

# 高比例可再生能源接入条件下的输电骨干网架结构探索

肖立业<sup>1,2,3</sup>, 刘 怡<sup>1,2</sup>, 夏孝天<sup>1,2,3</sup>, 韦统振<sup>1,2,3</sup>, 林良真<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院应用超导重点实验室, 北京 100190;  
2. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:**近年来,我国可再生能源发电得到了飞速的发展,每年新增的电力装机中,新增可再生能源电力装机已经超过50%以上。同时,可再生能源电力的上网电价持续下降,已经初步实现了平价上网。在不远的将来,可再生能源电力的上网电价将会继续下降,可再生能源成为主导能源的时代即将到来。由于可再生能源具有时变性、不可调度、地理上不可平移的特点,加之广域范围内的可再生能源具有较强的时空互补性,采用合理的输电网结构是实现高比例可再生能源接入的重要手段之一。本文针对我国可再生能源资源和负荷分布特点,提出了一种新的输电骨干网架结构,可以充分利用可再生能源的时空互补性,以降低对储能和旋转备用的需求。

**关键词:**可再生能源;输电骨干网架;高压直流输电;交直流混合电网

**DOI:** 10.12067/ATEEE1912012      **文章编号:** 1003-3076(2020)01-0001-04      **中图分类号:** TM715

## 1 引言

传统的电力系统中,几乎所有电源(如煤电、气电、核电、水电等)均是可以调度的电源。虽然水电具有季节波动性,但在短周期内(数小时至数天)也是可调度的电源;核电机组的可调度性相对差一些,发电功率相对稳定时,其综合效益更佳,但考虑到电网中存在一些基础性负荷,且我国的核电占比较低,一般情况下,也无需对核电机组的输出功率进行大范围调节。基于传统电源的特点,在新增输电线路时,一般是根据新增电源和新增负荷的变化情况在既有电网的基础上来合理地布局;此外,煤电厂和气电厂还可以根据负荷需求合理选址。然而,从总体上来看,输电网过去的发展历程,基本上是在既有输电网基础上不断叠加电源和输电线路的过程,每一次叠加均是做了一个局部优化,长期以来导致输电网结构没有达到全局优化,可以设想,如果将现有输电线路全部抹去,而采用新的输电线路重新连接所有电源和负荷中心,那么新的输电网结构与现有输电网结构将会有所不同。当然,现有输电网结构上未能达到全局优化,并非电网设计规划者的错误,而

是传统电源的特点必然导致的结果<sup>[1]</sup>。

近年来,我国可再生能源发电得到了飞速的发展,例如,2017年和2018年,我国新增的光伏和风电装机分别达到了5306万kW(其中集中式光伏电站为3362万kW)、1503万kW和4426万kW(其中集中式光伏电站为2330万kW)、2059万kW,每年新增的电力装机中,新增光伏和风电装机已经超过50%以上,可再生能源电力已经成为我国新增电力的主力<sup>[2]</sup>。同时,近年来,光伏和风电的上网电价持续下降,其中光伏已经初步实现了平价上网。可以预计,可再生能源成为主导能源的时代即将到来。由于光伏和风电具有时变性、不可调度和地理上不可平移的特点,加之广域范围内的光伏和风电具有较强的时空互补性<sup>[3-5]</sup>,采用合理的输电网结构,以充分利用光伏和风电的时空互补性,是实现高比例可再生能源接入电网的重要手段之一。我国地域广大,光伏和风电资源主要集中在西部和北部地区,水电资源主要集中在西部,而负荷中心主要集中在中部和东部地区,“西电东送、北电南送、各区互补”将是我国电网建设的长期格局,构建全国性统一电网以合理利用光伏和风电的时空互补性也具有现实基

收稿日期: 2019-12-09

作者简介: 肖立业(1966-),男,湖南籍,研究员,博导,博士,研究方向为电工理论与新技术;  
刘 怡(1986-),男,湖北籍,助理研究员,博士,研究方向为电工理论与新技术。

础。因此,考虑到可再生能源电力的特点并结合我国实际情况,对于我国未来输电骨干网架的建设,需要进行系统性谋划,而不宜继续采用传统的简单叠加电源和输电线路的思路。

近年来,我国在特高压交流输电、传统特高压直流输电(LCC-HVDC)、柔性直流输电(VSC-HVDC)、混合直流输电(H-HVDC)等多方面都取得了重大的进展<sup>[6-9]</sup>,也为系统谋划未来输电骨干网架提供了坚实的技术基础。为此,本文提出一种输电骨干网架结构,可以充分利用可再生能源的时空互补性,从而降低对储能和旋转备用的需求量,大幅度减少“弃风弃光”,提高输电线路的平均利用率。

## 2 适应高比例可再生能源接入的输电网架结构

为了适应高比例可再生能源接入电网,国内外同行也曾经提出过建设直流输电骨干网架的思路<sup>[10-13]</sup>。但是,建设直流骨干网需要以成熟的 VSC-HVDC 技术为基础,而 VSC-HVDC 技术还有待于大力发展。此外,在目前输电网的基本运行模式为交流的情况下,将输电骨干网全部替换为直流模式不仅代价高,而且需要一个长期的建设过程。因此,直流输电骨干网的构想可以作为一种远景规划。为此,从现实情况出发,首先建设交直流混合输电骨干网架是比较合理的选择。

本文提出了一种适合高比例可再生能源接入的交直流混合输电骨干网架结构。其基本思路是:

(1)建设跨区域的超级联络线,用于联结各大光伏基地、大型风电基地、大型传统能源发电厂、大型储能电站和枢纽变电站。超级联络线采用特高压交流运行模式,并采用背靠背柔性直流输电(BTB-VSC-HVDC)方式对超级联络线进行分段和实现各段间的灵活功率交换。分段的方式可以是,对相邻的两个大型电源基地或者枢纽变电站进行分段、或者在超级联络线跨越不同的区域同步交流电网时进行分段。采用此方式,一是可以充分利用联络线上各种电源的时空互补性,平滑超级联络线上电源总功率的波动性,从而降低光伏基地和风电基地的输出功率波动对电网的影响;同时,可以根据电网优化运行的需要,为超级联络线合理布局大型储能电站,以消除光伏和风电波动性对电网运行的影响。

(2)依据电源和负荷的地理分布,在特定的广域范围内(例如可把中国、美国或欧洲-北非各自看

成是一个特定的广域范围)建设若干条超级联络线;根据电源和负荷的分布及潮流走向情况,各超级联络线之间可以用传统特高压 LCC-HVDC、特高压 VSC-HVDC、特高压 H-HVDC 甚至特高压交流输电线路连接起来,从而实现远距离、大范围内的电力输送,并实现大范围内各区域电网内的资源互补。

(3)超级联络线可以接入来自国外电网的输电线路,从而实现跨国输电。

(4)对于区域内电网,也可参照上述模式建设电压等级低一级的区域骨干网。

超级联络线采用特高压交流模式,各种输电方式均可直接或通过变流器接入超级联络线,使得组网方式变得更加灵活。采用上述模式,各区域交流系统间采用直流隔离解耦,避免出现大的交流同步电网;同时,各条直流输电线路可被分段的超级交流联络线路进行隔离,也可暂时避免出现特高压 VSC-HVDC 网孔,因而可以在线路发生短路故障时直接闭锁 VSC-HVDC 换流器,以保障换流站的安全性。

依据上述思路,建设我国的输电骨干网架的构想如图 1 所示。①构建 4 条跨区超级联络线,分别为:沿新疆、甘肃、青海、宁夏、内蒙等建立北部超级联络线(北线),实现北部地区的大型光伏和风电基地等各种电源资源的互补;沿华北、华中、中南和华南建立中部超级联络线,实现中部地区各大传统电源的互补(中线);沿华北、东南沿海建立沿海超级联络线(东线),实现大型海上风电基地等各种电源的互补;沿甘肃、青海、四川、云南等建立西部超级联络线(西线),实现西部地区大型光伏发电基地和水电基地的资源互补。针对上述每一条超级联络线,可以区域(以省区为单位)用 BTB-VSC-HVDC 对其进行分段。②依据负荷和潮流分布,在上述 4 条超级联络线之间架设特高压输电线路,输电模式以直流为主(如传统特高压直流输电、柔性直流输电、混合直流输电等);对于特定的送端和受端,如果需要输送的功率过大(对于单回直流线路来说),也可以考虑采用传统直流输电线路和柔性直流输电线路并行的方式,由传统直流输电线路提供基础性功率,由柔性直流输电线路提供可以灵活调节的功率;对于跨越 3 条超级联络线的输电线路,可以采用相适应的多端直流输电技术。对于非跨区的电力输送,也可直接采用交流输电线路。

通过以上方式,可以实现我国广域范围内的各种电力资源的互补和各区域间的互动,为构建以可

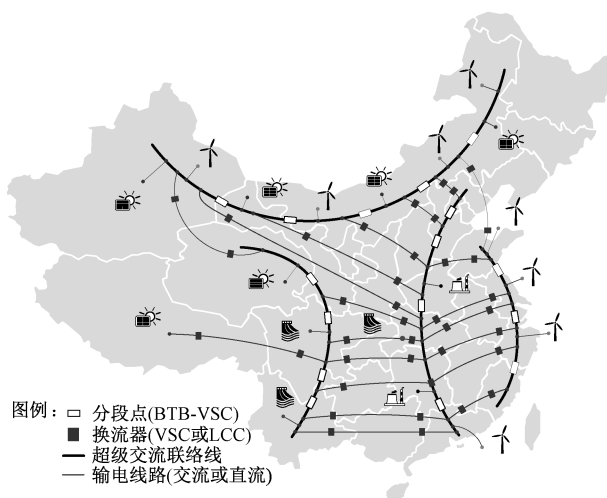


图1 适应我国高比例可再生能源并网的输电骨干网架构想图

Fig.1 Transmission network architecture suitable for China's high proportion of renewable energy interconnection

再生能源为主的电网提供一条技术途经。例如,就我国具体情况而言,根据气象数据的调查研究表明<sup>[14]</sup>,单个站点的风功率1min波动值最大约为20%、10min波动最大值达到了100%;如果在全国主要的风电基地采用统一的输电骨干网架有机联系起来以实现风资源互补利用,则总的风功率1min波动值将降低到约2.3%、10min波动值将降低到约9.6%。如果进一步考虑太阳能光伏发电的时空互补性,则将能更加有效降低光伏和风电总体出力的波动值。如果考虑在非雨季让水电站也适度参与短时(10min~1h)功率调节,则可以进一步提高可再生能源总体出力的相对稳定性。由此可见,充分利用可再生能源的时空互补性,将大大降低对储能和旋转备用的需求量,并有助于减少“弃风弃光”和提高输电线路的平均利用率。

### 3 需要进一步研究的关键科学和技术问题

以上的构想还只是一张图画,为了实现这一构想,还需要进一步对其中涉及的关键科学和技术问题进行系统性研究。主要的科学和技术问题包括:

(1)根据我国可再生能源资源分布及互补情况、未来负荷分布及潮流走向情况,并结合现有输电线路和枢纽变电站等情况,研究并确定超级联络线的详细分段方案、超级联络线之间的输电线路及其输电方式规划方案、现有跨区输电线路和枢纽变电站与超级联络线的联网规划方案等。

(2)在可再生能源不同占比的场景下,研究在

大型光伏基地或风电基地出现快速功率波动时,电网的电压稳定性与频率稳定性;为保障电网的稳定性,对基础性传统电力装机、旋转备用和大规模电力储能的优化配置研究,包括其地理位置布局、功率配置需求、功率响应特性需求等。

(3)针对上述网架结构,在电网经受重大故障(短路、断线、关键设备失效等)时,电网的暂态稳定性及快速恢复稳定性的机理和方法研究;小干扰时的电网稳定性问题研究。

(4)高压柔性直流输电、混合直流输电关键技术和装备,包括新型可关断电力电子器件、柔性直流输电换流器和直流断路器、新型混合直流输电换流器等。

(5)短路故障电流限制技术,为降低大规模电网的短路电流,确保设备和电网的安全性,研究开发交流和直流短路故障电流限制技术。

(6)基于历史数据和实时数据的大电网运行控制与调度技术,主要包括交直流混合大电网的实时仿真、可再生能源出力和负荷的短时超短时预测预报、换流器和潮流控制装置的控制方法、大型电力储能和旋转备用的调度技术、负荷响应和调度技术等。

(7)前瞻性技术研究:为提高超级联络线的输电容量,需前瞻性地研究管道输电、超导输电等新技术;为解决北部地区大规模电力储能的问题,需探索新型大规模电力储能技术、基于电解水制氢加二氧化碳的可再生能源制备燃料技术等。

### 参考文献 (References):

- [1] 肖立业 (Xiao Liye). 中国战略性新兴产业研究与发展 (智能电网) (Research and development of China's strategic emerging industries - Smart grid) [M]. 北京: 机械工业出版社 (Beijing: China Machine Press), 2013. 11-12.
- [2] 国家能源局 (National Energy Administration). 2018 年可再生能源并网运行情况介绍 (Introduction of grid-connected renewable energy operating situation in 2018) [EB/OL]. [http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c\\_137780519.htm](http://www.nea.gov.cn/2019-01/28/c_137780519.htm).
- [3] Jurasz J, Dańbek P B, Kaźmierczak B, et al. Large scale complementary solar and wind energy sources coupled with pumped-storage hydroelectricity for Lower Silesia (Poland) [J]. Energy, 2018, 161: 183-192.
- [4] Liu Y, Xiao L Y, Wang H F, et al. Analysis on the hourly spatiotemporal complementarities between China's solar and wind energy resources spreading in a wide area [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56 (3):



683-692.

- [ 5 ] Risso A, Beluco A, Rita de Cássia M A. Qualitative evaluation of spatial complementarity between renewable energy resources with complementarity roses [J]. *MethodsX*, 2019, 6: 800-804.
- [ 6 ] 刘振亚 (Liu Zhenya). 中国特高压交流输电技术创新 (Innovation of UHVAC transmission technology in China) [J]. *电网技术 (Power System Technology)*, 2013, 37 (3): T1-T8.
- [ 7 ] 饶宏, 张东辉, 赵晓斌, 等 (Rao Hong, Zhang Donghui, Zhao Xiaobin, et al.). 特高压直流输电的实践和分析 (Practice and analyses of UHVDC power transmission) [J]. *高电压技术 (High Voltage Engineering)*, 2015, 41 (8): 2481-2488.
- [ 8 ] 汤广福, 贺之渊, 庞辉 (Tang Guangfu, He Zhiyuan, Panghui). 柔性直流输电工程技术研究、应用及发展 (Research, application and development of flexible DC transmission engineering technology) [J]. *电力系统自动化 (Automation of Electric Power Systems)*, 2013, 37 (15): 3-14.
- [ 9 ] 许树楷 (Xu Shukai). 特高压混合多端直流输电技术及应用 (UHV hybrid multi-terminal DC transmission technology and application) [A]. 中国电机工程学会学术年会 (Chinese Electrical Engineering Society Academic Conference) [C]. 2019.
- [ 10 ] Grid 2030 – A national vision for electricity's second 100 years [R]. United States Department of Energy Office of Electric Transmission and Distribution, 2003.
- [ 11 ] Vrana T K, Torres-Olguin R E, Liu B, et al. The North Sea Super Grid-a technical perspective [A]. 9th IET International Conference on AC and DC Power Transmission [C]. London, UK, 2011.
- [ 12 ] 肖立业, 林良真 (Xiao Liye, Lin Liangzhen). 未来电网初探 (Discussion on future grid) [J]. *电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy)*, 2011, 30 (1): 56-63.
- [ 13 ] 周孝信 (Zhou Xiaoxin). 新能源变革中电网和电网技术的发展前景 (Development prospects of grid technology in new energy transformation) [J]. *华电技术 (Hudian Technology)*, 2011, 33 (12): 1-3.
- [ 14 ] 刘怡, 肖立业, 王海风, 等 (Liu yi, Xiao Liye, Wang Haifeng, et al.). 中国广域范围内风能资源短时间尺度的时空互补特性调查研究 (Investigation on the spatio-temporal complementary characteristics of wind energy resources in China in a short time scale) [J]. *电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy)*, 2014, 33 (8): 49-54.

## Investigation on architecture of backbone transmission system for renewable-energy-dominant power grid

XIAO Li-ye<sup>1,2,3</sup>, LIU Yi<sup>1,2</sup>, XIA Xiao-tian<sup>1,2,3</sup>, WEI Tong-zhen<sup>1,2,3</sup>, LIN Liang-zhen<sup>1,2</sup>

(1. Applied Superconductivity Laboratory, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** In recent years, China's renewable energy power generation has achieved rapid development, and over 50% percent of the newly increased power generation comes from solar energy and wind power. At the same time, the on-grid price of the renewable energy power has continued declining and initially achieved at a competitive price when compared with other traditional generations. With the continually decreasing of the generation cost, the renewable energy will become the dominant energy source in the future. The generating power from the renewable energy is random, not schedulable and geographically non-translatable, and the renewable energy in the wide-area range has strong tempo-spatial complementarities, hence a reasonable transmission network is one of the crucial solutions to achieve high proportion of renewable energy in the grid. Based on the investigation on the distribution of renewable energy resources and power load in China, this paper proposed a new transmission backbone architecture, which can make full use of the tempo-spatial complementarities of the renewable energy. Consequently, it can significantly reduce the requirements for energy storage and rotating reserve.

**Key words:** renewable energy; transmission backbone of the power grid; HVDC; hybrid power grid with AC and DC transmission