

三端混合直流输电实验平台控制参考值 变化斜率优化研究

秦嘉蔚,王顺亮,吴佳奇,刘天琪

(四川大学电气工程学院,四川 成都 610065)

摘要:文中主要对结合电网换相换流和模块化多电平换流两种换流技术的优点的三端混合直流输电系统进行研究。由于调节9电平模块化多电平换流器(MMC)控制器的定功率值时,直流电压会出现一个瞬时增大或减小的值;调节25电平MMC控制器定电压值时,该支路交流电流会出现一个瞬时增大或减小的值;当调节控制器的值越快时,冲击量的峰值将会越大;因此通过爬坡实验,找到9电平MMC功率参考值 P_{ref} 以及25电平MMC电压参考值 V_{ref} 合适的斜率,使系统既有较快的响应速度,又不会因直流电压/交流电流的冲击过大而发生跳闸。分别通过仿真和实验验证,最终得到所搭建设备 P_{ref} 的极限斜率为24 kW/s, V_{ref} 的极限斜率为1000 V/s,实验结果和仿真结果一致。

关键词:混合直流输电系统;SCADA实验系统;参考功率/电压斜率的爬坡实验

中图分类号:TM 72 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2021)05-0021-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210505

Research on Optimization of Reference Slope for A Three-terminal Hybrid LCC-MMC HVDC Experimental Platform

Qin Jiawei, Wang Shunliang, Wu Jiaqi, Liu Tianqi

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China)

Abstract: Combined with the advantages of line commutated converter and multiple module converter, LCC-MMC three-terminal hybrid DC transmission system is mainly studied. When the constant power value of 9-level MMC converter controller is adjusted, the DC voltage will increase or decrease instantaneously, and when the fixed voltage of 25-level MMC converter controller is adjusted, the AC current of the branch will increase or decrease instantaneously. When the value of the controller is adjusted faster, the peak value of the impact will be larger. Therefore, it is necessary to find the appropriate slope for 9-level MMC power reference and 25-level MMC voltage reference through climbing experiment, which will make the system not only have fast response speed, but also not trip due to excessive impact of DC voltage/AC current. Through simulation and experiments, the limit slope of power reference is 24 kW/s, and the limit slope of voltage reference is 1000 V/s, so the experimental results are consistent with the simulation results.

Key words: hybrid HVDC transmission system; SCADA experimental system; climbing experiment of reference power/voltage slope

0 引言

为了充分发挥电网换相换流器高压直流输电系统(line commutated converter based on high voltage direct current, LCC-HVDC)和电压源型换流器高压直流输电系统(voltage source converter based on high voltage direct current, VSC-HVDC)两者的优势,混

合型直流输电系统成为了新的研究热点。混合型直流输电系统的整流侧采用电网换相换流技术,逆变侧采用电压源型换流技术,既没有换相失败的风险,损耗也较低,运行技术较为成熟,有利于系统的安全稳定运行,是实现远距离大容量输电一种极具竞争力的方案^[1-5]。

对于结合电网换相换流器(line commutated converter, LCC)和模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)的LCC-MMC型混合双

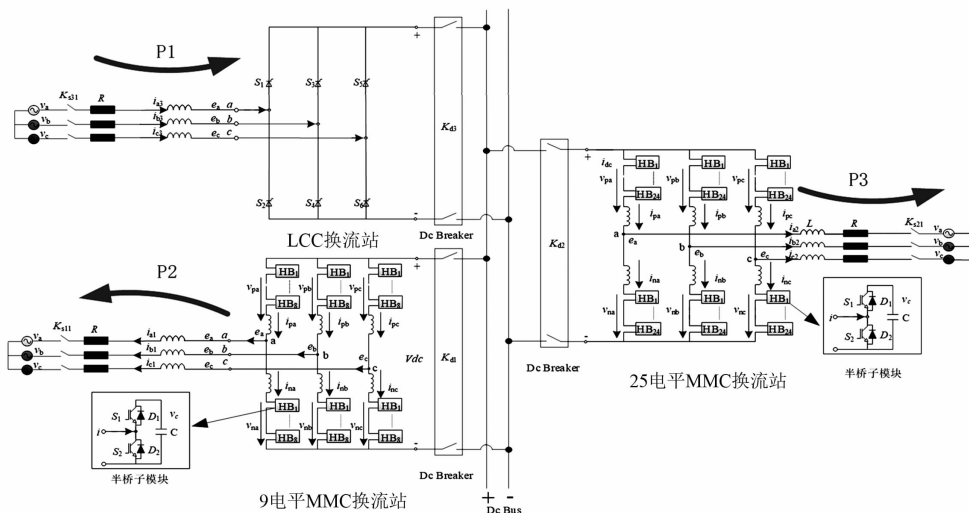


图 1 三端混合直流输电系统拓扑

端直流输电系统,整流侧 LCC 换流站常采用定电压控制,为逆变侧提供稳定的直流电压,维持功率传输。逆变侧 MMC 则采用定有功和定无功控制,因此逆变侧能灵活地控制有功功率和无功功率。对于多端混合直流输电系统,由于 LCC 与 MMC 各换流站有多种控制策略,因此需要专门设计相应的控制策略,以达到协调控制的目的。文献[6]提出了 4 种 LCC-MMC 混合三端直流系统的控制策略及运行方式,并对 4 种控制策略进行对比,通过仿真验证了 4 种控制策略下系统的启动、稳态运行和停机状态。文献[7]结合昆柳龙工程,分别给出了三端系统的启动和停运、两端系统启动和停运、三端系统中一端的停运、两端系统中增加一端的投入等情况操作过程,以及在稳态运行时协调各端功率的分配,在某一端退出运行时改变电流/功率参考指令,协调剩余两端的功率传输;最后,通过仿真验证了控制策略的可行性,能适用于多端直流输电系统复杂的运行环境。文献[8]为多端混合直流输电系统设计了两种控制模式,对比得出三台 MMC 采用定直流电压控制具有有效的电流平衡能力,可以避免交流故障时 MMC 直流电流振荡。

虽然对混合直流输电系统的研究有接近 20 年的时间,但混合直流输电系统投入工程应用的实例并不多,目前还是以 LCC-HVDC 和 MMC-HVDC 为主^[9-12]。除此之外,在已有文献中不能找到混合直流输电相关的实验研究,大多以仿真为主,但是实验是很重要的一个环节,能深入研究混合直流输电系统^[13]。下面将通过在所搭建的混合直流输电实验平台上完成爬坡实验,找到实验设备控制器合适的

斜率,使该混合直流输电系统既有较快的响应速度,又不会因直流电压/交流电流的冲击过大而发生跳闸。

1 系统工作原理

1.1 系统结构

在所设计的三端混合直流输电系统中,送端采用十二脉动 LCC 电网换相换流器,受端采用 25 电平 MMC 换流站和 9 电平 MMC 换流站并联。该三端混合直流输电系统拓扑图如图 1 所示,其中 25 电平 MMC 换流站采用最近电平逼近调制策略,9 电平 MMC 换流站采用多种脉冲宽度调制策略。两 MMC 换流站均使用半桥式子模块(half bridge sub-module, HBSM)。

1.2 换流站控制

该三端混合直流输电系统整流侧 LCC 换流站采用定电流控制。将整流输出的直流电流 I_{dc} 和设定直流电流参考值 I_{dcre} 比较,得到的差值通过 PI 环节,最后对触发角 α 角进行修正,使得直流电流 I_{dc} 越来越接近参考值,最终等于 I_{dcre} ,从而达到了定电流控制的目的。其控制框图如图 2 所示。

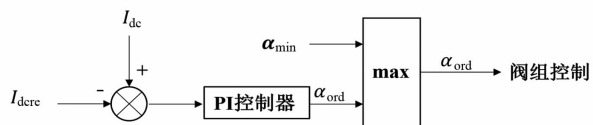


图 2 定电流控制

该三端混合直流输电系统逆变侧 MMC 采用的是传统双环控制。传统双环控制分为内环控制和外

环控制。

图 3 是 MMC 换流站双环控制的控制框图,左侧的框是外环控制,右侧的框是内环控制。外环控制主要包括有功类物理量和无功类物理量,其参考值与测量值的差值通过 PI 控制器,可以分别得到内环电流 d 轴参考值 i_{sdref} 和内环电流 q 轴参考值 i_{sqref} 。对于内环控制来说, d 轴电流的参考值 i_{sdref} 和 d 轴电流的测量值 i_{sd} 经过内环的电流解耦控制得到 d 轴的参考电压信号 U_d^* ; q 轴电流的参考值 i_{sqref} 和 q 轴电流的测量值 i_{sq} 经过内环的电流解耦控制得到 q 轴的参考电压信号 U_q^* 。最后将得到的 d 轴参考电压信号 U_d^* 和 q 轴参考电压信号 U_q^* 经过 dq/abc 坐标变换得到交流侧的三相电压参考值 $u_a、u_b、u_c$ 。[14]

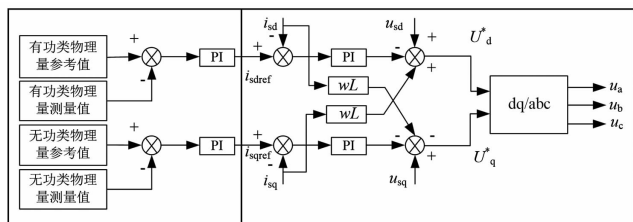


图 3 MMC 双环控制

外环控制器根据不同的控制标准,可分为 3 种:定直流电压控制、定有功功率控制、定无功功率控制。因此只改变相应的外环控制器就可实现系统有功量(直流电压、频率、有功功率)与无功量(交流电压、无功功率)的不同控制。

d 轴定有功功率控制参考电流表达式为

$$i_{d_ref} = k_p (P_{ref} - P) + k_i \int (P_{ref} - P) dt \quad (1)$$

q 轴定无功功率控制参考电流表达式为

$$i_{q_ref} = k_p (Q_{ref} - Q) + k_i \int (Q_{ref} - Q) dt \quad (2)$$

d 轴定直流电压控制参考电流表达式为

$$i_{d_ref} = k_p (U_{dc_ref} - U_{dc}) + k_i \int (U_{dc_ref} - U_{dc}) dt \quad (3)$$

对内环控制来说,其目的主要是电流参考值和电流测量值经过内环的电流解耦控制得到 d 轴和 q 轴的参考电压信号。

d 轴和 q 轴参考电压表达式为:

$$V_{d_ref} = u_d + \omega L i_q - \left[k_p (i_{d_ref} - i_d) + k_i \int (i_{d_ref} - i_d) dt \right] \quad (4)$$

$$V_{q_ref} = u_q - \omega L i_d - \left[k_p (i_{q_ref} - i_q) + k_i \int (i_{q_ref} - i_q) dt \right] \quad (5)$$

1.3 系统协调控制

对于该三端混合直流输电系统,整流站 LCC 采用定直流电流(功率)控制,逆变站 25 电平 MMC 采用定直流电压控制,逆变站 9 电平 MMC 采用定有功功率控制。

在该三端混合直流输电系统中, LCC 换流站和 9 电平 MMC 换流站可以直接实现有功功率的控制,或者通过定直流电流间接实现有功功率的控制。定直流电压换流站 25 电平 MMC 作为整个系统功率平衡站,同时也能控制系统的直流电压。

1.3.1 调节系统定功率的值

系统处于稳态运行时,可以调节 9 电平 MMC 换流站控制器定功率的值。

1) 当将 9 电平 MMC 换流站控制器定功率的值减小时,输送到功率平衡站 25 电平 MMC 的功率会增大。对直流系统来说, $P = UI$, 因此直流电压会出现一个瞬时增大的冲击电压。紧接着 25 电平 MMC 换流站定电压控制器发挥作用,直流电压恢复到设定值,25 电平 MMC 支路的直流电流增大。

2) 当将 9 电平 MMC 换流站控制器定功率的值增大时,输送到功率平衡站 25 电平 MMC 的功率会减小,因此直流电压也会出现一个瞬时减小的冲击电压。紧接着 25 电平 MMC 换流站定电压控制器发挥作用,直流电压恢复到设定值,25 电平 MMC 支路的直流电流减小。

以上是调节 9 电平 MMC 换流站控制器定功率的值的暂态过程,其流程框图如图 4 所示。

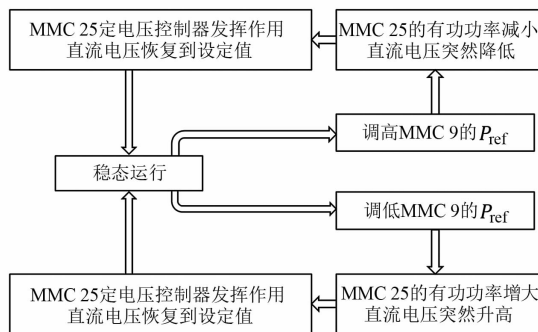


图 4 调节 MMC 9 控制器定功率值的暂态过程

因此,对整个系统来说,调节 9 电平 MMC 换流站控制器定功率的值时,直流电压会出现一个瞬时增大或减小的值。当调节定功率换流器的值越快,即斜率 k 越大时,那么直流电压的瞬时值也将会越大。

1.3.2 调节系统定电压的值

系统处于稳态运行时,可以调节 25 电平 MMC 换流站控制器定电压的值。由于可调节的电压范围很小,因此可近似地把直流电压看作不变。

1) 当将 25 电平 MMC 换流站控制器定电压的值减小时,由于输送到功率平衡站 25 电平 MMC 的功率不会变化,因此对直流系统来说,25 电平 MMC 换流站支路的直流电流会出现一个瞬时增大的冲击电流,25 电平 MMC 换流站支路的交流电流也会出现一个瞬时增大的冲击电流。

2) 当将 25 电平 MMC 换流站控制器定电压的值增大时,同理,25 电平 MMC 换流站支路的直流电流会出现一个瞬时减小的冲击电流,25 电平 MMC 换流站支路的交流电流也会出现一个瞬时减小的冲击电流。

以上是调节 25 电平 MMC 换流站控制器定电压的值的暂态过程,其流程框图如图 5 所示。

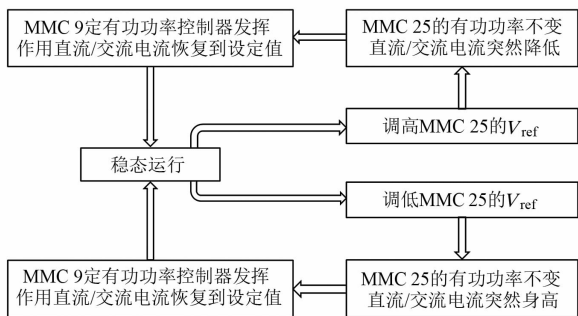


图 5 调节 MMC 25 控制器定电压值的暂态过程

因此,对整个系统来说,调节 25 电平 MMC 换流站控制器定电压的值时,25 电平 MMC 换流站支路直流电流和交流电流会出现一个瞬时增大或减小的值。当调节定电压控制器的值越快,即斜率 k 越大时,那么直流电流和交流电流的瞬时值也将会越大。

2 直流输电系统仿真验证

在仿真中,LCC 和 MMC 换流器主回路的额定电压和额定功率等参数如表 1 所示。实验中同样采用该参数。

表 1 LCC 和 MMC 换流器主回路参数

被控对象	额定功率/kW	额定电压/V
LCC	20	750
9 电平 MMC	12	750
25 电平 MMC	20	750
交流系统	—	380

2.1 优化功率参考值斜率的仿真实验

实验使用的设备能承受的最大直流电压是 900 V,当直流电压大于 900 V 时,设备将会发生跳闸。因此,接下来将会通过仿真和实验,减小 9 电平 MMC 换流站控制器定功率的值 P_{ref} , 找到一个合适的斜率 k ,使系统既能在调节功率时较快达到设定值,又能不发生跳闸使实验中中断。

9 电平 MMC 的额定功率是 12 kW,因此为了得到最大的冲击,9 电平 MMC 的功率参考值 P_{ref} 的初始值为 -12 kW。仿真中, P_{ref} 从 -12 kW 变化到 0。

当 P_{ref} 在第 4 s 从 -12 kW 到 0,变化时间为 2 s 时, $k = 6$ kW/s。仿真波形如图 6 所示,图中是直流电压的波形,其峰值约为 830 V。

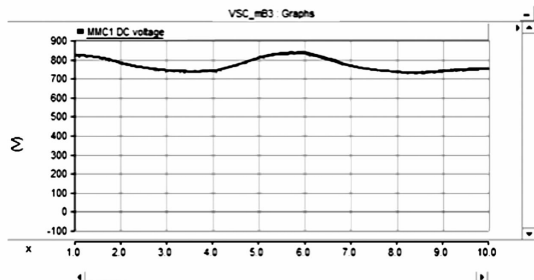


图 6 P_{ref} 的斜率为 6 kW/s 时仿真波形

当 P_{ref} 在第 4 s 从 -12 kW 到 0,变化时间为 1 s 时, $k = 12$ kW/s。仿真波形如图 7 所示,图中是直流电压的波形,其峰值约为 885 V。

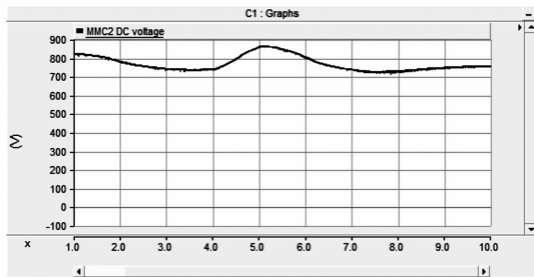


图 7 P_{ref} 的斜率为 12 kW/s 时仿真波形

当 P_{ref} 在第 4 s 从 -12 kW 到 0,变化时间为 0.5 s 时, $k = 24$ kW/s。仿真波形如图 8 所示,图中是直流电压的波形,其峰值约为 890 V。

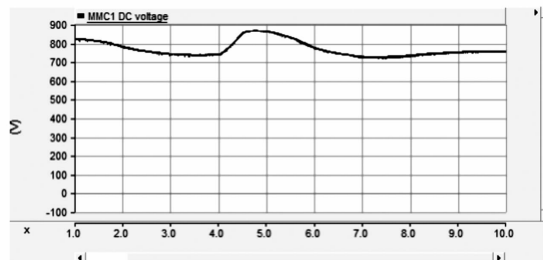


图 8 P_{ref} 的斜率为 24 kW/s 时仿真波形

2.2 优化电压参考值斜率的仿真实验

实验使用的设备能承受的最大交流电流是 40 A,交流电流大于 40 A 时,设备将会发生跳闸。相比交流电流,直流电流有更大的裕量,不容易因直流电流冲击过大而使设备发生跳闸。因此,接下来将会通过仿真和实验,减小 25 电平 MMC 换流站控制器定电压的值 V_{ref} ,找到一个最合适的斜率 k ,使系统既能在调节功率时较快达到设定值,又能不发生跳闸使实验中断。

该实验系统可设置的直流电压值最小为 700 V,最大为 750 V。因为 25 电平 MMC 的额定功率是 20 kW,所以为了得到最大的冲击,25 电平 MMC 的输出功率为 20 kW,9 电平 MMC 的输出功率为 0。

当 V_{ref} 的 $k = 1000 \text{ V/s}$ 时,电压从 750 V \rightarrow 700 V \rightarrow 750 V,各需要 0.05 s。图 9 是 25 电平 MMC 的交流电流波形,其冲击的值较大,约为 45 A。



图 9 V_{ref} 的 $k = 1000 \text{ V/s}$ 时仿真波形

当 V_{ref} 的 $k = 500 \text{ V/s}$ 时,电压从 750 V \rightarrow 700 V \rightarrow 750 V,各需要 0.1 s。图 10 是 25 电平 MMC 的交流电流波形。

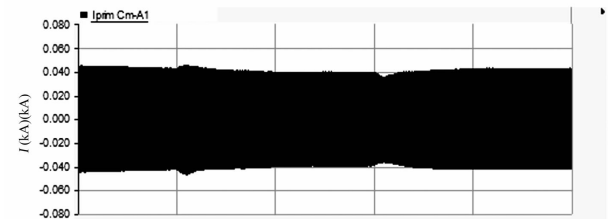


图 10 V_{ref} 的 $k = 500 \text{ V/s}$ 时仿真波形

当 V_{ref} 的 $k = 250 \text{ V/s}$ 时,电压从 750 V \rightarrow 700 V \rightarrow 750 V,各需要 0.2 s。图 11 是 25 电平 MMC 的交流电流波形。

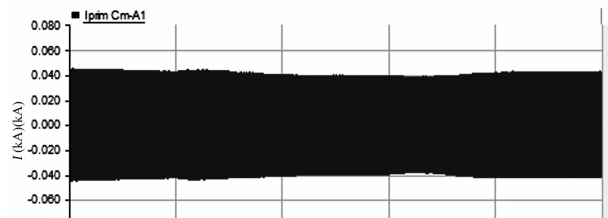


图 11 V_{ref} 的 $k = 250 \text{ V/s}$ 时仿真波形

综上所述,当 25 电平 MMC 输出功率最大

为 20 kW 时,得到的冲击值最大,当 V_{ref} 的斜率 $k = 1000 \text{ V/s}$ 时,电压从 750 V 降低到 700 V,得到交流电流的最大值约为 45 A。

3 优化设备参考值的爬坡实验

爬坡实验使用的实验设备包括 LCC 换流器、25 电平的 MMC 和 9 电平的 MMC 以及 SCADA 监测系统。SCADA 监测系统可以对设备中电压电流量进行实时监测。

3.1 优化功率参考值斜率的运行实验

在 P_{ref} 从 -12 kW 到 0 的基础上完成实验。

当 P_{ref} 的斜率小于 1.2 kW/s 时,直流电压没有出现冲击,实验波形如图 12 所示。

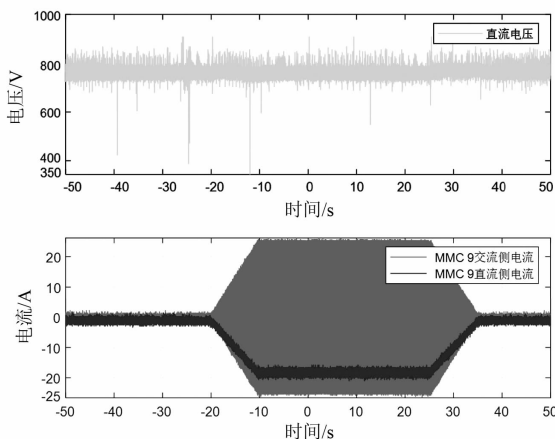


图 12 P_{ref} 的斜率为 1.2 kW/s 实验波形

当 P_{ref} 的斜率从 1.2 kW/s 逐渐增大时,直流电压的冲击值也越来越大。图 13 是 P_{ref} 斜率 - 冲击电压曲线图,随着斜率的增大,直流电压冲击值最大可达到 900 V。如果直流电压继续增大,设备将会发生跳闸,此时 P_{ref} 的极限斜率是 $k = 24 \text{ kW/s}$,实验波形如图 14 所示。

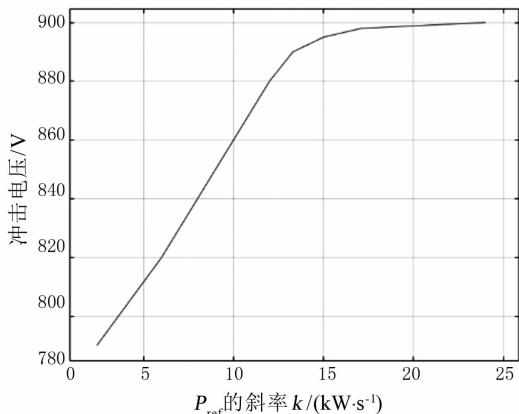


图 13 P_{ref} 斜率 - 冲击电压曲线

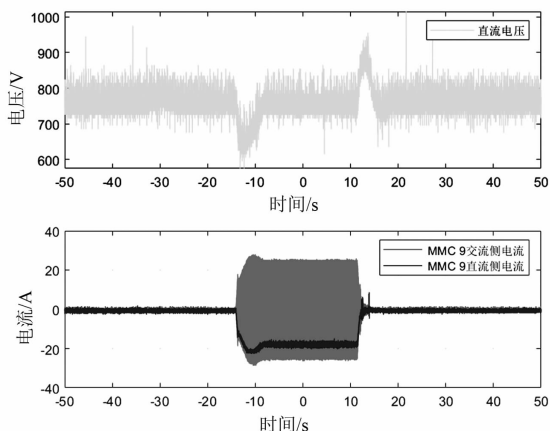


图 14 P_{ref} 的斜率为 24 kW/s 实验波形

在 P_{ref} 的几个特定的斜率值下,如 $k = 6 \text{ kW/s}$ 、 $k = 12 \text{ kW/s}$ 、 $k = 24 \text{ kW/s}$ 时,将实验结果和仿真结果相对比,最大直流冲击电压值的误差较小,都低于 5%。可以说明仿真的效果较好。

3.2 优化电压参考值斜率的运行实验

V_{ref} 从 750 V 下降至 700 V;当 $k = 1000 \text{ V/s}$ 时,需要 0.05 s,如图 15 所示;当 $k = 500 \text{ V/s}$ 时,需要 0.1 s,如图 16 所示;当 $k = 250 \text{ V/s}$ 时,需要 0.2 s,如图 17 所示。图 15 至图 17 中,波形从上到下依次为直流电压波形、25 电平 MMC 的直流电流波形、25 电平 MMC 的交流电流波形。

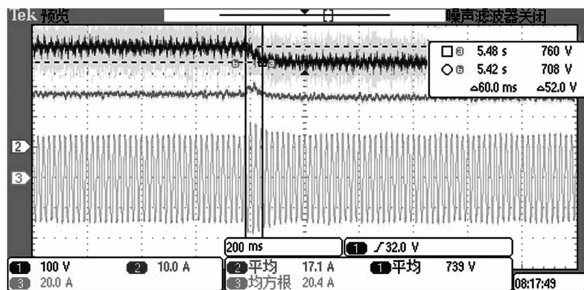


图 15 V_{ref} 的 $k = 1000 \text{ V/s}$ 时实验波形

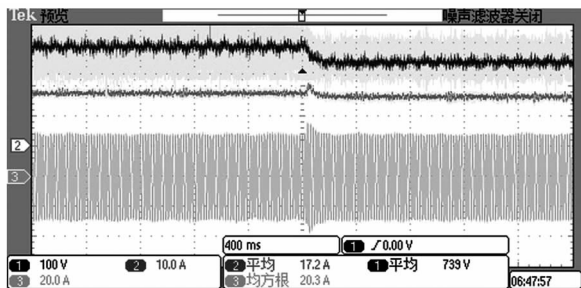


图 16 V_{ref} 的 $k = 500 \text{ V/s}$ 时实验波形

在完成实验时,发现 V_{ref} 的 $k = 1000 \text{ V/s}$ 时,25 电平 MMC 交流电流的冲击电流接近设备的额定值 40 A,如果 V_{ref} 的斜率继续增大时将会跳闸。当斜率

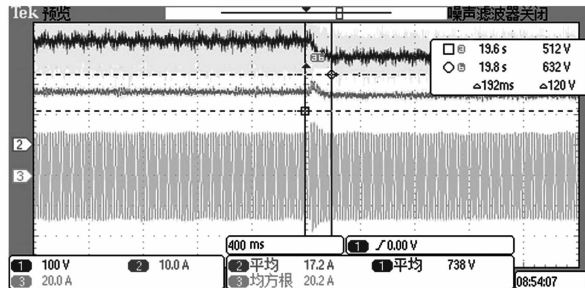


图 17 V_{ref} 的 $k = 250 \text{ V/s}$ 时实验波形

小于 1000 V/s 时,系统的响应较慢,功率控制没有很好的效果,改变功率参考值时,系统功率稳定到参考值的时间较长;当斜率大于 1000 V/s 时,系统会因为有功功率变化过快而发生跳闸,有较大的安全隐患。因此 V_{ref} 的极限斜率是 1000 V/s , V_{ref} 的斜率 k 取 1000 V/s 比较合适。

4 结语

前面在混合直流输电系统上进行爬坡实验,找到 9 电平 MMC 功率参考值 P_{ref} 合适的斜率以及 25 电平 MMC 电压参考值 V_{ref} 合适的斜率,使系统既有较快的响应速度,又不会因直流电压/交流电流的冲击过大而发生跳闸。

在 PSCAD 里仿真改变功率参考值斜率,直流电压的冲击电压达到 900 V 时, P_{ref} 的极限斜率是 $k = 24 \text{ kW/s}$ 。交流电流的冲击电流达到 45 A 时, V_{ref} 的斜率 $k = 1000 \text{ V/s}$ 。

在实验平台上搭建 LCC-MMC 三端混合直流输电系统的仿真模型,改变功率参考值斜率,当 P_{ref} 的斜率是 $k = 24 \text{ kW/s}$ 时,直流电压的冲击电压达到 905 V 时,继续增大斜率,设备发生跳闸。改变电压参考值斜率,当 V_{ref} 的斜率 $k = 1000 \text{ V/s}$ 时,交流电流的冲击电流达到 40 A,继续增大斜率,设备发生跳闸。因此可以得出结论,实验设备 P_{ref} 的斜率选择 $k = 24 \text{ kW/s}$ 较好, V_{ref} 的斜率选择 $k = 1000 \text{ V/s}$ 较好,所得结论与仿真结果相同。

参考文献

- [1] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [2] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2013.

- [5] 孔佳琦,夏志坚. 灭弧间隙改善 35 kV 配电线路防雷效果的仿真计算[J]. 电气开关,2020(2):62-67.
- [6] 李继强,毛成程,王成全,等. 高土壤电阻率地区喷射气体灭弧防雷效果分析[J]. 通信电源技术,2019,36(10):77-80.
- [7] 陶世祺,张小青,王耀武,等. 风电机组的雷电暂态过电压统计研究[J]. 太阳能学报,2018,39(11):3261-3269.
- [8] 蓝磊,陈子涵,刘宗喜,等. 35 kV 管型复合材料杆塔并联间隙防雷保护方案[J]. 高电压技术,2016,42(5):1511-1518.
- [9] 梁振,曾玲丽,戴何笠,等. 基于改进电气几何模型的某 500 kV 山区输电线路差异化防雷改造[J]. 电瓷避雷器,2019(1):145-151.
- [10] 周敏. 基于改进电气几何模型的湖南某 500 kV 输电线路差异化防雷改造研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2017.
- [11] 王国政. 基于雷电物理的风机叶片改进电气几何模型研究[D]. 济南:山东大学,2018.
- [12] 郑传啸,王巨丰,郭克竹,等. 基于强气吹扰动下的建弧率计算模型研究[J]. 电瓷避雷器,2018(6):122-131.
- [13] 张坤,郭建炎. 220 kV 输电线路耐雷水平仿真研究[J]. 水电能源科学,2016,34(2):182-185.
- [14] 周堃,韩号,夏泽举. 计及综合因素的改进电气几何模型对特高压输电线路绕击耐雷性能评估[J]. 电瓷避雷器,2018(6):75-79.
- [15] Sakae Taniguchi, Toshihiro Tsuboi, Shigemitsu Okabe, et al. Improved method of calculating lightning stroke rate to large-sized transmission lines based on electric geometry model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(1):53-62.
- [16] Yunchu Wang, Y Deng, X Wen, et al. An Improved Electric Geometry Model Based on Breakdown Test of Long Air Gaps and Suited for Large-Sized Transmission Lines [J]. Proceedings of the Chinese Society of Electrical Engineering, 2017, 37(12):3654-3661.
- [17] Shigemitsu Okabe, Toshihiro Tsuboi, Jun Takami. Analysis of aspects of lightning strokes to large-sized transmission lines. [J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2011, 18(1):182-191.

作者简介:

丁代筠(1969),男,助理工程师,研究方向为电网生产管理。(收稿日期:2021-03-24)

(上接第 26 页)

- [3] 王永平,赵文强,杨建明,等. 混合直流输电技术及发展分析[J]. 电力系统自动化,2017,41(7):156-167.
- [4] 郭春义,赵成勇,Allan Montanari,等. 混合双极高压直流输电系统的特性研究[J]. 中国电机工程学报,2012,32(10):98-104.
- [5] 冯明,李兴源,李宽. 混合直流输电系统综述[J]. 现代电力,2015,32(2):1-8.
- [6] 黄伟煌,许树楷,黄莹,等. 特高压多端混合直流输电系统稳态控制策略[J]. 南方电网技术,2017,11(7):5-10.
- [7] 李婧靓,黄伟煌,刘涛,等. 特高压多端混合直流输电系统的控制策略研究[J]. 南方电网技术,2018,12(2):47-55.
- [8] Xiaodong Li, Kun Han, Caiyun Fan, et al. Study on Main Circuit Configuration and Control Modes for A New LCC-MMC Hybrid HVDC System[C]//2019 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2019:1-5.
- [9] Rong Zeng, Lie Xu, Liangzhong Yao, et al. Hybrid HVDC for Integrating Wind Farms With Special Consideration on Commutation Failure [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2):789-797.
- [10] 李兴源,赵睿,刘天琪,等. 传统高压直流输电系统稳定性分析和控制综述[J]. 电工技术学报,2013,28(10):288-300.
- [11] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
- [12] Li Shenghu, Ma Yanru, Hua Yuting, et al. Reliability Equivalence and Sensitivity Analysis to UHVDC Systems Based on the Matrix Description of the F & D Method [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(2):456-464.
- [13] 胡锦涛,贾轩涛,王瑶,等. 基于 LCC-VSC 多端混合直流输电系统的启停控制策略及动模试验[J]. 电力建设,2017,38(8):86-94.
- [14] Jianing Lv, Xiaohui Ye, Mingyu Yan, et al. Research on control strategy of LCC-MMC hybrid HVDC system[C]. 8th Renewable Power Generation Conference (RPG 2019), 2019:1-6.

作者简介

秦嘉蔚(1999),女,在读研究生,研究方向为混合直流输电系统控制策略。

(收稿日期:2021-06-25)