

米米米米米米米米米米米米米米米米
米 水火电混合系统经济调度理论 米
米 在湖南电网节约一次能源和二次能源中的应用 米
米米米米米米米米米米米米米米米米

湖南省电力中心调度所

一九八一年九月

• 此项研究系国家重点科研项目“湖南电力系统水电及火电《解》运行调度最优化”的内容之一，同时列入湖南省科委重点科研项目，并单独列入电力部的重点科研项目。参加此项研究的有湖南电力中心调度所、电科院计算所、广西电力中心调度所。

(一) 电网经济运行的目的和意义

电能是现代应用的主要能量形式，生产电能除需消耗大量一次能源（水力、油、煤、核子能）外，为了维持电能的生产也需消耗电能（即厂用电，火电约占其总发电量的7%至10%），为了传输电能也需消耗电能（输变电损失及配电损失）。就湖南系统而论，实际供给用户消耗的电能只占电厂总发电量的75%左右，因此电力系统本身又是电能的最大用户。

由于电力部门是一次能源和二次能源（电能）最大的用户，又是二次能源的生产基地，所以电力系统是国民经济各部门节能潜力最大的部门。因此，研究和开展包括火电厂、水电厂和电网传输损失在内的整个动力系统的综合经济运行，以便在保证电网安全的前提下，使之达到充分利用水能资源、节约火电燃料和降低电网损失，达到最大限度地合理使用和节约能源的目的，对于克服当前国家能源紧张和加速四化建设具有重要意义。

由于电能生产的特点是电能即不能贮存，输送电能也几乎不需要时间，因此电能的生产、输送和消耗必须在任何时刻保持平衡。由于这个原因，使得构成电网的各基本环节：各火电厂、各水电厂、各传输线路、各变电设备及各电能用户任何时刻都互相依赖和影响，从而形成电力生产和消费的相互制约和分层控制的高度统一体，同时，由于气候变化，时间变化，设备投退以及人员的理解、判断、决策等管理问题，又构成了一个极为复杂的人机混和系统。系统开展经济运行的任务，就是分析研究构成系统各部分在总体中的作用及相互联系和制约的条件，然后加以去粗取精和去伪存真，以及最后做出各电厂及系统的最优决策方案，以期达到最大限度节省能源。

的目的。

(二) 动力系统经济运行的原理原则及计算程序

我们研究水火电混和动力系统的经济运行，是以系统在规划期内(0至T)总负荷曲线($P_R(t)$)给定和水电站的计划用水量(W_j)给定在各电站的发电量满足总的负荷要求的前提下，使总的火电燃料消耗(F)或系统供电成本为最小，即目标函数为

$$F = \int_0^T \sum_{i=1}^m F_i(t) dt \longrightarrow \text{最小} \quad (1)$$

式中： $F_i(t)$ —— t 时刻1台火电机组燃料消耗量；

m ——火电机组总台数

这类变分问题的实用解法到50年代后才开始研究，考虑到电力系统任何时刻 t 都需满足功率平衡式

$$\sum_{i=1}^m P_i(t) + \sum_{j=1}^n P_j(t) - P_L(t) = P_R(t) \quad (2)$$

式中： $P_j(t)$ —— j 水电机组的出力；

$P_i(t)$ ——1火电机组的出力；

$P_L(t)$ ——电网网损功率；

$P_R(t)$ ——电网总的二次供电量。

考虑等式约束(2)式，目标函数(1)式，对于火电厂可求得协调方程式。

$$\frac{dF_i(t)}{dP_i(t)} = \lambda(t) \left(1 - \frac{\partial P_L(t)}{\partial P_i(t)} \right) \quad (3)$$

$$i = 1, 2, \dots, m$$

式中: $\lambda(t)$ ——系考虑等式约束时的拉格朗日乘子数, 相当于由火电多供给电网一度二次供电量时, 系统增加的燃料消耗量。

对于系统的水电部分, 当考虑水库水位变化时, 导得协调方程式为

$$\gamma_j(t) \frac{dQ_j(t)}{dP_j(t)} = \lambda(t) \left(1 - \frac{\partial P_L(t)}{\partial P_j(t)} \right) \quad (4)$$

$$\gamma_j(t) = \gamma_j(0) e^{\int_0^t \frac{\partial Q_j(t)}{\partial V_j(t)} dt}$$

式中: $Q_j(t)$ ——j 电站使用流量;

$V_j(t)$ ——j 电站水库水位;

e ——自然对数的底;

$\gamma_j(t)$ ——t 时刻 j 电站的水价递增率, 即 j 电站 1 立方米水在数值上相当 t 时刻火电同样发电量时的燃料消耗量, 也就是在发电量等值的条件下水和煤的换算系数。

在短期经济运行中, 如果各水电站库容比较大, 并可以忽略水库水位变化时, 即有:

$$\gamma_j(t) = \gamma_j(0) = \text{常数} \quad (5)$$

因各水电站在 T 时间内都按计划使用水量(w_j)用水, 故各水电站应满足水量平衡式。

$$\int_0^T q_j(t) dt = w_j \quad (6)$$

如果把计划时间分成等时段, 即有

$$\sum_{t=1}^L q_j(t) = w_j \quad (6')$$

在国内外经济运行计算中, 普遍采用二次函数表示各电厂机组的消耗特性, 即对火电有

$$F_i(t) = a_i P_i^2(t) + b_i P_i(t) + c_i \quad (7)$$

$$i = 1, 2, \dots, m;$$

对水电有:

$$q_j(t) = a_j P_j^2(t) + b_j P_j(t) + c_j \quad (8)$$

$$j = 1, 2, \dots, n;$$

式中: $a_i, b_i, c_i, a_j, b_j, c_j$ ——机组特性常数。

为满足协调方程式的解必然是最小解, 则要求(7)和(8)式的二次函数必须是凸性的, 也就是必须满足 $a_i > 0$ 和 $a_j > 0$, 一般实际特性能满足这一要求。

上述条件的协调方程式的求解是相当复杂的, (文3)提出了一种直接解法。(文3)的解法虽好, 却只适合火主水从的系统。为了解决湖南这样一个水电大于火电比重的系统, 我们推广了(文3)的计算式(文4, 文5)。简述如下:

将(7)式代入(3)式整理后得:

$$P_1(t) = \frac{\lambda(t) \left(1 - \frac{\partial P_L(t)}{\partial P_1(t)}\right) - b_1}{2 a_1} \quad (9)$$

当不考虑水库水位变化时将(9)式代入(4)式得

$$P_j(t) = \frac{\frac{\lambda(t)}{\gamma_j} \left(1 - \frac{\partial P_L(t)}{\partial P_j(t)}\right) - b_j}{2 a_j} \quad (10)$$

将(9)式和(10)式代入(2)式, 得

$$\lambda(t) = \frac{2(P_R(t) + P_L(t)) + \sum_{i=1}^m \frac{b_i}{a_i} + \sum_{j=1}^n \frac{b_j}{a_j}}{\sum_{i=1}^m \left(\frac{1 - \frac{\partial P_L(t)}{\partial P_i(t)}}{a_i} \right) + \sum_{j=1}^n \left(\frac{1 - \frac{\partial P_L(t)}{\partial P_j(t)}}{a_j \gamma_j} \right)} \quad (11)$$

(11) 式即为直接解法满足系统功率平衡的 $\lambda(t)$ 的计算式。

同时对于水电站, 将(10)式代入(8)式(将水电站当作一台等效机时)有:

$$Q_j(t) = \frac{\left\{ \lambda(t) \left(1 - \frac{\partial P_L(t)}{\partial P_j(t)}\right) \right\}^2}{4 a_j \gamma_j^2} - \frac{b_j^2}{4 a_j} + c_j \quad (12)$$

将(12)式代入(6)式, 可求得

$$\gamma_j = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^T \left\{ \lambda(t) \left(1 - \frac{\partial P_L(t)}{\partial P_j(t)}\right) \right\}^2}{4 a_j D_j}} \quad (13)$$

$$\text{式中: } D_j = W_j + T \left(\frac{b_j^2}{4 a_j} - c_j \right)$$

式(13)即为满足水量平衡的水价微增率计算式。

将(13)式代入(12)式, 又得

$$Q_j(t) = \frac{D_j(\lambda(t)(1 - \frac{\partial P_L(t)}{\partial P_j(t)})^s}{\sum_{t=1}^T (\lambda(t)(1 - \frac{\partial P_L(t)}{\partial P_j(t)})^s} - E_j \quad (14)$$

其中:

$$E_j = \frac{b_j^s}{4a} - c_j$$

式(14)即为满足水库水量平衡的各时段水量分配式。

从(9)到(14)式表示出考虑系统电量平衡和水电站水量平衡的直接解的计算式, 但上述计算式仅考虑水电站仅有一台机的情形, 对一个水电站有多台机组的情形可参照上述情形做出 (见文3, 文4)。

在实际电网中, 由于各机组受最大和最小技术出力限制, 因此还有不等式约束条件:

$$\begin{aligned} P_{1min} &\leq P_1(t) \leq P_{1max} \\ P_{jmin} &\leq P_j(t) \leq P_{jmax} \end{aligned} \quad (15)$$

在利用上述诸式计算时, 当有机组越限 (越过最大出力或最小出力时), 就让机组带越限负荷, 从总负荷中扣除该机组所带负荷, 并从相应计算式中扣除有关的系数, 再重新计算其他机组负荷分配。

在上述计算中还存在一个较为复杂, 至今还在不断研究和改进的问题, 就是 P_L 和 $\frac{\partial P_L(t)}{\partial P(t)}$ 的计算。在经济运行计算中, 由于计算次数多, 计算时段多和迭代次数较多的特点, 使得要直接确定 P_L

和 $\frac{\partial P_L(t)}{\partial P(t)}$ 的潮流计算次数非常多和计算工作量非常大，且会遇到潮流计算不一定收敛的困难。为此，往往利用负荷分散度（即任一负荷电流和总负荷电流或成线性关系）的概念进行网络化简，化简时仅保留发电机节点，而把系统所有负荷当作一个等效负荷来处理（文5，文6）。这样一来，如果令 P_1 表示1节点发电机功率（并且令 Q_1 和 P_1 成线性关系），则网损功率可表示为发电机节点有功功率的函数，一般式为

$$P_L = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_i B_{ij} P_j + \sum_{i=1}^N B_{i0} P_i + B_{00} \quad (16)$$

式中： B_{ij} 、 B_{i0} 、 B_{00} ——网损公式的二次项，一次项和常数项系数，称为B系数。

我们研究了文献（文7等），在两个以上的不同电力系统潮流基础上采用线性回归方法求出上述线性关系的数学模型来计算损失公式中的B系数（文6）。B系数确定后，就可由（16）式求得。

$$\frac{\partial P_L}{\partial P_1} = 2 \sum_{j=1}^N B_{1j} P_j + B_{10} \quad (17)$$

来决定线损增长率。

根据上述原理，我们编制了B系数计算程序（文6）和经济负荷分配计算程序，前者为后者提供计算网损和网损增长率必要的B系数。在经济负荷分配程序的编制中考虑了线损修正，火电厂厂用电修正，地区保安出力限制，水电机组开停，按效率优先法的机组最优组合，及机组最大最小出力限制等具体条件。计算机输出结果中将各电厂各机组在每一时段最优决策的出力指标、网损功率与电厂

及系统燃料消耗指标打印出来，以供电网调度人员执行或参考之用。

(三) 湖南电网试行系统经济运行的节能效果

自四月起开始试用计算机计算制订经济运行方案以来，我们体会最深刻的是：要实行电网按经济运行协调方程式离线运行，计算程序的编制和运行方案的制订固然重要，但更重要的在于电力局和各级领导的重视和各运行单位积极配合。原因是电网经济调度涉及面广，人多，问题复杂，只有电网实行集中统一调度，全网上下协调，才能取得应有的效果。湖南省电力局除了局长和总工程师在大会小会上强调电网集中统一调度和电网经济调度的重要性和正确处理解决各方面的矛盾外，生产处和计划处还不断建立和施行必要的管理措施和技术措施。调度所在局领导下，从4月10日起对电网经济调度效果进行日统计月总结，用电力系统经济调度程序的计算方案来指导电网经济调度，并不断提出问题和改进管理办法，把电网经济调度效果按月通报局属领导和有关单位，以期引起重视。电力局计划处把各电厂执行调度命令情况和电网经济调度情况纳入各单位百分奖和省煤节电奖范围，做到有奖有罚，奖罚分明，有力地促进了电网经济调度的开展和实施。以今年五月份为例，与去年同期同样处于水电大发情况相比，单金竹山、株洲、鲤鱼江、岳阳、湘潭五个火电厂比去年同期少发电量2472.5万度，而柘溪、凤滩、沙田三个水电站多发电量5438万度，大大节省了燃煤，减少了水电弃水量。

若不计气候因素的影响（即将今年来水情况多的部分扣除掉），统计从4月到7月开展电网经济调度的节能效果（与去年同期同样

水力条件相比)如下。

其中上述五个火电厂和加上双牌、工农电厂等五个水电厂的系统电网经济调度使得电厂水能和煤合理利用取得的节能效果如表1。

4~7月电厂综合省能效果表

项 目 \ 月 份	四	五	六	七	累 计
节约标准煤量 (吨)	9880	17686.4	8586	8445	44597.4
按发电煤耗 500克/度计 折算成发电量 (万度)	1976	3537.28	1717.2	1689	8619.48
按45元/吨 标煤折算成本 (万元)	44.43	79.588	38.637	33.78	196.465

开展电网经济调度另一方面的节能效果是电网损失进一步降低。单湘中北网(湘南去年七月未并网,情况不清),与去年同期相比,到七月止,节省网损电量3463.97万度,按湖南供电煤耗530克/度标煤计算,节省标煤16359吨,按我省焦电成本32元/千度计算,相当100.848万元。

上述两项合计的节能效果相当节省标准煤62956.4吨,折合人民币283.3万元,根据逐天的实际统计分析。

如果各电厂进一步采取措施,创造条件,严格执行系统经济调度方

案，4至7月份电网还可节约标煤3万吨左右，即总节约额可达9万吨标煤，计币405万元。

为了核对上述统计数据正确性，根据省电力局计划处和财务处对整个系统的发供电量及发供电成本的逐月统计和分析，今年1至7月份较去年同期燃料成本下降660.9416万元，相当于节约标煤20.6362万吨，扣除1至3月份节约的标煤28790吨（计币120.9215万元），4至7月节约标煤17.7572万吨（计币740.02万元），其中又除7月份由于来水情况比去年好，使水电站比去年同期多发31335万度（折合标煤10617.5吨）外，来水情况相近的4至6月份节约标煤71397吨，（计币约321.2865万元）。由上述统计数据可知，电网经济调度的节能效果约占整个系统节能指标的2/3，效果十分显著。

根据历年来的情况看，由于今年在省局领导下，研究和开展了电网经济调度，使得今年头七个月全网综合经济指标是湖南电网历来最好的一年。

参 考 资 料

1. 湖南电力中心调度所：“电网计算与常用程序”。

1980年

2. 湖南电力中心调度所，湖南大学电力教研室

“经济运行译文集” 1978年

3. 冈本靖司：“用入法计算含有梯级水电站系统的经济运行”。

（日）《电气学会论文志》1977年3月号

4. 张清益、陈再良：“用拉格朗日乘子计算火电系统经济运行”。

11.

湖南电力中调所《电力技术》 1979年第8期

湖南电机工程学会《湖南电力技术报导》1980.3期

5. 张清益: “水火电并列系统经济运行的协调方程式”

湖南电机工程学会《湖南电力技术》1981年1期

6. 周全仁、张清益: “B系数的计算和应用”

湖南电力中调所《湖南电力》, 1981. 2

7. Raymond R Shoults 等. “An efficient method
for computing Loss formula Coefficients”

IEEE Transactions on PAS Vol

PAS-PS No 6 1979

