

УДК 621.311.07

О.С. ЯНДУЛЬСЬКИЙ (д-р техн. наук, проф.), А.А. МАРЧЕНКО (канд. техн. наук, доц.),

О.В. ХОМЕНКО (канд. техн. наук, доц.), В.В. МАЦЕЙКО

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

kafedra_ae@mail.ru

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ СИСТЕМНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ В ОЕС УКРАЇНИ

Розглянуто структуру та закони регулювання системи автоматичного регулювання частоти та активної потужності (САРЧП). Наведено результати моделювання роботи типового системного пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора. З використанням об'єктно-орієнтованої бібліотеки нелінійних систем середовища Matlab розроблена комп'ютерна модель САРЧП, яка дозволяє знайти параметри регулятора, що відповідають критерію оптимальності.

Ключові слова: регулювання, оптимізація, вторинне регулювання частоти, енергосистема, баланс активних потужностей, моделювання.

Забезпечення високої якості регулювання частоти САРЧП об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України зумовлено кількома чинниками. У відповідності з «Енергетичною стратегією України на період до 2030 року» передбачається введення в експлуатацію 20 - 21 ГВт замінних та додаткових потужностей на атомних електростанціях (АЕС). Це збільшить потужність генерації в базисній частині графіка навантаження і ускладнить задачу регулювання частоти і виконання узгоджених графіків міждержавних перетоків. В той же час вимкнення одиничної потужності блока АЕС призводить до різкої зміни режиму ОЕС (частоти і перетоків). На сьогодні в ОЕС України у вторинному регулюванні частоти приймає участь лише одна гідроелектростанція (ГЕС) - Дніпровська ГЕС-1, резерв активної потужності якої складає 432 МВт. Навіть за умов участі в автоматичному регулюванні ГЕС, регулювальний діапазон цих станцій є недостатнім. Запланована паралельна робота ОЕС України з енергооб'єднанням країн Західної Європи ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity- Європейська спілка операторів магістральних мереж в галузі електроенергетики) посилює вимоги до якості регулювання частоти у відповідності до правил регулювання частоти, які діють в ENTSO-E [1].

Дослідженню систем АРЧП присвячений ряд робіт, в яких або докладно розглядаються характеристики окремої електростанції, яка приймає участь в регулюванні частоти [2,3] при спрощеному аналізі окремої частини енергосистеми, або розглядається режим регулювання частоти та перетікань активної потужності в електроенергетичному об'єднанні, до складу якого входять дві енергосистеми [4], при спрощеному аналізі окремих енергосистем.

Удосконалення існуючих систем регулювання частоти та активної потужності потребує дослідження особливостей їх роботи в різних режимах проведення параметричної оптимізації. Найкращою основою даних досліджень є математичне моделювання, яке неможливе без моделей, які адекватно відображають процеси в елементах ОЕС [2].

Оскільки висока якість регулювання, в першу чергу, залежить від системного регулятора, розглянемо структуру (рис. 1) та режими роботи САРЧП на системному рівні [5]. Системна частина САРЧП призначена для підтримування балансу активних потужностей генерації та споживання, впливаючи на регулювальні станції, які задіяні у вторинному регулюванні частоти. Системний регулятор САРЧП представлений пропорційно-інтегральною ланкою, де k_p , k_i - коефіцієнти підсилення відповідних каналів.

Вхідними сигналами САРЧП є поточні значення перетоків активної потужності міжсистемних ліній електропередач $\Delta \bar{P}_{пер}$ та фактичної частоти f . На основі поточних значень $\Delta \bar{P}_{пер}$ визначається сальдо перетоків та його відхилення $\Delta \bar{P}_{пер}$ відносно уставки $P_{пер}^{зд}$, а також відхилення частоти Δf відносно заданого значення $f_{уст}$.

Регулювання частоти та активної потужності системним регулятором САРЧП здійснюється за таким критерієм:

$$ACE = \alpha_1 k_p \left(\sum_{i=1}^n P_{пер,i} - P_{пер}^{зд} \right) + \alpha_2 k_i (f - f_{уст}) \quad (1)$$

де ACE - помилка регулювання області (Area Control Error) k_p , k_q - коефіцієнти регулювання за перетоком активної потужності та частотою відповідно; α_1 та α_2 - коефіцієнти, які визначають вид регулювання частоти та потужності САРЧП ($\alpha_1 = 0, \alpha_2 = 1$ - автоматичне регулювання частоти $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 0$ - автоматичне регулювання перетоку; $\alpha_1 = 1, \alpha_2 = 1$ - автоматичне регулювання перетоку з коригуванням за частотою).

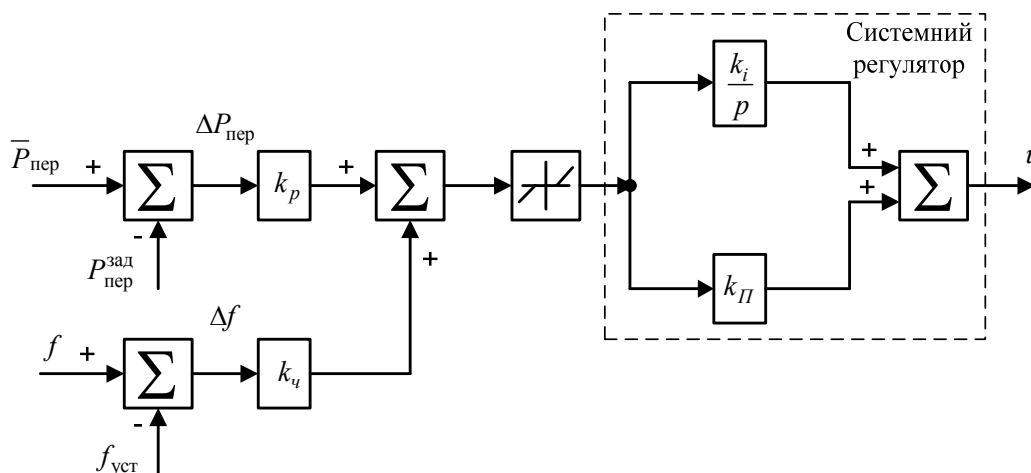


Рисунок 1 - Структурна схема САРЧП енергосистеми

Запишемо (1) через відхилення частоти Δf та перетік активної потужності $\Delta P_{пер}$:

$$ACE = \alpha_1 \Delta P_{пер} + \alpha_2 k_q \Delta f \quad (2)$$

Застосування системного ПІ-регулятора дає можливість забезпечити задані показники регулювання: пропорційна ланка забезпечує бажану швидкість, а інтегральна – задану точність регулювання. Внаслідок наявності інтегральної ланки вторинне регулювання частоти є астатичним, тобто в усталеному режимі $ACE = 0$.

В загальному вигляді розрізняють три типи регулювання частоти та потужності:

- автоматичне регулювання частоти (АРЧ);
- автоматичне регулювання перетоку (АРП);
- автоматичне регулювання перетоку з коригуванням за частотою (АРПЧ).

Автоматичне регулювання частоти є найбільш простим, оскільки контролюється лише частота. Енергосистема, в якій системний регулятор функціонує в режимі АЧР, повинна мати достатню пропускну спроможність ліній зв'язку і достатній регулювальний діапазон на електростанціях, які приймають участь у вторинному регулюванні частоти, для компенсації небалансу в будь-якій енергосистемі енергооб'єднання. В цьому разі системний параметр визначається як:

$$ACE = k_q \Delta f \quad (3)$$

Якщо коефіцієнт коригування перетоку за частотою k_q буде чисельно дорівнювати сумарній крутизні с.ч.х. енергосистеми, то в цьому випадку значення помилки регулювання області ACE буде близьким до небалансу активної потужності, який призвів до відхилення частоти Δf в ЕЕС.

Автоматичне регулювання перетоку (АРП) призначене для регулювання перетоку міжсистемними лініями зв'язку. Системні регулятори двох енергосистем не можуть працювати в режимі АРП, оскільки кожний регулятор буде підтримувати сальдо перетоків потужності на заданій уставці. Це може спричинити виникнення качань і, як наслідок, порушення стійкої роботи енергосистем. Системний параметр в цьому випадку визначається:

$$ACE = k_p \Delta P \quad (4)$$

В цьому разі величина ACE визначає відхилення сальдо перетоків активної потужності міжсистемними перетинами, яке викликане небалансом активної потужності.

Автоматичне регулювання перетоку з коригуванням за частотою здійснює комплексне регулювання частоти та перетоків активної потужності. АРПЧ дозволяє забезпечити селективність в компенсації збурення, тобто небаланс компенсує лише та енергосистема, в якій він виник. Системний параметр визначається як:

$$ACE = k_1 \Delta P + k_q \Delta f \quad (5)$$

Як видно, даний режим представляє собою поєднання режимів АРЧ та АРП. Якщо в цьому випадку коефіцієнт коригування перетоку за частотою k_q буде чисельно дорівнювати сумарній крутизні с.ч.х.

енергосистеми, то АСЕ буде визначати небаланс активної потужності, який призвів до відхилення частоти Δf і сальдо перетоків активної потужності $\Delta P_{пер}$.

В системі САРЧП також враховується зона нечутливості, яка визначається нормативними документами по регулюванню частоти та активної потужності в енергосистемі.

Оскільки системний ПІ-регулятор є астатичним, то критерієм регулювання частоти та перетоків активної потужності буде АСЕ=0, оскільки лише в цьому випадку системний регулятор не діє.

Незважаючи на те, що сучасні розробки систем автоматичного керування виконуються на цифровій базі, що дозволяє реалізувати складні закони регулювання, регулювання частоти та активної потужності здійснюється з використанням типового ПІ-закону.

Структура системи САРЧП суттєво нелінійна і викликана, з однієї сторони, дискретністю сигналів керування системного регулятора (SCADA), а з іншої, нелінійністю характеристик первинних регуляторів, які мають обмеження по відкриванню клапанів та механічній потужності турбіни. Тому проводити параметричну оптимізацію таких систем із застосуванням класичних методів (методу штрафних функцій, градієнтного спуску і ін.) неможливо, а перевага надається дослідженню імітаційних моделей.

З урахуванням вище викладеного, у середовищі Simulink програмного пакету Matlab проведено дослідження роботи системної частини САРЧП з типовим ПІ-регулятором. Модель САРЧП в ОЕС наведена в [6], моделі окремих елементів - в [2,7]. Під час розробки моделі припустили, що: регулювальні станції представлені одним еквівалентним генератором; навантаження прикладене безпосередньо до валу генератора; і не враховуються втрати у мережі [2, 6].

Для встановлення узагальненого критерію якості процесу регулювання без визначення його окремих показників застосовують інтегральні оцінки. Інтегральна оцінка являє собою означений інтеграл від деякої функції перехідної складової динамічної похибки. В астатичних системах ustalена похибка для стрибкоподібного збурення дорівнює нулеві, а перехідна складова динамічної похибки дорівнює похибці $\varepsilon(t)$ системи. Для нашого випадку

$$\varepsilon(t) = \Delta f \quad \text{або} \quad \varepsilon(t) = \Delta P_{пер}, \quad (6)$$

тоді для оцінки як коливних, так і монотонних процесів застосуємо квадратичну інтегральну оцінку

$$I = \int_0^{\infty} \varepsilon^2 dt \rightarrow \min, \quad (7)$$

яка не залежить від знаку похибки і від характеру кривої перехідного процесу системи. Величина інтегралу (7) буде тим меншою, чим ближче крива перехідного процесу до ustalеного режиму.

Також застосуємо нелінійні обмеження що враховують наступне.

Відхилення частоти не більше ± 20 мГц (сума похибки місцевого виміру частоти (± 10 мГц) та нечутливість регулятора (± 10 мГц)). Час введення в дію резерву первинного регулювання складає 30 с, зокрема: 50% - максимум 15 с, а в подальшому від 50% до 100% - зростає лінійно.

Максимальне квазістационарне відхилення частоти через спад (стагизм) генераторів пропорційної дії не повинно перевищувати ± 180 мГц після відновлення балансу, як результат первинного регулювання.

В моделі використовується інструмент оптимізації NCD Outport (Nonlinear Control Design)[8], мета якого - пошук оптимального параметра системи регулювання, який відповідатиме критерію оптимізації. На вході вказаного блоку реалізовано підінтегральну функцію, що відповідає відхиленню частоти Δf , або сальдо перетоків активної потужності $\Delta P_{пер}$.

В меню цього блоку вказується змінна (коефіцієнти K_i та K_p системного регулятора), що відповідає шуканому оптимальному параметру системи регулювання, а також нелінійні обмеження, за якими проводиться пошук відповідності критерію оптимізації.

Дослідження процесів регулювання частоти та активної потужності на моделі САРЧП виконано для режиму паралельної роботи двох ОЕС до складу якого входять ЄЕС Росії (ОЕС2) та ОЕС України (ОЕС1). В ОЕС України системний регулятор САРЧП працює в режимі АРПЧ, а в ЄЕС Росії - в режимі АРЧ. Моделювання виконано для випадку, що в ОЕС у вторинному регулюванні частоти приймають участь ГЕС. В якості небалансу потужності в ОЕС1 розглядалось стрибкоподібне збільшення потужності навантаження на 360 МВт. При цьому відхилення перетоку активної потужності міжсистемного перетину буде обумовлене небалансом активної потужності в ОЕС1.

Процес пошуку оптимальних параметрів системного ПІ-регулятора відображується графічно шляхом побудови. Першим виводиться графік, що відповідає початковим умовам оптимізації (рис. 2, рис. 3), далі виводиться графік, який частково задовольняє вимоги критерію оптимізації. Якщо в ході обчислень отримано таке значення змінної, що повністю відповідає критерію оптимізації, то процес розрахунку автоматично припиняється (рис. 2, рис. 3, лінія1), при $K_p = 3,8484$, $K_i = 1,6930$ для даного випадку збурення.

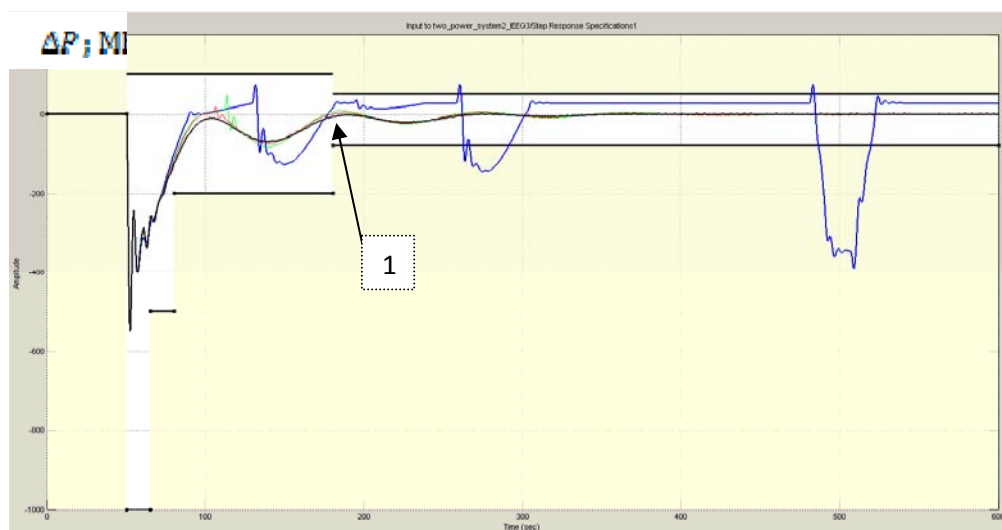


Рисунок 2- Зміна активної потужності на міжсистемному перетині при збуренні в системі (ітерації оптимізації).

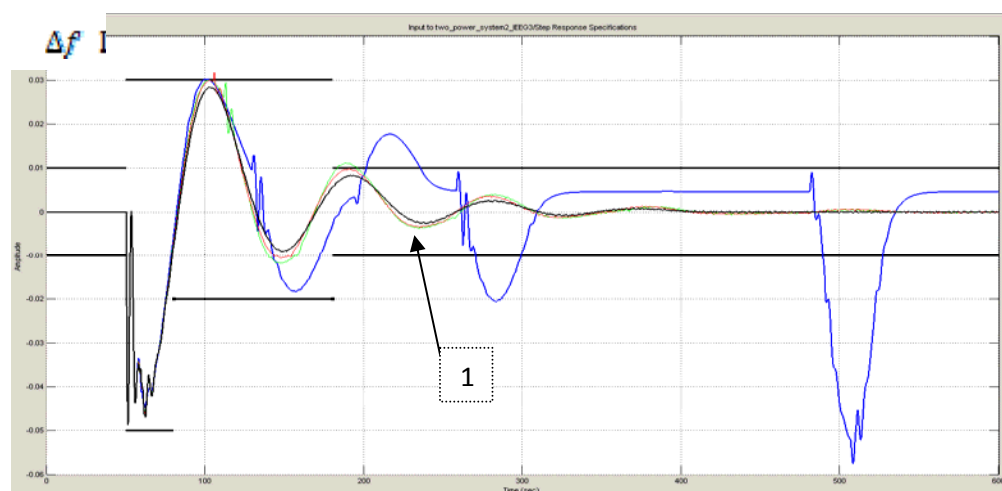


Рисунок 3- Відхилення частоти в ОЕС України при збуренні системі (ітерації оптимізації).

Отримані результати ілюструють доцільність використання оптимізації параметрів системного ПП-регулятора САРЧП, які впливають на показники якості перехідних процесів регулювання частоти та активної потужності в енергосистемі.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Правила первичного и вторичного регулирования частоты и мощности в УСТЕ. – 1998. – 37 с.
2. Алексеев С. В. Описание энергообъединения как объекта управления режимом по частоте и активной мощности / С. В. Алексеев, И. Б. Копылов, А. М. Машанский // Электричество. - 1980. - № 12. - С. 23-30.
3. Стернинсон Л.Д. Переходные процессы при регулировании частоты и мощности в энергосистемах. - М.: Энергия, 1975. – 216 с.
4. Автоматизация электростанций, энергосистем и АСУ реализацией энергии. Труды ВНИИЭ. - М.: Энергоатомиздат, 1984. – 72 с.
5. Яндульський О. С. Автоматичне регулювання частоти та перетоку активної потужності в енергосистемах / О. С. Яндульський, А. О. Стелюк, М. П. Лукаш. - К. : НТУУ «КПІ», 2010. - 88 с.
6. Яндульський А. С. Моделирование системы АРЧМ ОЭС Украины при регулировании перетока / А. С. Яндульський, А. О. Стелюк, Ю. Н. Бондаренко // Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки : тем. вип. - 2002. - Ч. 7. - С. 76-79.
7. Кириленко А.В., Яндульський А.С., Небрат Е.В. Моделирование системы автоматического регулирования частоты и активной мощности в энергосистеме Украины. // Технічна електродинаміка. - 2000. - № 1. - С. 99-102.
8. Веремей Е. И. Пособие "Nonlinear Control Design Blockset " [Електронний ресурс] / Е. И. Веремей, С. В. Погожев. - Режим доступу: <http://matlab.exponenta.ru/nonlinecondes/book1/preface.php>

REFERENCES

1. Rules of the primary and secondary frequency control and power in UCTE. - 1998. - 37. (Rus)
2. Alekseev, S.V. Description power association as an object of mode control the frequency and active power / S.V. Alekseev, I.B. Kopylov, A.M. Mashansky // Electricity. - 1980. - № 12. - S. 23-30. (Rus)
3. Sterninson L.D Transients in the regulation of frequency and capacity in power systems. - Moscow, 1975. - 216 p. (Rus)
4. Automation of power plants, power grids and energy information system implementation. Proceedings VNIIE. - M. Energoatomizdat, 1984. - 72.
5. Yandulskyy O. Automatic control of frequency and active power flows in power systems / O.S. Yandulskyy, A. Stelyuk, M. Lucas. - K.: NTUU "KPI", 2010. - 88 p.(Ukr)
6. Yandulskyy A. Modeling System ACFP PS of Ukraine in the regulation of flow / A. Yandulskyy, A. Stelyuk, Y. Bondarenko // Technical electro-dynamics. The problems of modern electrical engineering: thematic issue. - 2002. - Part 7. - S. 76-79.(Rus)
7. Kirilenko A.V, Yandulskyy A.S., Nebrat E.V. Simulation of automatic frequency and active power in the power system of Ukraine. // Technical electro-dynamics. - 2000. - № 1. - S. 99-102. (Rus)
8. Veremey E.I Benefit "Nonlinear Control Design Blockset" [E resource] / E.I. Veremey, S.V. Pogo-zhev. - Mode of access: <http://matlab.exponenta.ru/nonlinecondes/book1/preface.php> (Rus)

Надійшла до редколегії 13.04.2013

Рецензент: В.Ф. Сивокобиленко

А.С. ЯНДУЛЬСЬКИЙ, А.А. МАРЧЕНКО, О.В. ХОМЕНКО, В.В. МАЦЕЙКО
Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»

Оптимизация параметров системного регулятора для автоматического регулирования частоты и активной мощности в ОЭС Украины. Рассмотрена структура и законы регулирования системы автоматического регулирования частоты и активной мощности (САРЧМ). Приведены результаты моделирования работы типичного системного пропорционально-интегрального (ПИ) регулятора. С использованием объектно-ориентированной библиотеки нелинейных систем среды Matlab разработана компьютерная модель САРЧМ, которая позволяет найти параметры регулятора, отвечающих критерию оптимальности.

Ключевые слова: регулирование, оптимизация, вторичное регулирование частоты, энергосистема, баланс активных мощностей, моделирование.

O. YANDULSKYY, A. MARCHENKO, O. KHOMENKO, V. MATSEYKO
National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»

Optimization of Parameters in the System Controller for Automatic Control of Frequency and Active Power in Ukraine Power System. Introduction of new facilities at nuclear power plants will increase power generation in the base part of the load diagram and complicate the task of frequency regulation and the implementation of the agreed schedules flows of active power between the parallel energy systems. At the same time, turn off the power unit of the nuclear power plant leads to the sharp change of the mode of the power system (frequency and power flow). Today in the power system of Ukraine only one hydro power station participates in the secondary regulation of frequency. It's Dnieper hydroelectric station-1 with the provision of active capacity 432 MW. Even under condition of participation in the automatic regulation of the hydroelectric power plants, the range of control of these stations is insufficient. Planned parallel operation of the energy system of Ukraine with the energy systems of the countries of the Western Europe ENTSO-E (European Network of Transmission System Operators for Electricity) increases the requirements to the quality of frequency regulation in accordance with the rules of regulation of frequencies, which operate in the ENTSO-E. Improvement of existing systems of regulation of frequency and active power requires exploring of their work in different modes and conducting of parametric optimization. Since the high quality of the regulation, in the first turn, depends on the system controller, analysis and optimization of its parameters is an urgent task. While doing research the structure and laws regulating the system of automatic regulation of frequency and active power were considered. In the calculations of nonlinear models of the system of automatic regulation of frequency and active power, optimization tool NCD Outport (Nonlinear Control Design) library of nonlinear systems of Matlab is used. The purpose of it is the search for the optimal parameters of the system is proportional-integral (PI) controller system that will meet the optimality criterion. The results of the simulation are graphic dependences of iterative processes of change of frequency in the energy system of Ukraine and the flow of active power between the parallel energy systems, in the case of a sharp increase in capacity load on the 360 MW in power system of Ukraine. The expediency of the conducted research is justified.

Key words: Regulation, optimization, secondary frequency control, the power, the balance of active power, modeling.