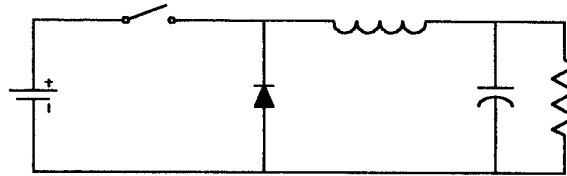


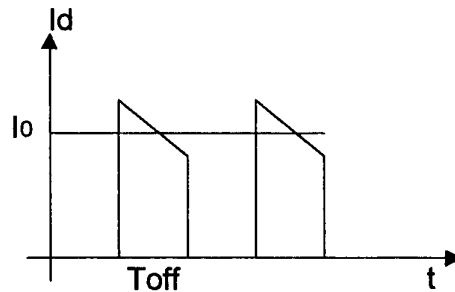
נצילות והפסדים



נניח וישנו מעגל Buck וכל רכיביו אידיאליים, אזי הנצילות של המעגל הייתה 100% אבל במעגל מעשי ישנם מסי גורמים לא אידיאליים כגון הדיודה, המתג הסליל והקבל. נבדוק את השפעת כל אחד מן הרכיבים על נצילות המעגל.

1. דיודה

כאשר זורם זרם דרך דיודה מעשית נופל עליה מתח מסוים בד"כ 0.7V בדיודות Si, אבל יכול להגיע במתח גבוה גם לערכים של 1.2V, ולכן ישנו בזבז אנרגיה עליה. ע"מ להקטין את בזבז האנרגיה משתמשים בדיודות Shotky שהמתח עליה נע בין 0.3V ל-0.4V ויכול להגיע עד 0.8V, הבעיה בדיודות אלו היא שהן מוגבלות למתח הפוך של 100V. נחשב את ההפסדים עקב המתח על הדיודה בהולכה



$$P = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_f \cdot I_d \cdot dt = \frac{V_f}{T_s} \int_0^{T_s} I_d dt = V_f \cdot \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} I_d dt$$

ממוצע הזרם דרך הדיודה הוא

$$I = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} I_d dt$$

ממוצע הזרם דרך הסליל הוא

$$I_D = I_o \cdot D_{off} = I_o \frac{T_{off}}{T_s}$$

נציב זאת בהספק ונקבל

$$P = V_f \cdot I_o \cdot D_{off}$$

ולכן הנצילות של הממיר היא

$$\eta = \frac{P_o}{P_o + P_d} = \frac{I_o V_o}{I_o V_o + I_o \cdot V_f \cdot D_{off}}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + D_{off} \frac{V_f}{V_o}}$$

דוגמא

נתון ממיר Buck בעל הנתונים הבאים :

$$V_{in} = 12\text{v}$$

$$V_o = 5\text{v}$$

$$V_d = 0.5$$

מהי הנצילות של ההמרה

$$\frac{V_o}{V_{in}} = D_{on} \quad D_{off} = 1 - D_{on} = 1 - \frac{5}{12} = \frac{7}{12}$$

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{7}{12} \cdot \frac{0.5}{5}} = \frac{1}{1 + \frac{7}{120}} = \frac{120}{127} \approx 94\%$$

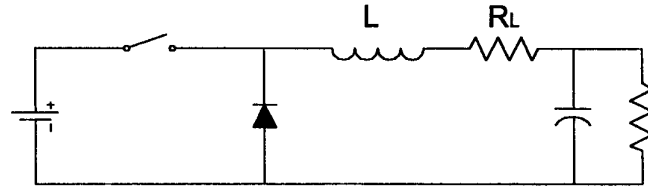
הערה

$$\frac{V_f}{V_o} D_{off} = \frac{P_d}{P_o}$$

כלומר ככל ש V_f מתקרב ל V_o גדלים ההפסדים עקב מפל המתח על הדיודה ב on.

2. הפסדי סליל

הפסדים בסליל נובעים מכך שלסליל ישנה התנגדות R_L קטנה. כאשר ישנו זרם בסליל מתבזזת אנרגיה בו בגלל התנגדות זו



ניח ש R_L היא ההתנגדות האפקטיבית כך ש:

$$R_{AC} \neq R_{DC}$$

וידוע כי

$$R_{AC} < R_{DC}$$

ולכן ניתן להניח כי

$$R_L = R_{AC}$$

דרך R_L זורם אותו זרם שזורם דרך הסליל כלומר:



האנרגיה הרגעית בנגד היא:

$$I_L^2(t) \cdot R_{AC} = P(t)$$

לכן מקבלים הספק ממוצע:

$$P_{Rac} = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} I_L^2(t) \cdot R_{ac} \cdot dt$$

וידוע כי

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

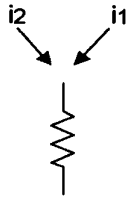
$$P_{Rac} = I_{RMS}^2 \cdot Rac$$

$$P_{Rac} = Rac \cdot I_{RMS}^2 = RI_{1RMS}^2 + RI_{2RMS}^2 + \dots$$

ניתן לחשב את PRac בצורה ישירה או להשתמש בשיטה הבאה :

חישוב Irms

אם נתונים שני זרמים I1 ו-I2 שנכנסים לנגד כמתוארים באיור

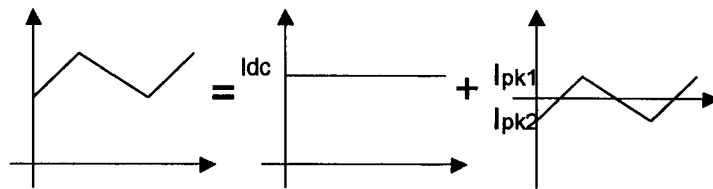


אזי זרם ה-RMS דרך הנגד יהיה

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum I_{RMS}^2} = \sqrt{I_{1RMS}^2 + I_{2RMS}^2}$$

במקרה שלנו צורת הזרם בנגד RL מורכבת משני זרמים שונים, זרם ראשון DC וזרם שני

AC



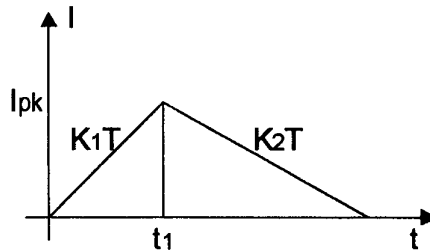
כלומר עיימ למצוא את זרם ה-RMS בסליל עלינו למצוא את זרם ה-RMS של כל אחד מן

הצורות (DC,AC).

זרם RMS של ה-DC הוא

$$I_{RMS(DC)}^2 = I_{DC}^2$$

עיימ למצוא את זרם ה-RMS של זרם ה-AC נחשב תחילה RMS של משולש



$$I_{RMS}^2 = \frac{1}{T_S} \int_0^{T_S} I^2(t) dt = \frac{1}{T_S} \int_0^{t_1} (k_1 t)^2 dt + \int_{t_1}^{T_S} (k_2 t)^2 dt$$

כלומר עלינו לפתור את האינטגרל הבא :

$$\int_{t_1}^{t_2} (kt)^2 dt = \left[\frac{1}{3} k^2 t^3 \right]_{t_1}^{t_2} = \frac{1}{3} k^2 (t_2^3 - t_1^3)$$

כלומר

$$T_S \cdot I_{RMS}^2 = \frac{1}{3} k_1^2 t_1^3 + \frac{1}{3} k_2^2 T_S^3 - \frac{1}{3} k_2^2 t_1^3$$

ידוע כי

$$I_{pk} = k_1 t_1 = k_2 (T_S - t_1)$$

ולכן

$$T_S \cdot I_{RMS}^2 = \frac{1}{3} I_{pk}^2 \cdot T_S$$

$$T_S \cdot I_{RMS}^2 = \frac{1}{3} I_{pk}^2 \cdot T_S$$

כלומר במשולש

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

אם נחזור לזרם ה AC המקורי נראה כי במחזור 1 ישנם 2 משולשים אחד בעל I_{pk1} ושני

בעל I_{pk2} אבל ניתן לראות בקלות כי $I_{pk1} = I_{pk2}$ ולכן

$$I_{RMS}^2 = \frac{I_{pk1}^2}{3} + \frac{I_{pk2}^2}{3} = \frac{2I_{pk1}^2}{3}$$

כמו כן ניתן לראות כי

$$2I_{pk1} = I_{pk}$$

לכן לסיכום זרם ה RMS הוא

$$I_{RMS}^2 = I_{DC}^2 + \frac{I_{pk}^2}{3}$$

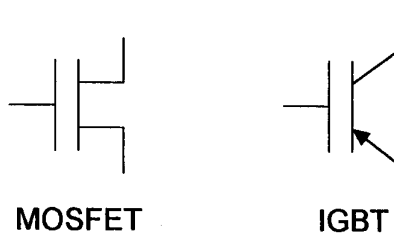
ולכן ההספק המתבזבז על הסליל בעקבות Rl הוא :

$$P_{RL} = R_L \cdot I_{RMS}^2$$

3. הפסדי מתג

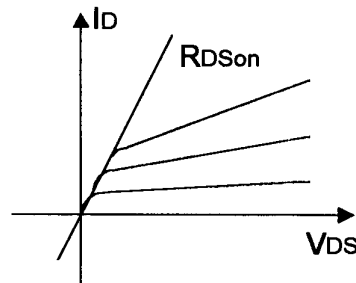
קיימים שני סוגי מתגים שימושיים בממירים, הראשון הוא טרנזיסטור MOSFET והשני

.BJT

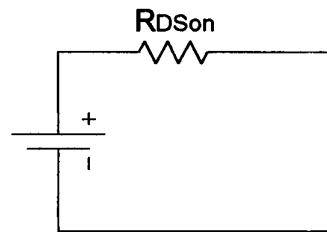


הבעיה במתגים אלה היא שאינם אידיאלים, וישנו בזבוז אנרגיה בהם. נדון כעת בכל אחד מן המתגים

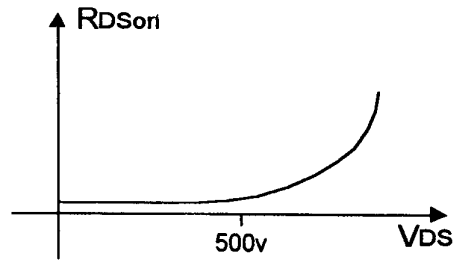
א. MOSFET



השיפוע מייצג התנגדות אומית של התעלה של ה MOSFET במצב drive חזק. כלומר בהולכה ה FET אינו קצר (כמו מתג אידיאלי), אלא מהווה התנגדות קבועה.



עיימ להתגבר על ההתנגדות הזו ישנם מתגי Power MOSFET כדוגמת IRF 150 זהו התקן שמורכב מהרבה MOS-ים קטנים המחוברים במקביל ולכן ההתנגדות קטנה אבל ישנה בעיה בחיבור מספר גדול מאוד של MOS-ים משום שחיבור כזה ייצור דפקטים בפיסה, שיפגעו במספר MOS-ים ולכן יצור של מספר MOS-ים רב יעלה כסף רב, והיצור לא יצדיק את עצמו.



עפ"י הגרף הנ"ל רואים כי $V_{DS} > 500V$ אזי ישנו $R_{DS(on)}$ גדול ולכן הפסדים גדולים.

ל - MOSFET במצב הסטטי אין צורך לספק זרם, מספיק $V_{GS} > 0$, אבל כאשר מדובר במצב הדינמי, ישנם קיבולים פרוזיטים בהדקי ה MOSFET ולכן כדי לעבור בין מצב למצב עלינו לטעון את הקבלים, דבר המצריך זרמים גדולים.

הערות

1. ה MOS הינו טרנזיסטור בו ההולכה אינה תלויה בצומת ולכן הוא מהיר יותר ניתן

להגיע למהירויות מיתוג של כ 500KHZ

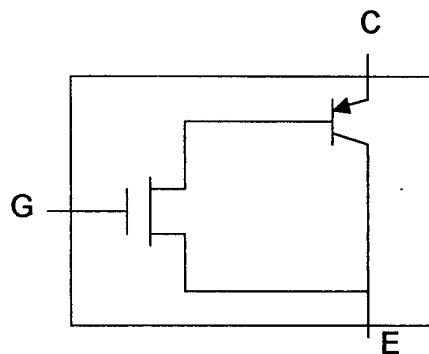
2. ל MOSFET ישנה התנגדות מאוד גדולה בכניסה, אבל ישנה בעיה של פריצת

ה-MOSFET, ע"מ שה MOSFET לא ייפרץ צריך להאריק את הגוף הנוגע לאדמה.

3. ההפסדים של ה MOSFET יהיו לפי התנגדות אומית אבל ההתנגדות תלויה בטמפ'

ב. IGBT

זהו התקן שבנוי מטרנזיסטור BJT שבכניסה שלו מחובר MOSFET



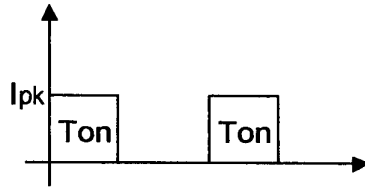
כאשר טרנזיסטור ה BJT ברוויה אזי מתח V_{ce} הינו קטן וקבוע, ולא תלוי בזרמים בבסיס.

ההפסדים במתג מסוג זה הינם

$$I_{av} \cdot V_{CES}$$

בד"כ $I_{rms} > I_{av}$ (ב $I_{rms} = I_{av}$ dc)

אם ניתן כי צורת הזרם היא



אז

$$I_{av} = I_{pk}D$$

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

ומשום ש $0 < D < 1$

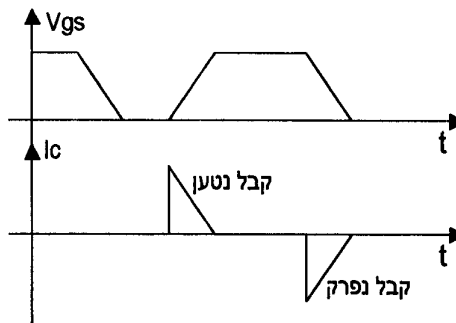
אזי

$$\sqrt{D} > D$$

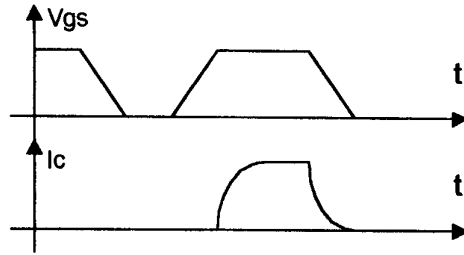
ולכן $I_{rms} > I_{av}$

כאשר לוקחים IGBT מהיר, המטען האגור יכול להתפזר מהר, ולכן V_{ces} נעשה גדול יותר ומכאן שההפסדים גדולים יותר.

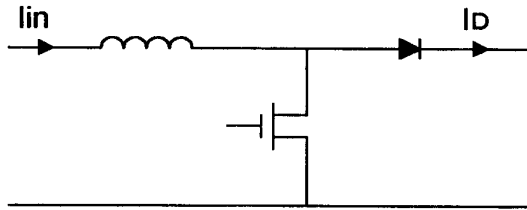
נדון כעת בהפסדי המיתוג של מתג מסוג MOSFET מתח V_{gs} הוא הבא



ה Driver שמטפל במיתוג מוגבל ביכולת הזרמת הזרם ל gate ולכן צורת הזרם היא :

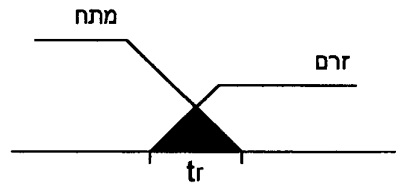


ניקה לדוגמא את ממיר ה boost



כאשר המתג עובר ממצב של קיטעון להולכה זורם דרכו זרם המתג ייסגר (יעבור להולכה) רק כאשר זרם דרכו I_{in} אבל עד שהזרם יהיה שווה ל I_{in} נופל על המתג מתח, בפרק זמן זה ישנו בזבוז אנרגיה.

ע"מ לחשב את בזבוז האנרגיה נבצע קירוב



ולכן בזבוז האנרגיה יהיה

$$\frac{I \cdot V \cdot t_r}{2} \text{ לכל מיתוג.}$$

ולכן בזבוז האנרגיה במחזור :

$$\frac{I \cdot V \cdot t_r}{2} + \frac{I \cdot V \cdot t_f}{2}$$

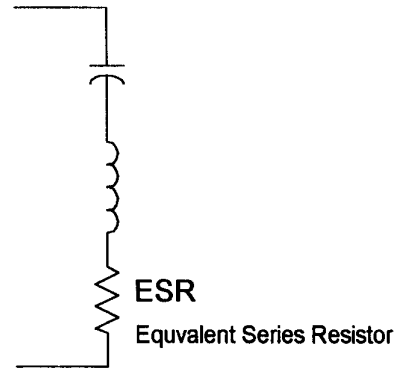
ומכאן שהפסדי המיתוג יהיו

$$P_{sw} \approx \left(\frac{I \cdot V \cdot t_r + I \cdot V \cdot t_f}{2} \right) f_s$$

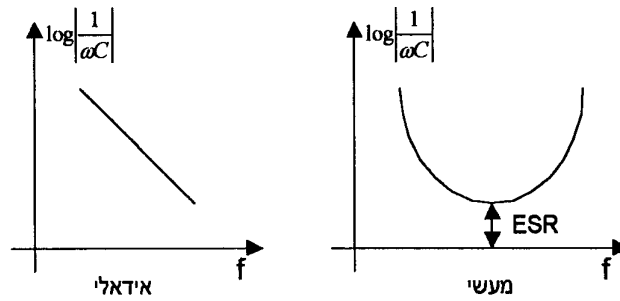
• רואים כי ככל שהתדר גדול יותר ההפסדים גדולים יותר.

4. הפסדי קבל

בעיקרון ההפסדים על הקבל זניחים, אבל ישנה בעיה של כמות הזרם שניתן להעביר דרך הקבל. סכמת התמורה של קבל מעשי הינה :



התגובה לתדר של קבל היא



בגלל ההתנגדות ESR ישנו בקבל בזבוז אנרגיה, כאשר זורם דרכו זרם (זרם משולש) וישנה אדווה שגדולה מהמתח המחושב. דבר נוסף בקבל הוא, שעלינו להקפיד על תכונות המתח והזרם ע"מ לא להזרים זרם או מתח גדולים מדי שעלולים לשרוף את הקבל.