



## 面向新能源不确定性的西北电力电量平衡机制

任景<sup>1</sup>, 高敏<sup>1</sup>, 程松<sup>1</sup>, 张小东<sup>1</sup>, 刘友波<sup>2</sup>

(1. 国家电网有限公司西北分部, 陕西 西安 710048;

2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 受新能源“无稳定电力、有基础电量”的发电特性影响, 西北地区电力电量平衡特性呈现新形态, 电网同时面临腰荷时段的新能源消纳压力及早晚高峰的保供压力。基于高比例新能源电网实际运行数据及历史统计数据, 分析了西北地区电力电量平衡的风险特性, 梳理了国内外电力系统面向区域供需平衡的关键技术及配套市场机制, 立足西北地区源网荷发展态势, 提出了兼顾电力可靠供应和新能源高效消纳的西北电网电力电量平衡措施与建议。

**关键词:** 新能源消纳; 电力电量平衡; 高比例新能源电网; 电力市场

**DOI:** 10.11930/j.issn.1004-9649.202306099

### 0 引言

在新型电力系统建设过程中, 新能源迎来高速发展<sup>[1]</sup>。然而, 一次风光能源易受极端气象影响, 新能源“靠天吃饭”特性愈发彰显。2022年, 西北新能源单日发电量占比达35%、最大出力占比高达48%, 均创下新高。西北电网作为全国首个新能源装机第一的区域电网, 同时面临腰荷时段的新能源最大化消纳压力与早晚高峰的保供压力, 受新能源“有电量、无稳定电力”的发电特性影响, 电网电力电量平衡呈现“整体富余、尖峰负荷紧张、局部时段紧缺”的新形态。随着社会用电量的稳步增长, 平衡安全问题或将成为限制西北电网新能源高效发展的关键瓶颈。

电力电量平衡是指不同时间尺度下源网荷各类可控资源的优化组合, 以计划方式满足系统新能源最大化消纳、发电经济性最优等目标, 是电网运行的重要前置性边界。不确定性下的电力电量相关的平衡机制及关键技术研究, 主要包括新

能源不确定性建模及预测<sup>[2]</sup>、电力电量平衡典型场景构建<sup>[3]</sup>、多时间尺度生产模拟快速求解算法<sup>[4]</sup>、跨区跨省电力调峰方法<sup>[5]</sup>等。

现有研究多由上至下从调度层面出发, 采用场景集构建、区间调度方法等描述不确定性变量, 在确保系统电力电量平衡可行下获得经济调度策略, 以全面提升区域电网的综合平衡能力。在全国统一电力市场背景下, 省内/间现货市场、辅助服务市场等机制设计对于激发源荷调节平衡能力、引导主体主动参与电力电量平衡起到至关重要的作用<sup>[6]</sup>。

西北电网的新能源外送电量占比已达到国家电网有限公司经营范围內跨区新能源外送电量的一半以上, 妥善解决好西北电网各种平衡安全风险, 提升平衡安全水平, 可为其他区域电网及全国提供借鉴。本文就高比例新能源电力系统面临的电力电量平衡风险问题展开分析讨论, 基于西北地区实际运行数据与历史统计数据, 阐述高比例新能源条件下西北电网电力电量平衡风险问题, 总结西北全网在不同时间尺度、不同风险概率下呈现出的电力电量平衡新形态, 梳理国内外电力系统面向区域供需平衡的关键技术及配套市场机制, 提出保障西北电网电力电量平衡的相关措施与建议, 为中国实现双碳目标及新型电力系统建设的发展愿景提供坚强支撑。

**收稿日期:** 2023-06-15; **修回日期:** 2023-08-01。

**基金项目:** 国家电网有限公司西北分部科技项目(应对一次能源供应不确定性的电力电量综合平衡与分析决策关键技术研究, SGNW0000DKJS2310082)。



# 1 西北电网电力电量平衡风险分析

## 1.1 基于新能源可信出力的电力电量平衡分析

不同时间尺度下的电力电量平衡分析是制定电网机组调度及外送运行方式、安排电源电网规划方案的基础。基于西北电网新能源发电历史数据，结合新能源历史统计出力数据，将部分新能源可信出力纳入日前平衡计划中，替代火电开机备用。在日内运行时，若新能源实际出力大于日前预测出力，且常规机组已处于最小出力，则新能源存在弃电风险（见图 1 的时段 1）；若新能源实际出力远小于日前预测出力，且常规机组上调容量不足，则部分时段全网最大发电功率将小于最大负荷需求，即电网存在损失负荷的风险（见图 1 的时段 2）。

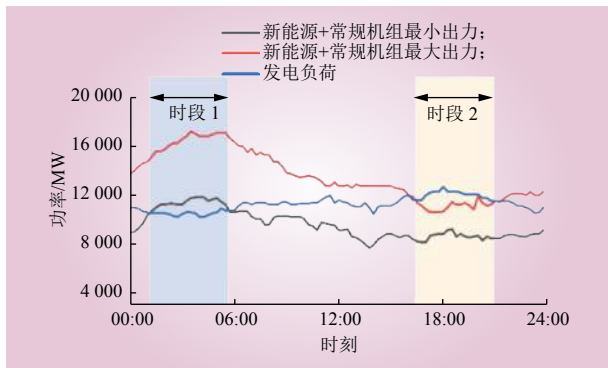


图 1 新能源出力不确定性下的供需失衡风险  
Fig. 1 Power supply-demand imbalances caused by renewable output uncertainties

## 1.2 考虑新能源可信出力的备用容量留取模式

电网的备用容量留取原则一般为预测负荷的 2%~5%，用来平衡短时间尺度下的源荷侧波动。考虑到现阶段西北电网负荷预测准确率约为 99%，基于正态分布来刻画负荷预测误差的概率分布，建立负荷预测偏差概率密度函数，基于西北历史统计数据，系统损失负荷概率与备用率的关系如图 2 所示。系统备用率的提升可有效降低系统切负荷的风险，但风险降低效果呈现非线性关系且逐渐变缓，在电网运行中，若要求将系统切负荷风险概率降至 1% 以下，则需将系统备用率提升至 3.8% 以上。

在电网新能源装机规模比较小时，系统备用容量可由常规火电机组提供，但此种备用方法会增大火电机组出力、降低新能源的消纳空间。西

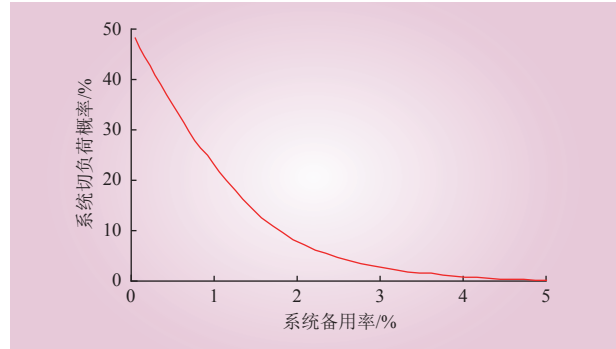


图 2 系统备用率与切负荷风险概率关系  
Fig. 2 The relationship between system reserve rate and load shedding risk probability

北电网采取将部分新能源可信出力纳入备用的模式，新能源纳入备用的容量等于新能源预测出力乘以新能源出力纳入备用的比例。日前预测新能源出力纳入备用的比例越高，消纳空间越高，但由于新能源预测不准确，系统供电缺口风险也相应增加。

以 2020 年西北最大负荷典型日为例，统筹考虑负荷与新能源出力的综合预测误差，设置 3.8% 系统备用率、1% 系统损失负荷风险概率的应用场景，在最大负荷时刻，西北电网新能源备用纳入比例为 0.39，纳入备用量为 9733 MW，即面临最大负荷时，需要新能源最小出力为 9733 MW。

在实际运行中，西北电网采取基于保证出力（供电保证率 95%）的模式将新能源纳入备用。基于统计数据，全网新能源预测出力所对应的备用纳入比例<sup>[7]</sup>如表 1 所示。在新能源装机容量一定时，其预测出力越高，存在的潜在预测偏差越高，为降低电力电量失衡风险，新能源纳入备用比例会进一步下降，以实现火电机组合理开机。

表 1 实际运行中的新能源纳入比例  
Table 1 Ratio of renewable energy output included in the system reserve during actual power grid operation

新能源预测出力/MW	备用比例
5000~10000	0.58~0.48
10000~15000	0.48~0.39
20000~30000	0.39~0.35

## 1.3 与电网发展规模相匹配的新能源最小出力测算分析

进一步建立电网电力电量平衡测算体系，评

估不同源网发展场景下的西北地区新能源最小出力需求, 全网电力电量平衡方程式为

$$P_N(t) = P_L(t) + P_S(t) - P_G(t) \quad (1)$$

其中,

$$0 \leq P_N(t) \leq P_{N0} + \sum_{k=0}^t P_{N,new}(k) \quad (2)$$

$$P_L(t) = P_{L0} + \sum_{k=0}^t P_{L,new}(k) \quad (3)$$

$$P_S(t) = P_{S0} + \sum_{k=0}^t P_{S,new}(k) \quad (4)$$

$$\alpha \left( P_{G0} + \sum_{k=0}^t P_{G,new}(k) \right) \leq P_G(t) \leq P_{G0} + \sum_{k=0}^t P_{G,new}(k) \quad (5)$$

式中:  $P_{N0}, P_{N,new}(k), P_N(t)$  分别为新能源基准装机、 $k$ 时增量装机及 $t$ 时下新能源实际出力;  $P_{L0}, P_{L,new}(k), P_L(t)$  分别为用电基准负荷、 $k$ 时增量负荷及 $t$ 时下的实际负荷;  $P_{S0}, P_{S,new}(k), P_S(t)$  分别为基准跨区外送功率、 $k$ 时外送增量功率及 $t$ 时下的实际外送功率;  $P_{G0}, P_{G,new}(k), P_G(t)$  分别为常规机组基准装机、 $k$ 时增量装机及 $t$ 时下的实际出力;  $\alpha$  为常规机组的最小技术出力系数。

依据历年来西北地区新能源出力统计数据, 在目标置信水平  $\tau_t$  下, 不同新能源装机规模下的新能源保证出力  $P_N^G(t)$  为

$$P_N^G(t) \geq F_{\tau_t} \left( P_{N0} + \sum_{k=0}^t P_{N,new}(k) \right) \quad (6)$$

式中:  $F_{\tau_t}$  为置信水平  $\tau_t$  下新能源保证出力与新能源装机容量的函数关系。

其中, 新能源机组成与新能源保证出力呈单调正相关关系。

$$\text{定义变量 } \Delta P_E(t) = \sum_{k=0}^t \Delta P_{L,new}(k) + \sum_{k=0}^t \Delta P_{S,new}(k)$$

来表示负荷及跨区外送增量需求预测偏差的综合影响。负荷增量需求预测偏差  $\Delta P_{L,new}$  的概率分布为  $f(\alpha)$ , 跨区外送增量需求预测偏差  $\Delta P_{S,new}$  的概率分布为  $g(\alpha)$ , 则变量  $\Delta P_G(t)$  的联合概率密度分布可表述为

$$h(\alpha) = \int_{k=0}^t f(p)g(\alpha-p)dp \quad (7)$$

电网通过灵活调度常规机组以实现西北地区

的电力电量平衡, 当常规机组以最大出力发电时, 考虑负荷预测偏差, 电网所需新能源最小出力为

$$P_{N,\min}(t) = P_L(t) + P_S(t) + \Delta P_E(t) - \left( P_{G0} + F_{\alpha_t} \left( \sum_{k=0}^t \Delta P_G(k) \right) \right) \quad (8)$$

在进行电力平衡风险概率评估时, 定义  $H_0 = \Pr(P_{N,\min}(t) \geq P_N^G(t))$ , 其中  $H_0$  为新能源最小出力大于目标置信水平  $\tau_t$  下新能源保证出力的概率值。

西北电网近几年不同置信水平下新能源保证出力如图 3 所示<sup>[7]</sup>。考虑到西北电网新能源发电随着装机的增加而提升, 西北电网新能源保证出力呈现逐年增长特征, 基于历史统计数据得到的保证出力, 可指导远期源网合理规划与科学布局。

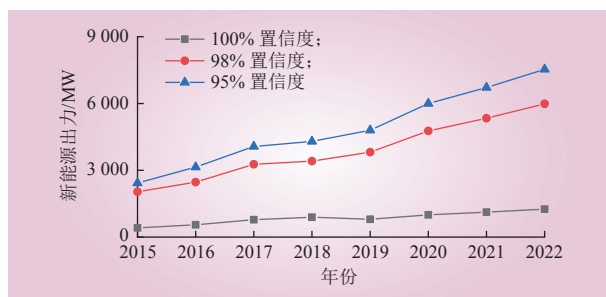


图 3 近年来西北电网新能源保证出力  
Fig. 3 The ensured output of renewable energy in Northwest power grid

## 2 西北电网电力电量平衡特征及挑战

当前西北电网平衡安全可分为 2 种: 一种是新能源高比例消纳及电力可靠供应要求带来的电力平衡风险, 主要由电网负备用、新能源预测偏差及负荷偏差引起; 另一种是转型下电源结构性矛盾带来的电量平衡风险, 主要由极端天气、用电增长、跨区外送容量不足、源荷发展不匹配以及新能源无法提供可信出力引起。

### 2.1 新能源高水平利用及电力可靠供应要求下的电力平衡风险

1) 新能源出力波动性与负荷尖峰化致使电力紧平衡。新能源出力与风光等一次能源及气候条件紧密耦合, 无风无光的气候条件及高温寒潮等极端天气易对系统的新能源发电能力带来冲击,



而难以预测的多风及晴朗天气会进一步挑战系统新能源消纳能力。目前,风光典型出力置信系数为5%~15%及0%~15%<sup>[8]</sup>,叠加极端气候场景影响,西北区内区外同步的局部时段尖峰负荷与新能源出力特性难以匹配,新能源对电力的平衡支持能力不足。

2) 新能源出力不确定性导致电力平衡存在缺口。在时间尺度上,西北电网可基本实现未来4 h内的新能源发电出力可靠预测,但超过4 h的新能源出力预测准确性不足,对火电机组启停计划提出较高要求;在空间上,目前新能源出力预测以省为单位,对于电网关键区域、重要通道近区的新能源出力关注较少,难以为调度运行提供决策依据。

3) 常态化备用模式增加备用不足平衡风险。西北电网采取“全网常规电源备用”的备用留取模式,该模式将新能源预测的95%置信概率出力纳入备用<sup>[9]</sup>。2020年西北电网常规电源备用在500万~1000万kW,为新能源提供增发空间约230亿kW·h,增发效果明显。但该模式下,电力平衡已不由常规电源完全保障,而是取决于新能源出力。该种模式将电网平衡决定权交给了新能源,且备用计划的制定遵循分调度区独立的原则,因此,在应对诸如新能源爬坡、机组大规模脱网等高风险事件时,部分风险区域可能出现由于备用资源不足而造成失负荷的情况。

4) 调峰资源有限制约新能源高质量消纳。目前,电网晚高峰电力缺口持续增大导致弃风弃光风险,日间调峰能力严重不足导致弃风弃光风险。西北地区调峰电源主要为梯级水电及煤电。其中,库容水电受来水、防汛、防凌等多因素影响,全年丰平枯调峰能力差异较大,调节平衡能力有限;而部分煤电机组虽然已实施灵活性改造,深调可降至20%额定功率,但随着西北地区火电装机占比逐步下降,难以全面支撑全网深度调峰。

5) 需求侧灵活性资源不足。需求响应主体多元,但受激励价格、响应模式、技术手段的约束,实施规模偏小。一是现阶段大多以有序用电方式“削峰”,在迎峰度夏、度冬等高峰时段开展有序用电,而难以引导负荷在低谷时段充分“填谷”。二是实时电价机制暂不成熟,现行西

北峰谷时段的划分不准确、调整不及时,缺乏负荷侧高效引导手段。三是需求侧响应基础设施尚未普及,西北电网“虚拟储能”等新型主体调节模式仍尚未大规模应用。

## 2.2 电源结构性矛盾下的电量平衡风险

1) 常规电源“顶峰兜底”保障作用不足。受环保督查、安全生产整治等情况影响,常规火电改造滞后,加上灵活性改造后火电参与调峰调频的边际效益持续下降,火电企业普遍缺乏灵活性改造积极性;此外,为提高利润,对冲煤价高企和低负荷率影响,部分火电转型热电联产模式,一定程度上降低了机组发电能力。

2) 新能源及水电发电量季节性差异大。新能源大发月与小发月的发电量存在波动,在迎峰度冬期间,将叠加防凌期、枯水期、低辐照度、风资源持续偏小等因素,电量供应出现硬缺口的概率极高。

3) 外送通道及配套电源需持续优化。“十四五”时期,预计西北沙戈荒大型风光基地规划建设约1.2亿kW,且有超50%电量外送。现有西北网架结构、站点布局及外送能力较难满足地区风光高速发展需求。需进一步加快跨省跨区通道建设及配套电源投产,全面提升新能源空间配置能力。

4) 省间现货市场机制需进一步完善。西北电网各省(区)间的负荷及新能源出力特性在季节上存在互补性,省间交易需求较大。一是缺乏灵活高频的省间短期现货交易机制,大量省间短期交易难以撮合;二是现货市场与中长期市场衔接机制不清晰,在应对新能源预测偏差、线路故障等场景时,现有现货市场机制难以满足新能源交易及消纳需求。

## 3 西北电网电力电量平衡工作实践

为应对新能源波动性,保障西北区域全网电力电量平衡,西北电网开展了一系列的前期工作探索。

1) 在源侧新能源预测方面,建立预测分级、预警标准和实用化分级响应指标,根据统计新能源可用功率-电量贡献率的特征,结合弃电控制目标、电网备用等因素,开展新能源预测电量分级

预警工作，为电网柔性调度提供依据。

2) 在网侧柔性调度方面，提出将部分新能源可信出力纳入电网备用的运行机制，定量剖析了系统备用率与失负荷风险、提升新能源消纳空间的耦合关系。结合西北电网各省错峰特性，进一步将区域内备用共享机制拓展到跨大区层面，跨区直流可回降量纳入西北备用体系，实现“负备用”容量更大范围和规模的常态化。

3) 在荷侧需求管理方面，在调研分析西北电网各类型负荷特性的基础上，开展了系列峰谷电价优化、提质增效的措施。如 2019 年在青海开展了铁合金行业峰谷电价优化试点工作；2020 年初，西北五省公司制定了利用峰谷电价提升负荷侧调控能力试点推广方案，稳步扩大峰谷电价优化范围和规模，推动西北电网需求侧主动响应的电网运行新模式。

4) 在市场建设方面，一是丰富实时交易品种及类型，针对不同需求提出日前、实时双边交易、主控区置换等多种灵活、高效的日前及实时跨省短期交易品种，通过开展高频密集的实时交易充分调用全网资源，促进新能源消纳。二是提出自备电厂“虚拟储能”模式，挖掘各类手段的调峰能力，进一步完善调峰服务市场规则，以提高传统能源发电机组调峰的主动性与积极性，提

升新能源消纳空间。

5) 在机组检修方面，针对停电工程，借鉴事故分级模式，通过新能源风险辨识、分级及预警，实现网、源两端停电工作统筹、协同，保障新能源消纳最大化。同时，结合新能源发电资源月际间分布规律，避开新能源大发时段，形成基于新能源消纳的停电“窗口期”。

#### 4 面向高比例新能源电网的电力电量平衡关键技术及配套市场机制

电力电量平衡分析本质上是在不同时间尺度下，通过对发用电平衡边界的预测，根据不同平衡场景实际需求，基于规划、运行、市场等各类综合平衡方法，实现对源侧多元机组出力、荷侧柔性负荷、网侧综合互济、储侧灵活调控等各类调节性资源的合理安排，以实现指定场景中可靠、低碳、灵活、经济等多类型目标综合优化。电力电量平衡关键技术如图 4 所示。

##### 4.1 短期电力平衡机制

为应对新能源短期波动性，实现新型电力系统对新能源不确定性的快速响应，以源网荷柔性调度及市场机制配套为着眼点，采用灵活调控手段引导主体主动参与至平衡机制中，保障短时间

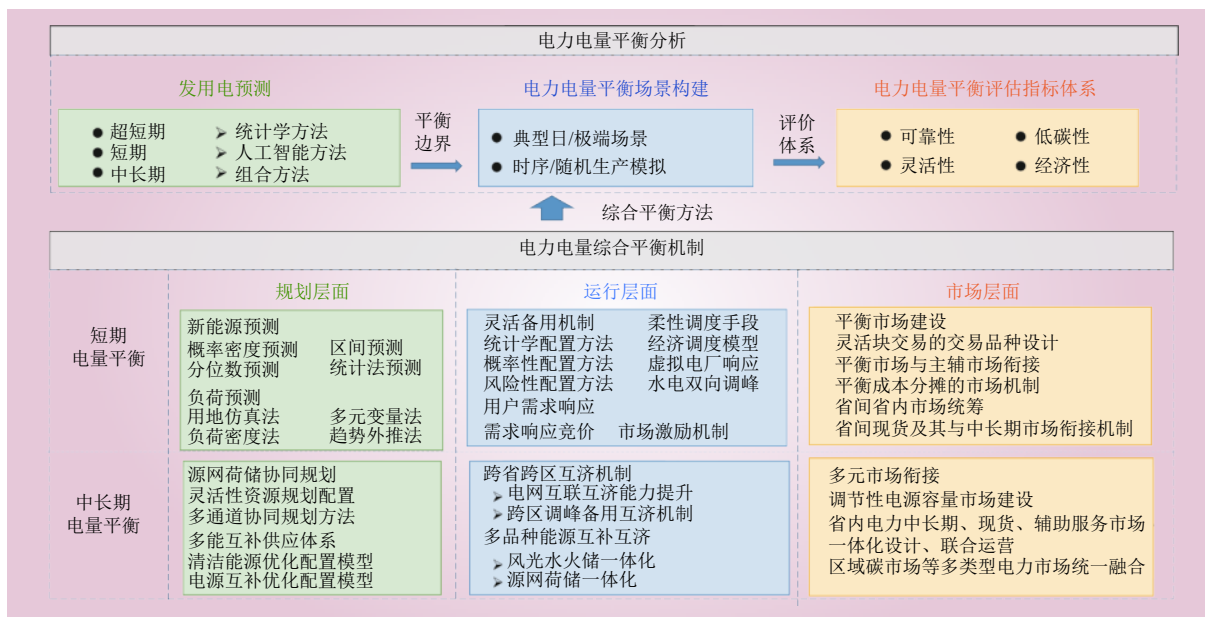


图 4 电力电量平衡关键技术

Fig. 4 Key technologies for power supply-demand balance



尺度下的电力平衡。

#### 4.1.1 区域发用电预测

高比例新能源电力系统预测主体多、时空尺度广、耦合影响因素多维、数据模式复杂。新能源与负荷预测作为指导电力系统运行的基本环节，传统确定性的预测方法预测准确性低、扩展性差、数据处理难度大，不适用于高不确定性下的电力系统供需态势预测。由此，国内外专家学者提出一系列概率预测技术，通过评估预测不确定性的概率分布，实现对预测对象的概率分布信息的量化分析与建模<sup>[10]</sup>。概率预测时间尺度有超短期（秒级）、短期（小时级、天级）、中长期（月度、季度）；主要表现形式包括概率密度预测、分位数预测、区间预测等<sup>[11]</sup>；采用的方法有统计学预测方法、人工智能预测方法、组合预测方法等<sup>[12]</sup>。对于风、光、水及负荷等源荷侧差异化对象，以及不同时间尺度下需求场景，可分别选取不同的输入元素及多类型的预测模型算法提升预测准确度。

#### 4.1.2 柔性调度机制

为保障电力系统中长期/实时电力电量平衡，解决办法之一是基于全网电力电量平衡指标，通过完善电网现有的优化调度机制和管理手段，减少预测偏差带来的不确定性影响。文献<sup>[13]</sup>系统归纳了电力电量平衡指标，指出高比例新能源电力系统不能仅以电力电量平衡充裕度为目标，在规划配置时还需考虑经济性、新能源消纳率、碳排放率等多维目标。文献<sup>[14]</sup>介绍了面向电力电量平衡的剩余容量日利用小时控制法、余荷逐次后移法等模型方法在源侧机组调度的应用。文献<sup>[15-18]</sup>分别基于机会约束、鲁棒优化、多阶段优化、随机规划等建立了考虑新能源预测误差与负荷不确定性下电网电力电量平衡经济调度模型和方法。文献<sup>[19-20]</sup>分别提出了日前、日内、实时等多时间尺度柔性调度机制，结合多类型的柔性响应负荷，对调节性机组进行滚动协调调度，以提升电网电力电量综合平衡能力。

高占比新能源电力系统预测、调度、运行涉及多目标、多因素的协调耦合，现阶段研究多采用不确定集构建、多场景生成等方式描述随机不确定因素，在确保系统电力电量平衡可行下获得经济调度策略。但优化过程决策变量与约束条件

多，存在计算负担重、收敛不稳定、边界等效假设较强等问题。可进一步考虑通过数据驱动方式实现高比例新能源电力系统的可观和可控，利用新型机器学习算法构建替代传统物理建模方法，实现电力系统的自趋优电力电量平衡。

#### 4.1.3 灵活备用机制

间歇性新能源与可响应负荷的广泛接入对灵活备用机制提出了更高要求，备用配置应并行考虑负荷与新能源的波动特性以降低系统失负荷风险。备用机制的不确定性处理方法包括3种。1) 统计学配置方法：基于新能源历史出力数据统计分析，可得到生成新能源出力的概率分布函数，以新能源出力置信区间的下边界（即一定保证出力）为标准，将新能源保证出力纳入备用，如西北电网采取的备用留取模式<sup>[9]</sup>。2) 概率性配置方法：统筹考虑供需不确定性，通过设定电力系统供电可靠性置信区间并在该置信区间范围内滚动优化备用方案，如文献<sup>[21]</sup>建立考虑电网检修、预测误差等约束在内的基于机会约束规划的备用优化方法；文献<sup>[22]</sup>提出了基于新能源发电偏差优化的备用容量在线滚动决策模型以保障供电可靠性。3) 风险性配置方法：基于风险指标实现自适应确定电力系统备用裕度的配置，如文献<sup>[23]</sup>以系统风险最小为目标建立旋转备用优化配置模型，保障新能源电力系统电力供给充裕度；文献<sup>[24]</sup>考虑风电备用风险，提出了融合经济、环保、风险多指标的期望值与最优值的电力系统多目标优化调度模型。

现阶段研究多采用不确定集构建、多场景生成等方式描述随机不确定因素。在高比例新能源系统中，源荷双边剧烈波动将致使系统对灵活性调节资源的需求大幅增加，在高可控常规电源被新能源替代、系统灵活电源比例日趋降低的发展形势下，单纯靠常规机组的备用电源保障系统电力电量平衡的模式成本昂贵且不可行，须进一步挖掘源网荷各个环节的灵活性调节潜力参与电网电力电量平衡。

#### 4.1.4 用户侧需求响应

在用户侧，以储能、电动汽车、电供暖、建筑电气化为代表的新型多元化柔性负荷的出现，为电力系统提供了更大的灵活性，可应对电力系统实时功率不平衡问题。灵活的市场体系建设及



有效的激励机制对于将用户侧响应潜力纳入电网调控范围内具有重要意义。

1) 市场竞价: 通过设置合理的用户侧交易品种, 促使用户将其可调节资源作为一种中长期/短期灵活交易产品主动参与市场竞争是现阶段用户侧响应项目的研究热点。面向市场竞价的用户侧响应项目包括需求侧竞价、容量市场项目和辅助服务项目等。用户可基于其灵活可调节电力参与辅助服务市场竞价<sup>[25]</sup>、主辅市场联合出清<sup>[26]</sup>等; 或基于其全部电力需求在集中市场提供需求侧竞价曲线<sup>[27]</sup>等。文献<sup>[28]</sup>构建了基于电力库的需求响应资源交易模型并实现“多买方”“多卖方”出清。2) 市场激励: 合理的激励机制也可引导用户侧响应资源高效响应。面向市场激励的用户侧响应项目包括直接负荷控制、可中断负荷、紧急需求响应等, 理论研究主要集中在基于用户侧响应偏好模型, 利用息票策略<sup>[29]</sup>、博弈论<sup>[30]</sup>等数学建模方法实现用户侧激励模式的优选, 从而引导用户侧自适应调节用电行为, 达到系统最大化消纳新能源、实现电力电量平衡等目的。

#### 4.1.5 电力平衡市场建设

平衡市场作为维持电力供需平衡的关键一环, 是现货市场的重要组成部分。国外典型电力市场引入市场化的平衡机制, 由调度机构调用平衡辅助服务、调节机组出力等方式, 实现系统电力平衡。文献<sup>[6]</sup>深入分析成熟的电力市场如北欧、英国和美国 PJM 平衡市场的设计, 在平衡资源获取、责任划分和平衡考核结算等方面总结了平衡市场的基本运行框架; 文献<sup>[31]</sup>指出平衡市场有助于为主辅市场提供实时价格发现信号, 为不平衡电量结算和系统平衡成本结算分摊提供依据。

传统的平衡辅助服务是面向负荷预测误差、线路故障、机组非计划停运等概率性事件下的电网平衡问题, 无法有效响应高比例新能源电网快速变化的净负荷<sup>[32]</sup>。为解决大规模新能源并网下的灵活调节资源短缺问题, 部分国家通过丰富市场化的短期灵活性交易品种, 引导电网电力电量供需灵活性资源的高效精准匹配。在北欧成熟的日前现货市场中, 设计了灵活块交易的交易品种, 包括小时交易、块交易、链交易等, 市场主体可根据实时能源特性在北欧集中式的平衡市场平台竞价投标<sup>[33]</sup>。在美国部分区域电力市场, 配

置了灵活调节服务交易品种 (flexible ramping products, FRP), 对市场主体提供与机会成本匹配的经济激励以保障系统实时平衡<sup>[34-36]</sup>。

中国正处于辅助服务市场和主能量市场解耦运行、中长期市场与现货市场逐步衔接的阶段。目前主能量市场仍按电量交易和偏差考核结算, 系统以集中式计划调度为主, 缺乏实时电力平衡的激励机制及平衡成本分摊的市场机制。需进一步探索竞争性的平衡服务设计, 实现平衡服务市场与现货市场、市场运营与集中调度的有效衔接; 通过建立多时间尺度、多品种平衡资源市场化交易机制, 明确平衡服务的真实价值, 引导多元主体参与电力系统供需平衡调节及灵活性服务。

#### 4.2 中长期电量平衡机制

新型电力系统建设下, 源网荷储规划呈现出互动性、不确定性、多目标性、多阶段性、多主体性等新特征, 从源网规划层面结合源网荷储运行特性保障电网中长期电力电量平衡、促进新能源健康发展亟待进一步深化研究。

##### 4.2.1 源网荷储协同规划

新形势下的源网规划需要对电力系统不同时空尺度下的电力电量平衡态势及灵活性需求进行预测和分析, 以满足负荷增长需求为导向, 统筹考虑互动性、可靠性、经济性、环境效益等多目标, 为电力系统的规划及运行提供边界条件及规划方案<sup>[37]</sup>。其中, 由于新能源出力及负荷多时空耦合具有较大的不确定性, 需要进一步研究多目标下考虑不确定性的源网荷储协同规划方法。国内外专家学者基于概率建模、模糊建模、区间建模、多场景分析、机会约束和鲁棒优化等理论方法处理规划环节不确定性<sup>[38]</sup>; 基于加权系数法、 $\epsilon$ -约束法、法线边界交叉法、博弈论、Pareto 理论处理等方法解决多目标问题<sup>[39]</sup>。总的来讲, 国内外研究侧重于基于不同的模型及算法为规划者提供不同灵活尺度下的规划方案, 从而使规划方案足以应对源荷侧长短期多重不确定性, 保障系统电力电量平衡。

此外, 现阶段面向源网荷协同规划多通过时序概率仿真、随机生产模拟技术及运行模拟技术等方法实现规划方案的评估校验。而高比例新能源电网净负荷呈现出季节敏感性高、日波动性强, 不同规划目标下对运行时间尺度颗粒度诉求



不一致，且规划方案的种类繁多、参数各异，从数学上应属于高维非线性优化问题，计算求解难度较大。这也给“源网荷储”协同规划下的电力电量平衡带来了新的风险。现阶段缺乏适用于高比例可再生能源的源网荷储协同规划的系统模型，及其配套的时序仿真技术、模拟规划流程及实践应用基础。

#### 4.2.2 多能互补供应体系电源结构

从国内外新能源电力消纳的情况来看，电源结构中需要增加与新能源装机容量相应的60%以上的灵活性调节电源<sup>[40]</sup>，但截至2021年底，中国含燃气机组、抽水蓄能、日调节水电机组在内的灵活性调节电源装机仅占总电源装机的18.5%。仅依靠传统常规机组灵活性提升难以匹配新能源快速增长下的灵活性需求。广义的灵活性调节电源还包括风光水储耦合互补系统、用户侧综合能源供应、网源侧规模化储能等技术<sup>[41]</sup>。

在高比例新能源电力系统中，系统净负荷曲线将随着新能源出力的波动而产生较大波动，在进行电源规划时，若忽略或者过于简化新能源出力的高随机性，极易增加由于电源结构性不合理而导致的电网电力电量平衡风险。如何在电源规划中全面评估电力系统广泛的灵活调节资源并作为优化决策变量纳入规划模型中，成为电源结构优化发展的重点问题。文献<sup>[42]</sup>指出在电源投资决策模型中灵活性充裕度配置不足易导致系统错误评估电网的新能源接纳能力；文献<sup>[43]</sup>提出了适应中长期的低成本高灵活性的电源规划模型；文献<sup>[44]</sup>建立评估发电系统灵活性指标，提出了基于帕累托最优的面向灵活性与经济性均衡的电源规划模型；文献<sup>[45]</sup>通过对机组灵活性评价分级，实现新能源消纳与电力电量平衡目标下的电源扩展规划决策。

面对国内能源转型和碳减排要求，需要构建多元协同的新型供应体系，打造“强平衡”型电网，实现结构、规模及空间布局的综合优化。合理的电源规划方案有助于从电源结构优化角度提高新能源的消纳能力、保障足够灵活性充裕度，实现电网电力电量实时平衡，满足电网迎峰度夏以及迎峰度冬期间的电力电量供应需求。

#### 4.2.3 多品种能源互补互济

“风光水火储一体化”“源网荷储一体化”

协同发展是高比例新能源电网的发展趋势<sup>[46]</sup>。

1) 在不同时间尺度与空间尺度上，风、光、水等不同可再生能源种类出力具有一定的互补特性及区域平滑效应，其波动性随空间范围的扩大而减小<sup>[4]</sup>。2) 在耦合互补性能上，新能源与水电、储能、火电等可调节设备构成互补系统联合优化<sup>[47]</sup>，可发挥不同能源品种的优势与潜力。具体而言，在调节速率上，光伏调节速率最快，其次是风电，而火电的调节速率相对最慢；在调节深度方面，常规机组可调节能力强而成本相对高，而新能源机组调节成本低但处于优先发电位置，调节能力相对较弱。多品种能源协调运行耦合互补互济，有利于扩大电力供需资源的优化配置规模，降低电网在大范围内的平衡压力。

#### 4.2.4 大电网调峰备用综合互济

互联电网在整合多区域调峰备用资源及优化配置方面的优势逐步凸显，跨区调峰备用综合互济作为解决系统低谷调峰困难、提升电网调度灵活性、保障大电网电力电量平衡的有效途径，引起了广泛关注。

多区域调峰备用调度机制的建设需统筹考虑区域电网新能源出力及负荷特性、多区域调峰备用资源的供需差异性、多区域效益分配机制及区域间互联线路约束等多维度问题。文献<sup>[48]</sup>依据区域备用资源供需特性，以全网备用容量最小为目标建立全网备用配置模型，以提升区域互联系统运行经济性。但降低全网备用容量易忽略小概率的风险事件，源荷出力随机特性会进一步增加全网面向电力电量平衡的风险控制成本。部分专家学者通过将系统电力电量平衡风险指标纳入互联电网调峰备用配置模型中，建立考虑不确定性下的调峰备用跨区优化调度模型。如文献<sup>[49]</sup>量化失负荷概率和弃风概率与多区域电网运行备用间的耦合关系；文献<sup>[50]</sup>基于电力电量不足概率期望值指标约束，提出了多区域概率性备用获取模型，以指导考虑跨区备用供需匹配下的机组组合安排；文献<sup>[51]</sup>提出了面向典型场景下的多区域风险预控模型及备用机制。此外，进一步打破区域省间调峰备用交易壁垒，利用市场化手段及效益分配机制实现省间和区域间主动备用互济，有利于降低有序用电与新能源弃电风险概率，提升大电网多区域灵活性资源优化配置能力。





#### 4.2.5 多元市场统一衔接

市场作为新能源高效消纳的“指挥棒”，实现碳市场、辅助服务市场、现货市场及中长期市场等多元省间省内统一融合，以市场价格引导新能源及源荷侧灵活性资源协调发展。一是可开展新能源与火电、水电、自备电厂的发电权及碳交易市场<sup>[52]</sup>，或基于一定的效益分配机制引导多能源耦合系统联合参与主辅多级市场<sup>[53]</sup>，形成新能源积极提供稳定电量、常规能源深度配合平滑电力服务的格局。二是可加快调节性资源容量市场建设，一方面，灵活性资源投资的部分成本可通过容量市场回收，解决企业投资回报率较低的问题；另一方面，可为新能源规模发展拓宽市场化消纳空间。三是分阶段逐步推进电力市场、碳市场、绿证市场等建设，剖析电力潮流与碳流、电价与碳价的时空耦合关系，如文献<sup>[54]</sup>提出了基于碳排约束下计及碳交易和绿证交易的市场集中出清模型；文献<sup>[55]</sup>分析了碳交易对电力市场出清均衡的影响。

## 5 西北电网电力电量平衡应对措施

### 5.1 短期电力平衡问题应对措施

针对新能源高水平利用率及尖峰负荷保供要求带来的平衡问题，建议从调度管理及市场机制建设方面进行提升。

1) 提升新能源与负荷多时空尺度的预测精度，为提升电网柔性调控水平提供更好支撑。持续优化提升新能源预测考核标准，进一步拓展预测的空间尺度，提高电网关键区域、重要通道近区的新能源出力的关注度。细化负荷预测颗粒度，从日前预测分解到日内分时预测，研究气候、节假日等关键环境因素对负荷预测的耦合影响机理。

2) 建立“水电协同”运行模式和黄河全流域水库水量调度模式。以水量调度计划、水库安全水位等条件为约束，以水资源利用最大化为目标，综合电网安全、新能源消纳等需求，进一步提升干支流联合优化调度水平，充分发挥水电厂调节能力，促进黄河流域资源利用和高质量发展。

3) 推动储能、抽水蓄能、光热发电等灵活性调节电源入网。完善储能、抽水蓄能参与电网调

节的市场化补偿机制及市场建设方案；探索对光热发电、配有合理比例储能的新能源发电给予一定价格激励的政策可行性，利用价格引导推动储能、抽水蓄能、光热发电等新兴产业发展，改善电力系统灵活性调节性能。

4) 加快省间现货市场及省内辅助服务市场建设进程。一是完善以中长期交易为主、现货交易为补充的省间交易体系，扩大新能源跨省交易与省间互补余济规模。二是探索省级现货市场逐步引入用户侧的可行性，推动市场由单边到双边的转变，将电力供应形势传导至用户，有序扩大市场主体和资源优化配置的范围。三是统筹中长期、现货与应急调度多层级交易框架，推进调峰、备用、顶峰多类型辅助服务品种，为新能源更大范围消纳提供市场基础。

5) 完善电力需求侧响应机制。分阶段、分重点建立用户需求侧响应项目，引入电动汽车、智慧楼宇等新兴负荷，基于需求侧灵活响应资源的时间、地点、响应效果与类型价值制定适应的需求侧响应价格机制，进一步扩大可参与电网调节的用户规模，在电力供应紧张时期挖掘调用可中断负荷，引导节约、有序、合理用电。

### 5.2 中长期电量平衡问题应对措施

针对中长期源网结构矛盾带来的平衡问题，建议以源网资源优化配置展开。

1) 开展煤炭价格指导。建议政府部门联合大型煤企、发电集团共同建立煤炭、电力的链条式能源经营管理机制，结合不同时期的需求提出适度的煤炭指导价格或价格限值，营造良好的火力发电的上下游生态环境。

2) 开展兼顾“保安全”和“调结构”双目标的水火电新增规模和布局研究。落实“科学发挥煤电对高峰用电的支撑作用，切实保障能源安全”要求，结合“十四五”期间新能源年度装机规划，统筹考虑电力保供安全和新能源发展目标，开展常规电源发展的适应性研究。根据电网安全约束和调峰电源支撑的需求，建议政府相关部门采用机组“延寿”及缓建火电分批建设投产等方式提升电力供应保障能力。

3) 强化跨区备用互济机制，打造“全国一盘棋”。加大跨区平衡统筹力度。将电网平衡的范围逐渐由“西北统筹”常态化转变为“全国统



筹”，结合省间市场及跨区辅助服务市场的进度，建立跨区直流柔性调整机制，实现更大范围内的资源优化配置。

预计在未来电网运行中，西北电网新能源高比例消纳及电力可靠供应引起的短期电力平衡风险依然存在，但其风险概率将随着调度管理技术的发展及市场建设的优化变得相对可控。针对能源转型下电源结构矛盾引起的中长期电量风险，极有可能由过去部分时段的小概率事件转变为大部分时段均有可能出现的大概率事件，亟须引起充分重视，引导优化电源结构与布局，保障全网电力电量平衡及新能源的健康发展。

### 参考文献：

- [1] 康重庆, 姚良忠. 高比例可再生能源电力系统的关键科学问题与理论框架[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 2-11.  
KANG Chongqing, YAO Liangzhong. Key scientific issues and theoretical research framework for power systems with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 2-11.
- [2] 吴应双, 冯祥勇, 王寅, 等. 一种考虑新能源电站出力不确定性的采样鲁棒无功优化方法[J]. 电力科学与技术学报, 2023, 38(2): 84-95.  
WU Yingshuang, FENG Xiangyong, WANG Yin, et al. A sample robust reactive power optimization approach considering the power output uncertainty of renewable energy stations[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2023, 38(2): 84-95.
- [3] 杨金海, 武家辉, 王海云, 等. 不同渗透率下多种新能源电力系统动态安全域分析[J]. 电力建设, 2022, 43(4): 58-68.  
YANG Jinhai, WU Jiahui, WANG Haiyun, et al. Dynamic security region analysis of power system under different penetration rate of new energy[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(4): 58-68.
- [4] 李明节, 陈国平, 董存, 等. 新能源电力系统电力电量平衡问题研究[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3979-3986.  
LI Mingjie, CHEN Guoping, DONG Cun, et al. Research on power balance of high proportion renewable energy system[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3979-3986.
- [5] 孙晓强, 张小奇, 张光儒, 等. 考虑跨区直流调峰的新能源参与电力平衡可信容量提升方法研究[J]. 电网技术, 2023, 47(3): 878-886.  
SUN Xiaoqiang, ZHANG Xiaoqi, ZHANG Guangru, et al. Credible capacity improvement with new energy participating in power balance considering cross-regional DC peak shaving[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 878-886.
- [6] 贺宜恒, 周明, 武昭原, 等. 国外典型电力平衡市场的运作模式及其对中国的启示[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3520-3528.  
HE Yiheng, ZHOU Ming, WU Zhaoyuan, et al. Study on operation mechanism of foreign representative balancing markets and its enlightenment for China[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3520-3528.
- [7] 张振宇, 孙晓强, 万筱钟, 等. 基于统计学特征的新能源纳入西北电网备用研究[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2047-2054.  
ZHANG Zhenyu, SUN Xiaoqiang, WAN Xiaozhong, et al. Research on reserve of northwest power grid considering renewable energy based on statistical characteristics[J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2047-2054.
- [8] 文云峰, 杨游航, 邢鹏翔, 等. 多维因素制约下新能源消纳能力评估方法研究综述[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-25[2023-06-05]. DOI: 10.13334/j.0258-8013.pcsee.223390.  
WEN Yunfeng, YANG Youhang, XING Pengxiang, et al. Review on the new energy accommodation capability evaluation methods considering multi-dimensional factors[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-25[2023-06-05]. DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.223390.
- [9] 张振宇, 王文倬, 马晓伟, 等. 基于风险控制的新能源纳入电力系统备用方法[J]. 电网技术, 2020, 44(9): 3375-3382.  
ZHANG Zhenyu, WANG Wenzhuo, MA Xiaowei, et al. Reserve of power system considering renewable energy based on risk control[J]. Power System Technology, 2020, 44(9): 3375-3382.
- [10] 万灿, 宋永华. 新能源电力系统概率预测理论与方法及其应用[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(1): 2-16.  
WAN Can, SONG Yonghua. Theories, methodologies and applications of probabilistic forecasting for power systems with renewable energy sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(1): 2-16.
- [11] WAN C, WANG J H, LIN J, et al. Nonparametric prediction intervals of wind power via linear programming[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 1074-1076.
- [12] KHORRAMDEL B, CHUNG C Y, SAFARI N, et al. A fuzzy adaptive probabilistic wind power prediction framework using diffusion kernel density estimators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 7109-7121.
- [13] 蒲天骄, 陈乃仕, 葛贤军, 等. 电力电量平衡评价指标体系及其综合评价方法研究[J]. 电网技术, 2015, 39(1): 250-256.  
PU Tianjiao, CHEN Naishi, GE Xianjun, et al. Research on



- evaluation index system and synthetical evaluation method for balance of electric power and energy[J]. *Power System Technology*, 2015, 39(1): 250–256.
- [14] 刘明浩, 王丽萍, 王渤权, 等. 基于出力不均匀性的火电站电力电量平衡方法 [J]. *电力自动化设备*, 2017, 37(11): 162–168.
- LIU Minghao, WANG Liping, WANG Boquan, *et al.* Power and energy balance method of thermal power station based on uneven output[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2017, 37(11): 162–168.
- [15] 夏澍, 葛晓琳, 季海华, 等. 基于机会约束规划的电力电量平衡分析 [J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(18): 102–107.
- XIA Shu, GE Xiaolin, JI Haihua, *et al.* Power supply-demand balancing analysis based on chance-constrained programming[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(18): 102–107.
- [16] 于丹文, 杨明, 翟鹤峰, 等. 鲁棒优化在电力系统调度决策中的应用研究综述 [J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(7): 134–143, 148.
- YU Danwen, YANG Ming, ZHAI Hefeng, *et al.* An overview of robust optimization used for power system dispatch and decision-making[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(7): 134–143, 148.
- [17] WANG J H, SHAHIDEHPOUR M, LI Z Y. Security-constrained unit commitment with volatile wind power generation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2008, 23(3): 1319–1327.
- [18] YANG L, HE M, VITTAL V, *et al.* Stochastic optimization-based economic dispatch and interruptible load management with increased wind penetration[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2016, 7(2): 730–739.
- [19] 杨胜春, 刘建涛, 姚建国, 等. 多时间尺度协调的柔性负荷互动响应调度模型与策略 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(22): 3664–3673.
- YANG Shengchun, LIU Jiantao, YAO Jianguo, *et al.* Model and strategy for multi-time scale coordinated flexible load interactive scheduling[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(22): 3664–3673.
- [20] 包宇庆, 王蓓蓓, 李扬, 等. 考虑大规模风电接入并计及多时间尺度需求响应资源协调优化的滚动调度模型 [J]. *中国电机工程学报*, 2016, 36(17): 4589–4600.
- BAO Yuqing, WANG Beibei, LI Yang, *et al.* Rolling dispatch model considering wind penetration and multi-scale demand response resources[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(17): 4589–4600.
- [21] WU H, SHAHIDEHPOUR M, LI Z, *et al.* Chance-constrained day-ahead scheduling in stochastic power system operation[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(4): 1583–1591.
- [22] 杨娜娜, 张建成, 顾志东. 消纳大规模风电的备用容量在线滚动决策与模型 [J]. *现代电力*, 2015, 32(1): 52–58.
- YANG Nana, ZHANG Jiancheng, GU Zhidong. An online rolling dispatch method and model of spinning reserve for accommodating large-scale wind power[J]. *Modern Electric Power*, 2015, 32(1): 52–58.
- [23] 吴俊, 薛禹胜, 舒印彪, 等. 大规模可再生能源接入下的电力系统充裕性优化 (二) 多等级备用的协调优化 [J]. *电力系统自动化*, 2019, 43(10): 19–26.
- WU Jun, XUE Yusheng, SHU Yinbiao, *et al.* Adequacy optimization for a large-scale renewable energy integrated power system part two collaborative optimization of multi-grade reserve[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2019, 43(10): 19–26.
- [24] 姚瑶, 于继来. 计及风电备用风险的电力系统多目标混合优化调度 [J]. *电力系统自动化*, 2011, 35(22): 118–124.
- YAO Yao, YU Jilai. Multi-objective hybrid optimal dispatch of power systems considering reserve risk due to wind power[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2011, 35(22): 118–124.
- [25] PHILPOTT A, PETERSEN E. Optimizing demand-side bids in day-ahead electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2006, 21(2): 488–498.
- [26] WANG J, REDONDO N E, GALIANA F D. Demand-side reserve offers in joint energy/reserve electricity markets[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2003, 18(4): 1300–1306.
- [27] NGUYEN D T, NEGNEVITSKY M, GROOT de M. Pool-based demand response exchange-concept and modeling[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2011, 26(3): 1677–1685.
- [28] NGUYEN D T, NEGNEVITSKY M, DE GROOT M. Walrasian market clearing for demand response exchange[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2012, 27(1): 535–544.
- [29] ZHONG H, XIE L, XIA Q. Coupon incentive-based demand response: theory and case study[J]. *IEEE Transactions on Power System*, 2013, 28(2): 1266–1276.
- [30] MOHSENIAN-RAD A H, WONG V W S, JATSKEVICH J, *et al.* Autonomous demand-side management based on game-theoretic energy consumption scheduling for the future smart grid[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2010, 1(3): 320–331.
- [31] Elexon. A guide to electricity imbalance pricing in Great Britain [EB/OL]. [2018-05-04] [2022-06-14]. <https://bscdocs.elexon.co.uk/guidance-notes/imbalance-pricing-guidance>.
- [32] 肖定堃, 王承民, 曾平良, 等. 电力系统灵活性及其评价综述 [J]. *电网技术*, 2014, 38(6): 1569–1576.
- XIAO Dingyao, WANG Chengmin, ZENG Pingliang, *et al.* A survey



- on power system flexibility and its evaluations[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(6): 1569–1576.
- [33] 张馨瑜, 陈启鑫, 葛睿, 等. 考虑灵活块交易的电力现货市场出清模型[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(24): 35–41.  
ZHANG Xinyu, CHEN Qixin, GE Rui, *et al.* Clearing model of electricity spot market considering flexible block orders[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(24): 35–41.
- [34] SREENU S, SUMANTH Y, KAILASH C S, *et al.* Flexible ramp products: a solution to enhance power system flexibility[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2022, 162: 112429.
- [35] MISO. Ramp Product Enhancements [EB/OL]. [2022-12-1][2023-06-11]. <https://cdn.misoenergy.org/20221201%20MSC%20Item%2006%20Ramp%20Product%20Enhancements627169.pdf>.
- [36] 程浩忠, 李隽, 吴耀武, 等. 考虑高比例可再生能源的交直流输电电网规划挑战与展望[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(9): 19–27.  
CHENG Haozhong, LI Jun, WU Yaowu, *et al.* Challenges and prospects for AC/DC transmission expansion planning considering high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(9): 19–27.
- [37] 鲁宗相, 李海波, 乔颖. 含高比例可再生能源电力系统灵活性规划及挑战[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(13): 147–158.  
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Power system flexibility planning and challenges considering high proportion of renewable energy[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(13): 147–158.
- [38] 杨修宇, 穆钢, 柴国峰, 等. 考虑灵活性供需平衡的源-储-网一体化规划方法[J]. *电网技术*, 2020, 44(9): 3238–3246.  
YANG Xiuyu, MU Gang, CHAI Guofeng, *et al.* Source-storage-grid integrated planning considering flexible supply-demand balance[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(9): 3238–3246.
- [39] 赵东元, 胡楠, 傅靖, 等. 提升新能源电力系统灵活性的中国实践及发展路径研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(24): 1–8.  
ZHAO Dongyuan, HU Nan, FU Jing, *et al.* Research on the practice and road map of enhancing the flexibility of a new generation power system in China[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(24): 1–8.
- [40] 徐唐海, 鲁宗相, 乔颖, 等. 源荷储多类型灵活性资源协调的高比例可再生能源电源规划[J]. *全球能源互联网*, 2019, 2(1): 27–34.  
XU Tanghai, LU Zongxiang, QIAO Ying, *et al.* High penetration of renewable energy power planning considering coordination of source-load-storage multi-type flexible resources[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2019, 2(1): 27–34.
- [41] HOLTINEN H, TUOHY A, MILLIGAN M, *et al.* The flexibility workout: managing variable resources and assessing the need for power system modification[J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2013, 11(6): 53–62.
- [42] MEJÍA-GIRALDO D, MCCALLEY J D. Maximizing future flexibility in electric generation portfolios[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2014, 29(1): 279–288.
- [43] MARTÍNEZ CESEÑA E A, CAPUDER T, MANCARELLA P. Flexible distributed multienergy generation system expansion planning under uncertainty[J]. *IEEE Transaction on Smart Grid*, 2015, 7(1): 1–10.
- [44] MA J, SILVA V, BELHOMME R, *et al.* Evaluating and planning flexibility in sustainable power systems[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2013, 4(1): 200–209.
- [45] 关于开展“风光水火储一体化”“源网荷储一体化”的指导意见(征求意见稿)[J]. *大众用电*, 2020, 35(9): 6–8.
- [46] 王青, 杨悦, 汪宁渤, 等. 风电与火电“打捆”外送系统频率调控策略研究[J]. *中国电力*, 2014, 47(3): 6–13.  
WANG Qing, YANG Yue, WANG Ningbo, *et al.* Study on the frequency adjustment characteristics of wind power uniting thermal power outgoing system[J]. *Electric Power*, 2014, 47(3): 6–13.
- [47] 吴杰康, 史美娟, 陈国通, 等. 区域电力系统最优备用容量模型与算法[J]. *中国电机工程学报*, 2009, 29(1): 14–20.  
WU Jiekang, SHI Meijuan, CHEN Guotong, *et al.* Immune genetic algorithms for modeling optimal reserve capacity of interconnected regional power systems[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2009, 29(1): 14–20.
- [48] 王木. 含风电场的互联电力系统跨区备用优化决策研究[D]. 北京: 华北电力大学(北京), 2016.  
WANG Mu. Research on reserve optimization dispatch method for multi-area interconnected power system with wind power integration [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [49] AHMADI-KHATIR A, BOZORG M, CHERKAOUI R. Probabilistic spinning reserve provision model in multi-control zone power system[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 2819–2829.
- [50] 曹宇峰, 陈启鑫, 夏清, 等. 基于风险预控的多区域电力网络能量-备用联合优化[J]. *电网技术*, 2014, 38(8): 2155–2160.  
CAO Yufeng, CHEN Qixin, XIA Qing, *et al.* Energy-reserve co-optimization in multi-area power systems towards risk precaution target[J]. *Power System Technology*, 2014, 38(8): 2155–2160.
- [51] 裴哲义, 王彩霞, 和青, 等. 对中国新能源消纳问题的分析与建



- 议 [J]. 中国电力, 2016, 49(11): 1-7.
- PEI Zheyi, WANG Caixia, HE Qing, *et al.* Analysis and suggestions on renewable energy integration problems in China[J]. *Electric Power*, 2016, 49(11): 1-7.
- [52] 郝供晗, 裘智峰, 曹胡辉, 等. 基于多级市场驱动的风电协同消纳策略 [J]. 电网技术, 2020, 44(7): 2590-2600.
- HAO Qihan, QIU Zhifeng, CAO Huhui, *et al.* Multi-level market-driven coordination strategy for wind power accommodation[J]. *Power System Technology*, 2020, 44(7): 2590-2600.
- [53] 叶晨, 牟玉亭, 王蓓蓓, 等. 考虑动态碳交易曲线的电-碳市场出清模型及节点边际电价构成机理分析 [J]. 电网技术, 2023, 47(2): 613-624.
- YE Chen, MOU Yuting, WANG Beibei, *et al.* Mechanism of locational marginal prices and clearing model of electricity and carbon market considering dynamic carbon trading curve[J]. *Power System Technology*, 2023, 47(2): 613-624.
- [54] 李吉峰, 邹楠, 李卫东, 等. 计及需求灵活性的地区绿色证书、碳排放权及电力联合交易分析 [J/OL]. 电网技术: 1-11[2023-06-21]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2484.
- LI Jifeng, ZOU Nan, LI Weidong, *et al.* Analysis of local green power certificate, carbon emission and electricity joint trading considering demand flexibility[J/OL]. *Power System Technology*: 1-11[2023-06-21]. DOI:10.13335/j.1000-3673.pst.2022.2484.
- [55] 王子恒, 鲍海, 张峰, 等. 考虑碳交易收益和网损成本的发电权交易优化模型 [J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 23-29.
- WANG Ziheng, BAO Hai, ZHANG Feng, *et al.* Optimization model of power generation right trading considering carbon trading income and network loss cost[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2023, 43(5): 23-29.

#### 作者简介:

任景 (1982—), 女, 硕士, 高级工程师, 从事调度计划和新能源管理工作, E-mail: renj@nw.sgcc.com.cn;

刘友波 (1983—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 从事电力市场、电力供需研究, E-mail: liuyoubo@scu.edu.cn.

(责任编辑 李博)

## A Balance Method for Power Supply-Demand Adapting to High Uncertainties of Renewable Energy in Northwest Power Grid

REN Jing<sup>1</sup>, GAO Min<sup>1</sup>, CHENG Song<sup>1</sup>, ZHANG Xiaodong<sup>1</sup>, LIU Youbo<sup>2</sup>

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China; 2. Department of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** Due to the high uncertainties of renewable energy, the power supply-demand balance state shows new features in Northwest power grid. The power grid faces big challenges in both renewable energy accommodation in low load period and reliable power supply in peak load period. This paper firstly evaluates the characteristics of power supply-demand imbalance risks in Northwest China, according to the actual operation data and historical statistical data. Then, the key technologies and supporting market mechanisms for regional power supply-demand balance in China and abroad are reviewed. Based on the development trend of grid-source-load in Northwest China, some measures and suggestions are proposed for power supply-demand balance in Northwest power grid to guarantee the reliable supply of electric power and efficient accommodation of renewable energy.

This work is supported by Science and Technology Project of Northwest Branch of State Grid Corporation of China (Research on Key Technologies of Power Balance Strategy to Deal with Uncertainties of Primary Energy Supply No.SGNW0000DKJS2310082).

**Keywords:** renewable energy accommodation; power supply-demand balance; power system with high proportion of renewable energy; electricity market