



УДК 621.311

ЛІТВІНОВ В.В., канд. техн. наук; начальник ВТС
Дніпровської ГЕС ПрАТ "Укргідроенерго"

ОПТИМІЗАЦІЯ РОЗПОДІЛУ НАВАНТАЖЕННЯ МІЖ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ КАСКАДУ ГЕС, ЯКІ ПРАЦЮЮТЬ В САРЧП

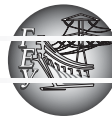
Проаналізовано новий алгоритм роботи САРЧП для гідроелектростанцій дніпровського каскаду. Визначено його переваги та недоліки у порівнянні з попереднім алгоритмом. Запропоновано новий удосконалений підхід до розподілу навантаження між ГЕС, що працюють в САРЧП, який підвищує загальнокасадний ККД та дозволяє більш ефективно використовувати водні ресурси не погіршуючи умови функціонування інших водокористувачів.

К л ю ч о в і с л о в а: регулювання, розподіл навантаження, загальнокасадний ККД, гідроагрегат, активна потужність

Вступ. З 2003 року в об'єднаній енергетичній системі (ОЕС) України працює система автоматичного регулювання частоти та активної потужності (САРЧП), основним призначенням якої на теперішній час є регулювання перетоків активної потужності між Україною та сусідніми державами з підтримкою нульового сальдо. Ключову роль в САРЧП, завдяки власній маневреності, відіграють потужні гідроелектростанції (ГЕС) [1]. Згідно з [2], ще у 2004 році планувалось підключення до САРЧП більшості ГЕС Дніпровського каскаду (Київська ГЕС, Кременчуцька ГЕС, Середньодніп-

ровська (тоді Дніпродзержинська) ГЕС, Дніпровська ГЕС-1, Каховська ГЕС).

Фактично ж, з різних причин, протягом 2005—2017 років в САРЧП брали участь тільки 6 гідроагрегатів Дніпровської ГЕС-1, які працювали за алгоритмом, представленим в [2]. Оскільки умови забезпечення нульового сальдо є досить жорсткими (припустимий небаланс перетоку в один чи інший бік складає 100 МВт·год за 1 годину), то завдання центрального регулятора САРЧП, яке передавалось на Дніпровську ГЕС, змінювалось через малі інтервали часу (до 30 хвилин) і, по суті, мало стохастичний характер. Це



призводило до великої кількості перевідних режимів "генераторний режим – режим синхронного компенсатора" з переходом через зону nereкомендованої роботи турбіни. Кількість таких переходів, зазвичай, перевищувала гранично допустимі заводами-виробниками гідроенергетичного обладнання значення. Наслідком цього стало зростання кількості відмов та аварій на гідроагрегатах Дніпровської ГЕС-1, серед яких слід відзначити наступні:

- вихід з ладу двигунів компресорів повітряного господарства;
- зношення ущільнень підшипників (гідроагрегат № 4, 9);
- зношення бронзових втулок у механічних вузлах управління направляючим апаратом (гідроагрегати № 8, 9);
- підвищення биття диску під'ятників гідроенергетичних генераторів з подальшим руйнуванням опор сегментів (гідроагрегати № 5, 6, 8, 9);
- вихід з ладу насосів маслосмазочних установок (гідроагрегат № 2, 3);
- руйнування штоків сервомоторів (гідроагрегати № 1, 2);
- пошкодження (тріщина) генераторного валу в зоні кріплення маточини під'ятника (гідроагрегат № 6).

У червні 2017 року мала місце комп'ютерна вірусна атака, наслідком якої був системний збій через наслідки якого протягом декількох місяців САРЧП не працювала, що значно полегшило режими роботи гідроагрегатів Дніпровської ГЕС-1. Після відновлення роботи САРЧП у жовтні 2017 року було прийнято рішення про введення в роботу нового алгоритму, який не передбачає знаходження гідроагрегатів у зоні nereкомендованої роботи, та поступове підключення до САРЧП інших станцій каскаду після проведення випробувань ГРАП (Каховська ГЕС, Середньодніпровська ГЕС, Київська ГЕС, Дніпровська ГЕС-2, Кременчуцька ГЕС, Канівська ГЕС). Також розглядається питання підключення до САРЧП гідроакуюлюючих станцій (Київська ГАЕС, Дністрівська ГАЕС)

Аналіз стану проблеми. Принципи роботи нового алгоритму САРЧП полягають в наступному:

1) гідроагрегати ГЕС, що підключені до САРЧП, працюють у базовому режимі відповідно до добового графіка навантажень;

2) гідроагрегати, підключені до САРЧП, працюють в діапазоні регулювання від верхнього значення зони nereкомендованої роботи (P_{\min}) до номінальної потужності гідроагрегату (P_{\max}). При цьому виключається можливість роботи гідроагрегатів в режимі синхронного компенсатора та їхнє перебування в зоні nereкомендованої роботи. Значення діапазону регулювання активної потужності при цьому складає:

$$P_{\text{регГРАП}} = \sum_{i=1}^n (P_{\max i} - P_{\min i}), \quad (1)$$

де n – кількість гідроагрегатів, підключених до САРЧП

3) всі гідроагрегати, що підключені до САРЧП, одночасно приймають участь у виконанні завдання, отриманого від центрального регулятора САРЧП, замість відпрацювання завдання меншою кількістю агрегатів. Для цього, мінімальне значення завдання центрального регулятора САРЧП має складати

$$P_{\text{задmin}} = \sum_{i=1}^n P_{\min i}.$$

Особливо важливою при цьому залишається реалізація третього принципу, суть якого полягає в оптимальному навантаженні кожного з гідроагрегатів, що приймають участь у САРЧП не в межах окремої станції, а в масштабах каскаду ГЕС. На теперішній час, в алгоритм САРЧП закладено пропорційний принцип, який не враховує індивідуальні експлуатаційні характеристики турбін, які на різних станціях каскаду суттєво відрізняються одна від одної.

В роботах [1, 3] розглянуто підходи до удосконалення попереднього алгоритму САРЧП як з точки зору зменшення кількості перевідних режимів, так і з точки зору оптимізації використання гідроенергетичним обладнанням ГЕС водних ресурсів шляхом максимізації загальностанційного ККД. За нового алгоритму роботи САРЧП задача зменшення кількості перевідних режимів не є актуальною. Задача оптимального використання водних ресурсів каскадом ГЕС за нового алгоритму також потребує вирішення, причому розроблена модель оптимізації загальностанційного ККД не підходить для її вирішення, так як загальностанційний ККД є характеристикою окремої ГЕС, а не всього каскаду.

Питанням оптимізації режиму роботи каскаду ГЕС присвячені роботи [4, 5]. Так в [4] розроблено метод управління водноенергетичними комплексами каскаду водосховищ ГЕС з урахуванням режимів роботи сільськогосподарських комплексів в умовах обмеженості водних ресурсів та рівних пріоритетів водокористування енергетичними та сільськогосподарськими галузями. У запропонованому методі оптимізуються витрати води на ГЕС, а цільовою функцією є прибуток. Недоліком запропонованого методу є те, що цільовою функцією є економічний, а не технічний показник, що унеможливує його використання в задачі розподілу навантаження між ГЕС, що працюють в САРЧП.

В [5] вирішується задача максимізації виробітку електричної енергії, а не оптимального відпрацювання завдання по активній потужності. Розподіл потужності між агрегатами ГЕС рівномірний без оптимізації пропуску води через гідровузлу.

В [6] приведено алгоритм роботи САРЧП України зі вторинним регулюванням, яке забезпечується ГЕС України. Розподіл завдання між ГЕС виконується за пропорційним принципом, а між агрегатами ГЕС – за рівномірним. Гідрологічний режим каскаду ГЕС та витрати води через гідровузлу при цьому не розглядаються.



Розглянуті матеріали дозволяють зробити висновки, що необхідні рішення, які б оптимізували роботу ГЕС у системі САРЧП, оскільки питання розподілу завдання центрального регулятора між агрегатами, які будуть його виконувати, залишається недопрацьованим.

Постановка задачі. Основними проблемами при оптимізації розподілу завдання центрального регулятора САРЧП між ГЕС каскаду є необхідність регулювати всі ГЕС з урахуванням водного режиму водосховищ ГЕС та визначення дольової часті кожної станції каскаду в регулюванні. Таким чином, розподіл заданого навантаження між ГЕС Дніпровського каскаду має забезпечувати відпрацювання завдання центрального регулятора САРЧП з мінімальними витратами води, урахуванням технологічних обмежень гідротурбін всіх ГЕС та дотриманням вимог Міжвідомчої комісії при Державному агентстві водних ресурсів (урахування інтересів всіх водокористувачів).

Підхід до розподілу завдання навантаження між ГЕС каскаду. На каскаді є m гідроелектростанцій. На кожній станції каскаду є n агрегатів, з яких n_1 ($n_1 < n$) підключені до САРЧП. Є завдання активної потужності від центрального регулятора САРЧП $P_{\text{зад}}$, яке має відпрацювати каскад ГЕС. Необхідно розподілити це завдання між електростанціями каскаду таким чином, щоб було найбільш ефективно використано водні ресурси ріки в припустимих межах рівнів б'єсів та можливому діапазоні витрат води, тобто необхідно отримати максимальний загальнокаскадний ККД.

Згідно з діючим алгоритмом САРЧП [6], регулювати потужності гідроагрегатів допускається тільки в припустимому діапазоні роботи гідротурбін. В цьому випадку, оптимізаційна задача виглядає наступним чином:

$$F = \frac{\sum_{i=1}^m P_{\text{ГЕС}i}}{\sum_{i=1}^m P_{\text{ГЕС}i} / \eta_{\text{ГЕС}i} |_{H=H_{\text{ГЕС}i}}} \rightarrow \max. \quad (2)$$

Із завдання активної потужності для каскаду ГЕС та виразу для потужності ГЕС формуються обмеження у формі рівності:

$$P_{\text{зад}} = \sum_{i=1}^m P_{\text{ГЕС}i}. \quad (3)$$

$$P_{\text{ГЕС}i} = g Q_{\text{ГЕС}i} H_{\text{ГЕС}i} \eta_{\text{ГЕС}i}(H_{\text{ГЕС}i}). \quad (4)$$

Обмеження у вигляді нерівності:

$$P_{\text{ГЕС}i}^{\text{MAX}} \geq P_{\text{ГЕС}i} \geq P_{\text{ГЕС}i}^{\text{MIN}}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (5)$$

$$H_{\text{ГЕС}i}^{\text{MAX}} \geq H_{\text{ГЕС}i} \geq H_{\text{ГЕС}i}^{\text{MIN}}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (6)$$

$$Q_{\text{ГЕС}i}^{\text{MAX}} \geq Q_{\text{ГЕС}i} \geq Q_{\text{ГЕС}i}^{\text{MIN}}, \quad i = 1, \dots, m, \quad (7)$$

У виразах (2)–(7):

F – цільова функція, що представляє собою загальнокаскадний ККД – відношення сумарної еле-

ктричної потужності на виході ГЕС каскаду до сумарної механічної потужності на вході;

$P_{\text{ГЕС}i}$ – потужність генераторів i -ї ГЕС, підключених до САРЧП;

$\eta_{\text{ГЕС}i}$ – загальностанційний ККД i -ї ГЕС;

$P_{\text{ГЕС}i}^{\text{MIN}}$ – мінімально припустима за режимом турбін потужність генераторів i -ї ГЕС, підключених до САРЧП;

$P_{\text{ГЕС}i}^{\text{MAX}}$ – максимально припустима потужність за номінальною потужністю генераторів i -ї ГЕС, підключених до САРЧП;

$H_{\text{ГЕС}i}$ – робочий напір i -ї ГЕС;

$H_{\text{ГЕС}i}^{\text{MAX}}$ – максимальний напір ГЕС за форсованого підпірного рівня води у ВБ та рівня мертвого об'єму у НБ;

$H_{\text{ГЕС}i}^{\text{MIN}}$ – мінімальний напір ГЕС за рівня мертвого об'єму у ВБ та форсованого підпірного рівня води у НБ;

$Q_{\text{ГЕС}i}$ – витрата води через гідроагрегати i -ї ГЕС, що працюють у САРЧП;

$Q_{\text{ГЕС}i}^{\text{MAX}}$ – максимальна витрата води через гідроагрегати i -ї ГЕС, що працюють у САРЧП;

$Q_{\text{ГЕС}i}^{\text{MIN}}$ – мінімальна витрата води через гідроагрегати i -ї ГЕС, що працюють у САРЧП.

g – прискорення вільного падіння, 9,81 м/с²;

$P_{\text{ГЕС}i} = \sum_{j=1}^{n_i} P_j$, де P_j – це робоча потужність j -го гідрогенератора i -тої ГЕС;

$P_{\text{ГЕС}i}^{\text{MIN}} = \sum_{j=1}^{n_i} P_{\text{MIN}j}$, де $P_{\text{MIN}j}$ – це мінімально припустима за режимом турбіни потужність j -го гідрогенератора i -ї ГЕС;

$P_{\text{ГЕС}i}^{\text{MAX}} = \sum_{j=1}^{n_i} P_{\text{ном}j}$, де $P_{\text{ном}j}$ – це номінальна потужність j -го гідрогенератора i -ї ГЕС;

$Q_{\text{ГЕС}i} = \sum_{j=1}^{n_i} Q_j$, де Q_j – це витрата води через j -тий гідрогенератор i -ї ГЕС;

$Q_{\text{ГЕС}i}^{\text{MIN}} = \sum_{j=1}^{n_i} Q_{\text{MIN}j}$, де $Q_{\text{MIN}j}$ – це мінімально припустима за режимом турбіни витрата води через j -ий гідрогенератор i -ї ГЕС;

$Q_{\text{ГЕС}i}^{\text{MAX}} = \sum_{j=1}^{n_i} Q_{\text{ном}j}$, де $Q_{\text{ном}j}$ – це номінальна витрата води через j -ий гідрогенератор i -ї ГЕС.

Для вирішення сформованої оптимізаційної задачі через значну нелінійність цільової функції та велику кількість обмежень у формі нерівностей, застосовано генетичний алгоритм [3]. Оптимізаційна задача формалізується таким чином, щоб її рішення





можна було представити у вигляді вектору генів $P_i = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, кожен з яких є певним числом. За допомогою генератора випадкових чисел формується множина генотипів початкової популяції.

Кожен елемент в популяції має певний рівень якості, який характеризується значенням цільової функції. Ці значення оцінюються з використанням "функції пристосованості" [7]. З отриманої множини рішень з урахуванням значення "пристосованості" обираються рішення до яких застосовуються генетичні оператори "схрещування" та "мутація", в результаті чого отримуються нові рішення. Для них також визначається пристосованість та проводиться відбір кращих рішень у наступне покоління, і т. д. Якщо виконуються умови закінчення циклу – останнє покоління приймається в якості рішення, якщо ні – цикл виконується знову. Рішенням є вектор значень сумарних потужностей генераторів, підключених до САРЧП по кожній ГЕС каскаду:

$$\bar{P} = \{P_1, P_2, \dots, P_n\}, \quad (8)$$

де n – кількість ГЕС каскаду, що беруть участь в САРЧП.

Згідно з запропонованим алгоритмом розподілу завдання центрального регулятора, можна виконувати підключення до САРЧП гідроагрегатів всіх ГЕС Дніпровського каскаду в наступній кількості (Табл. 1).

З Табл. 1 видно, що регулювальний діапазон САРЧП за такої кількості агрегатів, підключених до центрального регулятора, складає 927 МВт. Мінімальне значення завдання центрального регулятора САРЧП (базова потужність каскаду ГЕС) при цьому складає 836 МВт.

В якості прикладу, який демонструє ефективність нового алгоритму САРЧП з точки зору збереження ресурсу генеруючого обладнання, на Рис. 1 приведено статистичні дані з кількості перевідних режимів гідроагрегатів Дніпровської ГЕС-1 протягом 2017 року, коли гідроагрегати спочатку працювали в САРЧП за старим алгоритмом, потім деякий час були відключені від САРЧП, а повторно підключені до САРЧП були за новим алгоритмом.

Середня кількість перевідних режимів на місяць протягом першого півріччя складає 7750, протягом третього кварталу – 2117, протягом четвертого кварталу – 517. Аналіз приведених статистичних даних показує, що у період відключення гідроагрегатів від САРЧП (липень–вересень)

Таблиця 1. Характеристики ГЕС Дніпровського каскаду

ГЕС	Регулювальний діапазон гідроагрегату, МВт		Кількість гідроагрегатів на ГЕС	Кількість гідроагрегатів, одночасно підключених до САРЧП	Регулювальний діапазон гідроагрегату, МВт	Регулювальний діапазон ГЕС, МВт
	P_{MIN}	P_{MAX}				
Київська	10	22	20	8	12	96
Канівська	10	22	24	4	12	48
Кременчуцька	16	57	12	6	41	246
Середньодніпровська	20	48	8	3	28	84
Дніпровська 1	45	72	9	6	27	162
Дніпровська 2	70	119	8	3	49	147
Каховська	20	56	6	4	36	144
РАЗОМ						927

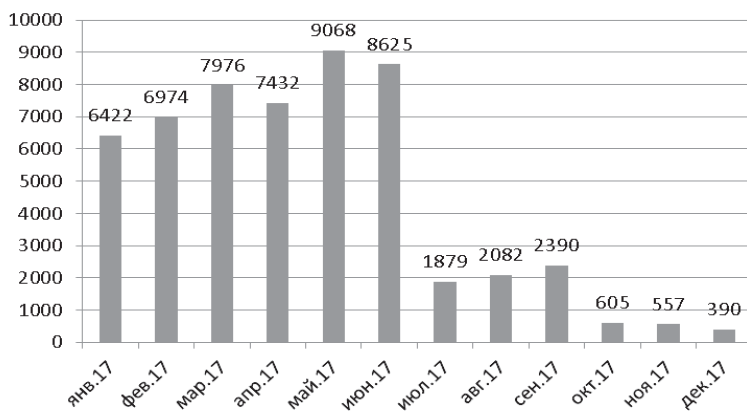


Рис. 1. Помісячна кількість перевідних режимів гідроагрегатів Дніпровської ГЕС-1 протягом 2017 року

кількість перевідних режимів в середньому зменшилася у 3,6 разів у порівнянні з періодом роботи за алгоритмом, який передбачав перехід через зону не рекомендованої роботи (січень–червень). Після підключення гідроагрегатів до САРЧП за новим алгоритмом (жовтень–грудень), загальна кількість перевідних режимів ще зменшилась: у 15 разів у порівнянні з періодом роботи за алгоритмом, який передбачав перехід через зону не рекомендованої роботи (січень–червень) та в 4 рази у порівнянні з періодом роботи без підключення до САРЧП. Припустима заводами-виробниками кількість перевідних режимів агрегатів на рік при роботі за новим алгоритмом не перевищується.

Висновки. Новий алгоритм роботи САРЧП значно покращив режими роботи генеруючого та допоміжного обладнання ГЕС та вирішив проблему перевідних режимів гідроагрегатів через зону не рекомендованої роботи, причому кількість перевідних режимів при роботі у САРЧП за новим алгоритмом є навіть меншою за кількість перевідних режимів без роботи в САРЧП через те, що у гідроагрегатів, підключених до САРЧП, режим синхронного компенсатора не використовується. Недоліком цього алгоритму є те, що у маловодні роки в період межени неможлива нестача водних ресурсів для забезпечення несення базової потужності каскадом ГЕС.

Для оптимізації використання водних ресурсів ріки Дніпро запропоновано метод розподілу завдання центрального регулятора САРЧП між станціями каскаду, який на відміну від існуючого пропорційного підходу, дозволяє підвищити загальнокаскадний ККД, при цьому не порушуючи умови



функціонування інших водокористувачів, визначені рішеннями Міжвідомчої комісії при Державному агентстві водних ресурсів.

Подальші дослідження та удосконалення алгоритму САРЧП передбачаються у поєднанні запропонованого методу розподілу завдання центрального регулятора САРЧП між станціями каскаду з зробленим раніше методом розподілу завдання для ГЕС між її агрегатами та адаптації методів та алгоритмів до участі ГАЕС у регулюванні частоти та активної потужності.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Літвінов В.В.* Використання нечітких моделей та генетичних алгоритмів для удосконалення режиму групового регулювання активної потужності на ГЕС / В.В. Літвінов, Є.В. Галько // Гідроенергетика України. — 2016. — №1–2. — С.19–25.
2. *Редин В.И.* Принципы построения и организация взаимодействия системы SCADA/AGC – Centralog ГЭС / В.И. Редин, А.Г. Баталов, Ю.Н. Бондаренко, Д.А. Олефир, А.Г. Денисенко // Электрические сети и системы. — 2004. — №3. — С. 3–8.

3. *Літвінов В.В.* Удосконалення методу розподілу навантаження між гідроагрегатами з неідентичними характеристиками турбін / В.В. Літвінов, Є.В. Галько // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: "Механіко-технологічні системи та комплекси". — 2015. — № 36. — С.131–137.

4. *Дауд М.Д.* Режим работы каскада ГЭС с водохранилищами энергосельскохозяйственного назначения: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.10 — гидроэлектростанции и гидроэнергетические установки / Маан Даниэль Дауд. — СПб., 1995. — 18 с.

5. *Султонов Ш.М.* Оптимизация режимов работы энергосистемы с высокой долей гидроэлектростанций: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.14.02 — электрические станции и электроэнергетические системы / Шерхон Муртазокулович Султонов. — Новосибирск, 2016. — 20 с.

6. *Яндульський О.С.* Автоматичне регулювання частоти та перетоків активної потужності в енергосистемах / О.С. Яндульський, А.О. Стелюк, М.П. Лукаш. К.: НТУУ "КПІ", 2010. — 88 с.

7. *Ротштейн А.П.* Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические алгоритмы, нейронные сети / А.П. Ротштейн. — Вінниця: ВНТУ, 1999. — 320 с.

© Літвінов В.В., 2018

