

2. Запропонований спосіб регулювання дає змогу тільки при одній відпайці реактора  $Rk_3$  суттєво знизити коефіцієнт гармонік вхідного струму ТРК (струму мережі) до 0,525 % (для  $\mu = 5$ , тобто при відношенні  $x_C/x_2 = 5^2$ ) і до менш ніж 2 % (для  $\mu = 125$ , тобто при відношенні  $x_C/x_2 = 125^2$ ). Використання декількох відпайок у реакторі  $Rk_3$ , що перемикаються під навантаження у процесі регулювання реактивної потужності, забезпечить ще більш радикальне зменшення цього показника якості вхідного струму.

3. Впровадження запропонованого методу регулювання сприяє економії міді у обмотках реакторів  $Rk_3$ , чим покращує їх масогабаритні показники та такі показники ТРК у цілому.

4. Запропонований спосіб дає змогу без суттєвих втрат у якості вхідного струму відмовитись у обладнанні ТРК від цілої групи реакторів, а саме від реакторів  $Rk_2$ .

1. Чиженко О.І., Трач І.В. Аналіз електромагнітних процесів у системі мережа–ТРК у режимі плавного регулювання реактивної потужності. Оцінка впливу параметрів мостового ТРК на його електромагнітну сумісність з мережею // Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. пр. – К.: ІЕД НАНУ, 2016. – Вип. 45. – С. 20–29.
2. Чиженко А.И. Трехфазный вентильный индуктивно-емкостный источник реактивной мощности. – Киев, 1990. (Препр./АН УССР Ин-т электродинамики; № 662).
3. Auetul Gelen, Tankut Yalcinoz. An educational software package for Thyristor Switched Reactive Power Compensators using Matlab/Simulink // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2010. – N 18. – P. 366–377.

УДК 621.316

**А.И. Чиженко**, докт. техн. наук, **И.В. Трач**, канд. техн. наук  
Институт электродинамики НАН Украины,  
пр. Победы, 56, Киев-57, 03057, Украина

**Способ улучшения качества тока системы сеть – тиристорный компенсатор реактивной мощности**

*Предложен способ регулирования генерируемой тиристорным регулируемым компенсатором (ТРК) в сеть реактивной мощности, который заключается в том, что в процессе плавного регулирования осуществляется под нагрузкой переключение отпаяк обмоток индуктивного реактора  $Rk_3$ , чем достигается существенное улучшение качества входного тока ТРК (он же ток сети), путем уменьшения в нем содержания высших гармоник. Библи. 3, рис. 4, табл. 2.*

**Ключевые слова:** электрическая сеть, ТРК, регулирование реактивной мощности, качество тока, коэффициент гармоник тока.

**A.I. Chyzhenko, I.V. Trach**

Institute of electrodynamics of the National Academy of Sciences Ukraine,  
Peremohy, 56, Kyiv-57, 03057, Ukraine

**A method of improving the quality of the current in the system “network – controlled bridge thyristor compensator of reactive power”**

*Method of smooth controlling the reactive power in the electrical network using a thyristor reactive power compensator is proposed. Smooth control is carried out under a load by switching taps inductive reactor coils. Significant improvement in the quality of the input current is accomplished by reducing higher harmonics therein levels. Referenses 3, figures 4, tables 2.*

**Key words:** network, thyristor reactive power compensator, regulation of reactive power, switching taps, inductive reactor coils, power quality, current harmonic distortion.

Надійшла 22.09.2016

Received 22.09.2016

УДК 621.314.5

**ОСОБЛИВОСТІ ІНТЕГРАЦІЇ СИСТЕМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ В МАГІСТРАЛЬНІ МЕРЕЖІ ЗМІННОЇ НАПРУГИ**

**А.В. Білик**

Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут ім. І. Сікорського",  
пр. Перемоги, 37, Київ, 03056, Україна  
e-mail: [andret-2@mail.ru](mailto:andret-2@mail.ru)

*Досліджено аспекти використання систем постійного струму в складі магістральних мереж змінної напруги. Розглянуто питання, пов'язані з гармоніками в мережах з системами високої напруги постійного струму*

(ВНПС). Проаналізовано і вивчено причини виникнення гармонічних складових у вихідній напрузі перетворювачів ВНПС. Описано умови і методи щодо зменшення гармонічного спектра. Досліджено модель гібридної енергосистеми змінного і постійного струмів. У результаті моделювання експериментальним шляхом, знято характеристики струму холодного ходу і його гармонічний спектр при різних умовах намагнічування. Бібл. 3, рис. 3.

**Ключові слова:** системи постійного струму високої напруги, гармоніки, намагнічування.

Світовий досвід використання систем високої напруги постійного струму (ВНПС) показує, що останнім часом їх все ширше інтегрують до складу систем змінної напруги. Перш за все, це пов'язано з рядом переваг, якими володіють системи ВНПС відносно систем змінного струму [2]. Зазначимо, що під системами високої напруги постійного струму розуміються лінії, а також вставки постійного струму.

**Метою роботи є** проведення аналітичного аналізу питань, пов'язаних з гармонічними складовими напруги електричних систем з високовольтними перетворювачами постійного струму, а також мереж змінної напруги, в складі яких працюють системи ВНПС.

Варто зазначити, що для керування напівпровідниковими перетворювачами ВНПС використовуються методи синусоїдальної широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Як правило, частота керування ШІМ значно вища номінальної частоти мережі змінного струму. В результаті високочастотних перемикачів на виході як транзисторних, так і тиристорних перетворювачів формується дуже широкий спектр гармонік. Фактично форма кривої напруги, що отримується на виході перетворювача, не придатна для використання, і для її покращення застосовуються різного роду фільтри. У роботі [1] виконано детальний аналіз вихідної напруги перетворювачів з ШІМ регулюванням. Аналізуючи вирази вихідної напруги напівпровідникових перетворювачів, наведених в [1], можна відмітити, що при непарних значеннях відносної частоти модуляції  $k$  у вихідній напрузі формуються як парні, так і непарні гармоніки. Для того щоб позбутися парних гармонік, потрібно вибирати парні значення частоти керування. При частоті, кратній трьом,  $k = 6s$ , де  $s = 1, 2, 3, \dots$ , у вихідній напрузі, крім того, відсутні гармоніки, кратні трьом [1]. Однак більшість гармонік, таких як 5, 7, 11, 13, 17, 23, ... все ж залишається присутніми у вихідній напрузі. Зрозуміло, що амплітуда гармонік по мірі збільшення їх порядкового номера зменшується. З цих міркувань на перетворювальних підстанціях зазвичай встановлюють фільтри лише на частоти 5-, 7-, 11-, а іноді і 13-ї гармонік. Відповідно в разі недостатнього дослідження питання гармонік на стадії проектування системи ВНПС гармонічні складові вищих порядків, які містяться у вихідній напрузі перетворювача, що в свою чергу подається на обладнання змінного струму, можуть призводити до негативних наслідків і виходу обладнання з ладу.

Аналізуючи проблеми гармонік магістральних мереж змінного струму, у складі яких працюють системи ВНПС, у поле зору потрапляють питання, пов'язані з намагнічуванням осердя силових трансформаторів постійним струмом. На рис. 1 показана гібридна мережа змінного і постійного струмів. Тут П1, П2 – напівпровідникові перетворювачі; Л1, Л2 і Л3, Л4 – лінії постійного і змінного струмів відповідно; ПТ1, ПТ2 – перетворювальні трансформатори; Т1, Т2 – силові трансформатори загального призначення. При роботі системи ВНПС в уніполярному режимі, коли як зворотний шлях використовується земля, струм  $I_{z3}$  призводить до виникнення різниці потенціалів  $\Delta U$  між нейтральними точками заземлених силових трансформаторів загального призначення, що в свою чергу призводить до виникнення постійного струму  $I_{\text{нам}}$ , який тече по лініях змінного струму від трансформатора Т1 до Т2. Очевидно, що в цьому випадку потенціал землі буде залежати від структури ґрунту. Базуючись на рівняннях Лапласа, потенціал землі в першому шарі структури ґрунту можна вивести за допомогою методу зображень функції Гріна [2]:

$$\varphi = \frac{\rho_n I}{2\pi} \int_0^{\infty} \alpha_1(\lambda) J_0(\lambda r) e^{-\lambda z} d\lambda;$$

$$\alpha_1(\lambda) = 1 + \frac{2\kappa_1 e^{-2\lambda h}}{1 - \kappa_1 e^{-2\lambda h}}, \quad \kappa_1(\lambda) = \frac{\rho_n - \rho_1}{\rho_n + \rho_1}.$$

де  $\varphi$  – поверхневий потенціал землі;  $\rho_n$  – питомий опір шару землі шару  $n$ ;  $I$  – постійний струм заземлюючого електрода системи ВНПС;  $J_0$  – функція Бесселя першого роду;  $z$  – гли-

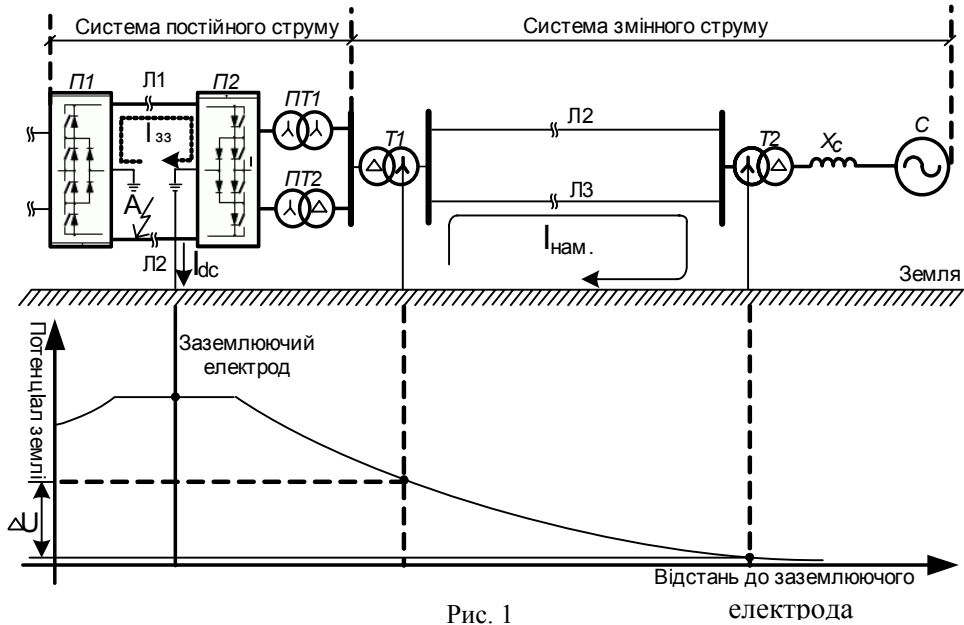


Рис. 1

бина заземлюючого електрода;  $n$  – номер шару ґрунту (в загальному випадку наведений вираз використовується для визначення потенціалу землі багат шарового ґрунту);  $h_n$  – товщина ґрунту  $n$ -го шару.

Відомо, що в якості первинного захисту трансформаторів використовують диференціальний захист. Для того щоб відрізнити пускові струми від струмів внутрішніх пошкоджень, у сучасному диференційному захисті широко застосовується метод гальмування другої, а також інколи і п'ятої гармоніки. На практиці уставка за другою гармонікою відповідає приблизно 15 % від основної. Використовуючи програмне середовище *MatLab* і підставляючи усереднені значення параметрів ґрунту в наведену формулу, не важко розрахувати, що при струмі  $I_{dc} = 3$  кА потенціал землі  $\Delta U$  змінюється в межах 1,6...0,2 кВ залежно від відстані  $\lambda = 1...10$  км.

Моделювання намагнічування постійним струмом виконується шляхом додавання

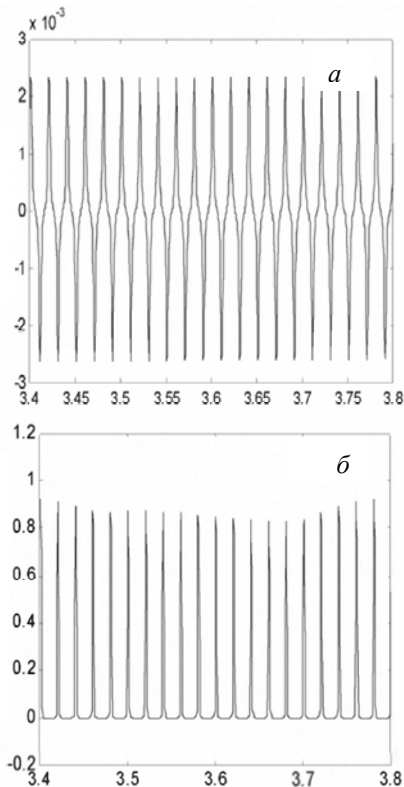


Рис. 2

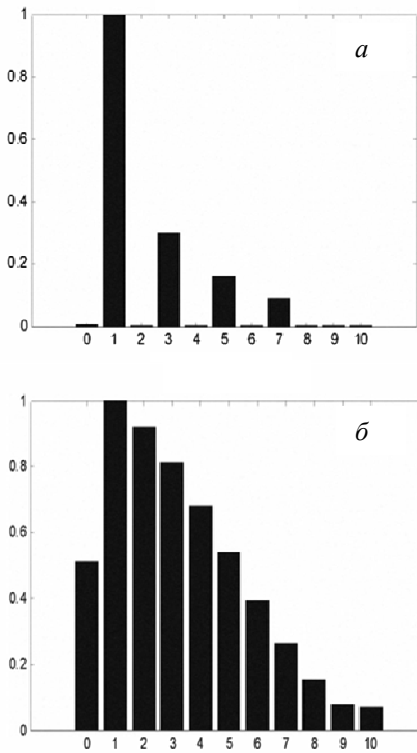


Рис. 3

джерела постійної напруги між нейтральними точками трансформаторів Т1 і Т2.

На рис. 2 зображено форми кривих струму холостого ходу при різних умовах намагнічування: *а* – без намагнічування; *б* – зі струмом намагнічування 100 А. Очевидно, що намагнічування постійним струмом викликає насичення трансформатора протягом півперіоду струму холостого ходу, що в свою чергу призводить до збільшення кількості навіть непарних гармонік. Зазвичай гар-

монічні складові струму холостого ходу, спричинені намагнічуванням постійним струмом, є результатом перезбудження трансформатора. На рис. 3 показано гармонічний спектр струму холостого ходу: *a* – без намагнічування; *б* – з намагнічуванням.

Струм холостого ходу є частиною диференційного струму, який виникає при пошкодженнях в зоні дії диференціального захисту трансформатора. З рис. 3 *б* видно, що вміст другої гармоніки значно перевищує встановлений поріг (15 %). Це вказує на те, що через намагнічування при внутрішніх пошкодженнях трансформатора диференціальний захист не спрацює.

В [3] детально проаналізовано три методи боротьби з постійним струмом намагнічування: ввімкнення в нейтраль трансформатора зустрічного джерела постійної напруги, активного опору або статичної ємності. Відповідно кожен з цих методів має низку як переваг, так і недоліків.

У результаті викладеного можна зробити такі висновки: 1. Основними причинами виникнення гармонічних складових у мережах з системами ВНПС є високочастотна комутація (широкоімпульсна модуляція) в напівпровідникових перетворювачах; підмагнічування осердя силових трансформаторів постійним струмом.

2. Постійний струм намагнічування значно погіршує гармонічний спектр струму холостого ходу силового трансформатора (рис. 3 *б*), що в свою чергу призводить до таких проблем: збільшення втрат; некоректна робота диференціального та інших видів захисту трансформатора; погіршення експлуатаційних умов роботи трансформатора і виникнення аварійних ситуацій.

3. Відсутність в електроенергетиці універсальних методів розв'язання задач, пов'язаних з гармонічними складовими напруги в мережах з системами ВНПС, потребує комплексного підходу при проектуванні в кожному окремому випадку.

1. Голубев В.В. Импульсное преобразование переменного напряжения. – К.: Наук. думка, 2014. – 247 с.
2. Yongming Y., Xingmou L., Fan Y. Soil Structure Effect on Transformer DC Bias // IEEE International Conference on Industrial Technology, 2014. – 6 p.
3. Rong Zeng, Zhanqing Yu, Jinliang He Study on Restraining DC Neutral Current of Transformer During HVDC Monopolar Operation // IEEE transactions on power delivery, 2011. – 7 p.

УДК 621.314.5

**А.В. Билык**

Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт им. И. Сикорского", пр. Победы, 37, Киев, 03056, Украина

#### **Особенности интеграции систем постоянного тока в магистральные сети переменного напряжения**

*Исследованы аспекты использования систем постоянного тока в составе магистральных сетей переменного напряжения. Рассмотрены вопросы, связанные с гармониками в системах высокого напряжения постоянного тока (ВНПТ). Проанализированы и изучены причины появления гармонических составляющих в выходном напряжении преобразователей ВНПТ. Описаны условия и методы по уменьшению гармонического спектра. В результате моделирования экспериментальным путем сняты трансформаторные характеристики тока холостого хода и его гармонический спектр при различных условиях намагничивания. Библ. 3, рис. 3.*

**Ключевые слова:** системы высокого напряжения постоянного тока, гармоника, намагничивание.

**A. Bilyk**

National technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Peremohy, 37, Kyiv, 03056, Ukraine

#### **Features of integration high voltage direct current system into hvac networks**

*Investigated aspects of DC systems composed of alternating voltage grids. Studied issue of harmonics in systems of high voltage direct current (HVDC). Analyzed and studied the causes of harmonic components in the output voltage of HVDC converters. Describe the conditions and methods to reduce the harmonic spectrum. Investigated the model of hybrid power AC and DC. As a result of simulations experimentally, removed characteristics of current and its harmonic spectrum magnetization under different conditions. References 3, figures 3.*

**Key words:** high voltage direct current, harmonic, magnetic bias.

Надійшла 11.01.2017

Received 11.01.2017