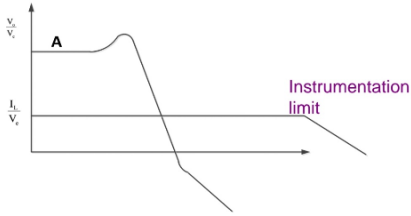
נסתחם פא ממנה אאב. אנו בוללים את הזרם מ-איזשהו תנאים מצרם לעתה (אפשר ע"י נגי שטאי זרם) ונקרא  $V_{IL}$  שזכו ממש במובורזונו:  $V_{IL}$ .  $V_e$  - זי איזשהו עק שטאי משונים איתו שהוא תינס לזרים שהינו חזים במערכת.  $V_{IL}$  ו- $V_e$  נכנסים למעבר PWM וייצא ע"י  $d$ .

#### System representation in CPM



⊗ התנאי שהמשוג מסביב חזק (כלומר ההתנהגות של המשוג קוראת בתזרים הרבה יותר גבוהים משל המעלה) אנו מקבלים את המעלה הבא: ← מקור הזרם כאן מייצג את הזרם המבוקר, כי הזרם הזה קבוע ע"י תדור. ובאמת ניתן לראות שקיבלנו מעדינה מסדר ראשון ונכח להיצע  $\beta A$  גדול מאוד.

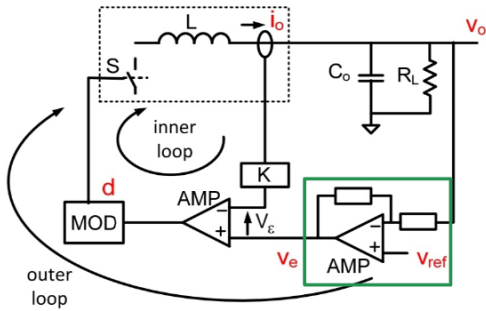
Design of the feedback loops



BW of the inner loop must be well above the outer loop BW

כאן ניתן לראות את הדרישה שלנו ממסוד הזרם - כפי שאמרנו קודם התמסורת  $\frac{I_L}{V_e}$  צריכה להיות flat בכל תחום התדירים של המערכת. מבחינת אינטואיציה אפשר לומר שמערכת הקורה של הזרם 'שקופה' למערכת הכוללת ( $\frac{V_o}{D}$ ) כי היא הרבה יותר מהירה למענה (זו המשמעות של רחב סרט) הרבה יותר גדול).

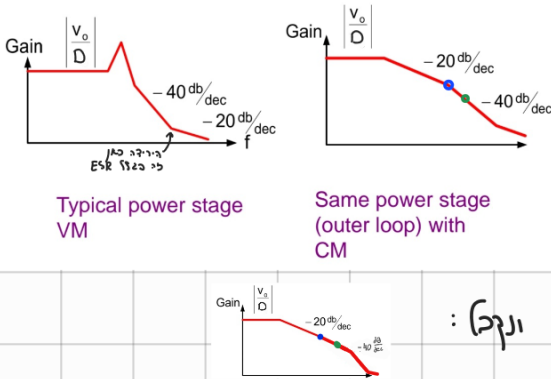
Design of the feedback loops



כעת נצטרך בצורה ברורה יותר מהו  $V_e$  שאליה משווים את  $V_L$ . כפי שניתן לראות בעקף  $V_e$  הוא בדיוק אותו  $V_e$  ששייברנו אליו בבקורת משוד המעלה!  
 נשים לב כי א צינג להיות כזה שיטאים לערכים של המתח  $V_e$  מולו אנו מוגדים ( $\frac{V_{L1}^{(A)}}{V_e}$ )

זכשין בעצם אנו רואים את התעוים המלוכה יש לנשוד חיציני (מתנה) ומשוד פנימי (זרם) ורשת הפיזי יפלה להיות יותר פאסה (כניה Lead-Lag).

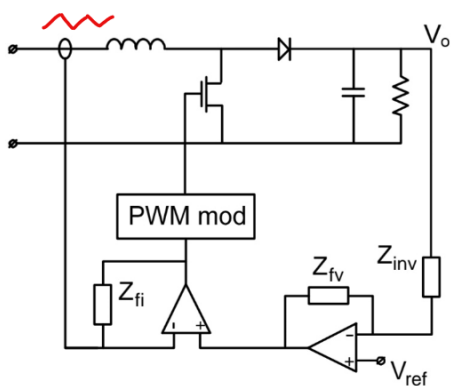
The advantages of current feedback



נשתכל אל המערכת הכוללת ( $\frac{V_o}{D}$ ) כאשר יש משוד פנימי (זרם). בקורה הוצ מניחים כי משוד הזרם הפסיק להשיץ ולכן חוצבים לתמסורת שהיפכה כל המשוד (הק משוד מתם <math>\leq</math> בלסט- <math>\leq</math> סהי טני) ולכן אם לבואא נרצה  $\frac{1}{k}$  שיתען בקורה הוצ, או שנעשה מערכת מסדר טני או שנעשה משוד פנימי (זרם) עם רחב סרט גדול יותר ונקב:

שיטות לצירת משוד זרם:

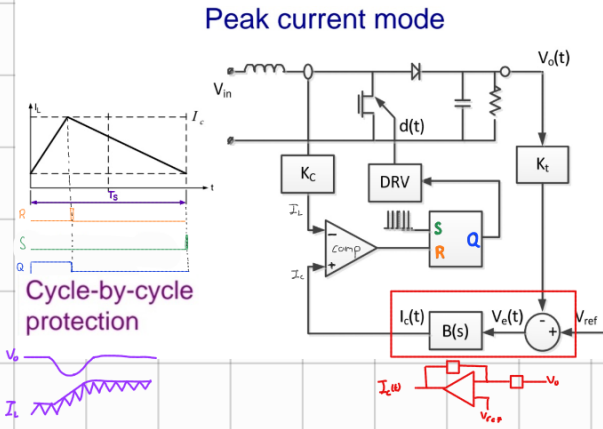
Average current mode



שיטה Average Current mode - I - זו שיטה יותר מעברנית יותר פאסה לרוב. לוקחים את הזרם ועושים אליו פאטר כדי להוציא את הממוצע והפאטר הכי משוד ל-  $V_e$ . הפאטר הזה יכול להיות ה-  $f_z$  (להזמא:  $\frac{V_{L1}}{V_e}$ ) צינג לבאז פה שהמשוד הפנימי יהיה עם רחב סרט יותר גדול.  
 נשים לב שצב  $V_o$  וצב הזרם שאנו משווים הוא הממוצע.

שיטה II - Peak Current mode

כל החלק **האדום** קשור לבקורת התפרח כאשר העשוא שלו הוא  $I_L$  (שקד קודם היה  $V_e$ ) אבל  $I_L$  הוא הסרן של ה-Peak של הזרם  $I_L$  (ולא  $\bar{I}_L$  כמו ב- $V_e$  שקד קודם). כאן במקום למדוד כמו קודם יש לנו משווא (comperator) והעשוא שלו נכנס ל-latch עם כאשר תפרי השסון ב-5 הוא  $\frac{1}{T_s} \cdot \Delta I_1$ .



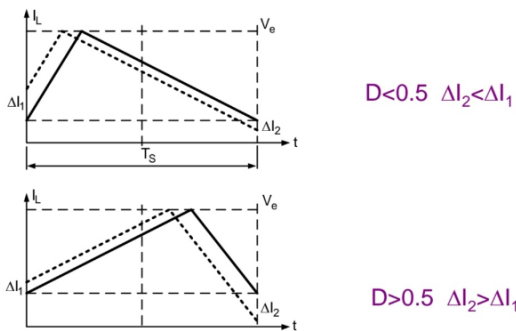
⊗ לא חייב לעבוד את הזרם בסליל אפשר גם בארץ מכיוון שמעשין איתנו רק ה-Peak ( $I_L$ ) מסקנה: אנו שולטים בסרן של זרם הישא באמצעות רשת הפיצוי של העשוא הכולל. שיטה II - נותנת לנו רוחד סרט יותר גבוה ובנוסף מקנה לנו משאנן Cycle by Cycle protection.

PCM and ACM

- Current feedbacks - reduce the order of system
- The difference is in BW of the current feedback loop
- Increase the output impedance

- בשני השיטות אנו מורידים את סדר המערכת.  
 - ההבדל העיקרי בין שתי השיטות הוא הרוחד הסרט ב- ACM מכיוון שעשית ממוצע רוחד הסרט יותר, כלומר העשוא זרם של PCM יותר חזק! יש גם הסרין לעשוא זרם! וזו התפסדה הבאה:

Sub-harmonic oscillations



Sub harmonic oscillation - במצב PCM

חמים תופסת אי-יציבות שנגרמת ממעגל הזרם.

תיאור גרפי (אינאואיטיבי) - הזרם הלא מקוויב זה הזרם

במצב היציב, הוא מתחיל בקי ומסתיים באותו קודם.

כאשר היינח הסרטה פלטה בזרם התחיל ב- $\Delta I_2$  מתק' בה התחיל

המעגל הקודם (במצב היציב) היינו רוצים שאם הוא התחיל ב- $\Delta I_1$

אז שם יס"ם ב- $\Delta I_1$  אלא הסוף זה לא קורה כי השיפועים נשארים קבועים ומה שקורה זה

אנו מתחילים ב- $\Delta I_1$  ועולים בשיפוע כמו קודם עד  $I_e$  ולכן הצטנ חס קצר יותר ובאותו אופן נקט

סהפנן off ארוך יותר ולכן מסיימים ב- $\Delta I_2$  נמוך יותר.

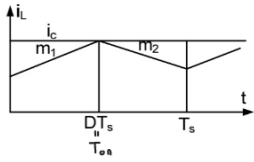
• עבור  $D_{on} < \frac{1}{2}$ :  $\Delta I_2 > \Delta I_1$  ולכן אעמנו נתכנס ונחצור לעצב היציב (הצ תודען עד שמתבר לעליד יציב)

• עבור  $D_{on} > \frac{1}{2}$ :  $\Delta I_1 < \Delta I_2$  וכאן מעמכור לעמכור  $\Delta I$  ילך וייגדף ( $\Delta I_2 < \Delta I_1 < \Delta I_2 < \Delta I_1 < \dots$ ) ואנחט נלך

ונעבדור, חוטר יציבור זה לא נכס ממסוד (ק שלא מוזכר ב-PM) אלא נכס

מההשוואה של ה-Comperator.

### Stability analysis of Sub-harmonic oscillations



$$I_L(t_{on}) = I_L(0) + m_1 t_{on}$$

$$I_L(T_s) = I_L(t_{on}) - m_2 t_{off}$$

$$I_L(T_s) = I_L(0) + m_1 t_{on} - m_2 t_{off}$$

Steady-state:  $I_L(T_s) = I_L(0)$

$$m_1 t_{on} = m_2 t_{off}$$

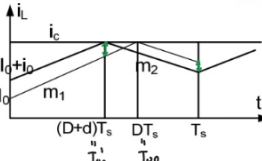
$$\frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{D_{on}}{D_{off}}$$

תיאור אנליטי - נסתכל על משוואת קו ישר

צביר מדי יציג זריק להתייחס  $I_L(t) = I_L(0)$

ומכאן ש:  $m_1 t_{on} = m_2 t_{off}$  ולבסוף נקבל  $\frac{t_{on}}{t_{off}} = \frac{m_2}{m_1} = \frac{D_{on}}{D_{off}}$

### Stability analysis of Sub-harmonic oscillations



$$I_L((D+d)T_s) = I_L(0) + i_L(0) + m_1(D+d)T_s$$

$$DC: I_L(DT_s) = I_L(0) + m_1 DT_s$$

$$AC: I_L(dT_s) = i_L(0) + m_1 dT_s$$

באותו אופן נניח דעימות עבור  $i_L(T_s)$  ונקבל:

$$i_L(0) = -m_2 dT_s$$

$$i_L(T_s) = m_2 dT_s$$

$$i_L(T_s) = i_L(0) \left( -\frac{m_2}{m_1} \right) = i_L(0) \left( -\frac{D_{on}}{D_{off}} \right)$$

נבצע הפרדה כדי לבחון את היציבות עבור  $I_0, I_s$

באשר  $I_0$  זה העתה ההתחלתי בעמק יציב!  $I_0$  מהווה

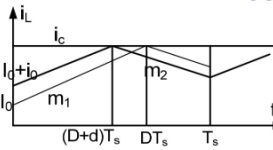
$\Delta I$  מהתיאור הזרבי נרצה להסתכל על הפרטי

הזרביים בזמן  $T_s$  ו-  $(D+d)T_s$  (הם). נסתכל כמו

השקף הקודם על משוואת קו ישר, אבל ננסה הפרדה

צביר AC ו- DC (אות גמול ואות קין). ונקבל: ←

### Stability analysis of Sub-harmonic oscillations



$$i_L(T_s) = i_L(0) \left( -\frac{D_{on}}{D_{off}} \right)$$

$$i_L(2T_s) = i_L(T_s) \left( -\frac{D_{on}}{D_{off}} \right) = i_L(0) \left( -\frac{D_{on}}{D_{off}} \right)^2$$

$$i_L(nT_s) = i_L((n-1)T_s) \left( -\frac{D_{on}}{D_{off}} \right) = i_L(0) \left( -\frac{D_{on}}{D_{off}} \right)^n$$

$$i_L(nT_s) = i_L(0) \left( -\frac{D_{on}}{D_{off}} \right)^n \quad i_L(nT_s) = \begin{cases} 0, & \left| \frac{D_{on}}{D_{off}} \right| < 1 \\ \infty, & \left| \frac{D_{on}}{D_{off}} \right| > 1 \end{cases} \rightarrow \text{Stable when } D_{on} < 0.5$$

עבשו נסתכל מה קורה אחרי מהפוך  $T_s$  ואלו אחי  $2T_s$

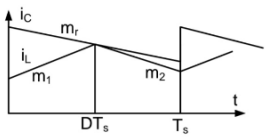
וככה גם לאחר  $n \cdot T_s$  ונקבל את הביאוי

נבדוק מתי האר הזה מתכנס ונקבל כי

המתכנסות קוראת בתנאי ש-  $D_{on} < 0.5$ , כפי

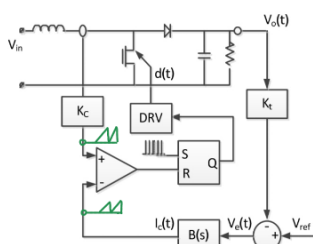
שראנו מהתיאור הזרבי!

### Slope compensation

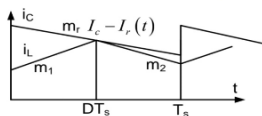


$$I_L(t) + I_r(t) = I_c$$

$$I_L(t) = I_c - I_r(t)$$



### Slope compensation



$$i_L(0) = -(m_1 + m_r) dT_s$$

$$i_L(T_s) = -(m_r - m_2) dT_s$$

$$i_L(T_s) = i_L(0) \left( -\frac{m_2 - m_r}{m_1 + m_r} \right)$$

$$i_L(nT_s) = i_L(0) \left( -\frac{m_2 - m_r}{m_1 + m_r} \right)^n = i_L(0) \alpha^n$$

$$i_L(nT_s) = \begin{cases} 0, & |\alpha| < 1 \\ \infty, & |\alpha| > 1 \end{cases}$$

$$\alpha = \frac{m_2 - m_r}{m_1 + m_r} = -\frac{1 - \frac{m_r}{m_2}}{\frac{m_1}{m_2} + \frac{m_r}{m_2}} = -\frac{D_{on} + \frac{m_r}{m_2}}{D_{off} + \frac{m_r}{m_2}} \rightarrow \frac{m_r}{m_2} \geq 0.5$$

כעת נרצה להשוות לעדן רפרנט שהוא לא קבוע

אלא בשיפוע, מה הרעיון? הרעיון הוא כזה שלנה

והיה  $\Delta I_2$  אז אם  $\frac{1}{2}$  ימים תקבל  $\Delta I_1 > \Delta I_2$  ואז מתבדרים

אז אם האר רפרנט עלתה היה בשיפוע יורד פשוט  $(m_r)$  אז

נעלם לקבל  $\Delta I_1 < \Delta I_2$  עלה  $D$ . נמצא את השיפוע הזה.

השיפוע הזה הוא שיפוע מלאכותי ומוסיפים אותו במוד

מהקודמת (לואי או לאור הנמצא או לאור רפרנט)

- הוספה לאור הנמדד  $I_L$ ,  $\uparrow m_2, \downarrow m_1, m_r = 0$

- הוספה לאור רפרנט  $I_c$ ,  $\uparrow m_1, \downarrow m_2, m_r \geq \frac{1}{2}$

# Switch-Mode Power Supplies

## ממירים מבוססים קבל מתמדת

### Lesson 10:

### Introduction to Switched-Capacitor Converters

#### Inductor Disadvantages

Inductors have several disadvantages:

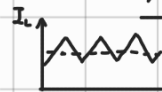
- High cost
- Low power density
- EMI Pollution
- Large size
- Discrete



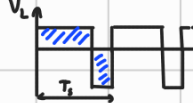
אם כד דיבורנו על ממירים הבאים מבוססים סליל מתמדת אבל מכיון שסליל זכו רכיב די גדול והבקרה של סליל אורמת עוצמות נמוכה וזמן נהדר של ממירים מבוססים קבל מתמדת.

השאלה כאן נייטם לראות כדאי מסך שסליל יש סליל וקבל ונייטם לראות את ההבדל באילו וצד חסרונות.

#### נשוא מוצקי עבודה בין סלילים לקבלים:



אנו יודעים כי בסלילים הרכב נראה כך: והמתח שלו: כך שמעקבים וולט-שניה שווה לאבס.



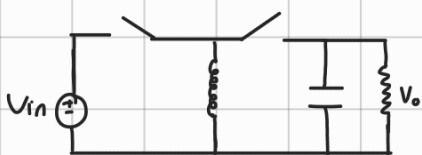
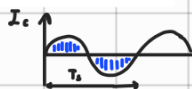
קבל זה הרכיב הדומה לסליל כלומר יהיה סליל צורה של מתח מסויימת והצבם סליל חייב להיות סביב האבס אמפר-שניה שווה לאבס.

#### Steady State Operation Demands

Duality:

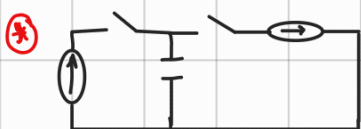
- Inductor: Volt Sec. = 0
- Capacitor: Ampere Sec = 0

כלומר במקום וולט-שניה יש לנו



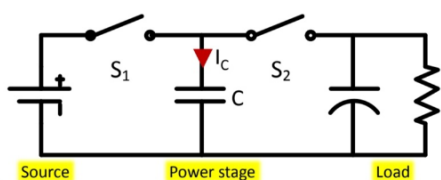
ממיר ב-ב מבוסס סליל

כאשר בסתכלנו על ממירים מבוססים סליל מתמדת היה לנו מקור מתח ויכולנו לעשות ממנו איזה צרם שרצינו והסליל הוא ערצפות בצרם ולק בקבל נצפה להסתכל על משאל עם מקור צרם שניתן לעשות ממנו כל מתח שנרצה והקבל יהיה אחראי ערצפות המתח (כלומר בסליל היה דוגמ חופש בצרם וקבל יש דוגמ חופש במתח). ולכן היינו מצפים למעשה



משאל שביינו מצפים להיות ממיר מבוסס סליל

#### Basic Example (1:1)

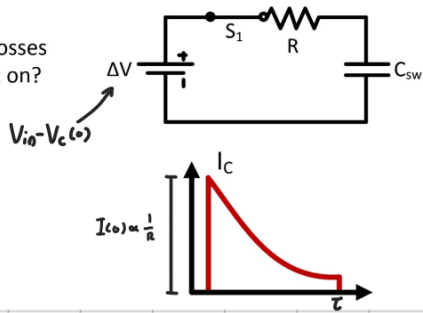


- The topology creates voltage balance
- Seemingly no straightforward regulation can be done

אבל יש בעיה שרצפות צרם נילא לעשות רק אם יש סליל בדרך אבל ס המטרה הייתה להפאר מהסליל ולק למעשה לא עוצר לנו. עלן נשמור על הזישה של משאל עם מקורות מתח נשים על כך בצורה זו יש הפש. מתחים (בין מתח וקבל ומתח המקור) ואז בהצד הימני קבל ספיק לא צרם!

### Charge Profile ('Complete Charge')

- $\tau \ll T_s$
- What are losses dependent on?



נראה כי מקור התנעה בסל מתח  $V_s$  אם הקבל שלנו בזמן אפס כבר לען בתחילת מסוים אז בזמן התנעה אין סיבה להסתכל על  $V_s$  אלא רק על  $\Delta V = (V_s - V_c)$ . התנעה אולי (ולרוב נדונו בהמשך) ייקבע גודל הספייק בזרם.

### Charge Profile ('Complete Charge')

- Loss analysis can be done through energy conservation equations

$$E_{C_{sw}} = \frac{C\Delta V^2}{2}$$

$$E_1 = \int_0^\infty \Delta V I(t) dt = C\Delta V \int_0^\infty \dot{V}_C(t) dt = C\Delta V^2$$

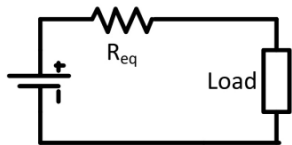
$$P_{loss} = 2 \frac{C\Delta V^2}{2} f_s = C\Delta V^2 f_s$$

מבחינת אנרגיה אנחנו יודעים כי אנרגיה שמתקבלת במדק של מקור מתח שטווח קטן זה  $\frac{C\Delta V^2}{2}$  אלא זה כן בסדרים כל מה שמסתכלים עליו זה  $\Delta V$  ולכן  $\frac{C\Delta V^2}{2}$ .

### Charge Profile ('Complete Charge')

- An average model can be then composed:

$$R_{eq} = \frac{\Delta V^2}{P} = \frac{1}{f_s C}$$

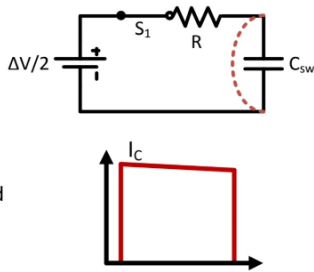


ההנחות האלו נכונות להגיע למודל הממוצע עבור המעגל: כפי שניתן לראות כאן

נשים לב כי לפי המודל הממוצע אם נבחר לעבוד בתדירות גבוהים / קטן גדול נעלם להגיע למעגל עם הפסדים מאוד נמוכים.

### Charge profile ('No-charge')

- $\tau \gg T_s$
- Current can be considered constant
- What are the losses dependent on?
- Both sub-circuits are literally the same and can be considered as one

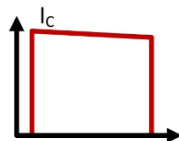
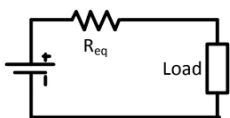
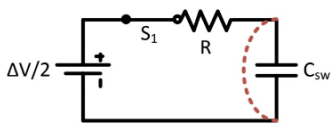


הנחות אלו זה נשמע כאילו אנחנו יכולים לספור בתדר כמה מנייה וחוז מעברות נרדמות הפסדים נמוכים יותר, אלא בפועל זה לא נכון כי כל שאנו עושים בתדר אנחנו מתקרבים ל- $\tau$  שלנו (בין הפריקה של הקבל) במידה ו- $\tau$  כייח אנחנו קובעים על כמעט שרוב וואו כמו קודם. קיבלנו זרם כמעט קבוע והקבל לא מספיק להיפרק ולהיטען (מבין השם 'No-charge')

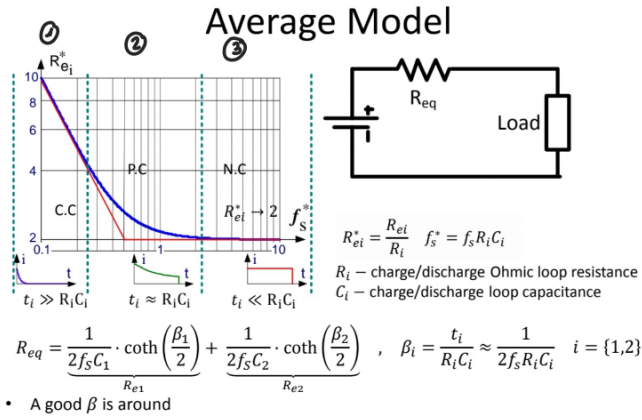
### Charge profile ('No-charge')

$$P_{Loss} = \left(\frac{\Delta V}{2}\right)^2 / R$$

$$R_{eq} = 4R$$



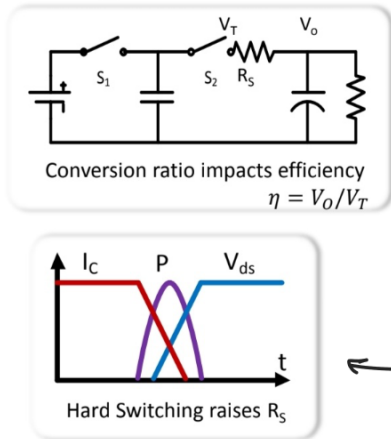
והמתח של הקבל  $\frac{V_{in} + V_o}{2}$ . ולכן זה הפריקה וזה באמצע יש לנו את אותו  $\Delta V$  ונקרא את המעגל השקול  $\leftarrow$  והפסדים שלנו יהיו  $P_{Loss} = \left(\frac{\Delta V}{2}\right)^2 / R = \frac{\Delta V^2}{4R}$  ונקרא  $R_{eq} = 4R$



ניתוח המודל הממוצע עבור 3 המקרים  
 בהם  $T \ll T_d$ ,  $T \approx T_d$ ,  $T \gg T_d$  (כאשר  $T = t_i$ ;  $T = R_i C_i$ ).  
 $\beta = \frac{T}{T_d}$  בתנאים אלו יש לזכור חזקה כי  $f_s$   
 וכך שאנו הולכים ועולים בתדר ההתנגדות האקוויולנטית  
 המעולה  $\left(\frac{R_{ei}}{R_i}\right)$  יורדת.

מסקנה: כל שאנו עולים בתדר ההסדים יורדים אבל אפילו חסומים שלמה עדין 4 פעמים התנגדותם של המערכת ( $R_{eq} = 4R$ ).

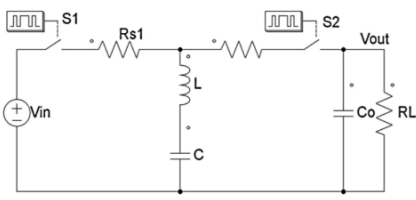
### Disadvantages



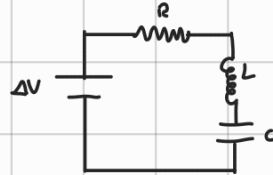
יש למערכות של קוליה מתעלמים זה הסרוניות.  
 חסרון אחד מאוד גדול זהו הזרם ההתחלתי שהוא מאוד  
 גבוה. ואנו קטל ההסדים מאוד גדולים בזמן המיתוך.  
 ההסדים האלה כמובן לא מיתוך ארמים לזרם  $I_{C1}$   
 בזמן  $R$  המקורי (הממוצע) גדול ולכן המערכת יכולה להיות בעייתית  
 בתדרים גבוהים ככל שהתדרים יותר גבוהים נובע את זה  
 יותר פעמים והחלק הזה יהיה יותר דומיננטי כי הזמן שלוקח

למעשה לעלות הוא פונקציה של הפרמטרים הפיזיקליים שלו והזמן הזה תלוי בקיבול הכרטיזי שלו ובאסי  
 נבחר ארבעה מהיר (אם קטן הכרטיזי קטן) יהיה לו מיתוך יותר גדול. כלומר יש טווח לרייז אולם בין  
 רציון למעשה מהיר עם התנגדות גדולה למעשה איננו עם התנגדות קטנה.

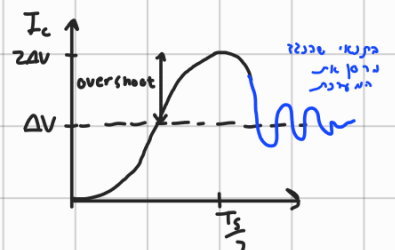
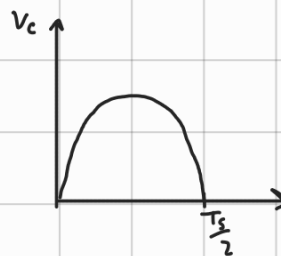
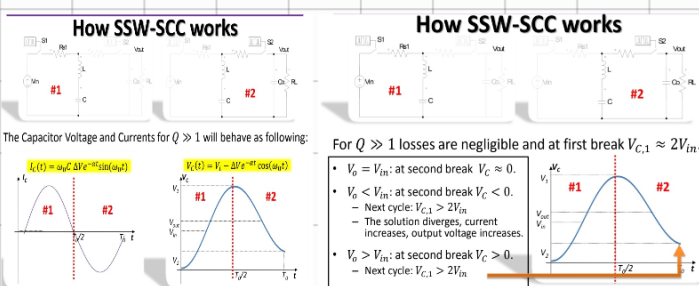
- Soft Switched SCC**
- Utilizes the resonant characteristics of an RLC branch
- Switch transition occurs at half resonance time



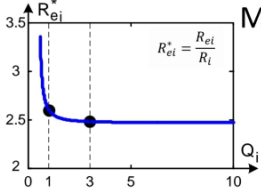
אין נושא להיפוך מבטית המיתוך הזו?  
 נרצה לומר את הזרם  $I_C$  ושלא יהיה ספיין גדול  
 ויבין נקטן את ההספק ולכן נשים ספילס באור לקבלה.  
 יקבל מעטל שקול:



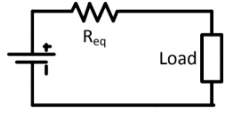
עבורו מקיבים:



# Soft Switched Capacitor Average



## Model



$R_i$  - charge/discharge Ohmic loop resistance  
 $C_i$  - charge/discharge loop capacitance  
 $L_i$  - charge/discharge loop inductance

$$R_e = \frac{4Q_1^2 R_1 \cdot \phi_1 \cdot \tanh(\phi_1)}{R_{e1}} + \frac{4Q_2^2 R_2 \cdot \phi_2 \cdot \tanh(\phi_2)}{R_{e2}}$$

A good Q factor is around 1

$$\omega_{0i} = \frac{1}{\sqrt{L_i C_i}} ; Q_i = \frac{\omega_{0i} L_i}{R_i} = \frac{1}{R_i} \sqrt{\frac{L_i}{C_i}}$$

$$\phi_i = \frac{\pi}{2 \cdot \sqrt{4Q_i^2 - 1}} ; i = \{1,2\}$$

למ במקרה הזה הנצילות היא  $\eta = \frac{V_o}{V_T}$  אבל הסנן

הוא מהותני נקודת המינימום היא  $R_{eq} = 5 \cdot R$

