

智能电网与能源网融合中的新材料与新装备技术

宁圃奇^{1,2}, 韦统振^{1,2}, 肖立业^{1,2}, 齐智平¹, 严萍^{1,2}

(1. 中国科学院电工研究所, 北京 100190; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 新材料技术及其新装备作为未来智能电网与能源网融合的重要组成部分, 对推动我国能源革命, 促进能源转型以及刺激能源行业创新发展具有重大作用。本文以“融合网”为对象, 重点探讨了新材料及其新装备的关键技术, 并详细分析了发展新材料及其新装备对我国能源战略布局与发展的重要意义。基于国内外发展现状, 本文重点讨论了新材料及其新装备在实现“融合网”过程中可能遇到的主要问题, 分析了面向“融合网”新材料及其装备的发展趋势与挑战。据此本文在最后提出发展建议, 力求助力我国新材料及其新装备的建设, 推动“融合网”的深度发展。

关键词: 新材料; 新装备; 融合网

中图分类号: TM725 **文献标识码:** A

New Materials and Related New Equipment Targeting Integration of Smart Grid and Energy Grid

Ning Puqi^{1,2}, Wei Tongzhen^{1,2}, Xiao Liye^{1,2}, Qi Zhiping¹, Yan Ping^{1,2}

(1. Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: New materials and related new equipment, as a significant part of integration of the smart grid and the energy grid, plays a critical part in promoting China's energy revolution, facilitating the energy structure transformation, and stimulating the innovative development of the energy industry. In the context of integrated grid, the key technology of new materials and related new equipment, and their important contributions to China's energy strategic layout and development are first discussed in this paper. This paper also reveals some dominant restraints, trends and challenges of new materials and related new equipment based on the state-of-the-art status of the integrated grid. In this basis, several suggestions are proposed at the end of this paper, striving to facilitate construction of China's new materials and related new equipment, and propel in-depth development of the integrated grid.

Keywords: new material; new equipment; integrated grid

一、前言

清洁能源的巨大变革使得长距离超大容量的电力输送、超大规模电网的安全稳定、电网电能质量与供电可靠性的保障以及电网与用电终端效率的

提高成为未来电网发展需要重点解决的问题 [1~3]。超导电力技术、新型导体、新型绝缘技术、新型半导体器件、新型传感技术、储能技术等在对未来电网的重大挑战方面将发挥重大或不可替代的作用, 能够为未来智能电网与能源网的融合提供有力

收稿日期: 2018-06-22; 修回日期: 2018-06-25

通讯作者: 宁圃奇, 中国科学院电工研究所, 研究员, 主要从事功率器件特性建模及模块封装技术研究; E-mail: npq@mail.iee.ac.cn

资助项目: 中国工程院咨询项目“我国能源技术革命的技术方向和体系战略研究”(2015-ZD-09)

本刊网址: www.enginsci.cn

的技术支撑 [4,5]。

能源和电力工业是国民经济的重要基础工业，是国家经济发展战略中的重点和先行产业 [6]。但我国能源产地和需求地分布极不均衡，大部分能源资源分布在西部和北部，而需要大量能源的用户则集中在东部沿海地区，这种能源供需的地理分布失衡决定了我国电能输送具有跨区域、远距离和大规模的特点 [7]。当前，我国电网的损耗约为 7.5%，以 2014 年总发电量 5.5×10^{12} kW·h 计算，电网的损耗高达 4×10^{11} kW·h，相当于 4 座三峡电站的发电量。考虑到未来可再生能源的大量接入以及电能终端能源中的比重不断提高，如果没有技术上的进步，则总的输电损耗将不可避免地增加 [8~10]。因此，采用新型材料技术及其新装备实现大容量、远距离、高效率的电力输配成为十分迫切的任务 [11~13]。

为此，本文面向未来智能电网与能源网的融合，分析了新材料及其新装备的关键技术，探讨了推动新材料及其新装备发展对我国能源领域的重大意义。并对国内外新材料及其新装备在能源领域的应用现状及存在问题进行了简要分析。立足现存问题，对我国下一步新材料及其新装备的布局提出了若干发展建议，以支撑“融合网”战略发展。

二、面向“融合网”的新材料及其新装备技术

（一）面向“融合网”的新材料技术

由分布式发电部件、储能介质、可控负荷和变流装置等有机融合的分布式能源系统，借助信息电子和电力电子技术，能够智能地调控本地资源，充分发挥其互补性优势，为本地用户和配电网提供优

质、可靠、可调度的电能，成为智能电网中重要的研究内容。各类新材料是电网系统中能量变换、电力传输和运行控制的直接载体，直接决定着微网的运行效率、安全可靠性和系统成本，是智能电网中最为关键的元素之一 [4,9,14]。

磁性材料是电网应用的基础必备材料，先进电工磁性材料探索和制备可极大推动电工装备的持续发展和新装备的研制，可提高电网智能电力设备的设计水平和效率，减小电力设备的体积和质量 [15~17]。将磁性材料应用于电网智能传感器，将有助于实现电网信息采集和状态监测，提高新型电力系统运行的可靠性。因此，如图 1 所示，利用磁性材料提升电网智能电力设备和传感器的性能，是“融合网”提高效率的重要手段，也是“融合网”可靠运行的重要保障。

高效率和高可靠性是未来“融合网”的必然发展趋势，研究电阻率低、机械强度高、耐腐蚀、磨损性能好、可加工性好、性价比高的新型导电材料，如高性能铜/铜合金材料、铜/碳纳米管复合材料、碳-金属合金材料等，将对未来电网发展具有重大影响。如果此类新材料能把目前导线的电阻率降低 1/3，每年节约的电能将高达 1×10^{11} kW·h，超过三峡水电站的年总发电量 [12]。此外电动机、电力机车和家电等各种用电终端的导线采用新型高导材料，将会进一步降低能耗，有效缓解我国东部地区能源短缺和环境污染等问题 [6,18,19]。

未来特高压输电电压等级的提高与网络规模的扩大，以及气电混合网络传输中对绝缘新结构和新技术的需求，使得“融合网”对绝缘系统的结构和材料提出了新的要求；直流输电导致的空间电荷积聚效应使局部空间电场产生畸变进而会加速绝缘材

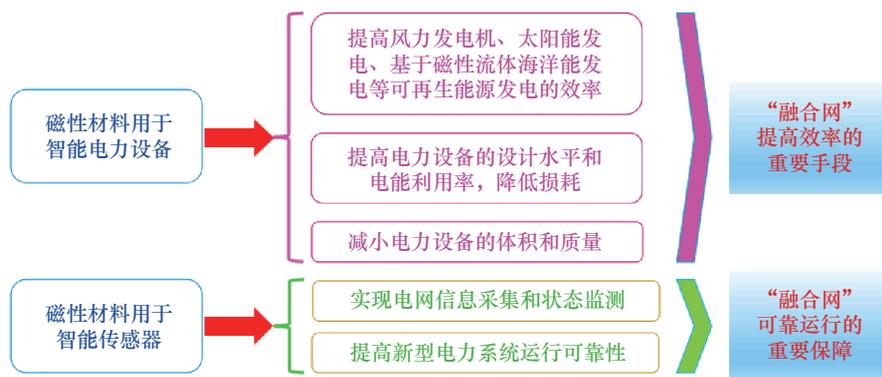


图 1 新磁性材料对“融合网”的促进作用

料的老化,无线输电网络的空间绝缘及其能量传输存在限制,输电系统中的空间电荷问题将会对绝缘设备造成影响;电力电子设备的引入会导致更加频繁的瞬时脉冲过电压,这改变了绝缘设备的工作环境[20]。因此,新型电工绝缘材料将为未来“融合网”提供重要的支撑。

以碳化硅(SiC)和氮化镓(GaN)为代表的宽禁带半导体材料,是继以硅和砷化镓为代表的第一代、第二代半导体材料之后迅速发展起来的新型半导体材料。和硅材料相比,SiC和GaN具有10倍以上的击穿电场强度和3倍的禁带宽度[21]。因此,SiC和GaN器件具有极低的导通比电阻、很高的开关速度和频率。此外,SiC和GaN电力电子器件的最大理论工作温度是硅器件的4倍以上,有助于散热系统的优化和功率密度的进一步提升,更能满足电网的特殊应用[22]。宽禁带半导体器件以其优异的性能,将广泛应用于未来电网的发电、输电和用电侧中,必将给智能电网带来革命性的变化。

(二) 面向“融合网”的新装备技术

1. 基于新型半导体器件的电力电子装备将广泛应用

以新型半导体器件制造的新型电力电子装备,以其优异的性能将广泛应用于未来电网的发电、输电和用电侧,如绿色能源开发、下一代电网、轨道交通、电动汽车、大型节能电机以及消费电子等领域。由分布式发电部件、储能介质、可控负荷和变流装置等有机融合的分布式能源系统,借助信息电子和电力电子技术,能够智能地调控本地资源,充分发挥其互补性优势,从而为本地用户和配电网提供优质、可靠、可调度的电能,成为智能电网中重要的研究内容[19~22]。功率变换器是电网系统中能量变换、电力传输和运行控制的载体,决定着微网的运行效率、安全可靠性和系统成本,是智能电网中最为关键的电力装备之一[3,19]。

2. 状态的充分监测与感知是未来“融合网”的重要特征

随着现代电力技术的发展,电力电子器件已经成为电力调控的重要手段,对电力装备运行的可靠性提出了更高的要求;电力电子技术也让可再生能源从集中式并网向分布式供能发展,分布式的电网体系对于运行状态的监控以及感知提出

了更高的要求[23]。因此传统的高电压及大电流的测量手段将面临严峻的考验。随着光电子技术的高速发展,基于激光和光纤的传感技术得到了极大地拓展,考虑到光学检测系统具有天然良好的绝缘性和抗干扰能力,较高的测量精度和容易小型化、可分布组网等优越性,可满足未来能源系统的“融合网”中需要的实时分布监控的要求,因此大力发展基于光学的测量、监控及感知系统是“融合网”的重要发展方向。

3. 储能在未来“融合网”中不可或缺

大力发展可再生能源已成为我国的重要国策,然而,由于风力发电和光伏发电等可再生能源发电具有随机性和间歇性的特点,当它们大量接入电网时,将对电网的安全、可靠、高效运行带来了很大的挑战[24]。另一方面,我国经济长期保持高速发展,电力负荷增长很快,电力负荷的结构变化也很快,电力供需矛盾日益突出,致使电力负荷和峰谷差有不断增大的趋势。这使电力系统必须留有较大的备用容量,导致电力系统中设备运行效率降低[25]。储能装置(储电、储冷、储热等)可以为电网和能源网提供能量缓冲作用,作为网络中的特殊单元,可以被灵活地控制和调度。在电网的削峰填谷、改善电能质量、提高供电可靠性、提高可再生能源并网发电率、提高能源转换效率等方面的作用越来越重要和不可或缺,是实现电力系统安全、可靠、清洁、高效、经济的必要环节,也是实现智能电网与能源网融合的重要功能单元。

4. 超导技术广泛应用于未来“融合网”

超导技术可以广泛应用于超导输电电缆、超导变压器、超导发电机、超导电动机、超导限流器、超导储能系统等多方面[14,26]。表1列出了各种超导电力设备对电网的作用和影响。由此可见,超导输电电缆将可以为未来电网提供一种低损耗、大容量的电力输送方案,有助于解决现有输电损耗高和输电走廊紧张问题;超导限流器可以有效降低电网的短路电流从而保障大电网的安全稳定性;超导储能系统可以对波动的可再生能源电力进行有效的正补偿和负补偿,从而提高电网吸纳可再生能源的能力;超导变压器、超导发电机和超导电动机在提高电气设备效率、减少占地面积方面也具有不可替代的优势。因此,如果超导技术能够实现电网中的广泛应用,则可以有效应对可再生能源变革对电网

表 1 各种超导电力设备对未来电网的作用和影响

应用	特点	对未来电网的作用和影响
超导限流器	正常时阻抗很小，故障时呈现一个大阻抗 集检测、触发和限流于一体 反应和恢复速度快 对电网无副作用	大幅度降低短路电流 提高电网稳定性 改善供电可靠性 保护电气设备 降低建设成本和改造费用
超导电缆	功率输送密度高 损耗小、体积小、重量轻 单位长度电抗值小 液氮冷却	实现大容量高密度输电 符合环保和节能发展要求 减少城市用地 缩短电气距离 有助于改善电网结构
超导变压器	极限单机容量高 损耗小、体积小、重量轻 液氮冷却	减少占地面积 符合环保和节能发展要求
超导储能系统	反应速度快 转换效率高 可短时向电网提供大功率支撑	快速进行功率补偿 改善大电网稳定性 改善电能品质 改善供电可靠性
超导电动机	极限单机容量高 损耗小、体积小、重量轻	减少损耗 减少占地面积
超导发电机	极限单机容量高 损耗小、体积小、重量轻 大型超导发电机的同步电抗小 过载能力强	减少损耗 减少占地面积 提高电网稳定性 超导同步调相机可用于无功功率补偿 超导风力发电机在大容量海上风力发电中具有比较优势

带来的一系列重大挑战，对未来电网的发展产生重大意义，因而被美国能源部认为是 21 世纪电力工业唯一的高技术储备。

三、面向“融合网”新材料及其装备的发展趋势与挑战

本研究方向具有鲜明的创新性和前沿性，一旦取得突破将给智能电网发展带来根本性的变革，满足国家经济、社会发展对节能减排和能源科技创新的重大需求，为节约资源、降低能耗、保护环境等做出积极贡献。

1. “融合网”对超导新材料及其装备的需求

近年来，我国在新超导体的发现、超导物理机制的认识、超导材料的制备和超导技术的发展等方面取得了长足的进步，为应对新能源革命对电网带来的重大挑战提供了一条可能的技术途径 [27]。近年超导电力技术主要呈现以下发展趋势：①向更高电压等级或更大容量方向发展；②应用原理向多样化和功能集成化方向发展；③与智能电网技术的发

展需求相结合；④开始更多面向直流电网发展需求。但要真正实现规模应用，还存在多方面的问题亟待解决，主要包括：①需要提高超导材料的临界温度；②需要大幅提高辅助设备（主要是低温和制冷设备）的长期运行可靠性；③需要进一步大幅降低高温超导材料的价格。

2. “融合网”对高导电材料和新型磁性材料的需求

我国高导电材料和新型磁性材料的研究已经取得了一定进展，但研究刚刚起步，突破性成果并不多，目前主要研究重点是：①新型材料微观结构的形成及作用机制；②新型材料加工成型中组织形成机制及演化规律；③高强度负载下新材料结构、组织与性能耦合响应机制。

3. “融合网”对绝缘材料的需求

高电压绝缘材料新技术未来的发展方向就是针对未来电网需求，研发能够在较高温度和较高电场等恶劣环境下正常稳定运行的绝缘材料，但这其中面临的困难也是显而易见的，无论是成本和绝缘效果的平衡，还是环境保护对未来绝缘材料提

出的新的需求,都是在未来的研究中需要考虑的问题[28,29]。但总体而言,我国的高电压外绝缘材料技术仍是向着低能源及成本消耗、高安全性和运行稳定性以及可持续发展等方向不断发展。

4.“融合网”对电力电子新器件的需求

目前市场上主流的高频全控器件基本上被国外所垄断,我国尚未掌握其关键技术,导致相关重大装备受制于人。同时,国际上第三代半导体材料和器件技术的发展水平日新月异,对我国电力电子技术和产业开始了新一轮的冲击[30~32]。需要尽快开展的重点研究包括:SiC、GaN等宽禁带半导体材料的大尺寸、低缺陷、高可靠制备;半导体材料的表面沟道钝化技术;新型半导体材料的研制和功能解析;更高电压等级、更大电流容量、更低导通电阻、更快开关速度的硅基电力电子器件的设计和制备;多芯片多模块的功率器件组合扩容和串并联技术;宽温度特性、高运行特性的新一代电力电子器件的新结构、新工艺、新原理和新设计;电力电子功率器件的先进封装、驱动、保护技术;电力电子功率器件的可靠性分析和应用技术等[33]。

5.“融合网”对新型传感技术的需求

光纤传感新技术方面,主要向纳米光学发展,主要利用近场、表面等离激元、光子晶体等技术对敏感效应进行加强,从而进一步提高传感器的灵敏度[32]。在应用方面,目前全光纤的传感器在环境稳定性和度稳定性方面还有大量的研究工作要做。光纤技术的发展可以将光学传感器以光的形式联系起来,形成真正的全光纤传感器网络,建立多元的全光纤电力设备状态检测系统是未来智能电网发展的大势所趋。

6.“融合网”对新型储能技术的需求

我国尚未完全掌握新型储能技术,主要瓶颈有:压缩空气储能中高负荷压缩机技术,系统研发尚处在示范阶段;飞轮储能的高速电机、高速轴承和高强度复合材料等关键技术尚未突破;化学电池储能中关键材料制备与批量化/规模技术,特别是电解液、离子交换膜、电极、模块封装和密封等与国际先进水平仍有明显差距;超级电容器中高性能材料和大功率模块化技术,以及超导储能中高温超导材料等尚未实现突破[34]。另外,一些新型储能技术的研究和知识产权布局没有得到足够的重视和支持。

四、发展面向“融合网”新材料战略建议

(一) 推动超导技术与新装备技术融合, 培育能源产业新发展

超导技术一旦取得重大突破,将同时对电力、能源、交通、通信、医疗、科学研究等带来重大的影响。因此建议国家科技部门以实现超导电力技术的现实应用为目标牵引,加强总体设计和制定近、中、远期发展战略路线图,突出目标驱动导向,通过国家重点研发计划予以长期稳定支持[33,34]。国家也只有通过对类似的基础性、前瞻性的高风险项目的长期稳定支持,才可能实现重大原创突破和科技创新能力的全面提升[35]。作为重要切入点,建议在我国现有超导研究的基础上,启动更高运行温度(例如液化天然气温度及以上)的超导输电示范工程项目,通过15~20年的努力,建成百公里级超导输电示范系统。围绕该项目,重点突破示范目标所涉及的超导物理基础、高温超导材料制备关键技术、长寿命高可靠性低温与制冷关键技术、超导输电电缆制造关键技术,以点带面,全面促进我国超导技术在各个领域的应用发展[36]。

(二) 加速高性能导电、绝缘、磁性材料的研究与开发, 补齐基础设施短板

结合目前国家战略需求和智能电网对导电材料的具体需求,建议开展以下几方面研究:①优先开展高性能导电材料、绝缘材料、磁性材料的研究与开发,解决材料在制备、加工过程中的关键科学问题;②推动新型导电材料、绝缘材料、磁性材料在国家电网等重大领域的应用和验证,制备大容量、低能耗、远距离输电电缆与变压器等[37];③基于新型导电材料、绝缘材料、磁性材料的电气性能、热性能,制备电力电子装备;④建设完善的新型导电材料、绝缘材料、磁性材料性能测试平台,建立行业或国家标准,加强学科建设和人才培养。

(三) 深化电力电子技术器件领域建议, 实现独立自主

为更好地促进我国电力电子技术器件的自主创新,建立强大、完整、独立的电力电子器件产业,从政府规划、技术研发、产业推进和条件支撑等四个方面提出以下建议:①在政府规划方面,全面提

高电力电子器技术的地位，列入国家中长期规划；②在技术研发方面，以器件为核心，从材料、器件和应用三个环节层层推进，全面掌握核心关键技术；③在产业推进方面，着重提高电力电子器件产业核心竞争力，促进产业健康发展；④在条件支撑方面，加强组织领导，建立完备的平台、人才体系 [38]。

（四）完善储能装备系统级规划，成为“融合网”支撑

在具体技术路线规划方面，有如下五点建议：

①必须明确储能装备（本体）技术和储能应用技术的区别和联系；②对于大型并网示范项目，应该借鉴或利用已有电网模拟系统，论证关键应用技术问题，先模拟后建设；③以具体储能应用场景需求以及技术发展所处不同等级进行规划；④加强储能项目立项与结题的知识产权竞争力评估和技术应用前景评估；⑤建立储能产业联合创新研究机构，重视产业规划与布局 [39]。

五、结语

新材料及其新装备技术是支撑未来智能电网与能源网融合的重要基础，本文首先阐述了新材料及其新装备的主要技术，比较分析了技术特点，并指出新材料及其新装备对能源市场化改革、能源系统智能化升级以及推动能源行业创新发展的重要意义。然后分析总结了我国新材料与新装备仍存在的短板和突出问题。最后，本文针对面向“融合网”需求，进一步提炼了对新材料及其新装备的建议。

参考文献

[1] 肖立业. 中国战略性新兴产业研究与发展: 智能电网 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2013.
Xiao L Y. R & D of China's new strategy industry: Smart grid [M]. Beijing: China Machine Press, 2013.

[2] 李立涅, 张勇军, 陈泽兴, 等. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(11): 1-9.
Li L C, Zhang Y J, Chen Z X, et al. Merger between smart grid and energy-net: Mode and development prospects [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(11): 1-9.

[3] Bahrami S, Sheikhi A. From demand response in smart grid toward integrated demand response in smart energy hub [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 650-658.

[4] 孙宏斌, 郭庆来, 潘昭光. 能源互联网: 理念、架构与前沿展望 [J]. 电力系统自动化, 2015 (19): 1-8.
Sun H B, Guo Q L, Pan Z G. Energy Internet: Concept, architec-

ture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015 (19): 1-8.

[5] Zhong Q C, Konstantopoulos G C, Ren B, et al. Improved synchronverters with bounded frequency and voltage for smart grid integration [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 786-796.

[6] Hassan H A H, Pelov A, Nuaymi L. Integrating cellular networks, smart grid, and renewable energy: Analysis, architecture, and challenges [J]. IEEE Access, 2017, 3: 2755-2770.

[7] Athari M H, Wang Z F. Modeling the uncertainties in renewable generation and smart grid loads for the study of the grid vulnerability [C]. Melbourne: Innovative Smart Grid Technologies Conference, 2016.

[8] 张扬, 沈俊, 孙东方. 智能电网与能源网融合的模式及其发展前景 [J]. 农村电气化, 2017 (9): 8-9.
Zhang Y, Shen J, Sun D F. Energy Internet: Concept, architecture and frontier outlook [J]. Rural Electrification, 2017 (9): 8-9.

[9] 李建林, 田立亭, 来小康. 能源互联网背景下的电力储能技术展望 [J]. 电力系统自动化, 2015 (23): 15-25.
Li J L, Tian L T, Lai X K. Outlook of electrical energy storage technologies under energy internet background [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015 (23): 15-25.

[10] Zhang Y, Rahbari-Asr N, Duan J, et al. Day-ahead smart grid cooperative distributed energy scheduling with renewable and storage integration [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(4): 1739-1748.

[11] Bhalshankar S S, Thorat C S. Integration of smart grid with renewable energy for energy demand management: Puducherry case study [C]. Paralakhemundi: International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System, 2017.

[12] 蒲天骄, 刘克文, 陈乃仕, 等. 基于主动配电网的城市能源互联网体系架构及其关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2015 (14): 3511-3521.
Pu T J, Liu K W, Chen N S, et al. Design of ADN based urban energy internet architecture and its technological issues [J]. Proceedings of the CSEE, 2015 (14): 3511-3521.

[13] 田世明, 栾文鹏, 张东霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术 [J]. 中国电机工程学报, 2015 (14): 3482-3494.
Tian S M, Luan W P, Zhang D X, et al. Technical forms and key technologies on energy Internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2015 (14): 3482-3494.

[14] 刘恒, 夏水斌, 何行, 等. 从智能电网到能源互联网的探索 [J]. 仪表技术, 2018 (1): 38-40.
Liu H, Xia S B, He X, et al. The exploration from smart grid to energy internet [J]. Instrumentation Technology, 2018 (1): 38-40.

[15] 齐正平. 我国分布式能源发展现状分析与建议 [J]. 电器工业, 2017 (12): 22-29.
Qi Z P. Analysis and suggestions on the current situation of distributed energy development in China [J]. China Electrical Equipment Industry, 2017 (12): 22-29.

[16] Rahbar K, Chai C C, Zhang R. Energy cooperation optimization in microgrids with renewable energy integration [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1482-1493.

[17] Gottwalt S, Gärtner J, Schmeck H, et al. Modeling and valuation of residential demand flexibility for renewable energy integration [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(6): 2565-2574.

[18] Rahbar K, Moghadam M R V, Panda S K, et al. Real-time shared

- energy storage management for renewable energy integration in smart grid [C]. Washington DC: Innovative Smart Grid Technologies Conference, 2016.
- [19] 包铭磊, 丁一, 邵常政. 国际能源系统转型对我国能源互联网建设的借鉴 [J]. 分布式能源, 2017 (2): 11–19.
Bao M L, Ding Y, Shao C Z. Reference of international energy system transformation to energy internet construction in China [J]. Distributed Energy, 2017 (2): 11–19.
- [20] 蒋菱, 袁月, 王峥, 等. 智能电网创新示范区能源互联网评估指标及评价方法 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2016 (1): 39–45.
Jiang L, Yuan Y, Wang Z, et al. Evaluation index system and comprehensive evaluation method of energy Internet in innovative demonstration area of smart grid [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016 (1): 39–45.
- [21] 薛飞, 李刚. 能源互联网的网络化能源集成探讨 [J]. 电力系统自动化, 2016 (1): 9–16.
Xue F, Li G. Discussion on networking energy integration for energy Internet [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016 (1): 9–16.
- [22] 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 Z M, Zhang J M, Sheng K. Status and development of power semiconductor devices and its applications [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(29): 5149–5161.
- [23] Bhalshankar S S, Thorat C S. Integration of smart grid with renewable energy for energy demand management: Puducherry case study [C]. Bangalore: International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System, 2017.
- [24] Manshadi S, Khodayar M. A hierarchical electricity market structure for the smart grid paradigm [C]. Denver: Transmission and Distribution Conference and Exposition, IEEE, 2016.
- [25] 陈阿平. 从智能电网到能源互联网及对宝钢电能使用的启示 [J]. 宝钢技术, 2015 (5): 1–6.
Chen A P. Development of energy internet from the smart grid and revelation of electricity use in Baosteel [J]. Bao-Steel Technology, 2015 (5): 1–6.
- [26] 马衍伟. 实用化超导材料研究进展与展望 [J]. 物理, 2015, 44(10): 674–683.
Ma Y W. Recent developments of practical superconducting materials [J]. Physics, 2015, 44(10): 674–683.
- [27] Tabari M, Yazdani A. An energy management strategy for a DC distribution system for power system integration of plug-in electric vehicles [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 659–668.
- [28] Andrén F P, Strasser T, Langthaler O, et al. Open and interoperable ICT solution for integrating distributed energy resources into smart grids [C]. Pune: IEEE 21st International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, 2016.
- [29] Xu Y, Yang Z, Gu W, et al. Robust real-time distributed optimal control based energy management in a smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1568–1579.
- [30] 曹军威, 杨明博, 张德华, 等. 能源互联网——信息与能源的基础设施一体化 [J]. 南方电网技术, 2014 (4): 94–95.
Cao J W, Yang M B, Zhang D H, et al. Energy Internet: An infrastructure for cyber-energy integration [J]. Southern Power System Technology, 2014 (4): 94–95.
- [31] 侯健敏, 周德群. 我国分布式能源的政策演变与三阶段、四模式发展 [J]. 经济问题探索, 2015 (2): 126–132.
Hou J M, Zhou D Q. The evolution of China's distributed energy policy and development of the three stage and the four mode [J]. Inquiry Into Economic Issues, 2015 (2): 126–132.
- [32] 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 Z M, Yuan L Q, Lu T, et al. Overview of the developments on high power electronic technologies and applications in China [J]. Electrical Manufacturing, 2015, 10(4): 26–34.
- [33] 赵乃勤, 何春年. 原位合成碳纳米管增强金属基复合材料 [M]. 北京: 科学出版社, 2014.
Zhao N Q, He C N. In situ synthesis of carbon nanomaterials reinforced metal matrix composites [M]. Beijing: China Science Publishing & Media Ltd., 2014.
- [34] Häßler W, Herrmann M, Rodig C, et al. Further increase of the critical current density of MgB₂ tapes with nanocarbon-doped mechanically alloyed precursor [J]. Superconductor Science & Technology, 2008, 21(6): 52.
- [35] Nagamatsu J, Nakagawa N, Muranka T, et al. Superconductivity at 39K in magnesium diboride [J]. Nature, 2001, 410: 63–64.
- [36] Rogalla H, Kes P H. One hundred years of superconductivity [M]. New York: CRC Press, 2011.
- [37] Melhem F Y, Moubayed N, Grunder O. Residential energy management in smart grid considering renewable energy sources and vehicle-to-grid integration [C]. Saskatoon: Electrical Power and Energy Conference, 2016.
- [38] 孙伟卿, 田坤鹏, 谈一鸣, 等. 全球能源互联网关键技术与研究展望 [J]. 自动化仪表, 2017, 38(1): 1–6.
Sun W Q, Tian K P, Tan Y M, et al. Key technologies and research prospects of global energy internet [J]. Process Automation Instrumentation, 2017, 38(1): 1–6.
- [39] 董朝阳, 赵俊华, 文福拴, 等. 从智能电网到能源互联网: 基本概念与研究框架 [J]. 电力系统自动化, 2014 (15): 1–11.
Dong C Y, Zhao J H, Wen F Q, et al. From smart grid to energy internet: Basic concepts and research framework [J]. Automation of Electric Power Systems, 2014 (15): 1–11.