

# 超导技术在智能电网中的应用

纪尚昆

(钦州供电局调度管理所, 广西 钦州市 535000)

**[摘要]** 本文阐述了超导技术的发展, 通过超导技术在智能电网中的应用, 分析超导电缆和超导储能装置技术在这两个领域的作用及与传统方式的比较, 得出超导技术所带来的革命性的进步, 并分析超导技术发展所面临的一些难题。

**[关键词]** 超导电缆; 智能电网; 超导储能; 新能源

## 1 引言

1911年, 卡麦林·昂尼斯(Kamerlingh Onnes)发现汞在低温下具有“零”电阻的“超导电性”, 从而使人类开创了超导新纪元。1986年4月, 瑞士IBM实验室的Bednorz J G和Muller K A发现一氧化物具有超导电性, 其超导态转变温度高于液氮温区。这个发现在全世界物理界引起极大的震动, 并立即在世界范围内掀起探索、研究高温超导体的热潮, 两位科学家也因此获得了当年的物理学诺贝尔奖。随后, 美国、中国等物理学家相继发现转变温度高于液氮温区的超导体, 从而开创了液氮温区超导体的新时代, 于是超导技术又迈上了一个新的阶段。超导材料的性质可由三个基本参量来表征, 即临界温度 $T_c$ 、临界磁场强度 $H_c$ 和临界电流 $J_c$ [2,3]。三者的关系如图1所示。

高温超导材料在能源、交通、医疗、科学仪器、国防、信息、农业、环保和材料制备等多方面具有重要的应用价值, 其中高温超导强电应用技术主要包括高温超导磁体技术和高温超导电力技术两个方面。

高温超导磁体技术主要应用于大型科学工程、工业交通、医学生物以及其他方面, 其中超导核磁共振技术(MRI)由于其具有的高场强、高性噪比等特性, 使其已经广泛应用于医疗机械中, 依靠其能够拍摄心脏脑部的活动及进行血管造影。

高温超导电力技术的应用对提高电网容量、电能质量、供

电可靠性和安全性具有重要意义, 包括输电电缆、限流器、电动机、发电机、变压器、超导储能系统等在内的一系列高温超导产品将给电力技术的发展、人类的文明产生深远的影响, 其中,

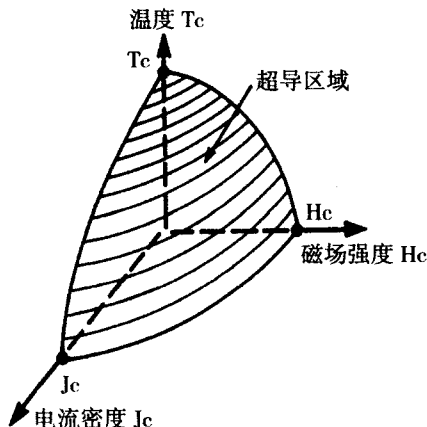


图1 超导材料的临界参数

高温超导输电电缆被认为是实现高温超导电力应用最有希望的领域之一。

超导技术的发展给电力系统的技术带来质的飞跃, 许多过去无法实现的电工装备由于采用超导技术而成为现实, 或即将成为现实。超导磁体由于其具有能耗低、体积小、重量轻等优点, 展现出极大的优势。例如, 它可以在大空间内产生强磁场而几乎不消耗电能, 从而为一些高技术, 如核聚变、磁流体发电等实际应用创造了有利条件。另外, 目前常规的电工装备如果采用超导技术, 不仅将大大改善其性能, 而且还可极大地节省电能。目前, 超导电工技术已成为国际科技发展的前沿领域, 开展超导电工技术的研究符合我国国民经济发展的需要。

## 2 超导技术在智能电网的应用

在当前世界能源短缺危机日益严重的大背景下, 有鉴于电力基础设施是全球最大价值的物质设施, 也是可以最大限度实现能源效率提高的平台, 发展智能电网将是关系到国家安全、经济发展和环境保护的重要举措。

通过全面改造现有的电力系统, 将构建高效、自愈、经济、兼容、集成和安全的智能电网。有了智能电网的支撑, 在发电领域, 可接入更多分布式新能源发电和远距离大规模可再生能源发电, 减少对以化石能源为主的传统能源的依赖; 在输配电领域, 新型输配电设备的使用将降低输电损耗, 提升跨大区经济调度和资源配置的能力, 以及增强电网的抗攻击、快速反应和自愈能力; 在用电领域, 动态电价和智能用电设备将使用户更充分地利用新能源, 提高资源利用效率并实现引导负荷跟随发电能力波动的功能, 增强电网运行的安全性。智能电网的实施将优化能源结构、转变能源供给方式、提高能源利用效率, 并为国家能源安全提供保障。同时, 智能电网的建设和运行, 将带来大量新的工业、商业增长点, 在我国产业结构调整、升级的大背景下, 智能电网是继新能源汽车之后的又一重量级新兴产业规划。另外, 发展智能电网将在多个相关领域推动科技创新, 提高我国的科技实力。最后, 以智能电网为平台所组成的分散决策机制将为电力市场的良性运作提供保证, 并推动电力市场改革的进一步深入。而超导技术的发展为

电力科技的进步提供了新的研究领域,其中高温超导电缆和电磁储能已经成为国外智能电网研究的热点。

### 2.1 高温超导电缆

我国幅员辽阔而经济发展的不均衡造成了资源与负荷中心距离过远,如何传输电能成为了一个难题。美国能源部(DOE)对传输电能的基本思路是通过改良输电材料增加电网输送能力,采用高温超导体及具有极低阻抗率的先进材料(如纳米材料)构成骨干网架。在美国能源部(DOE)的支持下,1996年美国电力研究所(EPRI)和Pirelli电缆公司及Southwire公司采用ASC的Bi-2223/Ag带状导线合作研制出长30m、115kV、2kA的三相交流高温超导模型电缆,其目标是研制1km的高温超导电缆。Southwire已经在变电站安装一段长30m、1215kV、1125kA的三相高温超导电缆试验线,并将在Carrollton的三个电站安装类似的电缆。Pirelli电缆公司已于2000年3月在底特律Edison变电站安装了长130m、24kV、2.4kA的三相交流HTS电缆以取代现有的9根铜电缆。与原来的9根铜电缆相比,该HTS电缆的总直径减少66%,总重量由8170kg减少到110kg。Pirelli公司已经在2001年将第一根高温超导电缆投入了商业运行。

1995年,日本东京电力公司(TEPCO)研制出长7m、66kV、1kA的三相交流电缆,其阻抗为常规电缆的10%。1997年,TEPCO又研制出50m、2kA的交流电缆。TEPCO的目标是研制出66kV、1000MVA的HTS电缆为东京地区供电。2000年11月,日本中部电力公司和富士库拉公司成功开发了高性能的高温超导电缆,其交流损耗仅为铜芯电缆的1/300;这两家公司开发的高温超导电缆是由三层Bi系高温超导材料构成,内层与外层相互交错,形成带状,用它包裹芯材,成为高温超导电缆。这种结构可以避免电流偏流现象产生的高电阻,因此大大减少了交流损耗,其交流损耗仅为0.1W/ln,比欧美国家开发的高性能高温超导电缆还少1/2。东京电力公司和住友电气工业公司携手制作的100m长高温超导电缆,已经完成通电试验,正在为并网运行做准备。

由于采用无阻、能传输高电流密度的超导材料作为导体,所以超导电缆具有体积小、重量轻、损耗低和传输容量大等优点。

**2.1.1 大容量** 目前我国交流特高压试验示范工程晋东南-南阳-荆门已经于2009年1月6日全线正式投运。而导线输送容量与其输送距离有关,如再提高送电容量,由于导体热量损耗随容量的提高而迅速增加,需采取强冷措施,应限制其容量的提升。超导电缆中应用无阻和高临界电流密度的高温超导线材作为导体,极大地提高了电流/电能传输能力。热绝缘超导电缆传输的电流至少是传统电缆的3~5倍,这是由低温封套和屏蔽层的涡流损耗所决定的。如低温保持器由非金属材料制造,电流传输能力将可进一步提高。冷绝缘超导电缆的电流传输能力更大一些,直流超导电缆的更高。

**2.1.2 低损耗** 超导材料在进入超导状态时直流电阻几

乎为零;但对于交流电缆而言,超导体中仍有磁滞涡流损耗,因此电导损耗不可忽略,但其值比常规电缆的小得多,即使计及低温冷却所需的电力,其电力损耗仍比常规电缆的小。交流高温超导电缆的功率损耗约为输送容量的1%,直流电缆的功率损耗比交流电缆的更低。如计及电缆制冷功率,高温超导电缆的总损耗约为常规电缆的35%。如采用超导输电技术,使总的输电效率提高约4%,则目前我国每年可节约电力10GW以上。据统计,如全部采用高温超导电缆,按现在的电价和用电量计算,我国每年可节约400亿元,还可降低耗煤量,减少燃煤对环境的污染。

**2.1.3 紧凑结构** 现在输电走廊的问题日益突出,而高温超导电缆传输的电流密度高,因此传输相同电能所需的送电通道远小于常规电缆,单回路的超导电缆即能达到或超过双回路或三回路常规电缆的最大输电电流的要求。从有限的电缆安装空间和安全角度出发,在需要扩容的城市电网中应用高温超导电缆,可使用现有的地下电缆沟,既增大了传输功率,又节省了土建费用。

基于超导电缆的以上特点,超导电缆组成的主干电网可增大传输容量、减少损耗、解决大城市大功率集中供电的瓶颈、平衡等诸多问题,为我国输电网的建设提供了一种新型行之有效的方法。

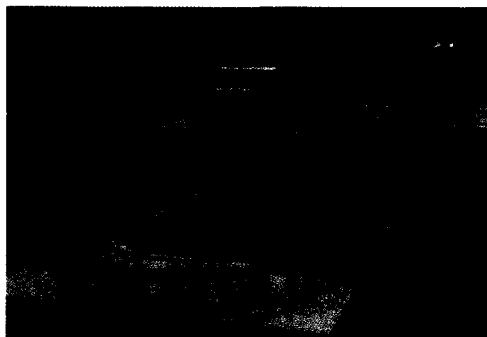


图2 TEPCO公司开发的世界最长的3芯超导电缆

### 2.2 超导储能装置

20世纪70年代后,随着现代工业的发展,全球能源危机和大气污染问题日益突出,传统的燃料能源正在一天天减少,对环境造成的危害却越来越大,同时全球约有20亿人得不到正常的能源供应。这个时候,全世界都把目光投向了可再生能源,希望可再生能源能够改变人类的能源结构,维持长远的可持续发展,太阳能和风能成为人们重视的焦点。

太阳辐射能是取之不尽、用之不竭的、无污染、廉价和自由利用的能源。太阳能每秒钟到达地面的能量高达80万千瓦,假如把地球表面0.1%的太阳能转为电能,转变率5%,每年发电量可达 $5.6 \times 10^{12}$ 千瓦小时,相当于世界上能耗的40倍。正是由于太阳能的这些独特优势,20世纪80年代后,太阳能电池的种类不断增多,应用范围日益广阔,市场规模也逐步扩大。近10年来,全球太阳能电池产量年均增长率达到了33%,2004年的世界太阳能电池产量超过1200兆瓦,2005年

达到1818兆瓦,2006年达到2536兆瓦,年增长率分别达到61.2%、51.5%和40%。

作为一种新型的可再生能源,风力发电产业20世纪80年代始发于美国加利福尼亚州。近年来,全球风电发展进入迅速扩张的阶段,风能产业每年保持20%的增速。截止到2007年底,全世界风力发电机组的装机容量已经达到了9400.5万MW,而到2012年,全世界风力发电机组总装机容量预计将超过11000万MW。迄今为止,全球已有70多个国家在开发利用风能资源。目前,国内外发展风电已成为解决石油危机,能源减少碳排放的重要举措之一。根据预计,未来几年亚洲和美洲将成为最具增长潜力的地区。

大量新能源的接入,由于其不确定性对电网所带来的冲击和危害是巨大的,因此发展储能系统对系统的安全稳定运行具有极强的现实意义。而超导储能(superconducting magnetic energy storage)SME系统通过超导磁体的低损耗和快速响应来储存能量的能力,通过现代电力电子型变流器与电力系统接口,组成既能储存电能(整流方式)又能释放电能(逆变方式)的快速响应器件,从而达到大容量储存电能、改善供电质量、提高系统容量和稳定性等诸多目的。其具有蓄电池储能压缩、空气储能和抽水储能等储能装置所没有的特点,尤其是在小的储存能量条件下能进行快速冲放电,即也可在小的储能时实现高功率。在电网出现短路等瞬态扰动时,SMES可迅速反应,通过对有功及无功的吸收或释放,给电网提供电压及频率的支持,以保证电网的稳定运行。对于发电机的突然故障,SMES可立即输出能量以弥补水轮发电机旋转,保持系统的启动时间,避免电网的频率因此失控。SMES在改善电网稳定性方面的作用还包括无功补偿、次同步振荡阻尼、电压波动、负载波动及频率波动阻尼等。

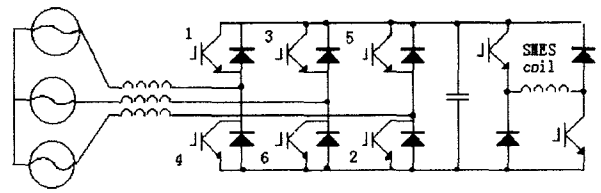
在改善电能质量方面,SMES系统则可充当干扰屏蔽器或隔离器的角色。SMES的动态电压补偿器(DVR)为瞬间电压跌落这个许多工业和商业用户所面临的最严重的电能质量问题提供了一个强有力的解决措施。

美国超导公司(ASC)在90年代中期就将改善用户电能质量的'Micro-SMES'推入市场;2000年初,ASC和美国的通用电气公司(GE)联合,使用于配电网的'DSMES'产品得以迅速推广。

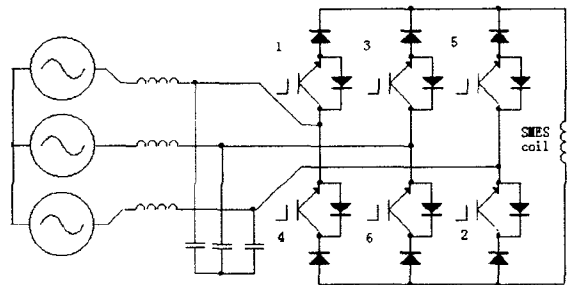
图3给出了SMES系统的基本原理框图,系统由变压器、可控AC/DC变流器、电流引线、低温容器及超导线圈组成。三相交流电经过变压器之后通过一个不可控的整流器把电能储存在超导线圈中。一般在超导线圈中储存一部分电能(25%~75%),再通过控制变流器的触发脉冲来实现SMES与系统的有功、无功交换,从而完成SMES的多种功能。



图3 SMES系统基本原理框图



(a)IGBT电压型变流器



(b)IGBT电流型变流器

图4 两种IGBT逆变器

图4给出了两种基于IGBT的变流器,(a)为电压型逆变器,(b)为电流型逆变器。

SMES系统最大的优越性在于其不仅能快速地与系统进行无功交换,而且可快速地与系统进行有功交换。更重要的是,有功、无功的交换可四象限独立进行。因此,在控制器设计和控制策略的选择过程中,最关键的是SMES系统的控制策略是否能使SMES装置与电网良好地匹配,并根据不同的控制目标使SMES装置能最大限度地改善电力系统的性能。

SMES也面临和任何一项新技术相同的挑战,即:优化系统及改善性能;降低成本和运行价格;开发和掌握市场机会;克服用户对新技术的抵制。

### 3 结语

本文结合高温超导技术的发展提出了其在智能电网中的两个应用方面,即超导电缆和超导储能。早在超导电性发现初期,超导材料用于输电电缆就成为最吸引人的设想。超导电缆是解决当前输电问题的最佳方案,因为提高输电电压而提高容量毕竟有限,也受到很多因素的制约,而高温超导电缆的传输容量几乎是不受限制的。目前,随着越来越多新能源的使用,储能问题成为系统是否稳定的关键,而超导储能具有响应快、损耗低的特点,因而其不仅能用于电网调峰,而且可以储存应急的备用电力,提高容许输电容量。

目前,高温超导强电应用技术已经接近实用化的水平,它的应用前景是相当广阔的。随着我国电网规模和容量的不断扩大,电网的稳定性、可靠性和安全的问题将变得更为明显。常规电网的高功率损耗和电网建设用地的矛盾等问题日益突出,迫切需要突破传统的技术限制,采用新 (下转第109页)

- c.把低加疏水泵开关摇至工作位置。
- d.在主控 DCS 合上低加疏水泵开关,即启动疏水泵电机。
- e.检查电机转向正确。
- f.试运 30 分钟后,测量变频柜内的刀型转换开关是否发热。
- g.断开低加疏水泵开关停下电机。
- h.试运结束。

## 6 联锁试验

6.1 正常运行时另一台处于备用状态,但开关不合上(变频器自检时间 5S)。

6.2 A 泵与 B 泵互锁及联启:当 A 泵变频故障时自动合上 B 泵开关并启动变频器。

6.3 手动模拟故障:手动按下 K3,发模拟故障信号,跳本台开关,同时启动另一台备用泵。

6.4 为避免故障时或倒泵时水箱满水,加速度设 20S,最低转速设 1200r/min。

(上转第 105 页)

口,通过压板的投退方便的实现切换,只有在并联变压器空载合闸前才投入低电压闭锁功能。

采取以上措施后,现场实际工作中,在以后数次并联变压器的空载充电操作中以及以后数次并联变压器的空载充电操作中未出现过运行变压器的差流异常或保护误动现象。

## 5 结语

本文通过实例分析,从偏磁的角度解释了和应涌流产生

(上接第 117 页) 的技术来解决我国电网所面临的问题。因此,高温超导电力技术的到来无疑给我国带来一次难得的机会。

### 参考文献:

- [1]赵贺,电力电子学在电力系统中的应用:灵活交流书店系统.北京:中国电力出版社. 2000
- [2]Narlikar A V.High Temperature Superconductivity.Berlin: Springer, 2004.

## 7 改造效果

采用变频装置后,根据疏水箱水位信号控制变频器频率,实时性强;原来机械调节改为电气信号调节,提高了灵活性;调节对象——疏水箱液位基本恒定,达到无差调节,消除疏水对调节门的冲击。并且由于水位稳定,可避免低加疏水泵因水位变化过大带来的振动、渗漏等故障,提高运行可靠性。电动机实现软启动和软停止功能,它不仅避免启动转矩对电机的冲击,同时,因为低转速工作,使系统压力降低,减轻对阀门及管道等设备的冲刷,避免了水锤现象的发生,降低了机械损耗,有效降低设备故障率和维修费用,延长设备使用期限。低加疏水泵改造前后参数如表 2,从表 2 得知,加装变频装置后,平均节电率达 65%。如果 2 台 330MW 机组同时运行,按每小时节电 160kW.h,全年按运行 300 天计算,则改造后每年可节约电量  $160 \times 24 \times 300 = 1152000 \text{ kW.h}$ ,按市场价 0.5 元 /kW.h 计算,每年可产生经济效益  $1152000 \text{ kW.h} \times 0.5 \text{ 元 /kW.h} = 57.6 \text{ 万元}$ 。

的机理,并指出了它对继电保护产生的危害,同时还提出了五条措施予以防范。从实际来看,这些措施易于在现场施行,效果明显,值得推广。

### 参考文献

- [1] SAIED M M. A Study on the Inrush Current Phenomena in Transformer Substations. In Proceedings of Industry Applications Conference & Thirty-sixth IAS Annual Meeting, Vol.2. Piscataway (NJ): IEEE, 2001. 1180-1187.

[3]Hull J R.Applications of high-temperature superconductors in power technology.Reports on Progress in Physics, 2003(66): 1865- 1886.

[4]林良真.我国超导技术研究现状及展望.电工技术学报,2005(1): 1-7.

[5]唐跃进,李敬东,程时杰,潘垣,等.发展超导电力技术的关键及主要研究客体电力系统自动化,2001.25(18): 66-70

[6]肖立业,林良真,等.超导电力技术即将带来电力工业的革命.物理,2000(3):131-140.