

МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ РЕГУЛЯТОРІВ СТРУМУ МЕРЕЖЕВИХ ІНВЕРТОРІВ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

Вінницький національний технічний університет

Анотація

Запропоновано вдосконалену модель регулятора поздовжньої складової струму інвертора, яка враховує рівень споживання реактивної потужності з вузла мережі, поточну напругу мережі та напругу сонячного модуля і дозволяє оптимізувати роботу інвертора як зі сторони сонячного модуля, так і з боку мережі за напругою. Запропоновано вдосконалену модель регулятора поперечної складової струму інвертора, яка враховує відношення спожитої активної потужності з вузла мережі до поточної потужності сонячного модуля і дозволяє оптимізувати роботу інвертора за навантаженням та частотою.

Ключові слова: інвертор, управління, сонячний модуль.

Abstract

Improve the regulator model of longitudinal component of inverter current, which consider the consumption of reactive power from the network node, current network voltage and voltage of the solar module and inverter to optimize work with both sides of the solar module and from the network voltage. Improve the regulator model of transversal component of inverter current, which consider the ratio of active power consumption of network node to the current capacity of solar module and inverter allows to optimize the load and frequency.

Keywords: inverter, control, solar module.

Вступ

Обсяг виробництва тонкоплівкових сонячних модулів значно зріс за останні роки, що в свою чергу обумовлює зростання пропозиції на ринку електроенергії з боку сонячних електростанцій [1]. Для формування вихідної змінної напруги в якості узгоджувальних пристроїв значну популярність здобули багаторівневі мережеві інвертори напруги, що виготовляються серійно [2]. Основною перевагою багаторівневих інверторів перед традиційними однорівневими є покращена форма вихідної напруги, менші втрати в силовій частині, покращена електромагнітна сумісність [3]. Разом з тим недоліками вказаних пристроїв є збільшення кількості силових ключів та відповідного ускладнення системи управління комутацією, а при використанні їх в межах сонячних електростанцій вимагає ще й додаткової адаптації до вимог існуючої електроенергетичної системи.

Аналіз попередніх досліджень

В роботах [3, 4] розглядаються моделі перспективних багаторівневих каскадних інверторів, які застосовуються в якості перетворювальних агрегатів регульованих асинхронних електроприводів. Вказані моделі досліджені для двигунного режиму електроприводу з традиційною для багаторівневих інверторів векторною системою управління, однак в них відсутній аналіз роботи інверторів в генераторному режимі роботи електроприводу, аналіз паралельної роботи на електричну мережу, що підтверджує необхідність проведення досліджень в напрямку синтезу систем управління багаторівневими інверторами, орієнтованими на застосування в сонячних електростанціях.

Запропонований варіант системи управління інвертором в роботі [5] передбачає застосування контролера з високопродуктивним DSP ядром, який комбінує управління вузлом комутації ключів з задачею відслідковування точки максимальної потужності сонячного модуля та струму заряду акумулятора автономної СЕС, однак ефективне управління інвертором сонячної батареї в реальному часі вимагає узгодження ряду незалежних параметрів як з боку сонячного модуля так і з боку електричної мережі (напруга, частота електричної мережі, активна та реактивна потужності). Врахування останніх параметрів в контролері інвертора зручно розв'язує задачу ефективного управління енергетичною системою з точки зору концепції Smart Grid.

Мета роботи

Розробка моделей регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора сонячної електростанції, який враховує параметри сонячного модуля, мережі та дозволяє оптимізувати роботу силового модуля сонячної електростанції.

Результати дослідження

Значення напруги на виході фотогальванічних панелей постійно змінюється внаслідок таких факторів як погодні умови, час доби та температура панелей [6]. Стан конденсатора батареї сонячних елементів також змінюється в залежності від того, заряджений він чи розряджений. Важливим фактором з точки зору розробки системи управління інвертором є забезпечення роботи сонячного батареї в районі точки відбору максимальної потужності. Алгоритм пошуку такого режиму роботи повинен передбачати пошук цієї точки в широкому діапазоні напруги для того, щоб уникнути попадання на локальні максимуми, що виникають внаслідок короткочасних змін зовнішнього середовища (наприклад, попадання панелі в тінь невеликої хмари). Особливістю такого інкрементного індукційного алгоритму є те, що пристрій не працюватиме постійно з максимальною продуктивністю, а знаходиться постійно в пошуку такого стану. Зазначений алгоритм в серійних сонячних однорівневих інверторах комбінується з обчисленням похідної потужності сонячного модуля від напруги на вході інвертора, яка прирівнюється до нуля, надаючи в такий спосіб системі керування значення шуканого квазіекстремуму або екстремумів в межах визначеного робочого діапазону напруг.

В сучасних системах векторного керування інверторами, які набули застосування в частотних електроприводах, 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 . У випадку узгодження роботи багаторівневого інвертора з мережею для відслідковування точки квазіекстремуму вольт-амперної характеристики (ВАХ) сонячного модуля поздовжня та поперечна складові струму багаторівневого інвертора аналогічно забезпечуватимуть напругу та потужність, яка зі сторони входу інвертора зніматиметься з сонячного модуля, а зі сторони виходу – віддаватиметься в мережу.

Блок обчислення квазіекстремуму БОК в такій системі обчислює координати області точки відбору максимальної потужності та формує сигнали завдання за напругою U_r та за потужністю P_r для регуляторів поздовжньої I_d та відповідно поперечної складової I_q струму інвертора. Зворотні зв'язки вказаних регуляторів реалізуються шляхом переведення трифазної системи струмів I_a , I_b та I_c до ортогональної I_d та I_q . Перетворення здійснюється відповідно кута електромагнітного навантаження інвертора θ , що відповідає куту навантаження електричної машини, яка працює паралельно з мережею.

Автоматичні регулятори напруги (поздовжньої складової струму інвертора I_d) та потужності (поздовжньої складової струму інвертора I_q) функціонують відповідно до ПІ-закону регулювання.

Контролер скиду КС активується вихідним сигналом S_0 модуля ШІМ з відповідною шпаруватістю у тому випадку, коли сонячний модуль генерує надлишкову потужність, а його слід утримувати в точці відбору максимуму потужності без відхилення вхідної напруги від області допустимих значень. Надлишкова потужність скидається через шунт $R_{ш}$, або може використовуватись для підзарядки акумуляторної батареї (за наявності).

Запропонована структура системи управління сонячним інвертором вирішує локальну задачу утримання режиму роботи пари «сонячний модуль – інвертор» в точці квазіекстремуму ВАХ за умови стабілізації вихідних параметрів енергії, яка віддається в мережу – напруги та частоти. На вказані параметри впливає не лише робота сонячного модуля, але й баланс активної та реактивної потужності, яка віддається в мережу та споживається з неї. Тому охоплення запропонованої системи управління відповідними зворотніми зв'язками за відхиленням P та Q дозволить збільшити стійкість системи та покращити якість регулювання напруги та частоти електроенергії з СЕС.

Автоматичні регулятори напруги вимагають більшої швидкодії та розробляються за комбінованим принципом, основу якого складає ПД-регулятор з відповідною передавальною функцією [7]. Для системи управління сонячним інвертором можна використати подібний підхід, однак слід враховувати визначене значення оптимальної напруги інвертора U_r , що відповідає заданій

потужності освітлення в точці квазіекстремуму. Тобто на вимірювальному вході регулятора поздовжньої складової струму інвертора слід сформувати сигнал, що відповідає наступній функції:

$$U_r = \sqrt{\frac{Q_{cn}}{X_{мер}} - U_{\kappa}}, \quad (1)$$

де U_{κ} – напруга, що відповідає заданій потужності освітлення в точці квазіекстремуму. Для збільшення швидкодії в базове рівняння закону регулювання поздовжньої складової струму включено Д-складову [7].

З врахуванням зазначеного система рівнянь регуляторів матиме вигляд:

$$\left\{ \begin{aligned} I_{rd} &= k_{pd} \left(\left(k_u \cdot \left(\left(\sqrt{\frac{Q_{cn}}{X_{мер}}} - U_{\kappa} \right) - k_{cu} \cdot U_s \right) - I_d \right) + \right. \\ &+ \frac{1}{T_{id}} \int_0^t \left(k_u \cdot \left(\left(\sqrt{\frac{Q_{cn}}{X_{мер}}} - U_{\kappa} \right) - k_{cu} \cdot U_s \right) - I_d \right) dt + \\ &\left. + T_{dd} \cdot d \left(k_u \cdot \left(\left(\sqrt{\frac{Q_{cn}}{X_{мер}}} - U_{\kappa} \right) - k_{cu} \cdot U_s \right) - I_d \right) / dt \right), \\ I_{rq} &= k_{pq} \left(\left(k_{pi} \cdot \frac{P_{ocv}}{P_{cn}} - I_q \right) + \frac{1}{T_{iq}} \int_0^t \left(k_{pi} \cdot \frac{P_{ocv}}{P_{cn}} - I_q \right) dt \right), \end{aligned} \right. \quad (2)$$

де k_{pd} та k_{pq} – коефіцієнти підсилення регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора відповідно; T_{id} та T_{iq} – постійні часу інтегрування регуляторів; k_u – коефіцієнт з розмірністю провідності для приведення напруги в каналі завдання регулятора до відповідного значення струму на вході вимірювального органу регулятора; k_{cu} – коефіцієнт корекції завдання за напругою на виході інвертора (забезпечує компенсацію відхилення вихідної напруги за рахунок спаду напруги в силовому колі інвертора при зміні навантаження); U_{κ} та P_r – задані значення напруги та потужності інвертора відповідно, що визначаються, виходячи з утримання режиму сонячного модуля в області квазіекстремуму; I_{rd} та I_{rq} – вихідні сигнали регуляторів поздовжньої та поперечної складових струму інвертора, T_{dd} – стала часу диференціювання каналу регулювання I_d .

Функціональна схема вимірювальних каналів регуляторів матиме вигляд (рис. 1).

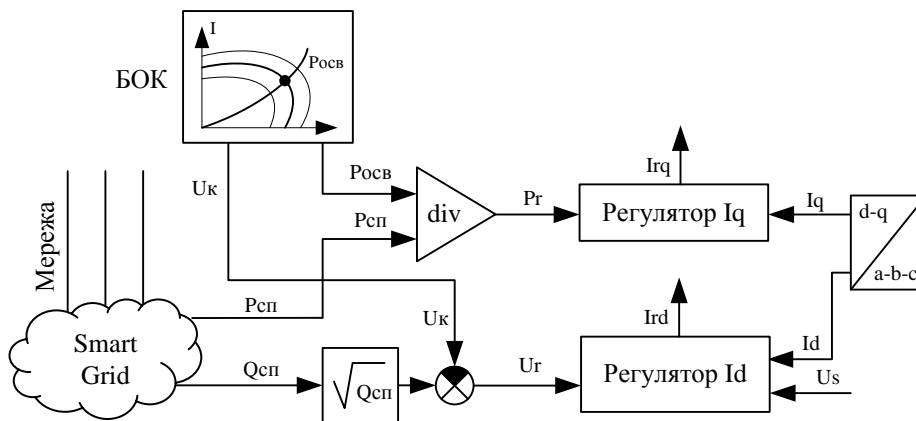


Рисунок 1 – Функціональна схема вимірювальних каналів регуляторів складових струму I_d та I_q

Як було зазначено, для реалізації системи управління інвертором, що включає в себе задачі комутації силових ключів, проведення обчислень пошуку точки квазіекстремуму, проведення прямих та зворотних.

Висновки

Запропоновано закон управління багаторівневим сонячним інвертором та розроблено структуру для його реалізації, що поєднує задачі утримання режиму роботи сонячного модуля в точці відбору максимальної потужності та стабілізації напруги і частоти на виході інвертора, що дозволяє збільшити продуктивність сонячного модуля, привести у відповідність баланс згенерованої сонячним модулем та спожитої електричної потужності в режимі реального часу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Gaëtan Masson, Sinead Orlandi, Manoël Rekinge. Global Market Outlook For Photovoltaics 2014-2018. – European Photovoltaic Industry Association. Brussels, Belgium, 2014 – 57 p. – ISBN 9789-0822-2840-3.
2. Corzine K. A. Operation and design of multilevel inverters. – University of Missouri: Rolla, 2005. – 79 p.
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. Volodymyr Grabko, Serhiy Levitskiy and other. Mathematical control system of grid-tied multilevel voltage inverter / Przegląd Elektrotechniczny, Poland, R. 92 NR 3/2017 - P.133-140. - ISSN 0033-2097 / SCOPUS
6. Лежнюк П. Д. Оцінювання впливу джерел відновлювальної енергії на забезпечення балансової надійності в електричній мережі / П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, Д. С. Собчук // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2013. – № 6. – С. 45-47.
7. Овчаренко Н. И. Автоматика энергосистем / Н. И. Овчаренко. – М.: Изд. дом МЭИ. – 2009. – 476 с.

Сергій Михайлович Левицький – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Вінницький національний технічний університет, м. Вінниця, e-mail: levitskiy@vntu.edu.ua.

Sergey M. Levitsky – Cand. Sc. (Eng), Assistan Professor of electrical power consumption and power management, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, e-mail: levitskiy@vntu.edu.ua.