

Изследване енергийните и пусковите показатели на асинхронен двигател при различно изпълнение на накъсосъединената роторна намотка

Димо Димов, Миглена Христова

Energy and starting performance research of the induction motor with different rotor bar: In accordance with Commission Regulation (EC) № 640/2009 about minimum efficiency requirements in this article an comparative analysis is presented for induction motor energy and starting performance of the three different rotor cage types: aluminium rotor bar M1; copper rotor bar with less rotor bar dimensions than the aluminium rotor bar M2; copper rotor bar with the current density equal to the aluminium rotor bar M3.

Key words: induction motor, die-cast copper rotor, aluminium rotor, motor efficiency, starting performance

Електродвигателите консумират около 40% от произведената електроенергия в света. От нея 90% се изразходва за захранване на асинхронните двигатели (АД) с мощност от (0,75...200)kW.

Разходите за електроенергия през целия жизнен цикъл на асинхронния двигател са от (60...100) пъти по-големи от разходите за закупуване му. Затова повишаването на коефициента на полезно действие (к.п.д.) на асинхронните двигатели е от първостепенно значение. Дори и най-малкото повишаване ефективността на асинхронните двигатели води до значителна икономия на електроенергия и съответно до намаляване замърсяването на околната среда.

От 1999г. в Европейския съюз действа доброволно споразумение между Европейската комисия (ЕК) и Европейски комитет на производителите на електрически машини и силова електроника (CEMEP) за обозначаване на енергийния клас на асинхронните двигатели ниско напрежение с цел да се намали консумацията на електроенергия чрез използването на високоефективни двигатели. Споразумението регламентира минималните стойности на к.п.д. за 2- и 4-полюсни енергоефективни двигатели с мощност от 1,1 kW до 90kW.

В резултат от приетото споразумение се намалява делът на двигателите с най-ниския енергиен клас EFF3 на европейския пазар. Не е така успешен опитът за въвеждане на двигателите с висок енергиен клас EFF1. От 2000г. до 2005г. делът на пазара на двигателите с клас EFF3 намалява от 43% на 4%, а на двигателите с EFF2 нараства от 54% на 85%, но двигателите с EFF1 успяват да заемат само 9% от пазара до 2005г, започвайки с 3% през 2000г.

През октомври 2008 е въведен стандартът IEC 60034-30, с който в зависимост от стойностите на к.п.д. за едноскоростните трифазни асинхронни двигатели с накъсосъединен ротор се определят три класа IE (International Efficiency): IE1 с нормален к.п.д.; IE2 с висок к.п.д. и IE3 с най-висок (Premium) к.п.д.

На 22 юли 2009г. Европейската Комисия приема Регламент (ЕО) № 640/2009 [4] за прилагане на Директива 2005/32/ЕО, който определя изискванията за екопроектиране за предлагането на пазара и пускането в експлоатация на едноскоростните, трифазни асинхронните двигатели с накъсосъединен (кафезен) ротор, 50 или 50/60-херцови, които имат от 2 до 6 полюса; с номинално напрежение до 1000 V; с номинална мощност на вала между 0,75 kW и 375 kW. В приложението на регламента са посочени минимални стойности за к.п.д. за ниво на ефективност IE2 и IE3.

Европейската Комисия определя графика за въвеждане на изискванията на регламента: от 16 юни 2011 г. електродвигателите не трябва да са с к.п.д., по-нисък от този за ниво на ефективност IE2; от 1 януари 2015 г. двигателите с номинална мощност на вала между 7,5 и 375 kW не трябва да са с к.п.д., по-нисък от този за ниво на ефективност IE3 или трябва да отговарят на ниво на ефективност IE2 и да бъдат оборудвани с регулатор на честотата на въртене; считано от 1 януари 2017 г. всички

двигатели с номинална мощност на вала между 0,75 и 375 kW не трябва да са с к.п.д., по-нисък от този за ниво на ефективност IE3 или трябва да отговарят на ниво на ефективност IE2 и да бъдат оборудвани с регулатор на честотата на въртене.

Една от мерките за постигане на по-висок к.п.д. на асинхронните двигатели с накъсосоединен ротор е използването на мед, вместо алуминий за отливане на роторната намотка.

СРАВНЯВАНЕ НА ЕНЕРГИЙНИТЕ И ПУСКОВИТЕ ПОКАЗАТЕЛИ НА АСИНХРОННИ ДВИГАТЕЛИ

Целта на настоящата работа е да се направи сравнителен анализ на енергийните и пусковите показатели на стандартен асинхронен двигател при различно изпълнение на накъсосоединената роторната намотка.

При проектиране на двигател с лята медна роторна намотка може да се запази геометрията и размерите на роторния лист както при алуминиевата намотка или да се променят размерите на роторните канали.

Обект на изследване е базов стандартен асинхронен двигател тип АО 90s-4с, за който размерите на статора и данните на статорната намотка са посочени в [1], а размерите на роторните канали и параметрите на статорната и роторната намотка (табл.1) са изчислени по методика посочена в [3]. По нея са определени и данните за построяване на работните характеристики при различните накъсосоединени роторни намотки. За улеснение е възприето вариантите на изпълнение на ротора да се обозначат както следва: **M1** - с алуминиева роторна намотка и плътност на тока в роторната пръчка $J_2 = 3.10^6 \text{A.m}^{-2}$; **M2** - с медна роторна намотка, която има по-малки размери на роторните пръчки (канали) и плътност на тока $J_2 = 5.10^6 \text{A.m}^{-2}$; **M3** - медна роторна намотка с размери на пръчките и плътност на тока J_2 , равни на тези за **M1**.

Таблица 1
Параметри на трифазния асинхронен двигатели при различни варианти на накъсосоединената роторна намотка

Величина	M1	M2	M3
r_1, Ω	6,68	6,68	6,68
r_2', Ω	3,47	3,78	2,19
x_1, Ω	3,02	3,02	3,02
x_2', Ω	7,6	7,01	7,6
$S_{пр}, \text{m}^2$	$61,12.10^{-6}$	$36,42.10^{-6}$	$61,12.10^{-6}$
$G_{рн}, \text{kg}$	0,505	0,999	1,676
$P_{ел2}, \text{kW}$	56,2	61,14	35,4
$I_{\mu}, \%$	58,2	48,5	58,2
$\zeta_p, \text{лв}$	1,48	9,80	16,59

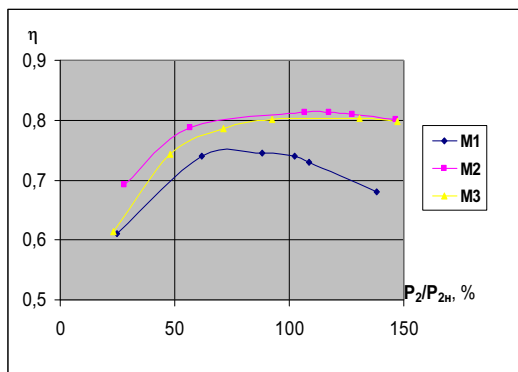
Активното r_1 и индуктивното x_1 съпротивление на статорната намотка за трите варианта има една и съща стойност, защото се използва един статор. Геометрията и размерите на роторния лист за вариант **M1** и **M3** са еднакви, затова приведеното

индуктивно съпротивление на роторната намотка X'_2 не се променя. Медта е с по-малко специфично съпротивление от алуминия, по тази причина медната роторна намотка има по-малко приведено активно съпротивление r'_2 от това на алуминиевата намотка при еднакви размери на пръчките. Поради, което електрическите загуби в ротора $P_{ен2}$ са най-малки при вариант **M3**. Медта има по-голяма специфична плътност от алуминия, затова при еднакви размери на роторните пръчки медната намотка има по-голяма маса $G_{рн}$ от алуминиевата. По тази причина се увеличава инерционният момент на ротора при вариант **M3**. От своя страна това води до намаляване на бързодействието на двигателя.

При вариант **M2** параметрите на медната роторна намотка са определени при по-голяма плътност на тока ($J_2 = 5.10^6 \text{A.m}^{-2}$) от плътността при алуминиевата ($J_2 = 3.10^6 \text{A.m}^{-2}$). По-голямата плътност на тока води до намаляване сечението на роторните пръчки $S_{пр}$ и съответно до по-малки размери на каналите на ротора. Това предизвиква изменение на приведеното активно r'_2 и индуктивно X'_2 съпротивление на роторната намотка. При този вариант широчината на роторните зъби е по-голяма, отколкото при другите два варианта. Следствие на което магнитовъзбудителното напрежение на зъбната зона на ротора е по-малко, т.е. насищането на магнитната верига намалява. Това води до намаляване на стойността на намагнитващия ток $I_{ц}$.

Стойността на материала $C_{р}$, необходим за изработване на различните роторни намотки, е изчислена при цена за килограм мед (6,6\$/kg) и алуминий (1,95\$/kg) за курс на долара 1,5лв/\$. При сравняване на получените резултати (табл.1) се вижда, че стойността на материала за изработване на медна накъсосъединена роторна намотка при по-малки роторни канали (**M2**) се повишава 6,6 пъти, а при запазване на размерите на роторните канали (**M3**) повече от 11 пъти в сравнение с алуминиевата намотка (**M1**).

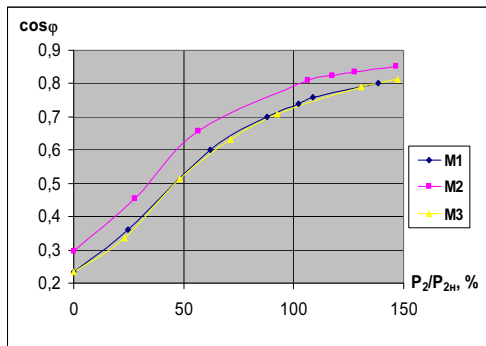
Използвайки данните от табл.1 по аналитичен път са получени стойностите за построяването на зависимостта на к.п.д (η) и $\cos\phi$ във функция от относителното натоварване $P_2/P_{2н}$, които са показани на фиг.1 и фиг.2.



Фиг.1. Зависимост на к.п.д. η от натоварването

От фиг.1 може да се констатира, че к.п.д за асинхронните двигатели с медна роторна намотка е по-висок отколкото на двигателите с алуминиева намотка. За вариант **M2** η е най-висок и при номинално натоварване достига 0,81. В зоната на

номиналните натоварвания стойностите на η малко се различават при двете медни намотки.



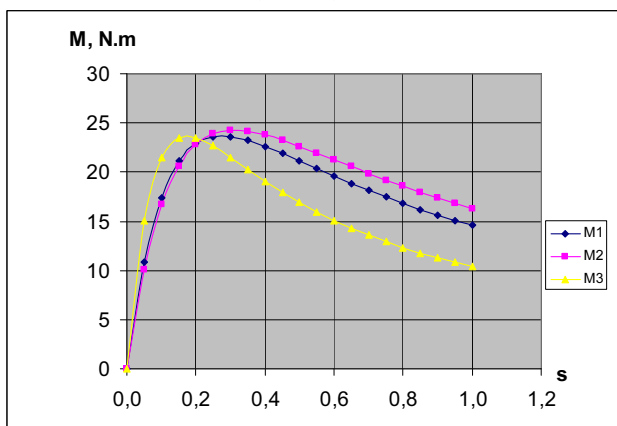
Фиг.2. Зависимост на $\cos\phi$ от натоварването

От фиг. 2 се вижда, че при номинална полезна мощност на вала най-висок $\cos\phi$ има двигателят с медна роторна намотка **M2**, на която размерите на роторните пръчки (канали) са по-малки. Това се дължи на малкия намагнитващ ток консумиран от двигателя, вследствие на по-малкото насищане. Кривите на изменение на $\cos\phi$ за вариантите **M3** и **M1** се прекриват, тъй като размерите на роторните канали се запазват и намагнитващия ток не се променя.

От анализа на кривите от фиг.1, фиг.2 и данните от табл.1 може да се констатира, че с изменение на плътността на тока при вариант **M2** може да се търси оптимално решение за повишаване на к.п.д (η) и $\cos\phi$ на трифазните асинхронни двигатели с накъсо съединена роторната намотка.

За получаване на данните за построяване на механичните характеристики от фиг. 3 се използва зависимостта [2]

$$M_{\delta} = \frac{pm_1 U_1^2 r_2'}{2\pi f_1 s \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_1 + x_2')^2 \right]}$$



Фиг.3. Зависимост на електромагнитния момент **M** от хлъзгането

При вариант **M3** приведеното активно съпротивление на роторната намотка r_2' е най-малко, затова критичното хлъзгане, пусковият момент и хлъзгането в работния участък на механичната характеристика на двигателя са най-малки. При вариант **M2** двигателят има най-голям пусков момент и критично хлъзгане, тъй като r_2' е най-голямо. За този вариант критичният момент е също най-голям, поради най-малкото индуктивно съпротивление на роторната намотка X_2' .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Цената на асинхронния двигател с медна накъсосъединена роторна намотка е по-висока от тази на двигател с алуминиева намотка, но коефициентът на полезно действие при меден ротор е по-висок.

2. Чрез промяна на плътността на тока през роторните медни пръчки може да се търси оптимално повишаване на η и $\cos\phi$ на трифазните асинхронни двигатели с накъсо съединена роторната намотка при зададени граници на изменение на пусковия момент.

3. Инерционният момент на ротора с медна намотка е по-голям, затова се намалява бързодействието на двигателя, което го прави неподходящ за задвижвания с често реверсиране и регулиране на честотата на въртене, както и при работа в повторно-кратковременен режим.

ЛИТЕРАТУРА

[1] Дончев Г. Б. и др., Справочник по експлоатация и ремонт на електрически двигатели, Техника, С., 1981.

[2] Димов, Д., М. Христова, Електрозадвижване, Печатна база при Русенски университет „Ангел Кънчев, 2009.

[3] Копилов И. П. и др., Проектиране на електрически машини, Техника, С. 1988.

[4] Регламент (ЕО) №640/2009 на Комисията от 22 юли за прилагане на Директива 2005/32/ЕО на Европейския парламент и на Съвета по отношение на изискванията за екопроектиране на електродвигатели, Официален вестник на Европейския съюз, 23.07.2009.

За контакти:

Доц. д-р инж. Димо Димов, Катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, Тел.: 888 659, E-mail: dnd@ru.acad.bg

Гл. ас. инж. Миглена Христова, Катедра “Електроснабдяване и електрообзавеждане”, Русенски университет “Ангел Кънчев”, Тел.: 888 659, E-mail: mcankova@ru.acad.bg

Докладът е рецензиран.