

РЕВЕРС ТРИФАЗНИХ АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ З ШЕСТИФАЗНИМИ ОБМОТКАМИ

Доведена можливість здійснення реверсу в трифазних асинхронних двигунах з шестифазними обмотками на статорі. Показано, що під час реверсу шестифазні обмотки зберігають всі свої заявлені переваги.

Доказана можливість здійснення реверса в трехфазных асинхронных двигателях с шестифазными обмотками на статоре. Показано, что при реверсе шестифазные обмотки сохраняют все свои заявленные преимущества.

ВСТУП

Шестифазні обмотки трифазних асинхронних двигунів є поєднанням на загальному магнітопроводі двох обмоток трифазного струму. Одна з обмоток ввімкнена зіркою, інша обмотка вмикається трикутником. Ці обмотки повинні бути зміщені взаємно на $1/6$ полюсного ділення, а струми в них повинні бути зсунуті на $1/12$ періоду, причому фазні струми в обмотці, з'єднаній трикутником, повинні бути зсунуті по фазі в ту ж сторону, в яку просторово зсунута обмотка трикутника. Шестифазні обмотки мають на 3,5 % більший обмотковий коефіцієнт по основній гармоніці порівняно з трифазними обмотками та абсолютну відсутність в кривій МРС п'ятої та сьомої гармонік [1]. Коефіцієнт корисної дії збільшується, вібрації зменшуються на 30 % [2], що призводить до підвищення надійності роботи асинхронних двигунів з шестифазними обмотками.

"Донецький електротехнічний завод" в 2012 р. почав серійний випуск конвеєрних двообмоткових двигунів АДВК 355 LA12/4-М з шестифазними обмотками потужністю 85/250 кВт [2], "Луганський енергозавод" з 2011 р., ремонтуючи двигуни АИУМ потужністю 55 кВт, вкладає в статори шестифазну обмотку. По цій же схемі "Луганський енергозавод" приступає до ремонту двигунів 2ЭДКОФВ 250 потужністю 55 кВт і 110 кВт напругою 1140 В, а також починає серійний випуск двигунів ВАО2 560 LA4 потужністю 800 кВт напругою 6000 В і двигунів ВРМ 160 потужністю 25 кВт.

Деякі з зазначених двигунів повинні мати можливість бути реверсивними, тобто мати можливість зміни напрямку обертання ротора. В трифазних двигунах це досягається зміною чергування фаз статорних обмоток, для чого необхідно поміняти місцями відносно записки мережі будь-які два із трьох проводів, які з'єднують обмотку статора з мережею. Відносно асинхронних двигунів з шестифазними обмотками це питання слід розглянути окремо, тому що, наприклад, зсув фазних струмів трикутнкової обмотки по фазі в протилежному напрямі, в якому просторово зсунута обмотка трикутника, призведе до зменшення обмоткового коефіцієнта по основній гармоніці на 13,4 %, виникнення в кривій МРС п'ятої та сьомої гармонік [1].

ОСНОВНА ЧАСТИНА

На рис. 1,а приведена схема шестифазної двополюсної обмотки, виконаної на $z = 12$ пазах, в якій фазні струми обмотки, з'єднані трикутником, зсунуті по фазі в ту ж сторону, в яку просторово зсунута обмотка трикутника.

Кількість пазів на полюс і фазу кожної окремої трифазної обмотки $q = 1$, тому кожна фаза складається з одної котушки. Поряд показана принципова електрична схема, дві трифазні обмотки включені паралельно, а також вектори МРС всіх фаз для миті часу, коли МРС фази А обмотки, з'єднаної в зірку, максимальна.

Використовуючи розклад в ряд Фур'є для прямокутної форми кривої МРС окремої котушки:

$$F_{kv} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin \pi v (T_0/T)}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x, \quad (1)$$

де T_0 – крок котушки; T – просторова координата; дорівнює подвійному полюсному діленню; v – порядок гармоніки; x – змінна просторова координата; та вибравши початок координат по вісі фази А, з'єднаної в зірку, а також враховуючи просторовий зсув фаз В і С відповідно на кут 120° та 240° , одержимо значення МРС фазних обмоток, з'єднаних в зірку:

$$F_{AY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x,$$

$$F_{BY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3} \right), \quad (2)$$

$$F_{CY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \left(\omega t - \frac{4\pi}{3} \right) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \left(\frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3} \right).$$

Для визначення результуючої МРС кожної гармоніки потрібно скласти відповідні гармоніки всіх трьох фаз.

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1Y} = \frac{1}{\pi} I_m w \left[\begin{aligned} & \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) + \\ & \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) + \\ & \sin \left(\omega t + \frac{2\pi}{T} x - \frac{8\pi}{3} \right) + \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right) \end{aligned} \right] =$$

$$= \frac{3}{\pi} I_m w \sin \left(\omega t - \frac{2\pi}{T} x \right).$$

Лівобігучі МРС, як зміщені одна відносно іншої на кут 120° , взаємно знищуються.

Для п'ятої гармоніки:

$$F_{5Y} = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin \left(\omega t + \frac{10\pi}{T} x \right). \quad (4)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_{7Y} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x). \quad (5)$$

МРС фазних обмоток, з'єднаних в трикутник:

$$F_{A\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{\pi}{6}) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{\pi}{6}),$$

$$F_{B\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{5\pi}{3}) \times$$

$$\times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6}), \quad (6)$$

$$F_{C\Delta} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{9\pi}{3}) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{9\pi}{6}).$$

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1\Delta} = \frac{1}{\pi} I_m w \left(\sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x) + \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x) + \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x) \right) = \frac{3}{\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x). \quad (7)$$

Для п'ятої гармоніки:

$$F_{5\Delta} = \frac{1}{5\pi} I_m w \left[\begin{aligned} &\sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi) + \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - 5\pi) + \\ &+ \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - 9\pi) \end{aligned} \right] = \quad (8)$$

$$= \frac{3}{5\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi).$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_{7\Delta} = -\frac{1}{7\pi} I_m w \left[\begin{aligned} &\sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi) + \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + 5\pi) + \\ &+ \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + 9\pi) \end{aligned} \right] = \quad (9)$$

$$= -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi).$$

Складуючи відповідні гармоніки двох трифазних обмоток, одержуємо для першої гармоніки:

$$\sum F_{1Y,\Delta} = \frac{6}{\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{T} x). \quad (10)$$

Отже, перша гармоніка рухається вправо.

Для п'ятої і сьомої гармонік:

$$\sum F_{5Y,\Delta} = \frac{6}{5\pi} I_m w \times$$

$$\times \left[\sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x) + \sin(\omega t + \frac{10\pi}{T} x - \pi) \right] = 0, \quad (11)$$

$$\sum F_{7Y,\Delta} = -\frac{6}{7\pi} I_m w \times$$

$$\times \left[\sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x) + \sin(\omega t - \frac{14\pi}{T} x + \pi) \right] = 0. \quad (12)$$

Як бачимо, в кривій МРС, створеній шестифазною обмоткою, відсутні п'ята та сьома гармоніки, а обмотковий коефіцієнт по основній гармоніці $k_{об.1} = 1$.

Графік МРС шестифазної обмотки для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рис. 1,б. Відповідні напрями струмів показані у верхній частині пазів на рис. 1,а.

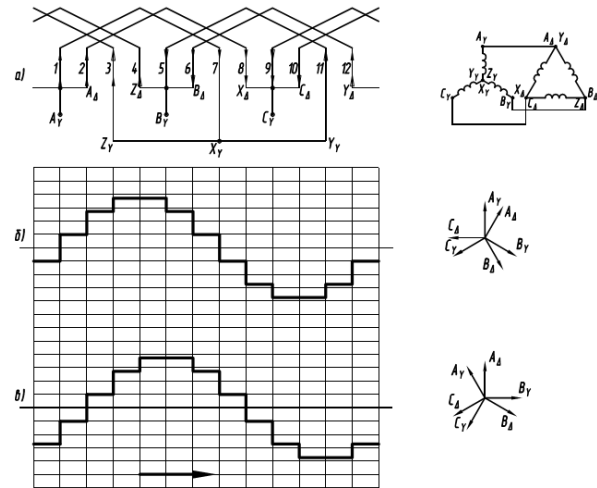


Рис. 1. Шестифазна обмотка ($z = 12, 2p = 2$)

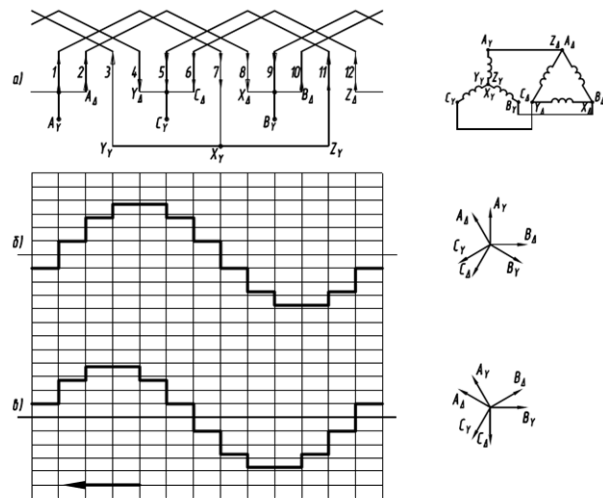


Рис. 2. Шестифазна обмотка ($z = 12, 2p = 2$) під час реверсу

При повороті векторів МРС всіх фаз на кут 30° в напрямі проти годинникової стрілки (в позитивному напрямі) графік МРС зміщується вправо (рис. 1,б). Відповідні напрями струмів показані у нижній частині пазів на рис. 1,а.

На рис. 2,а показана шестифазна обмотка, в якій до фази В обмотки на рис. 1,а приєднується провід мережі, що живив попередню фазу С, а до фази С на рис. 1,а приєднаний провід, що живив фазу В.

Враховуючи, що струми мережі фаз А, В, С не змінились, а фази В і С помінялись місцями, МРС фазних обмоток, з'єднаних в зірку:

$$F_{AY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin \omega t \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v \frac{2\pi}{T} x,$$

$$F_{BY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \times$$

$$\times \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{4\pi}{3}), \quad (13)$$

$$F_{CY} = \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \cdot \frac{\sin \frac{\pi}{2} v}{\pi v} \cos v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{2\pi}{3}).$$

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1Y} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{2\pi}{T} x). \quad (14)$$

Правобігучі МРС, як зміщені одна відносно іншої на кут 120° , взаємно знищуються.

Для п'ятої гармоніки:

$$F_{5Y} = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{10\pi}{T} x). \quad (15)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_{7Y} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{14\pi}{T} x). \quad (16)$$

Враховуючи, що фазові струми трикутнкової обмотки випереджують на кут 30° струми обмотки, з'єднаної в зірку (рис. 2,б – вектори МРС), МРС фазних обмоток, з'єднаних в трикутник:

$$\begin{aligned} F_{A\Delta} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t + \frac{\pi}{6}) \cdot \sin v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{\pi}{6}), \\ F_{B\Delta} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{3\pi}{6}) \cdot \sin v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{9\pi}{6}), \\ F_{C\Delta} &= \sum_{v=1}^{\infty} 2I_m w \sin(\omega t - \frac{7\pi}{6}) \cdot \sin v(\frac{2\pi}{T} x - \frac{5\pi}{6}). \end{aligned} \quad (17)$$

Для першої гармоніки одержуємо:

$$F_{1\Delta} = \frac{3}{\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{2\pi}{T} x). \quad (18)$$

Для п'ятої гармоніки:

$$F_{5\Delta} = \frac{3}{5\pi} I_m w \sin(\omega t - \frac{10\pi}{T} x + \pi). \quad (19)$$

Для сьомої гармоніки:

$$F_{7\Delta} = -\frac{3}{7\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{14\pi}{T} x - \pi). \quad (20)$$

Складуючи відповідні гармоніки двох трифазних обмоток, одержуємо для першої гармоніки:

$$\sum F_{1Y,\Delta} = \frac{6}{\pi} I_m w \sin(\omega t + \frac{2\pi}{T} x). \quad (21)$$

Для п'ятої і сьомої гармонік:

$$\begin{aligned} \sum F_{5Y,\Delta} &= \frac{6}{5\pi} I_m w \times \\ &\times \left[\sin(\omega t - \frac{10\pi}{T} x) + \sin(\omega t - \frac{10\pi}{T} x + \pi) \right] = 0, \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} \sum F_{7Y,\Delta} &= -\frac{6}{7\pi} I_m w \times \\ &\times \left[\sin(\omega t + \frac{14\pi}{T} x) + \sin(\omega t + \frac{14\pi}{T} x - \pi) \right] = 0. \end{aligned} \quad (23)$$

Графік МРС обмотки для миті часу, коли МРС фази А, з'єднаної в зірку, максимальна, – показаний на рис. 2,б. Напрями струмів показані у верхній частині паців на рис. 2,а.

При повороті векторів МРС всіх фаз на кут 30° в напрямі проти годинникової стрілки графік МРС зміщується вліво. Відповідні напрями струмів показані в нижній частині паців на рис. 2,а.

ВИСНОВКИ

Однією з суттєвих переваг трифазних асинхронних двигунів з шестифазною обмоткою є можливість здійснення реверсу простим способом: зміною порядку чергування фаз джерела живлення, або зміною підключення двох фаз.

У випадку трифазного двигуна з шестифазною обмоткою така можливість реверсу обґрунтована теоретично і підтверджена практичними дослідженнями.

Можливість здійснення реверсу простим способом дозволяє практично замінити всі трифазні обмотки в асинхронних двигунах шестифазними.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Луцик В.Д. Шестифазна обмотка асинхронних двигунів // Електротехніка і електромеханіка. – 2012. – №2. – С. 42-44.
2. Луцик В.Д., Кирьянов В.В., Полезін С.Ю. Електромагнітний розрахунок трифазних асинхронних двигунів з шестифазною обмоткою // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №1. – С. 35-37.

Bibliography (transliterated): 1. Lushchik V.D. A six-phase winding of induction motors. *Electrical engineering & electromechanics*, 2012, no.2, pp. 42-44. 2. Lushchik V.D., Kiryanov V.V., Polezin S.Yu. Electromagnetic calculation of three-phase asynchronous motors with a six-phase winding. *Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.1, pp. 35-37.

Надійшла (received) 20.09.2013

Луцик В'ячеслав Данилович¹, д.т.н., проф.,

Полезін Сергій Юрійович¹, аспірант,

¹Донбаський державний технічний університет,

94204, Алчевськ, пр. Леніна, 16,

тел/phone +38 099 7654495,

e-mail: v.d.luschnik@yandex.ua, news4xander@mail.ru

V.D. Lushchik¹, S.Yu. Polezin¹

¹Donbass State Technical University

16, Lenin Avenue, Alchevsk, Lugansk region, 94204, Ukraine

A reverse mode of three-phase asynchronous motors with hexaphase windings.

A reverse operation feasibility in three-phase asynchronous motors with the stator hexaphase windings is proved. In the reverse mode, the hexaphase windings are shown to keep all their declared advantages.

Key words – asynchronous motor, hexaphase winding, winding factor, MMF, higher harmonics, reverse mode.