

铜冶炼企业 66 kV 变电站扩建设计探讨

朱世薇

(谦比希铜冶炼有限公司 动力分厂, 赞比亚 卡鲁鲁西)

[摘要] 本文以铜冶炼企业 66 kV 变电站实际情况为基础,通过理论分析、科学计算以及目前的装备水平,对变电站扩建设计方案进行讨论。讨论内容主要包括:扩建部分现场布置方案;分析比较三台变压器三种运行模式下各电气参数,用以确定 66 kV 侧主回路开关设备和线路配置;10 kV 侧铜管形母线载流量、动稳定和热稳定校验计算;二次设备配置和主要保护整定、避雷针移位后避雷保护范围计算等。实践证明,扩建后的变电站运行情况良好,满足企业需求,达到设计目的。

[关键词] 变电站; 扩建设计; 主回路; 二次设备; 避雷保护范围

[中图分类号] TF811; TF08

[文献标志码]

[文章编号] 1003-8884(2023)05-0076-09

DOI:10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2023.05.014

0 引言

位于非洲赞比亚某中国粗铜冶炼企业,始建于 2006 年,2009 年 2 月份投产。一期设计生产能力为 15 万吨,随着不断扩大产能,到 2017 年,设计生产能力达 25 万吨。该企业设置一座 66 kV/10 kV 降压变电所。一期设计两台 40 000 kVA 变压器,运行方式为分列运行,一台变压器出现故障退出运行时,另一台变压器可满足全公司正常运行的用电需求。生产规模扩大后,全厂用电负荷需求由 2009 年的 18 000 kVA 增至 2017 年 53 000 kVA,新增负荷 35 000 kVA。一旦任意一台主变压器出现故障,另一台变压器将超负荷运行,存在极大风险;另一方面,企业将面临长时间低负荷生产,造成巨大经济损失。增加一台变压器,形成两用一备供电模式,确保生产长期稳定进行,是该企业较为迫切的需求。

1 66 kV/10 kV 变电站概况

1.1 66 kV 接线方式

66 kV 变电所电压等级为 66 kV/10 kV,两回路

66 kV 电源引自赞比亚 ZESCO 供电公司 330/66 kV 变电所。配置 2 台主变压器 MT1 和 MT2,每台容量为 40 000 kVA,三相两卷变压器。66 kV 主接线采用单母线分段接线方式。66 kV 变电站系统原理图如图 1 所示。

1.2 10 kV 供电及接线方式

66 kV/10 kV 变电所设置一座 10 kV 配电室,采用单母线分段接线,正常情况下母线分段运行。10 kV 配电室内配电装置采用内装真空断路器的 KYN28A-12 铠装式开关柜。所内包括若干台馈线柜、2 台 PT 柜、2 台所用变、1 台母联柜、1 台隔离柜,分别为全公司 10 kV 配电所提供进线电源。

1.3 变压器配置

变压器配置如表 1 所示。

1.4 二次设备配置

变电站二次设备配置表如表 2 所示。

2 扩建设计

2.1 变电站扩建总体布置方案

本次扩建设计的难点在于,在原有场地和建筑基础上进行扩建,空间受限;根据公司生产经营计划,66 kV 侧扩建部分与原有线路停电搭接时间仅为五天,施工难度非常大。设计方案安全可靠、维修方便、节约投资是关键。

经现场踏勘,在现有开关场向南扩建 14 m,新

[收稿日期] 2023-06-10

[第一作者] 朱世薇(1975—),女,山西垣曲人,高级工程师,主要从事火法炼铜企业电气、仪表、控制系统维护工作,现任谦比希铜冶炼有限公司动力分厂厂长。

[引用格式] 朱世薇.铜冶炼企业 66kV 变电站扩建设计探讨[J].有色设备,2023,37(5):76-84.

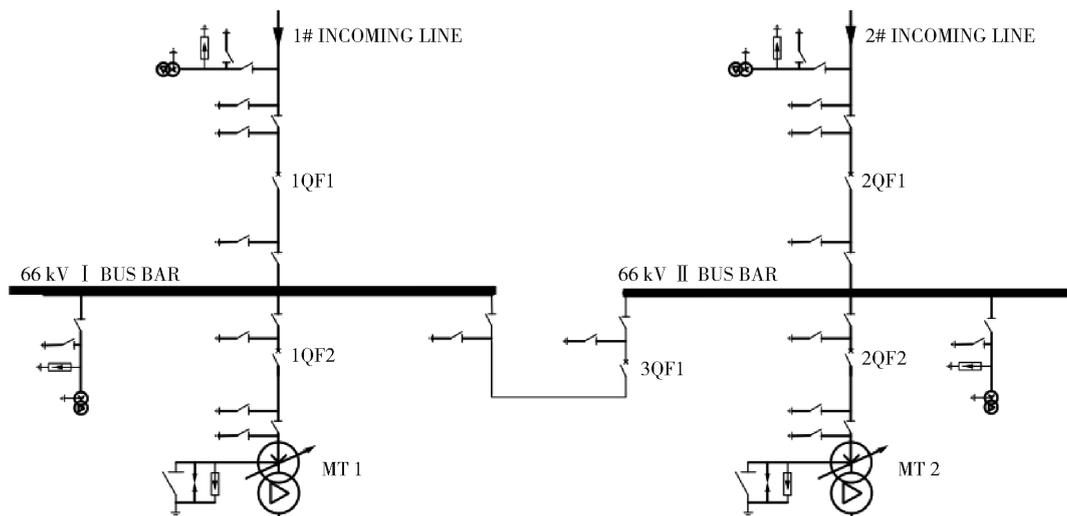


图 1 一期 66 kV 变电站系统原理图

表 1 66 kV/10 kV 变压器主要参数表

参数名称	参数值
变压器型式	三相双绕组油浸有载调压 自然风冷全密封免维护电 力变压器
变压器型号	SFZ10-40000/66
变压器调压方式	有载
变压器冷却方式	ONAN/ONAF
变压器压力释放阀个数	2
额定电压高压	66 kV
额定电压低压	10 kV
额定频率	50 Hz
联结组标号	YN d11
冷却方式	ONAN/ONAF
短路阻抗	10.5%
额定容量	40 MVA

增一台 66/10 kV 40 MVA 电力变压器(与 MT1 和 MT2 完全相同)作为备用,变压器输入端与 66 kV 母线连接;输出端与 10 kV 母线连接。

2.2 变电站扩建主回路设计方案

2.2.1 66 kV 侧设计方案

通过两台隔离开关输入侧分别与 66 kV I、II 段母线连接,输出侧连接至同一台 SF6 断路器,理论上可方便快捷地实现 MT3 变压器与 66 kV I 段或 II 段母线连接,但是受到 66 kV 开关场空间和场

地限制,无法满足 66 kV 架空线路引下线至隔离开关、隔离开关至 66 kV 断路器之间连接线相间最小安全距离(1.6 m)要求。因此,考虑空间限制、投入成本和安全运行等因素,MT3 变压器只能与 66 kV I 段母线连接,电气条件图如图 2 所示,剖面图如图 3 所示。

扩建后,通过各断路器投切,可实现 MT1、MT2、MT3 三台主变压器不同运行模式,变压器运行模式分析如表 3 所示。

2.2.2 10 kV 侧设计方案

原 10 kV 配电室南侧出线位置,扩建 10 kV 配电室。配电室内包括 1 台 10 kV 进线断路器、1 台 PT 柜、2 台联络柜、2 台备用柜。MT3 变压器 10 kV 侧出线与新建配电室进线开关连接;新增 10 kV 侧母线 2 个联络开关和管形母线分别于原 10 kV 配电室 I、II 两段母线连接。通过 2 个联络开关柜 + AH301 和 + AH302 的投切,实现 MT3 变压器对 10 kV 侧 I 段母线和 II 段母线供电。10 kV 侧系统设计原理图如图 2 所示,10 kV 主接线布置图如图 3 所示。

10 kV 进线断路器、两台联络断路器各电气参数相同,额定频率 50 Hz,额定电流 3150 A,短时耐受电流 31.5 kA(有效值),额定动稳定电流 63 kA(峰值)。

10 kV 联络母线选用管形母线为复合屏蔽绝缘铜管母线,铜管母线规格为 $\Phi 80 \times 8$ 。管形母线载流量、动稳定和热稳定校验计算如下所示。

表 2 变电站二次设备配置表

设备名称	规格型号	作用
66 kV 侧电流互感器	AGU-72.5 500/1 0.2S/0.5/5P20/5P20/5P20 20VA/20VA/30VA/30VA/30VA	测量各 66 kV 断路器回路电流
	TYD66 $\sqrt{3}/-0.02$ FH, 额定电压比: $\frac{66}{\sqrt{3}}/\frac{0.1}{\sqrt{3}}/\frac{0.1}{\sqrt{3}}/\frac{0.1}{3}$	测量 66 kV I、II 母线电压
10 kV 侧电流互感器	LZZBJ9-10 0.5/5P20/5P10 20/20/20VA 3150/5	测量各 10 kV 开关柜回路电流
10 kV 侧电压互感器	JDZX90 0.5/6P 90/100VA, 额定电压比: $\frac{10\text{ kV}}{\sqrt{3}}/\frac{100}{\sqrt{3}}/\frac{100\text{ v}}{3}$	10 kV 回路母线电压
微机监控保护装置	NSC320 总控装置和 NS2000 监控后台。	对变电站主要设备和输、配电线路的自动监视、测量、自动控制和微机保护等
直流电源系统	PGD40-200 Ah/220 V	为微机监控保护装置、继电器屏、仪表、66 kV 断路器控制回路及储能回路、10 kV 断路器控制回路及储能回路、站内逆变装置提供直流电源

1) 载流量计算

铜管截面积为: $A = 3.14 \times (80/2)^2 - 3.14 \times ((80 - 8)/2)^2 = 1\,808.64 \text{ mm}^2$ 。

管形母线最大持续工作电流计算过程见式(1)。

$$I = S/j = 1\,808.64/0.55 = 3\,288.43 \text{ A} \quad (1)$$

式中: I 为持续工作电流, A; S 为管形母线截面, mm; J 为经济电流密度, $0.55 \text{ A/mm}^{[1]}$ 。

结论: 最大持续工作电流为 $3\,288.43 \text{ A} > 3\,150 \text{ A}$ (进线断路器额定电流), 管形母线截面满足要求。

2) 动稳定校验

动稳定计算过程见式(2) ~ (3)。

$$M = \sigma \times W/100 = 13\,720 \times 49.8/100 = 6\,832.56 \text{ (Nm)} \quad (2)$$

式中: M 为短路状态母线承受最大弯矩, Nm; σ 为短路状态母线承受最大应力, 取 $13\,720 \text{ N/cm}^{[2]}$; W 为截面系数, 取圆环形状计算公式 $49.8^{[3]}$ 。

$$F = \frac{M}{0.171 \times L \times L \times 9.8} = \frac{6\,832.56}{0.171 \times 4 \times 4 \times 9.8} = 254.82 \text{ (kg/m)} \quad (3)$$

式中: F 为短路状态电动力, kg/m; L 为管形母线最大跨距, 4 m; $I_{sh}^2 = \frac{F \times \alpha}{1.76 \times \beta} = \frac{254.82 \times 27.5}{1.76 \times 0.58} = 6\,864.76$ 。

开方之后得到, $I_{sh} = 82.85 \text{ kA} > 63 \text{ kA}$ (断路器额定动稳定电流)。

式中: I_{sh} 为三相短路峰值电流, kA; α 为管形母线相间距离, 27.5 cm; β 为管形母线振动系数, $0.58^{[4]}$ 。

结论: 管形母线跨距满足要求。

3) 热稳定校验计算

根据 10 kV 进线断路器短时耐受电流, 计算铜母线最小截面积, 计算过程见式(4)。

$$S = I/K\sqrt{t} = 31.5 \times 10^3/143 \times \sqrt{4} = 440 \text{ mm}^2 < 1\,808 \text{ mm}^2 \quad (4)$$

式中: S 为按短时耐受电流计算母排最小截面积, mm^2 ; I 为短时耐受电流, 31.5 kA; K 为乙丙橡胶为绝缘材料导体的热稳定计算系数, 143; t 为持续时间, 4 s。

根据以上计算可知, 本设计方案采用的铜管形母线截面积、机械应力、跨距满足使用要求。

表 3 变压器运行模式分析表

投入运行变压器	MT1&MT2	MT2&MT3	MT1&MT3
高压侧接入 66 kV 母线方式	两台变压器高压侧可分别接至 66 kV I 段、II 段母线或通过 66 kV 联络断路器接入同一段母线	两台变压器高压侧可分别接至两段 66 kV I 段、II 段母线或通过 66 kV 联络断路器接入同一段母线	两台变压器高压侧接入 66 kV I 段母线或通过 66 kV 联络断路器接入 66 kV II 段母线
低压侧接入 10 kV 母线方式	两台变压器低压侧可分别接至 10 kV I 段、II 段母线或通过 10 kV 联络断路器同时接至 10 kV 两段母线。		
分别接入 66 kV I 段、II 段母线时的长期运行电流	I 段:228 A II 段:244 A	I 段:228 A II 段:244 A	I 段:472 A II 段:0 A
同时接入 66 kV I 段或 II 段母线时的长期运行电流	I 段或 II 段:472 A	I 段或 II 段:472 A	I 段或 II 段:472 A
本站 66 kV 三相短路冲击电流	15.45 kA	15.45 kA	15.45 kA
本站 66 kV 三相短路最大有效值电流	9.21 kA	9.21 kA	9.21 kA
允许长期运行模式	两台变压器分列运行	两台变压器分列运行	不建议按此方式长期运行
架空线	本站 66 kV 侧架空线采用型号为 LGJQ-240/30 的钢芯铝绞线,查手册知其连续截流量为 610 A,可满足两台变压器同时接入同一段 66 kV 母线的截流量需求		
SF6 断路器技术参数	包括 66 kV I、II 段母线进线断路器、母联断路器、变压器进线断路器。额定电压:72.5 kV,额定电流:3150 A,额定短路开关电流:31.5 kA,额定短路开合电流:80 kA,额定峰值耐受电流:80 kA,额定短时耐受电流:31.5 kA		
隔离开关技术参数	包括各断路器进线和出线端隔离开关。额定电压:72.5 kV,额定电流:200 A,额定峰值耐受电流:100 kA,额定短时耐受电流(4 s):40 kA		
结论	通过分析三台变压器各种运行模式下各电气参数可知,其长期运行电流小于各电气设备及线缆额定电流,66 kV 侧短路冲击电流、短路最大有效值电流没有变化,线路上各设备动稳定、热稳定校验与一期相同;选用与一期相同技术参数的设备,满足扩建需求。应当注意的是,由于全公司用电负荷增加较多,当任意两台变压器接入同一段母线时,此段母线负荷加重,不利于长期稳定运行,因此,本站应避免在此模式下长期运行		

4)本降压站变压器,装设下列辅助保护:①冷却系统故障、油温升高超过允许值时,动作于信号或跳闸;②变压器绕组温度过高,超过允许值时,动作于信号或跳闸;③变压器油箱及本体的压力释放装置动作,动作于信号或跳闸。

2.3.4.2 瓦斯保护

本变电站配置有变压器本体及有载调压开关瓦

斯保护,分重瓦斯和轻瓦斯保护。选用 NSR699RF-D01 主变操作及非电量保护装置,该装置有四路非电量跳闸开入,分别定义为本体重瓦斯开入、有载重瓦斯开入、压力释放开入、冷控失电开入,装置收到上述信号后直接启动信号继电器发信,同时经过外部压板启动跳闸重动继电器,由该重动继电器直接跳闸并发事故信号。

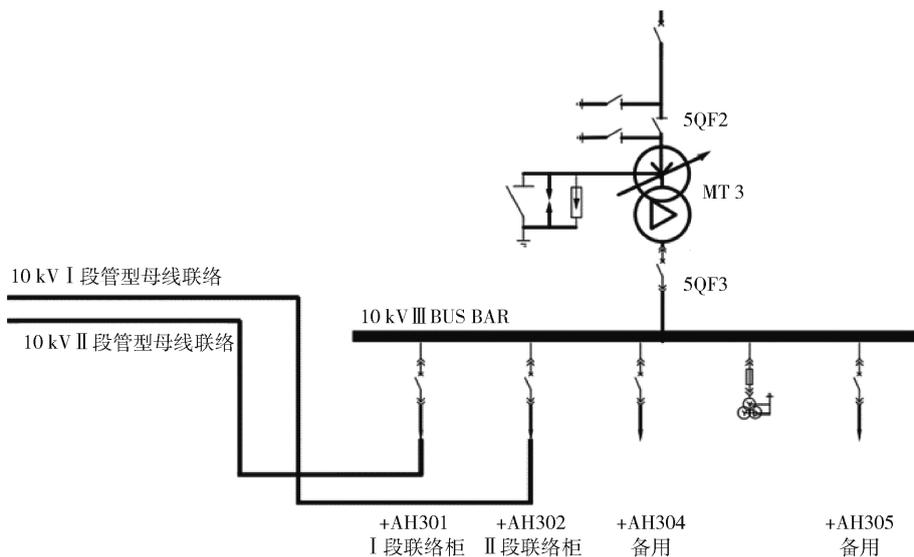


图 4 10 kV 侧系统设计原理图

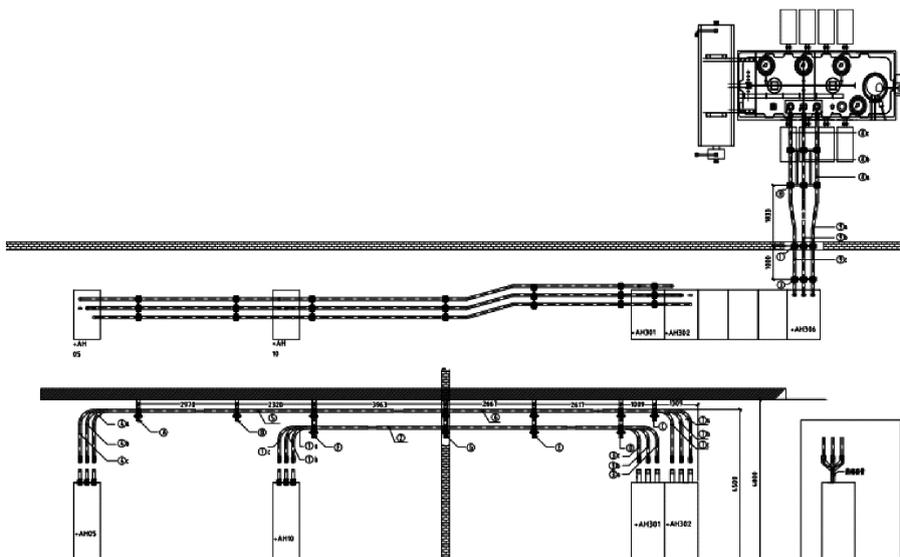


图 5 10 kV 主接线布置图

2.3.4.3 变压器的差动保护

1) 差动电流速断部分

在纵差动保护中,设置差动电流速断是为了检测在差动保护区内出现大的故障电流。当检测到大的故障电流时,保护立即动作,使得在可能出现的电流互感器饱和前,保护动作于跳闸,防止因电流互感器在大故障电流时饱和使保护拒动。差动电流速断的动作电流按躲过变压器的励磁涌流和外部故障时可能出现的最大不平衡电流来整定。可按额定电流的 4~5 倍整定。差动电流速断的动作时间不应大于 20 ms。

2) 比率制动部分

比率制动部分是为提高差动保护的灵敏性而设置的。此部分的动作电流随着外部穿越性短路电流的增大而自动增大。在制动电流小于或等于变压器额定电流的 1.2~1.5 倍时,继电器没有制动作用,此时差动继电器的最小动作电流可整定为变压器额定电流的 20%~50%。这就可以保证在内部故障、短路电流较小时,差动保护还能有足够的灵敏度。

在内部故障,短路电流较大时,虽然也有制动作用,但通过适当选取制动系数,可以做到在有制动的情况下,也能保证所需的灵敏度。在外部故障时,短

路电流全部为制动电流,提高保护的動作值,而差动回路的电流只是不平衡电流,可保证差动保护可靠,不会動作。

本降压站新扩建 3# 变压器采用的是 NSR691RF-D00-E 主变差动保护装置,其配置见图 6 和差动保护逻辑如图 7 所示。

装置型号		NSR691RF-D00
装置名称		变压器四侧差动保护装置
保护功能	比率差动元件	✓
	二次谐波制动 (波形对称制动可选)	✓
	TA 断线闭锁及告警	✓
	差动速断保护	✓
	差流越限告警	✓
	非电量保护	✓
其他	信息记录	✓
	录波功能	✓
	通讯功能	✓
	遥信功能	✓
	打印功能	✓

图 6 差动保护配置图

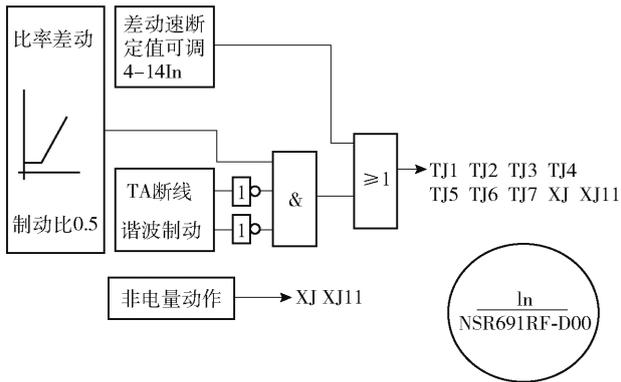


图 7 差动保护控制逻辑图

2.4.3.4 变压器的后备保护

本站变压器设置有变压器的高压(66 kV)侧后备保护和低压(10 kV)侧后备保护。选用的是 NSR692RF-D01-E 主变高后备保护装置和 NSR692RF-D01-E 主变低后备保护装置。变压器后备保护装置设置有复合过流 I 段保护(电流速断保

护),复合过流 II 段保护,限时过流保护等符合 66 kV 变压器后备保护的要求。完全满足新新扩建变压器的后备保护要求。

2.4 扩建后防雷保护范围验算

总降压开关场内避雷针 2 向南位移 14 m,用于安装新增 8-9 跨间隔主变间隔和 66 kV 引下线间隔,扩建后 1~9# 间隔建筑尺寸(长×宽(最宽处)×高):63 m×21 m×7 m,新增变压器 MT3(长×宽×高):9.8 m×8 m×6.15 m、扩建 10 kV 配电室(长×宽×高):15 m×6 m×5 m,如图 8 所示。

根据《DL_T620—1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》四支等高避雷针保护范围计算下列参数^[5]。

1) 各针外侧保护范围计算见式(5)。

$$r_x = (1.5h - 2h_x)P = (1.5 \times 35 - 2 \times 7) \times \frac{5.5}{\sqrt{35}} = 35.7 \text{ m} \quad (5)$$

式中: r_x 为避雷针在 h_x 平面上的保护范围,m; h 为避雷针的高度,35 m; h_x 为被保护物的高度,7 m; P 为高度影响系数,30 m < $h \leq 120$ m 时, $P = \frac{5.5}{\sqrt{h}}$ 。

2) 距离最远两针间(避雷针 2 和避雷针 3)的保护高度范围应按通过两针顶点及保护范围上部边缘最低点 O 的圆弧确定,其最低点 O 距地面高度 h_{023} 应按式(6)计算。

$$h_{023} = h - \frac{D}{7P} = 35 - \frac{93.81}{7 \times 0.929} = 22.55 \text{ m} \quad (6)$$

式中: h_{023} 为避雷针 2 和避雷针 3 间保护范围上部边缘最低点高度,m; D 为避雷针 2 和避雷针 3 间的距离,93.81 m。

结论:最低点 O 距地面高度为 22.55 m > 7 m,满足建筑物高度保护范围要求。

3) 距离最远的两针(避雷针 2 和避雷针 3)间 $h_x = 7$ m 水平面上保护范围的一侧最小宽度 b_x 按式(7)计算。

根据 $h_x = 7$ m, $h = 35$ m, $h_x = 0.2P$ 查对应的 b_x 与 $\frac{D}{haP}$ 关系曲线,得知: $\frac{D}{haP} = \frac{93.81}{(35 - 7) \times 0.929} \approx 3.6$

对应的 $\frac{b_x}{haP} \approx 0.9$, b_x 计算结果见式(7)。

$$b_x \times 23 = 0.9 \times h_a \times P = 0.9 \times (35 - 7) \times 0.929 \approx 23 \text{ m} \quad (7)$$

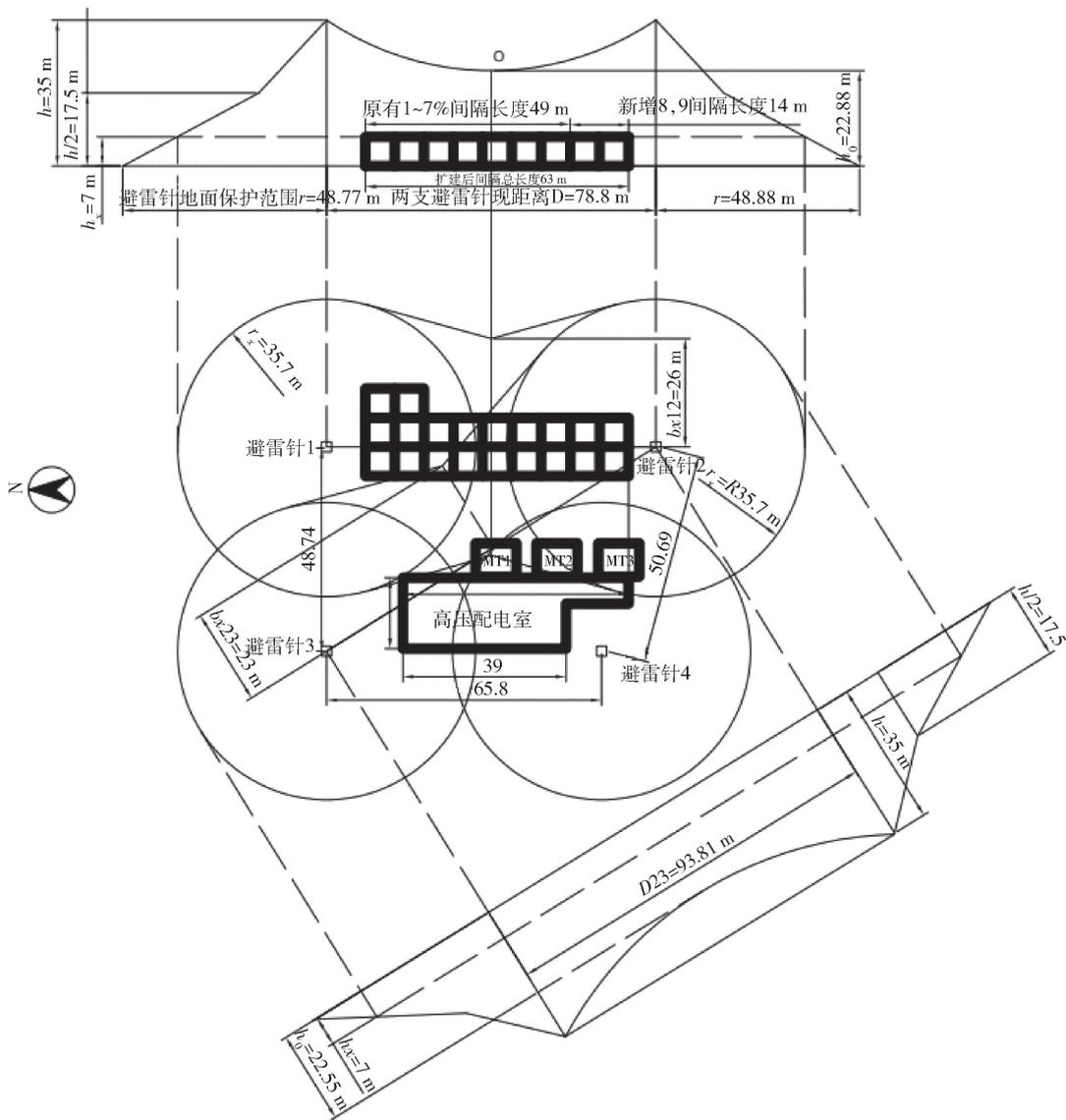


图8 避雷针保护范围计算示意图

式中: h_a 为避雷针与被保护物高度差,28 m。

各边的保护范围一侧最小宽度 $b_x \approx 23 \text{ m} > 0$, 则全部面积即受到保护。

由以上计算可知,避雷针2在向南移动14 m之后,避雷针1~4的避雷保护范围仍可满足扩建后1#~9#间隔、MT3和扩建10 kV高压配电室的需求。

3 运行效果

本站实现66 kV/10 kV主变两用一备后,在其中一台变压器出现故障或者定期的检修需要退出运行时,只需将备用的变压器投入运行,同时10 kV侧切换至需要投入运行变压器所连接的10 kV母线,不会出现企业用电设备大面积停电,避免造成长时

间停产或者减产,极大的提高了企业供电稳定性和可靠性,保证生产的连续性,为企业创造更大经济效益提供强有力的供电保障。

4 结束语

此次改造扩建,场地空间限制、新旧主接线搭接时间短是本次设计方案的难点,为最大限度满足企业需求,通过现场踏勘、科学计算和不同方案比较,最终确定的设计方案简单明了,易于实施,投资成本低,为其他中小型变电站新建、改建和扩建提供很好的借鉴经验。由于空间、场地、装备和投资限制,未能实现MT3与66 kV II段母线连接,可在今后66 kV主接线装备水平提升后进行改进。

[参考文献]

[1] 弋东方. 电力工程电气设计手册(电气一次部分)[M]. 北京:中国电力出版社,2018.

[2] DL_T620—1997,交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S].

Discussion on the Expansion Design of 66 kV Substation in Copper Smelting Enterprise

ZHU Shiwei

Abstract: Based on the actual situation of 66 kV substation in copper smelting enterprises, this paper discusses the substation expansion design scheme through theoretical analysis, scientific calculation and the current equipment level. The main contents of the discussion include: the site layout scheme of the extension part. The electrical parameters of three transformers in three operating modes are analyzed and compared to determine the main circuit switchgear and line configuration on the 66 kV side. 10 kV side copper tube bus load, dynamic stability and thermal stability check calculation; Secondary equipment configuration and main protection setting, lightning protection range calculation after lightning rod shift, etc. Practice has proved that the expanded substation runs well, meets the needs of enterprises and achieves the design purpose.

Key words: substation; expansion design; main loop; secondary equipment; lightning protection range



.....
(上接第 75 页)

Research on the Application of Automatic Magnetic Flotation Separator in Improving the Quality for Copper Tailings

XU Jialin, ZHU Dongfang, ZHENG Deliang

Abstract: This article introduces the new generation fully automatic electromagnetic gravity separation equipment LONGi Magnet Co., Ltd. It solved some problems in the production application of the older one which is successfully applied to improve Fe grade in copper tailings. In response to the difficulty of extracting iron from some copper mine tailings through the iron separation process, it is necessary to replace the flotation process. The research and development process, from laboratory data analysis to industrial solution customization, to data analysis during production, has demonstrated the superior performance and reliability of the new generation fully automatic magnetic flotation separation. The necessity of continuing fine sorting of magnetic gravity separation products has been verified. A new route has been opened up for improving the quality of copper tailings and iron products both domestically and internationally.

Key words: copper tailings iron products quality improvement; replacement of flotation; fully automatic magnetic flotation separation; equipment automation level

