

超导电力技术将推动 21 世纪电力工业的革命

Superconducting Power Technology Will Promote the Revolution of the Power Industry in the 21st Century

林良真 肖立业

(中国科学院电工研究所 北京中关村 100080)

一、采用超导电力技术是经济和社会发展的必然要求

随着经济和社会的发展,人们对电能的需求量日益增长。根据预测,到 2000 年、2010 年、2020 年,我国的装机容量可分别达到 300GW、550GW、800GW。目前,我国的燃煤发电量约占总发电量的 75%,水力发电量约占总发电量的 23%,核电、太阳能发电和风力发电等约占 2%。其中,水力发电站大多集中在西、南部地区,燃煤发电站的多数靠近煤资源比较丰富的地区。电能消耗情况是:电动机的电能消耗量占总发电量的 60~70%,而负荷中心大多数在中、东部及沿海地区。

电能需求量的日益增长使得电力系统的容量越来越大,与此同时人们对电能质量的要求越来越高。为了改善电能的质量并提高电力系统的稳定性和可靠性,要求电力系统各部分电气紧密连接,从而使电力系统向更大规模方向发展。加之我国电力资源的分布不均和负荷分布不均所造成的矛盾日益突出,使得长(远)距离高压输电成为必要。因此,我国电力系统的发展趋势是:电力系统的容量越来越大,电网向超大规模方向发展,在不远的将来,我国各地区的电网将联成一体。三峡电站建成运行后,这一趋势将更为明显。

然而,由于常规电力设备和电力系统存在着一些自身的缺陷,严重地阻碍了电力系统的发展。一方面,随着电网容量的增加和规模的不断扩大,电力系统的短路容量越来越大。一般情况下,短路电流约为额定电流的 20 倍。不加限制的短路电流对电气设备和正常的工业生产带来很大的危害,这种危害甚至可能是灾难性的,因为短路电流在许多电气设备中会产生高温和很大的 Lorentz 力,它所引起的电压和频率不稳定性将对某些用户产生严重的后果。不仅如此,巨大的短路电流还可能导致电力系统的崩溃。目前,在配电系统中广泛采用的快速熔断丝不具备自动复位的功能,在输电系统中尚无有

效的限流设备。从电网的结构上和运行方式上入手来降低短路电流,其造价非常昂贵。目前,对付短路故障的办法是用最先进的六氟化硫断路器直接开断故障线路,这是一种被动的对付短路故障的方法。目前,六氟化硫断流器的最高开断容量约为 63kA,要进一步提高其开断容量是非常困难的。由于受现行技术的限制,要扩大电网的输送容量与规模,必须对短路电流采用有效的限制措施。

另一方面,常规发电机组的过载能力较低并且电力系统中缺乏能对功率振荡和功率失衡作出快速反应(或补偿)的功能设备。这就使得电力系统的功率只能维持基本的相对的平衡。因此,一旦电力系统发生扰动特别是较大的扰动(如短路故障),可能导致严重的功率失衡,从而引起系统崩溃并对电力系统产生破坏性的危害。常规电力系统是依赖于机组的惯性、继电保护和自动控制来保持系统的稳定性,这一做法已经不能适应电力系统发展的需要,必须寻找新的稳定思路以缓和甚至消除电力系统中的扰动所造成的影响。

第三,常规电力系统的效率受到铜、铝等基本导电材料的限制,要进一步提高难度很大。我国电网的功率损耗约占总发电量的 8.5%,这是一笔巨大的浪费。1997 年,我国发电容量约为 200GW,电网的功率损耗达到 17GW,相当于一个三峡电站的发电容量。预计到 2010 年,我国的总发电容量将达到 550GW,电网的总损耗将高达 47GW。目前,我国发电量的 75% 来自燃煤发电。燃煤发电会造成环境污染。通过显著降低电网的损耗,不仅可提高效率,而且可降低燃煤发电量,从而减少污染排放量。

第四,常规电气设备占地面积大,而人口密集的大中城市正是负荷中心。我国是一个人口大国,土地紧缺,而人口多集中在中、东部地区。一方面,随着经济的不断发展,城市人口和较发达的地区人口密度会越来越高。另一方面,随着电能需求量的不断增长,城市和中、东部地区对电网建设占地的需求量也越来越大。要解决这一矛盾,必须使电力系统有根本性的变化。

第五, 可再生能源如太阳能发电、风力发电和潮汐发电的能量密度低, 并且容易受到气候条件的影响。要使这种能源得到充分有效的利用, 必须采用新的技术措施改善其品质并使其能更为有效地与大电网联结。

综上所述, 经济与社会的发展要求采用最新的电力技术取代陈旧的电力技术。采用超导电力技术, 不仅可以大大提高单机容量和电网的输送容量并大大降低电网的损耗, 而且还可以明显改善电能的质量、提高电力系统运行的稳定性和可靠性、降低电压等级、提高电网的安全性、降低电网的占地面积和电网的造价及改造成本, 并使超大规模电网的实现成为可能。不仅如此, 通过大容量的超导输电系统, 可将排污的发电厂建在煤矿和油田附近或将核电站建在比较偏远的地区, 从而改善人类生存环境的质量。通过超导储能, 还可大大改善可再生能源的电能质量, 并使其与大电网有效地联结。

二、超导电力应用研究发展概况

1908 年始, 荷兰莱顿实验室的 Kamerlingh Onnes 研究汞在低温下的电阻率随温度的变化, 偶然于 1911 年发现了超导现象。但直到 60 年代, 实用的非理想第二类超导材料 NbTi 和 Nb₃Sn 陆续被发现后, 超导电力应用的研究才得以全面地开展。这个时期, 各种超导电力设备的原理性研究结果和模型相继出台。当时, 由于超导线的交流损耗太大, 超导电力应用的研究发展比较缓慢。80 年代初, 低交流损耗的极细丝复合多芯 NbTi 超导材料研制成功后, 超导电力应用的研究再次活跃起来。1986 年, IBM 瑞士研究中心的 J. G. Bednorz 和 K. A. Müller 发现了 La 系高温超导材料。随后的近两年时间里, “高温超导热潮” 象厄尔尼诺现象一样席卷全球, Y 系、Bi 系和 Tl 系高温超导材料 (临界温度为 85K~125K) 相继被发现。高温超导电力设备可在液氮温度运行 (77K), 与低温超导电力设备相比 (运行于液氦温度, 4.2K), 不仅运行成本大大降低, 而且磁—热稳定性大大提高, 因而具备了大规模应用的可行性。在“高温超导热潮” 的推动下, 很多国家和跨国公司都制定了自己的超导技术发展战略。MIT 的科学家迅速组建了响亮的美国超导公司 (ASC), ASC 在 Nasdaq 上市的股票十分抢手。继 ASC 之后, 美国又有几家超导技术公司相继成立。

自那次“科学厄尔尼诺”现象以来, 实用化高温超导材料的研究已经取得了长足的进展。目前, 实用高温超导材料已经商品化, 价格约为 \$ 600/ kA · m, 相应的载流性能约为 $J_c = 100 \sim 200 \text{ A/mm}^2$ (77K, 0T), 单根高温超导带的长度已经可以达到几千米以上。与此同时, 高温超导电力应用的研究蓬勃地

开展起来, 而低温超导电力应用的研究则相对萎缩了。在过去 10 多年的超导技术研究中, 政府的投入仍占主要部分, 研究工作的大部分也在高等学校和研究机构进行。近几年来, 美日欧各国政府和世界各大公司投入了大量的人力和资金用于超导电力应用的研究。在 21 世纪来临前后, 超导电力技术产业化的呼声越来越高。储能量为 1~10MJ 的小型低温超导磁储能系统 (SMES) 已经商品化, 价格约为 70~90 万美元。高温超导限流器已经在电厂和变电站成功地通过了试验运行, 基本上达到了实用化的水平, 并即将商品化。短距离内传输大电流的高温超导电缆已经在发电厂和变电站得到实际的应用, 更多的类似的应用也已在美、日、欧等国家和地区进行。小型高温变压器已成功通过了试验运行, 中等容量的高温超导变压器将在 2001 年投入运行。高温超导发电机和电动机也有成功的试验品问世, 例如日本 Super G M 计划的 70MW 超导发电机已经成功地通过了 1000 小时的试验运行; 美国 Reliance 公司已经成功研制出 200 马力的高温超导电动机, 5000 马力的高温超导电动机将于 2001 年投入运行, 功率为 25000 马力的用于美国海军航空母舰推进的高温超导电动机也正在研制之中。

三、经济可行性分析

一项新技术和发明能否得到推广的关键往往不在技术问题上, 而在于经济上的问题。根据目前的技术水平估计, 容量在 300MVA 的超导发电机和容量大于 30MVA 的超导变压器比常规的更为经济。同样, 大容量 (>1GV) 长距离 (>200km) 的超导电缆比常规输电线路的经济性更高。随着电力系统容量的不断增长, 电机的单机容量将向更大规模方向发展, 电能的输送也将向超大容量远距离方向发展。因此, 超导电力设备将具有很大的经济优势。

研究表明, 对于 300MVA 的电机来说, 超导发电机和变压器的总功率损耗只及对应的常规电机的 40%。超导电缆的功率损耗只占其输送容量的 0.1% 左右, 比常规电缆的 7% 低得多。如果包括制冷功率, 超导电缆的总损耗仅约为常规电缆的 35%。据统计, 我国电能的近 60%~70% 被各种电动机消耗。如果采用超导电动机, 可将效率提高 1%~1.5%, 其节约的电能是非常可观的。目前, 我国输电系统和配电系统 (T & D) 的损耗约为电力系统容量的 8.5%。采用超导电缆和变压器后, 可将该损耗减少至 4.2%。如果采用超导发电机, 则可将发电—输电—配电的总效率提高约 5%。据统计, 如果全部采用超导电缆、超导电动机和超导发电机, 则按现在的电价和用电量计算, 则我国每年可分别节约

400 亿元、400 亿元和 120 亿元(共 920 亿元)。

当然, 以上还没包括采用超导电机和电缆所降低的电网的建设费用、改造费用和通过提高效率降低污染排放量所带来的经济效益。污染会造成经济“溢出”(即外部经济效果)。我国燃煤发电量约占总发电量的 75%。通过提高效率, 可减少煤的消耗量, 降低污染排放量, 从而减少经济“溢出”。据统计, 我国燃煤释放的 SO_2 占全国总排放量的 85%, CO_2 占 82%, NO_x 占 60%, 烟尘占 70%。1997 年, 我国 SO_2 的总排放量为 2 346 万吨。我国酸雨区域正在迅速扩大, 已经超过国土面积的 40%, 1995 年酸雨所造成的经济损失达到 1 165 亿元。这其中, 燃煤发电对环境污染的贡献占很大的比例。如果采用超导电力技术, 使总的发电—输电—配电的总效率提高约 5%, 则目前我国可节约用电约 1 125 万千瓦, 即可少建 11 座百万千瓦的燃煤发电厂。

随着电能需求量的日益增长, 电网向超大规模方向发展。与此同时, 人们对电能质量提出了更高的要求。SMES(低温超导磁储能系统)可以大大改善电能质量, 降低特殊用户为维持高质量电能所付出的高额成本, 并可减少扰动和瞬时故障对电力安全运行系统造成的危害。因此, SMES 的广泛应用将产生巨大的社会效益。

电力系统发生的故障中 90% 以上为短路故障, 短路故障电流约为额定电流的 20 倍。因此, 短路故障对电力系统的稳定可靠运行会造成巨大的威胁。一般说来, 电气设备按短路容量设计, 所以很不经济。在电力系统中安装高温超导限流器(SFCL), 可大大降低短路故障电流, 从而显著提高系统的稳定性和可靠性、大大改善电能质量、明显降低电网的建设和改造成本并提高电网的输送容量。因此, SFCL 所带来的巨大经济效益和社会效益是难以估量的。

四、前景预测

一般说来, 一项新技术往往会在某一时间上出现大的突破, 从而使相关产品的性能大大提高而价格大大下降, 进而使其得以迅速推广并产生巨大经济效益。国际科技界和产业界普遍认为: 超导技术

(上接第 57 页)

提高 1 倍以上。用加鲁梅克斯黄贮料喂养的 90 只羊平均日增重 0.2~0.3 公斤, 且羊肉鲜嫩, 质量明显提高。

4 肉猪饲喂 我国生猪在畜禽产品中居首位, 但养猪耗粮多, 寻找新的饲料资源对促进我国养猪业的发展具有积极意义。曾在四川的什邡市作过饲喂试验, 时间两个月。分 3 组进行: 第一组, 猪平均体重 96.4 公斤, 平均耗全价饲料 122.3 公斤, 耗鲁

形成规模产业的问题不是“是否”的问题, 而是“何时”的问题。根据第五届国际超导工业高峰会议(即 ISIS-5)的预测: 作为 21 世纪具有重大经济战略意义的高新技术, 超导电力技术(将以高温超导为主)将会在 2010~2015 年左右出现大规模的应用; 2010 年, 全球超导电力技术方面的产业将达到 74 亿美元(其中 SFCL 占 35 亿美元, SMES 占 15 亿美元, 超导变压器占 15 亿美元), 占整个超导产业的 29%; 到 2020 年, 全球的超导产业将可达到 2 440 亿美元, 其中电力方面将达到 700 亿美元。

1997 年, 美国 IGC 的创始人 Carl H. Rosner 根据科技界和产业界的估计并结合目前超导技术的发展情况得出如下预测: SFCL、超导变压器、超导电缆、超导电动机、超导发电机的商品化时间将分别是 1999 年、2002~2006 年、2002~2010 年、2010~2020 年、2020 年。根据 Rosner 的预测, 到 2010 年左右, 除超导发电机外的其它超导电力设备都可达到商品化阶段, 其中高温超导限流器将会达到大规模应用的程度。Rosner 非常肯定地说: 21 世纪将是“超导技术时代”, 超导技术对于 21 世纪将如同半导体技术对于 20 世纪一样具有重要的意义, 而 21 世纪的超导材料将如同 20 世纪的铜一样被普遍地使用。

正因为如此, 美国能源部认为超导电力技术将是 21 世纪电力工业唯一的高技术储备, 美国科技界认为: 超导电力技术将是实现美国长期能源发展战略的最可靠的选择; 日本新能源开发机构更是认为发展超导电力技术将是在 21 世纪全球竞争中保持尖端优势的关键所在。作为超导技术最重要的组成部分, 超导电力技术将率先形成规模产业, 并将带来电力工业的革命, 从而将大大推动整个超导技术的产业化。可以认为: 超导电力技术将是 21 世纪具有经济战略意义的高新技术。

总之, 超导电力技术的前景是相当广阔的, 而下一个 10 年将是国际超导电力技术竞争的关键时期。我们热切地希望我国政府部门和科技界能对超导电力应用研究予以高度的重视, 从而为我国在 21 世纪国际超导技术产业中占有一席之地打下坚实的基础。

(责任编辑 王宏章)

梅克斯 K-1 240 公斤, 肉料比为 1: 3.36; 第二组猪平均体重 98.3 公斤, 平均耗常青料甘薯藤 279.7 公斤, 肉料比 1: 3.36; 第三组猪平均体重 98.1 公斤, 全部喂全价饲料 163.5 公斤, 肉料比 1: 4.3。结果显示: 采用鲜鲁梅克斯 K-1 与全价饲料混合喂猪比单纯用全价饲料喂猪可省饲料费 46.02 元/头。使用鲁梅克斯 K-1 作饲料降低了养猪成本, 提高了养猪的效益。

(责任编辑 孙立明)