

适用于直流配电网的改进下垂电压控制策略

高闰国¹, 匡洪海¹, 钟浩², 周宇健¹, 郭茜¹

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412000;

2. 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室(三峡大学), 湖北 宜昌 443002)

摘要:为了解决直流配电网传统下垂控制中有功功率波动过大所引起系统直流电压大幅度变化的问题,首先对传统的电压下垂控制进行了分析,并由此提出了改进下垂电压控制策略。该策略在传统下垂控制的基础上,将下垂系数由常量转换为变量,通过监测系统直流电压,构建下垂系数与直流电压偏差函数关系,并引入电压裕度和指令上、下限值,使其能将系统直流电压限定在设定范围内。系统在受到小功率扰动时能保持传统下垂控制快速调节不平衡功率的优点;受到大功率扰动后能自我修正下垂系数,加强电压控制性,减小系统电压偏差。最后,在PSCAD/EMTDC仿真平台搭建两端供电式直流配电网模型,对改进下垂电压控制策略进行仿真分析,并和传统控制策略进行了对比,仿真结果表明,相比传统下垂控制,改进下垂控制能更有效地稳定系统电压。

关键词:直流配电网;电压控制策略;下垂控制;改进下垂控制

中图分类号:TM72 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed22266

Improved Droop Voltage Control Strategy for DC Distribution Network

GAO Runguo¹, KUANG Honghai¹, ZHONG Hao², ZHOU Yujian¹, GUO Qian¹

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou 412000,

Hunan, China; 2. Hubei Key Laboratory of Cascaded Hydropower Station Operation & Control

(China Three Gorges University), Yichang 443002, Hubei, China)

Abstract: In order to solve the problem about severe change of system DC voltage caused by active power excessive fluctuations under the traditional droop control in DC distribution network, the traditional droop voltage control strategy was analyzed firstly, and an improved droop voltage control strategy was proposed. Based on the traditional droop control, the strategy converts the droop coefficient from a constant to a variable. By monitoring the DC voltage of the system, the function between the droop coefficient and the DC voltage deviation was constructed, and the voltage margin and upper and lower limitations were introduced, which enable the system voltage is limited within the preset range. When the system is subjected to low-power disturbances, it can maintain the advantages of traditional droop control that quickly adjust unbalanced power; after high-power disturbances, it can self-correct the droop coefficient to enhance voltage control ability and reduce the system voltage deviation. Finally, the PSCAD/EMTDC simulation platform was used to build a two-terminal power supply DC distribution network model, and the simulation analysis of the improved droop voltage control strategy was performed, and compared with the traditional control strategy. The simulation results show that the improved droop voltage control can stabilize the system voltage more effectively than the traditional droop control.

Key words: DC distribution network; voltage control strategy; droop control; improved droop control

直流配电网凭着输送容量大、电能质量好、供电可靠性高和分布式电源灵活接入等诸多优点^[1-3],在近几年间得到一系列学者的关注,且相关研究取得迅速发展。随着用电负荷的多元化,

基金项目:湖南省自然科学基金(2018JJ4076);湖北省重点实验室开放基金(2019KJX06)

作者简介:高闰国(1995—),男,硕士研究生,Email:gaorunguo72@163.com

通讯作者:匡洪海(1972—),女,博士,教授,Email:342113970@qq.com

直流负荷所占比重不断增加,相比于交流电网,直流电网在很多领域取得了技术和经济优势,具有巨大的发展前景^[4-5]。同时,电力电子器件的发展对直流配电网产生巨大推进作用,目前,分布式能源、负载和储能等接口变换器的研究相对成熟,并早已应用于工业领域^[6]。随着智能电网和能源互联网的兴起,直流配电网在电力系统中的作用将愈发重要。直流电压稳定和有功功率平衡是衡量直流配电网稳定运行的重要指标,只有控制电压稳定和功率协调,系统才能平稳运行,因此,控制技术是直流配电网关键技术之一。

直流配电网控制策略可参考柔性直流输电和直流微电网等相关方面技术^[7-8]。目前主要是通过电压源型换流器(voltage source converter, VSC)来控制电压稳定和协调功率平衡。文献[9]设计了一种改进下垂控制,该方法可通过检测本地电压来修正下垂系数,在发生小扰动时可减小直流电压偏差,而发生严重故障时能够防止换流器过载运行。文献[10]提出一种混合控制策略,设计出4阶混合控制器,来优化直流电压的控制效果。文献[11]通过改进最优潮流算法来修正下垂系数,实现直流系统的经济运行。文献[12]提出一种协调控制策略,在考虑换流站运行状况、分布式电源和负荷变化的情况下,将系统分成3种运行模式,并通过储能设备充、放电实现各种模式的平滑切换。文献[13]对直流配电网的运行模式及换流站的模式切换进行分析,在主从控制的基础上,提出一种主站采用定电压控制,从站采用 $P-U-I$ 控制的方式,可有效解决复杂的模式切换问题。文献[14]提出含有分布式储能参与的控制策略,通过推导交、直流接口电压频率耦合关系和双向直流接口级联下垂特性,控制储能补偿电压波动和电网频率波动。文献[15]提出一种考虑电压偏差和功率裕度的自组织下垂控制,在传统下垂控制基础上,考虑换流站的功率裕度并

附加定电压控制,设计基于元胞自动机的自组织更新规则,有效提高系统的稳定性。上述文献从多角度改进了直流系统电压控制策略,主要集中在下垂控制和主从控制。

凭借良好的动态响应能力,下垂控制成为当前研究热点,然而固定的下垂系数使得电压变化在受到大功率波动时影响较大^[16],难以使系统电压维持在一定范围内。为了解决这个问题,本文提出改进下垂电压控制策略,在传统下垂控制基础上,通过监测本地直流电压,构建下垂系数与直流电压偏差函数,使下垂系数在大功率扰动下能自我修正,增强电压调控能力,并设定电压上、下限值,使系统电压限定在指定范围内。相比于传统下垂控制,改进下垂电压控制能更有效地减小电压偏差,维持系统电压稳定。并在PSCAD/EMTDC仿真平台搭建了两端供电直流配电网,测试了其控制策略效果,证实了此策略的有效性。

1 直流配电网电压控制

1.1 控制原理

直流配电网的基本拓扑结构主要有环状、两端供电和放射状3种^[17]。其中,放射状网络控制简单,但供电可靠性低,当上级故障时容易导致整个系统停止运行;环状网络供电可靠性高,但控制相对困难;两端供电相比放射状网络可靠性高,当一端故障时可由另一端继续供电,其控制相比环状网络简单。本文以两端供电结构的直流配电网为研究对象,其拓扑结构如图1所示。

直流配电网电压与功率控制主要通过VSC,采用双闭环控制。在 $d-q$ 同步旋转坐标系下,假设交流系统三相对称运行,其中没有零序分量,当 d 轴与交流母线基波电压同相位时,其 q 轴电压分量为零,即 $u_{sq}=0$,则并网的交流侧有功功率和无功功率为

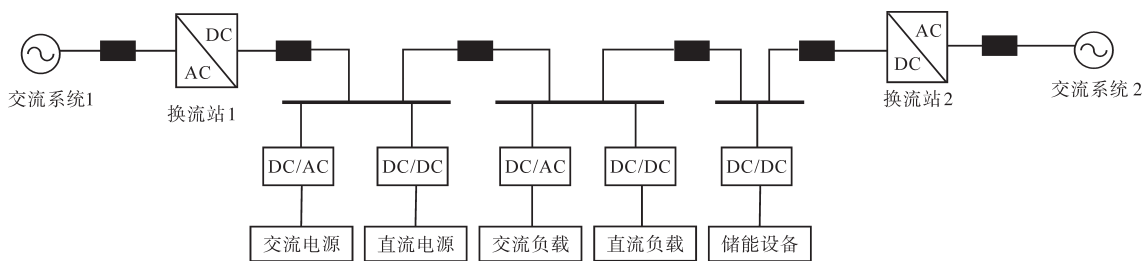


图1 两端供电结构直流配电网

Fig.1 Dual-terminal structure of DC distribution network

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (u_{sd}i_d + u_{sq}i_q) = \frac{3}{2} u_{sd}i_d \\ Q_s = \frac{3}{2} (u_{sd}i_q - u_{sq}i_d) = \frac{3}{2} u_{sd}i_q \end{cases} \quad (1)$$

在换流器稳定运行情况下, d 轴电压分量 u_{sd} 保持不变, 可以通过改变 d 轴电流分量 i_d 和 q 轴电流分量 i_q 来改变有功功率和无功功率, 实现了有功功率和无功功率的解耦控制。控制器外环实现各种不同的控制方式, 一般有主从控制、下垂控制和电压裕度控制, 而内环控制器用来提高电能质量^[18]。内环控制器结构如图2所示。

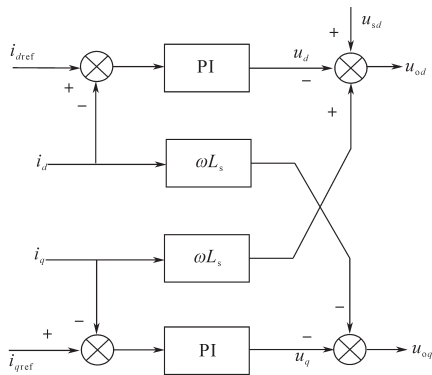


图2 内环控制器
Fig.2 Inner loop controller

1.2 电压下垂控制

电压下垂控制方法是参考交流系统中的调频器, 通过多个换流站对自身电压的测量, 基于下垂特性来调整功率的指令值, 进行功率的分配, 调整后的功率反作用于电压以维持电压的稳定。其特性曲线如图3所示, 当网络中功率发生变化时, 换流站按照其下垂特性调节电压和功率, 运行点由 A 点移动至 B 点, 达到新的稳态平衡。

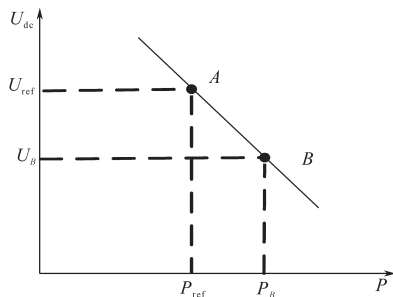


图3 下垂控制特性曲线
Fig.3 Characteristic curve of droop control

控制器输出偏差为

$$e_r = U_{ref} - U_{dc} + K(P_{ref} - P) \quad (2)$$

式中: e_r 为控制器输出偏差; U_{ref} 为直流电压指令值; U_{dc} 为直流电压实际值; K 为下垂系数; P_{ref} 为有功功率指令值; P 为有功功率实际值。

其控制器结构如图4所示。

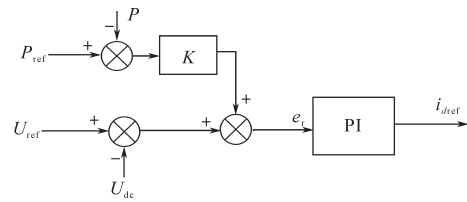


图4 下垂控制外环控制器
Fig.4 Outer loop controller of droop control

下垂控制能够迅速地对直流网络潮流变化作出响应, 调整直流功率。但是不能对系统直流电压精确跟踪, 固定的下垂系数难以适应多变的潮流状况。

2 改进下垂电压控制

2.1 原理分析

在图1所示的两端供电直流配电网中, 当换流站1处于定电压控制, 换流站2处于传统下垂控制时, 若系统有功需求减少, 换流站1通过减少有功输入以维持系统电压稳定, 直至功率越限切换至定功率控制后, 由换流站2来调节有功功率和系统直流电压。若此时有功输入仍大于所需功率, 系统电压将持续上升, 换流站难以稳定系统直流电压。传统的下垂控制不能将系统电压限制在一定范围内。为了解决此问题, 本文提出改进下垂电压控制, 当系统电压偏差过大时, 下垂系数将自动减小, 增强换流站电压刚性, 减小电压偏差。

改进下垂电压控制外环控制器如图5所示, 图5中, ΔK 为下垂系数修正值, 为电压偏差 ΔU 的函数; K_0 为换流站稳定运行时初始值, 与传统下垂控制系数设计方法相同, 此时, 换流站改进下垂系数为

$$K = K_0 - \Delta K \quad (3)$$

换流站输出偏差为

$$e_r = U_{dref} - U_{dc} + (K_0 - \Delta K)(P_{ref} - P) \quad (4)$$

随着 ΔU 的不断增大, ΔK 同时也不断增大, K 不断减小, 下垂系数减小, 换流站电压调控能力变强。当 ΔU 达到限定值时, $\Delta K = K_0$, 下垂系数减小至0, 换流站相当于处于定电压控制模式, 能将系统直流电压维持在限定范围内。

换流站电压指令值 U_{dref} 与实际电压值 U_{dc} 关系为

$$U_{dref} = g(U_{dc}) = \begin{cases} U_{refH} & U_{dc} \geq U_{refH} \\ U_{ref} & U_{refL} < U_{dc} < U_{refH} \\ U_{refL} & U_{dc} \leq U_{refL} \end{cases} \quad (5)$$

式中: U_{refH} , U_{refL} 为系统预先设定电压上、下限值; U_{ref} 为系统稳定运行额定值。

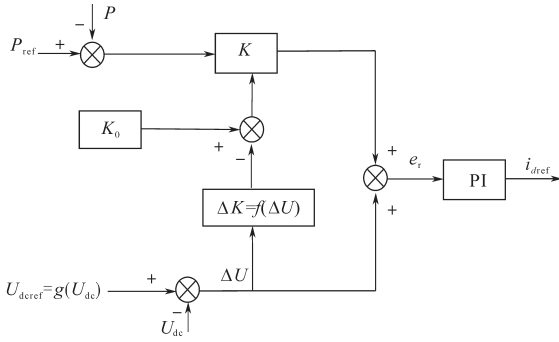


图5 改进下垂电压控制外环控制器

Fig.5 Outer loop controller of improved droop voltage control

2.2 参数选取

下垂系数修正值是改进下垂电压控制的关键,不同的函数 $\Delta K=f(\Delta U)$ 决定了不同的控制策略性能。函数的选择应满足:1)换流站稳态运行时,控制器不受小电压波动的影响;2)电压偏差值较大时,能迅速平稳地进行电压修正,减小电压偏差,并且在偏差大到一定程度时控制器处于定电压模式。

本文改进下垂电压控制策略采用抛物线函数计算 ΔK 值,其式为

$$\Delta K = \alpha \Delta U^2 \quad (6)$$

式中: α 为大于0的常数,影响 ΔK 的变化速率。

为保证直流电压偏差达到最大值时能将系统电压限定在设定值内,下垂系数应满足 $K=0$,换流站处于定电压控制,因此

$$K_0 - \alpha \Delta U_{max}^2 = 0$$

即

$$\alpha = \frac{K_0}{\Delta U_{max}^2} \quad (7)$$

其中 $\Delta U_{max} = U_{refH} - U_{ref} = U_{ref} - U_{refL}$

式中: ΔU_{max} 为预先设定系统电压裕度值。

因此,在确定初始下垂系数后, α 由电压裕度值决定。同时为避免 ΔU 过大导致下垂系数 K 为负数, ΔU 应满足

$$|\Delta U| = \begin{cases} |U_{ref} - U_{dc}| & |\Delta U| < \Delta U_{max} \\ \Delta U_{max} & |\Delta U| \geq \Delta U_{max} \end{cases} \quad (8)$$

改进下垂控制特性曲线如图6所示,由图6可知,当电压偏差较小时,改进下垂与传统下垂一致,靠初始固定下垂系数调节不平衡功率与电压,系统运行于点A。当电压偏差过大时,下垂系数将进行自我修正,增强换流站电压调控能力,若下垂系数减小至0,此时换流站处于定电压控

制状态,可将直流电压限定在设定值内,系统运行于点B或点C。为保证系统在下垂系数修正过程中稳定运行,换流站应迅速切换至定电压控制模式,其修正过渡过程要快速平稳。

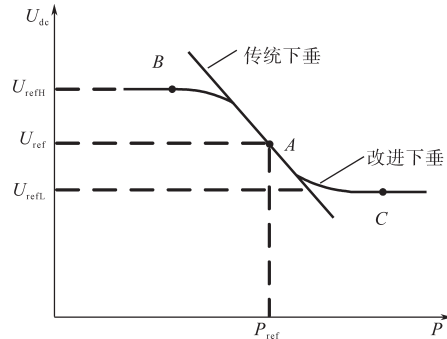


图6 改进下垂电压控制特性曲线

Fig.6 Characteristic curve of improved droop voltage control

3 仿真分析

为验证本文所提出电压下垂裕度控制策略的有效性,在PSCAD/EMTDC仿真平台建立两端供电式直流配电网模型,其主回路拓扑见图1所示。其中换流站1采用定功率控制,换流站2分别采用改进下垂控制和传统下垂控制,电压偏差裕度值取 ± 0.5 kV,系统及控制器参数为:直流系统额定电压 $U_{dc}=10$ kV,换流站1额定功率 $P_{ref1}=3$ MW,换流站2额定功率 $P_{ref2}=2$ MW,电压上限指令值 $U_{refH}=10.5$ kV,电压下限指令值 $U_{refL}=9.5$ kV,下垂系数初始值 $K_0=0.8$ 。本文在此控制方式下选取两种扰动方式来分析其动态响应特征:1)小功率波动仿真分析,换流站1功率指令值由3 MW下降至2.5 MW;2)大功率波动仿真分析,换流站1功率指令值由3 MW下降至1.7 MW。

3.1 小功率波动仿真

换流站1在 $t=3.5$ s时受到小功率扰动,其输出功率指令值由3 MW降低至2.5 MW,系统功率及电压仿真波形如图7和图8所示。

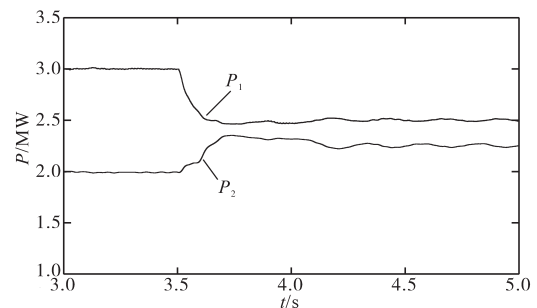


图7 小功率波动仿真功率波形

Fig.7 Simulated power waveforms under low power fluctuation

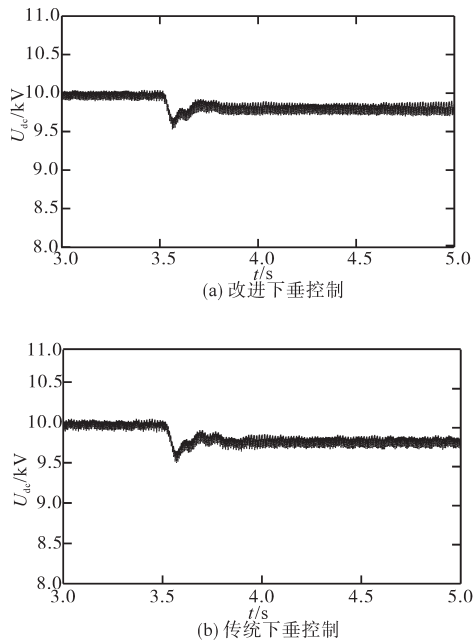


图8 小功率波动仿真电压波形

Fig.8 Simulated voltage waveforms under low power fluctuation

在 $t=3.5$ s时换流站1输出功率减少,为维持系统电压,在下垂特性调控下,换流站2有功输出增大,由2 MW增加至2.25 MW,功率偏差0.25 MW,初始下垂系数为0.8,可算得理论电压偏差值为0.2 kV,由电压仿真波形可知,在传统下垂控制和改进下垂控制下,系统电压都由10 kV降至9.8 kV,与理论计算结果吻合。根据仿真可知,在小功率波动下,改进下垂控制能保持传统下垂控制的优越性,控制性能及动态响应能力一致,能快速地调节不平衡功率,维持系统电压。

3.2 大功率波动仿真

在换流站1在 $t=3.5$ s时受到大功率扰动,其输出功率指令值由3 MW降低至1.7 MW,系统功率及电压仿真波形如图9和图10所示,下垂系数波形如图11所示。

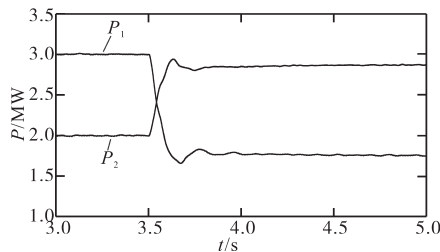


图9 大功率波动仿真功率波形

Fig.9 Simulated power waveforms under high power fluctuation

换流站1有功输出减少后,换流站2有功输出由之前的2 MW增加至2.85 MW,以维持系统电压稳定。在传统下垂控制下,功率偏差为0.85 MW,初始下垂系数为0.8,可算得理论电压偏差值为

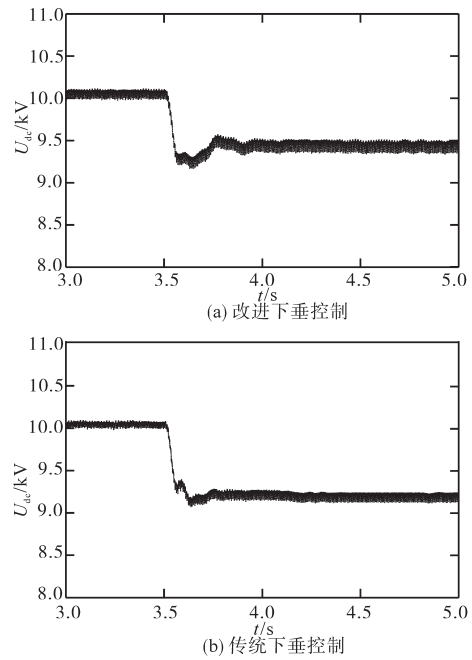


图10 大功率波动仿真电压波形

Fig.10 Simulated voltage waveforms under high power fluctuation

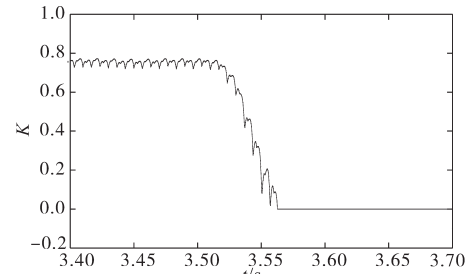


图11 下垂系数波形

Fig.11 Droop coefficient waveform

0.68 kV,由电压仿真波形可知电压由之前的10 kV降至9.3 kV,符合计算结果。在改进下垂控制下,系统检测到电压偏差超出其预先设定值0.5 kV,为加强电压控制能力,减小系统电压偏差,下垂系数将进行自我修正,由式(3)、式(6)和式(7)可知,此时 $\alpha=3.2$,下垂系数迅速减小至0,换流站表现为定电压控制,如电压仿真波形所示,系统电压稳定在9.5 kV。与传统下垂控制相比,系统直流电压偏差减小0.2 kV。从图11可知,在受到扰动前,系统下垂系数能保持在初始值0.8附近,微小的电压波动不会对系统造成影响,只有在受到大扰动时,下垂系数会快速自我调整,修正过渡时间为0.06 s。

本文提出的改进下垂控制策略与其他改进下垂控制相比,电压偏差达到设定限值后,下垂系数会减小至0,如同在下垂控制中引入电压裕度控制功能,能有效稳定系统电压。同时,通过抛物线函数设计下垂系数,使算法相对简单,过

渡更为平缓。

4 结论

本文通过分析传统下垂控制策略,说明了该方法的不足之处,提出改进下垂电压控制策略,详细分析了其工作原理,设计了改进下垂电压控制器,并对参数的选取做出说明,该策略保留了传统下垂控制优越的动态响应能力,同时弥补了该控制方式的不足,通过仿真实验分析可知:

1)系统受到小功率扰动后,改进下垂控制能保留传统下垂控制良好的动态响应能力,同样可以快速达到新的稳定状态;

2)系统受到大功率扰动后,在改进下垂控制下,下垂系数将进行自我修正,增强换流站电压调控能力,使系统电压稳定在一定范围内,减小系统电压偏差。

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.
 [2] 马骏超,江全元,余鹏,等.直流配电网能量优化控制技术综述[J].电力系统自动化,2013,37(24):89-96.
 [3] 杜翼,江道灼,尹瑞,等.直流配电网拓扑结构及控制策略[J].电力自动化设备,2015,35(1):139-145.
 [4] 杨旭红,尹聪聪.基于孤岛模式光储直流微电网的协调控制策略[J].电气传动,2020,50(5):75-80.
 [5] Ji Y, Yuan Z, Zhao J, et al. Overall control scheme for VSC-based medium-voltage DC power distribution networks[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(6):1438-1445.
 [6] Li Y, He L, Liu F, et al. Flexible voltage control strategy considering distributed energy storages for DC distribution network

[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2019, 10(1):163-172.
 [7] 李霞林,郭力,黄迪,等.直流配电网运行控制关键技术研究综述[J].高电压技术,2019,45(10):3039-3049.
 [8] 曾杰,张弛,袁志昌,等.实现分区均衡的直流配电系统控制方法研究[J].电气传动,2019,49(9):46-51.
 [9] 王渝红,陈勇,曾琦,等.适用于VSC-MTDC的改进下垂控制[J].高电压技术,2018,44(10):3190-3196.
 [10] 吴金龙,刘欣和,王先为,等.多端柔性直流输电系统直流电压混合控制策略[J].电网技术,2015,39(6):1593-1599.
 [11] 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.
 [12] 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.
 [13] 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.
 [14] 贺悝,李勇,曹一家,等.考虑分布式储能参与的直流配电网电压柔性控制策略[J].电工技术学报,2017,32(10):101-110.
 [15] 成龙,金国彬,王利猛,等.考虑功率裕度和电压偏差的多端直流配电网自组织下垂控制[J].电力系统自动化,2019,43(23):81-93.
 [16] Chen A, Xie D, Yu S, et al. Comprehensive evaluation index based on droop control for DC distribution system dispatching[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2019, 106:528-537.
 [17] 江道灼,郑欢.直流配电网研究现状与展望[J].电力系统自动化,2012,36(8):98-104.
 [18] 蒋智化,刘连光,刘自发,等.直流配电网功率控制策略与电压波动研究[J].中国电机工程学报,2016,36(4):919-926,1175.

收稿日期:2020-08-05

修改稿日期:2020-08-17

(上接第52页)

[13] Shadmam M B, Balog R S, Abu-Rub H. Model predictive control of PV sources in a smart DC distribution system: maximum power point tracking and droop control[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019,29(4):913-921.
 [14] Gu Y, Xiang X, Li W, et al. Mode-adaptive decentralized control for renewable DC microgrid with enhanced reliability and flexibility[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(9):5072-5080.
 [15] Li D, Ho C N M. A module-based plug-n-play DC microgrid with fully decentralized control for IEEE empower a billion lives competition[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021,36(2):1764-1776.
 [16] Lu X, Sun K, Guerrero J M, et al. Double quadrant state-of-charge-based droop control method for distributed energy stor-

age systems in autonomous DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015,6(1):147-157.
 [17] Elrayyah A, Sozer Y, Elbuluk M E. Modeling and control design of microgrid-connected PV-based sources[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2014, 2(4):907-919.
 [18] Cai H, Xiang J, Wei W. Decentralized coordination control of multiple photovoltaic sources for DC bus voltage regulating and power sharing[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018,65(7):5601-5610.
 [19] 王伟,徐燕芬.适用于功率突变的MTDC系统改进下垂控制[J].电气传动,2020,50(8),59-64.

收稿日期:2021-01-08

修改稿日期:2021-02-03