

DOI: 10.3969/j.issn.1001-4551.2013.04.027

# 某光伏行业多晶硅还原炉变压器烧毁实例分析

苟大斌, 严曜晖

(昆明冶研新材料股份有限公司, 云南 曲靖 655000)

**摘要:** 针对多晶硅还原炉变压器三相运行时的不平衡能力问题和调功柜电源工作时,调整线圈抽头会产生高次谐波等引起变压器线圈局部过热的绝缘问题,采用了低压侧最大档到最小档抽头电流线圈,按照“由外向内顺序靠近铁芯排列”布局,同时将各相高压线圈做成上下部两个线圈、中间分开应用制造技术;通过对还原炉变压器A相高压侧线圈和三相低压侧线圈层间短路故障数据的研究,分析了还原炉变压器绕组结构的合理布局与线圈绝缘能力好坏的关系,提出了改善绕组排列和铁芯结构工艺、增加外部风扇散热等方法;在制造工艺及运行条件上,针对还原炉变压器与调功柜配合所产生的高次谐波量进行了专门设计。最后,通过现场改善变压器运行环境及工艺结构等技术措施进行了试验,结果表明,变压器的抗谐波及不平衡能力得到增强,后期未再出现短路烧毁事故。

**关键词:** 光伏行业; 多晶硅; 还原炉变压器; 调功柜; 绕组结构; 高次谐波; 烧毁事故

中图分类号: TM407 文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2013)04-0497-04

## Analysis of a PV industry polysilicon reduction furnace transformer burned instance

GOU Da-bin, YAN Yao-hui

(Kunming Metallurgical Research Materials Co. Ltd., Qujing 655000, China)

**Abstract:** Aiming at solving the polysilicon reducing furnace transformer operation when the balance ability and power regulating cabinet power supply work adjustment coil tap will generate harmonics caused by local overheat problem of transformer coil insulation, a low voltage maximum to minimum current tapped coil, in accordance with the "outside-in sequence near the core arrangement" layout, and the high-voltage coil into two upper and lower coils, the middle application of manufacturing technology was used. According to reduce furnace transformer A phase high confining ring and low confining spheres of the three-phase short-circuit fault data analysis, the relationship between the reducing furnace transformer winding structure reasonable layout and whether the coil insulation ability is good or bad was analysed, improving winding arrangement and core structure process was proposed. The method of increasing the external fan cooling, consideration on reduction furnace transformer on manufacturing process and operation conditions and the adjustment work are producing the high order harmonic are content special designs, and through improving running environment and process structure and other technical measures tests. The results indicate that the capacity of the resistance of harmonics and unbalancedness of the reducing furnace transformer is enhanced, short-circuit burned accident does not occur again.

**Key words:** photovoltaic (PV); polysilicon; reduction furnace transformers; power adjust cabinet; winding structure; high harmonics; burned accident

## 0 引言

伴随着国际上节约能源、减排二氧化碳的潮流,近年来受市场行情及欧美双反影响,我国光伏行业正处于严寒冬季的整合阶段。众所周知,目前国际上采

用改良西门子法生产的多晶硅约占全球总产量的85%。主要是在温度为1 050 ℃~1 150 ℃时,在还原炉内主要发生下列反应:  $\text{SiHCl}_3 + \text{H}_2 = \text{Si} + 3\text{HCl}$  (氢化还原反应)<sup>[1]</sup>。而多晶硅还原炉是多晶硅生产过程中非常关键的设备,在其炉内完成从  $\text{SiHCl}_3$  到多晶硅的生产

收稿日期: 2012-11-01

作者简介: 苟大斌(1977-),男,云南曲靖人,主要从事电气工程一、二次设备技术及新能源电气工作。E-mail: kmyygd@126.com

工艺环节,控制好炉内温度,直接关系到其内硅芯的还原纯度和最终多晶硅产品质量的优劣,因而为还原炉提供加热电源的还原炉变压器设备就担负着非常重要的作用<sup>[2]</sup>。

研究者一致对还原炉变压器局部发热问题进行分析改进,还原炉变压器工作时,三相绕组电流工作不平衡严重,超过20%,达到50%以上,但高低压负载功率基本平衡,在7%~15%以内。在调功柜可控硅切换变压器抽头工作时,也容易产生高次谐波含量,这样对变压器的绝缘要求和抗谐波能力就非常高。

本研究通过对一起多晶硅还原炉变压器的烧毁事故研究分析,采取改变通风散热能力、绕组结构、加强工艺调整等措施,以增加其抗谐波及耐热能力。

### 1 某还原炉变压器结构及故障现象

首先,多晶硅还原炉设备(包括一体化电源设备)原理是对硅芯击穿后,通过逐步提供硅芯的大电流产生炉子温度,通过炉子内气体的物料置换,在硅芯上生长出高纯度的多晶硅。还原炉的一体化电源设备中,其中变压器就是提供给调功柜设备的电源设备,绕组一般是高压绕组三相角形连接,低压侧分相单独工作,各带对棒硅芯进行工作。运行时根据工况受各

对棒硅芯生长影响,电流不平衡因素大,但负载容量基本平衡,对应到高压侧三相绕组电流基本平衡,但变压器内部电磁转换对铁芯及绕组的影响较大,工艺及抗谐波、不平衡能力必须特别强<sup>[3]</sup>。

某光伏行业多晶硅企业购买的还原炉变压器为德国某厂家生产的12对棒式变压器,主要性能参数如图1、图2所示。

从图1、图2中可以看出,高压侧绕组容量比低压侧负载容量大,为角形连接,低压侧带4个抽头、1个公共抽头的接线方式。其中二次绕组2A(B、C)1抽头为公共绕组,2A(B、C)2→5→4→3抽头依次分别由高电压向低电压、小电流向大电流、小容量向大容量逐步调档变化。在提供负载电源时,本研究由负载的调功柜设备,通过可控硅导通/截止的调功,切换变压器档位,实现还原炉硅芯的供电,确保还原炉根据负荷的变化供给对应的电力。

该多晶硅企业在2011年10月份投入还原炉进行生产,2012年6月份在一次投入12对棒的还原炉运行中,炉内硅芯刚击穿,加热器退出运行,物料开始置换,电源设备变压器带调功柜运行正常。20 min后,10 kV还原炉变压器综合保护器“速断保护动作”、“过负荷报警”,开关跳闸,220 kV主变故障录波“故障录

Hochspannungstechnik und Transformatorbau GmbH Hanu, Münden/Germany							
3 -Phase transformer							
○	Type	GDGN 4535/17,5-spez		No.	*	DIN VDE 0532/ 97	○
	Protection class	IP00	Connection symbol	D iii	Fabrication	2008	
System	1	2			Rated frequency	50 Hz	
Rated Power	2 544*) kVA	2 544*) kVA		kVA	Sym,short-circuit current	kA	
Rated voltage	6-5	10 500 V	V	V	Short-circuit duration max.	2 s	
	5-7	102 500 V	V	V	Win ding material HV/LV	Cu/Cu	
	7-4	10 000 V	3×265*)	V	V	Thermal class HV/LV	F/F
	4-8	9 750 V	V	V	V	Environmental class	E2
	8-3	9 500 V	V	V	V	Firebehaviour class	F1
		V	V	V	Climatic Class	C2	
Rated current	147*) A	3 200*) A	A	A	Total-weight	9 930 kg	
Impedance volt		%	%	%	Oil-weight	kg	
○	Um	17,5 kV	3,6 kV	kV	Cooling medium		○
	LI/AC	75/35 kV	-/10 kV	kV	Cooling method	AN	
*)See connection diagram 2 791.002							E10/10

图1 铭牌参数

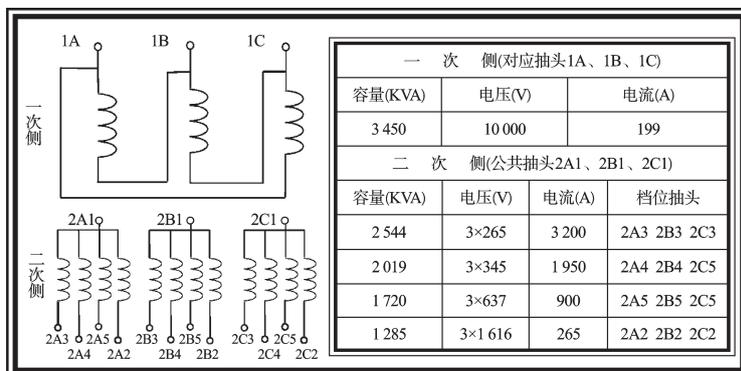


图2 电气绕组接线

波启动”记录故障波形,过负荷后备保护启动未跳闸,调功柜负载端发“可控硅故障”信号至DCS系统报警。

故障现象外观显示如图3、图4所示。



图3 A相和B相间故障上部外观



图4 B相故障绕组上部外观

如图4所示,外部颜色已变黑,具体位置造成变压器A相高压侧绕组靠多个抽头处剥裂,冷却风孔已堵塞;低压侧2A2抽头根部有带根熔断现象,但还没有全部熔断,各抽头连接排与母排连接板上有点状铜熔现象,2A2端子排与2A5端子排间可见明显短路铜熔点,靠铁芯处及线圈已部分发黑,地上有黑状粉末;B相低压侧2B2抽头根部有带根熔断现象,但还没有全部熔断,各抽头连接排上有点状铜熔现象,靠铁芯处及线圈已部分发黑;另外车间高温夹套水泵跳闸。

## 2 变压器烧毁原因分析

### 2.1 烧毁情况诊断

本研究事后对220 kV主变故障录波检查,所记录的10 kV系统故障前后参数如表1所示。

表1 10 kV故障前后运行参数比较

故障时间:21点24分18秒,短路时长70 ms~80 ms		
	故障前	故障时最大值
A相短路电流/A	9.6	7 500
B相短路电流/A	9.0	7 300
C相短路电流/A	9.2	1 100
A相电压/kV	5.86	1.6
B相电压/kV	5.8	4.4
C相电压/kV	5.8	8.2
零序电压/kV	0	5.8

本研究对还原炉干式变压器检查,测量变压器绕组绝缘对地合格,直流电阻与出厂数据比较如表2所示。

表2 故障后变压器直流电阻与出厂比较(单位:mΩ)

	出厂数据	故障后数据
A、B、C相高压侧直流电阻	315.3/315.2/315.3	无穷大/316.4/316.1
A相低压侧电阻:		
2A1-2A2	19.578	18.46
2A1-2A5	1.926	1.972
2A1-2A4	0.409	0.511 3
2A1-2A3	0.268	0.183 7
B相低压侧电阻:		
2B1-2B2	19.559	18.43
2B1-2B5	1.926	1.950
2B1-2B4	0.409	0.432 8
2B1-2B3	0.266	0.246 9
C相低压侧电阻:		
2C1-2C2	19.574	18.93
2C1-2C5	1.939	2.136
2C1-2C4	0.421	0.502 4
2C1-2C3	0.28	0.294 9

通过以上数据分析可知,保护动作可靠<sup>[4]</sup>,记录正确,未出现越级跳闸,变压器故障时A相绝缘击穿短路,逐步形成AB相间放电接地短路扩大至其他线圈故障,造成A相高压侧开路烧断;A相低压侧3档、4档匝间短路烧坏;B、C相低压侧有匝间短路情况,具体需要工作人员排除测试时接触电阻原因拆开检查。

### 2.2 原因分析

原因主要分析如下:

①该干式变压器没有冷却风机进行强迫风冷,出现局部过热热量不能及时带走;②设备二次绕组大电流档排列在铁芯内侧,小电流档绕组排列在外侧,靠近铁芯部位的发热情况更加严重,排列出现问题(依此从外到内是抽头2→5→4→3);③外部高压绕组上、下绕组没有分开,中间漏磁少,局部发热严重;④外部绝缘真空浇注工艺不到位,已出现局部龟裂现象,防潮、尘效果下降;⑤现场环境湿度太大,墙面和地上均有水汽覆盖在表面上;⑥工艺调整不稳定;⑦DCS系统检测到电源消失发“可控硅故障为正常现象;⑧瞬间的电压波动,造成相邻低压系统水泵的跳闸等。

基于以上原因造成了变压器的烧毁,企业对原有的变压器采取了以下改进措施,避免变压器的再次烧毁:①对所有变压器加装强迫风冷装置,在70℃就启动运行;②对变压器本身结构工艺能进行修补处理的加以改进;③加装空调设备,改善环境情况;④改进工艺调整,使变压器工作尽量平衡;⑤排查变压器与调功柜之间谐波产生源问题的处理;⑥对后期采购的干式变压器抗谐波及不平衡能力严格执行技术规定,特别是在结构排列及工艺材料上把关,杜绝不合格设备的引进等。

### 3 多晶硅还原炉变压器绕组结构

根据以上故障及原因分析研究可知,变压器一般铁芯构造与正常使用的变压器无异,只是工艺要求更高,绕组结构应考虑以下因素。

#### 3.1 低压绕组布局

低压侧绕组随抽头档位的不同依次由铁芯往外,小电流的线圈靠铁芯在最内侧,最大的电流(如二次绕组第5档)在外侧,最外侧再套上高压绕组。这样在靠近铁芯最近处由于铁芯磁电装换,损耗的问题,运行中铁芯最热,靠近铁芯的绕组电流是最小的,叠加起来的热量就不会太大;如果大电流靠近铁芯分布,离铁芯越远的小电流绕组分布,则靠近铁芯的温度随大电流和铁芯热量的叠加,温度会越高,靠外的小电流绕组温度会很低,则相互之间的温差更会很大,就会出现内部的特别高,离铁芯远的绕组不会升得太高,引起绕组的变形及局部过热<sup>[5]</sup>。

#### 3.2 层间绝缘材质

本研究中的一、二次绕组同为箔式结构,层间绝缘材料采用聚酯薄膜,以高韧性添加硅微粉环氧树脂体系,在严格的真空条件下浇注,并进行长时间的固化和应力消除处理,使得变压器的安匝平衡更容易保证,产生的短路力远小于电磁线绕组,既减少了因横向漏磁引起的绕组附加损耗,又提供了更好的导热性能,绕组内部热点分布更加均匀。

#### 3.3 高压绕组结构

由于箔式结构具有层间电压低、端部电场畸变小的特点,设计中研究者可以选取合适的纵绝缘和主绝缘,使箔式高压绕组获得优异的抗雷电冲击性能。同时对于外部高压绕组,为了降低中间局部的绕组发热集中问题,研究者一般将高压绕组做成上、下两个绕组,中间部分分开一定距离,增加漏磁。

#### 3.4 高次谐波含量

多晶硅还原炉用干式变压器在工作中负载(调功设备在硅芯上进行电源控制)对电压电流有特殊的技术要求,研究者在设计时需要考虑波形畸变引起的3、5、7、9、11、13次等谐波的影响,其中,一般3次谐波含量最大值42%,5次谐波含量最大值18%,7次谐波含量最大值15%,9次谐波含量最大值9%,11次谐波含量最大值7%,13次谐波含量最大值6%<sup>[6]</sup>;同时还要考虑到电流有效值一定但是电流峰值较大的情况,电流波形占空比最坏情况为50%,这样在制造时考虑进口材料作为首选材料。铁芯选用进口优质冷轧高导磁晶粒取向硅钢片(日本),采取5步以上进叠方式,表面涂专用高强度聚酯带经高温固化,使铁芯成为一整体。

### 3.5 绝缘等级

系统在运行中很容易出现温度过高的的问题,所以绝缘等级考虑在H级上<sup>[7]</sup>,部分达到C级以上,在温度较高时系统通过温控装置启动冷却风机进行强迫风冷,确保热量带走,控制温升,增加绕组的绝缘能力。

## 4 结束语

多晶硅还原炉变压器是多晶硅还原炉在生产过程中非常关键的设备,根据工作要求,该种变压器既需要满足调压要求,又需要为调功电路提供精确的抗阻值。具体要求如下:在使用过程中要求变压器具有良好的抗短路能力和抗系统电源谐波能力;在还原炉工作初期,硅芯直径细,阻值大,需施加较高电压,变压器电感要求大;随着硅的沉积,硅芯直径逐渐变大,阻值变小,需要较低电压,变压器电感要求低<sup>[8]</sup>。在整个工作过程中,变压器需要输出的电流从100多安增到几千安;电压从1 000多伏降低到几百伏。

因此,对于还原炉变压器的制造工艺及应用有一个很高的技术要求,制造时必须考虑高次谐波问题、温升问题、不平衡问题、浇注工艺及材料等<sup>[9]</sup>。技术上生产厂家都有不同的方法及工艺来进行处理,在实际生产中同时要多方面考虑还原炉与调功柜的匹配设计能力,不要让部分二次绕组过载或轻载,要控制局部温升,尽量减少高次谐波的冲击,增强变压器滤波能力,加装浪涌保护器,改善环境温度等<sup>[10]</sup>,同时根据实际情况制定正确的工艺参数,使还原炉系统电气设备在允许范围内正常工作,产出纯度极高的多晶硅。

#### 参考文献(References):

- [1] 龙桂花,吴彬,韩松,等.太阳能级多晶硅生产技术的发展现状及展望[J].中国有色金属学报,2008,18(z1):386-392.
- [2] 凌猛,赖喜德,刘东旗,等.多晶硅还原炉炉膛内的辐射传热模型研究[J].机械设计与制造,2009(4):125-127.
- [3] 黎文安.特种变压器:电气设备手册[M].北京:中国水利水电出版社,2007.
- [4] 方晖洋.电力系统变压器微机保护的研究[D].长沙:湖南大学电气与信息工程学院,2009.
- [5] 丁明军.一种实用的变压器绕组制作方法[J].机电工程,2001,18(4):72-74.
- [6] 马文雅,王丙奇.变压器高次谐波及其对单相接地电流的影响[J].电工技术,2004(11):63-64.
- [7] 保明会.变压器负载分配异常分析[J].变压器,2012,49(5):77-79.
- [8] 毛涛涛,李超林,毋克力,等.浅谈大功率多晶硅还原炉电源系统[J].有色冶金节能,2010,26(6):50-53.
- [9] 王建华.变压器:电气工程师手册[M].3版.北京:机械工业出版社,2006.
- [10] 郭云才,韦良文,张海燕,等.某油井雷击灾害调查分析及防护措施探讨[J].高压电器,2012,48(1):114-117,121.

[编辑:李辉]