

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210266

模块化多电平直流融冰装置谐振机理及抑制措施研究

班国邦^{1,2}, 牛唯^{1,2}, 杨旗^{1,2}, 杨文勇³, 吕黔苏^{1,2}, 张露松^{1,2}, 袁旭峰⁴

(1. 贵州电网有限责任公司电力科学研究院, 贵州 贵阳 550002; 2. 南方电网防冰减灾联合实验室, 贵州 贵阳 550002;
3. 贵州电网有限责任公司毕节供电局, 贵州 毕节 551700; 4. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 直流融冰作为电网抵御低温冰冻灾害的有效措施之一, 融冰装置在线路覆冰期间的运行可靠性极其重要。首先介绍了全桥模块化多电平直流融冰装置的拓扑结构以及直流融冰装置融冰工作状态下直流侧振荡现象。其次, 分析了融冰装置谐振机理并提出了抑制措施, 即在直流电压前馈环节引入非线性滤波器对高频谐振进行抑制。最后通过仿真与实验验证表明: 基于模块化多电平直流融冰系统阻抗的相频特性得到了大幅度的改善, 控制系统可以正常解锁、升压, 证明了抑制措施的有效性, 降低了高频振荡风险。

关键词: 模块化多电平换流器; 谐振机理; 非线性滤波器; 振荡抑制

The resonance mechanism and suppression measures of DC ice-melting equipment based on a modular multilevel converter

BAN Guobang^{1,2}, NIU Wei^{1,2}, YANG Qi^{1,2}, YANG Wenyong³, LÜ Qiansu^{1,2}, ZHANG Lusong^{1,2}, YUAN Xufeng⁴

(1. Electric Power Research Institute of Guizhou Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China; 2. Joint Laboratory of Ice Prevention & Disaster Reducing of China Southern Power Grid Co., Ltd., Guiyang 550002, China;
3. Bijie Power Supply Bureau, Guizhou Power Grid Co., Ltd., Bijie 551700, China;
4. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: DC ice-melting is one of the effective measures to prevent low temperature and freezing disasters in a power grid. The operational reliability of a DC de-icing device is very important during the icing period. This paper first introduces the topology of a full bridge modular multilevel DC de-icing device, and reveals the oscillation phenomenon on the DC side of the DC ice-melting device in the de-icing working state. Secondly, the oscillation mechanism of the ice melting device is analyzed and suppression measures are proposed. That is, a nonlinear filter is introduced in the DC voltage feedforward link to suppress high-frequency resonance. Finally, simulation and experimental verification show that the phase-frequency characteristics of the ice melting system impedance have been greatly improved, and the control system can be unlocked and boosted normally. This proves the effectiveness of the suppression measures and reduces the risk of high frequency oscillation.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52067004).

Key words: modular multilevel converter (MMC); resonance mechanism; non-linear filter; oscillation suppression

0 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。与其他事故相比, 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, 甚至电网瘫痪^[1-2]。特别是近年来全球各

类气象灾害更为频繁, 极端天气气候事件更显异常, 冰灾造成电力系统的损失和影响更趋严重, 破坏程度越来越强, 影响也越来越复杂, 应对难度也越来越大。如 1921 年 10 月瑞典冰灾、1972 年 1 月美国哥伦比亚州冰灾、1998 年 1 月美国东北部和加拿大东南部冰灾、1999 年 12 月法国冰灾、瑞典南部 2005 年 1 月冰灾、德国 2005 年 11 月冰灾、我国 2005 年冰灾、我国 2008 年冰灾等^[3-4]。2008 年冰灾后, 我国电力科技工作者自主进行了直流融冰技术及装

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52067004); 贵州电网公司科技项目资助(GZKJXM20182104)

置的研发, 成功研发出了具有完全自主知识产权的大功率直流融冰装置, 主要包括带专用整流变压器的直流融冰装置和不带专用整流变压器的直流融冰装置, 并在全国进行了推广应用^[5]。

基于模块化多电平换流器(Modular Multilevel Converter, MMC)克服了单个功率开关器件的电压等级和容量等级限制, 实现低压器件的高压应用, 相比传统两电平和钳位型多电平直流变换器, 具有较好的高压适用、电能质量、可靠性和可维护性能, 成为高压直流输电和大功率电力传动研究和应用的焦点^[6-19]。近年来, 随着基于 MMC 技术的直流融冰装置的研发成功并成功应用, 逐渐成为冬季融冰重点关注技术^[20]。基于全桥型 MMC 拓扑直流融冰装置由于其结构简单, 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, 大大提高了装置的利用率, 实现了对不同长度及型号的覆冰导线融冰的需求。相对于晶闸管整流直流融冰装置, 基于全桥型 MMC 拓扑直流融冰装置整流时谐波含量小, 不需单独设置滤波装置, 也不需在交流侧使用整流变压器, 在电网线路融冰方面具有显著优势^[21-24]。

全桥型 MMC 拓扑直流融冰装置具有比较多的优势, 但也给实际的工程应用带来了一定的挑战, 这主要是融冰系统中广泛使用的换流器能够发出较高频次的谐波, 在与电容器、电抗器及输电线路耦合可能形成谐振, 尽管采用多电平技术能够降低谐波量, 但仍难以将谐波完全消除, 在系统呈现弱阻尼或者负阻尼情况下, 谐波被放大进而出现系统性谐振^[25]。针对直流系统中的振荡, 参考文献^[26]提出了基于阻抗理论进行逆变器稳定性分析, 文献^[27]等提出了基于小信号阻抗/导纳网络的建模方法, 文献^[28]基于奈奎斯特稳定性判据给出了系统稳定性分析方法。而在振荡抑制方面, 目前最为简单的方法是采用附加阻尼控制策略来抑制各类振荡问题, 而在柔性直流系统则主要采用 dq 轴解耦的内外环控制方式进行抑制^[29-31]。

本文简要介绍了全桥型 MMC 拓扑直流融冰装置拓扑结构及整流原理, 从实际全桥型 MMC 拓扑直流融冰装置融冰模式升流试验中出现的高频振荡现象入手, 分析了电压电流高频振荡原因, 提出合理的抑制高频振荡措施, 仿真与实验结果表明了所提出措施的有效性。

1 全桥型 MMC 直流融冰装置拓扑结构及整流原理

基于 MMC 拓扑的直流融冰装置结构如图 1 所示。该拓扑由三相构成, 每一相包括两个桥臂, 每个桥臂由若干个全桥模块串联组成。该拓扑具备无功补偿功能, 在无需融冰的情况下, 交流侧可向交流系统输出无功功率。该拓扑运行于直流融冰模式时直流输出极连接覆冰线路。

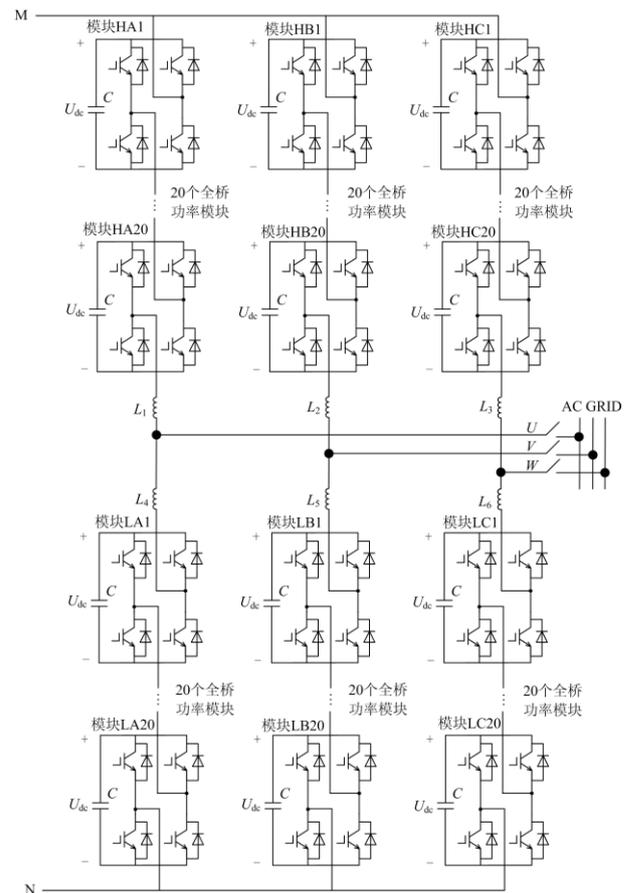


图 1 基于 MMC 的直流融冰装置拓扑图

Fig. 1 Topology of DC deicing device based on MMC

本套融冰装置交流侧接入 10 kV 电网, 直流输出电压 0~13 kV 连续可调, 电流 0~2 000 A 连续可调。MMC 换流阀包括三个相单元(A、B、C), 每相包含上下两个桥臂。每个桥臂由 20 个相同的全桥子模块(FBSM)级联而成, 整个装置共包含 120 个全桥功率模块。基于全桥 MMC 的直流融冰装置整流原理主要通过调整上下桥臂中性点的直流电位偏移, 实现可控且连续调节的直流输出, 满足不同电压等级、不同线路长度直流融冰需求。其运行控制具体可参照文献^[32], 本文不再赘述。基于全桥 MMC

的直流融冰装置能够实现动态无功补偿与直流融冰的结合，但在实际的运行中需要关注谐振问题。

2 装置解锁时的高频振荡现象

某变电站全桥型 MMC 拓扑直流融冰装置先启动无功补偿功能，无功设置 2 Mvar，运行正常，随后融冰线路投入，启动融冰功能进行融冰升流，直流刀闸柜内发出尖锐啸叫声，随后装置跳闸，报“交流母线过流”。通过查看录波发现：解锁后交流侧电压略有升高且正弦波形上逐渐出现高频振荡，跳闸时刻交流电流峰值 1 800 A 超过保护设置值 1 200 A，且直流极电压高频振荡，振荡频率 2.5 kHz，单极对地电压峰值达到 10 kV，电流波形与电压振动频率相同幅值为 200 A，相位超前电压 90°。故障过程录波情况如图 2 及图 3 所示。

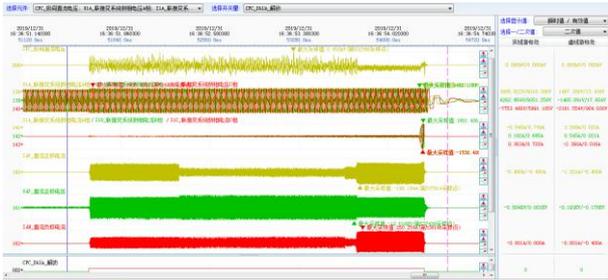


图 2 解锁时刻波形包络图

Fig. 2 Envelope waveform at unlocking time

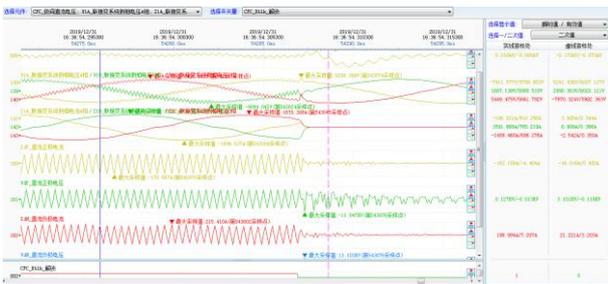


图 3 闭锁时刻波形展开图

Fig. 3 Expanded waveform at locking time

经分析，该套直流融冰装置在直流电流控制方式上，有两种控制方案。方案 1 采用通过控制直流电压间接控制直流电流的常规控制方式；方案 2 采用引入直流电压采样的前馈控制方式，方案 2 的优势在于多台装置并联融冰时能够实现多台装置并联的稳定运行。该融冰装置实际控制模式采用了直流电压前馈的控制方式，原因在于后续要满足多台融冰并联运行的需求，从设备软件一致性角度考虑采用了统一的控制方式。现场采用直流电压前馈运行

时出现了上述高频振荡的问题，主要是在于现场接入线路后，线路参数及融冰装置串联在振荡频率附近出现了负阻尼导致高频振荡产生。

3 振荡机理分析

考虑电压采样延时与基于 MMC 拓扑的直流融冰装置的融冰控制方式，可以得到图 4 所示的信号流程图^[33]。

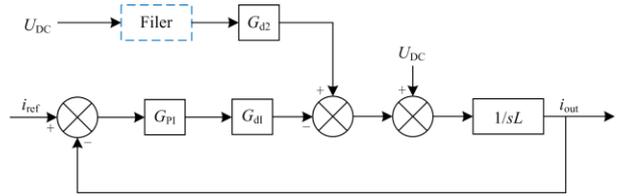


图 4 电流内环控制框图

Fig. 4 Current inner loop control block diagram

此时采用直流电压直接前馈的方式，控制框图中的 Filter 为滤波器，此时为 1，由图 4 可得电流内环的传递函数如式 1 所示。

$$i_{out} = \frac{G_{PI}G_{d1}}{sL + G_{PI}G_{d1}}i_{ref} + \frac{U_{DC}}{sL + G_{PI}G_{d1}} \frac{1}{1 - G_{d2}} \quad (1)$$

式中： i_{out} 和 i_{ref} 分别为直流电流及其参考值； U_{DC} 为直流融冰线路系统公共连接点电压； G_{PI} 为电流内环 PI 控制器增益； G_{d1} 和 G_{d2} 分别为电流控制和电压前馈延时环节的传递函数； L 为等效电抗(含桥臂电抗)。

分析传递函数可知，融冰装置可等效为电流源与阻抗并联的电路模型，即

$$i_{out} = Ai_{ref} + \frac{U_{DC}}{Z_0} \quad (2)$$

其中，

$$\begin{cases} A = \frac{G_{PI}G_{d1}}{sL + G_{PI}G_{d1}} \\ Z_0 = \frac{sL + G_{PI}G_{d1}}{1 - G_{FLT}G_{d2}} \end{cases} \quad (3)$$

式中： A 为等效电流源系数； Z_0 为融冰装置等效阻抗； G_{FLT} 为滤波器传递函数，未加入滤波器时，其为 1。基频分析时电网线路可等效为系统阻抗与电压源串联，用于控制系统的仿真分析。

实际上，在各个频次下，融冰线路均可以采用阻抗串联的形式进行等效，只是在不同频次下等效阻抗的幅值、角度不同。因此，融冰线路与基于 MMC 拓扑的直流融冰装置串联可等效为如图 5 电路模型。其中， i_s 为装置的等效电流源， v_g 为融冰线路的等效电压源。

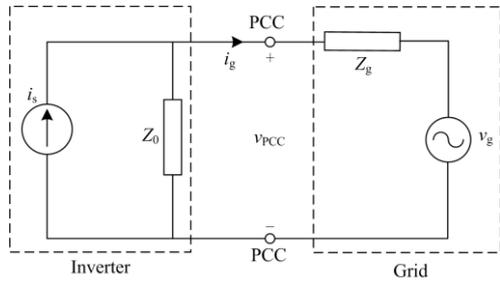


图5 线路与装置互联等效电路图

Fig. 5 Equivalent circuit diagram of interconnection between line and device

由图5可得到融冰设备与融冰线路的公共连接点(PCC)电压, 可以表示为

$$V_{PCC} = \frac{1}{1 + \frac{Z_g}{Z_0}} (Z_g i_s + v_g) \quad (4)$$

系统稳定性表达式 G_{stab} 如式(5)所示^[34]。

$$G_{stab} = \frac{Z_g}{Z_0} \quad (5)$$

根据奈奎斯特稳定性判据相角裕度大于 0° , 整个系统稳定, 即幅值等于 0 dB 时, Z_g 和 Z_0 相角差需小于 180° 。

由式(3)可以得到 Z_0 的幅频及相频特性, 系统阻抗 Z_g 可以近似等效为电感电阻串联与电容并联的等效电路, 将 Z_g 和 Z_0 的幅频特性及相频特性叠加可以得到图6。图中系统 G 为 Z_0 特性曲线, G_2 为 Z_g 特性曲线。

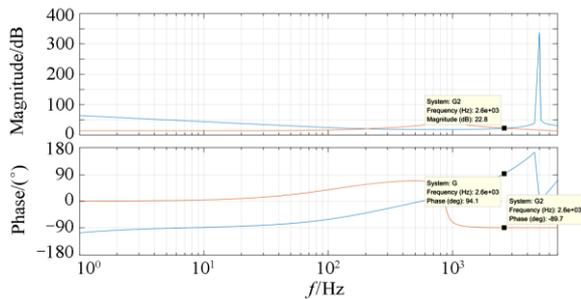


图6 阻抗伯德图

Fig. 6 Bode diagram of impedance

从图中可以看到在 2.6 kHz 处 Z_g 和 Z_0 幅值相等, 相角差为 183.8° , 系统不稳定, 在高频处易发生振荡。式(4)可变换为

$$V_{PCC} = \frac{Z_0}{Z_0 + Z_g} (Z_g i_s + v_g) \quad (6)$$

定义谐波放大系数为

$$K_{harm}(f) = \frac{|R(Z_0) + jX(Z_0)|}{|(R(Z_g) + R(Z_0)) + j(X(Z_g) + X(Z_0))|} \quad (7)$$

在某频率下当 $K_{harm}(f) > 1$ 时, PCC 点测得的电压谐波便已经被放大了。由于融冰装置桥臂电感较大, 在高频段融冰装置主要呈现出感性, 对式(7)分母分析可知, 最容易产生高频振荡的情况为: 在该频次下, 交流系统阻抗为容性, 且容性电抗幅值与柔直阀组等效感性电抗幅值相等; 在该频次下, $R(Z_0)$ 呈现负电阻特性, 与交流系统等效正电阻相互抵消。图6可以看到在 2.5 kHz 以上频率, Z_0 相角大于 90° 呈现出感性及较大负阻尼的特性, 而融冰线路在高频段呈现出电容特性, 此时容易发生振荡。

因此, 消除高频振荡的关注点为: 在系统阻抗接近 -90° 频带, 减小融冰设备的负阻抗幅值, 从相频特性分析即为尽量减小设备阻抗相频特性超过 90° 部分的相角。

4 高频振荡的抑制措施

由以上分析可知, 可引入滤波器改善融冰设备的高频特性, 可采用非线性滤波器的方式对前馈电压进行滤波, 达到改善高频特性又不影响低频特性的目的。

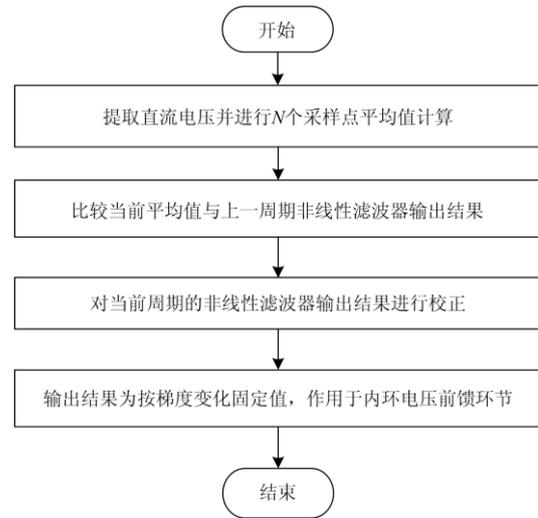


图7 非线性滤波器流程图

Fig. 7 Flow chart of nonlinear filter

非线性滤波器采用滞回比较器, 根据直流电压幅值分档选择接近的固定前馈值。仅在当前电压与前馈分量相差大于预设阈值时更新输出的前馈, 否则保持原输出, 比较周期设置为 20 ms, 且电压输出最小值为 0 , 最大值额定电压, 流程详见图7。电压前馈值滞回比较方式如式(8)所示。

$$V_{dup} = \begin{cases} V_{dup1} + Z(D_{dupy} > X) \\ V_{dup1} - Z(D_{dupy} < -X) \\ V_{dup1} (-X \leq D_{dupy} \leq X) \end{cases} \quad (8)$$

式中： V_{dup} 为当前前馈电压值； V_{dup1} 为上周期前馈电压输出值； Z 为阶梯梯度值，可设置为 1 kV； X 为滞回比较门槛值，设置为 0.75 kV。

非线性滤波器的传递函数，在 50 Hz 以上近似等于 0，引入该滤波器后的伯德图可得到图 8。其中在 2.02 kHz 处 Z_g 和 Z_0 幅值相等，相角差为 177.5° 系统稳定。图中系统 G 为 Z_0 特性曲线， G_2 为 Z_g 特性曲线。

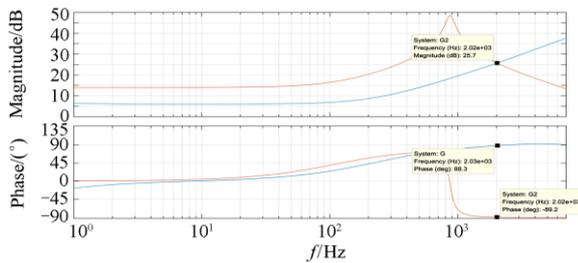


图 8 引入滤波器后的伯德图

Fig. 8 Bode diagram after introducing filter

从图中可以看到经过滤波器矫正后的设备阻抗伯德图在高频段相角在 90° 附近，负阻尼特性得到良好矫正，系统高频振荡风险大幅降低。

为进一步验证工程应用效果，首先在 PSCAD/EMTDC 软件中进行对比仿真验证，仿真参数按实际设备参数选取，参数如表 1 所示。

表 1 仿真参数表

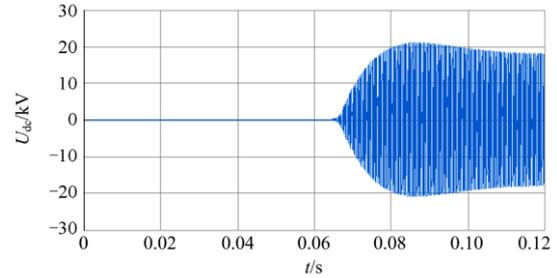
Table 1 Simulation parameters

参数	数值	参数	数值
链数	20	模块电容/ μF	16 800
交流电压/kV	10	直流电压/kV	0~13
直流电流/A	0~2 000	额定有功/MW	26
桥臂电感/mH	2.5	线路电阻/ Ω	6.5
线路电感/mH	6.72	线路电容/ μF	6.73

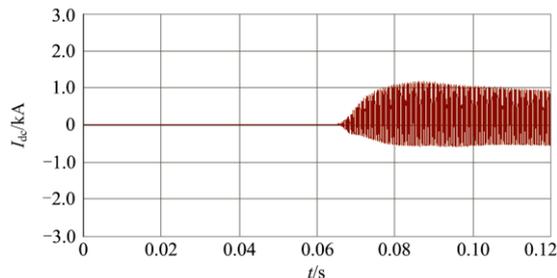
装置由充电模式转到控直流电流模式，采用电压直接前馈的控制方式，仿真波形如图 9 所示。进入控直流电流控制方式后，直流电压、直流电流开始发生振荡，同时可以看到调制输出发生相同的振荡，分析可知振荡是由于延时造成前馈电压形成正反馈，导致振荡发生，与理论分析相同。图 10 为放大后的直流电压电流波形，可以看到振荡电流超前振荡电压 90°，与实际情况相近。图 11 给出了直流电压快速傅立叶变换(Fast Fourier Transform, FFT)

结果，从图 11 中的结果可以看到振荡频率为 2 221 Hz，频率在 2 500 Hz 附近。

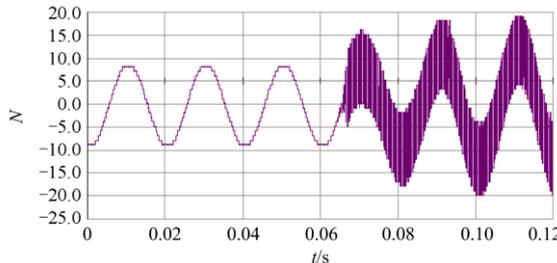
在直流电压前馈中引入所述非线性滤波器进行同工况仿真，结果如图 12 所示。此时直流电流稳定运行于 2 000 A，波动峰峰值在 40 A 左右；直流电压稳定在 13.25 kV，波动峰峰值在 0.3 kV 范围。达到了抑制高频波动的效果，实现了控直流电流方式的稳定运行。



(a) 直流电压波形



(b) 直流电流波形



(c) a相上桥臂调制输出

图 9 直流电压直接前馈仿真波形图

Fig. 9 Waveform of direct feedforward of DC voltage

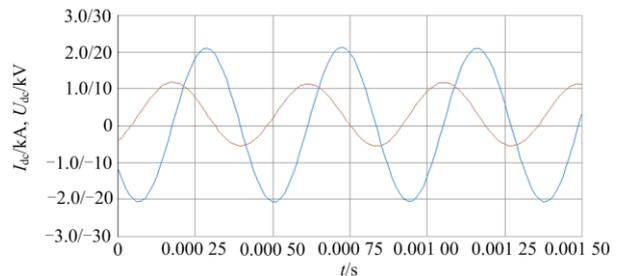


图 10 振荡过程放大波形图

Fig. 10 Enlarged waveform of oscillation process

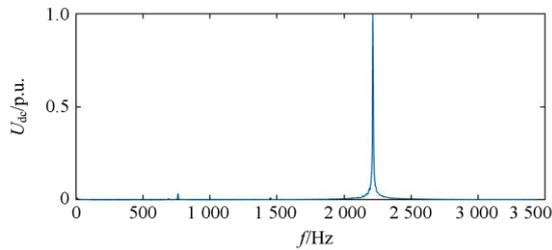
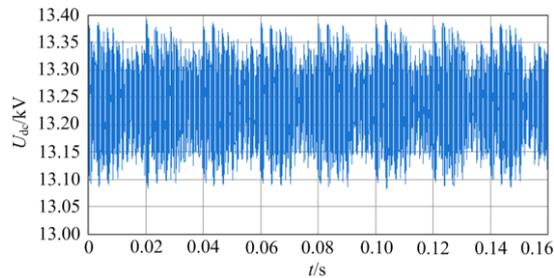
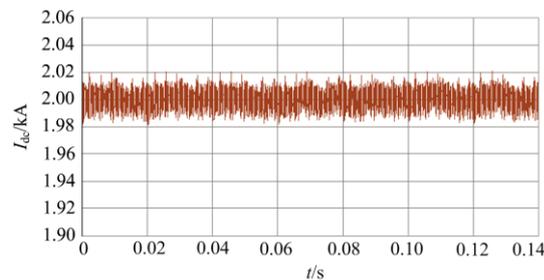


图 11 直流电压 FFT 结果

Fig. 11 FFT result of DC voltage



(a) 直流电压波形



(b) 直流电流波形

图 12 非线性滤波器直流电压直接前馈仿真波形图

Fig. 12 Waveform of direct feed forward simulation for DC voltage of nonlinear filter

对比上述仿真结果可知,在相同的系统条件下,采取优化措施引入非线性滤波器后,基于 MMC 拓扑的直流融冰装置控制系统可以正常解锁、升流,证明了优化抑制措施的有效性,大大降低了高频振荡风险。图 13 为采取措施后实际的直流电压和直流

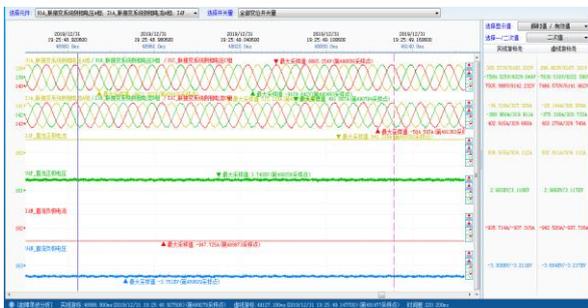


图 13 装置调整参数后升流波形图

Fig. 13 Waveform of current rise after adjusting parameters

电流波形图。可以看到,实际运行带线路升流至 900 A,装置状态正常,线路发热升温融冰,没有出现直流电压高频振荡问题。

5 结论

本文介绍了基于全桥模块化多电平直流融冰装置的拓扑结构,发现了工程应用的模块化多电平直流融冰装置在对交流输电线路融冰时出现谐振现象,并对谐振产生的机理进行原因分析,提出了抑制谐振措施并取得了明显的效果。得出结论如下:

1) 基于全桥型 MMC 拓扑直流融冰装置在设计时需要考虑控制系统解锁整流中出现的高频振荡问题,开展阻抗频率扫频分析,确保装置可靠运行。

2) 采用非线性滤波器实现了对前馈电压进行滤波,达到改善高频特性又不影响低频特性的目的。

3) 仿真与实验结果证明了抑制高频波动的有效性,实现了控直流电流方式的稳定运行,显著降低了高频振荡风险,方法为新型模块化多电平直流融冰装置工程应用提供了参考。

参考文献

- [1] 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.
MA Xiaohong, XU Kui, LIN Yiqun, et al. Research on the experimental technology of full-bridge MMC-type DC ice melting device[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2019, 40(5): 31-37.
- [2] 刘伟. 电网严重故障下的电压稳定应对措施分析[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(16): 163-170.
LIU Wei. Analysis of voltage stability countermeasures under a severe fault in a power grid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 163-170.
- [3] 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.
MA Xiaohong, ZHAO Lijin, LI Wei, et al. Application of DC ice melting technology in Guizhou power grid[J]. Southern Power Grid Technology, 2009, 3(5): 107-110.
- [4] 吴庆范, 黄金海, 吴彦维, 等. 特高压直流输电系统并联融冰运行方式的控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(11): 69-75.
WU Qingfan, HUANG Jinhai, WU Yanwei, et al. Control and protection strategies for parallel ice melting operation mode of UHV DC transmission system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 69-75.
- [5] 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, 38(11): 3041-3047.

LU Jiazheng, ZHANG Yun. Realization of de-icing based on 12-pulse rectification for 500 kV transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(11): 3041-3047.

[6] 杨波, 庄俊, 姚运昌, 等. 一种可阻断直流故障电流的双逆阻型 MMC 研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 39-46.

YANG Bo, ZHUANG Jun, YAO Yunchang, et al. A dual reverse blocking sub-module based MMC with DC fault current blocking capability[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 39-46.

[7] TAO Fen, XIE Zhujun, CHENG Jie, et al. Fast valve power loss evaluation method for modular multi-level converter operating at high-frequency[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 26-36.

[8] 陈磊, 何慧雯, 王磊, 等. 基于限流器与断路器协调的混合直流输电系统故障隔离方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(19): 119-127.

CHEN Lei, HE Huiwen, WANG Lei, et al. Fault isolation method of a hybrid HVDC system based on the coordination of a fault current limiter and a DC circuit breaker[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(19): 119-127.

[9] 孙冰, 包丹, 张磊. 考虑惯性与阻尼特性的 MMC-HVDC 附加功率控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(17): 108-114.

SUN Bing, BAO Dan, ZHANG Lei. Supplementary power control scheme for an MMC-HVDC station considering inertia and damping[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(17): 108-114.

[10] LI Shaohua, WANG Xiliu, YAO Zhiqing, et al. Circulating current suppressing strategy for MMC-HVDC based on nonideal proportional resonant controllers under unbalanced grid conditions[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 387-397.

[11] 夏长江, 韩民晓, 耿治, 等. MMC 子模块故障后线电压恢复容错控制策略[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 2-9.

XIA Changjiang, HAN Minxiao, GENG Zhi, et al. Fault-tolerant control strategy of line voltage recovery after MMC sub-modules fault[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 2-9.

[12] 殷冠贤, 朱铭炼, 谢晔源, 等. 模块化多电平换流阀新型运行试验拓扑及其控制方法[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 26-33.

YIN Guanxian, ZHU Minglian, XIE Yeyuan, et al. New operation test topology and control method of modular multilevel converter valve[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 26-33.

[13] 余昆, 薛卜, 顾盼渊, 等. MMC 整流器开关器件的损耗及温升建模研究[J]. 电力工程技术, 2021, 40(4): 18-25.

YU Kun, XUE Bu, GU Fangyuan, et al. The loss and temperature rise modeling of MMC rectifier switching devices[J]. Electric Power Engineering Technology, 2021, 40(4): 18-25.

[14] 邵峰, 杨晋霞. 基于电压电平的 MMC 模型预测控制[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(2): 12-21.

SHAO Feng, YANG Jinxia. Model predictive control of modular multilevel converter based on voltage level[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 12-21.

[15] 岳雨霏, 王文, 唐欣, 等. 基于等效电流分解模型的模块化多电平交—交变换器控制方法[J]. 电力科学与技术学报, 2021, 36(5): 50-60.

YUE Yufei, WANG Wen, TANG Xin, et al. A control method for modular multilevel AC/AC converter based the equivalent current decomposition model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2021, 36(5): 50-60.

[16] 吕承, 邵能灵, 郑晓冬, 等. 基于边界电流的柔性直流线路保护新方案[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 115-121.

LÜ Cheng, TAI Nengling, ZHENG Xiaodong, et al. Protection novel scheme for flexible DC line based on boundary current[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 115-121.

[17] 周月宾, 宋强, 杨柳, 等. 模块化多电平换流器电容用量的标幺化分析与设计方法[J]. 电力建设, 2021, 42(11): 1-12.

ZHOU Yuebin, SONG Qiang, YANG Liu, et al. Design and analysis for energy storage requirements of modular multilevel converter applying per-unit model[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(11): 1-12.

[18] 沈宝兴, 林琳, 董倩, 等. MMC-HVDC 孤岛供电系统交流故障穿越协调控制策略[J]. 电力建设, 2020, 41(6): 93-99.

SHEN Baoxing, LIN Lin, DONG Qian, et al. Coordinated control strategy for ac fault ride-through of MMC-HVDC island power supply system[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(6): 93-99.

[19] 张明奇, 刘麒麟, 张英敏. MMC 型换流器双极故障电流影响因素分析及其优化[J]. 电力建设, 2020, 41(5): 124-132.

ZHANG Mingqi, LIU Qilin, ZHANG Yingmin. Analysis and optimization of factors influencing current during MMC bipolar fault[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(5): 124-132.

[20] HU Pengfei, LIANG Yiqiao, DU Yi, et al. Development and testing of a 10 kV 1.5 kA mobile DC de-icer based

- on modular multilevel converter with STATCOM function[J]. *Journal of Power Electronics*, 2018, 18(2): 456-466.
- [21] 刘国伟, 赵宇明, 袁志昌, 等. 深圳柔性直流配电示范工程技术方案研究[J]. *南方电网技术*, 2016, 10(4): 1-7. LIU Guowei, ZHAO Yuming, YUAN Zhichang, et al. Research on Shenzhen flexible DC power distribution demonstration engineering scheme[J]. *Southern Power Grid Technology*, 2016, 10(4): 1-7.
- [22] 吴蒙, 贺之渊, 阎发友, 等. 下垂控制对直流电网动态电压稳定性的影响分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(10): 8-15. WU Meng, HE Zhiyuan, YAN Fayou, et al. Influence of droop control on the dynamic voltage stability of DC grid analysis[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(10): 8-15.
- [23] 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. GUO Yuqun, ZHOU Yuebin, XU Jianzhong, et al. Control strategy of DC ice melting device applicable to full-bridge modular multilevel converters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(5): 106-113.
- [24] 朱余林, 袁旭峰, 陈明洋, 等. 适用于 MMC 多端柔性直流电网的改进电压下垂控制研究[J]. *电力科学与工程*, 2018, 34(9): 14-19. ZHU Yulin, YUAN Xufeng, CHEN Mingyang, et al. Study on improved voltage droop control for MMC multi-terminal flexible DC distribution network[J]. *Power Science and Engineering*, 2018, 34(9): 14-19.
- [25] 赵国亮, 赵鹏豪, 赵成勇, 等. 模块化多电平换流器子模块拓扑结构对比分析[J]. *华北电力大学学报(自然科学版)*, 2015, 42(3): 15-21. ZHAO Guoliang, ZHAO Penghao, ZHAO Chengyong, et al. Comparison and analysis on the topology of modular multi-level converter submodule of modular multi-level converter[J]. *Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition)*, 2015, 42(3): 15-21.
- [26] SUN Jian. Impedance-based stability criterion for grid connected inverters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011, 26(11): 3075-3078.
- [27] 谢小荣, 刘华坤, 贺静波, 等. 新能源发电并网系统的小信号阻抗/导纳网络建模方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(12): 26-32. XIE Xiaorong, LIU Huakun, HE Jingbo, et al. Small-signal impedance/admittance network modeling for grid-connected renewable energy generation systems[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(12): 26-32.
- [28] 孙振奥, 杨子龙, 王一波, 等. 光伏并网逆变器集群的谐振原因及其抑制方法[J]. *中国电机工程学报*, 2015, 35(2): 418-452. SUN Zhen'ao, YANG Zilong, WANG Yibo, et al. The cause analysis and suppression method of resonances in clustered grid-connected photo voltaic inverters[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2015, 35(2): 418-452.
- [29] 赵岩, 郑斌毅, 贺之渊, 等. 南汇柔性直流输电示范工程的控制方式和运行性能[J]. *南方电网技术*, 2012, 6(6): 6-10. ZHAO Yan, ZHENG Binyi, HE Zhiyuan, et al. The control mode and operating performance of Nanhui VSC-HVDC demonstration project[J]. *Southern Power System Technology*, 2012, 6(6): 6-10.
- [30] CESPEDES M, SUN Jian. Impedance modelling and analysis of grid-connected voltage-source converters[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2014, 29(3): 1254-1261.
- [31] AMIN M, RYGG A, MOLINAS M. Self-synchronization of wind farm in an MMC-based HVDC system: a stability investigation[J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2017, 32(2): 458-470.
- [32] 杨刚, 杨奇逊, 张涛, 等. 直流融冰及无功功率补偿系统研究[J]. *中国电力*, 2016, 49(1): 119-126. YANG Gang, YANG Qixun, ZHANG Tao, et al. Research on DC de-icing and reactive power compensation system[J]. *Electric Power*, 2016, 49(1): 119-126.
- [33] 郭贤珊, 刘斌, 梅红明, 等. 渝鄂直流背靠背联网工程交直流系统谐振分析与抑制[J]. *电力系统自动化*, 2020, 44(20): 233-243. GUO Xianshan, LIU Bin, MEI Hongming, et al. Analysis and suppression of resonance between AC and DC systems in Chongqing-Hubei back-to-back HVDC project of China[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2020, 44(20): 233-243.
- [34] ZOU Changyue, RAO Hong, XU Shukai, et al. Analysis of resonance between a VSC-HVDC converter and the AC grid[J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, 33(12): 10157-10168.

收稿日期: 2021-03-13; 修回日期: 2021-05-05

作者简介:

班国邦(1983—), 男, 高级工程师, 研究方向为高电压电气技术及柔性直流配电技术; E-mail: 7393839@qq.com

牛唯(1989—), 女, 硕士, 工程师, 研究方向为输电线路防灾减灾与规划; E-mail: 327980534@qq.com

杨旗(1990—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为输变电装备安全与电网防冰减灾。E-mail: yangqi_cqu@163.com

(编辑 葛艳娜)