串补和可控电抗器在特高压电网的应用

周勤勇，李晶，秦晓辉，郭强

(中国电力科学研究院，北京海淀区清河小营东路 15 号 100192)

摘要：2008 年底，特高压交流实验示范工程顺利投产标志着我国电网技术取得了历史性的突破，电网发展进入一个全新阶段。与现有电网相比，特高压电网将实现更远距离、更大容量、更低损耗的电力输送。我们国家的能源资源分布决定了未来我国大火电、大水电基地基本都远离负荷中心，长距离（大于 400 公里）、大容量（规模在千万千瓦以上）输送的特征将更加突出。在特高压电网的规划中，我们也发现了由于特高压这种特征使得部分输电通道能力受到一定的限制：部分送电通道输送能力受到暂态稳定的限制；限制过电压要求的高补偿度高抗，与输送大功率对容性无功的需求形成矛盾，远距离送电通道电压支撑能力相对不足。借鉴 500kV 电网发展经验，对于上述问题，采用串补、可控电抗器是较好的解决方案之一。

关键词：特高压;串补;可控电抗器

1 串补在特高压电网的应用

1.1 串补应用规划探讨

固定串补的主要作用是通过降低线路的电抗，以降低线路的电压降和减小两端电压相角差，从而提高输电系统动态和暂态稳定裕度，为大功率传输创造有利条件。因此，在现有特高压规划中，在不增加输电走廊的情况下，通过在长距离线路安装串补，满足功率输送需求。

经初步分析，与锡盟外送类似，蒙西、陕北、川西等通道也需要安装串补以提高输电能力，满足外送需求。上述通道在同样考虑了 40%串补度后，各通道的特高压线路平均输送功率都在 400 万千瓦以上。平均每回线路输电能力提高 100 万千瓦，提高比例在约 25%，效果非常明显。

表 1 加装串补后主要电源基地外送通道输电极限功率

电源基地	最长线路长度（公里）	加装 40%串补后通道输送能力
锡盟	480	1670 万千瓦，平均 420 万千瓦/回
蒙西、陕北、靖边	470	5200 万千瓦，平均 470 万千瓦/回
川西	430	超过 2400 万千瓦，大于 480 万千瓦/回

上述串补工程已经纳入 2020 年特高压电网规划，作为规划方案研究的基础条件。考虑上述串补，一方面提升了特高压线路的输送能力，从而提高了特高压线路的效率和运行经济性；另一方面延缓或避免了新特高压通道的建设，为未来电网的发展预留了空间。串补安装时机与特高压工程输送功率需求紧密相关，从目前规划成果来看，上述串补的安装时间都应在 2015－2020 年间，但并不排除对串补工程的需求提前，因此应尽早开展研究，进行技术储备。

1.2 串补设备基本方案

以锡盟~北京东线路安装 40%串补为例，特高压串补应用系统条件为：线路长度 480km；应用系统额定电压 1050kV。线路的电抗按照 0.262Ω/km 考虑，补偿度为 40%的特高压常规串补，主要参数如下：

基本容抗：XC＝50.304Ω

额定电流：IN=6.0kA

额定电压：UN=301.8kV

三相额定容量：QCN=5432.8MVar

由于串补容量较大，纵向电压过高，可能对设备研制及绝缘带来较大压力，可以考虑串补分两段各 20%安装在线路两侧。分段后单段串补主要参数如下：

基本容抗：XC＝25.152Ω

额定电流：IN=6.0kA

额定电压：UN=150.9kV

三相额定容量：QCN=2716.4MVar

1.3 串补设备技术难点

电压等级上升到 1000kV 后，需要提高串补装置对地绝缘水平，主要影响如下设备选型：支撑绝缘子、光纤绝缘子、旁路断路器、旁路刀闸和接地刀闸。

与 500kV 相比，由于线路额定电流的增加，串补一次设备的额定电流相应增加，主要影响如下设备选型：电容器、阻尼回路设备、旁路断路器。可能导致 MOV 的容量增加。

1）电容器单元可以采用现有成熟技术和产品，

需要更多的电容器单元串并联实现。MOV 阀片可以选用现有成熟产品，增加串并联数。旁路刀闸和接地刀闸选现有产品。

2）GAP 的通流能力需要增加，串补端电压增大的影响可以增加 GAP 节数，每节 GAP 可以采用现有国内成熟产品。

3）旁路断路器、阻尼回路、电流互感器、光纤绝缘子需要重新设计和制造。

4）串补平台需要在绝缘、承重、抗震等方面进行深入研究。

5）测量系统的抗干扰能力需要提高。

2 可控电抗器在特高压电网的应用

2.1 可控电抗器应用规划探讨

在特高压电网规划中，为抑制过电压，规划安装了补偿度较高的并联电抗器（规划电网特高压线路高抗补偿度约 80%），而特高压线路规划输送功率一般在 300 万千瓦以上，部分线路达到了 400～600 万千瓦，无功需求大，因此，随着电压等级的提高，输电线路距离延长，高抗补偿度增大与输送大功率对容性无功的需求形成的矛盾越来越突出。可控电抗器的需求由此凸显。

经初步分析发现，出现可控电抗器需求的情况主要有三类：

1）长距离、大容量特高压输电通道，如陕北、蒙西等送出线路

这种情况下，一般线路输送功率大，无功需求大，需要考虑两端变压器对其进行无功补偿，而变压器补偿受容量受变压器容量限制，补偿能力有限，为达到无功分区分层平衡的目标，可以考虑采用可控电抗器，替代线路上原有固定高抗，根据需要实现无功平衡。

以 400km 同塔双线路为例，假设两端变电站各有 1 台 3000MVA 主变的低压补偿可以用来补偿线路无功，按变压器 67%负载率考虑，当输送功率大于 5900MW 时，就需要考虑可控电抗器；当变压器增为 2 台时，输送功率大于 7600MW，需要考虑可控电抗器。

上述只是理想的数值计算，对于送端电源线路和安装串补的线路，情况可能会乐观一些，而且在实际系统中，两端变电站如何对接入线路补偿与接入线路的长度、潮流都相关，因此，这只是针对规划电网诸多输变电工程进行筛选的条件之一。

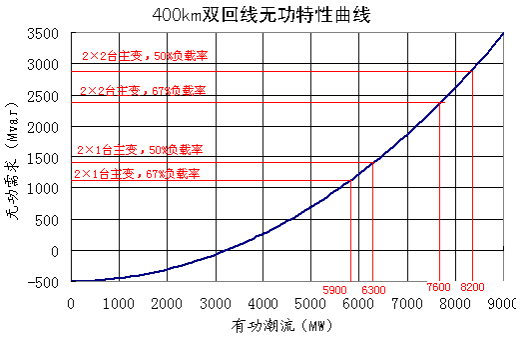

图 1 400km 特高压双回线路无功需求曲线

2）长距离输电通道，线路中间落点为开关站，如 2015 年前绵阳～万县～荆门通道。

在特高压电网发展过程中，有些长距离送出线路由于中间暂时没有负荷需求，建设开关站进行过渡，由于开关站没有无功补偿能力，因此对于长距离输电的无功平衡就比较艰难。这种情况往往就需要安装可控电抗器。

但安装可控电抗器需要远近结合考虑：一是开关站到扩建成变电站的过渡时间长度，二是否计划安装串补（因为往往这种线路输送功率也会受稳定限制而需要安装串补）。

3）进出线较多的枢纽变电站，如豫北、驻马店、长沙等变电站这种情况下，变电站一般远景出线规模在 8 回及以上，线路长度 200～500km，线路功率 2000～5000MW/回，如果按照变压器补偿所有出线线路的一半无功考虑，则可能受变电站容量限制而补偿不足的情况。

假设一个终期规模为 4×3000MVA 变压器变电站，低压电容补偿为 4×4×210Mvar。线路按 4 进 4 出考虑，假设线路平均长度 300km，变电站负载率 67%，则当进线功率超过 4200MW/回（出线功率 2200MW/回）时，变压器无功补偿不足，此时即可考虑采用可控电抗器以满足无功补偿需求。

2.2 可控电抗器设备选型

目前，可控电抗器的类型主要有两类，即高阻抗变压器分级投切式和磁阀式，对于特高压可控电抗器的研制难度而言，前者难度相对较小，而且，如果可控电抗器的主要目的为无功平衡和调压，则只要分级级数及容量能够满足各种运行条件下的无功调压需求即可，因此初期可以选择高阻抗变压器式分级投切式。从远期来看，如果需要兼顾动态过程调节，则需要采用磁阀式的可控电抗器，但还要视其可以达到的调节速度来确定。

可控电抗器在上述第一、二类的应用中，一般可以考虑用可控电抗器替代固定高抗，而在第三类应用中，则需视具体情况确定安装于线路还是变电站母线上。

3 串补及可控电抗器研制计划建议

根据特高压电网规划对 FACTS 设备的需求，并考虑到设备研制的技术难度，建议串补、可控电抗器和静止无功补偿装置按照示范、应用和推广三个阶段进行，对于具体的时间表提出初步建议如表 2：

表 2 串补和可控电抗器在特高压电网应用时间表

阶段	主要内容	可控电抗器	串补
示范	1.应用可行性深化研究 2.技术规范制定、设备研制、设备试验 3.建设示范工程	2010 年左右	2012 年左右
应用	1.设备性能升级，改善设备设计 2.建设应用工程	2010-2012 年	2012-2015 年
推广	配合特高压电网建设开展推广应用	2012 年后	2015 年后

4 结论

1）在特高压电网 400km 以上线路应用串补，平均每回线路输电能力可提高 25%以上，具有良好的应用前景。

2）特高压串补额定电流按照 6kA 考虑，单回线路配置串补容量约为 4500~5500Mvar，开发难度较大，应结合试验示范工程尽快开展串补设备研制工作。

3）在特高压电网应用可控电抗器，可以有效缓解输送大功率带来的大容量容性无功需求及电压控制的压力，具有良好的适用性。

4）可控电抗器初期可选择开发难度较小的高阻抗变压器分级投切式可控电抗器，其示范及应用可结合工程尽快开展。

参考文献

[1] “三华”特高压电网安全性深化研究
[2] 西北电网河西走廊建设 750kV 串补可行性研究
[3] 可控电抗器在我国超/特高压电网中的应用

收稿日期：

作者简介：
周勤勇（1977-），男，江苏，硕士，工程师，电力系统分析
李晶（1978-）,女，内蒙古，硕士，工程师，电力系统分析
秦晓辉（1979-），男，山西，博士，工程师，电力系统分析
郭强（1975-），男，陕西，博士，教高，电力系统分析