

2008 年国际大电网会议系列报道 ——高压直流输电和电力电子技术最新进展

汤广福, 贺之渊

(中国电力科学研究院, 北京市 100192)

摘要: 介绍了 2008 年国际大电网会议(CIGRE)中高压直流输电和电力电子技术委员会(SC B4)的主要专题和论文。涉及的技术领域包括: 现有高压直流输电(HVDC)工程运行、可行性研究、规划、设计、可靠性标准, 以及 ± 800 kV 特高压直流和基于电压源换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)工程的新进展、灵活交流输电(FACTS)装置的应用和最新发展、新型大功率电力电子装置的发展和应用等。

关键词: 国际大电网会议(CIGRE); 电力电子; 高压直流输电; 灵活交流输电; 电压源换流器

中图分类号: TM721.1; TM761

0 引言

第 42 届国际大电网会议(CIGRE)于 2008 年 8 月 25 日至 29 日在法国巴黎召开。高压直流输电与电力电子技术委员会(SC B4)是 CIGRE 的 16 个技术委员会之一^[1], 主要研究内容包括: 高压直流输电(HVDC)技术, 交流输配电系统和电能质量改进方面的电力电子技术, 先进电力电子技术在电力工业各个领域中的应用。同时, 还包括了与这些技术相关的经济和环境方面的课题。SC B4 目前有 23 位国家成员和 9 位国家观察员, 近期 SC B4 共设置 13 个工作组和 4 个专题组^[2-3], 分别为:

AG 1 专题组: 战略咨询。

AG 2 专题组: 工作组概念提出和指导方针。

AG 3 专题组: 环境问题。

AG 4 专题组: 直流输电系统性能。

B4-34 工作组: 基于电容换相换流器的 HVDC 系统互联——数字模型和标准电路。

WG B4-38 工作组: 直流输电和灵活交流输电(FACTS)系统仿真。

WG B4-39 工作组: 采用直流输电和电力电子开展大规模风电场互联技术。

WG B4-40 工作组: 静止同步串联补偿器

(SSSC)。

WG B4-41 工作组: 多馈入直流输电系统。

WG B4-43 工作组: 通过采用新一代电力半导体器件增强系统效率。

WG B4-44 工作组: 处理直流输电环境问题规划导则。

WG B4-45 工作组: 800 kV 特高压直流输电技术应用评价。

WG B4-46 工作组: 针对电力传输应用基于电压源换流器的高压直流输电(VSC-HVDC)技术——经济性及与其他交流输电和直流输电对比。

WG B4-47 工作组: 直流输电中交流滤波器技术规范特殊问题的研究。

WG B4-48 工作组: 基于 VSC-HVDC 系统组件的试验技术。

WG B4-49 工作组: 现有可控串补装置性能评估和应用评价。

JWG B2-17/B4/C1 工作组: 直流输电线路对直流项目经济性研究, 这是一个与 SC B2 架空线路和 SC C1 系统发展、经济性的联合工作组。

JWG A2/B4-28 工作组: 直流换流变压器试验程序, 这是一个与 SC A2 变压器的联合工作组。

SC B4 技术委员会 8 月 27 日举行内部会议, 会上 SC B4 主席进行了新老交接, 原主席巴西专家 Marcio Szechtman 博士任届期满, 由英国专家 Bjarne Andersen 博士接任; 各个工作组分别进行了汇报, 汤广福作为第 48 工作组召集人汇报了该工作组进展情况, 中国代表洪潮和汤广福分别就云广特高压直流进展和中国直流工程项目作了专题报告, 会议还重点讨论了 2010 年 CIGRE 大会优先主题。

收稿日期: 2008-10-07。

国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2004CB217907)。

[编者按]《高电压技术》和《电力系统自动化》联合向参加 2008 年 CIGRE 会议的中国代表约稿, 将分专业领域陆续报道会上讨论的热点议题、最新技术动态和各国电网的实践经验, 敬请关注。

SC B4 技术委员会 8 月 29 日举行技术大会,主要围绕 3 个主题^[4]展开讨论:① HVDC 技术,包括:现有 HVDC 工程的运行、旧项目的升级改造以及新 HVDC 项目的可行性研究, HVDC 项目的规划设计、可靠性标准及特性,以及 HVDC 技术的最新发展(特高压直流输电和 VSC-HVDC 技术)等;② FACTS 技术应用及其新发展,包括 FACTS 项目的可行性研究、现有项目的运行性能和对系统的影响以及新 FACTS 项目的规划等;③ 新型电力电子装置的发展和应用,包括:电力电子装置的新发展,电力电子装置在配电系统、风电和可再生能源发电以及城市供电用直流电网中的应用等。

本次大会 SC B4 共评选出 30 篇论文,包括 1 篇特约文章^[5]。这些论文的内容涵盖了 HVDC 和电力电子技术及应用中的最新进展,同时还包括了 ± 800 kV 特高压直流系统的运行经验探讨、远景项目的规划和遇到的挑战等问题。

本文重点介绍 SC B4 大会及其文章中讨论的几方面热门技术问题^[4-5]。

1 HVDC 技术

1.1 HVDC 工程的运行经验

来自日本的专家介绍近年来日本在 HVDC 系统中的运行技术和经验,例如:根据所提出的预测晶闸管失效率的方法,来确定室外油绝缘晶闸管阀和控制系统的更换策略,尤其是如何用现代的晶闸管阀来替代那些已经使用了 40 多年的汞弧阀,这是一个巨大的挑战。这种替代不是直接就能完成的,主要是因为最初安装的系统的运行方式和系统输电要求已经产生了变化,这就需要进行一整套的新研究(可靠性、谐波、计划、环境和电缆排列等)来优化系统并准备相应的规范。尤其是对于晶闸管的失效问题,需要进行深入研究来确定一种判断失效的标准以进行及时更换。

对于直流输电的控制系统来说,为了提高现有系统可靠性、控制辅助设备和满足系统调节要求,可能需要进行升级。一些代表介绍了现在所使用的新的控制和保护系统,它可以控制所有装置和辅助系统。这种快速响应控制系统的性能比以前提高 3 倍,以满足网络可靠性标准和其他相关控制系统的要求,而且新系统同时可以完成额外的功能,例如装置状态的在线监测功能。一位代表介绍了基于可靠性的维护(RCM—reliability centered maintenance)技术在 HVDC 换流站中的应用。在 RCM 技术应用之前,一般需要每年维护 1 次,这样不但系统的可用率较低,同时造成了维护成本的增加。而 RCM 技术的应用可以将维护频率从每年

1 次降低至 4 年 1 次,同时平均可以提高系统可用率达 3%。不过对于使用这些新控制系统所造成的成本增加与性能改善之间的关系,还需要进行深入考虑。由 CIGRE B4-AG04 专题组进行的研究表明,控制系统对被迫停运率的影响只有 9%,但是一些工程却将控制系统替换掉了。因此,使用 RCM 技术和新的控制系统是不是必要的,控制系统的实际寿命是多长,这些都是需要进一步研究、解决的问题。

一篇论文从总体上介绍了在中国南部 2 个 HVDC 系统互联所存在的一些问题,例如:有 2 台变压器由于交流绕组连接处的过热而失效;由于本地电网问题造成的一些双极停运事故等;由于备用件较少,一般系统要经过 7 年的运行之后才会更换控制和保护系统,这样阀电极就会有很大应力的累积效应存在,会增加失效率;接地极电流会使附近的交流电网产生过热问题;还有一些系统停运事故是由换流站维护人员不认真所造成的。因此,对于运行和维护人员的适当培训也非常关键。

在 HVDC 系统和交流网络之间的相互作用上,有文章指出连接于整流器侧 50 Hz 系统的性能对于 HVDC 的扰动很敏感,尤其对因逆变器中相序不正常所造成的故障更敏感。对于 HVDC 控制系统是如何来阻尼交流网络中的振荡,以及使用针对特定扰动而设计特定保护系统的有效性,都在这次会议上进行了讨论。

换流变压器的失效仍然在很大程度上影响着直流输电的强迫停运(强迫能量无效(FEU))指标,这些影响来自设计、制造和试验等各方面。有文章涉及到了换流变压器失效的相关标准问题,而 CIGRE JWG A2/B4 关于设计评论和试验进程研究的报告将在 2008 年年底提交。根据相关总结,在 2005 年和 2006 年期间,不考虑输电线或输电电缆故障导致系统停运,在影响交流设备 FEU 的因素中,换流变压器失效占了很大一部分。在消除了换流变压器失效的影响后,平均 FEU 从 3.04% 降低至 0.58%,等效停运时间(EOH)从 266.3 h 降低至 50.8 h。而所有报道的系统 FEU 和 EOH 的中间值分别是 0.29% 和 25.3 h。由此可见,提高备用数量、在大型换流站附近建造维修车间等,都可以显著提高系统的可用率。

1.2 HVDC 项目的可行性研究

巴西的 Madeira 河输电工程,其输送能力为 6 000 MW,传输距离从发电厂算起大概为 2 500 km。巴西学者针对此工程开展了深入研究。由于直流系统的一些优点已经得到公认,包括低成本、对受端电网影响较低、更易控制、更好的稳定性

能和更小的环境影响等,因此考虑到安全性、可靠性和经济性,这个工程最终选取的参数为 ± 600 kV 的双极 HVDC 系统,每极输送功率为 3 000 MW。同时,文章也介绍了电压选择和杆塔设计的经济性等问题。

从墨西哥大陆向下加利福尼亚州(Baja California)南方电网输送 340 MW 的输电工程,需要使用大约 200 km 的海底电缆,针对此工程,开展了可行性研究,共提出了 2 条技术方案,即采用线换相换流器(LCC)或电压源换流器(VSC)。最后选用了 VSC 方案,原因在于它的低成本和 VSC 有助于扩大系统的运行灵活性,包括提供黑启动能力、紧凑型变电站、聚合体电缆的采用降低了对环境的影响以及固有的动态电压支撑能力等。这个系统预计将于 2010 年投入运行。不过一般来说,VSC-HVDC 的换流器损耗差不多相当于 LCC-HVDC 换流器损耗的 3 倍。那么 VSC 的其他优点是否可以抵消这个较高的损耗值,这需要对 VSC 和 LCC 拓扑结构进行更详细的对比分析。当然,多个专家以实例表达了不同的观点,随着新型拓扑结构和脉宽调制(PWM)技术的发展,VSC 换流器损耗可以达到 LCC 换流器损耗的 1.0 倍至 1.5 倍。

有学者针对欧盟国家与南地中海国家电网互联进行了可行性研究,给出了一种研究方法。这个方法基于 2 步逼近法。首先,在第 1 个阶段完成以下内容:在某一确定的直流输电方案和直流电压下,比较直流互联工程可能的技术方案,包括换流站的位置、直流互联的容量(换流站、电缆、陆上架空线)与交流系统传输容量的关系,以及在预定的直流方案和电压下两端换流站的功率过载/欠载能力等。其次,在第 2 个阶段,研究互联技术、环境和经济性等方面的因素。该方法已应用在意大利、阿尔及利亚、突尼斯和利比亚之间的南北电网互联工程中。

1.3 HVDC 项目的规划、设计、可靠性标准及特点

丹麦 Storebaelt HVDC 互联工程连接丹麦东部与西部电网。互联工程通过分享丹麦东部与西部的发电机容量,可能会带来较大的经济效益。这个互联工程是希望通过降低发电行业市场垄断的可能性来降低电力市场价格。此工程换流器在运行时带有冗余冷却系统,因此系统可以设计在 105% 额定负荷和 110% 额定过负荷下连续工作 2 h,并且还有 3 s 的 135% 过负荷能力;其中,电缆负荷预测系统可以连续监测电缆温度,并且实时计算电缆上通过的电量;同时使用了 3 个监测系统,以确保工程具有较高可靠性。文章对于电缆负荷预测系统如何工作并没有给出具体介绍。

有学者针对印度一个多极接入系统进行了实时

数字仿真(RTDS)研究。这个多极接入系统由 2 个 ± 500 kV 双极系统和 1 个 ± 800 kV 双极系统组成;逆变器在地理位置上不靠近,但是电气连接上它们是紧挨着的。研究最后得出结论:任一系统单极或双极闭锁都能够把过电压限制在规定值以内,而且逆变器附近的各种故障导致的系统换相失败时,响应速度都是可以接受的。同时,作者也表明短路比为 18.8 时,逆变器对换相失败最不敏感,这和事先预想的一样。

目前,印度、中国、北欧和其他国家都在计划建立一些多馈入直流供电系统,这是一个非常重要的研究课题。CIGRE 工作组 WG B4-41 将在 2008 年对此发布一个最终研究报告。在交流系统故障时,HVDC 逆变系统的响应在系统稳定性和过电压等方面都带来一些非常具有挑战性的问题。然而,是否可以在技术上改善其换相失败后的性能,比如增大平波电抗器或串联电容器组,在多馈入直流系统中,还有必要对多极影响因子(MIIF)进行计算和比较。不管实际情况如何,同一电气区域内多馈入 HVDC 系统的性能都可能对邻近交流系统的特性和设计造成影响。

本次会议上对直流输电工程的介绍还包括沙特阿拉伯 1 800 MW HVDC 联络线的规划和设计,这个系统将频率为 60 Hz 的沙特阿拉伯系统和频率为 50 Hz 的邻国电网连在一起。联络线由 3 个相互独立的 600 MW 的背靠背组成。同时,还讨论了在沙漠地区设立换流站的问题。

一些学者介绍了对印度的 ± 800 kV/6 000 MW 工程的研究,着重分析了送端系统发生换相失败的后果和发生换相失败时维持系统稳定的措施。这个系统由 2 个并联的 1 500 MW 的换流器组成,在设计时每个换流器具有 33% 持续过负荷能力。研究还说明了有必要通过滤波器的投切把过电压限制在设定值之内。另外,还有美国新泽西州和长岛之间 660 MW/500 kV/105 km 的 HVDC 工程,这个工程中的 500 kV 海底电缆和地下电缆采用的是浸渍绝缘纸型,而且,此工程还用到了 XLPE(交联聚乙烯)绝缘金属地线和单路光缆,系统同时采用了无源交流滤波器和有源交流滤波器。

1.4 使用大地回线和接地极的问题和试验

印度学者的一篇论文描述了印度 ± 800 kV 联络线的接地极是怎样选址的。具体是通过 2 种地质研究,计算浅层(深度约 150 m)和深层(深度约 10 km)电阻率结构。浅层电阻率测量是在一个 600 m $\times$ 600 m 的区域内进行的,极间间距为 10 m,剖面长度 790 m(即具有 80 个电极的系统),应用高精度多电极直流电阻率成像技术进行检测而得出结

果,其数据是从 Wenner 和 Schlumber 换流站的多个剖面测得。在计划建设接地极的地点周围,用大地电磁法描绘了约 10 km 的深层电阻率结构。文章的最终结果使用比较试验的方法给出,目前可能还需要进一步研究有没有其他合理选择接地极地点的方法。

1.5 ± 800 kV 和 VSC-HVDC 工程的新进展

由于许多国家存在能源分布不均衡的问题,使得新建的发电站都远离负荷中心,对长距离、大容量能源传输有不断增长的需求,同时,这些输电系统还需要兼顾经济性、高效性和环境友好性。由于特高压直流输电相对于特高压交流输电存在显著优点,目前,几乎所有大容量、长距离输电的新项目都是采用特高压直流输电来传输的。

对于 ± 800 kV 特高压直流输电系统,目前还处于研究和开发阶段,对于其中的换流变压器、阀侧套管、平波电抗器、直流旁路开关、架空线路、母线绝缘支架、接地极和隔离开关等设备,还需要展开进一步研究,而 ± 800 kV 的绝缘可能是目前存在的最大问题。从经济上来说, ± 800 kV 特高压直流输电系统是可行的。

西门子公司提出了在 HVDC 应用中一种新型的多电平 VSC 拓扑。这种技术称为模块化多电平换流器(MMC),是由一系列串联的子模块组成换流器。每个子模块的电压或者是 0,或者是储能电容器的电压。因为每个子模块的开关都是独立控制的,所以 MMC 换流器产生的输出电压非常平滑并且几乎是理想正弦波形,这样就大大降低了对滤波器支路的要求。另外,还使得子模块的开关频率大大降低,因而降低了换流器的运行损耗。目前,还不知道 MMC 拓扑单独 1 个换流器能否达到 ± 500 kV 的电压等级。如果将这种拓扑应用到架空线路中,与只用一个直流电容器的技术相比,发生直流线路故障时电力恢复速度是否较慢需要进一步研究。当然,在经济层面上,MMC 拓扑的优势也没有进行具体的比较。

2 FACTS 装置应用及其最新发展

2.1 前瞻性研究

目前在电力系统中使用的无功补偿设备一般只能提供补偿无功的能力,但是有学者提议要改进传统的只进行无功补偿的方法,提出了通过有功和无功注入系统来改善系统稳定性的新概念。具体方法就是建议在静止无功发生器(STATCOM)的电容器两端并联一个电池,在运行时,电池将通过自充电存储能量或当需要时给系统提供有功功率。

2.2 装置运行性能和对系统的影响

在澳大利亚,有的静止无功补偿器(SVC)已经运行了 30 多年,在多年运行过程中,所遇到的 SVC 的主要故障模式有:主设备(变压器、电抗器和电容器)故障、晶闸管控制电抗器(TCR)阀触发、晶闸管投切电容器(TSC)阀闪络、水冷系统故障导致的晶闸管故障、交流系统扰动引起辅助控制和保护系统误动而导致的故障。

这些故障的分析和报道对大功率电力电子领域来说非常重要,因为它提供了一份有关 SVC 设备故障的很多不同原因和所产生后果的全面报告。尽管 SVC 的子系统相对简单,但是这些记录了 SVC 失效模式的重要记录,能够帮助世界上其他用户改进他们的维护制度。

法国也报道了 2 个 SVC 工程的运行经验,他们安装 SVC 的目的是改善当地电网较低的电压水平。由于未安装之前电压较低,导致了电网中的变压器抽头闭锁和风电场跳闸。安装单独的电容器组补偿并不是一个较好的解决办法,因为其不仅开关速度慢,还会放大已有的谐波电压,对电力供应商使用的 175 Hz 信号造成干扰。在加装了 SVC 之后,这些问题基本上都得到了消除和缓解。

2.3 新的 FACTS 工程

俄罗斯电网在未来几年的规划中,将会建设许多新的 FACTS 工程,包含一般的 FACTS 装置,如 STATCOM, SVC 和可控串补(TCSC)。除此之外,还计划安装异步旋转补偿器这种设备。俄罗斯专家认为, SVC、旋转电机和 STATCOM 的相关知识经过近 30 年发展,应该可以对无功补偿装置的设计进行一些改进,这些补偿器都将会提高系统的稳定惯量和电压的可控性。

3 新型大功率电力电子装置的发展和应用

3.1 新型大功率电力电子装置的发展

由于超高压技术正得到越来越多的应用,因此有必要研究应用于超高压领域的补偿分压器。有些专家比较了高阻分压器和 RC 补偿分压器的性能,介绍了杂散电容和杂散电感、绝缘子表面漏电流和电压的影响以及温度的线性度与稳定性的影响,还包括电阻的设计和所有分压器的温度特性等。

3.2 新型大功率电力电子装置在配电系统中的应用

有专家介绍了应用于配电网的基于多频率换流器的有源接地系统,这个有源接地系统有以下功能:接地故障检测、非永久性接地故障消除和永久性故障电流消除、非永久性和永久性故障定位(已消除和未消除)、电网隔离的预估维护等。在此系统中,故

障消除是通过消除故障相电压来实现的,而故障定位是通过注入特定频率的中性线电流实现的。

3.3 新型大功率电力电子装置在风电和可再生能源中的应用

根据近来风电场的大规模开发,有学者研究了如何使用 LCC-HVDC 实现风电场并网。在假设电能通过 190 km 的海底电缆和 50 km 的地下电缆传递的基础上,比较研究了 VSC 与 LCC 及混合并网的方式。仿真结果表明,选择 LCC-HVDC 并网能够满足动态故障穿越和电网的其他要求。

风电场并网有多种方式,而一些学者根据对众多大、小风电场的实例调研得出结论:对于小型风电场来说,建议最好通过 SVC/STATCOM 实现交流并网;而对于大型风电场来说,建议用 LCC-HVDC。VSC 技术尽管运行灵活度高,但是由于其损耗较高,加上换流器容量的限制,使得其在较大型风电场并网中不是一个最优的方案。

还有学者论述了利用定速感应电机,通过配电静止无功发生器(D-STATCOM)实现风电场并网的可行性。其仿真表明,不用 D-STATCOM 实现风电场并网不能达到并网要求。研究还表明,故障穿越能力取决于电网参数、风机参数和发电机参数,因而每种情况都需独立研究。在 9 MW 的风电场中采用 10.5 Mvar D-STATCOM 满足故障穿越要求的解决方案成本过高,可以考虑利用电容器组和一个较小的 D-STATCOM 来完成无功的需求。

还有学者提出了利用 1 个 SVC 和 1 个投切电容器组实现风电场并网的 2 种控制方案。在第 1 种方案中,SVC 电流维持在恒定值,用于限定母线电压的范围,当故障发生时,SVC 动作,维持母线电压,如果母线电压跌落到规定范围以外,那么控制系统将投入电容器组;在第 2 种控制方案中,让 SVC 动作,维持母线电压到一个参考点,而电容器组控制系统用来维持 SVC 的电流。现场试验表明,这 2 个方案对于抑制稳态电压波动都有较好的作用。

4 结语

HVDC 和电力电子技术的最新发展及应用是 2008 年 CIGRE 的热门主题,包括直流输电的运行特性、升级方案、可行性规划、可靠性标准、系统接地极等各个方面。特别是对于特高压直流输电的应用和新型的 VSC-HVDC 技术的发展,专家们给予了较多的关注。同时,对于其他的新型电力电子装置的发展趋势,包括在风电场和可再生能源发电、城市配电系统中的应用等方面,专家们也进行了热烈的讨论。

参考文献

- [1] 薛禹胜. 2002 年国际大电网会议系列报道——GIGRE 组织结构的改革. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 7, 14.
XUE Yusheng. The new organization in CIGRE. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 7, 14.
- [2] 汤广福. 2004 年国际大电网会议系列报道——高压直流输电和电力电子技术发展现状及展望. 电力系统自动化, 2005, 29(7): 1-5.
TANG Guangfu. A review of 2004 CIGRE on application status and perspective in HVDC and power electronics. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(7): 1-5.
- [3] 汤广福. 2006 年国际大电网会议系列报道——高压直流输电和电力电子技术. 电力系统自动化, 2007, 31(8): 1-6, 35.
TANG Guangfu. A review of CIGRE' 2006 on high voltage direct current (HVDC) and power electronics (PE) technologies. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(8): 1-6, 35.
- [4] DHALIWAL N S, FU Yanny. Special report for Group B4 (HVDC and Power Electronics)// Proceedings of CIGRE 2008, Session B4:00, August 25-29, 2008, Paris, France.
- [5] Proceedings of CIGRE 2008, Session B4: 101-307, August 25-29, 2008, Paris, France.

汤广福(1966—),男,通信作者,博士,博士生导师,教授级高级工程师,主要研究方向:灵活交流输电和直流输电工程技术。E-mail: gftang@epri.ac.cn

贺之渊(1977—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:灵活交流输电和直流输电技术。E-mail: hezhuyuan@epri.ac.cn

A Review of CIGRE 2008 on HVDC and Power Electronics Technologies

TANG Guangfu, HE Zhiyuan

(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Special reports and papers for high voltage direct current (HVDC) and power electronic (PE) technologies in study committee B4 of CIGRE 2008 are introduced. The main issues include operational performance of existing HVDC projects, feasibility studies, planning, designing and reliability criteria of HVDC projects, as well as new development of ± 800 kV UHVDC projects and HVDC projects based on voltage source converter (VSC), flexible AC transmission system (FACTS) applications and its new progress, new power electronic equipment development and its applications, etc.

This work is supported by Special Fund of the National Basic Research Program of China (No. 2004CB217907).

Key words: CIGRE; power electronics; HVDC; FACTS; VSC