

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2020.04.013

电力系统的电力电子化趋势分析与探讨

张栋凯¹,陈羽飞²,姜婷玉¹,徐科³,何永君²,陈谦¹,鞠平¹

(1. 河海大学能源与电气学院,江苏南京 211100; 2. 中国电机工程学会,北京 100761;
3. 国网天津市电力公司,天津 300010)

摘要: 首先,从电力电子的发展历程,以及当前电力系统电源、电力传输、用电等方面发展面临的问题,说明电力系统电力电子化的必要性;其次,从能源安全与政治建设、资源和环境效益、发输配用电变革3个方向,阐述电力电子化的政治、经济、技术等驱动因素;最后,对电力系统电力电子化的发展趋势和主要制约因素进行分析,并对有关的研究方向进行梳理,以期对后续研究提供参考与借鉴。

关键词: 电力系统;电力电子化;输电;配电;新能源发电;电力电子负荷

中图分类号:TM72 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2020)04-0377-08

Analysis and discussion of electronization trend of power system

ZHANG Dongkai¹, CHEN Yufei², JIANG Tingyu¹, XU Ke³, HE Yongjun²,
CHEN Qian¹, JU Ping¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;
2. Chinese Society for Electrical Engineering, Beijing 100761, China;
3. State Grid Tianjin Electric Power Company, Tianjin 300010, China)

Abstract: Firstly, the necessity of power electronization is explained from the development history of the power electronics and the challenges in power generation, transmission, distribution, and consumption. Secondly, the driving factors of power electronization, such as politics, economy, and technology, are elaborated in three aspects, including energy security and political construction, the resource and environmental benefits, and the transformation of power generation, transmission, distribution and consumption. Finally, the development trends and main restrictive factors of power electronization in power system are analyzed, and related study directions are summarized to provide some references and suggestions for future study.

Key words: power system; power electronization; power transmission; electric power distribution; renewable energy generation; power electronics load

结构合理、安全高效的电力系统是衡量社会 and 经济发展水平的重要标志。针对大量电能的转换与传输需求,逐步形成了现代电力系统。比如,我国、北美、欧洲等都建立了地理覆盖范围极广、负荷容量极大的跨区域互联电网^[1-6]。然而,随着传统电力系统的发展,逐渐暴露出一些难以克服的困难与障碍。一方面,随着电网的扩展,输电距离不断增加,输电电压等级不断升高,原有的电网发展模式逐渐受到了原理、技术、安全、经济等方面的制约;另一方面,新的发电设备、新的传输技术、新的用电负荷设备不断涌现,与原有电网在功能、接口、服务等方面都存在较大的冲突^[4, 7-8]。未来电力系统的发展迫切需要依托通讯、控制、人工智能等先进技术,而电力电子技术是其中最重要的技术手段之一^[9-10]。

基金项目: 国家自然科学基金(51837004);国家电网公司科技项目(SGT YHT/16-JS-198, KJ17-2-02/52039917005L)

作者简介: 张栋凯(1996—),男,硕士研究生,主要从事电力系统建模与控制研究。E-mail: zhangdongkai000@126.com

通信作者: 鞠平,教授。E-mail: pju@hhu.edu.cn

引用本文: 张栋凯,陈羽飞,姜婷玉,等. 电力系统的电力电子化趋势分析与探讨[J]. 河海大学学报(自然科学版),2020,48(4):377-384.
ZHANG Dongkai, CHEN Yufei, JIANG Tingyu, et al. Analysis and discussion of electronization trend of power system[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2020,48(4):377-384.

电力电子化设备的优点在于其接口不受限、响应速度快、变换效率高等。在电力生产方面,可支持各种可再生能源发电并网和提高传统发电效率^[11-12];在电力传输分配方面,可保障电力传输安全可靠并提高传输效率^[13];在电力消费方面,可满足用户日益多样的个性化需求并保证高标准的电能质量^[14]。

由于技术和成本问题基本解决,电力电子技术已在电力消费方面得到了广泛应用^[15]。有统计表明,我国实际照明负荷中包含了大量的电力电子元器件^[16];交通/工业传动领域普遍采用变频调速技术^[17];随着社会经济水平的提高,采用开关电源的各种电子电器设备比重持续提高^[14];等等。在电力生产和电力传输分配方面,电力电子技术也得到了大量工程应用。比如,常规发电机组的静止励磁装置、超高压/特高压直流输电、可控串联补偿、电力有源滤波器等^[18]。当前,传统发电、输配电领域的制约因素不断增强,而电力电子自身在技术、成本等方面高速发展,在这些综合因素的推动下,电力电子技术必然在整个电力系统中得到更广泛的应用。

虽然电力系统的电力电子化已成为一种趋势,但是很多机理问题和关键技术仍亟待研究。比如,由于电力电子设备的耐受性较差,外部故障期间出于自我保护的目的常采用脱网策略,给传统继电保护的故障定位和切除造成了障碍^[19]。再比如,目前在某些新能源发电基地的附近电网出现了机理不明的振荡^[8]。

本文将对此进行一些分析与探讨,包括当前电力电子设备在电力系统的应用现状,电力系统电力电子化的驱动因素,电力系统电力电子化的发展趋势,电力电子化电力系统面临的问题等,旨在为相关研究工作提供参考。

1 电力系统电力电子化的必要性分析

1.1 电力电子技术的发展历程

20世纪50—80年代是电力电子技术的初步发展阶段。这一时期电力电子设备的核心器件是半控型的晶闸管,以可控整流为主^[20]。受到半导体器件性能和成本因素的影响,电力电子器件主要应用于工业场合,在民用负荷领域应用较少。在电力系统的发电和传输方面应用也不多,主要有发电机励磁控制、高压直流输电、静止无功补偿器(SVC)等,对传统电力系统的性能影响较小。

20世纪80—90年代是电力电子技术的快速发展阶段。这一时期电力电子设备的核心器件逐步过渡到了全控型器件为主^[20-21]。随着技术的提高及成本的下降,利用全控型器件构成的电力电子设备在工业、民用、交通、商业等领域得到广泛应用。随着直流输电、轻型直流输电、FACTS等大型电力电子设备的使用,其与传统电力系统的交互影响也越来越明显^[22]。

2000年以后,电力电子技术的应用进入爆发式发展阶段,器件成本进一步下降,在电力牵引、新能源发电、电气节能等领域呈现高速发展的趋势。电力系统的应用也日渐广阔,包括新能源发电并网、柔性交流输电等^[1,20]。随着电力电子设备在电力系统中应用越来越广泛,相比传统电力系统产生了一些未知的特性变化,尤其是在某些局部场合其与电力系统的交互作用更加明显,如某些风电场接入区的异常波动与不明振荡等^[8]。

1.2 电力系统电力电子化的必要性

随着电力系统规模增大、构成趋向复杂,供电量逐年上升,所需要的运行控制手段也更加多变。然而,现有的技术和设备难以完全满足相应需求,使得当前电力系统面临着越来越多的发展瓶颈^[3]。

a. 电源方面。未来我国新能源发电所占比重越来越大,但与常规火电、水电相比,新能源波动性强、可控性低、功率密度偏低、可预测性有所不足,发出的电以直流形式居多。大量的新能源并网发电,不仅需要电力电子换流器并网,还需要配套储能、有源滤波、功率调节等设备辅助运行。传统同步电机发电技术也可以电力电子化提升,如辅助机械的变频驱动^[23]、励磁调节^[24]等。

b. 电力传输方面。该方面同样面临新的问题,包括:(a)传统的增高电压、增加距离的方式受到了制约^[20];(b)互联系统的安全隐患增加^[8,25];(c)环境经济等因素的限制,比如输电通道受限;(d)配电网建设扩展困难;(e)负荷中心的供电强度越来越高;(f)新型负荷对电网造成调度压力;(g)可控性更高的新型变压器需求。针对这些问题,出现了以电力电子技术为基础的灵活交流输电技术(FACTS),其他如直流输电、半频输电、电力电子变压器等也依赖于电力电子技术^[4,13,20]。

c. 用电方面。未来用户对电力的使用,在可靠性、便利性、效能等方面提出更高的要求,与电网的交互方式逐渐变多,比如,用户侧小型分布式发电设备的并网与存储、微电网、电动汽车充电系统等^[26-27]。另一

方面,电力电子化用电设备会向电网注入高次谐波。用户接口处将出现越来越多的辅助和控制性电力电子设备。

面对这些新出现的问题与瓶颈,有必要采用以电力电子为基础的综合技术加以解决,以适应电力系统源-网-荷设备快速更新变化的需求。

2 电力系统电力电子化的驱动因素

2.1 能源安全与政治建设的国家需求

能源安全是与政治安全、经济安全等多方面相关的关键环节之一,而电力系统是能源供给的重要方式。

a. 保障能源供给的安全需求。近年来,国际局势复杂多变,我国能源储备不足、能源依存度高,影响了我国经济安全和国家的安全形势^[5,13,28]。我国能源总依存度呈现上升趋势,2017年原油对外依存度达到67.4%,天然气对外依存度达到38.43%。原油和天然气对外依存度不断提高,增大了我国油气安全风险及与相关国家能源合作的难度^[3]。为此,我国一方面加强全方位国际合作,一方面推动内部能源革命,构建清洁能源供应体系。提出在2030年之前,实现可再生能源消费比例占总消费量的20%^[29]。通过电力电子化电力系统的建设,可实现大规模的能源跨区调配、促进新能源发电开发、推动电动汽车与先进轨道交通发展,从而降低常规油气运输通道风险,提高能源供给的安全性。

b. 中西部均衡发展的战略需求^[2]。我国经济和社会面临东部和西部发展不均的矛盾,而“西电东送”为西部省区把电力资源优势转化为经济优势提供了新的历史机遇^[5],其中电力电子化的远距离输电技术起到了至关重要的作用。截至2018年9月,国家电网在建在运特高压工程达到23项,总长度达到3.3万km^[30]。

c. “一带一路”建设的政治需求。“一带一路”是我国未来一段时期的重要战略举措,能源合作是“一带一路”战略中的重要内容,而电力建设又是其中的合作重点。中国电力建设集团有限公司获得印尼、巴基斯坦等国多项火力和水力发电站的建设合作项目^[31]。在“一带一路”合作项目建设,以及构建“全球能源互联网”的项目中,对发电、输电、配电、供电设备提出了新要求,因而构建电力电子化的电力系统是满足上述需求的必然之路。

d. 推动制造产业升级的需求。工业制造是国民经济的重要支柱,但中国制造业仍相对缺乏原创与核心技术。在能源、工业、交通、国防、航空航天、信息通信、民用等各领域,高性能的电力电子变流器及其相关控制系统均是必不可少的核心部件。因此,加快电力电子化电力系统的建设可以拉动相应装备制造业的发展,进而对把握制高点、突破技术壁垒、形成集群化的产品竞争优势具有重要的作用^[32]。

2.2 资源与环境的效益需求

a. 减少电网建设投资。据测算,“十三五”期间(2016—2020年)电网工程规划总投资2.38万亿元,带动电源投资3万亿元^[33]。电力工程项目通常十分巨大,需要庞大的资金,因此如何减少建设投资一直以来是电力系统规划与运行的焦点和难点。通过规划电力电子化装置的安装配置,能够增加单位造价输送容量、节省征地,大幅度提高经济性,并且能充分应用到电力系统源-网-荷各个环节。

b. 减少电力传输损耗^[7]。据国家能源局数据显示:2011年全国跨区输电线路平均输电损耗率3.8%,2012年平均输电损耗率4.02%,2013年平均输电损耗率4.34%^[34]。可见,在输电量压力逐年增加的同时,平均输电损耗也逐年上升。电力电子技术的应用可以有效降低电网输电损耗,比如柔性交流输电技术对线路功率的合理分配、直流输电技术避免无功损耗以及电力电子配电变压器的问世等等,采用优化配置的电力电子设备能够充分有效地优化电力系统不同环节、不同地点的传输损耗,进一步提升了电力系统的经济性^[13]。

c. 降低环境保护成本^[2]。电力系统电力电子化是降低发电与环保成本的关键手段。比如,对于环保成本较高的火电厂而言,脱硫、除尘等设备必不可少,均可运用电力电子技术对这些设备进行升级改造,在提升清洁效率的同时降低运行成本,从而减少发电厂的环保成本^[23]。另一方面,电力电子化变革促进了各种新能源发电的发展。

2.3 发输配用电变革的技术需求

a. 新能源发电及并网的需求。面对全球气候变化,化石能源日益紧缺,能源清洁低碳转型等背景,可再生能源受到世界各国的高度重视^[3,35]。我国提出,2020年风电装机2.1亿kW,光伏装机1.1亿kW等指标^[29]。这些不同于常规同步发电机的电源,难以直接并网输送,因此只能采用电力电子变换技术输送^[36]。

b. 提高电力传输能力的需求。我国资源分布与经济发展水平的地区不平衡性,决定了我国必需采取长距离输电形式。使用智能化的大功率电力电子装备,可以显著提升线路输送水平、改善潮流分布、增强电网供电可靠性,此外还可以提升电网安全防御能力,从而提高大型互联电网的安全性,形成坚强网架结构^[4-5,10,13]。

c. 灵活可靠配置电力的需求。传统配电网的电能质量和供电可靠性提升空间有限,难以满足用户高电能质量用电需求。随着大量分布式电源、微电网和柔性负荷接入配电网,传统配电网已逐步变得“有源”,分布式电源和柔性负荷的“即插即用”接入要求越来越高;不同负荷类型对电能质量和多种电能形式的定制需求也越来越强烈^[12,37-38]。

d. 用户高效便利用电的需求。在负荷侧,最主要的变化是分布式电源和储能装置的接入。大量新型负荷需要直流电源,如数据中心、计算机设备、LED照明等,都需要电力电子技术解决。用电领域新的需求为电力电子化变革提供了极大的发展空间,对电力电子技术在用电侧的适应性提出了新要求^[39]。

由上述分析可见,电力电子化的需求主要来自但不仅限于上述3个方面,比如也可以换一种维度按照规划、运行与控制3个方面进行综合分析。

3 电力电子化变革的趋势与难点

3.1 电力系统电力电子化的趋势与制约因素

总体而言,未来电力系统需采用新的输送和控制方式来满足安全、高效、智能等方面的要求^[40]。具体包括:(a)适应新能源电力的输送和分配网络;(b)与分布式电源、储能等融合互动的高效终端系统^[41];(c)极高的供电可靠性;(d)与信息系统结合的综合服务体系^[9];等等。这些新变化都需要采用电力电子化设备进行运行、补偿、控制,决定了电力系统电力电子化的必然趋势。

然而,在这个过程中仍然存在以下制约因素。

a. 政策与应用需求。一方面,电力电子器件价格敏感度较小,产品线较长;电力电子设备的一次性投资高,使用年限较长,产品迭代速度较慢,使得国产化电力电子器件得到市场关注不多。因此需要注重电力电子技术积累,保证国内电力电子市场正常发展,确保在新能源、电动汽车大规模发展时,不在电力电子技术上受限。另一方面,电力系统的电力电子化变革在国家整体发展规划方面一直欠缺,因此有必要研究制定统一的电力系统电力电子化发展规划,协调电力系统与其他部门、产业共同发展。

b. 资金与相关技术。一方面,电力系统电力电子化是一种长期的发展过程,涉及系统的方方面面,系统升级投资大,且有些直接效益不明显,如各级储能站的建设;有些短期效益不明显,如电动汽车充电桩。为了保证电力系统的安全稳定性,应确保系统电力电子化变革的资金和技术满足长期发展要求;另一方面,电力电子化相关的技术分布十分广泛,涉及诸多领域,且各领域方向之间多有联系。电力电子研究的方向划分和整体统筹难度较大,迫切需要制定电力电子技术发展路线图,统一协调电力电子技术发展。

3.2 电力系统电力电子化面临的问题与研究思路

随着电力系统内部电力电子设备和部件越来越多,它们之间产生了不同于以往的交互作用,且比重日益增大。由于把握深度不够,实际系统产生的一些不利影响难以掌控。随着电力电子设备比例不断增加,这些不利因素将更加显著,对电力系统的安全稳定运行造成严重影响。因此,需要对电力系统电力电子化面临的主要问题进行深入分析,包括:(a)系统机理分析与建模,如电力电子化设备/设备群的特性建模与分析、电力电子化设备高占比情况下电力系统特性建模与分析等^[42-43];(b)系统的动态过程机理研究,包括电力电子化电力系统暂态过程与应力特征分析、电力电子化电力系统失稳特征与稳定性分析等^[44-45];(c)系统的控制和保护方法,包括电力电子化电力系统中原有继电保护适应性与探索新型继电保护原理^[46-47];(d)分布式电源和电力电子设备多目标优化配置^[1]。

有必要针对电力系统的基本物理特征,改变以往针对单个电力电子装置和局部问题的研究,要更加关注系统与设备、设备和设备之间的整体关系。建议主要研究方向包括:(a)非线性条件下电能变换的多维度物理机制分析:从能量流、功率流等角度建立功率理论体系^[48-50]。(b)多类型电源、传输、负荷设备的电磁交互作用和传播机理,以及交互影响的评估;研究多类型设备串并行相互作用建模,分析串并行演化机理及其时空关联特征,并探索多样化串并行组合方式。(c)考虑多尺度耦合效应及负荷动态特性的系统建模及分析

方法^[45];针对电力电子设备或设备群机电、电磁控制环节和内部结构的关联机制,分析主要环节的输入激励-输出响应关系,建立设备的多时间尺度模型。(d)电力电子化电力系统的动态行为特性,及其对电力系统稳定性的作用^[51-53];从主要环节的功率存储和损耗特征,分析电力网络多时间尺度动态特性。(e)电网故障后电力电子化电源及负荷设备的响应特性^[20,54],以及系统级的保护与控制特性研究;研究功率不平衡、小扰动、大扰动条件下,不同电力电子设备的动态特性,分析电路和控制动态过程按逻辑切换的描述方法,建立多时间尺度下的电压、频率模型。研究不同故障深度及持续时间情况下,故障发生持续和切除过程中,设备主要环节的状态演化描述方法,建立故障下设备与网络故障模型,研究常规保护的适应性,并尝试构建适应电力电子化系统的新型继电保护原理。(f)系统可靠性、不确定性风险及经济性评估新方法^[20,47]等,如考虑电源不确定性的源网荷协同规划方法。

4 结 语

电力系统中的电力电子化设备占比越来越高,设备与系统以及设备与设备之间的交互作用越来越复杂,对电力系统运行特性的改变也越来越明显。因此需要以新视角、新理论、新方法来解决新问题,以实现电力系统安全、稳定、高效、长期地运行。

总体而言,电力系统的电力电子化趋势是比较明确的,但是其具体的发展过程仍有诸多不确定性,建议就电力电子化装备的动态特征及系统动态问题尽早展开相应研究,重点关注电力电子化设备与传统设备在构成与控制方面的差异,以及主要动态过程的解析、本质特征的提取等。

本文梳理了电力系统核心装备的发展脉络,指出了电力系统电力电子化发展的必然性,并对电力电子化电力系统的趋势进行了预测。总结了电力电子化的主要内容与关键问题,分析了电力电子化建设面临的难点,希望为后续的研究分析提供有益的借鉴。

参考文献:

- [1] 吴克河,王继业,李为,等. 面向能源互联网的新一代电力系统运行模式研究[J]. 中国电机工程学报,2019, 39(4): 966-979. (WU Kehe, WANG Jiye, LI Wei, et al. Research on the operation mode of new generation electric power system for the future energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(4): 966-979. (in Chinese))
- [2] 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): 1-10,25. (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, 25. (in Chinese))
- [3] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报,2018, 38(7): 1893-1904. (ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904. (in Chinese))
- [4] 周浩. 特高压交直流输电技术[M]. 杭州:浙江大学出版社,2014.
- [5] 刘振亚. 中国电力与能源[M]. 北京:中国电力出版社,2012.
- [6] BLAABJERG F, TEODORESCU R, LISERRE M, et al. Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1398-1409.
- [7] 刘振亚,舒印彪,张文亮,等. 直流输电系统电压等级序列研究[J]. 中国电机工程学报,2008, 28(10): 1-8. (LIU Zhenya, SHU Yinbiao, ZHANG Wenliang, et al. Study on voltage class series for HVDC transmission system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 1-8. (in Chinese))
- [8] 肖湘宁,罗超,廖坤玉. 新能源电力系统次同步振荡问题研究综述[J]. 电工技术学报,2017, 32(6): 85-97. (XIAO Xiangning, LUO Chao, LIAO Kunyu. Review of the research on subsynchronous oscillation issues in electric power system with renewable energy sources [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(6): 85-97. (in Chinese))
- [9] 鞠平,周孝信,陈维江,等. “智能电网+”研究综述[J]. 电力自动化设备,2018, 38(5): 2-11. (JU Ping, ZHOU Xiaoxin, CHEN Weijiang, et al. “Smart grid plus” research overview [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(5): 2-11. (in Chinese))
- [10] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J]. 中国电机工程学报,2014, 34(34): 6007-6020. (YAO Liangzhong, WU Jing, WANG Zhibing, et al. Pattern analysis of future hvdc grid development [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6007-6020. (in Chinese))

- [11] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14. (DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14. (in Chinese))
- [12] 梁有伟, 胡志坚, 陈允平. 分布式发电及其在电力系统中的应用研究综述[J]. 电网技术, 2003, 27(12): 71-75, 88. (LIANG Youwei, HU Zhijian, CHEN Yunping. A survey of distributed generation and its application in power system [J]. Power System Technology, 2003, 27(12): 71-75, 88. (in Chinese))
- [13] 刘振亚. 特高压交直流电网[M]. 北京: 中国电力出版社, 2013.
- [14] 钱照明, 张军明, 盛况. 电力电子器件及其应用的现状和发展[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(29): 5149-5161. (QIAN Zhaoming, ZHANG Junming, SHENG Kuang. Status and development of power semiconductor devices and its applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5149-5161. (in Chinese))
- [15] 赵争鸣, 袁立强, 鲁挺, 等. 我国大容量电力电子技术与应用发展综述[J]. 电气工程学报, 2015, 10(4): 26-34. (ZHAO Zhengming, YUAN Liqiang, LU Ting, et al. Overview of the developments on high power electronic technologies and applications in China [J]. Journal of Electrical Engineering, 2015, 10(4): 26-34. (in Chinese))
- [16] 孙萌, 余方召, 周荣玲, 等. 节能灯及LED灯的负荷特性研究[J]. 陕西电力, 2015, 43(12): 57-61. (SUN Meng, YU Fangzhao, ZHOU Rongling, et al. Research on load characteristics of energy saving lamp and LED lamp [J]. Shanxi Electric Power, 2015, 43(12): 57-61. (in Chinese))
- [17] 张承慧, 程金, 夏东伟, 等. 变频调速技术的发展及其在电力系统中的应用[J]. 热能动力工程, 2003, 18(5): 439-444. (ZHANG Chenhui, CHENG Jin, XIA Dongwei, et al. Development of frequency conversion-based speed governing technology and its application in electric power systems [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(5): 439-444. (in Chinese))
- [18] KOURO S, MALINOWSKI M, GOPAKUMAR K, et al. Recent advances and industrial applications of multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(8): 2553-2580.
- [19] 宋国兵, 陶然, 李斌, 等. 含大规模电力电子装备的电力系统故障分析与保护综述[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(12): 2-12. (SONG Guobing, TAO Ran, LI Bin, et al. Survey of fault analysis and protection for power system with large scale power electronic equipments [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(12): 2-12. (in Chinese))
- [20] 汤广福, 罗湘, 魏晓光. 多端直流输电与直流电网技术[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(10): 8-17. (TANG Guangfu, LUO Xiang, WEI Xiaoguang. Multi-terminal HVDC and DC-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(10): 8-17. (in Chinese))
- [21] 李碧珊, 王昭, 董妮. IGBT结构设计发展与展望[J]. 电子与封装, 2018, 18(2): 1-8. (LI Bishan, WANG Zhao, DONG Ni. Development and perspective of IGBT structural design [J]. Electronics & Packaging, 2018, 18(2): 1-8. (in Chinese))
- [22] 张文亮, 汤广福, 查鲲鹏, 等. 先进电力电子技术在智能电网中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(4): 1-7. (ZHANG Wenliang, TANG Guangfu, ZHA Kunpeng, et al. Application of advanced power electronics in smart grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(4): 1-7. (in Chinese))
- [23] 郭永明, 刘观起, 张豪, 等. 680 MW 超超临界机组轴流式引风机变频改造研究[J]. 中国电力, 2015, 48(11): 13-15. (GUO Yongming, LIU Guanqi, ZHANG Hao, et al. Retrofit of axial-flow IDF with variable frequency technology in 680-MW ultra-supercritical units [J]. Electric Power, 2015, 48(11): 13-15. (in Chinese))
- [24] 徐振阳. 自并励磁系统在M701F型燃气-蒸汽联合循环发电机组中的应用[J]. 化学工程与装备, 2017(5): 165-167. (XU Zhenyang. Application of self-shunt excitation system in M701F gas-steam combined cycle generator unit [J]. Chemical Engineering & Equipment, 2017(5): 165-167. (in Chinese))
- [25] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904. (ZHOU Xiaoxin, CHEN Shuyong, LU Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1893-1904. (in Chinese))
- [26] 刘爽, 牟龙华, 许旭锋, 等. 电力电子器件故障对微电网运行可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(24): 63-70. (LIU Shuang, MU Longhua, XU Xufeng, et al. Research on power electronic devices failures' effect on microgrid operational reliability [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(24): 63-70. (in Chinese))
- [27] PALENSKY P, DIETRICH D. Demand side management: demand response, intelligent energy systems, and smart loads [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2011, 7(3): 381-388.
- [28] 江泽民. 对中国能源问题的思考[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(3): 345-359. (JIANG Zemin. Reflections on energy issues in China [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2008, 42(3): 345-359. (in Chinese))

- [29] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 国家发展和改革委员会 国家能源局关于印发《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》的通知 [EB/OL]. [2018-12-11]. <http://zfxgk.ndrc.gov.cn/web/fileread.jsp?id=2392>.
- [30] 中共中央纪律检查委员会. 特高压:打造电力输送“超级动脉”[EB/OL]. [2018-12-11]. http://www.ccdi.gov.cn/xbl/201809/t20180928_180584.html.
- [31] 中国拟在建项目网. 中资企业参与的海外火电项目,您关注了吗 [EB/OL]. [2018-12-11]. <http://www.bhi.com.cn/sector/Detail.aspx?id=14813281>.
- [32] 中华人民共和国国务院. 国务院关于印发《中国制造2025》的通知 [EB/OL]. [2018-12-11]. <http://www.miit.gov.cn/n973401/n1234620/n1234622/c4409653/content.html>.
- [33] 国家电网有限公司. 特高压:世界上最先进的输电技术 [EB/OL]. [2018-12-11]. http://www.sgcc.com.cn/html/sgcc_main/col2017082063/2018-09/28/20180928100611160265233_1.shtml.
- [34] 国家能源局. 2011—2013年全国跨区跨省输电线路损耗情况通报 [EB/OL]. [2018-12-11]. http://zfxgk.nea.gov.cn/auto92/201503/t20150330_1896.htm.
- [35] 陆晶晶,贺之渊,赵成勇,等. 直流输电网规划关键技术与展望[J]. 电力系统自动化,2019,43(2):182-191. (LU Jingjing, HE Zhiyuan, ZHAO Chengyong, et al. Key technologies and prospects for DC power grid planning [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 182-191. (in Chinese))
- [36] BLAABJERG F, LISERRE M, MA K. Power electronics converters for wind turbine systems [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2012, 48(2):708-719.
- [37] 杨新法,苏剑,吕志鹏,等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报,2014,34(1):57-70. (YANG Xinfu, SU Jian, LYU Zhipeng, et al. Overview on micro-grid technology [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70. (in Chinese))
- [38] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11):4734-4749.
- [39] 赵剑锋,王浔,潘诗锋. 用电设备电能质量敏感度测试系统研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(22):35-40. (ZHAO Jianfeng, WANG Xun, PAN Shifeng. Study on power quality susceptibility testing system of AC contactor [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(22): 35-40. (in Chinese))
- [40] 关永刚,罗安. 国家自然科学基金电气科学与工程学科研究方向与关键词修订[J]. 中国电机工程学报,2019,39(1):126-129. (GUAN Yonggang, LUO An. Research direction and keyword revision of electrical science and engineering discipline of national natural science foundation of China [J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(1): 126-129. (in Chinese))
- [41] 李强,袁越,谈定中. 储能技术在风电并网中的应用研究进展[J]. 河海大学学报(自然科学版),2010,38(1):115-122. (LI Qiang, YUAN Yue, TAN Dingzhong. Progress on application of energy storage technology in wind power integration [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2010,38(1): 115-122. (in Chinese))
- [42] 王晖,李莹,李文锋,等. 并网逆变器复合电流环引起次/超同步振荡机理研究[J]. 电网技术,2017,41(4):1061-1067. (WANG Hui, LI Ying, LI Wenfeng, et al. Mechanism research of subsynchronous and supersynchronous oscillations caused by compound current loop of grid-connected inverter [J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1061-1067. (in Chinese))
- [43] 严亚兵,苗淼,李胜,等. 静止坐标系下变换器电流平衡-内电势运动模型:一种装备电流控制尺度物理化建模方法[J]. 中国电机工程学报,2017,37(14):3963-3972. (YAN Yabing, MIAO Miao, LI Sheng, et al. Current-balancing driven internal voltage motion model of voltage source converter in stationary frame: a physical modeling method in current-control timescale [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(14): 3963-3972. (in Chinese))
- [44] 穆钢,蔡婷婷,邸睿,等. VSC-HVDC交直流混合系统多时间尺度暂态特性建模与分析[J]. 可再生能源,2019,37(3):418-426. (MU Gang, CAI Tingting, Di Rui, et al. Modeling and analysis of multi-time scale transient characteristics of VSC-HVDC/AC hybrid system [J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(3): 418-426. (in Chinese))
- [45] 袁小明,程时杰,胡家兵. 电力电子化电力系统多尺度电压功角动态稳定问题[J]. 中国电机工程学报,2016,36(19):5145-5154. (YUAN Xiaoming, CHENG Shijie, HU Jiabing. Multi-time scale voltage and power angle dynamics in power electronics dominated large power systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5145-5154. (in Chinese))
- [46] RODRIGUEZ J, KAZMIERKOWSKI M P, ESPINOZA J R, et al. State of the art of finite control set model predictive control in power electronics [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2013, 9(2):1003-1016.
- [47] 肖湘宁,廖坤玉,唐松浩,等. 配电网电力电子化的发展和超高次谐波新问题[J]. 电工技术学报,2018,33(4):707-720. (XIAO Xiangning, LIAO Kunyu, TANG Songhao, et al. Development of power-electronized distribution grids and the new supraharmonics issues [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(4): 707-720. (in Chinese))

- [48] 伊曼纽尔. 功率定义及功率流的物理机制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2014.
- [49] 肖湘宁, 罗超, 陶顺. 电气系统功率理论的发展与面临的挑战[J]. 电工技术学报, 2013, 28(9): 1-10. (XIAO Xiangning, LUO Chao, TAO Shun. Development and challenges of power theory in electrical power system [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(9): 1-10. (in Chinese))
- [50] 林海雪. No. 6 电功率理论的概况与发展[J]. 供用电, 2016, 33(4): 32-40. (LIN Haixue. NO. 6 general situation and development of power theory [J]. Distribution & Utilization, 2016, 33(4): 32-40. (in Chinese))
- [51] 马明, 尹靖元, 弓新月, 等. 基于混合开关器件的高压直流断路器拓扑[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 31-38. (MA Ming, YIN Jingyuan, GONG Xinyue, et al. Topology of high voltage dc circuit breaker based on hybrid switching device [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 31-38. (in Chinese))
- [52] 贾海鹏, 尹靖元, 李金科, 等. 基于晶闸管的混合式高压直流断路器重合闸控制策略[J]. 高电压技术, 2019, 45(1): 46-54. (JIA Haipeng, YIN Jingyuan, LI Jinke, et al. Auto-reclosing control strategy of thyristors-based high voltage DC hybrid circuit breaker [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(1): 46-54. (in Chinese))
- [53] PEREZ M A, BERNET S, RODRIGUEZ J, et al. Circuit topologies, modeling, control schemes, and applications of modular multilevel converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 4-17.
- [54] 王学梅, 张波, 吴海平. 基于失效物理的功率器件疲劳失效机理[J]. 电工技术学报, 2019, 34(4): 717-727. (WANG Xuemei, ZHANG Bo, WU Haiping. A review of fatigue mechanism of power devices based on physics-of-failure [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(4): 717-727. (in Chinese))

(收稿日期: 2019-10-31 编辑: 高建群)

· 简讯 ·

南京水利科学研究院牵头研发的首艘大坝载人潜水器“禹龙号”在水库试验成功

2020年6月28日至7月2日,南京水利科学研究院牵头研发的水利水电行业首艘大坝载人潜水器“禹龙号”在浙江绍兴汤浦水库试验成功。该潜水器由南京水利科学研究院联合中船重工702研究所、杭州华能工程安全科技股份有限公司共同研发。

“禹龙号”载人潜水器研发,是“十三五”国家重点研发计划“水资源高效开发利用”重点专项首批立项项目,也是“重大水利工程大坝深水检测及突发事件检测预警与应急处置”项目中投入最大、最具原创性的标志性成果。该项目由南京水利科学研究院牵头,有研发“蛟龙”号、“深海勇士”号及全海深载人潜水器等的中船重工702研究所和专门从事大坝水下检测与修补加固的杭州华能工程安全科技股份有限公司参加研究。2016年7月立项以来,在国家科技部、水利部、21世纪议程管理中心的组织领导下,参研单位团结协作、精心组织、潜心研究,先后经历了方案设计、初步设计、细部设计,于2019年4月完成总装联调,先后水池下潜试验35次,完成了手操航行、自动控制、水下作业、应急安全、驾驶员培训等37项考核试验。本次试验表明,“禹龙号”潜水器功能可靠、性能优良,具备水库试验和应用示范条件。

本次水库试验是检验“禹龙号”载人潜水器技术与装备的安全性、先进性和实用性的重要环节,共进行了动力、姿态、导航、声呐探测、水下观察、通信、水下清理及缺陷探测示踪等多功能及多性能试验,实现了试验的预期目标,为下阶段深水环境试验与示范应用积累了经验。

(本刊编辑部供稿)