

Ю. В. КОВАЛЬОВА

АВТОМАТИЧНА КОМПЕНСАЦІЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ТИРИСТОРНИМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРУГИ

Асинхронні електроприводи з тиристорним регулятором напруги працюють в режимі змінного кута керування тиристорами. Мета статті - розробка схеми автоматичної компенсації реактивної потужності для будь-якого кута керування тиристорів. Схема працює наступним чином: визначається кут зсуву першої гармоніки струму статора відносно напруги мережі. Останній перетворюється інтегратором в напругу та подається на вхід чотирирозрядного аналого-цифрового перетворювача (АЦП). На чотирьох виходах АЦП з'являється двійковий код, який відповідає куту зсуву першої гармоніки струму i , отже, відносній величині реактивної потужності. В результаті формується 15 ступеней ємності, що забезпечує автоматичну компенсацію.

Ключові слова: асинхронний двигун, тиристорний регулятор, реактивна потужність

Ю. В. КОВАЛЕВА

АВТОМАТИЧЕСКАЯ КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОПРИВОДА С ТИРИСТОРНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ НАПРЯЖЕНИЯ

Асинхронные электроприводы с тиристорным регулятором напряжения работают в режиме переменного угла управления тиристорами. Цель статьи - разработка схемы автоматической компенсации реактивной мощности для любого угла управления тиристором. Схема работает следующим образом: определяется угол сдвига первой гармоники тока статора относительно напряжения сети. Последний превращается интегратором в напряжение и подается на вход четырехразрядного аналого-цифрового преобразователя (АЦП). На четырех выходах АЦП появляется двоичный код, который отвечает углу сдвига первой гармоники тока i , следовательно, относительной величине реактивной мощности. В результате формируется 15 ступеней емкости, что обеспечивает автоматическую компенсацию.

Ключевые слова: асинхронный двигатель, тиристорный регулятор, реактивная мощность

J. V. KOVALOVA

AUTOMATIC COMPENSATION OF REACTIVE POWER AC ELECTRIC DRIVE WITH THYRISTOR REGULATOR OF VOLTAGE

The article is devoted to compensation reactive power of AC motors with the thyristor voltage converter. Reactive power produce the losses of the electrical energy on the transmission lines and substation transformers. The electric diagram of compensation of reactive power contains AC motor, thyristor converter of voltage, transformer of current and transformer of voltage. The outputs of the first and second rectifiers are connected with the inputs of blocks of impulses of current of stator and voltage of network. The electric diagram contains trigger with two inputs R and S and with a control the falling side of puls. The input S is connected to the output of block of impulses of voltage, and the input R is connected to the output of block of impulses of current. The output of trigger is connected with the input of analog integrator. The output of analog integrator is connected with the input of analog comparator. The output of memory device is connected with the entrance of analog-digital converter. The power outputs of the controlled electron swithes turn on or turn off the first, second, third and fourth condensers for compensation reactive power. The capacities of the second, third and fourth condensers grow in relation to the first with coefficients equal 2,4,8. Such combination of capacities of condensers provides the error of compensation reactive power not more than 5%.

Keywords: AC motor, thyristor converter, reactive power compensation

Вступ. Асинхронні електроприводи з тиристорним регулятором напруги зазвичай використовують для регулювання швидкості турбомеханізмів з, так званою, вентиляторною характеристикою навантаження. Необхідність технологічного регулювання швидкості асинхронного двигуна зміною кута керування тиристорами потребує відповідної зміни параметрів компенсуючих пристрої для забезпечення енергозберігаючих властивостей електропривода [1-4]. В якості компенсуючих пристрої з точки зору їх вартості та надійності доцільно використовувати батареї конденсаторів.

Аналіз стану питання. Необхідність створення систем автоматичної компенсації реактивної потужності неодноразово розглядалась в сучасній технічній літературі, наприклад, в [5-9]. Зокрема, в [5] пропонується асинхронний електропривод тиристорним регулятора напруги з екстремальною схемою автоматичного керуванням струмом статора. Схема містить датчики струму і напруги статора, фільтр першої гармоніки струму статора, додатній зворотний зв'язок за струмом статора та

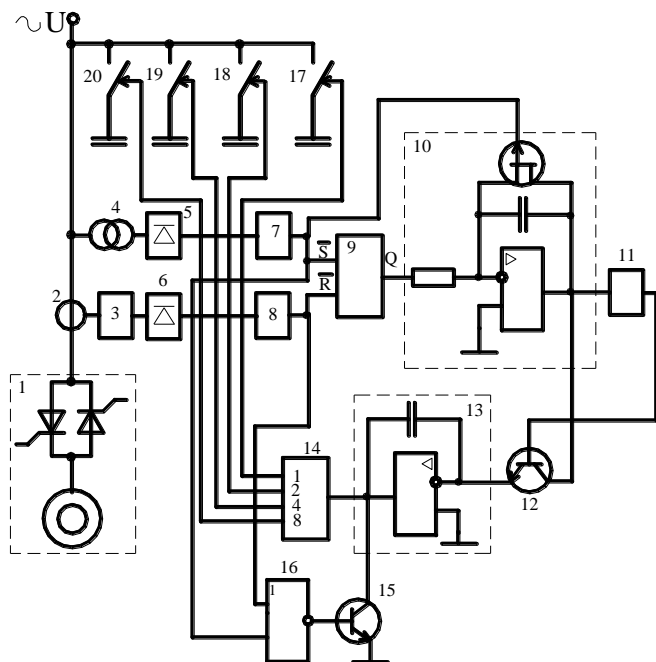
функціональний перетворювач з експоненціальною залежністю коефіцієнта підсилення від напруги статора. Недоліком схеми є те, що реактивна потужність зменшується не за рахунок компенсації реактивної потужності, а за рахунок зменшення струму статора функціональним перетворювачем з експоненціальною залежністю коефіцієнта підсилення. Тому є актуальною розробка схеми автоматичного керування, яка забезпечує безпосередньо компенсацію реактивної потужності, тобто, її споживання не з електричної мережі, а від батареї конденсаторів.

Мета статті. Розробити схему автоматичної компенсації реактивної потужності на основі ступінчастого керування батареями конденсаторів.

Результати дослідження. Основними елементами тиристорного перетворювача напруги для живлення асинхронного двигуна є зустрічно-паралельно включені тиристри за симетричною схемою вмикання тиристорів. При цьому статор асинхронного двигуна підключається до електромережі через тиристорний перетворювач

напруги, побудований на шести тиристорах, включених у кожну фазу зустрічно-паралельно. Недоліком такого електропривода є те, що його реактивна потужність некомпенсована і коефіцієнт потужності не перевищує 0,6.

Для компенсації, тобто, зменшення споживання реактивної потужності використовуємо ступені



конденсаторів з різними величинами ємностей, які вмикаються в необхідній комбінації. Функціональна схема автоматичної компенсації реактивної потужності електроприводу та часові діаграми, що пояснюють принцип її роботи, представлені на рис.1

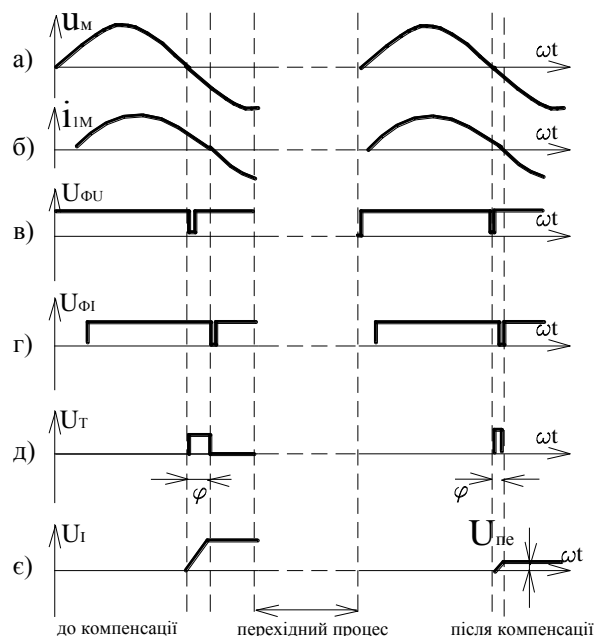


Рис. 1 - Схема автоматичної компенсації реактивної потужності асинхронного електроприводу з тиристорним регулятором напруги та часові діаграми напруг і струмів

На функціональній схемі показаний тиристорний електропривод 1, який складається з асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором та тиристорного регулятора напруги. Фазний струм статора та фазна напруга мережі вимірюються трансформатором струму 2 та трансформатором напруги 4. Струм статора при тиристорному регулюванні має явно неінусоїдний характер, як показано на експериментальній осцилограмі, отриманій на імітаційній моделі асинхронного електроприводу з тиристорним регулятором напруги в програмному середовищі Matlab (рис.2).

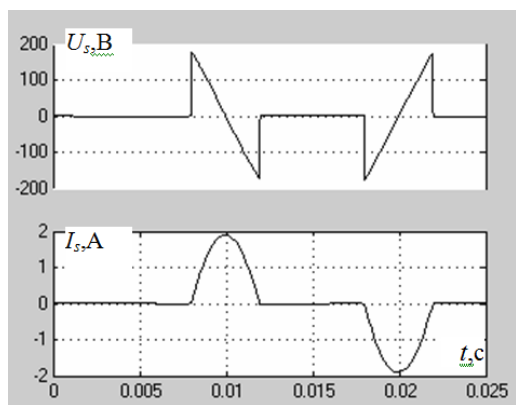


Рис. 2 - Напруга і струм фази статора асинхронного двигуна при тиристорному керуванні

Оскільки струм фази статора асинхронного двигуна при тиристорному керуванні має явно неінусоїдний характер, то необхідно віділити його першу гармоніку. Тому в схемі автоматичної компенсації реактивної потужності до вторинної обмотки трансформатора струму підключений фільтр 3 першої гармоніки фазного струму статора асинхронного двигуна. Вихід фільтру першої гармоніки фазного струму підключений до входу однофазного випрямляча 6. Вторинна обмотка трансформатора фазної напруги 4 підключена до входу однофазного випрямляча 5. На виходах однофазних випрямлячів 5 і 6 форма напруги має вигляд напівхвиль синусоїди, але для роботи тригерів необхідні прямокутні імпульси. Тому до виходів однофазних випрямлячів 5 і 6 підключені формувачі прямокутних імпульсів напруги 7 і струму 8.

Вихід формувача прямокутних імпульсів напруги 7 підключений установочного входу RS-тригера 9. Вихід формувача прямокутних імпульсів струму 8 підключений скидаючого входу RS-тригера. Необхідно зазначити, що RS-тригер спрацьовує при спадаючих фронтах імпульсів фазних напруги і струму статора. До прямого виходу RS-тригера підключений аналоговий інтегратор 10, який складається з операційного підсилювача, конденсатора та польового транзистора. Польовий транзистор скидає рівень напруги інтегратора задніми

фронтами імпульсів з формувача прямокутних імпульсів напруги 7. Вихід аналогового інтегратора підключений до входу порогового елемента 11, який в реальності являє собою стабілітрон. Вихід порогового елемента 11 підключений до бази біполярного транзистора 12, колектор якого підключений до виходу аналогового інтегратора 10, а емітер підключений до входу блоку пам'яті. Блок пам'яті складається з операційного підсилювача та конденсатора. Вихід блоку пам'яті підключений до входу чотирирозрядного аналого-цифрового перетворювача 14. Вихід аналого-цифрового перетворювача складається з чотирьох розрядів, біти яких в двійковій системі зчислення мають вигляд $2^3+2^2+2^1+2^0$. Виходи аналого-цифрового перетворювача підключені до входів чотирьох силових ключів 17-20. В якості силових ключів 17-20 використовуються трифазні оптронні тиристори. Керуючі світлодіоди оптронних тиристорів включені між собою послідовно та підключені до виходів аналого-цифрового перетворювача. Фототиристори включені між собою в схему "трикутника". Оптронні тиристори підключають до тиристорного електроприводу чотири конденсатори, ємність яких співвідноситься між собою як 1:2:4:8. В схемі також використаний логічний елемент 16 з функцією 2АБО-НІ, входи якого підключені до входів RS-тригера 9, а вихід – до входу ключа транзистора 15. На рис.1 показані часові діаграми, які пояснюють принцип дії схеми зверху вниз: а) синусоїда напруги мережі; б) синусоїда першої гармоніки струму; в) сигнал формувача імпульсів напруги; г) сигнал формувача імпульсів струму; д) сигнал на виході тригера; е) сигнал на виході інтегратора.

Особливість схеми полягає у введенні в RS-тригера з керуванням задніми фронтами імпульсів від формувачів імпульсів напруги і струму. На виході RS-тригера формується імпульс, ширина якого пропорційна реактивній потужності. Аналоговий інтегратор, який входом підключеним до виходу RS-тригера, перетворює ширину імпульсу в рівень напруги пропорційний реактивній потужності. Якщо рівень напруги, тобто, рівень реактивної потужності перевищує допустиму, то вмикається пороговий елемент і підключає вихід інтегратора до входу блоку пам'яті. Вихід останнього підключений до входу чотирирозрядного аналого-цифрового перетворювача, до чотирьох виходів якого підключені входи чотирьох силових ключів. В якості силових ключів використані оптронні тиристори підключають до тиристорного електроприводу комбінацію чотирьох конденсаторів з різними величинами ємностей. В процесі роботи асинхронного електропривода з тиристорним регулятором напруги можуть відбуватися випадки зменшення споживання реактивної потужності або в перехідному процесі наступати моменти часу співпадання напруги мережі і першої гармоніки струму за фазою. Тоді логічний елемент 2АБО-НІ, входи якого підключені до входів RS-тригера, а вихід – до входу ключа скиду пам'яті, обнуляє блок пам'яті і процес визначення величини реактивної потужності

за величиною кута зсуву фази струму від напруги повторюється.

Таким чином, коефіцієнт потужності асинхронного електропривода з тиристорним регулятором напруги підвищується саме за рахунок зменшення споживання реактивної потужності, а не за рахунок збільшення навантаження двигуна, як застосовується в [5].

Особливості функціонування запропонованої схеми тиристорного асинхронного електропривода з підвищеним коефіцієнтом потужності пояснюють часові діаграми напруг і струмів (рис.1).

Принцип дії тиристорного асинхронного електропривода з автоматичною компенсацією реактивної потужності полягає у наступному. При регулюванні напруги статора тиристорним регулятором струм першої гармоніки відстає від напруги (рис.1а, б). Формувачі імпульсів напруги 7 і струму 8 першої гармоніки формують на своїх виходах імпульси низького рівня при нульових рівнях напруги і струму (рис.1в,г). Формувач 7 імпульсів напруги встановлює високий рівень на виході RS-тригера 9 і одночасно обнулює інтегратор 10 (польовий транзистор з каналом р-типу закритий при позитивному потенціалі на затворі і відкривається при нульовому потенціалі), а формувач 6 імпульсів струму встановлює низький рівень на виході RS-тригера. На виході тригера з'являється імпульс (рис.1д), ширина якого дорівнює фазовому зсуву першої гармоніки струму від напруги. Після появи високого рівня на виході тригера починає підвищуватись напруга на виході інтегратора 10 (рис.1е). При досягненні заданного рівня напруги, який відповідає куту зсуву фази струму $5,5^0$ спрацьовує пороговий елемент 11. Мінімальний кут зсуву фази струму $5,5^0$ визначається наступним чином. Максимальний кут зсуву струму від напруги складає 82-84 градуси. Максимальна кількість ступенів ємності (дискретність зміни ємності) конденсаторів складає 15 дискрет. Тоді ціна однієї дискрети складає $83^0/15=5,5^0$.

Пороговий елемент 11 вмикає ключ 12 і вихідна напруга інтегратора запам'ятовується блоком 13. Напруга з виходу блоку пам'яті перетворюється у двійковий код на виході аналого-цифрового перетворювача (АЦП). Двійковому коду відповідають логічні рівні напруги на виходах АЦП, комбінація яких відповідає вхідній напрузі. Логічні рівні напруги вмикають конденсатори відповідної ємності. Після перехідного процесу вмикання конденсаторів фазовий зсув струму, ширина вихідного імпульсу тригера, вихідна напруга інтегратора зменшуються. Пороговий елемент вимикається, блок пам'яті залишає рівень напруги, який відповідає величині реактивної потужності, пропорційний куту зсуву фази струму. Реактивна потужність скомпенсована і асинхронний електропривод з тиристорним регулятором напруги працює з підвищеним коефіцієнтом потужності. У випадку зменшення споживання реактивної потужності при збільшенні кута керування тиристорним регулятором величина ємності стає більшою від необхідного значення і фаза струму

починає рухатись в сторону випередження. В момент співпадання імпульсів напруги і струму на виході елемента 2АБО-НІ з'являється високий рівень, вмикається ключ 15 і обнулює блок пам'яті 13. Починається новий процес визначення необхідної величини ємності конденсаторів.

Висновки. Таким чином, запропонована схема забезпечує автоматичну компенсацію реактивної потужності асинхронного електроприводу з тиристорним регулятором напруги і, отже, підвищує його коефіцієнт потужності. При цьому зменшуються втрати електроенергії в лініях електропередач і трансформаторах підстанцій від передачі реактивної потужності.

Список літератури

1. Барский, В. А. Электропривод как энергосберегающий фактор в промышленности и ЖКХ Украины / В. А. Барский, А. С. Бешта, Н. В. Горбачев, М. В. Загирняк, В. Б. Клепиков, О. Ю. Лозинский, С. А. Мехович, С. М. Пересада, А. В. Садовой, О. И. Толочко // Энергосбережение : Энергетика · Энергоаудит. – Харьков, 2013. – № 9(115). – С. 2–11.
2. Закладний, О. М. Энергобережения засобами промислового електропривода / О. М. Закладний, А. В. Праховник, О. І. Соловей. - К.: Кондор, 2003. - 408 с.
3. Владимиров, Ю. В. О концепции компенсации реактивной мощности [Текст] / Ю. В. Владимиров // Світлотехніка та електроенергетика. - Х. : ХНАМГ, 2008. - № 3. - С. 35–41.
4. Говоров, Ф. П. Компенсация реактивной мощности в системах электроснабжения и освещения городов / Ф. П. Говоров, В. Ф. Говоров // Наукові праці Донецького національного технічного університету. - Донецьк: ДонНТУ, 2013. - № 1 (14). - С.
5. Асинхронный электропривод с тиристорным управлением / Р. П. Герасимьяк, В. А. Лещев, Н. С. Путилин. - Киев: Техника, 1984. - 150 с.
6. Зеленов, А. Б. Потребление реактивной энергии тиристорными позиционными электроприводами постоянного тока [Текст] / А. Б. Зеленов, Е. В. Полилов, В. П. Яблонь, Д. И. Морозов // Вісник КДПУ, випуск 3/2007 (44). Частина 1. С. 76–78.
7. Чизенко, О. І. Обмінні енергетичні процеси в силових колах вентильних електричних перетворювачів [Текст] : автореф. дис. д-ра техн. наук : 05.09.05 / Чизенко О. І. - Київ, 2010. - 36 с.
8. Жемеров, Г. Г. Энергия и мощность в системах электроснабжения с полупроводниковыми преобразователями и

накопителями энергии / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай. // Электротехника і електромеханіка. 2014. - №1. - С. 45-57.

9. Mr. Musthafa, P. (2011) Analysis of Dynamic Power Factor Correction Using Flexible Ac Transmission Systems / Mr. P. Musthafa, Mr. M. Sivasubramanian, Mr. K. Sakthidhasan // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622. - Vol. 1, Issue 3, pp.710-715.

References (transliterated)

1. Barskiy V. A. Elektroprivod kak energosberegayuchiy factor v promishlennosti I ZKH Ukraini / V.A. Barskiy, A.S. Beshta, N.V. Gorbachov, M.V. Zagirniak, V.B. Klepikov, O. Yu. Lozinskiy, S.A. Mehovich, S.M. Peresada, A.V. Sadovoy, O.I. Tolochko // Energoberezenie·Energetica·Energoaudit. – Kharkov,2013.-№ 9(115). - p. 2-11.
2. Zakladniy O. M. Energozberezennia zasobami promislavogo elektroprivoda / O. M. Zakladniy, A. V. Prakhovnik, O. I. Solovey. - K.: Kondor, 2003. - 408 p.
3. Vladimirov Yu. V. O kontsepsii kompensatsii reaktivnoy moshnosti / Yu. V. Vladimirov // Svitlotekhnika ta elektroenergetika. - Kh. : KHNAMG, 2008. - № 3. - s. 35-41.
4. Govorov F. P. Kompensatsiya reaktivnoy moshnosti v sistemakh elektrosnabjeniya i osvicheniya gorodov / F. P. Govorov, V. F. Govorov // Naukovi praci Donetskogo natsionalnogo tekhnichnogo universitetu. - Donetsk: DonNTU, 2013 p. - № 1 (14). - P. 30-38.
5. Asinkhronniy elektroprivod s tiristornim upravleniem / R. P. Gerasimiak, V.A. Leschev, N. S. Putilin.-Kiyv: Tekhnika, 1984. – 150 s.
6. Zelenov A. B. Potrebleniye reaktivnoy energii tiristornimi pozitsionimi elektroprivodami postoyanogo toka / A. B. Zelenov, Ye. V. Polilov, V.P. Yablou, D.I. Morozov // Vicnik KDPU, vipusk 3/2007 (44). Chastina 1. P. 76-78.
7. Chizenko O. I. Obminni nergetichni protsecci v silovikh kolah ventilnikh elektrichnikh peretvorivuvachiv: avtorf. dis. d-ra tekhn. nauk : 05.09.05 / Chizenko O. I. - Kiyv, 2010. - 36 p.
8. Zemerov G.G. Energiya i moshnost v sistemakh elektrosnabzeniya s poluprovodnikovimi preobrazovateliami I nakopiteliami energiyi / G.G. Zemerov , D.V. Tugay. // Elektrotekhika i elektroekhanika. 2014. - №1. – P. 45-57.
9. Mr. Musthafa, P. (2011) Analysis of Dynamic Power Factor Correction Using Flexible Ac Transmission Systems / Mr. P. Musthafa, Mr. M. Sivasubramanian, Mr. K. Sakthidhasan // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622. - Vol. 1, Issue 3, pp.710-715.

Надійшла (received) 9.12.2017

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ковальова Юлія Вікторівна (Ковалева Юлія Вікторівна, Kovalova Yuliia Viktorivna) – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри систем електропостачання та електроспоживання міст Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова; тел.: (066) 97-97-302; e-mail: kovalova.jv@gmail.com.

Укладач: С. О. Федорчук, аспірант.