УДК 621.311

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ ВСТАНОВЛЕНОЇ ПОТУЖНОСТІ ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИМ ДЖЕРЕЛАМИ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

Бурикін О. Б.[1], Малогулко Ю. В.[1], Томашевський Ю. В.[2], Семенюк Ю. В.[1]

[1]Вінницький національний технічний університет,
[2]ПАТ "Вінницяобленерго"

В статті запропоновано метод визначення оптимальної встановленої потужності відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в електричних мережах (ЕМ). Оптимальну потужність генерування ВДЕ доцільно розв'язувати за комплексним критерієм, який враховує прибуток від функціонування ВДЕ, показники якості електроенергії та втрати на її транспортування електричними мережам. При визначенні показника якості електроенергії визначається імовірність забезпечення нормативного відхилення напруги та втрат електроенергії для заданого звітного періоду. Це дозволить мінімізувати можливі недоліки проектних рішень та покращити ефективність функціонування ЕМ.

Постановка проблеми. Стрімка децентралізація електропостачання споживачів, які пов'язані зі збільшенням вартості традиційних паливних ресурсів і проявляються у підвищенні частки розосередженого виробництва електроенергії за допомогою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), призводить до ускладнення планування режимів електроенергетичних систем (ЕЕС) та оперативного керування ними. В зв'язку з цим, державна підтримка розбудови відновлюваної енергетики стимулює дослідження питань проектування та експлуатації ВДЕ з метою підвищення рівня енергетичної безпеки країни та зниження впливу енергетики на довкілля. Не зважаючи не це, питаннями транспортування електроенергії виробленої ВДЕ та функціонування районних електричних мереж (РЕМ) у нових експлуатаційних умовах часто нехтують вже на етапі проектування ВДЕ [1–2].

Не достатня дослідженість питань проектування та експлуатації ВДЕ, їх впливу на режими роботи електричних мереж (ЕМ), неузгодженість номінальних параметрів основного обладнання з потребами таких джерел, відсутність типових рішень стосовно засобів захисту та автоматизації процесу виробництва електроенергії в сучасних умовах не дозволяє приймати обґрунтовані проектні рішення під час їх розбудови, а також не дозволяє ефективно їх експлуатувати [3].

Таким чином, актуальну задачу оптимізації функціонування ВДЕ в локальних електричних системах можна розв'язувати як задачу проектування – для визначення оптимальної встановленої потужності, та як експлуатаційну задачу – для оптимізації добових режимів генерування відновлюваних джерел та схеми видачі електроенергії мережами локальних електричних систем з ВДЕ. Це дозволить підвищити прибутковість енергопостачальних та енергогенерувальних компаній за рахунок покращення експлуатаційних характеристик електрообладнання ЕМ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В сучасній інженерній практиці розв'язується ряд задач оптимізації режимів роботи розподільних електричних мереж з ВДЕ. Такі задачі, як автономна робота ВДЕ, розташування комутаційного обладнання та формування комунікаційної мережі тісно взаємопов'язані та практично не можуть бути розв'язані в сучасних умовах [4]. Автономна робота ВДЕ, зважаючи на нестабільність цих джерел енергії, є фактично неможливою без розвиненої комунікаційної мережі, наявність якої дозволє отримувати двосторонній зв'язок між ВДЕ та споживачами електроенергії, відповідно до концепції Smart Grid [5], та регулювати режими електроспоживання підтримуючи умови автономної роботи.

Перераховані задачі розв'язують шляхом декомпозиції на задачі оптимізації функціонування ВДЕ та задачі функціонування ЕМ, кожну з яких розв'язують використовуючи один із критеріїв оптимальності, таких як: мінімум втрат електроенергії [6-7], якість електроенергії [8], надійність електропостачання, пропускна спроможність [9], швидкість відновлення напруги, максимум видачі потужності, максимум прибутку, мінімум інвестицій [10] тощо.

Метою статті є розроблення методу визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ в ЕМ. Оптимальну потужність генерування ВДЕ доцільно розв'язувати за комплексним критерієм, який враховує прибуток від функціонування ВДЕ, показники якості електроенергії та втрати на її транспортування мережами ЕМ. При визначенні показника якості електроенергії визначається імовірність забезпечення нормативного відхилення напруги та втрат електроенергії для заданого звітного періоду.

Основні матеріали дослідження. Для розв'язання задачі визначення оптимальної встановленої потужності за комплексним критерієм із урахуванням специфіки забезпечення рентабельності функціонування ЕМ, доцільно скористатись таким виразом сумарного прибутку від функціонування ВДЕ, поєднаних на паралельну роботу у ЕМ [11]

$$П^{ВДЕ} = \sum_{j=1}^{n}\left[ц_j \cdot P_j^{ВДЕ} \cdot k_{в_j} \cdot T \right], \qquad (1)$$

де $P_j^{ВДЕ}$ – встановлена потужність j-го ВДЕ, кВт;

$ц_j$ – тариф на виробництво електроенергії j-м ВДЕ ("зелений тариф"), коп/кВт·год.;

$k_{в_j}$ – коефіцієнт використання встановленої потужності j-го ВДЕ;

T – тривалість графіка навантажень, год.

З урахуванням (1) цільова функція задачі вибору оптимальної встановленої потужності відновлюваних джерел енергії в ЛЕС має такий вигляд

$$Ц = П^{ВДЕ} \cdot e^{-z_1} \cdot e^{-z_2} \rightarrow \max, \qquad (2)$$

за обмеження

$$\sum_{j=1}^{n} P_j^{ВДЕ} - \sum_{g=1}^{m} P_{H_g} \le P_{гр}, \qquad (3)$$

де e^{-z_1}, e^{-z_2} – експоненційні залежності, які визначають ступінь впливу складових критерію оптимальності функціонування;

$z_1 = k_1 \cdot \left(1 - \overline{P}\left(Uy_{доп}, T\right)\right)$ – показник рівняння регресії, який враховує обмеження прибутку від функціонування ВДЕ за критерієм якості електроенергії;

$z_2 = k_2 \cdot \left(1 - \overline{P}\left(\Delta W_{доп}, T\right)\right)$ – показник рівняння регресії, який враховує обмеження прибутку від функціонування ВДЕ за критерієм втрат електроенергії на її транспортування;

k_1, k_2 – вагові коефіцієнти рівняння регресії, для коригування впливу частинних критеріїв оптимальності на результати оптимізації;

$\overline{P}\left(Uy_{доп}, T\right)$ – імовірність забезпечення нормативного відхилення напруги для заданого звітного періоду T;

$\overline{P}\left(\Delta W_{доп}, T\right)$ – імовірність забезпечення нормативних втрат електроенергії для заданого звітного періоду T;

P_{H_g} – потужність навантаження g-го вузла споживання;

g = 1,2…m;

$P_{гр}$ – пропускна здатність електричних мереж ЛЕС, що обмежується найбільш слабкою ділянкою мережі.

Розв'язком задачі оптимізації (2) буде значення оптимальної встановленої потужності ВДЕ в мережі за умов багатоступеневого тарифу енергоринку цj та дотримання обмежень за пропускною здатністю ліній електропередачі та якістю електроенергії в ЛЕС.

Оцінювання імовірності забезпечення нормативного відхилення напруги для заданого звітного періоду. Відхилення напруги характеризується показником усталеного відхилення напруги δU_y. Воно є наслідком добових, сезонних і технологічних змін електричних навантажень споживачів, а також потужності компенсуючих пристроїв, регулювання напруги генераторами електростанцій та на підстанціях енергосистем, змін схеми електричних мереж.

Відхилення напруги δU_y – це різниця між фактичним U_t та номінальним $U_н$ значеннями напруги в абсолютних одиницях

$$\delta U_y = \frac{\left|U - U_{ном}\right|}{U_{ном}}, в.о. \qquad (4)$$

Для нього встановлені норми:

– нормально допустимі та гранично допустимі значення усталеного відхилення напруги δU_y на вводах електроприймачів дорівнюють відповідно 5% та 10% від номінальної напруги електричної мережі;

– нормально допустимі та гранично допустимі значення напруги в точках загального приєднання споживачів електричної енергії до електричних мереж напругою 0,38 кВ і більше повинні бути встановлені в угодах на використання електричної енергії з урахуванням необхідності виконання чинного стандарту на виводах електроприймачів.

Якість електричної енергії відповідає вимогам стандарту, якщо всі значення усталеного відхилення напруги, що виміряні протягом 24 год., знаходяться в інтервалі, обмеженому гранично допустимими значеннями, а не менше 95% вимірювань за цей період знаходяться в інтервалі обмеженому нормально допустимими значеннями.

Статистичну оцінку ймовірності забезпечення нормативного відхилення напруги пропонується визначати за формулою для статистичної оцінки ймовірності безвідмовної роботи технічних засобів, що для нашої задачі набуде вигляду

$$\overline{P}\left(Uy_{доп}, T\right) = \frac{t_{сум}\left(Uy_{\min} \le Uy_{доп} \le Uy_{\max}\right)}{T}, \qquad (5)$$

де $t_{сум}\left(Uy_{\min} \le Uy_{доп} \le Uy_{\max}\right)$ – сумарний час коли значення усередненої напруги знаходилось у допустимих межах.

Таким чином, використання ймовірності забезпечення нормативного відхилення напруги, в якості змінної в цільовій функції (2), дозволяє враховувати показник якості напруги під час розрахунку оптимального значення сумарного прибутку від експлуатації ВДЕ.

Оцінювання імовірності забезпечення нормативних втрат електроенергії та потужності. Для визначення ймовірності забезпечення нормативного відхилення втрат електроенергії у цільовій функції (2) використано вираз аналогічний (5)

$$\overline{P}\left(\Delta W_{доп}, T\right) = \frac{t_{сум}\left(\Delta W_{факт} \le \Delta W_{доп}\right)}{T}, \qquad (6)$$

де $t_{сум}\left(\Delta W_{факт} \le \Delta W_{доп}\right)$ – сумарний час, впродовж якого значення втрат електроенергії знаходилось у межах нормативного відхилення;

$\Delta W_{факт}$ – фактичні втрати електроенергії в ЕМ, в. о.;

$\Delta W_{доп}$ – нормативні або гранично допустимі втрати електроенергії ЕМ, в. о.

Значення нормативних втрат електроенергії визначаються відповідно до нормативного обсягу технологічних витрат при транспортуванні електроенергії для ІІ категорії споживачів та ІІ класу електричних мереж (10 кВ) згідно з постановою НКРЕ [12] та внутрішніх норм енергопостачальної компанії, що визначаються для кожної ЛЕС на підставі аналізу добових графіків генерування та споживання мережі за попередні періоди.

Визначення вагових коефіцієнтів рівнянь регресії комплексного критерію оптимальності функціонування локальної електричної системи. Регресійні залежності $e^{-k_1\cdot\left(1-\overline{P}\left(Uy_{доп},T\right)\right)}$, $e^{-k_2\cdot\left(1-\overline{P}\left(\Delta W_{доп},T\right)\right)}$ що запропоновані (2) є експоненційними функціями. Їх степеневі показники враховують обмеження прибутку від функціонування ВДЕ за рахунок невідповідної якості електроенергії та втрат електроенергії на її транспортування. Вагові коефіцієнти рівняння регресії, які визначають ступінь впливу критеріїв оптимальності функціонування, пропонується визначати за допомого методів регресійного аналізу, що полягає в аналітичному виявленні вагових коефіцієнтів рівняння регресії на підставі статистичної інформації. Відповідно до правил користування електричною енергією [13], в разі постачання електричної енергії, параметри якості якої перебувають поза межами показників, зазначених у договорі про постачання електричної енергії, постачальник електричної енергії за регульованим тарифом несе відповідальність перед споживачем у розмірі двадцяти п'яти відсотків вартості обсягу такої енергії, тобто, за певних допущень, прибуток від експлуатації ВДЕ для вказаного часового інтервалу становитиме 75% відсотків від загального прибутку. Таким чином, значення вагового коефіцієнту k_1 регресійної залежності можна визначити для граничних умов $\overline{P}\left(Uy_{доп},T\right)=0$ та $\overline{P}\left(Uy_{доп},T\right)=1$ з експоненційної функції

$$e^{-k_1\cdot(1-0)}=0,75;\ k_1=\text{-}ln\left(0.75\right)=0.288\,.$$

За умови дотримання нормативного відхилення напруги, тобто у випадку коли $\overline{P}\left(Uy,T\right)=1$ встановлене значення вагового коефіцієнту регресійної залежності не вплине на результати оптимізації.

Коефіцієнт кореляції регресійної залежності рівний 0,995, що свідчить про високу адекватність побудованої математичної моделі статистичним даним (рис. 1).

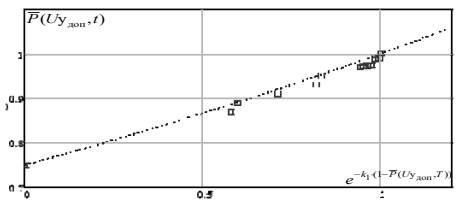

Рисунок 1 – Графічне відображення вектора спостережень ймовірності відхилення напруги та його експоненційної залежності

Ваговий коефіцієнт k_2 визначається з урахуванням "Порядку визначення плати за транспортування електричної енергії власного виробництва при постачанні електроенергії за нерегульованим тарифом" [14]. Згідно з [14] обсяг технологічних витрат при транспортуванні електроенергії за умови постачання електроенергії, наприклад, споживачам ІІ класу (при ступені напруги на межі балансової належності між виробником електроенергії та електропередавальною організацією 0,4 – 10 кВ) для "ПАТ Вінницяобленерго" становить 15%.

Таким чином, значення вагового коефіцієнту k_2 регресійної залежності можна визначити для граничних умов $\overline{P}\left(\Delta W_{доп},T\right)=0$ (перевищення нормативних технологічних витрат електроенергії на передачу електроенергії становить 85%), $\overline{P}\left(\Delta W_{доп},T\right)=1$ з експоненційної функції

$$e^{-k_1\cdot(1-0)}=0,85;\ k_1=\text{-}ln\left(0.85\right)=0.163.$$

Коефіцієнт кореляції отриманої експоненційної залежності з статистичними даними рівний 0,955 говорить про високу адекватність побудованої математичної моделі статистичним даним (рис. 2).

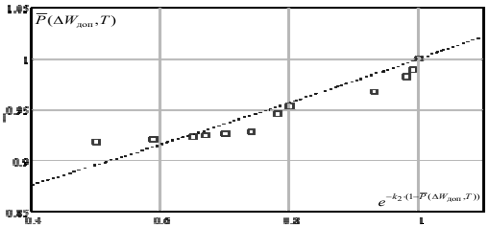

Рисунок 2 – Графічне відображення статистичних даних нормативного відхилення втрат електроенергії та пропонованої експоненційної залежності

Отже, для розв’язання поставлених вище задач визначення оптимальної встановленої потужності ВДЕ у ЛЕС та оптимізації їх добових режимів, пропонується використання вагових коефіцієнтів k_1=0,288 та k_2=0,163.

Параметри для розрахунку значень цільової функції (2) розраховувались за допомогою програмного комплексу аналізу втрат електроенергії та формування електроощадних заходів в розподільних електричних мережах з розосередженим генеруванням "ВТРАТИ-10/0,4 (РДЕ)".

Для аналізу ефективності використання встановленої потужності відновлюваних джерел енергії за комплексним критерієм використано графік навантаження характерного режиму фідеру Ф-31 (рис.4).

Усереднене за добу значення відхилення напруги для всіх вузлів ЕМ не перевищує 5%. Тому, відповідно до виразу (5) імовірність забезпечення нормативного відхилення напруги $\overline{P}\left(Uy,T\right)=1$ в.о.

Для перевірки ефективності запропонованого методу розглянемо фрагмент схеми електричної мережі (рис.3).

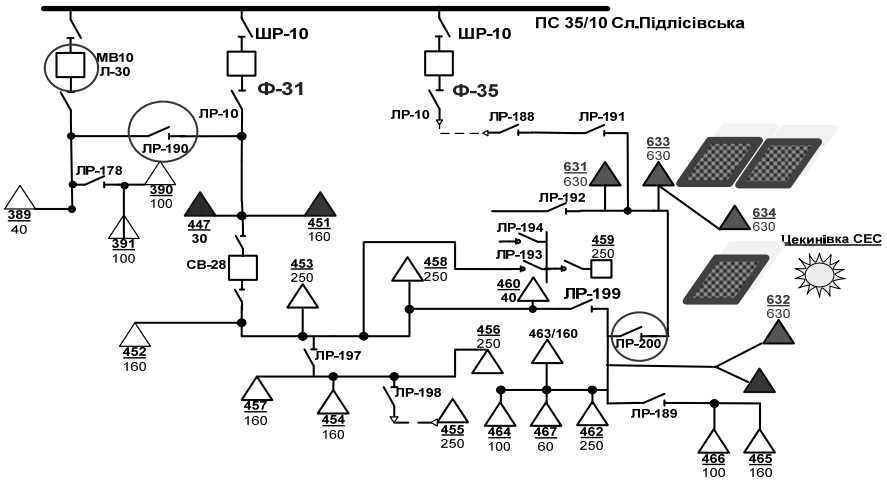

Рисунок 3 – ПС 35/10 "Слобода-Підлісівська" та електрична схема фідера №31 до якого приєднана перша черга Цекинівської СЕС потужністю 1,430 МВт

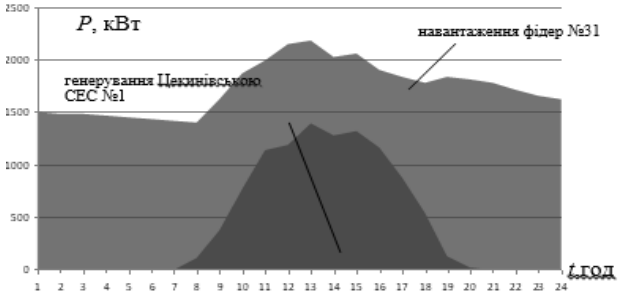

Рисунок 4 – Співвідношення графіків видачі потужності Цекинівською СЕС №1 та навантаження ПС 35/10 "Слобода Підлісівська" фідер №31

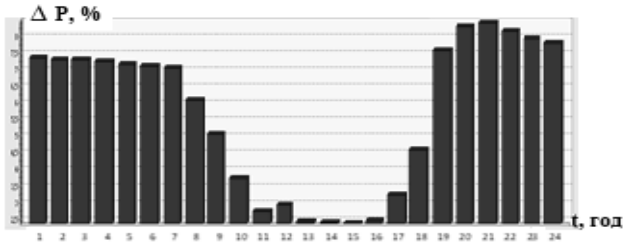

Рисунок 5 – Результати розрахунку забезпечення ймовірності нормативних втрат електроенергії

Аналіз графіку втрат потужності в електричній мережі (рис. 5) показав, що відносне значення втрат потужності у розрахунковій ЕМ перевищує попередньо прийняте значення у 5% впродовж 15 годин доби (для кожної ЕМ нормується окремо). Тому, відповідно до виразу 6) імовірність забезпечення нормативного відхилення втрат потужності становить

$$\overline{P}\left(\Delta W_{доп}, T\right) = \frac{t_{сум}\left(\Delta W_{факт} \le \Delta W_{доп}\right)}{T} = \frac{9}{24} = 0{,}375\,в.о$$

Для розрахунку значення цільової функції змінювалось значення встановленої потужності Цекинівської СЕС№1 у бік зростання, шляхом Результати розрахунку приведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати розрахунку оптимальної встановленої потужності першої черги Цекинівської СЕС за комплексним критерієм

Цекинівська СЕС №1, кВт	*П*, млн. грн/рік	P_1, в.о.	P_2, в.о.	$\Delta W_{факт}$, %	Ц, млн. грн/рік
1430	73,3	1	0,38	8,47	66,2
1680	86,1	1	0,42	8,21	78,4
2080	93,8	1	0,47	7,9	86,1
2710	105,6	0,6	0,35	9,2	84,7

Значення P_1 та P_2 відповідно значення імовірності відхилення напруги та втрат потужності від нормативу.

Як видно з результатів дослідження, оптимальним є приєднання потужності 2080 кВт до фідера №31 Слобода-Підлісівської підстанції. Збільшення встановленої потужності призводить до імовірного зниження якості напруги, що погіршує умови функціонування локальної електричної системи.

Висновки. Задачу визначення оптимальної потужності відновлюваних джерел енергії в електричній мережі доцільно розв'язувати за комплексним критерієм, який враховує прибуток від функціонування ВДЕ, показники якості електроенергії та втрати на її транспортування мережами ЛЕС. При визначенні показника якості електроенергії доцільно використовувати імовірність забезпечення нормативного відхилення напруги та втрат електроенергії для заданого звітного періоду. Використання запропонованого методу дозволило мінімізувати можливі недоліки проектних рішень та покращити ефективність функціонування електричних мереж.

Список використаних джерел

1. Кириленко О. В. Технічні особливості функціонування енергосистем при інтеграції джерел розподіленої генерації / О. В. Кириленко, І. В. Трач // Праці Інституту електродинаміки НАН України. – 2009. – Вип. 24. – С. 3–7. – ISSN 1727-9895.

2. Лежнюк П. Д. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія / П. Д. Лежнюк, О. А. Ковальчук, О. В. Нікіторович, В. В. Кулик. – Вінниця: ВНТУ, 2014. – 204 с.

3. Malogulko V. Optimization of the functioning of the renewable energy sources in the local electrical systems / V. Malogulko, P. Komada, A.Orshubekov, M. Kozhamberdiyeva, A. Sagymbekova // PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, 2017. – № 3. – P. 97-103. – ISSN 0033-2097.

4. Lezhnyuk P. Optimal control of distributed sources of energy in the local electrical system / P. Lezhnyuk, V. Kulik, O. Kovalchuk // Proceedings of the Institute of Electrodynamics of NAS of Ukraine. Collected works. Special Issue. Part 1. – 2011.– P. 48–55. – ISSN 1727-9895.

5. Кулик В. В. Оптимальне керування розосередженими джерелами електроенергії з асинхронними генераторами засобами Smart Grid [Електронний ресурс] / В.В. Кулик, Т.Є. Магас, Ю.В. Малогулко // Наукові праці ВНТУ. Енергетика та електротехніка. – 2011. – №4. – С. 1-6. Режим доступу: http://praci.vntu.edu.ua/article/view/1404/999. – ISSN 2307-5376.

6. El-Khattam W. Optimal Investment Planning for Distributed Generation in a Competitive Electricity Market / W. El-Khattam, K. Bhattacharya, Y. Hegazy and M. A. Salama // IEEE Transactions on Power Systems, vol. 19. – 2004. –no. 3. – PP. 1674-1684.

7. Rau N. S. Optimum location of resources in distributed planning / N. S. Rau, Y.-H. Wan // IEEE Transactions on Power Systems, vol. 9. – 1994. – pp. 2014-2020.

8. Falaghi H. ACO Based Algorithm for Distributed Generation Sources Allocation and Sizing in Distribution Systems / H. Falaghi, M. Haghifam // PowerThech, 2007. – PP. 555-560.

9. Keane A. Enhanced Utilization of Voltage Control Resources With Distributed Generation / A. Keane, E. Vittal, J. Dent, P. Harrison // IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26. – 2011. – no. 1. – pp. 252-260.

10. Ardeshna K. Supporting Islanded Microgrid Operations in the Presence of Intermittent Wind Generation / K. Ardeshna, H. Chowdhury // IEEE. – 2010. – pp. 1-8.

11. Бурикін О. Б. Оптимізація режиму локальних електричних систем з відновлюваними джерелами енергії / О. Б. Бурикін, Ю. В. Малогулко // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія "Електротехніка та електротехнології". – 2013. – №2. – Вип. 15 (338). – С. 42-46. – ISSN 2074-2630.

12. Методичні рекомендації визначення технологічних витрат електричної енергії в трансформаторах і лініях електропередавання [Електронний ресурс]: Наказ Міністерства енергетики та вугільної промисловості України від 21.06.2013 N 399. – Режим доступу: http://www.leonorm.com/p/NL_DOC/UA/201301/Nak399.htm.

13. Затвердження Правил користування електричною енергією [Електронний ресурс]: Постанова НКРЕ від 31.07.1996. – N 28. – Режим доступу: http://zakon0.rada.gov.ua/laws/show/z0417-96.

14. Порядок визначення плати за транспортування електричної енергії власного виробництва при постачанні електроенергії за нерегульованим тарифом [Електронний ресурс]: Постанова НКРЕ від 28.09.2000. – N 1038. – Режим доступу: http:// www.uazakon.com/documents/date_61/pg_gegwxw.htm.

Аннотация

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОПТИМАЛЬНОГО УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Бурыкин О. Б., Малогулко Ю. В.,
Томашевський Ю. В., Семенюк Ю. В.

В статье предложен метод определения оптимальной установленной мощности возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в электрических сетях (ЭС). Оптимальную мощность генерации ВИЭ целесообразно решать по комплексному критерию, который учитывает прибыль от функционирования ВИЭ, показатели качества электроэнергии и потери на ее транспортировку ЭС. При определении показателя качества электроэнергии определяется вероятность обеспечения нормативного отклонения напряжения и потерь электроэнергии для заданного отчетного периода. Это позволит минимизировать возможные недостатки проектных решений и повысить эффективность функционирования ЭМ.

Abstract

METHOD OF DETERMINATION OF OPTIMAL INSTALLED POWER OF GENERATION OF ELECTRIC POWER BY REFRACTORY ENERGY SOURCES IN ELECTRICAL NETWORKS

O. Burykin, Ju. Malogulko,
Ju. Tomashevs'kij, Ju. Semenjuk

The article proposes a method for determining the optimal installed capacity of renewable sources of energy (RSE) in electrical grids (EG). It is expedient to solve optimal power of generation of RSE in accordance with an integrated criterion, which takes into account the profit from the operation of RSE, indicators of the quality of electricity and the loss of its transportation of electricity. When determining the power quality indicator, the probability of providing a standard deviation of voltage and energy losses for a given reporting period is determined. This will minimize possible defects of design decisions and increase the efficiency of the functioning of EG.