

# Brief Discussion of Several Issues on Development of Hydropower Energy under Climate Change\*

Libing Zhang<sup>1,2</sup>, Juliang Jin<sup>2#</sup>, Zhanyu Zhang<sup>1</sup>, Hu Zhang<sup>2</sup>, Yanguo Zhao<sup>3</sup>

<sup>1</sup>School of Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing

<sup>2</sup>School of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei

<sup>3</sup>Water Resource Bureau of Yishu River, The Huaihe River Commission of ministry of Water Resources, Linyi  
Email: zhanglibing777@163.com, #jinjl66@126.com

Received: Jul. 17<sup>th</sup>, 2012; revised: Jul. 29<sup>th</sup>, 2012; accepted: Aug. 11<sup>th</sup>, 2012

**Abstract:** The global climate change has been doing greater and greater influence on nature and human society. After a brief discussion on the great opportunities, as well as challenge, that brought by the global climate change, this paper try to probe several issues such as the development and utilization, running risk analysis, and optimal scheduling of hydropower energy under the climate change. The main research contents existed in this field are analyzed finally. It is only way, for the social development and modern management of hydropower energy, that to minimize the its sensitivity to climate change taking full account of all kinds of extreme weather.

**Keywords:** Climate Change; Hydropower Energy; Development and Utilization

## 气候变化下水电能源开发利用若干问题探讨\*

张礼兵<sup>1,2</sup>, 金菊良<sup>2#</sup>, 张展羽<sup>1</sup>, 张 虎<sup>2</sup>, 赵言国<sup>3</sup>

<sup>1</sup>河海大学水利水电学院, 南京

<sup>2</sup>合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥

<sup>3</sup>水利部淮委沂沭河水利管理局, 临沂

Email: zhanglibing777@163.com, #jinjl66@126.com

收稿日期: 2012年7月17日; 修回日期: 2012年7月29日; 录用日期: 2012年8月11日

**摘 要:** 全球气候变化已对现代自然环境和人类社会的各个方面产生越来越深入的影响。在简要论述了全球气候变化对水电能源开发带来重大机遇和挑战的基础上, 分别就气候变化下的水电能源开发、运行风险分析以及优化调度管理等问题进行了初步探讨, 最后就今后该领域主要研究内容进行了分析。充分考虑水电能源系统在各种极端气候情景下的运行状况以把其对气候变化的敏感性降到最低程度, 是现代水电工程科学建设管理和社会发展实践的必由之路。

**关键词:** 气候变化; 水电能源; 开发利用

### 1. 引言

《联合国气候变化框架公约》(UNFCCC)中, 将

\*资助信息: 本研究得到“北京理工大学能源与环境政策研究中心”和“国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-001)”及国家自然科学基金项目(批准号 51079037)的支持。

#通讯作者。

作者简介: 张礼兵(1972-), 男, 安徽肥东人, 副教授, 博士后, 主要从事水资源与水环境系统工程研究。

“气候变化”定义为: “经过相当一段时间的观察, 在自然气候变化之外由人类活动直接或间接地改变全球大气组成所导致的气候改变”。目前, 气候变化(Climate Change)主要表现为三个方面: 全球气候变暖(Global Warming)、酸雨(Acid Deposition)、臭氧层破坏(Ozone Depletion), 其中全球气候变暖是人类目前最迫切的问题。在人类社会的发展过程中, 能源是经济

社会前进发展的动力,其开发利用水平标志着一个国家和民族的进步和文明程度。但能源部门同样也是温室气体单项来源中最大的一个部门,其对温室效应增强的比例占人为气候影响的一半以上。过去100多年间,人类主要依赖石油、煤炭、天然气等化石燃料来提供生产生活所需的能源,这些化石能源的燃烧所排放的二氧化碳、甲烷等温室气体使得地球温室效应有逐渐增强趋势,进而引发全球气候变化<sup>[1]</sup>。

《中国应对气候变化国家方案》指出:“近百年来,许多观测资料表明,地球气候正经历一次以全球变暖为主要特征的显著变化,中国的气候变化趋势与全球的总趋势基本一致”,并且中国政府和企业也开始为应对全球气候变化制订一系列行动纲要。全球碳循环的分析表明<sup>[2]</sup>,水电能源开发会带来区域生态环境、社会效益的极大改善,大量减少温室气体排放,是优质、绿色、清洁的可再生能源。就这点而言,气候变化为水电能源开发利用提供了良好的发展契机。为实践政府承诺积极应对全球气候变化,国家“十二五”电力发展规划把水电能源列在优先开发的位置。同时,在以往水电规划的基础上,中国适时提出规模庞大的“十三大水电基地”建设规划,计划到2050年,陆续开发建设金沙江水电基地、雅砻江水电基地、怒江水电基地、澜沧江干流水电基地、黄河中上游水电基地、东北水电基地等十三大水电基地,总装机容量275,772 MW,工程总投资达2万亿元以上,以实现水电流域梯级滚动开发,资源优化配置和带动西部经济发展。

## 2. 气候变化为水电能源开发利用带来的若干问题

然而,气候变化为水电能源开发提供发展契机的同时,也带来前所未有的挑战。由于水电站是直接利用气候资源的基础设施,其能源开发与利用极易受到气候变化和极端事件的影响。

### 2.1. 气候变化对水电能源开发的影响

一般而言,大气温度、降水和风这三种气候因子与水力发电关系密切:温度升高和风速加大,都会使水库蒸发增加而减少水力发电的引水量,同时也使水轮机需要频繁冷却;降水变化则直接影响水库的径流量而使水能蕴藏量显著降低。过去数十年间,气候变

化和极端天气事件已经对世界范围的水力发电造成了极大的影响<sup>[2-4]</sup>。研究表明<sup>[5]</sup>,美国的干旱引起水电生产的显著削减,科罗拉多河融雪径流的减少可能导致水电生产潜力下降,如果温度上升到中热程度,降水减少10%~20%,水力发电量将减少30%。以水电为主的南美洲国家巴西,2001年遭遇干旱气候,加之能源需求增加,造成该国大部分地区水电减产,使当年GDP减少1.5%,约合100亿美元。该年持续的干旱同时也造成大湖水位下降,导致加拿大尼亚加拉和苏圣玛丽2座水电站的发电量大幅减少。沃尔特水库是西非最大的人工湖,正常情况下能承担加纳60%的能源需求,2007年由于降雨量小,其水位常年处于低位,甚至低于死水位1.5 m,缺水造成了300 MW的电力缺口<sup>[6]</sup>。而对于北欧的瑞典,气候变化中温度和降水的上升可使其水电年生产量增加15%<sup>[7]</sup>。全球气候变化对我国水电能源利用的影响,在部分地区也得到较明显地印证,刘春婷<sup>[8]</sup>以吉林省相邻的白山地区和通化地区水电站为例,通过对两地区水电站的运行与气温、降雨等气象关系的多年统计分析,说明气候变化已经对两区水电站的发电能力同时产生正、反影响,其中冬季温度的升高增加了利用小时数,而春季温度的升高使发电能力降低,且降低的幅度大于升高的幅度,使得水电站的年利用小时数总体上趋于降低。

### 2.2. 气候变化对水电能源利用风险分析

气候变化引起的区域极端气象的频度和深度已越来越显著,也对水电系统的水能开发带来较大的风险性。平均气候的变化对水力发电影响有限且较易控制,但极端气候事件如暴雨、干旱等,将严重影响水电的生产、输送和分配。气候变化可能出现3种可能情景:干旱发生的频率和量级增加,洪水发生的频率和量级增加,或两者同时增加。降雨稀少引起干旱造成水库水位快速下降,水力发电水库可能难以蓄积多余的水量或发电;而降雨过多导致的洪水使库水位长时间处于高位而加大水力发电受阻容量,同时增加的径流将带来大量的泥沙引起水库淤积量的增加,并威胁着水库大坝的安全等<sup>[9]</sup>,这些风险都是在现代水电系统开发运行管理中要慎重和着重考虑的。目前,水系统中风险分析方法已有多种<sup>[9]</sup>,概括起来主要有:

1) 直接积分法:直接积分法理论概念强,可应用

于随机变量影响因素个数较少的系统问题,但针对影响因素众多的系统问题则难以找出概率密度函数或概率关系,或即使有也难以求得分布的解析解或数值解。

2) 蒙特卡罗法(MC): 蒙特卡罗法可以考虑随机变量各影响因素,且无论系统多么复杂都会有计算结果,但计算量最大且结果未必一定精确和收敛。

3) 一次两阶矩法(FOSM): 一次两阶矩法是一种在随机变量分布尚不清楚时,采用只有均值和方差的数学模型的方法。它运用泰勒级数展开,使之线性化。另外,根据线性化点选择的不同,分为 MFOSM(均值一次两阶矩)法和 AFOSM(改进一次两阶矩)法。MFOSM 法假设各影响因素相互独立,将线性化点选为均值点。MFOSM 的计算可能误差颇大。AFOSM 针对这一缺点,在进行泰勒级数展开时,将线性化点选为风险发生的极值点(风险点)。

4) 一次二阶矩验算点法(JC 法): 其基本原理是先将随机变量的非正态分布用正态分布代替,对于此正态分布函数要求在验算点处的累计概率分布函数(CDF)值和概率密度函数(PDF)值与原来分布函数的 CDF 值和 PDF 值相同。然后根据这两个条件求得等效正态分布的均值和标准差,最后用 FOSM 法求出风险值。该法适用于随机变量为任意分布的情况。

在水库(库群)运行管理的风险分析研究方面,国内外已经做了许多有益的探讨并取得了丰富的成果。Baecher 等<sup>[10]</sup>引入风险收益系数计算大坝失事概率。Moy 等<sup>[11]</sup>引入了易损性和可恢复性量度指标。洪家宁<sup>[12]</sup>通过来水、来沙的随机模拟和水库冲淤计算,分析了水库泥沙淤积量的风险度。冯平等<sup>[13]</sup>研究了汛限水位对防洪和发电的影响,通过风险效益比较定量给出了合理的汛限水位。谢崇宝等<sup>[14]</sup>分析了水库防洪风险计算中水文、水流及水位库容关系的不确定性,研究了水库防洪全面风险率模型应用问题。

### 2.3. 水电站库群优化运行管理

实践证明,大范围内的水电站库群联合运行管理,易于统筹兼顾各级水电站的水量、水头,便于充分利用水能资源<sup>[15]</sup>,在一定程度上能够调节和补偿因年内、年际气候变化对各单站水力发电的影响,从而提高水电系统抗风险能力。流域梯级电站群开发利用

一般具有多级电站、装机容量大等特点,通过具有年调节性能的水库拦蓄丰水期来水,减少无益弃水,补充枯水期水量以提高枯期发电量<sup>[16]</sup>。因此,随着我国各水电基地水电站项目的陆续投产,将会形成愈来愈多的梯级水电站群。在“中国十三大水电基地规划”中,黄河中上游、金沙江、雅砻江、澜沧江干流等大部分水电基地都是以梯级开发来规划的,其中,金沙江干流具有径流丰沛且较稳定、河道落差大、水能资源丰富、开发条件较好等特点,成为我国最大的水电基地。根据 1981 年成都勘测设计研究院编写了《金沙江渡口宜宾河段规划报告》,推荐金沙江下游四级开发方案,即:溪洛渡、向家坝、乌东德、白鹤滩,这 4 座梯级开发水电站总规划装机规模近 4300 万 kW,年发电量约 1900 亿 kW·h,相当于三峡工程的 2 倍。目前金沙江一期工程溪洛渡工程已经 2007 年实现截流,计划 2013 年首批机组发电,2015 年完工;二期工程向家坝工程于 2006 年 11 月 26 日正式开工建设,预计 2012 年首批机组投产,2015 年全面完工。溪洛渡是向家坝的上游调节水库,向家坝是溪洛渡的下游反调节水库,是相辅相成的梯级开发工程,以发挥溪洛渡和向家坝两座水电站的各自效益和整体效益。乌东德工程、白鹤滩工程也将相继上马。

而针对水电站群的联合运行管理的研究也经历了一个很长的发展过程,其研究方法也正在处于不断发展和完善之中。一般而言,根据水电站水库调度技术发展状况可将其大致分为三个阶段<sup>[17]</sup>: 常规调度、优化调度及智能化调度。水电站水库优化调度从时间上可分为长期(年、月)调度、短期(周、日、时)调度;从径流描述上可分为确定型和随机型两种,从所采用的优化方法上可分为线性规划、动态规划、动态解析法、逐次优化 POA 法、聚合分解法和系统分解协调法等;从所包含的水电站个数上可分为单库、梯级、并联及混联形式的优化调度。从国内外水电站优化调度的发展历程可知,单一水库的优化调度在理论和方法上都已比较成熟,在实践上也有许多成功的实例,而对于水库群联合运行调度而言,由于需要考虑库群联调要求和各级约束,往往导致一般意义上的优化调度方法失去对实际运行的指导作用。尽管近三、四十年来,国内外对于水库优化调度问题的研究和实践成绩斐然,但是,由于水电站群系统的复杂性、多样性和综合性,对于水库群联合调度而言,各种优化方法

和数学模型往往存在“维数灾”而难以求解, 特别是采用显随机优化途径解决库群联调问题更是如此。

### 3. 结论

综上, 气候变化已成为国内外绝大多数学者和政府的共识, 而气候变化中的全球变暖问题必然会对水电能源开发利用带来新的机遇与挑战。分析气候变化对水电站群保证出力以及水力发电的影响是今后研究工作的一个重要方面, 即利用流域和水库运行的水量平衡模型, 定量估计气候变化对水力发电影响的大小, 主要研究内容包括:

1) 水电站库群总体发电量和保证出力对气候变化(降水变化)的敏感程度, 同时结合风险评价给出库群抗风险能力;

2) 当考虑水库的综合效益(防洪、发电、生态环境等)时, 气候变化引起的电站库群年发电量和保证出力的对应变化规律;

3) 在系统优化理论方法指导下, 如何优化运行水电站群, 使得在极端气候条件下得到优化运行策略。

在水电能源开发利用过程中, 充分考虑系统在气候变化各种极端情景下的运行状况, 以期把水电站发电系统对气候变化的敏感性降到最低程度, 合理控制和管理水电系统风险, 研究和管理气候变化下的水库(尤其是水库群)最优运行策略, 可充分利用水能资源以积极应对气候变暖效应, 符合我国建设资源节约型、环境友好型社会的要求, 是实现国家节能减排目标和发展低碳经济的重要途径之一, 在工程科学管理和社会发展实践上具有现实需求的迫切性和必要性。

### 4. 致谢

本文得到“北京理工大学能源与环境政策研究中心”的资助与支持, 在此深表感谢。

### 参考文献 (References)

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change. Formulation of response strategies. Report Prepared for IPCC by Working Group III, 1990: P48-P49.
- [2] ROBINSON, P. J. Climate change and hydropower generation. *International Journal of Climatology*, 1997, 17(9): 983-996.
- [3] MOLARIUS, R., KERÄNEN, J., SCHABEL, J. and WESSBERG, N. Creating a climate change risk assessment procedure: Hydropower plant case, Finland. *Hydrology Research*, 2010, 41(3-4): 282-294.
- [4] HARRISON, G. P., WHITTINGTON, H. W. and WALLACE, A.

- R. Sensitivity of hydropower performance to climate change. *International Journal of Power and Energy Systems*, 2006, 26(1): 42-48.
- [5] SUNDT, N. A. Extreme summer weather conditions test US energy infrastructure. *Energy Economics and Climate Change*, 1993, 8: 2-3.
- [6] MARKOFF, M. S., CULLEN, A. C. Impact of climate change on Pacific Northwest hydropower. *Climatic Change*, 2008, 87 (3-4): 451-469.
- [7] BOER, M. M., KOSTER, E. A. and LUNDBERG, H. Greenhouse impact in Fennoscandia—Preliminary findings of a European workshop on the effects of climate change. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 1990, 19: 2-10.
- [8] 刘春婷. 吉林省东南部山区地方水电年利用小时数对气候变化的响应[J]. *吉林水利*, 2009, 8: 75-78.
- LIU Chunting. The impact of annual using hours of local hydropower in Northeast mountain area of Jilin Province on the climate change. *Jilin Water Resources*, 2009, 8: 75-78. (in Chinese)
- [9] 王栋, 朱元胜. 风险分析在水系统中的应用研究进展及其展望[J]. *河海大学学报*, 2002, 30(2): 71-77.
- WANG Dong, ZHU Yuansheng. Review and expectation of application of risk analysis to water resource systems. *Journal of Hehai University (Natural Sciences)*, 2002, 30(2): 71-77. (in Chinese)
- [10] BAECHER, G. B., PATE, M. E. and NEUFVILLE, R. D. Risk of dam failure in benefit-cost analysis. *Water Resource Research*, 1980, 16(4): 449-456.
- [11] MOY, W. S., COHON, J. L. and REVELLE, C. S. A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir. *Water Resource Research*, 1986, 22(4): 489-498.
- [12] 洪家宁. 水库泥沙淤积量风险分析[J]. *水文*, 1994, 14(4): 14-18.
- HONG Jihaning. Risk analysis of reservoir sedimentation. *Hydrology*, 1994, 14(4): 14-18. (in Chinese)
- [13] 冯平, 陈根福, 纪恩福, 等. 岗南水库超汛限水位蓄水的风险分析[J]. *天津大学学报*, 1995, 28(4): 572-576.
- FENG Ping, CHEN Genfu, JI Enfu, et al. Risk analysis of water storage over limit water level during flood season in Gangnan reservoir. *Journal of Tianjin University*, 1995, 28(4): 572-576. (in Chinese)
- [14] 谢崇宝, 袁宏源, 郭元裕. 水库防洪全面风险率模型研究[J]. *武汉水利电力大学学报*, 1997, 30(2): 71-74.
- XIE Chongbao, YUAN Hongyuan and GUO Yuanyu. Overall risk model of reservoir flood control. *Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering*, 1997, 30(2): 71-74. (in Chinese)
- [15] 杜成锐, 赵永龙, 陈尧. 流域梯级水电站集控中心管理的必要性及对低碳经济发展的作用[J]. *四川水力发电*, 2010, 29(6): 214-216.
- DU Chengrui, ZHAO Yonglong and CHEN Yao. The necessity of centralized control center management for cascade hydropower stations and its role in developing low-carbon economy. *Sichuan Water Power*, 2010, 29(6): 214-216. (in Chinese)
- [16] 尚金成, 张勇传, 岳子忠, 等. 梯级电站短期优化运行的新模式及其最优性条件[J]. *水电能源科学*, 1998, 16(3): 1-9.
- SHANG Jincheng, ZHANG Yongchuan, YUE Zizhong, et al. The model and optimality conditions for cascaded plants short term optimal operation. *Hydroelectric Energy*, 1998, 16(3): 1-9. (in Chinese)
- [17] 马光文, 王黎. 水电站群随机优化调度方法及其软件包研制[J]. *成都科技大学学报*, 1995, 84: 8-14.
- MA Guangwen, WANG Li. Standardized optimum algorithm and software for operation of multireservoir hydropower system. *Journal of Chengdu University of Science and Technology*, 1995, 84: 8-14. (in Chinese)