

基于动态无功电压灵敏度的有源配电网 移动式储能优化调度

王育飞¹, 陈强¹, 郑云平², 薛花¹, 李明², 米阳¹

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海 200090; 2. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830013)

摘要:随着城市负荷尖峰以及分布式电源渗透率的持续攀升,有源配电网存在负荷峰谷差进一步增大以及电压越限的风险。移动式电池储能系统(MBESS)具备时间-空间灵活性和四象限输出能力,考虑其有功出力参与削峰填谷、无功出力参与电压调节,提出了一种基于电压灵敏度分析的有源配电网MBESS的优化调度方法。首先,针对MBESS出力与接入位置之间的耦合影响,推导定有功功率条件下满足仿射关系的无功电压修正灵敏度;其次,考虑不同网络结构下不同节点电压的调整需求,提出一种动态无功电压修正灵敏度的计算方法,旨在确定MBESS的时序最优接入方案;然后,构建充分考虑运行经济性与可靠性的MBESS双层优化调度模型;最后,以IEEE 33节点配电系统为例,采用增强烟花算法对所提模型进行求解,结果表明所提方法能够在保证MBESS具备较好经济效益的同时,有效减小负荷峰谷差以及提升配电系统的整体电压水平。

关键词:有源配电网;移动式电池储能系统;削峰填谷;电压调节;动态无功电压灵敏度;优化调度

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202205040

0 引言

近年来,我国电量供需基本平衡,但区域性、时段性缺电现象仍然存在;分布式电源出力具有波动性和随机性,可能导致配电网出现“峰上加峰”现象,负荷峰谷差进一步加大^[1]。同时,当分布式电源渗透率较高时,易造成系统电压发生偏差甚至越限^[2-3]。移动式电池储能系统(mobile battery energy storage system, MBESS)兼具功率调节灵活性和时间-空间灵活性,为削峰填谷、电压质量等问题的解决提供了重要思路^[4]。因此,研究MBESS在配电网中的优化调度具有重要的意义。

目前,国内外学者针对配电网中MBESS应用及调度的研究取得了一定的成果,且主要从MBESS有功出力的角度进行研究。文献[5]针对分布式电源带来的供需不平衡问题,提出了一种固定式储能和移动式储能的协调运行模型,以提高系统运行的经济性与可靠性,并采用自然聚集算法对模型进行求解。文献[6]以削峰填谷为优化目标,建立了双层优化调度模型,采用增强烟花算法(enhanced fireworks algorithm, EFWA)进行求解。文献[7]针对孤岛微电网构建了多目标优化模型,并提出了一种改进的偏好-激励协同进化算法。也有文献同时考虑

MBESS的有功出力和无功出力,对MBESS的调度进行研究。文献[8]同时考虑MBESS参与削峰填谷和无功补偿,提出了一种日前优化调度模型,并采用改进粒子群优化算法进行求解。文献[9]以减小网损和调压为目标,提出了一种MBESS调度模型,并采用CPLEX求解器进行求解。文献[10]同时考虑利用MBESS进行峰谷差价套利、调压和最小化网损建立多目标模型,使配电网效益最大化,并提出了一种基于粒子群优化算法和混合整数凸规划的优化方法求解MBESS的调度方案。综上所述,在求解MBESS调度模型时,已有文献大多采用数学规划法、人工智能算法等,鲜有从电压灵敏度分析的角度进行研究。

电压灵敏度分析法已在光伏消纳能力^[11-13]、储能选址定容^[14]、电力系统稳定性^[15-17]等研究领域获得较好的应用。制定MBESS调度方案的关键在于确定其功率补偿点与补偿量。配电网中的候选补偿点众多,若同时求解补偿点与补偿量,则易陷入维数灾难问题^[18]。而采用灵敏度分析法先确定MBESS的有功和无功补偿点,可有效减少计算量。

对于配电网中已经配置的在常规情况下用于应急保电的MBESS而言,其在闲置时可用于削峰填谷。考虑到MBESS具备功率四象限运行能力,可同时吸收/发出有功功率和无功功率^[19],并能兼顾配电网调压,实现MBESS参与配电网调节的收益最大化,本文旨在通过无功电压灵敏度确定MBESS的最佳接入位置,从削峰填谷与改善配电网电压质量的角度分析MBESS的优化调度。MBESS的有功出力、无功出力与其接入位置存在耦合关系,无功电压灵敏度能够准确地反映注入无功功率后节点电压的变

收稿日期:2022-01-02;修回日期:2022-04-25

在线出版日期:2022-05-07

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61873159);上海市科技创新行动计划项目(20DZ2205500)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61873159) and Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan(20DZ2205500)

化。基于MBESS同时输出有功功率和无功功率,且有功和无功均会对节点电压产生影响,通过削峰填谷目标确定有功时序出力,从而计算满足仿射关系下的无功电压修正灵敏度;基于存在网络重构的配电网,并考虑不同时间下节点电压调整需求的不同,提出计及调压需求的动态综合无功电压修正灵敏度的计算方法。首先,构建了综合考虑MBESS运行经济性与可靠性的双层优化调度模型;其次,通过动态综合无功电压修正灵敏度计算MBESS的时序接入节点;然后,根据无功调压目标确定MBESS的无功时序出力;最后,确定MBESS的最优调度方案。

1 考虑MBESS功率四象限输出的有源配电网电压灵敏度分析

1.1 MBESS功率四象限输出特性

MBESS由载体和电池储能系统组成,其中电池储能系统变流器(power conversion system, PCS)通过双环控制器对输出的有功功率和无功功率进行解耦控制,实现储能系统输出功率的四象限运行。MBESS功率四象限输出范围如图1所示。图中: $P_{MB,t}$ 为 t 时刻MBESS的有功出力,单位为kW; $Q_{MB,t}$ 为 t 时刻MBESS的无功出力,单位为kvar; S_{MB} 为MBESS的额定视在功率。当PCS中的外环控制器检测到配电网存在有功功率和无功功率需求时,内环控制器控制电池储能的有功、无功出力大于0,此时电池储能向电网释放有功、无功功率,处于放电状态,对外进行无功补偿,相应的MBESS工作模式处于第一象限;当外环控制器检测到配电网中的有功功率和无功功率富余时,内环控制器控制电池储能的有功、无功出力小于0,此时电网向电池储能输送有功、无功功率,电池储能处于充电状态,从外界吸收无功功率,相应的MBESS工作模式处于第三象限;同理,MBESS也可工作于第二、四象限或坐标轴上,可根据实际需求灵活控制其充放电状态。

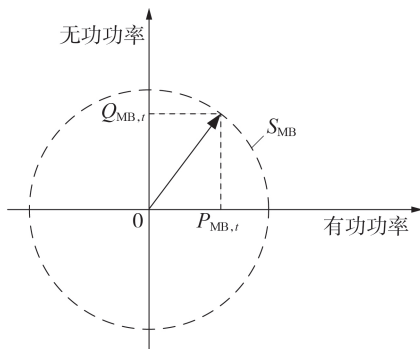


图1 MBESS功率四象限输出范围

Fig.1 Power four-quadrant output range of MBESS

基于MBESS有功功率和无功功率的灵活调节能力,本文主要针对MBESS的有功出力参与削峰填

谷、无功出力参与电压调节多应用场景下的优化调度进行研究。

1.2 有源配电网的电压灵敏度分析

1.2.1 基于仿射关系的无功电压修正灵敏度计算

对于含有 N 个节点的配电网而言,其节点电压幅值变化量 ΔU 与有功序列 ΔP 及无功序列 ΔQ 之间的关系满足:

$$\begin{cases} \Delta U \approx \Delta U_p + \Delta U_q \\ \Delta U_p = \alpha_{pv} \Delta P \\ \Delta U_q = \beta_{qv} \Delta Q \end{cases} \quad (1)$$

式中: ΔU_p 为有功功率变化引起的节点电压幅值变化量; ΔU_q 为无功功率变化引起的节点电压幅值变化量; α_{pv} 为有功电压灵敏度矩阵; β_{qv} 为无功电压灵敏度矩阵。式(1)的具体展开式如附录A式(A1)所示。

MBESS接入配电网提供服务,其有功功率和无功功率均会对节点电压造成影响。因此,在采用无功电压灵敏度确定MBESS的最佳接入节点时,应考虑有功出力对系统电压的影响。

MBESS的有功出力与无功出力具有相对独立性,可先确定其参与削峰填谷的有功出力,即式(1)中的 ΔP 。将 α_{pv} 和 ΔP 的结果代入式(1)即可求得MBESS有功出力确定情况下的节点电压幅值变化量 ΔU_p ,从而建立电压与注入有功功率和无功功率之间满足的仿射关系。进一步地,确定单位无功补偿量,补偿量的大小只会影响灵敏度值的大小,并不会影响灵敏度之间的大小关系。最后可计算得到相应的电压增量,修正后的无功电压灵敏度矩阵如式(2)所示。

$$\beta_{qv} = \Delta U' \Delta Q^{-1} \quad (2)$$

式中: $\Delta U'$ 为修正后的节点电压幅值变化量。

为了反映系统中节点 j 注入无功功率时该节点对系统整体电压的影响,可将 β_{qv} 按列求和,用式(3)表示节点 j 注入无功功率时的静态综合无功电压修正灵敏度 $Z_{s,j}$ 。

$$Z_{s,j} = \sum_{i=1}^N \beta_{ij} \quad (3)$$

式中: β_{ij} 为节点 j 注入无功功率 ΔQ_j 后节点 j 对节点 i 的无功电压灵敏度。

1.2.2 计及网络重构的动态综合无功电压修正灵敏度分析

当MBESS的无功出力参与电压调节时,应根据各节点的实际调压需求进行调整。不同节点的电压偏离额定电压值的程度不同,因此引入电压偏差因子 ω_i 对静态综合无功电压修正灵敏度进行改进,如

式(4)所示。

$$\begin{cases} \omega_i = V_i - V_{i, \text{rate}} \\ Z_{S,j} = \sum_{i=1}^N \beta_{ij} \omega_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: V_i 、 $V_{i, \text{rate}}$ 分别为节点 i 的实际电压值、额定电压值。

有源配电网中可能同时存在因分布式电源的接入导致的并网节点电压偏高、馈线末端电压偏低的情况。当利用 MBESS 对电压偏高节点的电压进行下调时,应避免造成电压偏低节点的电压发生恶化;当利用 MBESS 对电压偏低节点的电压进行上调时,应避免造成电压偏高节点的电压发生恶化。因此,考虑对电压偏高节点和电压偏低节点进行分类,对静态综合无功电压灵敏度进行改进,如式(5)所示。

$$Z'_{S,j} = \left| \sum_{i \in \Omega_{\text{up}}} \beta_{ij} \omega_i - \sum_{k \in \Omega_{\text{down}}} \beta_{kj} \omega_k \right| \quad (5)$$

式中: $Z'_{S,j}$ 为改进后节点 j 的静态综合无功电压灵敏度; Ω_{up} 、 Ω_{down} 分别为实际电压值高于、低于额定电压值的节点集合。

在有源配电网中,有时为了缓解分布式电源所带来的线路阻塞及电压质量问题,会对配电系统进行网络重构。若网络拓扑结构发生改变,则整个系统的节点电压分布规律也随之改变。考虑网络重构与不同分布式电源出力情况下各节点的电压情况,结合 MBESS 的时间-空间灵活性,将上述改进的静态综合无功电压修正灵敏度推广至动态综合无功电压修正灵敏度,对调度周期内各个时刻的无功电压灵敏度 $Z'_{S,j,t}$ 进行计算,如式(6)所示。

$$Z'_{S,j,t} = \left| \sum_{i \in \Omega_{\text{up},t}} \beta_{ij,t} \omega_{i,t} - \sum_{k \in \Omega_{\text{down},t}} \beta_{kj,t} \omega_{k,t} \right| \quad (6)$$

式中: $\Omega_{\text{up},t}$ 、 $\Omega_{\text{down},t}$ 分别为 t 时刻实际电压值高于、低于额定电压值的节点集合; $\beta_{ij,t}$ 、 $\beta_{kj,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 注入无功功率 ΔQ_j 后节点 j 对节点 i 、节点 k 的无功电压灵敏度; $\omega_{i,t}$ 、 $\omega_{k,t}$ 分别为 t 时刻节点 i 、节点 k 的电压偏差因子。

2 MBESS 双层优化调度模型

2.1 外层经济运行模型

外层优化模型以 MBESS 的日净收益最大化为目标,以配电网内允许安装的 MBESS 容量约束、节点电压约束、线路功率约束及系统功率平衡约束为约束条件,决策变量为 MBESS 的时序有功出力序列。

2.1.1 目标函数

外层优化模型的目标函数可表示为:

$$\begin{cases} \max F = C_a + C_d + C_l - C_{\text{MBESS, inv}} - C_{\text{MBESS, o\&m}} \\ C_a = \sum_{t=1}^{24} \sum_{h=1}^H C_{e,t} P_{\text{MBESS}, h, t} \\ C_d = \frac{1}{365 T_{\text{life}}} C_{\text{exp}} \left[1 - \left(\frac{1+r_{\text{inf}}}{1+r_{\text{dis}}} \right)^{\frac{\lg(1+\tau)}{\lg(1+\xi)}} \right] \\ C_l = \sum_{t=1}^{24} C_{e,t} |P_{\text{loss}, t} - P_{\text{MBESS, loss}, t}| \\ C_{\text{MBESS, inv}} = \frac{1}{365 T_{\text{life}}} \sum_{h=1}^H (C_{\text{truck}, h} + C_E E_{\text{ESS}, h} + C_P P_{\text{ESS}, h}) \\ C_{\text{MBESS, o\&m}} = H C_{\text{labor}} + C_m \sum_{h=1}^H P_{\text{ESS}, h} \end{cases} \quad (7)$$

式中: F 为 MBESS 的日净收益; C_a 为低储高放套利收益; C_d 为折合到每天的延迟电网升级收益; C_l 为日降损收益; $C_{\text{MBESS, inv}}$ 、 $C_{\text{MBESS, o\&m}}$ 分别为 MBESS 折合到每天的投资成本、日运维成本; $C_{e,t}$ 为 t 时刻的电价; $P_{\text{MBESS}, h, t}$ 为 t 时刻 MBESS _{h} 的有功出力,为正值表示 MBESS _{h} 向电网释放电能,为负值表示 MBESS _{h} 从电网吸收电能; T_{life} 为 MBESS 的等效运行年限; C_{exp} 为电网的升级成本; r_{inf} 、 r_{dis} 分别为通货膨胀率、贴现率; τ 、 ξ 分别为 MBESS 的削峰率、负荷年增长率; $P_{\text{loss}, t}$ 、 $P_{\text{MBESS, loss}, t}$ 分别为 MBESS 接入前、后 t 时刻系统的有功功率损耗; $C_{\text{truck}, h}$ 为 MBESS _{h} 的卡车成本; $E_{\text{ESS}, h}$ 、 $P_{\text{ESS}, h}$ 分别为 MBESS _{h} 的额定容量、额定功率; C_E 、 C_P 分别为储能系统的单位容量、单位功率投资成本; H 为每天调度的 MBESS 数量; C_{labor} 为每辆卡车每天的驾驶员人力成本; C_m 为 MBESS 的单位功率维护成本。

2.1.2 约束条件

1) 配电网内允许安装的 MBESS 容量约束。

$$\sum_{h=1}^H P_{\text{ESS}, h} \leq P_{\text{ESS, max}} \quad (8)$$

式中: $P_{\text{ESS, max}}$ 为配电网内允许 MBESS 接入的最大容量。

2) 节点电压约束。

$$V_{i, \min} \leq V_{i,t} \leq V_{i, \max} \quad (9)$$

式中: $V_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压幅值; $V_{i, \max}$ 、 $V_{i, \min}$ 分别为节点 i 电压的上、下限。

3) 线路功率约束。

$$S_{l,t} \leq S_{l, \max} \quad (10)$$

式中: $S_{l,t}$ 为 t 时刻线路 l 的传输功率; $S_{l, \max}$ 为线路 l 所允许传输功率的最大值。

4) 系统功率平衡约束。

$$\begin{cases} P_{\text{grid}, t} + P_{\text{DG}, t} + \sum_{h=1}^H P_{\text{MBESS}, h, t} = P_{\text{load}, t} + P_{\text{MBESS, loss}, t} \\ Q_{\text{grid}, t} + Q_{\text{DG}, t} + \sum_{h=1}^H Q_{\text{MBESS}, h, t} = Q_{\text{load}, t} + Q_{\text{MBESS, loss}, t} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $P_{\text{grid},t}$ 、 $P_{\text{DG},t}$ 、 $P_{\text{load},t}$ 分别为 t 时刻的网供有功功率、分布式电源有功出力、负荷有功功率; $Q_{\text{grid},t}$ 、 $Q_{\text{DG},t}$ 、 $Q_{\text{load},t}$ 分别为 t 时刻的网供无功功率、分布式电源无功出力、负荷无功功率; $Q_{\text{MBESS},h,t}$ 为 t 时刻 MBESS_{*h*} 的无功出力; $Q_{\text{MBESS,loss},t}$ 为 MBESS 接入后 t 时刻系统的无功功率损耗。

2.2 内层时序优化模型

内层优化模型以等效负荷标准差最小化和各时刻的整体电压偏移最小化为目标,以 MBESS 功率约束、荷电状态约束、运行状态约束为约束条件,决策变量为 MBESS 的接入节点及时序无功出力序列。

2.2.1 目标函数

1) 削峰填谷目标函数。

内层考虑 MBESS 的有功出力调节能力,MBESS 既可以作为电源向电网供电,降低负荷曲线的高峰,也可以作为负荷从电网吸收电能,抬高负荷曲线的低谷。因此,选取等效负荷标准差最小化作为内层削峰填谷的目标函数,如式(12)所示。

$$\min f_p = \sqrt{\frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \left(P_{\text{netload},t} - \sum_{h=1}^H P_{\text{MBESS},h,t} - P_{\text{av}} \right)^2} \quad (12)$$

式中: f_p 为等效负荷标准差; $P_{\text{netload},t}$ 为 t 时刻的等效负荷; P_{av} 为 MBESS 接入配电网后整个调度周期内等效负荷的平均值。

2) 无功调压目标函数。

为了定量反映 MBESS 接入对系统电压水平的提升能力,引入能反映 t 时刻节点 i 电压质量的馈线电压指标 $I_{VQ,i,t}$,以各时刻整体电压偏移最小化作为无功调压的目标函数,如式(13)所示。

$$\min I_{VQ,i,t} = \frac{(V_{i,t} - V_{i,\min})(V_{i,\max} - V_{i,t})}{(V_{i,\text{rate}} - V_{i,\min})(V_{i,\max} - V_{i,\text{rate}})} \quad (13)$$

2.2.2 约束条件

假设 MBESS_{*h*} 的接入位置已根据改进的无功电压灵敏度确定,则接入节点 i 处的 MBESS 在 t 时刻的出力应满足以下约束条件。

1) MBESS 功率约束。

$$P_{\text{MBESS},h,t}^2 + Q_{\text{MBESS},h,t}^2 \leq S_{\text{MBESS},h}^2 \quad (14)$$

式中: $S_{\text{MBESS},h}$ 为 MBESS_{*h*} 的额定视在功率。

2) 荷电状态约束。

$$S_{\text{SOC},\min} \leq S_{\text{SOC},h,t} \leq S_{\text{SOC},\max} \quad (15)$$

$$S_{\text{SOC},h,0} = S_{\text{SOC},h,24} \quad (16)$$

式中: $S_{\text{SOC},h,t}$ 为 t 时刻 MBESS_{*h*} 的荷电状态; $S_{\text{SOC},\max}$ 、 $S_{\text{SOC},\min}$ 分别为 MBESS 荷电状态的上、下限值; $S_{\text{SOC},h,0}$ 、 $S_{\text{SOC},h,24}$ 分别为调度周期始、末时刻 MBESS_{*h*} 的荷电状态。

3) 运行状态约束。

$$\mu_{c,h,t} + \mu_{d,h,t} \leq 1 \quad (17)$$

式中: $\mu_{c,h,t}$ 、 $\mu_{d,h,t}$ 分别为 t 时刻 MBESS_{*h*} 的充电、放电状态标志变量,MBESS_{*h*} 处于充电状态时有 $\mu_{c,h,t}=1$ 、 $\mu_{d,h,t}=0$,MBESS_{*h*} 处于放电状态时有 $\mu_{c,h,t}=0$ 、 $\mu_{d,h,t}=1$,MBESS_{*h*} 处于浮充状态或移动状态时有 $\mu_{c,h,t}=\mu_{d,h,t}=0$ 。

3 求解方法及流程

MBESS 的调度问题具有高维、非线性特性,根据动态综合无功电压修正灵敏度确定不同时刻 MBESS 的接入节点,可避免采用优化算法对配电网中可接入的节点进行编码,能有效降低编码维度。

本文采用双层优化方法对 MBESS 的调度问题进行循环反馈优化。首先,基于上述灵敏度计算结果,选择各时刻灵敏度最大的节点作为 MBESS 的接入节点。然后,根据多应用场景对 MBESS 的时序有功、无功出力进行编码,采用 EFWA 进行求解。EFWA 在前期具有较强的全局搜索能力,在中后期具有较强的局部搜索能力,可避免传统智能算法求解该类问题易陷入局部最优解的困扰。其中,设定利用 MBESS 无功出力进行调压的目标为最小化各时刻配电系统的节点电压偏移,找到可行解即跳出循环寻优过程。最后,将所得 MBESS 的时序无功出力序列反馈至外层模型。

为了方便潮流计算,引入式(18)所示网络邻接矩阵 M 表征配电网中各节点之间的联络状态。

$$M = \begin{bmatrix} 0 & 0/1 & \cdots & 0/1 & 0/1 \\ 0/1 & 0 & \cdots & 0/1 & 0/1 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0/1 & 0/1 & \cdots & 0 & 0/1 \\ 0/1 & 0/1 & \cdots & 0/1 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

式中:第 i 行第 j 列元素表示节点 i 与节点 j 之间是否有线路连接,若有则取值为 1,否则取值为 0。

若接入配电网的 MBESS 数量大于 1,则将 MBESS 依次并入电网,后接入的 MBESS 在已接入 MBESS 的基础上更新等效负荷数据并重新计算灵敏度。

综上,MBESS 双层优化调度模型的求解流程图如图 2 所示,具体求解步骤见附录 B。

4 算例仿真分析

4.1 算例数据

为了适应网架结构发生变化的应用场景,本文选用进行网络重构的配电网验证所提方法的有效性。以 IEEE 33 节点配电系统为例,其结构见附录 C 图 C1,并采用文献[20]中的网络重构方案及日前负荷、光伏发电和风电数据进行仿真分析,相关仿真参数见附录 C 表 C1。配电网在 00:00—07:00、07:00—16:00、16:00—24:00 这 3 个时段的开断线路分别为“ l_7 、 l_9 、 l_{14} 、 l_{28} 、 l_{31} ”“ l_7 、 l_9 、 l_{30} 、 l_{33} 、 l_{37} ”“ l_8 、 l_{30} 、 l_{33} 、 l_{35} 、 l_{37} ”。

系统的额定电压为 12.66 kV,分别在节点 9 和节

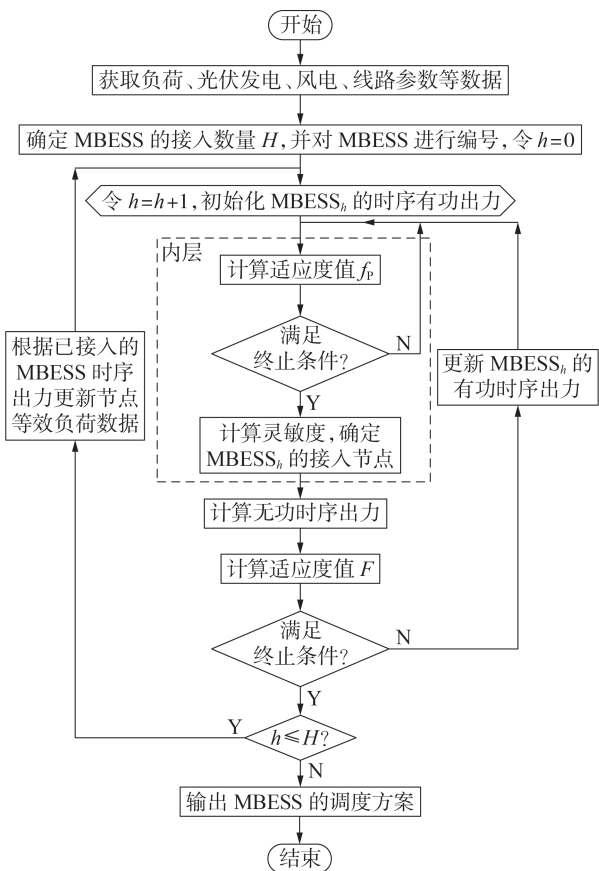


图2 MBESS 双层优化调度模型的求解流程图
Fig.2 Flowchart of solving two-layer optimal scheduling model of MBESS

点 32 处接入额定容量为 2.0、0.4 MW 的光伏, 分别在节点 15 和节点 26 处接入容量为 0.5、1.5 MW 的风机。风电、光伏发电及负荷日前预测曲线见附录 C 图 C2。各时段的电价见附录 C 表 C2。假设配电网中已配置 2 个常规情况下用于应急保电的 MBESS (MBESS₁ 和 MBESS₂), 在闲置时可将其用于削峰填谷, 同时兼顾配电网调压, 其参数见附录 C 表 C3。

4.2 仿真结果分析

4.2.1 基于灵敏度选择接入节点结果分析

首先, 通过潮流计算获得各节点的时序电压值, 根据电压情况分别计算传统综合无功电压灵敏度和综合无功电压修正灵敏度。为了验证本文所提灵敏度计算方法的有效性, 选取 15:00 时刻的综合无功电压灵敏度 (标幺值) 进行对比分析, 结果如图 3 和附录 C 表 C4 所示。在 15:00 时刻的网络结构下, 节点 30 与节点 31 之间的线路处于断开状态, 两节点均处于各自馈线支路的末端。由于此时节点 32 处的光伏出力较大, 节点 31 的电压值已接近额定电压值, 基本不需要进行调压。而节点 30 的电压值已接近下限值, 应对该节点的电压进行上调, 故 MBESS 更适合选择节点 30 作为此时的接入节点。

若按照传统综合无功电压灵敏度的计算结果选

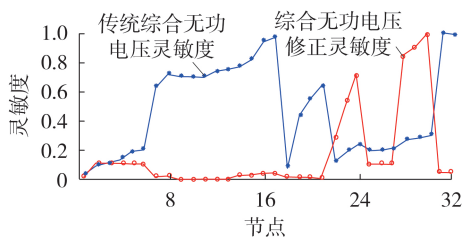


图3 15:00 时刻的综合无功电压灵敏度对比
Fig.3 Comparison of comprehensive reactive power and voltage sensitivity at 15:00

择 MBESS 接入节点, 则在 15:00 时刻应选择节点 31; 而若考虑各节点的实际电压情况及 MBESS 的有功出力, 即采用本文所提灵敏度计算方法, 则在 15:00 时刻选择节点 30 作为 MBESS 的最佳接入节点更合适。

4.2.2 MBESS 的调度结果分析

采用本文所提灵敏度计算方法计算全天 24 h 的时序灵敏度, 并对各时刻的灵敏度进行排序, 选取各时刻灵敏度最大的节点作为 MBESS 的最佳接入节点。

由于未考虑各节点间的实际距离, 假设 MBESS 能在 1 h 内完成任意两节点间的移动和安装。2 个 MBESS 的调度方案如表 1 所示。由表可以看出, 根据各时刻网络结构及各节点电压情况的不同, 2 个 MBESS 在不同时段根据灵敏度计算结果所得的最佳接入节点也不同。2 个 MBESS 的时序有功和无功出力结果如图 4 所示。MBESS 的削峰填谷效果如图 5 所示。由图 5 可以看出, 通过 MBESS 吸收或注入有功功率, 净负荷曲线的峰谷差得到明显减小。

为了验证 EFWA 的优越性, 将其与粒子群优化算法、CPLEX 求解器进行对比分析, 结果如表 2 所示 (表中节点电压范围为标幺值)。由表可知: 采用粒子群优化算法进行求解时, 负荷峰谷差减小为 2393 kW, 相比优化前负荷峰谷差率降低了 27%, 系统网损减少了 117 kW, MBESS 日净收益为 174 元; 采用 CPLEX 求解器进行求解时, 负荷峰谷差减小为 2441 kW, 相比优化前负荷峰谷差率降低了 25.5%, 系统网损减少了 59 kW, MBESS 日净收益为 167 元; 采用 EFWA 进行求解时, 负荷峰谷差减小为 2261 kW, 相较于优化前负荷峰谷差率降低了 31%, 系统网损减少了 210 kW, MBESS 日净收益为 198 元; 3 种优化方法均能使全时段系统节点电压保持在允许的合理

表 1 MBESS 的调度方案

Table 1 Scheduling scheme of MBESSs

时段	MBESS ₁ 所处节点	时段	MBESS ₂ 所处节点
00:00—07:00	31	00:00—16:00	30
07:00—08:00	31→30	16:00—17:00	30→27
08:00—24:00	30	17:00—24:00	27

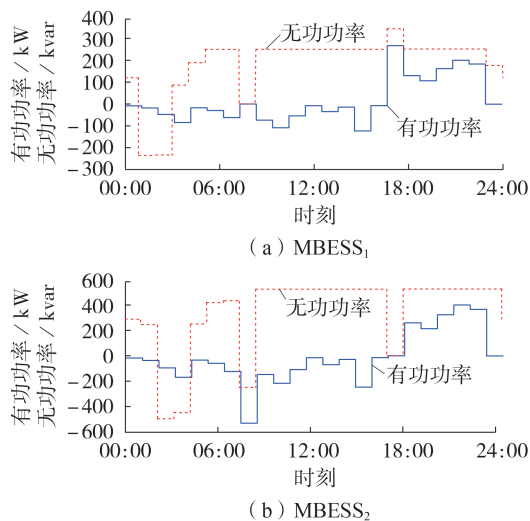


图4 MBESS的时序有功和无功出力

Fig.4 Sequential active and reactive output of MBESSs

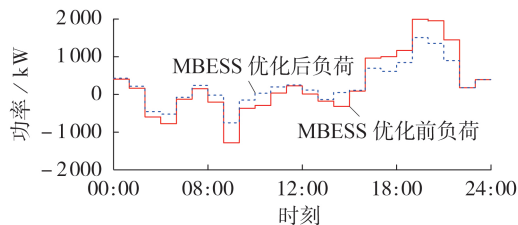


图5 MBESS的削峰填谷效果

Fig.5 Peak load shifting effect of MBESS

范围内,满足配电网的调压要求。

通过上述对比分析可知,EFWA在削峰填谷效果、减少系统网损及MBESS日净收益3个维度的求解结果都更优于粒子群优化算法和CPLEX求解器方法,其在求解MBESS优化调度问题时具有优越性。

MBESS提供无功出力后全时段系统的节点电压(标么值)如图6所示。可以看出,MBESS通过在不同时间对不同节点进行无功补偿,使系统整体电压全时段都保持在0.95~1.05 p.u.范围内,且电压分布较为均匀,有效减少了总体电压偏移。

计算MBESS的经济效益,结果见表3。可看出,优化MBESS的调度方案后,MBESS可获得的日净收益为198元。此外,MBESS的无功调压具有隐性价值,但由于目前的电力市场机制不够完善且缺乏政策支持,本文暂未考虑该部分收益。

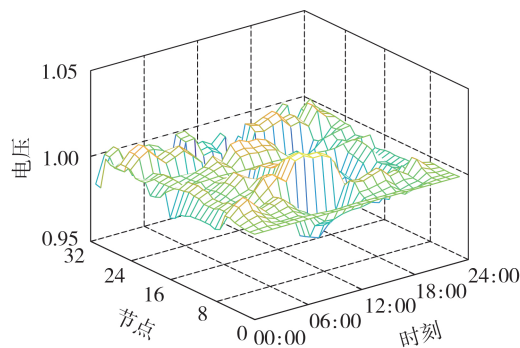


图6 MBESS接入后各节点电压

Fig.6 Voltage of each bus after access of MBESS

表3 MBESS的经济性分析

Table 3 Economic analysis of MBESS

经济性指标	结果 / 元
低储高放套利收益	923
日降损收益	214
折合到每天的投资成本	1212
日运维成本	471
折合到每天的延迟电网升级收益	742
日净收益	198

5 结论

为了应对分布式电源接入配电网带来的负荷峰谷差过大和电压质量问题,本文提出了一种基于动态综合无功电压修正灵敏度分析的优化调度方法。针对传统电压灵敏度在有源配电网中适用性不足的问题,综合考虑MBESS的有功、无功出力对系统节点电压的耦合影响以及不同网络结构下各节点电压的调压需求,提出了满足仿射关系的动态综合无功电压修正灵敏度的计算方法,并采用EFWA求解所提双层优化调度模型。算例仿真结果表明,采用所提电压灵敏度计算方法确定MBESS的调度方案,在保证经济性的前提下,有效地减小负荷峰谷差,提升系统的整体电压水平。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 王守相,陈建凯,王洪坤,等. 综合考虑电动汽车充电与储能及可中断负荷调度的配电网两阶段灵活性提升优化方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(11):1-10.
WANG Shouxiang, CHEN Jiankai, WANG Hongkun, et al. Two-stage flexibility improvement optimization method of distribu-

表2 不同优化方法的求解结果对比

Table 2 Comparison of solution results among different optimization methods

场景(求解方法)	负荷峰值 / kW	负荷谷值 / kW	负荷峰谷差 / kW	网损 / kW	MBESS 日净收益 / 元	全时段系统节点电压范围
MBESS接入前	1994	-1283	3277	1244	—	0.93~1.06
MBESS接入后(粒子群优化算法)	1628	-765	2393	1127	174	0.95~1.05
MBESS接入后(CPLEX求解器)	1578	-863	2441	1185	167	0.95~1.05
MBESS接入后(EFWA)	1509	-752	2261	1034	198	0.95~1.05

- tion network considering EV charging and scheduling of energy storage and interruptible loads[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(11): 1-10.
- [2] 刘文霞, 王凌飞, 徐艺铭, 等. 考虑节点运行风险差异的多端柔性配电网络自适应潮流优化[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 1-6, 14.
- LIU Wenxia, WANG Lingfei, XU Yiming, et al. Adaptive power flow optimization of multi-terminal flexible distribution network considering voltage operation risk difference[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 1-6, 14.
- [3] 高鹏程, 王蕾, 李立生, 等. 基于光伏逆变器调节的配电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 190-196.
- GAO Pengcheng, WANG Lei, LI Lisheng, et al. Voltage control strategy based on adjustment of PV inverters in distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 190-196.
- [4] YAO S H, WANG P, LIU X C, et al. Rolling optimization of mobile energy storage fleets for resilient service restoration[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1030-1043.
- [5] ZHENG Y, MENG K, LUO F J, et al. Optimal integration of MBESSs/SBESSs in distribution systems with renewables[J]. IET Renewable Power Generation, 2018, 12(10): 1172-1179.
- [6] 王育飞, 郑云平, 薛花, 等. 基于增强烟花算法的移动式储能削峰填谷优化调度[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(5): 48-56.
- WANG Yufei, ZHENG Yunping, XUE Hua, et al. Optimal dispatch of mobile energy storage for peak load shifting based on enhanced firework algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(5): 48-56.
- [7] SONG Y M, LIU Y J, WANG R, et al. Multi-objective configuration optimization for isolated microgrid with shiftable loads and mobile energy storage[J]. IEEE Access, 2019, 7: 95248-95263.
- [8] ABDELTAWAB H H, MOHAMED Y A R I. Mobile energy storage scheduling and operation in active distribution systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 6828-6840.
- [9] SABOORI H, JADID S. Optimal scheduling of mobile utility-scale battery energy storage systems in electric power distribution networks[J]. Journal of Energy Storage, 2020, 31: 101615.
- [10] ABDELTAWAB H, MOHAMED Y A R I. Mobile energy storage sizing and allocation for multi-services in power distribution systems[J]. IEEE Access, 2019, 7: 176613-176623.
- [11] 姚宏民, 杜欣慧, 李廷钧, 等. 光伏高渗透率下配网消纳能力模拟及电压控制策略研究[J]. 电网技术, 2019, 43(2): 462-469.
- YAO Hongmin, DU Xinhui, LI Tingjun, et al. Simulation of consumption capacity and voltage control strategy of distribution network with high penetration of photovoltaics[J]. Power System Technology, 2019, 43(2): 462-469.
- [12] 丁明, 刘先放, 毕锐, 等. 采用综合性能指标的高渗透率分布式电源集群划分方法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 47-52, 141.
- DING Ming, LIU Xianfang, BI Rui, et al. Method for cluster partition of high-penetration distributed generators based on comprehensive performance index[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 47-52, 141.
- [13] 马燕峰, 景雪, 赵书强, 等. 光伏接入系统的小干扰稳定灵敏度分析及其应用[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 70-75.
- MA Yanfeng, JING Xue, ZHAO Shuqiang, et al. Analysis and application of small disturbance stability sensitivity of photovoltaic accessed system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 70-75.
- [14] 李振坤, 陈思宇, 符杨, 等. 基于时序电压灵敏度的有源配电网储能优化配置[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4630-4640, 4888.
- LI Zhenkun, CHEN Siyu, FU Yang, et al. Optimal allocation of ESS in distribution network containing DG base on timing-voltage-sensitivity analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4630-4640, 4888.
- [15] 乐健, 廖小兵, 李奔, 等. 基于扩展仿射模型的不确定性静态电压稳定性全局灵敏度分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(13): 2821-2831.
- LE Jian, LIAO Xiaobing, LI Ben, et al. Global sensitivity analysis of uncertain static voltage stability based on extended affine model[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(13): 2821-2831.
- [16] 弓帅, 张文, 谢季平. 混合多馈入交直流混联系统中长期电压分级协调控制[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(22): 54-61.
- GONG Shuai, ZHANG Wen, XIE Jiping. Hierarchical coordinated medium-and long-term voltage control in hybrid multi-infeed AC/DC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(22): 54-61.
- [17] 肖宏飞, 黄锦锋, 陈鑫, 等. 基于动态负荷分配的直流微电网电压控制策略[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(8): 55-61.
- XIAO Hongfei, HUANG Jinfeng, CHEN Xin, et al. Voltage control strategy of DC microgrid based on dynamic load allocation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(8): 55-61.
- [18] 高慧敏, 章坚民, 江力. 基于二阶网损无功灵敏度矩阵的配电网无功补偿选点[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1979-1983.
- GAO Huimin, ZHANG Jianmin, JIANG Li. Optimal location of reactive power compensation for distribution network based on second order loss-reactive power sensitivity matrix[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1979-1983.
- [19] 贾兆昊, 张峰, 丁磊. 考虑功率四象限输出的配电网储能优化配置策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(2): 105-113.
- JIA Zhaohao, ZHANG Feng, DING Lei. Optimal allocation strategy of energy storage in distribution network considering power four-quadrant output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 105-113.
- [20] 李振坤, 路群, 符杨, 等. 有源配电网动态重构的状态分裂多目标动态规划算法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(17): 5025-5036, 5284.
- LI Zhenkun, LU Qun, FU Yang, et al. State split multi-objective dynamic programming algorithm for dynamic reconfiguration of active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(17): 5025-5036, 5284.

作者简介:



王育飞

王育飞(1974—),男,教授,博士,主要研究方向为电力储能应用技术、电能质量分析、混沌理论与应用(E-mail: wangyufei@shiep.edu.cn);

陈强(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为移动式储能应用技术(E-mail: 1289184378@qq.com);

郑云平(1994—),男,硕士,主要研究方向为移动式储能在配电网中的应用(E-mail: zyp_mess@163.com)。

(编辑 陆丹)

(下转第59页 continued on page 59)

Impedance modeling and stability analysis of MV / LV voltage DC distribution system with ISOP-DAB converter

LIU Yingpei, YANG Bochao, SHI Jinpeng, ZHU Yuqi

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Under the “dual-carbon” target, high proportion of renewable energy and power electronic equipment have become the main characteristics of medium voltage and low voltage (MV / LV) DC distribution system, which makes the stability problems caused by its low inertia and weak damping particularly prominent. Therefore, the impedance modeling of MV / LV DC distribution system with input series output parallel-dual active bridge (ISOP-DAB) converter is carried out and a stability analysis method suitable for the system is proposed. Firstly, the two port impedance model of ISOP-DAB converter and the impedance model of other units are established. On this basis, according to the port characteristics of each unit in the system, the MV / LV DC distribution system is equivalent to two DC subsystems with single bus, and the equivalent impedance ratio of the whole system on the medium and low voltage side is obtained. If and only if the equivalent impedance ratio meets the Nyquist criterion, the system can operate stably. Finally, the time-domain simulation model of MV / LV DC distribution system with ISOP-DAB converter is built based on PSCAD / EMTDC. The effects of constant power loads and DC line parameters on system stability are compared and analyzed through simulation experiment and theoretical calculation. The simulative results verify the accuracy and effectiveness of the small signal model of ISOP-DAB converter and the proposed stability analysis method.

Key words: MV / LV DC distribution system; ISOP-DAB converter; impedance model; stability analysis; small disturbance stability

(上接第35页 continued from page 35)

Optimal scheduling of mobile energy storage in active distribution network based on dynamic reactive power and voltage sensitivity

WANG Yufei¹, CHEN Qiang¹, ZHENG Yunping², XUE Hua¹, LI Ming², MI Yang¹

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830013, China)

Abstract: With the increase of urban load peak and the penetration rate of distributed generations, there are risks of further increase of peak-valley load difference and voltage out-of-limit in active distribution network. mobile battery energy storage system (MBESS) has time-space flexibility and four-quadrant output capability. Considering MBESS active power output participating in peak load shifting and reactive power output participating in voltage regulation, an optimal scheduling method of MBESS in active distribution network based on voltage sensitivity analysis is proposed. Firstly, in view of the coupling effect between the MBESS output and its access position, the reactive power and voltage correction sensitivity satisfying the affine relation under the condition of constant active power is derived. Secondly, considering the voltage adjustment requirements of different buses under different network structures, a calculation method of dynamic reactive power and voltage correction sensitivity is proposed to determine the optimal access scheme of MBESS. Then, a two-layer optimal scheduling model of MBESS is constructed, which fully considers the operation economy and reliability. Finally, taking IEEE 33-bus distribution system as an example, the proposed model is solved by using the enhanced fireworks algorithm. The results show that the proposed method can effectively reduce the peak-valley load difference and improve the overall voltage level of the distribution system while ensuring good economic benefits of MBESS.

Key words: active distribution network; mobile battery energy storage system; peak load shifting; voltage regulation; dynamic reactive power and voltage sensitivity; optimal scheduling

附录 A

将式 (1) 展开, 可得:

$$\begin{bmatrix} \Delta U_1 \\ \vdots \\ \Delta U_i \\ \Delta U_j \\ \vdots \\ \Delta U_N \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} \alpha_{11} & \cdots & \alpha_{1i} & \alpha_{1j} & \cdots & \alpha_{1N} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{i1} & \cdots & \alpha_{ii} & \alpha_{ij} & \cdots & \alpha_{iN} \\ \alpha_{j1} & \cdots & \alpha_{ji} & \alpha_{jj} & \cdots & \alpha_{jN} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \alpha_{N1} & \cdots & \alpha_{Ni} & \alpha_{Nj} & \cdots & \alpha_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta P_1 \\ \vdots \\ \Delta P_i \\ \Delta P_j \\ \vdots \\ \Delta P_N \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta_{11} & \cdots & \beta_{1i} & \beta_{1j} & \cdots & \beta_{1N} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \beta_{i1} & \cdots & \beta_{ii} & \beta_{ij} & \cdots & \beta_{iN} \\ \beta_{j1} & \cdots & \beta_{ji} & \beta_{jj} & \cdots & \beta_{jN} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ \beta_{N1} & \cdots & \beta_{Ni} & \beta_{Nj} & \cdots & \beta_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta Q_1 \\ \vdots \\ \Delta Q_i \\ \Delta Q_j \\ \vdots \\ \Delta Q_N \end{bmatrix} \quad (A1)$$

式中: ΔU_i 为节点 i 注入有功功率 ΔP_i 和无功功率 ΔQ_i 后电压的变化值; α_{ij} 为节点 j 注入功率 ΔP_j 后节点 j 对节点 i 的有功电压灵敏度; β_{ij} 为节点 j 注入功率 ΔQ_j 后节点 j 对节点 i 的无功电压灵敏度。

附录 B

MBESS 双层优化调度模型的求解步骤如下:

- 1) 获取负荷数据、光伏和风电出力数据、配电网支路阻抗、分时电价等数据, 确定接受调度的 MBESS 台数并对各 MBESS 进行编号, 记为 MBESS₁、 $\cdots$ 、MBESS _{h} 、 $\cdots$ 、MBESS _{H} ;
- 2) 初始化烟花可行域 (MBESS 的有功和无功范围), 并从中随机产生 M 个烟花 (MBESS 时序出力);
- 3) 导入配电系统网络结构矩阵, 采用前推回代法进行潮流计算各节点电压; 进一步计算动态综合无功电压修正灵敏度, 选择各时刻灵敏度值最大的节点作为 MBESS 的接入节点;
- 4) 计算每一个烟花的适应度值(削峰填谷目标函数值), 判断是否收敛或达到最大迭代次数, 若是, 则进行潮流计算, 否则, 更新 MBESS 时序有功出力, 返回步骤 4);
- 5) 内层所得 MBESS 时序无功出力及潮流计算结果传递至外层, 计算外层适应度值(总运行费用), 判断是否收敛或达到最大迭代次数, 若是, 则进行无功调压, 否则更新 MBESS 时序出力, 返回步骤 4);
- 6) 判断当前 MBESS 接入台数是否达到最大可接入台数, 若是, 则输出各 MBESS 的最优调度方案, 否则, 根据已接入的 MBESS 时序出力更新节点等效负荷数据, 返回步骤 2)。

附录 C

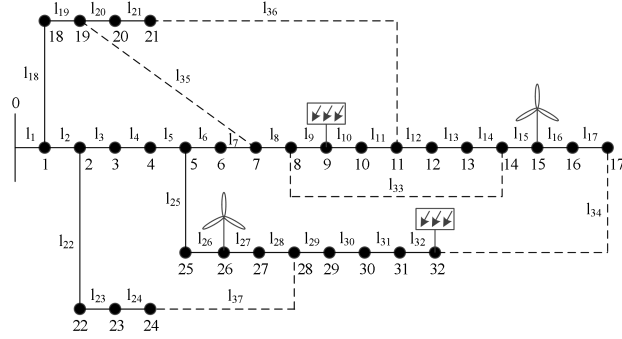


图 C1 IEEE 33 节点配电网系统结构

Fig.C1 Structure of IEEE 33-bus distribution network system

表 C1 仿真参数

Table C1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
T_{life}/a	10	$C_m/(\text{元}/\text{kW})$	0.05
$r_{int}/\%$	1.5	$C_{labor}/(\text{元}/\text{h})$	16
$r_{dis}/\%$	9	$C_E/(\text{元}/\text{kW})$	1750
$\xi/\%$	1.5	$C_P/(\text{元}/\text{kW}\cdot\text{h})$	1300
$C_{exp}/(\text{元}/\text{kW})$	8000		

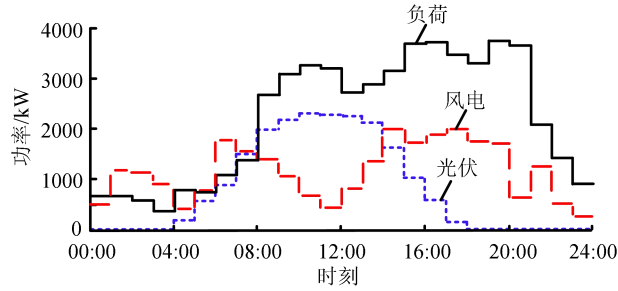


图 C2 风、光、荷日前预测曲线

Fig.C2 Day-ahead forecasting curves of wind,photovoltaic and load

表 C2 分时电价

Table C2 Time-of-use electricity price

时段	电价/(元·(kW·h) ⁻¹)
高峰	08:00—12:00, 17:00—21:00
平段	12:00—17:00, 21:00—24:00
低谷	00:00—08:00

表 C3 MBESS 参数

Table C3 Parameters of MBESS

编号	额定视在功率/(kV·A)	额定容量/(MW·h)	SOC _{min} /SOC _{max}
MBESS ₁	353	1.5	0.2/0.9
MBESS ₂	707	1.5	0.2/0.9

表 C4 15:00 时刻各节点电压及电压灵敏度

Table C4 Node voltage and voltage sensitivity at 15:00

节点	电压 标么值	传统静态 综合无功 电压灵敏度	静态综合 无功电压 修正灵敏度	节点	电压 标么值	传统静态 综合无功 电压灵敏度	静态综合 无功电压 修正灵敏度	节点	电压 标么值	传统静态 综合无功 电压灵敏度	静态综合 无功电压 修正灵敏度
1	0.9992	0.0250	0.0173	12	1.0023	0.7360	0.0010	23	0.9755	0.1835	0.4828
2	0.9947	0.0849	0.1111	13	1.0015	0.7493	0.0009	24	0.9662	0.2369	0.7192
3	0.9963	0.1067	0.1104	14	0.9985	0.7669	0.0257	25	1.0045	0.1903	0.1048
4	0.9984	0.1262	0.1093	15	0.9991	0.8157	0.0294	26	1.0069	0.1952	0.1041
5	1.0029	0.1851	0.1054	16	0.9957	0.9383	0.0405	27	1.0064	0.2110	0.1024
6	1.0023	0.1956	0.1054	17	0.9946	0.9705	0.0439	28	0.9622	0.2657	0.8535
7	0.9985	0.6243	0.0172	18	0.9991	0.0689	0.0170	29	0.9600	0.2770	0.9090
8	0.9985	0.7146	0.0224	19	0.9997	0.4330	0.0146	30	0.9586	0.2946	1.0000
9	1.0091	0.6999	0.0001	20	0.9997	0.5551	0.0137	31	0.9934	1.0000	0.0472
10	1.0076	0.6986	0.0004	21	1.0023	0.6511	0.0056	32	0.9942	0.9895	0.0459
11	1.0047	0.6942	0.0014	22	0.9883	0.1181	0.2250				