

FENBUSHI FADIAN GAILUN

分布式发电 概论

郑志宇 艾 芊 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

分布式发电 概论

编著 郑志宇 艾 芊



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书结合分布式发电技术最新发展,系统且完整地介绍了多种分布式电源工作原理和模型、分布式电源并网关键技术和微电网,分析了分布式电源对智能电网的影响,并对智能电网中与分布式电源接入技术相关的高级测量体系、高级配电运行及高级资产管理等方面内容进行了详细介绍。鉴于国家目前正大力促进节能减排的电动汽车发展,在本书的最后对电动汽车充电站进行了详细的讲解。

本书适用于从事分布式发电的技术人员参考,还可供对分布式发电技术感兴趣的广大读者阅读。

图书在版编目(CIP)数据

分布式发电概论/郑志宇,艾芊编著. —北京:中国电力出版社, 2012. 11

ISBN 978-7-5123-3782-4

I. ①分… II. ①郑… ②艾… III. ①发电 IV. ①TM61

中国版本图书馆CIP数据核字(2012)第279842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

*

2013年2月第一版 2013年2月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 13.25印张 322千字

印数0001—3000册 定价30.00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

序

气候变化和能源问题对世界各国提出了低碳发展的迫切要求。以发展可再生能源、节约能源为主题的低碳经济已经成为未来发展主流。分布式发电技术以其独有的环保性和经济性引起越来越多的关注。在分布式能源的应用方面，欧、美、日等已走在了世界的前列。美国是最早发展分布式供能系统的国家之一，1978年，以冷热电联产系统为主要形式的分布式供能系统在美国推广。据国际分布式能源联盟统计，截至2004年底，美国分布式供能系统装机容量占总装机容量的7.8%。欧洲分布式供能发展水平世界领先，尤其是丹麦、荷兰、芬兰，其分布式供能发电量分别占到国内总发电量的52%、38%、36%，远远高于世界平均水平。在日本能源供应领域中，热电（冷）联产系统是仅次于燃气、电力的第三大公益事业。而随着化石能源的消耗和分布式发电技术的发展，更大比例间歇性电源将被接入电网。美国电力科学研究院的研究表明，到2010年全球25%的电能由小于2MW的分布式电源提供，并且分布式电源所占市场份额将达到20%。

在我国，在已建中央电站及电网的基础上，大力发展分布式发电技术将是我国电力系统未来发展的必然趋势。随着我国经济建设的发展，集中式供电网络的规模扩大，由于地域经济的差异，对于落后的农村地区，特别是农牧地区和偏远山区，要形成一定规模的配电网需要很大的投资，能源供应严重制约这些地区的经济发展，分布式发电技术能够弥补集中发电模式的局限性。在我国西北的广大农村地区风力和太阳能资源比较丰富，为分布式发电技术的发展提供了条件，内蒙古已经形成了年发电量1亿kWh的规模，除自用外，还送往北京地区，这种无污染绿色能源减轻了当地环境的污染。在可再生能源分布式发电系统中，除了风力发电外，还有太阳能光伏电池、中小水电等都是解决我国偏远地区缺电的较好方法。

大力发展分布式发电技术需要培养大量了解分布式发电技术的高级专门人员，而目前国内缺少完整且系统介绍分布式发电及相关技术的书籍。本书作者具有丰富的电力系统科研工作经历，研究范围广泛，涉及分布式电源与微电网、柔性直流输电、多代理系统、复合建模与预测等，历时两年之久编著这本书籍，将为我国的电力系统建设、分布式发电发展做出贡献。值此书籍出版之际，特向本书作者表示祝贺，同时再接再厉，不断取得新的成果，勇于探索，为电力系统发展与建设做出更大的贡献。

沈喜德

2012年11月

前 言

中国是一个能源生产和消费大国，经济的快速发展导致能源需求的快速增长。从长远来看，可能面临着能源资源不足、供应压力增加、环境保护矛盾突出、能源技术落后和农村能源亟待改善等问题。实现能源的多样化和可持续发展，增加可循环利用能源的开发，是满足我国能源需求的重要途径。

在这种社会大背景下，传统的“大机组、大电网、高电压”供电模式显示出了一定的局限性。分布式发电是一种新兴的能源利用方式，其定义可概括为：直接布置在配电网或分布在负荷附近的发电设施，经济、高效、可靠地发电。分布式发电系统中的发电设施称为分布式电源，主要包括风力发电、太阳能发电、燃料电池、微型燃气轮机等。这些电源通常发电规模较小（一般 50MW 以下）且靠近用户，一般可以直接向其附近的负荷供电或根据需要向电网输出电能。与传统的集中式能源相比，分布式发电具有投资小、发电方式灵活、损耗低、利于环保等优点，对于高峰期电力负荷比集中供电更经济、有效，因此已成为现代电力系统规划中重要的研究方向。分布式发电与大电网联合运营，更被国内外许多专家学者认为是降低能耗、提高电力系统可靠性和灵活性的主要方式，同时也是我国电力工业未来的发展方向。

分布式电源接入电网后，将给配电网乃至输电网的电压、电能质量、系统保护和调度运行等带来一系列的影响，并联模式下电网的监控和管理面临很多技术上的难题。智能电网技术的发展为分布式电源的无缝并网提供了契机。智能电网在国际上尚未给出明确的定义。一般认为，智能电网以高级传感装置为核心，集合各种最先进的信息技术形成高效的自动化信息网络，实时监控每个用户和节点，并通过电子终端保证了传感器和发电厂之间、用户和电网公司之间的双向通信与即时连接。智能电网通过广泛应用的分布式智能和通信系统及自动控制系统的集成，自动监控电网，保证市场交易的实时进行和动态议价，电网上各成员之间的无缝连接及实时互动。

智能电网技术有机融合了高级传感、通信、自动控制等技术，具有自我管理、自我恢复、兼容性强等特点。通过合理的应用智能电网技术，能在分布式电源接入电网后，实现实时互动和协调运行。智能电网与传统电网的重要区别之一即为智能电网能够使分布式能源、可再生能源与现有电力系统有机融合；支持分布式发电方式友好接入以及可再生能源的大规模应用，并推动实现“即插即用”的标准化；根据分布式电源的不同类型，采取不同的对应控制措施，实现分布式能源管理。同时，智能电网中的虚拟电厂技术，能将分布式电源有效整合接入现有电力系统。利用该技术能提高分布式电源的渗透率，吸引分布式电源参与电力交易和需求侧响应，实现有效调度管理。

因此，在对分布式发电进行研究的基础上，将智能电网与分布式发电有机结合，分析两

者协同应用的情况是未来的研究重点。然而同时介绍分布式发电和智能电网的书籍目前还十分鲜见，这也是我们编写本书的目的。

本书共 9 章：第 1 章对分布式发电技术进行了简介；第 2 章重点分析了各种分布式电源的原理和模型；第 3 章介绍了分布式发电并网；第 4 章介绍了微电网；第 5 章讨论了分布式电源对智能电网的影响；第 6~8 章分别详细讨论了智能电网中的高级量测体系、高级配电运行和高级资产管理；鉴于国家目前正大力促进节能减排的电动汽车发展，本书第 9 章对电动汽车充电站进行了详细的讲解。

分布式发电技术和智能电网都是快速发展的热点科研领域，由于作者学识有限，本书编写时间又很仓促，书中一定有很多疏漏及错误，殷切希望广大读者批评指正。

编者

2012 年 10 月

目 录

序	
前言	
第 1 章 分布式发电简介	1
1.1 分布式发电概述及发展现状	1
1.2 分布式电源入网对现有电力系统的影响	6
第 2 章 分布式发电的原理及模型	9
2.1 风力发电	9
2.2 光伏发电	43
2.3 燃料电池	58
2.4 微型燃气轮机	66
2.5 储能系统	72
2.6 本章小结	88
第 3 章 分布式发电并网	89
3.1 分布式发电并网概述	89
3.2 并网逆变器系统	91
3.3 分布式电源的互联标准简介	95
3.4 孤岛效应与反孤岛效应	98
3.5 本章小结	104
第 4 章 微电网	105
4.1 微电网的基本概念	105
4.2 国内外微电网的研究现状及前景	107
4.3 微电网研究中的关键技术和问题	109
4.4 微电网能量控制方法	113
4.5 多代理 (Multi Agent) 技术在微电网中的应用	115
4.6 本章小结	120
第 5 章 分布式电源对智能电网的影响	121
5.1 智能电网的发展概述	121
5.2 国内外智能电网的研究现状与发展	122
5.3 智能电网的组成与特征	127
5.4 智能电网技术在分布式发电中的应用	130

5.5	智能电网与分布式能源结合的应用技术	133
5.6	本章小结	136
第6章	高级量测体系	137
6.1	智能电能表与高级传感器	138
6.2	开放、标准、集成的通信系统	138
6.3	计量数据管理系统	142
6.4	电网模型参数与仿真决策	143
6.5	广域测量系统	150
6.6	本章小结	153
第7章	高级配电运行	155
7.1	高级配电自动化	155
7.2	高级 DA 的基本概念	155
7.3	高级 DA 的关键技术	156
7.4	配电快速仿真与模拟	157
7.5	新型电力电子装置	158
7.6	清洁能源与分布式能源的接入	163
7.7	虚拟发电厂	166
7.8	本章小结	170
第8章	高级资产管理	171
8.1	输、配电网规划	171
8.2	资产管理	172
8.3	工程管理	175
8.4	电力市场和顾客服务	176
8.5	本章小结	176
第9章	电动汽车充电站	178
9.1	电动汽车充电站发展背景	178
9.2	电动汽车充电站发展现状	180
9.3	电动汽车充电站结构简介	185
9.4	电动汽车充电站原理	186
9.5	充电站并网的影响因素	190
9.6	电动汽车充电站对电网的影响	191
9.7	充电站规划原则	193
9.8	电动汽车充电站容量选择及建设方案	194
9.9	电动汽车充电方式选择	196
9.10	电动汽车充电站运行方式选择	201
9.11	本章小结	202
参考文献	203

分布式发电简介

1.1 分布式发电概述及发展现状

目前,电力系统已经发展成为以大机组、大电网、高电压为主要特征的集中式单一供电系统。然而,随着电网规模的不断扩大,当今社会对电力能源供应的质量、安全可靠性的要求越来越高,超大规模电力系统的运行难度大、投入成本高、环境污染严重等弊端也日益凸现。与此同时,全球范围的能源危机和环境危机使得新兴能源的开发和利用成为一种迫切的需求。于是,分布式电源的兴起成为 21 世纪一个引人注目的动向。为了弥补和完善大规模集中式电力系统发电、输电的不足,直接安装在用户近旁的分布式发电(Distributed Generation, DG)近年来越来越受到人们的重视。目前,大电网与分布式电源相结合被世界许多能源、电力专家公认为是能够节省投资、降低能耗、提高电力系统可靠性和灵活性的主要方式,是 21 世纪电力工业的发展方向。

1.1.1 分布式能源系统内涵及特点

分布式能源系统(Distributed Energy Resources, DER)是世界能源工业发展中的一个重要方向,在发达国家此技术已较成熟并得到了大力推广应用。但涉及分布式能源系统的概念时,在国际上并没有统一的定义,主要引用美国或欧洲机构的定义。

分布式能源系统在英语中对应的专有缩略名词有以下 3 个: DG、DP、DER。

(1) DG: 存在于传统公共电网以外,任何能发电的系统,原动机包括内燃机、燃气轮机、微型燃气轮机、燃料电池、小型水力发电系统以及太阳能(风能、垃圾及生物能)等的发电系统。

(2) DP: 包含所有 DG 的技术,并且能将电能通过蓄电池、飞轮、再生型燃料电池、超导磁力储存设备、水电储能设备等将电能储存下来的系统。

(3) DER: 涵盖更加广泛的概念,在用户当地或靠近用户的地点生产电或热能,提供给用户使用。它包含了 DG 与 DP 所有的技术,并且包含那些与公共电网相连接的系统,用户可将本地的多余电能通过连接线路,出售给公共电力公司。

从上述关于 DG、DP、DER 定义可以看出它们三者之间的关系,DP 包含 DG,而 DER 包含 DP,即它们的概念是由狭义趋于广义。

在现今能源短缺,环境污染严重的时代,分布式能源系统得到越来越广泛的应用,对其研究也越来越广泛。在《DER Benefits Analysis studies: Final Report》中对 31 份有关分布式能源系统研究报告进行深刻评论,总结分布式能源系统的特点和评价准则,这些研究报告被认为在量化分布式能源系统特点方面是最好的。在我国关于分布式能源系统特点的研究也很多,总结有以下几个方面:

(1) 实现能源综合梯级利用, 能源利用率高, 具有非常好的节能效应。常规的集中供电方式相对单一, 当用户不仅仅需要电力, 还需要其他形式的能量供应, 如供热, 尤其是供冷和生活热水时, 仅通过电力来满足上述需要时难以实现能量的综合梯级利用。而分布式能源系统以其规模小、灵活性强等特点, 通过不同循环的有机整合, 可以在满足用户需求的同时, 克服了冷、热无法远距离传输的困难, 实现能量的综合梯级利用。大型发电厂的发电效率一般为 35%~55%, 扣除厂用电和线损率, 终端的利用效率只能达到 30%~47%。而分布式能源系统的能源利用率可达到 80%以上, 没有输电损耗。

(2) 弥补大电网安全稳定性的不足。近年来世界上发生的几次大的停电事故, 特别是美国加州东部发生的大停电事故, 每天的经济损失达 300 亿美元, 充分反映了以集中供电模式为主的现代电力系统脆弱的一面。同时, 美国“9·11”事件后, 供电安全已上升至国家安全, 引起各国高度重视, 而电网的急速膨胀给供电安全稳定性也带来很大威胁。在用户附近直接安置分布式能源系统, 与大电网配合, 可以大大地提高供电可靠性, 在电网崩溃和意外灾害(例如地震、暴风雪、人为破坏、战争)情况下, 维持重要用户的供电。

(3) 装置容量小、占地面积小, 初始投资少, 降低了远距离输送损失和相应的输配系统投资, 可以满足特殊场合的需求。分布式能源系统是按需就近设置, 尽可能与用户配合。与集中能源系统相比, 没有能源远距离输送引起的输配损失以及相应的输配系统投资, 经济性好, 为终端用户提供了灵活、节能型的综合能源型服务。对于不适宜铺设电网的西部等偏远地区或散布的用户, 可以发展分布式能源系统。此外, 在废弃资源现场, 因地制宜地就地利用转换余热、余压以及可燃性废弃气体, 也有重要意义。

(4) 环境友好, 燃料多元化, 为可再生能源利用开辟了新方向。分布式能源系统一般采用清洁燃料做能源, 同时以其高效率可以实现环保效益。按照美国能源部 CCHP2020 纲领的描述, 部分新建建筑采用热电冷三联产(CCHP)后, 美国 CO₂ 可以减排 19%。相对化石能源而言, 可再生能源如太阳能、地热、风能等的能量密度较低、分散, 而且目前的可再生能源利用系统规模小、能源利用率低, 作为集中供电手段难度很大。分布式能源系统规模小, 适合与可再生能源相结合。

分布式能源系统形式根据燃料不同, 主要可分为燃用化石能源、利用可再生能源和燃用二次能源及垃圾燃料等几种。燃用化石能源的动力装置有: 微型燃气轮机、燃气轮机、内燃机、常规的柴油发电机、燃料电池; 利用可再生能源有太阳能、风能、水能、生物质等可再生能源综合利用系统; 燃用二次能源的如氢能。根据用户侧需求不同, 则可分为电力单供、热电联产方式(CHP)和热电冷三联产(CCHP)等方式。分布能源系统的组成部分包括发电设备(汽轮机、燃气轮机、微型蜗轮机、内燃机或燃料电池)、供热或制冷设备(吸收式冷/热水机组、电制冷机组)、锅炉或蓄热系统、汽-水换热器、调节装置(使蒸汽参数符合用户要求)以及建筑控制系统等。

1.1.2 分布式能源系统应用现状

在欧美随着能源市场放松管制, 竞争机制的引入以及可持续发展战略的实施, 分布式能源系统得到迅猛的发展。在欧盟委员会发布的能源效率行动计划中, 提出到 2020 年减少一次能源消费 20% 的节能目标, 并减少温室气体排放 20%, 对此, 欧洲有关机构对分布式发电的节能潜力进行评估, 结果表明: 仅分布式热电联产就能完成 1/3 的欧盟节能目标, 每年可减少 CO₂ 排放 1 亿 t。英国过去 20 年中, 超过 1000 个分布式能源系统已被安装, 遍布英

国的各大饭店、休闲中心、医院、综合性大学和学院、园艺、机场、公共建筑、商业建筑、购物商城及其他相应场所。其中，超过10%的家庭安装了小型风力发电机，其成本价和传统电网的价格持平。2005~2008年，英国安装了1万多台小型风力发电机组，装机容量约2万kW。2008年，英国小型风力发电机组新增装机容量为0.72万kW。在数量上，1.5~50kW的机组仅占1/5，但就装机容量而言，小型风力发电机组占了总装机容量的61%。德国分布式发电装机容量约2084万kW，占总装机容量的19.8%。2010年新增光伏发电装机容量740.8万kW，其中80%以上为住宅用小型太阳能发电系统。德国还有300多个1万kW以下的沼气和其他生物质能发电站。丹麦是世界上能源利用效率最高的国家，在过去20年中，GDP翻了一番，能源消耗却没有增加，污染排放反而大幅度下降。其主要的措施就是大力发展分布式能源，丹麦80%以上的区域供热能源采用热电联产方式产生。丹麦分布式发电量超过全部发电量的50%，分散接入低电压配电网的风电总装机容量有300万kW。丹麦从1980年开始大力发展电热联供项目，全丹麦共有8个互联的热电联产大区，目前的技术水平可达到煤/电转化效率超过50%；连同供热考虑，总效率高达90%以上。现在，越来越多的人口密集地区的热电联产厂使用天然气作为燃料，其热电效率指标还略高于燃煤技术。热电联供厂每千瓦容量的建设成本为1200~1600欧元。丹麦风电装机容量也在迅速增加，截至2010年，丹麦风电新累计装机容量达到375.2万kW，风力发电接入电网的比率高达20%。

美国是最早发展分布式能源系统的国家之一，自20世纪70年代开始开发以来，美国已有6000多座分布式能源站，仅大学校园就有200多个采用了分布式能源站供能。美国分布式发电的市场已达10多亿美元，全球大多数商用分布式发电设备是由美国提供的。美国在2001年颁布了IEEE P1547/D08“关于分布式电源与电力系统互联的标准草案”，并通过了有关的法令让分布式发电系统并网运行和向电网售电。2003年1月，美国能源部(DOE)在Virginia召开了分布式能源系统的研讨会，DTE能源技术公司总裁MarkFallek在会上指出：“分布式能源系统应用的重要一步是：从小规模的提供紧急与临时动力发展到为家庭、商业、工业提供连续、高可靠、低品质的能源，以保护自然资源与环境。根据EIA《美国2011能源展望》：预计可再生能源发电的装机容量从2009年的4700万kW增加到2035年的10000万kW，其中增长幅度最大的是风电装机容量，风电装机容量于2012年将达到1820万kW，但2012~2035年增速放缓，新增风电装机容量仅为690万kW。太阳能发电装机容量占可再生能源发电装机的比例将从2009年的2%增至2035年的5%，发电量将从2009年23亿kWh提高到2035年的168亿kWh。生物质发电的装机容量将从2009年700万kW增加到2035年的2020万kW，在可再生能源电力中的占比从15%提高到20%，见图1-1。

日本不仅是亚洲能源利用效率最高的国家，在全世界也位居前列。由

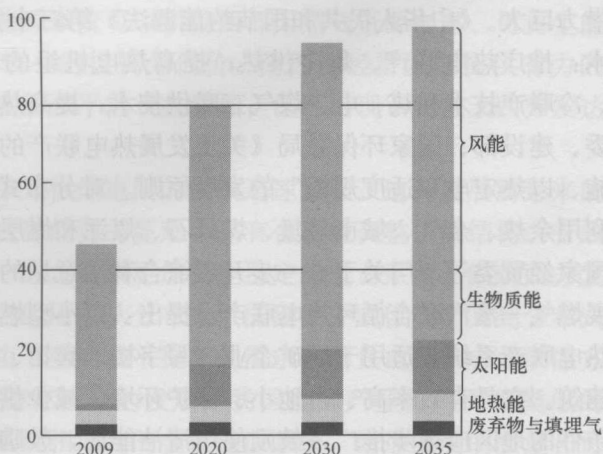


图1-1 2009~2035年可再生能源电源结构

于日本缺乏能源资源，政府高度重视提高能源利用效率，颁布了不少优惠政策，诸如建立环境保护基金、制定允许分布式能源系统并网的政策。日本的分布式发电以热电联产和太阳能光伏发电为主，总装机容量约 3600 万 kW，占全国发电总装机容量的 13.4%。其中商业分布式发电项目 6319 个，主要用于医院、饭店、公共休闲娱乐设施等；工业分布式发电项目 7473 个，主要用于化工、制造业、电力、钢铁等行业。据国际分布式能源联盟（WADE）对日本能源供需前景的预测，到 2030 年日本分布式发电比重将达到总发电量的 20%。近年来，日本分布式能源发展较快，其中热电联产装机容量超过过去 20 年的总和。2006 年，日本热电联产装机容量达到 870 万 kW，占日本电力总装机容量的 4%。其中，以天然气为原料的热电联产装机容量达到 450 万 kW，占热电联产总装机容量的 51.2%。日本光伏分布式发电应用广泛，不仅用于公园、学校、医院、展览馆等公用设施，还开展了居民住宅屋顶光电的应用示范工程。2006 年底，日本光伏发电累计装机容量达到 201.7 万 kW，其中户用光伏系统安装量 36 万户，累计装机容量达到 125.4 万 kW，位居全球第一。截至 2009 年底，日本光伏发电装机总量达到 297.7 万 kW，其中户用光伏系统装机容量占比约 80%。日本制定了相关的法令和优惠政策保证分布式发电事业的发展，有条件、有限度地允许这些分布式发电系统上网，通过优惠的环保资金支持分布式发电系统的建设。优惠政策包括以下几点：①对城市分布式发电单位进行减税或免税。建成分布式发电的项目第一年可享受 30% 安装成本折旧率或 7% 免税；总投资的 40%~70% 部分可享受低息贷款（每年利率 2.3%）；免除供热设施占地的特别土地保有税和设施有关的事业所得税；区域供热工程费用、供热的固定资产税、区域供热用折旧资产税等给予优惠。②鼓励银行、财团对分布式发电系统出资、融资。针对区域供热系统需要大规模投资，日本有关金融机构长期施行通融资金、低利息等制度。③修订《电力事业法》在内的一系列放宽管制的办法出台，允许非公共事业类的供应商对需求大的用户售电，而在以前，该项售电业务通常被电力公司所垄断，并规定新建和改建 30 000m² 以上的建筑物必须纳入到城市分布式能源系统中。

我国面临的巨大挑战依然是人口、资源和环境问题，实现可持续发展的唯一选择就是全力提高资源的利用效率，最大限度地减少环境污染，而分布式能源系统将会使这一问题得到一定程度的缓解。分布式能源系统是保证我国能源可持续发展战略实施的有效途径之一，发展潜力巨大。《中华人民共和国节约能源法》第三十九条明确，国家鼓励发展下列通用节能技术：推广热电联产、集中供热；提高发电机组的利用率；发展热能梯级利用技术，热、电、冷联产技术和热、电、煤气三联供技术，提高热能综合利用率。原国家计委、原国家经贸委、建设部、国家环保总局《关于发展热电联产的规定》文件中明确了“统一规划、分步实施、以热定电和适度规模”的发展原则。对分布式能源系统有明文规定，其中第十一条：凡利用余热、余气、城市垃圾、煤矸石、煤泥和煤层气等作为燃料的热电厂，按《国务院批转国家经贸委等部门关于进一步开展综合利用意见的通知》文件执行。第十四条：积极支持发展燃气—蒸汽联合循环热电联产，提出：以小型燃气发电机组和余热锅炉等设备组成的小型热电联产系统，适用于厂矿企业、写字楼、宾馆、商场、医院、银行、学校等较分散的公用建筑。它具有效率高、占地小、保护环境、减少供电线损和应急突发事件等综合功能，在有条件的地区应逐步推广，鼓励使用清洁能源，鼓励发展热、电、冷联产技术和热、电、煤气联供，以提高热能综合利用效率。十届全国人大常委会第十四次会议于 2005 年 2 月 28 日

通过了《可再生能源法》。国家主席胡锦涛签署第三十三号主席令，公布了这部法律《可再生能源法》明确规定：所称可再生能源是指风能、太阳能、水能、生物质能、地热能、海洋能等非化石能源，并声明通过低效率炉灶直接燃烧方式利用秸秆、薪柴、粪便等不适用本法。并且对分布式能源系统的并网、上网和电价的确定以及法律责任等都有明确规定，为分布式能源系统的发展，扫清了一些重要的障碍。

目前，我国以天然气为燃料的分布式能源系统建设已逐步进入实质性开发实施阶段，在北京、上海、广州等大城市的居民小区、商城楼宇、大学城都有一批热、电、冷联产示范工程投运。例如：上海浦东国际机场能源中心 4000kW 燃气轮机热电联供项目，系统燃料以天然气为主，0 号柴油作为备用，能源中心实现热、电、冷三联产的主要设备为：1 台额定功率为 4000kW 的燃气轮机发电机组；1 台额定负荷为 9.7t/h、利用燃气轮机排出的高温烟气产生 0.9MPa 饱和蒸汽的余热锅炉和在蒸汽供应量不足时使用的燃气/油锅炉；溴化锂制冷机组和离心式制冷机组。上海黄浦区中心医院 1000kW 燃气轮机热电联供项目，北京中关村软件园热、电、冷联产项目等各项工程的实施和投运等。

1.1.3 分布式能源系统发展趋势

分布式能源系统是在 20 世纪 70 年代开始发展的，在集中式供电技术还未完全成熟，能源需求快速增长的情况下，该技术一直没有得到重视。随着经济的发展、能源供应质量要求的提高，以及热、电、冷负荷需求的逐步普遍化，分布式能源系统的应用逐渐引起了人们的关注。该技术以其投资小，适用范围广的特点，已成为国家总体能源供应系统中，一种最为灵活和有效的补充，分布式能源技术在欧美、东南亚等地广泛应用，前景看好。

我国是一个发展中国家，能源消费与发达国家相比存在较大的差距，按照目前的发展趋势，我国所面临的能源问题仍然是相当严峻的。在我国经济和城市化发展过程中，居民小区和工业园区的建设一直是处于发展的前列，如何实现区域的整体能源供应，是目前城市建设规划应当十分关注的问题，在这方面分布式能源系统具有广阔的发展空间，另外，发展中央商务区楼宇的分布式能源系统也是值得研究的重要课题。就我国能源情况来看，能源资源相对贫乏，而且各地区经济发展不平衡。对于西部等偏远、落后地区，由于远离经济发达地区，形成一定规模的、强大的集中式西北电网系统需要很长时间和巨额的投资，无法满足目前西部经济快速发展的需要。分布式能源系统可以借助西部天然气资源丰富、可再生能源多种多样的优势，在不长的时间内，以较小的投资为代价，为西部经济发展提供有力的支撑。对于东南沿海经济发达地区，由于生活水平的日益增加，已经出现了类似于西方发达国家的对于能源产品需求多样化的趋势。

随着经济建设的飞速发展，我国集中式供能电网的规模迅速膨胀。这种发展所带来的安全性问题是不容忽视的。为了及时抑制这种趋势的蔓延，只有合理地调整供能结构、有效地将分布式能源系统和集中式供能结合在一起，构架更加安全稳定的电力系统。纵观西方发达国家能源产业的发展过程，可以发现：它经历了从分布式供能到集中式供能，又到分布式供能方式的演变。造成这种现象不仅仅是由于生活水平提高的需求，而且也是集中式供能方式自身所固有的缺陷造成的。毋庸置疑，随着社会的发展，我国能源产业也将面临类似的问题。构造一个集中式供能与分布式能源系统相结合的合理能源系统，增加电网的质量和可靠性，将为我国能源产业的发展打下坚实的基础。

1.2 分布式电源入网对现有电力系统的影响

目前分布式电源的容量都比较小,在现有的装机水平下,分布式电源不会对大区域的电力系统稳定产生影响,但是随着分布式电源的发展,如果这种小型机组的数量达到一定水平,就有可能影响到整个电力系统的特性。分布式电源入网运行,目前主要发生在配电网,其产生的影响表现为如下几个方面。

1.2.1 分布式发电对电能质量的影响

1. 对电压波动的影响

在传统配电网中,有功、无功负荷随时间变化会引起系统电压波动。沿线路末端方向,电压的波动越来越大。如果负荷集中在系统末端附近,电压的波动会更大,一般尽量避免这种情况的发生。分布式电源接入配电网后,对系统电压波动的影响主要表现为两种方式:①分布式电源与当地的负荷协调运行,即当该负荷增加(或减小)时,分布式电源的输出量增加(或减小),此时分布式电源将抑制系统电压的波动。②分布式电源不能与当地的负荷协调运行。以风力发电为例,由于其有功输出在很大程度上取决于风速的大小,波动性较大,很难与当地负荷协调运行,此时将增大系统电压的波动。分布式发电接入系统对系统电压波动的影响属于固有问题,只要该分布式电源处于运行状态,其波动的功率输出就会对电网电压造成影响,只是影响程度大小不同而已,在某些情况下电压波动已经成为制约分布式电源装机容量的主要因素。因此,全面系统地对分布式电源接入的电压波动问题进行研究,就具有实际意义。

2. 谐波问题

分布式电源接入系统后可能引发的另一个问题就是谐波问题。谐波的来源有两种可能:一是分布式电源本身就是一个谐波源,二是分布式电源中采用的一些电力电子设备。以风力发电为例,不论何种类型的风电机组,发电机本身产生的谐波是可以忽略的,谐波电流的真正来源是风电机组中的电力电子元件。尤其是变速恒频风电机组,其中的变流器始终处于工作状态,谐波电流大小与输出功率基本呈线性关系,也就是与风速大小有关。在正常状态下,谐波干扰的程度取决于变流器装置的设计结构及其安装的滤波装置状况,同时与电网的短路容量有关。

1.2.2 分布式发电对系统安全和可靠性的影响

分布式电源接入配电网,对系统的安全和可靠性可能会带来正面影响,也可能带来负面影响,视具体情况而定。若将分布式电源作为备用电源接入系统,则可以部分消除电网的过负荷和堵塞,提高电网的输电裕度。在适当的分布式电源布置和电压调节方式下,分布式电源可以对系统电压起支持作用,改善系统电压的整体水平;若该种分布式电源具有低电压穿越能力,则在系统发生故障时还能继续运行,并起到缓解电压骤降的作用,提高系统对电压的调节性能。这些都有利于提高系统的可靠性水平。但若分布式电源并网运行,则也可能降低系统的安全可靠性。若分布式电源不具备低电压穿越能力,则在系统发生故障时通常要求该分布式电源从电网中切除,则当其所接的线路故障重合时,分布式电源不但不能起到电压支持的作用,反而会加重电压跌落;且如果分布式电源没有及时跳闸脱网,造成的非同期重合可能引起保护误动作、设备受损,线路无法及时恢复运行,反而增加了用户的停电时间。

发生系统停电时,有些分布式电源的燃料会中断或供给分布式电源辅机的电源会失去,分布式电源会同时停运,仍无法提高供电的可靠性。同时,分布式电源与配电网的继电保护如果配合不好,可能使继电保护误动作,反而使系统的安全可靠性降低。另外,分布式电源不适当的安装地点、容量和连接方式都可能降低配电网的安全可靠性。

1.2.3 分布式发电对系统保护的影响

配电网往往是辐射状结构,只有一个电源,线路潮流单向流动。考虑到配电网80%的故障都是瞬时的,配电网的保护设计通常是在变电站处安装反向过电流继电器,主馈线上装设自动重合闸装置,支路上装设熔断器。根据“仅断开故障支路,对瞬时故障进行重合闸”原则,使自动重合闸装置与各侧支路上的熔断器相互协调,而每个熔断器又分别与其直接相连的上一级和/或下一级支路上的熔断器相互协调以实现配电网线路的保护。分布式电源在接入配电网后,由于配电网结构发生变化,将给继电保护带来下面几个问题:

(1) 当分布式电源接入配电线路后,线路保护的灵敏度降低或者保护范围缩小。在线路的某些位置,速断保护根本无法启动,形成速断保护死区,使线路故障不能及时切除。若分布式电源并网点位于速断保护死区,在不改变保护系统的情况下,只能由后备过电流保护动作切除故障,这增加了故障对电网的影响。若调整速断保护整定值,则可能造成速断、过电流保护和其他控制装置之间无法协调,导致保护误动作。

(2) 相邻线路故障时分布式电源可能引起所在线路保护误动作。如果故障发生在距离母线较近的部分,由于分布式电源的作用,其所在线路的线路保护检测到的故障电流值将大于其整定值,从而引起误动作,使分布式电源所接线路无故障跳闸。

(3) 分布式电源对重合闸的影响。当分布式电源接入配电线路后,如果线路因故障跳闸,所形成的孤岛保持了功率和电压在额定值附近运行,分布式电源极有可能在重合闸动作时没有跳离线路,这将产生两种潜在的威胁。①非同期重合闸。由于电网电源的失去,电力孤岛很难与电网保持完全同步,在电网电源跳开后至重合闸时的这段时间内,两者之间的相角差可能出现在 $0^{\circ}\sim 360^{\circ}$ 之间的任何一个位置。在此电流的作用下,线路保护可能发生误动作,而使重合闸失去了迅速恢复瞬时故障的能力。②故障点电弧重燃。在失去电网电源后,故障点仍然由分布式电源维持故障电流。当进行重合闸时,由于电网电源的作用,可能引起故障电流跃变,引起故障点电弧重燃,导致绝缘击穿,进一步扩大事故。

1.2.4 分布式发电对电力市场的影响

电力工业解除管制和电力市场的兴起,使得各种分布式发电方式能够在统一开放的交易市场上进行公平竞争,从而为电力用户提供多种选择的机会:①不同的电力供应商;②不同时段的用电;③不同的供电质量;④不同计量方式;⑤不同的费率结构;⑥不同的付款方式;⑦不同的用户侧管理计划;⑧自己发电或者蓄电。

配电网的开放,引入了电力零售市场,电力零售市场上电力供应竞争给企业自备电厂和用户自己安装的分布式电源带来商机,拥有分布式电源的用户在电力零售市场上面临三种选择:①从电网受电;②自己发电,自给自足;③自己发电并向电网卖电。根据发电竞争市场的电价信息和零售电力市场的需求信息,用户完全可以用活自己的分布式电源,让它发挥更大的作用,产生更大的效益,为自己或者附近用户提供供暖和供电服务。电力零售市场的建立将会确立电力零售机制,任何形式的发电商都可以作为电力供应商向零售电力市场提供电力产品,在零售市场上公平竞争。

1.2.5 其他影响

分布式电源接入电力系统后，除了会对系统产生上述影响外，还存在一些其他方面的问题，有待于进一步研究，例如，由于分布式发电的兴起，当前需要建立相应的法律、法规和行业规范，建立一个普遍适用的 DG 与配电网的并网标准；同时，为了实现 DG 系统间以及 DG 与配电网之间的相互协调和对分布式电源的调度，需要涉及到通信技术、GPS 技术、DSP 技术以及电力系统的动态测量和在线检测技术在分布式发电中的应用研究等。同时，有时候 DG 会对电力系统可靠性产生不利的影 响，如大系统停电时有些 DG 的燃料会中断，或供给 DG 辅机的电源会失去，DG 也会随之停运，仍无法提高供电的可靠性；DG 与配电网的继电保护配合不好的话，可能使继电保护误动作，反而降低系统的可靠性；不适当的安装地点、容量和连接方式会使配电网可靠性变坏等。

分布式发电的原理及模型

2.1 风力发电

2.1.1 风能资源的特点

1. 风速的典型随机分布

常用来描述平均风速随机性的分布主要有：双参数 Weibull 分布、Rayleigh 分布、Log-Normal 分布和 Gumbel 分布。其中双参数 Weibull 分布是应用最为广泛、适应性最强的一种。

在多种描述极限值分布的分布形式中第一类极值分布或称为 Gumbel 分布是一种拟合极值分布的经典、常用形式。

为了分析方便，下面分别将双参数 Weibull、Rayleigh、LogNormal、Gumbel 这四种分布的分布函数列写出来。

双参数 Weibull 分布

$$F_{\text{Weibull}}(v) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad (2-1)$$

Rayleigh 分布

$$F_{\text{Rayleigh}}(v) = 1 - \exp\left(-\frac{v^2}{2a^2}\right) \quad (2-2)$$

LogNormal 分布

$$F_{\text{LogNormal}}(v) = \int_{-\infty}^v \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma t}} \exp\left\{-\frac{[\ln(t) - \mu]^2}{2\sigma^2}\right\} dt \quad (2-3)$$

Gumbel 分布

$$F_{\text{Gumbel}}(v) = \exp\left[\exp\left(-\frac{v-b}{d}\right)\right] \quad (2-4)$$

式中： v 为风速； t 为时间； a 、 b 、 c 、 d 、 k 、 μ 、 σ 为待定的系数。

2. 风能资源的季节特性

风能资源年内季节分布特点是干季大，雨季小。干季各月风速大，有效风能密度大，多在 $100 \sim 150 \text{ W/m}^2$ 以上，有效利用时数多在 500h 以上。雨季各月风速一般都在 2 m/s 以下，已无开发利用价值。

3. 我国风能资源的分布

我国风能资源丰富，具有良好的开发前景。据国家能源局组织中国气象局等单位开展的