

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.06.008

“嵌入式”直流技术在省级输电网中的规划及应用

王之伟¹, 黄俊辉², 程亮¹, 胡伟¹, 蔡晖², 韩杏宁²

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024;

2. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 江苏 南京 210008)

摘要:江苏电网作为典型的省级输电网,面临着大规模新能源接入带来的能源转型压力和挑战,需要从“源网荷储”等方面进行转型升级。文中对负荷、电源、网架结构等江苏能源电力发展格局进行分析,总结了江苏电网面临的挑战,如重要输电断面输电能力不足等;结合新能源大规模发展及江苏输电网结构特点,重点分析了“十四五”及远景江苏输电网过江断面输电能力需求,提出了送、受两端均位于江苏交流电网内部且分布长江两侧的“嵌入式”直流技术。相较于传统互联方式建设的远距离、大容量直流输电技术,“嵌入式”直流输电技术通常利用现有架空输电线路、现有或预留交流电缆通道,构建交直流混联电网,在有限输电走廊空间内可大幅提高电网关键断面的输电能力,挖掘现有电网的供电潜力,满足电网发展的需求。

关键词:能源转型;新能源接入;省级输电网;“嵌入式”直流输电技术;江苏电网;过江断面

中图分类号: TM715

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2022)06-0065-10

0 引言

为加快能源绿色低碳转型,传统电力系统需要从“源网荷储”等方面向以新能源为主体的新型电力系统进行转型升级^[1-3]。在转型升级过程中面临着严峻的形势和挑战:电力供应短缺现象凸显能源低碳转型的复杂性^[4-5];能耗考核机制变革凸显新能源开发利用的重要性^[6-7];大规模新能源接入电网凸显电网安全稳定运行压力^[8-9]。

江苏电网作为典型的省级输电网,面临着特有的转型升级压力与挑战^[10-12],主要表现为能源“增长期”和“转型期”双期叠加的矛盾。立足江苏能源资源禀赋和电网发展现状,以服务江苏率先碳达峰为目标,以保障能源电力可靠供应为底线,以助力新能源大规模发展和高效能利用为核心,江苏电力开展了对电网升级的探索和实践^[13-16]。

直流技术以其功率调节快速灵活、不增加系统短路容量、损耗低和占地面积小等优越特性,在远距离大容量输电、异步联网、海底电缆输电等方面得到广泛应用^[17-18]。相较于传统互联方式建设的远距离、大容量直流输电技术,“嵌入式”直流输电技术的送、受两端换流站建设于同一个交流电网内部,通常利用现有架空输电线路“交改直”、现有或预留交流电缆通道,在有限输电走廊空间内可大幅提高电网输电能力和电网的可控能力与灵活性。

文中通过研究负荷、电源、网架结构等江苏能

源电力发展格局,分析了江苏电网在能源转型中面临的挑战,例如重要输电断面输电能力不足、供电安全性及可靠性有待提高等,并提出了建设新型电力系统的重要举措。随后,结合电网现状及发展规划,根据输电网网架的结构特点,梳理了“十四五”及远景江苏电网重要过江断面输电能力需求。在此基础上,研究并提出了包括现有交流通道“交改直”、利用现有过江通道资源铺设直流电缆等提升过江断面输电能力的“嵌入式”直流技术及其安全稳定仿真分析方法。在现有交流电网的基础上,通过应用“嵌入式”直流技术构建省内交直流混联电网,最大程度挖掘现有电网的供电潜力,满足江苏电网发展的需求。

1 江苏电网面临的形势和挑战

1.1 江苏能源电力现状及发展格局

“十三五”期间,江苏全社会用电量由5 115亿 kW·h 增长至6 374 亿 kW·h,年均增速达到4.5%;最高用电负荷由86 GW 增长至124 GW,年均增速达到6.7%。预计2025年、2030年全社会用电量将分别达到8 200 亿 kW·h 和9 280 亿 kW·h,最高用电负荷将分别达到150 GW 和170 GW。

“十三五”期间,电源装机由96 GW 增长至142 GW,其中新能源并网装机比重上升至23%,发电量占比上升至8%;煤电装机比重下降至56%,发电量占比下降至70%。

根据“十四五”规划,2025年电源装机将达到212 GW,其中风电、光伏装机分别为32 GW、58 GW,

收稿日期:2022-07-06;修回日期:2022-09-18

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2021YFB2501600)

装机容量占比达到 42%，发电量占比达到 21%。

结合国家及江苏省能源相关政策，预计至 2030 年江苏省电源装机达到 291 GW，其中风电、光伏装机分别为 50 GW、100 GW，装机容量占比达到 52%，发电量占比达到 30%。

2020 年以来，江苏省区外受进最大电力达到 31 GW，相比“十二五”增长接近 15 GW，占全社会最高用电负荷的比重提高至 24%。2020 年净受进电量 1 300 亿 kW·h，占全社会用电量比重提高至 20%。预计“十四五”末区外来电将达到 46 GW，远期将达到 60 GW。

1.2 江苏电网现状

截至 2021 年底，江苏电网共有 1 000 kV 变电站 3 座，±800 kV 换流站 3 座，±500 kV 换流站 1 座，500 kV 变电站（开关站）74 座，220 kV 变电站 624 座，110 kV 变电站 2 020 座。

基于江苏特殊的地理位置，江苏电网以地域分为苏北、苏南电网两部分，过江断面作为重要的电力输送通道，现有输电能力为 18 GW，由 4 个主要通道构成，具体如图 1 所示，其中 500 kV 输电断面的输电能力约为 12 GW。500 kV 西通道由三汉湾—秋藤—秦淮双回线路、三汉湾—龙王山双回线路 2 个通道构成；500 kV 中通道由江都—梦溪双回线路构成；500 kV 东通道由泰兴—斗山双回线路构成；特高压通道由 1 000 kV 泰州—东吴双回线路构成。

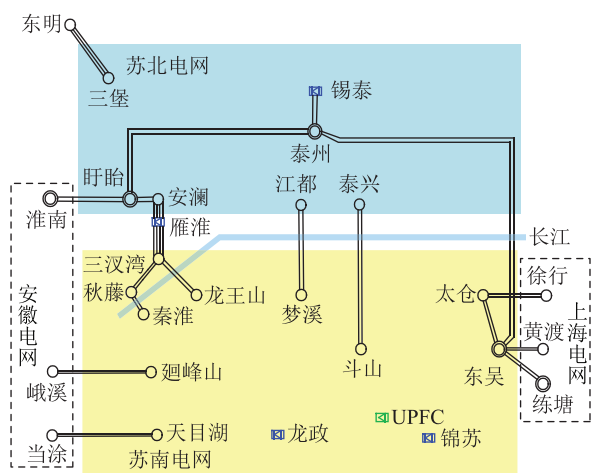


图 1 过江断面结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the Yangtze-river-crossing section structure

1.3 江苏电网结构特点

(1) 江苏电力流呈现“北电南送、西电东送”格局，省内煤电分布相对均衡，其中沿江区域煤电布局丰富，为苏南发达地区的电力供应保障提供了重要支撑。未来煤电逐步转移至沿海区域，而增量新能源主要布局在苏北、苏中地区，过江断面由北向

南的电力流将持续增加。

过江断面最大电力流出现时段与负荷高峰基本吻合。随着新能源并网装机比重的增大，受新能源出力及发电特性耦合影响，过江断面最大电力流将出现在春、冬季，与江苏负荷高峰时段出现偏差。

(2) 江苏电源主要以煤电为主，煤电机组作为电力平衡的压舱石，出力较为稳定，重要断面电力流呈现确定性及规律性，断面输电能力主要由线路热稳极限控制。随着大规模新能源并网，受新能源出力影响，重要断面电力流出现随机性，呈现幅值大但持续时间较短的特点，根据线路热稳极限确定的断面输电能力存在很大的冗余性。

(3) 根据规划，500 kV 及以上主网架层面将继续承载核电、抽蓄和大容量跨区直流等大型集中式电源的接入；省内各地区风电、光伏、储能等新能源将分散接入 220 kV 及以下电网，尽可能实现新能源出力与当地负荷的就地平衡。大规模风电、光伏对接入电网的规划、运行、保护等方面均提出了挑战。江苏 220 kV 及以下电网不仅需要满足负荷供电安全性和可靠性需求，还要满足新能源接入和消纳（考虑新能源出力置信度）的需求。

1.4 过江断面输电需求分析

未来江苏一方面进一步开发海上风电和沿海滩涂光伏资源，另一方面将落点苏北的区外直流通通过过江输电通道输送至苏南负荷中心。因此，结合负荷结构转型发展，过江输电断面仍然是全省电力规划和新能源消纳的重要影响因素。

为了精细化分析过江断面输电需求，采用全时序生产模拟法^[20-21]，详细呈现 2025 年 90 GW 新能源装机的系统运行场景。通过模拟过江断面潮流概率分布持续曲线，可以得到基于新能源出力统计特性的断面输送电力流情况，如图 2 所示。

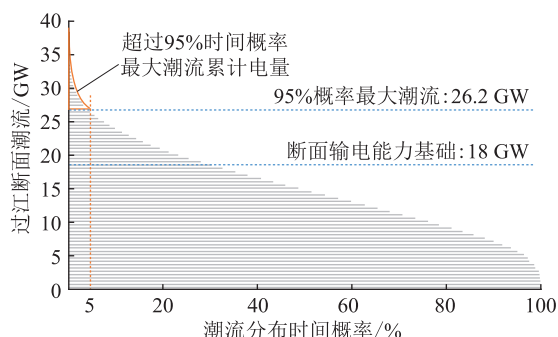


图 2 2025 年过江断面概率潮流

Fig.2 Current probability in the Yangtze-river-crossing section in 2025

在不考虑 2025 年断面输电约束的情况下，按照新能源总消纳率 95% 控制，过江断面整体电力流最

大将达到 37.3 GW,出现概率仅为 0.01%,满足尖峰小概率电力流的输电能力提升效果甚微。考虑保证过江输电断面 95% 概率潮流下(438 个小时),过江断面电力流需求为 26.2 GW,其对应的输送电量占比为 99.2%。

2025 年过江断面电力流运行小时数区间分布如图 3 所示,主要分布于 20%~60% 最大潮流区间。500 kV 过江断面电力流最大将达到 30.8 GW,按照 95% 概率潮流计算约为 23.1 GW。

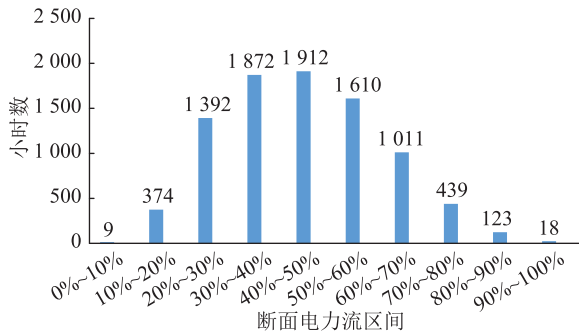


图 3 过江断面电力流运行小时数分布

Fig.3 Distribution of power flow operation hours in the Yangtze-river-crossing section

分析 2030 年 150 GW 新能源装机的系统运行场景,在不考虑 2030 年断面输电约束的情况下,按照新能源总消纳率 95% 控制,过江断面整体电力流最大将达到 44.8 GW,出现概率也仅为 0.01%。考虑保证过江输电断面 95% 概率潮流下,过江断面电力流需求为 32.4 GW,其对应的输送电量占比升至 99.4%。过江断面电力流主要分布于 30%~70% 最大潮流区间。500 kV 过江断面电力流最大将达到 36.9 GW,按照 95% 概率潮流计算约为 25.8 GW。

由全时序模拟结果可知,随着未来新能源的大规模增长,过江断面电力流存在尖峰潮流“极值高、时间少”的特征,过江断面加强须结合系统整体调峰的经济性来综合考虑技术经济合理的方案。

1.5 过江断面输电需求提升措施

根据规划,2025 年风电、光伏装机规模分别为 32 GW 和 58 GW,2030 年装机规模将达到 50 GW 和 100 GW。新增新能源分布具有一定的地理特性,风电几乎均集中在江北,光伏也是江北远多于江南,叠加苏北长期以来布局的大量煤电和区外火电,网内的负荷和电源的逆向分布会造成江苏电网过江断面电力流明显提升。

江苏北电南送输电通道的最大瓶颈在跨江输电通道的选址上。江苏段长江岸线是江苏最为活跃的经济带,密布大量港口、桥梁、城市及大型企业,通道资源十分紧张。长江沿线的 500 kV 架空跨

越共有 4 处,分别分布在南京 2 处(西通道)、镇江 1 处(中通道)、无锡 1 处(东通道);1 000 kV 特高压输电通道通过江底气体绝缘输电线路(gas insulated line,GIL)管廊铺设。另有 220 kV 架空跨越 1 处(五峰山大跨越),位于 500 kV 中通道西侧,设计电压等级 220 kV,降压至 110 kV 运行,由镇江 220 kV 绍隆变馈供扬州 110 kV 高桥变。

直流输电技术为提升过江断面电力输送能力提供了新的思路:

(1) 利用现有 220 kV 交流输电通道,通过“交改直”技术,形成直流输电通道^[21-22];

(2) 利用建成的交流 GIL 特高压管廊预留的 500 kV 电缆位置,改造形成直流输电通道^[23-24];

(3) 与规划交通隧道共用过江隧道资源,预留直流输电通道。

为充分利用现有跨江输电通道资源,“十四五”拟将现有五峰山大跨越的双回 220 kV 同杆交流线路(6 根导线),改造成 3 回双极直流线路。利用“交改直”技术,大幅提高线路输电能力,最大化利用现有跨江通道资源。由于送、受两端均位于江苏交流电网内部且分布于长江两侧,两端直流输电系统“嵌入”交流电网中,因此该直流为“嵌入式”直流。

2 江苏电网“嵌入式”直流输电技术

江苏电网基于现有特高压馈入式交直流混联的电网形态,进一步探索在省级电网的重要断面应用直流输电技术,构建“嵌入式”直流,最大化利用现有过江通道资源,大幅提升过江断面的输电能力,形成交直流混联省级电网形态。

2.1 国内外“嵌入式”直流应用概述

国内直流工程主要用于高电压、大规模、远距离输电及大区联网,例如江苏电网运行的 ± 800 kV 锦苏直流、 ± 800 kV 雁淮直流、 ± 800 kV 锡泰直流和刚投运的 ± 800 kV 建苏直流工程等。另外还有大电网向海岛供电或海上风电接入电网等,例如 ± 200 kV 舟山柔性直流、 ± 400 kV 如东直流工程等。鲜有在省级电网内通过“嵌入式”直流输电技术实现交直流混联的案例。

国外直流工程主要用于陆地和海上风电场等可再生能源电力并网、为海岛或海上石油、天然气的钻井平台供电、在用地紧张的城市中心建立供电设施与跨越海洋的跨国电力互连,其中具备“嵌入式”直流结构特点的直流工程主要有英国 Western Link 和德国的 SuedLink。这 2 条直流主要将英国/德国北部的风电通过直流电缆输送至南部负荷中

心,通过开辟直流输电通道提高了海上风电的消纳能力,缓解了现有交流电网“北电南送”断面的输电压力。2 条典型直流工程的概况如表 1 所示^[25-27],其中 LCC-HVDC 为基于电网换相型换流器的高压直流输电;VSC-HVDC 为基于电压源型换流器的高压直流输电。

表 1 国外典型直流概况

Table 1 Profiles of typical DC channels in foreign countries

对比项目	Western Link	SuedLink
直流位置	英国	德国
建设年份	2012	2020
投运年份	2015(部分容量), 2019(满容量)	2026
传输功率/MW	2 200	2×2 000
直流电压等级/kV	600	525,320
交流电压等级/kV	400	380
线路路径长度/km	420	700
架空线长度/km	0	0
陆上电缆长度/km	35	暂未公布
海底电缆长度/km	385	暂未公布
直流类型	LCC-HVDC	VSC-HVDC
直流拓扑	对称单极	对称单极

2.2 “交改直”线路工程技术

将原有交流双回线路中 6 根导线改成 3 个双极直流输电系统,每个双极利用 2 根导线;改造线路杆塔和绝缘子,形成新的电压等级,在两端新建换流设备,单独或者并联运行。

以江苏 220 kV 五峰山大跨越线路为例(如图 4 所示),该线路交改直的核心问题是根据原大跨越的塔头结构,确定能满足安全运行的最大直流电压。在不改变杆塔结构时,将交流绝缘子更换成直流绝缘子,使更换后的总结构高度接近原有交流绝缘子结构高度,根据绝缘子的爬距反推满足污秽要求的直流电压,并验算操作过电压、雷电过电压和直流跳闸率等是否满足要求;当改变杆塔结构时,除了上述电气间隙要满足要求外,还须验算原有的杆塔和基础荷载能否满足要求,以获得更高的直流电压等级^[28-30]。

该跨越塔若由 220 kV 交流线路改为直流运行,相关技术参数将发生变化,如表 2 所示。

相关校核、试验计算证明,将 220 kV 交流大跨越线路改为±200 kV 直流运行后,输送容量能达到原交流线路的 3.2 倍;在满足通航要求的前提下,结合杆塔荷载条件进行线路增容改造,输送容量可以达到交流线路的 4.8 倍,充分挖掘了现有输电廊道

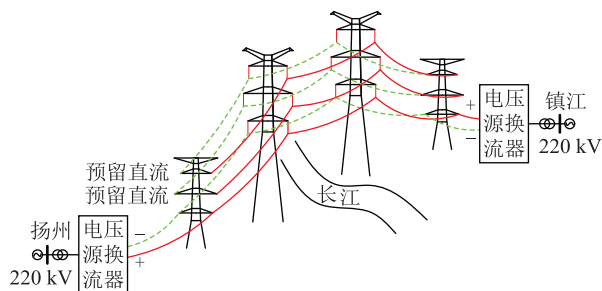


图 4 五峰山大跨越线路交改直运行示意

Fig.4 Schematic diagram for operation of Wufengshan long-span transmission line from AC to DC

表 2 五峰山大跨越线路采用交流与直流的技术参数对比
Table 2 Comparison of technical parameters of AC/DC for Wufengshan long-span transmission line

对比项目	改造前	改造后 (不更换导线)	改造后 (更换导线)
电压等级/kV	220(交流)	±200(直流)	±200(直流)
回路数	2	3	3
导线型号	2×ACSR/ EST-500/230	2×ACSR/ EST-500/230	2×JNRLH2/ G4A-500/230
单回最大 电流/A	2 060	2 060	3 000
输送容量/MW	745(考虑交流 线路 N-1)	3×800	3×1 200
最高线温/°C	90	90	131
平均运行 张力/%	18.26	18.26	21.26
最大弧垂/m	80.7	80.7	78.9

的输电潜能,可有效解决过江输电瓶颈问题,具有良好的社会和经济效益。

2.3 直流主接线选择技术路线

两端直流输电系统的拓扑可分为单极系统、双极系统和背靠背直流系统 3 种基本类型。主接线类型的选择应综合考虑直流输电系统的额定参数要求,如额定输电功率、导线通流能力、额定电压、线路架设条件,以及接入电网对直流系统运行灵活性和可靠性的要求。

应用双极结构的两端直流系统的直流主接线包括双极一端中性点接地方式(对称单极)、双极两端中性点接地方式和双极金属中线方式。主接线型式示意如图 5 所示,其中 DCF 为直流滤波器。方案如表 3 所示,其中 NBS 为中性母线开关。技术和经济性对比如表 4 所示。

对比可知,双极两端中性点接地方式和双极金属中线方式运行方式多、灵活性高、能量可用率较高。双极一端中性点接地方式(对称单极)正常按照单极配置,只具备对称双极运行方式,设备配置和站内布置最为简单,经济性较好。该方式类似于

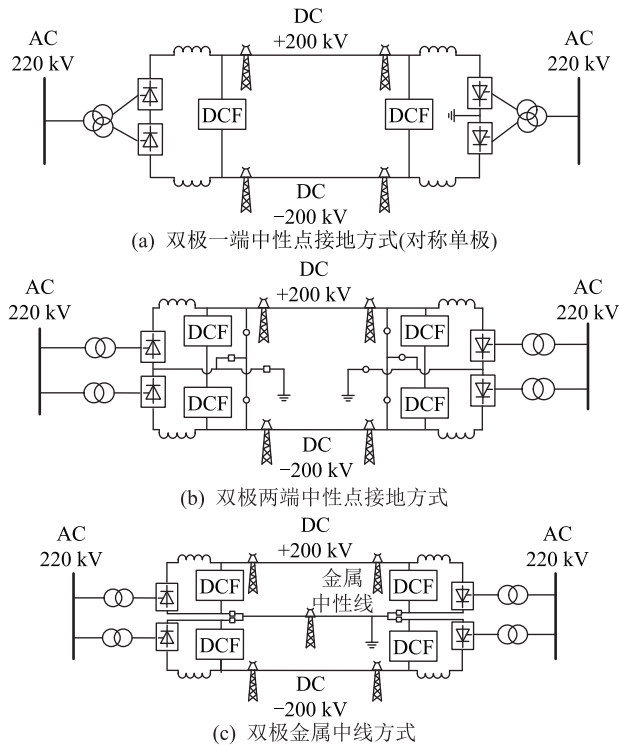


图5 双极结构两端直流输电系统主接线型式

Fig.5 Main wiring modes of two-terminal DC transmission system with bipolar structure

背靠背直流系统的拓展,如不考虑线路,该接线型式与背靠背系统相同。

考虑到五峰山“交改直”工程的输电距离约为100 km,距离不长且输送功率不大,因此可考虑类似“背靠背”的对称单极主接线方式。

2.4 “嵌入式”直流工程应用效果分析

针对断面加强需求,拟利用江都一梦溪通道相

邻的220 kV五峰山大跨越过江通道实施“交改直”线路工程。该工程为江苏首个220 kV电网“嵌入式”直流工程,送端接入扬州、泰州等苏北地区220 kV分区电网,受端接入镇江、常州等苏南地区220 kV分区电网,在过江输电断面“嵌入”3回 ± 200 kV直流线路,单回直流系统输电容量为1.2 GW,如图6所示。

2.4.1 对江苏500 kV主网架的影响

冬、春季新能源大发方式是江苏全年过江断面的主要控制方式。该方式下,苏南水电直流因送端枯水期出力降低,苏南受电需求提高,叠加苏北新能源大发,北电南送电力流显著提升。

2025年考虑3.6 GW“嵌入式”直流工程投运,500 kV交流线路N-1方式仍是江苏过江断面输电能力的控制方式。计算表明,500 kV交流电网能够全部承受直流系统发生故障时的潮流转移,且过江断面“嵌入式”直流工程N-1故障对控制过江断面输电能力的影响程度小于500 kV交流通道N-1方式。

凤城—梅里线路N-1方式下,约1/4功率转移至剩余1回交流线路,约3/4功率转移至相邻的500 kV交流通道;“嵌入式”直流N-1方式下,约1/2功率转移至500 kV江都—梦溪通道,转移至凤城—梅里双线的潮流很小,不会导致500 kV交流通道过载。计算结果如表5所示。

2.4.2 对送端、受端220 kV分区的影响

过江断面“嵌入式”直流工程一期工程(第1回

表3 两端直流输电系统主接线型式技术比较

Table 3 Technical comparison of main wiring modes of two-terminal DC transmission systems

接线型式	运行特性			设备配置				线路条件	
	运行方式	功率范围	单极接地故障损失功率	换流阀	直流滤波器	交流滤波器	开关		
双极一端中性点接地(对称单极)	双极对称运行	10%~100%	100%,非故障极电压升至2.0 p.u.	12脉动	1组	8组	无	需2根额定通流能力的导线	
双极系统	双极两端中性点接地	1.双极对称运行; 2.双极不对称运行; 3.单极运行	5%~100%	50%,需要一定时间完成方式转换	12脉动	1组或2组	10组	直流转换开关、NBS和极隔离相关开关	需2根额定通流能力的导线,并建设接地极址和接地极线路
	双极金属中线	1.双极对称运行; 2.双极不对称运行; 3.单极运行	5%~100%	50%	12脉动	1组或2组	10组	NBS和极隔离相关开关	需3根额定通流能力的导线
背靠背系统	双极一端中性点接地(对称单极)	双极对称运行	10%~100%	100%	12脉动	1组	8组	无	无线路

表 4 双极结构两端直流输电系统主接线型式技术经济比较
Table 4 Technical and economic comparisons of main wiring modes of two-terminal DC transmission systems with bipolar structure

对比项目	双极一端中性点接地 (对称单极)	双极两端中性点接地	双极金属中线
运行方式	仅能双极对称运行	单极、双极对称和不对称运行	单极、双极对称和不对称运行
单极故障	损失全部功率	损失 50% 功率	损失 50% 功率
可靠性	传输双极额定功率的可用率	0.992 468 163	0.987 825 284
	能量可用率	0.982 543 482	0.983 916 31
	停运频率/(次·a ⁻¹)	2.94	4.83(单极)
设计布置	换流器	双极 12 脉动	双极 12 脉动/单极 6 脉动
	换流变型式及数量	单相三绕组,每站 3 台,送受端共配置 6 台+1 备	单相双绕组,每站 6 台,送受端共配置 12 台+2 备
	滤波器组数	8	10
	其他配置需求	主要设备和阀厅按单极配置,站内设置阀厅 1 座	主要设备和阀厅按双极对称配置,站内设置阀厅 2 座及相关开关设备,站外设置接地极址、线路及相关设备
换流站投资/亿元	换流变	1.832	2.48(+0.648)
	换流阀	1.5	1.5
	平抗	0.11	0.11
	直流场	0.19	0.37(+0.18)
	交流场	0.61	0.662 5(+0.052 5)
	交流滤波器	约 0.48	约 0.56(+0.08)
	阀厅	约 0.26	约 0.4(+0.14)
线路投资/亿元	3.08	3.47(+0.39)	3.52(+0.44)
应用场景	1.背靠背工程; 2.满足短距离小容量电力输送需求	1.满足超长距离大容量电力输送需要; 2.对直流系统可靠性和可用率要求高	1.对直流系统可靠性和可用率要求高; 2.不允许地中流过直流电流或接地极很难选址
典型工程	1.江苏如东海海上风电送出工程; 2.中俄直流背靠背联网工程	1.三峡—常州±500 kV 直流输电工程; 2.锡盟—泰州±800 kV 特高压直流工程	暂无。需要采用 3 根导线组成输电系统,线路结构复杂,线路造价较高

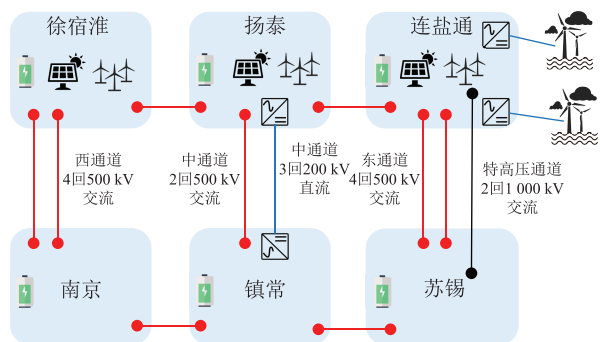


图 6 江苏过江断面“嵌入式”直流工程示意

Fig.6 Schematic diagram of embedded DC system in Jiangsu Yangtze-river-crossing section

直流)送端考虑在新能源资源丰富的扬州高邮等地区汇集电力,受端考虑镇江大港地区。

送端扬泰北分区现有 500 kV 主变容量 7 000 MV·A,已接入风、光新能源 1.48 GW,“十四五”已明确的光伏规划容量达到 1.87 GW,2024 年在冬季

表 5 交/直流故障对江苏 500 kV 过江电力流的潮流影响
Table 5 Influence of 500 kV power flow to Jiangsu Yangtze-river-crossing section when AC/DC faults occur MW

线路	潮流		
	正常方式	凤城—梅里 N-1	直流 N-1
西通道	秋藤—秦淮	3 710	3 910 (+200) 3 770 (+60)
	三汊湾—龙王山	3 250	3 320 (+70) 3 460 (+210)
中通道	“嵌入式”直流	3 600	3 600 2 400 (-1 200)
	江都—梦溪	3 000	3 210 (+210) 3 690 (+690)
东通道	泰兴—斗山	3 630	3 990 (+360) 3 680 (+50)
	凤城—梅里	4 460	5 680 (+1 220) 4 560 (+100)
特高压通道	7 600	8 080 (+480) 7 690 (+90)	

平均高峰(60%夏季最大负荷)、新能源大发方式(风机出力系数70%,光伏出力系数60%)下,分区分外送压力最大。直流工程实施后,将大幅缓解分区内500 kV主变的升压压力。

受端镇江东分区负荷密度大、接入电源以燃气机组为主,现有500 kV主变容量4 000 MV·A。受冬季燃气供应影响,2024年在冬季高峰(90%夏季最大负荷)、燃机出力受限(考虑1组/台燃机关停)方式下,分区受电需求最大。计算表明,送端、受端电网现有500 kV主变容量裕度均能满足直流满送方式下的直流N-1校核,计算结果如表6所示。

表6 直流故障对送端和受端分区的平衡影响
Table 6 Influence of power balance in sending-and receiving-end power grids when DC fault occurs

对比项目	送端 220 kV 分区		受端 220 kV 分区	
500 kV 主变配置数量	高邮 3 台	凤城 4 台	梦溪 2 台	访仙 2 台
500 kV 主变容量/(MV·A)	1 000	1 000	1 000	1 000
500 kV 主变供电能力/MW	6 000		3 000	
直流满功率运行时主变功率/MW	升压 150	降压 390	升压 610	降压 385
直流N-1时主变功率/MW	升压 930 (+780)	升压 30 (-420)	升压 1 270 (+660)	降压 920 (+535)

2.4.3 整体能力提升

新增“嵌入式”直流可以显著提升北电南送断面输电能力,满足苏北、苏中新能源的送出需求。江苏500 kV交流电网相当密集,苏南地区多处主干网架须通过装设串抗控制短路电流。若考虑新增交流通道,将对现有交流电网结构调整提出较高要求,必须同时加装串抗装置实现潮流或短路控制,投资的边际效益显著下降。

考虑到首个220 kV电网“嵌入式”直流工程单回直流系统输电容量为1.2 GW,其故障后对相邻500 kV交流输电通道潮流转移及送/受端220 kV分区的电力平衡不会造成影响,因此建议“嵌入式”直流应用对称单极方式,节约工程投资。

“嵌入式”直流技术利用部分已建成或规划的过江廊道,在交流电网中嵌入若干直流输电单元,可以在江苏北电南送断面构建灵活可控的交直流混联结构,大幅增强主网架承载力,实现清洁电力在全省范围内更有效地汇集、输送、消纳,保障系统安全稳定运行。

由于苏北大量富集新能源皆接入220 kV分区

电网,苏南负荷中心供电也以220 kV分区电网为主,因此将富集新能源的苏北220 kV和苏南负荷中心220 kV分区电网通过直流互联,实现220 kV分区电网的互联互通,为主网架在更大范围内进行资源分配、调节提供可能性,同时将大大缓解500 kV及以上网架的输电负担,如图7所示。

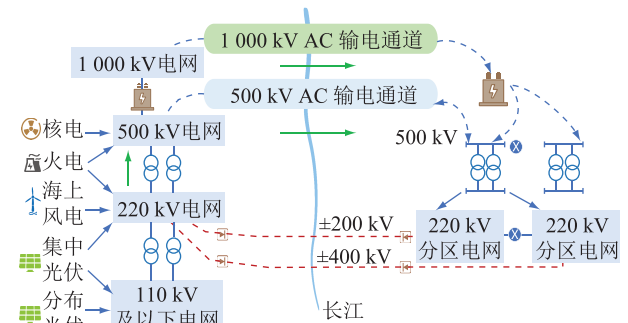


图7 江苏过江断面的交直流混联网架建设设想

Fig.7 Assumption of AC/DC hybrid grid construction for Jiangsu Yangtze-river-crossing section

3 江苏电网“嵌入式”直流安全稳定分析

以扬州—镇江(五峰山)直流工程为例,全接线夏季高峰方式下,江苏省内5个换流站系统有效短路比均大于2.8 p.u.。为接入强交流系统,直流换流站短路比统计结果见表7,其中,扬州—镇江直流送端有效短路比4.76 p.u.,受端有效短路比7.01 p.u.。

表7 江苏直流换流站短路电流
(扬州—镇江直流工程投运后)

Table 7 Short circuit currents of DC converters in Jiangsu with the Yangzhou-Zhenjiang DC project

工程	母线名	短路电流/kA	短路容量/(MV·A)	短路比/p.u.	有效短路比/p.u.
五峰山直流	扬州换 21	30.97	11 799	5.07	4.76
	镇江换 21	39.01	14 864	7.30	7.01
建苏直流	苏苏州 51	43.95	38 058	5.17	4.84
锡泰直流	国泰换_525	47.52	41 156	4.54	4.23
	国泰换_1050	31.18	54 000	4.24	3.99
雁淮直流	国淮安	59.19	51 256	4.48	4.10
龙政直流	国政平	52.36	45 346	7.30	7.00
锦苏直流	国苏州	41.70	36 109	3.37	2.82

基于机电-电磁暂态混合仿真程序,对扬州—镇江直流近区220 kV交流故障和江苏省内500 kV交流、特高压交流及特高压直流故障进行仿真^[31-32]:

扬州—镇江直流工程投运后,52个换流站近区220 kV/500 kV交流故障能够引起扬州—镇江直流发生换相失败;少游换—高邮220 kV双回交流线路

(送端换流站并网交流线路)发生三相永久性 $N-2$ 故障时,会引起扬州—镇江直流双极闭锁。

扬州—镇江直流送/受端通过 500 kV 交流线路紧密联系,形成交直流混联形态。送端换流站近区交流故障,有可能引发扬州—镇江直流发生换相失败,但均不会引起江苏电网系统失稳。

4 江苏电网“嵌入式”直流远景规划展望

江苏省内电源仍以煤电为主,分布相对均衡,但随着电力格局的发展变化,煤电将逐步转移至沿海区域,且新增新能源主要布局在苏北、苏中地区,使得省内北电南送断面整体优化加强将成为江苏主网架形态升级的重中之重。电源结构演进使得北电南送、过江等重要断面电力流受不同时段方式、季节气候影响较大,随机波动性加剧。在能源转型发展的关键时期,结合江苏电网特点分析,因地制宜发展直流技术,能够提升江苏省电网应对多场景的整体能力。

“十五五”期间,随着省内新能源装机规模的增长(2030 年风电、光伏装机分别达到 50 GW、100 GW),过江断面电力流将进一步增至 32.4 GW(按照 95% 概率潮流计算),需积极利用过江通道资源,进一步提升北电南送、过江输电能力。经初步摸排,江苏既有、在建及规划过江桥隧资源合计 36 处,部分具备直流通道建设条件。通过改造或新建,直流输电能力最大可增加约 12 GW,如图 8 所示。

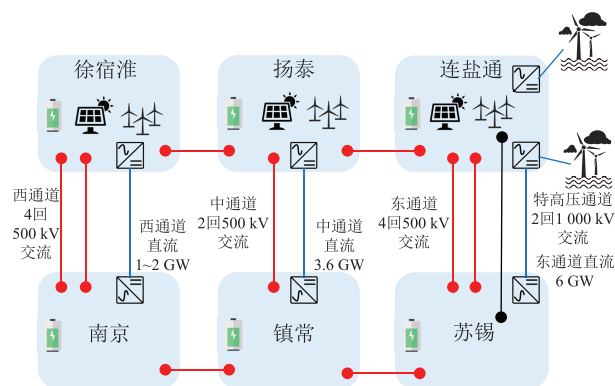


图 8 江苏过江断面“嵌入式”直流远景规划设想

Fig.8 Planning blueprint for embedded DC systems in Jiangsu Yangtze-river-crossing section

远景规划上,江苏过江断面能力提升需统筹考虑“过江直流(改造或新建)+建设储能+运行协控”等多维手段。一级控制应统筹考虑交流协控量、储能投入量、跨江直流投入量的实施效果与策略,二级控制应在一级控制目标下,根据 500 kV 交流通道负载及协控策略、送受端调节资源情况,进一步优化分配各控制量,如图 9 所示。

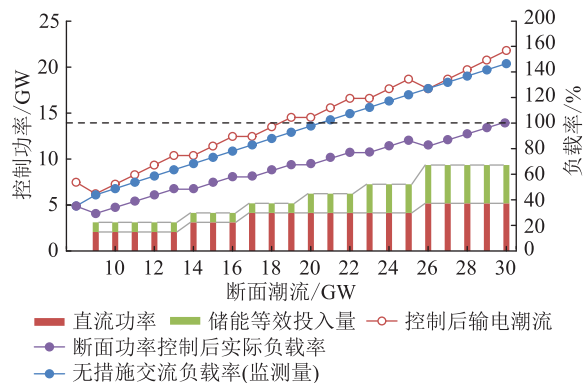


图 9 江苏过江断面控制策略远景设想

Fig.9 Planning blueprint of control strategies in Jiangsu Yangtze-river-crossing section

5 结语

针对可再生能源发展迅速等带来的压力与挑战,江苏电网提出以交流大电网为基础平台,直流输电作为重要补充,构建坚强智能的交直流混联网架,利用电网存量资源,通过低电压等级“交改直”、铺设过江直流电缆等直流输电技术,采用“嵌入式”直流方式寻求网架形态升级的解决方案,解决重要过江断面输电能力不足的难题,为其他省级输电网发展提供了解决方案。

采用“嵌入式”直流方式构建交直流混联电网既充分发挥现有网架的效益,又不对其作结构性调整,在短路电流水平可控的同时大幅提升输电能力,满足负荷发展、新能源消纳的需求。但仍存在建模仿真、宽频振荡风险分析及量化评估、系统运行控制策略等难点亟待研究解决。

参考文献:

- [1] 辛保安. 加快建设新型电力系统 助力实现“双碳”目标[J]. 国家电网,2021(8):10-12.
XIN Baoan. Speeding up the construction of new power system to help realize the goal of "double carbon"[J]. State Grid,2021(8):10-12.
- [2] 全球能源互联网发展合作组织. 中国 2060 年前碳中和研究报告[R]. 北京:全球能源互联网发展合作组织,2020.
Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization. Research report on carbon neutralization in China before 2060[R]. Beijing: Global Energy Interconnection Development and Cooperation Organization,2020.
- [3] 江冰. 构建面向 30·60 的新型电力系统:中国电力 4.0 的思考[J]. 全球能源互联网,2021,4(6):534-541.
JIANG Bing. Building new power system for 30·60: reflections on China's electricity 4.0[J]. Journal of Global Energy Interconnection,2021,4(6):534-541.
- [4] 舒印彪,陈国平,贺静波,等. 构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J]. 中国工程科学,2021,23(6):61-69.

- SHU Yinbiao, CHEN Guoping, HE Jingbo, et al. Building a new electric power system based on new energy sources [J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 61-69.
- [5] 郭剑波. 新型电力系统面临的挑战以及有关机制思考[J]. 中国电力企业管理, 2021(25): 8-11.
- GUO Jianbo. Challenges faced by new power system and thoughts on related mechanisms[J]. China Power Enterprise Management, 2021(25): 8-11.
- [6] 肖先勇, 郑子萱. “双碳”目标下新能源为主体的新型电力系统: 贡献、关键技术与挑战[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 47-59.
- XIAO Xianyong, ZHENG Zixuan. New power systems dominated by renewable energy towards the goal of emission peak & carbon neutrality: contribution, key techniques, and challenges[J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(1): 47-59.
- [7] 卓振宇, 张宁, 谢小荣, 等. 高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(9): 171-191.
- ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [8] 黄雨涵, 丁涛, 李雨婷, 等. 碳中和背景下能源低碳化技术综述及对新型电力系统发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(S1): 28-51.
- HUANG Yuhuan, DING Tao, LI Yuting, et al. Decarbonization technologies and inspirations for the development of novel power systems in the context of carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(S1): 28-51.
- [9] 张金平, 周强, 王定美, 等. “双碳”目标下新型电力系统发展路径研究[J]. 华电技术, 2021, 43(12): 46-51.
- ZHANG Jinping, ZHOU Qiang, WANG Dingmei, et al. Research on the development path of new power system to achieve carbon peaking and carbon neutrality[J]. Huadian Technology, 2021, 43(12): 46-51.
- [10] 蔡晖, 万振东, 孙文涛, 等. 高受电比例受端电网的输电网网架结构优化技术研究[J]. 电网与清洁能源, 2018, 34(12): 6-13, 26.
- CAI Hui, WAN Zhendong, SUN Wentao, et al. Research on optimization technologies for transmission grid structures in the high-proportion receiving-end power system[J]. Power System and Clean Energy, 2018, 34(12): 6-13, 26.
- [11] 茆书睿. 柔性直流输电技术在高受电比例电网中的应用研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021.
- MAO Shurui. Research on application of MMC-HVDC technology in power grid with high power import proportion[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.
- [12] 国网江苏省电力有限公司. 江苏将构建以新能源为主体的新型电力系统[J]. 新能源科技, 2021(7): 18, 38.
- State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Jiangsu will build a new power system with new energy as the main body[J]. New Energy Technology, 2021(7): 18, 38.
- [13] 蔡晖, 张文嘉, 彭竹弈, 等. 基于大规模风电机组的虚拟惯量控制技术对江苏电网频率稳定性的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2021, 42(4): 41-46.
- CAI Hui, ZHANG Wenjia, PENG Zhuyi, et al. Influence of large scale wind turbine-based virtual inertia control technology on frequency stability of Jiangsu power grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2021, 42(4): 41-46.
- [14] XU X Y, YAN Z, SHAHIDEHPOUR M, et al. Power system voltage stability evaluation considering renewable energy with correlated variabilities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3236-3245.
- [15] 林江, 柯意志. 缓解中国电力短缺和加速清洁能源转型的三大重点[J]. 能源, 2021(12): 28-29.
- LIN Jiang, KE Yizhi. Three key points of alleviating power shortage and accelerating clean energy transformation in China[J]. Energy, 2021(12): 28-29.
- [16] 左鹏. 江苏省能源消费与碳排放的偏离份额研究[D]. 常州: 常州大学, 2021.
- ZUO Peng. Research on the shift share of energy consumption and carbon emissions in Jiangsu province[D]. Changzhou: Changzhou University, 2021.
- [17] 兰贞波, 宋友, 邓建钢, 等. 我国特高压交直流套管研究现状[J]. 电瓷避雷器, 2021(2): 1-6.
- LAN Zhenbo, SONG You, DENG Jiangang, et al. Status and application of UHV AC/DC bushing in China [J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(2): 1-6.
- [18] QIAN H, JIN L Y, XIA Y, et al. A robust control strategy to improve transient stability for AC-DC interconnected power system with wind farms[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019(2): 259-265.
- [19] HAN X N, CHEN X Y, MCELROY M B, et al. Modeling formulation and validation for accelerated simulation and flexibility assessment on large scale power systems under higher renewable penetrations[J]. Applied Energy, 2019, 237: 145-154.
- [20] CHEN X Y, LYU J J, MCELROY M B, et al. Power system capacity expansion under higher penetration of renewables considering flexibility constraints and low carbon policies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6): 6240-6253.
- [21] 蔡晖, 韩杏宁, 许偲轩, 等. 输电线路“交改直”技术在江苏电网的应用研究[J]. 电力建设, 2021, 42(S1): 105-110.
- CAI Hui, HAN Xingning, XU Sixuan, et al. Research on the application of the AC-to-DC transmission lines conversion technology in Jiangsu power system[J]. Electric Power Construction, 2021, 42(S1): 105-110.
- [22] 徐政, 许烽. 输电线路交改直的关键技术研究[J]. 高电压技术, 2016, 42(1): 1-10.
- XU Zheng, XU Feng. Research on key technologies of AC-to-DC transmission lines conversion[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(1): 1-10.
- [23] 蔡晖, 彭竹弈, 张文嘉, 等. 柔性直流输电技术在江苏电网的应用研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(2): 90-

- 94, 100.
- CAI Hui, PENG Zhuyi, ZHANG Wenjia, et al. Study on application of voltage-source-controlled high-voltage direct-current transmission technology in Jiangsu power grid[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(2): 90-94, 100.
- [24] 韩先才, 孙昕, 陈海波, 等. 中国特高压交流输电工程技术发展综述[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(14): 4371-4386, 4719.
- HAN Xiancai, SUN Xin, CHEN Haibo, et al. The overview of development of UHV AC transmission technology in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(14): 4371-4386, 4719.
- [25] Orestes Macchione-Business Development Manage. Western link HVDC[R]. UK: Siemens, 2018.
- [26] MAGNUS Callavik, PETER Lundberg, OLA Hansson. Nordlink Pioneering VSC-HVDC interconnector between Norway and Germany[R]. Germany: ABB, 2015.
- [27] MARIUS Strecker. Public information document on specific grid development[R]. Germany: TenneT, 2014.
- [28] FENG W, YUAN C, SHI Q X, et al. Graph computing based distributed parallel power flow for AC/DC systems with improved initial estimate[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(2): 253-263.
- [29] YU Z, SHI D, WANG Z W, et al. Distributed estimation of oscillations in power systems: an extended Kalman filtering approach[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(2): 181-189.
- [30] 郭琦, 卢远宏. 新型电力系统的建模仿真关键技术及展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 18-32.
- GUO Qi, LU Yuanhong. Key technologies and prospects of modeling and simulation of new power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 18-32.
- [31] 张能, 孙建军, 程成, 等. 基于高频等值阻抗的机电-电磁暂态混合仿真接口模型[J]. 电测与仪表, 2020, 57(14): 1-6.
- ZHANG Neng, SUN Jianjun, CHENG Cheng, et al. An interface model of electromechanical-electromagnetic transient hybrid simulation based on high frequency equivalent impedance[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(14): 1-6.
- [32] 蔡普成, 向往, 彭红英, 等. 基于 ADPSS 的含背靠背 MMC-HVDC 系统的交直流电网机电-电磁混合仿真研究[J]. 电网技术, 2018, 42(12): 3888-3894.
- CAI Pucheng, XIANG Wang, PENG Hongying, et al. Hybrid electromechanical-electromagnetic simulation of AC/DC power grid with back-to-back MMC-HVDC system based on ADPSS[J]. Power System Technology, 2018, 42(12): 3888-3894.

作者简介:



王之伟

王之伟(1966),男,硕士,高级工程师,从事电力系统规划、电力建设、电力人工智能相关工作(E-mail:wangzhiwei@js.sgcc.com.cn);

黄俊辉(1965),男,学士,研究员级高级工程师,从事电力系统规划、柔性输电相关工作;

程亮(1972),男,硕士,研究员级高级工程师,从事电力系统规划、柔性输电相关工作。

Planning and application of embedded DC transmission technology in the provincial transmission power grid

WANG Zhiwei¹, HUANG Junhui², CHENG Liang¹, HU Wei¹, CAI Hui², HAN Xingning²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Economic Research Institute, Nanjing 210008, China)

Abstract: As the typical provincial transmission power grid, Jiangsu power grid is faced with the pressures and challenges induced from system-integration of rapid developments of renewable energy during the energy transition period, which needs to be upgraded in "source-network-load-storage" and other aspects. Through the analysis of energy development from load, power supply, grid structure in Jiangsu, challenges faced by Jiangsu power grid such as insufficient transfer abilities of important transmission sections are put forward. Considering the large-scale integrated renewable energy and structure characteristics of Jiangsu transmission power grid, transmission-capacity demands of the Yangtze-river-crossing section during the "14th Five-Year Plan" and future are emphatically analyzed. Afterwards embedded DC transmission technology that both the transmission- and receiving-ends are located in Jiangsu AC network and distributed on both sides of the Yangtze River are proposed. Comparing with the traditional long-distance and high-capacity DC transmission technology constructed under the interconnection mode, the embedded DC transmission technology proposed in this paper usually uses the existing overhead transmission lines or existing/reserved AC cable channels to construct the AC-DC hybrid power grid in Jiangsu, greatly improving transmission capacities of important sections with limited transmission corridor spaces and power supply potential abilities of the existing power system to satisfy the development demands of Jiangsu power system.

Keywords: energy transition; system-integration of renewable energy; provincial transmission power grid; embedded DC transmission technology; Jiangsu power grid; Yangtze-river-crossing section

(编辑 方晶)