On-line diagnostika elektrických strojů točivých.

Ing. Petr BERNAT

VŠB - Technická univerzita Ostrava, FEI, Katedra elektrických strojů a přístrojů

Ve spolupráci s energetickými a průmyslovými podniky se naše pracoviště podílí na vývoji on-line sledovacích systémů pro energetické jednotky. Tyto systémy na základě monitorování provozních veličin umožňují diagnostiku některých závad elektrických strojů.

Technická diagnostika používá množství metod pro zjištění aktuálního stavu testovaného zařízení a její výsledky jsou mnohdy podkladem k rozhodování o dalším osudu daného zařízení. Pro elektrické stroje a speciálně pro asynchronní stroje se nám nabízí několik skupin diagnostických metod zaměřených na zjišťování aktuálního stavu jednotlivých funkčních částí, tj. především izolačního systému, vinutí, magnetického obvodu a mechanického stavu (ložiska). Hlavním problémem diagnostiky pak je nalezení jednoznačného vztahu mezi změnou některé rozhodující funkční vlastnosti stroje a některou, dostupnými prostředky měřitelnou veličinou.

Pro testování stavu stroje máme k dispozici diagnostické metody obecné i cílené na konkrétní možnou poruchu. Z pohledu systému diagnostiky je jednoznačně výhodnější funkční diagnostika, která využívá měřitelné veličiny generované samotným zařízením (strojem) při jeho normálním provozu na rozdíl od diagnostiky testovací, u které je testovaná veličina generována diagnostickým prostředkem a zpravidla vyžaduje odstavení stroje z provozu a jeho přípravu pro měření. Funkční diagnostika tím, že nenarušuje běžný provoz stroje může být prováděna kontinuálně a může být součástí monitorovacích a tzv. on-line systémů. Trend v oblasti diagnostiky strojů směřuje právě k využití těchto metod pro vytvoření on-line systému. Spojení měřicího přístroje a vyhodnocovací části do jednoho celku dnes zpravidla s využitím výpočetní techniky a metod virtuální instrumentace umožňuje pro složitější vyhodnocení kontinuálně měřených diagnostických veličin použít expertní systém a umožnit tak komplexnější vyhodnocení než pouhé sledování, zda některý z parametrů nevybočuje z předem daných mezí.

Pro funkční diagnostiku a kontinuální sledování indukčních strojů napájených ze sítě nebo z měničů kmitočtu máme při splnění výše uvedených podmínek funkční diagnostiky k dispozici elektrické, magnetické a mechanické veličiny do stroje vstupující (statorový proud a napětí) a veličiny, strojem generované (rozptylový magnetický tok, vibrace, hřídelová napětí. Časový průběh těchto veličin je výrazně ovlivněn stavem stroje (nesymetrie obecně, závady vinutí či izolace, ustavení stroje, stav ložisek, výrobní vady..), pomocí jeho záznamu a rozboru můžeme přímo usuzovat na stav jednotlivých částí.

Časový a prostorový průběh elektrických a magnetických veličin ve střídavých elektrických strojích není čistě sinusový. Použitím Fourierovy transformace můžeme získat frekvenční spektrum, v němž bude vedle základní harmonické i řada vyšších harmonických a také subharmonických. Nejdostupnější veličinou, která mimo jiné nese informaci o aktuálním stavu stroje je primární napájecí proud. K jeho měření pro on-line diagnostiku využíváme zpravidla měřicí transformátory proudu, zabudované přímo v rozváděči stroje. U velkých strojů jsou už tyto transformátory součástí obvodů pro ochrany a měření. Pro naše použití je

jen nutné ověřit, zda ve sledovaných pracovních režimech stroje (rozběh a chod při zatížení) tyto měniče pracují v lineární oblasti a nevnášejí tak do měřené veličiny další zkreslení.

Přirozená frekvenční spektra motoru

Vyšší harmonické se ve statorovém proudu asynchronního motoru vyskytují i tehdy, když napájecí napětí statoru je čistě sinusové a stroj nevykazuje žádnou závadu. Je to způsobeno prostorovými harmonickými, které vznikají v důsledku diskrétního rozložení vinutí do drážek. Prostorových harmonických je celá řada. Pokud je třífázové vinutí symetrické budou v proudovém spektru zastoupeny liché harmonické 5, 7, 11, 13, ... Vzduchová mezera mezi statorem a rotorem není konstantní. Povrch statoru a rotoru určující velikost vzduchové mezery motoru není hladký, ale je drážkován. Magnetický odpor a tedy i magnetická vodivost je na různých místech vzduchové mezery různá. Z výše uvedených důvodů neplatí úměrnost mezi průběhem magnetického napětí a magnetické indukce ve vzduchové mezeře, nýbrž na základní vlnu budou nasuperponovány další vlny od drážkování statoru a rotoru. S uvedeným rozložením vinutí a také vlivem drážkování vznikají vyšší harmonické frekvence jejichž řád bude

$$\upsilon = c \cdot \frac{Q}{p} \pm 1$$

kde c ... 1, 2, 3,
Q ... počet drážek,
p ... počet pólpárů stroje.

Frekvenční spektra při poruchách motorů

Rotorové vinutí asynchronního motoru může být buď připojeno ke kroužkům, anebo trvale spojeno nakrátko, tj. vinutí složené z tyčí uložených v drážkách a spojených na obou stranách čelními kruhy.

Indukčně napájené vinutí může být tvořeno libovolným počtem fází, v nichž magnetické točivé pole indukuje napětí a proudy. Klecové vinutí asynchronního stroje je mnohofázová soustava zapojená do hvězdy bez nulového vodiče. Každá fáze je tvořena jednou tyčí. Napětí, které se indukuje v tyči klece, závisí na relativní rychlosti tyče vzhledem k točivému poli. Napětí jednotlivých tyčí tvoří symetrickou fázorovou hvězdici.

Tato napětí vyvolávají v kleci proudy, které rovněž vytvoří symetrický vícefázový systém proudů. Jednotlivé tyče nebo i části kruhu rotorů střídavých strojů mohou mít z různých důvodů (výrobních, technologických, provozních) různé elektrické odpory. Krajním případem je pak přerušení jedné nebo několika tyčí nebo kruhu spojujícího tyče nakrátko. Takováto nesymetrie vinutí způsobí zhoršení provozních vlastností stroje. Jde zejména o zvýšení oteplení nepoškozené části vinutí, vznik parazitních momentů, zhorší se časové průběhy proudů a otáček i rozběhové podmínky apod. To vše způsobí vznik přídavných magnetických polí ve vzduchové mezeře, jejichž rychlost otáčení se liší od synchronní rychlosti.

Při poruše tyče nebo kruhu bude tedy uvedená symetrie porušena. To vyvolá deformaci magnetického pole ve vzduchové mezeře, a tím změny elektrických, elektromechanických, akustických a tepelných veličin stroje. Takovýto nesymetrický systém si pak můžeme rozložit na symetrický systém přímý, zpětný a nulový.

Přímé pole se otáčí synchronními otáčkami n_1 s polem statoru. Zpětné pole se otáčí v opačném směru otáčkami n_1

$$n_2 = -s \cdot n_1$$

ve vztahu k rotoru, který se otáčí otáčkami n.

Relativní otáčky zpětného pole vzhledem ke statoru budou

$$n_3 = n + n_2 = n - n_1 \cdot s$$

Protože $n = n_1(1 - s)$ bude

$$n_s = n_1(1-s) - n_1 s = n_1(1-2s)$$

a protože $n = f/p$ bude dále

$$f_x = f_1(1-2s).$$

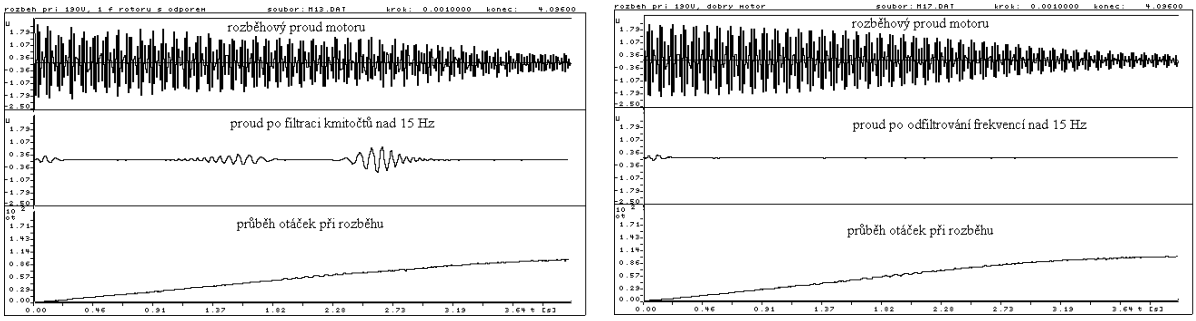
Magnetické pole otáčející se ve vzduchové mezeře otáčkami n_1 vybudí ve statorovém vinutí proud I_3, uvedené frekvence f_3. Tento proud je nasuperponován na proud I_1 a uzavírá se přes síť. Čím větší bude nesymetrie rotoru, tím víc bude kolísat proud I_1 a zvětší se proud I_3. Ve frekvenčním proudovém spektru se pak tato frekvence projeví jako postranní pásmo základní frekvence f_1, eventuálně jako postranní pásmo vyšších harmonických určených dle (1.3.1) tj.

$$f_v = \nu \cdot f_1 \pm 2sf$$

Můžeme je zjistit dvěma způsoby:

- Harmonickou analýzou statorového proudu při konstantním zatížení; složka proudu o této frekvenci bude tvořit postranní pásma základní frekvenci f_1 a vyšších drážkových harmonických.
- Záznamem rozběhového proudu motoru; proud (I_3) získáme odfiltrováním frekvencí vyšších než např. 15 Hz; velikost tohoto proudu bude pouze několik % velikosti statorového proudu.

Pro v současnosti vyvíjený sledovací systém jsme zvolili druhou z těchto metod - rozběhovou zkoušku. Popis této metody byl námi již vícekrát publikován, na následujícím obrázku je tedy jen pro připomenutí obrázek typických průběhů při použití této metody na stroji se simulovanou poruchou v rotoru a na bezvadném stroji.



Obr. 1 - záznam rozběhové metody u motoru s rotorovou nesymetrií a u dobrého motoru

Z obrázků je patrná především jednoznačnost metody - rozdíl mezi záznamem na dobrém a vadném stroji je okamžitě viditelný a v automatickém režimu při měření pomocí

virtuálního přístroje a výpočetní techniky snadno vyhodnotitelný. Po řadě provedených pokusů na velkém množství asynchronních strojů můžeme potvrdit, že tato metoda je citlivým indikátorem vzniku nesymetrie v rotoru. U asynchronních strojů tato nesymetrie nejčastěji vzniká jako následek přerušení některé z tyčí rotorové klece. Jako všechny ostatní diagnostické metody má však i tato metoda některé nedostatky. Pomineme -li nutné podmínky pro její použití - minimální dobu rozběhu nad 2s a přímý rozběh ze sítě 50Hz, které jsou zpravidla u velkých strojů snadno splnitelné, narazíme na hlavní problém. Tím je u všech diagnostikovaných strojů předpoklad symetrie v bezvadném stavu. Dalším problémem je pak citlivost měření ve vztahu k relativní velikosti poruchy. Oba problémy budou rozebrány dále.

Z teoretických předpokladů a principu metody vyplývá, že je schopna rozpoznat porušení symetrie rotorového vinutí, v praxi zpravidla přerušení některé z tyčí klece nebo poruchu spoje tyče s kruhem. Takto vzniklou nesymetrii metoda spolehlivě indikuje. Na určitý, i když řešitelný problém narazíme v případě, kdy je diagnostikovaný stroj konstrukčně nesymetrický tj. zpravidla u velkých synchronních strojů s asynchronním rozběhem. Právě u těchto strojů je diagnostika rozběhové klece žádoucí pro její značné zatížení při rozběhu, výchozí stav je však komplikován nesymetrickým (řekněme spíše nepravidelným) uspořádáním jednotlivých tyčí rotorové klece do skupin konstrukčně umístěných v pólech magnetového kola. Při rozběhu i bezvadného stroje tak určité zákmity na záznamu naměříme vždy a prohlásit v tomto případě stroj za vadný by bylo chybou. Řešením je v tomto případě právě on-line diagnostika. Na stroji je proveden záznam (v praxi řada záznamů) v čase, kdy je rotorová klec prokazatelně v pořádku, např. na novém stroji nebo na stroji po opravě a revizi. Každý další rozběh je pak srovnáván s takto vytvořeným referenčním záznamem. Objeví - li se během dalšího provozu stroje na rotoru porucha, vzroste nesymetrie nad původní míru a v záznamu stoupne amplituda zákmitů proudu po filtraci. Vazba velikosti amplitudy zákmitů a velikosti nesymetrie je teoreticky i prakticky ověřena. On-line systém pak může na základě této změny upozornit na vznik poruchy již v počátku a zabránit tak jejímu dalšímu šíření. Dle praktických zkušeností přerušení tyče zpravidla vede k poruchám dalších tyčí v blízkosti poruchy (proud z přerušené tyče se rozdělí do tyčí sousedních, které jsou tak přetěžovány).

Dalším problémem je citlivost metody ve vztahu k relativní velikosti poruchy. Co to znamená v praxi - je rozdíl, zda dojde k přerušení tyče u stroje, který má klec složenu např. z 48 tyčí nebo u stroje, který má klec s 240 tyčemi. Velikost nesymetrie je v těchto případech nesrovnatelná, převedeme - li si ji např. na procenta, pak jedna tyč v prvém případě představuje změnu v mezích přes 2%, ve druhém „jen“ 0,4%. Vezmeme - li do úvahy možnosti měřicí techniky (rozlišovací schopnost, třídu přesnosti přístrojů...), musíme ve druhém případě volit mnohem citlivější přístroje, při měření pak musíme také pečlivěji eliminovat rušivé vlivy. V současnosti lze říci, že použití této metody pro stroje s velkým počtem tyčí je na hranici měřicích možností dvanáctibitového A/D převodníku. Metoda není dále obecně kvantifikovatelná tj. dle velikosti zákmitů po filtraci proudu na zcela neznámém stroji nejsme schopni obecně říci, kolik tyčí je přerušeno. To není v praxi až tak na závadu, u velkých strojů lze opět využít sledování trendu pomocí on-line systému, v off-line diagnostice lze metodu použít jako indikační.

On-line systém v praxi: Rozběhovou metodu prakticky používá sledovací systém (dále jen „systém“), který jsme vytvořili pro monitorování stavu rozběhových klecí generátorů na přečerpávací elektrárně v Dalešicích. Stroje této elektrárny jsou vybaveny pro asynchronní rozběh klecí tvořenou 288 tyčemi rozloženými v pólech rotoru. Při vyhodnocování jsou tedy aktuální oba výše popsané problémy - konstrukční nesymetrie rotorového vinutí a značný

počet tyčí a tím i relativně malá změna při poruše oproti výchozímu stavu. Rozběhová metoda je pro synchronní stroje jediná dostupná metoda cílená na stav rozběhové klece. Případné nesymetrie klece se při synchronním chodu už nedají odhalit. Pokud by stroj zůstal po nějaký čas v ustáleném asynchronním chodu, bylo by možné použít i metodu frekvenční analýzy. Tento případ je však v praxi a především u velkých strojů nepoužitelný - jednak klec není dimenzována na trvalý chod v asynchronních otáčkách a jednak je tento případ chápán jako poruchový a nedovolí jej ochrany.

Na strojích jsme provedli řadu měření v off-line režimu. Zde se potvrdily předpoklady, že metoda je schopna odhalit vznik poruchy klece, vzhledem k různým dalším vlivům (konstrukční nesymetrie, rušení, různé podmínky při rozběhu) tak však nelze automaticky usuzovat z jediného měření. Situace na elektrárně je navíc komplikována omezeným počtem rozběhů za den, pro naměření statisticky významného počtu rozběhů by bylo nutno sledovat stroje po několik týdnů. Řešením je proto právě on-line systém, který zaznamená každý rozběh. Ze záznamů, naměřených na stroji po revizi, který provozovatel prohlásí za bezvadný se vytvoří referenční záznam. Vzhledem k drobným odchylkám v konstrukci jednotlivých generátorů musí být tento referenční záznam vytvořen individuálně pro každý stroj. Další postup vyhodnocování využívá tohoto referenčního záznamu a srovnává s ním záznam každého rozběhu stroje. V určitém časovém okně je na filtrovaném záznamu proudu vyhodnocována maximální amplituda a efektivní hodnota zákmitů proudu. V případě, že se objeví zvětšená amplituda zákmitů na určitém počtu po sobě jdoucích záznamů (statistická eliminace náhodných rušivých vlivů), je tento stav vyhodnocen jako vznik poruchy rotoru. U on-line systému, který pracuje samostatně bez zásahu obsluhy je důležitá právě volba počáteční míry změny stavu, který již vede k vyhlášení poruchy. Na záznamu se mohou objevit např. rušivé kmity (špičky), vzniklé nějakým náhodným procesem (vf. rušení od spínání apod). Takovéto rušení by obsluha při ručním systému vyhodnocování záznamů ihned odhalila a záznam by vyloučila jako nepoužitelný. Systém při vyhodnocování používá srovnávání amplitud a použití dodatečné filtrace případných špiček by mohlo zkreslit vyhodnocovaný signál. Proto k vyhlášení poruchy nedojde ihned při prvním překročení mezí z referenčního záznamu, ale až po určitém počtu opakování tohoto stavu. Toto zpoždění není v praxi na závadu, porucha tyče neznemožňuje okamžitě další provoz stroje, informace o poruše však může provozovatel využít při následující plánované opravě.

Systém využívá již zabudovaných proudových měničů pro ochrany a proud snímá až v sekundární pětiampérové smyčce. Před nasazením systému jsme na řadě měření v různých místech snímání proudu ověřili, že tvar průběhu proudu zde není zkreslen případným přetížením proudových měničů. Z důvodu robustnosti jsme celý systém konstrukčně uspořádali jako kompaktní přístroj, zabudovaný do běžné skříně PC. Měřené proudy od jednotlivých strojů jsou snímány a na napětí převáděny pomocí LEM čidel (proudová čidla na kompenzačním principu s hallovou sondou a napěťovým výstupem, s malým zkreslením a s frekvenčním rozsahem do 20kHz) a snímány běžnou měřicí kartou s dvanáctibitovým A/D převodníkem. Filtrace signálu proudu je prováděna číslicově - matematickou filtrací v obslužném programu. Ten také tvoří jádro systému, zabezpečuje komunikaci s měřicí kartou, obsluhou a po každém rozběhu provádí automaticky vyhodnocování. V případě změn stavu a rovněž v pravidelných intervalech záznamy automaticky archivuje pro pozdější vyhodnocení dalšími metodami.

V současné době (květen 97) systém pracuje v přípravné fázi tj. měří a archivuje jednotlivé rozběhy strojů za účelem vytvoření referenčních záznamů pro automatické vyhodnocování.