

СТАТИЧНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА РЕГУЛИРУЕМО АСИНХРОННО ЕЛЕКТРОЗАДВИЖВАНЕ ПРИ ОТЧИТАНЕ НА ЗАГУБИТЕ В СТОМАНАТА

Димитър Спиров

Университет по хранителни технологии - Пловдив

STATIC CHARACTERISTICS OF REGULATED INDUCTION ELECTRIC DRIVE TAKING INTO ACCOUNT THE STEEL LOSSES

Dimitar Spirov

University of Food Technologies – Plovdiv

Abstract

An algorithm has been developed to determine the static characteristics of induction motors in account of steel losses. The applicability of the algorithm in the frequency control system has been investigated while maintaining constant overload and constant speed for various modes over the whole range of electric drive operation.

Keywords: static characteristics, induction motor, steel losses.

ВЪВЕДЕНИЕ

При изследване на преходните и установените процеси в асинхронните машини и на регулируемите асинхронни електрозадвижвания се използват модели на асинхронната машина, представени в координатни системи, въртящи се с различни скорости [1, 2, 3, 5]. Преобразуването на координатните системи позволява да се опростят уравненията и да се получат постоянни коефициенти пред променливите величини, но не намалява броя на уравненията. От друга страна в зависимост от целта на изследванията и от необходимите резултати в моделите се използват в качеството на зависими променливи токовете и пълните потоци съответно на статора, на ротора и на намагнитващия клон, или различни комбинации между тях. Особено полезни са подобни модели при регулируемите асинхронни електрозадвижвания, когато трябва да се регулира определена величина, като е удобно регулируемата величина да се получава директно без да се използват допълнителни преобразувания. Освен това тези модели могат да се използват за определяне

на консумираните активна, реактивна и пълна мощности на асинхронната машина при динамичните и установените режими [1, 2].

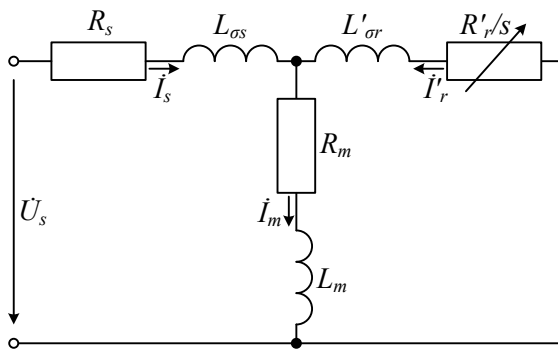
При честотното управление, което се използва за управление на асинхронните машини с по-ниски изисквания към качеството на регулиране на скоростта, като например регулиране на скоростта при механизми с константен съпротивителен момент, за да се поддържат практически постоянни к.п.д., фактор на мощността и коефициентът на претоварване е необходимо пълният магнитен поток да се поддържа постоянен и близък до номиналния в целия диапазон на работа [1, 2]. Управление при константен пълен магнитен поток може да се получи на базата на статичната механична характеристика на асинхронната машина като се изменят пропорционално статорното захранващо напрежение и неговата кръгова честота. Възможността да се определи статичната механична характеристика с висока точност позволява получаването на различни алгоритми за управление при поддържане на постоянно претоварване, посто-

янна скорост и др. в целия диапазон на работа на електрозадвигването.

Целта на настоящия доклад е да бъде разработен алгоритъм за определяне на статичните характеристики на асинхронните двигатели при отчитане на загубите в стоманата. Необходимо е да се изследва приложимостта на алгоритъма при система за честотното регулиране на скоростта при поддържане на постоянна претоварваща способност и постоянна скорост при различни задания на честотата в целия диапазон на работа на електрозадвигването.

ИЗЛОЖЕНИЕ

На фиг. 1 е дадена заместващата схема на фазата на асинхронния двигател (АД) [3, 4].



Фиг. 1. Заместваща схема на АД

За тази схема по законите на Кирхоф можем да запишем система уравнения:

$$\begin{cases} \dot{U}_s = Z_s \dot{I}_s + Z_m \dot{I}_m; \\ 0 = Z_r \dot{I}_r + Z_m \dot{I}_m; \\ \dot{I}_m = \dot{I}_s + \dot{I}_r. \end{cases} \quad (1)$$

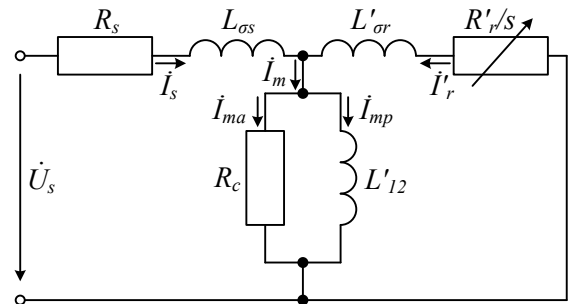
където: $Z_s = R_s + j\omega_s L_{\sigma s}$; $Z_r = R_r/s + j\omega_s L'_{\sigma r}$; $R_{rs} = R_r/s = R_r + (1-s)R_r/s = R_r + R_{\Delta}$; $Z_m = R_m + j\omega_s L_m$; $\dot{E}_m = Z_m \dot{I}_m = (R_m + j\omega_s L_m) \dot{I}_m = R_c \dot{I}_{ma} = jX'_{12} \dot{I}_{mp} = j\omega_s L'_{12} \dot{I}_{mp} = j\omega_s \dot{\Psi}_m$.

От горната система можем да изчислим токовете във веригата:

$$\begin{cases} \dot{I}_s = \dot{U}_s (Z_r + Z_m) / Z_e; \\ \dot{I}_r = -\dot{U}_s Z_m / Z_e; \\ \dot{I}_m = \dot{U}_s Z_r / Z_e. \end{cases} \quad (2)$$

В изразите за токовете в различните клонове въвеждаме елвивалентното съпротивление: $Z_e = Z_s Z_r + Z_s Z_m + Z_r Z_m$.

Реалната и имагинерната съставки на комплексното съпротивление $Z_e = R_e + jX_e$ можем да представим с изразите: $R_e = R_{e1} + R_{e2}/s$; $X_e = X_{e1} + X_{e2}/s$, където: $R_{e1} = R_s R_m - \omega_s^2 [L_{\sigma s} L_{\sigma r} + L_m (L_{\sigma s} + L_{\sigma r})]$; $R_{e2} = R_r (R_s + R_m)$; $X_{e1} = \omega_s [R_s (L_{\sigma r} + L_m) + R_m (L_{\sigma s} + L_{\sigma r})]$; $X_{e2} = \omega_s R_r (L_{\sigma s} + L_m)$.



Фиг. 2. Заместваща схема на АД с отчитане на загубите в стоманата

Въвеждането на допълнително активно съпротивление в намагнитващия клон R_c , паралелно свързано на индуктивното съпротивление на взаимна индукция X'_{12} , дава възможност да се отчетат загубите в стоманата [4] (фиг. 2). По този начин намагнитващия ток \dot{I}_m има две съставки: активна \dot{I}_{ma} , която определя мощността на загубите в стоманата, и реактивна \dot{I}_{mp} , която възбужда основния магнитен поток в магнитопровода (фиг. 2). Тези две съпротивления се определят с изразите [4]:

$$R_c = \frac{R_m^2 + X_m^2}{R_m}; \quad X'_{12} = \frac{R_m^2 + X_m^2}{X_m}. \quad (3)$$

Пълният взаимен магнитен поток на АД може да се определи с израза:

$$\dot{\Psi}_m = \frac{\dot{E}_m}{j\omega_s} = \frac{Z_m \dot{I}_m}{j\omega_s} = \frac{R_c \dot{I}_{ma}}{j\omega_s} = L'_{12} \dot{I}_{mp}, \quad (4)$$

където $L'_{12} = X'_{12}/\omega_s$.

В израрза за електромагнитния момент

$$M_e = 1,5 p_p \operatorname{Im}(\dot{\Psi}_m \bar{I}_r) \quad (5)$$

като заместим полученото по-горе и групираме по степените на хлъзгането s , получаваме:

$$M_e = 1,5 p_p U_s^2 k_1 s / (k_2 s^2 + k_3 s + k_4) = k_M s / (k_2 s^2 + k_3 s + k_4), \quad (6)$$

където $k_M = 1,5 p_p U_s^2 k_1$; p_p са брой двойки полюси на двигателя, а за коефициентите $k_1 \div k_4$ получавме: $k_1 = R_r(R_m^2 + \omega_s^2 L_m^2)$; $k_2 = \omega_s(R_{e1}^2 + X_{e1}^2)$; $k_3 = 2\omega_s(R_{e1}R_{e2} + X_{e1}X_{e2})$; $k_4 = \omega_s(R_{e2}^2 + X_{e2}^2)$.

От (6) можем да изразим хлъзгането s_c , което се получава при даден съпротивителен момент M_c :

$$s_c = \frac{k_M - k_3 M_c - \sqrt{(k_3^2 - 4k_2 k_4) M_c^2 - 2M_c k_3 + k_M^2}}{2M_c k_2}. \quad (7)$$

За критичният момент M_k и критичното хлъзгане s_k получаваме изразите:

$$M_k = k_M \sqrt{k_2 k_4} / (2k_2 k_4 + k_3 \sqrt{k_2 k_4}); \quad (8)$$

$$s_k = \sqrt{k_4 / k_2}.$$

При честотното управление регулирането на скоростта е свързано с определянето на ефективната стойност и честотата на статорното напрежение. Така например ако прилагаме закона за управление $U_s/f_s = \text{const}$, по (8) можем да изчислим спада на критичния момент при пропорционалното намаляване на U_s и f_s . За да получим $M_k = M_{kN} = \text{const}$ в целия диапазон на регулиране от (8) можем да определим U_s , съответстващо на f_s :

$$U_{s(M_k=M_{kN})} = \sqrt{\frac{M_{kN} (2k_2 k_4 + k_3 \sqrt{k_2 k_4})}{3 p_p k_1 \sqrt{k_2 k_4}}}. \quad (9)$$

За да получим $\omega_r = \omega_{rN} = \text{const}$ в целия диапазон на регулиране от (6) можем да определим U_s , съответстващо на M_c :

$$U_{s(\omega_r=\omega_{rN})} = \sqrt{\frac{M_c (k_2 s_n^2 + k_3 s_n + k_4)}{3 p_p k_1 s_n}}. \quad (10)$$

ПОЛУЧЕНИ РЕЗУЛТАТИ

С цел да се проверят разработените алгоритъм и математически модели е изследван

трифазен асинхронен двигател тип 4АО-80В-4Д с номинални данни 0,75 kW, 380 V, 50 Hz при различни закони за регулиране на честотата на въртене. Техническите данни и параметри на електродвигателя са дадени в Приложение.

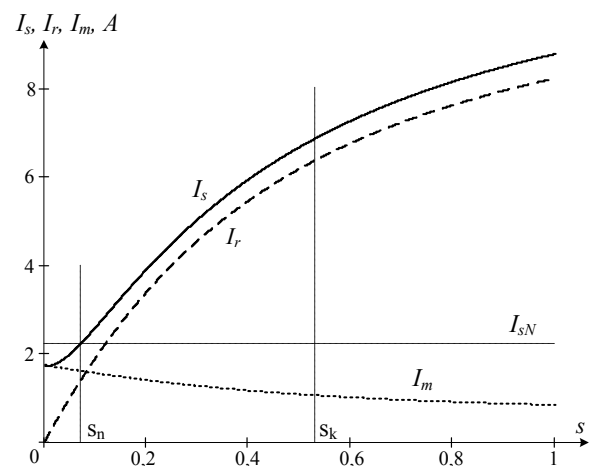
В таблица 1 са сравнени резултати от изчисленията на статорния I_s , роторния I_r и намагнитващия I_m токовете, както и електромагнитния момент M_e при номинално хлъзгане; критичния момент M_k и критичното хлъзгане s_k и пусковия момент M_{II} при $s = 1$ на електродвигателя по предложената методика с отчитане на загубите в стоманата (ОЗС) с резултати, при неотчитане на тези загуби по изрази предложени в [3, 4].

Таблица 1. Резултати от изчисленията.

Параметър		с ОЗС	без ОЗС	δ , %
I_s	A	2,25	-	-
I_r	A	1,44	1,52	5,91
I_m	A	1,59	-	-
M_e	Nm	5,21	5,85	12,17
M_k	Nm	14,17	15,20	7,29
s_k	-	0,53	0,52	-2,45
M_{II}	Nm	12,53	13,38	6,77

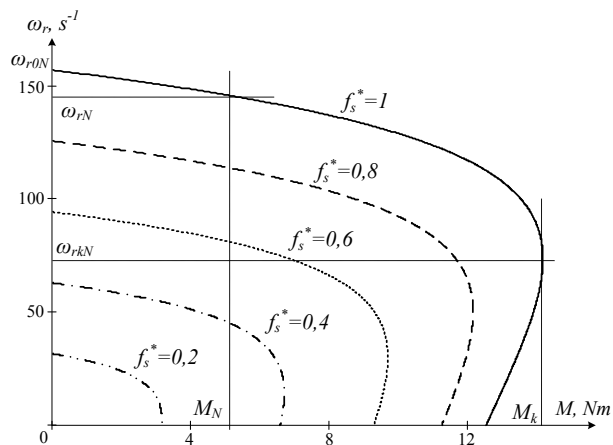
От таблицата се вижда, че неотчитането на загубите в стоманата води до големи изчислителни грешки, като при роторния ток се получава 5,91%, а при електромагнитния момент 12,17%.

На фиг. 4 са представени зависимостите на статорния, роторния и намагнитващия токове при отчитане на загубите в стоманата във функция от хлъзгането s от празен ход ($s = 0$) до късо съединение ($s = 1$) при работа на машината в двигателен режим.



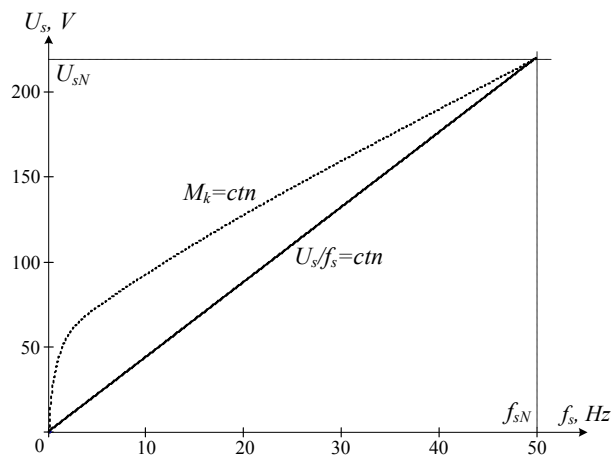
Фиг. 4. Зависимости на $I_s, I_r, I_m = f(s)$

На фиг. 5 са получени по израз (6) зависимостите на ъгловата скорост на ротора ω_r във функция от момента M при честотно управление по закона $U_s/f_s = \text{const}$ за различни задания на честотата в относителни единици $f_s^* = f_s/f_{sN}$, където $\omega_r = \omega_s(1-s)/p_p$; $\omega_s = 2\pi f_s$.



Фиг. 5. Зависимости на $\omega_r = (M)$ при $U_s/f_s = \text{const}$

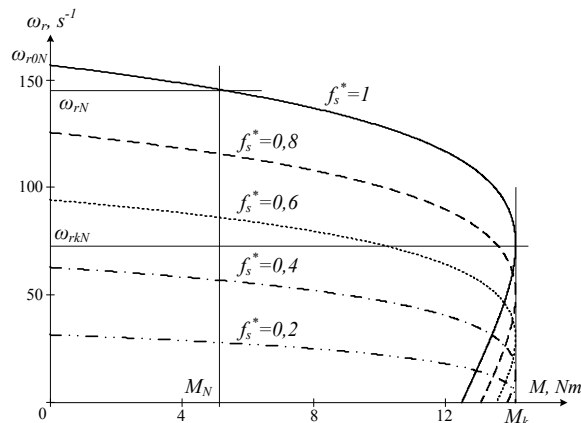
От горната фигура се вижда, че при ниски честоти ($f_s^* = 0,2$) няма пресечна точка между характеристиката на двигателя и на товара, т.е. при този закон за регулиране при ниски скорости спада рязко товарната способност на машината.



Фиг. 6. Зависимости на $U_s = f(f_s)$

На фиг. 6 е получена по (9) зависимостта на ефективната стойност на статорното напрежение във функция от честотата му при поддържане на $M_k = \text{const}$. За сравнение на същата фигура е дадена и зависимостта при $U_s/f_s = \text{const}$. От фигурата се вижда, че за да се получи постоянна товарна способност на двигателя в целия диапазон на регу-

лиране е необходимо да се повиши напрежението при дадената честота. На фиг. 7 са дадени механичните характеристики за този режим на работа.



Фиг. 7. Зависимости на $\omega_r = (M)$ при $M_k = \text{const}$

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В доклада е разработен алгоритъм за определяне на статичните характеристики на асинхронните двигатели при отчитане на загубите в стоманата.

Показана е приложимостта на алгоритъма при честотно управление и поддържане на критичния момент, равен на номиналния в целия диапазон на работа на електродвигателя.

REFERENCE

- [1] P. Vas. Sensorless Vector and Direct Torque Control, Odord University Press, 1998.
- [2] Krishnan, R. Electric motor drives: modeling, analysis and control, Prentice Hall, New Jersey, 2001.
- [3] Kluchev V. I. Theory of electric drive, DI Tehnika, Sofia, 1989. (in Bulgarian)
- [4] Bojilov G., E. Sokolov, I. Vaklev Electromechanical devices, DI Tehnika, Sofia, 1991. (in Bulgarian)
- [5] Spirov D., N. Komitov. Determination of induction machine parameters in case of dynamic and steady-state operating modes, UNITECH'17, Gabrovo, 2017, pp. 101-105. (in Bulgarian)

ПРИЛОЖЕНИЕ

Технически данни и параметри на асинхронен електродвигател тип 4АО-80В-4Д:

$P_N=0,75\text{kW}$; $U_N=380\text{V}$; $I_N=2,25\text{A}$;
 $n_N=1390\text{min}^{-1}$; $\eta_N=72\%$; $\cos\varphi_N=0,72$;
 $J_m=0,0013\text{kgm}^2$.
 $R_s = 11,8\Omega$; $R'_r = 9,67\Omega$; $L_{\sigma s} = L'_{\sigma r} = 0,0229\text{H}$;
 $R_m = 5,77\Omega$; $L_m = 0,38\text{H}$.