

超导电力科学技术——发展中的新学科和新技术 Superconducting Electric Power System——A Developing New Discipline and Technology

唐跃进¹ 李敬东 段献忠 程时杰 潘 垣²

(华中理工大学超导电力科研与发展中心, 教授¹、中国工程院院士² 武汉 430074)

电力是现代工业化社会的主要能源形式之一, 是以计算机为基础的现代信息化社会不可缺少的能源。向现代社会提供电能的电力系统已发展成为一个非常庞大的人造系统。但是, 随着系统的扩大和系统重要性的增加, 电力系统所面临的困难也越来越大。不在技术上有新的突破, 电力系统将难以满足现代社会对电力的进一步需求。另一方面, 随着超导技术的发展, 特别是 80 年代以来在交流超导线材以及高温超导技术上的突破, 使得超导应用技术取得了长足的进步, 一个新兴的超导产业正在形成。目前, 超导在电力系统的应用研究已经取得了可喜的进步, 若干超导电力装置试制成功, 有的已经开始在电网试运行。电力系统正面临着一次重大的技术革命, 一个新兴的科学学科——超导电力科学正在兴起。

一、超导电力——超导与电力的交叉和结合

自 1911 年荷兰物理学家昂尼斯(Onnes)发现超导电性以来, 人们就对超导电性的实际应用提出了许多设想。但是, 直到 80 年代可用于交流的极细丝多芯超导线材开发成功, 才给超导技术在电力工业的应用开辟了广阔的前景。高温超导材料的发现和 90 年代高温超导线材技术的进步, 使得超导技术在电力工业的应用有了更加现实的意义。

电力系统由小到大, 经过低压输电、高电压输电等若干技术变革, 发展为现代的多机、大容量的复杂系统, 成为现代社会生产生活的支柱产业。同时, 随着系统的扩大, 现代电力系统在若干方面正面临着难以克服的困难, 这些困难主要表现在以下几个方面: 长距离、大容量输电的稳定性; 过大的短路电流容量; 大城市的高密度大容量输配电; 电网损耗。

首先, 由于能源资源和能源消费分布的不一致, 电能往往要输送很远的距离。我国水利资源多

分布在西南, 煤炭等火力资源多分布在西北, 而我国的电力负荷却集中在东南沿海经济发达地区。高电压、长距离的西电东送不可避免, 这使得系统的稳定性问题变得十分突出。有些地区因系统稳定性问题, 使得低成本的水力资源无法得到有效利用, 而不得不在负荷中心附近发展火力发电。

其次, 随着城市消费水平的发展, 在大城市, 电能消费的密度不断增加; 相反地, 由于城市地价高涨, 送电通道受到越来越多的限制, 常规的电力技术已经难以解决大城市高密度的送电问题。

而且, 随着电力消费的增长, 电力系统会越来越大, 断路器的断流容量将很难满足系统短路容量增长的要求。

另外, 由于传统电力系统不得不以具有电阻的铜、铝作为导电物质, 无法从根本上解决网络损耗问题, 从而使电力系统的效率难以进一步提高。目前, 我国输配电系统的网损高达 8.5%, 到 2010 年, 按预测的装机容量, 我国将在输配电网损失近两个三峡电站所发出的电能。

显然, 只有在电力系统中彻底解决上述难题, 才能满足社会飞速发展的需要。因此, 电力工业迫切要求一个新的技术革命, 而超导技术正是解决上述困难的一个最佳选择。

目前, 国外的超导应用研究正处在一个新的发展阶段。部分超导应用装置已经步入市场。将超导技术应用于电力系统的研究也取得了长足的进步。超导发电机、超导变压器、超导限流器、超导电缆、超导磁储能系统(SMES: Superconducting Magnetic Energy Storage System)等超导电力装置的实验样机相继试制成功, 有的已经达到或接近实用水平。专家估计再经过 10~15 年的努力, 超导电力的广泛应用将成为现实。21 世纪的电力系统将会系统地引用超导电力装置。图 1 给出了超导电力系统的概念示意图。送电端的 SMES 可用于提高系统的稳定性; 负荷端的 SMES 可用于改善用户的供电品质; 超导电缆可用于向大城市的负荷中心高密度地输送大容

量电能; 超导限流器可限制系统的短路电流并改善系统的暂态稳定性; 全封闭超导送电系统可高效地向系统提供大容量电力。在这种系统地引进了超导电力装置后的超导电力系统中, 各类电力装置相互依存、相互影响, 其系统性能必将不同于传统电力系统, 一个新兴的超导电力科学领域正在形成。

超导科学的进步和电力科学的发展需求使得超导电力科学应运而生。没有超导科学的发展, 超导技术就无法在电力工业得到实际应用; 没有电力工业的迫切要求, 应用超导技术也不可能产生应有的技术经济价值。同时, 在超导电力系统中, 既要求超导电力装置充分发挥超导电性的优越性能, 也要求根据超导电力装置的技术要求来进行电力系统的运行管理。超导电力将是超导与电力两个学科的有机的交叉和结合。

系统的稳定性和供电品质。

在传统电力系统中, 由于没有大容量快速存取电能的器件, 电能的生产和消费必须保持在机—电功率平衡状态。一旦系统受到扰动, 将引发机—电功率失衡, 危及系统的稳定, 甚至导致系统崩溃。传统电力系统的致稳措施主要依赖于继电保护和自动控制装置。这种被动致稳已渐渐不能适应电力系统发展的要求。在发展稳定控制理论的同时, 还必须突破被动致稳的框架, 建立新的主动致稳思想。

利用超导体电阻为零的特性, 可以制造能保持永久循环电流的超导磁储能系统。超导储能系统不仅是一种效率最高的储能方式, 它还可以通过电力电子变流器与系统接口, 实现电能的快速存取, 成为能为系统快速提供有功、无功功率支持的快速响应器件。在系统的适当部位设置 SMES, 不仅可提高电力系统的稳定性, 增加西电东送的输电容量, 同时, 还可以改善系统供电品质、增强分散电力系统的可用性, 也可为重要用户提供备用电源。

一般说来, 在电力系统中应用超导技术, 可以取得图 2 所示的技术、经济效益。

三、超导电力科学技术的研究课题

超导电力科学技术是一个新兴的学科, 超导电力系统的运行性能将完全

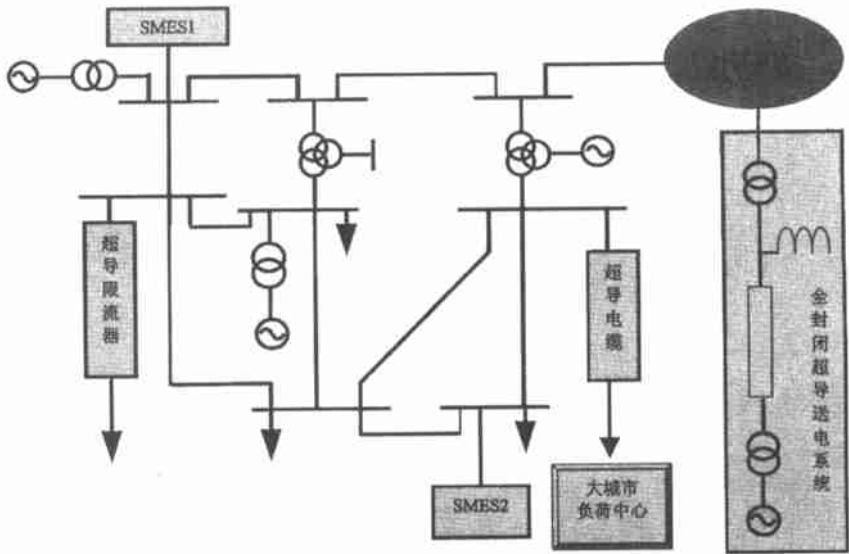


图 1 超导电力系统概念图

二、超导电力的优良特性

应用超导技术可以解决若干现有的常规技术无法解决的电力系统中的重大难题。超导发电机可以使发电机的同步电抗减小到常规发电机的 1/ 3, 从而提高发电机的稳定送电极限。超导电缆可以降低电网损耗, 减少输电线路的占地面积, 以较低电压输送巨大容量的电能, 为大城市的高密度送电提供强有力的技术手段, 同时, 电压等级的降低, 还会降低系统对绝缘水平的要求, 使电网结构得到改善, 带来巨大的经济效益。超导限流器可以极大地限制系统的短路电流, 从而降低系统中电气设备的电动、热稳定的技术指标。

技术经济效益更为明显的是, 超导储能系统 (磁储能和磁悬浮飞轮储能) 可以显著地改善电力



图 2 电力系统中应用超导技术的优越性

不同于现有的电力系统,因此,存在以下一些特殊的有待研究的科学技术问题。

1. 关于超导电力系统的理论研究

电力系统短路等所引起的复杂振荡,是以往非电力用超导装置所不曾碰到的运行环境;而与传统电力装置相比,超导电力装置具有许多完全不同的特性,而这种特性又必然会对电力系统动态特性产生影响。在这种系统和装置相互作用的条件下,必然要求在业已形成的现代大规模电力系统的高阶非线性复杂动态模型中引入完全不同类型的数学方程,两者的结合必然带来许多新的科学问题,对传统的电力系统理论提出新的挑战。为此,首先要深入分析各种超导电力装置的工作机理和电磁特性,建立各类超导电力装置适用于电磁动态、机械动态和稳态分析的数学模型,进而建立超导电力系统的整体数学模型,进行超导电力系统整体和各类装置的仿真分析,进一步研究超导电力系统的运行理论、规划理论、稳定理论、经济优化理论和安全保障理论等,并研究超导电力装置的内部动态特性和与电力系统动态相互作用的机理。

欲利用超导储能为系统提供快速响应容量,必须利用大功率电力电子能量变换装置。电力电子装置为电力系统提供了快速控制手段,但由于超导电力装置不同于传统电力装置的动态行为,须在装置级和系统级两个层次上对自动控制提出更高的要求。超导电力技术的引入,使各类动态电力装置的电气距离大大缩小,使电网中扰动的传递速度加快,影响范围扩大,同时,超导电气设备电阻的减小又会极大地影响到各类装置和整个系统的时间常数,最终表现出可能完全不同于传统电力系统的动态行为。而且,超导电力装置的应用将改变传统电力系统中快速可控元件主要集中于电网端部节点的发电机和负荷的局面,使电网的各环节都可能出现快速可控元件,这就向各类快速可控装置的协调控制提出了更高的要求和挑战。

2. 关于超导电力装置的基础研究

超导电力系统是一个动态系统。系统中的超导电力装置必将遇到诸如系统短路故障、瞬时负荷变化等各种动态过程,承受短路大电流、不平衡电流的冲击以及由此而产生的电磁、机械应力的作用。同时,SMES快速存取能量提供有功、无功功率的性能也要求超导电力装置能在电流变化率很大的动态电流下正常运行,超导电机、超导变压器、超导电缆必须运行在稳定的超导状态,而超导限流器则必须利用超导体在超导状态和常电导状态之间的相变过程。要将这些特性各异的超导电力装置有机地运行于一个动态特性复杂的系统,防止因失超而引起的系统故障,必须给超导电力装置和系统以一整套有充分物理依据的设计、运行和保护准则。为此,

必须研究以下几个方面的基础课题。

(1) 研究大容量交流电流、高变化率动态电流甚至瞬变脉冲电流条件下的超导电线电缆内的磁通运动与交流损耗机理,提出适合超导电力装置各类性能要求的超导电线电缆的合理结构和载流特性,以确保超导电力装置能在各种复杂的动态条件下保持其超导稳定性。

(2) 研究超导电力装置的失超和恢复常态的动态过程,探讨超导状态识别与失超先兆诊断的基础理论,并确立与超导电力装置的稳定性、安全性有关的保护策略。

(3) 研究超导电力装置内部的复杂电磁场优化理论,并以此为依据对超导线圈、超导磁体的结构和位形进行优化设计,减轻在瞬变、动态条件下的电磁应力。同时,磁场优化也是降低交流损耗、提高超导稳定性的重要手段。

(4) 开展低温绝缘的研究,特别重视在超导——常电导状态变化的动态条件下的低温绝缘。

3. 关于超导电力相关学科的基础研究

在超导电力系统中,超导储能磁体与电力系统之间需要进行双向能量交换,大容量、高效益、高功率密度的快速、准确的能量双向交换系统基础理论研究是超导电力科学研究中的重要组成部分。

超导电力能量交换系统,一般是由电子开关元件组成的多相、多重、多电平的复杂非线性系统,这类系统的分析、综合问题是要研究的重要理论问题。电能变换与控制过程中对电力系统的二次污染问题已引起人们的广泛关注,加在超导体上的谐波电流还可能引起超导体的“失超”问题,因此必须进行高功率因数、低谐波电流的电能变换拓扑结构和控制方式等相关技术与理论研究,在超导电力中实现低污染的、清洁的能量交换。相对电力系统来说,电子式能量交换系统所用电力电子器件的耐压、耐流量是很不够的,必须开展由模块化电能变换单元构成的能量变换阵列的优化拓扑结构研究。介于电力系统和超导储能系统之间的能量交换系统必须是极其可靠的,否则会引起严重的后果,故超导电力能量交换系统的可靠性理论、故障诊断及保护技术和冗余结构是确保超导电力得以应用的基础理论与技术,必须深入研究。在上述研究的基础上,通过仿真和模拟试验研究,确定试验性SMES系统用能量变换系统的最佳组合拓扑结构及全数字化控制和监测保护方案,并通过试验,充实、验证理论研究结果,获取实用系统设计准则,可为超导电力系统的应用与发展打下理论基础。

现代低温技术是超导电力科学研究和开拓应用的前提条件之一。研究相关的低温热力学、低温传热学、低温工程学等问题是发展超导电力系统的重要保证。因此,有必要运用低温热动力学和微结

构低温工程学观点研究超导电力系统热稳定性,并研究低温、强磁场、大电流、高真空、高导热、高电压绝缘等特殊条件下的热传输特性、低温界面热阻和最佳热耦合机制等。在此基础上,研究制冷机直接冷却的网络理论,以及超导电力—低温一体化新概念、新机理及其关键技术。并从超导电力应用出发,研究超导电气动态热稳定性模型与冷却介质动态特性及其状态识别,进行高效、节能、闭式循环低漏热率和无磁杜瓦低温系统及低温测控器件的相关技术基础研究,以满足超导电力系统发展对低温技术的进一步需要。

四、对应策略与展望

超导电力科学的研究在我国可以说还是一个空白领域。以超导电力作为发展我国超导科学技术的突破口,既符合我国的国情,又切合超导发展的现实可能。超导科学与电力技术相结合,将在传统电力系统的改造、超导技术的实用化和产业化等方面取得重大的突破并有所创新。

1. 超导科学与电力技术相结合必将推动传统电力技术的改造,提出若干新的概念和一些独具特色的思路,使现有电力系统的稳定性、供电质量、网络损耗、断路容量等理论都得到新的发展。

2. 超导电力科学的基础性研究,不仅可望为我国未来以三峡电站为中心、华中电网为枢纽的全国统一大电网的安全稳定运行探索出新的方案和模式,还可望解决或改善目前我国电力系统中存在的一些老大难技术经济问题,如网损过大、断路器容量不足等,开发出适合我国国情的若干超导电力和电工制造的新技术,形成自己的知识产权,发展我国的超导市场。

3. 为使超导电力装置满足电力系统动态特性而开展的超导电磁特性的研究,将改变目前仅对超导的静态电磁特性进行研究的现状。这必将引发一些新的物理现象和科学技术课题,其某些研究成果将是开创性的,也会促进超导理论研究的发展。

4. 以低温热动力学和微结构低温工程学为基

础,探索超导电力装置动态热稳定性和最佳热耦合的新概念、新机理,将为发展超导电力应用的超导—低温一体化技术的理论与关键技术奠定基础。

超导电力是多学科的交融和结合,我们应当立即从超导电力科学这一学科高度着眼,系统地多学科地开展超导电力科学的研究工作。我们认为,超导电力科学技术的发展必须得到如下学科的强有力的支持,即,电力系统及其自动化;电机与电器;电力电子;低温工程;电磁测量;凝聚态物理;超导材料。

反过来说,超导电力的发展,也必将促进超导物理、超导材料、电力电子、低温工程等学科的交叉和融合,使我国的超导科学从理论到应用全面地同步走向世界先进水平。

参考文献

- [1] Klaus Peter Juengst: "SMES Progress", Proceedings of 15th International Conference on Magnet Technology, Beijing, Oct, 1997, Part 1, pp. 18-23
- [2] C. A. Luongo: "Superconducting Storage System: An Overview", IEEE Trans. on MAG, Vol. 32, No. 4, 1996, pp. 2214-2222
- [3] 东京大学: 奥地利电力公司购入超导磁储能(SMES)设备. 超导电讯, 1999(2): 5(原文为日文)
- [4] 国际超电产业技术研究中心: 超导电力应用技术开发调查研究. 新能源、产业技术综合开发机构, 1998年(原文为日文)
- [5] Y. J. Tang, et al.: "Development of the Prospective Power Transmission Model System Integrated under Superconducting Environment PROMISE", IEEE Trans. on ASC, Vol. 5, No. 2, 1994, pp. 945-948
- [6] Y. J. Tang, et al.: "Quench Current-Time Characteristics of Four Kinds of Superconducting Cables", Cryogenics, Vol. 36, No. 6, 1996, pp. 447-455
- [7] H. M. Cheng, et al.: "Thermodynamic Optimization of Conduction-cooled HTS Current Leads", Cryogenics, Vol. 38, No. 7, 1998, pp. 729-736
- [8] Ivan Hlasnik and Daisuke Ito: "AC Application of Superconductors at 50/60Hz Frequency", Cryogenic Engineering, Vol. 28, No. 8, 1992, pp. 404-426

(责任编辑 王宏章)

人,每日开行60对客车,使用TGV高速列车105列之多,若采用磁浮列车,购置费少于轮轨高速列车。显然,总投资磁浮系统均低于轮轨高速。

综上所述,传统的轮轨高速已是落伍的“明日黄花”,为了实现技术发展的跨越,应肯定21世纪的高速铁路发展方向是磁浮列车。笔者建议如下:(1)停止评估京沪高速铁路项目建议书;(2)修建磁浮试验线;(3)京沪既有线应即电化;(4)租用摆式列车2~3列在电化后的京沪线试运,并与国外合作研制摆式列车,为全国铁路普遍提速创造条件。(责任编辑 蔡德诚)

(上接第22页)

宁段因通过软土地段修建了不少高架桥,基本上相当于山区。

京沪高速线高中速混跑,需要增加不少待避站及延长股道。中速机车为6轴23吨集中荷载,而磁浮列车为2.4T/M匀布荷载,载重比轮轨中速列车轻得多。另外,磁浮线桥梁造价低,而且可全部避免修建隧道。

据《西方交通建设》1999年1期报道,德国柏林—汉堡线年运量1500万人,每日开行51对客车,仅需磁浮列车11列;法国大西洋线年运量1800万