

# 基于模块化多电平变换器的高压直流输电 故障特性与控制保护

常 非<sup>1</sup>, 王 一<sup>2</sup>, 王一振<sup>2</sup>, 许树楷<sup>3</sup>

(1. 北京交通大学电气工程学院, 北京 100044; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084;  
3. 南方电网科学研究院, 广州 510080)

**摘 要:** 风电并网基于模块化多电平变换器的高压直流输电(MMC-HVDC)交流电网侧发生短路故障, 故障点交流电压的降低会使受端系统传输有功功率的能力下降, 而风场侧功率传输基本不受影响, 送端和受端有功功率出现差额, 直流系统电压将持续上升, 威胁系统安全。此外, 如果 MMC 中部分子模块发生故障将导致换流器不能正常工作。为此, 首先提出了可在直流侧并联安装采用统一控制的分散式小型卸荷负载来消耗直流系统无法消除的功率差额, 从而维持直流系统电压的恒定; 其次研究分析了换流器子模块故障特性, 并提出了一种换流器子模块故障冗余保护策略。基于 PSCAD/EMTDC 仿真验证, 通过将多余的能量消耗在分散式小型卸荷负载上, 有效地抑制了直流过电压, 保证整个柔性直流输电系统在故障期间短时运行, 最大限度地保持功率的传输; 采用子模块冗余保护策略可使换流器具有一定的故障容错能力, 不因一个或少数几个子模块的故障影响整个装置的运行, 提高了系统可靠性。

**关键词:** 柔性直流输电; 模块化多电平变换器; 风电并网; 卸荷负载; 故障特性; 控制保护

## Faults Feature Analysis and Control Protection Strategies of Modular Multilevel Converter Based High Voltage Direct Current

CHANG Fei<sup>1</sup>, WANG Yi<sup>2</sup>, WANG Yizhen<sup>2</sup>, XU Shukai<sup>3</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 3. EPRI of China Southern Power Grid, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** Short circuit faults usually occur in AC grid side of modular multilevel converter based high voltage direct current (MMC-HVDC). AC voltage of fault points will reduce and lower the active power transmission capacity of the end-terminal system, the power transmission of the wind farm-side substantially remains unaffected, the active power difference occurs between the sending and the receiving terminals, and the DC system voltage will continue to rise. In addition, if part of the sub-module failure occurs, the converter will not work. Therefore, we first put forward that the small and distributed unloading load which utilized the uniform control in DC side was installed in parallel to consume power difference that MMC-HVDC could not be eliminated in order to maintain a constant voltage in DC side. Secondly, we also analyzed the fault characteristics of the sub-module, and presented a control and protection strategy. Based on PSCAD/EMTDC simulation, by consuming the excess energy in decentralized small unloading load, DC overvoltage can be effectively suppressed, the flexible HVDC transmission system short-time operation can be ensured during the fault, and the maximum power transmission can be maintained; the sub-module redundancy protection strategy can improve the fault tolerant ability of the converter, does not affect the operation of the entire device due to the failure of one or a few sub-module, to improve the reliability of the system.

**Key words:** flexible HVDC; modular multilevel converter(MMC); wind power grid; unloading load; faults feature; control protection

## 0 引言

模块化多电平变换器(modular multilevel con-

verter, MMC)是 R. Marquardt 于 2001 年提出的新型电压源换流器拓扑结构<sup>[1]</sup>, 凭借其模块化、低谐波含量、低损耗等优势受到广泛关注, 目前在国内已投运的基于模块化多电平变换器的高压直流输电(modular multilevel converter based high voltage di-

基金资助项目: 中央高校基本科研业务费专项资金(2015YJS162).  
Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities (2015YJS162).

rect current, MMC-HVDC)工程有<sup>[2]</sup>: 上海南汇风电场示范工程; 南澳三端柔性直流输电工程, 该工程是世界首个投运的多端柔直工程; 浙江舟山五端柔性直流输电工程, 该工程是世界上端数最多的柔直工程; 此外, 正在建设中的中国大连双端 MMC-HVDC 工程, 额定容量 1 000 MW, 为世界上容量最大的柔直工程。

目前国内外关于 MMC-HVDC 的研究主要集中在稳态控制方面, 包括数学模型的建立、系统控制、调制策略、电容预充电、电容电压平衡和环流抑制策略等方面, 并取得了一系列的研究成果。MMC-HVDC 故障暂态方面, 文献[3-5]研究了 MMC-HVDC 直流侧故障特性和控制保护策略, 文献[6-8]在交流侧电压发生不对称故障时, 基于不同控制理论设计了系统分序电流控制器。通过设计分序电流控制器可以保证交流系统故障时系统三相电流仍然保持对称, 抑制了系统交流负序分量, 维持换流器安全运行不脱网。但故障点交流电压的降低, 会使系统传输有功功率的能力下降, 而风场侧功率传输基本不受影响, 使送端和受端有功功率出现不平衡, 当有功功率下降幅度超过定直流电压控制换流站的控制能力时, 直流电压将会持续升高, 威胁各器件的绝缘。而且直流电压若不稳定, 会影响到风场侧换流站的性能, 故障通过直流电压进行传播<sup>[9-10]</sup>。为尽可能多地传输有功功率, 最大限度地维持输电系统能量的守恒, 维持直流系统电压恒定, 使柔性直流输电系统能够穿越受端交流电网的故障, 文献[9-12]研究了在直流侧并联安装卸荷负载, 即受 IGBT 控制的电阻器, 通过卸荷负载消耗直流输电系统无法消除的功率差额, 从而维持直流系统电压恒定。本文在此基础上提出采用统一控制的分散式小型卸荷负载, 这样不但可以减小卸荷负载的设计和建造难度, 并且可以提高卸荷负载的可靠性; 此外, 本文还研究分析了换流器子模块的故障特性, 并提出了一种故障冗余保护策略。

## 1 多端柔性直流输电系统的故障特性与控制保护

本章以两送端、单受端的三端柔性直流输电系统为研究对象, 系统结构如图 1 所示, 系统仿真参数如表 1 所示。

### 1.1 卸荷负载及其控制

交流电网不对称故障点对应图 1 中的 1 点。交

表 1 系统仿真参数

Table 1 Simulation parameters of MMC-HVDC

参数	有名值
交流电网额定容量/MVA	300
风场 1 额定容量/MVA	100
风场 2 额定容量/MVA	200
换流站 1 变压器变比(Y/Δ)	220 kV/150 kV
换流站 2 变压器变比(Y/Δ)	110 kV/150 kV
换流站 3 变压器变比(Y/Δ)	110 kV/150 kV
直流母线电压/kV	±150
桥臂子模块个数 $N$	4
换流站 1 控制方式	直流电压、无功功率控制
换流站 2 控制方式	定交流电压控制
换流站 3 控制方式	定交流电压控制
调制策略	载波移相
电容均压策略	电容电压排序

流电网侧发生故障, 由于风场侧功率不受直流输电系统控制, 且功率调节的时间常数很大, 因此在交流故障的短暂过程中, 可以认为风场持续地向输电系统注入有功功率。而故障下交流系统电压跌落, 为传送等量的有功功率, 电网侧换流站在定直流电压控制环的作用下, 会增大输出正序电流。当输出电流达到限幅值后, 输出的有功功率达到极限, 若此时仍存在输入、输出功率的差额, 则控制器的调节作用已经不能消除这一功率差额, 直流系统电压将持续上升。

为防止直流侧过电压, 直流侧可以并联安装卸荷负载, 即受 IGBT 控制的电阻器, 电路如图 2 所示, 其中  $R$  为电阻。触发 IGBT 导通时, 卸荷负载开始消耗能量; 令 IGBT 工作在 PWM 模式, 则可定量地控制卸荷负载上消耗的能量。通过卸荷负载消耗直流输电系统无法消除的功率差额, 从而维持直流系统电压恒定。

卸荷负载工作原理为<sup>[9-12]</sup>: 在检测到直流电压上升超过允许值后, 测量输电系统输入功率  $P_{\text{gen}}$  和输出功率  $P_{\text{out}}$ , 需要对  $P_{\text{gen}}$  和  $P_{\text{out}}$  进行低通滤波, 消除负序分量带来的二倍频波动。根据功率的差额计算 IGBT 导通的占空比  $D$ , 如式(1), 其中  $U_{\text{dc}}^*$  为直流电压参考值,  $U_{\text{dc}}$  为直流电压实际采样值。控制框图如图 3 所示。

$$D = \frac{\sqrt{(P_{\text{gen}} - P_{\text{out}}) \cdot R}}{U_{\text{dc}}^*} \quad (1)$$

文中提出采用统一控制的分散式小型卸荷负载, 即(1)安装位置分散, 分别选在风场侧换流站 MMC2 和 MMC3 的直流出口处, 而不是仅在 MMC1

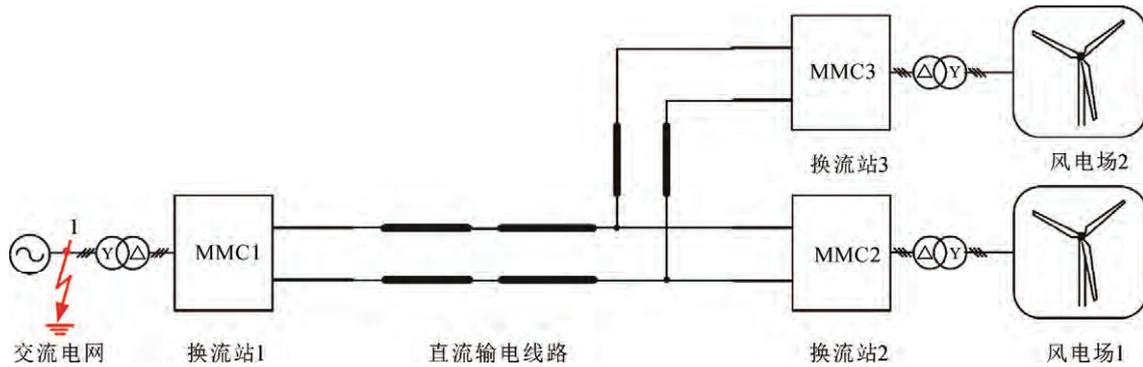


图1 三端 MMC-HVDC 系统结构图

Fig.1 System structure of three-terminal MMC-HVDC

的直流出口处；(2)装置容量分散，选用多台容量较小的卸荷负载，分别与风场侧换流站的容量成正比，而不是仅采用一台与 MMC1 相匹配的大型卸荷负载。这样不但减小了卸荷负载的设计和建造难度，并且提高了卸荷负载的可靠性；(3)采用一套控制器，进行统一控制。设测量到的第  $i$  个风电场输入功率为  $P_{gen\_i}(i=1, 2)$ 和输出功率为  $P_{out}$ 。按照第  $i$  个风电场额定功率  $P_{N\_i}(i=1, 2)$ 的比例来分配功率的差额，分别计算第  $i$  个风电场卸荷负载的 IGBT 导通的占空比  $D_i(i=1, 2)$ ，如式(2)，其中， $R_i(i=1, 2)$ 为第  $i$  个风电场换流站的卸荷负载。控制框图见图 4。

$$D_i = \frac{\sqrt{\left(\sum_{i=1}^2 P_{gen\_i} - P_{out}\right) \cdot \frac{P_{N\_i}}{\sum_{i=1}^2 P_{N\_i}} \cdot R_i}}{U_{dc}^*} \quad (2)$$

1.2 仿真验证

以交流电网最为常见的单相接地短路故障为例，按照上述方法进行控制后的仿真波形如图 5 所示。仿真系统的结构如图 1 所示，仿真参数详见表 1。稳态运行时，风场 1 和风场 2 分别向柔直系统输入 160 MW/10 MVA(有功/无功)和 80 MW/20 MVA(有功/无功)的功率。MMC2 配置卸荷负载 1，阻值为 900 Ω，最大能够卸载 100 MW 的功率；MMC3 配置卸荷负载 2，阻值为 1 800 Ω，最大能够卸载 50 MW 的功率；两台卸荷负载的触发阈值均设为直流电压参考值的 1.05 倍。在 1.5 s 时 A 相接地短路故障，可以看出交流电网电压中出现不对称分量(如图 5(a)，其中  $u_{ab1}$ 、 $u_{bc1}$ 、 $u_{ca1}$  为 MMC1 交流线电压)，由于短路故障的发生，MMC1 传输的有功功率下降为 120 MW 左右(如图 5(b)，其中  $P_1$ 、 $Q_1$  为 MMC1 传输的有功、无功功率)，而两个风场

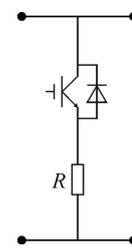


图2 卸荷负载电路图

Fig.2 Circuit diagram of unloading load

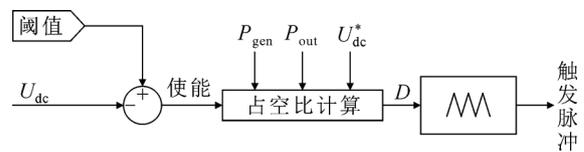


图3 卸荷负载控制框图

Fig.3 Control diagram of unloading load

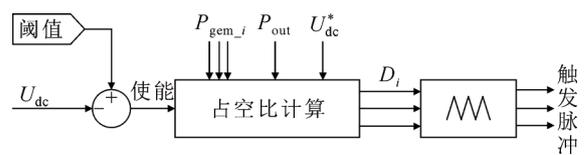


图4 分散式卸荷负载控制框图

Fig.4 Control diagram of distributed unloading load

由于惯性的作用，传输的有功功率仍然保持 160 MW 和 80 MW(如图 5(c)，其中  $P_2$ 、 $Q_2$  为 MMC2 传输的有功、无功功率， $P_3$ 、 $Q_3$  为 MMC3 传输的有功、无功功率)。功率的不平衡反映在直流电压上，引发卸荷负载工作。多余的能量消耗在卸荷负载上，保证直流电压保持在参考值附近(如图 5(d)，其中  $U_{dcp1}$ 、 $U_{dcn1}$ 、 $U_{dcp2}$ 、 $U_{dcn2}$ 、 $U_{dcp3}$ 、 $U_{dcn3}$  分别为 MMC1、MMC2 和 MMC3 正、负直流母线电压，简称  $U_{dcpj}$ 、 $U_{dcnj}$ ， $j=1, 2, 3$ )，有效地抑制了直流过电压，保证

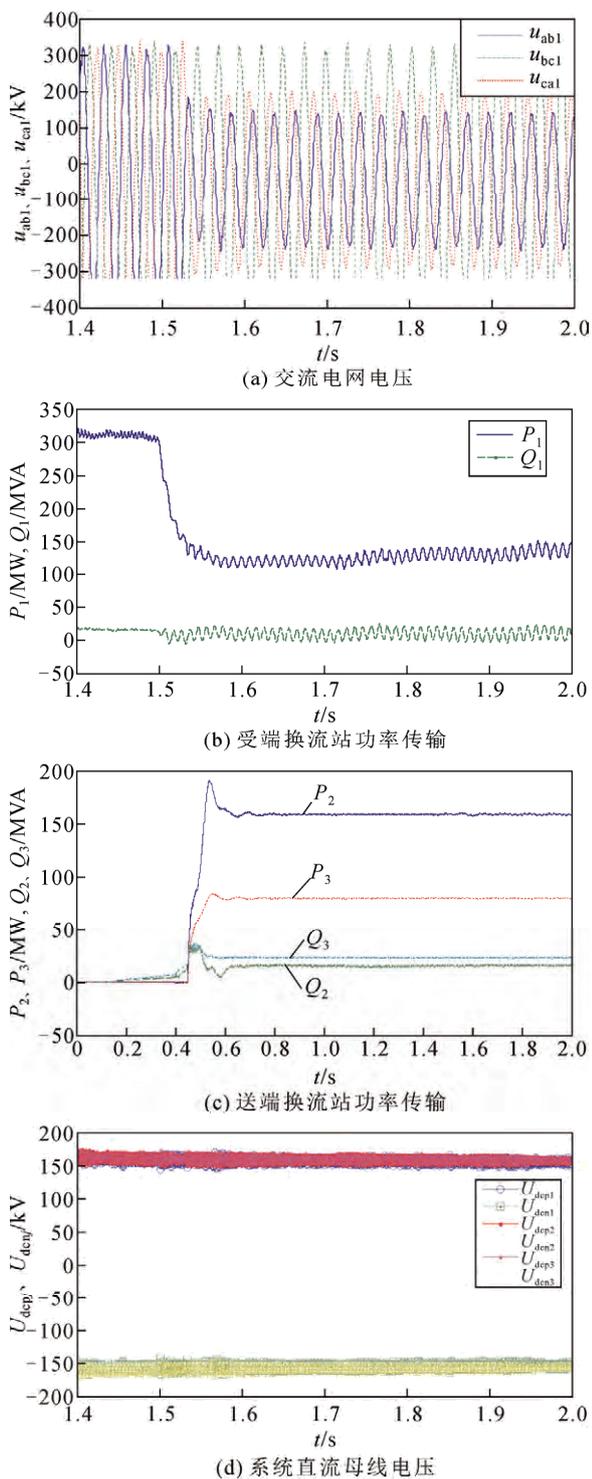


图5 交流电网发生A相接地短路故障的仿真波形

Fig.5 Simulation waveforms of A phase grounding short-circuit fault in AC grid

整个柔性直流输电系统在故障期间短时运行, 最大限度的保持功率的传输。

## 2 换流器子模块故障冗余保护

常见的子模块故障原因主要有电力电子器件

因过电压、过电流或者是过高的电压、电路上升率造成的损坏或者是因误发脉冲而导致的触发控制故障。一个或少数几个子模块的故障, 不应影响整个装置的运行, 因此必须采取子模块故障冗余保护, 使换流器具有一定的故障容错能力, 提高系统的可靠性。

### 2.1 故障分析

这里选取由误发脉冲而引起的子模块直通故障进行分析。系统结构采用双端 MMC-HVDC 结构, 仿真参数见表 2。子模块故障特性的仿真波形见图 6。稳态时, 向无源负载提供 250 MW 的有功功率和 20 MVA 的无功功率。 $t=4.4$  s 时, MMC1 A 相下桥臂 2 号子模块(其电容电压为  $U_{da2n}$ )由于上、下 IGBT 同时导通发生直通故障。从图 6 中可以看出, 故障子模块的电容电压( $U_{da}$ )迅速衰减至 0, 相当于该子模块退出运行, 故障相的直流电压会降低, 由于三相并联关系, 会引起直流电流( $I_{dc}$ )在故障相和非故障相之间振荡, 直流振荡电流流入桥臂, 再流入开通的 IGBT 中, 会引起正常子模块电容电压的波动。

表 2 双端 MMC-HVDC 系统仿真参数

Table 2 Simulation parameters of two-terminal MMC-HVDC

参数	有名值
系统额定容量/MVA	300
整流变压器变比(Y/Δ)	220 kV/150 kV
逆变变压器变比(Y/Δ)	110 kV/150 kV
直流母线电压/kV	300
桥臂子模块个数	10
调制方式	最近电平逼近
电容均压策略	电容电压排序
整流站控制方式	直流电压、无功功率控制
逆变站控制方式	定交流电压控制

### 2.2 故障冗余保护

冗余保护在级联 H 桥换流器中已有较多研究, 主要有如下 2 种<sup>[13-15]</sup>。

方案 1: 正常运行时少量冗余子模块置于热备用状态, 其余冗余子模块被置于冷备用状态, 一旦出现子模块故障, 用热备用冗余子模块将故障子模块替换, 同时冷备用冗余子模块进入热备用状态。其缺点是冗余子模块接入及其电容充电需要一定的时间。

方案 2: 冗余子模块不再设置热备用和冷备用状态, 直接参与正常运行工作, 一旦出现子模块故障并被旁路掉后, 其直流电压由桥臂中剩余子模块分担。对其余正常相, 为了保持对称运行, 可以旁

路与故障相相同数量的子模块,也可以不对称运行。

与级联 H 桥换流器不同, MMC 每相的上、下桥臂必须严格对称,才能保证 MMC 的正常工作。借鉴级联 H 桥换流器的冗余保护方法,文中提出的冗余保护方法为,当监测到子模块发生故障时,迅速将其旁路掉,然后在同相非故障桥臂中旁路掉相同数量的子模块,保持上、下桥臂的对称性,最后相应调整换流器的控制策略,实现从全子模块运行模式到(N-x)运行模式的平滑过渡,其中 x 为故障子模块的数目。一般地,  $x \leq 3$ ; 当  $x > 4$  时,应当停运。

以某一个子模块发生故障为例,保护方法的具体流程见图 7。

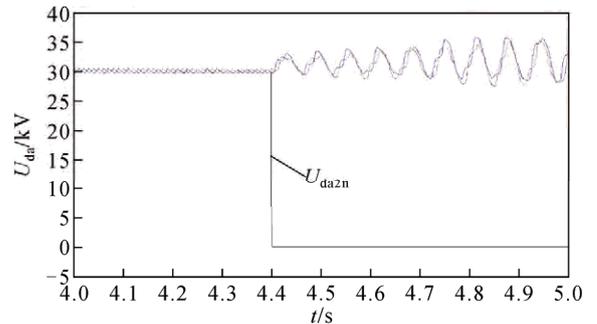
①监测子模块的电容电流、电容电压、脉冲等信号,一旦检测到子模块故障后,闭锁故障子模块,并将其从换流器中旁路。此时故障桥臂的子模块数目变为(N-x),而同相非故障桥臂的子模块数目仍为 N。

②为保持直流电压恒定和同相上、下桥臂子模块数目相同,需要旁路该相非故障桥臂中 x 个子模块。此时,故障相的子模块总数目变为  $2(N-x)$ ,同时导通的子模块数目变为(N-x),每个子模块的电容电压上升为  $U_{dc}/(N-x)$ ,其中  $U_{dc}$  为直流母线电压。

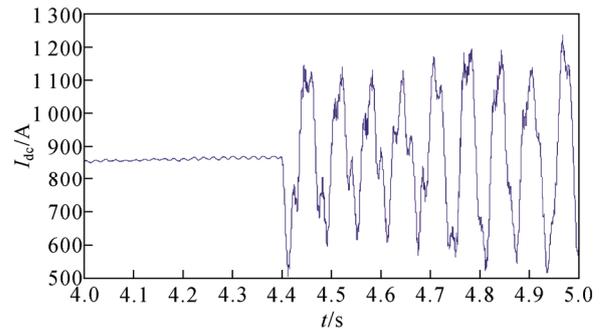
③子模块数目会影响到脉冲控制策略和直流平衡控制策略,因此需要相应地调整这两种控制策略当中涉及到子模块数目的部分。例如,最近电平逼近调制(nearest level modulation, NLM)控制的总电平数应减少一个,由(N+1)变为 N;排序法则应在剩余的  $2(N-1)$  个正常工作的子模块当中进行。

但需要注意的是,子模块故障冗余保护应当与其他保护相互配合。故障子模块及其互补子模块在被旁路后,由于三相是并联关系,正常相对故障相剩余子模块的电容进行充电,使故障相电容电压逐步上升至  $U_{dc}/(N-x)$ ,因此故障相不可避免地要经历直流电流上升的暂态过程。这一暂态过程可能会引起桥臂的短时过流,大概持续一个工频周期后消失,由于存在时间较短,热效应不会积累至烧坏器件,并且子模块故障也不应引起整个桥臂过流保护的动作为,导致整个换流器被闭锁甚至停运。因此应当合理地设置桥臂过流保护的阈值和子模块保护的阈值,或者延长桥臂过流保护的动作为,防止保护误动。

加入冗余保护后的仿真效果如图 8 所示。由于 A 相下桥臂 2 号故障子模块快速闭锁,保留了一定



(a) MMC1 A 相子模块电容电压



(b) MMC1 直流电流

图 6 换流器子模块故障仿真波形

Fig.6 Characteristics of sub-module fault

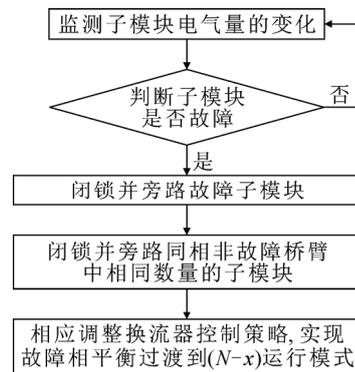


图 7 子模块故障冗余保护流程图

Fig.7 Flow chart of control and protection strategies for SM fault

的电容电压,其互补子模块电容电压保持在额定值附近,故障相的其余正常子模块电容电压上升为额定值的  $N/(N-1)$  倍,经历短暂的暂态过程后保持稳定(如图 8(a));桥臂电流、直流电流的振荡分量逐步衰减至零(如图 8(b)和(c),其中,  $i_{oap}$ 、 $i_{oan}$  分别为 a 相上、下桥臂电流);双端系统直流电压稳定(如图 8(d)),功率传输正常(如图 8(e)和(f));换流器内部子模块故障不影响换流器外部的输出特性(如图 8(g)和(h),其中,  $u_{ab1}$ 、 $u_{bc1}$ 、 $u_{ca1}$  分别为 MMC1 交流线电压,  $i_{a1}$ 、 $i_{b1}$ 、 $i_{c1}$  分别为 MMC1 交流线电流)。可见,文中的冗余保护可使换流器在子模块发生故

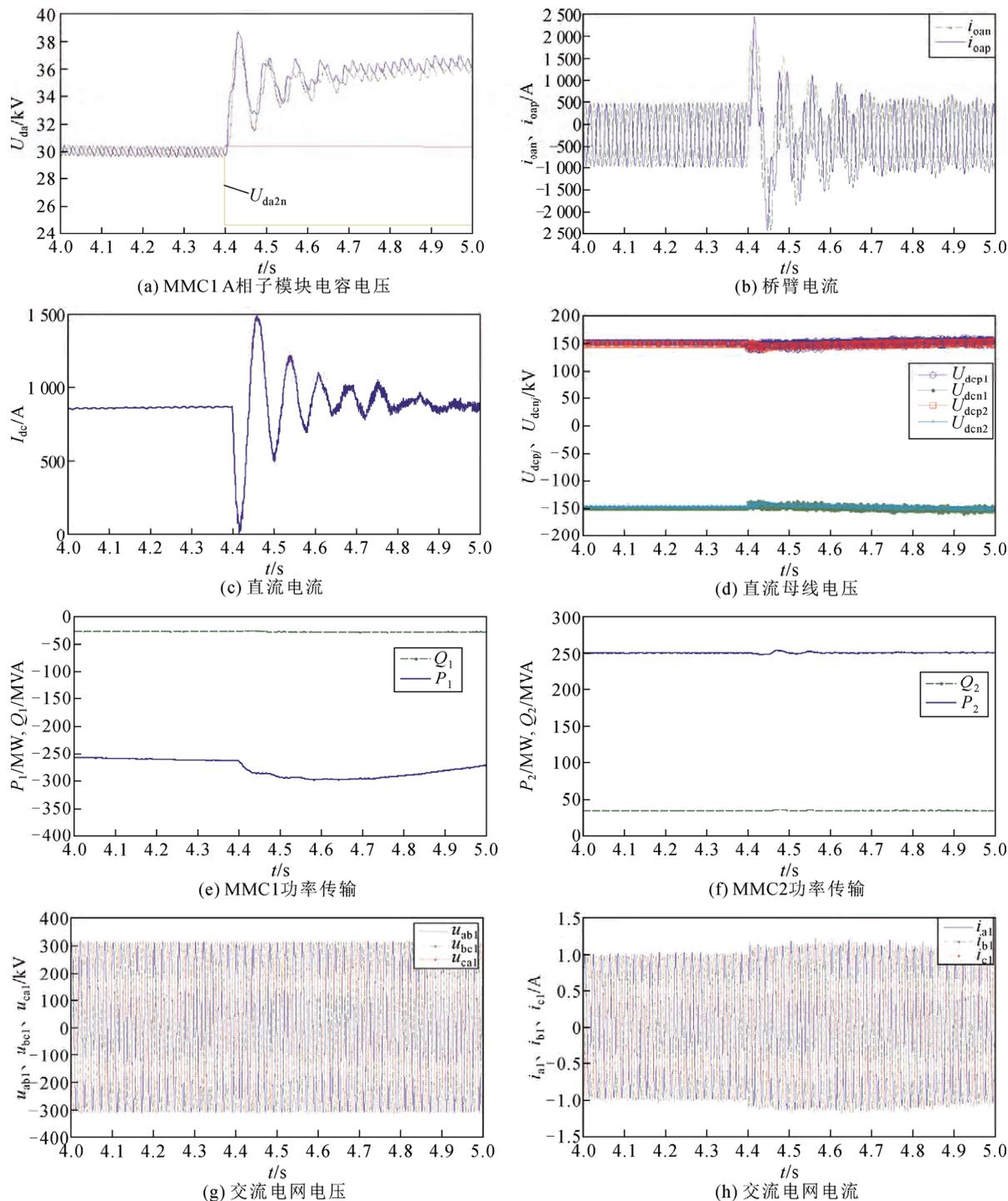


图8 子模块故障时, 冗余保护后的仿真效果图

Fig.8 Simulation effect after adding fault redundancy protection

障后, 保持整个系统仍然可以稳定运行。

### 3 结论

1) 本文提出在直流侧并联采用统一控制的分散式小型卸荷负载来消耗网侧交流系统故障时直流输电系统无法消除的功率差额, 从而维持直流系统电压恒定。基于 PSCAD/EMTDC 构建了风电并网

三端 MMC-HVDC 系统, 验证了方案的可行性。

2) 针对换流器子模块故障提出了一种冗余保护策略, 可以确保一个或少数几个子模块的故障, 不影响整个 MMC-HVDC 系统的运行。

### 参考文献 References

[1] Marquardt R. Stromrichter schaltungen mit verteilt energie spei-

- chern: German, DE10103031A1[P]. 2001-01-24.
- [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] 薛英林, 徐政. 稳态运行和直流故障下桥臂交替导通多电平换流器的控制策略[J]. 高电压技术, 2012, 38(6): 1521-1528.  
XUE Yinglin, XU Zheng. Control strategy of AAMC under steady operation and DC fault conditions[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(6): 1521-1528.
- [4] 赵成勇, 陈晓芳, 曹春刚, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 82-87.  
ZHAO Chengyong, CHEN Xiaofang, CAO Chungang, *et al.* Control and protection strategies for MMC-HVDC under DC faults[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(23): 82-87.
- [5] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路模块过电流分析[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 1-7.  
WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, *et al.* Analysis of submodule overcurrent caused by DC pole-to-pole fault in modular multilevel converter HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 1-7.
- [6] 刘钟洪, 宋强, 刘文华. 采用 MMC 变流器的 VSC-HVDC 系统故障态研究[J]. 电力电子技术, 2010, 44(9): 69-71.  
LIU Zhongqi, SONG Qiang, LIU Wenhua. Research on the VSC-HVDC system using modular multilevel converters under fault condition[J]. Power Electronics, 2010, 44(9): 69-71.
- [7] 孔明, 汤广福, 贺之渊, 等. 不对称交流电网下 MMC-HVDC 输电系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(28): 41-49.  
KONG Ming, TANG Guangfu, HE Zhiyuan, *et al.* A control strategy for modular multilevel converter based HVDC of unbalanced AC systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(28): 41-49.
- [8] 管敏渊, 徐政, 潘武略, 等. 电网故障时模块化多电平换流器型高压直流输电系统的分析与控制[J]. 高电压技术, 2013, 39(5): 1238-1245.  
GUAN Minyuan, XU Zheng, PAN Wulue, *et al.* Analysis and control of modular multilevel converter based HVDC transmission systems during grid faults[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5): 1238-1245.
- [9] Ramtharan G, Arulampalam A, Ekanayake J B, *et al.* Fault ride through of fully rated converter wind turbines with AC and DC transmission[J]. IET Renewable Power Generation, 2009, 3(4): 426-438.
- [10] 李琦, 宋强, 刘文华, 等. 基于柔性直流输电的风电场并网故障穿越协调控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1739-1745.  
LI Qi, SONG Qiang, LIU Wenhua, *et al.* A coordinated control strategy for fault ride-through of wind farm integration based on VSC-HVDC[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1739-1745.
- [11] Maneiro J, Tennakoon S, Barker C, *et al.* Energy diverting converter topologies for HVDC transmission system[C]//2013 15<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE). Lille, France: IEEE, 2013: 1-10.
- [12] Husseinnether V, Rittiger J, Barth A, *et al.* Projects BorWin2 and HelWin1-large scale multilevel voltage-sourced converter technology for Bundling of offshore wind power[C]// CIGRE Technical Program Session B4-306. Paris, France: CIGRE, 2012: 1-11.
- [13] 管敏渊, 徐政. 模块化多电平换流器子模块故障特性和冗余保护[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(16): 94-98, 104.  
GUAN Minyuan, XU Zheng. Redundancy protection for sub-model faults in modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 94-98, 104.
- [14] Song W, Huang A. Fault-tolerant design and control strategy for cascaded H-bridge multilevel converter-based STATCOM[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2700-2708.
- [15] 马为民, 吴方劼, 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.  
MA Weimin, WU Fangjie, YANG Yiming, *et al.* Flexible HVDC transmission technology's today and tomorrow[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2429-2439.



CHANG Fei

Ph.D. candidate

常非

1986—, 男, 博士生

研究方向为柔性输电

E-mail: 14117397@bjtu.edu.cn

收稿日期 2014-10-25 修回日期 2015-01-08 编辑 陈蔓