

一种基于自耦原理的农网低电压补偿变压器

姚宗溥¹, 马崇伟², 吉庆文³, 陈益³, 贾利利³

(1. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750004;

2. 国网宁夏电力有限公司平罗供电公司, 宁夏 石嘴山 753400;

3. 上海九洲信息技术有限公司, 上海 201203)

摘要:农村配电距离长,线损大,其导致的线路中端和末端电压不足是目前农村电网的主要难题。设计了一种自耦型农网低电压补偿变压器,该变压器将二次侧串联入主电路,只需要提供该节点的缺失电压即可达到低电压治理的效果,变压器容量小、成本低,可在同一线路多个节点进行配置。各相二次侧分接头由IGBT控制独立,可以治理三相电压不平衡。最后对补偿变压器进行了数字仿真校验以及数字物理混合实验校验,证明了该方法能够保证线路各节点的电能质量,同时与其他低电压治理方法的经济性进行对比分析,验证了补偿变压器具有较高的经济性。

关键词:农村电网;补偿变压器;低电压治理;分接头;经济性

中图分类号: TM761.12 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21610

A Low Voltage Compensation Transformer for Rural Power Network Based on the Principle of Auto Coupling

YAO Zongpu¹, MA Chongwei², JI Qingwen³, CHEN Yi³, JIA Lili³

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd., Yinchuan 750004, Ningxia, China;

2. Pingluo Power Supply Company, State Grid Ningxia Electric Power Co., Ltd.,

Shizuishan 753400, Ningxia, China; 3. Shanghai Jiuzhou Information

Technology Co., Ltd., Shanghai 201203, China)

Abstract: At present, the main problem of rural power grid is the lack of voltage at the middle and end of the line caused by long distance and large line loss. An auto-coupling transformer of low voltage compensation of rural power network was designed. The transformer connects the secondary side in series with the main circuit and only needs to provide the missing voltage of the node to achieve the effect of low-voltage control. The transformer has small capacity and low cost, and can be configured in multiple nodes of the same line. The secondary side taps of each phase are independently controlled by IGBT, which can control the unbalanced three-phase voltage. Finally, the digital simulation verification and digital physical hybrid experiment verification of the compensation transformer were carried out, which prove that this method can guarantee the power quality of each node of the line and at the same time. The transformer was compared with other low voltage control methods in terms of economy, which prove that the compensation transformer seems more economical.

Key words: rural power grid; compensation transformer; low voltage control; transformer taps; economy

配电网的电压质量是保证优质配电的重要环节^[1],农村配电不同于城市园区配电,由于城市居民用电较为集中,所以通常采用10 kV线路进入园区,在园区各个建筑下将电压等级变为380 V

入户,低压线路配电距离很短,电压几乎无跌落^[2-3]。而农网配电通常在村口由一台变压器将10 kV电压变为380 V,由于各个用户较为分散,低压线路配电距离较长,有些甚至需要传输几

基金项目: 国家电网公司总部科技项目(5102-201999343A)

作者简介: 姚宗溥(1971—),男,硕士,高级工程师,Email:SGJEP_Lipeng@outlook.com

km,电压跌落较大,线路中部用户无法使用与电压平方成正比关系的旋转设备,线路末端用户无法正常照明^[4-5],同时由于各相负荷大小不同,农网也存在三相不平衡的问题^[6-8]。

目前,国内学者针对农网低电压问题已经提出了较多的办法。文献[9]提出使用无功补偿器的方法,有效提升了农网进村端口处的电压,该方法能够使村口附近的用户获得标准电压,但仍无法解决末端用户低压问题。文献[10]提出了在低压农网中串联变压器的方法,该策略虽然能够提升电压,但各个串联的变压器容量必须大于后续线路的所有负荷,经济性较差。文献[11]提出了使用分布式电源治理低电压的策略,其本质是在线路各处配置无功补偿器,成本较高,不适用于380 V农网。文献[12]提出一种串联调压器的方法,能够提升功率因数,降低线损,但各个调压器容量较大,不利于大量配置。

此外,在配电网中配置电力电子变压器,使用直流线路直接对低电压点进行补偿,是解决低电压及三相不平衡的有效手段^[13-14],但这种方法涉及到大量的开关器件以及较为复杂的控制策略,应用于110 kV等中压配电网具有一定的优势,在380 V的农村电网中将丧失其经济性。为在农村配电网中继续发挥电力电子开关的优势,如何将传统交流变压器与绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)低成本地相结合,成为目前农网低电压治理的研究方向^[15]。

本文提出了一种自耦型农网低电压补偿变压器,该变压器将二次侧串联于低压线路当中,仅仅补充线路缺失的电压即可使周围用户获得标准电压,这使其具备容量小、成本低的优势,可以在低压农网中串联多个进行电压补偿。变压器各相二次侧配有由IGBT控制的分接头,通过相应的控制策略调节单相变比,可以用于治理农网三相不平衡,提升各个用户的用电质量。该方案通过了数字物理混合仿真的实验验证^[16-17],具有一定的工程适用性。

1 变压器接线及控制

1.1 变压器接线

本文所提方法的思路是将变压器二次侧电压与主线路电压相叠加,实现电压的提升。图1a给出了自耦型农网三相电压补偿变压器的接线方法,变压器一次侧采用Y型接线,二次侧直接

串联在三相线路中。各相详细接线如图1b所示,各相二次侧带有分接头,可以调节变压器变比,分接头由 $T_0\sim T_4$ 5个IGBT组控制,各组IGBT反向并联。

这种拓扑结构实际是将变压器串联在各相线路当中,其优势在于仅需要提供所连接节点的缺失电压,变压器容量可以仅为传统连接方式的几十分之一,体积较小,成本较低,可以在同一条线路上多个节点进行配置,实现多级电压补偿。同时变压器各相二次侧都独立配有IGBT开关控制分接头,当用户负荷不平衡时,可以通过改变各相分接头进行微调,实现三相不平衡治理。

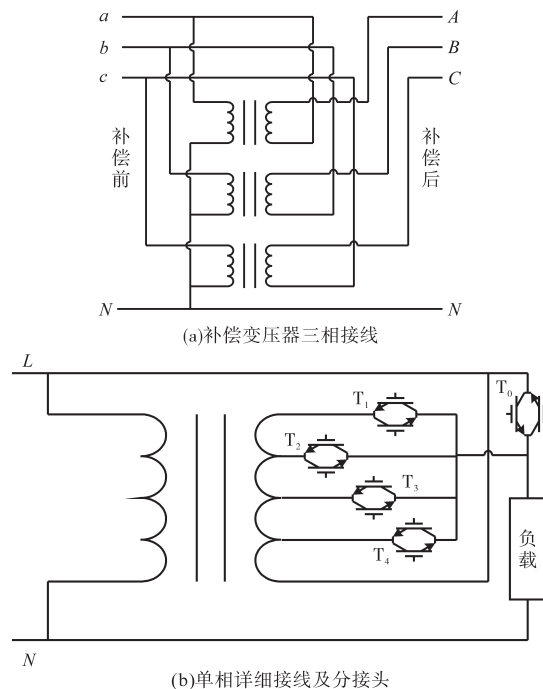


图1 农网低电压治理变压器接线图

Fig.1 Transformer connection diagram for low voltage control in rural power network

1.2 变压器控制方式

本文采用的控制芯片为低功耗的MSP430单片机^[18-19],各相电压互感器将电压信号经过AD转换芯片将模拟量变为数字量,发送给控制芯片MSP430,控制芯片判断变压器的工作方式:

1)若互感器所监测的电压不低于标准电压的5%,则向 T_0 开关组下发导通信号, $T_1\sim T_4$ 开关组保持关断状态。此时变压器二次侧处于断路状态,电流通过 T_0 向负载供电。

2)若互感器所监测的电压低于标准电压的5%,则向 T_0 开关组下发关断信号,依据电压所在范围确定需要导通的IGBT组号。此时变压器二次侧串联入主电路,对电压进行抬升。若变压器

所在节点的电压有效值与标准电压的百分比为 $\Delta U\%$, 则详细触发规则为: 若 $90\% \leq \Delta U\% < 95\%$, 触发 T_4 ; 若 $85\% \leq \Delta U\% < 90\%$, 触发 T_3 ; 若 $80\% \leq \Delta U\% < 85\%$, 触发 T_2 ; 若 $75\% \leq \Delta U\% < 80\%$, 触发 T_1 。

为了保证电能的持续供应, 必须保证在任何时刻均存在导通状态的 IGBT 开关组, 即 $T_0 \sim T_4$ 不可出现同时关断的情况。在 IGBT 开关组的交替过程中, 应确保 T_n 开关组导通后, 再对 T_m 开关组进行关断 ($n, m \in [1, 4]$)。

在农网实际运行条件下, 若要解决因各相线路的用户用电量不尽相同所导致的三相交流电压不平衡的难题, 必须首先面临农网电能质量较差、所受扰动因素较多、谐波含量较大等严重影响变压器控制系统的问题, 上述问题有可能导致变压器控制系统向 IGBT 器件发送误动指令, 并且农网受端噪声影响较大, 可能致使 $\Delta U\%$ 计算结果在某一周期超出初始阈值范围, 最终造成 IGBT 反复动作。针对上述问题, 本文所采用的解决方案如下: 变压器控制系统的采样步长设置为 $100 \mu\text{s}$, 即每个正弦波采样 200 次数据, 若检测到节点电压 $\Delta U\%$ 超出了其原始阈值范围, 则进入噪声判断逻辑环节, 直至 1 000 个数据点 (5 个周波) 的有效值计算结果均超出阈值范围, 命令有关 IGBT 器件动作, 以此防止噪声及干扰造成的 IGBT 高频反复投切。

整套装置的控制流程如图 2 所示。本方案根据单相电压进行单相调整, 在进行农网低电压治理的同时也可以有效降低农网三相不平衡程度, 提升农网电能质量。



图2 变压器控制流程

Fig.2 Transformer control flow

1.3 变压器安装位置

首先应对需要改善的农网进行调研, 在村内负荷高峰期找到电压值刚好低于标准电压 5% 的区段, 并在该区段配置第一台变压器, 该变压器正常运行后, 寻找下一处电压值刚好低于标准电压 5% 的区段, 继续配置变压器, 以此类推, 直至线路中所有节点电压满足下式:

$$u_{\min} \leq u_i \leq u_{\max} \quad (1)$$

其中 $u_{\min} = 0.95U_N$
 $u_{\max} = 1.05U_N$

式中: u_i 为 i 节点的相电压; U_N 为农网各相额定电

压; u_{\min}, u_{\max} 分别为各个节点电压最小值和最大值。

对应的单相多级补偿变压器主接线方案如图 3 所示。

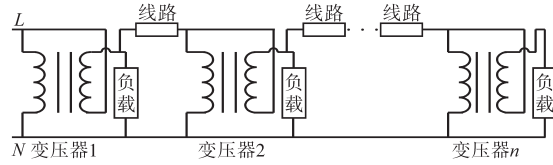


图3 农网低电压补偿图

Fig.3 Low voltage compensation chart of rural power network

2 仿真与实验

2.1 数字仿真验证

在 Matlab/Simulink 上搭建低压线路仿真模型, 10 kV 配电线路经过降压变压器输出 380 V 接入村内线路, 整条线路长 2 km, 阻抗参数为 $0.73 \Omega/\text{km}$ 。各相线路首端电压约为 220 V, 中端约为 210 V, 末端约为 205 V。在中端及末端新增本文所提出的自耦型电压补偿变压器一台, 仿真开始 0.5 s 后, 将该补偿变压器投入运行, 末端相电压改善效果如图 4 所示。

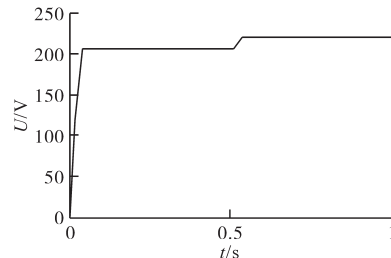


图4 线路末端电压有效值

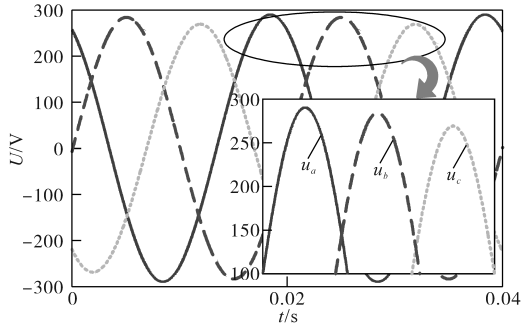
Fig.4 RMS of line terminal voltage

模型组 A, B, C 三相所接负荷分别 2 000 W, 3 000 W 及 5 000 W, 由于在仿真模型中各相负荷配置不同, 末端三相电压如图 5a 所示, 三相电压呈现出明显的不平衡状态, 图中 u_a, u_b, u_c 分别为三相电压。补偿变压器投入后, 对三相不平衡现象进行改善, 如图 5b 所示。

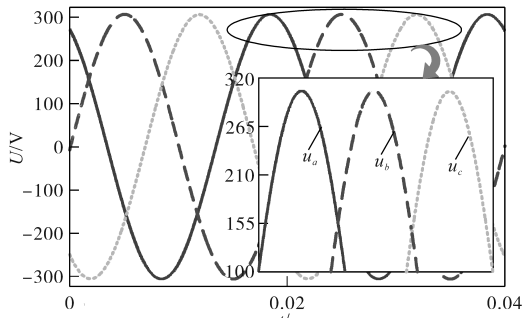
观察图 4 及图 5 可知, 配置了电压补偿变压器后, 末端电压得到了显著提升, 各相电压峰值约为 305 V, 三相电压不平衡得到了有效改善。仿真证明了本文所提出的自耦型补偿变压器的农网低电压治理策略能够改善线路末端用户的用电质量。

在图 5b 的基础上进行负荷不平衡突变仿真校验, 如图 6 所示, 于稳定后 0.1 s 时突变各相负荷, 模型组 A, B, C 三相所接负荷分别 4 000 W,

5 000 W 及 6 000 W,可以看出各相电压有所降低,出现三相电压不平衡现象。变压器控制系统检测到该变化后,通过分析计算 0.1 s(5个周波)内的数据,排除噪声等扰动因素,确定为该变化原因是负荷的增加,随即命令相关 IGBT 投切,对三相电压不平衡进行治理。



(a)改善前末端三相电压



(b)改善后末端三相电压

图5 末端三相电压

Fig.5 Terminal load three-phase voltage

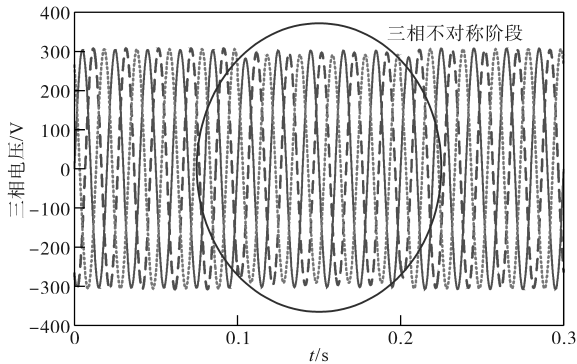


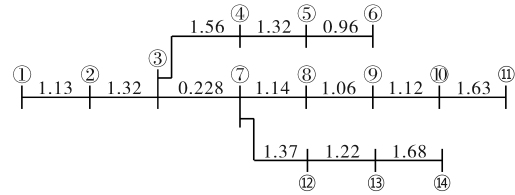
图6 负荷不平衡突变仿真校验

Fig.6 Simulation verification of load unbalance sudden change

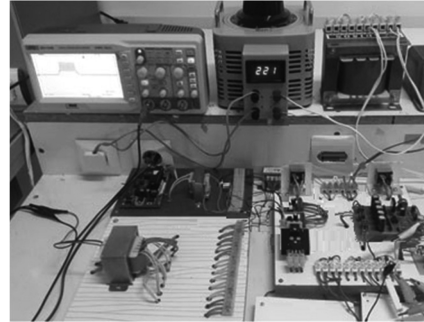
2.2 数字物理混合实验验证

在 Matlab/Simulink 软件上搭建了图 7a 所示农网电路,共 14 个节点(①~⑭),假定每个节点为 1 户,各个户间线路长度已在图中标注(单位:km),电压不足的节点均配置了本文的补偿变压器。该电路在 RT-LAB 实时数字仿真器中运行,在⑨号节点处配置功率接口^[16-17],通过四象限功率放大器在物理端输出该节点的电压,物理侧实验平

台接线如图 7b 所示。



(a)农网数字模型接线图



(b)⑩号节点补偿变压器处物理接线

图7 数字物理混合实验验证

Fig.7 Validation of digital physics hybrid experiments

各个节点电压提升前后的对比数据如表 1 所示,数字侧分别在③,⑥,⑨,⑬四个节点配置了电压补偿变压器模型,电压提升效果明显,农网数字侧不存在电压低于额定值 5% 的节点。但对⑨号节点进行升压后,⑩号节点电压已经降至 214 V,必须在 11 号节点物理侧配置电压补偿变压器才能正常向负载供电,⑪号节点电压提升前后波形如图 8 所示,电压提升前后有效值分别为 203 V 和 227 V。

表1 各节点电压前后对比

Tab.1 Voltage comparison of each node

节点号	节点电压/V	
	提升前	提升后
①	220	220
②	215	215
③	210	228
④	203	220
⑤	195	214
⑥	190	224
⑦	207	222
⑧	199	218
⑨	193	228
⑩	189	214
⑪	178	227
⑫	195	213
⑬	188	227
⑭	175	215

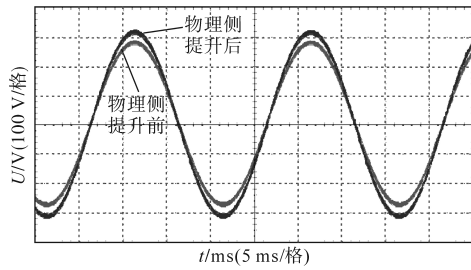


图8 ①号节点电压补偿前后波形

Fig.8 Waveforms of node ① voltage compensation

2.3 不同低电压治理方法对比

针对串联补偿变压器(本文方法)、增大线路截面积、增加主变压器容量、增设无功补偿器这4种农网低电压治理方式进行对比,各型号线路成本及各型号变压器成本如表2所示,各型号无功补偿器成本如表3所示,采用不同治理方法的线路首端和末端对比情况如表4所示。

表2 各型号线路及变压器成本

Tab.2 Costs of various types of transformers and lines

导线型号	价格(元/m)	变压器型号	价格(万元)
LGJ-240/30	18.56	S11-630	5.07
LGJ-180/25	14.22	S11-500	4.31
LGJ-150/35	12.24	S11-400	3.72
LGJ-150/20	11.07	S11-315	3.11
LGJ-150/8	10.27	S11-250	2.74
LGJ-120/7	8.44	S11-200	2.43
LGJ-95/55	10.40	S11-160	2.12
LGJ-95/15	7.42	S11-125	1.85

表3 各型号无功补偿器成本

Tab.3 Cost of various types of reactive power compensator

项目	型号		
	XBJW1-0.4/100T2	XBJW1-0.4/80T2	XBJW1-0.4/75T2
容量/kvar	100	80	75
价格/万元	2.12	1.64	1.36

表4 各节点电压前后对比

Tab.4 Voltage comparison of each node

低电压治理方法	村口用户	线路末端用户
	电压/V	最低电压/V
串联补偿变压器	225.7	214.0
增大线路截面积	223.3	190.6
增加主变压器容量	226.2	180.2
增设无功补偿器	221.9	210.3

综合分析表2~表4可以得出,增加主变压器的方法最为传统,投入成本最高,即使选用S11-250型号也需要2.74万元,并且该方法末端电压改善效果最差,所以正在逐步被淘汰。增大线路面积需要更换整个农网的线路,工程量大,施工

过程停电面积大,并且对末端电压改善效果并不理想。增设无功补偿器有较高的电压改善效果,但无功补偿器造价较高,XBJW1-0.4/75T2需要1.36万元,并且为达到理想抬压效果应该在多点配置无功补偿器,投入成本高昂。

经过相关调研,单台一次侧380V的自耦降压变压器价格约为500元,低功率型IGBT器件价格约为100元,即一台自耦型串联补偿变压器主电路成本约为1500元,综合考虑控制器等必要的二次设备成本,整套自耦型串联补偿变压器成本不足0.25万元。由表4可知,本文的串联补偿变压器能够使线路末端电压得到良好改善,虽然需要多点配置,但单台变压器容量小、成本低,具有较强的经济优势和农网应用前景。

3 结论

本文针对农网低电压问题提出了一种自耦型的电压补偿变压器,使用多个变压器多级串联,逐级抬高电压,同时治理三相电压不平衡,保证整个线路的中端及后端的电能质量。该变压器容量小,成本低,使用IGBT电力电子开关及单片机控制分接头,动作迅速,便于安装。该变压器通过了数字仿真测试以及数字物理混合实验,各个节点电压均得到有效改善,不低于标准电压的5%。通过与其他几种低电压治理方法进行比较,得出本文方法具有较高的经济型与治理效果。

参考文献

- [1] 应鸿,林琳,吴星昂,等.新型配电网动态电压调节器拓扑结构研究[J].电气传动,2018,40(10):22-27.
- [2] 孙晓艳,刘俊勇,魏震波,等.基于输配全局的城市电网供电能力研究[J].电力自动化设备,2018,38(11):100-106.
- [3] 苏宇,王强钢,雷超,等.电能替代下的城市配电网有载调容配电变压器规划方法[J].电工技术学报,2019,34(7):1496-1504.
- [4] 张之昊,武建文,李平,等.应用于农村配电网的测量点与补偿点分离式无功补偿设备及其优化配置[J].电工技术学报,2015,30(3):205-213.
- [5] 张曙云,匡洪海,唐婷媛,等.农村配电网无功补偿最佳优化配置[J].电源学报,2018,16(3):84-90.
- [6] Tan Y, Wang Z. Incorporating unbalanced operation constraints of three-phase distributed generation[J].IEEE Transactions on Power Systems, 2019,34(3):2449-2452.
- [7] 张静,白士贤,刁晓虹,等.一种基于改进S变换的三相不平衡检测方法[J].电气传动,2019,49(1):87-90.

- [8] 魏剑啸,粟忠来,杨波,等. 配电台区无功功率及三相不平衡电容调节的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(16): 71-79.
- [9] 胡翔,邵叶晨,雷超,等. 计及电压不可行节点的配电网低电压治理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 102-109.
- [10] 肖宏,何森,董伟,等. 基于宽幅调压器与电容器组合的农网低电压治理方法[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(6): 156-159.
- [11] 孟晓芳,王俊,王英男,等. 计及分布式电源局部调压能力的10 kV 配电网低电压治理方法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(10): 65-72.
- [12] 杨伟奇,高晓阳,朴在林. 中压配电网低电压补偿调控技术及实现[J]. 农业工程学报, 2016, 32(S1): 198-202.
- [13] 马保慧,程盛,史书怀,等. 基于混合子模块MMC结构的直流变压器控制策略[J]. 电气传动, 2019, 49(10): 75-79.
- [14] 孟凡刚,满忠诚,高蕾. 基于电力电子移相变压器的12脉波整流技术[J]. 电工技术学报, 2019, 34(18): 3865-3872.
- [15] 辛业春,张弛,于温方,等. 配网末端低电压串联补偿控制方法及装置设计[J]. 电测与仪表, 2020, 57(7): 126-133.
- [16] Dargahi M, Ghosh A. Controlling current and voltage type interfaces in power-hardware-in-the-loop simulations[J]. IET Power Electronics, 2014, 7(10): 2618-2627.
- [17] 辛业春,王威儒,李国庆,等. 多端柔性直流输电系统数字物理混合仿真技术[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 3903-3909.
- [18] Dallago E, Danioni A, Marchesi M, et al. An autonomous power supply system supporting low-power wireless sensors [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(10): 4272-4280.
- [19] 赵泽生,张向前,赵磊,等. 基于MSP430单片机的制动单元设计[J]. 电气传动, 2014, 44(11): 65-68.

收稿日期:2020-03-10

修改稿日期:2020-03-18

(上接第37页)

出了在全桥子模块占比较高时,不控充电结束时HBSM存在自取能不足的问题,为解决该问题,提出了一种将FBSM延迟投入的策略,在保证HBSM自取能的情况下平衡了不控充电结束时两类子模块电压不均的问题。同时,考虑到半控充电结束时FBSM与HBSM子模块电压和为线电压幅值,为了保证两类子模块电压均衡,对FBSM延迟投入的时间提出了要求,同时该方法对于不同子模块比例的混合MMC广泛适用。

参考文献

- [1] 赵成勇,陈晓芳,曹春刚,等. 模块化多电平换流器HVDC直流侧故障控制保护策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(23): 82-87.
- [2] Solas E, Abad G, Barrena J A, et al. Modular multilevel converter with different submodule concepts—part I: capacitor voltage balancing method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(10): 4525 - 4535.
- [3] 董云龙,凌卫家,田杰,等. 舟山多端柔性直流输电控制保护系统[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(7): 169-175.
- [4] 孔明,邱宇峰,贺之渊,等. 模块化多电平式柔性直流输电换流器的预充电控制策略[J]. 电网技术, 2011, 35(11): 67-73.
- [5] 周月宾,江道灼,郭捷,等. 模块化多电平换流器型直流输电系统的启停控制[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 204-209.
- [6] 赵文强,高得力,马云龙,等. 基于混合式MMC的混合高压直流输电系统启动策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(7): 62-70.
- [7] Zeng R, Xu L, Yao L, et al. Precharging and DC fault ride-through of hybrid MMC-based HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2015, 30(3): 1298-1306.
- [8] 李超,李钢,董云龙,等. MMC-HVDC启动过程用限流电阻保护策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 39-45.

收稿日期:2020-03-13

修改稿日期:2020-03-24