

基于子模块电压分组检测的MMC子模块 开路故障诊断定位方法

荣飞¹, 朱语博¹, 周诗嘉², 黄莹², 杨光源³

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082;

2. 南方电网科学研究院有限责任公司, 广东 广州 510663;

3. 南方电网超高压输电公司检修试验中心, 广东 广州 510663)

摘要:模块化多电平变流器(MMC)子模块数目较多时,系统结构复杂且发生故障概率较高。针对子模块的开路故障诊断问题,提出一种基于子模块电压分组检测的MMC子模块开路故障诊断定位方法。分析子模块故障特性,通过对比子模块组输出电压的预测值和实际值获得检测判据,根据检测判据诊断故障发生的子模块组及故障类型;改变子模块的工作状态,根据检测判据进行故障定位;定量分析分组检测时子模块电容电压的测量误差,为子模块电压分组提供依据。通过MATLAB/Simulink搭建49电平MMC仿真平台,在电容值偏移的情况下对不同类型的故障进行仿真,仿真结果表明,所提故障诊断定位方法能在减少电压传感器数量的情况下实现子模块开路故障诊断定位,提升系统的可靠性。

关键词:MMC; 分组检测; 电压观测; 子模块故障特性; 子模块故障诊断

中图分类号:TM 46

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202010015

0 引言

模块化多电平变流器(MMC)因具有模块化设计、器件开关损耗低、故障容错能力强等优点,被广泛应用于高压大功率电能变换、高压直流输电(HVDC)等领域^[1-4]。当MMC应用于HVDC系统时,子模块(SM)数目庞大^[5],适合采用最近电平逼近调制(NLM)策略。当SM数量较多时,传统检测方法需使用大量传感器,系统结构复杂、成本高^[6-7],并且每个SM都是潜在故障点,数目庞大的SM导致系统发生故障的概率增加^[8]。

为解决电压传感器数目庞大的问题,文献[9]采用自适应观测器估算SM电容电压,用李亚普诺夫理论研究自适应观测器的稳定性,保证估算量的稳定性和收敛性。文献[10]在文献[9]的基础上,将卡尔曼滤波和自适应观测器结合,以减小系统噪声对估算结果的影响。文献[9-10]在SM电容值不一致的情况下能够取得较好的估算精度,但算法较复杂,且未考虑故障对系统可靠性的影响。文献[7,11]对桥臂SM进行分组,通过电压、桥臂电流对SM电容电压进行预测和矫正。文献[12]提出分组检测过电压防护策略,以减小SM电容电压测量误差,避免出现SM

过电压现象。文献[13]将SM电容电压预测与限电压波动排序平衡法相结合,保证SM电容电压预测精度的同时,降低了系统开关频率,并验证了测量方法在稳态和暂态时的稳定性。但文献[7,9-13]没有考虑SM的故障诊断与定位。目前有关减少电压传感器数量的研究主要集中于如何对SM电容电压进行预测和矫正。SM故障诊断定位技术影响系统的安全稳定运行^[14],分组检测中,由于传感器数量减少,不能实时准确地测量SM电容电压,传统MMC故障诊断方法不适用于分组检测。

综上所述,针对MMC中SM发生故障的问题,本文在SM电容电压分组检测的基础上,分析电容值偏移对SM电容电压测量误差的影响,为SM分组提供依据;分析SM开路故障特性,提出基于分组检测的SM开路故障诊断定位方法。根据电压、电流采样值以及SM开关状态计算SM输出电压的预测值,将预测值与实测值对比获得检测判据,判断组内是否有SM发生故障以及故障类型,在诊断出SM发生故障后,改变SM的工作状态,根据检测判据进行故障定位。

1 SM电压分组检测

1.1 MMC的基本工作原理

MMC中每个桥臂由 N 个结构相同的SM和桥臂电感 L 串联构成,SM由2个IGBT(T_1 、 T_2)、2个续流二极管(D_1 、 D_2)、1个高速旁路开关 K 及1个电容 C 构成,MMC的拓扑结构见图1。图中, u_c 为电容电压; i_{dc} 、 U_{dc} 分别为直流电流、直流母线电压; i_{px} 、 i_{nx} ($x=a, b, c$)分别为 x 相上、下桥臂电流; u_x 、 i_x 分别为 x 相电压、电流; i_{am} 为桥臂电流; u_p 、 u_n 分别为上、下桥臂电压。

收稿日期:2020-05-24;修回日期:2020-08-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51977070);湖南省自然科学基金资助项目(2018JJ2045);中国南方电网有限责任公司科技项目(ZBKJXM20180560)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51977070),the Natural Science Foundation of Hunan Province(2018JJ2045) and the Science and Technology Project of CSPG(ZBKJXM20180560)

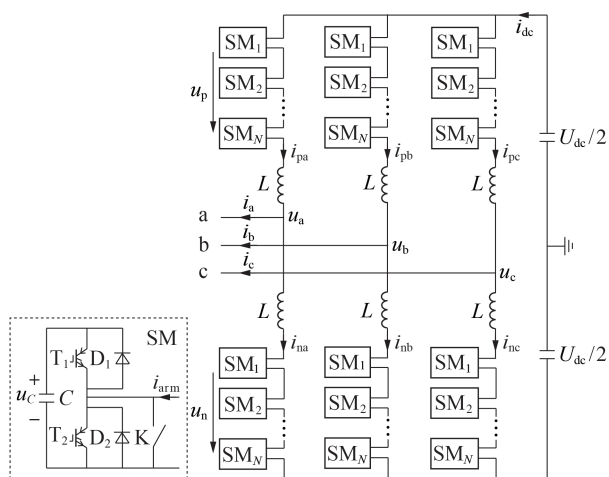


图1 MMC的拓扑结构

Fig.1 Topology structure of MMC

1.2 分组检测原理

对各桥臂的SM进行分组,每组中SM个数可以不同,每组配置1台电压传感器,电压传感器安装在各组两端,测量每组SM的输出电压 u 。为简化分析,将各桥臂的 N 个SM平均分为 g 组,每组 M 个SM,分组检测的桥臂拓扑结构见图2。

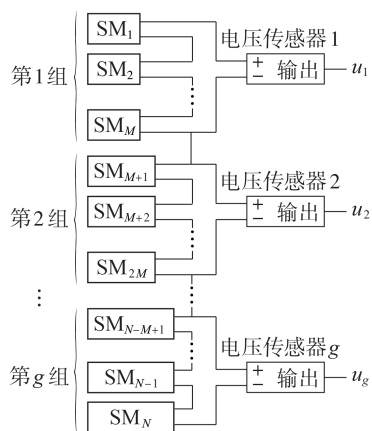


图2 MMC桥臂的拓扑结构

Fig.2 Topology structure of bridge arm of MMC

以第1组SM为例,设 k 为控制周期序号,在每个控制周期开始时对输出电压、桥臂电流采样,获得相应的采样值 $u(k)$ 、 $i_{arm}(k)$ 。 $u(k)$ 可以表示为该组SM在第 $k-1$ 个控制周期结束时的输出电压之和,即:

$$u(k) = \sum_{j=1}^M s_j(k-1) u_{Cj}(k) \quad (1)$$

其中, $u_{Cj}(k)$ 为第1组第 j 个SM在第 k 个控制周期的电容电压; $s_j(k-1)$ 为第1组第 j 个SM在第 $k-1$ 个控制周期的状态,其值为1表示第 j 个SM投入,其值为0表示第 j 个SM切除。

对第1组SM的投入情况进行分类,分别讨论3种情况下SM电容电压的测量方法。

情况1:在第 k 个控制周期开始时,组内只有第 q

个SM投入。此时电压传感器输出电压的采样值为该SM的电容电压值,即:

$$u_{Cq}(k) = u(k) \quad (2)$$

情况2:与第 $k-2$ 个控制周期相比,第 $k-1$ 个控制周期内只有第 q 个SM状态发生改变,可得第 q 个SM的电容电压。设2个相邻控制周期电压传感器采样的差值 $\Delta u(k)$ 为:

$$\Delta u(k) = u(k) - u(k-1) \quad (3)$$

根据SM电容的充电模型,可得:

$$u_{Cj}(k) = u_{Cj}(k-1) + \frac{1}{C} \int_{(k-1)T}^{kT} s_j(k-1) i_{arm}(t) dt \quad (4)$$

其中, T 为控制周期。将式(4)代入式(1)可得:

$$u(k) = \sum_{j=1}^M s_j(k-1) \left(u_{Cj}(k-1) + \frac{1}{C} \int_{(k-1)T}^{kT} s_j(k-1) i_{arm}(t) dt \right) \quad (5)$$

将式(5)代入式(3)可得:

$$\Delta u(k) = \sum_{j=1}^M s_j(k-1) u_{Cj}(k-1) - \sum_{j=1}^M s_j(k-2) u_{Cj}(k-1) + \frac{1}{C} \sum_{j=1}^M \int_{(k-1)T}^{kT} s_j(k-1) i_{arm}(t) dt \quad (6)$$

根据式(6),若第 q 个SM状态由切除变为投入,则有:

$$u_{Cq}(k) = \Delta u(k) - \frac{1}{C} \sum_{j=1}^M \int_{(k-1)T}^{kT} s_j(k-2) i_{arm}(t) dt \quad (7)$$

若第 q 个SM状态由投入变为切除,则有:

$$u_{Cq}(k) = -\Delta u(k) + \frac{1}{C} \sum_{j=1}^M \int_{(k-1)T}^{kT} s_j(k-1) i_{arm}(t) dt \quad (8)$$

情况3:除情况1、2外的其余情况,SM电容电压可通过电压观测器获得其观测值 $\tilde{u}_{Cj}(k)$ 。 $\tilde{u}_{Cj}(k)$ 可表示为:

$$\tilde{u}_{Cj}(k) = \tilde{u}_{Cj}(k-1) + \frac{1}{C} \int_{(k-1)T}^{kT} s_j(k-1) i_{arm}(t) dt \quad (9)$$

SM电容电压在大多数情况下由情况3中的电压观测器获得,存在测量误差且误差累积。情况1中SM电容电压由电压传感器测量获得,可准确测量SM电容电压,消除累积误差;情况2中SM电容电压的计算,只包括1个控制周期内对SM电容电压变化量的计算,可消除累积误差。情况1和情况2均能够对SM电容电压观测值进行校正。在MMC投入前,用情况1检测所有SM电容电压,获得SM电容电压初始值。

分组检测可在减少电压传感器数量的情况下检测SM电容电压。获得SM电容电压后,采用NLM策略实现MMC稳定运行,NLM策略步骤如下:①将桥臂调制波除以SM电容电压参考值,结果取整可获得各组需要投入的SM个数 N^* ;②对桥臂SM电容电压进行排序;③根据SM电容电压排序结果,当桥臂电流大于0时,投入SM电压值最低的 N^* 个SM,当桥臂电流小于0时,投入SM电压值最高的 N^* 个SM。

2 分组检测误差

电力电子器件的导通压降和内阻导致测量结果产生的误差较小,因此本文忽略电力电子器件造成的误差。以单相 MMC 为例,对分组检测中 SM 电容电压测量值的误差进行分析。环流中交流分量以二倍频分量为主,忽略 3 次及以上高次谐波,则上桥臂电流为^[15-16]:

$$i_p = \frac{i}{2} + i_{cir} = \frac{1}{2} I \cos(\omega t + \theta) + I_d - I_2 \cos(2\omega t + \theta_2) \quad (10)$$

$$I_d = mI \cos \theta / 4 \quad (11)$$

$$I_2 = \frac{NS \sqrt{9 + m^2 \cos^2 \theta (m^2 - 6)}}{U_{dc} [48\omega^2 LC - (3 + 2m^2)N]} \quad (12)$$

$$\theta_2 = \arctan [3 \tan \theta / (3 - m^2)] \quad (13)$$

其中, i 为输出电流; i_{cir} 为环流; $\omega = 100\pi \text{ rad/s}$; θ 为功率因数角; I 为输出相电流幅值; I_d 为环流直流分量; I_2 、 θ_2 分别为环流二倍频分量幅值、初相角; m 为调制比; S 为 MMC 视在容量。

由于控制周期 T 的作用,用梯形法求积分近似值。在单个控制周期内,由电压观测器获得的 SM 电容电压变化量的观测值为 $\Delta \tilde{u}_c$, SM 电容电压的实际变化量为 Δu_c , 则:

$$\Delta \tilde{u}_c = \frac{T}{2C^N} (i_p(k) + i_p(k-1)) \quad (14)$$

$$\Delta u_c = \frac{1}{C^A} \int_{(k-1)T}^{kT} i_p(t) dt \quad (15)$$

其中, C^N 、 C^A 分别为 SM 电容的标称值、实际值。将单个控制周期内,桥臂电流积分实际值与计算值做差,可得:

$$\begin{aligned} & \int_{(k-1)T}^{kT} i_p(t) dt - \frac{T}{2} (i_p(k) + i_p(k-1)) = \\ & I \cos \left(\omega t + \theta + \frac{\omega T}{2} \right) \left(\frac{1}{\omega} \sin \frac{\omega T}{2} - T \cos \frac{\omega T}{2} \right) - \\ & I_2 \cos(2\omega t + \theta_2 + \omega T) \left[\frac{\sin(\omega T)}{\omega} - T \cos(\omega T) \right] \end{aligned} \quad (16)$$

一般情况下,控制周期 $T < 10^{-3} \text{ s}$, 因此:

$$\int_{(k-1)T}^{kT} i_p(t) dt - \frac{T}{2} (i_p(k) + i_p(k-1)) \approx 0 \quad (17)$$

定义 SM 电容电压的测量误差为分组检测值与实际值的差值,用 ε 表示。在单个控制周期内,电压观测器获得的 SM 电容电压变化量的误差 ε_T 为:

$$\begin{aligned} \varepsilon_T = \Delta \tilde{u}_c - \Delta u_c &= \frac{T(i_p(k) + i_p(k-1))}{2C^N} - \frac{\int_{(k-1)T}^{kT} i_p(t) dt}{C^A} \approx \\ & \left(\frac{1}{C^N} - \frac{1}{C^A} \right) \int_{(k-1)T}^{kT} i_p(t) dt \leq \left| \frac{1}{C^A} - \frac{1}{C^N} \right| \int_{(k-1)T}^{kT} |i_p(t)| dt \end{aligned} \quad (18)$$

当 $C^A = C^N$ 时, $\varepsilon_T \approx 0$, 则不考虑电压传感器误差且电容值一致时,分组检测能够准确获得 SM 的电容

电压。由于制作工艺、器件老化等原因,电容实际值与标称值相比存在偏差,进而会影响分组检测的准确度,不可避免地造成误差,且 ε 随电容偏移量增大而增大。当电容值偏移时,MMC 仍然能够实现 SM 电容电压平衡,在稳态运行时,1 个调制波周期 (0.02 s) 内 $\Delta u_c = 0$, 即电容充、放电量相同。在 $i_{arm} = 0$ 时, ε 达到最大值,因此可只计算出 $i_{arm} > 0$ 时的最大误差。将 MMC 的额定参数代入式 (10) — (13), 计算 $i_p(t)$ 。 $i_p(t)$ 为周期函数,在 1 个周期内,当 $i_p(t) \geq 0$ 时,求出满足式 (19) 的 t_1 、 t_2 :

$$\begin{cases} i_p(t_1) = 0 \\ i_p(t_2) = 0 \\ i_p(t) \geq 0 \end{cases} \quad 0 < t_2 - t_1 < 0.02 \text{ s}, t_1 \leq t \leq t_2 \quad (19)$$

$w(t) = 0.5[1 - m \cos(\omega t)]$ 为上桥臂等效开关函数,在 $[t_1, t_2]$ 内 SM 的平均占空比为:

$$\bar{w} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} w(t) dt \quad (20)$$

只用电压观测器测量 SM 电容电压时, ε 的最大值 $\varepsilon_{\max}$ 满足:

$$\varepsilon_{\max} \leq \left| \frac{1}{C^A} - \frac{1}{C^N} \right| \bar{w} \int_{t_1}^{t_2} i_p(t) dt \quad (21)$$

由于情况 1、2 可对 SM 电容电压进行校正,分组检测所得 SM 电容电压的测量误差满足 $\varepsilon < \varepsilon_{\max}$ 。

3 故障特性诊断定位方法

3.1 故障特性

SM 中 IGBT 开路故障分为 T_1 开路故障、 T_2 开路故障 (以下简称 T_1 故障、 T_2 故障)。SM 发生 T_1 故障后,当 SM 切除时,SM 正常运行;当 SM 投入时,工作状态见图 3。当 $i_{arm} > 0$ 时,SM 正常运行;当 $i_{arm} < 0$ 时,电流流经 D_2 , 电容不会进行放电, SM 输出电压为 0。SM 发生 T_2 故障后,当 SM 投入时,SM 正常运行;当 SM 切除时,工作状态见附录图 A1。当 $i_{arm} < 0$ 时,SM 正常运行;当 $i_{arm} > 0$ 时,电流流经 D_1 与电容,形成电容充电回路, SM 输出电压为电容电压 u_c 。

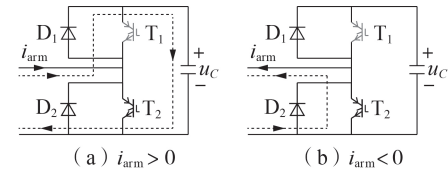


图 3 T_1 故障且 SM 投入时的工作状态

Fig.3 Working state under T_1 fault when SM puts into operation

3.2 故障诊断

在第 k 个控制周期,可根据第 $k-1$ 个控制周期内的 SM 电容电压值、SM 工作状态和桥臂电流,计算 SM 组的输出电压预测值 $u^*(k)$:

$$u^*(k) = \sum_{j=1}^M s_j(k-1) \left(u_{cj}(k-1) + s_j(k-1) T \frac{i(k) + i(k-1)}{2C} \right) \quad (22)$$

将 $u^*(k)$ 与 SM 组输出电压的采样值 $u(k)$ 进行比较, 可判断该组是否发生故障, 定义检测判据 λ 为:

$$\lambda = \frac{u(k) - u^*(k)}{U_c} \quad (23)$$

其中, U_c 为 SM 电容电压额定值。

若一组中第 q 个 SM 发生故障, 根据 SM 故障特性可知: 当发生 T_1 故障时, $\lambda = -u_{cq}(k)/U_c$; 当发生 T_2 故障时, $\lambda = u_{cq}(k)/U_c$ 。考虑 SM 电容电压波动 δ 可得:

$$\begin{cases} \lambda \leq -1 - \delta & T_1 \text{ 故障} \\ \lambda \geq 1 - \delta & T_2 \text{ 故障} \\ |\lambda| < 1 - \delta & \text{正常} \end{cases} \quad (24)$$

图4为分组检测中故障诊断流程图。图中, F_1 、 F_2 分别为 T_1 、 T_2 的故障诊断信号, 其值为1表示元件故障, 其值为0表示元件正常。为避免噪声干扰造成误判断, 当故障诊断信号持续周期数大于阈值 Z 时, 判断系统发生故障, 进而可诊断出故障 SM 所在组及故障类型, 进入故障定位环节。

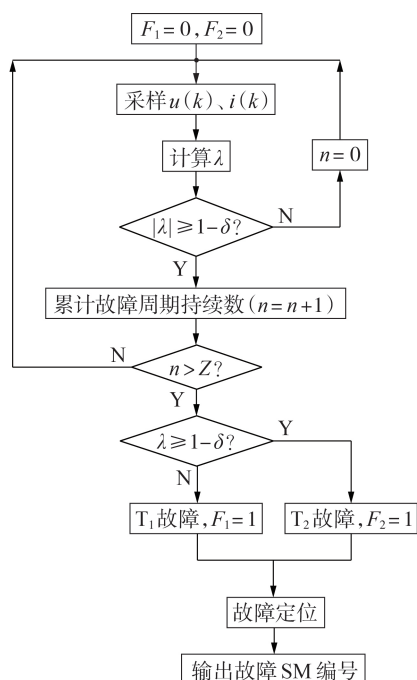


图4 故障诊断流程图

Fig.4 Flowchart of fault diagnosis

分组检测中测量值存在误差, 为避免误差对故障诊断造成干扰, 一组中所有 SM 的检测误差之和应小于 $(1-\delta)U_c$ 。在对 SM 分组时, 每组的 SM 个数 M 应满足:

$$M < \frac{(1-\delta)U_c}{\varepsilon_{\max}} \quad (25)$$

MMC 系统限定 SM 电容电压波动范围为 $\pm\zeta$, 为避免误判断, 在设定诊断阈值与计算每组 SM 个数时, δ 的取值应大于 ζ , 可选取 $\delta = 2\zeta$ 。

3.3 故障定位

在第 k 个控制周期检测到 SM 组内发生 T_1 故障, 表明第 $k-1$ 个控制周期投入的 SM 中包含故障 SM, 将第 $k-1$ 个控制周期内投入的 SM 标记并记录其个数 α ($0 < \alpha \leq M$), 记标记的 SM 为 SM^* , 未标记的 SM 为正常, 对正常 SM 按照电容电压大小进行排序。对 SM 分类, 可加快故障定位速度。

T_1 故障定位流程图如图5所示。图中 A_n ($n=0, 1, 2, \dots$) 为第 n 个计数周期内 $|\lambda|$ 的取值范围, 其值为1表示该计数周期内 $|\lambda| < 1-\delta$, 其值为2表示该计数周期内 $|\lambda| \geq 1-\delta$ 。为避免噪声造成的误判断, 将 β_1 个 SM^* 持续切除若干个周期后判断其中是否含有故障 SM。当 $n \geq Z$ 时, 通过 λ 的大小判断切除的 β_1 个 SM^* 中是否有故障 SM, 若 $|\lambda| \geq 1-\delta$, 则切除的 β_1 个 SM^* 都为正常 SM, 取消其标记, 投入的 $\alpha - \beta_1$ 个 SM^* 中有故障 SM, 更新 α ($\alpha = \alpha - \beta_1$); 否则, 投入的 $\alpha - \beta_1$ 个 SM^* 都为正常 SM, 取消其标记, 切除的 β_1 个 SM^* 中有故障 SM, 更新 α ($\alpha = \beta_1$)。当 $i_{arm} > 0$ 时, 系统正常运行。为加快故障定位速度, β_1 为:

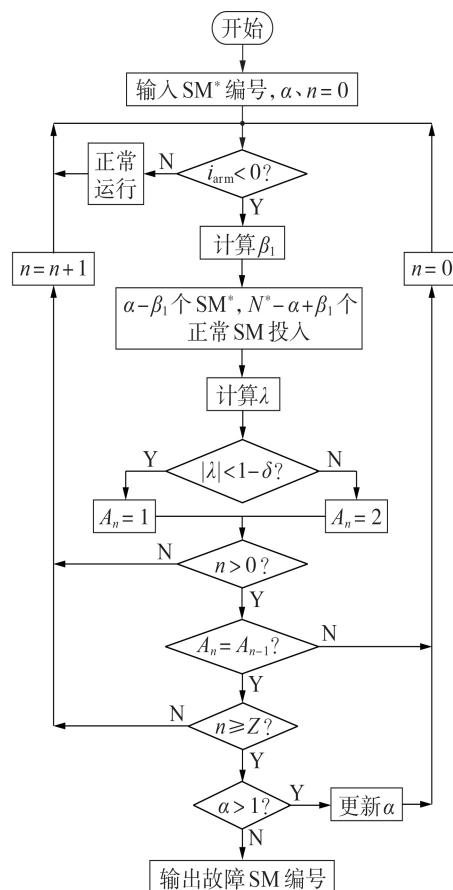


图5 T_1 故障定位流程图

Fig.5 Flowchart of T_1 fault location

$$\beta_1 = \min(\text{round}(\alpha/2), N - N^*) \quad (26)$$

其中,函数 $\text{round}(y)$ 为用四舍五入法求 y 的近似值;函数 $\min(x, y)$ 为求 x, y 的最小值。

T_2 故障定位流程图见附录图 A2, 在第 k 个控制周期检测到某一组 SM 内发生 T_2 故障, 将第 $k-1$ 个控制周期内切除的 α 个 SM 标记。当 $i_{\text{am}} > 0$ 时, 将 β_2 个 SM* 持续投入若干个周期后, 通过 λ 的大小判断投入的 β_2 个 SM* 中是否有故障 SM。若 $|\lambda| \geq 1 - \delta$, 则投入的 β_2 个 SM* 都为正常 SM, 切除的 $\alpha - \beta_2$ 个 SM* 中有故障的 SM, 否则, 投入的 β_2 个 SM* 中含有故障 SM, 切除的 $\alpha - \beta_2$ 个 SM* 都为正常 SM。对 β_2 个 SM* 检测完后, 更新标记个数 α , SM 的标记情况。当 $i_{\text{am}} < 0$ 时, 系统正常运行。 β_2 为:

$$\beta_2 = \min(\text{round}(\alpha/2), N^*) \quad (27)$$

4 仿真分析

为验证本文提出的基于 SM 电压分组检测的 MMC 系统 SM 开路故障诊断定位方法的有效性, 基于上海南汇柔性直流输电示范工程, 在 MATLAB / Simulink 仿真平台搭建了 49 电平 MMC 仿真模型, 每个桥臂有 56 个 SM, 将其平均分为 7 组, 每组 8 个, 前 6 组为运行模块, 第 7 组为冗余模块, 系统参数见附录表 A1。

4.1 SM 电容电压测量值误差仿真分析

在 SM 正常运行下进行稳态仿真, 所有 SM 的电容值一致, 设为 6 mF, a 相仿真结果如图 6 所示。图 6(a) 为 a 相输出电流波形, 对其进行快速傅里叶变换 (FFT) 分析, 相电流基波幅值为 419.9 A, 谐波含量为 0.81 %。图 6(b) 为 a 相 SM 电容电压及其放大图, 可以看出, SM 电容电压均在给定值 1 250 V 附近波

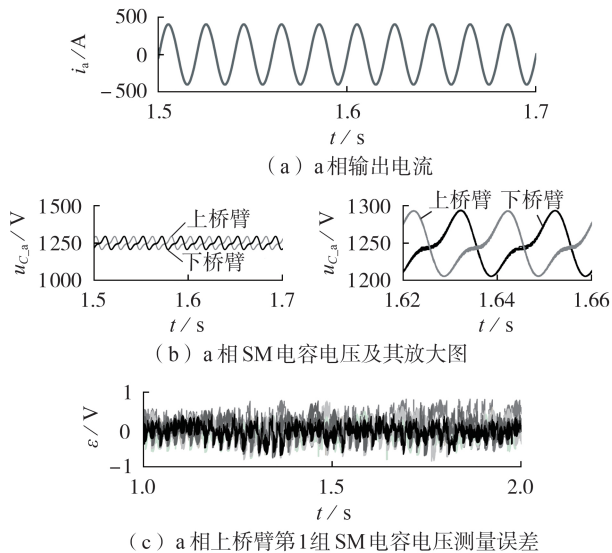


图 6 电容值一致时的仿真结果

Fig.6 Simulative results when capacitance values are consistent

动, 波动幅度为 3.6 %。图 6(c) 为 a 相上桥臂第 1 组 SM 电容电压测量误差, 可以看出, 在电容值一致的情况下, 误差小于 1 V, 测量误差与 SM 电容电压额定值的比值小于 1 %, 可忽略不计, 与理论分析结果一致。由仿真结果可知, 在 SM 电容值一致的情况下, 分组检测能够准确测量 SM 电容电压值。

为了验证本文提出的分组测量误差计算方法, 随机选取 4 个 SM, 其电容值分别偏移 -20 %、20 %、-10 %、10 %, 上桥臂 SM₁、SM₃ 的电容值分别设为 4.8、7.2 mF, 下桥臂 SM₂、SM₄ 的电容值分别设为 5.4、6.6 mF, 其余 SM 的电容值设为 6 mF。SM 电容值偏移情况下的仿真结果见附录图 A3。图 A3(a) 为 a 相输出电流波形, 对其进行 FFT 分析, 相电流基波幅值为 419.9 A, 谐波含量为 0.82 %。图 A3(b) 为 a 相 SM 电容电压及其放大图, 可以看出, SM 电容电压均在给定值 1 250 V 附近波动, 由于电容值偏移, 波动幅度变大, 为 5.6 %。

根据表 A1 中参数, 通过 U_{dc} 、 m 、负载电阻 R 可计算出 I 、 θ , 将 I 、 θ 、 m 、 L 、 C 、 N 代入式 (11) — (13) 计算出 I_d 、 I_2 、 θ_2 , 将 I 、 θ 、 I_d 、 I_2 、 θ_2 代入式 (10) 计算出 i_p , 将 i_p 、 m 、 C 代入式 (19) — (21) 计算可得: 当电容值偏移 20 % 时, $\varepsilon_1 = 31.98$ V; 当电容值偏移 10 % 时, $\varepsilon_2 = 14.21$ V。

图 A3(c) 为 a 相上桥臂第 1 组 SM 电容电压的测量误差及其放大图, 由仿真结果可知, 上桥臂 SM₁ — SM₃ 测量误差都在 $[-\varepsilon_1, \varepsilon_1]$ 范围内。图 A3(d) 为 a 相下桥臂第 1 组 SM 电容电压的测量误差及其放大图, 由仿真结果可知, 下桥臂 SM₁ — SM₃ 测量误差都在 $[-\varepsilon_2, \varepsilon_2]$ 范围内。由仿真结果可知, 当电容值偏移时, 本文提出的分组检测误差计算方法能够计算 SM 误差, 为如何分组提供依据。

4.2 SM 故障仿真分析

上桥臂 SM₁、SM₃ 的电容值分别设为 4.8、7.2 mF, 其余 SM 的电容值设为 6 mF, 阈值 Z 设为 5, $\delta = 20$ % (MMC 中 SM 电容电压波动一般控制在 ± 10 % 以内, 此处选取 $\delta = 20$ %)。将 ε_1 、 δ 、 U_c 代入式 (25) 中可得 $M < 30$, 本文选取 $M = 8$ 。

SM₂ 发生 T_1 故障时的仿真结果见图 7。图中, s_j ($j = 1, 2, \dots, N$) 为第 j 个 SM 的开关状态。由图 7(a) 可知, 当 MMC 正常运行时, $|\lambda|$ 远小于 $1 - \delta$, M 满足式 (25) 时, 电容值偏移不会造成误判断。由图 7(b) 可知, 在 $t_1 = 0.2926$ s 时诊断出系统发生 T_1 故障, $t_2 = 0.2944$ s 时找出故障 SM。由图 7(c) 可得 a 相上桥臂第 1 组检测判据 λ 、SM 开关情况。为便于分析, 将图 7(c) 转换为图 7(d), 当检测到故障时, 编号为 1、2、3、5、6、7 的 6 个 SM 被标记, 根据本文提出的检测方法, 依次对标记 SM 进行检测: 将 SM₁ — SM₃ 切除, $|\lambda| < 1 - \delta$, 表明在 SM₁ — SM₃ 中有故障 SM, SM₅ — SM₇ 都为正常 SM, 取消其标记; 将 SM₁、SM₂ 切除, $|\lambda| <$

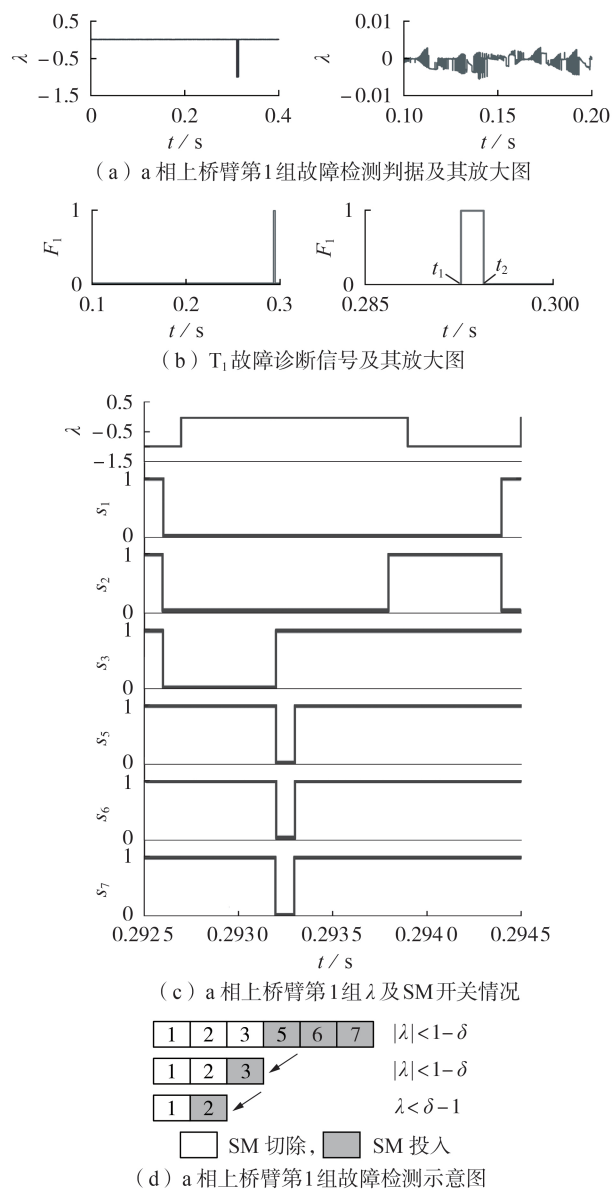


图7 T_1 故障诊断定位仿真结果
Fig.7 Simulative results of T_1 fault diagnosis and location

$1-\delta$, 表明 SM_1 、 SM_2 中有故障 SM, SM_3 为正常 SM, 取消其标记; 将 SM_1 切除, $\lambda < \delta-1$, 可判断 SM_2 发生故障。

SM_2 发生 T_2 故障时仿真结果见附录图 A4。根据图 A4(a)、(b), 在 0.2825 s 时诊断出系统发生 T_2 故障, 0.2843 s 时找出故障 SM。根据图 A4(c) 所示 a 相上桥臂第1组分类情况, 将图 A4(c) 转换为图 A4(d) 可知, 在检测到故障时, 编号为 1、2、3、4、5、6、8 的 7 个 SM 被标记, 对标记 SM 进行检测: 将 SM_1 — SM_4 投入, $|\lambda| < 1-\delta$, 表明在 SM_1 — SM_4 中有故障 SM, SM_5 、 SM_6 、 SM_8 为正常 SM, 取消其标记; 将 SM_1 、 SM_2 投入, $|\lambda| < 1-\delta$, 表明 SM_1 、 SM_2 中有故障 SM, SM_3 、 SM_4 为正常 SM, 取消其标记; 将 SM_1 投入, $\lambda > 1-\delta$, 可判断 SM_2 发生故障。

5 结论

当 MMC 系统 SM 数量较多时, 传统检测方法需大量传感器, 系统结构复杂、成本高, 并且每个 SM 都是潜在故障点, 数目庞大的 SM 会导致系统发生故障的概率增加。为了实现在减少电压传感器数量的同时, 提高系统的可靠性, 本文提出了基于分组检测的 MMC 系统 SM 开路故障诊断定位方法。该方法利用分组检测时测量、存储的信息进行诊断与定位, 无需增加额外的器件, 在检测到发生故障后, 对组内 SM 进行分类标记, 改变 SM 的工作状态, 根据 SM 故障特性, 对故障 SM 进行定位。仿真结果表明, 所提出的故障诊断定位方法, 可实现在减少传感器数量的情况下进行 SM 开路故障诊断, 对 MMC 简化系统结构的同时保证了系统可靠性。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张建坡, 田新成, 尹秀艳. 模块化多电平换流器直流输电控制策略[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(11): 103-108.
ZHANG Jianpo, TIAN Xincheng, YIN Xiuyan. Control strategy of MMC-HVDC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(11): 103-108.
- [2] 黄守道, 付雪婷, 饶宏, 等. 基于 Semi-Markov 的模块化多电平换流器的可靠性分析及其冗余配置策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(7): 128-133.
HUANG Shoudao, FU Xueting, RAO Hong, et al. Reliability analysis and redundant configuration strategy of MMC based on Semi-Markov[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(7): 128-133.
- [3] 许建中, 李承昱, 熊岩, 等. 模块化多电平换流器高效建模方法研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(13): 3381-3392.
XU Jianzhong, LI Chengyu, XIONG Yan, et al. A review of efficient modeling methods for modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(13): 3381-3392.
- [4] 李辉, 邓吉利, 姚然, 等. 计及运行工况的 MMC 换流阀可靠性建模与分析[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 108-114.
LI Hui, DENG Jili, YAO Ran, et al. Reliability modeling and analysis of MMC converter valve considering operation conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 108-114.
- [5] 张静, 郝亮亮, 黄银华, 等. 基于叠加逼近调制的模块化多电平换流器谐波环流抑制策略[J]. 电网技术, 2017, 41(11): 3539-3546.
ZHANG Jing, HAO Liangliang, HUANG Yinhua, et al. Circulating harmonic suppressing strategy for MMC based on superimposed approach modulation[J]. Power System Technology, 2017, 41(11): 3539-3546.
- [6] 马文忠, 张子昂, 王晓, 等. 一种能够清除直流故障和减少传感器数量的 MMC 子模块及其特性研究[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 87-92.
MA Wenzhong, ZHANG Ziang, WANG Xiao, et al. Research on MMC submodule which can clear DC fault and reduce number of sensors and its characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 87-92.
- [7] 徐业事. 模块化多电平换流器的优化均压策略与改进的子模块电压检测方法[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.

- XU Yesi. An optimized voltage balancing strategy and improved sub module voltage detection method for modular multilevel converter[D]. Changsha: Hunan University, 2017.
- [8] 徐帅, 张建忠. 多电平电压源型逆变器的容错技术综述[J]. 电工技术学报, 2015, 30(21): 39-50.
- XU Shuai, ZHANG Jianzhong. Overview of fault-tolerant techniques for multilevel voltage source inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(21): 39-50.
- [9] NAJMI V, NADEMI H, BURGOS R. An adaptive back-stepping observer for modular multilevel converter[C]//2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE). Pittsburgh, USA: IEEE, 2014: 2115-2120.
- [10] ABUSHAFA O S H M, DAHIDAH M S A, GADOUE S M, et al. Submodule voltage estimation scheme in modular multilevel converters with reduced voltage sensors based on Kalman filter approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(9): 7025-7035.
- [11] PICAS R, ZARAGOZA J, POUL J, et al. New measuring technique for reducing the number of voltage sensors in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(1): 177-187.
- [12] 罗德荣, 贺锐智, 黄守道, 等. 模块化多电平变流器子模块电压分组检测中过电压防护策略[J]. 电工技术学报, 2019, 34(14): 2957-2969.
- LUO Derong, HE Ruizhi, HUANG Shoudao, et al. Over-voltage protection strategy for sub-module of modular multilevel converter with reduced sensors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(14): 2957-2969.
- [13] 岳雨霏, 徐千鸣, 罗安, 等. 模块化多电平换流器单传感器电容电压平衡控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(16): 3663-3676.
- YUE Yufei, XU Qianming, LUO An, et al. Capacitor voltages balancing control strategy with single sensor measurement for modular multilevel converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(16): 3663-3676.
- [14] 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.
- [15] 周月宾. 模块化多电平换流器型直流输电系统的稳态运行解析和控制技术研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- ZHOU Yuebin. Steady-state analysis and control technologies for modular multilevel converter based HVDC[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [16] 周月宾, 江道灼, 郭捷, 等. 模块化多电平换流器子模块电容电压波动与内部环流分析[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(24): 8-14.
- ZHOU Yuebin, JIANG Daozhuo, GUO Jie, et al. Analysis of sub-module capacitor voltage ripples and circulating currents in modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(24): 8-14.

作者简介:



荣飞

荣飞(1978—),男,湖北仙桃人,副教授,博士,主要研究方向为分布式能源发电技术、电力电子变流技术、电力系统有源滤波和无功补偿(E-mail: rf_hunu@126.com);

朱语博(1996—),男,河南许昌人,硕士研究生,主要研究方向为电力电子变流技术、分布式能源发电技术(E-mail: 872907014@qq.com)。

(编辑 王欣竹)

Sub-module open fault diagnosis and location method of MMC based on sub-module voltage packet detection

RONG Fei¹, ZHU Yubo¹, ZHOU Shijia², HUANG Ying², YANG Guangyuan³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Southern Power Grid Research Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China;

3. Maintenance & Test Center of China Southern Power Grid EHV Power Transmission Company, Guangzhou 510663, China)

Abstract: With a large number of sub-modules of MMC (Modular Multilevel Converter), the system structure is complicated and the probability of failure is high. Aiming at the problem of sub-module open fault diagnosis, a sub-module open fault diagnosis and location method of MMC based on sub-module voltage packet detection is proposed. The fault characteristics of sub-modules are analyzed, the detection criterion is obtained by comparing the predicted value and actual value of the output voltage of the sub-module group, and the sub-module group and fault type are diagnosed according to the detection criterion. The working state of the sub-module is changed, and the fault is located according to the detection criterion. The measurement error of the sub-module capacitor voltage is analyzed quantitatively during the packet detection to provide a basis for sub-module voltage packet detection. A 49-level MMC simulation platform is built with MATLAB/Simulink, and different types of faults are simulated under the condition of capacitance value deviation. The simulation results show that the proposed fault diagnosis and location method can realize the sub-module open fault diagnosis and location when reducing the number of voltage sensor, so as to improve the system reliability.

Key words: MMC; packet detection; voltage observation; fault characteristics of sub-modules; sub-module fault diagnosis

附录

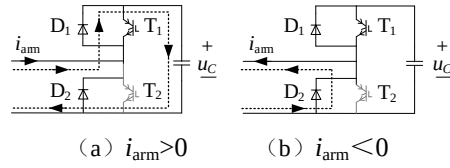


图 A1 T_2 故障且 SM 切除时的工作状态

Fig.A1 Working state when T_2 fault and SM exit operation

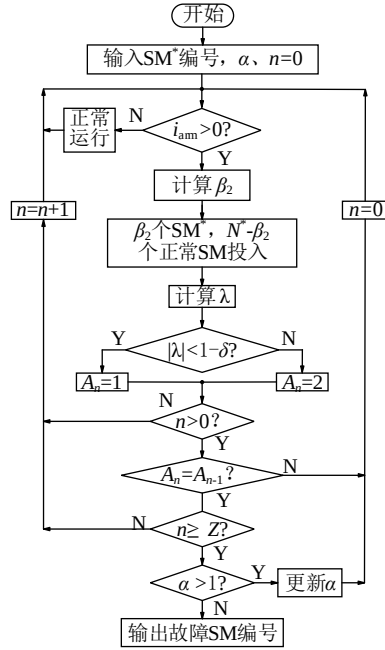


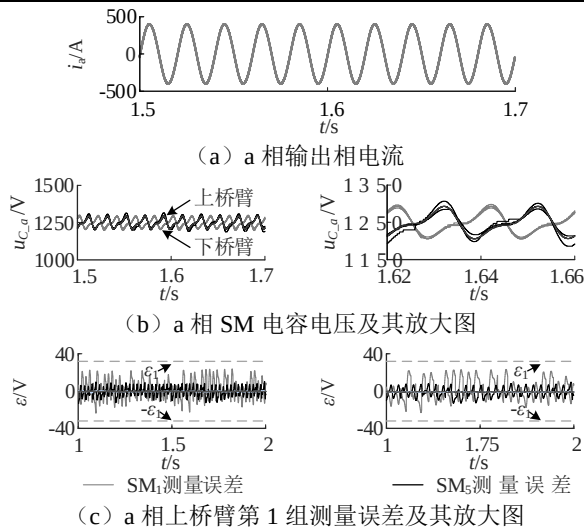
图 A2 T_2 故障定位流程图

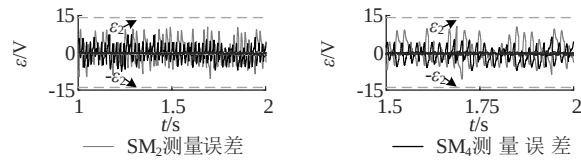
Fig.A2 Flowchart of T_2 fault location

表 A1 MMC 系统参数

Table A1 Parameters of MMC system

参数	取值	参数	取值
直流母线额定电压 U_{dc}	± 30 kV	交流侧电压 U_{ac}	35 kV
桥臂电抗器 L	53 mH	调制比 m	0.953
SM 电容 C	6 mF	负载电阻 R	68 Ω
SM 电容电压额定值 U_C	1.25 kV	控制周期 T	0.000 1 s
系统额定容量 P	18 MW		

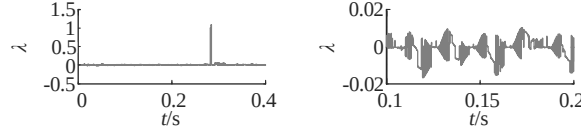




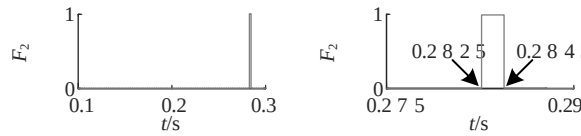
(d) a相下桥臂第1组测量误差及其放大图
注：仅标注 SM_1 、 SM_2 、 SM_4 、 SM_5 测量误差，
其余 SM 的测量误差在 0 附近，不予标注。

图 A3 电容值偏移下仿真结果

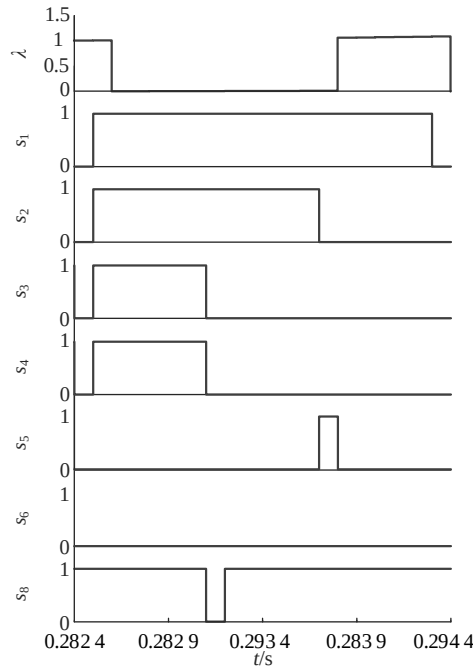
Fig.A3 Simulative results when capacitance value is offset



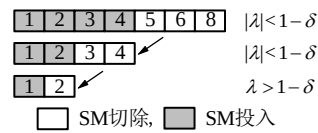
(a) a相上桥臂第1组故障检测判据及其放大图



(b) T_2 故障诊断信号及其放大图



(c) a相上桥臂第1组 λ 、开关情况



(d) a相上桥臂第1组故障检测示意图

图 A4 T_2 故障诊断定位仿真结果

Fig.A4 Simulative results of T_2 fault diagnosis and location