

УДК 618.31.05

Л. Ю. Курганова, студ.;

Ж. І. Остапчук, к. т. н., доц.;

А. В. Огніщенко, студ.

БАГАТОФАКТОРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ У ВЗАЄМОРОЗРАХУНКАХ ОКРЕМИХ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Вирішуються проблеми структуризації взаєморозрахунків з виробниками за отриману електричну енергію з врахуванням втрат активної потужності. Задача визначення структури розрахунків за втрати активної потужності ефективно розв'язана методом планування експерименту (МПЕ). Ілюстрацією такого підходу запропоновано приклад визначення взаєморозрахунків для двох «Обленерго», які входять до складу Південно-Західної ЕС.

Вступ

Однією з характерних особливостей будь-якої електроенергетичної системи (ЕЕС) є те, що вона створюється на основі територіально-ієрархічного принципу. Лінії міжсистемного зв'язку з напругою 330 кВ і вище та значною протяжністю поєднують енергосистеми різних регіонів і навіть держав. Режим таких ліній залежить від резерву потужностей в окремих системах та одночасності проходження максимумів навантажень. Але й між окремими енергосистемами рівня «Обленерго» існують відповідні системні зв'язки. Часто енергосистеми переривають такі зв'язки, що дозволяє їм локалізувати власні проблеми розрахунків за електроенергію. Проте переривання ліній зв'язку призводить до погіршення надійності в забезпеченні споживачів електроенергією.

Системні зв'язки рівня «Обленерго» — це, як правило, лінії 110 або 35 кВ, однак втрати активної потужності (ΔP) цих ліній, залежать від потоків як активної, так і реактивної потужностей [1]. За втрати ΔP в електричних мережах всі енергосистеми розраховуються з енергопостачальними компаніями. Тут важливо, яка саме енергосистема повністю або частково буде включати в свій баланс вартість втрат електричної енергії на лініях зв'язку? Отже постає задача структуризації взаєморозрахунків по втратах активної потужності від транзитів різних «Обленерго» на лініях зв'язку між ними [2].

Відомо, що втрати активної потужності будь-якого елемента ЕЕС визначаються на основі електротехнічних законів і закону збереження енергії. Але складові додаткових втрат активної потужності суттєво залежать від того, в якому напрямку транспортується транзитна потужність. Отже, з'являється необхідність виявлення взаємовпливу окремих енергосистем і їх режимів. Тепер задача структуризації взаєморозрахунків може бути поставлена як задача визначення впливу відповідних параметрів режиму однієї та іншої енергосистеми на додаткові втрати в лініях зв'язку.

Основна частина

Для розв'язання задачі структуризації взаєморозрахунків між енергосистемами можна використати будь-який метод лінійного, нелінійного або й динамічного програмування. Проте на сьогодні, поряд з іншими, достатньо ефективним методом для визначення взаємовпливу окремих систем вважається метод теорії планування експерименту (МПЕ) [3, 4]. Причиною цього стала універсальність методу планування експерименту, можливість, за наявності невеликого обсягу вхідної інформації, здійснити дослідження і отримати достовірні результати. Також однією з причин широкого застосування цього методу стало те, що немає жорсткої регламентації щодо використання МПЕ. Тобто, в залежності від поставленої мети, дослідник сам вибирає тип експерименту, який буде покладений в основу методу планування, вибирає вид функції відгуку, способи оцінки отриманої інформації та ін.

Вибір факторів, які потрібно враховувати, це найвідповідальніший аспект МПЕ. Впливові фактори можуть бути вибрані на основі дослідження режимів роботи окремих і об'єднаних енергосистем, за допомогою спеціальних відсіювальних експериментів, або на основі однофакторного експерименту. За результатами таких експериментів формуються рівні варіювання факторів. Дана

процедура відноситься до неформалізованого розділу МПЕ. Всі інші розділи: побудова матриці планування експерименту, побудова математичної моделі, аналіз отриманих результатів — носять формалізований характер, та все ж залишається простір для прийняття обґрунтованих рішень [4].

У плануванні експерименту сам експеримент розглядається як об'єкт дослідження і оптимізації, а процес планування експерименту являє собою кібернетичний підхід до організації і проведення експериментальних досліджень складних систем. Виключаючи сліпий пошук, він значно скорочує кількість дослідів, дає можливість отримати кількісні оцінки впливу кожного фактора, і нарешті, побудувати математичні моделі за обраними факторами.

Застосування МПЕ в задачах електроенергетики пов'язано з певними труднощами, що впливають з характеру самого об'єкта — розташування на значній території, неможливість проведення натурних активних експериментів тощо. В зв'язку з цим для побудови моделей для електроенергосистем (ЕЕС) в основному використовуються результати експериментів, отриманих шляхом проведення розрахунків на ЕОМ. При цьому розробник моделі з застосуванням МПЕ і методів розрахунків сталих режимів на ЕОМ проводить мінімальну кількість розрахунків і визначає параметри моделі з оцінкою її адекватності, а дослідник режиму за допомогою цієї моделі, не застосовуючи ЕОМ, здійснює аналіз режиму, прогнозує режими для різних ситуацій і приймає обґрунтовані рішення по їх управлінню [5].

Саме завдяки вищеписаним властивостям МПЕ може застосовуватись для дослідження взаємозв'язків і взаємодій в енергосистемах. Тому на основі МПЕ пропонується здійснити підхід до розв'язання задачі структуризації взаєморозрахунків окремих підсистем.

За багатофакторний об'єкт взяли відому схему ЕЕС, яка підпорядкована НЕК України. В якості факторів обрано активні і реактивні потужності, що надходять від вузлів 810 і 840. По суті, це потужності еквівалентних генераторів відповідно до схеми Вінницького облэнерго. Відгуками є сумарні втрати активної потужності, та втрати потужності в лінії 20—355, тобто в лінії зв'язку між сусідніми системами («Вінницяобленерго» (ВОЕ) і «Хмельницькобленерго» (ХОЕ)).

Вибір цих факторів не є випадковістю. Спочатку провели відсіювальний експеримент на основі ортогональних планів Плакетта-Бермана. В цей план включили 15 факторів, які мають вплив на вихідні параметри: $K_{T810-811}$, $K_{T830-840}$, $K_{T825-826}$, P_{802} , Q_{802} , P_{801} , Q_{801} , P_{826} , Q_{826} , P_{840} , P_{810} , Q_{810} , P_{826} , P_{840} , P_{810} , Q_{801} , Q_{826} , Q_{810} . Тут варто зауважити, що всі позначення факторів загальноприйняті в електротехнічній літературі, а їх номери є по суті кодами НЕК реальних підстанцій в схемах облэнерго. В результаті розрахунків та їх аналізу за відповідними формулами було виявлено, що істотний вплив на перетоки потужності будуть мати такі параметри: P_{840} , P_{810} , Q_{810} , $K_{T830-840}$, $K_{T825-826}$.

Проводився обчислювальний експеримент на базі відомого програмного комплексу «Аналіз чутливості втрат» — АЧП. План експерименту здійснювався за таблицею 1.

Таблиця 1

Матриця планування експерименту для лінійної регресійної залежності

№ дослідю	Керовані фактори			Відгуки	
	P_{810}	Q_{810}	P_{840}	ΔP_{20-355} , МВт	ΔP_{Σ} , МВт
1	—	—	—	0,4633	25,30
2	+	—	—	0,3270	16,13
3	—	+	—	0,4187	24,23
4	+	+	—	0,2927	15,33
5	—	—	+	0,4585	21,09
6	+	—	+	0,3258	13,94
7	—	+	+	0,4146	20,07
8	+	+	+	0,2874	14,23

Для розрахунку коефіцієнтів рівняння лінійної регресійної залежності, яка відображує взаємовплив двох зазначених енергосистем на режим обраної лінії зв'язку, використовуються формули

$$b_0 = \frac{\sum_{u=1}^N (P_{810}; P_{840}; Q_{810}) R_{\Sigma}}{N}; \quad (1)$$

$$b_i = \frac{\sum_{u=1}^N (P_{810}; P_{840}; Q_{810}) R_{\Sigma}}{2^3 + 2\alpha^2}. \quad (2)$$

Лінійна регресійна модель має такий вигляд:

$$\Delta P = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i (P_{810}; P_{840}; Q_{810}). \quad (3)$$

Оцінка адекватності лінійної моделі здійснюється за F-критерієм (таблиця 4). Очевидно можна стверджувати, що з достатньою точністю отримані моделі вже можуть бути використані для структуризації розрахунків між сусідніми енергосистемами.

Для отримання точніших результатів оцінювання взаємодії енергосистем варто спробувати застосувати модель другого порядку. [6] Для цього використовується ядро ПФЕ (табл. 1) і принципи побудови ортогональних центральних композиційних планів (ОЦКП) (табл. 2).

Таблиця 2

Матриця планування експерименту для моделі другого порядку

№ досліду	X ₁	X ₂	X ₃	X ₁ ²	X ₂ ²	X ₃ ²	ΔP _{20–355} МВт
1	—	—	—	+0,27	+0,27	+0,27	0,4633
2	+	—	—	+0,27	+0,27	+0,27	0,3270
3	—	+	—	+0,27	+0,27	+0,27	0,4187
4	+	+	—	+0,27	+0,27	+0,27	0,2927
5	—	—	+	+0,27	+0,27	+0,27	0,4585
6	+	—	+	+0,27	+0,27	+0,27	0,3258
7	—	+	+	+0,27	+0,27	+0,27	0,4146
8	+	+	+	+0,27	+0,27	+0,27	0,2874
9	+1,215	0	0	+0,746	–0,73	–0,73	0,3512
10	–1,215	0	0	+0,746	–0,73	–0,73	0,4185
11	0	+1,215	0	–0,73	+0,746	–0,73	0,3983
12	0	–1,215	0	–0,73	+0,746	–0,73	0,2541
13	0	0	+1,215	–0,73	–0,73	+0,746	0,4763
14	0	0	–1,215	–0,73	–0,73	+0,746	0,3789
15	0	0	0	0	0	0	0,3623

В табл. 2 для зручності керовані фактори P₈₁₀, Q₈₁₀, P₈₄₀ позначили відповідно X₁, X₂, X₃. Перші 8 дослідів – це ядро ПФЕ, досліди 9...14 є зірковими точками для кожного фактора і використовуються для побудови квадратичної моделі, дослід 15 відповідне плече з центральною точкою. Для формування зіркових точок використовується зіркове плече α в даному разі α = 1,215, яке визначається за формулою [7]

$$\alpha = \sqrt{\sqrt{N \cdot 2^{k-2}} - 2^{k-1}}. \quad (4)$$

Коефіцієнт перетворення φ, що застосовується для обчислення значень квадратичних форм φ = 0,73, визначається

$$\varphi = \frac{2^{k+p} + 2\alpha^2}{N} = 0,73. \quad (5)$$

В цьому випадку коефіцієнти рівняння регресії та коефіцієнти моделі визначаються за формулами

$$b_{ij} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu} X_{ju} Y_u}{2^k}; \quad (6)$$

$$b_{ii} = \frac{\sum_{u=1}^N X_{iu}^2 Y_u}{2^k (1 - \varphi) + 2\alpha^2 (\alpha^2 - 1)}. \quad (7)$$

Регресійна модель другого порядку має такий вигляд:

$$\Delta P = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i (P_{810}; P_{840}; Q_{810}) + \sum_{i=1}^k b_{ii} (P_{810}; P_{840}; Q_{810})^2. \quad (8)$$

Оцінка адекватності останніх моделей дозволяє стверджувати, що і лінійна і квадратична моделі надають відповідь про взаєморозрахунки між енергосистемами з необхідною точністю [8, 9]. Після проведення всіх необхідних розрахунків отримані такі результати: при перетоках потужності від ХОЕ

до ВОЕ за додаткові втрати потужності має сплачувати Вінницьке облэнерго ХОЕ, та ще і доплачувати 25 % від сум додаткових втрат Хмельницькому облэнерго за використання її мереж. А от при пере-токах потужності від ВОЕ до ХОЕ Вінницьке облэнерго повинно сплачувати лише 1 % за додаткові втрати потужності і 99 % повинно сплачувати ХОЕ.

Запропонований підхід на основі МПЕ може ефективно застосовуватись до діючих енергосистем і зв'язків між ними, але він може бути використаний для прогнозування впливу нових об'єктів (станцій, ліній, підсистем) на процес структуризації взаєморозрахунків окремих систем [10, 11].

Через декілька років в роботу буде остаточно введена Дністровська гідроакумуляююча електростанція (ДГАЕС). Для врахування її впливу на зв'язок між досліджуваними ВОЕ і ХОЕ проведемо дробовий факторний експеримент (ДФЕ). Сенс проведення ДФЕ з'являється у разі значного збільшення впливових факторів. ДФЕ типу 2^{4+1} подано в табл. 3.

Таблиця 3

Матриця планування ДФЕ типу 2^{4+1}

№ дослідю	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	$X_1X_2 = X_3X_4$	$X_1X_3 = X_2X_4$	$X_2X_3 = X_1X_4$	ΔP_{20-355} , МВт	ΔP_{346-57} , МВт
1	+	+	+	—	—	+	—	—	0,1632	0,4993
2	+	—	—	—	—	+	+	+	0,0866	0,2755
3	+	+	—	—	+	—	—	+	0,0863	0,2505
4	+	—	+	—	+	—	+	—	0,1505	0,4448
5	+	+	+	+	+	+	+	+	0,1492	0,6242
6	+	—	—	+	+	+	—	—	0,0852	0,3814
7	+	+	—	+	—	—	+	—	0,149	0,5853
8	+	—	+	+	—	—	—	+	0,0852	0,3523

В поставленому ДФЕ в якості факторів взяті активні потужності, які генеруються у вузлах 810, 840 і у вузлі ДГЕС, а також коефіцієнт трансформації на лінії 830—840. Всі фактори також варіюються на двох рівнях, які визначаються фізичними аспектами функціонування ЕЕС. До функцій відгуку додана функція втрат активної потужності для ще однієї лінії зв'язку між «Вінницяобленерго» і «Хмельницькобленерго» — лінія 346-57.

Результати проведення ДФЕ дозволили отримати коефіцієнти адекватних моделей для оцінки впливу ДГАЕС на структуризацію взаєморозрахунків між ВОЕ та ХОЕ.

Таким чином, отримані рівняння регресії мають вигляд

$$\Delta P_{\Sigma} = 18,79 - 3,8825 P_{810} - 0,325 Q_{810} - 1,4575 P_{840}; \quad (9)$$

$$\Delta P_{20-355} = 0,3735 - 0,065272 P_{810} - 0,02015 Q_{810} - 0,001925 P_{840}; \quad (10)$$

$$\Delta P_{20-355} = 0,3948 - 0,0526 X_1 - 0,0299 X_2 - 0,0015 X_3 + 0,0022 X_1^2 + 0,072 X_2^2 - 0,0054 X_3^2; \quad (11)$$

$$\Delta P_{20-355} = 0,1177 - 0,5098 X_1 - 0,0022 X_2 + 0,0029 X_3 - 0,0018 X_4 + 0,0022 X_1 X_2 - 0,0071 X_1 X_3 - 0,000038 X_2 X_3; \quad (12)$$

$$\Delta P_{346-57} = 0,4198 - 0,0826 X_1 - 0,0216 X_2 + 0,0557 X_3 - 0,0064 X_4 + 0,0326 X_1 X_2 - 0,0284 X_1 X_3 + 0,0189 X_2 X_3. \quad (13)$$

Результати оцінювання адекватності наведені в таблиці 4.

Таблиця 4

Табличне та розрахункове значення критерію Фішера для відповідних ступенів свободи побудованих регресійних моделей

	лінійна модель F_T	лінійна модель F_p	квадратична модель F_T	квадратична модель F_p
(9) $f_1 = 4, f_2 = 3$	6,6	3,871	—	—
(10) $f_1 = 4, f_2 = 3$	6,6	0,132	—	—
(11) $f_1 = 10, f_2 = 4$	—	—	3,5	0,145
(12) $f_1 = 5, f_2 = 4$	5,2	1,635	—	—
(13) $f_1 = 5, f_2 = 4$	5,2	1,427	—	—

Висновки

1. Застосування методу планування експерименту є доцільним для отримання багатосторонньої інформації про функціонування ліній зв'язку в енергосистемах;
2. За напрямком потужності у лініях зв'язку, а також за знаками та величинами коефіцієнтів регресійних моделей, можна робити висновки про те, яку частину від додаткових втрат активної потужності має сплачувати енергопостачальникам відповідна енергосистема;
3. Вибір незалежних факторів, що впливають на процес структуризації взаєморозрахунків, повинен здійснюватись на підставі схеми ЕМ, потужностей джерел відповідних енергокомпаній, угод між енергокомпаніями та енергосистемами, а також з використанням відсіювальних експериментів;
4. Вибір виду регресійних моделей залежатиме від заданої точності у взаєморозрахунках.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Адлер Ю. П., Маркова Е. В., Грановский Ю. В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. — М.: Наука, 1976. — С. 326.
2. Математическая теория планирования эксперимента / Под ред. Ермакова. — М.: Наука, 1983. — С. 329.
3. Веников В. А. Теория подобия и моделирования. — М.: Высшая школа, 1984. — С. 458.
4. Гусейнов Ф. Г., Мамедяров О. С. Планирование эксперимента в задачах электроэнергетики. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — С. 124.
5. Федоров В. В. Теория оптимального эксперимента. — М.: Наука, 1971. — С. 356.
6. Финни Д. Введение в теорию оптимального эксперимента. — М.: Наука, 1970. — С. 256.
7. Бродский В. З. Многофакторные регуляторные планы. — М.: изд-во МГУ, 1972. — С. 349.
8. Применение математических методов для исследования многокомпонентных систем / Сб. под ред. Зедгенидзе И. Г. и др. — М.: Металлургия, 1974. — С. 237.
9. Мамедяров О. С. Регрессионный анализ установившихся режимов энергетической системы // Электричество. — 1982. — № 5. — С. 10.
10. Бхавараджу М. П., Дж. Д. Хебсон, У. Вуд. Новые проблемы планирования развития энергосистем // ТИИЭР. — 1984. — № 6. — С. 70—79.
11. Остапчук Ж. І., Аль-Омарі Закарія, Мадьяров В. В. Оцінка взаємовпливу підсистем електричної системи методом планування факторного експерименту // Вісник Вінницького політехнічного інституту. — 1997. — № 2. — С. 62—66.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Надійшла до редакції 22.07.05
Рекомендована до друку 10.10.05

Курганова Людмила Юрїївна — студентка Інституту магістратури, аспірантури та докторантури, **Остапчук Жанна Іонівна** — доцент кафедри електричних станцій та систем, **Огніщенко Андрій Валерійович** — студент Інституту електроенергетики, екології та електромеханіки.

Вінницький національний технічний університет