

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.05.009

# 适用高比例新能源系统广域消纳的输电技术研究综述

刘增训<sup>1</sup>, 游沛羽<sup>2</sup>, 周勤勇<sup>3</sup>

(1. 国家电网有限公司, 北京 100031; 2. 国网经济技术研究院有限公司, 北京 102209; 3. 中国电力科学研究院有限公司, 北京 100192)

**摘要:**针对特高压直流输送新能源存在的频率、电压稳定和连锁反应等问题,文中分析了目前研究较多、有可能在我国纳入规划的输电技术原理、应用场景和案例。从替代技术角度,对半波长交流输电提出替代特高压直流输电和构建立体电网的应用场景;对柔性直流输电技术分析利于组网的特点,提出用于新能源接入及构建直流电网的应用场景。以单位容量年费用法比较2类替代技术的经济性,得出柔性直流输电技术更优的结论,并研究分析了在不同输电距离和容量组合下年费用最低的直流电压等级。从辅助技术角度,对虚拟同步发电机(VSG)分析新能源调频特性,提出可应用于新能源高渗透率送受端电网的场景;对调相机分析动态无功调节能力,提出可应用于新能源基地的输电系统。基于4类替代和辅助技术的发展轨迹、我国电网发展历程及未来形态的变化,讨论并预测4类技术的发展趋势及其对未来电网形态的影响。

**关键词:**特高压直流;半波长交流输电;柔性直流;单位容量年费用法;虚拟同步发电机(VSG);调相机

**中图分类号:** TM721

**文献标志码:** A

**文章编号:** 2096-3203(2020)05-0059-12

## 0 引言

近年来,风电、光伏发电等新能源发展迅猛,根据我国电力发展“十三五”规划(2016年—2020年),到2020年,风电、光伏装机容量分别达到210 GW和110 GW(含光热发电5 GW)以上<sup>[1]</sup>。特高压直流输电是目前实现新能源跨区输送的主要途径。文献[2—7]研究了直流控制策略,文献[8]建议提高风电电源的涉网性能标准。此类研究主要基于工程实际情况,从电网规划理论出发,为特高压直流输送新能源、改善系统稳定性提出了解决办法,但较少涉及新能源跨区消纳技术的研究。文献[9]介绍了未来输电网可能采用的新技术,半波长交流输电、柔性直流电网、调相机和虚拟同步发电机(virtual synchronous generator, VSG)均为研究较多且未来可能在我国广泛应用的替代型或辅助型输电技术。

模块化多电平换流器高压直流输电系统(modular multilevel converter-high voltage direct current transmission system, MMC-HVDC)是实现柔性直流输电的手段,也是目前我国主要采用的满足大规模新能源输送的新型输电技术。随着电网新能源渗透率提高,需要引入新技术缓解电网惯性、频率、电压调整能力及阻尼比等的恶化,VSG的研究及应用愈

发重要<sup>[10]</sup>。调相机应用历史悠久,上世纪50年代,很多国家将调相机作为提升电网电压稳定水平的手段。我国20世纪80年代,同步电网规模小,因马达负荷、新能源装机尚未形成规模,且常规水力、火力发电机组存在足够的动态无功补偿能力,调相机的应用近乎停滞。随着电力电子技术的成熟,特高压常规直流规模的扩大、新能源基地的发展及马达负荷对动态无功需求的增加,送端工频过电压控制、受端电网连锁反应和换相失败的危害逐渐增大。新型调相机因其进相能力、次暂态出力特性及强励能力优于静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止同步补偿器(static synchronous compensator, STATCOM),且能预防换相失败、协助直流快速恢复<sup>[11]</sup>,故广泛投入使用。

新能源在送端大规模汇集,并通过特高压直流输送。新能源间歇式出力特性增加了系统的调峰压力和安全稳定风险<sup>[12—14]</sup>,如送端换流站及新能源机组机端易产生瞬时过电压<sup>[15]</sup>,限制了特高压直流输电能力。受端电网,除了满足接纳新能源带来的调峰、调频及灵活性需求外,也因集中馈入带来安全稳定风险,如电压稳定<sup>[16—19]</sup>、多直流馈入系统多回直流同时换相失败等<sup>[18,20]</sup>。问题产生的根源可分为2类,一是输电方式主要依赖特高压双端常规直流,其特性和技术要求与送、受端电网不适应;二是由新能源发电设备特性决定,如缺乏惯量和电压支撑。因此,需要针对新能源输电和发电方式开展研究,前者采用其他可能的输电方式,提高送、受端

收稿日期:2020-03-15;修回日期:2020-04-29

基金项目:国家电网有限公司科技项目(SGTYHT/19-JS-215)

电网的适应性;后者提升新能源的友好接入能力,使其特性在一定程度上向常规机组靠近。

文中针对大规模新能源跨区输送带来的安全稳定风险,研究新型输电技术的原理和应用场景,并提供案例。作为替代技术,对半波长交流输电、柔性直流电网技术,分析其替代传统输电方式的技术可行性;作为辅助技术,对 VSG、调相机技术,分析新能源抗扰动、跨区输送能力的提升作用。

## 1 半波长交流输电技术及其适用场景

### 1.1 技术特性

半波长交流输电技术即指输电距离接近或达到一个工频半波长的超远距离三相交流输电技术。在输电距离接近但未达到半波长时,可借助 MMC 等附加装置调谐线路的电气参数使其接近半波长,称为调谐式半波长输电技术<sup>[21]</sup>。

文献[22]给出了线路稳态等效模型的选择对稳态过电压最值与位置的影响,高频半波长输电技术问题及应用是未来有待研究的方向。文献[23]指出需要研究沿线避雷器分流特性不一致引起的能量吸收差异对避雷器耐受能力的影响及研究电源侧除切机外的功率波动控制技术。文献[24]提出真实电弧的模型及其发展过程、投产试验的预案等需要进一步分析研究。总体而言,半波长交流输电相关理论基础有待完善。

### 1.2 适用场景

半波长交流输电可用于远距离输电,当技术可行性得到充分论证,且经济性相比直流输电存在明显优势或相当时,可选作替代方案。

## 2 柔性直流电网输电技术及其适用场景

### 2.1 技术特性

柔性直流输电是指采用绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)等全控型可关断器件构成电压源换流器(voltage source converter, VSC)进行输电的技术。国际大电网会议工作组 B4.52 的技术报告定义直流电网为由多个网状和辐射状连接的由变换器组成的直流网络<sup>[25]</sup>。该技术可划分为 2 个发展阶段。第一阶段自 20 世纪 90 年代初至 2010 年,采用二电平或三电平 VSC 及脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)理论。第二阶段自 2010 年至今,采用 MMC 及阶梯波逼近的方法<sup>[26]</sup>。

柔性直流电网相比常规直流,对系统的适应性强,具有故障后可黑启动等优势<sup>[26-27]</sup>。对孤岛新能

源基地的送端柔性直流换流站,修改文献[26]中的控制策略,使新能源基地为受端电网提供惯性支持。需要修改的有受端换流站直流电压、有功功率控制策略和送端换流站变频控制策略。将受端电网频率信号反馈至直流电网,将直流电网直流电压的变化变形为频率信号反馈至孤岛新能源基地调整其出力,并调整送端新能源机组的有功控制策略。

直流电网可为环形或非环形拓扑。环形拓扑存在可靠性高、灵活性好、扩展性好的优势。例如,已投产的张北四端柔直电网在未来可考虑纳入承德风电基地、唐山负荷中心,使得新能源在更大范围优化配置。然而环形拓扑需额外引入直流潮流控制装置<sup>[26]</sup>,包括可变电阻器、DC/DC 变换器、辅助电压源、模块化多电平潮流控制器(modular multi-level power flow controller, MMPFC)。

柔性直流电网技术应用可能存在的问题有:(1) 输电方式需与受端电网相适应,可能提供短路电流;(2) 过负荷能力有待校核、考验;(3) 损耗较大、投资较高。直流断路器、直流变压器均是柔性直流电网输电技术发展尚需突破的技术<sup>[28]</sup>。

### 2.2 适用场景

和常规直流一样,柔性直流可应用于输电、背靠背联网和构建直流电网<sup>[25-26]</sup>。鉴于其相比常规直流的优势,可应用于多种场合<sup>[29]</sup>。

(1) 向弱系统或孤岛供电,同时控制其频率。工厂存在大量电弧炉类的有功、无功负荷,波动明显,电压闪变严重。文献[30]研究了用柔性直流输电技术为工厂供电,损耗降低且电能质量改善。

(2) 大城市电网增容及直流供电、省间及跨国输电工程。文献[27]以郑州 220 kV 电网为例,提出柔性直流分区、额定容量和配置位置的优选方法,研究支撑城市电网分区互联的柔性直流优化控制技术,提升供电能力。文献[29]提出了基于柔性直流输电技术将江苏 500 kV 电网进行分区的设想。

采用了柔性直流输电技术的统一潮流控制器(unified power flow controller, UPFC)亦在该方面存在功用。1998 年美国 Inez1 38 kV UPFC 工程投运;2003 年韩国 Kangjin 154 kV UPFC 工程投运;2004 年美国 Marcy 345 kV UPFC 工程投运。串、并联换流器容量分别为  $2 \times 160 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $2 \times 160 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ;  $2 \times 40 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $1 \times 40 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ;  $2 \times 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $1 \times 100 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

南京 220 kV、上海 220 kV、苏州南部 500 kV 电网于 2015 年、2017 年、2017 年分别投运 1 台 UPFC。串、并联换流器容量分别为  $2 \times 60 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $1 \times 60 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ;  $1 \times 50 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $1 \times 50 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ;  $2 \times 250 \text{ MV} \cdot \text{A}$ ,  $1 \times 250 \text{ MV} \cdot \text{A}$ 。

UPFC 对提升电网供电能力、优化潮流流向、提高电网安全稳定水平具有重要作用<sup>[29]</sup>。

(3) 可替代常规直流进行大规模输电。除了全部直流换流站由常规改为柔性外,还可仅将某一直流换流站由常规改为柔性。换流站是否为柔性,与投资能力、潮流流向、所处电网网络结构、动态无功供需情况有关。若送端为柔性换流站,受端为常规逆变站,送端可以通过调整接入的换流单元个数,对受端换相失败后的恢复起到积极作用<sup>[26]</sup>。

(4) 可再生能源并网,包括海上风电的汇集与输送。

(5) 构建直流电网,实现异步互联。一方面可用于大规模输电,欧洲的 Super-Grid 计划<sup>[31]</sup>就是直流电网,并且可以友好衔接现有交流电网。直流电网模式亦为亚洲互联电网最可能的模式<sup>[32]</sup>。另一方面可用于新能源大规模汇集。考虑到新能源装机存在与柔性直流换流阀控制原理相同、结构相似的换流阀单元,采用直流电网汇集新能源电力,可降低换流单元数量,提高能源利用效率,并借助控制策略解决频率稳定问题。我国 2020 年投产的张北可再生能源四端柔性直流送出工程,输电能力达到 3 750 MW。

文献[33]将柔性直流输电技术作为未来广泛采用的新型输电技术进行详细介绍。基于此,文中新增文献[33]未包含的规划中或已投产的国内外柔性直流输电工程,如表 1、表 2 所示。表 1 中张北柔直系统是世界上首个直流电网工程,用于可再生能源并网及清洁能源输送;乌东德—广西、广东柔直工程用于大规模输电,满足三端电力互济。

表 1 国内投产、规划中的多端柔直工程

Table 1 Domestic application and planning of multiple-end flexible DC transmission

工程名称	电压等级、端数及各换流站容量	投产年份
张北柔直系统	±500 kV; 四端:	2020
	张北 3 000 MW, 康保 1 500 MW, 丰宁 1 500 MW, 北京 3 000 MW	
乌东德—广西、广东	±800 kV; 三端: 云南 8 000 MW, 广西 3 000 MW, 广东 5 000 MW	2021

文献[34—37]以单位容量年费用法比较了各电压等级常规直流输电工程在不同输电距离下参考各自输电能力归一化后的成本。年费用中,静态投资、损耗年费用占比较大,运行维护、换流站及输电走廊土地贬值年费用占比较小。直流输电线路的单位长度静态投资随着电压等级的提升而提升,而常规直流换流站的单位容量静态投资考虑目前的技术成熟度,±800 kV 为最低。对双端柔性直流

输电技术,以常规、柔性±500 kV 换流站的静态投资作参考,估算±660 kV, ±800 kV, ±1 100 kV 柔性换流站的静态投资<sup>[36]</sup>。半波长输电技术本质上属于交流输电技术,我国交流电网频率为 50 Hz,半波长距离接近 3 000 km。设 1 000 kV, 750 kV, 500 kV 半波长交流线路系统送、受端联网点的短路电流水平分别为 30 kA, 40 kA, 50 kA。考虑主变压器、输电线路 2 类设备的静态投资及合理损耗率,当输电距离为 3 000 km 时,半波长交流输电的单位容量年费用高于双端柔性直流输电。

在给定输电容量需求和输电距离的情况下,计算所需不同电压等级双端柔性直流输电工程个数,进而选择单位容量年费用最低的双端柔性直流输电电压等级。不同输电容量和距离组合下选择的年费用最低的电压等级如图 1 所示。结合目前的设备制造和运行实绩,±500 kV, ±660 kV, ±800 kV, ±1 100 kV 的输电能力分别为 3 000 MW, 4 000 MW, 8 000 MW, 12 000 MW。输电距离在 500 km 以下(包括背靠背工程)时,可采用较低的电压等级。

依据不同的输电容量,可采用不同电压等级。1 700 MW, 4 000 MW, 8 000 MW 为采用不同电压等级的容量临界点,不大于容量临界点可采用较低一级,大于容量临界点可采用较高一级。当输电距离在 2 000 km 以上时,输电距离远,损耗费用较大,±800 kV、±1 100 kV 的容量临界点需适当下调。当输电距离达 3 000 km 时,输电容量约为 7 000 MW。

### 3 VSG 技术及其适用场景

#### 3.1 技术特性

VSG 是通过模拟同步发电机组的机电暂态特性,使采用变频器的电源具有同步发电机组的惯量、阻尼、一次调频、无功调压等并网运行外特性的技术<sup>[39]</sup>。2007 年,德国 Beck 教授率先提出 VSG 概念;2012 年,美国 Hussam Alatrash 提出的发电机模拟控制方案首次引入光伏逆变器,实现了独立 VSG 在新能源发电技术中的应用;2013 年,中国电科院开发完成“Synchronverter”内核 50 kW 的 VSG 样机<sup>[10]</sup>。

VSG 技术可以提高电网安全稳定性,进行自主有功调频、自主无功调压、虚拟惯量、惯量频率支撑和虚拟阻尼控制。对电压源型 VSG,可有效实现外部负荷扰动时的瞬时功率响应和分配。VSG 控制原理如图 2 所示<sup>[40—43]</sup>,可独立亦可结合柔直体现。

图 2 中,带“\*”为指令值,不带“\*”为输出值; $J$ 为虚拟转动惯量; $D$ 为阻尼系数; $K$ 为模拟励磁调

表2 国内外投产和正在建设及规划中的双端柔直工程

Table 2 Worldwide constructing, planning and application of double-end flexible DC transmission

工程名称	电压等级/kV	输电容量/MW	投产年份	特征
卡普里维联网工程	±320	300	2010	用于跨省输电
Borwin1	±150	400	2011	用于可再生能源并网
Britain-Ireland	±200	500	2012	用于跨省输电
Dolwin1	±320	800	2013	用于可再生能源并网
Borwin2	±300	800	2013	用于可再生能源并网
Helwin1	±259	576	2013	用于可再生能源并网
Synwin1	±320	864	2014	用于可再生能源并网
Norway—Denmark	±500	700	2014	用于跨国输电
Mackinac	±70	200	2014	用于跨省输电
法国—西班牙联网 (INELFE)工程 <sup>[38]</sup>	±320	2×1 000	2014	用于跨国输电
瑞典和列支敦士登 (HVDC Nord Balt)	±300	700	2015	用于跨省输电
Dolwin2	±320	900	2015	用于可再生能源并网
Helwin2	±320	690	2015	用于可再生能源并网
挪威海上平台 (HVDC Troll 3&4)	±60	2×50	2015	用于孤岛供电
Borwin3	±320	900	2019	用于可再生能源并网
Johan Sverdrup	±80	100	2019	用于孤岛供电
FK CGS HVDC	±140	410	2019	用于可再生能源并网
COBRA cable	±320	700	2019	用于跨省输电
Nemo Link	±400	1 000	2019	用于跨省输电
France—Italy trans link	±320	1 200	2019	用于跨国输电
Nord Link	±525	1 400	2020	用于可再生能源并网,水电与风电互联
North Sea Link	±525	1 400	2021	用于跨省输电
Dolwin5	±320	900	2024	用于可再生能源并网
Sofia	±320	1 200	2025	用于可再生能源并网
Sued Link			2025	用于跨省输电
Sued Ost Link			2025	用于跨省输电
中海油文昌油田平台	±10	4	2011	用于孤岛供电
福建厦门柔性直流	±320	1 000	2015	我国首个真双极柔直工程,用于城市电网扩容
云南鲁西背靠背 <sup>[38]</sup>	±350	1 000	2016	用于跨省输电,解决外送通道“强直弱交”问题及长距离送电稳定问题
渝鄂背靠背	±400	2×2 500	2019	用于跨省输电,解决外送通道“强直弱交”问题及长距离送电稳定问题
江苏如东海上风电	±400	1 100	2021	用于可再生能源并网
江苏射阳海上风电	±320	1 000	2021	用于可再生能源并网
中国山东—韩国	±500	2 400	2025	东北亚联网示范工程,用于大规模输电,实现韩国西北部负荷中心地区能源替代

节的惯性系数;  $k_u$  为无功-电压下垂系数;  $\omega_b$  为额定角频率;  $\omega$  为实测角频率;  $P_e$ ,  $Q_e$  分别为 VSG 输出的有功、无功功率;  $U$  为 VSG 输出电压。

变流器模拟的 VSG 从外特性上可完全模拟同步发电机,且具有比同步发电机更宽的运行范围和更快的动态性能。但由于变流器的电力电子特征,

VSG 会出现异于同步发电机的现象,如同步频率谐振等,机理有待研究。在静态运行时, VSG 可工作在功角大于  $90^\circ$  的情况,易带来新的功角稳定性问题。文献[44]在考虑 VSG 饱和特性的前提下,给出了提高暂态功角稳定水平的措施。VSG 带宽可调,具有比同步发电机更宽的频率响应。此外,由于逆



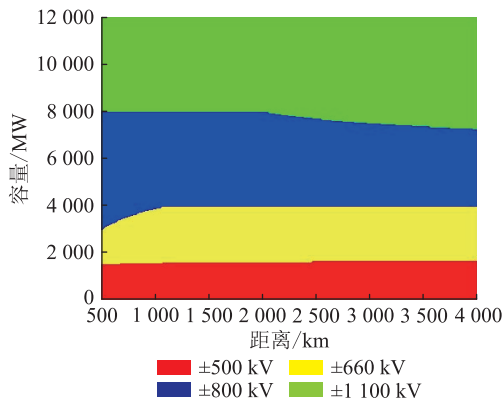


图1 双端柔性直流经济输电范围

Fig.1 Economical power transmission range of diversified double-end flexible DC

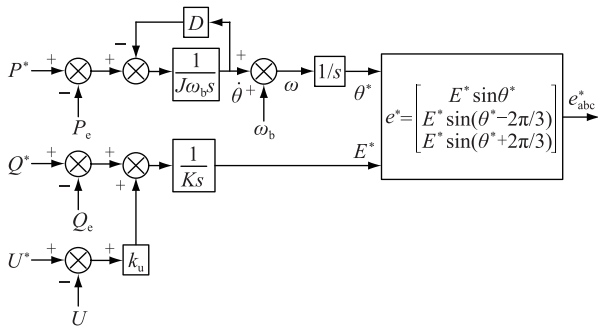


图2 VSG 控制原理

Fig.2 Control principle of VSG

变器的限流作用,VSG 易退化为电流源,暂态电压支撑能力受限,暂态稳定性降低。同时其用于新能源基地时,承受过电压能力有限。需要在不影响 VSG 稳态运行特性的情况下,优化暂态性能,使其接近同步发电机特性。该技术仍有较大提升空间。

### 3.2 适用场景

VSG 技术在新能源机组并网中,发挥有益作用。依据应用场景不同,分为清洁能源 VSG 与负荷 VSG。清洁能源 VSG 包括风机、光伏和集中式 VSG,存在单元式和电站式 2 种形式;负荷 VSG 包括采用 VSG 技术的各类用电设备,实现源-荷动态平衡<sup>[10,39-40]</sup>。VSG 的适用场景为:

(1) 送端新能源高渗透率电网。如果在送端新能源近区安装 VSG,则在其一次调频功能的作用下,VSG 将响应系统频率偏差降低有功出力,抑制系统频率上升;在其无功-电压下垂紧急控制的作用下,VSG 可以快速降低容性无功出力或发出感性无功,一定程度上缓解系统的过电压问题。VSG 不基于锁相同步,可有效避免电压支撑能力不足导致的新能源并网困难。在储能系统中,可采用 VSG 技术结合系统功率波动情况,为系统提供惯量,调节储能单元的输出功率,维持电压、频率稳定。

(2) 受端新能源高渗透率电网。如果在受端新能源电源近区集中安装 VSG,在其一次调频功能的作用下,VSG 将发出响应系统频率偏差的有功备用出力,抑制系统频率下降。受端区域比送端区域存在更多的马达负荷,由于常规水、火电装机往往少于送端,部分区域存在缺少动态无功的情况,VSG 可发挥动态无功支撑作用。

(3) 无同步机接入电网的运行控制。在微网或未来极高新能源渗透率的电网中,若无同步发电机,系统内将不再有独立电压源提供电压参考,也不再真实的频率信号,所有通过电力电子设备接入的新能源无法针对接入点的电网电压进行锁相和运行控制,也难以针对网内的负荷波动进行各发电单元间的功率分配和全网功率平衡控制,一次调频由于没有外界的频率信号也无法进行。此时,需要某个或多个电力电子逆变器进行电压频率(VF)控制,为网内其他发电单元提供电压和频率参考信号。如果有多个逆变器进行 VF 控制,还需对多个逆变器进行协调,如采用频率-有功下垂控制等。

文献[45]提出对不同类型 VSG 的协调控制有待研究。文献[46]提出负载变化在多逆变器中的分配与逆变器额定容量成比例。VSG 在我国应用的典型案例除文献[47]所述外,总结如表 3 所示<sup>[10]</sup>。

表3 VSG 在我国的应用案例

Table 3 Domestic applications of VSG

应用案例	装机性质及容量	投产年份
张北风光储输基地	风机改造 435.5 MW, 光伏改造 12 MW, 集中式储能 VSG 新建 10 MW, 按照 10% 惯性容量配比建设	2017
浙江绍兴诸暨市兆山电器屋顶光伏项目	光储一体 VSG 新建 120 kV·A	2017
中新天津生态城智能营业厅内微电网	风机改造 6 kW, 光伏改造 30 kW, 储能改造 100 kW, 电动汽车充电桩改造 10 kW	2018
重庆巫溪光伏扶贫项目	集中式光伏系统新建 35 kW	2018
安徽金梧桐 MW 级直流微电网工程	光伏发电新建 960 kW, 铅碳储能系统新建 200 kW, 超级电容储能系统新建 200 kW×30 s, VSG 新建 1 000 kW	2018
山西太原迎春路汽车充换电站	光伏发电新建 100 kW, 电动汽车充电桩新建 60 kW, 惯量储能装置新建 1 路	2019

表 3 中,张北风光储输基地是世界上规模最大的 VSG 示范工程,用于无同步机接入电网的运行控制;浙江绍兴诸暨市兆山电器屋顶光伏项目用于受端新能源高渗透率电网,分布式电源采用“即插即用”设计;中新天津生态城智能营业厅内微电网用

于受端新能源高渗透率电网,首次引入基于 VSG 技术的电动汽车充电桩,是世界首个“网-源-荷-储”全要素微电网均采用 VSG 技术的工程;重庆巫溪光伏扶贫项目用于受端新能源高渗透率电网,解决末端电压不稳、越限问题,为光伏接入县域电网树立典范;安徽金梧桐兆瓦级直流微电网工程用于送端新能源高渗透率电网,缓解发电高峰时段功率倒送,提升直流侧负荷供电可靠性,节省并网设备投资;山西太原迎春路汽车充换电站是首个以 VSG 技术控制的能量路由器,用于受端新能源高渗透率电网。

此外,2018年9月带有 VSG 控制策略的 60 kW/120 kW 电动汽车充电桩应用在江苏泰州医药城电动汽车充电站、同里综合能源服务中心项目,体现了电动汽车和电网的智慧响应<sup>[48]</sup>。

## 4 调相机技术及其适用场景

### 4.1 技术特性

调相机是进相或滞相运行的空载同步电动机,可通过励磁电流控制进行动态无功补偿<sup>[49]</sup>。调相机不受电压影响,有快速的次暂态出力能力和暂态过程中的强励能力,存在转动惯量,可向系统提供短路电流。进行针对性设计的新型调相机<sup>[50]</sup>在容量(达到 300 Mvar)等方面均有提升。文献[51]对新型、传统调相机的参数进行对比,文献[51—52]对比了新型调相机相比 SVC、STATCOM 在常规直流闭锁、换相失败故障恢复过程中的优势。

### 4.2 适用场景

2019 年底前,国网公司在运、在建的双端常规直流输电工程送、受端换流站加装了新型调相机<sup>[50—51]</sup>作为配套工程,进行动态无功支撑,同时减少受端电网电压崩溃风险<sup>[53—54]</sup>。适用场景包括:

(1) 直流弱送端输电系统,特别是送端换流站新能源汇集近区。直流输送能力提升严重依赖送端水、火电的开机方式,直接影响清洁能源消纳和电网运行方式的灵活性。由于系统短路容量低,缺少动态无功,容易造成暂态过电压,调相机的快速进相能力可予以抑制,防止新能源机组大面积脱网。

(2) 直流馈入受端系统<sup>[50]</sup>。直流近区交流系统“N-1”等几种故障易导致电压稳定破坏,在受端电网安装调相机可有效提高系统电压稳定性。表 4 为我国支撑常规特高压直流输电的调相机典型应用案例。

(3) 缺少动态无功的负荷中心。文献[55]介绍了调相机在国外的研发及应用史。天津北郊 500 kV 变电站 1991 年安装投运 1 台 160 Mvar 苏制

表 4 我国新型调相机典型应用案例

Table 4 Particular application examples of domestic new synchronous condensers

应用工程	安装位置	容量/Mvar
祁连—湘潭特高压直流输电 ±800 kV/8 000 MW	送端	2×300
扎鲁特—广固特高压直流输电 ±800 kV/10 000 MW	送端	2×300
复龙—奉贤特高压直流输电 ±800 kV/6 400 MW	受端	2×300
昌吉—古泉特高压直流输电 ±1 100 kV/12 000 MW	受端	2×300

调相机<sup>[50]</sup>,是新型调相机投运前最大容量的调相机,因振动超标到 1995 年被迫停机 4 次<sup>[56]</sup>。

为了避免动态无功过度补偿后对其他区域存在不利影响,传统中小型调相机仍不被淘汰,甚至可以更好地解决电压稳定问题。中小型调相机有在风电、光伏场替代 SVC、STATCOM 进行场内动态无功补偿的趋势<sup>[57]</sup>。在某些受端省级电网,随着小型燃煤、燃气机组的退役及受电比例增加,且由于环保的原因难以新建常规电源项目,缺少动态无功的情况愈发严重。此时将退役机组改造为调相机运行,在减少新建动态无功补偿装置的情况下,可缓解该问题。

青海—河南常规直流投产后,配套的水电站未及时投产,配套风电、光伏电源通过多个 330 kV 升压站在整流站近区汇集,近区无其他常规电源。为限制机端瞬时暂态过电压及满足换流站动态无功需求,考虑滤波器切除时间及 330 kV 与 750 kV 的线路、变压器在换流站连续换相失败时消耗或提供无功的快速变化等,在 330 kV 汇集站安装 50 Mvar 小型调相机实现动态无功就地平衡,避免大范围电压波动,保障通道输电能力。

新能源基地若存在有串补站的交流外送通道,需额外考虑串补站与新能源装机的次同步谐振问题<sup>[58]</sup>。调相机在美国、加拿大、韩国、阿根廷、埃及、巴西亦有与国内相似的应用<sup>[50]</sup>,具体见表 5。

## 5 关键技术对我国未来电网形态的影响

### 5.1 关键技术发展趋势预测

柔性直流输电将逐步进入传统交流输电主导的电网,形成直流和交直流混合电网新模式。一方面,碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)等宽禁带电力电子器件的发展,将促进高压直流断路器发展;另一方面,采用新型电力电子元件的柔性交流输电系统(flexible alternate current transmission systems, FACTS)和交直流能量路由器直接接入电网,具有更

表 5 国外调相机应用案例

Table 5 Synchronous condenser application abroad

应用国家或地区及其配套输变电工程	安装位置	容量/Mvar	特征
韩国海南—济州直流输电工程	送、受端换流站	50	用于直流弱送端输电系统、直流馈入受端系统
美国田纳西河谷	负荷中心	$\pm 12$	补偿负荷中心的动态无功,避免大停电
美国佛蒙特州 <sup>[59]</sup>	负荷中心	25	补偿负荷中心的动态无功
加拿大皮斯河叔姆水电站(2 416 MW) 500 kV 双回送出线路,长 930 km	中间变电站	2×160	补偿负荷中心的动态无功,为输电线路提供动态无功支撑
加拿大勒格朗德水电站(10 260 MW) 735 kV 5 回送出线路,长 1 000 km	受端变电站	250	补偿负荷中心的动态无功
巴西伊泰普水电站(14 292 MW) 交直流混合输电	受端变电站	4×200	用于直流馈入受端系统,补偿负荷中心的动态无功
巴西美丽山水电站(11 000 MW) $\pm 800$ kV 特高压直流输电, 长 2 518 km,输电容量 4 000 MW	受端换流站	2×150	用于直流馈入受端系统
阿根廷埃尔乔孔、班代里塔水电站 (共 1 650 MW)500 kV 双回 送出线路,长 1 000 km	受端变电站	750	补偿负荷中心的动态无功
埃及阿斯旺水电站(2 100 MW) 500 kV 双回送出线路,长 700 余 km	受端变电站		补偿负荷中心的动态无功

高功率体积比和更低损耗,适用于构建直流电网功率转换装置,将对电网带来革命性变化。

直流电网是另一种完全不同的组网形态,与交流电网呈现并列、独立发展态势。可考虑充分利用不同类型直流输电技术的优势,因地制宜采用不同电压等级、不同接线方式和不同直流系统结构,最大化发挥直流电网的潜力。在直流输电网的各项关键技术取得突破后,现有电网的结构和形态需要重新考虑。直流电网将与交流电网在输电和配电领域发挥各自优势,形成更加灵活、安全、可靠的电网。电源基地、交流电网和直流电网的协调发展规划,直流和交流电网的分析决策系统及统一运行控制等技术领域也将得到全面研究和发展。

作为特高压常规直流输电技术的辅助技术,文献[60—61]提出新型调相机需进一步考虑  $d$  轴开路暂态时间常数  $T'_{d0}$  优化带来的转子发热、通风优化问题;短路冲击电流  $i_{ch}$  增加带来的机械结构优化问题; $d$  轴电枢反应电抗  $X_{ad}$  减小带来的本体尺寸、成本增加问题。此外,新型调相机的建模精度、状态监测评价机制亦有待提升。同时,需要深入研究新型调相机与电力电子无功补偿装置、多台调相机的协调控制问题<sup>[62—63]</sup>。

有可能融入柔性直流控制技术的 VSG 技术,存在些许问题需要突破,如大规模并网稳定性分析,多 VSG 的协同控制与稳定运行<sup>[40]</sup>,VSG 性能分析,评估量化标准的统一,经济效益的提升<sup>[47]</sup>,暂态特

性趋向真实发电机的优化等<sup>[10]</sup>。开展负荷侧 VSG 试点应用,探索源-网-荷灵活互动与自主交互模式,形成支撑电力系统稳定运行的 VSG 完整技术体系。

## 5.2 我国电网形态变化历程及预测

我国电网经历了电压等级由低到高,联网规模从小到大的发展历程。以电压等级提高和电网互联规模为标志,可分为 3 个重要阶段<sup>[64]</sup>。

第一阶段:省级电网发展阶段(改革开放以前)。20 世纪 60 年代,以 220 kV 线路为主网架、以省域为主要覆盖范围的省级电网开始形成。第二阶段:区域联网发展阶段(20 世纪 70 年代—90 年代)。至 20 世纪 80 年代末,形成了 7 个跨省电网:东北、华北、华东、华中、西北、川渝、南方互联电网。第三阶段:全国联网发展阶段(1997 年至今)。三峡输变电工程对促进全国联网、实现资源优化配置起到了关键作用。

我国电力需求与能源资源逆向分布,为了满足西、北部能源基地的开发以及东、中部地区的用电需求,“十四五”期间,在东、中部省份规划建设包括新能源、煤电、核电在内的储备电源,其中煤电、核电对受端电网网架可进行有效支撑,缓解动态无功缺少的局面。以优先就地就近、同时考虑合作意愿的原则规划建设电源、安排电力流,满足受端省市的用电需求,同时使我国各类电源装机的占比及重要输电通道各类电源电量的占比处于合理区间。

传统交直流电网输电能力与系统电源、负荷的

分布及短路电流等因素有关。若无可靠的电压支撑,输电能力将严重降低。在换相失败风险较大的区域,需要考虑将部分逆变站改造为柔性直流换流站。特高压柔性直流电网必须在有可靠应对直流断路器拒动故障的安全措施后才能全面取代传统的特高压交直流电网,柔直电网的发展加速了传统煤电、气机组的淘汰及新能源机组的发展<sup>[65]</sup>。

### 5.3 关键技术对未来电网形态的影响

继续沿用当前的常规超/特高压交直流输电技术,维持当前电网格局基本不变,增加规模与量级。该技术路线下,送、受端电网均面临电压稳定问题。西部送端电网可配置调相机等无功补偿设备,并配合 VSG 等技术实现新能源送出;东部受端电网可配置调相机等无功补偿设备,确保受端电网稳定运行。

常规、柔性直流输电技术为大型能源基地远距离、大容量输电提供了多种选择。特高压交流除承担大容量输电功能外,多用于区域骨干网架建设,柔性直流、以调相机作为辅助技术的常规直流输电技术可用于远距离、大容量输电。按照“强交强直”原则,构建交直流协调发展、结构合理、技术先进的特高压电网,增强电网承载力,实现电力大容量、远距离汇集、输送、消纳,保障系统安全稳定运行<sup>[20]</sup>。

未来,随着柔性直流输电技术逐步成熟,建设成本逐步降低,输电网将广泛采用 FACTS、柔直等灵活交直流输电技术。柔性直流电网在某些局部应用场景,如海上风电场、西部新能源发电汇集、城市负荷中心等得到应用,并初具规模。广泛采用柔性直流输电技术,可以避免安装大量无功补偿设备,减少电网建设投资,有效缓解系统电压问题。

调相机的安装会增加接入点的短路电流。因此,在短路电流水平大面积接近或超过遮断电流的电网,应谨慎考虑调相机的应用。当因缺少动态无功必须应用调相机时,需考虑短路电流抑制方案,如改变网架结构、改变系统运行方式、改变系统开机方式、增加系统电气距离等。考虑特定区域电网结构变化(如新建输变电工程、发电机组退役)对电压稳定的影响,研究采用调相机的必要性和时机。

同时需考虑将 VSG 技术融入柔性直流换流站控制中。通过 VSG 技术,电源与负荷均可根据电网状态,自主参与调压、调频,实现源-网-荷间能量的自主交互,降低对通信系统的依赖,提高电力系统的稳定性、自主性、友好性。

## 6 结语

文中首先分析了 4 类有较大应用前景的替代、

辅助技术的发展、应用及规划情况,然后分析了制约各类新技术发展的关键点,预测了各类新技术的发展趋势及其对未来电网发展形态的影响。

特高压常规直流输电面临一定的安全稳定问题,难以完全满足未来大规模新能源的跨区输电需求。对于已经建成和在建的工程,需要采用可行的辅助技术,提高通道外送能力,新型调相机和 VSG 可以提升大规模集中新能源场站的抗扰动能力。大容量的柔性直流输电技术可以一定程度上逐步替代常规直流输电。

新型调相机和柔性直流技术均已获得突破或实现应用,VSG 技术正处于理论研究和研发阶段,可能存在一定的缺陷。不断发展的柔性直流技术,在构建直流电网方面解决了与现有交流电网衔接、工程造价高等技术、经济问题后,可在未来实现新能源的安全可靠接入、汇集,进而实现远距离、大容量的电力输送。

中国主干输电网将延续现有电网的基本形态,逐渐成为超大规模超/特高压交直流混联的复杂电网。未来随着 MMC-HVDC 技术的成熟及成本的降低,在基于 MMC 的多端直流输电和直流电网技术成熟条件下,交流同步电网和区域性直流组网形态出现,全国可能形成送端高压直流与受端超/特高压交直流混联相融合的主干输电网格局。

### 参考文献:

- [1] 国家能源局. 电力发展“十三五”规划(2016年—2020年)[R]. 2016.  
National Energy Administration. The 13th five-year plan for electric power development(2016—2020)[R]. 2016.
- [2] 郭小江,马世英,申洪,等. 大规模风电直流外送方案与系统稳定控制策略[J]. 电力系统自动化,2016,36(15):107-115.  
GUO Xiaojiang, MA Shiyong, SHEN Hong, et al. HVDC grid connection schemes and system stability control strategies for large-scale wind power[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 36(15): 107-115.
- [3] 张爱玲,李少华,张崇见,等. “风火打捆”孤岛特高压直流送端电压和频率控制[J]. 电力系统自动化学报,2015,27(3): 29-35.  
ZHANG Ailing, LI Shaohua, ZHANG Chongjian, et al. Voltage and frequency control of wind-thermal-bundled island transmission by UHVDC system[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2015, 27(3): 29-35.
- [4] 李春华,蒋碧松,周勤勇,等. 一种适用于风电外送的直流输电控制策略及无功投切方法[J]. 电网技术,2015,39(11): 3280-3285.  
LI Chunhua, JIANG Bisong, ZHOU Qinyong, et al. HVDC control strategy and reactive power switching method for wind power delivery[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3280-



- 3285.
- [5] 朱艺颖,董鹏,谢国平,等. 适应大规模风电外送的特高压直流协调控制实时仿真研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1814-1819.
- ZHU Yiyang, DONG Peng, XIE Guoping, et al. Real-time simulation of UHVDC cooperative control suitable to large-scale wind farms[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1814-1819.
- [6] 王衡,常喜强,周专,等. 特高压直流系统故障对送端近区风电送出的影响及改进措施[J]. 新疆电力技术, 2014(2): 22-30.
- WANG Heng, CHANG Xiqiang, ZHOU Zhuan, et al. Influence and improvement measures of wind power output near sending-end during the fault on UHVDC system[J]. Xinjiang Electric Power, 2014(2): 22-30.
- [7] 徐式蕴,吴萍,赵兵,等. 提升风火打捆哈郑特高压直流风电消纳能力的安全稳定控制措施研究[J]. 电工技术学报, 2015, 30(13): 92-99.
- XU Shiyun, WU Ping, ZHAO Bing, et al. Study on the security and stability control strategy enhancing the wind power consuming ability of the wind-thermal power combining Hazheng UHVDC system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(13): 92-99.
- [8] 孙湘. 大规模新能源基地对疆电外送影响研究[J]. 新疆电力技术, 2016(2): 34-40.
- SUN Xiang. Study on the influence of large-scale new energy base on power transmission in Xinjiang[J]. Xinjiang Electric Power Technology, 2016(2): 34-40.
- [9] 米格里瓦卡朱革兰. 未来输电网的先进技术[M]. 北京:机械工业出版社, 2016: 1-10.
- MIGLIAVACCA Gianluigi. Advanced technologies for future transmission grids[M]. Beijing: China Machine Press, 2016: 1-10.
- [10] 吕志鹏,盛万兴,刘海涛,等. 虚拟同步机技术在电力系统中的应用与挑战[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(2): 349-359.
- LYU Zhipeng, SHENG Wanxing, LIU Haitao, et al. Application and challenge of virtual synchronous machine technology in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(2): 349-359.
- [11] 张志猛,贾伯岩,张建忠,等. 新型大容量调相机在特高压直流输电中的应用研究[J]. 河北电力技术, 2019, 38(4): 1-4, 19.
- ZHANG Zhimeng, JIA Boyan, ZHANG Jianzhong, et al. Research of new large-capacity synchronous condenser in UHVDC transmission application[J]. Hebei Electric Power, 2019, 38(4): 1-4, 19.
- [12] 舒印彪,张智刚,郭剑波,等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-8.
- SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-8.
- [13] 刘振亚,张启平,董存,等. 通过特高压直流实现大型能源基地风、光、火电力大规模高效率安全外送研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2513-2522.
- LIU Zhenya, ZHANG Qiping, DONG Cun, et al. Efficient and security transmission of wind, photovoltaic and thermal power of large-scale energy resource bases through UHVDC projects[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2513-2522.
- [14] 陈国平,李明节,许涛,等. 关于新能源发展的技术瓶颈研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 20-26.
- CHEN Guoping, LI Mingjie, XU Tao, et al. Study on technical bottleneck of new energy development[J]. Proceeding of the CSEE, 2017, 37(1): 20-26.
- [15] 高超,郭强,周勤勇,等. “十三五”电力规划中新能源大规模外送的安全稳定问题[J]. 中国电力, 2017, 50(1): 37-42.
- GAO Chao, GUO Qiang, ZHOU Qinyong, et al. The security and stability problems of large-scale outbound power transmission of renewable energy in the 13th five-year power plan[J]. Electric Power, 2017, 50(1): 37-42.
- [16] DENIS L H A, ANDERSSON G. Analysis of voltage and power interactions in multi-infeed HVDC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 816-824.
- [17] 刘振亚,张启平. 国家电网发展模式研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(7): 1-10.
- LIU Zhenya, ZHANG Qiping. Study on the development mode of national power grid of China[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(7): 1-10.
- [18] 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.
- [19] 周勤勇,刘玉田,汤涌. 受端电网最大直流受入规模分析方法[J]. 高电压技术, 2015, 41(3): 770-777.
- ZHOU Qinyong, LIU Yutian, TANG Yong. Analysis method for the maximum HVDC's capacity to receiving-end power grid[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(3): 770-777.
- [20] 全国电网运行与控制标准化技术委员会. 电力系统安全稳定导则: GB 38755—2019[S]. 北京: 中国电力出版社, 2019.
- National Power Grid Operation and Control Standardization Technical Committee. Code on security and stability for power system: GB 38755—2019[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2019.
- [21] 周攀,汪大洋,戴朝波,等. 基于MMC的半波长交流输电变频调谐技术[J]. 高电压技术, 2018, 44(1): 99-105.
- ZHOU Pan, WANG Dayang, DAI Chaobo, et al. Variable frequency tuning technology of half-wavelength AC transmission based on MMC[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(1): 99-105.
- [22] 邱璐. 半波长输电线路稳态与暂态过电压特性及抑制技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2017.
- QIU Lu. Research on steady state and transient overvoltage characteristics and control technology of half-wavelength transmission lines[D]. Changsha: Hunan University, 2017.

- [23] 张媛媛. 特高压半波长交流输电电磁暂态特性及控制技术研究[D]. 北京:北京交通大学,2018.  
ZHANG Yuanyuan. Electromagnetic transient characteristics and control technology of UHV half-wavelength AC transmission[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2018.
- [24] 谷鹏. 半波长交流输电技术电磁暂态关键问题及真型线路试验方法研究[D]. 北京:中国电力科学研究院,2018.  
GU Peng. Research on electromagnetic transient key problems and true line test methods of half wavelength AC transmission technology[D]. Beijing:China Electric Power Research Institute,2018.
- [25] 严胜,罗湘,贺之渊. 直流电网核心装备及关键技术展望[J]. 电力系统自动化,2019,43(3):205-215.  
YAN Sheng,LUO Xiang,HE Zhiyuan. Prospect of core equipment and key technology for DC power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(3):205-215.
- [26] 徐政. 柔性直流输电系统[M]. 北京:机械工业出版社,2017.  
XU Zheng. Flexible DC transmission system[M]. Beijing:China Machine Press,2017.
- [27] 张正卫. 柔性直流应用于城市电网220 kV分区互联的规划和控制技术[D]. 保定:华北电力大学,2019.  
ZHANG Zhengwei. Planning and control technology of VSC-HVDC applied to 220 kV partition interconnection of urban power grid[D]. Baoding:North China Electric Power University,2019.
- [28] 刘涛. 柔性直流电网工程技术与应用研究[J]. 现代工业经济和信化,2017(18):15-17.  
LIU Tao. Research on flexible DC power grid engineering technology and application[J]. Modern Industrial Economy and Informationization,2017(18):15-17.
- [29] 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.
- [30] 许云旺,王丙辉,曾洋,等. 多端柔性直流输电应用及仿真[J]. 电子设计工程,2018,26(10):176-179.  
XU Yunwang,WANG Binghui,ZENG Yang,et al. Application and simulation of multi-terminal flexible DC transmission[J]. Electronic Design Engineering,2018,26(10):176-179.
- [31] 姚美齐,李乃湖. 欧洲超级电网的发展及其解决方案[J]. 电网技术,2014,38(3):549-555.  
YAO Meiqi,LI Naihu. An introduction to European supergrid and its solutions[J]. Power System Technology,2014,38(3):549-555.
- [32] 周勤勇. 亚洲电网互联模式探讨[J]. 电网技术,2017,41(5):1491-1497.  
ZHOU Qinyong. Discussion on interconnection mode of Asian power grids[J]. Power System Technology,2017,41(5):1491-1497.
- [33] 国网北京经济技术研究院. 电网规划设计手册[M]. 北京:中国电力出版社,2015:330-334.  
State Grid Economic and Technological Research Institute. Power grid planning and design manual[M]. Beijing:China Electric Power Press,2015:330-334.
- [34] 游沛羽,张艳,佟宇梁,等. 跨国互联电网的成本分摊方法研究[J]. 山东电力技术,2018,45(4):17-23.  
YOU Peiyu,ZHANG Yan,TONG Yuliang,et al. Study on the tactic of cost allocation of transnational interconnected electric system[J]. Shandong Electric Power,2018,45(4):17-23.
- [35] 徐政,程斌杰. 不同电压等级直流输电的适用性研究[J]. 电力建设,2015,36(9):22-29.  
XU Zheng,CHENG Binjie. Applicability study on DC transmission with different voltage levels[J]. Electric Power Construction,2015,36(9):22-29.
- [36] 游沛羽,佟宇梁,魏楠,等. 东北亚跨国互联电网的成本评估方法研究[J]. 全球能源互联网,2018,1(S1):249-256.  
YOU Peiyu,TONG Yuliang,WEI Nan,et al. Study on the strategy of cost evaluation of transnational interconnected electric system of northeast Asia[J]. Global Energy Internet,2018,1(S1):249-256.
- [37] 张运洲,韩丰,赵彪,等. 直流电压等级序列的经济比较[J]. 电网技术,2008,32(9):37-41.  
ZHANG Yunzhou,HAN Feng,ZHAO Biao,et al. Economic comparison of HVDC voltage class sequence[J]. Power System Technology,2008,32(9):37-41.
- [38] 刘振兴. 柔性直流输电技术的发展和 application 研究[J]. 机电信息,2018(15):14-15,18.  
LIU Zhenxing. Research on development and application of flexible HVDC transmission technology[J]. Electromechanical Information,2018(15):14-15,18.
- [39] 国家电网有限公司. 虚拟同步发电机技术导则:Q/GDW 11824—2018[S]. 北京:中国电力出版社,2018.  
State Grid Corporation of China. Guidelines for virtual synchronous generator technology:Q/GDW 11824—2018[S]. Beijing:China Electric Power Press,2018.
- [40] 郑天文,陈来军,陈天一,等. 虚拟同步机技术及展望[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):165-175.  
ZHENG Tianwen,CHEN Laijun,CHEN Tianyi,et al. Review and prospect of virtual synchronous generator technologies[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(21):165-175.
- [41] 陈天一,陈来军,汪雨辰,等. 考虑不平衡电网电压的虚拟同步机平衡电流控制方法[J]. 电网技术,2016,40(3):904-909.  
CHEN Tianyi,CHEN Laijun,WANG Yuchen,et al. Balanced current control of virtual synchronous generator considering unbalanced grid voltage[J]. Power System Technology,2016,40(3):904-909.
- [42] 陈天一,陈来军,郑天文,等. 基于模式平滑切换的虚拟同

- 步机低电压穿越控制方法[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 2134-2140.
- CHEN Tianyi, CHEN Laijun, ZHENG Tianwen, et al. LVRT control method of virtual synchronous generator based on mode smooth switching [J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 2134-2140.
- [43] 陈来军, 王余阳, 郑天文, 等. 基于一致性的并联虚拟同步机分布式协同控制[J]. 控制理论与应用, 2017, 34(8): 1084-1091.
- CHEN Laijun, WANG Yuyang, ZHENG Tianwen, et al. Consensus-based distributed control for parallel-connected virtual synchronous generator [J]. Control Theory & Applications, 2017, 34(8): 1084-1091.
- [44] 管玮琦, 张兴, 李明, 等. 电网对称故障下虚拟同步机暂态稳定性分析[J]. 电气传动, 2020, 50(1): 83-90.
- GUAN Weiqi, ZHANG Xing, LI Ming, et al. The transient stability analysis of the power grid symmetric fault with VSG saturation characteristic [J]. Electric Drive, 2020, 50(1): 83-90.
- [45] 颜湘武, 贾焦心, 王德胜, 等. 基于  $P/\omega$  “导纳”的并联虚拟同步机功频响应建模与分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(15): 3191-3202.
- YAN Xiangwu, JIA Jiaoxin, WANG Desheng, et al. Modeling and analysis of active power-frequency response of parallel VSGs using a  $P/\omega$  "admittance" [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(15): 3191-3202.
- [46] 伍兴煌, 魏强. 使用虚拟阻抗的虚拟同步机转子角下垂控制[J]. 电气技术, 2020, 21(3): 31-36, 58.
- WU Xinghuang, WEI Qiang. Virtual synchronous machine rotor angle droop control using virtual reactance [J]. Electrical Engineering, 2020, 21(3): 31-36, 58.
- [47] 刘国宇, 蔺圣杰, 吴鸣, 等. 虚拟同步机示范工程综述[J]. 供用电, 2019, 36(4): 37-42.
- LIU Guoyu, LIN Shengjie, WU Ming, et al. Summary of virtual synchronous machine technology demonstration project [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(4): 37-42.
- [48] 周珊, 吕志鹏, 吴鸣, 等. 虚拟同步机技术在电动汽车充电桩中的应用[J]. 供用电, 2019, 36(4): 24-30.
- ZHOU Shan, LYU Zhipeng, WU Ming, et al. The application of virtual synchronous generator technology in electric vehicle charging pile [J]. Distribution & Utilization, 2019, 36(4): 24-30.
- [49] 水利电力部西北电力设计院. 电力工程电气设计手册(电气一次部分)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1989: 472-474.
- Northwest Electric Power Design Institute of Water Resources and Electric Power Ministry. Electrical design manual for power engineering (electrical primary part) [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1989: 472-474.
- [50] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 22-28.
- WANG Yating, ZHANG Yichi, ZHOU Qinyong, et al. Study on application of new generation large capacity synchronous condenser in power grid [J]. Power System Technology, 2017, 41(1): 22-28.
- [51] 金一丁, 于钊, 李明节, 等. 新一代调相机与电力电子无功补偿装置在特高压交直流电网中应用的比较[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2095-2102.
- JIN Yiding, YU Zhao, LI Mingjie, et al. Comparison of new generation synchronous condenser and power electronic reactive-power compensation devices in application in UHV DC/AC grid [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2095-2102.
- [52] 阮羚, 王庆, 凌在汛, 等. 新型大容量调相机性能特点及工程应用[J]. 中国电力, 2017, 50(12): 57-61.
- RUAN Ling, WANG Qing, LING Zaixun, et al. Study on the performance feature and key engineering application of new large capacity condenser [J]. Electric Power, 2017, 50(12): 57-61.
- [53] 肖繁, 王涛, 高扬, 等. 基于特高压交直流混联电网的调相机无功补偿及快速响应机制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 93-100.
- XIAO Fan, WANG Tao, GAO Yang, et al. Research on reactive power compensation and fast response mechanism of synchronous condenser based on UHV AC/DC hybrid grid [J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 93-100.
- [54] 滕辉, 马龙, 陈大庆. 调相机在  $\pm 800$  kV 特高压直流换流站中的应用研究[J]. 山东电力技术, 2019, 46(2): 19-21.
- TENG Hui, MA Long, CHEN Daqing. Application of synchronous compensators in  $\pm 800$  kV UHVDC converter station [J]. Shandong Electric Power, 2019, 46(2): 19-21.
- [55] 戴庆忠. 同步调相机特性及应用[J]. 东方电气评论, 2016, 30(4): 47-52.
- DAI Qingzhong. Extensive talk on synchronous condenser [J]. Dongfang Electric Review, 2016, 30(4): 47-52.
- [56] 程文旭. 浅析天津北郊 160 Mvar 调相机运行中振动逐渐增大原因[J]. 天津电力技术, 2001(2): 17-21, 24.
- CHENG Wenxu. A rough analysis on the factor of increasing vibration in operation of 160 Mvar synchronous condenser in Tianjin northern suburb substation [J]. Tianjin Electric Power, 2001(2): 17-21, 24.
- [57] 吴文波, 李积霞, 蒲太平. 中小容量调相机用于风电场无功补偿的可行性分析[J]. 机电信息, 2019(30): 51-52.
- WU Wenbo, LI Jixia, PU Taiping. Feasibility analysis of reactive power compensation for wind farm with medium and small capacity synchronous condenser [J]. Electromechanical Information, 2019(30): 51-52.
- [58] 陈晓伟. 风电—串补输电系统次同步谐振机理与抑制措施研究[D]. 保定: 华北电力大学, 2018.
- CHEN Xiaowei. Research on mechanism and suppression method of subsynchronous resonance in wind farm compensated power transmission system [D]. Baoding: North China Electric Power University, 2018.
- [59] SKLIUTAS J, LAFOREST D, D'AQUILA R, et al. Next-generation synchronous condenser installation at the VELCO granite substation [C] // IEEE Power & Energy Society General Meet-

- ing. 2009;1-8.
- [60] 李志强,蒋维勇,王彦滨,等. 大容量新型调相机关键技术参数及其优化设计[J]. 大电机技术,2017(4):15-22.  
LI Zhiqiang,JIANG Weiyong,WANG Yanbin,et al. Key technical parameters and optimal design of new types of large capacity synchronous condenser[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine,2017(4):15-22.
- [61] 马一鸣,周理兵,王晋,等. 新型调相机接入对特高压直流输电线路动态过程的影响分析[C]//超/特高压直流输电技术会议论文集. 2018;207-215.  
MA Yiming,ZHOU Libing,WANG Jin,et al. Analysis for influence of novel synchronous condenser access on dynamic process[C]//Proceedings of Conference on HVDC Transmission Technology. 2018;207-215.
- [62] 程明,田伟杰,王伟,等. 新型调相机的关键技术及研究进展[J]. 电力工程技术,2020,39(2):2-9.  
CHENG Ming,TIAN Weijie,WANG Wei,et al. Review on key technologies and latest development of new synchronous condenser[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2):2-9.
- [63] 刘会鹏,杨江涛,李军,等. 多台调相机在特高压换流站中的协调控制策略分析[J]. 湖南电力,2020,40(1):27-31.  
LIU Huipeng,YANG Jiangtao,LI Jun,et al. Analysis of coordinated control strategy for synchronous condensers in UHVDC converter station[J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(1):27-31.
- [64] 刘振亚,舒印彪,张启平,等. 世界大型电网发展百年回眸与展望[M]. 北京:中国电力出版社,2017.  
LIU Zhenya,SHU Yinbiao,ZHANG Qiping,et al. Review and prospect of the development of large power grid all over the world in the past century[M]. Beijing:China Electric Power Press,2017.
- [65] 杨海涛,吉平,苗森,等. 未来中国特高压电网结构形态与电源组成相互关系分析[J]. 电力系统自动化,2018,42(6):9-17.  
YANG Haitao,JI Ping,MIAO Miao,et al. Analysis on interrelationship between future UHV power grid structural form and power source composition in China[J]. Automation of Electric Power Systems,2018,42(6):9-17.

作者简介:



刘增训

刘增训(1979),男,硕士,高级工程师,从事电网规划与设计研究工作(E-mail:zengxun-liu@sgcc.com.cn);

游沛羽(1987),男,硕士,工程师,从事电网规划与设计研究工作;

周勤勇(1977),男,博士,教授级高级工程师,从事电力系统分析、规划及电网新技术应用研究等工作。

## Transmission technologies adapting to power systems with widely-consumed high-proportion renewable energy

LIU Zengxun<sup>1</sup>, YOU Peiyu<sup>2</sup>, ZHOU Qinyong<sup>3</sup>

(1. State Grid Corporation of China, Beijing 100031, China;

2. State Grid Economic and Technological Research Institute Co., Ltd., Beijing 102209, China;

3. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The frequency instability, voltage instability and chain reactions could occur on renewable energy transmitted by ultra high voltage direct current(UHVDC) lines. Therefore, the theory, application and cases of power transmission technologies which are commonly researched and could be utilized in planning in China are analyzed. From the angle of alternative technology, the traits of half-wave-length transmission that act as a substitution of UHVDC transmission and can construct three-dimensional grid are put forward. Flexible DC transmission has preponderances such as practicability to organize DC network, which can be utilized in the scenes to admit renewable energy and establish DC network. The economy of two alternative technologies is compared based on the principle of annual fee per unit capacity. Conclusion is that flexible DC transmission costs less. Moreover, the choice of DC voltage level on the basis of least annual fees under diversified combinations of transmission distance and capacity is researched and analyzed. The characteristics of frequency modulation of virtual synchronous machine for new energy are analyzed as an assistive technology. Its application in new energy high permeability sending or receiving end power grid is presented. The dynamic reactive modification capacity of synchronous condenser is analyzed. Its application in transmission systems of new energy is presented. On the basis of trajectory of four alternative and assistive technologies and the variation of the pattern of power system in the history and anticipated, the tendency of technology development and influence on the shape of power system are discussed and forecasted.

**Keywords:** ultra high voltage direct current(UHVDC); half-wave-length accurate current; flexible direct current(DC); the principle of annual fee per unit capacity; virtual synchronous generator(VSG); synchronous condenser

(编辑 吴楠)