

全桥 MMC 型直流融冰装置关键参数及装置容量解耦分析研究

吴小刚^{1,✉}, 何锐²

(1. 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广东 广州 510663;
2. 西华大学 电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

摘要: [目的] 文章旨在研究全桥 MMC (Modular Multi-Level Converter, 模块化多电平变流器) 型直流融冰装置在不同工作模式下的融冰容量与无功输出容量问题。[方法] 以某 500 kV 变电站实际工程全桥 MMC 型直流融冰装置参数设计为例, 详细阐述了全桥 MMC 型直流融冰装置换流器桥臂电流交流分量、直流分量、有效值及峰值计算, 桥臂模块数量选取, IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor, 绝缘栅双极晶体管) 功率模块支撑电容计算, 桥臂电抗器电感计算, 启动回路电阻计算; 详细分析了在设定融冰容量下装置最大无功输出能力以及在设定无功输出容量下装置最大的融冰能力, 并探究融冰容量与无功输出容量之间耦合关系及解耦计算。[结果] 研究表明在融冰装置参数确定后融冰容量与无功输出容量存在此消彼长的耦合关系。[结论] 其原因在于桥臂电流中既含有交流分量, 也含有直流分量, 而交流分量由融冰模式和无功补偿模式共同决定, 直流分量仅取决于线路融冰电流。

关键词: 模块化多电平变流器; 全桥 MMC; 直流融冰装置; 融冰容量; 无功容量

中图分类号: TM7; TM752

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2023)05-0072-08

开放科学(资源服务)二维码:



Research on the Key Parameters and Device Capacity Decoupling Analysis of Full Bridge MMC DC Ice-Melting Device

WU Xiaogang^{1,✉}, HE Rui²

(1. China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, Guangdong, China;
2. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, Sichuan, China)

Abstract: [Introduction] This article aims to study the issue of the melting capacity and reactive output capacity of the full bridge modular multi-level converter (MMC) type DC (Direct Current) melting ice device under different operating modes. [Method] Calculation of current AC (Alternating Current) component, DC component, rms value and peak value of bridge arm converter of full-bridge MMC type DC ice melting device, selection of number of bridge arm modules, IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor) power module support capacitance calculation, bridge arm reactor inductance calculation, start-up loop resistance calculation were elaborated; The maximum reactive power output capacity of the device under the set ice melting capacity and the maximum ice melting capacity of the device under the set reactive power output capacity were analyzed in detail, and the coupling relationship and decoupling calculation between the ice melting capacity and the reactive power output capacity were explored. [Result] Research has shown that there is a coupling relationship between the melting capacity and reactive output capacity after the parameters of the melting device are determined. [Conclusion] The reason is that the bridge arm current contains both AC and DC components, and the AC component is determined by both the melting mode and reactive compensation mode, while the DC component only depends on the line melting current.

Key words: modular multi-level converter; full bridge MMC; DC ice melting device; melting capacity; reactive capacity

2095-8676 © 2023 Energy China GEDI. Publishing services by Energy Observer Magazine Co., Ltd. on behalf of Energy China GEDI.

This is an open access article under the CC BY-NC license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).

收稿日期: 2023-05-06 修回日期: 2023-06-01

基金项目: 中国能建广东院科技项目“中低压柔性直流电网关键技术研究”(EV04421W)

0 引言

南方冬季的低温雨雪冰冻气候给南方电网尤其是贵州电网的安全稳定运行带来巨大挑战,2008年1月的大范围凝冻灾害给以贵州电网为主的南方电网供电区域设施带来严重破坏^[1-3]。

文献[4-6]分析了目前主流直流融冰技术及基于各类融冰技术研制的融冰装置在工程应用中的问题。文献[7]基于常规十二脉动直流融冰技术,提出了一种新型直流融冰拓扑结构,其能够同时满足导线融冰的大电流和地线融冰的高电压需求。文献[8-10]对全桥 MMC (Modular Multi-Level Converter, 模块化多电平换流器) 直流融冰兼 STATCOM 装置的实验、检测技术及控制策略等进行研究。文献[11]给出了六脉动换流器的 FC 滤波器参数设计,文献[12-14]就全桥 MMC 型直流融冰装置控制方法、参数优化设计及子模块配置优化进行理论研究。文献[15-16]着重研究了全桥 MMC 型直流融冰装置的充电启动策略、充电功率模块直流电容电压纹波分析。

文献[17]深入细致地分析了 MMC 型和晶闸管整流型两类直流融冰技术的工作原理和控制策略,分析了两类融冰技术在融冰能力、可靠性、控制系统的复杂性、装置经济性等方面的优缺点。

MMC 型直流融冰装置有全桥和半桥两种拓扑结构。与半桥 MMC 型相比,虽然全桥 MMC 型运用了更多的半导体开关元件,但其输出直流电压范围更广,更适用于直流融冰技术^[18]。

文献[19]提出一种全桥 MMC 型直流融冰装置的综合设计方案,通过对有功功率与无功功率的控制,实现融冰直流电压和交流无功功率的连续调节。文献[20]研制了大容量直流融冰兼无功补偿器 (Static Var Compensator, SVC) 装置,可实现直流融冰模式与无功补偿模式之间的自动切换。

全桥 MMC 型直流融冰装置兼具无功补偿功能,正常状态可作为无功补偿装置运行,融冰功能长期处于热备用状态。对于实际工程应用,一般是先根据线路融冰需求,确定融冰装置参数进而选定功率单元 IGBT (Insulated-Gate Bipolar Transistor, 绝缘栅双极晶体管) 规格型号,再进一步测算无功容量的最大输出。

截至目前鲜有文献对全桥 MMC 型直流融冰装

置的融冰模式及无功补偿模式下的融冰容量和无功输出容量之间的耦合关系进行分析。

文章以贵州电网某 500 kV 变电站实际工程所采用的全桥 MMC 型直流融冰装置为例,给出装置关键参数计算,深入比较和全面分析了装置在融冰模式及无功补偿模式下装置融冰容量和无功输出容量之间的耦合关系,分别计算在设定融冰容量下装置最大无功输出容量以及在设定无功输出容量下装置可输出的最大融冰容量,并开展不同运行模式下两类容量的解耦计算,供同类工程设计人员参考。

1 融冰装置额定参数

根据线路融冰需求,计算出融冰装置额定参数如表 1 所示,融冰电流为 3.6 kA,融冰压降为 16.8 kV,融冰容量为 60.48 MW。考虑裕度后(裕度系数为 1.3)无功补偿模式可输出无功容量为 ±120 MVar。融冰装置交流侧引接电源电压为 35 kV,装置采用全桥拓扑结构,交流侧每相分为上下两个桥臂。

表 1 全桥 MMC 型直流融冰装置额定参数表

Tab. 1 Rated parameters for full bridge MMC DC ice melting device

参数	数值
额定融冰容量/MW	60.48
额定无功输出容量/MVar	±120
额定融冰电流/kA	3.6
额定融冰电压/kV	16.8
桥臂电流额定交流分量/kA	0.499
桥臂电流额定直流分量/kA	1.2
桥臂电流额定有效值/kA	1.300
桥臂电流额定峰值/kA	1.906
IGBT规格型号	富士: 2MBI1400VXB-170E-54

2 融冰装置元器件参数

2.1 融冰模式参数计算

根据上述融冰装置参数,可计算出额定融冰容量时的交流侧额定电流为:

$$I_s = \frac{S}{\sqrt{3} \times U_s} = 0.998 \text{ kA} \quad (1)$$

式中:

I_s —— 交流侧额定电流,计算得 0.998 kA;

S —— 额定融冰容量,60.48 MW;

U_s ——交流侧母线电压, 35 kV。

换流器桥臂电流交流分量为:

$$I_{V_AC} = 0.5 \times I_s = 0.499 \text{ kA} \quad (2)$$

换流器桥臂电流直流分量为:

$$I_{V_DC} = \frac{1}{3} \times I_{DC} = 1.2 \text{ kA} \quad (3)$$

式中:

I_{DC} ——额定融冰电流, 3.6 kA。

换流器桥臂电流有效值为:

$$I_{V_RMS} = \sqrt{I_{V_AC}^2 + I_{V_DC}^2} = 1.300 \text{ kA} \quad (4)$$

换流器桥臂电流峰值为:

$$I_{V_PEAK} = I_{V_DC} + \sqrt{2} \times I_{V_AC} = 1.906 \text{ kA} \quad (5)$$

2.2 桥臂模块数量计算

融冰装置交流侧输入电压为 35 kV, 直流输出电压为 16.8 kV, 融冰工况下单桥臂的等效输出电压为:

$$U_V = \frac{U_{dc}}{2} + U_{ac} = 39.8 \text{ kV} \quad (6)$$

式中:

U_V ——一个桥臂的等效输出电压, 计算得 39.8 kV;

U_{dc} ——直流输出电压, 16.8 kV;

U_{ac} ——交流侧输入相电压峰值(考虑 1.1 倍过电压, 为 31.4 kV)。

设定模块运行电压为 0.9 kV, 最大调制比为 0.9, 单桥臂所需模块数量为:

$$N = \frac{U_V}{U_c \times k} = 49.1 \quad (7)$$

式中:

N ——桥臂模块数, 计算得 49.1;

U_c ——单个功率模块运行电压, 0.9 kV;

k ——最大调制比, 0.9。

计算所需模块数量为 50, 考虑留 2 个冗余模块, 每桥臂配置 52 个功率模块。

2.3 IGBT 功率模块支撑电容计算

功率模块支撑电容起到能量存储和直流电压支撑的作用, 其大小与全桥 MMC 型融冰装置的最大无功容量 Q_{max} 、桥臂模块个数 N 以及模块直流运行电压 U_c 之间满足下述公式:

$$C = \frac{Q_{max}}{3kN\omega_0\epsilon(U_c)^2} \left[1 - \left(\frac{k\cos\phi}{2} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} = 22.4 \text{ mF} \quad (8)$$

式中:

C ——功率模块支撑电容值, 计算得 22.4 mF;

Q_{max} ——最大无功输出容量, 120 MVar;

ω_0 ——额定角频率, 100π ;

ϵ ——直流电压波动系数, 取 0.15;

$\cos\phi$ ——功率因数, 按无功运行取 0。

2.4 桥臂电抗器电感计算

桥臂电抗器在实际工程中一般采用干式空芯, 户外布置。结合理论及已有工程实际应用情况其等效交流电抗值按 0.1 pu 取值, 等效电感有名值计算为:

$$L_{eq} = \frac{U_s^2}{S \times 100\pi} \times 0.1 = 6.5 \text{ mH} \quad (9)$$

式中:

L_{eq} ——等效电感有名值, 计算得 6.5 mH。

2.5 启动回路电阻计算

预充电阻在预充电期间所累积的能量等于换流器预充电结束后模块电容所储存的能量, 即单相电阻的累积能量:

$$W = 2N \times 0.5 \times C \times U_c^2 \times 1/3 = 311 \text{ kJ} \quad (10)$$

式中:

W ——单相电阻的累积能量, 计算得 311 kJ。

设定预充电时间为 6 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 回路充电原理也即 $4\tau = 6$ s 可得:

$$C_{eq} = \frac{C}{N} \times 2 = 0.862 \text{ mF} \quad (11)$$

$$R = \tau / C_{eq} = 1740 \Omega \quad (12)$$

式中:

C_{eq} ——桥臂等效电容, 计算得 0.862 mF;

R ——启动电阻, 计算得 1740 Ω 。

考虑电容充电电压和充电时间留取裕量, 实际电阻取 1750 Ω 。

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, 在初始时刻预充电阻瞬时功率达到最大值, 即:

$$P_{max} = \frac{U_p^2}{4R} = 116.7 \text{ kW} \quad (13)$$

式中:

P_{max} ——预充电阻瞬时功率最大值, 计算得 116.7 kW;

U_p ——交流侧相电压峰值, 28.577 kV。

贵州电网某实际 500 kV 变电站直流融冰装置设计参数及电气平面布置图如图 1、图 2 所示。

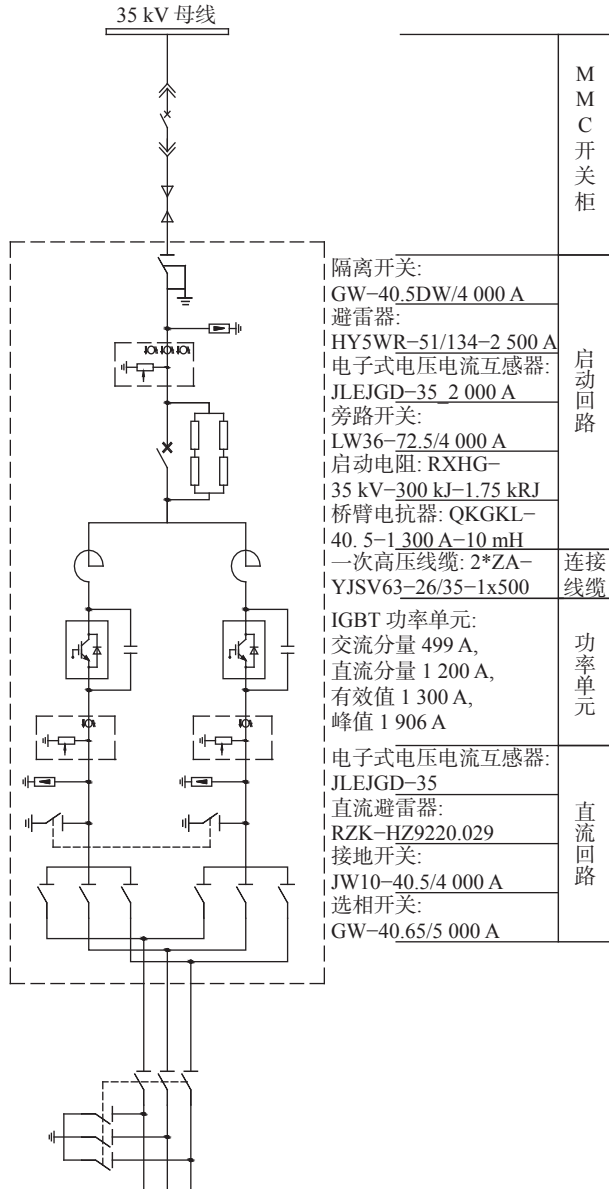


图 1 实际工程融冰装置电气接线示意图

Fig. 1 Electrical wiring diagram of actual engineering ice melting device

3 融冰模式与无功补偿模式装置容量解耦分析

通过上述分析可知, 制约装置融冰模式或者无功补偿模式容量输出的关键因素在于桥臂电流有效值允许值的大小, 而该值主要取决于选定的 IGBT 管

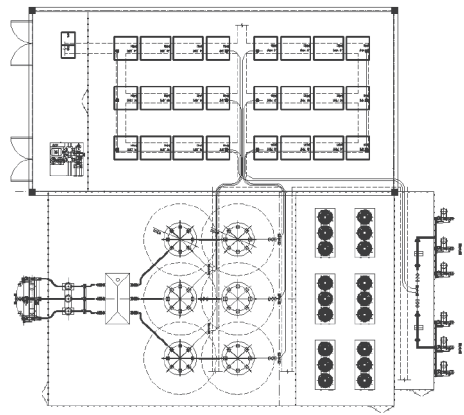


图 2 实际工程融冰装置电气平面布置示意图

Fig. 2 Electrical layout diagram of actual engineering ice melting device

子规格型号。桥臂电流中既有交流分量, 也有直流分量; 交流分量受融冰容量以及无功输出容量影响, 而直流分量由线路融冰电流决定。

全桥 MMC 型直流融冰装置的最大优势在于直流融冰工况运行的同时, 能提供无功输出, 实际工程中该型装置运行模式可以分为 3 种状态: (1) 纯融冰模式, 该模式下不考虑装置无功输出需求; (2) 纯无功输出模式, 该模式下不考虑装置融冰需求; (3) 融冰模式与无功输出模式同时运行。

运行于状态(3)时的融冰容量与无功输出容量存在此消彼长的耦合关系, 在具体设定的某一融冰容量下装置能发出的最大无功容量或者在设定的无功容量下装置具备的最大直流融冰容量往往是设计人员比较关心的问题。

3.1 设定融冰容量下装置最大无功输出容量

融冰容量取决于待融线路的融冰直流压降与融冰电流之乘积, 而待融线路长短不一, 为了便于分析, 融冰直流压降取装置额定值 16.8 kV。下面分别计算不同设定融冰电流下装置的最大无功输出能力, 结果如表 2 所示。

融冰模式下桥臂电流中用于融冰的交流分量、可用于无功输出的交流分量以及仅考虑融冰, 不考虑发出无功时桥臂电流有效值随设定融冰电流的变化趋势如图 3 所示, 在融冰模式下装置能发出的最大无功容量(以容性无功为例)随设定的融冰电流变化趋势如图 4 所示。

从以上计算结果可以看出:

全桥 MMC 型直流融冰装置在额定参数为融冰

表 2 设定融冰容量下装置最大无功输出容量计算表

Tab. 2 Calculating the maximum reactive power output capacity of the device under the set melting capacity

设定融冰容量/MW	设定融冰电压/kV	设定融冰电流/A	在设定融冰容量下桥臂电流交流分量/A	在设定融冰容量下桥臂电流直流分量/A	在设定融冰容量下桥臂电流有效值(不考虑发出无功)/A	交流侧母线电压/kV	在设定融冰电流下能用于无功输出的桥臂电流交流分量/A	在设定融冰容量下能发出最大无功容量/MVar
60.48	16.8	3600	499	1200	1299.6	35	0.0	0.0
50.40	16.8	3000	415.7	1000	1083.0	35	414.3	50.2
40.32	16.8	2400	332.6	800	866.4	35	691.6	83.8
30.24	16.8	1800	249.4	600	649.8	35	903.4	109.5
20.16	16.8	1200	166.3	400	433.2	35	1070.2	129.8
10.08	16.8	600	83.1	200	216.6	35	1201.0	145.6
0.00	16.8	0	0	0	0.0	35	1299.6	157.6

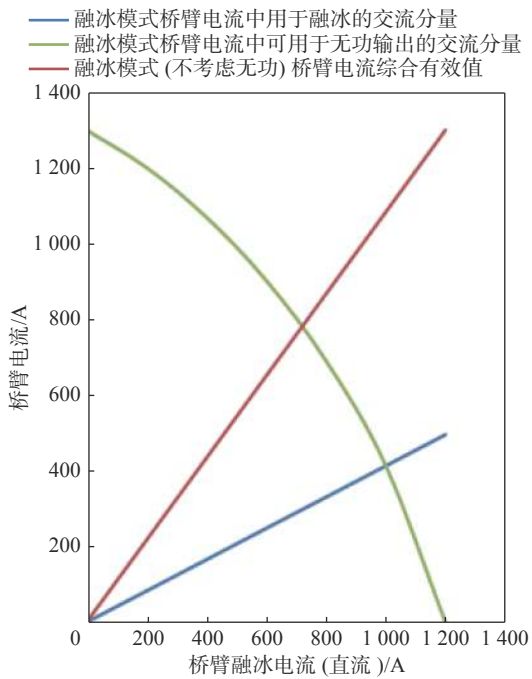


图 3 融冰模式桥臂电流各分量变化趋势图

Fig. 3 Trend chart of various components of bridge current in ice melting mode

电压 16.8 kV, 融冰电流 3.6 kA, 融冰容量 60.48 MW 下, 当切换至无功补偿模式时(不考虑融冰)其最大无功输出容量为 157.6 MVar, 考虑到 IGBT 功率单元散热、寿命等因素, 将其额定无功输出范围设定为 ± 120 MVar(额定无功输出为最大无功输出容量的 0.76 倍, 即裕度系数 1.3)。

装置融冰电压固定为 16.8 kV 下, 融冰电流按照 $\Delta I=600$ A 从 0 A 递增至额定输出融冰电流 3.6 kA, 此时融冰容量与无功输出容量存在此消彼长的耦合关系, 其核心在于 IGBT 功率单元的可承受电压及电流在参数选型确定后是一确定值, 进而决定桥臂电

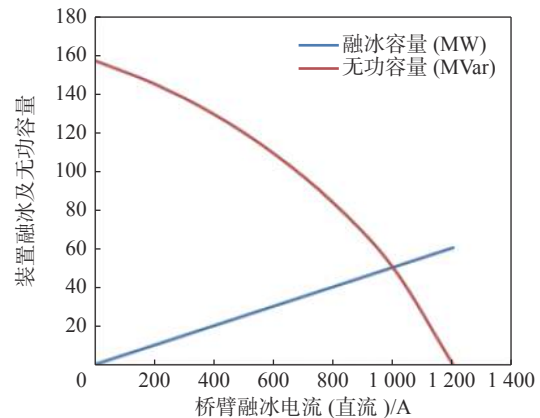


图 4 融冰模式装置融冰及无功容量变化趋势图

Fig. 4 Melting mode device melting and reactive capacity change trend chart

流有效值的最大值(1299.6 A)。

装置融冰工况下, 其最大无功输出能力取决于桥臂通流能力中能用于无功输出的交流分量。

桥臂电流交流分量取决于融冰容量和无功容量的叠加, 桥臂电流直流分量取决于融冰电流。

3.2 设定无功输出容量下装置最大融冰容量

考虑到装置现场运行方式的多样性, 进一步探究在设定无功输出容量下装置可用于线路融冰的最大容量。为了便于对比分析, 仍假定线路融冰电压设定为 16.8 kV, 计算结果如表 3 所示。

在无功补偿模式下, 根据设定的无功输出容量(以容性为例), 计算出桥臂电流中可用于融冰的交流分量、直流分量值变化趋势如图 5 所示, 在设定的融冰容量下装置能够用于线路融冰的最大容量变化趋势如图 6 所示。设定交流母线电压为 35 kV, 为便于前后比较, 图中横坐标用桥臂电流中用于无功补

表 3 设定无功输出容量下装置最大融冰容量计算表

Tab. 3 Calculating the maximum ice melting capacity of the device under the setting of reactive power output capacity

设定无功输出容量/MVar	交流侧母线电压/kV	桥臂电流额定有效值/kA	在设定无功输出容量下	在设定无功输出容量下	在设定无功输出容量下	设定融冰电压/kV	在设定无功输出容量下最大可融冰容量/MVar
			用于无功的桥臂电流交流分量/A	可用于融冰的桥臂电流交流分量/A	可用于融冰的桥臂电流直流分量/A		
+120	35	1.2996	989.8	208.8	502.3	16.8	25.32
+90	35	1.2996	742.3	314.5	756.4	16.8	38.12
+60	35	1.2996	494.9	394.1	948.0	16.8	47.78
+30	35	1.2996	247.4	454.6	1093.6	16.8	55.12
0	35	1.2996	0.0	498.9	1200.0	16.8	60.48

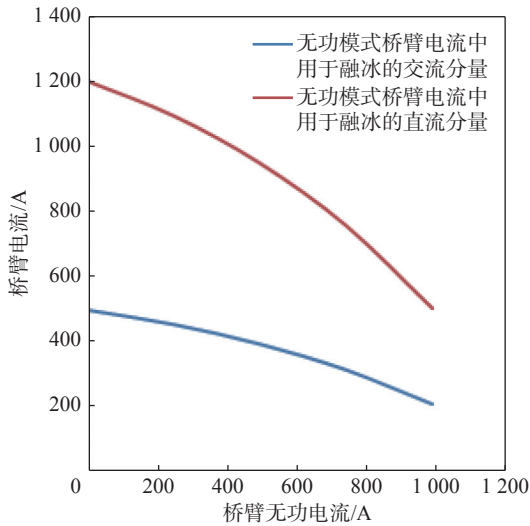


图 5 无功模式桥臂电流各分量变化趋势图

Fig. 5 Trend chart of various components of reactive mode bridge current

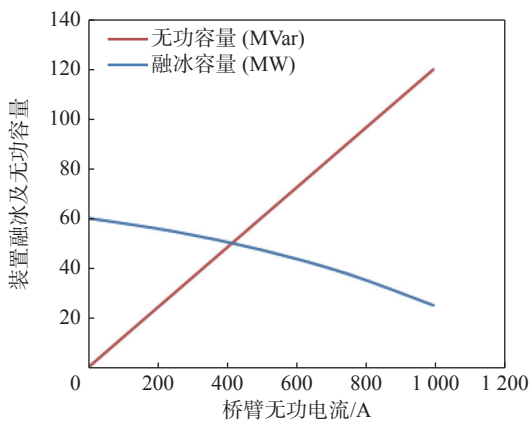


图 6 无功模式装置融冰及无功容量变化趋势图

Fig. 6 Trend chart of ice melting and reactive capacity change of reactive power mode device

偿的交流分量表示。

从以上计算结果可以看出: 当装置容量确定后

在设定融冰容量下, 以桥臂电流有效值为边界条件, 在额定输出容性无功 120 MVar 时, 装置剩余最大融冰容量为 25.32 MW。实际工程中, 应根据厂家给出的无功及融冰模式运行曲线, 合理选择无功输出与融冰容量的合理运行方式。

4 结论

文章以贵州电网某 500 kV 变电站实际工程所采用的全桥 MMC 型直流融冰装置为例, 给出装置关键参数设计计算, 深入比较和全面分析了装置在融冰模式和无功补偿模式下融冰容量与无功输出容量之间的耦合关系, 分别计算装置在设定融冰容量时最大的无功输出容量以及在设定无功输出容量时的最大融冰容量, 进行不同模式下的两类容量解耦计算, 得出以下结论:

1) 在全桥 MMC 型直流融冰装置额定参数为融冰电压 16.8 kV, 融冰电流 3.6 kA, 融冰容量 60.48 MW 时其无功补偿模式(不考虑融冰)最大无功输出容量为 157.6 MVar, 考虑到 IGBT 功率单元散热、寿命等因素, 将其额定无功输出范围设定为±120 MVar(额定无功输出为最大无功输出容量的 0.76 倍, 即裕度系数 1.3)。

2) 融冰装置参数确定后, 融冰容量与无功输出容量存在此消彼长的耦合关系, 其核心在于 IGBT 功率单元的长期工作电压及电流在参数选型确定后是一确定值, 进而决定桥臂电流有效值的最大值。

3) 装置融冰工况下, 其最大无功输出能力取决于桥臂通流能力中能用于无功输出的交流分量; 当装置融冰容量满发时, 从安全运行角度考虑不能再兼顾发出无功容量。

4) 装置无功补偿工况下, 在其输出最大容性无

功 120 MVar 时, 剩余最大融冰容量 25.32 MW; 实际工程中, 应根据厂家给出的无功及融冰模式运行曲线, 合理选择无功输出与融冰容量的合理运行方式。

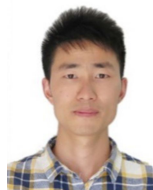
5) 不同模式融冰容量与无功容量存在耦合关系的原因在于桥臂电流中既含有交流分量, 也含有直流分量, 而且交流分量由融冰模式和无功补偿模式产生, 而桥臂电流直流分量仅取决于线路融冰电流。

参考文献:

- [1] 饶宏, 傅闯, 朱功辉, 等. 南方电网直流融冰技术的研究与应用 [J]. 南方电网技术, 2008, 2(6): 7-12. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0629.2008.06.002.
RAO H, FU C, ZHU G H, et al. Research & application of DC-based deicing technology in CSG [J]. Southern power system technology, 2008, 2(6): 7-12. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0629.2008.06.002.
- [2] 常浩, 石岩, 殷威扬, 等. 交直流线路融冰技术研究 [J]. 电网技术, 2008, 32(5): 1-6.
CHANG H, SHI Y, YIN W Y, et al. Ice-melting technologies for HVAC and HVDC transmission line [J]. Power system technology, 2008, 32(5): 1-6.
- [3] 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(2): 7-12, 36. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0629.2008.02.002.
RAO H, LI L C, LI X L, et al. Study of DC based de-icing technology in China southern power grid [J]. Southern power system technology, 2008, 2(2): 7-12, 36. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0629.2008.02.002.
- [4] 班国邦, 吕黔苏, 马晓红, 等. 直流融冰技术应用比较研究 [J]. 电力大数据, 2021, 24(9): 83-92. DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2021.09.011.
BAN G B, LÜ Q S, MA X H, et al. Comparative study on application of DC ice-melting technology [J]. Power systems and big data, 2021, 24(9): 83-92. DOI: 10.19317/j.cnki.1008-083x.2021.09.011.
- [5] 谢惠藩, 朱坚, 唐金昆, 等. 直流融冰装置理论与应用的若干问题探讨 [J]. 南方电网技术, 2013, 7(3): 13-20. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2013.03.006.
XIE H F, ZHU J, TANG J K, et al. Investigation on several issues of theory and application of DC De-icers [J]. Southern power system technology, 2013, 7(3): 13-20. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2013.03.006.
- [6] 陈亦平, 刘文涛, 和识之, 等. 直流融冰装置在南方电网的应用分析 [J]. 南方电网技术, 2011, 5(4): 74-77. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0629.2011.04.018.
CHEN Y P, LIU W T, HE S Z, et al. Analysis on the application of DC de-icer in China southern power grid [J]. Southern power system technology, 2011, 5(4): 74-77. DOI: 10.3969/j.issn.1674-0629.2011.04.018.
- [7] 陈立群, 李成博, 周启文, 等. 新型整流桥串并联切换直流融冰装置 [J]. 电力工程技术, 2022, 41(6): 230-238. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2022.06.027.
CHEN L Q, LI C B, ZHOU Q W, et al. New DC ice-melting device with the function of series-parallel switching of rectifier bridge [J]. Electric power engineering technology, 2022, 41(6): 230-238. DOI: 10.12158/j.2096-3203.2022.06.027.
- [8] 马晓红, 许途, 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. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2019.05.006.
MA X H, XU K, LIN Y Q, et al. Study on the testing technology of full bridge MMC based DC deicing device [J]. Power capacitor & reactive power compensation, 2019, 40(5): 31-37. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2019.05.006.
- [9] 饶崇林, 毕仁明, 梁一桥, 等. 移动式全桥MMC型融冰兼STATCOM装置研制 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(2): 29-35. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2021.02.006.
RAO C L, BI R M, LIANG Y Q, et al. Development on MMC-based mobile DC de-icing device with STATCOM function [J]. Power capacitor & reactive power compensation, 2021, 42(2): 29-35. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2021.02.006.
- [10] 王斌. 基于混合型MMC的直流融冰技术及应用研究 [D]. 太原: 山西大学, 2019.
WANG B. Research on DC melting technology and application based on hybrid MMC [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2019.
- [11] 张敬民, 柯祖梁, 马冬梅, 等. 大容量融冰装置系统设计与仿真 [J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(5): 113-118. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2016.05.023.
ZHANG J M, KE Z L, MA D M, et al. Design and simulation of large-capacity DC ice-melting systems [J]. Power capacitor & reactive power compensation, 2016, 37(5): 113-118. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2016.05.023.
- [12] 蔡斌军, 李谭欣. 基于全桥型MMC的直流融冰控制方法研究 [J]. 湖南工程学报 (自然科学版), 2017, 27(1): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1671-119X.2017.01.001.
CAI B J, LI T X. Control of full-bridge modular multilevel converter for de ice-melting application [J]. Journal of Hunan institute of engineering (natural science edition), 2017, 27(1): 1-9. DOI: 10.3969/j.issn.1671-119X.2017.01.001.
- [13] 杨立敏, 朱艺颖, 孙栩, 等. 基于损耗分析的全桥型MMC参数优化设计 [J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 128-133. DOI: 10.16081/j.epae.202003017.
YANG L M, ZHU Y Y, SUN X, et al. Optimization design of full bridge MMC parameters based on loss analysis [J]. Electric power automation equipment, 2020, 40(3): 128-133. DOI: 10.16081/j.epae.202003017.
- [14] 蒋纯冰, 王鑫, 赵成勇. 混合型MMC全桥子模块的配置比例优化设计 [J]. 华北电力大学学报, 2020, 47(4): 10-18. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2691.2020.04.02.
JIANG C B, WANG X, ZHAO C Y. Configuration proportion

- optimization design of hybrid MMC full-bridge submodule [J]. *Journal of North China electric power university*, 2020, 47(4): 10-18. DOI: 10.3969/j.issn.1007-2691.2020.04.02.
- [15] 毕仁明, 饶崇林, 梁一桥, 等. 全桥MMC型融冰装置充电启动策略研究 [J]. *电力电容器与无功补偿*, 2021, 42(3): 132-137. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2021.03.021.
- BI R M, RAO C L, LIANG Y Q, et al. Study on charging start-up strategy for full bridge type MMC de-icing device [J]. *Power capacitor & reactive power compensation*, 2021, 42(3): 132-137. DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2021.03.021.
- [16] 许逵, 马晓红, 胡鹏飞, 等. 全桥MMC型直流融冰技术功率模块直流电容电压纹波分析 [J]. *高电压技术*, 2021, 47(2): 596-602. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20191725.
- XU K, MA X H, HU P F, et al. Analysis of sub-module capacitor voltage of full bridge MMC-based deicing technology [J]. *High voltage engineering*, 2021, 47(2): 596-602. DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20191725.
- [17] 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. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2020.04.007.
- XU K, MA X H, RAO C L, et al. Research and comparison of DC deicing technologies based on full bridge MMC and thyristor rectifier [J]. *Southern power system technology*, 2020, 14(4): 45-53. DOI: 10.13648/j.cnki.issn1674-0629.2020.04.007.
- [18] 魏敏. 基于半桥型MMC的直流融冰和无功补偿应用研究 [D]. 太原: 山西大学, 2018.
- WEI M. Research on DC melting and reactive power compensation based on half-bridge MMC [D]. Taiyuan: Shanxi University, 2018.
- [19] 袁康, 吕孝国, 田智全, 等. 全桥MMC直流融冰装置设计及仿真 [J]. *辽宁科技大学学报*, 2021, 44(6): 456-463. DOI: 10.13988/j.ustl.2021.06.009.
- YUAN K, LV X G, TIAN Z Q, et al. Design and simulation of full bridge MMC DC ice melting device [J]. *Journal of university of science and technology Liaoning*, 2021, 44(6): 456-463. DOI: 10.13988/j.ustl.2021.06.009.
- [20] 张翔, 丁勇, 朱炳坤, 等. 大容量直流融冰兼静止无功补偿装置的研制与应用 [J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(20): 104-108.
- ZHANG X, DING Y, ZHU B K, et al. Development and application of large-capacity DC deicer/static VAR compensator [J]. *Automation of electric power systems*, 2012, 36(20): 104-108.

作者简介:



吴小刚

何锐

2003-, 男, 学士, 研究方向为变电站直流融冰技术 (e-mail) 2145968633@qq.com。

吴小刚 (第一作者, 通信作者)

1987-, 男, 高级工程师, 硕士, 主要从事变电站电气一次设计、直流融冰装置等相关建设、技术管理工作 (e-mail) wuxiaogang@gedi.com.cn。

项目简介:

项目名称 中低压柔性直流电网关键技术研究 (EV04421W)

承担单位 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

项目概述 项目通过对柔性直流配电技术进行专题研究, 全面掌握柔性直流配电系统的关键设备制造水平, 研究不同用户需求下直流配电网的拓扑结构, 以及相应的电气主接线、设备选型及控制保护技术等, 为后续工程的实施提供重要设计和应用依据。

主要创新点 (1) 研发可靠性计算软件和网络拓扑结构评估准则, 提出未来 5~10 年适用的若干种柔性直流配电网的网络拓扑结构方案; (2) 研发基于 PSCAD 的多端柔直流配电网仿真模型和直流配电网工程通用的主回路参数计算软件, 可适用于未来 5~10 年的典型柔性直流配电网网络拓扑结构方案; (3) 在换流器、直流变压器的拓扑结构选择、接地方式选择、电气主接线选择、过电压和绝缘配合等方面进行创新。

(编辑 叶筠英)