

Teljesítményelektronika

Veszteségszámítás



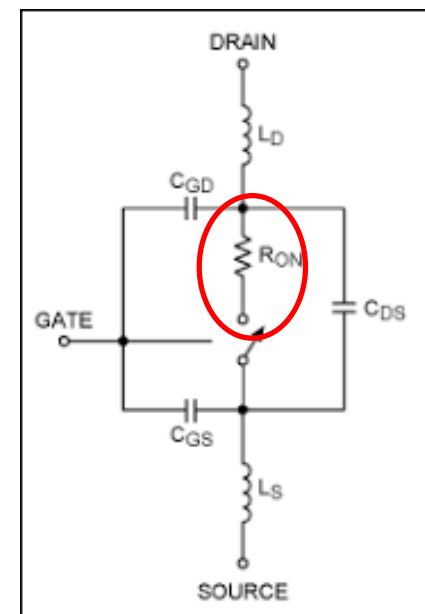
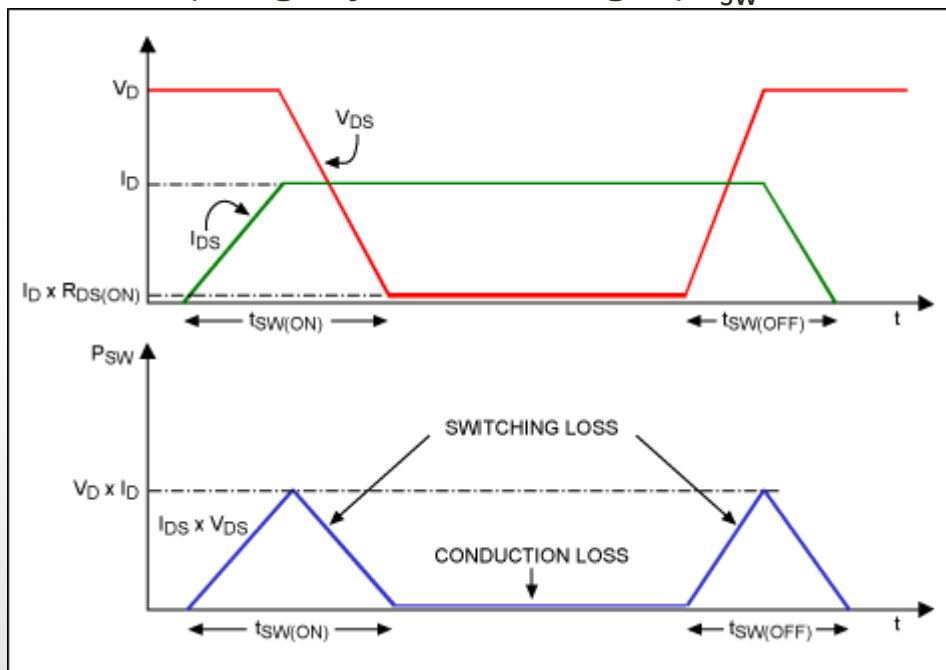
Áttekintés

- Teljesítményelektronikai eszközök veszteségszámítása:
 - MOSFET (kapcsolóüzem)
 - Dióda (kapcsolóüzem)
 - IGBT (kapcsolóüzem)
 - Kábel (szkin hatás – nagyfrekvencia)
 - Induktivitás
 - Transzformátor

$$HATÁSFOK_{[\%]} = \frac{P_{ki}}{P_{be}} \cdot 100\%$$

MOSFET-ek kapcsolóüzemű veszteségei

- A kapcsolóüzemű veszteségek összessége két fő forrásra bontható:
 - Vezetési veszteség (frekvencia független)
 - Kapcsolási veszteség (függ a frekvenciától)
 - (Meghajtó vesztesége (Q_{sw} -től és f -től függ)



Veszteségi egyenletek

- A vezetési veszteség függ:
 - A MOSFET-en átfolyt áram négyzetes értékétől
 - A MOSFET $R_{DS(on)}$ csatorna ellenállásától (katalógus adat)
 - A bekapcsolt időtartamtól (amikor az eszköz vezet)

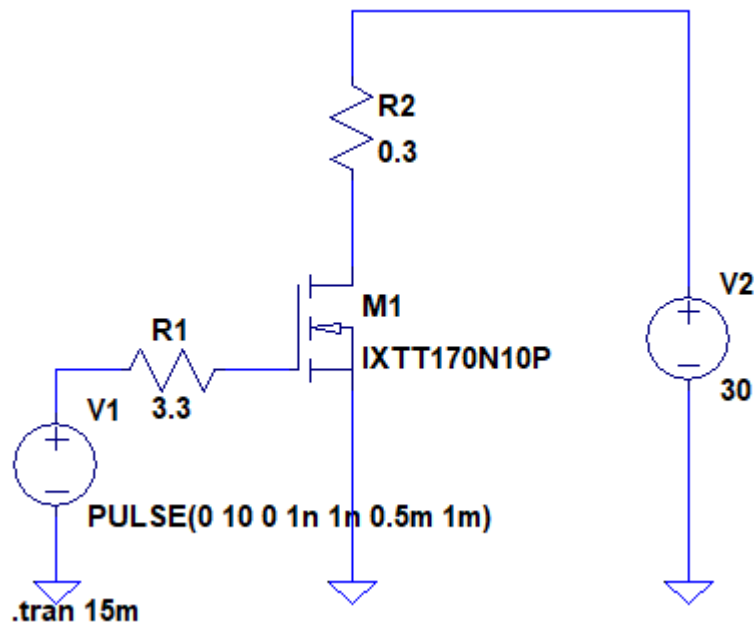
$$P_{loss_cond} = I_D^2 \cdot D \cdot R_{DS(on)}$$

- A kapcsolási veszteség függ:
 - A MOSFET-en átfolyt áram és V_{DS} feszültség értékétől
 - A MOSFET kapcsolási paramétereitől (t_r és t_f) (katalógus adat)
 - A kapcsolási frekvenciától (induktív terhelés esetén)

$$P_{loss_sw} = \frac{V_{DS} \cdot I_D}{2} \cdot (t_r + t_f) \cdot f_{sw}$$

Megjegyzés: Kapcsolási veszteség tekintetében beszélhetünk induktív (fentebb említve) illetve rezisztív jellegű terhelésről.

Példa MOSFET veszteségeinek számítására



$t_{d(on)}$ t_r $t_{d(off)}$ t_f	Resistive Switching Times	35	ns
	$V_{GS} = 10V, V_{DS} = 0.5 \cdot V_{DSS}, I_D = 60A$	50	ns
	$R_G = 3.3\Omega$ (External)	90	ns
		33	ns

$R_{DS(on)}$	$V_{GS} = 10V, I_D = 0.5 \cdot I_{D25}, \text{ Note 1}$ $V_{GS} = 15V, I_D = 350A$	7	9 mΩ
--------------	---	---	------

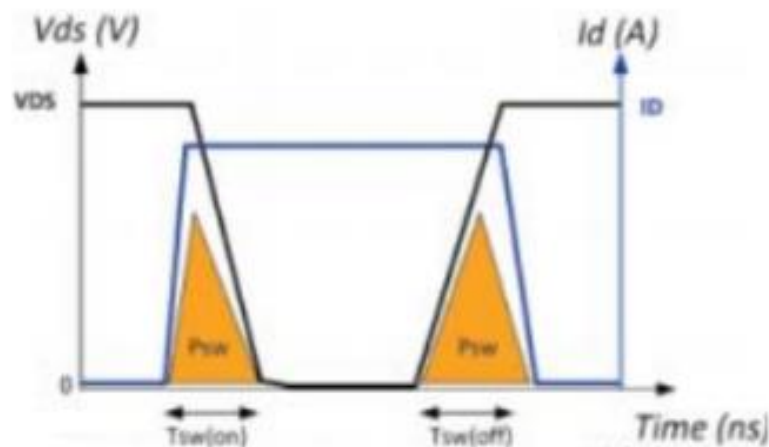
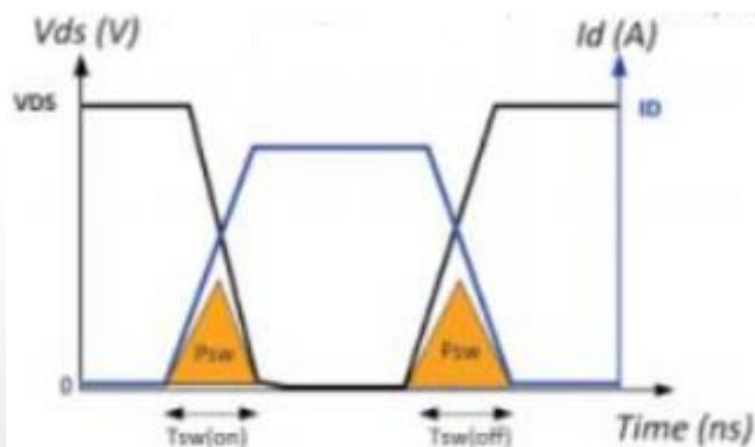
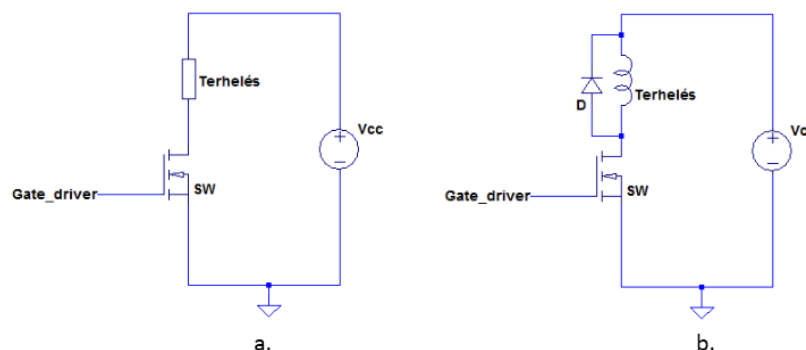
- $f_{sw} = 1kHz$
- $I_D = 100A$
- $V_{DS} = 30V$

- $P_{loss_cond} = I_D^2 \cdot D \cdot R_{DS(on)} = 100^2 A \cdot 0,5 \cdot 7m\Omega = 35W$
- $P_{loss_sw} = \frac{V_{DS} \cdot I_D}{4} \cdot (t_r + t_f) \cdot f_{sw} = \frac{30V \cdot 100A}{4} \cdot (50ns + 33ns) \cdot 1kHz = 0,06225W = 62,25mW$
- Összesen:
- $P_l = P_{l_cond} + P_{sw_sw} = 35W + 0,1245W = 35,06225 W$

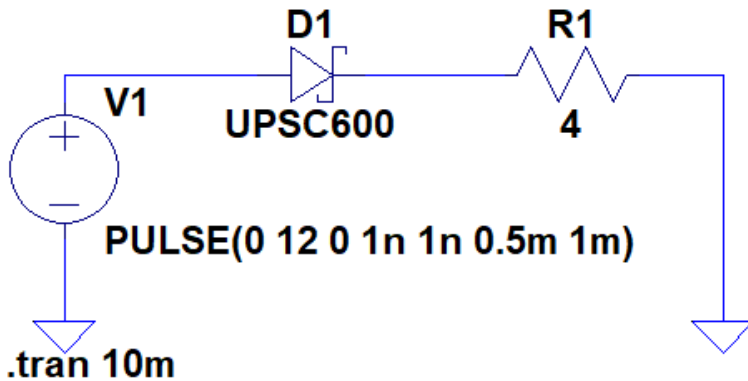
Terhelések jellege

- A gyakorlatban a kapcsolási veszteségek tekintetében két terhelést különböztetjük meg:

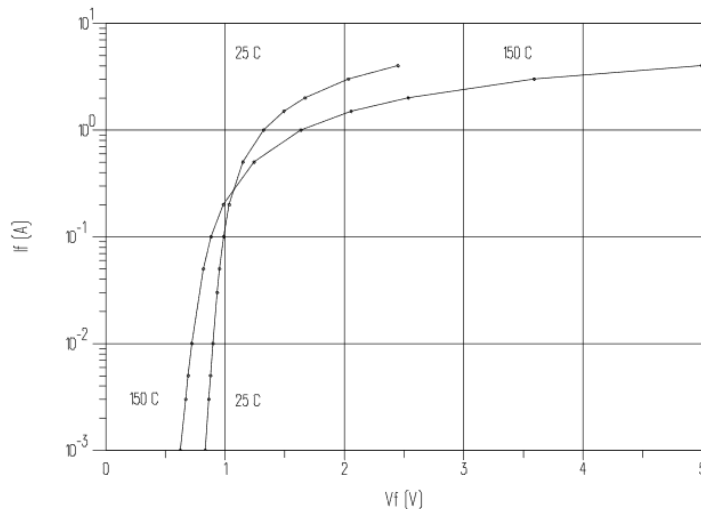
- Induktív:* $P_{l_sw_ind} = \frac{V_{DS} \cdot I_D}{2} \cdot (t_r + t_f) \cdot f_{sw}$
- Rezisztív:* $P_{l_sw_rez} = \frac{V_{DS} \cdot I_D}{4} \cdot (t_r + t_f) \cdot f_{sw}$



Dióda kapcsolóüzemű veszteségei



FORWARD CHARACTERISTICS



- A dióda vesztesége legegyszerűbb módon a rajta átfolyt áram és a drop feszültség szorzatából számítható:

$$P_{l_diode} = V_f I_D D$$

- V_f az adatlapi gráfról leolvasható, adott áramerősség és hőmérséklet mellett
- A diódán átfolyt áram meghatározása nem triviális, mivel a dióda is rendelkezik egy differenciális ellenállással
- A példában:

- $I_D = 2,52A$

$$P_{l_diode} = V_f I_D D = 2V \cdot 2,52A \cdot 0,5 \cong 2,5W$$

IGBT-k kapcsolóüzemű veszteségei

- IGBT esetén nem beszélhetünk csatornaellenállásról, így kicsit más módon kell számolnunk
- A részveszteségek itt is hasonlóan alakulnak, mint a MOSFET esetén:

$$P_{L_IGBT} = P_{cond} + P_{sw}$$

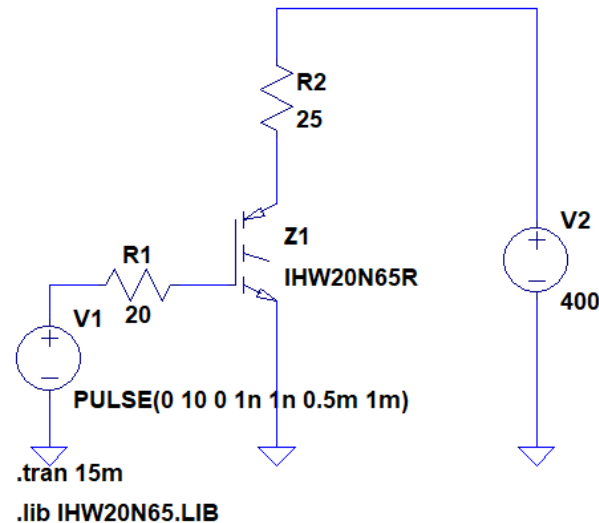
- A vezetési veszteség függ:
 - Az IGBT-n átfolyt áram effektív értékétől
 - Az IGBT szaturációs feszültségétől (adatlap érték)
 - A bekapcsolt időtartamtól (amikor az eszköz vezet)

$$P_{swcond} = V_{CEsat} \cdot I_{prieff} \cdot D_{max}$$

- A kapcsolási veszteségek esetén az adatlap értékekhez normalizálunk
- A kapcsolási veszteség függ:
 - A be és kikapcsoláshoz szükséges energiától (adatlap érték)
 - Az eszközön átfolyt áram illetve V_{CE} feszültségétől
 - Kapcsolási frekvenciától

$$P_{loss,swIGBT} = \frac{(E_{on} + E_{off}) \cdot I \cdot V_{CE} \cdot f_{sw}}{I_{nom} \cdot V_{nom}}$$

Példa IGBT veszteségeinek számítására



Collector-emitter voltage, $T_{vj} \geq 25^\circ\text{C}$	V_{CE}	650	V
DC collector current, limited by T_{vjmax} $T_C = 25^\circ\text{C}$ $T_C = 100^\circ\text{C}$	I_C	40.0 20.0	A

Collector-emitter saturation voltage	V_{CEsat}	$V_{GE} = 15.0\text{V}, I_C = 20.0\text{A}$ $T_{vj} = 25^\circ\text{C}$ $T_{vj} = 175^\circ\text{C}$	-	1.35 1.60	1.70 -	V
--------------------------------------	-------------	--	---	--------------	-----------	---

IGBT Characteristic, at $T_{vj} = 175^\circ\text{C}$

Turn-on delay time	$t_{d(on)}$	$T_{vj} = 175^\circ\text{C},$ $V_{CC} = 400\text{V}, I_C = 20.0\text{A},$ $V_{GE} = 0.0/15.0\text{V},$ $R_{G(on)} = 20.0\Omega, R_{G(off)} = 20.0\Omega,$ $L_\sigma = 35\text{nH}, C_\sigma = 32\text{pF}$ L_σ, C_σ from Fig. E	-	22	-	ns
Rise time	t_r		-	16	-	ns
Turn-off delay time	$t_{d(off)}$		-	290	-	ns
Fall time	t_f		-	20	-	ns
Turn-on energy	E_{on}	Energy losses include "tail" and diode reverse recovery.	-	0.62	-	mJ
Turn-off energy	E_{off}		-	0.29	-	mJ
Total switching energy	E_{ts}		-	0.91	-	mJ

- $f_{sw} = 1\text{kHz}$
- $I = 16\text{A}$

- $P_{cond} = V_{CEsat} \cdot I \cdot D = 1,35\text{V} \cdot 16\text{A} \cdot 0,5 = 10,8\text{W}$

- $$P_{sw} = \frac{(E_{on} + E_{off}) \cdot I \cdot V_{CE} \cdot f_{sw}}{I_{nom} \cdot V_{nom}} = \frac{(0,62\text{mJ} + 0,29\text{mJ}) \cdot 16\text{A} \cdot 400\text{V} \cdot 1\text{kHz}}{20\text{A} \cdot 650\text{V}} = 0,448\text{W}$$

- $P_{l_IGBT} = P_{cond} + P_{sw} = 10,8\text{W} + 0,448\text{W} = 11,24\text{W}$

Kábelek vesztesége

- A kábelek vesztesége függ:
 - A kábel hosszától
 - Anyagától
 - Keresztmetszetétől
 - A kábelen átfolyt áram áram négyzetes értékétől
- A kábel ellenállása:

$$R = \rho \frac{l}{A}$$

- Ahol:
 - ρ – Az adott anyag fajlagos ellenállása [$\Omega\text{mm}^2/\text{m}$]
 - l – A kábel hossza [m]
 - A – A kábel keresztmetszete [mm^2]
- A kábel vesztesége:

$$P_l = R_{k\acute{a}bel} I^2$$

Példa

- Adatok:

- A kábel anyaga: réz* $\left(\rho = 0,0175 \frac{\Omega mm^2}{m}\right)$
- A kábel hossza: 120m
- A kábel átmérője: 5mm
- A kábelben átfolyt áram: 10A

- Megoldás:

- A kábel keresztmetszete: $A = \frac{d^2 \pi}{4} = \frac{5^2 mm \cdot \pi}{4} = 19,64 mm^2$
- A kábel ellenállása: $R = \rho \frac{l}{A} = 0,0175 \frac{\Omega mm^2}{m} \cdot \frac{120m}{19,62 mm^2} =$
0,107Ω
- A kábel vesztesége: $P_l = R_{kábel} I^2 = 0,107 \Omega \cdot 10^2 A =$ **10,7W**

Kábelek magas frekvencián

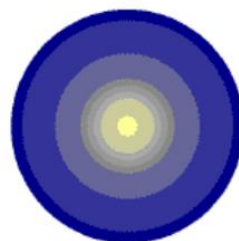
- A kábelek fontos paramétere az áramsűrűség, mely a tekercselő huzal keresztmetszeti paraméterével van a összefüggésben
- Jellemzően 3 – 5A/mm²-t engedünk meg
- Magasabb frekvencián a szkin (bőr) hatást is figyelembe kell vennünk:

$$\sigma[mm] = 0,503 \sqrt{\frac{\rho \left[\frac{\Omega mm^2}{m} \right]}{f[MHz]}}$$

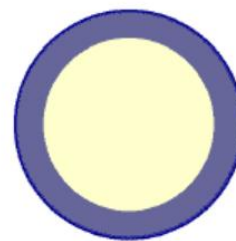


- Magasabb frekvencián litze kábel használata előnyös

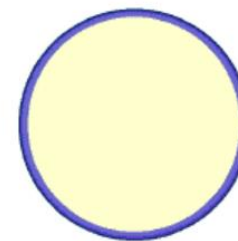
Frekvencia	Behatolási mélység		
	Acél	Réz	Ón
50 Hz	1,00 mm	9,30 mm	24,00 mm
150 kHz	0,22 mm	0,17 mm	0,44 mm
30 MHz	41,00 μm	12,00 μm	31,00 μm
1 Ghz	7,10 μm	2,10 μm	5,40 μm



60Hz.
6" (150mm)



1000Hz.
0.2" (5mm)



400KHz.
0.030" (0.75mm)

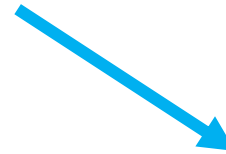
Transzformátorok, tekercsek veszteségei

- Mivel jellemzően (por)vasmagos tekercseket használunk (transzformátor esetén ez természetes), így a veszteségek két nagy csoportba oszthatók:



Tekercselés vesztesége

- Számítása hasonló a „kábelek vesztesége” módszeréhez
- A kábel hosszánál egy közepes menetszámot veszünk figyelembe



Vasvesztés

- Magába foglalja a hiszterézis és örvényáramú veszteségeket
- W/kg-ban van megadva
- Függ a frekvenciától
- Általában a katalógus specializálja
- Számítási úton (kisebb frekvenciák esetén) a Steinmetz egyenlettel számítható:
 - $P_{L_core} = k f^{\alpha} \hat{B}^{\beta}$
 - Ahol, k, α és β tapasztalati (katalógus) értékek

Ajánlott irodalom

- Christan A.: *Design of a 2,5kW DC/DC full bridge converter*
- Hisao Kakitani, Ryo Takeda: *Selecting the Best Power Device for Power Electronics Circuit Desingn through Gate Charge Characterisation*, **Bodos's Power Systems**, May2014, pp. 57-60, 2014