

7 Ztráty v elektrických strojích

Výpočet ztrát je klíčovým krokem jednak pro výpočet účinnosti stroje, ale i pro potřeby výpočtu oteplení stroje, neboť všechny ztráty – ať již přímo, či nepřímo – způsobují oteplení stroje. To pak má vliv na degradaci všech částí stroje – způsobuje urychlení stárnutí izolace, degradaci ložiskového tuku, ale v kombinaci s teplotní roztažností též namáhání mechanických komponent stroje.

Přesné složení ztrát je specifické podle typu stroje, jeho topologie a způsobu provozu. Ztráty, které se vyskytují ve všech typech elektrických strojů jsou Jouleovy ztráty (ΔP_j), mechanické ztráty (ΔP_m), ztráty v železe (ΔP_{Fe}) a zpravidla v nějaké formě ztráty vlivem drážkování, tzn. buď ztráty pulzační (ΔP_{pul}) či povrchové (ΔP_{pov}). Mezi typy ztrát, které jsou specifické pro daný typ stroje jsou pak ztráty v budícím vinutí (ΔP_b – pro stejnosměrné a synchronní stroje s elektrickým buzením), ztráty v permanentních magnetech (ΔP_{PM} – pro stroje s permanentními magnety) a v případě strojů napájených z polovodičových měničů též ztráty vlivem pulzně-širokové modulace (ΔP_{PWM}). S ohledem na nejistoty v určení jednotlivých typů ztrát, rozptylová pole od vinutí a různé výrobní nedostatky pak závěrečnou komponentu ztrát tvoří ztráty přídatné (ΔP_d), které se v závislosti na velikosti stroje odvozují jako jisté procento z jmenovitého výkonu stroje.

7.1 Jouleovy ztráty

Ztráty způsobené průchodem proudu vinutím se v naší literatuře označují souhrnným názvem Jouleovy ztráty, anglofonní literatura pro ně pak používá zjednodušený termín „ I^2R losses“, což vlastně popisuje způsob jejich výpočtu. Obecně mohou vznikat v jakémkoliv vinutí elektrického stroje, nicméně pro potřeby návrhu se rozlišují Jouleovy ztráty vznikající v kotvě stroje, které se označují tradičním označením ΔP_j , a ztráty vznikající v buzení stroje (stejnosměrného či synchronního), které se označují ΔP_b . Oba typy ztrát vycházejí z odporu konkrétního vinutí a pro potřeby výpočtu účinnosti a oteplení musí být použit odpor při jmenovité teplotě stroje⁸. Ztráty v kotvě obecně m -fázových střídavých strojů se tak určují jako

$$\Delta P_j = m R_{\sim} I^2, \quad (7.1)$$

kde $R_{\sim}$ je odpor vinutí vůči střídavému proudu při určité frekvenci.

V kotvě stejnosměrných strojů se situace zjednodušuje, a zde lze Jouleovy ztráty určit jako

$$\Delta P_j = R_a I_a^2. \quad (7.2)$$

Obdobně pak lze určit též ztráty v budícím vinutí, které jsou

$$\Delta P_b = R_b I_b^2. \quad (7.3)$$

⁸ V některých případech se však kromě jmenovité účinnosti, tj. účinnosti při jmenovité teplotě, udává též účinnost pro jistou dohodnutou referenční teplotu (např.: 150 °C v elektrické trakci). Důvodem je vzájemná porovnatelnost různých strojů určených pro různé provozní podmínky a s různými způsoby provozu.

Za Jouleovy ztráty pak lze považovat též ztráty vznikající v kartáčích stejnosměrných strojů. Ty, díky tomu, že jejich materiál má poměrně značný odpor, tvoří nezanedbatelnou část ztrát a určují se z napěťového úbytku na kartáčích jako

$$\Delta P_k = U_k I_a, \quad (7.4)$$

kde napěťový úbytek na kartáčích je třeba určit dle daného materiálu kartáčů a neměl by být vyšší než $U_k = 1 \text{ V}$.

7.2 Ztráty v železe

Ztráty v železe byly částečně řešeny v souvislosti s popisem magnetického obvodu v kapitole 5.2 a týkají se všech elektricky a magneticky vodivých částí magnetického obvodu stroje. Podle mechanismu vzniku je lze ovšem dále rozdělit na ztráty, které vznikají průchodem hlavního magnetického toku a ztráty, které vznikají v důsledku působení drážkových harmonických, a to jak na masivní, tak i na plechované a drážkované části stroje.

7.2.1 Ztráty vlivem hlavního magnetického toku

Ztráty vlivem hlavního magnetického toku vznikají ve všech částech stroje, kterými tento magnetický tok protéká ve své časově proměnné podobě – jde tedy hlavně o zuby a jeho kotvy. S odkazem na kapitolu 5.2 zde lze pouze shrnout, že se samostatně určují pro zuby jako

$$\Delta P_z = k_{tz} m_z \Delta p_z, \quad (7.5)$$

kde k_{tz} je technologický činitel opracování zubů ($k_{tz} = 1,5 \dots 2$)

m_z celková hmotnost zubů

a Δp_z měrné ztráty v železe při počítané frekvenci f a indukci B_z určené z

$$\Delta p_z = \Delta p_{ref} \left(\frac{f}{f_{ref}} \right)^\alpha \left(\frac{B}{B_{ref}} \right)^\beta, \quad (7.6)$$

kde Δp_{ref} jsou měrné ztráty v použitém materiálu při zvolené referenční frekvenci a sycení

α je exponent frekvenční závislosti, pro běžné elektrotechnické plechy $\alpha \approx 1,5$

a β je exponent závislosti na sycení, pro běžné elektrotechnické plechy $\beta \approx 2$.

Ekvivalentně pak platí pro jeho stroje

$$\Delta P_j = k_{tj} m_j \Delta p_j, \quad (7.7)$$

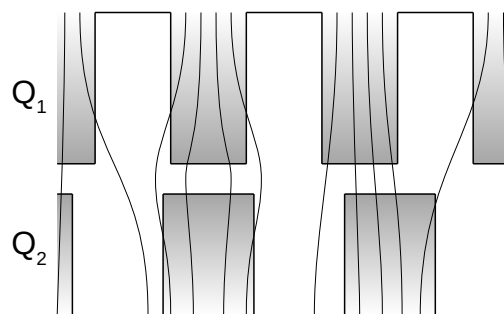
kde k_{tj} je technologický činitel opracování jha ($k_{tj} = 1,3 \dots 1,7$)

m_j hmotnost jha

a Δp_j měrné ztráty v železe při počítané frekvenci f a indukci B_j určené ze vztahu (7.6).

7.2.2 Pulzační ztráty

Pulzační ztráty vznikají v drážkovaných částech strojů které se vůči sobě vzájemně pohybují. Typickým příkladem tohoto systému jsou například asynchronní stroje, u kterých se kotva rotoru pohybuje vůči kotvě statoru – obě části jsou přitom drážkované a každá z nich způsobuje pulzace magnetického pole ve vzduchové mezeře. Tyto pulzace se pohybují s každou z těchto částí a způsobují zákmity v té druhé – pulzace vlivem drážkování statoru způsobují zákmity magnetického pole v zubech rotoru a naopak - pulzace vlivem drážkování rotoru se pohybují s rotorem a způsobují zákmity magnetického pole v zubech statoru. Tyto pulzace pak způsobují rychlé přemagnetovávání zubů a tedy další komponentu ztrát v zubech.



Obr. 7.1: Magnetické pole mezi zuby statoru a rotoru

Pulzační ztráty jsou jedny z typů ztrát, které jsou určovány v různých zdrojích různými způsoby, většinou však za pomoci empirických vztahů. Měření velmi dobře odpovídají vztahy uvedené v [3], přičemž pulzační ztráty ve statoru se určují jako

$$\Delta P_{pulz1} = 8,3 \Delta p_v \left(\frac{Q_2 n}{10000} \right)^2 \left(\frac{B_{p1}}{B_{ref}} \right)^2 m_{z1} \quad , \quad (7.8)$$

kde Δp_v je ztrátové číslo plechů pro vířivé proudy při referenční frekvenci a indukci, přičemž lze použít $\Delta p_v = 0,5 \Delta p_{ref}$,

Q_2 je počet drážek rotoru,

n je rychlost stroje v otáčkách za minutu,

m_{z1} je hmotnost zubů statoru,

B_{ref} je hodnota referenční indukce

a B_{p1} je amplituda pulzací v zubech statoru určená jako

$$B_{p1} = \frac{t_{d2}}{2 t_{d1}} k_{C1} (k_{C2} - 1) B_{z1} \quad , \quad (7.9)$$

kde t_{d1} je drážková rozteč statoru,

t_{d2} je drážková rozteč rotoru,

k_{C1} je Carterův činitel pro stator,

k_{C2} je Carterův činitel pro rotor

a B_{z1} je indukce v zubech statoru.

Ekvivalentně je pak pro rotor

$$\Delta P_{pulz2} = 8,3 \Delta p_v \left(\frac{Q_1 n}{10000} \right)^2 \left(\frac{B_{p2}}{B_{ref}} \right)^2 m_{z2} \quad (7.10)$$

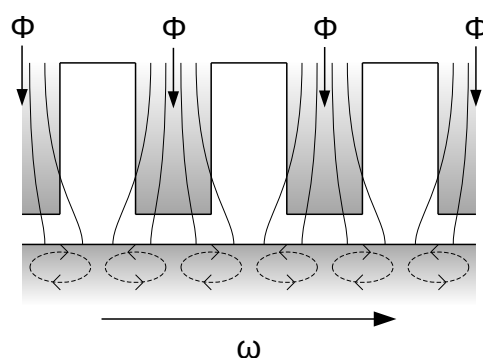
s amplitudou pulzací

$$B_{p2} = \frac{t_{d1}}{2t_{d2}} k_{C2} (k_{C1} - 1) B_{z2} \quad (7.11)$$

Obdobný mechanismus ztrát pak lze nalézt v řadě synchronních strojů (stroje vybavené tlumičem, stroje s hladkým rotorem), reluktančních strojích s bariérami v rotoru či stejnosměrných strojích vybavených kompenzačním vinutím.

7.2.3 Povrchové ztráty

Stejně jako pulzační ztráty, i povrchové ztráty jsou způsobeny drážkováním kotvy. V tomto případě ovšem nezpůsobují pulzace magnetického pole v protějším drážkovaném povrchu, nýbrž postupnou vlnu pohybující se nad masivním povrchem, která v něm způsobuje vířivé proudy. Zmiňovaným povrchem může být například pólový nástavec (synchronní stroje s vyniklými póly či stejnosměrné stroje s masivními nástavci), případně i masivní rotor (synchronní stroje s hladkým rotorem). I v případě těchto ztrát se přístupy různých zdrojů liší a vycházejí víceméně z empirických vzorců. Velmi často se pak objevuje tvar



Obr. 7.2: Vířivé proudy v masivním povrchu rotoru

$$\Delta P_{pov} = \sqrt{\frac{\gamma}{2\pi\mu}} S_p t_d^2 B_p^2 f_p^{1.5} \quad (7.12)$$

- kde γ je vodivost materiálu pólových nástavců,
 μ je jejich permeabilita,
 S_p je celkový povrch pólových nástavců,
 t_d je velikost drážkové rozteče protějšší kotvy,
a B_p je amplituda pulzační pole určená jako

$$B_p = \left(1 - \frac{1}{k_C}\right) B_\delta \quad (7.13)$$

- kde k_C je velikost Carterova činitele
a B_δ je amplituda magnetického pole ve vzduchové mezeře.

Frekvence pulzací je pak obdobně jako v případě výpočtu pulzačních ztrát

$$f_p = \frac{Qn}{10000} \quad (7.14)$$

kde Q je počet drážek protěží kotvy
a n rychlost otáčení rotoru.

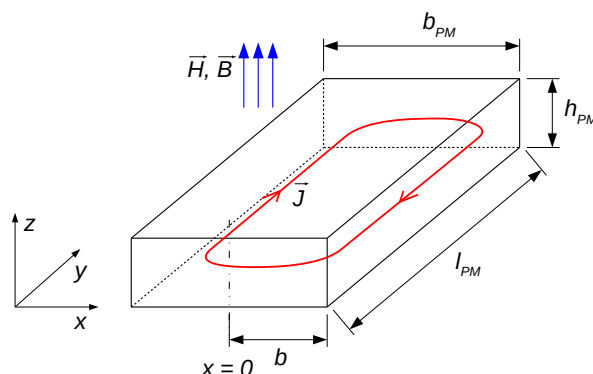
S ohledem na problematicky určitelný poměr odmocniny vodivosti a permeability materiálu rotoru pak bývá tento poměr tabelizován jako činitel k_p – činitel povrchových ztrát. Jeho hodnoty pro různé typy materiálů jsou uvedeny v tab. 7.1.

materiál	k_p [-]
strojařská ocel	23,3
šedá litina	17,3
nízkoolegované plechy (2 mm)	8,6
nízkoolegované plechy (0,5 mm)	2,5
vysokoolegované plechy (0,5 mm)	1,5

Tab. 7.1: Hodnoty činitele povrchových ztrát dle materiálu (překlad z [3])

7.3 Ztráty v permanentních magnetech

Ačkoliv jsou permanentní magnety považovány za ryze pasivní prvek v magnetickém obvodu, a tedy v nich nevznikají ztráty, ve skutečnosti mají i permanentní magnety jistou vodivost, díky které se do nich mohou indukovat vířivé proudy, které v nich způsobují ztráty. Tyto vířivé proudy mohou být generovány jednak drážkováním stroje (u permanentních magnetů umístěných na povrchu rotoru) a jednak pulzacemi magnetického pole, které způsobuje zvlnění proudu při napájení z polovodičových měničů. Ať je již zdroj pulzací magnetického pole jakýkoliv, ztráty v permanentních magnetech lze určit analýzou vířivých proudů a vychází pro danou harmonickou magnetického pole generující ztráty v magnetech vztah



Obr. 7.3: Vířivé proudy indukované do permanentního magnetu

$$\Delta P_{PMv} = \frac{1}{16} \cdot \frac{\alpha_v^2}{\zeta_v} B_v^2 \gamma_{PM} \omega_v^2 b_{PM}^2 \left(\frac{\sinh \zeta_v - \sin \zeta_v}{\cosh \zeta_v - \cos \zeta_v} \right) b_{PM} l_{PM} h_{PM} \quad (7.15)$$

kde α_v je činitel krytí permanentních magnetů danou harmonickou (v intervalu $2/\pi \dots 1$ dle vlnové délky harmonické),

ω_v je úhlová rychlost dané harmonické,

B_v je amplituda pulzací dané harmonické,

a ζ_v je poměrná hloubka vniku dané harmonické dle

$$\zeta_v = \frac{b_{PM}}{a_v} \quad (7.16)$$

kde b_{PM} je šíře permanentního magnetu

a a_v hloubka vniku

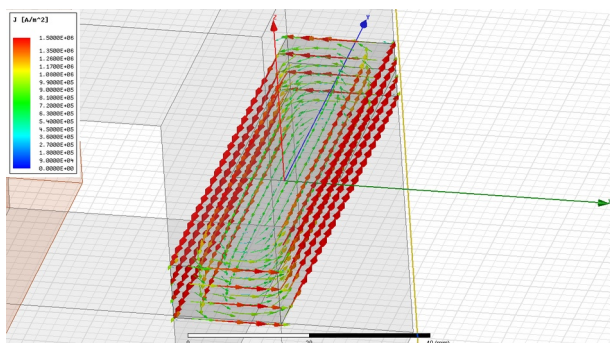
$$a_v = \sqrt{\frac{2}{\omega_v \gamma_{PM} \mu_{PM}}} \quad (7.17)$$

Zbývající parametry jsou pak parametry magnetu jako takového – jeho vodivost γ_{PM} , permeabilita μ_{PM} , délka l_{PM} a výška h_{PM} . Je zřejmé, že tímto postupem lze určit ztráty pouze v jediném magnetu a pro jedinou harmonickou složku magnetického pole. Proto je třeba provést na závěr provést sumaci, aby byl obdržen korektní výsledek:

$$\Delta P_{PM} = n_{PM} \sum_{v, \mu} \Delta P_{PM, v, \mu} \quad (7.18)$$

kde n_{PM} je celkový počet permanentních magnetu ve stroji

a v, μ jsou označení řádů prostorových respektive časových harmonických.



Obr. 7.4: Vířivé proudy v permanentním magnetu (FEM)

Ze vztahu (7.15) je pak zřejmý ještě jeden důsledek tohoto výpočtu – a to závislost ztrát v permanentních magnetech na jejich šíři a objemu. Z tohoto důvodu je vhodné volit permanentní magnety jako segmentované, což vede na podobný způsob omezení ztrát jako v případě elektrotechnických plechů. Tím se též inspiroval výrobce Arnold Magnetics, který uvedl na trh tzn. vrstvené permanentní magnety – magnety vyrobené z tenkých vzájemně izolovaných segmentů [10].

S ohledem na náročnost výpočtu (nutná znalost popisu magnetického pole ve vzduchové mezeře, znalost napájení stroje atp.) se někdy stanovují ztráty v permanentních magnetech empiricky jako jedno procento z výstupního výkonu stroje či za pomoci zjednodušujících vztahů [11].

7.4 Mechanické ztráty

Mechanické ztráty jsou jedna z nejobtížněji určitelných komponent ztrát elektrického stroje, neboť závisí na řadě parametrů, které jsou samy o sobě těžko výpočetně postižitelné. Z toho vyplývá i značná nejistota v jejich určení spojená se značnou variabilitou vztahů, které se pro jejich výpočet používají. Tyto ztráty v sobě zahrnují veškeré mechanické interakce ve stroji, které snižují jeho výstupní výkon – tření rotoru o vzduch, tření případného ventilátoru o vzduch, tření v ložiskách, ale i tření kartáčů o kroužky/komutátor. Ovlivněny jsou drsnostmi povrchu, viskozitou chladicího média ale i vůlí zvolených ložisek, ve výsledku tedy tvoří obtížně analyticky popsitelný systém.

7.4.1 Ztráty způsobené pohybem rotoru

Pro tento typ ztrát existuje řada výpočetních vztahů, které se je snaží aproximovat (viz např. [4], kde je těchto vztahů hned několik), skutečně kvalifikovaný odhad lze ovšem získat až měřením na řadě podobných strojů. Jako jeden z kompromisních vztahů lze zmínit vztah z [3]

$$\Delta P_m = k_m D (l + 0,8^3 \cdot 0,6 t_p) v^2 \quad (7.19)$$

kde k_m je činitel mechanických ztrát,

D je průměr rotoru,

- l je délka rotoru,
 t_p je pólová rozteč rotoru
a v je jeho obvodová rychlost, tedy

$$v = \frac{\pi D n}{60} . \quad (7.20)$$

Tvar rotoru a způsob chlazení stroje je pak respektován ve výše uvedeném činiteli mechanických ztrát. Jeho orientační hodnoty jsou uvedeny v tab. 7.2 a nejvyšší hodnoty odpovídají strojům s radiálním ventilátorem na hřídeli, střední hodnoty strojům s axiálním ventilátorem a díky nízké viskozitě vodíku odpovídá nejnižší hodnota koeficientu k_m vodíkem chlazeným strojům.

typ chlazení	k_m [-]
povrchové, ventilátor na hřídeli	15
profukované s ventilátory na hřídeli	8 – 10
vzduchem chlazené stroje s hladkým rotorem	5
vodíkem chlazené stroje s hladkým rotorem	< 3

Tab. 7.2: Hodnoty činitele mechanických ztrát pro jednotlivé způsoby chlazení (překlad z [3])

7.4.2 Ztráty vlivem tření kartáčů

Na rozdíl od předchozí komponenty ztrát jsou ztráty vlivem tření kartáčů o komutátor či kroužky poměrně dobře postihnuteľné, neboť vyjdeme-li ze vztahu

$$\Delta P_{tk} = F_{tk} v_k , \quad (7.21)$$

kde F_{tk} je třecí síla kartáčů

a v_k je rychlost kartáčů vůči povrchu kroužků/komutátoru, tedy

$$v_k = \frac{\pi D_k n}{60} , \quad (7.22)$$

kde D_k je průměr komutátoru

a n rychlost stroje,

lze za třecí sílu dosadit jednoduše

$$F_{tk} = k_t S_k p_k , \quad (7.23)$$

kde k_t je součinitel smykového tření kartáčů (běžně v intervalu 0,15 – 0,5; většinou pod 0,2),

S_k je kontaktní plocha kartáčů

a p_k je přítláčná síla kartáčů ke kroužkům/komutátoru (nastavována v intervalu 15 – 70 kPa), dostáváme vztah

$$\Delta P_{tk} = k_t S_k p_k v_k . \quad (7.24)$$

Tento vztah pak vychází přímo z měřitelných fyzikálních hodnot a je i dobře ověřitelný.

7.5 Přídavné ztráty

Přídavné ztráty se určují ryze empiricky, kromě případů, kde je třeba znát ztráty v nějaké konkrétní kritické části, pak se postupuje většinou za pomoci metody konečných prvků (příkladem mohou být přídavné ztráty vznikající ve stahovacích deskách turboalternátorů a podobně). Empiricky se pak určují jako

$$\Delta P_d = (0,2 \dots 1\%) P_n, \quad (7.25)$$

kde P_n je jmenovitý výkon stroje.

Volba konkrétního procenta pak závisí hlavně na velikosti stroje, přičemž dolní mez uvedeného intervalu se uvažuje pro velké turboalternátory, 0,5 % pro velké motory a 1 % pro malé a střední motory.

7.6 Ztráty vlivem nesinusového napájení

Ztráty vlivem pulzně-šířkové modulace patří k jednomu z velmi komplexních elementů ztrát, neboť pulzní tvar napětí způsobuje jednak zahřívání izolace posuvnými proudy, jednak zvlnění proudu, které vede na vířivé proudy ve vinutí, ale i na pulzace magnetického pole stroje, které se superponují na hlavní magnetický tok a způsobují tak ohřívání magnetického obvodu stroje. Jejich přesné vyčíslení je tak velmi náročné a v řadě případů se pro vyjádření této složky ztrát využívá hodnot změřených na předchozích vyrobených strojích napájených z daného typu měniče s určitým způsobem řízení stroje.

Obecný postup pro návrh a analýzu strojů napájených z polovodičových měničů je uveden v normě ČSN CLC/TS 60034-25 [12], přičemž jedním z jejích závěrů je, že v případě napájení stroje z polovodičových měničů, mohou ztráty ve stroji vzrůst až od 20 %. Celkové ztráty ve stroji napájeném z polovodičových měničů s uvažováním ztrát vzniklých vlivem PWM tak lze určit jako

$$\Delta P_{PWM} = 1,2 \Delta P_{sin}, \quad (7.26)$$

kde ΔP_{sin} je suma ztrát ve stroji při uvažování sinusového napájení.

7.7 Účinnost stroje

Účinnost stroje pak udává poměr mezi výstupním a vstupním výkonem stroje, tzn.

$$\eta = \frac{P}{P_p} = \frac{P}{P + \Delta P}, \quad (7.27)$$

kde ΔP je suma ztrát pro uvažovaný způsob napájení, tedy buď suma ztrát pro sinusové napájení nebo suma ztrát s uvažováním vlivu napájení z polovodičových měničů. Jak již bylo uvedeno dříve, určuje se účinnost pro jmenovitou teplotu stroje a jeho jmenovitou rychlost a výkon, není-li dohodnuto jinak.