

DOI:10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2026.01.012

采用双重卡尔曼滤波的 MMC 子模块电容值 在线估计方法

许启东¹, 吴思婕¹, 周腾龙², 温创平¹, 张帆¹, 林泽锋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(modular multilevel converter, MMC)子模块电容器是柔性直流输电系统的关键设备,其安全稳定运行是提升系统可靠性的关键。本文提出了一种采用双重卡尔曼滤波的 MMC 子模块电容器值在线估计方法,该方法减少了传感器的数目。首先,通过桥臂电压传感器和电流传感器获取桥臂电压和电流;然后,再次利用卡尔曼滤波算法和桥臂电流建立用于估计每个子模块电容的数学模型;最后,在 PSCAD/EMTDC 中建立仿真模型进行验证,电容值估计误差均在 0.5% 以内。

关键词: 模块化多电平变换器(MMC); 子模块; 电容器; 双重卡尔曼滤波; 传感器数目

Online Estimation Method for MMC Sub-module Capacitance Using Dual Kalman Filtering

XU Qidong¹, WU Sijie¹, ZHOU Tenglong², WEN Chuangping¹, ZHANG Fan¹, LIN Zefeng¹

(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 sub-module capacitor of the modular multilevel converter (MMC) is a critical equipment of VSC-HVDC transmission systems, and its safe and stable operation is key to enhancing system reliability. In this paper an online estimation method for the sub-module capacitance of MMC using dual Kalman filtering is proposed, which reduces the number of sensors. First, the arm voltage and current are obtained through the arm voltage sensor and current sensor. Then, the Kalman filtering algorithm and arm current are used again to set up a mathematical model for estimating the capacitance of each sub-module. Finally, a simulation model is set up in PSCAD/EMTDC for verification, and the estimation error of the capacitance is within 0.5%.

Keywords: modular multilevel converter (MMC); submodule; capacitor; dual Kalman filter; number of sensors

0 引言

近年来,模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)由于其显著的技术优势,在国内外得到了广泛的运用^[1-3]。与传统的多电平换流器相比,MMC 具有开关损耗较低,灵活性高和低谐波等特点^[4-6]。子模块的安全可靠性影响着整个柔性直流输电系统的稳定运行,因此,子模块在线监测技术具有重要研究意义。

随着 MMC 向更高电压等级发展,其子模块的

串联数量快速增长^[7-9]。这些级联子模块作为柔性直流输电系统的核心组成部分,其可靠性直接影响整个系统的安全运行。每个子模块通常包含多组电容器和 IGBT 功率器件,其中任一元件发生性能劣化,都可能引发连锁反应,最终导致系统安全隐患^[10]。

在 MMC 中,金属化聚丙烯薄膜电容器因其卓越的自恢复特性、优异的介质强度以及较高的能量密度等优势,成为子模块电容器的首选方案。然而,正是这种自恢复特性会导致电容器在长期

收稿日期:2025-08-21; 修回日期:2025-09-06

基金项目:湖南省教育厅科学研究项目(23B0987)。

Project Supported by Scientific Research Project of the Education Department of Hunan Province(23B0987)。

运行过程中出现容值持续衰减的现象,进而显著缩短其使用寿命^[11-15]。研究表明,当电容器容值衰减超过初始额定值的5%时,其工作性能将出现明显劣化;若容值衰减进一步加剧,将引发介质损耗急剧增加、容值加速下降等连锁反应,最终可能导致电容器爆裂,严重威胁换流阀的安全运行^[16-18]。

文献[19]提出了一种基于谐波激励的子模块电容在线监测方法,通过在控制回路中注入特定频率的激励信号,利用桥臂电流和开关函数重构电容电流,并采用递推最小二乘算法实现电容参数的动态辨识。尽管该方法能够有效抑制背景谐波干扰,但由于需要额外的谐波注入装置,不仅增加了系统复杂度,也难以满足实际工程中对电容器参数在线监测的需求。

在文献[20]中,通过减少所需电压传感器的数量,已经实现了七电平 MMC-HVDC 系统的电压平衡,此时仅需要两个电压传感器获取上、下桥臂各自的总电压,然后利用桥臂总电压、子模块电压和各个子模块的开关函数之间的数学模型估计出各个子模块的电压。

本文首先分析了 MMC 的拓扑架构和工作原理;然后提出了一种减少传感器数量的子模块电容值在线估计新方法,最后在 PSCAD/EMTDC 中建立仿真模型进行验证,仿真结果验证了所提在线估计方法的正确性。

1 MMC 拓扑结构与运行原理

1.1 MMC 拓扑结构

三相 MMC 和半桥子模块的通用结构如图 1 所示。

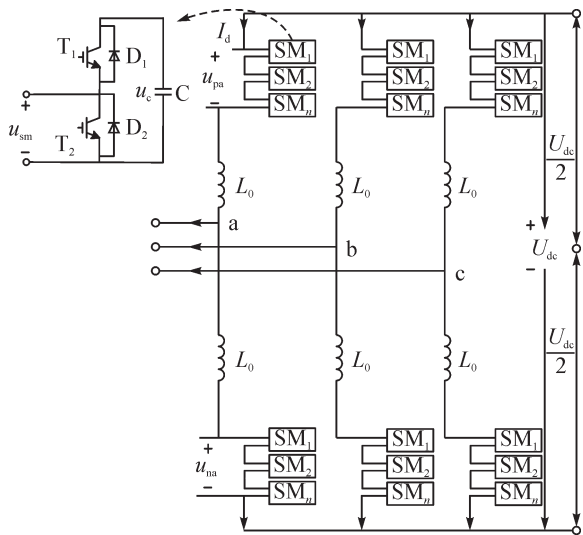


图 1 三相 MMC 拓扑图
Fig. 1 Three-phase MMC topological diagram

MMC 由 6 个桥臂构成,且上、下桥臂构成一个相单元,每个桥臂由 n 个子模块级联而成并含有一个桥臂电抗器 L_0 。MMC 的子模块可以采用半桥结构、全桥结构和混合结构等拓扑^[21-24]。全桥结构和混合结构具备直流故障穿越能力,但是由于元件数目的增加,所需投资成本和功率损耗大大增加,现阶段实际工程中大多仍采用半桥结构^[25-30]。 U_{dc} 和 I_{dc} 分别为直流侧电压和电流。

1.2 MMC 运行原理

MMC 子模块处于运行状态的 3 种工作状态分别如表 1 和图 2 所示。其中,当正向电流流过反并联二极管 D_1 给电容充电时对应于模式 1;当负向电流流过反并联二极管 D_2 将电容器旁路时对应于模式 2。该闭锁工作状态为非正常工作状态,仅在 MMC 启动时用于子模块电容充电以及子模块故障时用于旁路故障子模块。

表 1 子模块的 3 种工作状态
Table 1 3 types of operating states of sub-module

工作模式	T_1	T_2	电流方向	U_{sm}	状态
闭锁	0	0	>0	U_c	充电
闭锁	0	0	<0	0	旁路
投入	0	0	>0	U_c	放电
投入	1	0	<0	U_c	充电
切除	0	1	>0	0	旁路
切除	0	0	<0	0	旁路

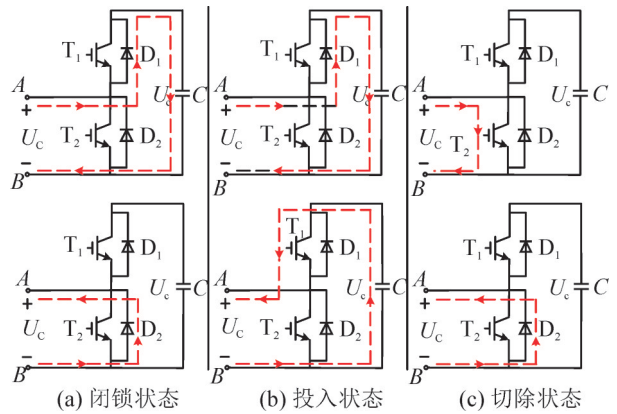


图 2 子模块不同工作状态的通路
Fig. 2 Pathways under different operating states of sub-module

当 T_1 导通、 T_2 施加关断信号时,子模块处于投入状态,如图 2(b)所示。其中,当正向电流流过反并联二极管 D_1 给电容充电时对应于模式 3,尽管此时 T_1 施加了导通信号,其仍然被关断;当负向电流流过 T_1 即电容放电时对应于模式 4。子模块处于该投入状态时,电容总以冲/放电的形式接入电路中,即子模块输出电压为 u_c 。

当 T_2 导通、 T_1 施加关断信号时,子模块处于切除状态,如图 2(c)所示。其中,当正向电流流过 T_2 将电容旁路时对应于模式 5;当负向电流流过反并联二极管 D_2 将电容旁路时对应于模式 6,尽管此时 T_2 施加了导通信号,其仍然被关断。子模块处于切除状态时,电容总处于旁路状态,即子模块输出电压为 0。

MMC 运行时,子模块电容电压是随着时间变化的,不同控制时刻子模块的电容电压不同,因此对于桥臂上的每个子模块的电容电压均衡控制尤为重要。

上桥臂第 i 个子模块的端电压公式为

$$u_{sm,p,i} = S_{p,i} u_{c,p,i} \quad (1)$$

式中: $S_{p,i}$ 是上桥臂第 i 个子模块的开关函数; $u_{c,p,i}$ 是上桥臂第 i 个子模块的电容电压。

根据基尔霍夫定律,可以得到方程:

$$u_p = \sum_{i=1}^N u_{sm,p,i} \quad (2)$$

$$v_o = \frac{u_{dc}}{2} - L_0 \frac{di_p}{dt} - u_p \quad (3)$$

式中: u_p 为上桥臂电压; i_p 为上桥臂电流; v_o 为输出相电压,为了估计电容电压,将式(3)重新排列并改写为矢量形式为

$$\frac{u_{dc}}{2} - v_o - L_0 \frac{di_p}{dt} = [S_{p,1} \ S_{p,2} \ \cdots \ S_{p,N}] \begin{bmatrix} u_{c,p,1} \\ u_{c,p,2} \\ \vdots \\ u_{c,p,N} \end{bmatrix} \quad (4)$$

因为上桥臂正常及故障状态具有相同的特性,下文均以以上桥臂为例,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:

$$u_p = S_p^T u_{c,p} \quad (5)$$

式中:

$$u_{c,p} = \begin{bmatrix} u_{c,p,1} \\ u_{c,p,2} \\ \vdots \\ u_{c,p,N} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$S_p = \begin{bmatrix} S_{p,1} \\ S_{p,2} \\ \vdots \\ S_{p,N} \end{bmatrix} \quad (7)$$

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线性最小方差估计,也是一种递归数据处理算法,可进行对含有噪声的数据在线处理。卡尔曼滤波算法在电力系统中应用的主要优点是能够消除由传感器测量引起的测量噪声的影响,还可以有效地应对高斯白噪声,已广泛应用在电力系统状态估计中^[18-20]。卡尔曼滤波算法以状态方程的方式估计系统状态参数,因此,MMC 子模块关键元件参数在线估计采用卡尔曼滤波算法较为合适。

一般形式的卡尔曼滤波算法可以用状态空间模型描述动态系统,状态方程为

$$X(t) = \Phi X(t-1) + \Gamma W(t-1) \quad (8)$$

观测方程为

$$Y(t-1) = H X(t-1) + V(t-1) \quad (9)$$

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,公式为

$$\hat{u}_p(t-1) = S_p^T(t-1) \hat{u}_{c,p}(t-1) + v(t-1) \quad (10)$$

式中, $v(t-1)$ 为测量白噪声。

2) 计算卡尔曼增益,公式为

$$K(t) = \frac{P(t-1)S_p(t)}{S_p^T(t)P(t-1)S_p(t) + r(t)} \quad (11)$$

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,公式为

$$\varepsilon(t-1) = u_p(t-1) - \hat{u}_p(t-1) \quad (12)$$

4) 状态更新,公式为

$$\hat{u}_{c,p}(t) = \hat{u}_{c,p}(t-1) + K(t)\varepsilon(t) \quad (13)$$

5) 协方差阵更新,公式为

$$P(t) = P(t-1) - \left[\frac{P(t-1)S_p(t)S_p^T(t)P(t-1)}{r(t) + S_p^T(t)P(t-1)S_p(t)} + Q(t) \right] \quad (14)$$

式中: $Q(t)$ 为观测噪声方差矩阵; $r(t)$ 方差系数,将其定义为整个采样时间的一个常数即 $r(1)=r(2)=\cdots=r(j)$ 。

卡尔曼滤波算法的流程如图 3 所示。

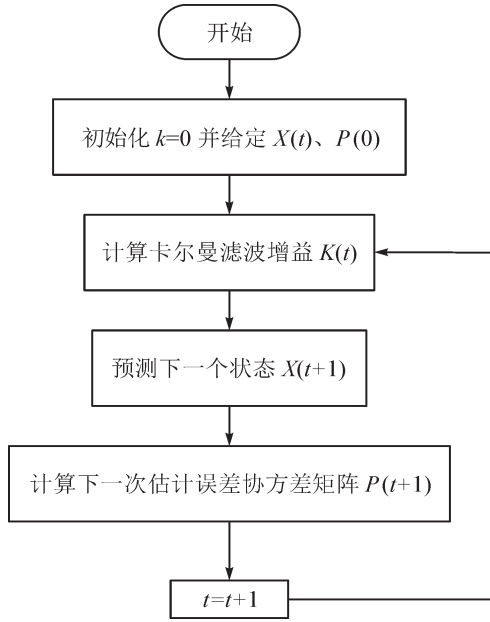


图3 卡尔曼滤波算法流程图
Fig. 3 Flowchart of Kalman filtering algorithms

上文的电压估算过程可以用图4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,分别对应式(9)中的 Y 和 H ,然后通过式(10)–(14)估计对应桥臂上的SM电压。其中式(13)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(11)、(12)、(14)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 $u_p(t-1)$ 。

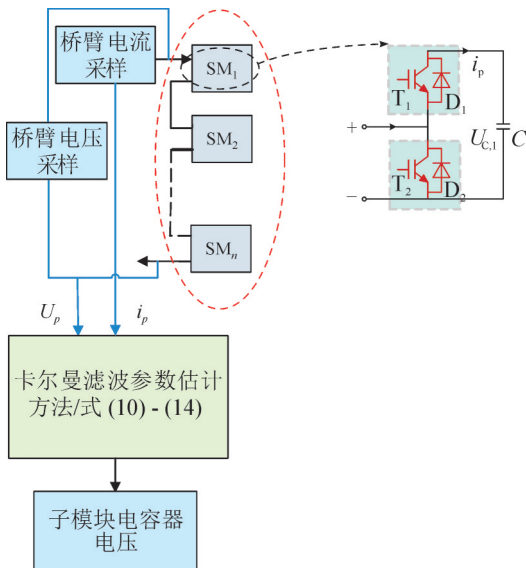


图4 基于卡尔曼滤波算法估计上桥臂子模块电压
Fig. 4 Estimation of upper arm sub-module voltage based on Kalman filtering algorithms

在 MMC 运行过程中,电容器是持续充电和放电的。SM 电容可以通过在充放电过程中估计电容

器电压、桥臂电流和电容之间的直接关系来计算。对于 SM,桥臂电流与 SM 电容电压之间的关系可以描述为

$$i_p = C \frac{du_{C,p,x}}{dt} \quad (15)$$

由于采集到的信号是离散的,需要对式(15)进行离散化处理,进而可得计算电容 C 的表达式如式(16)所示。

$$C = \frac{i_p(t_i)\Delta t}{[u_{C,x}(t_i) - u_{C,x}(t_{i-1})]} \quad (16)$$

式中: Δt 为测量系统的采样周期,即 $\Delta t = t_i - t_{i-1}$; $u_{C,x}(t_i)$ 、 $u_{C,x}(t_{i-1})$ 为相邻时刻测得的子模块电容器电压值。

然后引入 H_x ,令

$$H_x(t_i) = \frac{u_{C,x}(t_i) - u_{C,x}(t_{i-1})}{\Delta t} \quad (17)$$

则式(17)可改写为

$$i_p(t_i) = C_x(t_i)H_x(t_i) \quad (18)$$

通过建立 SM 估计电容电压模型,利用卡尔曼滤波算法对各臂各 SM 电容的电压进行估计。SM 电容值在线估算过程如图3所示。每个桥臂上只安装一个电压传感器和一个电流传感器。将式(15)推广为 n 个子模块的电容电压与桥臂电流的关系,并将其离散化,重写为矩阵形式,公式为

$$i_{pa}(t_i) = \frac{1}{\sum_{x=1}^n T_x(t_i)} \times \left[\frac{u_{C,1}(t_i) - u_{C,1}(t_{i-1})}{\Delta t} \times K \times \frac{u_{C,n}(t_i) - u_{C,n}(t_{i-1})}{\Delta t} \right] \begin{bmatrix} C_1(t_i) \\ C_2(t_i) \\ \vdots \\ C_n(t_i) \end{bmatrix} \quad (19)$$

测量矩阵,设为

$$H(t_i) = \frac{1}{\sum_{x=1}^n T_x(t_i)} \times \left[\frac{u_{C,1}(t_i) - u_{C,1}(t_{i-1})}{\Delta t} \times K \times \frac{u_{C,n}(t_i) - u_{C,n}(t_{i-1})}{\Delta t} \right] \quad (20)$$

然后式(19)可以写成

$$i_{pa}(t_i) = H(t_i)C_x(t_i) \quad (21)$$

式(21)是 SM 电容的测量方程。电容可以通过

卡尔曼滤波算法结合 SM 电容的计算原理得到。为了使用该算法来估计 SM 电容,需要完成以下高级计算。式(21)为子模块电容值的量测方程。通过卡尔曼滤波算法结合子模块电容的计算原理来获得电容,为了估计子模块电容为目的采用此算法,完成式(22)–式(24)进行更新计算,式中为第 x 个子模块 t_i 时刻的电容估计值。

$$C_{x-\text{est}}(t_i) = C_{x-\text{est}}(t_{i-1}) + K(t_i)e(t_i) \quad (22)$$

$$K(t_i) = \frac{P(t_{i-1})u_{Cx}}{1 + u_{Cx}^T P(t_{i-1})u_{Cx}} \quad (23)$$

$$P(t_i) = P(t_{i-1}) - [K(t_i)u_{Cx}^T P(t_{i-1})] + r(t_i) \quad (24)$$

电容值的在线估计基于桥臂电压和电流的数学模型,MMC 调制策略,子模块电容均衡策略,SM 的数量,并且工作条件对 SM 电容值的在线估计没有影响。因此,本文提出的电容值在线监测方法具有较高的适应性。

3 仿真验证

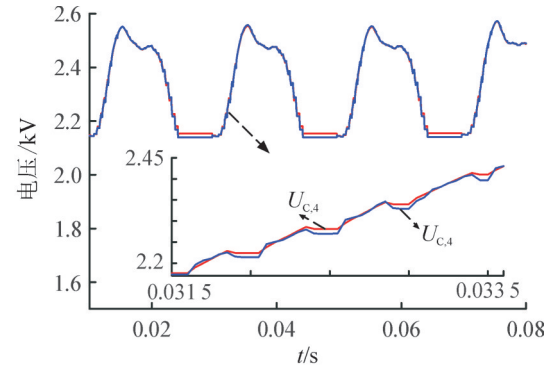
为了验证所提出的方案,本节基于 MMC 的基本工作原理和控制以及调制策略,并在 PSCAD/EMTDC 仿真平台下建立了五电平 MMC 电磁瞬态仿真模型三相 MMC 系统上进行仿真,仿真步长设置为 $50 \mu\text{s}$,仿真系统参数如表 2 所示。

表 2 MMC 仿真系统参数
Table 2 MMC simulation system parameters

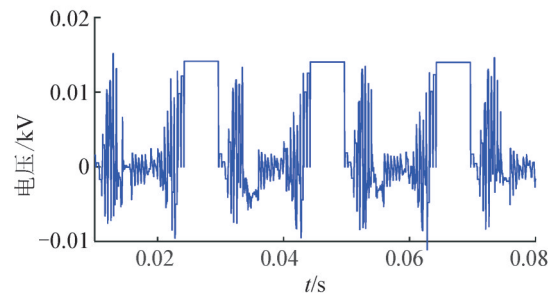
参数	数值
直流侧电压/kV	9
额定调制比	0.85
桥臂子模块数目	4
输出基波频率/Hz	50
桥臂电感/mH	10
子模块电容值/ μF	2 800

在本次仿真中子模块电容值设定为 $2\,000 \mu\text{F}$ 。首先验证子模块电容电压估计模型的准确性,以第 4 个子模块的电容电压的估计结果为例。估算结果如图 5 所示,估计的最大误差为 0.7%。

子模块电容器的电容估计结果和误差如图 6 所示。结果表明,收敛后估计误差均在 2.5% 以内,满足估计要求,可以有效实现在线提取子模块电容值,为操作人员处理子模块老化电容器提供了可预测性。

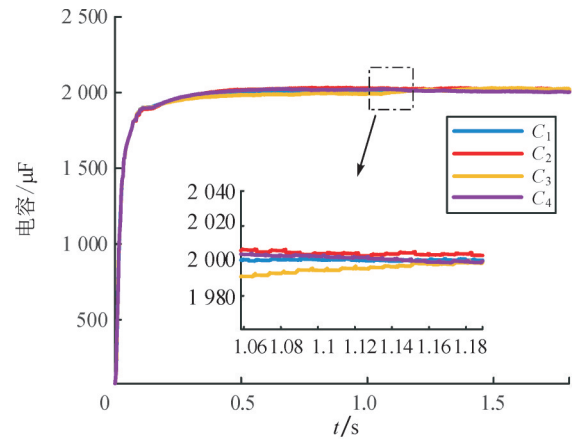


(a) 子模块电压估计情况

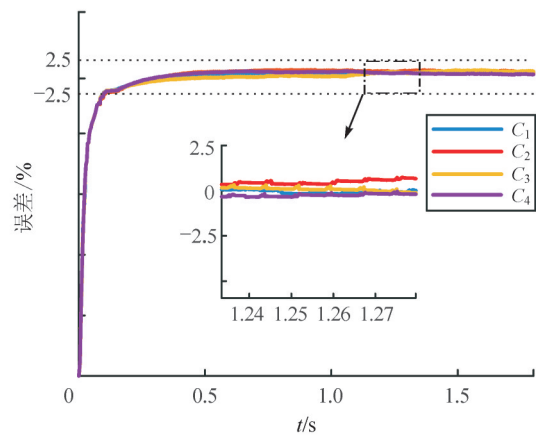


(b) 子模块电容电压估计差值

图 5 子模块的电容电压估计结果
Fig. 5 Estimation result of capacitor voltage of sub-module



(a) 电容值估计结果



(b) 电容值估计误差

图 6 电容值估计结果
Fig. 6 Capacitance estimation result

4 结语

本文提出了基于双重卡尔曼滤波算法的MMC子模块电容值在线估计方法。本文方法只需要在每个桥臂上使用一个电压传感器和一个电流传感器来获取桥臂电压和电流,大大减少了传感器的数量,提高了系统的可靠性。所提方法在线估计的子模块电容值误差在2.5%以内,通过对子模块电容器健康状况的在线监测,操作人员可以及时更换老化的子模块进行预测保护。

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] WANG K, LI Y, ZHENG Z, 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.
- [3] 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.
- [4] 王楚扬,张梦杰,赵云龙,等. 基于标签技术的MMC-UPFC电容电压减频效应与抑制策略[J]. 电力建设, 2025, 46(6): 150-164.
WANG Chuyang, ZHANG Mengjie, ZHAO Yunlong, et al. Frequency reduction effect of capacitor voltage in MMC-UPFC based on labeling technology and its suppression strategy[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(6): 150-164.
- [5] 张适宜,周明,黄瀚燕,等. 新能源基地多端柔性直流汇集系统运行灵活性研究[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3846-3857.
ZHANG Shiyi, ZHOU Ming, HUANG Hanyan, et al. Research on operational flexibility of multi-terminal flexible DC collection system for renewable energy bases[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3846-3857.
- [6] 李奇南,孙宝奎,孙华东,等. 柔性直流输电系统中高频振荡研究综述[J]. 电力自动化设备, 2025, 45(1): 156-171.
LI Qinan, SUN Baokui, SUN Huadong, et al. A review of research on high-frequency oscillations in VSC-HVDC transmission systems[J]. Electric Power Automation Equipment, 2025, 45(1): 156-171.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] WANG J, MA H, BAI Z. 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.
- [10] YANG H, ZHOU W, SHENG J, et al. A statistical submodule open-circuit failure diagnosis method for modular multilevel converter[J]. IEEE Open Journal of Power Electronics, 2020, 1(6): 180-189.
- [11] 王开正,孔德照,何渝霜,等. 自愈式金属化膜电容器微结构演变分析及仿真[J]. 高电压技术, 2024, 50(10): 4581-4590.
WANG Kaizheng, KONG Dezhaoh, HE Yushuang, et al. Analysis and simulation of microstructure evolution in self-healing metallized film capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4581-4590.
- [12] 肖萌,陈毓妍,赵亦烁,等. 高压直流金属化薄膜电容器绝缘性能提升方法研究进展[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2319-2331.
XIAO Meng, CHEN Yuyan, ZHAO Yishuo, et al. Research progress on insulation performance improvement methods for HVDC metallized film capacitors[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2319-2331.
- [13] 许馨愉,汲胜昌,郑琳子,等. 基于超声信号的金化膜电容器老化状态评估方法[J]. 电工技术学报, 2025, 40(5): 1652-1661.
XU Xinyu, JI Shengchang, ZHENG Linzi, et al. Aging state assessment method of metallized film capacitors based on ultrasonic signals[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(5): 1652-1661.
- [14] 刘刚,姚成,贾磊. 温湿度联合作用下金属化膜电容器的寿命预测[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 35-39.
LIU Gang, YAO Cheng, JIA Lei. Life prediction of metallized film capacitors under combined temperature and humidity stress[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 35-39.
- [15] 张天栋,马海鑫,刘刚,等. 金属化薄膜电容器介电薄膜材料的研究现状[J]. 绝缘材料, 2024, 57(11): 18-33.
ZHANG Tiandong, MA Haixin, LIU Gang, et al. Research status of dielectric film materials for metallized film capacitors[J]. Insulating Materials, 2024, 57(11): 18-33.
- [16] 潘亮,陈世瑛,张健,等. 柔性直流输电电子模块电容器电

- 容值在线获取方法[J]. 西安交通大学学报, 2019, 53(6): 161-168.
- PAN Liang, CHEN Shiyang, ZHANG Jian, et al. Online acquisition method of submodule capacitor capacitance for VSC-HVDC transmission[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2019, 53(6): 161-168.
- [17] 张国豪, 李化, 林福昌, 等. 金属化聚丙烯膜电容器自愈产气特性与保护技术[J]. 高压电器, 2024, 60(6): 197-202.
- ZHANG Guohao, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Study on self-healing gas generation characteristics and protection technology of metallized polypropylene film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 197-202.
- [18] 王健涛, 吴致远, 王昕劼, 等. 金属化膜击穿与自愈性能研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2024, 45(1): 102-107.
- WANG Jiantao, WU Zhiyuan, WANG Xinjie, et al. Study on breakdown and self-healing performance of metallized film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 102-107.
- [19] HAMMAMS, 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.
- [20] SOLIMAN H, WANG H, BLAABJERG F. A review of the condition monitoring of capacitors in power electronic converters[C]. Electrical Machines & Power Electronics, 2016: 243-249.
- [21] 杨淇鸾, 肖晃庆, 朱琼海. 基于电容电压平衡的MMC-SCES 荷电状态均衡控制方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(11): 36-46.
- YANG Qiluan, XIAO Huangqing, ZHU Qionghai. A SOC equilibrium control strategy for MMC-SCES based on capacitor voltage balancing[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(11): 36-46.
- [22] 朱博, 徐攀腾, 崔远卓, 等. 连接无源网络的LCC-FHMMC混合直流输电系统送端交流故障穿越控制策略[J]. 高压电器, 2024, 60(3): 151-160.
- ZHU Bo, XU Panteng, CUI Yuanzhuo, et al. AC fault ride-through control strategy for LCC-FHMMC hybrid HVDC system with passive network[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(3): 151-160.
- [23] 陆翌, 吴俊健, 裘鹏, 等. 基于桥臂等效电容的全桥子模块型MMC快速仿真方法[J]. 浙江电力, 2024, 43(3): 47-54.
- LU Yi, WU Junjian, QIU Peng, et al. A rapid simulation method for full-bridge sub-module MMC based on bridge arm equivalent capacitance[J]. Zhejiang Electric Power, 2024, 43(3): 47-54.
- [24] 陈国平, 张志宇, 贺亚慧, 等. 混合MMC无源供电系统的自取能预充电策略研究[J]. 高压电器, 2024, 60(11): 160-168.
- CHEN Guoping, ZHANG Zhiyu, HE Yahui, et al. Research on self-charging strategy for hybrid modular multilevel converter-based passive power supply system[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(11): 160-168.
- [25] 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, 2015, 31(1): 177-187.
- [26] 耿治, 肖扬. 基于双半桥重构型故障阻断子模块的新型混合模块化多电平变换器[J]. 电力电容器与无功补偿, 2025, 46(2): 90-97.
- GENG Zhi, XIAO Yang. A novel hybrid modular multilevel converter based on dual half-bridge reconfigurable fault-blocking submodule[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(2): 90-97.
- [27] 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 capacitance estimation method for modular multilevel converters based on Kalman filtering algorithm[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2020, 48(4): 479-484.
- [28] 徐郁盛, 李虎, 姜旭, 等. 卡尔曼滤波参数自适应寻优算法研究[J]. 自动化仪表, 2025, 46(8): 52-57.
- XU Yusheng, LI Hu, JIANG Xu, et al. Research on parameter adaptive optimization algorithm for Kalman filtering[J]. Process Automation Instrumentation, 2025, 46(8): 52-57.
- [29] 李亚楠, 段承昊. 融合粒子滤波与卡尔曼滤波算法的带电作业目标跟踪方法研究[J]. 电气技术与经济, 2025(7): 41-43.
- LI Yanan, DUAN Chenghao. Research on target tracking method for live working integrating particle filter and Kalman filter algorithms[J]. Electrical Engineering and Electric Power Economy, 2025(7): 41-43.
- [30] 朱博, 徐攀腾, 王晓雪, 等. 基于混合型MMC的柔性直流电网故障电流阻断控制策略[J]. 高压电器, 2024, 60(6): 148-155.
- ZHU Bo, XU Panteng, WANG Xiaoxue, et al. Fault current blocking control strategy for DC grid based on hybrid MMC[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(6): 148-155.

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及变电运维。E-mail: xqd19950121@163.com。

吴思捷(1997—), 女, 主要研究方向为配网建设。

周腾龙(1995—), 男, 讲师, 主要研究方向为柔性直流输电系统。