

Ložiskové proudy u asynchronních motorů napájených z napěťových polovodičových střídačů

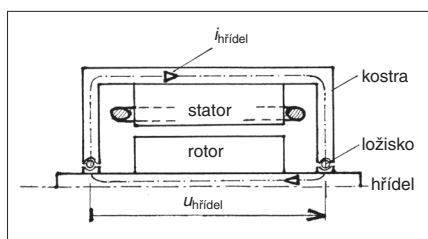
doc. Ing. Stanislav Bartoš, CSc.,
Ústav termomechaniky AV ČR, v. v. i.

1. Úvod

Účelem předloženého článku je, pokud možno názorně a co nejjednodušeji, vysvětlit vznik napětí na ložiskách vícefázových asynchronních motorů napájených z napěťových polovodičových střídačů, tj. střídačů na bázi součástek GTO, IGBT, IGCT apod., a poskytnout základní informace o problematice poškození ložisek ložiskovými proudy. Jde o problematiku zdánlivě technicky okrajovou, ve skutečnosti však značně obtížnou, protože se v ní současně uplatňuje více vlivů. Přitom ložiska nejsou poškozována pouze ložiskovými proudy. Aktuální stav poškození ložisek v průběhu provozu zůstává při letmém sledování obvykle dlouho utajen. Důsledky následné poruchy však mohou být závažné, neboť asynchronní motory napájené z napěťových polovodičových střídačů jsou základem většiny moderních elektrických řízených pohonů. Ložiskové proudy jsou střídavé a jsou vyvolány střídavými ložiskovými napětími, která v rozhodující míře vznikají činností napěťových polovodičových střídačů. Proto poškození ložisek ložiskovými proudy výrazně vzrostlo s rozšířením napěťových polovodičových střídačů po roce 1980. Od té doby bylo zjištěno a zdokumentováno mnoho poškozených a havarovaných ložisek asynchronních motorů, viz např. [1]. Ložiskovými proudy jsou poškozována jak ložiska kluzná, tak ložiska valivá. Vzhledem k různým okolnostem a podmínkám, v nichž k poškození postupně docházelo, nebyl dlouho zřejmý úplný mechanismus vzniku ložiskových proudů. Principiální vysvětlení tohoto mechanismu je proto náplní tohoto článku.

Pro úplnost si nejprve připomeňme stav před příchodem napěťových polovodičových střídačů, kdy asynchronní motory bylo možné napájet pouze sinusovými napětími ze střídavé rozvodné sítě. Už v roce 1907 jako první upozornili F. Punga a W. Hess na střídavé hřídelové napětí mezi konci hřídele, která měla za následek střídavé hřídelové proudy. Fyzikální příčinou těchto hřídelových proudů byly magnetické nesymetrie, popř. technologické nedostatky stroje, které se projevíly indukovaným napětím ve hřídeli nejčastěji v důsledku vzájemného pohybu hřídele a magnetického točivého pole stroje. Pečlivým návrhem stroje i jeho pečlivou výrobou

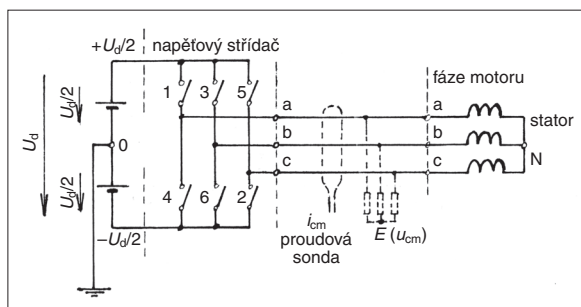
lze uvedená nežádoucí napětí indukovaná mezi konci hřídele, tj. mezi ložisky, výrazně omezit tak, že nedosahují hodnoty potřebné pro elektrický průraz olejového filmu v obou ložiskách (asi 2 V). Průraz olejového filmu je nezbytný pro vznik cirkulačního hřídelového proudu – viz obr. 1. Proto se cirkulačními hřídelovými proudy asynchronního motoru při



Obr. 1. Hřídelové napětí $u_{hřídel}$, cirkulační hřídelový proud $i_{hřídel}$ (po stejné dráze jako $i_{hřídel}$ se uzavírá také cirkulační ložiskový proud, viz dále kapitola 3)

jeho napájení sinusovým napětím nebude článek dále zabývat.

Aby v následujícím výkladu vynikly základní mechanismy vzniku ložiskových proudů, nebudou uvažovány speciální úpravy asynchronního motoru, jeho ložiska budou standardní ocelová. Střídač bude uvažován dvouhladinový, třífázový bez obvodových úprav i bez úprav spínacích algoritmů zaměřených na omezení ložiskových proudů. Pro přehlednost a snadné pochopení vlastních principů bude v některých fázích výkladu zanedbán vliv významných parametrů, což by v exaktním řešení přípustné nebylo.



Obr. 2. Připojení napěťového střídače k třífázovému asynchronnímu motoru; polovodičové spínací součástky jsou nahrazeny mechanickými kontakty

Pro poškození ložiska ložiskovými proudy má zásadní význam olejový film (tj. mazací vrstvička), brání v ložisku přímému styku kov na kov. Pokud je olejový film neporušen, chová se ložisko jako kondenzátor a jeho proud je ložiskovým proudem. Dielektrikem kondenzátoru je olejový film. Při proražení olejového filmu dojde v místě poruchy ke styku kovu na kov a procházející elektrický proud vytváří na stykových ploškách miniaturní krátery, a tím ložisko poškozuje. V nejhorším případě se může u ložisek motorů napájených z napěťových polovodičových střídačů objevit elektrické jiskření (vyvolané tzv. EDM proudy), kdy lokální tavení poškozuje stykové povrchy ložiska a navíc zhoršuje vlastnosti maziva v ložisku.

Předložený článek se zabývá negativním působením napěťových polovodičových střídačů na ložiska napájených asynchronních motorů. Tyto střídače totiž z principu své činnosti vytvářejí napětí, které je označováno jako *common mode voltage* (u_{cm}), a to i v neanglicky psané literatuře. Napětí *common mode voltage* je příčinou vzniku ložiskových proudů necirkulačních i cirkulačních, které v ložiskách mohou protékat současně.

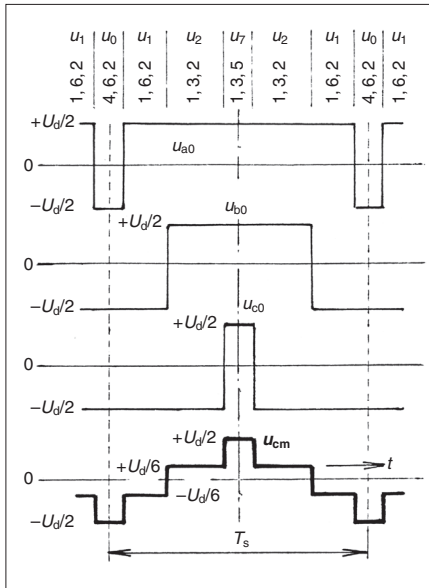
2. Necirkulační ložiskové proudy

2.1. Napěťový střídač jako zdroj napětí *common mode voltage* (u_{cm}) přiváděného na asynchronní motor

V článku [2] bylo ukázáno, že třífázové napětí přiváděné na stator motoru lze vytvářet např. metodou prostorově vektorové šíř-

kově-pulzní modulace (dále zkráceně PWM). Pro výklad bude uvažován dvouhladinový třífázový napěťový střídač pracující v režimu PWM, připojený ke statoru asynchronního motoru podle obr. 2.

V zapojení je třeba důsledně rozlišovat mezi fázovými napětími zátěže (motoru) u_a , u_b , u_c , což jsou napětí mezi vstupními svorkami stroje a uzlem N statorového vinutí zapojeného do hvězdy (Y), a mezi výstupními napě-



Obr. 3. Příklad vytvoření výstupních napětí střídače u_{a0} , u_{b0} , u_{c0} a napětí u_{cm} v průběhu zvoleného dílčího časového intervalu T_s v první šestině výstupní periody střídače

tími střídače u_{a0} , u_{b0} , u_{c0} , tj. napětími výstupních svorek střídače a, b, c proti bodu 0 (střed vstupního stejnosměrného napětí U_d , který se obvykle ztotožní s potenciálem země).

Princípem funkce napěťového střídače je připojování jednotlivých fází střídače (tedy výstupních svorek střídače) ke vstupním stejnosměrným napětím $+U_d/2$ a $-U_d/2$. Důsledkem takového spínání jsou obdélníková výstupní napětí střídače (u_{a0} , u_{b0} , u_{c0} o velikosti $\pm U_d/2$ – viz obr. 3). Obdélníková výstupní napětí střídače, na rozdíl od sinusových napájecích napětí, nemají v žádném okamžiku nulový součet. Pro úplnost zopakujeme, že šest spínačů střídače umožňuje vytvořit šest nenulových stavů sepnutí, které lze vyjádřit symbolickými vektory u_1 až u_6 , a kromě toho ještě dva stavy nulové vyjádřené symbolickými nulovými vektory u_0 a u_7 .

Výstupní třífázové napětí střídače je metodou PWM vytvářeno tak, že každá výstupní perioda střídače (tedy např. perioda výstupního napětí) je rozdělena na šest šestin a každá šestina je dále složena z většího počtu dílčích časových intervalů T_s . Přitom stavy sepnutí (použité symbolické vektory) a jejich sled v jednotlivých dílčích intervalech T_s uvnitř každé jednotlivé šestiny jsou vždy stejné, odlišné od jiných šestin; dílčí intervaly T_s se přitom navzájem liší délkou trvání jednotlivých stavů sepnutí (symbolických vektorů). Příklad postupného sledu sepnutí (symbolických vektorů) střídače během jednoho dílčího časového intervalu T_s v první šestině výstupní periody střídače byl převzat z [2] a je zde uveden v obr. 3 (symbolické vektory $u_0 \rightarrow u_1 \rightarrow u_2 \rightarrow u_7 \rightarrow u_2 \rightarrow u_1 \rightarrow u_0$).

Vraťme se ještě k obr. 2. Z něho je zřejmé, že napětí uzlu N vzhledem k bodu 0 je současně napětím všech fází (a, b, c) moto-

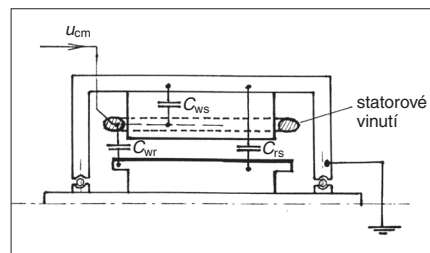
ru vzhledem k tomuto bodu. Znamená to, že kromě fázových a sdružených napětí motoru vytváří napěťový střídač svým spínáním ještě také napětí společné (common) pro všechny fáze zátěže, které je označováno jako *common mode voltage* (u_{cm}). Napěťový střídač je tedy zdrojem napětí *common mode voltage* (u_{cm}), které lze změřit jako napětí mezi uzlem tří stejných impedancí zapojených do hvězdy (uzel N, popř. E v obr. 2) a bodem 0 (zem). Pro jeho průběh lze snadno odvodit:

$$u_{cm} = \frac{u_{a0} + u_{b0} + u_{c0}}{3} \quad (1)$$

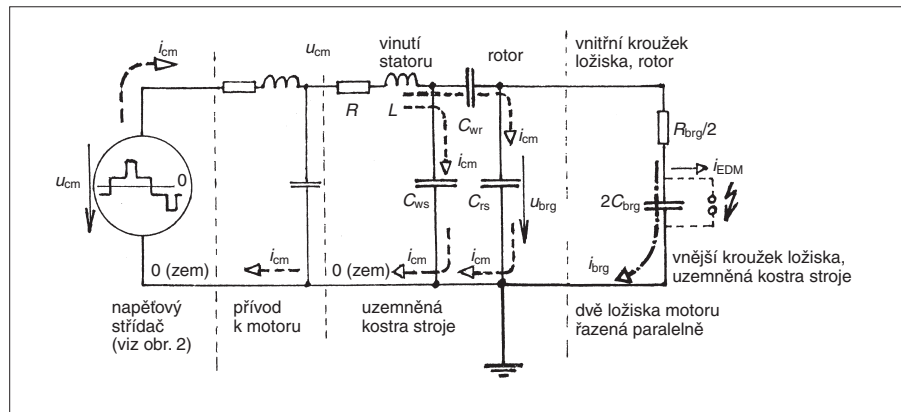
Názorně je průběh u_{cm} patrný z obr. 3.

2.2. Kapacity mezi jednotlivými částmi asynchronního motoru jako cesty vysokofrekvenčních proudů. Náhradní zapojení motoru z hlediska napětí u_{cm}

V obr. 4 si všimněme kapacit mezi jednotlivými částmi asynchronního motoru. Napěťové průběhy vytvářené ve střídači polovodičovými spínacími součástkami (GTO, IGBT, IGCT apod.) se vyznačují velkými strmými nárůsty a poklesy. Obecně přitom platí, že v důsledku změny napětí na kapacitě (du_C/dt) protéká kapacitou proud $i_C = C \times (du_C/dt)$. Znamená to, že strmé změny (skoky) napětí u_{cm} na statorových vinutích vyvolá průtok proudů (proudových pulzů) kapacitami stro-



Obr. 4. Kapacity mezi jednotlivými částmi asynchronního motoru, uvažované jako soustředěné parametry; největší hodnotu má kapacita C_{ws} indexu u kapacit C : w_s vinutí na statoru – železo statoru (kostra stroje), uzemněno w_r vinutí na statoru – rotor r_s rotor – železo statoru (kostra stroje), uzemněno



Obr. 5. Náhradní zapojení třífázového asynchronního motoru z hlediska napětí u_{cm} , jsou uvažovány soustředěné parametry; index brg znamená ložisko

je (obr. 4). Frekvence napěťových skoků napětí u_{cm} , a tedy i frekvence proudových pulzů procházejících kapacitami, je nejčastěji v řádu desítek kilohertzů (viz obr. 6).

Společné napětí *common mode* (u_{cm}) a kapacity společné pro celý stroj (viz obr. 4) umožňují vyjádřit vlastnosti třífázového asynchronního motoru z hlediska napětí u_{cm} náhradním zapojením podle obr. 5. Uvedené parametry C , L jsou uvažovány jako soustředěné a odpovídají celému třífázovému motoru. Zapojení podle obr. 5 tedy reprezentuje celý třífázový motor, nikoliv jednu jeho fázi. Napěťový střídač je k modelu motoru připojen jediným vodičem, neboť tři skutečné fázové přívody s tímž napětím u_{cm} lze nahradit vodičem jediným.

Každé ložisko má parametry C_{brg} , R_{brg} . (V obr. 5 jsou uvedeny parametry $2C_{brg}$, $R_{brg}/2$, neboť jde o model celého motoru se dvěma ložisky, která jsou z hlediska napětí u_{cm} , popř. u_{brg} , řazena paralelně.) Činné odpory R mají nepodstatný vliv, a proto jsou ve výkladu zanedbány.

2.3. Napětí na ložisku (u_{brg}) vyvolané napětím u_{cm} . Necirkulační ložiskové proudy: proudy du/dt a EDM proudy

Z obr. 5 je zřejmé, že uvedené náhradní zapojení působí, zjednodušeně řečeno, jako napěťový dělič, jehož poměr napětí na ložisku (tj. na olejovém filmu ložiska) u_{brg} k napětí u_{cm} je dán vztahem:

$$\frac{u_{brg}}{u_{cm}} = \frac{C_{wr}}{C_{wr} + C_{rs} + 2C_{brg}} \quad (2)$$

Pro kapacity běžného asynchronního motoru vychází uvedený poměr přibližně 5%. Znamená to, že napětí u_{brg} na ložisku (na ložiskách) je „kopíí“ průběhu u_{cm} zmenšenou v tomto poměru. Napětí u_{brg} obvykle dosahuje velikosti 10 až 40 V.

Předpokládejme nejdříve, že olejový film ložisek se součtovou kapacitou $2C_{brg}$ není proražen. Potom při každé kladné (záporné) skokové změně napětí u_{brg} teče do (z) této kapacity v obr. 5 proud ve tvaru proudové špičky, tzv. proud du/dt , který označme $i_{du/dt}$ – viz obr. 6. Velikost proudové špičky závisí pře-

devším na strmosti průběhu u_{brg} , tj. na parametru du_{brg}/dt , na velikosti C_{brg} (tedy nepřímo úměrně na tloušťce olejového filmu), ale také na dokonalosti uzemnění statoru (kostry) stroje. Frekvence proudových špiček $i_{du/dt}$ jsou jednotky až desítky kilohertzů, což při použití uvažovaného střídače je šestinásobek frekvence, se kterou spínají jednotlivé součástky ve střídači. Proud $i_{du/dt}$ je v tomto případě totožný s proudem i_{brg} v obr. 5 a uzavírá se na dráze: *napěťový střídač (zdroj napětí u_{cm}) – vinutí statoru – C_{wr} – rotor – $2C_{brg}$ – zem a dále zem zpět do střídače.*

Nyní uvažme tak vysokou hodnotu napětí u_{brg} , že nastane průraz dielektrika (tj. olejového filmu) kondenzátoru $2C_{brg}$ v obr. 5. Tím vzniká uvnitř tohoto kondenzátoru zkrat, kterým se $2C_{brg}$ nejdříve vybije „uvnitř sám v sobě“ vnitřním zkratovým proudem i_{EDM} . Nadále je zkratový proud i_{EDM} dodáván z (do) kapacity C_{rs} jako proud i_{brg} , který teče do země – viz obr. 5. Uvedený vnitřní zkratový proud i_{EDM} i navazující zkratový proud i_{EDM} tekoucí z (do) C_{rs} jsou v obr. 5 schematicky znázorněny jako průraz fiktivního kulového jiskřiště paralelně připojeného ke kondenzátoru $2C_{brg}$. Po dobu průchodu zkratového proudu i_{EDM} žádný proud $i_{du/dt}$ kapacitou $2C_{brg}$ neprochází.

Špičky proudu i_{EDM} jsou méně časté, avšak masivní, tj. řádově větší než špičky proudu $i_{du/dt}$, neboť jde o zkratový výboj tří nabitých kapacit řazených paralelně: dvou kapacit C_{brg} a kapacity C_{rs} . Proud i_{EDM} se vyskytnou převážně v teplém ložisku. Index v označení i_{EDM} odkazuje na termín *Electrostatic Discharge Machining* – opracování elektrostatickým výbojem.

Z obr. 3 a obr. 5 vyplývá, že omezit proudy i_{EDM} by bylo možné, kdyby to připustila strategie spínání střídače, např. zkrácením doby trvání nulových stavů sepnutí 4, 6, 2; 1, 3, 5, tj. nulových vektorů u_0, u_7 . Tím by se snížila střední hodnota napětí u_{cm} (a tedy také u_{brg}) a rovněž napětí na kapacitě ložisek $2C_{brg}$.

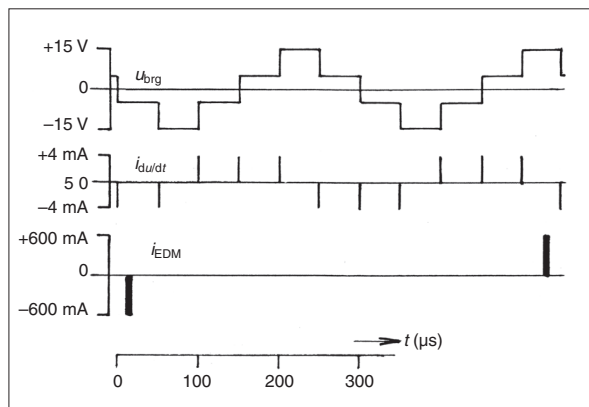
Základní výklad uvedený v této kapitole je předložen především bez uvažování odrazu vln na vedení, bez uvažování hloubky regulace střídače a dalších proměnlivých vlivů. Je zřejmé, že v reálném provozu mohou být napěťové a proudové průběhy těmito okolnostmi výrazně ovlivněny.

3. Cirkulační ložiskové proudy

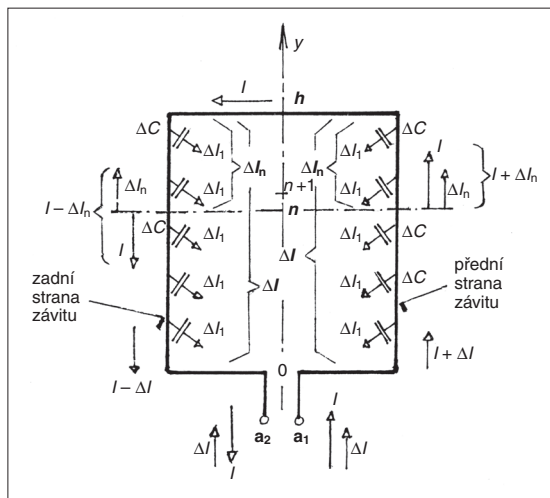
3.1. Zjištění nového cirkulačního ložiskového proudu

S použitím obr. 5 lze sledovat vznik a průtok kapacitních ložiskových proudů $i_{du/dt}$ o frekvencích jednotek až desítek kilohertzů

a rovněž stochastický (náhodný) výskyt nebezpečných proudů i_{EDM} , což jsou zkratové proudy uvnitř ložisek. Proud $i_{du/dt}$ a i_{EDM} se nevyskytují současně; v obr. 5 je pro ně použito společné označení i_{brg} . Oba typy proudů ($i_{du/dt}$, i_{EDM}) jsou necirkulační, neboť ložiska stroje pro ně znamenají paralelní proudové cesty. Objasnění jejich vzniku bylo významným přínosem k vysvětlení mechanismu vzniku ložiskových proudů. Přesto však toto vysvětlení nebylo úplné. Jeho chybějící část,



Obr. 6. Idealizované zjednodušené průběhy napětí u_{brg} a proudů $i_{du/dt}$, i_{EDM} ; příklad nakreslen podle naměřených průběhů uvedených v [3]



Obr. 7. Schematické znázornění proudů v závitě (cívce) statorového vinutí; ΔC parazitní kapacita, Δl_1 dílčí parazitní kapacitní proud

nebo alespoň většina toho, co nelze vysvětlit necirkulačními ložiskovými proudy, byla objasněna až okolo roku 1995.

V té době byl totiž v ložiskách asynchronních motorů zjištěn a následně popsán nový, dosud neznámý cirkulační ložiskový proud v podobě pulzů tlumených střídavých průběhů s frekvencí stovek kilohertzů až jednotek megahertzů. Uzavírá se na dráze: *hřídel – 1. ložisko – kostra stroje – 2. ložisko – hřídel*; je to tedy cirkulační ložiskový proud (viz obr. 1), avšak příčiny jeho vzniku jsou zcela odlišné od cirkulačního hřídelového proudu zmíněného v kapitole 1.

3.2. Proud common mode current (i_{cm}), parazitní kapacitní proudy, rozložené kapacity, vznik nového cirkulačního ložiskového proudu

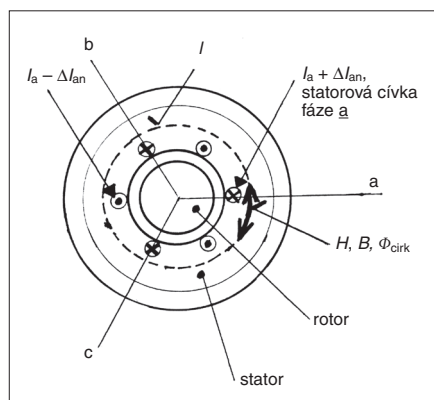
Nejprve je třeba zavést pojem *common mode current* (i_{cm}), což je proud tekoucí působením napětí *common mode voltage* (u_{cm}) současně ze všech vinutí statoru do země (a nebo naopak), a to cestami, které jsou rovněž patrné i z obr. 5 (tedy především přes C_{ws} , ale také přes C_{wr} , C_{rs}). Zdrojem proudu *common mode current* (i_{cm}) je napěťový polovodičový střídač (který je také zdrojem u_{cm}).

Základní příčinou nově zjištěného cirkulačního ložiskového proudu jsou parazitní kapacitní proudy vznikající jako důsledek velmi vysokých strmostí při skokových změnách napětí ve fázových vinutích statoru. Nemusí jít jen o skoky napětí u_{cm} , protože fázová vinutí stroje mají sice společné napětí u_{cm} vzhledem k zemi, ale současně mají také svá fázová napětí určená napětími mezi vstupními svorkami stroje. Strmosti napěťových skoků (které jsou vysoké zejména u střídačů se součástkami IGBT) vedou ke vzniku proudů v parazitních kapacitách, které jsou zde označovány jako ΔC . Proto kapacity C_{ws} , C_{wr} v obr. 5, dosud chápané jako soustředěné parametry, je třeba při velkých hodnotách du/dt uvažovat jako kapacity rozložené, tj. tvořené velkým množstvím prostorově rozložených parazitních kapacit ΔC . Kapacity ΔC však nevytvářejí kapacitní vazbu uvažovaného fázového vinutí pouze k zemi, nýbrž současně také k jiným fázovým vinutím.

Parazitními kapacitami ΔC protékají dílčí parazitní kapacitní proudy ΔI_1 , a to podle základního vztahu $i_C = C \times (du_C/dt)$. V tomto vztahu závisí směr proudu i_C na tom, zda hodnota du_C/dt je kladná nebo záporná, tj. jde-li o nárůst nebo o pokles napětí na kapacitě. Ve třífázovém systému lze vždy dílčí parazitní kapacitní proud ΔI_1 rozdělit na dvě složky: na diferenciální parazitní proud, který se uzavírá mezi fázemi statoru, a na složku proudu *common mode* (i_{cm}),

která teče v důsledku vysoké hodnoty du_{cm}/dt z fáze statoru do země (a nebo naopak). S využitím rozboru provedeného v [4] uvedeme nyní zjednodušený kvalitativní výklad vzniku nového cirkulačního ložiskového proudu. Zjednodušení bude spočívat především v tom, že bude zanedbána indukčnost statorových vinutí (L v obr. 5). Proto např., na rozdíl od zjednodušeného postupu, mají skutečné pulzní průběhy cirkulačního ložiskového proudu (i_{cirk}) střídavý vysokofrekvenční charakter. Kromě toho pro názornost dalšího výkladu bude statorová cívka nahrazována jediným jejím závitem $a_1 - h - a_2$, viz obr. 7.

Závit leží ve směru osy y , tj. ve směru osy hřídele stroje, a protékají jím současně dva proudy. Především to je fázový proud o základní harmonické (50 Hz) + vyšší harmonické (3., 5., 7. apod.), který je označen I a který protéká všemi cívkami své statorové fáze a je vyvolán svorkovým napětím stroje. V naznačeném případě přitéká do závitů proud I svorkou \mathbf{a}_1 a vystupuje z něho svorkou \mathbf{a}_2 . Kromě proudu I však při skokových napětích procházejí v přední i v zadní straně závitů také pulzy



Obr. 8. Příčný řez třífázovým asynchronním motorem pro $y = n$, pohled ve směru osy y ; fázová vinutí statoru jsou v osách $a, b, c.$, směry proudů ve fázi a odpovídají směrům v závitě na obr. 7, proudy jsou označeny souhlasně s fází a ($I_a, \Delta I_{an}$), obdobně u fází b, c (proudy neoznačeny); čárkovaně naznačená uzavřená dráha l obepíná celkový průtok vodivého proudu

parazitních kapacitních proudů ΔI , resp. ΔI_n . Představa o průtoku těchto parazitních kapacitních proudových pulzů je odlišná od průtoku fázového proudu I . Na obr. 7 je ukázáno, že při uvedeném směru dílčích parazitních kapacitních proudů ΔI_1 odtékajících z přední i zadní strany závitů musí do obou svorek $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ přitékat proudy stejné velikosti i smyslu, tj. parazitní kapacitní proudy $\Delta I = \Sigma \Delta I_1$. (Parazitní kapacitní proud ΔI je tedy součtem dílčích parazitních kapacitních proudů ΔI_1 v jedné straně závitů.) Tyto parazitní kapacitní proudy ΔI shodného směru přicházejí do svorek $\mathbf{a}_1, \mathbf{a}_2$ (popř. z těchto svorek odcházejí) stejnými vodiči jako proud I , bez ohledu na jeho momentální směr. Parazitní kapacitní proudy jsou vyvolány napětím u_{cm} a rovněž okamžitými napětími mezi fázovými vinutími statoru. Stejně jako jednotlivé dílčí parazitní kapacitní proudy ΔI_1 , má i jejich součet v jedné straně závitů, tj. parazitní kapacitní proud ΔI , dvě složky: diferenciální parazitní proud, který se uzavírá mezi fázemi statoru, a proud *common mode* (i_{cm}), který odtéká do země (nebo přitéká ze země).

Pro uzavřenou dráhu l v obr. 8 platí 1. Maxwellova rovnice (zákon průtoku):

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \Sigma I \quad (3)$$

Integrál po uzavřené dráze l na levé straně rovnice je tzv. magnetomotorické napětí

(F_m), \mathbf{H} v něm označuje vektor intenzity magnetického pole, ΣI je celkový průtok vodivého proudu obepjatý uzavřenou dráhou l při respektování směrů (+, -) proudů. Z rovnice (3) vyplývá, že při nenulové hodnotě průtoku ΣI působí v obr. 8 podél naznačené kruhové dráhy l magnetické pole H , a tedy také magnetická indukce B a magnetický cirkulační tok Φ_{cirk} .

Všimněme si nyní blíže průtoku ΣI v rovnici (3). V symetrickém třífázovém systému je v každém okamžiku součet všech fázových proudů nula ($I_a + I_b + I_c = 0$). Lze ukázat, že v třífázovém systému je také součet všech diferenciálních parazitních proudů nulový. V cívkách v obr. 8 zbývají tedy pouze proudy *common mode* (i_{cm}). Celkový proud i_{cm} celé cívky je dán součtem proudů i_{cm} obou stran všech závitů, které tuto cívku tvoří. Proud i_{cm} obecně teče ze svého zdroje (napětiový střídač) přes parazitní kapacity ΔC do země (nebo naopak). Proto proudy i_{cm} budou procházet ve stejném směru všemi cívkami všech fází. Znamená to, že přední i zadní stranou všech závitů ve statoru budou proudy *common mode* (i_{cm}) vždy procházet ve shodném směru. Tento směr závisí na tom, zda derivace du_{cm}/dt , která vyvolá průtok parazitního kapacitního proudu i_{cm} , má momentálně kladnou, či zápornou hodnotu. Je tedy zřejmé, že každá skoková změna napětí u_{cm} má za následek nenulový součet proudů (přesněji: proudových pulzů) všech tří statorových vinutí, tedy nenulový průtok ΣI , a to buď v jednom, nebo ve druhém směru osy y (směr hřídele). Odtud v souladu s rovnicí (3) vyplývá, že podél uzavřené čárkované dráhy l v obr. 8 budou protékat (v jednom nebo ve druhém směru) pulzy magnetického toku Φ_{cirk} . Lze shrnout, že cirkulační magnetický tok Φ_{cirk} je vyvolán proudem i_{cm} v závitěch statorových vinutí, přičemž příčinou proudu i_{cm} jsou skokové změny napětí u_{cm} .

Vznik cirkulačního ložiskového proudu i_{cirk} (viz obr. 9) v důsledku změny magnetického toku Φ vyjadřuje 2. Maxwellova rovnice (indukční zákon):

$$\oint_s \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} = -d\Phi/dt \quad (4)$$

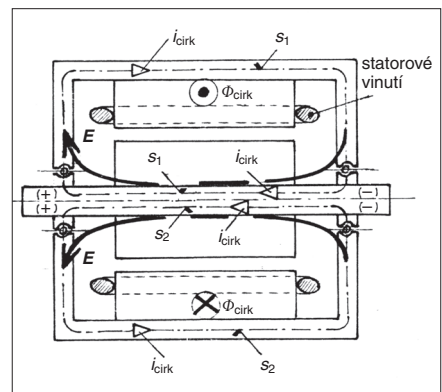
Integrál na levé straně rovnice je tzv. elektromotorické napětí. Rovnice (4) říká: Obepíná-li dráha s zcela magnetický tok Φ , změna (nárůst, pokles) tohoto toku indukuje na uzavřené dráze s elektrické pole o intenzitě E ; znaménko minus znamená, že E má kladný směr (podle pravidla pravé ruky) při poklesu toku Φ (a naopak).

V popisovaném případě se uplatní rovnice (4) v obr. 9, kde je znázorněn zjednodušený osový řez třífázovým asynchronním motorem. V tomto obrázku jsou zakresleny dvě samostatné uzavřené dráhy s_1, s_2 tak, že obě zcela obepínají tentýž cirkulační magnetický tok Φ_{cirk} , který působí podél dráhy l v obr. 8. V obr. 9 je zakreslena situace, kdy v horní části obrázku tok Φ_{cirk} vystupuje z nákrсны směrem k očím pozorovatele, a v dolní části

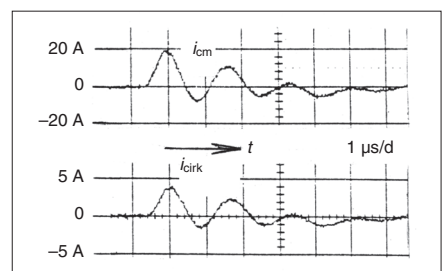
tudíž naopak vstupuje do nákrсны. Uvažme přitom okamžitý stav, kdy tok Φ_{cirk} narůstá (tj. $d\Phi_{cirk}/dt > 0$). Potom v souladu s rovnicí (4) tato změna toku Φ_{cirk} indukuje podél drah s_1, s_2 elektrická pole E naznačených směrů, která na koncích hřídele vytvoří okamžitý kladný (+) a záporný (-) pól elektrického napětí. Při dosažení dostatečné velikosti prorazí elektrické napětí izolační olejový film v obou ložiskách a po drahách s_1, s_2 se budou ve směru elektrického pole E uzavírat cirkulační ložiskové proudy i_{cirk} - viz obr. 9. Proud i_{cirk} jsou střídavé.

4. Závěr

Předložený článek podává zjednodušený kvalitativní výklad vzniku dvou různých typů ložiskových proudů u asynchronních motorů napájených z napětiových polovodičových střídačů: proudů necirkulačních a cirkulačních. Pro snadnou srozumitelnost je výklad podáván za ideálních předpokladů, často se zanedbáním funkčně významných parametrů či provozních



Obr. 9. Průtok cirkulačních ložiskových proudů i_{cirk} , které jsou působeny naznačeným cirkulačním magnetickým tokem při $d\Phi_{cirk}/dt > 0$



Obr. 10. Proud *common mode* (i_{cm}) a cirkulační ložiskový proud (i_{cirk}); naměřené průběhy na asynchronním stroji $P_n = 500 \text{ kW}$ při $n = 3\,000 \text{ min}^{-1}$ a teplotě ložisek 70 °C

stavů (indukčnost statorových vinutí motoru, odrazy vln ve vedení mezi střídačem a motorem, hloubka regulace střídače apod.). Ve výkladu jsou oba typy ložiskových proudů vysvětlovány „samy o sobě“, tj. bez vzájemného ovlivňování. Ve skutečnosti se necirkulační a cirkulační ložiskové proudy mohou vyskytovat současně, a tím na sebe působit. Některé ideální předpoklady uvažované ve výkladu nejsou v praxi dostatečně splněny, počínaje např.

The purpose of this paper is to explain in the simplest way voltage generation in bearings of multiphase asynchronous motors powered by semiconductor inverters based on GTO, IGBT, IGCT etc. components and to provide basic information about bearing damaging through bearing currents.

This paper explains qualitatively and in simplified way the matter of generation of two different types of damaging bearing currents that are powered by voltage semiconductor inverters – namely circulating and non-circulating currents.

The explanation of this matter is provided – for better clarity – under ideal terms and conditions, i. e. there are often omitted functionally important parameters or operating conditions (stator winding inductance of asynchronous motors, wave reflections in electric connection between inverter and motor, inverter regulation range and so on).

průběhem napětí common mode voltage (u_{cm}). V důsledku toho jsou vyhodnocování a identifikace naměřených výsledků značně obtížné. Výzkum diskutované problematiky není dosud uzavřen; objevují se nové práce, které potvrzují správnost poznatků uvedených v předloženém článku, avšak jejich přístup je odlišný. Je to např. propracovaný článek [5], z něhož byly pro ilustraci převzaty naměřené průběhy uvedené v obr. 10.

Základním problémem při napájení asynchronních motorů z napěťových polovodičových střídačů jsou kapacitní vazby, jimiž se vysokofrekvenční ložiskové proudy uzavírají. V některých případech je možné pro eliminaci nebo omezení ložiskových proudů použít relativně drahá keramická ložiska, speciální izolovaná ložiska nebo tzv. hybridní ložiska. Univerzální optimální způsob řešení však neexistuje. V každém jednotlivém případě záleží na konkrétních okolnostech, jako je uložení a uzemnění motoru, jeho připojení ke střídači i k poháněnému zařízení apod. Typické příklady různých drah (cest) ložiskových proudů jsou uvedeny v [1]; předpokládanou vhodnou

variantu je však třeba v konkrétním uspořádání nejprve experimentálně ověřit. K identifikaci průběhů ve složitých záznamech reálných ložiskových proudů může pomoci jejich rozdělení na proudy necirkulační a cirkulační, jako tomu bylo v předloženém článku.

Životnost ložisek je vedle ložiskových proudů také významně ovlivňována mechanickým namáháním ložisek i jejich konstrukčním řešením, včetně použitých materiálů a maziv. Také zde může být velmi užitečná publikace [1], v níž autoři shromáždili a zdokumentovali velké množství praktických zkušeností, cenných (a obtížně získávaných) poznatků i množství postupů využitelných v průmyslové praxi.

Literatura:

- [1] CHMELÍK, K. – POSPÍŠILÍK, J. – FOLDYNA, J.: *Ložiskové proudy v elektrických strojích*. Odborná publikace VŠB-TU Ostrava, 2008.
- [2] BARTOŠ, S.: *Tříhladinový střídač – řízený zdroj pro střídavé motory na vysoké napětí*. Elektro, 2008, roč. 18, č. 2, s. 4–10.
- [3] HAUSBERG, V. – SEINSCH, H. O.: *Kapazitive Lagertenspannungen und -ströme bei*



Doc. Ing. Stanislav Bartoš, CSc. (*1935) absolvoval Fakultu elektrotechnickou ČVUT v Praze v roce 1958 v oboru výroba, rozvod a využití elektrické energie. V období 1959 až 1981 pracoval v podniku ČKD Praha (postupně v pražských závodech Elektrotechnika, Polovodiče, Trakce) jako vývojový, později vědecký pracovník v oblasti aplikací výkonové elektroniky. Od roku 1981 až doposud pracuje v Akademii věd ČR (do roku 2005 v Ústavu pro elektrotechniku, který je od roku 2006 sloučen s Ústavem termomechaniky, v v. i.), stále v oboru výkonové elektroniky. V roce 1970 získal titul kandidát věd (CSc.) na VUT Brno, v roce 1997 byl jmenován docentem (doc.) na FEL ČVUT Praha. V letech 1993 až 2003 působil ve vedlejší pracovním poměru jako vysokoškolský učitel na Dopravní fakultě Jana Pernera – Univerzita Pardubice.

umrichter gespeisten Induktionsmaschinen.

Electrical Engineering, 2000, 82, s. 153–162.

- [4] CHEN, S. – LIPO, T. A.: *Circulating Type Motor Bearing Current in Inverter Drives*.

IEEE Industry Appl. Magazine, Jan./Feb. 1998, s. 32–38.

- [5] MUETZE, A. – BINDER, A.: *Calculation of Circulating Bearing Currents in Machines of Inverter-Based Drive Systems*. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, Vol. 54, No. 2, s. 932–938.

AMT měřicí technika

AUTORIZOVANÝ DISTRIBUTOR MĚŘICÍ TECHNIKY

KONZULTACE – PRODEJ – KALIBRACE – SERVIS



www.amt.cz

T Cert ISO 9001

AMT měřicí technika, spol. s r. o., Leštinská 2418/11, 193 00 Praha - Horní Počernice, fax: 281 924 344, tel.: 281 925 990, tel.: 602 366 209, e-mail: info@amt.cz

www.odbornecasopisy.cz

**nové webové stránky
s vylepšeným vyhledávačem
a možností stahovat články v PDF**

