

多端交直流混合配电网的集中-分散控制策略

孟明¹, 李宽¹, 周晓兰²

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003;

2. 华北电力大学图书馆科技查新工作站, 河北省 保定市 071003)

Centralized-distributed Control Strategy of Multi-terminal AC/DC Hybrid Distribution Network

MENG Ming¹, LI Kuan¹, ZHOU Xiaolan²

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei

Province, China; 2. Library Science and Technology Search Station, North China Electric

Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

摘要: 针对交直流混合配电网中系统优化调度与本地分散控制的协调问题, 提出了一种集中-分散式控制架构, 在集中控制层, 以系统网损最低以及新能源最大水平消纳为优化目标, 通过优化调度算法计算出系统中各可控单元的最优功率参考值, 为本地分散控制层提供初始运行指令; 在分散控制层, 将直流母线电压分为正常状态、风险状态、越限状态, 在正常状态和风险状态, 各从换流站通过基于优化调度指令的下垂控制实现系统的平稳运行, 在直流电压越限时, 蓄电池作为后备单元进行充放电控制, 实现直流电压的二次恢复。基于 Matlab/Simulink 的仿真结果表明: 正常运行时, 该控制策略在各种工况下均能对系统功率进行灵活、高效的调节, 主换流站退出运行时, 通过蓄电池单元的充放电实现系统电压的二次恢复, 提高了配电网的可靠性。

关键词: 交直流混合配电网; 集中-分散控制; 优化调度; 电压分层控制; 二次电压恢复

Abstract: Aiming at the coordination problem between system optimization scheduling and local distributed control in AC/DC hybrid distribution network, a centralized-distributed control architecture was proposed. At the centralized control layer, the minimum network loss and the maximum level of new energy consumption were optimized. The optimal power reference value of each controllable unit in the system was calculated by optimizing the scheduling algorithm to provide an initial operation instruction for the local control layer; in the distributed control layer, the DC bus voltage was divided into normal state, risk state, and limit state. In the normal state and risk state, each slave converter station realized the smooth operation of the system through the droop control based on the optimized dispatching command. When the DC voltage exceeded the limit, the battery acted as a backup unit for charging and

discharging control to realize secondary recovery of the DC voltage. The simulation results based on Matlab/Simulink show that the control strategy can flexibly and efficiently adjust the system power under normal operating conditions. When the main converter station exits, the system is realized by charging and discharging of the battery unit which can improve the reliability of the distribution network.

Keywords: AC/DC hybrid distribution network; centralized-distributed control; optimized scheduling; voltage hierarchical control; secondary voltage recovery

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2019.0461

0 引言

交流电作为主流配电形式已有一百多年的历史, 现如今, 随着越来越多的一类负荷、敏感负荷以及非线性负荷接入电网, 传统的交流配电网暴露出愈发严重的问题, 如谐波含量高、供电能力差、传输走廊紧张等^[1-2]。

随着电力电子技术的不断进步, 集高效、清洁于一体的分布式电源受到越来越多电力用户与企业的青睐, 成为国家电力发展战略的重要组成部分。直流配电网正是由于其易于分布式电源接入以及输电容量大、电能损耗低等特点而受到广泛的关注与研究^[3-4], 然而, 在较短时间内完全取代传统交流配电形式并不现实, 基于配电网改造的交直流混合配电网能够最大限度利用原有交流配电系统存量资产, 不失为一种可行的过渡技术模式^[5]。柔性直流技术在配电网中的发展及应用

使得交直流混合配电网能够消纳更多的分布式电源,实现灵活的功率转换,其直流侧不存在谐波功率流及同步问题,可为交流侧提供就地无功补偿,提高交流侧电压稳定性,同时降低无功补偿装置的运行成本[6-7]。

交直流混合配电网控制系统的性能对系统的效率及供电可靠性具有极大的影响。目前,国内外相关文献已对此展开初步研究,文献[8-9]分别提出了针对直流微电网与直流配电网的电压分层控制策略,通过检测直流电压变化量来调节各接入单元换流器的工作状态,此类方法无需通信,提高了系统的可靠性,但难以对系统运行状态做出优化,无法实现系统经济运行;文献[10]将最优潮流算法与电压下垂控制相结合,提出了多端直流电网的协调控制方法,但未对直流电压进行分层且下垂系数的计算过程较为复杂。文献[11]提出了考虑系统交流侧故障的交直流混合配电网控制策略;文献[12]将电网运行状态分为正常状态及风险状态,在2种状态分别以降损和调压为目标,实现电网的经济可靠运行,但其优化目标的求解过程较为复杂;文献[13]提出了优化调度与分散控制相结合的电压分层控制策略,对每一层采用不同的控制方法,有效地降低了对通信速度的要求,但该控制策略会对主换流站造成较大的功率压力。

针对上述问题,本文提出一种将优化调度与传统主从控制相结合的协调控制方法。系统稳定运行时,优化调度系统为各可控单元提供优化指令;系统发生功率波动时,通过判断直流母线电压状态,各可控单元依据基于优化调度指令的下垂控制进行充放电控制,从而保证系统稳定可靠运行。

1 多端交直流混合配电网简介

1.1 系统结构与组成

交直流混合配电网相比于传统配电网具有更高的经济性[14],文献[14]根据某实际配电网提出了基于配电网改造的多端交直流混合配电网网络架构,本文在此结构上加以适当改造简化,通过柔性互联装置在传统两端交流配电网的基础上新增一条直流线路,其结构如图1所示,主要有4部分组成:

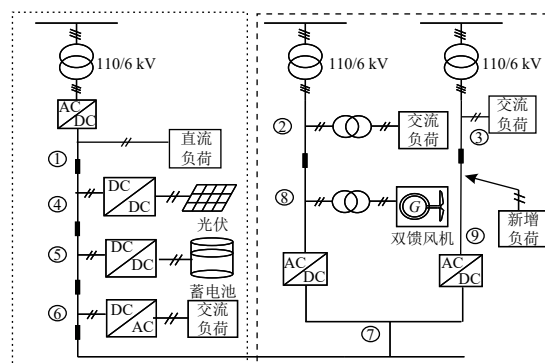


图1 多端交直流混合配电网网络架构

Fig. 1 Multi-terminal AC/DC hybrid distribution network architecture

1) 并网换流器单元: 交直流混合配电网直流母线通过双向DC/AC变流器分别与上级电网以及交流母线相连,双向DC/AC变流器能够在直流电压变化时调节功率的大小与流向,保证系统稳定。

2) 分布式电源单元: 双馈风力发电机通过交流变压器接入交直流混合配电网交流侧,光伏发电单元通过DC/DC变换器接入直流侧,在系统正常状下一般工作在最大功率跟踪(maximum power point tracking, MPPT)模式,保证分布式电源的最大消纳,在某些特殊情况下需要降功率运行,本文将定义为不可调度单元。

3) 蓄电池储能单元: 蓄电池组通过双向DC/DC变换器接入交直流配电网直流系统,根据系统的运行状态实时调整变换器的输出功率,维持系统功率的平衡以及直流母线电压的稳定。

4) 负荷单元: 直流负荷(L1)与一部分交流负荷(L2)分别通过DC/DC和DC/AC变换器接入直流母线,其余交流负荷(L3)接入交流母线。

1.2 传统控制策略

在交直流混合配电网中,直流系统无感抗、无容抗的特点使得电压成为衡量直流网络功率平衡的唯一指标,目前,针对多端交直流配电网的电压控制策略主要包括主从控制、电压下垂控制以及电压裕度控制。主从控制是指主换流站采用定直流电压控制,保证整个直流系统的功率稳定,其余换流站采用定功率控制,该方法对站间的通信有较高的要求,一旦主换流站故障,系统将面临崩溃的危险;电压裕度控制可认为是主从控制的改进,当主换流站由于故障退出运行时,另一

从换流站自动切换为定直流电压控制模式, 维持系统的功率平衡, 该方法不依靠站间通信, 但电压裕度值的选取较为困难; 电压下垂控制是指各换流站利用给定的直流电压与直流电流 (或功率) 的斜率特性, 在系统电压发生变化时, 实时响应系统内的功率波动, 该方法不依靠站间通信, 调节能力强, 但存在直流电压偏差。

2 集中层控制器设计

配电网能量管理系统 (energy management system, EMS) 承担着交直流混合配电网的优化调度任务, 本文设计的控制器如图 2 所示。首先, 集中控制层对上传至 EMS 的风电、光伏、储能单元功率预测信息以及配电网结构与参数等信息进行综合分析, 得到各交/直流分区的区域消纳功率, 其次在各个分区, 以网损最小为优化目标, 对各可控单元的运行状态以及控制指令进行优化, 并将其作为分散控制层的初始运行指令, 由于优化区间较长, 有效降低了对通信的过高要求。

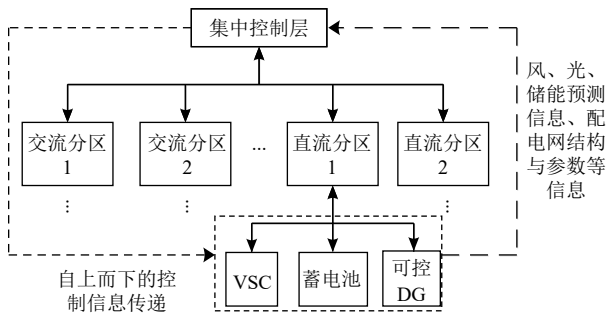


图 2 集中层控制器设计

Fig. 2 Design of centralized layer controller

2.1 优化目标

本文设计的控制器以分布式电源最大水平消纳以及以系统网损最小为优化目标, 其中分布式电源最大水平消纳由 MPPT 控制模式实现, 因此, 设计优化调度策略的目标为系统网损最低, 系统网损由两部分组成, 即换流器功率损耗以及传输线功率损耗, 即:

$$\min F = \sum_{k=1}^n (1 - \eta_k) P_{VSCk} + P_{\text{loss_line}} \quad (1)$$

式中: η_k 表示换流站 k 的效率; P_{VSCk} 表示第 k 个换流站发出的功率; $P_{\text{loss_line}}$ 表示系统线路损耗。

2.2 约束条件

2.2.1 等式约束

$$P_i = U_i \sum_{j=1}^n (U_i - U_j) G_{ij} \quad (2)$$

式中: P_i 为节点 i 的净功率; U_j 表示与节点 i 直接相连的节点 j 的电压; G_{ij} 表示 i 、 j 节点之间的互导。

2.2.2 不等式约束

本文的优化调度策略包含的不等式约束主要包括节点电压约束、换流器容量约束、线路传输功率约束、蓄电池容量及充放电功率约束。

1) 节点电压约束为

$$U_{i_min} \leq U_i \leq U_{i_max} \quad (3)$$

式中: U_i 表示配电网直流侧节点 i 的节点电压; U_{i_min} 和 U_{i_max} 表示节点 i 的额定电压的最小、最大值。

2) 换流器容量约束为

$$P_{VSCk_min} \leq P_{VSCk} \leq P_{VSCk_max} \quad (4)$$

式中: P_{VSCk} 表示换流器 k 注入直流侧的有功功率; P_{VSCk_min} 和 P_{VSCk_max} 表示其最小、最大值。

3) 线路传输功率约束为

$$P_{ij_min} \leq P_{ij} \leq P_{ij_max} \quad (5)$$

式中 P_{ij} 表示线路传输的有功功率; P_{ij_min} 和 P_{ij_max} 表示其最小、最大值。

4) 蓄电池荷电状态及充放电功率约束为

$$C_{SOC_min} \leq C_{SOC} \leq C_{SOC_max} \quad (6)$$

$$P_{bat_min} \leq P_{bat} \leq P_{bat_max} \quad (7)$$

式中: C_{SOC} 表示蓄电池的荷电状态; C_{SOC_min} 、 C_{SOC_max} 分别表示其最小、最大值; P_{bat} 表示蓄电池的充放电功率; P_{bat_min} 、 P_{bat_max} 分别表示其最小、最大值。

3 分散控制器设计

3.1 电压分层控制

交直流混合配电网的电压分层控制是指根据直流母线电压变化情况将系统分为不同的控制层, 其中, 一端换流站应作为主换流站运行于定电压状态, 值得注意的是, 在设计不同层的控制策略时, 应保证至少存在一端换流站依据 V-I 或 V-P 下垂特性来控制直流母线电压^[15], 避免主站承担

过大的压力。图3为多端交直流混合配电网的电压分层控制策略示意图,直流母线电压采用标么值表示。本文将直流母线电压分为正常、风险和越限3种状态,各状态的临界电压参考值已标于图3中,通过判断直流母线电压所处的区间即可确定变流器的工作方式。当直流母线电压处于

[0.97, 1.03] pu 时,为了减轻主站压力,系统不仅仅由主换流站提供功率差额,从换流站1也根据制定好的下垂曲线对输出功率进行控制,在电压升高/降低时减小或增大输出功率,同时从换流站2按照优化调度系统给出的功率参考值运行于定功率状态。

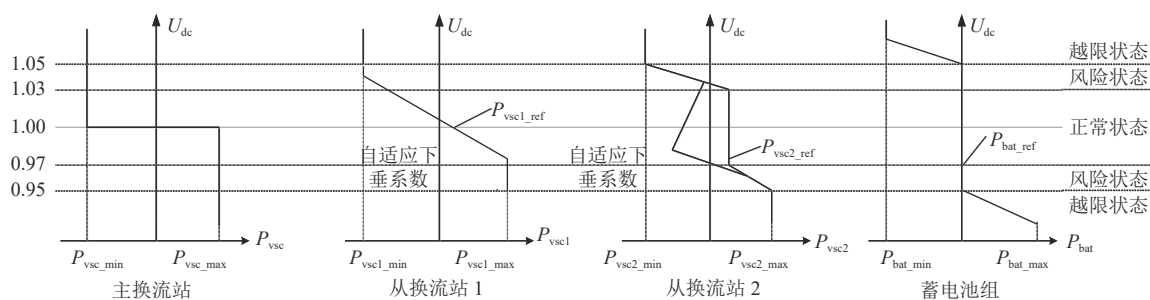


图3 系统控制策略

Fig. 3 System control strategy

当大容量负荷的投切或分布式发电单元功率剧变导致系统运行状态恶化时,仅靠单个换流站无法平抑功率波动,从换流站2转入下垂控制提供部分功率差额,维持系统功率平衡。当 $\Delta U_{dc} < -0.05$ 时,表明系统功率缺额较大,此时蓄电池由闲置状态转换为下垂控制,为交直流混合配电网直流母线电压提供电压支撑;当 $\Delta U_{dc} > 0.05$ 时,表明系统功率充足,此时系统对蓄电池进行充电,由蓄电池消纳多余功率。

3.2 系统组成单元本地控制

3.2.1 VSC 换流器控制策略

本文设计的电压分层控制策略中,主换流站采用定电压控制,当检测到输出功率达到限值时转入定功率控制,此时,主换流站进入限流模式,由于该控制策略较为简单,不再赘述其构建过程。

在系统正常运行时,从换流站依据优化调度指令恒功率运行,当系统发生功率波动时,各单元依据制定好的优先级依次进入电压-功率下垂控制,维持系统功率平衡。对于从换流站1,由式(8)、(9)可计算其下垂系数,控制策略如附图A1(a)所示。

$$U_{V1} - U_{V1_ref} = k_{v1}(P_{V1} - P_{V1_ref}) \quad (8)$$

$$k_{v1} = \min \left\{ \frac{U_{V1_max} - U_{V1_ref}}{P_{V1_ref} - P_{V1_min}}, \frac{U_{V1_ref} - U_{V1_min}}{P_{V1_max} - P_{V1_ref}} \right\} \quad (9)$$

式中: k_{v1} 为其下垂系数; U_{V1_max} 、 U_{V1_min} 分别为从换流站1的额定电压最大、最小值; P_{V1_max} 、

P_{V1_min} 分别为其额定容量的最大、最小值; P_{V1_ref} 、 U_{V1_ref} 分别为从换流站1的功率、电压参考值。

对于从换流站2,由式(10)、(11)计算其下垂系数,其控制策略如附图A1(b)所示。

$$k_{v2} = \frac{U_{V2_max} - 1.03U_{dc}}{P_{V2_min} - P_{V2_ref}} \quad (10)$$

$$k'_{v2} = \frac{0.97U_{dc} - U_{V2_min}}{P_{V2_ref} - P_{V2_max}} \quad (11)$$

式中: k_{v2} 、 k'_{v2} 分别为系统直流侧电压处于[0.95, 0.97]以及[1.03, 1.05] pu时的下垂系数; U_{V2_max} 、 U_{V2_min} 分别为从换流站2的额定电压最大、最小值; P_{V2_max} 、 P_{V2_min} 分别为其额定容量的最大、最小值; P_{V2_ref} 为从换流站2的功率参考值。

3.2.2 蓄电池变流器控制策略

蓄电池作为系统的后备电源,在系统正常运行时处于充电或待机状态,在系统异常时作为二次调压单元进行快速的充放电控制,实现系统直流侧电压的二次恢复,维持系统内的功率平衡。其下垂特性曲线可表示为

$$U_{bat} - U_{bat}^* = -k_b(P_{bat} - P_{bat}^*) \quad (12)$$

式中: U_{bat}^* 表示蓄电池进入下垂控制模式的电压临界值,分别为 $1.05U_{dc_ref}$ 和 $0.95U_{dc_ref}$; k_b 为其下垂系数; P_{bat} 为蓄电池注入系统直流侧的功率; P_{bat}^* 为蓄电池初始功率参考值,为减少蓄电池充

放电时长，本文将其设为 0。相应的控制策略如附图 A2 所示。

4 仿真分析

为了验证本文提出的协调控制策略的有效性，在 Matlab/Simulink 仿真软件中搭建了如图 1 所示的仿真系统。直流母线额定电压为±10 kV，交流侧电网电压均为 6 kV。配电网中各换流单元的容量约束与损耗参数如表 1 所示，各支路阻抗参数如表 2 所示，直流侧电压选取光伏电池并网点电压。

表 1 换流单元容量约束与损耗参数
Table 1 Parameter of capacity and loss in distribution network

节点类型	$[P_{\min}, P_{\max}]/\text{MW}$	换流站损耗百分比/%
主换流站	$[-2, 2]$	2
从换流站1	$[-1, 1]$	2
从换流站2	$[-1, 1]$	2
光伏单元	$[0, 5]$	3
蓄电池单元	$[-2, 2]$	3
双馈风机单元	$[0, 4]$	5
直流负荷L1	/	0
交流负荷L2	/	2
交流负荷L3	/	0

表 2 支路阻抗参数
Table 2 Parameter of branch impedance

支路编号	首节点	末节点	阻抗
1	①	④	0.19
2	④	⑤	0.15
3	⑤	⑥	0.25
4	⑥	⑦	0.2
5	②	⑧	$0.92+j0.0012$
6	③	⑨	$0.92+j0.0012$

4.1 正常运行模式

仿真初始时刻，负荷 L1、L2 和 L3 分别为 0.6、0.7 和 0 MW，光伏电池及双馈风机的发电功率分别为 1.5、0.5 MW，此时系统按照能量优化调度系统计算出的优化运行指令稳定运行，从换流站 1、2 发出的功率分别为-0.2、0.39 MW，此时相应的系统损耗为 0.13 MW。取仿真初始时刻为 0.5 s。

4.1.1 负荷投切

图 4 为负荷投切的仿真结果，其中图 4(a)、4(b)、4(c) 分别为主换流站功率、负荷功率、光伏并网点电压。

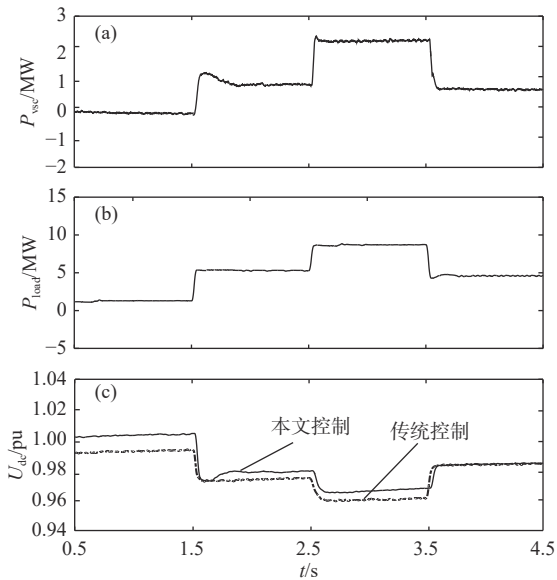


图 4 负荷投切时系统的运行特性

Fig. 4 System operation performances during load switching

1.5 s 时，负荷 L2、L3 分别增大为 2.7 和 2 MW，此时，直流侧电压仍处于正常状态，功率差额由主换流站与从换流站 1 共同提供。2.5 s 时，负荷 L1 增大为 3.1 MW，由于运行状况变化导致系统进入风险状态，此时主换流站进入限流模式，从换流站 2 加入功率调节。3.5 s 时，负荷 L1、L2 分别减小为 1.6、1.7 MW，直流侧电压恢复到正常状态。由图 4(c) 可知，相比于传统控制方法（主换流站采用定电压控制，从换流站均采用下垂控制），本文所提的新型控制方法在减小直流侧电压偏差上具有一定的优势。

4.1.2 分布式电源出力变化

图 5 为分布式电源出力变化的仿真结果，其中图 5(a)、5(b) 分别为主换流站功率、光伏电池并网点电压。取仿真初始时刻为 0.5 s。

1.5 s 时，光照增强，光伏发电功率增大为 5 MW，此时直流侧电压由正常状态转入风险状态，同时主换流站再次进入限流模式，在 2.5 s 光伏发电功率回落至 3.5 MW 时直流侧电压回到正常状态。

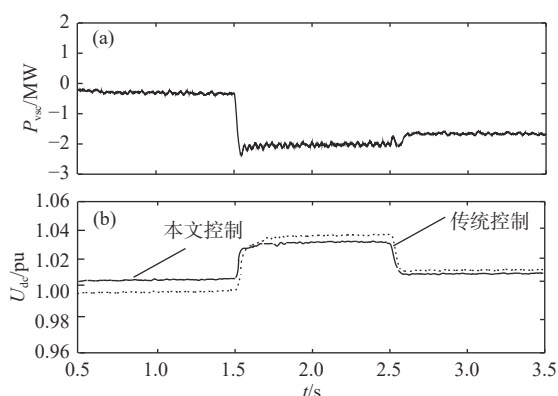


图5 分布式电源出力变化时系统的运行特性

Fig. 5 System operation performances when the distributed power output changes

4.2 主换流站退出运行

图6为多端交直流混合配电网主换流站退出运行时的仿真结果,其中6(a)、6(b)、6(c)分别为主换流站功率、蓄电池功率、光伏并网点电压。仿真初始时刻,交/直流负荷均未接入系统,光伏发电功率以及双馈风机发电功率均为0.5 MW。

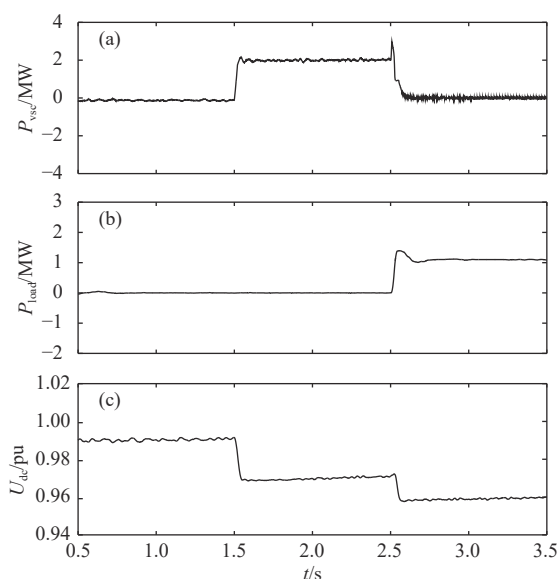


图6 主站故障时系统的运行特性

Fig. 6 System operation performances in fault conditions

1.5 s时,负荷L1、L2、L3接入交直流混合配电网,功率均为2 MW;2.5 s时,主换流站由于故障退出运行,此时,从换流站1和从换流站2输出功率均达到限值但仍难于补偿功率差额,系统直流侧电压进入越限状态,蓄电池组由待机状态转入下垂控制模式,发出约1.1 MW功率,直

流侧电压被维持在0.96 pu左右,保证了电压不越限。

5 结论

本文搭建了多端交直流混合配电网的网络架构,建立了以分布式电源最大水平消纳和系统网损最低为目标的优化模型,并提出了各换流站以及蓄电池单元的控制策略,理论分析和仿真验证表明,提出的控制策略具有以下优点:

1) 将优化调度策略与传统主从控制策略相结合,优化区间长,有效降低了对通信的要求。

2) 在直流母线电压处于不同状态时,保证了至少存在一端换流站运行于下垂控制状态以补偿功率差额,降低了对主换流站的压力。

3) 电压分层明确,下垂系数计算简便,具有一定的工程实用性。

(本刊附录请见网络版,印刷版略)

参考文献

- [1] WANG P, GOEL L, LIU X, et al. Harmonizing AC and DC: a hybrid AC/DC future grid solution [J]. *IEEE Power and Energy Magazine*, 2013, 11(3): 76–83.
- [2] DU Yi, HU Pengfei, LIN Hongyang, et al. A high-reliability dc distribution network topology [C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2). Beijing: IEEE, 2017: 1–5.
- [3] 宋强, 赵彪, 刘文华, 等. 智能直流配电网研究综述 [J]. *中国电机工程学报*, 2013, 33(25): 9–19.
SONG Qiang, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2013, 33(25): 9–19 (in Chinese).
- [4] SEO G, BAEK J, CHOI K, et al. Modeling and analysis of DC distribution systems [C]//8th International Conference on Power Electronics - ECCE Asia. Jeju: IEEE, 2011: 223–227.
- [5] 张祖平. 直流配电技术的发展前景 [J]. *供用电*, 2014(7): 16–19.
ZHANG Zuping. Development prospects of DC power distribution technology [J]. *Distribution & Utilization*, 2014(7): 16–19 (in Chinese).
- [6] DRAGICEVIC T, VASQUEZ J C, GUERRERO J M, et al. Advanced LVDC electrical power architectures and microgrids: A step toward a new generation of power distribution networks [J]. *IEEE Electrification*

- Magazine, 2014, 2(1): 54 – 65.
- [7] ZHANG L, TANG W, LIANG J, et al. A medium voltage hybrid AC/DC distribution network and its economic evaluation [C]//12th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Beijing: IET, 2016: 1-6.
- [8] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微网的电压分层协调控制 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 16 – 24.
WANG Yi, ZHANG Lirong, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 16 – 24 (in Chinese).
- [9] 马秀达, 康小宁, 李少华, 等. 直流配电网的电压协调控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(17): 169 – 176.
MA Xiuda, KANG Xiaoning, LI Shaohua, et al. Coordinated scheme for automatic voltage control of DC distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(17): 169 – 176 (in Chinese).
- [10] ROUZBEHI K, MIRANIAN A, LUNA A, et al. DC voltage control and power sharing in multiterminal DC grids based on optimal DC power flow and voltage-droop strategy [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4): 1171 – 1180.
- [11] 张学, 裴玮, 邓卫, 等. 交直流混合配电网的运行模式和协调控制方法 [J]. 供用电, 2016, 33(8): 27 – 31, 56.
ZHANG Xue, PEI Wei, DENG Wei, et al. The concept and demonstration project of flexible interconnection of urban power grid partition [J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(8): 27 – 31, 56 (in Chinese).
- [12] 张璐, 唐巍, 梁军, 等. 基于VSC的交直流混合中压配电网功率-电压协调控制 [J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(22): 6067 – 6075.
ZHANG Lu, TANG Wei, LIANG Jun, et al. Power-voltage coordinated control in hybrid AC/DC medium voltage distribution networks based on VSC [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(22): 6067 – 6075 (in Chinese).
- [13] 马秀达, 康小宁, 李少华, 等. 多端柔性直流配电网的分层控制策略设计 [J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(8): 117 – 122, 150.
MA Xiuda, KANG Xiaoning, LI Shaohua, et al. Hierarchical control in multi-terminal flexible DC distribution system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(8): 117 – 122, 150 (in Chinese).
- [14] 严道, 焦彦军, 杜哲. 基于柔性直流技术的一种交直流混合配电网可行性研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 110 – 116.
YAN Xiao, JIAO Yanjun, DU Zhen. Feasibility study of AC/DC hybrid distribution network using VSC-based DC technology [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 110 – 116 (in Chinese).
- [15] 王毅, 于明, 李永刚. 基于模型预测控制方法的风电直流微网集散控制 [J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 57 – 66.
WANG Yi, YU Ming, LI Yonggang. Model predictive controller-based distributed control of wind turbine DC microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 57 – 66 (in Chinese).

收稿日期: 2019-05-28

作者简介:

孟明 (1967), 男, 博士, 副教授, 研究方向为新能源发电、智能微电网、电机及其控制等, Email: mmwxp@126.com;

李宽 (1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为交直流混合配电网的协调控制, Email: 1841871561@qq.com;

周晓兰 (1965), 女, 研究馆员, 研究方向为科技查新及电力情报分析与学科服务。

