

铝电解整流装置的现状及改进

张 黎

(贵阳铝镁设计研究院有限公司, 贵州 贵阳 550081)

摘 要: 通过对国内铝电解整流装置使用现状的分析, 对目前在役的大功率铝电解整流装置的技术特点、存在的问题作了阐述与分析, 特别是对在电解系列直流电压不断升高时整流装置各个方面由量到质的变化情况进行了详细的分析与比较, 并对目前铝电解整流装置存在的缺陷提出了具体可行的技术和制造改进意见。同时根据铝电解工艺及系列产能规模的发展趋势以及现代煤电铝联营模式的要求, 对今后大功率铝电解整流装置的技术发展提出了切实可行的建设性意见。

关键词: 铝电解; 整流装置; 同相逆并联; 非同相逆并联; 滤波补偿

中图分类号: TM461

文献标识码: A

文章编号: 2095-3631(2014)02-0041-05

Present Situation and Improvement of Aluminum Electrolytic Rectifier

ZHANG Li

(Guiyang Aluminium Magnesium Design & Research Institute Company Limited, Guiyang, Guizhou 550081, China)

Abstract: Through analyzing the current situation of aluminum electrolytic rectifier used in China, the current technology of high-power aluminum electrolytic rectifier and existing problems were analyzed, especially in the case of a series of DC voltage rising, the changes of rectifying device from quantity to quality were analyzed and compared in detail. In allusion to the defects existing in current electrolytic aluminium rectification device, the practical technology and manufacturing improvements were put forward. Meanwhile, according to the development of electrolytic aluminum process and series production scale, it proposed some feasible and constructive ideas for the technical development of high-power aluminum electrolytic rectifier in order to adapt to the requirements of modern coal-aluminum joint management pattern in the future.

Keywords: aluminum electrolysis; rectifier; cophase counter parallel connection; non cophase counter parallel connection; filter compensation

0 引言

进入21世纪, 中国的铝电解工业取得了飞速的发展, 铝电解工艺技术已经达到国际先进水平, 单系列产能最大达到了40万t, 电解槽电流最大到500 kA, 系列直流电压也增加到1 450 V及以上。国内目前大部分的铝电解整流装置, 特别是2008年前投运的铝电解整流装置, 基本上是采用同相逆并联的主接线方式。面对铝电解

的直流电流和电压的提高, 这类装置在制造上只是对硅整流装置等主体设备进行了简单的扩容, 即加大了二极管和快速熔断器的容量和并联数量, 而整体结构没有本质的变化, 没有充分考虑因直流电压升高和具有强大储能功效的电解槽给硅整流装置带来的影响, 导致在2002年~2008年间数个正在运行的大功率铝电解整流装置发生致命性的短路崩溃事故, 造成重大经济损失。在经历了多次惨痛的教训之后, 设计院、电解铝厂、整流设备制造厂等各方都在积极地追索事故原因和探寻解决办法, 以下是笔者根据多年的铝电解整流

收稿日期: 2014-01-05

作者简介: 张黎 (1966-), 女, 高级工程师, 主要从事轻金属冶炼供电整流系统的设计工作。

系统设计经验,综合行业专家的观点,对目前铝电解整流装置的技术现状、所存在的问题、解决办法以及未来的发展谈一些看法。

1 铝电解整流装置的技术现状

铝电解整流装置主要由调压及整流变压器、整流器、滤波补偿装置组成,经过多年的努力,其整体设备的制造已国产化,但其中部分关键元器件目前还依赖进口。

1.1 调压及整流变压器

1.1.1 调压及整流变压器的主接线方式

国内目前运行的调压变压器基本上都是采用双圈递降式和自耦线端调压式2种主接线方式。其中双圈递降式可靠性高、抗短路能力强,但矽钢片用量较大、制造成本较高、本体损耗也较大;自耦线端调压主接线式对矽钢片用量较少、本体损耗较小、制造费用相对较低,但因其阻抗偏小,抗短路的能力较差。随着调压整流变压器单机容量的不断增大和供电系统容量的加大,自耦接线方式的弱点已引起关注,应充分考虑自耦接线整流变压器抗短路的安全性。

整流变压器的主接线方式均为:三相桥式同相逆并联结构,绕组的接线形式一般为 $\square/\Delta$ 和 λ/Δ ,移相绕组设置在整流变压器网侧(D和Y接线),以实现各机组间的移相;而非同相逆并联接线的整流变压器,由于其阀侧电磁涡流引起发热的问题目前国内还未能解决,因此目前国产的铝电解用整流变压器均未采用非同相逆并联的接线方式。

1.1.2 整流机组的调压方法

根据铝电解工艺的操作要求,系列直流电压需要按照电解槽的运行情况进行调整,系列直流电压的调压模式根据整流器整流元件的不同而采用不同的调压方法。

(1) 二极管整流调压

采用二极管的整流器,其直流电压的调整主要依靠调压变压器的有载调压开关在交流侧实施,直流电压的调整范围根据铝电解工艺的要求一般为电解系列电压的2%~105%,电解铝正常生产的工作电压一般为额定系列电压的80%~85%。在电解铝的生产过程中,会经常产生阳极效应,导致系列电压波动。为了不使系列电流产生波动,需要尽快调整系列电压来稳定电流。为避免有载调压开关的动作过于频繁,在整流变压器低压侧设置自饱和电抗器来进行无级调压,其调节范围为2个阳极效应电压(约70 V),正常的电解铝生产过程

中一般有30~70 V的直流电压波动。饱和电抗器的调节反应速度较慢,在深度控制的情况下,功率因数低,损耗增大,会导致整流机组的效率下降。

(2) 晶闸管整流调压

采用晶闸管的整流器,由于利用晶闸管导通角的大小来调节电压,因此此模式下的整流机组调压具有响应快、平滑、准确等优点。从理论上讲,其电压调节可以从0~100%。但由于在深度控制状态下,其功率因数低和谐波电流加大,因此在实际运行中,根据工艺的要求,将晶闸管的控制角限制在一定范围内,调压范围一般在150~200 V之间,有效地提高了整流机组的功率因数,并大幅提高机组的整流效率,但为此需在调压变压器上设置有载调压开关来调节基础电压,且细调晶闸管导通角(调压范围150~200 V)。

在铝电联营即“孤网运行”模式的推广中,晶闸管整流调压方式因其快速调节和投切负荷的优点非常适合该模式,加上现代控制技术的发展,其可靠性得到了大幅的提高,目前在铝电解行业的应用范围正在逐步扩大。

1.2 整流器的结构

1.2.1 同相逆并联框架结构

同相逆并联接线的整流器由日本富士公司首先推出,由于其结构为“对称性”配置,大幅度减少了整流柜内的电磁损耗,提高了同臂整流元件的均流系数,自80年代引进我国后得到了广泛的应用,并已国产化。随着铝电解单系列产能的提高,电解系列的直流电压均大于1 350 V,而传统的同相逆并联整流柜是基于直流电压小于1 000 V设计的,特别是对于整流柜内的交直流短路故障的研究不深,在整流柜的改进过程中只进行了简单的扩容,因此仍存在较多的缺陷,主要体现在以下几个方面:

(1) 整流元件和快速熔断器的选用和匹配(特别是 I^2t 计算)不合适;

(2) 对过压保护电路(整流臂换向过电压吸收保护装置及直流过压保护装置)设计及安装方面考虑不全面;

(3) 相与相之间的间距不够;

(4) 同相逆并联桥臂之间的距离过小;

(5) 整流桥臂的固定、爬电距离以及柜内绝缘考虑不周全;

(6) 过电压保护的吸收容量计算不准确;

(7) 大功率整流元件(主要是4英寸及以上)的压装方式不合理;

(8) 整流柜内非电量保护措施不到位。

由于上述的工作未做到位, 2008年前生产的整流柜在结构形式和内部安装方面都存在缺陷, 导致在2003~2007年期间, 多家大型电解铝企业因整流器发生短路爆炸故障, 引起电解系列全部停运, 造成重大经济损失, 在整个行业引起震动。此后行业设计院、主要的电解铝厂、设备供应商共同组织人员多次前往现场调查, 经过仔细分析, 对整流柜的缺点做了全面的剖析, 提出了一系列改进意见:

(1) 加大相与相之间的间距(不小于700 mm);

(2) 整流元件与快速熔断器之间的连接母线采用软连接, 以便应力释放;

(3) 与整流柜连接的外部母线要做好母线重力支撑, 以尽量减少整流柜内部架构的受力;

(4) 整流元件的选择必须同时满足额定电流和反向耐压的要求, 快速熔断器的选择也要同时满足额定电流和分断能力的要求, 两者的匹配必须按 I^2t 的计算值确定, 原则上快速熔断器的 I^2t 值应小于整流元件的 I^2t 值;

(5) 整流柜的结构要保证母排间有足够安全的爬电距离和空间拉弧距离, 要有足够的机械强度, 在整流柜发生短路故障状态下, 母排不变形、不拉弧;

(6) 整流器内的二次导线采用3~5 kV的高压导线, 因为有部分导线是直接主回路母排相连接的, 必须要有足够的绝缘强度;

(7) 充分重视柜内循环水管的连接, 冷却水盒和水管必须能长期承受5 kg以上的压力;

(8) 重视操作过电压及换相过电压保护器件的选择, 参数计算及器件选型必须正确;

(9) 整流元件在桥臂母排上的固定采用新型压板及连接螺杆, 整流元件与桥臂母排之间的接触面积需尽可能大;

(10) 加强整流柜内的隔弧措施, 在各整流臂之间、同相逆并联整流臂之间设置厚度10 mm以上的环氧玻璃布板进行隔离;

(11) 整流柜必须增加逆流保护, 建议增设均流检测仪, 有条件的话可以加装弧光保护, 同时动作于跳闸的信号只能通过干接点直接接入跳闸回路, 而不能通过PLC出口。

自2008年以后, 各电解铝厂根据上述意见, 结合自身的实际情况基本上都对在役的整流器进行了整改, 新制造的整流器也根据上述意见进行了重新设计, 并认识到只有同步解决同相逆并联结构整流器存在的4个

主要问题(磁场、电场、电力及电腐蚀), 才能保证整流器在铝电解整流系统中安全可靠运行。截至2013年底, 采用新型整流器的电解铝厂的整流装置尚未发生重大事故, 运行情况良好。图1为某铝厂的新型整流器, 经过几年的运行, 证实该新型整流柜是可靠的, 其实质是加大了相与相之间以及同相逆并联桥臂之间的距离, 从根本上避免了柜内的交直流短路, 但其损耗较传统结构的同相逆并联整流柜的大。



图1 新型卧式双层布置的同相逆并联整流器

Fig. 1 A new type cophase counter parallel connection rectifier with horizontal double-layer layout

1.2.2 同相逆并联整流变压器与非同相逆并联整流器组合的新型整流机组

一般情况下同相逆并联整流变压器与同相逆并联整流器匹配, 三相桥式整流变压器与三相桥式非同相逆并联整流器匹配。根据国内整流变压器制造的实际情况, 经过多方研究, 开发出了同相逆并联整流变压器与非同相逆并联母线框架自撑式结构整流器配合的新型整流机组。同相逆并联的整流变压器实际上是由2台三相桥式变压器的线圈逆向绕制而成。新的非同相逆并联整流柜实际上也是由2个三相桥式整流器组成, 只是加大了同相逆并联桥臂之间的距离或者是错开安装, 充分考虑了绝缘距离和飞弧距离, 尽量减少柜内的电磁涡流损耗; 同时取消了设备的外壳, 并用非金属材料制作非同相逆并联母线框架自撑式结构。目前单系列产能30万t以上的电解铝厂多采用该新型整流机组。它既发挥了同相逆并联整流变压器的技术优势, 也吸取了三相桥式整流器的安全优点, 且降低了制造难度, 整流效率较传统的三相桥式整流机组高, 可能成为今后超大功率整流装置的发展方向。由于该结构的整流装置没有外壳, 对整流室的环境条件提出了较高的要求, 在配置设计中要充分考虑运行人员的安全防护问题。图2、图3为目前国内有代表意义的2种型式的整流器外形图。



图2 非同相逆并联母线自撑式整流器

Fig. 2 Self-supporting type rectifier with non-cophase counter parallel connection busbar



图3 密闭柜式同相逆并联整流器

Fig. 3 Airtight cabinet cophase counter parallel connection rectifier

1.3 滤波补偿

铝电解整流机组无论采用二极管还是晶闸管整流方式,其自然功率因数一般都在0.80~0.88之间。通常在整流变压器一次侧设置移相绕组,并尽量通过增加整流机组数来增加整流的等效脉波数,以达到抑制谐波的目的。例如采用6组整流机组,其单机组12脉波整流,6个机组等效脉波数超过60,理论上60次以下的谐波均可以抵消。但由于各整流机组的参数不能达到完全的一致,仍会存在少量奇次谐波和高次谐波。同时,为满足国标功率因数(0.95)的要求,在调压变压器设置第三线圈用于连接补偿滤波装置,以提高整流机组的功率因数,对整流机组产生的谐波进行滤波。滤波补偿装置的电压等级视补偿容量而定,一般在10~35 kV之间,原则上是尽量降低电压以减少投资。

2 整流装置中所采用的整流元件与保护器件

2.1 大功率整流元件

目前国内大型铝电解整流装置主要采用3英寸和4英寸硅片的二极管或晶闸管元件,更多的是使用4英寸

整流元件,其中采用ABB公司元件所占的比列超过70%。近年来随着国产元件制造技术的提高,采用国产4英寸整流元件的铝电解大功率整流器正在逐渐增多,也有少部分电解铝厂使用5英寸的国产元件。

2.2 保护器件

当大功率整流元件发生故障时,为了防止事故的进一步扩大,通常采用功率器件串联快速熔断器的方法,切除故障元件,并尽量采用单体快速熔断器。快速熔断器的发热量较大,主要采用水冷的方法带走热量。随着电解系列直流电压的不断升高,对纯水水质提出更加严格的要求,国内以前整流柜导电母排的材质多为铜材,在纯水中铜以离子状态存在,对水质的破坏相当大,导致纯水的水质下降,严重威胁整流机组的安全。目前新制造的整流器一般都建议采用铝母排作为导体,因为铝金属与空气接触后会氧化,生成一层致密的氧化铝(Al_2O_3)薄膜,阻止铝进一步氧化,氧化铝的特性稳定,不易发生化学反应,对铝排起到保护作用,也不会影响水质。

3 铝电解整流装置的发展趋势

近年来,晶闸管整流器发展迅速,其应用遍布各行各业,直流电压较低的整流装置几乎均使用晶闸管整流方式。随着晶闸管的制造水平及控制水平的不断提高,单体晶闸管的容量,特别是耐受反向峰值电压的能力大幅提高,为其在大功率铝电解整流器中使用创造了条件。目前铝电解行业的运营模式逐渐向铝电联营、直供电(孤网运行)的方式转变,直供电系统由于其系统容量较小,电解铝的负荷占其主要部分。因此当一台发电机发生故障时,必须快速降切负荷,以避免系统解列造成更大的损失。采用传统的有载调压开关降负荷满足不了快速的要求,而采用分断交流断路器的方式,会对整流变压器造成破坏性的冲击,同时也会对直供电网造成“飞车”。因此充分利用晶闸管整流器能快速无级降、切负荷的特点,是未来直供电(孤网运行)铝电解整流器的研究和应用方向。目前国内已经有多家铝电解厂在尝试直供电(孤网运行)加晶闸管整流器的方式,并取得了良好的效果。

随着电解槽容量的不断增大(未来可能发展到600 kA),目前整流元件大多采用4英寸元件,预期未来将大量采用5英寸及以上的整流元件。随着管径增大,元件的浪涌电流、正向耐压及反向耐压, I_{T1} 值均有明显的增大,其中的 I_{T1} 值是反映元件安全及可靠性的重要指标,因此选用大直径的整流元件是保证系统安全可

靠运行的关键措施之一。目前国产整流元件已能满足以上要求,但目前国产5英寸元件的参数一致性较4英寸元件的差,故在使用5英寸元件时需对元件的均衡性、各参数的一致性作匹配选择。必须保证整流器桥臂的均流系数达到要求值(≥ 0.88),同时还须关注开断容量大于230 kA的单体快速熔断器的研发及制造进程,快速熔断器的可靠性以及与元件的匹配将是今后使用5英寸及以上元件的瓶颈。

由于铝电解受电网的限制,采用小网和孤网供电成为铝电解发展必经之路,开发适应未来供电模式的整流装置成为整流器制造厂家的目标。因此,未来的谐波补偿装置将通过静态补偿加有源动态补偿的方式来实现动态调节,以提高滤波补偿装置的自适应性,提高滤波补偿的质量,降低补偿装置的能耗。

目前,中铝华大科技股份有限公司研究开发出一种新型感应滤波整流变压器,其滤波绕组设置在整流变压器上(图4)。由于功率补偿装置的投入位置更靠近负载,机组运行的基波和谐波损耗进一步减少,主要表现在以下几个方面:

(1) 经过整流变压器一次绕组和调压变压器二次绕组的负载无功电流减少,故绕组损耗减少;

(2) 新机组的滤波绕组采用零阻抗设计,其损耗很小,而传统机组的功补装置接至调压变压器的第三绕组,当有电流流通时,在绕组上会产生损耗;

(3) 新机组功补装置所承受的电压比传统机组低,其流过的电流小于传统机组的。

该技术已经在化工行业整流变压器中应用,在铝电解大功率整流变压器中的应用正在试验中。

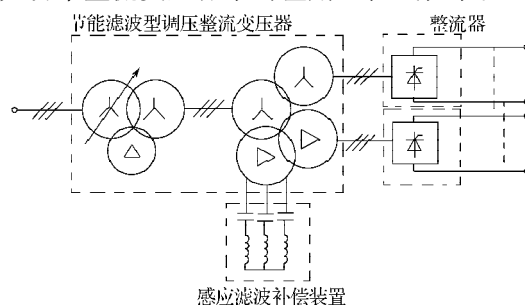


图4 节能滤波型整流变压器简单接线图

Fig. 4 Simple wiring diagram of energy saving filter type rectifier transformer

4 结语

本文只是笔者在多年整流系统设计过程中对同相逆并联整流器的技术发展的一些认识。目前,我国已经开始研发600 kA级的电解槽,单系列的电解铝产能还将增长。铝电解整流装置的可靠性和单柜容量是制约电解系列规模的瓶颈,尤其需要开发新型结构的整流器,以从根本上解决高电压、大电流整流柜存在的关键技术问题。

参考文献:

- [1] 沈阳铝镁设计研究院. 硅整流所电力设计[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1982.
- [2] 黄俊, 王兆安. 电力电子变流技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1993.

(上接第30页)

本文定性地分析了电动汽车用驱动电机系统的气候应力、机械应力、固体/液体应力和化学应力等环境应力条件及其对驱动电机系统的影响,对各环境应力条件的基准值进行了探讨,提出若干环境适应性设计方法。为定量地评估环境应力对驱动电机系统的影响,有必要开展以下工作:

(1) 通过测量,得出不同安装悬挂方式的驱动电机系统的冲击振动值;

(2) 开展驱动电机系统环境工程研究,建立环境严

酷度平台和环境适应性平台^[4];

(3) 开展环境适应性验证试验。

参考文献:

- [1] 应红亮. 新能源汽车的驱动电机系统[J]. 汽车与配件, 2012, 41(5): 38-41.
- [2] 中华人民共和国科技部. 国家高技术研究发展计划(863计划)现代交通技术领域电动汽车关键技术与系统集成(一期)重大项目课题申请指南[S]. 2010.
- [3] 陈世坤. 电机设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [4] 杨铭, 陈芳. 机电产品环境适应性设计和控制策略[J]. 电子机械工程, 2001, 93(5): 21-24.