

<https://doi.org/10.31891/2219-9365-2024-79-30>

УДК 681.5

МАРТИНЮК Валерій

Хмельницький національний університет

<https://orcid.org/0000-0001-5758-4244>

e-mail: martynyuk.valeriy@gmail.com

ГРУШКО Андрій

Хмельницький національний університет

e-mail: andriy19997982@gmail.com

МЕТОД КОМПЕНСАЦІЇ ПІКОВИХ СТРУМІВ НАВАНТАЖЕННЯ НА ОСНОВІ СУПЕРКОНДЕНСАТОРІВ

У статті зображена імітаційна модель автономної системи електроживлення в середовищі Matlab/Simulink. Отримані графіки потужностей, які генеруються фотоелектричними модулями та споживаються навантаженням. При відсутності пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, потужність, що генерується фотоелектричними модулями складає $P_{Vmax}=820,4$ Вт.

Для імітаційного моделювання пікових струмів навантаження паралельно із опором навантаження увімкнено блок керованого джерела струму та генератор прямокутних імпульсів. Приріст мінімальної потужності, яка виділяється на навантаженні при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, складає $\Delta P_{Lmin}=543,4$ Вт.

Ключові слова: автономної системи електроживлення, метод компенсації пікових струмів навантаження на основі суперконденсаторів.

MARTYNYUK Valeriy, GRUSHKO Andriy

Khmelnitskyi National University

METHOD OF COMPENSATION OF PEAK LOAD CURRENTS BASED ON SUPERCAPACITORS

The method of compensation of peak load currents based on supercapacitors is a modern approach to solving the problem of stabilizing energy consumption in electrical networks, in particular under conditions of dynamic load changes. This method has wide application in electrical engineering, in particular in electric transport systems, renewable energy sources, as well as in industrial and household electrical networks.

Supercapacitors are a suitable replacement for batteries in energy storage systems where high power density is required repeatedly. Compared to batteries, supercapacitors have lower energy density and higher power density. Therefore, they can be used in many applications for managing energy storage, especially where power bursts are required for a short period of time.

The use of supercapacitors requires the use of power electronic converters to ensure their efficient control. The power converter connects the supercapacitors to the DC bus of the drive. It is controlled according to the system requirements, namely, regulating the DC bus voltage, monitoring the state of charge of the supercapacitors, or distributing active energy between the drive and the ultracapacitors.

The article presents a simulation model of an autonomous power supply system in the Matlab/Simulink environment. The obtained graphs of the powers generated by photovoltaic modules and consumed by the load. In the absence of a peak load current with an amplitude of $I_{PV_max}=30.29$ A, the power generated by photovoltaic modules is $P_{Vmax}=820.4$ W.

For simulation modeling of peak load currents, a controlled current source unit and a rectangular pulse generator are connected in parallel with the load resistance. The increase in the minimum power that is allocated to the load when the peak load current with an amplitude of $I_{PV_max}=30.29$ A is $\Delta P_{Lmin}=543.4$ W.

Keywords: autonomous power supply system, method of compensation of peak load currents based on supercapacitors.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМИ У ЗАГАЛЬНОМУ ВИГЛЯДІ

ТА ЇЇ ЗВ'ЯЗОК ІЗ ВАЖЛИВИМИ НАУКОВИМИ ЧИ ПРАКТИЧНИМИ ЗАВДАННЯМИ

Суперконденсатори є доречною заміною батареям в системах зберігання енергії, де потрібна повторювана висока щільність потужності. У порівнянні з батареями, суперконденсатори мають меншу щільність енергії і більшу щільність потужності. Таким чином, вони можуть використовуватися в багатьох додатках для управління накопиченням енергії, особливо там, де потрібні сплески потужності протягом короткого періоду часу [1].

Використання суперконденсаторів вимагає застосування силових електронних перетворювачів для забезпечення ефективного керування ними. Силовий перетворювач з'єднує батарею суперконденсаторів з шиною постійного струму приводу. Він керується відповідно до системних вимог, а саме регулювання напруги на шині постійного струму, контроль за станом заряду батареї суперконденсаторів або розподіл активної енергії між приводом і батареєю ультраконденсаторів [2].

Середній струм навантаження - це струм акумулятора в системах, які використовують акумулятор як джерело живлення [3]. Таким чином, струми, що виходять за ці межі, будуть надходити від суперконденсаторів. Опорний струм автоматично змінюється, коли батарея повністю заряджена, що

запобігає перезарядці батареї. Для генерації еталонних значень також можна використовувати інструменти оптимізації.

Розмір суперконденсаторної батареї важливий з точки зору початкової вартості, впровадження та обслуговування. Також слід враховувати вагу та об'єм, який займає батарея. Для деяких пристроїв навантаження є динамічним/пульсуючим і змінним у часі. В результаті пікова потужність навантаження значно перевищує середнє навантаження. У [4] показано, що це ключова проблема з точки зору вибору джерела енергії, оскільки, з одного боку, джерело має забезпечувати коротко часову високу пікову потужність навантаження, а з іншого боку, джерелом потрібно забезпечити потрібну кількість енергії.

АНАЛІЗ ДОСЛІДЖЕНЬ ТА ПУБЛІКАЦІЙ

Найпростішим рішенням, представленим у [4], у цьому випадку є використання достатньо великого накопичувача енергії - велика ємність накопичувача забезпечує як відповідну пікову потужність, так і достатній запас енергії. На жаль, таке рішення є великим, дорогим і важким, а у випадку з мобільними рішеннями це рішення часто неможливо використовувати.

Як описано в [5], альтернативою є використання гібридного накопичувача енергії. Зазвичай гібридний накопичувач енергії складається з двох компонентів.

1. Джерело великої потужності - суперконденсатор.
2. Джерело великої енергії - акумуляторна батарея.

Таким чином, оптимізований гібридний накопичувач енергії, набагато легший, ніж великий накопичувач енергії, виконуючи ті самі завдання [6].

ВИКЛАД ОСНОВНОГО МАТЕРІАЛУ

Суперконденсатор - це накопичувач енергії, який здатен витримувати швидкі коливання рівня енергії. Суперконденсатори мають значно нижчу щільність енергії, але вищу щільність потужності порівняно з батареями. Батареї використовують хімічні процеси для зберігання енергії, яка потім може бути вивільнена у вигляді струму. Суперконденсатори, однак, зберігають енергію за рахунок розділення зарядів. Таким чином, потреба в хімічних речовинах зменшується, що забезпечує довший термін служби суперконденсаторів

Головним недоліком суперконденсаторів є низька робоча напруга від 2,7 В до 3,3 В. Для подолання цього недоліку суперконденсатори з'єднують послідовно у модулі. У цьому випадку дуже важливо відсортувати суперконденсатори з однаковими електричними параметрами, якщо тільки вони не заряджаються з різними швидкостями.

Для запобігання перевищенню критичних значень напруги для всіх суперконденсаторів у модулі необхідно виміряти ємність і активний опір суперконденсатора, а потім відсортувати суперконденсатори для модуля з однаковими електричними параметрами.

Відомі еквівалентні схеми заміщення та відповідні їм математичні моделі суперконденсаторів базуються на обчисленнях цілого порядку та апроксимують імпедансний спектр суперконденсатора з високою точністю, але вони мають деякі недоліки:

- а) математичні вирази для опису функції імпедансу суперконденсатора досить складні;
- б) елементи традиційних еквівалентних схем суперконденсатора не відповідають параметрам матеріалів суперконденсатора, таких як вугільні електроди та електроліт;
- в) дуже важко знайти обернене перетворення Лапласа для функції імпедансу суперконденсатора, щоб знайти вираз перехідного опору та змоделювати процеси заряду або розряду суперконденсатора у часовій області.

Використання дробового числення усуває ці недоліки. Дробові моделі суперконденсатора використовують спеціальні частотно-залежні дробові елементи. Відомі дробові моделі суперконденсатора базуються на діаграмі Найквіста, яка складається з двох сегментів, що відповідають двом різним областям: високочастотній області з кутом $\alpha \approx 45^\circ$ та низькочастотній області з кутом $\gamma \approx 89^\circ$.

Отримані експериментальні результати для імпедансних спектрів суперконденсатора показують, що більш точна діаграма Найквіста суперконденсатора має три діапазони частот: високочастотну область з кутом $\alpha \approx 45^\circ$; діапазон середніх частот з кутом $\beta \approx 75^\circ$ і діапазон низьких частот з кутом $\gamma \approx 89^\circ$.

Звідси можна зробити висновок, що потрібно використовувати більш гнучку математичну модель, ніж традиційна математична модель цілого порядку. Ретельне дослідження діаграм Бode та Найквіста суперконденсатора показує, що дробова модель передатної функції суперконденсатора має вигляд (1):

$$H_{ST}(s) = K \cdot \frac{\left[\frac{a}{s} + A \right] \cdot \left[1 + Bs \right]}{s^{a+b}} = R + \frac{1}{s^a \cdot C_a} + \frac{1}{s^b \cdot C_b} + \frac{1}{s^{a+b} \cdot C_{a+b}}, \quad (1)$$

де R - активний послідовний опір;

C_a і C_b - ємності конденсаторів дробового порядку з порядками a і b ($0 \leq a \leq 1$ і $0 \leq b \leq 1$);

D - параметр елемента дробового порядку з порядком $a + b \leq 2$.

Запропонована передавальна функція (1) відповідає еквівалентній схемі суперконденсатора дробового порядку, яка показана на рис. 1.

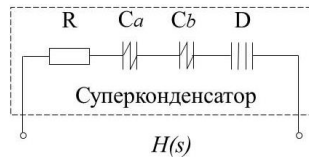


Рис. 1. Еквівалентна схема заміщення суперконденсатора дробового порядку

На рис. 1. зображена імітаційна модель автономної системи електроживлення в середовищі Matlab/Simulink.

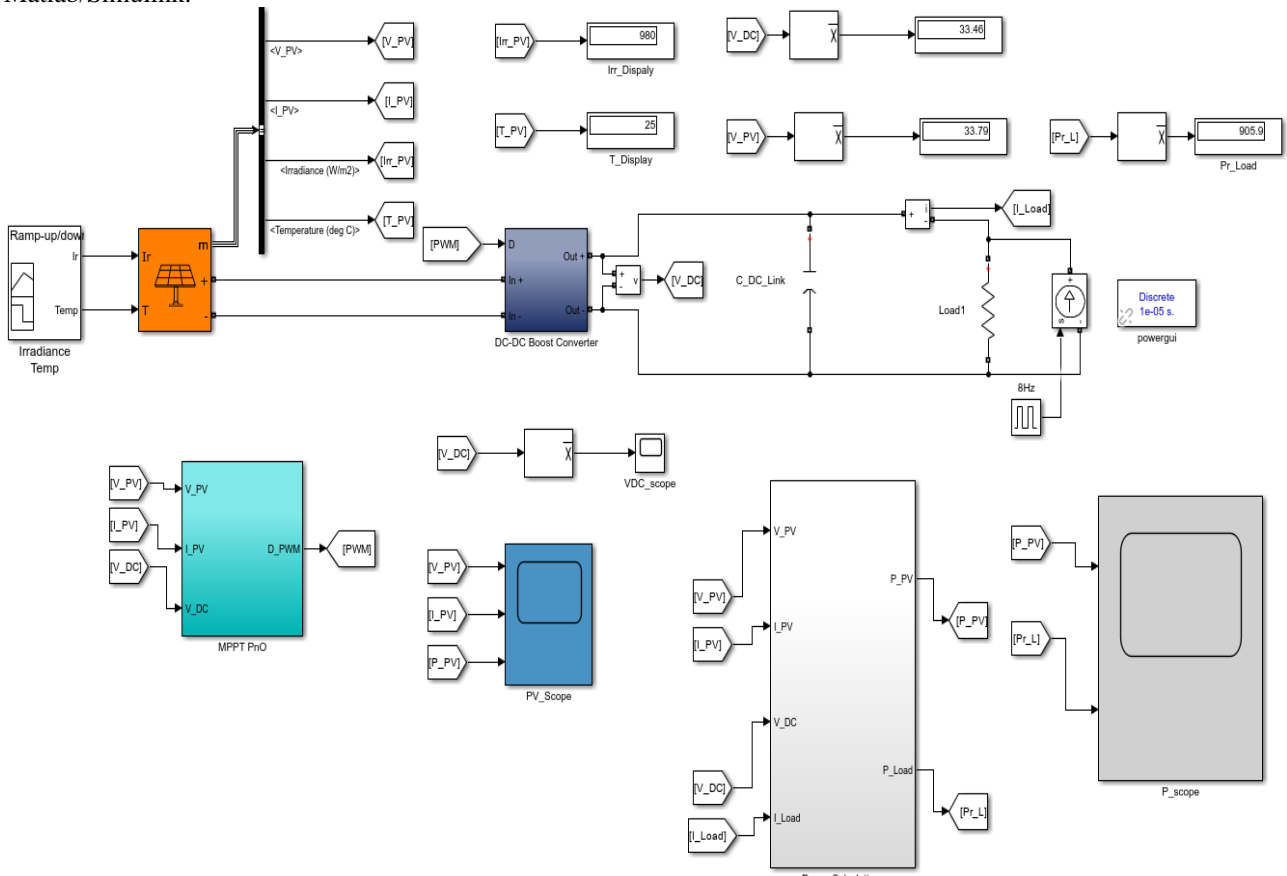


Рис. 1. Імітаційна модель автономної системи електроживлення

Для імітаційного моделювання пікових струмів навантаження паралельно із опором навантаження увімкнено блок керованого джерела струму та генератор прямокутних імпульсів. Задамо величину пікових струмів навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, які обумовлюють зменшення максимальної потужності, що генерується фотоелектричними модулями до величини $P_{Vmin}=570,2$ Вт у відповідності до рис. 2.

На рис. 3 зображено графіки потужностей, які генеруються фотоелектричними модулями та споживаються навантаженням. При відсутності пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, потужність, що генерується фотоелектричними модулями складає $P_{Vmax}=820,4$ Вт.

У цьому випадку потужність, яка виділяється на навантаженні складає $P_{Lmax}=794,9$ Вт, а при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А потужність на навантаженні складає $P_{Lmin}=442,5$ Вт.

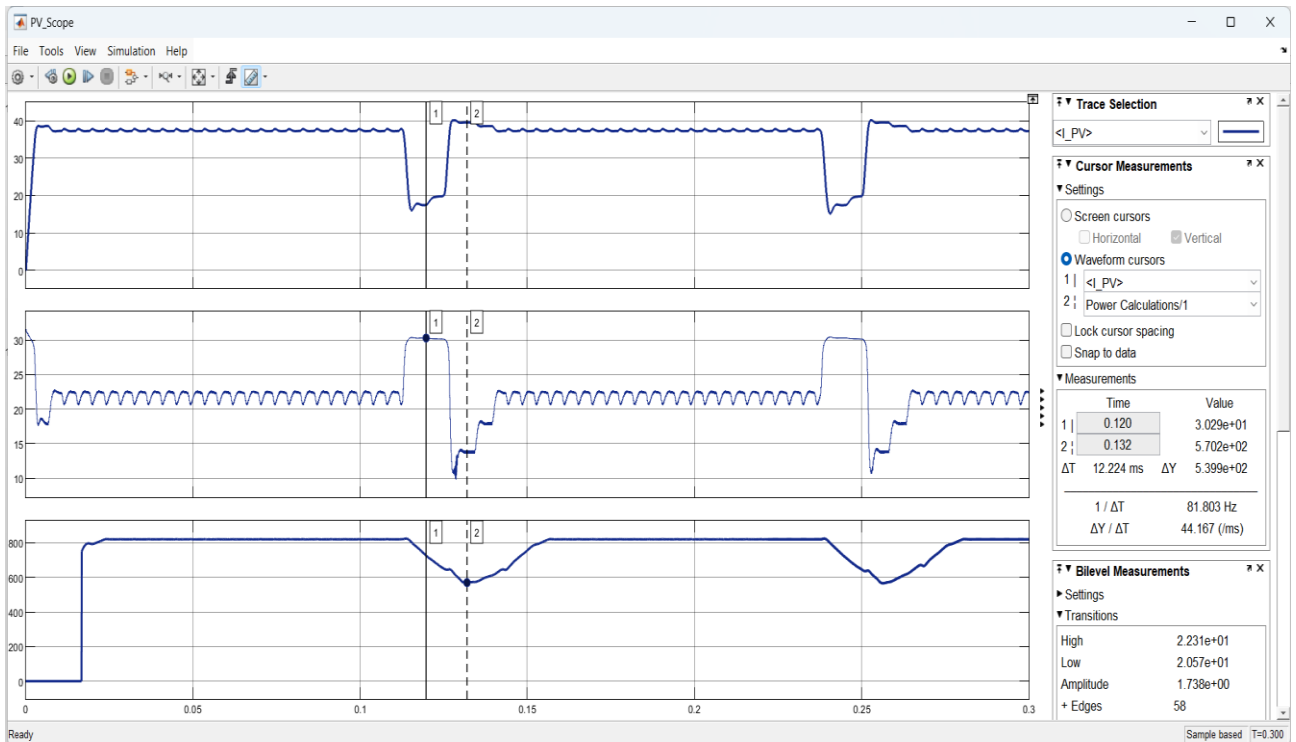


Рис. 2. Пікові струми навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А

Аналіз рис. 3 показує, що фотоелектричні модулі не забезпечують потужності на навантаженні, що обумовлює використання суперконденсаторів.

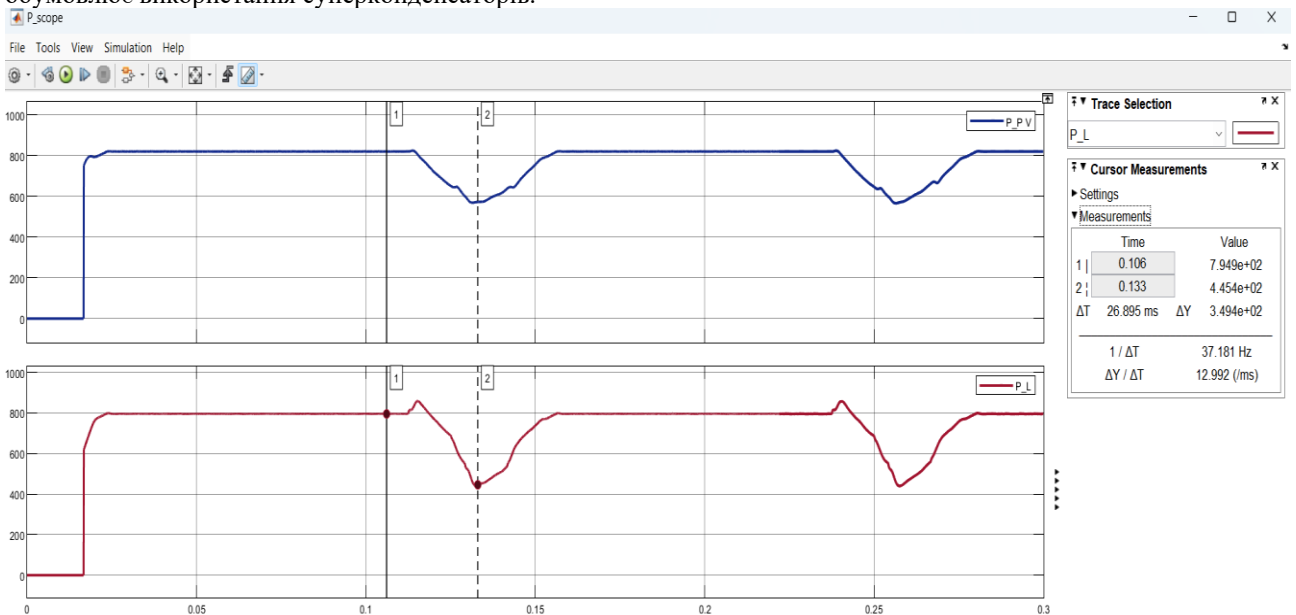


Рис. 3. Графіки потужностей, які генеруються фотоелектричними модулями та споживаються навантаженням

Додамо до імітаційної моделі автономної системи електроживлення, яка зображена на рисунку 1, блоки суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача у відповідності до рисунку 4.

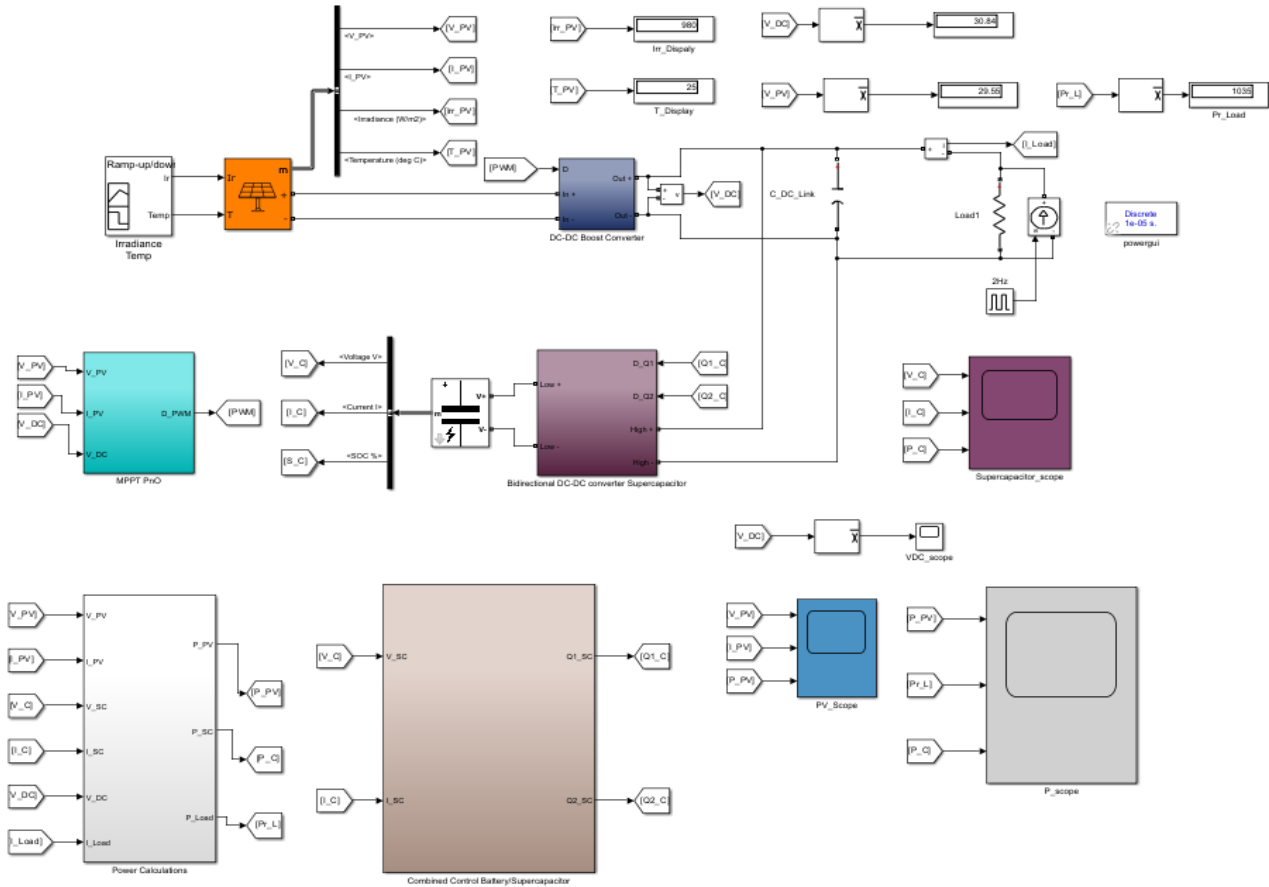


Рис. 4. Імітаційна модель удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження із доданими блоками суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача

Встановимо аналогічні пікові струми навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, щоб визначити вплив блоків суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача на потужність навантаження. Результати імітаційного моделювання зображені на рис. 5.

Аналіз графіків, які зображені на рис. 5 показує, що мінімальна потужність фотоелектричних модулів при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А зростає до $P_{Vmin}=777,6$ Вт у порівнянні із потужність фотоелектричних модулів $P_{Vmin}=570,2$ Вт без суперконденсаторів.

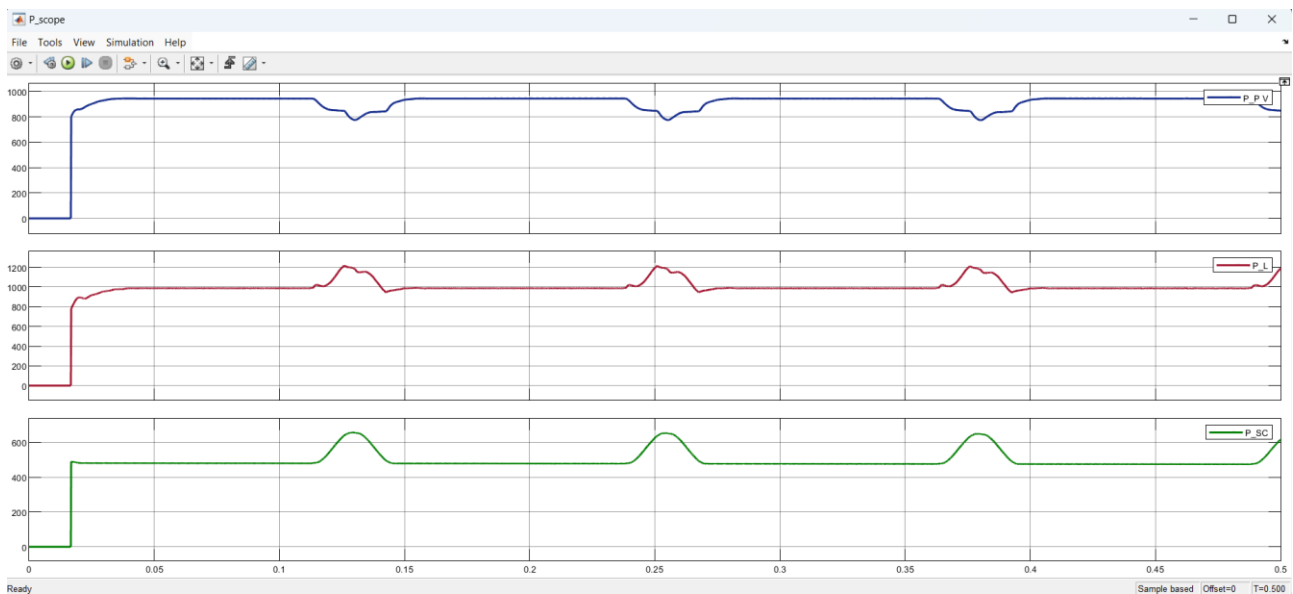


Рис. 5. Результати імітаційного моделювання удосконаленого методу компенсації пікових струмів навантаження із доданими блоками суперконденсаторів та двонаправленого підвищувально-понижувального перетворювача

ВИСНОВКИ З ДАНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ І ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ РОЗВІДОК У ДАНОМУ НАПРЯМІ

Приріст мінімальної потужності фотоелектричних модулів при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А складає $\Delta P_{Vmin}=207,4$ Вт. У цьому випадку мінімальна потужність, яка виділяється на навантаженні складає $P_{Lmin}=985,9$ Вт у порівнянні із $P_{Lmin}=442,5$ Вт без суперконденсаторів.

Приріст мінімальної потужності, яка виділяється на навантаженні при дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А, складає $\Delta P_{Lmin}=543,4$ Вт. При дії пікового струму навантаження амплітудою $I_{PV_max}=30,29$ А максимальна потужність на навантаженні складає $P_{Lmax}=1202$ Вт, що на $\Delta P_{Lmin}=407,1$ Вт більше за максимальну потужність на навантаженні без суперконденсаторів.

Література

1. W. Lhomme, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol and A. Rufer, "Design and Control of a supercapacitor storage system for traction applications," in Industry Applications Conference, Villeneuve d'Ascq, 2005.
2. P.J. Grbović, P. Delarue, P. L. Moigne and P. Bartholomeus, "A Bidirectional Three-Level DC–DC Converter for the Ultracapacitor Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 10, pp. 3415-3430, 2010.
3. M. Camara, H. Gualous, B. Dakyo and P.M. Nichita, "Buck-Boost converters design for Ultracapacitors and lithium Battery mixing in Hybrid Vehicle Applications," in Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, 2010.
4. P. Piórkowski, A. Chmielewski, K. Bogdzin'ski, J. Moz'aryn, T. Mydłowski Research on Ultracapacitors in Hybrid systems: Case Study. Energies 2018, 11, 2551.
5. A.K. Podder, O. Chakraborty, S. Islam, N.M. Kumar, A.H.H. Alhelou Control Strategies of Different Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles Applications. IEEE Access 2021, 9, 51865–51895.
6. S. Hu, Z. Liang, X. He Ultracapacitor-battery hybrid energy storage system based on the asymmetric bidirectional Z-source topology for EV. Trans. Power Electron. 2016, 11, 7489–7498.

References

1. W. Lhomme, P. Delarue, P. Barrade, A. Bouscayrol and A. Rufer, "Design and Control of a supercapacitor storage system for traction applications," in Industry Applications Conference, Villeneuve d'Ascq, 2005.
2. P.J. Grbović, P. Delarue, P. L. Moigne and P. Bartholomeus, "A Bidirectional Three-Level DC–DC Converter for the Ultracapacitor Applications," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 10, pp. 3415-3430, 2010.
3. M. Camara, H. Gualous, B. Dakyo and P.M. Nichita, "Buck-Boost converters design for Ultracapacitors and lithium Battery mixing in Hybrid Vehicle Applications," in Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), Lille, 2010.
4. P. Piórkowski, A. Chmielewski, K. Bogdzin'ski, J. Moz'aryn, T. Mydłowski Research on Ultracapacitors in Hybrid systems: Case Study. Energies 2018, 11, 2551.
5. A.K. Podder, O. Chakraborty, S. Islam, N.M. Kumar, A.H.H. Alhelou Control Strategies of Different Hybrid Energy Storage Systems for Electric Vehicles Applications. IEEE Access 2021, 9, 51865–51895.
6. S. Hu, Z. Liang, X. He Ultracapacitor-battery hybrid energy storage system based on the asymmetric bidirectional Z-source topology for EV. Trans. Power Electron. 2016, 11, 7489–7498.