

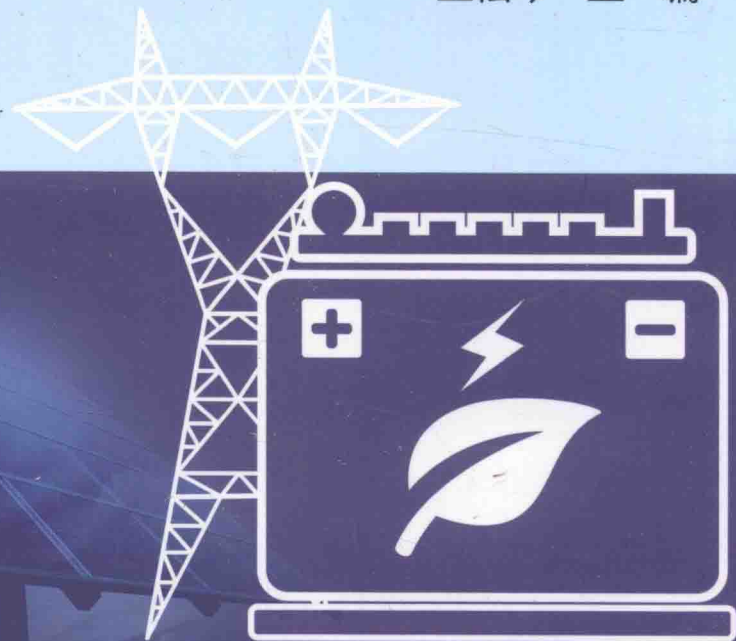


国家电网公司
电力科技著作出版项目

智能电网关键技术丛书

大规模储能技术 及其在电力系统中的应用

中国电力科学研究院 组 编
王松苓 主 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

智能电网关键技术丛书

大规模储能技术 及其在电力系统中的应用

中国电力科学研究院 组 编

王松苓 主 编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

加强智能电网关键技术的研发,共同推进智能电网建设与技术发展,对推动我国产业结构调整,加快经济发展方式转变和培养战略新兴产业具有重要意义。在当前各企业日益关注智能电网的时期,《智能电网关键技术丛书》的出版恰逢其时,可给各方研究提供有益的借鉴,避免设备创新风险,促进社会进步。

本分册为《大规模储能技术及其在电力系统中的应用》,包括概述、储能技术的发展概况、储能技术在电力系统中的应用前景、电池储能的系统集成及管理技术、储能系统的功率调节与控制、储能技术在配电网中的优化配置及储能技术在电力系统中的实践与展望。

本丛书可供从事智能电网研究、运行、开发、管理人员与设备制造、研制技术人员,以及相关专业人员使用和参考。

图书在版编目(CIP)数据

大规模储能技术及其在电力系统中的应用 / 王松岑主编;
中国电力科学研究院组编. —北京:中国电力出版社,2016.6
(智能电网关键技术丛书)

ISBN 978-7-5123-8961-8

I. ①大… II. ①王…②中… III. ①大规模-储能-技术-应用-电力系统 IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第037255号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年6月第一版 2016年6月北京第一次印刷

710毫米×980毫米 16开本 8.75印张 150千字

印数0001—1500册 定价36.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

编 委 会

主 编 王松岑

副 主 编 来小康 惠 东

编写人员 田立亭 杨 凯 官亦标 杨水丽

闫 涛 陈继忠 刘家亮 丘 明

金 翼 李建林 李相俊 李 蓓

高 飞 胡 晨 胡 娟 侯朝勇

徐守平 刘道坦 刘赞甲 渠展展

序

进入 21 世纪后,大规模开发利用化石能源带来的能源危机、环境危机凸显,建立在化石能源基础上的电力工业面临重大挑战,新一轮能源变革正在世界范围内蓬勃兴起。世界范围内电力系统面临如下问题:一是应对大型风能、太阳能等可再生能源发电快速增长对电网的挑战;二是适应小容量分布式电源、电动汽车等对用电结构产生变化的影响;三是适应政府节能减排管制和低碳经济发展的需要;四是网络技术向以能源体系为代表的实体经济渗透和新产业革命的推动。欧美发达国家从应对气候变化、保障能源供应安全、促进经济增长的需要出发,相继提出和建设智能电网。实际上,智能电网正是应对这些重大需求而产生的,是世界电力工业发展的新趋势。

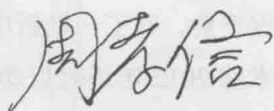
我国高度重视智能电网研究和建设,国务院总理李克强 2014 年主持召开节能减排及应对气候变化工作会议时指出“控制能源消费总量,提高使用效率,调整优化能源结构,积极发展风电、核电、水电、光伏发电等清洁能源和节能环保产业,开工一批新项目,大力推广分布式能源,发展智能电网。”国家科学技术部 2012 年适时启动智能电网重大专题研究,大力推动智能电网关键技术研究和应用示范。国家电网公司 2009 年根据电网建设的整体需要和智能电网顶层设计,率先启动了智能电网的研究、应用示范与工程建设;开展了智能变电站的持续实践,研制完成了智能电网调度控制系统、输电线路状态监测系统并得到广泛应用;构建了规模大、数据处理能力强的用电信息采集系统及电动汽车充换电服务网络;建成了中新天津生态城、张北风光储输等一批智能电网综合示范工程。

实施智能电网发展战略不仅能使用户获得高安全性、高可靠性、高质量、高效率 and 价格合理的电力供应,还能提高国家的能源安全、改善环境、推动可

持续发展，同时能够激励市场不断创新，从而提高国家的经济竞争力。智能电网是新一轮能源革命的基础平台，对能源革命具有全局性和根本性的推动作用。未来的智能电网，适应大型风电、光伏发电及分布式电源大规模接入，形成广泛覆盖、清洁高效的电力资源配置体系，具有强大的电力资源配置能力；电力网、互联网、物联网等相互融合，构成功能灵活互动的社会公共服务平台，广泛支持配置社会公共服务资源；汇集和分析电力系统广域数据和知识，自动预判、识别电网典型故障和风险，保障电网安全可靠运行；促进用户与各类用电设备广泛交互、与电网双向互动，支撑智能家庭、智能楼宇、智能小区、智慧城市建设，推动生产、生活智慧化。

中国电力科学研究院在智能电网关键技术研究、国际国内标准制定、试验检测能力建设等方面开展了卓有成效的科研工作，为了总结相关技术成果和实践经验，推动我国智能电网技术进步，为我国智能电网建设提供有益参考，特组织专家编写了本套丛书。

本套丛书的编撰出版，凝聚了电网一线科研工作者的汗水和心血。通过本套丛书的出版，希望更多的人士关注、关心智能电网并投身于智能电网的研究和建设中来，共同打造一个安全高效、清洁环保、友好互动的智能电网，并推动构建智能便捷的生产生活新模式。



2014年11月

前言

我国自 2009 年正式启动智能电网技术研究和试点示范工作以来,在智能电网关键技术研究、国际国内标准制定、应用示范工程及试验检测能力建设等方面取得了一系列重大成果。为总结智能电网技术研究成果,分析我国智能电网技术发展趋势,与电力科技教育、电力企业及产业公司分享研究成果,中国电力科学研究院组织专家编写了本套丛书。

本套丛书在编写原则上,突出以智能电网诸环节关键技术为核心,优选丛书选题;在内容定位上,突出技术先进性、前瞻性和实用性,并涵盖了智能电网相关技术领域的新知识、新方法、新技术、新设备(系统);在写作方式上,做到深入浅出,既有深入的理论分析和技术解剖,也有典型案例介绍和效果分析。

本套丛书涵盖输变电、配用电及储能等智能电网技术,按照专业技术领域分成 7 个分册,即《输电线路建设技术》《智能高压设备》《智能配电与用电技术基础》《智能电网用电技术》《智能电网与电动汽车》《智能电网广域监测分析与控制技术》《大规模储能技术及其在电力系统中的应用》。本套丛书既可作为电力企业运行管理专业员工系统学习智能电网技术的专业书籍,也可作为高等院校电气自动化专业师生的教学、学习用书,同时还可供智能电网产品研发工程师参考,实现一书多用。

本分册是《大规模储能技术及其在电力系统中的应用》,第一章为概述,第二章为储能技术的发展概况,第三章为储能技术在电力系统中的应用前景,第四章为电池储能的系统集成及管理技术,第五章为储能系统的功率调节与控制,第六章为储能技术在配电网中的优化配置,第七章为储能技术在电力系统中的实践与展望。

由于编写时间仓促，书中难免存在疏漏之处，恳请各位专家和读者提出宝贵意见，使之不断完善。

编者

2014年11月

目 录

序 前言

第一章 概述	1
第一节 储能技术的概念	1
第二节 储能技术的分类	3
第三节 储能技术的评价指标	5
第四节 储能技术发展的需求和背景	6
第二章 储能技术的发展概况	14
第一节 储能技术在电力系统中的应用现状	14
第二节 机械储能	18
第三节 电化学电池储能	30
第四节 电磁场储能	46
第五节 融盐蓄热储能	52
第六节 氢储能	56
第三章 储能技术在电力系统中的应用前景	60
第一节 储能技术在电力系统中的主要应用场景	60
第二节 电力系统不同应用场景的储能时间尺度划分及其技术需求特征	61
第三节 适合规模化应用的储能技术评价指标	64
第四节 电力系统大规模储能重点关注的技术类型	67
第四章 电池储能的系统集成及管理技术	72
第一节 概述	72
第二节 电池分选技术	74
第三节 电池连接成组方式	81
第四节 电池管理技术	83

第五章 储能系统的功率调节与控制	93
第一节 概述	93
第二节 功率调节与控制系统的拓扑结构	94
第三节 功率调节与控制系统的运行模式	97
第四节 PCS 的控制	97
第六章 储能技术在配电网中的优化配置	103
第一节 储能在配电网中的应用模式	103
第二节 单目标优化	105
第三节 多目标优化	112
第七章 储能技术在电力系统中的实践与展望	117
第一节 储能技术在大规模新能源集中接入中的应用示范	117
第二节 储能技术在分布式电源接入及微电网中的应用示范	120
第三节 展望	124
参考文献	126
索引	128

概 述

第一节 储能技术的概念

能量 (energy) 是度量物质运动的一种物理量, 是物质的作功能力。由于物质存在着各种不同的运动形态, 能量也相应具有不同的形式, 如电能、机械能、热能、化学能、核能、辐射能等。各种能量形式之间是可以相互转化的, 在转化中能量总量恒定不变。正如能量守恒和转换定律指出的: “自然界的一切物质都具有能量; 能量既不能创造, 也不能消灭, 而只能从一种形式转换成另一种形式, 从一个物体传递到另一个物体; 在能量转换与传递过程中, 能量的总量恒定不变。”

储能即能量存储 (energy storage) 是指通过一种介质或者设备, 把一种能量形式用同一种或者转换成另一种能量形式存储起来, 基于未来应用需要以特定能量形式释放出来的循环过程。储能过程往往同时伴随着能量的传递和形态的转化。我们常说的储能系统是为研究某个对象而划出的部分物体和空间范围, 包括能量、物质的输入和输出设备、能量转换及存储设备等。

从宏观角度看, 目前人类所认识的能量形式包括机械能、热能、电能、辐射能、化学能和核能。

机械能是与物质宏观机械运动或者空间状态相关的能量, 前者称之为动能, 后者称之为势能, 这是人类最早认识的能量形式。动能源自宏观机械运动, 其能量可以表示为

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1-1)$$

式中 m —— 物质质量;
 v —— 运动速度。

势能通常包括重力势能、弹性势能和表面势能。重力势能源自位置高度不

同，其能量可以表示为

$$E_p = mgH \quad (1-2)$$

式中 m ——物质质量；

g ——重力加速度；

H ——物质高度。

弹性势能源自弹性变形，其能量可以表示为

$$E_r = \frac{1}{2} kx^2 \quad (1-3)$$

式中 k ——弹性系数；

x ——变形量。

表面势能源自不同物质或相界面上的表面张力，其能量可以表示为

$$E_s = \sigma S \quad (1-4)$$

式中 σ ——表面张力系数；

S ——相界面面积。

热能是构成物质的微观分子运动的动能和势能的总和，其宏观表现是温度的高低，它反映了分子运动的激烈程度，它的能量可以表示为

$$E_q = \int TdS \quad (1-5)$$

式中 T ——温度；

dS ——熵变。

热能是能量的一种基本形式，大多数的一次能源都是首先经过热能形式而被利用的。

电能是和电子流动与积累有关的一种能量，其能量可表示为

$$E_e = UI \quad (1-6)$$

式中 U ——电动势；

I ——电流。

电能的转换与存储是本书将要介绍的重点，它通常由化学能或机械能转换得到。化学能可以直接转换为电能，如化学电池，也可以通过机械能等中间能量形式间接转换为电能，如火力发电。它是先把燃料的化学能转换为热能，再由热能转换为机械能，最终再借助发电机通过电磁感应原理把机械能转换为电能；再如水力发电，是把水面落差的势能转换为水轮机旋转的势能，进而再转换为电能。

辐射能是物质以电磁波形式发射的能量。物体会因各种原因发出辐射能，其中因热的原因而发射出的辐射能称为热辐射能，其能量可表示为

$$E_r = \varepsilon c_0 \left(\frac{T}{100} \right)^4 \quad (1-7)$$

式中 ε ——物体发射率；
 c_0 ——黑体辐射系数；
 T ——热力学温度。

地球表面所接受的太阳能是最重要的热辐射能。常见的很多能源形式都是直接或间接由太阳能转换而来的，如化石能、风能、海洋能、生物质能等。

化学能是物质结构能的一种，即原子核外进行化学变化时放出的能量。人类利用最普遍的化学能是燃烧碳和氢，它们也是煤炭、石油、天然气等燃料中的主要可燃元素。化学能和电能的转换即电化学电池储能将是本书介绍的重点。

核能是蕴藏在原子核内部的物质结构能。轻质量的原子核（氘和氚等）和重质量的原子核（铀等）核子之间的结合力比中等质量原子核的结合力小，这两类原子核在一定条件下可以通过核聚变和核裂变转变为在自然界更稳定的中等质量的原子核，同时释放出巨大的结合能，这种结合能就是核能。

从微观角度看，各种能量形式可以归类为电子、光子、离子、声子、分子等各种载能子的动能、势能或者动能与势能的组合，这也正是不同能量形式以及各种储能技术的共性物理本质。

第二节 储能技术的分类

储能技术分类方法有多种方式，可以按照能量形式、技术原理、存储介质、功率和容量等级、应用领域、使用形式等分类。目前采用较多的是按照能量形式分类。广义的储能技术，根据不同能量类型，基本可分为四大类别：

- (1) 一次能源的储存，如煤、石油、天然气等；
- (2) 二次能源的储存，如氢、煤气、合成天然气等；
- (3) 电能储存；
- (4) 后消费能量储存，如蓄热、蓄冷等。

我们通常所说的与电力系统相关的储能技术，主要是电能存储和后消费能量存储中的热能储能。电力储能技术通常是按技术原理，也可以按能量形式来分，可分为物理形式和化学形式，物理形式又可以分为机械储能和电磁场储能，如图 1-1 所示。

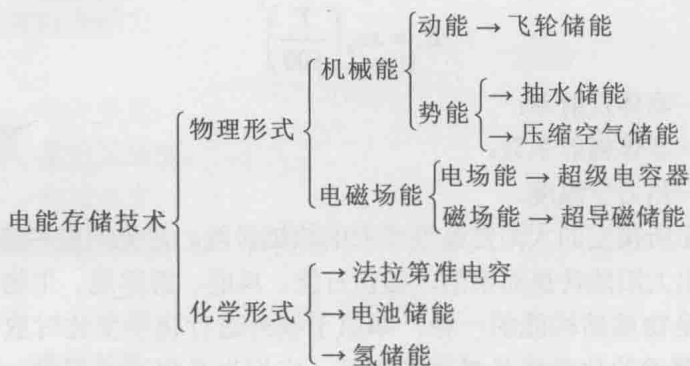


图 1-1 电能存储技术的分类

考虑到最初出现的超级电容器主要指双电层电容器，所以在以下的章节中，把法拉第准电容和双电层电容器一起归类到电磁储能类型的超级电容器储能当中。

除了技术原理或能量形式外，还可以从存储能量和释放能量的周期或持续时间、规模等级、储能介质特性、输入输出接口方式、储能载体的端口电量或其他物理量的形式、应用领域、布置方式等多种角度对其分类。

如按照规模和容量等级，可分为：

(1) 大规模储能，功率等级达十兆瓦到数百兆瓦，存储时间达数小时，包括抽水蓄能，大型地下压缩空气储能，大容量的电池储能、氢储能、热能存储等；

(2) 中等规模储能，功率等级达兆瓦级，存储时间达小时级，如化学储能，小型的地上压缩空气储能等；

(3) 小规模储能，功率等级多在兆瓦级以下，包括小容量的电池储能，超级电容储能等。

按照持续时间并结合应用特性分为：

(1) 功率型储能，如飞轮储能、超级电容器储能、超导磁储能等，存储时间基本在分钟及以下，主要应用在需要储能装置提供短时间快速功率支撑的场合；

(2) 能量型储能，如抽水蓄能、压缩空气储能、化学电池储能等，存储时间在小时级及以上，主要应用在需要长时间、大功率能量存储和释放的场合。

按照储能系统输入输出的接口方式，可分为：

(1) 电力电子接口方式：如超导磁储能、超级电容器储能、化学电池储能、飞轮储能等；

(2) 电动机/发电机接口方式：如抽水蓄能、压缩空气储能及飞轮储能（若直接采用电机接入）等。

按照储能载体的端口电量形式，可分为：

- (1) 直流电流形式：如超导磁储能；
- (2) 直流电压形式：如各类电池储能、超级电容器储能等；
- (3) 交流电压形式：如飞轮储能、抽水蓄能、压缩空气储能等。

按照布局方式，可分为：

- (1) 集中式储能：如抽水蓄能、压缩空气储能以及用于大型风电场接入的大规模电池储能等；
- (2) 分布式储能：应用于分布式电源或微电网的电池储能、超级电容器储能以及可在配电网中广域多点分布布局的电池储能等。

通常所说的大规模储能技术其实有两个含义（或者说两种实现方式）。一个是指单个储能系统的规模大，即通常所说的大规模集中式储能；另一个含义为虽然单个储能系统规模相对较小，但分散或分布布置的多个小规模储能系统通过统一调度和控制管理组成了大规模系统，即所谓大规模分布式储能。

第三节 储能技术的评价指标

用来评价某种储能技术或某个储能装置的指标通常包括储能密度、储能功率、储能周期、储能效率、蓄能和释能的速率、蓄能和释能的周期（时间）、储能装置的经济性等。

储能密度是单位质量或体积储能系统或储能设备所能存储能量的多少。

储能功率是储能系统在存储或释放能量时的输入和输出功率。

储能周期是在储能系统或物质中储存和释放能量的周期，用于描述储能技术或储能系统的时间特征，通常可分为短期储能、中期储能和长期储能。

储能效率是储能系统输出能量与输入能量之比。

以上介绍的是储能技术通用的评价指标，需要指出的是，不同的应用领域或场景所关注的评价指标的重要程度是不同的，以储能密度为例，对于电动汽车领域，由于汽车上安装空间非常有限，因此储能密度是衡量动力电池的重要指标之一，但在电力系统的某些场景如配合大型风电场应用的化学电池储能系统，由于此时安装空间不是问题，因此对储能密度的要求就大大降低。此外，针对特定的应用领域或场景，可能还需要其他评价指标，本书第3章将对适合电力系统规模化应用的储能技术评价指标作进一步的阐述。

第四节 储能技术发展的需求和背景

一、电力系统在能源革命中面临的挑战

进入新世纪后,大规模开发利用化石能源带来的能源危机、环境危机凸显,建立在化石能源基础上的工业文明逐步陷入困境,新一轮能源变革正在世界范围内蓬勃兴起。这一轮能源变革是以电为中心、以新能源大规模开发利用为特征的能源变革。2000~2012年间,全球风电、太阳能发电装机分别由1793万kW、140万kW增长到2.8亿kW、1亿kW,分别增长了15倍和71倍。随着新一轮能源变革的到来,新能源技术、智能技术、信息技术、网络技术不断突破,与智能电网全面融合,正在承载并推动第三次工业革命。

2005年以来,我国以风能和太阳能为主的可再生能源发电得到迅速发展。目前,我国成为全球风电规模最大、光伏发电增长最快的国家,并网风电、光伏发电装机容量已突破1亿kW,国家电网公司是目前全球接入新能源规模最大的电网。“十二五”期间,我国风电装机容量年均增长29%,发电量年均增长29%;太阳能发电装机容量年均增长170%,发电量年均增长219%。新能源在15个省(区)已成为第二大电源,其中11个在“三北”地区,占比均超过10%,冀北、甘肃、蒙东、蒙西新能源装机比重均超过30%。大规模及分布式可再生能源的开发和利用将促进我国电力生产和消费方式的变革。未来的智能电网,是网架坚强、广泛互联、高度智能、开放互动的“能源互联网”。

在新能源革命中,电能扮演着新能源与可再生能源利用载体的重要角色,发电能源清洁化、电力系统容纳新能源能力强、能源消费(尤其交通能源)电气化、能源系统智能化等新能源革命的主要特征都与电力有着密切的关联。同时,核能、水能以及化石能源清洁利用的绝大部分也都要通过转化为电能来实现。因此,随着未来几十年新能源革命的发展,电能将越来越成为能源系统的中心。而电网作为电能输送的载体网络,将成为全社会重要的能源输送和配给网络,其重要性日益突出,在能源体系中的地位和作用将更加核心,电网的使命也将发生巨大的变化。

1. 大规模集中式可再生能源发电的送出和消纳

我国风能和太阳能资源丰富,但多集中于西部、北部地区,远离中东部负荷中心。在我国风电以大规模能源基地的方式集中开发并网,目前已启动了甘肃酒泉、新疆哈密、蒙西、蒙东、吉林、江苏等多个“千万千瓦级”风电基地的建设;光伏累计装机容量排前五位的省为青海、甘肃、新疆、宁夏、内蒙古,

其中青海光伏累计装机容量约占总装机容量的 20%。我国“可再生能源中长期发展规划”中指出, 2020 年我国风能和太阳能发电装机将分别达到 2 亿 kW 和 5000 万 kW。

我国新能源富集地区本地消纳能力有限, 大规模集中开发的风能、太阳能发电需要输送到区域电网甚至跨区域电网进行消纳。可再生能源发电的送出问题已成为制约其发展的主要因素之一。由于当地电网的调峰能力严重匮乏, 可再生能源开发与电网消纳能力的矛盾日益突出, 加之输送通道建设滞后的影响, 一些地区的弃风率已超出 20%。按照国家电网公司规划, 将通过以特高压电网为骨干网架的坚强智能电网, 向东中部负荷中心地区大规模、远距离输电, 在全国范围实现可再生能源发电资源的共享。

依据我国风能、太阳能资源的特性, 风电场的利用小时数为 2000~3000h, 光伏电站的利用小时数为 1200~2000h。单纯输送可再生能源发电, 难以保障特高压输电线路的利用率和经济性。目前通过可再生能源发电同传统电源打捆的方式改善可再生能源发电输出特性, 提高输电通道的利用率。如在建的新疆哈密至郑州±800kV 特高压直流输电工程确定了“主送风电、火电调峰”的组合方式。这种利用火电、水电等传统电源调节能力进行综合互补的方式某种程度上损失了传统电源的利用小时数, 而且传统电源的调峰能力在一定条件下(冬季供热或汛期)受到限制难以保障可再生能源发电的送出, 这种方式只能缓解可再生能源的送出和消纳问题。另外, 为可再生能源发电配套火电等电源, 削弱了利用可再生能源发电减少环境影响的作用。电网需要更加清洁和灵活有效的方法来促进大规模可再生能源的送出与消纳。

2. 大量分布式可再生能源发电的接入

我国可再生能源发电呈现大规模、远距离、高电压、集中接入特点的同时, 分布式发电尤其是分布式光伏发电近年来也得到了大力地发展。截至 2015 年底, 我国太阳能光伏发电量累计并网容量达到 4158 万 kW, 同比增长 67.3%, 约占全球的 1/5, 超过德国成为世界光伏第一大国。

分布式电源的接入使配电网变成有源电网, 对配电网规划、并网管理、运行、经营服务等提出了很大的挑战。需要建设技术领先、结构优化、布局合理、高效灵活、具备故障自愈能力的智能配电网, 适应分布式电源、微电网加快发展的需要。

分布式电源的接入使用户具备了供电者和消费者的双重角色, 用户的冗余电力将出售给电网, 用户侧分布式电源经聚合后还可参与电网的运行调度。电能自由流动需要在用户和电网之间建立双向的信息互动平台、智能化的管理