超导电力技术

肖立业　林良真　戴少涛

现代社会，电力在能源消费结构中的比例是一个国家发达程度的标志之一。随着我国社会发达程度越来越高，电力的需求量也必将日益增长。例如，2003 年，我国总的发电机装机容量约为 3.5 亿 kW，而 2012 年，我国总装机容量已经接近 12 亿 kW，预计到 2025 年，将超过 20 亿 kW。由于我们越来越多地依赖电力，因此，作为实现电力输送和分配的电网，其安全稳定性和可靠性也就决定了我们获取电力的安全稳定性和可靠性。一旦失去电力供应，我们将无所适从甚至陷入混乱，因为我们将无法使用电脑和网络，我们的家电设备将罢工，地铁和电梯等交通工具将无法运行，银行只能停业，需要得到急救的病人将无法得到应有的治疗，自来水也将无法供应，工厂将停止生产，超级市场将无法营业……2003 年 8 月，美国和加拿大的大停电，使 5000 万人在数天内失去电力供应，造成了大量的经济损失；2012 年 7 月，印度大停电甚至使约 6 亿人在数天内失去电力供应，造成了很大的社会影响和经济损失。由此可见，电网的安全稳定性和可靠性对于人类是何等的重要！

发电、输配电和用电三个环节是由电网联系起来的统一整体。在这里，电网联络着成千上万台位于不同地区的发电机、数十万乃至百万台输变电设备及其辅助设备，以及多达数十亿乃至数百亿个用电设备。在这个网络中，任何故障、事故或干扰所能造成的影响将以光速传递到整个电网。其中，比较大的故障、事故或干扰（如短路、大型电力设备故障、雷击或剧烈的太阳风等）均可能造成电网的局部或整体瘫痪。近年来，可再生能源（如风能和太阳能等）得到了很快的发展，而风能和太阳能因受自然条件的约束，它们具有波动性和间歇性的特点，如果大量接入电网，对电网的安全稳定性和供电可靠性也将带来新的挑战。但由于煤炭、石油、天然气等化石能源发电是不可持久的，且化石能源发电对环境会造成大量的污染和温室效应，因此，人类必将越来越多地发展可再生能源。可见，确保电网的安全稳定性和可靠性将是一项长期而艰巨的任务。

与此同时，现有电力设备是以铜和铝等导体为基础制造而成的，因而具有电阻损耗。据统计，我国电网的损耗占总发电量的约 7%。以 2012 年我国总装机为 12 亿 kW 为例，我国的电网损失达到约 8400 万 kW，大致相当于 3 个三峡发电站的总和，也约等于 1 个欧洲大国的总发电量，损失相当惊人！

本文所介绍的超导电力技术，是基于超导体零电阻高密度载流能力或其超导态－正常态的转变特性发展起来的一门新技术，如果能够实现规模化应用，可望解决电网所面临的安全稳定性问题，并能大幅度地降低电网的损耗。因此，美国能源部将超导电力技术视为“21 世纪电力工业的唯一高技术储备”。

一、超导体的正常态 - 超导态转变与零电阻高密度载流特性

1911 年，荷兰莱登实验室的卡末林 • 昂内斯在测量低温下金属的电导率时发现，当温度下降到 4.2 K 时，汞的电阻完全消失（图 1），他把这种现象称为超导电性。由图 1 可以看出，汞的电阻率只有达到一定温度以下时，才能由正常态转变为超导态，这个转变过程称之为正常态－超导态的转变。超导体从正常态转变到超导态的温度称为临界温度，记作 T_c。对于一般超导材料，其超导转变通常发生在 T_c 附近的一个温度范围，这个范围称为转变宽度。这个转变过程是可逆的，即温度升高后，超导态又会恢复到正常态。

实验进一步发现，随着外部的磁场升高，汞也会很快就失去了超导特性。迫使超导体失去超导特性的磁场为超导体的临界磁场，记作 H_c。在小于 T_c 的不同温度下，H_c 是一个随温度变化的值，一般随温度降

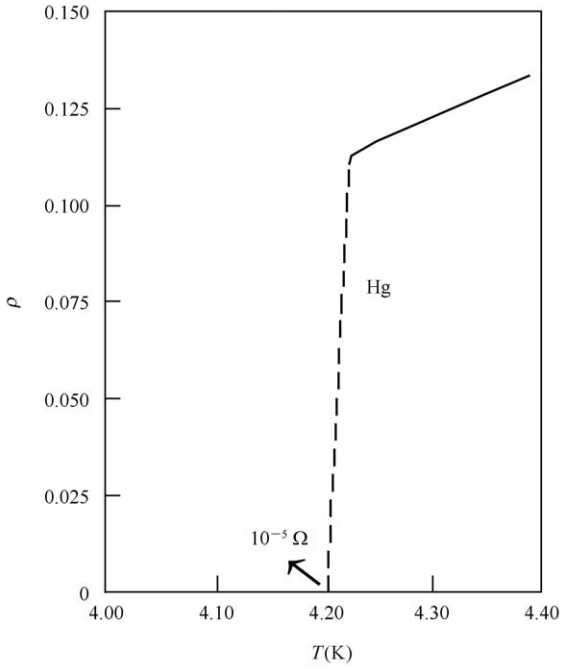


图 1　超导体的正常态－超导态转变

低而提高。类似于临界温度，超导体在临界磁场附近的超导－正常态转变也有一个宽度。在超导体中通以电流时，随着电流的增加，超导体也将在某一特定电流值以上失去超导特性，这一电流值被称为超导体的临界电流，记作 I_c。由于 I_c 与超导体的载流截面积 S 成正比，在科学和工程上人们更常用的是临界电流密度 $j_c=I_c/S$。因承载电流增加而发生的超导体向正常态的转变不是突变过程，为此人们根据超导体的电场强度 E 或电阻率 ρ 来确定超导体的临界电流，通常用的电场判据为 E=10 μV/m 或 E=100 μV/m，对应的电阻率判据为 $\rho=10^{-13}$ Ω•m, 或 $\rho=10^{-14}$ Ω•m（约为相同温度下铜的电阻率的万分之一）。超导体的 T_c、H_c 和 j_c 互相关联，如图 2 所示。超导体在环境条件位于它们构成的曲面以下时呈现超导态，在这个曲面以上则转变为正常态。

到目前为止，人类已经发现了成千上万种超导体。已发现的超导体 T_c 最高约 160 K，有些超导材料的 H_c 可达 10 T 以上，理论最高值达 100 T 以上；有些超导材料的 j_c 高达 10^3A/mm^2 以上。

根据物理学家的分类，按照转变温度范围，可以将超导体分为低温超导体（超导临界温度一般低于约 25 K 的一类超导体，一般工作温度为液氦温度

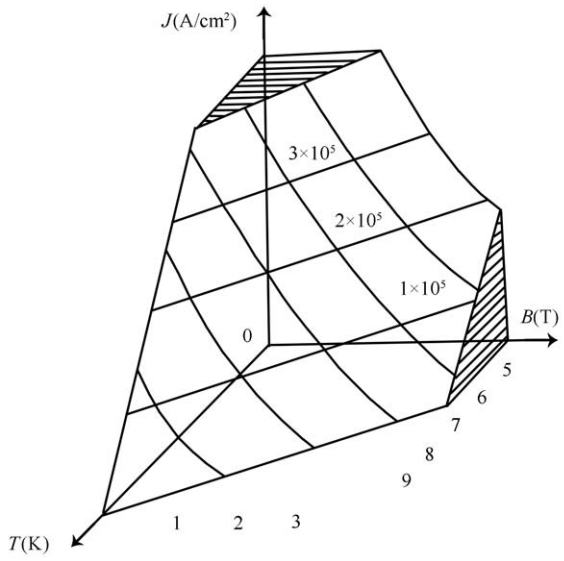


图 2　超导体三个临界参数及其相互关系

即 4.2 K）和高温超导体（超导临界温度一般高于约 25 K 的一类超导体）。当前，具备实用价值的低温超导体主要包括 NbTi、Nb_3Sn、Nb_3Al 等。1954 年，美国科学家马赛厄斯（B. T. Mathias）发现了 A15 型超导化合物 Nb_3Sn，这种超导材料在较高的磁场下（如 10 ～ 20 T）仍能保持很高的载流能力（大约为 100 ～ 500 A/mm^2）。然而 Nb_3Sn 脆性显著，难于成材，直到 1970 年代，许多实验室才用青铜法成功制备出高性能 Nb_3Sn 多芯超导体。而 1964 年发现的 NbTi 合金超导体加工性能良好，具有良好的塑性、很高的强度以及较高的性能价格比，因此其出现大大推动了超导技术的研究与应用。

1987 年，科学家们发现了可以运行在液氮温度及以上的高温超导体。目前，高温超导主要包括钇系（T_c 约为 90 K）、铋系（T_c 约为 90 ～ 110 K）、铊系（T_c 约为 125 K）和汞系（约为 135 K）。其中最有实用前途的是铋系（又分为 Bi-2212 和 Bi-2223 两种）、钇系（Y123）。高温超导体具有比低温超导体更高的临界温度和临界磁场，在液氮温度的临界电流密度 J_c 也可以达到 100 ～ 200 A/mm^2 以上（而铜的工程电流密度大约为 2 ～ 3 A/mm^2），因此具有很好的实用价值。图 3 显示了具有同等载流能力的铜电缆与美国超导公司生产的 Bi-2223 超导带材，可以看出，超导带材在减少导体的重量和体积方面具有显著的优势。

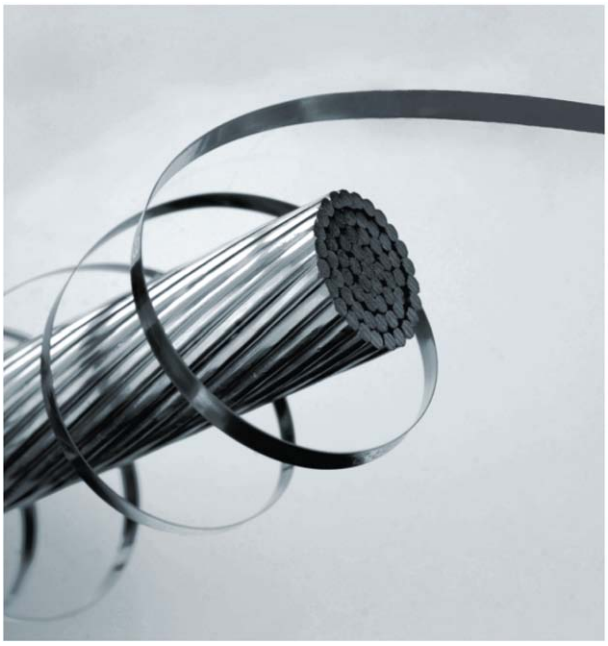


图 3　具有同等载流能力的 Bi-2223 超导带材（扁带）及铜电缆（多股圆形电缆）的比较

二、超导电力技术

超导电力技术就是基于如上所述的超导体零电阻高密度载流能力或其超导态－正常态的转变特性发展起来的一门新技术，主要包括超导故障短路电流限制器（简称超导限流器或 FCL）、超导储能系统（简称 SMES）、超导输电电缆、超导变压器等电力设备。

1. 超导限流器

如图 4 所示，超导体直接串联在输电线路中，当系统正常运行时，由于运行电流低于超导体临界电流，超导体处于超导态，整个超导体呈现出的电阻为零，压降也为零，对电网影响为零。当电网发生短路故障时，流过超导体的电流迅速增大，当超过超导体的临界电流时，超导体就会失超，转变为常导态，使线路电阻迅速增大，短路电流就会被限制在一定范围内。该超导体可以是无感超导线圈，其电感很小。图 4 中之所以要为超导体并联一个常规旁路阻抗，目的是在电网发生短路故障时，为超导体分担一定的短路电流，降低超导体的温升，便于超导体快速恢复，因此该电阻被称为旁路阻抗。实际应用中，超导限流器还有多种原理，但该原理是最简单也是很有应用价值的

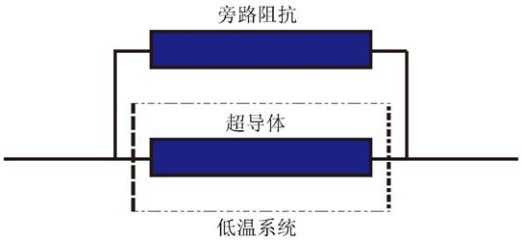


图 4　超导限流器的基本原理

一种。

由于电力设备在短路状态经受的电流是正常运行时的 20 倍左右，其经受的电动力和热损耗功率将达到正常时的 400 倍左右，因而可能会造成设备的损坏。超导限流器有效地降低了短路电流，也避免了短路电流对电力设备的冲击，从而保障了电网的安全稳定性。同时，严重的短路故障可能会造成电网中的功率失去平衡，从而造成电网的瓦解。通过降低短路电流，并将部分功率由超导限流器吸收，也就大大降低了电网瓦解的风险。

2. 超导储能系统

由于超导体的电阻为零，因此利用超导体研制而成的超导线圈的电阻也为零。如果将超导体通上电流以后，且将超导线圈闭环运行，则超导线圈中的电流不会衰减。这就相当于把能量以磁场的形式储存在线圈中（储存的能量为 $0.5LI^2$），而当外部电网需要时，可以将该能量释放出来回馈给电网。这就是超导储能（SMES）的基本原理，如图 5 所示。

大家都知道，电网中的用电是随机的，发电需要根据用电的多少来供应，也就是说，发电功率和用

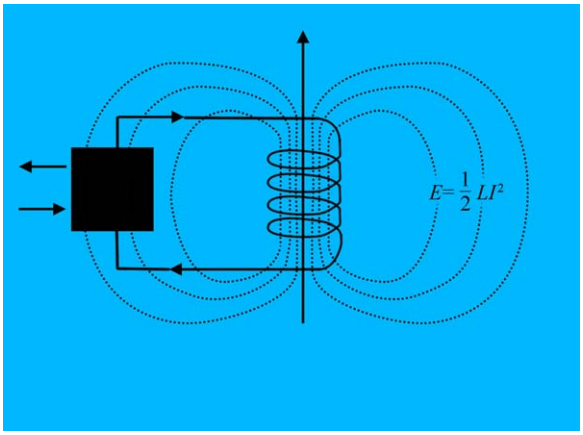


图 5　超导储能系统的基本原理

电功率要达到瞬态平衡。但是，发电机响应用电是需要时间的，因为发电机组是有惯性的。对于较小的功率不平衡，电网能够通过小的电压或频率的波动来达到平衡，这种较小的波动是电网所允许的。但当大的用电负荷或发电机组的投入和切出时，引起的功率不平衡就可能对电网安全稳定性或用电的可靠性造成影响。同时，由于电网可能会出现各种故障和干扰，也会导致瞬态功率不平衡。因此，如果在电网中接入超导储能，在发电多于用电的时候吸收电网的功率，而在发电少于用户需求时向电网回馈电能，就可以解决电网中的发电和用电的瞬态功率平衡问题，从而避免电网出现安全事故。

储能系统有多种多样，如抽水储能、飞轮储能、化学电池储能、压缩空气储能、电容器储能等，但超导储能是唯一具备高功率快速响应能力的一种储能系统，对于平滑电网瞬态功率不平衡具有重大的应用价值，因而受到电力工业界的高度重视。

3. 超导输变电设备

超导输变电设备主要是指超导输电电缆和变压器。由于超导体具有零电阻高密度载流能力，利用超导体制造而成的输变电设备就具有损耗小、体积小、重量轻的优势，从而在大幅度减少电网损耗及降低城市电力设施的占地方面具有显著的优势。图 6 显示的是一种超导输电电缆的基本结构图，这种超导电缆主要由骨架、绕制于骨架上的高温超导材料、维持低温环境的低温容器（即主要由高真空与超级绝热材料来维持低温环境）以及保持绝缘性能的电绝缘材料和绝缘护套组成。研究表明，对于长度为达到千米级以上的超导电缆，即使考虑维持其工作温度（如 77 K）所需的功率，其总输电损耗仍比常规电缆低 50% 左右，且同等尺寸超导电缆的输电容量将比常规铜电缆高 3~5 倍。对于超导变压器而言，当容量达到 3 万 kW 以上时，其电能损失和占地已经较常规变压器具有优势，而电网中的大型电力变压器的容量常常达到数十万乃至百万千瓦的容量，因而超导变压器也具有重要应用价值。

4. 超导变电站

变电站是整个电网的重要节点，它联系着电网中

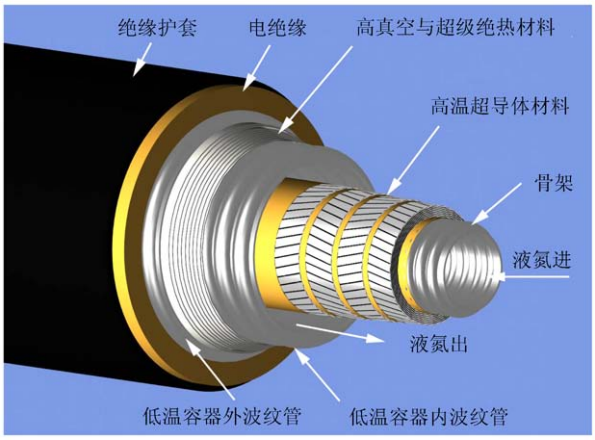


图 6　一种超导电缆的结构图

的发电厂、输电线路和电力用户，其重要性是不言而喻的。但常规变电站还基本不具备限流器和储能系统，因此，电网的安全可靠性存在隐患。超导变电站包括上述所有超导电力设备，是超导电力技术的总体集成。

图 7 是中国科学院电工研究所研制的国际首座示范性超导变电站的结构示意图。其中，超导储能系统并联于 10.5 kV 母线，超导限流器、超导变压器和超导电缆分别串联于输电线路上。当系统出现功率不平衡时，可以由超导储能系统进行动态调整，而发生短路故障时，超导限流器可以快速限制短路电流，超导

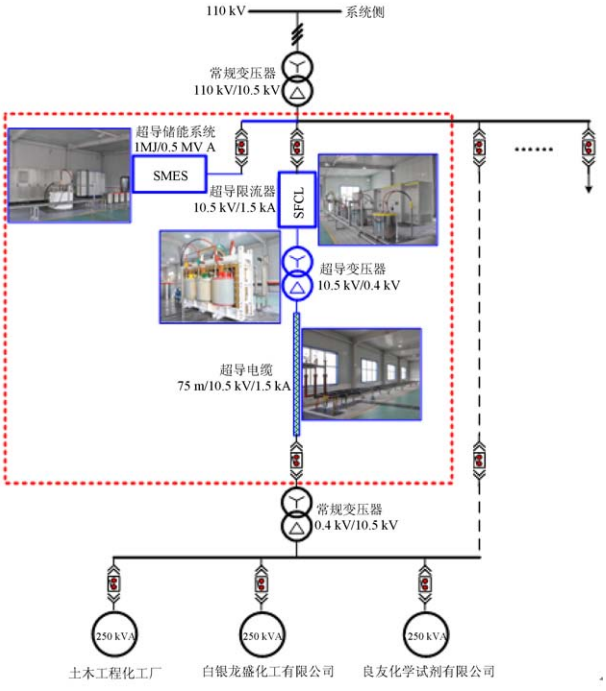


图 7　国际首座示范性超导变电站的结构示意图



图 8　世界首座示范性超导变电站现场

电缆和变压器以高效的方式向电力用户供应电力。因此，超导变电站的运用，可望解决电网的安全稳定性问题并提高电网的运行效率，对于可再生能源接入电网也将提供方便。

三、超导电力技术的发展现状及前景

20 世纪 60 年代以来，随着低温超导体开始走向实用化，人们就开始研制用于电力和能源的各种超导装备。20 世纪 90 年代，基于低温超导材料的超导输电电缆、超导限流器、超导储能系统和超导电机均研制成功并进行了试验。由于低温超导电力设备的制冷条件比较苛刻，随着高温超导体的发现，超导电力技术的研究全面转向以高温超导体为基础，至今，世界范围内已经广泛地开展了各种高温超导电力技术的应用示范。例如，2006 年，由美国超导公司等合作研制的 600 m、138 kV 高温超导电缆已经在纽约长岛投入实际运行，纽约电力公司还计划将该超导电缆作为一个永久性的电力设施用于居民的供电。多种形式的高温超导限流器已经分别在美国、德国、韩国等国家投入了配电网示范运行。自“十五”计划以来，中国科学院电工研究所全面系统地开展了超导电力技术的研究，已经先后研制成 10 kV 级的高温超导电缆、高温超导限流器、高温超导储能系统、高温超导变压器，并在实际电网中进行了示范运行，在此基础上，2011 年，研制成世界首座示范性超导变电站（图 8）并投入运行，该项成果被两院院士评为当年度我国十大科技进展新闻之一；同时，北京云电英纳超导电缆公司、中国船舶 712 研究所、华中科技大学、清华大学、中国电力科学研究院等单位也在超导输电、超导限流器、超导电机和超导储能等方面开展了技术研究与示范。

随着化石能源的日益枯竭以及日益增长的环境压力等因素的驱动，人类已经认识到必须大力发展清洁能源技术，不断提高能源系统的效率，大力提高可再生能源的比重，并逐步实现可再生能源替代化石能源的重大变革。可再生能源的飞速发展无疑对未来电网的远距离输送容量、安全稳定性、电力质量、综合效率等提出了更高的和更为迫切的需求，而基于超导体的独有特性而发展起来的超导电力技术，对于应对这些重大挑战将发挥巨大的作用，因而具有广阔的发展前景。

（北京中国科学院电工研究所　100190）

封底照片说明：

4 月 20 日四川雅安发生了 7.0 级地震，地震发生后，国家国防科技工业局立即紧急启动 5 颗卫星对受震灾区进行遥感监测。这 5 颗卫星是 : 实验九号 A 星、资源一号 02C 星、资源三号星、环境一号 A、B 星。

