

# A Day-Ahead Generation Dispatching Method for a Hydro-Dominated Power Grid

Xiufeng Li<sup>1</sup>, Yan Jiang<sup>1</sup>, Congtong Zhang<sup>1</sup>, Binbin Zhou<sup>1</sup>, Jianjian Shen<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Yunnan Power Dispatching Center, Kunming Yunnan

<sup>2</sup>Dalian University of Technology, Dalian Liaoning

Email: \*shenjj@dlut.edu.cn

Received: Jul. 5<sup>th</sup>, 2020; accepted: Jul. 20<sup>th</sup>, 2020; published: Jul. 27<sup>th</sup>, 2020

## Abstract

A day-ahead generation dispatching method for large-scale power plant group is proposed to solve short-term operation problems of a hydro-dominated power grid. Based on the forecasting load and the actual load profiles of the power grid, the correlation analysis method is used to select a reference date to determine initial generation schedules of each power plant. The current reservoir levels, inflow, and other constraints and conditions are considered to check the hydraulic connection and recognize reservoir spillage or empty states. A heuristic method is developed to adjust generation energy to assure the feasibility of day-ahead schedules. Some dispatchable hydropower plants are finally selected to meet load balance using an equally load-rate method. Finally, the application example shows that the proposed method can quickly obtain 96-point day-ahead power generation schedules, which can meet the timeliness and practicality requirements of short-term generation scheduling for large-scale power plants in a hydro-dominated power grid.

## Keywords

Hydro-Dominated Power Grid, Power Plants, Short-Term Dispatching, Hydropower Generation

# 水电为主电网日前发电调度方法研究

李秀峰<sup>1</sup>, 蒋燕<sup>1</sup>, 张聪通<sup>1</sup>, 周彬彬<sup>1</sup>, 申建建<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>云南电力调度控制中心发电管理科, 云南 昆明

<sup>2</sup>大连理工大学水利工程学院, 辽宁 大连

Email: \*shenjj@dlut.edu.cn

收稿日期: 2020年7月5日; 录用日期: 2020年7月20日; 发布日期: 2020年7月27日

作者简介: 李秀峰(1983-), 男, 云南大理, 高级工程师, 硕士研究生, 云南电力调度控制中心, 从事电网经济运行调度、水电优化调度、电力市场建设运营等管理生产研究。

\*通讯作者。

文章引用: 李秀峰, 蒋燕, 张聪通, 周彬彬, 申建建. 水电为主电网日前发电调度方法研究[J]. 水资源研究, 2020, 9(4): 403-410. DOI: 10.12677/jwrr.2020.94042

## 摘要

针对水电为主电网短期调度问题,提出一种大规模电站群日前发电调度方法。基于电网预测负荷与实际负荷过程,采用相关分析法优选计划参考日,确定电站初始计划;考虑面临水位和来水等约束条件,进行水力校核以确定水库弃水或放空情况,并启发式调整发电量保证计划可行性;选择少量调节性能较好电站参与平衡计算,采用等负荷率方法优化水电站出力,实现系统电力平衡。通过实际仿真分析,本文方法能快速得到日前96点发电计划,满足以水电为主电网大规模电站群短期计划编制时效性和实用性要求。

## 关键词

以水电为主电网, 电站群, 短期调度, 水力发电

Copyright © 2020 by author(s) and Wuhan University.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

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



## 1. 引言

近年来,我国水电进入大规模集中建设、投产时期,西南地区形成了以云南电网、四川电网为代表的水电为主电网,两个省级电网的水电装机均超过7000万kW,且装机容量和发电量比重达到80%和90%左右,统调水电站数量超过100座,再加之风电、光伏等不可控新能源电站,其调度管理极大不同于以火电为主的电网,发电协调控制面临很大难题与挑战[1] [2] [3]。以云南电网为例,统调100多座水电站分布在澜沧江、金沙江、怒江、红河、伊洛瓦底江、珠江多个流域,囊括了多年调节、年调节、季调节、周调节、日调节、径流式多种调节类型,运行特点互不相同,来水以及面临的电网控制需求也存在很大差异,而且需要与煤电、风电、光伏性能各异电源进行协调控制,使得以往的统一建模方法很难适应如此特大规模电站群调度问题[4] [5],特别是在日前发电调度中,直接优化求解得到的调度结果以及计算效率均很难达到实际运行要求。因此,对具有不同特点和需求的电站进行差异化处理,在特大规模电网发电调度中就变得极为必要与关键,需要结合问题特点设计切实有效的实用化方法与策略[6] [7]。

本文以云南电网为工程背景,提出一种水电为主电网大规模电站群日前发电调度方法。基于电网预测负荷与实际负荷过程,采用相关分析法优选计划参考日,确定电站初始计划;考虑面临水位和来水等约束条件,进行水力校核以确定水库弃水或放空情况,并启发式调整发电量保证计划可行性;选择少量调节性能较好电站参与平衡计算,采用等负荷率方法优化水电站出力,实现系统电力平衡。模拟分析结果表明,本文方法能得到合理和实用的日前发电计划,可以有效满足大规模电站群短期计划快速编制需求。

## 2. 多源电站群总体协调框架

将电网短期调度问题分解为三个关键子问题(一是进行电网负荷分析,确定负荷相似日,为确定电站初始计划提供基础;二是按照参考日出力确定电站初始计划,并对所有水电站进行分析,以适当调整不合理电站出力过程;三是选择少量平衡电站进行局部优化计算,实现电网电力平衡),并针对这三个子问题,分阶段采用相关分析法、定出力计算和均匀策略、以及等负荷和改进切负荷方法分别求解,满足电网的负荷平衡要求[8] [9] [10] [11]。图1给出了省级电网多源电站群总体协调框架。

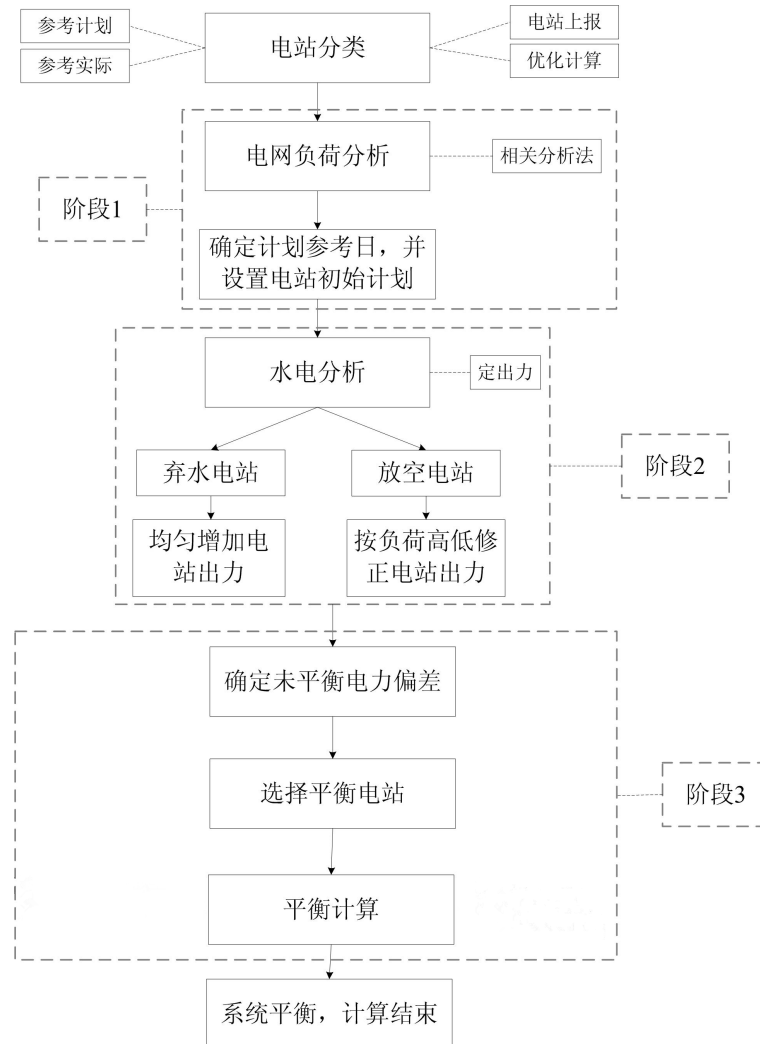


Figure 1. Whole coordination framework for power plants  
图 1. 电站群总体协调框架

### 3. 求解方法

#### 3.1. 负荷分析

负荷分析旨在对比预测负荷与实际负荷过程，找出历史上与计划日负荷条件最相似的一天。本文方法采用相关分析法计算二者的相关系数，并将相关系数最大的日期作为计划参考日，以提取参考日开机及出力计划，作为当前日期的初始计划值。主要求解步骤如下：

步骤 1：采用公式(1)计算预测负荷与实际负荷的相关系数：

$$COE_n = \frac{\sum_{t=1}^T (C_t - \bar{C})(C'_t - \bar{C}')}{\sqrt{\sum_{t=1}^T (C_t - \bar{C})^2} \sqrt{\sum_{t=1}^T (C'_t - \bar{C}')^2}} \quad (1)$$

式中： $C'_t$  为  $t$  时段电网实际负荷； $\bar{C}$ ， $\bar{C}'$  分别为预测负荷与实际负荷的平均值。

步骤 2：对相关系数序列按从大到小排序；

步骤 3: 将第一序位值对应的日期作为计划参考日, 并提取参考日计划出力。

### 3.2. 水电分析

水电分析旨在以参考日出力计划为条件, 对所有水电站进行调节分析, 采用定出力计算方法, 确定初始的水位过程与出库决策, 并对可能出现的弃水和水库放空情形进行分析和自动处理, 其求解过程包括定出力计算和出力修正两个主要部分:

1) 定出力计算。对于任一时段  $t$ , 以电站出力为控制目标, 以最大和最小发电流量为边界条件, 采用二分法进行迭代搜索, 直至计算出力与给定出力满足收敛精度; 在搜索过程中采用式(2)确定计算出力。

$$p_{m,t} = f(Z_{m,t-1}, Q_{m,t}, q_{m,t}, Ql_{m,t}, \Delta t) \quad (2)$$

式中:  $f(\bullet)$  表示电站的出力、水头、流量之间的函数关系;  $Z_{m,t-1}$  为  $t-1$  时段  $m$  号水库的库水位;  $Q_{m,t}$  为  $t$  时段  $m$  号水库的入库流量;  $q_{m,t}$  为  $t$  时段  $m$  号水库的发电流量;  $Ql_{m,t}$  为  $t$  时段  $m$  号水库的弃水流量;  $\Delta t$  为  $t$  时段的小时数。

2) 进行弃水或放空统计, 并修正出力。

对于任一个电站  $m$ , 采用式(3)计算其调度期内平均弃水流量  $\bar{Q}l_{m,t}$ ; 若  $\bar{Q}l_{m,t} > 0$ , 则找出电站第一个弃水时段, 记为  $t_2$ ; 同时将初始时段记为  $t_1 = 0$ ; 采用式(4)在  $t_1 \sim t_2$  时段内均匀增加电站发电流量, 并采用式(2)计算对应出力。

$$\bar{Q}l_{m,t} = \frac{\sum_{t=1}^T Ql_{m,t}}{T} \quad (3)$$

$$q'_{m,t} = \min \left\{ \frac{\bar{Q}l_{m,t}}{(t_2 - t_1)} + q_{m,t}, q_{m,\max} \right\}, \quad t_1 \leq t < t_2 \quad (4)$$

采用式(5)分析电站是否放空; 若是, 则根据电站可发电量, 按照电网负荷从高到低的顺序, 以最大可用容量为限制条件, 逐时段安排电站出力。

$$\begin{cases} \text{if } (Z_{m,T-1} \leq Z_{m,\text{dead}}) & \text{放空} \\ \text{else} & \text{未放空} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $Z_{m,\text{dead}}$  为水库死水位。

### 3.3. 平衡计算

根据电网未平衡负荷大小, 以及水电站调节性能, 选择少量电站进行平衡计算, 实现电网负荷平衡。由于澜沧江中下游和金沙江中游梯级水电装机比重占全网水电站总比重超过 80%, 且调节性能较好, 所以优先选择这上述两流域梯级电站作为平衡电站。

考虑电网未平衡电量大小和平衡电站的可用容量, 按照调度期发电负荷率尽量相等目标(见式(6)), 采用式(7)计算确定各电站发电量。

$$\begin{cases} Rl_{m_1} = Rl_{m_2} = \dots = Rl_{m_c} \\ Rl_{m_c} = \frac{\bar{P}_{m_c}}{P_{m_c,\max}} \end{cases} \quad (6)$$

$$E_{m_c} = \frac{P_{m_c,\max}}{\sum_{c=1}^c P_{m_c,\max}} \times \sum_{t=1}^T D_t \times \Delta t \quad (7)$$

式中： $C$ 为平衡电站个数； $p_{m_c, \max}$ 为电站 $m_c$ 的最大可用容量； $\bar{p}_{m_c}$ 为电站 $m_c$ 的平均出力。根据各电站发电量控制目标，按照从上游至下游顺序，采用下述步骤逐电站计算日96点出力过程，并定出力确定电站的水位和出库流量过程。

步骤1：根据式(8)计算电站 $m_c$ 需要调整的电量值；

$$pd_{m_c} = \sum_{t=1}^T D_t \times \Delta t \times \frac{\sum_{t=1}^T (p_{m_c, \max} - p_{m_c, t})}{\sum_{c=1}^C \sum_{t=1}^T (p_{m_c, \max} - p_{m_c, t})} \quad (8)$$

步骤2：根据式(9)逐时段计算调整后出力值；

$$p'_{m_c, t} = p_{m_c, t} + \frac{D_t \times pd_{m_c}}{\sum_{t=1}^T D_t \times \Delta t} \quad (9)$$

步骤3：检验出力是否在合理范围，若大于上边界值，则取为上边界；若小于下边界值，则取为下边界。

步骤4：进行定出力计算，确定时段水位和出库流量。

步骤5：更新当前电站为下游电站，并转至步骤1。若 $c = C$ ，则计算结束。

#### 4. 实例分析

以云南电网为背景，考虑119座水电站(部分电站为虚拟电站)、11座火电站、60余座风电、光伏电站，采用本文方法模拟编制电网日前发电运行计划。在计划编制过程中，考虑不同类型电源运行特性差异以及不同流域和上下游不同电站间的调节性能、装机容量等方面差异，需要结合各类电站运行特点和面临的电网控制需求，合理确定各电站的调度方式，以保证优化结果的合理性和实用性。以制作某日发电运行计划为例，采用参考计划、参考实际、电站上报、优化计算四种方式对所有电站进行归类，其中风电站、光伏电站具有不可控特点，一般采用电站上报或者参考实际方式；煤电站启停速度和调节性能较差，采用参考计划方式；大多数中小型水电站采用参考计划或参考实际，少量调节性能较好且装机较大的水电站进行平衡优化计算。通过负荷分析和水电分析，可以得到所有电站的初始计划，进而计算得到电网未平衡电力偏差过程，见图2。

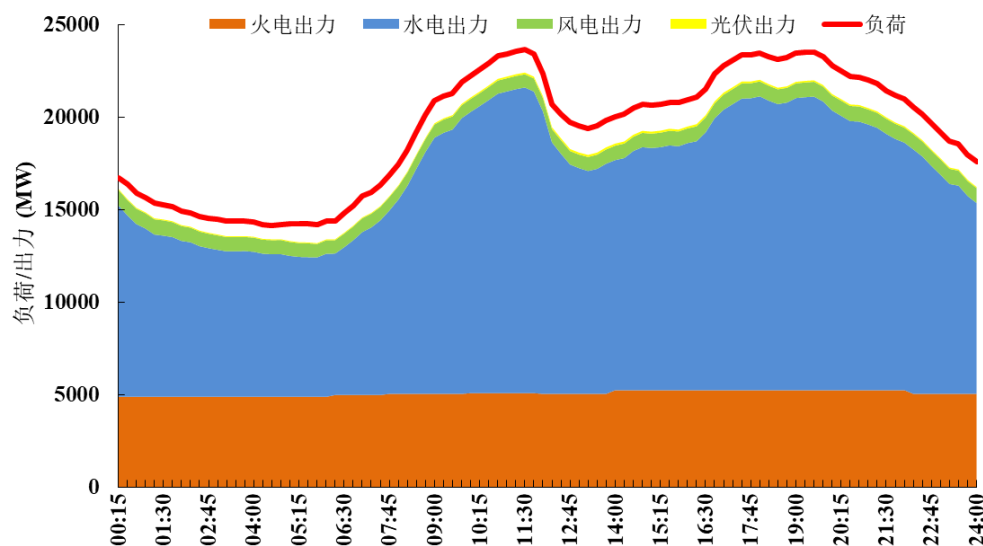


Figure 2. Unbalanced generation deviation profile of power grid

图2. 电网未平衡电力偏差过程

从图 2 可以看出,通过预先确定风电、光电和煤电,以及中小流域梯级水电站的调度方式,可以有效简化大规模电站群的优化计算规模,减缓优化维数灾问题,从实用性和合理性角度出发,这种思路是切实可行的。另一方面,针对未平衡负荷,利用装机容量较大、调节性能较好的少数电站进行优化平衡计算,合理调整这些电站的日出力过程,可以较好地满足系统的平衡调节要求。考虑到澜沧江梯级和金沙江梯级在云南电网水电总装机中占有较大比重,所以本文选择澜沧江下游部分梯级水电站进行优化计算,平衡负荷偏差。图 3、图 4 分别给出了采用水电站平衡后的电网负荷平衡图和主要电站的出力过程图。由图可见,以水电站为平衡优化对象有效实现了系统负荷平衡,其中小湾、漫湾、大朝山等主要水电站运行过程合理,漫湾和大朝山作为系统的整体平衡电站,主要利用 AGC 机组平衡系统负荷的频繁波动,所以图 4 中平衡电站的时序出力在日内的波动较大,这也是合理的。此外,可以看到水电系统的整体出力和澜沧江、金沙江等主要调节和主力水电站均发挥了很好的调峰作用,确实充分利用了水电的优质调节作用,从表 1 平衡结果也可以直观看出,电网日 96 个时段均实现了电力供需平衡。

另一方面,本文方法体现了较好的时效性,其计算效率与以往统一优化建模求解方法(目标为发电量最大)相比,本文方法计算耗时减少超过 50%,主要是由于大量对系统影响较小的中小型水电站利用实用化策略避免了优化计算,节省了大量优化耗时,确实能够极大地提升短期计划编制效率。

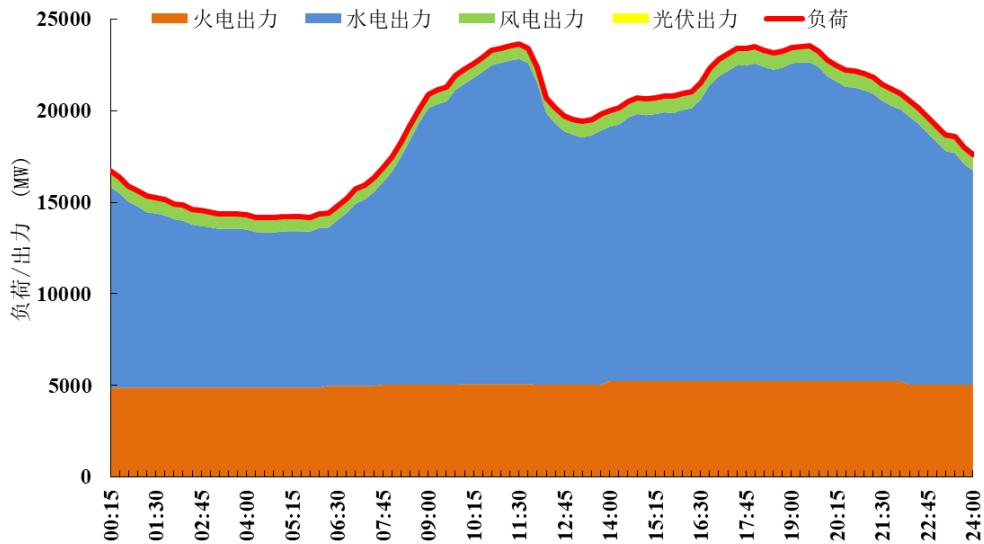


Figure 3. Power balance profile of power grid using hydropower plants

图 3. 采用水电站平衡后的电网负荷平衡图

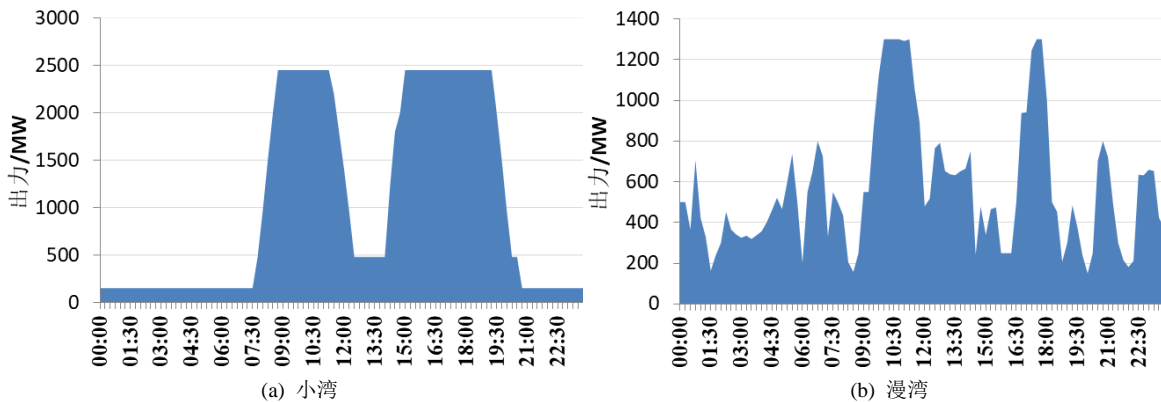


Figure 4. Generation profile of main hydropower plants

图 4. 主要水电站出力过程图

**Table 1.** Power balance results of various power plants  
**表 1.** 各类电站的负荷平衡结果

时间	负荷	水电	火电	风电	光伏	时间	负荷	水电	火电	风电	光伏	时间	负荷	水电	火电	风电	光伏
00:15	16,722	10,955	4880	834	54	08:15	18,239	12,431	5040	716	52	16:15	21,064	14,898	5240	807	119
00:30	16,363	10,602	4880	828	54	08:30	19,175	13,365	5040	716	55	16:30	21,527	15,360	5240	811	116
00:45	15,907	10,144	4880	829	54	08:45	20,113	14,313	5040	701	59	16:45	22,323	16,167	5240	804	111
01:00	15,660	9902	4880	826	53	09:00	20,905	15,089	5040	713	63	17:00	22,794	16,628	5240	818	108
01:15	15,333	9578	4880	824	52	09:15	21,143	15,319	5040	717	68	17:15	23,082	16,926	5240	813	104
01:30	15,270	9514	4880	825	52	09:30	21,288	15,469	5040	710	70	17:30	23,383	17,225	5240	818	100
01:45	15,143	9403	4880	808	52	09:45	21,904	16,090	5040	701	73	17:45	23,385	17,238	5240	812	95
02:00	14,929	9198	4880	800	52	10:00	22,256	16,395	5080	704	77	18:00	23,476	17,337	5240	807	92
02:15	14,840	9118	4880	790	52	10:15	22,574	16,713	5080	701	80	18:15	23,280	17,146	5240	809	85
02:30	14,622	8901	4880	788	53	10:30	22,913	17,043	5080	707	83	18:30	23,128	17,002	5240	802	84
02:45	14,538	8824	4880	784	50	10:45	23,290	17,411	5080	712	87	18:45	23,226	17,106	5240	798	82
03:00	14,466	8756	4880	780	50	11:00	23,412	17,530	5080	711	91	19:00	23,467	17,351	5240	794	83
03:15	14,371	8673	4880	770	48	11:15	23,541	17,656	5080	712	94	19:15	23,516	17,395	5240	798	83
03:30	14,370	8679	4880	763	48	11:30	23,635	17,747	5080	714	95	19:30	23,530	17,406	5240	801	83
03:45	14,377	8688	4880	762	48	11:45	23,417	17,531	5080	710	96	19:45	23,273	17,144	5240	806	83
04:00	14,321	8630	4880	763	48	12:00	22,356	16,495	5040	722	99	20:00	22,766	16,635	5240	809	83
04:15	14,183	8499	4880	756	47	12:15	20,698	14,837	5040	717	104	20:15	22,489	16,345	5240	823	81
04:30	14,160	8473	4880	760	47	12:30	20,134	14,255	5040	733	106	20:30	22,199	16,058	5240	821	80
04:45	14,165	8477	4880	760	47	12:45	19,705	13,829	5040	728	108	20:45	22,170	16,031	5240	819	80
05:00	14,213	8534	4880	752	47	13:00	19,515	13,632	5040	735	109	21:00	22,006	15,875	5240	812	79
05:15	14,227	8552	4880	748	47	13:15	19,404	13,499	5040	754	112	21:15	21,821	15,693	5240	810	79
05:30	14,213	8537	4880	749	47	13:30	19,541	13,622	5040	767	112	21:30	21,441	15,304	5240	820	78
05:45	14,175	8522	4880	726	47	13:45	19,804	13,877	5040	772	115	21:45	21,164	15,031	5240	818	75
06:00	14,373	8717	4880	730	47	14:00	20,027	13,894	5240	780	114	22:00	20,959	14,835	5240	810	74
06:15	14,393	8638	4980	727	48	14:15	20,144	14,005	5240	786	113	22:15	20,562	14,628	5040	822	72
06:30	14,821	9056	4980	738	48	14:30	20,497	14,379	5240	767	111	22:30	20,168	14,249	5040	808	71
06:45	15,203	9433	4980	742	48	14:45	20,702	14,577	5240	773	111	22:45	19,669	13,734	5040	825	70
07:00	15,719	9944	4980	748	48	15:00	20,647	14,521	5240	777	110	23:00	19,193	13,258	5040	826	69
07:15	15,939	10,172	4980	739	47	15:15	20,711	14,577	5240	785	109	23:15	18,694	12,763	5040	822	68
07:30	16,327	10,576	4980	724	47	15:30	20,812	14,676	5240	789	107	23:30	18,568	12,653	5040	808	68
07:45	16,862	11,047	5040	728	47	15:45	20,773	14,630	5240	799	104	23:45	17,979	12,063	5040	809	67
08:00	17,450	11,638	5040	723	49	16:00	20,937	14,802	5240	794	102	24:00	17,593	11,685	5040	802	66

## 5. 结论

我国“西电东送”送端电网的水电规模超过上百座，水电装机即将突破 1 亿 kW，电网发电优化调度问题更

加突出,特别是在短期计划编制中,如何合理利用水电与风电、光电、煤电等多种能源形式电源协调,实现系统全过程电力平衡,满足电网安全经济运行已成为以水电为主省级电网大规模电站群调度突出和紧迫难题。本文提出的日前发电调度方法能够有效结合电网工程实际特点,快速得到实用的短期发电运行计划,可以为以水电为主电网实际生产提供一种有效的技术手段。

## 基金项目

中央高校基本科研业务费专项资金项目(DUT19JC43)。

## 参考文献

- [1] HUANG, H., YAN, Z. Present situation and future prospect of hydropower in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, 13(6-7): 1652-1656. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2008.08.013>
- [2] CHENG, C. T., SHEN, J. J., WU, X. Y., et al. Operation challenges for fast-growing China's hydropower systems and response to energy saving and emission reduction. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2012, 16(5): 2386-2393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.056>
- [3] 程春田, 申建建, 武新宇, 等. 大规模复杂水电优化调度系统的实用化求解策略及方法[J]. *水利学报*, 2012, 43(7): 785-795.  
CHENG Chuntian, SHEN Jianjian, WU Xinyu, et al. Practical solution strategies and methods of large-scale complex hydro-power system operations. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2012, 43(7): 785-795. (in Chinese)
- [4] BARROS, M. T. L., TSAI, F. T. C., YANG, S., et al. Optimization of large-scale hydropower system operations. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2003, 129(3): 178-188. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:3\(178\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:3(178))
- [5] FINARDI, E. C., SCUZZIATO, M. R. Hydro unit commitment and loading problem for day-ahead operation planning problem. *Electrical Power and Energy Systems*, 2013, 44(1): 7-16. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2012.07.023>
- [6] CHENG, C.-T., SHEN, J.-J. and WU, X.-Y. Short-term hydro scheduling with discrepant objectives using multi-steps of progressive optimality algorithm. *Journal of the American Water Resources Association*, 2012, 48(3): 464-479. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2011.00628.x>
- [7] SHAWWASH, Z. K., SIU, T. K. and RUSSELL, D. The B.C. hydro short term hydro scheduling optimization model. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2000, 15(3): 1125-1131. <https://doi.org/10.1109/59.871743>
- [8] 唐俊杰, 牛焕娜, 杨明皓. 基于线性相关分析的周期自回归短期负荷预测[J]. *电力系统保护与控制*, 2010(14): 128-133.  
TANG Junjie, NIU Huanna and YANG Minghao. Periodic autoregressive short-term forecasting method based on the linear correlation analysis. *Power System Protection and Control*, 2010(14): 128-133. (in Chinese)
- [9] 余平, 唐杰阳, 蒲瑜, 等. 流域梯级电站群短期负荷计划分配方法研究[J]. *中国农村水利水电*, 2015(6): 166-169.  
YU Ping, TANG Jieyang, PU Yu, et al. Research on the method of short-term load plan distribution in cascade hydropower stations. *China Rural Water and Hydropower*, 2015(6): 166-169. (in Chinese)
- [10] 涂启玉, 蔡华祥. 云南电力电量平衡分析[J]. *云南电力技术*, 2013, 41(3): 50-53.  
TU Qiyu, CAI Huaxiang. Analysis on power and energy balance in Yunnan. *Yunnan Power Technology*, 2013, 41(3): 50-53. (in Chinese)
- [11] 施建华, 谭素梅. 节能发电调度发电计划编制算法[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(24): 48-51.  
SHI Jianhua, TAN Sumei. Algorithm of energy saving generation dispatch scheduling. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(24): 48-51. (in Chinese)