

ПЕРЕНАПРУГИ В АСИНХРОННИХ ДВИГУНАХ З ПАРАЛЕЛЬНО УВІМКНЕНИМИ КОНДЕНСАТОРАМИ

Розглядається питання дослідження перенапруг в асинхронних двигунах, які працюють з паралельно увімкненими косинусними конденсаторами у разі вимкнення напруги живлення. Отримані часові залежності координат режиму з урахуванням насичення та витіснення струму в стержнях ротора на підставі чисельного розрахунку перехідних процесів.

Рассмотрен вопрос исследования перенапряжений в асинхронных двигателях, работающих с параллельно включенными косинусными конденсаторами в случае выключения напряжения питания. Получены временные зависимости координат режима с учетом насыщения и вытеснения тока в стержнях ротора на основе численного расчета переходных процессов.

ВСТУП

Асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором найбільш поширені в сучасних електроприводах. Водночас вони є основними споживачами реактивної енергії, що призводить до зниження коефіцієнта потужності в системі електропостачання. Ситуація погіршується тим, що здебільшого вони працюють недовантаженими. Тому питання компенсації реактивної енергії з метою зменшення реактивних струмів у мережі є актуальним. В асинхронних електроприводах може застосовуватися індивідуальна компенсація реактивної потужності шляхом безпосереднього приєднання до затискачів двигуна конденсаторної батареї. У світовій практиці такий спосіб є досить поширеним.

Якщо зсув фаз між напругою та струмом АД складає φ_1 (коефіцієнт потужності – $\cos\varphi_1$), то для підвищення коефіцієнта потужності установки до $\cos\varphi_2$, необхідна потужність конденсаторів визначається за формулою

$$Q_c = P \cdot (tg\varphi_1 - tg\varphi_2), \quad (1)$$

де $tg\varphi_1 = Q_1 / P_1$.

Вибір значення ємності конденсаторів за формулою (1) потребує додаткових досліджень, тому що при цьому, як і в будь-якій схемі з конденсатором та нелінійною індуктивністю, можуть виникати резонансні явища [1, 4]. Крім того, в результаті від'єднання джерела живлення при паралельно увімкнених до АД конденсаторах за певних значень моменту інерції, ємності конденсаторів та моменту навантаження можуть виникати коливні процеси з частотою, яка визначається параметрами системи конденсатори-двигун, а це спричиняє значні перенапруги [1], і, як наслідок, супроводжується значними струмами. І перше, і друге є небезпечним не тільки для двигуна, але й для іншого обладнання, зокрема для конденсаторів. Задача дослідження таких процесів досить складна, оскільки ротор двигуна при втраті напруги живлення продовжує обертатись. Тривалість часу гальмування залежить від багатьох чинників, і перш за все від моменту інерції системи електроприводу та величини навантаження.

Проблеми, які виникають внаслідок ферорезонансних перенапруг в мережах у разі використання для компенсації реактивної потужності батарей конденсаторів мають неабияке практичне значення, оскільки вони нерідко спричиняють аварії. Очевидно, що для

запобігання різним негативним явищам необхідно проводити комплекс досліджень не на реальних об'єктах, що є не тільки надто коштовно, але й нерідко неможливо взагалі, а на їх математичних моделях.

Отже, вибір косинусних конденсаторів для компенсації реактивної потужності в мережі потребує всесторонніх досліджень з урахуванням умов роботи установки на етапі проектування засобами математичного моделювання, що дає змогу здійснювати багатоваріантний аналіз шляхом комп'ютерного симулювання.

Для дослідження резонансних нелінійних електричних кіл можуть застосовуватись наближені аналітичні методи, якісні і чисельні [1-3]. Аналітичні методи потребують низки спрощуючих допущень, а це може призвести до невідповідних не тільки кількісних, але й якісних результатів [7]. Якісні методи аналізу пов'язані з використанням фазового простору змінних, які визначають стан системи. Більш повний аналіз методів дослідження резонансних явищ здійснений в [2].

СУТЬ МЕТОДУ

В статті розглядається алгоритм розрахунку перехідних процесів в АД, який працює в режимі компенсації реактивної потужності з увімкненими паралельно до статора косинусними конденсаторами. Алгоритм розрахунку полягає в наступному.

Рівняння електричної рівноваги статорного кола АД, складені за першим та другим законами Кірхгофа за відсутності нейтрального проводу у нерухомих відносно статора трифазних осях мають вигляд [6]

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(\Psi_A - \Psi_C) &= u_{AC} - r_A i_A + r_C i_C \\ \frac{d}{dt}(\Psi_B - \Psi_C) &= u_{BC} - r_B i_B + r_C i_C \\ i_A + i_B + i_C &= 0, \end{aligned} \quad (2a)$$

де $u_{AC} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega_0 t - \pi/6)$; $u_{BC} = \sqrt{3} U_m \sin(\omega_0 t - 2)$ – лінійні напруги живлення фаз статора; $\Psi_A, \Psi_B, \Psi_C, i_A, i_B, i_C, r_A, r_B, r_C$ – потокозчеплення, струми та активні опори фаз статора.

Рівняння електричної рівноваги перетвореної до трифазних осей короткозамкненої обмотки ротора у нерухомих трифазних осях мають вигляд

$$\frac{d}{dt}(\psi_a - \psi_c) = -r_a i_a + r_c i_c - \frac{\omega}{\sqrt{3}}(2\psi_b - \psi_c - \psi_a)$$

$$\frac{d}{dt}(\psi_b - \psi_c) = -r_b i_b + r_c i_c - \frac{\omega}{\sqrt{3}}(\psi_c - 2\psi_a + \psi_b) \quad (26)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0,$$

де $\psi_\xi, i_\xi, r_\xi, (\xi = a, b, c)$ – потокозчеплення, струми та активні опори контурів ротора; $\omega = \omega_0(1 - s)$ – швидкість обертання ротора в ел. рад/с.

Рівняння динаміки ротора запишемо у вигляді

$$\frac{J}{p_0} \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_{\hat{a}}, \quad (3)$$

де електромагнітний момент M_e АД в трифазних осях обчислюється за формулою [6]

$$M_e = -\frac{p_0}{\sqrt{3}} L_\mu \times$$

$$\times ((i_{\mu B} - i_{\mu C}) \cdot i_A + (i_{\mu C} - i_{\mu A}) \cdot i_B + (i_{\mu A} - i_{\mu B}) \cdot i_C)$$

де $i_{\mu A}, i_{\mu B}, i_{\mu C}$ – проєкції зображуючого вектора i_μ струмів на відповідні осі; L_μ – диференціальний індуктивний опір АД, який визначається з кривої намагнічування $\psi_\mu = \psi_\mu(i_\mu)$ головного магнітного шляху у відповідності з [5].

При з'єднанні конденсаторів зіркою розрахункова схема для дослідження динамічного гальмування наведена на схемі рис. 1. В результаті відмикання двигуна від мережі струми i'_A, i'_B, i'_C в лінії живлення рівні нулю, а струми конденсаторів рівні струмам фаз з протилежним знаком

$$i_{Ak} = -i_A; \quad i_{Bk} = -i_B; \quad i_{Ck} = -i_C,$$

а отже достатньо систему ДР, яка складається з рівнянь (2), (3) доповнити двома рівняннями

$$\frac{du_{AC}}{dt} = \frac{i_C - i_A}{C}, \quad \frac{du_{BC}}{dt} = \frac{i_C - i_B}{C}, \quad (4)$$

які дають змогу на кожному крокові інтегрування визначати значення лінійних напруг u_{AC}, u_{BC} в рівняннях (2а).

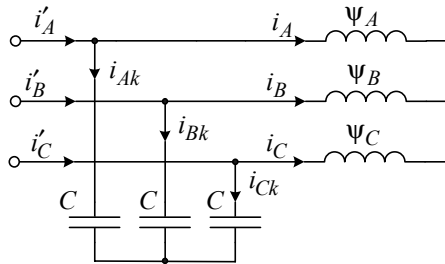


Рис. 1. Вмикання косинусних конденсаторів

Для розрахунку перехідного процесу під час динамічного гальмування необхідно систему рівнянь (2), (3) електромеханічної рівноваги разом із рівняннями (4) проінтегрувати чисельним методом до повної зупинки АД ($\omega = 0$), обчислюючи на кожному крокові повну матрицю диференціальних індуктивностей у трифазних осях згідно з викладеним в [6]. Для цього необхідно визначити початкові умови – значення координат режиму в момент переривання живлення АД. Ці умови для інтегрування системи ДР визначаються вектором $i = (i_A, i_B, i_C, i_a, i_b, i_c)^T$ струмів контурів та швидкості ω обертання ротора. Для їх знаходження

немає необхідності інтегрувати систему (2), (3) ДР до усталення процесу, оскільки їх можна отримати шляхом розв'язування нелінійної системи алгебричних рівнянь, якою описуються усталені режими в ортогональних осях. Зокрема, в усталених режимах за умови постійного моменту навантаження електромагнітні процеси в перетворених до осей x, y [6] контурів статора і ротора АД описуються системою алгебричних рівнянь, яка в матрично-векторній формі має вигляд

$$u - \Omega \psi - Ri = 0, \quad (5)$$

де

$$\Omega = \begin{bmatrix} & -\omega_0 & & \\ \omega_0 & & & \\ & & & \omega - \omega_0 \\ & & \omega_0 - \omega & \end{bmatrix};$$

$\psi = (\psi_{sx}, \psi_{sy}, \psi_{rx}, \psi_{ry})^T$; $i = (i_{sx}, i_{sy}, i_{rx}, i_{ry})^T$; $u = (u_{sx}, u_{sy}, 0, 0)^T$; $R = \text{diag}(r_{sx}, r_{sy}, r_{rx}, r_{ry})$ – відповідно вектори потокозчеплення, струмів та напруг і діагональна матриця активних опорів контурів (верхній індекс "r" означає транспонування);

Систему рівнянь (5) можна розв'язати ітераційним методом Ньютона, вибравши відповідне початкове наближення або методом продовження по параметру [6]. Елементами матриці Якобі у цьому разі будуть диференціальні індуктивності контурів АД в осях x, y .

Активна (P_1) та реактивна (Q_1) потужності, які споживає двигун, визначаються через перетворені до осей x, y координати за формулами [7]

$$P_1 = 1,5 \cdot (u_{sx} \cdot i_{sx} + u_{sy} \cdot i_{sy}),$$

$$Q_1 = 1,5 \cdot (u_{sy} \cdot i_{sx} - u_{sx} \cdot i_{sy}).$$

Для підтримання коефіцієнта потужності установки на рівні $\cos\phi_2$, необхідна величина ємності конденсаторів визначається за формулою

$$C = \frac{Q_1 - P_1 \cdot \text{tg}\phi_2}{1,5 \cdot \omega_0 \cdot U_m^2}. \quad (6)$$

Перехід від значень струмів в ортогональних осях x, y до реальних струмів у фазних координатах, які входять до рівнянь (2) та (3) як початкові умови, здійснюється за відомими формулами [6].

Як приклад, на рис. 2 наведено результати розрахунку напруги, а на рис. 3 – швидкості обертання ротора та струму фази АД 4AP160S4Y3 ($P = 15$ кВт, $U = 220/380$ В) з паралельно увімкненими конденсаторами при втраті напруги живлення.

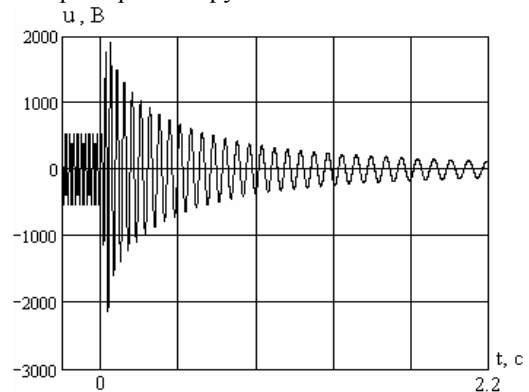


Рис. 2. Залежність лінійної напруги АД з паралельно увімкненими конденсаторами при втраті напруги живлення

Як розрахунок початкових умов в осях x , y так і перехідного процесу в фазних координатах після втрати напруги живлення здійснюється з урахуванням насичення магнітопроводу та витіснення струму в стержнях ротора АД, яке враховується шляхом розбиття стержнів разом з короткозамикаючими кільцями по висоті на кілька шарів згідно з викладеною в [5] методикою.

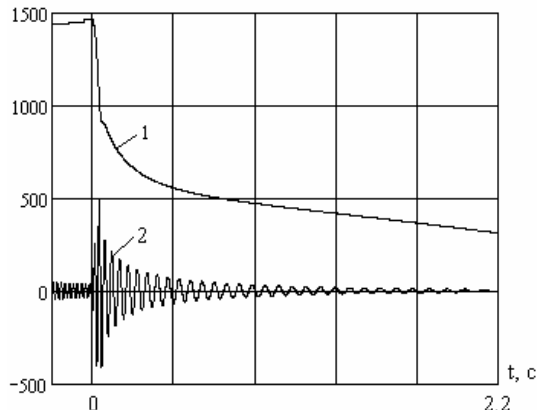


Рис. 3. Залежність швидкості обертання ротора (1) та струму (2) фази двигуна з паралельно увімкненими конденсаторами при втраті напруги живлення

ВИСНОВКИ

Запропоновано алгоритм розрахунку перенапруг, які виникають в результаті вимкнення напруги живлення асинхронного двигуна, який працює з паралельно увімкненими конденсаторами, що дає змогу досліджувати процеси в асинхронних електроприводах з урахуванням насичення магнітопроводу АД та витіснення струму в стержнях ротора.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Долгинов А.И. Перенапряжения в электрических системах. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1962. – 512 с.
2. Кузнецов В.Г. Сучасні методи аналізу ферорезонансних процесів в електричних мережах / Кузнецов В.Г., Тугай Ю.І. // Праці ін-ту електродинаміки НАНУ. – К.:ІЕД НАНУ. – 2002. – Вип. 3(3). – С. 27-31.

3. Маляр В.С. Чисельний метод аналізу періодичних режимів ферорезонансних електричних кіл / Маляр В.С., Маляр А.В. // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 1. – С. 13-16.
4. Тугай Ю.І. Оцінка можливостей виникнення ферорезонансного процесу в електричній мережі // Технічна електродинаміка. – 2006. – Темат. вип., т.5. – С. 13-16.
5. Фильц Р.В. Алгоритм расчета переходных процессов в асинхронной машине с учетом насыщения и вытеснения тока / Фильц Р.В., Онышко Е.А., Плахтына Е.Г. // Преобразователи частоты для электропривода. – Кишинев: Штиинца. – 1979. – С. 11-22.
6. Фильц Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей. – К.: Наукова думка, 1979. – 208 с.
7. Шидловська Н.А. Аналіз помилки, що виникає в разі заміни нелінійної індуктивності лінійною при резонансі напруг / Шидловська Н.А., Кравченко О.П. // Праці Інституту електродинаміки НАН України. Енергетика. – 2005. – № 3(12). – С. 3-8.

Надійшла 05.02.2010

Маляр Василь Сафронівч., *д.т.н., проф.*
 кафедра теоретичної та загальної електротехніки
 тел. (032) 258-21-19, e-mail: svmalyar@polynet.lviv.ua
 Маляр Андрій Васильович, *к.т.н., доц.*
 кафедра електроприводу і автоматизації
 промислових установок
 тел. (032) 258-26-20, e-mail: svmalyar@lp.edu.ua
 Добушовська Ірина, *магістр*
 кафедра автоматизації теплових та хімічних процесів
 тел. (032) 258-25-16
 Національний університет "Львівська політехніка"
 79013, Україна, м. Львів, вул. С.Бандери, 12

Malyar V.S., Malyar A.V., Dobushovska I.

Overvoltage in asynchronous motors with parallel capacitors.

The paper deals with research on overvoltage in asynchronous motors with cosine capacitors connected in parallel in the condition of supply voltage cut-off. The mode coordinates versus time adjusted for saturation and displacement of current in the rotor rods are plotted on the basis of numerical calculation of transient processes.

Key words – asynchronous motor, parallel cosine capacitors, overvoltage, supply voltage cut-off, mode coordinates time dependence.