

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.181549

含多微电网的柔性中压直流配电中心优化调度方法

徐玉韬¹, 谈竹奎¹, 郭力², 赵一奇², 吴家宏³

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002; 2. 天津大学智能电网教育部重点实验室, 天津 300072; 3. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 提出了一种含多微电网的柔性中压直流配电中心优化调度方法。首先介绍了中压直流配电中心系统的控制架构, 集中控制器可以实现系统的局部自治和协同优化。分别对交流配电管理系统、中压直流配电中心和微电网进行建模。对于不同的集中控制器, 采用不同的调度方法。微电网集中控制器采用日前调度和滚动优化相结合的调度方法, 以微电网的运行成本最小为目标。MMC集中控制器采用实时调度的调度方法, 以配电网的有功损耗和交流线路负载均衡率的加权和最小为目标。最后通过算例验证调度方法的可行性。

关键词: 多微电网; 直流配电中心; 优化调度; 局部自治; 协同优化

An optimal dispatching method with multi-microgrid for flexible medium voltage DC distribution center

XU Yutao¹, TAN Zhukui¹, GUO Li², ZHAO Yiqi², WU Jiahong³

(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China; 3. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: In this paper, an optimal dispatching method with multi-microgrid for flexible medium voltage DC distribution center is proposed. The control architecture of the medium voltage DC distribution center system is introduced firstly. The local autonomy and collaborative optimization of the system can be achieved by the concentrated controllers. The distribution network, medium voltage DC distribution center and microgrids are modeled separately. For different centralized controllers, different dispatching methods are introduced. A combination of daily dispatching and rolling optimization is adopted by the microgrid concentrated controllers with the goal of minimizing the operating cost of the microgrid. A real-time dispatching method is adopted by the MMC concentrated controller with the goal of minimizing weighted sum of the active loss of the distribution network and the load balancing rate of the line. Finally, the feasibility of the dispatching method is verified by an example.

This work is supported by Key Project of China Southern Power Grid (No. GZKJQQ00000417).

Key words: multi-microgrid; DC distribution center; optimal dispatching; local autonomy; collaborative optimization

0 引言

传统配电网中依赖于联络开关进行供电。在智能配电网中, 常规联络开关制约了配电系统的经济性、可靠性和灵活性。智能配电系统应具备灵活、可靠的配电网架构, 实现潮流的灵活控制。智能软开关(Soft Open Point, SOP)是一种取代常规联络开关的智能配电装置^[1-7], 与常规联络开关相比, SOP的引入可以彻底改变传统配电网闭环设计、开环运

行的供电方式, 极大地提高了配电系统的经济性、可靠性和灵活性。文献[1]分析了 SOP 接入后配电网的运行优化问题; 文献[2]阐述了以 SOP 为核心的柔性互联技术理念、特征与优势; 文献[3-4]提出了一种考虑分布式电源运行特性的有源配电网 SOP 规划方法; 文献[5]提出了一种基于智能软开关与市场机制的有源配电网阻塞管理方法; 文献[6]提出了基于 SOP 的配电网供电恢复模型; 文献[7]提出了联络开关和 SOP 并存时配电网运行的时序优化模型。

目前, 随着电力电子技术的不断发展以及直流负荷的广泛应用, 采用直流配电技术可以降低线路成本、输电损耗, 逐渐成为国内外研究、应用的热

点。文献[8-9]总结了直流配电的电能质量问题; 文献[10]提出了一种以配网协调能力最强为全局优化目标的“配网-微网”的分层调度策略; 文献[11]提出了实时电价机制下的交直流混合微网优化运行方法; 文献[12]提出了一种交直流混合主动配电网的分层分布式多源协调优化调度体系; 文献[13]提出了适用于交直流混合智能配电网的两阶段随机集中调度方案; 文献[14]对多端柔性直流配电网运行策略进行研究; 文献[15]提出了基于增广雅可比矩阵的交直流解耦潮流新算法来进行交直流潮流计算。

为了在计及分布式电源的概率及误差的基础上优化调度计划, 基于多时间尺度的调度策略也得到了广泛的关注。文献[16]建立了计及多时间尺度需求响应资源的日前-日内-实时滚动调度模型, 文献[17]建立了需求响应的多代理架构, 设计了日前、日内到实时多时间尺度滚动协调的需求响应调度策略, 文献[18]提出“多级协调、逐级细化”的多时间尺度协调的柔性负荷响应调度模型与策略。文献[16-18]是从需求响应资源分类的角度入手, 进行多时间尺度的调度。文献[19]提出基于模型预测控制的多时间尺度主动配电网多源协调优化调度策略, 文献[20]提出基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度方法。文献[21]通过分析风电预测精度随时间尺度逐级提高的特性, 提出了多时间尺度的有功调度模式。文献[19-21]是基于模型预测进行多时间尺度的调度。

在中压配网层面, 可以预计未来智能配电网将会从基于 SOP 的配电网柔性互联阶段, 逐渐发展成为更加灵活、可靠、高效的交直流混合配电网。作为未来智能配电网发展的重要组成部分之一, 图 1 所示的中压直流配电中心系统可深度融合多端 SOP 和多个交/直流微电网。交直流柔性互联系统通过多个模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)与主配电网互联, 形成高可靠性的多端供电网络^[22-23]。每个微电网自成一个局部自治系统, 且通过电力电子互联装置和分布式协同控制策略, 实现微网内部及多微电网与交流配电网之间的灵活互动与相互支撑。基于“局部自治”和“区域协调”的控制思路, 直流配电中心内每个相对独立的子系统均含有一个集中控制器, 其通过协调子系统内部各设备就地控制器, 实现局部自治控制; 同时各子系统集中控制器能够相互通信, 实现区域间的协调优化控制。该结构不仅可以实现多条交流馈线的柔性互联, 还可以灵活接入多个交/直流微电网系统, 该结构对于交流配网扩容受限的城市负荷中心与多端柔性直流配网等方面具有广泛的应用前景。

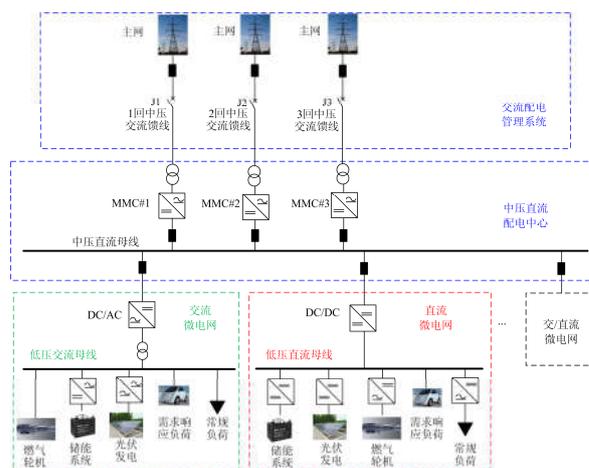


图 1 中压直流配电中心系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of medium voltage DC power distribution center system

本文提出了一种含多微电网的柔性中压直流配电中心优化调度方法。首先介绍了中压直流配电中心系统的控制架构, 集中控制器可以实现系统的局部自治和协同优化。然后分别对交流配电管理系统、中压直流配电中心和微电网进行建模。对于不同的集中控制器, 本文采用不同的调度方法: 微电网集中控制器采用日前调度和滚动优化相结合的调度方法, 以微电网的运行成本最小为目标; MMC 集中控制器采用实时调度的调度方法, 以配电网的有功损耗和交流线路负载均衡率的加权和最小为目标。最后通过算例仿真验证调度方法的可行性。

1 中压直流配电中心系统控制架构

由图 1 所示, 该中压直流配电中心系统由中压直流配电中心、交流微电网和直流微电网组成。交流微电网和直流微电网均接入相应的可再生能源分布式发电单元、储能单元及电动汽车等用电负荷。各微电网内的接入单元可以分为平衡单元和功率单元两部分, 其中平衡单元作为主电源控制系统内电压/频率(交流微电网)和直流电压(直流微电网)稳定, 采用最大功率控制的可再生能源分布式发电单元或功率调度模式下的储能单元及负荷等, 此处均看成功率单元。中压直流配电中心是微电网与交流配网连接的枢纽, 由中压直流母线和多个 MMC 组成。

交流微电网和直流微电网平衡单元的主要功能是保证各自系统内交流电压/频率和直流电压稳定, 以及维持各自系统内功率平衡, 在并网模式下交流微电网集中控制器和直流微电网集中控制器分别向 DC-AC 和 DC-DC 互联装置下发功率调度指

令，即可控制微网与交流电网之间的传输功率，实现对微电网的局部自治。多个 MMC 采用直流下垂控制，维持中压直流母线电压恒定。同时，MMC 集中控制器实时采集 DC-AC 和 DC-DC 互联装置的传输功率，接收交流配电管理系统的信息，以配电网的有功损耗和交流线路负载均衡率的加权和最小为目标，计算多个 MMC 间的功率分配，实现对 MMC 的局部自治。各微电网集中控制器和 MMC 集中控制器各司其职，实现系统的局部自治。

直流微电网集中控制器、交流微电网集中控制器和 MMC 集中控制器相互通信。MMC 集中控制器向微电网集中控制器下发互联功率约束，MMC 集中控制器根据交流微电网集中控制器和直流微电网集中控制器优化结果进行实时调度，互相交互运行状态，实现子系统间的协同优化。

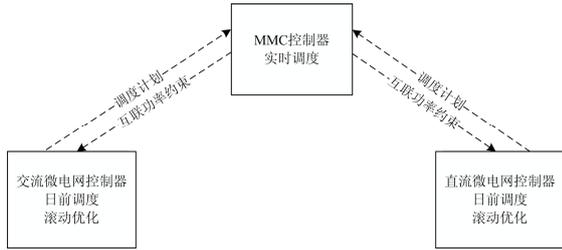


图 2 中压直流配电中心系统控制架构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of control system of medium voltage DC power distribution center system

2 动态优化调度模型

MMC 集中控制器基于本地量测信息和相邻区域的通信数据，在维持系统稳定运行的前提下，对区域内多台 MMC 的传输功率进行实时优化调度，以实现最小化配电网的有功损耗和交流线路负载均衡率的目标。

微电网集中控制器基于本地量测信息、预测数据以及与 MMC 集中控制器交换的边界数据，优化调度微网内可控设备的运行参数，以实现微网的日运行成本最小。

2.1 交流配电管理系统和中压直流配电中心的动态优化调度模型

1) 实时优化调度目标函数

单个调度周期(如 1 h)配电网有功损耗和交流线路负载均衡率的加权和最小。

$$\min(\alpha f_{\text{loss},t} + \beta f_{\text{bal},t}) \quad (1)$$

$$f_{\text{loss},t} = P_{\text{loss},t}^{\text{AC}} + P_{\text{loss},t}^{\text{DC}} + P_{\text{loss},t}^{\text{MMC}} \quad (2)$$

$$P_{\text{loss},t}^{\text{AC}} = \sum_{j=1}^N R_{ij} \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{V_{i,t}^2} \quad (3)$$

$$P_{\text{loss},t}^{\text{DC}} = \sum_{l=1}^M R_{lm} \frac{P_{lm,t}^2}{V_{l,t}^2} \quad (4)$$

$$f_{\text{bal},t} = \sum_{l=1}^{N_L} I_{\text{load},l}^2 \quad (5)$$

式中： $f_{\text{loss},t}$ 为 t 时刻系统的总有功损耗； $f_{\text{bal},t}$ 为 t 时刻交流线路负载均衡率； α 和 β 为权重系数； $P_{\text{loss},t}^{\text{AC}}$ 为 t 时刻交流线路的有功损耗； R_{ij} 为节点 i 与节点 j 间的线路电阻值； $P_{ij,t}$ 和 $Q_{ij,t}$ 分别为 t 时刻从上游节点 i 流向节点 j 的有功和无功功率，节点间关系可表示为 $i \rightarrow j$ ； $V_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的电压幅值； N 为交流配电网所有节点的集合； $P_{\text{loss},t}^{\text{DC}}$ 为 t 时刻直流线路的有功损耗； R_{lm} 为节点 l 与节点 m 间的直流线路电阻值； $P_{lm,t}$ 为 t 时刻从直流节点 l 流向节点 m 的有功功率，节点间关系可表示为 $l \rightarrow m$ ； $V_{l,t}$ 为 t 时刻节点 l 的电压幅值； $P_{\text{loss},t}^{\text{MMC}}$ 为 t 时刻所有 MMC 的有功损耗； M 为直流网络所有节点的集合； $I_{\text{load},l}$ 为支路 l 的负荷平衡指标，定义为流过该支路的电流幅值与支路最大允许载流量的比值； N_L 为系统支路数。

2) 交流配电网潮流等式约束

$$\sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij,t} - R_{ij} \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{V_{i,t}^2}) - P_{j,t} = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,t} \quad (6)$$

$$\sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij,t} - X_{ij} \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{V_{i,t}^2}) - Q_{j,t} = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,t} \quad (7)$$

$$V_{j,t}^2 = V_{i,t}^2 - 2(R_{ij}P_{ij,t} + X_{ij}Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{V_{i,t}^2} \quad (8)$$

式中： X_{ij} 为节点 i 与节点 j 间的线路电抗值； $P_{j,t}$ 和 $Q_{j,t}$ 为 t 时刻节点 j 净负荷的有功和无功功率。

对于 MMC 接入的交流节点，节点净负荷的表达式为

$$P_{j,t} = P_{Lj,t} + P_{in,t}^{\text{MMC}n} \quad (9)$$

$$Q_{j,t} = Q_{Lj,t} + Q_{in,t}^{\text{MMC}n} \quad (10)$$

式中： $P_{Lj,t}$ 和 $Q_{Lj,t}$ 分别为 t 时刻节点 j 的负荷有功和无功功率； $P_{in,t}^{\text{MMC}n}$ 和 $Q_{in,t}^{\text{MMC}n}$ 分别为 t 时刻第 n 个 MMC 从交流节点 j 吸收的有功功率和无功功率。

式(6)一式(8)所示的潮流模型非凸，运用优化算法求解无法保证收敛性，所以将其转化为如下二阶锥模型^[24]。

$$\sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij,t} - R_{ij}I_{ij,t}) - P_{j,t} = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,t} \quad (11)$$

$$\sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij,t} - X_{ij} l_{ij,t}) - Q_{j,t} = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,t} \quad (12)$$

$$u_{j,t} = u_{i,t} - 2(R_{ij} P_{ij,t} + X_{ij} Q_{ij,t}) + (R_{ij}^2 + X_{ij}^2) l_{ij,t} \quad (13)$$

$$\left\| \begin{array}{c} 2P_{ij,t} \\ 2Q_{ij,t} \\ l_{ij,t} - u_{i,t} \end{array} \right\| \leq l_{ij,t} + u_{i,t} \quad (14)$$

其中,

$$l_{ij,t} = \frac{P_{ij,t}^2 + Q_{ij,t}^2}{V_{i,t}^2} \quad (15)$$

$$u_{j,t} = V_{j,t}^2 \quad u_{i,t} = V_{i,t}^2 \quad (16)$$

3) 交流配电网电压安全约束

$$(1 - \varepsilon)^2 V_{\text{ref}}^2 \leq u_{j,t} \leq (1 + \varepsilon)^2 V_{\text{ref}}^2 \quad (17)$$

式中: V_{ref} 为区域节点电压参考值; ε 为节点电压的最大允许偏差。

4) MMC 约束

$$P_{in,t}^{\text{MMC}n} - P_{o,t}^{\text{MMC}n} = P_{\text{loss},t}^{\text{MMC}n} \quad (18)$$

$$P_{\text{loss},t}^{\text{MMC}n} = A_n^{\text{MMC}} \sqrt{(P_{in,t}^{\text{MMC}n})^2 + (Q_{in,t}^{\text{MMC}n})^2} \quad (19)$$

$$\underline{Q}_{in}^{\text{MMC}n} \leq Q_{in,t}^{\text{MMC}n} \leq \bar{Q}_{in}^{\text{MMC}n} \quad (20)$$

$$\sqrt{(P_{in,t}^{\text{MMC}n})^2 + (Q_{in,t}^{\text{MMC}n})^2} \leq S^{\text{MMC}n} \quad (21)$$

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{MG}}} P_{\text{MG},i,t} = P_{o,t}^{\text{MMC}1} + P_{o,t}^{\text{MMC}2} + \dots + P_{o,t}^{\text{MMC}n} \quad (22)$$

式中: $P_{o,t}^{\text{MMC}n}$ 为 t 时刻第 n 个 MMC 向中压直流母线输出的有功功率; $P_{\text{loss},t}^{\text{MMC}n}$ 为 t 时刻第 n 个 MMC 的有功功率损耗; A_n^{MMC} 为第 n 个 MMC 的损耗系数; $\underline{Q}_{in}^{\text{MMC}n}$ 和 $\bar{Q}_{in}^{\text{MMC}n}$ 分别为第 n 个 MMC 从交流侧吸收无功功率的下限值和上限值; $S^{\text{MMC}n}$ 为第 n 个 MMC 的容量; $P_{\text{MG},i,t}$ 为微电网 i 从中压直流母线吸收的有功功率; N_{MG} 为微电网数量。

MMC 的网损约束和容量约束可以改写为如下所示的二阶锥形式:

$$\left\| \begin{array}{c} P_{in,t}^{\text{MMC}n} \\ Q_{in,t}^{\text{MMC}n} \end{array} \right\|_2 \leq \frac{P_{\text{loss},t}^{\text{MMC}n}}{A_n^{\text{MMC}}} \quad (23)$$

$$\left\| \begin{array}{c} P_{in,t}^{\text{MMC}n} \\ Q_{in,t}^{\text{MMC}n} \end{array} \right\|_2 \leq S^{\text{MMC}n} \quad (24)$$

5) 直流线路潮流等式约束

$$P_{lm,t} - R_{lm} \frac{P_{lm,t}^2}{V_{l,t}^2} - P_{m,t} = \sum_{k:m \rightarrow k} P_{mk,t} \quad (25)$$

$$V_{m,t} = V_{l,t} - R_{lm} \frac{P_{lm,t}}{V_{l,t}} \quad (26)$$

式中, $P_{m,t}$ 为 t 时刻节点 m 的负荷有功功率。

2.2 微电网的动态优化调度模型

1) 目标函数

微电网的日运行成本最小, 包括设备调度成本以及购电成本。

$$\min \sum_{t=1}^{N_T} (C_{\text{CG}}(t) + C_{\text{ES}}(t) + C_{\text{DR}}(t) + C_M(t)) \quad (27)$$

式中: $C_{\text{CG}}(t)$ 、 $C_{\text{ES}}(t)$ 和 $C_{\text{DR}}(t)$ 分别为 t 时刻微电网内可控分布式电源、储能和需求响应负荷的调度成本; $C_M(t)$ 为 t 时刻微电网从配电网的购电成本; N_T 为调度周期。

2) 可控分布式电源成本函数和运行约束

可控分布式电源主要包括微型燃气轮机、燃料电池等, 发电成本函数为

$$C_{\text{CG}}(t) = (aP_{\text{CG}}(t) + b)\Delta t \quad (28)$$

式中: $P_{\text{CG}}(t)$ 为 t 时刻的分布式电源的有功发电功率; a 和 b 为常量; Δt 为时间步长。

由于微型燃气轮机的功率响应速度相对较快, 故不考虑其爬坡率约束, 仅考虑输出功率约束。

$$P_{\text{CG}}^{\min} \leq P_{\text{CG}}(t) \leq P_{\text{CG}}^{\max} \quad (29)$$

式中: P_{CG}^{\min} 和 P_{CG}^{\max} 分别为分布式电源有功功率的下限和上限。

3) 储能成本函数和运行约束

储能的运行成本考虑一次投资成本和运行成本并折算到单位充放电功率成本, 调度周期内的储能运行成本可表示为

$$C_{\text{ES}}(t) = K_{\text{ES}} \sum_{m} (P_m^{\text{ESS_dis}}(t)/\eta + P_m^{\text{ESS_ch}}(t)\eta)\Delta t \quad (30)$$

式中: $P_m^{\text{ESS_dis}}(t)$ 和 $P_m^{\text{ESS_ch}}(t)$ 分别为第 m 个储能的放电功率和充电功率; K_{ES} 为储能的单位充放电成本; η 为储能的充放电效率。

储能安全运行约束包括充放电功率约束和荷电状态运行约束。任意时刻储能的荷电状态都必须在一定范围内, 此外, 储能系统每个调度周期始末的存储能量即荷电状态需一致, 以确保其连续运行的周期性, 所以约束为

$$0 \leq P_m^{\text{ESS_dis}}(t) \leq U_m^{\text{ESS}}(t)E_m^{\text{ESS}} \quad (31)$$

$$0 \leq P_m^{\text{ESS_ch}}(t) \leq (1 - U_m^{\text{ESS}}(t))E_m^{\text{ESS}} \quad (32)$$

$$\eta \sum_{t=1}^{N_T} [P_m^{\text{ESS_ch}}(t)\Delta t] - \frac{1}{\eta} \sum_{t=1}^{N_T} [P_m^{\text{ESS_dis}}(t)\Delta t] = 0 \quad (33)$$

$$E_S^{\min} \leq E_{m,0} + \eta \sum_{t=1}^t [P_m^{\text{ESS_ch}}(t')\Delta t] - \quad (34)$$

$$\frac{1}{\eta} \sum_{t'=1}^t [P_m^{\text{ESS_dis}}(t')\Delta t] \leq E_S^{\max}$$

式中: $U_{m,t}^{\text{ESS}}$ 为二进制变量, 其值为 1 表示第 m 个储能放电, 否则充电; E_m^{ESS} 为第 m 个储能允许的最大充放电功率; $E_{m,0}$ 为储能调度初始时刻的容量; E_s^{max} 、 E_s^{min} 为储能调度过程中允许的最大/最小剩余容量。

4) 需求响应负荷成本函数和运行约束

$$\sum_{t=1}^{N_t} P_{\text{DR}}(t) \Delta t = D_{\text{DR}} \quad (35)$$

$$P_{\text{DR}}^{\text{min}}(t) \leq P_{\text{DR}}(t) \leq P_{\text{DR}}^{\text{max}}(t) \quad (36)$$

式中: D_{DR} 和 $P_{\text{DR}}(t)$ 分别为需求响应负荷对总用电量和各时段用电功率的要求; $P_{\text{DR}}^{\text{min}}(t)$ 和 $P_{\text{DR}}^{\text{max}}(t)$ 分别为 t 时段需要响应负荷的最小和最大功率。

需求响应可以改变用户的用电计划, 所以用电计划的改变势必影响用户的舒适度, 因此, 微电网需付出的调度成本为

$$C_{\text{DR}}(t) = K_{\text{DR}} |P_{\text{DR}}(t) - P_{\text{DR}}^*(t)| \Delta t \quad (37)$$

式中: $P_{\text{DR}}^*(t)$ 为 t 时段需求响应负荷的期望用电功率; K_{DR} 为需求响应负荷单位调度成本。

式(37)中的绝对值项用于表示实际调度功率和期望用电功率之间的偏差, 通过引入辅助变量 $P_{\text{DR1}}(t)$ 、 $P_{\text{DR2}}(t)$ 及相关约束, 可将其化为如式(38)一式(40)所示的线性形式^[25]。

$$C_{\text{DR}}(t) = K_{\text{DR}} (P_{\text{DR1}}(t) + P_{\text{DR2}}(t)) \Delta t \quad (38)$$

$$P_{\text{DR}}(t) - P_{\text{DR}}^*(t) + P_{\text{DR1}}(t) - P_{\text{DR2}}(t) = 0 \quad (39)$$

$$P_{\text{DR1}}(t) \geq 0, P_{\text{DR2}}(t) \geq 0 \quad (40)$$

5) 配电网交换功率约束和购电成本

当微电网内的负荷供给不足时, 需要向配电网购电; 反之, 微电网可将富余的电能出售给配电网, 获取收益。微电网和配电网之间的交换功率需满足如下约束。

$$P_M^{\text{buy}}(t) - P_M^{\text{sell}}(t) = \sum_{\forall m} (P_m^{\text{ESS, ch}}(t) - P_m^{\text{ESS, dis}}(t)) + \quad (41)$$

$$P_{\text{DR}}(t) + P_L(t) - P_{\text{CG}}(t) - P_{\text{RES}}(t)$$

$$0 \leq P_M^{\text{buy}}(t) \leq U_M(t) P_M^{\text{max}} \quad (42)$$

$$0 \leq P_M^{\text{sell}}(t) \leq (1 - U_M(t)) P_M^{\text{max}} \quad (43)$$

式中: $P_M^{\text{buy}}(t)$ 和 $P_M^{\text{sell}}(t)$ 分别为微电网向配电网购电和售电的有功功率; $U_M(t)$ 为二进制变量, 其值为 1 表示微电网向配电网购电; P_M^{max} 为微电网向配电网售电或者购电的最大功率; $P_L(t)$ 为 t 时段非弹性负荷功率; $P_{\text{RES}}(t)$ 为 t 时段分布式可再生能源出力。

微电网向配电网购电的成本为

$$C_M(t) = \sigma_{\text{DSO}, m}(t) (P_M^{\text{buy}}(t) - P_M^{\text{sell}}(t)) \Delta t \quad (44)$$

式中, $\sigma_{\text{DSO}, m}(t)$ 为 t 时刻配电网与微电网的双边电价。

3 调度方法

为了实现中压直流配电中心系统中各个子系统的“局部自治”和“协同优化”, 需要制定合理的优化调度方法。

3.1 微电网集中控制器的调度方法

当中压直流配电中心系统正常运行时, 微电网根据日前调度的计划进行调度; 当出现不确定性因素时, 微电网在日前调度的计划基础上进行滚动优化。

1) 日前调度

微电网集中控制器根据历史数据, 对第二天分布式电源出力数据和负荷数据进行预测, 制定一个从 0:00—24:00 的日前调度计划, 时间尺度为 1 h。

2) 滚动优化

a) 由于微电网的分布式电源出力预测和负荷预测具有不确定性, 未来时刻离当前时刻越近, 数据预测越准确。因此, 每隔 4 个小时对未来时刻的数据重新进行预测, 并重新制定从该时刻到 24 时的调度计划, 滚动优化时间尺度为 1 个小时。

b) 该系统在运行中, 可能会出现 MMC 退出运行、投入运行等一些非正常工况。当部分 MMC 退出运行时, MMC 集中控制器对微网集中控制器下发新的互联功率约束, 配电网与微电网间的互联功率约束数值会减少, 可能出现微电网的传输功率大于互联功率约束的情况。

为了避免中压直流母线电压由于功率不平衡出现的电压抬升, DC/DC 和 DC/AC 互联装置依靠就地通用控制, 调整微电网与中压直流配电中心之间的交换功率, 留有裕量的平衡单元会平衡微网内的不平衡功率, 保证故障区域内重要负荷不间断供电, 支撑故障区域持续运行, 控制策略详见参考文献[26-27], 就地控制时间尺度为毫秒级。

为防止平衡单元过充, 各微电网集中控制器根据微电网容量来分配不平衡功率削减量, 时间尺度为秒级。等到下个整点制定从该时刻到 24:00 的调度计划, 系统重新进入正常运行状态。当 MMC 恢复运行时, 在下个整点重新制定从该时刻到 24:00 的调度计划。

滚动优化得到的调度计划和日前调度得到的调度计划分别代入到真实的数据中进行调度。考虑到预测的波动性, 会产生功率平衡问题, 因此需要对配网和微网的交换功率和目标函数进行修正。

3.2 MMC 集中控制器的调度方法

MMC 集中控制器实时采集 DC-AC 和 DC-DC 互联装置的传输功率, 接收交流配电管理系统的信息进行计算, 进行实时优化调度。

4 算例分析

本文选取了如图 3 所示的贵州直流配电中心系统案例。交流配电网 3 个变电站延伸出来的线路, 并在 5、10 和 15 这 3 个节点分别接入 3 台 MMC 变流器。中压直流配电中心下接入两个微电网 MG1 和 MG2。本文运用 Matlab R2015a 环境下的 CPLEX 算法包求解各优化模型。

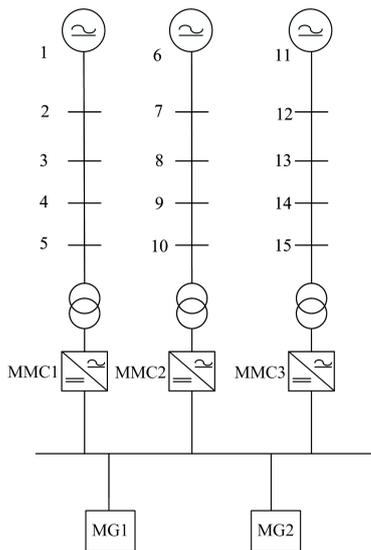
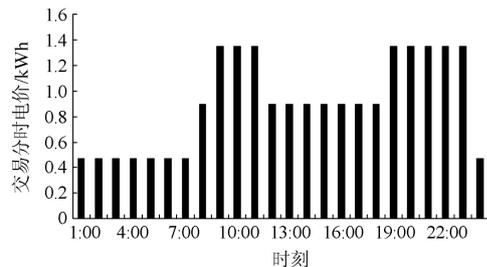


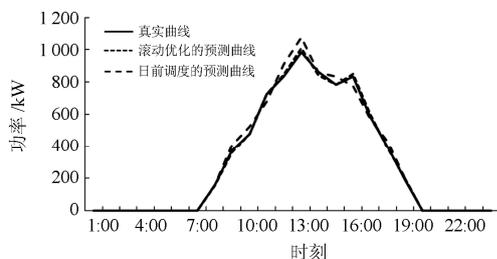
图 3 贵州直流配电中心系统案例

Fig. 3 Guizhou DC distribution center system case

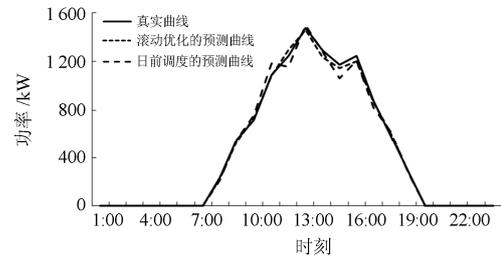
仿真所需的参数如图 4 和表 1 所示。



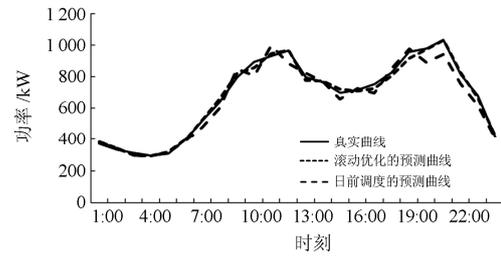
(a) 交易分时电价



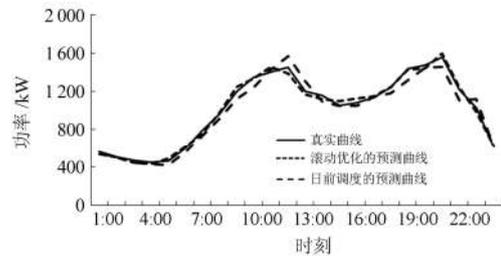
(b) MG1 的光伏出力曲线



(c) MG2 的光伏出力曲线



(d) MG1 的负荷曲线



(e) MG2 的负荷曲线

图 4 仿真所需的参数图

Fig. 4 Parameter diagram required by simulation

表 1 微电网运行参数

Table 1 Operation parameters of microgrid

类别	参数名称	取值
微型燃气轮机	最大出力	800 kW
	最小出力	80 kW
	a	0.67 元/kWh
	b	0
储能	最大充放电功率	500 kW
	调度过程允许最大容量	1 800 kWh
	调度过程允许最小容量	400 kWh
	充放电效率	0.95
	初始状态	1 000 kWh
需求响应负荷	单位充放电成本	0.38 元/kWh
	单位调度成本	0.32 元/kWh
配电网	交换功率约束	3 000 kW

4.1 微电网日前调度结果和配电网实时调度结果

1) 微电网日前调度结果

MG1 和 MG2 的调度结果如图 5 所示, 其中图 5(a)为 MG1 和 MG2 储能充放电曲线, 充电时取值

为正, 放电时为负; 图 5(b)为 MG1 和 MG2 与配网的交换功率曲线, 当微电网向配电网购电时取值为正, 反之, 微电网向配电网售电时取值为负。图 5(c)为 MG1 和 MG2 的可控分布式电源出力曲线, 图 5(d)为 MG1 需求响应负荷实际值与期望值, 图 5(e)为 MG2 需求响应负荷实际值与期望值。

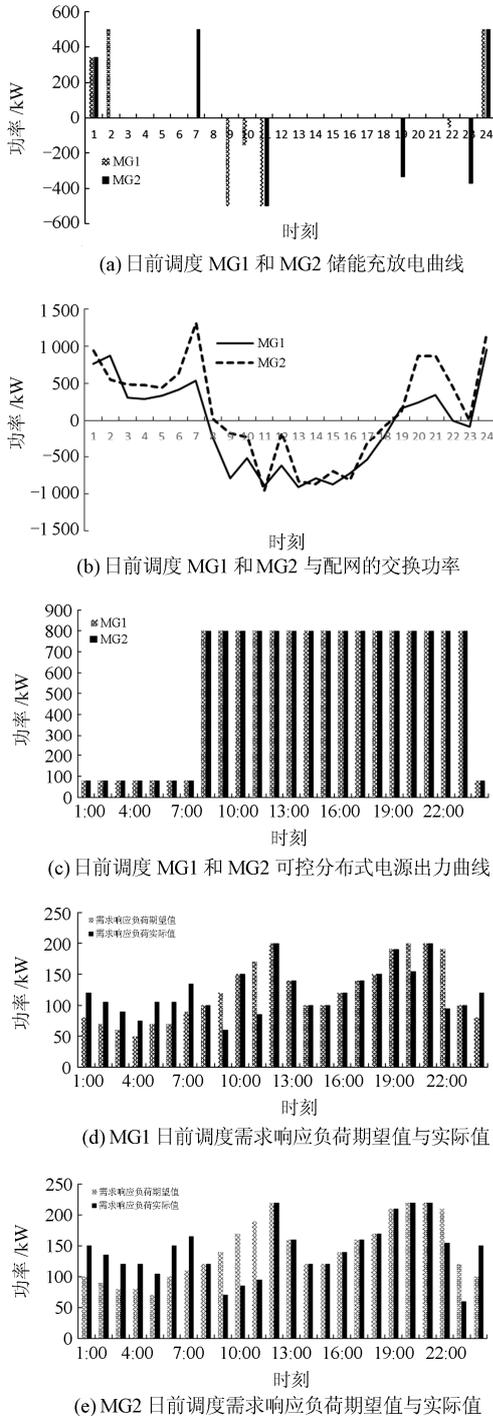


图 5 微电网日前调度结果

Fig. 5 Microgrid day-ahead dispatching results

由图 4(b)和图 4(c)可得, 在 1:00—7:00 及 20:00—24:00, 光伏输出功率为 0, 微电网内的负荷完全依靠可控分布式电源、储能及配电网供给。此时, 当配电网日前交易电价低于微型燃气轮机单位发电成本时, 可控分布式电源以最小输出功率运行, 如图 5(c)中 1:00—7:00 和 24:00 所示; 在其余时段, 可控分布式电源输出最大功率, 降低成本。

由图 5(a)可得, MG1 的储能单元在 1:00、2:00 以及 24:00 进行充电, 而在 9:00—11:00、22:00 进行放电, MG2 的储能单元在 1:00、7:00 和 24:00 进行充电, 在 11:00、19:00 和 23:00 放电。在谷时电价将电能储存起来, 在峰时电价将电能卖出, 实现削峰填谷的作用。由图 5(b)可得, MG1 在 1:00—8:00、19:00—22:00、24:00 向配电网购电, 其余时间向配电网售电。MG2 在 1:00—7:00、19:00—24:00 向配电网购电, 其余时间向配电网售电。白天电价高时利用光伏出力获得利润, 晚上负荷大时向配电网购电, 夜间谷时电价将电能储存起来。由图 5(d)和图 5(e)可知, 需求响应负荷的期望用电计划类似于常规负荷, 用电主要集中在电价高峰时段。在满足总用电量需求和各时段用电量约束的前提下, 将电价高峰时期的用电需求分配至电价较低时期, 从而降低了微电网在峰电价时段需要购买的电能。

2) 配网优化结果

由图 6 可得 MMC 在各时刻的功率分配。当微电网向配电网购电时数值为正, 反之, 当微电网向配电网售电时数值为负。由于各条线路的参数不同, 影响 MMC 的功率分配。当微电网向配电网购电时, 负载轻的线路上 MMC 传递的功率更多, 负载重的线路上 MMC 传递的功率更少。当微电网向配电网售电时, 为了均衡各条线路的负载, 负载重的线路上 MMC 传递的功率较多, 负载轻的线路上 MMC 传递的功率较少。

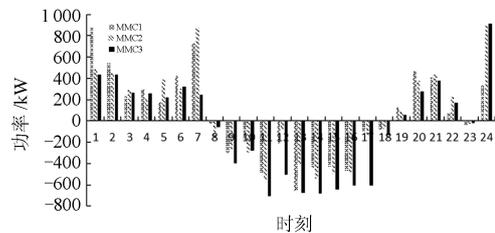


图 6 MMC 的功率分配

Fig. 6 Power distribution of MMCs

4.2 由于预测不准造成的微电网滚动优化结果

图 7 是微电网滚动优化的结果, 由于 0:00—4:00 是负荷和光伏的预测数据相同, 所以这段曲线和 4.1

节中微网日前调度结果相同。4:00 之后微网进行了滚动优化, 因为预测数据的偏差, 储能单元、与配网的交换功率和需求响应负荷实际值的调度结果发生了变化。可控分布式电源的调度结果并没有发生变化,

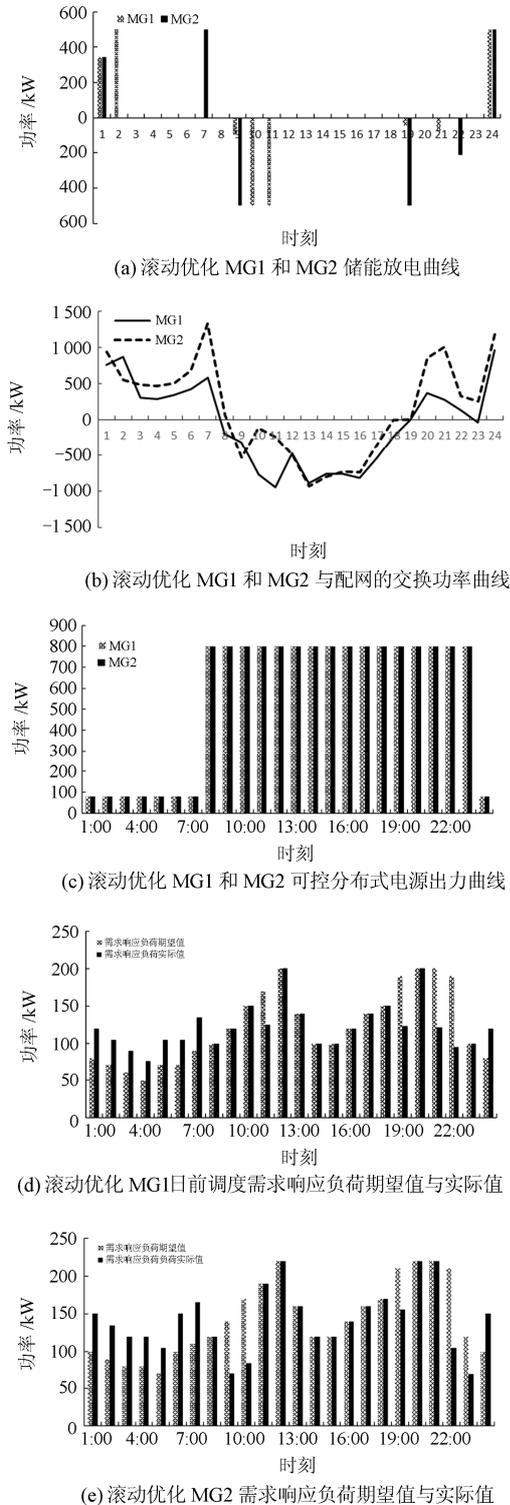


图 7 微电网滚动优化结果

Fig. 7 Microgrid rolling optimization results

说明可控分布式电源的调度只受到电价影响, 当发电成本比电价高时可控分布式电源以最小输出功率运行, 反之可控分布式电源以最大输出功率运行。

4.3 日前调度计划和滚动调度计划的修正结果

滚动优化后的调度计划与日前调度计划分别代入真实的数据中进行调度, 会产生功率偏差值, 这部分功率通过配电网与微电网间交易过程来平衡。

滚动优化中配电网与微电网功率交换量的修正结果如图 8 所示。

日前调度中配电网与微电网功率交换量的修正结果如图 9 所示。

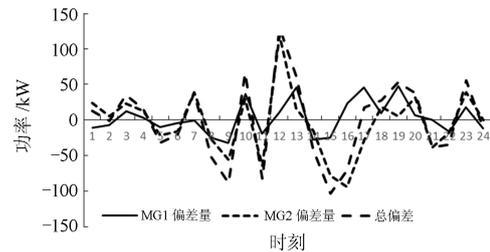


图 8 滚动优化的功率偏差值

Fig. 8 Power deviation value in rolling optimization

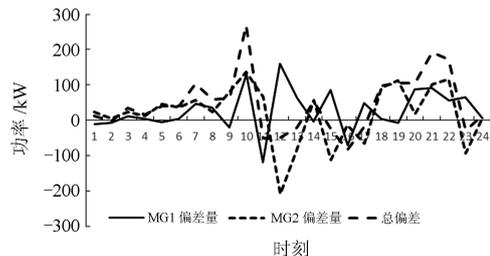


图 9 日前调度下的功率偏差值

Fig. 9 Power deviation value in rolling optimization

由图 8 和图 9 可得, 滚动优化中的计划交换量和实际交换量的偏差值比日前调度中的偏差值要小。已知配电网与微电网的交易电价, 可以得到目标函数总偏差。滚动优化的目标函数偏差是 -53.1782 , 目标函数的偏差率为 0.35% 。日前调度的目标函数偏差是 1254.393 , 目标函数的偏差率为 7.9% 。由此可见, 基于滚动优化的调度计划更具有真实性, 更接近于真实值。

4.4 由于 MMC 非正常工作造成的微电网滚动优化结果

日前调度正常进行, 假设此系统在 $12:00-13:00$ 之间两台 MMC 退出运行, 此时只有一台 MMC 正常工作, 传输功率约束变为 1 MW 。而 MG1 和 MG2 与配网的交换功率分别为 892.124 kW 和 936.084 kW , 总和大于传输功率约束。DC/DC 和 DC/AC 分别限制微电网出力, 按 MG1 和 MG2 容

量比进行限制, MG2 的容量约为 MG1 容量的 2 倍, 所以 MG1 和 MG2 的平衡单元需要平衡的功率分别为 276.07 kW 和 552.14 kW。MG1 和 MG2 的可控分布式电源分别削减 276.07 kW 和 552.14 kW, 时间为秒级。由于就地控制时间尺度为毫秒级, 储能单元的容量可以看作不变。这种状态维持到下个整点, 然后再进行滚动优化。调整后的微电网调度计划如图 10(14:00—24:00)。

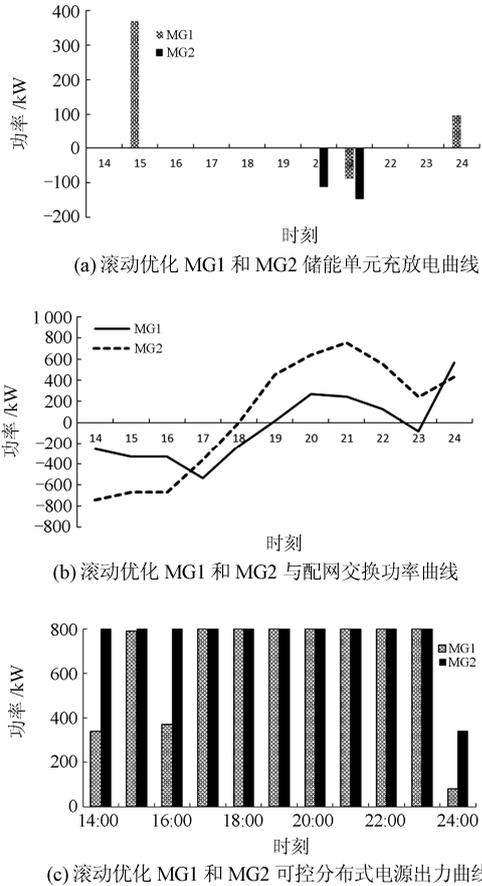


图 10 由于 MMC 非正常工作造成的微电网滚动优化结果
Fig. 10 Microgrid rolling optimization results due to abnormal operation of MMCs

图 10 是微网滚动优化后的结果, 这里只展示出 MMC 故障后的微电网滚动优化结果。在 MMC 退出运行之前, 微电网根据 4.2 节中的滚动优化计划进行调度。由图 10(a)可得, 与相同时段进行对比, 滚动优化后的 MG1 的储能在 15:00 和 24:00 充电, 在 21:00 进行放电。MG2 的储能在 20:00—21:00 进行放电。由图 10(b)可得, 由于传输功率限制, MG1、MG2 与配电网的传输功率大幅度减小, 其传输功率总和不超过传输功率约束。由图 10(c)可得, MG1 的可控分布式电源在 14:00—16:00 没有达到最大出

力, 进行出力的削减, 这是因为传输功率约束减小, 在这段时间光伏的出力较多, 可控分布式电源会为了满足功率约束减小出力。

5 结论

本文提出了一种含多微电网的柔性中压直流配电中心优化调度方法。微电网集中控制器采用日前调度和滚动优化相结合的调度方法, 以微电网的运行成本最小为目标; MMC 集中控制器采用实时调度的调度方法, 以配电网的有功损耗和交流线路的负载均衡率加权和最小为目标。

由算例可以得到, 滚动优化的效果比日前调度效果更好, 且更接近实际情况。当 MMC 出现不正常工作情况, 这种方法也可以适用。

参考文献

[1] 王成山, 孙充勃, 李鹏, 等. 基于 SNOP 的配电网运行优化及分析[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 82-87.
WANG Chengshan, SUN Chongbo, LI Peng, et al. SNOP-based operation optimization and analysis of distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 82-87.

[2] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 基于智能软开关的智能配电网柔性互联技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(22): 168-175.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Research and prospect for soft open point based flexible interconnection technology for smart distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(22): 168-175.

[3] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 考虑分布式电源运行特性的有源配电网智能软开关 SOP 规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1889-1896.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. Optimal configuration of soft open point for active distribution network considering the characteristics of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1889-1896.

[4] WANG C, SONG G, LI P, et al. Optimal siting and sizing of soft open points in active electrical distribution networks[J]. Applied Energy, 2017, 189: 301-309.

[5] 李鹏, 张培深, 王成山, 等. 基于智能软开关与市场机制的有源配电网阻塞管理方法[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(20): 9-16.

- LI Peng, ZHANG Peishen, WANG Chengshan, et al. Congestion management method for active distribution networks based on soft open point and market mechanism[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(20): 9-16.
- [6] LI P, SONG G, JI H, et al. A supply restoration method of distribution system based on soft open point[C] // IEEE Innovative Smart Grid Technologies-Asia, November 28-December 1, 2016, Melbourne, Australia: 535-539.
- [7] 王成山, 宋关羽, 李鹏, 等. 一种联络开关和智能软开关并存的配电网运行时序优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2315-2321.
WANG Chengshan, SONG Guanyu, LI Peng, et al. A hybrid optimization method for distribution network operation with SNOP and tie switch[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2315-2321.
- [8] 姚钢, 纪飞鹏, 殷志柱, 等. 直流配电电能质量研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 163-170.
YAO Gang, JI Feipeng, YIN Zhizhu, et al. Review on the research of DC power distribution power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 163-170.
- [9] 陈鹏伟, 肖湘宁, 陶顺, 等. 直流微网电能质量问题探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 148-158.
CHEN Pengwei, XIAO Xiangning, TAO Shun, et al. Discussion on power quality problems for DC microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 148-158.
- [10] 戴志辉, 陈冰研, 谢军, 等. 含多微网的主动配电网分层调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 121-127.
DAI Zhihui, CHEN Bingyan, XIE Jun, et al. Hierarchical scheduling strategy for active distribution network with multi-microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 121-127.
- [11] 陈安伟, 华浩瑞, 李鹏, 等. 实时电价机制下交直流混合微网优化运行方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 13-20.
CHEN Anwei, HUA Haorui, LI Peng, et al. Optimal operation of AC/DC hybrid micro-grid based on real-time price mechanism[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 13-20.
- [12] 齐琛, 汪可友, 李国杰, 等. 交直流混合主动配电网的分层分布式优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(7): 1909-1917.
QI Chen, WANG Keyou, LI Guojie, et al. Hierarchical and distributed optimal scheduling of AC/DC hybrid active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(7): 1909-1917.
- [13] EAJAL A A, SHAABAN M F, PONNAMBALAM K, et al. Stochastic centralized dispatch scheme for AC/DC hybrid smart distribution systems[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1046-1059.
- [14] 于立杰, 董沛毅. 多端柔性直流配电网运行策略优化研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(9): 78-84, 93.
YU Lijie, DONG Peiyi. Operation strategy optimization of multi-terminal flexible DC distribution network[J]. Smart Power, 2018, 46(9): 78-84, 93.
- [15] 王家融, 艾欣, 王坤宇, 等. 基于增广雅可比矩阵的交直流解耦潮流新算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1382-1389.
WANG Jiarong, AI Xin, WANG Kunyu, et al. A novel AC-DC decoupled power flow calculation method based on the augmented jacobian matrix[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1382-1389.
- [16] 包宇庆, 王蓓蓓, 李扬, 等. 考虑大规模风电接入并计及多时间尺度需求响应资源协调优化的滚动调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4589-4599.
BAO Yuqing, WANG Beibei, LI Yang, et al. Rolling dispatch model considering wind penetration and multi-scale demand response resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4589-4599.
- [17] 姚建国, 杨胜春, 王珂, 等. 平衡风功率波动的需求响应调度框架与策略设计[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(9): 85-92.
YAO Jianguo, YANG Shengchun, WANG Ke, et al. Framework and strategy design of demand response scheduling for balancing wind power fluctuation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(9): 85-92.
- [18] 杨胜春, 刘建涛, 姚建国, 等. 多时间尺度协调的柔性负荷互动响应调度模型与策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(22): 3664-3673.
YANG Shengchun, LIU Jiantao, YAO Jianguo, et al. Model and strategy for multi-time scale coordinated

- flexible load interactive scheduling[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(22): 3664-3673.
- [19] 董雷, 陈卉, 蒲天骄, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度动态优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(17): 4609-4616.
- DONG Lei, CHEN Hui, PU Tianjiao, et al. Multi-time scale dynamic optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(17): 4609-4616.
- [20] 任佳依, 顾伟, 王勇, 等. 基于模型预测控制的主动配电网多时间尺度有功无功协调调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1397-1407.
- REN Guiyi, GU Wei, WANG Yong, et al. Multi-time scale active and reactive power coordinated optimal dispatch in active distribution network based on model predictive control[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(5): 1397-1407.
- [21] 张伯明, 吴文传, 郑太一, 等. 消纳大规模风电的多时间尺度协调的有功调度系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(1): 1-6.
- ZHANG Boming, WU Wenchuan, ZHENG Taiyi, et al. Design of a multi-time scale coordinated active power dispatching system for accommodating large scale wind power penetration[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(1): 1-6.
- [22] 徐玉韬, 谈竹奎, 郭力, 等. 贵州电网柔性直流配电系统设计方案[J]. 供用电, 2018, 35(1): 34-39.
- XU Yutao, TAN Zhukui, GUO Li, et al. Design scheme of flexible DC power distribution system in Guizhou Power Grid[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1): 34-39.
- [23] 徐玉韬, 谈竹奎, 乔真, 等. 在能源互联网背景下交直流混合微电网的研究[J]. 电器与能效管理技术, 2017(18): 8-16.
- XU Yutao, TAN Zhukui, QIAO Zhen, et al. Study of hybrid AC/DC micro-grid under the background of energy internet[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(18): 8-16.
- [24] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.
- LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.
- [25] 徐伟宣, 何建秋, 邹庆云. 目标函数带绝对值号的特殊非线性规划问题[J]. 中国管理科学, 1987(3): 9-13.
- XU Weixuan, HE Jianqiu, ZOU Qingyun. Special nonlinear programming problem with absolute value of the objective function[J]. Chinese Journal of Management Science, 1987(3): 9-13.
- [26] LI X, GUO L, LI Y, et al. A unified control for the DC-AC interlinking converters in hybrid AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(6): 6540-6553.
- [27] LI X, GUO L, LI Y, et al. Flexible interlinking and coordinated power control of multiple DC microgrids clusters[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 904-915.

收稿日期: 2018-12-13; 修回日期: 2019-08-21

作者简介:

徐玉韬(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为柔性直流配网运行与控制、分布式电源及微电网; E-mail: 95616048@qq.com

郭力(1981—), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为微电网优化规划、协调控制和高级能量管理; E-mail: liguo@tju.edu.cn

吴家宏(1979—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为微电网运行与控制。E-mail: wujiahong@sf-auto.com

(编辑 周金梅)