Повышение эффективности использования метода Монте-Карло при анализе надежности электроэнергетических систем

С. М. Пержабинский
Институт систем энергетики им. Л. А. Мелентьева СО РАН, Иркутск, Россия
Контактный e-mail: smper@isem.irk.ru

Рассматривается методика анализа балансовой надежности электроэнергетических систем, базирующаяся на параметрическом представлении значений случайных величин. Для определения дефицита мощности состояний электроэнергетической системы используется параметрическая модель оценки дефицита мощности. Модель имеет вид задачи линейного параметрического программирования. В работе представлено описание двойственной к указанной параметрической задаче оценки дефицита мощности. Обсуждается методика вычисления показателей надежности. Исследуются свойства модели оценки дефицита мощности. Приводятся результаты экспериментальных исследований.

Ключевые слова: метод Монте-Карло, электроэнергетическая система, балансовая надежность, анализ надежности.

Введение

Методика анализа балансовой надежности электроэнергетических систем (ЭЭС), разработанная в ИСЭМ СО РАН [1], включает три блока:

1) вероятностный блок, в котором формируются возможные состояния ЭЭС на базе метода Монте-Карло [2];

2) блок оптимизации сформированных расчетных состояний (модель минимизации дефицита мощности);

3) блок вычисления показателей надежности ЭЭС, где обрабатывается накопленная информация в результате работы двух первых блоков.

В работах [3, 4] представлены результаты исследований, направленных на увеличение эффективности методики анализа балансовой надежности ЭЭС (разработка новых моделей оценки дефицита мощности и алгоритмов их реализации). Для повышения достоверности показателей надежности ЭЭС требуется анализ большого числа реализаций их случайных состояний. Общая схема использования метода Монте-Карло для анализа балансовой надежности ЭЭС приведена на рис. 1, *а*, где темными точками представлены состояния ЭЭС в дефицитной области, светлыми — в бездефицитной. Для увеличения числа оцениваемых состояний функционирования ЭЭС за априори заданное время предлагается модифицировать правила моделирования случайных величин.

© ИВТ СО РАН, 2017

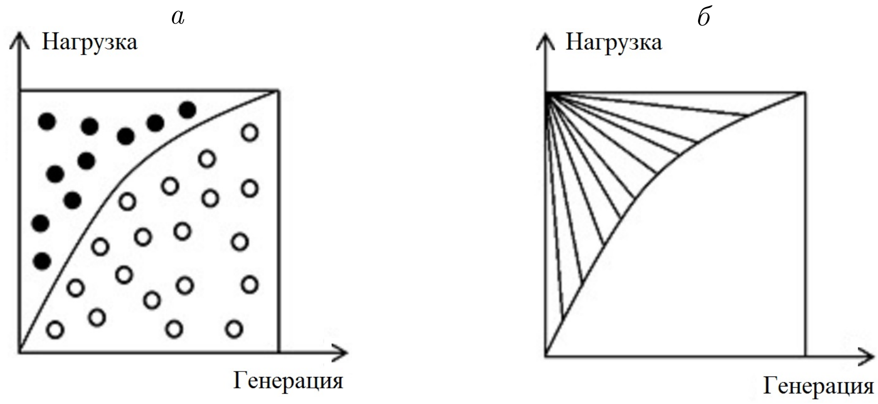

Рис. 1. Демонстрация работы классической (*а*) и разрабатываемой (*б*) методик

Значения случайных величин требуется представить в виде линейных функций от неотрицательного параметра λ и направлений изменения случайных величин, полученных при помощи датчика случайных чисел. Вычисления следует начинать с состояния ЭЭС при минимальной генерации и максимальной нагрузке (рис. 1, *б*) и прекращать при достижении бездефицитного состояния ЭЭС. Тем самым обеспечивается анализ всех дефицитных состояний ЭЭС, которые соответствуют некоторому направлению изменения значений случайных величин.

Для определения дефицита мощности сформированных состояний ЭЭС используется параметрическая модель оценки дефицита мощности. Модель имеет вид параметрической задачи линейного программирования, в которой двусторонние ограничения-неравенства на переменные зависят от неотрицательного параметра λ. Вычислительная сложность решения параметрической задачи линейного программирования сопоставима с трудоемкостью решения задачи линейного программирования [5]. Следовательно, за время анализа одного состояния ЭЭС возможна оценка множества состояний системы. За счет рассмотрения большего количества дефицитных состояний ЭЭС повышается достоверность показателей надежности. Обсуждаемая в работе методика анализа надежности ЭЭС позволяет работать с непрерывными случайными величинами без их последующей дискретизации, что открывает дополнительные возможности при оценке надежности современных ЭЭС.

В работе представлено описание методики анализа надежности ЭЭС, которая базируется на параметрической модели оценки дефицита мощности. Параметрическая модель оценки дефицита мощности формализована в виде задачи параметрического линейного программирования. К данной задаче построена двойственная задача. Методика апробирована на тестовых примерах, в статье представлены результаты экспериментальных исследований.

1. Исходные данные

Рассматривается схема электроэнергетической системы, состоящая из n узлов и некоторого набора связей между ними. Согласно методике [6], для анализа балансовой надежности ЭЭС требуется многократное формирование расчетных состояний ЭЭС (на основе метода Монте-Карло) и последующий их анализ. Расчетное состояние ЭЭС характеризуется набором значений случайных величин: нагрузки, располагаемой генерирующей мощности в узлах, пропускной способности линий электропередачи

$$\bar{x}_i,\ \bar{y}_i,\ \bar{z}_{ij}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n, \quad i \neq j.$$

Заданы интервалы, содержащие значения случайных величин $[0,\ x_i^{\max}]$, $[0,\ y_i^{\max}]$, $[0,\ z_{ij}^{\max}]$, функции плотности вероятности

$$f_i(\bar{x}_i) \geq 0, \quad g_i(\bar{y}_i) \geq 0, \quad t_{ij}(\bar{z}_{ij}) \geq 0,$$

$$\int\limits_0^{x_i^{\max}} f_i(x)dx = 1, \quad \int\limits_0^{y_i^{\max}} g_i(y)dy = 1, \quad \int\limits_0^{z_{ij}^{\max}} t_{ij}(z)dz = 1,$$

$i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$, $i \neq j$. Далее будем считать, что $x_i^{\max} \neq 0$, $y_i^{\max} \neq 0$, $z_{ij}^{\max} \neq 0$ для всех $i \neq j$.

2. Задача оценки дефицита мощности

Модель оценки дефицита мощности [6] используется для определения величины дефицита мощности в сформированных расчетных состояниях ЭЭС. Существующие модели оценки дефицита мощности, их свойства и особенности обсуждаются в [7]. Рассмотрим линейную постановку задачи поиска минимального дефицита мощности, предложенную в [4].

Переменные задачи: x_i — используемая мощность в узле i, y_i — покрываемая в узле i нагрузка, z_{ij} — поток мощности из узла i в узел j, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$, $i \neq j$.

Решается задача

$$\sum_{i=1}^{n} y_i \to \max, \tag{1}$$

$$x_i - y_i + \sum_{j=1}^{n}(1 - \alpha_{ji})z_{ji} - \sum_{j=1}^{n} z_{ij} = 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad i \neq j, \tag{2}$$

$$0 \leq x_i \leq \bar{x}_i, \quad i = 1, \dots, n, \tag{3}$$

$$0 \leq y_i \leq \bar{y}_i, \quad i = 1, \dots, n, \tag{4}$$

$$0 \leq z_i \leq \bar{z}_{ij}, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n, \quad i \neq j. \tag{5}$$

Здесь α_{ij} — заданные из интервала $(0,\ 1)$ коэффициенты удельных потерь мощности при ее передаче из узла i в узел j, $i \neq j$. Дефицит мощности в системе определяется по формуле

$$d = \sum_{i=1}^{n} (\bar{y}_i - y_i). \tag{6}$$

3. Выпуклость множества бездефицитных состояний ЭЭС

Состояние ЭЭС $\bar{x}_i = \hat{x}_i$, $\bar{y}_i = \hat{y}_i$, $\bar{z}_{ij} = \hat{z}_{ij}$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$, $i \neq j$, назовем бездефицитным, если в оптимальном решении задачи оценки дефицита мощности для всех переменных y_i имеет место равенство $y_i = \hat{y}_i$, $i = 1, \dots, n$, т. е. согласно (6)

$d = 0$. В противном случае состояние ЭЭС будет дефицитным. Множество всех состояний ЭЭС является объединением множества дефицитных и бездефицитных состояний. Справедливо следующее утверждение.

Теорема. *Множество бездефицитных состояний ЭЭС выпукло.*

Доказательство. Пусть у системы (2)–(5) при $\bar{x}_i = \bar{x}_i^1$, $\bar{y}_i = \bar{y}_i^1$, $\bar{z}_{ij} = \bar{z}_{ij}^1$ и $\bar{x}_i = \bar{x}_i^2$, $\bar{y}_i = \bar{y}_i^2$, $\bar{z}_{ij} = \bar{z}_{ij}^2$ имеются бездефицитные решения x_i^1, y_i^1, z_{ij}^1 и x_i^2, y_i^2, z_{ij}^2, $i = 1, \ldots, n$, $j = 1, \ldots, n$, $i \neq j$ соответственно. Выпуклая комбинация указанных решений $x_i^3 = \upsilon x_i^1 + (1-\upsilon)x_i^2$, $y_i^3 = \upsilon y_i^1 + (1-\upsilon)y_i^2$, $z_{ij}^3 = \upsilon z_{ij}^1 + (1-\upsilon)z_{ij}^2$ для всех $\upsilon \in (0, 1)$ будет бездефицитным решением системы уравнений и неравенств (2)–(5) при $\bar{x}_i^3 = \upsilon\bar{x}_i^1 + (1-\upsilon)\bar{x}_i^2$, $\bar{y}_i^3 = \upsilon\bar{y}_i^1 + (1-\upsilon)\bar{y}_i^2$, $\bar{z}_{ij}^3 = \upsilon\bar{z}_{ij}^1 + (1-\upsilon)\bar{z}_{ij}^2$, $i = 1, \ldots, n$, $j = 1, \ldots, n$, $i \neq j$. В самом деле, выполнение условий (2)–(5) для x_i^1, y_i^1, z_{ij}^1 и x_i^2, y_i^2, z_{ij}^2 означает их справедливость для x_i^3, y_i^3, z_{ij}^3, при этом условие (4) выполняется в форме равенства, что означает бездефицитность данного решения, $i = 1, \ldots, n$, $j = 1, \ldots, n$, $i \neq j$.

Теорема доказана. ■

Из выпуклости множества бездефицитных состояний ЭЭС следует, что множество дефицитных состояний ЭЭС невыпукло (за исключением вырожденного случая, когда схема ЭЭС задана в виде концентрированного узла).

4. Параметрическая задача оценки дефицита мощности

Известно, что при использовании метода Монте-Карло необходимо рассмотрение большого числа реализаций значений случайных величин [2]. Для увеличения количества оцениваемых состояний ЭЭС за априори заданное время предлагается значения случайных величин $\bar{x}_i$, $\bar{y}_i$, $\bar{z}_{ij}$ представить в виде линейных функций $\bar{x}_i(\lambda, \tilde{x}_i)$, $\bar{y}_i(\lambda, \tilde{y}_i)$, $\bar{z}_{ij}(\lambda, \tilde{z}_{ij})$ от неотрицательного параметра λ, $\lambda \in [0, \bar{\lambda}]$ ($\bar{\lambda} > 0$) и набора значений случайных величин $\tilde{x}_i$, $\tilde{y}_i$, $\tilde{z}_{ij}$, характеризующихся законом равномерного распределения на отрезках $[0, x_i^{\max}]$, $[0, y_i^{\max}]$, $[0, z_{ij}^{\max}]$, $i = 1, \ldots, n$, $j = 1, \ldots, n$, $i \neq j$. Величина $\bar{\lambda}$ выбирается таким образом, чтобы значения $\bar{x}_i(\lambda, \tilde{x}_i)$, $\bar{y}_i(\lambda, \tilde{y}_i)$, $\bar{z}_{ij}(\lambda, \tilde{z}_{ij})$ не выходили за границы допустимой области.

В случае параметрического представления значений случайных величин (генерации, нагрузки, пропускной способности линий электропередачи) модель оценки дефицита мощности (1)–(5) приобретает вид задачи параметрического программирования. Для каждого значения параметра $\lambda \in [0, \bar{\lambda}]$ при заданном наборе $\tilde{x}_i$, $\tilde{y}_i$, $\tilde{z}_{ij}$ требуется найти максимум функции (1) при условии (2) и ограничениях на переменные

$$0 \leq x_i \leq \bar{x}_i(\lambda, \tilde{x}_i), \quad i = 1, \ldots, n, \tag{7}$$

$$0 \leq y_i \leq \bar{y}_i(\lambda, \tilde{y}_i), \quad i = 1, \ldots, n, \tag{8}$$

$$0 \leq z_{ij} \leq \bar{z}_{ij}(\lambda, \tilde{z}_{ij}), \quad i = 1, \ldots, n, \quad j = 1, \ldots, n, \quad i \neq j. \tag{9}$$

Формула (6) примет вид

$$d(\lambda) = \sum_{i=1}^{n} (\bar{y}_i(\lambda, \tilde{y}_i) - y_i). \tag{10}$$

Вычислительная трудоемкость решения задачи (1), (2), (7)–(9) [5] сопоставима с оценкой отдельного состояния ЭЭС. Тем самым за априори заданное время обрабатывается большее число расчетных состояний ЭЭС и повышается достоверность показателей надежности.

Следует отметить, что при использовании параметрической модели оценки дефицита мощности анализируются только дефицитные состояния ЭЭС. Вычисления прекращаются при достижении равенства $d(\tilde{\lambda}) = 0$, $\tilde{\lambda} \in [0,\ \bar{\lambda}]$. Указанная особенность организации вычислений обеспечивает дополнительную вычислительную эффективность за счет исключения из анализа заведомо бездефицитных состояний.

5. Двойственная параметрическая задача оценки дефицита мощности

В [5] предложена модификация симплекс-метода для решения задачи максимизации линейной параметрической целевой функции при линейных ограничениях. В данном алгоритме сначала находится оптимальное решение задачи при некотором значении параметра λ, затем определяется подмножество значений параметра λ, при которых это решение оптимально. В исходной параметрической задаче оценки дефицита мощности параметр λ присутствует только в ограничениях (7)–(9), что делает невозможным применение указанного алгоритма. Поэтому вместо задачи (1), (2), (7)–(9) предлагается решать двойственную к ней задачу, в которой от параметра λ зависит только целевая функция.

Множители Лагранжа, соответствующие ограничениям (2), (7)–(9), обозначим u_i, w_i, v_i, h_{ij}, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$, $i \neq j$. Двойственная параметрическая задача оценки дефицита мощности имеет вид

$$\sum_{i=1}^{n} \bar{y}_i(\lambda,\ \tilde{y}_i)v_i + \sum_{i=1}^{n} \bar{x}_i(\lambda,\ \tilde{x}_i)w_i + \sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1,\, i\neq j}^{n} \bar{z}_{ij}(\lambda,\ \tilde{z}_{ij})h_{ij} \to \max,$$

$$u_i - v_i - 1 \geq 0, \quad i = 1, \dots, n,$$

$$u_i + w_i - 1 \leq 0, \quad i = 1, \dots, n,$$

$$u_i - (1 - \alpha_{ij})u_j - h_{ij} \geq 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n, \quad i \neq j,$$

$$u \in R^n, \quad v_i \leq 0, \quad w_i \leq 0, \quad h_{ij} \leq 0, \quad i = 1, \dots, n, \quad j = 1, \dots, n, \quad i \neq j.$$

Здесь λ — величина из отрезка $[0,\ \bar{\lambda}]$, $\bar{\lambda}$ — верхняя граница изменения параметра λ, которую определим чуть позже.

6. Методика вычисления показателей надежности ЭЭС

Для анализа балансовой надежности ЭЭС используются вероятность безотказной работы (в зарубежной литературе у данного показателя есть аналоги: Loss of Load Expectation — LOLE, Loss of Load Hours — LOLH [8]), математическое ожидание дефицита мощности, коэффициент обеспеченности потребителей электроэнергией [9].

Приведем описание основных этапов вычислений разрабатываемой методики для нахождения вероятности бездефицитной работы и математического ожидания дефицита мощности.

1. При помощи датчика случайных чисел формируются K наборов значений случайных величин $\tilde{x}_i^k$, $\tilde{y}_i^k$, $\tilde{z}_{ij}^k$, $k = 1, \dots, K$, равномерно распределенных на соответствующих отрезках $[0,\ x_i^{\max}]$, $[0,\ y_i^{\max}]$, $[0,\ z_{ij}^{\max}]$, $i = 1, \dots, n$, $j = 1, \dots, n$, $i \neq j$.

2. Значения величин $\bar{x}_i$, $\bar{y}_i$, $\bar{z}_{ij}$ представляются в виде линейных функций от неотрицательного параметра λ:

$$\bar{x}_i^k(\lambda,\, \tilde{x}_i^k) = \lambda \tilde{x}_i^k, \quad \bar{y}_i^k(\lambda,\, \tilde{y}_i^k) = y_i^{\max} - \lambda \tilde{y}_i^k, \quad \bar{z}_{ij}^k(\lambda,\, \tilde{z}_{ij}^k) = \lambda \tilde{z}_{ij}^k,$$

$k = 1, \ldots, K$, $i = 1, \ldots, n$, $j = 1, \ldots, n$, $i \neq j$.

3. Максимальное рассматриваемое значение параметра λ (для всех отличных от нуля $\tilde{x}_i^k$, $\tilde{y}_i^k$, $\tilde{z}_{ij}^k$) вычисляется по формуле

$$\bar{\lambda}^k = \min_{i,j,i\neq j} \left\{ \frac{x_i^{\max}}{\tilde{x}_i^k},\ \frac{y_i^{\max}}{\tilde{y}_i^k},\ \frac{z_{ij}^{\max}}{\tilde{z}_{ij}^k} \right\}, \quad k = 1, \ldots, K.$$

4. Весовые коэффициенты β^k, нормирующие точки на отрезке $[0,\, \bar{\lambda}^k]$, находятся из выражения

$$\int_0^{\bar{\lambda}^k} \beta^k \lambda d\lambda = 1, \quad k = 1, \ldots, K.$$

Отсюда

$$\beta^k = 2/(\bar{\lambda}^k)^2.$$

5. Определяются функции плотности вероятности случайных величин, распределенных на отрезках $[0,\, \bar{\lambda}^k]$:

$$\theta^k(\lambda) = \beta^k \lambda \prod_{i=1}^{n} f_i(\lambda,\, \tilde{x}_i^k) g_i(\lambda,\, \tilde{y}_i^k) \prod_{j=1,\, j\neq i}^{n} t_{ij}(\lambda,\, \tilde{z}_{ij}^k), \quad k = 1, \ldots, K.$$

6. Значения функции плотности вероятности, характеризующей распределение случайных величин среди отрезков, вычисляются по формуле

$$\int_0^{\bar{\lambda}^k} \theta^k(\lambda) d\lambda = \omega^k, \quad k = 1, \ldots, K.$$

7. Вероятность возникновения дефицита мощности в ЭЭС определяется следующим образом:

$$Q = \sum_{k=1}^{K} \int_0^{\tilde{\lambda}^k} \theta^k(\lambda) d\lambda \Big/ \sum_{k=1}^{K} \omega^k.$$

Здесь $\tilde{\lambda}^k$ — длина k-го отрезка до границы области бездефицитных состояний ЭЭС. Отсюда вероятность безотказной работы P находится по формуле $P = 1 - Q$.

8. Математическое ожидание дефицита мощности в ЭЭС, принимая во внимание (10), вычисляем по следующему правилу:

$$MD = \sum_{k=1}^{K} \int_0^{\tilde{\lambda}^k} d(\lambda) \theta^k(\lambda) d\lambda \Big/ \sum_{k=1}^{K} \omega^k.$$

7. Экспериментальное исследование

Для иллюстрации разрабатываемой методики рассмотрим схему ЭЭС, состоящую из двух узлов, и связи между ними. В первом узле располагается генерирующая мощность, во втором — потребитель мощности. Объем генерации x и пропускная способность линии z являются случайными величинами, распределенными на отрезках от 0 до 40 МВт. Функции плотности вероятности случайных величин имеют следующий вид:

$$f(x) = \begin{cases} 0.0025x, & x \in [0,\, 20), \\ 0.1 - 0.0025x, & x \in [20,\, 40], \end{cases} \qquad t(z) = \begin{cases} 0.0025z, & z \in [0,\, 20), \\ 0.1 - 0.0025z, & z \in [20,\, 40]. \end{cases}$$

В экспериментах рассматривался заданный уровень нагрузки: 10 и 20 МВт. Будем считать, что потери мощности при передаче отсутствуют. На рис. 2 затемненной областью

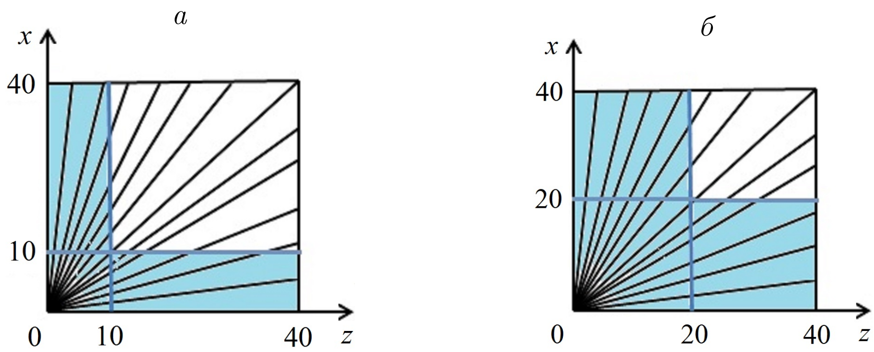

Рис. 2. Множества дефицитных состояний функционирования ЭЭС

Т а б л и ц а 1. Вероятность возникновения дефицита мощности в ЭЭС, нагрузка 10 МВт

K	Разрабатываемая методика	Методика на основе метода Монте-Карло
1000	0.234778	0.244000
5000	0.236071	0.243400
10 000	0.233274	0.230300
20 000	0.235285	0.240400
30 000	0.237323	0.234166
40 000	0.233861	0.233125
50 000	0.233768	0.235440

Т а б л и ц а 2. Математическое ожидание дефицита в ЭЭС, нагрузка 10 МВт

K	Разрабатываемая методика	Методика на основе метода Монте-Карло
1000	0.808561	0.892564
5000	0.805490	0.846805
10 000	0.797492	0.795154
20 000	0.806269	0.821902
30 000	0.816136	0.799707
40 000	0.802408	0.800727
50 000	0.800751	0.811770

Т а б л и ц а 3. Вероятность возникновения дефицита мощности в ЭЭС, нагрузка 20 МВт

K	Разрабатываемая методика	Методика на основе метода Монте-Карло
1000	0.745756	0.748000
5000	0.743024	0.740200
10 000	0.753246	0.755800
20 000	0.749564	0.750650
30 000	0.750491	0.746566
40 000	0.749467	0.748725
50 000	0.751098	0.751820

Т а б л и ц а 4. Математическое ожидание дефицита в ЭЭС, нагрузка 20 МВт

K	Разрабатываемая методика	Методика на основе метода Монте-Карло
1000	5.603675	5.923932
5000	5.566933	5.495518
10 000	5.729110	5.732769
20 000	5.663483	5.672079
30 000	5.664394	5.640642
40 000	5.664862	5.652182
50 000	5.678868	5.681687

представлены множества дефицитных состояний ЭЭС. Вероятность возникновения дефицита мощности в данном примере может быть вычислена аналитически. В случае нагрузки 10 МВт величина показателя составляет 0.234375, в случае 20 МВт — 0.75. Показатели надежности вычислялись при помощи методики, базирующейся на методе Монте-Карло, и разрабатываемой методики. В табл. 1 и 2 представлены результаты вычисления вероятности возникновения и математического ожидания дефицита мощности для случая нагрузки 10 МВт, в табл. 3 и 4 — для случая нагрузки 20 МВт.

Как видно из таблиц, при малой величине K значения показателей надежности сильно отличаются от значений, вычисленных аналитически. С ростом K показатели немонотонно сходятся к своим предельным значениям (например, в случае нагрузки 20 МВт вероятность возникновения дефицита сходится к значению показателя 0.75). При этом показатели, вычисленные с помощью классической методики, отличаются от аналитических значений сильнее, чем показатели, полученные при использовании разрабатываемого подхода.

Заключение

В работе представлена методика анализа балансовой надежности ЭЭС, базирующаяся на параметрической модели оценки дефицита мощности. Модель имеет вид задачи параметрического линейного программирования, в которой ограничения на переменные зависят от неотрицательного параметра. Существуют эффективные модификации симплекс-метода для решения задач линейного программирования с параметрическими целевыми функциями. В этой связи для линейной параметрической задачи оценки дефицита мощности построена двойственная задача, в которой от параметра зависит только целевая функция.

Доказана выпуклость множества бездефицитных состояний электроэнергетической системы для модели оценки дефицита мощности. Данное свойство задачи используется в разработанной методике, тем самым обеспечивается анализ только дефицитных состояний ЭЭС. Ожидается, что применение параметрической модели оценки дефицита мощности при анализе надежности позволит повысить достоверность показателей надежности за счет рассмотрения большего числа дефицитных состояний ЭЭС за априори заданное время.

Предлагаемая в статье методика анализа надежности ЭЭС апробирована на тестовом примере с непрерывными случайными величинами с кусочно-линейными функциями плотности вероятности. Результаты расчетов показали, что с ростом числа направлений изменения исходных случайных величин показатели надежности немонотонно сходятся к своим предельным значениям. При небольшом числе реализаций значений случайных величин показатели надежности сильно отличаются от своих фактических значений. Следует отметить, что показатели надежности, полученные посредством разрабатываемой методики, более достоверны, чем результаты расчетов с использованием классической методики.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 16-37-00333мол-а).

Список литературы / References

[1] **Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б.** Надежность и резервирование в электроэнергетических системах. Новосибирск: Наука, 1974. 263 с.
Rudenko, Yu.N., Cheltsov, M.B. Reliability and reservation in electric power systems. Novosibirsk: Nauka, 1974. 263 p. (In Russ.)

[2] **Соболь И.М.** Метод Монте-Карло. М.: Наука, 1968. 64 с.
Sobol, I.M. Monte Carlo method. Moscow: Nauka, 1968. 64 p. (In Russ.)

[3] **Зоркальцев В.И., Лебедева Л.М., Пержабинский С.М.** Модель оценки дефицита мощности электроэнергетической системы с учетом квадратичных потерь мощности в линиях электропередач // Сиб. журн. вычисл. математики. 2010. Т. 13, № 3. С. 285–295.
Zorkaltsev, V.I., Lebedeva, L.M., Perzhabinsky, S.M. Model for estimating power shortage in electric power systems with quadratic losses of power in transmission lines // Numerical Analysis and Applications. 2010. Vol. 3, No. 3. P. 231–240.

[4] **Чукреев Ю.Я.** Модели обеспечения надежности электроэнергетических систем. Сыктывкар: Коми НЦ УрО РАН, 1995. 176 с.
Chukreev, Yu.Ya. Models for reliability of electric power systems. Syktyvkar: Komi NTs Uro RAN, 1995. 176 p. (In Russ.)

[5] **Зуховицкий С.И., Авдеева Л.И.** Линейное и выпуклое программирование. М.: Наука, 1964. 348 с.
Zukhovitskiy, S.I., Avdeeva, L.I. Linear and convex programming. Moscow: Nauka, 1964. 348 p. (In Russ.)

[6] **Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М.** Надежность систем электроэнергетики. Новосибирск: Наука, 2015. 224 с.
Kovalev, G.F., Lebedeva, L.M. Reliability of electric power systems. Novosibirsk: Nauka, 2015. 224 p. (In Russ.)

[7] **Зоркальцев В.И., Пержабинский С.М.** Модели оценки дефицита мощности электроэнергетических систем // Сиб. журн. индустр. математики. 2012. Т. 49, № 1. С. 34–43.

Zorkaltsev, V.I., Perzhabinskii, S.M. Models for estimating the power deficit in electric power grid // Sibirskii Zhurnal Industrial'noi Matematiki. 2012. Vol. 49, No. 1. C. 34–43. (In Russ.)

[8] **Чукреев Ю.Я.** Сравнение отечественных и зарубежных вероятностных показателей балансовой надежности электроэнергетических систем // Изв. РАН. Энергетика. 2012. № 6. С. 27–38.

Chukreev, Yu.Ya. Compare of domestic and foreign probability adequacy indices of electric power systems // Proc. of the Russ. Acad. of Sci. Power Eng. 2012. No. 6. P. 27–38. (In Russ.)

[9] **Ковалев Г.Ф., Лебедева Л.М.** Комплекс моделей оптимизации режимов расчетных состояний при оценке надежности электроэнергетических систем. Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 2000. 73 с.

Kovalev, G.F., Lebedeva, L.M. Complex of models for optimization of computational states under reliability analysis of electric power systems. Irkutsk: ISEM SO RAN, 2000. 73 p. (In Russ.)

Поступила в редакцию 19 декабря 2016 г.,
с доработки — 5 июня 2017 г.

Increasing efficiency of the Monte Carlo method when analyzing the adequacy of electric power systems

Perzhabinsky, Sergey M.

Melentiev Energy Systems Institute SB RAS, Irkutsk, 664033, Russia

e-mail: smper@isem.irk.ru

New method for generation of adequacy assessment of electric power system (EPS) is presented in the paper. The method is based on a modified approach to simulation of random values. We propose to simulate directions for variation in random values. Computations begin with the EPS worst state with minimal generation and maximal load. We use simulated directions to find the EPS state without power shortage. For power shortage estimation, we use parametric linear programming problem. Dual parametric problem is also presented in the paper.

The dual problem has parametric objective function and constraints without parameters. There are effective methods to solve such kind of parametric linear programming problems. Computational complexity of solving the dual parametric problem is equal to the complexity of solving a linear programming problem. We analyze the set of EPS shortage states along given directions within given time while solving parametric problem of power shortage estimation. Such approach will increase the certainty of reliability indices.

The developed method was tested for problems with continuous random variables. We compared the developed method with classical approach experimentally. Results of experiments corroborate the efficiency of new method.

Keywords: Monte Carlo method, electric power system, adequacy, adequacy analysis, reliability.

Acknowledgements. This research was supported by RFBR (Grant No. 16-37-00333).

Received 19 December 2016
Received in revised form 5 June 2017

© ICT SB RAS, 2017