

编者按语:

建设特高压交流输电工程投资巨大,对国民经济影响深远,迄今在国际上尚无成功运行的经验。由于电力系统是一个十分庞大、复杂的系统,涉及到很多问题,对如此重大的新技术进行百家争鸣有助于使每一个问题得到深层次的考虑,促进技术更加完善,使决策更加科学。本刊已开辟的特高压技术论坛专栏,让各方能阐述自己的主张,在每一个有争议的问题上准确地进行分析,据理论证深入探讨,以供决策者研究。无论最终得到何种结论,各方的意见对今后电力系统工程的建设 and 运行都有重要的参考价值。热忱欢迎广大电力行业工作者投稿本刊,阐述观点,参与讨论。

交流特高压在中国应用的 经济和安全分析研究

王仲鸿

(清华大学 电机工程与应用电子技术系,北京 100084)

摘要: 就交流特高压在我国远距大容量输电、区域网互联和特高压网 3 个应用范围进行了安全性和经济性分析,在直流高压(包括背靠背)、交流 500 kV 和特高压 3 种方案之间展开比较。结合有关特高压文章中不同观点进行讨论,结论是在 3 种不同应用范围,与直流高压(包括背靠背)、交流 500 kV 比较,交流特高压在经济和安全方面都没有优势。其中,远距大容量输电在 600 km 及以上优选直流高压输电,600 km 以下优选交流 500 kV,在接近 600 km 和大于 7 000 MW 以上的输电容量可在 500 kV 与特高压之间进行比较选择。交流互联因扩大同步网降低了安全稳定性,直流背靠背互联可提高安全性但投资较大,需根据不同情况进行优选。特高压网的互联经济效果与其它方式的互联效果差别不大,若再考虑投资因素,可推荐超高压网+直流和超高压输电+背靠背或超高压互联模式。建议积极展开提高我国超高压网利用率的研究。

关键词: 远距大容量输电; 区域网互联; 特高压网; 安全性; 经济性

中图分类号: TM 723

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)10-0001-04

交流特高压工程的规模可比三峡工程,涉及数千亿元的投入,值得和应当进行多角度包括不同观点的公开讨论。经过民主科学的学术交流,提供更全面的观点,综合得到更正确的建议和方案。交流特高压可以讨论和研究的问题很多,其中最重要的是中国电力发展的需求与交流特高压的关系。它是否为中国电力发展的必要技术,或者是具有比较优势?如果需要进行比较,应当选用哪些比较标准?现实合理的对比方案有哪些?比较后会有哪些结论和待研究问题?这就是本文的研讨构架。因引用论据多来自文献[1-4],在此不再重复展开。在作为正面观点引用时,也会对不同观点发表评述,努力做到对具体问题进行分析。

1 交流特高压不是中国电力发展的必要技术

综观世界电力系统,都是由多个超高压区域网分别向各自的经济(负荷)中心提供电能服务。中国目前有六大区域网,美国、日本和欧洲共同体等也都是如此。超高压网的共同的技术属性是交流同步

网,区内网络相互紧密联结,保证了经济可靠的电力供给,但在安全上也存在失去同步稳定运行后共同停电的风险和实例。超高压区域网是世界电力供给的一般组成单元模式,与天然环境和人文特点关系很少,可以作为借鉴和比较的模型。国家电力发展只能通过区域网实现电力供应,笼统地由国家电力发展的规模和速度出发不能具体科学地进行分析。通过研究分析区域网的技术经济特点,才能得到可比较的典型指标和有说服力的论据。超高压区域网的规模和密度基本反映了该区的电力发展水平,它们与提出的短路电流容量和输电走廊等问题密切相关。规模和密度愈大、短路容量愈大,密度愈大则输电走廊要求愈高。我国现有的区域网规模都处在几千万千瓦的水平,即使到 2020 年,中国超高压区域的电力规模和密度也和现在发达国家的区域网处在同一水平。发达国家现有的大规模和高密度的超高压区域网都在正常稳定运行供应电力,并没有把特高压作为解决短路容量和输电走廊等问题的推广技术,交流特高压不是中国电力发展的必要技术。交流特高压技术在发达国家已有应用,中国电力发展有需求,可以试验研究,也可以引进消化,所以不是特高压技

术阻碍了中国未来的电力,现在更需要研究的是特高压技术在中国的应用有哪些比较优势。

2 交流特高压的比较分析

建设电力网络通用的比较标准是经济性和安全性,根据应用场合不同,需要分成 3 种不同情况进行比较,即:远距大容量输电;超高压区域网的互联;覆盖在超高压区域网之上的特高压网。为了进行比较,选择了 3 个有代表性的项目:直流;交流特高压;交流超高压(500 kV)。下面分别对 3 种不同情况,结合 3 个选项进行经济性和安全性比较。

2.1 远距大容量输电

中国规划(2010 至 2020 年)大容量煤电能源基地约 28 个,容量都在 1 200~6 400 MW 之间,输电距离大约在几百千米以上。规划中的大水电基地容量更大、距离更长,其总容量占全部规划容量的比值约等于 1/3。在此把输电容量的研究范围界定在百万千瓦级及以上,输电距离在百千米级及以上,以便以下的分析研究比较。输电方案选择的决定性因素是经济,因为短路容量、输电走廊等并没有成为不可解决的实际技术问题,也不需要因此提高输电等级。而且它们都可以包括在经济指标中进行比较,在规划设计中也是这样进行技术经济方案比较选择的。

a. 输电距离在 600 km 及以上,选择直流输电更经济。在研究的输电容量范围内,国内外工程公认的交流和直流的经济交叉点是 600 km,在 600 km 以上选用直流输电,而且直流在输电走廊和限制短路电流方面也比交流输电有优势。输电线的故障率是随着电压提高而下降,对于 500 kV 及以上的交直流输电线,整条输电通道的实际故障率都降到近 1 次/年的水平,已经不会是强大的受端系统的主要安全比较指标,直流输电的可控性和单极供电方式还在安全可靠方面比交流特高压输电有优势。有些文章采用自然功率作为比较标准,实际设计和运行输电功率一般都不同于自然功率,既可大于自然功率也可小于自然功率,因而出现的电压问题可以用无功补偿和调节更经济地解决。决定输电能力的关键不是自然功率而是暂态稳定极限,科学合理的比较应在一定距离内进行,并且把线路稳定措施(如串并联补偿)包括在内进行经济比较。现在的规划设计部门都是这样做的,发表的文章中也有是这样比较的。

b. 输电距离在 600 km 以下,交流 500 kV 比特高压输电有经济优势。距离 1 000 km,500 kV 采用同杆并架拥有 3 800 MW 的输电能力,其输电能力、造价和占用的输电走廊与一回交流特高压输电线相近。为了避免因永久故障和检修丧失全部输电能力导致电能基地失效,实际输电都至少是两回线并列输电。这样,特高压两回线和 500 kV 两路同杆并架(四回输电线)的输电能力都能达到 7 600 MW,而且投资费用相近。与输电距离 1 000 km、输电功率 7 600 MW 相比,输电功率愈小、距离愈短,500 kV 的输电方案

愈经济。在 600 km 及以上的大容量输电已优选直流输电,在 600 km 以下的交流 500 kV 输电方案几乎覆盖了大部分的规划输电容量,对特高压输电都有经济优势。只有对于更大容量的接近 600 km 的大水电基地,可以作为个案进行特高压的比较选择计算。从输电可靠性看,多回的 500 kV 输电线和不同电容串补度的组合可以形成不同的经济输电功率,对于发电厂逐步扩大建设过程和不同最终建成容量,比起特高压还有外加的静态和动态的经济优势。

综上所述,大容量输电 600 km 及以上优选直流输电,600 km 以下优选交流 500 kV 输电方案。交流特高压的输电方案可以作为个别情况进行比较,即使如此,用交流 500 kV 输电方案有技术成熟、可靠性高和配套产品规范的优势。

2.2 超高压的区域网互联

区域网互联有 2 个好处:稳态的区间差别的经济互济和动态的安全支援。有 2 个因素影响比较结果,即互联的输电容量和可控性能。

a. 区域网间可以互济的稳态等值电力只是误差级的小数,而且与原超高压互联相比较,特高压互济的经济效益是可质疑的。区域网络都是应负荷中心需要而发展起来的,我国六大系统都有着对应的经济集中发展的大都市圈。电源只是根据负荷发展需要逐步建设,无论出现超前或滞后都会给本区经济发展带来损失,电源建设计划必会不断调整更新进行平衡。责任主管就是要不断地按长短不同的规划年限进行电源和电网建设,保持与负荷发展的平衡,并全面考虑政治、经济和社会等各种因素,确定适合本区的投入产出的优化平衡实施方案。现实可以区间调剂的电力只是估算中的误差级小数。根据文献[2],2006 年全国跨区交易电量达到 1.2×10^{11} kW·h,如果按每年 5 000 h 折算成发电机容量,相当于 2.4×10^7 kW,即占当年全国装机容量约 6 亿多千瓦的 4%。同文规划的 2020 年,特高压网的互调节约效益折合发电机容量为 2×10^7 kW,为当年全国预估装机容量 10^9 kW 的 2%,相对于全国总电力规模,两者的比值都不算大。为了发挥特高压网的互济效益,就需要切断原超高压网和包括区间的互联,强迫超高压网的潮流通过特高压网进行联网互济。中国区域网大多已经通过超高压等进行联网互济,如何可知改为特高压互联的效益会更高呢?就用上述文献[2]提及的互联效益来比较,在 2006 年用超高压互联获得的相对效益(4%)和绝对效益(2.4×10^7 kW)比 2020 年特高压网互联的对应值(2%, 2×10^7 kW)都要高。这至少说明,对比原超高压的互联,特高压的互联相对效益和绝对效益不一定会增加,如果考虑到特高压的大投资和使原超高压互联的投入失效的浪费,即使有些效益,得失相比,是否值得仍待商榷。

b. 用交流实现互联会加大系统的不安全。其一,加大了连锁反应发生串级故障的可能性。世界大停电过程都是在同步网中的偶发事件引起的恶性连锁

反应造成的。同步网愈大,组成的元件愈多,偶发事件和连锁反应的组合愈多(至少是按 2^N 的规模来扩大, N 为同步网内的元件数,2表明元件的开关的2个状态),这样庞大组合数目是保护、控制事先无法考虑并得到正确及时的应对。这些过程都是在破坏系统同步网的电力平衡,当不平衡冲击超出同步范围,系统就会失去自我调节恢复到新平衡点的能力,进而恶化安全稳定性能。因此,同步网愈大,通过互联传递破坏平衡的可能因素愈多,发生系统崩溃的不安全可能性愈大。其二,弱化了系统固有振荡的阻尼能力。同步网受干扰后都会发生频率不同的机电固有振荡,表现为多组送受2个等值同摆集团发电机间的功率振荡。各组的振荡频率与对应的2个等值集团发电机的惯量的倒数之和成正比,当等值集团发电机的惯量大小相差很大时,振荡频率主要由小惯量的等值集团发电机所决定,如单机对无穷大的本地振荡模式。2个等值集团发电机的惯量愈接近,其倒数之和愈小,振荡频率也就愈低。区域网互联所对应的等值集团发电机的惯量较接近,也就出现了对应的频率更低的固有机电振荡。在主力大容量机组的电子励磁和调速系统强反馈控制作用下,提供的阻尼力矩随着频率降低趋向弱化直至为负,即发生自发振荡。中国电力系统日益显现的弱阻尼振荡是与区域网互联和系统发展相关的。弱阻尼的低频振荡还会形成互联后新的振荡干扰源,使原有各种稳定状态恶化。弱阻尼的动态不稳定已经成为中国电力系统安全稳定的瓶颈。交流互联的同步网愈多愈大,会出现愈多更低的机电振荡频率,对应的阻尼也更弱。与本地模式振荡不同,这种由多机组成的集团发电机间的区间模式振荡需要在多机上实现对单一的目标振荡进行阻尼。传统的电力系统稳定器(PSS)因其相互影响使全局优化整定调试更困难,人们期待阻尼效率更高和适应性更强的长效PSS。

c. 直流背靠背的区域网互联的可控技术性能最好。直流背靠背的控制响应时间可以短到几十至100 ms。在这段时间内可以实现潮流正负双向的额定功率控制,这是交流互联做不到的。在紧急情况下,可以隔绝区域网故障的干扰。背靠背互联还可以利用正常区域网的热备用能力向事故区域网提供动态安全支援,其数额可以在秒级范围内超载背靠背额定值的20%~30%。无论对于稳态的潮流互济调节或动态的安全支援,背靠背的互联技术性能最好,选用背靠背互联的主要阻碍是投资较大。

综上所述,区域网的互联功率为百万千瓦级,上述方案都可行。对比交流互联,背靠背互联方式对动态安全支援和稳态的区间差别互济的经济性都有正面的积极作用,缺点是投资较大。选择要根据在研究的互联区域网的安全重要性和投资与互济的经济性间进行折衷优选。若安全稳定要求高、互联的经济效益相对投资更有利,选择背靠背互联,否则用500 kV交流互联,因为交流特高压互联的投资要大得多。

2.3 超高压区域网之上覆盖交流特高压网

交流特高压网可以得到超高压网间的互联经济效益,但由于互联交换功率不大,与在大区边缘实施超高压互联相比,投资过大且不易充分发挥交流特高压的大输电能力。为了尽量利用特高压网的输电能力,达到节能和减少短路容量的目的,需将原500 kV网络解环,把原超高压输电线路改变成单端分配电能的支路,形成全国性的特高压网架向全国供电。发电机和负荷都是处在高压及以下的电压等级,不用已经可就近在超高压网实现的供需输电通道,而要通过解环的超高压输电支路送到新建的特高压网再返回供电。这样是否能比原超高压的互联更节能?经济潮流如何控制?特高压网的投资是否经济?其回收年限是多少?这些都需要深入研究。

从安全稳定分析,特高压网将不可控的同步网扩大到全国,增加了串级连锁故障的概率。同步网的稳定破坏主要来自干扰引起的不平衡潮流对同步运行发电机的冲击。特高压线路阻抗小,流经的潮流大,发生故障引发的不平衡潮流比原超高压网更大。发电机是通过解环后的超高压支路与特高压网连通,再折返到超高压支路与其它发电机连通,发电机间的等值联系电抗未见减少,而不平衡的冲击更大,暂态功角稳定水平更可能是降低而不是提高,而且不可控的交流特高压网变成了相互影响的干扰通道,一旦同步稳定破坏,就会连锁扩大到全国。即使更远的未来存在更大的联网效益,也可以用可控的直流互联,既可以更精准方便地得到控制互联的经济潮流,又可以避免上述大同步网存在的安全隐患。

3 结论和建议

a. 同步交流超高压区域是典型反映电力发展技术特征的模型,世界运行中的不少超高压网在电力规模和用电密度上比中国更大,并未采取特高压技术来解决短路容量和输电走廊等提出的技术问题,特高压不是中国发展电力的必要技术。

b. 交流特高压是已投运的应用技术,研究的重点应是特高压在输电、互联和特高压网络3个方面对经济和安全的比较优势,对比可以在交流特高压、直流和交流500 kV超高压3个方案之间进行。

c. 远距大容量输电在600 km及以上优选直流高压输电,输电距离在600 km以下一般用交流500 kV更有优势,在接近600 km和大于7 000 MW以上的输电容量可在500 kV与特高压之间进行比较选择。

d. 区域网互联可获得区间差别互济的经济效益和动态安全支援2个好处。交流互联因扩大同步网降低了安全稳定性能,直流背靠背互联可以提高安全性,但投资比交流500 kV互联大,需要根据不同情况权宜经济性和安全性进行优选。

e. 特高压网扩大了同步网,无论对暂态功角稳定或动态稳定都不利,而且更容易使事故扩大。特高压网的互联经济效益与其它方式的互联效果差别不

大,如果再考虑到投资因素,可以推荐超高压网+直流和超高压输电+背靠背或超高压互联模式,它基本满足中国未来电力发展的需求。

f. 用超高压输电线总长度对装机总容量的比值可以在一定程度反映国家电力网络的利用率,美国在 1997 年约为 $3.3 \times 10^4 \text{ km} / 10^8 \text{ kW}$, 中国在 2005 年约为 $5.8 \times 10^4 \text{ km} / 10^8 \text{ kW}$ 。中国的比值大于美国对应值,建议展开提高中国超高压网利用率的研究工作,在对比分析中寻找充分利用中国已有电网资源的可能性。

参考文献:

- [1] 蒙定中. 建议直流远送/稳控互联各大区强化的同步网,避免全国 1 000 kV 联网[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):13-22.
MENG Ding-zhong. Recommendation of HVDC transmission / interconnection for every strengthened regional grids, avoiding countrywide 1000kV interconnection[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 13-22.

- [2] 杜至刚,牛林,赵建国. 发展特高压交流输电,建设坚强的国家电网[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):1-5.
DU Zhi-gang, NIU Lin, ZHAO Jian-guo. Development UHV AC transmission and constructing strong state power grid [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 1-5.
[3] 周浩,钟一俊. 特高压交、直流输电的适用场合及其技术比较[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):6-12,39.
ZHOU Hao, ZHONG Yi-jun. Applicable occasions of UHVAC / UHVDC transmission and their technology comparisons in China [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5): 6-12, 39.
[4] 张育英. 探讨全国电力系统安全、可靠运行的基础——评“特高压电网安全对策研究”[J]. 电力自动化设备,2007,27(6):122-124.
ZHANG Yu-ying. On foundation of safe and reliable operation of national power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(6): 122-124.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

王仲鸿(1933-),男,福建闽侯人,研究员,主要从事电力系统方面的研究(E-mail: wangzhzh@tsinghua.edu.cn)。

Economy and security analysis of AC UHV in China

WANG Zhong-hong

(Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: The economy and security analysis of AC UHV in China is carried out in three applications: long - distance large - capacity transmission, regional grid interconnection and UHV network, which is compared among three schemes: DC high - voltage (including back - to - back), AC 500 kV and UHV. Combined with different views in some relative references, it is concluded that, compared with the other two schemes, the AC UHV has no superiority in both economy and security for all three applications. DC high - voltage scheme is the better choice for 600 km and above transmission distance while AC 500 kV for less than 600 km. For about 600 km distance and over 7 000 MW transmission capacity, comparative selection between 500 kV and 1 000 kV may take place. AC interconnection enlarges the synchronous power grid but lowers security, while DC back - to - back interconnection improves the security but increases investments. The economic effect of UHV network is nearly same as other interconnection modes. With the consideration of investment, it is recommended to adopt EHV network + DC and EHV transmission + back - to - back or EHV interconnection. It is suggested to carry out the research for improving the usage efficiency of EHV network in China.

Key words: long-distance large-capacity transmission; regional grid interconnection; UHV network; security; economy

IEEE 2008 国际工业技术会议(ICIT2008)通知

IEEE 国际工业技术会议 ICIT(International Conference on Industrial Technology)是 IEEE 工业电子学会 IES(Industrial Electronics Society)主办的一个有广泛影响的国际学术会议。大会旨在为日益发展的工业电子领域提供一个交流与合作的国际平台,并竭力促进各先进技术的传播与应用。2008 国际工业技术会议由四川大学承办,将于 2008 年 4 月 21~24 日在中国四川成都举行。

本次会议工作语言为英语。专业范围涉及:

工业信息学(Industrial Informatics);机器人(Robotics and Mechatronics);电力系统(Power Systems);计算机和控制系统(Computer and Control Systems);电力电子(Power Electronics and Energy Conversion)。

详情请见会议网站 <http://icit08.scueei.net/>