



低温技术 在电力工业中的应用

〔英〕 M. 雷乔威兹 著

科学出版社

低温技术在电力工业中的应用

〔英〕 M. 雷乔威兹 著

赵根深 译

科 学 出 版 社

内 容 简 介

本书叙述低温技术在电力工业中的应用，特别是在电力电缆、发电机和变压器上的应用。全书分七章，前面几章论述了常规电力系统的局限性，低温的产生和保持，以及在低温下的工程材料的性状，接着详细论述了低温电阻和超导电缆。最后一章讨论了超导电性在直流电机、交流发电机和变压器中的应用。全书篇幅不长，但内容全面，不流于表面的叙述，有理论内容，结构紧凑，可供电力工业的设计、研究工作者、大专院校有关专业的师生和低温技术工作人员参考。

M. Rechowicz

ELECTRIC POWER AT LOW TEMPERATURES

Clarendon Press • Oxford, 1975

低温技术在电力工业中的应用

〔英〕M. 雷乔威兹 著

赵根深 译

*

科学出版社出版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1980年11月第一版 开本：787×1092 1/32

1980年11月第一次印刷 印张：6

印数：0001—3,250 字数：132,000

统一书号：15031·317

本社书号：1954·15—5

定价：0.95 元

译者前言

电力工业是国民经济的“先行官”。电力的生产状况标志着一个国家电气化的水平。随着工农业生产的迅速发展,人们生活水平的不断提高,世界各国对电力的需求急剧上升。据统计,世界电站装机总容量几乎每十年翻一番。电力工业发展的总趋向是单机容量、电站规模越来越大,要求输电能力越来越高。常规的发电和输电技术已逐渐暴露出局限性。低温超导技术的应用将为电力工业的革新开辟新的前景。它不仅可使电机容量达到一千至两千万千瓦以上,输电能流密度超过 10^8 — 10^9 瓦/厘米²,而且可使发电输电效率提高,成本降低,设备重量减轻,体积缩小。采用敷设于地下的低温电力电缆进行远距离输电,不仅可以大大减少传输线路的损耗,而且有利于战备、环境保护,少占城市地面,减少对无线电、电视接收的干扰。

本书篇幅不长,但理论与实际密切交融,图文并茂,许多内容为国内现有图书所未见,尤其关于绝缘介质特性的论述,不论在理论上和在实际应用上都具有很好的参考价值。

在本书的翻译过程中,得到了吴杭生、葛新石、关怀、张其瑞等同志的热忱支持,承他们帮助审阅并提出许多宝贵意见,译者谨致深切感谢。

译文错误或不妥之处,诚望读者指正。

1979年2月

序 言

《低温技术在电力工业中的应用》一书的部分内容取材于作者在索斯安普敦 (Southampton) 大学给攻读理科硕士学位的研究生讲授低温物理学时所用的一系列讲义。本书旨在向大学毕业的科技人员介绍低温技术在电力工业中应用的进展近况。书中同时也介绍了有关低温的产生及在低温条件下材料特性方面的一些内容。

在本书的编写过程中,我得到了许多人的协助。在此,我特别对威德 (B. M. Weedy) 博士所给予的有益的批评与指教,对斯蒂普尔 (H. Steeple) 博士热心地审读整个原稿,以及对我的助手利泽莫尔 (R. B. Lezemore) 先生进行了大量的测量工作表示感谢。同时我也想趁此机会对哈蒙德 (P. Hammond) 教授及皮雷利 (Pirelli) 通用电缆制造有限公司对我在索斯安普敦大学任研究员期间所给予的支持表示感谢。

M. 雷乔威兹

1975 年 4 月于米兰

前 言

低温下金属电阻大大降低,尤其是奇妙的超导电现象,多年来一直在激励着电力设备设计师们产生很多设想。最近,在这一方面人们已从理论向实践,从设想向设计方案,从科学向工程迈进了一步。为使低温技术能够在电力工程中开始实际应用,人们已经进行了大量必要的实验工作。可是我认为,要在电力设备中广泛应用低温技术,还必须进行更多的实验工作。

雷乔威兹博士所著的这本书主要是论述低温技术在电力设备中的应用。它所涉及的范围很广,从低温的产生到低温下材料的性能,从低温电缆到超导旋转电机和变压器。尽管本书内容如此广泛,但作者尽可能依据实验得来的实际资料,故决非肤浅之谈。尤其有关低温电缆的几章是这样,因为作者在这方面已进行了大量具有独创性的研究。书中对于低温电缆绝缘介质特性的论述,可能是这方面已发表文献中论述最完善的。

雷乔威兹博士在本书的整个论述中始终不忘将低温电力设备与常规电力设备进行明显的对比。因此,读者会立即感到本书谈的不是臆想,而是实际应用问题。从工程设计观点来看,本书可以说是一本论述低温电力设备应用的入门书。所以我深信,它将拥有广泛的读者。

皮雷利通用电缆制造有限公司

主任工程师 G. 马斯精(G. Maschio)

符号一览表

a_0, a_1, a_2 ——供应系数

A, dA ——面积

b, c, g, m, M ——常数

B, B_m ——磁通密度

C ——电容

C_v ——定容比热

d ——直径

D ——低温液体流动管道直径

e_1, e_2 ——辐射系数

E ——电场强度

E_{cl} ——超导体能量损耗

f ——频率

G ——克分子气体常数

h ——平均粗糙度

H ——磁场强度

H_0 ——I类超导体的临界磁场强度

H_{c1}, H_{c2} ——II类超导体临界磁场强度的下限和上限

H_0 ——绝对零度时的临界磁场强度

I ——电流

k ——热导率

k_e, k_g ——分别为电子热导率和晶格热导率

l ——长度,升

L ——超导体每扭转 360° 的节距

n ——转速

p ——压力
 Δp ——压力降
 P ——功率损耗
 q ——热量
 Q ——热流量率(传热率)
 r ——半径
 R ——电阻
 R_{ac} ——交流电阻
 R_{dc} ——直流电阻
 (Re) ——雷诺数
 S ——表面张力
 S_D ——旋转泵速度
 t ——时间
 T ——绝对温度(K)
 ΔT ——温差
 T_c ——超导体转变温度
 v ——速度
 V ——电压
 W ——功
 α ——线膨胀系数
 β ——蠕变应变
 γ ——格临爱森常数
 δ ——电介质损耗角, 密度
 ϵ ——介电常数
 η ——效率, 粘度
 θ_D ——固体的德拜特征温度
 λ ——趋肤深度
 λ_n ——摩擦系数

ρ ——电阻率
 τ ——衰减时间常数
 σ ——斯忒藩常数
 ϕ ——功率因数角
 χ ——压缩系数
 ω ——角频率

目 录

序 言	iv
前 言	v
符号一览表	vi
第一章 常规发电和输电系统的局限性	1
1.1 引言	1
1.2 常规发电机的局限性	3
1.3 常规输电系统的局限性	6
1.4 电缆的人工冷却	8
1.5 电力电缆的发展现状和趋势	10
第二章 低温的产生	14
2.1 引言	14
2.2 低温致冷	15
2.3 气体的液化	16
2.4 传热	19
2.5 绝热	22
2.6 真空的产生	25
2.7 低温液体的性质	28
第三章 低温下材料的性能	33
3.1 引言	33
3.2 机械性能	33
3.3 热性能	41
3.4 导电性能	47
第四章 低温电缆导体的电气设计问题	52
4.1 引言	52
4.2 正常金属的电阻率	54
4.3 超导体	61

4.4	超导体的退化	66
4.5	稳定超导体的方法	68
4.6	新超导体	73
第五章	低温电缆的绝缘介质	74
5.1	引言	74
5.2	低温液体	79
5.3	低温气体	85
5.4	低温液体浸渍的绝缘纸	87
5.5	低温下的常规纸-油电介质	94
5.6	低温液体浸渍的聚合材料	95
5.7	真空绝缘	102
第六章	低温电缆的致冷与设计	109
6.1	引言	109
6.2	致冷机的负载	110
6.3	低温系统的压降	112
6.4	低温电缆的冷却	114
6.5	导体的机械设计	117
6.6	低温电阻电缆的式样	119
6.7	超导电缆的式样	124
6.8	低温电缆的过载保护	133
6.9	低温电缆终端装置的设计	134
6.10	低温电缆的经济性	136
6.11	低温电缆的前途	141
第七章	超导体和发电	145
7.1	引言	145
7.2	超导直流发电机	146
7.3	超导交流发电机	152
7.4	超导电力变压器	160
参考文献		166
中英名词对照索引		175

第一章 常规发电和输电系统的局限性

1.1 引言

高度工业化的国家，对电力的需要量每隔十年就增长一倍(见表 1.1)，而有些发展中国家对电力需要量的增长率甚至更快。按这一增长率估算，到公元 2000 年，美国所需要的总的峰值电功率将几乎达到二十亿千瓦，约为 1970 年的七倍¹⁾(如图 1.1 所示)。图 1.1 中的曲线虽然是表示美国的情况，但这种指数曲线上升的趋势同样出现在欧洲各国及日本。在美国，大约到 1990 年即要求具有 500 万千瓦调度能力的交流电力系统，而 1990 年以后，将要求发展容量可能高达 1000 万千瓦²⁾的低损耗远距离输电系统。

自然，今后所需发电站(厂)的规模及单机容量均要增加。很明显将要求输电线路的电力容量也跟上负荷的增长。虽然增长的负荷大部分将仍然由架空线来传输，但是由于负荷中心往往分布在人口稠密的城市地区，因此，地下电力电缆在整个输电网络中的比例将增大。这种扩大地下输电网的趋势无疑将由于保护环境的需要而进一步增强。迅速发展地下输电网的需求引起了发电和输电两方面的一系列问题。尽管其中有的是技术性问题，无疑可以及时得到解决。但是有一些是常规电力系统本身的根本弱点造成的，不可能通过本身的改良来解决。

1) 原文为 11 倍，与图 1.1 不符，eleven 疑为 seven 之误。——译者注

2) 指的是系统的输送容量而不是装机容量。——译者注

表 1.1 工业化程度最高的十个国家所生产的电量
(千瓦小时或度)

	月 平 均 (10^6 度)	
	1962年	1972年预报数
美 国	78877	150000
苏 联	30773	70000
英 国	13242	21600
日 本	11697	32481
西 德	11286	23583
加 拿 大	9789	20100
法 国	6924	13200
意 大 利	5405	10500
瑞 典	3385	5985
澳大利亚	2318	5350

数据摘自《电世界》179,88. 麦格劳-希尔公司 (McGraw-Hill Inc.)
1973 年版

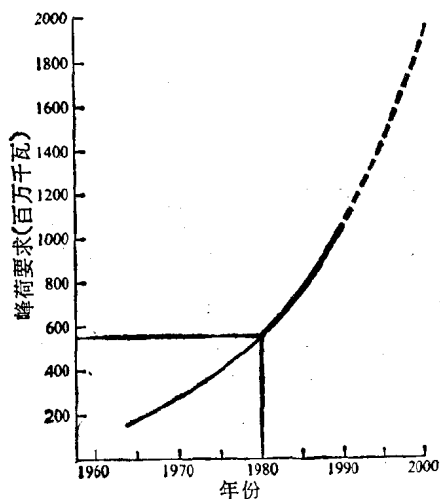


图 1.1 到公元 2000 年美国对峰值电功率的需要量预测 [引
自科里(Corry)和卡萨姆(Kasum) 1972 年的论文]

我们所以能进行有效的发电和输电，是因为我们采用了诸如铜和铝这一类导电性较好的材料。这类材料的电阻要引起发电机和输电线发热。这种有害的热量必须通过导热性很低的绝缘电介质逸散到周围环境中去。因此在常温下，用铜和铝来导电所能获得的电流密度是很低的，约为 1 安/毫米^2 。

把这类材料做的导体致冷到低温，可降低导体的电阻，从而能获得更高的电流密度。例如，当温度为 80 K 时，铜的电阻大约只有室温下的十分之一。将某些称为超导体的材料致冷到 4 K ，还可取得更大的收效，因此时导体的直流电阻显示为零，而对 50 赫(Hz) 的交流电，只产生极小的电阻（大约为正常铜电阻的百万分之一）。虽然超过某一临界磁场强度，超导性就会消失，因而不可能全部发挥超导体的载流能力，然而获得大约 200 安/毫米^2 的电流密度是可能的。尽管在低温下致冷效率很低，但是，综合起来考虑，致冷到低温条件下来发电和输电仍然是有利的。

1.2 常规发电机的局限性

遗憾的是电能不能大量储存，所以必须根据需求发电。但是由于用户负荷经常起伏（如图 1.2 所示），因此必须保证供过于求，否则将导致电力系统运行不稳定，从而迫使所有发电厂停止工作。1965 年，北美地区就曾经发生过此类影响极大的停电事故。因此，必须保持一定数量的备用发电机组，以便在负荷突然上升时迅速投入运行。另外，电站即使在最有利的条件下，其热效率也不会高于 40% 。因此电能成本昂贵是不足为奇的。

降低电能成本的一种途径是制造大型发电机和建设大型电站，因为总单位投资和运行费用是随着单机容量和电站规

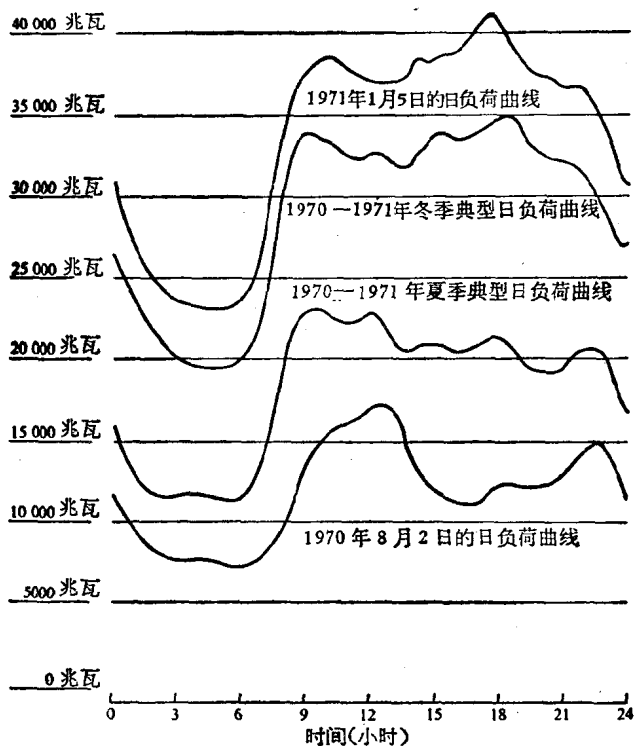


图 1.2 英国中央电业局系统在 1970 到 1971 年冬季和夏季的日负荷曲线
(英国中央电业局 1971 年提供)

模的增大而下降的。随着对电能需要量的不断增长，发电机的单机容量要不断增大，一直达到电机构造上允许的极限，或者达到增大电机容量所带来的好处为稳定性的降低所抵消为止。为此，英国正在安装最高容量为 66 万千瓦的发电机组，美国 130 万千瓦的并列多缸式发电机组也正在运转，但是研制单机容量更大的发电机还面临着十分困难的问题。

到目前为止，增大交流发电机额定容量所采取的措施是增大机组尺寸和采用强制冷却技术。这已使得电机绕组能够采用更高的电流密度。目前，发电机越大，其转子锻件所承受的离心力就越大，因而转子锻造的强度就成了增大发电机容量的一个限制性因素。所以，在研制成抗张强度更高的材料之前，不能指望进一步增大发电机容量。而转子和定子的磁饱和现象，已使磁负载不可能再显著增大，因此提高电机容量的唯一办法是增大绕组的载流能力。目前，一台容量为 50 万千瓦的发电机，其电功率损耗大约为 5000 千瓦，其中 2700 千瓦损失在转子中，其余损失在定子中。定子由软化过的水通过绕组直接冷却，而转子则采用在其周围循环流通三个大气压的氢气的方法来冷却。如要将发电机的额定功率提高到 150 万千瓦，则只有直接用水或油来冷却转子绕组才有可能 [参阅霍利(Hawley)，特里斯(Treece)和拉尔夫(Ralph) 1973 年的论文]。要使制造每分钟 3000 转的水冷转子在技术上是可行的，事先还须解决许多难题。在水冷方面有两个主要问题：一是腐蚀，一是转子转动引起的高水压。

另一种消除所涉及的大量热的途径是利用超导电现象。虽然只有转子的直流励磁绕组可以采用超导体（因为在工频下超导体的损耗较大，因此交流定子绕组不宜采用超导体），也仍能大幅度提高发电机的容量。超导体所能获得的高电流密度使得发电机所允许的磁密比常规交流发电机所允许的磁密大好几倍。这将直接增大发电机的输出功率，或者在输出功率一定的情况下，大大缩小发电机的体积。在此种情况下，铁芯已不再是必要的（因为在如此高的磁密下，铁已经磁饱和）而可以省去，从而可以减轻发电机的重量。此外，这样还将允许加粗¹⁾定子绕组的铜导线，从而减少焦耳(热)损耗。

1) 省去了铁芯后，空间就大了，导线就可以加粗。——译者注

在增大常规发电机容量方面，尤其是在冷却转子方面还有不少难题需要解决。虽然要确切评价超导发电机的经济性是困难的，但是许多研究结果 [参阅哈罗韦尔 (Harowell) 1972 年，科学研究委员会 (Science Research Council) 1972 年，洛奇 (Lorch) 1973 年的文献] 表明，当容量达到 200 万千瓦以上时，超导发电机就优于常规发电机。超导发电机除其单机容量能超过 200 万千瓦 (常规交流发电机的额定容量看来不大可能超过 200 万千瓦) 之外，还具有重量轻、体积小、效率高、成本低等优点。当然可靠性是采用超导发电机时首先要考虑的，因为一台 200 万千瓦发电机的运行一旦发生故障，就将导致很大范围的混乱并使几百万人口同时失去电力供应。

1.3 常规输电系统的局限性

发电站(厂)规模的扩大以及单机输出功率的增加，将要求建立与之相应的大容量输电系统。由于经济方面的考虑，发电站常座落在燃料供应场地附近；而由于燃料供应场地一般都不在城市地区，因此电能必须输送很远的距离。随着核电站的出现，电站将不再依赖燃料场地，可是为了安全起见，核电站也不允许建造在人口稠密地区附近。所以，为了把电能输送到负荷中心去，输电系统的调度能力和输电距离都必须增大。输电系统，特别是高压输电系统还起着联络电站的作用。这种电站之间的相互联系有着显著的经济意义，因为发电站联合运行，可以最大限度地减少备用机组容量，同时又能充分利用最好的发电厂。

在工业化程度较高的国家，大部分电网都采用高压架空线，因为采用高压(英国为 400 千伏，北美洲高达 765 千伏)，电力可以经济地贯穿全国传输。但是，无论从新架设的电站