

УДК 621.311.1

І.А. КОЗАКЕВИЧ, канд. техн. наук, доц., М.Г. КОТЯКОВА, асп.  
Криворізький національний університет

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ДЖЕРЕЛ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ НА ЯКІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

**Мета** роботи полягає у розробці системи керування інверторами джерел розосередженої генерації з мінімізацією гармонічних викривлень вихідної напруги. Даний напрямок є актуальним у зв'язку з бурхливим розвитком джерел відновлювальної енергії, а також потенційним їх впливом на зниження якості електричної енергії.

**Методи дослідження.** У роботі використано методи теорії автоматичного керування при аналізі динамічної системи відновлювального джерела енергії – інвертор – фільтр – мережа та розробки регуляторів системи керування, методи математичного моделювання для аналізу процесів у електроенергетичній системі з відновлювальними джерелами енергії, методи теоретичних основ електротехніки для аналізу складових активної та реактивної потужності, що циркулює між джерелом енергії та мережею централізованого електропостачання.

**Наукова новизна.** Розроблено принцип функціонування систем інтеграції відновлювальних джерел енергії до мереж електропостачання з мінімізацією впливу на показники якості електричної енергії. В основі розробленої системи – двоконтурна система керування, яка містить зовнішній контур керування величинами вихідної напруги та частоти інвертора, а внутрішній контур – керування складовими вектору мережевого струму.

**Практична значимість.** Розроблена система керування може знаходити практичне втілення у системах інтеграції відновлювальних джерел енергії, а також в системах поліпшення якості електричної енергії.

**Результати.** Розглянуто принципи формування систем керування мережевими інверторами задля мінімізації їх впливу на якість електричної енергії в мережі. Розглянуто аналітичні залежності, що описують динамічну систему відновлювальне джерело енергії – інвертор – фільтр – мережа змінного струму та складено модель у просторі станів, що може бути основою для синтезу системи керування. Запропоновано внутрішню систему керування струмом реалізувати з використанням  $H_\infty$ -регуляторів, а зовнішню систему керування величинами амплітуди та частоти вихідної напруги – з використанням методу статизму.

**Ключові слова:** відновлювальні джерела енергії, якість електричної енергії, гармонічні складові, закон статизму, коефіцієнт загального гармонічного спотворення.

doi: 10.31721/2306-5451-2021-1-52-175-179

**Проблема та її зв'язок з науковими та практичними задачами.** Під терміном «якість електричної енергії» розуміють низку електричних показників електропостачання, які можуть впливати на коректну роботу електротехнічного та електромеханічного устаткування. Цей термін описує електричну енергію, що живить навантаження, при цьому недотримання необхідних показників якості може призвести до некоректної роботи навантаження, його відключення або навіть виходу з ладу. Незважаючи на те, що термін «якість електричної енергії» відноситься до цілого ряду показників, проте найчастіше його відносять до якості живлячої напруги, оскільки в традиційних електроенергетичних системах у якості джерел живлення виступають джерела напруги, а форми струмів визначаються характеристиками навантаження. Низька якість електричної енергії може бути відображена у вигляді різних показників, таких як коливання амплітуди та частоти, перехідні процеси, вміст гармонік у формі сигналів, коефіцієнт потужності, несиметрія фаз, неперервність потужності і т.д. Низька якість електричної енергії може виникати за різних причин, наприклад, через вплив нелінійних навантажень. Оскільки електроенергетична система є взаємопов'язаною, то зниження показників якості в одній точці мережі може призводити до зниження показників якості в інших частинах мережі. Важливим етапом розвитку систем електропостачання в даний час є перехід від централізованих моделей до систем з розподіленою генерацією з інтеграцією до мережі відновлювальних джерел енергії, що базуються на використанні енергії сонця, вітру, води і т.д. При цьому такі мікромережі можуть або працювати ізольовано від централізованого електропостачання, або підключатися до нього. При цьому основним елементом, що забезпечує взаємодію джерел розподіленої генерації та мережі є інвертори, робота яких через ключовий режим роботи напівпровідникових елементів пов'язана з виникнення гармонічних складових напруги, що і призводить до необхідності аналізу питання якості електричної енергії в мережах з розподіленою генерацією. При цьому важливо врахувати аспект того, що джерелами гармонік в таких мережах є не лише інвертори джерел розподіленої генерації, а й інші навантаження. Значна кількість споживачів електричної

енергії можуть розглядатися як нелінійні навантаження, оскільки містять в своєму складі напі-впровідникові перетворювачі, що призводять до створення гармонічних струмів навіть при живленні від чисто синусоїдальної напруги. Ці гармонічні струми протікають через опори розподільчої мережі, включаючи внутрішні опори джерела енергії, і викликають виникнення гармонічних складових напруги. В подальшому гармоніки напруги призводять до виникнення гармонік струму навіть в лінійних навантаженнях. Таким чином, діючі вітчизняні та міжнародні стандарти якості електричної енергії накладають обмеження як на рівень індивідуальних гармонічних складових, так і на загальні показники гармонічного забруднення, такі як коефіцієнт загального гармонічного спотворення (THD). Отже, системи керування інверторами джерел розподіленої генерації повинні мати можливості усунення або мінімізації гармонічних складових для виконання вимог стандартів та зменшення втрат енергії.

**Аналіз досліджень і публікацій.** У літературі розглядається цілий ряд замкнених систем керування, що дозволяють знизити гармонічне спотворення сигналів інверторами джерел розподіленої генерації [1-10]. Завданням таких систем є наближення вихідної напруги інвертора до синусоїдального сигналу завдання з усуненням інших гармонічних складових. У [6] розглядаються аперіодичні цифрові (deadbeat) регулятори для керування інверторами. У [7] виконано аналіз системи керування з використанням гістерезисного керування. Значна увага дослідників присвячена системам повторюваного (repetitive) керування мережевими інверторами [8], що використовують прості навчальні методи, які дозволяють усунути періодичні похибки у динамічних системах з використанням внутрішньої моделі. Перевагою такого підходу є те, що при цьому може враховуватися велика кількість гармонічних складових, забезпечуючи низькі показники коефіцієнту загального гармонічного спотворення. Недоліком такого підходу є необхідність проведення значного обсягу експериментальних досліджень для визначення задаючих сигналів гармонік.

Окрім того, важливою складовою аналізу способів поліпшення якості електричної енергії є з'ясування причин їх погіршення. Як відомо, величина вихідного опору інвертора відіграє вирішальну роль у зменшенні коефіцієнту загального гармонічного спотворення напруги. Тому доцільним є розглянути підходи до зниження цього коефіцієнту шляхом зниження величини вихідного опору. Якщо розглядати питання якості електричної енергії у контексті коефіцієнту загального гармонічного спотворення струму, то актуальним напрямком розвитку даного питання є розвиток структур силових активних фільтрів.

**Постановка завдання.** Метою роботи є аналіз підходів до розробки систем керування мережевими інверторами джерел розосередженої генерації та вивчення принципів функціонування систем керування, що дозволяють покращити показники якості електричної енергії. Для досягнення поставленої мети сформульовано та вирішено наступні завдання: аналіз схемних рішень систем інтеграції джерел відновлювальної енергетики; дослідження аналітичних залежностей, що описують процеси у системі інвертор – фільтр – мережа, отримання рівнянь динамічної системи у просторі станів; структурний та параметричний синтез системи керування; дослідження поведінки розробленої системи за допомогою математичної моделі.

**Викладення матеріалу та результати.** Метою синтезу регуляторів струму системи керування мережевим інвертором є забезпечення вихідного струму інвертора з мінімальним вмістом гармонік за умови простої реалізації синхронізації з мережею. При використанні трифазної системи відліку  $abc$  окремі регулятори струму застосовуються для кожної фази. При цьому сигнал завдання мережевого струму  $i^*$  отримується з сигналів завдання струму по осям  $d$  та  $q$  ( $I_d^*$  та  $I_q^*$ ) шляхом координатних перетворень. Для отримання фазової інформації щодо вектору струму мережевої напруги є можливим застосувати блок фазового автопідлаштування частоти. Таким чином, за належної синхронізації вектору напруги мережі та системи координат  $dq$ , що обертається, складові вектору струму завдання  $I_d^*$  та  $I_q^*$  будуть впливати на обмін активною та реактивною потужністю між мережею та інвертором. За умови, що поточний режим роботи системи не передбачає передачу енергії від інвертора до мережі або в зворотній бік, то сигнали завдання складових струмів  $I_d^*$  та  $I_q^*$  мають бути встановлені рівними нулю, а для відсутності енергообміну вихідна напруга інвертора повинна дорівнювати напрузі в мережі. Для досягнення цього необхідно до вихідних сигналів регуляторів струму додати виміряні значення напруги в мережі, що можуть бути додатково відфільтровані.

Для подальшого синтезу систем керування розглянемо однофазну заступну схему об'єкту керування «інвертор – фільтр – мережа змінного струму» (рис. 1). Об'єкт керування містить інвертор, LC-фільтр, сформований індуктивністю  $L_f$  та  $C_f$ , а також активний опір  $R_g$  та індуктивність мережі  $L_g$ .

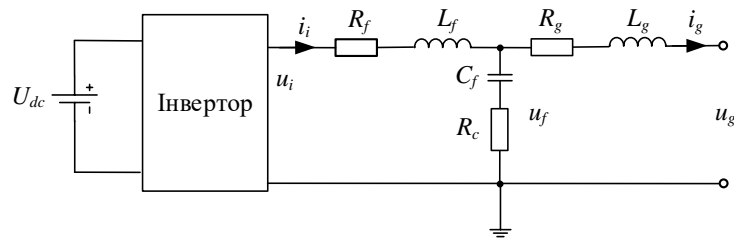


Рис. 1. Однофазна заступна схема об'єкту керування «інвертор – фільтр – мережа змінного струму»

Струми у двох індуктивних гілках, а також напруга на конденсаторі можуть розглядатися у якості змінних стану, напруга мережі та струм завдання у якості вхідних сигналів, а сигнал завдання напруги інвертора – у якості керуючої змінної

$$x = [i_i \ i_g \ u_f]^T; \quad (1)$$

$$w = [u_g \ i^*]^T. \quad (2)$$

У якості вихідного сигналу об'єкту керування можна розглядати похибку керування величини струму, тобто різницю між заданим значенням струму  $i^*$  та реальним значенням струму, що протікає від інвертора до мережі

$$e = i^* - i_g. \quad (3)$$

Тоді об'єкт керування у просторі станів можна описати наступними рівняннями

$$\frac{dx}{dt} = Ax + B_1 w + B_2 u; \quad (4)$$

$$y = C_1 x + D_1 w + D_2 u; \quad (5)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_f+R_c}{L_f} & \frac{R_c}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{R_c}{L_g} & -\frac{R_g+R_c}{L_g} & \frac{1}{L_g} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ -\frac{1}{L_g} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$C_1 = [0 \ -1 \ 0]; \quad (8)$$

$$D_1 = [0 \ 1]; \quad D_2 = 0. \quad (9)$$

Оскільки система керування мережевим інвертором повинна забезпечити стійкість в умовах невизначеності параметрів опору мережі, то доцільно в контурі керування струмом застосувати  $H_\infty$ -регулятор. Задачею його функціонування буде мінімізації похибки керування та отримання низьких показників коефіцієнту загального гармонічного викривлення струму мережі за умови зміни величини опору мережі у широких змінах. Відповідні параметри такого регулятора були отримані за допомогою функції середовища Matlab hinfscn.

На вищому рівні системи керування застосовувався метод статизму, що дозволяє керувати потужністю, яка передається кожним з інверторів мережі, за допомогою впливу на величини частоти та амплітуди вихідної напруги. Така концепція наслідуює властивості аналогічних систем, що використовуються в мережах з потужними синхронними генераторами, що мають значні моменти інерції, та дозволяють їм працювати паралельно, розподіляючи навантаження шляхом зменшення частоти при збільшенні активної потужності в мережі. Проте, на відміну від систем з синхронними генераторами, інвертори джерел розосередженої генерації не мають таких значних інерційних властивостей, що забезпечують стійкість системи під час виконання синхронізації. В той же час, система керування забезпечує гнучке керування динамічними процесами, демонструючи високу швидкодію. Тому для підвищення стійкості

мережі та узгодження джерел живлення, які працюють паралельно, інерційні властивості синхронного генератора відтворюються за допомогою законів статизму, регулюючи амплітуду та частоту напруги пропорційно до складових активної та реактивної потужності.

Основні залежності, що описують керування інверторами при використанні закону статизма, мають вигляд

$$\omega_k = \omega_{nom} - m_k P_k; \quad (10)$$

$$U_k = U_{nom} - n_k Q_k, \quad (11)$$

де  $\omega_k$  – кутова частота  $k$ -го інвертора, що змінюється в залежності від вимірюваного значення його активної потужності  $P_k$ ;  $\omega_{nom}$  – номінальне значення кутової частоти в мережі;  $m_k$  – коефіцієнт, що формує закон статизму для активної потужності;  $U_k$  – амплітуда вихідної напруги  $k$ -го інвертора, що змінюється в залежності від вимірюваного значення його реактивної потужності  $Q_k$ ;  $n_k$  – коефіцієнт, що формує закон статизму для реактивної потужності.

Величина частоти напруги є спільною змінною стану усієї мережі, що означає однаковість її значення для усіх мережевих перетворювачів у статичному режимі роботи, що призводить до рівномірного розподілу між ними активної потужності, коли коефіцієнти статизму  $m_k$  є постійними та однаковими для усіх інверторів. Таким чином

$$m_1 P_1 = m_2 P_1. \quad (12)$$

Величина амплітуди напруги не є спільною змінною стану усієї мережі, оскільки її значення у різних вузлах схеми може відрізнятися, а тому навіть за однакових величин коефіцієнтів  $n_k$  ідеального розподілу реактивної потужності неможливо досягти. Це підтверджується наступною залежністю

$$n_1 Q_1 + U_1 = m_2 Q_1 + U_2. \quad (13)$$

З метою дослідження процесів впливу джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії було розроблено математичну модель у середовищі Matlab/Simulink, що наведена на рис. 2. Параметри інвертора, що використовувалися під час дослідження, наведені у табл. 1.

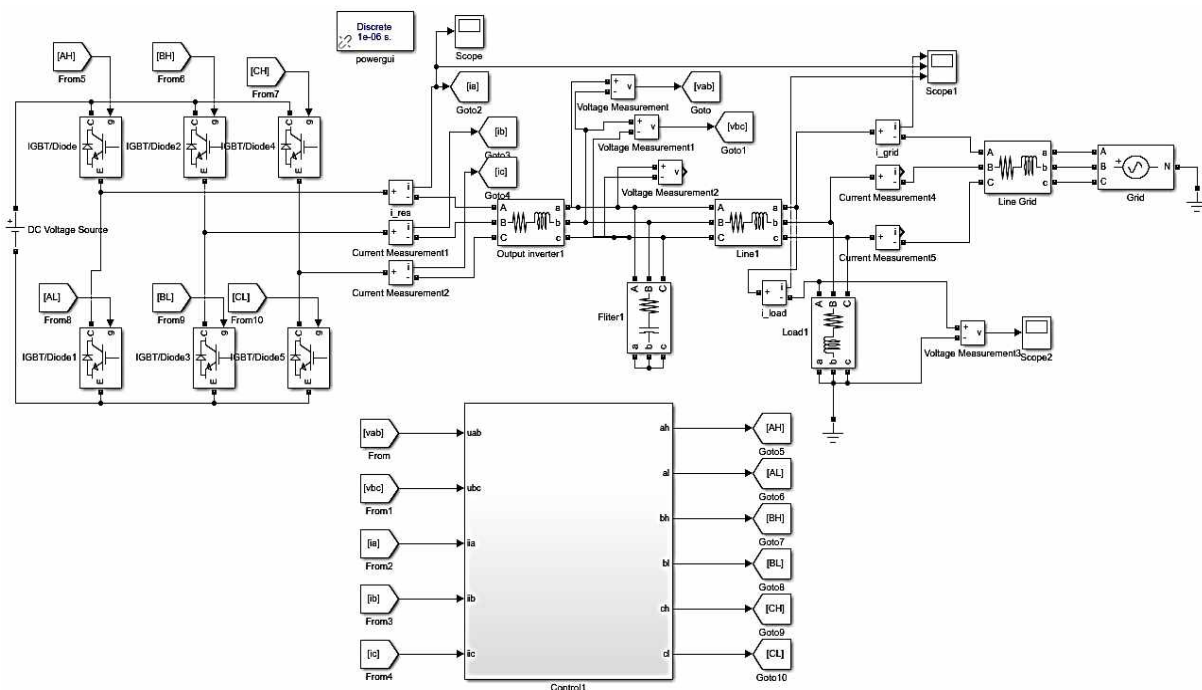


Рис. 2. Структура математичної моделі для дослідження впливу джерел розосередженої генерації на якість електричної енергії

З отриманих результатів (рис. 3) видно, що форма мережевого струму є досить близькою до синусоїдальної, помітні гармонічні викривлення, що викликані роботою інвертора. Порівняння даної системи з традиційною з використанням релейних регуляторів струму показало, що рівень гармонічних викривлень вихідного струму є помітно нижчим, що виправдовує використання запропонованих рішень.

Параметри мережевого інвертора джерела розосередженої генерації

Найменування параметру	Значення параметру
Частота комутації ключів інвертора	10 кГц
Індуктивність фільтру $L_f$	0.2 мГн
Активний опір фільтру $R_f$	0.06 Ом
Ємність фільтру $C_f$	15 мкФ
Активний опір мережі $R_g$	0.15 Ом
Індуктивність мережі $L_g$	0.5 мГн
Активний опір $R_c$	1.5 Ом

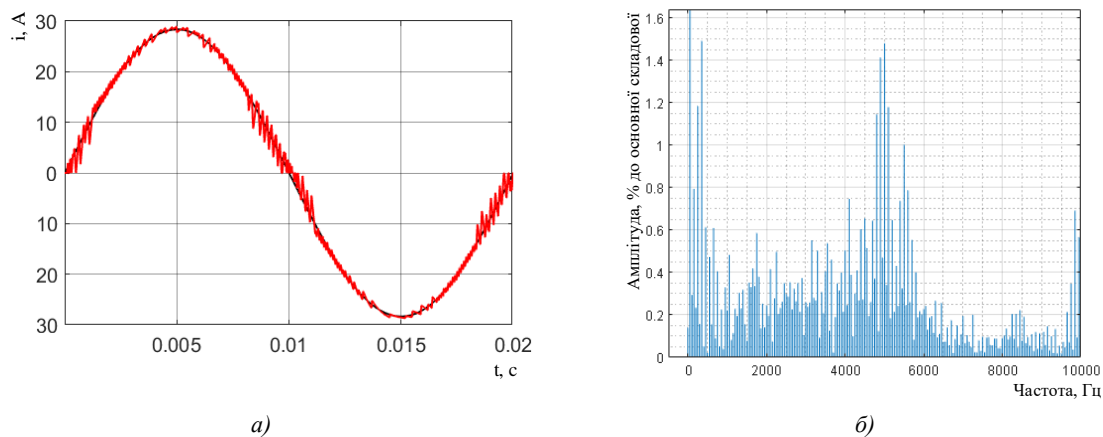


Рис. 3. Результати моделювання роботи системи: *а* – графік струму завдання та отриманого мережевого струму; *б* – спектр мережевого струму

**Висновки та напрямок подальших досліджень.** У роботі розглянуто принципи формування систем керування мережевими інверторами задля мінімізації їх впливу на якість електричної енергії в мережі. Запропоновано внутрішню систему керування струмом реалізовувати з використанням  $H_\infty$ -регуляторів, а зовнішню систему керування величинами амплітуди та частоти вихідної напруги – з використанням методу статизму.

#### Список літератури

1. Козакевич І.А. Система енергоефективного керування динамічним компенсатором викривлень напруги / І.А. Козакевич, А.А. Кондратенко // Гірничий вісник. – 2019. – Випуск 105. С. 154-159.
2. Козакевич І.А. Керування потоками потужності гібридних транспортних засобів / І.А. Козакевич, Ю.Г. Осадчук, Р.А. Ільченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 124-129.
3. Козакевич І.А. Дослідження роботи синхронного двигуна з постійними магнітами в гібридних тягових електроприводах / І.А. Козакевич, І.В. Касаткіна, Л.В. Єрмоєнко // Гірничий вісник. – 2018. – Випуск 104. С. 106-110.
4. Козакевич І.А. Система керування вентилями реактивними двигунами / І.А. Козакевич, І.І. Шевченко // Гірничий вісник. – 2017. – Випуск 102. С. 135-138.
5. Сінчук І.О. Превентивна оцінка і основні напрями підвищення енергоефективності підземних залізничних підприємств / І.О. Сінчук, І.А. Козакевич, М.Л. Барановська, Т.М. Берідзе, І.І. Пересунько // Вісник Криворізького національного університету. Збірник наукових праць. – Кривий Ріг, 2020. – Вип. 50. С. 142-147.
6. Jahanbakhshi M. A novel deadbeat controller for single phase PV grid connected inverters / M. Jahanbakhshi, B. Asaei, B. Farhangi // 23rd Iranian Conference on Electrical Engineering. – Tehran, 2015. – Pp. 1613-1617.
7. Kanai N. A Study of Quasi Multi-rate Deadbeat Control for Modular Multi-level Converter using FPGA based Hardware controller / N. Kanai, S. Kurita, T. Ando and T. Yokoyama // IEEE 4th International Future Energy Electronics Conference (IFEEEC). – Singapore, Singapore, 2019. – Pp. 1-5.
8. Tao Y. Deadbeat Repetitive Control for a grid-connected inverter with LCL Filter / Y. Tao, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou, L. Liu // IEEE 15th International Conference on Control and Automation (ICCA). – Edinburgh, United Kingdom. – 2019. – Pp. 573-577.
9. Ueta H. 1MHz multisampling deadbeat control with disturbance compensation method for three phase PWM inverter / H. Ueta, T. Yokoyama // International Power Electronics Conference (IPEC-Niigata 2018 -ECCE Asia). – Niigata, 2018. – Pp. 1883-1889.
10. Xing Y. An improved deadbeat plus plug-in repetitive controller for three-phase four-leg inverters / Y. Xing, C. Tan, Q. Chen, L. Zhang, K. Zhou // IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – Beijing, 2017. – Pp. 6325-6329

Рукопис подано до редакції 05.04.2021