

DOI: 10.7500/AEPS201301158

# 模块化多电平换流器子模块故障冗余容错控制策略

胡鹏飞, 江道灼, 周月宾, 林志勇, 梁一桥, 郭捷

(浙江大学电气工程学院, 浙江省杭州市 310027)

**摘要:** 阐述了模块化多电平换流器(MMC)子模块故障类型,包括绝缘栅双极型晶体管(IGBT)模块故障、直流电容故障和控制信号故障。分析比较了 3 种子模块冗余容错方案的优缺点,选择采用对 MMC 影响较小的子模块热备用的冗余容错方案。该方案的缺点是 MMC 运行于不对称状态,导致 MMC 直流电流出现波动。为此,在推导 MMC 冗余运行状态的基本数学模型、得出桥臂能量数学表达式的基础上,提出了基于桥臂能量平衡的冗余容错控制策略来抑制直流电流的波动。在时域仿真软件 PSCAD/EMTDC 中搭建了 61 电平 MMC 模型,仿真结果验证了提出的冗余容错控制策略的有效性。

**关键词:** 模块化多电平换流器;子模块故障;冗余容错控制;能量平衡

## 0 引言

模块化多电平换流器(MMC)是德国学者于 2002 年提出的新拓扑,其模块化结构使其具有很强的可扩展性、良好的交直流输出特性和较高的可靠性。因此,MMC 非常适合于轻型直流输电、电力机车拖动和新能源并网等领域。2010 年,连接美国匹兹堡和旧金山的世界上首条商业化 MMC 型高压直流输电(MMC-HVDC)线路投运<sup>[1]</sup>,而国内基于 MMC 的南汇风电场柔性输电示范工程也已于 2011 年通过验收<sup>[2]</sup>。

目前,学术界针对 MMC 的研究主要集中于暂态和稳态数学建模<sup>[3-4]</sup>、调制控制策略<sup>[5-10]</sup>、相间环流抑制策略<sup>[11-12]</sup>,以及交直流系统故障保护<sup>[13-14]</sup>等方面,对于子模块故障的保护控制策略研究较少。MMC 包含大量的子模块,部分子模块发生故障将导致换流器不能正常工作,降低了其可靠性<sup>[15]</sup>。因此,必须设计冗余子模块来应对部分子模块故障时的情况。文献<sup>[15]</sup>提出了一种冷备用的子模块冗余保护方案,但该方案在故障时需要将冷备用子模块控制投入并进行充电,需要较长的暂态过程,控制过程较为复杂。本文根据 MMC 冗余运行原理,提出了一种新的子模块热备用的冗余容错控制策略,并通过电磁暂态仿真验证了该策略的有效性。

## 1 子模块故障原因

MMC 的子模块如图 1 所示,子模块包括半 H

桥绝缘栅双极型晶体管(IGBT)模块、直流电容和子模块控制信号。

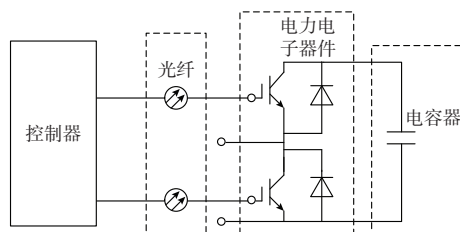


图 1 MMC 子模块结构  
Fig.1 Sub-module structure of MMC

以下列举了几种常见的子模块故障。

### 1) IGBT 模块故障

IGBT 模块由 IGBT 和反并联二极管等电力电子器件组成,其电压、电流过载能力较弱。过电压、过电流,或过高的电压、电流上升率都可能导致其损坏。该故障类型是子模块最常见的故障。

### 2) 直流电容故障

直流电容的过载能力较强,故障概率较低。

### 3) 控制信号故障

MMC 主要应用于中高压领域,控制侧和主电路侧由于电位差很高,因此需要隔离。通常采用光纤传输控制信号。串联子模块数量多,控制信号传输量很大。控制信号的传输错误也是导致子模块不能正常运行的常见故障之一。

## 2 冗余容错方案分析

MMC 的最大优点是模块化构造,能方便扩展到各种电压等级和实现冗余容错控制。冗余容错控制的主要思路是:在电路中配置一部分冗余子模块,

收稿日期: 2013-01-20; 修回日期: 2013-04-10。  
浙江省重点创新团队资助项目(2010R50004)。

当有一部分运行的子模块故障时, 冗余子模块能保证 MMC 不间断运行。冗余子模块的运行方案主要有如下 3 种。

方案 1: 当子模块正常运行时, 冗余子模块被旁路, 不参与工作; 当子模块发生故障时, 冗余子模块替换故障子模块。此方案缺点是冗余子模块接入及充电需要花费较长时间, 系统将经历一个较长的暂态过程, 冷备用子模块需要额外的控制, 同时冗余子模块在正常运行时处于闲置状态, 未能被充分利用以改善系统均压性能。

方案 2: 当子模块正常运行时, 冗余子模块参与工作; 当子模块发生故障时, 旁路故障子模块后, 同时旁路其他桥臂上相同数量的子模块, 保持系统对称运行。

方案 3: 当子模块正常运行时, 冗余子模块参与工作; 当子模块发生故障时, 仅旁路故障子模块, 其他桥臂不作变动, 系统不对称运行。

方案 2 中, 当 1 个桥臂子模块发生故障时, 为保持系统的对称性, 旁路其他 5 个桥臂的正常子模块, 将造成系统的可靠性大幅下降, 很不经济。方案 3 弥补了方案 1 和方案 2 的缺点, 但会造成桥臂的不对称。经过比较分析发现, 方案 3 更适合于 MMC。本文采用方案 3, 提出一种基于能量平衡的冗余容错控制策略, 有效消除了由桥臂不对称带来的桥臂电流不对称和直流电流波动。

### 3 冗余运行原理

MMC 的基本电路结构如图 2 所示, 以 a 相为例进行分析。子模块并网运行时, MMC 交流输出电压参考值  $u_a^{\text{ref}}$  由电流内环、功率外环交叉解耦控制器<sup>[5]</sup>得到。

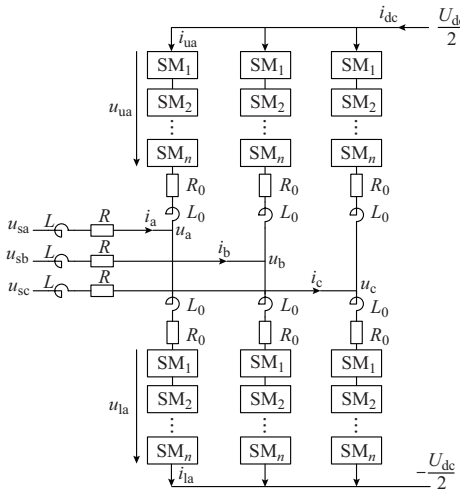


图 2 MMC 电路结构  
Fig.2 Circuit structure of MMC

设交流电压、电流参考值分别为:

$$u_a^{\text{ref}} = \frac{1}{2} U_{\text{dc}} m \cos \omega t \quad (1)$$

$$i_a^{\text{ref}} = I_m \cos(\omega t + \varphi) \quad (2)$$

式中:  $m$  为电压调制比, 其取值范围为  $(0, 1]$ ;  $U_{\text{dc}}$  为系统直流电压;  $I_m$  为交流电流幅值。

采用直接调制法, 上下桥臂电压参考值  $u_{\text{ua}}^{\text{ref}}$  和  $u_{\text{la}}^{\text{ref}}$  分别为:

$$u_{\text{ua}}^{\text{ref}} = \frac{1}{2} U_{\text{dc}} - u_a^{\text{ref}} = \frac{1}{2} U_{\text{dc}} (1 - m \cos \omega t) \quad (3)$$

$$u_{\text{la}}^{\text{ref}} = \frac{1}{2} U_{\text{dc}} + u_a^{\text{ref}} = \frac{1}{2} U_{\text{dc}} (1 + m \cos \omega t) \quad (4)$$

上下桥臂子模块总电压  $u_{\text{ua}}^{\Sigma}$  和  $u_{\text{la}}^{\Sigma}$  分别为:

$$u_{\text{ua}}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{\text{sum}}} u_{\text{dua}i} \quad (5)$$

$$u_{\text{la}}^{\Sigma} = \sum_{i=1}^{N_{\text{sum}}} u_{\text{dla}i} \quad (6)$$

式中:  $N_{\text{sum}}$  为桥臂子模块总数;  $u_{\text{dua}i}$  和  $u_{\text{dla}i}$  分别为 a 相上下桥臂中第  $i$  个子模块电压。

设均压效果良好, 各子模块的电压可认为相等, 则式(5)和式(6)可表示为:

$$u_{\text{ua}}^{\Sigma} = N_{\text{sum}} u_{\text{dua}} \quad (7)$$

$$u_{\text{la}}^{\Sigma} = N_{\text{sum}} u_{\text{dla}} \quad (8)$$

式中:  $u_{\text{dua}}$  和  $u_{\text{dla}}$  分别为 a 相上下桥臂任意子模块电压, 冗余运行条件下,  $u_{\text{ua}}^{\Sigma} > U_{\text{dc}}$ ,  $u_{\text{la}}^{\Sigma} > U_{\text{dc}}$ 。

假设开关频率无穷大, 定义上下桥臂的连续开关函数  $S_{\text{ua}}$  和  $S_{\text{la}}$  分别为<sup>[9]</sup>:

$$S_{\text{ua}} = \frac{u_{\text{ua}}^{\text{ref}}}{N_{\text{sum}} u_{\text{dua}}} = \frac{U_{\text{dc}} (1 - m \cos \omega t)}{2 N_{\text{sum}} u_{\text{dua}}} \quad (9)$$

$$S_{\text{la}} = \frac{u_{\text{la}}^{\text{ref}}}{N_{\text{sum}} u_{\text{dla}}} = \frac{U_{\text{dc}} (1 + m \cos \omega t)}{2 N_{\text{sum}} u_{\text{dla}}} \quad (10)$$

由于开关频率无穷大, 流过电容的电流与桥臂电流满足如下关系:

$$i_{\text{dua}} = S_{\text{ua}} i_{\text{ua}} = C \frac{du_{\text{dua}}}{dt} \quad (11)$$

$$i_{\text{dla}} = S_{\text{la}} i_{\text{la}} = C \frac{du_{\text{dla}}}{dt} \quad (12)$$

式中:  $C$  为电容值;  $i_{\text{dua}}$  和  $i_{\text{dla}}$  分别为上下桥臂电容电流;  $i_{\text{ua}}$  和  $i_{\text{la}}$  分别为上下桥臂电流。

把式(9)和式(10)代入式(11)和式(12)可得:

$$\frac{du_{\text{dua}}^2}{dt} = \frac{U_{\text{dc}}}{CN_{\text{sum}}} (1 - m \cos \omega t) i_{\text{ua}} \quad (13)$$

$$\frac{du_{\text{dla}}^2}{dt} = \frac{U_{\text{dc}}}{CN_{\text{sum}}} (1 + m \cos \omega t) i_{\text{la}} \quad (14)$$

上下桥臂的能量  $W_{\text{ua}}$  和  $W_{\text{la}}$  可表示为:

$$W_{ua} = \frac{1}{2} CN_{\text{sum}} u_{\text{dua}}^2 = \int_0^T \frac{U_{\text{dc}}}{2} (1 - m \cos \omega t) i_{ua} dt + \frac{1}{2} CN_{\text{sum}} U_{\text{d}}^2 \quad (15)$$

$$W_{la} = \frac{1}{2} CN_{\text{sum}} u_{\text{dla}}^2 = \int_0^T \frac{U_{\text{dc}}}{2} (1 + m \cos \omega t) i_{la} dt + \frac{1}{2} CN_{\text{sum}} U_{\text{d}}^2 \quad (16)$$

式中:  $U_{\text{d}}$  为正常运行子模块的额定电压;  $T$  为工频周期。

由式(15)和式(16)可以看出, 桥臂的能量由平均值和波动量构成。子模块正常运行时, 各桥臂平均能量相等。

#### 4 能量平衡容错控制策略

以 a 相上桥臂为例, 当有一部分子模块发生故障并被旁路时, 子模块总数将小于  $N_{\text{sum}}$ , 系统处于不对称运行状态。根据式(15)和式(16), a 相上桥臂能量平均值将小于其他桥臂, 这会造成 a 相上桥臂子模块电压波动幅度变大、桥臂电流畸变、三相环流不对称, 最终导致直流电流波动。

为了抑制不对称运行带来的直流电流波动, 可以控制故障桥臂的平均能量与其他桥臂的平均能量相等, 达到能量平衡状态。

子模块正常运行时, MMC 满足以下条件:

$$N_{\text{sum}} = N + N_f \quad (17)$$

$$U_{\text{dc}} = NU_{\text{d}} \quad (18)$$

$$W_{\text{rated}} = \frac{1}{2} CN_{\text{sum}} U_{\text{d}}^2 \quad (19)$$

式中:  $N$  为正常运行的桥臂子模块最大投入数;  $N_f$  为子模块正常运行时的冗余子模块数;  $W_{\text{rated}}$  为额定桥臂能量。

当有  $N_f$  个子模块发生故障时, 故障桥臂的总能量  $W_{ua}$  为:

$$W_{ua} = \frac{1}{2} C(N_{\text{sum}} - N_f) U_{\text{fd}}^2 \quad (20)$$

式中:  $U_{\text{fd}}$  为故障桥臂子模块额定电压。

按照各桥臂能量相等的原理 ( $W_{ua} = W_{\text{rated}}$ ), 故障桥臂子模块的额定电压可表示为:

$$U_{\text{fd}} = \sqrt{\frac{N_{\text{sum}}}{N_{\text{sum}} - N_f}} U_{\text{d}} \quad (21)$$

子模块正常运行时,  $N_f = 0$ , 此时式(21)也适用, 所以该策略同时满足子模块正常运行和子模块故障时的情况, 控制系统的一致性好。冗余容错控制策略如图 3 所示。

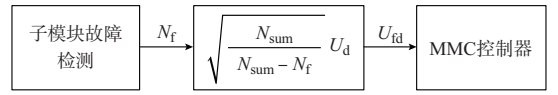


图 3 冗余容错控制

Fig.3 Redundancy fault-tolerated control

#### 5 子模块故障个数限制

考虑实际电容能承受的耐压有一定的限制且直流侧需要足够的子模块维持直流电压, 子模块故障个数必须满足如下限制条件。

限制 1: 子模块电压小于子模块电容最大耐受电压, 即

$$U_{\text{fd}} < U_t \quad (22)$$

式中:  $U_t$  为子模块电容最大耐受电压。

将式(21)代入式(22), 可得出子模块故障个数的取值范围为:

$$N_f < N_{\text{sum}} \left( 1 - \frac{U_{\text{d}}^2}{U_t^2} \right) \quad (23)$$

限制 2: 具有足够的子模块维持直流电压, 即

$$(N_{\text{sum}} - N_f) U_{\text{fd}} \geq U_{\text{dc}} \quad (24)$$

将式(18)和式(21)代入式(24)可得故障子模块个数的取值范围为:

$$N_f \leq N_{\text{sum}} - \frac{N^2}{N_{\text{sum}}} \quad (25)$$

故 MMC 单个桥臂子模块故障个数要同时满足式(23)和式(25), 即能忍受的最大故障子模块数为  $N_{\text{sum}}(1 - U_{\text{d}}^2/U_t^2)$  与  $N_{\text{sum}} - N^2/N_{\text{sum}}$  中的较小值。

#### 6 仿真分析

为验证本文提出的子模块冗余容错控制策略的有效性, 在 PSCAD/EMTDC 仿真软件搭建了 61 电平 MMC 模型, 主电路拓扑如图 2 所示。MMC 直流侧接恒定直流源, 交流侧通过电抗器接交流电网。模型的主要参数如附录 A 表 A1 所示。

模型的交流侧通过有功、无功电流交叉解耦控制, 正常运行时的有功电流设为  $-0.5$  kA (定义电流从电流向换流器的方向为正方向), 无功电流设为 0。0.3 s 时, a 相上桥臂有 8 个子模块发生故障; 0.3~0.5 s 时, 仅旁路故障子模块, 故障容错控制不投入; 0.5 s 以后投入故障容错控制。

直流电流、a 相桥臂电流、a 相桥臂环流和三相上桥臂能量的仿真波形如图 4 至图 7 所示。

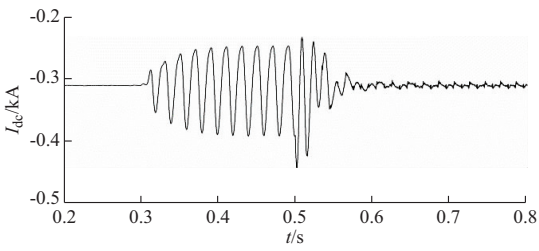


图4 直流电流  
Fig.4 DC current

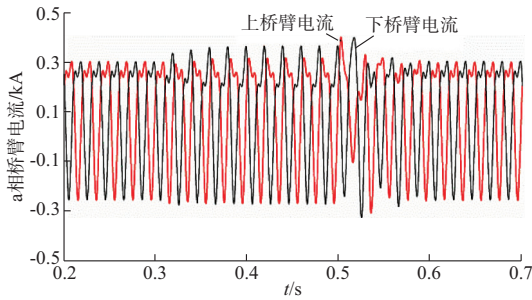


图5 a相桥臂电流  
Fig.5 Arm currents in phase a

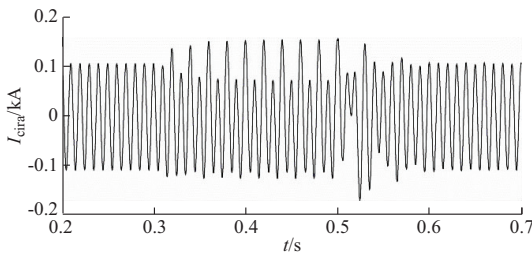


图6 a相桥臂环流  
Fig.6 Circulating current in phase a

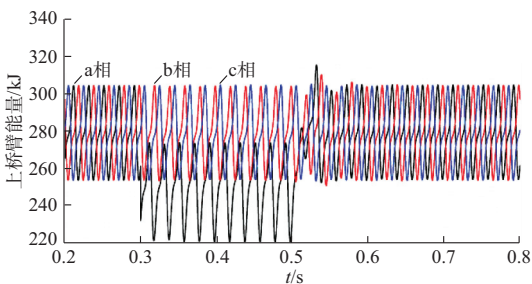


图7 三相上桥臂能量  
Fig.7 Upper-arm energies in three phases

由上述仿真波形可以看出:子模块发生故障并被切除,但故障容错控制不投入的情况下,直流电流发生波动,故障相上下桥臂电流出现不对称,桥臂环流波形畸变,故障桥臂能量小于其他桥臂;当故障容错控制投入后,直流电流波动被抑制,桥臂电流和环流不对称被消除,各相桥臂的能量恢复平衡。

其余仿真波形见附录 A 图 A1 至图 A7。可以看出:①当故障容错控制不投入时,无功功率基本平稳,有功功率出现轻微的波动,控制投入后波动消除;②子模块故障对 MMC 交流输出电压影响不大;③对于交流电流,当故障容错控制不投入时,交流电流波形出现轻微波动,控制投入后波动消除。

从仿真结果可以看出,子模块故障对系统的直流侧影响较大,对交流侧影响较小。

## 7 结语

1) 本文阐述了 MMC 子模块故障的原因,在分析比较 3 种常见的冗余容错方案优缺点的基础上,提出采用子模块热备用、故障时仅旁路故障子模块的方案。

2) 为抑制 MMC 不对称运行导致的直流电流波动和桥臂电流不对称,理论上推导了 MMC 冗余运行的数学原理,并据此提出了一种基于能量平衡的子模块冗余容错控制策略。

3) 在 PSCAD/EMTDC 平台搭建了 61 电平 MMC 仿真模型,仿真结果验证了冗余容错方案和冗余容错控制策略的有效性。

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

## 参考文献

- [1] DIETMAR R. HVDC plus-innovative multilevel technology for power transmission[R]. 2009.
- [2] 杨晓峰,林智钦,郑琼林,等. 模块组合多电平变换器的研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(6): 1-14.  
YANG Xiaofeng, LIN Zhiqin, ZHENG Trillion Q, et al. A review of modular multilevel converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-14.

· 广告 ·

**Mexon 兆越®**  
<http://www.mexontec.com>

IEEE 1588 24GE+2G 全千兆  
工业以太网交换机

网管型工业以太网交换机

Cronet CC-3952M 48G+4T 模块化  
三层万兆工业以太网交换机

**上海兆越通讯技术有限公司**  
HOTLINE: 400-66-12508



- [3] ILVES K, ANTONOPOULOS A, NORRGA S, et al. Steady-state analysis of interaction between harmonic components of arm and line quantities of modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(1): 57-68.
- [4] HARNEFORS L, ANTONOPOULOS A, NORRGA S, et al. Dynamic analysis of modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2013, 60(7): 2526-2537.
- [5] 郭捷, 江道灼, 周月宾, 等. 交直流侧电流分别可控的模块化多电平换流器控制方法[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(7): 42-47.  
GUO Jie, JIANG Daozhuo, ZHOU Yuebin, et al. AC and DC current hybrid control strategy for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(7): 42-47.
- [6] 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.  
GUAN Minyuan, XU Zheng, TU Qingrui, et al. Nearest level modulation for modular multilevel converters in HVDC transmission[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 48-52.
- [7] 胡鹏飞, 江道灼, 郭捷, 等. 基于晶闸管换向的混合型多电平换流器[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(21): 102-107.  
HU Pengfei, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. Hybrid multilevel converters based on thyristor alternate-arms[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(21): 102-107.
- [8] HAGIWARA M, AKAGI H. Control and experiment of pulsewidth-modulated modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2009, 24(7): 1737-1746.
- [9] ILVES K, ANTONOPOULOS A, HARNEFORS L, et al. Capacitor voltage ripple shaping in modular multilevel converters allowing for operating region extension[C]// Proceedings of the 37th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, November 7-10, 2011, Melbourne, Australia: 4403-4408.
- [10] HU Pengfei, JIANG Daozhuo, ZHOU Yuebin, et al. Study of the proportional resonant control based modular multilevel converter[C]// Proceedings of the 3rd International Conference on Digital Manufacturing and Automation, July 31-August 2, 2012, Guilin, China: 810-813.
- [11] 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.  
TU Qingrui, XU Zheng, GUAN Minyuan, et al. Design of circulating current suppressing controllers for modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(18): 57-61.
- [12] ANGQUIST L, ANTONOPOULOS A, SIEMASZKO D, et al. Open-loop control of modular multilevel converters using estimation of stored energy[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2011, 47(6): 2516-2524.
- [13] 王姗姗, 周孝信, 汤广福, 等. 模块化多电平换流器 HVDC 直流双极短路子模块过电流分析[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.
- [14] MINYUAN G, ZHENG X. Modeling and control of a modular multilevel converter-based HVDC system under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(12): 4858-4867.
- [15] 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.  
GUAN Minyuan, XU Zheng. Redundancy protection for submodule faults in modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 94-98.

胡鹏飞(1988—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向: 柔性直流输电与柔性交流输电。E-mail: eehpf@zju.edu.cn

江道灼(1960—), 男, 教授, 主要研究方向: 交直流电力系统运行与控制技术、电力电子在电力系统中的应用技术、电力系统现场智能测控技术。E-mail: dzjiang@zju.edu.cn

周月宾(1987—), 男, 博士研究生, 主要研究方向: 直流输电与柔性交流输电。E-mail: zhouyuebin@zju.edu.cn

(编辑 孔丽蓓)

## Redundancy Fault-tolerated Control Strategy for Sub-module Faults of Modular Multilevel Converters

HU Pengfei, JIANG Daozhuo, ZHOU Yuebin, LIN Zhiyong, LIANG Yiqiao, GUO Jie

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

**Abstract:** Sub-module fault types of modular multilevel converters (MMCs) are explained, including insulated gate bipolar translator (IGBT) module fault, fault of capacitor in DC link and control signal. Advantages and disadvantages of three redundancy fault-tolerated schemes of sub-module are analyzed. One scheme with sub-modules in hot standby is adopted, which has small impact on MMC. The drawback of this scheme is DC currents fluctuation presenting when MMC operates under unsymmetrical condition. Thus, based on derived basic math model of MMC under redundancy operation condition and yielded arm-energy math expressions, a redundancy fault-tolerated control strategy based on energy balance of arms is proposed to suppress the fluctuation of DC currents. A 61 voltage-level MMC simulation model is set up in PSCAD/EMTDC. Simulation results verify the validation of the proposed redundancy fault-tolerated control strategy.

**Key words:** modular multilevel converter (MMC); sub-module fault; redundancy fault-tolerated control; energy balance