

ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ В АСИНХРОННОМУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІ З ІНДИВІДУАЛЬНОЮ КОМПЕНСАЦІЄЮ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ ПРИ ВТРАТІ НАПРУГИ ЖИВЛЕННЯ

© Маляр В.С., Добушовська І.А., 2013

Розглядається проблема розрахунку перехідних процесів в асинхронних двигунах, які працюють з паралельно увімкненими конденсаторами при втраті напруги живлення. В основу розробленого алгоритму покладено математичну модель асинхронного двигуна, в якій враховується явище витіснення струму в стержнях ротора і насичення магнітопроводу.

Ключові слова: асинхронний двигун, перехідний процес, ємнісна компенсація.

The article discusses the problem of calculation transient processes in the asynchronous motors with capacitors switched in parallel that work in case of leakage of input voltage. The basis of the algorithm is a mathematical model of asynchronous motor that includes phenomenon of current extrusion in the bars of the rotor and magnetic saturation.

Key words: asynchronous motor, transient processes, capacitive compensation.

Вступ

Проблема дослідження процесів, які виникають в асинхронних електроприводах у разі вмикання паралельно до обмотки статора асинхронного двигуна (АД) косинусних конденсаторів, заслуговує на увагу, оскільки наявність конденсаторів і нелінійних індуктивностей, якими характеризуються обмотки двигуна, може призводити до появи ферорезонансних явищ, які супроводжуються перенапругами. Дослідження процесів, які виникають у системі конденсатори-двигун під час гальмування двигуна внаслідок втрати живлення, має важливе практичне значення, а розроблення ефективних методів їх аналізу є актуальною задачею.

Аналіз останніх досліджень та постановка задачі

Питання компенсації реактивної потужності в мережі в ustalених режимах достатньо повно висвітлене в технічній літературі. Поза тим, вибір величини ємності конденсаторів для роботи АД в динамічних режимах залишається нез'ясованим до цих пір, тому цій проблемі приділяють значну увагу. [1, 3–5]. Однак в основі цих досліджень є електричні заступні схеми [1, 4]. Елементами заступних схем є активні та індуктивні опори обмоток АД, значення яких у динамічних режимах внаслідок насичення магнітопроводу та витіснення струму в стержнях короткозамкненої обмотки ротора змінюються в широких межах. Поширений спосіб урахування насичення сталі та витіснення струмів за допомогою коефіцієнтів забезпечує достовірність результатів лише в номінальному режимі роботи АД. Для дослідження повної картини явищ методами математичного моделювання необхідно мати високого рівня адекватності математичні моделі, які б давали достовірні результати.

У разі втрати живлення АД утворюється електрична схема, в якій послідовно з'єднані конденсатори і фази обмотки статора. (рис. 1). Процеси у цьому разі набагато складніші, ніж у разі відомого з електротехніки процесу розряду конденсатора на індуктивну котушку. Складність процесів зумовлена наявністю взаємоіндуктивних зв'язків між рухомими контурами АД, активні і індуктивні опори яких змінні. Крім того, на перебіг процесу впливає ЕРС, яка індукується в обмотці статора. Зазначені чинники визначаються сукупністю координат АД, якими є струми контурів та швидкість обертання ротора, а отже, методи аналізу, які мають в своїй основі заступні схеми АД, не

забезпечують достовірності визначення параметрів у динамічних режимах, а як зазначено в [5], похибки у параметрах можуть призвести до неправильних результатів.

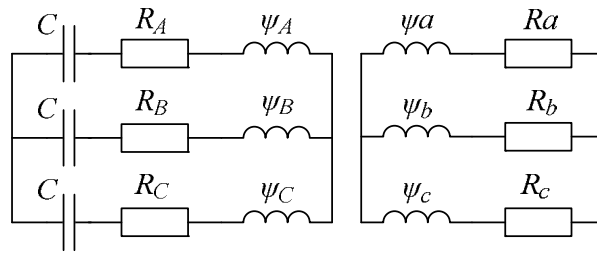


Рис. 1. Розрахункова схема

Мета роботи

Метою роботи є розроблення алгоритму дослідження перехідних процесів в асинхронних електроприводах з паралельно увімкненими косинусними конденсаторами, які виникають внаслідок вимикання напруги живлення.

Алгоритм розв'язування задачі. Об'єктом дослідження є АД з короткозамкненим ротором, трифазна обмотка статора якого симетрична і живиться від мережі з симетричною системою напруг, паралельно до обмотки статора якого увімкнено батарею косинусних конденсаторів. З метою врахування витіснення струму короткозамкнена обмотка ротора еквівалентується n обмотками, утвореними в результаті розбиття стержнів по висоті на n елементарних [2, 6].

Динамічний режим, який виникає під час втрати напруги живлення АД, описується нелінійною системою диференціальних рівнянь (ДР) електромагнітної рівноваги контурів АД, яка в осях x, y має вигляд

$$\begin{aligned}
 \frac{d\psi_{sx}}{dt} &= \omega_0 \psi_{sy} - r_s i_{sx} - u_{cx}; \\
 \frac{d\psi_{sy}}{dt} &= -\omega_0 \psi_{sx} - r_s i_{sy} - u_{cy}; \\
 \frac{d\psi_{1x}}{dt} &= s\omega_0 \psi_{1y} - r_1 i_{1x}; \\
 \frac{d\psi_{1y}}{dt} &= -s\omega_0 \psi_{1x} - r_1 i_{1y}; \\
 &\vdots \\
 \frac{d\psi_{nx}}{dt} &= s\omega_0 \psi_{ny} - r_n i_{nx}; \\
 \frac{d\psi_{ny}}{dt} &= -s\omega_0 \psi_{nx} - r_n i_{ny}; \\
 \frac{du_{cx}}{dt} &= \frac{i_{sx}}{C}; \quad \frac{du_{cy}}{dt} = \frac{i_{sy}}{C},
 \end{aligned} \tag{1}$$

де $\psi_{sx}, \psi_{sy}, \psi_{1x}, \psi_{1y}, \dots, \psi_{nx}, \psi_{ny}, i_{sx}, i_{sy}, i_{1x}, i_{1y}, \dots, i_{nx}, i_{ny}$ – потокозчеплення та струми перетворених контурів статора та ротора; r_s, r_r – активні опори цих контурів; $s = (\omega_0 - \omega) / \omega_0$ – ковзання ротора; ω_0, ω – циклічна частота напруги живлення та кутова швидкість обертання ротора; u_{cx}, u_{cy} – складові по осях x, y зображуючого вектора напруги на конденсаторах ємністю C на одну фазу.

Динаміка руху ротора описується рівнянням

$$\frac{ds}{dt} = \frac{p_0}{\omega_0 J} (M_c - M_e), \tag{2}$$

де M_c – момент навантаження на валу двигуна; $M_e = 1,5p_0(\psi_{sx}i_{sy} - \psi_{sy}i_{sx})$ – електромагнітний момент АД; J – момент інерції системи електроприводу; p_0 – кількість пар полюсів.

Для розрахунку перехідного процесу, який виникає під час вимикання напруги живлення АД, необхідно проінтегрувати одним із чисельних методів систему рівнянь (1), (2), а для цього необхідно знати початкові умови. Розглянемо алгоритм їх розрахунку.

Визначення початкових умов. Якщо до втрати живлення АД працював в усталеному режимі з ковзанням s , то розрахунок усталеного режиму здійснюється шляхом розв'язування нелінійної алгебричної системи рівнянь електричної рівноваги, яка має вигляд

$$\begin{aligned} \omega_0 \psi_{sy} - r_s i_{sx} + u_{sx} &= 0; \\ -\omega_0 \psi_{sx} - r_s i_{sy} + u_{sy} &= 0; \\ s\omega_0 \psi_{1y} - r_1 i_{1x} &= 0; \\ -s\omega_0 \psi_{1x} - r_1 i_{1y} &= 0; \\ &\vdots \\ s\omega_0 \psi_{ny} - r_n i_{nx} &= 0; \\ -s\omega_0 \psi_{nx} - r_n i_{ny} &= 0, \end{aligned} \quad (3)$$

де u_{cx}, u_{cy} – складові по осях x, y зображуючого вектора напруги живлення.

Розв'язком системи (3) при заданому значенні ковзання s є струми контурів, які можна здійснити методом продовження по параметру в поєднанні з ітераційним методом Ньютона. Для цього, задаючись значенням ковзання, поступово (за кілька кроків) нарощуємо вектор прикладених напруг, що дає змогу на кожному крокові забезпечити збіжність ітераційного процесу.

Якщо представити систему нелінійних алгебричних рівнянь (3) у векторній формі

$$\bar{z}(\bar{\psi}, \bar{i}, s) = \bar{u}, \quad (4)$$

де $\bar{\psi}, \bar{i}, \bar{u}$ – вектори-стовпці потокозчеплень, струмів та напруг, то приріст $\Delta \bar{i}^{(k)}$ вектора струмів \bar{i} на k -му кроці ітерації методу Ньютона визначається за формулою

$$W \Delta \bar{i}^{(k)} = -\bar{Z}(\bar{i}^{(k)}), \quad (5)$$

в якій $\bar{Z}(\bar{i}^{(k)})$ – вектор нев'язок системи (4) при заданих значеннях ковзання і вектора $\bar{u}^{(k)}$.

Система рівнянь (5) в розгорнутій формі має вигляд

$x_{sysx} - R_s$	x_{sysy}	x_{sy1x}	x_{sy1y}	\dots	x_{synx}	x_{syny}	\times	$\begin{matrix} \Delta i_{sx}^{(k)} \\ \Delta i_{sy}^{(k)} \\ \Delta i_{r1x}^{(k)} \\ \Delta i_{r1y}^{(k)} \\ \vdots \\ \Delta i_{rx}^{(k)} \\ \Delta i_{ry}^{(k)} \end{matrix}$	$=$	$\begin{matrix} z_1^{(k)} \\ z_2^{(k)} \\ z_3^{(k)} \\ z_4^{(k)} \\ \vdots \\ z_{2n+1}^{(k)} \\ z_{2n+2}^{(k)} \end{matrix}$	$, (6)$
$-x_{sxsx}$	$-x_{sxsy} - R_s$	$-x_{sx1x}$	$-x_{sx1y}$	\dots	$-x_{synx}$	$-x_{syny}$					
sx_{1ysx}	sx_{1ysy}	$sx_{1y1x} - R_1$	sx_{1y1y}	\dots	sx_{1ynx}	sx_{1yny}					
$-sx_{1xsx}$	$-sx_{1ysy}$	$-sx_{1y1x}$	$-sx_{1y1y} - R_1$	\dots	$-sx_{1ynx}$	$-sx_{1yny}$					
\vdots	\vdots	\vdots	\vdots		\vdots	\vdots					
sx_{nyxs}	sx_{nyys}	sx_{ny1x}	sx_{ny1y}	\dots	$sx_{nynx} - R_n$	sx_{nyny}					
$-sx_{nxsx}$	$-sx_{nxsy}$	$-sx_{nxsy}$	$-sx_{nxsy}$	\dots	$-sx_{nxx}$	$-sx_{nxy} - R_n$					

а компоненти вектора нев'язок визначаються згідно з формулами

$$\begin{aligned} z_1 &= \omega_0 \psi_{sy} - r_s i_{sx} + u_{sx}; & z_4 &= -s\omega_0 \psi_{1x} - r_1 i_{1y}; \\ z_2 &= -\omega_0 \psi_{sx} - r_s i_{sy} + u_{sy}; & &\vdots \\ z_3 &= s\omega_0 \psi_{1y} - r_1 i_{1x}; & z_{2n+1} &= s\omega_0 \psi_{ny} - r_n i_{nx}; \\ & & z_{2n+2} &= -s\omega_0 \psi_{nx} - r_n i_{ny}. \end{aligned} \quad (7)$$

Індуктивні опори, які є елементами матриці Якобі системи (6), та потокозчеплення контурів, які входять до вектора нев'язок, визначаються сукупністю струмів контурів у відповідності до математичної моделі АД [7].

Для прикладу нижче наведені криві фазної напруги двигуна при вимкненні напруги живлення АД, який працював в усталеному режимі з номінальним навантаженням, отримані викладеним методом при різних значеннях ємності конденсаторів.

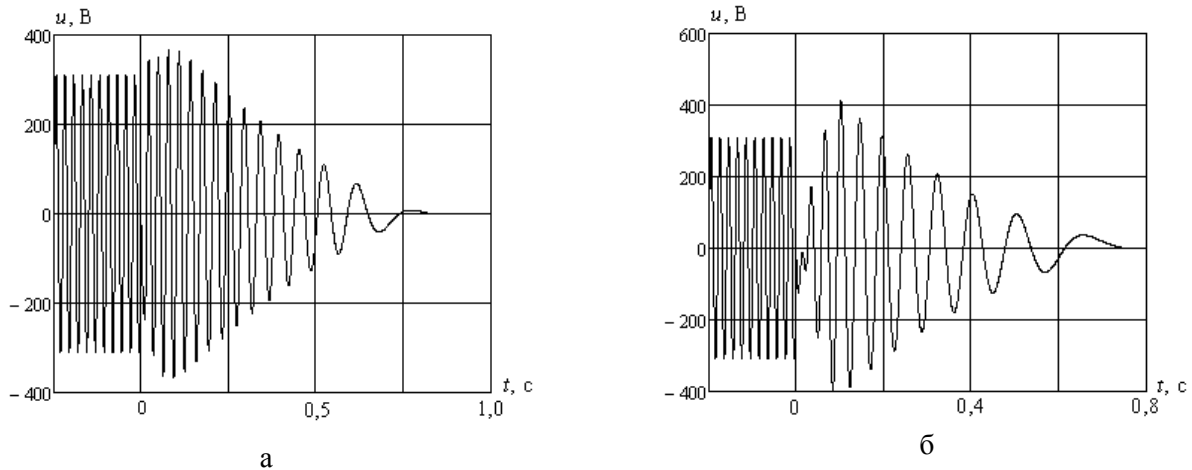


Рис. 2. Залежність від часу фазної напруги АД при втраті живлення з паралельно увімкненими конденсаторами ємністю $C = 800 \text{ мкФ}$ (а), $C = 2500 \text{ мкФ}$ (б)

Висновки

Вибір необхідного для компенсації реактивної потужності АД значення ємності конденсаторів за статичною характеристикою потребує перевірки поведінки двигуна в динамічних режимах, зокрема при втраті живлення. Як свідчить практика, у цьому разі можуть виникати перенапруги, зумовлені резонансними явищами та самозбудженням.

Дослідження процесів, які виникають при цьому, неможливо здійснити з високою достовірністю на основі спрощених математичних моделей АД, оскільки на перебіг процесів впливає значення параметрів обмоток двигуна, а неточність їх визначення призводить до спотворення не тільки кількісної картини явищ, але й якісних показників.

Розроблений алгоритм і складена на його основі програма розрахунку процесів в АД, який працює з наглухо під'єднаними конденсаторами, дає змогу досліджувати динаміку процесів при втраті живлення з різними значеннями ємності конденсаторів.

1. Бесараб А.Н., Невольниченко В.Н., Шабовта М.Ю. Исследование переходных процессов при индивидуальной компенсации реактивной мощности асинхронного двигателя // *Електромашинобудування та електрообладнання*. – К.: Техніка, 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. Кузнецов В.Г., Ю.И. Тугай. Сучасні методи аналізу ферорезонансних процесів в електричних мережах // *Праці ін-ту електродинаміки НАНУ*. – К.: ІЕД НАНУ, 2002. – Вип. 3(3). – С. 27–31.
4. Мугалимов Р.Г. Расчет емкости конденсатора для асинхронного двигателя с индивидуальной компенсацией реактивной мощности // *Электротехника*. – 2012. – № 3. – 19–22.
5. Тугай Ю.И. Умова виникнення ферорезонансних процесів в електричних мережах // *Вісник Нац. ун-ту “Львівська політехніка”*. – 2007. – № 596 *Електроенергетичні та електромеханічні системи*. – С. 132–136.
6. Фильц Р.В., Онышко Е.А., Плахтына Е.Г. Алгоритм расчета переходных процессов в асинхронной машине с учетом насыщения и вытеснения тока // *Преобразователи частоты для электропривода*. – Кишинев: Штиинца. – 1979. – С. 11–22.
7. Фильц Р.В. *Математические основы теории электромеханических преобразователей*. – К.: Наук. думка, 1979. – 208 с.