

О. С. Яндульський, д-р. техн. наук, проф.;
 М. П. Лукаш, канд. техн. наук, доц.;
 А. О. Стелюк, канд. техн. наук, доц.

ВИБІР СИСТЕМНОГО РЕГУЛЯТОРА ДЛЯ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ЧАСТОТИ ТА АКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ

Розглянуто структуру та закони регулювання системи автоматичного регулювання частоти та активної потужності (САРЧП). Наведено результати моделювання роботи типового та нечіткого системного пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора САРЧП.

Вступ

Автоматичне регулювання частоти та активної потужності відіграє визначальну роль у забезпеченні споживачів електричною енергією належної якості, а також економічності та надійності функціонування електроенергетичних систем та їх об'єднань. Забезпечення високої якості регулювання, в першу чергу, залежить від системного регулятора.

Актуальність забезпечення високої якості регулювання частоти САРЧП об'єднаної енергосистеми (ОЕС) України зумовлена 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 Дніпровського каскаду та Дністровської ГЕС регульовальний діапазон цих станцій складає 797,4 МВт, що є недостатнім. Теплові електростанції (ТЕС) участі у вторинному регулюванні взагалі не приймають, в той час як їх залучення до САРЧП різко збільшить регульовальний діапазон системи, що дозволить підвищити ефективність функціонування САРЧП ОЕС України. Крім того, 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) також посилює вимоги до якості регулювання частоти у відповідності до правил регулювання частоти, які діють в ENTSO-E.

Структура САРЧП

Розглянемо структуру (рис. 1) та режими роботи САРЧП на системному рівні [1].

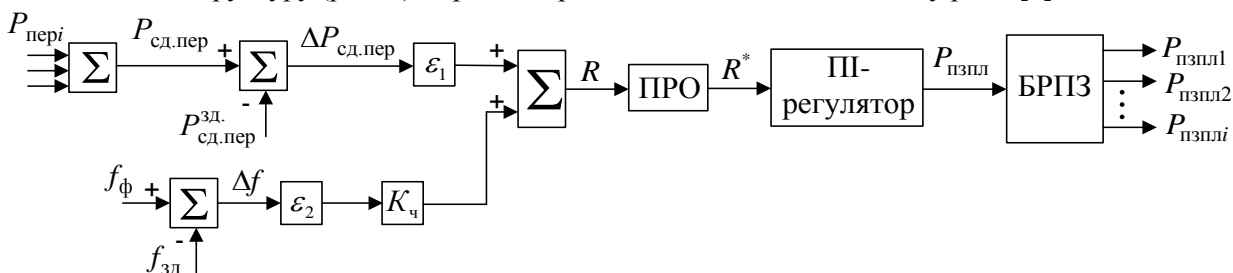


Рис. 1. Структурна схема системної частини САРЧП в ОЕС

Системна частина САРЧП призначена для підтримання балансу активних потужностей генерації та споживання, впливаючи на регульовальні станції, які задіяні у вторинному регулюванні частоти.

На вхід САРЧП подаються поточні значення перетоків активної потужності міжсистемними лініями зв'язку $P_{\text{пері}}$ та фактичної частоти f_{ϕ} . На основі поточних значень $P_{\text{пері}}$ визначається сальдо перетоків

$P_{\text{сд.пер}}$ та його відхилення $\Delta P_{\text{сд.пер}}$ відносно завдання $P_{\text{сд.пер}}^{\text{зд.}}$, а також відхилення частоти Δf відносно заданого значення $f_{\text{зд.}}$. Коефіцієнти ε_1 та ε_2 визначають режими регулювання: $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$ — режим автоматичного регулювання перетоку з коригуванням за частотою (АРПЧ); $\varepsilon_1 = 1, \varepsilon_2 = 0$ — режим автоматичного регулювання перетоку (АРП); $\varepsilon_1 = 0, \varepsilon_2 = 1$ — режим автоматичного регулювання частоти (АРЧ).

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

$$R = \varepsilon_1 (P_{\text{сд.пер}} - P_{\text{сд.пер}}^{\text{зд.}}) + \varepsilon_2 K_{\text{ч}} (f_{\text{ф}} - f_{\text{зд.}}) = \varepsilon_1 \Delta P_{\text{сд.пер}} + \varepsilon_2 K_{\text{ч}} \Delta f, \quad (1)$$

де R — системний параметр; $K_{\text{ч}}$ — коефіцієнт коригування перетоку за частотою; Δf — відхилення частоти; $\Delta P_{\text{сд.пер}}$ — сальдо перетоків активної потужності.

Системний параметр R^* , який коригується з урахуванням помилки регулювання області (ПРО), визначається таким чином:

$$R^* = \begin{cases} 0, & \text{якщо } R_{\text{мін}}^{\text{ПРО}} \leq R \leq R_{\text{макс}}^{\text{ПРО}}; \\ R, & \text{якщо } R < R_{\text{мін}}^{\text{ПРО}} \cup R > R_{\text{макс}}^{\text{ПРО}}, \end{cases}$$

де $R_{\text{мін}}^{\text{ПРО}}, R_{\text{макс}}^{\text{ПРО}}$ — мінімальна та максимальна межі ПРО відповідно.

Величина R^* подається на вхід системного пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора. У разі змінення R^* в межах допустимих значень ПРО регулятор не діє. В іншому разі регулятор виконує позапланове завдання за активною потужністю $P_{\text{пзпл}}$

$$P_{\text{ПЗПЛ}} = K_P R^* + K_I \int_{t_1}^{t_2} R^* dt, \quad (2)$$

де K_P, K_I — коефіцієнти підсилення пропорційної та інтегральної ланок регулятора; t_1, t_2 — межі інтегрування (інтервал контролю значень $f_{\text{ф}}$ та $P_{\text{пері}}$).

Застосування системного ПІ-регулятора дозволяє забезпечити задані швидкість та точність регулювання: пропорційна ланка забезпечує бажану швидкість, а інтегральна — задану точність регулювання. Через наявність інтегральної ланки вторинне регулювання частоти є астатичним, тобто в усталеному режимі $R = 0$.

В блоці розподілу позапланових завдань (БРПЗ) здійснюється розподіл позапланового завдання між регульовальними станціями. Так, у відповідності з коефіцієнтом часткової участі γ_i i -ї станції у вторинному регулюванні частоти, позапланове завдання $P_{\text{пзпл}i}$ на i -ту станцію визначається з виразу $P_{\text{ПЗПЛ}i} = \gamma_i P_{\text{ПЗПЛ}}$.

Режими автоматичного регулювання

Режим автоматичного регулювання частоти. Системний параметр в (1) визначається як

$$R = K_{\text{ч}} \Delta f. \quad (3)$$

Якщо в (3) коефіцієнт коригування перетоку за частотою $K_{\text{ч}}$ буде чисельно дорівнювати сумарній крутизні статичної частотної характеристики (с. ч. х.) енергосистеми, то в цьому випадку значення системного параметра R буде близьким до небалансу активної потужності, який призвів до відхилення частоти Δf в енергосистемі.

Позапланове завдання за активною потужністю $P_{\text{пзпл}}$, яке виробляє системний ПІ-регулятор, визначається як

$$P_{\text{ПЗПЛ}} = K_P K_{\text{ч}} \Delta f + K_I \int_{t_1}^{t_2} K_{\text{ч}} \Delta f dt.$$

Оскільки системний ПІ-регулятор є астатичним, то критерій регулювання частоти — $\Delta f = 0$.

Режим автоматичного регулювання перетоку. Системний параметр в (1) визначається як

$$R = \Delta P_{\text{сд.пер}}. \quad (4)$$

В цьому випадку системний параметр R визначає відхилення сальдо перетоків активної потужності міждержавними перетинами, яке викликано небалансом активної потужності.

Позапланове завдання $P_{\text{ПЗПЛ}}$, яке виробляє системний ПІ-регулятор на регулювальній станції, визначається як

$$P_{\text{ПЗПЛ}} = K_P \Delta P_{\text{СД.ПЕР}} + K_I \int_{t_1}^{t_2} \Delta P_{\text{СД.ПЕР}} dt.$$

Значення позапланового завдання повинно бути таким, щоб регулювальні станції компенсували небаланс активної потужності, який призвів до зміни сальдо перетоків міждержавними перетинами.

Критерій регулювання сальдо перетоків активної потужності — $\Delta P_{\text{сд.пер}} = 0$.

Режим автоматичного регулювання перетоку з коригуванням за частотою. Системний параметр в цьому випадку визначається з виразу

$$R = \Delta P_{\text{СД.ПЕР}} + K_{\text{ч}} \Delta f. \quad (5)$$

Як випливає з (5), цей режим є поєднанням режимів АРЧ та АРП. Якщо в (5) коефіцієнт коригування перетоку за частотою $K_{\text{ч}}$ буде кількісно дорівнювати сумарній крутизні с. ч. х. енергосистеми, то системний параметр буде визначати небаланс активної потужності, який призвів до відхилення частоти Δf і сальдо перетоків активної потужності $\Delta P_{\text{сд.пер}}$. В цьому випадку відпрацьовування небалансу потужності виконує та енергосистема, в якій виник небаланс. Необхідно зазначити, що величина системного параметру в цьому разі не залежить від режимів роботи системних регуляторів в інших ОЕС, від їх частотних властивостей та балансу потужностей.

Величина позапланового завдання $P_{\text{ПЗПЛ}}$ системного регулятора визначається виразом (2).

Критерій регулювання частоти та перетоків активної потужності — $R = 0$, оскільки лише в цьому випадку системний регулятор не діє.

В останній час для побудови цифрових регуляторів широко використовується апарат нечіткої логіки [2], який дозволяє виконувати адаптивне керування в умовах неповноти та неточності вихідних даних і не потребує ідентифікації моделі. 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. З урахуванням вищевикладеного, у середовищі Simulink програмного пакету Matlab V.7.11 проведено дослідження роботи системної частини САРЧП з нечітким на основі алгоритму Мамдані та типовим ПІ-регулятором (з жорстким налаштуванням параметрів).

Дослідження процесів регулювання частоти та активної потужності на моделі САРЧП виконано для режиму паралельної роботи двох ОЕС (ОЕС1 та ОЕС2), де встановлена потужність ОЕС2 в декілька разів більше встановленої потужності ОЕС1. В ОЕС1 системний регулятор САРЧП працює в режимі АРПЧ, а в ОЕС2 — в режимі АРЧ. Для спрощення моделювання та аналізу результатів прийнято, що в ОЕС1 у вторинному регулюванні частоти приймають участь 3 ТЕС, а інша частина ОЕС віднесена до еквівалентної групи нерегульованих турбін. В якості небалансу потужності в ОЕС1 розглядалось стрибкоподібне збільшення потужності навантаження на 100 МВт. В цьому випадку відхилення перетоку активної потужності еквівалентною лінією зв'язку буде обумовлене небалансом активної потужності в ОЕС1. З урахуванням того, що встановлена потужність ОЕС2 в декілька разів більша встановленої потужності ОЕС1, далі буде достатньо розглядати лише модель ОЕС1 [3]. Під час розробки моделі припустили, що: регулювальні станції представлені одним еквівалентним генератором; навантаження прикладене безпосередньо до валу генератора; і не враховуються втрати у мережі [3, 4].

Модель САРЧП в ОЕС наведена в [5], моделі окремих елементів — в [3—5]. Результати досліджень типового та нечіткого системного ПІ-регулятора для різних налаштувань (різна кількість термів на діапазонах зміни вхідних та вихідних сигналів регулятора, зміна форми трикутних функцій належності (ФН)) наведені в таблиці.

Для оцінки якості регулювання використані: $t_{\text{пп}}$ — час перехідного процесу, фіксований на момент досягнення потужності першого енергоблоку в перехідному режимі (помилка регулювання); значення $\Delta P_{1\text{уст}} = 0,05 P_{\text{уст}}$, де $P_{\text{уст}}$ — усталене значення зміни потужності першої станції; ΔP_1 — максимальне перерегулювання за час $t_{\text{пп}}$. Показники якості регулювання на двох інших регулювальних станціях практично не відрізняються від поданих у таблиці.

Результати досліджень типового та нечіткого ПІ-регулятора з трикутними ФН

Типовий ПІ-регулятор		Нечіткий ПІ-регулятор (системний рівень)											
		Кількість термів вхідних та вихідного сигналу регулятора											
		3 терми		5 термів		7 термів		9 термів		7 термів зі зміщеними до центру вершинами ФН		7 термів зі збільшеними від центру основами ФН	
$\Delta P_1, \%$	$t_{\text{пн}}, \text{с}$	$\Delta P_1, \%$	$t_{\text{пн}}, \text{с}$	$\Delta P_1, \%$	$t_{\text{пн}}, \text{с}$	$\Delta P_1, \%$	$t_{\text{пн}}, \text{с}$	$\Delta P_1, \%$	$t_{\text{пн}}, \text{с}$	$\Delta P_1, \%$	$t_{\text{пн}}, \text{с}$	$\Delta P_1, \%$	$t_{\text{пн}}, \text{с}$
10,9	80	10,6	95	8,6	90	10,8	60	9,9	70	7,7	82	6,9	80

На рис. 2 показано графіки перехідного процесу, які отримані з використанням типового системного та нечіткого ПІ-регулятора при відпрацюванні сигналу $P_{\text{пзпл}} = 100$ МВт трьома регульовальними ТЕС. Заданий розподіл потужності між станціями складає: $P_{\text{пзпл1}} = 35$ МВт; $P_{\text{пзпл2}} = 25$ МВт; $P_{\text{пзпл3}} = 40$ МВт, який забезпечується алгоритмом, викладеним в [5].

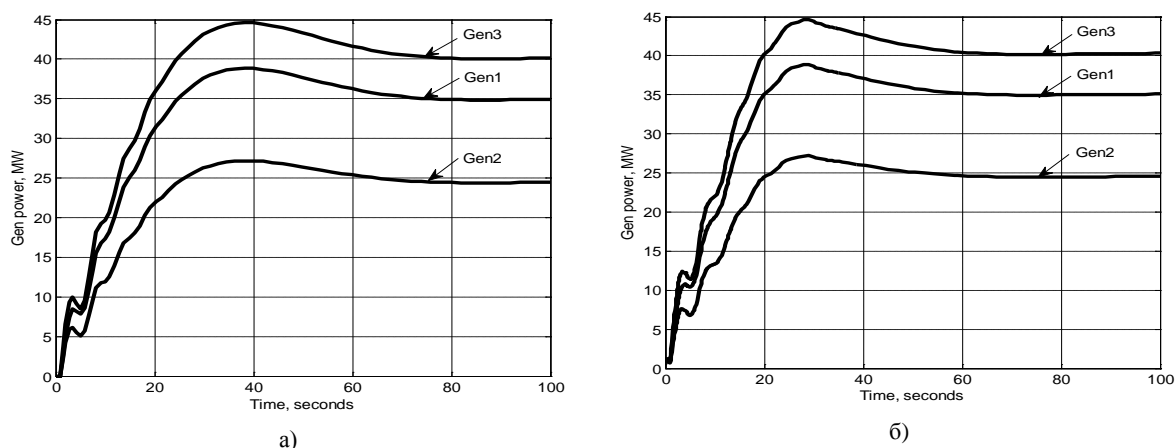


Рис. 2. Перехідні процеси зміни потужності регульовальних станцій при використанні:
а — типового ПІ-регулятора з жорстким налаштуванням параметрів;
б — нечіткого ПІ-регулятора на основі алгоритму Мамдані (7 симетричних термів трикутних ФН)

Висновки

Отримані результати ілюструють доцільність використання нечіткого системного ПІ-регулятора. Показано, що вибір поділення діапазонів зміни сигналів регулятора та форми ФН впливають на показники якості перехідних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Яндутьський О. С. Автоматичне регулювання частоти та перетоків активної потужності в енергосистемах / О. С. Яндутьський, А. О. Стелюк, М. П. Лукаш. — К. : НТУУ «КПІ», 2010. — 88 с.
2. Bevrani H. Intelligent automatic generation control / H. Bevrani, T. Niyama // CRC Press, 2011. — 278 p.
3. Яндутьський А. С. Моделирование системы АРЧМ ОЭС Украины при регулировании перетока / А. С. Яндутьський, А. О. Стелюк, Ю. Н. Бондаренко // Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки : тем. вип. — 2002. — Ч. 7. — С. 76—79.
4. 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.
5. Яндутьський О. С. Моделювання системи автоматичного регулювання частоти та потужності об'єднаної енергосистеми з регульовальними енергоблоками теплових електростанцій / О. С. Яндутьський, А. О. Стелюк, М. П. Лукаш // Технічна електродинаміка. Проблеми сучасної електротехніки : тем. вип. — 2010. — Ч. 3. — С. 48—52.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 10.10.11
Рекомендована до друку 7.11.11

Яндутьський Олександр Станіславович — професор, **Стелюк Антон Олегович** — доцент.

Кафедра автоматизації енергосистем;

Лукаш Микола Петрович — доцент кафедри електричних станцій.

Національний технічний університет «Київський політехнічний інститут», Київ