

# Study on Long-Term Scheduling Model of Multi-Objective Hydrothermal System

Liqi Gao<sup>1</sup>, Benxi Liu<sup>1</sup>, Bin Luo<sup>1</sup>, Chuntian Cheng<sup>1</sup>, Junwen Yang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Institute of Hydropower System & Hydro-informatics, Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

<sup>2</sup>Yunnan Electric Power Dispatching and Communication Bureau, Kunming Yunnan

Email: 769857179@qq.com

Received: May 14<sup>th</sup>, 2016; accepted: May 31<sup>st</sup>, 2016; published: Jun. 3<sup>rd</sup>, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

Focus on the problem of long-term generation scheduling of hydrothermal system, this paper combines OPF and long-term optimal scheduling hydrothermal system that proposes the multi-objective model of generation maximization of hydropower, spillage minimization of hydropower, consumption minimization of coal-fired thermal power and line loss minimization. The model takes into account the hydraulic constraints, water balance constraints, security constraints in the power grid, power balance constraints and power supply. The multi-objective is transformed into a single objective by using the linear weighted sum method. On the basis of the typical daily load curve, hydrothermal power output distribution and the power flow and network loss are calculated with hydropower successive cutting load and thermal power equal incremental rate. Finally, the genetic algorithm is used to solve this problem. IEEE-30 bus system is used to verify the effectiveness of the proposed method. The numerical results show that the generation scheduling obtained from the proposed method can reduce the total loss of the power grid; it's a feasible long-term optimal dispatching method.

## Keywords

Hydrothermal System, Scheduling of Cascade Hydropower Stations, Optimal Power Flow, Long-Term Scheduling

---

# 多目标水火协调长期优化调度模型研究

高力奇<sup>1</sup>, 刘本希<sup>1</sup>, 罗彬<sup>1</sup>, 程春田<sup>1</sup>, 杨浚文<sup>2</sup>

作者简介: 高力奇(1991-), 男, 硕士研究生, 主要从事梯级水电站群优化调度研究。

<sup>1</sup>大连理工大学水电与水信息研究所, 辽宁 大连

<sup>2</sup>云南电力调度控制中心, 云南 昆明

Email: 769857179@qq.com

收稿日期: 2016年5月14日; 录用日期: 2016年5月31日; 发布日期: 2016年6月3日

## 摘要

针对水火电力系统长期优化调度问题, 将电网最优潮流和水电站长期优化调度相结合, 提出了考虑水电发电量最大、水电弃水量最少、火电煤耗最低以及全网网损最小的多目标水火电联合优化调度模型。该模型考虑了水电站水位约束、水电站流量约束、水量平衡约束、水火电源出力约束、潮流计算功率平衡约束以及电网安全约束, 采用线性加权方法将多目标转化为单目标。以每月典型日负荷曲线为基础, 将水电逐次切负荷与火电等微增率分配机组出力相结合, 计算水火电出力分配、电网潮流及网损, 最后采用遗传算法进行求解。通过IEEE-30节点系统模拟调度表明, 本文所提方法能够有效减少水电弃水并显著降低系统总损耗, 提高了电力系统的经济性, 是一种可行的水火电长期联合优化调度方法。

## 关键词

水火协调, 梯级水电站优化调度, 最优潮流, 长期调度

## 1. 引言

我国水电资源主要集中在西南地区, 随着近年来澜沧江、金沙江等特大流域水电站群的竣工投产, 水电在整个西南地区电力系统的比重迅速攀升, 给水火电优化调度带来了新的挑战。水火电长期优化调度能够为电网中、短期调度提供必要的参考, 并在较长时间尺度上协调电网发电资源, 对于减少富水电地区水电弃水、降低电网输电成本、提高电网整体发电效益具有十分重要的意义。

水火电联合优化调度一直是电力调度领域研究的热点问题, 经过几十年的研究, 已经在我国得到了广泛的应用。单从梯级水电站优化调度的角度出发, 以发电量最大、水库蓄能最大、弃水最小、保证出力最大等目标, 建立了大量的单目标优化模型, 提高了水电站调度效率[1]-[3]; 从电网水火电协调优化调度的角度出发, 国内外学者围绕着火电出力最小、火电煤耗最小、发电成本最低、水耗最低等单目标优化展开了大量研究, 提高了水火电力系统的经济性[4]-[7]。在水火联合优化调度多目标模型研究中, 文献[8]提出了提高水电上网电量且保证火电输出功率的多目标、多约束的动态短期调度模型, 文献[9]提出了水电水耗价格系数、火电煤耗价格系数和环保价格系数的概念, 并将多目标问题转化为单目标问题, 文献[10]从购电成本和煤耗的角度, 建立了基于内点法的水火协调模型。然而上述研究均未涉及到, 使用优化方法解决多目标水电发电量、水电弃水、电网网损、火电煤耗的问题。

本文将电网最优潮流和水电站群优化调度相结合, 考虑电网调度的经济性和节能性, 采用水电发电量最大、水电弃水最小、火电煤耗最小以及全网网损最低为目标, 建立了水火电长期联合优化调度多目标模型, 引入水力约束、水火电出力约束及潮流节点电压上下限约束等, 并将每月典型日出力分配嵌入长期调度, 以此进行潮流计算、网损统计及电网安全校核, 最后应用遗传算法对模型进行求解。以 IEEE-30 节点为实例的研究表明: 本文提出的调度模型能够在发电量、弃水、网损和火电煤耗等目标中得到合理的方案, 降低系统总损耗, 保证调度方案经济节能的目标。

## 2. 数学模型

### 2.1. 目标函数

对于水火电力系统长期优化调度，不仅需要考虑电网安全，而且需要尽量减少水电弃水，并降低煤耗和网损，以提高电网发输电的可行性和经济性。因此，建立水电发电量最大  $E_1$ 、水电弃水最小  $E_2$ 、火电煤耗最少  $E_3$  和网损最低  $E_4$  的多目标调度模型。具体是：

$$\begin{cases} E_1 = \max \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T P_{m,t} \times \Delta t \\ E_2 = \min \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T Qd_{m,t} \times 3600 \times \Delta t \\ E_3 = \min \sum_{n=1}^N \sum_{t=1}^T F_{n,t} \times \Delta t \\ E_4 = \min \sum_{t=1}^T P_{loss,t} \times \Delta t \end{cases} \quad (1)$$

式中： $m$ 、 $M$  分别为水电站编号和水电站总数， $n$ 、 $N$  分别为火电站编号和火电站总数， $t$ 、 $T$  分别为长期调度时段编号和时段总数，本文以月作为长期调度时段， $T=12$ ， $\Delta t$  是第  $t$  个调度时段总小时数； $P_{m,t}$  (kW)、 $Qd_{m,t}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 分别为水电站  $m$  在  $t$  时段的平均出力和弃水流量； $F_{n,t}$  (t/h) 为火电站  $n$  在  $t$  时段的平均煤耗； $P_{loss,t}$  (kW) 为  $t$  时段的平均网损， $P_{loss,t} = \sum_{h=1}^H P_{loss,t,h} / H$ ， $P_{loss,t,h}$  (kW) 为根据典型日负荷进行水、火电负荷分配后通过潮流计算得到的全网第  $t$  个长期调度时段在第  $h$  个典型日时段的网损。

### 2.2. 约束条件

#### 2.2.1. 电网约束

1) 功率平衡约束

$$P_{Gi} - P_{Li} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) = 0 \quad (2)$$

$$Q_{Gi} - Q_{Li} - V_i \sum_{j=1}^N V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) = 0 \quad (3)$$

式中： $P_{Gi}$ 、 $Q_{Gi}$  为典型日情况下各时段潮流计算中节点  $i$  的出力有功功率、无功功率， $P_{Li}$ 、 $Q_{Li}$  是节点  $i$  的负荷有功功率、无功功率， $N$  是节点总数， $V_i$ 、 $V_j$ 、 $\theta_{ij}$  分别是节点  $i$ 、 $j$  的电压幅值和相角差， $G_{ij}$ 、 $B_{ij}$  是节点导纳矩阵第  $i$  行、第  $j$  列的实部和虚部。

2) 节点电压上下限约束

$$\underline{V}_i \leq V_i \leq \bar{V}_i \quad (4)$$

式中： $\bar{V}_i$ 、 $\underline{V}_i$  是节点  $i$  电压  $V_i$  的上下限。

#### 2.2.2. 电源约束

1) 水电站水量平衡方程

$$K_{m,t+1} = K_{m,t} + 3600(Q_{m,t} - q_{m,t} - Qd_{m,t}) \Delta t \quad (5)$$

式中： $K_{m,t}$  ( $\text{m}^3$ ) 和  $K_{m,t+1}$  ( $\text{m}^3$ ) 为水电站  $m$  在  $t$  时段末和  $t+1$  时段末的蓄水量， $Q_{m,t}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ )、 $q_{m,t}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 和  $Qd_{m,t}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 分别是水电站  $m$  在  $t$  时段的入库流量、发电流量和弃水流量。

2) 水电站发电流量约束

$$\underline{q}_{m,t} \leq q_{m,t} \leq \bar{q}_{m,t} \quad (6)$$

式中： $\bar{q}_{m,t}$ 、 $\underline{q}_{m,t}$  是水电站  $m$  第  $t$  个长期调度时段发电流量  $q_{m,t}$  的上下限。

3) 水电站出库流量约束

$$\underline{R}_{m,t} \leq R_{m,t} \leq \bar{R}_{m,t} \quad (7)$$

式中： $\bar{R}_{m,t}$ 、 $\underline{R}_{m,t}$  是水电站  $m$  第  $t$  个长期调度时段出库流量  $R_{m,t}$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 的上下限， $R_{m,t} = Qd_{m,t} + q_{m,t}$ 。

4) 水电站水位约束

$$\underline{Z}_{m,t} \leq Z_{m,t} \leq \bar{Z}_{m,t} \quad (8)$$

式中： $\bar{Z}_{m,t}$ 、 $\underline{Z}_{m,t}$  是水电站  $m$  第  $t$  个长期调度时段末水位  $Z_{m,t}$  的上下限。

5) 水电站出力约束

$$\underline{P}_{m,t} \leq P_{m,t} \leq \bar{P}_{m,t} \quad (9)$$

式中： $\bar{P}_{m,t}$ 、 $\underline{P}_{m,t}$  是水电站  $m$  第  $t$  个长期调度时段平均出力  $P_{m,t}$  (kW) 的上下限。

6) 水电站已知起始水位和调度末水位

$$Z_{m,0} = Z_{m,beg}; \quad Z_{m,T} = Z_{m,end} \quad (10)$$

式中： $Z_{m,0}$ 、 $Z_{m,beg}$ 、 $Z_{m,T}$ 、 $Z_{m,end}$  分别是水电站  $m$  调度期的初水位、末水位和给定的初始水位、期望末水位。

7) 火电站出力约束

$$\underline{P}_{n,t} \leq P_{n,t} \leq \bar{P}_{n,t} \quad (11)$$

式中： $\bar{P}_{n,t}$ 、 $\underline{P}_{n,t}$  是火电站  $n$  在  $t$  时段平均出力  $P_{n,t}$  (kW) 的上下限。

### 3. 求解方法

#### 3.1. 典型日水火电出力分配

由于水火电长期优化调度难以精确考虑短期调度的影响[11], 本文选用每个长期调度时段中接近月平均负荷的某一天日负荷过程作为该长期调度时段的典型日负荷。为了让火电出力平稳, 本文以水电站长期调度时段的平均出力作为典型日的水电站给定的平均出力, 采用逐次切负荷方法进行水电负荷分配[12], 让水电尽量承担电网负荷峰值, 剩余的负荷由火电承担, 火电总出力按等微增率原则分配。水电逐次切负荷的方法是将各水电站按照负荷率由小到大排序, 然后按照此顺序进行切负荷, 单个水电站出力分配的计算过程是: 1) 轮到某电站参与平衡时, 计算系统剩余负荷过程和剩余负荷最大值, 该电站的工作位置是剩余负荷最大值减去该电站的最高出力限制; 2) 如果该电站日电量大于给定工作位置的电量, 则抬高工作位置, 反之则降低工作位置, 工作位置以上的负荷由该电站承担; 3) 不断重复第 2) 步, 直至电站分配到的平均出力与给定的平均出力相等或电站的工作位置达到最低。

#### 3.2. 火电机组最优分配处理

##### 3.2.1. 火电机组煤耗特性

火电机组出力与煤耗呈现二次函数关系, 单个火电机组煤耗量是:

$$F_k = a_k P_k^2 + b_k P_k + c_k \quad (12)$$

式中： $F_k$  是火电机组  $k$  的煤耗, 单位是 t/h,  $P_k$  是火电机组  $k$  的出力(MW),  $a_k$ 、 $b_k$ 、 $c_k$  是火电机组  $k$  的煤耗

特性系数，煤耗特性系数由机组实验数据拟合所得。

### 3.2.2. 等微增率机组出力分配

在给定火电机组总出力的情况下，为了火电机组总煤耗最小，通常采用基于数学极值理论的等微增率法处理火电机组出力最优分配问题[13]。设有  $K$  台火电机组，由式(12)可知机组的二次函数煤耗特性，火电机组总煤耗  $F$  最小目标函数是：

$$\min F = \min \sum_{k=1}^K F_k = \min \sum_{k=1}^K a_k P_k^2 + b_k P_k + c_k \quad (13)$$

火电机组的总出力给定，对机组的煤耗特性函数求偏导，按照等微增率准则，微增率  $\lambda$  相等，可得线性方程组：

$$\begin{cases} \frac{\partial F}{\partial P_1} = \frac{\partial F}{\partial P_2} = \dots = \frac{\partial F}{\partial P_k} = \dots = \frac{\partial F}{\partial P_K} = \lambda \\ \frac{\partial F}{\partial P_k} = 2a_k P_k + b_k = \lambda \\ \sum_{k=1}^K P_k = P \end{cases} \quad (14)$$

求解公式(14)，可得机组  $k$  的出力  $P_k$  是：

$$P_k = \frac{1}{2a_k} \times \left( 2P + \sum_{k=1}^K \frac{b_k}{a_k} \right) / \left( \sum_{k=1}^K \frac{1}{a_k} - \frac{b_k}{2a_k} \right) \quad (15)$$

### 3.3. 多目标函数预处理

对于多目标函数问题，有效的求解方法之一是将多目标问题单目标化。本文引入线性加权和方法，权重是各个目标重要程度的体现，权重越高说明目标越重要，权重的选择将直接影响到优化结果。引入权重因子后，目标函数变为  $E^*$ ：

$$\begin{cases} E^* = \max \sum_{i=1}^e (\omega_i \times E_i^*) \\ \sum_{i=1}^e \omega_i = 1 \end{cases} \quad (16)$$

其中， $E_i^*$  是第  $i$  个归一化子目标函数， $e$  是子目标总数，本文  $e=4$ ， $\omega_i$  是权重系数， $\omega_i > 0$ 。

由于各个子目标量纲不同，无法直接计算，将它们采用归一化处理，子目标弃水最小、煤耗最小和网损最小归一化的目标函数是：

$$E_i^* = \max \left\{ \frac{E_i^{\max} - E_i}{E_i^{\max} - E_i^{\min}} \right\}, i = 2, 3, 4 \quad (17)$$

水电发电量最大归一化的目标函数是：

$$E_i^* = \max \left\{ \frac{E_i - E_i^{\min}}{E_i^{\max} - E_i^{\min}} \right\}, i = 1 \quad (18)$$

其中， $E_i^{\max}$  和  $E_i^{\min}$  分别是子目标函数  $E_i$  的极大值和极小值。

### 3.4. 模型求解

本文的水火电长期联合优化调度多目标模型，涉及到水电站群调度、水火协调以及电网潮流计算，求解相

当复杂。遗传算法有寻优能力强、收敛速度快的优点。因此，本文将梯级水电站的水位组合作为染色体，采用十进制编码遗传算法进行求解。

具体计算步骤如下：

- 1) 初始化种群，对参与计算的各水电站的水位运行序列进行编码，设种群数为 100，随机初始化种群，并设置当前进化代数  $g = 0$ ；
- 2) 设置长期调度时段  $t = 0$ ，总时段长度为  $T$ ；
- 3) 根据典型日负荷分配方法，计算典型日水电站的出力分配，根据电力平衡计算火电总出力，采用等微增率法计算火电出力分配；
- 4) 采用牛顿拉夫逊法进行潮流计算，并计算出典型日各时段的全网网损，设  $t = t + 1$ ，若  $t < T$ ，返回到第 3) 步，否则到第 5) 步；
- 5) 计算个体适应度，对违反约束条件的个体给予惩罚。如果满足终止条件，则计算结束，保存最优个体作为求解结果，否则到第 6) 步；
- 6) 选择运算是轮盘赌选择，个体的选择概率与其适应度大小成正比；
- 7) 采用算术交叉的方法进行交叉运算；
- 8) 变异运算，生成下一代种群。 $g = g + 1$ ，返回第 2) 步。

#### 4. 算例

如图 1 所示，本文在 IEEE-30 节点系统的基础上，系统基准容量取 100 MVA。节点 1 是平衡节点，选用可调节的火电站；节点 2、5、7、11 是梯级水电站 A、B、C、D，节点 1、13 处是火电站。电站 A 是多年调节电站，电站 C 是不完全年调节电站，B 和 D 是季调节电站。A 水库总库容 145.57 亿  $m^3$ ，正常蓄水位 1240 m，死水位 1166 m，B 水库总库容 9.2 亿  $m^3$ ，正常蓄水位 994 m，死水位 988 m，C 水库总库容 9.42 亿  $m^3$ ，正常蓄水位 899 m，死水位 882 m，D 水库总库容 11.4 亿  $m^3$ ，正常蓄水位 602 m，死水位 591 m，入库流量数据采用频率为 25% 的丰水年的径流数据。本文长期调度时段是 12 个时段，时段长度是一个月，典型日负荷选取 24 个时段，时段长度为一小时。遗传算法种群数 100 个，交叉概率是 0.8，变异概率是 0.02，算法用 Java 实现。

计算结果如表 1 所示，方案一是水电常规调度结果，从表中数据可知，该方案水电发电量较低，系统煤耗和网损较大，水电弃水较多。方案二是单目标水电发电量最大模型的计算结果，在系统负荷给定的情况下，是火电发电量最小的方案，但是存在大量弃水，与梯级水电站实际调度不符。方案三是本文调度方案，梯级水电站年发电量 532.01 亿 kWh，火电年发电量 514.14 亿 kWh，弃水是 83.56 亿  $m^3$ ，总煤耗 1524.45 万 t，总网损 21.05 亿 kWh，由于采用频率为 25% 的径流数据，来水较多，梯级水电站会有一定的合理弃水。从表中可知，相比于方案一，本文方案的水电发电量大幅提高，弃水、煤耗、网损等指标均大幅减小，相比于方案二，本文方案的水电发电量降低 1.2%，但是弃水减小了 18.79%，因此本文所提方案更具可行性；另外，本文所提方案得到的系统网损也比另外两种方案的网损要少，有效减少了清洁能源的浪费，达到了电力系统经济性的目标。

图 2 和图 3 是本文调度模型与水电发电量最大模型的梯级水电、火电的出力对比，相对于水电发电量最大模型，本文模型得到的水电在枯期稍稍加大出力，有助于枯水期电网调峰，汛期电量变化较小，弃水量大幅减小。图 4 是本文方案的水火电出力分配，水电在枯期总出力较少，完成抬高水位蓄能，在汛期水电的出力增大；火电出力稳定，在枯期承担主要出力，在汛期火电上网电量减小，充分实现了两种电源的互补，并有利于实现电网节能减排，更加符合实际调度。

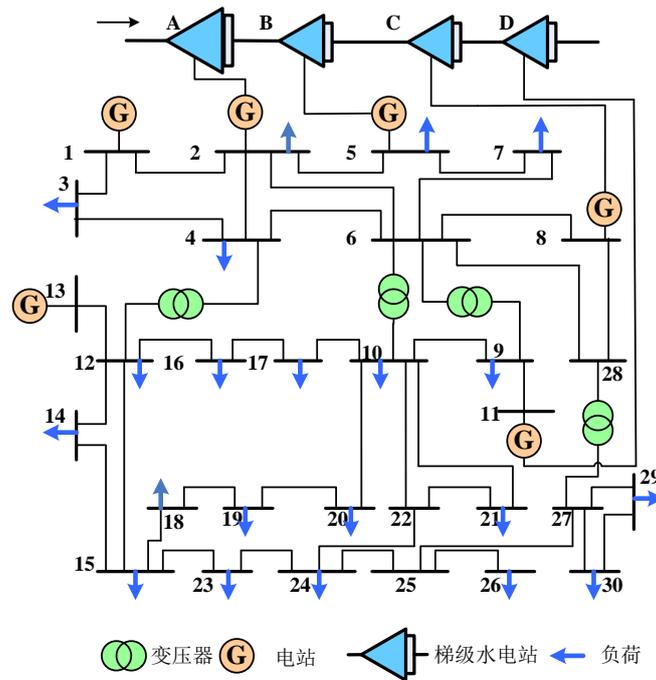
表 2 是本文调度方案梯级水电站的流量表，本文的入库流量数据采用频率为 25% 的丰水年的径流数据，从结果可以看出，7~9 月，汛期来水量很大，水电发电流量达到最大，总弃水量是 83.56 亿  $m^3$ 。弃水是实际水电调度中十分重要的一个考核指标，从表 1 可知，本文所提模型能够大幅减小弃水，与实际调度更加吻合。

**Table 1. Scheme comparison**  
**表 1. 方案对比**

方案	水电发电量/亿 kWh	火电发电量/亿 kWh	水电弃水/亿 m <sup>3</sup>	总煤耗/万 t	总网损/亿 kWh	总负荷电量/亿 kWh
方案一	501.33	514.14	132.87	1551.18	21.89	993.58
方案二	532.01	483.01	102.90	1521.25	21.44	993.58
方案三	525.61	489.02	83.56	1524.45	21.05	993.58

**Table 2. The flow of cascade hydropower stations in this paper**  
**表 2. 本文调度方案梯级水电站流量表**

月份	水电站 A			水电站 B			水电站 C			水电站 D		
	入库流量 m <sup>3</sup> /s	发电流量 m <sup>3</sup> /s	弃水 m <sup>3</sup> /s	入库流量 m <sup>3</sup> /s	发电流量 m <sup>3</sup> /s	弃水 m <sup>3</sup> /s	入库流量 m <sup>3</sup> /s	发电流量 m <sup>3</sup> /s	弃水 m <sup>3</sup> /s	入库流量 m <sup>3</sup> /s	发电流量 m <sup>3</sup> /s	弃水 m <sup>3</sup> /s
1	431.0	862.6	0.0	867.6	864.0	0.0	888.3	883.5	0.0	1059.7	1047.6	0.0
2	386.0	607.5	0.0	611.5	610.9	0.0	632.7	634.5	0.0	724.2	724.2	0.0
3	497.0	968.4	0.0	973.4	973.9	0.0	1001.9	1001.9	0.0	1125.0	1125.0	0.0
4	771.0	1354.2	0.0	1362.2	1361.7	0.0	1405.2	1408.6	0.0	1599.6	1601.0	0.0
5	1326.0	1731.2	0.0	1742.2	1775.0	0.0	1849.7	1952.6	0.0	2280.4	2279.1	0.0
6	1306.0	1951.4	0.0	1967.4	1980.9	0.0	2054.7	2084.8	0.0	2409.0	2527.1	0.0
7	3166.0	2202.0	123.9	2359.9	2123.0	191.1	2492.8	2085.0	270.8	3430.6	3327.8	8.1
8	3899.0	2202.0	146.7	2393.7	2123.0	272.2	2615.5	2085.0	535.4	4034.0	3327.8	711.3
9	3354.0	1970.9	321.5	2327.4	2123.0	203.3	2515.6	2085.0	425.5	3341.5	3327.8	13.7
10	1484.0	1313.9	0.0	1332.9	1333.4	0.0	1417.3	1417.3	0.0	1785.8	1761.0	0.0
11	915.0	1224.7	0.0	1234.7	1234.7	0.0	1286.4	1286.4	0.0	1516.7	1516.8	0.0
12	565.0	1148.8	0.0	1154.8	1157.9	0.0	1189.8	1194.7	0.0	1378.8	1390.8	0.0



**Figure 1. IEEE-30 bus system diagram**

**图 1. IEEE-30 节点系统图**

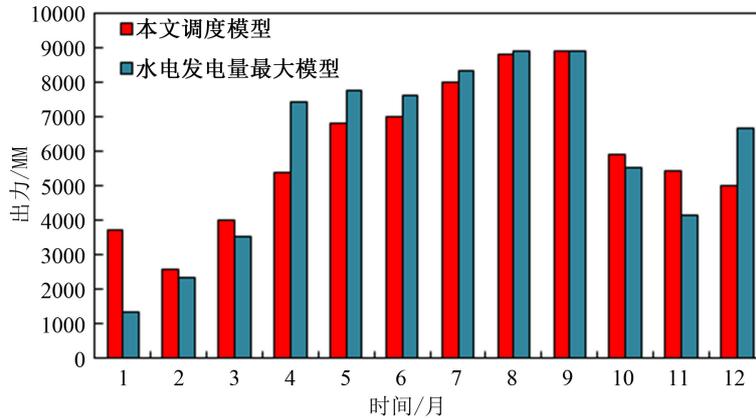


Figure 2. Output comparison of hydro power stations  
图 2. 梯级水电站出力对比

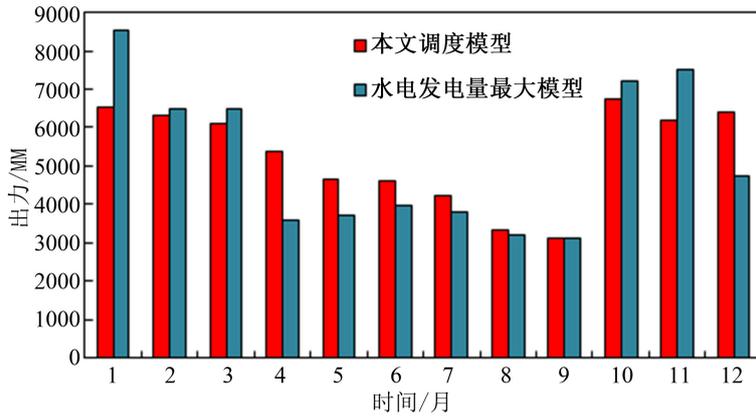


Figure 3. Output comparison of thermal power stations  
图 3. 火电出力对比

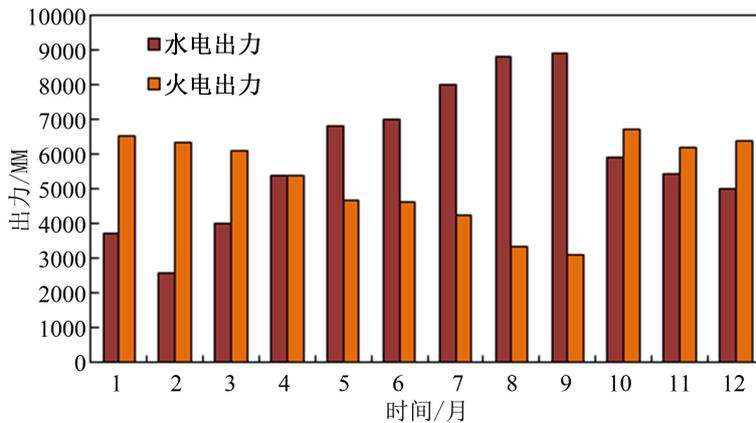


Figure 4. Hydropower and thermal power allocation  
图 4. 本文调度方案水火电出力分配

## 5. 结语

本文将电网最优潮流与水电站经济调度运行相结合，在保证电网潮流收敛的前提下，考虑水电站的弃水最小、网损最小和火电节能等目标，实现了电网水火电长期发电计划节能、稳定。以 IEEE-30 为基础的梯级

水电站群、火电站系统为实例的研究结果表明, 本文所提模型能够显著减小梯级水电站的弃水, 降低电网输电损耗, 提高电力系统经济性, 为电网长期发电计划制作提供有效的方案。

## 基金项目

中央高校基本科研业务费(DUT15RC(3)077)。

## 参考文献 (References)

- [1] 程春田, 郜晓亚, 武新宇, 等. 梯级水电站长期优化调度的细粒度并行离散微分动态规划方法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(10): 26-32.  
CHENG Chuntian, GAO Xiaoya, WU Xinyu, et al. Fine-grained parallel discrete differentiation and dynamic programming algorithm for long-term optimization of cascade hydropower system. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(10): 26-32. (in Chinese)
- [2] 周建中, 李英海, 肖舸, 等. 基于混合粒子群算法的梯级水电站多目标优化调度[J]. 水利学报, 2010, 41(10): 1212-1219.  
ZHOU Jianzhong, LI Yinghai, XIAO Ge, et al. Multi-objective optimal dispatch of cascade hydropower stations based on shuffled particle swarm operation algorithm. Shuili Xuebao, 2010, 41(10): 1212-1219. (in Chinese)
- [3] 刘娜, 李昱, 丁伟, 等. 跨流域水库群联合调度规则研究[J]. 水资源研究, 2015(4): 216-227.  
LIU Na, LI Yu, DING Wei, et al. Reservoir operating in multi-reservoir for water transfer system. Journal of Water Resources Research, 2015(4): 216-227. (in Chinese)
- [4] 陈雪青, 陈刚, 相年德, 等. 大型水火电力系统经济调度的分解协调算法[J]. 清华大学学报, 1987, 27(1): 97-107.  
CHEN Xueqing, CHEN Gang, XIANG Niande, et al. Decomposition and coordination method for optimal scheduling of large hydro-thermal power systems. Journal of Tsinghua University, 1987, 27(1): 97-107. (in Chinese)
- [5] GIL, E., BUSTOS, J. and RUDNICK, H. Short-term hydrothermal generation Scheduling model using a genetic algorithm. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(4): 1256-1264. <http://dx.doi.org/10.1109/TPWRS.2003.819877>
- [6] 袁晓辉, 袁艳斌, 张勇传. 用改进遗传算法求解水火电力系统的有功负荷分配[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(23): 33-36.  
YUAN Xiaohui, YUAN Yanbin, ZHANG Yongchuan. Active power dispatch of hydrothermal power system using refined genetic algorithms. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(23): 33-36. (in Chinese)
- [7] LU, Y. L., ZHOU, J. Z., QIN, H., et al. An adaptive chaotic differential evolution for the short-term hydrothermal generation scheduling problem. Energy Conversion and Management, 2010, 51(7): 1481-1490.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2010.02.006>
- [8] 薛美娟, 杨晓萍, 马啸远. 基于最优潮流理论的风电、梯级水电短期联合优化调度[J]. 水利学报, 2014, 45(3): 368-375.  
XUE Meijuan, YANG Xiaoping, MA Xiaoyuan. The united optimal operation of wind power and cascaded hydropower based on the optimal power flow theory. Shuili Xuebao, 2014, 45(3): 368-375. (in Chinese)
- [9] 马瑞, 贺仁睦, 颜宏文, 等. 考虑水火协调的多目标优化分组分段竞标模型[J]. 电机工程学报, 2004, 24(11): 53-57.  
MA Rui, HE Renmu, YAN Hongwen, et al. A novel multi-objective optimal group and block bidding model for hydrothermal powermarket. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 53-57. (in Chinese)
- [10] 韦化, 梁振成, 阳育德, 等. 节能调度中的水火电力最优协调问题[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(4): 1-4.  
WEI Hua, LIANG Zhencheng, YANG Yude, et al. Optimal coordination between hydraulic and thermal powers in energy-saving dispatch. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(4): 1-4. (in Chinese)
- [11] 武新宇, 程春田, 李刚, 等. 水电站群长期典型日调峰电量最大模型研究[J]. 水利学报, 2012, 43(3): 363-371.  
WU Xinyu, CHENG Chuntian, LI Gang, et al. Research on long term typical day peak load regulation energy maximization model for hydropower systems. Shuili Xuebao, 2012, 43(3): 363-371. (in Chinese)
- [12] 廖胜利, 程春田, 蔡华祥, 等. 改进的火电调峰方式[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 89-93.  
LIAO Shengli, CHENG Chuntian, CAI Huaxiang, et al. Improved algorithm of adjusting discharge peak by thermal power plants. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 89-93. (in Chinese)
- [13] 李刚, 程春田, 曾筠, 等. 改进等微增率算法求解火电负荷分配问题的实用化研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 72-76.  
LI Gang, CHENG Chuntian, ZENG Yun, et al. Practical study and application of thermal load distribution solved by improved equal incremental principle. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 72-76. (in Chinese)