

Ladislav Janoušek - Valéria Hrabovcová *

VYŠETROVANIE ÚČINNOSTI ASYNCHRÓNNEHO MOTORA S VYUŽITÍM NELINEÁRNEHO PROGRAMOVANIA

DETERMINATION OF INDUCTION MOTOR EFFICIENCY USING NON-LINEAR PROGRAMMING

Článok sa zaoberá vyšetrovaním účinnosti asynchrónneho motora, ako jedného z kvalitatívnych ukazovateľov prevádzky stroja, na základe výpočtu a merania počas prevádzky. V článku sú ukázané možnosti výpočtu, resp. určovania účinnosti asynchrónneho stroja. Najjednoduchší prístup spočíva vo výpočte účinnosti pomocou náhradnej schémy asynchrónneho stroja. Táto metóda je zdokonalená tým spôsobom, že hodnoty prvkov náhradnej schémy sú optimalizované na základe údajov, meraných počas ustálenej prevádzky stroja. Optimalizácia využíva prostriedky nelineárneho programovania.

1. Úvod

Priama metóda určovania účinnosti spočíva vo výpočte pomeru výkonu P na hriadelí a príkonu motora P_p na svorkách stroja. Výkon P sa vypočíta ako súčin momentu a otáčok, pričom otáčky a moment sú merané priamo na hriadelí stroja. Všetky priame metódy využívajú dynamometre, magnetostrikčné, laserové, resp. iné snímače momentu, ktoré sa vyznačujú mnohými nevýhodami, hlavne vysokou cenou zariadenia, zložitoušou procesom, redukovanými možnosťami použitia pohonu ako celku a obyčajne nemožnou implementáciou. Preto sa hľadajú iné možnosti získavania momentu motora, napr. takže moment sa vypočíta na základe náhradnej schémy asynchrónneho stroja.

V tomto článku je prezentovaný výpočet účinnosti asynchrónneho stroja na základe meranej hodnoty príkonu motora a vypočítanej hodnoty výkonu motora, ktorý je určený pomocou meranej hodnoty rýchlosti a hodnoty momentu stroja vypočítanej na základe klasickej náhradnej schémy asynchrónneho stroja. Táto metóda výpočtu je menej presná, nevyžaduje však použitie špeciálnych snímačov, resp. meraní. Presnosť uvedenej metódy závisí od presnosti znalostí hodnôt parametrov náhradnej schémy asynchrónneho stroja. V štandardných prístupoch sú hodnoty parametrov počítané na základe výsledkov merania jednosmerným prúdom, merania naprázdno a nakrátko. Takto získané hodnoty parametrov nezodpovedajú skutočným hodnotám parametrov stroja počas jeho prevádzky, čo spôsobuje nižšiu presnosť výpočtu účinnosti asynchrónneho stroja na základe jeho náhradnej schémy. Pokiaľ budú parametre identifikované priamo počas

This paper deals with determination of induction motor efficiency, as one of the qualitative indexes of machine operation, by means of a calculation and measurement during its operation. The possibilities of the efficiency calculation are described and it is explained that the simplest method for the efficiency determination is a calculation from a steady state equivalent circuit of the machine. This method is improved by an optimization of the induction machine equivalent circuit parameters based on the measured quantities during steady state operation of the machine. Optimization utilises non-linear programming.

1. Introduction

Shaft torque measurement is a direct method of efficiency determination by using the ratio of motor output power P to the input power P_p , where P_p is measured and P is given as a product of measured value of speed and measured value of torque. All methods use dynamometers or magnetostrictive, laser etc. torque sensors but have a lot of disadvantages, especially, the high cost of the equipment, the complexity of the procedures, the reduced possibilities of the whole drive using and usually impossible implementation because of the dimension or temperature limits. Hence, other possibilities for motor torque determination have been looked for; for example, torque calculation based on the steady state model of the machine.

This paper presents an efficiency determination based on the output power calculation from the measured speed and calculated mechanical torque, by means of classical steady state equivalent circuit of induction machine, and measured input power. This method is less accurate, but the simplest method available without using special sensors or tests. Accuracy of the proposed method strictly depends on the exact knowledge of the induction machine's equivalent circuit parameters. In the classical approach, these values are calculated based on the results from a DC test, no-load and locked-rotor tests. Such determined values of electrical parameters of induction machine equivalent circuit do not correspond to the real values during operation of the machine and, therefore, the efficiency calculation based on these parameters has lower accuracy. If the values of equivalent circuit

* Ing. Ladislav Janoušek, Doc. Ing. Valéria Hrabovcová, PhD.,

Department of Electrical Tractions and Energetics, Faculty of Electrical Engineering, University of Žilina, Veľký diel, SK-010 26 Žilina, Slovak Republic
phone/fax: +421 89-652 231, phone/fax department: +421 89-549 63, E-mail: ladislav@kete.utc.sk, hrabovc@fel.utc.sk

prevádzky stroja, presnosť spomínanej metódy výpočtu účinnosti vzrastie. Preto článok prezentuje metódu optimalizácie hodnôt elektrických parametrov náhradnej schémy asynchrónneho stroja, získaných pomocou klasických meraní, na základe údajov meraných počas ustáleného chodu stroja. Ako uvedieme neskôr štyri veličiny sú merané a rovnaké veličiny sú počítané na základe úplnej náhradnej schémy asynchrónneho stroja. Optimalizované hodnoty parametrov sú určené pomocou prostriedkov nelineárneho programovania minimalizáciou súčtu štvorcov relatívnych rozdielov medzi meranými a vypočítanými hodnotami veličín. Tieto hodnoty parametrov najlepšie popisujú náhradnú schému stroja pre stav, na základe ktorého boli optimalizované. Článok popisuje možnosti identifikácie všetkých hodnôt elektrických parametrov asynchrónneho stroja, počas jeho ustálených stavov a zdokonalenú metódu výpočtu účinnosti asynchrónneho stroja na základe jeho náhradnej schémy s optimalizovanými hodnotami parametrov.

2. Výpočet výkonu a účinnosti asynchrónneho motora na základe jeho náhradnej schémy

Náhradná schéma asynchrónneho stroja, znázornená na obr. 1, uspokojivo popisuje asynchrónny stroj počas ustáleného stavu.

Účinnosť asynchrónneho stroja je daná známym vzťahom:

$$\eta = \frac{P}{P_p} \cdot 100 \% \quad (1)$$

Cieľom je nájsť hodnoty výkonu P a príkonu P_p pomocou hodnôt prvkov náhradnej schémy, ktoré budú on-line optimalizované počas prevádzky stroja.

parameters are identified during the motor's operation, the preciseness of the efficiency determination mentioned above rises. Therefore, the paper presents a method for optimization of the electric parameters of an induction machine obtained from the classical tests owing to measured quantities during a steady state operation of the machine. Four steady state quantities are measured and the same quantities are calculated based on the complete equivalent circuit of the machine. The sum of square relative differences between measured and calculated values are minimized by means of the non-linear programming to find out the right values of the parameters which fit best the steady state based on which they have been optimized. The paper shows possibilities of the identification of all induction machine parameters during a steady state operation of the machine and efficiency calculation improvement by using the optimized parameters.

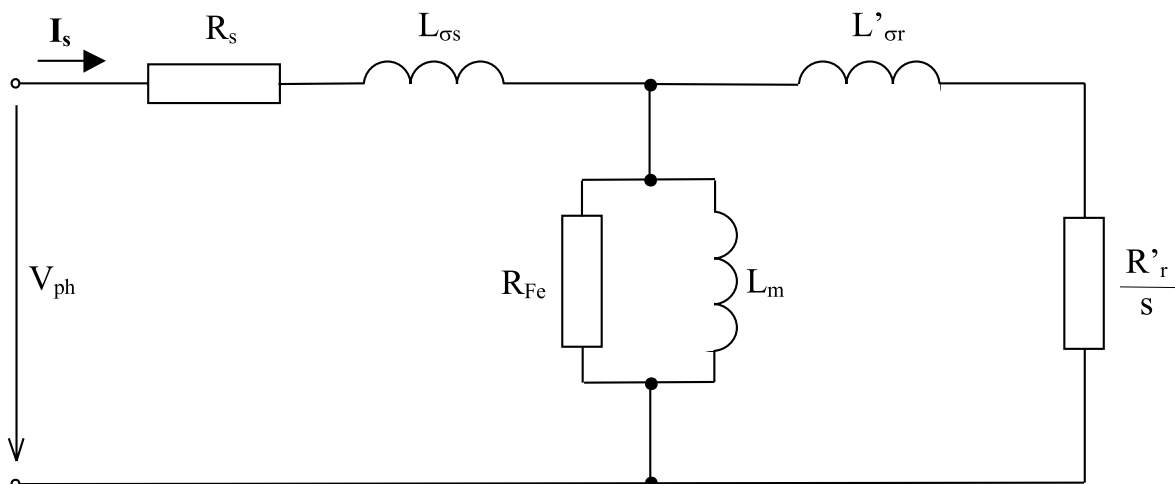
2. Calculation of the output power and efficiency of induction motor based on its steady state equivalent circuit

The steady state equivalent circuit of an induction machine, drawn on Fig. 1, fits very well with the steady state behaviour of an induction machine.

Efficiency of induction motor is given by the well-known relation:

$$\eta = \frac{P}{P_p} \cdot 100 \% \quad (1)$$

The purpose is to find out the value of output power P and input power P_p by means of the equivalent circuit parameters, which will be adapted on-line during the induction motor operation.



Obr. 1 Náhradná schéma jednej fázy asynchrónneho stroja
Fig. 1 Steady state equivalent circuit of one phase of induction machine

Komplexná vstupná impedancia jednej fázy asynchrónneho stroja je na základe náhradnej schémy daná:

$$Z_{in} = R_s + jX_{os} + \frac{Z_0 \cdot Z_r}{Z_0 + Z_r} \quad (2)$$

kde: Z_0 je komplexná impedancia magnetizačnej vetvy, daná

$$Z_0 = \frac{R_{Fe} \cdot jX_m}{R_{Fe} + jX_m}$$

Z_r je komplexná impedancia rotorovej vetvy, prepočítaná

$$\text{na stator, daná } Z_r = \frac{R'_r}{s} + jX'_{or}$$

3-fázový činný príkon asynchrónneho stroja je daný (V označuje efektívnu hodnotu fázového napätia):

$$P_p = 3 \cdot \frac{V^2}{|Z_{in}|^2} \cdot \text{Re}\{Z_{in}\} \quad (3)$$

Výstupný výkon 3-fázového asynchrónneho stroja je daný:

$$P = 3 \cdot R'_r \cdot I_r'^2 \cdot \frac{1-s}{s} - P_m \quad (4)$$

kde: s je sklz

I_r' je efektívna hodnota rotorového prúdu, prepočítaného na stator:

$$I_r' = \frac{V}{|Z_{in}|} \cdot \left| \frac{Z_0}{Z_0 + Z_r} \right| \quad (5)$$

P_m sú mechanické straty, uvažované ako 1 % z príkonu.

Pokiaľ chceme vylepšiť presnosť výpočtu účinnosti je potrebné adaptovať (optimalizovať) parametre stroja počas jeho prevádzky.

3. Optimalizácia hodnôt parametrov náhradnej schémy asynchrónneho stroja počas ustálených prevádzkových stavov

Princíp metódy

Ako už bolo spomenuté, hodnoty parametrov náhradnej schémy asynchrónneho stroja získané výpočtom z merania jednosmerným prúdom, merania nakrátko a naprázdno, nezodpovedajú aktuálnym hodnotám parametrov počas prevádzky stroja. Pokiaľ chceme získať presné hodnoty parametrov, musíme hodnoty získané z klasických meraní optimalizovať tak, aby zodpovedali čo najpresnejšie stavu, ktorý reprezentujú, čiže urobiť on-line identifikáciu parametrov. Všeobecne sú známe tri hlavné prístupy identifi-

Input complex impedance of one phase of asynchronous machine based on the equivalent circuit is given:

$$Z_{in} = R_s + jX_{os} + \frac{Z_0 \cdot Z_r}{Z_0 + Z_r} \quad (2)$$

where: Z_0 is complex impedance of magnetising branch, given

$$Z_0 = \frac{R_{Fe} \cdot jX_m}{R_{Fe} + jX_m}$$

Z_r is complex impedance of rotor branch referred to the

$$\text{stator, given } Z_r = \frac{R'_r}{s} + jX'_{or}$$

The input active power of 3 phase induction machine is given (V is rms value of phase voltage):

$$P_p = 3 \cdot \frac{V^2}{|Z_{in}|^2} \cdot \text{Re}\{Z_{in}\} \quad (3)$$

Output power of 3 phase induction machine is given:

$$P = 3 \cdot R'_r \cdot I_r'^2 \cdot \frac{1-s}{s} - P_m \quad (4)$$

where: s is slip

I_r' is the rms value of rotor current referred to the stator given:

$$I_r' = \frac{V}{|Z_{in}|} \cdot \left| \frac{Z_0}{Z_0 + Z_r} \right| \quad (5)$$

P_m is mechanical loss assumed as 1% of input active power.

To improve the accuracy of the efficiency calculation, the adaptation (optimization) of machine parameters during its operation is needed.

3. Optimization of induction machine equivalent circuit parameters during its steady state operation

Principle of the method

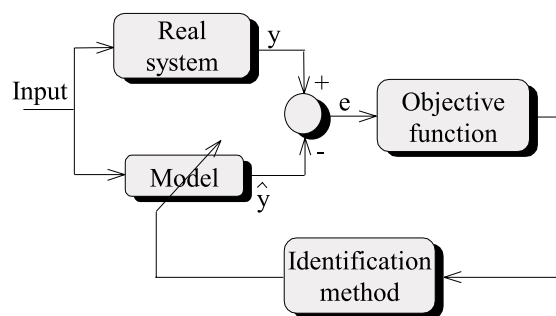
As mentioned above, the values of parameters of an induction machine equivalent circuit calculated from the results of the classical tests, such as D.C. test, locked rotor and no load test, do not correspond to the actual values during the machine operation. Therefore, these values have to be optimized if the accurate values of parameters are needed. Three main approaches for the parameters identification are generally known. First, one employs a testing signal and the transfer function is calculated based on the known input testing signal and a measured output signal. The

kácie parametrov. Prvý prístup využíva testovacie signály, pričom pri známom vstupnom testovacím signále a zosnímanej odozve systému je vyhodnocovaná jeho prenosová funkcia. Druhý prístup využíva možnosti vyšetrovania prídavných oscilácií, získaných zámerne zaradenou nelinearitou. Tento prístup nemôže byť využitý pre on-line identifikáciu, pretože môže ovplyvniť prevádzku stroja. Tretí prístup je založený na vyšetrovaní chýb medzi výstupom systému a výstupom jeho modelu. Tento spôsob je najrozšírenejší a je známy ako adaptívny systém s referenčným modelom (ASRM). ASRM je použitý v tejto práci pre optimalizáciu hodnôt parametrov asynchrónneho stroja, získaných z klasických meraní.

Základný princíp ASRM je zrejmý z obr. 2. Pri rovnakých vstupných podmienkach sú porovnávané chyby medzi výstupom systému a výstupom jeho modelu a pomocou identifikačnej metódy sú tieto chyby minimalizované.

Ďalšie úlohy, ktoré musia byť vyriešené je výber vhodného modelu asynchrónneho stroja a vytvorenie identifikačnej metódy. Týmito otázkami sa zaoberajú nasledujúce podkapitoly.

Je potrebné poznamenať, že pokiaľ pri minimalizácii funkcie, ktorá upravuje parametre systému, vychádzame z prípustného riešenia, vtedy hovoríme o optimalizácii. V tomto zmysle bude tento výraz použitý aj v ďalšom texte.



Obr. 2 Princípová schéma adaptívneho systému s referenčným modelom

Fig. 2 Principal scheme of the Model Reference Adaptive System

second approach utilises investigation of an oscillation gained by an intentional non-linearity. This approach cannot be used in the on-line identification because it can affect the current operation of the machine. The third approach investigates an error between the output of a system and its model. This kind of identification is widely used and is known as Model Reference Adaptive System (MRAS). MRAS is used in this work for the optimization of induction machine parameters obtained by means of the standard tests.

The basic principle of MRAS can be seen from Fig.2. Outputs of the system and its model under similar input conditions are compared and the identification procedure works in such way that the differences between system and its model outputs are forced to minimum.

The next tasks which have to be solved are the choosing of the appropriate model of induction machine and the creation of the identification procedure. The next chapters deal with these tasks.

It should be noted that if minimization of some function which improves parameters of the system starts from one feasible solution, it is called optimization. In this sense, this expression will be used in the further text.

Ustálený model asynchrónneho stroja použitý pri optimalizácii jeho parametrov

Problémom modelu asynchrónneho stroja použitého v optimalizácii jeho parametrov sa zaoberali predchádzajúce práce autorov [3], [4]. V týchto prácach bolo ukázané, že len úplná náhradná schéma asynchrónneho stroja môže byť použitá pri optimalizácii jeho parametrov. Táto náhradná schéma je veľmi dobre známa z klasickej teórie elektrických strojov a je znázornená na obr. 1.

Ako už bolo spomenuté, ASRM pracuje na základe porovnania výstupov systému a výstupov jeho modelu. Ktoré výstupné veličiny môžu byť porovnávané závisí od možností ich merania v reálnom systéme a od možností ich výpočtu pomocou modelu. Je potrebné poznamenať, že výstupy, ktoré sa majú porovnávať, musia obsahovať bohaté informácie o zmenách parametrov. Vektorový wattmeter umožňuje merať vstupný prúd, účinník, činný a jalový príkon počas ustálenej prevádzky stroja. Rovnaké veličiny môžu byť počítané pomocou náhradnej schémy na obr. 1:

- statorový prúd: $I_s = \frac{V}{|Z_{in}|}$ (6)

- statorový účinník: $\cos\varphi_s = \frac{Re(Z_{in})}{|Z_{in}|}$ (7)

Steady state model of an induction machine used in the optimization of its parameters

A problem of a steady state model of induction machine used in the identification procedure was solved in the recent papers of authors [3], [4]. It has been found out that only a complete equivalent circuit of the induction machine can be used in the optimization procedure, described below, to get appropriate results. Fig. 1 shows the complete equivalent circuit of an induction machine, known very well from the basic theory of the electric machines.

As mentioned above, MRAS works based on the outputs of the real system and its model. Which output values can be compared depends on the possibilities of their measurement in the real system and on the possibilities of the reconstruction of these values by means of the model of the system. It should be noted that the outputs which are compared must carry rich information about parameters changing. The Vector Wattmeter can be used to measure the values of the input current, power factor, input active power and input reactive power during steady state operation of an induction machine. The same values can be calculated by means of the equivalent circuit of an induction machine shown on Fig.1.:

- stator input current: $I_s = \frac{V}{|Z_{in}|}$ (6)

- stator power factor: $\cos\varphi_s = \frac{Re(Z_{in})}{|Z_{in}|}$ (7)

• činný príkon: $P_{in} = 3 \cdot \frac{V^2}{|Z_{in}|^2} \cdot \operatorname{Re}(Z_{in})$ (8)

• jalový príkon: $Q_{in} = 3 \cdot \frac{V^2}{|Z_{in}|^2} \cdot \operatorname{Im}(Z_{in})$ (9)

Minimalizovaná funkcia

V predchádzajúcom texte sme si priblížili model asynchrónneho stroja použitý pri optimalizácii jeho parametrov a vysvetlili sme si, ktoré veličiny môžeme porovnávať. Optimalizácia vychádza z nejakého prípustného riešenia a na základe minimalizácie definovanej funkcie prechádza k novým, optimálnym hodnotám parametrov. Funkcia, ktorá má byť minimalizovaná, musí poskytovať jednoznačné riešenie. Podľa matematickej analýzy len kvadratická funkcia má jednoznačné minimum. V [4] boli prezentované štyri kvadratické funkcie dané štvorcami absolútnych rozdielov medzi meranými a vypočítanými veličinami. V tomto článku je prezentovaná nová funkcia, ktorá má byť minimalizovaná. Je daná sumou štvorcov relatívnych rozdielov medzi vypočítanými a meranými veličinami satorového prúdu, účinníka, činného a jalového príkonu:

$$f = f_1 + f_2 + f_3 + f_4 \quad (10)$$

$$f_1 = \left(\frac{I_s - \hat{I}_s}{I_s} \right)^2, f_2 = \left(\frac{\cos\varphi_s - \cos\hat{\varphi}_s}{\cos\varphi_s} \right)^2, f_3 = \left(\frac{P_p - \hat{P}_p}{P_p} \right)^2, f_4 = \left(\frac{Q_p - \hat{Q}_p}{Q_p} \right)^2$$

kde $I_s, \cos\varphi_s, P_p, Q_p$ - merané veličiny,

$\hat{I}_s, \cos\hat{\varphi}_s, \hat{P}_p, \hat{Q}_p$ - vypočítané veličiny.

Rovnica (10) je daná súčtom štyroch kvadratických funkcií a preto má táto funkcia okrem globálneho minima aj lokálne minimá. Ako nájsť práve globálne minimum funkcie f je popísané nižšie. Na základe skúseností je možné odporúčať, že pre optimalizáciu parametrov asynchrónneho stroja je nutné použiť čo najväčší počet veličín.

Funkcia (10) je nelineárna vzhľadom na parametre stroja, preto môžeme na jej minimalizáciu s výhodou využiť nelineárne programovanie.

Nelineárne programovanie

Základným pojmom či už v lineárnom alebo nelineárnom programovaní je účelová funkcia. Je to funkcia, ktorej extrém sa snažíme nájsť. V našom prípade ide o minimalizáciu funkcie f , danú rovnicou (10), ktorou nájdeme optimálne hodnoty elektrických parametrov asynchrónneho stroja.

Ďalším, veľmi dôležitým pojmom je gradient účelovej funkcie f' . Je to stĺpcový vektor prvých derivácií účelovej funkcie podľa parametrov v bode x a tento gradient ukazuje smer maximálneho nárastu hodnoty účelovej funkcie v bode x . Antigradient potom predstavuje smer maximálneho poklesu hodnoty účelovej funkcie v bode x .

• input active power: $P_{in} = 3 \cdot \frac{V^2}{|Z_{in}|^2} \cdot \operatorname{Re}(Z_{in})$ (8)

• input reactive power: $Q_{in} = 3 \cdot \frac{V^2}{|Z_{in}|^2} \cdot \operatorname{Im}(Z_{in})$ (9)

Minimized function

The model of induction machine used in optimization procedure was described in the previous chapter. It explained which values of induction machine and its model can be compared. Optimization starts from one feasible solution and calculates new values of the parameters based on the minimization of a defined function. A function which has to be minimized must be found to get a uniform solution. Mathematical analysis says that only quadratic function has uniform minimum. In [4] four quadratic functions given as the square absolute difference between measured and calculated values were presented. In this paper, a new function which has to be minimized is presented. It is given by the sum of the square relative differences between measured and calculated values of the stator current, power factor, input active power and input reactive power:

where $I_s, \cos\varphi_s, P_p, Q_p$ - measured values,

$\hat{I}_s, \cos\hat{\varphi}_s, \hat{P}_p, \hat{Q}_p$ - calculated values.

From (10) it can be seen that it is the sum of four quadratic functions, so it has not only an absolute minimum but it has a local minimum, too. How to find an absolute minimum of the function f is described below. It was found out that as many values as possible have to be used for parameters of induction machine optimization.

Function (10) is not linear in regard to the machine parameters. This function can be minimized by using the non-linear programming.

Non-linear programming

A basic term in the linear or in the non-linear programming is an objective function. It is the function by which an extreme has to be found. In this case, the objective function f , given by (10) has to be minimized to find the optimal values of the electric parameters of an induction machine.

The next very important term is a gradient of the objective function f' . The gradient of the objective function is the column's vector of the first derivatives objective function by parameters in point x and this gradient shows the direction of the maximum grow of the objective function in the point x . The antigradient thereby represents the direction of the objective function maximum drop in point x .

V tomto prípade bola pre optimalizáciu parametrov asynchrónneho stroja, získaných výpočtom z klasických meraní, použitá Fletcher-Reevesova metóda, ktorá pracuje na základe princípu združených smerov, spolu s metódou zlatého rezu. Bližšie informácie o spomínaných metódach nájdete v [2, 4, 5].

Pokutová funkcia

Spomínaná metóda nelineárneho programovania je len numerickou metódou a teda okrem globálneho minima môže nájsť aj lokálne minimum, čo nie je riešením nášho problému, pretože hodnoty optimalizovaných parametrov môžu byť mimo prijateľnú oblasť. Preto definujeme pokutovú funkciu. Princíp spočíva v minimalizácii funkcie $f(X_n) = f(X_n) + P(X_n)$, kde P je pokutová funkcia, na otvorenom intervale, namiesto minimalizácie funkcie f , ktorá je definovaná na uzavretom intervale U . Pokiaľ hodnoty optimalizovaných parametrov patria do intervalu U , pokutová funkcia konverguje k 0 a ak tieto hodnoty nepatria do intervalu U , tak pokutová funkcia konverguje k ∞ . Pokutová funkcia, daná vzťahom (11) bola použitá pri optimalizácii hodnôt parametrov asynchrónneho stroja.

$$P = K \cdot \left(\left(\frac{\bar{R}_s - R_s^*}{\bar{R}_s} \right)^2 + \left(\frac{\bar{R}'_r - R_r^*}{\bar{R}'_r} \right)^2 + \left(\frac{\bar{R}_{Fe} - R_{Fe}^*}{\bar{R}_{Fe}} \right)^2 + \left(\frac{\bar{X}_{os} - X_{os}^*}{\bar{X}_{os}} \right)^2 + \left(\frac{\bar{X}'_{or} - X_{or}^*}{\bar{X}'_{or}} \right)^2 + \left(\frac{\bar{X}_m - X_m^*}{\bar{X}_m} \right)^2 \right) \quad (11)$$

kde $\bar{\quad}$ označuje hodnoty parametrov vypočítané z klasických meraní

* označuje hodnoty parametrov, optimalizované na základe meraných údajov

K je konštanta vyjadrujúca váhu pokutovej funkcie

4. Experimentálne výsledky

Pre overenie opísanej optimalizácie bola urobená zaťažovacia skúška asynchrónneho stroja, počas ktorej boli zaznamenané nasledujúce údaje: fázová hodnota statorového prúdu, účinník, činný a jalový príkon a rýchlosť rotora. Počas merania bolo statorové napätie a jeho frekvencia udržiavané na konštantnej hodnote.

Štítkové údaje meraného stroja sú:

3f IM 1.8kW 1440 ot/min
Y/Δ 380/220 V
3.8/6.5 A

a hodnoty jeho elektrických parametrov, získané pomocou klasických meraní, sú: $R_s = 2,01 \Omega$; $R'_r = 1,97 \Omega$; $L_{os} = L'_{or} = 11,575 \text{ mH}$; $L_m = 421,55 \text{ mH}$; $R_{Fe} = 884,971 \Omega$

Obr. 3 znázorňuje priebehy optimalizovaných parametrov asynchrónneho stroja, na základe údajov nameraných počas spomínanej zaťažovacej skúšky. Tieto parametre nie sú závislé od sklzu stroja, ale sú znázornené v závislosti od sklzu, pretože všetky veličiny boli merané v závislosti od sklzu.

In this case Fletcher-Reeves method, which works based on the Principle of Conjugate Gradient, together with the Method of Gold Section has been used for the induction machine parameters, obtained by means of the standard tests, optimization. For more information about these methods see [2, 4, 5]

Penalty function.

The above mentioned method of the non-linear programming is only a numerical method and it can find a local minimum of the function f which is not the solution of our problem and values of parameters can be out of the appropriate ranges. Therefore, a penalty function must be defined. The principle of this method consists in minimization of the function $f(X_n) = f(X_n) + P(X_n)$, where P is the penalty function, on the open interval instead of the function f defined on the closed interval U . If the optimized values of parameters X_n are found from the interval U , penalty function P converges to 0 and if the optimized values of parameters X_n are out of interval U penalty function P converges to ∞ . The penalty function given by (11) was used for optimization of parameters of an induction machine.

where $\bar{\quad}$ denotes value of parameter obtained by calculation from the classical tests

* denotes optimized value of parameter based on the measured data

K is a constant which treats the rate of the penalty function

4. Experimental results

A loading test of an induction motor was carried out. The phase current, power factor, input active power, input reactive power and rotor speed were measured during this test under several loading conditions. The voltage and frequency were held constant during the whole test.

The ratings of the motor used in the experiment are:

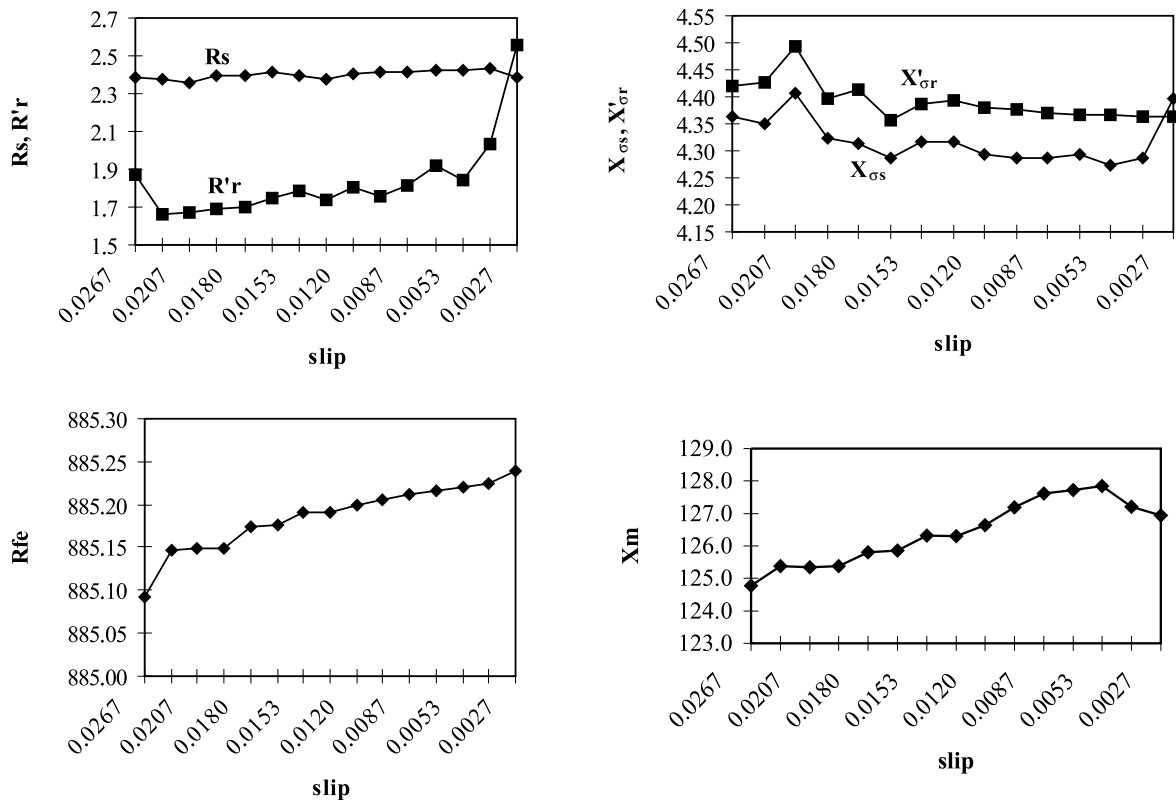
3f IM 1.8kW 1440 ot/min
Y/Δ 380/220 V
3.8/6.5 A

and the values of parameters of its equivalent circuit obtained from the classical tests are: $R_s = 2.01 \Omega$; $R'_r = 1.97 \Omega$; $L_{os} = L'_{or} = 11.575 \text{ mH}$; $L_m = 421.55 \text{ mH}$; $R_{Fe} = 884.971 \Omega$

Fig. 3 shows the flows of the optimized values of the parameters of the induction machine obtained from classical test based on the measured data during the test mentioned above. These parameters are not dependent on the slip, but values based on which the optimization of the parameters was performed were measured as the dependency on the slip.

Z obr. 3 vidno, že R'_r sa počas merania zmenilo až o 40 %, oproti R_s , ktoré sa zmenilo len o 2 %. Reaktancie a odpor reprezentujúci straty v železe sa zmenili len o niekoľko percent 1 - 3 %, z čoho môžeme predpokladať, že boli konštantné počas celého merania (iba detailná mierka zobrazuje veľké zmeny). Je potrebné poznamenať, že meranie musí byť presné, pretože ovplyvňuje presnosť opísanej metódy. Počas celej optimalizácie bola účelová funkcia spolu s pokutovou funkciou minimalizovaná na hodnotu približne $10^{-6} - 10^{-7}$ a relatívne rozdiely medzi meranými a vypočítanými hodnotami veličín boli $10^{-2} - 10^{-4}$ %. Z uvedeného môžeme predpokladať, že navrhovaný algoritmus optimalizácie hodnôt parametrov asynchrónneho stroja, získaných z klasických meraní, na základe údajov meraných počas ustáleného chodu stroja, je dobre navrhnutý a že získané výsledky sú uspokojivé

From Fig.3 it can be seen, that R'_r changed rapidly by about 40 %, different from the R_s , that changed only by about 2 % during the test. The reactances and resistance corresponding to the core losses changed only 1 - 3 % and can be supposed to be constant during the whole measurement (only detailed scale shows large variation). It should be noted that the method described needs very accurate values of measured quantities because of the errors occurring during the identification. During whole optimization, the objective function f together with the penalty function P were minimized to approximately $10^{-6} - 10^{-7}$ and relative differences for each measured value are about $10^{-2} - 10^{-4}$ %. It can be supposed that proposed algorithm of optimization of the induction machine parameters obtained from the classical test based on the measured data during a steady state operation of the machine is well designed and the gained results are very satisfactory.



Obr. 3 Priebehy optimalizovaných parametrov počas zaťažovacej skúšky
Fig. 3 The optimized parameter flows during the loading test

Účinnosť

Účinnosť, ako jeden z kvalitatívnych ukazovateľov prevádzky stroja, môže byť vyšetovaná na základe náhradnej schémy asynchrónneho stroja s optimalizovanými hodnotami elektrických parametrov. Navrhovaná metóda môže byť overená presnejším určením účinnosti na základe merania otáčok a momentu stroja.

Pre porovnanie bola účinnosť stroja počas zaťažovacej skúšky určovaná tromi metódami. Po prvé bola účinnosť určená na

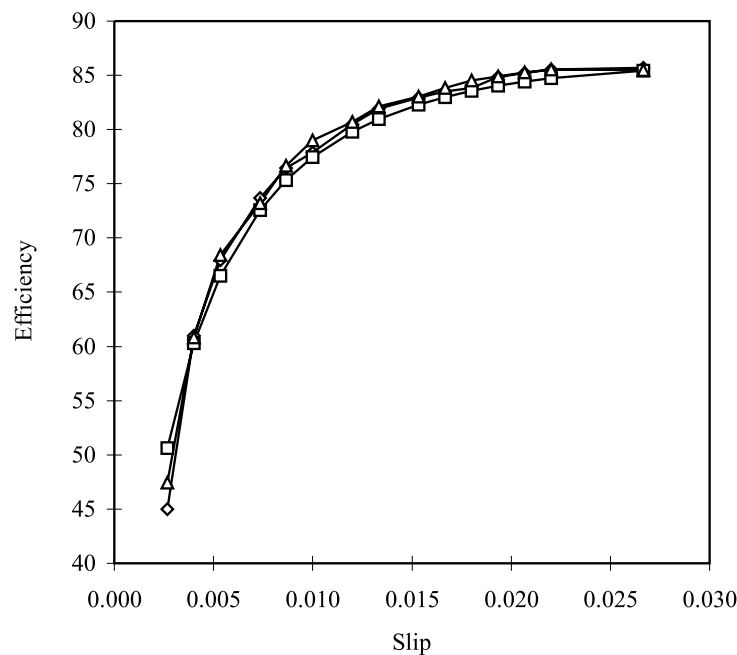
Efficiency

Based on the optimized values of parameters obtained from the standard tests during a steady state operation of the machine, the efficiency of the machine operation can be investigated. If the efficiency is precisely calculated by means of the speed and torque measurement, it can be used for the verification of the proposed method for the parameters identification.

Efficiency of the motor during the test was calculated based on the three methods for comparison. At first the efficiency was

základe meraného príkonu, otáčok a momentu stroja (obr. 4 - krivka „a“). Druhý prístup spočíval vo výpočte účinnosti na základe náhradnej schémy asynchrónneho stroja s konštantnými hodnotami parametrov, určenými z klasických meraní (obr. 4 - krivka „b“). A krivka „c“ na obr. 4 znázorňuje výsledok tretieho prístupu, kedy bola účinnosť určovaná na základe náhradnej schémy asynchrónneho stroja s optimalizovanými hodnotami parametrov počas zaťažovacej skúšky. Z obr. 4 môžeme vidieť, že účinnosť stroja určená pomocou náhradnej schémy s optimalizovanými hodnotami parametrov sa lepšie približuje účinnosti určenej na základe meranej hodnoty otáčok a momentu, rozdiel podľa integrálneho kritéria je 0,2 %, než účinnosť určená na základe náhradnej schémy s pevnými hodnotami parametrov, rozdiel podľa integrálneho kritéria je 1 %.

calculated based on the measured torque by means of dynamometer, speed and input power (Fig. 4 - curve “a”). In the second method, efficiency was calculated by means of the steady state equivalent circuit of induction machine with fixed parameters calculated from classical tests (Fig.4 - curve “b”). The third method - curve “c” on Fig.4, represents efficiency dependence determined by means of the adapted (optimized) values of parameters during the loading test. From Fig.4 it can be seen that the efficiency calculated from adapted induction machine’s equivalent circuit parameters better fits the measured efficiency (by means of dynamometer) of the motor and the difference according to the integral criteria is 0.2 % instead of the 1 % obtained by means of the equivalent circuit with fixed parameters.



Obr. 4 Závislosť účinnosti od sklzu
Fig.4 Efficiency versus slip

5. Záver

Článok sa zaoberá určením účinnosti asynchrónneho stroja na základe jeho úplnej náhradnej schémy. Hodnoty parametrov náhradnej schémy, získané z výsledkov klasických meraní, sú optimalizované na základe hodnôt meraných počas ustálenej prevádzky stroja, čo zvyšuje presnosť výpočtu účinnosti stroja. Optimalizácia sa vykonala na základe minimalizácie účelovej a pokutovej funkcie daných vzťahmi (10) a (11), pomocou metód nelineárneho programovania. V závere sú uvedené výsledky experimentov, ktoré potvrdzujú vhodnosť použitia zvoleného prístupu.

Recenzenti: L. Klug, B. Dobrucký

5. Conclusion

The paper deals with the determination of the efficiency of induction machine based on its complete steady state equivalent circuit. The values of equivalent circuit parameters obtained by means of standard tests were optimized based on the measured data during a steady state operation of the machine which results in increasing of efficiency calculation preciseness. Optimization has worked based on the minimization of the objective function together with the penalty function given by (10) and (11) by using the non-linear programming. The experimental results shown in the end of the paper confirm the suitability of the presented approach.

Reviewed by: L. Klug, B. Dobrucký

Literatúra - References

- [1] VAS, P.: Vector Control of AC Machines. CLARENDON PRESS OXFORD, 1990.
- [2] JANÁČEK, J.: Operating Analysis I (in Slovak). Text-book, University of Žilina, ALFA, Bratislava, 1985.
- [3] JANOUŠEK, L.: Investigation of the induction machine parameters (in Slovak). In proceeding of International students' conference, Bratislava - Slovak Republic, 23-24 June 1997, p.p. 33-39.
- [4] HRABOVCOVÁ, V., JANOUŠEK, L., RAFAJDUS, P., LIČKO, M.: Identification of induction motor parameters. In proceeding of SPEEDAM '98 conference, Sorrento - Italy, 3-5 June 1998, p.p. P3-27 - P3-32.
- [5] HRABOVCOVÁ, V., JANOUŠEK, L., RAFAJDUS, P., LIČKO, M.: Investigation of Induction Machine Parameters based on the Steady State Variables Measured during its Operation. International Workshop on Electric Machines, 8-9 September 1999, Prague - Czech Republic, accepted for presentation.
- [6] JANOUŠEK, L., HRABOVCOVÁ, V.: Investigation of the Induction Machine Operation Quality. In proceeding of TRANSCOM '99 conference Section 3, Žilina - Slovakia, 29-30 June 1999, p.p. 21-24.
- [7] KOCK, J., MERWE, F. S., VERMEULEN, H. J.: Induction Motor Parameter Estimation through an Output Error Technique. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 9, No. 1, March 1994.
- [8] PILLAY, P., LEVIN, V., OTADUY, P., KUECK, J.: In-Situ Induction Motor Efficiency Determination Using the Genetic Algorithm. IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 13, No. 4, December 1998.