

分类号_____

UDC _____

密级_____

编号_____

清 华 大 学

博 士 后 研 究 报 告

能源互联网架构及关键技术研究

谢 涛

清 华 大 学 (北 京)

2013 年 09 月

能源互联网架构及关键技术研究

RESEARCH ON ARCHITECTURE AND KEY TECHNOLOGIES OF ENERGY
INTERNET

博 士 后 姓 名: 谢涛

流动站（一级学科）名称: 控制科学与工程

专 业（二级学科）名称: 控制理论与控制工程

合 作 导 师: 曹军威（研究员）

研究工作起止日期 2011年09月 — 2013年09月

中文摘要

摘要：能源互联网作为未来的智能能源解决方案正逐渐成为研究的热点和潮流，本报告针对能源互联网的几个关键问题进行深入和细致的研究。

对能源互联网这一新事物的相关问题进行梳理，阐述能源互联网的特征、功能构成及技术体系。对现有能源互联网的架构进行分析，在此基础上提出信息物理融合体系的能源互联网架构，并给出实现该能源互联网架构的能源路由器原型，最后根据所提架构设计能源互联网示范工程。

针对间歇性可再生能源发电输出功率波动的问题，提出一种基于滑动最小二乘算法和电池荷电状态的电池储能系统实时控制策略，通过滑动最小二乘拟合算法确定储能系统的功率输出量，并辅助以荷电状态和最大波动功率限制调节，从而有效降低平滑控制过程中电池的充放电深度。

根据能源互联网能量管理对数据中心的要求，设计并实施了一种整体化的集装箱式数据中心，作为能源互联网的能量管理平台。该集装箱式数据中心包括计算机集群、低压供配电，空调制冷、和环境及动力设备监控等数据中心所需完整功能。最后对集装箱式数据中心的运营模式进行了分析和阐述。

关键词：能源互联网；可再生能源；分布式发电；储能系统控制；集装箱式数据中心

ABSTRACT

ABSTRACT: Energy internet, as a promising smart energy solution in the future, is gradually becoming hotspot in researches. This report conducts in-depth study on several key issues of energy internet.

The relevant issues regarding the energy internet are clarified in terms of the feature, functionality and technical structure. The current architecture of energy internet is analyzed, on the basis of which a kind of cyber physical system based new architecture is proposed. To realize the proposed architecture, the prototype design of energy router is given. Finally according to above, a pilot project of energy internet is designed.

To mitigate the output fluctuation of intermittent power supplies, a real time control strategy is proposed for energy storage system based on sliding least square algorithm and state of charge. Output power can be determined by sliding least square algorithm. Combined with regulation of state of charge and maximum fluctuation power limit, depth of discharge of energy storage system can be effectively reduced during the smoothing control process.

According to the requirements of energy management of energy internet for data center, an integrated container data center is designed and implemented as the energy management platform. The designed container data center includes computer clusters, low voltage power supply and distribution, air conditioning, and environment/power supervising equipment, which forms a complete data center product. At the end, operation mode of the designed container data center is analyzed and elaborated.

KEYWORDS: Energy internet; Renewable energy; Distributed generation; Energy storage system control; Container data center

目录

1. 绪论.....	1
1.1. 引言	1
1.2. 能源互联网的发展概况及研究动态.....	2
1.2.1. 国外发展现状及研究动态	2
1.2.2. 国内发展现状及研究动态	5
1.3. 能源互联网的研究意义	7
1.4. 报告的主要工作和篇章结构.....	8
2. 能源互联网概况及其架构研究.....	9
2.1. 引言	9
2.2. 能源互联网概况	9
2.2.1. 能源互联网特征.....	9
2.2.2. 能源互联网功能构成.....	10
2.2.3. 能源互联网技术体系.....	11
2.3. 现有能源互联网架构分析.....	12
2.4. 信息物理融合体系能源互联网研究.....	16
2.4.1. 能源互联网的体系架构.....	16
2.4.2. 能源互联网的能量缓冲.....	19
2.4.3. 能源互联网的能量管理.....	19
2.4.4. 能源互联网的能源路由器.....	20
2.5. 能源互联网示范工程设计.....	23
2.5.1. 能源互联网示范工程设计目标及方案.....	23
2.5.2. 能源互联网示范工程运营方案规划.....	24
2.6. 本章小结	26
3. 能源互联网储能系统控制策略研究.....	27
3.1. 引言	27
3.2. 能源互联网中的分布式储能技术分析.....	27
3.3. 间歇性电源输出功率平滑控制策略分析.....	29

3.4.	滑动最小二乘算法及储能系统控制策略研究.....	31
3.4.1.	滑动最小二乘算法及储能系统控制方法.....	31
3.4.2.	SOC 调节器设计及其特性分析.....	33
3.5.	平滑控制策略算例仿真分析.....	36
3.6.	本章小结.....	38
4.	能源互联网分布式能量管理平台设计.....	39
4.1.	引言.....	39
4.2.	集装箱式数据中心及其优劣分析.....	40
4.2.1.	现有的集装箱式数据中心分析.....	40
4.2.2.	集装箱式数据中心特性及优劣分析.....	43
4.3.	集装箱式数据中心设计目标及技术要求.....	46
4.4.	集装箱式数据中心工程实施.....	47
4.4.1.	集装箱式数据中心总体方案.....	47
4.4.2.	集装箱箱体及智能机柜设计.....	48
4.4.3.	计算机集群系统设计.....	48
4.4.4.	低压供配电设计.....	52
4.4.5.	空调制冷（新风）系统.....	52
4.4.6.	防雷及接地设计.....	55
4.4.7.	环境及动力设备监控设计.....	55
4.4.8.	集装箱式数据中心整体结构.....	57
4.5.	分布式能量管理平台运营模式分析.....	59
4.6.	本章小结.....	60
5.	结论.....	61
	参考文献.....	62

1. 绪论

1.1. 引言

能源是人类生存发展的重要物质基础。当今世界,能源问题和环境问题日益突出,威胁到人类的可持续发展。在全球气候变化和能源紧缺的背景下,人们一方面寻找可以持续利用,同时又清洁无污染的可再生能源资源,如水能、风能、太阳能、生物质能和海洋能等;另一方面思考如何依靠通信信息、互联网络、控制技术有效地协调与利用资源,以解决难题。然而,解决能源问题,已不是简单地增加能源供给、提高能源利用效率,而是需要全面的变革,这个变革把能量流和信息流耦合,建立一个全新的能源体系,形成能源应用的创新形式。可再生能源提供了新能源体系的能源,而信息通信技术的发展与成熟则为可再生能源的可利用提供了支撑。通过互联网技术与可再生能源结合起来,可以创造强大的、新的能源基础设施,这就是能源互联网。

尽管关于未来能源网络的发展问题,专业研究人员早已进行了大量的相关研究,但是将能源互联网作为一个正式的未来能源发展模式和解决方案,并引起广泛关注,是在《第三次工业革命》一书出版之后。该书作者杰瑞米·里夫金是美国著名经济学家。他认为“在即将到来的时代,我们将需要创建一个能源互联网,让亿万人能够在自己的家中、办公室里和工厂里生产绿色可再生能源。多余的能源则可以与他人分享,就像我们现在网络上分享信息一样”,“互联网技术和可再生能源将结合起来所构成的能源互联网,将是实现能源分布式供应的一种有效模式”^[1]。

能源互联网与智能电网既有联系又有区别,不能脱离智能电网而简单讨论能源互联网。智能电网在不同的国家和地区被赋予了有差别的含义,虽然智能电网也在不同程度上体现了对分布式能源供需平衡的配置,但主要还是在现有电网架构上通过信息化和智能化的手段,解决设备利用率,安全可靠、供电质量、新能源接入等基本问题,还是在传统电网的基础上,根据电力需求变动,智能配置供需平衡,提高用能效率,依然是能源集中供应方对多方需求的智能电力配置模式。而能源互联网的不同在于采用互联网理念、方法和技术实现能源基础设施架构本身的重大变革,构建新型的信息能源融合网络。能源互联网在智能电网基础上,大幅度增添了功能,能源互联网中既有集中的能源供应方,也有大量分散的能源供应方,还有分散的能源需求方,是多供应方对多需求方的智能能源配置模式。不论是分散化的用电设备,还是分布式的可再生能源都可即插即用接入配电网,实现能源的共享。

智能电网和能源互联网并不互斥,智能电网为能源互联网提供了更好的能源和信息技术的融合平台,为能源互联网的发展提供电网信息化和智能化的基础,而能源互

联网的发展对当前智能电网建设提出了更高的要求。智能电网是能源互联网的雏形，是能源互联网在当前阶段的一种表现形式。智能电网建设所积累的通信信息基础实施以及信息化的提升为能源互联网的实现建立了典型示范和基础。能源互联网与目前的大电网、智能电网、分布式能源、微网等的发展是相辅相成的，不存在对立或者被取代的问题。在智能电网建设中，把接入新能源和分布式能源上升到能源互联网的层次来考虑，便可以将两者的关系统一起来。

根据能源互联网的思想，将来的能源会像现在的社交网络一样，可以互相分享，人人都是能源生产者，人人也都是能源消费者。现在的电网还是呈现集中式的分布、单向传输，而互联网则是多向的、交互的，是分散的结构和拓扑。未来能源会变成分布式，就像互联网一样。通过信息技术把各种能源集中起来，用不同的形式存储并能分布出去。每一个建筑都是智能的住宅，都可以吸收能量、消耗能量、分布和存储能量。总体上讲，能源互联网就是在现有能源供给系统的基础上，通过新能源技术与互联网技术的深度融合，将大量分布式能量采集装置和分布式能量储存装置互联起来，通过智能化的管理，实现能量和信息双向流动的能源对等交换和共享网络。

1.2. 能源互联网的发展概况及研究动态

1.2.1. 国外发展现状及研究动态

1998年，美国电科院（EPRI）开展“复杂交互式网络/系统”（CIN/SI）研究，目的是打造高可靠、完全自动化的美国电网，这是美国智能电网的最初原型。

2002年，美国电科院正式提出并推动了“Intelli grid”项目研究，致力于智能电网整体的信息通信架构开发，配电侧的业务创新和技术研发，开展电能和通讯系统框架整合项目研究，之后该项目正式命名为智能电网框架（IntelliGrid Architecture）。这是世界上第一个智能电网框架研究。

2003年美国规划了“Grid2030”远景图及路线图，正式启动智能电网研究与建设，2009年奥巴马将智能电网提升为美国国家战略，将每年耗费1200亿美元对电网系统进行升级换代，建立美国横跨四个时区的统一电网。

2009年4月美国能源部宣布，将投资34亿美元用于资助智能电网技术开发，6.15亿美元用于资助智能电网的示范项目。资助的技术项目包括开发智能电网的各种相关技术、开发和研制智能电网中使用的电子部件以及各种设备。IBM 公司、通用电气公司和谷歌公司已获得政府资助用以研发智能电表及利用电表节约电费的应用等软件。

与美国不同，欧洲智能电网主要侧重于清洁能源的利用，特别是将大西洋的海上风电、欧洲南部和北非的太阳能电融入欧洲电网。同时，欧洲电网还将接入大量分布

式微型发电装置——住宅太阳能光伏发电装置、家用燃气热电联产装置等，以实现可再生能源大规模集成性跳跃式发展。

2002年4月，欧盟委员会提出了“欧洲智能能源”计划，并在2003~2006年投资2.15亿欧元，支持欧盟各国和各地区开展旨在节约能源、发展可再生能源和提高能源使用效率的行动，更好地保护环境，实现可持续发展。

2005年，根据可再生能源和分布式发电的发展要求，欧洲智能电网技术论坛成立。该论坛发表的报告重点研究了未来电网的发展前景和需求，提出了智能电网的优先研究内容和欧洲智能电网的重点领域。在欧盟第五、第六研发框架计划的支持下，欧洲未来电网SmartGrids（智能电网）技术平台在2005年正式启动，适应智能电网的家用电器技术开发进程也随之启动。

2006年，欧盟理事会能源绿皮书《欧洲可持续的、竞争的和安全的电能策略》明确指出，欧洲已经进入新能源时代，智能电网技术是保证电能质量的关键技术和发展方向。未来整个欧洲的电网将向用户提供高度可靠、经济有效的电能，并充分开发利用大型集中发电机和小型分布式电源。

2009年10月，欧盟公布了战略能源技术计划（SET-Plan）路线图，旨在加速低碳技术发展和大规模应用，其中将智能电网作为第一批启动的六个重点研发投资方向之一，从电网的技术、规划架构、需求侧参与和市场设计四个方面，提出了2010至2020年智能电网技术发展路线。其战略目标是：到2020年实现35%的电力输配来自于可再生能源，到2050年实现完全除碳化；将各国电网纳入一个基于市场的泛欧大电网中；保障为所有消费者提供高质量电力，并使其主动参与提高能源效率；发展电气化交通等新领域。

欧盟各国对智能电网技术的发展普遍表现出很高的积极性，目前，欧盟多个国家都在加快推动智能电网的应用和变革。

丹麦在智能电网的研发和演示方面处于欧盟领先地位，过去丹麦的电力供应主要靠几个大型发电站集中生产，然后传送给用户。但现在情况已发生变化，全国有几百个区域热电联产厂、数千台风力发电机、大量太阳能以及生物燃料发电设备。经过成功改造的智能电网，可将任何地方以任何形式生产的电能进行全局科学调配输出。最近丹麦启动新的智能电网战略，以大幅推进消费者自主管理能源消费的步伐。该战略将综合推行以小时计数的新型电表，采取多阶电价和建立数据中心等措施，鼓励消费者在电价较低时用电。

德国提出了E-Energy（信息能源）计划，并在2008年年底开始投资实施该计划。把信息通信技术和能源这两个领域综合起来是E-Energy项目的重点，E-Energy充分利用信息和通信技术开发新的解决方案，以满足未来以分布式能源供应结构为特点的电力系统的需求。E-Energy支持在六个模型地区研发和测试基于新的信息和通信技术的

智能电网的程序、基础设施、设备和概念框架，还进行风力发电和电动汽车实证实验，并对互联网管理电力消费进行检测。此外，E-Energy支持了德国工程院进行“未来能源网络”的研究，从长远角度分析直到2030年的智能网络建设中技术、经济和社会的成功因素。

早在2001年，意大利国家电力公司就安装和改造了3000万台智能电表，建立起智能化的计量网络。2008年7月1日，意大利国家电力公司(ENEL)负责启动了欧盟11个国家25个合作伙伴联合承担的ADRESS项目。该项目总预算为1600万欧元，目的是开发互动式配电能源网络，让电力用户主动参与到电力市场及电力服务中。

2009年4月，西班牙电力公司ENDESA牵头，与当地政府合作在西班牙南部城市PuertoReal开展智能城市项目试点，包括智能发电（分布式发电）、智能化电力交易、智能化电网、智能化计量、智能化家庭，该项目涉及9000个用户、1个变电站以及5条中压线路和65个传输线中心。

2009年6月，荷兰阿姆斯特丹选择埃森哲（Accenture）公司帮助自己完成“智能城市（SmartCity）”计划。该计划包括可再生能源利用、下一代节能设备、CO2减排等内容。法国的规划是从2012年1月开始，将所有新装电表更换为智能电表。英国能源和气候变化部2011年3月宣布，将于2019年前完成为英国3000万户住宅及商业建筑物安装5300万台智能电表的计划。目前英国的人口约为6000万，约有2300万户家庭，该计划几乎涉及英国所有住宅和商业建筑物。

智能电网建设是一项耗资大、跨时长的巨大工程，如此复杂、庞大的系统是难以进行一体化建设，其建设过程也是复杂多变。例如美国加州是全美最早提出发展智能电网的地方，但其升级改造的步伐一直很缓慢，这让人不禁怀疑加州2020年能实现其设定的33%电力供应来自可再生能源的目标，可再生能源的间歇性很难适应采取集中统一方式输电的传统电网。微型智能电网的概念由此应运而生，微型智能电网的概念最早是加州加尔文电力创新公司推出来的，是智能电网和微电网思想融合的体现，也可称之为智能微电网。智能微电网是对电力服务的重新定位，它拉近了供电商与电力消费者的距离，可以采取更加灵活的运营模式。可再生能源并入智能微电网相对简单，微电网能保障当地的能源安全，在停电的时候为当地供电，并降低用电高峰期向主干电网重新分配电力的费用。

首先建设小型的、局部化的智能微电网，再将这些点状的智能微电网扩展到线和面构成能源局域网，最终与智能输电骨干网络相连接构成广域的能源互联网。这与互联网产业发展路线相类似，通过首先在边缘部署智能特性的方式实现广域大系统的实现。其实早在2001年美国电力研究所在报告“未来展望”中评述道：“分散式能源生产的发展可能会采取与计算机产业发展极为相似的路线。大型主机电脑已经让位于小型化、在地理上分散分布的台式和笔记本电脑，它们相互连接、充分整合，成为一个

极富弹性的网络。在电力行业中，集中式电厂仍将发挥很重要的作用。但是我们更加需要更小、更清洁、分散化的发电厂，能源储存技术将支持它们的发展。对这样一个系统，最基本的要求是先进的电子控制技术，对于控制、处理由如此复杂的互联系统所带来的海量的信息与能量流通，它绝对是必不可少的。”

2008年，美国国家科学基金项目未来“可再生电力能源传输与管理系统”（The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management system, FREEDM system）由北卡罗莱纳州立大学黄勤教授主持，研究一种构建在可再生能源发电和分布式储能装置基础上的新型电网结构，称之为能源互联网，是未来智能电网的发展方向。效仿网络技术的核心路由器，他们提出了能源路由器的概念并且进行了原型实现，利用电力电子技术实现对变压器的控制，路由器之间利用通信技术实现对等交互。FREEDM是从电力电子技术的角度出发，希望以分布对等的系统控制与交互，实现能源互联网的理念^[2-5]。FREEDM系统的目的是架设智能微电网，并实现智能微型电网的互通互联。

FREEDM系统并不是一个特例，普渡大学 Lefteri H. Tsoukalas 教授及其研究团队也在2008年参照互联网的架构提出了能源互联网架构，与FREEDM系统相比，所提能源互联网架构更注重发挥储能系统的作用^[6]。加利福尼亚大学伯克利分校的研究人员提出了与与FREEDM系统相类似的能源互联网架构，其研究工作注重满足能源互联网的信息体系建设^[7]。瑞士联邦理工学院的研究团队则设计了能源集线器（Energy Hub），并通过能源集线器架设能源互联网^[8-11]。

2011年2月，美国能源部发起Sunshot计划，拟在2020年前将太阳能光伏系统总成本降低75%，该计划若能实现，将使能源互联网实现成本极大降低，具备经济上的可行性。同年6月，美国白宫宣布实施一系列新的计划，以加速国家电力基础设施的现代化，支撑与能源互联网相关的电网创新项目（如FREEDM系统），推动清洁能源经济转型。

1.2.2. 国内发展现状及研究动态

自2007年开始，华东电网公司，上海市电力公司，华北电网公司，中国科学院电工研究所等单位先后启动了智能电网相关试点工程与实践研究。在2009年的特高压输电技术国际会议上，国家电网公司正式发布了“坚强智能电网”的发展规划，规划提出，将分三个阶段推进“坚强智能电网”的建设：2009年至2010年为规划试点阶段，重点开展规划、制定技术和管理标准、开展关键技术研发和设备研制，及各环节试点工作；2011年至2015年为全面建设阶段，加快特高压电网和城乡配电网建设；2016年至2020年建成统一的“坚强智能电网”。

2010年10月，科技部在国家高技术研究发展计划（863计划）先进能源技术领域

部署“智能电网关键技术研发（一期）”重大项目共21个课题，总经费5亿元。2011年3月国家科技部公开的《国家重点基础研究发展计划973（2011-2012）年项目立项的通知》将“智能电网的重大基础研究”列为重点支持方向。2011年12月科技部公开的《2012年度国家科技支撑计划能源技术领域备选项目》中包含了多个智能电网的研究项目。2012年3月科技部又发布了《“十二五”国家科技计划先进能源技术领域2013年度备选项目征集指南》，指南中首要支持的项目类别就是智能电网。

近年来智能电网的概念及其重要作用在学术界和工业界逐渐获得认可^[12-17]。余贻鑫院士及其团队认为智能电网不是一个单纯的技术问题，它涉及许多基本理念，中国坚强智能电网需大量原创技术支撑。智能电网技术涉及广泛，其关键目标是像十年前的互联网一样，催生新的技术和商业模式，实现产业变革。其变迁的过程，必将改变行业的整个业务模型，且对所有利益相关者都有利，智能电网将创造30-50倍于互联网的市场空间，涉及新能源、软件、储能、通讯、自动化、电动汽车、高级传感器、智能电器等领域^[14-15]。周孝信院士及其团队认为以大规模可再生能源利用和智能化为特征发展智能电网将带来新一代电网技术，包括新型输电技术、大规模可再生能源电力接入技术、智能化调度和运行控制技术等的创新发展^[16]。卢强院士及其团队则认为我国智能电网建设中的问题更集中反映在电网调度运行上，要将整个电力大系统控制得如同一台智能机器人，“具有多指标自趋优运行能力”的电网是电网智能的最高形式，可称为“智能广域机器人”^[17]。

能源专家武建东提出智能能源网，也称为互动电网^[18-19]，这一观点认为需要建立一个能够提高能源效率、优化能源使用和服务的全新的能源网络平台。智能能源网通过将水、电、气甚至热力等不同的能源品种网络进行有机整合，形成跨能源品种的能源生产、流通、消费网络，并采用信息化集成技术，构建一个生产输送侧与需求侧相对称、相互动的智能能源运转体系。通过形成不同能源网架间更高效能量流的智能配置、智能交换，推动现有单向运转的能源体系向更高级发展。

2012年8月，由中国科学院院咨询评议工作委员会、国家自然科学基金委员会信息科学部、国防科技大学、中国电力科学研究院、湖南省科学技术厅举办，国防科技大学承办的首届中国能源互联网发展战略论坛在长沙举行。国家能源局、中国科学院、国家自然科学基金委员会、国防科技大学、中国电力科学研究院等单位负责人和来自全球各地著名院士、专家、学者150多人参加了会议。

国内科研单位从各自研究基础出发，提出了各具代表性的能源互联网发展方式，并在实际的研究工作中产生了一定的科研成果，推动了我国能源互联网的发展^[20-21]。国内关于能源互联网的研究有几家具有代表性的单位，主要有清华大学、国防科技大学、电科院、中科院电工所等。北京市科委近期组织了“第三次工业革命”和“能源互联网”专家研讨会，并启动了相关软课题研究，以期形成详细的能源互联网调研报

告和路线图。可以说，能源互联网技术目前国内已经引起了广泛关注，但相关研究尚处于起步阶段。

1.3. 能源互联网的研究意义

能源是人类生存发展的重要物质基础，但从世界范围来看，能源可持续发展的问题始终没有得到根本解决。解决能源问题，已不是简单地增加能源供给、提高能源利用效率，而是需要全面的变革，这个变革把能量流和信息流融合，建立一个全新的能源体系，形成能源应用的创新形式。基于现有的能源基础设施，可再生能源资源在传输和利用等方面仍存在瓶颈，基于现有的能源基础设施，运用先进的信息和互联网的理念、方法和技术，与可再生能源技术相结合，构建能源互联网，为实现能源可持续发展提出了一条可预见并且具有可行性的技术路线。

当前阶段看来，能源互联网是传统能源结构裂解的最好触媒，它推动能源设施从孤岛系统、自动化运转到柔性能源生态集群，会是人类智能化历史上最大的产业升迁。能源互联网将推动所有能源设施从孤立设施、专业系统、行业网络整合为网络化能源生态集群，形成人、机、网、市场四位一体的格局，全球能源结构正面临着一次前所未有的巨大转型和产业增长的爆发。

目前风电、太阳能等可再生能源单从经济性上而言，尚无明显优势，仍需要国家补贴；此外，由于其发电具有不稳定、间歇性等劣势，容易对电网造成冲击，如果对其发展不加以理性规划，会给电网造成巨大的负担。能源互联网利用系统能效技术、IT互联网技术，形成信息和能量的耦合与协同，构建基于能源生产、储运、应用和再生四个环节的信息和能量循环回路，从而实现系统能效的最大化，促进能源与环境的和谐、可持续发展。信息和能源循环回路既可以形成每个能源用户的小循环，也可以形成广域的大循环，从而对于可再生能源的接入，以及彻底改变传统的能源生产与能源应用方式，向城区和企业提供节能减排的区域能源整体解决方案。

长期以来，传统的“竖井式”能源利用方式不仅效率低下、耗费严重，还大量增加温室气体的排放。能源互联网将从根本上实现区域性乃至国家的节能减排目标，是促进产业升级的重要手段。一方面，该产业将能源产业和IT产业的发展有机融为一体，不仅占据了下一轮IT应用领域的制高点，还催生了新的能源产业和能源装备产业。另一方面，该产业将大大提高能源利用效率并降低能源消费量，从而达到节能减排的效果，实现能源的循环经济和低碳经济。

传统的电网观念认为，电能是廉价的，而有关发电、配电和用电的信息则相对昂贵。但展望未来，能源将变得宝贵，而无所不在的信息将使我们能够通过灵活调度、间歇性可再生能源并网、随供电量智能调整负荷等措施实现能源的更高效利用。以信

息为基础的能源网络将极大地提高配用电效率。能源互联网是传统能源结构裂解的最好触媒，它推动能源设施从孤岛系统、自动化运转到柔性能源生态集群，可能会是人类智能化历史上最大的产业升迁。能源互联网将推动所有能源设施从孤立设施、专业系统、行业网络整合为网络化能源生态集群，形成人、机、网、市场四位一体的格局，全球能源结构正面临着一次前所未有的巨大转型和产业增长的爆发。

不可否认，能源互联网作为未来可能的智能能源解决方案正逐渐成为研究的热点和潮流的同时也受到一定的质疑。电力专家、信息专家、经济学家等都在能源互联网系统相关研究中进行深入探讨、技术攻关等科学研究。尽管能源互联网是什么，有什么样的强大功能，离我们有多遥远，如何实现等一系列问题都未完全解决，但从世界及国内的研究动向和重视程度来判断，有必要对能源互联网及其关键技术进行研究和梳理，形成全面、客观、科学的看法。

1.4. 报告的主要工作和篇章结构

本报告针对能源互联网的几个关键问题进行研究。首先分析能源互联网的基本架构，阐述能源互联网组成及关键技术，提出信息物理融合体系的能源互联网架构，并给出能源路由器的原型设计；其次对能源互联网中的储能系统控制算法进行细致研究，提出新的储能系统控制算法，从而有效提高了储能介质的利用效率；最后设计并实施了一种整体化的集装箱式数据中心，用作能源互联网的分布式能量管理信息平台。具体各章的主要内容如下：

第一章论述了报告选题的内容和意义。介绍了能源互联网基本概念，论述了当前能源互联网的国内外现状及发展动态，阐述了能源互联网研究的意义，最后简要介绍了本报告的主要工作和篇章结构。

第二章对能源互联网架构及关键技术进行研究。阐述能源互联网的特征、功能构成及技术体系。在对现有能源互联网架构进行分析的基础上，提出信息物理融合体系的能源互联网架构，并给出能源路由器的原型设计。

第三章研究了储能系统的控制策略。针对间歇性可再生能源发电输出功率波动的问题，研究基于电池储能系统的平滑控制策略，提出一种基于滑动最小二乘算法和电池荷电状态的平滑控制策略。

第四章设计并实施了能源互联网的分布式能量管理平台。针对能源互联网的分布特性，根据分布式能量管理对数据中心的要求，设计并实施了一种集装箱式的数据中心，作为分布式能量管理信息平台。

最后为结论。将总结论文的主要工作。

2. 能源互联网概况及其架构研究

2.1. 引言

能源互联网虽然涉及多种能源，是复合能源体系，但是，因电力在国民经济中的重要地位以及电力系统发展的状况，从国内外能源的发展现状以及未来的发展趋势看，未来能量管理架构的主体必然是电能源，能源互联网的主体也必然是电能源，发展能源互联网应优先发展智能电网，并将超越智能电网的具体实现形式，构建基于信息架构的电网。在不到十年的时间，“智能电网”概念已从最初的输配电过程中的自动化技术，扩展到电力产业全流程实现智能化、信息化、分级化互动管理。而现在来看，电网正充分利用现代通信和信息技术成果，向着智能化的方向发展也即向着能源互联网的方向发展。

能源互联网是一个全新的概念，却不是一个全新的事物，能源互联网脱胎于智能电网、微电网等技术领域而产生，可以看到智能电网，智能配电网，微电网，分布式发电，先进计算技术，网络技术元素，是能源技术和信息技术发展到一定程度的产物，是不同国家和地区能源理念与实践工作碰撞的产物，是集中式智能电网理念向分布式智能电网方向发展的变革。目前能源互联网尚处于初期阶段，对能源互联网进行研究，明确其概念与组成，梳理与智能电网的关系，研究、开发可实现能源网络互联的网络架构及关键技术和设备对推动能源互联网的发展至关重要的。

2.2. 能源互联网概况

能源互联网是通过先进的电力电子技术、信息技术和智能能量管理技术，将大量由分布式能量采集装置和分布式能量储存装置构成的新型电力网络节点互联起来，实现能量和信息双向流动的能量对等交换与共享网络。

2.2.1. 能源互联网特征

能源互联网，目前并没有一个标准的定义。但研究者对其满足未来发展要求的特征具有相同意见^[21]。能源互联网具有五大特征：

可再生：可再生能源是能源互联网的主要能量供应来源。可再生能源发电具有间歇性、波动性，其大规模接入对电网的稳定性产生冲击，从而促使传统的能源网络转型为能源互联网。

分布式：由于可再生能源的分散特性，为了最大效率的收集和使用可再生能源，需要建立就地收集、存储和使用能源的网络，这些能源网络单个规模小，分布范围广，

每个微型能源网络构成能源互联网的一个节点。

联起来：大范围分布式的微型能源网络并不能全部保证自给自足，需要联起来进行能量交换才能平衡能量的供给与需求。能源互联网关注将分布式发电装置、储能装置和负载组成的微型能源网络互联起来，而传统模式的智能电网更关注如何将这些要素“接进来”。

开放性：能源互联网应该是一个对等、扁平化和能量双向流动的能源共享网络，发电装置、储能装置和负载能够即插即用，只要符合互操作标准，这种接入是自主的，从能量交换的角度看，没有一个网络节点比其它节点更重要。

融进去：能源互联网的基础设施建设不能完全摒弃已有的传统电网，特别是传统电网中已有的骨干网络投资大，在能源互联网的结构中应该考虑对传统电网的基础网络设施进行改造并将微型能源网络融入到改造后的大电网中，形成新型的大范围分布式能源共享互联网络。

2.2.2. 能源互联网功能构成

能源互联网系统功能构成主要包括智能能量管理系统IEMS（Intelligent Energy Management System）、分布式可再生能源、储能装置、能源输变路由装置和智能终端等五大功能结构。

（1）智能能量管理系统

智能能量管理系统可以基于本地信息对能源网中的事件做出快速独立的响应。当网内发生故障时，能源互联网的各分布子系统可以自动实现孤岛运行与并网运行之间的平滑切换。智能能量管理系统的控制功能可以监视系统各功能模块，实现实时、高速、双向的能源供需数据读取，显示故障位置、装置运行状态等信息，接收运行人员指令进行调控；可以为分布式可再生能源发电装置、用能装置和储能装置提供接入管理，并可实现实时实地的即插即用。

（2）分布式可再生能源装置

除了传统能源发电装置，分布式可再生能源装置是能源互联网的重要能源供应部分。目前的分布式可再生能源发电主要包括风力发电、水力发电、太阳能发电、生物质能发电、潮汐发电等多种方式，其中水力发电、生物质能发电属于比较成熟的技术，而风力发电、光伏发电、太阳热发电、地热及潮汐发电等都属于新兴的发电技术，当前研究的热点方向主要是风力发电和光伏发电。

（3）储能装置

储能装置是能源互联网系统中重要的组成部分，在三个方面发挥重要作用。第一，储能装置对于能源正常有效的持续供应起到保障作用。在部分供能装置不能正常工作时，储能装置能够起到过度作用，持续向用户稳定供应能源。第二，储能装置能够改

善能源质量，维持系统稳定。第三，储能装置能源合理调度的必要支持部分，根据需求提供调峰和紧急功率支持等服务。

(4) 能源输变路由装置

能源输变路由装置是智能管理系统的具体实施装置，在实际应用中接受智能管理系统的调控指令，包括能源的高效传输装置、低损耗转换装置、高度能源自由路由装置等。通过这些装置实现能源远距离、高功率、低消耗的传输和调配，完成不同地区上传能源的全网优化分配，实现不同地区用能需求的全网调配。优化的能源路由方式与低功耗能量传输装置的结合是实现能源互联互通，共享能源生产与分配的核心环节。

(5) 智能终端

智能终端能够实现客户、客户用能设备、智能家居设备的信息交互，满足高效需求侧管理的要求。智能终端连接形成的智能用能网络能够对信息加以整合分析，合理配置能源资源，能够实现市场需求响应迅速、计量公正准确、数据实时采集、多途径收缴费用等功能。在从功能上，智能终端可以分为：用电信息采集终端、智能交互终端、智能家居交互终端、能源接入终端以及汽车充放电智能终端等。

2.2.3. 能源互联网技术体系

能源互联网具体功能的实现需要相应的技术支撑。能源互联网支撑技术体系可以分为五个子技术体系：综合与规划技术体系、能源技术体系、信息通信技术体系、管理调度技术体系和安全防护技术体系。每个技术体系衍生分支出不同门类的技术升级创新要求。五大技术体系关系如下图^[21]。

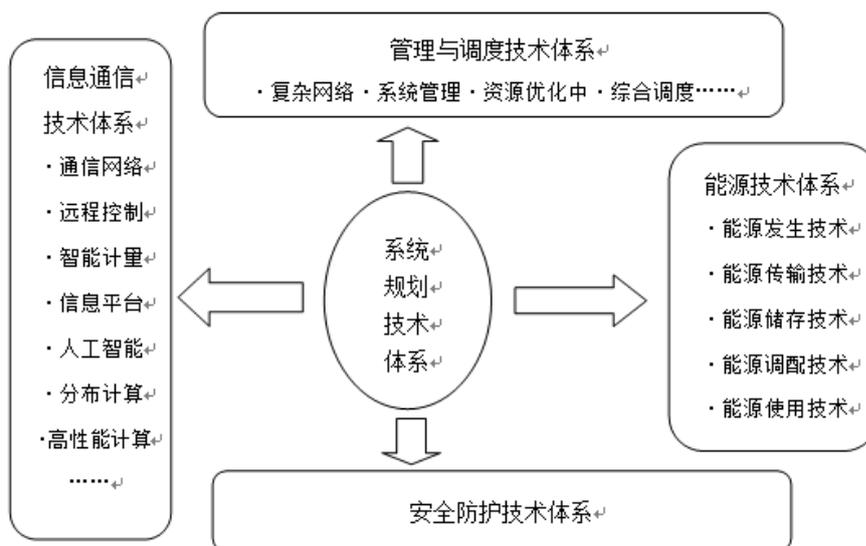


图2-1 能源互联网的技术体系

Fig.2-1 Technology system of energy internet

(1) 系统规划技术体系。能源互联网是由多个复杂系统组成的复杂体系，需要用系统和体系的思想进行顶层谋划。因此，综合与规划技术体系是能源互联网的核心，主要包括体系架构设计、方法学与接口设计、发展规划设计、相关协议标准等。

(2) 能源技术体系。主要包括从能源发生到传输、调配、储存、使用等关键环节的支撑技术。其中能源发生技术中以分布式可再生能源为主，辅以清洁高效的传统能源技术，探索未来新兴能源技术。降低传输损耗、延长传输距离是保障能源互联网未来运行稳定的关键传输技术。储存技术为能源稳定供应提供保障。调配技术是实现能源互联的核心环节，实现能源高效合理地自由流动。能源使用技术则将实现用能信息收集、分析、反馈与预判断，对稳定能源传输提供必要的信息支持。

(3) 信息通信技术体系。在能源互联网中，信息通信技术充当中枢神经系统，对社会用能进行监管、协调和处理，是能源合理调配的前提和实现保障。信息通信技术体系主要包括智能计量、信息平台、人工智能、分布计算、高性能计算以及通信网络等相关技术。

(4) 管理调度技术体系。主要对能源互联网复杂网络进行系统管理、资源优化与综合调度。管理的目标主要包括能源利用率管理、需求响应管理、费用效用价格管理以及排放管理等。管理的方法与工具包括优化方法、机器学习、博弈论、拍卖等。

(5) 安全防护技术体系。从网络性质看，有能源网络的安全防护和信息网络的安全防护；从攻击或故障的性质看，有针对蓄意攻击（网络黑客、恐怖分子等）的安全防护和非蓄意攻击（自然灾害、设备自然故障、用户操作故障等）的安全防护；从安全防护问题本身的内容看，可以分为网络攻防、故障诊断、自保护、可靠性安全性等技术。

2.3. 现有能源互联网架构分析

目前，已经有一些研究机构针对能源互联网进行基础性的研究，也有一些国家，如德国已经开始实践能源互联网，下面对主流的几个能源互联网观念或架构进行介绍和分析。

(1) 杰里米·里夫金教授从哲学和经济学角度所论述的能源互联网

杰里米·里夫金教授提出^[1]，通信和能源这种新的结合方式即将出现，互联网技术和可再生能源将结合起来，为第三次工业革命创造强大的基础，并提出第三次工业革命的支柱包括以下五个：

- a) 能源转型，传统化石能源向可再生能源转型；
- b) 能量收集，将每一大洲的建筑转化为微型发电厂，以便就地收集可再生能源；
- c) 能量存储，在每一栋建筑物以及基础设施中使用氢和其他存储技术，以存储

间歇式能源；

d) 能源互联网，利用互联网技术将每一大洲的电力网转化为能源共享网络，这一共享网络的工作原理类似于互联网（成千上万的建筑物能够就地生产出少量的能源，这些能源多余的部分既可以被电网回收，也可以被各大洲之间通过联网而共享）；

e) 电动交通系统，将运输工具转向插电式以及燃料电池动力车，这种电动车所需要的电可以通过洲与洲之间共享的电网平台进行买卖。

其中能源互联网的作用是使电力输送网络将会转变成信息能源网络，构建双向的能量流网络，根据源-网-荷的实际状况调节能量流，使得数以百万计自助生产能源的人们能够通过对等网络的方式分享彼此的剩余能源。

（2）北卡来纳大学未来可再生电能传输及能量管理系统研究中心提出的FREEDM系统

目前的文献显示，能源互联网（Energy Internet）这一名称最早出现在FREEDM的研究工作中。FREEDM中心是美国NSF于2008年在北卡州立大学建立，目前有17个科研院所和30余个工业伙伴共同参与，希望将电力电子技术和信息技术引入电力系统，在未来配电网层面实现能源互联网理念^[2-6]。效仿网络技术的核心路由器，他们提出了能源路由器的概念并且进行了原型实现，利用电力电子技术实现对变压器的控制，路由器之间利用通信技术实现对等交互。

图2-2给出了FREEDM系统的框架图。FREEDM系统可以称作是一种绿色智能电网架构，包括以下特性：具备可再生发电电源及储能设备的即插即用；具有可扩展和安全的新型通信网络；可脱离主干电网由可再生能源独立支撑运行；可以提供良好的电能质量和系统稳定性；具备更高的效率和可控的功率因数。

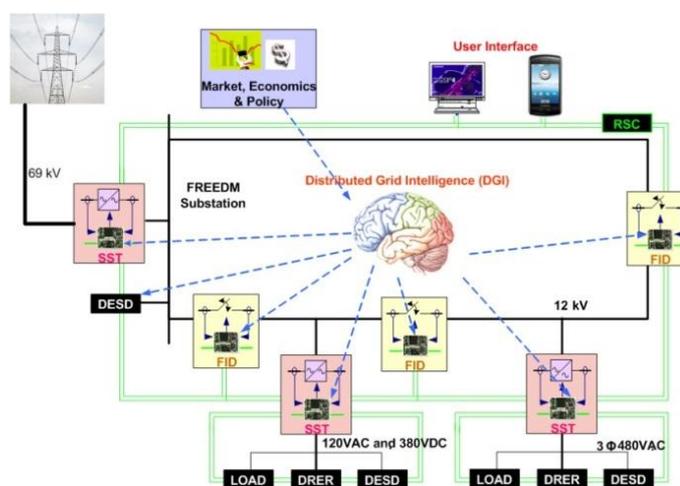


图2-2 FREEDM系统框架

Fig.2-2 Architecture of FREEDM system

资料显示，FREEDM侧重于发挥电力电子设备对能量流的可控制性操作，再结合信息通信技术实现能量流的管理、控制，目前该系统尚处于基础理论研究和原型系统设计阶段。

(3) 伯克利观点——以信息为中心的能源基础设施

加利福尼亚大学伯克利分校的研究团队更关注智能电网的底层信息架构，提出“以信息为中心的能源网络”架构^[8]。以期在一个通用架构中将智能通信协议与电能传输相结合，能够实现分布式控制，以及对于价格信号或更详细可用电量的持续需求响应。

以信息为中心的能源网络在配电系统之上覆盖了信息传输，遍布各种物理场所，如机房、楼宇、社区、发电孤岛和区域电网等。图2-3是此覆盖网络的示意图。

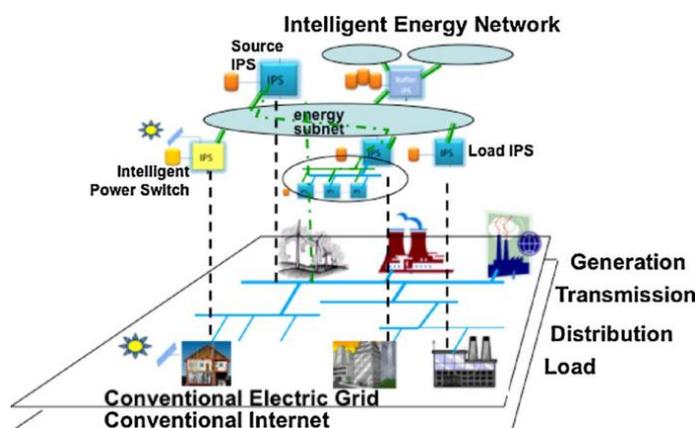


图2-3 以信息为中心的能源网络架构

Fig.2-3 Architecture of information-centric energy network

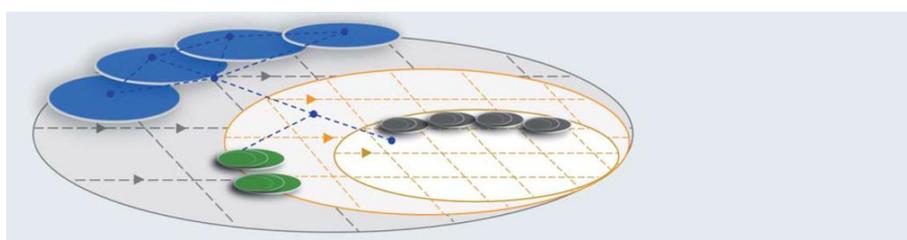
图2-3所示的能源网络对电源、负荷或储能容量进行分组，构成能源子网；子网通过图中名为“智能电源开关（IPS）”的接口与该网络的其他部分进行交互。能源网络将其子网成员的总供需以可预测、可筹集、可调整的计划商品的形式表示，并在电源和负荷间不断进行电力交易时为双方提供通信服务。该能源网络是以互联网数据中心作为研究的案例，对深层需求响应和“随供电量调整负荷”进行研究，随后将这种智能负荷的概念扩展到数据中心之外，应用于整座楼宇乃至楼宇群。

需要提及的是，该课题组正在设计可扩展能源网络模型——LoCal。LoCal旨在研究信息传输能如何更好地支持能源系统，紧密集成发电、储能和用电，并开发各种规模的能源信息接口和传输协议，包括机房、楼宇设施、储能设施、楼宇和电网发电级等。通过信息交流，更好地感知可用电量 and 负荷状况，能够更准确地匹配电源与负荷，消纳可再生能源，实现更高水平的整体能效，并避免过度超量配置能源系统。

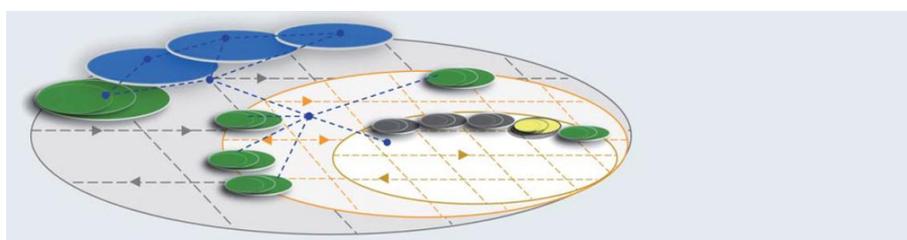
(4) 德国的信息能源——E-Energy

E-Energy是2008年德国联邦经济技术部与环境部在智能电网的基础上推出的一个技术创新促进计划，是基于ICT的未来能源系统^[22]。它提出打造新型能源网络，在整个能源供应体系中实现综合数字化互联以及计算机控制和监测的目标。

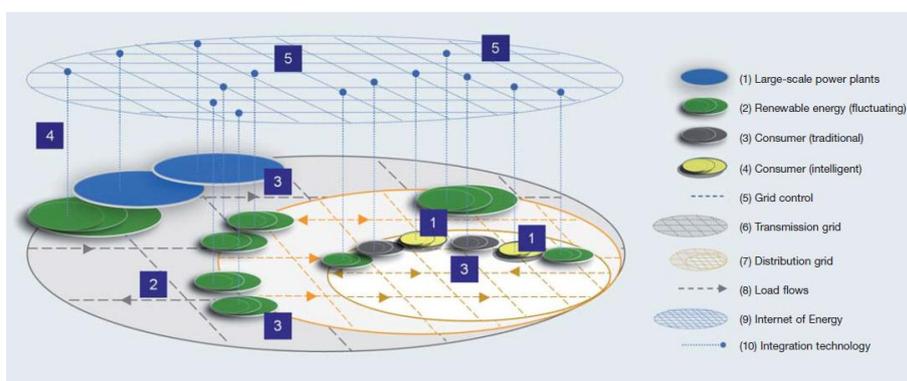
E-Energy充分利用信息和通信技术开发新的解决方案，以满足未来以分布式能源供应结构为特点的电力系统的需求。它将实现电网基础设施与家用电器之间的相互通信和协调，进一步提高电网的智能化程度。换句话说，其目标不仅是通过供电系统的数字联网保证稳定高效供电，还要通过现代信息和通信技术优化能源供应系统。德国总理默克尔专门针对E-Energy表示：“应该为能量生产和消费提供智能IT支持，包括从电站中的发电机到客户的各个环节。把信息通信技术和能源这两个领域综合起来是E-Energy项目的重点，在解决核心技术之后，德国准备从配电到循环电网打造一个全新的能源互联网。



(a) 目前由大型发电厂统一供电方式



(b) 2015年用户变成分布式发电厂



(c) 2020年能源网络中所有元素通过互联网协调工作

图2-4 E-Energy 架构

Fig.2-4 Architecture of E-Energy

图2-4描述了E-Energy的发展规划,图2-4(a)所示为目前大型发电厂统一发电的模式,到2015年实现图2-4(b)所示的集中式大型发电厂和用户侧分布式可再生能源发电共存,最终在2020年实现在电力系统覆盖信息网络,能源网络中所有的元素通过互联网的信息协调工作。从能源消费模式上讲的角度来看,E-Energy是促进电力系统的范式转变,从“以消耗决定电力生产”转变到“以电力生产决定消耗”,是从理念上的深刻变革。

日本福岛核电站泄漏事件加速了德国的弃核步伐,更快的转而更大力度的发展和依靠可再生的新能源,清洁的可再生能源固有的不稳定特性对德国的能源布局产生了很大的困扰,解决这种困扰的主要方法之一正是发展能源互联网。可以说,弃核也将在一定时期内造成德国的能源困局,但长远来讲也将促使德国在能源产业相关技术走在世界前列,或许在几十年后德国就像输出列车、汽车一样输出新能源技术。

通过以上的对比分析,能源互联网在美国和欧洲主要有集中、自上而下模式和分散、合作两种模式。美国由于其广阔的疆域与自然形成的能源布局,注定集中式的超级大电网会在未来能源互联网中占据重要地位;欧盟本身是一个区域一体化组织,分散式模式更适合欧盟的进一步发展。但是,无论哪种模式,能源互联网都将把一个集中式的、单向的、生产者控制的电网,转变成大量分布式辅助较少集中式的和与更多的消费者互动的电网。能源互联网是微网的广域连接形式,是分布式能源的接入形式,是从分布式能源的大型、中型发展到了任意的小型、微型的实现。能源互联网是分布式能源网络化的发展,微电网是能源互联网中的基本组成元素。

2.4. 信息物理融合体系能源互联网研究

能源互联网是以信息为支撑的能源基础设施变革,如何实现能量流与信息流的融合,有效实现信息的实时采集和控制策略的实时实施是至关重要的。信息物理融合系统(CPS)是综合计算、网络和物理环境的多维复杂系统,通过3C(Computation、Communication、Control)技术的有机融合与深度协作,实现大型工程系统的实时感知、动态控制和信息服务。CPS实现计算、通信与物理系统的一体化设计,可使系统更加可靠、高效、实时协同。可见信息物理融合体系的角度研究能源互联网的架构是非常合适的,可以有效解决能量流与信息流深度耦合的难题^[23-27]。

2.4.1. 能源互联网的体系架构

信息技术能够提高电网的可靠性、可视性和可控性,但要想把电网建设成为能源互联的基础设施网络,仅仅依靠当前应用于需求响应系统的智能量测技术是无法实现的。过去几十年互联网发展过程中提出了实现更加智能的组织原则,即通过在边缘部

署智能特性，并以定义明确的接口涵盖多元化的底层技术，并获得了巨大的成功。参照信息互联网的发展历程，能源互联网中任何设备可作为路由流量的发送器或接收器，而智能终端可以根据基础设施的本地供电情况调整其行为。

当前基础设施部署广泛、已投入高额成本，且技术为人们所熟知，彻底更换现有基础设施的激进作法不太可能成功。互联网在这方面也起到了示范作用——基础设施长期共存，服务逐步更换。早期的网络是部署在电话网络之上的，它有着更富弹性的组织原则，构成了自己的基础设施，最终实现了角色的转变。用同样的方法也可打造一个全新的本地发配电架构，在利用现有电网的基础上，实现效率和耐用性的新突破。这与互联网在一定程度上以异步传输模式（ATM）电话技术为基础，而又大幅改进了电话网络的发展路径有异曲同工之妙。

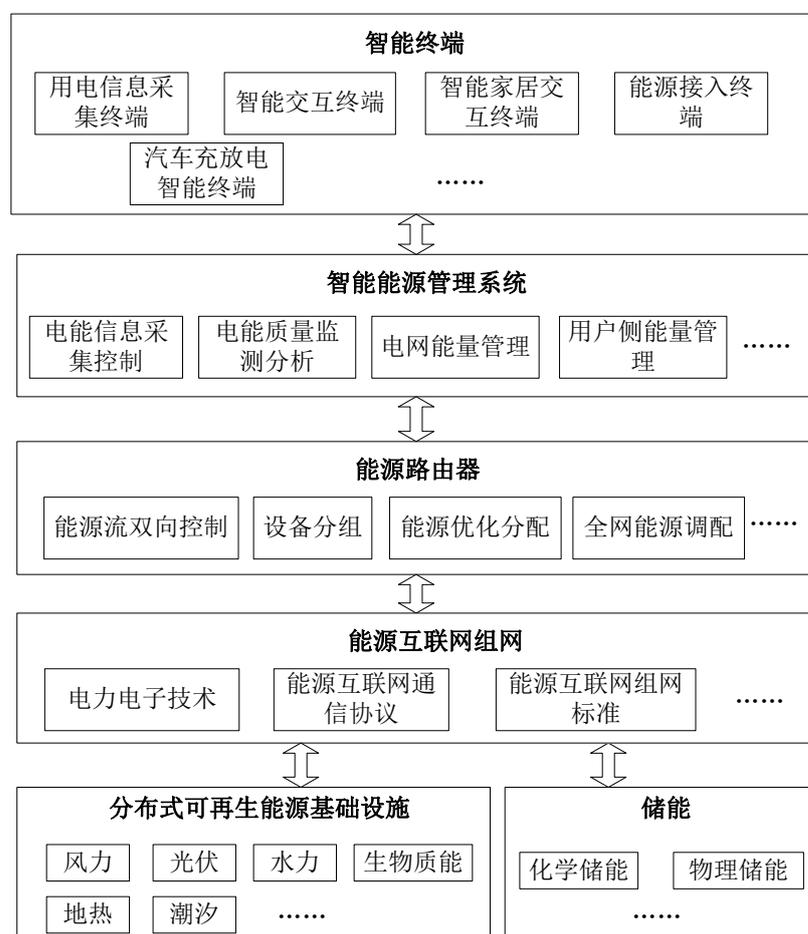


图2-5 能源互联网体系架构

Fig.2-5 Systematic architecture of energy internet

在一个通用架构中将智能通信协议与电能传输相结合，能够实现分布式控制，以及对于价格信号或更详细的可用电量的持续需求响应。采用此种基础设施设计，当前满足高峰/最坏情况需求的战略将转变为关注平均需求，同时留出一定的空间，这与

分组网络中的统计复用相似。关键在于利用预留空间，作为一个输入参数，来控制发电、储能和负荷。通过边缘配置的标准化智能“接口”提供了智能特性，支持独立供电、分布式发电和电力交易。该架构应能够汇总负荷和供电，接入地区电网、邻近的对等电网（P2P电网）或设施电网，利用本地储能和管理，使负荷趋于平稳，调整需求，进行交易。

“计算系统”以层次架构、聚合、分层、应用编程接口（API）和协议等概念为基础，这一术语对于确立能源互联网的概念非常重要。发电和用电负荷间的储能打破了它们之间的同步，这与网络缓冲使发送方和接收方去耦合的作用相似。电网的重要服务功能包括资源配置、负荷平衡、负荷迁移和重定向等。与互联网的智能边缘和哑管道类似，能源互联网支持智能发电和用电，但该环境中存在着可靠性问题。通过监控、建模和管理，能够实现普遍的用电情况感知，并实现“随供电量调整负荷”。图2-5给出了五个层次的能源互联网体系架构示意图。

早期的微电网研究与发展为能源互联网形式的电网架构奠定了基础，微电网实现了大电网的裂解和能源的分布式管理和调度^[28-37]。微电网是能源互联网中的基本组成元素，通过新能源发电、微能源的采集、汇聚与分享以及微网内的储能或用电消纳形成“局域网”。所提出的基于信息物理融合体系能源互联网中，能源互联网是微电网的广域连接形式，是分布式能源的接入形式，是从分布式能源的大型、中型发展到了任意的小型、微型的“广域网”实现。大电网的形成有其必然性，在传输效率等方面仍然具有无法比拟的优势，将来仍然是能源互联网中的“主干网”。

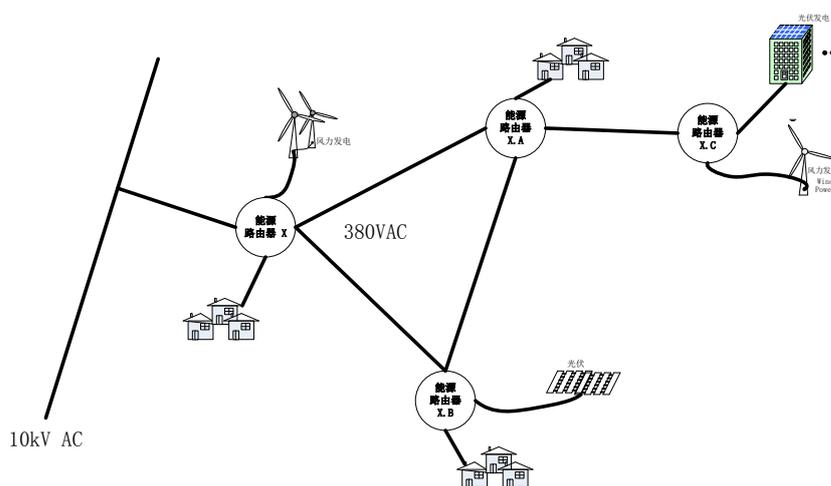


图2-6 能源互联网网络结构示意图

Fig.2-6 Schematic diagram of energy internet network structure

可以总结，基于物理信息体系的能源互联网是以互联网理念构建的新型信息能源融合“广域网”，它以大电网为“主干网”，以微网为“局域网”，以开放对等的信

息能源一体化架构真正实现能源的双向按需传输和动态平衡使用，因此可以最大限度的适应新能源的接入。通过以信息为中心的、互联网为模型的新一代能源互联网体系架构（如图2-5示意）以及信息能源融合机制，实现信息流与能量流的深度耦合，实现不同能源之间及能源与消费者之间的协同互动，达到能源综合利用的高效。

上述的能源互联网需要对原有配电网结构进行裂解，并实现分布式的能量流管理控制，这需要称之为能源路由器的设备，实现如图2-6所示的能源互联网网络，能源路由器将在章节2.5.5中进行详细讨论并给出原型设计。

2.4.2. 能源互联网的能量缓冲

储能/用电缓冲是能源互联网架构的重要组件，以打破供电和用电间的同步性。能源互联网的重要功能之一是能够预测供电量和用电量，并将其作为供电方和用电方之间协商的基础。对这些信息进行适当的汇总和交流，将有助于供需双方相互适应、共同协作。借助定义明确的接口，能够实现逐步增量部署。此外，以信息流控制能量流还有助于供需双方更好地调整，提高可靠性和灵活性。

在能源互联网架构中，储能装置既是负荷也是电源。电源是智能的，能够预计供电状况并发送相关信息；负荷也是智能的，能够根据接收到的供电信息调整自身工作。它们必须通过控制算法，根据电网和分布式发电的电量或电价，决定是充电以备将来使用，还是放电以供当前使用。除了采用电池等传统储能装置来缓冲用电，还可通过合理调度用电时间来缓冲。现在用电就等于提前了负荷的工作时间，调峰用电则是延后了负荷的工作时间，这个过程就是用电缓冲的过程。能源互联网可以利用子网内的数据中心、电动汽车等包含储能的设备作为子网能源硬备储能单元；将用能伸缩性较大的负荷构成虚拟电厂作为子网软备储能单元；设计收敛型的能源消纳方式，实现能源的最小区域消纳，避免双向的能量流对电网潮流复杂化。

本报告第3章将针对能源互联网中的储能系统控制策略进行研究。

2.4.3. 能源互联网的能量管理

基于物联网、云计算等先进通信信息技术的智慧管理系统，主要包括电能信息采集控制系统、电能质量监测分析系统、电网能量管理系统、用户侧能量管理系统等多个子系统。部分重点功能：

（1）电源协调控制功能：

系统中包含多个分布式能源，可以是同类型的，也可以是不同类型的，它们的外特性、时间常数和组成环节等各不相同，需要解决能量平衡，电压稳定，系统的平稳性和可靠性等。

（2）电能质量控制功能：

可再生能源的接入会对系统中的电能质量产生或多或少的影响,控制不当会对电压波形、频率、功率因数产生负面影响,尤其是太阳能、风能这种随机性的能源,频繁的启停操作、功率输出的变化,都可能给系统中的用户带来电能质量问题:大量单相分布式电源的存在,增加了配电系统的三相不平衡水平;电子负载易受暂态、跌落、谐波、瞬间中断及其他扰动的影响等。

(3) 高级能量管理功能:

能够根据能源需求、市场信息和运行约束等条件实时决策,自由控制可再生能源发电与电网的能量交换;调整电源冷热能量输出满足热负荷和电负荷的需求;提供分级服务,通过延迟对弹性负荷的需求响应确保关键负荷的优质电力保证;对设备和负荷进行灵活调度确保系统的最优化运行。

本报告第4章将论述能源互联网中分布式能量管理平台的设计。

2.4.4. 能源互联网的能源路由器

能源路由器是一个全新的概念,却不是一项全新的技术,能源路由器是智能变压器的进一步发展,是智能能量管理设备,可以根据信息流完成对能量流的控制,是电磁技术、通信技术、控制技术、电力电子技术、计算机技术的高水平综合产物。针对电网设计的能源路由器称之为“电能路由器”更能与其功能相贴近,但为了与前期出现的类似设备相一致,此处依然称其为能源路由器。

能源互联网从根本上看是对能量流的精细化管理控制,改变传统单向能量流流向为双向流向,在能源网络中对电源、负荷或储能容量等进行分组,构成能源子网,分区域、分层次的实现能源的管理控制。因此,由可以友好接入到当前电网中的能源路由器完成区域能源的管理控制,对实现覆盖于当前电网上的能源互联网是核心的设备。任何不稳定的能源接入(例如风能)都需要一个优秀的能源路由器。通过能源路由器可以管控能源网内的能量流,可以提供对不同结构微电网的管理连接,实现多层次能源网络的开发式管理控制。

目前,国外的能源路由器主要有美国FREEDM系统的“Energy Router”^[4-5],瑞士联邦理工学院研究团队开发的“Energy Hub”^[9-10],日本数字电网联盟提出的“电力路由器”等^[38]。国内主要有联方云天科技(北京)的“gEnergyRoute”^[39]。

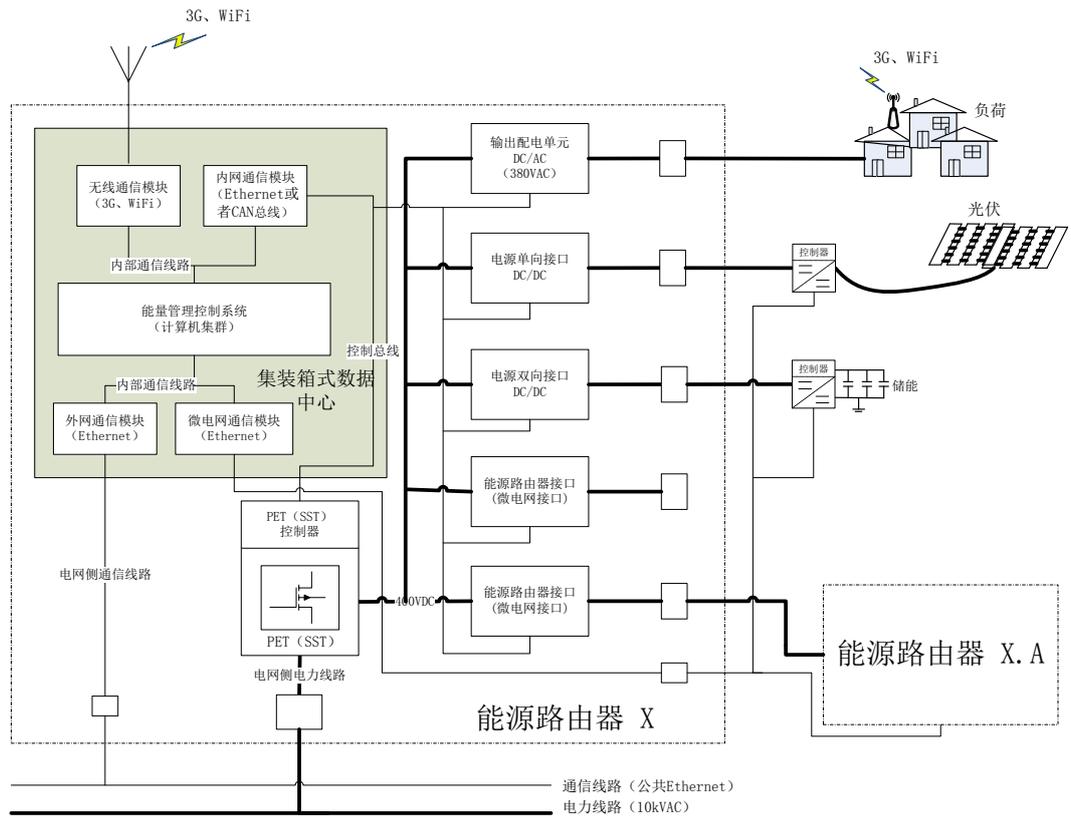
FREEDM系统的“Energy Router”是以电力电子变压器(也称为固态变压器)为核心,通过远程可控制的快速智能开关实现微电网或者线路的智能通断控制,并加以以能量管理系统。该能源路由器的功率部分实现了中压(7.2kV AC)、高压直流(10kV DC)和低压交流(120V AC)、低压直流(400V DC)的控制,通信模块则采用了Zigbee、Ethernet和WLAN三种模式实现“Energy Router”内部和“Energy Router”之间的通信。

瑞士联邦理工学院研究团队开发的“Energy Hub”称之为能量集线器，是由计算机科学中集线器的概念引申而来，也叫能量控制中心。宏观上看，“Energy Hub”是一个信息中心，它通过超短期负荷预测以及实时在线监测分布式电源、配电网的潮流数据，对各发电侧及受控负荷侧进行优化控制。“Energy Hub”规模可以覆盖一个家庭甚至整个城市。“Energy Hub”在系统中是一个广义的多端口网络节点，它与配电网连接，对配电网上的能量起到补充、缓解、转换、调节、存储的作用。“Energy Hub”上的端口分为输入和输出两种，输入侧一部分为从配网流入Hub的电量，另一部分为从各分布式电源中流入Hub的不同形式的能量；输出侧一部分为供给各种负荷（电、热，冷）用的不同形式的能量，另一部分为反馈回配网中的冗余电量。

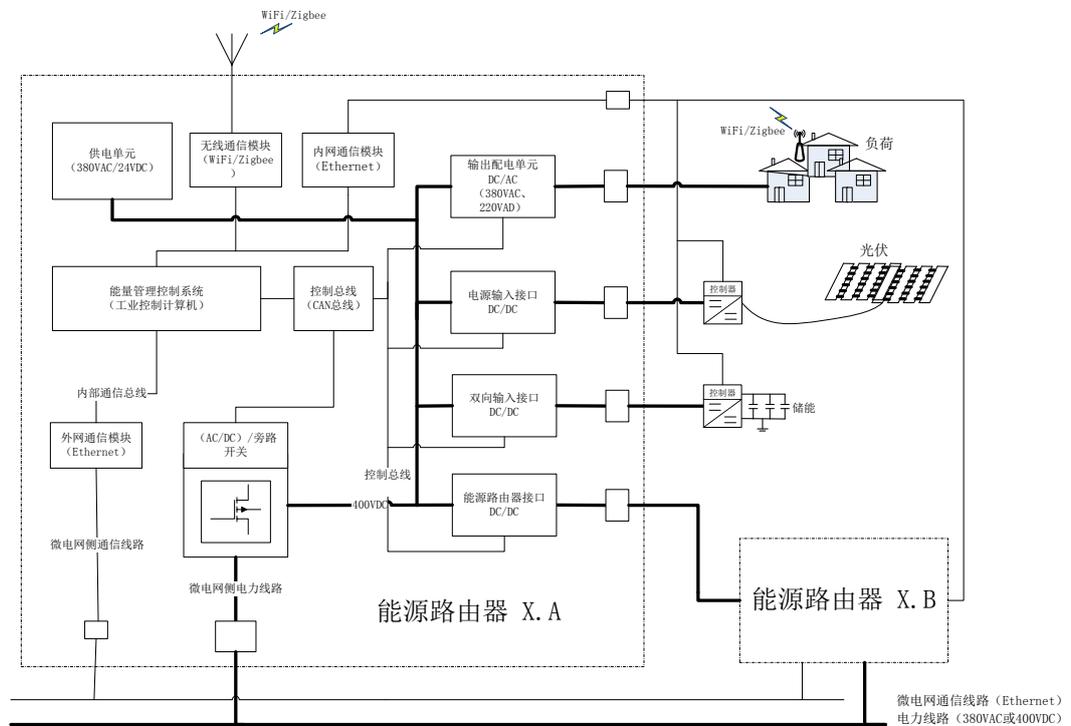
日本研制的数字电网路由器，称之为“电力路由器”，可以统筹管理一定范围的地区的电力，并可通过电力路由器调度地区电力。电力路由器与现有电网及能源局域网相连，可以根据相当于互联网地址的“IP地址”识别电源及基地，由此就可进行“将A地区的风力发电电力送往B地区的电力路由器”等控制。在电网因发生灾害而停止供电时，电力路由器之间可相互调度蓄电池存储的电力，从而防止造成地区停电。此外，位于东京都港区的VPEC公司通过电力系统自身携带信息，而不需要通过互联网实现信息传递。该公司开发的电力供给系统称为“ECO网络”，通过带有蓄电池的电力路由器，统筹含有发电设备以及需求侧的一定面积的区域，电力路由器能够根据蓄电池剩余电量改变输出电力的频率。电力路由器通过邻近电力路由器发来的频率，来判断邻近发电站、所的电量余量，再根据这一数值差异，形成站所间自律性电力流通的机制。这样一来，能够自律性解除局部电力不足问题，所需电力从系统网向下流进行补充。由于采用的频率位于目前商用电源频率上下0.2Hz的范围之内，因此家电可直接使用。因为信息交换过程中，并没有采用互联网等机制，所以基础设施本身能够极为简单，也更具备抗灾害的能力。

“gEnergyRouter”由联方云天科技（北京）设计开发，可以支持多路电源输入，包含交流、直流、再生能源及电池，能源转换效率极高并具备智能输入切换能力，UPS不断电能力及大容量电池组管理功能，若同时将多台“gEnergyRouter”并网输出，即可形成直流微电网。需要提及的是，“gEnergyRouter”的开发是针对数据中心的应用，以节能减碳为设计理念，结合再生能源（如太阳能）的使用与智能管理的概念，是能源互联网理念在数据中心中的体现。

通过以上几种主要能源路由器的分析，可见无论针对什么样的场景，或采取什么样的技术，能源路由器主要功能是电力能量流的控制和信息流的融合，可以通过信息通道及时反馈能量流的状态，并可根据信息流的反馈及时的调整对能量流的控制。在这种思想指导下，能源路由器可以是智能变压器的进一步发展。



(a) 电能路由器I型



(b) 电能路由器II型

图2-7 能源路由器原型功能图

Fig.2-7 Schematic diagram of Energy Router prototype

图2-7给出了两种能源路由器的原型功能图，图2-7（a）所示为与10kVAC电网的连接的能量路由器，图2-7(b)所示为与380VAC或者400VDC电网连接的能源路由器，这两种能源路由器再配合智能电表可以构成图2-6所示的三级能源互连网络。为了表述方便，并与其他研究机构设计、研发的能源路由器相区别，图2-7（a）所示的能源路由器称之为电能路由器I型，图2-7（b）所示的能源路由器称之为电能路由器II型，智能电表称之为电能路由器III型，智能电表市场上已经有较多的选择，因此不进行特定的原型系统开发。电能路由器I型可以实现10kVAC微电网的能量和信息管理控制，电能路由器II型可以实现380VAC/400VDC微电网的能量和信息管理控制，电能路由器III型则是实现单用户的能量和信息管理控制。

电能路由器I型相比于II型的结构更为复杂，最大可以实现一个变电站区域的电力能量和信息管理控制，功率控制部分采用与电力电子变压器相类似的结构，电能路由器I型内部功率主线采取400VDC，通过双向AC/DC单元将10kVAC变换成400VDC（也可反向变化，即可400VDC转换成10kVAC输送到电网），输出可以逆变成380VAC供给用户，或者连接至I型电力路由器，可实现分布式电源和储能设备的接入，并以集装箱式数据中心作为能量管理中心。电能路由器II型内部功率线主线采用400VDC，可与380VAC和400VDC电网线路或电力路由器I型相连接，可实现分布式电源和储能设备的接入，可与其它II型电能路由器串联、并联，或者串并联构成图2-7（b）中所示环形网络。

2.5. 能源互联网示范工程设计

2.5.1. 能源互联网示范工程设计目标及方案

以能源互联网技术为核心突破点，以经济技术开发区为典型区域，以目前智能园区等工程为实施基础，开展能源互联网区域示范工程的方案设计研究。

（1）能源互联网区域示范工程的总体设计目标

通过以信息为中心的、互联网为模型的新一代能源基础设施构架与建设，实现信息流与能量流的深度融合，实现不同能源之间及能源与消费者之间的协同互动，达到能源综合利用的高效。

（2）能源互联网区域示范工程的具体目标

在总体目标的指导下，能源互联网区域示范工程的具体目标可以分解如下：

a) 形成能源互联网体系建设标准

主要包括能源互联网语义标准、能源互联网架构标准、能源数据交互标准、能源服务逻辑接口标准、能源服务组织规范、能源服务流程规范等。

b) 实现能源信息流的双向管理

通过配电侧的能源路由器，发挥能源互联“网”的优势，设计收敛型的能源消纳方式，实现示范区域内能源信息流的双向管理控制。

c) 实现能源的按需低碳高效利用

通过能源信息流的实时监控、智能分析、在线决策、协同互动等机制，实现示范区域内能源的按需低碳高效利用。

d) 探索能源互联网服务运营管理的商业新模式

成立能源互联网服务运营管理公司，这是一种基于合同能量管理机制运作的、具有规范操作流程和可靠服务标准的专业化公司。

(3) 能源互联网区域示范工程的工程方案

能源互联网示范工程建设一个示范性的能源局域网，其总的网络拓扑结构如图2-6所示，包括一个I型电能路由器，三个II型电能路由器，以及若干III型电能路由器。通过在区域电网上布设能源路由器，构成能源局域网，在公共大电网侧并网不上网，用电不馈电，而在能源局域网内实现产能、用能的精细化管理控制，利于任意类型可再生能源发电的接入、聚集和消纳，并试点电能的自由交易。

能源互联网示范工程创建新型的，以信息为中心，能量与信息融合的新型智能电网。在广域电网局部构建一个小型的，示范性的能源局域网。能源互联网具有很强的开发性和拓展性，可以连接控制众多区域示范工程，并且在示范工程的基础上可以向外、向上扩展到更大范围。

借能源互联网示范工程之际，完成系列电能路由器的研究、开发、设计和产业化。

2.5.2. 能源互联网示范工程运营方案规划

能源互联网区域示范工程涉及多部门的协调参与，运营的主要目标是：发展和推广可再生资源的高渗透率使用，提高不可再生能源的使用效率，扩大能源使用的效益，提高能源业务的服务水平，并将能源互联网示范工程的经验进行推广，以点连面，建成大范围的能源公共服务体系。

能源互联网的建设需要政府管理部门提供相应的政策支持，进而引导政府资源和社会资金投向能源互联网式能源基础设施方向。政府管理部门委托科研机构提供示范工程建设和运营的完整解决方案，使用公开招标的方式选择具有优秀资质的企业运营示范工程，明确投资方、科研方、运营方、能源使用方等各方的责任和权益。在示范工程的进入运营阶段，政府管理部门协调相关各方制定详细的示范工程运营及服务规范。

该方案贯穿能源互联网投资决策、能源生产运行以及能源消费的整个过程，并探索在新环境下能源服务运营的商业模式。具体运营方案如下：

(1) 首先由政府管理部门批复特许经营权，政策上允许能源互联网基础设施的

运营，划定示范工程试点区域，并允许示范区域内电力转售。

(2) 由政府管理机构、研究机构、第三方企业和电网公司等共同投资成立能源互联网运营公司。运营公司主要负责示范工程的融资和投资决策，并承担工程建设、运营和推广等方面的具体实施，最终完成能源互联网的商业化运转和推广。

(3) 在运营初期，预计2~3年的时间内，建设一个能源微网示范点，实现示范区域内分布式可再生能源的建设和该能源微网的运营，具体包括：

a) 在能源微网内建设一批可再生能源发电站（光伏发电、风电）及高效率的分户式发电站（燃气热电联产），产权自有，可根据需要实时调节电站的出力，完成产能基础设施建设。

b) 建设一定容量的自有储能装置，作为产能、用能的缓冲。

c) 在电网公司的协助下完成现有配电网的信息化改造工程。建设具有自主技术优势的能源路由器、能源与信息融合网络，并将老式电力设备更换成为智能设备，实现产能、用能的精细化管理控制。

d) 建立能源微网运营的业务流程和管理模式，并根据能源微网的业务需求和运营需求开发能量管理系统，以信息为中心，实现能源微网内能源调度、功率控制功能。

e) 在能源微网内开放能源的自由交易，在整个能源微网的统筹管理下，允许用户之间、用户与运营公司之间进行能源的自由交易。运营公司通过能源交易市场、用能服务费用等获得经济效益。

(4) 能源互联网运营公司通过建立分公司和外包给第三方公司的方式，依据功能分工成立多个能源微网子公司，负责运营中的各项业务。

(5) 在已有能源微网成功运营的基础上，5年内建设3-5个的能源微网，将这些能源微网互联构成环状的能源局域网络。具体包括：

a) 基于已有能源微网成功运营的经验，建设新的能源微网，并将它们各自成功运营。

b) 通过对配电网进行改造，在线路上加装能源路由器（站），建立二级的能源路由，实现多个能源微网之间能量流和信息流的交互和控制，构成能源局域网。

c) 建立整个能源局域网络运营的业务流程和管理模式，并改进能量管理系统实现更大范围内的能源调度、功率控制等功能，推进不同能源微网间的能源交易。

(6) 在示范工程的建设和运营中，在能源互联网架构、电力电子技术、储能技术、能源路由管理、信息采集和数据分析、能源质量保障等方面形成一系列的知识产权，包括标准体系、专利体系等。

(7) 利用示范项目的成功经验，推动能源互联网在全国范围的推广和发展。

2.6. 本章小结

本章首先对能源互联网的概况进行了阐述，主要包括能源互联网的特征、组成及其技术体系。对目前国内外主要的能源互联网架构及关键技术进行分析，在此基础上提出了符合信息物理融合体系的能源互联网架构，并给出了两种能源路由器的原型设计，通过这两种能源路由器可以在现有配电网基础上实现所提出的能源互联网。最后根据所给能源互联网架构设计了能源互联网示范工程，并分析了能源互联网示范工程的运营模式。

3. 能源互联网储能系统控制策略研究

3.1. 引言

分布式可再生能源的输出功率随着大气的变化等情况发生波动，如何对间歇式的可再生能源进行洁净存储和提取，保持能源供应系统的稳定性，是能源互联网面临的主要挑战之一。能量储能系统（ESS）可以作为电能的缓冲池有效解决这个问题，可以在负荷低落时储存电源的多余电能，而在负荷高峰时回馈给电网以调节功率需求。而对于光伏或者风电等具有间歇性特性的电源，外在条件的变化会导致输出功率的变化而引起电能质量的下降，与储能装置结合可以很好地解决电压骤降、电压跌落等电能质量问题。针对系统故障引发的瞬时停电、电压骤升、电压骤降等问题，此时利用储能装置提供快速功率缓冲，吸收或补充电能，提供有功功率支撑，进行有功或无功补偿，以稳定、平滑电网电压的波动。当能源微电网与大电网并联运行时，微电网相当于一个有源电力滤波器，能够补偿谐波电流和负载尖峰；当微电网与大电网断开孤岛运行时，储能系统能够很好地保持电压稳定^[40-41]。

风力发电、光伏发电等可再生能源发电的输出功率会跟随外界变化而具有较大的波动性，随着在电网中的渗透率提高，其对传统电网的安全性、稳定性、电能质量等多方面造成了冲击和影响，国内外都对此进行了规范^[42-43]。在间歇性电源出口配置一定容量和功率的储能装置，可以有效抑制输出功率的波动及骤变，提高并网稳定性和调度性，增强此类可再生能源发电的可利用性^[44-45]。鉴于目前储能装置的成本较高，使用寿命较短，如何配置储能系统的容量^[46-48]，以及利用有限容量的储能系统平滑波动性功率输出^[49-58]，并保证储能系统的安全持续运行，对控制提出了较高的要求。

目前平滑控制多采用储能电池作为能量存储介质，而电池存在价格较高，使用寿命较短的缺点。电池的寿命主要是由充放电深度决定的，浅充浅放有助于延长电池的使用寿命^[59]，同时也意味着在平滑控制过程中降低了对电池容量的需求，因此，研究有效的控制策略实现在平滑控制过程中降低电池的充放电深度具有重要的理论和工程意义。

3.2. 能源互联网中的分布式储能技术分析

储能技术主要有机械储能、电化学储能和电磁储能等三大类。由于各种储能技术都存在一定的优势和局限性，因此针对不同的应用领域，多种技术并存是未来储能技术发展的趋势。现阶段分布式储能中可利用的储能装置很多，主要包括电池类储能、超导储能、飞轮储能、超级电容器储能等。

（1）电池类储能

电池储能是目前分布式储能中应用最广泛、最有前途的储能方式之一。电池储能可以解决系统高峰负荷时的电能需求，也可用电池储协助无功补偿装置，有利于抑制电压波动和闪变。然而电池的充电电压不能太高，要求充电器具有稳压和限压功能。电池的充电电流不能过大，要求充电器具有稳流和限流功能，所以它的充电回路也比较复杂。另外充电时间长，充放电次数有限，因此限制了使用寿命，维护、维修费用高。如果过度充电或短路容易爆炸，不如其他储能方式安全，并且由于电池中化学物质的使用，还会造成环境污染。目前电池的效率一般在60%~80%之间，这主要取决于使用的周期和电化学性质。

目前电池的种类较多，主要有铅酸蓄电池、锂电池、钠硫电池和液流电池等。其中，铅酸蓄电池技术成熟、成本低廉，但是体积大、寿命短；锂电池体积小、寿命长、密度高，但是成本高；钠硫电池和液流电池具有效率高、寿命长等优点，近年的研究取得了突破性进展，在少量微电网研究系统中得到了应用，但大规模应用还有待时日。

（2）超级电容储能

超级电容器作为一种新兴的储能元件，它与其他储能方式比较起来有很多的优势。超级电容器与电池比较具有功率密度大、充放电循环寿命长、充放电效率高、充放电速率快、高低温性能好、能量储存寿命长等特点。与飞轮储能和超导储能相比，它在工作过程中没有运动部件，维护工作极少，相应的可靠性非常高。但是超级电容的缺点是容量较小，因此难以单独使用，一般与其他储能方式（如电池类储能）联合使用构成符合储能系统。

（3）超导储能

超导储能系统利用由超导体制成的线圈，将电网供电励磁产生的磁场能量储存起来，在需要时再将储存的能量送回电网或直接给负荷供电。超导储能系统与其他储能技术相比，由于可以长期无损耗储存能量，能量返回效率很高，并且能量的释放速度快，通常只需几秒钟，因此采用超导储能系统可使电网电压、频率、有功和无功功率容易调节。但是，超导体由于价格太高，造成了一次性投资太大。

（4）飞轮储能

飞轮储能技术是一种机械储能方式。早在20世纪50年代就有人提出利用高速旋转的飞轮来储存能量，但是直到80年代，随着磁悬浮技术、高强度碳素纤维和现代电力电子技术的新进展，才使得飞轮储能真正得到应用。飞轮储能具有效率高、建设周期短、寿命长、高储能量等优点，并且充电快捷，充放电次数无限，对环境无污染。但是，飞轮储能的维护费用相对其他储能方式要昂贵得多。

上述是目前可用于分布式储能场景的几种较为成熟的储能技术，其中电池储能系统是目前最实用，且应用最广泛的储能技术，性能上可满足大容量、快速反应的要求，

有时会与超级电容储能构成复合储能发挥各自有时，但相对于复合储能系统，电池储能系统（BESS）还是具有结构简单、控制方便的优点，因此在较多数的场景中或的利用，本章的工作也将集中于对电池储能系统控制策略的研究。

3.3. 间歇性电源输出功率平滑控制策略分析

采用低通滤波算法获得输出参考功率，通过补偿间歇性电源输出功率与参考功率的功率差，从而获得在联络线平滑的功率输出，是目前主要采用的方法。文献[49]采用一阶低通滤波原理进行平滑控制，并加入了基于电池荷电状态（SOC）的反馈环节。之后，文献[50-52]将电池的SOC反馈到一阶低通滤波器的时间常数中，其中文献[50-51]通过SOC值实时确定滤波器的时间常数，文献[52]则根据SOC调整混合储能的出力值，保护充电电池。文献[53-54]研究采用加权移动平均算法对风电场的功率波动进行平滑，其中文献[53]中根据电池SOC和功率波动程度通过模糊控制调整算法中的权重及窗口宽度，达到维持SOC合理水平的同时平滑功率波动；文献[54]则根据蓄电池和超级电容器的特性实时调节算法中的窗口宽度，调整混合储能的功率分配，实现平滑功率波动的目的。

文献[55]改变传统对原始数据进行滤波获得参考功率的方式，实现了基于指数平滑方式的并网光伏电站功率平滑控制。文献[56]更多的在控制过程中考虑了储能电池的状态，从而尽可能平滑功率波动的同时增强了对电池持续工作状态的优化。文献[57-58]进一步采用了模型预测控制实现平滑风电场的功率波动，在控制过程中加入了电池储能系统的容量和功率作为约束。

利用储能系统对间歇式电源输出的功率进行平滑处理的基本原理是通过实时调节储能系统的输出功率，对间歇式电源输出功率中高频段的波动成分进行补偿，以达到平滑间歇式电源输出功率的目的，集成了电池储能系统的间歇式电源系统结构如图3-1所示。

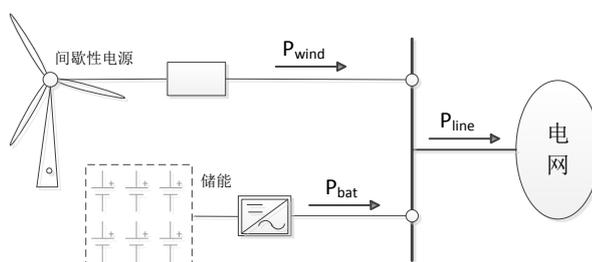


图3-1 集成储能的间歇式电源系统

Fig.3-1 Intermittent power supplies with BESS

此处以风力发电机组代表间歇式电源，以下的分析也采用风力发电实测数据。

图3-1中： P_{wind} 表示风力发电输出功率； P_{bat} 表示电池输出功率， P_{line} 则是连接到电网的联络线功率。

图3-1所示的系统，由基尔霍夫定律可得：

$$P_{wind} + P_{bat} - P_{line} = 0 \quad (3-1)$$

以基于低通滤波原理的风力发电输出功率平滑控制为例说明储能平滑控制的基本原理。控制平滑图3-2所示是利用一阶巴特沃兹低通滤波器实现对间歇式电源功率平滑控制的基本框图。

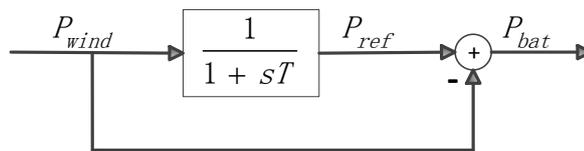


图3-2 基于定T低通滤波器的基本控制框图

Fig.3-2 Basic control block diagram based on low pass filter with fixed T

图3-2所示方法中滤波器的时间常数可以固定，也可以通过储能装置的状态实时调整^[50-51]，如图3-3所示。在控制过程中如果固定时间常数T，则可能会导致电池的过充或者过放，引发危险或者降低电池的寿命，因此本节采用图3-3所示的变时间常数T的控制方法对基于低通滤波器的平滑控制策略进行分析。

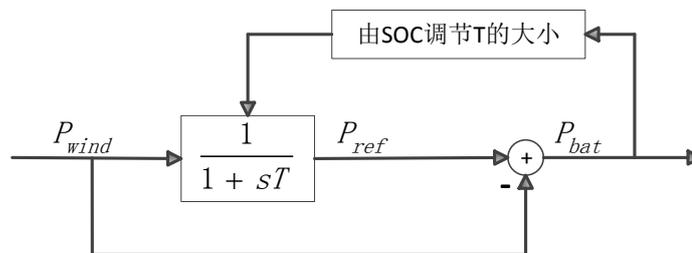


图3-3 基于变T低通滤波器的基本控制框图

Fig.3-3 Basic control block diagram based on low pass filter with adjustable T

波动的风电输出功率 P_{wind} 通过低通滤波器之后得到一个功率参考值 P_{ref} ， P_{ref} 是期望平稳输出到联络线上的功率值，如果储能装置可以提供功率 $P_{bat}=P_{ref}-P_{wind}$ ，则联络线功率达到期望的 $P_{line}=P_{ref}$ 。其中， $P_{bat}>0$ 表示电池放电， $P_{bat}<0$ 表示电池充电。

图3-1所示物理系统通过图3-3所示的控制系统实现平滑控制，输出结果如图3-4所示，图中包含原始风力发电输出功率波形以及基于低通滤波原理获得的并网参考功率波形。图中的细实线描绘了1天内风力发电机组输出的功率，可见具有较大波动的

特性，粗虚线描绘了产生的并网参考功率曲线，在电池储能系统提供 P_{wind} 和 P_{ref} 之间部分的功率后 $P_{line}=P_{ref}$ 。

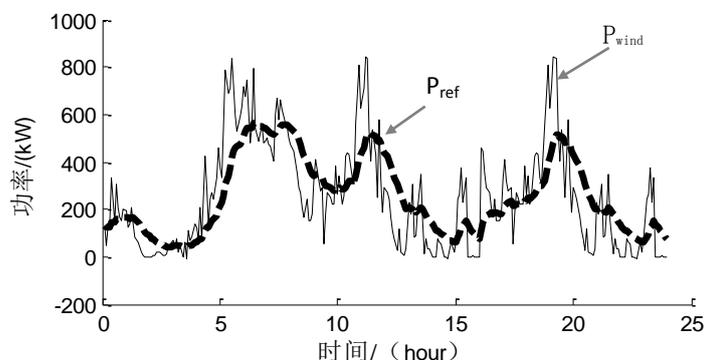


图3-4 基于低通滤波算法的平滑控制输出

Fig.3-4 Smoothing control output based on low pass filter algorithms

经过一阶巴特沃兹低通滤波器后，相对于 P_{wind} ， P_{ref} 曲线产生了延迟，这种延迟使储能系统需要较大的容量对原始功率进行平滑处理，而这种延迟特性也正是较大电池充放电深度产生的根源。除了上述基于巴特沃兹低通滤波器原理的平滑控制策略，基于加权平滑滤波算法的控制策略也具有其本质的输出延迟性，因此也需要较大的储能容量实现平滑功能。

3.4. 滑动最小二乘算法及储能系统控制策略研究

3.4.1. 滑动最小二乘算法及储能系统控制方法

(1) 基本控制策略的提出

本文采用最小二乘拟合算法，期望获得位于功率波动中心位置的平滑参考功率曲线，以尽可能减少电池充放电的动作深度，从而降低对储能容量的需求。这一目标可以转换成优化目标：要求一段时间内的电池的充电功率和最小，并且放电的功率和也最小。

设 $P_{wind}(k)$ ($0 < k \leq N$) 为一段时间内离散采样的风电输出功率，其中， N 为采样的功率点数。则优化目标可表示成式 (3-2) 和式 (3-3)。式 (3-2) 中 J_1 表示大于参考值的实际风电功率数据与参考值的均方差之和，式 (3-3) 中 J_2 表示小于参考值的实际风电功率数据与参考值的均方差之和。

$$J_1 = \sum (P_{wind-h} - P_{ref})^2 \quad (3-2)$$

其中：

$P_{wind-h} \in P_{wind}$ ，且满足 $P_{wind-h} > P_{ref}$ 。

$$J_2 = \sum (P_{wind-l} - P_{ref})^2 \quad (3-3)$$

其中：

$P_{wind-l} \in P_{wind}$ ，且满足 $P_{wind-l} < P_{ref}$ 。

如果可以同时满足 $\min(J_1)$ 和 $\min(J_2)$ ，可以认为在这段时间内对电池的充电功率和放电功率最小，而 $\min(J_1+J_2)$ 即是最小二乘问题求解。

由此可得，可以针对 $P_{wind}(k)$ 进行最小二乘多项式拟合处理，获得曲线上的离散点 $P_{ref}(k)$ ，所得 $P_{ref}(k)$ 代表了距离 $P_{wind}(k)$ 最近的点集合，即 $P_{ref}(k)$ 的所有点在一条曲线上，而该曲线具备的特性是距离 $P_{wind}(k)$ 所有点的均方差最小，意味着统计意义上电池充放电的功率达到最小。

(2) 滑动最小二乘拟合算法及控制策略

由上述的分析得出，通过最小二乘拟合可以获得一段时间内电池充放电功率动作深度最小的 P_{ref} ，然而，常规最小二乘拟合仅仅适用于对历史数据的处理，针对间歇式电源功率平滑实时控制问题，本文提出一种滑动最小二乘拟合算法，以实时获得 $P_{ref}(k)$ 。

取 k 时刻实时获得的风电功率数据 $P_{wind}(k)$ ，及 k 时刻之前连续的 $NI-1$ 个风电功率数据构成式 (3-4)，通过最小二乘拟合算法可获得多项式方程 $\phi_k(x)$ 使得 $\min(J_k)$ ，则 $P_{ref}(k) = \phi_k(k * \Delta t)$ ，其中 Δt 为计算窗口， NI 为滑动窗口宽度。

$$J_k = \sum_{i=k-NI+1}^k (P_{wind}(i) - \phi_k(i))^2 \quad (3-4)$$

根据线性最小二乘拟合的原理，由式 (3-4) 获得的 $P_{ref}(k)$ 是局部数据获得的优化结果，如果在 $NI * \Delta t$ 时间段内功率数据波动较小，则式 (4) 中满足 $\min(J_k)$ 的 $\phi_k(x)$ 和满足 $\min(J_{k+1})$ 的 $\phi_{k+1}(x)$ 差异也较小，此时 $\phi_{k+1}(k+1)$ 可以看做是下一步调整过程中满足最小能量波动的 $P_{ref}(k+1)$ 。反之，如果该时间段内功率数据波动较大，则 $\phi_{k+1}(x)$ 相对于 $\phi_k(x)$ 是摒弃最旧的功率数据并加入最新功率数据获得的拟合，具备跟随最新功率数据变化趋势的特性，通过滑动最小二乘拟合算法获得的参考功率全局上并不一定是功率波动最小的曲线，却可以认为是符合局部区域功率最小的参考功率值。考虑到该方法对部分功率的聚变不具有平滑性，可采取输出功率限制，使 ΔP_{ref} 变化不会太剧烈，以符合平滑控制的需要。图3-5给出了基于该控制策略的实现流程。

实现最小二乘拟合的过程中，可以使 $\phi_k(x)$ 是线性的或者是非线性的，在本文的章节3.5将对这个问题进行专门的分析。

根据图3-5所示的流程图，设滑动窗口宽度为 NI ，在起始时刻，功率数据长度小于 NI 时，采取最大可用的数据长度进行运算，及至功率数据长度达到 NI 时，开始采取窗口宽度为 NI 的拟合运算。通过最小二乘拟合算法获得功率参考值后，与前一

刻联络线功率值对比，如果超出了允许的最大波动量则需以最大波动量作为调节量，最后给出的期望电池充放电功率要根据电池的SOC值进行调整后送给储能装置。

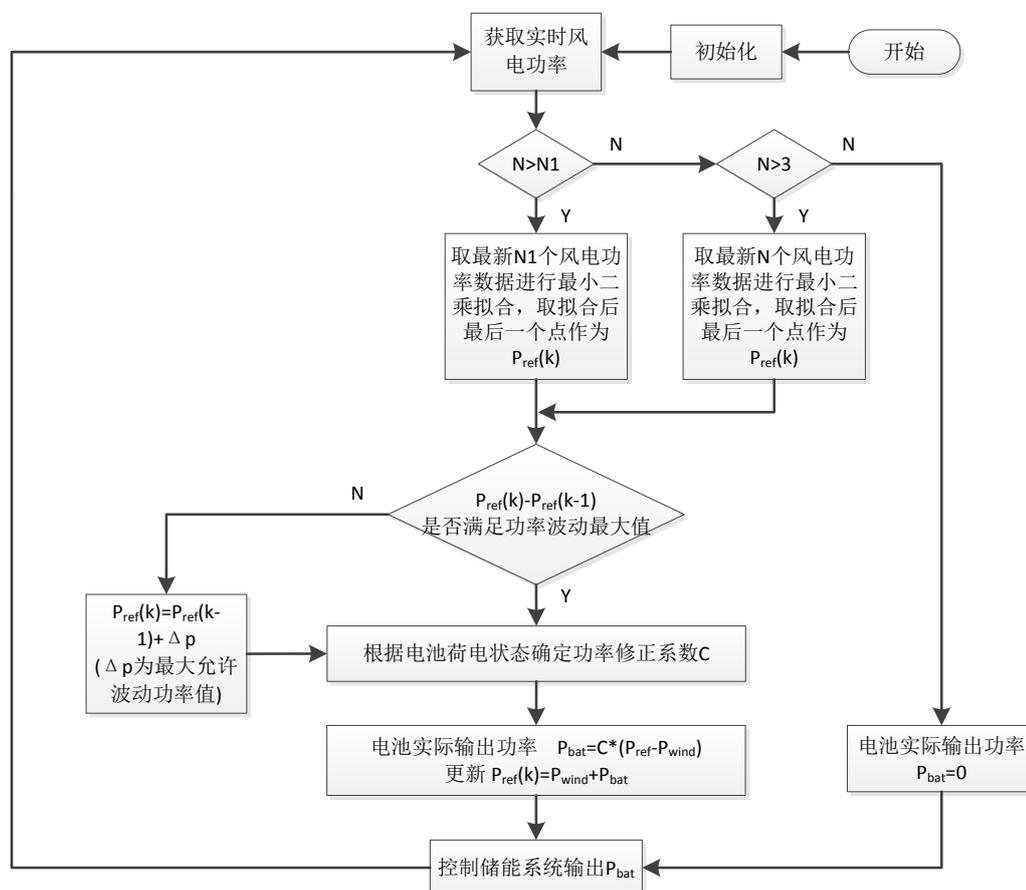


图3-5 BESS控制的实现流程

Fig.3-5 Flowchart of BESS control

滑动窗口宽度 NI 可采取固定的方式，初始设定根据联络线功率的波动进行调整， NI 越大则平滑的效果越好，但也会降低参考功率曲线对原始功率的快速跟随性能，所需电池充放电功率也越偏离实际的最小功率曲线。

3.4.2. SOC 调节器设计及其特性分析

(1) SOC调节器设计

储能电池的充放电过程应当实时考虑电池当前的SOC水平以及这一时刻的功率指令状况。在图4的控制流程中，对获得的 P_{bat} 乘以一个修正系数 c ，修正系数 c 的作用就是根据当前SOC水平及功率指令状况对实际电池输出功率进行调整，本节提供SOC调节器设计。

根据电池的工作特性，电池充放电功率采取以下规则进行修正：

1) 当SOC较大时,表示储能趋于饱和,可充分放电而尽可能少充电或者不充电,可通过保持电池放电功率而逐渐减小充电功率实现。

2) 当SOC较小时,表示储能不足,可充分充电而尽量少放电或者停止放电,可通过保持电池充电功率而逐渐减小放电功率实现。

所设计的SOC调节器采用坐标图形给出,如图3-6所示,其中SOC值根据文献[60]中提供的方法进行计算。

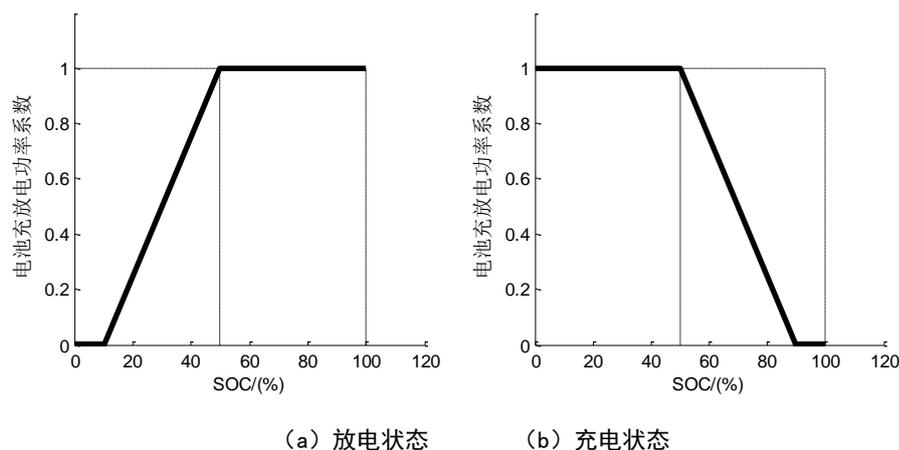


图3-6 充放电工况下功率修正系数

Fig.3-6 Power correction factor under charge/discharge modes

放电状态时:当SOC小于电池最小允许放电深度(此处定为10%,可根据电池实际参数调整)时,功率修正系数 $c=0$,使电池放电功率为零;当SOC大于电池最小允许放电深度并小于最优调节SOC值(50%)时,功率修正系数 c 从0到1均匀增大;当SOC大于50%时,功率修正系数 $c=1$,电池可按照平滑控制需要的功率放电。

充电状态时:当SOC大于电池最大允许充电深度(此处定为90%,可根据电池实际参数调整)时,功率修正系数 $c=0$,使电池充电功率为零;当SOC大于最优调节SOC值(50%)并小于电池最大允许充电深度时,功率修正系数 c 从1到0均匀减小;当SOC小于50%时,功率修正系数 $c=1$,电池可按照平滑控制需要的功率充电。

(2) SOC调节器的性能分析

针对以上所设计的SOC调节器性能进行测试。首先针对该SOC调节器在控制过程中SOC变化曲线的收敛性进行测试,分别将初始SOC值设置为10%、50%和90%,利用原始风电功率数据,进行测试。

测试结果如图3-7所示,无论初始SOC值如何,最终SOC调节器都尽量将电池的SOC调节到50%左右,以有利于应对下一步未知的充放电工作。表明该SOC调节器对控制过程中储能电池的SOC状态具备较好的调节能力。

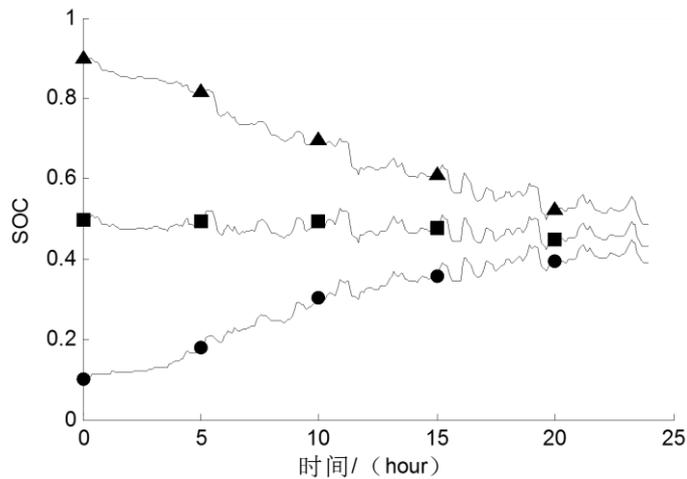


图3-7 不同初始值的SOC曲线

Fig.3-7 SOC under different initial values

以上所分析SOC调节器的收敛性是在充放电波动较小的情况下进行，并未显示出电池在输出电量较大情况下的调节性能，此处，保持原始风电测试数据不变，降低储能电池的容量，对有、无SOC调节器的状况进行分析，结果如图3-8所示。图3-8中，粗实线显示为有SOC调节器时控制过程中的SOC变化，细实线显示为无SOC调节器时控制过程中SOC变化。可见，有SOC调节器的控制系统抑制了电池荷电状态向两极方向的偏移，有效避免电池的过充和过放。

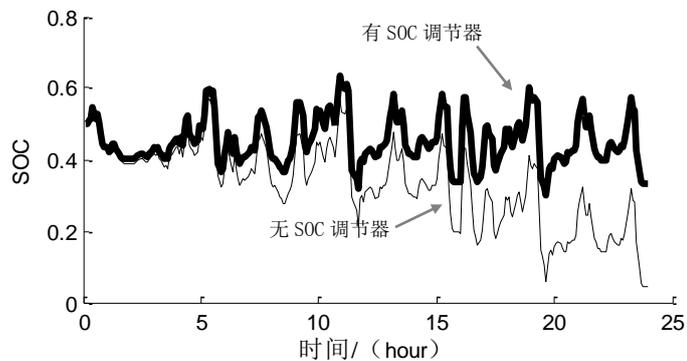


图3-8 有无SOC调节器荷电状态趋势

Fig.3-8 State of charge trends comparison between with and without SOC regulator

结果表明本文所设计的SOC调节器对储能电池的SOC产生了期望的调整效果，电池充放电深度较小时可以将SOC实时调整到中心的位置，为下一阶段的平滑控制提供最大电池容限，而电池充放电深度较大时又可以在尽可能提供平滑功率的同时有效避免电池的过充和过放。

3.5. 平滑控制策略算例仿真分析

(1) 采取线性拟合算法和非线性拟合算法的控制效果对比

算例中间歇性电源输出采用某额定功率为1MW的风力发电机组五月份1天的实际输出功率数据。储能系统的储能介质采用国内外逐渐普及应用的锂离子电池，电池额定容量为800kWh，额定放电功率不小于200kW，允许充放电深度10%~90%，初始荷电状态设为50%^[61]。计算窗口时长 Δt 取5min，滑动窗口宽度N1取5，要求间歇性电源输出功率波动不超过额定功率的20%/10min。

首先采用2次多项式拟合算法，按照2.2中所描述的算法流程，针对上述算例进行分析，输出结果如图3-9所示，其中图3-9（a）所示为联络线功率波形，图3-9（b）所示为电池充放电电量变化波形，其中大于零的部分代表电池充电，小于零的部分代表电池放电。

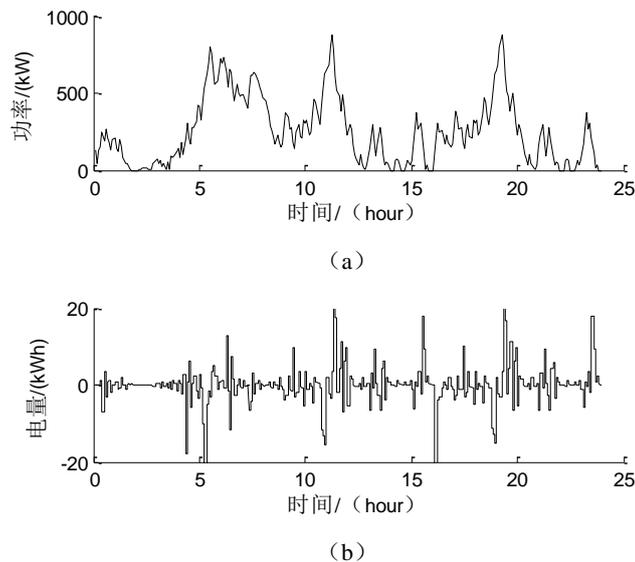
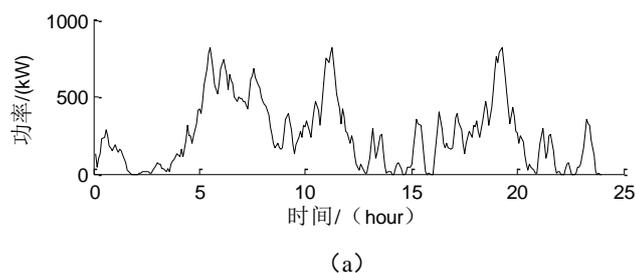


图3-9 联络线功率及电池充放电电量曲线1

Fig.3-9 Curve 1 of line power and battery charge/discharge power

将上述分析中的2次多项式拟合算法换成线性拟合算法，进行相同的实验，结果如图3-10所示。



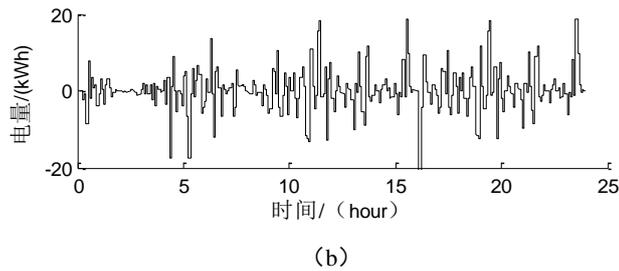


图3-10 联络线功率及电池充放电电量曲线2

Fig.3-10 Curve 2 of line power and battery charge/discharge power

分别将图3-9 (b) 和图3-10 (b) 中的电池充放电电量进行统计, 可得采用2次多项式拟合算法时, 控制过程中电池组充放电电量之和总计848kWh, 而采用线性拟合算法时, 控制过程中电池组充放电电量之和总计1059kWh。

基于同样的储能系统, 采用线性拟合算法的控制流程所获得联络线功率曲线略微平滑, 但采用2次多项式拟合算法的控制流程电池的充放电电量较小, 可见采取采用2次多项式拟合算法的控制流程更符合电池浅充、浅放的特性, 可延长电池的使用寿命。

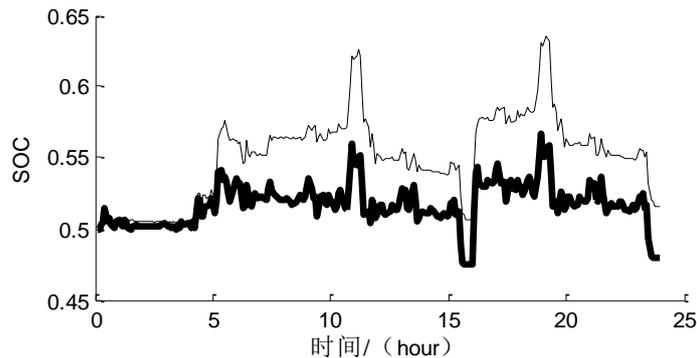


图3-11 基于不同拟合算法的SOC曲线对比

Fig.3-11 SOC comparison between different fitting algorithms

通过对比图3-11所示SOC曲线, 分析采取不同拟合算法对电池容量需求的影响, 图7中粗实线所示采用2次多项式拟合算法的控制过程中SOC曲线的波动性要小于采用线性拟合算法控制过程中SOC曲线的波动性。

综上可以得出, 在 $N1=5$ 的条件下, 2次多项式拟合算法在控制过程中可以产生更好的控制效果。

(2) 与其它控制方法的性能比较

采取章节3.3相同的算例仿真参数, 对比基于2次多项式拟合算法和传统滤波算法的控制策略对电池容量的需求和电池充放电电量。基于2次多项式拟合算法的控制策略产生的SOC曲线如图3-12中的粗实线所示, 基于滤波算法的控制策略产生的SOC曲

线如图3-12中的细实线所示。

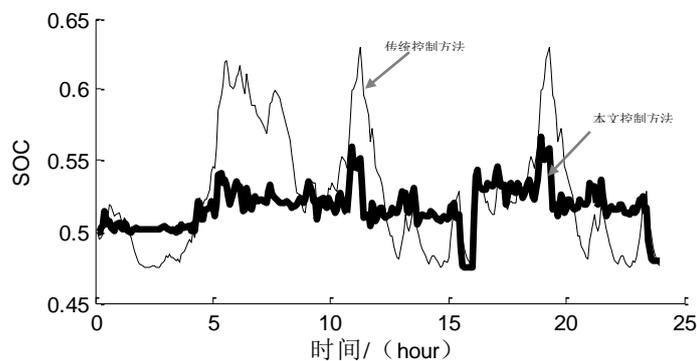


图3-12 基于不同控制算法的SOC曲线对比

Fig.3-12 SOC comparison based on different control algorithms

计算结果显示，传统控制策略在所示1天的控制过程中MAX(SOC)-MIN(SOC)值为15.6%，基于本节所述新策略的控制过程中该值则降低为9.2%，表明新的控制策略比传统控制策略对电池容量的需求降低了40%。相应的，统计传统控制策略在所述1天的控制过程中电池组充放电电量之和总计1412kWh，与此相比，本节分析中所得出的848kWh和1059kWh都具有较大程度的改善效果，尤其是采用基于2次多项式拟合的控制策略其充放电总电量降低了40%。可见，相比于传统控制策略，本文所提的控制策略在电池容量需求和电池充放电深度上都有了大幅度的改善。

3.6. 本章小结

利用储能系统可以抑制风力发电、光伏发电等间歇式可再生能源发电系统对电网运行的不利影响，由于目前储能设备的成本较高，合理使用和保护储能系统也就具备较为重要的经济和工程意义。

本章提出一种基于滑动最小二乘拟合算法和电池SOC的储能控制策略，可在间歇性电源输出的波动功率中实时寻找使电池充放电电量之和最小的参考点，降低了控制系统电池容量的需求，减少控制过程中对电池的充放电电量。将所提控制策略应用于间歇式电源输出功率实时平滑控制，结果显示，与传统控制策略相比较，新的控制策略在电池容量需求和对电池充放电总电量方面的性能实现了大幅度的提高。

4. 能源互联网分布式能量管理平台设计

4.1. 引言

相对于传统以化石能源为主的集中式供电来说,面向可再生能源的分布式发电系统中电源具有多样性并且受到不同外界环境的影响、约束和限制,系统具有动态随机性,能源节点频繁的退出和投入运行,系统的能源供给和负荷需求具有时空分散性。分布式电源和储能装置的大量存在使得系统能量在支路上可双向流动,能源节点与负荷节点的接入与退出要求具有标准的接口和交互模式,从而保证分布式发电系统的柔性和动态重构的能力。因此,小到电源个体,大至系统本身,进而扩展至系统与系统之间,以致未来整个智能电网的需求,都迫切要求建立能量管理系统,在电源自治和系统局部优化的基础上,实现个体与系统之间的协商以达到全局优化,并要求能够动态适应系统内在的复杂性和环境变化的动态随机性,实现动态优化与调度,最终达到能源的优质高效利用。

分布式能量管理系统需要高可靠的硬件设施,强大的计算和网络能力,这需要一定规模的数据中心作为支撑,在第1章的能源互联网架构分析中指出,未来的能源互联网可建立在现有电网分步、分阶段改造的基础上实现,分布式能量管理需要一种可快速部署于现有电网架构中的信息平台。近年来,数据中心行业的一个新事物——集装箱式的数据中心服务器、存储、网络设备等一股脑的放入集装箱,这就是集装箱式数据中心,集装箱式数据中心整体化、可快速部署等优点正是分布式能量管理系统平台所需要的。

集装箱式数据中心是在一个标准集装箱(20英尺或40英尺)内实现数据、信息的集中处理、存储、传输、交换、管理,除了包括作为核心设备的计算机设备、服务器设备、网络设备、存储设备等,还包括关键设备运行所需要的环境因素,如供电系统、制冷系统、机柜系统、消防系统、监控系统等基础设施。集装箱式数据中心可作为数据中心构建的标准模块,可在短时间内完成数据中心容量的布设或者扩展,是应对数据中心快速、灵活需求的最佳解决方案。另外,集装箱式数据中心的内部空间紧凑,需要冷却的体积小,风道设计和冷热通道隔离容易实现,因此集装箱式数据中心具有较高的制冷效率。

目前主要涉足集装箱式数据中心的厂商和公司,国外有思科、戴尔、Google、IBM、惠普、微软、SGI等,国内有华为赛门铁克、世纪互联、天地云箱科技、浪潮、富士康、台达电子等。2010年可以认为是集装箱式数据中心概念落地的转折年,微软、Google等已经开始大规模部署集装箱式数据中心解决方案,其中云计算的发展也有利的推动了集装箱式数据中心的发展,而云计算也正是实现能源互联网智慧能量管理计

算资源调度的有效方法。本章将在对现有集装箱式数据中心进行分析的基础上，根据报告第2章中对能源互联网能量管理的要求和能源路由器原型设计的要求适用于能源互联网能量管理的集装箱式数据中心^[62-66]。

4.2. 集装箱式数据中心及其优劣分析

4.2.1. 现有的集装箱式数据中心分析

在集装箱式数据中心的产品供应方面，一种是20英尺的，就是标准的集装箱一半，还有一种是标准40英尺的。目前已有国内外的多家企业可以提供集装箱式数据中心的成型产品，包括国外厂商Sun、IBM、HP、谷歌、SGI、思科、微软以及国内厂商世纪互联、台达等都可以提供这类“集装箱式数据中心”产品。

作为最早提出并实施的集装箱式数据中心“BlackBox”的Sun在被甲骨文收购之后，甲骨文没有对BlackBox进行推广，但是也没有“雪藏”集装箱式数据中心，BlackBox并不在正式产品的目录中，但如果客户需要的话依然会去生产。图4-1所示为2006年Sun推出的BlackBox。



图4-1 Sun的“Blackbox”集装箱式数据中心

Fig.4-1 Sun “Blackbox” container data center

作为服务器行业老大，IBM自然不甘人后，08年中开始推出其模块化数据中心产品。09年12月，IBM在拉斯维加斯举办的第28届Gartner数据中心大会上展示了名为“Portable Modular Data Centre（便携式模块化数据中心）”的集装箱式数据中心。

数据中心产品巨头惠普在08年7月也推出了名为“Performance Optimized Data Center”（POD）的集装箱式数据中心。首度推出的惠普POD块头较足，这个8×40英尺的POD集装箱设备提供了12TB的存储空间。在能源密度上，POD要远远高于传

统数据中心，据惠普介绍，传统数据中心每平方英尺功率为200~300瓦，而POD可以达到1800瓦。另外，POD从下订单到供货只需要6周时间，可以让用户快速的搭建出一个数据中心。

网络巨头思科公司推出模块化的集装箱式数据中心，作为推广统一计算系统UCS系统的一种方式。思科表示，通过采购应用集装箱式数据中心，不论是40英尺大小集装箱式数据中心，还是20英尺的，企业可以节省50%的成本支出以及30%运营费用。正是这种集装箱式数据中心的推出，使思科在其UCS系统推广方面有了新思路，通过提供一个IT套件方案，不断扩大其数据中心市场的影响力。

微软的巨型数据中心也采用了集装箱设计。微软最大的数据中心，芝加哥数据中心占地面积70万平方英尺，一层就像一个停车场，停放着几辆拖车，上面放着集装箱。这些集装箱放置着微软云计算产品的重要组件，每个拖车的集装箱都存放了1800至2500台服务器，每台服务器都可以用来为微软即将发布的云计算操作系统Windows Azure收发电子邮件、管理即时通信或运行应用程序。微软的集装箱式数据中心布置如图4-2所示。



图4-2 微软集装箱式数据中心

Fig.4-2 Microsoft container data center

高性能计算行业巨头SGI的集装箱式数据中心有个好听的名字，Ice Cube，即“冰立方”，有两种规格，20英尺和40英尺。SGI对“冰立方”进行改进，采用了模块化设计，能够容纳SGI所有的服务器和存储设备，并允许客户对数据中心硬件进行混搭，从而增加灵活性。SGI模块化数据中心可以达到超高密度，每个集装箱可以支持46,080个处理器核或29.8PB数据存储。这些优势使得ICE Cube成为建立新数据中心，改造旧数据中心或取代各种规模传统数据中心的理想选择。

中国首个集装箱式数据中心由中国规模最大的互联网基础设施服务提供商世纪互联设计制造并投入使用。世纪互联集装箱式数据中心实现了高密度IT设备布置，每

个集装箱式数据中心可容纳912台1U服务器，这相当于127个传统机房机柜（1.5KVA/rack）的容量，可以适用于深度不超过800mm的所有服务器。采用UPS集装箱单路N+1供电，电池后备时间10分钟，PUE值低至1.3。

浪潮在2009年发布首款云数据中心产品——“云海”集装箱式数据中心。该产品是浪潮针对云计算应用趋势，立足数据中心建设与运营的全生命周期创新，推出的移动式、集装箱标准化的数据中心解决方案。该产品将数据中心以标准化、模块化的设计实现数据中心产品化，可以随买随用，即插即用。以集装箱为单位，工厂预装，批量制造。云海采用一体化设计生产，所有的装配、调试工作全部在生产车间装配完成。设备到达用户现场后，仅需要接上水、电、网络等基本线路，即可正常工作并对外提供服务。

在IDF 2011技术峰会上，富士康首次亮相了Patent Cloud集装箱式数据中心，这也是英特尔和富士康联手打造的一款集装箱式数据中心。目前富士康的集装箱式数据中心已经在企业内部开始使用。

云箱是北京天地云箱科技有限公司（以下简称“天地云箱”）设计生产的集装箱式机房系列产品的统称，其利用集装箱为载体，在集装箱中放置机房运行环境所需的各种设备，比如动力设备、制冷设备、消防设备、监控设备等。云箱设计了一体化和分离式两种形式的集装箱式数据中心。



图4-3 云箱集装箱式数据中心

Fig.4-3 Yunxiang container data center

台达电子集团则利用自身在全球电源领域的优势地位，推出了绿色节能、可靠稳定的台达数据中心整体解决方案（InfraSuite），设计中纳入了可扩充性、高集成度、可管理性、易于维护、标准化和模块化的特点，该解决方案可以协助各企业降低数据

中心的建置、维护成本，且达到绿色节能的目标，力求在生产制造或是营运管理上能获得最高市场竞争力。

能源消耗过剩已经成为全世界不得不关心的重点问题。国家在顶层规划中积极提倡和推广使用可再生能源，发展以低能耗、低污染、低排放为基础的低碳经济，成为实现我国社会经济可持续发展的必然选择。调查显示，超过70%的全球1000强企业都将在今后5年内对数据中心的设备进行更新与扩展，应用和计算密度的快速增长，使得资本压力不断上升，数据中心的电力消耗在过去10年增长了5倍，一台1U服务器的使用成本高达采购成本的2倍，并且还在继续增加、能源价格飙升也导致更加困难的局面，用于空调冷却的电力甚至超过了计算用的电力。传统数据中心能源的巨大消耗急需呼唤新一代绿色数据中心的出现。而集装箱式数据中心的出现提供了一种很好的选择，与传统数据中心相比同样计算处理能力的集装箱式数据中心的PUE值至少降低了0.5，专业的一站式数据中心服务使客户受益最大化。

随着各行业、领域数据业务的快速增长，对数据中心的建设、扩容的要求也快速增长，集装箱式数据中心更加廉价，省去了大笔的数据中心建设费用，并更容易运输。与具有大量空调甚至活动地板和天花板的传统数据中心相比，集装箱式数据中心在设计和建造上要便宜30%，可以在4周到6周内完成生产制造，并在1天内安装调试完成，建造周期远远快于传统数据中心。并且建设的地点更加灵活，此外集装箱式数据中心必将成为一种向现有数据中心增加容量、又不用建造一座全新数据中心的方法，在一定时期内作为传统数据中心更新的重要手段和主要方式，并最终成为传统数据中心构成模式的替代。

当前集装箱式数据中心作为数据中心行业的新生事物，集装箱式数据中心的特点在于将数据中心变成一个模块，促使了数据中心的“商品化”，使数据中心的生产和部署更加容易，并且实现了更高密度的计算能力的快速部署、碳排放量减少和较高投资回报率。集装箱式数据中心将快速成为一种向现有数据中心增加容量、又不用建造一座全新数据中心的方法，在一定时期内作为传统数据中心更新的重要手段和主要方式，并最终成为传统数据中心构成模式的替代。

此外，集装箱式数据中心具有传统数据中心无法做到的灵活部署能力，集装箱式的广泛应用也将改变传统数据中心的运营模式，开创新的应用领域，从而催生新的IT业务增长热点，而将集装箱式数据中心应用于需要便利部署的能量管理场景也是一种新的IT业务增长热点。

4.2.2. 集装箱式数据中心特性及优劣分析

集装箱式的设计对于运输来说非常方便，甚至不用专门为其配置机房、电力系统等其它机器运行所需的苛刻的外部环境了。对于那些不想让别人知道自己机房在何处

的IT公司来说，这简直就是完美的计划，随便将其放在某个地方，一般人对着一个集装箱估计也想不到内有乾坤。

集装箱式数据中心作为一种模块化数据中心还有很多优势，其中的大部分优势来自于模块是一个集成的系统这一事实。可以认为模块是一个高度优化的微型数据中心或者一台服务器。传统数据中心的设计有点支离破碎，因为不同的设备（例如服务器、配电系统以及通风和空调设备等）在设计时都要考虑到最坏情况，所以在设计余量中存在着严重的成本浪费。但是，由于模块化设计是一种平衡的系统设计方法，所以利用模块化设计可以建立一个最优的数据中心生态系统，具有恰如所需的供电、冷却和计算能力等。集装箱式数据中心还具有下列优点：

（1）高密度。可容纳高密度计算设备，相同空间内可容纳六倍于传统数据中心的机柜数量；

（2）低PUE。由于采用了全封闭、冷热通道分离，减少了冷空气的消耗，令电力使用率大大提高；

（3）快速部署。集装箱式数据中心不需要企业再经过空间租用、土地申请、机房建设、硬件部署等周期，可大大缩短部署周期。

（4）一站式专业服务。数据中心属于专业产品，设计、制造、硬件都需要专业服务与运营的保障。

（5）按需部署。一个模块可以安装400至2000台服务器，这些服务器都是预先安装并经过测试，可以在几个小时内投入运行，因为所有这些测试和联网工作都是在出厂前完成的。

（6）即插即用。模块的安装非常容易，只需提供电源连接、水源连接（用于精密空调加湿功能或者冷却）和数据连接即可。

（7）将成本的投入时间从前期投资推迟到服务器部署：模块化数据中心的一大优势是，模块将电源、冷却设备和IT设备集成在一起，客户付费后即可使用。这不但推迟了资本成本的投入时间，而且由于数据中心能够满负荷运行，还消除了未使用计算能力，显著节约了成本。

上述的集装箱式数据中心优势中（3）-（5）对于能源互联网中分布式能量管理信息平台建设尤其重要。为了定量的对集装箱式数据中心和传统数据中心进行一个全面的对比，此处以20英尺的小尺寸集装箱式数据中心为例与传统数据中心的各方面参数进行对比。如表1所示，从占地面积、建设成本、建设周期、功率密度、可扩展性、可维护性等方面进行详细对比。

表4-1 传统数据中心与集装箱式数据中心对比

Tab.4-1 Comparison of container data center and traditional data center

	传统数据中心	集装箱式数据中心 (以 20 英尺集装箱为参照)	对比分析
样本	32 个标准机柜，服务器可用机位在 300U 左右； 配置发电机。	6 个 54u 机架，服务器可用机位在 300U 左右； 配置 UPS 电源及空调系统。	
占地面积	占地约 300 平米的传统数据中心	占地约 30 平米的集装箱式数据中心	纯机房面积，不含外市电，油机，及配套的管理用房
建设成本	机房设计：需要考虑基础建设，设计复杂； 机房装饰装修系统：防火、防水、防漏电、防雷击； 机房供电系统：使用与集装箱一致的产品； 弱电监控系统：内部结构复杂，距离长，成本高； 消防系统：施工量大，成本高； UPS 及蓄电池：与集装箱大体相当； 精密空调：成本低； 发电机：成本低，必备； 机柜：简单，造价便宜。	机房设计：标准化设计； 机房装饰装修系统：防火、防水、防漏电、防雷击； 机房供电系统：使用与传统机房相一致的产品； 弱电监控系统：内部机构简单，布线简单、距离短； 消防系统：比传统机房技术高端，但管控面积小，总体费用低； UPS 及蓄电池：与传统机房成本相当； 精密空调：与传统机房成本相当； 发电机：根据需求选配 机柜：非常简单，造价便宜。	集装箱式数据中心和传统数据中心的内部架构基本相同。都是以电力的稳定性和空调的制冷能力为基础，在保证网络的稳定性的基础上，合理的布局各设备的位置，但是传统机房需要基础建设，占地面积过大，导致机房内部部署复杂，使得成本过高。据我们的工程师测算，传统机房的造价比集装箱式数据中心平均高 20%-30%
建设周期	从设计到选址，从选址到设计，从设计到建成，平均时间在 2 年左右。	标准化设计，30 平米占地面积，从设计到部署时间可控制在 2-4 个月。	集装箱式数据中心大大节省建设时间，可以实现快速部署，建造时间仅为 3 个月左右。
灵活性	建造规范，结构结实稳定性好。一次性选择，终身使用。用途不可变	安装简便，可根据需求整体移动。	集装箱式数据中心的安装简单，灵活性高，可以在 1 天内安装完成。
功率密度	IT 设备安装密度低，单个机架平均装 10~15U 的 IT 设备 机架的功率密度可达到 2.5KW/机柜； 占地总面积 300 平米。	IT 设备安装密度高，每个机架可安装 50U 的 IT 设备 机架的功率密度可达到 15KW/机柜； 占地总面积 30 平米。	集装箱式数据中心使用了大容量机架，且机架的功率密度可达到 15KW/机柜，远远超出传统数据中心。
资源的节能减排	PUE 在 2.0 左右。	PUE 在 1.5 左右。	PUE 值越大，代表能源损耗越大，集装箱式数据中心低于传统机房。
功能扩展	一次性部署并布线，在扩容时需要重新设计各种线路，	模块化设计，扩容时按需扩容即可。	传统数据中心灵活性差，在设计过程中包含

	并重新施工，造价比较高。		所有设备的容灾冗余，所以在设计会存在的成本的浪费。集装箱式数据中心采用的模块化设计是一种平衡的系统设计方法，具有恰如所需的供电、冷却和计算能力和良好的扩展能力。
最终用户设备兼容性	可支持任何设备。	目前只能提供标准机柜，支持 800-1000mm 深度的服务器，可满足通用性。	
安全性	大楼具备安保、防火、防盗、防水等措施。	采用户外部署存在安全隐患。	
可维护性	24 小时专人值守； 值守人员须定期巡视； 专职工程师作为技术保障； 设备需按类别找特定商家定期维护。	无人值守； 专业详细的监控平台，随时可见各种问题； 24 小时客服电话，专业的技术人员值守； 专业运维团队。	作为产品，集装箱式数据中心的售后保障更具优势。

通过表4-1种的对比显示，集装箱式数据中心虽然略有一些不足，但相对传统的数据中心模式部署密度、部署速度、节能等方面都具有很大的优势。

4.3. 集装箱式数据中心设计目标及技术要求

(1) 整体设计目标

目标是设计一种具有通用性和便于维护的集装箱式数据中心，这种集装箱式数据中心相比于现有的集装箱式数据中心更有利于分散部署和运行维护，为能源互联网的智慧能量管理提供硬件支撑。

与行业其它厂商的集装箱式数据中心相比，该集装箱式数据中心不过多追求于单位面积所容纳的数据处理能力，而是侧重于IT设备、供配电设备以及制冷设备的模块化设计，侧重于利用物联网技术加强集装箱式数据中心的综合监控能力和远程监控能力，提高数据中心整体的模块化程度，降低数据中心的维护、维修难度，缩短数据中心的维修时间，提高数据中心的组态性，降低数据中心的运行成本，可实现区域能量管理功能的快速部署。

(2) 整体技术要求

实用性和先进性：采用先进成熟的技术和设备，满足当前的需要，兼顾未来的计算需要，尽可能采用最先进的技术、设备和材料，以适应高速的数据传输要求，使整个系统在一段时间内保持技术的先进性，并具有良好的潜力，以适应未来业务的发展和升级的需要。

安全可靠：网络必须是高可靠性的，保障能量管理的连贯性，不能出现单点故障。要对数据中心布局、结构设计、设备选型、日常维护等方面进行改可靠性的设计和建设。在关键设备采用硬件备份、冗余等高可靠性技术的基础上，采用物联网技术及相关的软件技术提供较强的管理机制、控制手段和监控与安全保密等技术措施提高数据中心的安全可靠性。

灵活性与可扩展性：集装箱式数据中心具有良好的灵活性和可扩展性，能够根据今后业务的不断深入发展的需要，扩大设备容量和提高用户数量和质量的功能。具备支持多种网络传输、多种物理接口的能力，提供技术升级、设备更新的灵活性。

IT设备通用性：目前的市场上的集装箱式数据中心在机架的设计上往往按照特定的IT设备的安装尺寸进行设计，力求空间的充分利用而牺牲通用性，考虑到本集装箱式数据中心的定位，集装箱式数据中心要能够适应多数的服务器结构，以满足一定阶段内利用集装箱对传统数据中心改造的要求，需要侧重于数据中心的通用性。

标准化：虽然集装箱式数据中心尚处于发展的初级阶段，未出台针对集装箱式数据中心的国际、国家标准，但在系统的结构设计中务求基于国际标准和国家颁布的有关标准，包括各种建筑、机房设计标准，电力电气保障标准以及计算机局域网、广域网标准，坚持统一规范的原则，并为多集装箱部署的增容奠定基础。

4.4. 集装箱式数据中心工程实施

4.4.1. 集装箱式数据中心总体方案

本节目标给出一种具有通用性和便于维护的集装箱式数据中心设计方案，这种集装箱式数据中心相比于现有的集装箱式数据中心更有利于分散部署和运行维护，为能源互联网的智慧能量管理的运行提供硬件支撑。与行业其它厂商的集装箱式数据中心相比，该集装箱式数据中心不过多追求于单位面积所容纳的数据处理能力，而是侧重于IT设备、供配电设备以及制冷设备的模块化设计，侧重于利用物联网技术加强集装箱式数据中心的综合监控能力和远程监控能力，提高数据中心整体的模块化程度，降低数据中心的维护、维修难度，缩短数据中心的维修时间，提高数据中心的组态性，降低数据中心的运行成本。

根据集装箱式数据中心的功能要求，依据国家有关标准和规范，结合各种系统运行特点进行总体设计^[67-69]。总体设计方案以功能完善，技术规范，安全可靠为主，确

保系统的可靠安全运行，满足能源互联网的智慧能量管理对集装箱式数据中心的要求。

集装箱式数据中心包括以下六个子系统：计算机集群系统、集装箱箱体及智能机柜、低压供配电系统、空调制冷（新风）系统、防雷及接地和环境及动力设备监控。其中环境及动力设备监控除了包括对集装箱内部温度、湿度和外部温度的环境监控、箱体内部动力设备的监控、空调制冷设备的监控，还包括消防系统和安全门禁系统，是一个基于先进物联网技术和理念的综合监控系统。

对于传统机房式的数据中心，以上几个方面都具有目前技术发展较为成熟的领域产品，可以保障性能良好、运行安全可靠，但是没有针对集装箱式数据中心应用场景开发的产品，这对集成相关子系统为一个整体数据中心解决方案造成了较大的困难，不能够将各种电子产品、通信设备、制冷设备以及机箱机柜等进行简单的积木式的组合，集装箱式数据中心设计实质上是需要进行最优化的综合统筹设计和系统实施，是一种体现一种新的数据中心实施思想，体现设备综合能力的工程^[70-71]。

4.4.2. 集装箱箱体及智能机柜设计

采用海运标准20英尺钢结构集装箱体框架，三明治双层板结构，具备抗机械冲击、防火隔热、防水、防盗、屏蔽、防尘、抗震、美观之功能。采用工字钢和C型槽钢进行抗震设计，承载重量标准达到750 kg/m²以上，安装1500kg/m² 配合减震机柜，具备抗震和减震能力，可满足8级以上抗击地震冲击要求。

集装箱箱体内壁安装防火型隔热保温材料，冬季不结露，夏季冷量不外泄；外表面喷涂反射隔热涂料，夏天防止太阳直射使箱体内温度升高，防护等级为IP65。

采用标准19寸抗震机架，单个20英尺集装箱箱体容纳4台40U的机柜，达160个U设备安装空间。机架采用导轨安装方式，可以通过电控装置实现机柜在一个特定范围内的移动，方便设备的维护、维修，提升机房宝贵空间的有效利用。

智能机柜作为物联网的一个节点，提供单机柜内部的用电情况和局部环境状况，并通过嵌入式物联网数据集中器提供给监控系统中心。

4.4.3. 计算机集群系统设计

为了提高整个数据中心系统的可用性，除了提高计算机各个部件的可靠性以外，采用集群的方案。所谓集群，就是共同为客户机提供网络资源的一组计算机系统。而其中的每一台提供服务的计算机，我们称之为节点。当一个节点不可用或者不能处理客户的请求时，该请求将会转到另外的可用节点来处理，而这些对于客户端来说，它根本不必关心这些要使用的资源的具体位置，集群系统会自动的完成任务。

本集装箱式数据中心所承载的IT设备采用DELL服务器及相应网络设备构成计算机集群，在配置上突出对虚拟机支持的，集群的拓扑结构如图4-4所示。

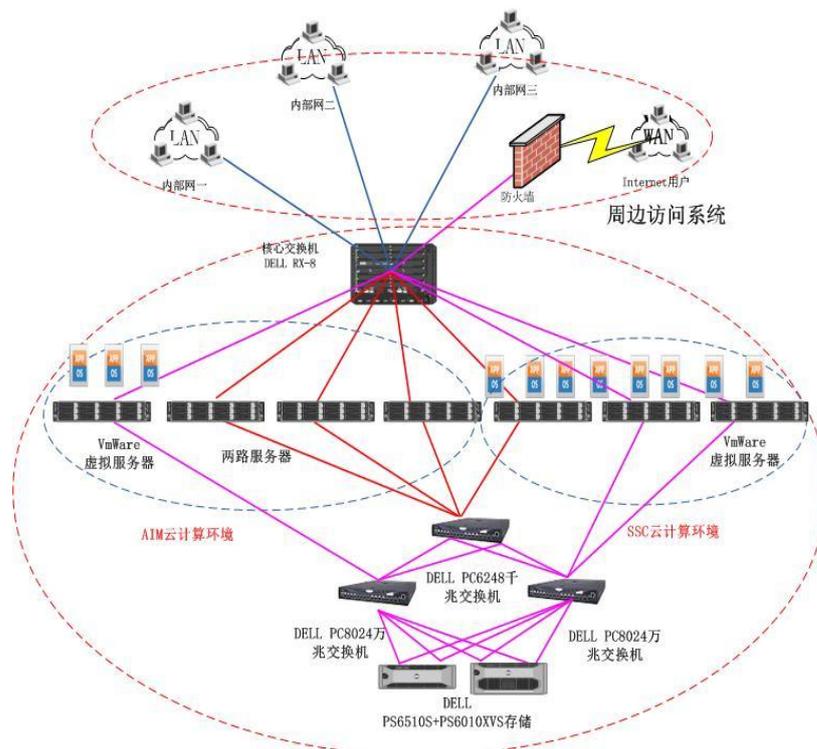


图4-4 服务器集群拓扑结构

Fig.4-4 Topology of cluster server

拓扑结构图4-1中所示的服务器及网络设备列表如表格4-2所示，包括虚拟服务器、标准服务器、核心交换机、存储交换机和存储设备等。

表4-2 集群设备列表

Tab.4-2 Cluster equipment list

机型		参数	数量	
虚拟化服务器	R610 机架式服务器	高度	1U	50
		机箱	DELL R610 机箱	
		CPU	2*intel 5645 6 核处理器 (2.4GHz)	
		内存	96GB 内存(12x8GB), 1333MHz 双列 UDIMM	
		千兆网卡	集成 2 块 Broadcom 10/100/1000Mbps 自适应以太网卡 (支持 TOE offload 引擎技术)	
		万兆网卡	1 块双口万兆自适应以太网卡 (支持 TOE offload 引擎技术)	
		硬盘	2*300GB 2.5 英寸 10K RPM SAS 硬盘 - 热插拔	
		扩展槽	2 个 PCIe x8 G2 插槽	
		导轨	机架通用导轨	
		电源	服务器用冗余电源模块	

机型		参数		数量
标准服务器	R610 机架式服务器	高度	2U	40
		机箱	DELL C6100 机箱, 配置 4 个刀片服务器	
		CPU	2*intel 5645 6 核处理器 (2.4GHz)	
		内存	24GB 内存(6x4GB), 1333MHz 双列 UDIMM	
		千兆网卡	集成 2 块 Broadcom 10/100/1000Mbps 自适应以太网卡 (支持 TOE offload 引擎技术)	
		硬盘	2*300GB 2.5 英寸 10K RPM SAS 硬盘 - 热插拔	
		扩展槽	2 个 PCIe x8 G2 插槽	
		导轨	机架通用导轨	
		电源	服务器用冗余电源模块	
机型		参数		数量
存储网交换机	DELL PowerConnect 8024F 万兆以太网交换机	架构	全线速第 2/3 层万兆以太网交换机, 带管理功能	2
		接口	24 个万兆模块, SFP+接口, 12 条五米线缆, 12 条 10 米线缆	
		主要功能	可用数据传输能力: 480 Gbps	
			包转发传输能力: 357 Mbps	
			高度 (英寸/机架单位) 1 RU	
电源冗余: 1+1				
机型		参数		数量
存储网交换机	DELL PowerConnect 6248 千兆以太网交换机	架构	全线速第 2/3 层千兆以太网交换机, 带管理功能	1
		接口	48 个千兆接口, 4 个万兆上联模块, SFP+接口	
		主要功能	可用数据传输能力: 184 Gbps	
			包转发传输能力: 131Mbps	
			高度 (英寸/机架单位) 1 RU	
电源冗余: 1+1				
机型		参数		数量
存储器	Equallogic PS6510X 存储	控制器	双存储控制器, 互为冗余提供故障切换功能	1
			4GB 存储缓存, 带后备电池的高速缓存 (保护 Cache 时间长达 72 小时) 支持 RAID 0,1,5,6 和 10	
		接口方式	每控制器含 2 个 10 Gbps 网络接口,共 4 个 10Gbps 网络接口	
		RAID 支持	支持 RAID 5,6 和 10	
		硬盘及扩展能力	SAS 600GB 硬盘(10K) *48 支持 48 块 SAS/SATA 硬盘扩展,可支持 16 台存储	

			系统扩展	
		管理/高级数据管理功能	可支持快照, 卷拷贝等功能, 远程复制容灾(可选), 支持动态数据扩展	
			可支持基于 IP 远程管理, 基于 WEB 图形界面方式	
			智能虚拟化存储产品, 可支持多台扩展, 并行处理, 线性提升存储性能	
			支持硬件故障检测, 诊断功能	
		电源	冗余双电源模块	
	机型		参数	数量
存储 器	Equallogic PS6010XVS 存储	控制器	双存储控制器, 互为冗余提供故障切换功能	1
			4GB 存储缓存, 带后备电池的高速缓存 (保护 Cache 时间长达 72 小时), 支持 RAID 0,1,5,6 和 10	
		接口方式	每控制器含 2 个 10 Gbps 网络接口, 共 4 个 10Gbps 网络接口	
		RAID 支持	支持 RAID 5,6 和 10	
		硬盘及扩展能力	SAS 450GB 硬盘(15K) *16+SSD 100GB 硬盘	
			支持 16 块 SAS/SATA 硬盘扩展, 可支持 16 台存储系统扩展	
		管理/高级数据管理功能	可支持快照, 卷拷贝等功能, 远程复制容灾 (可选), 支持动态数据扩展	
			可支持基于 IP 远程管理, 基于 WEB 图形界面方式	
智能虚拟化存储产品, 可支持多台扩展, 并行处理, 线性提升存储性能				
支持硬件故障检测, 诊断功能				
电源	冗余双电源模块			
	机型		参数	数量
核 心 交 换 机	DELL PowerConnect -J 核心以太网交换机	架构	模块化全线速第 2/3 层以太网交换机, 带管理功能	1
		I/O 模块插槽	8	
		千兆模块	3 个 48 口千兆模块	
		万兆模块	1 个 16 口万兆模块	
		主要功能	可用数据传输能力: 800 Gbps	
			交换机总传输能力: 1.92 Tbps	
			每个系统的信息包转发传输能力: 571 Mpps	
每个系统的最大 10-GbE 端口数: 32				
每个系统的最大 1-GbE 端口数: 384				
高度 (英寸/机架单位): 12.25 英寸/7 RU				

		气流：边到边	
		电源冗余：M+N	

4.4.4. 低压供配电设计

集装箱式数据中心设计两路三相五线制的380VAC供电输入，外部可以连接两路供电以提高供电的可靠性，在可靠性要求较低的场景，也可以仅仅连接其中一路供电输入使用。在可靠性要求较高的场景可将其中一路供电连接到外部变压器配电输出，另一路供电连接到柴油机，或者变电站其它变压器配电输出。集装箱式数据中心的外部供电输入直接连接到UPS设备的输入端，集装箱式数据中心内部的所有用电设备从UPS输出端获得电能，以保障在集装箱式数据中心外部供电故障的情况下短时间（30分钟以上）连续工作。

根据上述设计思路，结合文献[72-74]的设计，设计集装箱式数据中心的供配电系统，主配电图如图4-5所示。

机柜内部的供电采用三相380VAC输入，单相220VAC输出智能PDU单元，智能PDU单元具备计量功能，可以获得每个输出插口的电压、电流等参数。每个机柜安装三个智能PDU单元。智能PDU单元在提供IT设备正常用电的同时可通过TCP/IP网络向动力监控提供实时用电信息。

4.4.5. 空调制冷（新风）系统

空调制冷（新风）系统完成集装箱式数据中心环境调节，保证严格的温、湿度条件，设为夏季温度 $23\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，冬季温度 $20\pm 2^{\circ}\text{C}$ ，最大温度变化速度 $\leq 5^{\circ}\text{C} / \text{h}$ ，湿度保持在45~65%。集装箱内空间狭窄，要维持正压，送风速度不小于3米/秒，因此采用性能优异的精密空调，为了实现模块化设计，采用小功率精密空调的分布设计安装，分布设计安装方式即可以提供更为均匀的散热效果，且在某一制冷单元发生故障时不会导致整个数据中心的停止工作，便于通过短时间的维修恢复数据中心的满负荷工作状态^[75-79]。

（1）制冷方式选择

在数据中心空调系统中主要分为风冷直接蒸发式空调系统、水冷直接蒸发式空调系统、冷冻水空调系统、双冷源空调系统等空调系统。风冷机组是冷热型空调，通过空调与外界空气换热，一般为氟里昂冷机，也有风冷模块水机，用风（空气）来换热，带走热量，来产生冷水和热水。水冷机组一般来说是螺杆水机，单冷型，靠冷却塔提供冷却水来使机组制冷，一般为水机，能效比较高，选型则因制冷量与用途不同而选不同机型。

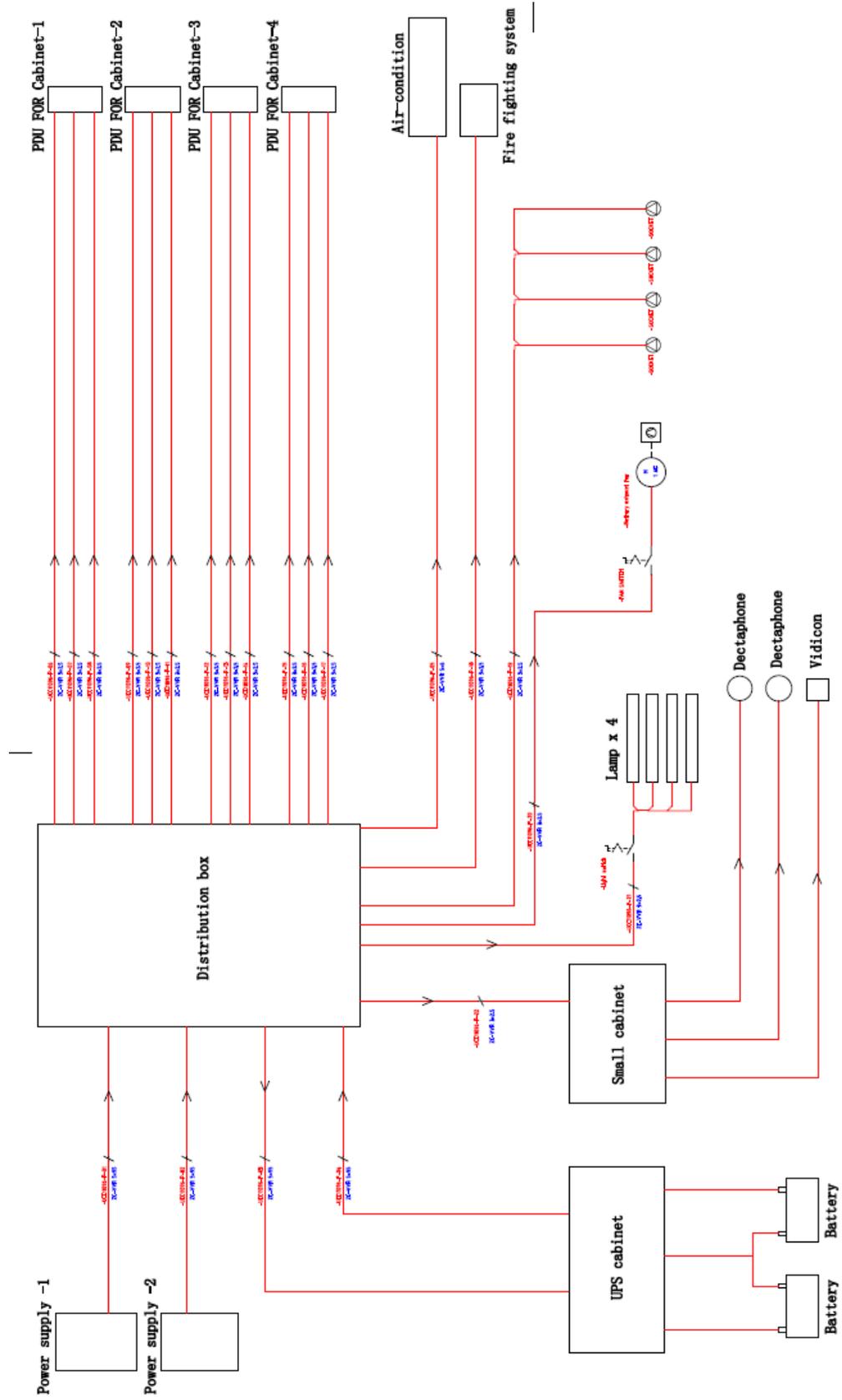


图4-5 低压配电图

Fig.4-5 Low voltage power distribution diagram

风冷直接蒸发式机组，适用于水源缺乏的地区和无冷却水系统的场所，可外挂或外置室外机，系统简单，无须考虑配备水泵和冷却塔，也无需集中冷冻水系统为之服务。缺点为室内外机之前的管长受限，在室内外机之前接管超过60米时，需要根据实际情况采取解决方案。

水冷直接蒸发式机组，适用于有集中冷却水系统的场所，机组能效比风冷式机组高，机组安装不受室外场地限制。

双冷源机组具有直接蒸发式和冷冻水机组的双重优点外，同时还具有冷源相互备份的特点，当使用用户冷冻水资源时，只有冷冻水盘管换热，压缩机停止运行，有利于节能，当用户停止中央空调冷冻水系统时，机组启动压缩机进行制冷。

水冷方式可以提供更好的制冷能力，目前多数集装箱式数据中心的制冷采用了水冷方式，如微软、谷歌、天津云立方、天地云箱等公司研发的集装箱式数据中心均采用了水冷方式实现数据中心内部制冷。但考虑到数据中心中集装箱的布置方式，水冷方式的冷凝塔等设备不利于便利的安装与模块化的实现，并且作为能源互联网的分布式能量管理信息平台，风冷直接蒸发式机组制冷方式已经可以满足计算机集群的制冷要求，因此该集装箱式数据中心采用风冷直接蒸发式机组制冷方式。

(2) 集装箱内的送风方式

传统数据中心机房专用精密空调机送风形式多为上送下回和下送上回式。机房中铺设防静电活动地板，机房专用精密空调采用下送上回式送风，使冷气直接进入活动地板下，这样使地板下形成静压箱，然后通过地板送风口，把冷气均匀地送入机房内，送入设备机柜内。为此，机房专用精密空调应有足够的风量把机房中的热量带走，并且送风的通道要具备一定的宽度和高度以保障不会对风速产生较大的阻碍，而在集装箱式数据中心的，考虑到集装箱的高度限制，上送风和下送风的方式都会对风速产生一定的阻碍。

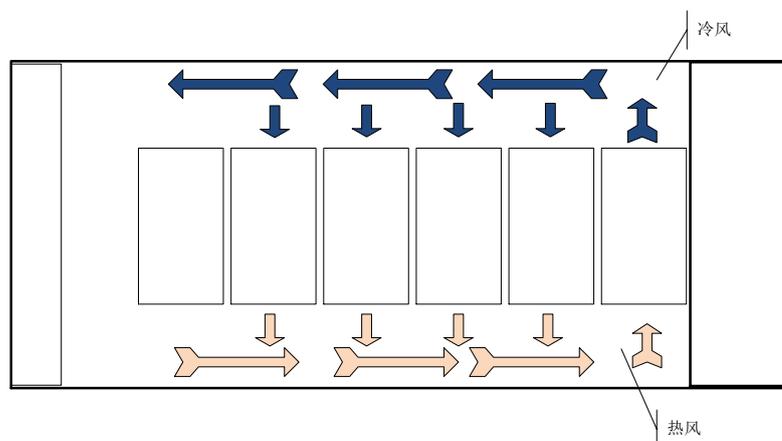


图4-6 冷、热风道示意图

Fig.4-6 Diagram of cool air channel and hot air channel

本章所述集装箱式数据中心采取列间精密空调，精密空调安装于机柜之间，采取前送风方式。列间空调也称为行间空调，其室内机安装在服务器机柜列间，其中大多数采取前送风方式，可直接靠近热源安装进行散热，由于可以直接靠近热源，空调的回风温度较高，能效非常好，最初是为了应对数据中心的局部热点而设计的精密空调。列间空调的前送风方式非常适用于像集装箱式数据中心这种冷热通道分离的数据中心场景。

图4-6显示了采用列间空调前送风方式集装箱式数据中心内部的冷通道和热通道分布图，冷风从精密空调前部通过风机吹出，冷通道较宽的宽度也保证了冷风的送达，经过机柜通过热通道回到列间空调的背面回风口。

4.4.6. 防雷及接地设计

本章所述集装箱式数据中心采用三级防雷的防雷方式，按照GB50057-94《建筑物防雷设计规范》要求建设。在每路市电的进线配电柜内设置一级防雷，安装符合实际需要的电源浪涌抑制器，在UPS输入端装设另外二级防雷；

第一级防雷：集装箱式数据中心配电柜内总进线端进行第一级避雷保护，考虑到以及防雷对动力线路进线距离的要求，在进线设计10米的电缆环绕以达到防雷设计的要求。

第二级防雷：集装箱式数据中心配电柜内选用最大容通电流为40KA的三相四线电源避雷器，安装于UPS的输出端、旁路，以保护UPS、旁路后端所有的用电设备，防止感应雷电流通过电源线损坏设备。作为第二级防雷保护，在避雷器前端安装3P/20A空气开关，保护避雷器，免受工频过电压损坏。

第三级防雷：在计算机机房重点负载的电源输出插座旁串接壹只防雷插座，以防止雷电波通过电源线对整个机房所有用电设备造成损坏，作为第三级防雷保护。

4.4.7. 环境及动力设备监控设计

监控对象为构成机房的各个环节，包括动力系统、环境系统、消防系统、保安系统、网络系统^[69,80]。环境设备监控系统基于网络综合布线系统采用集散监控，在集装箱中放置监控主机，运行组态监控软件，以统一的界面对各个子系统集中监控，并可实现远程监控桌面。实时监视各系统设备的运行状态及工作参数，发现部件故障或参数异常，即时采取有线、无线（短消息）的方式通知控制中心。

◆ 监控内容：配电柜电流电压、UPS设备、智能PDU单元、精密空调、室内温湿度、漏水检测、机房内视频、门禁等。

◆ 报警方式：报警自动弹出报警框；并实现网络远程报警和短消息报警。

图4-7给出了监控系统主系统的实景图。



图4-7 数据采集与监控

Fig.4-7 Data collection and supervisory control

（1）动力设备状态监控

在UPS供应商提供UPS通讯协议的情况下，可以监测协议提供的所有参数和状态。参数包括输入输出电压、电流、频率、功率、蓄电池组的电压、后备时间、温度等；状态包括整流器、逆变器、电池、旁路、负载等部件的状态；显示和记录各种参数的变化曲线，并对各种报警状态进行记录和报警处理。其中UPS的监控数据来源于UPS的RS485总线输出，配电柜安装智能PDU单元，可获得功率输出电流电压以及电能质量参数。

（2）空调制冷设备状态监控

机房内采用精密空调制冷，可根据精密空调供应商提供的通讯协议，实时监测精密空调的送风、回风温度、压缩机工作电压电流、湿度、水箱液位、水泵工作电流等参数；监测工作状态包括压缩机状态、风机状态、加热器状态、抽湿器状态等各种工作状态；显示和记录各种参数变化曲线。

空调制冷设备的参数由空调输出的RS485总线获得。依米康的列间空调可以配置6组温湿度探头，获得机柜的温湿度参数，该部分参数通过精密空调的RS485总线获得。

（3）温湿度监控

对于机柜以外的空间，可安装4组温湿度传感器，集装箱式数据中心冷热通道的两侧各一组。通过采集温湿度传感器所监测的温度和湿度数据，以直观的画面实现温度、湿度显示，并记录集装箱内部各区域的温湿度数据，对采集的温度数据进行分析，当温度和湿度越界是产生报警信息处理，并获得局部热点上报中心以备制服务器调度的改善。

(4) 漏水监测

对于集装箱式数据中心，漏水是不容忽视的安全防护主要内容之一。数据中心中为其提供恒温恒湿环境的精密空调运行过程中要求要有加湿的上水、排水及空调的冷凝水。空调的水系统对在地板下面众多传输线缆及电源插头及接线盒构成极大的危害，即便是一个很小的泄漏，也可能造成设备的运行瘫痪。为保证数据中心电气设备的正常运行，安装于地板下的漏水检测对机房设备的保护非常重要。能够精确及时的发现泄漏位置，及时处理，对保证整个系统的安全至关重要。

漏水监测系统通过采集测漏主机的报警信号监测任何漏水探头上的漏水情况，一旦发生报警，立即切断上水支管和上水总管的上水电磁阀，彻底封闭水路，断绝继续泄水发生，并可以定位检测具体的漏水系统，同时将报警信息通过短信平台发送到相关管理人员，且在现场有声光报警产生。

(5) 消防系统监控

a) 探测装置安装

集装箱式数据中心顶部安装弱电线路，地板下安装布有动力线路，这些线路、设备老化后也极易产生不安全因素。考虑到集装箱式数据中心空间较小，局部火灾会使烟雾迅速蔓延到整个集装箱空间，也会使集装箱内温度在较短时间内升高，因此可以仅仅在集装箱式数据中心内部顶部安装点型感烟感温探测器，在探测器同时探测到烟雾和温度升高时产生火灾报警。

b) 灭火方式选择

针对集装箱式数据中心灭火过程中要求清洁、低毒、良好电绝缘性、灭火效率高的特点，采用七氟丙烷（HFC-227ea）作为灭火剂，实现无管网气体灭火。七氟丙烷虽然是目前对电路损害较小的一种灭火剂，但是仍需要在断电后进行灭火，因此将灭火控制器与低压配电系统相联动，在烟感、温感传感器检测到火灾发生时，首先通过控制信号切断整个集装箱式数据中心的供电之后进行气体释放操作。

(6) 视频监控

在集装箱式数据中心的冷通道和热通道分别安装一组摄像头，并且安装云台，可以远程遥控摄像头的观测范围。将图像监控与动力系统监控、温湿度监控和消防系统监控实现联动，可以随意实现动力系统监控、温湿度监控和消防系统监控与图像的联动控制，一旦有异常事件发生，监控系统自动弹出现场图像画面，即时录像并作报警提示和处理。

4.4.8. 集装箱式数据中心整体结构

(1) 集装箱式数据中心总体设计

集装箱式数据中心总体结构分布如图4-8所示，其中图4-8（a）为平面结构图，图

4-8 (b) 为立体结构图。



(a) 平面布局图

(b) 立体布局图

图4-8 整体布局图

Fig.4-8 Whole layout

20英尺标准集装箱箱体作为数据中心的载体，箱壁内部的表层隔热包装，风冷式精密空调的室内机安装于集装箱的内部的一侧，精密空调的室外机以隔离方式安装于集装箱外部的凹处，这种布局可以保障运输的方便性^[81-82]。

通过支撑结构将集装箱内部分割成三个层次，最上边的一层作为弱电线路走线空间，中间一层放置机柜、UPS、配电柜、空调室内机、环境及动力设备监控柜等设备，最下边一层作为动力线路铺设空间及蓄电池容纳空间。

(2) 集装箱式数据中心实景

图4-9给出本章所述集装箱式数据中心的外部实景图。



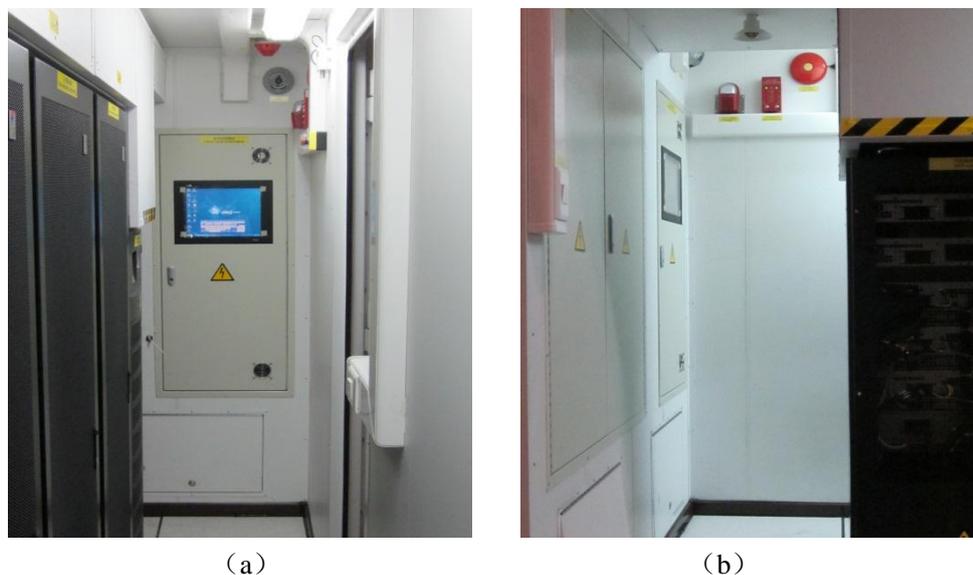
(a)

(b)

图4-9 集装箱式数据中心外部实景图

Fig.4-9 External real map of container data center

图4-10给出本章所述集装箱式数据中心的内部实景图。



(a) (b)

图4-10 集装箱式数据中心内部实景图

Fig.4-10 Internal real map of container data center

4.5. 分布式能量管理平台运营模式分析

目前集装箱式数据中心产业根据应用分为：自用、供应商和数据中心服务提供商三种形式。

(1) 自用品。代表厂商是Google，Google的集装箱式数据中心主要是自用的，且并不具备通用性。Google集装箱数据中心有许多独特之处，比如它不像一般的集装箱数据中心那样配备UPS系统，而是为服务器配备12V的电池，Google的设计人员认为这样可以节省更多的能源。

(2) 供应商型。这类厂商很多，包括IBM、惠普、SGI、富士康，华为赛门铁克，天地云箱科技、浪潮等。虽然不同厂商提供的产品规格不尽相同，但是基本上都提供标准的20英尺和40英尺集装箱式数据中心。

(3) 数据中心服务提供商型。便于移动、即插即用的集装箱式数据中心对于提供灵活的数据中心外包服务来说是理想的选择。2010年，世纪互联公司的集装箱式数据中心正式投入商用，采用类似航空业的“湿租模式”，提供运维团队的整体外包服务，从而降低了数据中心外包服务的门槛。

采用第一种形式优点是能源互联网的运营者可以开发满足自身独特需要的集装箱式数据中心，缺点是运营者需要具备集装箱式数据中心设计开发能力，或者需委托其它集装箱式数据中心设计生产商设计制造特定的集装箱式数据中心，并且在使用过程中需要配备专业的数据中心运维团队。

第二种形式的优点是可以直接采购到了成品集装箱式数据中心，并且使用过程中有厂商提供有保障的售后服务，缺点是没有定制性，不能根据自己的需要进行修改，这种形式在使用过程中同样需要配备专业的数据中心运维团队。

第三种形式优点是可以按需购买，直接使用获得的计算、网络、存储等资源，不需要配备专业的数据中心运维团队，能源互联网运营者的财力、人力可以集中于其核心业务，缺点是需要强化信息的安全措施。

可见，三种方式各自具有优点和缺点，重要的是根据实际应用场景灵活选择上述的三种不同形式。

4.6. 本章小结

能源互联网是以信息为中心的能源网络，能源产生、传输、使用的过程中能量流与信息流深度融合，通过能量管理系统实现大规模分布式可再生能源的消纳和能量的高效能利用。新的能量管理模式需要可快速部署的分布式能量管理平台，集装箱式数据中心的出现恰好迎合了这种需求，集装箱式数据中心的快速部署、按需部署等特点符合能源互联网对分布式能量管理平台的要求。

本章在对现有国内外集装箱式数据中心技术进行系统分析的基础上，根据能源互联网对能量管理系统平台的要求，设计并实施了一种整体化集装箱式数据中心作为能源互联网能量管理的信息平台。该集装箱式数据中心包括计算机集群、箱体及智能机柜、低压供配电，空调制冷（新风）系统、防雷及接地和环境及动力设备监控等数据中心所需完整功能。最后对集装箱式数据中心用于分布式能量管理平台的运营模式进行了分析和阐述。

5. 结论

能源互联网是未来能源网络的实施,是能量流与信息流深度融合的能源网络结构,是解决大量分布式可再生能源接入和实现能量管控的有效解决方案。本文对能源互联网关键技术进行了研究,包括能源互联网的架构、能源路由器、储能系统控制技术以及能量管理平台。报告的主要工作包括:

1、给出基于信息物理融合体系的能源互联网架构。

首先对能源互联网概况进行了阐述,包括能源互联网的特征、组成及其技术体系。其次在对现有国内外主要能源互联网架构进行分析的基础上,提出了符合信息物理融合体系的能源互联网架构,并给出了可实现所提架构的两种能源路由器原型设计。最后根据所提出的能源互联网架构及能源路由器设计了能源互联网的示范工程,并规划了其运营方案。

2、提出基于滑动最小二乘算法和电池荷电状态的储能系统平滑控制策略。

对能源互联网中的储能系统控制技术进行研究,论述了能源互联网中的主要分布式储能技术。对间歇性电源输出功率的平滑控制策略进行分析,提出了一种基于滑动最小二乘拟合算法和电池SOC的储能控制策略,可在间歇性电源输出的波动功率中实时寻找使电池充放电电量之和最小的参考点,降低了控制系统电池容量的需求,减少控制过程中对电池的充放电电量。与传统控制策略相比较,新的控制策略在电池容量需求和对电池充放电总电量方面的性能实现了大幅度的提高。

3、设计并实施了一种整体化的集装箱式数据中心。

在对现有集装箱式数据中心进行分析的基础上,根据能源互联网对能量管理系统的要求,设计并实施了一种整体化的集装箱式数据中心,可作为能源互联网能量管理的信息平台。该集装箱式数据中心包括计算机集群、箱体及智能机柜、低压供配电,空调制冷系统、防雷及接地和环境及动力设备监控等数据中心所需完整功能。最后对集装箱式数据中心用于分布式能量管理平台的运营模式进行了分析和阐述。

参考文献

- [1] 杰里米.里夫金著, 张体伟, 孙毅宁译. 第三次工业革命[M]. 中信出版社, 2012, 第1版.
- [2] A Huang. FREEDM System – A Vision for the Future Grid[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1-4.
- [3] A Huang, M L. Crow, G T Heydt, et al. The Future Renewable Electric Energy Delivery and Management (FREEDM) System: The Energy Internet[C]. Proceeding of the IEEE, 2011, 99(1): 133-148.
- [4] Y Xu, J H Zhang, W Y Wang, et al. Energy Router: Architectures and Functionalities toward Energy Internet[C]. 2011 IEEE International Conference on Smart Grid Communications, 2011: 31-36.
- [5] J H Zhang, W Y Wang, et al. Architecture of solid state transformer-based energy router and models of energy traffic[C]. 2012 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, 2012: 1-8.
- [6] L H Tsoukalas, R Gao. From Smart Grids to an Energy Internet -- Assumptions, Architectures and Requirements[C]. Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2008: 94-98.
- [7] R H Katz, D E Culler, S Sanders, et al. An information-centric energy infrastructure: The Berkeley view[J]. Sustainable Computing: Informatics and Systems, 2011, 7: 7-22.
- [8] P F Perrod, M Geidl, B Klokl, et al. A vision of future energy networks[C]. Power Engineering Society Inaugural Conference and Exposition in Africa, 2005: 13-17.
- [9] M Geidl, B Klokl, G Koepfel, et al. Energy Hubs for the Futures[J]. IEEE power & Energy Magazine, 2007(1): 24-30.
- [10] M Schulze, L Friedrich, M Gautschi. Modeling and Optimization of Renewables: Applying the Energy Hub Approach[C]. International Conference on Sustainable Energy Technologies, 2008: 83-88.
- [11] A Ghasemi, M Hojiat, M H Javidi. Introducing a new framework for management of future distribution networks using potentials of energy hubs[C]. 2nd Iranian Conference on Smart Grids, 2012: 1-7.
- [12] 肖世杰. 构建中国智能电网技术思考[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(9): 1-4.
- [13] 常康, 薛峰, 杨卫东. 中国智能电网基本特征及其技术进展评述[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 10-15.
- [14] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7-11.
- [15] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网的基本理念[J]. 天津大学学报, 2011, 44(5): 377-384.
- [16] 周孝信. 新能源变革中电网和电网技术的发展前景[J]. 华电技术, 2011, 33(12): 1-4.
- [17] 卢强, 戚晓耀, 何光宇. 智能电网与智能广域机器人[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 1-5.
- [18] 武建东. 智能电网与中国互动电网创新发展[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(4): 5-8.
- [19] 武建东. 下一代全球电网的基本模式[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(11): 1-6.
- [20] 于慎航, 孙莹, 牛晓娜, 等. 基于分布式可再生能源发电的能源互联网系统[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(5): 104-108.
- [21] 查亚兵, 张涛, 谭树人, 等. 关于能源互联网的认识和思考[J]. 国防科技, 2012, 5: 1-6.
- [22] E-Energy - Smart Energy made in Germany[EB/OL]. [2013-5-10]. <http://www.e-energy.de/en/>.

- [23] L Xie, M D ILIC. Module—based modeling of cyber-physical power systems[C]. Proceedings of the Distributed Computing Systems Workshops, 2008: 513—518.
- [24] G Li, C Du, C Song, et al. Cyber-physical aware model based on IEC 61850 for advanced power grid[C]. Proceedings of the Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, 2010: 1-5.
- [25] 赵俊华,文福拴,薛禹胜,等.电力 CPS 的架构及其实现技术与挑战[J].电力系统自动化, 2010, 34(16): 1-7.
- [26] 赵俊文,文福拴,薛禹胜,等.电力信息物理融合系统的建模分析与控制研究框架[J].电力系统自动化,2011,35(16):1-8.
- [27] 刘汉宇,牟龙华.微电网 CPS 体系框架及其物理端研究[J].电力自动化设备,2012,32(5): 34-37.
- [28] N Hatziargyriou, H Asano, R Iravani, et al. Microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2007, 5(4):78-94.
- [29] G Venkatramanan, C Marnay. A larger role for microgrids[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 78—82.
- [30] B Kroposki, R Lasseter, T Ise. Making microgrids work[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008, 6(3): 40-53.
- [31] R H Lasseter. Smart Distribution: Coupled Microgrids[C]. Proceedings of the IEEE, Special Issue: Smart Grid: The Electric Energy System of the Future, 2011, 99(6):1074-1082.
- [32] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.
- [33] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能电网的发展和挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14.
- [34] A A Bayod-Rujula. Future development of the electricity systems with distributed generation[J]. Energy, 2009, 34(3): 377-383.
- [35] F Li, W Qiao, H Sun, et al. Smart Transmission Grid: Vision and Framework[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2010, 1(2): 168-177.
- [36] 李振杰, 袁越. 智能微网——未来智能配电网新的组织形式[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(17): 42-48.
- [37] 周念成, 金明, 王强钢, 等. 串联和并联结构的多微网系统分层协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37: DOI.
- [38] H A Emalfarb, D Swan, H Glenn, et al. System and method for energy management: US, 2011/0276194 A1[P]. 2011-10-11.
- [39] gEnergyRouter[EB/OL]. [2013-8-5]. <http://www.gccacloud.com/products.php>.
- [40] 陈伟, 石晶, 任丽, 等. 微网中的多元复合储能技术[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 112-115.
- [41] 丁明, 陈忠, 苏建徽, 等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 19-26.
- [42] GBT 19963-2011. 风电场接入电力系统技术规定[S].
- [43] IEEE Std 1547-2003 IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems[S].
- [44] J P Barton, D G Infield. Energy storage and its use with intermittent renewable energy[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2004, 19(2): 441-448.

- [45] 张步涵, 曾杰, 毛承雄, 等. 电池储能系统在改善并网风电场电能质量和稳定性中的应用[J]. 电网技术, 2006, 30(15): 54-58.
- [46] 吴云亮, 孙元章, 徐箭, 等. 基于饱和控制理论的储能装置容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(22): 32-39.
- [47] 王成山, 于波, 肖峻等. 平滑可再生能源发电系统输出波动的储能系统容量优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16): 1-8.
- [48] 张坤, 毛承雄, 谢俊文, 等. 风电场符合储能系统容量配置的优化设计[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 79-87.
- [49] K Yoshimoto, T Nanahara, G Koshimizu. New control method for regulating state-of-charge of a battery in hybrid wind power/battery energy storage system[C]. Power Systems Conference and Exposition, 2006: 1244-1251.
- [50] 张野, 郭力, 贾宏杰, 等. 基于电池荷电状态和可变滤波时间常数的储能控制方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 34-38.
- [51] 谢俊文, 陆继明, 毛承雄. 基于变平滑时间常数的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 96-102.
- [52] 刘霞, 江全元. 风光储混合系统的协调优化控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(14): 95-100.
- [53] 丁明, 吴建锋, 朱承治, 等. 具备荷电状态调节功能的储能系统实时平滑控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(1): 22-29.
- [54] 张国驹, 唐西胜, 齐智平. 平滑间歇式电源功率波动的混合储能系统设计[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(20): 24-28.
- [55] 鲍雪娜, 张建成, 徐明, 等. 基于混合储能的并网光伏电站有功分级控制策略[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 115-121.
- [56] S Teleke, M E Baran, A Huang, et al. Control strategies for battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24(3): 725-732.
- [57] S Teleke, M E Baran, A Huang. Optimal control of battery energy storage for wind farm dispatching[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2010, 25(3): 787-794.
- [58] 洪海生, 江全元, 严玉婷. 实时平滑风电场功率波动的电池储能系统优化控制方法[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 103-109.
- [59] W Kempton, J Tomic. Vehicle-to-grid power fundamentals: Calculating capacity and net revenue[J]. Journal of Power Sources, 2005, 144(1): 268-279.
- [60] S Barsali, M Ceraolo. Dynamical models of lead-acid batteries: Implementation issues[J]. IEEE Trans. Energy Convers, 2002, 17(1): 16-23.
- [61] BYD Company Limited[EB/OL]. [2013-5-10]. <http://www.bydenergy.com/energy/Products/>.
- [62] 林峰, 胡牧, 蒋元晨, 等. 电力调度综合数据平台体系结构及相关技术[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 61-64.
- [63] 丁明, 杨为, 张颖媛, 等. 基于 IEC61970 标准的微网 EMS 平台设计[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(10): 16-20.
- [64] 周邗飞, 徐石明. 智能变电站数据中心初探[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 57-61.
- [65] 曾君, 刘俊峰, 吴丽群. 可再生能源分布式发电能量管理的复杂性研究[J]. 控制理论与应用, 2012, 29(2): 257-264.
- [66] 王德文. 基于云计算的电力数据中心基础架构及其关键技术 [J]. 电力系统自动化, 2012

- 36(11): 67-72.
- [67] GB 50174-2008. 电子计算机机房设计规范[S].
- [68] GB 50642-2008. 电子信息系统机房施工及验收规范[S].
- [69] ASHRAE TC 9.9 主编, 杨国荣, 胡仰耆, 沈添鸿, 等译. 数据通信设备中心设计研究[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2010.
- [70] 彭永辉, 赵钧, 韦娜, 等. 集装箱式数据中心: 中国, 201010553715.1[P]. 2010-11-17.
- [71] 李金, 谷俊杰, 滕学军, 等. 一种模块化集装箱式数据中心方法设计: 中国, 201110376681.8 [P]. 2011-11-24.
- [72] 蔡丹确, 李汉国. 数据中心的配电设计分析[J]. 建筑电气, 2010, 29(1): 23-26.
- [73] 董青, 周政达, 郝秀云. 数据中心供配电系统设计[J]. 建筑电气, 2010, 29(7): 11-23.
- [74] 李兴林, 李华英. 大型数据中心电源及 UPS 配电系统设计[J]. 建筑电气, 2010, 29(7): 28-38.
- [75] 钟志鲲, 丁涛. 数据中心机房空气调节系统的设计和运行维护[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2009.
- [76] R Sharma, C Bash, C Patel, et al. Experimental investigation of design and performance of data centers[C]. Proceeding of Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2004: 579-585.
- [77] M K Patterson. The effect of data center temperature on energy efficiency[C]. Proceeding of Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems, 2008: 1087-9870.
- [78] 周航. 电信机房空调送风方式的选择与设计[J]. 制冷与空调, 2009, 23(3): 69-71.
- [79] 蒋雅靖, 刘成. 列间空调在高密度数据中心应用的数值模拟[J]. 建筑热能通风空调, 2012, 31(6): 92-95.
- [80] 孟庆祝. 数据中心机房环境综合监控系统方案设计[J]. 智能建筑电气技术, 2011, 5(5): 49-51.
- [81] 王万清. 风冷机房专用空调安装探讨[J]. 制冷与空调, 2010, 10(5): 90-99.
- [82] 找小志, 藏润清, 刘杨. 机房空调室内外机间配管长度对机房空调性能影响的研究[J]. 制冷与空调, 2011, 11(2): 91-93.