

# 多端柔性直流下垂控制的功率参考值修正方法

喻 锋,王西田,解 大

(上海交通大学 电气工程系 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室,上海 200240)

**摘要:**基于电压源型换流器的多端柔性直流输电(VSC-MTDC)所采用的外环有功控制方式会对直流系统潮流分布造成影响。首先提出了电压源型换流器外环有功控制通用模型,该模型基本涵盖了常用的外环有功控制方式。基于该模型推导直流网络潮流计算方法。采用直流电压下垂控制的换流器其直流输送功率会与参考值偏离,为了提高直流系统输送能力,提出了根据期望输送功率对直流功率参考值进行修正的方法。最后通过PSCAD/EMTDC时域仿真模型与潮流计算的结果对比,对所提出潮流计算及直流功率参考值修正方法的有效性进行验证。结果表明所提出的功率参考值设定方法可以使采用下垂控制的多端直流系统按期望功率传输。

**关键词:**潮流;电压源型换流器;多端柔性直流输电;功率控制;下垂控制

**中图分类号:** TM 721.1

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.11.018

## 0 引言

电压源型换流器 VSC(Voltage Source Converter)可以对有功功率、无功功率独立控制,控制方式灵活多变。基于 VSC 的直流输电具有潮流翻转无需改变直流电压极性的优点,更加适于建立直流输电网络<sup>[1]</sup>。基于 VSC 的多端直流输电 VSC-MTDC(VSC based Multi-Terminal Direct Current)在无源网络供电、新能源并网、大型城市直流配电等领域具有广阔前景<sup>[2-3]</sup>。模块化多电平换流器 MMC(Modular Multilevel Converter)作为一种新型 VSC 结构,相比于低电平的 VSC 具有低次谐波含量小、开关频率低、损耗小的优点。而且 MMC 具有的模块化结构易于扩展,子模块的串联也降低了单个电容器承受的电压,使其更适用于高电压场合<sup>[4]</sup>。

VSC-MTDC 系统稳定运行需要换流站间的配合以实现功率的平衡及直流电压稳定,现有文献围绕该点开展了大量的研究。VSC-MTDC 输电系统控制方法有主从控制<sup>[5]</sup>、直流电压偏差控制<sup>[6]</sup>以及直流电压下垂控制<sup>[7]</sup>等。主从控制中主换流站采用定直流电压控制,作为平衡节点平衡系统有功,维持直流电压恒定;其余换流站则采用定有功功率控制。直流电压偏差控制为主换流站退出运行后,主后备换流站检测到电压偏差信号后切换到定直流电压控制方式作为新的平衡节点。直流电压下垂控制则是通过功率与直流电压下垂特性使多个或者全部换流站承担功率平衡及电压稳定的功能。下垂控制虽然使直流系统的稳定性提高,但采用下垂控制的换流器实际输送功率会随着直流电压的偏离而小于其参考值,使直流系统设计容量得不到充分的利用。

针对含有 VSC-MTDC 的交直流混联系统的潮流计算问题,已经有较多的文献对其进行论述。文献[8-9]对混联系统的统一潮流计算方法进行了研究,并通过算例验证了提出的统一潮流计算方法的有效性。文献[10-11]对包含 VSC-MTDC 的交直流混联系统的状态估计及最优潮流计算方法进行了研究。文献[12]分析了 VSC-MTDC 系统中下垂控制对直流输电线路电压降落及潮流计算的影响,并推导了采用下垂控制的直流系统潮流计算的解析表达式。然而以上文献均未考虑因功率控制方式不同而带来 VSC-MTDC 的潮流计算结果的差异性,未就通用性更强的潮流计算方法进行研究。

本文首先提出了 MMC 外环有功控制器通用模型,基于该模型推导了直流网络潮流计算方法。为了充分利用系统资源,提高直流网络的实际输送容量,提出了根据期望输送功率计算功率参考值的方法。最后通过 PSCAD/EMTDC 时域仿真模型仿真计算与潮流计算的结果对比,对本文所提出潮流计算及直流功率参考值计算方法的有效性进行验证。

## 1 MMC 控制原理

MMC 常见控制器结构如图 1 所示。其中  $I_{dc}$ 、 $U_{dc}$  分别为直流线路的电流、电压; $P_{dc}$  为直流传输功率。MMC 通过  $dq$  解耦的方法实现了有功功率与无功功率的独立控制,其中  $d$  轴控制有功, $q$  轴控制无功。外环功率控制提供内环电流控制所需的电流参考值  $i_{dref}$  及  $i_{qref}$ ,内环控制通过控制换流器电压输出值  $u_{ref}$ ,使电流快速跟踪其参考值<sup>[13]</sup>。

MMC-MTDC 中换流器的外环功率控制器  $d$  轴常采用的控制方式包括:定直流功率控制、定直流电压控制、直流电压偏差控制以及直流电压下垂控制<sup>[14-18]</sup>。

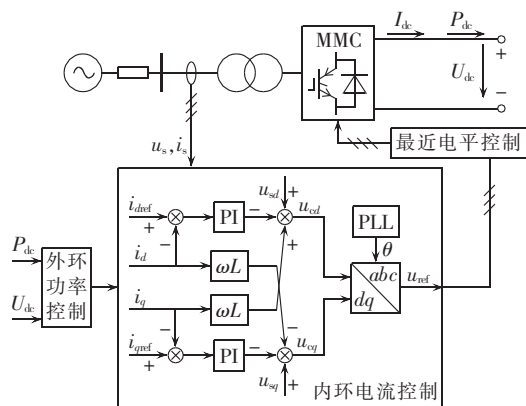


图 1 MMC 控制器结构

Fig.1 Structure of MMC controller

其中直流电压下垂控制采用的控制量有直流电压一次<sup>[12]</sup>( $\tau=1$ )和直流电压二次<sup>[14]</sup>( $\tau=2$ )2种。图2为外环有功控制器的通用模型,可以通过参数的设置实现各种控制方式。其中 $K_u$ 为电压比例系数; $K_p$ 为功率比例系数; $\tau$ 为直流电压指数系数。当 $K_p=1$ 、 $K_u=0$ 时为定有功功率控制;当 $K_p=0$ 、 $K_u=1$ 时为定直流电压控制;对于下垂控制则需根据系统特性选取合适的 $K_p$ 、 $K_u$ (一般可选取 $K_p=1$ 、 $K_u=1/\rho_{dc}$ ,其中 $\rho_{dc}$ 为直流下垂常数)。直流电压偏差控制一般为采用定直流电压的主换流器退出运行后由主备用换流器承担直流电压稳定功能的控制方式,由于2种情况下系统结构已经发生变化,可以根据图2中的通用控制模型分别对其进行建模。

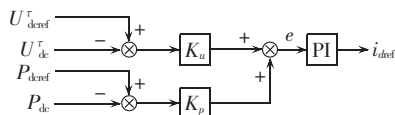


图 2 外环有功功率控制器通用模型

Fig.2 Universal model of outer-loop active-power controller

若控制系统设计有效,由于PI控制器的作用,控制误差信号 $e$ 在稳态条件下应为0,即:

$$e = K_p(P_{dc}^{ref} - P_{dc}) + K_u(U_{dc}^{ref} - U_{dc}) = 0 \quad (1)$$

## 2 通用潮流计算算法

对于多端直流系统,由节点电压方程可得:

$$I_{dc} = Y_{dc} U_{dc} \quad (2)$$

其中, $Y_{dc}$ 为直流网络节点导纳矩阵。式(2)中电流各项可以分别表示为:

$$I_{dci} = \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{dcij} (U_{dcj} - U_{dci}) \quad (3)$$

流入直流网络的功率可以表示为各节点电压与电流的乘积,即:

$$P_{dc} = U_{dc} \otimes I_{dc} \quad (4)$$

其中, $\otimes$ 表示向量对应序号的元素分别相乘。式(4)

中功率各项可以分别表示为:

$$P_{dci} = U_{dci} \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{dcij} (U_{dcj} - U_{dci}) \quad (5)$$

直流功率与直流电压的雅可比矩阵 $J_{dc}$ 可表示为:

$$J_{dc} = \frac{\partial P_{dc}}{\partial U_{dc}} \quad (6)$$

将式(5)代入式(6)可得:

$$J_{dcij} = \begin{cases} U_{dci} Y_{dcij} & i \neq j \\ \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{dcij} U_{dcj} - 2U_{dci} \sum_{j=1, j \neq i}^n Y_{dcij} & i = j \end{cases} \quad (7)$$

直流功率修正方程可以表示为:

$$\Delta P_{dc} = J_{dc} \Delta U_{dc} \quad (8)$$

为了使潮流计算具有通用性,根据图2中控制器的通用模型,由直流功率与直流电压组成的联合变量 $W$ 表示为:

$$W = K_p \otimes P_{dc} + K_u \otimes U_{dc}^{\tau} \quad (9)$$

联合变量目标值 $W_{ref}$ 可以表示为:

$$W_{ref} = K_p \otimes P_{dc}^{ref} + K_u \otimes U_{dc}^{\tau, ref} \quad (10)$$

联合变量与直流电压的雅可比矩阵 $J_W$ 可以表示为:

$$J_W = \text{diag}(K_p) \cdot J_{dc} + \tau \cdot \text{diag}(K_u \otimes U_{dc}^{\tau-1}) \quad (11)$$

其中, $\text{diag}(V)$ 是由列向量 $V$ 扩展成的对角阵, $V$ 的各元素与对角矩阵对角线上对应序号元素相等,对角矩阵其他元素为0。由式(1)可得:

$$\Delta W = W_{ref} - W = 0 \quad (12)$$

由式(11)及式(12)可得联合变量 $W$ 的修正方程为:

$$\Delta W = J_W \Delta U_{dc} \quad (13)$$

综上所述,可得直流网络通用潮流计算求解算法,详述如下。

**a.** 潮流计算初始化。以外环 $d$ 轴功率控制器直流电压参考值作为节点电压初值 $U_{dc}^{(0)}$ , $k=0$ 。

**b.** 收敛条件判断。根据计算得到的 $U_{dc}^{(k)}$ ,联立式(4)、(9)及(12)计算 $\Delta W^{(k)}$ 。如果 $\max\{|\Delta W^{(k)}|\} < \varepsilon$ 满足,表明潮流计算结果收敛,潮流计算结束;如果不满足,则继续步骤c。

**c.** 求解修正方程。根据式(7),求解雅可比矩阵及式(11),由 $\Delta U_{dc}^{(k)} = J_W^{-1(k)} \Delta W^{(k)}$ 计算电压修正量。

**d.** 修正各节点电压。 $U_{dc}^{(k+1)} = U_{dc}^{(k)} + \Delta U_{dc}^{(k)}$ ,返回至步骤b。

## 3 功率参考值修正方法

下垂控制利用直流电压的下垂特性,将直流网络中的功率突变由多个或者全部换流站共同承担,避免主从控制由单个换流站承担功率变化可能造成可调容量不足的问题。当采用下垂控制时,换流器实际输送功率会随着直流电压的偏离而小于其参考值,使直流系统的传输容量得不到充分的利用<sup>[12]</sup>。为了

提高直流电网实际输送功率,需要根据传输功率期望值对直流功率参考值进行修正,然而现有文献未对该问题开展研究。本文结合通用潮流计算,设计了一种按照期望传输直流功率值计算功率参考值的方案。

### 3.1 仅含下垂控制的参考值修正

在直流网络中,一般会选取连接交流系统较强或者设计容量较高的换流站作为系统的主换流站。该类换流站作为功率调整的平衡节点,其下垂控制器会选用较大的  $K_u$  参数,将该类节点编号为  $n$ 。假设直流系统中各点期望的传输功率为  $P^*$ (该期望功率可以由减小网络损耗为目标的交直混联系统的最优潮流计算得到<sup>[15]</sup>),则以潮流计算为基础的功率参考值计算方法如下。

a. 潮流计算。以  $P^*$  为参考值,即  $P_{ref}=P^*$ ;采用本文提出的通用潮流算法计算  $P_{dc}$  及  $U_{dc}$ 。

b. 定义系统各变量的降维矩阵及向量为:

$$\begin{cases} J_{dc\_RD}=J_{dc}(1:n-1, 1:n-1) \\ U_{dc\_RD}=U_{dc}(1:n-1) \\ P_{dc\_RD}=P_{dc}(1:n-1) \\ P_{RD}^*=P_{RD}^*(1:n-1) \end{cases} \quad (14)$$

c. 计算电压偏差。由前  $n-1$  个节点的功率偏差计算直流电压偏差值,如式(15)所示:

$$\Delta U_{dc\_RD}=J_{dc\_RD}^{-1}(P_{dc\_RD}-P_{RD}^*) \quad (15)$$

d. 直流电压修正。修正后各节点直流电压值为:

$$U_{dc\_newi}=\begin{cases} U_{dci}+\Delta U_{dc\_RD} & i \neq n \\ U_{dci} & i = n \end{cases} \quad (16)$$

e. 功率参考值修正。根据式(4)重新计算系统直流功率  $P_{dc\_new}$ 。

f. 由式(1)得到修正后的直流功率参考值计算公式,如式(17)所示。

$$P_{dcrefi}=P_{dc\_newi}+(K_{ui}/K_{pi})(U_{dci}^r-U_{dcrefi}^r) \quad (17)$$

### 3.2 含有定直流电压控制的参考值修正

对于系统中含有定直流电压控制的 VSC-MTDC 系统,将定电压控制节点编号设为  $n$ ,假设各节点期望传输功率为  $P^*$ ,则计算参考值可采用如下步骤。

a. 参数设定。将除定直流电压控制外的其他节点设置为定功率节点,其功率参考值为实际需要传输值  $P_{ref}=P^*$ 。令潮流计算控制参数为  $K_u=[0,0,\dots,0,1]$ 、 $K_p=[1,1,\dots,1,0]$ ,即以主从控制方式计算系统潮流分布。

b. 潮流计算。采用本文提出的通用潮流算法计算  $P_{dc}$  及  $U_{dc}$ 。

c. 修正功率参考值。对于非定直流电压节点  $K_p$  不等于 0,因此其直流功率参考值可由式(18)计算。

$$P_{dcrefi}=P_{dci}+(K_{ui}/K_{pi})(U_{dci}^r-U_{dcrefi}^r) \quad (18)$$

由于定功率节点可以看作为  $K_u=0$  的下垂控制

节点,仍然可以按本节方法修正功率参考值。

## 4 仿真计算

为了验证本文设计潮流计算及功率参考值计算方法的有效性,在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了 201 电平 MMC-MTDC 输电系统<sup>[18]</sup>,其结构如图 3 所示。该系统交流额定电压均为 220 kV,直流额定电压为  $\pm 200$  kV,额定传输功率均为 600 MW,直流输电线路阻值为  $0.01 \Omega/\text{km}$ ,仿真步长为  $20 \mu\text{s}$ 。在 MATLAB 上实现本文提出的潮流计算及功率参考值计算程序,潮流计算收敛判断参数  $\varepsilon$  设置为 0.01 MW。

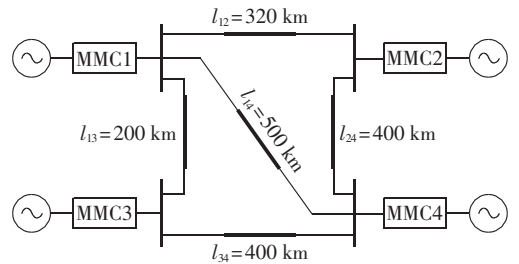


图 3 VSC-MTDC 系统结构

Fig.3 Structure of VSC-MTDC system

### 4.1 通用潮流计算校验

为了校验本文提出的直流电网通用潮流计算算法的正确性,分别对主从控制、 $\tau=1$  的下垂控制及  $\tau=2$  的下垂控制 3 种工况下潮流计算的结果与采用相应控制方式的 PSCAD/EMTDC 模型仿真结果进行对比。

a. 主从控制。取通用控制器参数  $K_u=[0,0,0,1]$ 、 $K_p=[1,1,1,0]$ 、 $\tau=1$ 。即 MMC4 采用定直流电压控制,其余换流器采用定直流功率控制。当控制系统功率及电压参考值设为  $P_{dcref}=[600,-500,400,-500]$  MW、 $U_{dcref}=[400,400,400,400]$  kV 时,潮流计算及 PSCAD/EMTDC 仿真结果记录如表 1 所示。

表 1 主从控制潮流计算校验

Table 1 Verification of power flow calculation for master-slave control

节点	潮流计算		PSCAD 仿真	
	$P_{dci}/\text{MW}$	$U_{dci}/\text{kV}$	$P_{dci}/\text{MW}$	$U_{dci}/\text{kV}$
1	600.00	402.88	600.08	402.93
2	-500.00	399.37	-500.13	399.42
3	400.00	403.24	400.14	403.29
4	-491.71	400.00	-491.79	400.04

b.  $\tau=1$  的下垂控制。取通用控制器的参数  $K_u=[50,45,50,60]$ 、 $K_p=[1,1,1,1]$ 、 $\tau=1$ 。当控制系统功率参考值及电压参考值分别设为  $P_{dcref}=[600,-500,400,-500]$  MW、 $U_{dcref}=[400,400,400,400]$  kV 时,潮流计算及 PSCAD/EMTDC 仿真结果记录如表 2 所示。

c.  $\tau=2$  的下垂控制。取通用控制器参数  $K_u=$

表 2  $\tau=1$  下垂控制潮流计算校验Table 2 Verification of power flow calculation for droop control with  $\tau=1$ 

节点	潮流计算		PSCAD 仿真	
	$P_{dci}/\text{MW}$	$U_{dci}/\text{kV}$	$P_{dci}/\text{MW}$	$U_{dci}/\text{kV}$
1	534.28	401.31	534.07	401.29
2	-423.58	398.30	-422.96	398.28
3	322.77	401.54	322.29	401.52
4	-427.38	398.79	-427.31	398.77

$[0.05, 0.04, 0.05, 0.06]$ 、 $K_p=[1, 1, 1, 1]$ 、 $\tau=2$ 。当控制系统功率参考值以及电压参考值分别设置为  $P_{dref}=[600, -500, 400, -500]\text{MW}$ 、 $U_{dref}=[400, 400, 400, 400]\text{kV}$  时,潮流计算及 PSCAD 仿真结果记录如表 3 所示。

表 3  $\tau=2$  下垂控制潮流计算校验Table 3 Verification of power flow calculation for droop control with  $\tau=2$ 

节点	潮流计算		PSCAD 仿真	
	$P_{dci}/\text{MW}$	$U_{dci}/\text{kV}$	$P_{dci}/\text{MW}$	$U_{dci}/\text{kV}$
1	548.13	401.29	548.55	401.28
2	-441.60	398.17	-441.77	398.15
3	337.80	401.55	337.11	401.53
4	-437.81	398.70	-437.37	398.68

由表 1—3 的对比可知,在不同的工况下本文设计的潮流计算方法计算得到的结果与 PSCAD/EMTDC 模型仿真计算的结果都高度一致,表明本文设计的通用潮流计算方法针对多种控制方式均具有有效性。

由表 2、表 3 可知,对于采用下垂控制的直流系统实际输送功率小于其参考值。如果直接按照期望传输功率设置功率参考值,那么直流系统的传输容量将得不到充分利用。

#### 4.2 功率参考值修正方法校验

工况 1 为仅含下垂控制节点。系统通用控制器参数  $K_u=[50, 45, 50, 60]$ 、 $K_p=[1, 1, 1, 1]$ 、 $\tau=1$ 。当控制系统功率期望值及电压参考值分别为  $P^*=[600, -500, 400, -500]\text{MW}$ 、 $U_{dref}=[400, 400, 400, 400]\text{kV}$  时,功率参考值计算结果以及采用该功率参考值的 PSCAD/EMTDC 模型直流传输功率仿真结果记录如表 4 所示。

表 4 功率参考值计算校验

Table 4 Verification of power reference calculation

节点	MW					
	工况 1			工况 2		
	$P_i^*$	$P_{drefi}$	$P_{dci}$	$P_i^*$	$P_{drefi}$	$P_{dci}$
1	600	683.91	600.11	600	600.00	600.14
2	-500	-582.71	-499.76	-500	-528.19	-500.22
3	400	502.17	399.63	400	562.33	399.96
4	-500	-564.46	-491.65	-500	—	-491.58

工况 2 为含有定直流电压节点和定功率节点。

系统通用控制器参数  $K_u=[0, 45, 50, 1]$ 、 $K_p=[1, 1, 1, 0]$ 、 $\tau=1$ ,即节点 1 为定有功控制节点,节点 2 和节点 3 为下垂控制节点,节点 4 为定直流电压控制节点。当控制系统功率期望值及电压参考值分别为  $P^*=[600, -500, 400, -500]\text{MW}$ 、 $U_{dref}=[400, 400, 400, 400]\text{kV}$  时,功率参考值计算结果以及采用该功率参考值的 PSCAD/EMTDC 模型直流传输功率仿真结果记录如表 4 所示。

表 4 对本文设计的功率参考值修正方法的有效性进行了验证。由表 4 可得在 2 种工况下 PSCAD/EMTDC 模型仿真计算得到直流实际传输功率与期望传输的功率相等,即本文方法能够通过参考值的修正使直流系统按期望功率传输。

#### 4.3 动态仿真结果验证

为了进一步验证本文提出的功率参考值修正方法在电网动态调整过程中的有效性,在 PSCAD/EMTDC 时域仿真模型上进行了仿真实验。测试仍然采用图 3 所示的 MMC-MTDC 系统,其控制参数选为  $K_u=[50, 45, 50, 60]$ 、 $K_p=[1, 1, 1, 1]$ 、 $\tau=1$ 。

实验 1:直流系统期望传输功率  $P^*=[600, -500, 300, -400]\text{MW}$ ,1 s 前控制系统功率及电压参考值设定为  $P_{dref}=[600, -500, 300, -400]\text{MW}$ 、 $U_{dref}=[400, 400, 400, 400]\text{kV}$ ,1 s 后采用本文计算方法得到的功率参考值  $P_{dref}=[678.91, -580.66, 386.04, -452.31]\text{MW}$ 。各换流器直流输出功率的仿真结果对比如图 4 所示。

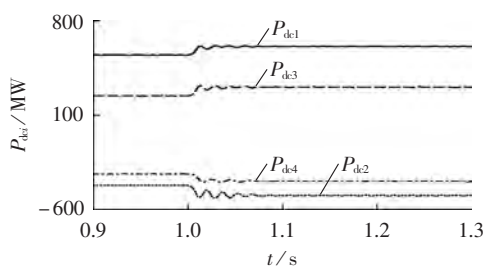


图 4 参考值设定方法仿真结果对比

Fig.4 Comparison of simulative results for transfer power reference correction method

1 s 前系统运行于传统的下垂控制方式下,以期传输功率作为参考值。由图 4 可知,由于功率与电压的联合作用,该方式下直流系统实际输送功率小于其参考值,直流系统的传输能力没有得到有效利用。1 s 后采用本文提出方法对功率参考值进行修正,修正后直流系统能够按照其预先期望的功率传输,系统总的传输功率得到明显的提升。

实验 2:1 s 前直流系统期望传输功率  $P^*=[600, -500, 300, -400]\text{MW}$ ,1 s 后该期望传输功率变化为  $P^*=[600, -500, -300, 200]\text{MW}$ ,即 MMC3 发生了功率反转。直流系统的功率参考值均由本文提出的修

正方法得到,直流电压的参考值设定为  $U_{dref}=[400, 400, 400, 400]$  kV。采用下垂控制的各换流器直流传输功率仿真结果如图 5(a)所示。图 5(b)为主从控制方式下同样动态过程传输功率仿真结果,其中 MMC4 采用直流电压控制,MMC1 和 MMC2 分别保持其功率参考值 600 MW 与 -500 MW 不变,1 s 时 MMC3 的功率参考值由 300 MW 变化为 -300 MW。

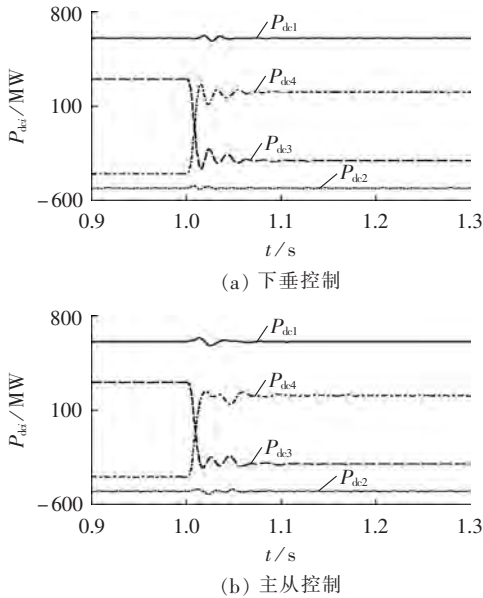


图 5 直流功率调整仿真结果

Fig.5 Simulative results of DC power adjustment

由图 5(a)可以看出,调整前后直流传输功率均能够按照期望的功率传输。采用本文提出的修正方法后,由于 MMC1 及 MMC2 期望传输功率不变,其传输的有功功率在动态过程中基本不变;功率调整仅在期望功率发生变动的 MMC3 及 MMC4 之间进行,MMC3 传输功率由 300 MW 变化为 -300 MW。在调整的过程中直流传输功率未出现不稳定现象,表明本文提出的方法在动态过程中也是可靠的。该调整过程的仿真结果与图 5(b)采用主从控制系统的仿真结果一致。

以上实验说明本文提出的方法能够使采用下垂控制的直流输电系统达到主从控制的效果,使直流传输功率按照其期望值进行传输,充分利用了直流系统的传输能力;而且本文提出的方法保留了下垂控制的基本特性,使其在暂态过程中能够充分利用功率和电压联合控制的缓冲作用来减小对各直流换流站的冲击。

## 5 结语

本文首先提出了 MMC 外环有功通用控制模型,并基于该模型推导直流网络潮流计算方法。通过多种控制方式下 PSCAD/EMTDC 时域仿真模型与潮

流计算的结果对比,验证了本文设计潮流计算的通用性及计算结果的准确性。

为了提高直流系统利用率,提出一种根据预期输送功率修正功率参考值的方法。针对 2 种不同的工况计算了功率参考值,并将计算结果分别代入 PSCAD/EMTDC 时域仿真模型,仿真结果表明各换流器均能按预期功率传输,验证了本文提出方法的有效性。

## 参考文献:

- [1] 汤广福,贺之渊,滕乐天,等. 电压源换流器高压直流输电技术最新研究进展[J]. 电网技术,2008,32(22):39-44.  
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, TENG Letian, et al. New progress on HVDC technology based on voltage source converter [J]. Power System Technology, 2008, 32(22): 39-44.
- [2] 汤广福,罗湘,魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报,2013,33(10):8-17.  
TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17.
- [3] 张文亮,汤涌,曾南超,等. 多端高压直流输电技术及应用前景[J]. 电网技术,2010,34(9):1-6.  
ZHANG Wenliang, TANG Yong, ZENG Nanchao, et al. Multi-terminal HVDC transmission technologies and its application prospects in China[J]. Power System Technology, 2010, 34(9): 1-6.
- [4] 杨晓峰,林智钦,郑琼林,等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(6):1-15.  
YANG Xiaofeng, LIN Zhiqin, ZHENG Qionglin, et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-15.
- [5] 孙文博,徐华利,付媛,等. 应用于大型风电基地功率外送的多端直流输电系统协调控制[J]. 电网技术,2013,37(6):1596-1601.  
SUN Wenbo, XU Huali, FU Yuan, et al. Coordinated control of multi-terminal DC transmission system to send out power from large-scale wind farm[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1596-1601.
- [6] 付媛,王毅,张祥宇,等. 多端电压源型直流系统的功率协调控制技术[J]. 电力自动化设备,2014,34(9):130-136.  
FU Yuan, WANG Yi, ZHANG Xiangyu, et al. Coordinated power control of VSC-MTDC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(9): 130-136.
- [7] CHAUDHURI N R, CHAUDHURI B. Adaptive droop control for effective power sharing in Multi-Terminal DC (MTDC) grids[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(1): 21-29.
- [8] BARADAR M, GHANDHARI M. A multi-option unified power flow approach for hybrid AC/DC grids incorporating multi-terminal VSC-HVDC[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3): 2376-2383.
- [9] 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.
- [10] WANG F, LE T, BERTLING L, et al. A new approach for benefit evaluation of multi-terminal VSC-HVDC using a proposed mixed AC/DC optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 29(1): 432-443.
- [11] RODRIGUES S, PINTO R T, BAUER P, et al. Optimal power flow control of VSC-based multiterminal DC network for

- offshore wind integration in the North Sea[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2013, 1(4):260-268.
- [12] 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.
- [13] SAEEDIFARD M, IRAVANI R. Dynamic performance of a modular multilevel back-to-back HVDC system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4):2903-2912.
- [14] CAO J, DU W, WANG H F, et al. Minimization of transmission loss in meshed AC/DC grids with VSC-MTDC networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(3):3047-3055.
- [15] LIU Sheng, XU Zheng, HUA Wen, et al. Electromechanical transient modeling of modular multilevel converter based multi-terminal HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(1):72-83.
- [16] 任敬国, 李可军, 赵建国, 等. 基于  $N-1$  准则的 VSC-MTDC 输电系统稳态调控方案[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2):74-80.  
REN Jingguo, LI Kejun, ZHAO Jianguo, et al.  $N-1$  principle based steady-state control of VSC-MTDC transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2):74-80.
- [17] 陈谦, 唐国庆, 潘诗锋, 等. 采用多点直流电压控制方式的 VSC 多端直流输电系统[J]. 电力自动化设备, 2004, 24(5):10-15.  
CHEN Qian, TANG Guoqing, PAN Shifeng, et al. VSC-MTDC using multi-terminal DC voltage control scheme [J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(5):10-15.
- [18] 阎发友, 汤广福, 贺之渊, 等. 基于 MMC 的多端柔性直流输电系统改进下垂控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3):397-404.  
YAN Fayou, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, et al. An improved droop control strategy for MMC-based VSC-MTDC system [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3):397-404.

#### 作者简介:



喻 锋

喻 锋(1985—),男,湖北汉川人,硕士,通信作者,主要研究方向为直流输电、电网安全稳定控制及电力系统规划设计(E-mail: yufengsh@163.com);

王西田(1973—),男,陕西旬阳人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统机网协调及电力系统仿真研究(E-mail: x.t.wang@sjtu.edu.cn);

解 大(1969—),男,黑龙江哈尔滨人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统 FACTS 研究以及电力系统仿真(E-mail: xieda@sjtu.edu.cn)。

## Power reference correction method for droop control of VSC-MTDC system

YU Feng, WANG Xitian, XIE Da

(Key Laboratory of Control of Power Transmission and Transformation, Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** The power flow distribution of DC system is influenced by the outer-loop active-power control mode of VSC-MTDC (Voltage Source Converter based Multi-Terminal Direct Current). A universal model of outer-loop active-power controller of VSC is proposed, covering common outer-loop active-power control modes. A method of power flow calculation for DC grid is derived based on the proposed model. The DC transfer power of converter adopting the DC voltage droop control may deviate from its reference, for which, a method of DC transfer power reference correction according to its expectation is proposed to improve the transfer capacity of DC system. The results of PSCAD/EMTDC time-domain model simulation and power flow calculation are compared to verify the effectiveness of the proposed power flow calculation and reference correction methods, which show that, the expected power transfer of MTDC system with droop control is realized by using the proposed power reference correction method.

**Key words:** power flow; voltage source converter; MTDC; power control; droop control