

模块化多电平换流器型直流输电的建模与控制

管敏渊，徐 政

(浙江大学电气工程学院，浙江省杭州市 310027)

摘要：分析了模块化多电平换流器(MMC)的电路结构和运行特性，指出了 MMC 每相上、下 2 个桥臂交流输出端是等电位点。将三相等电位点虚拟短接后，每相上、下 2 个桥臂换流电抗可以并联成一个电抗，与交流系统相连，其结构与传统电压源换流器(VSC)类似。文中据此得到了 MMC 的简化等效电路理论模型。根据该等效电路理论模型，MMC 的控制可以直接使用传统 VSC 的控制策略。将传统 VSC 常用的矢量控制策略应用于 MMC 型直流输电系统。时域仿真结果表明，MMC 每相上、下 2 个桥臂交流输出端的电位非常接近，验证了所提出的 MMC 等效电路理论模型的正确性。仿真结果也表明所设计的 MMC 型直流输电系统的矢量控制策略控制性能良好。

关键词：电压源换流器；电压源换流器型直流输电；模块化多电平换流器；换流电抗；等效电路；矢量控制

0 引言

电压源换流器(VSC)是电压源换流器型高压直流(VSC-HVDC)输电系统和静止同步补偿器(STATCOM)的核心部件^[1-5]。最基本的 VSC 是两电平和中点钳位型三电平换流器。这 2 种拓扑用于高压大功率场合时，需要使用电力电子开关器件的直接串联，对串联器件的开关一致性要求很高^[6-8]。目前，ABB 公司的 VSC-HVDC 输电系统和 STATCOM 工程主要采用这 2 种拓扑^[9-10]。级联型多电平换流器使用子模块串联，可以减少甚至取消开关器件的直接串联；并且电平数的增加改善了换流器的输出特性。H 桥级联型换流器(cascaded H-bridge converter, CHBC)已被用于 STATCOM 工程^[4]，但是该拓扑不存在公共的直流正、负极母线，不能用于直流输电。为此，文献^[11-12]提出了基于半 H 桥级联的模块化多电平换流器(MMC)，其拓扑含有公共的直流正、负极母线，适用于直流输电^[6-8, 13-14]。西门子公司计划在其“Trans Bay Cable”VSC-HVDC 输电工程中使用 MMC 拓扑^[6-8]。文献^[13]给出了一种适合 MMC 型直流输电系统的调制策略。文献^[14]对 MMC 型直流输电系统进行了建模和控制，取得了较好的效果，其问题是建模和控制中未考虑换流器中 6 个换流电抗的作用。本文提出了一种 MMC 拓扑的简化等效电路理论模型，根据该等效电路模型设计了 MMC 的矢量控制策略。

1 MMC 运行特性分析

1.1 桥臂电流分析

MMC(拓扑结构见图 1)的 6 个桥臂是对称的。将 6 个桥臂的串联子模块组分别用 6 个理想电压源等效替换，可以得到如图 2 的 MMC 简化电路。

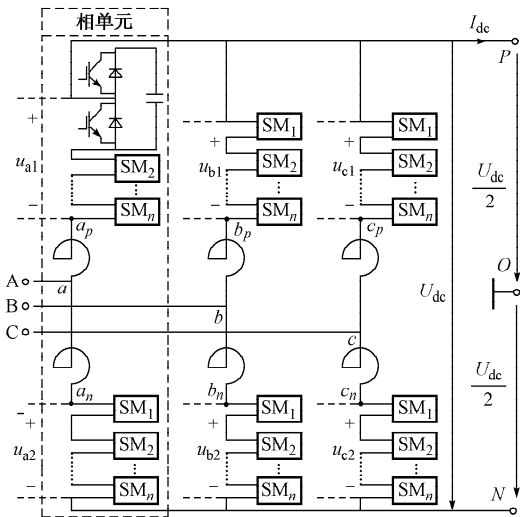


图 1 MMC 拓扑结构
Fig. 1 Circuit configuration of MMC

由于 3 个相单元的对称性，直流电流 I_{dc} 在 3 个相单元之间均分，即流过每个相单元的直流电流为 $I_{dc}/3$ ，方向如图 2 所示；又由于上、下桥臂的近似对称性(上、下桥臂的换流电抗值相等)，交流相电流在上、下桥臂间近似均分，即流过每个桥臂的交流电流为相电流的一半，方向如图 2 所示。以上结果与文献^[7]的结论相一致。以 A 相为例，计入换流器运

收稿日期：2010-06-07；修回日期：2010-07-14。
“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAA02A21)。

运行时相单元中的交流环流 i_{acir} (2 倍工频), 则 A 相上、下桥臂中的电流为:

$$i_{a1} = \frac{I_{dc}}{3} + i_{acir} + \frac{i_a}{2} \quad (1)$$

$$i_{a2} = \frac{I_{dc}}{3} + i_{acir} - \frac{i_a}{2} \quad (2)$$

式中: i_a 为 A 相的相电流。

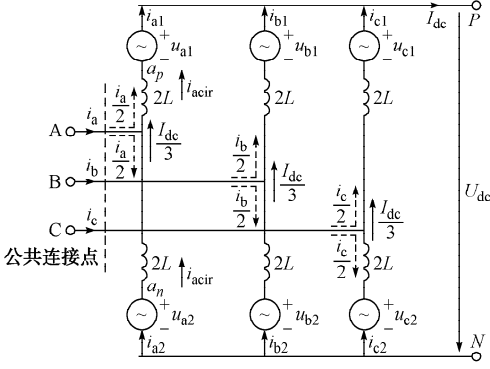


图 2 使用理想电压源的 MMC 简化电路
Fig. 2 Simplified circuit of MMC using voltage sources

利用式(1)和式(2)可以求得点 a_p 与点 a_n 间的电压。稳态下直流电流流过换流电抗不会引起电压降, $i_a/2$ 在上、下换流电抗上造成的电压降互相抵消, 所以点 a_p 与点 a_n 的电压之差为:

$$\Delta u = u_{a_p} - u_{a_n} = -4j\omega L i_{acir} \quad (3)$$

由于运行时相单元中的交流环流可以被换流电抗很好地抑制, 因此 Δu 很小, 并且其平均值为 0, 所以可以近似地认为:

$$u_{a_p} = u_{a_n} \quad (4)$$

同理, 可以近似地认为点 b_p 与点 b_n 以及点 c_p 与点 c_n 分别为两对等电位点, 即

$$\begin{cases} u_{b_p} = u_{b_n} \\ u_{c_p} = u_{c_n} \end{cases} \quad (5)$$

1.2 直流电压分析

直流电压 U_{dc} 可以表示为:

$$U_{dc} = u_{a1} + u_{a2} + \Delta u \quad (6)$$

即

$$\frac{u_{a1} + u_{a2}}{U_{dc}} + \frac{\Delta u}{U_{dc}} = 1 \quad (7)$$

稳态下, 直流电流在换流电抗上造成的电压降为 0, 因此换流电抗无法提供直流电压支撑。换流器的直流电压 U_{dc} 主要是由串联子模块来提供的。只要 $\Delta u/U_{dc}$ 足够小, 就可以将式(7)中的该项忽略, 由此得到:

$$U_{dc} = u_{a1} + u_{a2} \quad (8)$$

点 a_p 的电压为:

$$u_{a_p} = \frac{U_{dc}}{2} - u_{a1} \quad (9)$$

根据式(8)和式(9)得:

$$u_{a_n} = -\frac{U_{dc}}{2} + u_{a2} = u_{a_p} \quad (10)$$

即式(4)成立, 同理可得式(5)也成立。

1.3 级联结构分析

从图 1 可见, MMC 拓扑实际上是由上、下 2 个完全相同的半 H 桥级联型换流器构成的。根据对称性, 总的有功功率和无功功率由上、下 2 个半 H 桥级联型换流器平均分担。以 A 相为例, 由于 a 点是公共点, 要实现功率均分, 就希望 A 相的两交流输出端点 a_p 与点 a_n 的电压相等, 即式(4)成立。同理式(5)也成立。

综上, MMC 的运行特性决定点 a_p 与点 a_n 、点 b_p 与点 b_n 以及点 c_p 与点 c_n 分别是 3 对近似等电位点。

2 等效电路理论模型

根据电路原理, 在理论分析中将等电位点虚拟短接, 可以简化电路结构而又不影响外部电路特性。如图 3 将等电位点虚拟短接后可以发现, 上、下桥臂的换流电抗可看成是并联关系。

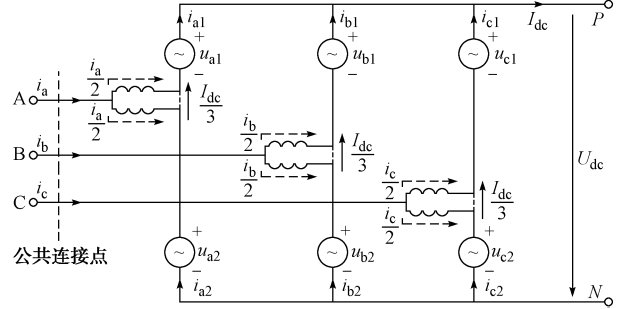


图 3 等电位点虚拟短接的 MMC 等效电路理论模型
Fig. 3 Equivalent circuit model of MMC with equal potential points short-circuited

将 2 个并联的换流电抗合并为一个电抗值等于原电抗一半的新电抗后, 主电路可以进一步简化为图 4。

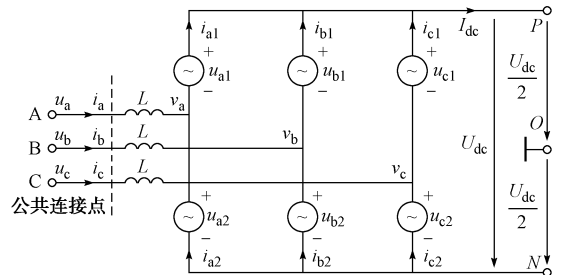


图 4 MMC 简化等效电路理论模型
Fig. 4 Simplified equivalent circuit model of MMC

这就是 MMC 的简化等效电路理论模型,它只有 3 个交流输出端,每个输出端各通过一个换流电抗与三相交流电网相连,连接点称为公共连接点(PCC)。该等效电路模型很好地简化了 MMC 中的 6 个换流电抗,其结构与传统 VSC 拓扑(两电平换流器、钳位型多电平换流器和 H 桥级联型多电平换流器等)类似。基于 MMC 的等效电路理论模型,理论上所有传统 VSC 的控制策略都可以直接应用到 MMC 中。需要注意的是,MMC 等效电路理论模型不是一种实际电路,而是用于 MMC 建模和控制的一种虚拟的理论模型。

3 建模与控制

基于 MMC 的等效电路理论模型,本文将传统 VSC 的一种常用控制方法——矢量控制应用到 MMC 中。三相 abc 坐标系下电压、电流的动态表达式为:

$$\begin{cases} L \frac{di_a(t)}{dt} = u_a(t) - v_a(t) \\ L \frac{di_b(t)}{dt} = u_b(t) - v_b(t) \\ L \frac{di_c(t)}{dt} = u_c(t) - v_c(t) \end{cases} \quad (11)$$

各物理量的意义见图 4。对式(11)施加 dq 坐标变换,得到:

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{1}{L}u_d + \omega i_q - \frac{1}{L}v_d \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{1}{L}u_q - \omega i_d - \frac{1}{L}v_q \end{cases} \quad (12)$$

式中: i_d 和 i_q 为状态变量, d 轴、 q 轴变量之间存在耦合,另外还存在电网电压扰动项 u_d 和 u_q 。

其变换矩阵为:

$$\mathbf{T}(\theta) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: θ 为 u_a (余弦形式)的相角。

在式(13)所示的 dq 变换下,稳态时有 $u_q = 0$,交流系统与换流器相连接的 PCC 处送入换流器的有功功率和无功功率为:

$$\begin{cases} P = 1.5u_d i_d \\ Q = -1.5u_d i_q \end{cases} \quad (14)$$

矢量控制包含内环电流控制和外环控制。内环电流控制通过调节换流器的输出电压,使 i_d 和 i_q 快速跟踪其指令值 i_{dref} 和 i_{qref} 。式(12)中输入变量 v_d 和 v_q 取值为^[15]:

$$\begin{cases} v_d = u_d + \omega L i_q - \left[k_{p1}(i_{dref} - i_d) + k_{i1} \int (i_{dref} - i_d) dt \right] \\ v_q = u_q - \omega L i_d - \left[k_{p2}(i_{qref} - i_q) + k_{i2} \int (i_{qref} - i_q) dt \right] \end{cases} \quad (15)$$

式(15)等号后前 2 项用于抵消式(12)中的电网电压扰动项和耦合项,第 3 项是比例积分(PI)调节项。将 v_d 和 v_q 经过 dq 反变换到 abc 坐标系下,得到需要换流器输出的三相工频交流相电压,即调制波。

外环控制器根据有功功率、无功功率和直流电压等指令,生成内环电流指令值 i_{dref} 和 i_{qref} 。结合式(14)并引入 PI 调节器。根据有功功率和无功功率指令得到内环电流指令值:

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{P_{ref}}{1.5u_d} + \left[k_{p3}(P_{ref} - P) + k_{i3} \int (P_{ref} - P) dt \right] \\ i_{qref} = -\frac{Q_{ref}}{1.5u_d} + \left[k_{p4}(Q - Q_{ref}) + k_{i4} \int (Q - Q_{ref}) dt \right] \end{cases} \quad (16)$$

如果采用直流电压控制,则可以根据直流电压指令得到内环电流 i_d 的指令值:

$$i_{dref} = k_{p5}(U_{dref} - U_{dc}) + k_{i5} \int (U_{dref} - U_{dc}) dt \quad (17)$$

文献[13]对使用最近电平逼近调制(nearest level modulation, NLM)的 MMC 谐波含量进行了计算。在 21 电平、31 电平、41 电平和 51 电平下,换流器交流输出端(图 1 中的 a_p 和 a_n 点)的电压总谐波畸变率(THD)值分别小于 5%,4%,3%,2%。由于换流电抗对高频谐波的抑制作用,PCC 的电压和电流的 THD 值会更小。因为控制器使用的是 PCC 处的电压和电流,所以高频谐波分量对控制器的影响是有限的。

4 仿真研究

在 PSCAD/EMTDC 中搭建了 MMC 型两端直流输电系统的仿真模型,其基本结构如图 5 所示。两端交流系统用理想电压源和感性的系统阻抗来模拟,整流侧交流电压源线电压有效值为 220 kV,逆变侧交流电压源线电压有效值为 200 kV。换流器共 6 个桥臂,每个桥臂使用 20 个子模块串联而成,电平数为 21。子模块电容值为 3 000 μ F,换流电抗电感值为 0.04 H。整流侧采用直流电压和无功功

率控制;逆变侧采用有功功率和无功功率控制。仿真系统使用文献[8]的子模块电容电压均衡控制策略和文献[13]的调制策略,并且使用了低通滤波器来滤除信号中的高频分量。

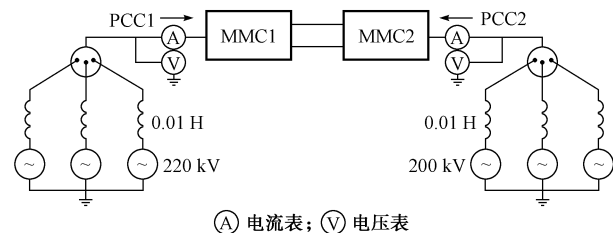


图5 MMC型直流输电系统结构

Fig. 5 Schematic diagram of the MMC based HVDC transmission system

图6(a)是图1中点 a_p 的电压 u_{a_p} 和点 a_n 的电压 u_{a_n} 以及两者之差 Δu ,图6(b)将 Δu 进行了放大显示。 u_{a_p} 和 u_{a_n} 的幅值在180 kV左右,直流电压 U_{dc} 在400 kV左右,而 Δu 的幅值则小于10 kV, Δu 的幅值与 U_{dc} 之比小于2.5%,这与第2部分 Δu 足够小的假设相吻合。B,C两相的情况也类似,验证了本文所提出的MMC等效电路理论模型。

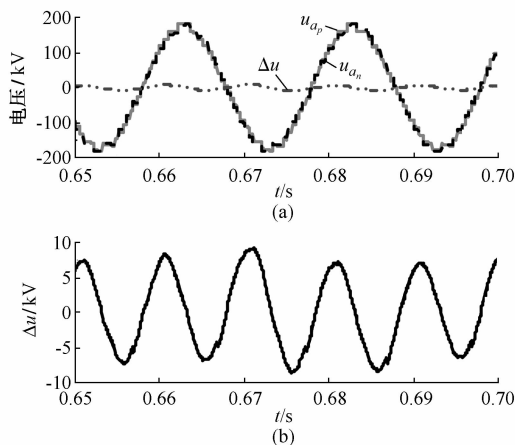


图6 电压 u_{a_p} , u_{a_n} 及其差值 Δu 与 Δu 的放大图

Fig. 6 The u_{a_p} , u_{a_n} , their difference Δu and enlargements of Δu

图7(a),(b),(c)分别是整流侧直流电压 U_{dc} 、逆变侧有功功率 P 和逆变侧无功功率 Q 的控制响应。整流侧直流电压指令值 U_{dref} 设为400 kV,无功功率指令值设为0;逆变侧有功功率指令值 P_{ref} 在0.3 s时从-800 MW阶跃到-600 MW,无功功率指令值 Q_{ref} 在0.5 s时从50 Mvar阶跃到-50 Mvar。从图7可见,逆变侧有功功率和无功功率能够迅速跟踪指令值的大幅度阶跃变化,响应时间在10 ms~30 ms左右,并最终稳定在指令值附近。有功功率和无功功率控制之间的相互影响小,

解耦性能好。整个过程中,整流侧直流电压一直被维持在指令值附近,最大波动幅度小于3%。附录A图A1是整流侧测得的直流电流 i_p 和 i_n ,以及逆变侧A相的交流电压和交流电流(PCC2处),可见直流输电系统运行情况良好,交流电压和交流电流波形基本为正弦。附录A图A2给出了整流侧A相上桥臂一个子模块的电容电压,全过程中电容电压的最大波动幅度基本在 $\pm 6\%$ 以内,其他子模块电容电压波动情况也类似。

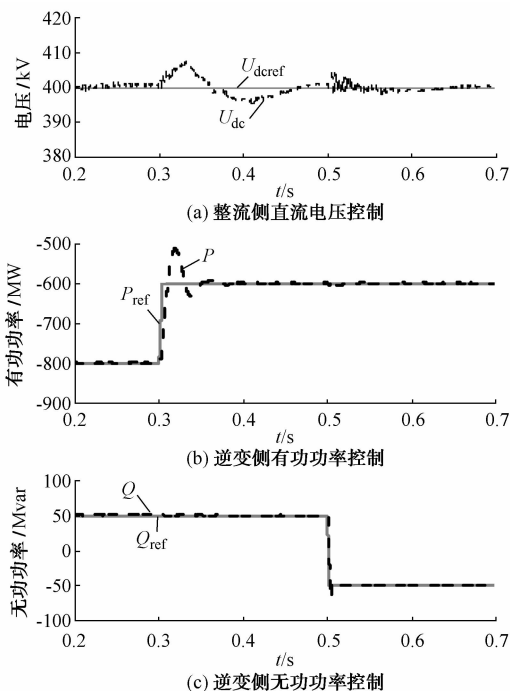


图7 控制器跟踪性能

Fig. 7 Tracking performance of the controller

5 结语

MMC每相上、下2个交流输出端的电位是非常接近的,其电位差 Δu 的幅值与 U_{dc} 相比很小,可以认为是等电位的。通过将三相3对等电位点虚拟短接后,得到的MMC等效电路理论模型与传统VSC的电路模型结构一致。因此可以将适用于传统VSC的控制策略直接应用于MMC的控制。将矢量控制策略应用于MMC型直流输电系统,仿真结果表明所设计的控制策略具有很好的控制性能。

附录见本刊网络版(<http://aeps.sgepri.sgcc.com.cn/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] FLOURENTZOU N, AGELIDIS V G, DEMETRIADES G D. VSC-based HVDC power transmission systems; an overview. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(3): 592-602.

- [2] 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. 电力系统自动化, 2003, 27(4): 1-5.
LI Gengyin, LÜ Pengfei, LI Guangkai, et al. Development and prospects for HVDC light. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(4): 1-5.
- [3] 徐政, 陈海荣. 电压源换流器型直流输电技术综述. 高电压技术, 2007, 33(1): 1-10.
XU Zheng, CHEN Hairong. Review and applications of VSC HVDC. High Voltage Engineering, 2007, 33(1): 1-10.
- [4] 刘文华, 宋强, 滕乐天, 等. 基于集成门极换向晶闸管与链式逆变器的±50 Mvar 静止同步补偿器. 中国电机工程学报, 2008, 28(15): 55-60.
LIU Wenhua, SONG Qiang, TENG Letian, et al. ±50 Mvar STATCOM based on chain circuit converter employing IGCT's. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(15): 55-60.
- [5] 沈斐, 王娅岚, 刘文华, 等. 大容量 STATCOM 主电路结构的分析和比较. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 59-65.
SHEN Fei, WANG Yalan, LIU Wenhua, et al. Analysis and comparison of large capacity STATCOM circuit configuration. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 59-65.
- [6] DORN J, HUANG H, RETZMANN D. Novel voltage-sourced converters for HVDC and FACTS applications// Proceedings of CIGRE Symposium, November 1-4, 2007, Osaka, Japan.
- [7] DORN J, HUANG H, RETZMANN D. A new multilevel voltage-sourced converter topology for HVDC applications// Proceedings of CIGRE Symposium, August 24-29, 2008, Paris, France.
- [8] GEMMELL B, DORN J, RETZMANN D, et al. Prospects of multilevel VSC technologies for power transmission// Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 21-24, 2008, Chicago, IL, USA: 16p.
- [9] ABB. It's time to connect-technical description of HVDC light technology [R]. Ludvika, Sweden: ABB Power Technology, 2005.
- [10] OSKOUI A, MATHEW B, HASLER J P, et al. Holly

- STATCOM-FACTS to replace critical generation, operational experience// Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, May 21-24, 2006, Dallas, TX, USA: 1393-1398.
- [11] LESNICAR A, MARQUARDT R. A new modular voltage source inverter topology// Proceedings of the 10th European Conference on Power Electronics, September 2-4, 2003, Toulouse, France.
- [12] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range// Proceedings of the IEEE Power Tech Conference, June 23-26, 2003, Bologna, Italy.
- [13] 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. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 48-52.
GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.
- [14] 刘钟淇, 宋强, 刘文华. 基于模块化多电平变流器的轻型直流输电系统. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 53-58.
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. VSC-HVDC system based on modular multilevel converters. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 53-58.
- [15] YAZDANI A, IRAVANI R. A unified dynamic model and control for the voltage-sourced converter under unbalanced grid conditions. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(3): 1620-1629.

管敏渊(1985—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 直流输电系统和柔性交流输电系统. E-mail: guanminyuan@gmail.com

徐政(1962—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、电力谐波与电能质量、风力发电技术与风电场并网技术. E-mail: hnxuzheng@yahoo.com.cn

Modeling and Control of Modular Multilevel Converter in HVDC Transmission

GUAN Minyuan, XU Zheng

(Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Modular multilevel converters (MMCs) belong to a new cascaded multilevel voltage source converter (VSC) suitable for HVDC transmission purpose. The analysis of circuit configuration and operation mechanism of MMC indicates that the potentials of the two AC terminals in one phase are approximately equal, such that these two AC terminals can be short circuited. By doing so, the upper and lower converter reactors in one phase are connected in parallel and hence can be merged into one. Accordingly, the theoretical equivalent circuit model of a MMC can be derived. The derived model has three terminals at the AC side, each one of them is connected to the three-phase power system through a converter reactor. The equivalent circuit model has the same structure as a conventional VSC. In this way, the conventional VSC control strategies can be directly used for MMC. The vector control strategy which is widely used in conventional VSCs is used for a MMC based HVDC transmission system. The time-domain simulation results show that the potentials of the two AC terminals in one phase are nearly equal, and the derived equivalent circuit model of the MMC is valid. Moreover, the vector control strategy is effective for controlling of the MMC based HVDC transmission systems.

This work is supported by National Mega-project of Science Research for the 11th Five-year Plan (No. 2006BAA02A21).

Key words: voltage source converter (VSC); voltage source converter based high voltage direct current (VSC-HVDC); modular multilevel converter (MMC); converter reactor; equivalent circuit; vector control

附录 A

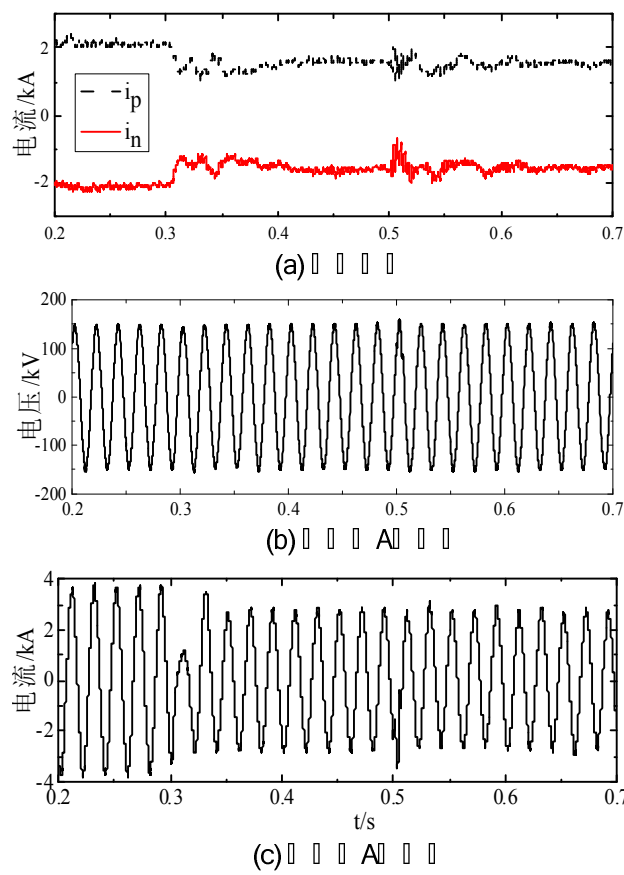


图 A1 系统响应
Fig.A1 System response

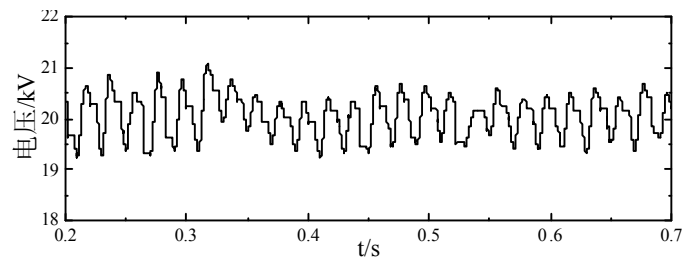


图 A2 整流侧一子模块电容电压波动
Fig. A2 Voltage ripples of one submodule capacitor at rectifier side