

DOI: 10.7652/xjtuxb201906021

柔性直流输电电子模块电容器电容值 在线获取方法

潘亮¹, 陈世瑛¹, 张健², 刘源³, 刘琛硕¹, 汲胜昌¹, 祝令瑜¹

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安;
2. 广东电网有限责任公司电力科学研究院, 510080, 广州; 3. 国网西安供电公司, 710000, 西安)

摘要: 针对柔性直流输电系统中模块化多电平换流器(MMC)子模块电容器常常会老化失效,威胁系统安全的问题,以监测 MMC 子模块电容器状态为目标,提出了一种采用自适应滤波器的柔性直流输电电子模块电容器电容值的在线获取方法。首先,利用实时反馈到控制系统的子模块电压和桥臂电流信息,基于离散化处理后的电容器电压、电流以及电容值的关系,实时计算得到电容器电容值;然后,引入自适应滤波技术滤除计算结果的噪声,得到最终电容值的计算结果。利用 Simulink 仿真平台和阀段试验平台实测数据对所提计算方法进行了验证。验证结果表明,最终的电容值计算结果始终稳定在真值附近,当电压电流测量的不确定度小于 1% 时,可以保证计算结果误差小于 0.5%,能够满足子模块电容器状态监测的需求。

关键词: 柔性直流输电;模块化多电平换流器;子模块电容器;自适应滤波器;状态监测

中图分类号: TM536;TM930.12 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)06-0161-08

Online Monitoring Method of Capacitance Value of Sub-Module for Flexible High Voltage Direct Current Using Adaptive Filter

PAN Liang¹, CHEN Shiyang¹, ZHANG Jian², LIU Yuan³, LIU Chenshuo¹,
JI Shengchang¹, ZHU Lingyu¹

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co. Ltd., Guangzhou 510080, China;
3. State Grid Xi'an Power Supply Company, Xi'an 710000, China)

Abstract: An online monitoring method of capacitance value of sub-module for flexible high voltage direct current (HVDC) transmission system using adaptive filter is proposed to solve the problem that the sub-module capacitors of modular multi-level converter (MMC) in the flexible HVDC system often age and fail, threatening the safety of the system, and to monitor the capacitor state. Firstly, the capacitor's capacitance value is calculated in real time based on the relationship among the capacitor's voltage, current and capacitance value after the discretization process, in which the information of the sub-module voltage and bridge arm current displayed in the control system in real time is used. Then an adaptive filtering technology is introduced to filter out the noises in calculation results to obtain the final capacitance value. The proposed calculation method is verified by using the measured data from a Simulink platform and a valve section test platform. The verification results show that the final capacitance values calculated are

always stable around the true value. When the uncertainty of voltage and current measurement is less than 1%, the errors of calculation results are guaranteed to be less than 0.5%, which meets the requirement of sub-module capacitor condition monitoring.

Keywords: flexible high voltage direct current transmission; modular multi-level converter; sub-module capacitor; adaptive filter; condition monitoring

基于模块化多电平换流器(MMC)的柔性直流输电(HVDC)具有显著的技术优势,在世界范围内得到了快速发展^[1]。子模块是 MMC 最基本的构成单元,也是最重要的关键组件,其运行状态直接关系到整个换流器甚至是整个柔性直流输电系统的运行安全。子模块中的 IGBT,电容等元件在实际运行过程中会逐渐老化,对系统安全运行带来隐患^[2]。MMC 子模块中的电容器普遍采用金属化膜电容器(MPPF-Cap),金属化膜电容器具有自愈性性能优良、运行可靠性高的优点,但在运行过程中会逐渐老化,电容值会不断减少^[3-5],当电容值衰减 5%时可视为器件失效^[6-7]。由于金属化膜电容器的电容减少速度会随着老化程度的增加而增加,电容值过低不仅会加速老化,甚至还会引起爆炸等严重事故,因此开展 MMC 子模块电容值在线监测技术研究具有重要工程意义。

MMC 子模块电容器状态监测研究已得到相关学者的关注。2013 年,Yun-Jae 等人提出通过注入纹波电流来监测子模块电容值的方法^[8],该方法是首先在环流回路中注入一个可控的交流电流来引起电容上的纹波电压,在测量时先用带通滤波器滤出所注入电流频率的纹波电压和纹波电流,再通过最小二乘法(RLS)用电压电流值来计算子模块电容。这种方法能排除其他频率电压电流的影响,测量精度也达到了 1%左右,但需要增加额外的装置,不能很好的满足金属化膜电容器在线状态监测的需求。2015 年,Newcastle 大学的 Abushafa 等人提出了另一种监测子模块电容器电容值的方法^[9],然后利用卡尔曼滤波器(KF)滤波得到一条收敛的电容值曲线,最后得到的电容值误差波动保持在 1%以内,但其验证过程中没有考虑测量精度的影响,且不同的运行环境和测量环境会对这种方法的收敛速度和测量精度造成较大影响。

本文借鉴前人的研究成果,提出了一种基于自适应滤波器的 MMC 子模块电容器在线监测方法。在利用 MMC 的桥臂电流和子模块电压计算出子模块电容值之后,利用自适应滤波器进行滤波,不仅拥有更好的适用性,而且得到了更稳定、更精确的监测

结果。同时,本文在利用仿真数据计算电容值时考虑到了工程应用时子模块电压和桥臂电流的测量误差。此外,本文最后通过实际工程的阀段级实验平台实测数据对所提算法进行了进一步验证。

1 MMC 的运行结构及控制原理

三相 MMC 的基本结构^[10]如图 1 所示,图 1a 为整体结构图,每相由上下 2 个桥臂构成,每个桥臂由 N 个子模块和一个桥臂电感组成。图 1b 为单个子模块的结构示意图,其中 $D1$ 和 $D2$ 为其反并联的二极管, C 代表子模块电容器,即需要监测的电容器模块, S_1 和 S_2 分别是 IGBT1 和 IGBT2 的驱动逻辑信号。根据 IGBT 的导通状态和子模块电流的流向可以把子模块的工作状态分为以下 3 种^[11]。

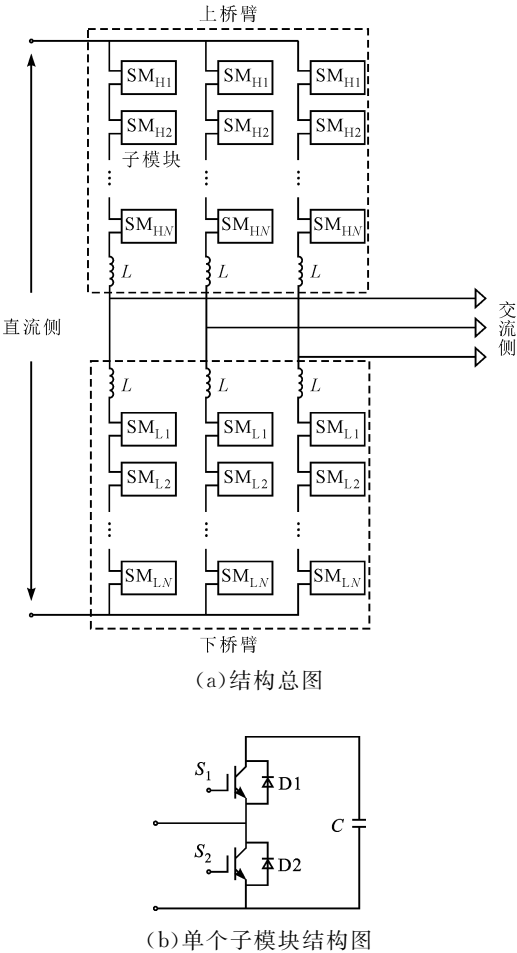


图 1 三相 MMC 的基本结构示意图

(1)状态 1。\$S_1 = S_2 = 0\$ 均关断,此时根据电流流向不同,工作模式可分为模式 1 和模式 2,分别用于 MMC 启动时向电容器供电和模块故障时将子模块电容旁路。

(2)状态 2。\$S_1 = 1, S_2 = 0\$,工作模式根据电流流向分为模式 2 和模式 3,这种状态由称为投入状态,此时电容器一直投入运行,不同模式下电容器处于充电或放电状态。

(3)状态 3。\$S_1 = 0, S_2 = 1\$,此时子模块工作模式处于模式 5 和模式 6,这 2 种模式下电容器均处于旁路状态。

MMC 子模块不同的工作状态及工作模式如图 2 所示。

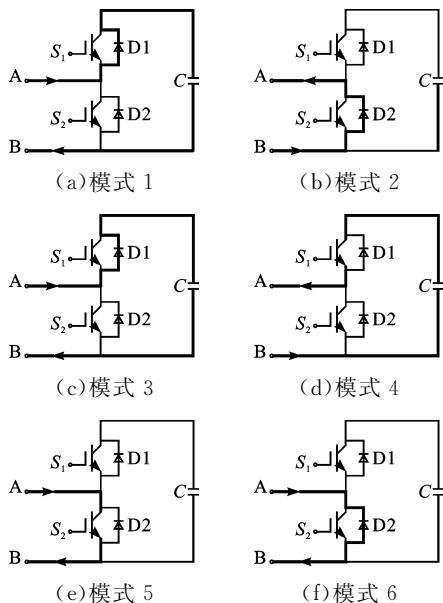


图 2 MMC 子模块不同的工作状态及工作模式

在 MMC 运行过程中,因为直流侧电压是由多个子模块的电容电压串联维持,所以对于每个子模块上的电容电压的平衡控制非常重要。本文采用传统的排序算法^[11-12]来维持各个子模块电容电压的平衡。首先根据调制信号得到 2 个桥臂中应处于投入状态和切除状态的子模块的数量,再对监测到的子模块电容电压值进行排序,然后根据桥臂电流的方向确定此时投入的子模块中电容器的充电或放电状态,最后投入合适的子模块。如果电流方向会对子模块电容器充电,则选择投入子模块电容器电压较低的子模块;如果电流方向会造成子模块电容放电,则选择投入子模块电容器电压较高的子模块。如此,通过每一次的调整可以减小各个子模块的电压波动。

2 子模块电容值在线计算方法

MMC 子模块电容器的状态监测通过监测电容器电容值实现。本文将通过 MMC 控制系统已监测的电流量(桥臂电流和子模块电容器电压)计算 MMC 子模块电容器电容值,实现 MMC 子模块的在线监测,不需要额外添加传感器。

2.1 电容值计算原理

在 MMC 运行过程中,子模块电容器不断充放电。利用充放电中电容器电压、充放电电流以及电容值直接的关系即可对子模块电容值进行计算。在子模块电容投入运行的状态下,电容器电压等于反馈到控制系统的子模块电容电压,充放电电流等于同一时间的桥臂电流。从前文对 MMC 结构和控制的分析可知,子模块电压和桥臂电流对于 MMC 控制系统为已知信息,且在运行过程中实时更新,因此利用子模块电容电压和桥臂电流在线获取子模块电容值的方法是可行的。对于特定的子模块,桥臂电流和子模块电容电压的关系满足

$$i = C \frac{d(U - U_{\text{ESR}})}{dt} \quad (1)$$

式中:\$i\$ 为桥臂电流;\$C\$ 为子模块电容值;\$U\$ 为子模块电容电压值;\$U_{\text{ESR}}\$ 为电容等效串联电阻(ESR)的电压。

MMC 子模块中的电容器采用的是金属化膜电容器,其等效串联电阻是 \$\text{m}\Omega\$ 量级,由于实际等效串联电阻上的电压 \$U_{\text{ESR}}\$ 仅占子模块电压 \$U\$ 的 0.1%,因此,等效串联电阻在电容值计算过程中可以忽略。

在实际运行过程中,由于采集的信号是离散的,所以需要式(1)进行离散化处理,在忽略掉等效串联电阻上的电压后进行计算,得到子模块电容值 \$C\$ 的计算公式如下

$$C = \frac{(i(t) + i(t-1))\Delta t}{2(U(t) - U(t-1))} \quad (2)$$

式中:\$\Delta t\$ 为测量系统的测量周期;\$U(t-1)\$、\$i(t-1)\$ 为上一时刻的电压、电流值;\$U(t)\$、\$i(t)\$ 为此时刻的电压、电流值。

电容值的计算基于单个电容器的电压和电流,因此 MMC 的调制策略、子模块电容电压平衡策略以及 MMC 子模块数量对电容值计算没有影响,由运行工况等因素造成的桥臂电流畸变对电容值计算也没有影响。本文所提电容值计算方法具有较高的适应性。

在 MMC 的运行过程中,电容器经常处于旁路

状态,而由上式计算电容值需要子模块处于投入状态,即第 2 节所述状态 2 的电容器充放电模式。判断子模块处于投入状态的方法有以下 2 种。

(1)使用门极控制信号 $S(t)$ 。根据第 2 节的分析,运行过程中,子模块只有处于投入状态的时候,电容器才被接入电路中进行正常的充放电,此状态下门极信号 $S_1(t)=1, S_2(t)=0$;在切除状态下,门极信号 $S_1(t)=0, S_2(t)=1$ 。所以,计算时首先需要根据 $S_1(t)=1$ 或 $S_2(t)=0$ 的判据判断当前时刻数据是否为子模块投入状态的连续时间段内测量的信号,并在子模块投入状态的连续时间段上利用公式(2)计算电容值。

(2)利用电容电压的波动情况进行判断。计算需在子模块投入状态的连续时间段上进行,此状态子模块电容器处于充电或放电模式,子模块电容器电压均会有变化,而子模块处于切除状态时电容器电压几乎不变。因此,通过计算数个连续的子模块电容器电压监测数据的差值,即可判断子模块是否处于投入状态。

2.2 计算精度与自适应滤波

实际测量过程中,由于电压电流的测量误差和离散过程中的量化误差等因素的影响,使得计算出的电容值呈现波动的情况。由于电容值衰减 5%即可认为设备失效,当计算结果本身的不确定度超过 1%时,用其判断子模块电容器老化程度的可靠性大大降低。所以,减小计算值的误差、提高电容值计算精度对于 MMC 子模块电容器状态监测十分重要。

本文采取自适应滤波的方法对子模块电容值的原始计算结果进行处理。自适应滤波器具有强的适应性,其优点在于不需要预先知道噪声信号的频率特性,而且参数是不断自适应,自动加以调整改变的^[13-14]。对于 MMC 子模块中计算得到的电容值而言,其噪声干扰往往是多方面的,而且噪声特性也难以得知,所以应用这种自适应滤波的方式最为适合。

自适应滤波器的原理流程图如图 3 所示。原始信号首先进入滤波结构进行第一次迭代,然后对输出结果进行性能评估,本文的评估方法采取的是 LMS 算法^[15]。根据评估的误差改变滤波器自身的滤波器系数,然后进入下一步迭代,直到得到最终的滤波结果。

本文选取的是基于 LMS 算法的经典的自适应滤波器,具体运算流程如下。

(1)滤波输出

$$y(n) = \omega^T(n)x(n) \tag{3}$$

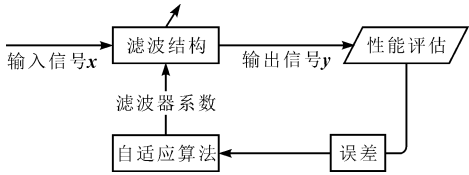


图 3 自适应滤波器原理图

式中: $\omega(n)$ 为自适应滤波滤波器的滤波系数,是一个 m 维的向量, m 是自适应滤波器的系数个数,该值太小会使得滤波结果不够精确,太大则会导致计算时间较长,收敛速度慢^[16],在本次仿真中选取为 50; $x(n)$ 为原始电容值,波动较大; $y(n)$ 为滤波后的电容值,由不断调整的滤波系数进行修正。

(2)误差信号

$$e(n) = d(n) - y(n) \tag{4}$$

式中: $e(n)$ 为误差信号,用于调节滤波器的滤波系数。通过参数的不断调节,最终可以获得理想的滤波效果。

(3)滤波器系数更新

$$\omega(n+1) = \omega(n) + \beta e(n)x(n) \tag{5}$$

3 仿真验证

为了验证本文所提子模块电容值在线获取方法的各项性能,本文利用 Simulink 平台搭建了一个三相 9 电平的 MMC 仿真模型。模型采用 NLM 调制策略^[17-18],模型电容电压平衡控制方法采取经典的电容排序的方法。仿真时选取的各个电气元件参数如表 1 所示。

表 1 仿真选取元件的参数

电气参数	数值
直流侧电压/kV	8
子模块电容/mF	5
桥臂电感/mH	10
负载/ Ω	20
计算步长/ μ s	100

仿真得到的输出相电压结果如图 4 所示。由图 4 可见,输出电压为标准的阶梯波。在运行过程中测量得到的桥臂电流和子模块电压如图 5、图 6 所示。为了模拟工程实际,将桥臂电流和子模块电压测量值测量不确定度均设置为 1%。

由桥臂电流、子模块电压以及子模块的控制信号 $G(t)$ 可以测量出一系列的子模块电容值,结果如图 7 所示。由图 7 可见,未进行滤波时其误差过大,无法作为判断电容器老化的判据,所以对其进行滤

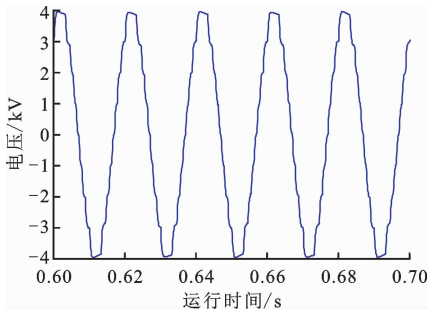


图 4 仿真模型输出电压

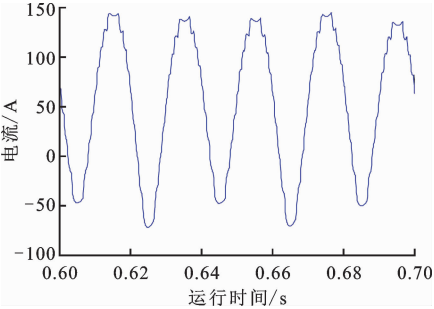


图 5 仿真模型桥臂电流

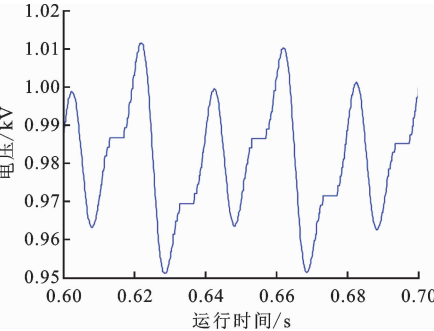


图 6 仿真模型子模块电压

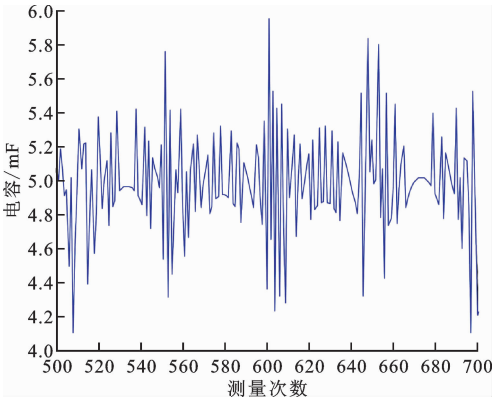


图 7 滤波前仿真计算的子模块电容

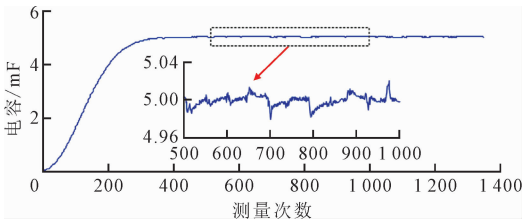


图 8 滤波后仿真计算的子模块电容

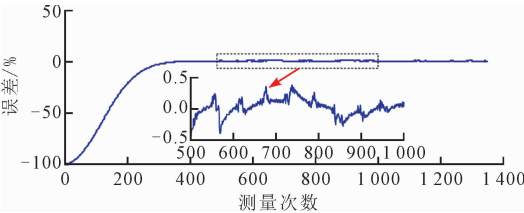


图 9 滤波后仿真计算的电容误差值

差结果如图 9 所示。可以看到,在仿真系统中,在桥臂电流和子模块电压测量值测量不确定度为 1% 的情况下,该方法得到的电容值的误差可以保持在 0.5% 之内,而且收敛速度也比较快,计算次数在 500 次以内即可收敛。计算精度和速度可以满足工程上对子模块电容器状态监测的要求。误差主要来源于式(2)对电流的离散处理时使用平均值作为一段时间内的电流值。

4 阀段级试验验证

本研究通过实际工程的阀段级试验平台对所提方法进行进一步验证。阀段试验是验证 MMC 运行特性和保护策略的重要手段,能够在实验室中模拟真实现场的设备开关过程 and 控制系统功能,因此对于子模块电容值在线计算方法的验证具有足够的说明性^[19]。阀段运行试验平台由补能系统、陪试阀段、被试阀段和负载电感组成^[20],其结构如图 10 所示,试验平台的关键参数如表 2 所示。

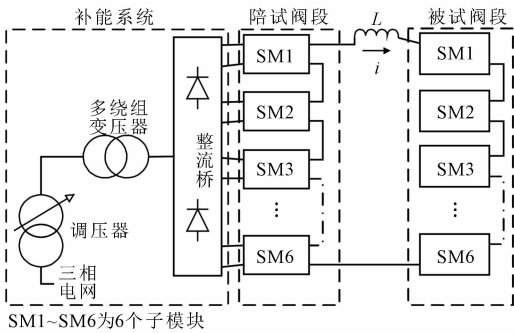


图 10 阀段试验平台结构原理

波非常重要。

利用自适应滤波器对图 7 中的计算电容值进行滤波,所得到的最终结果如图 8 所示。

对图 8 所示电容值计算结果进行误差分析,误

阀段试验平台实测的桥臂电流和子模块电容器

电压值分别如图 11、图 12 所示。从子模块电压波形可以看出,子模块电压时而变化时而保持不变,分别对应子模块投入状态和旁路状态。

表 2 阀段试验平台关键参数

电气参数	数值
负载电感/mH	4.5
直流侧最大电压/kV	10.2
子模块电容/mF	18
阀段级数	6
电容额定电压/kV	1.7

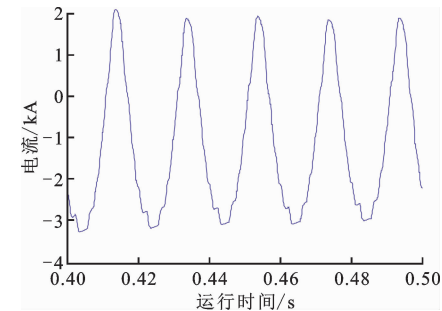


图 11 桥臂电流

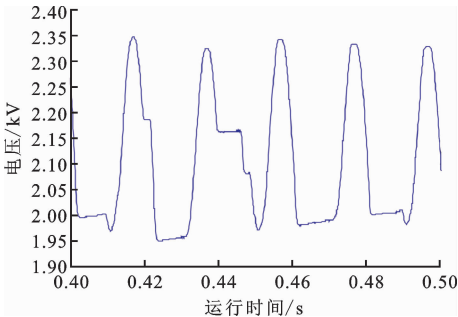


图 12 子模块电容器电压

实际工程中未必可以方便获得子模块开关的开关状态信息。本阀段级试验研究通过检测一段时间内子模块电容器电压值的变化情况来判断子模块是否处于投入状态。

选择电容处于投入状态的时刻,利用式(2)直接计算得到子模块电容器电容值如图 13 所示。由图 13 可以看出,滤波前,计算得到的电容值波动和误差较大,最大误差超过 10%。

对其应用自适应滤波器得到子模块电容值和误差如图 14、图 15 所示,可以看到相比于仿真系统的测量结果,阀段试验平台数据得到的计算结果误差相对较大,这是由于工程中的测量误差等原因导致的结果,但该方法所测量得到的计算结果不确定度仍可以控制在 1% 以内。

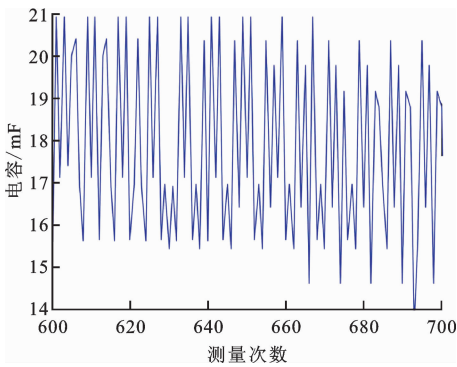


图 13 滤波前阀段实测数据计算所得电容值

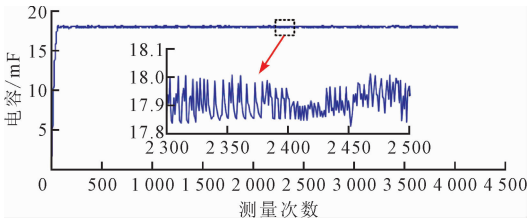


图 14 滤波后阀段实测数据计算的电容

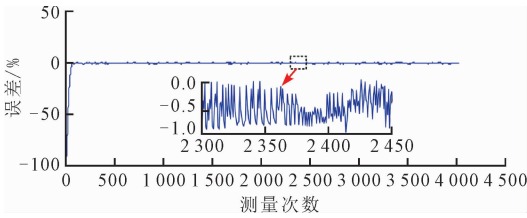


图 15 滤波后阀段试验数据计算的子模块电容误差

另外,由图 15 可知,计算结果普遍小于子模块电容的标称值,经过滤波后计算结果的波动幅度小于标称电容值的 1%。造成这种结果的原因可能是分析误差时使用标称值作为参考值,忽略了标称值与真值间的差别,而此电容器的真实电容值很可能小于其标称值,这样计算结果的不确定度可能比图 15 中所描述的情况更为乐观。由于当时不具备电容值实测条件,因此此假设暂时没有得到验证,但在实际工程运行中,可以把设备初始运行电容值计算结果保存,后期评估设备老化的电容值计算结果以设备初始运行电容值计算结果为参考。

5 结 论

本文提出了一种基于自适应滤波器的 MMC 子模块电容值的在线获取方法,并且分别利用仿真数据和阀段级试验平台实测数据对所提方法进行了验证,得到的主要结论如下。

(1)利用控制系统连续监测的子模块电压和桥臂电流可以在不增加额外设备的情况下对子模块电容值实现实时计算。

(2)受测量不确定度和离散处理的影响,电容值计算会产生较大波动,直接计算结果无法直接用于子模块电容器状态监测。

(3)利用自适应滤波技术可以减小子模块电容值计算结果的波动,并提高计算精度。对于本文的仿真验证模型,在测量不确定度不大于1%的情况下,计算结果的不确定度不大于0.5%,能够满足子模块电容器状态监测的要求。

本文所提在线获取方法具有较好的稳定性,受环境温度的影响较小。因为环境温度的改变只会改变电容器的ESR,而ESR的变化所引起的子模块电压的变化非常小,可以忽略不计,所以环境温度的改变几乎不会影响测量精度。

MMC子模块中所使用的金属化膜电容器的老化机理和老化模型还有待进一步完善,因此基于电容值计算的子模块电容器状态监测技术值得进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 汤广福,贺之渊,庞辉. 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(15): 3-14.
TANG Guangfu, HE Zhiyuan, PANG Hui. Research, application and development of VSC-HVDC engineering technology [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(15): 3-14.
- [2] 崔江,王友仁. 采用基于模糊推理的分类器融合方法诊断电力电子电路参数故障[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(18): 54-59.
CUI Jiang, WANG Youren. Testing EHT parametric faults of power electronic circuits applying classifiers fusion method based on fuzzy inference [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(18): 54-59.
- [3] BARLINI D, CIAPPA M, CASTELLAZZI A, et al. New technique for the measurement of the static and of the transient junction temperature in IGBT devices under operating conditions [J]. Microelectronics Reliability, 2006, 46(9/10/11): 1772-1777.
- [4] SUN Q, TANG Y, FENG J, et al. Reliability assessment of metallized film capacitors using reduced degradation test sample [J]. Quality & Reliability Engineering International, 2013, 29(2): 259-265.
- [5] WALGENWITZ B, TORTAI J H, BONIFACI N, et al. Self-healing of metallized polymer films of different nature [C]// IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2004: 29-

32.

- [6] HUAI W, FREDE B. Reliability of capacitors for DC-Link applications in power electronic converters-an overview [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2014, 50(5): 3569-3578.
- [7] HAMMAM S, HUAI W, FREDE B. A review of the condition monitoring of capacitors in power electronic converters [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 52(6): 4976-4989.
- [8] YUN-JAE J, THANH H, DONG-CHOON L. Condition monitoring of submodule capacitors in modular multilevel converters [C]// 2014 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2014: 2121-2126.
- [9] ABUSHAF A S G, DAHIDAH M, ATKINSON D. A new scheme for monitoring submodule capacitance in modular multilevel converter [C]// 8th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives. London, UK: IET, 2016: 1-6.
- [10] SUMAN D, JIANGCHAO Q, BEHROOZ B, et al. Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 37-53.
- [11] 徐政,屠卿卿,管敏渊,等. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2013: 1-25.
- [12] 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 Qionglin, et al. A review of modular multilevel converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(6): 1-14.
- [13] 赵彤,梁家碧,夏天翔,等. 基于LMS自适应滤波算法的电力变压器有源降噪系统[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2299-2307.
ZHAO Tong, LIANG Jiabi, XIA Tianxiang, et al. Active noise reduction system of power transformer based on LMS adaptive filtering algorithm [J]. High Voltage Technology, 2016, 42(7): 2299-2307.
- [14] 许赞,邹云屏,胡小磊. 一种新型变步长自适应滤波算法[J]. 高电压技术, 2009, 35(6): 1434-1438.
XU Yun, ZOU Yunping, HU Xiaolei. A novel variable step size adaptive filtering algorithm [J]. High Voltage Technology, 2009, 35(6): 1434-1438.
- [15] 白晶,尹怡欣,郝智红. 基于变论域变步长LMS算法的自适应逆控制系统稳定性[J]. 电工技术学报, 2009, 24(7): 59-64.
BAI Jing, YIN Yixin, HAO Zhihong. Stability of adaptive inverse control system based on variable uni-

- verse variable step size LMS algorithm [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(7): 59-64.
- [16] WANG F, DU J. A variable step-size LMS adaptive filtering algorithm based on error feedback [C]//IEEE International Conference on Signal Processing, Communications and Computing. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2016: 1-6.
- [17] 张建坡, 赵成勇, 孙海峰. 基于改进拓扑的 MMC-HVDC 控制策略仿真 [J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(5): 1032-1040.
- ZHANG Jianpo, ZHAO Chengyong, SUN Haifeng. Simulation of MMC-HVDC control strategy based on improved topology [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(5): 1032-1040.
- [18] 孙广星, 苟锐锋, 孙伟. 基于 MMC 结构的电力电子变压器拓扑结构及控制策略研究 [J]. 高压电器, 2016, 52(1): 142-147.
- SUN Guangxing, GOU Ruifeng, SUN Wei. Research on topology and control strategy of power electronic transformer based on MMC structure [J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(1): 142-147.
- [19] 郑博文, 王轩, 赵东元, 等. 一种改进的 MMC 换流阀运行试验装置及其控制策略 [J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2611-2616.
- ZHENG Bowen, WANG Xuan, ZHAO Dongyuan, et al. An improved MMC converter valve operation test device and its control strategy [J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2611-2616.
- [20] 吴亚楠, 吕天光, 汤广福, 等. 模块化多电平 VSC-HVDC 换流阀的运行试验方法 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(30): 8-15.
- WU Yanan, LU Tianguang, TANG Guangfu, et al. Operational test method of modular multi-level VSC-HVDC converter valve [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(30): 8-15.

(编辑 刘杨)