

УДК 621.316

IMPROVING THE QUALITY OF THE OUTPUT VOLTAGE OF SOLAR PANELS

S. Baliuta, V. Shesterenko, V. Sofilkanych

National University of Food Technologies

Key words: <i>Voltage</i> <i>Nonsinusoidal nature</i> <i>Harmonics</i> <i>Power supply system</i> <i>Voltage regulator</i>	ABSTRACT It is shown that the issue of higher harmonics is the main problem of electrical equipment electromagnetic compatibility. The basic aspects of the analysis are introduced in the context of solar panels nonsinusoidal voltage that depends on the network voltage. The expediency of using Fourier series is shown. Mathematical tools of probability theory and mathematical statistics are used. Thus, the voltage deviation is one of the major problems in terms of power supply systems of industrial enterprises. Its solution is a priority task when designing the power supply systems. The way to improve voltage quality is suggested. The systematic approach to voltage regulation that allows increasing economic performance of energy sources is introduced. The most promising is the regulation method acting on voltage and reactive power.
Article history: Received 01.11.2015 Received in revised form 15.11.2015 Accepted 09.12.2015	
Corresponding author: S. Baliuta E-mail: npnuht@ukr.net	

ПІДВИЩЕННЯ ЯКОСТІ НАПРУГИ НА ВИХОДІ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ

С.М. Балюта, В.Є. Шестеренко, В.В. Софілканич

Національний університет харчових технологій

У статті показано, що проблема вищих гармонік — це основна частина проблеми електромагнітної сумісності електрообладнання. Наведено основні аспекти аналізу несинусоїдної напруги сонячних батарей залежно від напруги мережі. Показано доцільність використання рядів Фур'є. Використано математичний апарат теорії ймовірності і математичної статистики. Зазначено, що відхилення напруги — це одна з найважливіших проблем у системах електропостачання промислових підприємств, тому вирішення є пріоритетним завданням при проектуванні систем електропостачання. Запропоновано спосіб підвищення якості напруги. Розроблено системний підхід до регулювання напруги, що дозволяє підвищити економічні показники джерел енергії. Найперспективнішим є метод регулювання шляхом дії на напругу і на реактивну потужність.

Ключові слова: напруга, несинусоїдність, вищі гармоніки, система електропостачання, регулятор напруги.

Постановка проблеми. В існуючих способах локального регулювання напруги при електропостачанні від потужної геліоустановки здійснюється вплив тільки на один показник якості електроенергії — напругу [2, 3, 4, 5, 6, 7].

У запропонованому способі локального регулювання напруги при електропостачанні від потужної геліоустановки живлення споживачів здійснюють через імпульсний напівпровідниковий регулятор напруги, який використовують для зміни діючого значення змінної синусоїдальної напруги, одночасно активно впливаючи на форму синусоїди, що мінімізує рівень вищих гармонік [1, 8].

Існує реальна можливість використання регулятора напруги для мінімізації вищих гармонік. Так, на вхід імпульсного регулятора подається напруга з певним спектром вищих гармонік, відбувається додавання або віднімання коливань однакових частот напруги геліоустановки та напруги регулятора:

$$u_{v \text{ вих}} = U'_{Mv} \cdot \sin(\omega t \pm \phi'_v) + U_{DMv} \cdot \sin(\omega t \pm \phi_{Dv}), \quad (1)$$

де U'_{Mv}, ϕ'_v — амплітудне значення гармоніки вхідної напруги та кут зсуву її відносно синусоїди основної частоти мережі, U_{DMv}, ϕ_{Dv} — те ж, але для напруги добавки регулятора.

Якщо між ϕ'_v та ϕ_{Dv} існує співвідношення

$$\phi'_v - \phi_{Dv} = |\pi|, \quad (2)$$

то відбувається послаблення v -ої гармоніки і навіть повне знищення її при

$$U'_{Mv} = U_{DMv}.$$

Гармонічний склад напруги на виході геліоустановки досить стабільний, тому його можна поліпшувати за наперед заданою програмою. Для аналізу ϕ_{Dv} необхідно визначити коефіцієнти синусного B_v та косинусного C_v рядів Фур'є напруги добавки. Алгоритм розрахунку амплітудних значень вищих гармонік, складений на основі вказаних формул, досить простий і може бути реалізований на ПК.

Зсув фази вищих гармонічних відносно основної частоти мережі визначається за формулою:

$$\phi_v = \text{arctg} \frac{B_v}{A_v}. \quad (3)$$

Плавне змінювання в широких межах кутів ϕ_{Dv} вищих гармонічних забезпечує компенсацію гармонік мережі, а способи регулювання дозволяють здійснювати підбір ϕ_{Dv} без погіршення якості напруги $U_{\text{вих}}$.

Метою статті є надання рекомендацій щодо впровадження й оптимального застосування винаходу, захищеного патентом України № 89096, МПК H02M 11/00 — спосіб локального регулювання напруги при електропостачанні від потужної геліоустановки.

Матеріали і методи. Як відомо, сонячні батареї генерують постійний струм. Для передачі в електричну мережу струм необхідно інвертувати. Інвертування струму — це процес, зворотний до випрямлення. Частота на виході інвертора може регулюватись у широких межах. Для того, щоб струм мав форму синусоїди, прямокутні імпульси напруги інвертора модулюють за

законами синуса. Процес формування синусоїди з постійного струму викликає погіршення форми кривої напруги.

Якщо при постійній несучій частоті змінювати співвідношення між Δt_1 (час підключення тиристора анодної групи) і Δt_2 (час підключення тиристора катодної групи) за синусоїдальним законом

$$\frac{\Delta t_1 - \Delta t_2}{\tau} = \mu \sin \Omega t, \quad (4)$$

то середнє за період несучої частоти значення напруги на навантаженні також буде змінюватися за синусоїдним законом:

$$U = \frac{\mu E}{2} \sin \Omega t, \quad (5)$$

де Ω — частота модуляції (частота на виході); μ — коефіцієнт глибини модуляції, що показує, в яких межах змінюються інтервали Δt_1 та Δt_2 протягом періоду частоти модуляції.

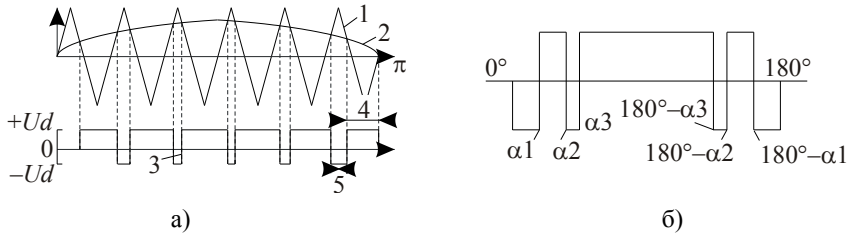


Рис. 1. Принцип широтно-імпульсної модуляції (а) і півперіод промодульованої напруги (б): 1 — несуча частота; 2 — частота модуляції за синусним законом; 3 — напруга на шинах постійного струму; 4, 5 — періоди роботи тиристорів

Результати і обговорення. Напруга за способом являє собою суму двох кривих: синусоїди напруги мережі та послідовності імпульсів, висота яких змінюється за синусоїдальним законом, а ширина — за лінійним. Відповідно до загальноприйнятої класифікації, дану напругу можна розглядати як один із видів амплітудно-імпульсної модуляції (АІМ) із змінною шириною імпульсів і стабільною амплітудою модулюючої напруги.

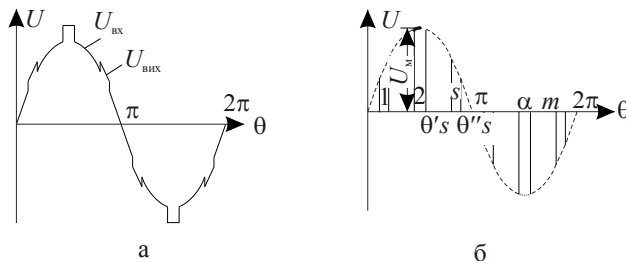


Рис. 2. Напруга на виході регулятора (а) і в обмотці збудження (б) при широтно-імпульсному методі регулювання

Ефект імпульсного регулювання напруги досягається синхронною зміною ширини всіх імпульсів, однакової для кожного з них у будь-який момент часу.

Несучу частоту необхідно вибрати так, щоб створити симетричну систему напруг як у фазній, так і в лінійній напрузі на виході регулятора. Крім того, в $U_{\text{вих}}$ повинна бути відсутня постійна складова.

Оскільки амплітуди імпульсів промодульовані по синусоїді, а тривалість імпульсів і пауз між ними залишаються без змін, ні величина напруги добавки, ні фаза цієї напруги не змінюються при зміщенні імпульсів, тому що таке зміщення не впливає на ступінь регулювання ψ .

При виконанні запропонованого способу досягається симетрія напруг трифазної системи в будь-який момент часу і при всіх режимах регулювання.

Одним із важливих параметрів імпульсного регулювання є скважність

$$Q' = \frac{t_i + t_n}{t_i}, \quad (6)$$

де t_i — тривалість імпульсу; t_n — тривалість паузи між імпульсами.

Скважність для напруги добавки може змінюватися в межах

$$1 \leq Q' \leq \infty,$$

що викликає труднощі при дослідженні, тому як параметр, що характеризує регульовальну властивість імпульсного регулятора, прийнято ступінь регулювання ψ -величини, що зворотна скважності

$$\psi = \frac{1}{Q'}. \quad (7)$$

Враховуючи, що α характеризує тривалість імпульсів, ступінь регулювання визначається за формулою:

$$\psi = \frac{\alpha m}{2\pi}. \quad (8)$$

При імпульсному регулюванні в мережу генеруються вищі гармоніки. В запропонованому способі регулювання вищі гармоніки спектра розміщуються у вигляді сплесків окремих гармонічних, біля яких знаходяться гармоніки меншої інтенсивності. Затухання амплітуд сплесків вищих гармонік відбувається за законом, близьким до експоненціального. Амплітуда першого сплеску з ростом f_n зміщується в сторону збільшення номера гармонік, не змінюючись при цьому по величині. Частота гармонік першого сплеску визначається за формулою:

$$f_v = f(m \pm 1). \quad (9)$$

До основних параметрів, що характеризують даний вид АІМ, відносять коефіцієнт послідовності імпульсів m , що дорівнює числу імпульсів в одному періоді напруги модуляції, частота якої дорівнює частоті мережі

$$m = \frac{f_n}{f}, \quad (10)$$

де f_n — несуча або модульована частота.

Миттєве значення цієї напруги визначається за формулою:

$$u_{\text{ВДО}} = U_{\text{вх}} \sqrt{2} D \sin \omega t, \quad (11)$$

де D — діапазон регулювання пристрою, ω — кутова частота.

Ефект регулювання напруги $U_{\text{вих}}$ досягається синхронною зміною ширини α всіх імпульсів, однакової для кожного з них в будь-який момент часу. В трьох граничних режимах, коли добавка напруги $E = \pm E_{\text{max}}$ або дорівнює нулю, регулятор працює без спотворення напруги $U_{\text{вих}}$.

Використання напруги з АІМ призводить до спотворення форми напруги $U_{\text{вих}}$. Ступінь спотворення можна визначити кількома способами. Основним критерієм оцінки несинусоїдальності напруги є гармонічний склад напруги.

У процесі роботи регулятора несуча частота та частота мережі можуть змінюватися в сторону підвищення чи пониження. Величина цих змін і час їх виникнення є випадковими величинами. Під час таких відхилень частот розміщення імпульсів напруги з АІМ відносно синусоїди напруги мережі може змінюватись. Більш того, послідовність імпульсів може постійно «плавати» відносно синусоїди мережі зі швидкістю, що залежить від ковзання частот.

Вказана властивість АІМ дозволяє застосувати більш дешеву та просту схему керування регулятором напруги. АІМ передбачає імпульсно-фазове регулювання, яке відрізняється тим, що напругу формують з двох кривих — синусоїди напруги мережі та послідовності імпульсів, висота яких змінюється за синусоїдальним законом, а ширина — за лінійним. Напругу регулюють синхронною зміною ширини всіх імпульсів, однакової для кожного з них у будь-який момент часу, шляхом зміщення фронтів імпульсів. Спосіб не призводить до споживання реактивної потужності, не викликає несиметрії напруг і постійної складової.

Відхилення форми кривих струму і напруги від синусоїди розглядають за допомогою гармонічних складових (гармонік) за математичною теорією, створеною Ш. Фур'є (1768—1830). Термін «гармоніка» використовується в акустиці для позначення коливань струни з частотою, кратною основній частоті коливання. Вищі гармоніки негативно діють на електрообладнання всіх видів, навіть на значній відстані від місця генерації гармонік. Вони створюють додатковий шум у телефонному зв'язку, призводять до помилкових спрацювань відповідальної апаратури. Проблема вищих гармонік — це основна частина проблеми електромагнітної сумісності електрообладнання у зв'язку із збільшенням потужності тиристорних перетворювачів і широким застосуванням електронних систем автоматичного керування, які чутливі до форми синусоїди напруги.

Вищі гармоніки суттєво впливають на роботу систем електропостачання. В ЛЕП з'являються додаткові втрати енергії та напруги. В кабельних лініях прискорюється старіння ізоляції, збільшується кількість пошкоджень за рахунок зростання амплітуди напруги. В ЛЕП надвисоких напруг зростають втрати на корону. У трансформаторах збільшуються втрати в обмотках та в сталі. Скорочується термін служби ізоляції. Струми нульової послідовності, що циркулюють в обмотках, з'єднаних трикутником, можуть перевантажити ці обмотки.

Дуже чутливі до вищих гармонік батареї конденсаторів. Додаткові втрати потужності в конденсаторах визначаються за формулою:

$$\delta P = \sum_{v=2}^{\infty} \Delta P_0 \omega c U_v^2, \quad (16)$$

де ΔP_0 — питомі втрати на основній частоті, кВт/квар; c — ємність конденсатора; U_v — напруга v -ої гармоніки.

Ці втрати призводять до перегрівання конденсаторів та виходу їх з ладу. Крім того, на одній з вищих гармонік можливий резонанс, що інколи призводить до підвищення напруги.

Вищі гармоніки призводять до збільшення втрат в статорі та роторі електромашини. Додаткові втрати потужності підвищують температуру машини, з'являються локальні місця перегрівання. Особливо чутливі до вищих гармонік двигуни з фазним ротором. В асинхронних машинах з'являються додаткові моменти на частотах вищих гармонік. Ці моменти можуть призвести до відчутних вібрацій двигуна.

Вищі гармоніки погіршують роботу системи дистанційного керування. Помилки в роботі цих систем можуть виникнути, якщо з'являються гармоніки з частотою, близькою до частоти керування. При цьому можливі два випадки:

1. Блокування сигналу, коли вищі гармоніки не дозволяють виділити сигнал керування.

2. Робота реле за відсутності сигналу керування.

Вищі гармоніки суттєво впливають на роботу релейного захисту, вносячи похибки при вимірюванні опору на основній частоті. Тільки цифрові фільтри забезпечують належну роботу захисту в таких умовах. Проблемою є момент підключення потужних трансформаторів, коли величина струму намагнічування може перевищувати номінальний струм. Амплітуда струму намагнічування залежить від індуктивності трансформатора, опору обмоток і моменту часу, коли відбувається підключення. У вторинній обмотці в ці моменти струм відсутній. Це може призвести до спрацювання диференційного захисту. Підвищити надійність захисту можна шляхом виділення другої гармоніки з струму намагнічування, яка подається в схему блокування диференційного захисту.

Вищі гармоніки можуть вивести з ладу газорозрядні лампи. До схеми ПРА входить конденсатор і можливий резонанс на одній з вищих гармонік. Вимірювальні прилади, як правило, калібруються при синусоїдальних струмах і напругах, тому в більшості випадків спотворення синусоїди викликає зростання похибки, вище за визначене нормою.

Потужність вищих гармонік є сумарною потужністю і вимірюється із значними похибками. Вищі гармоніки впливають на точність вимірювання реактивної потужності та коефіцієнта потужності.

Висновки

1. Сонячні батареї генерують постійний струм. Для передачі в електричну мережу струм необхідно інвертувати. Для того, щоб струм мав форму синусоїди, прямокутні імпульси напруги інвертора модулюють за

синусоїдальними законами. Процес формування синусоїди з постійного струму призводить до погіршення форми кривої напруги.

2. Аналіз несинусоїдної напруги сонячних батарей доцільно виконати з використанням рядів Фур'є.

3. Живлення споживачів від сонячної батареї рекомендується здійснювати через імпульсний напівпровідниковий регулятор напруги, який використовують для зміни діючого значення змінної синусоїдальної напруги, одночасно активно впливаючи на форму синусоїди, що мінімізує рівень вищих гармонік у напрузі геліоустановки.

Література

1. *Shesterenko V., Sofilkanych V.* Local control of alternating current, received from solar panels power supply // Ukrainian Journal of Food Science. — 2015. — Volume 3, Issue 1. — P. 113—122.

2. *Шестеренко В.Є.* Системи електроспоживання та електропостачання промислових підприємств: підручник / В.Є. Шестеренко. — Вінниця: Нова Книга, 2011. — 656 с.

3. *Shesterenko V., Sidorchuk I.* Research of the features of reactive power compensation in the combined system of food industry // Ukrainian Journal of Food Science. — 2013. — Volume 1, Issue 1. — P. 89—95.

4. *ГОСТ 13109-97.* Электрическая энергия. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. Введ. 01.01.2000. — К.: Изд-во стандартов, 1998; Госстандарт Украины, с доп. и попр., 1999. — 31 с.

5. *Якість електричної енергії.* Терміни та визначення: ДСТУ 3465-96. — Чинний від 1998-01-01. — К.: Держстандарт України, 1996. — 35 с.

6. *Правила користування електричною енергією.* Затверджено постановою НКРЕ 31.07.2005 № 910. Зареєстровано в міністерстві юстиції України 18.11.2005 № 1399/11679.

8. *Патент України № 89096, МПК H02M 11/00* — Спосіб локального регулювання напруги при електропостачанні від потужної геліоустановки / Шестеренко В.Є., Балюта С.М., Софілканич В.В.; опубл. 10.04. 2014.

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА НАПРЯЖЕНИЯ НА ВЫХОДЕ СОЛНЕЧНЫХ БАТАРЕЙ

С.Н. Балюта, В.Е. Шестеренко, В.В. Софілканич

Национальный университет пищевых технологий

В статье показано, что проблема высших гармоник — это основная часть проблемы электромагнитной совместимости электрооборудования. Приведены основные аспекты анализа несинусоидальности напряжения солнечных батарей в зависимости от напряжения сети. Показаны преимущества использования рядов Фурье. Использован математический аппарат теории вероятности и математической статистики. Подчеркнуто, что отклонение напряжения — одна из важнейших проблем в системах электроснабжения, поэтому ее решение является приоритетным заданием при проектировании систем электроснабжения. Разработан способ повышения качества напряжения. Предложен системный подход к регулированию напряжения, что позволяет повысить экономические показатели источников энергии. Самым перспективным является метод регулирования путем воздействия на напряжение и на реактивную мощность.

Ключевые слова: *напряжение, потери энергии, высшие гармоники, система электроснабжения, регулятор напряжения.*