

## 柔性直流输电网的电压控制原理研究

徐政<sup>1</sup>, 张哲任<sup>2</sup>, 刘高任<sup>1</sup>

(1. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027;

2. 国网浙江省电力公司经济技术研究院, 浙江 杭州 310000)

**摘要:** 本文研究柔性直流输电网的电压控制原理。描述了柔性直流电网电压控制的3种基本策略及其特点, 提出了一种一次调压与二次调压相协调的直流电网电压控制策略, 其中一次调压采用带死区的直流电压下斜控制律, 二次调压采用基于电压基准节点电压恒定的控制准则。论文给出了带死区的直流电压下斜控制的实现方法和逻辑框图; 描述了电压基准节点的选择原则, 并给出了基于电压基准节点电压恒定控制的二次调压实现方法。构建了一个四端直流输电网测试系统, 基于该测试系统, 介绍了带死区的直流电压下斜控制的参数设计方法, 测试了直流电网负荷改变以及电压基准换流站退出运行2种工况下整个系统的响应特性。测试结果表明, 所提出的一次调压与二次调压相协调的直流电网电压控制策略具有良好的控制性能, 适用于普遍意义的直流电网。

**关键词:** 柔性直流输电网; 电压控制; 电压基准节点; 一次调压; 二次调压; 电压死区; 下斜控制

**中图分类号:** TM73

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2017)01-0054-06

基于电压源换流器(VSC)的柔性直流输电技术出现以后<sup>[1-3]</sup>, 由于直流电流可以反向, 直流电网的优势可以充分发挥, 因而发展柔性直流电网技术已成为电力工业界的一个新的期望<sup>[4]</sup>。但发展柔性直流电网除了在设备制造方面还存在瓶颈之外, 在控制策略方面同样存在挑战。

目前已提出的柔性直流输电网的控制策略可以分为3种基本类型<sup>[4]</sup>: 即主从控制策略<sup>[5,6]</sup>, 直流电压裕额控制策略<sup>[7,8]</sup>和直流电压下斜控制策略<sup>[4]</sup>。而得到实际工程应用并已有运行经验的只有主从控制策略。

主从控制策略的优点是简单清晰, 缺点主要是2个: (1) 整个系统的直流电压控制落在主控站上, 即主控站担负了整个系统的功率平衡任务, 因此, 对主控站的容量提出了很高的要求。(2) 如果主控站功率调节能力达到极限或者故障退出, 需要有一个从控站立刻转变为主控站, 以控制整个系统的电压并实现功率平衡; 否则, 整个系统的直流电压就会失控, 导致严重的过电压或系统崩溃; 如何实现主控站的平稳交接, 是主从控制策略需要解决的一个关键问题, 因而主从控制策略对通信系统有很强的依赖性。根据主从控制策略的上述特点, 其应用范围局限在端数很少的小型直流电网上。

为了解决主从控制对通信系统的强依赖性, 提出了直流电压裕额控制策略。其优势是在系统发

生大扰动时电压控制能够自动转换到新的主控站, 且这个过程不需要换流站间的通信。相比于主从控制策略, 其可靠性更强; 但其控制器设计与主从控制器相比复杂很多, 特别是端数多时, 需要校核的运行方式成倍增加。另外, 直流电压裕额控制与主从控制一样, 任何时刻只有一个站承担电压控制的任务, 同时平衡整个直流系统的功率; 因而对电压控制站的容量有很高的要求, 特别是当运行方式有大幅度变化时, 一个单站的容量很难满足平衡整个系统功率的要求, 同时对与电压控制站相连的交流系统的功率冲击也较大。因而直流电压裕额控制与主从控制一样, 通常应用于端数较少且换流站容量差别悬殊的小型直流系统中。

为了克服主从控制策略和电压裕额控制策略的不足, 根据直流电网电压与交流电网频率在表征电网功率平衡特性上的相似性, 很自然地借用交流电网负荷频率控制的思路, 提出了直流电压下斜控制策略<sup>[4]</sup>。尽管直流电压下斜控制策略的实现方法已有非常多的文献进行过讨论, 但到目前为止并没有一种实现方法得到广泛的接受, 且没有一种实现方法得到实际工程的检验。本文提出一种一次调压与二次调压相协调的直流电网电压控制策略<sup>[9]</sup>, 其中一次调压采用带死区的直流电压下斜控制律, 二次调压采用基于电压基准节点电压恒定的控制准则。

### 1 直流电网电压控制的基本原理

直流电网功率平衡的指标是直流电网的电压。当注入直流电网的功率大于流出直流电网的功率

收稿日期: 2016-10-12; 修回日期: 2016-11-16

基金项目: 国家电网公司科技项目(柔性直流换流器容量提升及其架空线应用的基础理论和关键技术研究)

时,直流电网电压就会上升;当注入直流电网的功率小于流出直流电网的功率时,直流电网电压就会下降。因此,直流电网的电压与交流电网中的频率具有相似的特性,都是指示功率是否平衡的指标。但直流电网电压与交流电网频率在时间和空间特性上具有显著的差别。在时间响应特性上,直流电网电压比交流电网频率快3个数量级,即直流电网电压的响应时间一般在毫秒级。而交流电网中的能量储存在发电机转子上,交流电网的频率直接与发电机转子的转速即动能相关,频率响应的时间与发电机的惯性时间常数相当,在秒级。在空间响应特性上,交流电网频率稳态下是全网一致的;而直流电网中各个节点的电压是不一致的,随运行方式的改变而改变。因此,为了定义直流电网的电压偏差,首先得设定一个直流电网电压的基准节点,直流电网的电压偏差就定义为基准节点上的电压偏差。一般将某个容量较大且对全网电压有决定性作用的换流站节点设为电压基准节点。

采用直流电压下斜控制策略时,需要对直流电网中的换流站节点进行分类。按照输出功率是否能够根据电网运行的需要进行调整,可以将直流电网中的换流站节点分为可调功率节点与不可调功率节点。一般接入大电网的换流站节点为可调功率节点;而直接联接负荷的换流站节点以及直接联接风力发电和光伏发电的换流站节点为不可调功率节点。直流电网若采用电压下斜控制作为一次调压的控制方式,那么除电压基准节点外,功率可调的换流站节点都应设置为电压下斜控制节点,而功率不可调的换流站节点应设置为定功率控制节点。

由于直流电网电压与交流电网频率在表征能量平衡方面的相似性,直流电网中负荷的分摊方法完全可以借鉴交流电网中的负荷分摊方法。交流电网采用一次调频和二次调频来实现负荷分摊和频率控制,直流电网也可以采用一次调压和二次调压来实现负荷分摊和电压控制。因此,直流电网的电压控制也可以分两层来实现,底层的是电压下斜控制,上层的是与交流电网二次调频(目前称为自动发电控制 AGC,也称负荷频率控制)类似的二次调压系统(本文也称其为负荷电压控制)。

直流电网一次调压是直流电网遭受扰动后换流器所配置的电压下斜控制器的固有响应。通常,扰动结束后 0.5 s 左右的时间段,属于一次调压起作用的时间段。扰动结束后 0.5 s 之后的时间段,二次调压或称负荷电压控制系统会起作用。本文

假定二次调压系统会根据直流电网电压控制的要求,每隔 0.5 s 刷新一次各功率可切换流站的功率指令值,就如同交流电网中的二次调频每隔若干秒刷新一次 AGC 电厂的功率指令值一样。

## 2 带电压死区的电压下斜控制特性及其实现方法

带电压死区的电压下斜控制特性<sup>[1]</sup>如图 1 所示,其中, $U_{dcmax}$ 和 $U_{dcmin}$ 分别为电压死区的上限值和下限值,是直流电网正常运行时,考虑所有运行方式后对应换流站稳态直流电压的最大值和最小值; $P_{dc}^*$ , $P_1^*$ , $P_2^*$ 和 $P_3^*$ 为电压二次调节系统每隔 0.5 s 下发的功率指令值; $K$ 为电压下斜曲线的斜率。在一次调压起作用的时间段内,认为功率指令值 $P_{dc}^*$ , $P_1^*$ , $P_2^*$ 和 $P_3^*$ 为不变量。而控制策略中的其他几个参数, $U_{dcmax}$ 、 $U_{dcmin}$ 和 $K$ ,对于特定的换流站可以认为是固定不变的。这类似于交流电网中的 AGC,其频率死区和调差率等参数在运行中是不变的,可变的仅仅是 AGC 机组的功率指令值。

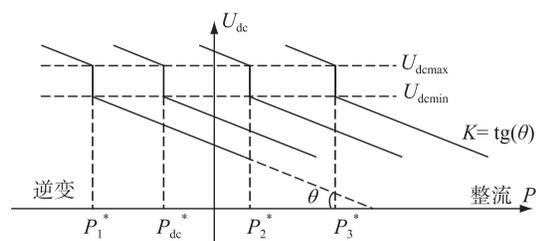


图 1 带电压死区的电压下斜控制特性

带电压死区的电压下斜控制器的实现框图如图 2 所示。在一次调压起作用的过程中,该控制器根据实测的换流站输出功率 $P_{dc}$ (以图 1 中功率为 $P_{dc}$ 的换流站为例)及直流电压 $U_{dc}$ 计算出换流站定功率控制器的新的功率指令值 $P_{dc}^* + \Delta P_{dc}^*$ 。当 $U_{dc}$ 落在死去范围内时,换流站定功率控制器的功率指令值修正量 $\Delta P_{dc}^* = 0$ , $P_{dc}^*$ 保持原来的值不变;当 $U_{dc}$ 越出死去范围时, $\Delta P_{dc}^* \neq 0$ , $P_{dc}^*$ 按照图 1 中的电压下斜特性取值。由带电压死区的电压下斜控制器确定的功率指令值 $P_{dc}^* + \Delta P_{dc}^*$ 与实际功率 $P_{dc}$ 的偏差作为 PI 控制器的输入,PI 控制器的输出为 $i_d^*$ ,是换流站内环控制器的有功( $d$ 轴)电流指令值。

## 3 二次调压原理

直流电网正常运行时,全网设置一个电压基准节点,该基准节点对应的换流器采用定电压控制。因此,基准节点注入直流电网的功率不是恒定的,会随负荷的变化而变化。为了使基准节点注入直

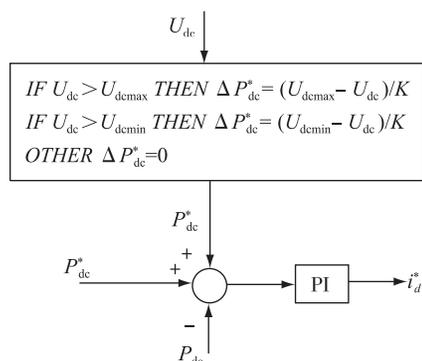


图2 带电压死区的电压下斜控制器实现框图

流电网的功率基本保持恒定值,需采用二次调压,也称负荷电压控制。其控制原理与交流电网的负荷频率控制类似。

负荷电压控制器的输入由两部分组成,第一部分为功率偏差值,是电压基准节点的功率指令值  $P_{\text{demark}}^*$  与实测功率  $P_{\text{demark}}$  之间的偏差;第二部分是电压偏差值,是电压基准节点的电压指令值  $U_{\text{demark}}^*$  与实测电压  $U_{\text{demark}}$  之间的偏差。负荷电压控制器框图如图3所示<sup>[6]</sup>。其中  $\Delta P_{\text{grid}}^*$  为整个直流电网需要增加的有功功率,将  $\Delta P_{\text{grid}}^*$  按照一定的比例分配给直流电网中的功率可调节节点,本文假定每隔 0.5 s 向各功率可调节节点发送一次新的功率增量指令值。

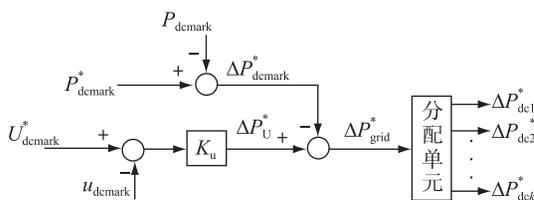


图3 负荷电压控制器的原理

#### 4 一次调压与二次调压相互协调的仿真验证

采用图4所示的四端柔性直流测试系统来展示本文所述电压控制原理的特性。图4所示的测试系统是一个具有大地回线的  $\pm 500$  kV 双极直流电网(图中只画出了其中的一个极),每个换流站由正极

换流器和负极换流器构成,接地极引线从正极换流器与负极换流器在直流侧的联接点引出。

换流站1的容量为1500 MW,所联接的是一个新能源基地,且该新能源基地没有与交流同步电网相联接,其功率送出完全依靠换流站1,即换流站1所联接的交流系统是一个没有同步电源的孤立电网。因此,换流站1采用定换流站交流母线电压幅值和频率控制策略,换流站1注入直流系统的功率等于新能源基地输出的功率(不计换流站损耗)。

换流站2的容量为3000 MW,所联接的也是一个新能源基地,但该新能源基地与交流同步电网相联接,其功率送出存在2条路径,其一是通过换流站2送入直流系统,其二是直接送入交流同步电网。因此,换流站2的控制方式比较灵活,可以采用直流侧定有功功率类(包括定有功功率和定直流电压2种情况)、交流侧定无功功率类(包括定无功功率和定交流电压2种情况)的控制策略。

换流站3的容量为1500 MW,接入交流同步电网,其功率可以双向流动,即换流站3既可以作为整流站运行,也可以作为逆变站运行。正常运行方式下换流站3的功率流向是确定的,因此换流站3也可以采用直流侧定有功功率类(包括定有功功率和定直流电压2种情况)、交流侧定无功功率类(包括定无功功率和定交流电压2种情况)的控制策略。

换流站4的容量为3000 MW,接入交流受端电网。由于交流受端电网容量足够大,因此正常运行方式下换流站4作为功率平衡站。

测试系统中的所有直流线路采用  $4 \times \text{LGJ}-720$  线路,基本电气参数为电阻  $0.009\ 735\ \Omega/\text{km}$ ,电感  $0.848\ 9\ \text{mH}/\text{km}$ ,电容  $0.013\ 67\ \text{mF}/\text{km}$ 。测试系统各换流站的主回路参数如表1所示。

##### 4.1 带电压死区的电压下斜控制器的设计

首先需要对方图4所示测试系统的直流节点进行分类。显然,换流站1联接新能源基地,且新能源基地不与交流电网相联,因此,换流站1为功率不可调节节点,且必须采用定交流母线电压幅值和频率控

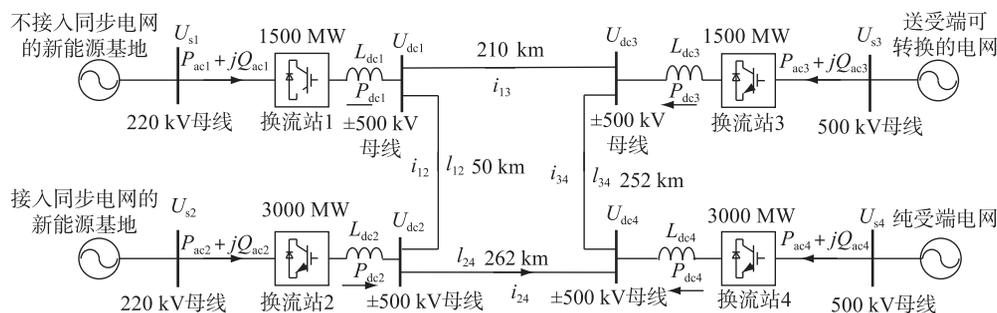


图4 四端柔性直流测试系统结构

表1 四端柔性直流测试系统各站单个换流器主回路参数

	换流站1	换流站2	换流站3	换流站4	
换流器额定容量/(MV·A)	750	1500	750	1500	
网侧交流母线电压/kV	220	220	500	500	
交流电网短路容量/(MV·A)	不适用	8000	6000	15 000	
直流电压/kV	500	500	500	500	
连接变压器	额定容量/(MV·A)	900	1800	900	1800
	变比	220/255	220/255	500/255	500/255
	短路阻抗/%	15	15	15	15
子模块额定电压/kV	1.6	2.2	1.6	2.2	
单桥臂子模块数/个	313	228	313	228	
子模块电容值/mF	12	18	12	18	
桥臂电抗/mH	66	32	66	32	
换流站出口平波电抗器/mH	300	300	300	300	

制策略。换流站2、换流站3和换流站4都与交流同步电网相联,其输出功率都是可调节的,因此可以采用直流电压下斜控制策略。由于换流站4是本网测试系统的最大受端换流站,其电压大小对全网电压有决定性影响,因此本网测试系统的电压基准节点选为换流站4,其基准电压就定为 $\pm 500$  kV。下面讨论换流站2、换流站3两个换流站电压下斜控制器的具体参数确定方法。

显然,对于每个换流站,需要确定的参数有 $U_{dcmax}$ ,  $U_{dcmin}$ , 输出直流功率上下限值 $P_{dcmax}$ 和 $P_{dcmin}$ 以及斜率 $K$ 。而斜率 $K$ 的意义是换流站输出功率从零变化到额定值时,换流站节点电压的变化范围,一般工程中 $K$ 取4%~5%,本章设定所有换流站电压下 $K$ 为4%。对于图4所示的四端测试系统,根据其实际运行的可能性,认为表3所示的4种极端运行方式已能够覆盖该测试系统的所有需考虑的运行方式。而 $P_{dcmax}$ 和 $P_{dcmin}$ 是由换流站的容量以及所联接的交流系统的特性决定的。对于本网测试系统,换流站2是送端系统,其输出直流功率的上下限值为零到换流站额定容量;换流站3既可作为送端系统,也可作为受端系统,其输出直流功率的上下限值为负的换流站额定容量到正的换流站额定容量;换流站4是受端系统,其输出直流功率的上下限值为零到换流站额定容量。表2给出了测试系统4个换流站的直流功率上下限值,表3给出了4种极端运行方式下各换流站的电压。根据表3,可以确定出 $U_{dc2max} = 506.423$ ,  $U_{dc2min} = 501.05$ ,  $U_{dc3max} = 504.606$ ,  $U_{dc3min} = 501.225$ 。

#### 4.2 控制指令值改变时的响应特性仿真

设测试系统的初始运行状态如表4所示,仿真开始时( $t=0$  s)测试系统已进入稳态运行, $t=0.1$  s时改变换流站1的有功功率指令值 $P_{dc1}^*$ 从1000 MW

变为1400 MW;并设二次调压系统每隔0.5 s刷新一次功率指令值。仿真时,图3负荷电压控制器的参数设置如表5所示。

表2 测试系统中换流站的功率上下限值 MW

换流站	$P_{dcmax}$	$P_{dcmin}$
换流站1	1500	0
换流站2	3000	0
换流站3	-1500	1500
换流站4	0	-3000

表3 4种极端运行方式下对应换流站的电压

运行方式	换流站1 $P_{dc1}$ / MW	换流站2 $P_{dc2}$ / MW	换流站3 $P_{dc3}$ / MW	换流站4 $P_{dc4}$ / MW	换流站 $U_{dc2}$ / kV	换流站 $U_{dc3}$ / kV	基准站 $U_{dc4}$ / kV
1	1500	3000	-1500	-3000	506.423	501.225	500
2	0	3000	0	-3000	505.57	502.089	500
3	1500	0	1500	-3000	502.962	504.606	500
4	0	0	1500	-1500	501.05	502.734	500

表4 四端柔性直流测试系统的初始运行状态

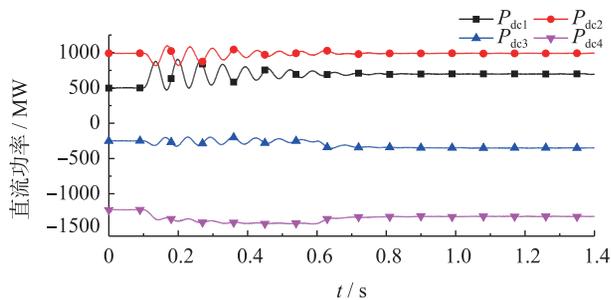
换流站编号	换流站控制策略	控制器的指令值
		$U_{s1}^* = 220$ kV $f_0^* = 50$ Hz
1	无源孤岛控制器	$P_{ac1}^* = 2 \times 500$ MW $Q_{ac1}^* = 0$ Mvar
2	直流侧定有功功率; 交流侧定无功功率	$P_{dc2}^* = 2 \times 1000$ MW $Q_{ac2}^* = 0$ Mvar
3	直流侧定有功功率; 交流侧定无功功率	$P_{dc3}^* = -2 \times 250$ MW $Q_{ac3}^* = 0$ Mvar
4	直流侧定电压; 交流侧定无功功率	$U_{dc4}^* = \pm 500$ kV $Q_{ac4}^* = 0$ Mvar

表5 负荷电压控制器的参数设置

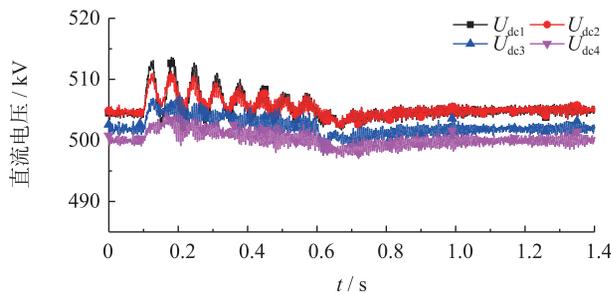
换流站	换流站1	换流站2	换流站3	换流站4
初始状态的功率指令值/MW	2×500	2×1000	-2×250	由初始状态潮流确定
目标状态的功率指令值/MW	2×700	由负荷电压控制器决定	由负荷电压控制器决定	由负荷电压控制器决定
比例系数 $K_U$ /(MW·kV <sup>-1</sup> )	不适用	不适用	不适用	10
功率分配系数/%	不适用	0	50	50

图5给出了测试系统的响应特性。由于换流站1的功率变化量较小,换流站4从直流电网吸收的功率没有超出其容量限值,因此其定电压控制的模式没有被改变,整个系统的电压不会出现大的波动。在此功率扰动下整个系统的响应过程可以描述如下:功率扰动后,注入直流电网的功率增加了 $2 \times 200$  MW,导致直流电压有上升的趋势,换流站4测量到电压上升的趋势后,其定电压控制器就发生作用,从而换流站4加大从电网吸收的功率;由于二次调压的控制周期是0.5 s;因此,当 $t=0.6$  s时,第1

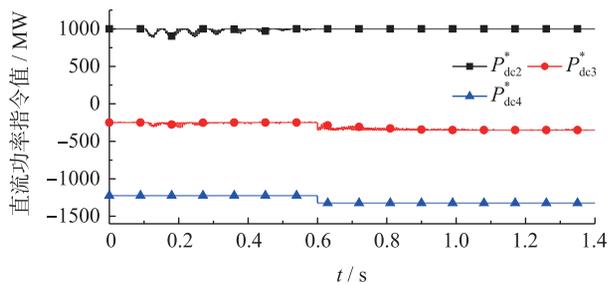
次计算换流站 4 上的实际功率  $P_{\text{demark}}$  与初始化时设定的功率指令值  $P_{\text{demark}}^*$  之间的偏差量  $\Delta P_{\text{demark}}^*$ , 由于此时换流站 4 保持在基准电压上, 因此电压偏差为零, 即  $t=0.6 \text{ s}$  时  $\Delta P_{\text{grid}}^* = \Delta P_{\text{demark}}^*$ ; 然后, 将  $\Delta P_{\text{grid}}^*$  按表 5 的功率分配系数分配到换流站 2、3、4 上, 并与换流站 2、3、4 上当前的功率指令值相加后构成新的功率指令值, 即  $t=0.6 \text{ s}$  后, 换流站 2、3、4 按新的功率指令值定功率运行; 再过  $0.5 \text{ s}$ , 即  $t=1.1 \text{ s}$  时, 第 2 次计算换流站 4 上的实际功率  $P_{\text{demark}}$  与当前功率指令值  $P_{\text{demark}}^*$  之间的偏差量  $\Delta P_{\text{demark}}^*$ ; 得到新的  $\Delta P_{\text{grid}}^*$ , 继续在换流站 2、3、4 之间分配  $\Delta P_{\text{grid}}^*$ , 对于本算例, 此时系统已进入稳态,  $\Delta P_{\text{grid}}^*$  近似为零。由图 5 可以看出, 最终换流站 2、3、4 的功率指令值稳定在  $2 \times 1000 \text{ MW}$ ,  $-2 \times 350 \text{ MW}$  和  $-2 \times 1350 \text{ MW}$  上。



(a) 4个换流站的直流功率(单极)



(b) 4个换流站端口的直流电压(单极)



(c) 换流站2、3、4的功率指令值波形(单极)

图5 换流站1功率改变时的响应特性

#### 4.3 换流站 4 故障退出时的响应特性仿真

设测试系统的初始运行状态如表 4 所示, 仿真开始时 ( $t=0 \text{ s}$ ) 测试系统已进入稳态运行,  $t=0.1 \text{ s}$  时换流站 4 因故障而退出。设换流站 2 为备用电压基准站, 其作用是在主电压基准站退出时承担电压

基准站的功能。对于确定的直流电网, 主电压基准站与备用电压基准站在系统设计时就已确定。当主电压基准站故障退出时, 保护系统通过通信通道通知备用电压基准站转入电压基准站控制模式, 此过程有一定的时间延迟, 在本算例中, 取这个时间延迟为  $50 \text{ ms}$ , 即换流站 2 在换流站 4 故障退出  $50 \text{ ms}$  后转为定电压控制模式。表 6 给出了本算例中负荷电压控制器的参数设置。

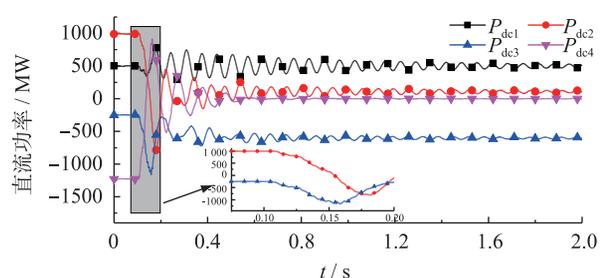
图 6 给出了这种情况下测试系统的响应特性。结合图 6, 对此大扰动下整个系统的响应过程描述如下: 换流站 4 退出后, 整个直流电网功率盈余, 电压快速上升, 换流站 2 和 3 进入电压下斜控制区域, 一次调压起作用, 换流站 2 减少注入直流电网的功率指令值, 换流站 3 增大从直流电网吸收功率的指令值;  $50 \text{ ms}$  后换流站 2 转入定电压控制模式, 同时换流站 3 对应于电压死区的功率指令值也变为  $-1200 \text{ MW}$ ; 系统在故障后  $0.4 \text{ s}$  后进入稳定状态。

表5 负荷电压控制器的参数设置

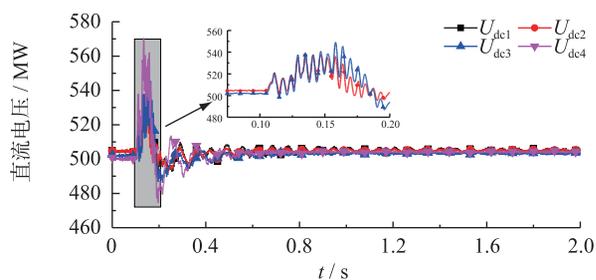
换流站	换流站 1	换流站 2	换流站 3	换流站 4
初始状态的功率指令值/MW	$2 \times 500$	$2 \times 1000$	$-2 \times 250$	由初始状态潮流确定
目标状态的功率指令值/MW	$2 \times 700$	由负荷电压控制器决定	由负荷电压控制器决定	由负荷电压控制器决定
比例系数 $K_U / (\text{MW} \cdot \text{kV}^{-1})$	不适用	不适用	不适用	10
功率分配系数/%	不适用	0	50	50

表6 具有备用电压基准站的负荷电压控制器参数设置

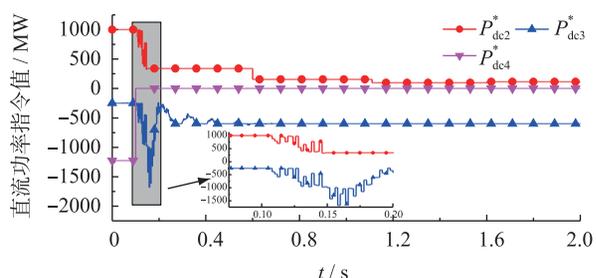
换流站	换流站 1	换流站 2(备用电压基准站)	换流站 3	换流站 4(主电压基准站)
初始状态的功率指令值/MW	$2 \times 500$	$2 \times 1000$	$-2 \times 250$	由初始状态潮流确定
故障后功率指令值/MW	$2 \times 500$	由负荷电压控制器决定	$-2 \times 600$	0
定电压控制电压指令值/kV	不适用	$\pm 505$	不适用	$\pm 500$
比例系数 $K_U / (\text{MW} \cdot \text{kV}^{-1})$	不适用	10	不适用	10
功率分配系数/%	不适用	100	0	0



(a) 4个换流站的直流功率(单极)



(b) 4个换流站端口的直流电压(单极)



(c) 换流站2、3、4的功率指令值波形图(单极)

图6 换流站4故障退出时的响应特性

## 5 结束语

本文提出了一种一次调压与二次调压相协调的直流电网电压控制策略,其中一次调压采用带死区的直流电压下斜控制律,二次调压采用基于电压基准节点电压恒定的控制准则。仿真测试表明所提出的直流电网电压控制策略具有如下优势:(1)电压控制精度高,由于引入了电压基准换流站和负荷电压控制器,稳态下全网所有功率可切换流站的直流电压都会落在电压死区范围内,使整个直流电网的电压在极小的范围内变化。(2)由所有功率可切换流站共同承担因负荷变化引起的不平衡功率,克服了采用主从控制策略和电压裕额控制策略时不平衡功率全部由单个换流站承担的缺点。(3)所

提出的一次调压与二次调压相协调的直流电网电压控制策略对直流电网的端数和容量没有限制,适用于普遍意义的直流电网。

### 参考文献:

- [1] 胡兆庆,董云龙,田杰,等.基于模块化多电平换流器结构的柔性直流控制策略[J].江苏电机工程,2013,32(1):5-12.
- [2] 尹寿垚,翟毅,吴昊,等.基于柔性直流输电技术的分布式发电在城市电网中的应用[J].江苏电机工程,2013,32(4):9-12.
- [3] 许烽,宣晓华,黄晓明,等.LCC-FMMC型混合直流输电系统的潮流反转控制策略[J].江苏电机工程,2013,34(6):51-55.
- [4] CIGRE Working Group B4.52. HVDC Grid Feasibility Study [M]. CIGRE Brochure No.533,2013.
- [5] 伍双喜,李力,张轩,向丽玲,等.南澳多端柔性直流输电工程交直流相互影响分析[J].广东电力,2015,28(4):26-30.
- [6] 吴浩,徐重力,张杰峰,等.舟山多端柔性直流输电技术及应用[J].智能电网,2013,1(2):22-26.
- [7] SAKAMOTO K, YAJIMA M. Development of a Control System for a High-performance Self-commutated AC/DC Converter [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1998, 13(1):225-232.
- [8] NAKAJIMA T, IROKAWA S. A Control System for HVDC Transmission by Voltage Sourced Converters [C]//Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999: 1113-1119.
- [9] 徐政,肖亮,刘高任.一种基于电压基准节点的带死区直流电网电压下垂控制策略:中国,201610377375.9 [P]. 2016.

### 作者简介:



徐政

徐政(1962—),男,浙江海宁人,博士,教授,主要研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、风力发电技术与风电场并网技术;

张哲任(1988—),男,浙江建德人,博士,从事电力系统规划和运行工作;

刘高任(1990—),男,河北武强人,博士研究生,研究方向为直流输电与柔性交流输电。

## Research on Voltage Control Principle of Flexible DC Transmission Power Grid

XU Zheng<sup>1</sup>, ZHANG Zheren<sup>2</sup>, LIU Gaoren<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Zhejiang Electric Power Company Economic Research Institute, Hangzhou 310000, China)

**Abstract:** This paper studies the voltage control principle of flexible DC transmission power grid. Firstly, the main 3 voltage control strategies and their characteristics are reviewed. Then the voltage control strategy for DC grids in which primary voltage regulation and secondary voltage regulation coordinate with each other is proposed. The proposed primary voltage regulation is based on the law of voltage droop control with voltage dead band whose realization method and logic diagram have been described in the paper, while the proposed secondary voltage regulation is based on the control criterion of keeping the voltage of the benchmark voltage node constant. After introducing the concept of the benchmark voltage node, the paper describes the benchmark voltage node selection method and the implementation of the secondary voltage control. A 4 terminal DC grid is constructed as the test system. Based on the test system, the design procedure for the voltage droop control with voltage dead band is described in detail. Two operation situations are tested on the test system. One is when the load of the DC grid changes and the other is when the benchmark voltage converter drops out. The results show that the proposed DC voltage control strategy has good control performance and can be used in general DC grids.

**Key words:** flexible DC transmission power grid; voltage control; benchmark voltage node; primary voltage regulation; secondary voltage regulation; voltage dead band; voltage droop control.