

考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置

齐晓光¹,姚福星²,朱天瞳¹,张倩茅¹,张菁¹,王颖¹,苗世洪²

(1. 国网河北省电力有限公司经济技术研究院,河北 石家庄 050000;

2. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室
电力安全与高效湖北省重点实验室,湖北 武汉 430074)

摘要:不同储能技术在响应特性、经济成本、容量规模等方面各具特色,适用于不同的应用场景。由2种或多种储能装置耦合形成的混合储能系统往往能够综合各方技术经济特性,显现出更加优异的性能。针对现有电网受可再生能源出力波动性的影响日益严重、促进消纳存在技术瓶颈、调峰压力大等问题,提出了一种由全钒液流电池和先进绝热压缩空气储能组成的混合储能系统,建立了考虑大规模风电接入的系统容量优化配置模型。首先,分析了风电出力的频谱特性,提出了一种基于经验模态分解的风电功率分配策略;然后,基于该策略,构建了混合储能系统的双层容量优化配置模型,上层以规划期内总经济投入最小为目标决策混合储能系统的配置容量,下层以系统运行成本最低为目标决策其日前发电计划;最后,基于某实际电网典型日的风电及负荷数据对所提模型进行了仿真分析与验证。算例结果表明:所提混合储能系统的容量优化配置模型不仅可以满足电网的多性能需求,还能有效提升系统的经济性。

关键词:大规模风电接入;混合储能系统;容量配置;全钒液流电池;先进绝热压缩空气储能

中图分类号:TM 732;TM 614

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202107032

0 引言

近年来,随着风光资源的大规模接入以及居民生活水平的不断提高,我国电网的清洁能源渗透率及负荷峰谷差与日俱增,正面临受可再生能源出力波动性的影响日益严重、促进消纳存在技术瓶颈、调峰压力大等一系列技术问题,严重制约了可再生能源的发展,给电网的经济与安全运行带来了更为严峻的挑战^[1]。为了有效应对上述问题与挑战,储能技术作为一种灵活性调节资源,逐渐受到学术界及工业界的广泛关注^[2]。然而,现代电网的能量及功率需求复杂多样,单一类型的储能技术往往难以满足要求,而由2种或多种储能技术进行联合配置可以取长补短,充分发挥各方的技术经济优势,极大地扩展储能系统的应用场景^[3]。与此同时,储能技术飞速发展,各种新型储能日趋成熟,也为混合储能配置增添了新的动力。在此背景下,混合储能系统的容量优化配置问题日趋成为学者们关注和研究的焦点^[4]。

已有较多的文献针对由蓄电池、超级电容器或飞轮储能组成的混合储能系统进行了研究^[5],该配置方式具有变工况特性好、易于控制的优点。也有部分文献对由锂电池和超级电容器组成的混合储能系统进行了深入的研究^[6],采用不同的方法对二者

的功率频段进行划分,进而实现其容量配置。此外,还有部分文献分析了蓄电池与抽水蓄能电站的容量优化配置问题。上述研究在功率分配策略、求解方法等方面开展了卓有成效的工作,并提出了行之有效的混合储能系统的容量优化配置方案,但在推广应用方面还存在以下问题:①超级电容器以及飞轮储能的成本较高,难以大规模推广应用^[7],且二者的持续充放电能力差,在应对可再生能源出力剧烈波动时往往捉襟见肘;②蓄电池的循环寿命短,日常维护较为频繁,且存在环境污染风险,同时锂电池的成本高,安全性较差^[8],均不适合大规模应用;③抽水蓄能技术对地形和水源的要求较高,规划设计前需要进行生态评估,建设周期长,应用场景受限^[9]。

在众多储能技术中,全钒液流电池VRB(Vanadium Redox flow Battery)因具有功率与容量可独立设计、响应速度较快、建设周期短等特点而备受关注,相比于飞轮储能和超级电容器,其持续充放电时间更长,性能更稳定,相比于锂电池,其成本低且安全性好,相比于蓄电池,其运行维护费用低,循环寿命更长,被认为是最适用于可再生能源出力波动平抑的储能技术之一,近年来已在国内外多项示范工程中得到应用^[10]。另一方面,压缩空气储能CAES(Compressed Air Energy Storage)是目前公认的除抽水蓄能外最适合实现大容量、长时间电能存储的技术。目前,全球已有2座CAES电站投入商业化运行,即德国的Huntorf电站和美国的McIntosh电站。然而二者均属于传统的CAES电站,存在循环效率低和需要补燃等缺陷。为了弥补这些缺陷,有学者

收稿日期:2020-12-31;修回日期:2021-06-03

基金项目:国网河北省电力有限公司科技项目(SGHEJY00GHJS2000023)

Project supported by the Science and Technology Project of State Grid Hebei Electric Power Co.,Ltd.(SGHEJY00GHJS2000023)

考虑回收再利用压缩热,提出了先进绝热压缩空气储能AA-CAES(Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage)的概念,用换热器替代了传统的燃烧室,从而摆脱了对化石能源的依赖,实现了零排放,并提高了循环效率。除此之外,AA-CAES还可选用钢瓶作为储气室,故受地理条件的限制较小,因而在电网的削峰填谷及可再生能源的大规模消纳方面具有广阔的应用前景^[11]。然而,随着风光资源的大规模并网,现代电网受可再生能源出力波动的影响日益突出,若仅配置AA-CAES,一方面由于内部机械结构复杂,其变工况调节速度相对较慢,难以对可再生能源出力波动做出快速响应(响应时间为3~10 min^[12]);另一方面,AA-CAES需要依据波动结果频繁调节自身出力,大幅加快了机械部件的磨损与老化,循环寿命将显著降低。相较而言,VRB可实现秒级响应,擅长小功率快充快放^[12],适用于平抑可再生能源的出力波动,能够实现与AA-CAES的优势互补。因此,建立由VRB和AA-CAES组成的混合储能系统,不仅有利于实现大规模可再生能源出力波动平抑和消纳,改善电网的运行状态,还能够“扬长避短”,提高储能系统的使用寿命,减少系统投资。但如何对二者进行功率分配,并进一步实现其容量的优化配置,已成为混合储能领域亟待解决的关键问题之一。

针对上述问题,本文提出了一种基于经验模态分解EMD(Empirical Mode Decomposition)的风电功率划分方法,实现了VRB和AA-CAES的功率分配;在此基础上,构建了由VRB和AA-CAES组成的混合储能系统的双层容量优化配置模型,上层模型以规划期内系统总经济投入最小为目标,对VRB和AA-CAES进行容量优化配置,下层模型以系统运行成本最低为目标,对其进行日前优化调度;最后,基于某实际电网典型日的风电及负荷数据进行算例分析,结果验证了所建模型的有效性。

1 基于EMD的风电功率分配策略

1.1 风电功率分配策略

为了保障电网安全、优质、经济运行,有必要对风电场的并网调度进行规范化管理。根据GB/T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》,当风电场的装机容量为30~150 MW时,1 min有功功率变化量最大值为该风电场装机容量的1/10;当风电场的装机容量大于150 MW时,1 min有功功率变化量不得超过15 MW,否则将面临考核。为了避免支付高昂的考核费用,本文考虑在风电场内配置VRB,以满足系统允许接入的最大波动率限制。

风电场的风速特性表现为:低频部分幅值较大,而高频部分幅值很小。可以推测,在风电出力信号

中也应存在类似的结论。为了验证这一观点,本文以5 min为采样间隔,对某风电场2019年的实际出力数据进行快速傅里叶变换,得到其幅频特性如附录A图A1所示。由图可知,风电出力信号的能量主要集中在低频部分,而高频部分的幅值接近于0,能量占比很低。由此可见,若采用一定的技术手段消除风电信号中的高频分量,则可以平滑其出力曲线,并保留信号的主要能量。据此,本文将风电出力信号高频分量合成结果的相反数作为VRB功率的期望值,在改善风电出力特性的同时,实现VRB和AA-CAES的功率分配,即VRB负责消纳风电出力信号中的高频分量,而AA-CAES负责对低频分量重构后的风电功率进行优化调度,以实现削峰填谷、促进新能源消纳等目标。风电功率分配策略示意图如图1所示。

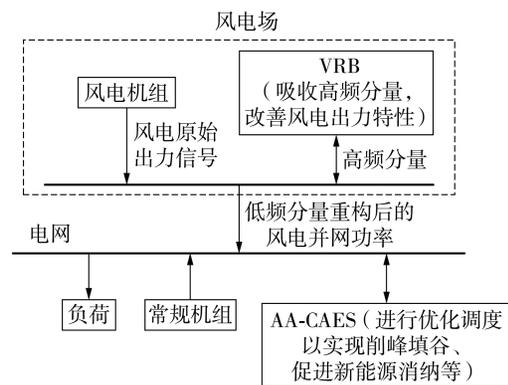


图1 风电功率分配策略示意图

Fig.1 Schematic diagram of wind power distribution strategy

1.2 基于EMD的风电出力信号分解方法

风电出力信号的高、低频段划分结果将直接影响其波动平抑效果,因此,选取一种合理有效的方法对风电出力进行分解具有重要的意义。

EMD方法被认为是2000年以来以傅里叶变换为基础的线性和稳态频谱分析的一个重大突破,其无需预先设定任何基函数,而是直接依据信号本身的特征进行分解,因此在处理非线性、非平稳信号序列方面具有显著优势^[13]。EMD方法可以将输入信号分解为多个本征模态函数IMF(Intrinsic Mode Function),每个IMF代表输入信号在不同时间尺度下的局部特征,但必须满足以下2个条件:①信号的极值点数量与过零点数量最多只能相差1;②由信号局部最大值和局部最小值拟合所得包络平均值必须为0。EMD方法的实现步骤见附录B。

在分解结果中,IMF分量的阶数越高,其所包含的瞬时频率成分越低,即第一阶IMF分量包含最高的瞬时频率成分,而最后一阶IMF分量包含最低的瞬时频率成分。因此,先对风电出力信号进行EMD,

将分解结果中 K 阶及其之后的 IMF 分量之和作为风电期望并网功率,而 K 阶之前的 IMF 分量之和由 VRB 进行消纳,从而实现风电功率的划分。对于 K 值的选取,可以采用试差法,即 K 由小到大逐次取值,直至满足并网风电波动率要求为止^[14]。

2 混合储能系统的双层容量优化配置模型

2.1 整体建模思路

结合第 1 节所述风电功率分配策略,本文建立由 VRB 和 AA-CAES 组成的混合储能系统的双层容量优化配置模型。其中,上层模型以规划期内总经济投入最小为目标函数,兼顾地理条件及经济成本限制,对 VRB 和 AA-CAES 进行容量优化配置,并将相应的配置方案传递给下层;下层模型基于上层给定的配置方案,以系统日前运行成本最低为目标函数。在下层模型运行过程中,根据风电功率分配策略,借助商业优化软件设计系统在各典型日下的运行结果,并将相应的运行成本反馈给上层。此时上层模型结合下层传递的成本结果进行对比优化,探索新的容量配置方案。上、下层模型反复迭代,直至在满足二者约束条件的前提下,获得 VRB 和 AA-CAES 的最优容量配置结果。双层容量优化配置模型结构如图 2 所示。

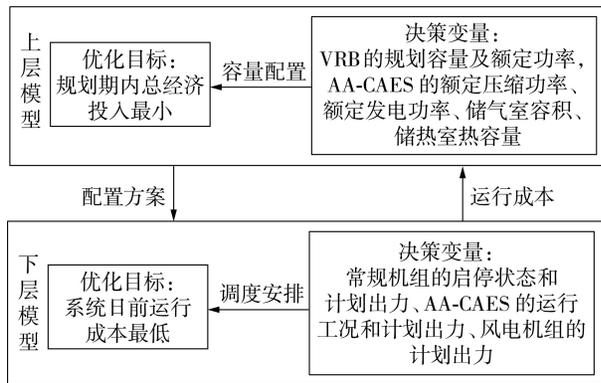


图 2 双层容量优化配置模型结构

Fig.2 Structure of bi-level capacity optimization configuration model

2.2 上层容量决策模型

上层模型用于实现 VRB 和 AA-CAES 的容量优化配置,决策变量包括 VRB 的规划容量及额定功率,AA-CAES 的额定压缩功率、额定发电功率、储气室容积、储热室热容量。

2.2.1 目标函数

混合储能系统容量优化配置模型的优化目标为:在满足系统要求及各类约束条件的前提下,使系统在规划期内的总经济投入最小^[15],即规划期内混合储能系统的安装成本、置换成本、残值回收结果(负值)、年维护成本、年运行成本之和最小,如式(1)

所示。

$$\min \left\{ \frac{\gamma(1+\gamma)^{T_{CAES}}}{(1+\gamma)^{T_{CAES}} - 1} (C_{ins} + C_{rep} - C_{rec}) + C_{om} + C_{op} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{cases} C_{ins} = c_{VRB,E} E_{VRB} + c_{VRB,p} P_{VRB,r} + c_{CAES,c} P_{CAES,rc} + \\ c_{CAES,g} P_{CAES,rg} + c_{ST} V_{ST} + c_{TES} Q_{TES} \\ C_{rep} = \sum_{k=1}^{\rho} \frac{1}{(1+\gamma)^{kT_{VRB}}} (c_{VRB,E} E_{VRB} + c_{VRB,p} P_{VRB,r}) \\ C_{rec} = \frac{(c_{VRB,E} E_{VRB} + c_{VRB,p} P_{VRB,r}) [(\rho+1)T_{VRB} - T_{CAES}]}{T_{VRB} (1+\gamma)^{T_{CAES}}} \\ C_{om} = c_{VRB,om} P_{VRB,r} + c_{CAES,om} (P_{CAES,rc} + P_{CAES,rg}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\rho = \left\lceil \frac{T_{CAES}}{T_{VRB}} \right\rceil - 1 \quad (3)$$

式中: γ 为贴现率; T_{CAES} 、 T_{VRB} 分别为 AA-CAES、VRB 的寿命周期(需要说明的是,由于没有显著影响混合储能系统寿命周期的因素,本文直接采用其使用年限作为 VRB 和 AA-CAES 的寿命周期^[16]); C_{ins} 、 C_{rep} 、 C_{rec} 、 C_{om} 分别为混合储能系统的安装成本、置换成本、残值回收结果、年维护成本; C_{op} 为年运行成本,具体可根据下层模型的反馈结果进行加权计算得到; $c_{VRB,E}$ 、 $c_{VRB,p}$ 分别为 VRB 的单位容量成本、单位功率成本; E_{VRB} 为 VRB 的规划容量; $P_{VRB,r}$ 为 VRB 的额定功率; $c_{CAES,c}$ 、 $c_{CAES,g}$ 、 c_{ST} 、 c_{TES} 分别为 AA-CAES 的压缩机、膨胀机、储气室、储热室的成本系数; $P_{CAES,rc}$ 、 $P_{CAES,rg}$ 、 V_{ST} 、 Q_{TES} 分别为 AA-CAES 的额定压缩功率、额定发电功率、储气室容积、储热室热容量; $c_{VRB,om}$ 、 $c_{CAES,om}$ 分别为 VRB、AA-CAES 的年维护成本系数; ρ 为 VRB 需要进行置换的次数; $\lceil \cdot \rceil$ 表示向上取整。

2.2.2 约束条件

受地理条件及经济成本限制,混合储能系统的功率和容量约束为:

$$\begin{cases} E_{VRB,min} \leq E_{VRB} \leq E_{VRB,max} \\ P_{VRB,r,min} \leq P_{VRB,r} \leq P_{VRB,r,max} \\ P_{CAES,rc,min} \leq P_{CAES,rc} \leq P_{CAES,rc,max} \\ P_{CAES,rg,min} \leq P_{CAES,rg} \leq P_{CAES,rg,max} \\ V_{ST,min} \leq V_{ST} \leq V_{ST,max} \\ Q_{TES,min} \leq Q_{TES} \leq Q_{TES,max} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $E_{VRB,max}$ 、 $E_{VRB,min}$ 和 $P_{VRB,r,max}$ 、 $P_{VRB,r,min}$ 分别为 VRB 规划容量和额定功率的上、下限; $P_{CAES,rc,max}$ 和 $P_{CAES,rc,min}$ 、 $P_{CAES,rg,max}$ 和 $P_{CAES,rg,min}$ 、 $V_{ST,max}$ 和 $V_{ST,min}$ 、 $Q_{TES,max}$ 和 $Q_{TES,min}$ 分别为 AA-CAES 额定压缩功率、额定发电功率、储气室容积、储热室热容量的上限和下限。

2.3 下层日前优化调度模型

为了凸显 VRB 和 AA-CAES 在不同时间尺度下的响应特性,对于各典型日的风电出力数据,以 1 min 为时间间隔取 1 个样本点,一天共有 1440 个样

本点。首先对样本点数据进行EMD,然后根据选定的 K 值确定每分钟VRB期望平抑的功率波动量,在求解过程中要求VRB的额定功率满足每分钟的出力需求,且荷电状态(SOC)不得越限,以保障VRB对风电出力特性的改善效果。而AA-CAES、常规机组仅参与日前优化调度,以凸显其削峰填谷、促进新能源消纳等作用。

综上所述,下层模型的主要任务为:对各典型日的风电出力进行EMD,将高频IMF分量之和作为VRB的期望平抑功率值,进一步建立AA-CAES参与的日前优化调度模型,根据上层模型传递的参数,借助商业优化软件进行求解,得到调度结果,并将相应的运行成本反馈给上层。下层模型的决策变量包括常规机组的启停状态和计划出力、AA-CAES的运行工况和计划出力、风电机组的计划出力。

2.3.1 目标函数

下层模型的优化目标为使系统日前运行成本最低,即使电网向常规机组的购电成本及备用容量购置成本、风电场有功出力波动越限考核成本、弃风成本之和最低,如式(5)所示。需要特别说明的是,本文假定AA-CAES由电网公司建设并管理,因此在目标函数中并未考虑AA-CAES的购电成本及备用容量购置成本,相关费用体现在同时段常规机组的购电成本之中^[15]。

$$\min \{C_{G,g} + C_{G,R} + C_{W,cur} + C_{H,pen}\} \quad (5)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} C_{G,g} = \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{t=1}^T (a_i P_{G,i,t} + b_i + F_{G,i,t}) \\ C_{G,R} = \sum_{i=1}^{N_G} \sum_{t=1}^T (\alpha_i R_{G,i,t}^{up} + \beta_i R_{G,i,t}^{down}) \\ C_{W,cur} = \sum_{t=1}^T \lambda_{W,cur} (P_{W,fs,t} - P_{W,t}) \\ C_{H,pen} = \sum_{\tau=1}^{T_m} \left[\lambda_{H,pen} \left(\left| \Delta P_{W,fs,\tau} \right| - \Delta P_{W,limit} \right) \times \right. \\ \left. s \left(\left| \Delta P_{W,fs,\tau} \right|, \Delta P_{W,limit} \right) \right] \end{array} \right. \quad (6)$$

式中: $C_{G,g}$ 、 $C_{G,R}$ 、 $C_{W,cur}$ 、 $C_{H,pen}$ 分别为电网向常规机组的购电成本、电网向常规机组的备用容量购置成本、弃风成本、风电场有功出力波动越限考核成本; N_G 为常规机组数量; T 为日前调度时段数量,本文取值为24; a_i 、 b_i 分别为常规机组 i 的发电成本一次项、常数项系数; $P_{G,i,t}$ 为 t 时段常规机组 i 的发电功率; $F_{G,i,t}$ 为 t 时段常规机组 i 的启动成本; α_i 、 β_i 分别为电网向常规机组 i 购买正、负备用容量的单价; $R_{G,i,t}^{up}$ 、 $R_{G,i,t}^{down}$ 分别为 t 时段电网向常规机组 i 购买的正、负备用容量; $\lambda_{W,cur}$ 为单位功率弃风成本; $P_{W,fs,t}$ 为 t 时段经VRB平抑后的风电有功出力; $P_{W,t}$ 为 t 时段风电实际调度有功出力; T_m 为分钟级时段数量,取值为1440; $\lambda_{H,pen}$ 为单位风电有功出力波动越限考核成本; $\Delta P_{W,fs,\tau}$ 为

时段的风电有功出力波动量; $\Delta P_{W,limit}$ 为系统允许的风电有功出力波动限值; $s \left(\left| \Delta P_{W,fs,\tau} \right|, \Delta P_{W,limit} \right)$ 为二进制变量,若 $\left| \Delta P_{W,fs,\tau} \right| > \Delta P_{W,limit}$ 则取值为1,否则取值为0。

2.3.2 约束条件

下层模型的约束条件包括分钟级时间尺度下VRB的约束条件以及小时级时间尺度下常规机组的运行约束、AA-CAES的运行约束、风电场的运行约束、系统功率平衡约束及备用容量约束。

1) VRB的约束条件。

(1) VRB的额定功率约束:

$$P_{VRB,\tau} \geq \left| \Delta P_{W,fs,\tau} \right| \quad \tau = 1, 2, \dots, T_m \quad (7)$$

(2) VRB的SOC约束:

$$\left\{ \begin{array}{l} S_{VRB,\tau} = S_{VRB,0} + \frac{1}{E_{VRB}} \times \\ \left[\sum_{j=1}^{\tau} (\eta P_{VRB,c,j} - P_{VRB,d,j} / \eta) \right] \Delta t \\ S_{VRB,min} \leq S_{VRB,\tau} \leq S_{VRB,max} \quad \tau = 1, 2, \dots, T_m \\ (1-\nu) S_{VRB,0} \leq S_{VRB,T_m} \leq (1+\nu) S_{VRB,0} \end{array} \right. \quad (8)$$

式中: $S_{VRB,\tau}$ 为 τ 时段VRB的SOC; $S_{VRB,0}$ 为VRB的初始SOC; η 为VRB的充放电效率; $P_{VRB,c,j}$ 、 $P_{VRB,d,j}$ 分别为 j 时段VRB的充、放电功率,其值由EMD结果及选定的 K 值决定; Δt 为分钟级时间尺度下的时间间隔,取值为1 min; $S_{VRB,max}$ 、 $S_{VRB,min}$ 分别为VRB的SOC上、下限; S_{VRB,T_m} 为末时段VRB的SOC; ν 为VRB始末SOC最大允许偏差系数。

2) 常规机组的运行约束。

常规机组的运行约束包括常规机组的出力上下限约束、爬坡约束、最小启停时间约束以及备用能力约束,具体可参见文献[17]。

3) AA-CAES的运行约束。

由于AA-CAES具有快速响应的能力,在日前调度时间尺度下,可以忽略其爬坡约束、启停时间约束和工况转换时间约束^[18]。因此,本文中AA-CAES需满足如下运行约束条件。

(1) AA-CAES的运行状态约束:

$$u_{CAES,g,t} + u_{CAES,c,t} \leq 1 \quad (9)$$

式中: $u_{CAES,g,t}$ 、 $u_{CAES,c,t}$ 为表征AA-CAES运行状态的二进制变量,若AA-CAES处于发电状态,则 $u_{CAES,g,t} = 1$,若AA-CAES处于压缩状态,则 $u_{CAES,c,t} = 1$,若AA-CAES处于停机状态,则 $u_{CAES,g,t} = u_{CAES,c,t} = 0$ 。

(2) AA-CAES的发电及压缩功率上下限约束:

$$u_{CAES,g,t} P_{CAES,g,min} \leq P_{CAES,g,t} \leq P_{CAES,g,max} u_{CAES,g,t} \quad (10)$$

$$u_{CAES,c,t} P_{CAES,c,min} \leq P_{CAES,c,t} \leq P_{CAES,c,max} u_{CAES,c,t} \quad (11)$$

式中: $P_{CAES,g,t}$ 和 $P_{CAES,c,t}$ 分别为 t 时段AA-CAES的发电和压缩功率; $P_{CAES,g,max}$ 、 $P_{CAES,g,min}$ 以及 $P_{CAES,c,max}$ 、 $P_{CAES,c,min}$ 分别为AA-CAES发电功率以及压缩功率的

上、下限,本文取 $P_{CAES, g, \max} = P_{CAES, rg}, P_{CAES, c, \max} = P_{CAES, rc}$,
 $P_{CAES, g, \min} = 0.4P_{CAES, rg}, P_{CAES, c, \min} = 0.4P_{CAES, rc}$

(3) AA-CAES 的储气室气压约束:

$$\begin{cases} p_{ST, t} = p_0 + \sum_{l=1}^t k_c P_{CAES, c, l} - \sum_{l=1}^t k_g P_{CAES, g, l} \\ p_{ST, \min} \leq p_{ST, t} \leq p_{ST, \max} \\ (1-\mu)p_0 \leq p_{ST, T} \leq (1+\mu)p_0 \end{cases} \quad (12)$$

式中: $p_{ST, t}$ 为 t 时段储气室的气压值; p_0 为储气室的初始气压; k_c 为压缩系数; k_g 为发电系数; $p_{ST, \max}$ 、 $p_{ST, \min}$ 分别为储气室气压的上、下限; $p_{ST, T}$ 为末时段储气室的气压值; μ 为始末气压最大允许偏差系数。

(4) AA-CAES 的储热室热容量约束:

$$\begin{cases} Q_{TES, t} = Q_{TES, 0} + \sum_{l=1}^t H_c P_{CAES, c, l} - \sum_{l=1}^t H_g P_{CAES, g, l} \\ Q_{TES, \min} \leq Q_{TES, t} \leq Q_{TES, \max} \end{cases} \quad (13)$$

式中: $Q_{TES, t}$ 为 t 时段储热室的储热量; $Q_{TES, 0}$ 为储热室的初始储热量, 本文取 $Q_{TES, 0} = 0.6Q_{TES}$; H_c 、 H_g 分别为压缩机、膨胀机的热量变化系数; $Q_{TES, \max}$ 、 $Q_{TES, \min}$ 分别为储热室热容量的上、下限, 本文取 $Q_{TES, \max} = Q_{TES}$, $Q_{TES, \min} = 0.2Q_{TES}$

(5) AA-CAES 的备用能力约束。

AA-CAES 在提供旋转备用时, 需要计及压缩功率约束、发电功率约束以及储气室的气压约束、储热室的热容量约束^[19], 因此压缩状态、停机状态、发电状态下 AA-CAES 的旋转备用能力约束分别如式 (14)~(16) 所示。

$$\begin{cases} 0 \leq R_{CAES, t}^{\text{up}} \leq P_{CAES, c, t} - P_{CAES, c, \min} \\ 0 \leq R_{CAES, t}^{\text{down}} \leq \min \left\{ P_{CAES, c, \max}, \frac{p_{ST, \max} - p_{ST, t}}{k_c} \right\} \\ \frac{Q_{TES, \max} - Q_{TES, t}}{H_c} \leq P_{CAES, c, t} \end{cases} \quad (14)$$

$$R_{CAES, t}^{\text{up}} = R_{CAES, t}^{\text{down}} = 0 \quad (15)$$

$$\begin{cases} 0 \leq R_{CAES, t}^{\text{up}} \leq \min \left\{ P_{CAES, g, \max}, \frac{p_{ST, t} - p_{ST, \min}}{k_g} \right\} \\ \frac{Q_{TES, t} - Q_{TES, \min}}{H_g} \leq P_{CAES, g, t} \\ 0 \leq R_{CAES, t}^{\text{down}} \leq P_{CAES, g, t} - P_{CAES, g, \min} \end{cases} \quad (16)$$

式中: $R_{CAES, t}^{\text{up}}$ 、 $R_{CAES, t}^{\text{down}}$ 分别为 t 时段 AA-CAES 的正、负旋转备用能力。

4) 风电场的运行约束。

$$0 \leq P_{W, t} \leq P_{W, fs, t} \quad (17)$$

5) 系统功率平衡约束。

$$\sum_{i=1}^{N_G} P_{G, i, t} + P_{W, t} + P_{CAES, g, t} = P_{L, t} + P_{CAES, c, t} \quad (18)$$

式中: $P_{L, t}$ 为 t 时段的负荷功率。

6) 备用容量约束。

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_G} R_{G, i, t}^{\text{up}} + R_{CAES, t}^{\text{up}} \geq \varepsilon_L P_{L, t} + \varepsilon_W P_{W, t} + \max \{ P_{G, i, t} \} \\ \sum_{i=1}^{N_G} R_{G, i, t}^{\text{down}} + R_{CAES, t}^{\text{down}} \geq \varepsilon_L P_{L, t} + \varepsilon_W P_{W, t} \end{cases} \quad (19)$$

式中: ε_L 、 ε_W 分别为负荷、风电功率的预测误差系数。

3 模型求解方法

粒子群优化 PSO (Particle Swarm Optimization) 算法是一类概率型全局优化算法, 相比于确定性算法, 其有更多的机会求解全局最优解, 且算法本身不依赖于优化问题的严格数学性质, 鲁棒性强, 求解速度快。此外, PSO 算法还具有突出性、并行性、稳健性以及良好的自组织性、进化性和记忆功能。由此可见, PSO 算法具有广阔的应用前景及发展空间, 故本文采用 PSO 算法求解上层模型。在上层生成混合储能系统的容量配置结果后, 下层模型将被转化为混合整数线性规划 MILP (Mixed Integer Linear Program) 问题, 可以借助成熟的商业优化软件进行求解, 本文采用 YALMIP 调用 Gurobi 9.0.1 求解器进行求解。

混合储能系统容量优化配置模型的求解流程图如图 3 所示。其中, 进行可行性检测的原则为: 在各粒子生成的容量配置结果中, AA-CAES 的额定压缩功率不得低于额定发电功率的 1/3, 额定发电功率也

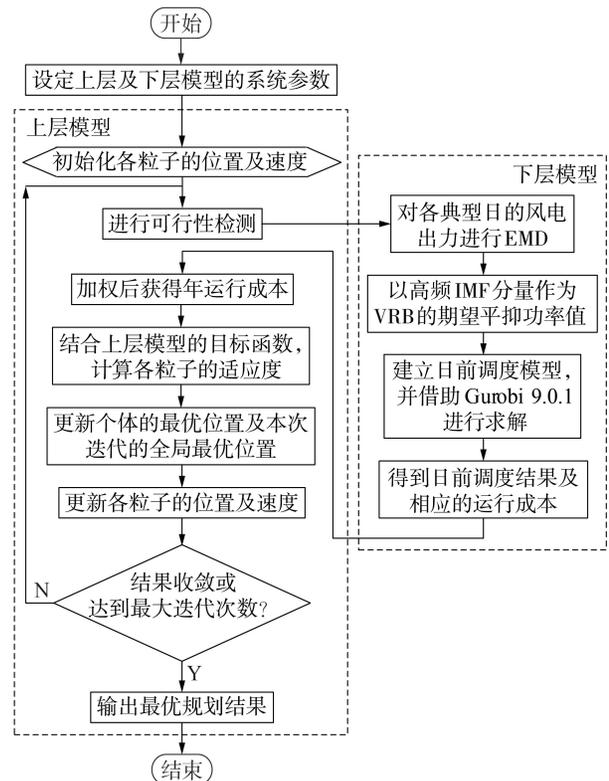


图 3 混合储能系统容量优化配置模型的求解流程图

Fig.3 Flowchart for solving capacity optimization configuration model of hybrid energy storage system

不得低于额定压缩功率的1/3,且AA-CAES在满足气压约束时的最大发电功率下的持续工作时间不得低于3h,VRB的最大放电功率持续时间不得低于3h,即需满足式(20)。

$$\begin{cases} P_{CAES,rc} = \max\{P_{CAES,rc}, P_{CAES,rg}/3\} \\ P_{CAES,rg} = \max\{P_{CAES,rg}, P_{CAES,rc}/3\} \\ V_{ST} = \max\left\{V_{ST}, \frac{3k_g V_{ST} P_{CAES,rg}}{P_{ST,max} - P_{ST,min}}\right\} \\ E_{VRB} = \max\{E_{VRB}, 3P_{VRB,t}\} \end{cases} \quad (20)$$

4 算例分析

4.1 算例参数及场景设置

混合储能系统的容量上下限、成本系数等上层模型参数见附录C表C1,其中AA-CAES的容量上下限、成本系数及贴现率来源于文献[15,18],VRB的成本系数、AA-CAES及VRB的寿命参数来源于文献[20]。

下层基于改进的IEEE 30节点系统进行仿真分析,拓扑图及常规机组参数见文献[15,18]。其中,风电场、VRB接入节点22,AA-CAES接入节点23。为了保证容量配置结果的合理性,本文选取某电网一年四季4个典型日的风电及负荷数据分别进行调度分析,并最终加权获得年运行成本,将其计入容量配置结果。AA-CAES的储气室气压约束、VRB的SOC约束等下层参数见附录C表C2。各典型日的风电原始出力数据(1440个样本点)见附录C图C1,用于日前调度的负荷数据见附录C图C2。其中,春秋典型日的负荷功率曲线相同,但风电出力数据不同。

为了验证本文所建混合储能系统容量优化配置模型的有效性,设定了如下3种运行场景:①场景1,系统中只包含AA-CAES,不包含VRB;②场景2,系统中只包含VRB,不包含AA-CAES;③场景3,系统中同时包含VRB和AA-CAES(即本文研究场景)。

4.2 结果分析

4.2.1 容量优化配置结果及经济性分析

各场景下混合储能系统的容量优化配置结果、各项成本结果分别如表1和表2所示。

由表1可知:场景2与场景3下VRB的规划结果相差并不大,这主要是因为VRB用于平抑风电出力波动,仅以EMD结果中的高频IMF分量的相反数作为其出力期望值,面对同样的风电出力预测数据,其规划结果必然相近;然而,相较于场景3,场景1下AA-CAES的额定压缩功率、额定发电功率及储气室容积均有所增加,这是因为场景1未建设VRB,无法对风电功率波动进行有效平抑,但系统又存在功率平衡约束,要求在任何时段都能满足负荷用电需求,此时常规机组的爬坡能力有限,难以进行有效响应,因此要求AA-CAES能够根据风电功率的大幅波动而大幅调整其出力,从而满足系统的用电需求及备用需求,故AA-CAES规划的额定功率及储气室容积均较高。

由表2可知,场景1的综合成本最高,这是因为:虽然场景1未建设VRB,减少了相应的安装成本及年维护成本,并避免了置换成本,但由于场景1无法对风电出力波动进行有效平抑,每年都必须承担高昂的风电有功出力波动越限考核成本,这直接导致该场景下各典型日的运行成本处于较高的水平,所以综合成本最高。场景2的综合成本也较高,这是因为:场景2仅建设了VRB用于平抑风电出力波动,而未建立AA-CAES进行削峰填谷和保证可再生能源消纳,虽然避免了高昂的风电有功出力波动越限考核成本,但由于无法较好地削峰填谷,实现富余风电资源的“低储高放”,从而导致部分风电资源被浪费,需要承担较高的弃风成本;同时,为了满足系统功率平衡约束,常规机组的运行成本也会有所提升。相较而言,场景3的综合成本最低,这是因为场景3既可以充分利用VRB平抑风电出力波动,又可以借助AA-CAES削峰填谷,有效保障可再生能源消纳,相比于场景1其风电有功出力波动越限考核成本大

表1 各场景下混合储能系统的容量优化配置结果

Table 1 Capacity optimization configuration results of hybrid energy storage system under each scenario

场景	VRB		AA-CAES			
	额定功率/MW	规划容量/(MW·h)	额定压缩功率/MW	额定发电功率/MW	储气室容积/m ³	储热室热容量/(MW·h)
1	—	—	366.5148	357.3432	3.9844310×10 ⁶	5077.6692
2	62.9502	424.3012	—	—	—	—
3	62.9452	424.2896	330.4074	328.1378	3.5259498×10 ⁶	6290.8733

表2 各场景下混合储能系统的成本

Table 2 Costs of hybrid energy storage system under each scenario

场景	安装成本/\$	置换成本/\$	年维护成本/\$	残值回收结果/\$	年运行成本/\$	综合成本/\$
1	3.9963×10 ⁸	0	2.8957×10 ⁶	0	6.9012×10 ⁸	7.2653×10 ⁸
2	1.1268×10 ⁸	4.6719×10 ⁷	8.3927×10 ⁵	-1.7289×10 ⁶	3.5251×10 ⁸	3.6657×10 ⁸
3	4.3493×10 ⁸	2.8031×10 ⁷	3.1380×10 ⁶	-1.0373×10 ⁶	1.9074×10 ⁸	2.3262×10 ⁸

幅降低,相比于场景 2 其常规机组运行成本及弃风成本也有所下降,因此最为经济。

4.2.2 混合储能系统的运行灵活性分析

根据 GB / T 19963—2011《风电场接入电力系统技术规定》,为了保障电网的安全稳定运行,本文要求全网风电 1 min 有功功率变化量不得超过其总装机容量的 1/10。各典型日的原始风电波动量曲线和经 VRB 平抑后的风电波动量曲线分别见附录 C 图 C3 和图 C4。由图可知:若不配置 VRB 对风电出力特性曲线进行改善,大多时间全网风电 1 min 有功功率变化量将会超过其装机容量的 1/10,相关风电场将面临考核;反之,配置 VRB 之后,其 1 min 有功功率变化量均在规定的允许范围内,可以避免支付高昂的考核费用。场景 3 下各典型日经 VRB 平抑后的风电功率见图 4。对比图 4 和附录 C 图 C1 可看出,经 VRB 平抑后,各典型日的风电功率波动性明显降低,有利于电力系统的调度安排。

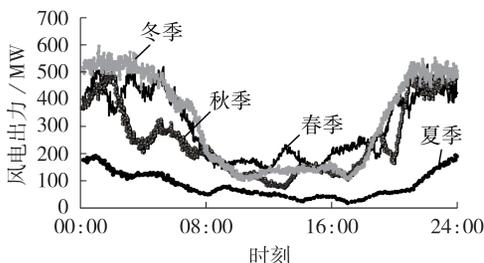


图 4 场景 3 下经 VRB 平抑后各典型日的风电出力曲线
Fig.4 Wind power output curves of each typical day after suppression by VRB under Scenario 3

场景 3 下冬季典型日的系统调度结果如图 5 所示。从图中可看出:在 00:00—07:30 和 20:30—24:00 时段内,风电大发而负荷功率较小,AA-CAES 工作在压缩状态,吸收富余的风电并进行存储;而在 07:30—20:30 时段内,风电出力处于较低的水平,负荷却处于高峰期,此时 AA-CAES 释放已存储的电能,以满足高峰时期的用电需求。经 AA-CAES 削峰填谷后,系统负荷峰谷差率为 50.96%。为了便于比

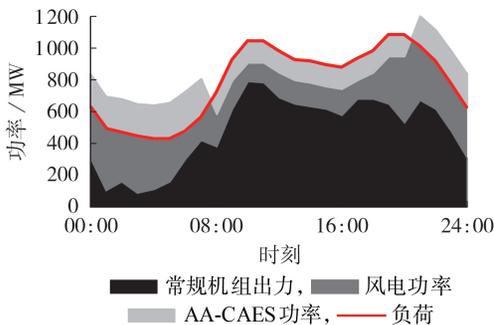


图 5 场景 3 下冬季典型日的调度结果
Fig.5 Scheduling results of winter typical day under Scenario 3

较,附录 C 图 C5 给出了场景 2 下冬季典型日的系统调度结果。由图可知,若不建设 AA-CAES,系统难以实现削峰填谷,系统负荷峰谷差率高达 67.71%。由此可见,建设 AA-CAES 后,系统负荷峰谷差率下降了 16.75%,这主要是因为 AA-CAES 实现了富余风电的“低储高放”,即在负荷低谷时期存储富余的风电,并在高峰期进行释放,较好地实现了削峰填谷的功能。

场景 3 下冬季典型日的风电调度结果如图 6 所示。从图中可看出,在 AA-CAES 的参与下,系统的风电消纳率高达 99.98%,较好地促进了可再生能源的消纳。为了便于进行比较,附录 C 图 C6 给出了场景 2 下冬季典型日的风电调度结果。由图可知,场景 2 的风电消纳率较低,仅为 79.75%,大约有 20% 的风电资源被浪费。由此可见,建设 AA-CAES 后,系统的风电消纳率提升了 20.23%,这同样是因为 AA-CAES 具有“低储高放”的特性,能够存储富余的风电功率,并在有需要时进行释放,有力保障了可再生能源的消纳。

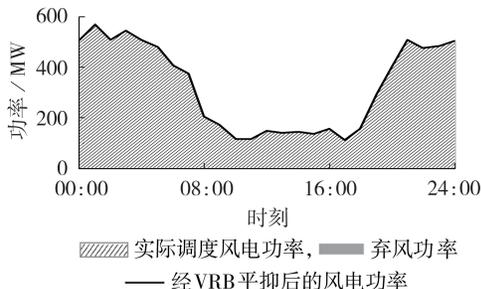


图 6 场景 3 下冬季典型日的风电调度结果
Fig.6 Wind power scheduling results of winter typical day under Scenario 3

场景 3 下冬季典型日的备用需求及备用调度结果如图 7 所示。由图可看出,引入 AA-CAES 后,常规机组的备用压力大幅降低,AA-CAES 独自承担了系统约 50% 的正备用需求以及 56% 的负备用需求,这主要是因为 AA-CAES 具有极好的快速响应能力,在

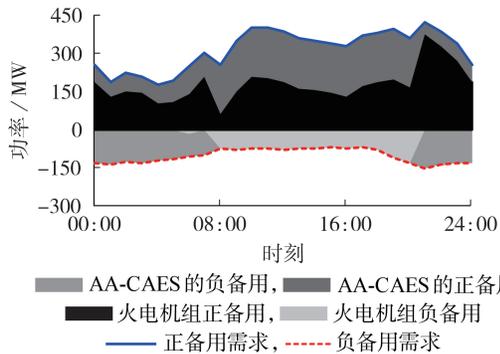


图 7 场景 3 下冬季典型日的备用需求及备用调度结果
Fig.7 Reserve demand and scheduling results of winter typical day under Scenario 3

日前调度时间尺度下,可以忽略其爬坡约束、起停时间约束等,相比于常规机组,AA-CAES能够更好地响应系统的备用需求,保证系统运行的可靠性。其余3个季节(春、夏、秋)典型日下的调度结果与冬季类似,不再赘述。

5 结论

本文提出了一种基于EMD的风电功率分配策略,并基于该策略建立了由VRB和AA-CAES组成的混合储能系统的双层容量优化配置模型,所得结论如下:

1)风电出力的高频分量幅值接近于0,能量占比很低,若采用VRB对其进行消纳,则可以在保留风电主要能量的同时,显著改善风电出力曲线;

2)相比于单一类型的储能规划,进行混合储能系统的容量优化配置不仅可以实现优势互补,满足电网的多性能需求,还能在一定程度上降低系统在规划期内的总经济投入;

3)在电网内进行VRB和AA-CAES混合储能的容量优化配置,不仅可以平抑可再生能源出力波动,实现削峰填谷,有效保障可再生能源消纳,还可以提高系统的运行灵活性及可靠性,对提升电网的安全经济运行水平具有重要的意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

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] 李军徽,张嘉辉,穆钢,等. 计及负荷峰谷特性的储能调峰日前优化调度策略[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):128-133,140.
LI Junhui, ZHANG Jiahui, MU Gang, et al. Day-ahead optimal scheduling strategy of peak regulation for energy storage considering peak and valley characteristics of load [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 128-133, 140.
- [3] WANG Y L, SONG F H, MA Y Z, et al. Research on capacity planning and optimization of regional integrated energy system based on hybrid energy storage system [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 180: 115834.
- [4] 吴倩,王洋,王琳媛,等. 计及波动平抑与经济性的风光储系统中混合储能容量优化配置[J/OL]. 电测与仪表. (2020-06-04) [2020-09-30]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200601.1243.018.html>.
- [5] 何俊强,师长立,马明,等. 基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(7):157-167.
HE Junqiang, SHI Changli, MA Ming, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 157-167.
- [6] 郭玲娟,魏斌,韩肖清,等. 基于集合经验模态分解的交直流混合微电网混合储能容量优化配置[J]. 高电压技术,2020,46(2):527-537.
GUO Lingjuan, WEI Bin, HAN Xiaoqing, et al. Capacity optimal configuration of hybrid energy storage in hybrid AC/DC micro-grid based on ensemble empirical mode decomposition [J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(2): 527-537.
- [7] 何颖源,陈永翀,刘勇,等. 储能的度电成本和里程成本分析[J]. 电工电能新技术,2019,38(9):1-10.
HE Yingyuan, CHEN Yongchong, LIU Yong, et al. Analysis of cost per kilowatt-hour and cost per mileage for energy storage technologies [J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(9): 1-10.
- [8] LUO X, WANG J H, DOONER M, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation [J]. Applied Energy, 2015, 137: 511-536.
- [9] BUENO C, CARTA J A. Wind powered pumped hydro storage systems, a means of increasing the penetration of renewable energy in the Canary Islands [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2006, 10(4): 312-340.
- [10] 汪惟源,朱寰,高正平,等. 大规模低成本电化学储能技术及应用研究进展[J]. 现代化工,2020,40(10):80-85.
WANG Weiyuan, ZHU Huan, GAO Zhengping, et al. Progress in large-scale low-cost electrochemical energy storage technology and its application [J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(10): 80-85.
- [11] 文贤旭,张世海,王锁斌. 压缩空气储能技术及示范工程综述[J]. 应用能源技术,2018(3):43-48.
WEN Xiankui, ZHANG Shihai, WANG Suobin. Summary of compressed air energy storage technology and demonstration projects [J]. Applied Energy Technology, 2018(3): 43-48.
- [12] MONGIRD K, FOTEDAR V, VISWANATHAN V, et al. Energy storage technology and cost characterization [EB/OL]. [2020-10-24]. https://www.energy.gov/sites/prod/files/2019/07/f65/Storage%20Cost%20and%20Performance%20Characterization%20Report_Final.pdf.
- [13] 徐平,郝旺身. 振动信号处理与数据分析[M]. 北京:科学出版社,2016:164-170.
- [14] 娄素华,杨天蒙,吴耀武,等. 含高渗透率风电的电力系统复合储能协调优化运行[J]. 电力系统自动化,2016,40(7):30-35.
LOU Suhua, YANG Tianmeng, WU Yaowu, et al. Coordinated optimal operation of hybrid energy storage in power system accommodated high penetration of wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 30-35.
- [15] 尹斌鑫,苗世洪,李姚旺,等. 考虑变寿命特性的先进绝热压缩空气储能电站容量规划模型[J]. 电工技术学报,2020,35(3):612-622.
YIN Binxin, MIAO Shihong, LI Yaowang, et al. A capacity planning model of advanced adiabatic compressed air energy storage plant considering lifetime varying characteristic [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(3): 612-622.
- [16] 贺鸿杰,张宁,杜尔顺,等. 电网侧大规模电化学储能运行效率及寿命衰减建模方法综述[J]. 电力系统自动化,2020,44(12):193-207.
HE Hongjie, ZHANG Ning, DU Ershun, et al. Review on modeling method for operation efficiency and lifespan decay of large-scale electrochemical energy storage on power grid side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(12): 193-207.
- [17] 张高航,李凤婷. 计及源荷储综合灵活性的电力系统日前优化调度[J]. 电力自动化设备,2020,40(12):159-167.
ZHANG Gaohang, LI Fengting. Day-ahead optimal scheduling of power system considering comprehensive flexibility of source-

- load-storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(12):159-167.
- [18] 李姚旺,苗世洪,尹斌鑫,等. 考虑先进绝热压缩空气储能电站备用特性的电力系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2018,38(18):5392-5404.
LI Yaowang, MIAO Shihong, YIN Binxin, et al. Power system optimal scheduling strategy considering reserve characteristics of advanced adiabatic compressed air energy storage plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2018,38(18):5392-5404.
- [19] 蔡杰,张世旭,廖爽,等. 考虑AA-CAES装置热电联储/供特性的微型综合能源系统优化运行策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(2):480-490.
CAI Jie, ZHANG Shixu, LIAO Shuang, et al. Optimal operation strategy of micro-integrated energy system considering heat and power cogeneration characteristics of AA-CAES devices[J]. High Voltage Engineering, 2020,46(2):480-490.
- [20] 熊宁,朱文广,杨为群,等. 基于成本分析的配电网储能系统配置方法[J]. 智慧电力, 2019,47(10):51-55,111.
XIONG Ning, ZHU Wenguang, YANG Weiqun, et al. Energy

storage system configuration method for distribution network based on cost analysis[J]. Smart Power, 2019,47(10):51-55,111.

作者简介:



齐晓光

齐晓光(1989—),男,河北石家庄人,工程师,硕士,主要研究方向为电网规划设计、新能源并网及消纳分析(E-mail: qxgb15@sina.com);

姚福星(1998—),男,吉林桦甸人,博士研究生,通信作者,主要研究方向为储能系统优化规划及运行(E-mail: yaofuxing@hust.edu.cn);

苗世洪(1963—),男,湖北随州人,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为压缩空气储能系统建模及应用、电力系统继电保护与运行控制等(E-mail: shmiao@hust.edu.cn)。

(编辑 陆丹)

Capacity optimization configuration of hybrid energy storage in power system considering large-scale wind power integration

QI Xiaoguang¹, YAO Fuxing², ZHU Tiantong¹, ZHANG Qianmao¹, ZHANG Jing¹,
WANG Ying¹, MIAO Shihong²

(1. Economic Research Institute of State Grid Hebei Electric Power Company, Shijiazhuang 050000, China;

2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology, School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: Different energy storage technologies have their own characteristics in terms of response properties, economic costs, capacity scale, and so on, and are suitable for different application scenarios. The hybrid energy storage system, which is formed by two or more energy storage devices, can often integrate the technical and economic characteristics of all parties and show more excellent performance. Aiming at the problems of the existing power grid being increasingly affected by the output fluctuations of renewable energy, the technical bottleneck in promoting the consumption, and the high pressure of peak shaving, a hybrid energy storage system composed of VRB (Vanadium Redox flow Battery) and AA-CAES (Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage) is proposed, and a capacity optimization configuration model considering large-scale wind power integration is established. Firstly, the spectrum characteristics of wind power output are analyzed, and a wind power distribution strategy based on empirical mode decomposition is proposed. Then, based on this strategy, a bi-level capacity optimization configuration model of hybrid energy storage system is constructed. The upper layer decides the configuration capacity of hybrid energy storage system with the goal of minimizing the total economic input in the planning period, while the lower layer decides its day-ahead generation plan with the goal of minimizing the system operation cost. Finally, the proposed model is simulated and verified based on the typical daily wind power and load data of an actual power grid. The results show that the proposed capacity optimization configuration model of hybrid energy storage system can not only meet the multiple performance requirements of power grid, but also effectively improve the economy of the system.

Key words: large-scale wind power integration; hybrid energy storage system; capacity configuration; vanadium redox flow battery; advanced adiabatic compressed air energy storage

附录 A

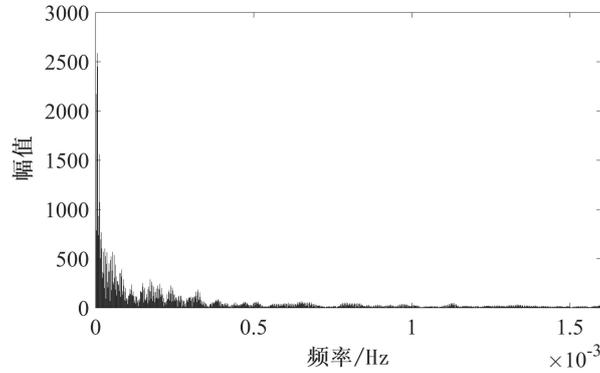


图 A1 某风电场出力信号的幅频特性
Fig.A1 Amplitude-frequency characteristics of output signal of a wind farm

附录 B

EMD 方法的实现步骤如下:

- (1) 找出原始信号 $s_0(t)$ 的所有极大值与极小值点，并分别采用三次样条插值算法获得信号的上包络线 $e_{up}(t)$ 和下包络线 $e_{down}(t)$;
- (2) 对上、下包络线取均值 $e_m(t)$ ，用原始信号 $s_0(t)$ 减去均值 $e_m(t)$ 得到新的信号 $s_1(t)$;
- (3) 判断 $s_1(t)$ 是否满足 IMF 的 2 个条件，若满足，则将 $s_1(t)$ 记为 1 阶 IMF 分量 C_1 ，若不满足，则用 $s_1(t)$ 代替信号 $s_0(t)$ ，重复步骤 (1) 和步骤 (2);
- (4) 用原始信号 $s_0(t)$ 减去 1 阶 IMF 分量 C_1 得到剩余信号 $r_1(t)$ ，用 $r_1(t)$ 代替 $s_0(t)$ ，重复步骤 (1) — (3)，得到各阶 IMF 分量 C_2 、 \dots 、 C_n ，直至剩余信号小于某一设定值或无法分解得出 IMF 分量为止;
- (5) 分解结束，各阶 IMF 分量 C_1 、 C_2 、 \dots 、 C_n 加上最终剩余的信号 $r_n(t)$ 即为分解结果。

附录 C

表 C1 上层模型参数

Table C1 Parameters of upper layer model

参数	数值	参数	数值	参数	数值
VRB 额定功率最大值/MW	200	VRB 额定功率最小值/MW	20	VRB 规划容量最大值/ (MW·h)	800
VRB 规划容量 最小值/ (MW·h)	50	AA-CAES 额定压缩功率 最大值/MW	500	AA-CAES 额定压缩功率 最小值/MW	10
AA-CAES 额定发电功率 最大值/MW	500	AA-CAES 额定发电功率 最小值/MW	10	AA-CAES 储气室容积 上限/m ³	4000000
AA-CAES 储气室容积下限/m ³	10000	AA-CAES 储热室容量 上限/ (MW·h)	8000	AA-CAES 储热室 容量下限/ (MW·h)	10
VRB 功率成本系数/ (\$·MW ⁻¹)	400000	VRB 能量成本 系数/[\$·(MW·h) ⁻¹]	100000	VRB 年度维护成本 系数/ (\$·MW ⁻¹)	8000
AA-CAES 压缩机建设 成本系数/ (\$·MW ⁻¹)	390000	AA-CAES 膨胀机建设 成本系数/ (\$·MW ⁻¹)	325000	AA-CAES 储气室建设 成本系数/[\$·(10 ³ m ³) ⁻¹]	30000
AA-CAES 储热室建设 成本系数/[\$·(MW·h) ⁻¹]	4140	AA-CAES 年度维护 成本系数/ (\$·MW ⁻¹)	4000.4	贴现率	0.08
AA-CAES 电站寿命/a	40	VRB 电站寿命/a	15	典型日种类数	4
各典型日所占比例	1:1:1:1				

表 C2 上层模型参数

Table C2 Parameters of lower layer model

参数项目	数值	参数项目	数值	参数项目	数值
VRB 的 SOC 上限	0.9	VRB 的 SOC 下限	0.1	VRB 的初始 SOC	0.5
VRB 充放电效率	0.9	VRB 始末 SOC 最大允许偏差系数	0.2	AA-CAES 储气室气压上限/bar	55
AA-CAES 储气室气压下限/bar	40	AA-CAES 储气室初始气压/bar	47.5	储气室始末气压最大允许偏差系数	0.05
压缩系数/ (bar·MW ⁻¹)	$\frac{9.68}{V_{ST}}$	膨胀系数/ (bar·MW ⁻¹)	$\frac{17.68}{V_{ST}}$	压缩机热量变化系数/h	0.9583
膨胀机热量变化系数/h	1.2375	风电预测误差系数	0.2	负荷预测误差系数	0.05
单位弃风成本/ (\$·MW ⁻¹)	300	单位风电有功出力波动越限考核成本/ (\$·MW ⁻¹)	300		

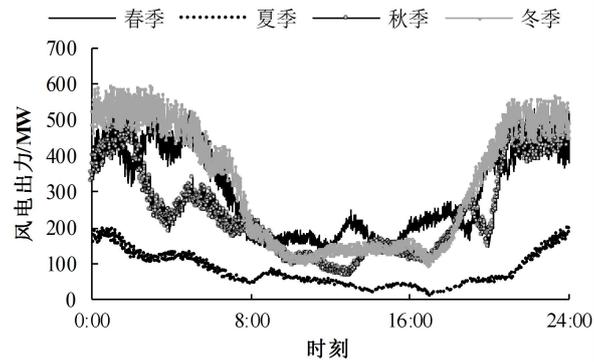


图 C1 各典型日的原始风电出力曲线

Fig.C1 Original wind power output curve of each typical day

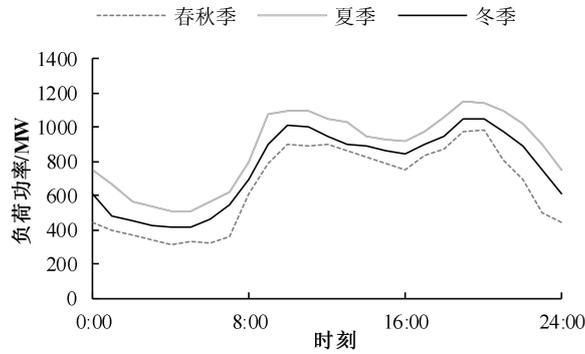


图 C2 各典型日的负荷功率曲线

Fig.C2 Load power curve of each typical day

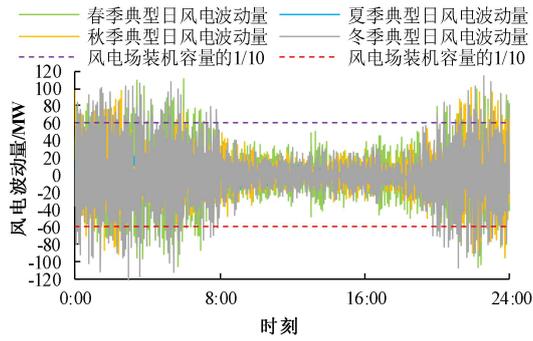


图 C3 各典型日的原始风电波动量曲线

Fig.C3 Original wind power fluctuation curve of each typical day

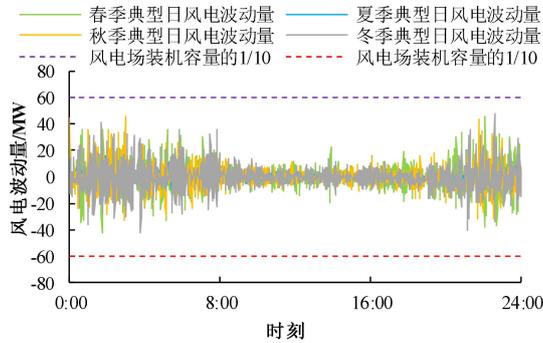


图 C4 各典型日经 EMD 及 VRB 平抑后的风电波动量曲线

Fig.C4 Wind power fluctuation curve after EMD and VRB smoothing of each typical day

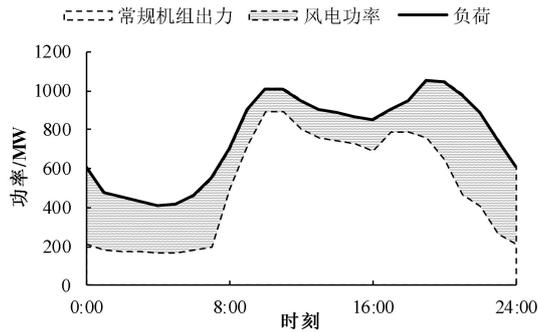


图 C5 场景 2 下冬季典型日的调度结果

Fig.C5 Scheduling results of winter typical day under Scenario 2

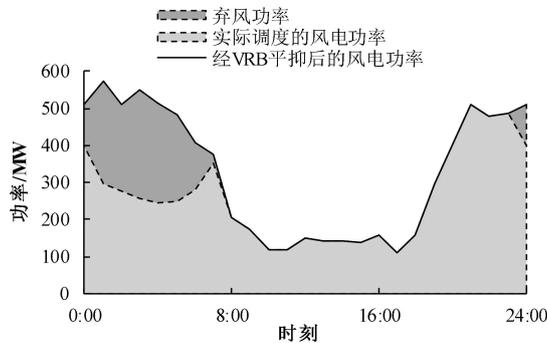


图 C6 场景 2 下冬季典型日的风电调度结果

Fig.C6 Wind power scheduling results of winter typical day under Scenario 2