含混合储能的铁路10 kV 配电网综合能源系统规划

肖 斐,吴命利,何婷婷

(北京交通大学 电气工程学院,北京 100044)

摘要:针对铁路10kV配电网多类能源的用能需求,建立一种含混合储能的铁路配电网综合能源系统规划模型。设计铁路10kV配电网区域综合能源系统架构;针对光伏出力波动平抑需求,提出一种基于经验模态分解的光伏出力高频分量提取方法,并联合典型日负荷数据生成考虑多类光伏高频分量平抑需求的场景集。 在此基础上,以等值年总成本最低为目标、混合储能和综合能源系统的运行和功率平衡为约束,建立综合能 源系统优化配置模型并利用混合整数线性规划算法求解该模型。最后,以我国北方某铁路10kV配电网为 例,分析验证了混合储能接入综合能源系统在平抑分布式能源出力波动、提升系统经济效益方面的有效性。 关键词:铁路;配电网;综合能源系统;混合储能;光伏;经验模态分解;高频分量平抑;规划

中图分类号:TM 715;TK 01 文献标志码:A DO

DOI:10.16081/j.epae.202202004

0 引言

随着经济、社会、文化的快速发展,人民生活质量 在日益提高的同时,对能源供应质量和能源种类也 提出了更高的要求^[1]。区域综合能源系统作为一种 集成冷、热、电、气等多种能源形式的新型供电系统, 目前已受到广泛的关注^[2]。已建成的示范性区域综 合能源系统包括上海迪士尼度假区示范工程^[3]、天 津中新生态城^[4]、北京延庆光热发电基地^[4]、广东佛 山冷热电联供微网系统等。通过大量实践表明综合 能源系统通过多能生产、能源转换和存储环节可有 效提升系统能源使用效率,降低总体经济成本。

在区域综合能源系统规划方面,文献[5]提出一 种联合区域综合能源系统管网规划和能源站枢纽规 划的双层规划方法,上层规划模型以直流潮流模型 和气网潮流模型为基础,下层规划模型以多能源转 换模型为基础,以实现多能设备容量配置和线路优 化配置。文献[6]提出一种考虑多区域互联协同的 分布式能源站规划模型,涵盖了设备类型选择、管道 路径规划和多区域间协同优化运行。文献[7]提出 一种计及需求响应不确定性的区域综合能源系统协 同规划配置方法,利用证据合成理论实现需求响应 的不确定性评估,并结合双层规划模型确定最优电 价和设备容量配置方案。文献[8]提出一种考虑冷 热电多能负荷不确定性的区域综合能源系统鲁棒规 划方法。文献[9]提出以综合能源系统建设成本和 运行费用最低为目标,且考虑多种能源枢纽架构的

收稿日期:2021-05-11;修回日期:2021-12-13

在线出版日期:2022-02-16

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (2020JBZD012)

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2020JBZD012)

规划模型。上述模型主要用多能源之间的转换关系 和多能源设备的经济成本计算得到各类设备的最优 容量。以光伏与风力发电为典型代表的发电形式存 在间歇性、随机性及波动性等缺点,为确保上述系统 中的功率平衡、稳定性、电能质量等,必须配备相应 的储能系统^[10-14]。近年来,混合储能作为一种兼具 功率型和能量型的复合储能设备,已成为区域综合 能源系统盈利和分布式能源功率平抑的关键环节。

在混合储能容量规划方面,文献[15]基于区域 综合能源系统架构,设计一种考虑系统全寿命周期 收益的冷、热、电混合储能配置方法,为工程实践提 供参考。文献[16]在净负荷功率频谱分析的基础 上,提出一种协调蓄电池(BES)与超级电容器(SC) 运行的微电网功率分配策略,并以混合储能年综 合成本最小为目标建立了容量优化配置模型。文 献[17]提出了一种基于集合经验模态分解(EMD)的 交直流微电网混合储能容量优化配置方法,该方法 以平抑后的负荷功率波动量和年综合成本最小为目 标。文献[18]基于离散傅里叶变换方法将孤岛型微 电网中的电源负荷不平衡功率进行分频处理,提出 频率分断原则以实现混合储能经济优化配置。由上 述分析可知,现有的区域综合能源系统规划多以能 源均衡分配为约束,有必要考虑混合储能对分布式 能源波动量的消纳平抑。另一方面,铁路10kV配 电网作为保障铁路安全运行的关键,有必要对其开 展含混合储能的综合能源系统规划研究,以提升其 运行的可靠性和经济性。

综上,本文提出一种含混合储能的铁路10 kV 配电网综合能源系统规划模型。首先,针对铁路配 电网用能需求设计区域综合能源系统架构。其次, 提出一种基于EMD的光伏出力高频分量提取方法, 并联合典型日负荷数据生成考虑多类光伏高频分 量平抑的典型场景集。然后,以等值年总成本最低 为目标、混合储能和综合能源系统的运行和功率 平衡为约束,建立多场景铁路10kV配电网综合能 源系统优化配置模型,并利用混合整数线性规划算 法求解该模型。最后,以我国北方某铁路10kV配 电网为例分析验证了所提方法的有效性和可行性。

1 含混合储能的铁路 10 kV 配电网综合能源 系统架构

混合储能是由功率型和能量型储能共同组成的 复合储能装置,具有响应速度快、循环寿命长的特 点。通过合理配置不同种类的储能容量,可充分利 用其在充放电性能和经济性之间的互补特性。鉴于 上述分析,有必要在铁路10 kV 配电网规划中引入 混合储能系统。通过合理规划SC、BES和储热(HS) 设备的容量,以实现铁路10 kV 配电网光伏出力波 动消纳平抑和经济效益提升。另一方面,通过接入 热电联产(CHP)设备可满足配电网的多能源需求。

图1展示了铁路10kV配电网综合能源系统内 多能设备的物理连接拓扑和多能转换关系。由图可 知,综合能源系统包含了燃气锅炉(GB)、CHP、SC、 BES、HS和光伏(PV)设备。鉴于现有配电系统已建 设了电网线路和热网管道,本文不考虑从配电网至 各用户负荷端传输电、热的管线投资成本^[19]。





2 考虑光伏出力波动水平的场景生成方法

2.1 基于EMD的光伏高频分量提取

考虑到光伏出力的波动性,本文用EMD方法对 光伏出力曲线进行分解,将原始信号分解为一系列 不同频率的信号,即固有模态函数(IMF)分量。相 较于传统的傅里叶变换方法和小波变换方法,EMD 方法无需设置基波分量且计算量较小,在实际工程中 使用较为广泛。EMD方法提取IMF的步骤如下^[20]。

步骤1:针对含 $N_{\rm T}$ 个采样点的光伏出力曲线 $\mathbf{x}^{\rm pv} = [x^{\rm pv}(1), x^{\rm pv}(2), \cdots, x^{\rm pv}(N_{\rm T})], 根据曲线的局部极$ $大值和局部极小值可求出上包络<math>\mathbf{x}^{\rm pv}_{\rm up}$ 和下包络 $\mathbf{x}^{\rm pv}_{\rm down}$ 的平均值,如式(1)所示。

$$\boldsymbol{x}_{\text{mean}}^{\text{pv}} = (\boldsymbol{x}_{\text{up}}^{\text{pv}} + \boldsymbol{x}_{\text{down}}^{\text{pv}})/2 \tag{1}$$

步骤 2:将光伏出力曲线 $\mathbf{x}^{PV} = \mathbf{x}^{PV}_{mean}$ 求差得 \mathbf{x}^{PV}_{dev} , 根据式(2)判断 \mathbf{x}^{PV}_{dev} 是否为IMF。若 $S_{D} \in [0.2, 0.3]$ 则 判断此次求得的 \mathbf{x}^{PV}_{dev} 为 IMF,执行步骤 3,否则将 \mathbf{x}^{PV}_{dev} 作为新的数据样本代入步骤 1。

$$S_{\rm D} = \sum_{t=1}^{N_{\rm T}} \left| \frac{\left| x_{\rm dev,j-1}^{\rm pv}(t) - x_{\rm dev,j}^{\rm pv}(t) \right|^2}{x_{\rm dev,j-1}^{\rm pv}(t) x_{\rm dev,j-1}^{\rm pv}(t)} \right|$$
(2)

式中:x^{pv}_{dev,i}(t)为t时刻第j次迭代的光伏出力偏差量。

步骤3:将原始样本数据x¹与求得的IMF分量 作差,求得更新后的样本数据,如式(3)所示。判断 x¹¹是否满足以下终止条件:x¹¹基本呈单调变化趋势 或|x¹¹ 很小可视为量测误差。若满足上述终止条件 则判断迭代结束,否则转至步骤1。

$$\boldsymbol{x}^{\mathrm{pv}} = \boldsymbol{x}^{\mathrm{pv}} - \boldsymbol{x}^{\mathrm{pv}}_{\mathrm{dev}} \tag{3}$$

通过反复迭代以上步骤可求得具有不同频率的 光伏出力曲线,图2展示了 $N_{\rm T}$ =720时光伏出力曲线 和经EMD后的各IMF分量($\mathbf{x}_{\rm IME}$)。







2.2 基于分频参数的光伏高频分量计算

本文通过依次选取前 N_{I} 项光伏出力曲线 IMF 分量的累加和作为光伏出力的高频分量。以图 2 为 例,当 N_{I} =3时,将光伏出力 \boldsymbol{x}_{IMFI} 一 \boldsymbol{x}_{IMF3} 分量的累加 量作为光伏高频分量 $\boldsymbol{P}_{high}^{PV}$ 、 \boldsymbol{x}_{IMF4} 分量作为光伏低频分 量 $\boldsymbol{P}_{how}^{PV}$,且满足:

$$P_{\text{high}}^{\text{PV}}(t) + P_{\text{low}}^{\text{PV}}(t) = P^{\text{PV}}(t) \quad \forall t$$
(4)
$$P: P_{\text{high}}^{\text{PV}}(t) \text{和} P_{\text{low}}^{\text{PV}}(t) \text{分别为} t \text{时刻光伏高频分量和}$$

式中: $P_{high}^{PV}(t)$ 和 $P_{low}^{PV}(t)$ 分别为t时刻光伏高频分量和低频分量; $P^{PV}(t)$ 为t时刻光伏出力。

2.3 考虑光伏高频分量的典型场景生成方法

为提升模型的通用性,本文按电、热负荷水平和 光伏出力水平设置了3种典型日。在此基础上,利 用EMD方法提取每类典型日光伏出力曲线的IMF 分量,用于计算光伏出力的高频分量。综合考虑需 平抑的光伏高频分量,本文将光伏高频分量参数*N*₁ 最大值设为3,即每一类典型日数据可生成3种含不 同光伏高频分量平抑需求的典型场景。综合以上分 析,本文共生成3×3=9种典型运行场景。

3 铁路10 kV 配电网综合能源系统规划方法

3.1 目标函数

本文所提规划模型以等值年总成本 C_{cost}最低为 目标,包含设备投资费用 C_{inv}和系统运行费用 C_{oper}两 部分,目标函数如下:

$$\min C_{\rm cost} = C_{\rm inv} + C_{\rm oper} \tag{5}$$

设备投资费用包含了GB、CHP、SC、BES、HS设备的建设投资费用,具体如下:

$$C_{inv} = C_{inv}^{GB} + C_{inv}^{CHP} + C_{inv}^{SC} + C_{inv}^{BES} + C_{inv}^{HS}$$
(6)

$$C_{inv}^{GB} = \sum_{k=1}^{N_{GB}} \theta_{k}^{GB} \omega_{k,inv}^{GB} r (1+r)^{T_{k,GB}} / \left[(1+r)^{T_{k,GB}} - 1 \right]$$

$$C_{inv}^{CHP} = \sum_{k=1}^{N_{CHP}} \theta_{k}^{CHP} \omega_{k,inv}^{CHP} r (1+r)^{T_{k,CHP}} / \left[(1+r)^{T_{k,CHP}} - 1 \right]$$

$$C_{inv}^{SC} = (\theta^{SC} \omega_{inv}^{SC} + \varphi^{SC} P_{max}^{SC}) r (1+r)^{T_{SC}} / \left[(1+r)^{T_{SC}} - 1 \right]$$

$$C_{inv}^{BES} = (\theta^{BES} \omega_{inv}^{BES} + \varphi^{BES} P_{max}^{BES}) r (1+r)^{T_{BES}} / \left[(1+r)^{T_{BES}} - 1 \right]$$

$$C_{inv}^{HS} = (\theta^{HS} \omega_{inv}^{HS} + \varphi^{HS} P_{max}^{HS}) r (1+r)^{T_{HS}} / \left[(1+r)^{T_{HS}} - 1 \right]$$

式中: C_{inv}^{GB} 、 C_{inv}^{CHP} 、 C_{inv}^{SC} 、 C_{inv}^{BES} 和 C_{inv}^{HS} 分别为GB、CHP、SC、 BES和HS设备的等值年建设投资费用; θ_k^{GB} 、 θ_k^{CHP} 分 別为第k类GB、CHP设备的规划容量; θ_k^{CB} 、 θ_k^{BES} 和 θ^{HS} 分別为SC、BES和HS设备的规划容量; $\omega_{k,inv}^{CB}$ 、 $\omega_{k,inv}^{CHP}$ 分 別为第k类GB、CHP设备的单位容量成本; ω_{inv}^{SC} 、 $\omega_{k,inv}^{BES}$ 和 θ^{HS} 分别为SC、BES和HS设备的单位容量成本; φ^{SC} 、 φ^{BES} 和 φ^{HS} 分别为SC、BES和HS设备的功率成本 系数; P_{inx}^{BES} 和 φ^{HS} 分别为SC、BES和HS设备的功率成本 系数; P_{inx}^{BES} 和 P_{inx}^{HS} 分别为SC、BES和HS设备的功 率上限; $T_{k,GB}$ 、 $T_{k,CHP}$ 分别为第k类GB、CHP设备的使 用年限; N_{GB} 、 N_{CHP} 分别为GB、CHP设备类型的数 量;r为设备折旧率,本文取r=0.02。

系统运行费用*C*_{oper}包含了购电、购气费用和设备运行维护费用2个部分,具体公式如下:

$$C_{\text{oper}} = C_{\text{grid}} + C_{\text{gas}} + C_{\text{main}}^{\text{GB}} + C_{\text{main}}^{\text{CHP}} + C_{\text{main}}^{\text{SC}} + C_{\text{main}}^{\text{BES}} + C_{\text{main}}^{\text{HS}} \quad (7)$$

$$C_{\text{grid}} = \sum_{s=1}^{N_{\text{S}}} m_s \left(\sum_{t=1}^{N_{\text{T}}} P_s^{\text{grid}}(t) \, \pi_{\text{grid}}(t) \Delta t \right)$$

$$C_{\text{gas}} = \sum_{s=1}^{N_{\text{S}}} m_s \left(\sum_{t=1}^{N_{\text{T}}} P_s^{\text{gas}}(t) \, \pi_{\text{gas}}(t) \Delta t \right)$$

$$C_{\text{main}}^{\text{GB}} = \sum_{s=1}^{N_{\text{S}}} m_s \left(\sum_{t=1}^{N_{\text{T}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{CB}}} P_{k,s}^{\text{CB}}(t) \, \omega_{k,\text{main}}^{\text{CB}} \Delta t \right)$$

$$C_{\text{main}}^{\text{CHP}} = \sum_{s=1}^{N_{\text{S}}} m_s \left(\sum_{t=1}^{N_{\text{T}}} \sum_{k=1}^{N_{\text{CHP}}} P_{k,s}^{\text{CHP}}(t) \, \omega_{k,\text{main}}^{\text{CHP}} \Delta t \right)$$

$$C_{\text{main}}^{\text{SC}} = \sum_{s=1}^{N_{\text{S}}} m_{s} \left[\sum_{t=1}^{N_{\text{T}}} \left(P_{\text{c},s}^{\text{SC}}(t) + P_{\text{d},s}^{\text{SC}}(t) \right) \omega_{\text{main}}^{\text{SC}} \Delta t \right]$$
$$C_{\text{main}}^{\text{BES}} = \sum_{s=1}^{N_{\text{S}}} m_{s} \left[\sum_{t=1}^{N_{\text{T}}} \left(P_{\text{c},s}^{\text{BES}}(t) + P_{\text{d},s}^{\text{BES}}(t) \right) \omega_{\text{main}}^{\text{BES}} \Delta t \right]$$
$$C_{\text{main}}^{\text{HS}} = \sum_{s=1}^{N_{\text{S}}} m_{s} \left[\sum_{t=1}^{N_{\text{T}}} \left(P_{\text{c},s}^{\text{HS}}(t) + P_{\text{d},s}^{\text{HS}}(t) \right) \omega_{\text{main}}^{\text{HS}} \Delta t \right]$$

式中: C_{grid} 、 C_{gas} 分别为系统的购电、购气费用; N_s 为场 景总数,本文中 $N_s = 9$; m_s 为一年内场景s的总天数; Δt 为最小调度时长,为模拟SC的充放电特性,同时 考虑模型的求解效率,本文设置 $\Delta t = 2 \min; N_T$ 为一 天总调度时段数,本文设置 $N_T = 720$; C_{main}^{GB} 、 C_{main}^{CHD} 、 C_{main}^{SC} , C_{main}^{BES} 和 C_{main}^{BES} 分别为GB、CHP、SC、BES和HS设备的维 护费用; $P_s^{grid}(t)$ 和 $P_s^{gas}(t)$ 分别为t时刻场景s下的系 统购电量和购气量; $\pi_{grid}(t)$ 为t时刻的电价; $\pi_{gas}(t)$ 为t时刻的气价; $\omega_{k,main}^{CB}$ 和 $\omega_{k,main}^{CHD}$ 分别为第k类GB和 CHP设备的单位容量运行维护费用; ω_{main}^{SC} 、 ω_{main}^{BES} 和 ω_{main}^{BES} 分别为SC、BES和HS设备的单位容量运行维护 费用; $P_{k,s}^{GB}(t)$ 、 $P_{k,s}^{CHP}(t)$ 分别为t时刻场景s下第k类 GB、CHP设备的耗气量; $P_{c,s}^{SC}(t)$ 和 $P_{d,s}^{SC}(t)$ 、 $P_{c,s}^{BES}(t)$ 和 $P_{d,s}^{BES}(t)$ 、 $P_{c,s}^{CHP}(t)$ 分别为t时刻场景s下SC、 BES和HS设备的充能和放能功率。

3.2 约束条件

含混合储能的铁路10kV配电网综合能源系统 规划模型的约束条件包括GB、CHP、SC、BES和HS 设备的容量约束、运行约束以及系统能量平衡约束。

1)设备容量约束。

考虑到GB、CHP设备的占地面积和实际用能需求,设置GB、CHP的规划容量约束分别如下:

$$\theta_{k,\min}^{\rm CB} X_k^{\rm GB} \leq \theta_k^{\rm GB} \leq \theta_{k,\max}^{\rm GB} X_k^{\rm GB} \quad k \in \Omega_{\rm GB} \tag{8}$$

 $\theta_{k,\min}^{CHP} X_k^{CHP} \leq \theta_k^{CHP} \leq \theta_{k,\max}^{CHP} X_k^{CHP} k \in \Omega_{CHP}$ (9) 式中: $\theta_{k,\min}^{CB}$, $\theta_{k,\min}^{CB}$ 和 $\theta_{k,\max}^{CHP}$, $\theta_{k,\min}^{CHP}$ 分别为第 k 类 GB 和 CHP 设备的规划容量上、下限; $X_k^{CB} \in \{0,1\}$ 和 $X_k^{CHP} \in \{0,1\}$ 分别为第 k 类 GB 和 CHP 设备的建设状态变量, $X_k^{CB} = 1$ 表示建设第 k 类 GB 设备, $X_k^{CB} = 0$ 表示未建 设第 k 类 GB 设备, X_k^{CHP} 类似; Ω_{CB} 和 Ω_{CHP} 分别为 GB 和 CHP 设备类型集合。

为保证每类设备至多选择1种进行建设,设置 如下约束:

$$\sum_{k=1}^{N_{\rm CB}} X_k^{\rm CB} \le 1$$
 (10)

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{CHP}}} X_k^{\text{CHP}} \leq 1 \tag{11}$$

2)设备运行约束。

联合设备容量规划结果,设置GB和CHP设备的耗气量约束,分别如式(12)和式(13)所示。

$$0 \leq P_{k,s}^{GB}(t) \leq \theta_k^{GB} \quad k \in \Omega_{GB}, \forall t, \forall s$$
(12)

 $0 \leq P_{k,s}^{CHP}(t) \leq \theta_k^{CHP} \quad k \in \Omega_{CHP}, \forall t, \forall s$ (13) 3)储能设备约束。

考虑到 SC、BES 和 HS 设备的充放能过程类似, 本文采用一种通用的储能模型表示各类设备的容量 约束和出力约束,分别如式(14)和式(15)所示。

$$\begin{split} X^{\text{SC/BES/HS}} & \theta^{\text{SC/BES/HS}} \leqslant \theta^{\text{SC/BES/HS}} \leqslant X^{\text{SC/BES/HS}} \theta^{\text{SC/BES/HS}}_{\text{max}} & (14) \\ X^{\text{SC/BES/HS}} & \delta^{\text{SC/BES/HS}} \leqslant P^{\text{SC/BES/HS}}_{\text{max}} \leqslant X^{\text{SC/BES/HS}} \delta^{\text{SC/BES/HS}}_{\text{max}} & (15) \\ \vec{x} 中: \theta^{\text{SC/BES/HS}}_{\text{max}} \pi \theta^{\text{SC/BES/HS}}_{\text{min}} \mathcal{D} \mathcal{H} \mathcal{D} \text{SC} \\ \text{BES of HS } \mathcal{D} \in \mathbb{R} \\ \text{的规划容量上限和下限}; \delta^{\text{SC/BES/HS}}_{\text{max}} \pi \delta^{\text{SC/BES/HS}}_{\text{SC/BES/HS}} \mathcal{D} \mathcal{H} \mathcal{D} \\ \text{SC} \\ \text{SES of HS } \mathcal{U} \\ \text{Bes of HS } \mathcal{U} \\ \text{SC} \\ \text{SC} \\ \text{SES of HS } \mathcal{U} \\ \text{SC} \\ \text{S$$

基于容量规划结果设置各储能设备的充放能约 束如式(16)—(21)所示,其中式(16)—(19)为储能 的功率和能量约束,式(20)表示储能设备不能同时 充能和放能,式(21)表示在调度初期和末期设备的 荷电状态相等。

 $0 \leq P_{d,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \leq X_{d,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) P_{\max}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \quad \forall t, \forall s \ (16)$ $0 \leq P_{c,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \leq X_{c,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) P_{\max}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \quad \forall t, \forall s \ (17)$ $S_s^{\text{SC/BES/HS}}(t + \Delta t) = S_s^{\text{SC/BES/HS}}(t) (1 - \eta_1^{\text{SC/BES/HS}}) +$

$$(P_{c,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t)\Delta t - P_{d,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t)\Delta t)/\theta^{\text{SC/BES/HS}} \quad \forall t, \forall s$$
(18)

$$S_{\min}^{\text{SC/BES/HS}} \leq S_s^{\text{SC/BES/HS}}(t) \leq S_{\max}^{\text{SC/BES/HS}} \quad \forall t, \forall s \quad (19)$$

$$X_{\mathrm{c},s}^{\mathrm{SC/BES/HS}}(t) + X_{\mathrm{d},s}^{\mathrm{SC/BES/HS}}(t) \leq 1 \quad \forall t, \forall s$$
 (20)

$$S_{s}^{\text{SC/BES/HS}}(1) = S_{s}^{\text{SC/BES/HS}}(N_{\text{T}}) \quad \forall s \tag{21}$$

式中: $X_{d,s}^{SC/BES/HS}(t)$ 和 $X_{c,s}^{SC/BES/HS}(t)$ 分别为t时刻场景s下 SC、BES或HS设备的放能和充能的状态变量,且 $X_{d,s}^{SC/BES/HS}(t) \in \{1,0\}, X_{c,s}^{SC/BES/HS}(t) \in \{1,0\}; S_{s}^{SC/BES/HS}(t)$ 为t时刻场景s下 SC、BES或HS设备的荷电状态; $S_{max}^{SC/BES/HS}$ 和 $S_{min}^{SC/BES/HS}$ 分别为SC、BES或HS设备的储能 荷电状态的上限和下限; $\eta_{1}^{SC/BES/HS}$ 为SC、BES或HS设 备自损率; $S_{s}^{SC/BES/HS}(1)$ 和 $S_{s}^{SC/BES/HS}(N_{T})$ 分别为场景s下 SC、BES和HS设备在调度初期和末期的荷电状态。

4)能量购置约束。

为避免出现能量倒送,设置购电量和购气量约 束分别如式(22)和式(23)所示。

$$P_s^{\text{grid}}(t) \ge 0 \quad \forall t, \forall s \tag{22}$$

$$P_s^{\text{gas}}(t) \ge 0 \quad \forall t, \forall s \tag{23}$$

5)能量平衡约束。

考虑到多能源系统之间的耦合关系和含综合能 源系统的铁路配电网运行方式,设置电、热、气平衡 约束分别如式(24)—(26)所示。

$$P_{s}^{\text{grid}}(t) + P_{s}^{\text{PV}}(t) + \sum_{k=1}^{N_{\text{CIP}}} P_{k,s}^{\text{CHP}}(t) \eta_{k,\text{E}}^{\text{CHP}} + P_{d,s}^{\text{SC}}(t) \eta_{d}^{\text{SC}} + P_{d,s}^{\text{BES}}(t) \eta_{d}^{\text{BES}} = P_{s}^{\text{load}}(t) + P_{e,s}^{\text{SC}}(t) / \eta_{e}^{\text{SC}} + P_{e,s}^{\text{BES}}(t) / \eta_{e}^{\text{BES}} \quad \forall t, \forall s$$
(24)

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{CHP}}} P_{k,s}^{\text{CHP}}(t) \eta_{k,\text{H}}^{\text{CHP}} + \sum_{k=1}^{N_{\text{CB}}} P_{k,s}^{\text{CB}}(t) \eta_{k}^{\text{CB}} + P_{d,s}^{\text{HS}}(t) \eta_{d}^{\text{HS}} = P_{s}^{\text{het}}(t) + P_{c,s}^{\text{HS}}(t) / \eta_{c}^{\text{HS}} \quad \forall t, \forall s \quad (25)$$
$$\sum_{k=1}^{N_{\text{CHP}}} P_{k,s}^{\text{CHP}}(t) + \sum_{k=1}^{N_{\text{CB}}} P_{k,s}^{\text{CB}}(t) = P_{s}^{\text{gas}}(t) \quad \forall t, \forall s \quad (26)$$

式中: $P_{s}^{\text{load}}(t)$ 和 $P_{s}^{\text{heat}}(t)$ 分别为t时刻场景s下系统的 电负荷和热负荷; $\eta_{e}^{\text{sc}}, \eta_{e}^{\text{BES}}, \eta_{d}^{\text{HS}}$ 和 $\eta_{d}^{\text{sc}}, \eta_{d}^{\text{BES}}, \eta_{d}^{\text{HS}}$ 分别为 SC、BES和HS设备的充能和放能效率; $\eta_{k,E}^{\text{CHP}}$ 和 $\eta_{k,H}^{\text{CHP}}$ 分 别为第k种 CHP 设备的发电和产热效率; η_{k}^{CB} 为第k种 GB 设备的产热效率。

6)光伏高频分量平抑约束。

利用SC这类功率型储能元件的快速充放电特性,实现光伏高频分量平抑。设 $P_{high,s}^{PV}(t)$ 为t时刻场景s下的光伏高频分量,当 $P_{high,s}^{PV}(t)$ >0时,SC吸收能量;当 $P_{high,s}^{PV}(t)$ <0时,SC释放能量;当 $P_{high,s}^{PV}(t)$ <0时,SC释放能量;当 $P_{high,s}^{PV}(t)$ =0时,SC根据自身容量和分时电价信息,确定充放电状态。具体约束如下:

$$\begin{cases} P_{\mathrm{d},s}^{\mathrm{SC}}(t)\eta_{\mathrm{d}}^{\mathrm{SC}} = -P_{\mathrm{high},s}^{\mathrm{PV}}(t) & P_{\mathrm{high},s}^{\mathrm{PV}}(t) < 0\\ P_{\mathrm{c},s}^{\mathrm{SC}}(t)/\eta_{\mathrm{c}}^{\mathrm{SC}} = P_{\mathrm{high},s}^{\mathrm{PV}}(t) & P_{\mathrm{high},s}^{\mathrm{PV}}(t) > 0 \end{cases} \quad \forall t, \forall s \ (27)$$

3.3 模型求解

本文模型属于混合整数非线性规划模型,鉴于现有算法在混合整数非线性规划模型求解精度和求解效率方面仍存在不足,故通过Big-M等线性化方法将所提模型转化为混合整数线性模型,并利用MATLAB联合YAMIP、CPLEX优化工具箱对模型进行求解。规划模型式(16)、(17)中存在非线性项,可通过引入辅助变量 y^{SCBES/HS}(t)、y^{SCBES/HS}(t)和极大值 M₄、将其转化为式(28)—(31)。

$$\begin{cases} -M_{p}X_{d,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \leq y_{d,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \leq M_{p}X_{d,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \\ -M_{p}X_{s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \leq y_{s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \leq M_{p}X_{d,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \end{cases} \quad \forall t, \forall s \end{cases}$$

$$\begin{pmatrix} -M_{p} \left(1 - X_{d,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t)\right) \leq y_{d,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) - P_{\max}^{\text{SC/BES/HS}} \leq \\ M_{p} \left(1 - X_{d,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t)\right) \\ -M_{p} \left(1 - X_{c,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t)\right) \leq y_{c,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) - P_{\max}^{\text{SC/BES/HS}} \leq \\ M_{p} \left(1 - X_{c,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t)\right) \end{cases} \quad \forall t, \forall s$$

$$0 \leq P_{d,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \leq \gamma_{d,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \quad \forall t, \forall s$$
(30)

$$0 \leq P_{c,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \leq y_{c,s}^{\text{SC/BES/HS}}(t) \quad \forall t, \forall s$$
 (31)

模型的具体求解步骤如下。步骤1:统计3种典型日下铁路10kV配电系统电负荷、热负荷、光伏发电、电价和气价数据,数据采样周期为2min;利用EMD方法将光伏出力曲线分解为IMF分量;分别设定分频参数N_i取值为1、2、3,并计算各场景下的光伏出力高频分量。步骤2:联合3种典型日下的电、热负荷和光伏高频分量,生成9种典型运行场景。步骤3:建立考虑多场景的铁路10kV配电网综合能源系统规划模型。模型目标函数包括等值年总成

本,约束条件包括设备容量约束、设备出力约束、能量 平衡约束和光伏高频分量平抑约束。步骤4:基于 MATLAB平台联合YAMIP和CPLEX优化工具箱求 解所提规划模型,并求得系统最优规划方案和建设 运行成本。

4 算例分析

4.1 测试系统及参数介绍

依据我国北方某铁路 10 kV 配电系统实际数据 进行算例分析,计划建设的 GB、CHP、SC、BES 和 HS 设备的建设投资费用和运行维护费用参数见附录 A 表 A1 和表 A2^[6]。3种典型日下的光伏出力、电负荷 和热负荷数据见图3,其中3种典型日的光伏出力峰 值分别为 6.77、10.16、3.39 kW,电负荷峰值分别为 112.30、222.84、53.02 kW,热负荷峰值分别为 0.60、 1.22、0.33 kW。由典型日数据生成的9种典型场景 参数见附录 A 表 A3。电网分时电价曲线见图 4,气 价则用天然气热值折算求得为 0.28 元 / (kW · h)。 本文算例测试均在 MATLAB 2014a 平台下进行,硬 件设备参数为:CPU Intel®Core[™] i7 2.40 GHz,RAM 8 GB,Win 7环境。





curves in typical day





4.2 规划结果分析

4.2.1 光伏出力曲线高频分量提取 考虑到规划模型中光伏出力高频分量需由SC 进行平抑,图5和图6分别展示了典型日2下设置不同的分频参数 N₁时求得的光伏高频和低频分量曲线。由图可知,随着 N₁值增大,光伏高频分量曲线幅值逐渐增大,光伏低频分量曲线逐渐平滑。



图 5 采用不同分频参数时典型日2下的光伏高频分量

Fig.5 High frequency components of PV with different values of N_1 in Typical Day 2



图 6 采用不同分频参数时典型日 2 下的光伏低频分量 Fig.6 Low frequency components of PV with different values of N₁ in Typical Day 2

4.2.2 考虑光伏波动量平抑的规划结果分析 考虑到综合能源系统规划的经济性和光伏高频 分量的平抑需求,求解综合能源系统规划模型,规划 结果如表1所示。该设备容量配置方案的等值年总 成本为2.3467×10⁵元,模型计算时间为3616.12 s。

表1 设备容量优化配置结果

Table 1 Optimal configuration results of

equ	ipment capacity	
设备	指标	数值
CHP设备类型 I	功率限值 / kW	2.17
CHP设备类型 Ⅱ	功率限值 / kW	0
GB设备类型 I	功率限值 / kW	1.10
GB设备类型Ⅱ	功率限值 / kW	0
DECILA	设备容量 / (kW・h)	50.00
BLS以合	功率限值 / kW	21.82
COJER	设备容量 / (kW・h)	1.46
56. 反奋	功率限值 / kW	1.96
HOJA Z	设备容量 / (kW•h)	6.04
HS 议备	功率限值 / kW	0.56

为分析在最优规划方案下各多能设备的调度运行情况,附录B图B1-B3分别展示了场景1、场景4

和场景7下的系统购电量、CHP和GB设备的出力情况。由图可知,GB设备主要在电价较低的时段进行供热,该时段内CHP设备的热出力较小;当电价较高时,CHP设备出力较高承担了系统大部分电负荷和热负荷,多发的热能由HS设备进行存储。

为分析在最优规划方案下混合储能的充放电及 充放热情况,图7(a)—(c)分别展示了场景1下BES、 SC和HS设备的出力情况和剩余电量、热量曲线。由 图7(a)可知,BES设备在低电价时段充电,高电价时 段放电;由图7(b)可知,SC为实现光伏高频分量平 抑,在光伏出力时段进行了频繁的充放电;由图7(c) 可知,热储能设备在CHP低出力时段放热,在CHP 高出力时段储存热量,提升了系统的经济效益。 4.2.3 混合储能经济性分析

为分析混合储能对综合能源系统建设运行的 经济效益影响,在SC、BES和HS混合储能设备未 建设的情况下,依据本文算例求得的规划方案为: CHP设备选型为类型I,功率限值为2.09 kW;GB设 备选型为类型I,功率限值为1.10 kW,等值年总成 本为2.3816×10⁵元。表1中设备容量配置方案的等 值年总成本为2.3467×10⁵元。由此可知,混合储能 接入综合能源系统能够提升系统整体的经济效益。 4.2.4 CHP设备灵敏度分析

为了分析 CHP 设备的投资费用和运维费用对 规划方案的影响,可以设置不同的CHP类型 I 单位 容量建设费用和单位容量运维费用,比较其等值年 总成本变化情况。设置 CHP 类型 I 的单位容量建 设成本为4500元/(kW·h),逐渐增加该成本并求 得不同的规划建设方案,规划结果如表2所示。由 表可知,随着CHP单位容量建设成本的增加,综合 能源系统等值年总成本逐渐上升,CHP设备的功率 限值逐渐减小,热储能设备容量逐渐下降。这是由 于模型中CHP的热电比固定,CHP多发的热能将存 储在HS装置中,故HS装置容量与CHP设备功率呈 正相关关系。设置CHP类型 I 的单位容量运维费 用为0.01元/(kW·h),逐渐增加该费用并求得不同 的规划建设方案,规划结果如表3所示。由表可知, 随着CHP运维费用逐渐增加,综合能源系统等值年 总成本逐渐上升,CHP设备的规划容量和HS设备容 量逐渐下降。

Table



图7 场景1下的仿真结果

Fig.7 Simulative results under Case 1

表2	CHP单位容量建设成本灵敏度分析
----	------------------

2	Sensitivity	analysis	of	investment	cost	ner	unit	canacity	/ for	CHI
_	Densitivity	anarysis	U1	mvcsument	COSt	per	um	capacity	101	

CHP单位容量	아마라화	力率 GB功率 ´kW 限值/kW	BES设备		SC设备		HS设备		がはた	
建设成本 / [元·(kW·h) ⁻¹]	UHP功率 限值 / kW		HP切率 GB切率 设备 值/kW 限值/kW (功率限值 / kW	设备容量 / (kW・h)	功率限值 / kW	设备容量 / (kW・h)	功率限值 / kW	等值年 总成本 / 元
4 500	2.17	1.10	50.00	21.82	1.46	1.96	6.30	0.56	2.3467×10 ⁵	
5 000	2.13	1.10	50.00	21.77	1.46	1.96	6.04	0.56	2.347 6×105	
5 500	2.07	1.10	50.00	21.76	1.46	1.96	6.05	0.55	2.3483×105	
6 0 0 0	1.72	1.10	50.00	21.68	1.46	1.96	3.98	0.45	2.3489×105	

表3 CHP单位容量运维费用灵敏度分析

Table 3 Sensitivity analysis of maintenance cost per unit capacity for CHP

CHP单位容量	CUD 中亚	CD 中南	BES设备		SC设备		HS	举占左	
运维费用 / 「元・(レW・h) ⁻¹]	UHP 功率 限值 / kW	GB 切率 限值 / kW	设备容量 /	功率限值 /	设备容量 /	功率限值 /	设备容量 /	功率限值 /	守值平 总成本 / 元
			(KW•n)	K W	(KW•n)	K W	(KW•n)	K W	
0.01	2.17	1.10	50.00	21.82	1.46	1.96	6.28	0.56	2.3467×10^{5}
0.02	2.15	1.14	50.00	21.80	1.46	1.96	6.04	0.52	2.3478×105
0.05	1.18	1.20	50.00	21.56	1.46	1.96	1.53	0.24	2.3508×105
0.10	0.58	1.26	50.00	21.45	1.46	1.96	0	0	2.3534×105

4.2.5 模型求解效率分析

为分析模型求解效率,本文分别按2、5、10 min 调度时间尺度对模型进行求解,计算时间和计算结 果如表4所示。由表可知,随着调度时间尺度的增 大,模型计算时间大幅缩短。由于规划模型中调度 时间尺度存在差异,所以光伏高频分量等模型参数 不同,造成各等值年总成本存在差异。

表4 模型计算时间和计算结果

Table 4 Calculation results and calculation

	time of model	
$\Delta t / \min$	等值年总成本 / 元	计算时间 / s
2	2.3467×10 ⁵	3616.12
5	2.2997×10 ⁵	228.81
10	2.3412×10 ⁵	18.78

5 结论

本文以铁路 10 kV 配电系统为研究对象,建立 了含混合储能的铁路 10 kV 配电网综合能源系统规 划模型。首先,采用 EMD 方法有效提取了光伏曲线 的 IMF 分量,并计算得到不同分频参数下需平抑的 光伏高频分量。其次,将光伏高频分量联合典型日 电、热负荷水平和光伏出力水平生成典型场景。然 后,基于多能设备的运行和成本参数建立含混合储 能的综合能源系统规划模型,并将需平抑的光伏高 频分量作为 SC 的充放电功率参考值。最后,基于我 国北方某铁路 10 kV 配电网实际量测数据,验证了 所提模型的有效性和可行性。通过仿真分析可知, 混合储能接入综合能源系统能有效平抑分布式能源 功率波动,并提升系统整体的经济效益。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

- [1]杨经纬,张宁,王毅,等.面向可再生能源消纳的多能源系统: 述评与展望[J].电力系统自动化,2018,42(4):11-24.
 YANG Jingwei, ZHANG Ning, WANG Yi, et al. Multi-energy system towards renewable energy accommodation: review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42 (4):11-24.
- [2] 艾芊,郝然. 多能互补、集成优化能源系统关键技术及挑战
 [J]. 电力系统自动化,2018,42(4):1-10,46.
 AI Qian,HAO Ran. Key technologies and challenges for multienergy complementarity and optimization of integrated energy

system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(4): 1-10, 46.

- [3] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 多能协同综合能源系统示范工程现状 与展望[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):3-10.
 PENG Ke,ZHANG Cong,XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multienergy collaboration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(6):3-10.
- [4] 贾宏杰,穆云飞,余晓丹.对我国综合能源系统发展的思考
 [J].电力建设,2015,36(1):16-25.
 JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan. Thought about the integrated energy system in China[J]. Electric Power Construction,2015,36(1):16-25.
- [5]黄武靖,张宁,董瑞彪,等.多能源网络与能量枢纽联合规划方法[J].中国电机工程学报,2018,38(18):5425-5437.
 HUANG Wujing, ZHANG Ning, DONG Ruibiao, et al. Coordinated planning of multiple energy networks and energy hubs
 [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(18): 5425-5437.
- [6] 王丹,孟政吉,贾宏杰,等.考虑多区域互联协同的分布式能源站设备配置及站间管线规划[J]. 电网技术,2020,44(10): 3734-3743.
 WANG Dan, MENG Zhengji, JIA Hongjie, et al. Distributed energy station equipment configuration and interconnected network planning considering multi-regional interconnection and coordination[J]. Power System Technology,2020,44(10):3734-3743.
- [7] 刘文霞,李征洲,杨粤,等. 计及需求响应不确定性的综合能源 系统协同优化配置[J]. 电力系统自动化,2020,44(10):50-62.
 LIU Wenxia,LI Zhengzhou,YANG Yue, et al. Collaborative optimal configuration for integrated energy system considering uncertainties of demand response[J]. Automation of Electric Power Systems,2020,44(10):50-62.
- [8] 沈欣炜,郭庆来,许银亮,等.考虑多能负荷不确定性的区域综合能源系统鲁棒规划[J].电力系统自动化,2019,43(7):46-57.
 SHEN Xinwei,GUO Qinglai,XU Yinliang, et al. Robust planning method for regional integrated energy system considering multi-energy load uncertainties[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(7):46-57.
- [9] WANG Y, ZHANG N, ZHUO Z, et al. Mixed-integer linear programming-based optimal configuration planning for energy hub:starting from scratch[J]. Applied Energy, 2018, 210:1141-1150.
- [10] 郑伟民,王蕾,孙可,等.考虑多能流广义储能作用的配电网协 调规划[J].电力自动化设备,2021,41(7):22-30.
 ZHENG Weiming,WANG Lei,SUN Ke,et al. Coordinated planning of distribution network considering function of multienergy flow generalized energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(7):22-30.
- [11] QIU J, DONG Z Y, ZHAO J H, et al. Multi-stage flexible expansion co-planning under uncertainties in a combined electricity and gas market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4):2119-2129.
- [12] 张坤,毛承雄,谢俊文,等. 风电场复合储能系统容量配置的优

化设计[J]. 中国电机工程学报,2012,32(25):79-87.

ZHANG Kun, MAO Chengxiong, XIE Junwen, et al. Optimal design of hybrid energy storage system capacity for wind farms[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25):79-87.

- [13] 王利猛,刘久成,田春光,等. 基于统计学方法的微网混合储能容量优化配置[J]. 电网技术,2018,42(1):187-194.
 WANG Limeng,LIU Jiucheng,TIAN Chunguang, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage in microgrid based on statistic method[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 187-194.
- [14] 肖峻,张泽群,张磐,等.用于优化微网联络线功率的混合储能容量优化方法[J].电力系统自动化,2014,38(12):19-26.
 XIAO Jun,ZHANG Zequn,ZHANG Pan,et al. A capacity optimization method of hybrid energy storage system for optimizing tie-line power in microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(12):19-26.
- [15] 熊文,刘育权,苏万煌,等.考虑多能互补的区域综合能源系统 多种储能优化配置[J].电力自动化设备,2019,39(1):124-132.
 XIONG Wen,LIU Yuquan,SU Wanhuang,et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(1):124-132.
- [16] 罗鹏,杨天蒙,娄素华,等. 基于频谱分析的微网混合储能容量 优化配置[J]. 电网技术,2016,40(2):376-381.
 LUO Peng,YANG Tianmeng,LOU Suhua, et al. Spectrum analysis based capacity configuration of hybrid energy storage in microgrid[J]. Power System Technology,2016,40(2):376-381.
- [17] 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.

[18] 李龙云,胡博,谢开贵,等. 基于离散傅里叶变换的孤岛型微 电网混合储能优化配置[J]. 电力系统自动化,2016,40(12): 108-116.

LI Longyun, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage systems in isolated microgrids based on discrete fourier transform [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 108-116.

- [19] 权超,董晓峰,姜彤.基于 CCHP 耦合的电力、天然气区域综合 能源系统优化规划[J].电网技术,2018,42(8):2456-2466. QUAN Chao,DONG Xiaofeng,JIANG Tong. Optimization planning of integrated electricity-gas community energy system based on coupled CCHP[J]. Power System Technology,2018, 42(8):2456-2466.
- [20] 李天云,赵妍,李楠,等. 基于HHT的电能质量检测新方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(17):55-59.

LI Tianyun,ZHAO Yan,LI Nan, et al. A new mehtod for power quality detection based on HHT[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(17):55-59.

作者简介:



肖 斐(1991—),男,博士,主要研究 方向为综合能源系统、电能质量等(**E-mail**: xiaofei@bjtu.edu.cn);

吴命利(1971—),男,教授,博士研究 生导师,博士,通信作者,主要研究方向为电 气化铁道及城市轨道交通供电、电磁暂态计 算与电力系统数字仿真等(E-mail:mlwu@

肖斐 bjtu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Integrated energy system planning of railway 10 kV distribution network with hybrid energy storage

XIAO Fei, WU Mingli, HE Tingting

(School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Aiming at the energy demand of multiple types of energy for railway 10 kV distribution network, a planning model of integrated energy system for railway distribution network with hybrid energy storage is proposed. The architecture of regional integrated energy system for railway 10 kV distribution network is designed. In view of the demand of suppressing photovoltaic output fluctuation, a method used to extract the high frequency components of photovoltaic output based on empirical mode decomposition is proposed. And combined with the typical daily load data, the scene set considering various demands of suppressing the high frequency components of photovoltaic output is generated. On this basis, the optimal allocation model of integrated energy system is established taking the minimum of the equivalent annual total cost as the objective, with the operation and power balance of hybrid energy storage and integrated energy system as constraints. The mixed integer linear programming algorithm is used to solve this model. Finally, a railway 10 kV distribution network in North China is used as an example, the effectiveness of integrated energy system integrated with hybrid energy storage in suppressing the distributed energy output fluctuation and improving the system economic benefits is analyzed and verified.

Key words:railway;distribution network;integrated energy system;hybrid energy storage;photovoltaic;empirical mode decomposition;high frequency component suppression;planning

Table AT Equipment capacity and cost parameters										
いた 夕	CHP	设备	GB 设备							
汉	类型 I	类型 Ⅱ	类型 I	类型Ⅱ						
容量上限/kW	10	10	10	10						
投资成本/(元・kW ⁻¹)	4500	3950	340	320						
维护费用/[元・(kW ・ h) ⁻¹]	0.01	0.01	0.02	0.02						
运行效率	发电效率 0.40 制热效率 0.45	发电效率 0.37 制热效率 0.42	制热效率 0.91	制热效率 0.90						
设备年限	25	25	20	20						

表 A1 设备容量和费用参数 Table A1 Equipment capacity and cost parameters

表 A2 储能设备容量和费用参数 Table A2 Capacity and cost parameters of energy sto

及A2 阳化反由谷里和页用多效												
Table A2 Capacity and cost parameters of energy storage equipment												
设备	容量上限/ (kW ・ h)	充放功率 限值/ kW	単位容量成本/ [元・(kW・h) ⁻¹]	功率成本 系数/ (元・kW ⁻¹)	运行维护费用/ [元・(kW ・ h) ⁻¹]	充放能 效率	自损率	初始 SOC	SOC 下限	SOC 上限	设备 年限/a	
BES 储能	50	25	640	1000	0.005	0.9	0.01	0.5	0.9	0.1	20	
SC 储能	50	25	27000	1500	0.01	0.98	0.01	0.5	0.9	0.1	20	
热储能	50	25	35	1100	0.08	0.88	0.01	0.5	0.9	0.1	20	

表 A3 典型场景参数 Table A3 Typical scene parameters

Tuble file Typical Scelle Parallecers											
参数	场景1	场景 2	场景 3	场景4	场景5	场景6	场景 7	场景 8	场景 9		
电负荷最大值/kW	112.30	112.30	112.30	222.84	222.84	222.84	53.02	53.02	53.02		
热负荷最大值/kW	0.60	0.60	0.60	1.22	1.22	1.22	0.33	0.33	0.33		
光伏出力最大值/kW	6.77	6.77	6.77	10.16	10.16	10.16	3.39	3.39	3.39		
分频参数 N _I	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
各场景天数 m _s	40	40	40	40	40	40	42	42	41		

附录 B

