

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.003

基于参数规划的电网侧储能容量价值评估方法

郑波坤¹, 魏韡¹, 于骏², 赵海吉², 梅生伟¹

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;

2. 国家电网公司东北分部, 辽宁 沈阳 110179)

摘要:在新能源大规模接入电力系统的背景下,电网侧储能作为一种灵活资源可以支撑电力系统运行。评估储能应用价值是进行储能容量配置的必要准备工作。文中首先定义3个评估指标,体现出储能对新能源消纳、电力系统灵活性和系统调度经济性的价值;然后基于多参数混合整数线性规划理论,提出一种储能容量价值评估方法,并应用到所提评估指标中,每个评估指标都能得到以储能功率容量和能量容量为参数的分段线性函数;最后使用东北电网数据仿真验证所提模型和方法。结果显示所提方法可以解析刻画储能容量对其应用价值的影响,并将结果进行可视化展示;解析表达式中包含的灵敏度信息揭示了储能容量价值的关键瓶颈参数,并可为不同应用场景储能容量配置提供参考。

关键词:储能容量;价值评估;新能源消纳;灵活性;多参数规划;混合整数线性规划(MILP)

中图分类号:TM71;TM91

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2024)01-0021-11

0 引言

开发利用以风电、光伏为代表的可再生能源是建设新型电力系统和实现“双碳”目标的关键手段。但新能源出力受天气等不确定性因素影响,波动性较大,难以准确预测,给电力系统灵活经济运行带来严峻挑战^[1-2]。储能因具有跨时间、空间转移能量的特性,被认为是支持新能源大规模并网的关键技术,在电力系统中得到了广泛应用^[3-4]。储能在促进新能源消纳^[5-7]、提高系统灵活性^[8-10]、提高系统经济性^[11-12]等方面具有广阔的应用前景。

评估电网侧储能容量价值是进行储能容量配置的必要准备工作,即给定储能功率容量和能量容量,评估其应用价值,从而实现储能应用价值与投资成本的权衡^[13]。部分文献对储能的应用价值进行直接评估。文献[14]为面向新能源消纳的共享储能设计综合评价指标体系,包括经济收益、低碳效益、市场绩效等指标,并使用青海共享储能交易试点数据进行仿真分析,验证了所提指标体系的适用性。文献[15]以储能在促进新能源消纳、降低火电备用、减少网损等方面的价值为基础,建立评估储能应用价值的协同效应矩阵。在高比例新能源接入电网的背景下,文献[16]评估了储能在促进新能源消纳、降低网损、提高系统稳定性等方面的价值;文献[17]评估了储能对能源消纳能力的提升效

果;文献[18]评估了在区域能源互联网中,储能在峰谷差、环境和降低能量损耗三方面的效益,并给出相应评估指标。但直接评估多是利用已有储能运行数据,构建评估指标,对储能应用价值进行评估;或给定储能容量,求解优化问题,进而对储能容量价值进行评估。这些都是在储能容量固定的情况下进行评估,当容量变化时,需要重新获取数据或求解优化问题,其本质上是对容量的采样。这种采样难以定量反映储能容量变化对其应用价值的影响,因此希望能够得到储能应用价值关于储能容量的解析函数表达式,以此评估储能容量价值。

部分文献在进行储能容量优化配置时考虑到储能的应用价值,属于间接评估。文献[19]基于分布鲁棒优化方法建立风电场储能容量规划模型,模型目标为最小化储能投资成本,在约束中考虑弃风率要求。文献[20]评估储能在电网规划和运行中的系统价值,并以经济性为目标,构建储-输联合规划模型。文献[21]在容量配置时考虑峰谷套利、辅助服务等直接价值与促进新能源消纳、降低网损等间接价值,构建双层容量规划模型。但间接评估没有直观给出储能应用价值的评估指标,其结果是最优储能容量规划方案,所以只能评估储能在该容量方案下的应用价值,无法获得定量的解析表达式。

针对上述两类储能价值评估文献的不足,文中构建储能应用价值与储能容量之间的函数表达式,解析刻画储能容量对储能应用价值的影响。首先定义电网侧储能容量价值,并提出3个指标评估储能容量价值;然后基于参数规划理论,提出一种储

收稿日期:2023-07-13;修回日期:2023-09-06

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGDB0000DKJS21-00096)

能容量价值评估方法,该方法可以获得储能应用价值评估指标与储能容量参数之间的分段线性函数表达式;最后通过东北电网算例验证所提储能容量价值评估方法的有效性。

1 电网侧储能容量价值评估模型

本章定义了储能容量价值,并给出紧凑形式的数学表达,提出3种评估指标模型,分别评估电网侧储能在促进新能源消纳、提高系统灵活性和提高系统经济性三方面的应用价值。

1.1 储能容量价值

将储能容量作为参数,含储能的电力系统运行优化问题可抽象为混合整数线性规划(mixed-integer linear program, MILP)问题,如式(1)所示。

$$\begin{cases} v(\boldsymbol{\theta}) = \min \mathbf{c}\mathbf{x} \\ \text{s.t. } \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{y} \leq \mathbf{b} + \mathbf{F}\boldsymbol{\theta} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\boldsymbol{\theta}$ 为储能容量参数向量, $\boldsymbol{\theta} = [\mathbf{P} \ \mathbf{E}]^T$, $\mathbf{P} = (P_1^{\max}, P_2^{\max}, \dots)$,为储能功率容量参数向量, $\mathbf{E} = (E_1^{\max}, E_2^{\max}, \dots)$,为能量容量参数向量; \mathbf{x} 为连续型决策变量; \mathbf{y} 为整数型决策变量; \mathbf{c} 、 \mathbf{b} 为常数向量; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{F} 为常数矩阵。

优化问题式(1)可以是最小化新能源弃电、最小化系统运行成本等。不安装储能时, $\boldsymbol{\theta} = \mathbf{0}$,维数与 \mathbf{F} 兼容,优化问题最优值为 $v(\mathbf{0})$;储能容量为 $\boldsymbol{\theta}$ 时,优化问题最优值为 $v(\boldsymbol{\theta})$ 。此时, $v(\boldsymbol{\theta})$ 与 $v(\mathbf{0})$ 的差别即代表容量为 $\boldsymbol{\theta}$ 的储能给电力系统创造的价值,也就是相应的储能容量价值。因此可定义安装储能容量为 $\boldsymbol{\theta}$ 时,所对应的储能容量价值 $V(\boldsymbol{\theta})$ 为:

$$V(\boldsymbol{\theta}) = |v(\boldsymbol{\theta}) - v(\mathbf{0})| \quad (2)$$

1.2 模型1:促进新能源消纳

模型1评估储能促进新能源消纳的价值。储能可以在新能源发电高峰储存电量,发电低谷释放电量,从而降低新能源弃电量,促进新能源消纳。

1.2.1 模型1优化目标

模型1的优化目标为最小化新能源弃电量:

$$\min \sum_{r \in S_r} \sum_{t \in T} \Delta p_{r,t} \Delta t \quad (3)$$

式中:决策变量 $\Delta p_{r,t}$ 为新能源机组 r 在时段 t 的弃电量; S_r 为新能源机组集合; Δt 为时间间隔; T 为储能运行周期, $T=24 \text{ h}$ 。

1.2.2 模型1约束条件

(1) 电力系统功率平衡约束。

$$\begin{cases} \sum_{g \in S_g} p_{g,t} + \sum_{r \in S_r} (p_{r,t} - \Delta p_{r,t}) + \\ \sum_{e \in S_e} (p_{e,t}^d - p_{e,t}^c) = \sum_{d \in S_d} p_{d,t} \\ 0 \leq \Delta p_{r,t} \leq p_{r,t} \end{cases} \quad (4)$$

式中: S_g 、 S_e 、 S_d 分别为火电机组、储能装置和负荷节点集合;决策变量 $p_{g,t}$ 为火电机组 g 在时段 t 的有功出力; $p_{r,t}$ 为新能源机组 r 在时段 t 的有功出力;决策变量 $p_{e,t}^c$ 、 $p_{e,t}^d$ 分别为储能装置 e 在时段 t 的充电和放电功率; $p_{d,t}$ 为负荷节点 d 在时段 t 的有功负荷需求。新能源弃电量 $\Delta p_{r,t}$ 不超过该时段新能源出力 $p_{r,t}$ 。

(2) 网络潮流约束。

$$\begin{cases} -F_l \leq \sum_{g \in S_g} \pi_{lg} p_{g,t} + \sum_{r \in S_r} \pi_{lr} (p_{r,t} - \Delta p_{r,t}) + \\ \sum_{e \in S_e} \pi_{le} (p_{e,t}^d - p_{e,t}^c) \\ - \sum_{d \in S_d} \pi_{ld} p_{d,t} \leq F_l \quad \forall l \in S_l \end{cases} \quad (5)$$

式中: S_l 为传输线路的集合; F_l 为线路 l 的最大传输容量; π_{lg} 、 π_{lr} 、 π_{le} 、 π_{ld} 分别为火电机组 g 、新能源机组 r 、储能装置 e 以及有功负荷 d 关于传输线路 l 的功率转移分布因子。文中使用直流潮流来描述电力系统的潮流分布,式(5)为传输线路 l 的容量约束。

(3) 火电机组出力约束。

$$\begin{cases} p_g^{\min} \leq p_{g,t} \leq p_g^{\max} \\ -r_g^- \leq p_{g,t+1} - p_{g,t} \leq r_g^+ \quad \forall t \in T \end{cases} \quad (6)$$

式中: p_g^{\max} 、 p_g^{\min} 分别为火电机组 g 有功出力上、下界; r_g^- 、 r_g^+ 分别为火电机组 g 向下、向上调节出力的爬坡速率上界。式(6)为火电机组 g 出力范围约束和爬坡约束。

(4) 储能装置约束。

$$\begin{cases} 0 \leq p_{e,t}^c \leq P_e^{\max} \\ 0 \leq p_{e,t}^d \leq b_{e,t} M_1 \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} 0 \leq p_{e,t}^d \leq P_e^{\max} \\ 0 \leq p_{e,t}^c \leq (1 - b_{e,t}) M_1 \end{cases} \quad (8)$$

$$E_{e,t} = E_{e,t-1} + (\eta_e^c p_{e,t}^c - p_{e,t}^d / \eta_e^d) \Delta t \quad \forall t \in T \quad (9)$$

$$\alpha_e E_e^{\max} \leq E_{e,t} \leq E_e^{\max} \quad (10)$$

$$E_{e,0} = E_{e,T} \quad (11)$$

式中: P_e^{\max} 、 E_e^{\max} 分别为储能装置 e 的功率容量和能量容量; $b_{e,t}$ 为0-1变量,为1表示储能装置充电,为0表示放电; M_1 为大M法系数,其值至少大于 P_e^{\max} ; $E_{e,t}$ 为储能装置 e 在时段 t 储存的电量; $E_{e,0}$ 、 $E_{e,T}$ 分别为储能装置 e 在一个调度周期的初始、最终储存电量; η_e^c 、 η_e^d 分别为储能装置 e 的充、放电效率; α_e 为储能装置 e 存储电量下界系数。式(7)、式(8)限制了充放电最大功率,且大M法为充放电变量加上了互补松弛约束,即不能同时充放电;式(9)

描述了储能储存电量的动态过程,是多时段耦合的约束;式(10)为储能储存电量的上下界约束;式(11)表示经过一个调度周期,储能存储电量回归初始状态。

1.3 模型2:提高系统灵活性

模型2评估储能提高电力系统灵活性的价值。在电力系统中,为了实现新能源消纳,须对传统火电机组进行灵活性改造,增大向下调峰能力^[22]。储能可以提高系统调峰能力,替代火电灵活性改造,因此可以使用火电机组灵活性改造替代量作为指标来衡量储能对系统灵活性的影响。

1.3.1 模型2优化目标

模型2的优化目标为最小化机组灵活性改造量:

$$\min \sum_{g \in S_g} \Delta p_g \quad (12)$$

式中:决策变量 Δp_g 为火电机组 g 的灵活性改造量。模型2中,火电机组的灵活性改造均为降低其出力下限,进而提高火电机组出力灵活性,以应对新能源出力的波动性。

1.3.2 模型2约束条件

(1) 电力系统功率平衡约束。

$$\sum_{g \in S_g} p_{g,t} + \sum_{r \in S_r} p_{r,t} + \sum_{e \in S_e} (p_{e,t}^d - p_{e,t}^c) = \sum_{d \in S_d} p_{d,t} \quad (13)$$

式(13)与式(2)含义相同,不同之处在于在考虑模型2机组组合问题时,假设火电机组灵活性改造后能够消纳所有的新能源出力,不出现新能源弃电现象。

(2) 网络潮流约束。

$$\begin{cases} -F_l \leq \sum_{g \in S_g} \pi_{lg} p_{g,t} + \sum_{r \in S_r} \pi_{lr} p_{r,t} + \\ \sum_{e \in S_e} \pi_{le} (p_{e,t}^d - p_{e,t}^c) \\ - \sum_{d \in S_d} \pi_{ld} p_{d,t} \leq F_l \quad \forall l \in S_l \end{cases} \quad (14)$$

(3) 火电机组出力约束。

$$b_{g,t} (p_g^{\min} - \Delta p_g) \leq p_{g,t} \leq p_g^{\max} b_{g,t} \quad (15)$$

$$0 \leq \Delta p_g \leq p_g^{\min} \quad (16)$$

$$p_{g,t} - p_{g,t-1} \leq b_{g,t-1} r_g^+ + (1 - b_{g,t-1}) (p_g^{\min} - \Delta p_g) \quad (17)$$

$$p_{g,t-1} - p_{g,t} \leq b_{g,t} r_g^- + (1 - b_{g,t}) (p_g^{\min} - \Delta p_g) \quad (18)$$

$$b_{g,\tau} \geq b_{g,t} - b_{g,t-1}$$

$$\forall t \in T; \tau = t, t+1, \dots, \min \{t + T_g^{\text{on}} - 1, T\} \quad (19)$$

$$b_{g,\tau} \leq 1 + b_{g,t} - b_{g,t-1}$$

$$\forall t \in T; \tau = t, t+1, \dots, \min \{t + T_g^{\text{off}} - 1, T\} \quad (20)$$

式中: $b_{g,t}$ 为0-1变量,为1表示机组处于运行状态,为0表示处于关闭状态; T_g^{on} 、 T_g^{off} 分别为火电机组 g 开机、停机持续时间。灵活性改造降低了火电机组最小出力的下限,变为了 $p_g^{\min} - \Delta p_g$ 。式(15)为火电机组 g 的出力约束;式(16)为机组灵活性改造的范围;式(17)、式(18)为机组爬坡速率约束;式(19)、式(20)为开停机时间约束。

在式(15)中,出现了整数变量和连续变量相乘的双线性项 $b_{g,t} \Delta p_g$,引入连续型辅助变量 $z_{g,t}$:

$$\begin{cases} 0 \leq z_{g,t} \leq M_2 b_{g,t} \\ 0 \leq \Delta p_g - z_{g,t} \leq M_2 (1 - b_{g,t}) \end{cases} \quad (21)$$

式中: M_2 是一个足够大的常数。无论 $b_{g,t}$ 取0还是1,该约束均能保证 $z_{g,t} = b_{g,t} \Delta p_g$ 成立。

(4) 储能装置约束。储能装置的约束同式(7)一式(11)。

1.4 模型3:提高系统经济性

模型3评估储能提高电力系统经济性的价值。储能可以降低系统运行成本,进而提高系统经济性。

1.4.1 模型3优化目标

模型3的优化目标为最小化系统运行成本:

$$\min \sum_{g \in S_g} \sum_{t \in T} (C_g p_{g,t} + C_g^{\text{SU}} s_{g,t}^{\text{SU}} + C_g^{\text{SD}} s_{g,t}^{\text{SD}}) + \sum_{d \in S_d} C_d \Delta p_{d,t} \quad (22)$$

式中: C_g 为单位煤耗成本; C_g^{SU} 、 C_g^{SD} 分别为火电机组 g 开机、关机成本; C_d 为单位弃负荷惩罚;决策变量 $s_{g,t}^{\text{SU}}$ 、 $s_{g,t}^{\text{SD}}$ 分别为火电机组 g 在时段 t 的启、停信号;决策变量 $\Delta p_{d,t}$ 为负荷 d 在时段 t 的弃负荷量。

1.4.2 模型3约束条件

(1) 电力系统功率平衡约束。

$$\begin{cases} \sum_{g \in S_g} p_{g,t} + \sum_{r \in S_r} (p_{r,t} - \Delta p_{r,t}) + \sum_{e \in S_e} (p_{e,t}^d - p_{e,t}^c) = \\ \sum_{d \in S_d} (p_{d,t} - \Delta p_{d,t}) \\ 0 \leq \Delta p_{r,t} \leq p_{r,t} \\ 0 \leq \Delta p_{d,t} \leq p_{d,t} \end{cases} \quad (23)$$

(2) 网络潮流约束。

$$\begin{cases} -F_l \leq \sum_{g \in S_g} \pi_{lg} p_{g,t} + \sum_{r \in S_r} \pi_{lr} (p_{r,t} - \Delta p_{r,t}) + \\ \sum_{e \in S_e} \pi_{le} (p_{e,t}^d - p_{e,t}^c) \\ - \sum_{d \in S_d} \pi_{ld} (p_{d,t} - \Delta p_{d,t}) \leq F_l \quad \forall l \in S_l \end{cases} \quad (24)$$

(3) 火电机组出力约束。

$$b_{g,t}P_g^{\min} \leq p_{g,t} \leq P_g^{\max} b_{g,t} \quad (25)$$

$$p_{g,t} - p_{g,t-1} \leq b_{g,t-1}r_g^+ + (1 - b_{g,t-1})p_g^{\min} \quad (26)$$

$$p_{g,t-1} - p_{g,t} \leq b_{g,t}r_g^- + (1 - b_{g,t})p_g^{\min} \quad (27)$$

$$b_{g,\tau} \geq b_{g,t} - b_{g,t-1}$$

$$\forall t \in T; \tau = t, t+1, \dots, \min\{t + T_g^{\text{on}} - 1, T\} \quad (28)$$

$$b_{g,\tau} \leq 1 + b_{g,t} - b_{g,t-1}$$

$$\forall t \in T; \tau = t, t+1, \dots, \min\{t + T_g^{\text{off}} - 1, T\} \quad (29)$$

$$\begin{cases} s_{g,t}^{\text{SU}} \geq b_{g,t} - b_{g,t-1} & s_{g,t}^{\text{SU}} \geq 0 \\ s_{g,t}^{\text{SD}} \geq b_{g,t-1} - b_{g,t} & s_{g,t}^{\text{SD}} \geq 0 \end{cases} \quad (30)$$

(4) 储能装置约束。储能装置的约束同式(7)~式(11)。

2 多参数 MILP 模型及算法

3类模型分别评估了电网侧储能对新能源消纳、系统灵活性和系统经济性的价值,其本质上都是含储能容量参数的 MILP。在其他条件不变的情况下,如果储能功率容量 P 和能量容量 E 改变, MILP 的最优解和最优值就会改变,储能容量价值也随之改变。分析储能容量 θ 变化对储能容量价值 $V(\theta)$ 的影响,即获得优化模型最优值 $v(\theta)$ 关于储能容量 θ 的解析函数表达式,多参数规划理论可以满足该诉求。3类模型都是以储能容量 θ 为参数的多参数 MILP (multi-parametric MILP, mp-MILP),如图1所示。

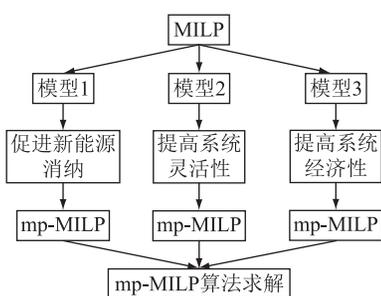


图1 3种模型总结

Fig.1 Summary of 3 models

2.1 mp-MILP 标准模型

标准的 mp-MILP 模型如下:

$$\begin{cases} v(\theta) = \min cx \\ \text{s.t. } Ax + By \leq b + F\theta \\ \theta = \{\theta \mid K\theta \leq h\} \end{cases} \quad (31)$$

式中:参数多面体空间 Θ 为 θ 的取值范围; h 为常数向量; K 为常数矩阵。

在多参数规划模型里,求解优化问题的目标是

将参数空间 Θ 划分为 N 个关键区域 (critical region, CR), 记作 $C_i^{\text{CR}}, i = 1, 2, \dots, N$, 并获得最优值 $v(\theta)$ 与参数 θ 之间的解析关系。关键区域 C_i^{CR} 为多面体,其维数与参数 θ 的维数相同,是参数 θ 的取值空间。多参数规划思想来源于优化问题的灵敏度分析,即定量分析参数 θ 的变化对最优值 $v(\theta)$ 的影响。在关键区域 C_i^{CR} 内, $v(\theta)$ 与参数 θ 之间为线性解析关系^[23],如式(32)所示。

$$v(\theta) = m_i\theta + n_i \quad \theta \in C_i^{\text{CR}} \quad (32)$$

式中: m_i 为向量,其长度与参数向量 θ 相同; n_i 为常数。关键区域 C_i^{CR} 划分理论以及 m_i 和 n_i 的确定方法参考文献^[23]。

基于多参数规划理论,可以得到最优值 $v(\theta)$ 关于储能容量参数 θ 的解析分段线性函数。应用到文中所提 3 种指标模型中,即可得到优化目标式(1)、式(12)、式(22)关于储能容量的分段线性表达式。相比于传统方法,当储能容量 θ 发生变化时,无须重复求解优化问题,只要将新容量值代入分段线性函数,即可获得储能应用价值评估结果。

为了将 3 种模型转化为 mp-MILP 标准模型,等式约束可以通过引入不等号“ \geq ”、“ \leq ”,转化为不等式约束。在模型 1 中,连续型决策变量 x 代表 $\Delta p_{r,t}, p_{g,t}, p_{e,t}^c, p_{e,t}^d$; 整数型决策变量 y 代表 $b_{e,t}$ 。在模型 2 中,连续型决策变量 x 代表 $\Delta p_g, p_{g,t}, p_{e,t}^c, p_{e,t}^d, z_{g,t}$; 整数型决策变量 y 代表 $b_{e,t}, b_{g,t}$ 。在模型 3 中,连续型决策变量 x 代表 $p_{g,t}, p_{e,t}^c, p_{e,t}^d, s_{g,t}^{\text{SU}}, s_{g,t}^{\text{SD}}$; 整数型决策变量 y 代表 $b_{e,t}, b_{g,t}$ 。参数向量 θ 为储能功率容量和能量容量;参数空间 Θ 为多面体,表示储能容量的变化范围,可由储能的最小容量约束、最大容量约束、总投资预算约束等组成。 c, A, B, b, F, K, h 可从 3 种模型的优化问题中提取。

2.2 mp-MILP 求解算法

参考文献^[24],求解 mp-MILP 的算法如图 2 所示,可概括为以下步骤。

步骤(1):初始化。将 θ 看作决策变量,求解 MILP 问题式(31),得到整数变量的初始给定值 \bar{y}_0 。

步骤(2):求解多参数线性规划 (multi-parametric linear program, mp-LP) 问题。给定整数变量 \bar{y} 和参数 θ 取值范围 Θ ,式(31)从 MILP 变为线性规划 (linear program, LP),可以使用 POP 参数规划工具包^[25]求解 mp-LP 问题式(33)。结果包括参数 θ 关键区域的划分和关键区域 C_i^{CR} 所对应的线性最优值函数 $v_i(\theta)$ 。为便于表述,将 C_i^{CR} 所对应的整数变量记作 y_i 。多参数规划的结果为 $\{C_i^{\text{CR}}, y_i,$

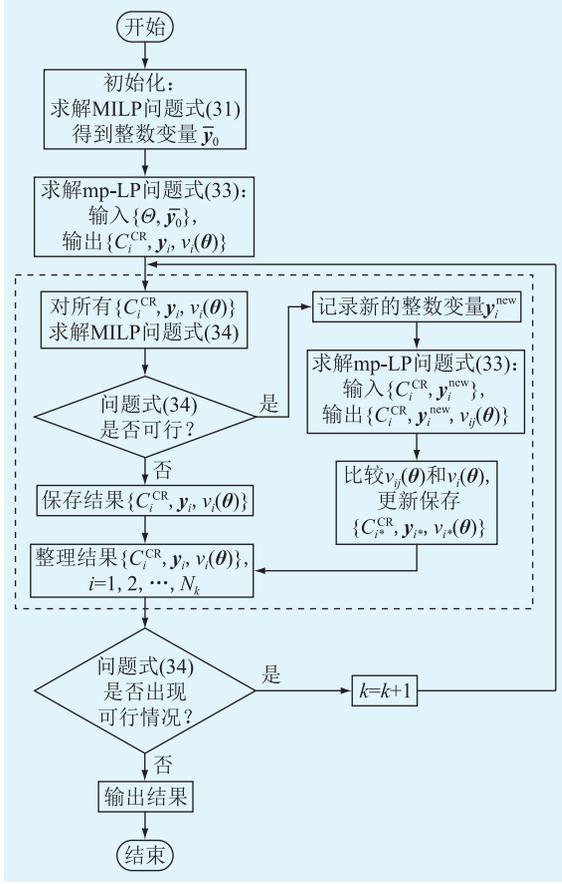


图2 mp-MILP 算法求解流程

Fig.2 Flow chart for mp-MILP algorithm

$v_i(\theta)\}, i=1, 2, \dots, N$ 。

$$\begin{cases} v(\theta) = \min_{x, \theta} cx \\ \text{s.t. } Ax + By \leq b + F\theta \\ \theta \in \Theta \end{cases} \quad (33)$$

步骤(3): 求解 MILP 问题。对任一 $\{C_i^{\text{CR}}, y_i, v_i(\theta)\}, i=1, 2, \dots, N$, 求解 MILP 问题式(34)。

$$\begin{cases} v(\theta) = \min_{x, y, \theta} cx \\ \text{s.t. } Ax + By \leq b + F\theta \\ cx \leq v_i(\theta) \quad \theta \in C_i^{\text{CR}} \\ \|y - y_i\|_2^2 \geq 1 \end{cases} \quad (34)$$

其中 $\|y - y_i\|_2^2 \geq 1$ 限制整数变量不能和 y_i 相同。若式(34)不可行, 当前的 $v_i(\theta)$ 即为参数 θ 在 C_i^{CR} 上的最优值函数, 保存结果 $\{C_i^{\text{CR}}, y_i, v_i(\theta)\}$ 。若式(34)可行, 记录新的整数变量结果 y_i^{new} , 将 $\{C_i^{\text{CR}}, y_i^{\text{new}}\}$ 代入 mp-LP 问题式(33), 得到参数 θ 关键区域的划分 $C_{ij}^{\text{CR}}, C_i^{\text{CR}} = C_{i1}^{\text{CR}} \cup C_{i2}^{\text{CR}} \cup \dots \cup C_{im}^{\text{CR}}$ 和关键区域 C_{ij}^{CR} 对应的线性最优值函数 $v_{ij}(\theta)$, 比较 $v_i(\theta)$ 和 $v_{ij}(\theta)$, 较小的部分即为 $v_{i*}(\theta)$, 将 $v_{i*}(\theta)$ 对应的关键区域记作 C_{i*}^{CR} 、整数变量取值记作 y_{i*} , 保存结果 $\{C_{i*}^{\text{CR}}, y_{i*}, v_{i*}(\theta)\}$ 。

步骤(4): 循环收敛。在步骤(3)结束后, 将所有结果统一记为 $\{C_i^{\text{CR}}, y_i, v_i(\theta)\}, i=1, 2, \dots, N_k, k$ 为循环次数。将所有结果重新代入步骤(3), 若该次循环中对任一 $\{C_i^{\text{CR}}, y_i, v_i(\theta)\}$, 问题式(34)均不可行, 算法终止。最终得到的结果如下:

$$v(\theta) = \begin{cases} m_1\theta + n_1 & \theta \in C_1^{\text{CR}} \\ m_2\theta + n_2 & \theta \in C_2^{\text{CR}} \\ \vdots & \vdots \\ m_{N_k}\theta + n_{N_k} & \theta \in C_{N_k}^{\text{CR}} \end{cases} \quad (35)$$

其中参数空间 Θ 共被分为互不重叠的 N_k 个关键区域; m_1, m_2, \dots, m_{N_k} 为向量, 代表斜率; n_1, n_2, \dots, n_{N_k} 为常数, 代表截距; 最优值函数 $v(\theta)$ 是分段线性函数。可以看到, 当储能容量参数 θ 在不同关键区域时, 评估指标值是关于 θ 的线性函数。给定参数 θ , 式(35)可解析计算 θ 所对应的价值。

3 算例分析

3.1 算例介绍

为验证文中模型和方法的有效性, 选取东北电网数据进行仿真分析, 东北电网参数如表 1 所示。从电网整体的角度, 定义总的储能功率容量为 P^{max} , 总的能量容量为 E^{max} 。图 3 为典型日负荷与新能源出力, 时间间隔为 1 h, S1、S2、S3、S4 分别代表四季典型日。

表 1 东北电网参数

Table 1 Parameters of Northeast Power Grid

参数	数值
火电装机容量/MW	7.7×10^4
火电出力下限系数	0.6
风电装机容量/MW	3.75×10^4
光伏装机容量/MW	1.2×10^4
电力负荷范围/MW	$5.76 \times 10^4 \sim 6.95 \times 10^4$
储能充/放电效率	0.9
P^{max} /MW	$0 \sim 2 \times 10^4$
E^{max} /(MW·h)	$0 \sim 4 \times 10^4$

在安装 Yalmip 的 MATLAB 中建模, 并使用商用求解器 Cplex 12.8 求解该 mp-MILP 问题。

3.2 模型 1 结果分析

使用 mp-MILP 算法求解模型 1, 得到参数关键区域的划分如图 4 所示, 共分为 4 个区域, 各个区域的定义见式(36)。与各个关键区域相对应的最优值的可视化结果如图 5 所示, 其解析表达式见式(37)。结果表明在没有安装储能的情况下, 系统每天的新能源弃电量高达 1.61×10^4 MW·h。当储能容量参数位于 C_4^{CR} 时, 可以实现新能源的全部消纳。

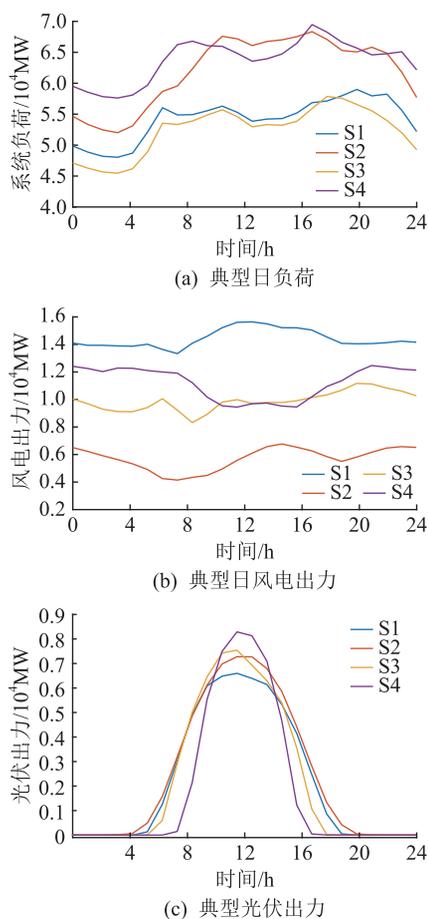


图3 典型日负荷与新能源出力曲线
Fig.3 Typical daily demand curves and renewable energy output curves

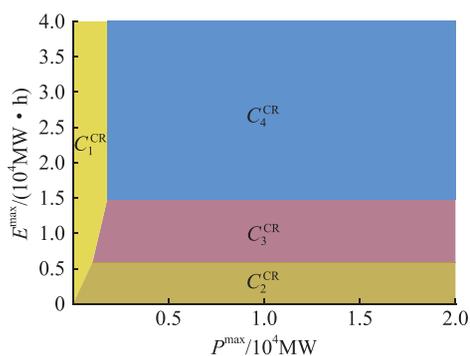


图4 模型1关键区域划分

Fig.4 Partition of critical regions in model 1

$$\begin{cases}
 C_1^{CR} = \{ \theta \mid 0 \leq P^{\max} \leq 0.18, 0 \leq E^{\max} \leq 4, \\
 \quad 5.13P^{\max} \leq E^{\max}, 11.53P^{\max} - 0.59 \leq E^{\max} \} \\
 C_2^{CR} = \{ \theta \mid 0 \leq P^{\max} \leq 2, 0 \leq E^{\max} \leq 0.59, \\
 \quad E^{\max} \leq 5.13P^{\max} \} \\
 C_3^{CR} = \{ \theta \mid 0.10 \leq P^{\max} \leq 2, 0.59 \leq E^{\max} \leq 1.47, \\
 \quad E^{\max} \leq 11.53P^{\max} - 0.59 \} \\
 C_4^{CR} = \{ \theta \mid 0.18 \leq P^{\max} \leq 2, 1.47 \leq E^{\max} \leq 4 \}
 \end{cases} \quad (36)$$

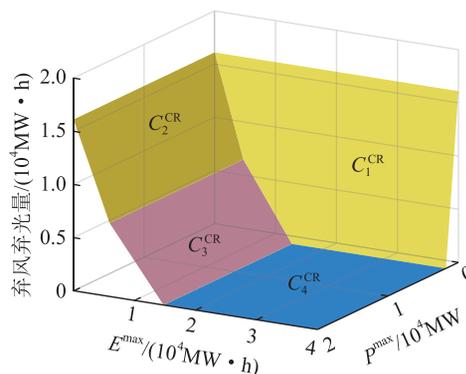


图5 模型1最优值函数

Fig.5 The optimal value function of model 1

$$v_1(\theta) = \begin{cases} 1.61 - [9 \ 0] \theta & \theta \in C_1^{CR} \\ 1.61 - [0 \ 1.56] \theta & \theta \in C_2^{CR} \\ 1.15 - [0 \ 0.78] \theta & \theta \in C_3^{CR} \\ 0 & \theta \in C_4^{CR} \end{cases} \quad (37)$$

$v_1(\theta)$ 以解析形式评估储能容量价值。考虑储能对提高新能源消纳能力的影响,给定储能容量值,可以直观地通过图4或根据式(36)确定该容量取值所处的关键区域 C_i^{CR} ,然后在式(37)找到关键区域 C_i^{CR} 对应的最优值函数 $v_{1,i}(\theta)$,将容量值代入 $v_{1,i}(\theta)$ 即可得到相应的弃电量。

更重要的是,解析表达式 $v_1(\theta)$ 还揭示了新能源弃电量和储能容量之间的灵敏度关系。考虑 $\theta^0 = [0.5 \ 1]^T$,参数落在关键区域 C_3^{CR} ,最优值函数为 $v_{1,3}(\theta^0) = 1.15 - [0 \ 0.78] \theta^0$ 。功率容量参数 P^{\max} 前的系数为0,这表明即使在0.5的基础上再增大储能功率容量,新能源弃电量也不会减少,此时限制新能源消纳的瓶颈不在于储能的功率容量 P^{\max} ,而在于其能量容量 E^{\max} 。 E^{\max} 前的系数为0.78,表明每增加 $1 \times 10^4 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 的能量容量,每天可减少 $0.78 \times 10^4 \text{ MW} \cdot \text{h}$ 的新能源弃电量。同理,当参数落入其他关键区域时,可采用同样的分析方法。

图4中不同关键区域的公共边界同样具有分析价值。以 C_1^{CR} 和 C_2^{CR} 的公共边界为例,当储能容量处于该边界上时,结合 $v_1(\theta)$ 可知,单独增加储能功率容量或者能量容量均不能提高新能源消纳率。考虑到储能的成本,避免资源的浪费,该公共边界是最高效率配置储能容量的参数组合,此时 $E^{\max}/P^{\max} = 5.13$ 。

此外,给定新能源弃电量时,也可以计算出所需要的储能容量配置方案,整个过程简单且直接。考虑新能源弃电量不超过 $v_1(\theta) = 0.4 \times 10^4 \text{ MW} \cdot \text{h}$,查看图5的z轴坐标可以看到处于 C_1^{CR} 和 C_3^{CR} 的容量参数能够满足新能源弃电量的要求。由于 C_1^{CR} 和

C_3^{CR} 公共边界是最优容量配置方案,因此可以求解线性方程组:

$$\begin{cases} 1.61 - [9 \ 0]\boldsymbol{\theta} = 0.4 \\ 1.15 - [0 \ 0.78]\boldsymbol{\theta} = 0.4 \end{cases} \quad (38)$$

得到最优容量配置结果为 $P^{\text{max}} = 0.13, E^{\text{max}} = 0.96$ 。获取该容量配置方案不要求解复杂的优化问题。

上述分析可为电网决策者提供有价值的参考,一方面找到限制新能源消纳的关键因素,另一方面实现最高效率配置储能容量资源。

结合文中方法,使用文献[26]中的成本数据,储能单位功率容量成本为 5×10^5 元/MW,储能单位能量容量成本为 1.3×10^6 元/(MW·h),表2总结了在不同新能源弃电量要求的情况下,得到的储能容量最优配置方案。从表2可以看出,最优的容量配置方案均处于各关键区域的边界处。

表2 不同新能源弃电量要求下的储能容量配置方案

Table 2 Energy storage configuration results under different renewable curtailment limitations

弃电量/ ($10^4 \text{MW} \cdot \text{h}$)	容量配置方案		总成本/ 亿元	方案所处 位置
	功率/ (10^4MW)	能量/ ($10^4 \text{MW} \cdot \text{h}$)		
0	0.180	1.47	200.10	C_4^{CR}
0.40	0.130	0.96	131.72	C_1^{CR} 与 C_3^{CR} 交界处
0.80	0.090	0.45	62.83	C_1^{CR} 与 C_5^{CR} 交界处
1.20	0.050	0.26	36.67	C_1^{CR} 与 C_2^{CR} 交界处
1.50	0.012	0.07	9.78	C_1^{CR} 与 C_2^{CR} 交界处
1.61	0	0	0	无储能

3.3 模型2 结果分析

使用 mp-MILP 算法求解模型2,得到参数关键区域的划分如图6所示,共分为5个关键区域,各个区域的定义见式(39)。与各个关键区域相对应的最优值函数的可视化结果如图7所示,其解析表达式见式(40)。仿真结果表明在没有安装储能的情况下,为保证新能源的完全消纳,传统火电机组的灵活性改造量为 0.47×10^4 MW,占火电机组总容量的6.1%,即火电出力调节范围由 $4.62 \times 10^4 \sim 7.7 \times 10^4$ MW 扩大到 $4.15 \times 10^4 \sim 7.7 \times 10^4$ MW。当储能容量参数位于 C_5^{CR} 时,火电灵活性改造量为0,即储能的使用可以完全替代火电灵活性改造。在 C_5^{CR} 内,考虑到投资成本,花费最少的储能容量为 $\boldsymbol{\theta} = [0.47 \ 2.75]^T$,此时储能的灵活性价值相当于火电灵活性改造量 0.47×10^4 MW 的价值。

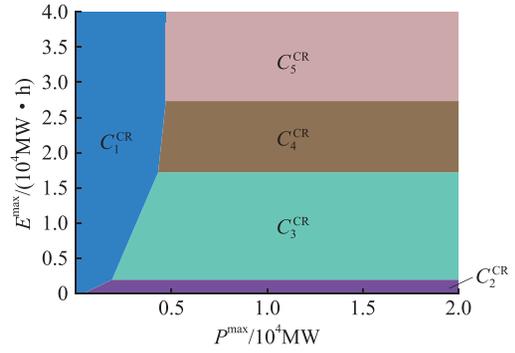


图6 模型2 关键区域划分

Fig.6 Partition of critical regions in model 2

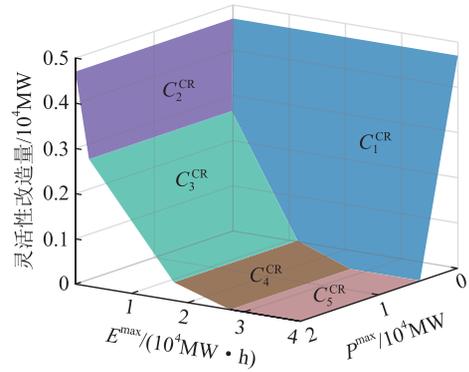


图7 模型2 最优值函数

Fig.7 The optimal value function of model 2

$$\begin{cases} C_1^{\text{CR}} = \{ \boldsymbol{\theta} \mid 0 \leq P^{\text{max}} \leq 0.47, 0 \leq E^{\text{max}} \leq 4, \\ 1.28P^{\text{max}} \leq E^{\text{max}}, 6.25P^{\text{max}} - 0.94 \leq E^{\text{max}}, \\ 25P^{\text{max}} - 9 \leq E^{\text{max}} \} \\ C_2^{\text{CR}} = \{ \boldsymbol{\theta} \mid 0 \leq P^{\text{max}} \leq 2, 0 \leq E^{\text{max}} \leq 0.24, \\ E^{\text{max}} \leq 1.28P^{\text{max}} \} \\ C_3^{\text{CR}} = \{ \boldsymbol{\theta} \mid 0.19 \leq P^{\text{max}} \leq 2, 0.24 \leq E^{\text{max}} \leq 1.75, \\ E^{\text{max}} \leq 6.25P^{\text{max}} - 0.94 \} \\ C_4^{\text{CR}} = \{ \boldsymbol{\theta} \mid 0.43 \leq P^{\text{max}} \leq 2, 1.75 \leq E^{\text{max}} \leq 2.75, \\ E^{\text{max}} \leq 25P^{\text{max}} - 9 \} \\ C_5^{\text{CR}} = \{ \boldsymbol{\theta} \mid 0.47 \leq P^{\text{max}} \leq 2, 2.75 \leq E^{\text{max}} \leq 4 \} \end{cases} \quad (39)$$

$$v_2(\boldsymbol{\theta}) = \begin{cases} 0.47 - [1 \ 0]\boldsymbol{\theta} & \boldsymbol{\theta} \in C_1^{\text{CR}} \\ 0.47 - [0 \ 0.78]\boldsymbol{\theta} & \boldsymbol{\theta} \in C_2^{\text{CR}} \\ 0.32 - [0 \ 0.16]\boldsymbol{\theta} & \boldsymbol{\theta} \in C_3^{\text{CR}} \\ 0.11 - [0 \ 0.04]\boldsymbol{\theta} & \boldsymbol{\theta} \in C_4^{\text{CR}} \\ 0 & \boldsymbol{\theta} \in C_5^{\text{CR}} \end{cases} \quad (40)$$

$v_2(\boldsymbol{\theta})$ 的线性表达式解析评估了储能容量价值。考虑储能对系统灵活性的影响,给定储能装置的容量值,可以直观地通过图6或式(39)确定该储能容量值所处的关键区域 C_i^{CR} ,然后在式(40)找到关键区域所对应的最优值函数 $v_{2,i}(\boldsymbol{\theta})$,将参数代入

$v_{2,i}(\theta)$ 即可得到相应的火电灵活性改造量,其与 0.47×10^4 MW 的差值即为储能容量的灵活性价值。同样考虑储能容量 $\theta^0 = [0.5 \ 1]^T$, 参数落在关键区域 C_3^{CR} , 最优值函数为 $v_{2,3}(\theta^0) = 0.32 - [0 \ 0.16]\theta^0$ 。最优值函数和储能的功率容量参数 P^{\max} 无关, 这表明此时降低火电灵活性改造量的瓶颈不在于储能的功率容量 P^{\max} , 而在于其能量容量 E^{\max} 。 E^{\max} 前的系数为 0.16, 表明每增加 1×10^4 MW·h 的能量容量, 其灵活性价值相当于 0.16×10^4 MW 的火电灵活性改造量。当储能参数落入其他关键区域时, 可采用同样的分析方法。

此外, 图 6 不同关键区域的共同边界同样具有分析价值。以 C_1^{CR} 和 C_2^{CR} 的公共边界为例, 当储能容量处于该边界时, 单独增加功率容量或者能量容量均不能降低火电机组灵活性改造量, 所以该公共边界是最高效率配置储能容量的参数组合, 此时 $E^{\max}/P^{\max} = 1.28$ 。能量与功率比值小于 2, 该数值从侧面反映在 C_1^{CR} 和 C_2^{CR} 的公共边界上, 储能的功率容量对于电力系统调峰还是比较重要的。

上述分析同样可为决策者提供有价值的参考, 决策者可以配置储能或者火电灵活性改造, 以提高系统调峰能力, 从而提高系统灵活性。该方法可以帮助决策者评估储能的灵活性价值, 其价值可以通过火电灵活性改造替代量表示, 并且可以为高效率配置储能容量资源提供参考。

3.4 模型 3 结果分析

使用 mp-MILP 算法求解模型 3, 得到参数关键区域的划分如图 8 所示, 共分为 4 个关键区域, 各个区域的定义见式 (41)。与各个关键区域相对应的最优值函数的可视化结果如图 9 所示, 其解析表达式见式 (42)。仿真结果表明没有安装储能时, 系统日运行成本为 5.78 亿元。当储能容量参数位于 C_4^{CR} 时, 系统运行成本为 5.68 亿元。即使再增加储能容量, 系统运行成本也不会再降低, 所以安装储能最多能降低运行成本 0.1 亿元。在 C_4^{CR} 内, 考虑到投资成本, 花费最少的储能容量为 $\theta = [0.17 \ 3.5]^T$, 此时储能容量价值为降低系统运行成本 0.1 亿元。

$$\begin{cases} C_1^{CR} = \{\theta \mid 0 \leq P^{\max} \leq 0.17, 0 \leq E^{\max} \leq 4, \\ \quad 10P^{\max} \leq E^{\max}, 30P^{\max} - 1.5 \leq E^{\max}\} \\ C_2^{CR} = \{\theta \mid 0 \leq P^{\max} \leq 2, 0 \leq E^{\max} \leq 0.75, \\ \quad E^{\max} \leq 10P^{\max}\} \\ C_3^{CR} = \{\theta \mid 0.075 \leq P^{\max} \leq 2, 0.75 \leq E^{\max} \leq 3.5, \\ \quad E^{\max} \leq 30P^{\max} - 1.5\} \\ C_4^{CR} = \{\theta \mid 0.17 \leq P^{\max} \leq 2, 3.5 \leq E^{\max} \leq 4\} \end{cases} \quad (41)$$

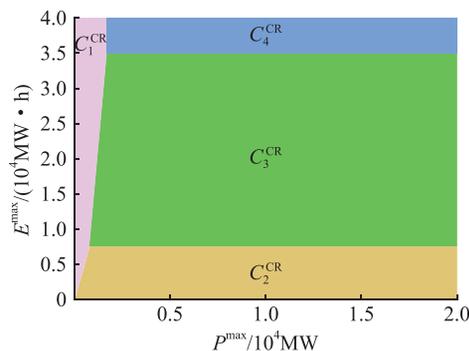


图 8 模型 3 关键区域划分

Fig.8 Partition of critical regions in model 3

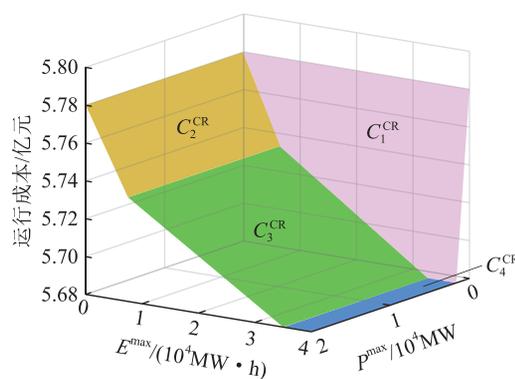


图 9 模型 3 最优值函数

Fig.9 The optimal value function of model 3

$$v_3(\theta) = \begin{cases} 5.78 - [0.6 \ 0]\theta & \theta \in C_1^{CR} \\ 5.78 - [0 \ 0.06]\theta & \theta \in C_2^{CR} \\ 5.735 - [0 \ 0.02]\theta & \theta \in C_3^{CR} \\ 5.68 & \theta \in C_4^{CR} \end{cases} \quad (42)$$

$v_3(\theta)$ 的分段线性表达式解析评估了储能容量价值。考虑电网侧储能提高系统经济性的应用价值, 给定储能容量值, 可以直观地通过图 8 或式 (41) 确定该容量值所在的关键区域 C_i^{CR} , 然后在式 (42) 找到关键区域所对应的最优值函数 $v_{3,i}(\theta)$, 将参数代入 $v_{3,i}(\theta)$ 即可得到相应的运行成本, 其与 5.78 亿元的差值即为储能容量的经济价值。同样考虑储能容量 $\theta^0 = [0.5 \ 1]^T$, 参数落在关键区域 C_3^{CR} , 最优值函数为 $v_{3,3}(\theta^0) = 5.735 - [0 \ 0.02]\theta^0$ 。最优值函数和储能的功率容量参数 P^{\max} 无关, 这表明此时降低系统运行成本的关键不在于储能的功率容量 P^{\max} , 而在于其能量容量 E^{\max} 。 E^{\max} 前的系数为 0.02, 表明每增加 1×10^4 MW·h 的能量容量, 其经济性价值为降低日运行成本 200 万元。当储能容量参数落入其他关键区域时, 可采用同样的分析方法。

图 8 中不同关键区域的共同边界同样具有分析价值。以 C_1^{CR} 和 C_2^{CR} 的公共边界为例, 当储能容量

处于该边界上时,此时单独增加功率容量或者能量容量均不能降低运行成本,所以该公共边界是最高效率配置储能容量的参数组合,此时 $E^{\max}/P^{\max} = 10$ 。由于能量与功率比值为10,该数值从侧面反映在 C_1^{CR} 和 C_2^{CR} 的公共边界上,储能的能量容量对于电力系统经济运行还是比较重要的。

上述分析可为决策者提供有价值的参考,如储能最多能降低系统日运行成本0.1亿元。 C_1^{CR} 和 C_2^{CR} 的公共边界 $E^{\max}/P^{\max} = 10$, C_1^{CR} 和 C_3^{CR} 的公共边界 $E^{\max}/P^{\max} = 30$,均体现出长时间储能对降低系统运行成本具有重要意义。

3.5 储能容量价值综合评估

储能对电网的应用价值应从多个角度综合评估,文中提出3个评估指标,对储能容量价值进行综合评估。给定储能容量 θ ,即可根据式(37)、式(40)、式(42)计算对应的3个评估指标值 $v_1(\theta)$ 、 $v_2(\theta)$ 、 $v_3(\theta)$,分别体现出储能对促进新能源消纳、提升系统灵活性和提升系统经济性的影响。当储能功率容量的取值范围为 $0 \sim 2 \times 10^4$ MW,能量容量的取值范围为 $0 \sim 4 \times 10^4$ MW·h时,记录3类评估指标值,将结果绘制在三维空间,如图10所示。

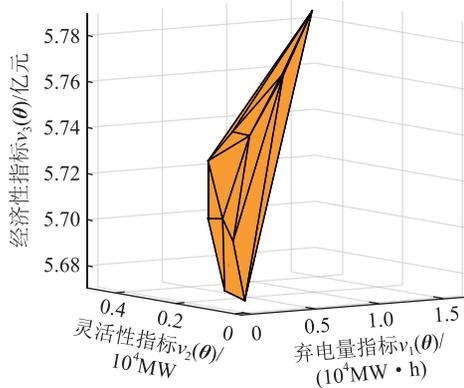


图10 3类评估指标值

Fig.10 The evaluation results of three index models

如当储能容量参数取值为 $\theta = [1 \ 2]^T$ 时, $v_1(\theta) = 0$ 、 $v_2(\theta) = 0.03 \times 10^4$ MW、 $v_3(\theta) = 5.695$ 亿元。 $v_1(\theta)$ 为0,说明在该容量方案下已经实现新能源的完全消纳,在此基础上继续增大储能功率容量参数 P^{\max} , $v_2(\theta)$ 、 $v_3(\theta)$ 均不会发生变化,说明此时限制系统灵活性和经济性的提升的瓶颈因素不是 P^{\max} ;若在此基础上继续增大储能能量容量参数 E^{\max} ,其在灵活性指标 $v_2(\theta)$ 的单位边际容量收益为 0.04×10^4 MW,在经济性指标 $v_3(\theta)$ 上的单位边际容量收益为0.02亿元/日。上述分析结果可以让决策者很清楚地知道各类评估指标的结果,以及提升某一类评估指标所能采取的有效措施。同时,图

10也蕴含着丰富的信息,如当决策者要求经济性指标达到5.725亿元时,通过在图10绘制z轴为5.725亿元的横截面,获得与三维多面体的交点,即可获得此时能达到的最优新能源弃电量指标 $v_1(\theta)$ 为 0.24×10^4 MW·h,最优灵活性指标 $v_2(\theta)$ 为 0.13×10^4 MW,该结果可帮助决策者对各类指标进行权衡。

4 结论

在新能源大规模接入电力系统的背景下,文中提出3个评估指标模型,分别反映了储能在促进新能源消纳、提高系统灵活性和提高系统经济性方面的应用价值。并基于参数规划理论,提出储能容量价值评估方法,将该方法应用到3个评估模型中,获得了评估指标与储能容量参数之间的解析函数表达式。东北电网算例结果表明:

(1) 3类模型均得到评估指标与储能容量参数的解析分段线性函数,从而可解析评估电网侧储能对新能源消纳、系统灵活性和经济性的应用价值,表明了所提储能容量价值评估方法的有效性。

(2) 储能容量关键区域划分和最优值函数可视化展示能直观反映储能容量对应用价值的影响。

(3) 该储能容量价值评估方法可以为储能容量配置提供参考。灵敏度分析揭示了影响储能容量价值的关键瓶颈参数;在给定评估指标要求的情况下,最优容量配置方案处于关键区域的边界处。

(4) 在不同的应用场景中,对储能参数要求也不相同。考虑储能提高系统灵活性,更看重储能功率容量;考虑储能提高系统经济性,更看重储能能量容量。

后续还可以进一步构造碳排放指标等,评估储能容量对电力系统绿色运行的影响;或固定储能容量,通过改变系统运行经济性和灵活性的边界条件,评估其对新能源弃电率的影响,此时参数为经济性和灵活性边界条件,优化目标为弃电率,其评估结果为3种指标的帕累托前沿。

参考文献:

- [1] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):1-9.
SHU Yinbiao,ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation [J]. Proceedings of the CSEE,2017,37(1):1-9.
- [2] 闫群民,穆佳豪,马永翔,等. 分布式储能应用模式及优化配置综述[J]. 电力工程技术,2022,41(2):67-74.
YAN Qunmin,MU Jiahao,MA Yongxiang, et al. Review of distributed energy storage application mode and optimal configuration [J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(2):67-74.

- [3] 胡泽春,丁华杰,宋永华,等. 能源互联网背景下储能应用的研究现状与展望[J]. 电力建设,2016,37(8):8-17.
HU Zechun, DING Huajie, SONG Yonghua, et al. Research status and prospect of energy storage application under energy Internet background[J]. Electric Power Construction,2016,37(8):8-17.
- [4] 梅书凡,檀勤良,代美. 考虑风光出力季节性波动的储能容量配置[J]. 电力工程技术,2022,41(4):51-57.
MEI Shufan, TAN Qinliang, DAI Mei. Energy storage capacity configuration considering seasonal fluctuation of wind and photovoltaic output [J]. Electric Power Engineering Technology, 2022,41(4):51-57.
- [5] 田蓓,王朝晖,张爽,等. 面向风光综合消纳的电力系统广域储能容量优化配置研究[J]. 智慧电力,2020,48(6):67-72.
TIAN Bei, WANG Zhaohui, ZHANG Shuang, et al. Wide-area optimized allocation of energy storage capacity considering wind/photovoltaic power accommodation in power systems[J]. Smart Power,2020,48(6):67-72.
- [6] DUI X W, ZHU G P, YAO L Z. Two-stage optimization of battery energy storage capacity to decrease wind power curtailment in grid-connected wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(3):3296-3305.
- [7] 黄英,刘宝柱,王坤宇,等. 考虑风电接纳能力的储输联合规划[J]. 电网技术,2018,42(5):1480-1489.
HUANG Ying, LIU Baozhu, WANG Kunyu, et al. Joint planning of energy storage and transmission network considering wind power accommodation capability[J]. Power System Technology, 2018,42(5):1480-1489.
- [8] 鲁宗相,李海波,乔颖. 高比例可再生能源并网的电力系统灵活性评价与平衡机理[J]. 中国电机工程学报,2017,37(1):9-20.
LU Zongxiang, LI Haibo, QIAO Ying. Flexibility evaluation and supply/demand balance principle of power system with high-penetration renewable electricity[J]. Proceedings of the CSEE, 2017,37(1):9-20.
- [9] 温丰瑞,李华强,温翔宇,等. 主动配电网中计及灵活性不足风险的储能优化配置[J]. 电网技术,2019,43(11):3952-3962.
WEN Fengrui, LI Huaqiang, WEN Xiangyu, et al. Optimal allocation of energy storage systems considering flexibility deficiency risk in active distribution network [J]. Power System Technology, 2019,43(11):3952-3962.
- [10] 牛焕娜,钱立,杨璐,等. 计及灵活性辅助服务费用的配电网灵活型资源优化配置[J]. 电力自动化设备,2021,41(10):52-59.
NIU Huanna, QIAN Li, YANG Lu, et al. Optimal allocation of flexible resources in distribution network considering cost of flexible auxiliary services[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(10):52-59.
- [11] 王博,詹红霞,张勇,等. 考虑风电不确定性的风蓄火联合优化经济调度研究[J]. 电力工程技术,2022,41(1):93-100.
WANG Bo, ZHAN Hongxia, ZHANG Yong, et al. Combined optimal economic dispatch of wind-storage-fire considering wind power uncertainty[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(1):93-100.
- [12] 吕齐,李明轩,魏韡,等. 基于参数规划的含储能和风电电力系统低碳经济调度[J]. 电力自动化设备,2023,43(7):12-18,43.
LÜ Qi, LI Mingxuan, WEI Wei, et al. Low carbon economic dispatch of power system with energy storage and wind power based on parametric programming[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(7):12-18,43.
- [13] 王承民,孙伟卿,衣涛,等. 智能电网中储能技术应用规划及其效益评估方法综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):33-41,21.
WANG Chengmin, SUN Weiqing, YI Tao, et al. Review on energy storage application planning and benefit evaluation methods in smart grid[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(7):33-41,21.
- [14] 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.
- [15] 孙伟卿,裴亮,向威,等. 电力系统中储能的系统价值评估方法[J]. 电力系统自动化,2019,43(8):47-55.
SUN Weiqing, PEI Liang, XIANG Wei, et al. Evaluation method of system value for energy storage in power system [J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(8):47-55.
- [16] 黄碧斌,胡静,蒋莉萍,等. 中国电网侧储能在典型场景下的应用价值评估[J]. 中国电力,2021,54(7):158-165.
HUANG Bibin, HU Jing, JIANG Liping, et al. Application value assessment of grid side energy storage under typical scenarios in China[J]. Electric Power,2021,54(7):158-165.
- [17] 杨军峰,郑晓雨,惠东,等. 储能技术在送端电网中促进新能源消纳的容量需求分析[J]. 储能科学与技术,2018,7(4):698-704.
YANG Junfeng, ZHENG Xiaoyu, HUI Dong, et al. Capacity demand analysis of energy storage in the sending-side of a power grid for accommodating large-scale renewables [J]. Energy Storage Science and Technology,2018,7(4):698-704.
- [18] 方陈,张宇,廖望,等. 区域能源互联网多能协同优化中的储能效益评估[J]. 电力建设,2021,42(5):48-56.
FANG Chen, ZHANG Yu, LIAO Wang, et al. Benefit evaluation of energy storage in multi-energy collaborative optimization of regional energy Internet [J]. Electric Power Construction,2021,42(5):48-56.
- [19] 杨立滨,曹阳,魏韡,等. 计及风电不确定性和弃风率约束的风电场储能容量配置方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(16):45-52.

- YANG Libin, CAO Yang, WEI Wei, et al. Configuration method of energy storage for wind farms considering wind power uncertainty and wind curtailment constraint[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(16):45-52.
- [20] 孙伟卿,刘唯,裴亮,等. 高比例可再生能源背景下考虑储能系统价值的储-输多阶段联合规划[J]. 高电压技术, 2021, 47(3):983-993.
- SUN Weiqing, LIU Wei, PEI Liang, et al. Multistage energy storage-transmission network joint planning considering the system value of energy storage under the background of high penetration renewable energy [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(3):983-993.
- [21] JIANG X, JIN Y, ZHENG X Y, et al. Optimal configuration of grid-side battery energy storage system under power marketization[J]. Applied Energy, 2020, 272:115242.
- [22] 李星梅,钟志鸣,阎洁. 大规模风电接入下的火电机组灵活性改造规划[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3):51-57.
- LI Xingmei, ZHONG Zhiming, YAN Jie. Flexibility reformation planning of thermal power units with large-scale integration of wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3):51-57.
- [23] WEI W, WU D M, WANG Z J, et al. Impact of energy storage on economic dispatch of distribution systems; a multi-parametric linear programming approach and its implications[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy, 2020, 7:243-253.
- [24] DUA V, PISTIKOPOULOS E N. An algorithm for the solution of multiparametric mixed integer linear programming problems [J]. Annals of Operations Research, 2000, 99(1):123-139.
- [25] OBERDIECK R, DIANGELAKIS N A, PAPATHANASIOU M M, et al. POP-parametric optimization toolbox[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2016, 55(33):8979-8991.
- [26] 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.

作者简介:



郑波坤

郑波坤(1999),男,博士在读,研究方向为储能规划及运行评估、分布式电能交易(email:zbs21@mails.tsinghua.edu.cn);

魏犇(1985),男,博士,副教授,研究方向为运筹学和能源经济;

于骏(1978),男,硕士,高级工程师,从事电力系统分析与控制、大电网安全运行相关工作。

Evaluation method for energy storage capacity value based on the multi-parametric programming

ZHENG Boshen¹, WEI Wei¹, YU Jun², ZHAO Haiji², MEI Shengwei¹

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

2. Northeast Branch of State Grid Corporation of China, Shenyang 110179, China)

Abstract: With the high penetration of renewable energy in modern power system, grid-side energy storage can support power system operation as a flexible resource. Evaluating the value of energy storage is a necessary preparation for its capacity sizing. Three value indexes that reflect the value on renewable energy utilization, power system flexibility, and dispatch economy are defined at first. Then, a value evaluation method based on multi-parametric mixed integer linear programming theory is proposed and applied to above indexes. As a result, each index is represented as an analytical piecewise linear function of the power and energy capacity of storage. Finally, the proposed models and method are verified on the Northeast Power Grid data. The simulation results show that proposed method can analytically describe how the value of energy storage is affected by its capacity, along with visualization. The analytical expression contains profound sensitivity information, which reveals the bottleneck of energy storage value and provides insightful reference for energy storage capacity sizing in different application scenarios.

Keywords: energy storage capacity; value evaluation; renewable energy accommodation; flexibility; multi-parametric programming; mixed integer linear programming (MILP)

(编辑 方晶)