

220 kV 变压器中性点接地方式改造后 相关设备的安全校核分析

孙鹏程,王贞强,梁伟,杨万波

(四川泸州川南发电有限责任公司,四川泸州 646007)

摘要:为限制方山电厂近区发生非对称故障时 500 kV 泸州变电站 220 kV 系统短路电流,需对电厂主变压器中性点接地方式进行改造,将电厂 2 台主变压器中性点分别通过接地小电抗器和 1 套隔直装置接地。文中通过仿真模拟电厂近区不同接地故障,电厂 2 台主变压器采用不同接地方式,分别得出主变压器中性点、接地小电抗器、隔直装置等设备的暂态电压和短路电流,验证电厂 2 台主变压器接地中性点分别通过接地小电抗器和 1 套隔直装置接地时,相关设备不会出现电压、电流超限而威胁设备的安全。同时,对线路、发电机、主变压器相关保护的影响进行了分析,对是否引发谐振进行了评估。

关键词:主变压器;中性点;隔直装置;限流电抗器;校核;保护;谐振

中图分类号:TM 471 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2022)05-0042-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20220508

Safety Checking and Analysis of Relevant Equipment after Transformation of Neutral Point Grounding Mode of 220 kV Transformer

SUN Pengcheng, WANG Zhenqiang, LIANG Wei, YANG Wanbo

(Sichuan Luzhou Chuannan Power Generation Co., Ltd., Luzhou 646007, Sichuan, China)

Abstract: In order to limit the short-circuit current of 220 kV system of 500 kV Luzhou substation when an asymmetric fault occurs in the near area of Fangshan power plant, the neutral point grounding mode of main transformer in the power plant needs to be modified. The neutral points of two main transformers in the power plant are grounded through small grounding reactors and a set of neutral DC current blocking device respectively. Through the simulation calculation and analysis, the different grounding faults in the near area of the power plant are simulated, and the transient voltage and short-circuit current of the neutral point of main transformer, small grounding reactor, neutral DC current blocking device and other equipment are obtained under different grounding modes of the two main transformers. It is verified that when the neutral points of the two main transformers are grounded through a small grounding reactor and a set of neutral DC current blocking device, the relevant equipment does not have excessive voltage and current that threaten the equipment security. Meanwhile, the impact on the related protections of line, generator and main transformer is also analyzed, and whether the resonance is triggered or not is evaluated.

Key words: main transformer; neutral point; neutral DC current blocking device; current-limiting reactor; checking; protection; resonance

0 引言

随着四川电网网架的变化,川内部分变电站出现单相短路电流高于三相短路电流的现象,已成为限制电网运行和发展的主导因素之一。经研究表

明,变压器中性点采用小电抗器接地的方式来限制短路电流是非常有效和必要的^[1-2]。

方山电厂 2×600 MW 机组于 2007—2008 年投运,布置有 2 台主变压器和 1 台启动备用变压器。由于曾发生过电厂出线单相接地短路故障导致主变压器损坏,为有效地限制电厂近区接地短路故障流

经主变压器的短路电流,方山电厂于 2014 年在 2 台主变压器中性点分别增加了限流小电抗器。同时由于电厂处于特高压直流输电线路接地极附近,在复龙、宾金直流输电线路不对称方式运行时,给方山电厂主变压器带来了直流偏磁问题。方山电厂通过多方调研和论证,于 2014 年在 2 台主变压器中性点增加了隔直装置。隔直装置采用一拖二的方式,通过隔离开关选择其中 1 台主变压器中性点经小电抗器和隔直装置接地。启动备用变压器中性点仍直接接地。

当前,随着电网网架的不断加强,方山电厂近区发生非对称故障时,不接地主变压器中性点放电击穿间隙将存在被击穿风险,同时 500 kV 泸州变电站 220 kV 系统单相短路电流将超过断路器遮断容量。为消除方山电厂中性点不接地主变压器中性点放电击穿间隙被击穿的风险,以及降低 500 kV 泸州变电站 220 kV 系统单相接地短路电流,需将电厂 2 台主变压器中性点接地方式进行改造。即由 1 台主变压器中性点经小电抗器和隔直装置接地,另 1 台主变压器中性点经间隙接地,调整成 2 台主变压器均经过小电抗器和隔直装置接地。

主变压器中性点接地方式改变后,电网零序阻抗特性发生变化,不对称故障时可能导致暂态电压过高引发设备损坏。为保证安全,需对相关设备进行仿真计算和安全校核。

下面通过仿真计算分析,模拟方山电厂近区不同接地故障,分别得出方山电厂 2 台主变压器采用不同接地方式下,主变压器中性点、接地小电抗器、隔直装置处的暂态电压和短路电流,以及通过对继电保护的影响分析、谐振风险评估,为主变压器中性点接地方式的改造提供依据。

1 相关设备主要参数

相关设备主要参数见表 1—表 3。主变压器中性点加装隔直装置后接线如图 1 所示。

表 1 主变压器及启动备用变压器参数

设备	容量/MVA	短路阻抗/%	连接组别	中性点工频绝缘水平 AC/kV	中性点雷电冲击绝缘水平 LI/kV
主变压器	720	14.0	YNd11	200	400
启动备用变压器	63	12.3	YNyn0-yn0+d	200	400

表 2 主变压器中性点小电抗器参数

参数	数值	参数	数值
额定容量/kVA	723	额定电抗/ Ω	11.67
额定电流/A	250	额定频率/Hz	50
绝缘水平/kV	325	短时电流/s	10(有效值为 8 kA)

表 3 主变压器隔直装置参数

产品型号:TFMFO-1K20-1108-1050				
电容	额定电压: 1200 V AC	实测总容量: 66 715 μ F (6 台并联)	耐压:极间电压 $U_{11} = 1800$ V DC, 10 s; 极壳电压 $U_{tc} = 6000$ V AC, 60 s	
			旁路断路器	额定电压: 12 kV 额定电流: 630 A
限流电抗器	额定电压: 10 kV	实测电感: 0.015 6 mH	绝缘水平: LI/AC 75/35 kV	热稳定电流: 22 kA(1 s)

注:电容两端电压达到 300 V 或流经中性点电流 300 A 时,晶闸管自动导通,旁路断路器合闸。

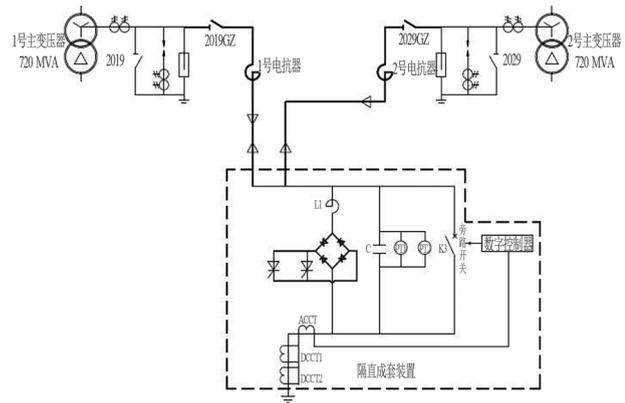


图 1 主变压器中性点加装小电抗器和隔直装置简化接线

2 不同接地方案下的电磁暂态分析

2.1 短路电流计算

2.1.1 方山电厂近区网架参数

方山电厂 2×600 MW 机组为单元机组接线方式,经 3 回 220 kV 线路接入 500 kV 泸州变电站,线路长约 5.8 km(方山电厂近区电网拓扑见图 2)。500 kV 泸州变电站主变压器采用自耦变压器。随着系统的扩大,接线间隔的不断接入,以及 500 kV 泸州东变电站的投运,500 kV 泸州变电站将面临 220 kV 系统单相接地短路电流高于三相短路电流,且超过断路器遮断容量的现象。

2.1.2 计算条件

本次仿真计算基于 2022 年四川电网夏季最大运行方式网架,全网全接线、全开机,退出四川 500 kV

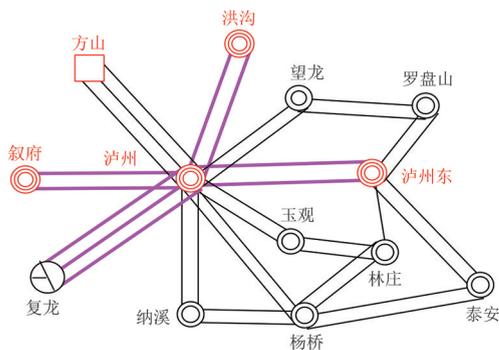


图2 2022年方山近区电网拓扑图

和 220 kV 变电站低电容低电抗,不退出超/特高压直流换流站高压滤波器,保留线路高压电抗器,退出母线高压电抗器,利用 PSASP7.60 基本计算方法计算短路电流^[3-4]。

2.1.3 计算结果

在方案 1(未加装小电抗器,2 台主变压器直接接地)、方案 2(1 号主变压器加装小电抗器和隔直装置,2 号主变压器直接接地)、方案 3(1 号主变压器加装小电抗器和隔直装置,2 号主变压器间隙接地)、方案 4(2 台主变压器均经小电抗器和隔直装置接地)的情况下,方山电厂主变压器高压侧、500 kV 泸州变电站主变压器中压侧三相短路电流及单相接地短路电流如表 4、表 5 所示。

表 4 方山电厂近区三相短路计算结果 单位:kA

短路点	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
方山电厂主变压器高压侧	45.1	45.1	45.1	45.1
500 kV 泸州变电站主变压器中压侧	49.1	49.1	49.1	49.1

表 5 方山电厂近区单相接地短路计算结果 单位:kA

短路点	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
方山电厂主变压器高压侧	48.7	45.4	38.6	40.5
500 kV 泸州变电站主变压器中压侧	52.2	50.0	45.1	46.5

表 4 表明主变压器中性点接地方式对三相短路电流无影响。

表 5 表明方案 4(2 台主变压器均经小电抗器和隔直装置接地)情况下,500 kV 泸州变电站主变压器中压侧发生单相接地短路故障,短路电流水平为 46.5 kA,满足断路器遮断能力要求(断路器遮断能力 50 kA)。

2.2 电厂近区线路非对称故障时主变压器电磁暂态分析

根据仿真计算,得知方山电厂主变压器中性点

最大电流 9.78 kA,隔直电容最高电压 6.43 kV 分别出现在方案 3、方案 4 情况下方山电厂 220 kV 母线单相接地时(中性点电流见图 3、图 4;隔直电容电压见图 5);主变压器中性点最高电压 135.06 kV 出现在方案 3 情况下 500 kV 泸州变电站 220 kV 母线两相接地短路故障时(见图 6、图 7)。考虑篇幅,电磁暂态分析只列举不同方案下方山—泸州 220 kV 线路两端发生不对称故障的计算数据。其中,暂态过电压的计算考虑故障时刻和相位影响,取过电压最大的方式为结果。

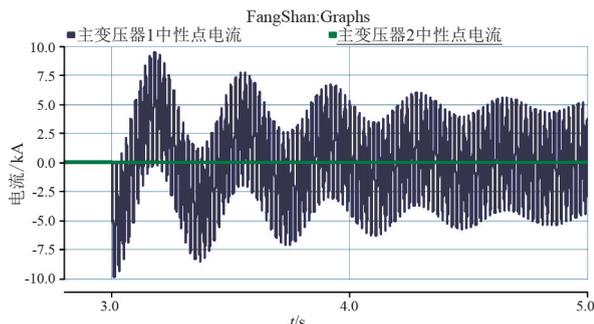


图3 方案 3 下方山电厂母线单相接地 1 号、2 号主变压器中性点电流

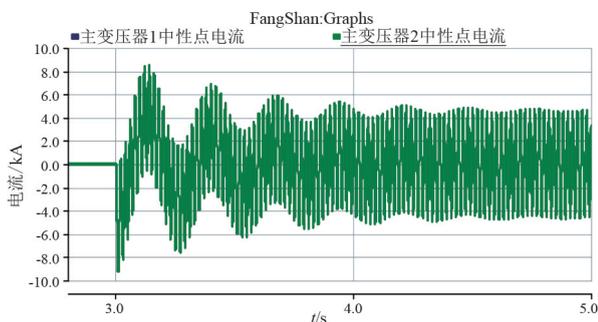


图4 方案 4 下方山电厂母线单相接地 1 号、2 号主变压器中性点电流

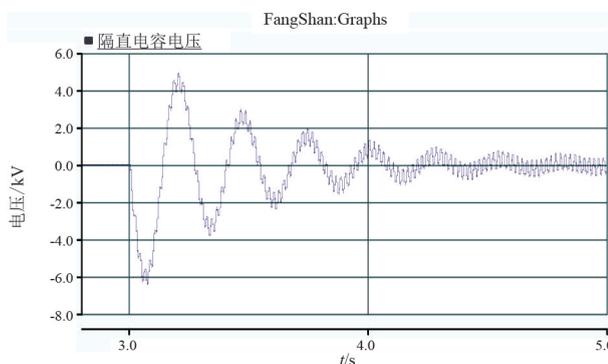


图5 方案 4 下方山电厂母线单相接地隔直电容电压

2.2.1 单相接地短路故障

1) 方山电厂 220 kV 母线单相接地短路故障

设定 $t=3.0$ s 时,方山电厂 220 kV 母线出现 A 相接地短路故障,不同方案下,分别得到方山电厂 1 号、

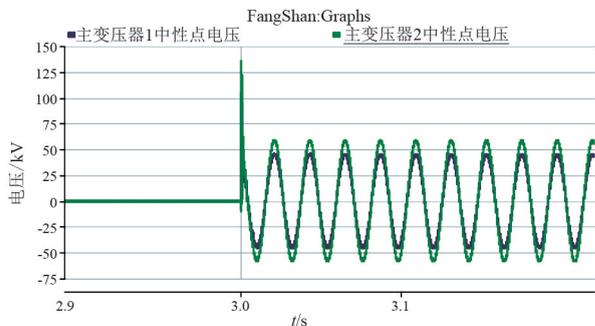


图6 方案3下泸州变电站220 kV 母线两相接地1号、2号主变压器中性点电压

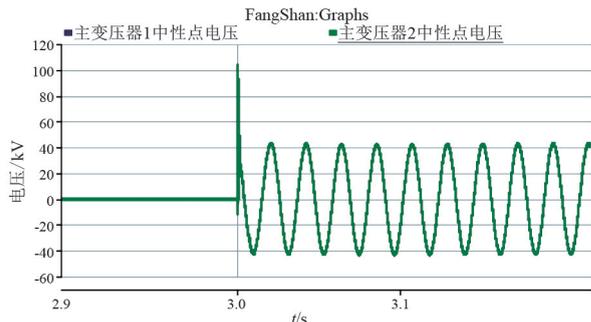


图7 方案4下泸州变电站220 kV 母线两相接地1号、2号主变压器中性点电压

2号主变压器中性点电压、电流及隔直电容电压幅值如表6所示。

表6 方山电厂220 kV 母线单相接地短路故障中性点最大电压和最大电流

方案	主变压器中性点电压/kV		主变压器中性点电流/kA		隔直电容电压/kV
	1号	2号	1号	2号	
1	0	0	28.11	28.11	—
2	50.23	0	7.58	33.03	3.08
3	57.32	76.74	9.78	0	4.85
4	55.07	55.07	9.14	9.14	6.43

2)500 kV 泸州变电站220 kV 母线单相接地短路故障

设定 $t=3.0\text{ s}$ 时,500 kV 泸州变电站220 kV 母线出现A相接地短路故障,不同方案下,分别得到方山电厂1号、2号主变压器中性点电压、电流及隔直电容电压幅值如表7所示。

2.2.2 两相接地短路故障

1)方山电厂220 kV 母线两相接地故障

设定 $t=3.0\text{ s}$ 时,方山电厂220 kV 母线出现A相和B相接地短路故障,不同方案下,分别得到方山电厂1号、2号主变压器中性点电压、电流及隔直电容电压幅值如表8所示。

2)500 kV 泸州变电站220 kV 母线两相接地短

表7 500 kV 泸州变电站220 kV 母线单相接地短路故障中性点最大电压和电流

方案	主变压器中性点电压/kV		主变压器中性点电流/kA		隔直电容电压/kV
	1号	2号	1号	2号	
1	0	0	19.29	19.29	—
2	37.69	0	5.39	23.51	1.74
3	48.20	62.44	7.53	0	2.95
4	44.20	44.20	6.88	6.88	4.03

路故障

设定 $t=3.0\text{ s}$ 时,500 kV 泸州变电站220 kV 母线出现A相和B相接地短路故障,方案1、方案2、方案3、方案4情况下,分别得到方山电厂1号、2号主变压器中性点电压、电流及隔直电容电压幅值如表9所示。

表8 方山电厂220 kV 母线两相接地短路故障中性点最大电压和电流

方案	主变压器中性点电压/kV		主变压器中性点电流/kA		隔直电容电压/kV
	1号	2号	1号	2号	
1	0	0	22.75	22.75	—
2	59.44	0	5.65	24.67	1.54
3	61.83	80.03	6.34	0	1.92
4	61.27	61.27	6.19	6.19	2.74

表9 500 kV 泸州变电站220 kV 母线两相接地短路故障中性点最大电压和电流

方案	主变压器中性点电压/kV		主变压器中性点电流/kA		隔直电容电压/kV
	1号	2号	1号	2号	
1	0	0	16.27	16.27	—
2	101.21	0	4.34	18.93	0.89
3	104.36	135.06	5.49	0	1.40
4	103.64	103.64	5.19	5.19	1.97

方案4下,从表6可知故障时隔直装置电容出现的电压峰值为6.43 kV,该电压远超过了晶闸管导通电压,此时晶闸管会瞬间导通且电容旁路断路器会闭合;由表9可知主变压器中性点电压峰值为103.64 kV,由表6可知电流峰值为9.14 kA,均低于表1给出的主变压器中性点工频绝缘水平200 kV,表2给出的小电抗器可承受的短时电流8 kA(有效值,10 s)以及表3给出的隔直装置热稳定电流22 kA(1 s)。

由此可得出方案4下,隔直电容出现的暂态电压虽超过了电容额定电压,但该电压下晶闸管会瞬

间导通,旁路断路器会闭合,隔直装置被旁路后可保障电容设备安全;主变压器中性点出现的暂态电压、电流峰值,小电抗器、隔直装置出现电流峰值均在设备的额定参数范围内,满足设备的安全要求。

3 对继电保护的影响分析

由于主变压器中性点加装小电抗器和隔直电容主要影响系统的零序网络,针对方山电厂主变压器高压侧和 500 kV 泸州变电站主变压器中压侧单相短路电流和两相接地短路电流进行分析。

目前方山电厂采用的方案 3,1 号主变压器经小电抗器(11.67 Ω)和隔直装置(66 000 μF)接地,2 号主变压器不接地。若改为方案 4,2 台主变压器加电抗器(均为 11.67 Ω)和 1 套隔直装置(66 000 μF)接地,根据表 10 单相接地短路计算结果和表 11 两相短路接地计算结果显示,在方山电厂和 500 kV 泸州变电站 220 kV 母线发生不对称故障时,单相接地短路电流峰值会增加 0.6 kA,两相接地短路电流峰值会增加 0.9 kA。

表 10 单相接地短路计算结果

短路点	序分量	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
方山电厂 主变压器高压侧	正序	14.3	13.2	11.1	11.7
	零序	14.3	13.2	11.1	11.7
500 kV 泸州变电站 主变压器中压侧	正序	15.5	14.7	13.1	13.6
	零序	15.5	14.7	13.1	13.6

表 11 两相接地短路计算结果

短路点	序分量	方案 1	方案 2	方案 3	方案 4
方山电厂 主变压器高压侧	正序	28.6	27.4	25.6	26.4
	零序	15.4	13.1	9.5	10.4
500 kV 泸州变电站 主变压器中压侧	正序	31.3	30.6	29.1	29.5
	零序	16.2	14.4	11.9	12.6

3.1 对线路保护的影响分析

3.1.1 线路相间距离

由于主变压器中性点接地方式不影响三相短路和两相短路的序网图,因此主变压器中性点接地方式不会影响线路保护的相间距离保护。

3.1.2 线路接地距离保护

表 10—表 11 表明,方案 4 相对于方案 3 来说,不同故障点以方山电厂 220 kV 母线发生单相接地短路故障时短路电流变化最大。以 500 kV 泸州变电站侧保护来说,方案 3 下接地距离保护测

量阻抗为 3.108 7 Ω ,较方案 4 的接地距离保护阻抗 3.107 2 Ω ,减少了 0.048%,可视作增大了保护灵敏度;对方山电厂侧来说,方案 3 下接地距离保护测量阻抗为 3.023 6 Ω ,较方案 4 的接地距离保护测量阻抗 3.039 3 Ω ,增大了 0.52%。

3.1.3 线路零序电流保护

方山电厂主变压器中性点接地方式的改变会导致零序等值网络的改变,接地故障时的零序阻抗和零序电流也必然改变。从仿真计算结果得知,方山电厂 220 kV 母线发生两相短路接地故障时方案 4 相对于方案 3 的短路点零序电流变化最大,方案 3 短路点零序电流为 9.53 kA,方案 4 短路点零序电流为 10.45 kA,增加了 9.65%。则需对线路零序保护进行整定校核。

3.2 对主变压器保护的影响分析

3.2.1 主变压器主保护

中性点接地方式的变化不会影响差动保护中的差动电流和制动电流的数值关系,因此不会对差动保护产生影响。

3.2.2 主变压器零序过电流保护

主变压器零序过电流保护直接以主变压器中性点电流为判据,所以改变中性点接地方式会对零序过电流保护有直接的影响。从仿真计算结果得知:方山电厂主变压器中性点接地方式从方案 3 改为方案 4 后,500 kV 泸州变电站 500 kV 单相接地短路故障时,主变压器中性点电流从 7.55 kA 降低至 6.81 kA,变化 9.8%;变压器高压侧绕组零序电流从 1.39 kA 升至 1.47 kA,变化 5.8%。泸州变电站 220 kV 单相接地短路,主变压器中性点电流从 7.53 kA 降低至 6.88 kA,变化 8.6%;主变压器中压侧绕组零序电流从 0.84 kA 变化为 0.79 kA,变化 5.8%。因此主变压器各绕组零序电流变化较大,需对主变压器高压侧零序保护进行整定校核。

通过对方山电厂主变压器高压侧零序过流保护定值进行了灵敏度校核,当前定值下 I 段灵敏度大于 2,满足规程 DL/T 684—2012《大型发电机变压器继电保护整定计算导则》的要求^[5]。

3.3 对发电机保护的影响分析

由于主变压器中性点接地点位于其高压侧,发电机侧(变压器低压侧)绕组为 Δ 接线,无零序通路,故发电机的零序等值网络没有变化。另外,主变压器中性点的变化不会影响发电机侧的正序和负序

网络。故主变压器中性点接地方式的改变不会对发电机保护产生影响。

4 谐振风险评估

加装 2 台小电抗器和隔直装置后,可能产生串联谐振问题,现对该问题进行分析。

4.1 仅 1 台小电抗器投入运行

小电抗器工频电抗 X_L 为 11.67Ω ,隔直电容 C 为 $66\ 000 \mu\text{F}$,可以计算得到电容器和电抗器的谐振频率为

$$f_1 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \approx 3.21 \text{ Hz}$$

4.2 2 台小电抗器均投入运行

2 台小电抗器工频电抗 X_L 均为 11.67Ω ,并联后等效为 5.835Ω ,隔直电容 C 为 $66\ 000 \mu\text{F}$,可以计算得到电容器和电抗器的谐振频率为

$$f_2 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{LC}} \approx 4.55 \text{ Hz}$$

无论是仅使用 1 台小电抗器还是 2 台小电抗器均使用,其谐振频率远远小于基波频率,因此不会发生串联谐振。

5 结论

1)方山电厂 2 台主变压器中性点均经小电抗器和隔直装置接地,可有效降低 500 kV 泸州变电站 220 kV 母线单相接地短路电流水平,在当前电网网

(上接第 30 页)

- [2] 杨洋,鄢秀庆,刘翔云,等.山区输电线路全过程机械化施工设计方案研究[J].四川电力技术,2017,40(5):78-83.
- [3] 邵俊杰,李旺年.单泵双工作机构钻机液压系统设计及改进[J].煤矿机械,2020,41(9):123-125.
- [4] 张始斋.ZYWL 系列履带式自动钻机模块化设计[J].煤矿机械,2020,41(6):11-13.
- [5] 吴晋军.掘进机机载钻机液压控制系统的设计[J].煤炭技术,2021,40(10):164-165.
- [6] 刘铸,栗林波,杜建荣,等.矿用水平定向钻机智能化电控系统设计[J].工矿自动化,2021,47(6):91-95.
- [7] 黄志强,喻洪梅,马亚超,等.山地物探电动钻机模块化设计及安全性分析[J].工程设计学报,2022,29(2):153-160.

架结构下满足断路器遮断能力要求,可消除非对称故障下方山电厂非直接接地主变压器中性点放电间隙被击穿的风险。

2)方山电厂近区 220 kV 系统不同接地故障情况下,方山电厂主变压器中性点、接地电抗器、隔直装置的安全校核满足要求。

3)方山电厂主变压器中性点接地方式的变化,谐振频率远小于基波频率,不会导致串联谐振的发生。

4)对方山电厂 220 kV 线路接地距离保护、零序电流保护存在一定的影响,需单独校核。对线路相间距离保护、主变压器差动保护以及发电机保护不会产生影响。通过对方山电厂主变压器高压侧零序过流保护 I 段定值进行了校核,灵敏度满足规程要求。

参考文献

- [1] 王开科,魏伟,孙帆,等.电力系统短路电流限制技术与运用设备篇[M].北京:中国电力出版社,2021.
- [2] 阿布德哈伊·撒拉姆,欧姆·马利克.电力系统稳定性:建模、分析与控制[M].北京:机械工业出版社,2018.
- [3] 电力行业继电保护标准化技术委员会.大型发电机变压器继电保护整定计算导则:DL/T 684—2012[S].北京:中国电力出版社,2012.
- [4] 李鑫,曾琢琳,石鹏,等.基于图计算的电力系统故障建模方法[J].四川电力技术,2021,44(5):36-44.
- [5] 刘起钟,魏巍,孙鹏程,等.220 kV 变压器中性点经隔直装置和限流电抗器接地应用[J].四川电力技术,2015,38(5):67-70.

作者简介:

孙鹏程(1985),男,工程师,从事发电厂电气技术管理工作。(收稿日期:2022-04-24)

- [8] 闫保永.山地模块化地面钻机关键技术研究[J].石油机械,2020,48(7):37-41.
- [9] 米树刚,李立明,梁有诚,等. CMD 系列模块化钻机的研制及地热施工中的应用[C]//第二十一届全国探矿工程(岩土钻掘工程)学术交流年会论文集,2021:345-350.

作者简介:

董杰(1996),男,硕士研究生,研究方向为机械设计与计算机仿真;

范荣全(1966),男,硕士,教授级高级工程师,研究方向为智能电网与电网新基建;

贺前(1982),男,硕士,工程师,从事输电线路运行工作。

(收稿日期:2022-05-20)