

兼具开路故障诊断能力的 MMC 电容电压测量方法

张正发, 李可军, 王卓迪, 刘智杰, 亓孝武, 于小晏

(山东大学电气工程学院, 山东省济南市 250061)

摘要: 模块化多电平换流器在高电压等级、大输送容量场合的应用中,各桥臂大量子模块的电压需要实时采集并维持在允许范围内,但电压传感器配置数量的增加影响了系统的经济性与可靠性。为解决以上问题,提出了一种基于电容电压预估和组电压测量的子模块电容电压测量方法。该方法对桥臂子模块进行了分组,每组仅配备一个电压传感器,从而使传感器数量得以减少。在该测量方法基础上提出了一种子模块开路故障诊断策略,通过比较电压实测值与预估值完成开路故障的快速诊断,并且对传感器设置了故障冗余,在传感器发生故障的情况下系统仍能保持稳定运行。基于 PSCAD/EMTDC 搭建了 21 电平基于模块化多电平换流器的高压直流仿真系统。仿真结果表明,所述方法具有与传统方法近似的测量精度,同时能在较短时间内诊断子模块开路故障与传感器故障。

关键词: 模块化多电平换流器; 电容电压测量; 电压传感器; 子模块开路故障

0 引言

模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)是由 R. Marquart 和 A. Lesnicar 提出的一种新型电压源换流器拓扑^[1]。因具有模块化设计、扩展性强、运行损耗小、输出波形质量高等优点,近年来 MMC 在高电压等级、大输送容量场合获得了越来越广泛的应用^[2-6]。

与传统两电平、三电平拓扑结构不同,MMC 通常不具备直流侧大电容,其通过桥臂子模块(sub-module, SM)中悬浮电容的级联来维持直流母线电压。因此,在中高压场合的应用中,为提高换流器容量和系统电压等级,每个桥臂上子模块的数量可能高达成百甚至上千个(以“Trans Bay Cable”为例,其每个桥臂包含 216 个子模块^[3])。实际运行中各子模块投切状态的不同使电容电压各异,因此需要均压策略将各子模块电压稳定在额定值附近。均压策略实时采集各子模块电容电压,并根据桥臂电流方向与电容电压的排序投切相应的子模块^[7]。随着子模块的增多,用于采集各子模块电压的电压传感器数量也需相应增加。这带来两方面弊端:一是增加了工程建设成本;二是增加了系统硬件配置的复杂度,且大量输入/输出(I/O)数据的获取与通信提

高了控制系统实现的难度,进而影响了系统运行的可靠性。

针对上述问题,目前已有一些学者开展了相关研究,这些研究主要分为两类:一是由开环控制代替传统的闭环控制^[8-10];二是仍基于闭环控制,但是在数据采集环节进行简化^[11-13]。其中文献[8]提出了一种无需子模块电压及桥臂电流测量的电容均压方法;文献[9]提出的开环调制策略可以显著降低开关频率;文献[10]提出了一种基于能量预估的开环控制方式且能消除特性次谐波。以上开环控制方式不需要子模块电压及桥臂电流反馈,但无法适用于故障工况下,稳定性稍差,且需要精确的系统参数。文献[11]设计了自适应观测器,通过直流母线电压及桥臂电流计算电容电压;文献[12]通过轮换采集各分组的电容电压,简化了数据采集环节,然而电压传感器的数量并未减少;文献[13]中电容电压由桥臂电流预估并以桥臂电压修正,减少了数据采集量与传感器数目,但该方法不适用于子模块数量较多及调制比低的情况。

本文提出了一种子模块电容电压测量新方法,该方法将桥臂子模块进行分组,每组仅配置一个电压传感器,能在显著减少传感器数量的前提下精确测量各子模块电压。在该测量方法基础上,提出一种子模块开路故障诊断方法,该方法通过比较组电压实测值与预估值完成开路故障的快速诊断;并对电压传感器设置了故障冗余,使系统在传感器出现

收稿日期: 2016-07-12; 修回日期: 2016-10-09。

上网日期: 2016-12-05。

国家自然科学基金资助项目(51347008)。

故障的情况下仍能保持正常运行。最后基于 PSCAD/EMTDC 搭建了仿真模型,验证了本文测量方法及故障诊断策略的有效性。

1 MMC 拓扑及运行原理

三相 MMC 拓扑及半桥子模块结构如附录 A 图 A1 所示。三相 MMC 由 6 个桥臂构成,上下桥臂合为一个相单元,每个桥臂包含若干个级联的子模块(SM₁ 至 SM_N)和一个桥臂电抗器 L 。半桥子模块(half bridge sub-module, HBSM)由两个绝缘栅双极型晶体管(IGBT)(T_1 和 T_2)和与之反并联的二极管(D_1 和 D_2)以及直流电容 C_0 构成。根据 T_1, T_2 开通状态不同,子模块端电压 u_{SM} 输出电容电压 u_c 或者 0。定义第 i 个子模块的开关状态 S_i 为:

$$S_i = \begin{cases} 1 & T_1 \text{ 开通}, T_2 \text{ 关断} \\ 0 & T_1 \text{ 关断}, T_2 \text{ 开通} \end{cases} \quad (1)$$

则单个子模块特性可用开关函数模型描述为:

$$\begin{cases} S_i i_{arm} = C \frac{du_{ci}}{dt} \\ u_{SM} = S_i u_{ci} \end{cases} \quad (2)$$

式中: C 为子模块电容; u_{ci} 为第 i 个子模块电容电压; i_{arm} 为桥臂电流,即附录 A 图 A1 中的上、下桥臂电流 i_{pj} 和 i_{nj} ,其中 j 取 a, b, c。

上、下桥臂电流可表示为:

$$i_{pj} = \frac{I_{dc}}{3} + i_{zj} + \frac{i_j}{2} \quad (3)$$

$$i_{nj} = \frac{I_{dc}}{3} + i_{zj} - \frac{i_j}{2} \quad (4)$$

式中: I_{dc} 为直流母线电流; i_j 为交流相电流; i_{zj} 主要为二倍频负序性质的环流。环流会增大系统损耗及电容电压波动,故采用文献[14]中方法对其进行抑制。

2 电容电压测量方法的基本原理

传统电容电压测量方法是在每个子模块中配置一个电压传感器以实时采集该子模块电压。实际工程中系统采样周期较短,子模块下个控制周期电压可由其开关函数模型及本控制周期初始状态预估得到。基于此,本文结合电容电压预估及组电压测量提出了一种能减少传感器配置数量的电容电压测量新方法。

2.1 电压测量与预估

以一个包含 4 个子模块的桥臂为例说明本文所提方法,如图 1 所示。

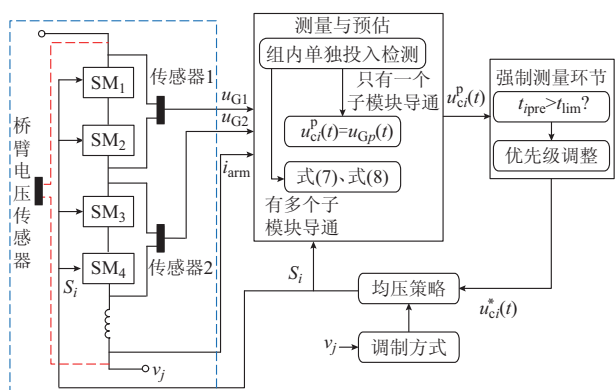


图 1 新测量方法结构框图

Fig.1 Block diagram of new measuring method

新测量方法将桥臂中 N 个子模块平均分为 M 组($M < N$),每组仅配置一个测量组电压的电压传感器,故每桥臂上电压传感器数目由 N 减少到 M 。当组中有多个子模块导通时,各子模块电容电压由预估得到,并由该组电压实测值修正;当组中仅有一个子模块导通时,传感器实测值即导通子模块的实际电压。测量原理及步骤详述如下。

根据式(1)和式(2),可由 $t - T_s$ 时刻电容初始电压 $u_{ci}(t - T_s)$ 及开关状态,求得 t 时刻电容电压预估 $\hat{u}_{ci}(t)$ 为:

$$\hat{u}_{ci}(t) = u_{ci}(t - T_s) + \frac{1}{C} \int_{t-T_s}^t S_i i_{arm}(t - T_s) dt \quad (5)$$

式中: $i = 1, 2, \dots, N$ 为子模块序号; T_s 为系统控制周期。

将第 p 组(组内 q 个子模块)中处于导通状态下子模块电压之和定义为组电压,则组电压预估值 \hat{u}_{Gp} 可表示为:

$$\hat{u}_{Gp}(t) = \sum_{i=1}^q \hat{u}_{ci}(t) S_i \quad (6)$$

受控制周期及积分方法等的影响,组电压实测值与预测值会产生很小的误差,定义该误差为 u_{err} 。采用误差平均的方法将该误差平均分配到处于导通状态的子模块中,得到子模块电压预估修正值 $\hat{u}_{ci}^p(t)$ 为:

$$\hat{u}_{ci}^p(t) = \hat{u}_{ci}(t) + \frac{u_{err}(t)}{\sum_{i=1}^q S_i} S_i \quad (7)$$

$$u_{err}(t) = u_{Gp}(t) - \hat{u}_{Gp}(t) \quad (8)$$

式中: $u_{Gp}(t)$ 为 t 时刻第 p 组电压实测值。

当组内只有一个子模块导通时,定义为该子模块“单独导通”。通过对该组内 q 个子模块开关状态 S_i 求和可判定组内是否有单独导通的子模块。若

某时刻组内子模块 S_i 之和为 1, 则 $S_i = 1$ 的子模块判定为单独导通。子模块单独导通时传感器测量值即为该子模块电容电压实际值, 将以该实测值代替电容电压预估修正值, 即

$$u_{ci}^p(t) = u_{Gp}(t) \quad (9)$$

2.2 强制测量环节

由 2.1 节可知, 当组内单个子模块导通时, 该子模块预估值由实测值更新, 实际运行中可能会有组内某子模块长时间未发生单独导通的情况。故引入强制测量环节, 确保每个子模块电容电压在有限时间内都能得到测量, 并使预估值由实测值更新。

强制测量环节结构框图如图 2 所示, 其通过合理地调整各子模块送入均压策略中的电压值 u_{ci}^* 来实现, 不需要额外增加硬件电路。若某个子模块距离上一次单独导通的时间 t_{ipre} 超过规定的时间限值 t_{lim} , 则强制该子模块单独导通。在图 2 中, 第 i 个子模块需要强制导通, 则该组子模块送入均压策略中的电压值附加一个调整因子(图 2 中蓝色虚线部分)。调整因子的选取需要考虑电流方向, 若电流方向为正时, 则第 i 个子模块送入均压策略中电压值降低 δ , 组内其他子模块则升高 δ ; 电流方向为负时则相反。 δ 的取值应大于电容电压最大波动幅值 ϵ 以屏蔽其他组子模块电压波动的影响, 本文中 δ 取 2ϵ 。

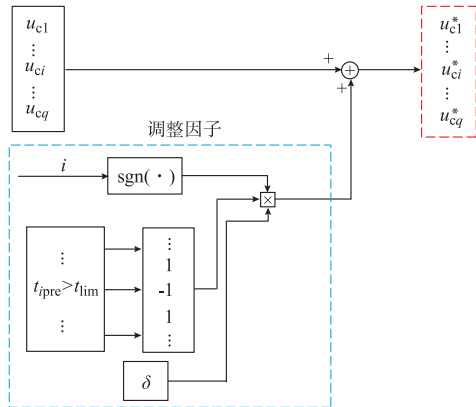


图 2 强制测量环节框图

Fig.2 Block diagram of compulsory measuring scheme

强制测量环节在桥臂导通子模块数不大于 $N_{lim} = N - N/M + 1$ 时才能进行。MMC 运行时桥臂子模块导通的最小数子模块数 N_{min} 与调制比 m 满足式(10)。

$$N_{min} = \frac{1}{2}(1 - m)N \quad (10)$$

若分组较少, 当桥臂子模块数量较多、同时调制比较低时, 会使 N_{min} 始终大于 N_{lim} , 此时强制测量环节无法进行。因此, 为满足强制测量环节, 最小的

分组数为 2。随着分组数增多, 子模块单独导通更容易发生, 测量精度也相应提高。

3 子模块及传感器故障诊断策略

3.1 子模块开路故障诊断

基于 MMC 的高压直流(MMC-HVDC)输电系统中半导体器件较为脆弱, 实际工程中包含 IGBT 数量又较多, 因此子模块中 IGBT 相对更容易发生故障^[15-16], 一般配备“热备用”状态下的冗余子模块以确保系统无间断运行^[15]。IGBT 故障分为短路故障和开路故障两种类型, 短路故障破坏性较大, 故子模块本地控制器一般配备了短路保护, 当短路故障发生时直接闭锁该子模块^[17]。开路故障危害相对较小并且可能不会立即被检测到, 造成电压、电流波形畸变等后果, 威胁到系统正常运行^[16], 因此本文着重考虑开路故障的情况。新测量方法测量子模块输出端电压而非传统测量方式下的电容电压, 开路故障子模块端电压特性与正常情况下又有所不同^[17-18], 故新方法下可以通过比较电压实测值与预估值完成子模块开路故障诊断。

子模块发生开路故障时端电压特性分析如下。

1) 当 T_1 开路故障时, 切除状态下子模块运行情况与正常时相同。对于导通状态下的子模块, 当 $i_a > 0$ 时桥臂电流流向如图 3(a) 所示, 电容仍可正常充电, 子模块端电压为 u_c ; 但当 $i_a < 0$ 时, 桥臂电流流向如图 3(b) 所示, 此时子模块端电压为 0, 不同于正常情况下的 u_c 。

2) 当 T_2 开路故障时, 处于导通状态下的子模块运行情况与正常时相同。对于切除状态下的子模块, 当 $i_a > 0$ 时, 桥臂电流流向如图 3(a) 所示, 此时子模块端电压为 u_c , 不同于正常状态下的 0; $i_a < 0$ 时电流流向如图 3(b) 所示, 此时端电压与正常状态下相同。虽然 T_1 和 T_2 开路故障时电容充放电异常, 然而均压策略作用下子模块电压仍可保持在额定值上下^[18]。

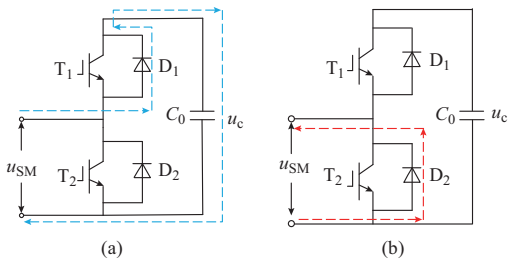


图 3 IGBT 开路时桥臂电流通路

Fig.3 Arm current path when IGBT is open-circuited

表 1 为各工况下子模块端电压 u_{SM} 特性, 表中

状态①和④分别作为本文 T_1 和 T_2 故障诊断的依据。本文故障诊断方法分为两步,具体如下。

表 1 子模块正常及故障工况下端电压
Table 1 SM terminal voltages under normal and faulty conditions

条件	子模块端电压			状态
	正常工况	T_1 故障	T_2 故障	
$(S_i=1) \& (i_a < 0)$	u_c	0	u_c	①
$(S_i=1) \& (i_a < 0)$	u_c	u_c	u_c	②
$(S_i=1) \& (i_a < 0)$	0	0	0	③
$(S_i=1) \& (i_a < 0)$	0	0	u_c	④

步骤 1: 由于传感器以组的形式进行配置, 所以首先对故障子模块组进行定位。若检测到 $u_{err}(t) > u_{th}$ 且持续一定时间, 则判定组内发生 T_2 开路故障; 若检测到 $u_{err}(t) < -u_{th}$ 且持续一定时间, 则判定组内发生 T_1 开路故障; 若 $-u_{th} < u_{err}(t) < u_{th}$, 则组内无故障。其中 u_{th} 为阈值, 为屏蔽各子模块电容电压波动的影响, u_{th} 及组内子模块数 q 取值范围应满足式(11)。

$$\begin{cases} q\epsilon < u_{th} < u_{nom} - \epsilon \\ 2 \leq q < \left\lceil \frac{u_{nom}}{\epsilon} \right\rceil - 1 \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\lceil x \rceil$ 表示不大于 x 的最大整数; u_{nom} 为子模块额定电压; ϵ 值通常为 $(0.05 \sim 0.1)u_{nom}$ ^[14,19]; q 值应该在满足式(11)基础上根据故障诊断速度、测量精度和经济性的需要灵活选择, 一般以不超过 10 为宜。

当组电压实测值与预估值偏差出现时, 不再对该组子模块电压预估值进行修正, 即送入均压策略中的预估值为 $\hat{u}_{ci}(t)$, 而非 $\hat{u}_{ci}^p(t)$; 同时组内子模块暂时屏蔽强制测量环节, 待步骤 2 定位到故障子模块后立即恢复。

步骤 2: 对故障子模块进行定位。

1) 当检测到 T_1 故障, 故障子模块存在于导通状态的子模块中。将导通状态下的子模块序号记入告警向量 \mathbf{k}_w , 然后对 \mathbf{k}_w 内各子模块进行检测, 检测方法是依次对其作切除处理并观察偏差是否消失。某个子模块受检测时, 应使告警向量内其他未受检测的子模块保持导通状态, 具体做法是使受检测的子模块送入均压策略的电压值降低一定值, 而其他未受检测的子模块电压值相应抬高一定值, 本文中该定值选为 3ϵ 。若某个子模块切除后 $u_{err}(t)$ 无明显变化, 则视为正常子模块, 将其移出告警向量并恢复正常运行; 若某子模块切除后使 $u_{err}(t)$ 恢复正常范围, 则判定其为故障子模块。

2) T_2 开路故障时, 类似于 1) 中, 将故障组内处于切除状态下的子模块序号记入告警向量 \mathbf{k}_w , 然后

依次对向量内子模块做导通处理以定位故障子模块。检测方法仍然靠改变故障组内子模块在均压策略中的排序实现, 即未受检测的子模块抬高一定值以保持切除状态, 受检测子模块送入均压策略中电压值则降低一定值使其导通, 导通时使 $u_{err}(t)$ 恢复正常范围的子模块即为故障子模块。

以上故障诊断方法适合单个子模块故障的情况, 对于多个子模块同时故障的诊断需要引入更复杂的判据。

3.2 传感器故障保护策略

新测量方法减小了系统硬件配置复杂度, 避免了每个控制周期内大量数据的采集与交互, 提高系统可靠性的同时也降低了工程成本。然而当某组传感器故障时, 会对该组子模块电压测量与故障诊断造成不利影响, 故本文对传感器设计了故障冗余。

如图 1 红色虚线部分所示, 传感器故障冗余的方法是增加一个桥臂电压传感器以测量桥臂电压, 并将该传感器测量值与同一桥臂各组传感器的测量值之和实时比较。如果两者之差在允许范围内, 则各传感器工作正常; 反之, 则有传感器故障。类似子模块故障定位过程, 当检测到故障后, 依次对各组子模块进行切除。若某组子模块切除后差值消失, 则该组传感器故障, 该组测量值由桥臂测量值与其他各组测值之差替代; 若该差值一直存在, 则判定桥臂传感器故障。

4 仿真分析

本文在 PSCAD/EMTDC 软件环境下搭建了 21 电平 MMC-HVDC 仿真系统对所提方法进行了验证。仿真系统参数见附录 A 表 A1, 系统参数设计参考了文献[19-20], 由于最近电平逼近(NLM)较其他调制方式更适合电平数较高的场合^[21], 故采用该调制方式。仿真系统中每个桥臂中子模块分为 6 组, 每组包含 4 个子模块。

在仿真中, $0.6 \sim 0.7$ s 换流器运行于额定负载; $0.7 \sim 0.85$ s 运行于 120% 负载; $0.85 \sim 1$ s 运行于 60% 负载; $1 \sim 1.15$ s 时负载与额定相同, 功率因数由 0.928 变为 0.90。附录 A 图 A2 和图 A3 分别为传统测量方法及新测量方法下换流器输出 A 相电流、电压波形图(B, C 相类似)。由图 A2 及图 A3 可以看出, 两种测量方式下换流器输出电压、电流均良好。通过对额定工况下电压、电流波形进行谐波分析可知, 传统测量方式下电压总谐波畸变率(THD)为 0.899%, 电流 THD 为 0.774%; 而新测量方式下电压、电流 THD 分别为 0.907% 和 0.848%, 证明新方法对换流器输出电压电流质量几乎无影响, 也不

会造成系统不稳定。附录 A 图 A4(a)和(b)分别为传统测量方法和新测量方法下 A 相上桥臂各子模块电压波形,由图 A4 可知,在系统运行的稳态及暂态过程中,新测量方法下子模块电容电压波动较传统测量方式下略微增大。新方法下电压波动略有增大主要是由于强制测量环节强制导通、切除某些子模块所致,但波动增大幅度仍在接受范围内。

附录 A 图 A5 比较了 A 相上桥臂单个子模块电压实测值与预估值的差值,比较结果显示新方法下的子模块电压测量值与实际值吻合度良好,误差很小,同时强制测量环节保证了预估值对实际值良好的收敛性。

通过设置 T_1 和 T_2 开路故障对本文中子模块故障诊断策略进行了验证,仿真中 u_{th} 设置为 $0.7u_{nom}$,仿真结果分别如图 4 和附录 A 图 A6 所示。

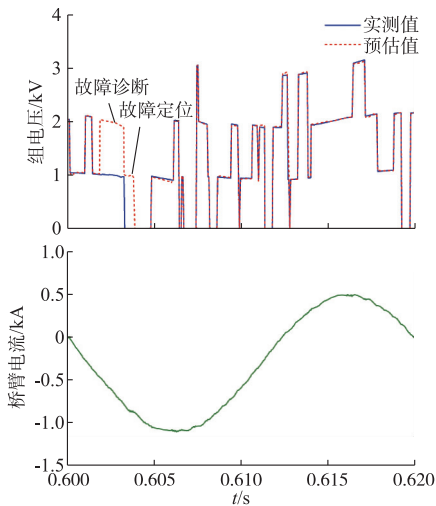


图 4 T_1 开路后组电压与桥臂电流波形图
Fig.4 Waveforms of group voltage and arm current after T_1 is open-circuited

图 4 中,在 0.6 s 发生 T_1 开路故障,0.601 8 s 时组电压预估值与实测值出现偏差,偏差持续 1 ms 后系统诊断为故障,0.603 9 s 系统定位并旁路故障子模块。附录 A 图 A6 中 0.73 s 发生 T_2 开路故障,但是故障发生时桥臂电流方向为负,所以故障没有被立即诊断;在 0.732 6 s 桥臂电流为正且故障子模块处于切除状态时,组电压实测值与预估值出现偏差,最终系统在 4.1 ms 内诊断并定位到故障子模块。从仿真结果还可以得知,尽管本文子模块故障定位时采用了各子模块依次检测的方式,并采用了一种降低器件开关频率的均压策略^[8],但由于组内子模块数目不是很多,同时系统控制周期较短,系统仍能快速诊断出故障。与现有的一些方法相比(例如文献[17]、文献[22]需要的时间分别为 13.7 ms 和 44 ms),本文能在更短时间内诊断并定位到故障

子模块。

为验证传感器故障保护策略有效性,在 0.81 s 设置 A 相上桥臂中一个传感器故障,故障后的传感器无法获取到组电压。由附录 A 图 A7 中的仿真波形可知,故障发生后桥臂传感器测量值与各组测量值之和出现偏差。在传感器故障保护策略作用下,系统在 2.5 ms 内识别出故障传感器并以桥臂传感器与其他组测量值之差替代故障组实测值,确保了系统的稳定运行。

以上分析及仿真的侧重点在系统的稳态及暂态过程,新方法在换流站启动时的应用情况未作过多探讨。对于研究换流器启动的文献[23-24],本文方法可满足文献中启动所需条件,然而目前尚未进行详细论证。

5 结语

本文提出了一种子模块电容电压测量新方法,该方法不仅能在显著缩减传感器数量的前提下获得与传统方法近似的测量精度,同时还具备子模块开路故障诊断能力。基于 PSCAD/EMTDC 软件环境的仿真结果证明了本文方法的有效性与可行性。相比传统测量方法,本文方法在缩减系统硬件配置的同时也降低了控制系统对实时采集数据的要求。然而目前文中开路故障诊断方法只适用于单个子模块故障的情况,同时新方法在换流器启动时的应用情况还未进行详细探讨,对以上几点的改进是下一步研究工作的方向。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] LESNICAR A, MARQUARDT R. An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range [C]// 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings, June 23-26, 2003, Bologna, Italy: 1-6.
- [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, et al. A review of modular multilevel converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-14.
- [3] DORN J, HUANG H, RETZMANN D. A new multilevel voltage-sourced converter topology for HVDC applications[C]// International Council on Large Electric Systems, August 25-29, 2008, Paris, France: 1-8.
- [4] 尹瑞,江道灼,胡鹏飞,等.新型混合高压直流输电技术在海上风电场并网中的应用[J].电力系统自动化,2015,39(14):133-139. DOI:10.7500/AEPS20141118017.
YIN Rui, JIANG Daozhuo, HU Pengfei, et al. Hybrid HVDC transmission topology for offshore wind farm integration[J].

- Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14): 133-139. DOI: 10.7500/AEPS20141118017.
- [5] 陈刚,李鹏,袁宇波.MMC-UPFC 在南京西环网的应用及其谐波特性分析[J].电力系统自动化,2016,40(7):121-127. DOI: 10.7500/AEPS20150613007.
- CHEN Gang, LI Peng, YUAN Yubo, Application of MMC-UPFC on Nanjing western grid and its application analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(7): 121-127. DOI: 10.7500/AEPS20150613007.
- [6] 梁莹玉,张涛,刘建政,等.向无源网络供电的 MMC-HVDC 逆变站高性能控制策略[J].电力系统自动化,2015,39(23):119-125. DOI:10.7500/AEPS20150127008.
- 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. DOI: 10.7500/AEPS20150127008.
- [7] PERALTA J, SAAD H, DENNETIERE S, et al. Detailed and averaged models for a 401-level MMC-HVDC system[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2012, 27(3): 1501-1508.
- [8] AHMED K H, ADAM G P. New modified staircase modulation and capacitor balancing strategy of 21-level modular multilevel converter for HVDC transmission systems [C]// 7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, April 8-10, 2014, Manchester, UK;1-6.
- [9] ILVES K, ANTONOPOULOS A, NORRGA S, et al. A new modulation method for the modular multilevel converter allowing fundamental switching frequency[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2012, 27(8): 3482-3494.
- [10] 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.
- [11] NADEMI H, DAS A, NORUM L E. Modular multilevel converter with an adaptive observer of capacitor voltages[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2015, 30(1): 235-248.
- [12] JUNG J J, LEE H J, HA J I, et al. Reduced sampling rate for cell voltage sensing in high-level modular multilevel converter [C]// 2014 IEEE International Conference on Industrial Technology, February 26-March 1, 2014, Busan, Korea: 336-341.
- [13] D'ARCO S, SUUL J A. Estimation of sub-module capacitor voltages in modular multilevel converters [C]// 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications, September 2-6, 2013, Lille, France: 1-10.
- [14] TU Q, XU Z, XU L. Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2011, 26(3): 2009-2017.
- [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 sub-module faults in modular multilevel converter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(16): 94-98.
- [16] LI B, SHI S, WANG B, et al. Fault diagnosis and tolerant control of single IGBT open-circuit failure in modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2016, 31(4): 3165-3176.
- [17] YANG Q, QIN J, SAEEDIFARD M. Analysis, detection, and location of open-switch submodule failures in a modular multilevel converter[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2016, 31(1): 155-164.
- [18] 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.
- [19] 王姗姗,周孝信,汤广福,等.模块化多电平 HVDC 输电系统子模块电容值的选取和计算[J].电网技术,2011,35(1):26-32.
- WANG Shanshan, ZHOU Xiaoxin, TANG Guangfu, et al. Selection and calculation for sub-module capacitance in modular multi-level HVDC power transmission system [J]. Power System Technology, 2011, 35(1): 26-32.
- [20] 赵成勇,胡静,翟晓萌,等.模块化多电平换流器桥臂电抗器参数设计方法[J].电力系统自动化,2013,37(15):89-94.
- ZHAO Chengyong, HU Jing, ZHAI Xiaomeng, et al. A parameter design method of bridge arm reactor in modular multilevel converter [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 89-94.
- [21] 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.
- [22] DENG F, CHEN Z, KHAN M R, et al. Fault detection and localization method for modular multilevel converters[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2015, 30(5): 2721-2732.
- [23] TIAN K, WU B, DU S, et al. A simple and cost-effective precharge method for modular multilevel converters by using a low-voltage DC source[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2015, 31(7): 5321-5329.
- [24] 郭高朋,胡学浩,温家良,等.模块化多电平变流器的预充电控制策略[J].电网技术,2014,38(10):2624-2630.
- GUO Gaopeng, HU Xuehao, WEN Jialiang, et al. Precharge control strategy for modular multilevel converter [J]. Power System Technology, 2014, 38(10): 2624-2630.

张正发(1990—),男,硕士研究生,主要研究方向:高压直流输电、柔性直流输电。E-mail: zhangzhengfa90@163.com

李可军(1972—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:柔性直流输电技术、输变电设备状态检修、智能配电网。E-mail: lkjun@sdu.edu.cn

王卓迪(1986—),男,博士研究生,主要研究方向:多端直流输电、高压直流系统控制策略。E-mail: wangzhuodi120@126.com

(编辑 孔丽蓓)

(下转第 167 页 continued on page 167)

Measuring Method of MMC Capacitor Voltage with Diagnostic Ability of Open-circuit Fault

ZHANG Zhengfa, LI Kejun, WANG Zhuodi, LIU Zhijie, QI Xiaowu, YU Xiaoyan

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: In the high-voltage and high-power applications of modular multilevel converters (MMCs), large amounts of sub-module (SM) capacitor voltages need to be sampled and maintained in an acceptable range, but the increase in the number of voltage sensors compromises both economy and reliability of the overall system. To solve this problem, a new method of measuring SM capacitor voltages based on voltage estimation and group voltage measurement is proposed. The proposed method divides SMs in the same converter arm into groups, with each group equipped with only one voltage sensor to reduce the number of voltage sensors. On the basis of the new measuring method, a SM open-circuit diagnosis strategy is introduced, which can detect and locate faulty SM rapidly by comparing voltage measurement and estimation, and voltage sensor redundant technique is given to guarantee system normal operation in case voltage sensor fault should occur. A 21-level MMC based high voltage direct current simulation system is set up in PSCAD/EMTDC software environment. It is shown by simulation results that the new method has an approximate measuring accuracy as the traditional one. Meanwhile, SM open-circuit fault and voltage sensor fault can be diagnosed within a relatively short time.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51347008).

Key words: modular multilevel converter (MMC); capacitor voltage measurement; voltage sensor; open-circuit fault of sub-module