

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ В КВАЗІСТАТИЧНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Бібік О.В., к.т.н., Попович О.М., к.т.н.
 Інститут електродинаміки НАН України
 Україна, 03680, Київ, пр-кт Перемоги, 56
 тел. (044) 454-25-43

Запропоновано алгоритм визначення резервів покращення експлуатаційних показників при проектуванні асинхронних двигунів з урахуванням реального режиму роботи.

Предложен алгоритм определения резервов повышения эксплуатационных показателей при проектировании асинхронных двигателей с учетом реального режима работы.

Асинхронні двигуни (АД) мають достатньо високі значення енергетичних коефіцієнтів у номінальних режимах роботи, що досягається оптимальним проектуванням для даних умов. На практиці режим роботи АД може істотно відрізнятись від номінального. При цьому енергоефективність значно знижується. На прикладі навантажень, досліджених у роботі [1], коефіцієнти корисної дії (ККД) і потужності (α) знижуються відповідно: для періодичного навантаження (типу поршневого компресора) на 37% і 17.5% у порівнянні з номінальними, для пульсуючої - на 21.5% і 12.5%. Резерви підвищення енергоефективності АД полягають в урахуванні реального режиму експлуатації в процесі оптимального проектування.

Метою даної роботи є підтвердження можливості підвищення енергоефективності і кількісне визначення резерву підвищення ККД асинхронних двигунів на конкретному прикладі експлуатації. Алгоритм визначення резервів підвищення експлуатаційних показників АД припускає:

1. Вибір цільової функції.
2. Еквівалентування заданого змінного навантаження еквівалентним сталим.
3. Пошук оптимальних параметрів АД при сталому режимі роботи з еквівалентним постійним навантаженням (статичний режим).
4. Пошук оптимальних конструктивних параметрів АД при квазістатичному режимі роботи з заданим змінним навантаженням, що було еквівалентоване сталим в п.2, і визначення при цьому максимального експлуатаційного ККД.
5. Дослідження АД з конструктивними параметрами, отриманими по п.3, у заданому квазісталому режимі роботи і визначення одержуваного при цьому значення ККД.
6. Визначення резервів підвищення енергоефективності в зіставленні експлуатаційних ККД, одержуваних по п.4 і п.5.

Визначення оптимальних параметрів АД виконано на базі трифазного асинхронного двигуна 4А80А6У3 (номінальна потужність $P_n = 750$ Вт, число пар полюсів $p = 3$, момент інерції ротора двигуна $J_p = 0,0031$ кг·м²) за критерієм максимуму ККД при пульсуючому навантаженні і живленні симетричною трифазною напругою в статичному і квазістатичному

режимах.

Як цільову функцію обраний коефіцієнт корисної дії, що розраховується як:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}, \quad (1)$$

де $P_1 = \sum_{k=1}^3 \frac{1}{T_H} \int_t^{t+T_H} u_k(t) \cdot i_k(t) dt + P_{ст}$ – споживана потужність;

$P_2 = \frac{1}{T_H} \int_t^{t+T_H} M(t) \cdot \omega_r(t) dt$ – корисна потужність; $P_{ст}$ – втрати в сталі; $M(t)$, $\omega_r(t)$ – миттєві значення електромагнітного моменту і частоти обертання ротора; T_H – період навантаження; k – число фаз.

У якості еквівалентного змінного навантаження $M_{сз}$ прийнятий середній момент $M_{ссп}$ за період зміни моменту навантаження T_H :

$$M_{сз} = M_{ссп} = \frac{1}{T_H} \int_t^{t+T_H} M_c(t) dt, \quad (2)$$

де $M_c(t)$ - часова залежність моменту опору.

Для виключення впливу сторонніх факторів, розрахунок робочих характеристик АД і здійснення процедури оптимального проектування виконані на одній і тій же математичній моделі, тим самим методом, як у статичному так і в квазістатичному режимах [1, 2]. Алгоритм розрахунку реалізований у системі Matlab-Simulink. Необхідно помітити, що метод оптимізації повинний забезпечити ефективний пошук оптимального варіанта в умовах значних витрат машинного часу, що має місце при дослідженні квазістатичних режимів роботи (повторюваних перехідних процесів).

Пошук оптимального варіанта АД поділено на два етапи: одержання аналітичної залежності зміни ККД у функції параметрів оптимізації й оптимізацію отриманої залежності. На першому етапі застосований метод планування експерименту МПЕ [3], в основі якого лежить побудова регресійної моделі. Використано ортогональний центрально-композиційний план другого порядку (ОЦКП), що забезпечує незалежність визначення коефіцієнтів регресії, достатню точність моделі і потребує порівняно невеликої

кількості експериментів.

Рівняння регресії в цьому випадку має вид

$$\hat{Y} = f(\bar{x}) = b_0 + \sum_{i=1}^n b_i x_i + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^n b_{ij} x_i x_j + \sum_{i=1}^n b_{ii} x_i^2, \quad (3)$$

де \hat{Y} – значення вихідної величини; x_i, x_j – значення змінних параметрів (факторів); n – число факторів; b_0, b_i, b_{ij}, b_{ii} – оцінки коефіцієнтів рівняння регресії, що визначаються рішенням системи лінійних рівнянь у матричній формі:

$$\hat{Y} = [f^T(x)] \cdot [B], \quad (4)$$

де $[f^T(x)]$ – транспонована матриця, $[B]$ – матриця оцінок коефіцієнтів. У результаті математичних викладень [3], отримане однорідне лінійне рівняння, рішенням якого є наступне:

$$[B] = \left([x^T] \cdot [x] \right)^{-1} \cdot [x^T] \cdot [\hat{Y}], \quad (5)$$

де $[x]$ – прямокутна матриця значень, що спостерігаються; \hat{Y} – матриця-стовпець вихідних змінних.

В ортогональному плані ОЦКП до ядра, що представляє повний факторний експеримент (ПФЕ) типу 2^n , додається центральна точка ($x_i = 0, i = 1, 2, \dots, n$) і по дві "зоряні" точки для кожного фактора ($x_i = \pm \alpha, x_j = 0, j \neq i$). Загальне число дослідів у даному плані складає: $N = 2^n + 2n + 1$.

Як параметри оптимізації для представленого варіанта розрахунку обрана: довжина пакета статора $l(x_1)$ і число ефективних провідників у пазу статора $sp_1(x_2)$. Як середні значення прийняті конструктивні параметри досліджуваного двигуна. Інтервали варіювання змінних обрані на рівні $\pm 10\%$ і представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

	$l, \text{ м}$	sp_1
Нижній рівень -1	0,702	74
Верхній рівень +1	0,0858	90
Середнє значення 0	0,078	82

Матриця планування експерименту однакова для статички і квазістатички (табл. 2).

Одержання аналітичної залежності $\eta_1 = f(l, sp_1)$ для статичного режиму проведено за допомогою ряду розрахунків, використовуючи математичну модель квазістатички при моменті інерції $J = \infty$. Визначивши матрицю коефіцієнтів регресії $[B]$ по формулі (5), вираження залежності функції мети \hat{Y}_1 від параметрів оптимізації x_1 і x_2 для випадку статички має вид:

$$\hat{Y}_1 = 74.137 + 4.583 \cdot x_1 + 5.608 \cdot x_2 - 1.95 \cdot x_1^2 - 2.395 \cdot x_2^2 - 3.625 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (6)$$

У таблиці 2 представлені значення функції \hat{Y}_1 , обчислені по поліному (6). Точність розрахунків погрішності Δ_1 визначаємо як відносну різницю між розрахунковими значеннями, отриманими по математичній моделі Y_1 , і аналітичної залежності \hat{Y}_1 :

$$\Delta_1 = \frac{Y_1 - \hat{Y}_1}{Y_1} \cdot 100\%. \quad (7)$$

Матриця планування експерименту, розрахункові значення Y_1, \hat{Y}_1 , погрішності Δ_1 представлені в табл. 2. Аналіз результатів показує, що отримана модель статички забезпечує досить високу точність розрахунків. Максимальна погрішність не перевищує 1.5%.

Для оптимізації виразу (6) використана стандартна функція оптимізації з обмеженнями `fmincon`, використовувана в середовищі Matlab [4]. У результаті розрахунків одержуємо максимальне значення ККД, рівне 77.47, у точці з координатами: $x_1 = 0.293$; $x_2 = 0.949$, що в реальному масштабі відповідає довжині пакета статора $l = 0.0803$ м і числу провідників $sp_1 = 84.4$. Позначимо цей АД (з параметрами: $sp_1 = 84, l = 0.0803$ м) як варіант №1.

Проводимо розрахунок квазістатичного режиму з оптимальними конструктивними параметрами статички і змінним навантаженням. ККД при цьому склав 56.31%. Цей режим АД відповідає варіанту №2 у таблиці 3.

Для визначення оптимальних конструктивних параметрів квазістатичного режиму використовуємо той же підхід, що і для статички. Коефіцієнти регресійної моделі визначаємо по формулі (5), з врахуванням яких поліном має вид:

$$\eta_2 = 58.159 + 2.668 \cdot l + 0.395 \cdot sp_1 - 1.532(l^2) + 2.98(sp_1)^2 - 2.575 \cdot l \cdot sp_1. \quad (8)$$

Розрахунок погрішності Δ_2 виконаний відповідно до формули (7). Її максимальне значення не перевищує 7%. Дані розрахунків приведені в таблиці 2. У результаті оптимізації залежності (8) отримане максимальне значення функції мети $f = 64.455$ в точці $x = 1; -1$, що відповідає точці 2 (див. табл. 2) з конструктивними параметрами: $l = 0.0858$ м, $sp_1 = 74$. (варіант №3 табл. 3.). Варіант №4 відповідає досліджуваному (базовому) двигуну.

Таким чином, у результаті визначення залежності ККД від довжини пакета статора і числа ефективних провідників у пазу обмотки статора отримані дві залежності для квазістатички (8) і статички (6). Варто помітити, що в результаті оптимізації функцій для інтервалу варіювання змінних $\pm 10\%$ максимальний ККД статички (η_1) відрізняється від ККД квазістатички (η_2) на 12,3%. Виконане оптимальне проектування в квазістатичному режимі роботи дало максимум експлуатаційного ККД 64.45%.

Таблиця 2

№	x_i											
	x_0	x_1	x_2	$x'_3 = x_1^2 - 0.67$	$x'_4 = x_2^2 - 0.67$	$x_5 = x_1 \cdot x_2$	Y_1	\hat{Y}_1	$\Delta_1, \%$	Y_2	\hat{Y}_2	$\Delta_2, \%$
1	+1	-1	-1	0.33	0.33	+1	55,38	53,976	-1,08	51,43	53,969	-4,9
2	+1	+1	-1	0.33	0.33	-1	72,0	72,392	-0,54	65,81	64,455	-2,06
3	+1	-1	+1	0.33	0.33	-1	74,75	74,442	0,41	58,52	59,909	-2,37
4	+1	+1	+1	0.33	0.33	+1	76,87	76,358	0,67	62,6	61,095	2,4
5	+1	-1	0	0.33	-0.67	0	67,89	67,604	0,42	57,89	53,959	6,79
6	+1	+1	0	0.33	-0.67	0	76,65	76,77	-0.16	55,44	59,295	-6,95
7	+1	0	-1	-0.67	0.33	0	67,12	66,134	1,47	61,94	60,744	1,93
8	+1	0	+1	-0.67	0.33	0	76,53	77,35	-1,07	60,43	61,534	-1,83
9	+1	0	0	-0.67	-0.67	0	73,74	74,137	0,22	58,07	58,159	0,15

Таблиця 3

Варіант АД	Режим АД	Параметри оптимізації		Параметри режиму								
		$l, м, (x_1)$	$sp_1, (x_2)$	$J, кг \cdot м^2$	$P_2, Вт$	$P_1, Вт$	$M_{ср}, Нм$	$s, о.е.$	$I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}, А$	$I_r, А$	$\alpha, о.е.$	$\eta, о.е.$
1	Статика	0.0803	84	∞	364.7	477.3	3.33	0.0342	1.313, 1.313, 1.313	105	0.538	76.41
2	Квазі-статика	0.0803	84	0.0046	231.4	555.7	3.33	0.0322	1.92, 1.94, 1.905	231.4	0.429	56.31
3	Квазі-статика	0.0858	74	0.0046	325.9	495.8	3.33	0.0250	1.77, 1.765, 1.769	136.9	0.408	65.73
4	Статика (базовий варіант)	0.078	82	∞	338.5	457	3.33	0.0293	1.422, 1.422, 1.422	211.1	0.42	58.07

ККД для квазістатичного режиму з конструктивними параметрами, що відповідають оптимальному статичному режиму склало 56.31 %.

Висновки. Оптимальне проектування АД з урахуванням реального навантаження забезпечує можливість підвищення енергоефективності електроприводів. У досліджуваному режимі підвищення експлуатаційного ККД склало 8.14%.

ЛІТЕРАТУРА

- [1] Библик Е.В., Попович А.Н., Головань И.В. Исследования квазистатических режимов асинхронного двигателя при пульсирующей и периодической нагрузках // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск "Силова електроніка та енергоефективність", частина 2, 2006, С. 99 – 102.
- [2] Попович А.Н. Математическая модель для расчета рабочих характеристик с учетом потерь в стали // Технічна електродинаміка.- 1999. – №4. - С. 46 –52.
- [3] Ивоботенко Б.А., Ильинский Н.Ф., Копылов И.П. Планирование эксперимента в электромеханике. - М.: Энергия, 1975. - 184 с.
- [4] Кетков Ю.А., Кетков А.Ю., Шульц М.М. MATLAB 6х.: программирование численных методов.-СПб.: БХВ – Петербург, 2004. - 672 с.

Надійшла 18.09.2006