

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.03.003

集中式储能运行备用能力的评估及仿真

雷长炎^{1,2}, 王琦¹, 谢东亮², 李威², 赖业宁², 张政^{1,2}

(1. 南京师范大学南瑞电气与自动化学院, 江苏 南京 210023;

2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106)

摘要:储能是电网灵活性调度资源的重要成分,集中式储能(CES)容量除了应对移峰填谷的迫切需求外,还能在新能源高渗透下发挥巨大的电网备用能力。然而,在发(用)电计划和自身电量约束的双重影响下,这一能力呈现出明显的动态特征,给准确评估带来一定困难。因此,文中引入运行可行域的概念,通过描述CES的电量边界和功率边界来分析其备用能力,提出了在给定发(用)电计划下计算CES运行备用能力的新方法。基于某储能电站、某省级电网的仿真分析,验证了方法的有效性。结果表明,计及储能的备用能力可以有效减少系统的弃风光。进而,定量分析了储能电量/容量比、备用合约等对动态备用能力可能造成的影响,给出了进一步优化储能备用能力的建议。

关键词:集中式储能;运行备用;动态特征;可行域;能力评估

中图分类号:TM732

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)03-0015-07

0 引言

风、光伏发电固有的随机性、间歇性的特点客观上将电网的可靠运行造成不利影响^[1-4]。通过提升风、光出力预测水平能在一定程度上减小平均误差,但很难消除出力预测的最大瞬时误差^[5],因此风、光要做到如常规水、火电一样出力可期并不现实。这是进一步提高电网新能源接纳能力所要跨越的关键障碍,解决办法之一是为电网配置更多的快速备用容量^[6-10]。目前电网中大部分旋转备用由常规水、火电机组承担,随着新能源逐步取代火电,电网的备用资源也在同步减少。这与电网需求相矛盾,系统需要通过库容式水电、储能和需求侧响应容量等多种途径来补充备用容量的不足^[11-12]。尤其针对想要实现全清洁能源供电的省份,这一需求更为迫切。

设立调峰、备用等辅助服务市场,有利于引导投资向提高电力系统灵活性方面转型,最终促进包括造价昂贵的储能系统在内的源/网/荷/储备用资源的发展^[13-16]。对多形态备用能力的准确评估是实现多形态备用优化配置的基础^[17-19]。集中式储能(centralized energy storage, CES)容量是未来电网备用的重要组成部分,其技术仍处于快速发展阶段,形态包括但不限于抽水蓄能电站、电池储能站

等。未来规划中的电网侧集中式储能分布地域广、接入规模大、响应速度快,将分担原由常规电源负责的调峰、调频、调压等电网关键服务。

新能源高渗透下,平衡待调控出力(预测负荷与新能源出力之差,也称“净负荷”)的随机波动需占用大量运行备用资源,学界对储能参与运行备用也进行了相关研究。文献[20]利用储能平滑风电出力的剩余容量参与备用,选取场景集描述系统的不确定性,建立了储能的有功和备用一体优化模型;文献[21]建立了独立储能电站参与调峰和备用市场的运行策略模型。上述计算模型都只考虑了储能的出力限制,而没有考虑其有限的电量存储能力,也未计及损耗,对储能备用能力过高或过低的估计都将给电网运行带来新的风险或浪费。文献[22]研究了以电动汽车为代表的分布式储能参与运行备用能力的量化评估方法。然而电动汽车并入/退出电网的时机和状态都具有随机性,与计划性较强的CES在运行方式上存在显著差异,但其思路值得借鉴。

文中首先分析了影响CES备用能力的主要因素,并提出适用于CES的充放电可行域概念;基于上述概念,提出在给定发(用)电计划下计算CES运行备用能力的方法;最后通过仿真验证了方法的有效性,分析了一系列因素对CES动态备用能力的影响,给出了改善CES备用能力的建议。

1 CES特性分析与建模

CES典型结构示意图如图1所示,CES可分为共

收稿日期:2020-11-22;修回日期:2020-12-27

基金项目:国家重点研发计划资助项目“应对风/光出力不确定风险的备用容量优化配置与紧急控制技术”(2018YFB-0904205)

享储能体 CES 和非共享储能体 CES 两类。共享储能体 CES 所有的发(用)电单元共享一个储能体,典型代表是抽水蓄能电站。非共享储能体 CES 的存储能力依靠多个储能单元实现,电池储能站是典型的非共享储能体 CES,由于电池储能是由巨量的单体电池串并联组成,电池管理系统(battery management system, BMS)会对回路中每一个电池单体施加控制,迫使其按照一致的荷电状态(state of charge, SOC)工作。因此,典型应用中,非共享储能体 CES 的每个储能单元的出力 and 等效电量状态均可视作一致。

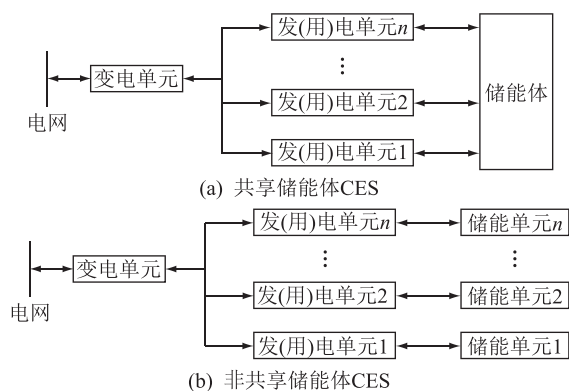


图 1 CES 典型结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of typical CES structures

当只关心聚合态功率特性时,考虑内部各单元状态一致,上述 2 种 CES 可以采用一致的约束模型,下文将不再区分这 2 种储能类型。这 2 种 CES 的功率约束和电量约束可记为:

$$-P_{L,max} \leq P(t) \leq P_{G,max} \quad (1)$$

$$E_{min} \leq E(t) \leq E_{max} \quad (2)$$

式中: $P_{L,max}$, $P_{G,max}$ 分别为 CES 的最大充电功率和最大放电功率,均为正值; E_{max} , E_{min} 分别为 CES 的最大、最小储存电量。对于共享储能体 CES 而言, $P_{L,max}$, $P_{G,max}$ 分别为其所有发(用)电单元的最大充电和放电功率之和, E_{max} , E_{min} 分别为其储能体的最大和最小储存电量;对于非共享储能体 CES 而言, $P_{L,max}$, $P_{G,max}$ 分别为其所有发(用)电单元的最大充电和放电功率之和, E_{max} , E_{min} 为其所有储能单元的最大和最小储存电量之和。

计及损耗后, CES 的储能侧充/放电功率为:

$$P_{GL}(t) = U_c(t)P(t)\eta_L + \frac{U_d(t)P(t)}{\eta_G} \quad (3)$$

式中: $P(t)$ 为 t 时刻网侧实时充/放电功率,放电时为正数,充电时为负数; η_L , η_G 分别为充电效率和放电效率; $U_c(t)$ 为充电状态 0-1 整数变量, $U_c(t)=1$ 表示储能处于充电状态, $U_c(t)=0$ 表示储

能处于放电状态或者不充不放状态; $U_d(t)$ 为放电状态 0-1 整数变量, $U_d(t)=1$ 表示储能处于放电状态, $U_d(t)=0$ 表示储能处于充电状态或者不充不放状态。 $U_c(t) + U_d(t) \leq 1$ 。

任意时刻 t 的电量状态 $E(t)$ 是初始时刻以来计及损耗的储能侧充/放电功率的积分,可表示为:

$$E(t) = E(0) + \int_0^t P_{GL}(\tau) d\tau \quad (4)$$

式中: $E(0)$ 为起始电量状态。

2 储能备用能力评估方法

储能备用能力评估方法主要是分析起始电量、期望电量范围、最大充放电功率、最大储存电量和调度机构提前为储能安排的发(用)电计划等参数,得到储能的功率边界和电量边界,同时满足功率边界和电量边界的区间就是运行可行域,再根据可行域计算备用能力。方法流程如图 2 所示。

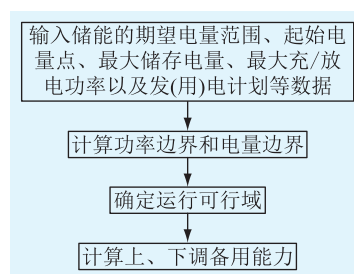


图 2 方法流程

Fig.2 Flow chart of method

功率边界需满足式(5)和式(6):

$$R_{up}(t) \leq P_{G,max} - P(t) \quad (5)$$

$$R_{down}(t) \leq P_{L,max} + P(t) \quad (6)$$

式中: $R_{up}(t)$, $R_{down}(t)$ 分别为 t 时刻的上、下调备用容量。

电量边界的存在是为了保证各个时刻储能发的(用)电计划都不会因电量已满或不足而违约:

$$E_{min}(t) \leq E(t) \leq E_{max}(t) \quad (7)$$

式中: $E_{min}(t)$, $E_{max}(t)$ 分别为 t 时刻允许到达的最小、最大电量状态。

求取任意时刻的 $E_{min}(t)$ 和 $E_{max}(t)$ 对 CES 备用能力的量化非常重要。为了降低复杂性,对时间轴进行离散化处理,将调度周期 T 分割为 n 个长度为 Δt 的时段,将每个 Δt 内的功率视为固定值,则 $E_{min}(k)$, $E_{max}(k)$ 可按式(8)~式(14)计算:

$$E_{max}(k) = \min\{E_{f,max}(k), E_{b,max}(k)\} \quad (8)$$

$$E_{min}(k) = \max\{E_{f,min}(k), E_{b,min}(k)\} \quad (9)$$

$$E_{f,max}(k) = \min\{E(k-1) + P_{L,max}\eta_L\Delta t, E_{max}\} \quad (10)$$

$$E_{f,\min}(k) = \max\{E(k-1) + P_{G,\max}/\eta_G \Delta t, E_{\min}\} \quad (11)$$

$$E_{b,\max}(k) = \min\{E_{\max}(k+1) + P_{GL}(k) \Delta t, E_{\max}\} \quad (12)$$

$$E_{b,\min}(k) = \max\{E_{\min}(k+1) + P_{GL}(k) \Delta t, E_{\min}\} \quad (13)$$

$$E(k) = E(0) + \sum_{k=1}^n [P_{GL}(k) \Delta t] \quad (14)$$

式中: k 为第 k 个 Δt 时段; $E(k)$ 为 k 时段的电量状态; $E_{f,\max}(k)$, $E_{f,\min}(k)$ 分别为由前一时刻电量状态和最大、最小充电功率决定的可能最大、最小电量,是储能自身物理条件所决定的最大、最小电量; $E_{b,\max}(k)$, $E_{b,\min}(k)$ 分别为由最大期望电量 \bar{E}_{\exp} 、最小期望电量 \underline{E}_{\exp} 起始,按照后续时段发(用)电计划逆推所得的可能最大、最小电量,能保证储能的后续发(用)电计划如约进行。假如储能不满足 $E_{b,\max}(k)$ 和 $E_{b,\min}(k)$ 约束,则会导致其后续时段无法按照原定发(用)电计划出力。 \bar{E}_{\exp} , \underline{E}_{\exp} 分别为调度终止时刻的最大、最小期望电量,对储能运营商来说,前一周期末的存储电量就是下一周期的初始电量,因此这一设置会影响后续时段的运营,此电量边界应由运营商设定。其中,式(14)为式(4)的离散化表达形式。

CES 的运行可行域原理示意如图 3 所示。

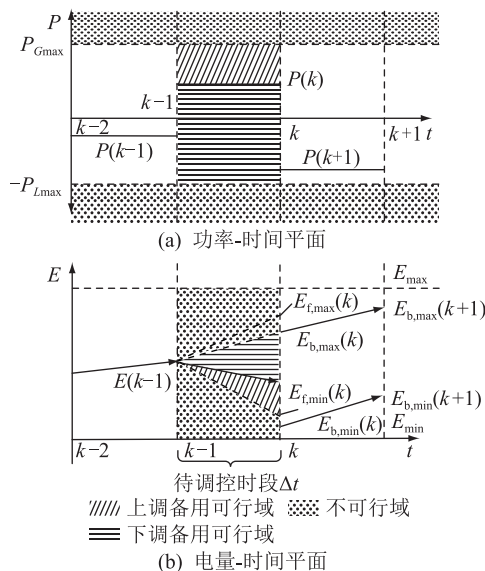


图 3 集中式储能的运行可行域

Fig.3 Feasible domain for a centralized energy storage's operation

图 3(a)为功率-时间平面($P-t$ 平面),图 3(b)为电量-时间平面($E-t$ 平面),黑色实线为依储能发或用电计划运行; k 为离散后的某一时间段; $k-1$

为时间段 k 的前一个时间段; $k+1$ 为时间段 k 的下一个时间段; $P(k)$ 为时间段 k 内集中式储能的充/放电功率(即发(用)电计划)。不可行域代表储能功率或电量无法到达或到达后注定无法满足后续时段发(用)电计划的状态区间;反之,可行域指储能功率和电量能够到达且到达后能够满足后续时段发或用电计划的状态区间。可行域会因初始状态及发或用电计划的调整而不断变化,因此具有动态性。充/放电计划只有运行于可行域中才具备可行性。

联立式(1)一式(14),取电量边界和功率边界的最小值,可得:

$$R_{up}(k) = \begin{cases} \min\{(P_{G,\max} - P(k), \\ [E(k-1) - E_{\min}(k)]/(\eta_L \Delta t) - P(k)\} \\ E(k-1) - E_{\min}(k) < 0 \\ \min\{(P_{G,\max} - P(k), \\ [E(k-1) - E_{\min}(k)]\eta_G/\Delta t - P(k)\} \\ E(k-1) - E_{\min}(k) > 0 \end{cases} \quad (15)$$

$$R_{down}(k) = \begin{cases} \min\{(P_{L,\max} + P(k), \\ [E_{\max}(k) - E(k-1)]/(\eta_L \Delta t) + P(k)\} \\ E_{\max}(k) - E(k-1) < 0 \\ \min\{(P_{L,\max} + P(k), \\ [E_{\max}(k) - E(k-1)]\eta_G/\Delta t + P(k)\} \\ E_{\max}(k) - E(k-1) > 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: $P(k)$ 为 k 时段的运行功率; $R_{up}(k)$ 为 k 时段的上调备用容量最大值; $R_{down}(k)$ 为 k 时段的下调备用容量最大值。文中将备用容量最大值称为“备用能力”。

3 仿真分析

在完成 CES 备用能力量化基础上,继续验证评估方法的有效性,研究 CES 参与备用对新能源消纳的影响,并从电量/容量比、备用合约等方面分析影响备用能力的因素及提升能力的措施。

3.1 方法的验证

基于文中所提方法计算上/下调备用能力,通过仿真模拟调度指令超出能力值时储能电站的表现。计划功率是指调度机构提前为储能电站安排的充/放电功率计划;实际功率是指储能电站的实际充/放电功率,通过在计划功率的基础上对某一时段功率调整得到,调整值等于文中方法计算出的

上/下调备用能力,其余时段实际功率和计划功率保持相同。

测试中令 Δt 为 1 h,测试的小型储能电站参数如表 1 所示,选取该储能电站某典型计划功率进行仿真,典型计划功率曲线如图 4(a)、(b)中黄色实线所示。

表 1 小型储能电站参数

Table 1 Parameters of small energy storage power station

参数名称	数值
$E_{\max}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	500
$E_{\min}/(\text{kW}\cdot\text{h})$	0
$E(0)$	$0.4E_{\max}$
\bar{E}_{exp}	E_{\min}
\bar{E}_{exp}	E_{\max}
$P_{L,\max}/\text{kW}$	100
$P_{G,\max}/\text{kW}$	100
$\eta_L/\%$	90
$\eta_G/\%$	95

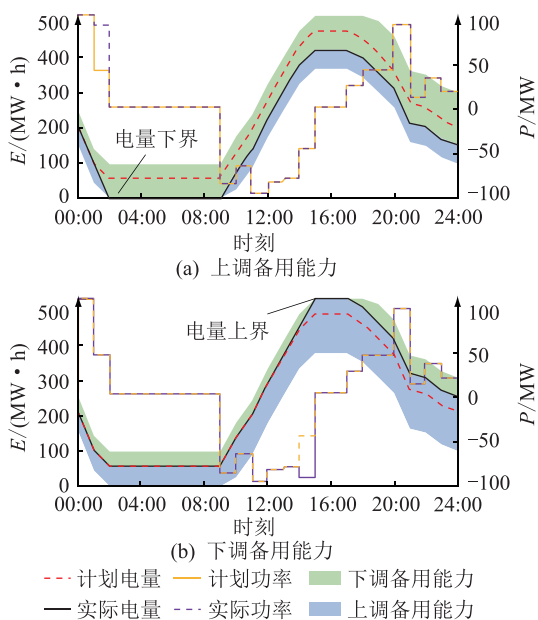


图 4 运行备用能力评估算法的验证

Fig.4 Verification of the storage reserve capability assessment algorithm

图 4(a)表明,01:00 收到电网调度机构下达的功率调节指令并开始调节(调节量采纳式(15)的结果),在储能电站提供上调备用后,02:00—09:00 时段实际电量刚好触及电量下界,上调备用能力刚好为 0,也不必调整后续时段的发(用)电计划。

图 4(b)表明,15:00 收到电网调度机构下达的功率调节指令并开始调节(调节量采纳式(16)的结果),在储能电站提供下调备用后,16:00—18:00 时段电量触及电量上界,下调备用能力刚好为 0,也不

必调整后续时段的发(用)电计划。

由此可知,继续提高功率调整要求,会导致储能电站无法保证后续时段的发(用)电计划按照计划功率执行。因此,在该算例条件下,文中算法计算所得备用能力是充分且必要的。

3.2 实际系统备用能力分析

基于某新能源外送省份实际规划数据开展分析,其储能容量及新能源装机取自该省的规划报告,参数见表 2,发(用)电计划采用夏、冬季典型值,并离散化处理(Δt 取 1 h)。

表 2 省级电网 CES 等效参数

Table 2 Equivalent parameters of provincial grid CES

参数名称	数值
$E_{\max}/(\text{MW}\cdot\text{h})$	34 500
$E_{\min}/(\text{MW}\cdot\text{h})$	0
$E(0)$	$0.5E_{\max}$
\bar{E}_{exp}	E_{\min}
\bar{E}_{exp}	E_{\max}
$P_{L,\max}/\text{MW}$	6 900
$P_{G,\max}/\text{MW}$	6 900
$\eta_L/\%$	90
$\eta_G/\%$	95

利用文中所提评估方法计算实际 CES 的 1 h 备用能力,如图 5 所示。

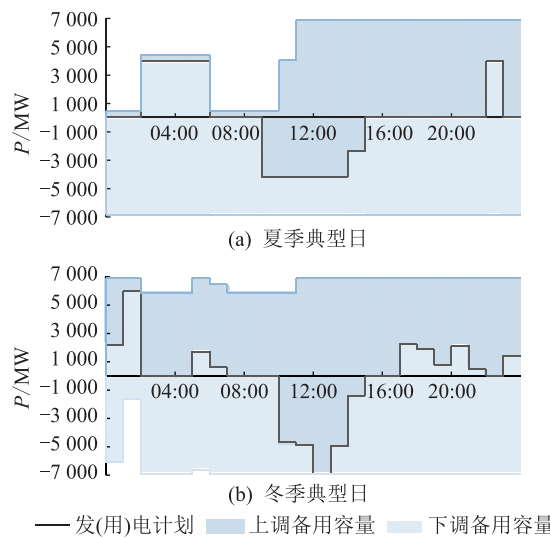


图 5 集中式储能的 1 h 备用能力(始于 50% SOC)

Fig.5 The predicted 1 h reserve capacity of the centralized energy storage system (SOC starts from 50% for all units)

由图 5 可知,CES 的备用能力很大程度上由夏、冬季典型日发(用)电计划曲线(图中实线,正、负值分别表示放、充电)决定:除了功率层面约束的影响外,夏季汛期更趋集中的发(用)电计划安排(夏季 02:00—06:00 集中放电与冬季 06:00—10:00 对

比),令储能电量不足,严重限制了局部时段的上调备用能力(00:00—10:00时段)。

储能的下备用能力可以增加新能源的消纳,其提供的上调备用能力可以缓解调峰压力,降低火电机组出力,间接增加新能源消纳。图6显示了夏季汛期储能参与备用前后对系统弃风光电量的影响。可见,计及储能参与备用的容量后,省内旋转备用不足的局面得到大幅缓解,在该典型日内,理论上最大可减少高达76 GW·h的弃风光电量。

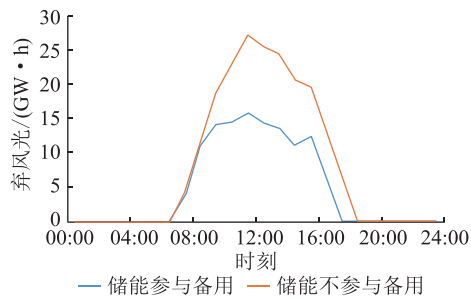


图6 新增规模储能备用对全省弃风光电量的影响

Fig.6 Increased massive energy storage reserve's influence on wind and solar curtailment in the whole province

3.3 电量/容量比对备用能力的影响

装机电量是指储能可以存储的最大电量 E_{\max} , 装机容量是指储能的最大放电功率 $P_{G,\max}$, 电量/容量比是指储能在初始电量为满时以最大功率放电至电量为空需要的时间。在保持储能最大功率不变的同时,扩大储能容量以存储更多的等效电量,如图7所示。

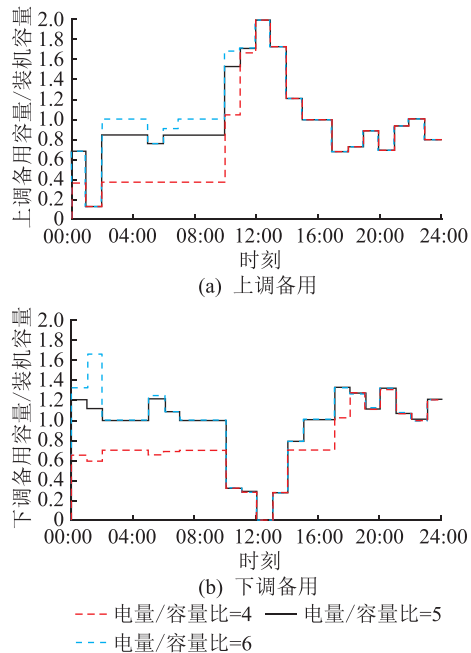


图7 电量/容量比对备用能力的影响

Fig.7 Effect of power/capacity ratio on spare capacity

当CES的电量(E_{\max}):容量($P_{G,\max}$)由4:1向6:1不断提升时,主要受电量约束影响时段的1h备用能力不断增加。以电量/容量比为4时一个周期内各时段的备用能力之和为基准值,电量/容量比为5和6时全天上调备用能力分别可以增加24%和30%,下调备用能力可以增加27%和31%。显然,电量/容量比越大则可提供的备用能力越多,但当电量/容量比达到一定程度,则对备用能力的影响较小,继续增加将无法提升储能的备用能力,这是因为此时储能的备用已经不受电量约束,仅由功率约束决定。

3.4 备用合约的影响

辅助服务市场旨在促进利益主体参与包括备用在内的电网关键过程,这一点集中体现在备用合约设计上。

合约周期是指CES必须持续提供一定备用能力的时长。周期过短,服务的间歇性会加剧调控的复杂性、减低可靠性;周期过长,又直接挑战储能的电量约束,打击CES的参与积极性。

图8比较了1h,4h,8h合约周期对CES备用能力的影响,以合约周期为8h时全时段备用能力之和为基准值,4h和1h的上调备用能力分别增加了23%和76%,下调备用能力增加了7%和41%。结果表明,储能参与短时备用市场可以提供的备用显著增加。

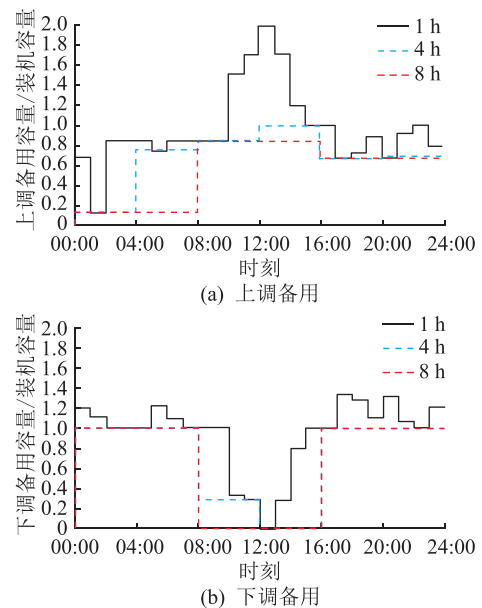


图8 合约周期对备用能力的影响

Fig.8 Impact of contract cycle on spare capacity

4 结语

文中综合考虑CES功率、电量两方面的约束,

首次提出了 CES 运行可行域的概念,并基于该概念进一步给出了确定发(用)电计划下评估 CES 实时运行备用能力的量化方法,算例验证了该方法的适用性。运用该方法,仿真分析了 CES 参与某省电网备用服务前后省内备用储备和 1 日弃风光电量发生的显著变化,显示了综合利用 CES 调峰、备用能力促进新能源消纳的作用。最后初步讨论了影响 CES 备用能力的关键因素及其改善方法,包括优化电量/容量比、合约周期等。后续研究计划包括计及 CES 备用能力后的电力系统运行优化等问题。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019055),江苏省研究生科研与实践创新计划项目(KYCX18_1228)资助,谨此致谢!

参考文献:

[1] 迟永宁,刘燕华,王伟胜,等. 风电接入对电力系统的影响[J]. 电网技术,2007,31(3):77-81.
CHI Yongning, LIU Yanhua, WANG Weisheng, et al. Study on impact of wind power integration on power system[J]. Power System Technology, 2007, 31(3):77-81.

[2] 牛东晓,李建锋,魏林君,等. 跨区电网中风电消纳影响因素分析及综合评估方法研究[J]. 电网技术,2016,40(4):1087-1093.
NIU Dongxiao, LI Jianfeng, WEI Linjun, et al. Study on technical factors analysis and overall evaluation method regarding wind power integration in trans-provincial power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(4):1087-1093.

[3] 李杨,刘伟佳,赵俊华,等. 含电转气的电-气-热系统协同调度与消纳风电效益分析[J]. 电网技术,2016,40(12):3680-3689.
LI Yang, LIU Weijia, ZHAO Junhua, et al. Optimal dispatch of combined electricity-gas-heat energy systems with power-to-gas devices and benefit analysis of wind power accommodation[J]. Power System Technology, 2016, 40(12):3680-3689.

[4] ZHOU S, WANG Y, ZHOU Y Y, et al. Roles of wind and solar energy in China's power sector: implications of intermittency constraints[J]. Applied Energy, 2018, 213:22-30.

[5] 吴晓刚,孙荣富,乔颖,等. 基于风电场功率特性的风电预测误差分布估计[J]. 电网技术,2017,41(6):1801-1807.
WU Xiaogang, SUN Rongfu, QIAO Ying, et al. Estimation of error distribution for wind power prediction based on power curves of wind farms[J]. Power System Technology, 2017, 41(6):1801-1807.

[6] 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(一)旋转级备用的优化[J]. 电力系统自动化,2019,43(8):101-109.
WU Jun, XUE Yusheng, SHU Yinbiao, et al. Adequacy optimization for a large-scale renewable energy integrated power system part one spinning-grade reserve optimization[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8):101-109.

[7] 梁子鹏,陈皓勇,雷佳,等. 考虑风电不确定度的风-火-水-

气-核-抽水蓄能多源协同旋转备用优化[J]. 电网技术,2018,42(7):2111-2119,2121-2123.
LIANG Zipeng, CHEN Haoyong, LEI Jia, et al. A multi-source coordinated spinning reserve model considering wind power uncertainty[J]. Power System Technology, 2018, 42(7):2111-2119,2121-2123.

[8] CHOUKRI K, NADDAMI A, HAYANI S. Evaluation of the reserve capacity in a grid supplied by intermittent energy sources[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(4):399-406.

[9] HELSETH A, FODSTAD M, ASKELAND M, et al. Assessing hydropower operational profitability considering energy and reserve markets[J]. IET Renewable Power Generation, 2017, 11(13):1640-1647.

[10] 殷桂梁,张雪,操丹丹,等. 考虑风电和光伏发电影响的电力系统最优旋转备用容量确定[J]. 电网技术,2015,39(12):3497-3504.
YIN Guiliang, ZHANG Xue, CAO Dandan, et al. Determination of optimal spinning reserve capacity of power system considering wind and photovoltaic power affects[J]. Power System Technology, 2015, 39(12):3497-3504.

[11] 谢东亮,薛峰,宋晓芳. 基于最优价值网络的储能系统调度优化及仿真[J]. 电力系统自动化,2016,40(24):42-48.
XIE Dongliang, XUE Feng, SONG Xiaofang. Optimization and simulation for dispatch of energy storage systems based on optimal value networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(24):42-48.

[12] 薛禹胜,罗运虎,李碧君,等. 关于可中断负荷参与系统备用的评述[J]. 电力系统自动化,2007,31(10):1-6.
XUE Yusheng, LUO Yunhu, LI Bijun, et al. A review of interruptible load participating in system reserve[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(10):1-6.

[13] 张明霞,闫涛,来小康,等. 电网新功能形态下储能技术的发展愿景和技术路径[J]. 电网技术,2018,42(5):1370-1377.
ZHANG Mingxia, YAN Tao, LAI Xiaokang, et al. Technology vision and route of energy storage under new power grid function configuration[J]. Power System Technology, 2018, 42(5):1370-1377.

[14] 袁小明,程时杰,文劲宇. 储能技术在解决大规模风电并网问题中的应用前景分析[J]. 电力系统自动化,2013,37(1):14-18.
YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, WEN Jinyu. Prospects analysis of energy storage application in grid integration of large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1):14-18.

[15] 胡娟,杨水丽,侯朝勇,等. 规模化储能技术典型示范应用的现状分析与启示[J]. 电网技术,2015,39(4):879-885.
HU Juan, YANG Shuili, HOU Chaoyong, et al. Present condition analysis on typical demonstration application of large-scale energy storage technology and its enlightenment[J]. Power System Technology, 2015, 39(4):879-885.

[16] 薛金花,叶季蕾,陶琼,等. 采用全寿命周期成本模型的用

- 户侧电池储能经济可行性研究[J]. 电网技术, 2016, 40(8):2471-2476.
- XUE Jinhua, YE Jilei, TAO Qiong, et al. Economic feasibility of user-side battery energy storage based on whole-life-cycle cost model[J]. Power System Technology, 2016, 40(8):2471-2476.
- [17] LAWDER M T, SUTHAR B, NORTHPROP P W C, et al. Battery energy storage system (BESS) and battery management system (BMS) for grid-scale applications [J]. Proceedings of the IEEE, 2014, 102(6):1014-1030.
- [18] 艾小猛, 塔伊尔江·巴合依, 杨立滨, 等. 基于场景集的含风电电力系统旋转备用优化[J]. 电网技术, 2018, 42(3):835-841.
- AI Xiaomeng, TAYIERJIANG B, YANG Libin, et al. Optimizing the spinning reserve in wind power system using scenario method[J]. Power System Technology, 2018, 42(3):835-841.
- [19] 张晓辉, 梁军雪, 李茂林, 等. 计及风光出力预测误差的电力系统经济调度[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(8):40-47.
- ZHANG Xiaohui, LIANG Junxue, LI Maolin, et al. Economic dispatch of power system considering prediction error of wind and photoelectric output[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(8):40-47.
- [20] 张学军, 王振. 含风储联合单元的电力系统有功和备用多目标协调优化模型[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(12):81-88.
- ZHANG Xuejun, WANG Zhen. Multi-objective coordinated optimization model of power system active power and reserve with wind-storage unit[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2019, 31(12):81-88.
- [21] 薛琰, 殷文倩, 杨志豪, 等. 电力市场环境下独立储能电站的运行策略研究[J]. 电力需求侧管理, 2018, 20(6):12-15.
- XUE Yan, YIN Wenqian, YANG Zhihao, et al. Study on operation strategy of independent energy storage power station in electricity market [J]. Power Demand Side Management, 2018, 20(6):12-15.
- [22] 吴巨爱, 薛禹胜, 谢东亮, 等. 电动汽车参与运行备用的能力评估及其仿真分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13):101-107, 168.
- WU Ju'ai, XUE Yusheng, XIE Dongliang, et al. Evaluation and simulation analysis of reserve capability for electric vehicles [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13):101-107, 168.

作者简介:



雷长炎

雷长炎(1995),男,硕士在读,研究方向为电力系统充裕性及仿真(E-mail:2578039545@qq.com);

王琦(1975),女,博士,副教授,硕士生导师,研究方向为电力系统分析、稳定和控制等;

谢东亮(1980),男,博士,工程师,从事电力系统可靠性及仿真相关工作。

Evaluation and simulation on the reserve capability of centralized energy storage

LEI Changyan^{1,2}, WANG Qi¹, XIE Dongliang², LI Wei², LAI Yening¹, ZHANG Zheng^{1,2}

(1. School of NARI Electric and Automation, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China;

2. NARI Group (State Grid Electric Power Research Institute) Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

Abstract: Energy storage is an important component of grid flexible dispatch resources. In addition to responding to the urgent needs of peak shifting and valley filling, the capacity of centralized energy storage (CES) can also exert huge grid backup capacity under the high penetration of new energy. However, under the dual influence of power generation (consumption) plan and its own power constraints, this capability exhibits obvious dynamic characteristics, which brings certain difficulties to accurate assessment. Therefore, a concept of operational viability domain is introduced. Its reserve capacity is analyzed by describing the electricity and power boundaries of CES, a new method is proposed to calculate the reserve capacity of CES operation under a given power generation (consumption) plan. Based on the simulation analysis of an energy storage power station and a provincial power grid, the effectiveness of the method is verified. The results show that taking into account the reserve capacity of energy storage can effectively reduce the abandonment of the system. Furthermore, the possible effects of energy storage electricity capacity ratio, reserve contracts, etc. on dynamic reserve capacity are quantitatively analyzed. The suggestions for further optimization of energy reserve capacity are given.

Keywords: centralized energy storage; operational standby; dynamic feature; feasible domain; capability assessment

(编辑 钱悦)