

全桥MMC型直流融冰装置电气设计仿真校核研究

班国邦, 邹 雕, 杨 旗, 张露松, 杨文勇, 刘 丽

贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳
Email: 957795204@qq.com

收稿日期: 2021年5月28日; 录用日期: 2021年6月12日; 发布日期: 2021年6月24日

摘 要

针对现有基于MMC的电压源型直流融冰装置在电气设计方面研究较少的问题, 以及为设备研发和工程调试提供支撑的目的, 本文围绕全桥MMC型直流融冰装置电气设计开展仿真校核研究工作。首先, 对全桥MMC型直流融冰装置的运行原理进行了介绍, 并提出了10.8 MW直流融冰装置设计方案。其次, 对直流融冰装置开展了电气设计, 给出了详细的主电路计算方法。最后, 在PSCAD/EMTDC中搭建了直流融冰模型, 仿真校核了所提电气设计方案的有效性及直流融冰装置的融冰和无功补偿功能, 为工程实际应用提供了依据。

关键词

直流融冰, 电气设计, 仿真校核, MMC

Research on Electrical Design Simulation and Verification of Full Bridge MMC DC Ice-Melting Device

Guobang Ban, Diao Zou, Qi Yang, Lusong Zhang, Wenyong Yang, Li Liu

Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang Guizhou
Email: 957795204@qq.com

Received: May 28th, 2021; accepted: Jun. 12th, 2021; published: Jun. 24th, 2021

Abstract

In view of the lack of research on the electrical design of the existing voltage source DC ice-melting

device based on MMC, and the purpose of providing support for equipment development and engineering commissioning, this paper focuses on the electrical design of full bridge MMC DC ice-melting device to carry out simulation and verification research. Firstly, the operation principle of full bridge MMC DC ice-melting is introduced, and the design scheme of 10.8 MW DC ice-melting device is proposed. Secondly, the electrical design of DC ice-melting is carried out, and the detailed calculation method of main circuit is given. Finally, the DC ice-melting model is built in PSCAD/EMTDC, and the effectiveness of the proposed electrical design scheme and the deicing and reactive power compensation functions of the DC ice-melting device are verified by simulation, which provides a basis for practical engineering application.

Keywords

DC Ice Melting, Electrical Design, Simulation and Verification, MMC

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

电力系统遭受的各种自然灾害中，冰灾是最严重的威胁之一。与其它事故相比，冰灾给电网造成的损失往往更为严重，轻则发生冰闪，重则会造成倒塔断线，甚至电力网络瘫痪。例如 2008 年我国南方地区受冰灾影响最严重的贵州、湖南两地发生了因冰灾引起的电网解列等严重问题，给国家造成了巨大的经济损失。因此，电气行业的科研院所、企业等进行了融冰装置的研制攻关，直流融冰相比交流融冰具有较大优势而成为融冰装置工程化应用的研究热点[1] [2] [3]。

目前，应用于输电线路融冰的直流融冰装置主要分为以下三类：第一类是基于不控整流型的直流融冰装置[4] [5]，采用不可控二极管器件，输出电压、电流无法实时调节，融冰范围相对较窄；第二类是基于可控硅的直流融冰装置[6] [7] [8] [9]，采用半控型晶闸管器件，因谐波较大需要配置滤波器组，故占地面积相对较大，且融冰电流无法“零起”；第三类是基于 MMC 的电压源型直流融冰装置[10]-[15]，采用全控型 IGBT 器件，因 MMC 拓扑输出电平数较多，对交流电网的谐波影响小，可实现“零起”升压、“零起”升流，在不需要融冰时，换流器可作为 STATCOM 运行，提高装置利用率，因此得到了广泛关注。综合现有文献，主要涉及全桥 MMC 直流融冰技术的原理[10]、控制策略[12]、实验技术[13]等方面，对于适用于工程领域的 MMC 拓扑直流融冰装置电气设计尚无深入报道，而这是直流融冰装置工程化应用的关键因素之一。

为了解决上述问题，本文围绕全桥 MMC 型直流融冰装置电气设计仿真校核开展研究工作。论文首先简要描述了全桥 MMC 型直流融冰装置的原理；其次，根据其具体应用场合，给出了详细的设计方案，并提出了主电路参数的设计方法；最后，通过 PSCAD 仿真验证了电气设计方案及主电路参数设计方法的正确性，并验证了直流融冰装置的直流融冰及无功补偿功能。

2. 工作原理及设计方案

2.1. 工作原理

全桥型 MMC 融冰装置的电路拓扑如图 1 所示[12]。3 相 MMC 共有 6 个桥臂，单桥臂均由 N 个全桥子模块与一个电抗器串联组成。图 1 中， u_{sa} 、 u_{sb} 、 u_{sc} 表示交流电源三相电压； i_{ap} 、 i_{an} 分别为上桥臂与

下桥臂电流。从图 1 可知, 全桥型 MMC 换流器等效于两个结构和参数完全相同的级联时星形连接的 STATCOM 并联在同一交流母线上。融冰时, 控制器控制两套 STATCOM 的中性点分别作为融冰电源的正、负极, 电压逐渐升高至 $U_{dc}/2$ 、 $-U_{dc}/2$, 使得接在正、负极的被融冰导线上的直流电压逐渐上升到额定的融冰电流值 ($I_{dc} = U_{dc}/R_{dc}$), 其中, R_{dc} 为融冰导线的等效电阻, I_{dc} 为融冰直流电流, U_{dc} 为直流融冰电源的输出直流电压。

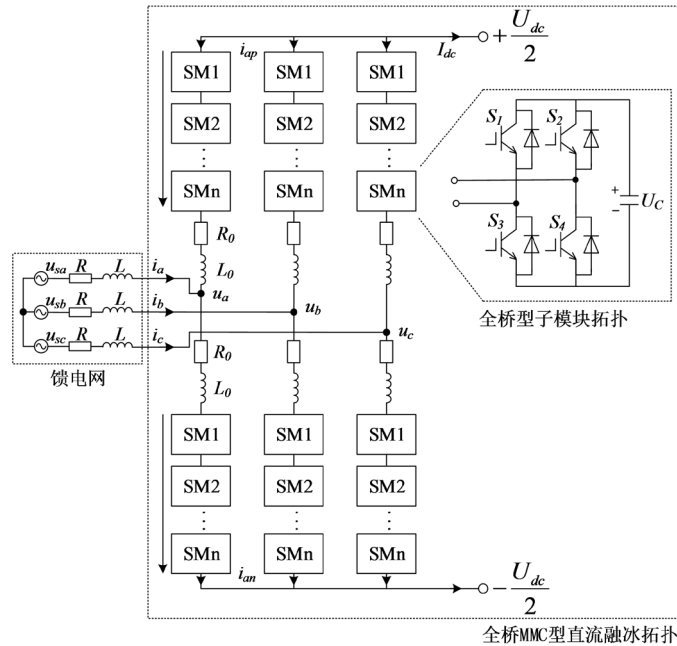


Figure 1. The circuit topology of full bridge MMC DC ice-melting device
图 1. 全桥 MMC 型直流融冰装置电路拓扑图

2.2. 12 MW 直流融冰装置设计方案

针对以往直流融冰装置存在的高次谐波含量高、体积较大、开关方式复杂、故障率高等各种问题, 本文提出一种电压源型直流融冰装置(基于 MMC 拓扑直流融冰装置), 该装置基于全桥型 MMC 的新型结构, 具有结构简单, 在输电线路正常运行时, 该装置作为 STATCOM 实现对电网的动态无功补偿; 在电网覆冰条件下, 该装置可输出从零到额定值范围内的连续可调直流电压和电流来实现融冰功能, 不仅提高了装置的利用率, 也实现了对不同长度及型号的覆冰导线融冰的需求。当装置在融冰模式下额定交流电压 10 kV, 额定直流电压为 9 kV, 额定直流电流为 1200 A, 融冰功率为 10.8 MW。装置在无功补偿运行模式下, 额定交流电压 10 kV, 额定无功输出容量不小于 16 MVar。

3. 直流融冰装置电气设计

直流融冰装置的电气设计至关重要, 其对于设备总体性能能否达到标准要求及设备经济性影响巨大。电气设计部分主要包括以下五部分, 分别是 IGBT 器件选型、功率模块数量确定、功率单元支撑电容计算、启动电阻计算及桥臂电抗器设计。

3.1. IGBT 器件选型

IGBT 器件的选型应充分考虑融冰装置运行在直流融冰工况和无功补偿工况下的电流应力。以下为直流融冰工况计算的推导过程:

交流侧额定电流为:

$$I_s = \frac{S}{\sqrt{3} * U_s} \quad (1)$$

换流器桥臂电流分量为:

$$I_{V_AC} = 0.5 * I_s \quad (2)$$

换流器桥臂直流分量为

$$I_{V_DC} = \frac{1}{3} * I_{DC} \quad (3)$$

换流器桥臂电流有效值为:

$$I_{V_RMS} = \sqrt{I_{V_AC}^2 + I_{V_DC}^2} \quad (4)$$

换流器桥臂电流峰值为:

$$I_{V_PEAK} = I_{V_DC} + \sqrt{2} I_{V_AC} = 841 \text{ A} \quad (5)$$

以下为无功补偿工况计算的推导过程:

交流侧额定电流为:

$$I_s = \frac{S}{\sqrt{3} * U_s} = 924 \text{ A} \quad (6)$$

桥臂电流有效值为:

$$I_{V_RMS} = \frac{I_s}{2} = 462 \text{ A} \quad (7)$$

根据两种工况下的电气应力可知, 直流融冰工况下的全桥 IGBT 模块承受的电流值最大, 有效值为 507 A, 峰值为 840 A。据此, 功率器件可选择富士公司 1700 V/450A 等级的半桥封装 IGBT2 个并联, 单个模块 4 个 IGBT, 且裕量足够。

3.2. 功率模块数量确定

根据直流融冰需求, 交流输入电压为 10.5 kV (变电站电压较为稳定, 暂不考虑长时过电压) 直流侧额定输出电压为 10 kV, 无功补偿模式下单桥臂的等效输出电压为:

$$U_v = \frac{U_{dc}}{2} + U_{ac} = 13.6 \text{ kV} \quad (8)$$

设定模块运行电压为 900 V, 最大调制比为 0.95, 单桥臂所需模块数量为:

$$N = \frac{U_v}{U_c * D} = 15.9 \quad (9)$$

考虑系统过压因数, 每个桥臂共配置 20 个模块, 不配置旁路冗余功能。

3.3. 功率单元支撑电容计算

利用桥臂电压与桥臂电流可得到桥臂瞬时功率, 对桥臂瞬时功率积分运算可得到每一个子模块的能量变化值(积分上下线在相邻 2 个零点位置), 子模块的能量变化值表示为:

$$\Delta W_{SM}(m) = \frac{2}{3} \frac{P_s}{mN\omega_0} \left[1 - \left(\frac{m \cos \phi}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (10)$$

电容的平均储能可表示为:

$$W_C = \frac{1}{2} C U^2 \quad (11)$$

计及电容电压 U_c 波动百分比 ε 的条件下, 最大值为 $U_{c\max} = U_c(1 + \varepsilon)$, 电容电压 U_c 的最小值为 $U_{c\min} = U_c(1 - \varepsilon)$ 。可推导出:

$$W_C(\varepsilon, U_c) = \frac{1}{4\varepsilon} \Delta W_{SM} \quad (12)$$

因此, 可推导出直流支撑电容大小与 MMC 的额定功率 P_s 、桥臂模块个数 N 以及模块直流电压 U_c 之间满足下述公式:

$$C = \frac{P_s}{3mN\omega_0\varepsilon(U_c)^2} \left[1 - \left(\frac{m \cos \phi}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} = 7.33 \text{ mF} \quad (13)$$

从式中可以看出, 按无功运行时所需模块电容为最大边界条件。式中: ε 一般取为 15%; 功率因数 $\cos \phi$ 按无功运行行为 0。

选用单体 110 V/420 μ F 18 只, 共 7.56 mF。

3.4. 启动电阻计算

对启动回路中预充电阻的设计主要考虑三方面, 预充期间的累积能量、充电时间及最大瞬时功率。理论推导及试验已经证明, 预充电阻在预充期间所累积的能量等于换流器预充电时间后模块电容所储层的能量, 也即单相电阻的累积能量:

$$W = 2N * 0.5 * C * U_c^2 = 19 \text{ kJ} \quad (14)$$

式中 $N = 20$, $U_c = 371 \text{ V}$, $C = 7.56 \text{ mF}$ 。设定预充电时间为 4 s, 预充电阻与桥臂等效电容的等效时间常数为 $\tau = RC_{eq}$ 。根据 RC 回路充电原理, 即 $4\tau = 4 \text{ s}$

$$C_{eq} = \frac{C_0}{N} * 2 = 0.756 \text{ mF} \quad (15)$$

电阻计算值为 $R = 1300 \Omega$ 。电容充电电压和充电时间留取裕量, 实际电阻取 500Ω 。由于上电瞬间电容电压不能突变, 模块电容相当于短路状态, 在初始时刻单只预充电阻瞬时功率达到最大值, 也即

$$P_{\max} = \frac{U_p^2}{4R} = 50 \text{ kW} \quad (16)$$

综合以上计算, 考虑直流融工况及无功补偿工况时对设备充电, 可承受最大瞬时功率 50kW, 选取电阻器阻值为 500Ω 。

3.5. 桥臂电抗器设计

基于全桥 MMC 拓扑的直流融冰装置的联结电抗由上、下桥臂电抗并联组成, 等效为图中所示的 $X_L/2$, 换流器的正序基波等效电路如下图 2 所示。对于 X_L 的取值, 其数值越小装置响应速度越快, 且无功损耗越小, 但从输出交流电流谐波性能以及电源抵御交流系统负序电压的能力, 其值越大越好。由于基于 MMC

4.1. 直流融冰模式

装置在直流融冰模式下，以控制直流电流为目标值，直流电压、直流电流可实现零起连续可调。结合系统交流电流、功率模块电容电压、直流电压、直流电流波形校核模型功能和性能是否满足要求。0~2 s为启动过程，具体如下：0.2 s合交流断路器，融冰装置带电，0.2~0.5 s为换流器不控充电阶段，0.5 s下发可控充电命令，1 s时系统直流电流抬升，时间设置为1 s。

直流电流 I_{dc} 波形如图 4(a)所示，可以看出，0~1 s时，直流线路未接入直流侧，在1 s时接入系统，系统控制直流电流从0开始以斜坡上升，2 s时直流电流达到期望值1.2 kA附近，进入稳态后，波动范围很小，从仿真波形看模型控制精度负荷要求。直流电压波形如图 4(b)所示，2 s时直流电压波形达到9.1 kV，比实际值略大，从仿真波形看其响应与设置一致。交流电流波形如图 4(c)所示，0~1 s装置为闭锁状态，其交流电流几乎为0，2 s时交流电流达到1 pu。图 4(d)为功率模块电容电压，可以看出，在0 s时，其电压值为0.125 kV，与设置(20个功率模块)和为2.5 kV一致，0.5 s时因子模块投切导致功率模块电容电压瞬时冲击达1.1 kV，1 s时，系统解锁，功率模块电容电压被控制到期望值0.9 kV附近，其波动百分比小于7%，符合工程要求。综上所述，仿真校核结果与方案一致。

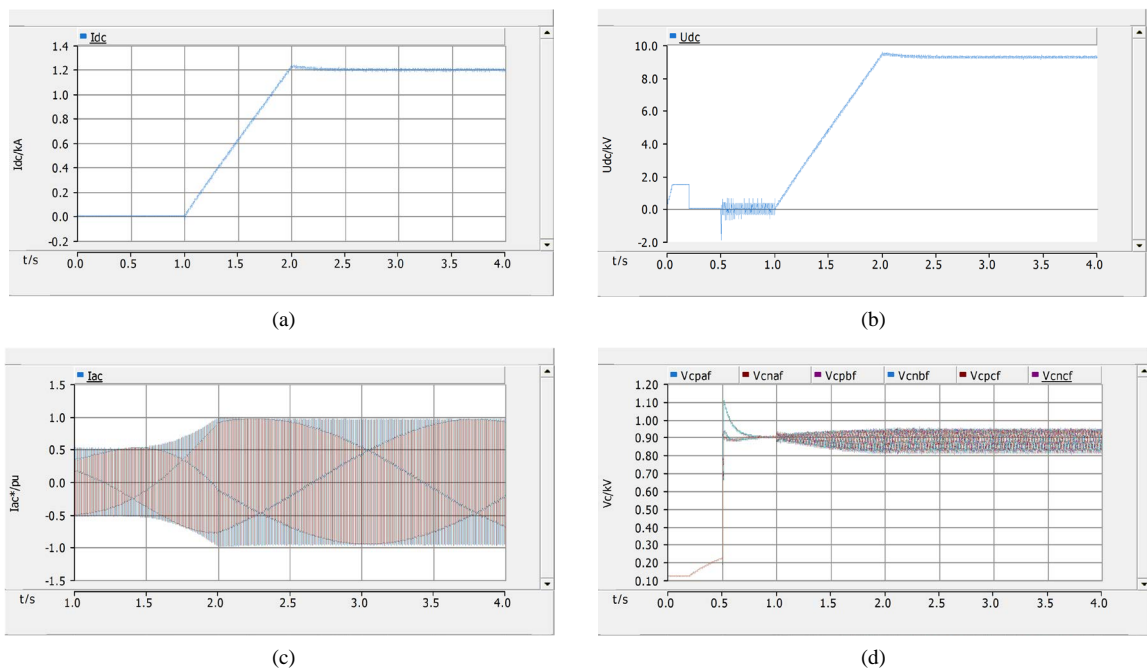


Figure 4. The wave of DC ice-melting mode: (a) DC current: I_{dc} ; (b) DC voltage: U_{dc} ; (c) AC current p.u: I_{ac} ; (d) Capacitor voltage of power module: V_c

图 4. 直流融冰模式下的波形: (a) 直流电流 I_{dc} ; (b) 直流电压 U_{dc} ; (c) 交流电流 I_{ac} 标么值; (d) 功率模块电容电压 V_c

4.2. 无功补偿模式

装置在无功补偿模式下，以控制无功功率为目标值，结合系统交流电流、功率模块电容电压、直流电压、直流电流波形校核模型功能和性能是否满足要求。与直流融冰模式类似，0~2 s为启动过程，具体如下：0.2 s合交流断路器，融冰装置带电，0.2~0.5 s为换流器不控充电阶段，0.5 s下发可控充电命令，1 s时系统电压源换流器发出无功。

图 5(a)为交流电流波形，可以看出，0.5 s时因可控充电阶段子模块投切导致交流瞬时冲击达3 pu，0.5~1 s换流器闭锁状态，电流几乎为0。图 5(b)为无功和有功功率波形，在1 s时，设置电压源吸收无功，

随后无功达到 16.2 MVar, 有功近似为 0 MW, 系统进入稳态, 仿真波形响应与模型设置一致。图 5(c)为功率模块电容电压波形, 可以看出, 在 0 s 时电容电压值为 0.125 kV, 与设置桥臂电容电压 20 个功率模块和为 2.5 kV 一致, 0.5 s 时因进入可控阶段功率模块电容电压瞬时冲击达 1.1 kV。0.5~1 s 换流器为闭锁状态, 功率模块电容电压逐渐控制到期望值附近。1 s 时, 设置电压源换流器发出无功, 交流电流相应增加, 功率模块电容电压受影响波动, 随后功率模块电容电压平均值逐渐稳定在 0.9 kV 附近。图 5(d)为桥臂电流波形, 可以看出, 在 2 s 后, 桥臂电流波形保持在期望值, 波动很小, 系统逐渐进入稳态。综上所述, 仿真校核结果与方案一致。

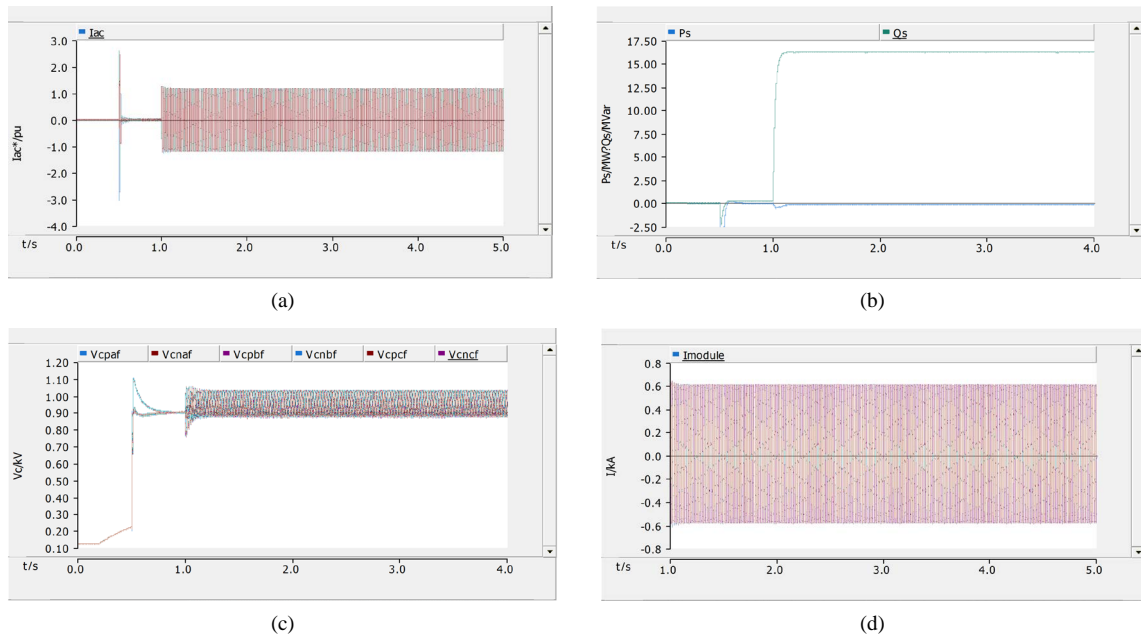


Figure 5. The wave of reactive power compensation mode: (a) AC current p.u: I_{ac} ; (b) Active power: P_s , reactive power: Q_s ; (c) Capacitor voltage of power module: V_c ; (d) Arm current: I_{module}

图 5. 无功补偿模式下的波形: (a) 交流电流 I_{ac} 标么值; (b) 有功功率 P_s 、无功功率 Q_s ; (c) 功率模块电容电压 V_c ; (d) 桥臂电流 I_{module}

5. 结论

针对现有基于 MMC 的电压源型直流融冰装置在电气设计方面研究较少, 以及为设备研发和工程调试提供支撑的目的, 本文开展了全桥 MMC 型直流融冰装置电气设计仿真校核研究工作, 主要内容如下:

1) 根据融冰装置的应用场景, 提出了额定融冰功率 10.8 MW、额定无功补偿能力不小于 16 MVar 的全桥 MMC 型直流融冰装置的设计方案。

2) 考虑融冰装置运行在直流融冰工况和无功补偿工况下的电气应力, 本文提出了融冰装置主电路参数计算方法, 并在 PSCAD/EMTDC 中仿真校核了所提电气设计方案的有效性及其直流融冰装置的融冰和无功补偿功能, 为工程实际应用提供了依据。

参考文献

- [1] 马晓红, 赵立进, 李巍, 等. 直流融冰技术在贵州电网的应用[J]. 南方电网技术, 2009, 3(5): 107-110.
- [2] 蒋兴良, 张志劲, 胡琴, 等. 再次面临电网冰雪灾害的反思与思考[J]. 高电压技术, 2018, 44(2): 463-469.
- [3] 蒋明, 赵汉棣, 马小强. 高压输电线路覆冰及防冰、除冰技术综述[J]. 电力安全技术, 2020, 22(4): 26-32.

-
- [4] 饶宏, 李立涅, 黎小林, 等. 南方电网直流融冰技术研究[J]. 南方电网技术, 2008(2): 7-12+36.
- [5] 傅闯, 饶宏, 黎小林, 等. 直流融冰装置的研制与应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11): 53-56+107.
- [6] 谢彬, 洪文国, 熊志荣, 等. 500 kV 复兴变电站固定式直流融冰兼 SVC 试点工程的设计[J]. 电网技术, 2009, 33(18): 182-185.
- [7] 吴永华, 张涛, 赵立进, 等. 直流融冰型 SVC 在贵州电网的应用研究[J]. 南方电网技术, 2010, 4(S1): 41-45.
- [8] 陆佳政, 朱思国, 李波, 等. 兼具无功补偿与有源滤波功能的新型融冰装置[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2207-2214.
- [9] 陆佳政, 张允. 基于 12 脉动整流技术的 500 kV 输电线路融冰装置实现[J]. 高电压技术, 2012(11): 3041-3047.
- [10] 梅红明, 刘建政. 新型模块化多电平直流融冰装置[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 96-102.
- [11] 赵庆明, 基于混合子模块的新型模块化多电平直流融冰装置[J]. 南方电网技术, 2015, 9(11): 36-41.
- [12] 郭裕群, 周月宾, 许建中, 等. 适用于全桥型模块化多电平换流器的直流融冰装置控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 106-113.
- [13] 马晓红, 许逵, 林奕群, 等. 全桥 MMC 型直流融冰装置试验技术研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(5): 31-37.
- [14] 全晓方, 王靓, 刘彬, 等. 直流融冰装置主参数设计与仿真[J]. 电工技术, 2019(9): 62-64+67.
- [15] 许逵, 马晓红, 饶崇林, 等. 全桥 MMC 型和晶闸管整流型直流融冰技术的研究与比较[J]. 南方电网技术, 2020, 14(4): 45-53.