

国外可控硅中频电源

上海市电动工具研究所 编译

上海科学技术情报研究所

TN 34
5023

前 言

可控硅静止变频器是一种把三相工频电流变换成单相中频电流的装置。这种装置和原有中频发电机组相比,具有效率高,重量轻,噪音小,启动快,制造工艺简单等优点。应该着重指出的是,可控硅变频器装置还具有自动调频的特点,这是中频发电机组所无法比拟的。因此,可控硅静止变频技术自本世纪六十年代初期开始发展以来,引起了各方面的重视。据了解,在国外,此种装置已形成了系列化生产,并被广泛应用于金属的感应加热,诸如熔炼、热处理、锻压、钎焊、弯管等方面。

我国的可控硅静止变频技术从开始研究算起,至今不过短短几年时间,但在党的“九大”团结胜利路线指引下,发展却很快。

为了促进我国可控硅变频技术的发展,在不远的将来赶上和超过世界先进水平,我们遵照伟大领袖毛主席关于“洋为中用”的教导,将近几年来结合科研工作搜集翻译的国外可控硅变频技术方面的有关资料整理出版,供从事这方面工作的工人和技术人员参考。

本专辑主要是收集国外频率在 2,500 赫以上的几种可控硅逆变器线路。此外,还适当收集了一些可控硅在应用频率增高时的开关损耗、线路保护以及可控硅中频装置的应用等方面的资料。在编译时,对于那些故弄玄虚,宣扬唯心主义,自我吹嘘的内容,作了适当的删改。但由于我们水平有限,本专辑在内容和译文质量等方面,可能有不少错误和缺点,殷切地期望读者批评指正。

上海市电动工具研究所

1973 年 8 月

毛主席语录

中国人民有志气，有能力，一定要在不远的将来，赶上和超过世界先进水平。

自力更生，艰苦奋斗，破除迷信，解放思想。

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

打破洋框框，走自己工业发展道路。

目 录

1. 国外可控硅中频电源及其应用	(1)
2. 金属感应加热用可控硅增频变频器	(9)
3. 电热用大功率单相逆变器新线路	(13)
4. 可控硅高频并联逆变器线路的研究	(18)
5. 感应加热用静止高频电源的最新发展	(30)
6. 四桥串联逆变器	(47)
7. 装有反接二极管的四桥串联逆变器	(52)
8. 在串联振荡回路变频器中对可控硅的要求	(57)
9. 感应加热和熔炼用的高频电源	(66)
10. 可控硅高频应用电路的设计	(72)
11. 硅整流元件高频损耗	(80)
12. 快速可控硅高频电流额定值	(85)
13. 保护回路的设计	(89)
14. 保护可控硅用的快速熔断器	(96)
15. 可控硅变频器直流母线故障电流的测定	(104)
16. 大功率可控硅用的熔断器保护	(110)
17. 锻坯的感应加热	(121)

国外可控硅中频电源及其应用

(综述)

一、概 况

用于感应加热的中频电源是一种将三相工频转变为单相中频的装置。自 1892 年诞生了第一台中频发电机组(由一台直流电动机和一台同步发电机组)以来,中频感应加热已在金属熔炼及金属加热等方面得到广泛的应用。

虽然早在 1931 年^[1]就有人提到过静止变频器,在 1948 年还曾制成以水银汞弧整流器作为电子开关得到频率为 3,000 赫的静止变频器^[2]。但在可控硅问世以前,静止变频器并未得到广泛的应用。直到 1958 年第一只 200 伏 50 安可控硅诞生以来,随着可控硅容量的不断增加和快速可控硅的出现,静止变频器才有可能得到迅速的发展。目前,这种装置有取代中频发电机组的趋势。

可控硅静止变频器最早在欧洲一些国家试制成功。1966 年瑞士 BBC 公司发表了第一台功率为 750 瓩、频率为 1,000 赫的可控硅中频电源,供瑞士一家翻砂厂应用,线路采用并联逆变,炉子电压为 1,400 伏^[3]。西德 AEG 公司在 1966 年报道制成了 840 瓩、500 赫的串联逆变器,炉子电压为 3,000 伏^[4]。1967 年,法国来克西(Lexy)一家钢管厂安装了由西德西门子公司生产的 12 台功率为 700~1,500 瓩、频率为 500~1,000 赫的可控硅变频器,供钢管加热用,其总容量为 10,000 瓩。到 1968 年大约已有 15 台大小不同的可控硅静止变频器投入了实际应用,工作频率最高为 4,000 赫。据介绍,1969 年 8 个月中就生产了 20 多台频率为 500~4,000 赫的可控硅静止变频器^[5]。到七十年代初,瑞士 BBC 公司及西德 AEG 公司均已制成了中频感应加热装置的系列^[6,7]。1970 年又报道 BBC 公司制成了 2 台单机容量为 2,200 瓩、频率为 500 赫可控硅中频装置,其中一台已在 1970 年 5 月开始运行^[8]。最近该公司又报道制成了 1,000 瓩、1,000 赫水冷式可控硅静止变频器,并认为利用水冷结构可制成 4,000 赫及几个兆瓦的可控硅中频装置^[9]。

日本在发展可控硅中频电源方面较瑞士、西德为迟,但近几年来发展很快。三菱电机公司 1971 年报道制成了 3,000 赫、300 瓩、800 伏的可控硅中频电源装置,并已完成了 500~3,000 赫可控硅中频装置的系列^[10]。

东芝公司 1969 年已制造了 1,200 瓩的大功率可控硅中频电源,其频率为 500 赫^[11]。到 1971 年则制成了单机容量为 1,800 瓩的可控硅中频电源,并完成了频率从 500~3,000 赫,功率从 150~1,800 瓩,电压为 1,100 伏的产品系列^[12]。

日本高周波热鍊公司 1973 年前完成了频率为 1,000 赫、3,000 赫、10,000 赫,功率从 25~720 瓩的可控硅中频装置系列。并制成了 10,000 赫、100 瓩的可控硅中频装置,其外形尺寸为 1,000×2,000×1,200 毫米^[13]。

美国在发展可控硅中频电源方面较西欧、日本为迟,到 1968 年才有较显著的发展。但

是,逆变器线路的形式较多。据报道^[14],主要有下述几种线路:额定功率为250瓩、频率为180~1,000赫采用并联逆变线路;额定功率为200瓩、频率从2,000~3,300赫采用串并联线路;额定功率为120瓩、频率为8,000~11,000赫采用时间分割式线路。同时又报道了采用交流-交流的直接变频线路,并制成了功率为100瓩、频率为700~1,000赫的中频装置^[15]。1972年报道已制成频率为950赫、功率为1,000瓩的可控硅中频装置^[16]。

苏联到七十年代初才报道采用倍频线路制成了2,500赫、100瓩的可控硅中频装置^[17]。并开展了四串联桥线路试制10,000~20,000赫可控硅中频装置的研究^[18]。

据最近了解,国外发展的可控硅中频感应加热装置,按其用途大致可分为两类:一类主要是用于金属熔炼及钢材透热,频率一般为180~2,500赫,单机容量在400~2,000瓩,其特点是朝低频(1,000赫以下)、大容量方向发展^[8,12,19];另一类主要是用于淬火及焊接,其频率在8,000~11,000赫,功率在200瓩以下,其特点主要是提高频率^[13,14,18,20,21]。

各国发展可控硅中频电源的概况列于表1。

表1 各国可控硅中频电源生产概况

国 别	容 量 (瓩)	频 率 (赫)	备 注
瑞 士	40, 60 65 110, 165, 280 410, 1,000 920, 2,200	10,000 4,000 2,000 1,000 500	采用并联逆变线路,已完成系列
	ASEA 公司	600	600
西 德	840, 1,000	400~4,000	小容量用并联逆变线路,大容量用串联逆变线路
	100	25,000	采用时间分割式线路
日 本	800~1,500 150 250	500 200~4,000 4,000	采用并联线路
	三 菱	300	3,000 以下
美 国	150, 300, 600 1,200, 1,800	500(430~520)赫或 1,000(860~1,040)赫	采用并联逆变线路,电压为1,100伏
	高周波热鍊公司	25~720	1,000 3,000 10,000
苏 联	225/250	180~1,000	并联逆变线路
	200	2,000~3,300	串并联逆变线路
	120	8,000~11,000	时间分割式线路
	100 350	700~1,000 1,000	直接变频(交流-交流)
	1,000	950	
民 德	100 800	2,500 800~1,500	倍频线路
		10,000~20,000	四串联桥线路
民 德	100 25	5,000 以下 10,000	倍频线路

可控硅中频装置和中频发电机组相比具有效率高、噪音小、重量轻、占地少等优点；特别是随着负载变化能自动调频而不需切换电容器，这是中频机组所无法比拟的。因此，国外正在大力发展可控硅中频装置，有替代发电机组的趋势^[22]。可控硅中频装置和中频发电机组的比较见表 2。

表 2 中频电源装置比较表

比较项目	可控中频装置	中频发电机组	比较项目	可控中频装置	中频发电机组
启动	可瞬时启动	容量愈大，启动愈麻烦	噪音及振动	小	大
停止	如遇短路，能在几毫秒内自行关断	惯性大，不易停止	重量	为机组的 40~50%	重
负载功率因数	自动调整	需要调整	占地面积	小	大
效率	90~95%	80~85%	搬移	容易	困难
空载损耗	0.5~1%	5~10%	安装工程	容易	比较困难
			维修	方便，无磨损件	有磨损件

二、可控硅中频装置的应用

由于可控硅中频装置具有上述许多优点，因此近几年来国外已将可控硅中频装置广泛地用于金属感应加热，诸如熔炼、透热、热处理、焊接等方面。

大大提高劳动生产率，实现了生产自动化。

1. 在熔炼方面的应用

国外在发展可控硅中频装置时，一开始就用于熔炼。如 BBC 公司在 1966 年设计的第一台 750 瓩、1,000 赫可控硅中频装置就是用于熔炼，平均熔化一吨铸铁的耗电量为 500 瓩小时左右。在以坩埚式熔炼炉熔炼金属时，通常按下式来选择最低频率：

$$f_{最低} = \frac{25 \times 10^8 \rho}{d^2} \quad (1)$$

式中 d ——坩埚炉直径(厘米)；

ρ ——体积电阻率(欧姆-厘米)。

因此从耗电角度看，国外在五吨以下的感应炉，采用中频炉熔炼的比较多，而工频感应炉则大多用在 10 吨以上。另外由于中频炉熔炼起动方便，不需开炉块或留少量熔池，同时涡流搅拌较小，熔炼的质量比工频炉好，因此可控硅中频炉已广泛地用于熔炼合金钢、合金铸铁、轻金属及有色金属等方面。在这方面，瑞士 BBC 公司、日本东芝公司已相继完成了可控硅中频装置的系列(分别见表 3 和表 4)。

表 3 BBC 公司可控硅中频装置系列

型 号	输出功率(瓩)	输出频率(千赫)	型 号	输出功率(瓩)	输出频率(千赫)
GL 40/10T	40	10	GL 165/2M	165	2
GL 60/10T	60	10	GL 280/2M	280	2
GL 65/4M	65	4	GL 410/1T	410	1
GL 110/2M	110	2			

表4 东芝感应炉用可控硅中频装置

输出功率 (瓩)	频率 (变化范围) (赫)	输出电压 (变化范围) (伏)
150 300 600 1,200 1,800	500 (430~520) 或 1,000 (860~1,040)	1,100 (450~1,100)

西德 AEG 公司亦已完成了中频感应炉的系列 (见表5), 并按此系列生产可控硅中频电源。日本的神钢电机公司亦按 AEG 公司的系列生产了 150 瓩 1,500 赫, 300 瓩 1,000 赫的可控硅中频熔炼装置。

表5 AEG 公司中频感应炉系列

型 式	炉 容 量 (公斤)	输出功率 (瓩)	频率范围 (赫)	型 式	炉 容 量 (公斤)	输出功率 (瓩)	频率范围 (赫)
MTG	630~10,000	400~3,000	300~600	MTM	50~150	50~200	2,000
MTK	100~500	100~700	1,000~2,000	MTH	50~150	50~200	2,000~4,000
MTV	50~150	50~200	2,000~4,000	MTL	5~25	12~30	5,000~10,000

可控硅中频装置的输出功率和熔炼特性见表6。熔炼特性按钢水温度 1,600°C, 取铸铁温度为 1,450°C, 均不包括保温和出钢出铁时间。

从表中可以看出, 随着感应炉功率的提高, 熔炼时的单位耗电量均有所降低。但功率进一步增加, 则单位耗电量降低不大, 因此当前国外的单机容量一般在 300~2,000 瓩, 频率在 500~1,500 赫之间。

表6 输出功率和熔炼特性

功 率 (瓩)	容 量 (公斤)	钢 熔 炼		铸 铁 熔 炼	
		熔 炼 时 间 (分)	熔炼耗电量 (瓩·小时/吨)	熔 炼 时 间 (分)	熔炼耗电量 (瓩·小时/吨)
300	500	75	700	70	620
	750	120	740	105	640
	1,000	170	800	150	680
600	1,000	70	640	60	560
	1,500	105	670	90	570
	2,000	160	720	130	600
900	1,500	65	610	60	530
	2,000	90	640	80	540
	3,000	150	690	120	570
1,200	2,000	65	600	55	520
	3,000	125	640	90	540
	5,000	180	680	150	560
1,500	2,000	50	580	45	510
	3,000	80	600	70	530
	5,000	140	640	120	550
1,800	3,000	65	580	55	510
	5,000	105	600	95	520
	8,000	180	640	160	540

2. 在透热方面的应用

可控硅中频电源很早就被用于钢管及钢板的加热。例如, 1967 年西门子公司供应给法国一家钢管制造厂一套可控硅中频装置, 就是用于加热直径为 172 毫米、管壁 4 毫米的钢管, 最高加热温度为 1,100°C, 生产能力为 30 吨/时。

又如 Elektrowärme 1970 年报道一台 1,760 瓩、2,000 赫的可控硅中频装置每小时能加热 4.4 吨, 80×250×900 毫米和 40×200×900 毫米的合金钢扁钢坯。

由于中频炉加热时间短, 加热时几乎没有或仅有少量的氧化皮, 因此氧化皮造成的重量损失少于 0.5%; 而煤气炉由于氧化皮造成的重量损失则高于 2.0%。同时中频炉没有污染, 且维护容易。因此国外不少钢材热加工车间在逐步采用可控硅中频装置进行加热。可控硅中频装置与煤气炉的技术经济指标对比见表 7^[5]。

表 7 中频感应加热炉和燃烧式加热炉的比较

计算根据	产 量	4,850 吨/年				
	操作时间	4,000 小时/年(以二班计算)				
	工作率	80%				
	单位时间产量	4,850/4,000×0.8=1.51 吨/小时				
	燃烧炉升温时间	400 小时/年(浪费时间)				
	在燃烧炉中保温时间	2,400 小时/年(浪费时间)				
	材 料 费	700 马克/吨				
	锻造产品成本	1,600 马克/吨				
	发 热 量	能 量 单 价				
煤气	4 兆卡/米 ³	1.6 分尼/兆卡				
重油	18 兆卡/公斤	1.1 分尼/兆卡				
电	0.86 兆卡/度	8.1 分尼/兆卡				

	感 应 加 热		煤 气		重 油	
1. 单位产量所需能量(加热到 1,200°C) (兆卡/吨)	375		700		800	
燃 料 费 (马克/吨)		30.4		11.2		8.8
炉子预热及保温用能量 (兆卡/年)	0		1,454×10 ³		1,673×10 ³	
折 合 燃 料 费 (马克/吨)		0		4.8		3.8
总 燃 料 费 (马克/吨)		30.4		16.0		12.6
2. 设 备 费 (马克)	350,000		175,000		175,000	
10 年 偿 还 (马克/吨)		7.2		3.6		3.6
3. 氧 化 皮 损 失 (重量%)	0.5		2.5		2.5	
(马克/吨)		3.5		17.5		17.5
4. 废 品 (%)	0.5		2.0		2.0	
(马克/吨)		8.0		32.0		17.5
合 计 (马克/吨)		49.1		69.1		65.7

从表 7 中可以看出, 感应加热的成本分别比煤气或重油加热降低 40% 或 34% 左右。

感应加热, 由于高频趋肤效应, 感应电流的密度是从表面到内部逐渐减少的, 同样的材料, 若频率越高, 减少得越快, 感应深度 δ 可按下式近似地计算出来:

$$\delta = 5030 \sqrt{\frac{\rho}{\mu f}} \quad \text{厘米} \quad (2)$$

式中: μ ——被加热工件的磁导率;
 ρ ——工件的体积电阻率(欧姆-厘米)。
 不同频率时的渗透深度分别见图 1 和表 8^[23]。

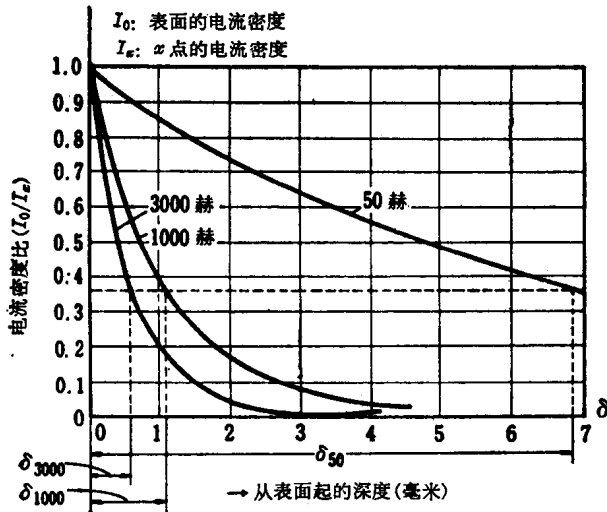


图 1 感应加热时的电流分布

表 8 电流渗透深度(厘米)

		频 率 (赫)			
		50~60	1,000	3,000	10,000
钢	常 温	0.3	0.08	0.04	0.02
	1,200°C	8.1	1.7	1.05	0.58
	熔融时	9.0	2.20	1.30	0.70
18-8 不锈钢	常 温	5.7	1.39	0.80	0.44
	1,200°C	8.3	1.85	1.06	0.59
	熔融时	9.1	2.22	1.31	0.71

对于圆柱形的小钢坯、扁钢坯、钢板等工件,其感应加热的最合适的频率见表 9^[24]。

表 9 加热圆柱形钢坯、扁钢坯、钢板等(1, 250°C)的最合适频率

频 率 (赫)	圆柱形钢坯直径 (毫米)	扁钢坯及钢板厚度 (毫米)	频 率 (赫)	圆柱形钢坯直径 (毫米)	扁钢坯及钢板厚度 (毫米)
50~60	200~600	150~600	3,000	30~80	20~80
500	75~200	50~200	10,000	16~45	10~45
1,000	55~150	35~150	400×10 ³	<8	<7

3. 在热处理方面的应用

国外不少钢管生产厂为了提高钢管的机械性能,采用连续感应热处理装置,其频率因钢管的直径、管壁的厚薄而异。一般,当钢管直径一定时,管壁愈薄,频率愈高。而当管壁一定时,钢管直径愈小,则感应加热的频率就愈高。据报道^[24],对于直径为 100~125 毫米,管壁 6.25 毫米的钢管,频率采用 150~500 赫较合适;对于 50~100 毫米的小直径管,频率为 1,000 赫;直径在 50 毫米以下,管壁小于 3 毫米,则根据钢管直径及管壁的厚薄,采用 3,000 赫或 10,000 赫的中频电源。

BBC 公司认为在热处理大直径管子时采用频率为 500~10,000 赫的中频电源。对于管子端部的热处理,则根据工件大小及生产率,采用频率为 1,000~4,000 赫,功率为 300~1,500 瓩的中频装置^[25]。

对于主轴的热处理和齿轮的淬火,则根据不同的淬硬层深度采用不同的频率,分别见表 10 和表 11。

表 10 主轴热处理的淬硬层深度与频率的关系

淬 硬 层 深 度 (毫米)	1.0	1.5	2.0	3.0	4.0	6.0	10
合 适 的 频 率 (千赫)	60	25	15	8	4	1.5	0.5

表 11 齿轮淬火时, 频率与淬硬层深度的关系

频 率 (千赫)	2.5	8	250
淬 硬 层 深 度 (毫米)	2.4~10	1.3~5.5	0.7~0.9

最近国外在热处理工艺上采用双频法加热, 利用不同的频率来达到不同的淬硬层深度, 提高热处理工件的质量, 并充分利用感应加热装置的效率。据介绍国外在制造内燃机螺栓时, 采用一种所谓深感应加热法, 它可使淬火层更深。如普通碳钢用中频感应加热装置进行淬火, 使淬火层深至芯部, 则其机械性能可与镍、铬、钼合金钢相媲美^[26]。由于可控硅中频装置能自动调频, 因此, 可以通过频率调节来达到不同的淬硬层深度。

4. 在焊接方面的应用

由于中频感应焊接具有焊接速度快, 对周围的热影响小, 不必用酸洗来清除氧化皮, 因此国外正在不断采用中频感应加热焊接各种金属管。BBC 公司报道采用 10,000 赫、60 瓩可移动的感应加热装置焊接汽轮发电机的水冷却管^[27]。该公司认为用于焊接的中频装置其功率在 20~200 瓩, 频率在 1,000~10,000 赫之间。

日本的高桥信夫根据式(2)计算了各种金属在不同频率时的渗透深度, 见表 12^[28]。

表 12 不同金属在不同频率时的渗透深度

种 类	频 率 (千赫)					
	10	100	200	300	400	500
软 钢 (居里点以下)	0.18	0.059	0.042	0.034	0.030	0.027
软 钢 (居里点以上)	5.3	1.591	1.125	0.918	0.795	0.711
18-8 不 锈 钢	4.264	1.350	0.954	0.779	0.675	0.604
铝	0.826	0.261	0.185	0.151	0.131	0.117
铜	0.656	0.207	0.147	0.120	0.104	0.093
七 三 黄 铜	1.252	0.396	0.280	0.229	0.198	0.177

日本专利^[21]介绍了淬火及焊接的最合适频率为 8,000~20,000 赫, 并设计了一种适合于焊接和淬火用的 10,000 赫线路。

可控硅中频装置除在上述几方面得到应用外, 还被应用于钢管的塑料涂敷、弯管等方面。

今后, 随着可控硅制造工艺的不断改进, 快速可控硅及其他特种可控硅的出现, 以及可控硅中频装置应用经验的不断积累, 可控硅中频装置必将在各方面得到越来越广泛的应用。

参 考 文 献

- [1] C. A. Sabbah, Gen. Elec. Rev., No. 5, No. 10, No. 12, 1931.
- [2] J. L. Boyer, "Inverters" in Industrial Electronics Reference Book, New York; Wiley; London; Chapman and Hall, 1948.
- [3] Brown Boveri Review, Vol. 53, No. 10, 1966, pp. 693~701.
- [4] AEG-Mitteilungen, 7 月, 1966.
- [5] Elektrowärme International, Vol. 28, No. 4, 1970.
- [6] Brown Boveri Review, Vol. 60, No.1, 1973, pp. 30~34.
- [7] 神钢电机, Vol. 17, No. 2, 1972, pp. 2~6.
- [8] Giesserei Praxis, 19, 10 月, 1970, pp. 297~305.
- [9] Brown Boveri Review, Vol. 59, No. 6, 1972, pp. 302~303.
- [10] 三菱电机技报, Vol. 45, 7 月, 1971, pp. 873~878.
- [11] 东芝评论, Vol. 25, No. 12, 1970, pp. 1530~1536.
- [12] 东芝评论, Vol. 26, No. 6, 1971, pp. 797~798.
- [13] 工业加热, No. 1, 1973.
- [14] IEEE Transaction on IEOT, Vol. IEOT-17, No. 4, 1970, pp. 297~312.
- [15] IEEE Transaction on IGA, Vol. IGA-5, No. 6, 1969, pp. 321~326.
- [16] Steel time, No. 4, 1972, p. 333.
- [17] Электричество, № 1, 1971, pp. 60~62.
- [18] 见本专辑第 47 页。
- [19] 小津厚二郎, 横田博, サイリスタの応用, p. 234.
- [20] 见本专辑第 57 页。
- [21] 特许公报, 昭 44-961.
- [22] 神钢电机, Vol. 16, No. 1, 1971, pp. 21~25.
- [23] 工业加热, Vol. 8, No. 1, 1971, pp. 17~26.
- [24] 工业加热, Vol. 9, No. 5, 1972, pp. 20~25.
- [25] Brown Boveri Review, No. 6, 1972, pp. 288~293.
- [26] 国外热处理工艺简况, 交通部戚墅堰机车车辆工艺研究所。
- [27] Brown Boveri Review, No. 5, 1972, pp. 231~235.
- [28] 溶接技术, No. 3, 1973, pp. 63~70.

金属感应加热用可控硅增频变频器

С. М. Капнельсон 等

金属感应加热用可控硅增频变频器经过了试验研究的阶段，已在工业中推广应用。可是，这类变频器在工业应用中的运行经验还没有收集，关于变频器与机组相比的可靠程度和可控硅增频变频器的使用寿命还没有明确的概念。

本文介绍由乌飞斯基航空研究所研制的功率为 100 瓩、频率为 2,500 赫的可控硅变频器工业试验的一些结果。变频器用于加热冲压锻坯，已在机械制造厂的锻压车间内在两班制的情况下连续运行了一年以上。

在变频器中应用装有反并联二极管和倍频桥式逆变器(图 1)，负载 Z_H 经过隔直电容 C_p 和保护电感 L_3 接到桥的一个对角上；而另一对桥臂与由电容 C_0 和电感 L_k 串联所组成的换流回路相接^[1]。

可控硅逆变器通过三相桥式整流线路直接接到车间内 380 伏的电网上，而不需经过工频电源变压器。整流器输出电压 U_d 为 500 伏，而可控硅上的最高电压不超过 $(1.6 \sim 1.8)U_d$ 。

在这种逆变器中，流过可控硅逆变器和反并联二极管的电流接近正弦波，并按下式表示：

$$i_T = \frac{U_{c_0} + U_d + R_H I_d}{\omega_1 L_0} e^{-\delta t} \sin \omega_1 t \quad (1)$$

式中： U_{c_0} ——换流电容 C_0 上的起始电压；

I_d ——逆变器输入电流；

R_H ——负载的等值电阻；

$$\delta = \frac{R_H}{2L_0}; \quad \omega_1 = \sqrt{\frac{1}{L_0 C_0} - \delta^2}; \quad L_0 = L_k + L_3 \quad (2)$$

可控硅上电压：

$$U_B = U_d + R_H I_d - (U_d + U_{c_0} + R_H I_d) \times [(1 - k_L) \cos \omega_1 t + \frac{\delta}{\omega_1} (1 + k_L) \sin \omega_1 t] e^{-\delta t} \quad (3)$$

式中： $k_L = \frac{L_k}{L_0}$ ——电感分布系数。

可控硅变频器装在外形尺寸为 1,200×750×2,000 毫米的柜内。因为变频器是在有大量尘埃的锻工车间内运行的，柜子门的周围用橡皮衬垫密封。变频器所有元件都用水冷散热。逆变器由 ТЛ2-150-6 和反并联二极管 BK2-200-10 装配而成。

按照工厂技术条件，变频器在加热直径为 45~60 毫米的钢坯锻件时，无需切换补偿电容，同时，感应加热器的运转应使从加热器中取出的第一个坯件就能达到锻压时的温度。在电网电压发生波动时，坯

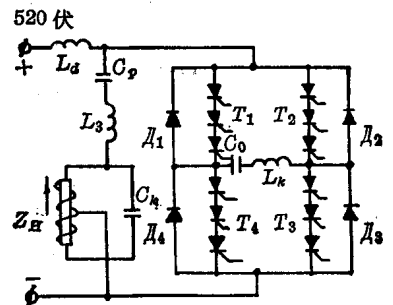


图1 逆变器线路原理图

件温度应自动保持在 $1, 150 \sim 1, 180^\circ\text{C}$ 的范围内。变频器还应该容许在所有可能的运行状态下工作, 包括感应器空载和在任何功率因数下工作。

对变频器提出在任何工作情况下都有高的可靠性和稳定性, 这就需要研究辅助措施, 以降低二极管反向电流断开瞬间在逆变器中产生的换流过电压。在逆变器的额定工作状态下, 换流过电压是不高的, 在正确选择保护电感和换流电感之比 ($L_0/L_k=0.5$) 的条件下, 换流过电压可以在容许的范围内。可是, 在偏离额定工作状态时, 特别是在容性或感性低功率因数时, 换流过电压就急剧增长, 并可能将二极管击穿, 同样, 由于换流过电压正向上升率增高, 而使可控硅自发导通造成逆变中断^[2]。

在装有反并联二极管的逆变器中 (图 1), 换流过电压保护是采用对每一可控硅通过辅助二极管并接一个衰减电容的方法, 并且放电电阻 (纯电感的^[3]或纯电阻的^[4]) 与辅助二极管并接。

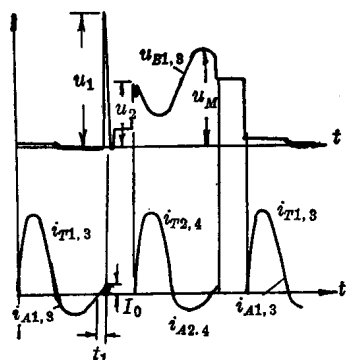


图 2 任一可控硅上的电压 U_T 和流经可控硅电流 i_T 与反并联二极管的电流 i_A 波形图

图 2 表示在加热锻坯件时, 逆变器输出功率为 100 瓩、频率为 2, 500 赫给感应加热器时, 逆变器两桥臂之一中 TЛ2-150-6 型可控硅上电压、流经可控硅的电流 i_T 和反并联二极管电流 i_A 的波形图。逆变器在将反并联二极管断开和将另一可控硅导通之间有不大的间隙时间。

在反并联二极管反向电流切断的瞬间, 可控硅上出现具有高陡度 du_1/dt 的正向大脉冲电压 u_1 。然后, 在存在间歇的条件下, 在导通另一相的可控硅时, 重行产生具有高陡度 du_2/dt 的正向脉冲电压 u_2 , 正向脉冲的出现不是由于反并联二极管的切断, 而是由于次一对可控硅的导通和被阻断的可控硅上正向电压的飞跃上升所造成的。

由于反并联二极管的反向电流幅值大, 在增频下达数十安, 为限制在切断这种电流所产生的换流过电压, 必须在保护支路中安装大电容。

反并联二极管反向电流切断之后, 衰减支路电容 C_A 的放电电流 i_{cA} 值由下式确定:

$$i_{cA} = \left[\frac{U_d + R_H I_d - U_{c0}}{\omega_A L_0} \sin \omega_1 t + I_0 \left(\cos \omega_A t - \frac{\delta}{\omega_A} \sin \omega_A t \right) \right] e^{-\delta t} \quad (4)$$

式中: I_0 ——切断瞬间反接二极管反向电流幅值;

$$\omega_A = \sqrt{\frac{2}{L_0 C_A}} \quad (5)$$

切断反并联二极管反向电流之后的电压幅值为:

$$U_1 = \frac{U_d + R_H I_d - U_{c0}}{2} \left[1 - \left(\cos \omega_A t_{\text{最大}} + \frac{\delta}{\omega_A} \sin \omega_A t_{\text{最大}} \right) e^{-\delta t_{\text{最大}}} \right] + \frac{I_0}{C_A \omega_A} e^{-\delta t_{\text{最大}}} \sin \omega_A t_{\text{最大}} \quad (6)$$

式中:

$$t_{\text{最大}} = \frac{1}{\omega_A} \text{tg}^{-1} \left(\frac{\delta}{\omega_A} - \frac{U_d + R_H I_d - U_{c0}}{\omega_A L_0 I_0} \right) \quad (7)$$

由式 (6) 求得可控硅上最大电压上升率:

$$\left(\frac{dU_1}{dt} \right)_{\text{最大}} = \left[\frac{U_d + R_H I_d - U_{c0}}{\omega_A L_0 C_A} \sin \omega_A t_k + \frac{I_0}{C_A} \left(\cos \omega_A t_k - \frac{\delta}{\omega_A} \sin \omega_A t_k \right) \right] e^{-\delta t_k} \quad (8)$$

只当感应器电压重新达到稳定值时,才可能将下一坯件推入。如果电网电压下降,那末,坯件下落的时间间隙自动地改变,同时,它们取出时的温度保持恒定。应该注意,虽然自动调整系统使感应器电压保持恒定平均值,可是,在下落速度改变时,负载的有效等值电阻几乎反比于坯件的平均移动速度。因此,在网络电压波动时,输出功率只与输入电压的一次方成比例地变化。

加热器的开动是在逆变器空载时实现的,此时,逆变器电压下降,自动稳定系统不工作。在开动时,坯件的自动下落是由作用于触发器 ($\Pi T_1, \Pi T_2$) 的晶体管时间继电器来实现的。为使第一个坯件在从感应器中取出时就具有锻压温度,下落速度规定为延迟 50~100%。随着坯件的加热,感应器电压增高,并且当感应器内充满坯件的瞬间感应器电压达到给定值,恒温系统自动地使坯件落下。

应用可控硅变频器时锻坯件的温度稳定程度要比发电机组集中供电给感应加热器时高,这就可以避免由于欠热和过热所引起的锻件报废,还可以提高冲压工的劳动生产率。

在第一年工业运行期间,可控硅变频器按生产计划完成了三千小时的工作,没有一个系统元件损坏,装置的接通和切断次数超过 1,200 个周期。

由于没有批量生产,且可控硅价格较贵,该可控硅变频器比发电机组贵 50%。可是,就是在现时,半导体元件在现在的价格下,组织批量生产也可使成本降低至与发电机组相同。如果考虑可控硅变频器能节约电力,有高的效率(93%),频率可以调节,在运行时所证实了的具有可靠性高,及其他优点。从运行经验可以得出结论:在正确选择线路方案的条件下,可以保证由工业成批生产的一般可控硅制成的中频大功率变频装置能可靠地工作。

参 考 文 献

- [1] Кацнельсон С. М., Ухов В. С., Авторское свидетельство, № 235177, Бюллетень изобретений, 1969, № 5.
- [2] Dyer R. T., SOR and Solid State Technology, April, 1965.
- [3] Кацнельсон С. М., Ухов В. С., Авторское свидетельство, № 251077, Бюллетень изобретений, 1969, № 21.
- [4] Джентри Ф., Гутцвиллер Ф., Голонык Н., Заостров Э., Управляемые полупроводниковые вентили, изд-во «Мир», 1967.

译自 Промышленная Энергетика, № 4, 1972, p. 45.

电热用大功率单相逆变器新线路

А. Е. Слухоцкий 等

感应加热使用的频率范围为 500 赫至 1,000 赫, 而对频率为 500 赫至 1,500 赫则要求电源功率在 1,000 瓩以上, 这些大功率电源要能在工艺周期内负载参数急剧变化时以及在机组电源上频繁地接上电器设备所引起的复杂条件下的电热车间中可靠的工作。

在研制最经济的电源——静止变频器的方案时, 必须考虑到尽管发电机组的力能特性不高, 但已在工业上运行了很多年, 并且在运行时比较简单。应用一般所熟知的静止变频器线路时, 或者会发生限制负载参数的变化范围, 或者会使自动调整线路过于复杂。其原因在于: 不论是电流逆变器, 还是电压逆变器*, 当负载向任何一方变化时, 其输入特性 $R_{\text{вх}} = \varphi(R_{\text{н}})$ 都趋于零^[1, 2]。

在列宁格勒电工学院 (ЛЭТИ) 和 ВНИИТВЧ 都在进行工作, 研究如何将电流逆变器和电压逆变器的优点组合在一起并且具有 U 形输入特性的线路, 得到一种能够在负载变化范围足够大的情况下工作的变频器。

首先研究如图 1 所示的那种线路。变频器由直流电流供电, 包括输入电抗 L_d , 由整流元件 $B_1 \sim B_4$ 、 $A_1 \sim A_4$ 所组成的桥, 转换回路 L_k 、 C_k , 隔直电容 C_p , 通过它接上负载。

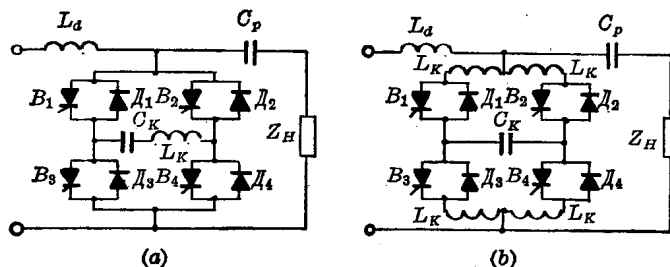


图 1 具有 U 形输入特性的变频器线路

在整流元件 B_1 及 B_4 导通时, 经过转换回路流过正向电流的半波; 反向电流的另一半波通过二极管 A_1 及 A_4 , 并流经负载。

当另一对桥臂上的整流元件 B_2 及 B_3 导通时, 与上同样的过程重复一个周期。因此, 负载频率是整流元件工作频率的两倍。

因线路参数的不同, 整流元件可以有几种工作状态。当 R_H 值不大时, 正向和反向整流元件交替地工作着 (工作状态 N), 而转换回路中的电流可以是连续的, 或是断续的。在将负载电阻增加到大于某值 $R = R_k$ 时, 出现了桥的对臂上的正向和反向整流元件同时导通 (工作状态 A) 的可能性, 这就得到新的外特性。反向整流元件的导通时间, 即可控整流元件的恢复时间, 在工作状态 N 时, 随着电阻 R_H 的增加而减少, 可是随着线路转入工作状态 A, 它却开始增大。

* 即不论是并联逆变器, 还是串联逆变器。——译者注