

**КОМП'ЮТЕРНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ МЕРЕЖЕВИМ
БАГАТОРІВНЕВИМ ІНВЕРТОРОМ НАПРУГИ**

Розроблено комп'ютерну модель в яку закладено синтезований закон керування мережесим багаторівневим інвертором напруги сонячного модуля, який дозволяє утримувати режим роботи сонячного модуля в області точки відбору максимальної потужності, що збільшує його продуктивність. Запропоновано комп'ютерну модель регулятора поздовжньої складової струму інвертора, яка враховує поточну та задану напругу мережі та напругу сонячного модуля. Запропоновано комп'ютерну модель регулятора поперечної складової струму інвертора, яка враховує задане значення активної потужності з вузла мережі та задане значення поперечної складової струму, яка необхідна для роботи інвертора в області точки відбору максимальної потужності.

Ключові слова: комп'ютерна модель, багаторівневий інвертор напруги, керування, сонячний модуль.

V.V. GRABKO, S.M. LEVITSKIY, V.S. BOMBYK
Vinnitsya National Technical University, Ukraine

COMPUTER MODEL OF CONTROL SYSTEM OF GRID MULTILEVEL VOLTAGE INVERTER

Abstract - Have been developed computer model, which consist synthesized control law for network multilevel inverter of solar module that allows you to hold the solar module operation in terms of selection of the maximum power, which increases productivity. Proposed computer model of the longitudinal component of the current controller of the inverter, which considers current and desired grid voltage and voltage of the solar modules. Proposed computer model of the transverse component of the current controller of the inverter, which allows for a given value of active power and grid node set to transverse component of the current, which is necessary for the inverter selection in terms of maximum power.

Keywords: computer model, multilevel voltage inverter, control, solar module.

Вступ

Останнім часом відновлювальні джерела електроенергії набувають все більшого використання в повсякденному житті, зокрема набувають популярність сонячні електростанції. Як наслідок зросло виробництво тонкопліткових сонячних модулів, фільтрів, інверторів та іншого сукупного обладнання [1]. Для формування вихідної змінної напруги в сонячних модулях як локальних, так і мережесим, як правило використовуються однорівневі інвертори напруги. Перевагами однорівневих інверторів є низька вартість, висока ефективність, стабільна робота, висока надійність та простота конструкції. З іншої сторони, багаторівневі інвертори напруги мають ряд переваг над однорівневими, зокрема: покращена форма вихідної напруги, покращена електромагнітна сумісність та менші втрати в силовій частині [2]. Але разом з тим також є деякі недоліки таких інверторів, а саме збільшення кількості силових ключів і як наслідок ускладнення реалізації системи керування комутацією, а при використанні їх в межах сонячних електростанцій вимагає ще й додаткової адаптації до вимог існуючої електроенергетичної системи.

В роботах [3, 4] розглядаються моделі багаторівневих інверторів напруги при роботі з електроприводом в двигунному режимі роботи, але в них відсутній аналіз паралельної роботи інверторів з мережею. Тому необхідно синтезувати систему керування багаторівневим інвертором, яка орієнтована на застосування в сонячних електростанціях.

Багаторівневі інвертори напруги при роботі в сонячних електростанціях мають два основних завдання: по-перше – формування синусоїдального струму та напруги на своєму виході для віддачі в мережу, по-друге – для зменшення рівня гармонік [5]. Метою роботи є комп'ютерне моделювання синтезованої системи керування мережесим багаторівневим інвертором напруги при роботі в складі сонячної електростанції для встановлення показників якості керування інвертором, допустимих режимів роботи, обчислення параметрів фільтра електромагнітної сумісності.

Результати дослідження

В системах векторного керування інверторами використовується приведення трифазної системи струмів інвертора до ортогональної d-q-системи координат. При цьому вихідна напруга на виході інвертора відповідно встановлюється пропорційною до поздовжньої складової струму I_d , а вихідна потужність забезпечується відповідним значенням поперечної складової I_q . При узгодженні роботи багаторівневого інвертора з мережею для відслідковування точки квазіекстремуму вольт-амперної характеристики сонячного модуля поздовжня та поперечна складові струму багаторівневого інвертора будуть забезпечувати напругу та потужність, яка зі сторони входу інвертора зніматиметься з сонячного модуля, а зі сторони виходу буде віддаватись в мережу. В роботі [6] зазначено, що гармоніки нижчого порядку сильно впливають на роботу інвертора тому є сенс встановити L-фільтр між виходом інвертора напруги та мережею. Враховуючи вище описане та структуру системи керування, яка представлена в роботі [7], структура внутрішнього контуру системи керування багаторівневим інвертором та його силова частина матиме вигляд, наведений на рис. 1 (на прикладі трирівневого інвертора).

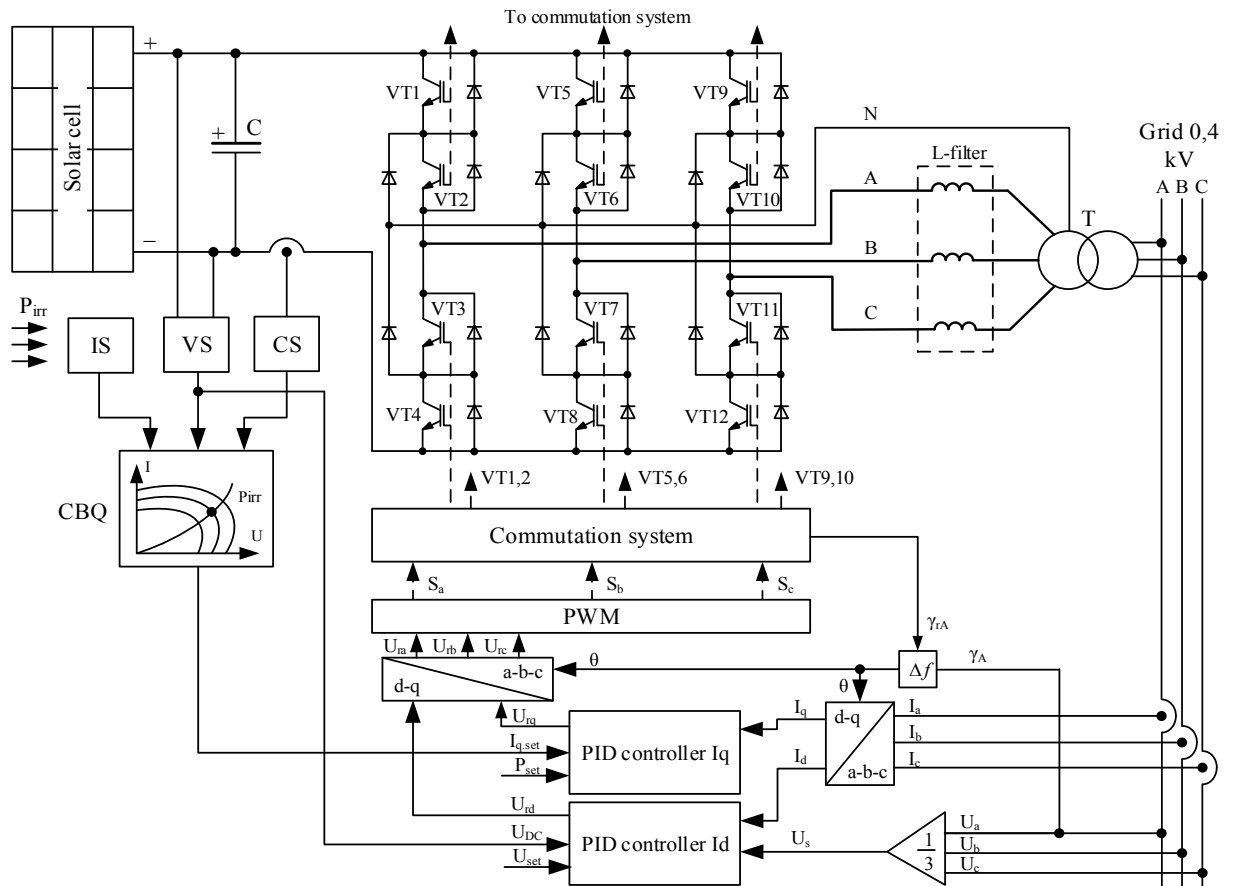


Рис. 1. Функціональна схема тривірневого мережевого інвертора з внутрішніми контурами регулювання струмів I_d та I_q

Блок обчислення квазіекстремуму (CBQ) обчислює координати області точки відбору максимальної потужності та формує сигнал завдання за струмом $I_{q,set}$ для регулятора поперечної складової I_q струму інвертора. Датчик вихідної напруги сонячного модуля формує сигнал завдання за напругою UDC для регулятора поздовжньої складової I_d струму інвертора. Зворотні зв'язки вказаних регуляторів реалізуються шляхом переводу трифазної системи струмів I_a , I_b та I_c до ортогональної I_d та I_q . Таке перетворення здійснюється відповідно кута електромагнітного навантаження інвертора θ .

Кут електромагнітного навантаження інвертора θ обчислюється системою в часовому інтервалі як різниця частот напруги мережі та інвертора відповідно

$$\theta = \int_0^{\pi} \Delta f dt. \tag{1}$$

Різниця частот визначається в часовому інтервалі на відповідному проміжку як час від моменту видачі команди системою комутації на вмикання ключа VT1 до моменту переходження через 0 кривої напруги мережі (по фазі A) в додатному напрямку (сигнал γ).

Блок перетворення трифазної системи струмів "a-b-c" до ортогональної "d-q", описується системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_d = \frac{2}{3} \left(\begin{array}{l} i_a \cdot \cos \theta + \\ + i_b \cdot \cos \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + \\ + i_c \cdot \cos \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{array} \right) \\ I_q = \frac{2}{3} \left(\begin{array}{l} i_a \cdot \sin \theta + \\ + i_b \cdot \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) + \\ + i_c \cdot \sin \left(\theta + \frac{2\pi}{3} \right) \end{array} \right) \end{array} \right. \tag{2}$$

Блок зворотного перетворення ортогональної системи обчислених оптимальних значень струмів I_{rd} та I_{rq} до трифазної системи напруг керування плечами моста інвертора U_{ra} - U_{rb} - U_{rc} працює відповідно до системи

$$\begin{cases} U_{ra} = I_{rd} \cdot \sin \theta + I_{rq} \cdot \cos \theta, \\ U_{rb} = \frac{1}{2} \cdot \begin{pmatrix} (\sqrt{3} \cdot \sin \theta - \cos \theta) I_{rq} - \\ -(\sin \theta + \sqrt{3} \cdot \cos \theta) I_{rd} \end{pmatrix}, \\ U_{rc} = -U_{ra} - U_{rb}. \end{cases} \quad (3)$$

Для забезпечення режиму утримання сонячного модуля в точці максимальної потужності автоматичні регулятори напруги (повздовжньої складової струму інвертора I_d) та потужності (поперечної складової струму інвертора I_q) будуть функціонувати відповідно до ПІД-закону регулювання та описуються системою рівнянь [8]:

$$\begin{cases} I_{set_q} = k_p \cdot k_{g_irr} \cdot P_{irr} + k_p \cdot P_{set} + \\ + k_u \cdot U_{DC} - k_{sl} \cdot I_{DC}, \\ U_{rq} = k_{pq} \cdot \left(k_{g_rq} \cdot (I_{set_q} - I_q) + \frac{1}{T_{iq}} \cdot \int_0^t (I_{set_q} - I_q) dt + \right. \\ \left. + T_{dq} \cdot \frac{d(I_{set_q} - I_q)}{dt} \right), \\ I_{set_d} = k_{b_c} \cdot \begin{pmatrix} U_{set} + U_{DC} \cdot k_{g_DC} - \\ -U_s \cdot k_{g_s} \end{pmatrix}, \\ U_{rd} = k_{pd} \cdot \left(k_{g_rd} \cdot (I_{set_d} - I_d) + \frac{1}{T_{id}} \cdot \int_0^t (I_{set_d} - I_d) dt + \right. \\ \left. + T_{dd} \cdot \frac{d(I_{set_d} - I_d)}{dt} \right), \end{cases} \quad (4)$$

де k_{pd} та k_{pq} – коефіцієнти підсилення регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора відповідно; T_{id} та T_{iq} – сталі часу інтегрування регуляторів; T_{dd} – стала часу диференціювання каналу регулювання I_d ; U_{rd} та U_{rq} – вихідні сигнали регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора; k_p – коефіцієнт з розмірністю провідності для приведення потужності до відповідного значення струму; k_{g_irr} – ваговий коефіцієнт підсилення значення потужності, що поступає на датчик освітлення; P_{set} – задане значення потужності сонячного модуля; k_u – коефіцієнт з розмірністю провідності для приведення напруги в каналі задання регулятора до відповідного значення струму на вході вимірювального органу регулятора; U_{DC} – напруга на виході датчика напруги сонячного модуля; k_{sl} – коефіцієнт нахилу регульовальної характеристики; I_{DC} – значення струму яке поступає на СВЧ з виходу датчика струму; k_{g_rq} – коефіцієнт підсилення П-складової вихідної напруги U_{rq} ; k_{g_i} – коефіцієнт приведення сигналу напруги до струму; U_{set} – задане значення напруги, яке повинен підтримувати сонячний модуль; U_{DC} – значення напруги на виході датчика напруги; k_{g_DC} – коефіцієнт підсилення напруги з виходу датчика напруги; U_s – середнє значення напруги мережі; k_{g_s} – коефіцієнт підсилення значення напруги мережі; k_{s_rd} – коефіцієнт підсилення П-складової напруги U_{rd} .

Розглянутий закон керування потребує уточнення коефіцієнтів налаштування, що відповідатимуть критеріям стійкості системи керування, визначення області стійкості роботи системи, встановлення динамічних характеристик для можливості їх аналізу та оптимізації в подальшому.

Здійснимо дослідження моделей регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора та перевіримо на стійкість. Також з метою встановлення оптимальних параметрів складових струму інвертора складемо комп'ютерну модель (рис.2), яка побудована у відповідності до синтезованого закону (4).

В даній моделі: U_{zad} – задане значення напруги мережі; P_{osv} – значення потужності, яка сприймається від освітлення; P_{zad} – задане значення потужності сонячного модуля; *Solar battery* – модель сонячної батареї; *PID d* – ПІД-регулятор повздовжньої складової струму інвертора; *PID q* – ПІД-регулятор поперечної складової струму інвертора; *load* – заданий графік навантаження; *Power grid* – модель мережі.

Результати моделювання для ПІД регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора представлені на рис.3.

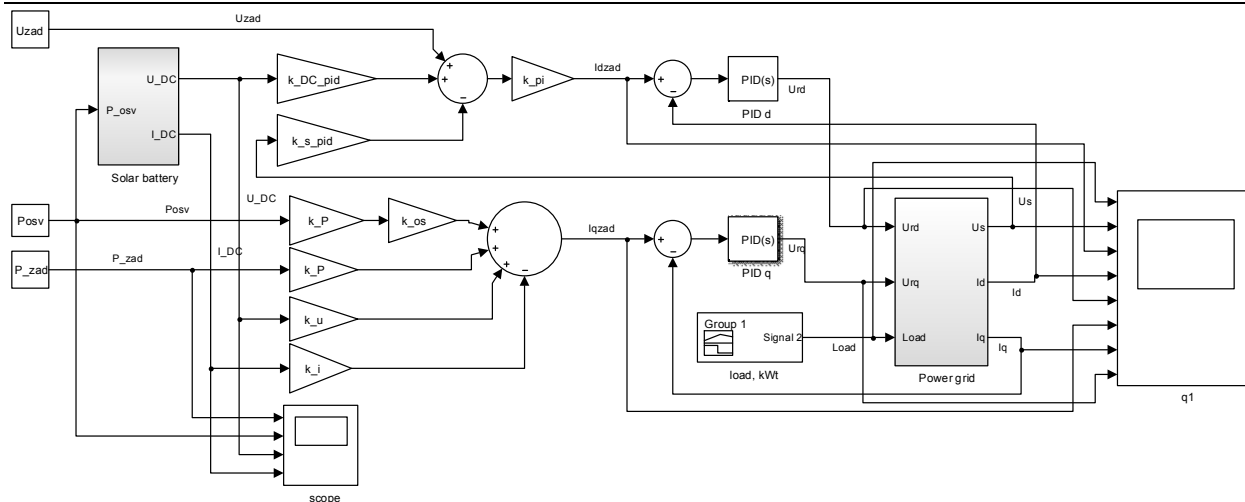


Рис.2. Комп'ютерна модель для перевірки адекватності роботи регуляторів d та q складових струму інвертора

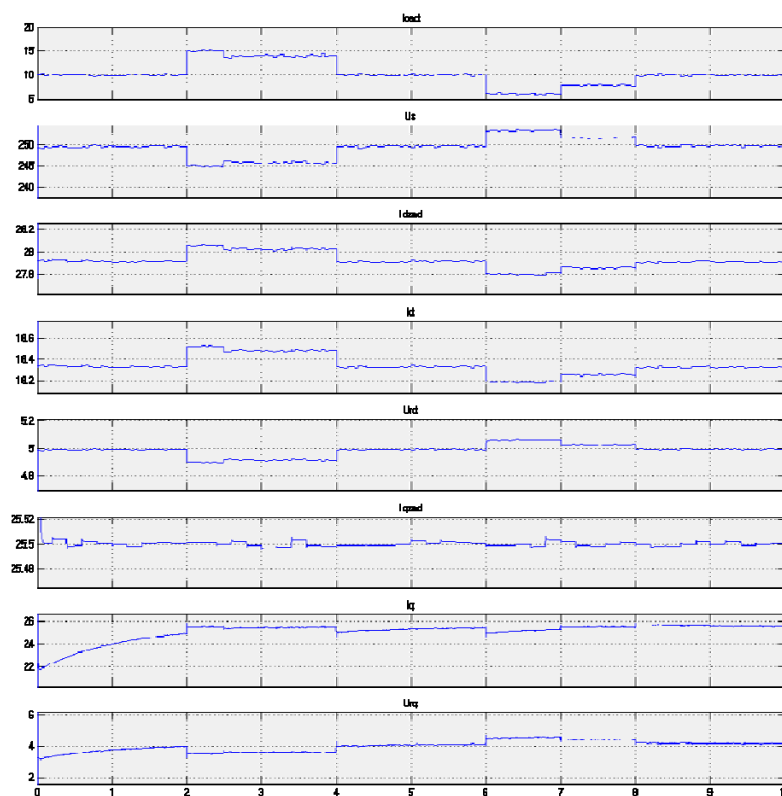


Рис. 3. Результати моделювання для ПІД регуляторів повздовжньої та поперечної складових струму інвертора

Задане та фактичне значення рівня освітленості, вихідний струм та напруга сонячної батареї показані на рис.4.

Комп'ютерна модель, яка відповідає схемотехнічній елементній базі багаторівневого інвертора напруги і працює у відповідності до закону (4) наведена на рис. 5. До її складу входять функціональні блоки: сонячний модуль (solar module), трирівневий інвертор напруги (three-level voltage inverter), трансформатор (transformer), фільтр (L-filter), навантаження (load), мережа (grid), система комутації (commutation system), регулятор повздовжньої складової струму інвертора Id (controller Id), регулятор поперечної складової струму інвертора Iq (controller Iq).

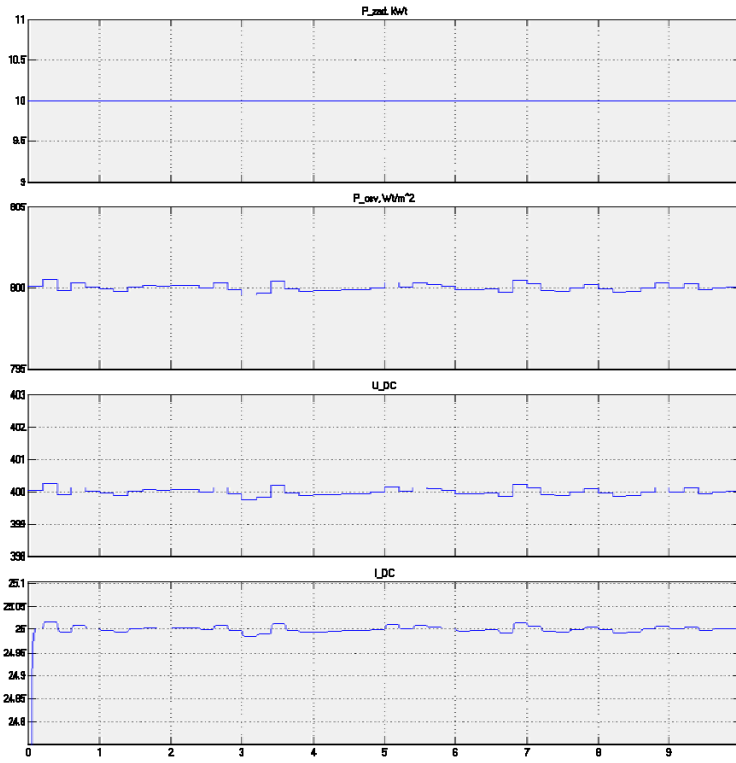


Рис.4. Задане та фактичне значення рівня освітленості, вихідний струм та напруга сонячної батареї

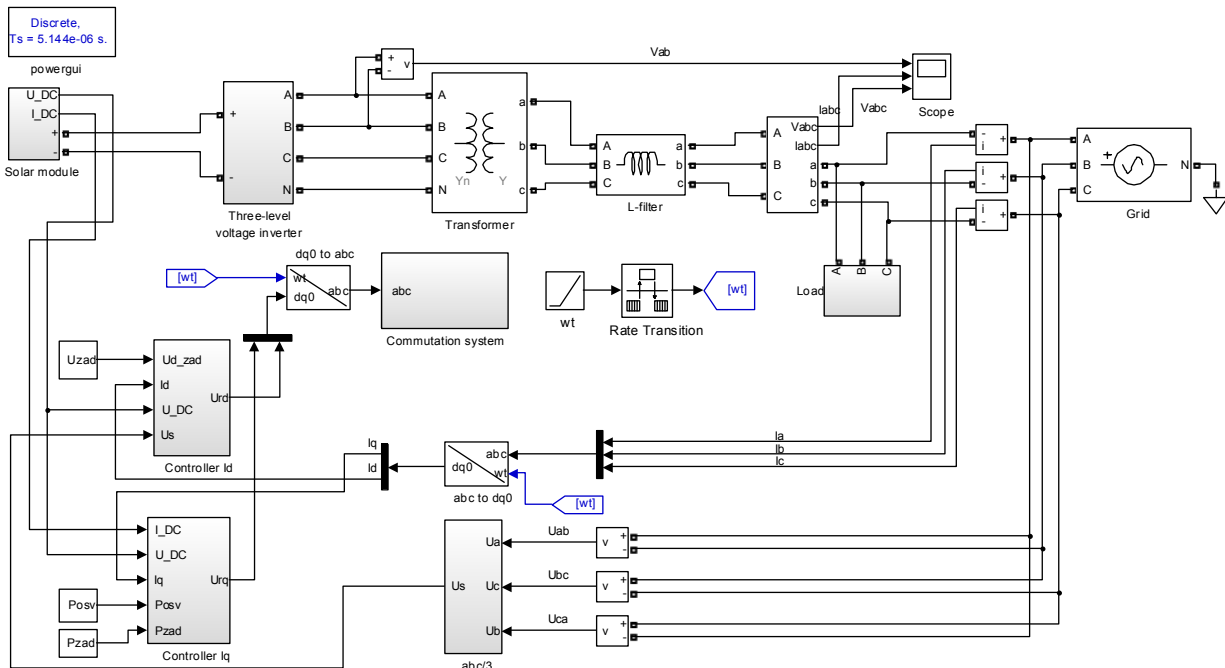


Рис.5. Комп'ютерна модель, яка відповідає схематичній елементній базі багаторівневого інвертора напруги

Провівши моделювання системи керування багаторівневим мережевим інвертором напруги при роботі з сонячним модулем та мережею ми отримали графіки перехідних процесів вихідної напруги мережевого багаторівневого інвертора напруги, графіки перехідних процесів струму та напруги на виході трансформатора, активної та реактивної потужностей для різних режимів роботи: при різних рівнях освітленості (рис. 6), при різних налаштуваннях регуляторів (рис. 7), без врахування (та з врахуванням) L-фільтра в системі (рис. 8).

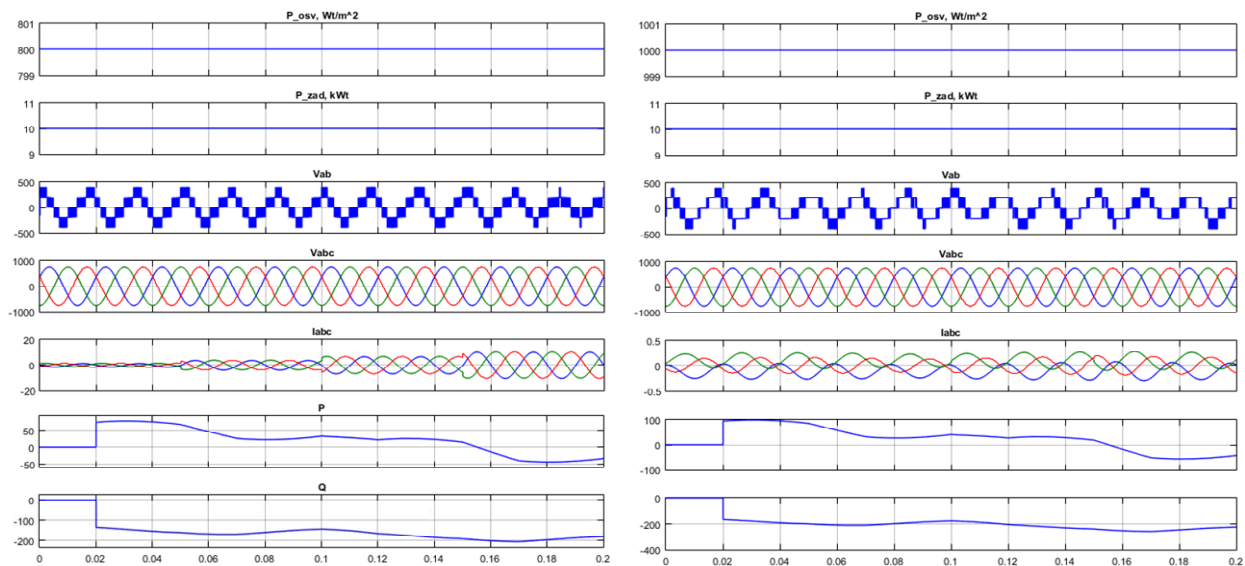


Рис. 6. Графіки перехідних процесів системи керування багаторівневим мережним інвертором напруги при різних рівнях освітленості

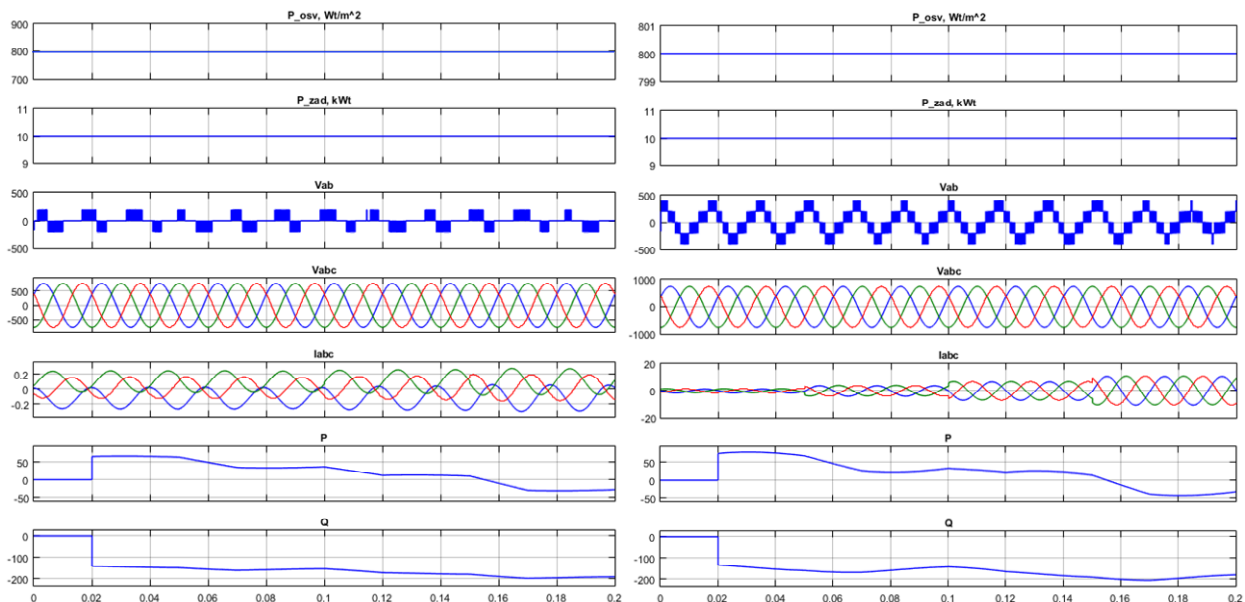
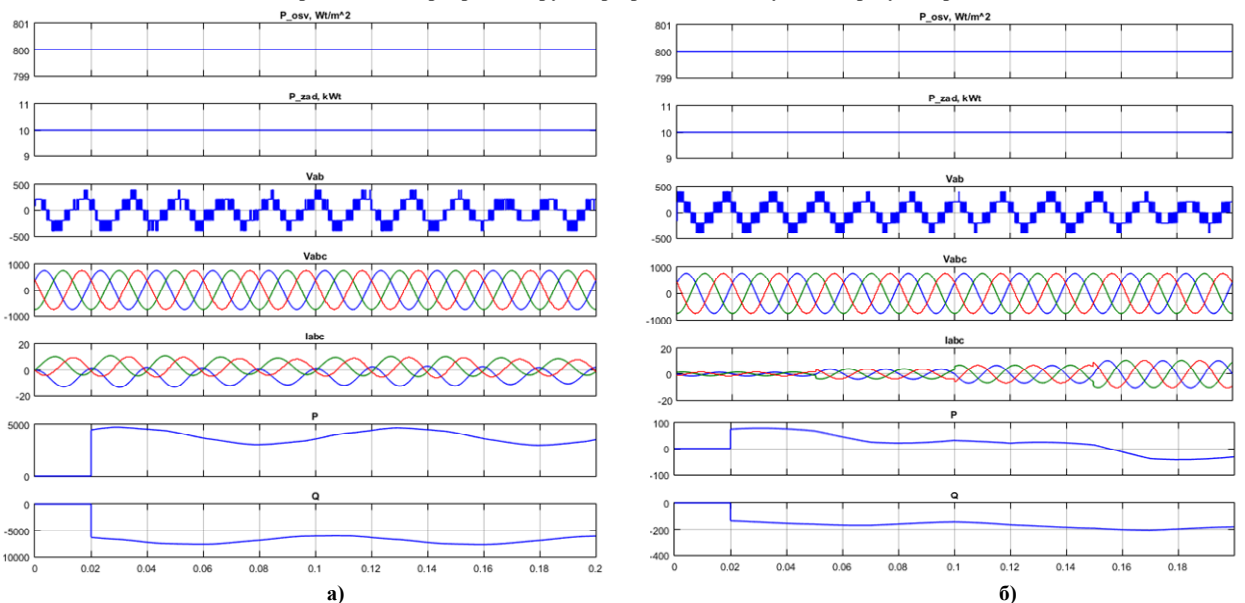


Рис. 7 Графіки перехідних процесів системи керування багаторівневим мережним інвертором напруги при різних налаштуваннях регуляторів



а)

б)

Рис.8 Графіки перехідних процесів системи керування багаторівневим мережним інвертором напруги з некомпенсованим фільтром (а) та фільтром з автоматичною компенсацією (б)

Під час проведення моделювання, були визначені оптимальні налаштування регуляторів системи (рис. 9), значення яких наведені в табл.1.

Таблиця 1

Оптимальні налаштування регуляторів системи

Ваговий коефіцієнт	k_{g_DC}	k_{g_s}	k_{g_i}	k_P	k_u	k_{g_irr}	k_{sl}
Значення	2	1	0.03	2	0.01	0.1	0.1

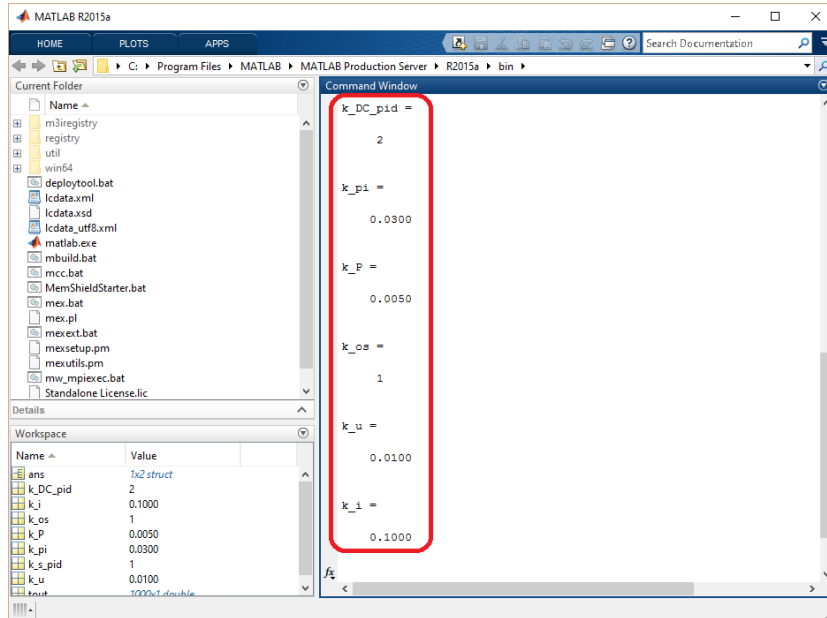


Рис. 9. Оптимальні налаштування регуляторів

Висновки

Розроблено комп’ютерну модель системи керування багаторівневим мережевим інвертором сонячної електростанції, яка вирішує задачі утримання режиму роботи сонячного модуля в точці відбору максимальної потужності, що дозволяє збільшити продуктивність сонячного модуля, привести у відповідність баланс згенерованої сонячним модулем та спожитої електричної потужності в режимі реального часу.

Література

1. Gaëtan Masson, Sinead Orlandi, Manoël Rekinger. Global Market Outlook For Photovoltaics 2014-2018.–European Photovoltaic Industry Association. Brussels,Belgium, 2014–57p.
2. Corzine K. A. Operation and design of multilevel inverters. – University of Missouri: Rolla,2005. – 79
3. Волков А. В., Скалько Ю. С. Высоковольтный асинхронный электропривод с трехуровневым автономным инвертором напряжения // А. В. Волков, Ю. С. Скалько -- Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського. Випуск 4/2008 (51). Частина 1. – С. 14-17.
4. Жемеров Г. Г. Моделирование электропривода переменного тока с каскадным многоуровневым инвертором напряжения / Г. Г. Жемеров, Д. В. Тугай, И. Г. Титаренко // Электротехника и Электромеханика. – 2013. – № 2. – С. 40-47.
5. Aarti Gupta. Grid integrated solar photovoltaic system using multi level inverter / Aarti Gupta, Preeti Garg // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 2, Issue 8, August 2013.
6. Simeen. S. Mujawar, Prof. Mrs. G. M. Karve. Control of grid connected inverter system for sinusoidal current injection with improved performance / Novateur publications international journal of innovations in engineering research and technology [IJIERT] ISSN: 2394-3696 Volume 1, ISSUE 2 DEC-2014.
7. Левицький С.М. Система керування багаторівневим інвертором сонячної електричної станції. // ISSN 2074-272X. Електротехніка і Електромеханіка. 2015. №5
8. Левицький С.М., Бомбик В.С. Система керування мережевим багаторівневим інвертором напруги // ISSN 2072–2052. Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Випуск 1/2016 (33). С. 75.

References

1. Gaëtan Masson, Sinead Orlandi, Manoël Rekinger. Global Market Outlook For Photovoltaics 2014-2018.–European Photovoltaic Industry Association. Brussels,Belgium, 2014–57p.

2. Corzine K. A. Operation and design of multilevel inverters. – University of Missouri: Rolla, 2005. – 79
3. Volkov A.V, Skalko YU.S. (2008) Vysokovoltnyj asinhronnyj jelektroprivod s trehurovnevym avtonomnym invertorom naprjazhenija. - Visnyk KDPU imeni Mikhailo Ostrogradskogo. Vypusk 4/2008 (51). Chastyna 1. - P. 14-17
4. Zhemerov G. G. (2013) “Modelirovanie electroprivoda peremennogo toka s kaskadnym mnogourovnevym invertorom napryajeniya”, Elektrotehnika i elektromekhanika – № 2. – P. 40-47.
5. Aarti Gupta. Grid integrated solar photovoltaic system using multi level inverter / Aarti Gupta, Preeti Garg // International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Vol. 2, Issue 8, August 2013.
6. Simeen. S. Mujawar, Prof. Mrs. G. M. Karve. Control of grid connected inverter system for sinusoidal current injection with improved performance / Novateur publications international journal of innovations in engineering research and technology [IJERT] ISSN: 2394-3696 Volume 1, ISSUE 2 DEC-2014.
7. S.M. Levitsky, (2015) “The Control System for Multilevel Invertor of Solar Power Station.” // ISSN 2074-272X. Electrical engineering and Electromechanics. 2015. №5
8. S.M. Levitsky, V.S. Bombyk (2016) “Systema keruvannya bagatorivnevym invertorom naprugy” // ISSN 2072–2052. Electromechanichni i energozberigauchi systemy. Vypusk 1/2016 (33) p. 75

Рецензія/Peer review : 27.6.2016 р.

Надрукована/Printed : 7.7.2016 р.
Стаття рецензована редакційною колегією

**Рекомендовано до друку рішенням вченої ради
Хмельницького національного університету,
протокол № 11 від 29.05.2016 р.**

Підп. до друку 30.06.2016 р. Ум.друк.арк. 27,6 Обл.-вид.арк. 26,75
Формат 30x42/4, папір офсетний. Друк різнографією.
Наклад 100, зам. № 337/11

Тиражування здійснено редакційно-видавничим центром
Хмельницького національного університету
29016, м. Хмельницький, вул. Інститутська, 7/1. тел (0382) 72-83-63