

Frekvenční měniče a elektromotory

Ing. Mečislav Hudeczek, Ph.D.

V současné době jsou frekvenční měniče běžným akčním regulačním členem silnoproudých rozvodů a to především pro napájení asynchronních elektromotorů. Jsou využívány pro regulaci čerpadel, ventilátorů, pásových dopravníků atd. Je možno tvrdit, že konfigurace síť, střídač, elektromotor a poháněný mechanismus je velice zdařilá po všech stránkách, které lze na tomto schématu pozorovat.

Při řešení spousty problémů v technické praxi docházíme k těmto myšlenkám a závěrům.

1 Pohonné mechanismy a jejich nedostatky

Technická bezdemontážní diagnostika je velmi dobrým nástrojem pro provádění různých druhů kontrolních měření kvality a opotřebení pohonů včetně samotných pracovních mechanismů. Pro provádění těchto měření je nutné, aby pracovníci vykonávající tuto činnost měli vysokou úroveň znalostí z oblasti pohonů, a taktéž musí mít velmi dobré znalosti a zkušenosti z technické bezdemontážní diagnostiky. Na základě dlouhodobých zkušeností z oblasti provádění technické bezdemontážní diagnostiky v průmyslu všeho druhu včetně energetiky a uhelného hornictví lze jednoznačně prohlásit, že základem pro technická bezdemontážní diagnostikování rotačních strojů, včetně elektromotorů, je vibrodiagnostika, následuje termovize, diagnostika elektrických izolací, atd.

Při řešení technických problémů u zákazníků se setkávám s těmito nedostatky na nových pohonech, pohonech provozovaných nebo pohonech po opravě včetně pohonů havarovaných:

- Poddimenzovaný přívod poháněcí energie
- Špatná konfigurace sítě při regulaci elektrické energie střídači,
- Nelinearity systému regulace asynchronních elektromotorů s kotvou kroužkovou,
- Nedostatečně a nekvalitně provedený základ pod pohon
- Porušený základ pohonu provozováním
- Měkký základový rám pod pohonem
- Neodborně provedená montáž pohonu na základový rám
- Vliv pohonu na prostředí a prostředí na pohon
- Nevyhovující souosost hnacího a hnaného mechanismu pohonu
- Rezonance pohonu
- Výrobní nebo provozní závady na hnacím a hnaném mechanismu.

Při řešení výše uvedených problémů následně zjišťují chyby, které provedli pracovníci diagnostiky. Mezi chyby při provádění diagnózy patří:

- Špatně provedená frekvenční analýza naměřených spekter v jednotlivých bodech pohonu
- Měření provedeno pouze na strojní nebo elektrické části pohonu
- Konstrukční neznalost diagnostikovaného pohonu

2 Jeden příklad špatné instalace frekvenční měnič a elektromotor

Na základě objednávky z jisté organizace bylo provedeno firmou HUDECZEK Service, s. r. o. diagnostické měření vertikálního čerpadla 350-NVJW-450-85 včetně elektromotoru 250 kW, 400 V, 990 min⁻¹.

Předmětem měření bylo stanovení příčin nadměrného chvění a oteplení elektromotoru při jeho chodu v provozních podmínkách.

Elektromotor o výkonu 250 kW, 400 V byl provozován při provozních otáčkách 1230 min^{-1} . Jmenovité otáčky elektromotoru jsou zvýšeny z 990 min^{-1} na 1230 min^{-1} prostřednictvím zvýšení frekvence na frekvenčním měniči, přes který je elektromotor napojen.

Podle informací provozovatele neměl výrobce elektromotoru námitek, aby tento elektromotor byl provozován s těmito zvýšenými otáčkami.

Štítkové údaje elektromotoru a čerpadla jsou uvedeny níže.

Elektromotor: napájecí síť 50 Hz, výkon 250 kW, jmenovité napětí D/Y 400/690 V, D/Y 433/251 A, $\cos \phi$ 0,88, jmenovité otáčky 990 min^{-1} , axiální ložisko NU322 C3, radiální ložisko 7322 C3.

Čerpadlo: otáčky 1230 min^{-1} , dopravní výška 38 m, výkon 191 kW, průměr oběžného kola 470 mm, axiální ložisko NU2224.2, radiální ložisko 7320 CB.

Pro zjištění anomálií na elektromotoru byly sledovány tyto parametry:

- teplota ložiska elektromotoru
- teplota ložiska čerpadla
- vibrace na ložiscích elektromotoru
- vibrace na ložiscích čerpadla
- napájecí napětí elektromotoru
- odebíraný proud elektromotorem
- byla provedena analýza proudu a napětí z hlediska obsahu vyšších harmonických
- byla posouzena předložená technická dokumentace z hlediska dimenzování jednotlivých částí napájecího obvodu soustrojí elektromotor čerpadlo
- byl posouzen způsob mechanického uložení a provedení konstrukce pro spojení elektromotor a čerpadlo

Měření elektromotoru a čerpadla bylo provedeno od studeného stavu tj., stroje měly teplotu okolí. Čerpadlo bylo zatíženo na plný výkon, který je nutný pro běžné čerpání vod.

Rozmístění měřících bodů

Sledování teplot ložisek bylo provedeno odporovými teploměrnými čidly vyvedenými do velínu čerpací stanice. Měření vibrací bylo provedeno v horizontální a axiální rovině ve čtyřech místech na ložiscích elektromotoru a čerpadla. Viz obrázek č. 1.1 a č. 1.2.



Obr. 1.1. Vyznačení měřících bodů na elektromotoru



Obr. 1.2. Vyznačení měřících bodů na čerpadle

Průběh oteplení sledovaných ložisek

Axiální ložisko elektromotoru NU 322 bod M1



Obr. 1.3. Průběh oteplení axiálního ložiska elektromotoru NU 322 bod M1

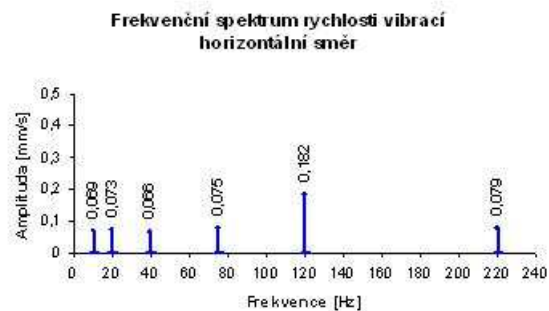
Měřením teploty na ložisku NU 322 elektromotoru byl prokázán lineární průběh oteplení ložiska. Teplotní charakteristika ohřevu ložiska nemá tendenci ke stabilizaci teploty. Teplota ložiska elektromotoru roste s dobou provozování.

Frekvenční analýza vibrací

Na soustrojí elektromotor – čerpadlo byly měřeny vibrace v hodnotách efektivní rychlosti a zrychlení amplitud. Pomocí rychlé Fourierovy transformace byla vytvořena frekvenční spektra. Byly sledovány změny amplitud ve frekvenčních spektrech s ohledem na oteplení elektromotoru.

Frekvenční spektra rychlosti vibrací elektromotoru na začátku zkoušky

Měřící bod M1H



Obr. 1.4. Frekvenční spektrum rychlosti vibrací v měřícím bodě M1H

Ve frekvenčním spektru je dominantní amplituda na frekvenci 122,5 Hz. Zvýšení vibrací na této amplitudě je způsobeno nesymetrickým elektromagnetickým polem. V průběhu dalších měření se amplituda na této frekvenci výrazně nemění. Hodnoty vibrací na 1x a 2x otáčkové frekvenci jsou nízké.

Elektromotor

Sledováním teplotního pole na statoru elektromotoru byl zjištěn nadměrný ohřev uprostřed statoru, tj. v okolí statorového a rotorového vinutí. V oblasti ložisek byly teploty mnohem nižší. Ve frekvenčních spektrech v měřicím místě M1H je patrný vysoký nárůst amplitud rychlostí vibrací na frekvenčních složkách 20 Hz a 40 Hz již po 1 hodině provozu stroje. Po 2 hodinách provozu dosáhla hodnota amplitud chvění na 20 Hz nepřipustné hodnoty. V měřicím místě M2H je rovněž alarmující nárůst rychlosti vibrací jak na frekvenci 20 Hz tak i 40 Hz. Zde dosáhly hodnoty přijatelných mezí již při 1 hodině provozu stroje.

Obecným jevem elektromotorů napojených přes frekvenční měniče je ta skutečnost, že elektromotory se více oteplují a také více vibrují. Musí být více pozornosti věnováno při projektování a navrhování výkonových parametrů pohonu, jeho chlazení, uložení a způsobu napojení na zdroj elektrickou energii.

Kontrolou uložení a provedení spojení elektromotor a čerpadlo bylo zjištěno, že spodní ložisko elektromotoru není chlazeno nuceným oběhem vzduchu, ale pouze vedením tepla v konstrukci. Tento způsob chlazení ložiska je nedostatečný.

Kontrolou předložené technické dokumentace elektrického napojení bylo zjištěno, že v projektu je uvedeno napojení elektromotoru pomocí dvou paralelních měděných kabelů o průřezu 120 mm². Ve skutečnosti je elektromotor napojen dvěma paralelními měděnými kabely každý o průřezu 95 mm². V dokumentaci není zaznamenána změna projektu projektantem. Odborníky firmy HUDECZEK SERVICE, s. r. o. byl v průběhu prohlídky proveden přepočítání napojení elektromotoru s výsledkem, který také připouští napojení elektromotoru pomocí měděných kabelů o průřezu 95 mm².

Pro spolehlivější provoz je výhodnější napojit elektromotor pomocí dvou paralelních měděných kabelů o průřezu 120 mm².

Napájecí délka kabelu elektromotoru předmětného čerpadla je podle technické dokumentace 55 m. Výkon elektromotoru je 250 kW při napájecím napětí 400 V. Pohon je regulován pomocí frekvenčního měniče bez výstupních tlumivek a vstupních filtrů. Při tomto výkonu a délce napájecího kabelu není takováto konfigurace vhodná pro zabezpečení spolehlivého chodu pohonu.

Čerpadlo je poháněno elektromotorem 250 kW se jmenovitými otáčkami 990 min⁻¹ při napětí 400 V a frekvencí napájecího napětí 50 Hz. Pro dosažení potřebných otáček je na poháněném čerpadle frekvence napájecího napětí elektromotoru pomocí frekvenčního měniče zvýšena cca 61 Hz. Motor pracuje s otáčkami 1200 min⁻¹ a čerpadlo je využito na plný výkon. Zvednutím jmenovitých otáček elektromotoru daných výrobcem tj. 990 min⁻¹ na 1200 min⁻¹ dochází ke snížení momentu elektromotoru. Tato skutečnost je dána momentovou charakteristikou asynchronních elektromotorů obecně. Při zachování potřebného momentu na čerpadle dochází ke zvětšení proudu v rotoru elektromotoru. Zvýšený proud vytváří s jeho kvadrátem větší teplo, na které konstrukce elektromotoru není dimenzována a neumí toto teplo v potřebné krátké době odvést a snížit na provozní přijatelnou teplotu. Zvyšování otáček poháněcího elektromotoru čerpadla je nevhodné.

Fenomén zvyšování chvění při postupném oteplování elektromotoru lze vysvětlit tím, že má elektromotor ve studeném stavu určitý vnitřní činný odpor, indukčnost a kapacitu. Totéž platí i pro napájecí kabel. Odpor, indukčnost a kapacita mají za studena určité hodnoty, které tvoří pro vyšší harmonické, kterými je elektromotor napájen, filtr a kompenzátor. Motor je při provozu ve studeném stavu klidný, což bylo potvrzeno měřeními. Při postupném zahřívání dochází ke změně základních parametrů napájecí sítě a elektromotoru, efekt filtrace a kompenzace vyšších harmonických ustupuje a elektromotor nadměrně vibruje.

Čerpadlo

Měřeními a analýzou frekvenčních spekter na ložiscích čerpadla byly detekovány zvýšené amplitudy na frekvencích 75 Hz a 122,5 Hz, které jsou dané vibracemi kardanové hřídele v místě spojky čerpadla. Hodnoty těchto amplitud se v časovém trendu výrazně neliší, takže můžeme vyloučit jakýkoliv vliv oteplení elektromotoru na vibrace čerpadla.

Závěr měření in situ a návrh na opatření

Závěrem nutno zdůraznit, že při vyhlášení výběrového řízení a následném projektování a schvalování provozovatelem bylo velmi málo věnováno výše uvedeným skutečnostem, především zkušenostem při výstavbě a provozování pohonů značných výkonů napájených z frekvenčních měničů. Výsledek je patrný z provozních problémů. Pro jejich odstranění a zajištění bezpečného a spolehlivého chodu předmětného čerpadla jsem navrhnul:

- Čerpadlo pohánět čtyřpólovým elektromotorem a otáčky snižovat pomocí frekvenčního měniče na otáčky potřebné pro čerpadlo.
- Provést výpočet a projekt cizího chlazení elektromotoru. Původní ventilátor elektromotoru demontovat. Při cizím chlazení elektromotoru by mohlo docházet ke snížení účinnosti.
- Provést úpravu ukotvení elektromotoru tak, aby bylo možné pomocí cizího nuceného větrného proudu chladit intenzivně i spodní ložiska elektromotoru.
- Samotný frekvenční měnič umístit do zvláštního rozvaděče a vybavit ho vnitřní rozvaděčovou klimatizací a filtry chránící napájecí síť. Rozvaděč s frekvenčním měničem umístit do těsné blízkosti elektromotoru tak, aby napájecí kabel z rozvaděče frekvenčního měniče nebyl delší než max. 3 m.
- Průřez napájecího kabelu volit Cu 240 mm².
- Celý systém napájení dořešit z hlediska elektromagnetické kompatibility (doposud také není řešen).

Jsou možná i jiná řešení, ale dle mých zkušeností jsou dalšími kroky metody pokus - omyl. Bude to mnohem nákladnější než řešení výše uvedené.

Realizace navržených opatření

Na základě výše uvedených doporučení provedl provozovatel výměnu elektromotoru se jmenovitými otáčkami 990 min⁻¹ při napětí 400 V za elektromotor se jmenovitými otáčkami 1489 min⁻¹ při napětí 400 V a otáčky snižoval pomocí frekvenčního měniče na potřebné otáčky 1200 min⁻¹. Tím byl zachován potřebný moment.

Dále byla provedena úprava nosného rámu elektromotoru tak aby bylo přirozeným větrným tahem chlazeno dolní ložisko elektromotoru.

3 Jeden příklad dobré instalace frekvenční měnič a elektromotor

V paměti se mi zchovalo, že elektromotory, které mají být napájeny z frekvenčních měničů musí mít speciální vlastnosti z hlediska magnetických vlastností statorových a rotorových plechů a taktéž je nutno věnovat pozornost jejich chlazení.

V poslední době, nakoupili v jedné organizaci frekvenční měniče a napojili jimi původní elektromotory, které pohánějí čerpadla. Jedná se elektromotory se jmenovitým napětím 500 V a jmenovitý výkon 75 kW a 160 kW. Motorů jsou řádově dvě desítky.

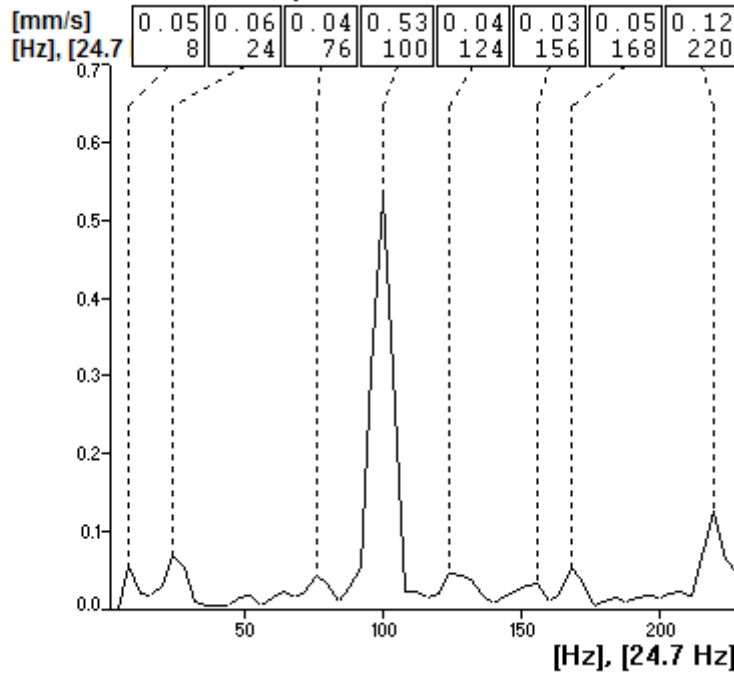
Na jednom 160 kW elektromotoru se poškodilo ložisko a tím došlo k havárii. Provozovatel měl k dispozici opět starý elektromotor, který byl několikrát převinutý.

Byli jsme provozovatelem požádáni, abychom posoudili vhodnost nasazení starého elektromotoru do obvodu s frekvenčním měničem.

Pro tyto expertizy má firma HUDECZEK SERVICE, s. r. o. Albrechtice vypracovaný metodický postup na posuzování starých elektromotorů a zjišťování vhodnosti pro další použití.

Prvním krokem posuzování je změření vibrací elektromotoru při chodu naprázdno, při rozpojené spojení od poháněného mechanismu.

ČERPADLO VT5 BEZ STŘÍDAČE\ELEKTROMOTOR, v.č. ,500 V, 160 k

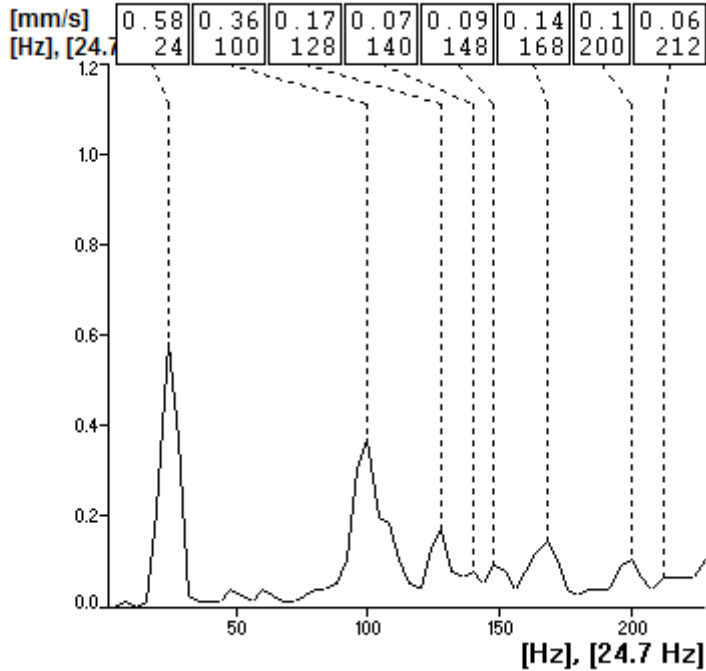


Obr. 3. 1.: Měřicí místo: ELEKTROMOTOR, v. č., 500 V, 160 kW, 1480 ot/min bez střídače a bez zatížení L2V 2. 3.2016 11:20:21 Rychlost MB2V TREND celkové hodnoty vibrací v [mm/s] 0.53

Ze spektra naměřených vibrací elektromotoru obr. 3. 1. při chodu naprázdno bez střídače je patrné, že harmonická na dvojnásobku frekvence sítě, to je 100 Hz, je ve spektru dominantní, první harmonická na frekvenci 24 Hz je velmi malá.

Ze spektrální analýzy frekvenčních spekter je jednoznačné, že nasazený elektromotor má nesymetrické elektromagnetické pole. Nesymetrie je způsobena tím, že elektromotor je starý a dřívější metody bourání vinutí ve statoru elektromotoru byly nevyhovující po stránce bodového nahřívání paketu plechů statoru, kde docházelo k lokálnímu přehřívání plechů nad povolenou tepelnou mez. Druhým nedostatkem dřívějších metod byly ekologické požadavky.

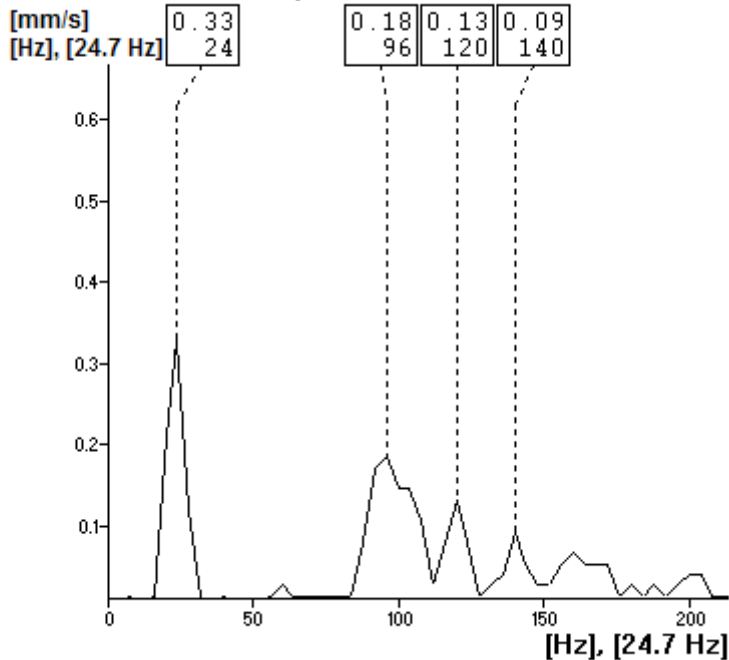
ČERPADLO VT5 BEZ STŘÍDAČE\ELEKTROMOTOR, v.č. ,500 V, 160



Obr. 3. 2.: Měřící místo: ELEKTROMOTOR, v. č.,500 V, 160 kW, 1480 ot/min bez střídače a se zatížením L2V 2. 3.2016 11:20:21 Rychlost MB2V TREND celkové hodnoty vibrací v [mm/s] 0.58

Ze spektra měření vibrací elektromotoru při zatížení na plný výkon elektromotoru bez střídače je patrné, že harmonická na dvojnásobku frekvence sítě to je 100 Hz ve spektru je malá a první harmonická na frekvenci 24 Hz je mnohem větší. Tento jev svědčí o elektromagnetické nesymetrii elektromotoru.

ČERPADLO VT5 SE STŘÍDAČEM\ELEKTROMOTOR, v.č. ,500 V, 160 k



Obr. 3. 3.: Měřící místo: ELEKTROMOTOR, v. č., 500 V, 160 kW, 1480 ot/min se střídačem a se zatížením L2V 2. 3.2016 11:20:21 Rychlost MB2V TREND celkové hodnoty vibrací v [mm/s] 0.33

Ze spektra měření vibrací elektromotoru při zatížení se střídačem je patrné, že harmonická na dvojnásobku frekvence sítě to je 100 Hz ve spektru je malá a první harmonická na frekvenci 24 Hz je značně větší. Přínos střídače v obvodu elektromotoru je v tom, že jsou menší vibrace na jednotlivých amplitudách, to platí pro celý elektromotor a taktéž i pro čerpadlo. V důsledku toho dochází k mechanickému šetření celého čerpadla. Dále byl při chodu se střídačem výkon čerpadla regulován automaticky střídačem a ne mechanicky na výtlaku. Bez střídače byl elektromotor zatížen proudem 201 A a se střídačem proudem 184 A.

Výhoda střídače je jednoznačná. V době měření byla potřeba vody značná. Při menších průtocích vody jsou úspory vyšší až 50 %.

4 Závěr

Při napájení elektromotorů přes regulační člen frekvenční měnič nutno dbát všech zásad, které se v průběhu provozování těchto přístrojů vyskytla. Pro montáže je nutné si najmout odbornou organizaci, která má bohaté zkušenosti při uvádění elektrospotřebičů do provozu.