



УДК 621.311

КОСТЕРЄВ М.В., докт. техн. наук, проф. кафедри електричних станцій,
БАРДИК Є.І., канд. техн. наук, доц.; зав. кафедри електричних станцій,
 НТУ України "Київський політехнічний ін-т", Київ
ЛІТВІНОВ В.В., канд. техн. наук, інж. ЦКТРЗіЗ Дніпровської ГЕС
 ПАТ "Укргідроенерго", доц. Запорізької держ. інж. академії

ВИЗНАЧЕННЯ ПАРЕТО-ОПТИМАЛЬНИХ РІШЕНЬ ПРИ РИЗИК-ОРІЄНТОВАНОМУ ПРЕВЕНТИВНОМУ УПРАВЛІННІ РЕЖИМАМИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ



КОСТЕРЄВ М.В.

Застосовано метод слабкої оптимальності за Парето для визначення найбільш доцільного превентивного заходу для зниження ризику виникнення аварії в електроенергетичній системі в умовах багатокритеріального вибору. Важливість критеріїв доцільності визначено шляхом узгодження експертних оцінок за методом парних порівнянь Саати.



БАРДИК Є.І.

Вступ. В останні роки функціонування електроенергетичної системи (ЕЕС) України відбувається у тяжких умовах, що є наслідком фізичного та морального зношення 70–75% відсотків електрообладнання та слабких темпів його заміни та модернізації. Наслідком цього є суттєве зниження надійності роботи ЕЕС, що призводить до зростання кількості аварійних ситуацій. В таких умовах важливим є обрання правильної стратегії управління ЕЕС. Ця стратегія має включати в себе:

- управління режимом ЕЕС з урахуванням фактичного технічного стану обладнання;
- модернізацію обладнання з урахуванням структурної, режимної та технічної надійності об'єктів;
- оптимальний розподіл наявних коштів та ресурсів між підсистемами ЕЕС;
- планування технічного обслуговування і ремонтів при обмеженому фінансуванні з урахуванням приналежності електрообладнання до певних класів, що визначені за ознаками важливості для експлуатаційної надійності та безпеки;
- ведення режиму роботи обладнання підсистем з урахуванням акцентованого розподілу уваги в залежності від приналежності до певних класів за ознаками важливості для забезпечення надійності режиму;
- планування планомірного та стійкого розвитку ЕЕС як багатокритеріальної задачі прийняття рішень.

Аналіз сучасних світових тенденцій показав ефективність та значні перспективи використання ризик-орієнтованого управління, основною кількісною характеристикою якого є ризик. В [1, 2] представлено нечітко-статистичний підхід до визначення ризику виникнення аварії в ЕЕС. Ризик представляє собою добуток імовірності ви-

никнення аварії та її наслідків та є кількісною характеристикою надійності енергосистеми на інтервалі часу. За цією величиною експерт або приймає рішення про її припустимість на розглядуваному інтервалі часу, або про доцільність її зменшення. Для зменшення величини ризику виникнення аварійної ситуації в ЕЕС необхідно задіяти певні заходи, найбільш ефективно обрання яких є основною задачею превентивного управління режимами ЕЕС.



ЛІТВІНОВ В.В.

Постановка задачі. Нехай для розглядуваної ЕЕС існує множина $Z = \{z_1, z_2, \dots, z_m\}$ можливих превентивних заходів та способів зниження ризику виникнення аварії. Існує ряд критеріїв ефективності цих заходів. Для визначення оптимального превентивного заходу визначається підмножина Парето-оптимальних рішень. Оптимальне рішення, що обирається на основі багатокритеріального підходу, завжди повинно знаходитись в області ефективних компромісів, коли жоден елемент множини Z не може бути покращений без погіршення хоча б одного з інших елементів [3]. Підмножина Парето-оптимальних рішень $Z^{opt} \in Z$ містить всі оптимальні за Парето рішення. Образ підмножини Z^{opt} у просторі оптимізаційних критеріїв L позначається як $Z^{opt} = f(D^{opt})$. Ця множина називається множиною Парето у просторі критеріїв.

Визначення Парето-оптимального рішення. В загальному випадку оптимізаційні критерії будуть мати різну розмірність. Для усунення цієї проблеми застосовано нормалізацію порівняння. Визначення підмножини Парето-оптимальних рішень виконується за принципом домінантності



[4]. Для цього розглядаються два види згортки: мінімізаційна $Q_1 = L_1 \cap \dots \cap L_j \dots \cap L_n$, та лінійна

$$Q_2 = \sum_{j=1}^n L_j \omega_j, \text{ де } \omega_j - \text{вагові коефіцієнти важливості оптимізаційних критеріїв } L, j = 1, \dots, n.$$

Найкращим буде те рішення, ступень не-домінантності якого за обома згортками є максимальною. Алгоритм визначення згорток наступний:

1) будується функція приналежності відношень переваги:

$$\mu_{R_j}(x, y) = \begin{cases} 1, \text{ якщо } x \succ y \text{ або } x \sim y; \\ 0, \text{ якщо } x \prec y. \end{cases} \quad (1)$$

2) визначається перша згортка Q_1 :

$$\mu_{Q_1}(x, y) = \min \{ \mu_{R_1}(x, y) \dots \mu_{R_j}(x, y) \dots \mu_{R_n}(x, y) \}. \quad (2)$$

3) визначається відношення суворої переваги за першою:

$$\mu_{Q_1^s}(x, y) = \min \{ \mu_{Q_1}(x, y) - \mu_{Q_1}(y, x); 0 \}. \quad (3)$$

4) визначається множина не-домінуючих альтернатив $Q_1^{нд}(x)$:

$$\mu_{Q_1^{нд}}(x) = 1 - \max \mu_{Q_1^s}(y, x). \quad (4)$$

5) визначається друга згортка Q_2 :

$$\mu_{Q_2}(x, y) = \sum_{j=1}^n \mu_{R_j}(x, y) \omega_j. \quad (5)$$

6) визначається відношення суворої переваги за другою згорткою та будується ФП:

$$\mu_{Q_2^s}(x, y) = \max \{ \mu_{Q_2}(x, y) - \mu_{Q_2}(y, x); 0 \}. \quad (6)$$

7) визначається множина не-домінуючих альтернатив за другою згорткою:

$$\mu_{Q_2^{нд}}(x) = 1 - \max \mu_{Q_2^s}(y, x). \quad (7)$$

8) визначається множина не-домінуючих альтернатив за обома згортками:

$$Q_{нд}(x) = Q_1^{нд}(x) \cap Q_2^{нд}(x). \quad (8)$$

$$\mu_{Q_{нд}}(x) = \min \{ \mu_{Q_1^{нд}}(x), \mu_{Q_2^{нд}}(x) \}. \quad (9)$$

9) визначається найкраще рішення:

$$\mu_{Q_0}(x) = \max \{ \mu_{Q_{нд}}(x_1) \dots \mu_{Q_{нд}}(x_m) \}. \quad (10)$$

При вирішенні оптимізаційної задачі, виникає проблема визначення вагових коефіцієнтів важливості оптимізаційних критеріїв [5]. Нераціональний вибір методу визначення вагових коефіцієнтів призводить до недостатньої обґрунтованості отриманого рішення. Основні фактори, що впливають на вибір методу визначення ваго-

вих коефіцієнтів, це складність отримання експертної інформації та ступень узгодженості міркувань експертів.

При визначенні вагових коефіцієнтів важливості оптимізаційних критеріїв задачі превентивного управління режимами ЕЕС експертна інформація часто є неповною та протирічливою. Для розв'язання задачі в таких умовах найбільш підходить метод парного порівняння Сааті з визначенням найбільшого власного числа та з обробкою інформації в первинних шкалах [6].

Приклад. В ЕЕС за схемою ІСМ проведено оцінювання величини технічного ризику порушення динамічної стійкості при відмовах обладнання на інтервалі часу $\Delta t = 1$ міс. Отримана величина технічного ризику складала $R = 0,31$ в.о. Експерт визначив отриману величину ризику як високу, яка потребує зменшення. За результатами аналізу силової та вторинної схеми ЕЕС запропоновані наступні альтернативні рішення, які дозволять знизити величину ризику та підвищити надійність ЕЕС:

z_1 – побудова паралельної ЛЕП-500 кВ довжиною 125 км ($R = 0,08$ в.о);

z_2 – побудова паралельної ЛЕП-220 кВ довжиною 72 км ($R = 0,17$ в.о);

z_3 – заміна автотрансформатора потужністю 630 МВА на підстанції 500/220 кВ ($R = 0,12$ в.о);

z_4 – встановлення пристрою автоматичного розвантаження гідрогенераторів ГЕС при відключенні ЛЕП-500 кВ ($R = 0,15$ в.о);

z_5 – встановлення пристроїв електричного гальмування турбогенераторів ТЕС при відключенні ЛЕП-500 кВ ($R = 0,2$ в.о).

Таким чином, для розглядуваної ЕЕС множини Z складається з п'яти елементів $Z = 5$.

Вагові коефіцієнти важливості оптимізаційних критеріїв визначаються за методом Сааті. За результатами опитування експерта щодо важливості оптимізаційних критеріїв із множини L отримано наступні співвідношення:

L_2 домінує над L_1 з інтенсивністю $a_{21} = 2$ (дуже слабка перевага);

L_1 домінує над L_3 з інтенсивністю $a_{13} = 7$ (явна перевага);

L_3 домінує над L_2 з інтенсивністю $a_{32} = 4$ (суттєва перевага).

За отриманими співвідношеннями складається матриця парних порівнянь:



$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1/2 & 7 \\ 2 & 1 & 1/4 \\ 1/7 & 4 & 1 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Визначаються власні числа матриці:

$$\det|A - \lambda E| = \det \begin{bmatrix} 1-\lambda & 1/2 & 7 \\ 2 & 1-\lambda & 1/4 \\ 1/7 & 4 & 1-\lambda \end{bmatrix} = \\ = \lambda^3 - \lambda^2 - 54,018 = 0. \quad (12)$$

Це рівняння має три корені:

$$\lambda_1 = 5,087; \lambda_{2,3} = -1,044 \pm j3,087. \quad (13)$$

Найбільшим власним числом матриці (11) є дійсний додатний корінь $\lambda_1 = 5,087$ при підстановці якого в (12) та заміні останнього рівняння

умовою нормування $\sum_{i=1}^3 \omega_i = 1$ формується систе-

ма рівнянь для визначення вагових коефіцієнтів важливості оптимізаційних критеріїв:

$$\begin{cases} -4,087\omega_1 + 0,5\omega_2 + 7\omega_3 = 0; \\ 2\omega_1 - 4,087\omega_2 + 0,25\omega_3 = 0; \\ \omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1. \end{cases} \quad (14)$$

Рішенням системи (14) є вектор коефіцієнтів ваги оптимізаційних критеріїв:

$$\Omega = \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0,483 \\ 0,253 \\ 0,264 \end{bmatrix}. \quad (15)$$

Отримані вагові коефіцієнти Ω використовуються для визначення підмножини Парето-оптимальних рішень. Для отримання згорток компонент багатокритеріального показника використані співвідношення (\succ – "краще", \prec – "гірше", \sim – "рівноцінно") переваг альтернатив Z за критеріями L .

Зниження ризику (L_1): $Z_1 \succ Z_3 \succ Z_4 \succ Z_2 \succ Z_5$.

Капіталовкладення (L_2): $Z_4 \sim Z_5 \succ Z_2 \succ Z_1 \succ Z_3$.

Термін реалізації (L_3): $Z_4 \sim Z_5 \succ Z_3 \succ Z_2 \succ Z_1$.

На основі отриманих переваг будуються згортки $\mu_{Lk}(Z_i, Z_j)$, $k = 1, 2, 3$:

$$\mu_{L1}(z_i, z_j) \Rightarrow \begin{matrix} & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \\ z_1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ z_2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ z_3 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ z_4 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ z_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}. \quad (16)$$

$$\mu_{L2}(z_i, z_j) \Rightarrow \begin{matrix} & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \\ z_1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ z_2 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ z_3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ z_4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ z_5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{matrix}. \quad (17)$$

$$\mu_{L3}(z_i, z_j) \Rightarrow \begin{matrix} & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \\ z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_2 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ z_3 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ z_4 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ z_5 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{matrix}. \quad (18)$$

Визначення першої згортки:

$$\mu_{Q1}(z_i, z_j) \Rightarrow \begin{matrix} & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \\ z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_2 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ z_3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ z_4 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 \\ z_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{matrix}. \quad (19)$$

Визначення відношення суворої переваги за першою згорткою:

$$\mu_{Q1^s}(z_i, z_j) \Rightarrow \begin{matrix} & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \\ z_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_4 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ z_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}. \quad (20)$$

Визначення множини недомінуючих альтернатив за першою згорткою:

$$\mu_{Q1_{нд}}(z) = 0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0. \quad (21)$$

Визначення другої згортки:

$$\mu_{Q2}(z_i, z_j) \Rightarrow \begin{matrix} & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \\ z_1 & 1 & 0,483 & 0,736 & 0,483 & 0,483 \\ z_2 & 0,517 & 1 & 0,253 & 0 & 0,483 \\ z_3 & 0,264 & 0,747 & 1 & 0,483 & 0,483 \\ z_4 & 0,517 & 1 & 0,517 & 1 & 1 \\ z_5 & 0,517 & 0,517 & 0,517 & 0,517 & 1 \end{matrix}. \quad (22)$$

Визначення відношення суворої переваги за другою згорткою:

$$\mu_{Q2^s}(z_i, z_j) \Rightarrow \begin{matrix} & z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 \\ z_1 & 0 & 0 & 0,472 & 0 & 0 \\ z_2 & 0,034 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_3 & 0 & 0,494 & 0 & 0 & 0 \\ z_4 & 0,034 & 1 & 0,034 & 0 & 0,483 \\ z_5 & 0,034 & 0,034 & 0,034 & 0 & 0 \end{matrix}. \quad (23)$$



Визначення множини невідоміючих альтернатив за другою згорткою:

$$\mu_{Q_{нд}}(z) = 0,966 \quad 0 \quad 0,528 \quad 1 \quad 0,517. \quad (24)$$

Найкращим рішенням буде те, у якого ступінь невідоміючності за обома згортками буде максимальною:

$$\mu_{Q_{нд}}(z_1) = \max\{0; 0,966\} = 0,966; \quad (25)$$

$$\mu_{Q_{нд}}(z_2) = \max\{0; 0\} = 0; \quad (26)$$

$$\mu_{Q_{нд}}(z_3) = \max\{0; 0,528\} = 0,528; \quad (27)$$

$$\mu_{Q_{нд}}(z_4) = \max\{1; 1\} = 1; \quad (28)$$

$$\mu_{Q_{нд}}(z_5) = \max\{0; 0,517\} = 0,517. \quad (29)$$

Оскільки $\mu_{Q_{нд}}(z_4) > \mu_{Q_{нд}}(z_1) > \mu_{Q_{нд}}(z_3) > \mu_{Q_{нд}}(z_5) > \mu_{Q_{нд}}(z_2)$, найефективнішим превентивним заходом по зниженню ризику порушення динамічної стійкості в ЕЕС буде альтернатива z_4 – встановлення пристрою автоматичного розвантаження гідрогенераторів ГЕС при відключенні ЛЕП-500 кВ.

Висновок.

Використання Парето-оптимальних множин при розв'язанні задачі превентивного ризик-управління режимами ЕЕС дозволяє визначити найбільш доцільні шляхи підвищення надійності роботи ЕЕС в умовах багатокритеріального вибо-

ру, обмеженого фінансування, випадкового характеру відмов електрообладнання та стохастичності режимів ЕЕС. Оцінювання важливості критеріїв за методом Сааті дозволяє отримати достовірну кількісну характеристику ваги критеріїв з урахуванням суб'єктивності експертних оцінок та переваг.

ЛІТЕРАТУРА

1. Костерев М.В., Бардик Є.І., Літвінов В.В. Нечітко-статистичний підхід до оцінювання експлуатаційної та режимної надійності об'єктів підсистем електроенергетичної системи // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Електротехніка і енергетика. – 2013. – № 1(14). – С. 122 – 128.
2. Літвінов В.В. Нечітко-статистичний підхід до оцінювання ризику пошкодження обмотки статора гідрогенератора / В.В. Літвінов // Гідроенергетика України. – 2014. – №2–3. – С. 74 – 80.
3. Орловский С.А. Проблемы принятия решений при нечеткой исходной информации. / С.А. Орловский. – М.: Наука, 1981. – 208 с.
4. Домарев В.В. Безопасность информационных технологий. Методология создания систем защиты / В.В. Домарев. – К.: ООО "ТИД "ДС", 2002. – 688 с.
5. Літвінов В.В. Оцінка ризику порушення стійкості двигунового навантаження при відмовах електрообладнання в підсистемі ЕЕС: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук: (05.14.02 – електричні станції, мережі та системи) / Літвінов Володимир Валерійович. – К., 2012. – 20 с.
6. Saaty T.L. Eigenweightor an logarithmic lease squares / T.L. Saaty // Eur. J. Oper. Res. – 1990. – 48, N1. – P. 156 – 160.

© Костерев М.В., Бардик Є.І., Літвінов В.В., 2014

