

梯级水电站群优化调度控制研究及解决方案

邹建国¹, 芮 钧^{2,3}, 吴正义²

(1. 乌江水电开发有限责任公司, 贵州 贵阳 550002; 2. 南京南瑞集团公司, 江苏 南京 210003;
3. 河海大学 水电学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 研制了分层的乌江梯级水电站群优化调度控制系统, 由 3 个子系统组成: 水情测报系统、水库调度系统和梯级远程集中监控系统。将调度控制的优化分解为 3 个子系统的优化控制。运用了梯级最大发电量、梯级最大蓄能量和梯级各电站最小库水位越限程度 3 个优化准则, 并针对各个优化准则建立了相应的数学模型。在对适用于梯级水电站群优化调度计算的各类优化算法进行分析并结合实际运用情况的基础上, 提出应优先考虑采用改进动态规划算法求解梯级水电站群优化调度问题。实际运行情况表明, 优化调度控制大幅提高了乌江梯级水电站群的经济效益和运行管理水平。

关键词: 梯级水电站群; 优化调度控制; 经济调度控制; 自动发电控制

中图分类号: TM 612

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2007)10-0107-04

梯级水电站群优化调度控制问题, 特别是梯级内有二级以上具有较大调节水库的梯级水电站群优化调度控制较为复杂。多年来, 有关学者为水电站优化调度控制建立了相关数学模型并提供了多种求解方法。但是, 类似于乌江, 在一条河流上具有多座年调节性能水库的梯级水电站群的优化调度研究, 在最优准则、目标函数、求解模型算法以及梯级电站约束条件等方面, 均没有可借鉴的成功经验。

乌江是长江上游南岸的最大支流, 是贵州第一大河, 多年平均水量 $5.34 \times 10^{10} \text{ m}^3$, 与黄河水量相当。根据规划, 在乌江干流贵州省境内将开发 9 个梯级水电站, 总装机容量为 7 725 MW。乌江渡电站扩机、增容, 东风电站扩机后, 总装机容量将为 8 520 MW。乌江支流众多, 已基本开发完毕的一级支流就有 9 条。

自 2000 年以来, 乌江水电开发有限责任公司就着手规划建设乌江干流梯级电站群远程集中控制系统, 文中针对乌江已投运的 4 座大型梯级水电站群优化调度控制需求, 确立了系统结构, 建立了基于 3 个优化准则的数学模型, 并提出了求解方法^[1-2]。

1 系统结构

梯级水电站群优化调度控制是一个涉及很多因素的复杂大系统优化问题, 很难整体求解, 因此, 将该大系统问题分解为几个较简单的子系统问题分别求解, 以此来降低问题的复杂度。根据梯级水电站群优化调度控制问题的特点, 可将其分为 3 个子系统优化问题, 分别为梯级水电站群来水量预报问题、梯

级水电站群中长期优化调度问题和梯级水电站群短期优化调度问题。

针对这 3 个子系统优化问题, 分别研制并建成了适用于梯级水电站群的水情测报系统、水库调度系统和梯级远程集中监控系统。3 个系统通过必要、正确的安全隔离措施相连接, 构成乌江梯级水电站群优化调度控制系统。

水情测报系统根据以往及当前来水情况、气象资料对梯级水电站群的来水量进行长、中、短期预报和实施修正, 为梯级水电站群优化调度决策提供基本水情信息。水库调度系统则根据水情测报系统预报的来水量, 考虑梯级防洪、区间及下游综合用水要求、梯级各电站的设计保证出力等因素, 进行梯级水电站群联合中长期发电优化调度及防洪优化调度。其主要目标是通过梯级水电站群合理的蓄放水次序, 提高梯级水电站群在年内的保证出力和总发电量。梯级远程集中监控系统则根据水库调度系统的中长期优化调度结果, 考虑电力系统负荷平衡、频率控制要求、各水电站机组特性等众多因素, 进行梯级水电站群联合短期优化调度和梯级实时负荷分配, 制定梯级各电站所有机组的启停计划, 并实时自动调整梯级各电站、各机组的出力。其目标是在完成上级调度部门下达的负荷指令的同时, 始终维持梯级水电站群在最小耗能状态。

目前, 国内建成的梯级集控中心均尚未纳入电力调度体系中, 上级调度部门仍下达梯级各水电站的负荷指令而非整个梯级的负荷指令。为了适应当前的这种调度模式, 梯级远程集中监控系统优化调度部分再细分为经济调度控制 EDC (Economic Dispatching

Control)和各水电站的自动发电控制 AGC(Automatic Generation Control) 2 个部分。EDC 负责梯级总负荷在各级水电站间的最优分配,主要考虑最优蓄放水次序、站间联合躲避振动区、避免负荷在站间大规模转移等因素;而 AGC 负责电厂总负荷在投入 AGC 的所有机组间的最优分配,主要考虑机组躲避振动区、最短开停机时间、机组启停顺序等因素。乌江梯级水电站群优化调度控制系统结构见图 1。

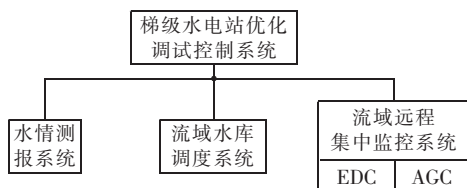


图 1 乌江梯级水电站群优化调度控制系统结构图

Fig.1 Structure of optimal dispatch control system of Wujiang cascaded hydropower stations

乌江梯级集中监控系统中针对梯级的每个水电站都有 1 个 AGC 模块,负责远程对该水电站单独进行自动发电控制。当某水电站的 AGC 模块控制方式设为省调时,该水电站的 AGC 模块从贵州省调接收负荷指令并自动对该水电站投入 AGC 的所有机组实施启停控制和负荷调整;当控制方式设为集控中心时,该 AGC 模块从乌江集控中心 EDC 模块接收负荷指令并自动对该水电站投入 AGC 的所有机组实施启停控制和负荷调整。这种双层的梯级实时负荷分配结构使得梯级水电站群优化调度控制系统具备了适应多种调度方式、降低系统复杂程度、提高系统可靠性、分散计算量、提高响应速度等许多优点。此外,EDC 模块还提供梯级日最优发电方案计算功能,运用合理数学模型和先进优化算法计算出的最优发电方案为运行调度人员制定发电计划提供了良好的参考。EDC 和 AGC 之间共同协调运行,以实现梯级水电站群的经济调度控制。EDC 将监视梯级各水电站的 AGC 运行状况,将通过优化计算得到的各水电站的发电过程线或将实时的负荷分配方案下发给各水电站 AGC;水电站 AGC 则必须实时地接收来自 EDC 程序的调度要求,并返回 EDC 调度指令执行的结果,在运行的过程中出现异常情况(如机组甩负荷等)时,应立即上送给 EDC 程序,由 EDC 迅速作出梯级调整策略,下达新的调度要求给各水电站,以重新达到流域水电站群水量平衡和电力平衡。乌江梯级远程集中监控系统 EDC 与 AGC 模块关系见图 2。

2 优化准则

梯级水电站群优化调度控制并不仅仅是简单意义上的负荷优化分配问题,而是由梯级发电计划优化制定、站间及站内负荷优化分配、梯级电站水位动态控制等一系列的优化调度决策共同组成的。多样的决策和控制目标决定了梯级水电站群优化调度控制存在多个优化准则。在不同的调度任务中,调度人员可决定由人工选择或由系统自动选择相应的优

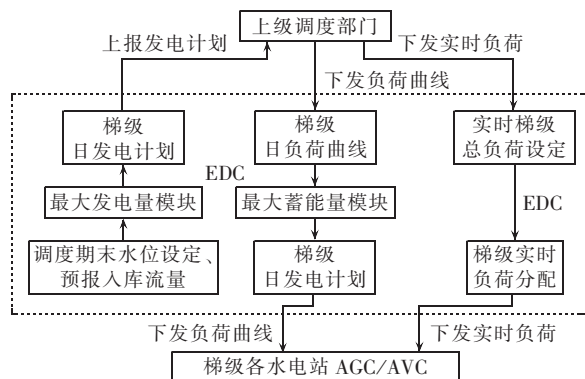


图 2 远程集中监控系统 EDC 与 AGC 模块关系图

Fig.2 Relationship between EDC and AGC in centralized remote supervisory system

化准则。乌江梯级水电站群优化调度控制中主要采用 3 个优化准则:最大发电量准则、最大蓄能量准则及最小库水位越限程度准则。在系统的研制过程中,需要对不同优化准则的适用情况、调度模型及优化算法作详细的分析和研究,这一步对于梯级水电站群优化调度控制至关重要,研究结果的正确性和合理性直接决定了优化调度控制的实用价值及优化水平。

2.1 约束条件

为便于阅读,此处一并列出所有模型中相同的约束条件,包括水量平衡约束、电站出力约束、电站发电流量约束以及水库蓄水量约束。

a. 水量平衡约束:

$$V_i^t = V_i^{t-1} + (q_i^t - Q_i^t - y_i^t) \Delta t \quad i=1; t=1, 2, \dots, T$$

$$V_i^t = V_i^{t-1} + (q_i^t + Q_{i-1}^{t-\tau_{i-1}} + y_{i-1}^{t-\tau_{i-1}} - Q_i^t - y_i^t) \Delta t$$

$$i=2, 3, 4; t=0, 1, \dots, T$$

式中 i 表示电站; T 为将整个调度期离散化处理后的时段数; t 代表各个时段,为 $[1, T]$ 内的正整数; Δt 为每个时段的时长,以秒为单位; $V_i^t, q_i^t, Q_i^t, y_i^t$ 分别为第 i 级电站第 t 个时段的水库库容、天然入库流量、发电流量、弃水流量; τ_i 为第 i 级电站到第 $i+1$ 级电站的水流流达时间与时段长 Δt 的比值取整。

b. 电站出力约束:

$$\underline{P}_i^t \leq \bar{P}_i^t \leq P_i^t \quad i=1, \dots, 4$$

式中 $\underline{P}_i^t, \bar{P}_i^t$ 分别为第 i 级电站第 t 个时段的允许最小有功出力、允许最大有功出力。

c. 电站发电流量约束:

$$Q_i^t \leq \bar{Q}_i^t \leq \bar{Q}_i^t \quad i=1, \dots, 4$$

式中 $\underline{Q}_i^t, \bar{Q}_i^t$ 分别为第 i 级电站第 t 个时段的允许最小发电流量、允许最大发电流量。

d. 水库蓄水量约束:

$$\underline{V}_i^t \leq V_i^t \leq \bar{V}_i^t \quad i=1, \dots, 4$$

式中 $\underline{V}_i^t, \bar{V}_i^t$ 为第 i 级电站第 t 个时段的允许最小蓄水量、允许最大蓄水量。

2.2 最大发电量准则

最大发电量准则主要用于在各级水库放水量已知的前提下,计算整个梯级水电站群在调度期内发出最大发电量所对应的梯级各电站发电方案,供运行调度人员参考用以制定长、中、短期及日发电计划。乌江梯级水电站群最大发电量准则数学模型为

$$J = \text{Max} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^4 E(\bar{H}_i^t, Q_i^t)$$

式中 $\bar{H}_i^t$ 为第 i 级电站第 t 个时段的平均发电水头; $E(\bar{H}_i^t, Q_i^t)$ 表示第 i 级电站第 t 个时段的时段发电量,依据厂内经济运行数学模型计算。

调度期起始时刻各级水库蓄水量 $V_i^0 (i=1, \dots, 4)$ 、调度期末各级水库蓄水量 $V_i^T (i=1, \dots, 4)$ 已知,具体计算方法见文献[3-4]。

2.3 最大蓄能量准则

最大蓄能量准则主要用于梯级集控中心在上级调度部门下达梯级负荷指令后,将该梯级总负荷最优地分配给梯级各水电站及各机组,使整个梯级水电站群在调度期内所蓄的能量最大。梯级水电站群的最大蓄能量准则本质上与最小耗能量准则是一致的。乌江梯级水电站群最大蓄能量准则的数学模型为

$$J = \text{Max} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^4 S(\bar{H}_i^t, Q_i^t)$$

其中, $S(\bar{H}_i^t, Q_i^t)$ 表示第 i 级电站第 t 个时段的蓄能量,计算公式为

$$S(\bar{H}_i^t, Q_i^t) = \begin{cases} (q_i^t - Q_i^t - y_i^t) \sum_{j=1}^4 \bar{H}_j^t & i=1; t=1, 2, \dots, T \\ (q_i^t + Q_{i-1}^{t-1} + y_{i-1}^{t-1} - Q_i^t - y_i^t) \sum_{j=i}^4 \bar{H}_j^t & i=2, 3, 4; t=1, 2, \dots, T \end{cases}$$

出力平衡约束为

$$\sum_{i=1}^4 P(\bar{H}_i^t, Q_i^t) = P_t^s$$

式中 $P(\bar{H}_i^t, Q_i^t)$ 表示第 i 级电站第 t 个时段的电站最优有功总出力; P_t^s 为第 t 个时段整个梯级水电站群的总有功指令。

调度期起始时刻各级水库蓄水量 $V_i^0 (i=1, \dots, 4)$ 已知,具体计算方法见文献[3-4]。

2.4 最小库水位超限程度准则

最小库水位超限程度准则主要用于当梯级各水电站上游水库有水位控制要求而当前库水位超出该范围的情况下,这在梯级防洪、施工等需要对库水位进行严格控制的情况下非常实用。其目标是使梯级各水电站库水位超限程度最严重的那级电站的超限值最小,数学模型如下:

$$J = \text{Min} \{ \text{Max} \{ \delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4 \} \}$$

约束条件与最大蓄能量准则数学模型相同。其中, δ_i 为第 i 级电站当前库水位与设定上下限的超限值,计算公式为

$$\delta_i = \begin{cases} 0 & \underline{Z}_i \leq Z_i \leq \bar{Z}_i \\ Z_i - \bar{Z}_i & Z_i > \bar{Z}_i \\ \underline{Z}_i - Z_i & Z_i < \underline{Z}_i \end{cases}$$

式中 $\underline{Z}_i, \bar{Z}_i$ 分别为第 i 级电站当前允许最低库水位、当前允许最高库水位。

3 优化算法

目前,在水电站优化调度控制中常用的优化算

法主要有等微增率法、基因遗传算法、动态规划算法、逐步优化算法。

等微增率法引入了数学中“微分”的思想,通过研究各台机组流量特性曲线的微增率来进行负荷的最优分配。该方法适用于机组台数不多且性能曲线较简单的单个水电站的厂内经济运行计算。当机组较多、性能曲线较复杂或者需要进行一段时期内的优化调度计算,宜采用其它优化算法。

遗传算法 GA (Genetic Algorithm) 在本质上是一种不依赖具体问题的直接搜索方法,这种搜索方法决定了遗传算法能够很好地处理多维优化问题。基本遗传算法及其改进遗传算法被证明能够很好地解决级数较多的梯级水电站群的优化调度控制计算[5-10]。然而,改进遗传算法只是在一定程度上避免了群体收敛于局部最优解的问题,并不能绝对保证每次都能收敛于最优解,这就带来了计算结果的不确定性。在梯级水电站群优化调度控制中,这种不确定性将直接引起机组启停控制和负荷调整的不确定性。因此,在既可以用动态规划算法又可以用遗传算法解决的问题中,应优先选择动态规划算法而不是遗传算法。

动态规划 DP (Dynamic Programming) 方法,是解决多阶段决策过程最优化的一种数学方法,由美国数学家 R. Bellman 等人创建。动态规划主要涉及阶段和阶段变量、状态和状态变量、决策变量和决策序列、状态转移方程、阶段效应和目标函数等概念,通过顺序或逆序逐时段递推求解问题的最优解。动态规划算法的优点非常显著,主要包括理论严谨、能保证绝对收敛于全局最优解,易于编程、求解效率高等。与此同时,动态规划算法也存在一定的缺点,即在处理多维问题时,很容易出现“维数灾”,导致计算无法运行或计算耗时太长无法满足实际应用要求。因此,在基本动态规划算法的基础上又出现了许多改进动态规划算法,主要有增量动态规划法、状态逐密动态规划、动态规划逐次逼近法和逐步优化法,这些方法采用了各自不同的改进措施来降低求解问题的计算量。

国内外学者针对动态规划算法及其各种改进算法在单个水电站厂内经济运行,单个水电站短、中、长期优化调度以及梯级水电站群短、中、长期优化调度中的应用开展了大量的研究和仿真计算,取得了很好的成果[11-13]。研究结果表明,对于级数不太多的梯级水电站群的短、中、长期优化调度及单个水电站的短、中、长期优化调度和厂内经济运行,动态规划算法及其改进算法均能够很好地求解。在这些改进算法中,增量动态规划法、状态逐密动态规划、动态规划逐次逼近法算法比较适用于单个水电站的短、中、长期优化调度计算及厂内经济运行计算,而逐步优化法比较适用于梯级水电站群的短、中、长期优化调度计算[14]。

乌江梯级水电站群优化调度控制系统主要使用各类改进动态规划算法来进行梯级调度最优化计算。实际运行中,在保证计算精度的情况下,对 4 个

电站进行实时负荷优化分配的单次计算时间在 1 s 内,对 4 个电站进行非实时的日最优发电方案的单次计算时间在 8 min 内,完全能满足实际应用的要求。

4 结语

从乌江梯级水电站群优化调度控制系统一年多的运行情况看,实施梯级水电站群之间联合优化调度控制可有效增加梯级水电站群的经济效益。此外,乌江梯级水电站群优化调度控制借助高性能的计算机系统,同时考虑与梯级水电站群调度相关的众多因素,使梯级各级水库在综合利用调度方面的效果非常显著,而这在以往是很难做到的,整个梯级电站的运行调度管理水平得到了很大的提高。

根据乌江支流中众多的实际情况,模型中已考虑了区间入流影响,同时,考虑到乌江渡下游构皮滩、思林即将投产发电,只要对模型相关参数进行适当调整,就可方便地计算求解新增水电站的优化调度控制问题。但是,在实施梯级水电站群实施优化调度控制的过程中,以下几个因素还需进一步深入研究。

梯级水电站群优化调度控制需要大量的原始资料,包括各级水库库容水位特性曲线、下游流量水位关系曲线、各机组特性曲线、各机组振动区、各机组水头损失等资料,这些资料的完整性和准确性直接决定了梯级水电站群优化调度控制的准确性。梯级水电站群优化调度控制实施前应尽量全面地搜集这些资料,在其中部分原始资料缺失或准确性不能保证的情况下如何实施梯级水电站群优化调度控制。

目前,梯级水电站群集控中心未纳入电力调度体系中,如何处理梯级水电站群集控中心与电网调度之间的关系,是大多数流域开发面临的最迫切问题。目前乌江公司集控中心采用的方式是通过监视电网运行潮流,实时跟踪电网运行状况,与电网调度保持经常性的沟通和协调,综合电网的电力供求情况、各电站生产设备的运行状况和检修安排、梯级电站群优化运行的要求等因素,及时给电网调度提出方式安排和调整建议,经电网调度同意后再做相应调整,达到梯级电站群发电方式优化、经济运行的目的。

参考文献:

- [1] 戴建伟,邹建国. 乌江干流梯级电站远程集控中心建设 with 思考[J]. 水电厂自动化,2005(1):92-96.
DAI Jian-wei,ZOU Jian-guo. Constructing and considering of Wujiang cascade hydropower stations remote controlling center[J]. Automation of Hydropower Plant,2005(1):92-96.
- [2] 李泽宏. 乌江干流梯级电站远程集中控制系统的联合调试[J]. 水电厂自动化,2005(5):37-41.
LI Ze-hong. Associated debugging of Wujiang cascade hydropower stations remote controlling system[J]. Automation of Hydropower Plant,2005(5):37-41.
- [3] 张勇传. 水电站经济运行原理[M]. 2 版. 北京:中国水利水电出版社,1998.
- [4] 邓晓娟,权先璋,张勇传. 三峡梯级水电站厂内经济运行[J]. 东北电力技术,2002(4):1-4.
DENG Xiao-juan,QUAN Xian-zhang,ZHANG Yong-chuan. The station-interior economic operation of Changjiang-Gorges cascade hydroelectric power stations[J]. Northeast Electric Power Technology,2002(4):1-4.
- [5] 王小平,曹立明. 遗传算法理论、应用与软件实现[M]. 西安:西安交通大学出版社,2002.
- [6] 伍永刚,王定一. 二倍体遗传算法求解梯级水电站日优化调度问题[J]. 水电能源科学,1999,17(3):31-34.
WU Yong-gang,WANG Ding-yi. To solve the daily cascaded stations optimal scheduling with a diploid genotypes based on genetic algorithm[J]. Water Resources and Power,1999,17(3):31-34.
- [7] 吴正义,施冲,芮钧. 乌江流域梯级水电站的经济运行研究[C]// 第一届水力发电技术国际会议. 北京:中国水力发电工程学会,2006:782-786.
WU Zheng-yi,SHI Chong,RUI Jun. Research on economic operation of Wujiang cascade hydropower stations[C]//China International Power Generation Technology Conference. Beijing,China: China Society of Hydroelectric Engineering,2006:782-786.
- [8] 姜铁兵,游大海,康玲,等. 水电站厂内经济运行基因遗传算法模型[J]. 华中理工大学学报,1995,23(7):78-80.
JIANG Tie-bing,YOU Da-hai,KANG Ling,et al. A model for economical operation of hydropower plant based on genetic algorithm[J]. Journal of Huazhong University Science & Technology,1995,23(7):78-80.
- [9] 马光文,王黎. 遗传算法在水电站优化调度中的应用[J]. 水科学进展,1997,8(3):275-280.
MA Guang-wen,WANG Li. Application of a genetic algorithm to optimal operation of hydropower station[J]. Advances in Water Science,1997,8(3):275-280.
- [10] 徐琦,张勇传,孔力,等. 改进遗传算法在梯级电站日优化运行中的应用[J]. 水电能源科学,2002,20(4):51-53.
XU Qi,ZHANG Yong-chuan,KONG Li,et al. An improved genetic algorithm for short-term optimal cascaded hydroelectric stations scheduling[J]. Hydroelectric Energy,2002,20(4):51-53.
- [11] 陈乐湘,杨侃,陆宝宏. 实现双状态动态规划算法的应用研究[J]. 水电能源科学,2003,21(1):35-37.
CHEN Le-xiang,YANG Kan,LU Bao-hong. Application study of binary state DP algorithm[J]. Water Resources and Power,2003,21(1):35-37.
- [12] 王定一. 水电厂计算机监视与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2001.
- [13] 杨侃. 大型水电站经济运行的多重动态规划模型[J]. 河海大学学报:自然科学版,1995,23(4):85-90.
YANG Kan. Multiple dynamic model used in economic operation of large hydroelectric station[J]. Journal of Hohai University:Natural Sciences,1995,23(4):85-90.
- [14] 刘胡,高仕春,万俊,等. 东江水电厂厂内经济运行动态规划算法[J]. 水电能源科学,2000,18(4):14-17.
LIU Hu,GAO Shi-chun,WAN Jun,et al. Dynamic programming model and algorithm for economic operation of Dongjiang hydropower station[J]. Hydroelectric Energy,2000,18(4):14-17.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

邹建国(1959-),男,贵州修文人,高级工程师,长期从事水电站生产技术管理及水电站自动控制的研究工作(E-mail: zou_jg@mail.wjzd.com.cn);

芮钧(1978-),男,江苏无锡人,工程师,博士研究生,从事梯级水电站群优化调度及自动发电控制研究;

吴正义(1968-),男,江苏南京人,高级工程师,长期从事水电站监控技术和经济运行的研究开发工作。

Research and solution of optimal dispatch control of cascaded hydropower stations

ZOU Jian-guo¹, RUI Jun^{2,3}, WU Zheng-yi²

(1. Wujiang Hydropower Development Corporation, Guiyang 550002, China;

2. Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China;

3. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: A hierarchical optimal dispatch control system is developed for Wujiang cascaded hydropower stations, which has three subsystems: hydrological metering and forecast system, reservoir dispatch system and centralized remote supervisory system. Three optimization rules are applied: maximum generation, maximum energy reservation and minimum level violation, for which three mathematical models are established. Based on the analysis of different dispatch optimization algorithms for cascaded hydropower stations and combined with the real applications, the advanced dynamic programming algorithm is recommended. Its operation shows that the developed optimal dispatch control system has enhanced the management level and economic effectiveness of Wujiang cascaded hydropower stations.

Key words: cascaded hydropower stations; optimal dispatch control; economic dispatch control; automatic generation control