

适用于多端柔性直流配电网的改进控制策略

李力¹, 郭佩乾²

(1. 上海吴泾第二发电有限责任公司, 上海 200241;

2. 清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 随着分布式能源的接入及规模的不断提升、电力电子器件的不断发展以及各类型直流负荷的增多, 直流配电网由于自身优点而获得越来越多的关注。然而, 柔性直流配电网与直流输电系统控制策略则不完全相同, 因此, 需要对直流配电网的控制方式进一步研究以满足直流配电网控制要求。首先对传统柔性直流系统控制策略进行分析, 以适合于多端直流配电网的下垂控制为基础提出一种改进下垂控制策略, 并依托多端直流配电网仿真模型验证该改进控制策略的正确性。结果表明所提改进控制策略可有效消除传统下垂控制稳态时存在的电压偏差问题, 同时当系统出现负荷波动时可将系统直流电压控制在所设定的范围内, 有效提高系统稳定运行能力。

关键词: 直流配电网; 电压源型换流器; 下垂曲线平移控制

中图分类号: TM72 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21227

An Advanced Control Strategy for Flexible Multi-terminal DC Distribution Network

LI Li¹, GUO Peiqian²

(1. Shanghai Wujing No.2 Power Generation Co., Ltd., Shanghai 200241, China; 2. Department of

Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the improvement of renewable integration scale, the development of power electronics and the increase of various types of DC loads, DC distribution network attracts more attention. However, the control strategies of flexible DC distribution network and HVDC transmission system are not exactly the same. Therefore, the control strategy needs to be further studied to meet the requirement of DC distribution network characteristics. According to the analysis of the traditional droop control strategy, an advanced strategy was proposed to apply for multi-terminal DC distribution network. Based on the simulation, the proposed method was performed to validate the improvement and effectiveness. The results show that the advanced control strategy can effectively eliminate the traditional droop control of steady-state voltage deviation problems, and control the DC voltage within the established range when the system load fluctuation occurs, which can effectively improve the stability of system.

Key words: DC distribution network; voltage sourced converter; variable intercept droop control

当前, 分布式能源并网规模与容量的不断提升, 电力电子设备渗透率不断增加, 新型电力系统逐渐进入电力电子化趋势。直流负荷中心、电动汽车以及终端用户负荷直流化趋势的发展直接驱动能源传输以及应用方式的变革。相较于交流配电网, 采用电力电子器件的柔性直流配电网优势如下: 1) 相比较于交流配网, 直流配网不存在频率、电压波动以及无功等问题, 可有效提高电能质量与供电可靠性; 2) 采用直流配电的输送能力是交流线路的 1.5 倍以上, 有效提高了输送能力, 缓

解了配电走廊与供电容量不足的问题; 3) 采用直流配电时, 直流负荷以及分布式直流源可直接并入直流配电网, 减少 AC/DC 转换损耗以及设备成本; 4) 交流配电网线路存在电晕损耗, 加上自身交流系统的无功损耗, 直流配电网的损耗就仅为交流电网的一半甚至以下^[1]。因此, 直流配电系统由于以上优势逐渐进入研究人员的视线, 进一步的探索对未来配网建设与改造具有重要的意义^[2]。

目前, 国内外已有多个研究机构和高校对直流配电网进行了研究。其中, 2004 年东京工业大

学提出基于微网的直流配电系统结构,该系统实现了10 kW的直流配电系统样机。同时,米兰理工则提出了基于分布式电源的直流配电系统,系统主接线方式则采用真双极供电系统。弗吉尼亚理工大学则在2007年提出未来楼宇低压供电系统,提高了楼宇供电效率。近年来我国也逐步开展了若干直流配网研究,2013年,深圳供电局依托863计划,提出基于10 kV电压等级的柔性直流配电网典型架构以及控制方式,并建立动态模拟实验室进行验证^[3-5]。北京市电力公司利用柔性直流输电技术对传统配电网进行改造,实现了三端柔性直流环网互联。2016年,北京市海淀区开展了能源互联微网项目,提出“互联互通,双向流动”的能源互联网架结构^[6]。2018年9月,国内首个五端柔性直流配电示范工程在贵州大学新校区投入试运行^[7],为未来直流配网的发展提供了良好的示范效果。

下垂控制由于其具备控制灵活、扩展性强以及对通讯要求低等优点而成为较适合多端柔性直流系统的控制方式。然而,不同于柔性直流输电系统特点,柔性直流配电网对电压要求更高,下垂控制自身存在的直流电压与功率的相互制约性不完全适用于柔性直流配网,易造成系统稳态直流电压误差。本文依托深圳局承担的柔性直流电网计划所提出的多端典型直流配网系统结构,对柔性直流配电网控制技术进行研究,提出一种适用于柔性直流配电网的改进下垂控制方法,解决下垂控制中存在的固有缺陷,并基于仿真验证其可行性。

1 控制方式分析

频率是衡量交流系统功率平衡的重要指标,不同于交流配电网,在直流系统中,由于无需考虑无功功率和相位同步等问题,所以直流电压直接反映了直流系统功率平衡的情况。当交流源侧注入直流配网的功率与配网中负荷不匹配时,将会导致直流电压上升或下降;同时直流电压还反映系统出现暂态扰动时的抗扰动能力。因此,直流电压控制能力是评价中压柔性直流配电网性能的关键指标之一。目前,柔性直流配网控制方式参考柔性高压直流输电,主要采用主从控制^[8-10]、电压裕度控制^[10-12]以及电压下垂控制^[13-17]。

主从控制利用单一换流站作为功率调节站

控制直流电压的平衡,其他换流站采用功率控制模式进行功率交互。主从控制模式由于采用单一调节站,对主站压力较大,同时需要较为稳定且快速的通讯能力^[8,18]。电压裕度控制方式则基于主从模式基础,当主换流站出现故障后或功率超额而造成直流电压无法恒定时,另一备用换流站代替主站起到维持电压恒定的作用。这种方式有效缓解了主从控制对通讯系统的要求,然而系统端数过多时,电压裕度控制存在的问题则会制约系统的运行。并且,存在后备换流站选取复杂、系统电压波动较大以及主站与后备主站频繁切换过程中造成系统振荡的问题,可靠性较差。

相对于直流输电系统,由于直流配网系统节点众多、潮流变化复杂,因此,主从控制与电压裕度控制这两种方式适合换流站较少且工况较为简单的直流配电系统。

电压下垂控制则不同于前两种,采用直流电压与直流功率间的斜率关系实现多个换流站承担直流电压控制的目的,即控制换流器的端电压随功率的变化呈现下垂特性构成了稳定的负反馈系统。当电压升高时,换流器输出的功率相应的减少;电压降低时,换流器输出的功率相应的增加,具有很强的稳定性。特别是当系统中负荷发生变化或新能源出力波动时,各端换流站同时参与系统功率调节,有效减少调节主流站所承担的压力。同时,由于该系统控制采用本地控制器,无需上层通讯,非常适合于多端互联系统。

2 传统下垂控制分析

传统下垂控制采用定直流电压控制与定有功功率控制相结合,以三个换流站为例,稳态时直流电压 U_{dc} 与有功功率 P 之间关系和外环控制器框图如图1和图2所示。

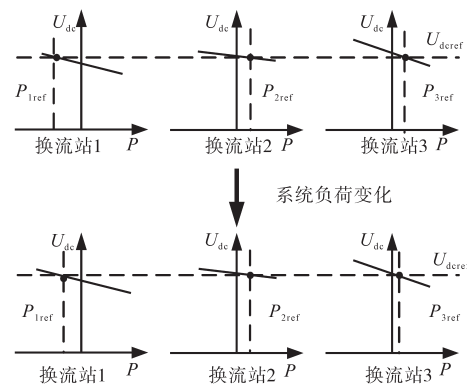


图1 下垂特性曲线

Fig.1 Characteristic curves of droop control

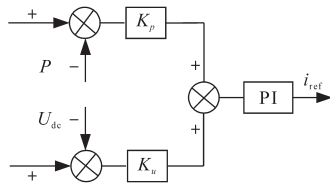


图2 下垂外环控制器

Fig.2 Outer-loop controller of droop control

图1中,电源换流器输出功率到系统,负荷换流器则从系统吸收功率,即图1中 $P_{1ref} < 0, P_{2,3ref} > 0$ 。同时,注入系统有功功率与有功功率吸收处于平衡关系,即 $|P_{1ref}| = P_{2ref} + P_{3ref}$ 。

因此,根据图2外环控制器可得出直流电压与有功功率之间的关系如下式:

$$\frac{P_{ref} - P}{U_{dcref} - U_{dc}} = k' \quad (1)$$

式中: U_{dcref} 为换流站直流电压参考值; U_{dc} 为换流站当前直流电压值; P_{ref} 为换流站有功功率参考值; P 为换流站当前有功功率; k' 为表征直流电压与有功功率控制的下垂斜率值。

由式(1)可以推出,在某一特定电压/功率下,换流站输出功率/端口电压的大小为

$$P = P_{ref} - k'(U_{dcref} - U_{dc}) \quad (2)$$

$$U_{dc} = U_{dcref} - \frac{1}{k'}(P_{ref} - P) \quad (3)$$

根据式(2)与式(3)可知,当 k' 取值越大,换流器输出功率受电压变化越敏感;反之,当 k' 取值越小,换流器输出功率受电压变化影响越小。当 k' 取值越大,换流器对直流配网电压调节支撑能力越强;当 k' 越小,换流器对电压调节能力越弱^[19]。

不同斜率取值下垂特性曲线如图3所示,以负荷换流器下垂特性曲线为例,当系统斜率取值过大时,系统功率调节能力较好,但是系统电压偏差较大;当系统斜率取值较小时,系统电压稳定性较好,但系统功率调节能力较差。特别是当系统负荷变动较大或频繁变动时,采用下垂控制会出现较大的直流电压偏差。

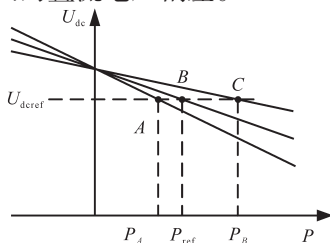


图3 不同斜率取值下垂特性曲线

Fig.3 Characteristic curves of droop control with different slope values

综上可得出,换流站采用下垂控制方式时具备有功功率平衡与直流电压稳定的功能,但是,由于系统下垂斜率的存在,系统有功功率与直流电压存在了制约,影响了系统的稳定性。因此,传统下垂控制存在着较少电压偏差与较快速功率调节能力的固有矛盾。

3 改进下垂控制方式

如第2节所述,对于直流配电网而言,直流电压的稳定意味着系统功率平衡以及下一次出现故障时系统的抗扰动能力的强弱。因此,下垂控制存在的电压偏差成为提高多端柔性直流配电网研究与应用的關鍵所在。

为了改善下垂控制电压与功率快速准确调节的局限性,二次控制被研究人员提出,通过对下垂控制曲线再次调节以达到电压补偿的目的。目前,对下垂控制进行改进的方法可大致分为三大类:1)下垂曲线平移法;2)调整下垂曲线系数法;3)混合法。

平移曲线方式通过对直流母线电压的检测来调节下垂曲线的上下移动以完成对输出电流的控制,最终调节功率以达到稳定直流电压的目的,下垂特性曲线平移如图4所示,以负荷所连接换流器的下垂特性为例。第二种调节下垂曲线系数方式则以不同功率单元运行在不同系数值的下垂曲线上时直流电压对应的功率数值不同为基础,通过调整下垂系统 k 值的大小进行调整,如图3所示。第三种混合方式则是结合两者优点,提高了调节自由度,同时解决了更多问题,满足了系统多控制要求。然而该方法存在控制复杂以及稳定性不足的问题,需要进一步实践验证。

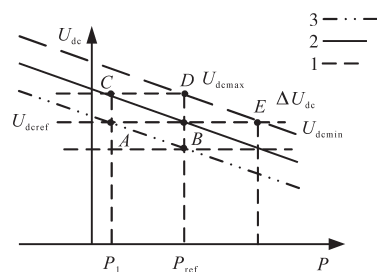


图4 下垂特性曲线平移

Fig.4 Characteristic curves of variable intercept droop control

文献[20]利用电压和电流一致性算法,修改下垂曲线的电压值平移下垂曲线,然而增加了系统对通讯的要求。文献[21]采用离散一致性算法,通过邻居节点间的信息交互寻找满足要求的

目标虚拟电阻调整下垂控制的曲线系数,计算量较复杂,实现灵活性不足。文献[22]提出通过集中式控制调节器进行参数补偿,改变下垂控制曲线参数,适用于微网且容易出现单点故障现象。文献[23]利用模糊控制调整下垂曲线系数,实现分布式发电与储能单元的协同配合,完成直流电压补偿。文献[24]则提出变截距直流电压下垂策略对风电场接入的直流输电系统控制方式进行改进,有效消除直流电压波动问题,该方法适用于功率频繁波动系统,不完全适用于直流配电网系统。

由于配网系统中存在诸多不确定因素,配网系统出现扰动或运行状况发生变化时,如负载突变等情况,运行特性曲线将会平移,继而导致稳定运行点发生改变,使直流母线电压产生波动。为防止配网系统直流母线电压偏差过大,需对直流母线电压进行二次补偿。因此,本文提出一种改进下垂控制方法。采用换流站输出电压与有功功率间的关系,进行修改下垂曲线设定功率参考值,平移下垂特性曲线,有效缓解有功功率和电压波动压力,从而实现稳定直流电压的功能。

为保证直流配网直流电压稳定,规定电压保持在基准参考电压上下允许的最大偏差范围内,即在图4中的直流电压最大上限值 $U_{d,max}$ 与直流电压最大下限值 $U_{d,min}$ 的范围之内。假定初始时刻受端换流站功率运行于下垂斜率为2曲线的B点并运行稳定,当系统出现负荷突降时,换流站下垂稳态运行点由B点转移至下垂曲线2的C点。系统直流电压 U_{dc} 升高,同时系统运行在新功率参考值 P_1 时,系统出现电压偏差。在这种情况下,通过修改下垂特性曲线为3时,系统运行点将稳定在新的运行点A,电压偏差同时被消除,直流电压恢复至参考值 U_{deref} 。

$$\Delta U_i = U_{deref,i} - U_{dc,i} \quad i = 1, 2, 3 \dots \quad (4)$$

式中: $U_{deref,i}$ 为每个换流站输出直流电压的参考值; $U_{dc,i}$ 为每个换流站的下垂特性曲线设定的初始电压; ΔU_i 则为每个换流站补偿电压偏差值。

另外,由于系统运行将出现新的功率参考值,因此,需要判定功率是否已经进入稳态。若系统功率未达到稳态,通过修改直流电压则可能造成系统的振荡,甚至导致系统不稳定运行[24]。移动平均器(moving average filter, MAF)属于数据处理方式,通过选取一定时间窗口内的数据量对其进行平均值计算[25]。设给定时间序列, $y = \{\dots, y_{t-2}, y_{t-1}, y_t, y_{t+1}, y_{t+2}, \dots\}$,则MAF的计算公式

如下所示:

$$\hat{x}_t = \sum_{i=-T/2}^{T/2} F_i y_{t-i} \quad t = 1, 2, \dots, N \quad (5)$$

式中: \hat{x}_t 为所设定函数 F 在 t 内经MAF计算后得到输出值; t 为时间; F_i 为所设定滤波函数在 t 时的取值; T 为所设定窗口时间长度且 $T < t < N - T$ 。

因此可通过采用MAF对换流器输出有功功率在一定时间尺度 t 内取样并进行平均值 \bar{P} 计算,之后通过对其在该时间尺度 t 内进行微分计算,当满足 $d\bar{P}/dt < \varepsilon$ 条件后则可认为有功功率进入新的稳态,进入下一级控制。因此,该改进下垂控制器的控制示意图如图5所示。

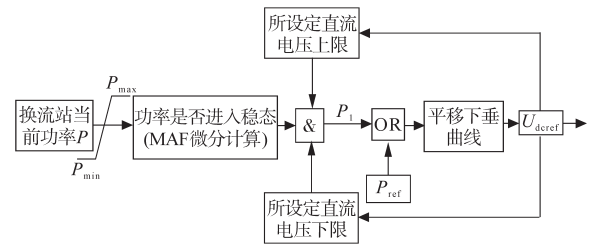


图5 改进下垂控制器示意图

Fig.5 Advanced droop controller schematic

4 仿真实验

依托柔性直流电网计划所提出的典型直流配网系统结构,在EMTDC/PSCAD平台建立下图6所示的 ± 10 kV中压多端环状柔性直流配电系统,直流配网主接线采用正负双极线路。为验证上述改进下垂控制的有效性及其优越性,分别应用以上提出的新型下垂控制策略与传统下垂控制策略将二者进行对比,并在系统出现负荷大扰动情况下进行仿真实验。

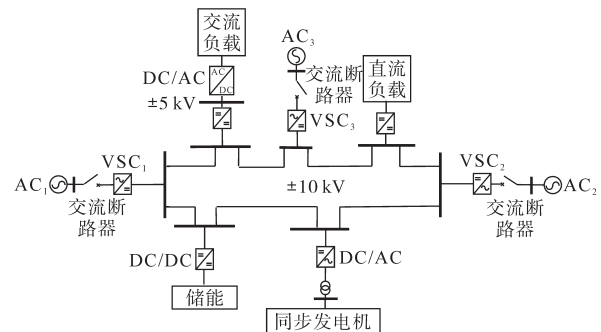


图6 多端直流配网架构图

Fig.6 Multi-terminal DC distribution network

直流配电网内部只存在直流分量,各节点对配电网输出或消耗的功率是由该节点电压、与该节点相邻各节点电压及线路电阻决定的。由于

配电网相较于输电网距离较短且仅验证所提控制方式的优越性,因此,在该直流配网架构验证改进控制方式时忽略线路电阻对电压的影响。

同时,考虑交直流负荷及同步机等对外特性且由于仿真系统复杂程度和仿真时间问题,对模型进行有效等效处理,且等效优化处理后不会影响仿真结果。系统仿真时间设定为7 s, ε 为0.1, MAF 移动窗口时间 T 设置为0.1 ms, 主要仿真参数如下:直流电压参考值 ± 10 kV;换流站 VSC₁~VSC₃ 容量 10 MV·A;交流负载容量 4 MW;同步电机容量 4 MW;直流负载容量 5 MW;换流器斜率 k_1, k_2, k_3 分别为 1/15, 1/20, 1/25; U_{dmax} 与 U_{dmin} 设定值分别为 20.5 kV, 19.5 kV。

柔性直流系统启动后,交流负载直流负载以及储能和同步电机在 0.5 s, 0.6 s, 0.7 s, 0.8 s 分别通过 DC/AC 与 DC/DC 并入直流母线。

传统下垂控制系统仿真结果如图 7 所示。当柔性直流配电系统采用传统下垂控制时,通过图 7a 可知,当系统负荷突变时,为维持系统功率稳定,各换流站紧急自调节根据已设定好的下垂控制曲线进行运行点移动。其中,图 7b~图 7d 则是由于负载变化后系统自适应调节功率输出曲线。

通过图 7e 可知,当系统处于稳态运行时($t < 3$ s 和 $t > 5$ s 时间段内),传统下垂控制由于自身特性约束,实际直流电压与设定参考值存在一定的电压偏差。在 3 s 时刻系统出现功率波动时,直流母线电压由于功率变化进行调节,进入新的稳态。当 4.5 s 之后系统恢复运行,换流站输出功率逐渐恢复至初始稳态数值,直流电压偏差逐渐明显。

对于改进下垂控制策略,系统稳定时直流电压稳定在 ± 10 kV, 由于直流配电网各换流器间的直流线路阻抗忽略,三个换流器端口电压各自稳定在 20 kV。

当 3 s 时刻负载功率发生突变,即负载 PL₁ 由稳定时 5 MW 突变至 -7 MW, 如图 7a 中 PL₁ 实线所示。此时,系统输出功率稳态时与负载吸收功率达到平衡,如图 8a 所示为系统输出功率大小。本文提出的改进控制方式将直流电压维持在所设定范围 U_{dmax} 与 U_{dmin} 之间;随后,当 4.5 s 负载 PL₁ 由 -7 MW 直接突变至 7 MW, 此时各换流站根据自身下垂控制特性自适应调节,将直流电压维持在 U_{dmax} 与 U_{dmin} 之间,图 8b~图 8d 为三个换流站直流电压。需要注意的是,由于负载变化大小以

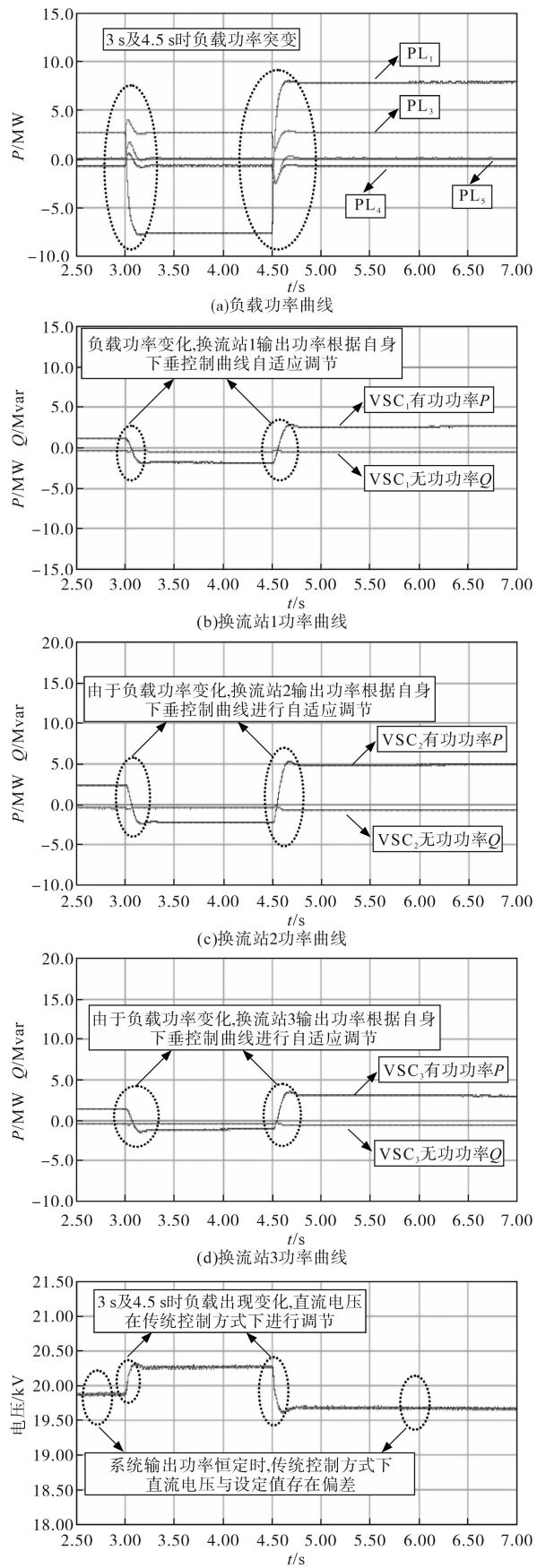


图7 传统下垂控制系统仿真结果

Fig.7 Simulation results of traditional droop control

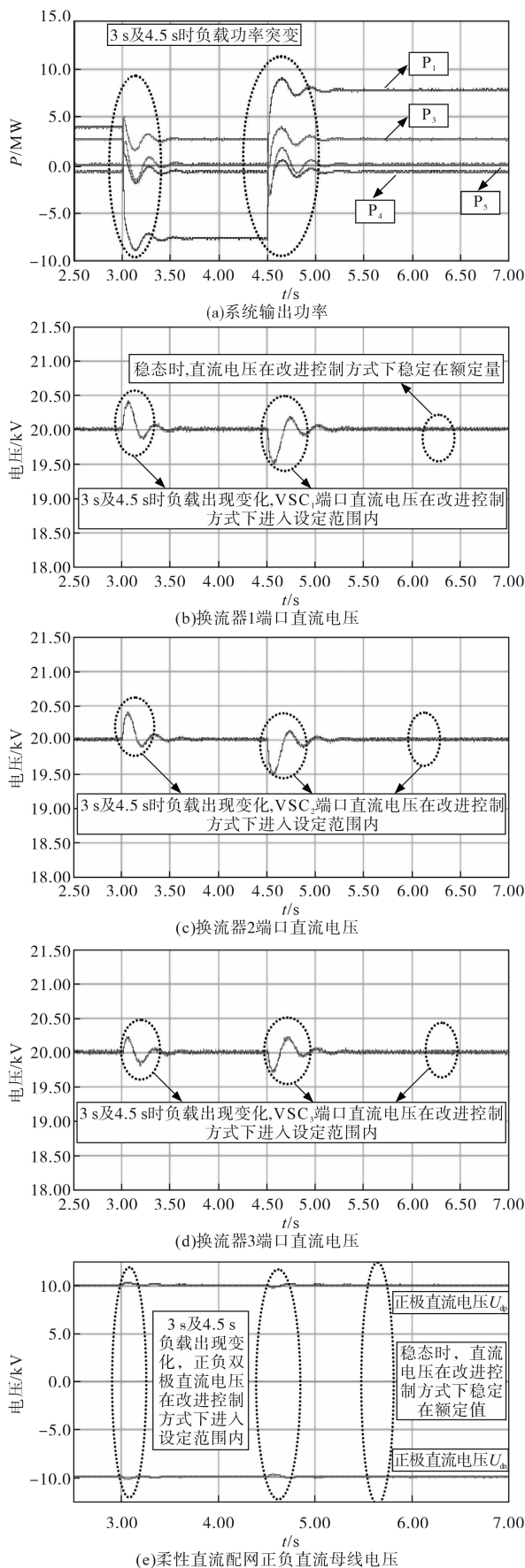


图8 改进下垂控制下系统仿真结果

Fig.8 Simulation results of advanced droop control

及系统容量变化的范围与自身斜率影响,因此换流器VSC₃端口直流电压并未达到所设定上下限。通过图8e可看出当系统出现负荷突变时,系统正负极电压偏差以及稳态时刻系统直流电压维持在20kV。

因此,上述仿真结果表明,本文所提出的适用于多端柔性直流配网的改进下垂控制方式可有效解决传统下垂控制下直流配网所存在的直流电压偏差问题,系统直流电压始终维持在所设定的±10kV左右。当系统出现负荷突变等状况时,直流电压一旦达到电压上下限,功率参考值则随之改变,进一步调整系统下垂控制曲线而将换流站端口直流电压维持在19.5~20.5kV之间,维持系统的持续稳定运行。

5 结论

比较直流配电系统与交流配电系统,直流配电系统对电压稳定性要求更高,然而,由于某些负载输出功率的自身变化性特点,采用传统的直流电压斜率控制策略的多端柔性直流配电系统会造成直流电压发生变化,直流电压与额定值存在偏差。在恶劣的运行工况下,可能出现偏差较大的情况,影响系统的正常运行,甚至造成停运的情形。

本文提出一种基于传统下垂控制的改进控制方式,通过功率与电压间的关系进行调节,以减少传统方式稳态时存在的电压偏差为目标。经过仿真验证结果得出,本文所提出的改进直流电压下垂控制方法可有效改进有功功率和电压参考值间的制约关系,实现自动调节,保证系统输出功率在恒定运行状态下,该改进控制策略能够有效减少直流母线电压偏差值;同时,当系统出现暂态功率突变时,保证系统直流母线电压运行在设定的较小且稳定的范围内,实现系统的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 王一振,赵彪,袁志昌,等. 柔性直流技术在能源互联网中的应用探讨[J]. 中国电机工程学报,2015,35(14):3551-3560.
- [2] 曾嵘,赵宇明,赵彪,等. 直流配用电关键技术研究与应用展望[J]. 中国电机工程学报,2018,38(23):6791-6801.
- [3] 赵彪,赵宇明,王一振,等. 基于柔性中压直流配电的能源互联网系统[J]. 中国电机工程学报,2015,35(19):4843-4851.
- [4] 李岩,易越,李巍巍,等. 直流配电系统对可再生能源的消纳能力分析[J]. 南方电网技术,2017,11(3):46-52.

- [5] 胡子珩,马骏超,曾嘉思,等. 柔性直流配电网在深圳电网的应用研究[J]. 南方电网技术,2014,8(6):44-47.
- [6] 班国邦,徐玉韬. 国内首个五端柔性直流配电网示范工程进入试运行[J]. 电力大数据,2018(9):93-94.
- [7] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013:128-135.
- [8] 李兴源,曾琦,王渝红,等. 柔性直流输电系统控制研究[J]. 高电压技术,2016,42(10):3025-3037.
- [9] 任敬国,李可军,张春辉,等. 基于直流电压—有功功率特性的VSC-MTDC协调控制策略[J]. 电力系统自动化,2015,39(11):8-15.
- [10] 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.
- [11] Chai R, Zhang B, Dou J. Improved DC voltage margin control method for DC grid based on VSCs[C]//IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEE-IC), Rome:IEEE,2015:1683-1687.
- [12] Jun L, Jing T. Operation and control of multi-terminal HVDC transmission for offshore wind farms[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2011,26(4):2596-2604.
- [13] Liang J, Gomis-Bellmunt O, Ekanayake J, et al. A multi-terminal HVDC transmission system for offshore wind farms with induction generators[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2012,43(1):54-62.
- [14] Haileselassie T M, Uhlen K. Precise control of power flow in multi-terminal VSC-HVDCs using DC voltage droop control[C]//Power and Energy Society General Meeting. San Diego, CA:IEEE,2012:1-9.
- [15] Zhao X, Li K. Droop setting design for multi-terminal HVDC grids considering voltage deviation impacts[J]. Electric Power Systems Research,2015,123:67-75.
- [16] Rouzbehi K, Miranian A, Luna A, et al. A novel approach for voltage control of multi-terminal DC grids with offshore wind farms[C]//ECCE Asia Downunder (ECCE Asia), Melbourne, VIC:IEEE,2013:965-970.
- [17] Rouzbehi K, Miranian A, Candela J I, et al. A generalized voltage droop strategy for control of multiterminal DC grids[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2015,51(1):607-618.
- [18] 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.
- [19] 解大,喻松涛,陈爱康,等. 基于下垂特性调节的直流配电网稳态分析[J]. 中国电机工程学报,2018,38(12):3516-3528.
- [20] Morstyn T, Savkin A V, Hredzak B, et al. Multi-agent sliding mode control for state of charge balancing between battery energy storage systems distributed in a DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2018,9(5):4735-4743.
- [21] 吕振宇,吴在军,窦晓波,等. 基于离散一致性的孤立直流微网自适应下垂控制[J]. 中国电机工程学报,2015,5(17):4397-4407.
- [22] Guerrero 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.
- [23] Diaz N L, Dragičević T, Vasquez J C, et al. Intelligent distributed generation and storage units for DC microgrids—a new concept on cooperative control without communications beyond droop control[J]. IEEE transactions on Smart Grid,2014,5(5):2476-2485.
- [24] 张海波,袁志昌,赵宇明,等. VSC-MTDC系统变截距直流电压下垂控制策略[J]. 电力自动化设备,2016,36(10):60-64.
- [25] Yan Zuanhong, Zhang Xiao-Ping. Master-slave wave farm systems based on energy filter with smoothed power output[J]. Global Energy Interconnection,2018,1(5):559-567.

收稿日期:2019-12-06

修改稿日期:2020-01-06