

DOI: 10.7667/PSPC160724

# 浙江交直流混联受端电网静态稳定分析

凌卫家<sup>1</sup>, 孙维真<sup>1</sup>, 叶琳<sup>1</sup>, 张静<sup>1</sup>, 李林芝<sup>2</sup>

(1. 国网浙江省电力公司, 浙江 杭州 310007; 2. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

**摘要:** 归纳提出了特高压交直流混联受端电网静态稳定分析通用流程, 探讨了影响静态稳定分析准确度的多种关键因素及处理原则。详细计算分析了±800 kV 宾金和灵绍两回特高压直流密集馈入后, 浙江电网的静态功角和静态电压稳定特性, 并针对特殊方式下浙江电网静态稳定裕度下降等情况, 提出了有针对性的预防措施。相关研究成果为新形势下浙江电网的优化运行和调度提供了理论依据。

**关键词:** 特高压; 交直流混联电网; 静态功角稳定; 静态电压稳定; 受端电网

## Static stability analysis of Zhejiang hybrid ultra-high voltage AC/DC receiving power grid

LING Weijia<sup>1</sup>, SUN Weizhen<sup>1</sup>, YE Lin<sup>1</sup>, ZHANG Jing<sup>1</sup>, LI Linzhi<sup>2</sup>

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Corporation, Hangzhou 310007, China;

2. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

**Abstract:** This paper presents the general procedure for the static stability analysis of the ultra-high voltage AC/DC receiving power grid firstly and discusses the main factors which influence the simulation accuracy and treatment principles. Then, the static angle stability and static voltage stability characteristics of Zhejiang hybrid ultra-high voltage AC/DC receiving power grid is analyzed after the ±800 kV Binjin and Lingshao projects commissioned. And some preventive countermeasures are proposed to overcome the decline of the static stability margin under some particular conditions. The analysis results provide theoretical reference for the operation and optimization of Zhejiang power grid.

**Key words:** ultra-high voltage; AC/DC hybrid power system; static angle stability; static voltage stability; receiving power grid

## 0 引言

特高压交直流电网是实现全国能源资源优化配置的重要载体, 可实现电力的大规模、远距离输送<sup>[1]</sup>。截止2015年底, 浙江电网已经投产了1 000 kV 淮沪、浙福特高压交流输变电工程和±800 kV 宾金特高压直流输变电工程等多项重点工程。随着2016年夏季±800 kV 灵绍特高压直流输变电工程的建成投运, 浙江电网将全面发展成复杂的交直流混联大型受端省级电网。一方面, 上述特高压输电工程的相继投产, 显著加强了浙江电网网架结构, 为浙江提供了清洁的电力供应, 有效解决了浙江电力短缺的问题, 保障了浙江经济社会的快速发展; 另一方面, 宾金和灵绍两回特高压直流密集馈入浙江西南和中北部后, 华东及浙江电网的运行特性都将发

生深刻的变化, “强直弱交”电网特性进一步显现, 系统的转动惯量水平和动态无功支撑能力下降, 给电网的安全稳定运行带来新的挑战<sup>[2-7]</sup>, 其运行的稳定性一直备受关注。与此同时, 浙江电网将出现了“大受电、小开机”方式, 电网的静态稳定特性发生显著的变化。在电网实际运行过程中, 迫切需要针对浙江电网发展新形势, 开展合理规范的静态稳定分析, 确保电网的安全稳定运行。

静态稳定包括静态功角和静态电压稳定两大方面<sup>[8-9]</sup>, 是电网稳定分析中不可或缺的重要部分。静态分析方法具有计算速度快, 能快速扫描大量电网故障, 可给出稳定裕度和灵敏度等重要信息的优点, 已经在国内外电力系统中得到越来越广泛的应用, 是指导大电网安全稳定运行的重要手段和工具。

本文归纳设计了特高压交直流混联受端电网静态稳定分析的通用流程, 探讨了影响静态稳定分析准确度的多种关键因素; 对宾金和灵绍双直流馈

入浙江电网后的静态功角和静态电压稳定特性进行了大量仿真, 归纳总结了静态稳定特性及影响因素。并针对特殊方式下浙江电网静态稳定裕度下降甚至不满足国家标准的情况, 提出了有针对性的预防性措施。研究成果为新形势下浙江电网的优化运行和调度提供了理论依据。

## 1 交直流受端电网静态稳定分析流程设计及关键因素探析

如图 1 所示, 特高压交直流混联受端电网静态稳定分析流程可以归纳为以下 6 个主要环节, 分别为确定研究对象、确定计算方法和稳定判据、选择合理仿真模型、静态稳定计算和制定应对措施等。工程实践过程中要重点分析和关注能影响计算结果准确性和可信度的关键因素。

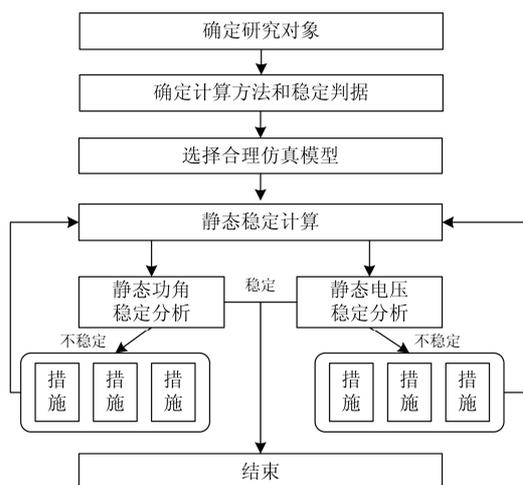


图 1 特高压交直流混联受端电网静态稳定分析流程图

Fig. 1 Procedure for the static stability analysis of hybrid ultra-high voltage AC/DC receiving power grid

### 1.1 确定研究对象

特高压交直流混联受端电网通常包含特高压交流主网架、受端电网主网架以及较低电压等级输电网架, 各层网架组成如表 1 所示, 其中特高压主网架通常是远方电力输送至受端电网的骨干通道, 具有输送容量大、影响范围广的特点, 而受端电网 500 kV 及 220 kV 主网架既是远方电力的疏散通道也是主力机组接入局部电网的媒介, 电网实际运行过程中必须确定静态储备是否满足要求, 故在特高压交直流混联受端电网静态稳定分析中, 研究对象必须涵盖特高压主网架和受端电网主网架。

受地理环境、网架结构和负荷分布等因素制约, 与浙江电网类似, 大型省级受端电网一般可进一步细分为多个分区, 部分分区内存在较大的有功功率

和无功功率不平衡, 其缺口需要通过关键输电通道来转送, 这些通道也应具备足够的静态稳定裕度。因此, 受端电网静态稳定分析除需要考虑正常方式、N-1 故障后方式外, 还需要考虑特高压交流疏散通道、特高压直流疏散通道、同杆架设线路故障以及特高压直流双极闭锁等方式下系统的静态稳定性。

表 1 受端电网的构成

Table 1 Structure of the receiving power grid	
网架	电压等级与网架组成
特高压主网架	±800 kV 及以上直流及其换流站
	1 000 kV 交流线路及主变
受端电网主网架	±500 kV 直流及其换流站
	500 kV 和 220 kV 交流线路及主变
较低电压等级输电网架	更低电压等级的线路和主变

### 1.2 确定计算方法和稳定判据

静态功角稳定分析方法主要包含特征根判别法和工程实用算法等多种方法<sup>[8]</sup>。受全维特征根算法“维数灾”和严重方式下潮流计算收敛性变差等因素限制, 对于大规模系统, 应用特征根判别法时会产生比较大的困难。静态功角稳定工程实用算法由于计算速度较快、结果准确度较高等原因, 在实际工程中被广泛采用。静态功角稳定分析过程中应综合考虑电网规模和复杂程度选择合理的计算方法。

静态功角稳定工程实用算法的基本思路是使用稳定计算程序, 逐步增加送端机组的功率或减少送端电网负荷, 并相应地减少受端的机组功率或增加受端的负荷, 通过功角特性曲线并采用  $dP/d\delta > 0$  作为稳定判据来判别系统的稳定性, 所求得的输电线路或断面最大输送功率即为静态功角稳定极限。在调整送受端机组功率时, 需要注意合理分配各机组出力以提高计算准确性。

记静态功角稳定功率裕度为  $K_{pa}$ , 线路或断面的极限传输功率为  $P_j$ , 线路或断面的正常传输功率为  $P_0$ , 则相应的静态功角稳定功率裕度定义为

$$K_{pa} = (P_j - P_0) / P_0 \times 100\% \quad (1)$$

根据《国家电网安全稳定计算技术规范》<sup>[8]</sup>(简称为《规范》, 下同)的要求, 在正常方式下,  $K_{pa}$  应为 15%~20%; 在事故后运行方式和特殊运行方式下,  $K_{pa}$  不得低于 10%。

静态电压稳定分析方法主要包括连续潮流法<sup>[9-12]</sup>、能量函数法<sup>[13]</sup>、非线性规划法<sup>[14]</sup>、两点估计法<sup>[15]</sup>等诸多方法, 其中连续潮流法是静态电压稳定分析的经典方法<sup>[8]</sup>, 被广泛应用于工程实践。

记静态电压稳定功率裕度为  $K_{pv}$ , 线路或断面的极限传输功率为  $P_{max}$ , 线路或断面的正常传输功

率为  $P_0$ ，则相应的静态电压稳定功率裕度定义为

$$K_{pv}=(P_{max}-P_0)/P_0 \times 100\% \quad (2)$$

《规范》要求，在正常方式下  $K_{pv} > 8\%$ ，N-1故障方式后  $K_{pv} > 5\%$ 。

### 1.3 选择合理仿真模型

高压直流模型：高压直流为交流系统提供电力的同时消耗了大量的无功功率，受端交流系统的电压稳定性与直流系统控制方式紧密相关<sup>[16]</sup>。静态稳定分析过程中，需要选择合理的高压直流输电模型，采用的模型应能准确模拟定电流控制、定功率控制、定直流电压控制以及定关断角控制等控制特性。

无功补偿装置模型：直流换流站和交流变电站内的无功补偿装置的运行控制特性对静态稳定分析结果，特别是静态电压稳定裕度的计算有显著影响。因此，计算过程中换流站、500 kV 变电站、220 kV 变电站内的无功补偿装置需要建立详细模型和控制逻辑。在开展静态电压稳定计算时，应充分考虑无功补偿装置的离散控制特性，避免评估结果过于乐观或过于保守。实践表明，若不考虑无功补偿装置的离散投切控制功能，在某些工况下可能会导致局部电网静态电压稳定裕度偏保守，不能真实反映静态电压稳定裕度，极端情况下甚至可能无法进行连续潮流计算，主要原因是在“鼻点”附近，潮流畸重导致潮流收敛性变差。

## 2 浙江电网静态特性分析

### 2.1 受端电网研究对象

2016 年夏季灵绍特高压直流投产后，总体上浙江电网已形成“交直互备、水火互济、东西互供、南北贯通”的主网架结构，特高压“两交两直”混联受端电网格局凸显，交直流电网交互更加紧密，运行特性更为复杂。如图 2 所示，根据特高压交直流电网的落点和机组分布情况，浙江受端电网可以进一步划分为浙北地区(区域 1)、浙西南地区(区域 2)和浙江宁绍台温地区(区域 3)三大区域，并形成三个关键断面，分别为钱塘江跨江断面、宁绍台温受电断面和浙西南水电外送断面。

钱塘江跨江断面与钱塘江重叠，由 1000 kV 安吉-兰江双线、500 kV 绍兴-涌潮双线、500 kV 兰江-昇光双线共计 6 回线路构成，是浙江南北电网间电力交换主通道，也是灵绍特高压直流和淮沪特高压交流受入电力疏散通道。

宁绍台温断面由绍兴-舜江双线、绍兴-兰亭双线、兰江-凤仪双线、金华-永康双线、莲都-瓯海共计 10 回 500kV 交流线路构成。此“十线断面”将浙江电网从东西方向划分为送端(区域 1+区域 2)和

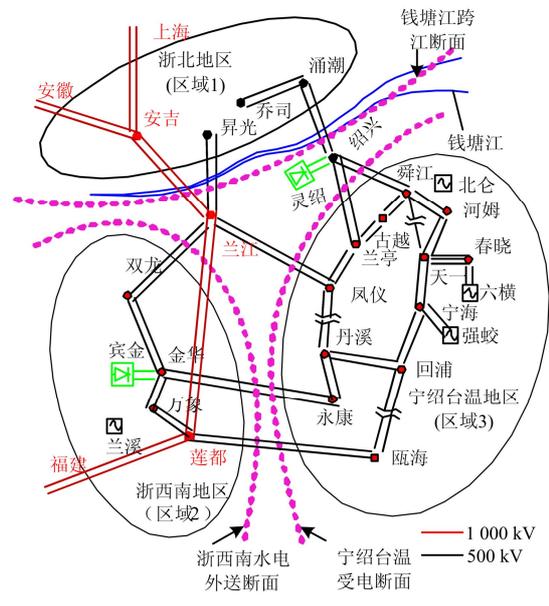


图 2 浙江电网关键断面示意图

Fig. 2 Key transmission sections of Zhejiang power grid

受端(区域 3)两大区域，交流特高压落点、直流特高压落点和省际联络通道均在“十线断面”西部和北部；“十线断面”以东则是宁波、绍兴、台州、温州局等负荷集中区域。

浙西南水电外送断面由 1000 kV 安吉-兰江双线、500 kV 兰江-双龙双线、金华-永康双线、莲都-瓯海 8 回线路构成。与宁绍台温地区相反，浙江西南地区经济欠发达，但水能丰富，且特高压宾金直流落点也在此区域。汛期浙江西南水电与宾金直流转送的四川水电叠加大量送出时，浙西南水电送出断面易重载或超限。

### 2.2 静态功角稳定特性分析

为了摸查灵绍直流投产后浙江电网各关键断面静态功角稳定极限，特别是高受电比例条件下相关断面静态稳定程度是否满足要求，制定了 2016 年夏季高峰(2016XG)和冬季高峰(2016DG)、2017 年夏季高峰(2017XG)和冬季高峰(2017DG)等多种典型方式，其负荷水平、开机方式及关键断面初始潮流如表 2、表 3 所示。根据上文所述的静态稳定分析流程，采用静态功角稳定工程实用算法对静态功角特性进行了分析。

#### (1) 钱塘江跨江断面

如表 3 所示，2016 年夏季高峰方式下，钱塘江跨江断面初始潮流为 7 660 MW，其中兰江-安吉双线 2 770 MW，兰江-昇光双线 1 918 MW，绍兴-涌潮双线 3 072 MW。采用上文所述工程实用静态功角稳定算法，减少安徽、江苏、上海、浙北发电机

组出力, 增加浙南、福建发电机组出力, 逐步逼近钱塘江过江断面的稳定极限。计算表明该断面极限为 16 340 MW, 其中兰江-安吉双线 6 880 MW、兰江-昇光双线 4 240 MW、绍兴-涌潮双回 5 220 MW, 静态功角稳定裕度为 113.3%, 失稳形式表现为浙西南和福建机组相对华东主网失步, 其发电机功角仿真曲线如图 3(a)所示, 各通道潮流仿真曲线如图 3(b)所示。类似地, 可以获得 2016 年冬季高峰、2017 年夏季高峰和冬季高峰等运行方式下钱塘江跨江断面静态功角极限, 具体数值如表 4 所示, 其失稳形式也表现为浙西南机组和福建机组相对华东主网失步, 其中以沪、浙、闽开头的机组分别为上海、浙江和福建省内机组(下同)。

表 2 静态功角稳定计算基础运行方式下负荷水平和开机方式

Table 2 Load level and switch-on mode in the basic operation cases for static angle stability

运行方式	华东电网负荷	浙江电网负荷	浙江开机容量	浙江出力水平	MW, %
					浙江总受电占比
2016XG	245176	66965	38611	38443	28522 (42.6%)
2016DG	220823	60559	42336	41936	18623 (30.8%)
2017XG	268376	72046	44701	43514	28532 (39.6%)
2017DG	235809	65049	45848	44878	20171 (31.0%)

表 3 静态功角稳定计算基础运行方式下关键断面初始潮流

Table 3 Initial power flow of the key transmission sections in the basic operation cases for static angle stability

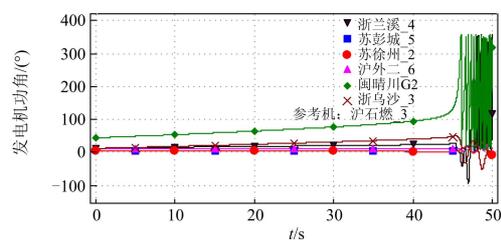
	MW				
	福建外送	特高压直流	钱塘江跨江断面	浙西南水电外送断面	宁绍台温断面
	初始潮流	宾金直流	灵绍直流	初始潮流	初始潮流
2016XG	6000	8000	8000	7660	10106
2016DG	6000	1200	6500	7182	4924
2017XG	6000	8000	8000	8080	10966
2017DG	6000	8000	8000	8344	6900

表 4 关键断面静态功角极限

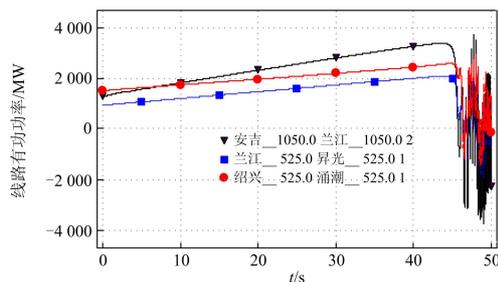
Table 4 Static angle stability limits of the key transmission sections

	MW, %					
	钱塘江跨江断面		浙西南水电外送断面		宁绍台温断面	
	静稳极限	静稳裕度	静稳极限	静稳裕度	静稳极限	静稳裕度
2016XG	16340	113%	15567	55%	26664	164%
2016DG	18920	163%	—	—	27500	1185%
2017XG	27580	241%	15900	45%	27580	226%
2017DG	19560	134%	—	—	25100	991%

注: 冬季枯水期, 浙西南水电送出断面静态功角稳定极限不再给出。



(a) 2016XG钱塘江跨江断面达稳定极限时机组功角



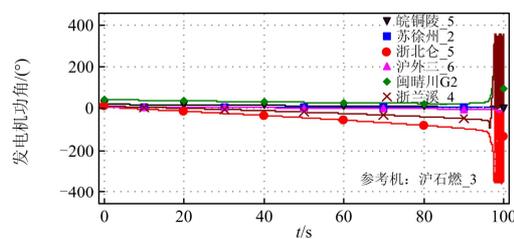
(b) 2016XG钱塘江跨江断面达稳定极限时各通道潮流

图 3 2016XG 钱塘江跨江断面静态功角稳定仿真曲线

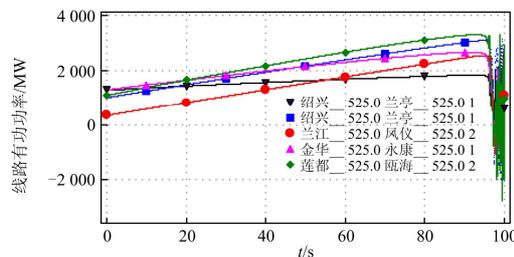
Fig. 3 Static angle stability limits for the Qiantangjiang section in 2016 summer peak case

(2) 宁绍台温受电断面和浙西南水电外送断面

宁绍台温受电断面和浙西南水电外送断面的静态稳定极限计算方法与钱塘江跨江断面相同。2016 年夏季高峰方式下宁绍台温断面初始潮流为 10 094 MW, 其静态功角稳定极限为 15 567 MW, 静态功角裕度达 55%, 失稳形式表现为区域 3 内的北仑电厂等机组相对区域 2 以及福建机组相失步, 其发电机功角仿真曲线如图 4(a)所示, 各通道潮流仿真曲线如图 4(b)所示。



(a) 2016XG宁绍台温断面达稳定极限时机组功角



(b) 2016XG宁绍台温断面达稳定极限时各通道潮流

图 4 2016XG 宁绍台温断面静态功角稳定仿真曲线

Fig. 4 Static angle stability limits for the Ningbo-Shaoxing-Wenzhou transmission section in 2016 summer peak case

类似地, 可以获得典型方式下宁绍台温断面和浙西南水电外送断面的静态功角极限及裕度(表 4)。由仿真结果可知, 上述三个关键断面的静态功角裕度均较大, 显著大于标准限值, 其中稳定裕度较小的浙西南水电送出断面静态功角稳定裕度也达到了 45%, 静态功角稳定非电网安全稳定运行的限制性因素, 运行过程中需要重点关注热稳定和暂态稳定问题。

### 2.3 静态电压稳定分析

采用静态电压稳定工程实用算法对 2016 年夏季高峰(2016XG)、冬季高峰(2016DG)和汛期高峰(2016XU)等多种典型运行方式进行静态电压稳定特性分析。在仿真过程中宾金直流和灵绍直流均采用了实际的控制模式, 500 kV 变电站和换流站无功补偿装置均建立了详细模型和投切策略。

上述典型方式下静态电压稳定裕度以及薄弱母线如表 5 所示(仅列出部分裕度相对较小者)。可以发现, 正常方式下浙江电网静态电压稳定裕度均大于《规范》中规定的 8% 的要求, 且直流重要通道 N-1(绍兴-舜江)、直流单极闭锁情况下的裕度均大于事故后 5% 的要求, 这一定程度反映了正常方式下浙江电网具备较充分的无功储备。2016 年夏季高峰正常方式下连续潮流计算获得的 PV 曲线如图 5 所示, 随着省内负荷的增长, 灵绍换流站周边的 500 kV 古越变母线电压逐步降低, 系统的静态电压稳定裕度为 5 450 MW, 静态电压稳定裕度为 8.1%。

从表 5 可以发现, 直流输送通道(绍兴-舜江)、关键输电线路 N-2、大型电厂送出线路 N-2 以及直流双极闭锁情况下系统的静态电压稳定裕度显著下降。主要表现如下述。

表 5 2016 年浙江电网静态电压稳定裕度

Table 5 Static voltage stability margin of Zhejiang in 2016

运行方式	%		
	2016XG	2016DG	2016XU
正常方式	8.1	10.4	10.5
绍兴-舜江 N-1	7.0	9.4	9.1
六横-春晓 N-2	3.2	10.3	7.1
宁海-天一 N-2	4.4	3.4	5.1
涌潮-乔司 N-2	4.8	6.5	7.4
宁海-强蛟 N-2	4.8	8.2	7.4
绍兴-舜江 N-2	4.9	7.6	6.3
直流单极闭锁	6.3	8.8	9.2
直流双极闭锁	3.1	5.2	6.0
电压稳定性最弱母线	古越、兰亭、舜江、河姆、涌潮、吴宁、丹溪	涌潮、古越、舜江、天一、春晓	古越、舜江、天一、句章、春晓

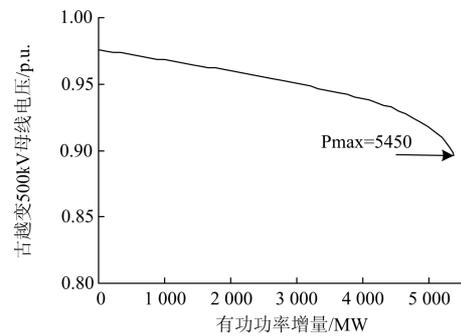


图 5 2016 夏季高峰方式下古越变母线电压

Fig. 5 Bus voltage of Guyue station in 2016 summer peak case

(1) 2016 夏高方式下直流双极闭锁后静态电压稳定裕度下降到 3.1%, 主要原因是直流闭锁后其大量功率缺口通过省级联络通道和省内机组弥补, 导致相关断面潮流重载且机组无功储备下降。

(2) 部分关键断面, 如区域 3 内的 500 kV 宁海天一双回线 N-2 故障后, 舟山地区和宁波地区的天一、春晓负荷中心与主网主要通过 3 回 500 kV 与主网联络, 局部网架显著削弱, 进而导致 2016 年冬高方式下电压稳定裕度下降到 3.4%, 如果进一步减少舟山和春晓供区开机方式, 局部电网将存在电压崩溃的风险。

负荷中心周边主力机组故障停运后, 由于无功功率支撑能力下降, 静态电压稳定裕度随之显著下降, 如六横-春晓两回 500 kV 线路故障跳闸后, 六横电厂两台 1 000 MW 机组同时失去, 机组对电压的支撑显著下降, 2016 年夏高方式下静态电压稳定裕度下降到 3.2%, 也存在电压崩溃的风险。

由表 5 可知, 电压稳定性薄弱的母线集中在灵绍直流换流站周边的涌潮、古越、舜江等变电站, 春晓、句章等负荷中心变电站, 且主要集中在区域 3 内。其原因如下:

(1) 当特高压直流输送功率较高或满送时, 换流站备用滤波器较少。随着省内有功负荷逐渐增大, 系统母线电压逐渐降低, 换流站内滤波器组输出的无功功率下降, 但换流器消耗的无功功率基本不变甚至有所增加, 使得换流站在交流母线电压下降后需要从交流系统吸收大量的无功功率, 从而进一步恶化了换流站周围的交流母线电压。

(2) 灵绍直流换流站与特高压交流站的电气距离较远, 受交流电网的支撑作用比宾金直流换流站弱, 且更接近负荷中心, 故灵绍直流换流站周边薄弱母线更为集中, 数量更多。

(3) 区域 3 内负荷中心变电站事故后电压稳定裕度偏小, 这主要是因为两回特高压直流大功率

馈入的情况下, 为保证功率平衡, 浙江省内机组开机数量被迫减少, 从而导致系统的无功储备和无功支撑减少, 降低了电压稳定裕度。极端情况下, 局部电网可能会因区内机组调停数量过多而出现电压崩溃的风险。

因此, 在电网实际运行中应特别关注灵绍换流站及其周边母线电压的变化。在高峰时段应该合理安排机组开机方式, 并确保相关地区 500 kV 低压容性补偿设备的投运率以及 220 kV 电网的无功补偿度, 以保留足够的动态无功备用。

### 3 提高静态电压稳定裕度措施

#### 3.1 加强无功电源和补偿装置管理

规范和加强发电机组管理, 深入挖掘机组动态无功调节能力, 合理确定电压薄弱区域的最小开机方式。强化无功补偿装置尤其是负荷高峰期间电容器的投运管理, 推动无功分层分区平衡, 在 500 kV 兰亭、古越、舜江、涌潮等电压薄弱变电站增设电容器组, 并尽快完成宾金和灵绍特高压直流 4 台 300 Mvar 调相机的建设工作。

#### 3.2 强化电压控制手段

研究国(分)、省、地多级 AVC 协调控制策略, 实现各电压等级无功电压协同优化控制; 深入研究新能源基地无功调节设备协同控制策略, 开展大规模新能源基地 AVC 功能应用和闭环控制, 提高新能源大幅波动情况下电网安全性和电压质量水平; 优化调相机、静止无功补偿器等无功补偿资源的协调控制策略, 提升直流落点地区与负荷中心地区的电压稳定水平。

#### 3.3 完善电压稳定的在线监视

充分利用智能电网调度技术支撑系统, 开发完善静态稳定监视模块, 通过在线系统实时监测电压薄弱地区的母线电压和负荷增长趋势, 合理安排机组开机方式和无功补偿装置的投切, 避免电压失稳现象的发生。

### 4 结论

本文总结提出了特高压交直流混联受端电网静态稳定分析的通用流程, 并重点讨论了仿真算法和模型等选取过程中需要重点关注的问题。针对宾金和灵绍特高压直流馈入浙江电网后的新形势, 详细分析了浙江电网静态功角和静态电压稳定特性。计算表明, 浙江主干网静态功角稳定裕度和静态电压稳定裕度均满足相关标准的要求, 但是在严重故障方式下, 静态电压稳定裕度偏小, 在电网实际运行过程中需要高度重视, 通过合理配置静态和动态无

功补偿容量, 合理安排机组开机方式等手段确保电网的安全稳定运行。

### 参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [2] 张文亮, 周孝信, 印永华, 等. 华北-华中-华东特高压同步电网构建和安全性分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(16): 1-5.  
ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, YIN Yonghua, et al. Composition and security analysis of "North China-Central China-East China" UHV synchronous power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 1-5.
- [3] 汤涌, 郭强, 周勤勇, 等. 特高压同步电网安全性论证[J]. 电网技术, 2016, 39(4): 97-104.  
TANG Yong, GUO Qiang, ZHOU Qinyong, et al. Security evaluation for UHV synchronized power grid[J]. Power System Technology, 2016, 39(4): 97-104.
- [4] 李明节. 大规模特高压交直流混联电网特性分析与运行控制[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 985-991.  
LI Mingjie. Characteristic analysis and operational control of large-scale hybrid UHV AC/DC power grids[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 985-991.
- [5] 周孝信, 鲁宗相, 刘应梅, 等. 中国未来电网的发展模式和关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 4999-5008.  
ZHOU Xiaoxin, LU Zongxiang, LIU Yingmei, et al. Development models and key technologies of future grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 4999-5008.
- [6] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流受端电网直流接入能力评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.  
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [7] 李兆伟, 翟海保, 刘福锁, 等. 多馈入交直流混联受端电网直流接入能力研究评述[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 142-148.  
LI Zhaowei, ZHAI Haibao, LIU Fusuo, et al. DC access capability study for multi-infeed HVDC power transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 142-148.
- [8] DL/T1234-2013 电力系统安全稳定计算技术规范[S]. 北京: 国家电网公司, 2013.
- [9] 孙华东, 汤涌, 马世英. 电力系统稳定的定义与分类述评[J]. 电网技术, 2006, 30(17): 31-35.

- SUN Huadong, TANG Yong, MA Shiyang. A commentary on definition and classification of power system stability[J]. Power System Technology, 2006, 30(17): 31-35.
- [10] 郭瑞鹏, 韩祯祥. 电压稳定分析的改进连续潮流法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(14): 13-16.
- GUO Ruipeng, HAN Zhenxiang. Advanced continuation power flow method for voltage stability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(14): 13-16.
- [11] 吴昊, 卫志农, 王成亮, 等. 基于连续潮流综合算法的电压稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(6): 99-104.
- WU Hao, WEI Zhinong, WANG Chengliang, et al. Voltage stability study based on synthesis method of continuous power flow[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(6): 99-104.
- [12] 薛振宇, 房大中. 大型交直流互联电力系统双向迭代连续潮流算法[J]. 电网技术, 2012, 36(10): 141-146.
- XUE Zhenyu, FANG Dazhong. Continuation power flow method based on bi-directional iteration in bulk AC/DC interconnected power system[J]. Power System Technology, 2012, 36(10): 141-146.
- [13] 郑武, 李华强, 刘慧, 等. 基于静态能量函数法的电压弱节点分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 79-83.
- ZHENG Wu, LI Huaqiang, LIU Hui, et al. Voltage weak node assessment based on static energy function[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 79-83.
- [14] 郭瑞鹏, 韩祯祥, 王勤. 电压崩溃临界点的非线性规划模型及算法[J]. 中国电机工程学报, 1999, 19(4): 14-17.
- GUO Ruipeng, HAN Zhenxiang, WANG Qin. Nonlinear programming model and algorithm for point of collapse[J]. Proceedings of the CSEE, 1999, 19(4): 14-17.
- [15] 周玮, 姜汀, 胡姝博, 等. 基于两点估计法的交直流混合系统电压稳定概率评估[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 8-13.
- ZHOU Wei, JIANG Ting, HU Shubo, et al. Probabilistic assessment on voltage stability of AC/DC hybrid systems based on two-point estimate method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 8-13.
- [16] 徐政. 联于弱交流系统的直流输电特性研究之二—控制方式与电压稳定性[J]. 电网技术, 1997, 21(3): 1-4, 9.
- XU Zheng. The characteristic of HVDC system to weak AC systems part II — control modes and voltage stability[J]. Power System Technology, 1997, 21(3): 1-4, 9.

收稿日期: 2016-05-18; 修回日期: 2016-06-28

作者简介:

凌卫家(1962-), 男, 学士, 高级工程师, 主要从事大电网运行与控制等方面的研究工作; ling\_weijia@126.com

孙维真(1963-), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网调度与运行等方面的研究工作;

叶琳(1979-), 女, 硕士, 高级工程师, 主要从事电网调度与运行等方面的研究工作。

(编辑 姜新丽)