



# 同一电网中 水电对火电补偿 效益理论与 计算方法

张泽中 著



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

# 同一电网中 水电对火电补偿 效益理论与 计算方法

张泽中 著



 中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

·北京·

## 内 容 提 要

如何高效利用与管理水能资源是水文水资源领域重点研究方向和热点之一。本书介绍了这一学科领域的部分研究成果,由国家自然科学基金(51309098)资助的同一网中水电对火电的补偿机理与补偿效益研究的工作总结。全书共9章,主要包括构建水电对火电补偿效益理论体系,揭示水电对火电补偿效益产生机理,建立电网中水电与火电联合调度仿真模型及求解,研究水电对火电生态环境补偿效益、节能补偿效益、社会补偿效益定量化,以及水电对火电补偿效益分摊方法等研究内容。书中介绍的研究思路、理论和模型方法等具有一定的普适性,可供国家能源政策制定者、电网和水电企业管理者以及流域梯级开发建设规划时参考和应用。

本书可供从事水利水电和水文水资源系统规划、设计部门的工程技术人员以及相关专业的高等院校师生阅读参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

同一电网中水电对火电补偿效益理论与计算方法 / 张泽中著. — 北京:中国水利水电出版社, 2018. 12  
ISBN 978-7-5170-6993-5

I. ①同… II. ①张… III. ①水力发电工程—电力系  
统一功率补偿—成本—效益分析—研究 IV. ①TM714.3

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第225155号

书 名	同一电网中水电对火电补偿效益理论与计算方法 TONGYI DIANWANG ZHONG SHUIDIAN DUI HUODIAN BUCHANG XIAOYI LILUN YU JISUAN FANGFA
作 者	张泽中 著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京时代澄宇科技有限公司
印 刷	北京虎彩文化传播有限公司
规 格	175mm×245mm 16开本 10.75印张 125千字
版 次	2018年12月第1版 2018年12月第1次印刷
定 价	58.00元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

## 前言

我国正处于经济社会转型发展的关键时期，需要以习近平新时代中国特色社会主义思想为指南，主动适应经济发展新常态，落实中央提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念，积极推进供给侧结构性改革，破解经济社会可持续发展中面临的难题。“十三五”时期是我国建设生态文明、推动能源革命的攻坚阶段。党的十八届五中全会明确指出，要推动低碳循环发展，建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系，这是我们未来能源发展的纲领性指导方针。“十三五”时期也是积极应对气候变化的重要转折期。我国政府已经向国际社会承诺非化石能源占比在2020年达到15%，2030年达到20%。

加快发展清洁低碳的可再生能源，是中国推动经济绿色转型的新动力，是开展能源市场和消费革命的核心内容，也是中国落实《巴黎协定》、减排温室气体的必然要求。我们要进一步转变思想，加快可再生能源发展，以可再生能源引领我国的能源革命。由于水电具有成本低廉、调节灵活、清洁环保等优点，是我国节能减排强有力措施，对于促进经济和社会的可持续发展、维护电网安全运行等方面发挥着重要的作用。国家大力支持梯级水电的开发，但是在管理和补偿等政策措施方面还不够健全。国家亟需系统地研究水电

对火电的补偿效益理论为水电健康可持续发展提供科技支撑。水电对火电补偿效益的研究为水电的合理定价提供基础，关系到水电事业的健康发展和国家的能源安全。研究水电对火电的补偿机理与水电对火电补偿效益计算方法具有十分重要的意义。

水电是优质、绿色、清洁的可再生资源，对我国的国民经济发展和能源安全保障发挥着重要的作用，流域梯级水电开发已经成为国民经济基础产业新的增长点。为了我国水电事业健康发展，争取得到更为公平更为合理的政策支持和发展环境，本书以水电混合电网为对象，以节能减排与水电的健康发展为背景，全面分析电力市场环境下，电网中水电站对火电站的补偿关系，以能值理论为支撑揭示其补偿机理，合理定量计算各种主要补偿效益以及探讨了补偿效益分摊理论方法，为实现水电站损失的效益和外部效益内部化提供理论支撑；为水电的合理定价提供科学依据，进而推动水电事业的健康发展和保障国家的能源安全。书中成果有利于为更好地合理开发利用水能资源、科学制定水电定价及补偿机制、促进我国水电事业健康可持续发展提供理论支撑，对提升我国可再生能源高效利用与管理具有重要的理论和现实意义。

本书由作者科研团队近期科研成果构成，由华北水利水电大学张泽中副教授、刘建厅副教授和李小龙等撰写；其中，第1章由张泽中撰写，第2章由张泽中撰写，第3章由张泽中和李小龙撰写，第4章由刘建厅撰写，第5章由张泽中和刘建厅撰写，第6章由张泽中撰写，第7章由张泽中和刘建厅撰写，第8章由张泽中和李小龙撰写，第9章由张泽中撰写。本书得到国家自然科学基金（51309098）的支撑与资助。

书中成果研究和数据收集过程中得到西安理工大学黄强教授和

王义民教授的指导和大力帮助，并且借鉴同行专家学者部分成果不仅列出参考文献，而且在此一并表示感谢！

本书中的研究是水文学及水资源学科中一个正在发展中的复杂系统领域，加之作者知识水平有限，对书中的谬误和不足敬请读者批评指正。

作者

2018年10月15日

于郑州华水龙子湖校区

# | 目录 |

## 前言

### 第 1 章 绪论 /1

- 1.1 研究背景与研究意义 /1
- 1.2 研究目的 /4
- 1.3 国内外研究进展 /5
- 1.4 研究发展趋势 /12
- 1.5 研究主要内容、难点和创新点 /13
- 1.6 研究技术路线 /17

### 第 2 章 同一电网中水电对火电的补偿理论体系 /20

- 2.1 概念及内涵 /20
- 2.2 水电对火电补偿效益组成 /24
- 2.3 水电对火电补偿关系研究 /27
- 2.4 水电对火电补偿效益产生机理 /32
- 2.5 水库补偿效益计算机理 /32
- 2.6 水电对火电补偿效益分摊机理 /33
- 2.7 小结 /33

第 3 章	水电对火电补偿效益产生机理的研究	/35
3.1	能值理论	/37
3.2	水电并入电网对电网能值指标的影响	/44
3.3	水电对火电补偿的外部性	/53
3.4	水电对火电补偿效益的实现	/55
3.5	小结	/58
第 4 章	同一电网中水电对火电调度补偿计算模型及其求解	/60
4.1	水电和火电的运行特性	/60
4.2	水电与火电联合调度分析	/68
4.3	同一电网中水电与火电联合调度仿真模型构建	/70
4.4	同一电网中水电与火电联合调度仿真模型求解	/73
第 5 章	水电站对火电厂的生态环境补偿效益	/81
5.1	相关概念界定	/81
5.2	减排补偿效益的研究	/84
5.3	氧气生态补偿效益的研究	/88
5.4	除污补偿效益的研究	/96
5.5	环境补偿效益产生机理分析	/100
5.6	环境补偿政策制定	/102
5.7	小结	/102
第 6 章	节能补偿效益的研究	/104
6.1	相关概念界定	/104
6.2	煤炭资源开采中的外部成本及测算	/107
6.3	水电对火电节能补偿效益的计算	/114
6.4	水电对火电节能补偿效益产生机理分析	/117

6.5	节能补偿效益政策制定	/118
6.6	小结	/118
第7章	水电对火电社会补偿效益	/120
7.1	相关概念界定	/120
7.2	矿区生态补偿效益	/123
7.3	运输补偿效益	/125
7.4	安全生产补偿效益	/128
7.5	水电对火电的社会补偿效益的计算	/132
7.6	水电对火电社会补偿效益产生机理分析	/133
7.7	小结	/133
第8章	水电对火电补偿效益分摊方法研究	/134
8.1	分摊机理分析	/135
8.2	分摊主要影响因子识别	/136
8.3	分摊方法	/139
8.4	小结	/144
第9章	结论与展望	/146
9.1	主要结论与研究成果	/146
9.2	展望	/150
参考文献		/152

# 第1章 绪 论

## 1.1 研究背景与研究意义

当前，我国正处于经济社会转型发展的关键时期，需要主动适应社会经济发展的新常态，落实中央提出的“创新、协调、绿色、开放、共享”五大发展理念，积极推进供给侧结构性改革，破解社会可持续发展中面临的难题。“十三五”是我国建设生态文明、推动能源革命的攻坚阶段，也是积极应对气候变化的重要转折期。党的十八届五中全会明确指出，要推动低碳循环发展，建设清洁低碳、安全高效的现代能源体系，是我国未来能源发展的纲领性指导方针。我国政府已经向国际社会承诺非化石能源占比到2020年达到15%，2030年达到20%。2016年9月，习近平主席在杭州G20峰会上正式向联合国秘书长提交《巴黎协定》的批准文件，承诺在2030年左右并力争提前实现二氧化碳排放达到峰值，将按照《巴黎协定》要求每五年评估进展。今后，应对气候变化将是我国作为一个负责任大国的主动作为。加快发展清洁低碳的可再生能源，是中国推动经济绿色转型的新动力，是开展能源市场和消费革命的核心内容，也是



中国落实《巴黎协定》、减排温室气体的必然要求，因此要进一步转变思想，加快可再生能源发展，以可再生能源引领我国的能源革命。

21 世纪前叶是我国经济腾飞和民族振兴的关键时期，尤其是在前 20 年，我国国民经济总产值再翻两番，全面建成小康社会，为今后的更大发展提供基础。中国的和平发展是不可抗拒，但确实存在很多严重的制约因素。能否妥善地处理这些问题，决定了我国的前途。在诸多问题中能源，尤其是电力能源的供应无疑是关键问题之一。众所周知，我国的一次性能源以煤为主，在近期这一局面很难改变。设想如果 4.3 万亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$  的电能全赖燃煤供应，则年燃煤约 21.5 亿 t (潘家铮, 2004)，不仅在煤炭开采上将遇到难以克服的困难，而且由此引起的环境污染与生态破坏问题也不可想象。可以说，中国面临的能源挑战是巨大的。解决能源瓶颈是关系到我国能否健康地、快速地、可持续发展的重大问题。

我国水能资源得天独厚，大陆部分水电的理论蕴藏容量为 6.944 亿  $\text{kW}$  (按 8760h 运行计)，年发电量 6.0829 万亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，其中技术可开发容量为 5.416 亿  $\text{kW}$ ，相当于年发电量为 2.474 万亿  $\text{kW} \cdot \text{h}$ ，居世界第一。但是，我国目前水资源开发率不足 17%，按可发电量算只有 9% 左右，不仅远远落后于美国、加拿大、法国等发达国家，而且落后于巴西、埃及、印度等发展中国家 (周大兵, 2000)，因此大江大河将成为梯级水电开发的重点。

随着国民经济的持续快速增长和全面建设小康社会进程的推进，我国能源需求持续增长，电力需求逐年上升，部分地区在用电高峰时段供电紧张，一些地区甚至出现拉闸限电，电力供应不足的矛盾开始显现，2010 年之前，我国电力需求年均增长 7% 左右，年均净装机容量 23000~26000MW。我国能源消费以煤为主，由此产生的

环境污染、生态破坏、地表塌陷、酸雨等问题日益严重，减排温室气体，应对气候变化的压力也越来越大。特别是气候变化已成为国际社会关注的热点和焦点，减排任务日益严峻。为此，我国在不断提高能源利用效率，节约能源资源的同时，积极开展节能减排发电优化调度，大力开发利用可再生能源，加快调整能源结构，加快水电发展，逐步降低煤炭等化石能源在能源消费结构中的比重，并把此视为我国能源的发展趋势。水电是可持续利用的清洁能源，科学开发、合理利用水能资源是保障我国能源供应的重要措施。水电联调对可持续发展具有重大意义，不仅减轻电网中火电产生的环境污染、生态破坏、地表塌陷、酸雨等日益严重的生态和环境压力，而且减排温室气体、缓解气候变化等国际发展问题的压力。但是，电网中水电对火电的补偿效益需要有更科学合理的核算办法。

随着“厂网分开，竞价上网”，我国的电力市场正在逐步的建立。按照电力体制改革的总体部署，电力工业将继续推进各项配套改革，在组建区域电网公司的基础上积极稳妥地全面推进区域电力市场的建设，建立电力市场运行规则和政府监管体系，逐步实行新的电价机制。目前，部分区域电力市场已在运行，例如《华东电力市场运营基本规则》的颁布标志着华东电力市场对发电侧市场的逐步开放。电力市场的建立，对于水电的发展既是一种机遇，也是一种挑战。水电对于火电成本相对较低，若市场发电侧完全开放，则水电具有较强的竞争优势，特别是流域梯级的滚动开发，水电实行梯级联合优化调度，给电网提供价廉质优的电能。据不完全统计，实行梯级水库联合优化与单库优化运行相比，在几乎不增加任何额外工程投资的情况下，可增加发电量3%~5%（原文林，2009）。

由于水电具有成本低廉、调节灵活、清洁环保等优点，是我国



节能减排的强有力措施，对于促进经济和社会的可持续发展、维护电网安全运行等方面具有重要作用。虽然梯级水电开发得到国家的大力支持，但是支持力度远远不够，管理和补偿等政策措施还不健全，比如，当前电价不仅没有按质论价，也没有按照同网、同质、同价的原则定价，而且从运行初期就被作为征税大户，受到不公正待遇，这种不利环境严重影响了水电事业健康发展和国家能源安全。为了满足电网中火电厂的运行要求，调节性能较好的水电站，常被作为调峰运行，或在谷底电价时段发电。为了降低火电成本，确保电网的运行安全，水电时常调峰启闭，造成水轮机组寿命缩短，升高了水电的维护费用。水电站牺牲自身的发电效益，使得火电厂获得了显著的社会、经济、生态效益，该部分效益是因为水电站的补偿而获得的，称为补偿效益。从建设资源节约型、环境友好型社会的总体要求来看，梯级水电站在整个电网中的补偿效益非常可观，但是水电站损失的效益和效益外部化却没有得到应有的补偿。系统地研究水电对火电的补偿效益理论是解决上述问题的前提。水电对火电补偿效益的研究为水电的合理定价提供基础，关系到水电事业的健康发展和国家的能源安全。研究水电对火电的补偿机理与水电计算方法具有重要的理论创新意义和重大的实用价值。

## 1.2 研究目的

水电是优质、绿色、清洁的可再生资源，对我国的国民经济发展和能源安全保障发挥着重要的作用，流域水电梯级开发已经成为国民经济基础产业新的增长点。为了我国水电事业健康发展，争取得到更为公平更为合理的政策支持和发展环境，本文以水电联调电网为对象，以节能减排与水电的健康发展为背景，全面分析电力市

场环境下，电网中水电对火电的补偿关系，揭示其补偿机理，合理定量计算各种补偿效益，为实现水电损失的效益和外部效益内部化提供理论支撑；为水电的合理定价提供科学依据，进而推动水电事业的健康发展和保障国家的能源安全。

### 1.3 国内外研究进展

在电力市场环境下，水电对火电的补偿效益是节能减排与水库补偿效益两大研究领域的交叉科学问题，国内外有关水电对火电补偿效益的研究鲜有报道，这一领域可供参考的文献更是凤毛麟角。但是水电对火电补偿效益的研究符合当今节能减排的时代潮流，影响水电的定价和补偿，关系到水电的健康发展，涉及社会、经济、政治、能源、水利、环境和生态多个学科，必将成为国内外研究重点和热点。本书研究范围限于电力市场环境下水电联调运行中梯级水电对火电的补偿效益，梯级水电站优化调度是本研究的基础，水库补偿效益理论对本研究具有指导和借鉴意义。因此，国内外研究现状主要针对梯级水电站发电优化调度和现有水库补偿效益理论进行阐述。

#### 1.3.1 梯级水电站发电优化调度研究

水电对火电补偿效益是以电力市场等变化环境下水电站优化调度为基础的，因此，水电对火电补偿效益研究必须以梯级水电站研究为前提。1955年 Little 采用马氏过程原理建立水库调度随机动态规划模型标志着水库优化调度的开始 (Little J. D. C, 1955)。1970年 Roefs 和 Bordin 将水库优化调度研究的重心从单个水库转移到多个水库 (Roefs & Bordin, 1970)。为了克服动态规划用于水库群优化调度中“维数灾”的问题，1968年，Larson 提出了增量动态规划



法 (Larson, 1968)。1971 年, Heidari 提出了离散微分动态规划法 (Heidari, 1971)。1972—1981 年, Trott, Gilest 和 Yeh 等相继使用了动态规划逐次逼近法 (Dynamic Programming with Successive Approximation, DPSA) 对水库群优化调度进行研究 (Trott, 1973; Yeh & Trott, 1972; Trott & Yeh, 1975; Gilest, 1981), 然而采用 DPSA 方法求解时并无法保证针对任何情况都能找到全局最优解。1975 年, Howson 提出了逐步优化算法 (Howson, 1975), 该方法在求解每个子问题时只需考虑与该子问题相邻的两个时段的子目标值, 从而减小了计算过程中所占用的内存。1981 年, Turgeon A 将逼近法和随机动态规划应用于并联的水电站水库群, 解决了水电站水力发电系统的优化问题 (Turgeon A, 1985)。1988 年, Foufoula 等提出了一个梯度动态规划算法 (GDP), 能够有效地克服水库数目增加所造成的“维数灾”的问题 (Foufoula, 1988)。1992 年, Karamouz 等提出了贝叶斯随机动态规划 (Karamouz, 1992)。随着计算机技术的不断发展, 人工智能算法已受到广大学者的广泛关注, 水库优化调度学者也相继将其运用到水库优化调度中。20 世纪 60 年代末至 70 年代初美国密歇根大学的 Holland J H 教授及学生提出了遗传算法 (Holland J H, 1975)。1994 年, Esat 和 Hallt 在四个水库的优化调度问题中应用 GA 算法进行求解, 并应用于实际中 (Esat & Hallt, 1994)。1983 年, Kirkpatrick 等提出了现代的遗传算法 (Kirkpatrick, 1983), 在解决大规模的最优组合问题中取得了很好的成绩。意大利学者根据蚂蚁群体觅食行为方式而提出一种仿生优化算法——蚁群算法 (Dorigo M, 1999)。2004 年, Becerra R L 等针对非线性约束优化问题, 在文化算法的种群空间中引入了基于概率分析的微分进化算法 (Becerra R L, 2004)。智能算法不仅为水

库优化调度研究开辟了新的空间，提供了新的思路，还丰富了水电站水库群优化调度的理论。

我国于 20 世纪 80 年代初开始研究水电站水库群优化调度的问题。1981 年，张勇传把并联水库的优化调度问题转化为各个水库单独的优化调度问题，分别得出两库的优化调度策略后，以偏优损失最小为两库总体最优的目标函数，协调两水库单独的最优策略，最后得到总体的最优策略（张勇传，1981）。1982 年，叶秉如等提出了并联水库年最优调度的动态解析法，将其应用在闽北水电站水库群中取得了显著的效果（叶秉如等，1982）。1983 年，纪昌明将离散微分动态规划法应用于混联式水电站水库群动能指标的优化中，随后，在此基础上和冯尚友进一步研究了离散微分动态规划法在长期优化调度中的应用（纪昌明等，1982）。1984 年，张勇传等将模糊等价聚类、模糊决策和模糊映射等理论引入水电站水库群优化的调度中（张勇传，1984）。1988 年，胡振鹏、冯尚友运用动态大系统多目标递阶分析理论的分解—聚合方法解决跨流域供水的水库群优化调度问题，并取得了良好的效果（胡振鹏，1985；冯尚友，1988）。1991 年，为了克服大规模水电站水库群补偿调节调度遇到的困难，董子敖等引入了大系统优化递阶理论，将多目标层次优化模型进一步扩展为“分级多层次优化”模型（董子敖，1991）。1995 年，秦大庸、黄守信研究了大规模水电站水库群的优化补偿调节问题，提出了基于蓄水、放水次序的水电站水库群优化补偿调节方法，在实际运用中取得了良好的效果（秦大庸等，1995）。虽然人工智能算法引入我国水库调度中比较晚，但还是取得了一定的成果，成为近年来国内研究的热点。1996 年，马光文首先采用遗传算法（GA）求解了确定性入流的单目标水电站水库年优化调度的问题，之后又将该算法用



于梯级水电站群优化运行问题的求解中，最后根据水电站水库调度多目标问题提出了多目标遗传算法（马光文，1996）。2005年，徐刚等将蚁群算法应用到水库优化调度中，并取得了良好的效果（徐刚等，2005）。2012年，喻杉提出了基于逐步优化的变异算子的改进蚁群算法（POM-ACO），利用指导式变异模块增强蚁群的性能，采用自适应调整信息素挥发因子机制改善水库优化调度计算的收敛速度，为大型水电站水库群优化调度问题求解提供了一条快速便捷的途径（喻杉，2012）。2006年，马西霞等将粒子群算法引入水库调度中，并取得了良好的效果（马西霞等，2006）。2007年，张双虎、黄强等提出了改进自适应粒子群算法，并应用在水库优化调度求解问题中（张双虎等，2007）。2012年，谢维将文化算法（CA）和病毒进化机制分别引入到粒子群算法中，提出了文化粒子群算法（PSO-CA）和病毒粒子群算法（VPSO），并将其应用到梯级水电站水库群的优化调度中（谢维，2012）。

从国内外水库电站调度研究来看，在早中期偏向于理论的研究，研究的主要内容集中在两个方面：①如何建立调度模型；②求解模型的方法（原文林，2009）。

随着我国电力市场的逐步建立，水电如何发展，许多学者进行探讨，建立了水电参与市场的初步理论。欧述俊针对谷峰电价差，发电量最大不代表效益最大这一问题，提出了考虑峰谷电价因素的水库发电优化调度方法（欧述俊，2003）；成立芹针对电力工业现状，在借鉴国外电力市场经验的基础上，论述了我国现阶段电力市场的运行模式定价方法及其影响因素，研究了相关的竞价策略模型及其均衡解，以及水电站的优化调度策略（成立芹，2004）；曾明就厂网分开后，在电力市场环境下，针对水电比重较大的省份提出了