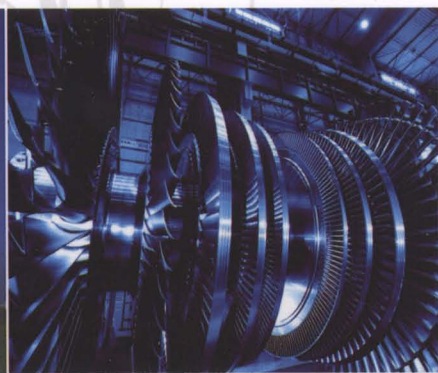


广东电网多种发电模式 联合运营综合效益评估

牛东晓 陈晓科 劳咏昶 许柏婷 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

广东电网多种发电模式 联合运营综合效益评估

牛东晓 陈晓科 劳咏昶 许柏婷 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书对多种发电模式联合运营和综合效益评估的概念进行了界定、阐述和分析,并以广东省发电行业为例,分别对火力发电、风力发电、水力发电、核能发电综合效益进行分析。另外,本书建立了广东省电网多种发电模式联合运营综合效益的指标体系,采用模糊层次分析法对其综合效益进行了评估,得出了结论。本书还建立了多种发电模式最优结构的计算模型,给出了广东省多种发电模式最优结构。最后,根据评估分析的结果,提出了相应的建议措施。研究成果可供广东电网及全国相关单位借鉴和参考。

本书适合于电力系统科技人员、电力技术经济研究人员、相关专业教师 and 研究生使用。

图书在版编目(CIP)数据

广东电网多种发电模式联合运营综合效益评估/牛东晓等
编著. —北京:中国电力出版社,2013.8

ISBN 978-7-5123-4704-5

I. ①广… II. ①牛… III. ①发电-效益评价-研究-广东省 IV. ①F426.61

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2013)第 158317 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 8 月第一版 2013 年 8 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 10.25 印张 179 千字

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

前言

当今世界，新能源发展风起云涌，为改善环境作出了重要贡献，但是传统能源与新能源的联合运营给电网安全稳定运行带来了重大挑战，直接影响到电力企业运营的综合效益，已成为电网运行的新问题。

本书主要以广东电网公司电力科学研究院提供的“十一五”期间广东电网调度数据、各发电机组运行技术报告和财务报告等作为基础资料，对广东电网多种发电模式联合运营的综合效益进行评估，旨在确定多种发电模式联合运营的理想发电比例，提出措施建议，为广东电网及全国相关单位提供借鉴参考。

本书内容共八章。第1章和第2章对多种发电模式联合运营的背景、意义、现状、模式和规划进行分析和阐述，并对多种发电模式综合效益评估的意义、评估体系、评估方法进行归纳总结。第3~6章主要对广东省各种发电模式综合效益逐一分析，包括火力发电、风力发电、水力发电以及核能发电综合效益评估。第7章建立了广东电网多种发电模式联合运营综合效益评估指标体系，在此基础上运用了FAHP的综合效益评估模型进行评估。另外，通过对火电、风电等各种发电模式环境影响的分析，最终确定多种发电模式联合运营的理想发电比例。第8章主要对多种发电模式中风力发电的电网消纳能力进行了分析计算，从多种发电模式联合运营发展战略、推进绿色电力市场建设、推广多种发电模式联合运营规划、加强配电网规划和建设四个方面提出了若干条建议措施。

本研究受到了广东电网公司电力科学研究院课题“广东电网多种发电模式联合运营综合效益评估”的资助，同时也受到了国家自然科学基金课题“智能电网中适应不稳定大规模清洁能源发电的联合智能调度管理理论研究”(71071052)的资助，在此表示感谢！

本书得到了广东电网公司电力科学研究院、相关单位以及地方政府有关人员的支持，在此表示感谢！本书的完成得到了本校老师和学生的大力帮助，刘崇明、沈巍、宋晓华、刘达、李金超、王永利、王建军、房芳、刘金朋、路妍、梅林、刘春香、朱琳、范磊磊、宋嫒琳、吴巧玲、许晓敏、乔欢欢、张宏运、魏亚楠等在调查研究、模型计算、文字处理等方面做了大量工作，在此一并表示感谢！对于书中的不妥之处，敬请批评指正。

作 者

2013 年 6 月

目 录

前言

1	多种发电模式联合运营概述	1
1.1	多种发电模式联合运营的背景及意义	1
1.2	多种发电模式联合运营模式介绍	6
1.3	多种发电模式联合运营的规划	9
1.4	多种发电模式联合运营规划模式分析	11
1.5	广东电网多种发电模式联合运营的基础现状	13
2	多种发电模式联合运营综合效益评估概述	17
2.1	多种发电模式联合运营综合效益评估的意义	17
2.2	多种发电模式联合运营综合效益评估体系的构建	17
2.3	多种发电模式联合运营综合效益评估的方法	25
3	广东省火力发电现状及综合效益分析	43
3.1	广东省火力发电现状	43
3.2	广东省火力发电综合效益分析	46
4	广东省水力发电现状及综合效益分析	62
4.1	广东省水力发电现状	62
4.2	广东省水力发电综合效益分析	65

5	广东省风力发电现状及综合效益分析	77
5.1	广东省风力发电现状	77
5.2	广东省风力发电综合效益分析	79
6	广东省核能发电现状及综合效益分析	92
6.1	广东省核能发电发展概况	92
6.2	广东省核能发电综合效益分析	97
7	广东省多种发电模式联合运营综合效益评估	110
7.1	评估指标体系	110
7.2	广东省多种发电模式联合综合效益评估	129
7.3	最优结构研究	132
8	广东省多种发电模式联合运营政策建议	138
8.1	多种发电模式消纳建议	138
8.2	政策建议	151
	参考文献	156



多种发电模式联合运营概述

1.1 多种发电模式联合运营的背景及意义

1.1.1 联合运营的背景意义

当前世界经济全球化进程加快，对地球资源的摄取与掠夺越来越严重，人类赖以生存的地球遭到严重破坏，生态环境形势日趋严峻，应当寻求一种更加积极有效的经济模式以获得更大的生存和发展空间。可持续发展概念被正式提出，引发了人类对经济可持续发展、生产可持续发展、社会可持续发展等一系列问题的思考与研讨。在能源、粮食、气候变化以及金融危机等多重危机形势下，绿色经济已经成为全球环境与发展领域的一种趋势和潮流。新的历史背景和发展阶段赋予了绿色经济新的内涵与使命。中国正处于全面落实科学发展观、建设环境友好型和资源节约型社会的战略转型期，多重危机给我们提供了加快产业结构调整、转变经济发展方式的重大契机。

在早期的经济发展过程中，能源并不是引起专家学者关注的重大议题。第一代新古典经济学家把能源作为一个是由资本、劳动和土地等主要生产要素所产生的中间变量，并不认为它是影响经济发展的关键要素。1973 年第一次世界石油危机爆发，使人们开始逐步关注能源问题。1977 年 Rashe 和 Tatom 将“能源”作为一个重要因素引入 Cobb-Douglas 生产函数，力图寻求“能源”这一因素与经济增长之间的基本规律，这是学术界第一次把能源视为和劳动、资本一样的影响经济发展的基础要素。1978 年底，第二次石油危机爆发，此次危机被视为 20 世纪 70 年代末西方经济全面衰退的一个主要原因，更引发了世界级的经济危机。自此，能源问题成为国际社会关注的焦点问题。

20 世纪 70 年代连续爆发的石油危机，引起了世界能源市场的结构性变化，促使能源消费大国和依靠进口能源的国家积极寻找替代能源，开发节能技术。



世界能源署发布的《世界能源展望 2009》(World Energy Outlook 2009)对未来二十年的国际能源市场需求形势进行了分析预测(见表 1-1)。根据世界一次能源预测,全球 2005 年到 2030 年间的一次能源需求将增加 55%,年均增长率为 1.8%。化石燃料仍将是一次能源的主要来源,在增长总量中占到 84%。从绝对数量上看,煤炭需求量增幅最大,需求量将上升 73%,其在能源总需求中的比例也将从 25%提高到 28%。煤炭消费增长大多数来源于中国和印度。电力消费将翻一番,它在终端能源消费中的比例将从 17%上升到 22%。

表 1-1 世界一次能源需求 单位:百万吨标准油

资源类型 \ 年份	2000	2005	2015	2030	年平均增长率 (%)
煤炭	2292	2892	2988	4994	2.2
石油	3647	4000	4720	5585	1.3
风力发电	226	251	327	416	2
核电	675	721	804	854	0.7
其他可再生能源	53	61	145	308	6.7

数据来源:《世界能源展望 2009》。

随着经济发展,全球能源需求量也在不断增加,加速开发使化石能源剩余可采储量飞速减少;按照现今的消费水平估算,石油、天然气和煤炭分别还可用 41 年、71 年和 140 年。

中国的情况更是不容乐观,众所周知中国已经成为世界第二大能源消费国,能源消费增长势头也最为迅猛。煤炭是中国能源体系的支柱。中国 61%以上的一次能源需求由煤炭来满足,包括发电站使用的大部分燃料以及工商业和家庭所消费的大量终端能源。实际上,由于对电力的需求高涨,而中国近 80%的发电量来自燃煤发电,因此,近年来煤炭在整体燃料构成中的重要性在不断提高。目前虽然核能、水电等能源比重在逐步加大,但石油、煤炭和天然气仍然在能源格局中处于主体地位,2011 年,中国煤炭消费 34.25 亿吨,占一次能源消费总量的 68.8%,而中国石油天然气消费比重仅为 22%。长期以来我国能源结构变化不大,都是以煤为主。当前受到环境压力和多种条件的约束,以煤为主的能源供应趋势改变,可供选择的能源路线有很多,为了改变能源消费结构不合理的现状,我们在加强清洁煤技术的同时,势必要大力发展其他清洁能源和可再生能源。即使如此,以煤为主的能源消费结构短时间内难以改变。

此外,我国能源资源的地区分布极不均衡。煤炭探明储量主要集中在华北和西北,分别占 59.3%和 19.2%,西南占 9.6%,华东占 5.8%,中南占 3.4%,东北占 2.7%。石油探明储量和天然气储量主要分布在黑龙江、辽宁、河北、河南、山东、四川、甘肃和新疆等省区内。可开发水力资源主要集中在西南,占 68%,中南占 15.2%,西北占 10%,华东占 3.6%,东北占 2%,华北占 1.2%。煤炭资源有 60%分布在华北,水力资源有 70%分布在西南。而经济发达、工业和人口比较集中的南方八省一市能源却都比较缺乏。

因此,如何减少电力工业碳基能源使用量、如何提高电力工业能源的利用效率已经成为我国电力工业面临的严峻问题。部分专家指出我国以煤炭为主导的一次能源消费结构是造成能源利用效率低和环境污染严重的根本原因,高效率、低成本、规模化开发水电、风力发电、太阳能发电等清洁能源,提高清洁能源比例,促进电力能源结构多元化,并逐步取代碳基能源,是解决我国电力工业能源问题的根本性措施。但能源结构的转变依赖于科技的进步,是一个逐步实现的过程,在短期内我国以碳基能源为主导的能源结构体系并不会改变。因此,在现有的能源框架下研究如何快速有效地提高电力工业能源利用效率和电力系统运行的经济性是一个非常意义的课题。为提高我国电力工业能源利用效率及逐步转变其能源利用方式,国家提出了以机组能源利用效率为优先调度标准的节能调度机制,要求优先利用清洁可再生能源,效率高污染物排放少的火电机组优先被调度。

火力发电是我国电源结构的主体,水力发电是我国西南省份的传统清洁能源,核能发电是新兴的稳定清洁能源,风力发电则是我国最有发展潜力的清洁电源。同时理论和实践表明,开展清洁电源与常规碳基电源之间的互补运行,利用优化技术协调电源间出力、优化电网运行方式,具有实现便捷、成本低、见效快的特点,并可显著提高电力系统运行经济性,有利于促进节能降耗的实现及能源的可持续高效利用,是贯彻电力工业节能调度机制的重要和有效措施之一。因此开展清洁电源与常规碳基电源之间多种发电模式联合经济运行的研究具有重要的理论价值和现实意义。

1.1.2 联合运营的政策支持

当今世界,化石能源供应日益紧张,节能减排已经成为全世界共同关注的重大问题。1997年,全球 149 个国家在日本世界气候大会上签署了《京都议定书》,限制全球温室气体排放。2009年哥本哈根世界气候大会确定了 2020 年前全球减排计划。在哥本哈根气候大会上,中国承诺,到 2020 年单位 GDP 二氧化碳排放比 2005 年下降 40%~45%。这一减排目标的达成,需要我国在积极发



展清洁煤技术的同时，大力发展风能、太阳能等清洁能源。

自《可再生能源法》颁布以来，我国颁布了一系列促进可再生能源发展的法律法规（见表 1-2）。相关的法律法规主要包括可再生能源基础保障、可再生能源价格政策、可再生能源财政投资政策、可再生能源技术标准和规范四个部分。

表 1-2 中国有关可再生能源的法律、法规、政策、规划

序号	制定或颁布机构	颁布及施行时间	法律、法规、政策或规划
1	国家经济委员会水利电力部、国家物价局	1986 年 1 月	《关于小水电电价的各项规定的通知》
2	全国人大	2006 年 1 月	《可再生能源法》
3	国家发展改革委	2005 年 11 月	《可再生能源产业发展指导目录》
4	国家发展改革委	2006 年 1 月	《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》
5	财政部	2006 年 5 月	《可再生能源发展专项资金管理暂行办法》
6	国家发展改革委、财政部	2006 年 11 月	《促进风力发电产业发展实施意见》
7	国家发展改革委	2007 年 1 月	《可再生能源电价附加收入调配暂行办法》
8	国务院	2007 年 6 月	《中国应对气候变化国家方案》
9	国家电监会	2007 年 9 月	《电网企业全额收购可再生能源电量监管办法》
10	国家发展改革委	2007 年 8 月	《可再生能源中长期发展规划》
11	国家发展改革委	2007 年 8 月	《节能发电调度办法（试行）》
12	国家发展改革委	2008 年 3 月	《可再生能源发展“十一五”规划》
13	财政部	2008 年 4 月	《关于调整大功率风力发电机组及其关键零部件、原材料进口税政策的通知》
14	财政部	2008 年 8 月	《风力发电设备产业化专项资金管理暂行办法》
15	国家发展改革委	2008 年 8 月	《关于完善风力发电上网电价政策的通知》
16	财政部、科技部、国家能源局	2009 年 8 月	《金太阳示范工程财政补助资金管理暂行办法》
17	财政部、科技部	2009 年 11 月	《关于做好金太阳示范工程实施工作的通知》
18	国家能源局、全国人大	2009 年 12 月	《全国人民代表大会常务委员会关于修改〈中华人民共和国可再生能源法〉的决定》

1.1.2.1 可再生能源基础保障

2005 年，全国人大通过了《可再生能源法》，我国可再生能源发展得到了法律的支持。法律对于我国可再生能源的范围、资源调查与发展规划、产业规

划、推广方式、价格管理与费用分摊机制、激励及监督措施、相关单位的法律责任等内容作出了规定，是我国可再生能源发展的最重要的法律基础。随着可再生能源在我国的迅猛发展，2005 年的《可再生能源法》有些条款不适应当前发展要求，2009 年 12 月，全国人大常委会通过了《全国人民代表大会常务委会员会关于修改〈中华人民共和国可再生能源法〉的决定》，这是对我国《可再生能源法》的进一步完善，对风能、太阳能等可再生能源的发展提供了更为完善的法律保障。

1.1.2.2 可再生能源价格政策

现阶段，受到技术不完善、上网电量不足等因素的影响，我国清洁能源发电的成本要高于传统发电方式，电价竞争力较差。国家法律法规对于上网电价作出了规定。2006 年 1 月国家发展改革委发布了《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》，针对风力发电、太阳能发电、海洋能发电等各类可再生能源发电方式的上网电价以及费用支付和分摊方式作出了规定。2009 年 8 月，国家发展改革委发布了《关于完善风力发电上网电价政策的通知》，对于《可再生能源发电价格和费用分摊管理试行办法》的上网电价定价模式进行修改，根据我国的风能资源状况和地貌条件等将我国分为四个区域，制定相应的陆上风力发电标杆价格。

1.1.2.3 可再生能源财政投资政策

2007 年 9 月，国家发展改革委公布了《2006 年度可再生能源电价补贴和交易方案》，全国 38 个可再生能源发电项目获得 2.514 6 亿元的补贴，并对独立可再生能源系统运行和发电电网建设补贴 876 万元。2009 年 8 月，财政部、科技部、国家能源局发布《关于实施金太阳示范工程的通知》和《金太阳示范工程财政补助资金管理暂行办法》，规定并网光伏发电项目的补助比例，其中对于偏远无电地区的补助高达 70%。2009 年 12 月，全国人大常委会通过了《全国人民代表大会常务委会员会关于修改〈中华人民共和国可再生能源法〉的决定》，规定建立相关专项基金，用于可再生能源的专项扶持。

1.1.2.4 可再生能源技术标准和规范

2006 年，国家发展改革委和财政部印发了《促进风力发电产业发展实施意见》，确定了促进风力发电产业发展的实施意见。2008 年 8 月财政部颁布的《风力发电设备产业化专项资金管理暂行办法》中提出：中央财政安排专项资金支持风力发电设备产业化。2009 年，国家电网公司编制了《风力发电场介入电网技术规定》、《风力发电场接入系统设计内容深度规定》、《光伏电站接入电网技术规定》，积极推进我国清洁能源发电上网国家标准的制定。



1.2 多种发电模式联合运营模式介绍

1.2.1 风力发电—火力发电联营

火力发电运行稳定，电能质量较好，但煤炭耗费量大，环境污染较为严重；风力发电有利于我国减排目标的实现，随着技术的不断进步，风力发电质量和稳定性大幅提高，可以达到上网需要，但受自然因素影响，风力发电主要阶段为冬季、春季、夜晚。风力发电和火力发电联合运营有利于降低我国的化石能源消费和污染排放，又能保持我国电能质量稳定。

在 20 世纪 80 年代，我国的风力发电开始发展，但是装机规模一直很小，只是我国对于新型发电方式的一种探索，没有太大的实践意义。“十一五”时期风力发电一跃成为了我国第三大发电方式，风火电联合运营才有了真正的实践意义。在“十一五”时期，国家电网公司就把电网进行峰谷互补、电源结构互补作为重要研究工作。

风力发电—火力发电联合运营有两类，一类是少数几台火力发电机组和单个风力发电场的联合运营，这一类运营主要是使用火力发电来弥补风力发电的稳定性不足；另一类是风力发电场群和火力发电机组群的联合运营，这一类运营不但可以利用火力发电来弥补风力发电的稳定性不足，还可以利用风力发电来减少火力发电污染排放，是本书研究的类型。

现阶段风力发电—火力发电联合运营主要在两类地区：一是煤炭资源和风能资源都很丰富的地区；二是煤炭资源贫乏，有一定风能资源的地区。二类地区的风能资源通常不如一类地区，但是开发的积极性很强，风力发电在此类地区也得到了了一定的发展。

我国有着绵长的海岸线，近海风能资源十分丰富，随着海上风力发电技术的日益成熟，东部沿海地区有大力发展风力发电的有利条件，同时，我国东南沿海地区煤炭资源匮乏，主要依靠西部、北部煤炭产出和煤炭进口，火力发电发展潜力有限。江苏有着较大的火电装机规模，同时建设了千万千瓦级风力发电基地，煤炭储量较少，一直积极探索风力发电—火力发电联合运营模式。广东省电力消费居全国第一，煤炭全部依赖进口，有着丰富的近海风力资源，随着海上风力发电技术的成熟，广东省也在不断推进风力发电—火力发电联合运营的研究。

我国内陆地区有着丰富的煤炭资源和风力资源，一直致力于风力发电—火力发电联合运营的研究。内蒙古自治区风力发电装机容量居我国之首，火力发

电装机容量也居世界前列,是我国首先进行风力发电—火力发电联合经济调度研究的省份。

有些内陆省份,如吉林省、甘肃省煤炭资源不足,但风力发电资源丰富,煤炭进口依存度过高,在2008年我国煤炭价格持续高涨的压力下,这些省份不断加大风力发电发展比例,促进风力发电—火力发电联合运营发展。

1.2.2 火力发电—水力发电联营

我国是非常典型的以火力发电为主的能源消费结构,而且火力发电比重还有进一步上升的趋势。在空间布局上,以火力发电为主的能源消费结构在华北电网、华东电网和东北电网尤为明显,在西北电网、华中电网和南方电网区,由于水力资源丰富,水力发电装机容量相对较高。

完善中国电源结构,需要进行水火发电能力的平衡。从政策角度看,水力发电属于国家优先发展的产业,今后一个时期我国电力工业发展的基本方针是:优化发展火电、积极发展水电、适当发展核电、因地制宜发展新能源发电。

从对我国各网区用电量和发电量的分析中可以看出,除华东电网和重庆电网有少量电力缺口外,其他网区用电量和发电量基本平衡,网区间电力合作比较少。我国地域辽阔,电力供需的空间分布极不均匀,煤炭资源相对集中在陕西、山西和内蒙古西部的“三西”地区,水能资源主要集中在西南地区,这些地区是我国的能源富集地区,但其经济发展却相对落后,用电量低,能源优势尚未得到充分发挥。与此同时,东部地区煤炭储量有限且开发程度已经很高,水力发电的开发程度也很高,而且许多地区已经不适宜建设大型水电站,为了满足经济快速发展对电力的需求,东部地区不得不从外部调入煤炭发展火力发电,这既不利于全国电力资源合理配置,又给当地环境带来很大压力。因而,加大电网间合作力度,调入西部和中部地区清洁水能占有较大比重的电力资源,对于保障东部地区能源供应、改善生态环境以及充分发挥西部地区水力资源优势都具有重要意义。这不仅关系到沿海地区的持续发展,也关系到全国电力发展与电源建设的总体布局。因此,需要实行水火调剂、补偿运行。

火力发电—水力发电联合调度问题是电网经营中十分重要的问题,国内外众多学者在这一领域已持续开展了数十年的研究,取得了一系列研究成果,特别是在动态规划、多目标理论与应用方面更为突出。南京南瑞集团公司开发了火力发电—水力发电联合经济调度软件 VI.0,2005 年云南电网投运了火力发电—水力发电联合经济运行决策支持系统。这些研究的重点是针对火力发电—水力发电联合运行中水电的运行问题。



1.2.3 风力发电—抽水蓄能电站联营

风能的随机性和波动性导致了风力发电出力的不可控，现在有关风力发电控制技术研究的内容就是围绕着风力发电输出功率波动而展开的。在过去的风力发电技术的研究中，主要是围绕着电能质量而展开的，这是因为原来的风力发电场规模都较小，相对的装机容量不高，即使入网，也不会对系统造成太大的冲击和影响。但是随着风力发电迅速发展，装机容量突飞猛进增加，如果直接入网的话，会给电网带来巨大的冲击，使得电网不能安全稳定地运行。风速的变化造成风力发电有功功率输出波动，增加整个电网系统的调频、调峰的压力。目前，平抑这种波动性主要从两个方面入手：① 从风力发电场本身的设计入手；② 寻求一种更加有效的方式来解决风力发电大规模接入电网系统后的功率平衡和备用等问题，如蓄电池、柴油机、抽水蓄能电站等与风力发电的联合配套运行等。

目前抽水蓄能电站在解决电网调峰、填谷，改善电网运行条件，提高经济效益方面的优越性在实践应用中已经得到充分的验证。抽水蓄能装置响应快、实时调节能力强，清洁、高效，这是柴油机、燃气轮机等不具备的优势。在含有大规模风力发电的电网中，配置相应容量的抽水蓄能电站，实现风力发电—抽水蓄能电站联合运行，可以使得当地的风能资源得到优化的配置，促进风力发电的发展。风力发电—抽水蓄能电站联合开发，可利用抽水蓄能电站的能量互补功能和响应的灵活性，弥补风力发电输出的随机性和波动性，有利于大规模风力发电的入网。

在国外，风力发电—抽水蓄能电站联合运行已有相对成熟的经验，抽水蓄能电站长期以来被认为是与风力发电联合配套运行的理想装置。所以风力发电—抽水蓄能电站联合运行具有很大的意义。

1.2.4 核能发电—抽水蓄能电站联营

核能发电具有建设成本高、燃料费用等运行成本低的特点，调峰运行不具经济性。核能发电反应堆控制具有较高要求，机组发电负载的频繁变动具有一定的技术限制。同时我国正处于核能发电发展初期，无论从保证核能发电的经济性还是核能发电安全运行的角度出发，核能发电宜带基荷运行，不参与调峰。而抽水蓄能电站具有独特、灵活和多样的运行方式，不仅可以削峰填谷，还可以提供包括负载跟踪、频率控制、旋转备用、调相等多种动态服务，既可以改善整个电力系统运行的经济性，也可以提高电力系统的安全稳定性和可靠性。

因此，从技术上看，核能发电的运行特性决定其适合带基荷运行，而实际

的用电负载的发展趋势则是峰谷差日渐增大；抽水蓄能是一种良好的调峰电源，兼具调频调相等多种功能，核蓄二者联合运行，可扬长避短，互相补偿，以满足电力系统用电负载的实际供电需求。因此，世界上许多国家都采取了建设核能发电站的同时在电力系统内建设抽水蓄能电站与之配合运行的措施，以保证电力系统的安全稳定运行。

从经济上看，核电—抽水蓄能电站联合运营，对核能发电而言，在负载因子有保证的前提下，通过改善输出电力的品质，使其有可能获得更高的电价，提高其安全性与经济性；对抽水蓄能而言，可有效降低其运行成本，提高竞争力，降低经营风险。

1.3 多种发电模式联合运营的规划

1.3.1 联合运营规划含义分析

多种发电模式联合运营规划在理论上是一个最优化问题。所谓最优化问题，就是选取最优方案，使研究对象能够达到最优的预期目标。最优化问题一般分为无约束条件最优和有约束条件最优两种，而这种分类是按照控制变量的取值是否有范围限制来划分的。

多种发电模式联合运营规划是指在满足风力发电、火力发电、水力发电、核能发电、电网、社会等多方面约束条件下，应用最优化理论寻求最优化方法，使得整个系统运行的效益最大。

多种发电模式联合运营规划是一个复杂的社会问题，约束条件可包含多个方面：① 系统供电量要满足社会用电量；② 要考虑满足风力发电、火力发电、水力发电、核能发电等经济稳定运行，满足电网系统稳定、电能质量符合用户需求；③ 要考虑满足电力企业节能减排、拉动地区经济、提供就业的社会责任。整个系统运行的社会总成本最低，是指不能只考虑系统运行的经济成本，还应该考虑社会成本、环境成本等综合成本。而整个系统运行效益最大，包括发电经济效益最大、环境效益最大、社会效益最大等多个形式。组成系统的单一部分效益最佳，并不是整个系统的效益最大，系统内风力发电、火力发电、水力发电、核能发电、电网应当紧密联系，相互配合，以达到整个系统总体效益最大。

综上所述，多种发电模式联合运营规划就是在满足电力系统给定的总负载，满足风力发电、火力发电、水力发电、核能发电的经济稳定运行，满足电网系统稳定、电能质量符合用户需求，满足电力企业节能减排、拉动地区经济、提供就业的社会责任的约束条件下，应用最优化理论寻求最优化方法，使得整



个系统总体效益最大。

1.3.2 联合运营规划目标与准则

单独的某种发电模式运营通常以发电效益最大为企业目标，但是电力是重要的战略能源，电力企业既要面向电力市场，追求企业经济效益最大；又要承担国有企业节约能源、降低排放、创造就业的社会责任。

多种发电模式联合运营规划的目标分为经济效益和社会责任两方面，系统要考虑单个风力发电场、火力发电厂、水力发电站和核能发电站作为最小系统组成单位，在面向电力市场的环境下，追求企业发电效益最大；要考虑电网的供电可靠性、运行的稳定性、事故顶替的灵活性；考虑电力系统的节能减排要求，以及拉动就业和区域经济发展的要求。

多种发电模式联合运营规划的目标是追求系统运行的包括经济成本、社会成本、环境成本在内的社会总成本最低，最优准则是系统总体综合效益最大。

1.3.3 联合运营规划基本思路

风力发电场的工作情况和我国风力资源密切相关，而风力资源的间歇性、多变性、不重复性等特征加剧了风力发电场发电量预测的难度。现阶段我国风力发电技术日趋成熟，但是电网企业仍把风力发电作为不稳定电量来源，在调度中不会给予太大容量。电力负载的不稳定性和电能不能储存的特性，与风力发电的不稳定性共同造成了风力发电系统内电力电量供需的尖锐矛盾，系统内的火力发电机组群联合运营规划的方法可以克服该问题。对于系统内电网对于风力发电消纳能力进行测算，可以使风力发电场群获得尽可能大的容量效益和电量效益。

目前我国已掌握了百万千瓦机组、超超临界机组等核心技术，火力发电技术已达到世界领先水平。我国大型机组比例不断增加，小火电陆续关停，但还是存在一定比例 20 万千瓦以下机组。不同级别机组、热电联产机组与单电机组的煤耗、排污量、经济性能都有很大差异。火力发电机组群的联合运营必须考虑这些差异。

多种发电模式联合运营规划就是运用优化理论、控制理论和系统工程理论，编制出最优联合运营方案，用以指导系统内风力发电场群、火力发电厂群、水力发电站群甚至核能发电站群的最优运行方式，达到系统效益最大的目的。

寻求满足电力系统给定的总负载及其他约束条件下，风力发电场群、火力发电厂群、水力发电站群和核能发电站群整体最优联合运营方案，以系统总体综合效益最大为优化目标，充分利用我国短期、中期、长期气象预报，考虑我国风力资源和风力发电的特性，考虑风力发电场的集群效益，考虑我国水力发