

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191558

# 向海岛电网供电的 MMC-HVDC 有源/无源切换控制策略

马文忠<sup>1</sup>, 古丽帕丽·赛力江<sup>2</sup>, 周冠宇<sup>1</sup>, 孙鹏<sup>1</sup>, 董磊<sup>1</sup>

(1. 中国石油大学(华东)新能源学院, 山东 青岛 266580;

2. 国网新疆电力有限公司乌鲁木齐供电公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

**摘要:** 基于模块化多电平换流器的直流输电系统(Modular Multilevel Converter based High-voltage Direct Current, MMC-HVDC)可为海岛电网等重要领域供电, 当海岛电网处于有源和无源网络切换过程中时, 存在有功功率不平衡、交流电压振荡等不稳定问题。因此, 提出一种向海岛电网供电的 MMC-HVDC 有源/无源切换控制策略, 该控制策略对外环功率控制和相角控制进行优化, 消除切换时刻的瞬时有功功率不平衡, 实现海岛电网的平稳切换。最后在 PSCAD/EMTDC 中搭建三相 MMC 仿真模型。仿真结果表明, 在所提出控制策略的作用下, 系统在有源、无源及两者切换时刻皆可正常运行, 验证了所提控制方法的有效性和正确性。

**关键词:** 模块化多电平换流器; 海岛电网; 有源网络; 无源网络; 切换控制

## Active/passive switching control strategy for MMC-HVDC connected to an island power grid

MA Wenzhong<sup>1</sup>, GU LIPALI Sailijiang<sup>2</sup>, ZHOU Guanyu<sup>1</sup>, SUN Peng<sup>1</sup>, DONG Lei<sup>1</sup>

(1. College of New Energy, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd. Urumqi Power Supply Company, Urumqi 830000, China)

**Abstract:** A Modular Multilevel Converter-based High-voltage Direct Current (MMC-HVDC) can provide power to important areas such as island power grids. When island power grids are in the process of active and passive network switching, there are problems of instability such as active power imbalance and AC voltage oscillation. Therefore, an active/passive switching control strategy for an MMC-HVDC connected to an island power grid is proposed. This control strategy is optimized for outer loop power control and phase angle control. These eliminate the instantaneous active power imbalance of the island power grid at the moment of active/passive network switching, and can achieve a smooth switching of the island power grid. Finally, a three-phase MMC simulation model is built in PSCAD/EMTDC. The simulation results show that under the action of the proposed control strategy, the system can operate normally at the time of active, passive and both switching times. The results verify the effectiveness and correctness of the proposed control method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51777216) and Natural Science Foundation of Shandong Province (No. ZR2018MEE040 and No. ZR2019MEE094).

**Key words:** modular multilevel converter; island power grid; active network; passive network; switching control

## 0 引言

基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)的直流输电技术(MMC-HVDC), 具有独立控制有功和无功、开关频率低、损耗小, 拓展性强, 不存在换相失败, 无需交流滤波器等突出优势<sup>[1-5]</sup>。在无源系统供电、海上或偏远地区供电、海上风电场接入电网、海岛供电等领域发挥着越来越重要的作用<sup>[6-9]</sup>。

目前, 针对柔性直流输电系统向海岛等领域供电方面, 有较多文献侧重于分析柔直系统连接有源或无源网络时的动态系统特性和控制方法, 文献[10]建立了 VSC-HVDC 系统的暂态数学模型, 并设计了向无源网络供电时的控制策略。文献[11]提出了一种 VSC-HVDC 功率同步控制器, 在 VSC 连接强交流系统和弱交流系统时均可适用, 但存在无法抑制故障电流的问题。文献[12]提出了基于模型预测控制的 VSC-HVDC 系统整流侧直接功率控制和逆变侧直接交流电压控制策略, 与传统的控制策略相比, 克服了控制器参数整定困难和电流环参数整定对模型依赖度较高的问题, 具有良好的参数鲁棒性

**基金项目:** 国家自然科学基金项目资助(51777216); 山东省自然科学基金项目资助(ZR2018MEE040, ZR2019MEE094)

和动态性能,但计算量较大。文献[13-17]给出了向无源网络供电的 MMC 型 VSC-HVDC 通用的换流系统和受端交流系统的数学模型,建立了无源逆变的内环电流和外环电压的双闭环控制系统。文献[18-20]建立了 MMC 在电网电压不平衡条件下的数学模型,并分析了其内部动态特性,同时提出了在电网电压不平衡条件下 MMC 的无源控制策略。针对当海岛电网处于从有源网络变为无源网络切换过程中的控制方法,现有的研究并不多,文献[21-22]分析了 MMC 在联网状态和孤岛状态间相互转换的过程,并设计了基于本地电气量的 MMC 控制模式切换策略。

综合已有研究分析可发现,针对 MMC-HVDC 系统的控制器设计,以及对于海岛电网处于有源网络或无源网络下的控制策略研究较多,而海岛电网处在有源网络和无源网络切换时刻的控制策略方面,目前较少有文献展开深入的理论研究。

因此,针对上述问题,本文分析了 MMC 在有源和无源网络时的控制策略,以及海岛电网连接 MMC-HVDC 时有源/无源网络的切换过程。设计了一种系统在有源/无源切换时刻的控制策略,并在 PSCAD/EMTDC 仿真平台中进行了验证,结果表明此控制策略可保证系统在切换时刻实现稳定切换。

### 1 MMC 建模

MMC 的拓扑结构如图 1(a)所示,MMC 的各相主电路由上、下两个桥臂组成,每个桥臂各有  $n$  个模块单元,上、下两个桥臂通过桥臂串联电抗器相连,两个桥臂串联电抗器的连接点构成该相桥臂的交流输出端。

子模块单元如图 1(b)所示,子模块包含两个功率管  $T_1$ 、 $T_2$ ,为了保证桥臂电流流通,需反向并联两个开关管  $D_1$ 、 $D_2$ ,储能电容  $C$  与两个功率开关管并联。

图 1 中  $u_{pj}$ 、 $u_{nj}$ 、 $i_{pj}$ 、 $i_{nj}$  ( $j = a, b, c$ , 下同) 分别为上、下桥臂电压和电流,  $i_j$  为交流输出侧相电流,  $u_j$  为交流输出侧相电压,  $u_{sj}$  为并网电压,  $U_{dc}$  为直流侧电压,  $R$ 、 $L$  分别为交流侧电抗器的等效电阻和电感。

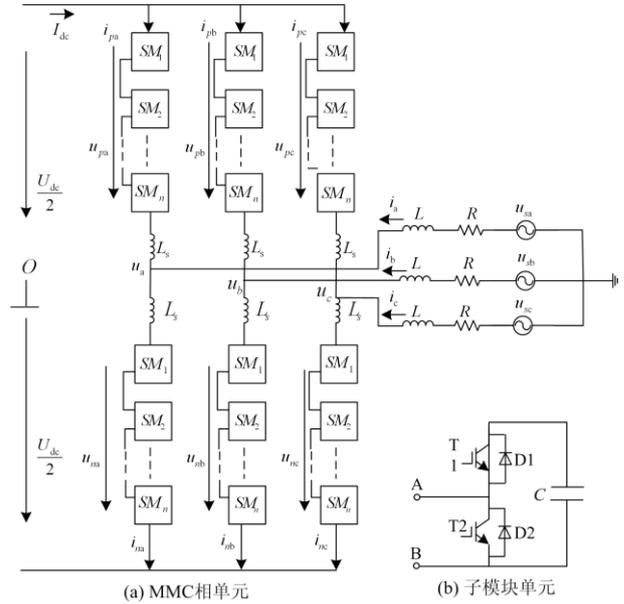


图 1 MMC 拓扑结构

Fig. 1 Topology of MMC system

## 2 向海岛电网供电的 MMC-HVDC 系统

向海岛电网供电的 MMC-HVDC 系统结构图如图 2 所示,主要由送端交流电网、两端换流器、直流输电电路、受端海岛电网组成。

由图 2 可知,系统两端换流器中,一端换流器工作在整流状态,另一端换流器工作在逆变状态,送端交流电网视为无穷大系统,受端海岛电网由静态恒阻抗负荷、动态负荷和发电机组组成。

当发电机处于正常运行状态时,海岛电网此时处于有源网络运行状态,而当发电机故障退出运行或被切断运行时,海岛电网此时由有源网络运行状态切换为无源网络运行状态。

### 2.1 连接有源网络的 MMC 控制器设计

当海岛电网中的发电机处于正常运行状态时,代表海岛电网此时运行在有源网络状态,因此 MMC-HVDC 需要向有源网络进行供电。

连接有源网络的 MMC 控制结构如图 3 所示,主要由外环功率控制环节、内环电流控制环节、锁相环设计、调制模块等构成。

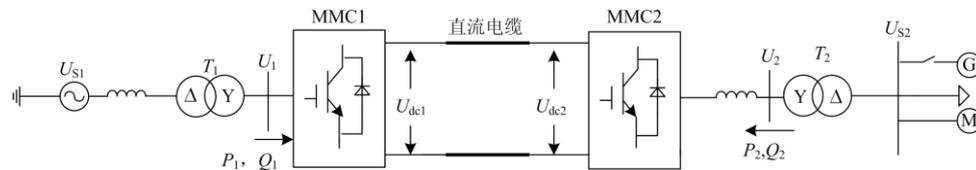


图 2 向海岛电网供电的 MMC-HVDC 系统结构图

Fig. 2 System structure of MMC-HVDC supplying to island power grid

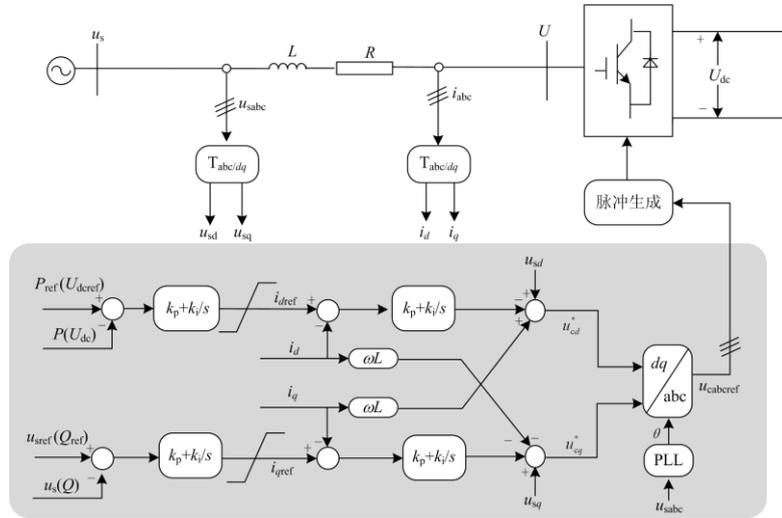


图 3 连接有源网络的 MMC 双闭环矢量控制结构

Fig. 3 MMC double closed loop vector control structure connected to active network

在  $dq$  坐标系下, MMC 数学模型为<sup>[23]</sup>

$$L \frac{di_d}{dt} + Ri_d = u_{sd} - u_{cd} - \omega Li_q \quad (1)$$

$$L \frac{di_q}{dt} + Ri_q = u_{sq} - u_{cq} + \omega Li_d \quad (2)$$

式中:  $R$ 、 $L$  分别为交流侧电抗器的等效电阻和电感;  $u_{sd}$ 、 $u_{sq}$  分别为 MMC 在交流侧三相电压瞬时值的  $dq$  轴分量;  $u_{cd}$ 、 $u_{cq}$  分别为 MMC 在阀侧输出三相电压瞬时值的  $dq$  轴分量;  $i_d$ 、 $i_q$  分别为 MMC 在阀侧输出三相电流瞬时值的  $dq$  轴分量。

引入  $\omega Li_d$ 、 $\omega Li_q$  两个耦合补偿项, 内环电流控制器输入可设计为<sup>[24]</sup>

$$u_{cd}^* = u_{sd} + \omega Li_q - \left[ k_{p1}(i_{dref} - i_d) + k_{i1} \int (i_{dref} - i_d) dt \right] \quad (3)$$

$$u_{cq}^* = u_{sq} + \omega Li_d - \left[ k_{p2}(i_{qref} - i_q) + k_{i2} \int (i_{qref} - i_q) dt \right] \quad (4)$$

式中:  $i_{dref}$  和  $i_{qref}$  分别为  $i_d$ 、 $i_q$  的指令值;  $u_{cd}^*$ 、 $u_{cq}^*$  分别为加入耦合补偿项后阀侧输出三相电压瞬时值的  $dq$  轴分量。

在外环功率控制方面, 整流侧采用定直流电压控制和定无功功率控制, 逆变侧采用定有功功率控制和定交流电压控制。

## 2.2 连接无源网络的 MMC 控制器设计

当海岛电网中的发电机处于故障或被切断状态时, 海岛电网运行在无源网络状态, 此时 MMC-HVDC 需要向无源网络进行供电。

连接无源网络时, MMC 整流侧控制结构与连接有源网络时的控制结构相同, 内环电流控制通过调节控制输入量使状态变量  $i_d$  和  $i_q$  快速跟踪其指令值  $i_d^*$  和  $i_q^*$ 。外环采用直流电压和无功功率控制, 外

环控制根据直流电压指令和无功功率指令计算得到内环电流控制的  $dq$  轴电流指令值  $i_d^*$  和  $i_q^*$ 。

与 MMC 连接有源网络时的控制策略相比, 无源网络逆变侧的控制策略有以下两处区别<sup>[25]</sup>:

1) MMC 连接无源网络时, 无法通过锁相环来获得交流系统的同步相位信息, 因此整流侧和逆变侧的控制器和调制模块所需的相位直接给定为  $\theta = 2\pi f_0 t$ , 其中  $f_0$  为电网额定频率, 以此保证了换流站输出的交流电压频率不变性。

2) MMC 逆变侧与无源网络连接时, 需要实现对无源网络的可靠供电, 并向无源网络供应幅值和频率稳定的交流电压。为了得到较好的电流响应, 需要保留电流内环, 而将交流电压控制作为外环控制, 将功率外环的控制量换成交流电压  $dq$  轴分量。为了保证交流电压的幅值和频率不变, 需通过控制  $d$  轴电流参考值  $i_{dref}$  使  $u_{sd} = u_s$ , 通过控制  $q$  轴电流参考值  $i_{qref}$  使  $u_{sq} = 0$ 。

因此, 可得到如图 4 所示的连接无源网络的 MMC 逆变侧双闭环矢量控制器。

## 3 向海岛电网供电的 MMC-HVDC 有源/无源网络切换控制策略

当海岛电网中发电机因故障或被断开后, 海岛电网将会由有源网络变成无源网络, 此时逆变换流站的控制方式将会发生变化, 若控制方式不变, 海岛电网由于发电机的切除会导致有功功率的不平衡, 间接导致电网频率的振荡, 并引起交流电压大幅度振荡, 从而使系统直流电压和有功功率振荡, 导致系统处于不稳定运行状态。

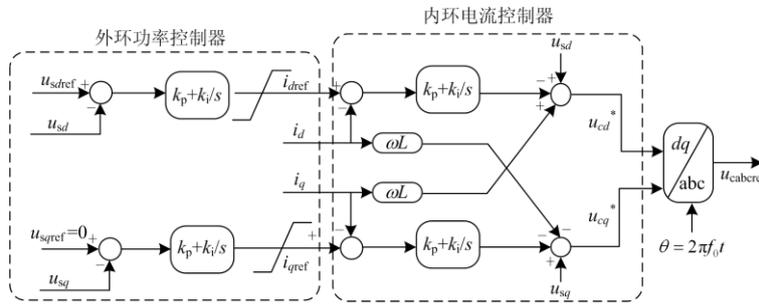


图 4 连接无源网络的 MMC 逆变侧控制结构

Fig. 4 MMC contravariant side control structure connected to passive network

从向有源网络供电和向无源网络供电的控制方式上分析，可以看出在有源状态下，逆变侧采用定有功功率和交流电压控制；在无源状态下，逆变侧采用定交流电压控制。因为在切换前后交流电压保持不变，所以切换过程中各电气量的波动主要由有功功率和电网相角的不一致引起，因此可以从以下两个方面来设计切换策略。

1) 相角控制

由于在向无源网络供电时，整流侧和逆变侧的控制器和调制模块所需的相位均为人为直接给定，为了使换流站该处的电网相角在切换前后保持一致，因此需要在切换至无源网络控制时，将 dq 变换旋转角设置为  $\theta = 2\pi f_0 t + \delta_s$ ，其中  $f_0$  为电网额定频率 50 Hz， $\delta_s$  为切换时刻对应的电网相角。

2) 外环功率控制

由于海岛电网变为无源网络后，为了弥补发电机切除后的电网功率缺额，换流站传输的有功功率将提高。在切换过程中，由于功率变化对系统稳定影响较大，所以在切换时刻采用有功控制优先策略，即在切换过程中，外环控制先由有功功率控制器工作，有功功率的指令值达到全网最大有功负荷之后再采用定交流电压的控制器。

因此，可得到如图 5 所示的有源/无源切换控制策略流程图。

该流程图总共分为以下几步：

Step1 首先需要确保海岛电网工作在有源网络状态，默认其为初始状态，即内环采用快速电流控制，外环控制环节中整流侧采用定直流电压控制和定无功功率控制，逆变侧采用定有功功率控制和定交流电压控制，利用锁相环锁定电网相位。

Step2 在 Step1 的基础上，判断海岛电网中发电系统是否处于正常运行状态，若发电系统为正常运行状态，那么海岛电网将继续保持在有源网络状态运行；若发电系统遇故障退出运行，海岛电网则会因此产生有功功率缺额，出现电网频率振荡、动态

负荷变化等现象，使系统处于不稳定状态。

Step3 在 Step2 的基础上，为弥补发电系统退出运行后的有功功率缺额，在切换过程中优先采用外环功率优化控制策略，之后再采用定交流电压的控制器。

Step4 在 Step3 的基础上，为了使 MMC 换流站的电网相角在切换前后保持一致，因此在海岛电网由有源网络切换至无源网络时，dq 变换旋转角设定为  $\theta = 2\pi f_0 t + \delta_s$ ， $f_0$  为电网额定频率 50 Hz， $\delta_s$  为切换时刻锁定的电网相角。

Step5 在 Step4 结束后，切换时刻各电气量波动达到最小，系统逐渐恢复稳定，海岛电网顺利切换至无源网络状态，即内环保留快速电流控制，外环控制环节中整流侧采用定直流电压和定无功功率控制，逆变侧采用定交流电压控制，由于当海岛电网处于无源网络时，无法通过锁相环来获得交流系统的同步相位信息，因此 MMC 整流侧和逆变侧的控制器和调制模块所需的相位直接给定为  $\theta = 2\pi f_0 t$ 。

结合以上两个切换策略和流程图，将图 3—图 5 的控制系统进行结合，可得到如图 6 所示的海岛电网在有源/无源切换时刻的控制器设计框图。其中，I 为外环功率控制器，II 为内环电流控制器，III 为锁相环控制。

图 6 中， $INV\_U_j$ 、 $INV\_U_{j\_GD}$  ( $j = d, q$ ) 分别代表海岛电网在无源网络状态时 MMC 逆变侧定交流电压的 dq 轴分量和指令值， $I_{REFj\_GD}$  ( $j = d, q$ ) 代表海岛电网在无源网络状态时 dq 轴电流指令值， $INV\_P\_ORD$ 、 $INV\_Q\_ORD$  分别代表海岛电网在有源网络时刻定有功功率和定无功功率的指令值， $INV\_I_{jref}$  ( $j = d, q$ ) 代表海岛电网在有源网络状态时 dq 轴电流指令值。

如图 6，开关 K1—K3 是实现控制的切换，其中，开关 K1 实现了逆变侧的解锁控制指令，待逆变侧成功解锁后，K1 将调至位置 A，反之则调至位置 B。开关 K2 实现了有源/无源切换控制指令，当

海岛电网处于有源网络状态时,  $K_2$  将调至位置 B, 此时, 可将  $INV\_I_{dref}$ 、 $INV\_I_{qref}$  作为内环电流控制的输入指令值; 当海岛电网处于无源网络状态时,  $K_2$  将调至 A, 此时, 可将  $I_{REFD\_GD}$ 、 $I_{REFQ\_GD}$  作为内环电流控制的输入指令值。开关  $K_3$  实现了锁相环的控制指令, 当海岛处于有源网络状态时,  $K_3$  将调至位置 B, 反之, 当海岛电网处于无源网络状态时,

$K_3$  将接收到切换时刻的电网相角并调至位置 A。

综上, 当海岛电网处于有源网络状态时, 有源侧的开关  $K_1$  位于位置 A,  $K_2$ 、 $K_3$  均位于位置 B; 当海岛电网内部的发电机遇故障退出运行或被切断时, 开关  $K_2$  将调至位置 A, 此时海岛电网由有源网络状态切换至无源网络状态, 无源侧的开关  $K_1$ 、 $K_3$  均调至位置 A。

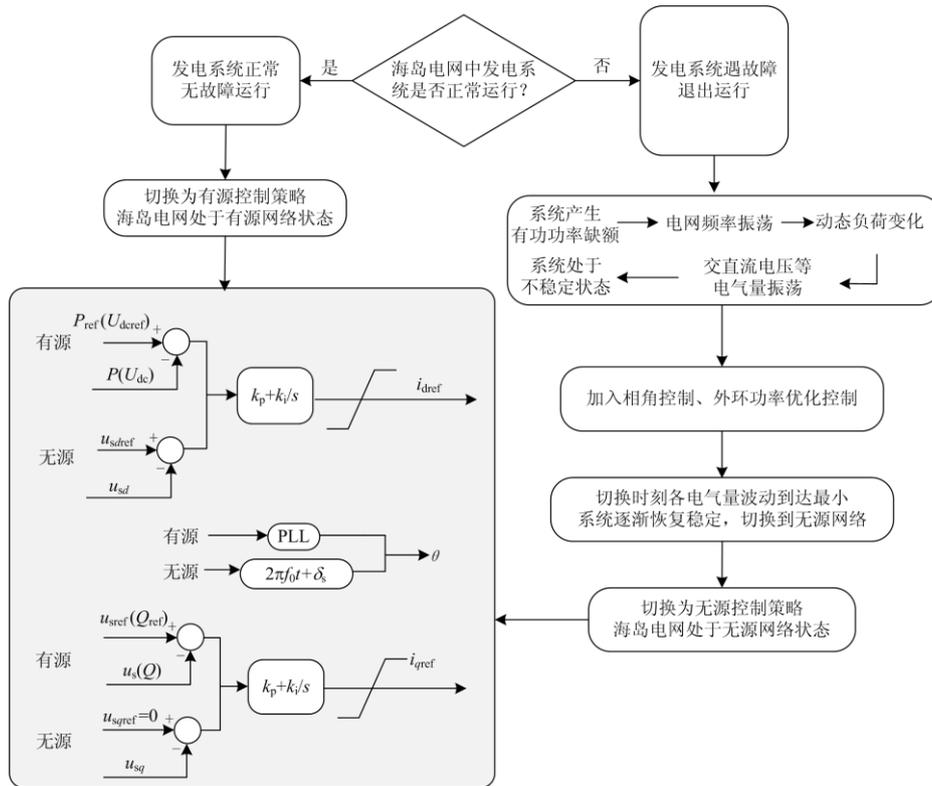


图 5 有源/无源切换控制策略流程图

Fig. 5 Flow chart of active/passive switching control

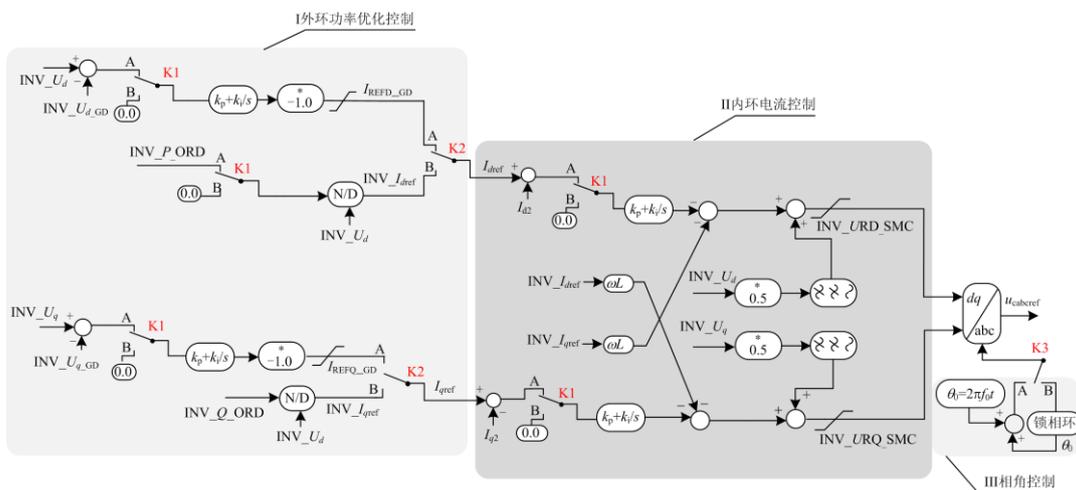


图 6 有源/无源切换控制策略的结构框图

Fig. 6 Structural diagram of active/passive switching control strategy

## 4 仿真验证

### 4.1 仿真模型参数

为了验证本文所提控制策略的正确性和有效性,在 PSCAD/EMTDC 中搭建了拓扑结构如图 2 所示的三相二十一电平 MMC-HVDC 仿真模型,系统主要仿真参数如表 1 所示。

表 1 系统仿真模型参数

Table 1 Parameters of simulated system

参数	MMC1	MMC2
MMC 额定容量/MVA	10	10
额定直流电压/kV	±10	±10
交流系统额定频率/Hz	50	50
变压器额定容量	15	15
变压器接线方式	Y <sub>n</sub> /Δ	Y <sub>n</sub> /Δ
网侧额定电压/kV	10	10
阀侧额定电压/kV	20	20
换流变压器漏抗/p.u.	0.1	0.1
桥臂电感/mH	8.2	8.2
桥臂子模块数目 <i>N</i>	20	20
子模块电容/μF	6 000	6 000

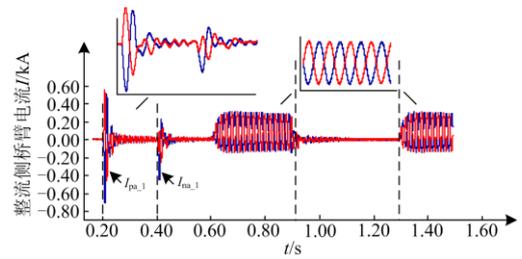
两端 MMC 均采用基于子模块电容电压排序的电压均衡策略和环流抑制控制策略,调制策略采用最近电平逼近法。当海岛电网处在有源网络状态时,MMC1 采用定直流电压和定无功功率控制,其初始指令值分别为 1.0 kV、0, MMC2 采用定有功功率和定无功功率控制。当海岛电网处在无源网络状态时,MMC1 依然采用定直流电压控制和定无功功率控制, MMC2 采用定交流电压控制。

仿真中设置系统在 0.2 s 时对整流侧进行充电,0.21 s 整流侧完成解锁;0.4 s 时对逆变侧进行充电,0.41s 逆变侧完成解锁;在 0.6 s 时对逆变侧突加有功功率 5 MW;切换时刻分别设置在 0.9 s 和 1.3 s,0.9 s 时海岛电网由有源转为无源状态,开关 K2 由位置 B 调至位置 A,1.3 s 时海岛电网由无源转为有源状态,开关 K2 由位置 A 调至位置 B。

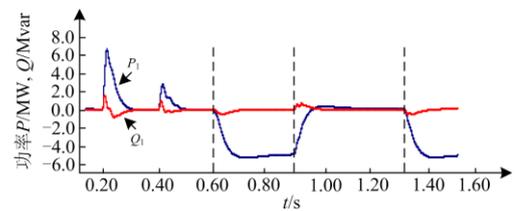
### 4.2 切换时刻 MMC 整流侧仿真分析

海岛电网切换时刻 MMC 整流侧的仿真波形图如图 7 所示(以整流侧 A 相为例)。通过图 7(a)可以看出整流侧在 0.2 s 时上下桥臂电流增长,持续 0.1 s 后整流侧解锁。0.9 s 开关 K2 切换至位置 A,海岛电网转入无源状态,上下桥臂电流均趋近于 0,直到 1.3 s 开关 K2 切换至位置 B 开始有源状态运行后才有了电流变化并逐渐趋于稳态。图 7(b)中,由于逆变侧有功功率的增加,导致整流侧有功功率和无

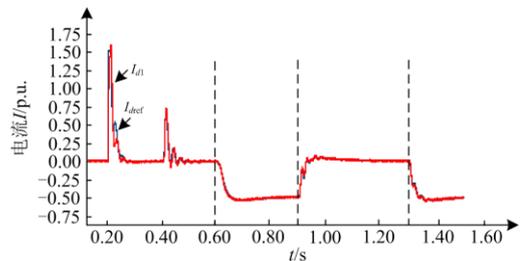
功率均将下降。图 7(c)、图 7(d)是整流侧内环 *dq* 轴电流和参考值,整流侧无功功率指令值为 0,  $I_{qref}$  保持为 0 不变,稳态下,内环控制的稳态误差接近于 0。



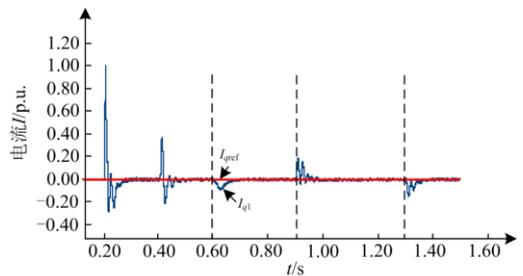
(a) 整流侧桥臂电流



(b) 整流侧有功功率、无功功率



(c) 整流侧内环 *d* 轴电流和参考值



(d) 整流侧内环 *q* 轴电流和参考值

图 7 切换时刻 MMC 整流侧仿真波形

Fig. 7 Simulated waveforms of rectification side at switching time

### 4.3 切换时刻 MMC 逆变侧仿真分析

逆变侧桥臂电流如图 8(a)所示,可以看出逆变侧在 0.4 s 时上下桥臂电流增长,持续 0.1 s 后逆变侧解锁,0.6 s 逆变侧突加有功功率 5 MW 后桥臂电流开始保持在 ±0.2 kA 之间,一直持续到切换为无源网络为止。

逆变侧 *dq* 轴电流和参考值如图 8(b)、图 8(c)所

示, 逆变侧  $d$  轴电流  $I_{d2}$  和其参考值  $INV\_I_{dref}$  在切换时刻  $0.9\text{ s}$  之前稳态误差均接近于  $0$ ,  $0.9\text{ s}$  后  $d$  轴参考电流小幅度增加, 此时的参考值  $INV\_I_{dref}$  对应海岛电网在无源时刻的逆变侧  $d$  轴电流, 由于切换至无源网络, 所以此电流持续  $0.1\text{ s}$  后逐渐趋近于  $0$ , 一直持续到  $1.3\text{ s}$  为止。  $q$  轴电流和其参考值同理。

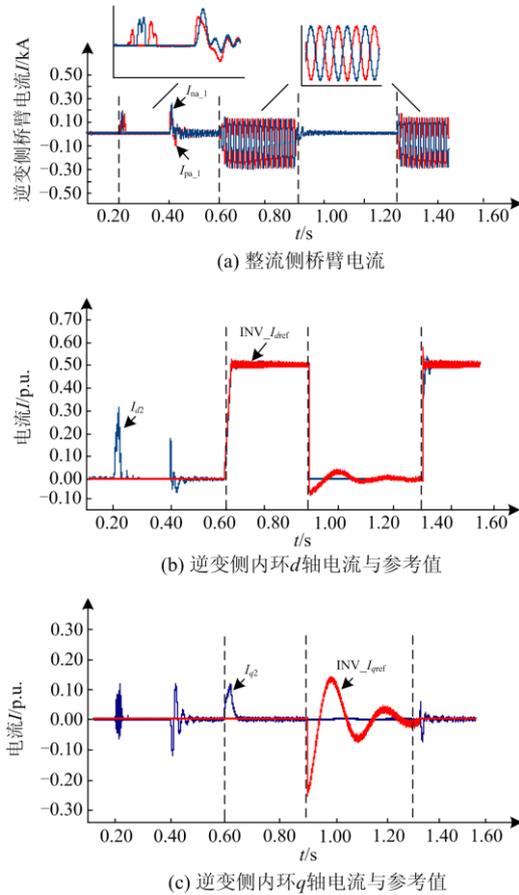


图 8 切换时刻 MMC 逆变侧仿真波形

Fig. 8 Simulated waveforms of inverter side at switching time

#### 4.4 海岛电网切换为无源网络时的仿真分析

系统在有源网络状态下稳定运行至  $0.9\text{ s}$ , 当海岛电网内发电机退出运行, 此时海岛电网为有源转无源切换时刻, 开关  $K1$ 、 $K2$ 、 $K3$  调至位置 A, 切换时刻波形如图 9 所示。

逆变侧有功功率和无功功率如图 9(a)所示,  $0.6\text{ s}$  逆变侧有功功率增加  $5\text{ MW}$ , 有功和无功功率均增加。  $0.9\text{ s}$  因发电机退出运行, 有功和无功均降至  $0$ ,  $1.3\text{ s}$  后系统很快调整至稳定的有源网络状态。 逆变侧交流电流、电压如图 9(b)、图 9(c)所示, 在  $0.9\text{ s}$  切换时刻逆变侧交流电压小幅度增加, 由于切换时刻有功功率的快速恢复, 交流侧电压、电流波动范围很小, 均可维持较高水平。

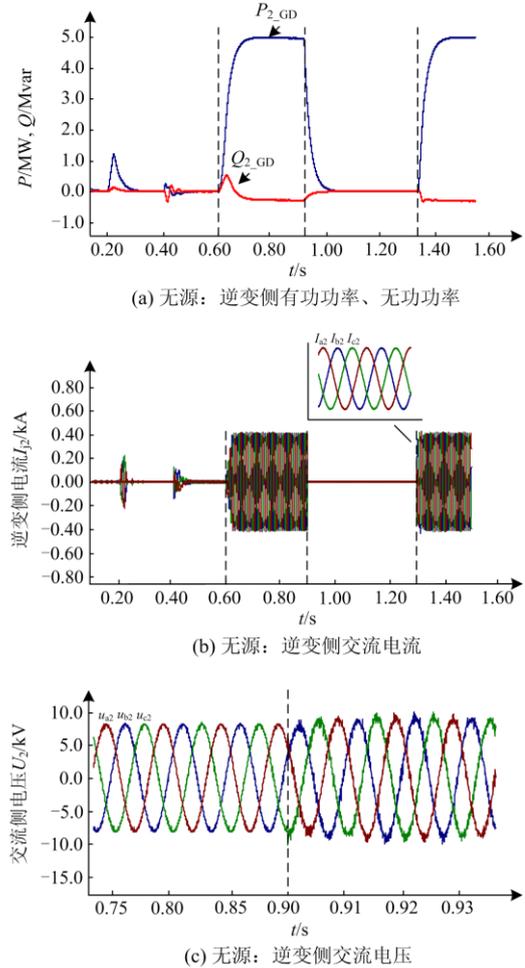


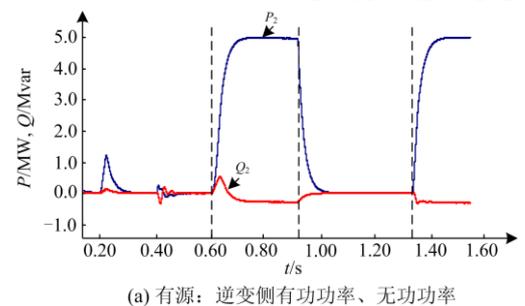
图 9 海岛电网切换为无源网络时的仿真波形

Fig. 9 Simulated waveforms of isolated power grid switched to passive network

#### 4.5 海岛电网切换为有源网络时的仿真分析

系统在有源网络状态下稳定运行至  $1.3\text{ s}$ , 开关  $K1$  调至位置 A,  $K2$ 、 $K3$  调至位置 B, 此时海岛电网为无源转有源切换时刻, 切换时刻波形如图 10 所示。

逆变侧有功功率和无功功率如图 10(a)所示, 可以看出在  $1.3\text{ s}$  后系统很快调整至稳定的有源网络状态。 逆变侧交流电流、电压如图 10(b)、图 10(c)所示, 由于有功功率的快速恢复, 切换时刻交流侧电压、电流波动范围很小, 能够更快达到稳定。



(a) 有源: 逆变侧有功功率、无功功率

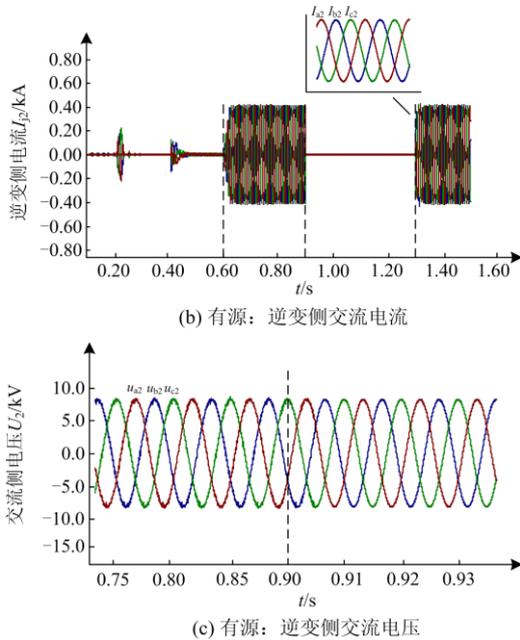


图 10 海岛电网切换为有源网络时的仿真波形

Fig. 10 Simulated waveforms of isolated power grid switched to active network

## 5 结论

本文以向海岛电网供电的 MMC-HVDC 系统为研究对象,设计一种连接 MMC-HVDC 的海岛电网有源/无源切换控制策略,得出了以下结论:

1) 通过分析 MMC-HVDC 向有源网络供电和无源网络供电的控制策略,可以发现两者的主要区别在于以下两点:一是向无源网络供电时,无法同向有源网络供电时一样通过锁相环获得同步相位信息,因此整流侧和逆变侧的控制器和调制模块的相位需直接给定,以此来保证输出的交流电压频率不变性;二是有源网络和无源网络时采用的外环控制器不同,无源网络时需要控制  $u_{sd} = u_s$ 、 $u_{sq} = 0$  以保持  $u_s$  的幅值和与  $d$  轴夹角不变。

2) 通过分析海岛电网有源/无源切换过程可知,切换前后变化的主要是有功功率和电网相角,因此本文提出相角控制和外环功率优化两个控制策略,两种策略均可使系统在有源/无源运行状态之间稳定切换。

3) 通过 PSCAD/EMTDC 建立 MMC-HVDC 向海岛电网供电的仿真模型,表明本文所提切换控制策略具有良好的动态性能、抗扰动能力,切换时刻各电气量波动较小,可实现平滑切换。

## 参考文献

[1] 徐进,金逸,胡从川,等.适用于海上风电并网的多端

柔性直流系统自适应下垂控制研究[J].电力系统保护与控制,2018,46(4):78-85.

XU Jin, JIN Yi, HU Congchuan, et al. DC voltage adaptive droop control of multi-terminal VSC-HVDC system for offshore wind farms integration[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 78-85.

[2] PEREZ M A, BERNET S, RODRIGUEZ J, et al. Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 4-17.

[3] 付艳,黄金海,吴庆范,等.基于 MMC 多端柔性直流输电保护关键技术研究[J].电力系统保护与控制,2016,44(18):133-139.

FU Yan, HUANG Jinhai, WU Qingfan, et al. Key technologies research based on multi-terminal MMC-HVDC protection[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 133-139.

[4] LI Bin, HE Jiawei, LI Ye, et al. A review of the protection for the multi-terminal VSC-HVDC grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(3): 239-249. DOI: 10.1186/s41601-019-0136-2.

[5] 徐殿国,李彬彬,周少泽.模块化多电平高压变频技术研究综述[J].电工技术学报,2017,32(20):104-116.

XU Dianguo, LI Binbin, ZHOU Shaoze. Overview of the modular multilevel converter based high voltage motor drive[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(20): 104-116.

[6] SONG Qiang, LIU Wenhua, LI Xiaoqian, et al. A steady-state analysis method for a modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(8): 3702-3713.

[7] 刘普,王跃,雷万钧,等.模块化多电平变流器稳态运行特性分析[J].电工技术学报,2015,30(11):90-99.

LIU Pu, WANG Yue, LEI Wanjun, et al. Analysis of steady-state operating characteristics for modular multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 90-99.

[8] YANG Yanchen, MA Shicong, LI Yingbiao. Analysis and control strategy of unbalanced power in MMC-HVDC grid[J]. The Journal of Engineering, 2017(13): 2211-2214.

[9] DEBNATH S, QIN Jiangchao, 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.

[10] 陈海荣,徐政.向无源网络供电的 VSC-HVDC 系统控制器设计[J].中国电机工程学报,2006,26(23):42-48.

CHEN Hairong, XU Zheng. Control design for VSC-HVDC supplying passive network[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(23): 42-48.

- [11] ZHANG Lidong, HARNEFORS L, NEE H P. modelling and control of VSC-HVDC links connected to island systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 783-793.
- [12] 梁莹玉, 张涛, 刘建政, 等. 向无源网络供电的 VSC-HVDC 模型预测控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(11): 78-89.  
LIANG Yingyu, ZHANG Tao, LIU Jianzheng, et al. model predictive control for VSC-HVDC supplying passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(11): 78-89.
- [13] 王卫安, 桂卫华, 马雅青, 等. 向无源网络供电的模块化多电平换流器型高压直流输电系统控制器设计[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 751-761.  
WANG Wei'an, GUI Weihua, MA Yaqing, et al. Control design for MMC-HVDC system connected to passive network[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 751-761.
- [14] 管敏渊, 徐政. 向无源网络供电的 MMC 型直流输电系统建模与控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 255-263.  
GUAN Minyuan, XU Zheng. Modeling and control of modular multilevel converter based VSC-HVDC system connected to passive networks[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 255-263.
- [15] 蔡新红, 赵成勇, 庞辉, 等. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 系统控制与保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(3): 405-414.  
CAI Xinhong, ZHAO Chengyong, PANG Hui, et al. Control and protection strategies for MMC-HVDC supplying passive networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(3): 405-414.
- [16] 梁莹玉, 张涛, 刘建政, 等. 向无源网络供电的 MMC-HVDC 逆变器高性能控制策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 119-125.  
LIANG Yingyu, ZHANG Tao, LIU Jianzheng, et al. High performance control strategy for inverter station of MMC-HVDC connected to passive network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 119-125.
- [17] ANUDEEP B, NAYAK P K. A passive islanding detection technique for distributed generations[C] // 2017 7th International Conference on Power Systems (ICPS), December 21-23, 2017, Pune, India.
- [18] 陆地, 李玉, 张虎, 等. 不平衡孤岛负荷供电需求下 MMC 换流器控制策略[J]. 南方电网技术, 2018, 12(2): 20-26.  
LU Di, LI Yu, ZHANG Hu, et al. Control strategy of MMC convertor under the demand of unbalanced island load power supplies[J]. Southern Power System Technology, 2018, 12(2): 20-26.
- [19] 程启明, 孙伟莎, 程尹曼, 等. 电网电压不平衡下 MMC 的无源控制策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(4): 78-85.  
CHENG Qiming, SUN Weisha, CHENG Yinman, et al. Passive control strategy of MMC under unbalanced grid voltage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(4): 78-85.
- [20] ZHANG Huaitian, WICKRAMASINGHE H R, LI Jinke, et al. Modular multilevel converter operation in passive networks under unbalanced loads[C] // 2019 IEEE PES GTD Grand International Conference and Exposition Asia (GTD Asia), March 19-23, 2019, Bangkok, Thailand.
- [21] 刘昇, 徐政, 唐庚, 等. MMC-HVDC 联网及孤岛运行状态转换策略[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(9): 2152-2161.  
LIU Sheng, XU Zheng, TANG Geng, et al. Study on MMC-HVDC switching scheme between grid-connected and passive islanding mode[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(9): 2152-2161.
- [22] 梅念, 苑宾, 李探, 等. 接入孤岛新能源电场的双极柔直流换流站控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3575-3582.  
MEI Nian, YUAN Bin, LI Tan, et al. Study on control strategy of bipolar VSC station connected to islanded renewable power plant[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3575-3582.
- [23] 姚为正, 邓祥纯, 易映萍, 等. 基于 dq0 同步坐标的柔性直流输电控制策略及仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(22): 71-76.  
YAO Weizheng, DENG Xiangchun, YI Yingping, et al. Research on modeling and simulation of VSC-HVDC based on dq0 synchronous coordinate[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(22): 71-76.
- [24] HARNEFORS L, ANTONOPOULOS A, NORRGA S, et al. Dynamic analysis of modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2526-2537.
- [25] 徐政, 肖晃庆. 柔性直流输电系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2017: 130-133.

收稿日期: 2019-12-18; 修回日期: 2020-02-09

作者简介:

马文忠(1968—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 研究方向为电力电子技术与智能电网技术等; E-mail: 501267351@qq.com

古丽帕丽·赛力江(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为基于模块化多电平换流器的直流输电技术控制。E-mail: career\_pary@163.com

(编辑 周金梅)