

## Úloha výkonových indukčností a kapacít v obvodoch meničov pre fotovoltaické aplikácie

Pollák Ján · Elektrotechnika

09.06.2014



Príspevok je zameraný na popis a analýzu veľmi dôležitej funkcie, ktorú plnia výkonové indukčnosti a kapacity pri premene a maximálnom využití jednosmernej elektrickej energie z fotovoltaických panelov. Hlavná pozornosť je sústredená na rozbor elektrických javov, ktoré prebiehajú v indukčnosti a kapacite v jednotlivých intervaloch pracovného cyklu meničov, ktoré sú často používané pre fotovoltaické aplikácie. V neposlednom rade je v príspevku analyzovaný podiel strát v indukčnostiach a kapacitách na celkových stratách meniča a spôsoby ich znižovania za účelom dosahovania čo najväčšej účinnosti pri premene energie z fotovoltaických panelov.

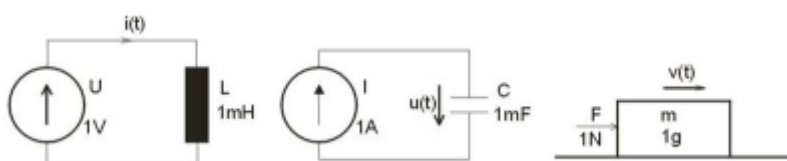
### 1. Úvod

V súčasnej dobe sa z rozličných dôvodov čoraz viac dostáva do popredia využívanie takzvaných „zelených“ alebo „ekologických“ zdrojov energie. Týmito prívlastkami môžeme charakterizovať aj slnečnú energiu, ktorá dopadá na zemský povrch. Najznámejším spôsobom využitia slnečnej energie je ohrev vody, prípadne iných teplotných médií a následne buď priama spotreba teplej vody, alebo využitie takto vyrobeného tepla napríklad na vykurovanie. Ďalším spôsobom, ktorý sa v ostatných rokoch začal veľmi dynamicky rozvíjať je využitie fotoelektrického javu a priama premena slnečnej energie na elektrickú prostredníctvom fotovoltaických článkov. Keďže fotovoltaický článok je nestabilným zdrojom jednosmernej elektrickej energie, je potrebná premena a akumulácia tejto energie, aby bolo možné jej praktické využitie.

Na premenu jednosmernej elektrickej energie z fotovoltaických článkov sa využívajú jednosmerné (DC/DC) alebo striedavé (DC/AC) meniče. Jednosmerné meniče zabezpečujú transformáciu a stabilizáciu jednosmerného napätia z fotovoltaických článkov na nižšiu hodnotu (znižovacie meniče, step-down converter, buck converter), alebo vyššiu hodnotu (zvyšovacie meniče, step-up converter, boost converter). Striedavé meniče transformujú jednosmerné napätie a prúd na striedavé s pevnou frekvenciou. Vo všetkých týchto meničoch hrajú veľmi dôležitú úlohu dva základné elektrické prvky a to indukčnosť a kapacita. Tieto prvky majú jednu spoločnú vlastnosť. Sú schopné krátkodobo akumulovať a následne odovzdávať elektrickú energiu s veľmi vysokou efektívnosťou.

### 2. Dualita indukčnosti a kapacity

Pri bližšom pohľade na vlastnosti indukčnosti a kapacity a analýze ich správania v elektrických obvodoch objavíme veľmi zaujímavú analógiu. Prechodové javy v indukčnosti v obvode s konštantným napätím je možné popísať rovnicami v rovnakom tvare ako prechodové javy v kapacite v obvode s konštantným prúdom. Samozrejme v rovniciach figurujú iné veličiny. Tejto vlastnosti indukčnosti a kapacity hovoríme dualita, alebo o indukčnosti a kapacite hovoríme ako o duálnych elektrických prvkoch. Podobnú analógiu je možné nájsť dokonca aj v mechanike, napríklad pri analýze rovnomerne zrýchleného pohybu hmotného telesa. Takéto analógie sú vo fyzike pomerne časté a ich poznanie je veľmi užitočné pre pochopenie jedného fyzikálneho javu pomocou iného, niekedy z úplne inej oblasti. Na obr.1 vidíme jednoduché elektrické schémy s indukčnosťou v obvode s konštantným napätím, kapacitou v obvode s konštantným prúdom a znázornenie pohybu hmotného telesa pri pôsobení konštantnej sily.

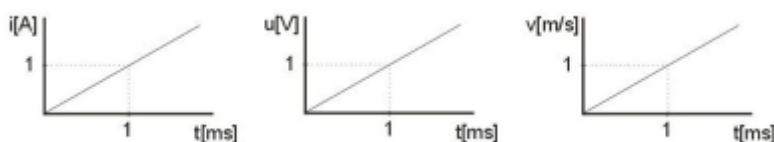


Obr.1 Príklady duality v elektrotechnike a mechanike

$$U = L \frac{di}{dt} \quad (2.1)$$

$$I = C \frac{du}{dt} \quad (2.2)$$

$$F = m \frac{dv}{dt} \quad (2.3)$$



Obr.2 Časové priebehy základných veličín

$$W_L = \frac{1}{2} Li^2 \quad (2.4)$$

$$W_C = \frac{1}{2} Cu^2 \quad (2.5)$$

$$W_m = \frac{1}{2} mv^2 \quad (2.6)$$

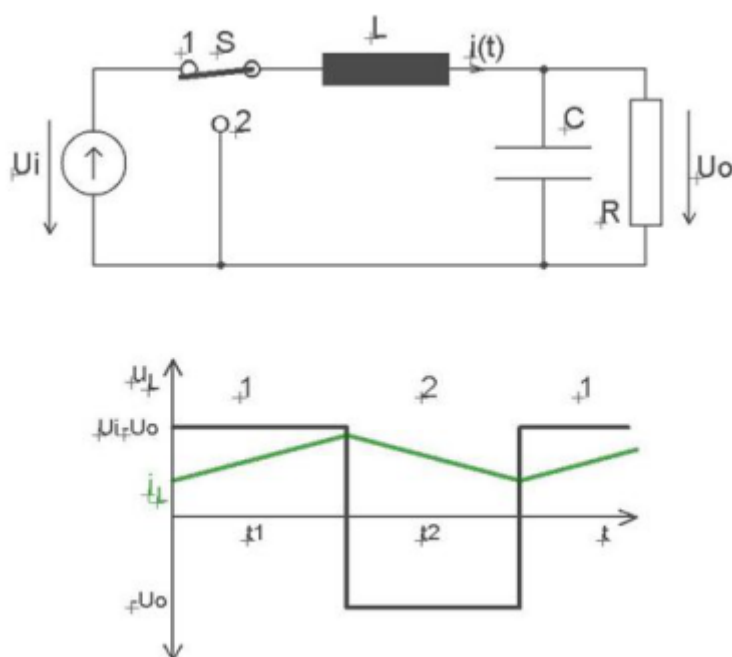
Pri napísaní základných rovníc (2.1), (2.2), (2.3) pre tieto príklady, na jednoduchých grafoch na obr.2 vidíme, že zdroj konštantného napätia pripojený k indukčnosti vyvolá lineárny nárast prúdu s časom. Zdroj konštantného prúdu pripojený ku kapacite vyvolá lineárny nárast napätia s časom. Pôsobenie konštantnej sily na hmotné teleso vyvolá lineárny nárast rýchlosti s časom. Vo všetkých troch prípadoch sa jedná o pôsobenie konštantného silového poľa na prvok s určitým parametrom. V prvom prípade je týmto parametrom indukčnosť  $L$ , v druhom prípade kapacita  $C$  a v treťom prípade hmotnosť  $m$ . Pri zapísaní rovníc pre získané energie jednotlivých prvkov v silovom poli (2.4), (2.5), (2.6) vidíme, že energia je v každom prípade popísaná rovnakou rovnicou a je priamo úmerná veľkosti parametra ( $L$ ,  $C$ ,  $m$ ) a druhej mocnine veličiny, ktorej zmena

bola vyvolaná v silovom poli ( $i$ ,  $u$ ,  $v$ ). Získaná energia zostane v danom prvku zachovaná aj po zániku pôsobenia silového poľa. To znamená, že po pripojení indukčnosti na zdroj nulového napätia (skrat) ostáva indukčnosťou tiecť prúd, ktorý ňou tiekol v okamihu zmeny napätia.

Po pripojení kondenzátora na zdroj nulového prúdu (rozpojený obvod) zostáva kondenzátor nabitý na napätie, ktoré na ňom bolo v okamihu rozpojenia. Taktiež hmotné teleso po zániku pôsobenia sily pokračuje v rovnomernom priamočiarnom pohybe rýchlosťou, ktorú malo v okamihu zániku sily. Keďže podľa zákona zachovania energie, energia nemôže zaniknúť, len sa zmení na inú formu energie, môžeme povedať, že nie je možná skoková (okamžitá) zmena prúdu v indukčnosti, nie je možná okamžitá zmena napätia kapacity a nie je možná okamžitá zmena rýchlosti hmotného telesa. Všetky zmeny hodnôt uvedených veličín sa musia udiať v nenulovom časovom intervale. Poznanie týchto vlastností a zákonitostí, ktoré platia pre indukčnosť a kapacitu umožňuje aplikáciu rôznych kombinácií a zapojení týchto elektrických prvkov, ktoré sú doplnené o riadené a neriadené spínacie prvky. Tieto zapojenia predstavujú rozličné typy elektrických meničov, ktoré umožňujú transformáciu aj jednosmernej elektrickej energie.

### 3. Indukčnosť a kapacita v znižujúcom meniči

Znižujúci menič (step-down converter, buck converter) je jedným zo základných typov meničov ktorý slúži na zmenu vstupného jednosmerného napätia na nižšie výstupné jednosmerné napätie. Tento menič je vo fotovoltaike využívaný hlavne pri nabíjačkách batérií, prípadne pri iných zdrojoch jednosmerného napätia, ktoré sú napájané fotovoltickými článkami. Tento menič umožňuje aplikovať tzv. MPPT algoritmus riadenia, čo znamená maximálne využitie dostupného výkonu fotovoltických panelov. Zjednodušené zapojenie meniča a časové priebehy napätia a prúdu sú na obr.3. V reálnych zapojeniach je prepínač  $S$  nahradený spínacím tranzistorom pre fázu 1 a spínacou rýchlou diódou pre fázu 2.



Obr.3 Zjednodušené zapojenie a priebehy znižovacieho meniča

Predpokladajme ustálený pracovný cyklus s konštantným časmi zopnutia prepínača v polohe 1 ( $t_1$ ) a časom zopnutia prepínača v polohe 2 ( $t_2$ ). V čase zopnutia prepínača S v polohe 1 ( $t_1$ ) je na indukčnosti napätie  $U_L = U_i - U_o$  a prúd indukčnosti lineárne narastá. Dochádza k zvyšovaniu energie („nabíjaniu“) indukčnosti. V tejto fáze dochádza aj k nárastu napätia (nabíjaniu) kapacity. Tento nárast napätia nie je lineárny ale kvadratický, pretože kapacita sa nabíja lineárne sa zvyšujúcim prúdom. V čase zopnutia prepínača v polohe 2 ( $t_2$ ) je na indukčnosti napätie  $-U_o$  a dochádza k znižovaniu energie („vybíjaniu“) indukčnosti. Súčasne dochádza aj k vybíjaniu kapacity. V tejto fáze je celá energia do záťaže dodávaná z energie, ktorá bola naakumulovaná v indukčnosti a kapacite vo fáze 1. Veľmi ľahko sa dá odvodiť vzťah medzi vstupným a výstupným napätím.

$$U_o = U_i \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (3.1)$$

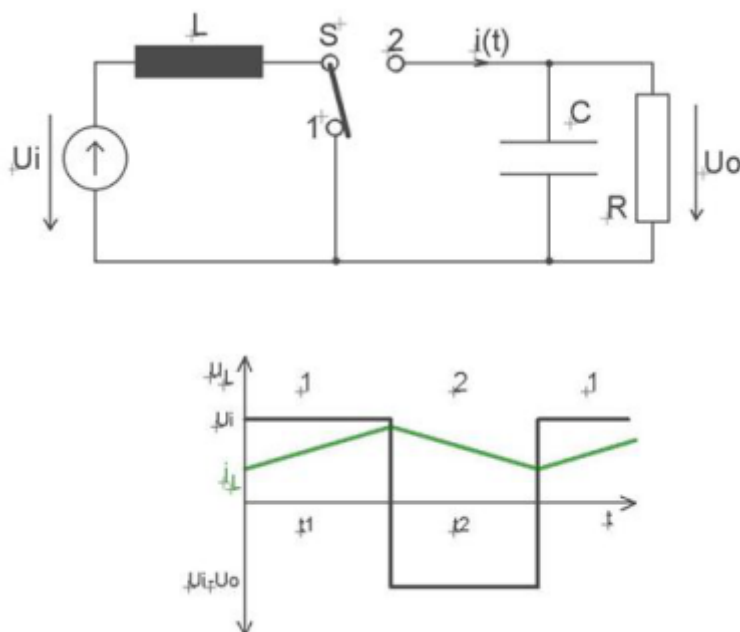
$$D = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (3.2)$$

$$D = \frac{U_o}{U_i} \quad (3.3)$$

To znamená, že výstupné napätie znižovacieho meniča je vždy menšie ako vstupné a je priamo úmerné striede D spínania prepínača S, ktorá je vždy menšia ako 1.

#### 4. Indukčnosť a kapacita v zvyšujúcom meniči

Zvyšujúci menič (step-up converter, boost converter) je taktiež jedným zo základných typov meničov a slúži na zmenu vstupného jednosmerného napätia na vyššie výstupné jednosmerné napätie. Tento typ meniča sa veľmi často používa ako prvý stupeň fotovoltických invertorov, ktorý zabezpečí zvýšenie a stabilizáciu napätia z fotovoltických panelov pre druhý stupeň a tým je DC/AC menič (striedač). Zvyšujúce meniče tiež umožňujú aplikovať tzv. MPPT algoritmus riadenia, čím je možné dosiahnuť maximálnu možnú využiteľnosť výkonu fotovoltických panelov. Zjednodušené zapojenie zvyšujúceho meniča a priebehy napätia a prúdu počas pracovného cyklu sú na obr.4. V reálnom zapojení je podobne ako u znižujúceho meniča prepínač S nahradený spínacím tranzistorom a spínacou diódou.



Obr.4 Zjednodušené zapojenie a priebehy zvyšovacieho meniča

Pri analýze funkcie zvyšovacieho meniča taktiež predpokladajme ustálený pracovný cyklus s konštantným časmi zopnutia prepínača S v polohe 1 ( $t_1$ ) a časom zopnutia prepínača S v polohe 2 ( $t_2$ ). V čase zopnutia prepínača S v polohe 1 ( $t_1$ ) je na indukčnosti pripojené vstupné napätie  $U_L = U_i$  a prúd indukčnosti lineárne narastá. Dochádza k zvyšovaniu energie („nabíjaniu“) indukčnosti. V tejto fáze súčasne dochádza k poklesu napätia (vybíjaniu) kapacity, pretože celá energia záťaže je hradená z energie, ktorá bola naakumulovaná v kapacite vo fáze 2. V čase zopnutia prepínača v polohe 2 ( $t_2$ ) je na indukčnosti napätie  $U_L = U_i - U_o$  a keďže  $U_i$  je menšie ako  $U_o$ , dochádza k znižovaniu energie („vybíjaniu“) indukčnosti. Súčasne dochádza k nabíjaniu kapacity. Indukčnosť pôsobí ako nábojová pumpa, ktorá umožní nabiť výstupnú kapacitu na vyššie výstupné napätie ako je vstupné. V tejto fáze je energia do záťaže dodávaná zo vstupného napätia a z energie, ktorá bola naakumulovaná v indukčnosti vo fáze 1. Odvozené vzťahy medzi vstupným a výstupným napätím zvyšovacieho meniča sú nasledovné:

$$U_o = U_i \frac{t_1 + t_2}{t_2} \quad (4.1)$$

$$D = \frac{t_1}{t_1 + t_2} \quad (4.2)$$

$$U_o = \frac{U_i}{1 - D} \quad (4.3)$$

Z toho vyplýva, že výstupné napätie je vždy väčšie ako vstupné, pretože strieda  $D$  je vždy menšia ako 1. So striedou spínania, ktorej hodnota sa približuje k 1, sa výstupné napätie zväčšuje exponenciálne, teoreticky až na hodnotu  $\infty$ .

## 5. Straty v reálnej indukčnosti a kapacite

Všetky analýzy a vzťahy uvedené v predchádzajúcich častiach predpokladali, že pracujeme s ideálnou indukčnosťou a kapacitou. V praxi sa samozrejme takéto prvky nevyskytujú a my musíme pracovať s reálnymi indukčnosťami a kapacitami, ktoré majú aj parazitné vlastnosti. Čím väčší je vplyv týchto parazitných vlastností, tým väčšie sú

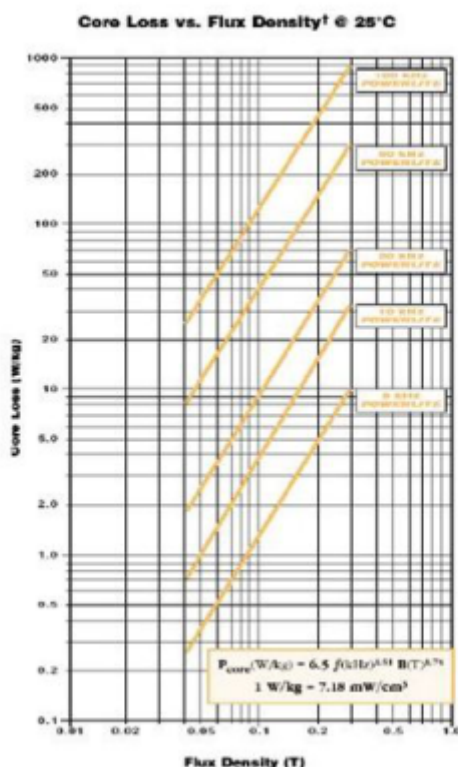
odchýlky nameraných parametrov meničov s reálnymi prvkami od vypočítaných. Tieto parazitné vlastnosti sú tiež príčinou strát v indukčnostiach a kapacitách, ktoré majú podiel na celkových stratách meničov a tým aj na znižovaní ich účinnosti. U indukčností je takouto parazitnou vlastnosťou sériový odpor vinutia a magnetické vlastnosti jadra, na ktorom je indukčnosť navinutá. Môžeme povedať, že straty v sériovom odpore indukčností sú priamo úmerné veľkosti pretekajúceho prúdu a sériového odporu indukčností.

$$P_{RL} = R_S \cdot I_L^2 \quad (5.1)$$

Výpočet magnetických strát je komplikovanejší a robí sa rozličnými spôsobmi. Vo všeobecnosti platí, že magnetické straty v indukčnosti sú závislé od sýtenia jadra  $\Delta B$ , spínacej frekvencie  $f$ , teploty jadra a objemu jadra. Napríklad výrobca jadier z amorfného kovu METGLAS uvádza nasledovný vzorec pre výpočet strát v jadre indukčností.

$$P_{core} = 6.5 f_{sw}^{1.51} B_{ac}^{1.74} [W/kg] \quad (5.1)$$

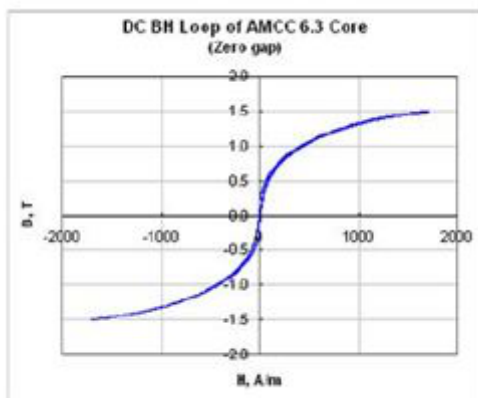
kde  $f_{sw}$  - frekvencia v kHz,  $B_{ac}$  - sýtenie jadra v T. Výrobcovia uvádzajú väčšinou grafy, v ktorých sú znázornené straty v jednotkovom objeme jadra pri určitých podmienkach. Na obr.5 je príklad takého grafu taktiež od výrobcu METGLAS.



Obr.5 Straty v jadre METGLAS Powerlite

V súčasnosti sú dostupné magnetické materiály pre jadrá výkonových indukčností, ktoré sa vyznačujú veľmi nízkymi mernými stratami a dovoľujú vysoké sýtenie, čo umožňuje návrh indukčností pre vysoké prenášané výkony s malými rozmermi a veľmi nízkymi stratami. Pre nižšie frekvencie (cca do 20kHz) sú z hľadiska magnetických strát vhodné jadrá s amorfných kovov, pre vyššie frekvencie sú vhodnejšie feritové

materiály. Na obr.6 je znázornená hysterézná krivka materiálu z amorfného kovu. Platí pravidlo, že magnetické straty v jadre sú úmerné ploche hysteréznej krivky magnetického materiálu. Čím je hysterézná krivka užšia, tým menšia energia je potrebná na zmenu magnetizácie jadra, ktorá predstavuje magnetické straty.



Obr.6 Typický priebeh hysteréznej krivky materiálu METGLAS Powerlite

Pre straty v kapacite vyvolané striedavou zložkou prúdu platí závislosť od sériového odporu kapacity tzv. ESR.

$$P_{Rc} = ESR \cdot I_C^2 \quad (5.3)$$

Pre spínané aplikácie sa používajú nízkoimpeďančné kapacity s veľmi nízkym ESR a vysokou dovolenou striedavou zložkou prúdu. Vývoj kapacít pre spínané aplikácie taktiež veľmi pokročil a v súčasnosti sa pre väčšie výkony čoraz viac používajú fóliové kondenzátory, ktoré majú výborné elektrické vlastnosti a dlhú životnosť na rozdiel od elektrolytických kondenzátorov.

## Podakovanie

Táto publikácia bola vytvorená v rámci projektu Výskum technologickej základne pre návrh aplikácií využívania obnoviteľných zdrojov energie v praxi, ITMS kód 26220220083 Operačného programu Výskum a vývoj hradený z Európskeho fondu regionálneho rozvoja.

## Literatúra

1. <http://en.wikipedia.org/wiki/Inductor>
2. <http://en.wikipedia.org/wiki/Capacitor>
3. <http://www.facstaff.bucknell.edu/mastascu/elessonshtml/LC/Capac1.htm>
4. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/capeng2.html>
5. Sanjaya Maniktala: Switching power supplies A - Z, second edition
6. POWERLITE High Frequency Distributed Gap Inductor Cores, Technical bulletin  
[www.metglas.com](http://www.metglas.com)

