

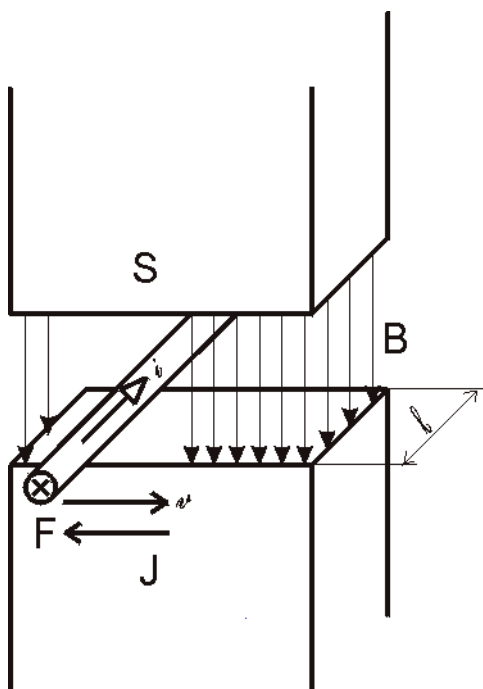
Úvahy o účinnosti elektrických strojů

© Ing. Ladislav Kopecký, 2005

Anotace

Pokud chceme vyvinout elektrický motor nebo generátor, který by měl účinnost přesahující 100%, musíme pochopit, proč konvenční elektrické stroje nejsou z principu schopny tuto hranici překonat. Tento článek přináší rozbor činnosti stejnosměrného motoru / generátoru a je zde odvozena závislost účinnosti stejnosměrného elektrického stroje na provozních podmínkách za předpokladu, že neuvažujeme mechanické a činné elektrické ztráty.

Princip funkce stejnosměrného motoru / generátoru



Obr. 1. Fyzikální princip běžného ss motoru / generátoru.

Podstata činnosti běžného stejnosměrného el. stroje vychází z principu, který by měl být známý každému úspěšnému absolventovi základní školy. Pohybujeme-li v homogenním magnetickém poli vodičem ve směru, který je kolmý na siločáry tohoto pole, indukuje se ve vodiči napětí, které je dáno vztahem

$$u = B \cdot l \cdot v \quad [V, T, m, m/s] \quad (1)$$

To je základní princip elektrického generátoru.

Nyní naopak nechme tímto vodičem protékat elektrický proud. Pokusem se dá ověřit, že na tento vodič bude působit síla, jejíž velikost lze vypočítat ze vzorce

$$F = B \cdot i \cdot l \quad [N, T, A, m] \quad (2)$$

Na tomto principu fungují všechny stejnosměrné elektromotory bez ohledu na to, mají-li cizí (třeba pomocí permanentních magnetů), sériové nebo paralelní buzení.

Je tedy zřejmé, že elektrický stroj založený na tomto principu může fungovat jako motor a zároveň jako generátor. To je bezesporu výhodné. Má to však jeden háček. Předpokládejme, že náš elektrický stroj provozujeme jako generátor. Jakmile ke svorkám generátoru připojíme zátěž, začne vinutím stroje protékat el. proud. Víme, že když vodičem v magnetickém poli protéká el. proud, působí na vodič síla daná vztahem (2). Jak je vidět z obr. 1, tato síla působí ve směru, který je opačný k pohybu vodiče. Zatížený generátor se chová zároveň jako motor, jehož krouticí moment působí proti směru rotace generátoru.

Když naopak stroj připojíme ke zdroji napětí, bude fungovat nejen jako motor, ale zároveň jako generátor. Napětí, které se bude indukovat ve vinutí stroje, bude působit proti napětí zdroje.

Takový stroj je velmi hloupý vynález, protože přitom mrháme energií. Je to podobné, jako kdybychom měli automobil, který by byl poháněn motorem provozovaným pouze na konstantní výkon, a jeho rychlost bychom regulovali šlapáním na brzdu.

Aby bylo možné u elektromotoru docílit účinnosti přesahující 100 %, museli bychom u něho potlačit jeho funkci generátoru. Naopak, u generátoru bychom museli potlačit jeho funkci motoru.

Rozbor účinnosti stejnosměrného motoru

Nyní odvodíme závislost účinnosti elektrického motoru na jeho zatížení. Uvažujme klasický stejnosměrný komutátorový motor s cizím buzením. Kotva elektromotoru o el. odporu R_K je napájena stejnosměrným zdrojem o napětí U . V prvním okamžiku po zapnutí napájení, kdy otáčky rotoru jsou nulové, teče kotvou záběrový proud

$$I_z = U / R_K \quad (3)$$

Po roztočení motoru na otáčky n se v kotvě indukují napětí U_i , které je dané vztahem, který vychází z (1):

$$U_i = B.l.v = B.l.\omega.r = B.l.2\pi.n/60.r$$

Označíme-li

$$k = B.l.2\pi.r/60 \quad , \quad (4)$$

bude pro indukované napětí platit následující jednoduchý vztah

$$U_i = k.n \quad , \quad (5)$$

kde k je konstanta, která je závislá na konstrukci stroje.

Během provozu potom kotvou protéká proud

$$I = \frac{U - U_i}{R_K} \quad (6)$$

Předpokládáme-li nulové činné a mechanické ztráty, bude se při chodu naprázdno v kotvě indukovat napětí, které se bude rovnat napětí napájecímu a kotvou nebude protékat žádný proud. V tom případě otáčky naprázdno budou

$$n_{\max} = U/k \quad (7)$$

Jelikož víme, že mechanický výkon točivého stroje je dán vztahem

$$P = M \cdot \omega \quad [W, Nm, rad/s] \quad , \quad (8)$$

je zřejmé, že při nulových otáčkách bude mechanický výkon nulový, stejně tak při chodu stroje naprázdno. Nyní si položíme otázku: Při jakých otáčkách bude mechanický výkon maximální? Abychom na ni dokázali odpovědět, musíme nejdříve odvodit vztah mezi výkonem a otáčkami.

$$P = M \cdot \omega = F \cdot r \cdot 2\pi \cdot n / 60 = I \cdot n \cdot B \cdot l \cdot 2\pi \cdot r / 60 \quad (9)$$

Vztah (9) obsahuje konstantu (k), takže po jejím dosazení se nám vztah pro závislost výkonu na otáčkách zjednoduší na

$$P = I \cdot n \cdot k \quad (10)$$

Vzorec (10) obsahuje proud, za který můžeme dosadit podle (6) a (5). Po dosazení dostaneme výsledný vztah:

$$P(n) = \frac{k \cdot n}{R_K} (U - k \cdot n) \quad (11)$$

Vidíme, že výkon je podle (11) kvadratická funkce otáček. Můžeme tedy vypočítat lokální extrém této funkce. Ze středoškolské matematiky víme, že lokální extrém funkce vypočítáme tak, že funkci zderivujeme a tuto derivaci položíme rovnu nule.

$$\frac{dP(n)}{dn} = 0 = \frac{d(k \cdot U / R_K \cdot n - k^2 / R_K \cdot n^2)}{dn} = k \cdot U / R_K - 2 \cdot k^2 / R_K \cdot n$$

Odtud

$$n_{opt} = U / 2k \quad (12)$$

Porovnáme-li (12) a (7), zjistíme, že výkon motoru je maximální při otáčkách, které se rovnají polovině otáček naprázdno.

Abychom mohli odvodit závislost účinnosti na otáčkách, musíme ještě odvodit funkční závislost příkonu na otáčkách.

$$P_p = U \cdot I = U \frac{U - k \cdot n}{R_K} \quad (13)$$

Nyní již víme vše, abychom mohli odvodit vzorec pro účinnost v závislosti na otáčkách

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{k \cdot n}{U} = \frac{U_i}{U} \quad (14)$$

Z tohoto vztahu je zřejmé, že při optimálních otáčkách je teoretická účinnost stejnosměrného motoru pouhých 50 %. Abychom dosáhli přijatelné účinnosti musíme motor předimenzovat a provozovat ho při otáčkách, které se blíží otáčkám naprázdno. Z tohoto hlediska je výhodné regulovat otáčky změnou indukce B.

Závěr

Stejnoseměrné motory a generátory již z principu své činnosti nemohou mít účinnost, která přesáhne 100%. (Ve skutečnosti je situace ještě horší, protože jsme neuvažovali to, že v kotvě se uplatňuje reaktance, protože komutátor zde vytváří střídavý proud.) To samé platí i pro střídavé motory pracující s točivým magnetickým polem (asynchronní a synchronní motory), i když výše uvedené odvození účinnosti pro tyto stroje neplatí. Zde je situace poněkud složitější, protože pracujeme se střídavým proudem a uplatňuje se zde navíc reaktance. V žádném případě to však neznamená, že u točivých elektrických strojů nelze dosáhnout účinnosti přes 100%. Samozřejmě to jde a nemusí to být složité. Musí se však dodržet určité zásady:

1. V motoru potlačit funkci generátoru.
2. V generátoru potlačit funkci motoru.
3. Eliminovat vliv reaktance.

Potlačit funkci generátoru u motoru můžeme například tak, že v rotoru místo vodičů nebo magnetů použijeme vyniklé póly z feromagnetika a zamezíme vzniku vířivých proudů.

Eliminovat vliv reaktance lze dvěma způsoby:

- a) Rekuperací, tj. vrácením energie nahromaděné v cívce zpět do zdroje.
- b) Rezonančním řízením.

Příkladem motoru, který může být kandidátem na stroj s účinností přesahující sto procent (v angličtině se pro takové stroje vžil termín *overunity*) může být např. Flynnův motor (<http://www.flynnresearch.net/>). Tento motor nemá v rotoru vinutí, ale pouze vyniklé póly z feromagnetika. Volbou vhodných materiálů lze docílit toho, že se v rotoru prakticky neindukují vířivé proudy. V tom případě se ve statorových cívkách vlivem rotoru neindukuje žádné protinapětí. Ztráty může působit pouze reaktance cívek a činné ztráty v železe a mědi. Reaktanční ztráty se dají eliminovat provozováním motoru v rezonančním režimu.