

考虑热电协调的城市电网调度计划方法研究与系统开发

热电联产机组在我国城市电网中规模日益增加,使得城市电网日前调度计划编制过程中,必须统筹考虑供电与供热的协调问题。按照“以热定电”的热电联产机组调度运行要求,提出了考虑热电协调的城市电网调度计划模型与方法。结合调度运行管理规定,设计了城市电网调度计划系统的体系架构和功能模块。最后,基于广州供电局的实践情况,介绍了该系统的实际应用效率。

姚林 蔡莹 罗微/广州供电局有限责任公司
薛艳军 张德亮/北京清大科越股份有限公司

0 引言

热电联产机组在我国城市电网中规模日益增加。与传统纯发电机组不同,热电联产机组发电与供热之间存在较强的耦合关系,导致城市电网日前调度计划编制过程中,必须考虑供热与供电的协调问题。

文献[1-2]介绍了我国城市电网中热电联产机组的发展情况,随着城市工业和居民供热需求的快速增长,热电联产机组的规模在城市电网中增长迅速。文献[3-4]提出了考虑热电联产机组运行特性的调度运行方法,该方法中热电联产机组按照“以热定电”的原则有限安排发电。文献[5]介绍了热电联产机组的节能调度方法,与传统纯发电机组相比,热电联产机组的能耗更为复杂,需要综合考虑其发电和供热水平。文献[6-8]介绍了发电计划编制系统的结构与功能,可以看出传统的发电计划编制系统并不考虑热电联产机组的特殊性,难以适应城市电网的要求。

围绕城市电网热电协调下的日前调度计划编制问题,本文首先深入研究了热电联产机组的运行特性,按照“以热定电”的运行要求,提出了考虑热电协调的城市电网调度计划模型与方法;基于调度运行管理业务,以上述模型为算法核心设计了城市电网日前调度计划编制系统的体系架构与功能模块;最后基于广州供电局实践情况,介绍了该系统实际应用效益。

1 考虑热电协调的城市电网调度计划模型与方法

1.1 热电联产机组运行特性

随着现代城市供热需求的快速增加,热电联产机组在城市电网中的规模增长迅速。与纯发电机组不同,热电联产机组在同一时段同时完成发电与供热两种形式的能量生产。按照汽轮机中高温高压热蒸汽参与供热的比例,热电联产机组可分为背压式和抽气式两种类型。

受自身结构影响,上述两种热电联产机组供热与发电存在较强的耦合关系,具体表现在给定供热量下机组发电能力不同,出力上下限将发生变化,同时爬坡速率也将受到影响。典型的热电联产机组供热-发电静态耦合关系曲线如图1所示^[9]。

一般来说,热电联产机组供热-发电静态耦合关系曲线所围成的运行区域均为凸多边形区域。规定热电机组 i 的运行区域共有 M_i 个顶点,顶点坐标系列为



姚林/工程师

关键词/Keywords

热电协调调度·
日前调度计划·
城市电网·
系统开发·

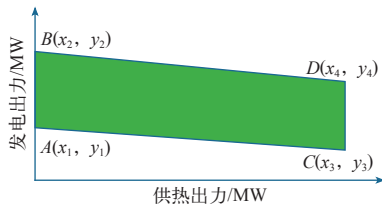


图1 供热-供电协调曲线

$\{(x_i^1, y_i^1), (x_i^2, y_i^2), \dots, (x_i^{M_i}, y_i^{M_i})\}$, 则时刻 t 其供热功率 $q_{i,t}^h$ 和发电功率 $p_{i,t}^h$ 可以用各顶点坐标线性表出, 满足

$$\begin{cases} q_{i,t}^h = \sum_{k=1}^{M_i} a_{i,t}^k x_i^k \\ p_{i,t}^h = \sum_{k=1}^{M_i} a_{i,t}^k y_i^k \\ 0 \leq a_{i,t}^k \leq 1 \quad \forall i, t, k \\ \sum_{k=1}^{M_i} a_{i,t}^k = 1 \quad \forall i, t \end{cases} \quad (1)$$

式中, $a_{i,t}^k$ 为引入的系数组合, 取值范围为 $0 \sim 1$, 且对于任意热电联产机组在任意时刻其和为1。

由于我国当前运行区域为非凸多边形的热电联产机组比例极低, 且可通过引入状态变量等方法将其等效转化为式(1)所示的运行约束条件, 本文中仅讨论凸多边形运行区域的情况。

1.2 考虑热电协调的城市电网调度计划模型与算法

1.2.1 目标函数

城市电网电力调度运行一般以能耗最低为优化目标, 在满足各项运行约束、保证电力供应的前提下, 降低调度运行能耗, 上述目标可表示为

$$\min f(p_{i,t}^C) + f(p_{i,t}^h, q_{i,t}^h) \quad (2)$$

式中, $f(p_{i,t}^C)$ 为纯发电机组的煤耗函数; $p_{i,t}^C$ 为纯发电机组 i 在时刻 t 的发电功率; $f(p_{i,t}^h, q_{i,t}^h)$ 为热电联产机组的煤耗函数, $p_{i,t}^h$ 、 $q_{i,t}^h$ 为热电联产机组 i 在时刻 t 的发电功率和供热功率。上述煤耗函数一般可表示为二次函数形式, 即满足^[10]

$$\begin{cases} f(p_{i,t}^C) = \sum_{i=1}^{N_C} \sum_{t=1}^{N_T} a_i^C p_{i,t}^{C2} + b_i^C p_{i,t}^C + c_i^C \\ f(p_{i,t}^h, q_{i,t}^h) = \sum_{i=1}^{N_H} \sum_{t=1}^{N_T} a_i^{h,p} p_{i,t}^{h2} + b_i^{h,p} p_{i,t}^h + a_i^{h,q} q_{i,t}^{h2} + b_i^{h,q} q_{i,t}^h + c_i^h \end{cases} \quad (3)$$

式中, N_C 、 N_H 和 N_T 分别为纯发电机组台数、热电联产机组台数和时段数; a_i^C 、 b_i^C 和 c_i^C 为纯发电机组煤耗函数的二次、一次和常数项系数; $a_i^{h,p}$ 、 $b_i^{h,p}$ 、 $a_i^{h,q}$ 、 $b_i^{h,q}$ 和 c_i^h 为热电联产机组发电煤耗函数和供热煤耗函数的一次、二次和常数项系数。

1.2.2 约束条件

所需要考虑的约束条件包括电网运行约束、热电联产机组运行约束、纯发电机组运行约束和外送受电约束。

(1) 电网运行约束

电网运行约束包括电力平衡约束、传输特性约束和传输能力约束, 即

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^{N_C} p_{i,t}^C + \sum_{i=1}^{N_H} p_{i,t}^h + \sum_{i=1}^{N_W} p_{i,t}^W + \sum_{i=1}^{N_S} p_{i,t}^S = \sum_{i=1}^{N_B} p_{i,t}^B \\ \mathbf{B}\boldsymbol{\theta} = \mathbf{P} \\ \underline{p}_i^L \leq p_{i,t}^L \leq \overline{p}_i^L \end{cases} \quad \forall t = 1, \dots, N_T \quad (4)$$

式中, N_W 、 N_S 和 N_B 为风电等分布式电源、外送电联络线和系统节点数; $p_{i,t}^W$ 为对应分布式电源 i 在时刻 t 的发电功率预测; $p_{i,t}^S$ 为外送电联络线 i 在时刻 t 的交换功率; $p_{i,t}^B$ 为节点 i 在时刻 t 的负荷预测; $\mathbf{B}$ 为系统节点导纳矩阵的虚部, 为 $N_B - 1$ 阶矩阵; 维列向量; $\mathbf{P}$ 、 $\boldsymbol{\theta}$ 分别是节点注入有功功率列向量和节点电压相角列向量, 为 $N_B - 1$ 维向量; $\underline{p}_i^L$ 、 $\overline{p}_i^L$ 为线路 i 在时刻 t 的潮流, $\underline{p}_i^L$ 、 $\overline{p}_i^L$ 为其上、下限值。

(2) 热电联产机组运行约束

$$\begin{cases} (1) \\ q_{i,t}^h = Q_{i,t}^{h,set} \end{cases} \quad (5)$$

如式(5)所示, 热电联产机组在满足式(1)的运行要求外, 其供热功率还必须满足给定值 $Q_{i,t}^{h,set}$ 的要求。

(3) 纯发电机组运行约束

$$\begin{cases} \overline{p}_i^C \geq p_{i,t}^C \geq \underline{p}_i^C \\ p_{i,t}^{C,C} \geq p_{i,t}^C - p_{i,t-1}^C \geq \underline{p}_{i,t-1}^{C,C} \end{cases} \quad (6)$$

如式(6)所示, 纯发电机组必须满足出力上下限和爬坡能力约束, $\overline{p}_i^C$ 、 $\underline{p}_i^C$ 、 $\overline{p}_{i,t-1}^{C,C}$ 和 $\underline{p}_{i,t-1}^{C,C}$ 为出

力上下限值和爬坡能力上下限值。

(4) 外送受电约束

外送受电约束包括传输功率上下限约束和传输电量约束。

$$\begin{cases} \overline{p_i^S} \geq p_{i,t}^S \geq \underline{p_i^S} \\ \Delta T \sum_{i=1}^{N_S} \sum_{t=1}^{N_T} p_{i,t}^S = W^S \end{cases} \quad (7)$$

式中, $\overline{p_i^S}$ 、 $\underline{p_i^S}$ 为交换功率上下限; ΔT 为时段间隔; W^S 为外送受电合约规定的交换电能。

1.2.3 求解算法

上述优化模型为标准的凸二次目标规划问题, 可通过现有的商用软件包直接求解, 这里不赘述其求解算法。

2 城市电网调度计划编制系统体系架构与功能设计

2.1 体系架构

在城市电网调度生产运行中, 调度计划编制系统处于生产运行策划的阶段, 位于整个调度运行自动化系统前端。其主要功能模块和各功能模块之间的业务流程关系如图2所示。

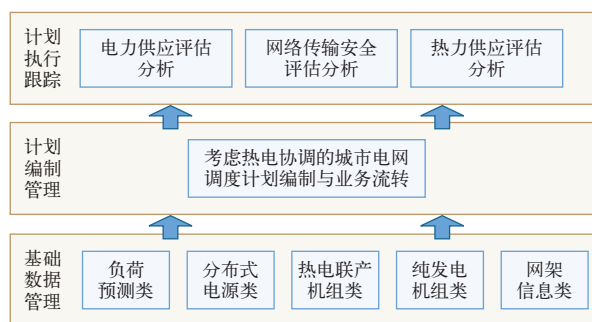


图2 系统体系结构

从体系架构上, 城市电网调度计划编制系统包括基础数据管理、计划编制管理和计划执行跟踪三个核心业务。

基础数据管理主要是实现从其他业务系统中获取调度计划编制所需要的基础数据信息, 并将其进行加工处理。

计划编制管理以本文所提出的考虑热电协调的城市电网调度计划编制模型与方法为核心, 基

于基础数据管理模块所提供的基础数据信息编制调度计划, 并进行计划的流转和发布。将审核、审批通过的调度计划提交相应的业务系统执行。

计划执行跟踪是根据实际执行效果, 从多个方面评估分析调度计划的编制水平, 定位编制过程中存在的问题, 以改进提升。

2.2 基础数据管理

城市电网调度计划编制系统所需要管理的基础数据信息包括三大类, 分别是负荷类数据、机组类数据和网架类信息。

负荷类数据包括系统和节点负荷预测数据。机组类数据包括分布式电源、热电联产机组、纯发电机组和外送受电计划等类型数据, 其中热电联产机组不仅需要对其发电能力数据进行管理, 还需要对其供热计划数据进行管理。网架类信息包括电网网架连接关系、输变电设备传输能力、设备检修计划和输变电断面控制要求等。

2.3 计划编制管理

计划编制管理包括编制、流转和发布三个核心功能。编制流程是基于上述基础数据, 依托本文所提出的编制模型自动优化生产发电计划。流转则是在电网企业内部进行审核、审批。经过流转的发电计划最终发布, 传递至响应的执行系统, 提交执行。

2.4 计划执行跟踪

计划执行跟踪则是根据调度计划的执行情况对其执行效益进行评估, 对存在问题进行分析, 从而实现闭环管控, 不断提升计划编制水平。调度计划评估主要从电力供应、网络传输安全和热力供应三个方面进行, 重点分析热电联产机组在热、电协调方面的执行情况。

3 系统开发与实践应用

本文所研究的考虑热电协调的城市电网调度计划编制系统已在广州市供电局得到实际应用, 从2015年底部署实施以来, 已稳定运行超过1年时间。

3.1 系统开发与部署

广州供电局考虑热电协调的城市电网调度计划编制系统部署于安全生产Ⅱ区，作为调度中心运行方式安排重要的业务平台，主要完成如下功能：

1) 发电机组基础信息统计管理。广州供电局调度中心共调管18台发电机组，其中热电联产机组16台。该系统实现了对所调管的所有机组的装机、出力调整范围、爬坡能力和热电协调特性等基础信息进行统一管理。

2) 发电计划编制。该系统不仅需要完成广州供电局调度中心所调管的所有发电机组日发电计划编制，还需要进行外送受电计划调整，保证广州市有序供电。

3) 发电机组电量统计及调度计划评价。及时统计各发电机组的发电量，跟踪其计划电量完成情况，并对各机组的发电计划完成情况进行评价分析。

从业务流转上，广州供电局考虑热电协调的城市电网调度计划编制系统需要与负荷预测系统、能量管理系统等多个业务系统接口，实现数据信息的流转，其部署结构如图3所示。

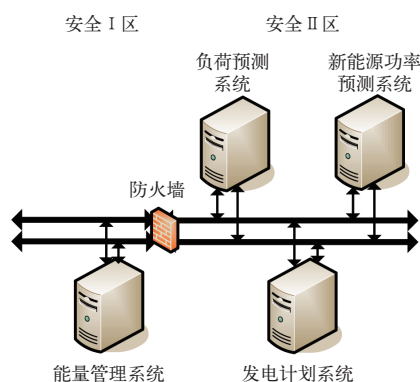


图3 系统部署结构

负荷预测系统和新能源功率预测系统分别实现对广州市系统负荷、母线负荷的预测和广州市分布式新能源的功率预测，预测结果将直接传递至考虑热电协调的城市电网调度计划编制系统中。各热电联产电厂将其供热计划通过该系统上报。由此调度中心发电计划编制人员可在该系统平台上实现日前发电计划编制。编制结果将发送

到能量管理系统提交执行，并下发到各电厂便于燃料供应。在日前发电计划执行完毕后，能量管理系统将把执行结果反馈至发电计划系统，以进行发电计划完成情况闭环分析。

3.2 使用效益分析

本系统上线使用以来，取得了显著的使用效益，主要表现在如下方面：

1) 大大降低了运行方式环节发电计划编制的工作量，提高了工作效率。本系统上线运行前，广州供电局发电计划主要由人工编制，随着发电机组增加，电网规模扩大，发电计划编制内容更加复杂，编制难度提高，人工编制已难以满足电网发展要求。依托该系统机组发电计划实现了自动编制，大大降低了编制工作量。

2) 显著提高了计划编制水平，计划可行性更强。传统模式下热电联产机组的运行特性复杂，发电计划与供热计划不匹配的问题时有发生，发电计划临时调整的工作量较大。依托该系统热电联产机组的发电计划与其供热计划紧密配合，大大提高了计划的可执行性。

4 结束语

针对城市电网日益凸显的热电联产机组热电协调问题，本文提出了考虑热电协调的城市电网调度计划编制模型与方法，并构建了系统体系架构和功能模块。广州供电局的实际应用情况表明该系统大大降低了调度运行发电计划编制的工作量，提升了计划可行性，对协调供热计划与供电计划具有显著效果。

参考文献

- [1] 彭祖辉, 孙栓柱, 代家元, 等. 火电机组节能发电调度决策支持系统研究与开发 [J]. 中国电力, 2014, 47 (5): 107-112.
- [2] 徐立中, 杨光亚, 许昭, 等. 考虑风电随机性的微电网热电联合调度 [J]. 电力系统自动化, 2011, 35 (9): 53-60, 66.

(下转第80页)

- [6] Tukka T, et al. Evaluating and improving the energy efficiency of counterbalanced elevators based on passenger traffic [C]. Sixteenth IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering, 2016 : 1-6.
- [7] 赵伟, 王志磊, 等. 基于客流分析的电梯群控仿真系统研究 [J]. 控制工程, 2015 (5) : 826-830.
- [8] 刘耀武, 聂风华, 等. 具有时间约束的电梯节能调度算法 [J]. 系统工程理论与实践, 2013 (9) : 2339-2346.
- [9] 郎曼, 李国勇, 等. 电梯群控系统的节能调度优化仿真 [J]. 计算机仿真, 2017 (2) : 375-379.
- [10] 蔡晓霞, 俞立峰. 群控电梯目的层调度系统的设计 [J]. 浙江工业大学学报, 2015 (1) : 52-57.
- [11] 马祎炜, 李杰, 等. 基于改进型幅相控制的单位功率因数电梯能量回馈器研究 [J]. 电工电能新技术, 2008 (1) : 76-80.
- [12] Marsong S, Plangklang B. Implementation analysis of an elevator energy regenerative unit (EERU) for energy saving in a building [C]. 2016 13th International Conference on ECTI-CON, 2016: 1-5.
- [13] 申瑞, 张自强, 等. 电梯节能能量回馈控制系统设计 [J]. 河南科技大学学报: 自然科学版, 2010 (1) : 27-30.
- [14] 宫成, 焦然, 等. 超级电容在电梯节能中的应用 [J]. 电气应用, 2014 (22) : 53-58.
- [15] Jabbour N, Mademlis C. Improved control strategy of a supercapacitor-based energy recovery system for elevator applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31 (12) : 1-1.
- [16] Jabbour N, Mademlis C. Supercapacitor-based energy recovery system with improved power control and energy management for elevator applications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017 (99) : 1-1.
- [17] 冀国郡, 王云亮. 基于模糊控制策略的超级电容节能电梯研究 [J]. 电源技术, 2016 (8) : 1673-1674.
- [18] 罗志群, 万健如, 等. 超级电容储能式电梯应用研究 [J]. 电机与控制学报, 2015 (6) : 55-60.
- [19] Xun Q, Wang P, Quan L, et al. Research on control strategy of super capacitor energy storage system in traction elevator [C]. International Conference on Engineering Science and Management, 2016: 160-164.
- (收稿日期: 2017-04-24) **EA**

(上接第41页)

- [3] 魏伟, 倪颖婷, 罗凤章, 等. 基于热网互联的电力系统灵活性调度模型 [J]. 电力自动化设备, 2017, 37 (6) : 164-170.
- [4] 马建伟, 葛挺, 荆百林, 等. 热电联产机组的节能发电调度技术研究与实践 [J]. 中国电力, 2009, 42 (4) : 14-17.
- [5] 龙虹毓, 徐瑞林, 何国军, 等. 基于热风电协调调度的系统日调峰能力分析 [J]. 电力自动化设备, 2013, 33 (4) : 30-34, 54.
- [6] 陈巨龙, 赵翔宇. 多时序协调的发电调度系统开发与应用 [J]. 南方电网技术, 2014, 8 (6) : 78-82.
- [7] 李翔, 赵翔宇, 辛阔, 等. 南方电网调度综合计划管理与评估系统研发 [J]. 南方电网技术, 2014, 8 (2) : 109-112.
- [8] 丁恰, 王岗, 唐然, 等. 日发电计划安全校核系统开发与应用 [J]. 江苏电机工程, 2013, 32 (1) : 9-12.
- [9] 王永庆, 张宏, 苏耕, 等. 热电联产机组节能发电组合研究 [J]. 电网与清洁能源, 2013, 29 (12) : 45-49.
- [10] 王冠群, 刘锋, 梅生伟, 等. 合同电量优化分解模型及算法 [J]. 电机与控制学报, 2012, 16 (7) : 58-64.
- (收稿日期: 2017-09-11) **EA**