

Прецизиране на механичните загубите при висока скорост на асинхронен двигател с кафезен ротор – експериментален подход

Кръстю Кръстев, Радка Кръстева

Exactitude of the mechanical losses in high speed asynchronous motor with cage rotor - experimental approach: In this paper experimentally is determined parameters of the mechanical equation of asynchronous motor with cage rotor at speeds up to 30000min^{-1} . Is used data from experiment at idle. As a result of the researches is proposed a more accurate mechanical equation for the model of induction motor valid at high speed.

Key words: Asynchronous motor, Model, Mechanical equation.

ВЪВЕДЕНИЕ

За правилното описание на функционирането на модела на двигателя при висока скорост в Matlab/Simulink среда, следва да се отчетат коректно загубите в двигателя. Обикновено при моделиране в Matlab/Simulink F_r е константа. Тогава съпротивителния момент, създаден от триене в лагерите, нараства линейно на скоростта. Това е почти вярно за скорости до 3000min^{-1} . При моделиране на електродвигател, който се изследва до този скоростен диапазон това допускане дава добри резултати, но когато е необходимо изследване на високооборотното електрозадвижване е необходимо по-прецизно моделиране на механичното уравнение на електродвигателя.

При този двигател с електронния преобразувател могат да се постигнат скорости до 30000min^{-1} . При моделиране с $F_r = \text{const}$ съпротивителният момент от триене расте пропорционално на скоростта и ако моделът дава задоволителни резултати при ниски скорости на въртене, сравнено с експерименталните резултати, то при високи скорости на въртене товарният момент значително надвишава максималния възможен момент на електрозадвижването.

Загубите в двигателя могат да се определят като се използват данните от хлъзгането, при движение на двигателя без товар. По този начин намерени, загубите в двигателя са от намагнитване, от триене и вентилационни загуби във въздушната междина (тъй като двигателя е без перка).

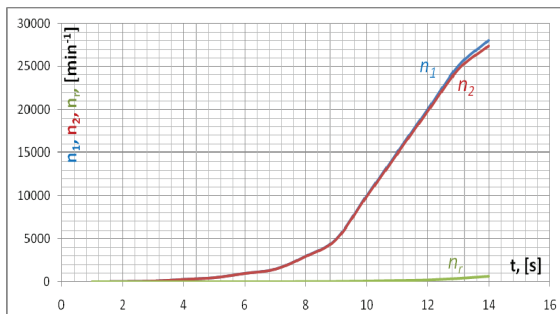
ОПРЕДЕЛЯНЕ ПАРАМЕТРИТЕ В МЕХАНИЧНОТО УРАВНЕНИЕ

• *Хлъзгане при промяна на скоростта в широк диапазон.* Относителната разлика на скоростите на въртене на статорното поле n_1 и ротора n_2 , се нарича хлъзгане $s = (n_1 - n_2) / n_1$. Хлъзгането може да се изрази също и в проценти

$$s = \frac{(n_1 - n_2)}{n_1} \cdot 100, [\%]. \quad (1)$$

Експериментално получените данни при празен ход в установен режим на работа са записани в таблица и са представени графично на *fig.1*, за високоскоростен асинхронен двигател с кафезен ротор тип ATF 80 E4 IM B3 4kW (*fig.7*). С помощта на разработения преобразувател (*fig.6*) се задава скоростта на въртене на статорното поле $n_1 [\text{min}^{-1}]$. Механичната скорост на въртене на вала n_2 се измерва с фототахометър за скорост до 30000min^{-1} . Скоростите до 3000min^{-1} са измерени с помощта на вала на прибора, а скоростите до 28000min^{-1} са измерени по стробоскопичен път.

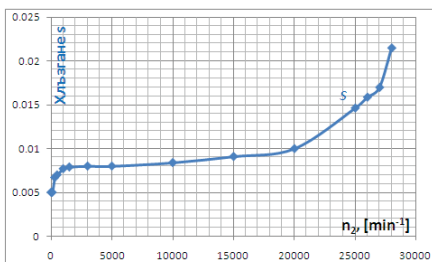
Собствената консумирана мощност на преобразователя в режим „СТОП“ е 6.6W, а в режим „СТАРТ“ (без включен електродвигател към клемите) е 35.5W. При определянето на загубите в двигателя трябва да се вземе предвид собствената консумирана мощност на преобразователя в режим „СТАРТ“.



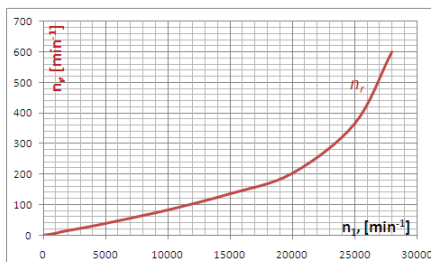
Фиг. 1. Зададена, действителна скорост и скорост на роторното поле при движение на празен ход, със скорост от 0 до 28000min⁻¹ АД с 4 полюса

Скоростта на статорното поле n_1 и скоростта на вала n_2 са с много близки стойности и $n_2 = (0.979 \div 0.995)n_1$.

Графиката на фиг.2 показва как се променя хлъзгането s при различните скорости, а на фиг.3 е показана скоростта на роторния поток n_r при стойностите на статорното поле n_1 .



Фиг. 2. Хлъзгане при движение на празен ход, със скорост от 10min⁻¹ до 28000min⁻¹, АД с 4 полюса.



Фиг. 3. Скорост на роторното поле при движение на празен ход, със скорост от 0÷28000min⁻¹, АД с 4 полюса.

Параметрите в механичното уравнение на двигателя определяме чрез хлъзгането при движение без товар в установен режим. Механичното уравнение на електродвигателя е

$$J \frac{d\omega_{rmeс}}{dt} = M_e - M_m - M_T. \quad (2)$$

Това са инерционния момент J , който се задава от производителя на мотора и момента от собствените механични загуби M_m . Тук този момент ще бъде определен при опит на празен ход, като двигателят се движи без товар ($M_T=0$), и се използва експериментално полученото хлъзгане s . При движение на празен ход в установен режим ускорението е $d\omega_{rmeс}/dt=0$. Тогава цялата консумирана мощност, създаваща електромагнитния въртящ момент на ротора се изразходва за преодоляване на механичните загуби и от (2) се получава $0=M_e-M_m-0$ т.е. $M_e=M_m$, където собствения механичен съпротивителен момент се състои основно от момента на триене в двата лагера и момента от вентилационните загуби във въздушната междина ($M_m=2M_{Fr}+M_w$).

За да се постигне същото хлъзгане в модела както експериментално полученото, електромагнитният момент трябва да е равен на механичния

съпротивителен момент $M_e=M_m$. Като се има предвид израза за активната електрическа мощност [1], предавана през въздушната междина от статора към ротора на двигателя, може да се запише

$$P_r = 3I_r^2 R_r / s = \frac{3U_s^2 R_r / s}{(R_s + R_r / s)^2 + x_k^2} \quad (3)$$

където $I_r = \frac{U_s}{\sqrt{(R_s + R_r / s)^2 + x_k^2}}$ и x_k е импеданса при късо съединение

$x_k = x_s + x_r = \omega_s(L_{sl} + L_{rl})$, като ω_s е електрическата ъглова скорост на статора.

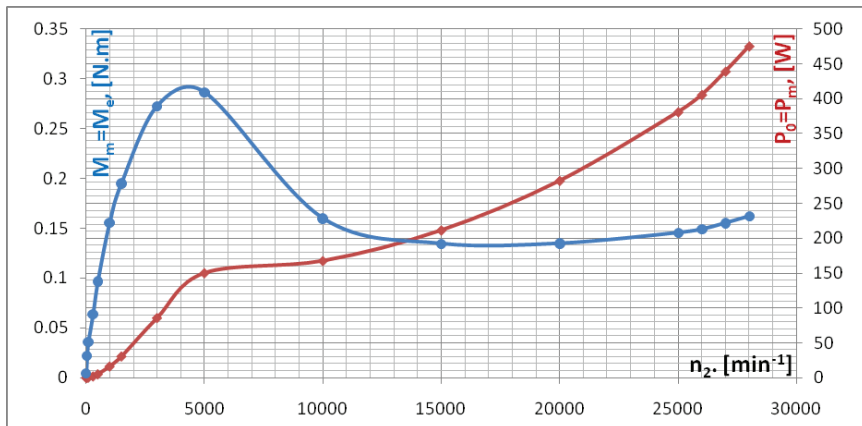
От друга страна, като се изрази електромагнитния момент M_e с мощността P_r и ъгловата скорост на статорното поле Ω_s , се получава

$$M_e = \frac{P_r}{\Omega_s} \quad (4)$$

След като се замести (3) в (4) за електромагнитния момент се получава уравнението [1]

$$M_e = \frac{3U_s^2 R_r}{s \Omega_s \cdot \left[(R_s + R_r / s)^2 + \Omega_s^2 \cdot p^2 (L_{sl} + L_{rl})^2 \right]} \quad (5)$$

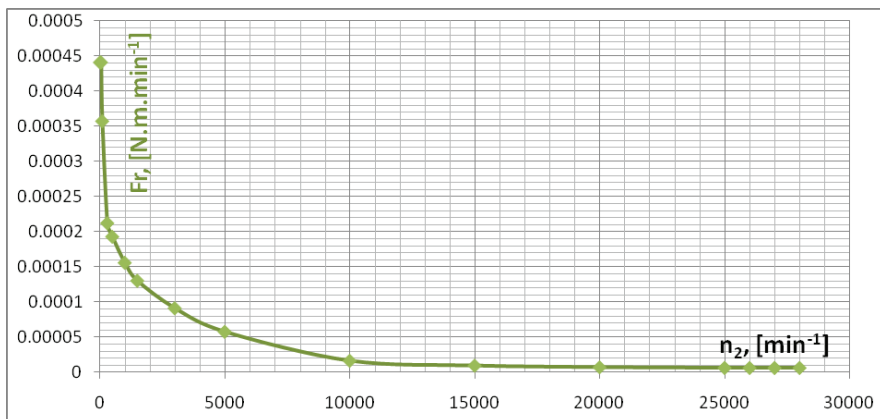
където $\Omega_s = \omega_s / p$, ω_s е електрическата ъглова скорост на статорния ток, а изследваният двигател е с два чифта полюси $p=2$.



Фиг. 4. Зависимост на товарния момент на празен ход, дължащ се на триене в лагерите и вентилационни загуби във въздушната междина, от скоростта на въртене на двигателя.

Експериментално получените данни за R_s , R_r , L_{sl} , L_{rl} и фиг.1 са използвани в уравнение (5) и резултатите от изчислението са показани в графичен вид на фиг.4. Вижда се, че при 4500min^{-1} се получава максимум за съпротивителния момент от 0.286Nm . След тази скорост моментът започва да намалява.

Механичните загуби на мощност нарастват по-стръмно до 5000 (150W), след което те нарастват плавно и достигат 475W при 28000min^{-1} (фиг. 4).



Фиг.5. Зависимост на коефициента F_r , свързан с триене в лагерите и вентилационни загуби във въздушната междина, от скоростта на въртене на двигателя.

На фиг.5 е показана зависимостта на коефициента F_r , свързан с триенето в лагерите, в зависимост от скоростта на въртене на двигателя. Графиката се получава като се използва израза $F_r = M_m / n_{2r}$ [N.m.min^{-1}], където n_{2r} е механичната скорост на ротора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложеното механично уравнение на системата при висока скорост на въртене е

$$\frac{d\omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{J} (M_e - M_\Sigma - M_T) \quad (6)$$

Където M_T е товарният момент, а M_Σ е моментът, съответстващ на сумарните загуби

$$M_\Sigma = M_{Fe} + M_m = M_{Fe} + 2 \cdot M_{Fr} + M_w \quad (7)$$

В уравнението M_{Fe} е моментът предизвикан от загуби в желязито

$$M_m = 2 \cdot M_{Fr} + M_w \quad (8)$$

е моментът, създаден от механичните загуби, които от своя страна се делят на момент от загуби от триене в двата лагера $2M_{Fr}$ и момент, създаден от вентилационни загуби във въздушната междина M_w .



Фиг.6. Преобразувател за управление на високоскоростни асинхронни двигатели.



Фиг.7. Четириполюсен асинхронен двигател ATF80E4IMB3 за скорост до 30000min^{-1} .

Резултатите от направените експериментални изследвания напълно съвпадат с резултатите, получени с аналитични и програмни модели на Matlab/Simulink,

При скорост над 1000min^{-1} сумарния съпротивителен момент M_Σ остава почти постоянен до края на изследвания скоростен диапазон.

На *фиг.6* е показан разработения преобразувател за управление на трифазни високоскоростни асинхронни електродвигатели с изходна честота на основния хармоник от 0Hz до 1000HZ. На *фиг.7* е показан изследвания четириполюсен асинхронен електродвигател, на който всички компоненти са стандартно използвани в редовното производство (лагери, ламели, статорен и роторен пакет, проводници).

ЛИТЕРАТУРА

[1] Ключев Владимир, Теория на електрозадвижването, София, Техника, 1989г, стр. 148-149.

[2] H.Dou, B. Khoo, K. Yeo, Energy Loss Distribution in Plane Couette Flow and the Taylor-Couette Flow between Concentric Rotating Cylinders, Inter. J. of Thermal Science, Vol.46, 2007, pp. 262-275.

[3] James E. Vrancik, Prediction of Winage Power Loss in Alternators, National Aeronautics and Space Administration – Washington, D.C. – October 1968, NASA TN D-4849, pp.1-18.

За контакти:

Гл.ас.д-р Кръстю Кръстев - кат. ЕЕА, ИПФ – Сливен, ТУ – София,
GSM: 0895 586 646, e-mail: krystev_kr@abv.bg

Докладът е рецензиран.