

# ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИМАЛЬНЫХ РЕЗЕРВОВ ГЕНЕРИРУЮЩИХ МОЩНОСТЕЙ ПРИ ПЛАНИРОВАНИИ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Д.С. Крупенёв, Г.Ф. Ковалёв, Д.А. Бояркин, Д.В. Якубовский  
Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН

## Введение

Определение уровня оптимального резервирования генерирующей мощности является сложной задачей, зависящей от множества факторов. Задача по своему содержанию является технико-экономической, а основным критерием при её решении является минимизация суммы затрат на повышение надёжности электроэнергетической системы и ущерба, возникающего в результате недостаточной надёжности [1].

Для рассматриваемых перспективных схем развития энергосистем ущерб может быть определен при оценке балансовой надёжности [2]. При оценке балансовой надёжности также определяется набор показателей балансовой надёжности, которые связаны с ущербом и интерпретируют уровень надёжности энергосистемы. Так, в задаче оптимального резервирования генерирующей мощности вместо использования ущерба от низкой надёжности может быть использована вероятность бездефицитной работы, как дополнительное ограничение. Такая постановка задачи эквивалентна постановке с ущербом, к тому же при данной постановке есть возможность учесть возможные требования со стороны потребителей электроэнергии в обеспечении заданного (нормативного) уровня надёжности электроснабжения. Обоснование уровня резервирования генерирующей мощности целесообразно осуществлять согласованно с развитием сетевой части энергосистемы. В смысле обеспечения надёжности потребителя электроэнергии данные технологические звенья соединены последовательно и завышенная надёжность одного из звеньев не приведет к эффекту обеспечения требуемого уровня надёжности потребителей электроэнергией [3].

## Постановка задачи

Математическое описание задачи оптимального резервирования генерирующей мощности с учетом усиления основной сети выглядит следующим образом [4]:

Требуется найти минимум приведенных затрат

$$\sum_{i=1}^n \left( \sum_{l \in L_i} c_{li} \Delta x_{li} + \sum_{j=1}^n \sum_{b \in B_{ij}} c_{bij} \Delta z_{bij} \right) \rightarrow \min_{\Delta x, \Delta z}, \quad (1)$$

учитывая ограничения

$$\Delta x_{li} \in G_i, l \in L_i, i = 1, \dots, n, \quad (2)$$

$$\Delta z_{bij} \in F_{ij}, b \in B_{ij}, i = 1, \dots, n, j = 1, \dots, n \quad (3)$$

$$R_i(\Delta x, \Delta z, \xi) \geq R_i^0, i = 1, \dots, n, \quad (4)$$

где  $c_{li}$  – удельные приведенные затраты, связанные с реализацией  $l$ -го варианта введения в эксплуатацию генерирующего оборудования в зоне надёжности  $i$ ;  $\Delta x_{li}$  – прирост генерирующих мощностей в результате реализации варианта  $l$ , в зоне надёжности  $i$ ;  $c_{bij}$  – удельные приведенные затраты, связанные с реализацией  $b$ -го варианта введения в эксплуатацию сетевого оборудования между зонами надёжности  $i$  и  $j$ ;  $\Delta z_{bij}$  – увеличение пропускной способности линии электропередачи между зонами надёжности  $i$  и  $j$  в результате реализации варианта  $b$ ;  $G_i$  – множество вариантов изменения состава генерирующего оборудования в зоне надёжности  $i$ ;  $F_{ij}$  – множество вариантов изменения состава сетевого оборудования между зонами надёжности  $i$  и  $j$ ;  $L_i$  – множество номеров вариантов расширения состава генерирующего оборудования в зоне надёжности  $i$ ;  $B_{ij}$  – множество номеров вариантов увеличения пропускной способности связи между зонами надёжности  $i$  и  $j$ ;  $\Delta x, \Delta z$  – векторы переменных, компонентами которых являются  $\Delta x_{li}, \Delta z_{bij}$  соответственно;  $R_i^0$  – требуемое (нормативное) значение показателя балансовой надёжности ЭЭС;  $\xi$  – случайная величина, влияющая на отказы генерирующего и сетевого оборудования в ЭЭС.

### **Проблема нормирования показателей балансовой надёжности**

Подходы к нормированию показателей балансовой надёжности могут базироваться на различных аспектах [1]:

- 1) нормирование на основе экономических оценок;
- 2) нормирование на основе экспериментальных исследовательских расчетов;
- 3) нормирование на основе прошлого опыта;
- 4) нормирование на основе экспертных оценок.

В современных условиях планирования развития Единой энергосистемы (ЕЭС) России необходимо обоснование норматива показателя балансовой надёжности проводить учитывая по возможности все перечисленные аспекты. За основу необходимо принимать экономический аспект и далее, по возможности,

использовать остальные аспекты для корректировки норматива балансовой надежности.

Общеизвестен рекомендованный нормативный показатель балансовой надежности – вероятность бездефицитной работы, равный 0,996 [5]. Данный показатель обоснован для условий функционирования и развития энергосистемы СССР. Для его обоснования было применено следующее соотношение [6]:

$$P_{\text{норм}} = 1 - \frac{C}{T y_{\text{уд}}}, \quad (5)$$

где  $C$  – ежегодные расчетные (приведенные) затраты на создание и годовое содержание единицы мощности, руб./кВт·год (для условий СССР были взяты равными 20 руб./кВт·год);  $T$  – период, на который обосновывается вероятность бездефицитной работы, ч;  $y_{\text{уд}}$  – удельный ущерб от недоотпуска 1 кВт·ч электроэнергии, руб./кВт·ч (для условий СССР был взят равным 0,6 руб./кВт·ч).

Формула (5) отражает экономический, основополагающий принцип обоснования норматива вероятности бездефицитной работы. Формулу (5) следует применять для оценки нижнего уровня норматива вероятности бездефицитной работы. После его определения необходимо принять во внимание другие факторы, касающиеся обеспечения надежного электроснабжения потребителей и далее на основании комплексной оценки принимать решение о рациональном, нормативном уровне вероятности бездефицитной работы.

Для современных условий эксплуатации ЭЭС России, в соответствии с [7] замыкающие капитальные затраты на ввод резервной генерирующей мощности  $C_K$  равны 53450 руб./кВт, эксплуатационные затраты  $C_Э$  равны 123 000 руб./МВт в месяц, а эффективный срок окупаемости объектов электроэнергетики 10 лет, соответственно коэффициент экономической эффективности капитальных вложений  $E$  равен 0,1. Исходя из этого приведенные замыкающие затраты на ввод резервной генерирующей мощности определяются по следующей формуле и равны:

$$C = E \cdot C_K + C_Э = 0,1 \cdot 53450 + 123 \cdot 12 = 6821 \text{ руб./кВт·год.}$$

Данная величина получена на уровне 2010 г., с учетом инфляции, например, на 2017 год величина замыкающих затрат на ввод резервной генерирующей мощности равна 11155 руб./кВт·год.

Определение удельного ущерба от недопоставки электроэнергии потребителям является сложной задачей, удовлетворительного решения которой до сих пор нет. На самом деле, в ЭЭС имеется

множество потребителей, у которых ущерб от перерывов снабжения электроэнергией различный. Для определения удельного ущерба необходимо систематически проводить комплексную работу по сбору статистики фактического ущерба у потребителей от недоотпуска электроэнергии. Далее, обрабатывая собранные статистические данные, можно вычислить удельный ущерб для системы в целом. Есть и другой способ получить оценку удельного ущерба  $y_{уд}$  для обоснования норматива балансовой надежности. Это можно сделать, применив следующую формулу:

$$y_{уд} = \frac{ВВП}{W_{год}}, \quad (6)$$

где ВВП - внутренний валовой продукт страны или региона, руб.;  $W_{год}$  - потребление электроэнергии за год в стране или регионе, кВт·ч.

В 2017 году ВВП Российской Федерации был равен 73,4 трлн. руб., а  $W_{год}$  составило 1,06 трлн. кВт·ч. В итоге,  $y_{уд}$  равен 69,25 руб./кВт·ч.

После подстановки полученных значений  $C$  и  $y_{уд}$  в формулу (6) находим, что  $P_{норм} = 0,982$ . В [8] рекомендуется  $y_{уд}$  принимать на уровне от 1,5 до 4 долл./кВт·ч. (в соответствии с курсом рубля на 7.05.18 от 94 до 251 руб./кВт·ч. соответственно), в соответствии с данными удельными значениями норматив вероятности бездефицитной работы может быть равен  $P_{норм} = 0,986$  и  $P_{норм} = 0,995$  соответственно.

#### **Определение необходимого уровня резервирования генерирующей мощности**

Для расчета уровня резерва генерирующей мощности должна выполняться вариантная оценка балансовой надежности ЭЭС на соответствующий период планирования [9]. Перед оценкой балансовой надёжности необходимо обоснованно сформировать расчетную модель ЭЭС, от адекватности которой зависит точность оценки.

Далее выполняется проверка условия соответствия расчетных значений вероятности бездефицитной работы  $P_i$  в зонах надёжности установленному нормативу:

$$P_i \geq P_{норм}, \quad i = 1, \dots, I, \quad (7)$$

где  $P_{норм}$  – нормативное значение вероятности бездефицитной работы.

Если условие (7) не выполнено, то корректируется величина резервов генерирующей мощности в зонах надёжности пока выполнение условия (7) не будет обеспечено. Для корректировки резервов генерирующей мощности и, при необходимости, пропускных способностей связей используются двойственные оценки для генерирующей мощности в зонах надёжности и для связей, полученные при оценке балансовой надёжности, которые интерпретируют «узкие» места в энергосистеме с позиций балансовой надёжности. Если вероятность бездефицитной работы в зонах надёжности меньше нормативной, то рассматриваются варианты ввода генерирующих агрегатов непосредственно в данной зоне надёжности или в смежных зонах надёжности, по которым возможна передача дополнительной мощности. В итоге выбирается вариант, при котором выполняется условие (7) и приведенные затраты на ввод генерирующих агрегатов наименьшие.

При комплексном планировании (проектировании) развития ЕЭС России целесообразно рассматривать как ввод генерирующих агрегатов, так и усиление электрических связей. В данном случае, при несоблюдении условия (7), на первом этапе рассматривается усиление связей, соединяющих зоны надёжности, вероятность бездефицитной работы которых ниже принятого норматива, со смежными зонами надёжности, где имеется профицит генерирующих мощностей. В случае, если не удастся получить требуемое значение вероятности бездефицитной работы только усилением связей, то рассматриваются варианты ввода дополнительных генерирующих агрегатов в связке усилением межзонных связей. В итоге выбирается вариант, при котором выполняется условие (7) и суммарные приведенные затраты на ввод генерирующих агрегатов и усиление связей наименьшие.

### **Заключение**

Проблема определения оптимальных резервов генерирующей мощности в электроэнергетических системах является традиционной и не утратившей свою актуальность. В статье представлена математическая постановка задачи определения оптимального уровня резервирования генерирующей мощности в энергосистеме, а также последовательность операций для решения данной задачи. Одним из ключевых моментов в предлагаемой постановке является определение нормативного показателя балансовой надёжности, в качестве которого принимается вероятность бездефицитной работы. Нормативная величина вероятности бездефицитной работы может быть обоснована различными критериями, но основополагающим является экономическое обоснование на основании приведенных затрат на ввод

резервной мощности и ущерба, возникающего из-за низкой надёжности энергосистемы.

#### СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ:

1. Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б. Надёжность и резервирование в электроэнергетических системах. Новосибирск: Наука. 1974. 263 с.
2. Ковалёв Г.Ф., Лебедева Л.М. Надёжность электроэнергетических систем. Новосибирск: Наука. 2015. 224 с.
3. Крупенёв Д.С., Ковалёв Г.Ф. Оценка надёжности звеньев основной структуры электроэнергетических систем. // Проблемы анализа риска. Том 7. 2010. № 3. с. 34-40.
4. Крупенёв Д.С., Пержабинский С.М. Алгоритм оптимизации балансовой надёжности электроэнергетических систем. // Известия РАН. Энергетика. 2014 г. №2. Стр. 96-106.
5. Справочник по проектированию электроэнергетических систем. Под ред. Рокотяна С.С. и Шапиро И.М. М.: Энергоатомиздат. 1985. 352 с.
6. Маркович И. М. Режимы энергетических систем. М.: Наука. 1986. 252 с.
7. Об определении ценовых параметров торговли мощностью на оптовом рынке электрической энергии и мощности. Постановление Правительства РФ от 13.04.2010 N 238 (ред. от 02.09.2017).
8. Методические рекомендации по проектированию развития энергосистем. Утверждены приказом Минэнерго России от 30.06.03 № 281.
9. Крупенёв Д.С., Лебедева Л.М., Ковалёв Г.Ф., Беляев Н.А., Егоров А.Е., Громов Р.Е. К оценке уровня резервирования генерирующей мощности в Единой энергосистеме России. // Энергетическая политика. 2018. № 1. Стр. 33-44.

Работа выполнена в рамках проекта государственного задания 17.5.3. (рег. № АААА-А17-117030310450-3), при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта №18-37-00234.