

考虑消纳水平的新能源配套储能和输电通道容量协调优化配置

谢毓广¹,李金中¹,王川²,高博¹,郑天文³,梅生伟²

(1. 国网安徽省电力有限公司电力科学研究院,安徽 合肥 230601;

2. 清华大学 电机工程与应用电子技术系,北京 100084;

3. 清华四川能源互联网研究院,四川 成都 610213)

摘要:随着以风光为代表的可再生能源发电比例迅速提升,风电场、光伏电站出力的不确定性和波动性给电力实时平衡带来了极大的挑战,配置合理规模的储能可以保障经济性并提高新能源利用率。为此,针对容量已知的新能源电站,提出了一种配套储能和输电线路容量协调优化配置的机会约束规划模型,以储能和输电线路建设成本最小化为目标,以年新能源弃电率不超过规定的指标为机会约束。由于机会约束非凸且缺乏显式表达,基于条件风险价值将机会约束对应的可行域保守转换为线性约束,得到易于求解的线性规划问题,并量化分析了规划方案对新能源场景概率分布的鲁棒性。算例分析结果表明,所提规划模型可以有效地解决考虑新能源消纳能力的储能和输电线路容量配置问题,通过合理配置储能可以降低输电线路的容量从而节约总投资成本。

关键词:新能源;储能;容量配置;条件风险价值;机会约束规划;协调优化

中图分类号:TM732

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202212008

0 引言

近十几年来,社会发展所带来的环境污染、能源稀缺等问题愈发严重。为了解决这些问题,风能、太阳能等可再生能源有了更为广阔的发展前景,清洁可再生能源发电技术成为实现电力系统向绿色低碳转型的必然选择,电力系统中风电和光伏的装机比例逐年提高。截至2020年底,我国电源总装机容量超过 2.2×10^9 kW,风电、太阳能分别成为第三、第四大电源,占比分别为13%、12%。随着碳达峰、碳中和目标的提出,预计到2030年,我国风电、太阳能发电总装机容量将超过 1.2×10^9 kW^[1]。

我国大型风光电站大多分布在偏远地区,风光电力通过远距离传输接入主网。新能源发电受天气和气候变化的影响,出力波动大,容量因子低。如果按照新能源电站的容量建设输电通道,则其利用率不高于容量因子;如果减小输电通道容量,则易造成弃风弃光现象,影响新能源电力的消纳。新能源电站配套储能是平抑出力波动、提升设施利用率的有效手段。考虑到风能、太阳能在时间和空间上具有互补性,可以为集群风光发电配套储能,从而减小对

储能容量的需求^[2-3];通过合理调度储能又可以降低输电通道的容量需求,通过较小的储能成本节约较大的输电通道投资成本^[4]。因此,为集群风光发电配套储能对远距离接入电网的风光电站具有重要的意义。

关于电网侧储能的容量规划,已有研究大多以储能规划提升系统经济性为主要目标^[5-6]。文献[7]对风/光/储微电网内经济性影响因素的关键程度进行了量化分析,以年净收益最优为目标,建立了经济运行模型。文献[8]建立了储热电混合储能系统的供热模型,提出了一种兼顾混合储能系统经济效益和功率优化分配的双层优化模型,以得到储能系统容量配置的最优解。文献[9]针对微电网系统中的储能容量优化配置问题,量化评估了运行中储能的寿命损耗,提出了一种同时计及系统经济运行和电池寿命的微电网储能容量双层优化模型和双阶段模型迭代求解策略。然而,上述研究未考虑新能源出力不确定性造成的过高弃电率对储能规划的影响,导致规划结果无法解决新能源资源波动问题,结果不具有普适性。

此外,还有研究主要以降低新能源弃电率为目标进行储能容量配置^[10-11]。文献[12]提出了基于预测误差评价指标和风电场预报考核指标的综合评价方法,以全寿命周期内储能净现值最大为优化目标进行储能容量配置,通过归纳预测误差的概率分布特征来处理新能源出力的不确定性。文献[13]提出了一种计及限风特性与经济性的大规模集中充放电

收稿日期:2022-06-29;修回日期:2022-11-06

在线出版日期:2022-12-13

基金项目:国家自然科学基金资助项目(52007100);国网安徽省电力有限公司科技项目(52120520004M)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(52007100) and the Science and Technology Project of State Grid Anhui Electric Power Co.,Ltd.(52120520004M)

储能系统的容量配置方法,基于风电场的实测限风功率制定了储能系统的多场景划分原则,基于代表性场景将不确定性分布转换为确定性分布来处理新能源出力的不确定性。文献[14]综合考虑各项效益并结合储能系统的成本,提出了一种电池储能系统容量配置方法,根据风电时序特性采用聚类算法生成大量的场景来处理新能源出力的不确定性。然而,虽然上述研究考虑了在新能源出力不确定性的条件下提高新能源消纳水平的问题,但是注重于根据新能源出力波动曲线得到确定的分布函数特征来解决新能源出力的不确定性问题,过分依赖于精准的概率密度函数和时序特性分类,难以应对在无法掌握准确的光伏和风电出力曲线分布函数时的问题求解。

采用概率分布函数构造多个新能源出力场景作为机会约束规划问题的研究范式,可以有效地解决无法掌握光伏、风电出力曲线不确定性分布的问题。此外,机会约束可以有效地量化新能源弃电率对储能规划的影响。鉴于此,本文提出了一种新能源电站配套储能和传输线路容量协调优化配置的机会约束规划模型,以最小化储能和传输线路的建设成本为目标,以年新能源弃电率不超过规定的指标为机会约束。由于机会约束通常是非凸的且缺乏显式表达,本文基于条件风险价值(conditional value at risk, CVaR)理论将机会约束对应的可行域保守地转换为线性约束,所得近似问题为线性规划问题,可采用求解器进行高效求解,同时量化分析了规划方案对新能源场景概率分布的鲁棒性。算例分析结果表明,本文所提模型可以有效地解决考虑新能源消纳能力的储能和传输线路容量配置问题,且结果对新能源预测场景的概率分布具有一定的鲁棒性。

1 新能源电站配套储能和传输线路容量协调优化配置的数学模型

包含风电场和光伏电站的发电系统拓扑结构示意图如图1所示。图中:箭头方向表示电能的流动方向;风、光伏发电容量均已经给定,需要配置储能来平抑新能源出力,并且需要建设与主网相连的输电通道。若完全不建设储能,则输电通道容量与风、光出力之和的最大值接近,这样才能保证弃电率足够小;若储能配置容量越大,则输电通道的容量就可以

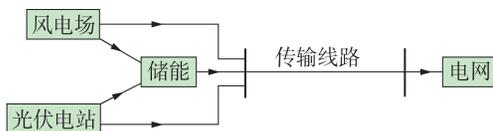


图1 风光储发电系统的拓扑结构示意图

Fig.1 Topology structure diagram of power generation system with wind-solar-storage

适当减小,直到新能源出力波动能够完全被储能平抑。但是需要确定如何以最小的投资成本配置储能和输电通道容量,以在给定的弃电率下完成风光出力输送。

1.1 系统运行模型

图1所示系统的运行约束条件如下:

$$p_t^{we} + p_t^{se} = p_t^c \quad (1)$$

$$p_t^{wg} + p_t^{sg} + p_t^{dc} = p_t^g \quad (2)$$

$$p_t^{we} + p_t^{wr} = p_t^{wr} \quad (3)$$

$$p_t^{se} + p_t^{sr} = p_t^{sr} \quad (4)$$

$$p_t^{we}, p_t^{se}, p_t^{wg}, p_t^{sg}, p_t^c, p_t^{dc} \geq 0 \quad (5)$$

$$p_t^g \leq P_1 \quad (6)$$

$$p_t^{wr} \leq p_t^{w*}, p_t^{sr} \leq p_t^{s*} \quad (7)$$

式中: p_t^{we} 、 p_t^{se} 分别为时段 t 风电场、光伏电站传输给储能的功率; p_t^c 为时段 t 储能的充电功率; p_t^{wg} 、 p_t^{sg} 、 p_t^{dc} 分别为时段 t 风电场、光伏电站、储能传输给电网的功率; p_t^g 为时段 t 传输给电网的总功率; p_t^{wr} 、 p_t^{sr} 分别为时段 t 风电场、光伏电站的调度功率; P_1 为输电线路的建设容量; p_t^{w*} 为时段 t 风电场取决于风速的最大出力; p_t^{s*} 为时段 t 光伏电站取决于光照强度的最大出力。式(1)表示风电场、光伏电站向集中式储能输送的功率为储能的充电功率;式(2)表示该风光储发电系统由风电场、光伏电站、储能共同为电网输电;式(3)和式(4)分别表示风电场、光伏电站的实际调度功率由输送给储能和电网的功率决定;式(6)表示传输给电网的总功率不能超过输电线路的建设容量;式(7)表示风电场、光伏电站的实际调度功率不能超过其最大出力。

储能需满足的约束条件如下:

$$W_t = W_{t-1} + \left(p_t^c \eta_c - \frac{p_t^{dc}}{\eta_{dc}} \right) \tau \quad (8)$$

$$0 \leq p_t^c \leq \gamma E, 0 \leq p_t^{dc} \leq \gamma E \quad (9)$$

$$0 \leq W_t \leq E \quad (10)$$

$$W_0 = W_T \quad (11)$$

式中: W_t 为时段 t 储能的储电量; η_c 、 η_{dc} 分别为储能的充、放电能量转换效率; τ 为时间间隔; γ 为储能的最大充放电功率-容量系数,在确定最优容量配置后,即可确定对应的最大充放电功率; E 为储能的建设容量; W_0 、 W_T 分别为调度周期开始时、末时段结束时储能的储电量, T 为调度周期的时段总数。式(11)表示始、末时刻储能的储电量须一致。需要指出的是,补充约束 $p_t^c p_t^{dc} = 0$ 被松弛处理了,这是因为充、放电过程中会产生能量损耗,导致储能同时充电和放电的调度策略并不具有经济性,因此最优调度策略自然会满足这一约束^[15]。另一方面,即使储能同时充电和放电带来的能量损耗能够对新能源的消

纳起作用,通过约束条件限制的新能源消纳目标也不会影响储能不能同时充电和放电的补充约束,最终优化得到的结果一定是经济效益最大化且同时满足新能源消纳要求的合理储能容量配置结果。

1.2 新能源弃电率约束

考虑到新能源消纳问题,希望弃风率和弃光率尽可能小,定义弃风率 R^w 和弃光率 R^s 的计算公式分别为:

$$R^w = \frac{\sum_{t=1}^T (p_t^w - p_t^{w*})}{\sum_{t=1}^T p_t^w} \quad (12)$$

$$R^s = \frac{\sum_{t=1}^T (p_t^s - p_t^{s*})}{\sum_{t=1}^T p_t^s} \quad (13)$$

式中: $p_t^w - p_t^{w*}$ 、 $p_t^s - p_t^{s*}$ 分别为时段 t 的实际弃风量、弃光量。在实际工程应用中,需要将弃风率和弃光率限定在一个阈值范围内,但是由于风速和光照强度具有不确定性,在规划储能和传输线路的最优容量时,无法准确获取其精确值。为了保证在较大的概率下弃风率和弃光率不大于给定的阈值,并能够用指标来衡量风光不确定性下的系统损失,引入式(14)和式(15)所示机会约束。

$$P_{r1} \{R^w - \varepsilon \leq 0\} \geq 1 - \delta \quad (14)$$

$$P_{r2} \{R^s - \varepsilon \leq 0\} \geq 1 - \delta \quad (15)$$

式中: ε 为弃电率上限; δ 为风险概率。事件 $R^w - \varepsilon \leq 0$ 和 $R^s - \varepsilon \leq 0$ 发生的概率分别取决于 p_t^w 和 p_t^s 的分布。基于多组服从经验分布 P_{r1} 的 p_t^w 和多组服从经验分布 P_{r2} 的 p_t^s 进行评估,弃风率和弃光率不大于 ε 发生的概率应不小于 $1 - \delta$,本文假设对风电资源和光伏发电资源的消纳要求相同。

1.3 容量协调优化配置模型

新能源场站配套储能和传输线路的容量协调优化配置模型可表示为:

$$\begin{cases} \min \{ EC_{ES} + P_1 C_1 \} \\ \text{s.t. 式(1)---(11)、(14)、(15)} \\ E \geq 0, P_1 \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: C_{ES} 、 C_1 分别为集中式储能、传输线路的单位容量成本。

由于机会约束式(14)和式(15)没有显式表达,上述优化问题不能直接求解。可以借助风险价值(value at risk, VaR)和CvaR理论将式(14)和式(15)转化为易于求解的形式。

2 基于风险理论的近似模型

考虑一个一般的机会约束规划,其可以表示为如下紧凑形式:

$$\begin{cases} \min_{x \in X} f(x) \\ \text{s.t. } P_{r0} \{h(x, \zeta) - \varepsilon \leq 0\} \geq 1 - \delta \end{cases} \quad (17)$$

式中: x 为决策变量; X 为决策变量的可行域; $f(x)$ 为目标函数; $h(x, \zeta)$ 为损失函数。式(17)中的机会约束表示按照不确定参数 ζ 的经验概率分布函数 P_{r0} 进行评估,事件 $h(x, \zeta) - \varepsilon \leq 0$ 发生的概率不小于 $1 - \delta$ 。

2.1 机会约束的风险近似

在风险理论中,损失函数 $h(x, \zeta) \leq \varepsilon$ 的概率被定义为VaR,即:

$$(1 - \delta) - \text{VaR}(x, \zeta, p_0) = \min \left\{ z \in \mathbf{R} \mid \int_{h(x, \zeta) \leq z} p_0(\zeta) d\zeta \geq 1 - \delta \right\} \quad (18)$$

式中: $p_0(\zeta)$ 为不确定参数 ζ 的概率密度函数。根据VaR的定义,式(19)所示约束与式(17)中定义的 x 可行域相同^[16],因此式(19)与式(17)中的机会约束可进行等价替换,但该约束为非凸,不易于求解。CVaR函数已被证明是关于 x 的凸函数^[17],因此可通过CVaR来近似机会约束,从而使规划问题更容易求解。

$$(1 - \delta) - \text{VaR}(x, \zeta, p_0) \leq \varepsilon \quad (19)$$

CVaR被定义为由不小于VaR的损失计算得到条件期望,即:

$$(1 - \delta) - \text{CVaR}(x, \zeta, p_0) = \frac{1}{\delta} \int_{h(x, \zeta) \geq (1 - \delta) - \text{VaR}(x, \zeta, p_0)} h(x, \zeta) p_0(\zeta) d\zeta \quad (20)$$

根据CvaR的定义,期望值一定大于VaR的值,因此VaR的值一定小于等于CVaR的值,即:

$$(1 - \delta) - \text{VaR}(x, \zeta, p_0) \leq (1 - \delta) - \text{CVaR}(x, \zeta, p_0) \quad (21)$$

综上所述,式(17)中的机会约束可以用式(22)进行风险近似。

$$(1 - \delta) - \text{CVaR}(x, \zeta, p_0) \leq \varepsilon \quad (22)$$

由式(22)定义 x 的可行域,根据式(21),则式(19)一定成立;又因为式(19)与式(17)中定义的 x 可行域相同,可等效替换,则式(17)中的机会约束一定成立。即式(22)定义的 x 可行域比式(17)定义的可行域范围更小,因此保证了式(22)所示CVaR约束下得到的最优解一定满足机会约束规划。

2.2 CVaR约束的线性化

由于式(22)所示约束缺乏显性表达,需先进行采样平均近似。假设有 N 个风速数组,对应的风电功率分别为 $p_i^{w,1}$ 、 $p_i^{w,2}$ 、 \dots 、 $p_i^{w,N}$,其概率分别为 α^1 、 α^2 、 \dots 、 α^N ; N 个光照强度数组对应的光伏功率分别为 $p_i^{s,1}$ 、 $p_i^{s,2}$ 、 \dots 、 $p_i^{s,N}$,其概率分别为 β^1 、 β^2 、 \dots 、 β^N 。最终,式(22)所示CVaR约束对应的原问题式(14)和式(15)可以转换为如下线性形式约束^[18]:

$$\frac{\sum_{t=1}^T (p_t^{w,n} - p_t^{wr,n})}{\sum_{t=1}^T p_t^{w,n}} - \varepsilon + \theta^w \leq \sigma^{w,n} \quad \forall n \quad (23)$$

$$\sum_{n=1}^N \alpha^n \sigma^{w,n} \leq \theta^w \delta, \quad \sigma^{w,n} \geq 0 \quad \forall n \quad (24)$$

$$\frac{\sum_{t=1}^T (p_t^{s,n} - p_t^{sr,n})}{\sum_{t=1}^T p_t^{s,n}} - \varepsilon + \theta^s \leq \sigma^{s,n} \quad \forall n \quad (25)$$

$$\sum_{n=1}^N \alpha^n \sigma^{s,n} \leq \theta^s \delta, \quad \sigma^{s,n} \geq 0 \quad \forall n \quad (26)$$

式中: θ^w 、 θ^s 、 $\sigma^{w,n}$ 、 $\sigma^{s,n}$ ($n=1, 2, \dots, N$) 均为辅助变量。

2.3 线性化近似模型

机会约束式(14)和式(15)用 CVaR 近似模型(23)–(26)代替后,可得风光储发电系统规划模型的近似凸模型为:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min \{ EC_{ES} + P_1 C_1 \} \\ \text{s.t. 式(23)–(26)} \\ p_t^{we,n} + p_t^{se,n} = p_t^{c,n}, \quad p_t^{wg,n} + p_t^{sg,n} + p_t^{dc,n} = p_t^{g,n} \\ p_t^{we,n} + p_t^{wg,n} = p_t^{wr,n}, \quad p_t^{se,n} + p_t^{sg,n} = p_t^{sr,n} \\ p_t^{we,n}, p_t^{se,n}, p_t^{wg,n}, p_t^{sg,n}, p_t^{c,n}, p_t^{dc,n} \geq 0 \\ p_t^{g,n} \leq P_1, \quad p_t^{wr,n} \leq p_t^{w,n}, \quad p_t^{sr,n} \leq p_t^{s,n} \\ W_t^n = W_{t-1}^n + \left(p_t^{c,n} \eta_c - \frac{p_t^{dc,n}}{\eta_{dc}} \right) \tau \\ 0 \leq p_t^{c,n} \leq \gamma E, \quad 0 \leq p_t^{dc,n} \leq \gamma E \\ 0 \leq W_t^n \leq E, \quad W_0^n = W_T^n, \quad E \geq 0, \quad P_1 \geq 0 \end{array} \right. \quad (27)$$

最终,原问题被转化为线性规划问题,易于采用现有的求解器进行求解。

2.4 机会约束转化的鲁棒性

由于在机会约束规划的转化中进行了 CVaR 近似,式(21)表明该转化是保守的,即式(22)所示 CVaR 条件是式(17)中机会约束的充分条件。若采用模型式(27)得到规划方案,则实际中的弃电率越限概率不超过 δ ,且天然具有一定的裕度。上述保守性恰好可以应对新能源出力场景概率的不准确性给机会约束评估带来的误差。以下分析规划结果对概率不精确性的鲁棒半径。

假定 x^* 为模型最优解,按照不确定参数 ζ 的经验概率分布函数 P_{i0} 进行评估,事件 $h(x^*, \zeta) - \varepsilon \leq 0$ 发生的概率为:

$$P_{i0} \{ h(x^*, \zeta) - \varepsilon \leq 0 \} = 1 - \delta^* \quad (28)$$

式中: δ^* 为鲁棒弃电率越限概率。根据式(21), δ^* 一定小于 δ , 定义 $\bar{\delta} = \delta - \delta^*$ 为保守性裕度。此外,若新能源场景的概率呈现不同的分布,则会对事件 $h(x^*, \zeta) - \varepsilon \leq 0$ 发生的概率造成影响,为了评估基于风险理论的近似模型的鲁棒性,首先需要定义不同的场景概率分布函数之间的距离,通常用于二范数

表示,如式(29)所示。

$$D_{\text{norm}}(\rho \| \rho_0) = \|\rho - \rho_0\|_2 \quad (29)$$

式中: D_{norm} 为场景概率分布函数之间的距离; ρ_0 为构建的经验分布函数的场景概率分布函数; ρ 为任意可生成的场景概率分布函数。假设实际的场景概率分布函数满足式(30),则按照场景概率分布函数 ρ 进行评估,事件 $h(x^*, \zeta) - \varepsilon \leq 0$ 发生的概率一定不小于 $1 - \delta$ 。

$$\Gamma = \left\{ \rho \mid D_{\text{norm}}(\rho \| \rho_0) \leq \omega \right\} \quad (30)$$

式中: ω 为使式(31)成立的最大值。

$$\sup_{\rho \in \Gamma} (\rho^T \lambda) = \delta \quad (31)$$

式中: $\sup(\cdot)$ 为集合上确界; λ 为由 0、1 组成的向量,表示各场景下 $h(x^*, \zeta) - \varepsilon \leq 0$ 是否成立,若成立则相应元素取值为 0,若不成立则相应元素取值为 1。场景概率分布函数为离散分布,式(31)表示事件的概率是按照场景概率分布函数 ρ 评估得到的。 ω 的解析表达式可根据下述推导得到。

设 $\bar{\rho} = \rho - \rho_0$, 则式(30)可改为:

$$\bar{\Gamma} = \left\{ \bar{\rho} \mid \|\bar{\rho}\|_2 \leq \omega \right\} \quad (32)$$

式中: $\bar{\Gamma}$ 为 $\bar{\rho}$ 的取值空间。

式(31)可等价于:

$$\sup_{\bar{\rho} \in \bar{\Gamma}} (\bar{\rho}^T \lambda) = \delta - \rho_0^T \lambda \quad (33)$$

根据式(33)以及柯西不等式 $\bar{\rho}^T \lambda \leq \|\bar{\rho}\|_2 \|\lambda\|_2$, 可以得到:

$$\delta - \rho_0^T \lambda \geq \|\bar{\rho}\|_2 \|\lambda\|_2 \quad (34)$$

式中:取等号的条件为 $\bar{\rho}$ 和 λ 线性相关。根据式(32)和式(34), ω 的取值能够使式(34)恒成立,因此可以得到:

$$\omega \leq \frac{\delta - \rho_0^T \lambda}{\|\lambda\|_2} \quad (35)$$

定义鲁棒半径 ω 是使得式(35)成立的最大值,则有:

$$\omega = \frac{\delta - \rho_0^T \lambda}{\|\lambda\|_2} \quad (36)$$

式中: $\rho_0^T \lambda = \delta^*$ 即为按照经验分布函数评估的弃电率越限概率。则对于满足式(30)的所有概率分布而言,有:

$$\omega = \frac{\delta - \delta^*}{\|\lambda\|_2} \quad (37)$$

当 ω 的取值满足式(37)时,机会约束不会越限。不确定风速场景的保守性裕度 $\bar{\delta}_w$ 和鲁棒半径 ω_w 、不确定光伏场景的保守性裕度 $\bar{\delta}_s$ 和鲁棒半径 ω_s 可根据各自的经验分布函数和场景分布函数计算得到。

3 算例分析

以含 1 座 200 MW 风电场和 1 座 200 MW 光伏电站的系统为算例,设定发电侧参与调峰的电化学储能最快 4 h 充满,即每小时的最大充放电功率为额定容量的 25%,该数值也可以根据工程实际需要进行调节,系统其他参数如附录 A 表 A1 所示。基于安徽省风、光气象数据,选取春、夏、秋、冬 4 个典型日的风电和光伏出力曲线,曲线中叠加了经验分布函数。假设预测误差服从均值为 0、标准差为预测值的 20% 的高斯分布,采用蒙特卡罗方法生成 1 000 个场景构建经验分布函数。设定新能源弃电率上限 $\varepsilon=10\%$,设定风险概率 $\delta=5\%$ 。采用 GUROBI 9.5.0 求解器在配备为 Intel Core i7 CPU@2.60 GHz、内存为 16 GB 的笔记本电脑上求解优化模型。

计算得到的最优储能建设容量为 73.49 MW·h,传输线路建设容量为 150.33 MW,最小建设成本为 $\$ 1.95094 \times 10^8$ 。本文定义的弃风率/弃光率为所有时段实际弃风/弃光电量总和与所有时段风电场/光伏电站可发出的最大电量总和之比,这意味着所定义的弃风率和弃光率为平均值,而在傍晚和凌晨时段,光伏出力很小,因此长时间运行后整体计算的弃电率不会过高。为了获得实际场景的年运行数据作为支撑,采用安徽省的实际风、光数据进行测算并优化弃电率,风电场取决于风速的最大出力和弃风量曲线如附录 A 图 A1 所示,光伏电站的取决于光照强度的最大出力和弃光量曲线如附录 A 图 A2 所示。根据定义的弃电率计算方式,得到弃风率 $\varepsilon_w=10\%$ 、弃光率 $\varepsilon_s=8.72\%$,均不超过设定的新能源弃电率上限 $\varepsilon=10\%$ 。

3.1 鲁棒性分析

为了验证最优决策时弃风率和弃光率满足所设新能源弃电率上限的概率是否满足风险等级要求,用构造的 1 000 个场景下的经验分布函数进行计算,得到弃风率小于 10% 的概率为 $1-\delta_w^*=98.5\%$,弃光率小于 10% 的概率为 $1-\delta_s^*=96.5\%$,均大于 $1-\delta=95\%$, $\bar{\delta}_w$ 和 $\bar{\delta}_s$ 的值分别为 3.5% 和 1.5%,证明了基于风险理论的近似方法具有保守性。

鲁棒性分析结果见表 1。表中, \bar{p}_{rw} 、 \bar{p}_{rs} 分别为弃风、弃光事件的测试概率。由表 1 可知,根据鲁棒半

表 1 鲁棒性分析结果

Table 1 Analysis results of robustness

变量	结果	变量	结果
$1-\delta_w/\%$	95	$1-\delta_s/\%$	95
$1-\delta_w^*/\%$	98.5	$1-\delta_s^*/\%$	96.5
$\bar{\delta}_w/\%$	3.5	$\bar{\delta}_s/\%$	1.5
ω_w	0.009	ω_s	0.0039
$p_{rw}/\%$	95.17	$p_{rs}/\%$	95.23
$\bar{p}_{rw}/\%$	93.86	$\bar{p}_{rs}/\%$	93.62

径求解方法所得 ω_w 和 ω_s 的值分别为 0.009、0.0039,这表明按照式(30)中集合 Γ 内的任意场景概率分布函数进行评估,事件 $h(x^*,\zeta)-\varepsilon \leq 0$ 发生的概率均不小于 $1-\delta=95\%$,即最优解 x^* 对构建的不同场景概率分布的扰动具有鲁棒性。

为了验证上述结论,基于蒙特卡罗方法生成的 1 000 个场景,生成与均匀分布完全不一样的场景概率分布函数,其与原场景概率分布函数的 2 范数距离为计算所得鲁棒半径,用于测试在该场景概率分布函数下事件 $h(x^*,\zeta)-\varepsilon \leq 0$ 发生的概率,相应的弃风事件测试概率 p_{rw} 、弃光事件测试概率 p_{rs} 结果见表 1。这 2 个测试概率都略微大于 $1-\delta=95\%$,验证了推导所得鲁棒半径 ω_w 、 ω_s 是准确的。为了对鲁棒性结果进行对比分析,针对原场景生成新的场景概率分布函数,且 $D_{\text{norm},w}(\rho \parallel \rho_0)=0.01$ 、 $D_{\text{norm},s}(\rho \parallel \rho_0)=0.005$,测试在新场景概率分布函数下事件 $h(x^*,\zeta)-\varepsilon \leq 0$ 发生的概率,所得弃风事件测试概率 \bar{p}_{rw} 、弃光事件测试概率 \bar{p}_{rs} 结果如表 1 所示。这 2 个测试概率的值都要小于 $1-\delta=95\%$,验证了当新场景概率分布函数与原场景概率分布函数的 2 范数距离超出鲁棒半径时,规划方案无法保证新能源弃电率在预期的可靠范围之内。

3.2 风光互补性对结果的影响

为了体现风光互补对减少新能源场站配套储能和传输线路容量的影响,基于安徽省的风电和光伏出力数据,计算得到全年风电场和光伏电站的容量因数分别为 0.1978 和 0.1600,根据两者的容量因数得到与原场景(200 MW 风电场+200 MW 光伏电站)等价出力的 2 种场景:场景 I,单独工作的 447.25 MW 光伏电站;场景 II,单独工作的 361.78 MW 风电场。不同场景下的规划结果如表 2 所示。由表可知,场景 I 和场景 II 下所需的最优储能建设容量、传输线路建设容量和建设成本均大于原场景,表明系统中风电、光伏出力的互补性特征可有效减少新能源场站配套储能和传输线路的建设容量。

表 2 风光互补性对储能和传输线路规划结果的影响

Table 2 Influence of wind-solar complementarity on planning results of energy storage and transmission lines

场景	储能建设容量/(MW·h)	传输线路建设容量/MW	建设成本/\$
原场景	73.49	150.33	1.951×10^8
场景 I	338.80	160.36	2.602×10^8
场景 II	90.42	203.49	2.623×10^8

3.3 储能额定充满电时长对结果的影响

由于储能的额定充满电时长会根据场景需求发生变化,其对储能和传输线路规划结果的影响如表 3 所示。由表可知,当储能额定充满电时长减小时,储能建设容量和最大充放电功率均增大,而传输

线路建设容量、建设成本减小,这是因为所需充电时长减小会导致储能的使用更加灵活,以更大的功率进行快充快放能够更有效地减小系统的弃电率,但由于传输线路的单位容量建设成本要高于储能的单位容量建设成本,因此建设容量更大的储能代替传输线路更具有经济性,且更大的储能最大充放电功率可以满足弃电率和风险等级的约束条件。

表 3 储能额定充满电时长对储能和传输线路规划结果的影响

Table 3 Influence of rated charging / discharging time on planning results of energy storage and transmission lines

额定充满电时长 / h	储能建设容量 / (MW·h)	储能最大充放电功率 / MW	传输线路建设容量 / MW	建设成本 / \$
2	94.05	47.03	142.75	1.901×10^8
3	83.13	27.71	147.15	1.932×10^8
4	73.49	18.37	150.33	1.951×10^8
5	32.68	6.54	158.03	1.972×10^8

3.4 风险等级对结果的影响

设定新能源弃电率上限 $\varepsilon=10\%$,考虑不同风险等级对储能、传输线路建设容量的影响,结果如表 4 所示。由表可以看出:随着风险等级降低,最优储能建设容量、传输线路建设容量和建设成本均增大,这说明当 $1-\delta$ 增大时,若要保持更多场景下的弃电率在约束范围内,则需要增加储能建设容量和传输线路建设容量,这样才能使更多场景下的弃电率减小,从而有更多的场景符合弃电率要求;储能、传输线路的建设容量随着风险等级增加呈非线性变化, δ 越接近 0,所需要的储能、传输线路建设容量增大得越快。此外,设定的单位容量储能建设成本比单位容量传输线路建设成本小,这导致通过增大储能建设容量使更多场景下的弃电率降低的方式更为经济,故储能容量的增大速度快于传输线路容量的增大速度。

表 4 风险等级对储能和传输线路规划结果的影响

Table 4 Influence of risk level on planning results of energy storage and transmission lines

$1-\delta / \%$	储能建设容量 / (MW·h)	传输线路建设容量 / MW	建设成本 / \$
90	72.66	150.01	1.945×10^8
95	73.49	150.33	1.951×10^8
97	78.98	151.27	1.973×10^8
99	85.12	152.71	2.003×10^8

3.5 新能源弃电率上限 ε 对结果的影响

设定风险概率 $\delta=5\%$,考虑不同的新能源弃电率上限 ε 对储能、传输线路建设容量的影响,结果如表 5 所示。由表可知,随着 ε 增大,最优储能建设容量、传输线路建设容量和建设成本均减小,这是因为

新能源弃电率上限增大,则系统无需额外的储能和传输线路容量来消纳新能源,就能满足设置的弃电率要求,且为了降低建设成本,储能和传输线路的最优建设容量会减少。结合表 4 和表 5 可知,新能源弃电率上限对规划结果的影响比风险等级的影响更大,储能建设容量随着新能源弃电率上限的提高显著减小。当 $\varepsilon=20\%$ 时,最优储能建设容量为 0,这是因为此时即使没有储能,风电场和光伏电站也能借助传输线路将新能源弃电率保持在规定的范围内。

表 5 ε 对储能和传输线路规划结果的影响

Table 5 Influence of ε on planning results of energy storage and transmission lines

$\varepsilon / \%$	储能建设容量 / (MW·h)	传输线路建设容量 / MW	建设成本 / \$
5	159.33	163.40	2.280×10^8
10	73.49	150.33	1.951×10^8
15	28.78	140.20	1.740×10^8
20	0	130.46	1.566×10^8

3.6 风光预测误差对结果的影响

设定经验分布函数由高斯分布构造,考虑不同的预测误差标准差对储能、传输线路建设容量的影响,结果如表 6 所示。由于预测风光数据的离散度会随着标准差的增大而变大,偏离值过大的风光数据会使系统的弃电率增大,导致新能源消纳能力不足的场景增多,超出风险等级阈值,因此需要建设额外的储能容量和传输线路容量使系统的弃电风险等级维持在设置的阈值范围内。由表 6 可知,预测误差的离散度对储能建设容量、传输线路建设容量和建设成本的影响均较大。

表 6 预测误差对储能和传输线路规划结果的影响

Table 6 Influence of prediction error on planning results of energy storage and transmission lines

预测误差标准差	储能建设容量 / (MW·h)	传输线路建设容量 / MW	建设成本 / \$
0.1	70.54	149.43	1.934×10^8
0.2	73.49	150.33	1.951×10^8
0.3	81.08	151.82	1.984×10^8
0.4	96.77	153.29	2.033×10^8

4 结论

针对风光储发电系统在配置储能容量和传输线路容量时存在的新能源弃电率不确定性因素,本文建立了包含系统弃电率约束的容量协调优化模型,提出了一种基于机会约束的规划方法,用于协调优化配置考虑新能源出力不确定性的新能源场站储能和传输线路的建设容量。所提方法利用 CVaR 函数近似化机会约束规划,解决了原模型难以求解的问题,并量化分析了规划方案对于新能源场景概率分

布的鲁棒性。算例分析结果验证了所提方法能有效解决考虑新能源消纳能力的储能和传输线路容量配置问题,且易于计算,所得结果对新能源预测场景的概率分布具有一定的鲁棒性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 李晖,刘栋,姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报,2021,41(18):6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Analysis and reflection on the development of power system towards the goal of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.
- [2] 涂炼,刘涤尘,廖清芬,等. 计及储能容量优化的含风光储配电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备,2015,35(12):40-46.
TU Lian, LIU Dichen, LIAO Qingfen, et al. Reliability evaluation considering storage capacity optimization for distribution system with wind-PV-storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(12): 40-46.
- [3] 崔勇,李鹏,姬德森,等. 基于多边收益的风光水能源联合运营策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(4):161-166,173.
CUI Yong, LI Peng, JI Desen, et al. Joint operation strategy of wind power-photovoltaic-pumped storage hydro energy based on multilateral income [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 161-166, 173.
- [4] CHEN Y, WEI W, WANG C, et al. Storage and transmission capacity requirements of a remote solar power generation system [J]. IEEE Systems Journal, 2022, 16(2): 3175-3178.
- [5] 司杨,陈来军,陈晓骏,等. 基于分布鲁棒的风-氢混合系统氢储能容量优化配置[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):3-10.
SI Yang, CHEN Laijun, CHEN Xiaotao, et al. Optimal capacity allocation of hydrogen energy storage in wind-hydrogen hybrid system based on distributionally robust [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 3-10.
- [6] 张江林,高红均,王家怡,等. 计及预测精度及拓扑结构的光伏电站储能经济配置[J]. 电力自动化设备,2019,39(6):115-121.
ZHANG Jianglin, GAO Hongjun, WANG Jiayi, et al. Economic allocation of energy storage in photovoltaic power station considering prediction accuracy and topological structure [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(6): 115-121.
- [7] 谢桦,滕晓斐,张艳杰,等. 风/光/储微网规划经济性影响因素分析[J]. 电力系统自动化,2019,43(6):70-76,115.
XIE Hua, TENG Xiaofei, ZHANG Yanjie, et al. Analysis of economic influence factors in wind-photovoltaic-storage microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 70-76, 115.
- [8] 李军徽,付英男,李翠萍,等. 提升风电消纳的储热电混合储能系统经济优化配置[J]. 电网技术,2020,44(12):4547-4557.
LI Junhui, FU Yingnan, LI Cuiping, et al. Economic optimal configuration of hybrid energy storage system for improving wind power consumption [J]. Power System Technology, 2020, 44(12): 4547-4557.
- [9] 肖浩,裴玮,杨艳红,等. 计及电池寿命和经济运行的微电网储能容量优化[J]. 高电压技术,2015,41(10):3256-3265.
XIAO Hao, PEI Wei, YANG Yanhong, et al. Energy storage capacity optimization for microgrid considering battery life and economic operation [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(10): 3256-3265.
- [10] 李军徽,岳鹏程,李翠萍,等. 提高风能利用水平的风电场群储能系统控制策略[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):162-169.
LI Junhui, YUE Pengcheng, LI Cuiping, et al. Control strategy of energy storage system in wind farm group to improve wind energy utilization level [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 162-169.
- [11] 邱伟强,王茂春,林振智,等. “双碳”目标下面向新能源消纳场景的共享储能综合评价[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):244-255.
QIU Weiqiang, WANG Maochun, LIN Zhenzhi, et al. Comprehensive evaluation of shared energy storage towards new energy accommodation scenario under targets of carbon emission peak and carbon neutrality [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 244-255.
- [12] 靳文涛,李蓓,谢志佳. 电池储能系统在跟踪风电计划出力中的需求分析[J]. 储能科学与技术,2013,2(3):294-299.
JIN Wentao, LI Bei, XIE Zhijia. Study on an analysis for the need of a battery energy storage system in tracking wind power schedule output [J]. Energy Storage Science and Technology, 2013, 2(3): 294-299.
- [13] 崔杨,朱加明,葛延峰,等. 计及限风特性与经济性的大规模集中充放电储能系统容量配置研究[J]. 电网技术,2016,40(2):484-490.
CUI Yang, ZHU Jiaming, GE Yanfeng, et al. Study on capacity configuration of large-scale energy storage system under concentrated charge and discharge based on wind curtailment characteristics and economics [J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 484-490.
- [14] 蔡霖霖,徐青山,袁晓冬,等. 基于风电消纳时序场景的电池储能系统配置策略[J]. 高电压技术,2019,45(3):993-1001.
CAI Jilin, XU Qingshan, YUAN Xiaodong, et al. Configuration strategy of large-scale battery storage system orienting wind power consumption based on temporal scenarios [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3): 993-1001.
- [15] LI Z S, GUO Q L, SUN H B, et al. Sufficient conditions for exact relaxation of complementarity constraints for storage-concerned economic dispatch [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1653-1654.
- [16] NEMIROVSKI A, SHAPIRO A. Convex approximations of chance-constrained programs [J]. SIAM Journal on Optimization, 2006, 17(4): 969-996.
- [17] CAO Y, WEI W, MEI S W, et al. Analyzing and quantifying the intrinsic distributional robustness of CVaR reformulation for chance-constrained stochastic programs [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2020, 35(6): 4908-4911.
- [18] ROCKAFELLAR R T, URYASEV S. Optimization of conditional value-at-risk [J]. Journal of Risk, 2000, 2(3): 21-41.

作者简介:



谢毓广

谢毓广(1979—),男,高级工程师,博士,主要研究方向为新能源电力系统的运行调控(E-mail:95662479@qq.com);

李金中(1990—),男,工程师,硕士,主要研究方向为新能源电力系统的运行调控(E-mail:981779186@qq.com);

王川(1996—),男,博士研究生,通信作者,主要研究方向为新能源电力系统优化(E-mail:wang-c20@mails.tsinghua.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

(下转第72页 continued on page 72)

Design of magnetic-gear speed regulator in energy storage system with synchronous condenser and flywheel

LI Zhiqiang, WANG Dongyang, XIAO Yang

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: The electromagnetic design of magnetic-gear speed regulator (MGSR) in the energy storage system with synchronous condenser and flywheel for new energy station is introduced. Based on the operation principle of coaxial magnetic gear, by changing the frequency of the stator current, the MGSR achieves stepless change of the flywheel speed and the power flow between the flywheel and the synchronous condenser whose speed is constant. Equipped with MGSR, the synchronous condenser is capable of not only regulating reactive power but also providing active power support. The basic structure, the regulation range of speed and frequency and other basic operation conditions of MGSR are determined. The electromagnetic performance of MGSR with different configurations of permanent magnets and different dimensions of modulating ring and stator slots are calculated and compared by using finite element software, and the V-shaped permanent magnets, the width and thickness of modulating pieces and the shape of stator slots are selected for the final design. This design increases the torque density of magnetic-gear speed regulator significantly and achieves fairly high operational efficiency.

Key words: synchronous condenser; flywheel energy storage; magnetic-gear speed regulator; torque density; efficiency

(上接第57页 continued from page 57)

Coordinated optimal capacity configuration of energy storage equipped by new energy and transmission lines considering consumption level

XIE Yuguang¹, LI Jinzhong¹, WANG Chuan², GAO Bo¹, ZHENG Tianwen³, MEI Shengwei²

(1. State Grid Anhui Electric Power Research Institute, Hefei 230601, China;

2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

3. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China)

Abstract: With the rapid increase of the proportion of renewable energy power generation represented by wind and photovoltaic power, the uncertainty and volatility of the output of wind farms and photovoltaic power plants pose great challenges to the real-time power balance. The configuration of energy storage with reasonable scale can guarantee the economy and improve the utilization rate of new energy. Therefore, aiming at the new energy power station with known capacity, a chance-constrained programming model for coordinated optimal capacity configuration of energy storage equipped by new energy and transmission lines is proposed, which aims to minimize the construction cost of energy storage and transmission lines, and takes the annual new energy abandonment rate not exceeding the specified index as the chance constraints. Since the chance constraints are usually non-convex and lack explicit expressions, the feasible domain corresponding to the chance constraints is conservatively converted into linear constraints based on conditional value at risk to obtain a linear programming problem which can be efficiently solved, and the robustness of the programming scheme to the probability distribution of new energy scenarios is quantitatively analyzed. The example analysis results show that the proposed programming model can effectively solve the capacity configuration problem of energy storage and transmission lines considering the consumption level of new energy, and the capacity of transmission lines can be reduced by rational configuration of energy storage, thus saving the total investment cost.

Key words: new energy; energy storage; capacity configuration; conditional value at risk; chance-constrained programming; coordinated optimization

附录 A

表 A1 参数设置
Table A1 Parameter setting

参数	数值	参数	数值
T	96	τ / h	1
η_c	0.95	η_{dc}	0.95
γ	0.25	n	1000
$C_{ES} / [\$ / (\text{MW} \cdot \text{h})]$	2×10^5	$C_1 / [\$ / (\text{MW} \cdot \text{h})]$	1.2×10^6
ε	10%	δ	5%

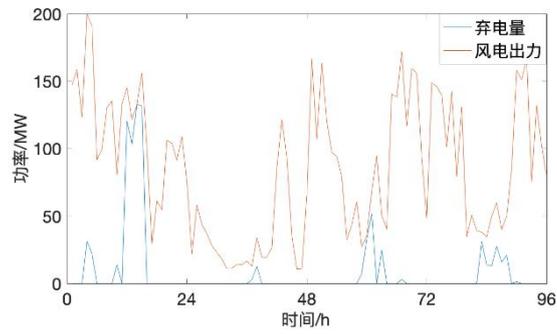


图 A1 风电场的出力和弃风量

Fig.A1 Output power and abandoned wind power of wind farm

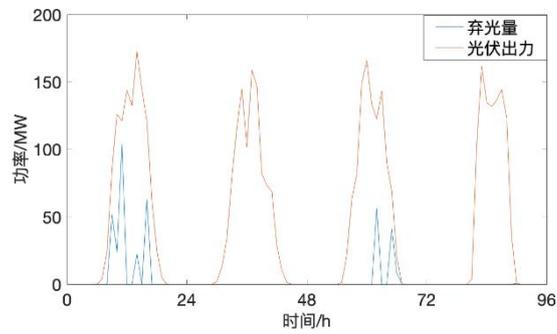


图 A2 光伏电站的出力和弃光量

Fig.A2 Output power and abandoned photovoltaic power of photovoltaic power station