

Vlastnosti frekvenčně řízených pohonů s jednofázovými asynchronními motory

doc. Ing. Jaroslav Novák, CSc., ČVUT Praha, Fakulta strojní, Ústav přístrojové a řídicí techniky
Ing. Jan Janeček a Ing. Hynek Václavík, Danfoss, s. r. o.

V některých speciálních aplikacích lze v současnosti sledovat snahu o využití měničů frekvence pro plynulé řízení otáček jednofázových asynchronních motorů s pomocnou fází a kondenzátorem. V předkládaném článku jsou v první části shrnuty základní informace o jednofázových asynchronních motorech a analyzovány vlastnosti pohonů s těmito motory při použití měničů frekvence. V další části jsou prezentovány výsledky experimentů s různými variantami řešení frekvenčně řízených pohonů s jednofázovými asynchronními motory. V závěru jsou uvedeny výsledky měření s určením oblasti použitelnosti těchto pohonů a jejich omezení.

1. Úvod

Díky široké nabídce nepřímých měničů frekvence s napěťovým stejnosměrným meziobvodem a IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor* – bipolární tranzistor s oddělenou řídicí elektrodou) výstupním střídačem a díky relativně příznivé ceně těchto zařízení je principiálně vyřešen problém možnosti provozu pohonu s plynulou regulací otáček s třífázovým asynchronním motorem v případech, kdy je k dispozici pouze jednofázová síť. V oblasti výkonů přibližně do 5 kW nabízejí výrobci měničů frekvence typy s jednofázovými vstupními usměrňovači a třífázovými výstupy; v některých případech jsou měniče integrovány přímo v konstrukci motoru. Vzhledem k příznivějším vlastnostem třífázových asynchronních motorů oproti jednofázovým ztrácí použití jednofázových motorů v těchto případech smysl.

I přes uvedené skutečnosti se však v některých případech vyskytuje v technické praxi potřeba plynulého řízení otáček jednofázového asynchronního motoru. Jde o pohony zařízení se speciálními jednofázovými asynchronními motory, jejichž konstrukce je integrální součástí celého zařízení. Nejčastějším případem těchto zařízení jsou ventilační systémy malých výkonů. V případě rekonstrukcí nebo modernizací těchto zařízení má smysl zvážit použití měničů frekvence ve spojení s jednofázovými motory za účelem zachování mechanické části zařízení. Na základě potřeb zákazníků iniciovala firma Danfoss, s. r. o., série experimentů, ve kterých byly vlastnosti frekvenčně řízených pohonů s jednofázovými asynchronními motory podrobně kvantitativně testovány v několika variantách. Klíčové závěry těchto měření, která probíhala v laboratořích ČVUT v Praze, na Fakultě strojní a která byla vykonávána pracovníky školy i firmy Danfoss, s. r. o., a z nich vyplývající závěry a doporučení jsou uvedeny v tomto článku.

2. Použití jednofázových asynchronních motorů

Jednofázové asynchronní motory se používají běžně v aplikacích, kde vynikají výhody jednoduchých provozně nenáročných, spolehlivých a levných indukčních motorů, kde však není k dispozici třífázová napájecí soustava. Jedná se typicky např. o oblast neregulovaných pohonů domácích spotřebičů (např. ledničky, sekačky, v dřívější době ve velké míře i pračky). Vzhledem ke jmenované sféře použití jde o pohony menších výkonů, přibližně v rozsahu desítek wattů až jednotek kilowattů.

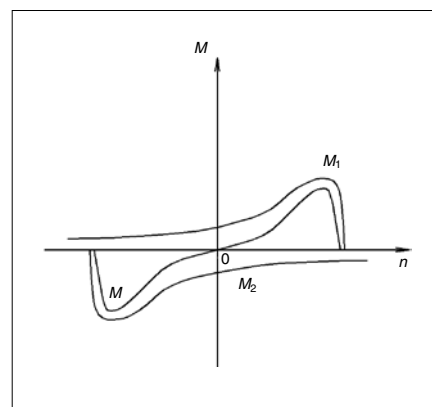
3. Princip funkce jednofázového asynchronního stroje a základní vlastnosti

Na rozdíl od třífázového asynchronního motoru není možné vytvořit jedním vinutím na statoru asynchronního stroje točivé magnetické pole. Při napájení tohoto jediného vinutí jednofázovým napětím vznikne pole pulzující. Toto pulzující magnetické pole lze však rozložit na dvě protiběžná točivá pole s poloviční magnetomotorickou silou. Pulzující pole v sobě zahrnuje složku souslednou s žádoucími magnetickými a mechanickými účinky a složku zpětnou, jejíž účinky jsou rušivé. Na základě uvedeného rozboru je možné ztotožnit vlastnosti jednofázového asynchronního motoru s vlastnostmi fiktivního modelu dvou asynchronních třífázových motorů na společné hřídeli. Směr točivých polí fiktivních motorů na společné hřídeli je opačný.

V oblasti pracovní – stabilní části mechanické charakteristiky, kdy motor pracuje s malým skluzem, převládá sousledná složka točivého pole, neboť větší část svorkového napětí stroje koresponduje s indukovaným napětím sousledné složky. V tomto režimu je moment, vytvořený souslednou složkou, dominantní. Vliv malého momentu zpětné

složky je malý, avšak v důsledku existence zpětné složky pole se projevuje částečný nárůst ztrát stroje.

Komplikací jednofázového asynchronního motoru představuje rozběh, kdy je momentové působení sousledné a zpětné složky točivého pole stejné co do velikosti, ale opačné co do směru. Záběrný moment jednofázově napájeného asynchronního motoru je tedy nulový a pomocí dodatečných opatření je třeba zabezpečit zvýšení záběrného momentu v požadovaném směru na nenulovou hodnotu. Popsané momentové vlastnosti jednofázově na-



Obr. 1. Konstrukce mechanické charakteristiky jednofázově napájeného stroje z charakteristik dvou strojů s protiběžnými poli

pájeného motoru dokumentuje průběh mechanické charakteristiky na obr. 1, který vznikne složením mechanických charakteristik dvou fiktivních strojů na společné hřídeli s protiběžnými točivými poli.

Při konstrukci asynchronních motorů pro jednofázové napájení se vychází ze skutečnosti, že točivé pole lze získat nejen pomocí třífázové soustavy, ale i pomocí dvoufázové soustavy, kdy stator motoru obsahuje dvě vinutí s prostorovým posunem 90°. Tato vinutí jsou protékána proudy s časovým posunem 90°. Tento pohled umožňuje u jednofázového motoru řešit problematiku rozběhu a dává předpoklady ke zlepšení momentových vlastností v okolí jmenovitého zatížení.

Jednofázový asynchronní motor má na statoru dvě vinutí – hlavní a pomocné. Výkon motoru se přenáší z větší části prostřednictvím hlavního vinutí, které zaujímá přibližně dvě třetiny drážek statoru. Hlavní vinutí je napájeno z přímo z jednofázové sítě.

Pomocné vinutí je dimenzováno na menší proud než hlavní vinutí. Snahou je, aby jeho magnetické účinky vytvářely spolu s magnetickými účinky hlavního vinutí takové pole, které se co nejvíce blíží poli kruhovému. Těměř kruhového magnetického pole lze však dosáhnout v podstatě pouze při jmenovitém chodu motoru, v ostatních případech je pole deformováno na eliptické.

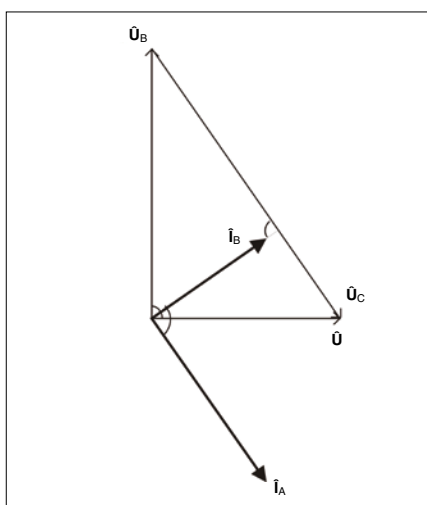
Při napájení pomocného vinutí je snahou dosáhnout takových podmínek, aby bylo možné motor buď pouze rozběhnout v požadovaném směru dosažením nenulového záběrného momentu, nebo optimalizovat chod i v okolí jmenovitého zatížení, kdy je proud pomocné fáze posunut o 90° oproti proudu hlavní fáze. Efektivní magnetické působení hlavní a pomocné fáze by v optimálním případě mělo být stejné.

Nejčastěji se dosahuje potřebného fázového posunu proudu pomocné fáze řazením kondenzátoru do série s pomocným vinutím a napájením této sériové kombinace z jednofázového zdroje paralelně s hlavním vinutím. Optimalizace konstrukce motoru i volby velikosti kapacity kondenzátoru se může uskutečnit buď s ohledem na co největší záběrný moment, nebo s ohledem na co nejpříznivější vlastnosti (moment, ztráty, účinnost, pulzace momentu, hluk) při chodu s konkrétním, typicky jmenovitým zatížením.

Z hlediska optimalizace konstrukce motoru na maximální záběrný moment je nejvýhodnější, má-li pomocné vinutí malý počet závitů. V tomto případě je zároveň výhodné volit co největší kapacitu rozběhového kondenzátoru. Používají se speciální elektrolytické kondenzátory pouze pro rozběh. Po rozběhu se kondenzátor odpojí a motor pracuje s čistě jednofázovým napájením. Elektrolytické kondenzátory pro tyto aplikace mají kapacitu přes $100 \mu\text{F}$.

Pro dosažení co nejsouměrnějšího pole při chodu v okolí jmenovitého zatížení je vhodný větší počet závitů pomocné fáze a menší kapacita kondenzátoru. Tato varianta je v současnosti rozšířenější. Používané kondenzátory mají papírové dielektrikum a jsou spolu s pomocným vinutím připojeny trvale. Kapacity kondenzátorů trvale připojených s pomocným vinutím k napájecímu zdroji bývají řádově desítky μF . Při jejich provozu je trvale připojený kondenzátor zdrojem ztrátového tepla, které se zvyšuje s rostoucí frekvencí proudu, včetně vlivu vyšších harmonických. Kromě tepelného dimenzování kondenzátoru je třeba věnovat pozornost dimenzování napětovému, neboť – jak je zřejmé i z obr. 2 – napětí kondenzátoru je vyšší než napětí napájecí. Optimalizace vinutí a kapacity trvale připojeného kondenzátoru zabezpečuje při jmenovitém zatížení motoru dosažení značné souměrnosti točivého pole, a tím i dobré účinnosti, malých ztrát, nízké hladiny hluku a dobrého účinku za tohoto stavu, nikoliv však při rozběhu. Situaci, ve které se nachází mo-

tor v optimálním stavu, zachycuje obr. 2 – U je napětí napájecí sítě, U_B je napětí pomocného vinutí, U_C je napětí kondenzátoru, I_A je proud hlavního vinutí a I_B je proud pomocného vinutí. Zachování tohoto optimálního stavu při dané kapacitě trvale připojeného kondenzátoru je podmíněno konstantní efektivní hodnotou a frekvencí napájecího napětí a konstantním zatěžovacím momentem. Změnou jedné z uvedených veličin dojde k rozvážení fázorového diagramu na obr. 2 – proud hlavní a pomocné fáze přestávají být vzájemně kolmé, pole ve stroji se deformuje, klesají moment a účinnost motoru a vzrůstají ztráty a hluk.



Obr. 2. Fázorový diagram jednofázového asynchronního motoru při optimálním chodu

V některých případech, kdy má pomocné vinutí umožnit jen rozběh motoru, je možné místo řazení kondenzátoru zvětšit odpor pomocného vinutí. Tato koncepce je z hlediska velikosti a průběhu momentu méně výhodná než řazení kondenzátoru, avšak jde o řešení konstrukčně jednodušší. U motoru určeného pro odporový rozběh je totiž často pomocné vinutí z mosazného drátu a jeho odpor je až pětkrát větší než odpor hlavního vinutí. Zároveň má pomocné vinutí menší počet závitů než hlavní vinutí, aby při rozběhu protékal tímto vinutím co největší proud a bylo dosaženo co největšího momentu. Při rozběhu s odporovým pomocným vinutím však není možné dosáhnout poměrů z obr. 2, tj. kolmosti proudů hlavního a pomocného vinutí. Motor konstruovaný pro odporový rozběh není vhodný pro rozběh kapacitní a naopak. Vzhledem k uvedeným nedostatkům se v současnosti používají motory s odporovým rozběhem velmi málo.

4. Vlastnosti jednofázového asynchronního motoru s frekvenčním řízením

Optimální provozní stav jednofázového asynchronního motoru s trvale připojeným

kondenzátorem v obvodu pomocného vinutí je charakterizován fázorovým diagramem na obr. 2. Závislost zachování podmínek z obr. 2, tedy kolmost proudů hlavního a pomocného vinutí, na podmínkách napájení je zřejmá i ze vztahu pro optimální kapacitu kondenzátoru v obvodu pomocného vinutí:

$$C_{\text{opt}} = \frac{I_B}{2\pi f U_C} \quad (1)$$

kde

f je frekvence napájecího napětí,

U_C napětí kondenzátoru,

I_B proud pomocné fáze.

Pro zachování točivého pole s minimem rušivých složek, tzn. pro dosažení optimálních vlastností motoru, je nutné zachovat fázový posun 90° mezi proudy hlavní a pomocné fáze a zachovat konstantní poměr mezi velikostmi proudů hlavní a pomocné fáze, tj. $I_B = kI_A$, kde k je konstanta.

Při frekvenčním řízení třífázového asynchronního motoru se v nejjednodušším případě mění lineárně s frekvencí i efektivní hodnota napětí. Tím je dosaženo stálého magnetického toku stroje a současně i stálého maximálního momentu a stále tvrdosti mechanické charakteristiky při proměnné frekvenci. Stejný požadavek i kritérium řízení platí i v případě jednofázového asynchronního motoru. Při proměnné napájecí frekvenci se však problémem stává změna optimální hodnoty kapacity kondenzátoru zařazeného v pomocné fázi. Z uvedeného vztahu (1) je zřejmé, že změnil-li se frekvence napájecího napětí (a tím i jeho efektivní hodnota) na polovinu, zvětší se hodnota optimální kapacity na čtyřnásobek původní velikosti. Při běžném provozu není frekvenčně závislá změna kapacity kondenzátoru řazeného sériově s pomocným vinutím reálná. Proto se také při jakékoliv jiné frekvenci než jmenovité (ale i při jiném zatížení než jmenovitém) deformuje fázorový diagram z obr. 2 – proudy hlavního a pomocného vinutí přestávají být vzájemně kolmé, zvyšuje se deformace pole ve stroji, klesá moment, vzrůstají ztráty a hluk motoru a klesá účinnost. Nepříznivý vliv změny frekvence je kvalitativně patrný i z uvedeného vztahu (1) – klesá-li hodnota frekvence a napětí, klesá výrazně proud kondenzátoru a pomocného vinutí, klesá i moment. Naprosto nevyhovující je situace při pokusu o frekvenční rozběh, neboť při malé nebo nulové frekvenci je proud pomocného vinutí tak malý, že je jeho momentové působení bezvýznamné – pomocné vinutí se v podstatě neuplatní a motor není možné tímto způsobem rozběhnout. Tyto vlastnosti jsou patrné z výsledků měření, které jsou uvedeny v dalším textu. Kromě popsané nevýhody frekvenčně řízeného jednofázového motoru přistupují i další.

V dále uvedených bodech jsou shrnuty přehledně nejvýznamnější skutečnosti související s frekvenčním řízením jednofázových motorů:

1. Jednofázové asynchronní motory jsou principiálně koncipovány pro provoz na jednofázové síti s konstantní frekvencí a efektivní hodnotou napětí s málo proměnným zatížením. V tomto stavu je možné dosahovat u motoru s pomocným vinutím připojeným přes kondenzátor přibližně stejných vlastností (moment, účinnost, hlučnost) jako u třífázového motoru. Při jakémkoliv vychýlení z tohoto stavu se vlastnosti jednofázového motoru výrazně zhoršují. Možnost frekvenčního řízení se v konstrukci jednofázového asynchronního motoru nezohledňuje. Pro provoz frekvenčně řízených pohonů na jednofázové síti se předpokládá výhodnější použití třífázových motorů napájených z měničů s jednofázovým vstupem.
2. Při výrazných výkyvech zatížení, změnách napájecí frekvence nebo efektivní hodnoty napětí se motor dostává v důsledku výrazné deformace pole do velmi nevýhodného režimu, při kterém klesá moment, roste proud, ztráty a hluk a klesá účinnost.
3. Při pokusu o frekvenční rozběh se při malých frekvencích vůbec neuplatní pomocné vinutí se sériově řazeným kondenzátorem. Rozběh je třeba realizovat zvýšením napětí a frekvence na jmenovitou hodnotu, což však vyžaduje větší proudové dimenzování měniče. Rozběh, kdy se motor nejprve roztočí naplno a potom zpomalí na požadovanou frekvenci, není technicky a bezpečnostně zcela korektní.
4. Při provozu frekvenčně řízeného jednofázového asynchronního motoru v klasickém zapojení a při napájení z uzpůsobeného měniče frekvence i při provozu z klasického měniče frekvence, kde se napájení hlavního a pomocného vinutí rozloží na všechny tři výstupní fáze, měnič vyžaduje v každém případě proudové a výkonové předdimenzování – jednofázový motor představuje pro měnič velmi nesouměrnou zátěž.
5. Kondenzátory ani jednofázové motory nejsou koncipovány pro provoz s pulzním napájením (zvýšené napětové namáhání izolace motoru, zvýšené namáhání dielektrika kondenzátoru). Při napájení z měniče klesá životnost motoru i kondenzátoru a zvyšuje se riziko průrazu.
6. Kombinace měniče frekvence a jednofázového motoru s odporovým rozběhem není výhodná z důvodu horších vlastností tohoto motoru, které se při frekvenčním řízení ještě dále zhoršují.
7. Frekvenčně řízený pohon s jednofázovým asynchronním motorem nemá žádné technické výhody ve srovnání s frekvenčně řízeným pohonem s třífázovým asynchronním motorem.

5. Cíle měření

Cílem vykonaných měření bylo experimentálně vyhodnotit možnosti a vlastnosti frekvenčně řízených pohonů s jednofázovými asynchronními motory s běžným měničem frekvence určeným pro třífázové motory a se speciálně upraveným měničem pro jednofázové asynchronní motory. Bylo uskutečněno srovnání s vlastnostmi neregulovaného pohonu napájeného z jednofázové sítě 230 V/50 Hz s vlastnostmi pohonu s třífázovým frekvenčně řízeným asynchronním motorem a s vlastnostmi pohonu s třífázovým

- Danfoss typ VLT Microdrive FC-051PK-75S2E20H3,
- 200 až 240 V IN; 0 až IN V OUT; 11,6 A IN; 4,2 A OUT; 0,75 kW.

Specifikace měniče pro jednofázový motor – CONV2:

- typ Inverttektidrive E1 ODE1-12075-IN,
- 200 až 240 V IN; 7 A OUT; 0,75 kW.

Specifikace měniče pro třífázový motor – CONV3:

- Danfoss typ VLT Microdrive FC-051PK-37S2E20H3,
- 200 až 240 V IN; 0 až IN V OUT; 6,1 A IN; 2,2 A OUT; 0,37 kW.

Tabulka s přehledem nejvýznamnějších zkoušených konfigurací

Číslo konfigurace	Konfigurace	Poznámka
1	MOT2 napájený ze sítě 230 V/50 Hz	
2	MOT2 napájený z CONV3 dvoufázově přes C	XXX ^{*)}
3	MOT2 napájený z CONV3 dvoufázově přes R	XXX
4	MOT2 napájený z CONV3 třífázově přes C	XXX
5	MOT2 napájený z CONV3 třífázově přes R	XXX
6	MOT2 napájený z CONV1 dvoufázově přes C	XXX
7	MOT2 napájený z CONV1 dvoufázově přes R	XXX
8	MOT2 napájený z CONV1 třífázově přes C	XXX
9	MOT2 napájený z CONV1 třífázově přes R	
10	MOT2 napájený z CONV2 jednofázově přes C	
11	MOT1 napájený ze sítě 3× 230 V v zapojení do Δ	
12	MOT1 napájený z CONV1 v zapojení do Δ	

^{*)}Symbol XXX ve sloupci Poznámka označuje konfigurace, které nebyly proměřovány, neboť pohon nebylo možné v těchto konfiguracích v podstatě provozovat ani v omezeném rozsahu.

asynchronním motorem napájeným ze sítě 3× 230 V/50 Hz. Měření bylo vykonáváno s motory o výkonech 520 W (jednofázový motor) a 550 W (třífázový motor).

5.1 Specifikace točivých strojů a měničů použitých při zkouškách

Měření byla vykonávána na zkušebním stavu se stejnosměrným cize buzeným dynamometrem. Dynamometr pracoval v generátorickém režimu a brzdná energie byla mařena v rezistorech připojených k rotorovému vinutí dynamometru.

Točivý moment byl snímán prostřednictvím měření silové reakce otočně uloženého statoru dynamometru. Otáčky byly snímány pulzním čidlem.

Specifikace dynamometru:

- typ FRA E0150,
- 120 V DC; 2 kW; 16,6 A DC; 7 000 min⁻¹.

Specifikace třífázového motoru – MOT1:

- typ FAERGO 4AMCH80D4KUPU3,
- Δ/Y 220/380 V; 2,9/1,7 A; 50 Hz; 550 W; 1 370 min⁻¹, cos φ = 0,70; 3,83 N·m.

Specifikace jednofázového motoru 520 W a souvisejícího kondenzátoru – MOT2:

- typ TYCO BRP474ENTZ B4T17247,
- 220 až 230 V; 3,3 A; 50 Hz; 520 W; 1 300 min⁻¹; 3,82 N·m,
- kondenzátor DNA MKP; 14 μF; 450 V.

Specifikace měniče pro třífázový motor – CONV1:

5.2 Přehled vykonaných zkoušek a měření

Na zkušebním stavu byly vykonány zkoušky rozběhů a provozu v různých konfiguracích zapojení pohonu. Konfigurace, u kterých bylo dosaženo samostatného rozběhu motoru a které vykazovaly další vlastnosti slučitelné minimálně s omezeným provozem pohonu, byly důkladně proměřeny. Byly sledovány zejména momentové vlastnosti motorů, odběr proudu a účinnost.

V konfiguracích 2, 3, 4 a 5 nebylo možné motor rozběhnout, neboť měnič nebyl schopen dodat dostatečný proud ani v případech, kdy byly činěny pokusy rozběhu s dodáním počátečního mechanického impulsu.

Při zkouškách s měničem CONV1 byla zadána kompenzace skluzu 0 % a vypnuta ochrana symetrie odběru na výstupu měniče.

V konfiguraci 6 nebylo možné motor rozběhnout bez dodání mechanického impulsu. I poté však i v běhu bez zatížení docházelo u měniče k hlášení proudového přetížení v případě, že byl nastaven v měniči jmenovitý proud 3,3 A. Stejně vlastnosti měl pohon i v konfiguraci 8 při nastavení proudu 3,3 A. Byla-li zvýšena hodnota jmenovitého proudu, zadávaná do měniče na 4,2 A, rozbíhal se motor sám pouze při mechanickém odpojení dynamometru; při jeho připojení bylo nutné zadat pro rozběh mechanický impuls. Po tomto rozběhnutí byl pohon již funkční. Každou

pádně však zadání většího proudu do měniče oproti jmenovitému proudu motoru není technicky korektní.

V konfiguraci 7 byla dále ověřována možnost řazení odporu 200 Ω do série s pomocnou fází. V tomto případě se pohon sám rozběhl, ale již ve stavu bez zatížení odebíral motor proud 3,5 A, což je více než proud jmenovitý.

Byla ověřována i možnost zvýšení kapacity kondenzátoru na 60 μF nebo řazení kombinace C a R do obvodu pomocného vinutí. Ve všech případech řazení C však nebylo dosaženo samostatného rozběhu pohonu standardním způsobem jako u třífázových frekvenčně řízených motorů.

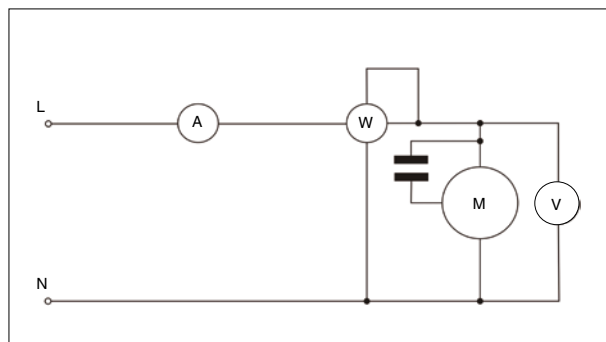
Po teoretické stránce koresponduje nemožnost frekvenčního rozběhu motoru s kondenzátorem se skutečností, kdy při nulové nebo nízké frekvenci protéká pomocným vinutím velmi malý proud se zanedbatelným momentovým působením. Při pokusu o zvýšení frekvence se však u stojícího motoru aktivuje proudové omezení.

Pohon nebyl v konfiguracích 6, 7 a 8 detailně proměřován, protože vzhledem k nemožnosti samostatného rozběhu, popř. vzhledem k odběru příliš velkého proudu, nemá jeho použití v praxi smysl.

6. Informace a závěry k proměřovaným konfiguracím

Konfigurace 1

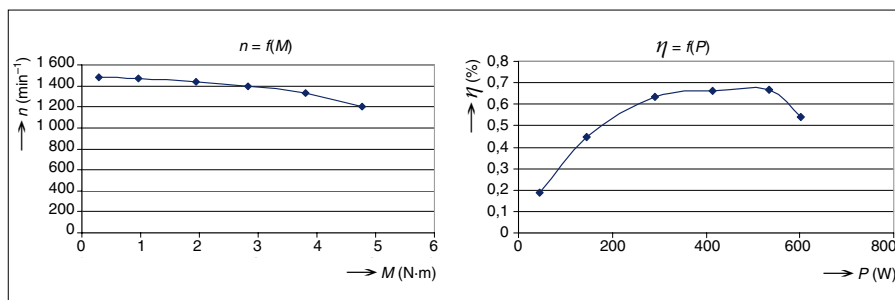
MOT2 byl proměřován při napájení ze sítě 230 V/50 Hz. Schéma zapojení je na obr. 3. Z výsledků měření v konfiguraci 1 jsou patrné dobré momentové vlastnosti motoru napájeného ze sítě i dobrá účinnost. Rovněž nedocházelo k neúměrnému nárůstu proudu.



Obr. 3. Elektrické připojení měřeného motoru v konfiguraci 1 při frekvenci 50 Hz

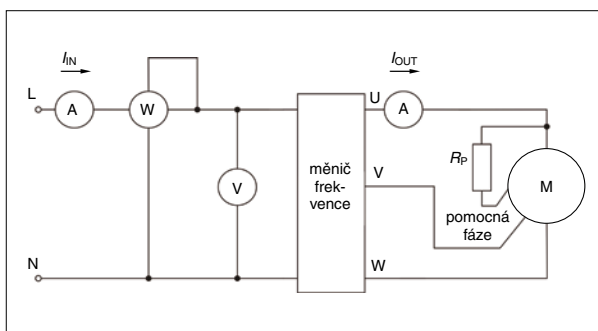
Konfigurace 9

V této konfiguraci je možné pohon v omezené míře provozovat, neboť dochází k samostatnému frekvenčnímu rozběhu a motor je možné zatěžovat. Vlastnosti této konfigurace byly proměřeny pro čtyři hodnoty rezistoru řazeného sériově s pomocným vinutím: 100, 200, 400 a 0 Ω. Průběhy byly proměřeny pro frekvence 20, 30, 40 a 50 Hz.



Obr. 4. Závislosti zjištěné v konfiguraci 1

Z výsledků je zřejmé, že při této konfiguraci nebylo možné dosáhnout jmenovitého momentu motoru, neboť proud motoru při zvyšování momentu roste rychleji než při napájení ze sítě – např. při $f = 40$ Hz a $R_p = 100 \Omega$ odebíral motor proud 4 A (jmeno-



Obr. 5. Elektrické připojení měřeného motoru v konfiguraci 9

vitá hodnota 3,3 A) při momentu 3 N·m (jmenovitá hodnota 3,82 N·m). S klesající hodnotou odporu rezistoru sériově řazeného k pomocnému vinutí roste dosažitelný moment, ale zároveň roste proudový odběr. Při tomto provozu je špatná účinnost. Její hodnota nepřekročí v žádném z případů výrazně 50 %, v mnoha případech se pohybuje pod 20 %. Ve většině případů účinnost roste s rostoucí napájecí frekvencí.

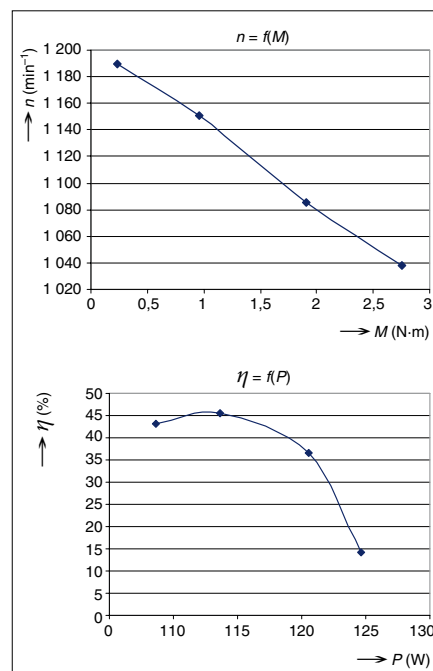
V této konfiguraci by bylo možné provozovat motor nouzově s odporem mezi 0 až 100 Ω. Tuto konfiguraci nelze v žádném případě doporučit pro běžný provoz vzhledem k malé momentové zatížitelnosti motoru, malé účinnosti a velkému proudovému odběru. Navíc motor konstruovaný pro kapacitní pomocnou fázi není vhodný pro použití rezistoru v sérii s pomocným vinutím.

Konfigurace 10

V této konfiguraci je motor možné v omezeném rozsahu provozovat, včetně frekvenčního řízení. Prvním nedostatkem tohoto způsobu je nutný počáteční rozběh na frekvenci 50 Hz a teprve následně zpomalení na zada-

nou rychlost. Principiálně však rozběh motoru v této konfiguraci jinak řešit nelze.

Měření byla vykonána pro frekvence 20, 30, 40 a 50 Hz. S klesající frekvencí velmi výrazně klesá dosažitelný moment a účinnost. Při frekvencích 20, 30 a 40 Hz bylo dosaženo mezního momentu s nepřiměřeným nárůstem proudu – např. při frekvenci 30 Hz dosáhl proud jmenovité hodnoty při momentu rovném 50 % jmenovité hodnoty. Při dalším zvýšení zatížení klesaly otáčky a proud rostl v podstatě na hodnotu proudu nakrátko. Ani při frekvenci 40 Hz nebylo možné dosáhnout jmenovitého momentu. Teprve při frekvenci 40 Hz byla překročena hodnota účinnosti 50 %.



Obr. 6. Závislosti zjištěné v konfiguraci 9 při frekvenci 40 Hz a $R_p = 100 \Omega$

Při frekvenci 50 Hz bylo dosaženo horších výsledků než při napájení ze sítě. Bylo dosaženo jen 95 % jmenovitého momentu, otáčky vykazovaly strmější pokles při rostoucím mo-

mentu, byl větší proudový odběr. Při zatížení 50 a 75 % jmenovitého momentu dosahuje účinnost akceptovatelných hodnot srovnatelných s hodnotami při síťovém napájení. Příčinou horších vlastností motoru při napájení z měniče oproti napájení ze sítě je zřejmě úby-

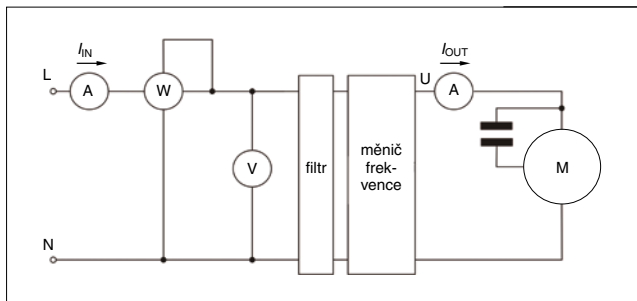
Konfigurace 12

Měření byla vykonána pro frekvence 20, 30, 40 a 50 Hz. Výsledky potvrdily, že měnič frekvence nedegraduje nijak při různých frekvencích vlastnosti motoru. Při všech frekvencích měniče byly, stejně jako při napájení

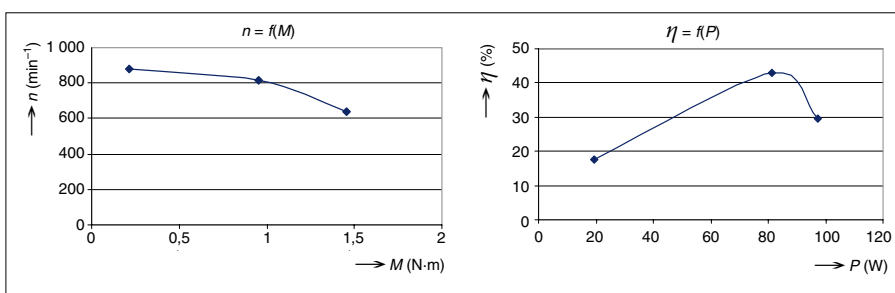
natelný sklon mechanické charakteristiky – pokles otáček o 100 až 110 min⁻¹. Průběhy účinností jsou v souladu s teorií – při rostoucích otáčkách roste účinnost, při frekvenci 50 Hz je účinnost srovnatelná s účinností při síťovém napájení. Např. při jmenovitém momentu je při frekvenci 50 Hz při napájení ze sítě účinnost 71,36 % (3× 230 V při zapojení do Δ), při napájení z měniče 69,60 %. To odpovídá účinnosti měniče 97,53 %. Kvalitativně lze usuzovat, že reálně může být účinnost měniče nižší, případná odchylka této hodnoty může být dána zejména konečnou přesností měřících metod a měřením neharmonického příkonu na vstupu měniče.

7. Celkové zhodnocení výsledků

Z hlediska možné konkrétní aplikace jednofázově napájeného frekvenčně řízeného pohonu s asynchronním motorem přicházejí z testovaných možností v úvahu konfigurace 10 a 12, tj. jednofázový asynchronní motor s pomocnou kapacitní fází napájený ze speciálně přizpůsobeného měniče frekvence s jednofázovým vstupem a výstupem a třífázový motor napájený z měniče frekvence s jednofázovým vstupem a třífázovým výstupem. Jak již bylo uvedeno, konfigurace 9 je vzhledem k nutnosti doplnění rezistoru, vzhledem ke zvýšenému proudovému odběru, malému



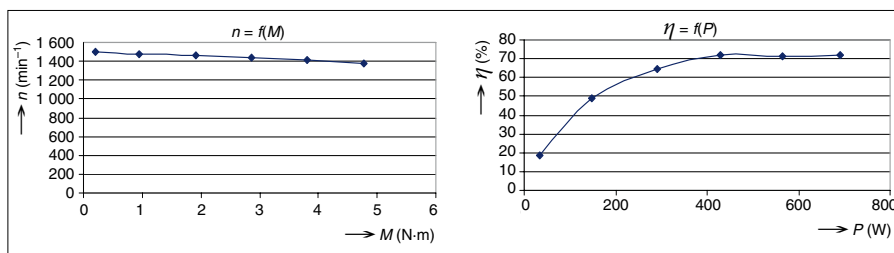
Obr. 7. Elektrické připojení měřeného motoru v konfiguraci 10



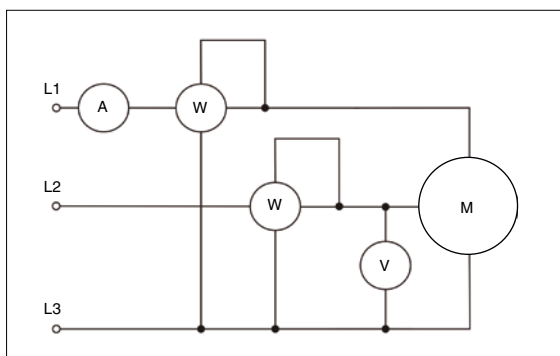
Obr. 8. Závislosti zjištěné v konfiguraci 10 při frekvenci 30 Hz

tek napětí na měniči daný principiálně činností vstupního jednofázového diodového usměrňovače s vyhlazovacím kondenzátorem a další jevy spojené s činností měniče frekvence.

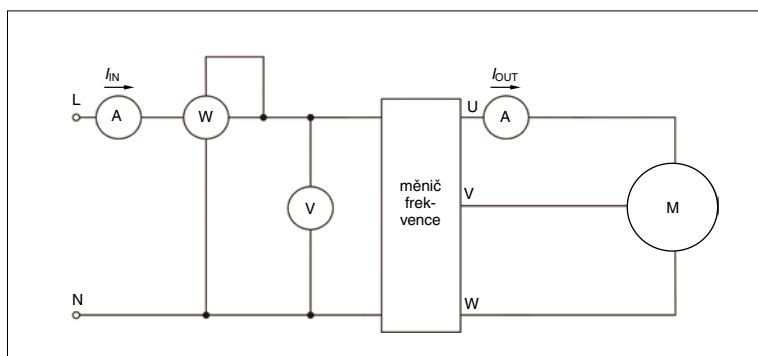
Při použití této konfigurace je možné provozovat pohon jen s omezenou účinností a s omezeným momentem. Především je však možné řízení otáček s akceptovatelnými vlastnostmi pohonu jen v úzkém rozsahu, přibližně od 40 Hz výše.



Obr. 10. Závislosti zjištěné v konfiguraci 11 při frekvenci 50 Hz



Obr. 9. Elektrické připojení měřeného motoru v konfiguraci 11



Obr. 11. Elektrické připojení měřeného motoru v konfiguraci 12

Konfigurace 11

Tato konfigurace byla proměřována především z důvodu srovnání s konfigurací 12. V této konfiguraci má motor téměř stejné momentové vlastnosti jako v konfiguraci 12 a pracuje s korespondujícími hodnotami účinnosti.

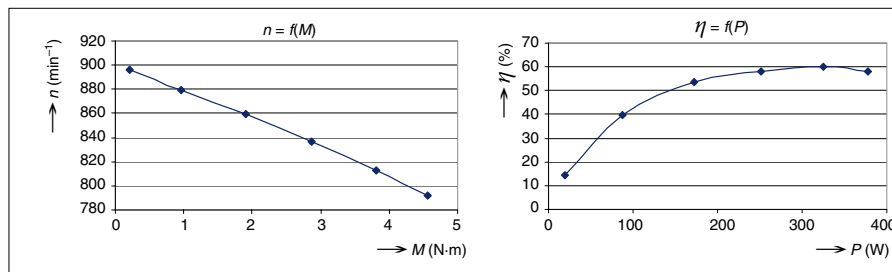
ze sítě, bez problému proměřeny charakteristiky do 120 až 125 % jmenovitého momentu. Při všech frekvencích měniče i při napájení ze sítě byly proudové odběry motoru v měřené oblasti srovnatelné. Při všech frekvencích při napájení z měniče i při napájení ze sítě byl v rozsahu měřených momentů srov-

dosazitelnému momentu a nízké účinnosti použitelná pouze nouzově. Uskutečněná měření potvrdila platnost bodů 1 až 7, které byly uvedeny v závěru teoretické části tohoto příspěvku. Z hlediska provozu pohonu jsou při srovnání výsledků měření v konfiguracích 10 a 12 nejvýraznější tyto skutečnosti:

In some special applications are tendencies the frequency converters for continuous speed control of the one-phase asynchronous motors to use. The one-phase asynchronous motors basic properties and the qualities of this motor with the frequency converter are presented in this paper. The experiments are done with the various configurations of the drive with the frequency controlled one-phase asynchronous motor. The experiment results are presented. The recommendations for using of this drive are in conclusions.

- I. Při frekvenci 20, popř. 30 Hz lze s použitím jednofázového motoru dosáhnout necelé čtvrtiny, popř. poloviny jmenovitého momentu. U třífázového motoru je možné pracovat bez problému i s momentovým přetížením. Při provozu s jednofázovým motorem je čtyřikrát až pětkrát větší pokles otáček s rostoucím momentem oproti třífázovému motoru. Účinnost pohonu s jednofázovým motorem je oproti pohonu s třífázovým motorem poloviční až dvoutřetinová.
- II. Při 40 Hz je možné jednofázový motor zatěžovat do asi dvou třetin jmenovitého mo-

mentu. Oblasti jsou však vlastnosti pohonu s jednofázovým motorem výrazně horší než s motorem třífázovým. V poněkud menší míře se projevily velmi nepříznivé momentové vlastnosti jednofázových frekvenčně řízených motorů u pohonů zařízení s kvadratickou či kubickou mechanickou charakteristikou (např. ventilátory), kde s klesajícími otáčkami výrazně klesá moment zátěže. Ani v případě této zátěže však nejsou vlastnosti pohonu optimální a rychlost lze řídit jen přibližně v rozsahu od 40 do 50 Hz. S třífázovým motorem lze dosahovat dobrých vlastností v celém rozsahu testovaných frekvencí.



Obr. 12. Závislosti zjištěné v konfiguraci 12 při frekvenci 30 Hz

mentu. Přibližně od poloviny jmenovitého momentu velmi rychle klesají otáčky se zatížením. V této oblasti velmi rychle klesá i účinnost. Účinnost jednofázového motoru je oproti třífázovému výrazně nižší. Mechanické vlastnosti třífázového motoru při napájení z měniče jsou srovnatelné s vlastnostmi při síťovém napájení (pokles otáček se zatížením, dosažitelný moment).

- III. Při frekvenci 50 Hz při napájení z měniče je možné zatěžovat jednofázový motor téměř do jmenovitého momentu, avšak při větším proudovém odběru než při napájení ze sítě. Maximální účinnost pohonu s jednofázovým motorem napájeným z měniče frekvence je při frekvenci 50 Hz téměř o 10 % nižší než účinnost pohonu s třífázovým motorem. Velikost poklesu otáček s rostoucím momentem je u jednofázového motoru přibližně čtyřikrát větší než u třífázového motoru.

Z uvedeného srovnání je zřejmé, že po stránce momentových vlastností, účinnosti, proudového odběru a tvrdosti mechanických charakteristik je použití frekvenčně řízeného jednofázového motoru jednoznačně velmi nevýhodné. V podstatě použitelný se zdá být tento pohon pouze v úzkém rozsahu otáček odpovídajících frekvencím od 40 do 50 Hz. I v této

V neprospěch použití jednofázového motoru hovoří i nutné předdimenzování měniče a zvýšené riziko poruch souvisejících s průběhem proudu kondenzátoru, který není čistě sinusový. Lze předpokládat, že nutnost použití kondenzátoru a předdimenzování měniče ovlivní nepříznivě i cenu.

8. Závěr a doporučení

Vzhledem k uvedeným skutečnostem lze konstatovat, že v době, kdy jsou běžně dostupné měniče s jednofázovým vstupem a třífázovým výstupem, nemá po technické stránce použití jednofázového frekvenčně řízeného asynchronního motoru žádné opodstatnění, neboť nepřináší oproti pohonu s třífázovým asynchronním motorem žádné výhody, ale naopak výrazně degraduje vlastnosti pohonu. Proto se vždy při požadavku na plynulé řízení otáček asynchronního motoru vyplatí hledat cesty k použití motoru třífázového.

Literatura

- [1] Štěpina, J.: *Jednofázové indukční motory*. SNTL Praha, 1957.
- [2] Firemní literatura Danfoss.
- [3] Firemní literatura Invertex.



doc. Ing. Jaroslav Novák, CSc., ukončil studium na Fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze v oboru silnoproudá elektrotechnika v roce 1989. V roce 1992 ukončil studium ve

vědecké výchově na téže fakultě na Katedře elektrických pohonů a trakce. Od roku 1992 pracoval jako odborný asistent, od roku 2003 jako docent na Ústavu přístrojové a řídicí techniky Fakulty strojní ČVUT v Praze. V letech 1995 až 2001 úzce spolupracoval s firmou Elektrosystém Praha, s. r. o., v oblasti vývoje a využití elektrických pohonů a řídicích systémů v průmyslových aplikacích, od roku 1998 úzce spolupracuje s Dopravní fakultou Jana Pernera Univerzity Pardubice v oblasti elektrických pohonů a mikroprocesorového řízení v dopravní technice. Svou odbornou činností zaměřuje zejména do oblastí elektrických pohonů, výkonové elektroniky, testování elektromechanických soustav a mikroprocesorového řízení.



Ing. Jan Janeček, absolvoval obor silnoproudá elektrotechnika na ČVUT FEL v roce 1993. V letech 1995 až 1996 pracoval u společnosti Intherm Praha, s. r. o., jako projektant elektro. Od roku 1997 působí ve společnosti Danfoss, s. r. o., divize Elektrické pohony – prodej a technická podpora měničů frekvence a softstartérů pro aplikace v oblasti HVAC.



Ing. Hynek Václavík, absolvoval obor výkonová elektronika a elektrické pohony na Fakultě Elektrotechniky a informatiky VŠB – Technické univerzity Ostrava v roce 1996.

V letech 1996 až 1998 pracoval u společnosti FPD, a. s., v inženýringu výstavby BTS. V roce 1998 nastoupil do společnosti Danfoss, s. r. o., na pozici technického poradce pro oblast měničů frekvence a softstartérů. Poslední dva roky pracuje jako aplikační inženýr. Hlavní náplní jeho práce je implementace měničů frekvence a softstartérů pro řízení průmyslových aplikací.

Danfoss, s. r. o., je dceřiná společnost Danfoss A/S, která je největší průmyslovou společností Dánska. Tato nadnárodní skupina je přední světovou společností ve výzkumu, vývoji, výrobě, prodeji a servisu mechanických a elektronických komponent pro široké spektrum průmyslových oborů. Aktivita skupiny Danfoss Group se dělí do tří hlavních divizí: chladicí a klimatizační zařízení, topná a vodovodní zařízení a řešení pohonů, přičemž každá divize je světovou špičkou ve svém oboru.