

КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В АСИНХРОННИХ ЕЛЕКТРОПРИВОДАХ

Розглядається проблема розрахунку ємності косинусних конденсаторів для індивідуальної компенсації реактивної потужності в асинхронних електроприводах в ustalених і пускових режимах роботи. В запропонованому алгоритмі використовується розроблена на основі теорії зображуючих векторів математична модель асинхронного двигуна високого рівня адекватності, в якій враховується як насичення магнітопроводу, так і витіснення струму в стержнях ротора.

Рассматривается проблема расчета емкости косинусных конденсаторов для индивидуальной компенсации реактивной мощности в асинхронных электроприводах в установившихся и переходных режимах работы. В предложенном алгоритме используется разработанная на основе теории изображающих векторов математическая модель асинхронного двигателя высокого уровня адекватности, в которой учитывается как насыщение магнитопровода, так и вытеснение тока в стержнях ротора.

ВСТУП

Регулювання реактивної потужності є однією з основних проблем електроенергетики в цілому і електропостачання зокрема, оскільки втрати в лінії електропередавання, зумовлені протіканням реактивних струмів, призводять до зниження енергоефективності. Основними споживачами реактивної потужності є трансформатори і асинхронні двигуни (АД). Використання в електроприводах АД значно знижує коефіцієнт потужності мережі, а тому потребує використання синусних конденсаторів. В практиці експлуатації використовують як групову, так і індивідуальну компенсацію, при якій конденсатори під'єднують паралельно до обмотки статора [1, 3]. Очевидно, що параметри двигуна внаслідок насичення магнітопроводу, а також витіснення струмів в стержнях ротора в динамічних режимах змінюються в широких межах. Однак завжди можна підібрати таке значення ємності паралельно увімкнених конденсаторів, щоб задовольнялась умова резонансу струмів і загальний коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$) системи АД-батарея конденсаторів був рівним одиниці.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

Найбільшої зміни зазнають параметри АД під час пуску, а якщо система електроприводу має значний момент інерції, то пуск може тривати кілька секунд. Пускові струми, які мають значну реактивну складову, призводять до провалу напруги в лінії живлення. В процесі пуску реактивна потужність АД змінюється в широких межах. Визначення закону її зміни під час пуску можна здійснити на підставі розрахунку статичних характеристик. Однак їх розрахунок зазвичай здійснюють за відомими методиками, розробленими на підставі добре опрацьованих методів лінійної теорії, в основі яких є заступні схеми [3]. Методика такого розрахунку добре відпрацьована, він забезпечує достатньо високої достовірності результати номінальних режимів. Розрахунок на підставі заступних схем відмінних від ustalених режимів не забезпечує необхідної точності, чим зумовлена велика кількість публікацій, в яких пропонуються експериментальні методи визначення параметрів заступних схем або різні, придатні для даної задачі, методи обчислення параметрів заступної схеми. Сучасні напівпровідникові комутуючі пристрої [4] дають змогу з високою

частотою комутувати батареї конденсаторів і змінювати ємність у відповідності до зміни реактивної потужності двигуна не тільки в ustalених, але й в пускових режимах. Для цього необхідно мати програму розрахунку, яка дає змогу визначити закон зміни споживаної двигуном реактивної потужності, і відповідно ємності конденсаторів, з високою достовірністю і швидкодією, яка дає змогу здійснювати керування в реальному часі. Отже визначення закону зміни ємності паралельно увімкнених конденсаторів, необхідної для компенсації реактивної потужності АД з урахуванням зумовленої насиченням магнітопроводу та витісненням струму в стержнях ротора зміни параметрів, є актуальною задачею.

Метою статті є розроблення методу й алгоритму розрахунку ємності косинусних конденсаторів, необхідної для компенсації реактивної потужності АД в ustalених і пускових режимах роботи.

АЛГОРИТМ РОЗВ'ЯЗУВАННЯ ЗАДАЧІ

Оскільки електромагнітні перехідні процеси в контурах АД згасають швидко, процес пуску можна розглядати як сукупність ustalених режимів. Задача аналізу впливу косинусних конденсаторів на процеси в АД розв'язується в ортогональних осях x , y , які обертаються синхронно з полем двигуна. Їх застосування дає змогу мінімізувати обсяг обчислень, оскільки при цьому розроблені програми мають найвищу швидкодію, що дає змогу аналізувати процеси в реальному часі. З метою урахування явища витіснення струмів у стержнях короткозамкненого ротора, паз ротора розбивається по висоті на n шарів [2]. Як показала практика розрахунків, для більшості випадків достатньо взяти $n=5$. У результаті отримуємо на роторі n трифазних обмоток, які приводяться до осей x , y . Насичення враховується шляхом використання кривих намагнічування як основного магнітного шляху, так і шляхів розсіяння статора та ротора [5].

В ustalеному режимі електромагнітні процеси в АД в осях x , y з урахуванням розбиття стержнів на n елементарних описуються нелінійною системою алгебричних рівнянь [5] $m=2(n+1)$ -го порядку

$$\omega_0 \Psi_{sy} - r_s i_{sx} + u_{sx} = 0;$$

$$\begin{aligned}
-\omega_0 \Psi_{sx} - r_s i_{sy} + u_{sy} &= 0; \\
s \omega_0 \Psi_{1y} - r_1 i_{1x} &= 0; \\
-s \omega_0 \Psi_{1x} - r_1 i_{1y} &= 0; \\
&\vdots \\
s \omega_0 \Psi_{ny} - r_n i_{nx} &= 0; \\
-s \omega_0 \Psi_{nx} - r_n i_{ny} &= 0,
\end{aligned} \quad (1)$$

де $\Psi_{sx}, \Psi_{sy}, \Psi_{1x}, \Psi_{1y}, \dots, \Psi_{nx}, \Psi_{ny}, i_{sx}, i_{sy}, i_{1x}, i_{1y}, \dots, i_{nx}, i_{ny}, u_{sx}, u_{sy}, r_s, r_1, \dots, r_n$ – потокозчеплення, струми та напруги перетворених контурів статора (s) і ротора (r) та активні опори цих контурів; s – ковзання; ω_0 – частота напруги живлення.

Потокозчеплення кожного контура однозначно визначається сукупністю струмів контурів, а розв'язком системи (1) при заданому значенні ковзання є вектор струмів $\vec{i} = (i_{sx}, i_{sy}, i_{1x}, i_{1y}, \dots, i_{nx}, i_{ny})^*$ (верхній індекс "*" означає транспонування). Задаючись значеннями ковзання s в межах $1,0 \geq s > 0,0$, можна розрахувати статичні характеристики у вигляді залежностей струмів від ковзання, які дають змогу обчислити потокозчеплення, електромагнітний момент та потужності. Внаслідок зумовленої насиченням магнітопроводу АД нелінійної залежності потокозчеплень контурів від струмів система алгебричних рівнянь (1) нелінійна, тому її розв'язування потребує розроблення відповідного алгоритму.

Утворивши вектори напруг $\vec{u} = (u_{sx}, u_{sy}, 0, \dots, 0)^*$ та потокозчеплень $\vec{\Psi}$, представимо її у векторній формі

$$\vec{z}(\vec{\Psi}, \vec{i}, s) = \vec{u}. \quad (2)$$

Якщо сумістити вісь x із зображуючим вектором напруги живлення, що зазвичай практикується, то $u_{sx} = U_m; u_{sy} = 0$, де U_m – амплітудне значення фазної напруги. Одним із шляхів визначення розв'язку системи (2) при заданому значенні ковзання s є метод диференціювання по параметру [6]. Для цього в системі (2) домножимо вектор $\vec{u} = \varepsilon \vec{u}_0$ на скалярний параметр ε та продиференціюємо отриману систему по цьому параметру. В результаті отримаємо

$$A \frac{d\vec{i}}{d\varepsilon} = \vec{u}, \quad (3)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} \\ A_{21} & A_{22} \end{bmatrix};$$

$$A_{11} = \begin{bmatrix} x_{sysx} - R_s & x_{sysy} & x_{sy1x} & x_{sy1y} \\ -x_{sxx} & -x_{syy} - R_s & -x_{sx1x} & -x_{sx1y} \\ sx_{1ysx} & sx_{1ysy} & sx_{1y1x} - R_1 & sx_{1y1y} \\ -sx_{1x} & -sx_{1xy} & -sx_{1x1x} & -sx_{1x1y} - R_1 \end{bmatrix};$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} \dots & x_{synx} & x_{syny} \\ \dots & -x_{sxn} & -x_{sny} \\ \dots & sx_{1ynx} & sx_{1yny} \\ \dots & -sx_{1n} & -sx_{1ny} \end{bmatrix};$$

$$A_{21} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ sx_{nysx} & sx_{nysy} & sx_{ny1x} & sx_{ny1y} \\ -sx_{nxx} & -sx_{nxy} & -sx_{nxy} & -sx_{nx1y} \end{bmatrix};$$

$$A_{22} = \begin{bmatrix} \vdots & \vdots & \vdots \\ \dots & sx_{nynx} - R_n & sx_{nyny} \\ \dots & -sx_{nxx} & -sx_{nxy} - R_n \end{bmatrix}.$$

Елементами матриці A є електромагнітні параметри, які визначаються згідно з математичною моделлю АД в осях x, y [5].

Інтегруючи систему (3) по ε в межах від $\varepsilon=0$ до $\varepsilon=1$ (що можна здійснити методом Ейлера за кілька кроків), отримаємо значення вектора струмів \vec{i} при заданому значенні фазних напруг U_m , який уточнюємо ітераційним методом Ньютона. Початкові умови (значення вектора \vec{i}) – нульові, оскільки при $\varepsilon = 0$ вектор прикладених напруг дорівнює нулю. Приріст $\Delta \vec{i}^{(k)}$ вектора струмів \vec{i} на k -му кроці ітерації визначається за формулою

$$A \Delta \vec{i}^{(k)} = -\vec{z}(\vec{i}^{(k)}), \quad (4)$$

де $\vec{z}(\vec{i}^{(k)})$ – вектор нев'язок системи (2) при заданих значеннях ковзання s і вектора напруг $\vec{u}^{(k)}$.

Алгоритм розрахунку статичних характеристик складається з двох етапів. На першому визначаємо значення координат при ковзанні $s = 1$, а на другому, приймаючи вектор напруг незмінним, змінюємо ковзання від одиниці до номінального значення, що дає змогу забезпечити збіжність ітераційного процесу, оскільки отримані з попереднього кроку значення координат знаходяться зазвичай в околі збіжності ітераційного процесу.

Задаючись рядом значень ковзання s ротора АД, можна отримати багатовимірну статичну характеристику у вигляді залежності вектора струмів $\vec{i} = \vec{i}(s)$ від ковзання, що дає змогу обчислити залежність значення ємності конденсаторів від ковзання за умови повної компенсації $\cos \varphi = 1$ реактивної потужності за формулою

$$C(s) = \frac{abs(i_{sy}(s))}{\omega_0 U_m}. \quad (5)$$

На рис. 1 наведено залежності коефіцієнта потужності АД ($P_n = 15$ кВт, $U_n = 380/220$ В) від ковзання та ємності конденсаторів, яка необхідна для його підтримання під час пуску АД на рівні $\cos \varphi = 1$.

На рис. 2 наведені розраховані при різних значеннях ковзання ($s = 1,0; 0,6; 0,2; 0,05; 0,016$) залежності відносного (стосовно номінального струму двигуна) значення струму в лінії, яка живить АД, від величини ємності конденсаторів.

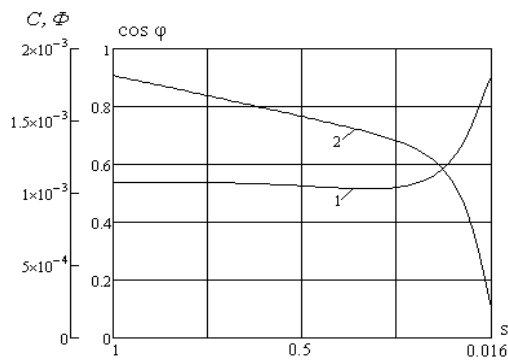


Рис. 1. Залежності від ковзання $\cos\phi$ двигуна (1) і ємності конденсаторів (2), необхідної для підтримання $\cos\phi = 1$ системи АД-конденсатори

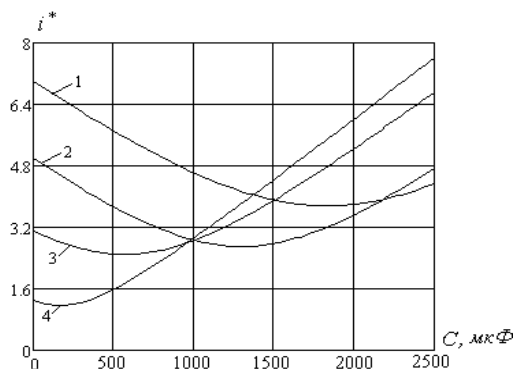


Рис. 2. Залежності струму в лінії живлення АД з паралельно увімкненими конденсаторами від ємності конденсаторів при різних значеннях ковзання:
1 – 1,0; 2 – 0,6; 3 – 0,2; 4 – 0,05; 5 – 0,016

ВИСНОВКИ

Розроблено алгоритм розрахунку залежності ємності паралельно увімкнених конденсаторів асинхронного електроприводу від ковзання, що є основою для її регулювання з метою повної або часткової компенсації реактивної потужності. В розробленій математичній моделі враховується насичення магнітопроводу асинхронного двигуна та витіснення струму в стержнях ротора.

Застосування перетворення координат до ортогональних осей x, y дає змогу здійснювати розрахунок з мінімальним обсягом обчислень, і відповідно витратами машинного часу, статичних характеристик, що дає змогу використовувати розроблений алгоритм для керування величиною реактивної потужності в регульованих електроприводах. Він може використовуватись для підтримання на заданому рівні коефіцієнта потужності електроприводів, розроблених на основі АД, які працюють в умовах змінного навантаження.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бесараб А.Н., Невольниченко В.Н., Шабовта М.Ю. Исследование переходных процессов при индивидуальной компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя // Электромашинобудовання та електрообладнання. – 2007. – Вип. 68 – С. 39-44.
2. Клоков Б.К. Практические методы учета эффекта вытеснения тока в стержнях произвольной конфигурации // Электротехника. – 1970. – № 6 – С. 48-51.
3. Мугалимов Р.Г. Расчет емкости конденсатора для асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // Электротехника. – 2012. – № 3. – С. 19-22.
4. Установки КРМ-0,4(УКМ-58). Технические характеристики // Промэлектроавтоматика. – 21.10.2010.
5. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – К.: Наукова думка, 1979. – 208 с.
6. Яковлев М.Н. К решению систем нелинейных уравнений методом дифференцирования по параметру // ЖВМ и МФ, Т.4. – 1964. – № 1. – С. 146-149.

Bibliography (transliterated): 1. Besarab A.N., Nevol'nichenko V.N., Shabovta M.Yu. Issledovanie perehodnyh processov pri individual'noj kompensacii reaktivnoj moschnosti asinhronnogo dvigatelya // Elektromashinobudovannya ta elektroobladnannya. - 2007. - Vip. 68 - S. 39-44. 2. Klokov B.K. Prakticheskie metody ucheta `effekta vytesneniya toka v stержnyah proizvol'noj konfiguracii // `Elektrotehnika. - 1970. - № 6 - S. 48-51. 3. Mugalimov R.G. Raschet emkosti kondensatora dlya asinhronnogo dvigatelya s individual'noj kompensaciej reaktivnoj moschnosti // `Elektrotehnika. - 2012. - № 3. - С. 19-22. 4. Ustanovki KRM-0,4(UKM-58). Tehnicheskie harakteristiki // Prom `elektroavto-matika. - 21.10.2010. 5. Fil'c R.V. Matematicheskie osnovy teorii `elektromehani cheskikh preobrazovatelej. - K.: Naukova dumka, 1979. - 208 s. 6. Yakovlev M.N. K resheniyu sistem nelinejnyh uravnenij metodom differencirovaniya po parametru // ZhVM i MF, T.4. - 1964. - № 1. - S. 146-149.

Надійшла 19.03.2013

Маляр Василь Сафранович, д.т.н., проф.,
Добушовська Ірина Андріївна
кафедра теоретичної і загальної електротехніки
Національний університет "Львівська політехніка"
79013, Львів, вул. С.Бандери, 12,
тел. (032) 2582119, e-mail: svmaljar@polynet.lviv.ua

Malyar V.S., Dobushovska I.A.

Reactive power compensation in asynchronous electric drives.

A problem of calculating capacity of cosine capacitors for individual compensation of reactive power in asynchronous electric drives in stationary and transient operation modes is considered. The algorithm introduced employs a high-adequacy mathematical model of asynchronous motor developed on the theory of representing vectors which takes into account both the magnetic core saturation and the current displacement in the rotor bars.

Key words – asynchronous motor, starting characteristics, reactive power, capacitors, compensation.