

DOI: 10.7652/xjtuxb201608019

多端柔性直流配电网的分层控制策略设计

马秀达¹, 康小宁¹, 李少华^{1,2}, 蒋帅¹, 屈小云¹, 张超¹

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 许继集团有限公司, 461000, 河南许昌)

摘要: 为了解决直流配电网中通信过程的信息传递以及优化调度与分散控制的协调问题, 针对含有多类型分布式电源、换流站、储能装置和交直流负荷的直流配电网, 设计了一种基于不同时间尺度的分层控制策略。在较短时间尺度内, 第 1 层控制通过主从控制实现直流系统在稳态模式下的平稳运行; 在较长时间尺度内, 第 2 层控制通过模式切换或调整联络线功率实现系统在恶劣运行条件下的 2 次电压恢复; 能量优化调度系统作为第 3 层控制, 以新能源最大接纳和网损最小作为优化目标, 通过最优潮流计算为系统下一层提供运行指令。通过 PSCAD/EMTDC 的仿真验证表明: 当发生新能源功率或负荷波动时, 通过主从控制模式可迅速实现系统平稳控制; 当主换流站短时退出运行时, 通过联络线功率调整可实现系统 2 次电压恢复。该分层控制策略信息传递明确, 实现了优化调度与分散控制的协调配合, 在各种工况下均能保证系统的可靠经济运行。

关键词: 直流配电网; 分层控制; 分布式电源; 能量优化调度

中图分类号: TM711 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2016)08-0117-06

Hierarchical Control in Multi-Terminal Flexible DC Distribution System

MA Xiuda¹, KANG Xiaoning¹, LI Shaohua^{1,2}, JIANG Shuai¹, QU Xiaoyun¹, ZHANG Chao¹

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Xuji Group Corporation, Xuchang, Henan 461000, China)

Abstract: In DC distribution system, it is necessary to accomplish immediate information transmission and coordination between optimal dispatch and decentralized control. Aiming at a DC distribution system with many kinds of distributed generations, energy storage device, converter stations and loads, a hierarchical control strategy with different time scales is proposed. In a short-term time scale, the first layer control enables to realize smooth system operation in the steady-state mode by means of master-slave control; in a longer time scale, secondary voltage recovery in harsh operating condition is achieved by mode switch or adjusting tie-line power; as the third layer control, targeting maximum new energy integration and minimum network loss, energy optimal dispatch system provides operation instructions for the lower control by optimal power flow calculation. Simulation results of PSCAD/EMTDC show that when new energy power or load fluctuation occurs, the system can achieve stable control rapidly by master-slave control; when the master converter station is out-of-operation, secondary voltage recovery is achieved by adjusting tie-line power. This hierarchical control strategy realizes clear information transmission and coordinated control between optimal dispatch and decentralized control to guarantee the system to operate smoothly and economically under various conditions.

收稿日期: 2016-03-11。 作者简介: 马秀达(1992—),男,硕士生;康小宁(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家高技术
研究发展计划资助项目(2015AA050101)。

网络出版时间: 2016-05-17

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20160517.1920.014.html>

为有效解决通信过程中的信息传递以及优化调度与分散控制的协调问题,本文提出了直流配电网的分层控制策略。第1层控制和第2层控制基于本地信息量实现直流电压控制,第3层控制通过最优潮流计算给出最优调度方案。为验证本文方法对直流配电网的有效控制,基于PSCAD/EMTDC建立直流配电网的仿真模型,并对不同运行工况下的系统进行仿真研究。

1 不同时间尺度的分层控制体系

在实现直流配电网运行平稳的前提下,为实现新能源最大出力、降低网损和储能装置损耗等功能,建立直流配电网的多层级控制系统,包括各换流器内部的控制系统、多端协调控制系统以及能量优化调度系统。以一个包含主、从换流站,风光储系统以及交直流负荷的环形直流配电网为例,分层控制框架如图1所示,主要包括如下结构。

(1)第1层控制:通过主从控制维持系统运行平稳。运行指令由能量优化调度系统给出,各单元内部控制在 ms 级内实现该运行指令。风机和光伏电池运行于最大功率跟踪(MPPT)模式^[10-11],蓄电池通过削峰填谷与分布式电源组成功率可控源。

(2)第2层控制:利用换流站、分布式电源和储能系统的配合实现2次电压恢复。各单元通过检测直流电压变化,将动作指令下达至第1层控制,进行模式切换,调整s级的功率波动,实现系统平稳运行。

(3)第3层控制:根据最优潮流计算给出第1层控制的调度指令,实现系统的能量优化调度。将直

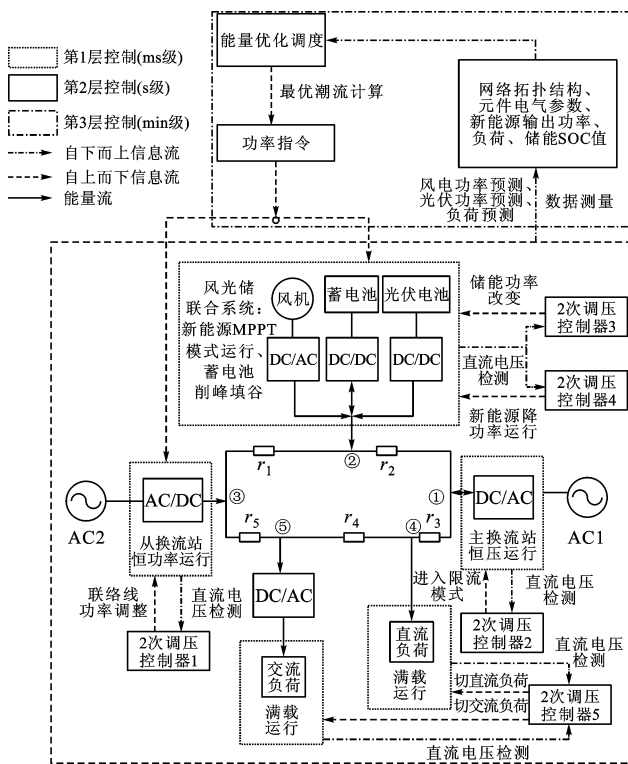


图 1 直流配电网的分层控制体系

流配电网的网络参数、预测数据以及储能装置的荷电状态(SOC)等数据输入能量优化调度系统,在min 级的优化区间长度内进行最优潮流计算,得到系统稳态运行的优化指令,实现技术与经济的最佳效益。

在以上各层控制中,第 1 层控制和第 2 层控制是对直流配电网进行分散控制的管理单元,无需通信,可靠性高且调节时间短;第 3 层控制是用于实现全局集中控制的管理单元,虽然需要依靠上下层的通信来完成,但由于优化区间较长,对通信时间要求不高。

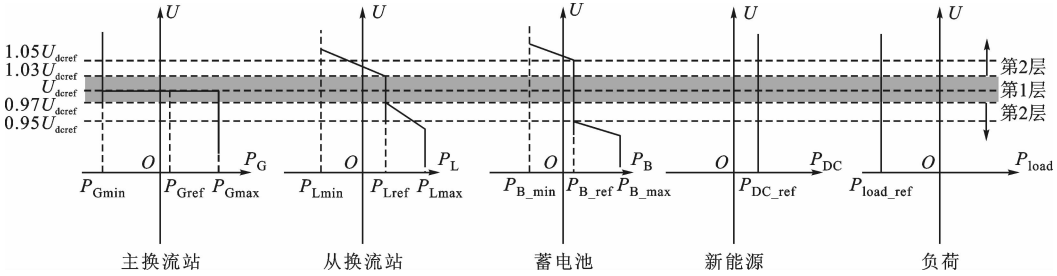


图 2 提出的分散控制策略

2.1 主从控制

在第 1 层控制中,主换流站控制直流电压,从换流站和风光-储联合系统按能量优化调度系统给出的运行指令恒功率运行。当分布式电源输出功率出现波动时,蓄电池通过双向 DC/DC 变换装置进行充放电,实现削峰填谷,保证联合系统的有功恒定,以减小分布式电源功率输出波动对系统的影响^[12];当负荷出现波动时,主换流站调节输入功率,维持直流电压稳定。

在实际系统中,由于功率流动,各节点电压并不相等,第 1 层与第 2 层控制模式切换的直流电压阈值应大于各器件稳态运行时直流电压的最大波动值,从而保证动作的可靠裕度,本文将第 1 层控制的直流电压波动范围定为 $(1 \pm 3\%)U_{deref}$ 。

2.2 2 次电压恢复

当系统出现较恶劣的不正常运行状态(如重载负荷的变化、大容量换流器的投切等)时,系统进入第 2 层控制,利用换流站、分布式电源和储能系统的配合实现系统有功平衡,使电压得到恢复。

若直流电压波动超过 $(1 \pm 3\%)U_{deref}$,主换流站转入限流模式,不再维持直流电压,从换流站进入下垂控制,图 2 中的 $U-P$ 下垂特性曲线可表示为

$$U_{dc} = U_{dc}^* + k_B(P_L - P_{ref}) \quad (1)$$

式中: P_L 为从换流站的输入功率; P_{ref} 表示有功参考值,由能量优化调度系统给出; k_B 为下降特性曲线斜

2 分散控制

直流配电网的分散控制是指各单元的控制切换条件由本地信息决定,包括直流电压变化量、并网器件容量以及蓄电池荷电状态等条件。结合主从控制策略与电压下降控制的优点,本文提出的分散控制策略如图 2 所示,取功率流出换流器的方向为正向参考方向, U_{deref} 表示直流侧额定电压。当直流电压波动不超过一定范围时,通过第 1 层控制实现系统的直流电压控制;当直流电压波动范围较大时,通过第 2 层控制实现系统的 2 次电压恢复。

率,斜率越小,对电压的控制能力越强; U_{dc}^* 表示从换流站进入下垂控制的最小电压值,分别为 $1.03U_{deref}$ 或 $0.97U_{deref}$ 。

换流站的控制策略如图 3 所示,对 PI 控制器输出进行最大、最小操作得到 i_{dref} ,将其输入内环电流控制器中实现有功和电压的调整。当输入功率达到自身容量限制时,自动进入限流模式。

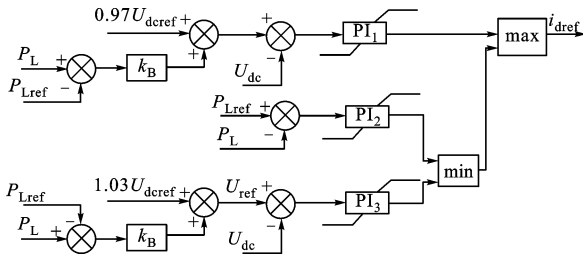


图 3 从换流站的控制策略

若直流电压波动范围超过 $\pm 5\%U_{deref}$,蓄电池并网换流器进入下降控制,控制策略如图 4 所示,通过快速充放电快速实现二次电压恢复。同时,电压波动范围设定为 $\pm 5\%U_{deref}$,避免了 DC/DC 变换器在 boost 与 buck 模式间频繁切换,提高了蓄电池的运行寿命,且减小了器件频繁动作引起的谐波^[13]。

蓄电池的容量和输出功率有限,为保证其运行寿命,应使蓄电池 SOC 值维持在一定范围。对蓄电池的 SOC 值进行实时检测,当检测到 SOC 值超出范围时,关闭蓄电池的充放电状态。

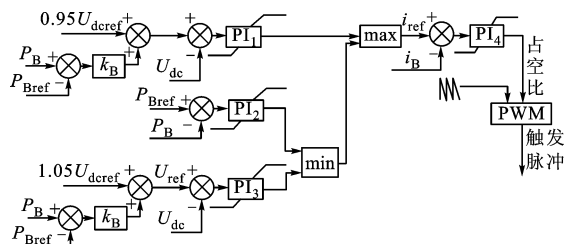


图4 DC/DC变换器的控制策略

当系统出现较大功率缺额且各调压器件的输入功率均达到容量极限时,直流电压将长时间处于较小值,当负荷侧检测到电压小于 $0.95U_{dcref}$ 且经过一定延时后,应按照负荷的优先级别进行切负荷操作。当系统的分布式电源渗透率较高且系统负荷较小时,直流电压将长时间处于较大值,当分布式电源检测到直流电压大于 $1.05U_{dcref}$ 且经过一定延时后,应调整 MPPT 模式为降功率运行。

综上所述,直流配电网中各单元实现分散控制的总体结构如图5所示,其中“1”表示第1层控制模式,“2”表示第2层控制模式。

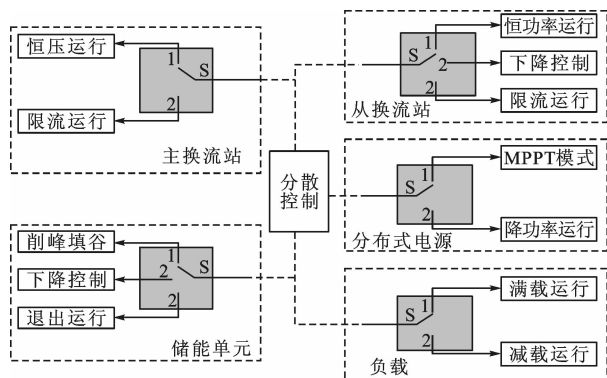


图5 分散控制总体结构

3 能量优化调度系统

直流配电网的能量优化调度通过最优潮流控制实现,以负荷预测数据以及分布式电源预测数据为基础,利用最优算法求解出直流配电网可控单元(包括从换流站、风-光-储联合系统)的优化调度指令。最优潮流模型由约束条件和优化目标两部分组成^[14],其中前者要求调度指令在各种运行条件下都能保证系统的安全平稳;而后者则针对调度部门要求对调度目标进行数学模型表示,并选择准确高效的求解算法,以实现预定目标最优化计算。

3.1 约束条件

(1) 潮流方程等式约束

$$P_i = U_{dci} \sum_{j \in I} (U_{dci} - U_{dcj}) g_{ij}, \quad i \in I \quad (2)$$

式中: I 表示所有节点的集合; g_{ij} 表示节点*i*与节点*j*之间的电导值。

(2) 节点电压约束

$$U_{dco} = U_{dcref} \quad (3)$$

$$U_{dci, \min} \leq U_{dci} \leq U_{dci, \max}, \quad i \in I, i \neq 0 \quad (4)$$

式中: U_{dco} 表示主换流站所在节点直流电压; $U_{dci, \min}$ 和 $U_{dci, \max}$ 分别表示节点*i*的最小和最大额定电压,按第1层控制对电压波动的要求, $U_{dci, \min}$ 和 $U_{dci, \max}$ 分别取为 $1.03U_{dcref}$ 和 $0.97U_{dcref}$ 。

(3) 节点有功约束

$$P_{i \min} \leq P_i \leq P_{i \max}, \quad i \in C \subseteq I \quad (5)$$

$$P_i = P_{Li}, \quad i \in L \subseteq I \quad (6)$$

式中: C 表示换流站和风光储系统所在节点集合; L 表示负荷所在节点集合; $P_{i \min}$ 和 $P_{i \max}$ 分别表示换流器*i*节点的最小和最大额定功率。

(4) 线路有功约束

$$|V_i(V_i - V_j)g_{ij}| \leq P_{ij \max}, \quad i, j \in I \quad (7)$$

式中: $P_{ij \max}$ 表示线路最大传输功率。

(5) 储能装置的荷电状态约束

$$C_{SOC \min} \leq C_{SOC} \leq C_{SOC \max} \quad (8)$$

$$C_{SOC} = C_{SOC0} - \frac{P_B}{Q} \Delta t \quad (9)$$

式中: $C_{SOC \min}$ 和 $C_{SOC \max}$ 分别表示蓄电池SOC值的最小和最大额定值; C_{SOC0} 表示上一优化时刻的SOC值; Q 表示蓄电池容量; Δt 表示优化时间长度。式(9)是充放电效率为1且不考虑自放电过程时的SOC值计算公式。

3.2 目标函数

本文以新能源最大接纳水平和网损最小为优化目标。其中,新能源最大接纳水平通过风机和光伏电池在稳态运行时的MPPT模式实现,以保证其最大出力。网损最小通过目标函数的建立实现,由于配电网系统中网损较大,因此进行合理调度优化实现损耗降低是必要的。

整个直流配电网的网损等于变流前的网络输入功率之和,即*n*节点系统中由网损最小约束下的优化目标函数为

$$F = \min \sum_{i \in I} f_i(P_i) = \min \sum_{i \in I} \frac{P_i}{1 - \eta_i} \quad (10)$$

式中: P_i 为各节点直流侧的功率; η_i 表示*i*节点换流器的电能损耗率,即换流器的损耗功率与流过功率的百分比,该值可通过对换流站的多次试验测量并进行拟合得到,直流负荷所在节点的 η_i 取为0。

由上述的优化建模过程可知,直流配电网的优

化调度本质上是二阶非线性优化问题,适合利用二阶锥规划(SOCP)求解^[15-16],其作为线性规划的推广,具有解的最优性和计算的高效性,在此不再赘述。

4 仿真验证

为了验证本文提出的直流配电网分层控制策略的有效性,采用 PSCAD/EMTDC 软件仿真,所搭建直流配电网的拓扑结构如图 1 所示。直流母线额定电压为±10 kV,两端电网电压均为 6 kV。直流线路参数如表 1 所示。

主、从换流站由 VSC 换流器组成,并网等值电阻和电感均为 0.02 Ω 和 1 mH。主换流站的额定容量为 5 MW,无功参考值为 0;从换流站的额定容量为 5 MW,无功参考值为 0, $U-P$ 下降特性曲线斜率为 -1 MW/kV 。VSC 换流器并网电能损耗率为 2%。

风机容量为 1.5 MW,风机额定风速为 10.5 m/s,切入、切出风速分别为 3 m/s 和 15 m/s,交流侧输出电压为 0.69 kV,额定频率为 12.18 Hz;光伏发电系统最大输出功率为 1.3 MW,通过 boost 变换器并网运行;储能装置由铅酸蓄电池的串并联组成,容量和最大转输功率为 $1.2\text{ MW}\cdot\text{h}/2.4\text{ MW}$,SOC 最大值和最小值分别为 0.8 和 0.4,SOC 初值定为 0.6, $U-P$ 下降特性曲线斜率取为 -2 MW/kV 。风光储联合系统并网电能损耗率为 3%。

表 1 直流配电网的线路参数

编号	首节点	末节点	电阻/Ω	最大传输功率/MW
1	①	②	1.5	4.0
2	②	③	1.0	4.8
3	③	④	2.0	6.0
4	④	⑤	1.2	3.0
5	①	⑤	1.0	3.2

某一时刻风机和光伏系统总的有功输出功率为 1.5 MW,交流负荷为 3 MV·A,功率因数为 0.95,直流负荷为 3 MW。仿真开始时,通过最优潮流计算得到从换流站有功参考值为 2.76 MW,风光储联合系统的有功参考值为 1.87 MW,将指令下达至直流配电网,通过第 1 层控制实现该运行指令,此时得到的最小网损为 0.24 MW。

4.1 新能源功率和负荷波动时的仿真结果

图 6 给出了当新能源功率输出和负荷变化时直流配电网的仿真结果。

在 2.2 s 之前,系统按能量优化调度系统给出的运行指令稳定运行。在 2.2 s 时,DG 单元输出减

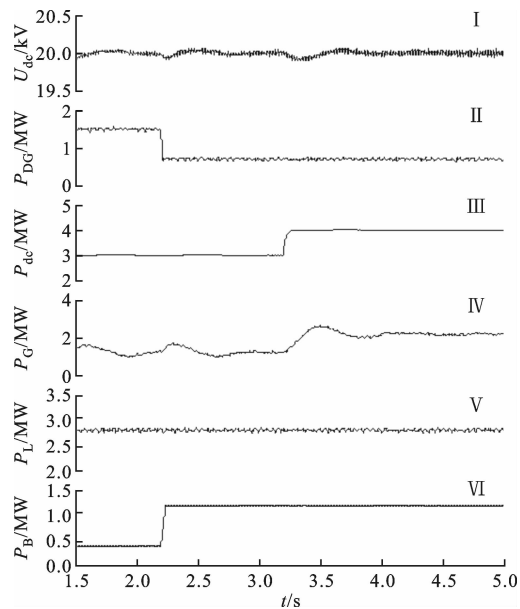


图 6 新能源功率和负荷波动时的仿真波形

少至 0.7 MW,见图 6 中 II;为了保证风光储系统仍旧按照能量管理系统的运行指令运行,蓄电池快速放电,输出功率升至约 1.2 MW,如图 6 中 VI 所示,通过削峰填谷实现了风光储系统功率输出的可控。在 3.2 s 时,直流负荷增大至 4 MW,如图 6 中 III 所示;由于直流电压下降幅度较小,从换流站继续控制功率恒定,如图 6 中 V 所示;主换流站通过增大输入功率(如图 6 中 IV 所示)来实现系统功率平衡,从而将直流电压稳定为 20 kV。

在上述调节过程中,直流电压变化较小,均未超过±3% U_{dref} ,如图 6 中 I 所示,因此可通过第 1 层控制实现系统稳定,调节过程为 ms 级,快速有效。

4.2 主换流站短时退出运行的仿真结果

图 7 给出了当主换流站短时退出运行时的仿真结果。

在 2 s 时,主换流站交流侧断路器跳开,换流器

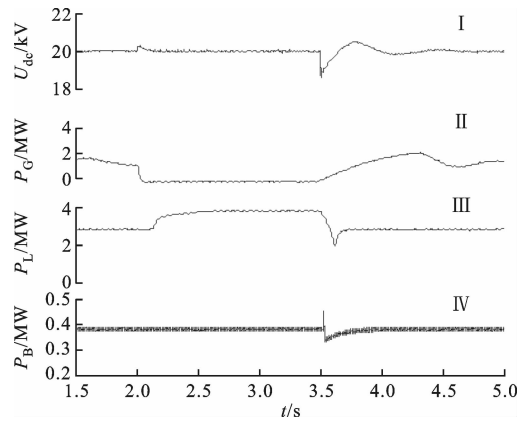


图 7 主换流站短时退出运行时的仿真波形

内 IGBT 闭锁,功率降为 0;在 3.5 s 时,断路器重合成功,IGBT 解锁,主换流站投入运行,见图 7 中 II。

在断路器跳开和重合过程中,由于平衡节点的切换,系统出现短时有功不平衡,直流电压将出现较大幅度波动,见图 7 中 I。当主换流站退出运行时,从换流站的控制策略转为下降控制,有功输出增大,同时改变联络线功率,实现了 2 次电压恢复;当主换流站恢复运行时,从换流站转为恒功率控制,有功输出减少,直流电压继续由主换流站控制,见图 7 中 III。断路器重合过程中,由于产生了较大的冲击电流,最小电压低于 $0.95U_{\text{deref}}$,蓄电池并网换流器转入下降控制,蓄电池快速放电,如图 7 中 IV 所示,从而减小了主换流站重新投运对系统的冲击影响。

在直流配电网中,大容量换流站的投、退引起剧烈的功率波动,可能会引起系统崩溃,采用上述分层控制方法可有效实现电压迅速恢复,且不受通信过程影响,该控制过程可在 s 级内实现。

5 结 论

本文提出的分层控制策略有效解决了直流配电网通信过程中的信息传递以及优化调度与分散控制的协调问题。理论推导及仿真验证表明,该控制策略具有以下优点:

(1)解决了分散控制与优化调度的协调问题,既保证了稳态运行时和恶劣运行条件下的系统稳定控制,又实现了系统的经济调度;

(2)本地控制与集中控制的信息传递清晰明确,且对通信速度要求不高,易于应用于工程实践;

对于各层控制策略之间的信息传递问题,本文提出了设计方案,但具体通信结构的设计是该控制策略实际应用中尚存在的问题,将在今后继续进行研究。

参考文献:

- [1] 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 Qing, ZHAO Biao, LIU Wenhua, et al. An overview of research on smart DC distribution power network [J]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(25): 9-19.
- [2] STARKE M, LI F X, TOLBERT L M, et al. AC vs. DC distribution: maximum transfer capability [C] // Proceedings of IEEE Power and Energy Society General Meeting: Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century. Piscataway, NJ, USA:

IEEE, 2008: 1-6.

- [3] HAMMERSTROM D J. AC versus DC distribution systems: did we get it right? [C] // Proceedings of IEEE Power Engineering Society General Meeting. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 1-5.
- [4] DASTGEER F, KALAM A. Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation [C] // Proceedings of Australasian Universities Power Engineering Conference. Adelaide, SA, Australia: [s. n.], 2009: 1-5.
- [5] JIANG H, EKSTROM A. Multiterminal HVDC systems in urban areas of large cities [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1278-1284.
- [6] MAHMOODI M, GHAREHPETIAN G B, ABEDI M, et al. A suitable control strategy for source converters and a novel load-generation voltage control scheme for DC voltage determination in DC distribution systems [C] // IEEE International Power & Energy Conference. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 363-367.
- [7] 陈海荣,徐政. 适用于 VSC-MTDC 系统的直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(19): 28-33.
CHEN Hairong, XU Zheng. A novel DC voltage control strategy for VSC based multi-terminal HVDC system [J]. Automation of Electric Power System, 2006, 30(19): 28-33.
- [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]. Proceeding of the CSEE, 2013, 33(4): 16-24.
- [9] CUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids: a general approach toward standardization [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [10] MOLINA M G, PONTORIERO D H, MERCADO P E. An efficient maximum power point tracking controller for grid-connected photovoltaic energy conversion system [J]. Electronic de Potencia, 2007, 12(2): 147-154.
- [11] 赵仁德,王永军,张加胜. 直驱式永磁同步风力发电系统最大功率追踪控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 27(27): 106-111.

(下转第 150 页)