

考虑输电损耗和新能源波动的 VSC-MTDC 下垂控制策略

李文勋¹, 车延博¹, 洪 潮², 张 野², 杨 健²

(1. 天津大学 智能电网教育部重点实验室, 天津 300072;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510080)

摘要: 输电线路功率传输引起的电压降使各个换流站的直流电压存在差异, 具有随机性的新能源接入也会带来系统直流电压波动。这两方面的原因会使换流站输出功率发生偏移, 从而影响多端直流输电(MTDC)系统的潮流控制。对此提出一种考虑输电损耗和新能源波动的 MTDC 下垂控制策略, 该控制策略根据潮流分析的结果为换流站指定运行参考点, 对主换流站和从换流站分别增加电压闭环和功率闭环, 形成带电压死区和带功率死区的下垂控制, 以补偿新能源接入带来的影响, 同时根据换流站容量和系统电压范围指定下垂系数。通过仿真表明, 该策略在正常运行状态下能够削弱新能源波动对从换流站输出功率的影响; 在大扰动状态下能够为换流站合理分配波动功率, 具有良好的调压性能。

关键词: 多端直流输电; 电压源型换流器; 下垂控制; 潮流分析; 电压死区; 功率死区

中图分类号: TM 761; TM 721.1

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2017.08.030

0 引言

基于电压源型换流器(VSC)的高压直流输电(HVDC)系统具有体积小、有功/无功独立可控等优势, 它可向无源网络供电, 便于构成并联型多端直流输电 MTDC(Multi-Terminal HVDC)系统, 在远距离大容量输电场合及新能源并网领域有着广阔的应用前景^[1]。柔性直流输电技术是欧洲“超级电网”计划和美国 Grid 2030 电网规划的解决方案^[2-3], 也是构建能源互联网的关键技术^[4]。我国在 2013 年和 2014 年分别建成投运南澳 ± 160 kV 三端柔性直流输电工程和舟山 ± 200 kV 五端柔性直流输电工程^[5]。

MTDC 系统是指多个换流站接于同一直流网络的输电系统, 系统多采用星形、环状、网络状结构, 其中各换流站一般以并联形式连接^[1]。这种结构能够实现多区域发电和多区域受电, 有利于提高系统的运行灵活性和可靠性, 但系统控制的复杂性也会增加^[6]。

MTDC 系统的控制目标是在保证换流站安全运行的基础上, 维持系统的直流电压稳定和功率平衡。目前主要的控制方式有主从控制、电压裕度控制^[7]和下垂控制^[8]等。主从控制中, 由主换流站控制系统直流电压, 各从换流站控制各自输出功率或电流。主从控制实现简单, 但是可靠性差, 一旦主换流站因故障退出运行, 系统电压就会失控。主换流站作为松弛节点, 需要补偿系统损耗和功率缺额, 因此要求电压控制站接入具有较大备用容量和支撑能力的交流

系统^[1]。电压裕度控制通过为不同换流站预先设置不同的参考电压, 使得处于定功率模式的换流站在系统电压失控后能够自动切换到定电压模式。电压裕度控制中也只有主换流站能控制系统电压, 但其主换流站无需依靠通信系统就能实现自动切换, 从而使系统的运行可靠性得以提高。然而, 有限的电压裕度会限制接入 MTDC 系统换流站的数量^[9]。下垂控制因其在交流系统中广泛应用而被引入 MTDC 系统^[10]。对于并联型 MTDC 系统, 系统直流电压可以作为换流站输出功率的参考变量。下垂控制中电压误差与功率误差成比例关系, 当直流电压发生变化时, 多个换流站可以合理动态调节输出功率以维持系统电压稳定, 从而显著提高系统的可靠性和响应能力。但是这一特点带来的不足是换流站输出功率易受直流电压波动的影响。一方面, 在 MTDC 系统中, 输电线路功率流动产生的电压差使得各换流站的直流电压存在差异, 同时使各换流站的直流电压偏离参考值, 产生电压误差^[11]; 另一方面, 具有随机性的新能源接入会引起系统直流电压波动, 从而使换流站的输出功率随之变化。换流站输出功率频繁变化不利于交流系统的潮流控制, 因此在系统稳定运行的前提下, 换流站输出功率应尽量保持恒定。

为了消除下垂控制中换流站直流电压误差对 MTDC 系统潮流分布的影响, 实现 MTDC 系统精确潮流控制, 现有研究提出了 3 种解决思路。第一种思路是选定一个换流站的直流电压作为公共直流参考电压, 其他所有换流站均以其作为控制器的输入^[12]。这种方法不存在电压误差, 但需要通信系统采集远端直流电压信号, 系统可靠性有所降低。第二种思路是结合潮流计算为各换流站指定参考电压和参考功

收稿日期: 2017-04-12; 修回日期: 2017-06-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2016YFB0900200); 南方电网重点科技项目(CSGTRC-K163001)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2016YFB0900200) and Science and Technology Project of China Southern Power Grid(CSGTRC-K163001)

率^[11,13],这种方法在潮流计算模型准确的前提下可消除由系统损耗引起的换流站输出功率误差,但无法抑制新能源波动带来的影响。第三种思路是在下垂控制中增加一段恒功率区域,具体有 2 种实现方法:一种是将电压裕度控制和电压下垂控制结合,根据换流站的直流电压决定控制模式^[9],换流站正常运行在定功率模式下,当直流电压偏差达到电压裕度限值后,切换为下垂控制;另一种方法是动态调节换流站的参考电压,通过在原有下垂控制的基础上附加功率闭环,利用功率积差修正电压参考值,从而实现换流站输出功率对指令值的动态跟踪^[5]。这 2 种方法均表现出分段带死区的下垂特性,为了减小输电损耗和新能源波动带来的影响,往往需要设置较大的功率死区。但系统在恒功率区内无调压性能,较大的功率死区会对下垂特性产生较大影响,使电压偏差增大^[14]。

本文对下垂控制的特性进行分析,对分段带死区的功率-电压下垂控制进行改进,结合上述后 2 种思路,提出一种考虑输电损耗和新能源波动的 MTDC 下垂控制策略。该策略在配置各换流站的下垂参数时考虑了系统损耗,根据潮流分析的结果为不同换流站指定不同的运行参考点,并对主换流站和从换流站分别增加电压闭环和功率闭环,形成带电压死区和带功率死区的下垂控制,以补偿新能源波动带来的影响,同时根据换流站容量和系统电压范围指定下垂系数,避免换流站过载。在 MATLAB/Simulink 中搭建五端 VSC-HVDC 模型进行仿真,结果表明该控制策略可结合裕度控制和下垂控制的优势。在正常工作状态下,系统损耗和新能源波动主要由主换流站承担,从换流站的输出功率基本不受影响;在大扰动情况下,所有使用下垂控制的换流站均可参与到电压调节的过程中,从而维持系统稳定运行。理论分析和仿真结果表明,该策略具有较好的稳态性能和较高的可靠性。

1 传统下垂控制

传统的功率-电压($P-U_{dc}$)下垂特性满足式(1),其中 U_{dc}^* 为换流站参考电压, P^* 为参考功率, K_U 和 K_P 分别为电压误差系数和功率误差系数, e 为比例-积分(PI)控制器的输入,各变量都取标么值。通过设置 K_U 和 K_P ,可以使换流站处于不同的工作方式。当 $K_U=0$ 时,换流站处于定功率模式;当 $K_P=0$ 时,换流站处于定电压模式;当 $K_U>0$ 且 $K_P>0$ 时,换流站处于下垂控制模式,下垂特性斜率为 $-K_P/K_U$ 。

$$e = K_U(U_{dc}^* - U_{dc}) + K_P(P^* - P) \quad (1)$$

定义电压误差 $e_U = U_{dc}^* - U_{dc}$,功率误差 $e_P = P^* - P$,式(1)可以写成:

$$e = K_U e_U + K_P e_P \quad (2)$$

功率-电压下垂特性和控制器设计分别见图 1

(a)、(b), e 经过比例-积分控制器产生 d 轴参考电流 I_d^* 。定义换流站功率从交流系统流向直流系统的方向为正。当 MTDC 系统因功率波动引起直流电压降低时,换流站会增加整流输出功率或减少逆变消耗功率,以阻止电压跌落。功率-电压下垂特性的斜率绝对值越小,因功率变动产生的电压偏差越小。

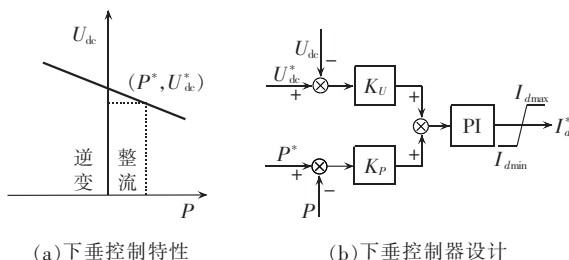


图 1 功率-电压下垂控制特性及控制器设计

Fig.1 Voltage-power droop control characteristic and controller design

由 N 个换流站组成的并联型 MTDC 系统中,忽略系统损耗,第 i 个换流站的参考电压 $U_{i,dc}^*$ 和参考功率 P_i^* 应满足:

$$U_{i,dc}^* = 1, \sum_{i=1}^N P_i^* = 0 \quad (3)$$

2 AC/DC 系统潮流计算

对于实际运行的 MTDC 系统,功率在输电线路上传输引起的电压降使得各换流站的电压各不相同,同时各换流站的电压都偏离参考值 1 p.u.。由式(2)可知,下垂控制中电压误差 e_U 与功率误差 e_P 成比例关系。稳态时 $e=0$,若电压误差 $e_U \neq 0$,则功率 P 也会偏移参考值 P^* 。为了消除此功率误差,可以借助潮流计算确定系统运行参考点。

由 N 个 VSC 构成的 MTDC 系统可划分为交流网络和直流网络,求解 AC/DC 潮流的算法可以分为交替求解法和统一求解法 2 种^[15-16]。交替求解算法对交流、直流系统依次进行迭代求解,只需在现有 AC 潮流计算程序的基础上增加 DC 潮流计算程序即可实现 AC/DC 潮流计算。MATACDC 是基于 MATLAB 使用交替求解算法的开源 AC/DC 潮流计算程序,由鲁汶大学的研究人员开发^[17]。

VSC 是连接交直流网络的接口,其控制方式会对系统潮流分布产生影响。对交流系统而言,根据 VSC 控制公共耦合点(PCC)处的变量(无功或交流电压幅值),VSC 可等效为 PQ 节点或 PV 节点。对直流系统而言,直流网络只涉及有功功率传输,系统内节点可分为定有功节点、定直流电压节点(松弛节点)和下垂节点。定有功节点的有功已知,松弛节点和下垂节点的有功在首次计算时经过估计得出。

经过交流潮流计算,换流站交流侧有功功率

$P_{i,c}$ 已知,注入直流网络的功率 $P_{i,dc}$ 为:

$$P_{i,dc}=P_{i,c}-P_{i,loss} \tag{4}$$

其中, $P_{i,loss}$ 为第 i 个换流站的损耗。

直流系统潮流方程为:

$$P_{i,dc}=U_{i,dc}I_{i,dc}=U_{i,dc}\sum_{j=1}^NY_{ij}U_{j,dc} \tag{5}$$

其中, $U_{i,dc}$ 、 $I_{i,dc}$ 分别为第 i 个换流站的直流侧电压和电流; Y_{ij} 为第 i 个换流站与第 j 个换流站间的输电线路导纳; N 为换流站个数; $U_{j,dc}$ 为第 j 个换流站的直流侧电压。结合式(1),可以求解得出各换流站的直流电压 $U_{i,dc}$ 和直流侧有功功率 $P_{i,dc}$ 。

此时,由于松弛节点和下垂节点的有功功率是估计值,因此还需要对这 2 类节点进行迭代。以 2 次求解的换流站损耗差值为判断依据,若差值大于迭代误差,则利用此更新值重新返回到交流潮流计算;否则停止迭代过程,输出计算结果。交替求解 AC/DC 潮流的流程见图 2,该程序有 3 个迭代过程,分别是交流系统迭代、直流系统迭代以及松弛节点与下垂控制节点的换流站损耗迭代,详细内容参见文献[18]。

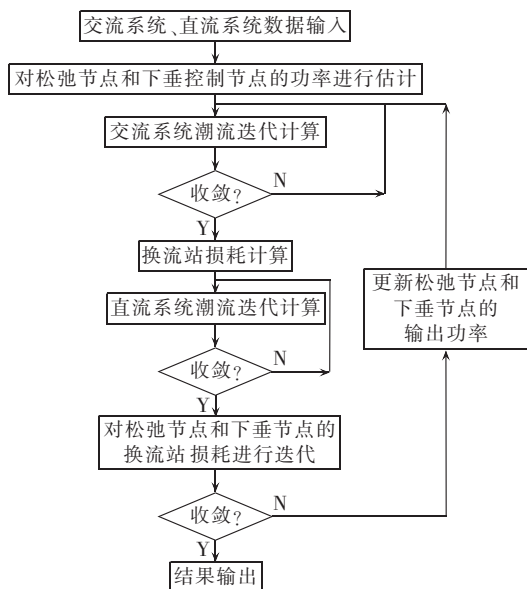


图 2 AC/DC 潮流交替求解算法流程图
Fig.2 Flowchart of sequential AC/DC power-flow algorithm

3 改进的 MTDC 下垂控制策略

3.1 带功率死区的下垂控制

借助潮流计算确定下垂控制的运行参考点可以使换流站输出功率误差为 0。但是在有新能源接入的场合,新能源波动会带来直流电压波动,从而影响换流站的功率输出。为了抑制新能源波动的影响,可以采取交流系统中二次调频平移发电机组特性曲线的方法,通过在原有下垂控制的基础上增加一个功率

闭环,实现换流站对输出功率参考值的跟踪。

通过附加功率闭环形成带功率死区的下垂控制设计如图 3 所示。功率闭环的输出为参考电压调整量 ΔU^* ,将此调整量与换流站参考电压 U_{dc}^* 相加,可以得到调整后的参考电压值 U_{dcM}^* 。这种方法通过功率闭环调节器实现下垂曲线的动态调整,具有抵抗小扰动的良好性能。但是它本质上属于定功率调节,在大扰动时难以发挥下垂控制调节电压和分配功率的作用,因此需要对功率闭环输出进行限幅($\pm\Delta U$),使系统发生较大功率变化时,换流站能够给予功率支持。

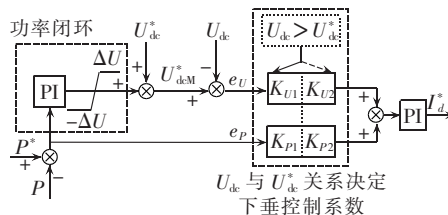


图 3 带功率死区的下垂控制器设计
Fig.3 Design of voltage droop controller with power dead-band

为了避免换流站过载,并考虑功率闭环带来的影响,下垂控制可分为 2 段斜率不同的下垂特性,下垂斜率分别为:

$$\begin{cases} -\frac{K_{p1}}{K_{U1}} = -\frac{U_{dc,max}-(U_{dc}^*+\Delta U)}{P^*-P_{min}} \\ -\frac{K_{p2}}{K_{U2}} = -\frac{(U_{dc}^*-\Delta U)-U_{dc,min}}{P_{max}-P^*} \end{cases} \tag{6}$$

其中, P_{max} 、 P_{min} 分别为换流站输出功率的最大值和最小值; $U_{dc,max}$ 、 $U_{dc,min}$ 分别为 MTDC 系统直流电压的最大值和最小值; ΔU 为功率死区取值。下垂系数的选择可通过 U_{dc} 与 U_{dc}^* 的关系决定,当 $U_{dc} > U_{dc}^*$ 时误差系数为 K_{U1} 、 K_{p1} ,当 $U_{dc} \leq U_{dc}^*$ 时误差系数为 K_{U2} 、 K_{p2} 。为避免误差系数频繁切换,可在 U_{dc} 与 U_{dc}^* 的比较中加入滞环比较器。

功率-电压下垂控制在附加功率闭环后会增加一段恒功率运行区域,见图 4。在一定电压范围内,功率闭环未饱和,换流站可实现定功率调节;功率闭环饱和后,参考电压调整量 ΔU^* 恒为 ΔU 或 $-\Delta U$,换流站运行于下垂控制区。功率死区 ΔU 取值越大,换流站维持功率恒定的效果越好,抵抗新能源波动的能力越强,但换流站参与电压调节的能力会降低。

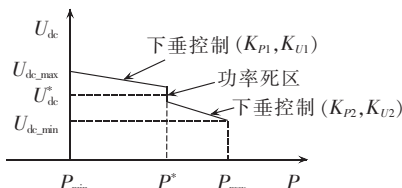


图 4 带功率死区的下垂控制特性
Fig.4 Characteristic of voltage droop control with power dead-band

3.2 带电压死区的下垂控制策略

与带功率死区的下垂控制类似,在传统下垂控制的基础上增加电压闭环,形成带电压死区的下垂控制,控制器设计见图 5。电压闭环的输出为参考功率调整量 ΔP^* ,将此调整量与换流站参考功率 P^* 相加,得到调整后的参考功率值 P_M^* 。同样需要对电压闭环输出进行限幅($\pm \Delta P$),使系统在发生较大功率变化时,换流站能切换到下垂控制。

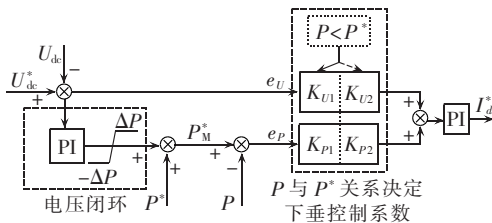


图 5 带电压死区的下垂控制器设计

Fig.5 Design of voltage droop controller with voltage dead-band

考虑电压闭环带来的影响,下垂控制可分为 2 段斜率不同的下垂特性,下垂斜率分别为:

$$\begin{cases} -\frac{K_{P1}}{K_{U1}} = -\frac{U_{dc_max} - U_{dc}^*}{(P^* - \Delta P) - P_{min}} \\ -\frac{K_{P2}}{K_{U2}} = -\frac{U_{dc}^* - U_{dc_min}}{P_{max} - (P^* + \Delta P)} \end{cases} \quad (7)$$

其中, ΔP 为电压闭环的饱和值。下垂系数的选择由 P 与 P^* 的关系决定。

功率-电压下垂控制在附加电压闭环后会增加一段恒电压运行的区域,如图 6 所示。在一定功率范围内,电压闭环未发生饱和,换流站可以实现定电压调节;当电压闭环饱和后,参考功率调整量 ΔP^* 恒为 ΔP 或 $-\Delta P$,换流站运行于下垂控制区。

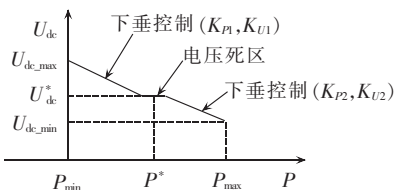


图 6 带电压死区的下垂控制特性

Fig.6 Characteristic of voltage droop control with voltage dead-band

3.3 改进的下垂控制策略

借助潮流计算确定换流站运行参考点,同时对主换流站和从换流站分别使用带电压死区和带功率死区的下垂控制,可以减少输电损耗和新能源接入带来的影响,提高 MTDC 系统的稳态性能。

改进的控制策略如图 7 所示,该控制策略可以分为系统级控制和换流站级控制 2 层。在系统级控制层通过执行离线潮流计算程序,得出一定功率分配情况下各换流站的电压值,并将此电压及功率用来配置各换流站下垂控制中的参考电压和参考功

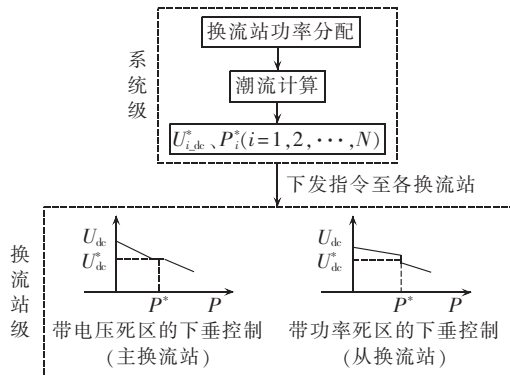


图 7 改进的下垂控制策略

Fig.7 Improved droop control strategy

率。如果潮流计算模型准确,则此时 e_U 和 e_P 均为 0。在系统级控制层还可以将系统的优化潮流 OPF (Optimal Power Flow) 考虑在内,得到经过优化后的系统运行点(如以输电损耗最小为优化目标)。

考虑到新能源具有随机性,在换流站级控制层需要采用带电压死区和带功率死区的下垂控制。需要注意的是,采用带电压死区下垂控制的换流站只能有 1 个,该站即为主换流站;而采用带功率死区下垂控制的换流站数量则不受限制,这些换流站为从换流站。电压死区(ΔP)和功率死区(ΔU)的取值需要根据新能源的功率波动范围来确定。通常 ΔP 和 ΔU 的取值较小,对原有下垂特性影响不大。由于换流站级控制采用本地测量信号作为输入,而系统级控制对通信速率要求不高,因此本策略具有较高的可靠性。

4 仿真实验及结果分析

4.1 仿真模型

为了验证所提控制策略的有效性,在 MATLAB/Simulink 中搭建图 8 所示的五端 VSC-HVDC 系统仿真模型。模型参数如下:额定功率为 200 MW,交流额定电压为 100 kV,直流额定电压为 ± 100 kV,变压器电感 L_T 为 50 mH,线路参数 R_L, L_L, C_L 分别为 0.015 Ω/km 、0.827 mH/km、0.0139 $\mu\text{F}/\text{km}$,线路长度 $l_{12}, l_{23}, l_{34}, l_{41}, l_{45}$ 分别为 180、150、230、500、200 km,换流站容量下限 $P_{1min}, P_{2min}, P_{3min}, P_{4min}, P_{5min}$ 分别为 0、0、0、-0.8、0 p.u.,换流站容量上限 $P_{1max}, P_{2max}, P_{3max}, P_{4max}, P_{5max}$ 分别为 0.7、0.5、0.6、0、0.2 p.u.。系统功率回路由交流电网、风机、传输线路和换流站组成。换流站采用三电平变流器,交流侧通过换流变压器与交流系统连接,直流侧并联有稳压电容 $C, C=50 \mu\text{F}$ 。4 个交流电网和风机分别通过 VSC₁—VSC₃ 接至 MTDC 系统。其中, VSC₁—VSC₃ 工作在整流模式,均采用 $P-U_{dc}$ 下垂控制, VSC₁ 为主换流站,采用带电压死区的下垂控制; VSC₂、VSC₃ 为从换流站,采用带功率死区

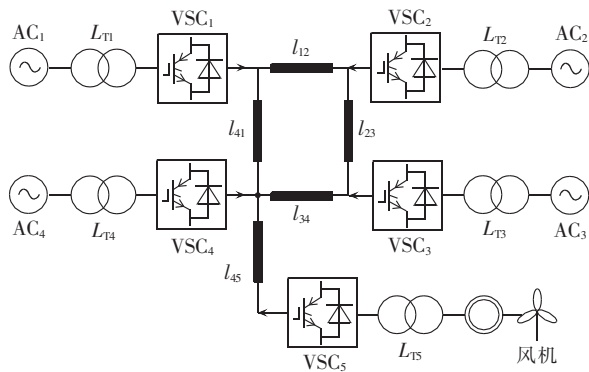


图 8 五端 VSC-HVDC 系统

Fig.8 Five-terminal VSC-HVDC system

的下垂控制;VSC₄工作在逆变模式,采用恒功率控制;VSC₅采用交流电压控制,吸收风机输出功率。

VSC₄需要从直流系统吸收 0.8 p.u. 的有功功率,风机经 VSC₅向直流系统注入的平均功率为 0.13p.u.,波动范围是 0.10~0.16 p.u.。VSC₂、VSC₃ 的功率分配分别为 0.25 p.u. 和 0.2 p.u.,VSC₁ 作为主换流站承担系统损耗和新能源波动。

仿真时序如下:系统在 0 s 时以主从控制方式启动,VSC₂、VSC₃ 的参考功率分别为 0.25 p.u. 和 0.2 p.u.,VSC₄ 的参考功率为 -0.8 p.u.;1 s 时风机接入系统,平均输出功率为 0.13 p.u.;2 s 时系统切换为传统下垂控制,VSC₁—VSC₃ 根据潮流计算结果(见表 1)确定运行参考点(风机平均输出功率为 0.13 p.u.);3.5 s 时系统解锁带电压死区和带功率死区的下垂控制,根据风机输出功率波动范围上下限(±0.03 p.u.)求解出的电压波动范围和功率波动范围分别是 0.003 p.u. 和 0.0313 p.u.(见表 1)。考虑潮流计算模型的准确性,VSC₁ 的电压死区(ΔP)取值为 0.06 p.u.,VSC₂、VSC₃ 的功率死区(ΔU)取值为 0.006 p.u.。为了验证系统

表 1 潮流计算结果

Table 1 Results of power flow analysis

初始条件		潮流计算结果	
风机平均输出功率 0.13 p.u.	$U_{dk1}=1\text{ p.u.}$	$P_1=0.3063\text{ p.u.}$	
	$\begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.2 \\ -0.8 \\ 0.13 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$	$\begin{bmatrix} U_{dk2} \\ U_{dk3} \\ U_{dk4} \\ U_{dk5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.994 \\ 0.979 \\ 0.983 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$	
风机最小输出功率 0.1 p.u.	$U_{dk1}=1\text{ p.u.}$	$P_1=0.3376\text{ p.u.}$	
	$\begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.2 \\ -0.8 \\ 0.1 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$	$\begin{bmatrix} U_{dk2} \\ U_{dk3} \\ U_{dk4} \\ U_{dk5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.999 \\ 0.993 \\ 0.978 \\ 0.980 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$	
风机最大输出功率 0.16 p.u.	$U_{dk1}=1\text{ p.u.}$	$P_1=0.275\text{ p.u.}$	
	$\begin{bmatrix} P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.25 \\ 0.2 \\ -0.8 \\ 0.16 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$	$\begin{bmatrix} U_{dk2} \\ U_{dk3} \\ U_{dk4} \\ U_{dk5} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1.000 \\ 0.995 \\ 0.980 \\ 0.985 \end{bmatrix} \text{ p.u.}$	

的运行可靠性,在 5 s 时分别模拟从换流站 VSC₂ 和主换流站 VSC₁ 退出运行的情况。

4.2 仿真结果

系统以主从方式平滑启动后切换到传统下垂控制,各个换流站的直流电压和输出功率(均为标幺值,后同)如图 9 所示。主从控制中从换流站具有跟踪指定功率的良好性能,系统损耗和新能源波动由主换流站来承担(0~2 s)。系统切换为传统下垂控制后,所有使用下垂控制的换流站输出功率均受新能源波动的影响(2~3.5 s)。系统在 3.5 s 时解锁主换流站的电压闭环控制器和从换流站的功率闭环控制器,从换流站 VSC₂、VSC₃ 的输出功率基本不受新能源波动的影响,具有与主控制类似的稳态性能。

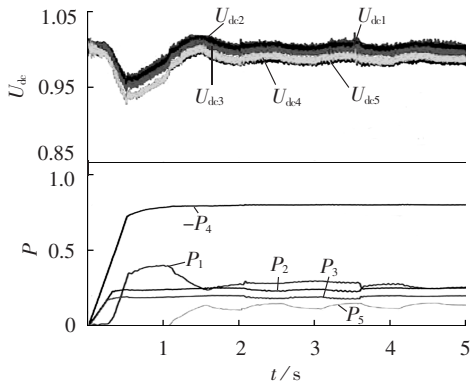


图 9 0~5s 各换流站电压与输出功率波形

Fig.9 DC voltage and output power of different VSCs for 0~5 s

在 5 s 时从换流站 VSC₂ 退出运行后的换流站电压与功率波形如图 10 所示,可见功率缺额由主换流站 VSC₁ 和从换流站 VSC₃ 共同承担,VSC₄ 输出功率不变。

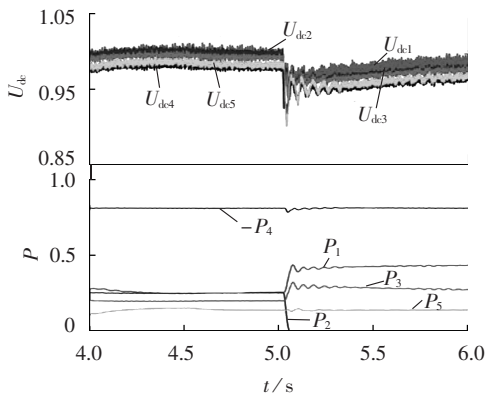


图 10 从换流站 VSC₂ 退出运行时各换流站电压与输出功率波形

Fig.10 DC voltage and output power of different VSCs during outage of VSC₂

在 5 s 时主换流站 VSC₁ 退出运行后的换流站电压与功率波形如图 11 所示,可见功率缺额由从换流站 VSC₂、VSC₃ 共同承担,VSC₄ 输出功率不变。

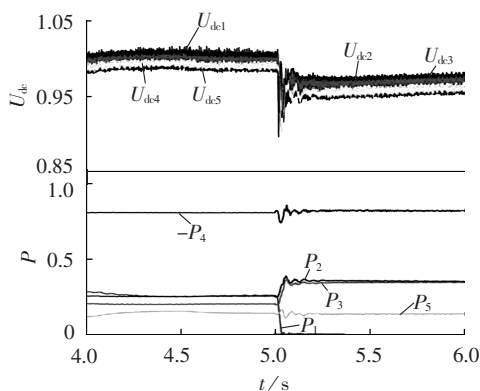


图 11 主换流站 VSC₁ 退出运行时各换流站电压与输出功率波形

Fig.11 DC voltage and output power of different VSCs during outage of VSC₁

为了研究电压死区和功率死区对下垂控制的影响,分别对不同 ΔU 和 ΔP 取值进行仿真,以 VSC₁ 的电压和 VSC₃ 的有功功率为例,不同 ΔU 和 ΔP 情况下的电压及功率波形如图 12 所示。图中,情况 1 为 $\Delta U=0.01$ p.u.、 $\Delta P=0.1$ p.u.;情况 2 为 $\Delta U=0.006$ p.u.、 $\Delta P=0.06$ p.u.;情况 3 为 $\Delta U=0.003$ p.u.、 $\Delta P=0.0313$ p.u.;情况 4 为 $\Delta U=0$ p.u.、 $\Delta P=0$ p.u.,对应于传统下垂控制。

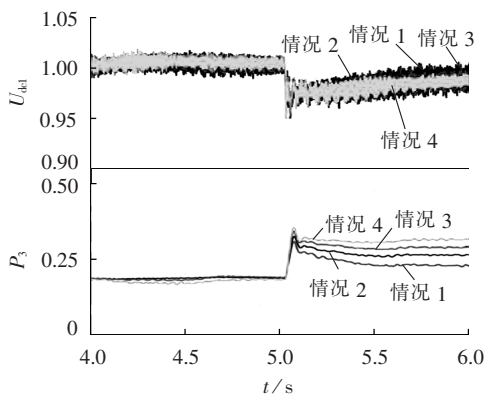


图 12 在不同模式下 VSC₁ 的电压与 VSC₃ 的功率

Fig.12 DC voltage of VSC₁ and output power of VSC₃ under different modes

从图 12 中可以看出, ΔU 和 ΔP 的取值越大,从换流站抵抗新能源波动的能力越强(4~5 s),但是较大的 ΔU 和 ΔP 会对原有下垂特性产生影响(5~6 s)。当 ΔU 和 ΔP 分别取 0.006 p.u. 和 0.06 p.u. 时,从换流站既能在正常工作状态下较好地跟踪功率指令值,又对原有下垂特性的影响不大,可以合理承担某一换流站退出运行后的功率缺额。

5 结论

本文提出一种考虑输电损耗和新能源波动的 MTDC 下垂控制策略。首先根据潮流计算结果为各换流站指定电压参考值和功率参考值,再对主换流站和从换流站分别增加电压闭环和功率闭环,形成带电压死区和带功率死区的下垂控制,以补偿新能源波动

带来的影响,同时考虑换流站容量和系统电压范围指定下垂系数。通过在 MATLAB 中搭建五端 VSC-HVDC 仿真模型,借助开源 AC/DC 潮流计算程序 MATA CDC,对所提控制策略进行仿真验证。结果表明:所提控制策略在正常工作状态下,主要由主换流站承担系统损耗和新能源波动,从换流站输出功率基本不受影响;在大扰动情况下,主换流站和从换流站都切换到下垂控制,共同承担系统中的功率缺额。理论分析和仿真结果表明,该控制策略具有较好的稳态性能和较高的可靠性。

参考文献:

- [1] 徐殿国,刘瑜超,武健. 多端直流输电系统控制研究综述[J]. 电工技术学报,2015,30(17):1-12.
- XU Dianguo,LIU Yuchao,WU Jian. Review on control strategies of multi-terminal direct current transmission system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2015,30(17):1-12.
- [2] 姚美齐,李乃湖. 欧洲超级电网的发展及其解决方案[J]. 电网技术,2014,38(3):549-555.
- YAO Meiqi,LI Naihu. An introduction to European supergrid and its solutions[J]. Power System Technology,2014,38(3):549-555.
- [3] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
- YAO Liangzhong,WU Jing,WANG Zhibing,et al. Pattern analysis of future HVDC grid development[J]. Proceedings of the CSEE,2014,34(34):6007-6020.
- [4] 徐成,梁睿,程真何,等. 面向能源互联网的智能配电网安全态势感知[J]. 电力自动化设备,2016,36(6):13-18.
- XU Cheng,LIANG Rui,CHENG Zhenhe,et al. Security situation awareness of smart distribution grid for future energy internet [J]. Electric Power Automation Equipment,2016,36(6):13-18.
- [5] 谢竹君,林卫星,张珂,等. 直流电网潮流分级分区控制方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(7):1959-1968.
- XIE Zhujun,LIN Weixing,ZHANG Ke,et al. Hierarchical and regional power flow control in a DC grid[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(7):1959-1968.
- [6] 徐政,胡永瑞,傅闯. 并联型多端直流输电系统的控制策略与故障特征[J]. 高电压技术,2013,39(11):2721-2729.
- XU Zheng,HU Yongrui,FU Chuang. Control strategy and fault characteristics of parallel MTDC transmission systems[J]. High Voltage Engineering,2013,39(11):2721-2729.
- [7] NAKAJIMA T,IROKAWA S. A control system for HVDC transmission by voltage sourced converters[C]//IEEE Power Engineering Society Summer Meeting. Edmonton,Alta,Canada:IEEE,1999:1113-1119.
- [8] BARKER C D,WHITEHOUSE R. Autonomous converter control in a multi-terminal HVDC system[C]//9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. London,UK:IET,2010:1-5.
- [9] 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.
- [10] ROUZBEHI K, GAVRILUTA C, CANDELA J I, et al. Comprehensive analogy between conventional AC grids and DC grids characteristics[C]//IECON 2013-39th Annual Conference of the IEEE. Vienna, Austria: IEEE, 2013: 2004-2010.
- [11] HAILESELASSIE T M, UHLEN K. Impact of DC line voltage drops on power flow of MTDC using droop control[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(3): 1441-1449.
- [12] BERGGREN B, MAJUMDER R, SAO C, et al. Method and control device for controlling power flow within a DC power transmission network: US 8553437 B2[P]. 2013-10-08.
- [13] 喻锋, 王西田, 解大, 等. 多端柔性直流下垂控制的功率参考值修正方法[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 117-122.
- YU Feng, WANG Xitian, XIE Da, et al. Power reference correction method for droop control of VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 117-122.
- [14] 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.
- [15] BEERTEN J, COLE S, BELMANS R. Generalized steady-state VSC MTDC model for sequential AC/DC power flow algorithms[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(2): 821-829.
- [16] 陈谦, 唐国庆, 王浔. 多端 VSC-MTDC 系统交直流潮流计算[J]. 电力自动化设备, 2005, 25(6): 1-6.
- CHEN Qian, TANG Guoqing, WANG Xun. AC-DC power flow

algorithm for multi-terminal VSC-HVDC systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2005, 25(6): 1-6.

- [17] BEERTEN J, BELMANS R. Development of an open source power flow software for high voltage direct current grids and hybrid AC/DC systems: MATA CDC[J]. IET Generation Transmission & Distribution, 2015, 9(10): 966-974.
- [18] BEERTEN J, HERTEM D V, BELMANS R. VSC MTDC systems with a distributed DC voltage control—a power flow approach[C]//2011 IEEE Trondheim Powertech. Trondheim, Norway: IEEE, 2011: 1-6.

作者简介:



李文勋

李文勋(1992—),男,山西晋中人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子技术在柔性直流输电方面的应用(E-mail: lwx2015@tju.edu.cn);

车延博(1972—),男,山东聊城人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统、电力电子及电力传动、新能源等(E-mail: ybche@tju.edu.cn);

洪 潮(1967—),男,湖北丹江口人,教授级高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统安全稳定、交直流相互影响;

张 野(1986—),男,辽宁锦州人,工程师,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、柔性直流输电技术;

杨 健(1988—),男,河南焦作人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、规划设计。

VSC-MTDC droop control strategy considering transmission loss and renewable energy fluctuation

LI Wenxun¹, CHE Yanbo¹, HONG Chao², ZHANG Ye², YANG Jian²

(1. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2. Electric Power Research Institute, China Southern Power Grid Co., Ltd., Guangzhou 510080, China)

Abstract: The voltage drop caused by the power transmission on line makes the DC voltages of different convertor stations different and the integration of random renewable energy may also induce the DC voltage fluctuation, which shifts the output power of convertor station and influences the power-flow control of MTDC (Multi-Terminal HVDC) system. A droop control strategy considering transmission loss and renewable energy fluctuation is proposed for MTDC system, which assigns the operating point references for different convertor stations according to the results of power flow analysis, adds a closed voltage loop and a closed power loop to the droop controls of master and slave stations respectively to improve the droop control with voltage dead-band and power dead-band for compensating the renewable energy fluctuation, and determines the droop coefficients according to the convertor station capacity and system voltage range. Simulative results show that, with the proposed control strategy, the influence of renewable energy fluctuation on the power output of slave station is reduced in normal operating conditions and the fluctuated power is properly distributed among the stations in large disturbance condition with good voltage regulation performance.

Key words: MTDC; VSC; droop control; power flow analysis; voltage dead-band; power dead-band