

火电厂厂级负荷优化分配系统研制

翟伟翔¹, 刘友宽¹, 苏 适¹, 李正志¹, 翟玲玲²

(1. 云南电力试验研究院 新能源及智能电网研究所, 云南 昆明 650217;

2. 驻马店电力公司, 河南 驻马店 463000)

摘要: 提出一种新颖的火电厂厂级负荷优化分配系统的设计与解决方案。采用 OPC 服务器与 IEC60870-5-104 远动通信方式替换了传统负荷分配系统方案中的硬接线, 简化了系统硬件结构。同时软件上增加了机组负荷指令偏置调整和手动功能, 分配方式更加多样。通过分析基于动态规划的多目标负荷优化分配算法, 同时要求兼顾负荷响应快速性和电厂经济性指标, 使其在满足调度中心时间要求与电厂总煤耗最省方面均具有有效性。通过云南省 7 家火电厂的实际运行, 证明了所提出的负荷优化分配系统经济性负荷分配效果好, 系统操作方式灵活、稳定可靠。

关键词: 自动发电控制; 厂级自动发电控制; 负荷分配系统; 经济性; 动态规划

中图分类号: TP 273; TM 72; TM 73

文献标识码: B

文章编号: 1006-6047(2011)03-0126-05

0 引言

目前, 云南省火电厂已全部实现厂级负荷调度方式。传统上电力调度中心对火电厂的自动发电控制 AGC (Automatic Generation Control) 调度采用的是机组直调方式, 即能量管理系统 (EMS) 将 AGC 负荷指令下发给每台机组, 直接调度每台机组负荷。2009 年云南省火电机组 AGC 投入率为 68%^[1-2]。但是, 由于网内涉及机组很多, 特性差异很大, EMS 只能考虑系统优化, 根本无法顾及各机组运行的复杂情况。因此, 调度中心确立了在云南省省调火电厂全部实施厂级 AGC 负荷优化分配系统的建设计划。有关人员承担了该系统的自主研发与建设工作。

1 厂级负荷优化分配系统的总体方案

负荷分配系统 (LDS) 是电网 AGC 的重要组成部分, LDS 除满足电网对全厂负荷调度, 分配机组负荷之外, 还具有负荷响应速度快、发电经济性好、操作灵活、稳定安全等特点^[3]。图 1 所示为系统硬件总体框图。硬件主要由负荷分配工作站计算机、机组分散控制系统 DCS (Distributed Control System) 的历史站或 Link 站、远动终端 RTU (Remote Terminal Unit)、值长操作站、可编程序控制器 (PLC) (当 DCS 只允许单向通信或通信方式难以实现时) 以及实现这些设备彼此互连的以太网网络系统组成。

a. 电厂调度通信远动终端 RTU。与负荷分配工作站间的通信链路为高速以太网, 通信协议采用 IEC 60870-5-104 (简称 104) 规约, 传递调度下发的全厂 AGC 实时指令、全厂 15 min 负荷指令预测值、当天

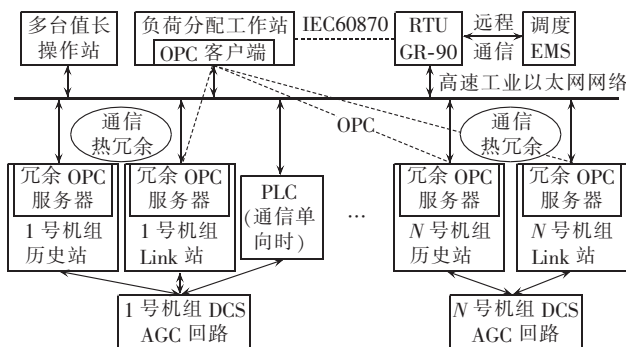


图 1 厂级负荷分配系统总体系统框图

Fig.1 Architecture of plant-level load dispatch system

全厂发电计划曲线 (96 点)、第 2 天全厂发电计划曲线 (96 点) 等; 负荷分配工作站通过 RTU 向调度中心上传全厂 AGC 负荷上下限、全厂 AGC 负荷响应速率、机组投入全厂 AGC 运行状态、全厂实发功率等。其中计划曲线点按南方电网扩展的 104 规约的 137 号报文传送。

b. 负荷分配工作站计算机。负荷分配工作站是系统的核心部件, 所有机组运行信息、调度指令信息、值长操作命令都汇集于此, 由它向各机组下达分配后负荷指令。工作站安装监控系统软件“力控”, 机组性能指标在线计算与分析软件, 经济性优化负荷分配软件, 全厂负荷手动分配、系数分配与偏置调节软件, 指令值形成与跟踪软件, 运行模式切换与保护软件。

c. 机组 DCS Link 站与历史站, 为工程师站内 DCS 已有计算机。由于受 DCS 软件授权保护, 不允许在 DCS 中添置新计算机, 将与 DCS 通信软件 OPC 服务器安装在原有计算机上, 如 Link 站、历史站、工程师站、操作员站和大屏显示站。由于这些计算机不定期地做重启维护, 因此开发了互为冗余热备的 OPC

Server 软件,同时安装在其中 2 台计算机上,以增强通信系统的可靠性^[5]。

d. PLC 及其开关量与模拟量模块。DCS 无法开发软件通信接口或电厂在要求 DCS 只能单向通信时安装使用,将数字量和模拟量信号以硬接线的方式接入 DCS,包括机组负荷指令、全厂负荷指令、切除全厂 AGC 命令和通信心跳信号等。

e. 值长操作站。它是值长或其他生产管理人员的人机接口计算机,安装“力控”View 运行包,与“力控”监控主站软件构成 C-S 分布式结构,可支持多台。主要功能为全面展示分配系统参数,输入基础参数、设置手动指令、执行切换操作。

f. 高速以太网网络系统。按照结构分散的要求,结合网络布线的要求,构架了一个多网段、纯交换高速以太网,布线距离超过 100 m 时,物理介质使用单模光纤。

2 厂级负荷优化分配系统软件设计方案

在负荷分配软件的整体架构设计中,运用了组件技术,遵循客户/服务器设计原则和开发方法构建软件框架模型。软件按 4 层 C/S 结构划分为表示层的负荷分配系统视图层程序、业务层(中间件)的负荷分配软件、数据层的实时数据库以及设备驱动层的 OPC Server、104 规约驱动、Modbus 驱动。负荷分配软件的整体结构如图 2 所示^[6]。

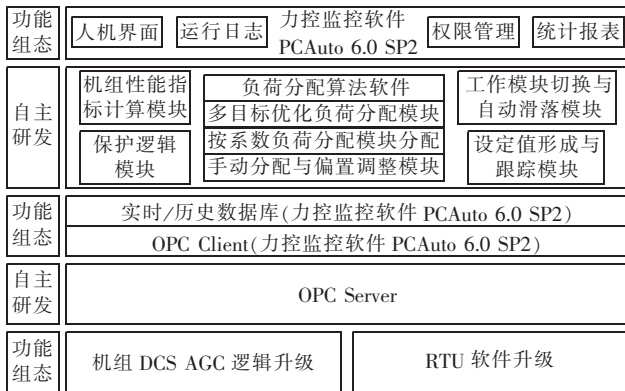


图 2 厂级负荷分配系统软件总体系统框图

Fig.2 Overall software system of plant-level load dispatch system

只有在充分掌握机组运行状态和参量的基础上,负荷分配系统才能更好地完成优化分配任务。按性能指标计算要求,需要从 DCS 采集的参数点多达 300 点,通过硬接线的方式已不现实。OPC(用于过程控制的 OLE)是一个国际工业标准。云南火电厂存在多种类型的 DCS,分别针对这些 DCS 开发了相应的数据存取 OPC Server 软件。

负荷分配业务逻辑处理软件模块为整个软件系统核心技术部分。该软件模块包括机组性能计算、负荷自动优化分配、手动操作与自动偏置调整控制、设定值形成与保护逻辑控制等软件子模块。其中软

件子模块指基于微软基础类库 MFC (Microsoft Foundation Class)的独立应用程序(进程),模块规模较大,通过控件 DBCOM 从力控数据库中读取数据,计算结果再写回力控数据库,控件子模块指嵌入到力控视图软件中运行的 ActiveX 控件,力控数据库相关数据改变时,通过所编写的脚本调用控件功能,结果通过 ActiveX 事件的形式传递给力控,力控视图是一个完善的控件容器,支持效果良好,软件规模不大,交互及时。

视图层软件是在力控 PCAuto6.0 上组态开发完成的,主要功能包括数据展示、运行操作、运行日志、权限管理和统计报表等。力控软件分为开发系统和运行系统。开发系统(Draw)是一个集成的开发环境,可以创建工程画面、分析曲线、报表生成、定义变量、编制动作脚本等,同时可以配置各种系统参数,启动力控其他程序组件等,“组态”就在此完成,运行系统执行开发完的工程,实现实时监控过程。

3 多目标的负荷优化分配算法与编程

厂级负荷优化分配数学模型利用基于经济性与快速性的多目标负荷优化分配动态数学模型^[8-9]。经济性指标表征为各台机组的煤耗之和,快速性指标表征为调度要求的负荷响应时间,通过经济性分配权重的在线手动或自动调整,兼顾电网与电厂两者利益,为火电厂进行负荷优化分配提供了较大的选择自由度,为新形势下的电厂与电网找到了一个共同的利益平衡点。优化计算采用了动态规划算法,煤耗特性曲线拟合利用的是最小二乘法算法。

目前在电厂机组运行经济性的评价中,煤耗率是评价机组经济性的一个重要指标^[10]。一般机组煤耗率是通过煤耗量或反平衡计算求得的,并且单台机组的煤耗特性曲线通常是机组负荷与机组煤耗率的关系曲线。最小二乘拟合算法作为一种数据拟合求解的有效手段,广泛应用于各种工程和试验技术中,而且动态规划法对煤耗曲线的要求不是很高。此外,鉴于各台机组实际消耗煤种不一致,加入了煤价指标,使经济分析更加合理。一般情况下,为了保证计算结果的准确和计算方法的简便,多采用二次多项式曲线拟合方法。本文采用基于最小二乘法的二次多项式曲线拟合来解决煤耗特性曲线拟合问题^[11-12]。

多目标负荷优化算法的目标函数:

$$\min M(P_i) = \min \sum_{i=1}^n m_i(P_i) = w_e R_e(P_i) + w_s R_l(P_i) = w_e \sum_{i=1}^n \left(\frac{P_i - l_i}{l_i} \right)^2 + w_s \sum_{i=1}^n \left(\frac{t_i - t_{ideal}}{t_{ideal}} \right)^2$$

其中, w_e 为经济性权重系数,即基于经济性的负荷优化分配在整个目标中的比重,它体现了电厂对经济性负荷优化分配的偏重程度; w_s 为快速性权重系数,即基于快速性的负荷优化分配在整个目标中的比重,它体现了电厂对快速性负荷优化分配的偏重程度; l_i 为

第 i 台机组进行经济优化所分配的负荷; t_i 为第 i 台机组完成分配负荷所用的实际时间; $R_e(P_i)$ 为经济性负荷优化改进目标函数; $R_l(P_i)$ 为快速性负荷优化改进目标函数; $m_i(P_i)$ 为第 i 台机组的快速性与经济性目标值的加权和; $M(P)$ 为全厂所有机组的快速性与经济性目标值的加权和。

基于时间性与经济性指标的负荷优化的数学模型详细论述可以参考文献[13], 所开发的多目标负荷优化算法软件模块总体流程图如图 3 所示。

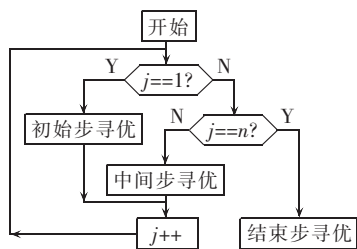


图 3 动态规划程序模块流程图

Fig.3 Flowchart of dynamic programming

初始步寻优流程中,在初始步 X_1 以步长 1 遍历其取值区间 $[P_{\min}, P_{\max}]$, 将每一步所求得的负荷分配值和该值对应的下标记录下来, 以备逆序查表时有据可循。中间步寻优与初始步不同之处就在于中间步以步长 1 遍历区间时, 每一步都对应着一组负荷分配值, 故要增加对这组负荷分配值求最小值的算法。完成以上步骤后, 再把每一步的最小负荷分配值和其对应的下标记录, 以备逆序查表算法的需要。结束步寻优的特点是该阶段 $X_n = P_{\text{total}}$, 所以结束步寻优不需要以步长 1 遍历区间, 只需要取对应的不同负荷分配值, 然后求其最小值。之后将求得最优负荷分配值记录。

结束步寻优完成后进行逆序查表, 逆序查表所需要的数据已经由上述的寻优算法所提供。逆序查表依据结束步求得的负荷分配值和其对应的逆序查找的一条唯一路径, 逆序依次寻优出各个阶段的负荷分配值。最终得到多目标负荷优化的唯一解^[14]。

在多目标负荷优化算法函数中, 经济性和快速性的权重是由调用该函数的程序提供的, 所以在调用多目标负荷优化函数时, 要进行权重的确定工作。设定调度指令要求的全厂负荷完成用时 t_{ens} , 单纯经济性优化方案用时为 t_{eco} , 单纯快速性优化方案用时为 t_{rap} 和多目标优化分配方案用时为 t_{mix} 。可以确定 $t_{\text{eco}} \geq t_{\text{ens}}$ 和 $t_{\text{ens}} \leq t_{\text{rap}}$ 时的经济性权重分别为 1 和 0, 而对于 $t_{\text{rap}} < t_{\text{mix}} < t_{\text{eco}}$ 情况采用优选法进行经济性权重的求取, 最后得到的结果即为最接近调度中心要求的权重分配^[15]。

4 负荷分配功能及逻辑分析

在系统软件开发过程中, 本文充分考虑了电厂在负荷分配方面的自主权和灵活性, 符合电厂运行人员操作习惯。按全厂总负荷设定值来源不同, 可以分

为 5 种模式, 即传统单机运行模式, 本地全厂 AGC 总指令模式, 本地全厂计划曲线模式, 远方全厂 AGC 总指令模式及远方全厂计划曲线模式。传统单机运行模式为一状态模式, 不可选择进入, 软件启动时或全厂机组均未投入厂级 AGC 时, 一旦有机组投入全厂 AGC, 自动切换到本地全厂 AGC 总指令模式, 投入全厂 AGC 的开关或按钮在机组 DCS 协调画面上, 由运行人员根据运行状态选择进入。当至少一台机组全厂 AGC 运行状态投入自动后, 可以选择进入后 3 种模式。在本地全厂计划曲线模式下, 全厂负荷指令按运行人员设定的当日全厂计划曲线(96 点)运行。远方全厂 AGC 总指令模式下, 全厂负荷指令即为调度中心下发的全厂 AGC 总指令。远方全厂计划曲线模式下, 全厂负荷指令从调度中心下发的当日全厂计划曲线中抽取。后 3 种模式之间不能直接切换, 中间必须经过本地全厂 AGC 总指令模式, 切换时总负荷指令跟踪全厂实发功率与全厂实际参与的一次调频总量差值, 这样不但避免各模式下指令不一致引发的机组负荷扰动, 而且可以使机组负荷指令不会被一次调频量拉回, 300 MW 机组一次调频量最大为 18 MW。

机组在各自的 DCS 上投入全厂 AGC 后, 交由负荷分配系统下发机组负荷指令, 此刻机组分配的负荷指令被强制为机组实发功率减去其所参与的一次调频量, 机组没有投入一次调频时调频量为零。机组的负荷分配可以工作于自动与手动状态下, 系统保证 2 个状态间的机组负荷指令无扰切换, 手动状态下, 运行人员在画面上手动下发机组负荷指令, 手动下发指令受机组协调控制系统 CCS (Coordinated Control System) 负荷上下限的约束。

自动方式下则可以根据分配方式由软件直接计算出各台机组的负荷指令下发给各台机组。自动状态下, 分配系统所支持的机组负荷分配方式为 3 种: 按比例分配、平均分配及经济优化分配。按比例分配方式指按运行人员预先设定的各台机组负荷分配系数对实际的全厂负荷按负荷指令进行分配, 如阳宗海电厂可按机组容量将分配系数设定为 2:2:3:3。平均分配为分配系数相同下的特例, 各台自动机组平均分配全厂负荷指令。经济优化分配指将系统按照发电煤耗最省和调度时间响应最快的综合考虑原则动态寻优算法计算出来的机组负荷分配量直接下发给各台机组的方式。当分配系统工作模式为传统单机 AGC 模式或有机组投入全厂 AGC 且全在手动时, 运行人员可在上述 3 种方式下相互切换, 切换时的机组下发负荷指令均为机组实发功率减去所参与的一次调频量, 保证机组负荷无扰。

偏置调整功能, 又可称为多机组负荷同操分配, 类似于燃烧控制系统中的磨煤机或给煤机同操。其目的在于为电厂运行人员提供一个更加自主的负荷分配方案。机组厂级 AGC 投入自动, 且分配方式为

比例分配或平均分配时,运行人员可以手动调整某台机的负荷指令,同时其他机组的负荷指令也根据当前的分配系数做相应的自动调整,从而保持各机组下发负荷指令仍与全厂负荷指令一致。这种偏置调整的方式在电厂涉及到多台设备联动的燃料调节、二次风调节、一次风调节等回路中多有应用,运行人员颇为熟悉。

为确保电网调度和电厂稳定安全运行,本系统对各类故障与报警进行了完善的处理。因为系统是以数据通信为基础的,所以本文为 RTU、DCS 和 PLC 等设备通信链路都设置了一个双向的周期性翻转的“心跳”信号,周期为 20 s,当超过 20 s 信号仍不变化时,系统认为通信链路故障。例如发生 DCS 通信故障时,DCS 逻辑立刻将该机组的全厂 AGC 切除交由自身的 CCS 控制,负荷分配站将其余机组切换到手动状态,工作模式切到本地全厂 AGC 总指令模式,当前全厂负荷总指令跟踪全厂实发功率减去全厂实际参与的一次调频总量。

5 负荷分配系统电厂实际调试与运行

目前本文开发的系统已在云南省调的 7 家火电厂通过调试并正式投入运行,社会效益与经济效益显著。负荷分配系统关乎电网和电厂的安全稳定运行,必须经过严格的运行调试,才能投入使用。测试方案全面,主要包括如下环节:信号核对与精度测试;厂内负荷手动分配的开环测试;厂内负荷手动分配的开环测试;厂内负荷自动分配的开环测试;多目标优化自动分配的开环测试;厂内负荷日发电计划曲线分配的测试;调度远程负荷自动分配的测试;调度远程日发电计划曲线接收的测试;系统故障安全性测试。实际运行表明:系统负荷分配功能完善,自动优化分配在调度负荷响应和全厂煤耗方面均具有有效性,负荷同操分配新颖实用,安全可靠,功能与性能上均达到了设计要求。

6 结语

与基于厂级监控信息系统 SIS(Supervisory Information System)开发的负荷优化分配功能不同,本文提出的负荷优化分配系统是一个可以独立安装和运行的系统。与硬接线方式不同,本文采用的 OPC 服务器接口与机组通信,具有标准化、数据量大、性能计算充分、数据精度高等特征。负荷分配运行模式灵活、完善,给予电厂更多自主权。自动优化分配在调度负荷响应快速性和全厂煤耗经济性方面均效果良好。本文所述系统在 7 家火电厂的稳定运行说明了所提方案、设计与开发的完善性与正确性。

参考文献:

- [1] 刘和森,石恒初,滕贤亮. 云南电网水火电机组 AGC 协调优化控制策略[J]. 电力系统自动化,2009,33(20):96-99.
- [2] 艾琳,华栋. 电力系统智能型调度[J]. 电力自动化设备,2008,28(10):83-87.
- [3] 侯子良,侯云浩. 推动厂级监控信息系统中优化负荷分配功能应用[J]. 中国电力,2005,38(6):50-52.
- [4] 孙玮,邱夕兆,王勇,等. 经济 AGC 控制装置在机网协调技术中应用[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):114-117.
- [5] 蒋近,段斌. 基于 OPC 技术的监控主站实时数据传输[J]. 电力自动化设备,2008,28(9):97-100.
- [6] 陆会明,邓慧,张智光. 实现电站 DCS 开放性的 OPC 开发方案[J]. 电力自动化设备,2007,27(7):95-97.
- [7] 曹文亮,王兵树,高建强,等. 火电厂厂级负荷优化分配软件设计[J]. 电力系统自动化,2004,28(5):80-84.
- [8] 王治国,刘吉臻,谭文,等. 基于改进 PSO 算法的快速性厂级负荷优化分配研究[J]. 华北电力大学学报,2006,33(5):19-24.
- [9] 刘进雄,刘涤尘,王波,等. 基于 SIS 的电厂运行可控指标优化[J]. 电力自动化设备,2009,29(12):19-23.
- [10] 王友,马晓茜,刘翔. 自动发电控制下的火电厂厂级负荷优化分配[J]. 中国电机工程学报,2008,28(14):103-107.
- [11] 李玲,柯炎,周鑫. 火电机组厂级负荷优化算法的比较[J]. 上海电力学院学报,2009,25(3):213-216.
- [12] 李学斌. 火电厂厂级负荷分配的多目标优化和决策研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(35):102-107.
- [13] 王治国,刘吉臻,谭文,等. 基于快速性与经济性多目标优化的

火电厂厂级负荷分配研究[J]. 中国电机工程学报,2006,26(19): 86-92.

WANG Zhiguo,LIU Jizhen,TAN Wen,et al. Multi-objective optimal load distribution based on speediness and economy in power plants[J]. Proceedings of the CSEE,2006,26(19): 86-92.

- [14] 张秀霞,王爽心,吴冠玮. 基于混沌遗传和模糊决策算法的多目标负荷经济调度[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):94-98.

ZHANG Xiuxia,WANG Shuangxin,WU Guanwei. Multi-objective economic load dispatching based on chaos genetic algorithm and fuzzy decision[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):94-98.

- [15] 王治国,刘吉臻,谭文,等. 基于快速性的火电厂厂级负荷优化分配研讨[J]. 现代电力,2006,23(2):68-71.

WANG Zhiguo,LIU Jizhen,TAN Wen,et al. Research and discussion of optimal load distribution in power plant based on speediness[J]. Modern Electric Power,2006,23(2):68-71.

(编辑: 汪仪珍)

作者简介:

翟伟翔(1974-),男,苗族,河南驻马店人,工程师,博士,研究方向为电站自动化、变电站综合自动化及新能源等方面(E-mail:zhaiweixiang163@163.com);

刘友宽(1973-),男,云南昭通人,高级工程师,硕士,主要从事电站自动化与厂网协调等方面的研究工作。

Development of optimal load dispatch system for power plant

ZHAI Weixiang¹,LIU Youkuan¹,SU Shi¹,LI Zhengzhi¹,ZHAI Lingling²

(1. Renewal Energy and Smart Grid Bureau,Yunnan Electric Power Test & Research Institute, Kunming 650217,China;2. Zhumadian Electric Power Corporation,Zhumadian 463000,China)

Abstract: A solution of plant-level optimal LDS(Load Dispatch System) is proposed for power plants. The hardware wiring in traditional LDS is replaced by OPC server and IEC60870-5-104 communication,which simplifies its system hardware structure. The load bias adjustment and manual functions are added to its software,which enhances the dispatch mode diversity. Its multi-objective optimization algorithm based on dynamic programming considers both the load response and plant economy to effectively meet both the requirement of dispatch center for quickness and the requirement of plant for optimal total coal consumption. The applications in 7 power plants validate its effectiveness in economic load dispatch,as well as its flexibility,reliability and stability in operation.

Key words: automatic generation control; plant-level AGC; optimal load dispatch system; dynamic programming