

# 电力系统新增电源规划模型及应用研究

于强, 张验科\*, 罗笙月, 卢焱键

华北电力大学水利与水电工程学院, 北京

收稿日期: 2024年1月22日; 录用日期: 2024年2月8日; 发布日期: 2024年2月21日

## 摘要

为了满足新型电力系统下的电力和电量需求增加, 在传统补充电源方法基础上, 将建设和运行阶段的费用视为一个整体, 考虑水、火、风、光等电源综合运行成本费用特性, 针对多能互补和机组经济优化组合对减少装机成本和运行费用的影响, 以效益最大为目标建立了新型电力系统补充电源优化模型, 并给出了基于动态规划的求解方法。应用于某区域电力系统的算例分析结果表明, 在基于各类电源资源条件限制给出的有限组补充电源方案中, 模型可以更为经济合理地给出优化的推荐方案为方案5, 相较于传统模型的净效益提高了7.01亿元, 对于新型电力系统下补充电源的策略优选提供了一定的参考。

## 关键词

新型电力系统, 补充电源, 机组组合, 电力电量平衡, 多能互补

# Research on a Supplementary Power Planning Model and Its Application in Power System

Qiang Yu, Yanke Zhang\*, Shengyue Luo, Yaojian Lu

School of Water Resources and Hydropower Engineering, North China Electric Power University, Beijing

Received: Jan. 22<sup>nd</sup>, 2024; accepted: Feb. 8<sup>th</sup>, 2024; published: Feb. 21<sup>st</sup>, 2024

## Abstract

In order to meet the increasing demand for electricity and power in the new power system, on the basis of traditional supplementary power supply methods, the construction and operation costs are regarded

作者简介: 于强(1997-), 男, 硕士研究生, 主要从事水风光互补调度研究, Email: 1498588608@qq.com

\*通讯作者 Email: ykzhang2008@163.com

文章引用: 于强, 张验科, 罗笙月, 卢焱键. 电力系统新增电源规划模型及应用研究[J]. 水资源研究, 2024, 13(1): 12-20.

DOI: 10.12677/jwrr.2024.131002

as a whole. The comprehensive operating cost characteristics of various power sources such as water, fire, wind, and solar are considered. Aimed at reducing installation costs and operating expenses through the synergy of multiple energies and optimized unit combinations, a new power system supplementary power optimization model is established with the goal of maximizing benefits, and a solution method based on dynamic programming is provided. The case analysis results applied to a certain regional power system show that among the limited group of supplementary power supply schemes based on various types of power resource constraints, the model can more economically and appropriately provide the optimized recommended scheme, which is scheme 5. Compared with the traditional model, the net benefits have increased by 701 million Yuan, which provides a certain reference for the strategic optimization of supplementary power supply in the new power system.

## Keywords

New Power System, Supplementary Power, Unit Commitment, Balance of Power Consumption, Multi-Energy Complementary

Copyright © 2024 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



## 1. 引言

随着我国经济的不断发展,平均每年能源量和全国电力能源消费总量呈现出逐年递增趋势[1],多数地区仍不可避免地存在持续的电力补充装机需求[2] [3]。“碳达峰,碳中和”目标给我国电力系统变革带来了严峻的挑战,伴随着风、光等大量新能源的建设,我国电源结构正在发生巨大变化,新能源占比逐渐增大,电力系统中的各个电站如何更好更经济的满足用户的电力和电量要求就成为了目前急需解决的重要课题。电力电量平衡工作能够根据系统负荷要求和电站的工作容量和发电量,对已建和待建电源的容量和发电量进行合理安排,以期在预期的规划设计水平年中满足容量和电量的需求,达到对水、火、风、光等形成的电能在多时间尺度和区域上进行统筹调配,从而实现全网内发电资源在一定周期内总体优化利用[4] [5] [6]。风光等新能源的强随机性和多能互补特性是新型电力系统的主要特征之一[7] [8],电力市场的逐步推进给电力系统电力电量平衡工作增添了更为复杂的因素,因此,针对目前多电源共存的新型电力系统建立补充电源优化模型,考虑多能互补和电价等因素对电力电量平衡的影响,经济合理地选择合适的电源机组组合来补充电力和电量需求的缺口,对于缓解电力供需矛盾具有重要意义。

在新型电力系统中,补充电源的主要工作是确定补充电源的类型和装机容量,在满足电力电量需求的情况下经济效益最大化或成本最小化是确定补充电源装机容量配置的关键,目前已有大量相关研究成果[9] [10] [11] [12] [13],例如,文献[14]基于水电站或火电站两种电源形式,以运行期内总费用现值最小与补充电站装机容量最小为目标,建立了确定补充电站方案的多目标规划模型;文献[15]考虑了抽水蓄能、新能源和火电机组之间的容量配置,对比分析了新能源联合抽水蓄能对火电的替代效果;文献[16]考虑了新能源发电、火电、水电、抽水蓄能等多种发电形式,以持续负荷曲线建模为基础,建立了中长期运行模型,以实现中长期时间尺度下的多能互补;文献[17]构建风光弃电率函数,以精准模拟长时段风光弃电量,提出了装机容量配置的解析优化方法。以上研究成果多数是针对电站整体装机容量优化开展的研究工作,且规划设计成本、系统运行的费用和效益多是分开研究的,随着新能源占比不断增高和电力市场的逐步推进,多种能源之间的互补特性和电价波动等因素对电力电量平衡的影响愈发明显,因此,如何将规划设计和系统运行视为一个整体,考虑多能互补特性和电价对电力电量平衡的影响,追求机组建设和运行成本最小化,建立新型电力系统运行效益最大的优化模型,寻求补

充电源最优的机组类型、台数及容量，对于未来电力系统的经济运行具有重要意义。

## 2. 模型建立

### 2.1. 目标函数

寻求给定负荷缺口条件下的系统效益最大的优化分配方案是新型电力系统补充电源的关键因素[18] [19] [20]，而电力系统经济运行则是衡量补充电源方案优劣的重要原则。因此，假设补充  $M_1$  种电源  $L_1$  种机组后得到新的电源装机情况为  $M_2$  种电源  $L_2$  种机组，建立的新型电力系统补充电源优化模型的目标函数如下：

$$\max F = \sum_{m=1}^{M_2} \sum_{l=1}^{L_2} \sum_{t=1}^T \left\{ \left( N_{m,l}(t) A_{m,l}(t) - C_m W_{m,l} [N_{m,l}(t)] \right) \Delta t \right\} - \sum_{m=1}^{M_2} \sum_{l=1}^{L_2} D_{m,l} K_m \frac{\alpha(1+\alpha)^{y_m}}{(1+\alpha)^{y_m} - 1} \quad (1)$$

式中：等号右端第一项为补充电源后满足电力系统负荷时  $M_2$  种电源  $L_2$  种机组的调度期  $T$ (年)内的运行净效益，其中  $N_{m,l}(t) A_{m,l}(t)$  为运行效益， $C_m W_{m,l} [N_{m,l}(t)]$  为成本特性曲线， $N_{m,l}(t)$ 、 $A_{m,l}(t)$ 、 $C_m$ 、 $W_{m,l} [N_{m,l}(t)]$  为第  $m$  种类型电源第  $l$  台机组  $t$  时段出力、单位电价、单位能耗成本及承担负荷  $N_{m,l}(t)$  时的机组耗能特性曲线， $\Delta t$  为时段长；第 2 项为补充  $M_1$  种电源  $L_1$  种机组的建设费用年值， $D_{m,l}$ 、 $K_m$  分别为第  $m$  种类型电源第  $l$  台机组的容量和建设成本， $\alpha$  为运行期内的资金折现率， $y_m$  为第  $m$  种类型电源的设计运行年限。其中，假设火电、水电、风电和光电分别为第 1、2、3、4 种类型电源，各种类型机组的耗能特性曲线如下：

#### 1) 火电机组耗能特性曲线

由于火电机组煤耗量一般为出力的二次凸函数，能耗特性曲线可表示为：

$$W_{1,l} = \sum_{t=1}^T \left\{ a_l \times [N_{1,l}(t)]^2 + b_l \times N_{1,l}(t) + c_l \right\} \times \Delta t \quad (2)$$

式中： $t$  为计算时段编号； $N_{1,l}(t)$  为第  $l$  台火电机组第  $t$  时段出力； $a_l$ 、 $b_l$ 、 $c_l$  为第  $l$  台火电机组的煤耗特性曲线参数； $\Delta t$  为时间段。

#### 2) 水电机组耗能特性曲线

水电机组可根据流量特性曲线与耗水率特性曲线求出耗能特性曲线，计算公式如下式所示：

$$W_{2,l} = \frac{Q_l(t) [N_{2,l}(t), H(t)] \Delta t}{\gamma_l(t) [N_{2,l}(t), H(t)]} \quad (3)$$

式中： $Q_l(t) [N_{2,l}(t), H(t)]$  为水电机组  $l$  的流量特性曲线； $\gamma_l(t) [N_{2,l}(t), H(t)]$  为水电机组  $l$  的耗水率特性曲线； $\Delta t$  为时间段。

#### 3) 风、光电机组耗能特性曲线

风电机组的耗能特性曲线：

$$W_{3,l} = \sum_{t=1}^T N_{3,l}(t) \Delta t \quad (4)$$

光电机组的耗能特性曲线：

$$W_{4,l} = \sum_{t=1}^T N_{4,l}(t) \Delta t \quad (5)$$

式中： $N_{3,l}(t)$ 、 $N_{4,l}(t)$  为  $t$  时段风电出力和光电出力。

### 2.2. 约束条件

#### 1) 电力平衡约束：

$$P_0(t) = \sum_{m=1}^{M_2} \sum_{l=1}^{L_2} N_{m,l}(t) \quad (6)$$

2) 电量平衡约束:

$$E_0 = \sum_{t=1}^T \sum_{m=1}^{M_2} \sum_{l=1}^{L_2} N_{m,l}(t) \Delta t \quad (7)$$

3) 备用容量约束:

$$U(t) = \sum_{m=1}^{M_2} \sum_{l=1}^{L_2} U_{m,l}(t) \quad (8)$$

式中,  $U(t)$  为  $t$  时段系统的负荷、事故和检修备用需求,  $U_{m,l}(t)$  为第  $m$  种类型电源第  $l$  台机组  $t$  时段承担的备用容量。

4) 容量平衡约束:

$$D_{m,l}(t) = W_{m,l}(t) + U_{m,l}(t) + S_{m,l}(t) + F_{m,l}(t) \quad (9)$$

式中,  $W_{m,l}(t)$ 、 $S_{m,l}(t)$  和  $F_{m,l}(t)$  分别为第  $m$  种类型电源第  $l$  台机组  $t$  时段的工作容量、受阻容量和空闲容量。

5) 机组出力约束:

$$N_{m,l}^{\min}(t) \leq N_{m,l}(t) \leq N_{m,l}^{\max}(t) \quad (10)$$

式中,  $N_{m,l}^{\min}(t)$  和  $N_{m,l}^{\max}(t)$  分别为第  $m$  种类型电源第  $l$  台机组  $t$  时段的最小和最大出力, 它们一般反应了机组振动、预想出力及电力线路等限制因素。

### 3. 模型求解

在有限种电源类型和机组台数的条件下, 模型的求解属于一个典型的多阶段决策过程[21], 因此, 基于各种类型的机组耗能特性曲线, 可将其转化为动态规划类问题来解决。由于补充  $M_1$  种电源  $L_1$  种机组后得到新的电源装机情况为  $M_2$  种电源  $L_2$  种机组, 则机组总台数为  $I_s = M_2 \times L_2$ , 如果时段  $t$  电力系统的负荷为  $P_0(t)$ , 系统可投入运行的机组台数为  $I(t) \leq I_s$ , 用  $i = H(t, j) [j = 1, 2, \dots, I(t)]$  表示时段  $t$  第  $i$  台可投入机组相应的原编号。为了表述方便, 这里用  $I$  代替  $I(t)$ , 设  $i = 1, 2, \dots, I (I \leq I_s)$ 。

对于整个调度期  $T$  的每一个时段  $t$ , 如果不考虑时段之间的关联, 可以将该模型分解为  $T$  个独立的动态规划问题, 则可得到基于动态规划顺序递推原理的求解方法如下:

1) 阶段与阶段变量: 以每个类型电源的每台机组  $i$  为阶段, 投入机组的编号  $i$  代表阶段变量 ( $i = 1, 2, \dots, I$ ),  $i$  为面临阶段,  $i-1, i-2, \dots, 1$  为余留时期。

2) 状态变量: 选取  $1, 2, \dots, i$  台机组的总出力  $N_i^{\text{sum}}(t)$  作为第  $i$  阶段末的状态变量。

3) 决策变量: 取每台机组出力  $N_i(t)$  为决策变量, 第  $i$  号机组时段  $t$  可行出力范围组成允许决策集合  $X_i(t)$ , 则  $N_i(t) \in X_i(t)$ , 子策略记为:  $r_{i,i} = \{N_1(t), N_2(t), \dots, N_i(t)\}$ , 则  $r_{i,i}$  为全过程的一个策略。

4) 状态转移方程: 根据电力平衡约束方程, 对于任何一个机组  $i$ , 阶段末状态  $N_i^{\text{sum}}(t)$  与阶段初状态  $N_{i-1}^{\text{sum}}(t)$  和决策  $N_i(t)$  之间的数学关系即可作为状态转移方程。

$$N_i^{\text{sum}}(t) = N_{i-1}^{\text{sum}}(t) + N_i(t) \quad (11)$$

5) 指标函数与最优值函数: 假设以阶段  $i$  的耗能表示指标函数  $W_i[N_i(t)]$ , 第  $1 \sim i$  阶段总耗能的最优值  $W_i^*[N_i^{\text{sum}}(t)]$  表示最优值函数。

$$W_i^*[N_i^{\text{sum}}(t)] = \min_{r_{1,i}} \left\{ \sum_{j=1}^i W_j[N_j(t)] \right\} \quad (12)$$

6) 递推方程：根据多阶段决策原理和式(8)，可以列出如下顺序递推方程：

$$\begin{cases} W_i^*[N_i^{\text{sum}}(t)] = \min_{N_i(t) \in X_i(t)} \left\{ \sum_{j=1}^i W_j[N_j(t)] + W_{i-1}^*[N_i^{\text{sum}}(t) - N_i(t)] \right\} \\ W_0(0) = 0 \end{cases} \quad (13)$$

7) 约束条件：递推计算中的约束条件主要是式(8)~(10)，而式(6)则用于回代计算确定最优决策。

## 4. 算例分析

### 4.1. 方案设置

以某区域电网为例，根据该地区资源条件的情况，水、火、风、光四种电源均可作为待选补充电源，已建电源和补充电源的基本信息一致，如下表 1 所示。

表 1. 电源的基本信息

电源	火电			水电	风电	光电
	1	2	3			
单机容量/MW	500	200	100	200	10	—
建设成本/(万元/MW)	600	600	600	700	550	292.5

根据统计预测，假设未来规划水平年的最大电力负荷缺口为 1000 MW，在满足电力缺口情况下，水、火、风、光电源之间的容量替代关系为 1:1.5:3:5 [22] [23] [24]，其中光电需与其它三种电源配合后联合开发，为了满足当地经济发展和国家“双碳”目标的要求，在同等条件下优先补充开发水、风、光等清洁能源，设置的 10 组方案如表 2 所示。

表 2. 未来规划水平年满足最大电力缺口 1000 MW 的 10 种电源补充方案

方案	装机容量/MW	火电机组/台			水电机组/台	风电机组/台	光电机组/MW
		1	2	3			
方案 1	3000	0	0	0	0	300	0
方案 2	4000	0	0	0	0	150	2500
方案 3	2400	0	0	0	3	180	0
方案 4	3600	0	0	0	3	0	3000
方案 5	3000	0	0	0	3	90	1500
方案 6	2500	1	0	0	0	75	1250
方案 7	2500	0	0	5	0	75	1250
方案 8	1000	2	0	0	0	0	0
方案 9	1000	0	5	0	0	0	0
方案 10	1000	0	0	10	0	0	0

从表 2 可以看出，方案 1 至方案 10 分别都可以满足最大电力缺口 1000 MW 的需求，但各个方案的侧重有所不同，方案 1 为只补充风电机组，方案 2 为补充风电和光电机组，方案 3 为补充水电和风电机组，方案 4 为补充水电和光电机组，方案 5 为补充水电、风电和光电机组，方案 6 和方案 7 分别为补充火电、风电和光电机

组且重点对火电机组容量加以区分, 方案 8、方案 9 和方案 10 分别为只补充火电机组, 只是区分火电机组的不同。

#### 4.2. 计算结果

假设水电、火电、风电、光电的设计运行年限分别为 50 年、30 年、20 年和 25 年, 资金折现率为 8%, 调度运行时段长为 15 分钟, 可用来与新增电源互补的电源资源分别有, 火电、水电、风电、光伏各 1000 MW, 各个电源互补后装机规模相对互补前的比值为水电:风电 = 0.8:0.8; 水电:光电 = 0.8:0.7; 风电:光电 = 0.7:0.7; 水电:风电:光电 = 0.6:0.6:0.6; 火电:风电:光电 = 0.5:0.5:0.6;  $C_1 = 500$  (元/吨),  $C_2 = 268.5$  (元/MWh),  $C_3 = 262.5$  (元/MWh),  $C_4 = 272.5$  (元/MWh), 其中  $C_3$ 、 $C_4$  为风电机会成本与光电机会成本。以上述方案设置中的 10 种方案作为本文模型的输入, 在给定负荷缺口 1000 MW 条件下, 以系统效益最大为目标, 寻求 10 种补充装机方案中年度总效益最大的优化分配方案。同时, 为了对比分析, 给出了文献[14]中不考虑电源机组的经济优化组合成本费用最小的方法进行对比分析。从电源侧来看, 电源建设企业一方面追求年度建设和运行成本费用最小, 另一方面是要寻求在电量、电价等条件已知时的总效益最大。同样以文献[14]中的方案进行对比分析, 对 10 种电源补充方案的总效益进行计算。计算结果如表 3 所示:

表 3. 10 种电源补充方案计算结果

方案	装机容量/MW	优化装机容量/MW	年总成本费用/亿元			年净效益/亿元		
			文献[14]中的模型	本文模型	节省费用	文献[14]中的模型	本文模型	效益增值
方案 1	3000	2500	19.96	17.16	2.8	4.13	6.93	2.80
方案 2	4000	2800	18.58	13.01	5.57	5.62	11.19	5.57
方案 3	2400	2080	19.61	17.48	2.13	4.25	6.38	2.13
方案 4	3600	3120	17.96	16.31	1.65	6.03	7.68	1.65
方案 5	3000	1840	18.79	11.78	7.01	5.14	12.15	7.01
方案 6	2500	1700	18.96	15.25	3.71	4.52	8.24	3.71
方案 7	2500	1500	19.84	11.90	7.94	3.65	11.58	7.94
方案 8	1000	500	19.35	9.67	9.68	3.43	13.10	9.68
方案 9	1000	600	20.22	12.13	8.09	2.55	10.64	8.09
方案 10	1000	500	21.1	10.55	10.55	1.68	12.23	10.55

从表 3 中可以看出, 根据文献[14]中的模型计算结果, 方案 4 的年总成本费用最小, 为 17.96 亿元; 而本文模型计算的结果, 方案 8 的年总成本费用最小, 为 9.67 亿元, 年总成本费用减小了 9.68 亿元; 在同一方案下, 应用两种不同的模型时, 方案 10 节省费用的最大, 为 10.55 亿元, 其次是方案 8、方案 9、方案 7、方案 5 和方案 2; 对于方案 8、方案 9 和方案 10, 均为火电类型装机方案, 通过与已建电源的互补, 机组装机容量分别减少了 50%、60% 和 50%, 是所有方案中减少最多的, 因此其总成本费用较低, 节省费用较高, 并且可以看出在补充电源同为火电机组时, 随着火电机组台数增多, 运行成本费用增大, 年总成本费用随之增大。

从年净效益来看, 文献[14]中的模型中方案 4 的年净效益最大, 为 6.03 亿元; 应用本文模型计算的结果是方案 8 的年净效益最大, 为 13.10 亿元, 其次为方案 10、方案 5、方案 7、方案 2、方案 9; 从净效益的增值来看, 方案 10 的年净效益增值最大, 为 10.55 亿元。因此, 不管从年总成本费用的节省程度还是从年净效益来看, 方案 8 的纯火电机组为最优方案, 而从对国家“双碳”目标的贡献来看, 方案 5 为水、风、光组合方案, 且年净效益优势明显, 比方案 7 的火、风、光方案效益还要高, 因此, 推荐方案是建设 3 台 200 MW 的水电机组、

90 台 10 MW 的风电机组和 1500 MW 的光电厂。

### 4.3. 互补比例对效益的影响

在电力系统电源规划时，不同电源之间互补影响到其装机容量，从而影响到装机成本。本文为了研究互补比例对系统效益的影响，对不同互补比例的 10 种方案进行计算[25]。假设各个电源互补前所需装机规模为 1，互补后装机规模相对互补前的比值如表 4 所示，将表 4 中的方案带入本文模型计算，以文献[14]中的方案进行对比分析，计算结果如表 5 所示：

**表 4.** 各个电源互补后装机规模相对互补前的比值的方案

方案	水:风	水:光	风:光	水:风:光	火:风:光
方案 I	0.9:0.9	0.8:0.8	0.8:0.7	0.7:0.7:0.6	0.6:0.6:0.6
方案 II	0.8:0.8	0.8:0.7	0.7:0.7	0.6:0.6:0.6	0.5:0.6:0.6
方案 III	0.7:0.7	0.7:0.6	0.7:0.6	0.6:0.5:0.5	0.5:0.5:0.5

**表 5.** 不同互补比例方案下的 10 种电源补充方案的净效益

方案	年净效益/亿元		
	方案I	方案II	方案III
方案 1	6.37	6.93	6.37
方案 2	10.19	11.19	12.05
方案 3	5.31	6.38	7.44
方案 4	7.13	7.68	8.24
方案 5	9.00	12.15	12.15
方案 6	8.24	8.24	8.24
方案 7	11.58	11.58	7.36
方案 8	3.43	13.10	13.10
方案 9	10.64	10.64	10.64
方案 10	10.12	12.23	12.23

由表 5 可以看出，互补比例方案 I 时，应用本文模型计算的结果是电源补充方案 9 的年净效益最大，为 10.64 亿元，其次为方案 10、方案 7、方案 2、方案 5、方案 6，从对国家“双碳”目标的贡献来看，应推荐方案 2 风、光组合方案为最优方案，仅次于方案 7 火、风、光机组方案；互补比例方案 II 时，电源补充方案 8 的年净效益最大，为 13.10 亿元，其次为方案 10、方案 5、方案 7、方案 2、方案 9，应推荐方案 5 水、风、光组合方案为最优方案，仅次于方案 7 火、风、光机组方案；互补比例方案 III 时，计算结果与 4.2 部分一致，推荐电源补充方案 5 为最优方案。互补比例方案 I 与其它两种互补比例推荐结果不同，是因为水电机组单机容量的限制，导致在分配时，水电机组需要 420 MW 才能满足出力，需要 3 台水电机组，而方案 II、III 则只需要 360 MW 装机，两台水电机组，从而增加了方案 5 的建设成本。

### 4.4. 电价波动对效益的影响

电价也是影响系统效益的重要因素，为了研究电价对系统效益的影响，这里通过改变电价的方法，来分析电价对成本和效益的影响，电价设置方案如表 6，其中方案 a 是计算 3.2.1 时的方案，方案 b、c、d 分别提高了

水电、风电、光电的电价，方案 e、f、g 分别提高了水电和光电、风电和光电、水电和风电的电价，方案 h 提高了水电、风电和光电的电价。以表 7 中不同电价为输入带入本文模型计算，同样以文献[14]中的方案进行对比分析，计算结果如表 7 所示：

**表 6. 电价方案设置/(元/kW·h)**

方案	水电	火电	风电	光电
方案 a	0.2685	0.26	0.275	0.2775
方案 b	0.32	0.26	0.275	0.2775
方案 c	0.2685	0.26	0.32	0.2775
方案 d	0.2685	0.26	0.275	0.32
方案 e	0.32	0.26	0.275	0.32
方案 f	0.2685	0.26	0.32	0.32
方案 g	0.32	0.26	0.32	0.2775
方案 h	0.32	0.26	0.32	0.32

**表 7. 不同电价方案下的净效益/亿元**

方案	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4	方案 5	方案 6	方案 7	方案 8	方案 9	方案 10
方案 a	6.93	11.19	6.38	7.68	12.15	8.24	11.58	13.10	10.64	12.23
方案 b	6.93	11.19	8.18	9.49	13.95	8.24	11.58	13.10	10.64	12.23
方案 c	10.87	13.16	8.74	7.68	13.33	9.23	12.57	13.10	10.64	12.23
方案 d	6.93	13.05	6.38	9.92	13.26	9.17	12.51	13.10	10.64	12.23
方案 e	6.93	13.05	8.18	11.72	15.07	9.17	12.51	13.10	10.64	12.23
方案 f	10.87	15.02	8.74	9.92	14.45	10.16	13.50	13.10	10.64	12.23
方案 g	10.87	13.16	10.55	9.49	15.13	9.23	12.57	13.10	10.64	12.23
方案 h	10.87	15.02	10.55	11.72	16.25	10.16	13.50	13.10	10.64	12.23

同理可以得出结论：除了电价方案 f 推荐方案为方案 2 风、光方案，其余电价下的推荐方案均为方案 5 水、风、光方案。因为电价方案 f 仅提高了风、光的电价，导致风、光方案 2 效益较大，而其余方案虽然提高了部分电源电价，但方案 5 的效益仍然较高。

## 5. 结论

为了解决新型电力系统缺电情况下的电力电量平衡问题，在传统补充电源方法的基础上，一方面考虑电源机组的多能互补比例减少装机成本，另一方面基于机组经济优化组合减少运行费用，建立了更为经济合理的以总效益最大为目标的新型电力系统补充电源优化模型，并进行了算例分析，得出了以下结论：

1) 本文模型以系统效益最大为目标，将补充电源的建设成本与经济运行费用融为一体，得出的方案的净效益相较于传统方案的净效益均有不同程度的提高，增幅从 1.65 至 10.55 亿元不等，仅从经济效益角度考虑应该选择方案 10，而从国家“双碳”目标需求来选择则应该选择方案 5，其效益增值为 7.01 亿元，说明本文模型可以根据地区资源条件的情况，在给定的有限组补充电源方案中以净效益最大优选出更为经济合理的推荐方案，是对传统补充电源方法的有益探索和补充；

2) 分别设置不同的互补比例和电价方案分析了多能互补比例和电价对各个方案的净效益的影响, 总体而言, 方案 5 为推荐的方案, 仅在多能互补比例方案 I 时方案 5 仅次于推荐的方案 2, 原因在于水电机组单机容量的限制, 导致在分配时, 水电机组需要 420 MW 才能满足出力, 需要 3 台水电机组, 而方案 2 仅需要 2 台, 增加了方案 5 的建设成本, 因此, 机组容量、多能互补比例和电价的变化均会对各方案的净效益造成一定的影响, 如果能够结合具体案例进行分析会更符合实际。

## 致谢

感谢国家自然科学基金项目 52279064 和 51709105 对本研究的支持。

## 参考文献

- [1] 国家统计局. 2022 年中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2022.
- [2] 武魏楠. 全年用电突破 9 万亿度, 供需偏紧、局部缺电难题待解[J]. 能源, 2023(5): 30-32.
- [3] 范珊珊. 西南水电困局: 从弃水到缺电[J]. 能源, 2023(7): 10-17.
- [4] 高红均, 郭明浩, 刘挺坚, 等. 新型电力系统电力电量平衡分析研究综述[J]. 高电压技术, 2023, 49(7): 2683-2696.
- [5] 王亮, 向铁元, 杨瑶, 等. 含水电的区域风光容量优化配置[J]. 现代电力, 2015, 32(1): 89-94.
- [6] 郭生练, 汪芸, 周研来, 等. 丹江口水库洪水资源调控技术研究[J]. 水资源研究, 2015, 4(1): 1-8.
- [7] 高力奇, 刘本希, 罗彬, 等. 多目标水火协调长期优化调度模型研究[J]. 水资源研究, 2016, 5(3): 237-245.
- [8] 范荣全, 杨云, 许珂, 等. “双碳”目标下新型电力系统典型特征与发展挑战综述[J]. 四川电力技术, 2023, 46(6): 10-14+58.
- [9] 王进, 赵志鹏, 程春田, 等. 耦合出力破坏深度与弃电准则的梯级水风光互补调度规则研究[J]. 水利学报, 2023, 54(12): 1415-1429.
- [10] 宋天华, 张权, 乔一帆, 等. 黑山峡水利枢纽装机容量优化调整研究[J]. 人民黄河, 2023, 45(11): 161-164.
- [11] LIU, W. X., WANG, L., ZHANG, B., et al. Unit commitment of wind integrated power system considering optimal scheduling of reserve capacity. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 431(1): 012054. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/431/1/012054>
- [12] 周业荣, 李相锐, 绳博宇, 等. 水风光蓄互补发电系统中风光容量配置研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(11): 1-14.
- [13] 朱燕梅, 陈仕军, 黄炜斌, 等. 一定弃风光率下的水风光互补发电系统容量优化配置研究[J]. 水电能源科学, 2018, 36(7): 215-218.
- [14] 纪昌明, 赵亚威, 马皓宇, 等. 电力系统充电站多目标规划模型研究与应用[J]. 水力发电学报, 2020, 39(5): 36-50.
- [15] 张云飞, 张弓, 徐三敏, 等. 抽水蓄能联合新能源替代火电参与电力电量平衡能力研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2022, 8(6): 26-31.
- [16] 邵成成, 王雅楠, 冯陈佳, 等. 考虑多能源电力特性的电力系统中长期生产模拟[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(13): 4072-4081.
- [17] 陈祥鼎, 刘攀, 吴迪, 等. 水风光互补系统装机容量配置解析优化及敏感性分析[J]. 水利学报, 2023, 54(8): 978-986.
- [18] 成楸语. 基于水风光多能互补的梯级储能调度研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安理工大学, 2023.
- [19] 郭洪武. 可再生能源多能协同调度优化及效益均衡模型研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2021.
- [20] 辛禾. 考虑多能互补的清洁能源协同优化调度及效益均衡研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 华北电力大学(北京), 2020.
- [21] 温大伟, 谢文环. 动态规划多阶段决策过程最优化推广[J]. 甘肃高师学报, 2018, 23(2): 7-9.
- [22] 姜梦妍, 王筱, 董闯, 等. 基于时序运行模拟的水风光储互补系统电源优化配置[J/OL]. 水力发电学报, 2023: 1-11. <https://link.cnki.net/urlid/11.2241.tv.20231031.1428.006>, 2024-01-26.
- [23] 耿新民, 许贝贝. 兼顾可靠性与经济性的风光火蓄多能系统容量配置方法[J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9(5): 53-60.
- [24] ZHANG, X., CAMPANA, P. E., BI, X., et al. Capacity configuration of a hydro-wind-solar-storage bundling system with transmission constraints of the receiving-end power grid and its techno-economic evaluation. Energy Conversion and Management, 2022, 270: 116177. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.116177>
- [25] 安莉娜, 范国福, 余兴奎, 等. 乌江洪家渡水电站水风光互补协调运行及其对梯级的影响研究[J]. 水电与抽水蓄能, 2023, 9(S1): 40-45.