

## ВИКОРИСТАННЯ В SMART GRID ТЕХНОЛОГІЯХ ПРИНЦИПУ НАЙМЕНШОЇ ДІЇ ЯК МЕХАНІЗМУ ПРИРОДНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

**П.Д.Лежнюк**, докт.техн.наук, **В.В.Кулик**, канд.техн.наук  
Вінницький національний технічний університет,  
Хмельницьке шосе, 95, Вінниця, 21021, Україна.  
e-mail: [LPD@inbox.ru](mailto:LPD@inbox.ru)

*Показано можливість і доцільність застосування принципу Гамільтона-Остроградського щодо електроенергетичних систем з метою забезпечення умов для їхньої самоорганізації та самооптимізації функціонування у відповідності до заданого критерію оптимальності – втратами електроенергії під час її транспортування.*  
Бібл 4.

**Ключові слова:** електроенергетична система, втрати електроенергії, оптимізація режиму, принцип найменшої дії.

**Вступ.** Нормальні стани електроенергетичних систем (ЕЕС) відрізняються між собою параметрами режиму і кількістю електроенергії, що витрачається на її передачу від джерел до споживачів (втрати електроенергії). При зміні будь-якого з параметрів в ЕЕС встановлюється новий режим, що характеризується певними втратами електроенергії. Не завжди наявність існуючого механізму зворотних зв'язків, завдяки якому здійснюється саморегулювання системи, може забезпечити режим, найвигідніший з погляду мінімуму втрат електроенергії і її якості. Таким чином, цю властивість ЕЕС як штучної системи кібернетичного типу необхідно розвивати.

В SMART Grid серед інших особливостей проявляються властивості до саморегулювання і самовідновлення, що робить ці технології доцільними для вдосконалення оптимального керування режимами ЕЕС. За рахунок поглиблення зворотних зв'язків вони дозволяють покращити якість функціонування автоматизованої системи керування (АСК) ЕЕС і, відповідно, сприяють наближенню поточних станів ЕЕС до оптимальних, які характеризуються мінімумом розсіювання електроенергії під час її транспортування. Ефективність процесу саморегулювання залежить від багатьох чинників, в тому числі від законів оптимального керування параметрами режиму ЕЕС. В даній роботі розглядається можливість і доцільність застосування принципу найменшої дії (ПНД) щодо ЕЕС з метою забезпечення умов для їхньої самоорганізації або самооптимізації їхнього функціонування у відповідності з заданим критерієм оптимальності – втратами потужності (електроенергії).

Використовується те, що ПНД в природних системах проявляється у виді механізму самооптимізації, тобто властивості систем та їхніх частин самоналагоджуватися таким чином, що забезпечується підвищення їхнього рівня з переходом до найбільш енергетично вигідного стану, або найбільш вигідного режиму функціонування. Після відхилення від оптимального стану функціонування в системі виникає зустрічна, протилежно скерована дія, тобто протидія, яка намагається повернути систему в оптимальний стан. Отже для будь-якої системи в довільний момент її існування нормою є якісний оптимум, глибина якого визначається мірою ідеальності системи [1,3,4].

**Математичне моделювання процесу оптимізації режимів ЕЕС з використанням ПНД.** Математична модель процесу оптимізації режимів ЕЕС будується на основі принципу Гамільтона-Остроградського [2]. Це дає змогу визначити економічний (ідеальний з позиції втрат електроенергії) режим ЕЕС і розробити на його основі метод оптимізації поточних режимів. Відмінною особливістю тут є те, що економічний режим приймається за початкове наближення, а процес розрахунку оптимального режиму зводиться до послідовного врахування активних обмежень на параметри режиму і введення їх в допустиму область. *Оптимізаційний обчислювальний процес будується від ідеального режиму до оптимального.*

Процес оптимізації режимів ЕЕС від початкового ідеального режиму зводиться до розрахунків режимів за заступною  $R$ -схемою. Джерела активної і реактивної потужності моделюються економічними опорами, в яких враховуються втрати активної потужності в ЕЕС [2]

$$R_{ei}(B) = \frac{B_i(P_i)U_i^2c_i}{P_i^2 \cdot c}, \quad (1)$$

де  $B_i(P_i)$  – витратна характеристика  $i$ -ої електростанції;  $P_i$  – потужність генерування  $i$ -го джерела;  $U_i$  – напруга на шинах  $i$ -го джерела;  $c_i$  – ціна тони умовного палива;  $c$  – вартість 1 кВт-год втрат електроенергії.

Представлені в такому вигляді економічні характеристики джерел електроенергії (ДЕЕ) відповідають моделі оптимізації режиму ЕЕС з використанням ПНД. Опори  $R_{ei}$  є нелінійними функціями витратних характеристик та навантаження станції  $P_i$ . Якщо ДЕЕ, залишаючись елементами ЕЕС в електротехнічному сенсі, є предметом самостійного господарювання, то оптимізація режимів ЕЕС проводиться за критерієм мінімуму затрат на відпущену станціями енергію  $Z_E$ . Тоді економічні опори, за якими розміщаються ДЕЕ, визначаються

$$R_{ei}(P) = \frac{U_i^2 \beta_i}{P_i c}, \quad (2)$$

де  $\beta_i$  – вартість 1 кВт·год електроенергії, відпущеної з шин  $i$ -ої станції.

Задача оптимального розподілу навантаження між джерелами реактивної потужності (ДРП) по аналогії може бути зведена до розрахунку усталеного режиму ЕЕС з заступною  $R$ -схемою, в якій ДРП представляються нелінійними економічними опорами. Значення їхні залежать від того, як компенсуються на електростанціях втрати електроенергії в ЕЕС від потоків реактивної потужності. Критерій оптимальності ЕЕС по реактивній потужності змінюється в залежності від того, як представлені в розрахунковій моделі електростанції – витратними характеристиками чи вартістю відпущеної з шин електроенергії. Наприклад, якщо станція в ЕЕС задається не витратною характеристикою  $B_j(P_j)$ , а відпускнуою ціною електроенергії з її шин  $\beta_j$ , в припущенні, що втрати від перетоків реактивної потужності  $i$ -го вузла  $V_{Qi}$  покриваються  $j$ -ою станцією  $P_j$ , то відповідно економічний опір визначається як

$$R_{ei}(Q) = \frac{\sum_{j=1}^s (P_j \beta_j) k_i U_i^2}{c Q_i^2}, \quad (3)$$

де  $P_j$  – потужність, що відпускається з шин станції на покриття втрат в електричній мережі від потоків реактивної потужності;  $\beta_j$  – вартість 1 кВт·год електроенергії, відпущеної з шин  $j$ -ої станції;  $k_i$  – частка втрат  $i$ -го вузла у загальних втратах від перетоків реактивної потужності.

Якщо ДРП умовно розмістити за розрахованими таким чином опорами, то можна замінити визначення сумарних витрат на покриття втрат електроенергії від перетоків реактивної потужності розрахунком поточкорозподілу в заступній схемі ЕЕС, складеній тільки з активних опорів її елементів.

За комплексної оптимізації джерел активної і реактивної потужності (це можуть бути електростанції або окремі агрегати) та джерел реактивної потужності в ЕЕС з сумарним навантаженням  $\sum P_H$  і  $\sum Q_H$  економічний опір визначається як

$$R_{ei}(P, Q) = \frac{P_i U_i^2 \beta_i}{(P_i^2 + Q_i^2) c}. \quad (4)$$

В останньому виразі економічний опір  $i$ -ї станції визначається з умов, що вартість втрат в ньому еквівалентна витратам на виробництво активної потужності на  $i$ -й станції, включаючи і активну потужність, що йде на покриття втрат від потоків реактивної потужності від  $i$ -ої станції  $Q_i$ .

З (4) можна визначити залежність оптимального співвідношення між реактивною й активною потужностями від активного навантаження станції та розрахованого її економічного опору

$$\operatorname{tg} \varphi_{ei} = \sqrt{\frac{U_i^2 \beta_i}{P_i R_{ei} c} - 1}. \quad (5)$$

Відповідно до допустимого діапазону зміни напруги на шинах  $i$ -ї станції з (5) визначаються  $\operatorname{tg} \varphi_{ei}^{\min}$  і  $\operatorname{tg} \varphi_{ei}^{\max}$ . Підтримання  $\operatorname{tg} \varphi$  в цьому діапазоні на шинах станцій забезпечує те, що режим ЕЕС знаходиться в області оптимальності. Утримується  $\operatorname{tg} \varphi$  в області оптимальності зміною генерування реактивної потужності. Очевидно, що для цього у вузлах, де нормуються значення  $\operatorname{tg} \varphi_e$ , повинні бути встановлені ДРП відповідної потужності, а також засоби зміни його навантаження згідно з заданим законом оптимального керування.

**Оптимальне керування режимами ЕЕС.** На підставі ПНД може бути побудована система оптимального керування режимами ЕЕС. В активно-адаптивній системі керування (ААСК) нормальним режимом ЕЕС, побудованій за принципами SMART Grid, де як еталонна модель використовується модель її економічного режиму, а джерела електроенергії представлені характеристиками економічних опорів, оптимальне керування в ЕЕС здійснюється таким чином, що поточні режими з параметрами  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{Q}$  і  $\mathbf{U}$  керуючими впливами  $\mathbf{u}$  скеровуються і наближаються до ідеального режиму з параметрами  $\mathbf{P}_e$ ,  $\mathbf{Q}_e$  і  $\mathbf{U}_e$

$$F(\mathbf{P}, \mathbf{Q}, \mathbf{U}, \mathbf{u}, t) \Rightarrow F(\mathbf{P}_e, \mathbf{Q}_e, \mathbf{U}_e, \mathbf{u}_e, t),$$

за умов, що

$$\mathbf{P} \in \mathbf{D}_P, \quad \mathbf{Q} \in \mathbf{D}_Q, \quad \mathbf{U} \in \mathbf{D}_U, \quad \mathbf{u} \in \mathbf{D}_u,$$

де  $\mathbf{u}$  і  $\mathbf{u}_e$  – параметри керування ЕЕС, зміна яких з  $\mathbf{u}$  на  $\mathbf{u}_e$  максимально наближає режим ЕЕС до економічного (ідеального з позиції втрат електроенергії);  $\mathbf{D}_P$ ,  $\mathbf{D}_Q$ ,  $\mathbf{D}_U$ ,  $\mathbf{D}_u$  – відповідно допустимі області параметрів режиму  $\mathbf{P}$ ,  $\mathbf{Q}$ ,  $\mathbf{U}$  і параметрів керування  $\mathbf{u}$ .

Для того, щоб наблизити (оптимізувати) втрати електроенергії до ідеально можливих, необхідно постійно в процесі експлуатації здійснювати в системі оптимізуючі дії засобами регулювання. Компенсувати додаткові втрати в ЕЕС можливо шляхом регулювання напруги у вузлах ЕЕС і введенням в контури зрівнюваль-

них ЕРС. В такій постановці задачі керуючими змінними є ЕРС, які необхідно вводити у всі замкнуті контури для реалізації оптимального струморозподілу. Попередньо, згідно економічних опорів електростанцій і ДРП, визначаються їхні оптимальні навантаження. На відміну від існуючих систем оптимального керування, де використовуються характеристики відносних приростів і спрощена модель ЕЕС, в ААСК джерела електроенергії, в тому числі відновлювані, моделюються характеристиками економічних опорів, а ЕЕС – її заступною R-схемою. Як інформаційне забезпечення використовується база даних ОІК ЕЕС. Відзначимо, що в побудованій таким чином ААСК реалізується комплексна оптимізація режимів ЕЕС по активній і реактивній потужностях.

**Висновки.** Моделювання джерел електроенергії економічними опорами, отриманими на підставі принципу Гамільтона-Остроградського, дозволяє задіяти в оптимальному керуванні нормальними режимами ЕЕС механізм їхньої природної оптимізації, результатом якого є мінімізація втрат електроенергії під час її генерування і транспортування. Включення в активно-адаптивну систему керування нормальним режимом ЕЕС моделі їхніх економічних режимів якісно покращує характер зворотних зв'язків, завдяки яким здійснюється саморегулювання режимів системи. Тим самим підвищується ефективність автоматизованої системи керування виробництвом і транспортуванням електроенергії в ЕЕС і проявляються переваги SMART Grid технологій.

1. *Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Оболонский Д.И.* Моделирование и компенсация влияния неоднородности электрических сетей на экономичность их режимов // *Электричество*. – 2007. – №11. – С. 2–8.

2. *Лежнюк П.Д., Кулик В.В., Нетребский В.В.* Принцип наименьшей дѣи в задачах оптимізації електроенергетичних систем // *Технічна електродинаміка*. – 2006. – №3. – С. 35–41.

3. *Пентегов И.В., Волков И.В.* Лагранжиан электрической цепи с сосредоточенными параметрами и его применение // *Электричество*. – 1969. – №5. – С. 59–63.

4. *Feynman, Richard P.* Quantum Electrodynamics. – Addison Wesley, 1962.

УДК 621.311.21.001

#### **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ В SMART GRID ТЕХНОЛОГИЯХ ПРИНЦИПА НАИМЕНЬШЕГО ДЕЙСТВИЯ КАК МЕХАНИЗМА ЕСТЕСТВЕННОЙ ОПТИМИЗАЦИИ**

**П.Д.Лежнюк, В.В.Кулик**

**Винницкий национальный технический университет,**

**Хмельницкое шоссе, 95, Винница, 21021, Украина.**

**e-mail: [LPD@inbox.ru](mailto:LPD@inbox.ru)**

*Показана возможность и целесообразность использования принципа Гамильтона-Остроградского в электроэнергетических системах с целью обеспечения условий для их самоорганизации и самооптимизации функционирования в соответствии с критерием оптимальности – потери электроэнергии при ее передаче. Библ 4.*

**Ключевые слова:** электроэнергетическая система, потери электроэнергии, оптимизация режима, принцип наименьшего действия.

#### **USE OF LEAST ACTION PRINCIPLE AS A MECHANISM OF NATURAL OPTIMIZATION FOR SMART GRID TECHNOLOGIES**

**P.D.Lezhnyuk, V.V.Kulyk**

**Vinnitsia National Technical University,**

**Khmelnyske Shose, 95, Vinnitsia, 21021, Ukraine.**

**e-mail: [LPD@inbox.ru](mailto:LPD@inbox.ru)**

*The possibility and expediency of Hamilton-Ostrogradskiy principle application in electric power systems in order to provide conditions for their self-organization and self-optimization of functioning in accordance with optimality criterion-losses of electric energy in the process of its transmission is shown: References 4.*

**Key words:** electric power system, losses of electric energy, mode optimization, least action principle.

1. *Lezhnyuk P.D., Kulyk V.V., Obolonskii D.I.* Design and indemnification of influence to heterogeneity of electric networks on the economy of their modes // *Elektrichestvo*. – 2007. – №11. – Pp. 2–8. (Rus)

2. *Lezhnyuk P.D., Kulyk V.V., Netrebskii V.V.* Principle of the least action is in the tasks of optimization of the electroenergy systems // *Tekhnichna Elektrodynamika*. – 2006. – №3. – Pp. 35–41. (Ukr)

3. *Pentegov I.V., Volkov I.V.* Lagrangian of electric circuit with concentrated parameters and its application // *Elektrichestvo*. – 1969. – №5. – Pp. 59–63. (Rus)

4. *Feynman, Richard P.* Quantum Electrodynamics. – Addison Wesley, 1962.

Надійшла 07.02.2014