

УДК 621.316

Яндульський О.С., д.т.н., проф., Марченко А.А., к.т.н., доц., Гулий В.С., аспірант.
Національний технічний університет України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВТОРИННОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА ПОТУЖНОСТІ ІЗ ЗАЛУЧЕННЯМ ЕНЕРГОБЛОКІВ РІЗНИХ ТИПІВ

Ефективне регулювання частоти та активної потужності відіграє важливу роль в забезпеченні надійної роботи енергосистеми. Аналіз стану вторинного регулювання частоти та активної потужності в ОЕС України показав, що в ОЕС України існує проблема недостатнього резерву активної потужності вторинного регулювання. Залучення енергоблоків ТЕС дозволить забезпечити необхідний резерв, проте використання енергоблоків ТЕС з різними маневровими характеристиками вимагає проведення додаткових досліджень ефективності регулювання частоти в енергосистемі. В даній роботі проведені дослідження та аналіз режимів роботи 2-х зонної енергосистеми при виникненні небалансу активної потужності. При цьому розглянуто декілька типів центрального регулятора САРЧП, а також враховано роботу теплового обладнання енергоблоку ТЕС, який залучений до вторинного регулювання. Виконано порівняльний аналіз ефективності вторинного регулювання частоти та активної потужності при використанні різних методів налаштування параметрів регулятора. Аналіз отриманих результатів показав, що застосування центрального регулятора на основі теорії нечіткої логіки забезпечує виконання чинних вимог до регулювання частоти та активної потужності.

Ключові слова: вторинне регулювання частоти та активної потужності, енергосистема, система автоматичного регулювання частоти та потужності, регулятор, частота.

Регулювання частоти є однією з ключових позицій в безпечному функціонуванні енергосистеми. На теперішній час в ОЕС України повинно виконуватись ряд заходів для регулювання частоти. А саме: забезпечення первинного, вторинного та третинного регулювання частоти згідно чинних нормативних вимог. За останні роки на деяких ТЕС була проведена реконструкція, що дозволило залучити їх до нормованого первинного регулювання частоти та активної потужності. Однак проблема забезпечення резервів вторинного регулювання досі не вирішена, оскільки існуючий резерв вторинної потужності недостатній згідно вимог [1–3].

Для вирішення даної проблеми існує можливість залучення енергоблоків ТЕС до участі у вторинному регулюванні частоти та активної потужності. Аналіз існуючих досліджень [4] показав, що при дослідженні роботи ТЕС при вторинному регулюванні не враховується теплосилове обладнання енергоблоку. Експериментальні дослідження [5] підтверджують необхідність розробки комплексної моделі енергоблоку ТЕС з врахуванням теплосилового обладнання та проведення детального порівняльного аналізу роботи ТЕС в цих умовах.

Метою роботи є дослідження ефективності участі ТЕС у вторинному регулюванні частоти та активної потужності за умови врахування роботи котельного обладнання та порівняння роботи регуляторів САРЧП різних типів.

На теперішній час ОЕС України працює паралельно з Єдиною енергосистемою (ЄЕС) Росії в режимі автоматичного регулювання активної потужності з корекцією по частоті. Згідно [3] система автоматичного регулювання активної потужності енергоблоку повинна забезпечити зміну потужності всього діапазону вторинного регулювання протягом 15 хв після виникнення небалансу активної потужності.

З метою підвищення ефективності регулювання частоти та активної потужності було виконано ряд досліджень, пов'язаних з оптимальним налаштуванням центрального регулятора системи автоматичного регулювання частоти та потужності (САРЧП) з використанням методів: Зіглера-Нікольса [6], CHR (Chien-Hrones-Reswick) та роботи ПІ регулятора на основі теорії нечіткої логіки [7] без врахування котельного обладнання в моделях енергоблоків ТЕС, а також виконано дослідження ефективності роботи ПІ регулятора на основі теорії нечіткої логіки при врахуванні роботи котла в моделі енергоблоку ТЕС.

Для досліджень було створено математичну модель 2-х зонної енергосистеми [8], узагальнена структурна схема якої приведена на рис.1. Кожна зона включає еквівалентні енергоблоки ТЕС, які задіяні у первинному та вторинному регулюванні частоти та активної потужності, навантаження кожної енергосистеми з еквівалентами нерегульованих турбін. Зони регулювання з'єднуються лініями зв'язку, які представлені однією еквівалентною лінією.

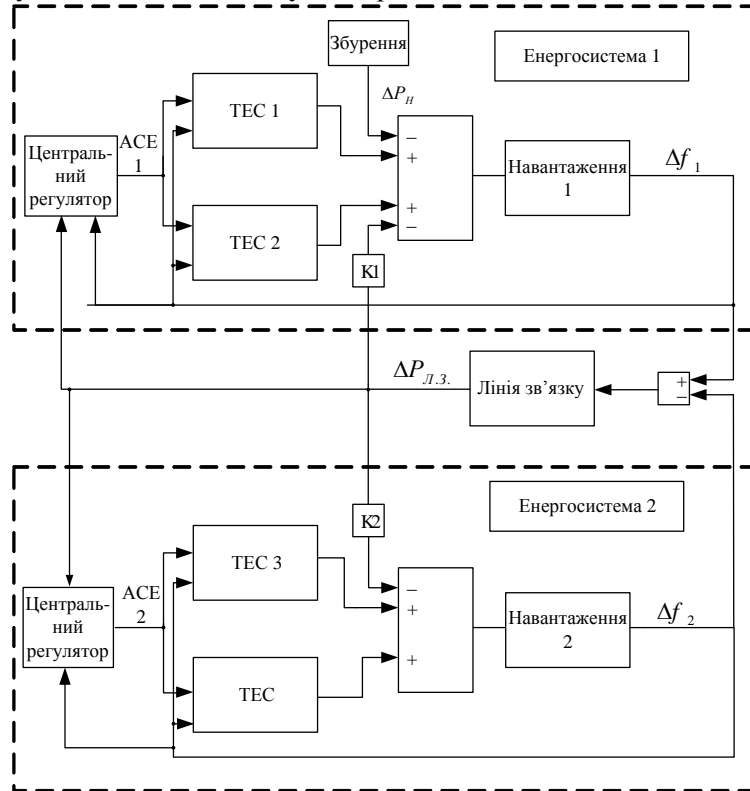


Рис.1. Структурна схема 2-х зонної моделі енергосистеми

Структуру 2-х зонної моделі сформовано виходячи з наведених нижче математичних залежностей.

Так, рівняння, яке зв'язує небаланс потужності та відхилення частоти представлено як [9]:

$$\Delta P_M(t) - \Delta P_H(t) = 2 \cdot H \frac{\partial \Delta f(t)}{\partial t} + D \cdot \Delta f(t) \quad (1)$$

де ΔP_M - зміна механічної потужності, ΔP_H - зміна навантаження, H - постійна інерції, D - коефіцієнт демпфування.

Використовуючи перетворення Лапласа рівняння (1) представлено як:

$$\Delta P_M(p) - \Delta P_H(p) = 2 \cdot H \cdot \Delta f(p) \cdot p + D \cdot \Delta f(p) \quad (2)$$

Рівняння перетоку потужності по лінії зв'язку двох енергосистем має вигляд:

$$\Delta P_{Л.З.1-2} = \frac{V_1 \cdot V_2}{X_{1-2}} \sin(\delta_1 - \delta_2) \quad (3)$$

де V_1, V_2 - напруги на затискачах генераторів двох енергосистем; δ_1, δ_2 - кути потужності генераторів, X_{1-2} - індуктивний опір елементів ділянки 1-2.

Лінеаризувавши (3) в околі δ_1^0 та δ_2^0 та використавши перетворення Лапласа отримаємо:

$$\Delta P_{Л.З.1-2}(p) = (\Delta f_1(p) - \Delta f_2(p)) \frac{2 \cdot \pi \cdot T_{1-2}}{p}, \text{ де } T_{1-2} = \frac{|V_1| \cdot |V_2|}{X_{1-2}} \cos(\delta_1^0 - \delta_2^0) \quad (4)$$

Модель енергоблока ТЕС представлено з наступними складовими: системи автоматичного регулятора швидкості турбіни (АРШ), механізму управління турбіною (МУТ), котла та турбіни і приведено на рис. 2.

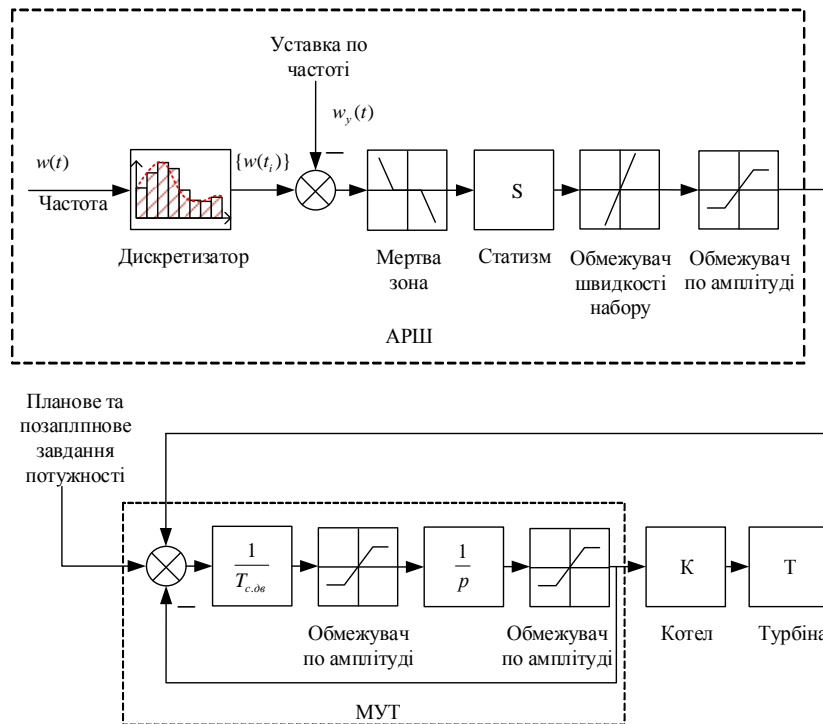


Рис.2. Структурна схема моделі енергоблока ТЕС (де $w(t)$ - поточне значення частоти, яка вимірюється на шині станції, $w_y(t)$ - уставка по частоті).

На виході АРШ формується сигнал зміни потужності енергоблоку згідно встановленого статизму, зони нечутливості по частоті та інших характеристик енергоблоку. Планове та позапланове завдання на зміну активної потужності енергоблоку надходить від задавача потужності енергоблоку та від центрального регулятора САРЧП кожної зони.

На вхід центрального регулятора надходить зміна відхилення частоти та перетоку активної потужності по лінії зв'язку. При виникненні небалансу потужності для кожної енергосистеми формується помилка регулювання АСЕ (Area control error). Для енергосистеми яка працює в режимі автоматичного регулювання активної потужності з корекцією по частоті значення АСЕ розраховується за формулою (5):

$$ACE = \Delta P_{Л.3.1-2}(p) + \beta \cdot \Delta f \quad (5)$$

де β - коефіцієнт коригування перетоку за частотою.

Структурна схема адаптивного ПІ регулятора на основі теорії нечітких множин представлена на рис. 3.

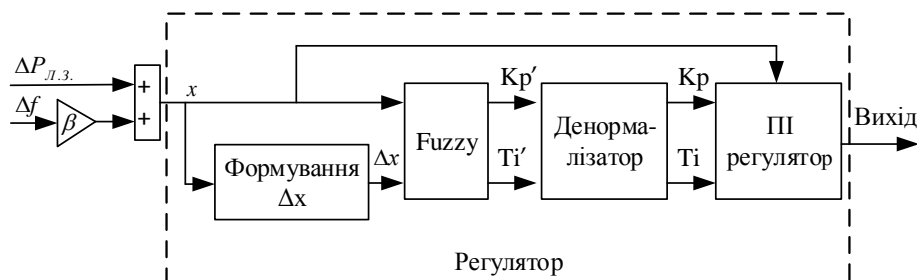


Рис.3. Структурна схема адаптивного регулятора на основі теорії нечітких множин

Запропонований адаптивний регулятор складається з блоку в якому реалізований алгоритм оснований на теорії нечіткої логіки (лінгвістичні змінні вхідних та вихідних сигналів якого зображені на рис. 4), блоку денормалізації, та класичного ПІ регулятора, параметри налаштування якого змінюються в залежності від рівня вхідного сигналу.

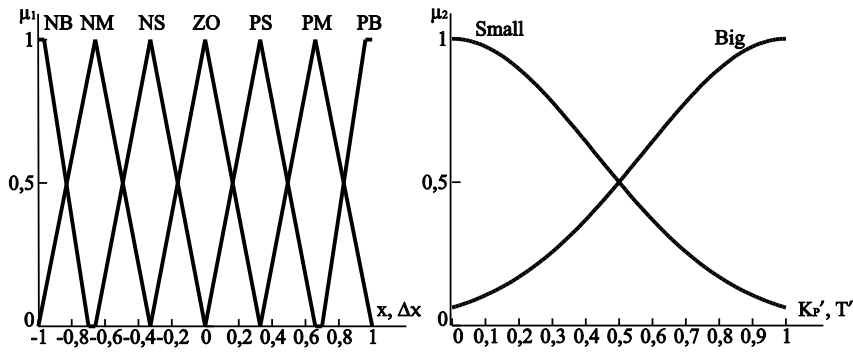


Рис.4. Лінгвістичні змінні входу та виходу регулятора

На вхід блоку нечіткої логіки подається помилка регулювання АСЕ, сигнал x та $\Delta x = x(i) - x(i-1)$, де $x(i)$ - значення поточного сигналу x , $x(i-1)$ - значення сигналу з затримкою на Δx . На виході блоку нечіткої логіки формуються нормалізовані значення параметрів налаштування: K_p' , T_i' ПІ регулятора. Перехід до реальних значень коефіцієнта підсилення та постійної часу ПІ регулятора виконується в денормалізаторі. Сигнал помилки регулювання АСЕ (сигнал x) також безпосередньо надходить на вхід ПІ регулятора, де формується керуючий вплив, який є виходом центрального регулятора САРЧП енергосистеми.

Використовуючи розроблену модель виконано моделювання режиму паралельної роботи двох енергосистем при збільшенні навантаження в першій енергосистемі на 0.02 в.о. при цьому враховуються наступні розрахункові величини: динамічне відхилення рівня частоти, перерегулювання по частоті, час поновлення резервів первинної потужності (час за який рівень частоти досягне значення $f_{ном} \pm 20$ мГц), час регулювання.

Аналіз отриманих результатів показав, що без врахування котельного обладнання при збільшенні навантаження в першій енергосистемі на 0,02 в.о. при оптимальному налаштуванні центрального регулятора за методом Зіглера-Нікольса динамічне відхилення частоти становить -60 мГц (крива 1, рис.5), перерегулювання склало 60 мГц, час поновлення резервів первинної потужності становить 146 с, однак на 15 хвилині після виникнення небалансу відхилення частоти становить -4.3 мГц. При налаштуванні параметрів регулятора методом СНР динамічне відхилення частоти становить -60.8 мГц (крива 2, рис.5), час поновлення резервів первинної потужності становить 250 с, перерегулювання відсутнє, на момент часу закінчення дії вторинного регулювання (15 хв) відхилення частоти становить -4.3 мГц. Використання регулятора на основі теорії нечітких множин показало, що перерегулювання становить 3.33 мГц (крива 3, рис.5), час поновлення резервів первинної потужності - 213 с, динамічне відхилення частоти становило -60.7 мГц, на момент часу закінчення дії вторинного регулювання (15 хв) відхилення частоти становить -0.45 мГц. Таким чином, використання центрального регулятора на основі теорії нечітких множин дозволяє зменшити перерегулювання по частоті в порівнянні випадком використання центрального регулятора, налаштованого за методом Зіглера-Нікольса, а також зменшити час поновлення резервів первинної потужності в порівнянні з використанням методу СНР.

Експериментальні дослідження [5, 6, 10] показали, що робота котельного обладнання значно впливає на маневреність та динамічні характеристики енергоблоків ТЕС. Тому з метою дослідження впливу котельного обладнання на якість регулювання частоти в енергосистемі було модернізовано модель енергоблоків ТЕС з врахуванням математичної моделі котла [11]. Моделювання режиму двох енергосистем з врахування котельного обладнання у складі математичної моделі ТЕС та з використанням регулятора на основі теорії нечітких множин показало, що динамічне відхилення частоти становить -63.1 мГц (крива 4, рис.5), час поновлення резервів первинної потужності - 531 с, перерегулювання відсутнє, на момент часу закінчення дії вторинного регулювання (15 хв) відхилення частоти становить -7.1 мГц.

Враховуючи отримані результати моделювання встановлено, що розраховані параметри вторинного регулювання при участі ТЕС з врахуванням котельного обладнання у вторинному регулюванні задовольняють вимоги чинних нормативних документів [1–3].

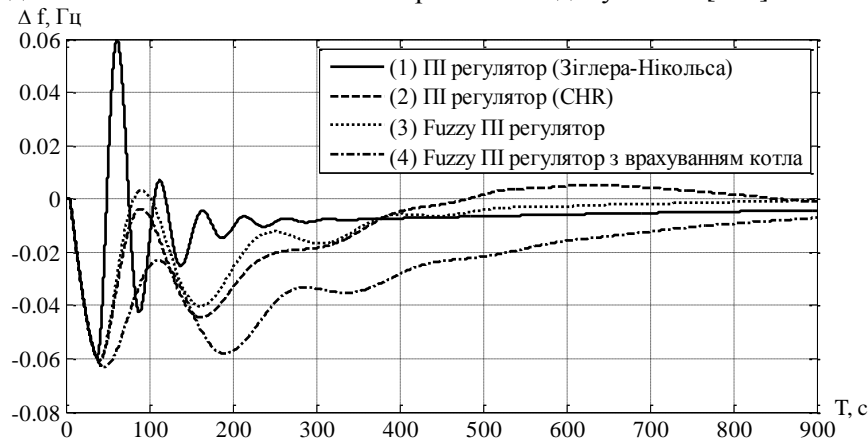


Рис.5. Графіки зміни частоти в енергосистемі

Висновки. Залучення енергоблоків ТЕС до вторинного регулювання частоти дозволить збільшити резерв потужності вторинного регулювання частоти та активної потужності. Використання центрального регулятора на основі теорії нечітких множин дозволило зменшити перерегулювання по частоті та час поновлення резервів первинної потужності в порівнянні з використанням таких методів налаштування параметрів ПІ регулятора, як метод Зіглера-Нікольса та метод CHR, що призведе до покращення показників якості регулювання частоти відповідно діючим нормативним вимогам.

Інформаційні джерела

1. Основні вимоги щодо регулювання частоти та потужності в ОЕС України / Київ, Україна : 2009. — С. 54.
2. Методики і рекомендації щодо організації первинного та вторинного регулювання частоти та потужності на енергоблоках ТЕС (ТЕЦ) / Київ, Україна : 2009. — С. 56.
3. Методики і рекомендації щодо перевірки готовності ТЕС, ГЕС і АЕС до участі у регулюванні частоти та потужності в ОЕС України / Київ : 2009. — С. 67.
4. Яндульський О. С. Особливості участі блоків ТЕС у вторинному регулюванні частоти в ОЕС України / О. С. Яндульський, В. С. Гулий // Наукові праці ВНТУ. — 2017. — No. 4. — С. 1–4.
5. Egido I. Modeling of thermal generating units for automatic generation control purposes / I. Egido, F. Fernández-bernal, L. Rouco[et al.] // IEEE transactions on control systems technology. — 2004.
6. Hambali N. Process controllability for flow control system using ziegler-nichols (zn), cohen-coon (cc) and chien-hrones-reswick (chr) tuning methods / N. Hambali, A. Masngut, A. A. Ishak, Z. Janin. — 2015.
7. Zhao Z. Y. Fuzzy gain scheduling of PID controllers / Z. Y. Zhao, M. Tomizuka, S. Isaka // IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics. — 1993.
8. Яндульський О. С. Оптимізація параметрів системного регулятора для автоматичного регулювання частоти та активної потужності в ОЕС України / О. С. Яндульський, А. А. Марченко, В. В. Мацейко, О. В. Хоменко // Наукові праці ДонНТУ. — 2013. — No. 2. — С. 294–298.
9. P.M. Anderson and A.A. Fouad Power system control and stability / P.M. Anderson and A.A. Fouad. — 2002.
10. Обстеження обладнання вуглегірської і старобешевської ТЕС на предмет відповідності вимогам исте щодо первинного і вторинного регулювання частоти і потужності / Горлівка : 2005.
11. Jagatheesan K. Load frequency control of an interconnected three area reheat thermal power systems considering non linearity and boiler dynamics with conventional controller / K. Jagatheesan, V. Anand // Advances in Natural and Applied Sciences. — 2014. — Vol. 8, No. 20. — С. 16–24.

Яндульский А.С., д.т.н., проф., Марченко А.А., к.т.н., доц., Гулий В.С., аспирант.
Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского"

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ВТОРИЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЕ ЧАСТОТЫ И МОЩНОСТИ С ПРИВЛЕЧЕНИЕМ ЭНЕРГОБЛОКОВ РАЗНЫХ ТИПОВ.

Эффективное регулирование частоты и активной мощности играет важную роль в обеспечении надежной работы энергосистемы. Анализ вторичного регулирования частоты и активной мощности в ОЭС Украины показал, что в ОЭС Украины существует проблема недостаточного резерва активной мощности вторичного регулирования. Привлечение энергоблоков ТЭС позволит обеспечить необходимый резерв, однако использование энергоблоков ТЭС с различными маневровыми характеристиками требует проведения дополнительных исследований эффективности регулирования частоты в энергосистеме. В данной работе проведены исследования и анализ режимов работы 2-х зонной энергосистемы при возникновении небаланса активной мощности. При этом рассмотрено несколько типов центрального регулятора САРЧП, а также учтено работу теплового оборудования энергоблока, который принимает участие в автоматическом вторичном регулировании. Выполнен сравнительный анализ эффективности вторичного регулирования частоты и активной мощности при использовании различных методов настройки параметров регулятора. Анализ полученных результатов показал, что применение центрального регулятора на основе теории нечеткой логики обеспечивает выполнение действующих требований к регулированию частоты и активной мощности.

Ключевые слова: вторичное регулирование частоты и активной мощности, энергосистема, система автоматического регулирования частоты и мощности, регулятор, частота.

O.S. Yandulskyi, A.A. Marchenko, V.S. Hulyi.
National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute".

ANALYSIS OF THE SECONDARY LOAD-FREQUENCY CONTROL EFFICIENCY WITH INVOLVEMENT OF THE DIFFERENT TYPES OF POWER STATION UNITS.

The effective load frequency control plays an essential role in maintaining of reliability of the power system operation. The analysis of secondary load-frequency control (LFC) of Integrated Power System (IPS) of Ukraine revealed the existence of the problem of insufficient reserve of secondary LFC. Involvement of power units of thermal power plants (TPP) will provide the necessary reserve, but utilization of TPPs power units requires conduction of the additional trials and research of the LFC efficiency. In this paper trials and analysis of 2-area power system modes under load demand occurrence have been carried out. A number of centralized controllers of automatic LFC system and the influence of boiler dynamic of power units of TPPs that involved in secondary LFC were considered. The comparative analysis of the efficiency of secondary LFC with using of different methods of the settings of controller parameters has been completed. The analysis of obtained results showed that using of LFC automatic system that based on Fuzzy logic controller meets the LFC requirements.

Keywords: secondary LFC, power system, automatic LFC system, Controller, Frequency.

Стаття надійшла до редакції 13.07.2018