

DOI: 10.7652/xjtuxb201402012

综合热电负荷控制下的省级电网风电并网研究

李鹏¹, 杨玉龙², 黄越辉¹, 吴锴²

(1. 中国电力科学研究院, 100192, 北京; 2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对中国北方电网中大量的间歇性和波动性的风电, 以及高比例的热电联产机组并存而带来的风电并网难题, 提出一种综合热电负荷控制的方法, 通过引入城市中广泛使用的空调热泵和集中供暖管道距离这两个因素来实现。根据上述提出的方法, 综合热电负荷控制可按照以下方法实现: 首先, 在系统风电出力不足时, 减少热电联产机组热水出力, 增加热电联产机组的发电出力, 等效补偿风电出力不足; 其次, 考虑到供暖距离导致的热热水传输延迟, 在风电出力过剩时, 通过使用空调热泵消耗电能提供采暖供热, 弥补热电机组采暖热水输出减少带来的终端用户采暖热水供给不足, 同时可以消耗多余的风电出力。仿真计算结果表明: 所提方法能够很好地帮助系统增加风电并网容量, 新增并网风电可达风电总发电量的 13%, 而且这种新的综合热电负荷的控制方法具有很好的节能潜力, 在现有条件下, 对所仿真的系统每日可减少标准煤耗 917.28 t。

关键词: 热电联产; 智能电网; 风电; 负荷控制

中图分类号: TM761 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)02-0069-06

Wind Power Integration in Provincial Power Grid under Electricity and Heating Load Control

LI Peng¹, YANG Yulong², HUANG Yuehui¹, WU Kai²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Aiming at the difficulties in wind power integration with a mass of intermittent wind power and combined heat and power (CHP) in northern China, a strategy for integrated electricity and heating load control based on smart grid technology is proposed via electric heat pumps (EHPs) and heating delay due to heating distance. According to aforementioned methodology, integrated electricity and heating load control is realized. When the wind power is insufficient, heating water from CHP units is suggested to be shaved so as to increase its power output and compensate wind power equivalently. Then taking account of heating delay due to heating distance, EHPs can supply heating by electricity to replace parts of CHP heating water when the wind power is surplus, so that excess wind power is utilized. A numerical simulation concerning CHP, wind power turbines and condensing unit is performed to illustrate the result. It indicates that the capacity of integrated wind power is heightened by 13% of the total wind power, and with less energy consumption, for the simulated system standard coal of 917.28 t can be reduced every day under the existing condition.

Keywords: combined heat and power; smart grid; wind power; load control

收稿日期: 2013-04-30。 作者简介: 李鹏(1985—), 男, 工程师; 吴锴(通信作者), 男, 教授, 博士生导师。 基金项目: 国家“863 计划”资助项目(2011AA05A101); 国家自然科学基金资助项目(51207145); 国家电网公司科技计划资助项目(NY71-12-018)。

网络出版时间: 2013-10-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20131018.0744.001.html>

随着中国经济的高速发展、化石燃料的严重污染和逐渐枯竭,风能作为一种清洁的可再生能源,大力发展风电既可以缓解用电紧张、为经济发展提供可持续的动力,也可以减少对传统化石燃料的过度依赖,对节能和环保都具有重要的意义^[1]。在过去的10年,中国风电发展迅速,截止到2011年底,全国风电总装机容量达到62.36 GW^[2]。中国的风能资源主要集中在东北、华北、西北地区,2011年整个三北地区风电装机约为50 GW^[3],而电力负荷主要分布在东南沿海地区,风能资源的地理分布与电力负荷并不匹配,面对当地负荷水平较低、电网建设滞后以及跨省区市场不成熟等原因,风电消纳问题突出^[4]。同时,风电自身具有随机性、波动性等特点,缺少灵活调峰设备也严重阻碍着电网接纳风电,其中我国北方地区存在着很高比例的热电联产机组,用于冬季居民、工业的采暖需求,使得热电联产机组运行在“以热定电”模式下^[5],其可调节发电出力范围十分有限,这进一步加剧了电网调峰以及风电的并网难度^[6-7]。

本文提出了一种综合热电负荷控制的方法,一方面利用城市中大量使用的空调热泵^[8-9]分担部分采暖负荷,使得热电联产热电解耦,增加机组调峰容量,同时电力热泵可以消耗过剩风电,减少弃风;另一方面考虑集中供暖系统的热水管道距离,利用热水管道距离导致的热电联产热水供给的延时效应,可以控制热电联产和电力热泵的功率以及调节时间,来匹配风电出力的波动,实现对风电出力的调节。

1 控制系统和方法

1.1 基于智能电网的控制系统

热电联产机组在线监测系统^[5]已广泛应用于省级电网,可以将现场实时数据通过远程数据终端由电厂收集到调度通信中心EMS系统,并从EMS系统写入数据库,实现对热电联产机组发电出力、供暖出力和燃料输入这3个物理量的监测与控制。

调度中心对采暖终端用户的远程监测与控制系统是实现综合热电负荷控制的关键^[10],具有双向性的智能电网通信技术。例如,电力线载波通信可以实时传送调度中心的控制信号和终端用户的热电负荷数据,用户侧的智能控制终端可以实时控制热水散热器节能调控阀门及空调热泵开关,智能电表和智能温度表实时测量负荷数据并汇总到智能采集终端,最后通过载波电力线传送到调度中心。相关智能调度系统结构如图1所示。

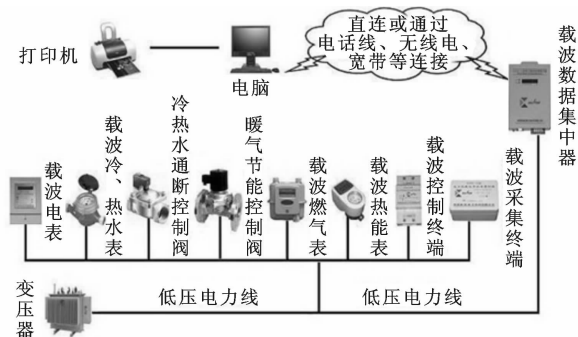


图1 电暖水气远程控制与智能管理示意图

1.2 风电波动控制方法

综合热电负荷控制的方法有:①利用用户侧的电力热泵分担部分采暖负荷,改善热电联产机组调峰能力,同时增加电力负荷消费,增加风电并网容量;②考虑采暖热水传输时间,分时控制热电联产机组出力及电力热泵的功率。系统通过上述方法来匹配风电出力波动,实现对风电出力的调节。综合热电负荷控制的方法依赖于热电联产机组运行工况的改变和分布式电力热泵的使用,热电联产机组的运行工况如图2所示^[9]。当热电联产承担较高的采暖负荷时,其发电出力范围狭小,而通过使用电力热泵分担部分采暖负荷,可以减小热电联产热水出力,从而增加其发电出力的调节幅度。

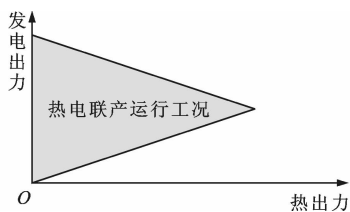


图2 热电联产运行工况

风电具体的控制流程如图3所示,首先,在风电出力低谷时段,可以减小热电联产的采暖热水出力,同时增加其发电出力,达到等效的弥补风电出力的调峰作用。然后,在风电出力高峰时段,根据热电联

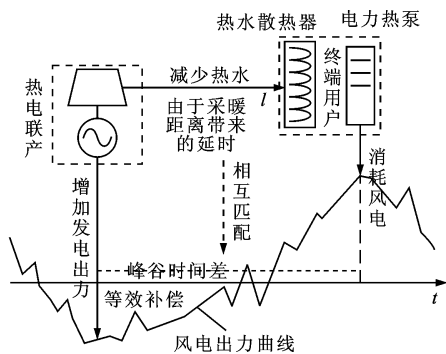


图3 风电出力控制流程

产机组减少的采暖热水输送到终端用户的延迟时间,将风电出力的峰谷时间差和热水传输时间相互匹配,确定电力热泵的空间分布和动作时间。此时用电力热泵耗电供暖,一方面可以补偿热电联产热水供暖不足,另一方面可以消耗过剩的风电出力。

2 数学模型

首先,为了方便计算,将实际运行的时间和终端用户距离热源的实际管道距离离散,计算运行时间 t 和采暖热水传输距离 l

$$t = \left\lceil \frac{T_s}{\Delta T} \right\rceil \quad (1)$$

$$l = \left\lceil \frac{M}{v \Delta T} \right\rceil \quad (2)$$

式中: T_s 代表实际运行时间(s); ΔT 代表时间间隔(s); M 代表采暖热水从热源到采暖终端用户的实际管道传输距离(m); v 是采暖热水流动速度(m/s); $\lceil \cdot \rceil$ 为取整符号。离散化后,时间 $t=0,1,2,\dots,T$,距离 $l=0,1,2,\dots,L$ 。

根据1.2节所述,由电力热泵承担热电联产机组节省的一部分采暖热水出力 $\Delta h(t)$,由此热电联产的采暖热水出力将由以热定电模式下的 $\sum H_{\text{CHP}}(t,i)$ 变化到采暖负荷调度模式下的 $\sum h_{\text{CHP}}(t,i)$,热水出力为

$$\Delta h(t) = \left| \sum H_{\text{CHP}}(t,i) - \sum h_{\text{CHP}}(t,i) \right| \quad (3)$$

式中: i 表示机组编号。热水传输距离 l 离散为 $0,1,2,\dots,L$ 后,终端用户的电力热泵也将按照该离散化距离分布。热水采暖不足的影响存在延时,且延时时间随着不同用户热泵的距离而变化,因此热电联产供暖热水不足的部分将由不同距离的分布式电力热泵在相应的时间承担,表示为

$$\Delta h(t) = \sum_{l=0}^L h_{\text{EHP}}(t+l,l), \quad t+l \leq T \quad (4)$$

式中: $h_{\text{EHP}}(t+l,l)$ 表示距离 l 的热泵在 $t+l$ 时段通过消耗电力提供的采暖功率。分布式热泵消耗的电力 $p_{\text{EHP}}(t,l)$ 和提供的热力 $h_{\text{EHP}}(t,l)$ 可以通过热泵性能系数 C_{EHP} 相联系

$$h_{\text{EHP}}(t,l) = C_{\text{EHP}} p_{\text{EHP}}(t,l) \quad (5)$$

这里为了简化模型,假设所有热泵的性能系数均为 C_{EHP} ,并规定热泵供热量不能超过终端用户的热负荷 $Q_{\text{Load}}(t,l)$

$$0 \leq h_{\text{EHP}}(t,l) \leq Q_{\text{Load}}(t,l) \quad (6)$$

此外,模型还需要满足电力电量平衡约束

$$P_{\text{load}}(t) + p_{\text{EHP}}^{\text{sum}}(t) =$$

$$\sum p_{\text{CHP}}(t,i) + \sum p_{\text{CON}}(t,i) + P_{\text{wind}}(t) \quad (7)$$

式中: $P_{\text{load}}(t)$ 为非采暖电力负荷; $p_{\text{CHP}}(t,i)$ 和 $p_{\text{CON}}(t,i)$ 分别为热电联产机组和纯凝汽式火电机组发电出力; $p_{\text{EHP}}^{\text{sum}}(t)$ 为新增加的采暖电力负荷,由所有用户的分散热泵耗电功率构成

$$p_{\text{EHP}}^{\text{sum}}(t) = \sum_{l=0}^L p_{\text{EHP}}(t,l) \quad (8)$$

热电联产机组和火电机组的发电出力约束分别为

$$P_{\text{CON}}^{\min}(i) \leq p_{\text{CON}}(t,i) \leq P_{\text{CON}}^{\max}(i) \quad (9)$$

$$p_{\text{CHP}}^{\min}(t,i) < p_{\text{CHP}}(t,i) \leq p_{\text{CHP}}^{\max}(t,i) \quad (10)$$

其中火电机组的发电出力上、下限是不随时间变化的常量,而热电联产机组的发电出力上、下限则受到热电工况的制约

$$0 \leq h_{\text{CHP}}(t,i) \leq H_{\text{CHP}}(t,i) \quad (11)$$

$$p_{\text{CHP}}^{\min}(t,i) = C_v(i) h_{\text{CHP}}(t,i) \quad (12)$$

$$p_{\text{CHP}}^{\max}(t,i) = C_{\text{CHP}}(i) - C_b(i) h_{\text{CHP}}(t,i) \quad (13)$$

式中: $C_{\text{CHP}}(i)$ 为热电联产机组的发电容量; $C_b(i)$ 和 $C_v(i)$ 为其工况曲线特性参数。由于风电出力波动频繁,还需要考虑机组的爬坡约束,热电联产机组和火电机组的爬坡出力限制为

$$|p_{\text{CHP}}(t,i) - p_{\text{CHP}}(t-1,i)| \leq R(i) \Delta T, \quad t \geq 1 \quad (14)$$

$$|p_{\text{CON}}(t,i) - p_{\text{CON}}(t-1,i)| \leq R(i) \Delta T, \quad t \geq 1 \quad (15)$$

式中: $R(i)$ 为机组的最大爬坡速度。为了更真实地反映实际的调度计划,针对机组组合问题^[11],需要考虑机组启停机运行状态逻辑约束和机组启停机时间约束

$$\left. \begin{aligned} X(t,i) - X(t-1,i) - Y(t,i) + Z(t,i) &= 0 \\ -X(t,i) - X(t-1,i) + Y(t,i) &\leq 0 \\ X(t,i) + X(t-1,i) + Y(t,i) &\leq 2 \\ -X(t,i) - X(t-1,i) + Z(t,i) &\leq 0 \\ X(t,i) + X(t-1,i) + Z(t,i) &\leq 2 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

$$Y(t,i) + \sum_{k=1}^K Z(t+k,i) \leq 1 \quad (17)$$

$$Z(t,i) + \sum_{k=1}^K Y(t+k,i) \leq 1 \quad (18)$$

式中: X 为机组运行状态参数(0表示停机,1表示运行); Y 为机组启动状态参数(1表示正在启机,0表示运行或停机); Z 为机组停机状态参数(1表示正在停机,0表示启动或运行); k 为启停机时间指数; K 为最小启停机时间周期数。以风电并网容量

最大为目标,得到目标函数为

$$\max P_{\text{wind}}^{\text{gross}}(t) = \sum_{t=0}^T P_{\text{wind}}(t) \quad (19)$$

另外,风电并网功率 $P_{\text{wind}}(t)$ 还要受到预测的风电理论功率 $P_{\text{wind}}^{\text{theory}}(t)$ 的约束

$$P_{\text{wind}}(t) \leq P_{\text{wind}}^{\text{theory}}(t) \quad (20)$$

3 模拟计算

模拟计算以北方某省级电网为例,其中纯凝汽式火电机组总装机容量为 13 909 MW,抽凝汽式热电机组总装机容量为 2 234 MW,风电总装机容量为 2 301 MW,冬季典型的风电理论功率曲线如图 4 所示,其中抽凝汽式热电机组共承担采暖负荷为 2 460 MW。

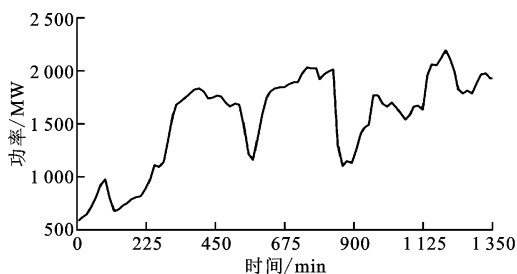


图4 理论上的风电功率曲线

根据风电的波动性和电网现行调度计划,设时间间隔 ΔT 为 15 min,总运行时长为 24 h。中国城市供暖热水流速 $v=2.5 \text{ m/s}^{[12]}$,热电联产机组到采暖终端用户的最长管道距离为 20 km^[12],由此采暖负荷的空间分布按均匀分布来计算,如图 5 所示,每个用户组的采暖负荷均为 307.5 MW,取空调热泵性能系数 C_{EHP} 为 1.0~5.0,来进行算例仿真。

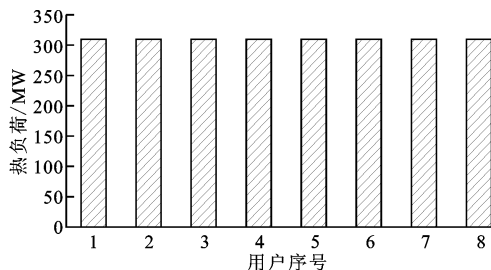


图5 采暖负荷空间分布

4 计算结果与分析

4.1 电力负荷调度情况

图 6 和图 7 分别为以热定电模式和热电负荷控制模式下的电力负荷平衡情况,可见在采用了热电

负荷的综合控制后,一方面弃风电量明显减少;另一方面热电联产机组的出力波动显著增加,且机组出力大幅降低,在某些时段降幅甚至超过 50%。

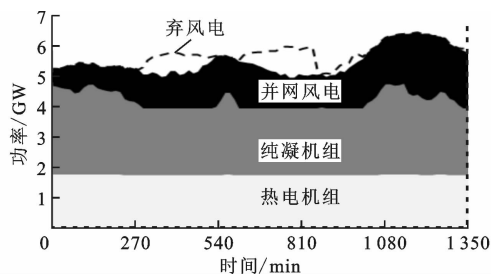


图6 原电力负荷构成

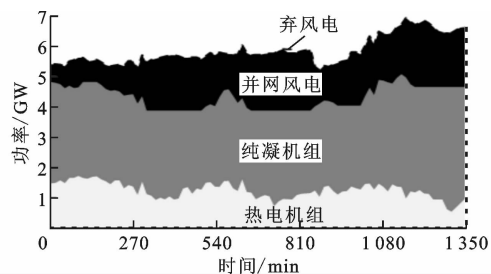


图7 现电力负荷构成

图 8 显示了负荷控制模式下的电力负荷构成情况。与以热定电模式下单一的非采暖电力负荷相比,在负荷控制模式下,尤其是在电力负荷低谷时段,新增加大比例的非采暖用电负荷。

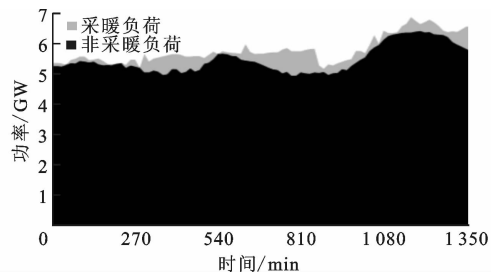


图8 负荷控制模式下的电力负荷构成

综合热电负荷控制可以显著地减小弃风电量,提高系统风电的接纳能力,其主要原因:①热电联产机组热出力减小、运行工况改变,导致其在风电富余时能够降低发电出力,为接纳风电并网留出足够的负荷空间;②使用分布式电力热泵,在弥补热电联产热水不足的同时,也达到了利用富余风电的目的,提高了风电并网容量。

4.2 热电负荷控制方法对减少弃风的影响

热电负荷控制方法对于系统减少弃风、帮助风电并网具有重要作用。图 9 显示了不同热泵性能系数 C_{EHP} 时,以热定电模式和负荷控制模式下的风电弃风情况,其中弃风率为

$$R_{wind}^{abandon} = \frac{E_{wind}^{abandon}}{E_{wind}} \times 100\% \tag{21}$$

式中: $E_{wind}^{abandon}$ 为弃风电量($MW \cdot h$); E_{wind} 为理论风电电量($MW \cdot h$)。在以热定电模式下,弃风率约为 15%,根据实际风电电量约为 37 103.3 $MW \cdot h$,弃风电量多达约 5 490.4 $MW \cdot h$ 。利用本文所述热负荷控制方法,可以大幅度减小弃风率至 2% 以下,弃风电量仅有几百 $MW \cdot h$ 。同时,热泵性能系数 C_{EHP} 对弃风率有着一定的影响, C_{EHP} 较小时,本文所述方法对减少弃风的效果更好。

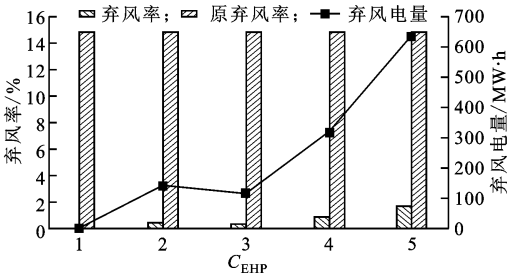


图 9 不同 C_{EHP} 下的弃风情况

4.3 节能效益

图 10 显示了不同 C_{EHP} 下的耗煤情况,其中分别包括采用热负荷调度后总煤耗以及原先的煤耗。除了 $C_{EHP}=1$ 时煤耗略有增加外,热负荷调度对于减少煤耗的作用都是十分明显的,且总的煤耗随着 C_{EHP} 的增大而增加。按现有空调热泵性能系数 $C_{EHP}=3$ 计算,节煤量可达 7 548 $MW \cdot h$,约合 917.28 t 标准煤。

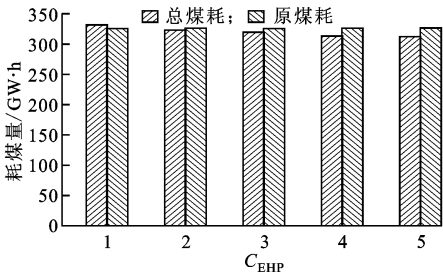


图 10 不同 C_{EHP} 下的弃风情况

综合分析,总煤耗的降低来源于:①使用分布式电力热泵,利用了清洁的风电,改变了单一的采暖能量来源,减少了化石燃料的消耗;②高效的电力热泵提高了供暖的效率。

5 结 论

中国北方存在的大量抽凝汽式热电联产机组,在供暖期承担较大的供暖负荷,运行在以热定电的模式下,对风电的并网造成了很大的负面影响。根

据本文所述热负荷控制的方法,可以利用城市中现有的分布式电力热泵分担部分采暖负荷,一方面可以增加热电联产出力的灵活性,为风电并网留下更大的负荷空间;另一方面,热泵耗电增加了低谷电力负荷,使得更多原本被弃的风电可以并网,降低了煤耗。

(1)分布式电力热泵分担了部分热电联产的采暖负荷,增加了热电联产机组发电出力的可调节范围,起到了很好的调峰作用,为风电并网提供了足够的负荷空间。

(2)由于使用分布式电力热泵,使得大量原本被弃的风电可以实现并网,这就增加了电力作为新的采暖能量载体,减少了单一热水采暖时的化石燃料消耗,起到了节能的作用。

(3)热泵性能系数 C_{EHP} 影响最终的调节效果和节能效益,一方面弃风量随着 C_{EHP} 的减小略有减少;另一方面, C_{EHP} 越大,节能效益越大,节能效果越好,当 $C_{EHP}>1$ 时,热负荷调度的总煤耗要明显低于以热定电模式,具有可观的节能效果。

参考文献:

[1] LIU W, LUND H, MATHIESEN B V. Large-scale integration of wind power into the existing Chinese energy system [J]. Energy, 2011, 36(8): 4753-4760.

[2] ZHANG Xiliang, CHANG Shiyao, MARTINOT E. Renewable energy in China: an integrated technology and policy perspective [J]. Energy Policy, 2012, 51(1): 1-6.

[3] LIAO C P, JOCHEM E, ZHANG Y, et al. Wind power development and policies in China [J]. Renewable Energy, 2010, 35(9): 1879-1886.

[4] 李俊峰. 2012 中国风电发展报告 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2012: 30-31.

[5] 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): 14-19.

MA Jianwei, GE Ting, JING Bailin, et al. The research and practice for energy conservation and emissions reduction dispatch of cogeneration unit [J]. Electric Power, 2009, 42(4): 14-19.

[6] 白雪飞, 王丽宏, 杜荣华. 风电大规模接入对蒙西电网调峰能力的影响 [J]. 内蒙古电力技术, 2010, 28(1): 1-4.

BAI Xuefei, WANG Lihong, DU Ronghua. Influence on peak regulation capability to Inner Mongolia power (下转第 117 页)