

ОСОБЛИВОСТІ ФУНКЦІОНУВАННЯ СОНЯЧНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ В ОЕС УКРАЇНИ В УМОВАХ ЗЕЛЕНОЇ ТРАНСФОРМАЦІЇ

А. М. Пустовий, аспірант

Ю. А. Веремійчук, кандидат технічних наук, доцент

Національний технічний університет України «КПІ ім. Ігоря Сікорського»

E-mail: pustovoy.tech@gmail.com

Анотація. У межах трансформації енергетичної системи в умовах забезпечення подальшого розвитку малої розподіленої генерації з відновлюваних джерел енергії пропонуються нові моделі підтримки для об'єктів малої потужності, що сприятиме введення в експлуатацію нових суб'єктів генерації. У роботі проведено дослідження щодо проблеми малої генерації в Україні, які постають перед енергосистемою, в умовах збільшення частки розосередженої генерації. Проведено оцінку впливу малих сонячних електростанцій на роботу електричної мережі, в тому числі і дахових, які встановлюються в домогосподарствах. Розглянуто типові схеми приєднання СЕС до електричної мережі та визначено їх вплив на електротехнічне обладнання, елементи систем електропостачання та принципи експлуатації. Встановлено, що при інтеграції нових суб'єктів ВДЕ, в тому числі СЕС малої потужності виникає ціла низка технічних проблем, які мають вплив на експлуатаційні характеристики мережі, безпеку постачання та надійність. Сформовано основні шляхи вирішення проблем втрат та відхилень рівня напруги в розподільчих мережах, при приєднання малих СЕС. У подальшому дослідженні отримані результати будуть використані для розробки пропозицій щодо підключення до електричної мережі суб'єктів малої потужності та їх формалізація у вигляді положень нормативно-технічних документів.

Ключові слова: відновлювальні джерела енергії, мала генерація, відхилення напруги, втрати в розподільчих мережах, сонячна електростанція, приєднання до електричної мережі

Анотація. Питання стимулювання розвитку відновлюваної енергетики є одним із пріоритетів державної політики України в електроенергетичному комплексі та інструментом гарантування енергетичної безпеки держави та відповідає прагненням України стати рівноправним суб'єктом нової кліматично нейтральної політики ЄС (European Green Deal).

Зокрема, внесенням змін до законів України щодо відновлення та "зеленої" трансформації енергетичної системи України, які направлені на вирішення ряду питань щодо:

- розробки дієвого механізму видачі, використання та припинення дії гарантій походження електричної енергії, виробленої з відновлюваних джерел енергії;
- врегулювання можливості виходу суб'єктів господарювання з балансуєючої групи гарантованого покупця з можливістю компенсації різниці вартості електричної енергії між «зеленим тарифом» та ринковою ціною;
- удосконалення моделі проведення аукціонів з розподілу квот підтримки суб'єктів господарювання, які виробляють електричну енергію з альтернативних джерел енергії;
- визначення регуляторні умови, щодо здійснення гарантованим покупцем діяльності з експорту та постачання електричної енергії;
- передбачення можливості завершення будівництва та введення в експлуатацію до кінця 2023 року об'єктів, що планують виробляти електричну енергію за «зеленим тарифом» з енергії вітру.

У цих умовах слід очікувати приріст нових потужностей від генерації ВДЕ та підходів до вибору точок їх приєднання до системи електропостачання. При цьому спостерігаються тенденції до збільшення попиту на електричну енергію в умовах післявоєнної відбудови та зміни характеру споживання, що створюють нові виклики для стратегій операційного керування та розвитку мереж. Враховуючи, що основа ОЕС України – магістральні мережі, які будувалися на базі централізованої генерації, не можуть у повній мірі забезпечити перехід до нової енергетичної моделі, відповідно до викликів сьогодення. Наразі розробляються стратегії щодо зміни парадигми побудови мереж, поміж яких слід відмітити «Концепцію впровадження “розумних мереж” в Україні до 2035 року» (схвалено розпорядженням Кабінету Міністрів України від 14 жовтня 2022 р. № 908-р).

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У результаті проведеного дослідження літературних джерел встановлено, що саме генерація ВДЕ, яка

приєднується на рівні споживача, може вирішувати деякі технічні проблеми на даному рівні та спростити перехід до нової електроенергетичної моделі [1-3].

Впровадження малих генеруючих потужностей (до 1 МВт) з ВДЕ, а саме СЕС і є такою генерацією, що максимально наближена до споживача. Робота СЕС має значний вплив на параметри електричної енергії в частини мережі, де вона приєднується, тому дослідження в цьому напрямку є актуальними.

Мета дослідження – проведення аналізу процесу приєднання та впливу сонячної генерації до 1 МВт на функціонування електричних мереж в умовах трансформації енергетичної системи України

Матеріали та методи дослідження. Зростання частки відновлюваних джерел енергії в енергетичному балансі країни передбачено Енергетичною стратегією України до 2035 року "Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність", схваленою розпорядженням Кабінету Міністрів України від 18.08.2017 № 605, згідно з якою передбачено досягнення частки більше 25 % відновлюваних джерел енергії в генерації електричної енергії в 2035 році. Державою створені правові, організаційні та економічні стимули, а саме запровадження моделі фіксованого "зеленого" тарифу (Feed-intariff). Впродовж останніх років в Україні спостерігається стрімке зростання встановлених потужностей об'єктів відновлюваної енергетики (більш ніж втричі у 2019-2020 роках). На початок 2022 року встановлена потужність об'єктів відновлюваної енергетики за "зеленим" тарифом вже досягла 9,5 ГВт (з урахуванням генеруючих установок приватних домогосподарств та без урахування об'єктів, розташованих на тимчасово окупованих територіях на той час).

Аналітичні дані показують, що малі СЕС (до 1 МВт) в Україні мають лише 2,5 % від загальної потужності ВДЕ (дахові СЕС не враховані) в Україні, що може пояснюватися загальними вимогами до реалізації та введення в експлуатацію таких об'єктів, як і для об'єктів великої потужності. Навіть спрощені умови взаємодії малих енергогенеруючих підприємств з ринком не додають їм інвестиційної привабливості.

При інтеграції нових суб'єктів ВДЕ, в тому числі СЕС малої потужності, виникає ціла низка технічних проблем, які мають вплив на технічні і експлуатаційні характеристики мережі, на безпеку постачання та надійність.

Вплив малих ФЕС на втрати та відхилення напруги електричної енергії в електромережі

Інтеграція нових генеруючих потужностей призводить до зміни напрямків перетоків струмів в електромережі (ЕМ) [3]. Так, для розподільчих мереж, які класично проектуються на жорстку вертикаль генератор-споживач це породжує нові виклики та можливості. Встановлення малих СЕС дозволяє розвантажити розподільну мережу, вносить додаткові можливості для розвитку ринків електричної енергії (ЕЕ), може змінювати рівні напруг точок мережі та ускладнює диспетчеризацію енергосистеми [4]. Загальні лінійні втрати ЕЕ в ЕМ при підключенні малих СЕС зменшуються за рахунок зменшення електричної відстані від точки забезпечення потужності до навантаження. Що не завжди справедливо для підключення потужних об'єктів ВДЕ на рівнях напруги 35-110 кВ, коли некоректний вибір точки приєднання або потужності установки можуть призводити до збільшення втрат в магістральних мережах [5].

Щодо малих СЕС, то існують такі випадки:

1) коли малі ФЕС приєднуються в кінці магістральної ЕМ, як це зображено на рисунку 1. Тоді, у випадку, коли потужність малих СЕС перевищує навантаження в точці приєднання, відбувається «реверсний» потік ЕЕ через деякі ділянки такої магістральної ЕМ, що змінює як струморозподіл на магістралі, так і напруги на фідерах (відносно запроектованих).

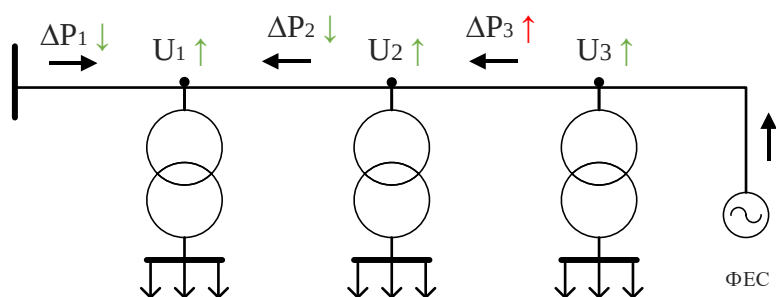


Рис. 1. Підключення ФЕС в кінці магістральної мережі

Такі схеми приєднання частіше зустрічаються в приєднанні об'єктів генерації від 300кВт. В такому випадку точка приєднання знаходиться в кінці лінії, або ж на останніх її секціях. Також об'єкти до 1МВт встановленої потужності часто приєднували шляхом реалізації підключення на відпайки від магістральної лінії.

2) коли малі СЕС встановлюються в безпосередній близькості до трансформатора (Т), який забезпечує ЕЕ для багатьох приватних домогосподарств (див. рис. 2). Тоді в сонячні дні, коли генерація висока, а споживання на даному Т низьке, відхилення напруги на Т виходить за дозволені межі $\Delta = \pm 5\% U_n$. Це відбувається по причині того, що для забезпечення генерації в мережу, інвертор повинен видавати напругу: $U_{\text{інв}} > U_{\text{мер.факт}}$.

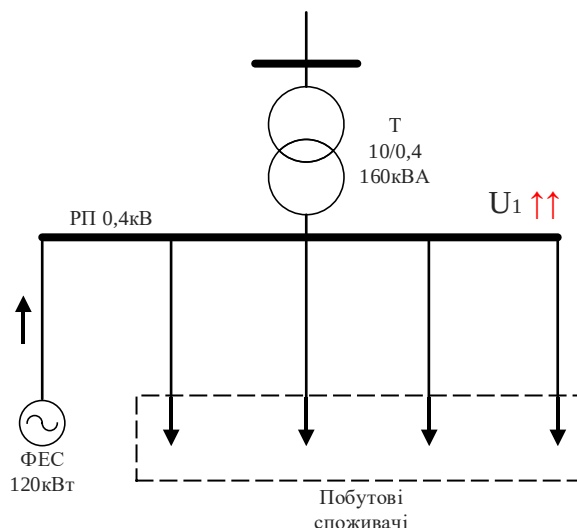


Рис. 2. Схема підключення ФЕС до тупикової підстанції

На рисунку 2 відображено схему приєднання малих ФЕС до підстанцій, що забезпечують велику кількість споживачів. Їх потужність майже не перевищує 300 кВт. Саме така схема застосовується здебільшого для дахових СЕС (дСЕС).

Подальше підняття напруги на виході інверторів призводить до спрацювання внутрішньої автоматики інвертора та різкого припинення генерації. Після чого напруга на фідері «миттєво» нормалізується, а інвертор, який продовжує аналізувати напругу мережі, знову вмикається та починає нарощувати вихідну потужність. Таким чином, у мережі відбуваються цикли стрибків напруги та

постійної зміни реверсних потоків електроенергії в лініях та трансформаторах. Наглядний приклад такого режиму роботи представлений на рис. 3.



Рис.3. Графік з системи моніторингу ФЕС 30 кВт, з наявними відхиленнями напруги мережі

У той же час, на ділянках мережі, які мають проблеми, пов'язані з низькою напругою на лініях (віддалені/тупикові ділянки ЕМ по типу рис.1), малі СЕС здатні підвищувати напругу, та зменшити її провали.

Створення реверсивних потоків через Т, на ряду зі співзмірними значеннями потужностей споживачів та генерації фідера, призводить до низького фактичного навантаження на трансформатор, що зумовлює низький ККД Т.

$$\eta = 1 - \frac{\Delta P_m + \beta^2 \Delta P_{el}}{\beta S_n \cos \varphi_2 + \Delta P_m + \beta^2 \Delta P_{el}}, \quad (1)$$

де

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2n}} \text{ — коефіцієнт завантаження трансформатора.} \quad (2)$$

Зазвичай найвищий ККД трансформатора досягається при $\beta=0,5..0,6$ і різко знижується при зменшенні значення I_2 .

Ще одним важливим аспектом втрат в мережі є втрати в Т, які виникають через узагальнений підхід до видачі технічних умов (ТУ) на приєднання електроустановок, що регламентуються Кодексом систем розподілу (КСР). Згідно з

КСР за кожним замовником, який приєднується до мережі, фіксуються трансформаторні потужності, які є на фідері забезпечення потужності. Тому виникають ситуації неузгодженості потужностей генерації та споживання, що призводять до недоцільного завантаження трансформатора, що призводить до збільшення витрат ОСР.

Так, існують випадки, коли в умовах дефіциту трансформаторної потужності, споживачам з СЕС для реалізації проекту на 20-30 кВт встановлювались додаткові трансформаторні підстанції, до яких приєднували лише замовника ТУ для такої СЕС

Так, спираючись на рівняння 1, можна дійти висновку, що при $P_{нав} - P_{ФЕС} \leq 0,5S_{ном}$, ККД трансформатора буде різко знижуватись. Що в свою чергу дозволяє не резервувати трансформаторну потужність для генеруючих установок, а обмежувати її величину за принципом:

$$P_{ФЕС} \leq P_{нав} - 0,5S_{ном} \quad (3)$$

Що дозволить приєднувати нових пасивних споживачів до максимально можливого завантаження трансформатора, не збільшуючи при цьому трансформаторну та лінійну інфраструктуру ОСР, що в свою чергу зменшить постійні втрати в мережах та витрати на їх амортизацію

Вплив малих СЕС на надійність ЕМ та якість ЕЕ

Фактор зменшення лінійних втрат системи є чинником, що підвищує надійність постачання споживачів. Поряд з цим, за умови неузгодженості потужності СЕС та навантаження, стрибки напруги в ЕМ можуть суттєво знижувати як надійність електропостачання, так і якість електричної енергії. За умови високої концентрації малих СЕС в електричній близькості одна до одної, або робота однієї потужної СЕС, можуть сильно впливати на надійність електропостачання за рахунок прямої залежності від інтенсивності сонячних променів, що потрапляють на фотомодулі. У той же час розосереджений характер приєднання малих СЕС здатний нівелювати вплив стохастичного характеру генерації на надійність ЕМ (зменшення дози флікера).

Використання перетворювачів електричної енергії на ФЕС (інверторів) породжує ризик генерації ними в ЕМ гармонік вищих порядків, що негативно

впливає на якість ЕЕ. Нині моніторинг за якістю згенерованої ЕЕ на СЕС не здійснюється.

Також потрібно брати до уваги, що стандартні параметри інверторів для СЕС мають коефіцієнт вихідної потужності близький до 0,99, що абсолютно відповідає вимогам до ТУ.

При цьому більшість мережевих та гібридних інверторів мають можливість генерації потужності в діапазоні 0,8 (індуктивна) .. 0,8 (ємнісна) [6].

Однак у цьому випадку потрібно враховувати, що певна концентрація генерації, максимально наближеної до чисто активного характеру, може призвести до збільшення реактивної складової струмів на вищих рівнях системи. Особливо гостро це питання стоїть і у випадку генерації ЕЕ великими СЕС. Власники таких установок не зацікавлені у виробництві такого балансу Р та Q, який буде вигідний мережі, оскільки вони отримують плату виключно за згенерований об'єм активної енергії. Хоча сучасні інверторні перетворювачі здатні генерувати електроенергію з широким діапазоном коефіцієнта потужності та необхідним характером реактиву (індуктивний чи ємнісний) (рис 4) [7].

OUTPUT DATA	FRONIUS ECO 25.0-3-S	FRONIUS ECO 27.0-3-S
AC nominal output ($P_{AC,r}$)	25,000 W	27,000 W
Max. output power / rated apparent power	25,000 VA	27,000 VA
AC output current ($I_{AC,nom}$)	37.9 A / 36.2 A	40.9 A / 39.1 A
Grid connection (voltage range)	3~NPE 380 V / 220 V or 3~NPE 400 V / 230 V (+20 % / - 30 %)	
Frequency (frequency range)	50 Hz / 60 Hz (45 - 65 Hz)	
Total harmonic distortion	< 3,0 %	
Power factor ($\cos \phi_{AC,r}$)	0 - 1 ind. / cap.	

Рис. 4. Технічні вихідні параметри мережевих інверторів «Fronius ECO»

Також ведуться дослідження з розробки інверторів з вбудованим регулюванням коефіцієнта потужності відповідно до заданих параметрів [8]. Наявність таких інструментів може дозволити створити нові додаткові послуги на ринку електричної енергії, наприклад з компенсації реактивної потужності, при чому це можуть бути не лише сегменти ринку мережа-генератор, а і двосторонні договори з електрично близькими споживачами.

«Нормативні неузгодженості»

Згідно з нормативною базою, що діє в Україні в частині видачі технічних умов на приєднання електроустановок, такий документ видається на запит замовника приєднання, а основними критеріями до вибору схеми приєднання є найменша довжина лінії та найбільш економічно вигідний варіант для замовника.

У той же час, ТУ є надважливим документом в житті об'єкта енергетики. Так, на рис.5 зображена схема почерговості етапів реалізації проектів енергетики, яка справедлива як для споживачів, так і для генеруючих об'єктів. Зі схеми стає зрозуміло, що перебуваючи на перших етапах реалізації, ТУ задає умови та обмеження для всіх наступних етапів важливих етапів (проектування, будівництво, введення в експлуатацію) а найголовніше, що це визначає подальші умови експлуатації об'єкта в ОЕС, та взаємний вплив об'єкта та ЕМ до якої він приєднаний.

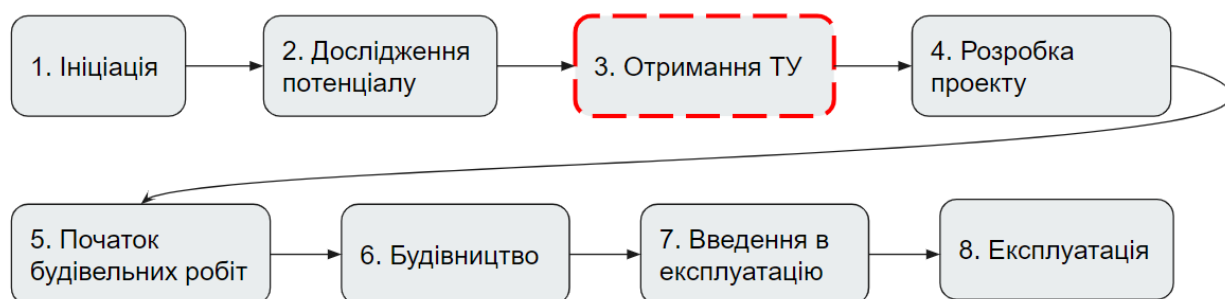


Рис. 5. Схема почерговості етапів реалізації проектів ВДЕ

Так, при формуванні ТУ, відбувається «бронювання» потужностей Т що живить точку забезпечення потужності. При цьому не враховується характер роботи об'єкта приєднання (споживання/генерація), що може призводити до аналогічних проблем, описаних на рис.2. Слід зазначити, що згідно норм КСР не існує підстав до відмови у видачі ТУ, що у випадках відсутності вільних потужностей лінійних або трансформаторних зобов'язує ОСР розбудовувати трансформаторну інфраструктуру та збільшувати кількість ПЛ/КЛ, що у випадках з об'єктами ВДЕ не буде використовуватись в повній мірі, зважаючи на нерівномірний характер роботи.

Вибір найбільш економічно вигідної точки приєднання також може призводити до збільшення втрат системи. Також це дослідження показує, що суттєвим фактором

є не лише точка приєднання, а й потужність об'єкта. Проте дослідження не враховує характер роботи новоприєданого об'єкту, що може внести суттєві корективи у розрахунки.

Висновки і перспективи. У межах трансформації енергетичної системи в умовах забезпечення подальшого розвитку малої розподіленої генерації з відновлюваних джерел енергії пропонуються нової моделі підтримки для об'єктів малої потужності, що сприятиме введення в експлуатацію нових суб'єктів генерації.

При проведенні дослідження встановлено, що малі розподілені потужності дають можливості наблизити виробництво електроенергії до споживачів, що дозволяє їм збільшити надійність власного електропостачання та зменшити власні втрати електроенергії.

Проведено аналіз основних схем підключень сонячної генерації до ЕМ і розглянуто особливості впливу СЕС на електротехнічне обладнання електричної мережі, елементи систем електропостачання та принципи експлуатації

У подальшому дослідженні отримані результати будуть використані для розробки пропозицій щодо підключення до ЕМ суб'єктів малої потужності та їх формалізація у вигляді положень нормативно-технічних документів.

Список використаних джерел

1. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. Вінниця : Вінниця : ВНТУ, 2014. 204 с.
2. Y. Veremiihuk, O Yarmoliuk, A Pustovyi, A Mahnitko, I. Zicmane, T. Lomane. Features of Electricity Distribution Using Energy Storage in Solar Photovoltaic Structure. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 2020 Volume 57: Issue 5. P. 18-29
3. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах / О.В. Кириленко, В.В. Павловський, Л.М. Лук'яненко // Технічна електродинаміка. 2011. № 1. С. 46-53.
4. Оцінка впливу розосередженого генерування на режими розподільних електричних мереж / В. О. Комар, Н. В. Остра, О. В. Кузьмик, С. В. Гуцол. Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Електротехніка і енергетика». 2013. №1(14).
5. Регулювання напруги в розподільних електричних мережах з відновлюваними джерелами енергії: Монографія / О. С. Яндульський, Г. О. Труніна, А. Б. Нестерко. К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. 191 с.

6. Бордаков М. М. Дослідження ефективності роботи інвертора центрального типу на промисловій сонячній електростанції. Відроджувана енергетика. 2019. № 3. С. 35-41.

7. Liu J., Du X., Su. X., Tai H-M. (2023). A phase feed-forward method to enhance inverter-grid system stability. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 3, vol. 150, 109106.

8. Kumar N., Raglend J. (2021) Multi-objective Control of Multi-Operational Grid-Integrated Inverter for PV Integration and Power Quality Service. Naveen Kumar, I. Jacob Raglend. Ain Shams Engineering Journal 9/12, 2859-2874.

References

1. Lezhniuk, P. D., Kovalchuk, O. A., Nikitorovych, O. V., Kulyk, V. V. (2014). Vidnovliuvani dzherela enerhii v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh [Renewable energy sources in distribution electric networks]: monograph. Vinnytsia: VNTU, 204.

2. Y. Veremiichuk, O Yarmoliuk, A Pustovyi, A Mahnitko, I. Zicmane, T. Lomane (2020). Features of Electricity Distribution Using Energy Storage in Solar Photovoltaic Structure. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences, 57(5), 18-29

3. O.V. Kirylenko, V.V. Pavlovsky, L.M. Lukyanenko (2011). Vidnovliuvani dzherela enerhii v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh [Technical aspects of implementation of distribution generation sources in electric networks] Technical electrodynamics, 1, 46-53.

4. O. Komar, N. V. Ostra, Fr. V. Kuzmyk, S. V. Hutsol (2013). Vidnovliuvani dzherela enerhii v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh [Assessment of the influence of decentralized generation on the regimes of distribution electric networks]. Scientific works of DonNTU. Series: "electrical engineering and energy" No. 1(14)' 2013

5. O.S. Yandulskyi, G.O. Trunin, A.B. Nesterko (2019). Rehulivannia napruhy v rozpodilnykh elektrychnykh merezhakh z vidnovliuvanymy dzherelamy enerhii [Voltage regulation in distribution networks with renewable energy sources]: Monograph Kyiv: KPI named after Igor Sikorskyi, 191.

6. Bordakov, M. M. (2019). Doslidzhennia efektyvnosti roboty invertora tsentralnoho typu na promyslovii soniachnii elektrostantsii [Study of the efficiency of the central type inverter at an industrial solar power plant]. Renewable energy. 3, 35-41.

7. Liu J., Du X., Su. X., Tai H-M. (2023). A phase feed-forward method to enhance inverter-grid system stability. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 3, vol. 150, 109106.

8. Kumar N., Raglend J. (2021). Multi-objective Control of Multi-Operational Grid-Integrated Inverter for PV Integration and Power Quality Service. Naveen Kumar, I. Jacob Raglend. Ain Shams Engineering Journal 9/12, 2859-2874.

FEATURES OF THE FUNCTIONING OF SMALL POWER SOLAR GENERATION IN THE IPS OF UKRAINE UNDER THE CONDITIONS OF THE GREEN TRANSFORMATION

A. Pustovij, Y. Veremiichuk

Abstract. *Within the framework of the transformation of the energy system in terms of ensuring the further development of small distributed generation from renewable*

energy sources, a new support model for low-power facilities is proposed, which will facilitate the commissioning of new generation entities. In the paper, research is conducted on the problem of small generation in Ukraine, which is faced by the power system, in the conditions of an increase in the share of distributed generation. An assessment of the impact of small solar power plants on the operation of the electrical network, including rooftop ones installed in households, was carried out. Typical schemes of connection of SPPs to the electrical network are considered and their influence on electrical equipment, elements of power supply systems and principles of operation are determined. It has been established that the integration of new renewable energy entities, including low-power SPPs, causes a number of technical problems that have an impact on the operational characteristics of the network, security of supply, and reliability. The main ways of solving the problems of losses and deviations of the voltage level in distribution networks, when connecting small SPPs, have been formed. In further research, the obtained results will be used to develop proposals for connecting low-power entities to the electric network and their formalization in the form of provisions of regulatory and technical documents.

Key words: *renewable energy sources, small generation, voltage deviation, losses in distribution networks, solar power plant, connection to the electrical network*