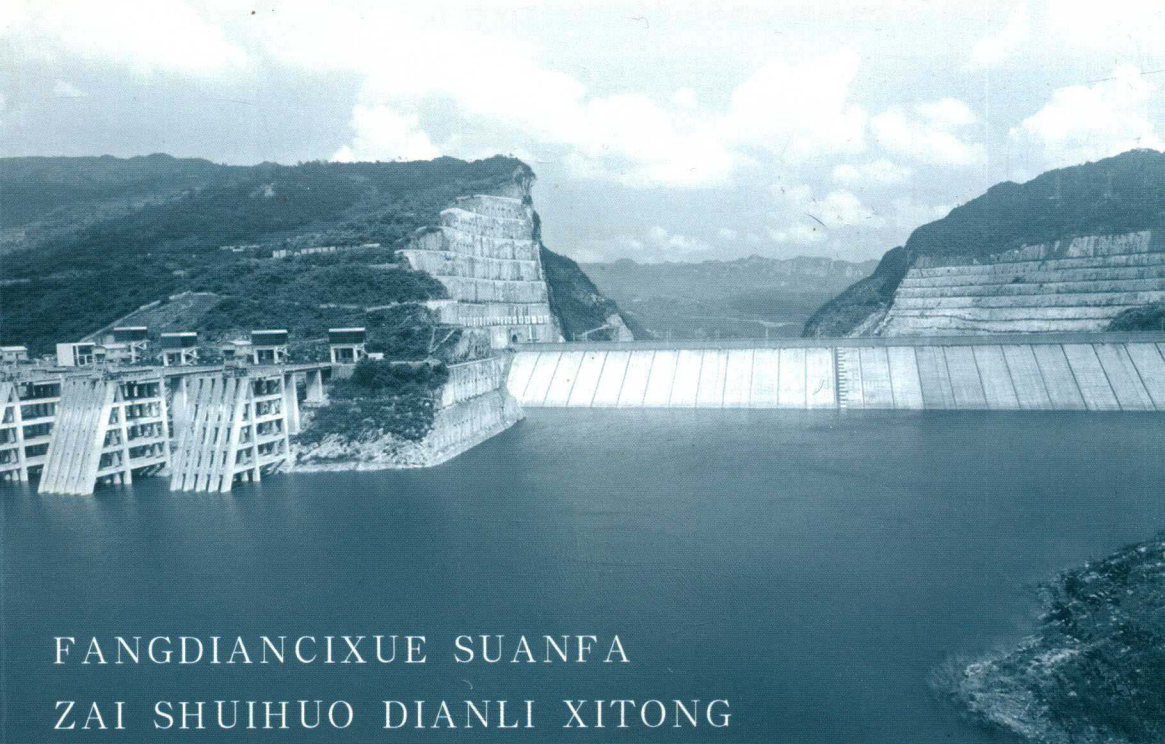




FANGDIANCIXUE SUANFA
ZAI SHUIHUO DIANLI XITONG
JIENENG DIAODU ZHONG DE YINGYONG

仿电磁学算法在水火电力系统 节能调度中的应用

郭壮志 著



黄河水利出版社

仿电磁学算法在水火电力系统 节能调度中的应用

郭壮志 著

黄河水利出版社

· 郑州 ·

内 容 提 要

本书紧密围绕节能调度背景下水火电力系统的联合调度控制问题开展研究,详细阐述了水火电力系统节能调度原理、节能调度模型建模机制和决策求解方法,主要包括水火电力系统节能运行理论、梯级水电站蓄能利用最大运行策略、水火电力系统节能调度模型建模原理、风火储电力系统储能容量优化配置原理与协调调度机制、节能调度模型决策求解的仿电磁学算法。

本书可作为从事电力系统调度工作的科研人员、工程技术人员和技术管理人员的参考书,也可作为普通高等院校电力系统及其自动化专业研究生的辅导教材。

图书在版编目(CIP)数据

仿电磁学算法在水火电力系统节能调度中的应用/
郭壮志著. —郑州:黄河水利出版社,2016. 12
ISBN 978 - 7 - 5509 - 1659 - 3

I. ①仿… II. ①郭… III. ①电磁学 - 算法 - 应用 - 水力发电站 - 节能 - 调度 - 研究②电磁学 - 算法 - 应用 - 火电站 - 节能 - 调度 - 研究 IV. ①TV74②TM621

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 320620 号

出 版 社:黄河水利出版社

地址:河南省郑州市顺河路黄委会综合楼 14 层 邮政编码:450003

发行单位:黄河水利出版社

发行部电话:0371 - 66026940、66020550、66028024、66022620(传真)

E-mail:hhsclbs@126.com

承印单位:河南承创印务有限公司

开本:787 mm × 1 092 mm 1/16

印张:11.25

字数:200 千字

版次:2016 年 12 月第 1 版

印数:1—1 000

印次:2016 年 12 月第 1 次印刷

定价:38.00 元

前 言

电力工业是高耗能产业,提高电力工业能源利用效率、转变能源利用方式、减少碳基能源使用量,对于缓解我国能源供需矛盾和改善生态环境等具有重要作用。理论和实践表明,优先利用清洁可再生能源、开展清洁电源与火电电源互补运行,是提高电力系统运行经济性、提高能源利用效率和节约非可再生能源的有效途径。目前,水电能源在我国清洁能源中占主导地位,通过开展水火电力系统联合运行,合理协调系统间运行方式,发挥水火电力系统互补优势,可显著提高电力系统运行经济性,有利于促进电力工业能源利用方式的调整和系统的节能运行。

本书紧紧围绕水火电力系统联合优化调度及仿电磁学算法的应用问题,针对含有梯级水电站的水火电力系统间复杂时空耦合特性,以水能资源的合理高效利用和燃煤等非可再生能源的节约为目的,在水火电力系统节能运行理论、单目标和多目标节能调度模型构建和优化算法等几个方面开展研究。

全书共8章,各章节主要内容可归纳如下:

第1章绪论:简要回顾国内外水火电力系统优化调度理论研究现状和我国节能调度理论的研究进展,论述开展水火电力系统联合优化调度的必要性、重要性。针对目前含有梯级水电站的水火电力系统联合运行所面临的问题和电力工业节能调度机制下的要求,提出本论文的主要研究内容。

第2章水火电力系统节能运行理论分析:水电站、火电厂的运行特性和水火电力系统间互动特性是构建合理优化调度模型及制订水电站合理用水计划与火电厂发电计划的前提和基础。本章详细分析了梯级水电站时空耦合特性、相互间作用规律、制约特性、弃水特性等,提出可有效反映水库特性影响的水电转换数学模型。分析了火电厂运行特性,通过拉格朗日极值条件揭示了水火电力系统互补运行的互动规律,定性提出了水火电力系统节能运行的措施。

第3章仿电磁学算法:群体智能算法在求解强非线性优化问题方面具有突出优势,本章对一种新型群体智能算法——仿电磁学算法进行研究。在详细分析仿电磁学算法理论基础、优化原理及对优化问题求解的一般理论框架基础上,研究影响算法优化性能的主要因素及其改进措施。提出了适合于求

解具有大规模变量优化问题的单方向受力的改进仿电磁学算法,并对其收敛性进行了理论证明,为求解水火电力系统节能调度模型提供理论基础。

第4章梯级水电站发电潜力挖掘的水库蓄能利用最大化优化模型:本章针对以发电为主的梯级水电站,采用强迫弃水和有益弃水相结合的弃水策略,建立能够描述水电站发电量最大、水力资源在梯级水电站之间的重新有益分配和最后一级水电站弃水损失最小的梯级水电站水库蓄能利用最大的长期优化调度数学模型。

第5章水火电力系统单目标节能调度与优化方法:构建了水电站运行协调条件和梯级水电站运行的动态弃水数学模型。提出了以动态发电流量极限为基础的单目标水火电力系统节能调度优化数学模型。针对所建模型的强非线性特点,提出了以遗传仿电磁学算法为基础的节能调度模型求解方法。

第6章水火电力系统多目标节能调度与优化方法:建立了兼顾用水、环境、节能等多方面要求的水火电力系统多目标节能调度模型,提出了利用仿电磁学算法和数据包络分析融合的多目标优化问题求解新方法。该方法无须考虑各目标函数的性质,同时可为决策者提供利用优化目标和数据包络分析的DEA值双重准则来选取决策方案的方法,有利于减少多个目标追求下的决策盲目性。

第7章含风电储能装置的复杂电力系统节能调度与优化方法:针对大规模并网运行的风电场,假定各时段的预测功率分布已知且准确,以最大程度发挥风电对火电能源的替代置换为目的,研究考虑大规模风电与储能系统时空多维度上的动态耦合作用及风火储能系统间的动态协调机制影响下,兼顾储能系统功率调节与能量输移双重特征的容量多指标优化配置与协调调度方法。

第8章结论与展望:对全文所做的主要工作和取得的成果进行总结,提出未来有待进一步研究的内容。

本书由河南工程学院郭壮志博士独立完成,并得到了河南省高等学校重点科研项目计划“含风电电力系统调度控制的随机区间规划方法(51075235)”项目的资助。

作者

2016年9月

目 录

前 言

第1章 绪 论	(1)
1.1 选题背景及意义	(1)
1.2 水火电力系统优化调度现状	(3)
1.3 水火电力系统节能调度现状	(6)
1.4 水火电力系统优化调度算法现状	(10)
1.5 本书所做的主要工作	(16)
第2章 水火电力系统节能运行理论分析	(20)
2.1 引 言	(20)
2.2 水电站运行特性	(21)
2.3 梯级水电站运行特性	(31)
2.4 火电厂运行特性	(34)
2.5 水火电力系统联合运行特性	(36)
2.6 水火电力系统节能运行策略分析	(40)
2.7 小 结	(40)
第3章 仿电磁学算法	(42)
3.1 引 言	(42)
3.2 基本仿电磁学算法	(43)
3.3 仿电磁学算法运行机制分析	(50)
3.4 仿电磁学算法的改进	(54)
3.5 小 结	(66)
第4章 梯级水电站发电潜力挖掘的水库蓄能利用最大化优化模型	(68)
4.1 引 言	(68)
4.2 强迫弃水与有益弃水相结合的水力资源分配	(69)
4.3 蓄能利用最大化优化调度数学模型	(70)
4.4 实例应用	(73)
4.5 小 结	(77)

第 5 章	水火电力系统单目标节能调度与优化方法	(78)
5.1	引 言	(78)
5.2	水电站运行协调条件	(79)
5.3	水火电力系统单目标节能调度数学模型	(89)
5.4	节能调度模型求解的混合仿电磁学算法	(93)
5.5	实例应用	(97)
5.6	小 结	(108)
第 6 章	水火电力系统多目标节能调度与优化方法	(110)
6.1	引 言	(110)
6.2	水火电力系统多目标节能调度模型	(111)
6.3	多目标节能调度模型求解的仿电磁学算法与数据包络分析方法	(116)
6.4	实例应用	(127)
6.5	小 结	(131)
第 7 章	含风电储能装置的复杂电力系统节能调度与优化方法	(133)
7.1	引 言	(133)
7.2	ESS 对系统间动态协调机制的作用	(134)
7.3	风储系统动态耦合特性的数学描述	(138)
7.4	含风电储能装置的复杂电力系统节能调度储能容量配置与调度模型	(139)
7.5	储能容量配置与调度模型决策求解	(143)
7.6	实例应用	(144)
7.7	小 结	(149)
第 8 章	结论与展望	(150)
8.1	结论与创新点	(150)
8.2	有待进一步研究的内容	(153)
附录 A	广西 500 kV 电网基础数据	(155)
附录 B	广西 500 kV 电网网损计算的 B 系数法	(157)
参考文献		(161)

第 1 章 绪 论

1.1 选题背景及意义

能源是国民经济发展的命脉,是社会稳定和进步的重要物质基础。随着世界性能源短缺及生态环境恶化,能源问题已成为人类社会关注的焦点。低碳经济、循环经济、生态经济、绿色经济等就是为有效解决能源问题和环境问题而提出的经济发展模式。经济发展模式的变革,本质上是实现能源的可持续、清洁、高效利用^[1]。

在过去十年间,我国国民经济保持着约 10% 的增长速度,并在 2010 年经济总量超过日本位居世界第二,经济增长迅速。根据国家政策及经济发展形势,我国国民经济未来仍将保持较高的增长速度,对能源的需求量将会显著增加,但能源的短缺和利用效率不高,已经成为制约我国国民经济发展的主要瓶颈和影响社会稳定的重要因素。要解决我国的能源问题,一方面要加强新能源和清洁能源建设^[2],另一方面要转变能源利用方式,坚持节能优先,提高能源的综合利用效率,增强清洁能源与碳基能源间的优势互补,促进能源的清洁、可持续、高效利用^[3]。

电力工业是重要的能源基础产业,是产能大户,为国民经济和社会生活提供了大量清洁、优质、高效的电能,但同时又是高耗能产业,每年我国发电用煤量占中国煤炭产量的 50% 以上,发电厂自用电量 and 供电线损电量占到电力生产量的 13.13%。因此,改变电力工业用能方式、优化电网运行方式、提高一次能源利用效率,对于缓解我国能源的供需矛盾、改善生态环境等都具有重要作用。

我国电力工业从 20 世纪 80 年代开始迅速发展,到 2010 年底全国发电设备容量达到 9.621 9 亿 kW,年发电量可达 41 923 亿 kWh,居世界第二位,对推动国民经济的发展起着举足轻重的作用,但存在的问题仍很明显:①电源结构不合理。截至 2010 年,火电所占电源总装机容量的比例为 73.44%,即使在水电能源比较丰富的西部、西南地区,火电所占电源总装机容量的比重也在 50% 以上,碳基能源的消费在一次能源中仍然占据主导地位,能源利用方式落

后。②发电一次能源利用效率不高。根据 2010 年全国电力工业统计快报,我国电力工业供电标准煤耗为 335 g/kWh 时,线损率为 6.49%,比 1999 年美国、日本、德国、法国等的标准供电煤耗和线损率还要高^[4]。我国电力工业的能源利用效率亟待提高,与世界发达国家相比节能空间还很大。

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。戴彦德等^[5]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,火电机组效率高、污染物排放少的优先被调度。

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的措施之一。因此,开展清洁电源与常规碳基电源之间联合经济运行的研究具有重要的理论价值和现实意义。

水电作为天下第一可再生能源^[6],是目前技术最为成熟、可大规模开发、可进行调度的清洁电源,具有运行灵活、运行成本低、启停速度快、调峰性能好等优点。在国家积极推进能源多元化清洁发展的政策大背景下,经过几十年发展,我国电力工业中的清洁电源已经形成了由水电、核电、风电、太阳能发电等多种形式共存的局面,而水电能源在清洁能源中处于主导地位。截至 2010 年底水电总装机容量突破 2 亿 kW,居世界第一位,在清洁电源中所占比例为 83.51%。根据国家积极发展水电的政策,水电规模将会继续扩大。既然在传统均衡电量发电模式下,开展水火电力系统联合经济运行可有效提高电力企业的能源利用效率,那么在节能调度的环境下,研究水火电力系统互补运行机制、挖掘水电系统发电潜力、实施水火电力系统节能调度,对于充分发挥清洁能源优势、提高能源利用效率、改善电网运行经济性同样具有重要的作用和意义。

在过去几十年中,水火电力系统联合经济运行因经济效益显著^[7],而吸引了国内外众多学者在这一领域开展研究,围绕着调度机制及优化方法做了大量的工作并取得了丰硕成果,部分已经成功应用到电力系统运行中,取得了较好的经济效益。水电站的梯级开发利用已经成为世界上水能利用的主要形式,我国在黄河、松花江、乌江、红水河等水能资源丰富的地区已经进行了水电站的梯级开发。梯级水电站在时间和空间上更具有高度耦合性,涉及问题更多,给水火电力系统节能调度问题的解决带来很大困难。尽管围绕梯级水电站和火电联合运行问题,国内外学者也开展了不少研究,但仍然面临一些难题:

(1)在构建梯级水电站和火电联合运行的节能调度模型时,如何更加全面地考虑水电站时空的高耦合特性、水头变化的影响、电网的影响等。

(2)在单一水电站中,弃水就意味着损失,那么在梯级水电站中是否也是这样;如何正确理解梯级水电站弃水的作用;如何正确处理水头、发电流量、弃水之间的关系;如何有效协调梯级水电站调节电站和径流电站的发电计划安排问题,从而挖掘水电站的发电潜力,发挥在水火电力系统中的互补优越性。

(3)梯级水电站与火电联合运行时,具有高度的时间耦合和空间耦合特性,建立的节能调度模型除具有很强的非线性外,还将因为时空耦合特性而变得更加复杂,如何对节能调度模型进行有效求解是一很有现实意义的问题。

(4)节能要求、资源限制、环境压力、电网特性等因素的影响,使得单目标优化调度模型难以兼顾多方面要求,研究在节能调度模式下水火电力系统多目标优化调度模型的构建方法具有重要的现实意义。至今,还没有统一有效的多目标优化模型的求解方法,针对所建模型,研究其有效的多目标优化方法具有重要的理论价值。

本书就是紧紧围绕水火电力系统节能及高效运行的核心,在研究水火电力系统节能调度机制基础上,构建水火电力系统单目标和多目标节能调度模型,并针对其强非线性、高度时空耦合的特点,探究其求解方法,以促进对电网运行方式和能源利用方式的优化,提高能源利用效率。因此,本书选题具有重要的理论价值和现实意义。

1.2 水火电力系统优化调度现状

水火电力系统之间的最优协调问题是伴随着水电和火电联网共同向社会供电局面的出现而产生的。法国学者 Ricard^[8] 是世界上最早开始关注水火电

力系统运行经济性问题的学者之一,在对该问题研究的基础上,通过严格的数学推导于1940年首次提出水电与火电联合经济运行的最优协调方程,成为世界上最早科学地描述水火电力系统经济运行问题的学者,其提出的最优协调方程也成为后续学者的理论研究基础。在此之后,水火电力系统间最优协调问题开始被世界关注,以经典数学为基础的水火电最优协调方程被广泛研究,加拿大学者 Chandler 于1953年提出了兼顾网损的水火电最优协调方程并被广泛应用到实际工程中。随着现代最优化数学理论的迅速发展及新型最优化理论的出现,以其为基础的水火电力系统最优协调问题成为国内外研究的热点,其目的是在满足水电和火电子系统运行约束及控制约束的前提下,利用最优化的技术手段确定调度周期内水电子系统的用水计划和火电子系统的出力计划,使系统的一个或多个指标达到最优,提高电力系统运行的综合经济性。

围绕着水火电力系统运行的综合经济性、安全性和可靠性等关键问题,国内外众多学者针对不同电力工业模式下的水火电力系统优化调度问题进行了广泛和深入的研究,经过几十年的发展,以水火电力系统物理运行机制和经济运行模式为基础的优化调度理论已经取得了丰硕成果,总体来说,可以概括优化调度模型的构建和优化调度模型的优化求解两方面内容。水火电力系统优化调度模型具有大规模、强非线性特点,为对其进行有效求解,科研工作者几乎尝试了所有的优化方法,如动态规划、线性规划、网流法、内点法、人工智能算法等^[9]。水火电力系统优化调度模型构建是以系统运行的物理机制和经济机制为基础的,其构建的合理性将对电力系统运行方式、潮流分布、运行经济性有着决定性影响,其关键内容主要涉及运行机制模型的模拟、约束条件的构建及优化准则的确定。

运行机制模型的模拟主要解决电能生产的物理机制到数学模型的转换,其合理性将直接影响优化模型是否反映了系统的物理运行特征,一直以来都是研究的重点。水电站运行机制模型主要是水头模型及水电电能生产模型的模拟。水电电能生产模型可以通过水头模型的确定表示出来,因此水头模型模拟的合理性将直接影响到电能生产模型的准确性,迄今为止,水头模型主要采用固定水头模型^[10,11]和变水头模型^[12]两种形式。在短期优化调度中,对于库容大调节能力强的水电站采用固定水头对优化调度结果影响不大,但对于调节能力差的水电站采用变水头模型将更具有合理性。对于梯级水电站还要考虑上下游水电站间的水力耦合对水头的影响,有学者专门研究了在是否考虑水电站间水力耦合对水头影响情况下调度方案的差别,算例分析表明调度结果有很大不同,建议对于水力耦合比较紧密的梯级水电站应该考虑相互间

水头的影响^[13]。水电电能生产模型的模拟是以水头模型为基础,围绕是否考虑发电效率变化而进行研究的。通常在优化调度中并不考虑水电站发电效率的变化,而是用水电站的平均发电效率表示,但实际上发电效率随发电流量和水头的变化而变化,且对电站的实际出力有显著影响,因此考虑水电站发电效率变化下的电能生产模型的模拟也越来越受到科研工作者的重视^[14,15],水电站电能生产模型主要有 Glim kirchmayer 模型、Hildebrand 模型、Hamilton - Lamont 模型和 Arvanitidis - Rosing 模型等。火电厂运行机制模型主要是电能生产成本模型的模拟。优化调度模型中一般采用二次成本模型,为了更加准确地描述发电机的出力与成本间的关系,有采用分段线性及分段非线性成本函数表示成本,但总体来说是围绕是否考虑阀点效应来建立电能生产成本模型的。不考虑阀点效应的电能生产成本模型具有应用简单的优点,考虑阀点效应时则更能真实地反映物理系统的实际运行情况,但其数学模型是一不连续的分段阶跃函数,给优化模型的求解带来一定困难^[16,17]。

约束条件是为保证水火电力系统运行可行性、经济性、安全性及稳定性而限制的运行范围。在早期的水火电力系统优化调度模型中约束条件比较简单,一般仅包括出力约束、水头约束、发电流量约束、用水约束及负荷平衡约束等,对系统运行的安全性约束、稳定性约束考虑较少。随着科研工作者对电力系统物理运行机制和经济运行机制更加全面和深入的了解,机组的启停约束、旋转备用约束、网络约束、电压稳定约束、爬坡约束等融入到约束条件中^[18,19]。电力工业市场化的实施又给电力系统运行增加了一些经济性约束^[20,21]。新约束条件的融入将对机组出力大小、电网运行方式、电网潮流分布等产生影响,最终影响到能源的利用方式、能源利用效率及电网运行的经济性。

优化准则即优化目标在一定程度上反映着决策者的主观意愿,通过系统优化运行而达到确定的技术指标或经济环境指标。目标函数因反映着决策者的主观愿望,因此其形式上无法统一,类型丰富多样。从科研论文来看,在传统垄断电力企业生产模式下,以电力企业总的运行成本最小化作为优化目标比较常见^[8-12,18,22-23]。20 世纪 90 年代,世界上发达国家开始电力企业的市场化改革,厂网开始逐渐分开运行,发电企业实行竞价上网,火电和水电的企业优化调度目标转变为企业收益最大^[21,24-26],而电网的运行目标也从电网运行成本的最小偏向于购电费用的最小等。此外,还有以有功的实时调整费用最小^[27]、水火置换效用最大等^[20]作为优化目标的。在单准则水火电力系统调度机制中,一般将与水电有关的因素作为约束条件融入到优化模型中,因此不

能全面兼顾水电运行的经济性,环境的制约也要求系统运行时要兼顾环境的要求,多目标优化准则下优化调度模型的构建是亟待研究的方向。从最近几年的科研论文也可看出,多目标优化模型的构建成为研究的热点^[28-30]。随着电力企业市场化改革的深入、资源制约、新型电源的引入等,优化目标将更加多样化。由此可见,优化准则没有一个确定的形式,应该在深入理解水火电力系统物理运行机制的基础上,根据国家能源政策、环境因素、社会因素、市场变革等构建合理的优化目标,以促进能源利用合理性及电力系统运行的经济性。

1.3 水火电力系统节能调度现状

1.3.1 节能调度模式综述

节能调度是针对我国电力企业火电电源比重大、能耗高、对环境污染严重的现实背景及“上大压小”和“电量置换”等措施未取得良好节能效果的情况下,为提高能源利用效率及降低污染物排放水平而提出的新型电力调度模式。该调度模式在保证电力供应安全可靠的前提下要求优先调度清洁电源,对火电电源以能耗及污染物排放水平作为排序准则获得发电权及发电量指标,能耗低、污染小的火电电源优先发电,从而促进电力工业调整及技术进步,提高能源利用效率,减少污染物排放量,最终实现电力工业的可持续高效运行。节能调度模式是对我国经典均衡发电量调度模式的一次变革,与国外市场化改革的电力企业经济调度模式也有着显著不同。

1.3.1.1 与我国经典均衡发电量调度模式的比较

在经典均衡发电量调度模式中,火电机组不论能耗及污染物排放水平高低都具有上网发电的权利,各机组年发电小时数基本上按照年预测电量与机组总装机容量的比值来确定,机组的年发电计划按照其装机容量占机组总装机容量的份额进行分配。均衡发电量调度模式将造成装机容量小、能耗高的机组发电上网时间较长,而装机容量大、效率高的机组设备利用率不高,进而导致一次能源的利用效率不高,对环境造成的污染严重。

节能调度模式中,在优先利用清洁电源和满足电力供需平衡的前提下,能耗低、污染物排放水平低的机组拥有优先调度权和更多发电小时数,而能耗高、污染物排放水平高的机组可能无法获得发电上网的权利,因此节能调度模式可显著提高一次能源利用效率,减少电力企业的污染物排放量。

1.3.1.2 与国外市场化改革的电力企业经济调度模式比较

国外主要发达国家从 20 世纪 90 年代开始在电力企业中引入竞争,利用市场的杠杆优化电力企业的资源配置,提高其利用效率。在电力市场环境下的电力企业经济调度模式,发电机组实施竞价上网,竞价价格低的机组具有优先调度权,发电企业追求的是利润最大化,电网企业追求的是购电成本最小化或社会福利最大化。随着国外对环境的重视,电力企业开展的环保经济调度重点强调的是环保和企业利益,并没有真正地从节能角度开展经济调度。因此在国外同样存在高效率机组因报价高而获得不了发电权,而低效率机组因价格优势在竞价中取胜的现象。

我国的节能调度模式采用的是能耗及污染物排放的竞争指标,能够保证优先调度能耗低、效率高的机组,电力企业追求的是能耗最小,从而可促进节能降耗的实现。节能调度模式还可以促进电力企业追求技术进步,激励企业淘汰高耗能机组,投资高效率机组或转向清洁能源领域,促进我国电源结构的改善。但是节能调度的缺点在于无法反映能源的稀缺程度,不利于资源的长期优化配置。

从与均衡发电量调度模式比较可看出,节能调度模式具有显著的优越性,而与国外的经济调度模式相比各有优缺点。广东、贵州、四川、江苏、河南等省作为节能调度试点以来,其节能减排效果显著,充分证明了节能调度实施的可能性和优越性。

1.3.2 节能调度机制研究现状

节能调度的实施将迫使部分能耗高、运行成本低的机组无法并网发电,并会显著减少边缘机组的发电小时数。电网电源点的改变将对电网运行的安全性及稳定性造成不利影响,同时会对企业间利益的合理分配、电网公司的购电成本等方面产生负面影响^[31]。针对节能调度模式的实施可能引发的问题,国内学者主要围绕企业层面^[32-37]及系统运行层面^[18-24]等两方面对节能调度问题开展研究。

企业层面的研究主要涉及节能调度实施对电力企业各主体的影响及利益补偿机制。围绕着企业层面:马光文等^[32,33]分析了节能调度的开展对我国火电企业和水电企业造成的不同影响,同时提出要提高节能调度环境下火电企业的竞争力需建立和完善电价机制、调度补偿机制、管理机制等。针对水电企业要通过提高径流预测的准确性,开展中长期和短期相融合的水电站经济调度,并通过厂内经济运行的方法提高水电站水能资源利用效率,进而提高水电

站在节能调度环境下的竞争力。但没有设计具体的电价模式和调度补偿模式。尚金成等^[34,35]指出如何合理解决节能调度实施引起的电力企业间利益再分配是影响节能调度顺利实施的重要因素。针对我国电力市场不成熟的情况,提出可采用行政手段及政府宏观调控与电力市场机制相结合的方法协调节能调度中的经济补偿问题,并设计了相应的经济补偿模式。胡建军等^[36]提出一种基于等效可用负荷率的机组调峰补偿机制,以便有效解决节能调度环境下高耗能机组参与调峰的合理补偿问题。张森林^[37]指出节能调度背景下我国现行上网电价不适应节能调度模式引起电力企业间利益分配不合理从而导致供电可靠性和安全性的重要原因,在此基础上提出了基于发电权转让的单一电价补偿模式和适应于节能发电调度的两部制电价模式。

系统运行层面的研究主要指电力系统运行方式的研究。围绕着系统运行层面:滕晓毕等^[38]提出了一种通过有序调停燃煤机组达到提高系统负荷率的效果,从而实现节能降耗的目的。梁志宏^[39]提出在节能调度环境下应该实行节能调度与市场机制相融合的集散交易模式,以确保节能调度实施的通畅性和市场竞争的公平性。胡建军^[40]通过将能耗指标及排放指标融合到电厂的排序价格中并体现能耗价格指标优先原则,有效地将节能调度和电力市场结合起来。苗增强等^[41]、葛亮等^[42]提出了基于两部制电价和能耗排放指标相融合发电侧节能调度模型和算法,通过竞价和合理结算实现节能降耗和资源的优化配置。周明等^[43]、尚金成^[44]分别从奖赏机制和政府宏观调控角度研究电力市场与节能调度之间的融合机制,以便实现模式间优势互补,发挥电力市场与节能调度双重杠杆在优化电力企业能源利用效率方面的作用。

文献[33]~文献[37]主要围绕节能调度实施后对发电企业如何进行合理的经济补偿等问题进行探讨,使其企业利益不致受损,提高电力企业开展节能调度的积极性,促进节能调度的平稳顺利实施。文献[38]~文献[44]主要从节能调度与电力市场相融合的角度研究节能调度的运作方式,充分利用节能调度杠杆和市场杠杆的资源配置作用,在实现资源高效利用的同时有效兼顾电力企业的利益,保证电力系统安全、可靠、经济的运行。

1.3.3 节能调度优化理论研究现状

节能调度优化模型构建的合理性和全面性将最终影响到电源的出力方式及电网运行方式,从而影响到电力系统潮流分布情况,最终会影响到节能调度实施的效果及电力系统运行的综合经济性、安全性和可靠性。因此,如何构建节能调度模型是节能调度优化理论研究的关键问题,国内学者主要从发电调

度和负荷经济分配两方面研究节能调度模型的建立方法。

火电企业是耗能大户,如何降低火电厂的燃料消耗量,对于节能调度的实施效果有重要影响,除按照节能发电调度办法中火电机组的排序上网发电外,对上网机组实施负荷经济分配对于降低火电燃料消耗量具有重要作用。牛玉广等^[45]针对集中调度中难以准确确定机组煤耗特性的情况,提出电网侧在考虑系统运行安全性及经济性的前提下对火电厂首先实行厂级负荷分配,电厂侧再根据机组实际煤耗特性实行厂内的二次负荷分配,分析表明该方法可显著提高火电的节能效果。唐茂林等^[46]针对在调度计划制订后负荷的短期预测与超短期预测之间存在的偏差,建立从电网调度侧考虑的有功实时调整燃料消耗量最小的节能调度模型,以便实现在电网侧的进一步节能降耗。

节能调度的实施将会导致一些能耗高、成本低的小火电机组无法并网发电,电网电源点的改变将会改变电网的潮流分布,可能威胁到电网的运行安全性及稳定性,建立兼顾电网安全性的节能调度模型显得尤为重要。熊小伏等^[47]建立了考虑电网安全约束及网络损耗影响的节能调度模型。陈之栩等^[48]构建了华北电网日前发电调度中考虑安全约束的机组组合优化决策系统。

针对区域电网间存在电能交易和传输的实际情况,研究区域电网间的节能问题同样十分重要。范玉宏等^[49]利用边际机组替代思想和经济学领域的撮合交易理念,在满足电网安全运行的前提下,采用机组煤耗高低匹配替换的途径,实现区域电网间煤耗节约量最大。但区域间机组替换势必影响到区域电网间的利益再分配,要保障该方案的实施需要进一步研究利益再分配后区域电网间的经济补偿方案。

电力市场是优化电力资源配置的最有效方式,随着我国电力市场的逐步实施和日趋成熟,研究电力市场下的节能降耗问题也成为研究的热点。徐致远等^[50]针对在电力市场下不能准确获得机组煤耗的情况,利用二氧化碳排放函数替代机组能耗函数,建立节能调度与市场机制相融合的机组组合优化模型。谭忠富等^[51]提出基于需求侧响应并考虑峰谷分时电价下的节能发电调度模型。李扬等^[52]建立了市场下考虑电网公司费用及节能调度下兼顾燃料消耗的多目标优化调度模型。

分布式电源多为清洁能源,在节能调度环境下除对节能降耗具有重要影响外,对于优化电源结构、改善电网运行安全性都有重要作用,研究节能调度环境下分布式电源的优化配置也是一个热点。唐勇俊等^[53]研究了多负荷水平下考虑节能调度的分布式电源优化配置问题。

环境问题已经成为制约我国经济发展的一个重要因素,在节能减排国家政策背景下开展电力系统的节能环保调度,不仅可促进电力企业的节能降耗,还可以促进生态环境的改善,有利于电网、社会、经济、生态之间和谐互动发展。韩彬等^[54]将惩罚价格因子二氧化硫排放转化为由污染成本表示的表达形式,然后融入到节能调度优化模型的目标函数中,其本质上还是通过权重法处理多目标优化问题,惩罚价格因子的不同将影响污染成本在目标函数中的重要性,进而影响节能效果。

水电作为清洁能源,开展水电站优化调度,实行水火电互补运行,可显著提高系统运行经济性 & 资源的利用效率,实现节能降耗的目的。喻洁等^[55]提出了节能调度环境下的水火电力系统联合调度多目标优化模型。马光文等^[56]针对梯级水电站情况,提出了梯级水电站在节能发电调度单站排序规则下的多种调度排序方案。

从文献[45]~文献[56]可看出,节能调度模型的构建主要是围绕火电进行研究的,对于水电的节能调度模型及水火电力系统联合运行时的节能调度模型的研究比较少。如何在节能调度机制下充分挖掘水电站的发电效率和发展潜力,如何构建合理的水火电力系统互补节能调度模型都是需要进一步研究的课题,对提高电力系统节能调度的效果具有重要意义。

1.4 水火电力系统优化调度算法现状

水火电力系统节能调度问题与经典优化调度问题在数学模型上都是具有非线性目标函数、大量强非线性约束条件及包含连续和离散变量的大规模非线性优化问题。一般来说,用于求解经典水火电力系统优化调度问题的算法也可用于求解节能调度优化问题。经过科研工作者几十年的研究,至今有很多优化技术成功应用于水火电力系统优化调度问题的求解,主要有大系统分解协调算法、混合整数规划、动态规划、内点法、人工智能算法、群体智能算法等。这些优化技术总体来说都是基于可行域局部搜索准则下的优化算法,可划分为确定型优化算法(大系统分解协调算法、混合整数规划、动态规划、内点法)和随机型优化算法两类(人工智能技术、群体智能算法)。确定型优化算法为导数算法,在求解过程中一般需通过梯度信息或海森矩阵信息确定下一步的寻优方向,属于局部搜索算法;随机型优化算法是根据适应度函数信息确定寻优方向,无需导数信息,属于全局搜索算法。