

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ СОНЯЧНИХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ ВИКОРИСТАННІ МРРТ – КОНТРОЛЕРА

В. І. Кривда, В. Г. Рудницький, В. О. Суворов, В. В. Зубак

Національний університет «Одеська політехніка»

Анотація. В даній статті розглянуті методи підвищення ефективності роботи сонячних панелей. Одним з таких методів являється використання контролера Maximum Power Point Tracking (MPPT) з алгоритмом роботи Perturb and Observe (P&O).

Запропонований метод підвищення ефективності роботи сонячних панелей за допомогою МРРТ - контролера дозволяє отримати максимальну потужність, яку віддають сонячні панелі при відстеженні точки максимальної потужності. Ефективне відстеження точки максимальної потужності сонячних модулів може дати приріст у виробленні енергії приблизно 15-30%.

При аналізі роботи МРРТ - контролера було розглянуто поєднання алгоритмів P&O та Model Predictive Control (MPC) для покращення структури управління перетворювачами підсилювача, що використовуються в системах відновлюваної енергії, та визначення значень зміни потужності сонячних панелей, при змінні сонячного випромінювання.

Проведено моделювання мережі в середовищі Simulink Matlab. Модель складається з сонячних панелей JAM60S09 320 Вт, трифазного інвертора, підвищуючого трансформатору ТМН – 250/20/0,4, фільтру ємності та індуктивності.

Під час моделювання була перевірена справність роботи моделі, ефективність роботи алгоритму при безперервній зміні сонячного випромінювання протягом 20 с, також був виконаний дослід при непередбаченим включенні активного навантаження в мережу.

Результати показали, що алгоритм справний. Ефективність роботи алгоритму МРРТ - контролера при відстеженні точки максимальної потужності в умовах безперервної зміни сонячного випромінювання складає 97%. Були отримані графіки: постійного струму та напруги на виводах сонячних панелей, активної та реактивної потужності на виході з інвертора, імітації сонячного випромінювання, ефективності відстеження точки максимальної потужності та графіки трифазного струму і напруги мережі.

Ключові слова: сонячні панелі, МРРТ - контролер, алгоритм, максимальна потужність, ефективність, мережа.

Вступ

На даний момент джерела відновлюваної енергії широко поширені в усьому світі. Найбільш відомими джерелами відновлюваної енергії є сонячні електростанції, вітрогенераторні установки, гідроелектростанції. Більш привабливими джерелами відновлюваної енергії є сонячні електростанції, а саме сонячні панелі і їх допоміжні пристрої.

Сонячна енергетика продовжує займати одне з перших місць за кількістю встановлених потужностей, серед поновлюваних джерел енергії в світі, тим самим створює конкуренцію традиційним джерелам енергії. Світовими лідерами з розвитку сонячної енергетики являються такі країни як Німеччина, Китай, Японія та США. Розвиток сонячної енергетики має великий вплив на економіку країн, та їх екологічний стан. Виробницт-

во електроенергії за допомогою поновлюваних джерел призведе до значного скорочення забруднення навколишнього середовища в порівнянні з виробництвом за рахунок викопного палива.

Сонячна енергія має ряд переваг серед традиційних джерел енергії, а саме екологічність та невичерпність. Однак вона має великий недолік, такий як низька ефективність перетворення світла на електричну енергію, приблизно 15-25% [1]. Тому необхідно застосовувати різні методи щодо підвищення ефективності та вдосконалювати їх. Збільшення ефективності сонячних панелей, дасть змогу перетворювати набагато більше сонячної енергії в електричну енергію, що дозволить збільшити коефіцієнт корисної дії (ККД) сонячних панелей та зменшити вартість панелей і допоміжних пристроїв. Найбільш ефективно використання сонячних панелей можливо при передачі їх максимальної потужності. У зв'язку з цим вчені ведуть активні пошуки нових та удосконалення старих методів і пристроїв для підвищення ефективності використання сонячних

панелей, які дозволяють максимально ефективно перетворювати сонячну енергію в електричну енергію.

1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Сонячна енергетика є перспективним напрямом у розвитку альтернативної енергетики. Кількість сонячної енергії, що надходить на поверхню планети Земля за тиждень, перевищує енергію всіх світових запасів енергетичних ресурсів. Кожен день в середньому на 1 м^2 потрапляє 1 кВт сонячної енергії, тому необхідно вміти ефективно використовувати та перетворювати цю енергію шляхом застосування різних методів та технологій.

Основні методи підвищення ефективності сонячних панелей:

- 1) застосування систем концентрації сонячного випромінювання [2];
- 2) використання систем стеження за Сонцем [3];
- 3) використання МРРТ - контролерів з різними алгоритмами відстеження точки максимальної потужності (ТМП) сонячних панелей;
- 4) розробка технологій виготовлення фотоелектричних модулів спрямованих на підвищення коефіцієнта ККД і зменшення терміну їх деградації [4].

Всі ці методи знайшли своє призначення і широко застосовуються в сучасному світі. Кожен з них має ряд переваг та недоліків які приведені в [5].

Одним з найефективніших та недорогих методів є метод застосування МРРТ - контролерів, які підвищують ефективність роботи сонячних панелей, шляхом відстеження їх максимальної вихідної потужності. Відстеження ТМП проводиться шляхом періодичного сканування і аналізу вольт-амперної характеристики (ВАХ) сонячних панелей, та визначення значень струму і напруги при яких відбувається споживання максимального значення потужності.

Існує велика різноманітність алгоритмів МРРТ. Найбільш відомими алгоритмами є Р&О, Increment Conductance та Hill Claiming. Вони відрізняються між собою за складністю, наявністю сенсорів, вартістю реалізації та діапазоном вимірювань [6,7,8,9]. Ці алгоритми визначають ТМП, постійно спостерігаючи за змінами рівня потужності та напруги. Для всіх алгоритмів МРРТ особливо важлива динамічна швидкість реакції, коли в системі відбуваються певні миттєві зміни потужності. Ці зміни можуть виникати під час зміни сонячного випромінювання, тимчасовому

затемненні поверхні сонячних панелей або при незапланованому вмиканні навантажень.

Переваги та недоліки алгоритмів МРРТ приводяться в [10]. Найбільш розповсюдженим є алгоритм Р&О, так як він простий в реалізації, має невелику вартість комплектуючих, а також у нього проста схема управління [11]. Однак алгоритм Р&О має ряд недоліків, які призводять до зниження ефективності визначення ТМП. При різкій зміні освітленості або температури, робота алгоритму може привести до помилкових результатів. Наприклад при частковому затемненні сонячних панелей. Принцип роботи алгоритму Р&О полягає в тому що, МРРТ – контролер збурює робочу точку та з певною періодичністю сканує напругу і силу струму на ВАХ сонячних панелей. Виходячи з отриманих даних обчислюється значення потужності в системі. Значення потужності і струму в момент kt зберігаються. Під час наступного сканування $(k+1)t$ значення сили струму і напруги вимірюються повторно і за цими даними також обчислюється вихідна потужність. Потім знаходиться різниця між потужностями отриманими в момент часу kt і $(k+1)t$. Залежно від значення різниці $P(k) - P(k-1)$ і $V_{in}(k) - V_{in}(k-1)$ алгоритм визначає, в яку із сторін потрібно зміщувати робочу точку A або B щоб досягти ТМП, чи збільшити робочий цикл, чи зменшити рис.1 [12,13].

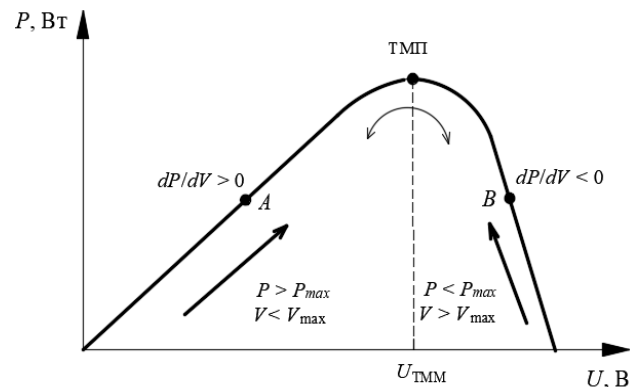


Рис.1. Характеристика потужності сонячної панелі при змінні положення робочої точки

На рис.2 можна побачити два робочих положення, це точка A та точка B . Вигин по правій стороні ВАХ сонячної панелі, де напруга залишається постійною, є нижньою межею для робочого циклу ($dP/dV < 0$) точка A , тоді як вигин лівої сторони є верхньою межею ($dP/dV > 0$) точка B . Отже, ключовою функцією алгоритму Р&О є визначення напрямку збурень та досягнення ТМП.

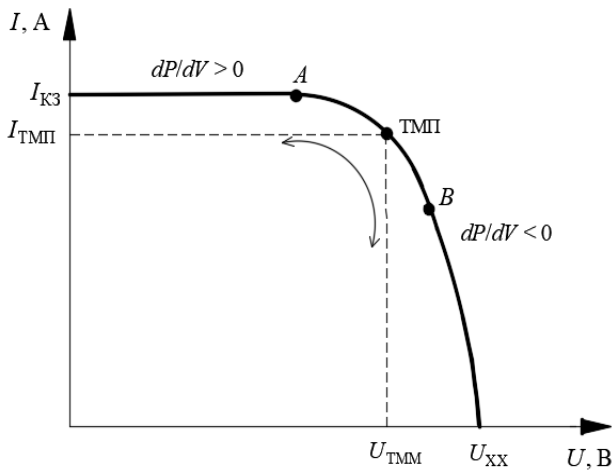


Рис.2. ВАХ сонячної панелі при збуренні робочої точки

Алгоритм роботи Р&О приводиться на рис.3.

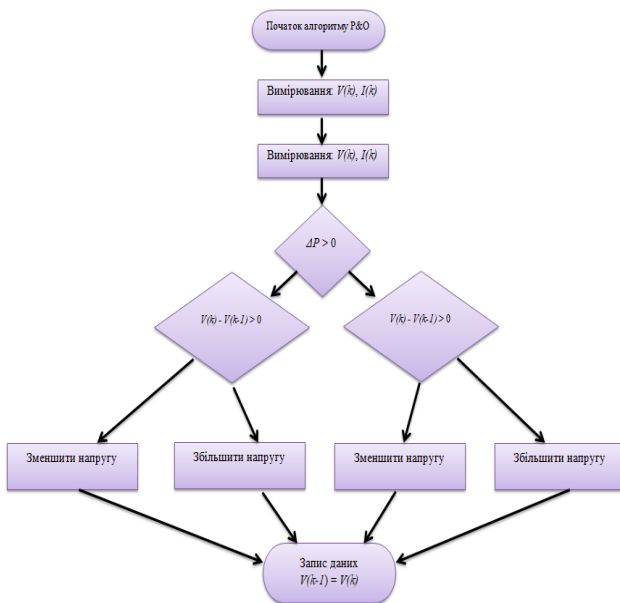


Рис.3. Алгоритм роботи Р&О

Для алгоритму Р&О характерні коливання робочої точки, навколо ТМП [14,15]. Ці коливання виникають під час досягнення стійкого стану роботи алгоритму.

Виходячи з недоліків роботи алгоритмів МРРТ пропонуються різні комбіновані алгоритми для підвищення ефективності роботи сонячних панелей і кращої продуктивності стеження за ТММ [16,17].

В роботі [18] пропонується об'єднання алгоритму Р&О і алгоритму МРС, для підвищення динамічної реакції і чутливості методу управління. Алгоритм роботи МРС почав використовуватися в електроніці ще в 1980-х роках для систем с великою потужністю, але малою частотою комутації [19]. Протягом останніх декількох десятиліть, завдяки вдосконаленню швидкодіючих та

потужних мікропроцесорів, інтерес до прогнозуючого управління в силовій електроніці значно зріс [20].

Ефективне відстеження ТММ сонячних модулів може дати приріст у виробленні енергії приблизно 15-30%, тому слід приділяти більше уваги алгоритмам МРРТ – контролерів, вдосконалювати та комбінувати їх.

2. Мета та задачі дослідження

Метою роботи є створення мережі 120 кВт з використанням комбінованого алгоритму МРРТ – контролера. Проаналізувати вплив сонячного випромінювання на зміну вихідної потужності сонячних панелей, та переконатися в ефективності роботи алгоритму МРРТ – контролера.

Для досягнення поставленої мети були поставлені наступні завдання:

- 1) вивчити алгоритми роботи МРРТ – контролерів;
- 2) побудувати модель сонячних панелей і МРРТ – контролера в середовищі Simulink / Matlab;
- 3) розрахувати і вибрати параметри елементів моделі;
- 4) виконати математичне моделювання змінюючи параметри моделі;
- 5) проаналізувати отримані дані.

3. Створення та опис моделі мережі 120 кВт з використанням комбінованого алгоритму МРРТ – контролера.

Математична модель представлена в середовищі Simulink Matlab рис. 4. Модель складається з групи сонячних панелей, які підключаються через фільтр індуктивності та ємності до трифазного інвертора, та з'єднуються з трифазною мережею через трансформатор ТМН – 250/20/0,4. Модель включає такі підсистеми як також: «Results», «MPPT Controller», «Current Invertor» [21].

Об'єктом дослідження являються 500 сонячних панелей JAM60S09-320/PR [22], які складаються з 60 кремнієвих елементів, вихідною потужністю 160 кВт. Схема з'єднання панелей: 25 модулів підключено послідовно, що складає один стринг, та 20 стрингів, які підключено паралельно. Характеристики сонячних панелей приводяться на рис. 5.

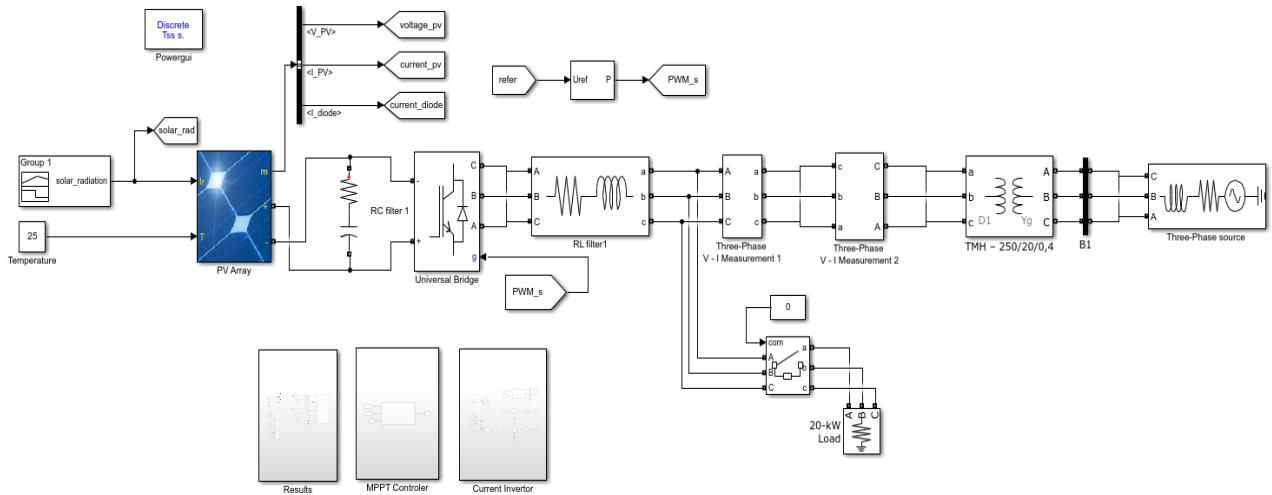
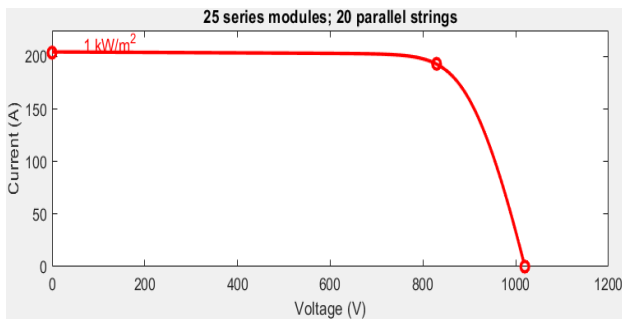
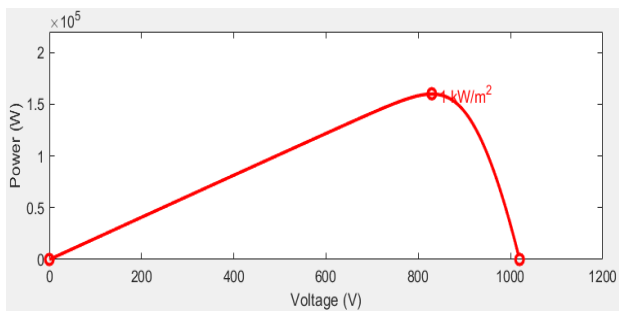


Рис. 4. Модель мережі 120кВт в середовищі Simulink Matlab



а)



б)

Рис.5. Характеристики сонячних панелей при освітленості 1000 Вт / м² і температурі 25 °С: а) ВАХ сонячних панелей; б) залежність вихідної потужності від напруги

Підсистема «MPPT - Controller» рис. 6. При створенні даного блоку використовувався алгоритм стеження ТМП на основі алгоритмів Р&О і МРС рис.7 [18]. Алгоритм Р&О використовується для визначення опорного значення струму. Це значення використовується в якості еталонного в алгоритмі МРС, який керує струмом інвертора. Алгоритм МРС виробляє відповідні комутаційні сигнали для вирівнювання струму індуктивності до еталонного значення. Таким чином, досяга-

ється комбінований алгоритм управління, що складається з МРРТ - структури, заснованої на алгоритмі МРС, для управління потоком потужності сонячних панелей. Велика частина алгоритмів управління використовує різницю між еталонним і вимірним значенням, на відміну від інших методів, алгоритм МРС використовує різницю між опорним і прогнозним значенням. Отже, МРС володіє кращими динамічними властивостями. [21,23]

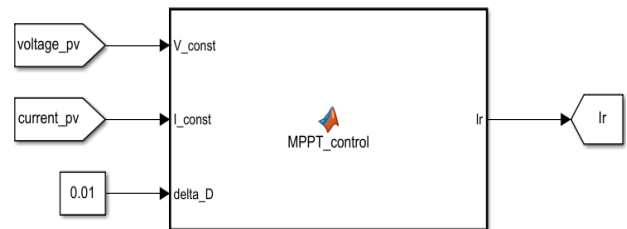


Рис. 6. Підсистема «MPPT Controller»

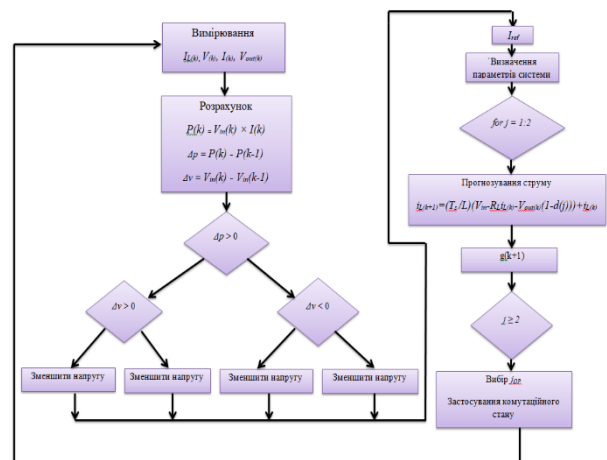


Рис.7. Алгоритм стеження ТМП на основі алгоритмів Р&О і МРС

Блок «Irradiation» використовується в якості імітації безперервної зміни сонячного випромінювання протягом 20 с. Сонячне випромінювання зображене у вигляді параболи рис. 8. Мінімальне значення сонячного випромінювання 0 Вт / м^2 , а максимальне 1000 Вт / м^2 .

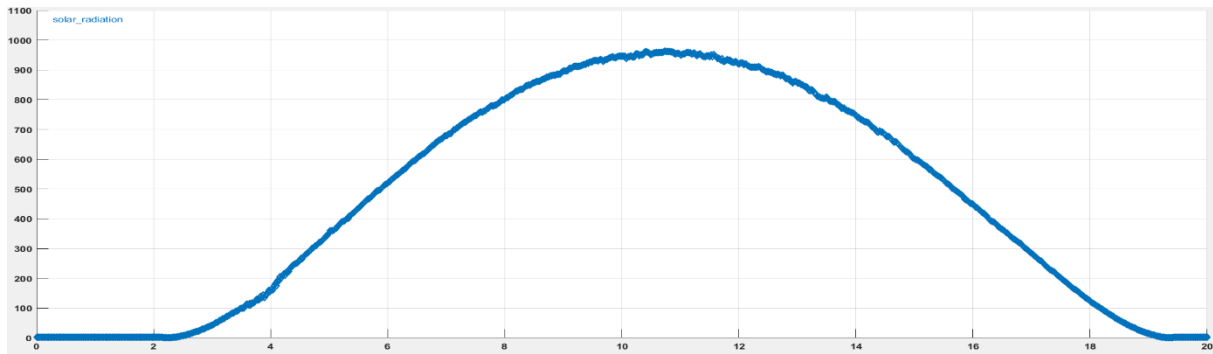


Рис. 8. Блок «Irradiation»

Підсистема «Results» (рис.9) використовується для відображення результатів моделювання.

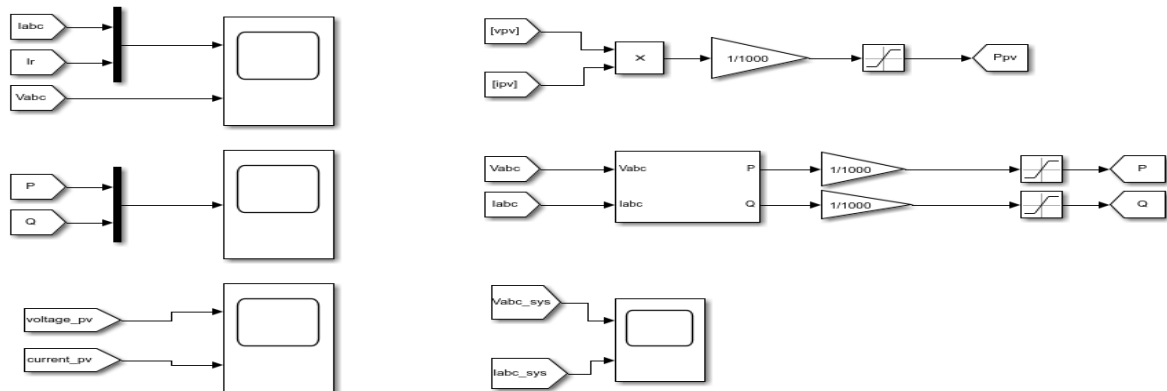


Рис. 9. Підсистема «Results»

Підсистема «Current Invertor» (рис.10) являє собою одноступеневий перетворювач потужності. Він перетворює значення трифазного струму у обертаючу систему координат $dq0$. Отримані вектори струму I_d та I_q використовуються для визначення різниці між еталонним значенням I_r та струмом інвертора I_{abc} . Далі отримані значення потрапляють в блок ПІ регулятора. Цей блок реалізує алгоритми управління ПІ безперервного та дискретного часу та проводить відстеження сигналу та виконує його інтегральне та пропорційне підсилення. Блок $dq0$ to abc виконує зворотне перетворення векторів $dq0$ в трифазний значення струму I_{abc} .

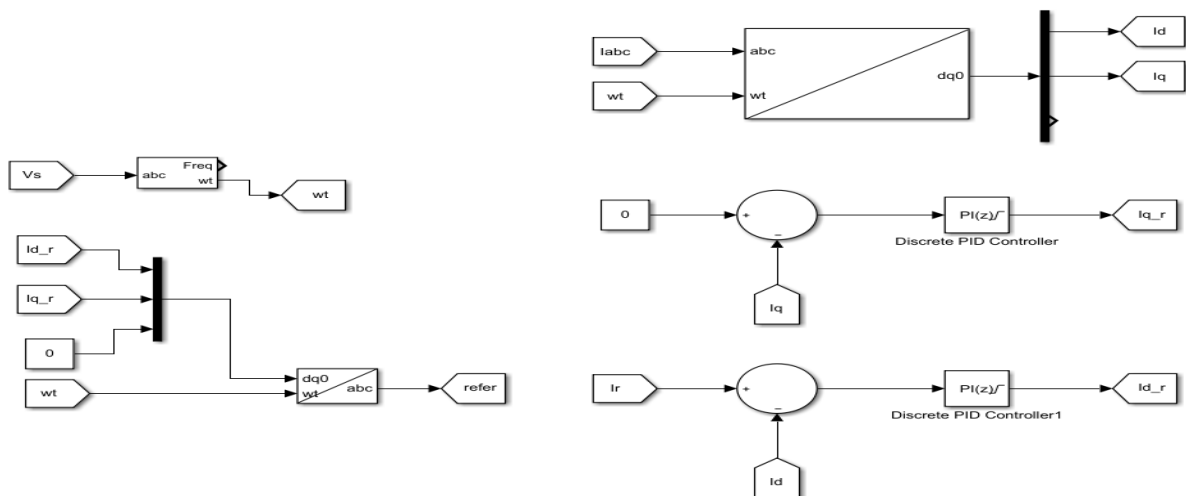


Рис. 10. Підсистема «Current Invertor»

Розрахунок параметрів фільтрів індуктивності та ємності проводиться за наступними формулами:

$$L = \frac{0,1U^2}{2\pi f P_p}, \quad (1)$$

$$C = \frac{0,05P_p}{2\pi f U^2}, \quad (2)$$

де U - трифазна напруга мережі, В;

P_p - вихідна потужність сонячних панелей, кВт.

Тестування моделі проводилося для сонячних панелей JAM60S09-320 / PR. Дані при яких виконувалося моделювання наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Параметри моделювання

Параметри	Значення
Напруга на виводах інвертора (U)	380 В
Номінальна потужність сонячних панелей (P)	180 кВт
Час вибірки (T)	10μс
Кількість панелей і тип з'єднання	500 панелі, 25 з'єднані послідовно, що складає один стринг, та 20 стрингів, які підключено паралельно.
Ємність RC фільтра (C)	50 мкс
Індуктивність RL фільтра (L)	1.2 мГн
Активний опір фільтра (R)	1 мОм
Частота мережі (f)	50 Гц
Час моделювання (t)	20 с

4. Результати моделювання мережі

В результаті моделювання були отримані наступні характеристики:

1) напруги і струму, що виробляють сонячні панелі (рис. 11);

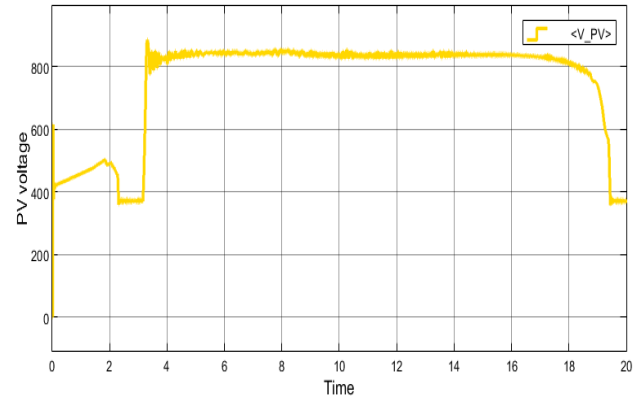
2) відстеження максимального значення трифазного струму мережі (рис. 12);

3) трифазного струму і напруги на затискачах трансформатора (рис. 13);

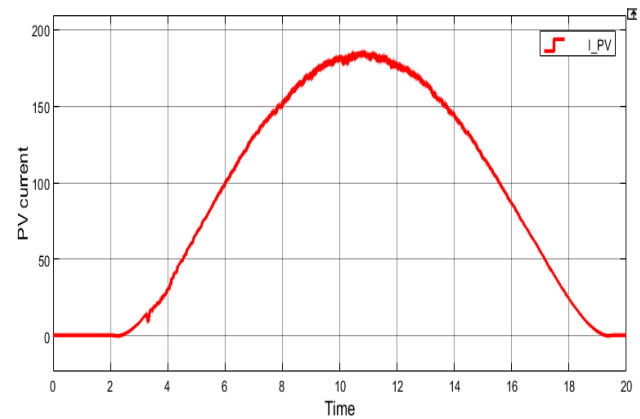
4) активної і реактивної потужності трифазної мережі (рис. 14);

5) відстеження трифазного струму при непередбаченим вмиканні активного навантаження (рис. 15);

6) ефективності роботи комбінованого алгоритму МРРТ – контролера при безперервній зміні сонячного випромінювання (рис. 16).

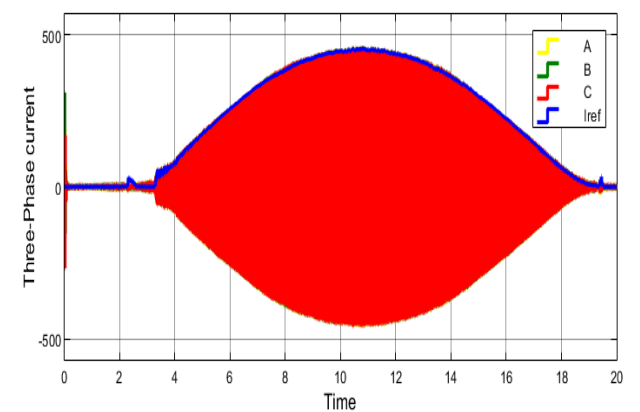


а)



б)

Рис. 11. – Отримані характеристики напруги та струму на затискачах сонячних панелей:
а) напруга; б) струм



а)

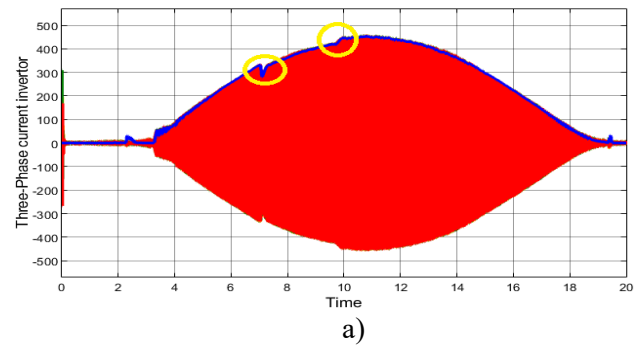
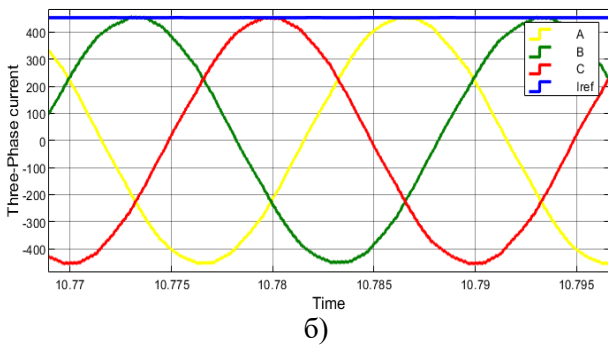


Рис. 12. – Графіки відстеження максимального трифазного струму сонячних панелей: а) на протязі 20 с; б) на 10 секунд

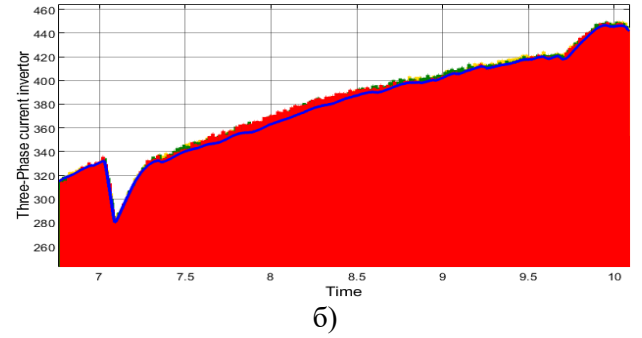
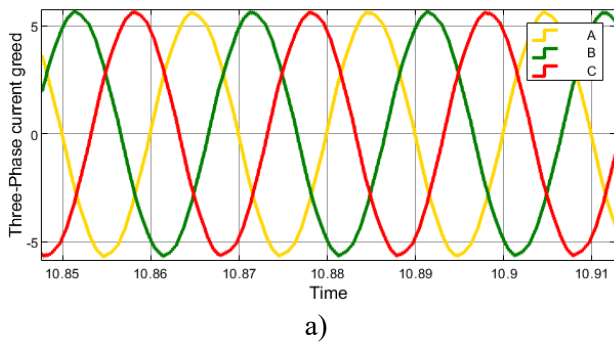


Рис. 15. – Результат відстеження трифазного струму при непередбаченим вмиканні активного навантаження: а) на протязі 20 секунд; б) у момент вмикання навантаження на 7 секунд та вимикання на 9,7 секунд

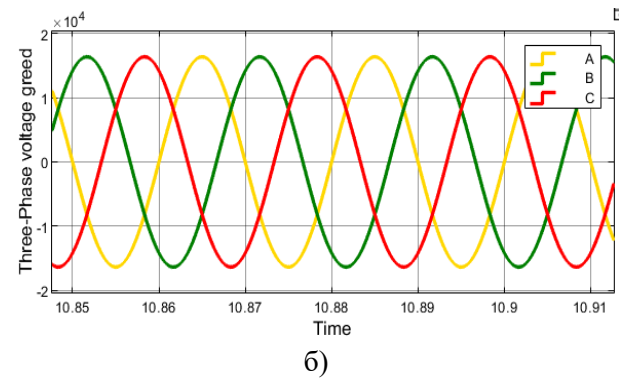


Рис. 13. – Графіки трифазного струму та напруги мережі на затискачах трансформатора: а) максимальне значення трифазного струму; б) максимальне значення трифазної напруги

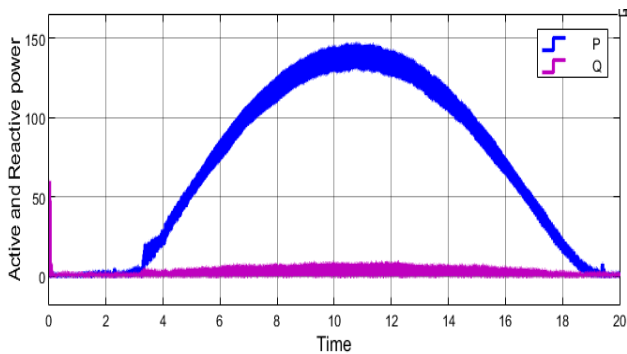


Рис. 14. – Активна і реактивна потужність мережі

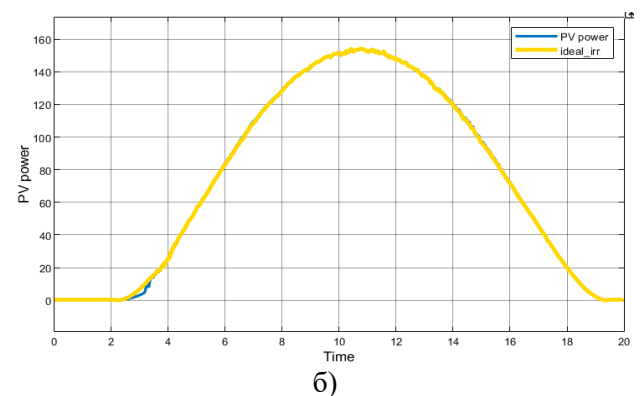
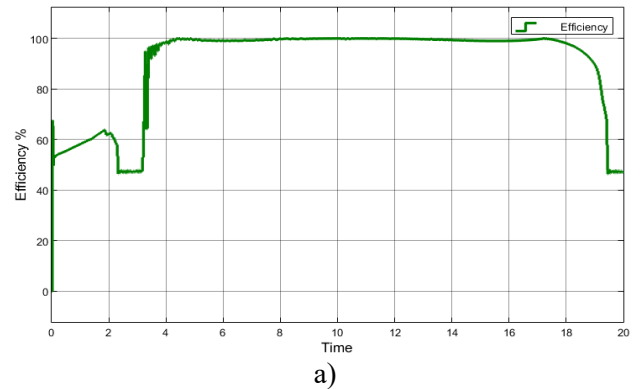


Рис. 16. – Ефективність роботи комбінованого алгоритму МРРТ – контролера: а) ефективність роботи МРРТ – контролера; б) поєднання кривої потужності інвертора при відстеження ТМІ та потужність сонячних панелей

5. Результати моделювання мережі

На рис. 11 зображені графіки постійного струму і напруги на затискачах сонячних панелей, на протязі 20 с моделювання, при безперервній зміні сонячного випромінювання. При значенні сонячного випромінювання 1000 Вт / м^2 , значення постійного струму досягає $I_{PV} = 185 \text{ А}$, а значення постійної напруги $V_{PV} = 850 \text{ В}$. З рис. 12 можна побачити, що комбінований алгоритм МРРТ - контролера працює правильно, так як трифазний струми інвертора I_{abc} обмежується опорним струмом I_r , відбувається так зване відстеження струму. Алгоритм МРРТ - контролера змінює значення опорного струму в залежності від кривої зміни сонячної радіації, при цьому вихідне значення трифазного струму також змінюється. Максимальне амплітудне значення трифазного струму на затискачах інвертора $I_{abc} = 450 \text{ А}$. На рис. 13 зображені графіки трифазного струму та напруги мережі на затискачах трансформатора. Максимальне амплітудне значення трифазного струму та напруги мережі $I_{abc_s} = 5,7 \text{ А}$ і $U_{abc_s} = 16,4 \text{ кВ}$.

На рис. 14 зображені графіки активної та реактивної потужності на затискачах інвертора. Активна потужність приймає форму параболи, як і графік сонячного випромінювання, в той час як реактивна потужність залишається близька нулю. Це свідчить про те що алгоритм справний.

На рис. 15 представлений графік відстеження трифазного струму на затискачах інвертора при непередбаченому активному навантаженні підключається до мережі на 7-ій секунді через перемикач «Three-Phase Breaker», та від'єднується від мережі на 9,7 секунді. При включенні активного трифазного навантаження спостерігається зменшення значень трифазного струму до з 330 А до 280 А. При відключенні активного трифазного навантаження, спостерігається збільшення трифазного струму від 420 А до 450 А. Алгоритм МРРТ – контролера працює правильно, так як відстежує максимальне значення трифазного струму, при включенні і відключенні додаткового активного трифазного навантаження. Виходячи з рис. 11 і рис. 14 можна побачити коливання в вершині графіків. Це пояснюється тим що, коли стійкий стан досягнуто, алгоритм коливається навколо точки максимуму і з'являються деякі шуми [24].

На рис. 16 приводяться графіки ефективності роботи комбінованого алгоритму МРРТ – контролера, і графік в якому поєднується крива потужності відстеження ТМП та потужність сонячних панелей, що віддається в мережу. Виходячи з даних графіків ефективність відстеження ТМП оцінюється як 97% .

6. Висновки

В ході створення та тестування моделі були розглянуті методи підвищення ефективності роботи сонячних панелей. Було вирішено застосувати МРРТ – контролер для підвищення ефективності роботи сонячних панелей, шляхом відстеження їх максимальної вихідної потужності. В процесі моделювання було використано комбінований алгоритм МРРТ – контролера. Була побудована модель і розраховані її параметри. Виконавши моделювання системи, були отримані результати відстеження ТМП, а також результат ефективності управління МРРТ - контролера, при безперервній зміні сонячного випромінювання, яка складає 97%. Також був проведений експеримент з непередбаченим включенням додаткового навантаження, що б переконатися в справності алгоритму роботи контролера. В процесі моделювання було помічено різке зниження значення трифазного струму при включенні додаткового активного трифазного навантаження, але при цьому МРРТ - контролер продовжував відстежувати ТМП на виході інвертора.

Список використаної літератури

1. Трещ А. М. (2013). Моделирование солнечных батарей в среде MATLAB/SIMULINK. Международная научно-техническая интернет - конференция.
2. Борщев В.Н., Листратенко А.М., Герасименко Н.В., Слипенченко Н.И., Глушко Е.С. (2014). Радиотехника, № 177, 86 – 93.
3. Chia-Yen Lee, Po-Cheng Chou, Che-Ming Chiang and Chiu-Feng Lin. (2009). Sun Tracking Systems: A Review. Sensors, № 9 (5), 3875 – 3890. <https://doi.org/10.3390/s90503875>.
4. Критская Т.В., Невмержицкий И. С (2018). Факторы, влияющие на деградацию кремниевых солнечных ячеек и модулей. Металлургия, № 2 (40), 80 – 84.
5. Галимуллина Э. Э., Абзалилова Ю. Р. (2016) Системы повышения эффективности солнечных батарей. Альманах современной науки и образования, № 12 (114), 31 – 35.
6. Imad Elzein, Петренко Ю.Н. (2017) Характеристика алгоритмов управления фотоэлектрическими станциями и их классификация. Международная научно-техническая интернет-конференция.
7. Tohid Kargar Tasooji, Asgar Mostafazadeh, Omer Usta. (2017). Model Predictive Controller As a Robust Algorithm for Maximum Power Point Tracking. 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 175 – 179.

8. UmaShankar Patel, Ms. Dhaneshwari Sahu, Deepkiran Tirkey. (2013). Maximum power point tracking using Perturb & Observe algorithm and compare with another algorithm. *International Journal of Digital Application & Contemporary research*, Volume 2, Issue 2, 2319 – 4863.
9. Sundareswaran K, Vigneshkumar V, Sankar P. (2016). "Development of an improved P&O algorithm assisted through a colony of foraging ants for MPPT in PV system" *IEEE Trans Ind Inform* 12(1), 187 – 200.
10. Ting-Chung, Yu Yu-Cheng Lin. (2014). 4-th international conference on Green Building, Materials and Civil Engineering, 7-11.
11. Hadjer Bounechba, K. Nebti, A. Bouzid, H. Benalla. (2013) Modeling and Simulation of Perturb and Observe MPPT Algorithm for PV systems. *International Conference STA 2013*.
12. Pradeep Kumar Yadav A., Thirumalial G., Haritha S. (2012). Comparison of MPPT Algorithms for DC – DC Converters Based PV Systems. *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Volume № 2, Issue № 7, 681 – 685.
13. Emad Talib Hashim, Sarah Adil Mohammed Hussien. (2018). "Synchronous Buck Converter with Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Implemented on a Low-Cost Arduino-microcontroller". *Journal of Engineering*, 16 – 3.
14. А. В. Пученкин, В. Г. Титов, И. В. Ходыкина. (2013). Анализ алгоритмов управления регулятором точки максимальной мощности для солнечных батарей. *Инженерный вестник Дона*, № 4, 1– 6.
15. Syed Ali A. Kazmi , Debraj Basu , Syed Faraz Hasan and Dong-Ryeol Shin. (2016). Power and Frequency Fluctuations of MPPT Algorithms in Variable Irradiance Environments. *MATECWeb of Conferences* 7. DOI: 10.1051 /matec-conf/20167012003.
16. Hadi M. El-Helw, Mostafa I. Marei. (2017). A Hybrid Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Arrays, *IEEE Access* 5: 11900 – 11908. DOI: 10.1109/ AC-CESS.2017.2717540.
17. Obaidullah Lodin, Inderpreet Kaur, Harpreet Kaur. (2019). Predictive-P&O Mpppt Algorithm for Fast and Reliable Tracking of Maximum Power Point in Solar Energy Systems. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. ISSN: 2277 – 3878, 264 – 268.
18. Erdal Irmak and Naki Güler. (2019). A model predictive control-based hybrid MPPT method for boost converters. *International Journal of Electronics*, in press. DOI:10.1080/00207217.2019.1582715.
19. J. Holtz and S. Stadtfeld. (1983). "A predictive controller for the stator current vector of AC machines fed from a switched voltage source". in *International Power Electronics Conference (IPEC)*, 1665 – 1675.
20. IMAD ELZEIN, YURY N. PETRENKO. (2015). «MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR PHOTOVOLTAIC STATION MAXIMUM POWER POINT TRACKING SYSTEM». *СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ И ПРИКЛАДНАЯ ИНФОРМАТИКА*, 17 – 25.
21. Erdal Irmak and Naki Güler. (2019). MPPT based model predictive control of grid connected inverter for PV system. *International Journal of Electronics*. DOI: 10.1109/ICRERA47325.2019.8997105.
22. Энергетическая альтернатива. <https://www.jasolar.com/uploadfile/2019/0812/20190812040710417.pdf>.
23. Yong YANG, Huiqing. (2019). "WEN Adaptive perturb and observe maximum power point tracking with current predictive and decoupled power control for grid-connected photovoltaic inverters". *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* volume 7, 422 – 432.
24. Md. Rokonzaman, Mahmuda Khatun Mishu, Md Hossam-E-Haider and Md. Shamimul Islam. (2017). Design of a MPPT solar charge controller in Matlab-Simulink gui environment. *International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science (ICMEAS)*.

References

1. Tresh AM (2013). Simulation of solar panels in the MATLAB / SIMULINK environment. *International scientific and technical Internet conference*.
2. Borshchev VN, Listratenko AM, Gerasimenko NV, Slipchenko NI, Glushko ES (2014). *Radio Engineering*, № 177, 86 - 93.
3. Chia-Yen Lee, Po-Cheng Chou, Che-Ming Chiang and Chiu-Feng Lin. (2009). Sun Tracking Systems: A Review. *Sensors*, № 9 (5), 3875 - 3890. <https://doi.org/10.3390/s90503875>.
4. Kritskaya TV, Nevmerzhitsky IS (2018). Factors affecting the degradation of silicon solar cells and modules. *Metallurgy*, № 2 (40), 80 - 84.
5. Galimullina E. E., Abzalilova Yu. R. (2016) Systems for increasing the efficiency of solar panels. *Almanac of Modern Science and Education*, № 12 (114), 31 - 35.
6. Imad Elzein, Petrenko Yu.N. (2017) Characteristics of photovoltaic control algorithms and their classification. *International scientific and technical Internet conference*.
7. Tohid Kargar Tasooji, Asgar Mostafazadeh, Omer Usta. (2017). Model Predictive Controller As

a Robust Algorithm for Maximum Power Point Tracking. 10th International Conference on Electrical and Electronics Engineering (ELECO), 175 – 179.

8. UmaShankar Patel, Ms. Dhaneshwari Sahu, Deepkiran Tirkey. (2013). Maximum power point tracking using Perturb & Observe algorithm and compare with another algorithm. International Journal of Digital Application & Contemporary research, Volume 2, Issue 2, 2319 – 4863.

9. Sundareswaran K, Vigneshkumar V, Sankar P. (2016). "Development of an improved P&O algorithm assisted through a colony of foraging ants for MPPT in PV system" IEEE Trans Ind Inform 12(1), 187 – 200.

10. Ting-Chung, Yu Yu-Cheng Lin. (2014). 4-th international conference on Green Building, Materials and Civil Engineering, 7-11.

11. Hadjer Bounechba, K. Nebti, A. Bouzid, H. Benalla. (2013) Modeling and Simulation of Perturb and Observe MPPT Algorithm for PV systems. International Conference STA 2013.

12. Pradeep Kumar Yadav A., Thirumaliah G., Haritha S. (2012). Comparison of MPPT Algorithms for DC – DC Converters Based PV Systems. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, Volume № 2, Issue № 7, 681 – 685.

13. Emad Talib Hashim, Sarah Adil Mohammed Hussien. (2018). "Synchronous Buck Converter with Perturb and Observe Maximum Power Point Tracking Implemented on a Low-Cost Arduino-microcontroller". Journal of Engineering, 16 – 3.

14. AV Puchenkin, VG Titov, IV Khodykina. (2013). Analysis of control algorithms for the maximum power point controller for solar panels. Don Engineering Bulletin, № 4, 1– 6.

15. Syed Ali A. Kazmi , Debraj Basu , Syed Faraz Hasan and Dong-Ryeol Shin. (2016). Power and Frequency Fluctuations of MPPT Algorithms in Variable Irradiance Environments. MATECWeb of Conferences 7. DOI: 10.1051 /matec-conf/20167012003.

16. Hadi M. El-Helw, Mostafa I. Marei. (2017). A Hybrid Maximum Power Point Tracking Technique for Partially Shaded Photovoltaic Arrays, IEEE Access 5: 11900 – 11908. DOI: 10.1109/ ACCESS.2017.2717540.

17. Obaidullah Lodin, Inderpreet Kaur, Harpreet Kaur. (2019). Predictive-P&O Mppt Algorithm for Fast and Reliable Tracking of Maximum Power Point in Solar Energy Systems. International Journal of Recent Technology and Engineering. ISSN: 2277 – 3878, 264 – 268.

18. Erdal Irmak and Naki Güler. (2019). A model predictive control-based hybrid MPPT meth-

od for boost converters. International Journal of Electronics, in press. DOI:10.1080/00207217.2019.1582715.

19. J. Holtz and S. Stadfeld. (1983). "A predictive controller for the stator current vector of AC machines fed from a switched voltage source". in International Power Electronics Conference (IPEC), 1665 – 1675.

20. IMAD ELZEIN, YURY N. PETRENKO. (2015). "MODEL PREDICTIVE CONTROL FOR PHOTOVOLTAIC STATION MAXIMUM POWER POINT TRACKING SYSTEM". SYSTEM ANALYSIS AND APPLIED INFORMATICS, 17 - 25.

21. Erdal Irmak and Naki Güler. (2019). MPPT based model predictive control of grid connected inverter for PV system. International Journal of Electronics. DOI:

10.1109/ICRERA47325.2019.8997105.

22. Energy Alternative.
<https://www.jasolar.com/uploadfile/2019/0812/20190812040710417.pdf>.

23. Yong YANG, Huiqing. (2019). "WEN Adaptive perturb and observe maximum power point tracking with current predictive and decoupled power control for grid-connected photovoltaic inverters". Journal of Modern Power Systems and Clean Energy volume 7, 422 – 432.

24. Md. Rokonzaman, Mahmuda Khatun Mishu, Md Hossam-E-Haider and Md. Shamimul Islam. (2017). Design of a MPPT solar charge controller in Matlab-Simulink gui environment. International Conference on Mechanical Engineering and Applied Science (ICMEAS).

IMPROVING THE EFFICIENCY OF SOLAR PANELS WHEN USING MPPT – CONTROLLER

V. Kryvda, V. Rudnytsky, V. Suvorov, V. Zubak
Odessa Polytechnic National University

Abstract. This article discusses methods to improve the efficiency of solar panels. One such method is to use a Maximum Power Point Tracking (MPPT) controller with a Perturb and Observe (P&O) algorithm.

The proposed method of increasing the efficiency of solar panels using MPPT - controller allows you to get the maximum power given by solar panels when tracking the point of maximum power. Effective tracking of the point of maximum power of solar modules can give an increase in energy production of about 15-30%.

In analyzing the operation of the MPPT controller, a combination of P&O and Model Predictive Control (MPC) algorithms was considered to improve the control structure of the amplifier converters used in renewable energy systems and to determine the values of solar panel power change when changing solar radiation.

Network modeling in Simulink Matlab environment is carried out. The model consists of solar panels JAM60S09 320 W, three-phase inverter, step-up transformer TMN - 250/20 / 0.4, capacitor and inductor.

During the simulation, the serviceability of the model was tested, the efficiency of the algorithm with a continuous change of solar radiation for 20 s, an experiment was also performed with the unforeseen inclusion of active load in the network.

The results showed that the algorithm is working. The efficiency of the MPPT-controller algorithm when tracking the point of maximum power in the conditions of continuous change of solar radiation is 97%. Graphs were obtained: direct current and voltage at the terminals of solar panels, active and reactive power at the output of the inverter, simulation of solar radiation, efficiency of tracking the point of maximum power and graphs of three-phase current and mains voltage.

Keywords: solar panels, MPPT - controller, algorithm, maximum power, efficiency, network.

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ СОЛНЕЧНЫХ ПАНЕЛЕЙ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ MPPT – КОНТРОЛЕРА

В. И. Крывда, В. Г. Рудницкий, В. О. Суворов, В. В. Зубак
Национальный университет «Одесская Политехника»

Аннотация. В данной статье рассмотрены способы повышения эффективности работы солнечных панелей. Одним из таких методов является использование контроллера Maximum Power Point Tracking (MPPT) с алгоритмом работы Perturb and Observe (P&O).

Предложенный метод повышения эффективности работы солнечных панелей с помощью MPPT – контроллера позволяет получить максимальную мощность, которую отдают солнечные панели при отслеживании точки максимальной мощности. Эффективное отслеживание точки максимальной мощности солнечных модулей может дать прирост в выработке энергии примерно 15-30%.

При анализе работы MPPT-контроллера было рассмотрено сочетание алгоритмов P&O и Model Predictive Control (MPC) для улучшения структуры управления преобразователями усилителя, используемых в системах возобновляемой энергии, и определения значений изменения мощности солнечных панелей, при изменении солнечного излучения.

Произведено моделирование сети в среде Simulink Matlab. Модель состоит из солнечных панелей JAM60S09 320 Вт, трехфазного инвертора, повышающего трансформатор ТМН – 250/20/0,4, фильтра емкости и индуктивности.

Во время моделирования была проверена исправность работы модели, эффективность работы алгоритма при непрерывном изменении солнечного излучения в течение 20 с, также выполнен опыт при непредвиденном включении активной нагрузки в сеть.

Результаты показали, что алгоритм исправен. Эффективность работы алгоритма MPPT - контроллера при отслеживании точки максимальной мощности в условиях непрерывного изменения солнечного излучения составляет 97%. Были получены графики: постоянного тока и напряжения на

выводах солнечных панелей, активной и реактивной мощности на выходе из инвертора, имитации солнечного излучения, эффективности отслеживания точки максимальной мощности и графики трехфазного тока и сети.

Ключевые слова: солнечные панели, MPPT – контроллер, алгоритм, максимальная мощность, эффективность, сеть.

Отримано 10.01.2022



Кривда Вікторія Ігорівна, Національний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту. пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: kryvda@op.edu.ua, т. +38-048-705-73-88

Viktoriia Kryvda, Odessa Polytechnic National University, PhD technical, associate professor, associate professor of department of electricity and energy management
E-mail: kryvda@op.edu.ua, t. +38-048-705-73-88
ORCID ID: 0000-0002-0930-1163



Рудницький Вальдемар Генрихович, Національний університет «Одеська політехніка», кандидат технічних наук, доцент кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту. пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: rudnitsky@op.edu.ua, т. +38-068-25-29-300

Rudnitsky Valdemar, Odessa Polytechnic National University, PhD technical, associate professor, associate professor of department of electricity and energy management, Shevchenko ave. 1, Odessa, Ukraine, E-mail: rudnitsky@op.edu.ua, t. +38-068-25-29-300
ORCID ID: 0000-0002-3157-2939



Суворов Владислав Олегович, Національний університет «Одеська політехніка», старший викладач кафедри електропостачання та енергетичного менеджменту. пр. Шевченка, 1, м. Одеса, Україна, 65044
E-mail: suvorov@op.edu.ua, тел. +38-048-705-85-12

Vladyslav Suvorov, Odessa Polytechnic National University, senior lecturer at the Department of power supply and energy management. Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: suvorov@op.edu.ua, t. +38048-705-85-12
ORCID ID: 0000-0003-2842-887X



Зубак Віктор Валерійович, Національний університет «Одеська політехніка», магістр з електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: zubak.8971127@stud.op.edu.ua, т. +38-095-216-12-49

Zubak Viktor, Odessa Polytechnic National University, Master's Degree of Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics Shevchenko ave., 1, Odessa, Ukraine, E-mail: zubak.8971127@stud.op.edu.ua, t. +38-095-216-12-49

ORCID ID: 0000-0002-6981-645X