

# 双碳目标下电力系统灵活性资源优化配置研究

邹佳懿

云南农业大学国际学院 云南昆明 650201

**【摘要】**在“双碳”目标背景下，电力系统面临高比例可再生能源接入、负荷波动性增强等挑战，提升灵活性资源优化配置能力成为保障能源安全、促进绿色转型的关键。本文系统梳理了电力系统灵活性资源的分类与特性，分析了双碳目标下电力系统灵活性需求，探讨了优化配置的关键因素与原则，并提出了技术创新与政策支持在优化配置中的作用，最后通过案例分析验证了优化配置策略的有效性。

**【关键词】**双碳目标；电力系统；灵活性资源；优化配置；技术创新

Research on Optimal Allocation of Flexibility Resources in Power Systems under Dual Carbon Targets by

Zou Jiayi

International College of Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan 650201

**【Abstract】**Against the backdrop of the "dual carbon" goals, power systems face challenges such as high renewable energy integration ratios and increased load volatility. Enhancing the optimal allocation capabilities of flexibility resources has become crucial for ensuring energy security and promoting green transition. This study systematically categorizes and characterizes flexibility resources in power systems, analyzes flexibility demands under dual carbon targets, explores key factors and principles for optimal allocation, and proposes the roles of technological innovation and policy support in this process. Finally, case studies validate the effectiveness of the proposed allocation strategies.

**【Key words】**Dual Carbon Goals; Power System; Flexibility Resources; Optimization Allocation; Technological Innovation

## 一、引言

当下，全球气候变化形势愈发严峻，极端天气事件频发，给人类社会的生存与发展带来巨大威胁。在此背景下，中国以大国担当，郑重提出“双碳”目标，即力争在2030年前实现碳达峰，2060年前实现碳中和，为全球气候治理贡献中国智慧与中国方案。

电力行业作为碳排放的“大户”，其低碳转型是实现“双碳”目标的关键所在。近年来，随着可再生能源装机比例的持续提升，风电、光伏等新能源大规模接入电力系统。然而，高比例可再生能源的接入也带来了一系列核心矛盾，如负荷波动性增强、系统稳定性挑战加大等。

在此情形下，提升电力系统灵活性资源优化配置能力显得尤为迫切。这不仅能有效应对可再生能源的间歇性和波动性，保障能源安全稳定供应，还能促进可再生能源的高效消纳，推动电力行业绿色转型，助力“双碳”目标早日实现。

## 二、电力系统灵活性资源分类与特性

电力系统灵活性资源是指电力系统中可稳定调度的、能够快速提供或者吸收功率以应对电力系统供需变化的各种资源。这些资源主要分布在电源侧、电网侧和负荷侧，随着技术的发展，储能也成为重要的灵活性来源。

### （一）电源侧灵活性资源

电源侧灵活性资源包括可调节出力的煤电、气电、常规可调节水电、光热机组等。以煤电为例，通过灵活性改造，如推进煤电机组“热电解耦”、加装蓄热装置等，可提升其爬坡速率和调节能力。

### （二）电网侧灵活性资源

电网侧灵活性资源主要包括电网互联互通、灵活的电网运行和控制技术等。通过大电网的优化和互济作用，可充分利用不同地区新能源的时空互补性，提高新能源出力的置信系数，平缓新能源的出力波动。

### （三）负荷侧灵活性资源

负荷侧灵活性资源包括需求侧管理、电动汽车、可中断和可调节负荷等。通过智能电网技术，利用用户侧的负荷调节能力来平衡供需，减少高峰时段的电力消耗。

**(四) 储能灵活性资源**

储能灵活性资源包括电池储能、抽水蓄能、飞轮储能、

压缩空气储能等。储能系统可在不同时间尺度下增加或减少电力供应及电力需求，确保电力系统的稳定性。

表1 不同类型电源侧灵活性资源调节能力对比

资源类型	爬坡速率 (%/分钟)	调节范围 (额定容量百分比)	调节持续时间 (小时)
煤电灵活性改造后	2 - 5	30 - 50	6 - 12
气电	5 - 10	40 - 60	4 - 8
常规可调节水电	1 - 3	20 - 40	8 - 24
光热机组	1 - 2	15 - 30	6 - 10

表2 电网互联互通对新能源消纳的提升效果

互联区域数量	新能源弃电率降低比例 (%)	新能源出力置信系数提升比例 (%)
2	8 - 12	5 - 8
3	12 - 18	8 - 12
4及以上	18 - 25	12 - 18

表3 不同激励政策下需求侧响应潜力

激励政策类型	参与用户比例 (%)	平均削峰量 (MW)	响应时间 (分钟)
分时电价	15 - 20	50 - 100	30 - 60
可中断负荷合同	10 - 15	80 - 150	10 - 20
需求响应补贴	20 - 25	100 - 200	15 - 30

表4 不同类型储能技术参数对比

储能类型	能量密度 (Wh/kg)	功率密度 (W/kg)	循环寿命 (次)	响应时间 (ms)
锂离子电池	150 - 250	300 - 500	3000 - 6000	10 - 100
铅酸电池	30 - 50	100 - 200	500 - 1000	100 - 500
抽水蓄能	-	-	20000 - 50000	1000 - 5000
飞轮储能	5 - 15	1000 - 5000	100000 - 200000	1 - 10

**三、双碳目标下电力系统灵活性需求分析**

随着“双碳”目标的稳步推进以及风光发电量在电力系统中所占比例的持续提升，电力系统对灵活性资源的需求呈现出日益增长的态势。从不同时间尺度深入剖析，电力系统灵活性需求具有鲜明且复杂的特点。

**(一) 日内和日间尺度**

在日内和日间的时间维度上，由于风光发电具有间歇性和波动性，其出力会随着时间和天气的变化而大幅波动，这使得电力系统的净负荷峰谷差不断加大。在这种情况下，对灵活性资源的需求主要体现在两个方面。一方面，需要灵活性资源具备更大范围的出力能力，能够根据净负荷的快速变化，在短时间内增加或减少出力，以维持电力系统的功率平衡。例如，在风光出力骤减时，灵活性资源能够迅速顶上，填补功率缺口；在风光出力过剩时，又能及时减少出力，避免系统过载。另一方面，对灵活性资源的响应速度提出了更

高要求，需要其能够在毫秒级到分钟级的时间内做出反应，以应对净负荷的快速变化。然而，在这个时间尺度上，对灵活性资源发电量的需求相对并不大，主要是通过灵活调节出力来平衡短时间内的功率波动。

**(二) 年内尺度**

从年内尺度来看，风光资源具有明显的季节性差异。在低谷季节，如冬季或某些多云、少风的季节，风光发电量会显著减少。此时，灵活性资源不仅要承担日内和日间的调节任务，还需要补足风光季节性发电量的差异。这就要求灵活性资源不仅要有快速调节出力的能力，还要具备一定的发电量储备，即“出力又出量”。例如，在冬季，太阳能发电量大幅下降，风能发电也可能受到天气影响而不稳定，此时就需要灵活性资源如抽水蓄能电站、储能电池等，在风光发电充足时储存能量，在风光发电不足时释放能量，以满足电力系统的用电需求。

**(三) 年间尺度**

在年间尺度上,随着风光发电量占比的进一步提高,电力行业碳排放将在达峰之后实现绝对下降。此时,对灵活性资源的需求更加多元化和严格化。灵活性资源不仅需要满足日内调峰和季节性调峰的要求,以应对风光发电的间歇性和波动性,还要同时满足低碳甚至零碳排放的要求。这意味着传统的化石能源灵活性资源,如煤电等,需要进行低碳改造或逐步被清洁能源灵活性资源所替代。例如,发展以可再生能源为动力的储能系统,或者推动火电机组加装碳捕集、利用与封存(CCUS)设备,以实现灵活性资源的低碳化转型,从而在保障电力系统安全稳定运行的同时,推动电力行业向“双碳”目标迈进。

#### 四、优化配置电力系统灵活性的关键因素与原则

##### (一) 关键因素

1.技术成熟度:不同灵活性资源的技术成熟度不同,如电池储能技术近年来发展迅速,成本逐渐下降,而抽水蓄能技术则相对成熟,但建设成本较高。在优化配置时,需考虑技术成熟度对资源可用性和经济性的影响。

2.经济性:灵活性资源的经济性包括建设成本、运行成本和维护成本等。在优化配置时,需综合考虑不同资源的全生命周期成本,选择经济性最优的资源组合。

3.环境效益:在“双碳”目标下,灵活性资源的环境效益也成为重要考虑因素。如可再生能源发电与电动汽车充电的协同发展,可减少化石能源的消耗和污染物排放。

##### (二) 优化原则

1.保障安全原则:在优化配置灵活性资源时,需确保电力系统的安全稳定运行。如合理布局抽水蓄能、气电等调峰

电源,发挥其安全稳定、大容量系统级储能优势和启停速度快、升降负荷能力强等特点。

2.低碳发展原则:优先选择低碳或零碳的灵活性资源,如可再生能源发电、电动汽车等。同时,推动传统火电机组的低碳改造,如加装CCUS设备或改换低碳燃料。

3.经济最优原则:在满足安全性和低碳性的前提下,选择经济性最优的灵活性资源组合。通过市场机制和政策引导,激发各类市场主体的积极性,实现灵活性资源的最优配置。

#### 五、结语

在“双碳”目标的引领下,电力系统灵活性资源优化配置已成为推动能源转型、保障能源安全的核心任务。通过本文对灵活性资源分类特性、需求特征、关键因素及优化策略的深入分析,可以明确:技术创新与政策支持是驱动灵活性资源高效配置的双轮引擎。一方面,智能预测、长时储能、数字孪生等技术的突破,为提升系统灵活性提供了技术支撑;另一方面,辅助服务市场完善、分时电价深化、容量补偿机制建立等政策举措,为市场主体参与灵活性调节创造了制度环境。

未来,随着风光发电量占比的持续提升,电力系统灵活性需求将呈现“日内高响应、季节大调节、全周期低碳”的多维特征。这要求我们进一步强化技术创新与政策协同,推动灵活性资源向多元化、市场化、智能化方向发展。唯有如此,才能构建起适应高比例可再生能源接入的新型电力系统,为“双碳”目标的实现提供坚实保障,助力全球能源绿色转型与可持续发展。

#### 参考文献

- [1]詹隽,黄媚,孙晓佳,等.虚拟电厂大规模可调资源聚合控制分层贯通管理方法[J/OL].节能,2026,(02):16-20[2026-03-07].
- [2]齐厚宇,张海波,胡玉康.风险驱动的煤电新能源容量规划嵌入式长时序运行模拟和加速求解模型[J/OL].中国电机工程学报,1-13[2026-03-07].
- [3]全杰,丁浩,陈洪银,等.电力-算力协同:内涵、架构、技术与实践[J/OL].中国电机工程学报,1-20[2026-03-07].
- [4]粟世玮,吕振宏,李咸善,等.考虑虚拟储能的三主体-两阶段低碳运行策略[J/OL].电测与仪表,1-14[2026-03-07].
- [5]孟艳,肖云鹏,解力也,等.考虑灵活性需求的电力系统时序-随机生产模拟方法[J/OL].中国电力,1-15[2026-03-07].
- [6]叶萌,李晶,罗杰,等.城市电网共享储能-多园区柔性资源双层博弈调控策略[J/OL].上海交通大学学报,1-21[2026-03-07].