

Ti, Y- based mechanical alloys, Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems (fourth ed. NATO Science for Peace and Security Programme) Springer. – 2008. – P. 429–436.

19. Ershova O., Dobrovolsky V., Solonin Yu. Thermal stability and hydrogen sorption properties of the MgH₂ hydride derived by the reactive milling of the Mg +10% wt. Ti mixture, Carbon Nanomaterials in Clean Energy Hydrogen Systems (fourth ed. NATO Science for Peace and Security Programme) Springer. – 2008. – P. 467–472.

20. Zhou C., Fang Z.Z., Lu J., Luo X., Ren C., Fan P., Ren Y., Zhang X. Thermodynamic Destabilization of Magnesium Hydride Using Mg-Based Solid Solution // J. Phys.Chem. – 2014. – 118. – P. 11526–11535.

21. Крейсберг В.Л., Тончиева К.В., Лошинов А.Ю. Взаимодействие водорода с окисью гольмия // Кинетика и катализ. – 1973. – Т. 14. – Вып. 4. – С. 1065–1067.

22. Dobrovolsky V.D., Yendzheevskaya S.N., Sinelnichenko A.K., Skorokhod V.V., Khizhun O.Yu. Analysis of the surface condition of Ti₄Fe₂O_x, Int. // J. Hydrogen Energy. – 1996. – Vol. 21. – No. 11/12. – P. 1061–1064.

23. Dobrovolsky V.D., Solonin Yu.M., Skorokhod V.V., Khizhun O.Yu. XPS and transmission electron microscopy of the multicomponent hydride-forming alloys for electrochemical

applications // J. Alloys Comp. – 1997. – Vol. 253–254. – P. 488–491.

24. Dobrovolsky V.D., Solonin Yu.M., Skorokhod V.V., Khizhun O.Yu. XPS and transmission electron microscopy of the multicomponent hydride-forming alloys // Int. J. Hydrogen Energy. – 1999. – Vol. 24. – P. 195–201.

25. Добровольский В.Д., Ендржеевская С.Н., Синельниченко А.К., Скороход В.В. Термическая активация порошковых гидридообразующих сплавов на основе интерметаллида TiFe // Порошковая металлургия. – 1997. – № 9/10. – С. 94–102.

26. Schlapbach L., Riesterer T. The activation of FeTi for hydrogen absorption // J. Appl. Phys. A. – 1983. – Vol. 32. – P. 169–182.

27. Яртысь В.А., Завалий И.Ю., Лотоцкий М.В. Абсорбенты водорода низкого давления на основе модифицированных оксидными добавками сплавов Zr–V и Zr–V–Fe // Коорд. Химия. – 1992. – Т. 18. – № 4. – С. 409–423.

28. Єршова О.Г., Добровольський В.Д., Хижун О.Ю., Солонін Ю.М. XPS і TDS дослідження механізму впливу поверхні і легуючої домішки титану на термічну стійкість і кінетику процесів десорбції водню з гідридної фази композитів, отриманих різними способами // Фізика і хімія твердого тіла. – 2011. – Т. 12. – № 4. – С. 1044–1051.

УДК 621.311

М.М.Кузнєцов, канд.техн.наук (Ін-т відновлюваної енергетики, Київ)

Вплив напівпровідникових перетворювачів відновлюваних джерел енергії на параметри якості електроенергії мережі

В статті наведені особливості напівпровідникових перетворювачів електроенергії сонячних та вітрових станцій та проаналізовані чинники впливу на параметри якості електроенергії мережі, що дозволяє повніше оцінити вплив станцій відновлюваної енергетики на енергосистему. Проаналізовані чинники розділені на детерміновані та хаотичні, аналіз їх впливу на мережу для одиничних перетворювачів у нормальних умовах показує, що параметри якості електроенергії залишаються в допустимих нормативними вимогами межах. Проте сумарні впливи хаотичних факторів в умовах реальної енергосистеми можуть суттєво зрости, що потребує подальших досліджень.

Ключові слова: енергосистема, вітрова електростанція, сонячна електростанція, напівпровідникові перетворювачі електроенергії, дестабілізуючі чинники.

В статье приведены особенности полупроводниковых преобразователей электроэнергии солнечных и ветровых станций и проанализированы факторы влияния на параметры качества электроэнергии сети, что позволяет полнее оценить влияние станций возобновляемой энергетики на энергосистему. Проанализированные факторы разделены на детерминированные и хаотические, анализ их влияния на сеть для единичных преобразователей в нормальных условиях показывает, что параметры качества электроэнергии остаются в допустимых нормативными документами пределах. Однако суммарные влияния хаотических факторов в условиях реальной энергосистемы могут существенно возрасти, что требует дальнейших исследований.

Ключевые слова: энергосистема, ветровая электростанция, солнечная электростанция, полупроводниковые преобразователи электроэнергии, дестабилизирующие факторы.

© М.М.Кузнєцов, 2015

Вступ. Напівпровідникові перетворювачі входять до складу більшості сучасних електричних станцій відновлюваної енергетики. Перетворювач дозволяє узгодити параметри електричної енергії первинного джерела (сонячних панелей, вітрогенераторів тощо) з електричною мережею при широкому діапазоні зміни швидкості вітру та сонячної інтенсивності, порівняно з генерацією електроенергії у мережу безпосередньо первинним джерелом. Далі розглядаються мережеві електричні станції [1] на основі фотоелектричних модулів чи вітрогенераторів, обладнаних напівпровідниковими перетворювачами електроенергії з ланкою постійного струму. Загальною особливістю перетворювачів є вихідна характеристика джерела струму, робота на підвищеній частоті (десятьки кілогерц), використання повністю керованих ключів та алгоритмів керування з пошуком точки максимальної потужності (МРР) [2–5]. Використання перетворювального обладнання зі складним алгоритмом керування дозволяє, з одного боку, забезпечити необхідні параметри якості електроенергії [6] у точці підключення станції та підвищити керованість системи загалом, а з іншого – зменшує надійність системи та підвищує схильність до некерованих процесів. У роботі розглядається вплив напівпровідникових перетворювачів електроенергії сонячних та вітрових електростанцій на параметри якості електроенергії мережі живлення.

Особливості напівпровідникових перетворювачів сонячних та вітрових електричних станцій. Сонячні та вітрові електростанції є даними (після ГЕС) за сумарною потужністю електростанціями відновлюваної енергетики. Це твердження актуальне як для України, так і для більшості європейських країн.

Особливості перетворювачів для сонячних станцій. Оскільки більшість електричних станцій призначені для постачання енергії в мережі змінного струму, для первинних джерел з виходом по постійному струму, до яких належать фотоелектричні модулі, наявність перетворювача (інвертора) є обов'язковою. Сонячні системи великої потужності (500 кВт і вище – до десятків мегават) характеризуються використанням інверторів, потужність яких рідко перевищує 500 кВт. Інвертори потужністю 1-2 МВт являють собою збірку

інверторів меншої потужності [2]. Інвертори сонячних електростанцій зазвичай є дворівневими та використовують мостову схему [2]. Складніші багаторівневі інвертори для станцій великої потужності використовуються рідко. Максимальна напруга на вході інвертора зазвичай становить до 1 кВ, вихідна напруга на виході – 0,4 кВ. За необхідності підключення до мережі з вищою напругою використовуються трансформатори, що можуть бути як вбудованими в інвертор, так і зовнішніми. Використання великої кількості фотоелектричних модулів, підключених до одного інвертора, підвищує вимоги до пошуку точки максимальної потужності поля в частині вибору глобального піка на характеристиці потужності [5, 7].

Особливості перетворювачів для вітрогенераторів. Перетворювачі для вітрогенераторів мають структуру перетворювачів частоти з ланкою постійного струму [3, 4, 8]. При підключенні перетворювача до генератора найчастіше використовуються дві технології: з передачею електроенергії ротора генератора в мережу через перетворювач і безпосередньою передачею енергії статора та з передачею всієї генерованої енергії через перетворювач [8, 9]. Перетворювачі для вітрогенераторів характеризуються великою потужністю (понад 1-3 МВт), високою вхідною напругою (понад 1 кВ) і часто багаторівневою структурою [4, 8]. Перетворювачі середніх потужностей (100 кВт) будуються за мостовою дворівневою схемою [3, 4]. Другою особливістю перетворювачів є робота блоку пошуку точки максимальної потужності – вітрогенератор має суттєво простішу характеристику потужності [8, 10, 11], ніж поле фотоелектричних модулів, проте визначення робочої точки генератора вимагає складних розрахунків [4, 8, 10].

Чинники впливу на мережу. Враховуючи природу напівпровідникових перетворювачів як імпульсних джерел живлення зі складними законами керування, основні чинники, що впливають на параметри якості електроенергії в мережі живлення, наступні:

1. Внесення до спектра струму та напруги складової, викликані комутацією ключів. Складова має високу частоту і зазвичай придушується фільтром перетворювача до несуттєвого рівня [2, 3].

2. Форма струму, що передається перетворювачем у мережу, повторює форму опорного сигналу системи керування [12–14], що викликає перенесення спотворень опорного сигналу на струм перетворювача та внесення спотворень, викликаних процесом відтворення опорного сигналу. При цьому опорним сигналом може виступати як сигнал джерела стабільної напруги/струму самої системи керування, так і напруга мережі.

3. Використання MPP алгоритмів вносить коливання потужності генерованої енергії через похибку визначення точки максимальної потужності та розрахунку робочої точки системи.

4. Перенесення спотворень вхідного сигналу перетворювача на вихідний. Періодичні спотворення сигналу на вході перетворювача з частотами, близькими та вищими за частоту мережі, зазвичай придушуються самим перетворювачем до несуттєвого рівня, тоді як коливання потужності з частотами, меншими за частоту мережі, переносяться до мережі без придушення.

5. Схильність до хаотичних процесів, що потенційно притаманна імпульсним перетворювачам, особливо з великою кількістю ключів та складним алгоритмом керування [13, 14].

6. При сумісному керуванні великою кількістю окремих перетворювачів виникають коливання вихідної потужності через помилки такого керування.

Перший, другий та частково четвертий чинники мають детерміновану природу, їх впливи повторювані у часі, а величини постійні і визначені для кожного перетворювача. Третій, п'ятий та шостий чинники мають хаотичну природу, їх граничні значення та імовірнісні характеристики впливу на параметри якості мережі викликають труднощі при оцінці. Розглянемо детальніше наведені чинники.

Детерміновані чинники. Сучасні напівпровідникові перетворювачі будуються з використанням принципів імпульсного перетворення напруг та струмів. Внаслідок цього у спектрі вихідних сигналів перетворювача з'являється високочастотна складова. Оскільки робоча частота імпульсних перетворювачів високої потужності відновлюваної енергетики становить понад 10 кГц, високочастотна складова імпульсної напруги доб-

ре придушується вихідним фільтром (так званим *RF* фільтром) [2, 3]. Висока частота перетворення дозволяє, крім зменшення габаритів перетворювача, згладжувати пульсації нижчої частоти за рахунок широтно-імпульсної модуляції, що позитивно впливає на параметри якості електроенергії.

Форма струму, що генерується у мережу, зазвичай задається каліброваним високочастотним джерелом, що входить до системи керування, і рідше – формою напруги мережі [12, 13]. Фаза вихідного струму встановлюється системою керування з урахуванням фази напруги мережі. Тобто на параметрах вихідного струму перетворювача позначаються невідповідність форми задавального сигналу синусоїді, неточність відтворення форми задавального сигналу та неточність встановлення фази струму. До спотворень, пов'язаних з опорним сигналом, умовно відносяться спотворення струмів магнітними елементами (дроселі та вихідний силовий трансформатор). Причиною спотворень форми струму є суттєва нелінійність магнітних характеристик та явище гістерезису, а не опорний сигнал, проте характер спотворень – поява непарних гармонік, зокрема 3-ї та 5-ї [12, 13] – часто схожий на спотворення, викликані опорним сигналом.

Спотворення параметрів електроенергії на вході перетворювача в ослабленому вигляді переносяться на вихід, впливаючи на параметри якості електроенергії. Проте, з огляду на те, що напівпровідникові перетворювачі для відновлюваних джерел енергії розраховані на зміну параметрів напруг та струмів на вході перетворювача в широкому діапазоні значень, ці спотворення придушуються до несуттєвого рівня.

Величина впливу наведених факторів описується коефіцієнтом гармонік (THD) та косинусом зсуву кута між напругою та струмом ($\cos \varphi$). THD та $\cos \varphi$ вимірюються для одиничних перетворювачів у стандартних, визначених виробником, умовах роботи. Відповідно при виході параметрів мережі чи первинного джерела за розрахункові значення, величини THD та $\cos \varphi$ можуть відхилитися від вимірних значень. Для сучасних перетворювачів сонячної енергетики THD рідко перевищує 3-5% [2]. Для перетворювачів вітроенергетики THD зазвичай менше 3-4% [3]. Слід зазначи-

ти, що для вітрогенераторів, у яких частина енергії передається в мережу через перетворювач, а частина – безпосередньо від генератора, значення THD може відхилитися від наведених меж.

Аналіз окремих гармонік спектра [15] струму одного з перетворювачів потужністю 500 кВт для сонячної енергетики показує, що найбільші значення мають непарні гармоніки, зокрема 3-я (близько 1,3-1,5% від першої гармоніки), 5-а та 11-а (0,7-0,8%), 13-а (0,4%). Вищі гармоніки успішно придушуються вихідним фільтром. Судячи з аналізованих спектрів, непарні гармоніки, кратні 3-м, придушуються з використанням додаткових комутацій ключових елементів, що дозволяє крім покращення спектрального складу вихідного струму використовувати фільтр з вищою частотою зрізу [12, 13]. Оскільки принципова схема та основні характеристики розглянутого перетворювача є типовими, можна очікувати, що інші перетворювачі матимуть схожі спектральні характеристики.

Значення косинуса кута зсуву фаз між напругою та струмом ($\cos \varphi$) зазвичай становить не менше 0,95-0,99 [2, 3]. Ряд перетворювачів мають можливість корекції значення $\cos \varphi$ в межах близько 0,7-1 (як у сторону випередження струму – ємнісна характеристика, так і в сторону запізнення – індуктивна характеристика). Часто значення $\cos \varphi$ представляють як коефіцієнт потужності, що актуально для квазісинусоїдальних напруг та струмів.

Як зазначалось, наведені чинники мають детерміновану природу. Вони визначаються конструктивними особливостями, притаманними більшості перетворювачів високої потужності сонячної та вітрової енергетики, а також конкретними параметрами окремо взятого перетворювача. Їх вплив на параметри якості електроенергії не призводить до перевищення встановлених державними стандартами меж [6]. Проте при великій кількості перетворювачів, що включені в єдину мережу, особливо при виході параметрів самої мережі чи первинних джерел за межі, визначені виробником обладнання, спотворення параметрів якості електроенергії можуть істотно перевищити допустимі межі.

Хаотичні чинники. Системи пошуку точки максимальної потужності призначені для встано-

влення такої робочої точки первинного джерела енергії, в якій джерело працює з максимальною можливою в поточних умовах потужністю. Таким чином, використання систем MPP дозволяє ефективніше використовувати первинне джерело.

Алгоритми пошуку MPP за відомою характеристикою потужності первинного джерела ґрунтуються на двох методиках – пошуку локального максимуму та пошуку глобального максимуму. Пошук локального максимуму дозволяє точніше встановити точку максимальної потужності, проте при наявності кількох локальних максимумів, що характерно для систем з багатьма первинними джерелами живлення (поле фотоелектричних модулів), локальний максимум може не збігтися з глобальним. Такої вади позбавлені алгоритми MPP з пошуком глобального максимуму, проте точність встановлення робочої точки у них нижча. Зазвичай алгоритм пошуку MPP для сучасних потужних перетворювачів є комбінацією методик і працює за пошуком локального максимуму з періодичною перевіркою його відповідності глобальному максимуму. Особливістю деяких алгоритмів є неперервне коливання значення робочої точки навколо точки максимальної потужності, без фіксації точного значення [4, 5, 16]. Крім власне алгоритму пошуку, на точність визначення точки максимальної потужності впливають помилки визначення вихідних даних та математичного розрахунку характеристики потужності первинного джерела в конкретних умовах та в поточний момент часу.

Загалом точність встановлення точки максимальної потужності для локального максимуму перевищує 99% [5]. З урахуванням визначення глобального максимуму точність встановлення точки максимальної потужності становить понад 95% [5]. Точність встановлення робочої точки при динамічній зміні освітленості поля фотоелектричних модулів або при поривчастому вітрі зменшується через низьку швидкодію алгоритмів пошуку MPP. Крім того, для напівпровідникових перетворювачів відновлюваних джерел енергії характерна нижня межа потужності (напруги/струму) джерела, з якого починається передача енергії в мережу. Для перетворювачів характерний інтервал роботи в діапазоні близько 70-

90% від номінальної потужності перетворювача в оптимальному і 20-100% в неоптимальному режимах роботи [2, 3].

Напівпровідникові перетворювачі характеризуються суттєвою нелінійністю характеристик та імпульсним режимом роботи, що в поєднанні зі складними законами керування підвищує схильність перетворювачів до хаотичних та некерованих процесів [13, 14]. З огляду на складність самого явища та перетворювача з системою керування як об'єкта дослідження, аналіз стійкості напівпровідникових перетворювачів відновлюваної енергетики викликає труднощі. Проте факти відмов існуючих станцій через зрив роботи перетворювача внаслідок некерованих процесів автору невідомі.

Особливістю хаотичних чинників є вплив на параметри якості електроенергії мережі внаслідок спотворення частотних та фазових характеристик напруг і струмів безпосередньо перетворювачем, однак важливішим видається вплив стрибків миттєвої потужності станцій відновлюваної енергетики на параметри електроенергії в загальній мережі. Адже при зростанні частки потужності відновлюваних джерел енергії, порівняно з традиційними, потенціал регулювання параметрів якості електроенергії скорочується [17, 18]. Частка відновлюваних джерел у загальній потужності енергосистеми, за якої вплив на параметри якості електроенергії стає істотним, за різними дослідженнями становить близько 10%. Отже, дослідження сумісної роботи комплексу електричних станцій з напівпровідниковими перетворювачами та розробка алгоритмів для їх сумісного керування є важливою задачею при зростанні частки енергії з відновлюваних джерел у балансі енергосистеми. Зокрема постає задача оцінки взаємного впливу станцій відновлюваної та традиційної енергетики та синхронізації їх роботи задля підвищення прогнозованості виробітку електроенергії, визначення необхідної кількості резервних потужностей та забезпечення відповідної якості параметрів електроенергії мережі [19]. Поставлена задача ускладнюється широким діапазоном зміни миттєвої потужності та виробітку електроенергії станціями відновлюваної енергетики, великою кількістю сумісно працюючих станцій різної потужності, взаємопов'язаністю та

часово-просторовим розподілом кліматичних явищ сонячної радіації, хмарності, напрямку та швидкості вітрів, тобто в системі можливі хвилюві, випадкові та важкопрогнозовані ефекти. Окремою задачею є інтеграція відновлюваних джерел у мережі *Smart Grid*, що також вимагає дослідження їх сумісної роботи.

Висновки. Робота напівпровідникових перетворювачів електричної енергії, що застосовуються у відновлюваній енергетиці, не спричиняє спотворення параметрів якості генерованої електричної енергії понад межі, визначені вимогами відповідних стандартів, за умов сталої генерації первинного джерела та незмінних параметрах електроенергії мережі. Проте сумісна робота великої кількості перетворювачів в умовах реальної енергосистеми та кліматичних впливів створює потенційну небезпеку істотних спотворень параметрів якості електроенергії. Окремих досліджень потребують хвилюві явища та випадкові процеси генерації електроенергії при сумісній роботі великої кількості станцій сонячної та вітрової енергетики в умовах реальної енергосистеми.

1. *Мхитарян. Н.М.* Энергетика нетрадиционных и возобновляемых источников. Опыт и перспективы. – К., Наукова думка, 1999. – 320 с.
2. *Аналіз матеріалів сайтів* <http://www.photon.info/>, <http://www.enfsolar.com/>, технічної документації перетворювального обладнання виробників ABB (Power One), SMA, Siemens, Schneider Electric (Xantrex), AEG, KACO, інші.
3. *Аналіз документації перетворювального обладнання виробників ABB, Vestas.*
4. *Long Pham.* A Review of Full Scale Converter for Wind Turbines. http://www.academia.edu/575903/A_Review_of_Full_Scale_Converter_for_Wind_Turbines [публікація в електронному виданні]
5. *Morales D.S.* Maximum Power Point Tracking Algorithms for Photovoltaic Applications. Thesis for obtaining the degree of Master of Science in Technology. Espoo, 14.12.2010.
6. ГОСТ 13109-97.
7. *Seyedmahmoudian M., Mekhilef S., Rahmani R., Yusuf R., Renani E.T.* Analytical Modeling of Partially Shaded Photovoltaic Systems // *Energies*. – 2013. – №6. – P. 128–144.
8. *Anaya-Lara O., Jenkins N., Ekanayake J. et al.* Wind energy generation: modelling and control. – U.K., Wiley, 2009. – 269 p.
9. *Blaabjerg F., Liserre M., Ma K.* Power Electronics Converters for Wind Turbine Systems // *IEEE Transactions on Industry Applications*. – 2012. – Vol. 48. – No.2. – P. 708–719.

10. *Koutroulis E., Kalaitzakis K.* Design of a Maximum Power Tracking System for Wind-Energy-Conversion Applications // IEEE Transactions on industrial electronics. – 2006. – Vol. 53. – №2. – P. 486–494.

11. *Ors M.* Maximum Power Point Tracking for Small Scale Wind Turbine With Self-Excited Induction Generators // CEAL. – 2009. – Vol. 11. – No.2. – P. 30–34.

12. *Розанов Ю.К.* Основы силовой электроники. – М., Энергоатомиздат, 1992. – 296 с.

13. *Перетворювальна техніка.* Частина II. – Під ред. Руденко В.С. – Київ, ІСДО, 1999. – 329 с.

14. *Михайлов. В.С.* Теория управления. – К., Выща школа, 1988. – 312 с.

15. *Матеріали,* надані для ознайомлення в приватному порядку одним з виробників перетворювального обладнання.

16. *Liu C., Wu B., Cheung. R.* Advanced Algorithm for MPPT Control of Photovoltaic Systems. Refereed Paper of Canadian Solar Buildings Conference, Montreal, 2004.

17. *Павловський В.В., Леньга О.В., Вишневецький М.В.* Дослідження стійкості режимів енергосистем з потужними сонячними та вітроелектростанціями. Методологічні питання. – 2012. – 22с. www.dmcc.com.ua [публікація в електронному виданні]

18. *Кириленко О.В., Павловський В.В., Яндульський О.С., Стелюк А.О.* Керування режимом роботи електростанції з відновлюваними джерелами енергії в умовах зміни частоти в енергосистемі // Технічна електродинаміка. – 2012. – № 4. – С. 52–57.

19. *Кузнєцов М.П.* Забезпечення електроенергетичного балансу при наявності вітрових електростанцій // Відновлювана енергетика. – 2014. – №2. – С. 60–64.

МІЖНАРОДНИЙ ІНВЕСТИЦІЙНИЙ БІЗНЕС-ФОРУМ З ПИТАНЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ВІДНОВЛЮВАНОЇ ЕНЕРГЕТИКИ

VIII МІЖНАРОДНА СПЕЦІАЛІЗОВАНА ВИСТАВКА

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ. ВІДНОВЛЮВАНА ЕНЕРГЕТИКА - 2015

АЛЬТЕРНАТИВНІ ДЖЕРЕЛА ЕНЕРГІЇ, ЕНЕРГОЗБЕРЕГАЮЧІ ТЕХНОЛОГІЇ, ОБЛАДНАННЯ, МАТЕРІАЛИ



10–13
листопада

ОРГАНІЗАТОР:
Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України

СПІВОРГАНІЗАТОР:
Міжнародний виставковий центр

ГАЛУЗЕВИЙ ПАРТНЕР:
Українська Вітроенергетична Асоціація

IEC

МІЖНАРОДНИЙ ВИСТАВКОВИЙ ЦЕНТР
Україна, Київ, Броварський пр-т, 15
М "Лівобережна"
☎ +38 044 201-11-66, 206-87-86
e-mail: energo@iec-expo.com.ua
www.iec-expo.com.ua, www.tech-expo.com.ua

Технічний партнер: **Reant Media**