

DOI:10.12158/j.2096-3203.2021.02.009

直流配电网电压控制技术综述

吴在军¹, 谢兴峰¹, 杨景刚^{1,2}, 司鑫尧², 杨媛平¹, 曹骁勇¹

(1. 东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096;

2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院, 江苏 南京 211103)

摘要:随着分布式可再生能源的快速发展以及电动汽车、数据中心等大量直流负荷的普及,交流配电网的运行和管理受到了挑战。直流配电系统潮流灵活可控,可闭环运行,供电方式多样,具有更广阔的应用前景。但是,相比交流系统的控制,直流配电系统的控制更加复杂。直流电压作为衡量直流配电网有功功率平衡的唯一指标,其稳定控制对直流配电网的可靠运行至关重要。文中首先列举了直流配电网的典型拓扑结构和直流电压等级序列;然后,总结了直流配电网中关键设备电力电子变流器的控制技术;接着,梳理了直流配电网的传统电压控制策略,并对目前一些改进的直流配电网电压控制策略进行了深入分析和总结。最后,指出了直流配电网电压控制需要重点关注和解决的问题,可为未来直流配电网直流电压控制的进一步研究提供思路和借鉴。

关键词:直流配电网;换流站控制;电力电子变压器控制;直流电压控制;控保一体化

中图分类号: TM761

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2021)02-0059-09

0 引言

随着分布式可再生能源发电渗透率的提高和电动汽车充电站的普及,以及包含风、光、储的微电网的快速发展,交流配电网的运行和管理受到了挑战。相比于交流配电网,直流配电系统可以实现闭环运行,具有多种供电方式,潮流灵活可控,更有利于整合和消纳如风力发电和太阳能发电等可再生能源^[1-3]。在向数据中心、商业中心、工业系统、电动汽车、高铁等直流负荷供电时,直流配电可省去一级交流变直流的环节,提高供电效率^[4-5]。新型的碳化硅等电力电子器件具有更低的开关损耗和通态损耗,未来其在变流器中的应用可使得直流换流站相比于同等容量的传统交流变压器具有更高的效率^[6]。另外,直流微电网和高压直流输电系统的快速发展也促使研究人员思考如何将两者互连,而直流配电系统是很好的解决方法^[7-8]。

美国弗吉尼亚理工 CPES 中心最初提出了交流混合配电系统的构想^[7];美国北卡罗来纳大学提出了多端口能量路由器,可用于构建灵活的直流配电系统^[9]。德国亚琛工业大学提出了“City of Tomorrow”城市供电方案,并在校园内建成了 10 kV 直流配电实际工程^[10]。国内已经建成或正在规划建设中的示范工程主要有苏州工业园区±10 kV 中压双端直流配电示范工程^[11]、浙江海宁尖山新区“基于柔性互联的源网荷储协同主动配电网试点工

程”^[12]、贵州中压柔性直流配电示范工程^[13]、杭州江东柔性直流配电网、上海南汇±30 kV 两端柔性直流配电示范工程、珠海科技园三端直流配电系统以及张北交直流配电网及柔性变电站示范工程等^[14]。

直流配电网虽然具有广阔的应用前景,但由于直流配电网惯性小、阻尼弱等特点,控制直流配电系统比控制交流系统更加困难^[15]。直流电压是衡量直流系统功率平衡的唯一指标,因此直流电压的控制对直流配电网的运行和稳定性非常重要。文中针对直流配电网电压的协调控制和电力电子设备自身控制,结合最新研究成果,对直流配电网直流电压波动抑制的控制策略进行梳理和总结,旨在为未来直流配电网直流电压控制的进一步研究提供思路和借鉴。

1 直流配电网系统拓扑结构及电压序列

1.1 直流配电网拓扑结构

直流配电网电压控制策略的确定在很大程度上受到配电网的拓扑结构影响。直流配电系统的拓扑可以分为单端辐射状拓扑结构、双端/多端状拓扑结构和环状拓扑结构^[16]。

单端辐射状直流配电网结构和交流配电网结构类似,由单电源辐射供电,结构简单、易于控制,但供电可靠性较低,适用于供电要求不高的用户。其结构如图 1 所示。

双端/多端拓扑结构有多电源点供电,供电可靠性较高^[17],控制方式较灵活,适用于供电要求较高的工业负荷等。双端“手拉手”拓扑结构见图 2。

收稿日期:2020-09-07;修回日期:2020-10-13

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0904700)

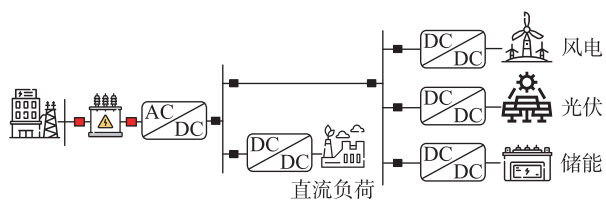


图1 单端辐射状拓扑

Fig.1 Radial-type topology

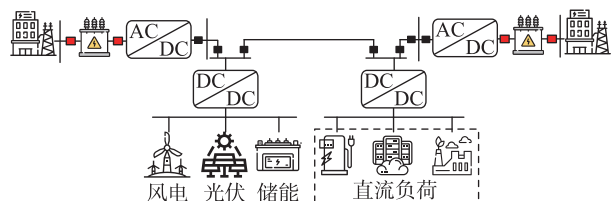


图2 “手拉手”状拓扑

Fig.2 Hand-in-hand topology

传统交流配电系统一般为闭环设计,开环运行。但是环状直流配电系统可以实现闭环运行,也可以像交流配电系统一样开环运行,因此配电方式更加灵活,具有更高的可靠性,但是闭环运行时其控制和保护都比较复杂,适用于供电可靠性要求很高或者集结大规模可再生能源的场合^[18]。环状直流配电拓扑如图3所示。

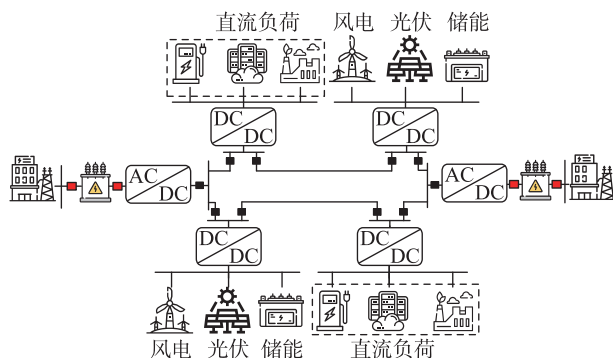


图3 环状拓扑

Fig.3 Ring topology

1.2 直流配电系统电压等级序列

中压直流电压的标准化对系统设计、设备研发、以及工程化应用至关重要。对于不同的直流电压等级采取的电压控制策略也不同。目前对于电压序列的研究国内外尚无统一标准,电压等级的研究还需要根据工程应用示范和分析逐步完善。国际上由国际大电网会议(CIGRE)、国际电工委员会(IEC)以及电气和电子工程师协会(IEEE)等机构初步明确了以1.5 kV(±0.75 kV)为界来划分中压直流和低压直流,但并未给出具体电压等级优选参考值。而国内目前国家标准GB/T 35727—2017《中低压直流配电电压导则》和中国电力企业联合会标

准T/CEC 107—2016《直流配电电压》已经发布。其中,国家标准明确了中、低压直流的电压等级范围、电压等级序列、优选值和备选值,并划定3 kV(±1.5 kV)~±50 kV为中压范围,推荐±35 kV/±10 kV/±3 kV(±1.5 kV)为中压直流配电的优选序列,1 500 V(±750 V)/750 V(±375 V)/220 V(±110 V)为低压直流配电的优选电压序列。

目前,国内对于直流配电网的研究在国际上处于领先地位,表1列出了国内具有代表性的部分直流配电网示范工程的拓扑结构以及电压等级。

表1 直流配电网示范工程电压等级及拓扑

Table 1 Voltage levels and topology of DC distribution network demonstration projects

示范工程	电压等级	拓扑结构类型
深圳宝龙直流配电工程	±10 kV, 400 V	双端
贵州直流配电工程	±10 kV, ±375 V, 380 V	三端
杭州江东柔性直流配电网	±10 kV, ±375 V	三端
珠海唐家湾直流配电工程	±10 kV, ±375 V, ±110 V	三端
苏州工业园区直流配网	±10 kV, ±375 V	双端
上海南汇直流配网	±30 kV	双端
许继园区交直流配网	±10 kV, ±380 V, ±110 V, 380 V	四端环网

2 直流配电网电压控制技术发展现状

直流配电网直流电压的控制一般划分为3个层级^[19]。上层为能量优化层,主要实现能量管理功能;中间层为协调控制层,实现系统级协调控制功能;最底层是电力电子设备层,主要包括装置自身的控制和设备级的协调控制。其中电力电子变换器和协调控制技术是抑制直流电压波动和保证系统功率平衡的关键。

2.1 电力电子变换器的基本控制

电力电子设备层作为电压控制3个层级中的最底层,对其的良好控制是能快速跟踪上层电压、功率等指令的基础。在直流配电网中,电力电子变换器有很多种类。各变换器需根据不同的分布式电源和不同的配电网工作模式来控制自身的功率或电压。目前,关于低压配电母线的接口电路的研究已经相对成熟^[20],而高压到中压和中压到低压的接口电路因功率大,且结构和控制相对复杂的特点,成为了目前的研究热点。

2.1.1 换流站的控制

直流配电网连接交流配电网需要通过换流站,换流站连接电压等级一般在10 kV及以上,其拓扑

主要采用模块化多电平变换器(modular multi-level converter, MMC)。换流站的控制器一般包括外环控制和电流内环控制,具体如图4所示。图中锁相环(phase locked loop, PLL)可获取电网角频率 ω_L 和相角 θ ,用于对交流电网电压和电流进行坐标系(abc-dq)变换。

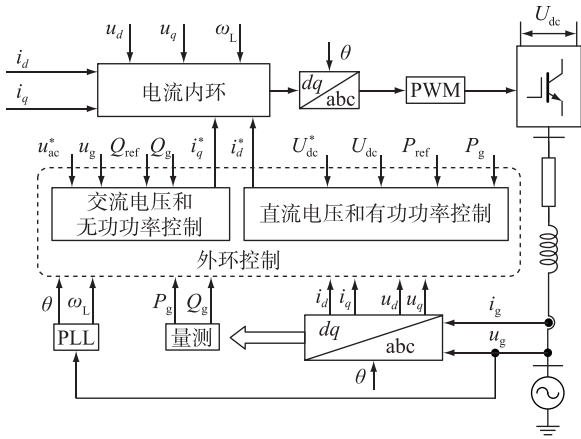


图4 MMC换流站控制框图

Fig.4 The control diagram of MMC converter station

内环控制指由电流指令 i_d^* , i_q^* 生成调制波的控制指令 U_d^* , U_q^* 。如图5所示,内环控制是基于dq解耦的动态电流控制。其中, U_d , U_q 为电网电压转换到dq坐标系下的直流分量; i_d , i_q 为电网三相对称电流转换到dq坐标系下的直流分量。

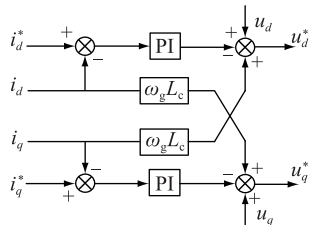


图5 电流内环控制

Fig.5 Current inner loop control

外环控制是指通过有功类指令(直流电压 U_{dc}^* , 有功功率 P_{ref} 等)生成d轴电流参考值 i_d^* ,通过无功类指令 Q_{ref} 生成q轴电流参考值 i_q^* 的过程。一般换流站外环d轴控制有3种模式:定有功功率控制,定直流电压控制和下垂控制模式。定有功功率控制模式控制换流站输出的有功功率 P_g 无偏差跟踪功率参考值 P_{ref} ,不随直流电压的波动而波动。定电压控制方式控制换流站直流电压 U_{dc} 无偏差跟踪直流电压参考值 U_{dc}^* ,直流电压不随功率的变化而变化。下垂控制可使换流站输出的有功功率按照设定的电压功率特性曲线实时调节。3种控制模式的功率电压特性曲线如图6所示,其中, P_{min} , P_{max} 分别为换流站最小和最大有功功率; U_{dc}^{min} , U_{dc}^{max} 分

别为正常运行所允许的直流电压最小值和最大值。

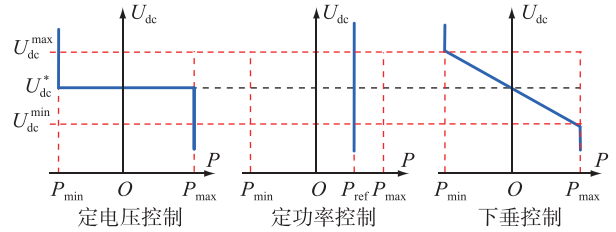


图6 外环控制

Fig.6 Outer loop control

2.1.2 直流变压器的控制

直流变压器是连接中压直流母线到低压直流母线的关键设备,主要采用高频隔离型DC/DC变换器。研究的拓扑结构主要有3种:(1)双向半桥;(2)串联谐振变换器;(3)双主动全桥(dual active bridge, DAB),其中应用最广泛的是DAB。对于DAB的控制,单移相调制方法是通过调节2个H全桥交流方波电压之间的移相比来控制DAB功率的大小和方向,其实现简单,也是目前工程应用中的主流调制方法。为了降低损耗、提高系统变换效率,一些改进的移相调制方法也相继被提出,主要包括扩展移相、双重移相和三重移相。

2.2 直流电压协调控制

直流配电网电压控制策略的选取与其网络拓扑结构有关。对于辐射状拓扑结构的直流配电网,由于仅有一端电源供电,为了保持系统电压稳定,其换流站通常采用定电压控制的方式;对于“手拉手”型或环状拓扑等多端直流配电系统,须同时考虑到直流电压的稳定和多端电源协调控制。

直流配电网电压控制的主要目标是维持直流电压稳定和有功功率的合理分配。该目标不仅希望稳态时直流配电网电压维持在额定值且尽可能实现有功功率在各单元接口间的准确分配,也须考虑到当系统发生较大扰动等暂态工况时,遇到的电压偏差过大或电压振荡的问题^[6]。因直流配电网发展相对较晚,其控制技术还不够成熟,现在大多协调控制技术都是借鉴多端柔性直流输电和低压直流微电网中的一些控制方法。其中适用于直流配电网的电压协调控制方法主要包括3类:主从控制,电压裕度控制和下垂控制。但直流配电网负荷波动频繁,含大量分布式能源,潮流灵活,传统控制方式并不能完全适用于直流配电网的电压控制^[21],往往难以兼顾系统的稳态和动态特性。因此,针对传统控制策略中难以兼顾直流配电网电压动态特性和保证有功功率的合理分配的问题,许多文献以传统控制方式为基础提出了一些改进控制方法。

2.2.1 传统控制方法及其改进策略

(1) 主从控制。主从控制是直流电网控制中较成熟的控制策略,只有 1 个换流站作为主控站并设定为恒压控制模式作为松弛节点来平衡系统功率。其他换流站均作为从站并设定为恒定功率或恒定电流模式。图 7 为一个三端直流电网的主从控制方案。其主要优点是:控制设计和实现简单,在系统稳态运行时易于实现功率的最佳分配,各组件之间发生不良交互的风险小。

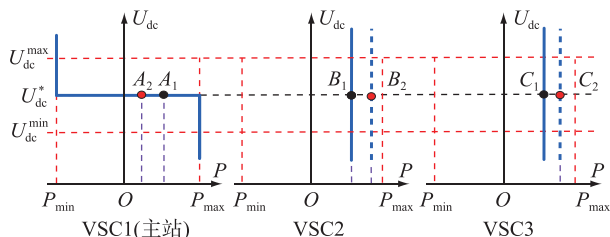


图 7 主从控制示意

Fig.7 Schematic diagram of master-slave control

虽然主从控制能实现稳态时有功功率的精确分配,但其电压动态调节性能差。由于是集中式直流电压控制方法,只有 1 个换流站参与电压调节,当主站中断或系统发生较大的干扰时,其他换流站电压响应速度很慢,会导致过电压或欠压,甚至系统奔溃。且主从控制需要准确和高速的通信来协调电压控制,因此该策略在 $N-1$ 故障时的直流电压调节能力较差。

为了改进主从控制的电压动态调节性能,文献[24]改进了主从控制并设计了一种 $P-U-I$ 控制器,该控制器在功率控制器之后增加了电压 PI 控制器,如图 8 所示。当换流站稳态运行时,跟踪功率给定值 P_{ref} ,当系统受到大扰动后,功率控制器输出达到限幅值,则将限幅值作为恒压控制器的给定,自动转为电压控制模式。该控制方法可以在恒功率控制和电压控制模式自动切换,提高了系统的动态调压性能,解决了主从控制策略在受到大扰动时换流站模式切换依赖快速通信的问题。但该方法增加了 PI 控制环节,控制器参数的设计较复杂。且当扰动使得换流站输出都达到限幅值的时候,无法自由分配各换流站的有功功率。文献[25]针对主从控制提出了一种考虑分布式储能参与调压的控制方法。该方法中,分布式储能采用虚拟惯性控制,可以在系统功率发生大幅变化时,依靠储能快速提供功率支撑,实现功率动态平衡,改善直流电压动态调节性能。

(2) 电压裕度控制。电压裕度控制是主从控制的扩展,该控制策略中每个换流站都具有定功率控

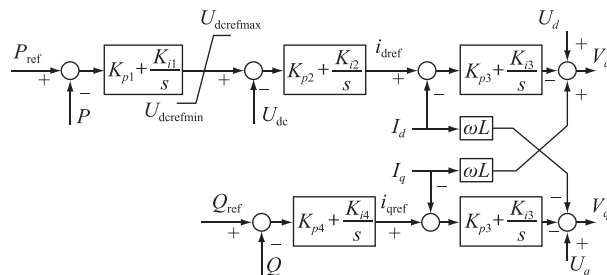


图 8 $P-U-I$ 控制器示意

Fig.8 Schematic diagram of $P-U-I$ controller

制和定直流电压控制 2 种控制方式。电压裕度是各换流站直流电压和直流基准电压的差值,当恒功率换流站的电压达到电压裕度值时,将自动切换到恒定直流电压控制模式,并以新的直流电压参考值运行,保证任意时刻只有 1 个换流站在恒压控制模式^[22]。图 9 为电压裕度控制原理。

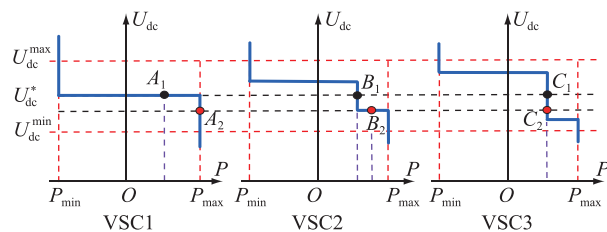


图 9 电压裕度控制示意

Fig.9 Schematic diagram of margin control

该方法不需要依赖站间通信,但由于直流配电网结构复杂,且负载变化、电压波动均较大,因此对于电压裕度的选择较为困难,且控制模式的频繁切换可能会引起系统振荡。同时,运行模式过渡时,所有换流站处于定功率控制,直流电压将无法稳定。

(3) 下垂控制。直流电压下垂控制是多个换流站根据有功功率和直流电压之间的特定关系来共同承担直流电压控制,类似于交流系统中的频率控制^[22]。图 10 为下垂控制原理。

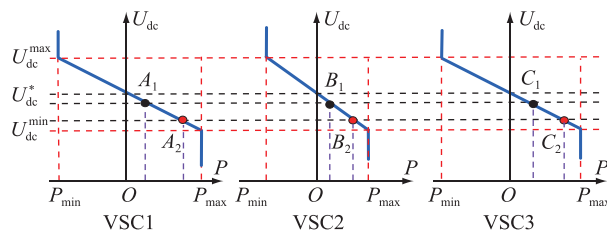


图 10 下垂控制示意

Fig.10 Schematic diagram of droop control

下垂控制是对等控制的一种,该模式不需要通信且具有良好的动态性能。相对主从控制而言,能更加灵活地适应多种运行方式,有更高的可靠性;相对电压裕度控制而言,不易导致电压振荡^[23]。但传统的定下垂系数控制中,其下垂系数选取较为困

难;同时,当系统稳定时,下垂控制会导致直流电压存在偏差。

传统的定下垂系数控制中,若下垂系数选取过小,换流站出力易达到上限;若下垂系数选取过大,则系统功率波动会导致电压较大幅度的波动,削弱系统的动态性能。因此,许多文献针对下垂系数选取进行了各种研究。文献[26]提出了一种自适应功率分配策略,该策略可通过自适应 k-sharing 函数来确保稳态运行时燃料电池和超级电容器之间的动态性能和有功功率的合理分配。文献[27]提出了一种考虑直流线路电阻影响的变下垂系数设计方法,以确保所有换流站都能按照任意的功率分配比分配功率。为了克服传统定下垂系数控制无法灵活适应各种工况或甚至于出现单个换流站功率裕量不足的问题^[28],提高动态调节能力,文献[29]提出了一种随功率裕量的变化而变化的下降系数设计方法,提高了参与电压调节的每个换流站的动态性能。文献[30]提出了一种直流电压下垂控制策略,其下垂系数根据不同的工作条件不断更新,可以使得控制更加优化,但计算量较大。在文献[31]中,为了确保每个换流站的直流电压和输出功率在暂态时不会达到限定的极限值,引入了直流电压偏差因子和功率分配因子来自适应地确定换流站的下垂系数,其控制框图如图 11 所示。

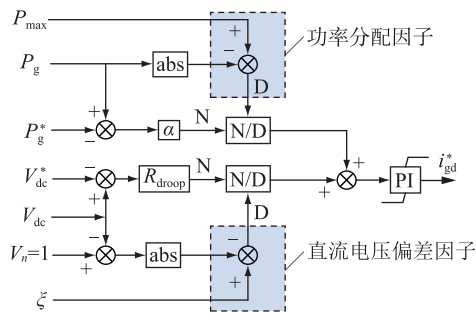


图 11 自适应下垂控制框图

Fig.11 The block diagram of adaptive droop control

在文献[32]中,通过提出的轨迹灵敏度算法来计算下垂系数,以提高突发情况下系统的稳定裕度。文献[33]提出一种基于电压偏差调整的权值系数来修正电压与功率下垂特性曲线,减少了换流站模式切换的暂态过程。文献[34]设计了一个可以根据换流站运行工况和功率裕度自适应变化的下垂系数,使采用下垂控制的换流站可以根据自身的功率裕度来分担不平衡功率。文献[35]设计了一种根据本地直流电压偏差来不断修正下垂系数的方法,并设计了带滞环的死区,其改进部分结构如图 12 所示。该方法在系统发生小故障时可以减

小直流电压偏差,发生大故障时,防止换流器功率超限。

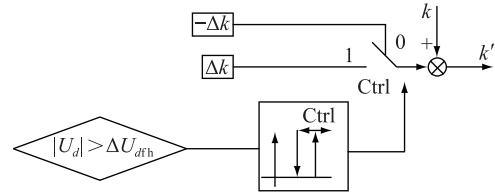


图 12 改进下垂控制框图

Fig.12 The block diagram of improved droop control

文献[36]提出了一种基于直流电压偏差的斜率控制方法,加快了电压调节的动态响应,同时能确保换流站有功功率的无差跟踪。文献[37]提出一种利用模糊控制改变下垂系数的控制策略,把难以整定参数的固定下垂系数变为可以根据运行工况变化的下垂系数,提高了系统稳定性,并在故障时能加快故障恢复。文献[38]针对风电接入的柔直电网提出一种协调控制策略,该策略根据直流电压大小、方向的变化以及换流站功率裕度自适应地改变下垂系数,实现了各换流站之间功率的优化分配,降低了系统损耗,并可以防止部分换流站功率过载。除了换流站级的控制,也可以将分布式电源引入电压控制范畴,如文献[39]利用虚拟惯性控制技术,将电压变化率引入下垂系数,从而使蓄电池在功率波动瞬间快速出力或吸收功率,抑制直流电压的波动。

为了解决稳态时下垂控制难以实现功率的精确分配和直流电压的准确调节、存在直流电压偏差等问题,可以将二级优化控制引入直流配电网领域,与下垂控制相结合,通过平移下垂控制曲线,实现有功分配或电压的精确调节。其中,集中式的二级优化控制依赖通信^[40-41],令主控制器收集各个单元的信息并将指令下发,降低了系统可靠性和可扩展性;分散式方法中,文献[42]针对系统通信故障的情况提出一种通过随机负荷潮流和优化比例系数计算的随机因子下垂控制,并且利用二次控制实现有功量目标值的补偿,但未考虑电压调节的优化。

2.2.2 组合控制

为了能够使得配电网既可以在稳态时准确地分配各换流站功率,又能确保在受到大扰动或发生 N-1 故障时快速调节直流电压以保证系统的安全,许多文献提出了将下垂控制策略与其他多种控制策略相结合的组合控制方法。文献[43]提出了一种通用的电压功率控制策略,采用该策略,各换流站可以通过调节控制器模式系数实现恒定有功功率模式、恒定直流电压模式和电压下垂控制模式之

间的灵活切换,稳态时可以工作在主从控制模式,发生扰动时可以快速切换到下垂控制模式。尽管该控制模式可准确地控制有功功率并改善动态电压调节的性能,但其需要接收来自上层的模式切换指令,须保证通信快速。文献[44]结合电压裕度控制和下垂控制,根据主换流站状态将直流配电系统划分成3种模式,同时将储能的调节考虑在内,实现了不同模式之间的平滑切换。文献[45]基于传统的电压裕度控制,结合了下垂控制的思想提出了一种快速电压裕度控制策略,通过引入考虑直流电压偏差的权衡系数 K 来调节裕度控制器的控制模式,其控制框图如图13所示。

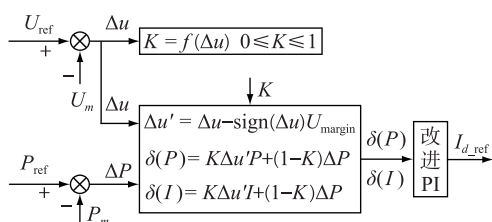


图13 快速电压裕度控制框图

Fig.13 Fast voltage margin controller

该方案根据 K 的不同取值,实现了控制器工作模式在定电压控制、定功率控制和下垂控制间的切换,加快了控制器的调节速度和响应速度,使得控制模式更平滑。文献[46]提出了一种通过两次调压的方式实现直流电压无偏差控制的策略。其中,一次调压采用含死区的下垂控制,二次调压以电压基准节点电压恒定为目标去调节各换流站功率给定值。该方法实际上相当于将主从控制和下垂控制相结合,系统根据不同状态在主从控制和下垂控制之间自动切换。

3 直流配电网电压控制关键技术展望

虽然已有大量文献针对直流配电网直流电压控制展开研究,但与高压直流电网和直流微电网相比,直流配电网的运行工况更加复杂,具有多电压等级的直流母线,电压控制难度更大,在今后的研究和实践中,直流配电网电压控制仍有如下问题需要重点关注和解决:

(1) 目前研究主要集中在换流站协调控制,针对将储能、负荷和换流站结合起来共同调节母线直流电压的研究较少。为了能充分利用分布式能源、储能和负荷的调节特性,应该综合考虑不同电压等级之间的相互影响以及“源-网-荷-储”的动态特性匹配。可以将直流配电网的实际控制需求分为功率平衡时的正常工况和供需紧张时的紧急工况两

类。正常工况下,“源-网-荷-储”的调控主要以经济最优为目标参与调节;紧急工况下,以直流电压的稳定为控制目标,通过使储能切换为功率快速支撑模式以及负荷采用分布式控制快速参与需求响应的方式来辅助换流站调节电压确保直流电压不越限。其中,如何实现配电网2种运行工况时源荷储不同运行模式的快速无缝自适应切换技术是需要解决的关键问题。

(2) 当交流系统故障、直流配电网发生 $N-1$ 故障(例如直流配电线路断开,换流站故障退出运行等)或遭遇大功率扰动时,系统的运行方式可能发生改变,现有的依靠可控设备模式切换的控制策略难以满足直流电压稳定的需求。研究者应跳出主从控制、电压裕度控制和下垂控制的框架,研究一种适应多场景、支持配用电设备灵活投退的多运行方式自适应控制策略或统一管理策略,从根本上解决无法同时保证稳态功率控制精度和动态电压调节特性以及实现直流配电网复杂运行模式无缝切换的问题。

(3) 大多数研究者都是将直流配电网的控制和保护作为2个技术独立进行研究。而直流配电网与交流配电网不同的是其换流站本身具有可控性,当系统发生大扰动或故障时具有抗扰性和一定的故障阻断能力。因此,在研究直流配电网的控制策略时,应该考虑将控制和保护结合起来研究,充分利用直流配电网的控制灵活性,分担保护的部分任务,实现控制保护一体化,提高系统的经济性和可靠性。

4 结语

随着可再生能源在配电网中渗透率的不断提高,直流配电网在新能源消纳方面将比交流配电网具有更大的优势,但在经济性和控制保护可靠性方面还需改进。目前国内已经建设了很多直流配电网示范工程,但总体正处于起步阶段。直流配电网直流电压的控制方法大多还是借鉴高压直流输电和直流微电网的控制方法以及对其方法的改进,并不能有效适应直流配电网复杂的模式切换等,且在同时保证较好的稳态性能和动态性能方面还有待提升。文中在国内外研究的基础上,对直流配电网的结构和电压控制技术做了总结和思考,期望可为未来直流配电网电压控制技术的进一步研究提供思路和借鉴。

本文得到国网江苏省电力有限公司科技项目(J2019111,SGJSDK00ZPJS1900271)资助,谨此致谢!

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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.
JIANG Daozhuo, ZHENG Huan. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(8):98-104.
- [3] 李冬梅,胡扬宇,王利利,等. 基于改进注入法的直流配电网双端测距故障定位方法[J]. 智慧电力,2019,47(12):110-116.
LI Dongmei, HU Yangyu, WANG Lili, et al. Double-end distance measurement fault location method for DC distribution network based on improved injection method[J]. Smart Power, 2019, 47(12):110-116.
- [4] 魏恩伟,张之涵,李伟华,等. 基于柔性直流技术的智能电网配电系统电压稳定性分析[J]. 智慧电力,2019,47(10):99-103.
WEI Enwei, ZHANG Zhihan, LI Weihua, et al. Voltage stability analysis in intelligent power distribution system based on VSC-HVDC[J]. Smart Power, 2019, 47(10):99-103.
- [5] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电技术在全球能源互联网中的应用探讨[J]. 智能电网,2016,4(2):116-123.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Discussion on applying the VSC-HVDC technology in global energy interconnection[J]. Smart Grid, 2016, 4(2):116-123.
- [6] 孙鹏飞,贺春光,邵华,等. 直流配电网研究现状与发展[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):64-73.
SUN Pengfei, HE Chunguang, SHAO Hua, et al. Research status and development of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(6):64-73.
- [7] 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):9-19,5.
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):9-19,5.
- [8] 姚钢,茆中栋,殷志柱,等. 楼宇直流配电系统关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制,2019,47(15):156-170.
YAO Gang, MAO Zhongdong, YIN Zhizhu, et al. Key technologies of building DC power distribution system: an overview[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(15):156-170.
- [9] HUANG A Q, CROW M L, HEYDT G T, et al. The future renewable electric energy delivery and management (FREEDM) system: the energy Internet[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1):133-148.
- [10] 李霞林,郭力,王成山,等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1):2-17.
- [11] 黄强,陈亮,袁晓冬,等. 多端直流配电系统工程仿真分析及示范应用[J]. 供用电,2018,35(6):24-32,82.
HUANG Qiang, CHEN Liang, YUAN Xiaodong, et al. Multi-terminal DC distribution system engineering simulation analysis and demonstration application[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(6):24-32,82.
- [12] 章雷其,汪湘晋,徐珂,等. 基于柔性互联的源网荷储协同主动配电网设计研究[J]. 供用电,2018,35(1):28-33.
ZHANG Leiqi, WANG Xiangjin, XU Ke, et al. Research on design of a source-grid-load-storage-collaborated active distribution network based on flexible interconnection[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1):28-33.
- [13] 徐玉韬,谈竹奎,郭力,等. 贵州电网柔性直流配电系统设计方案[J]. 供用电,2018,35(1):34-39.
XU Yutao, TAN Zhukui, GUO Li, et al. Design scheme of flexible DC power distribution system in Guizhou power grid[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(1):34-39.
- [14] 傅守强,高杨,陈翔宇,等. 基于柔性变电站的交直流配电网技术与工程实践[J]. 电力建设,2018,39(5):46-55.
FU Shouqiang, GAO Yang, CHEN Xiangyu, et al. Research and project practice on AC and DC distribution network based on flexible substations[J]. Electric Power Construction, 2018, 39(5):46-55.
- [15] MA J C, GENG G C, JIANG Q Y. Two-time-scale coordinated energy management for medium-voltage DC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5):3971-3983.
- [16] 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.
DU Yi, JIANG Daozhuo, YIN Rui, et al. Topological structure and control strategy of DC distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(1):139-145.
- [17] 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.
HU Ziheng, MA Junchao, ZENG Jiasi, et al. Research on application of flexible DC power distribution system in Shenzhen power grid[J]. Southern Power System Technology, 2014, 8(6):44-47.
- [18] 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):6791-6801,7114.
ZENG Rong, ZHAO Yuming, ZHAO Biao, et al. A prospective look on research and application of DC power distribution technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23):6791-6801,7114.
- [19] 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.
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.
- [20] LIANG Z G, GUO R, LI J, et al. A high-efficiency PV module-integrated DC/DC converter for PV energy harvest in

- FREEDM systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 897-909.
- [21] JI Y R, YUAN Z C, ZHAO J F, et al. Hierarchical control strategy for MVDC distribution network under large disturbance[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, 12(11): 2557-2565.
- [22] 徐政, 肖晔庆, 张哲任. 柔性直流输电系统[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
XU Zheng, XIAO Huangqing, ZHANG Zheren. Voltage source converter based hvdc power transmission systems[M]. 2nd ed. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [23] PINTO R T, RODRIGUES S F, BAUER P, et al. Comparison of direct voltage control methods of multi-terminal DC (MTDC) networks through modular dynamic models[C]//Proceedings of the 2011 14th European Conference on Power Electronics and Applications. Birmingham, UK. IEEE, 2011: 1-10.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] GHAZANFARI A, HAMZEH M, MOKHTARI H, et al. Active power management of multihybrid fuel cell/supercapacitor power conversion system in a medium voltage microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1903-1910.
- [27] LIU Y C, GREEN T C, WU J, et al. A new droop coefficient design method for accurate power-sharing in VSC-MTDC systems[J]. IEEE Access, 2019(7): 47605-47614.
- [28] 刘瑜超, 武健, 刘怀远, 等. 基于自适应下垂调节的 VSC-MTDC 功率协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 40-48.
LIU Yuchao, WU Jian, LIU Huaiyuan, et al. Effective power sharing based on adaptive droop control method in VSC multi-terminal DC grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 40-48.
- [29] CHAUDHURI N R, CHAUDHURI B. Adaptive droop control for effective power sharing in multi-terminal DC (MTDC) grids[C]//IEEE Transactions on Power Systems. IEEE, 2013: 21-29.
- [30] PRIETO-ARAUJO E, EGEE-ALVAREZ A, FEKRIASL S, et al. DC voltage droop control design for multiterminal HVDC systems considering AC and DC grid dynamics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2): 575-585.
- [31] WANG Y Z, WEN W J, WANG C S, et al. Adaptive voltage droop method of multiterminal VSC-HVDC systems for DC voltage deviation and power sharing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(1): 169-176.
- [32] MOAWWAD A, EL-SAADANY E F, EL MOURSI M S. Dynamic security-constrained automatic generation control (AGC) of integrated AC/DC power networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 3875-3885.
- [33] 孙黎霞, 陈宇, 宋洪刚, 等. 适用于 VSC-MTDC 的改进直流电压下垂控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1037-1043.
SUN Lixia, CHEN Yu, SONG Honggang, et al. Improved voltage droop control strategy for VSC-MTDC[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1037-1043.
- [34] 朱瑞可, 王渝红, 李兴源, 等. VSC-MTDC 系统直流电压自适应斜率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(4): 63-68.
ZHU Ruike, WANG Yuhong, LI Xingyuan, et al. An adaptive DC voltage droop control strategy for the VSC-MTDC system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(4): 63-68.
- [35] 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.
WANG Yuhong, CHEN Yong, ZENG Qi, et al. Improved droop control strategy for VSC-MTDC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3190-3196.
- [36] 唐庚, 徐政, 刘昇, 等. 适用于多端柔性直流输电系统的新型直流电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 125-132.
TANG Geng, XU Zheng, LIU Sheng, et al. A novel DC voltage control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 125-132.
- [37] 刘志江, 夏成军, 杜兆斌. 多端柔性直流输电系统直流电压模糊控制策略[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 21-26, 87.
LIU Zhijiang, XIA Chengjun, DU Zhaobin. Research of DC voltage fuzzy control strategy for VSC-MTDC systems[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2): 21-26, 87.
- [38] 邹朋, 李文帆, 伍文城. 适合风电接入的 VSC-MTDC 系统协调控制策略[J]. 电力工程技术, 2020, 39(1): 51-56.
ZOU Peng, LI Wenfan, WU Wencheng. Coordinated control strategy for VSC-MTDC systems with wind power integration[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(1): 51-56.
- [39] 王毅, 黑阳, 付媛, 等. 基于变下垂系数的直流配电网自适应虚拟惯性控制[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(8): 116-124.
WANG Yi, HEI Yang, FU Yuan, et al. Adaptive virtual inertia control of DC distribution network based on variable droop coefficient[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(8): 116-124.
- [40] JIANG W, FAHIMI B. Active current sharing and source management in fuel cell-battery hybrid power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(2): 752-761.
- [41] ZHANG Y, JIANG Z H, YU X W. Control strategies for battery/supercapacitor hybrid energy storage systems[C]//2008 IEEE Energy 2030 Conference. Atlanta, GA, USA. IEEE, 2008: 1-6.
- [42] 俞拙非, 武迪, 陈璐瑶, 等. 基于随机因子及优化下垂的多

- 端直流配电网控制策略[J]. 电力系统自动化,2018,42(14):145-150.
- YU Zhuofei, WU Di, CHEN Luyao, et al. Control strategies for multi-terminal DC distribution network based on random factor and optimized droop [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14):145-150.
- [43] 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.
- [44] 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.
- [45] 李梅航, 刘喜梅, 陈朋. 适用于多端柔性直流输电系统的快速电压裕度控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(10):3045-3051.
- LI Meihang, LIU Ximei, CHEN Peng. Fast voltage margin control strategy for VSC-MTDC systems [J]. Power System Technology, 2016, 40(10):3045-3051.
- [46] 徐政, 张哲任, 刘高任. 柔性直流输电电网的电压控制原理研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(1):54-59.
- XU Zheng, ZHANG Zheren, LIU Gaoren. Research on voltage control principle of flexible DC transmission power grid [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1):54-59.

作者简介:



吴在军

吴在军(1975),男,博士,教授,研究方向为电站自动化、分布式发电与微电网、电能质量分析与控制等(E-mail: zjwu@seu.edu.cn);

谢兴峰(1987),男,博士在读,讲师,研究方向为直流配电网运行控制;

杨景刚(1984),男,博士在读,高级工程师,从事高电压与绝缘技术、直流配电网相关工作。

A review on voltage control strategies in DC distribution network

WU Zaijun¹, XIE Xingfeng¹, YANG Jinggang^{1,2}, SI Xinyao², YANG Yuanping¹, CAO Xiaoyong¹

(1. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Nanjing 211103, China)

Abstract: With the rapid development of distributed renewable energy and the popularization of DC loads such as electric vehicles and data centers, the operation and management of AC distribution networks are confronted with challenges. DC power distribution system has a broad application prospect because of its flexible and controllable power flow, closed loop operation and various power supply modes. However, compared with the control of AC system, the control of DC distribution system is more complicated. As the only indicator to measure the active power balance of DC distribution network, the stability control of DC voltage is very important to the reliable operation of DC distribution system. Firstly, the typical topology structure and the DC voltage levels of DC distribution system is introduced. Secondly, the control technology of power electronic converter of key equipment in DC distribution network is introduced. Then, the traditional voltage control strategies of DC distribution network are sorted out, and some improved voltage control strategies of DC distribution network are deeply analyzed and summarized. Finally, it looks forward to and points out the problems that need to be paid attention to and solved in DC distribution network voltage control. Ideas and references for further research on DC voltage control in DC distribution network are provided.

Keywords: DC distribution network; control of converter station; control of power electronic transformer; control of DC voltage; integration of control-protection

(编辑 方晶)