

基于电压下垂特性的 MMC - MTDC 协调控制策略

杨林 张英敏 李兴源

(四川大学电气信息学院, 四川成都 610065)

摘要: 基于模块化多电平换流器的多端高压直流输电(modular multilevel converter based multi-terminal high voltage direct current, MMC - MTDC)系统中各个换流站的控制对整个系统电压和功率的稳定是至关重要的。基于电压与功率的关系进行设计的传统下垂控制器无法实现受端换流站之间的功率分配。针对这一问题,提出了一种基于电压下垂特性的多端组网协调控制策略。对 MMC 型换流站数学模型进行了详细地分析并根据多端直流组网结构的特点,推导出各换流站之间电压和电流关系。基于换流站 $U - I$ 特性曲线,设计了电压外环控制器,通过改变 $U - I$ 特性曲线的斜率即可实现换流站之间的功率分配。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建了四端模型,仿真结果显示,通过调整 $U - I$ 特性曲线斜率即可实现受端换流站功率按既定要求分配,验证了该控制策略的正确性和有效性。

关键词: MMC - HVDC; 功率分配; 电压下垂特性; $U - I$ 特性曲线; 多端组网协调控制

Abstract: It is crucial for the power and voltage stability to control converters in the system of MMC - MTDC. The traditional droop controller is designed based on the relationship between voltage and power, which makes it incapable of realizing the function of allocating the power among receiving-end converters. In order to solve the above-mentioned problem, a novel multi-terminal network coordinated control strategy based on voltage droop characteristic is proposed. Firstly, the mathematical model is analyzed in detail, and then the relationship between voltage and current among different converters is showed considering the characteristics of network structure of MTDC. A novel voltage droop controller is designed based on the characteristic curve ($U - I$ curve) of converters. The goal of allocating the power among different converters could be easily achieved by changing or adjusting the slope of $U - I$ curve. A four-terminal model is established through PSCAD/EMTDC simulation software. The simulation results show that allocating the power among different receiving-end converters according to the designated goals could be easily realized by changing the slope of $U - I$ curve, which verifies the correctness and feasibility of the proposed control strategy.

Key words: MMC - MTDC; power allocation; voltage droop characteristic; $U - I$ curve; multi-terminal network coordinated control

中图分类号: TM721.1 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2017)03 - 0005 - 06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2017.03.002

0 引言

电压源型换流器(voltage source converter, VSC)具有功率独立控制、潮流反转易于控制、具备黑启动能力和向无源电网供电的特点,使多端柔性直流输电系统(voltage source converter based multi-terminal high voltage direct current, VSC - MTDC)能够稳定运行并且便于控制潮流^[1-2]。模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)是由相同结构的子模块级联而成,其特点为极易扩展,适用于各

科技项目: 国家电网公司科技项目资助(SGRIZLKJ[2015]457)

个电压等级、电平数较高、电压电流畸变率低^[3-4]。基于模块化多电平换流器的高压直流输电(modular multilevel converter based high voltage direct current, MMC - HVDC)突破了传统柔性直流输电(voltage source converter based high voltage direct current, VSC - HVDC)电压和容量的等级,使之在高压大容量多端直流输电网络中具有明显的优势^[5]。

在多端柔性直流输电系统中,各个换流站之间可以实现功率的协调控制,从而具有灵活可靠的优势,但控制系统也相对复杂。目前,国内外的文献针对不同的控制目标提出了各种控制策略,主要分为两大类:主从控制和下垂控制。文献[6-7]研究了

多端系统的主从控制策略,该策略必须要求有且仅有一端换流站采用定直流电压控制,其余换流站采用定有功功率或定直流电流控制。文献[8]对主从控制中的电压裕度控制策略进行改进,提出了考虑线路损耗的精确电压裕度控制策略。文献[9-10]针对多端系统提出了基于自适应下垂调节控制的功率协调,实现了控制策略在换流站的各种控制模式中平滑切换。文献[11]针对模块化多电平变流器多端直流输电系统,提出将平移下垂曲线和改变下垂曲线斜率相结合的改进下垂控制策略,并对新型协调控制策略进行了稳定性分析。文献[12-14]根据电压电流的 $U-I$ 特性曲线,提出了基于电压下垂控制的控制策略。电压下垂控制主要为电压与功率之间的调整,文献[15-17]讨论了电压下垂特性,引入功率协调控制,使系统达到稳定协调控制的目的。

这里提出了基于电压下垂特性的 MMC-HVDC 的组网控制策略。对 MMC 型换流站进行分析,推导了换流站有功分量和无功分量独立控制的数学模型。针对多端直流网络的特点,分析了电压、电流和功率之间的关系,根据换流站直流侧电压电流的功率特性曲线,得出了可以通过控制曲线斜率进行功率分配的结论。电压外环控制器采集直流电流,通过电压电流的特性曲线得出参考电压,经过 PI 环节实现无差调节,得到内环控制电流的参考值。在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上搭建模型,验证了该控制策略在多端系统控制中实现功率分配的目标,并且还进行了三相短路接地故障测试,故障清除后系统能恢复到稳态,表明了该控制的有效性。

1 MMC 换流站控制

图1为基于模块化多电平换流器的换流站主电路图。 u_s 、 u_c 分别表示交流网侧和换流器阀侧的交流电压; R 、 L 分别表示换流变压器和 MMC 的等效阻抗; i 为交流侧流入直流侧的电流。

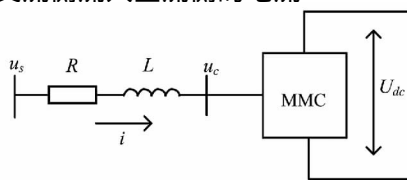


图1 MMC-HVDC 换流站主电路图

换流站级控制分为间接电流控制和直流电流控制,运用广泛采用的直接电流控制方式进行研究。将三相静止坐标系下的电气量在 $d-q$ 同步旋转坐标系下的数学模型为^[2]

$$\begin{cases} L \frac{di_{sd}}{dt} = u_{sd} - u_d - Ri_{sd} + \omega Li_{sq} \\ L \frac{di_{sq}}{dt} = u_{sq} - u_q - Ri_{sq} + \omega Li_{sd} \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_{sd} 、 u_{sq} 、 u_d 、 u_q 分别表示交流网侧和 MMC 换流器交流侧的 $d-q$ 轴分量; i_{sd} 、 i_{sq} 为电网电流的 $d-q$ 轴分量; ω 为电网侧电压矢量同步旋转角频率。

为了消除式(1)中的 $d-q$ 轴电流耦合和网侧电压波动,将式(1)改写成式(2),得到 MMC 换流器交流侧期望基波电压分量为

$$\begin{cases} u_d = u_{sd} - u_d^* + \Delta u_q \\ u_q = u_{sq} - u_q^* + \Delta u_d \end{cases} \quad (2)$$

式中,

$$\begin{cases} u_d^* = L \frac{di_{sd}}{dt} + Ri_{sd} \\ u_q^* = L \frac{di_{sq}}{dt} + Ri_{sq} \end{cases} \begin{cases} \Delta u_q = \omega Li_{sq} \\ \Delta u_d = \omega Li_{sd} \end{cases}$$

在式(2)中,采用比例积分环节实现对 u_d^* 、 u_q^* 的解耦,来补偿等效电抗的压降。 Δu_q 、 Δu_d 对网侧扰动电压 u_{sd} 、 u_{sq} 进行前馈补偿。

$$\begin{cases} u_d^* = K_p (i_{sdref} - i_{sd}) + K_I \int (i_{sdref} - i_{sd}) dt \\ u_q^* = K_p (i_{sqref} - i_{sq}) + K_I \int (i_{sqref} - i_{sq}) dt \end{cases} \quad (3)$$

式中 i_{sdref} 、 i_{sqref} 分别为有功电流和无功电流的参考值,其由外环控制器的输出得到。

根据式(1)、式(2)和式(3)可以得到如图2所示的换流站闭环控制框图。图中 P_{ref} 、 Q_{ref} 、 U_{dcref} 、 V_{acref} 分别表示上层控制指令给定的有功、无功、直流电压、交流电压的参考值; i_{dmax} 、 i_{dmin} 、 i_{qmax} 、 i_{qmin} 分别表示 $d-q$ 轴分量的限幅值。根据瞬时无功功率理论,并且以 d 轴为交流电网电压矢量基准定位(即令 $U_{sq} = 0$) 可得

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} U_{sd} i_d \\ Q_s = \frac{3}{2} U_{sd} i_q \end{cases} \quad (4)$$

由式(4)可知,通过调节 i_d 和 i_q 可以实现对 MMC 与交流电网的有功无功的控制。

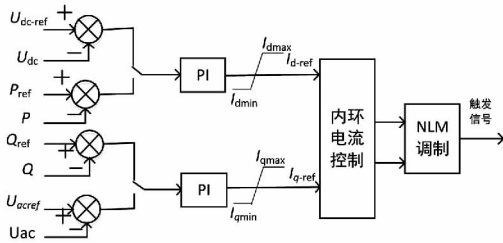


图2 MMC换流站闭环控制框图

2 MMC - MTDC 协调控制策略

图3为所研究协调控制策略搭建的基于MMC的四端柔性直流电网系统结构图。送端换流站MMC1、MMC2采用定有功功率的控制,受端换流站采用所提出的基于电压下垂特性的控制策略;4个换流站都工作于定无功功率的控制,并令其为0。为了使四端换流站的直流电压维持在统一水平,采用并联的连接方式。

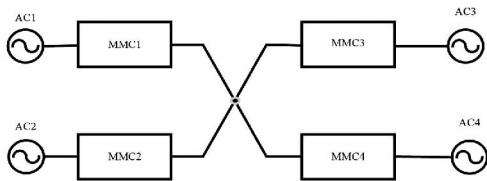


图3 MMC - MTDC 系统结构

2.1 MMC - MTDC 直流网络分析

多端直流输电系统运行于稳态时,各个换流站直流侧的电压和电流恒定,故将直流电压和电流看作稳态运行的工作点。当整流侧MMC1、MMC2输送的功率发生变化时,为了维持整个系统的有功平衡,受端换流站MMC3、MMC4的直流侧稳定工作点也会随之变化。现将图3的直流侧线路等效为电阻进行简化^[13],得到图4。

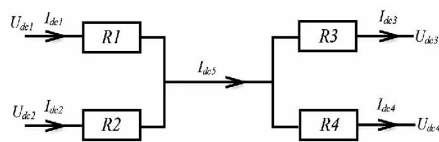


图4 直流侧等效网络

受端系统交流侧从MMC3、MMC4直流侧吸收的有功功率为

$$P_3 = U_{dc3} I_{dc3} \quad (5)$$

$$P_4 = U_{dc4} I_{dc4}$$

由KCL可知

$$I_{dc1} + I_{dc2} = I_{dc5} = I_{dc3} + I_{dc4} \quad (6)$$

对MMC3、MMC4分析,可得受端换流站的稳定

工作点关系为

$$U_{dc4} = U_{dc3} + R_3 I_{dc3} - R_4 I_{dc4} \quad (7)$$

设定MMC1、MMC2的直流电压与电流的工作特性如图5所示,其曲线方程分别为

$$U_{dc3} = U_{min} + k_3 I_{dc3} \quad (8)$$

$$U_{dc4} = U_{min} + k_4 I_{dc4}$$

式中: k_3 、 k_4 为 $U-I$ 特性曲线斜率; U_{min} 为设定的最小直流电压。该特性称为电压下垂特性。

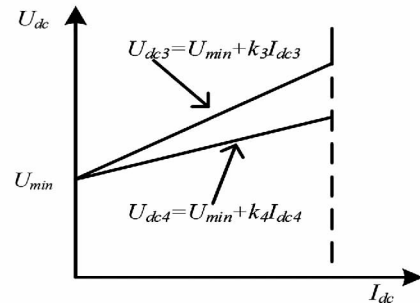


图5 直流电压与电流特性曲线

为了研究电压下垂特性与受端系统的功率分配关系,设稳态工作下换流站MMC3、MMC4吸收功率比为 n ,由式(5)可得

$$\frac{P_3}{P_4} = n = \frac{U_{dc3} I_{dc3}}{U_{dc4} I_{dc4}} \quad (9)$$

由于换流站直流电压都运行于额定值附近,可以近似地认为 U_{dc3} 和 U_{dc4} 相等。式(9)转化为

$$\frac{P_3}{P_4} = n \approx \frac{I_{dc3}}{I_{dc4}} \quad (10)$$

联立式(7)、式(8)、式(10)可得

$$k_4 = nk_3 + nR_3 - R_4 \quad (11)$$

式(11)表明,通过调节换流站 $U-I$ 特性曲线的斜率即可实现对受端换流站的功率分配。

2.2 控制器设计

多端柔性直流输电网络的控制有下垂控制、裕度控制等控制方式。下垂控制有基于电压和功率的控制模式,裕度控制有基于电流和电压裕度的控制模式。两种控制策略在多端直流协调控制系统中,都在外环电压控制器上进行改进来实现相应的控制目标。对换流站MMC3、MMC4采用电压下垂比例积分控制,其 $U-I$ 特性为图5所示。有功功率在换流站之间的功率分配通过改变曲线的斜率来实现,其控制策略为:通过采集直流侧电流,送入电压外环控制器;根据式(8)产生图2中的参考电压 U_{dref} ;参考电压 U_{dref} 和采集到的实际电压作差后进行PI调节,生成有功分量参考电流 I_{dref} 。

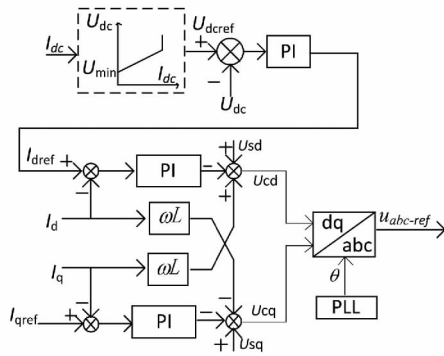


图6 电压下垂比例积分控制器

比例积分控制器能够实现无差调节,最终直流电压 U_{dc} 会追踪参考直流电压 U_{dcref} ,此控制策略能够使换流站在稳态时运行于 $U-I$ 曲线上。通过改变各个换流站 $U-I$ 特性曲线的斜率即可实现各个换流站之间功率的协调分配。

3 仿真分析

为了验证所提出的电压下垂比例积分控制策略在 MMC-MTDC 电网中的正确性和有效性,参照 CIGRE 工作组 B4-57 提出的 Type4 模型^[18],在 PSCAD/EMTDC 中搭建了如图 3 的 201 电平的 MMC-MTDC 的快速仿真模型和控制系统。四端换流站的 MMC 结构和参数都相同,送端换流站采用定有功功率控制,受端换流站采用电压下垂比例积分控制,调制方式为最近电平调制^[19],子模块的投入运用排序法进行选择^[20-21]。桥臂环流采用通用环流抑制策略进行抑制^[21]。系统仿真参数:MMC 容量为 400 MVA,桥臂电感为 29 mH,桥臂电阻为 1 Ω,MMC 子模块电容为 10 000 μF,换流变压器为 380/220(kV),交流侧额定电压为 380 kV,额定直流电压为 400 kV。

MMC3、MMC4 采用电压下垂比例积分控制时,其 $U-I$ 特性曲线由式(8)可得:

$$U_{dc3} = 380 + 40I_{dc3} \quad (12)$$

$$U_{dc4} = 380 + k_4 I_{dc4}$$

即最低直流电压为 0.95 倍的额定电压,为 380 kV; k_3 取 40;最大工作点的电流为 1 kA;则最大工作运行电压为 420 kV。通过以下仿真算例来分析通过调节 k_4 来改变受端环流站的功率分配。

1) 仿真算例 1: 输入功率变化

换流站 MMC1 和 MMC2 初始输入直流系统的

功率定为 200 MW,在 2 s 时刻,让 MMC1 的输出功率由初始的 200 MW 降至 100 MW,在 3 s 时刻将 MMC1 发出的功率再由 100 MW 升至 200 MW。在受端 MMC3、MMC4 吸收功率之比为 1:1 时,由式(10)和式(11)可得 k_4 取 40。

换流站 MMC1、MMC2、MMC3、MMC4 的仿真结果如图 7 所示。送端和受端换流站直流电流仿真结果如图 7(a) 所示,换流站直流侧的电压如图 7(b) 所示,图 7(c) 为四端换流站功率仿真结果。

从仿真结果分析,2 s 前系统运行于稳态,MMC3、MMC4 在稳态工作点时直流电压与电流相等,分别为 395 kV 和 0.5 kA,两换流站吸收的功率在 198 MW 附近波动,实现了功率的均分。在 2~3 s 之间,换流站 MMC1 发出的功率由 200 MW 减少为 100 MW 后,由于注入系统的有功功率减少,直流电压有所下降,经过调整后的稳态电压都为 395 kV,直流电流都运行于 0.375 kA 附近,受端换流站吸收的功率同时下调 50 MW,稳态时吸收的功率为 150 MW。在 3 s 时,MMC1 功率恢复为原来的 200 MW,经过系统调整后,直流电压、电流、有功功率恢复到 2 s 前的稳态运行值。从输入功率变化的仿真结果来看,功率实现了受端换流站功率之比为 1:1 的控制目标。

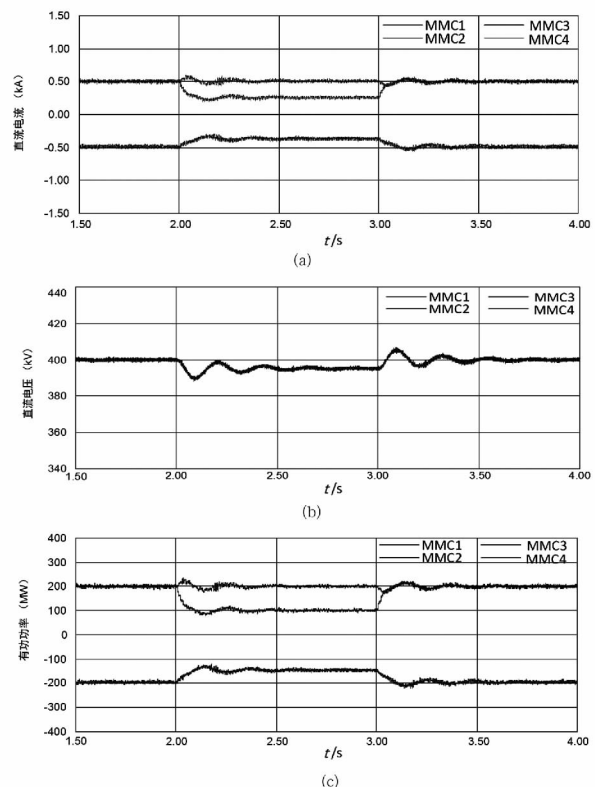


图7 输入功率变化时的仿真结果

2) 仿真算例 2: 功率分配之比变化

换流站 MMC1 和 MMC2 输入直流系统的功率为 200 MW, 仿真中维持不变。换流站 MMC3 的斜率 k_3 设定为 40。设定初始时刻 MMC3 和 MMC4 期望吸收功率之比为 1:2。根据式(12) 计算可得 k_4 为 19.5。在 2 s 时, 设定 MMC3 和 MMC4 期望吸收功率之比为 1:3, 此时可得 k_4 为 12.667。在 3 s 时, 再次调整 MMC3 和 MMC4 期望吸收功率之比为 1:2, 即 k_4 为 19.5。仿真结果如图 8 所示。

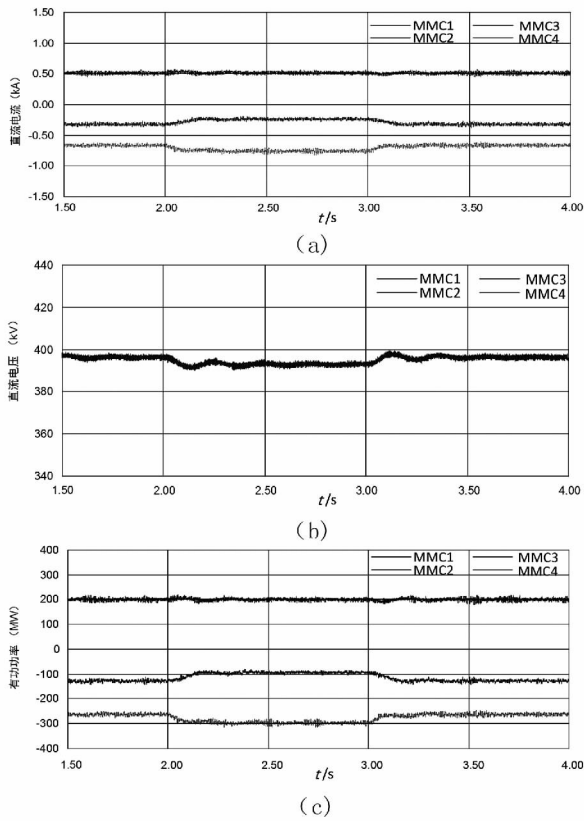


图 8 功率分配之比变化时的仿真结果

从仿真结果分析, 2 s 前系统运行于稳态, MMC3、MMC4 的直流电压在 398 kV 附近, 功率分别为 132 MW、267 MW, 功率分配之比接近于 1:2, 电流分别为 0.32 kA、0.67 kA, 电流之比接近 1:2。在 2~3 s 期间, 调整了换流站 MMC4 的 $U-I$ 特性曲线的斜率, MMC3、MMC4 吸收的功率分别为 97 kV、299 kV, 电压经过调整后变为 395 kV, 电流分别为 0.25 kA、0.76 kA。在 3 s 以后, 将斜率 k_4 调整为 19.5, 可以看出, 系统调整后又回到了初始状态的功率之比。整个仿真过程中, 受端换流站吸收的功率按照既定的功率之比实现了功率的准确分配, 达到了采用电压下垂控制实现功率分配的目的。

3) 仿真算例 3: 交流侧三相故障

对受端系统在交流侧发生后果较严重的三相故障进行仿真分析。设定换流站 MMC1、MMC2 各发出 200 MW 的有功功率, MMC3、MMC4 吸收功率按照 1:2 进行控制。设定 2 s 时在 MMC3 的换流变压器一次侧发生三相短路接地故障, 持续 0.2 s 后恢复正常。仿真结果如图 9 所示。

从仿真结果分析, 在故障发生前, MMC3、MMC4 吸收的功率分别为 130 MW、262 MW。在 2.0~2.2 s 发生三相故障期间, 由于 MMC3 交流侧故障导致其从直流侧吸收的功率降为 0, 为了维持系统功率平衡, 换流站 MMC4 吸收的功率逐渐增加。故障清除后, 系统控制器通过调整达到了稳态运行。但是, 在调整过程中 MMC3 吸收的功率振荡非常剧烈, 恢复过程中最大功率为 650 MW, 有可能超过设备的容量范围, 所以对换流站的短时抗冲击能力要求很高。电压和电流也发生剧烈振荡, 为了维持系统的稳定运行, 还需要辅助的控制策略。

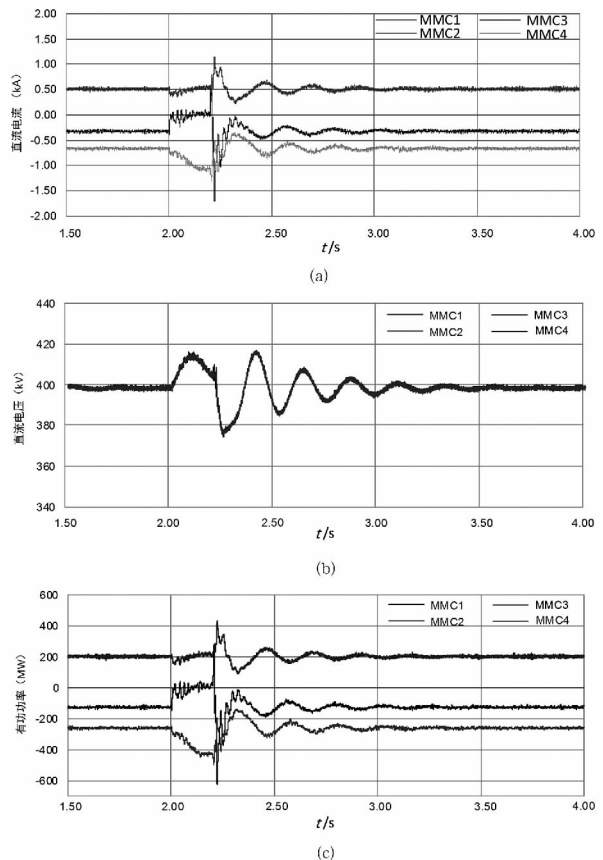


图 9 三相短路接地故障的仿真结果

4 结 论

1) 通过分析 MMC 换流站的主电路图, 引入了

在同步旋转坐标系下的控制策略,其与VSC换流站的控制策略相同。所提出的电压下垂比例积分控制策略同样适用于VSC-MTDC的组网控制。

2) 通过搭建四端MMC模型,分析了各个换流站直流侧电压与电流的特性,并推导出各个换流站电压电流的关系,提出了可以通过改变 $U-I$ 特性曲线的斜率实现换流站功率的分配。

3) 仿真结果表明,运用所设计的控制策略,直流电压稳定运行于额定值附近,功率按照预定的分配稳定运行,说明了本控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 李庚银,吕鹏飞,李广凯,等. 轻型高压直流输电技术的发展与展望[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 77-81.
- [2] 汤广福. 基于电压源换流器的高压直流输电技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 321-331.
- [3] 宋平岗,李云丰,王立娜,等. MMC-HVDC电容协同预充电控制策略[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2471-2477.
- [4] Debnath S, Qin J, Bahrani B, et al. Operation, Control, and Applications of the Modular Multilevel Converter: A Review[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 37-53.
- [5] 马为民,吴方劫,杨一鸣,等. 柔性直流输电技术的现状及应用前景分析[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2429-2439.
- [6] 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.
- [7] Yao L, XL, B M. Multi-terminal HVDC Grid for Network Interconnection and Renewable Energy Integratoin [C]. Paris France, 2010.
- [8] 胡静. 基于MMC的多端直流输电系统控制方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- [9] 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.
- [10] Kumars Rouzbehi, Arash Miranian. A Generalized Voltage Droop Strategy for Control of Multiterminal DC Grids, IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(1): 607-617.
- [11] 刘盼盼,荆龙,吴学智,等. 一种MMC-MTDC系统新型协调控制策略[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 64-69.
- [12] 彭衍建,李勇,曹一家. 基于VSC-MTDC的大规模海上风电并网系统协调下垂控制方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(8): 16-25.
- [13] 赵雄光,宋强,饶宏,等. 基于VI特性的多端柔性直流输电系统的控制策略[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(4): 15-20.
- [14] 付媛,王毅,张祥宇,等. 基于多端直流联网的风电功率协调控制[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 611-619.
- [15] 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): 0397-0404.
- [16] 韩民晓,熊凌飞,丁辉. 利用电压倾斜控制的VSC-MTDC稳定性分析[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1808-1816.
- [17] 冉晓洪,苗世洪,吴英杰,等. 基于最优功率分配的多端直流网络改进下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(9): 16-24.
- [18] CIGRE B4 Working Group, (visited, 19 Sep. 2013). [Online]. Available: <http://b4.cigre.org/Publications/Documents-related-to-the-developmentof-HVDC-Grids>.
- [19] 管敏渊,徐政,屠卿瑞,等. 模块化多电平换流器型直流输电的调制策略[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 48-52.
- [20] 丁冠军,汤广福,丁明,等. 新型多电平电压源换流器模块的拓扑机制与调制策略[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(36): 1-8.
- [21] 管敏渊,徐政. MMC型VSC-HVDC系统电容电压的优化平衡控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(12): 9-14.
- [22] 屠卿瑞,徐政,管敏渊,等. 模块化多电平换流器环流抑制控制器设计[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(18): 57-61.

作者简介:

杨林(1991),工学硕士,研究方向为柔性直流输电方面的研究工作;

张英敏(1974),副教授,研究方向为电力系统分析计算与稳定性控制、高压直流输电、柔性直流输电与新能源并网技术;

李兴源(1945),教授、博士生导师,研究方向为电力系统分析计算与稳定性控制、高压直流输电、柔性直流输电与新能源并网技术。

(收稿日期: 2017-03-14)