

УДК 621.311

ОБМЕЖЕННЯ ПОТУЖНОСТІ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ЗА УМОВАМИ ПРИЄДНАННЯ ДО ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ

В.В. Павловський, докт. техн. наук, **Л.М. Лук'яненко**, канд. техн. наук, **І.С. Гончаренко**, асп.,
А.М. Захаров, асп.

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна
e-mail: lukianenko.lukian@gmail.com

Використання лише потужності короткого замикання як критерію оцінки місць підключення і потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) до електричної мережі не завжди враховує реальні властивості мережі й може призводити до прийняття неоптимальних рішень. У статті розроблено критерій («К2»), що дає змогу визначити граничну потужність ВДЕ, яку можна підключити до певного вузла з врахуванням «міцності» його прив'язки до мережі та чутливості до коливання напруги. Використання запропонованого критерію дає змогу більш коректно визначати вузли підключення ВДЕ з технічної точки зору. На основі аналізу розрахункових значень критерію «К2» для різних електричних мереж України визначено діапазони його зміни для випадків 5- і 10 %-вого відхилення напруги на відповідних системних шинах. Бібл. 7, рис. 5. табл. 3.

Ключові слова: відновлювані джерела енергії, критерій підключення до мережі, електричні мережі, потужність КЗ.

Вступ. У багатьох розвинених країнах світу постійне зростання попиту на електроенергію задовольняється, у тому числі й завдяки підключенню до електричних мереж (ЕМ) відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). До основних переваг ВДЕ слід віднести зниження екологічного навантаження на навколишнє середовище та значне скорочення тривалості будівництва таких електростанцій порівняно з традиційними. Ці тенденції розвитку притаманні й Україні. Протягом останніх років системним оператором України (НЕК «Укренерго») було видано значну кількість технічних завдань на виконання ТЕО та технічних умов приєднання ВДЕ до мереж об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України. За наближеними оцінками йдеться про загальну встановлену потужність ВДЕ на рівні 7...10 ГВт, значна частина якої буде зосереджена у південній частині ОЕС України. За таких умов постає низка питань щодо врахування особливостей роботи ВДЕ при плануванні та керуванні режимами роботи ОЕС України.

Як відомо [1, 4], ВДЕ створюють певні проблеми, пов'язані зі стабільністю, надійністю та економічністю режимів роботи електромереж, до яких вони приєднуються. В першу чергу ці проблеми постають перед диспетчерськими службами в плані «ведення режиму» ОЕС України. Вплив флуктуаційного характеру роботи ВДЕ на керованість та стійкість режимів роботи енергосистеми є важливим чинником. Так, одночасне коливання потужності багатьох ВДЕ можуть внести суттєву нестабільність у режими роботи енергосистем. Враховуючи, що сучасні вітряні турбіни, як правило, підключаються до мережі з використанням повного перетворювача, немає принципової різниці між сонячними (СЕС) та вітровими (ВЕС) електростанціями.

Складний характер впливу ВДЕ на енергосистему обумовлює необхідність розробки спеціальних вимог до таких електростанцій. Зокрема, це стосується можливості підтримки частоти та напруги на заданому рівні [3]. Вироблення електроенергії електростанціями на базі ВДЕ може постійно змінюватись відповідно до місяця, години доби та погодних умов (хмарності, сили вітру та ін.), тоді як системний оператор має постійно підтримувати баланс між генерацією та споживанням енергії. Зважаючи на зазначене, на шляху широкого впровадження ВДЕ в Україні будуть виникати певні технічні проблеми, причому вони будуть різними на різних етапах [1]. Об'єднує їх одне – необхідність посилення електричних мереж та/або застосування гнучких засобів компенсації. Причому проблеми, притаманні ВДЕ, можуть посилюватись, якщо підключення ВДЕ зроблене в неоптимальному місці з точки зору ефективності функціонування ЕМ. Визначення місць підключення ВДЕ до мережі з врахуванням усіх чинників – це досить складна проблема [7], вирішення якої виходить за рамки цієї статті. Зважаючи на значну вартість заходів з посилення мережі та засобів гнучкої компенсації флуктуаційного характеру роботи ВДЕ, спочатку доцільно розглянути можливість та умови приєднання ВДЕ без таких додаткових засобів.

Таким чином, метою цієї роботи є розробка критерію оцінки гранично-допустимої пікової потужності ВДЕ, приєднання якої до одного вузла електричної мережі не призведе до неприпустимих відхилень напруги у місці підключення за умови, що в ЕМ не застосовуються додатково будь-які засоби компенсації реактивної потужності. Однією із складових задач є визначення цього критерію з урахуванням особливостей ОЕС України.

Аналіз світових підходів до оцінки місць підключення ВДЕ. У світовій практиці для оцінки «міцності» мережі з точки зору приєднання ВДЕ використовують, як правило, відношення потужності короткого замикання (КЗ) на системних шинах (СШ) $S_{КЗ_СШ}$ до потужності ВДЕ, що підключається до ЕМ (критерій K):

$$K = \frac{S_{КЗ_СШ}}{P_{ВДЕ}} \quad (1)$$

Таблиця 1

K	Дослідження, які треба виконати для підключення ВЕС
≥ 5	Ніяких спеціальних досліджень виконувати не треба
$3 \div 5$	Аналіз аварійних ситуацій. Можливе необхідне застосування компенсації
$2 \div 3$	Детальний аналіз аварій та оцінка стійкості системи. Компенсація флюктуаційного характеру ВЕС (скоріш за все) буде потрібна
< 2	Аналіз статичної та динамічної стійкості з настроюванням контролерів ВЕС

На базі цього критерію на практиці виконується наближена оцінка можливості підключення ВДЕ (СЕС або ВЕС) певної потуж-

ності до обраного вузла електромережі. Наприклад, фірма *Vestas* у своїх дослідженнях використовує значення критерію (K), наведені в табл. 1.

Хоча табл. 1 розроблена для вітрових електричних станцій, але, враховуючи викладене стосовно сучасних ВЕС та СЕС, можна певною мірою поширити ці результати і на СЕС. Системний оператор України в деяких проектах [5] використовує значення $K > 7-10$ як критерій приєднання ВЕС до ОЕС України. Проте, як свідчить досвід проведених розрахункових досліджень режимів з урахуванням СЕС та ВЕС для регіонів їх значної концентрації (наприклад, енергорайони Одеської та Кіровоградської областей, ЕС Криму), цього часто буває недостатньо. Можуть виникати ситуації, в яких критерій на базі «потужності КЗ» не досить коректно характеризує точки підключення ВДЕ до системи, не враховує окремі режимні питання, а саме відхилення напруги на шинах при зміні потужності генерування чи навантаження. Для цього використовуємо метод $V-Q$ чутливості.

Метод $V-Q$ чутливості. Як зазначено у [6], модель УР енергосистеми в лінеаризованій формі можна представити у вигляді

$$\begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{P\delta} & J_{PV} \\ J_{Q\delta} & J_{QV} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta V \end{bmatrix}, \quad (2)$$

де ΔP , ΔQ , $\Delta \delta$, ΔV – прирости активної та реактивної потужностей, кута та амплітуди напруги на шинах; $J_{P\delta}$, J_{PV} , $J_{Q\delta}$, J_{QV} – елементи матриці Якобі, що відображають взаємну кореляцію (чутливість) між перетоками потужностей та зміною напруг на СШ.

Стабільність напруги в системі залежить від коливання P та Q . При цьому, якщо в кожній робочій точці забезпечити P постійним ($\Delta P = 0$), то можна оцінити стабільність напруги шляхом розгляду додаткових зв'язків між Q і V . Таким чином, з врахуванням наведеного можна записати:

$$\Delta Q = J_R \cdot \Delta V \quad \text{або} \quad \Delta V = J_R^{-1} \cdot \Delta Q, \quad (3)$$

де

$$J_R = [J_{QV} - J_{Q\delta} \cdot J_{P\delta}^{-1} \cdot J_{PV}]. \quad (4)$$

Матриця J_R є скороченим Якобіаном, а її i -м діагональним елементом є $V-Q$ чутливість на шині i . Недіагональні елементи матриці J_R визначають зміни напруги на i -й шині у зв'язку зі зміною балансу реактивної потужності у різних вузлах мережі. Позитивне значення $V-Q$ чутливості свідчить про стабільну роботу певних СШ. Чим менша величина чутливості, тим більш стійкою є система. При зменшенні стабільності напруги величина чутливості збільшується і стає нескінченною ($+\infty$) на межі стійкості енергосистеми. Чинним є і зворотне твердження: негативна $V-Q$ чутливість свідчить про нестійку роботу системи. Від'ємне значення величини чутливості свідчить про виникнення нестійкого режиму роботи енергосистеми.

Слід зауважити, що $V-Q$ чутливість є достатньо практичним критерієм, оскільки вона досить легко обчислюється в рамках розв'язання рівнянь усталеного режиму методом Ньютона. Перевагами цього методу є те, що він безпосередньо дає інформацію щодо стійкості енергосистеми за напругою та оцінку міри стабільності напруги із загальносистемної точки зору. Метод дає змогу виконати ранжирування системних шин за критерієм «слабкості» за напругою.

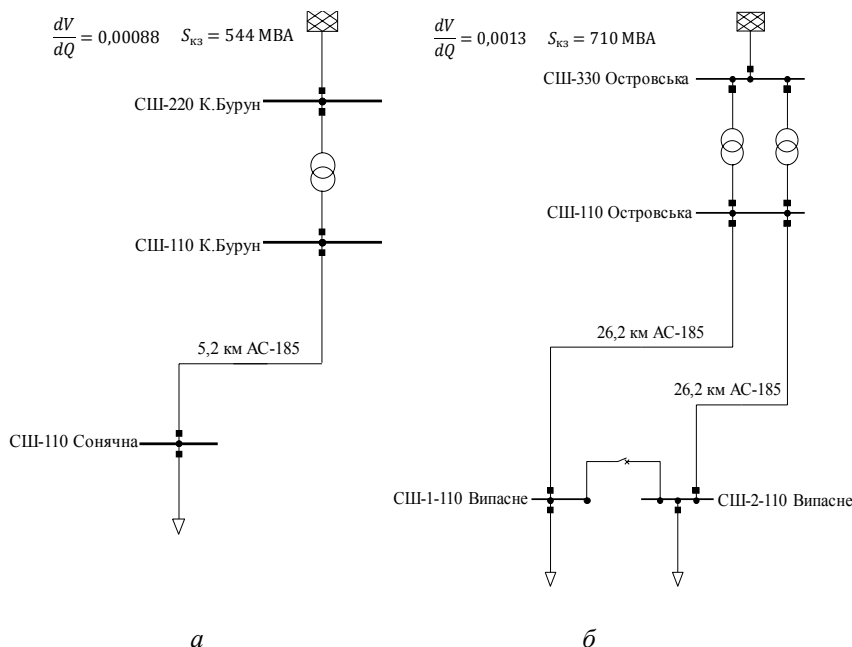


Рис. 1

Для прикладу розглянемо два випадки приєднання ВДЕ до ЕМ, зображені на рис. 1. Тут наведено спрощені схеми двох підстанцій (ПС) 110 кВ (ПС-110 кВ «Сонячна» (а) та ПС-110 кВ «Випасне» (б)). Для ПС «Сонячна» на місці приєднання ВДЕ характерне низьке значення коефіцієнта чутливості напруги до коливання реактивної потужності, що обумовлює незначні коливання напруги, і невелика потужність КЗ, що характерно для об'єктів зі слабкими зв'язками з енергосистемою. А для ПС «Випасне», навпаки, характерна більш велика потужність КЗ (відповідає більш сильній прив'язці до системи) і більш висока чутливість (характеризує значні коливання напруги на такій ПС). Якщо оцінювати ці ПС тільки за критерієм K («потужність КЗ»), то ПС-110 кВ «Випасне» є більш доцільним місцем з точки зору приєднання ВДЕ. З точки зору коливання напруги (критерій чутливості) ВДЕ більш доцільно приєднати до ПС «Сонячна». Це пояснюється тим, що ПС «Випасне» підключається до потужної підстанції 330 кВ через більш довгу лінію (26 км), а ПС «Сонячна», навпаки, через більш коротку лінію, але до підстанції з меншою потужністю КЗ.

Таким чином, необхідно мати інший критерій, більш інформативний, ніж критерій K , який би враховував не тільки «міцність» зв'язку ПС з енергосистемою, а й ступінь коливання напруги на цій ПС. Тому запропоновано поєднати досить поширений критерій на базі потужності КЗ та метод $V-Q$ чутливості, пов'язаний зі стійкістю за напругою [2]. З метою ілюстрації зв'язку між стійкістю за напругою та методу $V-Q$ чутливості розглянемо стисло основні положення останнього.

Розробка критерію оцінки гранично-допустимої потужності ВДЕ за умовами приєднання до електричної мережі (критерій $K2$). На основі проведеного дослідження запропоновано декілька модифікацій технічного критерію оцінки місць підключення ВДЕ до вузлів електромережі. Зважаючи на стислі рамки цієї статті, пропонується проаналізувати та порівняти тільки дві з них.

Для розробки критерію оцінки місць підключення ВДЕ до мережі та їх потужності, відключення якої не буде призводити до недопустимого відхилення напруги, було проведено відповідні розрахункові дослідження, під час яких на обрані СШ встановлювались віртуальні об'єкти ВДЕ. Їх потужність підбиралась таким чином, щоб відхилення напруги не перевищувало задану величину (наприклад, 5 або 10 %). На основі таких розрахунків було визначено потужності ВДЕ, вимкнення або ввімкнення яких призводить до відхилення напруги на задану величину для регіонів зі значним рівнем впровадження ВДЕ. Також для цих СШ було розраховано потужність КЗ та значення $V-Q$ чутливості. Проведений аналіз дав змогу запропонувати як новий критерій використовувати значення потужності КЗ з урахуванням значення чутливості до напруги. В процесі виконання досліджень було розглянуто та перевірено різні вирази такого критерію.

Дві модифікації, формули для обчислення, ($K2 = \frac{S_{K3_i} \cdot \left(1 - \frac{dV_i}{dQ_i}\right)^2}{S_{ВДЕ}}$ та $K2^* = \frac{S_{K3_i} \cdot \left(1 - \frac{dV_i}{dQ_i}\right)}{S_{ВДЕ}}$) проілюстровано на рис. 2 та в табл. 2.

Якщо проаналізувати результати в табл. 2, то можна ще раз побачити, що потужності ВДЕ не повною мірою корелюються з підходом на базі критерію потужності КЗ. Наприклад, при однаковому відхиленні напруги для ПС-110 кВ «Скло» відношення $S_{K3_СШ} / P_{ВДЕ}$ становить 4,2, а для ПС-110 кВ «Ковильне» – 8,2 (за критерієм (1)). Це ще раз підтверджує той факт, що необхідно враховувати реакцію напруги на коливання потужності ВДЕ. Більш наочно порівняння відношення потужності ВДЕ до реальної потужності КЗ та «приведеної» потужності КЗ показано на рис. 2, з якого видно, що «приведені» значення потужності КЗ згладжують викиди відношення $S_{K3} / S_{ВДЕ}$, тим самим даючи змогу визначити рекомендовані значення коефіцієнта (1) у більш вузькому діапазоні.

Таблиця 2

№	ПС 110 кВ	dU , [в.о.]	$V-Q$ чутливість [в.о./Мвар]	$P_{ВДЕ}$, МВт	$S_{ВДЕ}$, МВА	S_{K3} , МВА	$K2^*$	$K2$
1	Скло	0,10	0,107	125	139	525	3,4	3,0
2	Сонячна		0,093	135	150	554	3,4	3,0
3	Леніне		0,131	112	124	550	3,8	3,3
4	Випасне		0,145	112	124	710	4,9	4,2
5	Геліос		0,058	300	333	1397	3,9	3,7
6	Таврія		0,097	170	189	917	4,4	4,0
7	Ковильне		0,367	35	39	289	4,7	3,0
8	Глібівка		0,237	53	59	423	5,5	4,2
9	ПС-19		0,053	370	411	1523	3,5	3,3
10	Схід		0,077	200	222	858	3,6	3,3

На основі цих досліджень було прийнято остаточне рішення застосовувати наступну модифікацію (формулу розрахунку) критерію $K2$

$$K_{2_i} = \frac{S_{K3_i} \cdot \left(1 - \frac{dV_i}{dQ_i}\right)^2}{S_{ВДЕ}}, \quad (5)$$

де S_{K3} – потужність КЗ на відповідних i -х шинах; dV_i / dQ_i – чутливість, розрахована на цих же i -х шинах. Використання цього критерію дає змогу врахувати дві характеристики мережі: «міцність» прив'язки ПС до енергосистеми та ступінь чутливості коливання напруги на ПС до коливання реактивної потужності.

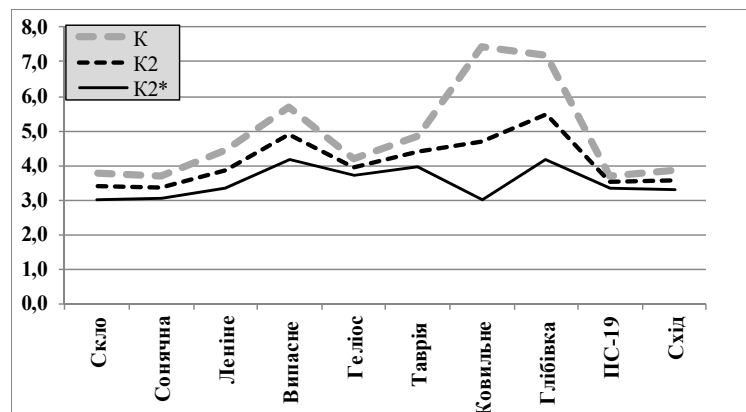
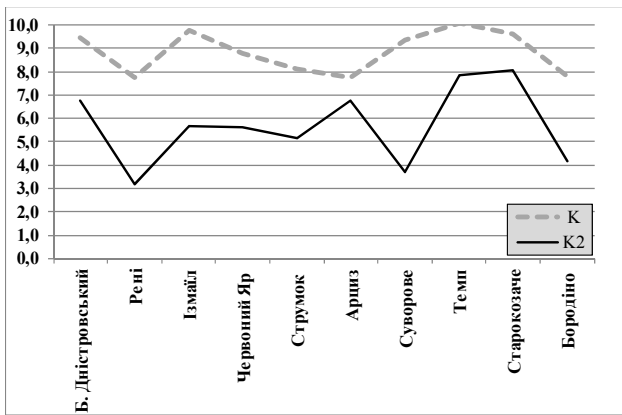


Рис. 2

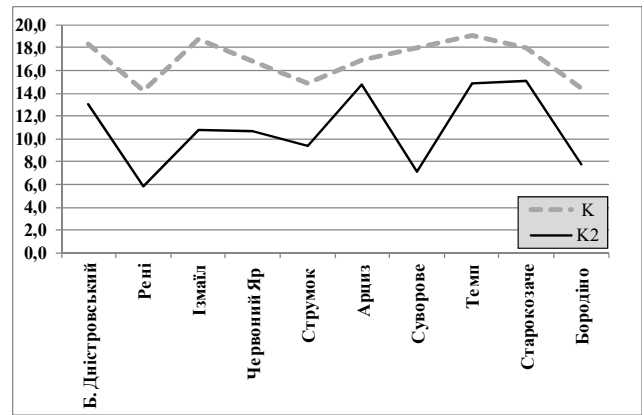
Визначення значень критерію оцінки гранично-допустимої потужності ВДЕ з врахуванням особливостей ОЕС України. З метою визначення значення критерію $K2$ було проведено моделювання усталених режимів для електричних мереж зі значною концентрацією ВДЕ (Кримська ЕС, мережі півдня Одеської області та Кіровоградобленерго). У процесі розрахунків на кожен з підстанцій вказаних ЕМ встановлювалась віртуальна електростанція ВДЕ, потужність якої вибиралась за критерієм обмеження відхилення рівня напруги. При моделюванні враховувались два режими: 1. Відхилення напруги (ΔU) через встановлення ВДЕ має не перевищувати 10 % від номінальної, при цьому ВДЕ могли виконувати регулювання напруги на своїх СШ з урахуванням $\cos\varphi=0,90$; 2. Відхилення напруги через встановлення ВДЕ має не перевищувати 5 % від номінальної, при цьому ВДЕ могли виконувати регулювання напруги на своїх СШ з урахуванням $\cos\varphi=0,95$.

У результаті проведеного моделювання було визначено потужності ВДЕ, які спричиняють відхилення напруги на окремих СШ на 10 та 5 % відповідно. На основі отриманих розрахованих даних було запропоновано та розраховано відношення приведенної потужності КЗ до гіпотетичної потужності ВДЕ (критерій $K2$), яка призводить до відхилення напруги на 5 та 10 % на СШ, до яких виконувалось її підключення. Результати порівняння критеріїв $K2$ та K для випадків 5- і 10 %-ого відхилення напруги для різних енергорайонів зі значною концентрацією ВДЕ (мережі Одесаобленерго, Кіровоградобленерго та ЕС Криму) представлено на рис. 3–5 відповідно. Результати отриманих розрахункових даних було узагальнено та зведено до табл. 3.

На основі аналізу рис. 3–5 та табл. 3, по-перше, можна зробити висновок, що різниця у діапазонах зміни критеріїв $K2$ та K для випадків 5- і 10 %-ого відхилення напруги в результаті підключення ВДЕ обумовлена різними характеристиками мереж різних енергорайонів. Так, для випадку 5 %-ого відхилення напруги відношення $K2$ змінюється в діапазоні 7...11, а для 10 %-ого відхилення напруги – в діапазоні 4...6. З урахуванням визначених діапазонів зміни напруги розраховуються максимальні значення потужностей ВДЕ, що можуть бути приєднані до підстанцій ОЕС України.

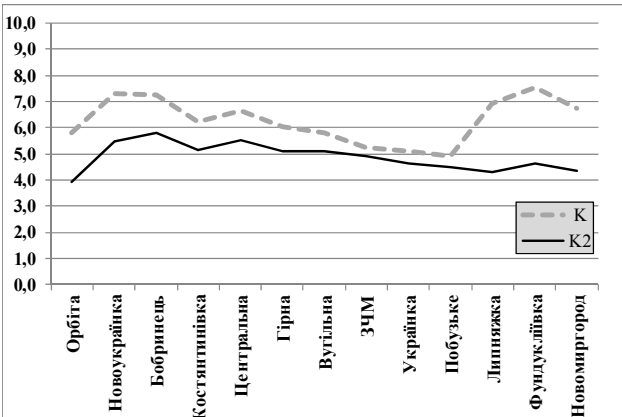


cosφ=0,90, ΔU=10 %

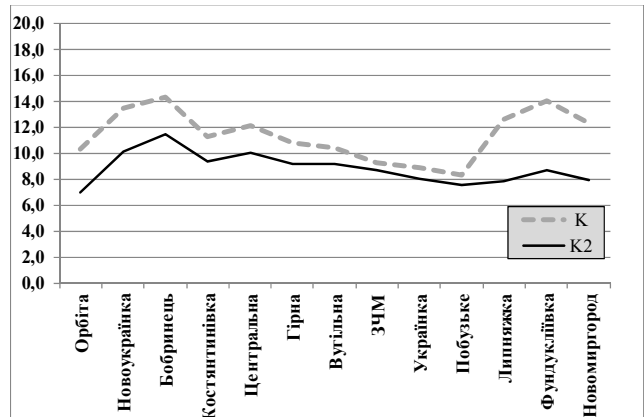


cosφ=0,95, ΔU=5 %

Рис. 3

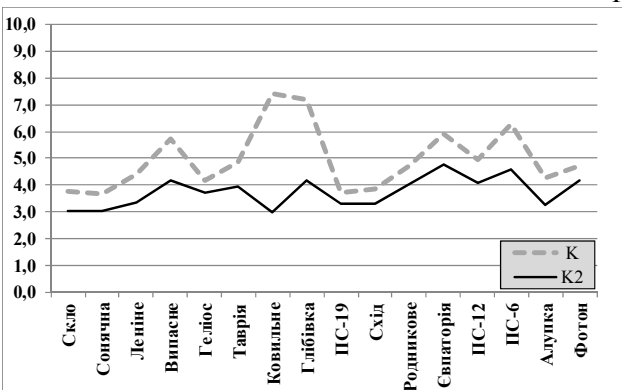


cosφ=0,90, ΔU=10 %

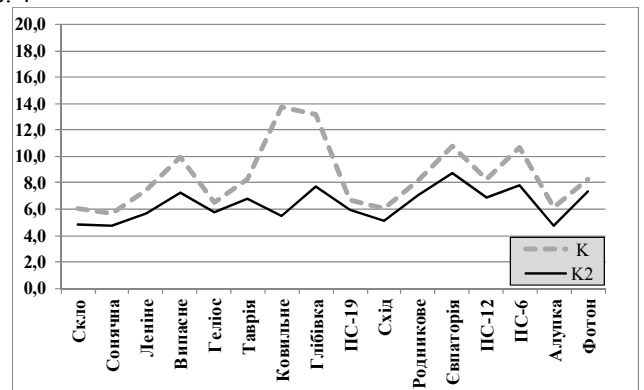


cosφ=0,95, ΔU=5 %

Рис. 4



cosφ=0,90, ΔU=10 %



cosφ=0,95, ΔU=5 %

Рис. 5

Таблиця 3

Варіант виконання розрахунків		Значення критерію $K2$ (відношення приведеної потужності $K3$ до потужності ВДЕ) для мереж:		
		Одесаобленерго	Кіровоградобленерго	Кримської ЕС
$\cos\varphi=0,90$ $\Delta U=10\%$	Розкид значень	4...8	3...5	4...6
	Середнє значення	6	4	5
$\cos\varphi=0,95$ $\Delta U=5\%$	Розкид значень	6...15	5...9	7...11
	Середнє значення	11	7	9

Висновки. Використання лише розрахункової потужності $K3$ у місці приєднання ВДЕ до електричної мережі як універсального критерію для оцінки максимальної потужності ВДЕ не завжди враховує реальні властивості мережі на місці приєднання ВДЕ і тому може призводити до значних помилок, завищуючи допустиму потужність ВДЕ, яку можна підключити до певної СШ.

Запропоновано критерій $K2$, який дає змогу визначати максимальну потужність ВДЕ при підключенні до певних системних шин з урахуванням як міцності «прив'язки» цих СШ до мережі, так і чутливості (напруги до коливання реактивної потужності на цих СШ). На основі розрахункових досліджень значень критерію $K2$ для різних електричних мереж України визначено діапазони його значень для випадків 5- і 10 %-ого відхилення напруги в результаті підключення ВДЕ.

1. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М. Технічні аспекти впровадження джерел розподільної генерації в електричних мережах // Техн. електродинаміка. – 2011. – № 1. – С. 46–53.
2. Кириленко О.В., Павловський В.В., Лук'яненко Л.М., Зорін Є.В. Аналіз стійкості енергетичних систем за напругою // Техн. електродинаміка. – 2010. – № 3. – С. 59–66.
3. Вимоги до вітрових та сонячних фотоелектричних електростанцій потужністю більше 150 кВт щодо приєднання до зовнішніх електричних мереж. AF-Mercados EMI; Національна комісія з регулювання електроенергетики України; European Bank; EXERGIA; RAMBOLL. 2011
4. Ackermann T., Andersson G., Soder L. Distributed generation: a definition // Electric Power Systems Research. – 2001. – Vol. 57. – P. 195–204.
5. Black Sea Regional Transmission Planning Project: Renewable Energy Compendium Report. March 19, 2012.
6. Kundur P. Power system stability and control – McGraw-Hill, 1994. – 1176 p.
7. Lukianenko L., Goncharenko I., Blonska O. Determination of the Optimal Placement and Capacity of Distributed Generation // International Conference on intelligent Energy and Power Systems. – 2014. – Vol. 1. – P. 159–162.

УДК 621.311

В.В. Павловський, докт. техн. наук, **Л.Н. Лук'яненко**, канд. техн. наук, **І.С. Гончаренко**, асп., **А.М. Захаров**, асп. Інститут електродинаміки НАН України, пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,

Ограничение мощности возобновляемых источников энергии по условию присоединения к электрической сети
Использование только мощности $K3$ в качестве критерия оценки мест подключения и мощности возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в сети не учитывает реальные свойства сети и может приводить к принятию неоптимальных решений. В статье разработан критерий ($K2$), который позволяет определить мощность ВИЭ, которую можно подключить к определенному узлу с учетом его привязки к сети и чувствительности к колебаниям напряжения. Использование предложенного критерия позволяет более корректно определять узлы подключения ВИЭ с технической точки зрения. На основании анализа расчетных значений критерия $K2$ для различных электрических сетей Украины определены диапазоны его изменения для случаев 5- и 10 %-ного отклонения напряжения на соответствующих системных шинах. Библ. 7, рис. 5, табл. 3.

Ключевые слова: возобновляемые источники энергии, мощность $K3$, критерий подключения к сети, электрические сети.

V.V. Pavlovskiy, L.M. Lukianenko, I.S. Goncharenko, A.M. Zaharov

Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Peremohy, 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Limitation of RES power under the terms of connection to electric network

Using only the short-circuit power for evaluation of the place and capacity renewable power to the grid not always take into account the real properties of the network and may lead to the adoption of wrong decisions. In this article the criterion of " $K2$ ", which can determine the capacity of renewable energy, which can be safely connected to one node have been developed. Using the criterion of " $K2$ " can help to more correctly determine the nodes connecting renewables from a technical point of view. Based at load flow calculation for various distribution networks of Ukraine the range of changing of criteria " $K2$ " have been defined for the cases of 5- and 10 % voltage deviation on the corresponding system buses. References 7, figures 5, tables 3.

Key words: renewable energy, short-circuit power, the criterion of network connectivity, power grids.

Надійшла 28.12.2015

Received 28.12.2015