УДК 621.314.58:621.311.13:004.67

О.Ю. Гаєвський, д-р фіз. мат.наук. наук, професор, **ORCID** 0000-0001-6144-2441
Д.С. Дєлєв, бакалавр, **ORCID** 0000-0002-8049-0163
М.О. Чорномурко, бакалавр, **ORCID** 0000-0002-9157-7491
В.В. Бодняк, магістр, **ORCID** 0000-0002-5605-090X
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ЕФЕКТИВНІСТЬ ОДНОФАЗНОГО ІНВЕРТОРА ФОТОЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ ТА ГАРМОНІЧНІ СПОТВОРЕННЯ ПРИ РІЗНИХ РІВНЯХ НАВАНТАЖЕННЯ

Робота присвячена дослідженню вихідних характеристик однофазного автономного інвертора: ККД, загального коефіцієнту гармонійних спотворень (Total Harmonic Distortion, THD) та внеску окремих гармонік у вихідну потужність. Запропонована методика визначення ККД на основі попереднього спектрального аналізу, яка враховує частку першої гармоніки у вихідної потужності. Створена система моніторингу ККД і THD за допомогою розробленого віртуального приладу в пакеті LABVIEW. Отримані залежності ККД і THD комерційного інвертору Power Star від потужності навантаження і проведено порівняння їх значень з нормами міжнародних та українських стандартів.

Ключові слова: інвертор, фотоелектричні станції. ефективність інвертора, ККД, якість потужності, коефіцієнт гармонійних спотворень, THD.

Вступ

Для сучасної енергетики характерне невпинне зростання частки розподіленої генерації від відновлюваних джерел енергії, в тому числі від фотоелектричних станцій (ФЕС). Значну частину вартості ФЕС складають перетворюючі пристрої - інвертори, які впливають на ефективність ФЕС і, як наслідок на величину виробленої енергії всієї станції. У зв'язку з цим актуальними є задачі моніторингу інверторів і дослідження їх ефективності (ККД) в мінливих умовах фотогенерації і при різному навантаженні.

Інверторам притаманні гармонійні спотворення вихідної потужності, що є однією з основних проблем при інтегруванні відновлюваної генерації в енергосистему. Присутність вищих гармонік може призводити до перегріву трансформаторів, двигунів, кабелів, що скорочує їх термін служби. Гармонійні спотворення також впливають на чутливі до них навантаження, вони можуть приводити до відключень, що обумовлені спрацюванням запобіжників і несправним обладнанням. Спотворення, що виникають в процесі вимірювання напруги, струму і потужності в точці підключення ФЕС, можуть ускладнити роботу мережі, релейного захисту, створити хибне уявлення про ефективність фотоелектричної станції.

Огляд стандартів якості потужності та постановка задачі

Згідно з європейським стандартом EN 50160: 2014 на якість електроенергії в низьковольтних мережах та ідентичному йому стандарту України ДСТУ EN 50160: 2014 [1] коефіцієнт нелінійних спотворень THD, включаючи гармоніки до 40-ї, не повинен перевищувати 8%. Допустимий вміст окремих гармонік в напрузі згідно з цим стандартом наведено в таблиці 1. Відзначимо, що в даний час в Україні застосовується також попередній стандарт ГОСТ 13109-97 [2], який встановлює обмеження на THD в залежності від напруги мережі: 8% - для напруги 0.38 кВ, 5% - для 6-20 кВ, 4% - для 35 кВ і 2% - для мереж з напругою понад 110 кВ.

Таблиця 1 – Допустимий внесок гармонік в напругу низьковольтних мереж відповідно до стандарту EN 50160

Непарні гармоніки				Парні гармоніки	
Не кратні трьом		Кратні трьом			
Номер	Напруга, %	Номер	Напруга, %	Номер	Напруга,
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,5	6÷24	0,5
13	3	21	0,5		
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

© О.Ю. Гаєвський, Д.С. Дєлєв, М.О. Чорномурко, В.В. Бодняк, 2017

Стандарт Міжнародної Електротехнічної Комісії (МЕК) IEC 61727, що встановлює норми на підключення ФЕС до мереж, регламентує THD по струму на рівні не вище 5%. МЕК встановила також групу стандартів IEC 61000 на «електромагнітну сумісність», яка складається з шести частин. У стандарті 61000-3-2 описані норми емісії гармонійних складових від обладнання з споживанням струму менше 16 А в одній фазі. Якщо розглядати інвертор невеликої потужності як джерело гармонік, то за класифікацією даного стандарту, його слід віднести до групи А. Для цього стандарту встановлюються граничні значення струму гармонік, що зазначені в Таблиці 2.

Таблиця 2 – Норми струму гармонік відповідно до стандарту EN 50160 для обладнання класу А

Непарні гармонічні складові		Парні гармонічні складові	
Номер гармоніки	Максимально допустиме значення струму,А	Номер гармоніки	Максимально допустиме значення струму,А
3	2,3	2	1,08
5	1,14	4	0,43
7	0,77	6	0,3
9	0,4	$8 \le n \le 40$	$0{,}15 * \frac{15}{n}$
11	0,33		
13	0,21		
$15 \le n \le 40$	$0{,}15 * \frac{15}{n}$		

Нарівні з показником THD, іншою не менш важливою характеристикою інвертора є його ККД, що визначається відношенням вихідної потужності інвертора на стороні змінного струму до вхідної потужності постійного струму. Особливістю інверторів ФЕС є залежність їх ККД від вхідної потужності, що надходить від фотомодулів, і відповідно рівня сонячної радіації (див. наприклад, [3]).

В даний час немає однозначно визначених методик вимірювання параметрів гармонійних спотворень і ефективності інвертора. Так, деякі стандарти регламентують коефіцієнт THD по струму, без регламентації спотворень по напрузі. Ще більш невизначена ситуація склалася у визначенні ефективності інверторів: найчастіше при оцінках ККД використовуються дані вимірювань повної вихідної потужності, в той час як, внаслідок суттєвого внеску вищих гармонік, слід враховувати лише потужність основної гармоніки. На користь такого підходу свідчить також те, що в досить великих ФЕС при паралельному підключенні інверторів, внаслідок випадкового характеру фаз неосновних гармонік, відбувається їх взаємна компенсація [4].

Дана робота присвячена розробці методики визначення THD і ККД автономних інверторів ФЕС у зв'язку з тим, що вимірювання при різних рівнях вихідної потужності автономного інвертора показали сильну залежність цих характеристик від величини навантаження.

Матеріал і результати досліджень

У даній роботі був досліджений автономний інвертор Power Star IR1012 з номінальної потужністю 1000 Вт. Електрична схема експериментальної установки для вимірювання коефіцієнтів ефективності і гармонічних спотворень показана на рис.1. Для забезпечення стабільного живлення інвертора постійним струмом був використаний гелевий акумулятор Santakups FCG11 з ємністю 200А-год, здатний підтримувати стабільне значення вхідної напруги 12.4В протягом часу проведення експерименту. Постійний струм вимірювався по падінню напруги на каліброваному шунті з опором 750мкОм за допомогою мультиметру UNI-T UT139C з похибкою 0,7%+3о.р.

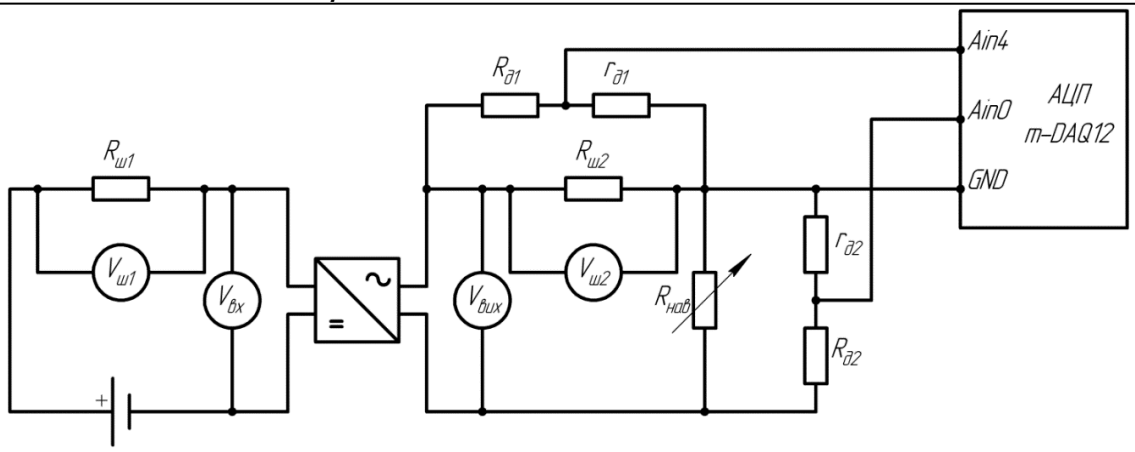


Рисунок 1 – Електрична схема установки для вимірювання характеристик інвертора

В якості навантаження було використано магазин опорів, що був розрахований на діапазон потужності від 40 Вт до 1100 Вт. Навантаження мало активно-індуктивний характер з невеликою, але контрольованою індуктивною складовою (cosφ=0.994).

На АС-стороні інвертора були використані дільники для реєстрації напруги і струму через навантаження. Сигнали по двох каналах 50 кГц подавалися на мікросистему збору даних m-DAQ12 (компанії Holit Data Systems). Частота відліків дозволяла з високою точністю фіксувати відхилення від синусоїдального сигналу (аж до 100-ї гармоніки). Дані вимірювань записувалися в файли з метою подальшого аналізу амплітуд і фаз гармонік в середовищі LABView за допомогою створеного раніше віртуального приладу [5]. Проведене в [5] порівняння різних програмних систем обробки даних з використанням швидкого перетворення Фур'є (C ++ Builder, MATLAB і LABView) показало практично повний збіг результатів гармонійного аналізу. Програмна обробка сигналу дозволяла також обчислювати потужності на основній та на вищих гармоніках.

Дані гармонійного аналізу вихідної напруги на навантаженні дозволяють обчислити коефіцієнт нелінійних спотворень (Total Harmonic Distortion - THD), по формулі

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_i V_i^2}}{V_1} 100\% \qquad (1)$$

де V_i – значення напруги відповідної *i*-гармоніки, V_1 – значення напруги першої гармоніки. Таким же чином можна визначити THD_I за струмом, замінивши значення напруг на відповідні значення струмів. Оскільки навантаження було активним і лінійним, то значення цих двох коефіцієнтів збігаються.

ККД інвертора в даній роботі обчислювався за формулою:

$$\eta_{inv} = \frac{P_1}{P_{DC}} \qquad (2)$$

де P_1 і P_{DC} - потужність першої гармоніки на виході і потужність на стороні постійного струму відповідно. Величина потужності першої гармоніки визначалася шляхом гармонійного аналізу вихідної напруги,що було записано з АЦП в файл.

Результати вимірювань і розрахунку рівня гармонійних спотворень наведені на рис. 2 у вигляді залежності коефіцієнта THD (1) від потужності, що споживалася навантаженням. При навантаженні, що не перевищує 70% від номінального значення, THD знаходиться в межах, що визначаються стандартами ДСТУ EN 50160:2014 і IEC 61727. При більшій вихідній потужності(> 700 Вт) спотворення починають зростати і досягають 18% по струму і напрузі при номінальної потужності. При цьому осцилограми вихідної напруги і потужності істотно відрізняються від синусоїдальних кривих (рис.3 а, б), причому амплітуда 3-й гармоніки складає приблизно 17% від основної (рис.4). Це значення перевищує індивідуальні межі гармоніки, що визначається в ДСТУ EN 50160. Крім того, помітними є внески 7-й і 9-й гармоніки.

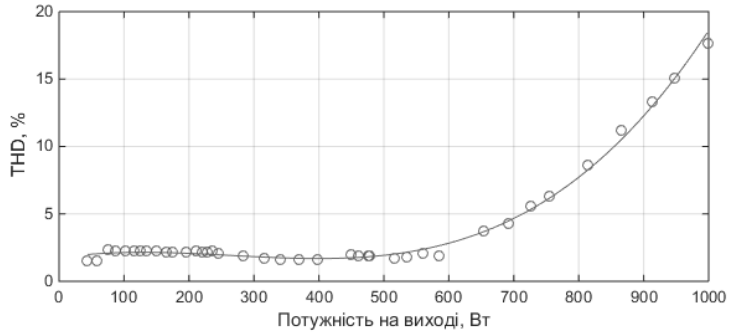
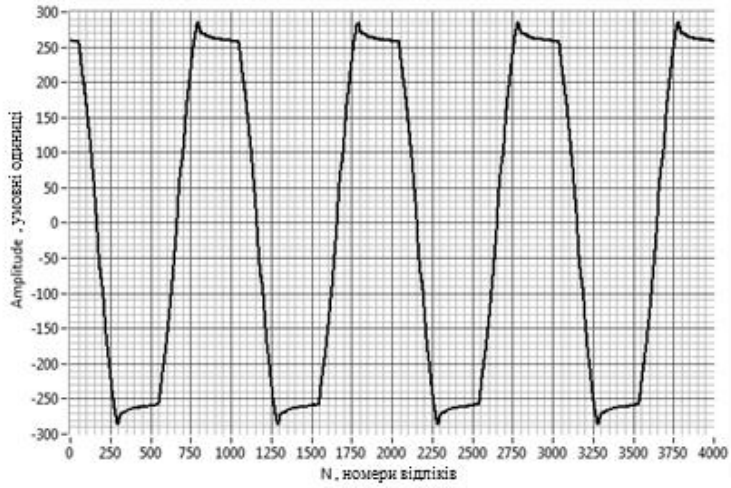


Рисунок 2 – Залежність THD від вихідної потужності інвертора:
о - експеримент; суцільна лінія - апроксимуюча функція

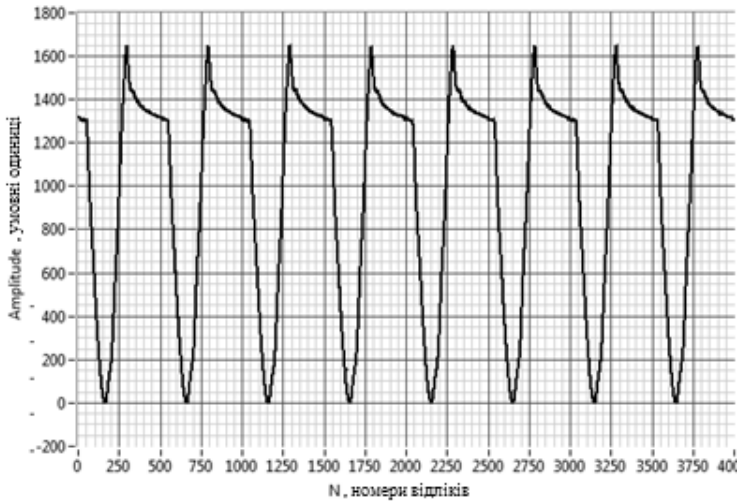
Експериментальні дані можуть бути апроксимовані модельної функцією такого вигляду:

$$THD_V = ((4.65 \cdot 10^{-8}) \cdot P_i^3 + (-3.69 \cdot 10^{-5}) \cdot P_i^2 + (7.17 \cdot 10^{-3}) \cdot P_i + 1.74) \cdot 100\% \quad (3)$$

де P_i – значення потужності, при якій обчислюється *THD*.



а



б

Рисунок 3 – *Осцилограми напруги (а) і потужності (б) на виході з інвертора при навантаженні 1 кВт*

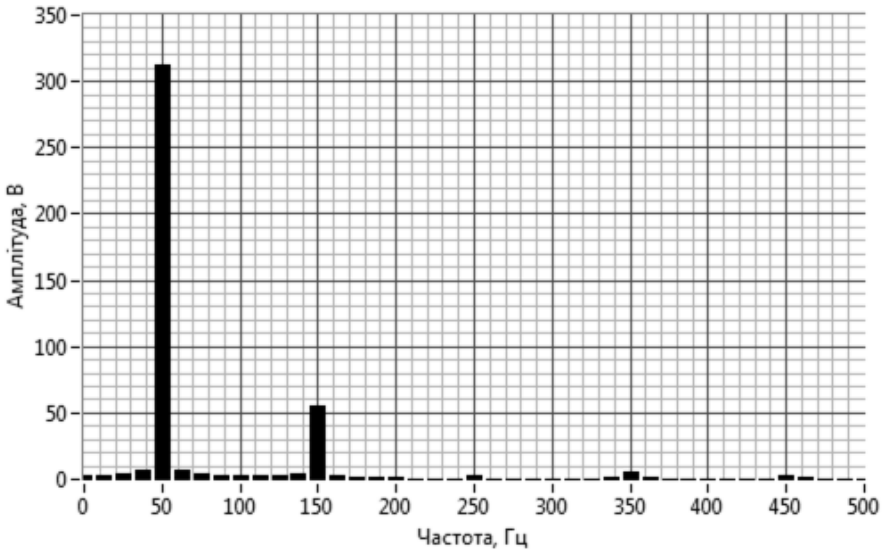


Рисунок 4 – Гармонічний склад напруги при навантаженні 1 кВт

Для розгляду ККД були використані значення потужності першої гармоніки співвіднесені до потужності на стороні постійного струму інвертора (формула для η_{inv} (2)). Відповідно до отриманих значень, залежність ККД від навантаження є нелінійною і змінюється в досить широкому діапазоні значень – від 51% (при навантаженні 5%) до 92% (при навантаженні 50%). Очевидно, що ККД по першій гармоніці (2) знижується з наростанням частки вищих гармонік в вихідній напрузі.

Модельна функція, що отримана шляхом апроксимації параметрів експериментальних даних виглядає наступним чином:

$$\eta_{inv} = ((-2.16\cdot10^{-15})\cdot P_i^6 + (7.83\cdot10^{-12})\cdot P_i^5 + (-1.13\cdot10^{-8})\cdot P_i^4 + (8.33\cdot10^{-6})\cdot P_i^3 + \\ +(-3.36\cdot10^{-3})\cdot P_i^2 + (7.19\cdot10^{-1})\cdot P_i + 2.73\cdot10)\cdot100\% \quad (4)$$

де P_i – значення потужності, при якій обчислюється *ККД*.

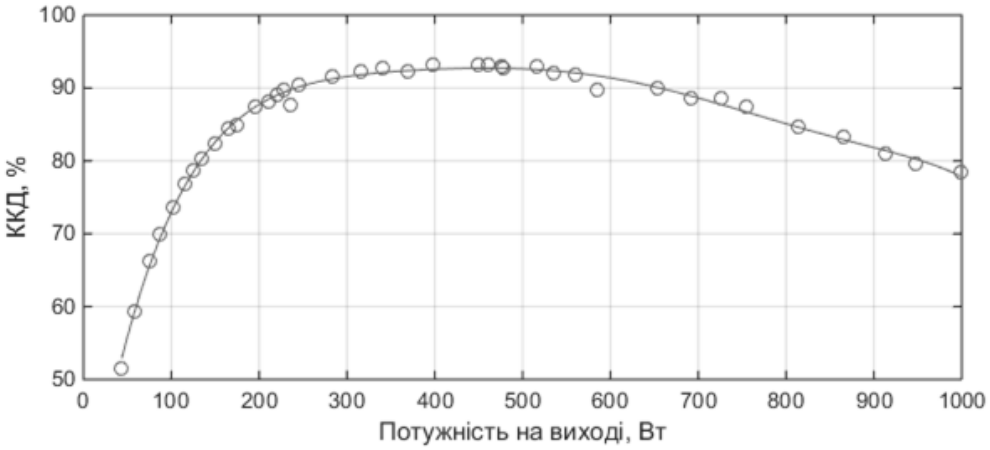


Рисунок 4 – Залежність ККД від вихідної потужності інвертора

При аналізі ефективності інверторів ФЕС доцільним є обчислення середньозваженого ККД, що враховує змінний рівень сонячної радіації і відповідно потужність на вході інвертора. Найбільш відомі два підходи для врахування даного фактора – це рекомендації Каліфорнійської енергетичної комісії (CEC) і Євросоюза [6], відповідно до яких зважені ККД обчислюються за формулами:

$$\eta_{CEC} = 0.04\cdot\eta_{10\%} + 0.05\cdot\eta_{20\%} + 0.12\cdot\eta_{30\%} + 0.21\cdot\eta_{50\%} + 0.53\cdot\eta_{75\%} + 0.05\cdot\eta_{100\%} \quad (5)$$

$$\eta_{EU} = 0.03\cdot\eta_{5\%} + 0.06\cdot\eta_{10\%} + 0.13\cdot\eta_{20\%} + 0.10\cdot\eta_{30\%} + 0.48\cdot\eta_{50\%} + 0.20\cdot\eta_{100\%} \quad (6)$$

Формули являють собою лінійні комбінації ККД при різних рівнях навантаження. Відповідно до даних формул були отримані наступні ККД: η_{CEC} = 88.1%, η_{EU} = 87.2%.

Аналогічне усереднення для коефіцієнта спотворень по току THD було запропоновано виконувати в роботі [7]:

$$THD_I = 0.03 \cdot THD_{I(5\%)} + 0.06 \cdot THD_{I(10\%)} + 0.13 \cdot THD_{I(20\%)} + \\ +0.10 \cdot THD_{I(30\%)} + 0.48 \cdot THD_{I(50\%)} + 0.20 \cdot THD_{I(100\%)} \quad (7)$$

Якщо виходити з експериментальних результатів, для інвертора Power Star IR1012, отримаємо THD_I =5.11%.

Висновки

У даній роботі були досліджені вихідні характеристики комерційного однофазного інвертора Power Star IR1012 з номінальною потужністю 1000 Вт. Визначено при різних рівнях активного навантаження значення коефіцієнта нелінійних спотворень по напрузі THD_V (в разі лінійного активного навантаження його значення збігаються з коефіцієнтом спотворень по струму THD_I). При навантаженні, що не перевищує 70% від номінального значення інвертора, *THD* відповідає нормам IEC 61727 ($THD \leq 5\%$), а при навантаженні 80% - нормам ДСТУ EN 50160:2014 та ГОСТ 13109-97 ($THD \leq 8\%$).Більш високі навантаження призводять до суттєвого зростання *THD* - до 18% при номінальній вихідній потужності інвертора. При цьому струм третьої гармоніки складає близько 17% від загального струму або ~ 0.77 А при навантаженні 1 кВт. Це значення виходить за рамки згаданих вище стандартів, однак є прийнятним за нормами IEC 61000-3-2 для емісії гармонік низьковольтного обладнання (див. Табл.2). Але також слід враховувати те, що струм неосновних гармонік може ще більше зрости при нелінійному або при активно-індуктивному навантаженні [5]. Відзначимо, що високий рівень 3-й гармоніки по струму (більше 27%), відповідно до роботи [8], характерний також для підключених до мережі інверторів Sunny Boy 3000TL.

Для визначення ККД автономного PV-інвертора була запропонована методика, при якій ККД обчислюється відносно першої (основної) гармоніки. При цьому слід використовувати дані гармонійного аналізу вихідної потужності інвертора і виключити внесок в ККД вищих гармонік. Максимальні значення ККД спостерігаються при навантаженні 40 - 50%. При номінальному навантаженні ККД становить 79%. Якщо врахувати внесок гармонійних складових (від 3-й гармоніки і вище), як це робиться при звичайному методі розрахунку ефективності, то ККД при відомому THD збільшиться приблизно на 3%.

Врахування зміни вхідної потужності інвертора внаслідок мінливих умов сонячної радіації, виконаний для ККД і THD за методикою «European efficiency» дає усереднене значення η_{EU} = 87.2% и THD_{EU} =5.11%.

Список використаної літератури

1. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [Чинний з 1.10.2014]. - К.: Держстандарт України, 2014. – 27 с.

2. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения: ГОСТ 13109-97. – К.: Изд-во стандартов, 1998; Госстандарт Украины, с доп. и попр., 1999. – 31 с.

3. R.S. Faranda, H. Hafezi, S. Leva, M. Mussetta and E. Ogliari. The optimum PV plant for a given solar DC/AC converter // Energies 2015, 8, 4853-4870

4. M. Armstrong, D.J. Atkinson, C. M. Johnson and T. D. Abeyasekera. Low order harmonic cancellation in a grid connected multiple inverter system via current control parameter randomization // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, No. 4, July 2005, p. 885-892.

5. О.Ю. Гаєвський, В.В. Магада, С.О. Ужейко. Методи гармонічного аналізу вихідної напруги інвертора в реальному часі // Енергетика: економіка, технології, екологія, – 2014. – № 3(37). – С. 72–77.

6. N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli. Power electronics and control techniques for maximum energy harvesting in photovoltaic systems // CRC Press: Boca Raton, Florida. - 2012, - 366 p.

7. M.S. de-Cardona, J. Carretero. Analysis of the current total harmonic distortion for different single-phase inverters for grid-connected PV-systems // Solar Energy Materials & Solar Cells 87 (2005) 529–540.

8. C. Nemes, F. Munteanu, D. Astanei. Analysis of grid-connected photovoltaic system integraton on low-voltage distribution network // Journal of Sustainable Energy. – 2016. - Vol. 7, No. 1, p.9-14.

A. Gaevski, Dr. Sc. Sc. (Phys. & Math.) Sciences., Prof.,**ORCID** 0000-0001-6144-2441
D. Delev, bachelor, **ORCID** 0000-0002-8049-0163
M. Chornomurko, bachelor, **ORCID** 0000-0002-9157-7491
V. Bodnyak, Msc., **ORCID** 0000-0002-5605-090X
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

EFFICIENCY OF THE PHOTOVOLTAIC SINGLE-PHASE INVERTER AND HARMONIC DISTORTION AT DIFFERENT LOAD LEVEL

Nowadays as renewable energy continues to develop there is a problem with control of harmonic distortion in output signal of different transforming systems such as power inverter. Existents of this harmonics can cause damage in some power supply systems that is very harmful for connected equipment. As a matter of fact, energy conversion efficiency depends on connected load but many manufacturers don't carry necessary data about this parameter in their manuals. So problem of researching dependency of efficiency from load arises.

Also today there are no particular measurement methods of harmonic distortion and energy conversion efficiency. For example to determine efficiency of inverter it is used a whole output energy though this signal also include some harmful harmonics.

So experiment was carried to understand how much connected load influences on the quality of output voltage, current and power. For this purpose was created experimental scheme that involved measurement on the side of alternative current and direct current. By means of analog-to-digital converter data of conducted experiment was written to file that later was analyzed to make Fourier transform and bring to life some necessary results. These results include dependencies, graphs of oscilloscope, approximation functions etc.

During experiment were researched such output characteristics of autonomous single-phase inverter as efficiency, total harmonic distortion and level of particular harmonics in the output voltage. Weighted energy conversion efficiency was also determined by means of two recommendations made by The California Energy Commission and European Union.

It is proposed to determine inverter efficiency by means of first harmonic for which it is necessary to make preliminary harmonic analysis. Conducted experiment makes possible to determine dependencies between inverter efficiency and THD on one side and level of load on the other one, and compare this data with different standarts.

Keywords: PV-inverter, photovoltaic plant, inverter efficiency, power quality, total harmonic distortion (THD).

References

1. Characterystyky naprugy electropostachannya v electrichnich merezhach zagalnoy pryznachenosty: DSTU EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). [From 1.10.2014]. - K.: Derzhstandart Ukrayiny', 2014. – 27 p.
2. Normy kachestva electricheskoy energy v sistemach electrosnabzhenia obshego naznachenia: GOST 13109-97. – K.: Izdateltsvo Standartov, 1998; Gosstandart Ukrainy', s dopolnenyiamy i popravkami, 1999. – 31 p.
3. R.S. Faranda, H. Hafezi, S. Leva, M. Mussetta and E. Ogliari. The optimum PV plant for a given solar DC/AC converter // Energies 2015, 8, 4853-4870
4. M. Armstrong, D.J. Atkinson, C. M. Johnson and T. D. Abeyasekera. Low order harmonic cancellation in a grid connected multiple inverter system via current control parameter randomization // IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 20, No. 4, July 2005, p. 885-892.
5. O.U. Gaevskyi, V.V. Magada, S.O. Uzheiko. Inverter output harmonic analysis methods in real time // Energetyka: ekonomika, technologii, ekologia, – 2014. – № 3(37). – P. 72–77.
6. N. Femia, G. Petrone, G. Spagnuolo, M. Vitelli. Power electronics and control techniques for maximum energy harvesting in photovoltaic systems // CRC Press: Boca Raton, Florida. - 2012, - 366 p.
7. M.S. de-Cardona, J. Carretero. Analysis of the current total harmonic distortion for different single-phase inverters for grid-connected PV-systems // Solar Energy Materials & Solar Cells 87 (2005) 529–540.
8. C. Nemes, F. Munteanu, D. Astanei. Analysis of grid-connected photovoltaic system integraton on low-voltage distribution network // Journal of Sustainable Energy. – 2016. - Vol. 7, No. 1, p.9-14.

Надійшла 19.05.2017
Received 19.05.2017