

国外机械技术资料

国外大型电动机近况

——七十年代初期水平综述——

哈尔滨大电机研究所编

第一机械工业部情报所

1 9 7 3

毛主席语录

鼓足干劲，力争上游，多快好省地建设社会主义。

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。

洋为中用。

前 言

根据我国大电机行业的发展需要，我们最近集中搜集了国外最近几年(1966—1971)发表的有关大型交直流电动机方面的技术情报资料，编写了这本国外六十年代末期七十年代初期水平综述性资料，以便供给有关工人、技术人员和领导干部以及其他有关部门参考。

由于我们水平低、时间仓促，加之搜集的资料有限，错误和不妥之处一定不少，请读者批评指正。

编 者

1972.

目 录

国外大型电动机的发展特点	1
--------------------	---

一、新产品

1. 同步电动机	3
2. 异步电动机	3
3. 极幅调制变速电动机	3
4. 异步同步电动机	4
5. 同期调相机	4
6. 轧机用直流电动机	6
7. 可控硅供电直流电动机	7
8. 超导体电机	8

二、新工艺

1. 整体浸渍	11
2. 油压套轴	15
3. 云母电泳涂敷	17
4. 射流技术	18
5. 流水线	18

三、新结构

1. 箱型机座	20
2. 鼠笼转子	23
3. 定子端部浇注	26

4. 中空轴	27
5. 无轴和无轮毂	32
6. 迭片机座	36
7. 单电枢	36
8. 无槽电枢	37
9. 炭丝电刷	37
10. 集锁式换向器	38
11. 无刷励磁	39
12. 冷却方式	42
13. 实心磁极	47
14. 组合式升高片	47

四、新材料

1. 硅钢片	50
2. 绝 缘	51
3. 磁性槽楔	54
4. 玻璃丝带	56

五、用电子计算机设计

六、电动机事故调查

七、技术经济指标

参考文献

国外大型电动机的发展特点

据有关情报资料报导,最近十年以来,特别是1966年以后的六十年代末期,伴随着工业技术的发展和大型驱动工业设备的需要,加之电网容量的不断增大,使得国外的工业用大型交直流电动机不断向着单机大容量化发展,而且用于高速驱动的高速大电机日益增多。如西德西门子公司在1960年制造的大型交流电动机,四极的是6300千瓦、二极的是5200千瓦,到了六十年代末期已制造出四极1.6万千瓦、二极1.2万千瓦的大电机,而且据称最近如有订货可造出3万千瓦及以上的大型高速电机。其他国家,如法国、瑞士、日本等最近也制造不少1万千瓦以上的二极或四极大电机,参见表1-2。此外,大型同步电动机制造业也同样向着高速大容量化发展,据称最近日本制造的5.2~6万千瓦二极高速大型同步电动机是目前单机容量最大的,而且7万千瓦的这种电动机正在制造中,参见表1-1。至于大型直流电动机,特别是用于驱动轧机的大直流机制造业主要是向着提高单枢容量、单机架和全机架容量以及可逆轧机电机的转矩方面发展,日本认为这些提高几乎是每十年增加一倍。此外,最近还把可控硅供电的直流电动机扩大应用到较大容量和系列产品上,见表1-8。据报导,日本于71年制造出三枢的1.2万千瓦大型直流电动机,并自称是世界上最大的直流机。

国外在发展大型电动机新品种方面,除了象磁阻电动机、直线运动电动机、无刷直流电动机和微波、静电、压电电动机尚处于小容量范围外,超导体电动机和极幅调制变速电动机已经制造到几千千瓦。据称最近投入运行的英国的2420千瓦超导体直流电动机是当前世界上最大的,而且日本、法国、美国等也在研制小型超导体电机的样机。至于极幅调制变速电动机从1000千瓦到5000千瓦的产品已经不少,见表1-3。

据报导,国外在大型电动机的标准化、系列化和通用化方面,有些国家如西德、英国、日本和瑞士等都在努力达到国际电工委员会(IEC)推荐的标准。在标准化方面有些国家力求减少大型电动机系列产品的容量等级数,据称苏联、捷克的一万千瓦以下的大型电动机系列产品的容量等级数目仅为美、英各国的一半,从而减少了工模具等工艺装备。美、英、西德、法国和瑞士等国自从采用箱型机座结构以来,使得交流电动机、包括鼠笼型转子和绕线型转子异步电动机以及同步电动机的机座外壳可以通用,而且对于各种防护外壳都是可以互换的,同时减少了机座的基本尺寸,有些国家的这种箱型电机系列最大达1万千瓦以上,甚至其轴颈尺寸对于滚动轴承和滑动轴承都是通用的。据称在瑞士和瑞典,这种简易式箱型机座已用于最大为1800和1900千瓦的新系列直流电动机上,同时可用于可控硅电源供电而不必用电抗器。

大型电动机的结构简化方面,据报导有些国家(如日本和瑞士)力求使电动机和被驱动机械设备一体化,从而减少重量和占地面积,使得成套设备结构更加紧凑,如无轴结构、无轮毂结构的电机即属此列。最近几年国外的大型交直流电动机,在结构的改进方面包括:采用箱型机座以便于减小体积重量;扩大应用中空轴以减轻重量;应用无轴、无轮毂结构使与被驱动机械一体化等。就大型交流电动机方面而言,还在转子鼠笼结构方面不断改进以防松断;在高速电机的定子绕组端部采用浇注树脂的结构代替传统的绑扎固定;采用焊筋轴代替整锻

轴；采用无刷励磁和静止励磁；扩大实心磁极的应用等。就大型直流电动机方面而言，还扩大和改进了迭片机座的应用；采用无槽电枢；提高单电枢的容量等级；对换向器实行单独通风；采用组合式升高片元件等等。

关于大型电动机的**制造工艺**方面，国外报导的不多，仅就有限的参考资料可见在大型交流电动机的定子整体浸渍、云母静电涂敷、射流技术用于制造线圈、金工加工的流水作业和集中加工以及油压套轴等新工艺正被应用，在此给予简单介绍。

国外最近几年在大型电动机制造业的技术发展方面声称是与化学和冶金等工业的发展分不开的，在新材料方面法国认为化工的发展提供了象 B 级热弹性粉云母绝缘，F 级或 H 级绝缘薄膜等新型绝缘材料，声称这是延长绕组寿命的重要因素；冶金工业所提供的高导磁低损耗硅钢片和高强度结构钢使得电机的电气、机械特性不断提高。国外多用无纬玻璃丝带代替钢丝绑扎电枢，有些国家(如西德)已把代替普通槽楔的磁性槽楔推广用于 1 万千瓦以下的新系列电机上。此外，电子工业的迅速发展，导致在大电机技术方面的改进，如半导体静止励磁和可控硅无刷励磁多数取代了传统的直流励磁机，在大电机的电磁、机械计算甚至绘制草图方面逐步扩大了电子计算机的应用等。

据报导，国外在提高技术经济指标方面又有较大的进展，单位材料重量的容量指标和效率等都有提高。

一、新 产 品

1. 同 步 电 动 机

在大型交流电动机中, 国外认为同步电动机与异步电动机相比其效率相应的要高 0.5~1.0%, 而且在负载减少时的效率下降较小, 可减少运行费用; 由于同步电动机可在功率因数为 100% 或超前的情况下运行, 所以可改善网路的功率因数; 同步电动机可以实现强励来抑制电网电压的变化^(1,62); 同步电动机的气隙比异步机的要大得多 (3~5 倍), 因此结构要可靠得多。

最近几年国外的高速大容量同步电动机已制造到六万千瓦的单机容量(日本)。由于同步电动机需另外置备一套励磁装置, 相应的对电刷和滑环的维护提出较高的要求, 因此, 最近不断发展了无刷励磁方式。可控硅旋转整流器式的无刷励磁当前国外已应用到几万千瓦的大型同步机上(见表 3-3)。带有阻尼绕组的同步电机制成高速时, 将在阻尼绕组上产生过热, 因而又发展和扩大了无阻尼绕组的实心磁极的应用, 当前国外实心磁极同步电机已制造到二万千瓦(见表 1-1)。为了改善起动特性, 最近还发展了异步同步电动机, 具有象异步电动机的起动特性、而在同步状态下满载运行(见表 1-4)。同步电机的极限功率见表 3-6。

2. 异 步 电 动 机

与同步电机相比, 异步电动机、特别是鼠笼型转子异步电动机具有结构简单、制造容易、维护方便、外形尺寸小、重量轻等特点而被大力发展, 当制成绕线型转子时, 还可容许变速。就异步电动机而言, 与绕线型转子异步机相比, 由于鼠笼型转子异步机的结构简单、造价低廉、维护方便、重量轻和外形尺寸小而得到较快的发展。各国最近几年制造的大容量异步电动机见表 1-2, 单机容量达二万千瓦及以上的大型异步电动机不断增多。当前异步电动机的极限容量见表 3-6。日本三菱公司认为, 当前 2 极绕线型转子异步电动机的制造极限可达 2 万千瓦, 超过这个容量时可选择 4 极的。而 2 极鼠笼型转子异步电动机的极限功率主要是受到转动惯量和起动转矩不大的限制, 如果采用低频起动方式或借用绕线型起动用电动机来起动时, 极限容量可达 3 万千瓦⁽⁶³⁾。

3. 极幅调制变速电动机

笼型电动机的最大缺点是受单一转速的限制, 为获得变速异步机, 过去曾经制造一些双绕组双速异步机, 由于这种电机运行于某一转速时也要附设两套绕组, 所以体积增大了, 加之, 槽底的绕组在很大的槽漏磁场作用下, 降低了最大转矩和功率因数, 使得这种电机的造价很高⁽²⁾。

据报导, 自 1897 年以来国外就一直在研究一种单绕组双速异步机, 但是, 一直到 1965 年, 才提出一种极幅调制变速的单绕组双速异步机, 与双绕组双速机相比, 其外形尺寸减小 25~30%, 效率提高了, 功率因数得到改善, 而且设备不再复杂化了。因此, 虽然只有几年的发展, 1000 到 5200 千瓦的极幅调速机已经出现不少(见表 1-3)⁽²⁾。

据称极幅调速异步机的制造特点和单速机一样把相同的线圈布满于所有线槽，两种极数的其中一个使用了组合绕组，这些线圈按特殊的方式分布于六个半相内。据称，与单速机相比，极幅调速异步机的绕组分布系数大约降低 1~25%，所以相同的容量和转速，则体积增加 1~25%。对于异步机来说(包括鼠笼型和绕线型)极幅调速毕竟是获得相邻极数的两种转速的仅有的新方法之一，法国认为，尽管能够制造 2/8 极和 4/6 极的双速机，但还是 4/6 极、8/10 极和 10/12 极的结果更好些⁽²⁾。

由于同步电动机有一个励磁的副边，在气隙磁密波形中能产生某些谐波，为应用极幅调速法获取双速，必使绕组对这些谐波不敏感，每相绕组的绕组系数都必须为零或接近于零，因此尚待完善。

4. 异步同步电动机

对于起动条件十分困难的场合，一种随负荷调节励磁的同步化异步电动机的优点已被证实。异步同步机具有良好的起动特性和牵入特性，因此单机容量高达近 2.5 万千瓦的异步同步电动机已经出现(见表 1-4)。

5. 同期调相机

现在世界上生产大型同期调相机的工厂极少，据报导⁽³⁾，70 年瑞典 ASEA 公司为美国电力公司提供的采用定转子双水冷却的 34.5 万千瓦乏调相机已经投入运行，据称这是当时世界上最大的调相机(见表 1-5)。

各国大型同步电动机对比表

表 1-1

国 别	公 司	制造年代	单 机 容 量 (万千瓦)	极数	转 速 (转/分)	电 压 (千伏)	功 率 因 数 $\cos\phi$	注
日	东 芝	在制	7.0					(183)
日	三 菱	71	6.0	2	3600	11	0.7	(42)
日	东 芝	71	5.4	2	3000	11	0.89	(57) 无刷励磁，氢冷
日	东 芝	71	5.2	2	3600			(67) 当 $\cos\phi = 0.9$ 时达 7.4 万 KW
美	GE	71	3.12					(187)
捷	CKD	65	1.55	2	3000	6		
法	J-S		2	4	1500	13.2		实心极 ⁽⁷²⁾
瑞士	BBC	65	1.9	6	1000		0.95	效率 98.5%
日	神 钢	67	1.9	4	1800			
英	EE-AEI	70	1.87	6	1200	13.2		实心极
比	ACEC	66	1.5	4	1500	13.2		
日	富 士	71	1.55	4	1800			低频起动
瑞士	BBC		1.48	4				
日	三 菱	71	1.45	6	1000		0.8	实心极
瑞士	BBC		1.07	6				
日	明 电 舍	70	0.95	6	1000			
日	东 芝	71	1.45	8	900			实心极
日	明 电 舍		1.05	8	900	11		实心极
西德	Siemens	70	2.98	60	120		0.95	
苏	УРАЛ		1.25	24	250			立式
东德	VEM		1.0	20	300			
日	三 菱	70	1.0	20	300	11		

各国大型异步电动机对比表

表 1-2

制造年代	国 别	公 司	极 数	容 量 (万千瓦)	电 压 (千伏)	频 率 (赫)	转 子 型	注
69	法 国	J-S	2	1		50	鼠 笼	(8)
67	西 德	Siemens	2	1.2		50	"	定子水冷
69	日 本	富 士	2	1.2			"	全闭外扇冷
	西 德	AEG	2	1.0			"	(9)
69	法 国	J-S	4	2		50	"	(8) (1)
	西 德	AEG	4	2			"	(9)
69	西 德	Siemens	4	1.6			"	
68	捷 克	CKD	4	1.5			"	双水冷
	法 国	Alsthom	4	0.85			"	
	苏 联		4	0.88			"	
70	日 本	三 菱	4	0.73	11	60	"	全闭空冷
	英 国	AEI	4	0.87	11	50	"	
70	瑞 士	B B C	4	0.5	11	50	"	
70	日 本	富 士	4	1.3	6.6	60	绕 线	(10)
70	瑞 士	B B C	8	2.1	11	50	"	(11)
	苏 联		4	1.2			"	
	西 德	Siemens	4	1.2			"	(11)
70	日 本	三 菱	4	1.15	6.6	60	"	全闭内冷 ⁽¹⁰⁾
68	日 本	富 士	4	1.15	6.6	60	"	
71	日 本	日 立	6	1.05	6		"	
69	日 本	日 立		1.4			"	257转/分 ⁽⁷⁸⁾
69	日 本	富 士		1.15			"	600转/分 ⁽⁷⁸⁾

最近国外的大型极幅调速电动机

表 1-3

国 别	公 司	容 量 (千瓦)	转 速 (转/分)	极 数	注
英 国		2120/1280	595/495	10/12	人入/△串接法 ⁽¹²⁾
" "		5200		6/10	(13)
" "	P P	1920/1160	595/495	10/12	
法 国	Alsthom	2100/1270	595/494	10/12	
日 本	神 钢	4200	600/720	10/12	11KV、B级、硅橡胶绝缘 ⁽¹²⁵⁾
苏 联	乌拉尔	3220/2400	428/375	14/16	69年设计
西 德		1000/710		8/10	6.6KV
日 本	三 菱	2250/1200	900/720	8/10	笼 型

国外大型异步同步电动机对比表

表 1-4

制 造 年代	国 别	公 司	容 量 (千瓦)	极 数	转 速 (转/分)	电 压 (千伏)	频 率 (赫)	备 注
1971	日 本	三 菱	8000	4	1800	6.6/3.3	60	(14)
1969	日 本	富 士	5500	8	750	5.5	50	(15)
	英 国	AEI	4470	12	500	11	50	
1968	日 本	川 崎	4100	8	750	3	50	
1970	日 本	安 川	3300	10	720	6.6	60	
1969	西 德		2100	6		6.6		立 式
1967	日 本	神 钢	3000	8/10		3.15	50/60	
1971	日 本	东 芝	9500	6	1200	6.6	60	
1971	英 国	Parsons	25000	6	1000		50	(18)

国外的大型同期调相机

表 1-5

制 造 年 代	国 别	公 司	容 量 (千乏)	极数	转 速 (转/分)	冷 却	注
1970	瑞 典	ASEA	345000	8	900	定转子双水冷	一分钟过载 45 万千乏 ⁽⁸⁾
1967	苏 联	YPAJI	100000	8	750	氢冷	16 万千乏在制 ⁽¹⁰⁷⁾
1966	西 德	Siemens	125000			氢冷	⁽¹⁰⁸⁾
1970	日 本	富 士	84000	6	1000	氢冷	可控硅励磁 ⁽¹⁰⁹⁾
1968	瑞 典	ASEA	125000				⁽¹¹⁰⁾
1971	英 国	E E	160000	6	1200		⁽¹⁰⁸⁾

6. 轧机用直流电动机

广泛采用直流电动机作为轧机的驱动装置，是由于它的转速、转矩和旋转方向可控，而且它还适用于较大的过载转矩。当主磁场励磁不变时改变电枢电压来控制转速，不仅对直流电源供电适用、对可控硅供电同样适用。据称当电枢电压不变时改变主磁场强度来控制转速，其调速比可达 5:1。为了保护电动机和轧机的机械部件，只要限制向电动机供电（直流电源和可控硅供电）电流就可精确的控制最大转矩⁽¹⁷⁾。

随着冶金工业的发展，对轧机用直流电动机本身不断提出大容量、高转速的要求，因此轧机电机发展的显著特征是高速大容量化。鉴于轧机电机经常处于正反转、频繁地起动和制动、加速和减速等动态过程，更加强调了对电机提高单机容量、增大转矩的前提下降低转动惯量的要求。此外，直流电机的极限容量主要是受到换向过程的限制，其一是片间电压的限制，其二是换向时线圈中的电抗电压的限制，正是这些成了判断换向性能是否良好的标准。

因为转动惯量近似的与电枢直径的四次方和铁心长成比例，为提高单机容量和降低转动惯量常常限制了电枢直径而增加铁心长度，但是电枢轴向长度的增加又受到机械上的限制和给电枢及磁系统通风冷却带来困难⁽¹⁷⁾。

当前各国在减少转动惯量方面采取的措施如下：

- ① 应用电子计算机设计；

低速可逆转直流电动机

表 1-6

制 造 年 代	国 别	公 司	容 量 (千瓦)	转 速 (转/分)	额 定 转 矩 (吨·米)	注
1967	日 本	三 菱	6700	40/80	163.5	双 枢
1970	日 本	日 立	5600	35/70	156	单 枢
1968	西 德	Siemens	7600	55/100	135	单 枢 ⁽¹⁰⁾
1970	瑞 士	B B C	5200	42/68	120	单 枢
1969	比利时	ACEC	7300	50/100	140	单枢, 电压 1 千伏 ⁽¹¹⁾
1969	瑞 典	ASEA	4550	50/100		单枢 ⁽¹¹⁾
1971	日 本	日 立	6720			
1968	英 国	Parsons	5950	51.5/129		双枢 1.5 千伏,
1966	英 国	AEI	3730	40/80		
1969	西 德	AEG	4000	70/180		
1969	日 本	富 士	5000	30/60		⁽⁷³⁾
1969	日 本	东 芝	1200	200/400		⁽⁷⁸⁾

- ② 采用中空轴结构;
- ③ 应用可控硅元件和二极管改善换向;
- ④ 应用 F 级新绝缘;
- ⑤ 采用双枢或多枢结构。

最近国外制造的轧机用直流电机见表 1-6、1-7。

高速非可逆转直流电动机

表 1-7

制 年 代	国 别	公 司	容 量 (千瓦)	转 速 (转/分)	$\beta \times 10^3$	注
1969	日	三 菱	5000	225/720	11.5	最大出力7600KW ⁽⁷⁸⁾
1969	日	东 芝	5250	210/460	5.29	三电动机
1967	日	日 立	8100	116/232	3.66	双 枢 ⁽²⁸⁾
1967	日	三 菱	5750	175/350	4.03	F 级绝缘
1969	日	日 立	1425	100/525		三电动机、调速比5.25 ⁽⁷⁸⁾
1969	日	日 立	6075	200/500		三电动机 ⁽⁷⁸⁾
1969	日	东 芝	7000	50/90		单 枢 ⁽⁷⁸⁾
1969	日	东 芝	4000	145/290		单 枢 ⁽⁷⁸⁾

7. 可控硅供电直流电动机

瑞典认为由于半导体方面的发展,过去认为那种几乎所有直流电动机都得从“良好平滑的直流电源供电”的时代已经过去了。近代直流电动机已经开始逐步扩大应用交流电源并经过可控硅整流器整流的电源供电,从而打破了直流电动机在扩大应用中在直流电源方面的限制,节省了既庞大而又昂贵的变流机组⁽³⁾。

日本认为当直流电动机应用可控硅供电时,其负载电流中的交流分量将对电机的换向性能、温升和损耗带来不利的影响,即磁通谐波在电枢内所产生的感应电势会增加换向火花、电刷磨损、电机损耗及电机温升,因而必须减少电机主回路电流的脉动、增加电枢匝数并相应增加换向片数,以便消除上述影响,使这种电机具有较平滑直流电源供电的电机为多的电枢电感⁽¹⁸⁾。

据报导,瑞典 ASEA 公司在最大容量为 2100 千瓦的 LAA 新系列直流电动机(参见图 3-6)上设计为可控硅供电时所采取的这方面措施包括:①补偿线圈;②机座和磁极均用迭片组成;③电枢线圈用异槽式分节距;④电枢线圈导体用多根换位方式。由于采取上述措施,该系列电机在可控硅供电时不必串接任何电抗器而保证良好运行⁽²⁶⁾。

据报导,日本的可控硅供电轧钢电机已推广应用到大容量电机上,如富士公司制造了水冷可控硅供电的 3500 千瓦电机。日立公司在考虑到可控硅电源所包含的脉动所引起的静态特性和与晶体管本身具有的高速应性有关的瞬变特性及其对瞬变换向过程的不利影响时,还发展了一种环状迭片机座和绝缘垫片以消除磁路中的短路回路,此外,该公司还发展了同时测定火花、磁场和电流的无火花换向区域直观装置,从而对瞬变换向的分析和采取措施取得了良好结果⁽¹⁸⁾。

西德西门子公司报导于 68 年制造的 7600 千瓦轧钢电机为 7700 安, 55/100 转/分, 转子重

达 74.7 吨, 当采用可控硅电源供电时, 电流上升速度达到 310 安/微秒⁽¹⁹⁾。

至于可控硅供电装置本身的发展, 有必要指出日本三菱公司报导的于 69 年完成的 10 万千瓦、450 千安的大型可控硅整流装置, 电压 230 伏, 交流输入为 66 千伏、50 赫⁽²⁵⁾。

最近国外制造的可控硅供电的大型直流电动机见表 1-8。

瑞士 BBC 公司制造的最大容量为 1800 千瓦的新系列直流电机也设计成用于可控硅供电, 而且采用箱型机座结构, 参见图 3-5⁽¹¹⁹⁾。

据称, 目前英国的直流发电机已有 95% 被半导体整流器(包括硅整流器)装置所代替⁽¹³⁶⁾。对于半导体、硅整流器供电的直流电动机, 英国采取下列措施: ①增加电枢电感; ②采用 F 级绝缘; ③换向极用硅钢片迭成; ④增加半导体数量, 即大功率电机用六相供电: 电机电压为 1000 伏时用两个三相桥并联, 电压为 1500 伏时用两个三相桥串联⁽¹³⁶⁾。

国外可控硅供电的直流电动机

表 1-8

年	国 别	公 司	容 量 (千瓦)	电 压 (伏)	转 速 (转/分)	注
67	日 本	富 士	3500	750	35/70	水冷可控硅供电 系列产品, 不用电抗器 ⁽¹¹⁷⁾ 7725 安 ⁽²²⁾
70	瑞 典	ASEA	2100		280	
69	比利时	ACEC	7300	1000	50/100	
	西 德	AEG	2300		50/100	
70	瑞 士	BBC	2550	750	70/150	(10)
67	日 本	日 立	2250	750	35/70	
68	西 德	Siemens	7600		55/100	
66	西 德	Siemens	3100	910	60/120	
70	瑞 士	B B C	1800			系列产品, 不用电抗器 ⁽¹¹⁹⁾ 三枢, 水冷可控硅供电 ⁽¹³⁸⁾
71	日 本	东 芝	12000			

8. 超 导 体 电 机

据报导, 国外最近几年研究和发展了一种“超导”技术, 即使金属导体处于临界低温(如 4.4°K)下, 其电阻几乎接近于零, 这种“超导”技术用于电机的励磁绕组可通过强大的励磁电流。最近“超导”技术主要是用于大型直流电动机上和大型交流发电机上。

英国 Parsons 公司的附属分公司, 即“国际研究和发展”组织 (IRD) 于 1963 年起就在研究和试制超导体直流电动机, 于 66 年曾试制出一台 37KW、2000 转/分电动机采用了超导体励磁绕组; 后于 69 年底制造一台 3250 马力(2420 千瓦)的超导体直流电动机, 其励磁电流为 5800 安培、励磁电压 430 伏, 并已投入 CEGB 电网系统的 Fawley 原子能电站运行, 用于驱动 50 万千瓦汽轮发电机组所属的循环水泵, 据称运行情况良好。该电机外径 2.8 米、内径 2.4 米、有效长为 0.53 米, 用铌钛铜(Nb-Ti-Cu)合金制造励磁绕组, 并以液态氮作为冷却介质, 被称为世界上最大的一台投入运行的超导体电机⁽¹²⁶⁾, 参见图 1-1。

据称⁽¹²⁶⁾, 超导体电机的主要优点是容量大、重量轻、价格低和效率高, 英国 IRD 公司最近曾把设计的一台 8000 马力(6000 千瓦)、50 转/分的超导体直流电动机与同规格的普通直流电动机作了对比, 见表 1-9。

据报导, 这种电机有可能制成 1.45 万千瓦、50 转/分和 1.32 万千瓦、3000 转/分及 4500 转/分以上的直流电动机; 当制成 200 转/分时可达 4 万千瓦、当制成高速电机(如 20000 转/分)时可达 20 万千瓦。IRD 公司 69 年正在设计 15 万千瓦的这种电机, 其励磁绕组电压为 1000 伏。

表 1-9

	传统结构电机	超导体电机
总重(吨)	370	40
总成本(英镑)	22 万	13 万
总效率(%)	94	97
直径比	1	0.87
长度比	1	0.22

另据报导^[126], 美国曾于 1970 年研究试制了一台 80 千伏安超导体同步发电机作为试验用样机, 励磁线圈也采用铌、钛、铜(Nb-Ti-Cu)合金, 系 2 极、60 赫芝、三相同步发电机, 转速为 3600 转/分, 同步电抗为 10%, 相阻为 13.2 兆欧, 短路比等于 10, 当励磁线圈浸入冷却用液态氮中可保证发电机工作一小时, 空载和短路时的摩擦损耗, 当 1800 转/分时为 230 瓦;

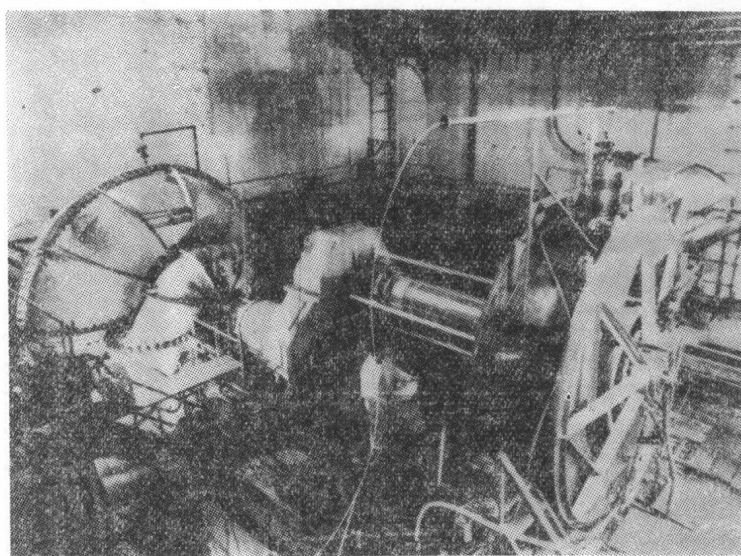


图 1-1 安装在 Fawley 电站的英国的 3250 马力(2420 千瓦)超导体直流电动机

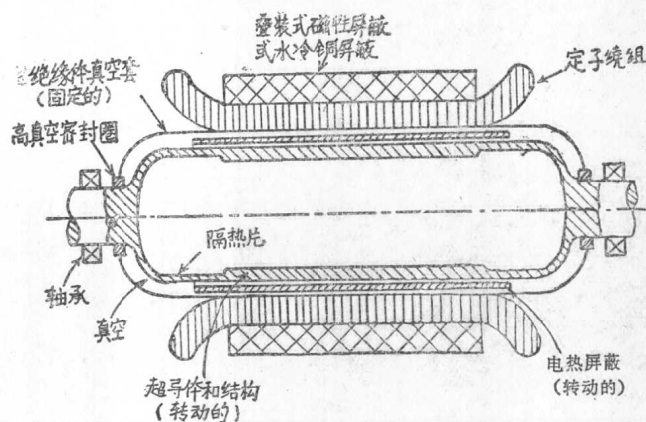


图 1-2 具有旋转超导体磁场的大型同步发电机剖面图

当 3600 转/分 时为 550 瓦，不计及励磁损耗和冷却氦的损耗的效率为 95%。据称这台样机 单位容量的重量达到 1.7 公斤/仟伏安，其机座仅相当于 7½ 马力异步电动机那样大小。认为这种超导体交流发电机适于制造 100 万到 1000 万千瓦的巨型汽轮发电机，而且指出，这种电机包括冷冻费用在内的单位容量成本达 0.3~1 美元/仟伏安，当制成 100 万到 1000 万千瓦电机时单位容量的重量只有 0.03 磅/仟伏安 (0.01365 公斤/仟伏安)^[128]。图 1-2 为具有超导磁场的大型同步发电机剖面图。

二、新 工 艺

1. 整体浸渍

对于大型交流电动机的定子绕组绝缘工艺,在十年前都是采用先浸渍、热压成型然后下线的,包括绕组线圈(圈式)和绕组线棒(条式)基本如此。但是这种老式绝缘工艺对于高速电机和全线圈(圈式)来讲,硬化成型的线圈下线是很困难的,而且下线的质量会影响到电机的可靠性^[32]。

自从 1958 年美国采用了定子铁心外装压(见箱型电机)以后,便为定子绕组线圈在下线后进行整体浸渍创造了有利条件。直到 1960 年整体浸渍已用于单机容量为七千千瓦电机上,到 65 年时单机容量高达一万千瓦以上的电压最高达 7 千伏的电机也已采用定子整体浸渍了。而最近,西德置备一个直径 4.6 米、高 2 米的浸渍罐,可进行达几万千瓦电机的整体浸渍^[28],参见图 2-1。

据报导最近几年各国采用定子整体浸渍绝缘工艺以来所获得的好处大致归纳如下几点:

① 下线简单,易保证质量。因为绕组线圈事先未经浸渍和硬化成型,具有柔韧性。如美国和瑞士在下线时是将定子放在一个可旋转的圆环支架上(图 2-3)可使定子的摆放经常便于下线操作。

② 槽满性好,导热性高。因为下线后整体浸渍时,人造合成树脂充满线槽和线圈的所有空隙,形成一个完整的整体。

③ 端部刚度提高,易于保证端部形状。因为在整体浸渍前,端部形状已经整好且借助于辅助夹子来防止端部变形。

④ 易于采用包扎机,提高加工效率。

⑤ 提高电机绝缘的耐热等级,达 F 级绝缘。

⑥ 提高出力达 20%。

当然,上述优点是采用的绝缘材料本身有关,特别是后三条。例如瑞士是采用粉云母带浸渍以 Micadur-Compact 人造合成树脂,而西德采用的是片云母带浸渍以 Micalastic 人造合成树脂。瑞士认为整体浸渍使得电机绝缘的介电强度达 32.5KV/cm,最高达 37.5KV/cm,而且能长期承受耐热 155°C,达到 F 级绝缘,短时耐热达 200°C。西德认为在采用磁性槽楔的同时还采用整体浸渍可使容量提高 20%^[(33)(34)]。

尽管整体浸渍工艺具有如上所述种种优点,但是在 1966 年法国认为也有不利之处:①整体浸渍受到浸渍罐尺寸的限制,对于整体浸渍几米以上直径的电机是困难的;②整体浸渍的电机运行电压一般限于 7KV 以下;③整体浸渍时渗透到槽内直线部份的中心和加压都并非十全十美的^①。

瑞士认为整体浸渍工艺终于突破了几十年来的老工艺,即绕组绝缘总是先在真空下浸渍沥青胶,再沿线圈槽部包云母片,端部用狭云母带包几层,以便下线时按照所希望的形状成型,这种老式绝缘处理方法的特点尽管还令人满意,但毕竟局限于 B 级耐热等级(130°C)而且在高温及高机械应力场合证明是不适用的^②。

据报导,整体浸渍的主要工艺过程如下:

① 包扎——一般采用经烘焙的玻璃粉云母干式绝缘带沿线圈全长连续包扎,可采用包扎机。

② 下线——包括下线后的打槽楔和端部接线,以及在端部采用具有吸收性玻璃丝加以绑扎以代替过去采用的间隔垫块,也就不存在浸渍时垫块跌落的危险。下线后和在整体浸渍前须对主绝缘及匝间绝缘作适当预防试验,以确保下线过程中没有损坏绝缘。试验后在联结处铜焊并绝缘,见图 2-3、2-5 和 2-6。

③ 整体浸渍——将预先干燥的整个定子放到一个很大的浸渍罐内,罐中抽真空至很低的绝对压力为止,输入浸渍树脂,如一种无溶剂的改性环氧树脂,直到整个绕组全部浸没,并在液态树脂上面施加几个大气压使树脂浸透,这时进行检查以确保线圈被树脂全部均匀地浸透和充满树脂后放出过剩的树脂,见图 2-1、2-2 和 2-7。

④ 烘干——将绝缘固化的整个定子从罐中吊出置于炉内烘干,见图 2-4,然后进行最后试验检查。

虽然法国于 66 年认为整体浸渍的电机一般限于 7KV 以下,实际上最近几年也大多数用于 6.6KV 电机,但是瑞士却曾用于 13.8KV 电压的电机上经过两年的运行未曾发生问题。

据报导,关于整体浸渍,需要强调和注意如下几点:

① 对于高压电机,根据电压情况,在下线前需要在线圈的端部或槽部涂以防电晕层。

② 下线后的绑扎端部玻璃丝带须具有适当弹性,以适应各种不同的空隙。

③ 下线后,匝间及主绝缘要作试验,以确保下线时的操作没有损伤绝缘。

④ 进行整体浸渍时,在抽真空和浸渍过程中须进行检查,以确保线圈全部均匀地充满树脂和浸透。

⑤ 浸渍和固化后的最后检查,包括用 2.5 倍额定电压的工频电压试验、在额定电压下的损失因数以及电晕放电测量等⁽²⁹⁾。

西德认为实现定子整体浸渍的主要限制就是浸渍罐尺寸大小的限制,对于由此限制而不能进行整体浸渍时,或者以后需要拆除线圈的大型电机,有的(如西德)采用未烘硬的线圈进行下线然后再整体烘干。即将线圈先用玻璃丝粉云母带包扎,压型,在真空中浸渍以 Micadur 合成树脂,在未烘硬的状态下进行下线,最后烘硬,这种绝缘工艺可以省去端部整形,并已用在 13.8KV 的 2.5 万千瓦电机上。有的(如瑞士)采用事先在绕组端部用硅树脂处理,在线圈进行浸渍时只有槽部能吸收合成树脂,而端部即使在浸渍处理固化后仍然保持具有挠性,这对下线操作是有利的见图 2-5、2-6、2-7。

据报导,瑞士 BBC 公司采用的整体浸渍树脂是 duro-plastischen 树脂,由于尺寸限制无法进行整体浸渍时采用的线圈浸渍树脂是 Micadur 树脂(见表 2-1)。现在 BB 公司已经成熟地掌握了表中序号 4 和 5 两项工艺,两者分别用整体浸渍和非整体浸渍,但皆属于 Micadur-Compact 绝缘,这种绝缘属于 F 级、最高耐温 150°C,但作为 B 级使用⁽³¹⁾。

目前日本三菱公司报导其整体浸渍罐尺寸允许用到 4 极 6000 千瓦的电机,电压用到 6.6 千伏;对于超过这个容量时则采用 11 千伏级的热弹性绝缘——DR 绝缘。该公司的整体浸渍已达到 F 级绝缘水平,但是作为 B 级使用⁽⁶³⁾。

BBC 公司高压线圈绕组的几种可能性的绝缘系统

表 2-1

		非 真 空 处 理 法			真 空 处 理 法		
序 号		1	2	3	4	5	6
材 料 代 号	槽 部	A	A	A	B	B	B
	端 部	C	A	A	B	B	C
绝 缘 形 式		不连续绝缘		连 续 绝 缘			不连续绝缘
工 艺 过 程		① 槽部绝缘和硬化	① 槽部和端部连续绝缘	② 槽部硬化	② 下线	② 槽部预成型	① 槽部绝缘浸渍和硬化
		② 端部绝缘	③ 下线	③ 下线	③ 真空浸渍	型	② 端部绝缘
		③ 下线	④ 端部硬化	④ 端部硬化	④ 绕组硬化	④ 下线	③ 下线
		④ 端部硬化			⑤ 绕组硬化	⑤ 绕组硬化	

材料代号 A = 玻璃粉云母带, 含有硬化树脂,
B = 玻璃粉云母带, 可浸渍的, 不含树脂,
C = 粉云母带, 带有柔性或可塑性树脂,

序号 4. 系下线后的定子整体浸渍以 duroplastischen 树脂

序号 5. 当定子尺寸大于浸渍罐时采用先浸渍 Micadur 树脂后下线, 据称 B B 公司已成熟地掌握序号 4 和 5 工艺, 两者都是 Micadur-Compact 绝缘。

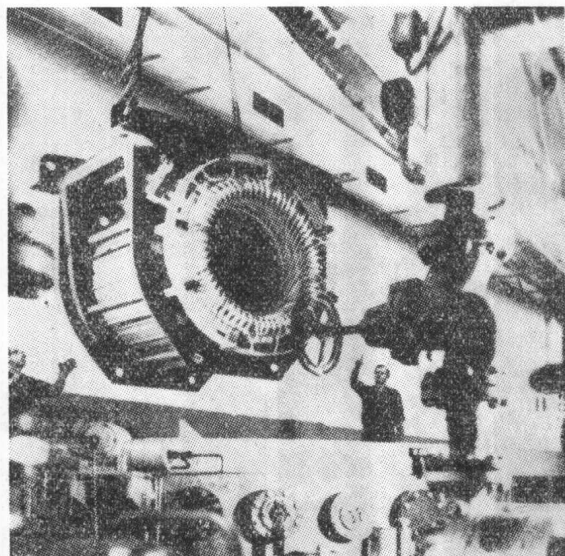


图 2-1 西德西门子公司的电机定子正在吊放罐内进行整体浸渍

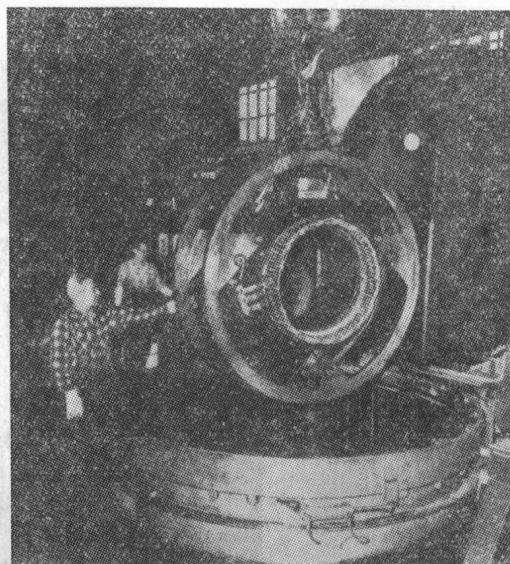


图 2-2 美国西屋公司的大型电机定子吊入整体浸渍罐中