УДК 621.317: 621.313.3 DOI: https://doi.org/10.15407/techned2018.06.085

ТОПОЛОГІЯ ФІЛЬТРОКОМПЕНСУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ПОКРАЩЕННЯ СПЕКТРА ВХІДНОГО СТРУМУ ДЖЕРЕЛ ЖИВЛЕННЯ В ЕЛЕКТРОТЕРМІЧНИХ УСТАНОВКАХ ІЗ ВИРОБНИЦТВА БАЗАЛЬТОВОГО СУПЕРТОНКОГО ВОЛОКНА

І.В. Волков*, докт.техн.наук, **В.П. Стяжкін**,** канд.техн.наук, **П.П. Подейко*****
Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ, 03057, Україна, **e-mail: tems@ukr.net**

Для покращення спектра вхідного струму джерела живлення в електротермічних установках із виробництва БСТВ розроблено новий підхід до корекції струму в режимі розігріву філь'єрної пластини, який використовує комбіновану схему джерела живлення за системою тиристорний регулятор – спеціальний трансформатор – активний коректор струму. Проведено аналіз діаграм струму коректора та спектрограм вхідного струму, який підтверджує ефективність запропонованого рішення. Бібл. 7, рис. 4, табл. 1.

Ключові слова: тиристорний регулятор струму, спеціальний трансформатор, коректор форми струму, гібридний фільтр, сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень.

Постановка проблеми. Велика кількість промислових споживачів, що споживають з мережі живлення несинусоїдальний струм, стає серйозною проблемою для систем енергопостачання України. До таких споживачів належать і силові джерела живлення установок, які виробляють базальтове супертонке волокно (БСТВ). У таких джерелах живлення узгодження параметрів мережі живлення з навантаженням відбувається при використанні спеціальних (пічних, зварювальних) трансформаторів (СТ), що мають великі коефіцієнти трансформації за струмом, а їхня вторинна обмотка навантажена на активний нелінійний опір (філь'єрна пластина, яка формує первинну базальтову нитку). Раніше регулювання струму навантаження виконувалося за допомогою контактного перемикання відпайок СТ на його первинній стороні, згодом з розвитком силових напівпровідників у таких джерелах живлення почали застосовувати тиристорні регулятори струму (ТРС) з фазовим керуванням [1]. Такі схеми регулювання струму при підключенні ТРС тільки до однієї ступені СТ використовуються ізараз, вносячи в мережу окрім реактивної потужності на основній гармоніці ще й високочастотні гармоніки, особливо при глибокому регулюванні струму. Залежність сумарного коефіцієнта гармонійних спотворень (THD_I) від кута управління α ТРС (режиму роботи установки) показано на рис. 1. Крім того, філь'єрну пластину на робочий температурний режим потрібно виводити поступово, бо її опір у холодному стані близький до нуля. Різке збільшення сили струму в пластині може бути причиною деформації та виходу її з ладу. Тому спочатку рівень струму в первинній обмотці СТ встановлюють 15 А, потім його підвищення відбувається через кожні 2–3 хвилини на 1 А до робочого рівня 46–53 А, який триває в середньому від однієї до двох годин. Вищі гармоніки струму споживання джерела живлення установки з виробництва БСТВ саме в режимі початкового розігріву філь'єрної пласти є причиною хибного спрацювання релейного захисту систем автоматики електроустановки, що призводить до зриву процесу отримання якісних БСТВ.

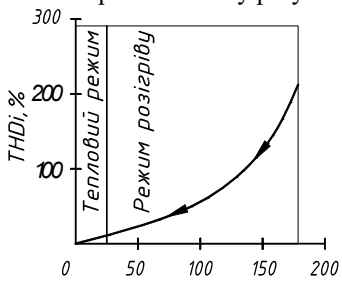


Рис. 1

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зазвичай задачу зменшення гармонійних спотворень вхідного струму джерел живлення електроустановок та підвищення якості електричної енергії вирішують з використанням фільтрокомпенсуючих пристроїв (ФКП), до складу яких можуть входити пасивні фільтри (ПФ) вищих гармонік або активні коректори форми струму (АКФС) [2]. Основні обмеження при використанні відносно простих і надійних пасивних фільтрів для корекції якості електроенергії визначаються необхідністю їхнього налаштування на ряд гармонік, близьких до основної, громіздкість, залежність від параметрів мережі і навантаження. Також включені послідовно з навантаженням резонансні пасивні фільтри впливають на стійкість енергосистеми, а їхня ефективність обмежена, особливо у разі зміни вхідного струму споживача, коли є небезпека виникнення резонансних явищ [3]. Активні ж методи більш точні та керовані, але відносно складні.

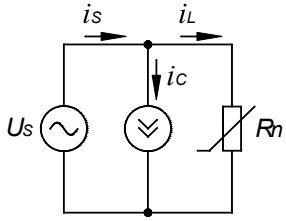


Рис. 2

Принцип паралельного включення нелінійного навантаження і керованого джерела реактивної потужності, струм i_C якого (рис. 2) направлений зустрічно миттєвому значенню струму навантаження i_L, покладено в основу активної корекції форми струму.

Такий активний коректор показав достатньо високі енергетичні показники

© Волков І.В., Стяжкін В.П., Подейко П.П., 2018
ORCID: * http://doi.org/0000-0002-0696-0382 ; **http://doi.org/0000-0003-0602-1112 ; ***http://doi.org/0000-0001-9201-102X

системи ТРС-СТ (знизивши THD_I мережевого струму i_S до 10,3 % у режимі розігріву жаростійкої пластини) під час заводських випробову-вань в установці з виробництва БСТВ філь'єрним способом. Проте амплітудний струм коректора досягає i_{C_MAX} =85,5 А (табл. 1, *а*), що, в свою чергу, накладає певні обмеження на широке використання такого прист-рою через високу вартість його силової частини, бо такі установки мають забезпечувати повну миттєву по-тужність нелінійного навантаження при максимальних величинах струму та напруги.

Для покращення техніко-економічних показників АКФС у промислових мережах застосовують неповну активну компенсацію спотворень, тобто використовують так звані гібридні системи (комбінація ПФ з АКФС). Але при гібридній фільтрації (ГФ) певного спектру гармонік, компенсації реактивної потужності та зсуву фаз перших гармонік використовується схема ГФ з одним або декількома каскадами ПФ [4], що значно ускладнює експлуатаційні можливості ФКП через необхідне налагодження кожного каскаду на домінуючі у спектрі гармоніки. Тому **метою статті** є аналіз показника THD_I струму споживання при побудові топології нового ФКП для джерел живлення в електротермічних установках з виробництва БСТВ, що буде ефективнішим у режимі розігріву філь'єрної пластини.

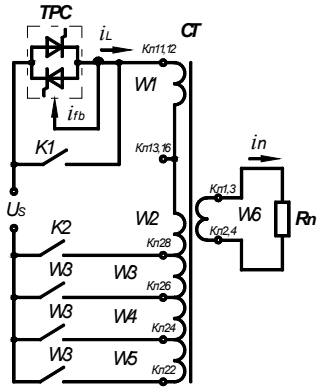


Рис. 3

Викладення основного матеріалу дослідження. В електротермічних установках зазвичай використовують СТ з нормальним магнітним розсіюванням і секційними обмотками. Такий трансформатор з ТРС при фазовому керуванні (рис. 3) має практично жорстку зовнішню характеристику з диференціальним нахилом опору даного джерела живлення не більше 0,01 В/А. Водоохолоджуваний зварювальний трансформатор ТВК-75, що використовується в установці БСТВ для нагрівання жароміцної філь'єрної пластини, має наступні технічні характеристики [5]: номінальна первинна напруга − 365 В; номінальний тривалий первинний струм − 148 А; номінальний тривалий вторинний струм − 9000 А.

У робочому температурному режимі філь'єри R_n вторинний струм трансформатора становить i_n = 2150 А, а первинний – i_L = 58,5 А. Саме така (рис. 3) система тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор (ТРС – СТ) використовується дотепер при виробництві БСТВ. Застосування контакторів *K2, K3, K4, K5* для перемикання ступенів первинної обмотки без ТРС (*K1* ввімкнений) забезпечує поетапне дискретне регулювання первинного струму СТ в інтервалі 38…64 А. Але точність такого регулювання струму не відповідає вимогам технологічного процесу, бо крок регулювання складає 4,7…11,2 А. Для отримання безперервних первинних волокон товщиною 100 … 250 мкм при виробництві БСТВ температура філь'єрної пластини має бути у межах 1300 ... 1350 ºС, а точність регулювання 1 А [1, 6]. Варто зазначити, що даний спосіб регулювання (у порівнянні з фазовим) має невисокі регулювальні властивості, але практично не впливає на мережу живлення. Саме цю перевагу СТ необхідно використати, поєднавши її з регулювальними достоїнствами ТРС із фазовим керуванням.

Так, тиристорні перетворювальні пристрої, виконавчі органи (ВО) яких поєднують напівпровідникові ключові елементи і СТ з відпайками на первинній стороні, при використанні імпульсно-фазових принципів керування суттєво зменшують спотворення струму, що споживається з мережі, забезпечуючи при цьому задану глибину регулювання струму навантаження i_n. [7].

Розглянемо двоступінчату схему ВО (рис. 4), у якій перша ступінь регулювання утворюється завдяки мережевій обмотці $w_S = w_1+w_2$ СТ, а друга ступінь СТ – регулювальній w_2. Така схема складається з двох тиристорних пар *VS* (силових зустрічно паралельних тиристорів), де *VS1* підключено до мережевої обмотки СТ; а *VS2* – до вольтододавчої обмотки. Для отримання мінімального струму навантаження i_{nMIN} весь півперіод має бути відкрита пара *VS1* (таблиця, *б*). При максимальному значенні струму навантаження i_{nMAX} – відкрита пара *VS2* (а пара *VS1* закрита, таблиця, *а*). Таким чином, для першої ступені регулювання забезпечується струм i_n = 1280 А, i_L = 38 А, а для другої – i_n = 2150 А, i_L = 58,5 А. Природно, що струм споживання при цьому має синусоїдальний характер, а величина його залежить від співвідношення обмоток w_1, w_2, w_3. У регулювальних режимах струму i_n першу частину півперіоду відкрита пара *VS1*, а іншу – *VS2*. Тоді форма вхідного струму i_L має ступінчато-синусоїдальний характер (таблиця, *г*). Регулювання здійснюється за рахунок зміщення моменту включення *VS2* на кут *α* відносно початку півперіоду.

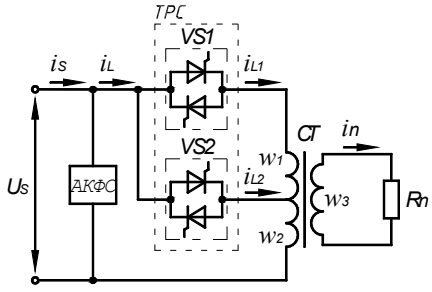
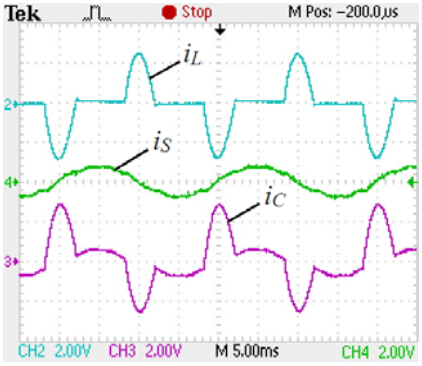
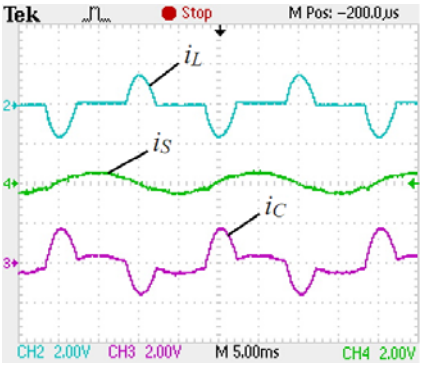
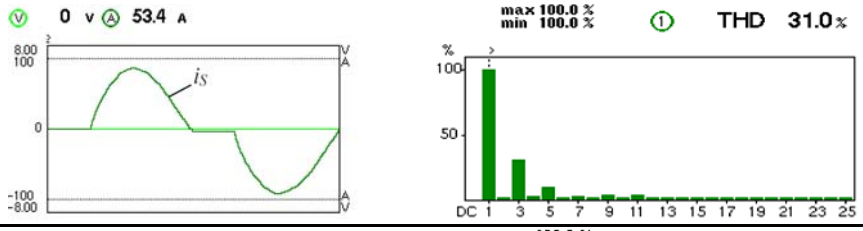
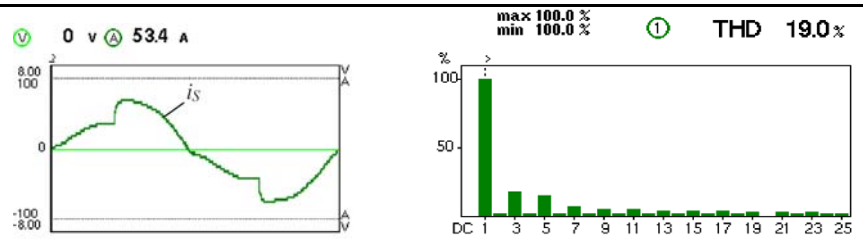


Рис. 4

Для поліпшення спектральних характеристик струму i_S можна піти шляхом збільшення кількості ступенів ВО, що призведе до значного ускладнення схеми керування тиристорними парами *VS*, бо існує певна послідовність переключення тиристорних ключів у залежності від зсуву струму при їх природній комутації [7]. У такому випадку більш раціонально використати АКФС у режимі розігріву пластини на першій ступені регу-

лювання. Тоді для компенсації реактивної складової струму мережі i_L та зниження рівня THD_I АКФС має забезпечувати струм i_{C_MAX} =56,3 А. На другій ступені регулювання відбувається розігрів філь'єри до номінального теплового режиму без АКФС, а коригування реактивної складової струму споживання i_S реалізується за допомогою існуючих статичних конденсаторних батарей.

Режим роботи		Форми струму i_S, i_C, i_L з АКФС	i_{C_MAX}, А	$THD_I i_L$,%	$THD_I i_S$,%
а	Розігрів пластини з АКФС при фазовому регулюванні *VS2*		85,5	98,5	10,3
б	Розігрів пластини з АКФС при фазовому регулюванні *VS1*		56,3	74	9.5
в	Тепловий при фазовому регулюванні *VS2* без АКФС				
г	Тепловий при фазовому регулюванні *VS1* та *VS2* без АКФС				

Таким чином, порівнюючи дані, наведені у таблиці, можна зробити **висновок**, що завдяки запропонованій топології комбінованих фільтрокомпенсуючих пристроїв у системі тиристорний регулятор струму – спеціальний трансформатор зменшився сумарний коефіцієнт гармонійних спотворень THD_I із 74 до 9.5 % у режимі розігріву філь'єри, а в тепловому режимі − із 31 до 19%. Запропонований підхід поєднує переваги СТ з відпайками та АКФС, знижує потужність коректора на 34% (струм i_{C_MAX} знизився з 85,5 до 56,3 А), а вартість такого ФКП стає прийнятною для подальшого використання в джерелах живлення електротермічних установок із виробництва БСТВ.

1. Стяжкин В.П., Подейко П.П. Оптимальное управление электротехнологической установкой по производству базальтового супертонкого волокна. *Вестник Национального технического университета ХПИ*. Тематический выпуск Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика. 2015. № 12 (1121). С. 124-127.
2. Zainal Salam, Tan Perng Cheng, Awang Jusoh. Harmonics Mitigation Using Active Power Filter. *A Technological Review. Department of Energy Conversion, Faculty of Electrical Engineering, University Technology Malaysia*. 2006. No 2. Pp. 17–26.

3. Комаров М.С., Головко О.О., Булатов А.Ю., Подейко П.П. Енергозберігаючі технології в комп'ютерних класах та навчальних лабораторіях закладів освіти. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2013. № 6. С. 278-286.
4. Колб А.А. Гибридные фильтры в устройствах управления качеством электроэнергии. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи.* 2012. Випуск 3 (19). С. 250-253.
5. Трансформатор сварочный ТВК-75 УХЛ4 для контактных электросварочных машин. Паспорт. 8 с.
6. Короткий курс навчання операторів, налагоджувальників, майстрів виробництва базальтових супертонких штапельних волокон (БСТВ). Система управління якістю. Інструкція. ВКП «Чернівецький завод теплоізоляційних матеріалів». 2014. 47 с.
7. Липківський К.О., Халіков В.А., Можаровський А.Г. Фазове регулювання напруги ключами із природною комутацією та її дослідження в системі MATLAB. *Технічна електродинаміка*. Темат. випуск «Проблеми сучасної електротехніки». 2002. С. 72-79.

ТОПОЛОГИЯ ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ СПЕКТРА ВХОДНОГО ТОКА ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ В ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ ПО ПРОИЗВОДСТВУ БАЗАЛЬТОВОГО СУПЕРТОНКОГО ВОЛОКНА

И.В. Волков, докт.техн.наук**, В.П. Стяжкин,** канд.техн.наук, **П.П. Подейко**
Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев, 03057, Украина, e-mail: tems@ukr.net

Для улучшения спектра входного тока источника питания в электротермических установках по производству БСТВ разработан новый подход к коррекции тока в режиме разогрева фильерной пластины, который использует комбинированную схему источника питания по системе тиристорный регулятор - специальный трансформатор - активный корректор тока. Проведен анализ диаграмм тока корректора и спектрограмм входного тока, который подтверждает эффективность предложенного решения. Библ. 7, рис. 4, табл. 1.

Ключевые слова: тиристорный регулятор тока, специальный трансформатор, корректор формы тока, гибридный фильтр, суммарный коэффициент гармонических искажений.

TOPOLOGY OF FILTER-COMPENSING DEVICES FOR IMPROVING THE SPECTRUM OF INPUT CURRENT OF POWER SOURCES IN ELECTROTHERMIC INSTALLATIONS ON THE PRODUCTION OF BASALT SUPERTON FIBER

I.V. Volkov, V.P. Styazhkin, P.P. Podeiko
Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
pr. Peremohy, 56, Kyiv, 03057, Ukraine, e-mail: tems@ukr.net

To improve the spectrum of the power supply input current in electrothermal installations for the BSTF production, the new approach to current correction in the spinneret plate heating mode, which uses combined circuit of the power source by the thyristor regulator system-a special transformer-an active current corrector, is developed. The diagrams of the corrector current and the spectrograms of the input current are analyzed, which confirm the effectiveness of the proposed solution. References 7, figures 4, table 1.

Key words: thyristor current regulator, special transformer, correction of current shape, hybrid filter, total harmonic distortion.

1. Styazhkin V.P., Podeiko P.P. Optimum control of the electrotechnological installation for the production of basaltic superthin fiber. *Vestnik Natsionalnogo tekhnicheskogo universiteta KhPI.* Tematicheskii vypusk Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriia i praktika. 2015. No 12 (1121). Pp. 124-127. (Rus)
2. Zainal Salam, Tan Perng Cheng, Awang Jusoh. Harmonics Mitigation Using Active Power Filter: A Technological Review. *Department of Energy Conversion,* University Technology Malaysia. 2006. No 2. Pp. 17–26.
3. Komarov M.S., Golovko O.O., Bulatov A.Y., Podeiko P.P. Energy-saving technologies in computer classes and educational laboratories of educational institutions. *Visnyk Kyivskoho Natsionalnoho Universytetu tekhnolohii ta dyzainu.* 2013. No 6. Pp. 278-286. (Ukr)
4. Kolb A.A. Hybrid filters in power quality control devices. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy.* 2012. Vyp. 3/2012 (19). Pp. 250-253. (Rus)
5. Welding transformer TVK-75 UHL4 for contact electrowelding machines. Pasport. 8 p.
6. Short course of training operators, debuggers, masters of production of basalt super-fine staple fibers (BSTS). Quality management system. Instruction. VKP Chernivetskii zavod teploizoliatsiinykh materialiv. 2014. 47 p. (Ukr)
7. Lypkivskyi K.O., Khalikov V.A., Mozharovskyi A.G. Phase voltage regulation with keys with natural switching and its research in the MATLAB system. *Tekhnichna Elektrodynamika*. Tematychnyi vypusk Problemy suchasnoi elektrotekhniky. 2002. Pp. 72-79. (Ukr)

Надійшла 02.03.2018
Остаточний варіант 03.05.2018