

铜电解用整流机组的选择与计算

卞海林

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘要] 整流机组是为铜电解车间提供能源的重要设备,其选型的合理与否关系到企业生产的可靠性和经济性。本文详细阐述了整流机组的各个重要参数的确定,包括整流变压器的一次侧电压、整流器直流电压、整流相数、整流电路型式、整流接线方式、整流变压器容量等,最后以某铜电解工程为例演示整流装置的选择与参数计算。

[关键词] 铜电解; 整流器; 整流变压器; 双反星型; 三相桥式; 同相逆并联; 非同相逆并联

[中图分类号] TM461 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1008-5122(2022)02-0070-05

DOI:10.19610/j.cnki.cn11-4011/tf.2022.02.017

0 前言

铜电解用整流装置主要包含整流变压器和整流器两大部分,整流机组的选择具体包括整流变压器的一次侧电压、整流器直流电压、整流器的整流相数、整流电路型式、整流变压器和整流器的连接方式等参数的选取。本文分析和比较了机组的各个重要参数的选取,最后通过实例进行了验证。

1 整流机组参数的确定

1.1 一次侧电压

整流机组一次侧电压通常由企业的外部供电电压和整流装置的容量决定。直接采用外部供电电网电压,可以避免在厂内进行二次降压,对于减少电能损耗有利,但也要根据直流负荷的容量来比较其经济性。

对于铜电解来说,单系列年产阴极铜 15~20 万 t 是比较典型的规模,其直流负荷为 6 000~12 000 kW,负荷容量不算太大,一次侧电压以 10 kV 较为常见。

若整流机组直接采用 110 kV 或 220 kV 直降式整流机组,可以获得更高的整流效率和更小的电能损失,但整体设备投资增加太多,经济上不大合理。

1.2 整流机组直流电压

整流机组的额定电压可以按式(1)~(2)^[1]确定:

$$U_{Dn} \geq U_{dx} + \Delta U_M \quad (1)$$

$$U_{dx} = N_{xc} U_p \quad (2)$$

式中, U_{Dn} 为整流机组额定输出直流电压,V; U_{dx} 为单系列直流电压,V; N_{xc} 为单系列总槽数; U_p 为最高槽电压,V; ΔU_M 为整流所母线压降,视铜母排的长度而定,一般取 4~5 V。

1.3 整流机组数量和额定电流

整流机组数量与机组额定电流的确定,主要考虑以下因素:1)满足工艺生产的要求;2)节省投资和获得较高的整流效率;3)大型整流所应有备用整流机组;4)整流机组的台数,应尽可能使整个整流所形成较高的整流相数,以减少整流机组产生的谐波污染;5)与工艺发展的可能性相协调;6)尽量选用成熟应用的标准设备。

对于铜电解工艺来说,单系列负荷不是很大,一般采用 2 套整流机组,互为备用,根据企业情况,单台机组容量备用率可在 50%~100% 范围内变化。

1.4 整流相数

由于整流机组是非正弦用电设备,会引起供电

[收稿日期] 2021-11-13

[作者简介] 卞海林(1983—),男,湖北枝江人,本科,高级工程师,主要从事有色冶炼工程的供配电和传动控制等电气设计工作。

[引用格式] 卞海林. 铜电解用整流机组的选择与计算[J]. 有色冶金节能,2022,38(2):70-74.

网络的电压和电流的波形畸变,造成电网损耗加大,对其他用电设备产生干扰和损坏。因此国家对关口处的电网谐波含量有要求,如果谐波含量超标会受到处罚。

整流相数的确定要综合比较经济性,选择合适的数值。在容量相同的情况下,整流相数越高,注入电网的谐波越少,但是投资也会相应加大。

如果选用较低的整流相数,整流设备的投资会小一些,但是注入电网的谐波会较大,为了满足国标要求就还需要额外设置谐波治理装置,这也是一笔不小的投资。

因此,在选择整流相数的时候需要根据当地电网的情况,分析和计算谐波,综合考虑各方面的影响

和总投资,合理选取。对于单系列整流负荷较小的铜电解,整流机组宜为12脉波或等效12脉波;对于单系列整流负荷较大的铜电解,整流机组宜为24脉波或等效24脉波。

1.5 整流电路

电解所用的硅整流装置,多属于大容量装置,用的最多的整流电路是双反星型带平衡电抗器整流电路和三相桥式整流电路。

1.5.1 整流电路构成型式比较

1.5.1.1 双反星型带平衡电抗器整流电路

如图1所示,整流变压器阀侧有两套三相星型绕组,两个星型对应相的感应电势相位相反,这样的电路称为双反星型电路。

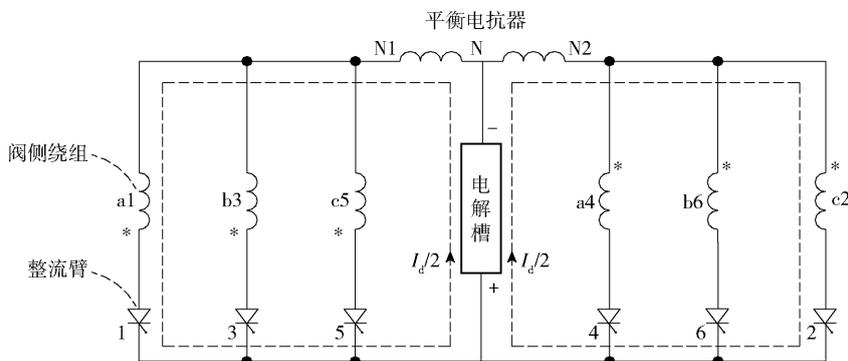


图1 双反星型带平衡电抗器整流电路

该电路其实是通过平衡电抗器将两个三相半波电路在直流侧并联运行^[1]。

6个整流臂的阴极连在一起,构成直流输出回路的正极。两个星型的中点通过平衡电抗器连在一起,平衡电抗器的中点抽出构成输出回路的负极^[1]。

1.5.1.2 三相桥式整流电路

如图2所示,三相桥式整流电路由两组三相半波整流电路串联组成,一组共阴极,一组共阳极。一

个周波内,阴、阳极组分别在正负半周导通,流经变压器二次侧的电流方向相反,直流磁势相互抵消。对变压器来讲,正负半周波都有电流流过,变压器的利用率高。对整流柜来讲,同样大小的电流需要流经两个整流臂,整流臂利用率低,压降大。

1.5.1.3 电路特点比较

双反星型带平衡电抗器整流电路和三相桥式整流电路的特点见表1。

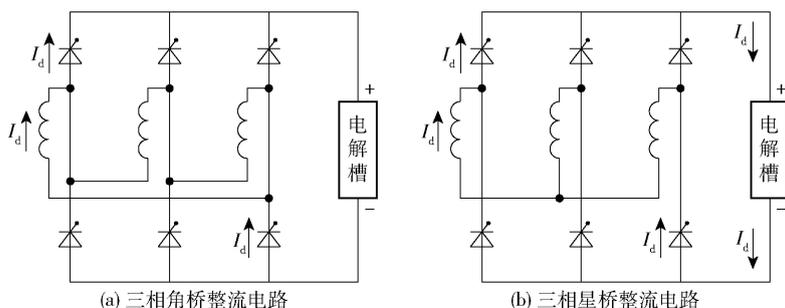


图2 三相桥式整流电路

表1 双反星型带平衡电抗器整流电路和三相桥式整流电路特点比较

电路名称	优点	缺点	适用范围
双反星型带平衡电抗器	1) 整流臂电流有效值小, 整流元件少 2) 功率单元损耗小	1) 需要平衡电抗器, 增加了变压器损耗 2) 负荷较小时, 会出现电压突升 3) 元件反峰压较高 4) 直流侧短路, 影响并联机组	低电压、大容量整流机组
三相桥式	1) 元件反峰压低 2) 整流变压器容量利用率高 3) 整流变压器结构简单	1) 整流臂电流有效值大, 整流元件多 2) 元件正向压降大 3) 功率单元损耗大	高电压、大容量整流机组

双反星型带平衡电抗器整流电路的优点在于它同时有两个整流臂导通, 在相同的直流输出电流下, 其整流臂电流的幅值仅为三相桥式电路的一半^[1]; 在相同直流输出电流和电流储备系数的条件下, 双反星型带平衡电抗器整流电路每一整流臂所需的并联整流元件数仅为三相桥式电路的一半, 因此整流柜的总元件功率损耗也跟着大大降低。双反星型带平衡电抗器整流电路的缺点是反向工作峰值电压比三相桥式高一倍, 当直流电压超过 300 V 时, 受 SCR 元件所能承受的反向重复峰值电压 (现常用为 1 200 V) 的制约, 要么采用低反向峰值电压等级的元件串联, 则整流元件数量增加一倍; 要么选用高反向峰值电压等级元件, 则造价偏高。无论何种选择都将影响其经济性和竞争力。

现在国产品闸管的发展比较迅速, 在价格增加不多情况下, 具有相对较高的反向工作峰值耐压, 因此双反星型的适用电压范围还有向上的空间。具体选择哪种整流电路需要综合比较才能确定。

1.5.2 整流接线方式的选择

1.5.2.1 同相逆并联整流接线

同相逆并联技术在以往的电解行业中应用较多, 因为它较好地解决了因整流电流产生的外磁场造成涡流损耗大、整流效率降低的问题, 也提高了桥臂的均流度^[2]。

双反星型带平衡电抗器整流电路和三相桥式整流电路的同相逆并联整流接线分别如图 3 和图 4 所示。同相逆并联技术是将电流相等、方向相反的两个导电臂靠拢, 从而达到交变磁场相互抵消、减小导排压降、提高功率因数和消除柜体涡流的目的。该技术主要适用于单台电流较大, 并且整流变压器与整流器的距离较远的情况。采用同相逆并联技术, 能明显地降低导电母排间的互感, 从而降低整流系统综合损耗。但其存在如下几个问题:

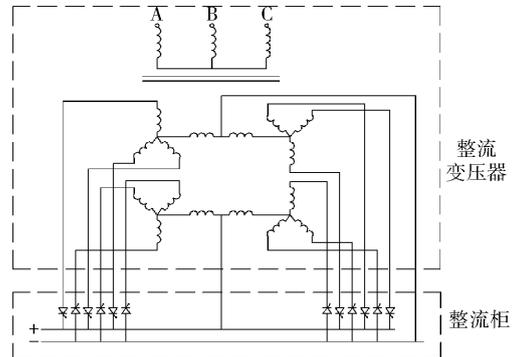


图3 双反星型带平衡电抗器整流同相逆并联接线

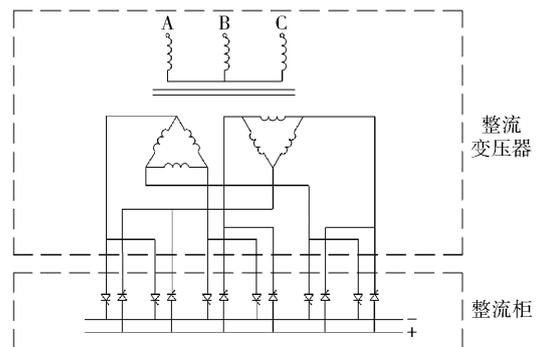


图4 三相桥式整流同相逆并联接线

1) 当阀侧出线采用同相逆并联接线时, 由于同相逆并联的臂间距离小于 100 mm, 在环境恶劣的情况下容易引起绝缘击穿^[3], 如果同相逆并联的两根导体发生短路故障, 则直流电压会提高 1.82 倍, 硅整流元件反向电压升高 2 倍^[4], 并承受其短路电流, 导致整流柜和整流变压器损坏。整流机组的输出直流电压越高, 问题越突出。因此, 必须特别注意同相逆并联的两根导体间的绝缘。

2) 整流变压器阀侧绕组结构和接线复杂, 导致整流变压器的成本提高。

1.5.2.2 非同相逆并联整流接线

双反星型带平衡电抗器整流电路和三相桥式整流电路的非同相逆并联接线如图 5 和图 6 所示。相

比同相逆并联接线,非同相逆并联接线的整流变压器的绕组少一半,所以附加损耗低;同时整流柜内的交直流导电排的数量和长度都减少,并且采用了大电流低压降的元件(4英寸全压接式),使整流器的损耗也相应减小。非同相逆并联整流电路臂间距离为480 mm左右,不存在臂间爬电的问题^[3]。

非同相逆并联的整流臂故障时,由于不存在其他臂的影响,直流侧电压降低,事故不会扩大。整流柜结构上的布置,元件、快熔母线无应力,直流侧短路或发生内部故障时,其电动力是同相逆并联的1/200~1/300^[4]。

非同相逆并联整流接线由于采用轴对式整流桥臂结构,母线布局简单、清晰,桥臂母线整流元件采用共阴极、共阳极布置。

减少整流柜和整流变压器之间母排长度,整流柜柜体采用非导磁材料基本就可以解决非同相逆并联接线带来的涡流损耗。

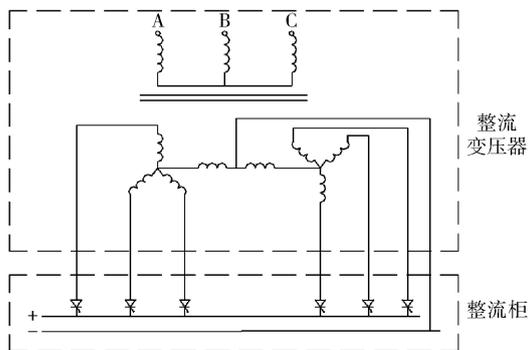


图5 双反星形带平衡电抗器非同相逆并联接线

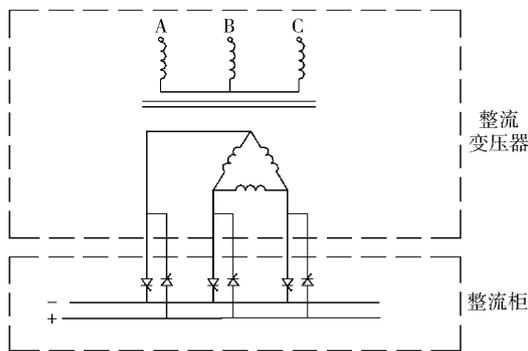


图6 三相桥式非同相逆并联接线

1.5.2.3 两种整流接线方式对比分析

就整流器而言,采用非同相逆并联要比采用同相逆并联接线的投资高出20%~30%^[5],但同时也带来了如下优势:结构简单化、维护空间增加、绝缘距离加大、安全性提高、总损耗降低和整流效率提

升。基于以上分析,整流器优先选用非同相逆并联接线。

1.6 整流变压器的容量

整流电路的型式不同,对应的整流变压器容量也不一样。

1.6.1 双反星型带平衡电抗器整流电路

整流变压器网侧绕组容量:

$$S_1 = 1.05P_{d0} \quad (3)$$

整流变压器阀侧绕组容量:

$$S_2 = 1.48P_{d0} \quad (4)$$

整流变压器的计算容量:

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2} = 1.265P_{d0} = 1.265U_{d0}I_d \quad (5)$$

式中, U_{d0} 为理想空载直流电压,V; I_d 为负载电流的平均值,A; P_{d0} 为直流侧输出功率。

1.6.2 三相桥式整流电路

整流变压器一次和二次绕组容量及计算容量公式如下:

$$S = S_1 = S_2 = 1.05P_{d0} = 1.05U_{d0}I_d \quad (6)$$

2 整流装置选型和计算实例

以某个铜电解工程为例来演示整流机组的选择(实例中的计算只为演示计算过程,仅限于文中参数,不考虑将来的生产富余)。

某年产40万t阴极铜电解项目,采用2个系列,每个系列设置640个电解槽,槽电压为0.3~0.4 V,系列电压为192~256 V,最大电流40 448.1 A,正常电流35 689.5 A。

考虑每个系列设置一个整流所,基于更高的供电可靠性和减少谐波的考虑,每个整流所设置两套12脉波整流机组(整流变压器+整流器)移相15°并联运行,等效24脉波,每套整流机组各承担50%的负载。

2.1 确定整流电路

单系列最大电压为256 V,根据上文比较的结果,宜采用双反星形带平衡电抗器整流非同相逆并联接线。

2.2 确定整流器的额定输出电压

$U_{Dn} = U_{dx} + \Delta U_M = 256 + (4 \sim 5) = 260 \sim 261$ V,取260 V。

2.3 确定理想空载直流电压

综合考虑整流柜内的换相电抗和电阻的直流

降压。

$$U_{d0} = (1.05 \sim 1.1) U_{Dn} = (1.05 \sim 1.1) \times 260 = 273 \sim 286 \text{ V}, \text{ 取 } U_{d0} = 285 \text{ V}。$$

2.4 确定负载电流的平均值

单系列直流侧最大电流 40 448.1 A, 单套机组承担一半的负载电流, 可取 $I_d = 21 \text{ kA}$ 。

2.5 计算整流变压器的容量

整流变压器容量为:

$$S = \frac{S_1 + S_2}{2} = 1.265 P_{d0} = 1.265 U_{d0} I_d = 1.265 \times$$

$$285 \times 21 = 7\,571 \text{ kVA}$$

根据计算结果, 考虑适当的设备富余, 单套整流装置可选用一台一次侧电压为 10 kV、容量为 7 500 kVA 的整流变压器, 以及额定输出直流电压为 260 V、直流电流为 21 kA 的整流柜, 采用双反星型带平衡电抗器整流非同相逆并联接线。

对于实际工程来说, 铜电解在生产运行中根据需求扩大产能是大概率事件, 在选择整流器时就需要适当的放大额定输出电流和提高额定电压, 增大整流变容量, 为将来扩产留有余地。

3 结束语

整流机组作为铜电解车间的关键设备, 选取的时候既要考虑一次性投资又要兼顾设备运行的可靠性和经济性。不同的项目有不同的工艺配置和要求, 设计者需要根据具体参数做出合适的选型和计算, 不可一概而论。

[参考文献]

- [1] 沈阳铝镁设计研究院电力室. 硅整流所电力设计 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1983.
- [2] 耿庆鲁. 大功率整流设备两种最常用接线方式的比较 [J]. 氯碱工业, 2008, 44(8): 4-5.
- [3] 苏建全. 电解用整流器装置同相逆并联技术与非同相逆并联技术的比较 // 2011 年氯碱整流技术研讨会论文集 [C]. 2011: 91-93.
- [4] 胡伟, 吴春学. 非同相逆并联整流装置在电解铜电源上的应用分析 [J]. 科学与信息化, 2019(17): 71, 75.
- [5] 李东林. 整流装置非同相逆并联接线的原理 [J]. 变压器, 2009, 46(3): 29-30.

Selection and Calculation of Rectifier Units for Copper Electrolysis

BIAN Hai-lin

Abstract: As rectifier units are crucial equipment to provide energy for the Cu electrolysis plant, the reasonable selection of such units bears on the reliability and cost-effectiveness of corporate production. This paper expounded the determination of all important parameters of rectifier units, including primary side voltage of rectifier transformer, DC voltage of rectifier, the number of rectifier phase, the form of rectifier circuit, the connection mode of rectifier transformer and rectifier, and the capacity of rectifier transformer. In addition, this paper took a Cu electrolysis project as an example to conduct selection and parameter calculation of rectification devices.

Key words: copper electrolysis; rectifier; rectifier transformer; double reverse star; three-phase bridge type; co-phase inverse parallel connection; non-co-phase inverse parallel connection