

面向保供电能力提升的源荷储两阶段备用规划方法

韦 斌, 邝 凡, 高 超, 蓝晓东
(广东电网有限责任公司, 广州 510080)

摘要:随着新型电力系统源荷不确定性日益上升,面向短周期应急保供电需求的备用资源规划方案可能在长周期电力系统运行场景下存在冗余,造成了电网规划资源的浪费,因此考虑长短周期的源荷储两阶段备用资源规划方法是兼顾电力系统保供能力和运行经济性的重要手段。首先,分析引发备用资源规划冗余的关键不确定性因素,包括新能源、负荷与线路故障的不确定性,构建基于机会约束的源荷储两阶段备用规划模型。然后,基于两阶段规划问题的解耦特性,提出了两阶段备用规划模型的单阶段近似求解方法,通过内嵌保供能力约束,实现了源荷储备用规划模型的高效求解。最后,采用改进的IEEE-30节点测试系统验证所提方法的有效性。算例结果表明,所提源荷储两阶段备用资源规划方法在不显著增加计算时间的情况下,可使系统平均功率缺额降低约54.7%,备用规划成本降低约26.7%,新能源弃电率降低约60.4%。因此,所提方法能够有效提升系统保供能力,改善新能源消纳效率,促进电力系统安全经济运行。

关键词:备用规划;保供能力;新能源消纳;源荷不确定性;机会约束;两阶段规划

Two-stage backup planning method for enhancing power supply reliability based on source-load-storage coordination

WEI Bin, KUANG Fan, GAO Chao, LAN Xiaodong
(Guangdong Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: With the increasing uncertainty of source-load in the new power system, the allocation of reserve resources designed for short-term emergency power supply may be over-configured in long-term power system operation scenarios, resulting in a waste of grid planning resources, so proposing a two-stage reserve resource planning method that considers both long-term and short-term cycles is an important means to balance the supply security and operational economy of the power system. First, the key uncertainty factors that lead to redundant reserve resource planning are analyzed, including the uncertainties of new energy sources, loads, and line failures. A two-stage reserve planning model based on chance constraints for source-load-storage is then constructed. Subsequently, based on the decoupling characteristics of the two-stage planning problem, a single-stage solution method for the two-stage reserve resource planning model is proposed. The power supply guarantee constraint is embodied to further achieve the effective solution of the source-load-storage backup planning model. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified in the modified IEEE-30 bus test system. The case study results show that, without significantly increasing the computation time, the proposed two-stage reserve resource planning method for source-load-storage can reduce the average power shortage by about 54.7%, lower the reserve planning cost by about 26.7%, and decrease the new energy curtailment rate by about 60.4%. Therefore, the proposed method can effectively enhance the system's power supply capability, improve the efficiency of new energy consumption, and promote the safe and economic operation of the power system.

Key words: reserve planning; power supply reliability; new energy consumption; source-load uncertainty; chance constraints; two-stage planning

0 引言

随着新能源大规模并网成为新型电力系统的重要特征,风能、光伏等新能源的波动性将加剧源荷双侧的不确定性^[1],导致电力系统实时平衡面临严峻的挑战^[2]。传统电力系统通常按照预测负荷的一定比例预留备用容量以平衡源荷波动^[3]。不同时

间尺度下电力系统对备用资源的需求存在明显差异:一方面,短周期运行更关注扰动下的快速响应与保供安全,往往需要预留较高备用容量^[4];另一方面,长周期运行则更关注资源配置效率与新能源消纳水平,此时若仍沿用面向短周期极端场景的备用配置方案,容易导致资源冗余和规划成本上升^[5]。这就造成了电力系统规划成本的损失。因此,亟须提出考虑长短周期的源荷储两阶段备用资源规划方法,以兼顾电力系统保供能力和运行经济性。

收稿日期:2025-12-21;修回日期:2026-02-25

基金项目:南方电网公司科技项目(030000KC24090071)

针对上述挑战,近年来国内外围绕考虑长短周期协同的源荷储两阶段备用资源规划开展了大量研究,并取得了丰富成果。现有研究主要可归纳为两类。第一类研究聚焦长期备用规划模型,进行短期不确定性建模,通常采用鲁棒优化或随机优化等方法刻画新能源功率、负荷波动及故障扰动对备用需求的影响。例如,文献[6]以规避可再生能源不确定性风险为目标,提出了面向综合能源与备用资源协同的鲁棒规划方法;文献[7]以概率约束刻画负荷不确定性,提出了备用资源的随机规划方法;文献[8]针对区域间传输不确定性提出了备用容量配置模型,有效缓解了区域间备用资源分配不均的问题;文献[9]采用大数据预测方法来评估电网运行的不确定性,提出了基于负荷预测的备用规划方法。第二类研究聚焦短期源荷储协同优化,通过联合调度常规电源、可调负荷和储能资源,以增强备用资源的支撑能力。例如,文献[10]构建了基于多目标优化的源荷储协同备用调度模型,兼顾经济性和供电安全;文献[11]进一步将动态风险指标纳入到源荷储协同备用调度模型;文献[12—13]则进一步研究了在多能互补、与多时段条件下的备用容量配置策略,进一步降低了系统总体运行成本。这两类研究有效拓展了备用资源的来源与调节方式,在一定程度上降低了长短周期备用配置需求不匹配引发备用资源的冗余。

然而,现有研究大多侧重于将短周期源荷储备用资源调度决策建模为长周期备用规划的边界条件,未在短周期调度决策中充分考虑电力系统的长周期不确定性和经济运行需求,仍然未能充分从长短周期协同的角度统筹备用资源配置,容易导致规划结果偏保守或资源冗余。此外,在长周期备用规划考虑海量短周期运行场景会导致模型规模迅速膨胀,收敛性和求解效率显著降低,不利于形成可快速评估的规划方案。例如,文献[14]表明处理短期不确定性需要提高备用规划模型对场景刻画的时空分辨率,从而带来计算复杂度。文献[15]指出现有两阶段备用资源规划方法仍需借助Benders分解、割平面法等分解协调算法来缓解场景膨胀带来的求解压力。

值得注意的是,机会约束方法在电力系统备用规划中的应用也日趋广泛^[16]。该方法通过在约束中引入概率容限,保证约定置信水平下约束条件得到满足,在降低最坏情况下备用过度保守性的同时兼顾了经济性。例如,文献[17]提出了基于机会约束的备用容量优化配置方法;文献[18]构建了考虑储能与备用协同的机会约束模型;文献[19]则利用

概率约束技术提出了一种新型备用资源规划方法,为电力系统在面对不确定性时提供了灵活而经济的调度策略。基于机会约束的优势,本文开展了面向保供电能力提升的源荷储两阶段备用规划方法研究,具体创新点如下:

(1) 本文将着重分析长短周期下电力系统备用规划的目标,构建包含新能源消纳与保供电双重目标的两阶段备用资源规划模型。基于机会约束规划理论,构建新能源功率、负荷需求与线路故障概率化模型,发挥备用资源在新能源消纳与保供电的协同互补效应,提高系统对不确定性的适应性。所提方法既能在短周期下考虑长周期电网运行不确定性,又可以挖掘备用资源在长短周期下不同规划目标下的潜在价值,有效兼顾电网安全性与经济性。

(2) 本文将进一步提出单阶段近似求解策略,基于两阶段规划问题的解耦特性,将原本复杂的两阶段随机优化问题转化为等价或近似的单阶段优化模型进行求解,大幅降低备用资源规划模型的复杂度。为了确保规划方案的有效性,基于单阶段优化模型,本文构造了参数化的保供电能力约束,通过放松或收紧约束,可实现不同保供电要求下的备用规划方案自适应调整。

1 基于机会约束的源荷储两阶段备用规划模型

1.1 短周期源荷储备用资源调度决策模型

短周期电力系统调度决策的重点是以最小化的备用资源调度成本实现源荷平衡,其目标函数主要包括火电机组功率成本、需求侧响应补贴成本、储能充放电成本和功率缺额(切负荷)惩罚成本,表示如下

$$\min Q = \lambda^D \sum_{i=1}^N (P_i^{D+} + P_i^{D-}) + \lambda^B \sum_{i=1}^N (P_i^{\text{Charge}} + P_i^{\text{Discharge}}) + \sum_{i=1}^N (\lambda_i^G P_i^G) + \lambda^L \sum_{j=1}^n P_i^{D, \text{loss}} \quad (1)$$

式中: N 为电力系统的节点数; i 为节点编号; λ^D 、 λ^B 、 λ_i^G 和 λ^L 为单位需求响应的补贴成本、单位充放电成本、机组 i 的单位火电功率成本和单位功率缺额(切负荷)惩罚成本; P_i^{D+} 和 P_i^{D-} 为可调节负荷的上调和下调功率; P_i^{Charge} 和 $P_i^{\text{Discharge}}$ 为储能充、放电功率; P_i^G 为火电有功功率; $P_i^{D, \text{loss}}$ 为节点 i 上的负荷功率缺额; P_i^{NG} 为节点 i 上的新能源机组功率; Q 为短周期源荷储备用资源调度决策模型的目标函数,其决策变量为 P_i^{D+} 、 P_i^{D-} 、 P_i^{Charge} 、 $P_i^{\text{Discharge}}$ 、 P_i^G 和 P_i^{NG} 。

备用资源调度决策模型的约束成本主要包含

功率平衡约束、线路潮流约束、火电及新能源机组运行约束、需求侧响应约束、储能设备运行约束和线路故障约束,具体建模如下。

(1) 电力供需平衡约束

电力系统必须满足实时的功率平衡,表示如下

$$P_i^G + P_i^{NG} + P_i^{\text{Discharge}} = P_i^{\text{Charge}} + P_i^D + P_i^{D+} - P_i^{D-} - P_i^{D,\text{loss}} + \sum_{j=1}^N P_{i,j} \quad i \in N \quad (2)$$

式中: N 为电力系统所有节点编号的集合; P_i^D 为节点 i 上的负荷需求; j 为节点编号; $P_{i,j}$ 为节点 i 流向节点 j 的潮流。

(2) 线路潮流约束

能量在电力系统的传输需要遵循潮流方程。在实际电力系统调度与规划中,直流潮流方程被广泛采用,表示如下

$$P_{i,j} = \frac{\theta_{i,j}}{x_{i,j}} \quad \{i,j\} \in \mathcal{B} \quad (3)$$

式中: $\mathcal{B}$ 为电力系统所有支路索引的集合; $\theta_{i,j}$ 为节点 i 到节点 j 的相角差; $x_{i,j}$ 为线路 $\{i,j\}$ 的电感。

(3) 火电机组运行约束

火电机组运行约束主要包含其在特定容量规划下的功率上下限约束,表示如下

$$P_i^{G,\min} \leq P_i^G \leq P_i^{G,\max} + \Delta P_i^{G,\max} \quad i \in N \quad (4)$$

式中: $P_i^{G,\max}$ 和 $\Delta P_i^{G,\max}$ 分别为节点 i 上已有火电机组的最大功率及该节点上新规划火电机组的容量(最大功率); $P_i^{G,\min}$ 为节点 i 上火电机组的最小功率。式(4)表示的是节点 i 上火电机组功率应小于节点 i 上已有火电机组和新规划火电机组的最大功率之和。

(4) 新能源机组运行约束

新能源功率的上限具有不确定性,为了在确定性规划模型表征新能源功率的不确定性特性,引入机会约束如下

$$\Pr\{P_i^{NG} \leq P_i^{NG,\max}\} \geq 1 - \varepsilon \quad i \in N \quad (5)$$

式中: $\Pr\{\cdot\}$ 为事件 $\{\cdot\}$ 的条件概率; P_i^{NG} 和 $P_i^{NG,\max}$ 分别为节点 i 上的新能源机组功率及其上限; ε 为约束越限的可接受风险水平(例如0.05或0.1)。式(5)保证了新能源功率 P_i^{NG} 在大部分情况下(概率至少为 $1 - \varepsilon$) 不会超过实际可能达到的上限 $P_i^{NG,\max}$ 。假设新能源功率上限 $P_i^{NG,\max}$ 服从特定分布,其累积分布函数设为 $F_i^{NG}(\cdot)$,于是机会约束(5)可以转化为确定性约束,具体推导如下

$$\begin{cases} \Pr\{P_i^{NG} \leq P_i^{NG,\max}\} \geq 1 - \varepsilon \\ 1 - F_i^{NG}(P_i^{NG,\max}) \geq 1 - \varepsilon \\ F_i^{NG}(P_i^{NG,\max}) \leq \varepsilon \\ P_i^{NG} \leq F_i^{NG,-1}(\varepsilon) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $F_i^{NG,-1}(\cdot)$ 为 $F_i^{NG}(\cdot)$ 的反函数,需要通过数值统计计算获得。具体而言,假如新能源功率上限 $P_i^{NG,\max}$ 存在 M 个历史值,将其从小到大排序, $F_i^{NG,-1}(\varepsilon)$ 的值是排序数据中第 $[\varepsilon \times M]$ 位的值。考虑新能源功率非负,新能源机组运行约束最终可以表示如下

$$0 \leq P_i^{NG} \leq F_i^{NG,-1}(\varepsilon) \quad i \in N \quad (7)$$

(5) 需求侧响应约束

需求侧响应与新能源功率类似,具有不确定的响应上限。同理,需求侧响应运行约束如下

$$\begin{cases} 0 \leq P_i^{D+} \leq F_i^{D+,-1}(\varepsilon) + \Delta P_i^{D+,\max} \\ 0 \leq P_i^{D-} \leq F_i^{D-,-1}(\varepsilon) + \Delta P_i^{D-,\max} \end{cases} \quad i \in N \quad (8)$$

式中: $F_i^{D+,-1}(\cdot)$ 和 $F_i^{D-,-1}(\cdot)$ 分别为上调和下调负荷上限累积分布函数的反函数; $\Delta P_i^{D+,\max}$ 和 $\Delta P_i^{D-,\max}$ 分别为上调和下调负荷的规划容量。

(6) 储能设备运行约束

储能设备的充放电功率 P_i^{Charge} 和 $P_i^{\text{Discharge}}$ 需保证在充放电上限 $P_i^{\text{Charge},\max}$ 和 $P_i^{\text{Discharge},\max}$ 以内。此外,储能设备需满足电量守恒约束,设储能设备容量为 $E_i^{\max}$,初始电量为 E_0 ,电池的充放电效率为 η ,于是储能设备运行约束如下

$$\begin{cases} 0 \leq P_i^{\text{Discharge}} \leq P_i^{\text{Discharge},\max} \\ 0 \leq P_i^{\text{Charge}} \leq P_i^{\text{Charge},\max} \\ 0 \leq E_{i,0} + \eta P_i^{\text{Charge}} - \frac{P_i^{\text{Discharge}}}{\eta} \leq E_i^{\max} \end{cases} \quad i \in N \quad (9)$$

由于储能设备的初始电量具有一定的不确定性,根据储能设备的历史运行数据构建式(9)的机会约束形式,表示如下

$$\begin{cases} 0 \leq P_i^{\text{Discharge}} \leq P_i^{\text{Discharge},\max} \\ 0 \leq P_i^{\text{Charge}} \leq P_i^{\text{Charge},\max} \\ 0 \leq \eta P_i^{\text{Charge}} - \frac{P_i^{\text{Discharge}}}{\eta} \leq E_i^{\max} - F_i^{B,-1}(1 - \varepsilon) \end{cases} \quad i \in N \quad (10)$$

式中: $F_i^{B,-1}(\cdot)$ 为 E_0 累积分布函数的反函数。由于历史场景可能并未涉及储能容量的规划,因此统计获取的 E_0 数值可能偏低。所提规划模型可以视为对低电量模式进行了一定程度的预防。

(7) 线路故障约束

考虑线路故障的场景,线路正常与故障的概率可以通过历史数据统计获得,假如线路正常的概率为 $p_{i,j}$,引入0—1变量 $\xi_{i,j}$ 表示线路 $\{i,j\}$ 是否通断,有 $p_{i,j}$ 的概率下 $\xi_{i,j} = 1$,线路在线;有 $(1 - p_{i,j})$ 的概率下 $\xi_{i,j} = 0$,线路故障。于是,电力系统线路约束可以表示如下

$$\Pr\{P_{i,j} \leq \xi_{i,j} P_{i,j}^{\max}\} \geq 1 - \varepsilon \quad i \in \mathcal{B} \quad (11)$$

式中: $P_{ij}^{\max}$ 为线路容量。为将机会约束表示为确定性约束形式,式(11)可以进一步推导为如下形式

$$p_{ij} \mathbf{1}\{|P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max}\} + (1 - p_{ij}) \mathbf{1}\{P_{ij} = 0\} \geq 1 - \varepsilon \quad i \in \mathcal{B} \quad (12)$$

式中: $\mathbf{1}\{\cdot\}$ 为指示函数,当事件 $\{\cdot\}$ 发生时为1,不发生时为0。

进一步讨论 P_{ij} 的取值,当 $P_{ij} = 0$ 时,式(11)恒成立,当 $P_{ij} \neq 0$ 时,必须保证事件 $\{|P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max}\}$ 成立,此时式(11)可以表示为:若 $p_{ij} \geq 1 - \varepsilon$,则 $|P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max}$;若 $p_{ij} < 1 - \varepsilon$,则 $P_{ij} = 0$ 。采用0—1变量 ξ_{ij} 与大 M 法对该约束进行统一化描述,假设 M 是一个足够大的常数,式(12)可以进一步等价

$$\begin{cases} P_{ij} \leq \xi_{ij} P_{ij}^{\max} + M(1 - \xi_{ij}) \\ -P_{ij} \leq \xi_{ij} P_{ij}^{\max} + M(1 - \xi_{ij}) \\ P_{ij} \leq \xi_{ij} M \\ -P_{ij} \leq \xi_{ij} M \\ \xi_{ij}(1 - \varepsilon) \leq p_{ij} \end{cases} \quad i \in \mathcal{B} \quad (13)$$

该模型可以实现,当线路在线时, $\xi_{ij} = 1$ 、 $p_{ij} \geq 1 - \varepsilon$ 且 $|P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max}$;当线路故障时, $\xi_{ij} = 0$ 且 $P_{ij} = 0$ 。

至此,面向短周期的源荷储备用资源调度决策模型可以写成式(1)—式(4),式(7),式(8),式(10)和式(13)。

1.2 长周期源荷储备用规划模型

长周期电力系统备用规划的重点是最小化源荷储容量投资的成本与弃风弃光情况,其目标函数主要包括火电备用、需求侧负荷、储能扩充容量成本和弃风弃光惩罚成本,如下所示

$$\begin{aligned} \min U = & c^G \sum_{j=1}^n \Delta P_i^{G,\max} + c^D \sum_{j=1}^n (\Delta P_i^{D^+, \max} + \Delta P_i^{D^-, \max}) + \\ & c^B E_i^{\max} + c^{NG} \sum_{j=1}^n (P_i^{NG, \max} - P_i^{NG}) \end{aligned} \quad (14)$$

式中: c^G 、 c^D 、 c^B 和 c^{NG} 分别为火电单位扩容成本、需求侧响应单位扩容成本、储能单位扩容成本和单位弃风弃光惩罚成本;符号 Δ 为对应物理量的新规划容量; U 为长周期源荷储备用规划模型的目标函数,其决策变量为新规划的火电机组容量、上调负荷容量、下调负荷容量和储能设备容量 $\Delta P_i^{G,\max}$ 、 $\Delta P_i^{D^+, \max}$ 、 $\Delta P_i^{D^-, \max}$ 和 $E_i^{\max}$ 。

长周期源荷储备用规划模型的约束主要包括各类备用资源规划容量的上下限,如下所示

$$\begin{cases} 0 \leq \Delta P_i^{G,\max} \leq \bar{\Delta P}_i^{G,\max} \\ 0 \leq \Delta P_i^{D^+, \max} \leq \bar{\Delta P}_i^{D^+, \max} \\ 0 \leq \Delta P_i^{D^-, \max} \leq \bar{\Delta P}_i^{D^-, \max} \\ 0 \leq E_i^{\max} \leq \bar{E}_i^{\max} \end{cases} \quad i \in N \quad (15)$$

式中: $\bar{\Delta P}_i^{G,\max}$ 、 $\bar{\Delta P}_i^{D^+, \max}$ 、 $\bar{\Delta P}_i^{D^-, \max}$ 和 $\bar{E}_i^{\max}$ 分别为火电、需求侧响应上调、需求侧响应下调和储能的可

规划容量。

至此,源荷储两阶段备用规划模型已经被成功建立,具体模型如图1所示。值得注意,上层决策变量 $\Delta P_i^{G,\max}$ 、 $\Delta P_i^{D^+, \max}$ 、 $\Delta P_i^{D^-, \max}$ 和 $E_i^{\max}$ 的取值影响下层模型的运行边界式(4)、式(8)和式(10),下层决策变量 P_i^{NG} 的取值构成上层模型的目标函数式(14)。所提模型采用机会约束在下层短周期源荷储调度决策模型中考虑上层长周期源荷储规划过程中的运行不确定性,使得所提规划模型可以在不引入时间序列问题的前提下挖掘备用资源在长短周期中的新能源消纳和保供电价值,极大降低了规划模型的复杂度,平衡了备用资源规划在长短周期下的安全性、经济性和计算效率。

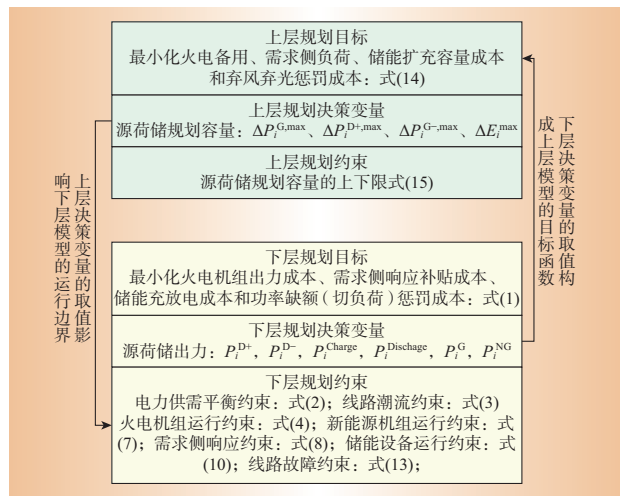


图1 源荷储两阶段备用规划模型

Fig. 1 Two-stage backup planning model based on source-load-storage coordination

2 面向保供电能力提升的源荷储两阶段备用规划模型求解方法

本节讨论源荷储两阶段备用规划模型的求解。首先,观察图1可知,下层短周期模型决策变量的取值构成了上层模型的目标函数,而上层长周期模型决策变量仅决定下层规划约束各个变量的上下限。上下层模型的约束条件相互解耦,没有共用的变量,上下层模型的目标函数亦然。因此,两阶段备用规划模型可以近似等价以下单目标优化问题。

2.1 目标函数

近似单目标优化问题的目标函数为上下层规划目标和在特定权重下的和。由于电力系统长周期的备用规划成本应均摊到短周期调度决策中,因此引入源荷储备用规划投资成本的等小时值系数 k ,表示如下

$$k = \frac{\beta(1+\beta)^T}{(1+\beta)^T - 1} \quad (16)$$

式中： β 为折现率，取值为 $8 \times 10^{-4}\%$ ； T 为所投资的备用资源，源投资设备的运行年限（寿命），取值为87 600 h（10年）。因此，近似单目标优化问题的目标函数可以表示如下

$$\begin{aligned} \min f = & Q + kU = \lambda^D \sum_{i=1}^N (P_i^{D+} + P_i^{D-}) + \\ & \lambda^B \sum_{i=1}^N (P_i^{\text{Charge}} + P_i^{\text{Discharge}}) + \sum_{i=1}^N (\lambda_i^C P_i^C) + \\ & \lambda^L \sum_{i=1}^N P_i^{\text{D,loss}} + k[c^G \sum_{j=1}^n \Delta P_i^{G,\max} + \\ & c^D \sum_{j=1}^n (\Delta P_i^{D+, \max} + \Delta P_i^{D-, \max}) + c^B E_i^{\max} + \\ & \lambda^{\text{NG}} \sum_{j=1}^n (P_i^{\text{NG}, \max} - P_i^{\text{NG}})] \end{aligned} \quad (17)$$

2.2 约束条件

近似单目标优化问题的约束条件为原始两阶段规划模型上下规划约束的并集，即约束式(2)一式(4)、式(7)、式(8)、式(10)、式(13)、式(15)。值得注意，基于多目标优化理论，将两阶段优化模型转化为单目标优化问题可能会导致解陷入局部最优。为此，本文面向保供电需求，构造了保供电能力约束，如下所示

$$\frac{\sum_{i=1}^N P_i^{\text{D,loss}}}{\sum_{i=1}^N P_i^D} \leq \delta \quad (18)$$

式中： $\sum_{i=1}^N P_i^{\text{D,loss}}$ 为电力系统总功率缺额（切负荷值）； $\sum_{i=1}^N P_i^D$ 为总负荷； δ 为保供电参数，可以根据实际需求设置 δ 的取值，以确保备用规划模型求解收敛到满足保供电要求的解。在实际工程应用中，所提备用规划方法可以设置不同的 δ 进行敏感性分析，获得不同保供电要求下的弃电率、备用规划成本和电网运行成本，然后选取合适的 δ ，以满足保供电要求、又不过度抬高规划成本的参数范围。

至此，所提面向保供电能力提升的源荷储两阶段备用规划模型的目标函数为式(17)，约束为

式(2)一式(4)、式(7)、式(8)、式(10)、式(13)、式(15)和式(18)。

3 算例分析

本节主要基于IEEE 30节点测试系统验证所提规划方法的经济性和保供电能力提升。其基本网络参数沿用MATPOWER的标准测试数据，上下调负荷补贴成本 λ^D 为300美元/MWh；储能充放电成本 λ^B 为60美元/MWh；切负荷惩罚成本 λ^L 为3 000美元/MWh；储能充放电效率 η 取0.95，初始荷电状态 E_0 取额定容量的50%，储能额定充、放电功率上限 $P_i^{\text{Discharge}, \max}$ 、 $P_i^{\text{Charge}, \max}$ 均取储能容量的0.5倍，火电、需求响应和储能的单位扩容成本分别设置为 0.12×10^6 美元/MW、 0.03×10^6 美元/MW和 0.06×10^6 美元/MWh，弃风弃光惩罚成本设置为300美元/MWh。所提备用规划模型的约束越限可接受风险水平 $\varepsilon = 5\%$ 。备用规划模型采用CPLEX求解，主要求解参数设置为：线程数为8，最优性间隙要求小于 10^{-4} ，采用CPLEX默认的模型预处理策略。首先，为了验证所提备用规划方法在长周期下的保供作用，规划周期设置为87 600 h（10年）。在算例分析中，本文所提方法与现有方法进行了比较。现有方法选用参考文献[23]中提出的不确定被用规划方法。二者的差异在于：现有方法不在下层运行优化问题考虑新能源机组运行约束式(5)、需求侧响应约束式(7)、储能设备运行约束式(8)及线路故障约束式(13)中的长期不确定因素，而本文所提方法则通过机会约束在短周期调度层显式反映长周期不确定性。换言之，现有方法是所提方法在约束越限可接受风险水平为 $\varepsilon = 0$ 的特例。此外，现有方法未包含本文所提的保供电能力约束式(18)。

所提规划方法在弃电率、备用规划成本与全年电网运行成本的表现如表1所示。其中，6种负荷场景被考虑，各场景负荷需求分别按照IEEE 30标准算例的基准按百分比缩放50%、100%、150%、200%、

表1 现有和所提规划方法在经济性的比较

Table 1 Comparison of economic performance between existing and proposed planning methods

负荷水平	弃电率/%		备用规划成本/ 10^6 美元		电网运行成本 (包括规划成本)/ 10^7 美元		计算时间/s	
	现有方法	所提方法	现有方法	所提方法	现有方法	所提方法	现有方法	所提方法
轻载(50%)	0.79	0.44	1.257	1.040	2.486	2.258	512	538
正常(100%)	1.02	0.49	1.694	1.387	5.851	5.683	529	516
重载(150%)	1.13	0.21	1.966	1.509	9.262	8.427	570	543
重载(200%)	1.08	0.41	2.612	1.778	14.837	14.501	613	634
重载(250%)	1.21	0.37	2.873	2.022	17.640	15.516	588	632
重载(500%)	1.16	0.54	6.145	3.679	28.843	23.513	647	549

250%和500%。所提方法在不显著增加计算时间的情况下,在弃电率、备用规划成本与电网运行成本方面的表现均优于现有方法,分别提升了约60.4%、26.7%和8.9%。值得注意的是,虽然所提方法在相对电网运行成本的提升不足10%,但是其在每个场景下可节省运行成本约150万美元/年,显著提高了实际场景下电力系统运行的经济效益。

进一步,为了验证本文所提单阶段近似求解方法相对于原始两阶段求解方法在求解精度和计算效率方面的表现,本文开展了单阶段求解方法与两阶段求解方法的对比算例。两阶段求解方法以上层备用资源规划和下层短周期源荷储调度决策的交替求解结果作为基准。单阶段求解方法则采用式(17)所示统一目标函数,并结合式(18)所示保供电能力约束,将原始两阶段备用规划问题转化为混合整数线性规划问题进行直接求解。为了量化两类方法的差异,本文选取备用规划成本相对偏差、电网运行成本相对偏差和计算时间作为评价指标,具体结果如表2所示。

表2 单阶段求解方法与两阶段求解方法的精度和效率对比

Table 2 Comparison of accuracy and efficiency between single-stage solution and two-stage solution method

负荷水平	备用规划成本相对偏差/%	电网运行成本相对偏差(包括规划成本)/%	计算时间/s	
			两阶段	单阶段
轻载(50%)	2.17	2.66	928	538
正常(100%)	3.19	4.13	849	516
重载(150%)	3.75	4.17	842	543
重载(200%)	4.76	5.32	962	634
重载(250%)	4.24	5.11	903	632
重载(500%)	5.71	6.37	740	549

由表2可以看出,本文所提单阶段近似求解方法与两阶段求解方法在不同负荷水平下具有较高的一致性。从备用规划成本相对偏差看,6种负荷场景下的偏差范围为2.17%~5.71%,平均偏差为3.97%;从电网运行成本相对偏差看,偏差范围为2.66%~6.37%,平均偏差为4.63%。这说明单阶段求解方法虽然对原始两阶段模型进行了近似处理,但其规划结果与两阶段交替求解结果之间的差异总体较小,能够较好保持两阶段模型在备用资源配置和系统运行经济性方面的优化效果。

从计算效率看,单阶段求解方法在所有负荷场景下均明显缩短了计算时间。两阶段求解方法的计算时间为740~962 s,平均计算时间为870.7 s;单阶段求解方法的计算时间为516~634 s,平均计算时间为568.7 s。相比两阶段求解方法,单阶段求解方法的计算时间降低比例为25.8%~42.0%,平均降低约34.4%。这是由于两阶段求解方法需要在上层备

用资源规划和下层短周期调度模型之间进行反复协调与校核,而单阶段方法通过式(17)将规划成本、运行成本和功率缺额惩罚统一纳入目标函数,并结合式(18)直接约束系统保供电能力,减少了上下层模型之间的反复迭代过程。

表2结果表明,本文所提单阶段近似求解方法能够在保持较小规划结果偏差的同时,有效降低模型求解时间。该方法并非简单牺牲精度来换取计算效率,而是在两阶段模型具备一定解耦特征的基础上,通过统一目标函数和保供电能力约束实现快速求解。因此,所提单阶段求解方法能够在求解精度和计算效率之间取得较好平衡,适用于多负荷场景下备用资源规划方案的快速评估。

然后,为了验证所提方法在短周期下的负荷保供电能力的表现,图2展示了所提方法在72 h运行场景下的弃电和功率缺额情况。经观察可以发现,采用本文提出的调度策略后,平均弃电量降低了约57.1%,在高可再生能源输出时段,弃电峰值甚至降低了近41.6%。与此同时,系统的功率缺额也由原来的约40 MW降至约20 MW,平均降幅约54.7%。主要是由于关键时段的供电缺口通过更高的新能源利用效率得到了弥补,即弃电率降低了。

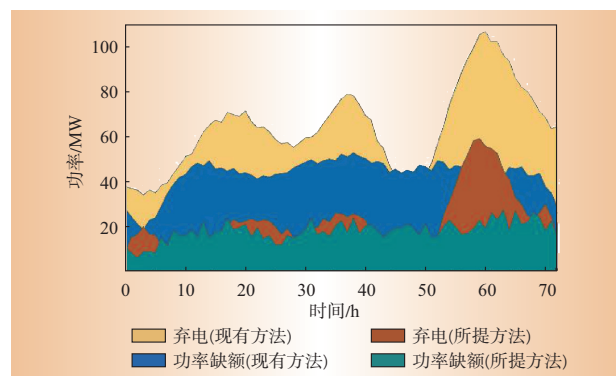


图2 现有和所提规划方法在保供电能力上的比较

Fig. 2 Comparison of the power supply guarantee capability between existing and proposed planning methods

总体而言,所提方法通过引入机会约束和保供电能力约束,不仅提升了负荷保供电能力,也兼顾了可再生能源的利用效率,表现出良好的经济性。针对区域特性进一步调整保供电能力约束的限制条件,将有望实现更高比例的可再生能源消纳,同时降低环境风险,推动绿色低碳发展目标的实现。

4 结束语

本文提出了面向保供电能力提升的源荷储两阶段备用规划方法,基于机会约束方法,在短周期调度

决策中考虑长周期不确定性,避免了短周期调度决策对备用资源的过度需求。后续研究可进一步构建面向极端气象全过程的多时段备用规划模型,以提高复杂极端气象场景下的保供电能力评估精度。D

参考文献:

- [1] 夏耀杰,程浩忠.基于改进灰色马尔科夫预测法的中长期负荷预测[J].电力需求侧管理,2015,17(1):21-25.
XIA Yaojie, CHENG Haozhong. Mid-long term load prediction based on improved grey Markov method[J]. Power Demand Side Management, 2015, 17(1): 21-25.
- [2] 冯松杰,魏韡.考虑新能源消纳和电力保供的电力系统多时间尺度平衡方法[J].电力系统自动化,2025,49(4):128-140.
FENG Songjie, WEI Wei. Multi-timescale balancing method for power systems considering renewable energy accommodation and power supply support[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(4): 128-140.
- [3] 彭钢,寇启龙,方涛,等.考虑新能源消纳率的主动配电网储能优化配置策略[J].浙江电力,2025,44(1):84-94.
PENG Gang, KOU Qilong, FANG Tao, et al. An optimal strategy for energy storage allocation in active distribution networks considering new energy consumption rates[J]. Zhejiang Electric Power, 2025, 44(1): 84-94.
- [4] 曲翀,王秀丽,曾平良,等.基于条件成本收益分析的长期备用规划与决策[J].中国电机工程学报,2014,34(31):5 642-5 650.
QU Chong, WANG Xiuli, ZENG Pingliang, et al. Long-term reserve requirements planning and decision-making based on a conditional cost/benefit analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(31): 5 642-5 650.
- [5] 唐伟斌,李涛,邹品晶,等.基于皮尔逊相关系数的电网夏季空调负荷预测研究[J].电力需求侧管理,2017,19(6):7-13.
TANG Weibin, LI Tao, ZOU Pinjing, et al. Air condition load forecasting in summer of power grid using pearson correlation coefficient[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(6): 7-13.
- [6] XU X, YAN Z, SHAHIDEHPOUR M, et al. Data-driven risk-averse two-stage optimal stochastic scheduling of energy and reserve with correlated wind power[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2019, 11(1): 436-447.
- [7] VRAKOPOULOU M, LI B, MATHIEU J L. Chance constrained reserve scheduling using uncertain controllable loads Part I: Formulation and scenario-based analysis[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 10(2): 1 608-1 617.
- [8] 王建学,王锡凡,丁晓莺.区域电力市场中的分区备用模型[J].中国电机工程学报,2006,26(18):28-33.
WANG Jianxue, WANG Xifan, DING Xiaoying. Study on zonal reserve model in power market[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 28-33.
- [9] 张新,岳园园,曾好,等.面向电网规划的重点需求侧资源响应潜力评估方法[J].电力系统自动化,2023,47(16):162-170.
ZHANG Xin, YUE Yuanyuan, ZENG Hao, et al. Response potential evaluation method of key demand-side resources for power grid planning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 162-170.
- [10] 许汉平,李姚旺,苗世洪,等.考虑可再生能源消纳效益的电力系统“源—荷—储”协调互动优化调度策略[J].电力系统保护与控制,2017,45(17):18-25.
XU Hanping, LI Yaowang, MIAO Shihong, et al. Optimization dispatch strategy considering renewable energy consumptive benefits based on source-load-energy storage coordination in power system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(17): 18-25.
- [11] 黄杨,胡伟,闵勇,等.计及风险备用的大规模风储联合系统广域协调调度[J].电力系统自动化,2014,38(9):41-47.
HUANG Yang, HU Wei, MIN Yong, et al. Risk-constrained coordinative dispatching for large-scale wind-storage system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 41-47.
- [12] MATOS M, BESSA R, BOTTERUD A, et al. Planning of reserve storage to compensate for forecast errors[J]. Renewable Energy Forecasting, 2017, 279-308.
- [13] 王开艳,罗先觉,贾嵘,等.充分发挥多能互补作用的风蓄水火协调短期优化调度方法[J].电网技术,2020,44(10):3 631-3 641.
WANG Kaiyan, LUO Xianjue, JIA Rong, et al. Short-term coordinated scheduling of wind-pumped-hydro-thermal power system with multi-energy complementarities[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3 631-3 641.
- [14] 黎博,陈民铀,钟海旺,等.高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J].中国电机工程学报,2023,43(2):555-581.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(2): 555-581.
- [15] WANG J, YIN L, DONG Y, et al. A two-stage distributed stochastic planning method for source-grid-load-storage flexibility resources considering flexible ramp capacity[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2024(160):110 134.
- [16] ZHANG J, TIAN G, CHEN X, et al. A chance-constrained programming approach to optimal planning of low-carbon transition of a regional energy system[J]. Energy, 2023, 52:547-552.
- [17] 李猛,吴伟杰,吴杰康,等.考虑光伏的备用容量替代配置优化模型[J].电力需求侧管理,2023,25(2):15-22.
LI Meng, WU Weijie, WU Jiekang, et al. Alternative allocation optimization model of reserve capacity considering photovoltaic[J]. Power Demand Side Management, 2023, 25(2): 15-22.
- [18] 韩为超,刘俊勇,向月,等.基于目标机会约束规划的储能容量优化配置模型[J].电力建设,2017,38(4):71-78.
HAN Weichao, LIU Junyong, XIANG Yue, et al. An optimal allocation model of energy storage capacity based on goal-chance constrained programming[J]. Electric Power Construction, 2017, 38(4): 71-78.
- [19] 刘德伟,郭剑波,黄越辉,等.基于风电功率概率预测和运行风险约束的含风电场电力系统动态经济调度[J].中国电机工程学报,2013,33(16):9-15,24.
LIU Dewei, GUO Jianbo, HUANG Yuehui, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power system based on wind power probabilistic forecasting and operation risk constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 9-15, 24.

作者简介:

韦斌(1977),男,广东广州人,硕士,高级工程师,研究方向为电网规划及新技术。

(责任编辑 水 鸽)