

[自控·检测]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2018.05.009

Y型模块化多电平变换器原理及其在中压馈线互联中的研究

叶天华, 杨欢, 张烨璐

(浙江大学电气工程学院, 浙江杭州 310027)

摘要:针对未来配网中压馈线柔性互联的迫切需求,提出了采用Y型模块化多电平变换器(Y modular multilevel converter, Y-MMC)实现柔性多状态开关功能的研究思路。首先分析其拓扑结构与工作原理,采用功率外环电流内环的双闭环控制策略,在MATLAB/Simulink平台中搭建了系统仿真模型。在10 kV中压配网环境下,仿真研究了Y-MMC对有功功率和无功功率的传输性能及系统的动态响应。结果表明所搭建的系统有较好的性能,该研究为新型交-交拓扑的柔性多状态开关用于中压配网环境下的适用性提供了参考。

关键词:Y型模块化多电平变换器;柔性多状态开关;双闭环控制策略;MATLAB/Simulink仿真;调制策略

中图分类号:TM71 **文献标志码:**A **文章编号:**1005-2895(2018)05-0045-08

Principle of Y Modular Multilevel Converter and Its Application in Medium Voltage Feeder Interconnection

YE Tianhua, YANG Huan, ZHANG Yelu

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In view of the urgent demand of the flexible interconnection of medium voltage feeders in the future distribution network, the research strategy of using Y modular multilevel converter (Y-MMC) to realize soft normally open point (SNOP) was proposed. The topology and working principle of Y-MMC were analyzed. A double closed loop control strategy based on power outer loop and current inner loop was adopted to establish a system simulation model in MATLAB/Simulink platform. In the 10 kV medium voltage distribution network environment, the transmission performance of Y-MMC to active power and reactive power as well as the dynamic response of the system was simulated. Simulation results show that the system has good performance, which provides reference for the applicability of the SNOP for the new type of AC-AC topology in the medium voltage distribution network environment.

Keywords: Y modular multilevel converter (Y-MMC); SNOP (soft normally open point); double closed-loop control strategy; MATLAB/Simulink simulation; modulation strategy

随着传统配电网向智能电网的发展,电力电子技术和控制领域广泛地应用于智能配电网,同时大量分布式能源的接入和对配电网的柔性控制得到越来越多的关注。柔性多状态开关(soft normally open point, SNOP)采用电力电子新技术,安装于传统开关联络处,是用于替代常规开关的电力电子装置^[1]。与常规机

械开关相比,柔性多状态开关有很多优势,不仅具备连通和开断2种状态,而且增加了功率连续可控状态,能够根据需要对其连接两侧馈线的有功功率和无功功率进行控制,促进馈线负载分配的均衡化和电能质量改善,为未来智能配电网的实施提供关键技术与设备支撑^[2-3]。

收稿日期:2018-03-26;修回日期:2018-05-20

基金项目:国家电网公司科技项目(521104170043)。

第一作者简介:叶天华(1992),男,山东莱州人,硕士研究生,主要研究方向为布式发电与电网、智能软开关。E-mail:yeth@zju.edu.cn

目前,SNOP 主要有 4 种类型:统一潮流控制器、静止同步补偿器、背靠背电压源型变换器和串联补偿器。其中,背靠背型运用最为广泛,是交-直-交型的结构。而交-交型的模块化多电平结构省去了中间的直流环节,其主要有 3 种类型:2001 年,美国科罗拉多大学提出的模块化多电平矩阵变换器^[4];2011 年,德国汉诺威-莱布尼茨大学提出的六边形模块化多电平变换器 Hexverter^[5-7];2015 年,西安交通大学提出的运用到海底低频输电中的 Y 型的模块化多电平变换器(Y modular multilevel converter, Y-MMC)^[8]。文献[9]详细介绍了模块化多电平矩阵变换器基于级联 H 桥的直接交-交变换器的拓扑结构。文献[10]提出了模块化多电平变换器一种抑制柔性直流输电电容电压波动的方法。文献[11]针对背靠背柔性直流的应用需求,提出了一种适用于背靠背 MMC 的控制策略。文献[12]基于模块化多电平矩阵式变换器拓扑,推导出了基于双 $d-q$ 坐标变换的 M3C 数学模型。文献[13]对基于模块化多电平矩阵变换器的拓扑结构进行研究,提出了独立控制策略。文献[14]对模块化多电平变换器若干技术进行了探究,全面开展应用技术探究分析,并且对技术的发展前景进行了展望。

课题组主要针对 Y 型模块化多电平变换器进行了研究,讨论其拓扑结构和工作原理,给出其数学模型。在 MATLAB/Simulink 仿真平台下搭建了 Y-MMC 双闭环控制系统仿真模型,研究了系统在 10 kV 中压配网环境下对有功和无功功率的传输性能以及系统的动态响应。研究为新型交-交拓扑的智能软开关用于中压配网环境下交流系统互联的适用性提供了参考。

1 Y-MMC 的拓扑结构及工作原理

1.1 Y-MMC 主电路拓扑结构

图 1 所示为三相 Y-MMC 的主电路结构。Y-MMC 拓扑中共有 9 个桥臂,包括 3 个主桥臂和 6 个辅助桥臂,3 个主桥臂为图 1 中位于中间的 N_1 、 N_2 和 N_3 ,6 个辅助桥臂为拓扑外边的 2 组桥臂,分别是输入桥臂 a_1 、 b_2 、 c_3 和输出桥臂 u_1 、 v_2 、 w_3 ,用于连接两侧电网系统馈线。主桥臂由 n 个全桥子模块 SM 级联组成,辅助桥臂包含电感 L 、等效电阻 R 以及 $n/2$ 个全桥级联子模块。从主电路的拓扑结构可以看出,Y-MMC 的各桥

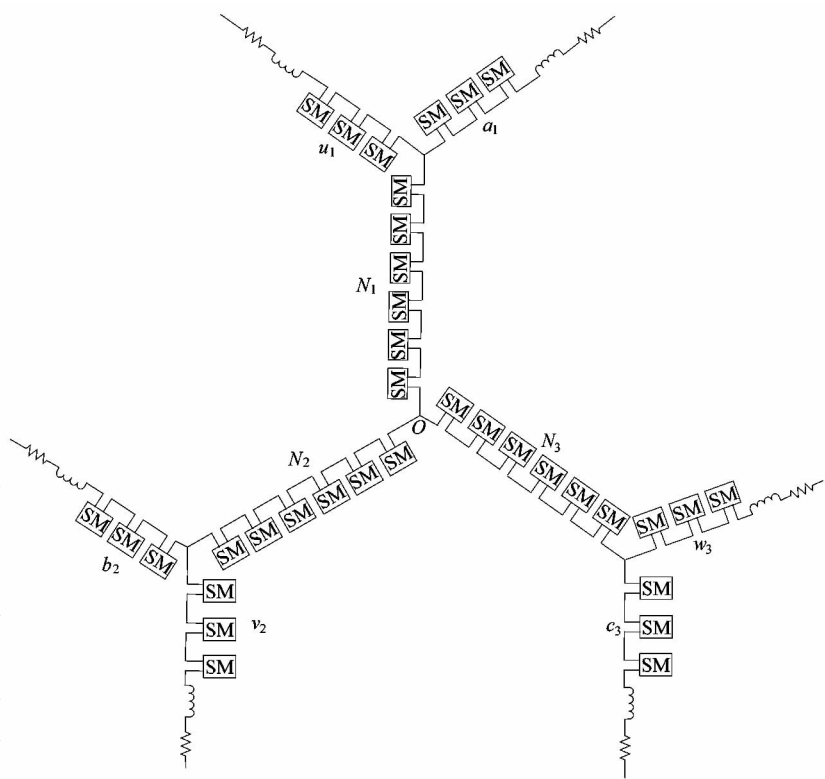


图 1 Y-MMC 主电路拓扑结构

Figure 1 Main circuit topology of Y-MMC

臂呈 Y 型相连,不存在闭合回路,所以没有环流流通的通道,故拓扑不存在环流问题,这也是 Y-MMC 拓扑的优势之一。此外,该拓扑应用于连接不同频率的两侧系统时,Y-MMC 的主桥臂和辅助桥臂可以通过拓扑优势,将输入侧和输出侧系统的频率通过电压对消进行解耦。

1.2 Y-MMC 子模块拓扑及其工作原理

图 2 所示为 Y-MMC 的子模块 SM 的具体结构,该模块是单相全桥结构,由 1 个以全控型器件 IGBT 为开关器件的全桥逆变单元和 1 个储能电容组成。在每个子模块电容电压稳定的条件下,各桥臂电压能够保持稳定,所以需要根据其运行的原理,对各子模块采用合适的控制策略,以实现该全桥子模块的正常运行。

由于全桥子模块的结构中存在桥臂电感和续流二极管(D_1, D_2, D_3, D_4),各个子模块不存在全部关闭的状态,通过触发信号对 IGBT(T_1, T_2, T_3, T_4)的开通和关断控制,全桥子模块可分为 3 种工作状态:

1) 当 T_1, T_4 开通, T_2, T_3 关断时,若电流从 A 端流入, B 端流出,则二极管 D_1 和 D_4 处在导通状态,电容进行充电;若电流从 B 端流入, A 端流出,则 IGBT(T_1 和 T_4)处在导通状态,电容进行放电。

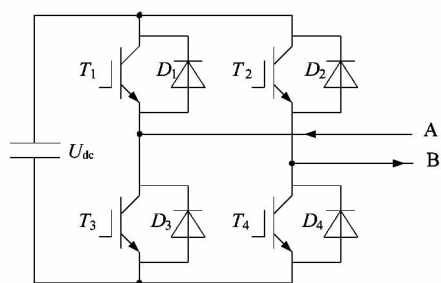


图2 Y-MMC子模块结构

Figure 2 Y-MMC submodule structure

2) 当 T_2, T_3 开通, T_1, T_4 关断时, 若电流从 A 端流入, B 端流出, 则二极管 D_2 和 D_3 处在导通状态, 电容进行充电; 若电流从 B 端流入, A 端流出, 则 IGBT (T_2 和 T_3) 处在导通状态, 电容进行放电。

3) 当 IGBT 只有一侧开通 (T_1, T_2 开通, T_3, T_4 关断; 或 T_1, T_2 关断, T_3, T_4 开通), 电流无法流经直流侧, 此时电容被旁路, 无充放电现象, 电压不变。

1.3 Y-MMC 的数学模型

对模型作如下假设:

- 1) 输入侧和输出侧的系统电压和电流是正弦波;
- 2) 电容电压稳定, O 点是理论上的中点;
- 3) 将各主桥臂和辅助桥臂的串联子模块等效为受控电压源。

分析可得电路简化模型如图 3 所示, 图中箭头指向方向为电流的参考方向, 输入桥臂 a_1, b_2 和 c_3 电压参考方向与电流参考方向相反, 输出桥臂 u_1, v_2, w_3 和主桥臂 N_1, N_2, N_3 的电压参考方向与电流参考方向相同。

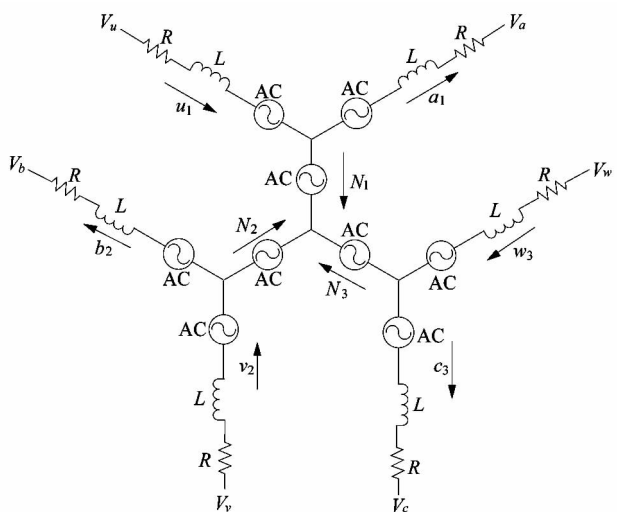


图3 Y-MMC 电路简化模型

Figure 3 Simplified model of Y-MMC circuit

对于正常运行下的三相三线制的对称系统, 输入

输出侧电压的中性点 O 点的电压为 0, 根据图 3 所示的拓扑结构, 可根据基尔霍夫定律列出系统回路电压和节点电流方程:

$$\left. \begin{aligned} V_u &= Ri_u + L \frac{di_u}{dt} + V_{u1} + V_{N1}; \\ V_v &= Ri_v + L \frac{di_v}{dt} + V_{v2} + V_{N2}; \\ V_w &= Ri_w + L \frac{di_w}{dt} + V_{w3} + V_{N3} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} V_a &= Ri_a + L \frac{di_a}{dt} + V_{a1} + V_{N1}; \\ V_b &= Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + V_{b2} + V_{N2}; \\ V_c &= Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + V_{c3} + V_{N3} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{N1} &= i_u - i_a; \\ i_{N2} &= i_v - i_b; \\ i_{N3} &= i_w - i_c \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中: V_u, V_v, V_w, V_a, V_b 和 V_c 分别对应图 3 中相应辅助桥臂端点处的电压; $V_{N1}, V_{N2}, V_{N3}, V_{u1}, V_{v2}, V_{w3}, V_{a1}, V_{b2}$ 和 V_{c3} 分别对应主桥臂和辅助桥臂相应的桥臂模块电压; $i_{N1}, i_{N2}, i_{N3}, i_u, i_v, i_w, i_a, i_b$ 和 i_c 分别表示主桥臂和辅助桥臂对应的电流。

因为要对 Y-MMC 的有功功率和无功功率分别独立控制, 为了便于进行控制, 将方程 (1) ~ (3) 从 $a-b-c$ 坐标系变换为 $d-q$ 坐标系下的电压电流方程:

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{bsd} \\ V_{bsq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{bcd} \\ V_{bcq} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} V_{1d} \\ V_{1q} \end{bmatrix} = -R \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} - L \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{b1d} \\ V_{b1q} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_{bcd} \\ V_{bcq} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$\begin{bmatrix} i_{bcd} \\ i_{bcq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_{1d} \\ i_{1q} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中: $V_{sd}, V_{sq}, V_{1d}, V_{1q}$ 对应 $V_u, V_v, V_w, V_a, V_b, V_c$ 在 $d-q$ 坐标系下的分量。 $V_{bcd}, V_{bcq}, V_{bsd}, V_{bsq}, V_{b1d}, V_{b1q}$ 对应 $V_{N1}, V_{N2}, V_{N3}, V_{u1}, V_{v2}, V_{w3}, V_{a1}, V_{b2}, V_{c3}$ 在 $d-q$ 坐标系下的分量。 $i_{bcd}, i_{bcq}, i_{sd}, i_{sq}, i_{1d}, i_{1q}$ 对应 $i_{N1}, i_{N2}, i_{N3}, i_u, i_v, i_w, i_a, i_b, i_c$ 在 $d-q$ 坐标系下的分量。

2 Y-MMC 系统的控制策略

2.1 Y-MMC 总体控制方法

由公式 (4) ~ (6) 可知, Y-MMC 与传统背靠背变换器的数学模型类似, 可参照传统背靠背变换器控制策略, 应用为 SNOP 的一种类型, 用于交流系统的直接互联, 以实现有功功率和无功功率的独立调节为控制

目标。

为了实现对有功功率和无功功率在两侧馈线的变换和传输的精确控制,控制系统采用外环功率控制和内环电流控制的双闭环控制方法,用以形成各桥臂的交流侧参考电压,如图4所示。对于连接的两侧系统,图中输入侧、输出侧系统通过下标1和2来区分,每侧都需要对有功量和无功量进行控制,为了保证系统的稳定和功率传输,可选择有功功率、无功功率和电容电压为外环控制系统的输入量,经过比例积分(proportional integral, PI)调节控制得到电流的参考量,与检测量一起作为内环电流控制的输入量,经过PI调节得到电压的参考量,再经过坐标变换得到三相电压参考量。

为了控制的需要,将 $a-b-c$ 坐标系下的交流正弦量通过坐标变换,转化为 $d-q$ 坐标系下的直流量进行控制。将有功类参考量和实际检测量的偏差经过PI外环控制得到 d 轴电流的参考量,电流的参考量和检测量经过PI内环控制得到 d 轴的参考电压量。将无功类参考量和实际检测量的偏差经过PI外环控制得到 q 轴电流的参考量,电流的参考量和检测量经过PI内环控制得到 q 轴的参考电压量。将得到的 d 轴和 q 轴参考电压量经过 dq/abc 坐标变换得到各主桥臂,输入侧辅助桥臂和输出侧辅助桥臂在 $a-b-c$ 坐标系下三相电压参考量。

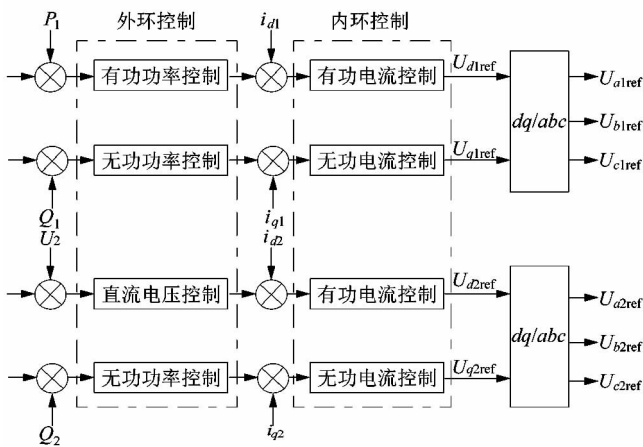


图4 Y-MMC控制框图

Figure 4 Y-MMC control block diagram

2.2 Y-MMC载波叠加调制技术

载波叠加调制方法是多电平常用的控制方法,其调制原理如图5所示,将幅值等分,因Y-MMC的拓扑对两侧系统直接实现交-交变换,每个桥臂都存在正负电压,所以采用全桥子模块,需要判断电压的正负来选择触发信号的触发模式。将载波的幅值依次叠加来实

现多电平的调制,相邻两个载波的幅值差相同,等分桥臂电压峰值,此方法可以比较得到正半周期的比较值,而负半周期的比较值为0,所以需要区分正负周期,将调制电压取反后再与载波比较可得负半周期的比较值,如图6所示。将所有的载波和桥臂的调制电压经过比较,得到需要投入的子模块数目,如图7所示,再经正负半周的区分后,得到模块的触发方式,通过这种方式来实现电平的脉冲调制。

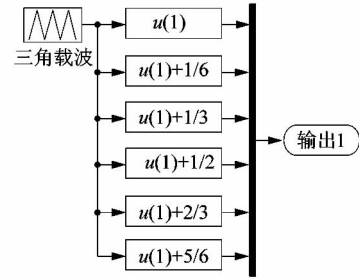
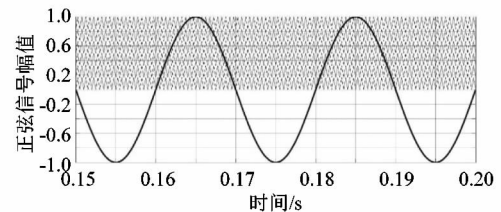
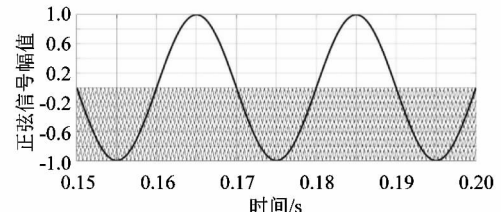


图5 载波叠加调制方式

Figure 5 Modulation strategy of carrier superposition



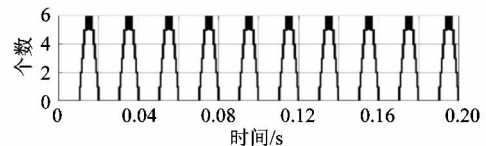
(a) 电压为正调制波形



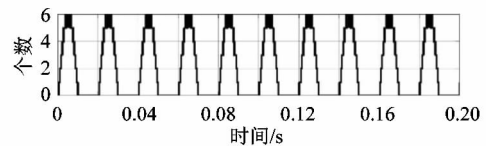
(b) 电压为负调制波形

图6 载波叠加的调制波形

Figure 6 Carrier superposition modulation waveforms



(a) 电压为正投入子模块数



(b) 电压为负投入子模块数

图7 主桥臂投入子模块数目

Figure 7 Number of input modules of main bridge

2.3 Y-MMC 模块均压技术

对于 Y-MMC 拓扑结构而言,要实现稳定运行必须平衡子模块的电容电压。目前常见平衡电容电压的控制方法为排序法。排序法基本原理为:在每个控制周期中,对各个子模块的电容按电压高低进行排序,结合调制方法,决定投入运行的子模块数量 n 。最后根据桥臂电流方向,判断子模块中电容电压的充放电情况。若电流为充电方向,则选择排序之后电压较低的 n 个模块电容进行充电;若电流为放电方向,则选择排序之后电压较高的 n 个模块电容进行充电。这种控制方法简单高效,优势明显。

3 系统仿真研究

为了验证 Y-MMC 这种拓扑结构的调制方法和控制策略的正确性,及其在中压配网环境下的适用性,课题组在给定的中压配网环境下建立主桥臂 6 个子模块,辅助桥臂 3 个子模块 Y-MMC 的 MATLAB/Simulink 仿真模型,采用合适的控制策略,对其进行仿真验证,仿真参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

主桥臂子 模块数	额定容 量/MW	辅助桥臂 电感/mH	系统线电压 有效值/kV	辅助桥臂 电阻/ Ω
6	10	10	10	0.02
系统频 率/Hz	主桥臂 电容/mF	辅助桥臂 电容/mF	子模块电容 电压/kV	
50	10	20	10/3	

图 8 所示为 Y-MMC 的主电路图,仿真系统由三相 6 个辅助桥臂和 3 个主桥臂、交流侧电阻、电感和电网系统等组成;如图 9 所示,每个主桥臂又由 6 个桥臂子模块组成;如图 10 所示,每个辅助桥臂由 3 个桥臂子模块组成。

图 11 所示为 Y-MMC 的控制框图。交流参考电压的形成,包括外环功率控制和内环电流控制,将得到的参考量经过一系列运算与坐标变换,最终得到 3 个主桥臂和 6 个辅助桥臂的电压参考量。

生成的电压参考值、桥臂电压电流、子模块开通数一起输入到 s-function 仿真模块后,得到桥臂每个子模块的开通与关断信号,如图 12 所示,辅助桥臂 3 个模块,主桥臂 6 个模块。

仿真在中压配网环境下进行,以两侧

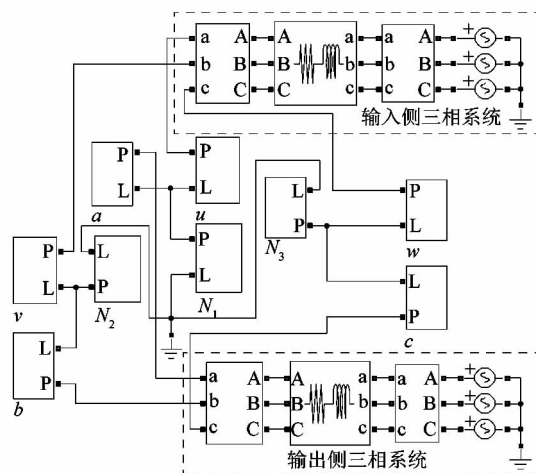


图 8 主电路仿真模型

Figure 8 Simulation model of main circuit

系统通过柔性多状态开关输送 5 MW 功率为初始条件,在 0.5 s 时,有功功率的接收端突加大负载,导致打破功率平衡,在这种重载情况下,需要接受更多的有功功率,以维持系统的正常运行。通过检测装置对两侧系统状态的实时检测,会对有功功率的传输进行快速控制,增加有功功率的给定,可通过观察得到的电压、电流和功率波形来验证仿真系统功率传输性能。

子模块电容电压如图 13 所示,初始电压为 10/3 kV,通过电容模块均压控制策略,使电压波动在 5% 以内,保证系统电压和各桥臂电压的稳定。

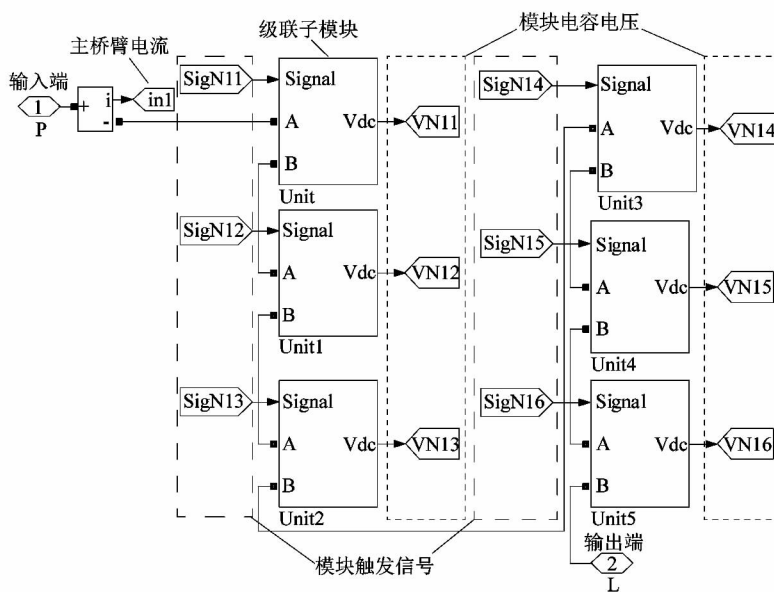


图 9 主桥臂子模块仿真模型

Figure 9 Simulation model of main bridge sub-module

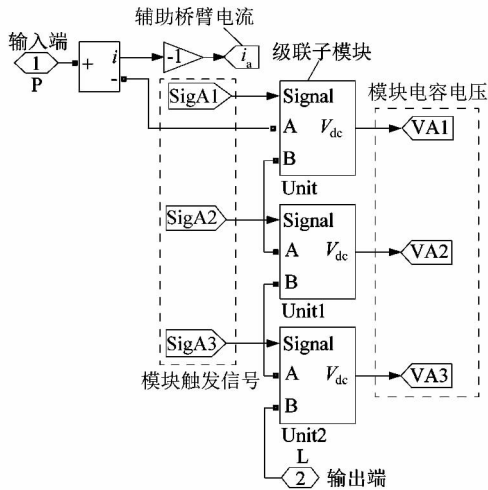


图 10 辅助桥臂子模块仿真模型

Figure 10 Simulation model of auxiliary bridge sub-module

对系统进行时长为 1.0 s 的仿真,仿真开始时,给定输送有功功率为 5 MW,在 0.5 s 时将给定功率变为 10 MW,得到图 14 所示的有功功率波形,在给定变化后的 0.01 s 内功率从 5 MW 变化到 10 MW,功率输送可以稳定在给定值,系统动态响应速度快。

图 15 所示为输入侧电压、电流波形图。由图可知电压在仿真过程中基本保持恒定,因采用 6 个模块,其波形阶梯状,含有一定谐波,随模块数的增多,电压波形会更接近正弦。随着输送有功功率增多,电流相应增加,电流波形良好,低次谐波含量少,满足中压配网环境下的应用。

图 16 所示为主桥臂和辅助桥臂的电压,主桥臂 6 个子模块,辅助桥臂 3 个子模块,每个子模块的电压为 10/3 kV,主桥臂电压幅值为 20 kV,辅助桥臂电压为 10 kV,桥臂电压基本保持正弦变化,保持系统的稳定。

当给定有功功率从 5 MW 变到 10 MW,同时给定

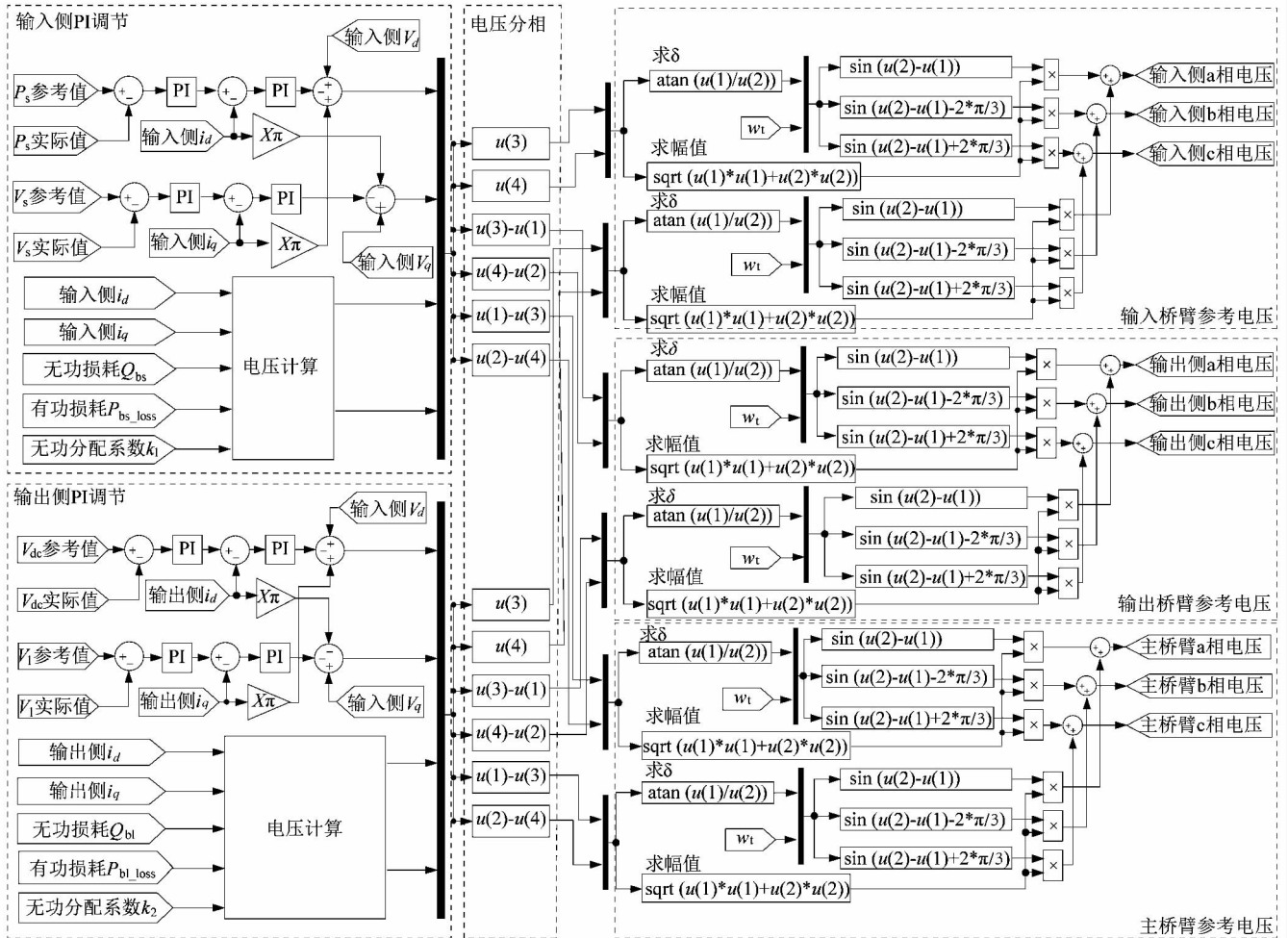


图 11 系统控制框图

Figure 11 System control block diagram

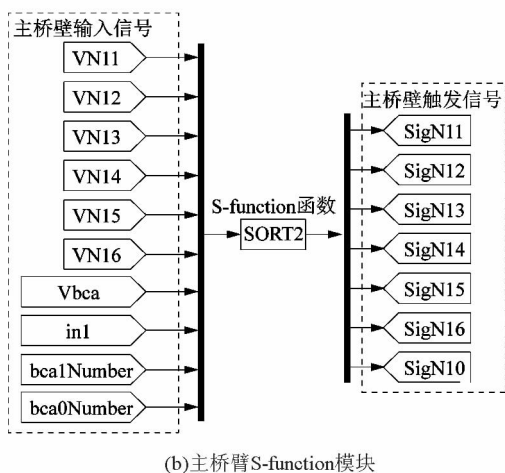
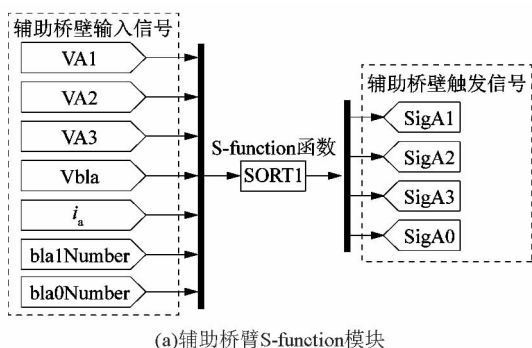


图 12 S-function 仿真模块

Figure 12 S-function simulation modules

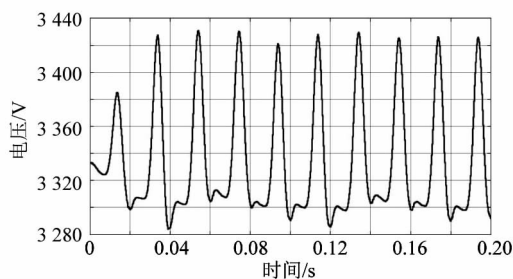


图 13 子模块电容电压波形

Figure 13 Sub-module capacitive voltage waveform

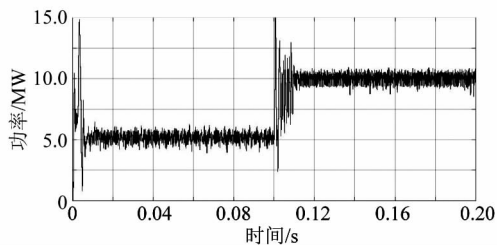


图 14 有功功率波形

Figure 14 Active power waveform

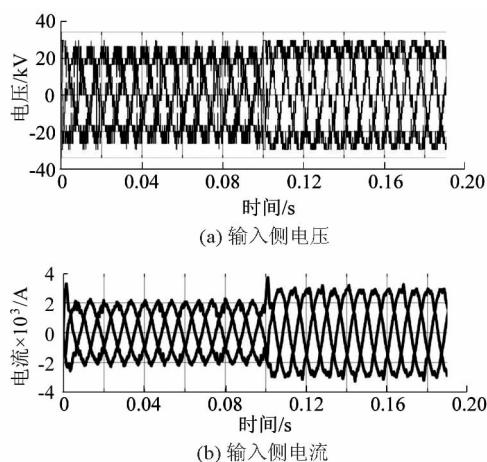


图 15 输入侧电压和电流波形

Figure 15 Voltage and current waveforms of input side

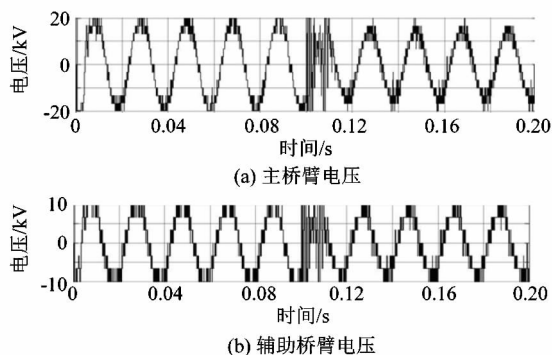
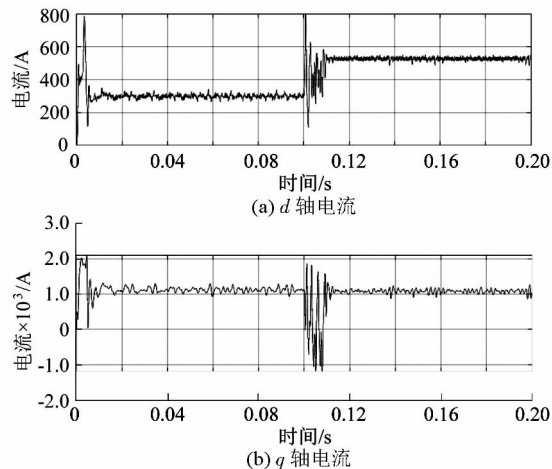


图 16 主桥臂和辅助桥臂电压

Figure 16 Main bridge and auxiliary bridge voltages
无功功率不变时,得到输入电流的 d 轴 q 轴分量如图 17 所示,电流对应的有功分量 i_d 变大,无功分量 i_q 保持不变,说明了控制系统的有功、无功分量已解耦,可分开单独控制,控制性能良好。

图 17 d 轴 q 轴电流Figure 17 d -axis currents and q -axis currents

5 结语

课题组研究了一种新的适用于中压配网环境的 Y 型模块化多电平变换器拓扑。将 Y-MMC 用于直接连接中压配网 10 kV 的两侧三相交流系统,拓扑结构简单对称,所需桥臂数为 9(包括 3 个主桥臂和 6 个辅助桥臂),同等情况下所需器件数少于其他主流拓扑,且电压波形和功率特性均表现良好,不存在环流问题。在分析 Y-MMC 拓扑结构和工作原理的基础上,采用同步旋转坐标变换,建立了系统在 $d-q$ 坐标下的动态数学模型;在此基础上对两侧系统采用相应的双闭环控制策略,包括外环电压、功率控制和内环电流控制,概念清晰,控制性能良好。最后在 10 kV 中压配网环境下,对 Y-MMC 变换器系统用 MATLAB/Simulink 搭建了系统仿真模型,进行稳态及动态运行仿真,仿真与理论相符,波形指标满足要求,通过仿真验证了 Y-MMC 作为柔性多状态开关代替传统联络开关,用于中压配网环境下交流系统互联的适用性。

参考文献:

- [1] 王成山,孙充勃,李鹏,等.基于 SNOOP 的配电网运行优化及分析[J].电力系统自动化,2015,39(9):82-87.
- [2] 洪亮,张庚午,刘涌,等.基于柔性分析的智能配电网运行方式优化方法[J].机电信息,2017(15):1-4.
- [3] 高凯,阳岳希,张艳军,等.适用于城市电网的柔性环网控制器拓扑方案研究[J].电网技术,2016,40(1):78-85.
- [4] ERICKSON R W, AL-NASEEM O A. A new family of matrix converters[C]//Proceedings of the 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. Denver, CO: IEEE, 2001: 1515 -

1520.

- [5] BARUSCHKA L, MERTENS A. A new three-phase AC/AC modular multilevel converter with six branches in hexagonal configuration[J]. IEEE Transactions on industry applications, 2013, 49(3): 1400 - 1410.
- [6] HAMASAKI S I, OKAMURA K, TSUJI M. Control of modular multilevel converter based on bridge cells for 3-phase AC/AC converter[C]//2013 International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Busan, Korea: IEEE, 2013: 1532 - 1537.
- [7] KARWATZKI D, BARUSCHKA L, MERTENS A. Survey on the Hexverter topology: a modular multilevel AC/AC converter[C]//9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia). Seoul, Korea: IEEE, 2015: 1075 - 1082.
- [8] 刘勃,孟永庆,白森戈,等.一种新的 Y 型大功率模块化多电平交变流器及其控制策略[J].中国电机工程学报,2017,37(6): 1764 - 1777.
- [9] 李峰,王广柱.模块化多电平矩阵变换器电容电压纹波稳态分析[J].中国电机工程学报,2013,33(24):52-58.
- [10] 蔡永梁,任成林,周竞宇,等.基于 MMC 的柔性直流输电电容电压波动抑制方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(5):48.
- [11] 阳岳希,杨杰,贺之渊,等.基于 MMC 的背靠背柔性直流输电系统控制策略[J].电力系统自动化,2017,41(4):120-124.
- [12] 孟永庆,王健,李磊,等.基于双 dq 坐标变换的 M3C 变换器的数学模型及控制策略研究[J].中国电机工程学报,2016,36(17): 4707.
- [13] 王婷,王广柱,张勋.基于模块化多电平矩阵变换器的电力电子变压器控制策略[J].电工技术学报,2016,31(18):108-115.
- [14] 万家乐.浅析模块化多电平变换器(MMC)若干关键技术[J].电子测试,2017(1):100-101.

(上接第 44 页)

状态,液体在蒸发管壁面的液膜宽度随着穿孔流速和孔径的增加而增加。

2) 利用中心复合实验设计对模拟结果进行数据处理,得到了液膜宽度关于穿孔流速和孔径的关系式。通过方差分析表可以看出各因素对液膜宽度的影响程度为:孔径 > 穿孔流速。同时,也得到了开孔间距关于穿孔流速和孔径的关系式。

3) 无论是在液体分布器布液管的设计中,还是在布液管的数值模拟中,式(2)建立了开孔间距、穿孔流速和孔径三者之间的内在关系,简化了布液管主要结构参数(布液管管径 D 、开孔间距 l 、布液孔孔径 d 和布液管穿孔流速 v),即由 4 个参数简化成 3 个,在一定程度上减少了布液管设计计算中的工作量,具有一定的参考和工程应用价值。

参考文献:

- [1] 郑东光.水平管降膜蒸发器液体分布装置与液体在管内流动模式的研究[D].石家庄:河北工业大学,2008:1-2.
- [2] 侯淳.水平管降膜卧式蒸发器液体分布器结构设计及流量计算[J].企业科技与发展,2012(22):8-10.
- [3] 罗彩霞.排管式液体分布器的设计研究[J].长春理工大学学报(自然科学版),2011,34(3):122-124.
- [4] 赵龙陆,陈晔.影响水平管降膜蒸发因素的实验研究[J].化工机械,2014,41(1):48.
- [5] 张晓红.基于 VOF 法的横管降膜蒸发传热特性的数值分析[D].大连:大连理工大学,2015:14-16.
- [6] 蒋维国.横管降膜流动特性与液膜分布规律的数值模拟研究[D].大连:大连理工大学,2016:16.
- [7] 王海涛,陈晔.水平管降膜蒸发液膜厚度及传热系数研究[J].海洋技术学报,2013,32(4):81-84.
- [8] 赵焯,许松林.降膜蒸发研究进展[J].石油化工设备,2013(6): 54-59.
- [9] 张震,张德聪.实验设计与数据评价[M].广州:华南理工大学出版社,2014:215-222.