

电解机组变频器单相接地故障分析及解决方案

高莹

(沈冶重型装备(沈阳)有限责任公司, 辽宁 沈阳 110027)

[摘要] 随着国内电解铝行业的迅猛发展和自动化及自动控制技术的不断进步,变频器已经普通应用在电解机组。在十几年的应用中有多个用户反映设备运行过程中,因变频电机损坏造成单相接地或变频器到电机之间的电缆出现问题,造成变频器输出侧单相接地,最终导致多台变频器同时烧毁,一直未找到合理的解决方案。本文对所提问题进行详细的理论分析,对变频器的工作原理、电解机组与该故障有关的特殊工艺进行了介绍,结合现场情况找出变频器集中烧毁的原因,并针对分析结果在设计中通过电压监测给出解决方案,经过现场试验及长期运行,得到了良好的效果。

[关键词] 电解机组;脉宽调制;单相接地;电源叠加

[中图分类号] TF821 **[文献标志码]** B **[文章编号]** 1003-8884(2021)06-0078-05

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2021.06.018

0 引言

随着自动化及自动控制行业的不断发展,目前变频器在铝电解多功能机组上已经普遍应用,不同的设备制造商对变频器的应用品牌和功率的选择略有不同,但在铝电解多功能机组上,大小车行走、出铝钩升降等驱动基本采用了变频调速技术。和早期的设备中应用到的切电阻调速相比,变频调速设备运行更加平稳,设备加速和减速柔和,机械冲击小。

铝电解多功能机组属于一种特殊的起重机械,由于电解车间电解工艺的要求,车间内铝电解多功能机组的滑线供电系统不允许引入地线,在铝电解多功能机组的供电系统中,为了进一步保证设备和检修人员的安全,采用隔离变压器对电源进行二次隔离,不引入地线,所有的电气设备都处于非接地运行状态,电解机组大梁上的设备外壳都与大梁等电位,所以对于一些电气设备来说,天车的大梁就是这些电气设备的悬浮地,电解机组上应用的变频器无

法接地。

自从变频器应用到铝电解多功能机组上之后,有多家用户反映设备在运行过程中,突然操作某些动作无反应,一般是变频器驱动的设备无法运行。出现这种情况时,经过检查会存在变频电机损坏造成单相接地(悬浮地)或变频器到电机之间的电缆出现问题造成变频器输出侧单相接地(悬浮地),大部分烧毁的变频器都是整流环节损坏,这种情况一般烧毁变频器不止一台,给设备使用企业带来了较大经济损失。同时,用户需要准备备件并进行变频器更换,即使有备件,完成变频器安装和调试后,设备也需要 4 小时以上能投入使用,如果没有备件设备停用时间更长,给车间的生产工作带来了巨大压力。

变频器集中烧毁,给用户带来的损失不仅仅局限于变频器本身更换备件的费用,影响生产工作可能会给用户带来较大的经济损失,很多用户对这一问题都非常重视,必须采取相应措施,避免这种情况的多台变频器集中烧毁,保证设备的长期稳定运行,满足生产要求。

1 现场检查情况

为了更好地分析现场出现的故障,对现场中同时出现工具车和出铝车没有动作进行实地检查和数据检测。

[收稿日期] 2021-08-09

[作者简介] 高莹(1979-),男,辽宁黑山人,高级工程师,大学本科,主要从事铝电解多功能机电控系统的研发、设计和调试等工作,现任中国有色(沈阳)冶金机械有限公司自动化控制工程研究所技术主管。

[引用格式] 高莹. 电解机组变频器单相接地故障分析及解决方案[J]. 有色设备, 2021, 35(6): 78-82.

该设备大车依靠 2 台 22 kW 的电机驱动、2 台电机由一台 90 kW 的变频器拖动,工具车和出铝车都依靠 2 台 5.5 kW 电机驱动、2 台电机由一台 18.5 kW 的变频器拖动,在设备运行过程中突然发现工具车、出铝车均无法运行,经现场确认,工具车及出铝车变频器均已烧毁,内部有较为严重的电路板烧毁痕迹,经进一步确认均为整流板损坏,有些电容严重损毁,大车变频器到电机的电缆无破损;为了进一步了解具体情况,采用万用表和兆欧表等检测工具进行详细检测,在不操作大车行走时,变压器二次侧电压分别为 385 V、386 V、385 V。操作大车行走时,变压器二次侧电压分别为 535 V、538 V、536 V,电压显著升高,因该实验有一定破坏性,为了避免事故扩大,只对大车行走操作时测量数据一次。之后对大车行走变频器、大车变频器到大车电机的电缆以及大车电机进行详细检查,发现电机一组绕组与电机外壳无绝缘,单相与大梁短接,电阻为 0Ω ,大梁与隔离变压器中性点之间电阻为 0Ω 。

2 电解机组变频器单相对地分析

交流变频调速技术原理是把工频 50 Hz 的交流电转换成频率和电压可调的交流电,在改变频率的同时也改变电压,从而达到调节电动机转速的目的。

频率与电机的转速直接相关,即频率越快、转速越快。随着设备工艺对电机转速要求的变化,变频器可以调高或降低电机转速以满足设备工艺对电机速度要求。

为了使变频器输出交流电压的波形近似为正弦波,使电动机的输出转矩平稳,从而获得良好的工作性能,目前变频器都是采用脉宽调制控制完成。

一个连续函数可以用无限多个离散函数逼近或替代的,在通用变频器采用的交-直-交变频装置中,前级整流器是不可控的,给逆变器供电的是直流电源,其幅值恒定,可以设想用多个等幅不等宽的矩形脉冲波来替代正弦波,每一个矩形波的面积都与相应时间段内正弦波的面积相等,则这一系列矩形波的合成面积就等于正弦波的面积,也即有等效作用,这就是变频器的正弦脉宽调制。

将变频器的某一相输出电压单极性正弦半波 n 等分,把每一份的正弦曲线与横轴所包围的面积都用一个与此面积相等的矩形脉冲来替代,矩形脉冲的幅值不变,各脉冲的中点与正弦波每一等分的中

点相重合,同样,正弦波的负半周也可用相同的方法与一系列负脉冲波等效,这样就形成了 spwm 波形,以上是以变频器单相上的电压进行分析的,实际上变频器输出电压是经正弦脉宽调制后的高频脉冲系列,是一系列等高矩形脉冲波,振幅值等于直流电压,脉冲的占空比按正弦规律分布,在一个周期内,脉冲的宽度和各脉冲之间的间隔是不相等的。由于电动机的绕组具有电感性,因此,尽管电压是由一系列的矩形脉冲构成的,但通过电动机的电流却和正弦波十分接近。为了提高等效的精度,矩形波的个数越多,电压波动相对越小,调制出来的波形越接近于正弦波,变频器的性能越好。

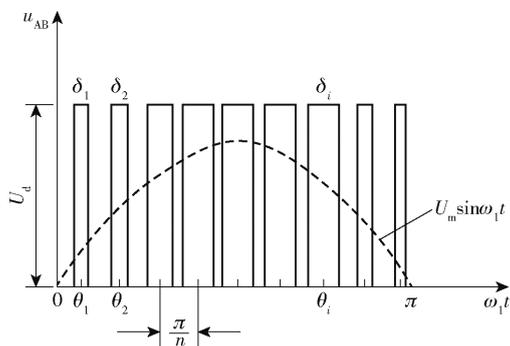


图 1 变频器单相单极性正弦调制波

变频器的输出电压的有效值随频率而变化,即:

$$U_x = C_u f_x \quad (1)$$

式中 f_x —变频器的输出频率,Hz;

C_u —比例常数。

变频器各相之间的线电压有效值相等,频率相同,相位角不同,各相之间的相位差相等,与变压器二次侧的交流电压类似,只是在有效值的大小、各相输出电压的周期及初相位不同,这也是二者在特定条件下形成叠加造成变压器二次侧电压大幅升高的一个重要因素。

变频器输出电压的有效值随着频率的升高而不断升高,变频器的输出属于等幅不等宽的脉宽调制波,是通过逆变环节以变频器直流母线上的电压为基础通过脉宽调制完成的变频器交流电的输出,所以,在变频器某相有电压输出的时刻,该电压等于变频器直流母线电压,没有电压输出时,电压为 0 V ,变频器的输出电压就是在 0 V 和与直流母线电压相等的电压值之间跳动。交流 380 V 变频器直流母线电压:

$$U_d = 1.414 \times 380 = 537.32 \quad (2)$$

在实际运行过程中,变频器的输出电压在 0 V 和 537.32 V 两个数值之间不断跳动,脉冲的占空比按正弦规律变化,在一个周期内,脉冲方波的宽度和时间间隔是不相等的。

变频器问世以来发生了很多变化,变频技术也随着电力电子及电子元件的性能变化而不断变化,应用电子器件性能不断提高,也使变频器性能越来越好,稳定性也越来越高,自从变频器应用到国产铝电解多功能机组上之后,已经进行了多代更新,与最开始的变频器相比,功率越做越大,体积越来越小,稳定性越来越好,保护功能越来越全面,操作越来越简单,抗干扰能力也越来越强。目前应用到工业上的变频器电压输出波形基本近似多脉动正弦波,因电机绕组的感性存在,电机内的电流更趋近于正弦波。图 2 为典型的变频器输出电压的等效波形。

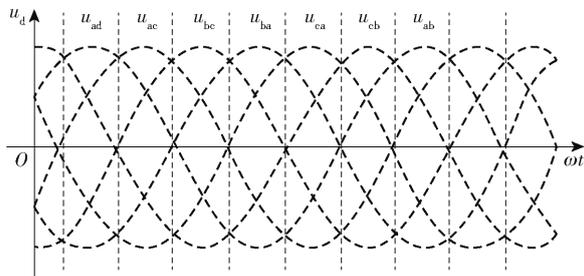


图 2 变频器输出电压等效波形

在电解机组的供电系统中,采用隔离变压器对

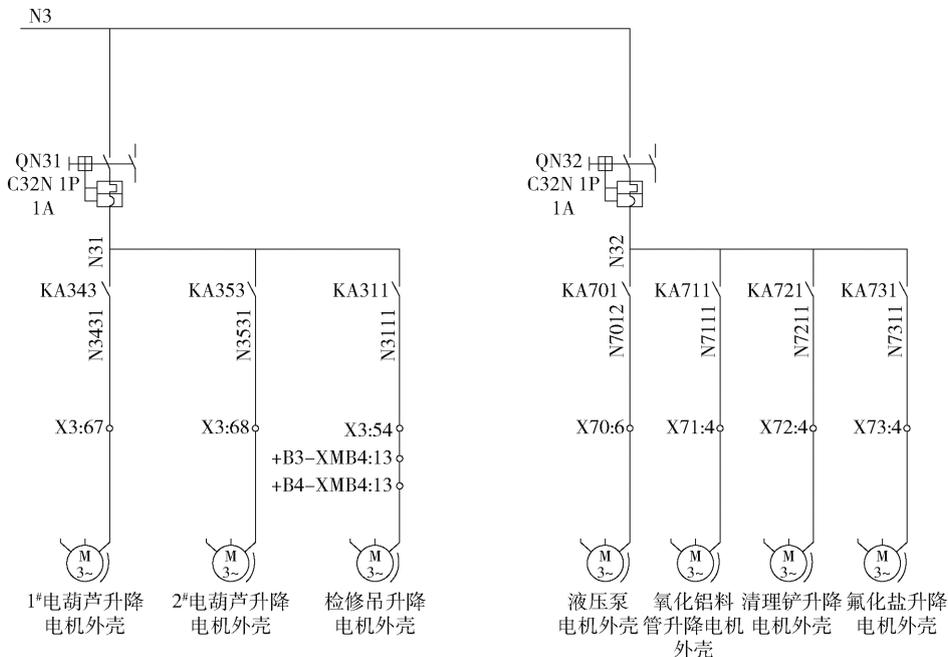


图 4 电解机组漏电保护原理图

电解机组的供电系统与供电电源进行了有效隔离。变压器的二次侧相电压瞬时值:

$$u = 1.414 \times 380 \sin(\omega t + \Phi) \quad (3)$$

式中 ω —角频率;

Φ —初相位。

任意两相电压之间的相位角都是相差 120 度。

变压器二次侧电压波形如图 3 所示。

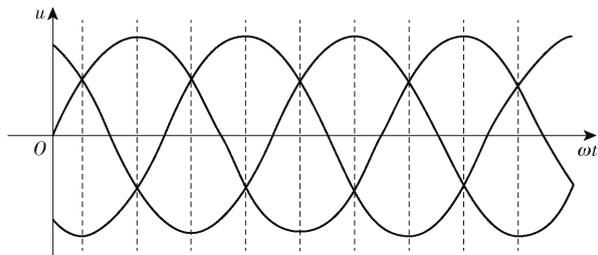


图 3 电解机组隔离变压器二次侧电压波形图

因电解机组的工艺要求,电解机组标配漏电保护功能,该功能通过一个微型断路器检测特殊位置电机外壳和隔离变压器中性点之间的电流来完成电机的漏电保护功能。

正常情况下,电机的外壳与电机的绕组之间是绝缘的,电阻值是无穷大的,电机外壳与隔离变压器中性点之间没有电压,就不会产生电流,微型断路器中没有电流流过,一直处于合闸状态,不会跳闸;一旦电机发生漏电时,电机外壳相当于某一相火线,因电机外壳和变压器中性点之间是等电位的,火线和

零线之间存在电压,自然会产生电流,使得微型断路器跳闸,微型断路器通过控制系统停止设备供电,完成电解机组特殊位置电机的漏电保护功能。

铝电解多功能机组的这一漏电保护功能,造成了变压器的中性点与电解机组的大梁等电位,变压器中性点连接于电解机组大梁这个悬浮地上。一旦发生变频器电机绝缘破坏或变频器到电机的电缆破皮单相连接到大梁,则变频器的输出电压将回到隔离变压器的中性点。

当大车变频电机一相绕组绝缘损坏单相对地(悬浮地)后,操作大车行走动作时,变频器开始运行,大车行走变频器输出的三相交流低频电压中的一相就会通过动力电缆、电机铁心、漏电保护电机保护线路、隔离变压器中性线叠加到供电变压器二次侧三相电源上。

图5的波形是施加到变压器中性点的变频电机故障相的电压波形,图6是变压器二次侧三相交流电的电压波形,由于电解机组大车行走变频器是将变压器二次侧三相交流电压整流、逆变成不同频率的三相交流电压,大车行走变频器相当于一个独立的电源,其输出的电压波形初相位、频率与隔离变压器二次侧供电不同。根据电源叠加原理,施加到变压器中性点的变频电机故障相的电压与隔离变压器二次侧的三相交流电压都将出现叠加现象,虽然变压器二次侧三相电的初相位不同,但是三相电压的幅值和频率是相等的,所以叠加后三相电压的最大值要比原来大得多,且三相电压的有效值基本相等。变频器容量越大,启动时负载电流越大,则叠加后的电压越高,其危害程度也越严重。因此当容量最大的大车行走电机单相绕组对电机外壳击穿后,电机绕组的一相和大梁等电位,造成隔离变压器绕组、变频器、电机、漏电保护回路等导体构成电流通路,大车行走变频器启动时,逆变器输出的电压频率从0 Hz 缓慢地增加,变频器输出0~50 Hz 交流电压与供电系统50 Hz 交流电压相互叠加,导致隔离变压器二次侧三相电压大幅升高,工具车变频器和出铝车变频器相对容量较小,抗电压波动的能力相对较小,所以工具车行走变频器、出铝车行走变频器整流单元同时烧毁。

3 解决方案

更换大车行走驱动电机、工具车行走变频器、出

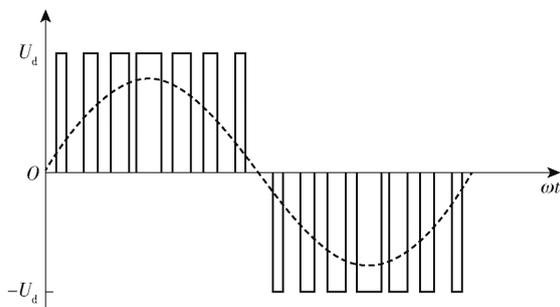


图5 变频器输出的漏电相电压波形图

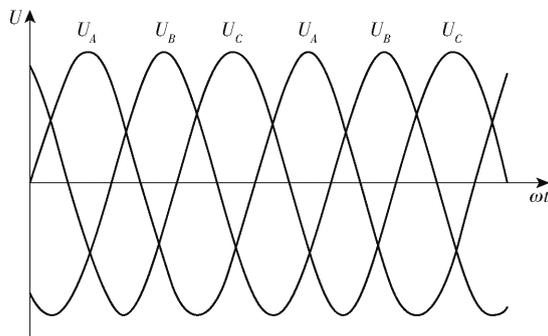


图6 三相电源波形图

铝车行走变频器,变频器上电后调整参数后,设备恢复正常运行,在大车行走变频器处于运行状态时,多次测量电解机组隔离变压器二次侧电压,没有明显过高的情况。设备恢复了正常运行,但并没有真正解决问题,应该找到解决变频电机绝缘击穿或变频器到电机之间的电缆破损造成单相对地(悬浮地)烧毁变频器的办法。

从以上的分析可以看出,在出现变频电机绝缘故障或变频器到电机之间的电缆破损造成单相对地的情况时,隔离变压器的二次侧电压会有明显升高,可以考虑通过一种瞬时反应的过压保护器实时监测隔离变压器二次侧电压。在铝电解多功能机组的控制系统中,在隔离变压器二次侧增设超压保护装置和变频器供电控制接触器,超压保护装置检测到过电压的情况,立即向控制系统发出过电压信号,控制系统 PLC 执行之前设定好的程序,断开变频器供电控制接触器,变频器供电电源断开停止故障电机回路中变频器的输出,避免造成其他变频器及该变频器本身的烧毁问题。同时,在控制系统的触摸屏上给出报警画面弹出对话框,提示故障原因及处理方案。其电气原理图如图7所示:

GY01 时刻监测着 T1 二次侧的电压,一旦出现变频器输出电缆单相对地造成 T1 二次侧电压升高,

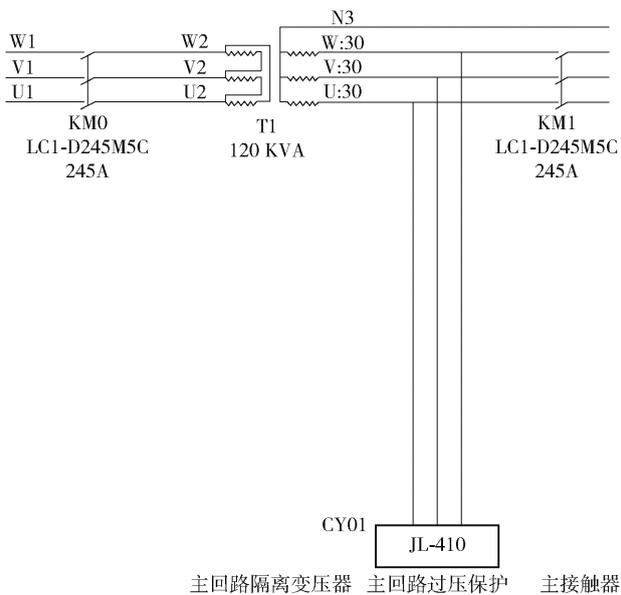


图 7 过压保护电气原理图

则 GY01 立即动作,并将控制信号发送到 PLC,PLC 根据内部程序,立即将 KM1 断开,KM1 下面的变频器立即断电,同时进行声光报警,避免造成损失。

为了保证该保护功能的稳定可靠,选用瞬断型超压保护装置,避免动作时间过长起不到对变频器的保护作用,这一点是解决方案的关键所在,为了确

认方案的可行性,控制系统增设过压保护器及变频器电源控制接触器后进行了现场模拟试验,模拟电解机组大车行走变频器输出电缆单相接地,过压保护立刻动作,在变频器没有出现任何问题的情况下,控制系统及时断开了变频器供电控制接触器,触摸屏弹出故障报警对话框,给出了故障原因和处理方案。

4 结束语

通过对电解机组变频器发生单相接地故障造成变频器集中烧毁的分析,阐明了变频器集中烧毁的具体原因,并根据分析结果提出了具体的措施和解决方案。该技术经过现场长期运行,有效保护了变频器,性能稳定、判断准确、得到了良好的使用效果。

[参考文献]

- [1] 白保东,关世海,刘万年,等.大型铝电解操作天车的电磁场计算及受力分析[J].金属材料与冶金工程,2010,38(5):22-26.
- [2] 赵新民.磁场环境对铝电解多功能机组运行的影响[J].有色设备,2010,24(1):5-9.
- [3] 闫照文,苏东林,李朗如,等.基于 ANSYS 分析的铝电解槽电磁场计算方法[J].电机与控制学报,2005(4):31-34.

Fault Analysis of and Solution to Single-phase Grounding of Frequency Converter in Electrolytic Unit

GAO Ying

Abstract: With the rapid development of Chinese electrolytic aluminum industry and the continuous progress of automation and automatic control technology, frequency converters have been widely applied in electrolytic units. In a decade of application, many users have reported that during equipment operation, the damage of the frequency converter causes failure of single-phase grounding or the cable between the frequency converter and the motor, resulting in single-phase grounding on the output side of the frequency converter and eventually simultaneous burning of multiple frequency converters, and no reasonable solution has been found. This paper conducts a detailed theoretical analysis on the problems raised, and introduces the working principle of the frequency converter and the special technology of the electrolytic unit related to the fault. Combined with the field situation, the reason for the centralized burning of the frequency converter is found, based on which a solution is provided through voltage monitoring in the design. And the solution is proved by field test and long-term operation, showing good results.

Key words: electrolytic unit; pulse width modulation; single-phase grounding; power superposition ▲