

改进下垂控制下的中压直流配电系统 双时间尺度分层调控方法

肖迁, 陆文标*, 贾宏杰, 穆云飞, 余晓丹

(智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072)

Dual-time-scale Hierarchical Regulation and Control for Medium-voltage DC Distribution System Under Improved Droop Control

XIAO Qian, LU Wenbiao*, JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China)

ABSTRACT: In the medium-voltage DC distribution system (MVDC-DS), there are some moments when the loads surge or the renewable energy sources (RESs) fluctuate greatly. Under these conditions, the conventional regulation and control strategies have the problems that the scheduling plan is not economically optimal and the DC bus voltages are easy to violate. To solve these issues, a dual-time-scale hierarchical regulation and control method based on the improved droop control is proposed for the MVDC-DS in this paper. First, a ± 10 kV three-terminal hybrid modular multilevel converter (MMC)-based ring MVDC-DS is constructed with DC fault ride-through capability. This system integrates electric vehicle (EV) charging stations, energy storage system (ESS), distributed photovoltaic and wind turbines. Next, in order to improve the system stability under load surging, this paper improves the conventional droop control based on the tan-function. Then, a dual-time-scale hierarchical regulation and control method is proposed. In the long time-scale scheduling layer, the reference power of MMC is optimized to minimize the total operating cost. In the short time-scale control layer between converters, the droop control is improved and the control parameters are optimized to make a compromise between the economy and voltage quality. Finally, a case verifying the effectiveness of the proposed method is given as follows: By optimizing the scheduling of flexible resources, the total operating cost can be reduced by about 11%; when the load of a data center increases by 100%, all DC bus voltages can be bounded within the allowable range of $\pm 3\%U_N$ (rated voltage).

KEY WORDS: medium-voltage DC distribution system (MVDC-DS); hierarchical regulation and control; dual-time-scale optimization; improved droop control; parameter optimization

摘要: 针对中压直流配电系统, 在负荷激增、可再生能源出力突变等特殊工况下, 传统优化调度方案与协调控制策略存在系统运行经济性有待提升、直流母线电压易越限的问题。为此, 提出一种基于改进下垂控制的中压直流配电系统双时间尺度分层调控方法。首先, 构建一种具备直流故障穿越能力的 3 端混合型模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)环状 ± 10 kV 中压直流配电系统, 该系统含电动汽车充电站、储能系统、分布式光伏与风电等灵活性资源。其次, 制定各单元协调控制策略, 并采用 tan 函数改进传统下垂控制, 以提高系统应对大幅功率波动的能力。然后, 基于改进控制策略提出一种双时间尺度分层优化调控方法: 在长时间尺度的系统调度层, 以运行总成本最小为优化目标, 确定各换流器参考功率; 在短时间尺度的换流器间协调控制层, 改进下垂曲线, 并优化控制系数, 以兼顾系统运行经济性与电能质量。最后, 以典型算例验证该文所提优化调度方案及协调控制策略的有效性: 通过灵活调度多种柔性资源, 系统运行总成本可降低约 11%; 在某数据中心负荷激增 100% 的工况下, 各直流母线电压波动仍能维持在 $\pm 3\%U_N$ (额定电压)的允许范围内。

关键词: 中压直流配电系统; 分层协调控制; 双时间尺度优化; 改进下垂控制; 系数优化

0 引言

随着电力电子技术、新能源发电技术的快速发展, 供能侧大量可再生能源(renewable energy sources, RESs)逐渐接入中压配电系统, 用户侧负荷需求愈发灵活多样, 同时, 储能设备也得到广泛

基金项目: 国家自然科学基金项目(52107121, 52222704, U2066213)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52107121, 52222704, U2066213).

配置^[1-3]。配电系统运行、控制呈复杂化、多样化趋势,其运行经济性、安全性等多方面受到严峻考验^[4]。中压直流配电系统(medium-voltage dc distribution system, MVDC-DS)具有容量大、损耗小、可靠性高的优势,与交流系统相比,不存在系统间同步运行的稳定性问题^[5-6],其特有的直流组网技术有利于 RESs、电动汽车(electric vehicle, EV)充电站、储能系统(energy storage system, ESS)、直流和变频负荷的高效接入与灵活管理,是一种有效应对前述考验与问题的新型配电系统发展方向^[7]。因此, MVDC-DS 具有广泛的应用前景与重要的社会意义。运行优化调度技术与协调控制技术作为 MVDC-DS 关键环节,是实现系统经济、安全运行的重点。

在直流配电网优化调度方面,现有文献已就直流配电系统潮流计算与分层调度开展了深入研究。文献[8-9]对基于下垂控制的多端互联交直流混合配电网分层潮流控制策略、系统稳定性进行深入研究。文献[10]建立直流配电网-换流站-交流配电网的三层结构,采用目标级联分析方法,进行系统分散式潮流计算。但前述研究尚未充分挖掘新型配电系统中 EV 充电站、储能系统等多种灵活性资源的调度潜力。为此,文献[11-12]针对交直流混合配电网,提出一种基于二阶段鲁棒博弈模型的优化调度方法,通过对换流器、储能系统的优化管理与实时控制,平抑 RESs 不确定性对系统优化调度与稳定性的影响。文献[13]针对多电压等级直流配电网,提出一种自适应多时间尺度滚动优化调度方法,高效利用储能系统,实现强随机性源荷接入背景下的直流配电网经济运行,但其并未考虑电动汽车这类重要灵活负荷。文献[14]中系统调度中心通过与电动汽车充电站签订充电合同,将具有较高不确定性的电动汽车负荷转化为确定性负荷,并以最小化日前调度成本与最小化联络线功率波动为目标进行直流配电网的调度优化。上述能量管理研究仅从调度方案制定的角度考虑了 RESs 和负荷的随机波动与不确定性,并未探讨在实际运行时这种随机波动对系统动态响应及运行经济性、安全性的影响。

源荷的不确定性与波动性会引起直流配电系统母线电压的波动,而母线电压的稳定是保证系统安全运行的必要条件^[15]。目前,众多学者已对直流配电网电压控制进行了深入研究,并提出了主从控制、下垂控制等典型控制策略^[16-17]。在此基础上,

文献[18]将优化调度与控制策略相结合,以线路损耗最小为目标,构建一种基于下垂控制的直流配电网鲁棒优化模型,该模型下的协调控制策略能够使系统适应 RESs 随机波动。文献[19]构建一种双时间尺度能量管理框架,在长时间尺度制定调度策略,在短时间尺度优化控制系数。相比于其他优化调度研究,上述两种方法分析了 RESs 与负荷实时波动对系统运行的影响,但尚未深入分析系统动态响应特性。

为同时提升系统层优化调度的经济性,与设备层换流器的动态响应能力,本文提出一种基于改进下垂控制的中压直流配电系统双时间尺度分层调控方法。首先,构建含有 EV 充电站、储能系统、分布式光伏与风电的 3 端混合型 MMC 环状 $\pm 10\text{kV}$ 中压直流配电系统,该系统可实现直流故障穿越。其次,根据各单元运行特性,制定基于主从控制的协调控制策略,并采用 \tan 函数改进下垂控制。然后,提出一种基于 \tan 形式下垂控制的双时间尺度分层优化调控方法:在长时间尺度的系统调度层,以运行总成本最小为优化目标,确定各个换流器的参考运行点,制定 EV 充电站和储能系统的调度方案;在短时间尺度的换流器间协调控制层,改进下垂控制,优化下垂系数,解决在负荷激增等特殊工况下,直流母线电压易越限等问题。最后,通过算例分析验证所提优化调度方案及协调控制策略的有效性。

1 中压直流配电系统概况

环状中压直流配电系统的典型拓扑结构如图 1 所示,该系统主要由中压交流(medium-voltage AC, MVAC)系统、模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)、电动汽车充电站、储能系统、分布式光伏与风电及多类型负荷共同组成。其中, MVDC-DS 经中压(额定电压 U_N 为 $\pm 10\text{kV}$)直流母线连接,呈环状拓扑,其他单元在不同位置接入该母线,并从该母线吸收功率或向该母线注入功率:3 个 MVAC 系统均为电压、频率稳定的系统,为该 MVDC-DS 提供稳定电能; MMC 采用全桥子模块与半桥子模块共同组成的混合型拓扑结构,实现交直流变换,相比于传统的电压源换流器(voltage source converter, VSC),其输出电能质量较高,且混合型拓扑结构使其具备直流故障穿越能力^[20]; EV 充电站、储能系统、MMC 由调度中心管理,并

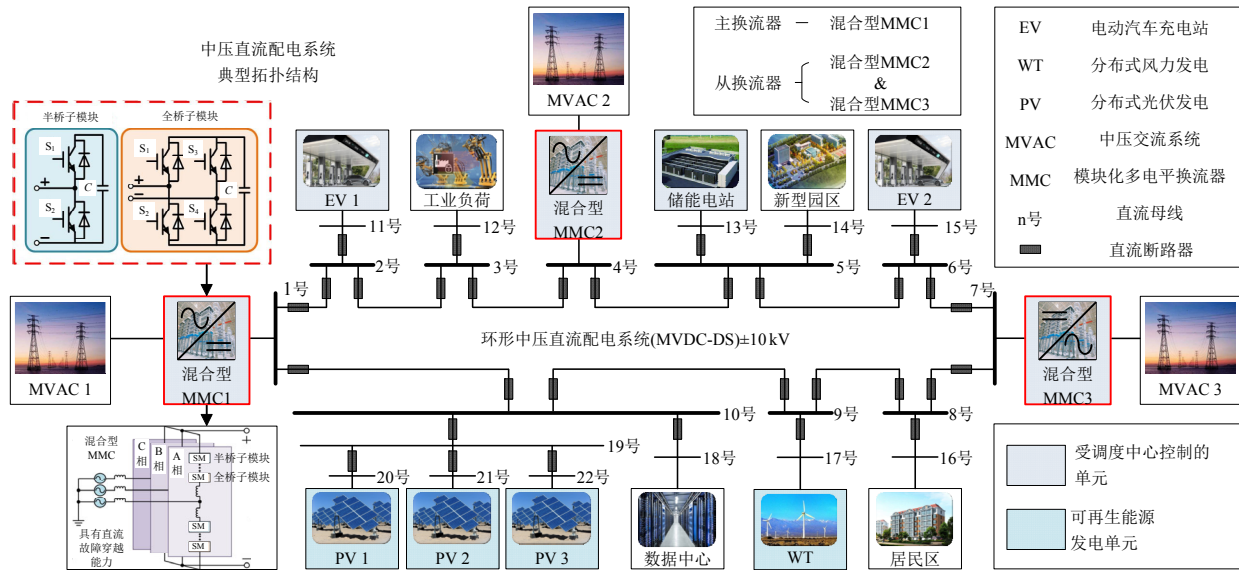


图 1 中压直流配电系统典型拓扑结构图

Fig. 1 Typical topology of the MVDC-DS

结合自身运行状态执行下发的调度指令；分布式光伏与风力发电为可再生能源发电单元，与由工业负荷、新型园区、居民区及数据中心组成的多类型负荷，共同分散接入到该 MVDC-DS 中。

需要说明的是，在本文所提 MVDC-DS 中，EV 充电站内配置独立的储能设备。在调度中心根据充电站签订的合同及分时电价向其下发充电指令后，EV 充电站通过内部优化 EV 充电量及储能充放电量的形式执行指令。在该过程中，调度中心无需考虑充电站内是否有 EV 正在进行充电，因此，EV 充电的不确定性不影响调度指令的正常执行。

在该 MVDC-DS 正常运行时，调度中心基于获取的预测数据，滚动优化调度方案，并将调度指令下发给受调度中心控制的单元。受控单元的本地控制器在接收到调度指令后，结合当前自身运行状态，于规定的时间内执行调度指令。

2 中压直流配电系统的控制策略

本文构建的环状中压直流配电系统含有多种类型单元，系统运行控制较为复杂，为提升系统实际运行性能，需为包括 MMC 在内的各单元，选取合适的协调控制策略。

2.1 MMC 主换流器控制方式

直流母线电压的稳定是直流配电系统控制的核心问题。本文选用一种典型的协调控制策略——主从控制^[17]，该控制策略中主换流器采用的定电压控制能够稳定直流母线电压。不失一般性，本文在图 1 所提 MVDC-DS 中将 MMC1 设置为主换流器。

2.2 储能系统、EV 充电站等单元控制方式

在中压直流配电系统中，调度中心通常以运行成本最小、线路损耗最小等为目标，优化储能系统、EV 充电站、RESs 等单元的输入、输出功率，制定日前/日内调度策略，并下发调度指令。系统在该指令规定的参考功率下运行，可实现前述调度目标。采用定功率控制的单元能够维持其输出功率为恒定数值。因此，本文设置储能系统、EV 充电站、RESs 等单元控制方式为定功率控制。

2.3 MMC 从换流器控制方式

若主从控制中的 MMC 从换流器均采用定功率控制方式，系统将无法保证 RESs 和负荷波动时的系统运行经济性与安全性。而下垂控制能够兼顾定电压控制“稳定电压”与定功率控制“稳定功率”的特点^[16]。另一方面，通过选取不同的下垂系数，改变下垂曲线特性，能够进一步提高 MVDC-DS 应对 RESs 与负荷波动的能力，优化系统运行经济性。因此，将下垂控制应用于 MVDC-DS 中的 MMC 从换流器，较为合适。

2.3.1 传统下垂控制

传统下垂控制的下垂曲线函数表达式通常如式(1)所示，其简要控制框图如图 2 右上图所示，其具体实现过程可参见文献[21-23]。

$$-\frac{P_{ref} - P}{P_{ref}} = D_{droop} \left(\frac{V_{ref} - V}{V_{ref}} \right) \quad (1)$$

式中： P 与 V 分别为实际功率与实际电压； P_{ref} 与 V_{ref} 分别为参考功率与参考电压； D_{droop} 为下垂系数。

在 MVDC-DS 实际运行时，若系统出现现轻微波

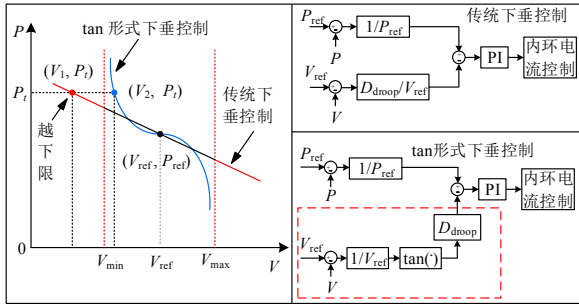


图2 传统下垂控制与 tan 形式下垂控制对比图

Fig. 2 Comparison of conventional droop control and improved droop control

动，即：RESs 出力或负荷需求小幅度波动时，功率与电压偏离较小，传统的下垂控制能够维持系统稳定运行；若系统出现较大波动，即：RESs 出力或负荷需求大幅度变化时，如图2中“传统下垂控制”曲线所示，该MMC从换流器将运行在 P_{ref} 以上的 (V_1, P_1) 点，电压将低于母线电压允许下限值，影响系统安全稳定运行。

2.3.2 改进下垂控制

为提高下垂控制在系统出现较大扰动时对电压偏差的敏感性，本文将传统下垂控制曲线改进为图2中蓝色“tan形式下垂控制”曲线，具体可表示为

$$-\frac{P_{ref} - P}{P_{ref}} = D_{droop} \tan\left(\frac{V_{ref} - V}{V_{ref}}\right) \quad (2)$$

当系统出现较大波动时，MMC的直流电压偏离参考值较多。此时，tan形式下垂控制将大幅度提高MMC输出功率，使下垂曲线几乎垂直于V轴，呈现近似定电压控制的特性。其将直流电压钳制在允许波动范围内的下限之上，保证电压不越限。

为从理论上分析tan形式下垂控制保证电压不越限的原因，将式(2)右侧在参考运行点 (V_{ref}, P_{ref}) 附近进行Taylor展开，如式(3)所示。

$$-\frac{P_{ref} - P}{P_{ref}} = D_{droop} \left(\frac{V_{ref} - V}{V_{ref}} \right) + \frac{1}{3} D_{droop} \left(\frac{V_{ref} - V}{V_{ref}} \right)^3 + o\left[\left(\frac{V_{ref} - V}{V_{ref}} \right)^3 \right] \quad (3)$$

可见，tan形式下垂控制函数Taylor展开的首项即为传统下垂控制函数式，因此，其“维持电压”的特性将由其他项决定。当系统波动导致的电压偏差 $(V - V_{ref})$ 不大时，Taylor展开式的高次项接近于零，控制效果近似于传统下垂控制；当系统电压偏差过大时，其三次项 $(V - V_{ref})^3$ 及高次项发挥作用，大幅度提高输出功率，使其控制效果近似于定电压控制。

需要说明的是，tan函数在该电压允许波动范围内为连续函数，因此，该改进下垂控制能够实现下垂控制特性与定电压控制特性的自动无缝切换。

3 双时间尺度分层调控方法

以上述MVDC-DS的协调控制策略为基础，本节提出基于改进下垂控制的MVDC-DS双时间尺度分层调控方法，并从以下3方面进行介绍：双时间尺度分层调控框架、长时间尺度系统调度层的参考运行点优化、短时间尺度换流器间协调控制层下垂控制优化。

3.1 双时间尺度分层调控框架

本文将长、短两种时间尺度的分层调控相结合，形成双时间尺度分层调控框架。在长时间尺度下，以系统运行总成本最小为优化调度目标，根据分布式光伏、风电出力及负荷的长时间尺度预测数据，确定各个MMC、储能系统、EV充电站的调度指令。在短时间尺度下，以系统调度层制定的调度方案为基础，根据短时间尺度预测数据，优化MMC从换流器的控制系数，从而使MVDC-DS具备能够快速响应RESs和负荷不确定性与波动性的能力，进一步降低系统运行总成本，同时保证系统母线电压不越限。所提双时间尺度分层调控的滚动优化过程如图3所示。

在本文所提分层调控方法中，每隔一段时间触发一次长时间尺度优化^[24-26]，该时间间隔定义为“优化间隔” T_{opt} ；调度中心发送调度指令到MMC、储能系统、EV充电站的时刻，定义为“调度指令时刻”；每相邻两个“调度指令时刻”之间的间隔定义为“调度间隔” Δt_L ，该间隔也是短时间尺度优化触发的间隔；“调度间隔”内的时刻定义为“中间时刻”，每相邻两个“中间时刻”之间的间隔定义为“中间间隔”。本文将“调度间隔”设置为10min，将“中间间隔”设置为1min。以MMC从换流器的传统下垂控制为例，“调度指令时刻”、“调度间隔”、“中间时刻”如图4所示。

为充分利用储能系统与EV充电站“低储高发”提高系统运行经济性的特性，本文将长时间尺度下参考运行点优化的单次优化总时长，设置为EV充电站签订的合同中连续3个响应阶段时长之和，优化间隔 T_{opt} 设置为1h^[26]。为兼顾求解速度与求解准确度，根据“短期预测比长期预测效果会更好”的性质^[27]，将长时间尺度优化时段分为“精确预测时

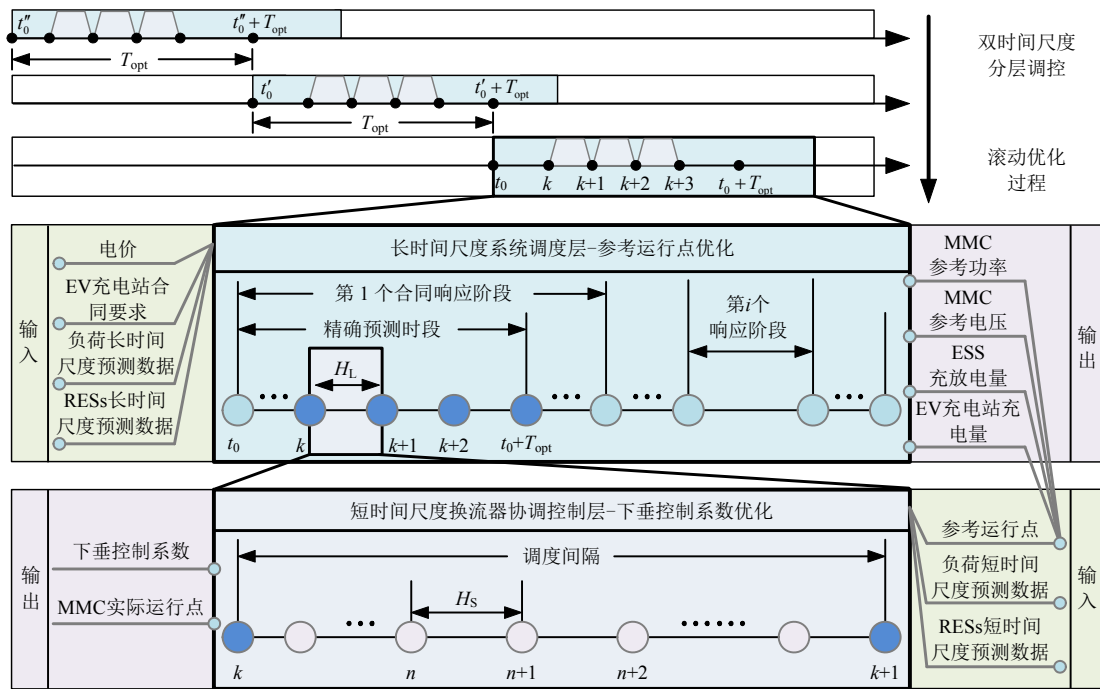


图 3 双时间尺度分层调控的滚动优化过程示意图

Fig. 3 Schematic diagram of rolling optimization with dual-time-scale hierarchical regulation and control

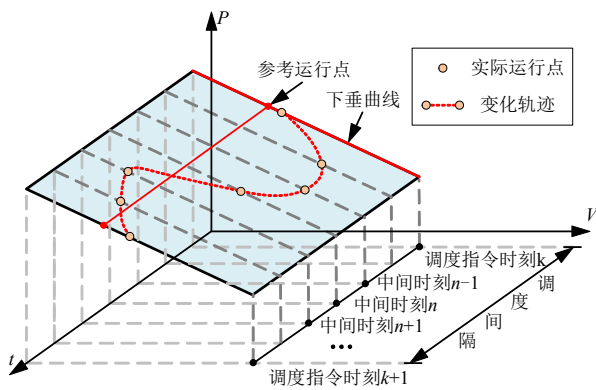


图 4 “调度指令时刻”、“调度间隔”、“中间时刻”的关系示意图

Fig. 4 Relationship of "dispatching time points",

"dispatching interval" and "intermediate time points"

“其他时段”，“精确预测时段”设置为距离“调度指令时刻”最近的 1h。在这 1h 内，待优化变量的优化步长为“调度间隔”，即为 10 min，在“其他时段”中，待优化变量的优化步长 Δt_h 为 1h。参考运行点优化结束后，仅在“精确预测时段”内进行短时间尺度优化。这种优化方法能够相对减少优化变量数量、加快求解速度，同时充分利用 RESs 和负荷的短时间尺度预测数据，提高系统运行经济性。

3.2 长时间尺度下系统调度层的参考运行点优化

在本文所提的 $\pm 10\text{kV}$ 环状 MVDC-DS 中，除负荷之外的所有单元(MMC、EV 充电站、储能系统等)，均由调度中心统一管理、控制。

根据前述“双时间尺度分层调控框架”内容，

长时间尺度系统调度层，将以 RESs 与负荷的长时间尺度预测数据、电价、EV 充电站签订的合同要求为输入，以系统运行总成本最小为优化目标，制定 MMC 参考运行点、储能系统响应量、EV 充电站充电量的调度指令。

本文采用 $\pm 10\text{kV}$ 环状 MVDC-DS 的运行成本反映系统运行经济性，目标函数为

$$\begin{aligned} \min f_{\text{MMC}}^L = & \sum_{k=1}^{N_{it}} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{MMC}}} P_{\text{MMC},i}^k c_{\text{net}}^k + \sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} P_{\text{PV},i}^k c_{\text{PV}}^k + \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^{N_{\text{WT}}} P_{\text{WT},i}^k c_{\text{WT}}^k + \sum_{i=1}^{N_{\text{ESS}}} |p_{\text{ESS},i}^k| c_{\text{ESS}}^k \right) \Delta t_L + \\ & \sum_{m=1}^{N_h} \left(\sum_{i=1}^{N_{\text{MMC}}} P_{\text{MMC},i}^m c_{\text{net}}^m + \sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} P_{\text{PV},i}^m c_{\text{PV}}^m + \right. \\ & \left. \sum_{i=1}^{N_{\text{WT}}} P_{\text{WT},i}^m c_{\text{WT}}^m + \sum_{i=1}^{N_{\text{ESS}}} |p_{\text{ESS},i}^m| c_{\text{ESS}}^m \right) \Delta t_h \end{aligned} \quad (4)$$

式中： f_{MMC}^L 为长时间尺度下 MVDC-DS 的运行总成本； N_{MMC} 、 N_{PV} 、 N_{WT} 、 N_{ESS} 分别为 MMC 总数、分布式光伏与风力发电单元各自总数、储能系统总数； N_{it} 为长时间尺度参考运行点优化中“精确预测时段”所含的调度间隔 Δt_L 总数； N_h 为“其他时段”所含的优化步长 Δt_h 总数； k 与 m 分别表示第 k 个调度指令与“其他时段”中第 m 个调度指令； $p_{\text{MMC},i}$ 、 $p_{\text{PV},i}$ 、 $p_{\text{WT},i}$ 、 $p_{\text{ESS},i}$ 分别为 MMC 从交流电网传输的功率、分布式光伏与风力发电单元发电功率、储能系统充放电功率； c_{net} 、 c_{PV} 、 c_{WT} 、 c_{ESS} 分

别为 MMC 对应交流电网的实时电价、分布式光伏与风力发电单元单位发电成本、储能系统充放电能量损耗单位成本。

系统需满足的功率平衡约束如式(5)所示,任意时刻 N_{MMC} 个 MMC 从交流电网购电总功率,为该时刻下负荷需求总功率、EV 充电站充电总功率、储能系统充放电总功率、线路损耗总功率、RESs 出力总功率的代数和。

$$\sum_{i=1}^{N_{\text{MMC}}} p_{\text{MMC},i}^t = \sum_{i=1}^{N_{\text{load}}} p_{\text{load},i}^t + \sum_{i=1}^{N_{\text{EV}}} p_{\text{EV},i}^t + \sum_{i=1}^{N_{\text{ESS}}} p_{\text{ESS},i}^t + \sum_{i=1}^{N_{\text{branch}}} p_{\text{branch},i}^t - \sum_{i=1}^{N_{\text{PV}}} p_{\text{PV},i}^t - \sum_{i=1}^{N_{\text{WT}}} p_{\text{WT},i}^t \quad (5)$$

式中: $p_{\text{load},i}^t$ 、 $p_{\text{EV},i}^t$ 、 $p_{\text{branch},i}^t$ 分别为 t 时刻的负荷需求功率、EV 充电站充电功率、线路损耗功率; N_{load} 、 N_{EV} 、 N_{branch} 分别为负荷总数、EV 充电站总数、支路总数。

为保证储能系统的运行安全性,需设置 ESS 荷电状态(state of charge, SOC)上下限约束,以第 k 至 $k+1$ 个调度指令时刻为例,该约束表示为

$$\Delta E_{\text{ESS}}^k = (P_{\text{ch}}^k \eta_{\text{ch}} - P_{\text{disch}}^k / \eta_{\text{disch}}) \Delta t_L \quad (6)$$

$$\begin{cases} p_{\text{ch},i}^k = p_{\text{ESS},i}^k, p_{\text{disch},i}^k = 0, & p_{\text{ESS},i}^k > 0 \\ p_{\text{disch},i}^k = |p_{\text{ESS},i}^k|, p_{\text{ch},i}^k = 0, & p_{\text{ESS},i}^k < 0 \end{cases} \quad (7)$$

$$S_{\text{OC}}^k C_{\text{ESS}} + \Delta E_{\text{ESS}}^k = S_{\text{OC}}^{k+1} C_{\text{ESS}} \quad (8)$$

$$S_{\text{OCmin}} \leq S_{\text{OC}}^k \leq S_{\text{OCmax}} \quad (9)$$

式中: $p_{\text{ch},i}^k$ 与 $p_{\text{disch},i}^k$ 分别为第 k 个调度指令时刻储能系统的充电功率、放电功率; ΔE_{ESS}^k 为第 k 个调度间隔的充放电能量; η_{ch} 为充电效率; η_{disch} 为放电效率; C_{ESS} 为储能系统的容量; S_{OC}^k 为第 k 个调度指令时刻时储能系统的 SOC; S_{OCmax} 与 S_{OCmin} 分别为储能系统的 SOC 上下限。

在调度中心制定调度策略前, EV 充电站已和 MVDC-DS 签订了有关电量响应的合同。因此,每个充电站充电功率需满足对应的合同要求,即:

$$\sum_{k=1}^{N_{\text{con}}^u} p_{\text{EV},i}^k \Delta t_L + \sum_{m=1}^{N_{\text{con}}^m} p_{\text{EV},i}^m \Delta t_h = E_{\text{con}}^u \quad (10)$$

式中: N_{con}^u 与 N_{con}^m 为第 u 个响应阶段包含的 Δt_L 与 Δt_h 总数; E_{con}^u 为第 u 个响应阶段中规定的充电响应量。

3.3 短时间尺度下换流器间协调控制层的下垂控制优化

在短时间尺度下,调度中心根据 RESs 与负荷

的短时间尺度预测数据对各个 MMC 从换流器的下垂控制系数进行优化。其目的在于,使 MMC 从换流器能够应对 RESs、负荷的波动性与不确定性,进一步提升系统运行经济性,同时保证系统安全稳定运行。

短时间尺度下系数优化的目标为购电成本最小化,以某调度间隔为例,其目标函数为

$$f_{\text{MMC}}^S = \sum_{i=1}^{N_{\text{MMC}}} \sum_{n=1}^{N_{\text{IS}}} p_{\text{MMC},i}^n c^n \Delta t_S \quad (11)$$

式中: f_{MMC}^S 为短时间尺度下的 N_{MMC} 个 MMC 从交流电网购电的总成本; N_{IS} 为该调度间隔中所含的中间间隔个数; Δt_S 为中间间隔。

在每个中间时刻, MMC 从换流器需要满足的下垂控制约束如下:

$$-\frac{p_{\text{MMC},i}^k - p_{\text{MMC},i}^n}{p_{\text{MMC},i}^k} = D_{\text{droopi}}^k \left(\frac{v_{\text{MMC},i}^k - v_{\text{MMC},i}^n}{v_{\text{MMC},i}^k} \right) \quad (12)$$

式中: $v_{\text{MMC},i}^n$ 与 $p_{\text{MMC},i}^n$ 分别为第 n 个中间时刻的 MMC 从换流器实际电压与实际功率; $v_{\text{MMC},i}^k$ 与 $p_{\text{MMC},i}^k$ 分别为 MMC 从换流器参考电压与参考功率; $v_{\text{MMC},i}^k$ 设置为系统正常运行电压 20 kV(即 ± 10 kV); D_{droopi}^k 为待优化的下垂系数。

短时间尺度下,系统同样需满足与式(5)相似的功率平衡约束,ESS 需满足与式(6)~(9)相似的 SOC 上下限约束,在此不再赘述。

将 tan 形式下垂控制应用于本文所提模型,并引入一个能够调节下垂控制响应特性的系数 a_i^k ,如式(13)所示。

$$-\frac{p_{\text{MMC},i}^k - p_{\text{MMC},i}^n}{p_{\text{MMC},i}^k} = \frac{D_{\text{droopi}}^k}{a_i^k} \tan \left[a_i^k \left(\frac{v_{\text{MMC},i}^k - v_{\text{MMC},i}^n}{v_{\text{MMC},i}^k} \right) \right] \quad (13)$$

由于 tan 形式下垂函数 Taylor 展开后的首项即为传统下垂控制函数式,所以可将在传统下垂控制短时间尺度系数优化时得到的 D_{droopi}^k 视为 tan 形式下垂控制系数优化中的固定系数。 a_i^k 可直接取值为 1,也可根据系统控制效果进行动态调整,从而获取较为理想的响应速度与超调量。

4 算例分析

4.1 中压直流配电系统算例说明

本文基于图 1 所示的环状 ± 10 kV(U_N)中压直流配电系统验证所提优化调度方案及协调控制策略的有效性。该系统中各支路电阻率均被设置为

0.075 Ω/km, 线路长度如附表 A1 所示。各个 MMC、EV 充电站、储能系统的出力上下限如附表 A2 所设置。EV 充电站与 MVDC-DS 签订的合同要求如表 1 所示, 第 4 个响应阶段包含次日(D2)的响应要求。储能系统的容量为 28 MW·h, 不失一般性, 将 SOC 初始值设置为 20%, S_{OCmin} 为 10%, S_{OCmax} 为 90%, 充放电效率 η_{ch} 与 η_{disch} 均设置为 90%^[19]。分布式光伏与风力发电单元的单位发电成本分别为 29.6 \$(/MW·h)、39.22 \$(/MW·h), 储能系统的充放电能量损耗单位成本为 50 \$(/MW·h)^[28]。系统内各直流母线电压允许波动范围设置为 $\pm 3\%U_N$ 。

表 1 EV 充电站签订合同的要求
Table 1 Contract for EV charging stations

合同响应阶段	EV1/(MW·h)	EV2/(MW·h)
00:00-08:00	9.6	8
08:00-15:00	7	9.8
15:00-22:00	9.8	11.2
22:00-08:00(D2)	11.6	10.4

多类型负荷以及分布式光伏、风电^[19]的 24 h 预测曲线如图 5 所示, 采样间隔为 1 min。本文设置 4 类不同特性的负荷, 以体现该 MVDC-DS 对多类型负荷的接纳能力。其中负荷 1 为工业敏感负荷, 对供电可靠性与电能质量要求较高。负荷 2 为普通居民负荷, 灵活性较高, 当系统出现特殊工况时能够以切负荷的形式参与需求侧管理。负荷 3 为数据中心, 主要任务为大数据处理等, 其对供电可靠性、电能质量要求较高。负荷 4 为含有高比例 RESs 的新型园区, 其负荷数值为考虑 RESs 本地消纳后的园区净负荷, 当其数值为负时, 表示本地 RESs 产能过剩, 外送电量。

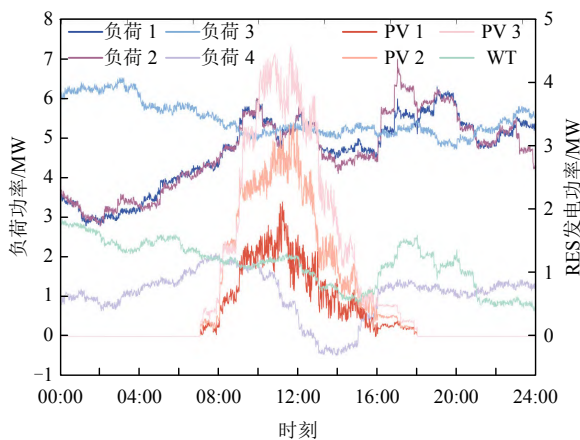


图 5 负荷、分布式光伏、风电预测曲线

Fig. 5 Curve of load, distributed PV and WT

针对本文所提模型, 系统调度中心以 RESs 与负荷预测数据为输入, 向储能系统下发滚动更新的

调度指令, 且该指令会持续滚动制定并执行, 因此, 本文不必考虑储能系统 SOC 在调度周期始末时刻保持不变的约束。

本文基于 MATLAB 平台, 采用粒子群算法求解该 ± 10 kV 环状 MVDC-DS 的双时间尺度分层调控问题。之后, 基于 MATLAB/Simulink 平台, 将分层调控优化求解的结果作为已知参数, 对 MVDC-DS 进行运行仿真, 获取系统动态响应情况, 验证所提优化调度方案及协调控制策略的有效性。

针对该 ± 10 kV 环状 MVDC-DS, 本文设置 5 种场景, 如表 2 所示, 各场景的详细说明如下。

表 2 场景设置

Table 2 Five scenarios

方案	储能系统	MMC 从换流器的控制策略
场景 1	参与优化运行	下垂控制(下垂系数优化)
场景 2	参与优化运行	下垂控制(下垂系数未优化)
场景 3	参与优化运行	定功率控制
场景 4	不参与优化运行	下垂控制(下垂系数未优化)
场景 5	参与优化运行	改进下垂控制($a=5$)

场景 1: 储能系统参与优化运行, MMC 从换流器的参考运行点由长时间尺度下的优化调度方案确定, 其下垂系数则基于预测数据由短时间尺度下的系数优化确定;

场景 2: 储能系统参与优化运行, MMC 从换流器的参考运行点同样由长时间尺度下的优化调度方案确定, 并采用下垂系数未经优化的下垂控制。其任意 1 h 内的下垂系数设置为场景 1 下每 10 min 优化一次的 6 个下垂系数的平均值;

场景 3: 储能系统参与优化运行, MMC 从换流器采用定功率控制方式, 即仅通过长时间尺度下的参考运行点优化制定 MMC 从换流器的运行指令;

场景 4: 储能系统不参与优化运行, 其他设置与场景 2 相同;

场景 5: 储能系统参与优化运行, MMC 从换流器的参考运行点同样由长时间尺度下的优化调度方案确定, 并采用改进 tan 形式下垂控制。

4.2 中压直流配电系统经济性分析

5 种场景下的系统运行总成本与线路总损耗如表 3 所示。本节基于该表依次分析 EV 充电站、储能系统、不同控制策略对系统运行经济性的影响。

4.2.1 EV 充电站合同响应情况分析

图 6 为 EV1、EV2 充电站充电功率与电价的 24 h 变化曲线。2 个 EV 充电站第 1 个响应阶段为 00:00—08:00, 其中, 07:00—08:00 时段电价较高,

表3 系统运行总成本与线路总损耗

Table 3 Total cost and total line loss

方案	运行总成本/\$	线路总损耗/(kW·h)
场景1	31 209	959.6
场景2	31 231	965.2
场景3	31 465	982.3
场景4	34 877	882.5
场景5	31 225	960.5

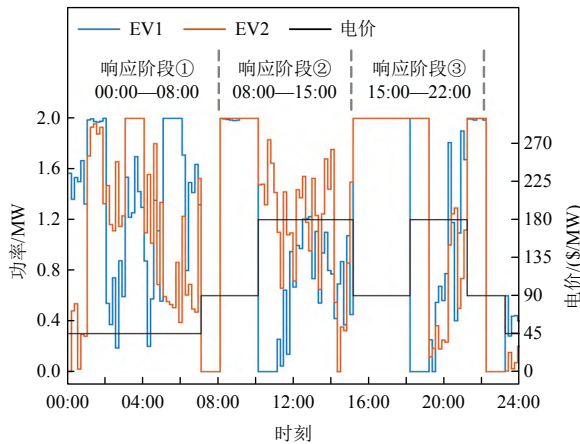


图6 电动汽车充电站的优化调度情况与电价曲线

Fig. 6 Optimal dispatching of EV charging station and price curve

在本文所提优化调度方案下，系统调度中心倾向于向2个EV充电站制定后期尽量不充电的调度指令，即在07:00—08:00时段内，2个EV充电站充电指令均为0MW。第2、3、4个响应阶段内EV充电站响应情况与第一个响应阶段类似，在此不再赘述。需要说明的是，本文以某一个典型日00:00—24:00时段优化调度结果说明该方法有效性，仅绘制第4个响应阶段(22:00—08:00(D2))内的22:00—24:00时段EV充电站响应情况。

因此，本文所提分层优化调控方法能够依据电价及EV充电站签订的合同，动态调整充电指令，在电价较高时，降低充电量，在电价较低时，增加充电量，以较小的系统运行总成本完成合同要求。

4.2.2 储能系统对系统运行经济性的影响及分析

对比表3中场景2与场景4下的系统运行总成本，可知当MMC从换流器采用相同的控制策略时，储能系统不参与优化调度(场景4)时的运行总成本为34877美元，储能系统参与优化调度(场景2)时的运行总成本为31231美元，运行总成本降低约11%。即本文所提的分层优化调控方法可以通过灵活调度储能系统，实现系统运行经济性的显著提升。

储能系统SOC与电价变化曲线如图7所示。储能系统充电时段集中在00:00—10:00与15:00—

18:00两个低电价时段，放电时段集中在10:00—15:00与18:00—21:00两个高电价时段，实现“低储高发”，降低运行总成本，提高系统运行经济性。

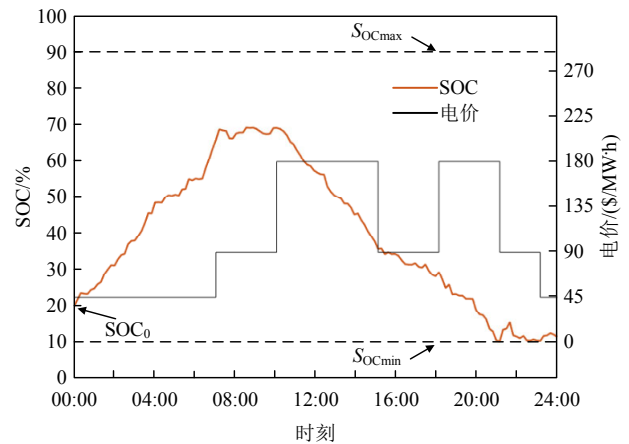


图7 储能系统SOC与电价变化曲线

Fig. 7 SOC of ESS and price curve

4.2.3 控制策略对系统运行经济性的影响及分析

对比表3中场景1-3的运行总成本，可知相比于定功率控制，当MMC从换流器采用下垂控制时，系统运行总成本较小。为详细分析优化下垂控制系数的必要性，以场景3下的运行总成本为基准值，引入成本降低指标，其计算公式如表4所示。其中： $D_{13,t}$ 与 $D_{23,t}$ 分别为第t小时的场景1与场景2相对于场景3的系统运行总成本降低程度； $f_{MMC,t}^{S1}$ 、 $f_{MMC,t}^{S2}$ 与 $f_{MMC,t}^{S3}$ 分别为第t小时的场景1-3的系统运行总成本。

表4 成本降低程度指标及计算公式

Table 4 Indicators of cost reduction and its calculation formula

成本降低指标	计算公式
$D_{13,t}$	$(f_{MMC,t}^{S3} - f_{MMC,t}^{S1}) / f_{MMC,t}^{S3} \times 100\%$
$D_{23,t}$	$(f_{MMC,t}^{S3} - f_{MMC,t}^{S2}) / f_{MMC,t}^{S3} \times 100\%$

可视化场景1与场景2两种下垂控制系数下的MVDC-DS运行总成本降低程度，如图8所示。可见，当系统波动不大、短时间尺度预测数据较为精确时，所提方法对系统经济性的提升效果甚微。当系统波动增加时，如10:00—15:00时段，图5所示的3个分布式光伏的发电功率波动增加，场景1、2的成本降低程度相较于其他时段较高。原因在于：该时段内，场景3中定功率控制的换流器不能快速响应这种强波动。但MMC从换流器能够基于下垂曲线，在电压允许范围内自动调节实际运行点，降低系统运行总成本。另一方面，在任意时段，场景1(下垂系数经过优化)的系统运行总成本降低程度

都高于场景 2(下垂系数未优化), 即短时间尺度内下垂系数的优化能够进一步降低系统运行总成本。

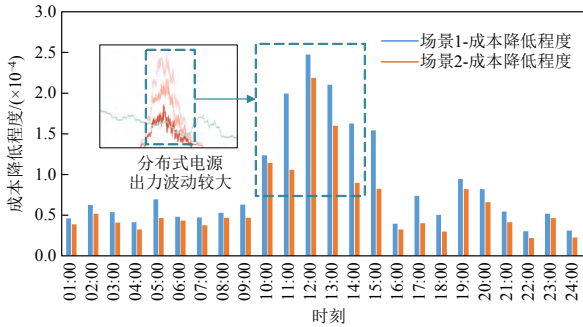


图 8 场景 1 与场景 2 下的成本降低程度

Fig. 8 Cost reduction in the scenario 1 and scenario 2

4.3 中压直流配电系统安全性分析

4.3.1 中压直流配电系统电能质量分析

通过上述场景对比可知, 基于下垂控制的双时间尺度分层调控方法能够提高系统运行经济性。为说明本文所提的 tan 形式下垂控制的优势, 选取场景 5 与其他场景的优化调度方案及协调控制策略结果进行对比分析, 并引入电压偏离率 $R_{Vdev,i}^t$ 与电压偏离指标 I_{Vdev}^R , 其计算公式如表 5 所示。其中: V_i^t 为第 i 个节点在第 t 个“中间时刻”的实际电压; N_{24h}^R 为电压偏离率在 $(0,R)$ 内的所有“中间时刻”数量。针对该算例, N_{24h} 为 22 个节点在 24 h 内以 1 min 为采样步长的“中间时刻”总数量, 即为 $22 \times 24 \times 60 = 31680$ 个。电压偏离指标 I_{Vdev}^R 表示满足最大电压偏离率为 R 的“中间时刻”数量所占百分比。

表 5 电压偏离率、电压偏离指标及计算公式

Table 5 Calculation formula of voltage deviation rate and voltage deviation indicator

电压偏离变量与指标	计算公式
$R_{Vdev,i}^t$	$ (V_i^t - V_{ref}) / V_{ref} \times 100\%$
I_{Vdev}^R	$N_{24h}^R / N_{24h} \times 100\%$

绘制不同场景电压偏离率在 $0 \sim 8 \times 10^{-3}$ 的电压偏离指标 I_{Vdev} 变化曲线, 如图 9 所示。当最大电压偏离率为 7×10^{-3} 时, 所有节点在任意中间时刻的电压都满足条件, 不同场景的 I_{Vdev} 均达到 100%。随着最大电压偏离率的降低, 能够满足条件的数量将呈现不断减小的趋势。在任意最大电压偏离率下, 采用 tan 形式下垂控制的场景 5 的 I_{Vdev}^R , 与采用传统下垂控制并优化下垂系数的场景 1 的 I_{Vdev}^R , 都高于采用其他场景的 I_{Vdev}^R , 且 tan 形式下垂控制下系统 I_{Vdev}^R 最高。在电压偏离率为 0.308% 时, 两者 I_{Vdev}^R 均达到 90% 以上。

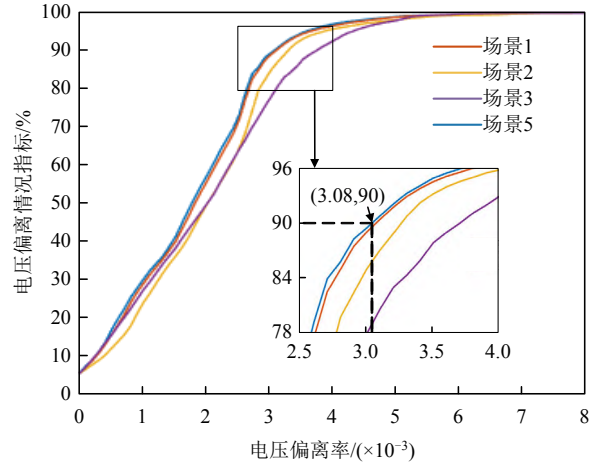


图 9 不同控制方式下的电压偏离情况

Fig. 9 Voltage deviation under different control modes

因此, 传统的下垂控制与 tan 形式下垂控制均能有效应对 RESs 和负荷的不确定性与小幅度波动, 减小稳态运行时的电压偏离, 有助于提高电能质量。

4.3.2 中压直流配电系统特殊工况运行分析

当 RESs 与负荷的短时间尺度预测数据出现较大偏差, 或实际生产生活中由于其他不可控事件使系统出现较大波动时, MVDC-DS 的直流母线电压将出现较大偏离, 从而影响系统的安全稳定运行。为进一步分析 tan 形式下垂控制在应对特殊工况时的有效性, 假设在 10:10—10:20 时段的 10:10:03 时刻, 节点 18 的数据中心负荷由原来的 4.8 MW 激增 100% 至 9.6 MW。

在 MATLAB/Simulink 仿真环境中, 该特殊工况下, 对比式(13)中参数 a 取 5 和 10 时的场景 5 下的节点 18 电压 V_{18} , 及场景 1 下的 V_{18} , 3 者的电压响应情况如图 10 所示。当 MMC 从换流器采用

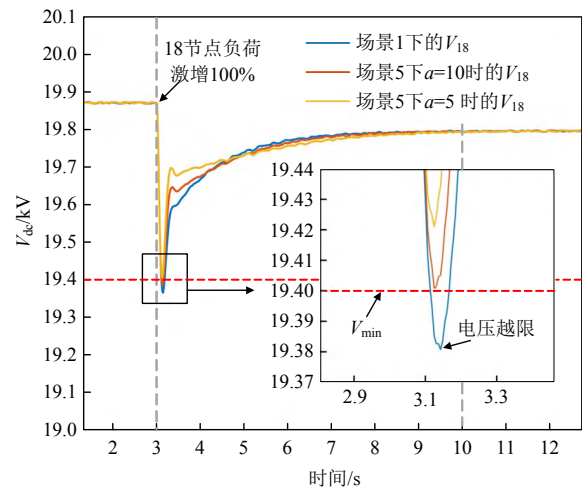


图 10 数据中心负荷发生激增情况下的 V_{18} 变化情况

Fig. 10 V_{18} under the data center load surging

场景 1 的优化下垂系数的下垂控制时, V_{18} 将大幅度跌落, 超过电压允许波动范围的下限, 即 $20 \times (1-3\%) \text{kV} = 19.40 \text{kV}$ 。当系统的 MMC 从换流器采用 tan 形式下垂控制时, V_{18} 将在允许波动范围之内, 且其响应特性会随着 a 的变化而改变。当 a 数值取值较小时, MMC 从换流器能够更为快速地响应负荷激增, 减小电压跌落幅值。

因此, 与传统下垂控制相比, 所提 tan 形式下垂控制能更好的应对 RESs 和负荷的大幅度波动, 提高特殊工况下直流配电系统运行安全性。

5 结论

本文以中压直流配电系统为研究对象, 为解决传统优化调度方案与协调控制策略难以应对负荷激增、RESs 出力突变等特殊工况的问题, 提出了一种基于 tan 形式下垂控制的双时间尺度分层调控方法。以 $\pm 10 \text{kV}$ 环状 MVDC-DS 为算例, 验证了所提优化调度方案及协调控制策略的有效性, 结论如下:

1) 本文构建的 3 端混合型 MMC 环状 $\pm 10 \text{kV}$ 中压直流配电系统典型拓扑, 具备直流故障穿越能力, 且包含电动汽车充电站、储能系统、分布式光伏与风电等灵活性资源与多类型负荷, 可在多种不同工况下稳定运行, 供电可靠性较高;

2) 本文所提出的双时间尺度分层调控方法, 能够通过系统层调度指令与换流器层控制系数的协同优化, 灵活应对 RESs 和负荷等单元的不确定性、波动性, 提高系统经济效益, 最高可降低系统运行总成本约 11%;

3) 在正常工况下, 相比于传统下垂控制, 采用本文所提 tan 形式下垂控制的 MVDC-DS, 电压偏离较小, 满足电压偏离率为 0.308% 的所有“中间时刻”数量占比高达 90% 以上, 系统电能质量得到有效提高;

4) 在特殊工况(如某负荷激增 100%)下, 基于所提的 tan 形式下垂控制, 系统内所有 MMC 均能正常工作, 系统直流母线电压始终不低于 $97\%U_N$ 的安全运行下限。

在本文所提优化调度方案及协调控制策略下, MVDC-DS 的运行经济性与电能质量均得到有效提升, 同时可在多种工况下稳定运行。后续, 将进一步研究该系统中改进下垂控制的系数优化等问题。

参考文献

[1] 王成山, 王瑞, 于浩, 等. 配电网形态演变下的协调规

划问题与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(8): 2385-2395.

WANG Chengshan, WANG Rui, YU Hao, et al. Challenges on coordinated planning of smart distribution networks driven by source-network-load evolution[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2385-2395(in Chinese).

[2] JIA Hongjie, XIAO Qian, HE Jinwei, et al. An improved grid current and DC capacitor voltage balancing method for three-terminal hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(6): 5876-5888.

[3] XIAO Qian, CHEN Linglin, JIA Hongjie, et al. Model predictive control for dual active bridge in naval DC microgrids supplying pulsed power loads featuring fast transition and online transformer current minimization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2020, 67(6): 5197-5203.

[4] 周逢权, 黄伟. 直流配电网系统关键技术探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(22): 62-67. ZHOU Fengquan, HUANG Wei. Study on the key technology of DC distribution power network[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(22): 62-67(in Chinese).

[5] 熊雄, 季宇, 李蕊, 等. 直流配用电系统关键技术及应用示范综述[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 6802-6813.

XIONG Xiong, JI Yu, LI Rui, et al. An overview of key technology and demonstration application of DC distribution and consumption system[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 6802-6813(in Chinese).

[6] 马钊, 焦在滨, 李蕊. 直流配电网架构与关键技术[J]. 电网技术, 2017, 41(10): 3348-3357.

MA Zhao, JIAO Zaibin, LI Rui. Network structures and key technologies of DC distribution systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(10): 3348-3357(in Chinese).

[7] 刘海涛, 熊雄, 季宇, 等. 直流配电网多微网系统集群控制研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(24): 7159-7167.

LIU Haitao, XIONG Xiong, JI Yu, et al. Cluster control research of multi-microgrids system under DC distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(24): 7159-7167(in Chinese).

[8] 赵学深, 彭克, 张新慧, 等. 多端柔性直流配电系统下垂控制动态特性分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 89-96.

ZHAO Xueshen, PENG Ke, ZHANG Xinhui, et al. Analysis on dynamic performance of droop control for multi-terminal VSC based DC distribution system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2):

- 89-96(in Chinese).
- [9] 彭克, 咸日常, 张新慧, 等. 多端互联交直流配电网的潮流分层控制策略及算法[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 72-77.
PENG Ke, XIAN Richang, ZHANG Xinhui, et al. Hierarchical power flow control strategy and algorithm for multi-terminal interconnected AC/DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 72-77(in Chinese).
- [10] QI Chen, WANG Keyou, FU Yong, et al. A decentralized optimal operation of AC/DC hybrid distribution grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6095-6105.
- [11] 符杨, 张智泉, 李振坤, 等. 基于二阶段鲁棒博弈模型的微电网群及混合交直流配电系统协调能量管理策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(4): 1226-1240.
FU Yang, ZHANG Zhiquan, LI Zhenkun, et al. A two-stage robust game approach for coordinated energy management in hybrid AC/DC distribution system with microgrid clusters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4): 1226-1240(in Chinese).
- [12] 符杨, 张智泉, 李振坤. 基于二阶段鲁棒优化模型的混合交直流配电网无功电压控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(16): 4764-4774.
FU Yang, ZHANG Zhiquan, LI Zhenkun. Research on reactive power voltage control strategy for hybrid AC/DC distribution network based on two-stage robust optimization model[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(16): 4764-4774(in Chinese).
- [13] 金国彬, 潘狄, 陈庆, 等. 考虑自适应实时调度的多电压等级直流配电网能量优化方法[J]. 电网技术, 2021, 45(10): 3906-3916.
JIN Guobin, PAN Di, CHEN Qing, et al. Energy optimization method of multi-voltage-level DC distribution network considering adaptive real-time scheduling[J]. Power System Technology, 2021, 45(10): 3906-3916(in Chinese).
- [14] 金国彬, 潘狄, 陈庆, 等. 考虑源荷不确定性的直流配电网模糊随机日前优化调度[J]. 电工技术学报, 2021, 36(21): 4517-4528.
JIN Guobin, PAN Di, CHEN Qing, et al. Fuzzy random day-ahead optimal dispatch of DC distribution network considering the uncertainty of source-load[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4517-4528(in Chinese).
- [15] 林莉, 马明辉, 金鑫, 等. 考虑 VSC 交直流侧瞬态功率的直流配网母线电压鲁棒控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(17): 5827-5841.
LIN Li, MA Minghui, JIN Xin, et al. DC-bus voltage robust control of VSC considering the instantaneous power of AC- and DC-side in DC distribution network [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(17): 5827-5841(in Chinese).
- [16] 李霞林, 郭力, 黄迪, 等. 直流配电网运行控制关键技术综述[J]. 高电压技术, 2019, 45(10): 3039-3049.
LI Xialin, GUO Li, HUANG Di, et al. Research review on operation and control of DC distribution networks [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(10): 3039-3049(in Chinese).
- [17] 季一润, 袁志昌, 赵剑锋, 等. 一种适用于柔性直流配电网的电压控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 335-341.
JI Yirun, YUAN Zhichang, ZHAO Jianfeng, et al. A suitable voltage control strategy for DC distribution power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2): 335-341(in Chinese).
- [18] SUN Fengzhou, MA Junchao, YU Miao, et al. A robust optimal coordinated droop control method for multiple VSCs in AC-DC distribution network[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 5002-5011.
- [19] MA Junchao, GENG Guangchao, JIANG Quanyuan. Two-time-scale coordinated energy management for medium-voltage DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3971-3983.
- [20] 鲁晓军, 向往, 林卫星, 等. 混合型模块化多电平换流器解析建模与功率运行区间分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 76-84.
LU Xiaojun, XIANG Wang, LIN Weixing, et al. Analysis on analytical modeling and power operating zone of hybrid modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(7): 76-84(in Chinese).
- [21] 解大, 陈爱康, 喻松涛, 等. 基于下垂控制的柔性直流配电网综合调度指标和调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2828-2839.
XIE Da, CHEN Aikang, YU Songtao, et al. Research on synthetic scheduling index and scheduling strategy of multiport flexible DC distribution network with droop-control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2828-2839(in Chinese).
- [22] XIAO Qian, LU Wenbiao, JIN Yu, et al. An improved master-slave control strategy for medium voltage DC distribution system[C]//The IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration. Taiyuan: IEEE, 2021: 95-100.
- [23] XIE Xingfeng, QUAN Xiangjun, WU Zaijun, et al. Adaptive master-slave control strategy for medium voltage DC distribution systems based on a novel nonlinear droop controller[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 4765-4777.
- [24] 孙惠娟, 张乐乐, 彭春华. 基于差异化需求响应模型预测控制的微网时域滚动优化调度[J]. 电网技术, 2021,

45(8): 3096-3104.

SUN Huijuan, ZHANG Lele, PENG Chunhua. Time-domain rolling optimal scheduling of microgrid based on differential demand response model predictive control[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3096-3104(in Chinese).

[25] 王成山, 吕超贤, 李鹏, 等. 园区型综合能源系统多时间尺度模型预测优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6791-6803.

WANG Chengshan, LÜ Chaoxian, LI Peng, et al. Multiple time-scale optimal scheduling of community integrated energy system based on model predictive control [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(23): 6791-6803(in Chinese).

[26] 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(in Chinese).

[27] 李奎, 高志成, 武一, 等. 基于统计回归和非线性 Wiener 过程的交流接触器剩余寿命预测[J]. 电工技术学报, 2019, 34(19): 4058-4070.

LI Kui, GAO Zhicheng, WU Yi, et al. Remaining lifetime prediction of AC contactor based on statistical regression and nonlinear wiener process[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(19): 4058-4070(in Chinese).

[28] 张虹, 闫贺, 申鑫, 等. 面向能源社区能量管理的配网产消者分布式优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(12): 4449-4458.

ZHANG Hong, YAN He, SHEN Xin, et al. Distributed optimal scheduling for prosumer in distribution network for energy community energy management [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(12): 4449-4458(in Chinese).

[29] AHMED M M A, SALAMA M M A. Energy management of AC-DC hybrid distribution systems considering

network reconfiguration[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(6): 4583-4594.

附录 A

表 A1 中压直流配电系统线路参数

Table A1 Line parameters of MVDC-DS

支路	长度/km	支路	长度/km	支路	长度/km
1-2	4.1	9-10	5.7	9-17	0.5
2-3	4.8	1-10	6.3	10-18	1.1
3-4	5.1	2-11	1.1	10-19	2.7
4-5	7.8	3-12	0.8	19-20	1.8
5-6	12.3	5-13	0.8	19-21	2.4
6-7	11.3	5-14	1.1	19-22	2.0
7-8	3.8	6-15	1.2		
8-9	6.8	7-16	0.8		

表 A2 中压直流配电系统可控单元参数

Table A2 Controllable unit parameters of MVDC-DS

内容	MMC1	MMC2	MMC3	ESS	LD
功率上限/MW	9	9	7.5	7	-11.4
功率下限/MW	1	1	1	-7	-21.8
内容	EV1	EV2	PV	WT	
功率上限/MW	0	0	9	3.8	
功率下限/MW	-2	-2	0	0	



肖迁

在线出版日期: 2023-03-28.

收稿日期: 2022-09-27.

作者简介:

肖迁(1988), 男, 副教授, 博士生导师, 研究方向为分布式能源与配网/微网、电力电子技术(多电平变换器等)及其在综合能源系统和电池储能系统中的应用等, xiaoqian@tju.edu.cn;

*通信作者: 陆文标(1996), 男, 博士研究生, 研究方向为分布式能源与配网/微网等, wenbiaolu@tju.edu.cn;

贾宏杰(1973), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为综合能源系统及智能电网领域的建模、优化、分析及控制, hjjia@tju.edu.cn。

(责任编辑 邱丽萍)

Dual-time-scale Hierarchical Regulation and Control for Medium-voltage DC Distribution System Under Improved Droop Control

XIAO Qian, LU Wenbiao*, JIA Hongjie, MU Yunfei, YU Xiaodan
(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education (Tianjin University))

KEY WORDS: medium-voltage DC distribution system (MVDC-DS); hierarchical regulation and control; dual-time-scale optimization; improved droop control; parameter optimization

In the medium-voltage DC distribution system (MVDC-DS), there are some moments when the loads surge or the renewable energy sources (RESs) fluctuate greatly. Under these conditions, the conventional regulation and control methods have the problems that the scheduling plan is not economically optimal and the DC bus voltages are easy to violate the limit. To solve these issues, a dual-time-scale hierarchical regulation and control method based on the improved droop control is proposed for the MVDC-DS in this paper, as shown in the Fig. 1.

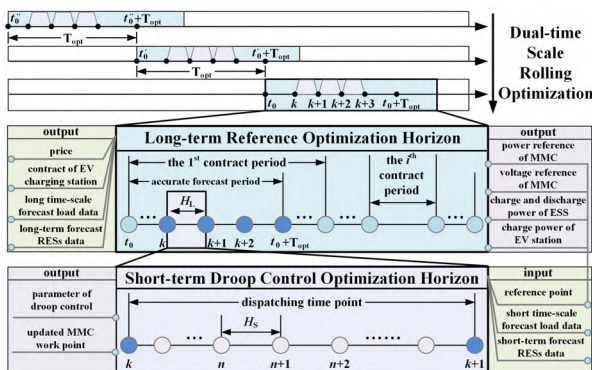


Fig. 1 Schematic diagram of rolling optimization with dual-time-scale hierarchical regulation and control

In the long-time-scale scheduling layer, the reference power of each MMC is determined by taking the minimum total operating cost as the optimization objective. The droop control is improved and the control coefficient is optimized in the short-time-scale scheduling layer to optimize both the operation economy and power quality of the system.

The droop control adopted by the hybrid MMC is improved by tan-function to achieve higher power quality, as shown in Eq(1)

$$-\frac{P_{MMC,i}^k - P_{MMC,i}^n}{P_{MMC,i}^k} = D_{droopi}^k \left(\frac{V_{MMC,i}^k - V_{MMC,i}^n}{V_{MMC,i}^k} \right) \quad (1)$$

Table 1 and Table 2 show the five scenarios set in this paper, as well as the total operation cost and total line loss under the corresponding scenarios. The comparison shows that energy storage system (ESS) can help reduce

operating costs, and the system economy is the best with the optimized the droop coefficient.

Table 1 Five scenarios

Scenario	ESS	The control mode of slave MMC
Scenario 1	Operating	droop control (optimized droop coefficient)
Scenario 2	Operating	droop control(unoptimized droop coefficient)
Scenario 3	Operating	Constant power control
Scenario 4	Not operating	droop control(unoptimized droop coefficient)
Scenario 5	Operating	tan-droop control ($a=5$)

Table 2 Total cost and total line loss

Scenario	Total cost /\$	Total line loss /(kW·h)
Scenario 1	31209	959.6
Scenario 2	31231	965.2
Scenario 3	31465	982.3
Scenario 4	34877	882.5
Scenario 5	31225	960.5

As Shown in Fig. 2, by the tan-droop control, all DC bus voltages of MVDC-DS are always above the lower limit of 97% U_N in different conditions, such as load surges by 100%. This is because the improved droop control can realize automatic and seamless switching between droop control characteristics and constant voltage control characteristics. When the system voltage deviation is too large, the output power is greatly increased to make the control effect approximate to the constant voltage control.

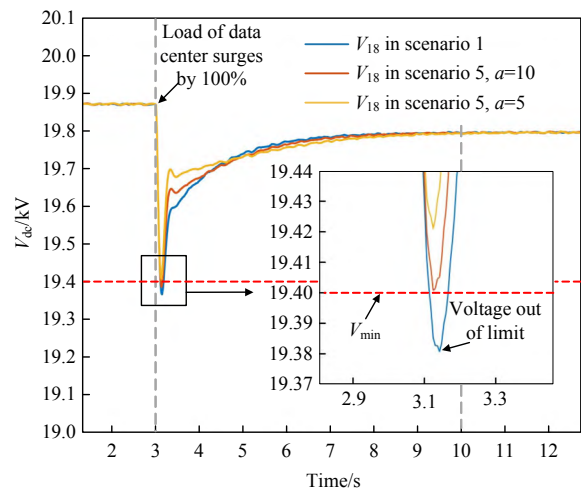


Fig. 2 V_{18} under the data center load surging