

采用电压相似性分析及欧式距离的 MMC 子模块 开路故障定位方法

许启东¹, 吴思婕¹, 周腾龙², 林泽锋¹, 温创平¹

(1. 国网福建省电力有限公司泉州供电公司, 福建 泉州 362000; 2. 湖南科技职业学院, 长沙 410000)

摘要: 模块化多电平换流器(MMC)子模块开路故障的快速定位是提升系统可靠性的关键。针对开路故障子模块的电容电压偏离正常值这一特性,本文提出了一种基于电压相似性及欧式距离的 MMC 子模块开路故障快速定位方法。首先采用卡尔曼滤波算法估计子模块电压,大大地减少了电压传感器数量;然后分析子模块开路故障特性,利用欧式距离计算同一桥臂的子模块电容电压估计值两两之间的电气距离,通过判别距离的大小进行了子模块开路故障的快速检测和定位,提高了系统可靠性并节约了成本开销。最后,通过 PSCAD/EMTDC 仿真验证了所提方法的正确性和高效性。
关键词: 模块化多电平换流器; 卡尔曼滤波; 电压相似性; 欧式距离; 故障定位

Open-circuit Fault Localization Method of MMC Submodules Based on Voltage Similarity Analysis and Euclidean Distance

XU Qidong¹, WU Sijie¹, ZHOU Tenglong², LIN Zefeng¹, WEN Chuangping¹

(1. State Grid Fujian Electric Power Company Quanzhou Power Supply Company, Fujian Quanzhou 362000, China; 2. Hunan Vocational College of Science and Technology, Changsha 410000, China)

Abstract: The rapid location of open-circuit faults in sub-modules of modular multilevel converter (MMC) is a key to enhance reliability of system. In response to the characteristic that the capacitive voltage of the open circuit sub-modules deviates from the normal value, a fast fault localization method for MMC submodules based on voltage similarity and Euclidean distance is proposed in this paper. Firstly, the Kalman filtering algorithm is adopted to estimate the sub-module voltage, which greatly reduces the number of voltage sensors. Then, the characteristics of open-circuit faults in the sub-modules are analyzed, and the electrical distance between the estimated capacitive voltages of the sub-modules in the same arm is calculated by using the Euclidean distance. The rapid detection and location of the open-circuit fault in sub-modules are carried out by discriminating the size of the distance, which not only improves the system reliability, but also saves cost and expenses. Finally, the correctness and efficiency of the proposed method are verified by PSCAD/EMTDC simulation.

Keywords: modular multilevel converter; Kalman filter; voltage similarity; Euclidean distance; fault location

0 引言

近年来,模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)以其良好的模块化结构和可拓展特性,在柔性直流输电系统^[1-2]、变频驱动系统^[3]和电能质量治理^[4-8]等领域中得到了广泛的运用。MMC 的

桥臂由多个结构相同的子模块级联而成,子模块上的绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)发生故障的可能性极大^[9-11]。文献[12]指出,电力电子换流器 30% 的故障均由功率器件引起,大量子模块的使用给 MMC 可靠性造成了一定的挑战。因此对 MMC 子模块 IGBT 故障诊断和快速定

位是十分有必要的。MMC 子模块 IGBT 故障可分为开路故障和短路故障,通常情况下,短路故障会导致过电流,具有非常大的破坏性,将会直接造成子模块损坏。因此短路故障通常由嵌入在 IGBT 栅极驱动器中的保护装置来检测^[13-14]。因此,本文仅考虑 IGBT 开路故障的定位。

从技术实现角度分析,MMC 子模块 IGBT 开路故障定位方法可以分为硬件法和软件法,硬件法需要额外的传感器去监测子模块运行状态,需要更改原有电路结构,大大地增加了 MMC 的构建成本并且新增电路也带有潜在故障点。因此,硬件法在 MMC 子模块 IGBT 开路故障定位的实际工程应用中受到了限制^[15]。相比于硬件法,软件法主要通过特定算法实现 IGBT 开路故障的诊断与定位,主要包括了模型分析法^[16-18]、机器学习法^[19]和统计分析法^[20-21]。模型分析法主要是对特征参数进行预测,常用的预测方法有滑膜观测器、卡尔曼滤波器和状态观测器等。文献[22]和[23]分别选用桥臂电流和子模块电压作为故障特征量并采用观测器对子模块 IGBT 开路故障进行了诊断;文献[24]采用卡尔曼滤波器对子模块电压进行估计,通过子模块电容电压变化诊断和定位故障子模块;文献[25]则采用子模块电容电压之间相似性以及皮尔逊相关系数判断故障子模块。随着人工智能的发展,机器学习在 MMC 子模块 IGBT 开路故障中得到了应用;文献[26]采用张量系统与宽度学习系统进行张量训练诊断子模块开路故障;文献[27]提出了一种基于最小二乘互信息谱聚类 and 整体最小二乘支持向量机的子模块 IGBT 开路故障诊断方法。机器学习在深度网络中的计算量和配置难度大且模型可解释性不强,还未在实际工程中得到应用。

本文首先采用卡尔曼滤波算法对子模块电容电压进行了估计,以期减少 MMC 所需的电压传感器数量;然后基于故障子模块的电容电压升高的特性,并利用子模块电容器电压相似性计算同一桥臂上所有电容电压的欧式距离快速定位故障。本文提出的方法所采集的数据均可在系统中直接获得,无需额外的传感器获取数据。

1 MMC 运行原理及故障特性

1.1 MMC 运行原理

MMC 的拓扑结构见图 1。上、下两个桥臂构成一个相单元,分为 A、B、C 三相组成,每个桥臂由 n 个子模块级联而成,然后与桥臂电抗器 L_0 和桥臂电阻 R_0 串联而成。IGBT 用 S_1 和 S_2 表示,反并联在

IGBT 两端的二极管用 D_1 和 D_2 表示,子模块电容器用 C 表示。 u_j 和 i_j 分别表示 j 相的电压和电流, U_{dc} 表示直流侧电压, u_{pj} 和 u_{nj} 分别表示 j 相的上、下桥臂电压, $U_{c,n}$ 则表示第 n 个子模块电容电压。

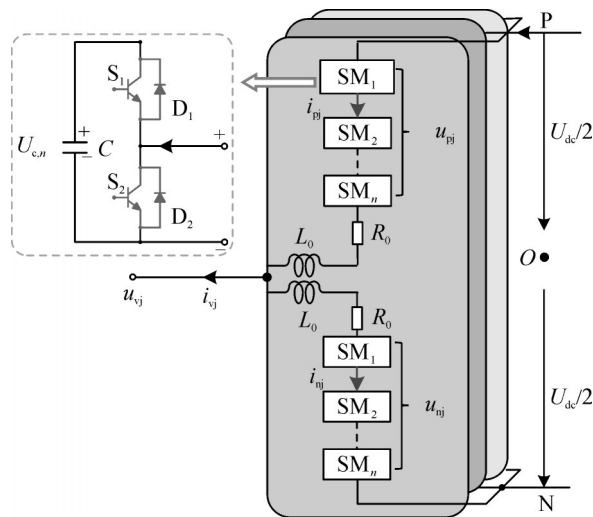


图1 模块化多电平换流器拓扑结构
Fig. 1 Topological structure of MMC

根据 S_1 和 S_2 的开关状态,子模块的端电压为 U_c 或 0, MMC 正常运行时,子模块的工作模式如表 1 所示。

表1 子模块工作模式
Table 1 Operation mode of sub-modules

状态	S_1	S_2	桥臂电流	电压	工作模式
ON	OFF	OFF	> 0	U_c	充电
ON	ON	OFF	< 0	U_c	放电
OFF	OFF	ON	> 0	0	旁路
OFF	OFF	OFF	< 0	0	旁路
CLOSE	OFF	OFF	> 0	U_c	充电
CLOSE	OFF	OFF	< 0	0	旁路

上、下桥臂第 i 个子模块的端电压分别表示为

$$U_{SM,p,i} = g_{p,i} U_{c,p,i} \quad (1)$$

$$U_{SM,n,i} = g_{n,i} U_{c,n,i} \quad (2)$$

式中: $g_{p,i}$ 和 $g_{n,i}$ 分别是上、下桥臂第 i 个子模块的开关函数; $U_{c,p,i}$ 和 $U_{c,n,i}$ 分别是上、下桥臂第 i 个子模块的电容电压。

根据基尔霍夫电压定律(KVL),可以得到以下方程

$$U_p = \sum_{i=1}^N U_{SM,p,i} \quad (3)$$

$$U_n = \sum_{i=1}^N U_{SM,n,i} \quad (4)$$

$$U_o = \frac{U_{dc}}{2} - L_0 \frac{di_p}{dt} - R_0 i_p - U_p \quad (5)$$

$$U_o = \frac{U_{dc}}{2} - L_0 \frac{di_n}{dt} - R_0 i_n - U_n \quad (6)$$

式中: U_p 、 U_n 分别为上、下桥臂电压; i_p 、 i_n 分别为上、下桥臂电流; U_o 为输出相电压, 为了估计电容电压, 将式(5)和式(6)重新排列并改写为矢量形式为

$$\frac{U_{dc}}{2} - U_o - L_0 \frac{di_p}{dt} - R_0 i_p = \begin{bmatrix} g_{p,1} & g_{p,2} & \cdots & g_{p,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{C,p,1} \\ U_{C,p,2} \\ \vdots \\ U_{C,p,N} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\frac{U_{dc}}{2} - U_o - L_0 \frac{di_n}{dt} - R_0 i_n = \begin{bmatrix} g_{n,1} & g_{n,2} & \cdots & g_{n,N} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{C,n,1} \\ U_{C,n,2} \\ \vdots \\ U_{C,n,N} \end{bmatrix} \quad (8)$$

因为上、下桥臂正常及故障状态具有相同的特性, 下文将均以以上桥臂为例, 可以发现桥臂电压 u_p 与 SM 电容电压 $u_{c,p}$ 满足线性关系。

$$U_p = g_p^T U_{C,p} \quad (9)$$

其中:

$$U_{C,p} = \begin{bmatrix} U_{C,p,1} \\ U_{C,p,2} \\ \vdots \\ U_{C,p,N} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$g_p = \begin{bmatrix} g_{p,1} \\ g_{p,2} \\ \vdots \\ g_{p,N} \end{bmatrix} \quad (11)$$

1.2 子模块开路故障特性分析

子模块开路故障通常由本体损坏、驱动信号丢失等导致。出现开路故障类型主要分为 S_1 故障、 S_2 故障、 S_1 和 S_2 同时发生故障 3 种情况。不同类型的子模块开路故障见图 2。

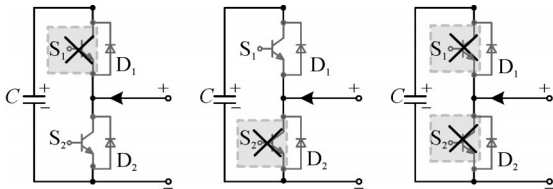


图2 不同类型的子模块开路故障

Fig. 2 Open circuit fault of different types of sub-modules

S_1 故障且桥臂电流为负时, 故障子模块电容没有放电回路, 只能通过 D_1 进行续流; S_2 故障且桥臂电流为正时, 故障子模块的电容将处于持续充电状

态; S_1 和 S_2 同时故障时, 当桥臂电流为正且子模块需要被切除时, 只能通过 D_1 续流, 额外引入充电时段; 当桥臂电流为负且子模块需要被投入时, 只能通过 D_2 续流, 导致没有放电回路。因此, 以上情况均会发生故障子模块电容电压将大于正常子模块, 可以由此定位故障。

2 基于卡尔曼滤波算法的子模块电压估计

卡尔曼滤波算法是一种广泛应用于电力电子领域基于数学序列的估计算法, 用于估计微分方程或状态空间模型中的状态和系统参数, 具有消除传感器对测量噪声影响的能力, 这使得该算法优于其他一些递归算法。在线性系统中, 卡尔曼滤波器是最有效的滤波器^[28-29]。

一般形式的卡尔曼滤波算法可以用如下的状态空间模型描述动态系统。

状态方程为

$$X(t) = \Phi X(t-1) + \Gamma W(t-1) \quad (12)$$

观测方程为

$$Y(t-1) = HX(t-1) + V(t-1) \quad (13)$$

设采样时间间隔为 T_s , 在 $t-1$ 时刻, 系统状态为 $X(t-1)$, 输入白噪声为 $W(t-1)$, 观测信号为 $Y(t-1)$, 观测噪声为 $V(t-1)$ 。根据上一采样时刻 $t-1$ 的状态预测 t 时刻的状态, 具体估计过程如下:

1) 状态一步预测

$$\hat{u}_p(t-1) = S_p^T(t-1) \hat{u}_{c,p}(t-1) + v(t-1) \quad (14)$$

其中, $v(t-1)$ 为测量白噪声。

2) 计算卡尔曼增益

$$K(t) = \frac{P(t-1)S_p(t)}{S_p^T(t)P(t-1)S_p(t) + r(t)} \quad (15)$$

式中: $P(t-1)$ 为协方差矩阵, 在递归算法中, 通常将其初始化为 $P(0) = GI$; G 为较大的正常数; I 为维度是 SM 个数 N 的单位阵。

3) 计算预测误差

$$\varepsilon(t-1) = u_p(t-1) - \hat{u}_p(t-1) \quad (16)$$

4) 状态更新

$$\hat{u}_{c,p}(t) = \hat{u}_{c,p}(t-1) + K(t)\varepsilon(t) \quad (17)$$

5) 协方差阵更新

$$P(t) = P(t-1) - \left[\frac{P(t-1)S_p(t)S_p^T(t)P(t-1)}{r(t) + S_p^T(t)P(t-1)S_p(t)} + Q(t) \right] \quad (18)$$

式中: $Q(t)$ 为观测噪声方差矩阵; $r(t)$ 为方差系数。

上文的估计过程可以用图 3 表示, 首先采样桥

臂电压及开关函数,其中桥臂电压 U_p 为观测量,开关函数 S_p 为观测矩阵,分别对应观测方程(13)中的 Y 和 H ,然后通过卡尔曼滤波算法式(14)–(17)估计对应桥臂上的 SM 电压。其中式(17)说明了根据 $t-1$ 时刻的状态估计 t 时刻状态的方法,通过协方差阵对预测效果做了定量描述,通过式(15)–(16)、(18)计算针对时间更新值的修正量,以上 5 个步骤均为了更合理的利用观测量 $u_p(t-1)$ 。

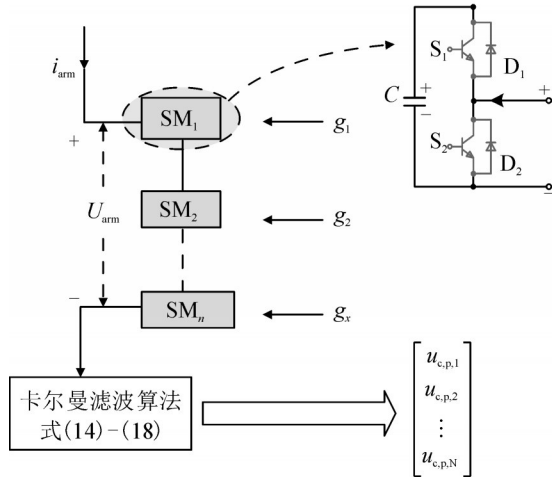


图3 子模块电容电压估计框图

Fig. 3 Capacitive voltage estimation block diagram of sub-modules

3 基于欧氏距离的故障定位方法

对于 MMC 子模块而言,电气距离可以反映出各个子模块间的耦合性,也可以反映它们之间的差异性。欧氏距离是指在 n 维空间中两个点之间的真实距离。1.2 节已经分析过子模块发生开路故障时,与正常子模块的电容电压存在较大差异,正是这种差异性,使得可以通过欧式距离计算子模块电容电压两两之间的欧式距离定位开路故障子模块,研究者通常把距离看作变量之间的不相似性度量^[26]。欧式距离的数学表达式为

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^n (U_{c,i}(k) - U_{c,j}(k))^2} \quad (19)$$

式中: D_{ij} 表示 i, j 之间的电气距离; n 为采样点数。

本文估计的子模块电容电压样本通过设计一个基本周期 T_s 的滑动窗口来获取,窗口长度 L 可以表示为 $L=1/T_s \cdot f$,其中 f 是输出电流的频率。因此,式(19)可以改写为

$$D_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^L (U_{c,i}(k-L) - U_{c,j}(k-L))^2} \quad (20)$$

图 4 为根据子模块电容电压相似性分析的开

路故障定位方法的流程图。

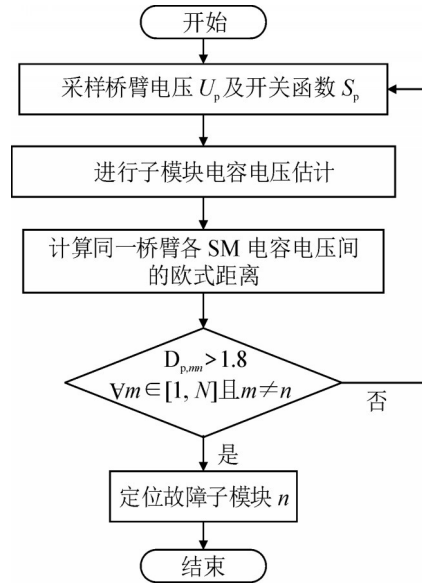


图4 子模块电容电压相似性分析的开路故障定位方法流程图

Fig. 4 Flowchart of open circuit fault location method based on sub-module capacitive voltage similarity analysis

4 仿真分析

本文基于 PSCAD/EMTDC 建立了三相五电平 MMC 仿真模型,下文将根据不同故障情况下的仿真结果对所提出的诊断策略进行验证。模型详细参数见表 2。

表2 三相五电平 MMC 仿真模型参数
Table 2 Parameters of three phase 5 level MMC simulation model

参数	数值
直流侧电压 U_{dc}/kV	9
额定功率/MVA	8
网侧滤波电感 L/mH	5
网侧等效电阻 R/Ω	0.01
桥臂子模块个数 N	4
子模块电容容值 $C/\mu F$	1 000
桥臂电感 L/mH	2
系统频率 f_s/Hz	50

4.1 基于卡尔曼滤波的电压估计分析

这部分仿真分析中,将基于电压估计算法与基于传感器测量的子模块电压值进行比较。其中,基于传感器测量的方案每个子模块均配置电压传感器,基于电压估计算法的方案仅需要在每个桥臂上配置一个传感器。

图 5(a)、(b)分别为正常情况下五电平 MMC $u_{c,p,4}$ 在两种方案下的仿真波形及差值。将两种方案比较可以看出,电压估计误差在 0.7% 以内。

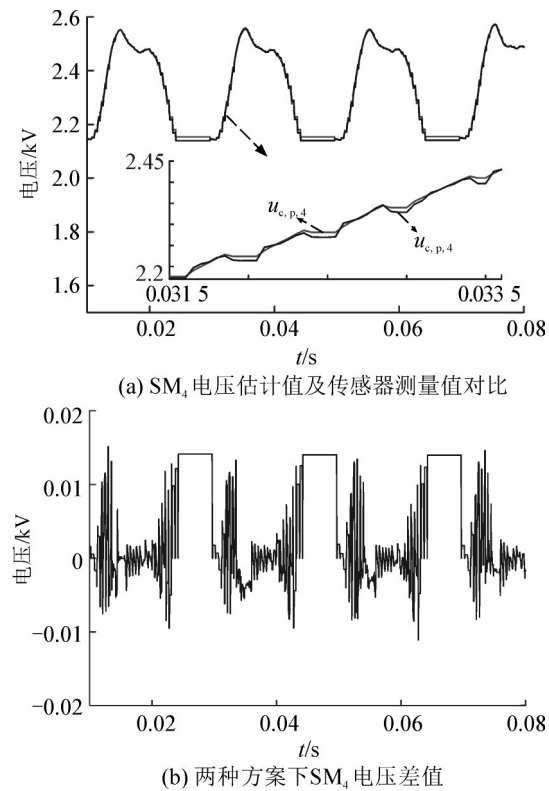


图5 正常情况下五电平MMC仿真
Fig. 5 Simulation of five-level MMC under normal condition

4.2 基于欧氏距离定位故障子模块仿真

根据工程经验阈值,子模块间欧式距离 ≥ 1.8 时,二者其中之一必然有故障。表3给出了SM个数 $N=4$ 时的故障诊断表,以说明故障定位方法。

图6为子模块SM₃T₂开路故障时的故障波形,开路故障发生在0.50s,图7为子模块间的欧氏距离。从图中可以看到当发生故障时,SM₃的电压与正常SM偏离,通过子模块欧式距离分析可以快速定位

表3 子模块故障定位表(N=4)
Table 3 Location table of sub-module fault (N=4)

故障定位	子模块间电气距离					
正常	$D_{1,2} \leq 1.8$	$D_{1,3} \leq 1.8$	$D_{1,4} \leq 1.8$	$D_{2,3} \leq 1.8$	$D_{2,4} \leq 1.8$	$D_{3,4} \leq 1.8$
SM ₁ 故障	$D_{1,2} \geq 1.8$	$D_{1,3} \geq 1.8$	$D_{1,4} \geq 1.8$	$D_{2,3} \leq 1.8$	$D_{2,4} \leq 1.8$	$D_{3,4} \leq 1.8$
SM ₂ 故障	$D_{1,2} \geq 1.8$	$D_{1,3} \leq 1.8$	$D_{1,4} \leq 1.8$	$D_{2,3} \geq 1.8$	$D_{2,4} \geq 1.8$	$D_{3,4} \leq 1.8$
SM ₃ 故障	$D_{1,2} \leq 1.8$	$D_{1,3} \geq 1.8$	$D_{1,4} \leq 1.8$	$D_{2,3} \geq 1.8$	$D_{2,4} \leq 1.8$	$D_{3,4} \geq 1.8$
SM ₄ 故障	$D_{1,2} \leq 1.8$	$D_{1,3} \leq 1.8$	$D_{1,4} \geq 1.8$	$D_{2,3} \leq 1.8$	$D_{2,4} \geq 1.8$	$D_{3,4} \geq 1.8$

5 结语

本文提出了一种采用电压相似性及欧式距离的MMC子模块开路故障快速诊断与定位方法,以提高MMC可靠性。通过仿真分析证明该方法可以在正常及故障情况下对SM电压进行估计,减少了所需电压传感器数量。利用故障时子模块电压值将偏离正常子模块电压值这一特性,计算同一桥臂

SM₃为故障子模块,诊断时间为2.5ms。

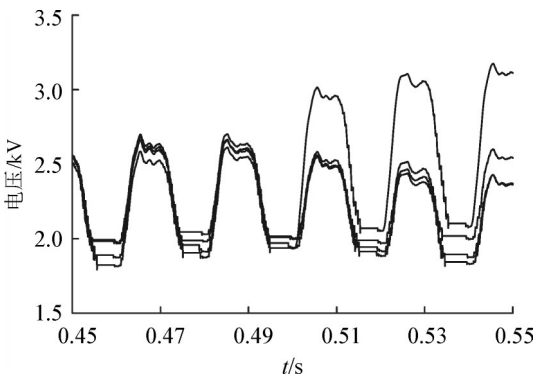


图6 第3个子模块T₂故障情况下电压估计情况
Fig. 6 Voltage estimation status of the third sub-module T₂ under fault condition

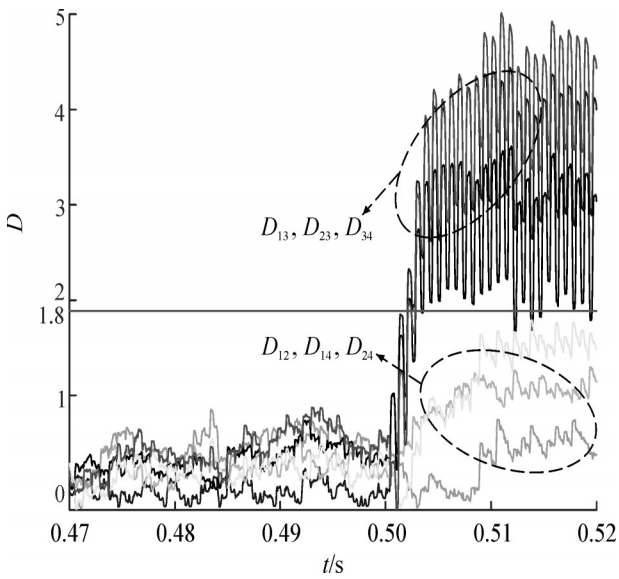


图7 第3个子模块T₂故障情况下五电平MMC仿真
Fig. 7 Simulation of five-level MMC of the third sub-module T₂ under fault condition

SM电压估计值的子模块间的欧氏距离,从而快速定位故障子模块位置。仿真结果表明,所提方法能在2.5ms内定位故障子模块,且有较强的适用性。

参考文献

[1] CHEN Yixin, WANG Zhixin, LIN Huancheng, et al. Model predictive control strategy of MMC-HVDC suitable for weak AC system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 80-86.

- [2] HAGIWARA M, NISHIMURA K, AKAGI H. A medium-voltage motor drive with a modular multilevel PWM inverter[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2010, 25(7): 1786-1799.
- [3] WANG Kui, LI Yongdong, ZHENG Zedong, et al. Voltage balancing and fluctuation-suppression methods of floating capacitors in a new modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(5): 1943-1954.
- [4] 熊俊, 甘文凤, 陈愚, 等. 受端电网故障下真双极柔性直流输电系统电压协同控制方法[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(5): 32-41.
- XIONG Jun, GAN Wenfeng, CHEN Yu, et al. A voltage collaborative control method for symmetrical bipolar MMC-HVDC under the receiving-end grid fault[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(5): 32-41.
- [5] 刘星, 汤自安, 张凯. 基于能量分析的MMC-STATCOM电容电压三级平衡控制[J]. 高电压技术, 2018, 44(7): 2222-2230.
- LIU Xing, TANG Zian, ZHANG Kai. Three-level capacitor voltage balance control of MMC-STATCOM based on energy analysis[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(7): 2222-2230.
- [6] 彭茂兰, 许诒翊, 严喜林, 等. 基于相对等效短路比的新能源——柔直送出系统振荡风险评估[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(5): 96-104.
- PENG Maolan, XU Jieyi, YAN Xilin, et al. Oscillation risk assessment of renewable connected to MMC-HVDC system based on relative equivalent short-circuit ratio[J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(5): 96-104.
- [7] 陆晶晶, 肖湘宁, 张剑, 等. 基于定有功电流限值控制的MMC型UPQC协调控制方法[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 196-204.
- LU Jingjing, XIAO Xiangning, ZHANG Jian, et al. MMC-UPQC coordinated control method based on fixed active current limit value control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 196-204.
- [8] 陈志军, 王骏, 郁超, 等. 低载波比调制下的MMC-UPFC电容电压减频效应[J]. 电网与清洁能源, 2024, 40(10): 93-104.
- CHEN Zhijun, WANG Jun, YU Chao, et al. Frequency-decrease effect in the capacitor voltage under the low modulation frequency ratio in an MMC-UPFC [J]. Power System and Clean Energy, 2024, 40(10): 93-104.
- [9] YANG Shunfeng, TANG Yi, WANG Peng. Seamless fault-tolerant operation of a modular multilevel converter with switch open-circuit fault diagnosis in a distributed control architecture[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7058-7070.
- [10] YANG Qichen, QIN Jiangchao, SAEEDIFARD M. Analysis, detection, and location of open-switch submodule failures in a modular multilevel converter[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(1): 155-164.
- [11] 李探, 赵成勇, 李路遥, 等. MMC-HVDC子模块故障诊断与就地保护策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(10): 1641-1649.
- LI Tan, ZHAO Chengyong, LI Luyao, et al. Sub-module fault diagnosis and the local protection scheme for MMC-HVDC system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(10): 1641-1649.
- [12] CIAPPA M. Selected failure mechanisms of modern power modules[J]. Microelectronics Reliability, 2002, 42(4/5): 653-667.
- [13] LAMB J, MIRAFZAL B. Open-circuit IGBT fault detection and location isolation for cascaded multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(6): 4846-4856.
- [14] KRONE T, XU C, MERTENS A. Fast and easily implementable detection circuits for short-circuits of power semiconductors[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 53(3): 2871-2879.
- [15] WANG Jun, MA Hao, BAI Zhihong. A submodule fault ride-through strategy for modular multilevel converters with nearest level modulation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(2): 1597-1608.
- [16] 徐坤山, 谢少军. 基于增量预测模型的MMC子模块功率管开路故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(21): 6420-6429.
- XU Kunshan, XIE Shaojun. Diagnosis method for submodule failures in modular multilevel converter based on incremental predictive model[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(21): 6420-6429.
- [17] 殷实, 谭国俊. 一种基于扩展卡尔曼滤波算法的MMC系统故障诊断策略[J]. 电工技术学报, 2016, 31(19): 74-84.
- YIN Shi, TAN Guojun. A novel fault diagnosis strategy of MMC system based on EKFA[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(19): 74-84.
- [18] 刘玉林, 齐静静, 李家宁, 等. 一种基于桥臂电流畸变及自适应观测的MMC子模块开路故障诊断定位方法[J]. 电源学报, 2020, 18(3): 106-115.
- LIU Yulin, QI Jingjing, LI Jianing, et al. Diagnosis and location method for open-circuit fault in MMC sub-module based on bridge arm current distortion and adaptive observation[J]. Journal of Power Supply, 2020, 18(3): 106-115.
- [19] 张彼德, 何恒志, 邵帅, 等. MMC子模块故障诊断的改进沙猫群优化极限学习机方法[J]. 电力科学与技术学报, 2025, 40(1): 245-255.

- ZHANG Bide, HE Hengzhi, SHAO Shuai, et al. Improved sand cat swarm optimization-based extreme learning machine method for MMC submodule fault diagnosis[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2025, 40(1): 245-255.
- [20] YANG Heya, ZHOU Weihao, SHENG Jing, et al. A statistical submodule open-circuit failure diagnosis method for modular multilevel converters (MMCs) with variance measurement[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2020, 1(2): 180-189.
- [21] 王江, 杨兴武, 李颖, 等. 基于四分位数的MMC子模块开路故障诊断方法[J]. 电力电子技术, 2023, 57(9): 120-122.
- WANG Jiang, YANG Xingwu, LI Ying, et al. MMC submodule open-circuit fault diagnosis method based on quartile[J]. Power Electronics, 2023, 57(9): 120-122.
- [22] 白志红, 蒋守赞, 郭咏春. 基于双重滑模观测器的MMC开关管开路故障诊断与定位策略[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(14): 147-156.
- BAI Zhihong, JIANG Shouzan, GUO Yongchun. Open-circuit fault diagnosis and location strategy of switches in modular multilevel converter based on dual sliding mode observers[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(14): 147-156.
- [23] 李群, 林金娇, 邓富金, 等. 基于龙伯格观测器的MMC子模块故障检测方法[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 58-66.
- LI Qun, LIN Jinjiao, DENG Fujin, et al. Fault detection method for modular multilevel converters based on Luenberger observer[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2023, 42(2): 58-66.
- [24] DENG Fujin, CHEN Zhe, KHAN M R, et al. Fault detection and localization method for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(5): 2721-2732.
- [25] ZHOU Dehong, QIU Huan, YANG Shunfeng, et al. Sub-module voltage similarity-based open-circuit fault diagnosis for modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(8): 8008-8016.
- [26] 耿想, 何顺帆, 朱容波, 等. 基于张量分解与宽度学习系统的MMC开关管开路故障诊断与定位[J]. 仪器仪表学报, 2025, 46(4): 150-162.
- GENG Xiang, HE Shunfan, ZHU Rongbo, et al. Diagnosis and location of switch open-circuit faults in modular multilevel converter based on tensor decomposition and broad learning system[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2025, 46(4): 150-162.
- [27] 李翠, 刘振兴, 柴利, 等. 模块化多电平换流器的子模块开路故障检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6995-7003.
- LI Cui, LIU Zhenxing, CHAI Li, et al. An open circuit fault detection method for sub-modules in modular multi-level converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6995-7003.
- [28] 唐志军. 采用卡尔曼滤波算法的模块化多电平换流器电容值在线估计方法[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2020, 48(4): 479-484.
- TANG Zhijun. Online estimating method for modular multilevel converter capacitor based on Kalman filtering[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2020, 48(4): 479-484.
- [29] 彭勃, 张逸, 熊军, 等. 结合负荷形态指标的电力负荷曲线两步聚类算法[J]. 电力建设, 2016, 37(6): 96-102.
- PENG Bo, ZHANG Yi, XIONG Jun, et al. A two-step clustering algorithm combined with load shape index for power load curve[J]. Electric Power Construction, 2016, 37(6): 96-102.

作者简介:

许启东(1995—),男,工程师,主要研究方向为柔性直流输电系统。E-mail:xad19950121@163.com。

吴思婕(1997—),女,主要研究方向为配网建设。

周腾龙(1995—),男,助教,主要研究方向为柔性直流输电系统。

(上接第64页)

- [30] 余波, 梁锐, 蒲亦非, 等. 超级电容器恒流充电的时域分数阶电路模型[J]. 电工技术学报, 2019, 34(17): 3533-3541.
- YU BO, LIANG Rui, PU Yifei, et al. Time-domain fractional-order circuit model for supercapacitors under constant-current charging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(17): 3533-3541.

作者简介:

陈楷(1980—),男,高级工程师,主要从事电网调度运行与研究工作。

高丽萍(1976—),女,高级工程师,主要从事电网规划发展工作。

闫琚(1976—),女,工程师,主要研究方向为电网调度自动化、电网运行方式。

张静雯(1988—),女,工程师,主要从事电力系统及其自动化工作。

刘卫民(1984—),男,高级工程师,主要从事电网规划、新能源规划、新型电力系统建设等方面的研究工作。

王淞(1997—),女,博士研究生,主要研究方向为电力系统优化调度。E-mail:1599364432@qq.com。

李江(1979—),男,教授,主要研究方向为大规模电网经济调度与主动控制、电力系统同步量测技术与应用等。