

Jmenovitý a skutečný výkon asynchronního motoru versus řešení přívodu

František Majda, elektrotechnik,
Popovice u Kroměříže

Úvod

Třífázový asynchronní motor (ASM) s kotvou nakrátko (obr. 1) je v průmyslu nejrozšířenějším typem elektromotoru. Výhodou ASM je jednoduchá konstrukce a z toho plynoucí velká spolehlivost, nenáročnost na údržbu a příznivá cena. Jde o nejpoužívanější elektrický pohon s možností napájení jedno- nebo třífázovým síťovým napětím. ASM má i dobrou účinnost (viz obr. 2).

Volba výkonu asynchronního motoru

Výkon ASM by měl přibližně odpovídat potřebnému příkonu poháněného stroje. Obvykle se však volí výkon ASM o třetinu větší, než by vycházelo z výpočtu. ASM je tak zatížen pouze na 75 % svého výkonu. Toto opatření má svůj důvod. Při pohledu na průběh účinnosti ASM jak se vyvíjí při různém zatížení (obr. 3) je patrné, že při zatížení 75 % je účinnost ASM stejná, nebo dokonce někdy i lepší než při zatížení 100 %. Při tomto třičtvrtěčném zatížení má ASM také příznivý účinník $\cos \varphi$ (obr. 4). Hlavní důvody tohoto opatření jsou však delší životnost ASM, neboť motor je méně tepelně namáhán, a rezerva záběrného momentu při případném podpětí. Krouticí moment třífázového ASM se mění přibližně s druhou mocninou napájecího napětí. Klesne-li napětí o 10 %, tj. na $0,9 U_n$, sníží se záběrný moment M_z na hodnotu $0,9^2 M_{zn} = 0,81 M_{zn}$, tedy o 19 %. U ASM zatěžovaných trvale na méně než 75 % dochází pak ke snížování účinnosti a ke zhoršování účinníku $\cos \varphi$.

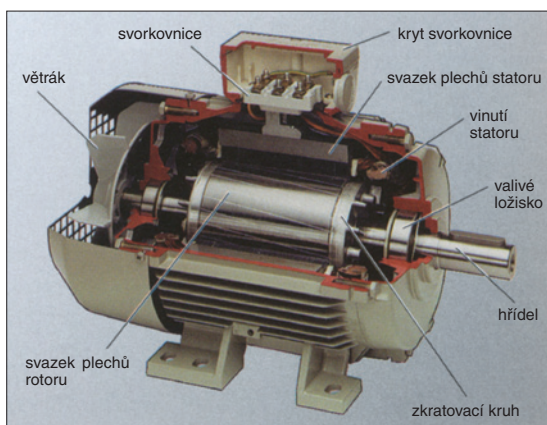
Zmírnění důsledků předimenzovaných ASM a přívodu – řešení z nedávné praxe

V truhlářském závodě na výrobu dřevěných oken a dveří se hotové dřevěné části po sklížení brousí na plošné pásové brusce (obr. 5) o šíři 133 cm činné plochy. Broušený předmět je protahován bruskou rychlostí 12 m·min⁻¹. Při broušení obstarávají pohon brusky dva ASM. Spodní ASM (pojezd válců) vtaňuje zespodu broušený předmět dovnitř a druhý ASM shora pohání brusný pás (133 cm), a zajišťuje tak vlastní broušení. Bruska italského původu z roku 1996 má jmenovitý štítkový vý-

kon $P = 29$ kW, proud $I = 56$ A a napětí $U = 380$ V. Stroj byl připojen z hlavní rozvodny výrobní dílny kabelem AYKY 4×35 mm². Součástí broušení je odsávání. K brusce je připojen ventilátor (obr. 6) odsávání jemných pilin, jež jsou odváděny do zásobníku. Tento ventilátor domácího výrobce z roku 1997 má motor o jmenovitém výkonu $P = 22$ kW, proud $I = 42,5/24,5$ A, $\cos \varphi = 0,87$, napětí $U = 400$ V. Tento motor byl rovněž připojen z hlavní rozvodny výrobní dílny kabelem CYKY 4×35 mm². Oba kabely měly přibližnou délku 40 m.

Výkony a proudy těchto strojů

U obou strojů byla provedena měření příkonů (elektrických) a proudů, neboť se zdálo, že průřezy přívodních kabelů jsou



Obr. 1. Třífázový asynchronní motor s kotvou nakrátko (zdroj: Příručka pro elektrotechnika)

pro jmenovité výkony příliš velké. Jmenovitý příkon brusky 29 kW je součet jmenovitých výkonů tří motorů. Jde o motor pohonu broušeného předmětu 11 kW, motor pohonu brusného pásu 15 kW a motor posuvu 3 kW k nastavení mezery podle tloušťky broušeného předmětu. Tento motor je v chodu pouze při nastavování žádaného rozměru broušeného předmětu před broušením. Na procesu nastavování se jiný motor, tedy ani motor odsávání, nepodílí. Při vlastním broušení motor nastavování již v chodu není. U běžící brusky byl naměřen proud naprázdno 23 A, u běžícího ventilátoru byl naměřen proud 23,6 A a příkon 10,2 kW. Uvedená provozovna byla zrušena a oba poslední zmíněné motory byly zapojeny na novém pracovišti.

Uvedení do chodu v nové provozovně

Motor ventilátoru 22 kW byl původně zapínán stykačovou kombinací hvězda/trojúhelník (Y/D) v příslušné ovládací skříni, kde bylo schéma zapojení s doporučeným přívodním kabelem CYKY 4×25 mm² (připojený přívod byl CYKY 4×35 mm²). Nadproudová ochrana ASM byla nastavena na jmenovitý proud. Protože byl naměřen proud motoru 23,6 A, a to jak při chodu motoru naprázdno, tak i při odsávání, bylo možné usoudit, že tento motor byl značně předimenzovaný – jeho vypočítaný výkon byl asi 40 % P_n (jmenovitého výkonu), účinnost $\eta = 0,81$, $\cos \varphi = 0,62$. Po připojení kompenzačního kondenzátoru o jalovém výkonu 8 kvar k tomuto motoru poklesl jeho proud na 17 A. Rovněž byl k brusce zkušebně připojen kompenzační kondenzátor o jalovém výkonu 16 kvar a přívodní proud poklesl při chodu naprázdno ze 23 A na 6,5 A, což odpovídá přibližně účinníku $\cos \varphi = 0,28$.

Proudy obou strojů naprázdno

Společný proud obou strojů naprázdno se pohyboval v rozsahu 46 až 47 A, což odpovídá i výpočtu:

činný proud obou strojů:

$$I_{\xi} = 0,28 \times 23 + 0,62 \times 23,6 = 21,1 \text{ A}$$

jalový proud obou strojů:

$$I_q \approx 0,96 \times 23 + 0,78 \times 23,6 = 41 \text{ A}$$

zdánlivý proud obou strojů:

$$I_s = \sqrt{21,1^2 + 41^2} = 46 \text{ A}$$

účinník obou strojů naprázdno:

$$\cos \varphi = I_{\xi}/I_s = 21,1/46 = 0,46$$

Proud obou strojů při zatížení

Broušení hotových výrobků, tj. křidel, oken a rámu probíhá jen na malé ploše. Při rozměrech rámu 8 cm je skutečná broušená plocha 16 cm. To znamená, že bruska je při broušení jen málo zatížena. Brusný pás je opotřebováván nerovnoměrně. Aby opotřebovávání brusného pásu bylo stejné, brousí se různé rámy po různé části brusné plochy o šířce 133 cm. Při posuvu broušeného předmětu zůstává proud obou motorů brusky stejný. Na procházejícím broušeném předmětu jsou jen drobné nerovnosti. Při průchodu broušeného předmětu se proud zvýší pouze částečně. Při připojeném kompenzačním kondenzátoru o jalovém výkonu 24 kvar

Asynchronní motor (ASM)

je točivý elektrický stroj na střídavý proud. Energie mezi státorem a rotorem je předávána pomocí elektromagnetické indukce (od toho je také někdy označován jako indukční motor). Stator je obvykle složen ze statorových plechů, na kterých je navinuto statorové vinutí. Rotor (kotva) má na hřídeli nalisované plechy s drážkami, do kterých jsou vloženy měděné tyče spojené na obou stranách mosaznými kruhy – tzv. kotva nakrátko (klecový rotor), nebo má rotor sběrací kroužky – tzv. kroužková kotva – a v drážkách plechů je uloženo třífázové vinutí z izolovaných vodičů zapojené většinou do hvězdy nebo trojúhelníka. Princip činnosti asynchronního motoru spočívá ve vytvoření točivého magnetického pole průchodem střídavého třífázového proudu vinutím statoru. Toto magnetické pole indukuje v rotoru napětí a vzniklý proud vyvolává sílu otáčející rotorem. ASM potřebuje skluz otáček mezi rotorem a státorem pro vytvoření indukce proudu v rotoru. Skluz otáček ASM je závislý na zátěži. Otáčky točivého pole (a současně statoru) n_s jsou dány frekvencí f napětí odebíraného ze sítě a počtem pólů p třífázového motoru:

$$n_s = f/p \text{ (s}^{-1}\text{)}$$

Mezi synchronními otáčkami točivého pole statoru n_s a asynchronními otáčkami rotoru n vzniká tzv. skluz s , pro který platí:

$$s = 100 \cdot (n_s - n) / n_s \text{ (\%)}$$

Pro otáčky rotoru platí:

$$n = n_s \cdot (1 - s) = f/p \cdot (1 - s)$$

Rotor ASM se nikdy nemůže otáčet stejnými otáčkami jako magnetické pole statoru (rotor a magnetické pole statoru by měly v tomto případě nulový skluz, neindukovalo by se napětí, a nevznikala by tak točivá síla). Podle skluzu lze vymezit tři režimy práce

ASM, a to režim generátoru ($s = -\infty; 0$), motoru ($s = 0; 1$) a brzdy ($s = 1; \infty$).

Činný odpor vodivé klece je velmi malý, a tak může rozběhový proud dosáhnout až desetinásobku jmenovitého proudu (obdoba zkratového proudu u transformátoru). Tím vznikají v síti velké proudové rázy při poměrně malém záběrném momentu (díky velkému fázovému posunu za magnetickým tokem). Proto je přímé spouštění povoleno pouze pro motory s výkonem asi do 3 kW.

Zmenšení velkého rozběhového proudu u ASM s kotvou nakrátko lze řešit **snížením rozběhového napětí**, přičemž nepoužívanější metody jsou:

- statorový spouštěč – do série s vinutím jsou zapojeny omezovací odpory, které se během spouštění postupně vyřazují;
- rozběhový transformátor – do spouštěcího obvodu je připojen transformátor (nejčastěji autotransformátor (u velkých výkonů));
- přepínač hvězda/trojúhelník (Y/D) – přepnutím do hvězdy se napětí na vinutí zmenší $\sqrt{3}$ krát, čímž klesne odebíraný proud a výkon na třetinu (při malých zátěžích);
- polovodičový regulátor napětí – umožňuje plynulý rozběh motoru, lepší účinek a úspory elektřiny.

S rostoucími otáčkami klesá indukované napětí i proud v rotoru. Současně se z důvodu snižování indukční reaktance rotoru zmenšuje i fázový posun mezi jeho napětím a proudem.

Pro **regulaci otáček ASM** se používají především tyto metody:

- změna počtu pólů – nepraktické, neboť otáčky lze řídit pouze skokově (počet pólových dvojic musí být celé číslo);
- změna skluzu – změnou výkonu marněném v rotoru (pouze pro ASM s kroužkovou kotvou);
- regulační odpor – přeměnou části skluzového výkonu na teplo (nehospodárné);

- podsynchronní kaskáda – vrácení části skluzového výkonu zpět do sítě (nutný měnič frekvence z důvodu rozdílných frekvencí ASM a sítě);
- změna frekvence – použitím měniče frekvence se řídí napětí, a tím i vytvářené magnetické pole statoru (u ASM s kotvou nakrátko);
- skalární řízení – nastavuje se velikost magnetického toku;
- vektorové řízení – nastavuje se velikost magnetického toku i jeho směr (plynulá změna otáček při jakémkoliv režimu práce a zatížení – nejdokonalejší způsob s možností nadsynchronních otáček).

Při odpojení ASM od sítě se v něm nahromadí velká kinetická energie mající za následek dlouhou dobu doběhu. Pro rychlejší zastavení ASM je třeba vytvořit brzdný moment, a to buď mechanicky, nebo elektronicky. Při **brzdění** se používají hlavně tyto metody:

- brzdění protiproudem – změnou smyslu otáčení magnetického pole statoru (brzdný moment působí proti směru otáčení rotoru a po dosažení nulových otáček se musí ASM odpojit, aby se nezačal otáčet opačným směrem – nehospodárné, neboť se veškerá kinetická energie přeměňuje na teplo);
- generátorické brzdění – v režimu práce jako generátor, kdy $n > n_s$ (nelze použít pro zastavení ASM);
- dynamické brzdění – statorové vinutí se odpojí od sítě a připojí se na zdroj stejnosměrného napětí s možností řízení jeho velikosti, a tím i brzdného momentu, čímž se magnetické pole statoru stane statickým a pohybující se rotor si sám vytváří brzdný moment – ASM je třeba dobrzdit mechanicky (nejvýhodnější způsob).

(redakce Elektro)

k oběma strojům klesl proud naprázdno na 23 A. Při zatížení, tj. broušení dosáhl hodnoty 34,5 A. To odpovídá zvýšení činného proudu o 12,5 A a úměrně tomu i výkonu o $P = 12,5 \times 0,4 \times \sqrt{3} = 8,6$ kW.

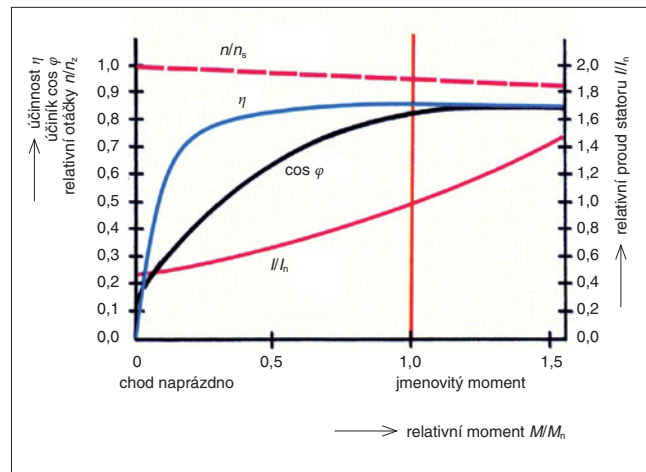
Zapojení motoru ventilátoru do Y

Při zapojení do trojúhelníka (D) protéká proudem 23,6 A, což odpovídá velikosti proudu tekoucího vinutím $I_v = 23,6/\sqrt{3} = 13,6$ A. Protože tento proud je menší než jmenovitý (štitkový) proud motoru při tomto zapojení do hvězdy ($I_{Yn} = 24,5$ A), rozhodl jsem se zapojit motor do hvězdy (Y) trvale. U nevytíženého motoru lze snížit ztráty motoru snížením napájecího napětí. Motor byl odpojením přívodu od časového spínače pro přepínání Y/D trvale zapojen pouze na chod v režimu Y. Proud při rozběhu dosahoval nárazově 70 A. Při zapojení do Y se ustálil na hodnotě 15,4 A. Proud ve vinutí při zapojení do Y větší než při zapojení do D.

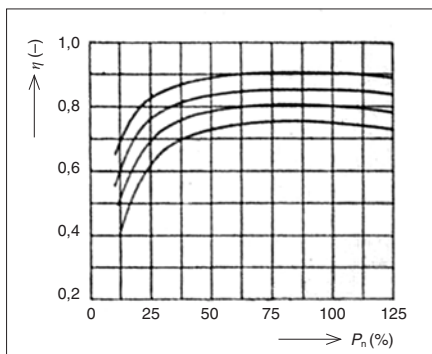
Napětí při zapojení do Y je asi 57 % napětí při zapojení do D, což je menší hodnota, než by při daném výkonu měla být. Vhodná veli-

kost napětí je přibližně úměrná \sqrt{P} (z poměru skutečného výkonu). Protože výkon motoru je asi 40 %, pak vhodné napětí pro takto snížený výkon by bylo $\sqrt{0,4}$, tj. 63 % U_n .

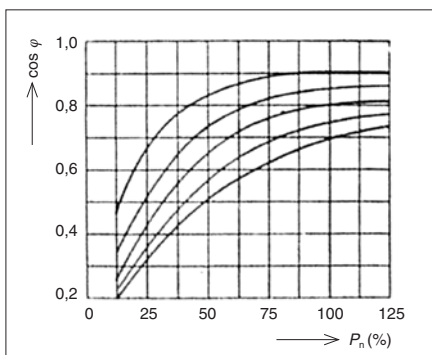
Při poklesu napětí se zmenší velikost magnetizačního proudu, který je na napětí sítě přímo závislý. Zmenšením magnetizačního proudu se zeslabí magnetizační pole motoru a ten se ustálí při daném zatížení na nové hodnotě momentu zvětšením činné složky. Zvětšení proudu ze 13,6 na 15,4 A však příliš ztráty ve vinutí nezvětší. Poklesnou ale ztráty motoru, a to zmenšením ztrát v železe. Rovněž poklesne



Obř. 2. Typické charakteristiky asynchronních motorů ($P_n = \text{ca } 2 \text{ až } 5 \text{ kW}$) s kotvou nakrátko (zdroj: Příručka pro elektrotechnika)



Obr. 3. Přibližná účinnost asynchronních motorů s kotvou nakrátko při různém zatěžovateli



Obr. 4. Přibližný účinník asynchronních motorů s kotvou nakrátko při různém zatěžovateli

příkon vlivem zmenšení otáček. Výkon ventilátoru roste se třetí mocninou otáček. Stoupnou-li otáčky motoru o 1 %, zvýší se výkon motoru o $1,01^3 = 1,03$, tj. o 3 %. Naopak při poklesu otáček o 1 % klesne příkon o 3 %, což při účinnosti motoru 81 % odpovídá snížení příkonu $0,03/0,81 = 0,037$, tedy 3,7 %. Mírný pokles otáček nemá vliv na kvalitu odsávání.

Proud obou strojů při zapojení ventilátoru do Y

Při tomto zapojení poklesl proud obou strojů na hodnotu 20,6 A při chodu naprázdno a při broušení dosáhl hodnoty 30 A. K brusce (a to jen k většímu motoru) byl přímo připojen pouze jeden kompenzační kondenzátor o jal-



Obr. 5. Práce na brusce

vém výkonu 8 kvar. Druhý kondenzátor 8 kvar byl připojen v ovládací skříni přímo k motoru ventilátoru. Oba stroje byly zapojeny na společný přívodní kabel CYKY $5 \times 16 \text{ mm}^2$.

Ekvivalentní (náhradní) proud

Při provozování obou strojů naprázdno (bez kompenzace) protéká přívodním vedením proud 46 A, který by se při broušení zvýšil na 53 A. Výpočet této hodnoty je následující:

$$I = \sqrt{(21,1 + 12,5)^2 + 41^2} = 53 \text{ A}$$

Protože režim broušení není bez výkyvů, ale probíhá přibližně v poměru 2 : 1 (tzn. dvě doby chodu naprázdno na jednu dobu broušení), bude pro ekvivalentní (náhradní) proud nekompenzovaného soustrojí platit:

$$I_{n1} = \sqrt{\frac{1}{3}(53^2 + 2 \cdot 46^2)} = 48 \text{ A}$$

Pro ekvivalentní proud kompenzovaného soustrojí platí:

$$I_{n2} = \sqrt{\frac{1}{3}(30^2 + 2 \cdot 20,6^2)} = 24 \text{ A}$$

Ekvivalentní hodnota proudu má na kabel stejné tepelné účinky jako proměnná hodnota

obou složek. Z ekvivalentní hodnoty se pak spočítá průřez přívodního kabelu.

Zhodnocení

Ekvivalentní proud 48 a 24 A u provozovaného zapojení naznačuje, jak je ošidné volit přívodní vedení a přístroje podle štítkových hodnot. V daném případě jde o jmenovitý proud motoru ventilátoru 43,5 A a štítkový proud pásové brusky 56 A. Díky této úvaze bylo možné zmenšit průřez přípojovacích kabelů uvedených strojů na třetinu ji-



Obr. 6. Ventilací zařízení s asynchronním motorem

nak obvyklé hodnoty. Místo předdimenzovaného motoru 22 kW by bylo vhodné použít motor o velikosti 11 kW. Tento motor má v současném provedení účinnost 89 % v rozsahu zatížení 75 až 100 %. Rovněž záběrový proud by při zapnutí poklesl přibližně na polovinu. Použití individuální kompenzace u těchto (ale i u dalších) strojů provozovny přineslo úspory na materiálu (mědi). Zmenšení jalového výkonu se pozitivně projevuje i na úsporách za poplatky za ne zcela vykompenzovaný jalový výkon.





Hledáte úspory? Snížíme vaše náklady na servisní služby UPS až o 20%

UPS bez kvalitní péče není jistotou nepřetržitého napájení !

Nabízíme Vám:

- projekty a návrhy řešení zálohování napájení
- dodávky, instalace, zprovoznění, revize
- záruční a pozáruční servis
- preventivní a trvalou péči o zařízení
- garanci doby opravy

UNISMINI - služby, spol. s r. o.
 Bělčická 2922/30
 141 00 Praha 4
 Tel.: +420 272 084 500
<http://www.unismini.cz>
 Praha - Brno - Strakonice