

市场环境下梯级水电站间发电补偿效益研究

王金龙¹,黄炜斌^{1*},马光文¹,郭乐²

(1. 四川大学 水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川 成都 610065;2. 中国长江三峡集团公司,湖北 宜昌 443000)

摘要:为解决现有梯级水电发电补偿效益核定及分摊方法的不足,提出基于“等效电量”概念的“核定电量”补偿效益算法,建立能够同时兼顾各电站主观偏好且保持群体一致性的效益协调分摊模型。新算法考虑市场环境下的分时电价差异和电网对电站增发电量的吸收限制,且相关参数均由实际运行资料率定而成,使得计算结果更贴近实际值。新模型依据各方协商确定的分摊原则,先以单站分摊比例最大为目标获取个体偏好下的分摊原则权重向量,然后按照群体一致性原理求得各分摊原则的群体权重,最后以距离不同分摊原则的分摊结果最近为目标计算各电站的分摊比例。计算实例表明:补偿效益核定结果公平、合理,符合事实;补偿效益分摊结果更好地反映了梯级中施益电站与受益电站在补偿效益产生中的作用大小,易被各方接受。

关键词:联合运行;核定电量;补偿效益分摊;群体一致性;梯级水电

中图分类号:TV697

文献标志码:A

Research on the Compensation Benefit of Cascade Hydro Plants in Power Market

WANG Jinlong¹,HUANG Weibin^{1*},MA Guangwen¹,GUO Le²

(1. State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China;
2. China Three Gorges Co., Yichang 443000, China)

Abstract: In order to accurately calculate the compensation benefit which comes from the joint operation of cascade hydro plants, a new method was proposed based on the electric energy benchmark of hydro plant, which not only takes into account the time-of-use power price of every plant, but also considers the load rate constraint from power grid for the incremental output of each station. In order to reasonably distribute the compensation benefit among the involved plants, a coordinated allocating model based on the basic principle of group decision was also developed, which comprises the following process steps. Firstly, for the benefit-sharing principles selected by all involved parties, the individual preference weight vector of every plant was obtained by solving an objective function whose goal is maximum single plant apportionment ratio. Secondly, the recognised weight vector was determined through the principle of maximizing group consistency, and finally, the actual benefit-sharing proportion of each plant was fixed by solving another objective function whose goal is minimizing the distance between the actual benefit-sharing proportion vector and the vectors from all the benefit-sharing principles. The study case showed that the proposed computing method can get closer to the real value of compensation benefit, and the benefit-sharing results from the presented model are not only reasonable but also can be accepted more easily by every involved plant.

Key words: joint operation; electric energy benchmark; compensation benefits allocation; group consistency; cascade hydro plants

梯级水电联合经济运行的本质是上游调节性水库对其下游电站进行补偿调度,进而使得下游电站在不增加任何额外工程投资的情况下获得可观的发电

增益。然而,受交通、库区淹没、移民等因素的影响,上游调节性水库的建设成本普遍偏高^[1]。按照“谁投资,谁受益”、“谁受益,谁补偿”的市场规律,

收稿日期:2015-03-24

基金项目:国家重点基础研究发展计划资助项目(2013CB036406-4)

作者简介:王金龙(1988—),男,博士生。研究方向:水利电力经济管理。E-mail:wangjlsu2014@126.com

*通信联系人 E-mail:xhuang2002@163.com

网络出版时间:2016-5-12 16:00:48

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1596.T.20160512.1600.002.html>

<http://jsuese.scu.edu.cn>

对隶属于不同投资主体的上、下游电站积极开展调节效益补偿工作^[2]。1997年,《四川省流域梯级水电站间水库调节效益偿付管理办法》是中国第一部开展流域梯级水电调节效益补偿工作的地方性法规^[3]。但时至今日,该办法的实施情况却不尽人意,主要原因有2个:一是,缺乏能够准确核定梯级水电补偿调节效益的规范性方法;二是,对于“将受益电站实际受益额的70%偿付给施益电站,年限为15 a(按当年应偿付额偿付)或12 a(按约定的年偿付额度定额偿付)”的规定,各方争议大,难以实施。近些年,中国西南水电集中区丰水期电力生产过剩,电网吸收电量不足,导致水电弃水严重。这增加了梯级补偿调节效益的核定难度,因为只有当下游电站的增发电量被电网吸收后,上游电站的补偿调节事实才成立。故研究准确的补偿效益核定法和各方均认可并接受的补偿效益分摊法意义重大,是推动多利益主体梯级水电站群开展联合经济运行的关键。

对于补偿效益的核定,现有方法主要是按有、无上游调节性电站两种情况对径流进行调节计算,进而将下游电站的电能增量作为补偿效益,该方法没有考虑市场环境下各电站的丰枯、峰谷电价差异及电网对理论增发电量的吸收约束,导致计算结果偏大^[4-7]。关于补偿效益的分摊,已有方法包括单指标法^[1]、综合指标法(如综合分析法、离差平方法等)^[1-2]和基于合作对策的 Shapley 值法^[8-9]3 大类,其中:单指标法分摊原则单一,结果片面;综合分析法分摊原则主观性强,难以体现公平性;离差平方法虽能根据不同分摊原则下电站分摊比例的差异程度来客观赋权,但难以反映各主体对不同分摊原则的主观偏好,不易达成共识;Shapley 值法在计算各电站不同结盟次序下的边际贡献时,忽视了独立电站与结盟电站之间的水力联系,如位于中间位置上的独立电站,其电能效益分别受到了上游结盟电站下泄流量、下游结盟电站水库回水的影响,同时该电站会对下游结盟电站的入库流量产生影响。

作者进行了两方面的研究:一是,提出通过梯级实际发电量和各电站“核定电量”来测算补偿效益的方法,其中,“核定电量”是在充分考虑电站分期电价差异和电网对其增发电量吸收约束的前提下,采用还原后的天然径流,按水能计算原理求得;二是,基于群决策的基本原理,构建能够兼顾不同主体对不同分摊原则偏好的补偿效益协调分摊模型,并采用改进单亲遗传算法对该模型进行求解。

1 补偿效益核定

1.1 等效电量

市场环境下的梯级水电发电补偿效益包括两部分:一是,上游调节性水库的“蓄丰补枯”作用,使得下游受益电站增加发电量收益;二是,因为上游施益电站的补偿调节,下游受益电站低电价时段电量转移至高电价时段所增加的收益。为了避免丰枯、峰谷电价差异带来分析描述上的不便,按各分期电价相对平水期平时段电价的浮动比例转化成同一基准电价下的“等效电量”,公式如下:

$$E = \sum_{m=1}^M \kappa_m \cdot E_m \quad (1)$$

式中: E 为计算周期内的等效电量,若计算周期为年,称作年等效电量; M 为计算周期内的分期个数; m 为分期编号; κ_m 为第 m 个分期的电价浮动比例; E_m 为第 m 个分期的分期电量。

由电站实际运行资料统计年等效电量时,首先根据日内峰、平、谷分时分配情况统计日等效电量,然后逐日累计到月,最后由年内丰、平、枯分期情况统计年等效电量。

1.2 核定电量

只有当上游调节性水库对下游受益电站进行补偿调节而增加的电量被电网吸收后,补偿效益才客观存在。为此,研究提出“核定电量”概念,定义为:天然径流不受上游水库调节影响时,下游电站单独运行所产生的能够被电网吸收的年等效电量。为了避免人为因素的影响,使计算结果合理、有效,各电站的年核定电量采用如下模型计算:

$$E' = \max \sum_{t=1}^T \kappa_t \cdot [K_t \cdot Q_t \cdot H_t - \beta \cdot \sigma_t \cdot (NP - K_t \cdot Q_t \cdot H_t)^\alpha] \cdot \Delta t \quad (2)$$

式中: E' 为电站年核定电量; NP 为电站保证出力; T 为年内计算总时段数; t 为时段编号; Δt 为 t 时段时长; κ_t 为电站 t 时段的电价浮动比例; K_t 为电站 t 时段的综合出力系数; Q_t 为电站 t 时段的发电流量; H_t 为电站 t 时段的发电水头; α, β 为模型参数, α 通常取1或2, $\beta > 0$,经试算确定; σ_t 为0-1变量,取值如下:

$$\sigma_t = \begin{cases} 1, & K_t \cdot Q_t \cdot H_t < NP; \\ 0, & K_t \cdot Q_t \cdot H_t \geq NP \end{cases} \quad (3)$$

若电站水库具有季及以上调节能力,以月($T = 12$)或旬($T = 36$)为计算时段;否则,计算时段取日。在满足水量平衡、流量平衡、水位、下泄流量、发

电流量、出力等约束条件下,通过优化算法直接求解式(2)即可获得各电站的年核定电量。相关的求解方法很多且很成熟,作者采用可保证全局最优的动态规划算法,按照梯级从上至下的关系逐个计算。其中,各电站无上游水库调节时的天然入库流量推演公式如下:

$$q_t = q_t^1 + \sum_{l=2}^L S_l^t \quad (4)$$

式中, q_t 为当前电站 t 时段的天然入库流量, q_t^1 为梯级中第 1 级电站 t 时段的入库流量, L 为梯级中从第 1 级到当前电站的电站个数, l 为电站编号, S_l^t 为 t 时段 $l-1$ 电站与 l 电站间的区间流量。

为了反映各电站及电力系统实际的运行特性,准确计算年核定电量,在上述模型求解时,进行如下处理:

1) 综合出力系数 K_t 根据电站 t 时段的实际运行资料采用分时段反向率定法^[10] 确定。

2) 设定出力约束为式(5),以保证电站 t 时段的核定出力能够被电网吸收^[11]。

$$\gamma_t \cdot N_t^{\max} \geq K_t \cdot Q_t \cdot H_t \geq N_t^{\min} \quad (5)$$

式中: γ_t 为电站 t 时段的核定负荷率,按该时段电网负荷需求并结合历史运行资料确定^[12]; N_t^{\max} 、 N_t^{\min} 分别为电站 t 时段的最大出力能力和最小出力要求。

1.3 补偿效益计算

从补偿效益的概念不难看出,上游施益电站的水库变化是“因”,相关主体利益变化是“果”,而衡量这个“果”的量便是补偿效益。因此,梯级水电发电补偿效益的计算基础是找到上游水库变化不对下游电站进行补偿调节时整个梯级的效益“基准”,然后通过对比梯级水电联合运行时的实际收益与该效益“基准”间的变化来判定补偿效益大小^[5]。

实际年等效电量是受益电站在接受上游施益水库补偿调节后,将实际年发电量按分期电价浮动比例转化至同一水平电价下的电能效益。年核定电量是受益电站入库径流在不受上游施益水库调节影响时,考虑电网负荷吸收约束、满足自身保证出力要求的“基准”效益。由于实施联合经济运行后,梯级整体收益增加,上游施益电站的效益会有所减少,即上游调节性电站的实际年等效电量小于其年核定电量。所以,只有当梯级实际年等效电量超过年核定电量时,补偿效益才存在;只有当受益电站的实际年等效电量超过其年核定电量时,受益电站的受益事实才成立,也才具有对上游施益电站进行调节效益补偿的义务。因此,梯级水电站间的补偿效益计算

公式如下:

$$\Delta E = \begin{cases} \sum_{i=1}^n (E_i - E_i'), & \sum_{i=1}^n E_i > \sum_{i=1}^n E_i'; \\ 0, & \sum_{i=1}^n E_i \leq \sum_{i=1}^n E_i' \end{cases} \quad (6)$$

式中, ΔE 为梯级水电实施联合经济运行后的补偿效益, n 为梯级电站个数, i 为电站编号, E_i 为 i 电站的实际年等效电量, E_i' 为 i 电站的年核定电量。

2 补偿效益分摊模型

2.1 补偿效益分摊原则

梯级水电实施联合经济运行后,上游调节性电站的发电收益不增反降,而下游调节能力较差的受益电站的发电时数增加较多,其设备的维修运转等成本也相应增高^[13]。补偿效益分摊的目的是为了明确电站间的补偿作用大小,兼顾各投资者的利益,使得受损主体得到受益主体的合理补偿,以保证流域统一调度的顺利实施。补偿效益的分摊结果需满足以下 2 个原则:

1) 补偿效益在各电站中完全分配,即

$$\sum_{i=1}^n \Delta E_i = \Delta E \quad (7)$$

式中, ΔE_i 为 i 电站的补偿效益分摊值。

2) 补偿效益分摊后,各电站实际收益应大于其单独运行时的电能效益,即

$$E_i^* \geq E_i' \quad (8)$$

式中, E_i^* 为 i 电站补偿效益分摊后的实际电能收益。

2.2 补偿效益协调分摊模型

通常,各参与效益分摊的电站会以自身利益最大化为目标提出不同的分摊原则。为了体现公平性,鼓励电站间实行联合统一运行,理想的分摊结果应该是与各原则分摊结果差异最小的可行解,故而构建以下效益协调分摊模型:

$$f(\mathbf{X}) = \min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^p \omega_j (x_i - r_{i,j})^2 \quad (9)$$

式中: p 为分摊原则个数; j 为分摊原则编号; ω_j 为第 j 个分摊原则的权重, $\omega_j \in (0,1)$ 且 $\sum_{j=1}^p \omega_j = 1$; x_i 为 i 电站应分摊的补偿效益比例, $x_i \in (0,1)$ 且 $\sum_{i=1}^n x_i = 1$; $r_{i,j}$ 为 i 电站采用第 j 种分摊原则时分摊的补偿效益比例, $r_{i,j} \in (0,1)$ 且 $\sum_{i=1}^n r_{i,j} = 1$ 。

该模型的求解,包括以下 3 方面的内容:

1) 确定分摊原则,计算每种分摊原则下各个电站的分摊比例 $r_{i,j}$ 。

2) 采用客观公平的方法确定各电站均可接受的每种分摊原则的权重 ω_j 。

3) 选择合适的优化算法求解式(9),得到每个电站实际应分摊的补偿效益比列 x_i 。

3 分摊模型求解

3.1 确定分摊原则

目前,从概念上易被各发电企业接受的补偿效益分摊原则包括2类:一是,按影响补偿效益产生大小的电站特性参数分,如调节库容、装机容量、保证出力、设计水头等^[1];二是,按各电站在补偿效益产生中的贡献大小分,如贡献系数法^[2]、动能效益增值比例法^[2]、Shapley 值法等^[8-9]。由于式(9)能够综合考虑多种分摊原则,以体现各电站的偏好,若将这2类分摊原则结合,不仅实际经济意义明确,而且更能体现出效益分摊的客观性与公平性。由于贡献系数法计算过程复杂、结果偏小、误差较大,而动能效益增值比例法采用多年平均电量增值,只适用于一次支付若干年或全部补偿效益的分摊,因此本文推荐采用电站特性参数值比法和体现期望边际贡献的 Shapley 值法。

1) 水库电站特性参数值比

$$\lambda_i = \alpha_i / \sum_{i=1}^n \alpha_i \quad (10)$$

式中, α_i 为 i 电站的某一特性值, λ_i 为 i 电站按这一特性值分摊的补偿效益比例。

2) 期望边际贡献值比

在 Shapley 值法中,梯级各电站在不同联盟组合下运行时的期望边际贡献值为:

$$\mu_i = \sum_{S \subset N, i \in S} \frac{(s-1)!(n-s)!}{n!} [E(S) - E(S-i)] \quad (11)$$

式中, $\frac{(s-1)!(n-s)!}{n!}$ 为联盟 S 出现的概率,

$E(S)$ 为联盟 S 中所有电站联合运行时的年等效发电量, $E(S) - E(S-i)$ 为 i 电站对联盟 S 的边际贡献。

按各电站期望边际贡献值大小分摊的分摊比为:

$$v_i = \mu_i / \sum_{i=1}^n \mu_i \quad (12)$$

式中, v_i 为 i 电站按期望边际贡献值分摊的补偿效

益比例。

各电站通过协商确定应采用的分摊原则,并根据式(10)或(12)计算对应分摊原则下所有电站的补偿效益分摊比例 $r_{i,j}$ 。

3.2 分摊原则的权重计算

式(9)的分摊结果 $\mathbf{X}^* = (x_1^*, x_2^*, \dots, x_i^*, \dots, x_n^*)$ 会因分摊原则权重向量 $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_j, \dots, \omega_p)$ 的不同而异,因此,设定合理的分摊原则权重值成为影响计算结果客观、公正的一个重要因素。对于各电站而言,会以自身分摊比例最大为目标提出自己偏好的分摊原则权重,即个体偏好权重向量 $\boldsymbol{\omega}^i = (\omega_1^i, \omega_2^i, \dots, \omega_j^i, \dots, \omega_p^i)$ 。但从补偿效益公平、合理分摊的角度来说,最终形成的分摊原则权重不应存在对任何电站的特殊偏好。可通过以下方法实现:

1) 以 i 电站分摊比例最大为目标,如式(13)所示,求解个体偏好权重向量 $\boldsymbol{\omega}^i$ 。

$$\begin{aligned} f(\boldsymbol{\omega}^i) &= \max \sum_{j=1}^p \omega_j^i \cdot r_{i,j}, \\ \text{s.t.} \quad \omega_j^{\min} &\leq \omega_j^i \leq \omega_j^{\max} \end{aligned} \quad (13)$$

式中: ω_j^i 为 i 电站认可的第 j 种分摊原则的权重,反映了 i 电站对第 j 种分摊原则的个体偏好程度, $\omega_j^i \in (0, 1)$ 且 $\sum_{j=1}^p \omega_j^i = 1$; ω_j^{\min} 和 ω_j^{\max} 为第 j 种分摊原则的权重区间,取值规则如下:

$$\begin{cases} \omega_j^{\min} = \min_{1 \leq i \leq n} \omega_j^i, \\ \omega_j^{\max} = \max_{1 \leq i \leq n} \omega_j^i \end{cases} \quad (14)$$

2) 基于群体一致性原理^[14-15],对所有电站的个体偏好权重向量进行协调,得出群体均较为满意的分摊原则权重向量 $\boldsymbol{\omega} = (\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_j, \dots, \omega_p)$,计算方法如下:

在 p 维空间中,2个向量夹角的大小反映了它们的一致程度^[14],夹角的余弦值(式(15))越大,夹角越小,一致性越好。

$$\cos(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}^i) = \frac{\langle \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}^i \rangle}{\|\boldsymbol{\omega}\| \|\boldsymbol{\omega}^i\|} \quad (15)$$

式中, $\langle \boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}^i \rangle$ 为向量 $\boldsymbol{\omega}$ 与 $\boldsymbol{\omega}^i$ 的内积。

为了使各电站间易于达成共识,同时兼顾各方的权重偏好,从与所有个体偏好一致性程度最好出发,建立权重向量协调优化模型:

$$\begin{aligned} f(\boldsymbol{\omega}) &= \max \sum_{i=1}^n \cos(\boldsymbol{\omega}, \boldsymbol{\omega}^i), \\ \text{s.t.} \quad \omega_j &> 0, \sum_{j=1}^p \omega_j = 1 \end{aligned} \quad (16)$$

通过优化算法求解式(16),即可得到与 n 个电

站个体偏好向量一致性最好的群体权重向量 ω 。

3.3 求解算法

考虑到补偿效益协调分摊模型中涉及3个优化目标函数(式(9)、(13)和(16)),且每个目标函数具有多维状态变量,采用改进单亲遗传算法^[16](improved partheno genetic algorithm, IPGA)求解。该算法与传统遗传算法(traditional genetic algorithm, TGA)相比,具有以下3个方面的特点:

1)通过模拟轮虫、水蚤等少数生物的单亲繁殖方式,在单个个体上进行遗传操作,以保证个体间的信息隔离,达到维持群体多样性的目的,避免TGA交叉算子作用于2个可行解个体而产生不可行解个体的情况发生,有利于提高遗传作用效率^[17]。

2)IPGA利用非均匀变异算子在寻优前期的充分全局勘探和后期的精细局部开发特性搜索全局最优解,仅涉及3个参数,遗传操作简单,易于控制。

3)IPGA在个体逐代进化过程中采用贪婪选择策略,以保证子代优于父代,达到减少无功操作的效果。同时,IPGA设立全局最优公告板,以加强全局最优与个体最优间的交流协作,为种群进化提供精英向导。

改进单亲遗传算法求解优化目标函数的具体步骤详见文献[16]。

4 实例

4.1 补偿效益计算结果及分析

以中国某流域中下游A、B、C3个梯级电站为例,进行发电补偿效益研究,各电站相关特性参数见表1,各电站分时电价见表2。

表1 各电站主要特性参数

Tab.1 Main characteristic parameters of three stations

电站	调节性能	调节库容/ 10 ⁸ m ³	装机容量/ MW	保证出力/ MW	额定 水头/m
A	季	38.8	3 600	926	148
B	周	0.96	700	179	48
C	日	0.55	600	130	31

表2 各电站分时电价

Tab.2 Time-of-use power prices of three stations

电站	时段	电价/(元·(MW·h) ⁻¹)		
		丰水期	平水期	枯水期
A	高峰	304.38	400.50	520.65
	平段	228.00	300.00	390.00
	低谷	143.64	189.00	245.70
B、C	高峰	221.18	291.03	378.34
	平段	165.68	218.00	283.40
	低谷	104.38	137.34	178.54

根据计算年份实际的运行资料和电网负荷需求,推求各电站 t 时段的综合出力系数 K_t 及核定负荷率 γ_t 之后,以A电站平水期平时段上网电价300元/(MW·h)为基准,按表2中各电价相对这一基准电价的浮动比例测算该梯级2012年的等效电量、核定电量和补偿效益。

为了说明所提方法的合理性,还建立了兼顾保证出力且同时考虑各电站分时电价因子的梯级联合优化调度模型^[18],计算2012年整个梯级的理论发电补偿效益。两种方法计算结果见表3。

表3 补偿效益计算结果

Tab.3 Results of compensation benefits

电站	单独运行	联合运行实际补偿效益			联合运行理论补偿效益		
	年核定电量/ (10 ⁸ kW·h)	实际年等效电量/ (10 ⁸ kW·h)	增加值/ (10 ⁸ kW·h)	增值比/ %	理论年等效电量/ (10 ⁸ kW·h)	增加值/ (10 ⁸ kW·h)	增值比/ %
A	131.51	130.62	-0.89	-0.68	150.59	19.08	14.51
B	27.09	29.34	2.25	8.31	33.48	6.39	23.59
C	20.78	22.62	1.84	8.85	24.77	3.99	19.20
梯级	179.38	182.58	3.20	1.78	208.84	29.46	16.42

从表3不难看出,相对于年核定电量,2012年A、B、C3站实施联合运行后,整个梯级实际年等效电量增加 3.20×10^8 kW·h,增幅比为1.78%,增加经济额为 0.96×10^8 元;梯级理论年等效电量增加 29.46×10^8 kW·h,增幅比为16.42%,增加经济额

为 8.84×10^8 元。考虑到电网对各电站增发出力的吸收限制,实际运行时不可能完全按照理想的优化结果实施发电调度,因此在进行发电调节效益补偿时,若以后者为据,结果显然偏大,这对下游受益电站不公平。

提出的以各电站年核定电量和实际运行结果为依据测算出来的补偿效益更准确、更贴近真实值。一是,以实际联合运行结果而非理论计算值为依据计算补偿效益,符合客观事实,可以根据受益电站的受益年限逐年进行补偿,避免了实际进行效益补偿时的结果偏大问题和根据理论计算值确定补偿年限问题;二是,各电站当年核定电量测算时采用的相关参数,均由当年实际的运行资料率定而成,同时考虑电站保证出力、分时电价差异和电网的吸收约束,使得梯级补偿效益计算时的基准(年核定电量)更符合实际,进而保证了得到的电量增益是被电网吸收的真实效益。

同时,由表3还可以计算得到A、B、C电站及整个梯级2012年的理论电量完成率(即实际发电量占理论发电量的百分比)^[19],分别为86.74%、87.63%、91.32%、87.43%,B、C电站高于A电站,说明施益电站A为补偿下游受益电站B、C,牺牲了自身的发电效益,存在效益补偿关系。同时说明,相对理论发电能力,各电站仍存在一定的发电效益提升空间,整个梯级尚存在12.57%的增效范围,今后还需继续加强整个梯级的联合运行管理水平,协调好梯级联合运行与电网调度之间的关系,进一步增加发电收益。

4.2 补偿效益分摊结果及分析

根据现有方法的特点按以下4种情况进行各电站补偿效益分摊比例的计算,最后对各种方法的分摊结果进行比较分析。

1)采用单指标法按水库电站特性(包括调节库容、装机容量、保证出力和设计水头)比分摊^[1]。

2)基于单指标法分摊结果,采用综合指标法,即综合分析法(各单指标法专家打分权重为0.25、0.25、0.15、0.35)和离差平方法分别计算各电站分摊比^[2]。

3)基于合作对策的Shapley值原理^[8-9],采用当年实际径流资料,按第4.1节中建立的梯级联合优化调度模型^[18]求解A、B、C电站在不同结盟次序下的期望边际贡献值(式(11)),按式(12)计算各电站分摊比。

4)基于单指标法和Shapley值法的分摊比例计算结果,通过本文建立的补偿效益协调分摊模型和对应的求解方法计算各电站补偿效益分摊比。

不同分摊方法的计算结果见表4。

A电站库容大、装机容量大,补偿调节能力强,作为梯级的龙头电站理应分得最多的补偿效益;相对于C电站,B电站具有更大的调节能力,具有一定

的调节补偿作用,应分得比C电站更多的补偿效益。从表4的分摊结果看,8种方法均满足这一要求,说明这些方法都具有一定的合理性。

表4 各种方法分摊结果

Tab.4 Results of different benefits-sharing methods

分摊方法	分摊比例			
	A	B	C	
单指标法	调节库容比	0.963	0.024	0.013
	装机容量比	0.735	0.143	0.122
	保证出力比	0.750	0.145	0.105
	设计水头比	0.652	0.211	0.137
综合指标法	综合分析法	0.765	0.137	0.098
	离差平方法	0.745	0.147	0.108
Shapley 值法	期望边际贡献比	0.505	0.355	0.140
补偿效益协调分摊模型法		0.658	0.223	0.119

但是,通过分摊方法的原理分析和应用案例结果比较,本文所构建的基于群体一致性原理的补偿效益协调分摊模型法更为合理,主要体现在以下几个方面:

1)单指标法中,虽然各电站的发电特性在补偿效益产生中发挥了一定的作用,但静态的特性参数值并不能充分体现梯级间的动态补偿关系,特性参数值比并非产生补偿效益的贡献大小比。从表4单指标法的分摊结果不难看出,A与B、C电站的分摊比例悬殊过大,这虽然体现了A电站的补偿调节作用大小,但未考虑到B、C电站在补偿效益的产生中对设备维修运转等经营成本的贡献。

2)综合指标法是将各单指标法的分摊结果按照不同的赋权方法进行加权综合,本质上仍属于按水库电站特性参数值比分摊。其中,综合分析法的权重确定依赖于专家意见,难以完全顾及到所有利益相关方的主观偏好,易引起对专家意见的质疑,造成分摊结果在实际实施中受阻;离差平方法虽能根据各单指标分摊结果的差异程度而客观赋权,但仍存在难以反映各利益相关方对各单指标法分摊结果的主观偏好问题,当各电站特性参数差异较大(如同时存在多年调节、径流式电站)时,也极易像单指标法一样出现分摊比例悬殊大、失衡严重问题,如本案例中A电站按该方法的分摊获得了绝大多数的比例,与B、C电站的分摊比例相差较大。

3)Shapely值法分摊的依据是各电站在不同结盟次序下的边际贡献,该贡献是不同联合调节下产

生的补偿效益,所以该方法较好地反映了梯级间的补偿关系和各电站在产生补偿效益中的作用大小,使得各电站的分摊比例差异小。但是,该方法除了引言中提到的在期望边际贡献值计算时存在的问题(易导致梯级中间位置电站的期望边际贡献值偏大,如表4中相比其他方法,Shapely值法得到的B电站分摊比要比C电站大很多)外,在效益分摊比计算时还视梯级中每个参与合作的电站处于同等重要水平,这与事实不符,未考虑各电站的个体特征差异和偏好。

4)由表4可见,提出的补偿效益协调分摊模型法,电站A获得较多比例,B、C电站分摊比例相对均衡,相比单指标法、综合指标法,梯级整体的分摊比例差异小,分摊结果与单指标法、Shapely值法的总体趋势保持一致。该方法最大的优点是:不仅体现了各参与电站的主观偏好和价值判断,而且客观、透明地给出了与各分摊原则及电站个体偏好信息一致性最好的分摊结果;不仅综合了各电站的个体特征差异及其重要性程度,而且使得各电站都能够从合作中得到与自身贡献相应的效益,较好地反映了梯级间的补偿关系及个体在补偿效益产生中的作用大小。这不仅有利于补偿效益分摊的顺利实施,而且可以调动各电站参与合作的积极性,使得梯级联合经济运行持续进行。根据前文实际补偿效益及其分摊比例计算结果,2012年A、B、C梯级实施补偿效益分摊后的结果见表5。

表5 补偿效益分摊结果

Tab.5 Results of benefits-sharing

电站	等效电量/(10 ⁸ kW·h)				
	年核定电量	实际年等效电量	补偿效益分摊	分摊后实得效益	分摊前后变化
A	131.51	130.62	2.11	133.62	3.00
B	27.09	29.34	0.71	27.80	-1.54
C	20.78	22.62	0.38	21.16	-1.46
梯级	179.38	182.58	3.20	182.58	0

由表5可知,2012年A、B、C梯级实施联合经济运行后,B、C电站应分别偿付 1.54×10^8 kW·h(经济额为 0.462×10^8 元)和 1.46×10^8 kW·h(经济额为 0.438×10^8 元)的等效电量给A电站,A电站从B、C处获得总计 3×10^8 kW·h(经济额为 0.9×10^8 元)的等效电量。分摊结果充分肯定了A电站在联合经济运行中的价值,保证了B、C电站的收益,满足式(7)、(8)的分摊要求。

5 结论

解决调节效益补偿问题是具有多个投资主体的流域梯级开展联合经济运行的关键。为了准确核定梯级发电补偿效益,提出了基于实际联合运行结果和各电站“核定电量”的补偿效益算法,该方法统筹市场条件下各电站的分时电价差异和电力系统对增发量的吸收限制,从补偿年份的实际运行资料出发率定相关参数来计算各电站的“基准”效益,使得补偿效益计算值更符合实际。为了使补偿效益的分摊结果客观合理,易被各发电主体接受,研究构建了基于群体一致性原理的协调分摊模型,并采用改进单亲遗传算法对该模型所涉及到的相关目标进行求解。计算实例显示,新模型的计算结果不仅与其他方法的分摊结果保持一致,而且兼顾了不同电站对不同分摊原则及其权重的主观偏好,更好地反映了各电站主体在梯级发电补偿效益产生过程中的作用大小。

需要说明的是,虽然本文方法能够更准确地反映真实情况,但是有关发电补偿效益分摊的计算过程略显复杂,并且复杂性还会随着电站数量的增多进一步提升。如何在不失精确合理性的前提下降低该模型的计算复杂度,以进一步提高求解效率,这将是下一步研究工作要开展的内容。

参考文献:

- [1] Xue Xiaojie, Huang Qiang, Tian Fengwei, et al. Research on method of sharing compensation benefits of cascade hydropower stations[J]. China Rural Water and Hydropower, 2001(4): 45-47. [薛小杰,黄强,田峰巍,等.梯级水电站补偿效益分摊方法研究[J].中国农村水利水电, 2001(4): 45-47.]
- [2] Zhao Maihuan, Xu Chenguang, Huang Qiang, et al. Application of differential square method for sharing compensation benefits between cascade hydropower stations and for sharing costs between multipurpose water projects[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2004, 23(6): 1-4. [赵麦换,徐晨光,黄强,等.离差平方方法在梯级水库补偿效益和综合水利工程费用分摊中的应用[J].水力发电学报, 2004, 23(6): 1-4.]
- [3] Zhou Yun, Ai Mingjian, Li Youhua. Study on the compensation methods of the reservoir regulation benefits among cascade hydropower stations[J]. Water Power, 2000(3): 7-10. [周云,艾明建,李幼华.梯级水电站间水库调节效益偿付方法研究[J].水力发电, 2000(3): 7-10.]
- [4] Liu Han, Huang Qiang, Xia Zhong, et al. Formation and solution of compensation benefits simulation model of cascade reservoirs in the main stream of Yellow river[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2005, 24(5): 11-

16. [刘涵,黄强,夏忠,等. 黄河干流梯级水库补偿效益仿真模型的建立及求解[J]. 水力发电学报,2005,24(5):11-16.]
- [5] Zhang Zezhong. Study on compensation mechanism theory and calculation method of the reservoirs compensation benefits[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2009. [张泽中. 水库补偿机理和补偿效益计算方法研究[D]. 西安:西安理工大学,2009.]
- [6] Bai Tao, Huang Qiang, Chen Guangsheng, et al. Reservoirs optimal operation based analysis of cascade compensation benefits in main stream of the Yellow river[J]. Journal of Northwest A&F University: Nature Science Edition, 2013, 41(5):189-195. [白涛,黄强,陈广圣,等. 基于水库群优化调度的黄河干流梯级补偿效益分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(5):189-195.]
- [7] Li Jinpeng. Research of benefits compensation mechanism among basin cascade hydropower plants[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. [李金鹏. 流域梯级水电站效益补偿机制研究[D]. 武汉:华中科技大学,2009.]
- [8] Cao Yunhui, Wang Liping, Wang Chunchao, et al. Sharing compensation benefits of cascade hydropower stations based on entropy weight and Shapley value method[J]. Water Resources and Power, 2013, 31(2):91-94. [曹云慧,王丽萍,王春超,等. 基于熵权 Shapley 值法的梯级水电站补偿效益分摊[J]. 水电能源科学,2013,31(2):91-94.]
- [9] Yang Chunhua, Du Kanghua. An approach of benefit distribution for joint operation of cascade reservoirs based on Shapley-Value method[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2011, 28(12):53-57. [杨春花,杜康华. 基于 Shapley-Value 的梯级水库联合调度效益分配方法探讨[J]. 长江科学院院报,2011,28(12):53-57.]
- [10] Xu Tingbing, Ma Guangwen, Li Zehong, et al. Evaluation of water-saving and power generation increase of cascade hydropower stations based on transportation situation back-calibration method of output coefficient[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(5):112-114. [徐廷兵,马光文,李泽宏,等. 基于 K 值分时段反向率定法的梯级水电站节水增发电考核[J]. 水电能源科学,2012,30(5):112-114.]
- [11] Wang Jinlong, Ma Guangwen, Huang Weibin, et al. Evaluation of water-saving and power generation increase in cascade hydropower stations based on automatic identification mechanism for assessment water level[J]. East China Electric Power, 2012, 40(8):1404-1408. [王金龙,马光文,黄炜斌,等. 基于考核水位自动判别机制的梯级水电站群节水增发电考核研究[J]. 华东电力,2012,40(8):1404-1408.]
- [12] Liu Zhao, Huang Qiang, Yan Ailing, et al. Research on the assessment system for water economization and power generating improvement of Gongboxia power station[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2006, 22(4):399-402. [刘招,黄强,燕爱玲,等. 公伯峡水电站节水增发考核方法研究[J]. 西安理工大学学报,2006,22(4):399-402.]
- [13] Wang Ganyi, Wu Xianglin. Research on compensation of power generation benefit in cascade hydropower stations[J]. Electric Power Construction, 2011, 32(6):5-8. [王干一,吴相林. 梯级电站发电效益补偿方式探讨[J]. 电力建设,2011,32(6):5-8.]
- [14] Liu Zhili, Ma Guangwen, Yao Ruojun, et al. Study on year generation schedule for hydropower enterprises based on group decision making method[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2009, 41(5):54-58. [刘治理,马光文,姚若军,等. 基于群体偏好的水电企业年发电计划的制定[J]. 四川大学学报:工程科学版,2009,41(5):54-58.]
- [15] Han Erdong, Guo Peng, Zhao Jing. Method for uncertain linguistic group decision making based on projection and dominance degree[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2015, 47(1):143-149. [韩二东,郭鹏,赵静. 基于投影及优势度的不确定语言群决策方法[J]. 四川大学学报:工程科学版,2015,47(1):143-149.]
- [16] Wang Jinlong, Huang Weibin, Ma Guangwen. Multi-objective optimization of cascade hydropower stations based on improved partheno-genetic algorithm[J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2014, 46(Supp 2):1-6. [王金龙,黄炜斌,马光文. 基于改进单亲遗传算法的梯级水电站群多目标优化[J]. 四川大学学报:工程科学版,2014,46(增刊2):1-6.]
- [17] Wang Bin, Li Yuanxiang, Wang Zhi. A partheno genetic algorithm for traveling salesman problem[J]. Computer Science, 2003, 30(4):162-164. [王斌,李元香,王治. 一种求解函数优化问题的单亲遗传算法[J]. 计算机科学,2003,30(4):162-164.]
- [18] Zhou Jia, Ma Guangwen, Zhang Zhigang. Study on the mid-long term optimal dispatching of cascaded hydropower stations on Yalong river based on POA modified adaptive algorithm[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2010, 29(3):18-22. [周佳,马光文,张志刚. 基于改进 POA 算法的雅砻江梯级水电站群中长期优化调度研究[J]. 水力发电学报,2010,29(3):18-22.]
- [19] Ran Qinpeng, Ma Guangwen, Huang Weibin, et al. Calculation method of water-saving and additional power generation capacity of cascade hydropower station in the lower reaches of Daduhe river[J]. Water Resources and Power, 2014, 32(6):53-56. [冉钦朋,马光文,黄炜斌,等. 大渡河下游水电站群节水增发电能力计算方法[J]. 水电能源科学,2014,32(6):53-56.]