

基于热电风电协调调度的系统日调峰能力分析

龙虹毓¹,徐瑞林²,何国军²,赵 渊³,谢开贵³,张 煦³

(1. 重庆市电力公司博士后科研工作站,重庆 401123;2. 重庆市电力公司电力科学研究院,重庆 401123;

3. 重庆大学 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室,重庆 400044)

摘要:提出一种热电风电协调调度方法,以热电联产机组和水源热泵作为联合热源,通过联合热源与风电出力的协调控制,减少等效风电出力波动性。该方法以风电出力波动最小为目标,将热源与采暖终端用户之间的供暖热水管道传输距离转化为输送时间,并将其作为热电风电协调调度的关键参量。计算了系统日调峰不足率,该指标反映了风电并网出力随机性对电网日调峰能力的影响,也验证了协调调度方法对减少风电波动和增加风电并网容量的有效性。

关键词:风电; 并网; 热电风电协调调度; 热电联产机组; 水源热泵; 调峰

中图分类号: TM 73; TM 614

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.04.006

0 引言

风能是目前开发技术最为成熟、规模效益明显和利用前景最为看好的可再生能源,近年来风力发电的发展势头强劲,风电装机容量不断增加,截至2011年底,中国风电累计装机容量达到62.73 GW^[1]。但是风电出力具有间歇性和波动性等特点^[2-3],大规模的风电并网会增大电力系统运行风险,特别是给系统调峰带来困难。

要实现大规模的风电并网,需对风电出力进行一定的控制,以平抑其波动性。目前,平滑风电出力的方式主要有2种:一是直接功率控制,通过调节桨距角或风机的转速等机组运行状态来实现;二是为风电配置一定容量的储能系统,通过储能系统与电网的双向功率交换,实现风电出力波动的平抑。文献[4-7]通过变桨距、控制转子转速或变速变桨距协调控制等方式实现风能充足时的稳定功率输出和风能不足时的最大功率跟踪,在一定程度上减小了风电出力的波动。文献[8-10]采用蓄电池、超级电容等快速储能装置实现风电潮流的优化控制,平滑风电注入电网的有功功率。文献[11-12]充分利用水电的储能能力,提出水电-风电系统联合调峰运行策略。文献[13]针对我国北方地区风资源和煤炭资源丰富的特点,提出了“风电-火电打捆上网”的方法,有效降低

了风电波动性对电网的影响。

以上文献在改善风电并网功率和调峰方面都取得较好的效果。但通过调节机组运行状态的直接功率控制方法功率调节能力有限,难以实现大规模的风电并网运行。为风电配置储能系统需要增加硬件装置,加大投资。

目前,我国风电主要集中在“三北”(东北、西北、华北)地区,而这些地区网内存在高比例的热电联产机组,热电联产机组通常按照以热定电模式运行,调峰能力有限,难以承受风电出力的大幅波动,大量现有研究表明二者的大量共存会给电网调峰带来困难^[14-15]。文献[16]指出内蒙古电网在冬季供暖期间,风电低谷大出力,反调峰几率高,而网内供热机组因承担供热任务,一般不参与调峰,导致系统调峰能力不足。文献[17]指出随着我国“三北”地区风电规模的逐渐增大,到冬季煤电机组供热期、水电机组枯水期、风电机组大发期相互叠加,导致调峰困难,弃风严重。

基于以上背景,本文提出热电风电协调调度方法,即把热电联产机组、集中式水源热泵和分布式热泵看成一个整体加以控制,通过调节热电联产机组的出力和集中式水源热泵的耗电功率以及用户侧分布式热泵的开启时间,在保证各用户原有热量供应的基础上,改变整体发电出力,等效改变风电出力,并基于风电出力标准差和调峰不足率指标对热电风电协调调度模式和传统的以热定电模式进行了对比研究,验证本文方法在平滑风电出力和缓解系统调峰压力方面的有效性。

1 热电风电协调调度方法及数学模型

1.1 热电风电协调的基本思路

热电风电协调调度基本思想是把抽凝式热电联产机组和电厂侧的集中式水源热泵构成的联合热源

收稿日期:2012-07-28;修回日期:2013-02-25

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2011-AA05A101);国家自然科学基金资助项目(50977094,50777067,51077135);国家电网公司科技项目(522023120017,52202312-0018)

Project supported by the National High Technology Research and Development Program(863 Program) of China(2011AA-05A101),the National Natural Science Foundation of China(50977094,50777067,51077135) and Research and Development Program of State Grid Corporation of China(522023120017,522023120018)

作为“源控点”,同时在用户终端使用分布式热泵作为“受控点”,通过优化控制“源控点”热电联产机组的发电出力 and 集中式水源热泵的耗电功率以及“受控点”分布式热泵的启动时间,等效改变风电出力,减小风电出力的波动。

具体协调调度过程如图 1 所示,当风电出力处于低谷时,可以在“源控点”减少集中式水源热泵消耗功率和抽凝式热电联产机组采暖供热出力,相应获得的热电发电出力增量可等效填补原来风电出力曲线的低谷;同时“源控点”减少的采暖热水,通过对供暖延时与风电出力的峰谷时间差之间的优化匹配,在“受控点”通过分布式热泵进行补偿,相应产生的耗电增量可等效削减原来风电出力曲线的高峰;这样对风电出力进行一系列的“削峰填谷”,最终实现减少等效风电出力的波动。

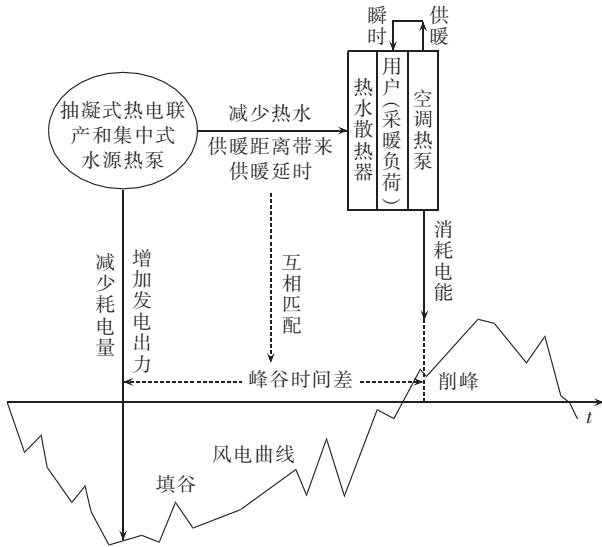


图 1 热电风电协调调度方法

Fig.1 Method of wind-thermal power combined dispatch

由于风电场群出力在短时间内具有互补性,变化速率在每分钟 0%~1.5% 之间的概率为 99%^[13],而抽凝式热电联产机组的出力爬坡速率是每分钟 2%~3%,集中式水源热泵和分布式热泵均可即时响应,从而由这三者组成的联合体变化速率可以跟上风电出力变化速率,所以利用热电风电协调调度方法调整风电出力变化是可行的。

1.2 数学模型

本文提出基于联合热源的热电风电协调调度方法来减少风电出力的波动,目标函数设为风电出力波动的标准差最小。

$$\min \Delta p_{\text{wind}} = \sqrt{\frac{\sum_{t=0}^T [p_{\text{wind}}(t) - \bar{p}_{\text{wind}}]^2}{T+1}} \quad (1)$$

$$\bar{p}_{\text{wind}} = \frac{\sum_{t=0}^T p_{\text{wind}}(t)}{T+1} \quad (2)$$

其中, T 为计算时长; Δp_{wind} 为经过热电风电协调调度调整以后,等效风电出力曲线的波动幅度; $p_{\text{wind}}(t)$ 为调整后新的等效风电出力; $\bar{p}_{\text{wind}}$ 为 $p_{\text{wind}}(t)$ 的算术平均值。

根据用户与“源控点”的距离把用户分成 N 组,设第 i 组用户到“源控点”距离为 l_i ,同时设热水流速为 v ,调度时间间隔为 ΔT 。为方便计算,在全文中功率的单位统一为 MW,距离单位为 m。

基于抽凝式热电联产机组、集中式水源热泵和分布式热泵组成的联合热源系统,得到 t 时刻的等效风电出力 $p_{\text{wind}}(t)$ 和供热功率减少量 $\Delta q(t)$ 的表达式:

$$p_{\text{wind}}(t) = P_{\text{wind}}(t) + [\bar{p}_{\text{CHP}}(t) - P_{\text{CHP}}(t)] + [P_{\text{WSHP}}(t) - p_{\text{WSHP}}(t)] - p_{\text{DHP}}^{\text{sum}}(t) \quad (3)$$

$$\Delta q(t) = Q_{\text{CHP}}(t) + Q_{\text{WSHP}}(t) - q_{\text{CHP}}(t) - q_{\text{WSHP}}(t) \quad (4)$$

其中, $P_{\text{wind}}(t)$ 为实际风电出力; $\bar{p}_{\text{CHP}}(t)$ 为热电风电协调调度模式下,考虑爬坡速率后的热电联产机组有效出力; $P_{\text{CHP}}(t)$ 为抽凝式热电联产机组在原来以热定电模式下的发电出力; $Q_{\text{CHP}}(t)$ 和 $Q_{\text{WSHP}}(t)$ 分别为以热定电调度模式下的热电联产机组和集中式水源热泵的供暖出力; $q_{\text{CHP}}(t)$ 和 $q_{\text{WSHP}}(t)$ 为在热电风电协调调度模式下的抽凝式热电联产机组和集中式水源热泵的供暖出力; $p_{\text{WSHP}}(t)$ 和 $p_{\text{WSHP}}(t)$ 分别为以热定电模式和热电风电协调调度模式下集中式水源热泵为提供采暖热水所消耗的电功率; $p_{\text{DHP}}^{\text{sum}}(t)$ 为 t 时刻所有用户处热泵的耗电功率之和。

由于“源控点”热水到用户 i 需要一定的传输时间 Δt_i ,即 t 时刻的供热减少量 $\Delta q(t)$ 需要延时 Δt_i 才能对用户供热造成影响,故需在 $t + \Delta t_i$ 时刻在用户侧开启分布式热泵进行供热,则:

$$\Delta q(t) = \sum_{i=1}^N q_{\text{DHP}}(t + \Delta t_i, l_i) \quad t + \Delta t_i \leq T \quad (5)$$

其中, $q_{\text{DHP}}(t + \Delta t_i, l_i)$ 为距离“源控点” l_i 的用户在 $t + \Delta t_i$ 时刻开启分布式热泵的供热出力。

$$q_{\text{DHP}}(t, l_i) = C_{\text{DHP}} p_{\text{DHP}}(t, l_i) \quad (6)$$

$$Q_{\text{WSHP}}(t) = C_{\text{WSHP}} P_{\text{WSHP}}(t) \quad (7)$$

$$q_{\text{WSHP}}(t) = C_{\text{WSHP}} p_{\text{WSHP}}(t) \quad (8)$$

其中, C_{WSHP} 、 C_{DHP} 分别为集中式水源热泵和分布式热泵的性能系数; $p_{\text{DHP}}(t, l_i)$ 为距离“源控点” l_i 的用户在 t 时刻的耗电功率。

热电风电协调调度约束条件如式(9)~(12)所示^[18-23]:

$$0 \leq q_{\text{CHP}}(t) \leq Q_{\text{CHP}}(t) \quad (9)$$

$$0 \leq q_{\text{DHP}}(t, l_i) \leq Q_{\text{Load}}(t, l_i) \quad (10)$$

$$p_{\text{CHP}}^{\min}(t) \leq p_{\text{CHP}}(t) \leq p_{\text{CHP}}^{\max}(t) \quad (11)$$

$$|p_{\text{CHP}}(t + \Delta T) - p_{\text{CHP}}(t)| \leq V \Delta T \quad (12)$$

其中, $p_{\text{CHP}}^{\min}(t)$ 、 $p_{\text{CHP}}^{\max}(t)$ 分别为 t 时刻最小、最大发电出

力^[17], V 为爬坡速率。式(9)、(11)、(12)分别为热电联产机组的供暖出力约束、发电出力约束、功率调节速率约束;式(10)为距离“源控点” l_i 的用户的热负荷约束,其最大热负荷为 $Q_{\text{Load}}(t, l_i)$ 。

2 热电风电协调调度下日调峰能力分析

2.1 系统接入风电的调峰需求变化

电力负荷由于受多种因素的影响,随时间不断变化,同时具有一定的规律性。这里选用日负荷曲线,描述系统接入风电的调峰需求变化。

图 2 所示为电力系统的日负荷曲线,描述了电力系统一天 24 h 的负荷变化情况。当电力系统没有接入风电前,调峰需求表现为该时刻负荷与日最小负荷的差值。风电接入系统后,若日前能准确预测风电出力,则系统调峰需求表现为净负荷曲线该时刻的负荷与该日最小净负荷之差^[24]。其中,净负荷曲线定义为:将风电看成负的负荷,在日负荷曲线上减去风电出力后得到的曲线。

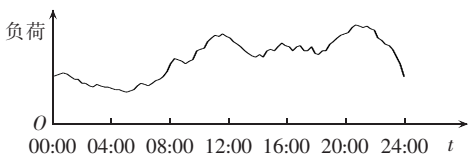


图 2 日负荷曲线
Fig.2 Daily load curve

由于风电出力的间歇性和随机性,风机有可能在系统日负荷最大时,出现低出力甚至零出力情况,而在系统日负荷最小时,出现满发情况,使得系统的日调峰需求具有较大的波动性。本文将热电联产机组、集中式水源热泵和分布式热泵看成一个联合体,通过热电风电协调调度,调整风电出力曲线,使得等效风电出力波动尽量小,从而降低系统的调峰需求。风电接入前后调峰需求曲线如图 3 所示。

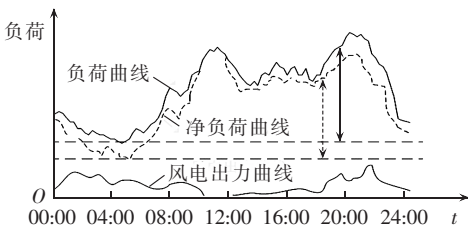


图 3 风电接入前后系统调峰需求曲线
Fig.3 Peak-load regulation demand curves before and after wind power integration

2.2 协调调度下系统日调峰能力分析流程

先定义系统调峰容量为系统正常运行机组出力与运行机组最小技术出力之差。调峰不足率定义为一定时间内调峰不足次数与总调峰次数的比值。

本文进行日调峰能力分析,具体步骤如下。

a. 根据风速分布模拟风电出力时序曲线;采用

热电风电协调调度方法,对风电出力曲线进行调整,得到等效风电出力时序曲线。

b. 由等效风电出力时序曲线和负荷时序曲线得到净负荷时序曲线,计算日调峰需求 $P_{\text{dem}}(t)$ 。

c. 由系统调峰容量 P_{ES} ,判断 t 时刻调峰是否充裕,判断式为 $P_{\text{ES}} \geq P_{\text{dem}}(t)$ 。若该式成立,则认为该时刻调峰充裕,否则认为该时刻调峰不足,并对调峰不足次数进行统计。

d. 判断该日模拟是否结束,若结束,则计算该日调峰不足率 $P_{\text{RES}} = N_{\text{RES}} / 96$,其中, N_{RES} 为该日调峰不足次数。

3 算例分析

算例条件如下:热源侧承担采暖负荷共 327 MW,选择电厂侧的集中式水源热泵的总热容量是 150 MW,性能系数为 5,选用一台 C135/N150-13.24 型抽凝式热电联产机组供热出力 177 MW,供电出力 130 MW,爬坡速率 $V = \pm 2 \text{ MW/min}$ 。系统调峰容量为 25 MW。

风速采用威布尔分布,形状参数为 2.1,尺度参数为 5.5。切入风速取 3 m/s,切出风速为 15 m/s,额定风速为 8 m/s,并网风电额定功率为 10 MW,按文献[25]计算风电出力,得到风电出力曲线,其中参数 A 、 B 、 C 分别取 0.36、0.24、0.04。负荷曲线采用修改的某地区典型日负荷曲线,如图 4 所示。

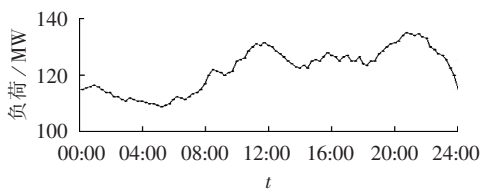


图 4 日负荷曲线
Fig.4 Daily load curve

热电风电协调调度的单位调度时间为 15 min,总调度时长为 24 h,共 96 个时段。热水流速为 2.5 m/s,用户间隔为 2.25 m,居于采暖终端用户处的分布式热泵的性能系数设为 5.0。

模拟实际供热状况,得到一组近端型的热负荷分布^[26],结果如表 1 所示。

表 1 热负荷分布
Tab.1 Distribution of heating load

用户组	距离/m	热负荷值/MW
用户 1	2.25	17.836
用户 2	4.50	79.937
用户 3	6.75	131.795
用户 4	9.00	79.937
用户 5	11.25	17.836

采用热电风电协调调度方法得到的等效风电出力曲线如图 5 所示,系统日调峰不足率如表 2 所示。

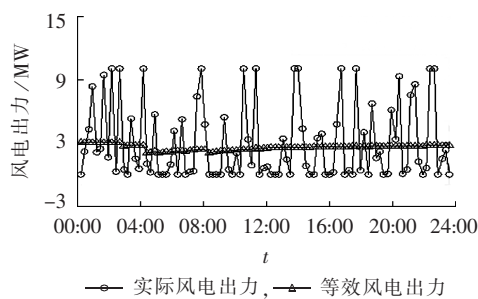


图 5 10 MW 风电并网容量下调整前后
风电出力曲线

Fig.5 Wind power output profiles before and after regulation with wind power integration capacity of 10 MW

表 2 10 MW 风电并网容量下日调峰能力

Tab.2 Daily peak-load regulation capability with wind power integration capacity of 10 MW

调度方法	日调峰不足次数	日调峰不足率
以热定电	21	0.2188
协调调度	1	0.0104

通过对 10 MW 风电并网容量下热电风电协调调度模式的研究可以得到如下结论。

a. 经过热电风电协调调度,等效风电出力曲线几乎变为一条直线,平滑效果较好。经计算,采用以热定电模式和协调调度模式得到的风电出力标准差分别为 3.5947 和 0.1021,表明热电风电协调调度可以显著降低风电出力的波动性。

b. 采用热电风电协调调度模式能够显著降低系统的调峰不足率,有效缓解了系统的调峰压力。

为进一步研究风电并网容量对等效风电出力波动性和系统日调峰能力的影响,将风电并网容量增加至 20 MW、30 MW,其等效风电出力、标准差、日调峰不足率如图 6、表 3、表 4 所示。

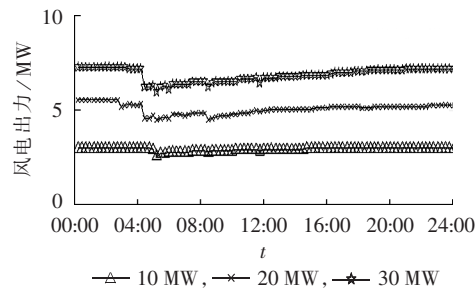


图 6 不同并网容量下的等效风电出力

Fig.6 Equivalent wind power outputs for different wind power integration capacities

表 3 以热定电模式下相关指标

Tab.3 Indicators in “electricity in terms of heat” mode

容量/MW	标准差	日调峰不足次数	日调峰不足率
10	3.5947	21	0.2188
20	6.7864	49	0.5104
30	11.5741	73	0.7604

表 4 热电风电协调调度模式下相关指标

Tab.4 Indicators in wind-thermal power combined dispatch mode

容量/MW	标准差	日调峰不足次数	日调峰不足率
10	0.1021	1	0.0104
20	0.2748	0	0
30	0.3483	1	0.0104

通过增大风电并网容量,对比分析热电风电协调调度模式和传统的以热定电模式在风电出力平滑和调峰方面的能力,可以得到以下结论。

a. 图 6 等效风电曲线和表 4 的标准差表明,随着风电并网容量的增加,等效风电出力波动性稍有增大,但仍能较好地保持等效风电出力的平稳性,体现了热电风电协调调度对风电出力具有良好的平滑性能。

b. 表 3 表明,采用以热定电模式,风电出力的波动性随着风电并网容量增大而显著增加,日调峰不足率也显著增大。

c. 表 4 表明,采用热电风电协调调度方法,随着风电并网容量的增大,等效风电出力的标准差较小,略有增大,日调峰不足率也保持较低水平,小于 0.02。通过表 3、表 4 的对比表明,热电风电协调调度方法能有效平滑风电出力,显著降低系统的日调峰不足率。

4 结论

针对我国北方地区风能资源丰富和存在高比例的热电联产机组的特点,并借鉴风电直接功率控制或配置大容量储能设备以减小风电波动,本文提出了一种新颖的热电风电协调调度方法,即通过热电联产机组、集中式水源热泵和分布式热泵的联合协调调度,等效改变风电出力。对热电风电协调调度模式与传统的以热定电模式进行了比较研究,得到这 2 种模式在不同风电并网容量下的风电出力标准差和系统日调峰不足率指标。通过仿真分析表明,本文方法可以有效平滑风电出力的波动,降低了系统的调峰压力,提高了系统运行的经济性,为大规模风电并网提供了可行思路和技术支撑。

参考文献:

[1] 北京正点国际投资咨询有限公司. 2012—2016 年中国风力发电设备行业投资分析及前景预测报告[R]. 北京:北京正点国际投资咨询有限公司,2012.

[2] 肖创英,汪宁渤,陟晶,等. 甘肃酒泉风电出力特性分析[J]. 电力系统自动化,2010,34(17):64-67.

XIAO Chuangying,WANG Ningbo,ZHI Jing,et al. Power characteristics of Jiuquan wind power base[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(17):64-67.

[3] 白永祥,房大中,侯佑华,等. 调度中心大规模风电场实时在线监控系统[J]. 电力自动化设备,2010,30(11):6-8.

BAI Yongxiang,FANG Dazhong,HOU Youhua,et al. Real-time online

- monitoring and control system in dispatch center for large-scale wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(11): 6-8.
- [4] SENJYU T, SAKAMOTO R, URASAKI N, et al. Output power leveling of wind turbine generator for all operating regions by pitch angle control[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2006, 21(2): 467-475.
- [5] LUO Changling, BANAKAR H, SHEN Baik, et al. Strategies to smooth wind power fluctuations of wind turbine generator[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2007, 22(2): 341-349.
- [6] 陈波, 吴政球. 基于约束因子限幅控制的双馈感应发电机有功功率平滑控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(27): 130-137.
- CHEN Bo, WU Zhengqiu. Power smoothing control strategy of doubly-fed induction generator based on constraint factor extent-limit control[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(27): 130-137.
- [7] 徐浩, 夏安俊, 胡书举, 等. 大型风电机组变速变桨距协调控制技术[J]. 电气传动, 2012, 42(6): 32-36.
- XU Hao, XIA Anjun, HU Shuju, et al. Research on large scale wind turbine variable speed variable pitch coordinated control technology[J]. Electric Drive, 2012, 42(6): 32-36.
- [8] 李国杰, 唐志伟, 聂宏展, 等. 钒液流储能电池建模及其平抑风电波动研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(22): 115-119.
- LI Guojie, TANG Zhiwei, NIE Hongzhan, et al. Modeling and controlling of vanadium redox flow battery to smooth wind power fluctuations[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(22): 115-119.
- [9] 王正浩, 刘金龙, 李国庆, 等. 基于超级电容器储能的并网风电场功率与电压调节技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(3): 113-115.
- WANG Zhenghao, LIU Jinlong, LI Guoqing, et al. Power and voltage regulation of wind farm based on EDLC energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(3): 113-115.
- [10] 丁明, 林根德, 陈自年, 等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(7): 1-6.
- DING Ming, LIN Gende, CHEN Zinian, et al. A control strategy for hybrid energy storage systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(7): 1-6.
- [11] 静铁岩, 吕泉, 郭琳, 等. 水电-风电系统日间联合调峰运行策略[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 98-103.
- JING Tiejian, LÜ Quan, GUO Lin, et al. An inter-day combined operation strategy of hydro and wind power system for regulating peak load[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 98-103.
- [12] 尚志娟, 周晖, 王天华. 带有储能装置的风电与水电互补系统的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(2): 99-105.
- SHANG Zhijuan, ZHOU Hui, WANG Tianhua. Research of complementary system for wind power with energy storage devices and hydro power[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(2): 99-105.
- [13] 肖创英, 汪宁渤, 丁坤, 等. 甘肃酒泉风电功率调节方式的研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(10): 1-7.
- XIAO Chuangying, WANG Ningbo, DING Kun, et al. System power regulation scheme for Jiuquan wind power base[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(10): 1-7.
- [14] LONG Hongyu, XU R L, HE J J, et al. Incorporating the variability of wind power with electric heat pumps[J]. Energies, 2011, 4(10): 1748-1762.
- [15] 刘臣宾, 夏彦辉, 常东旭, 等. 基于GPRS的风电并网稳定控制系统[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(7): 104-107.
- LIU Chenbin, XIA Yanhui, CHANG Dongxu, et al. Wide-area protection and control system based on GPRS for grid-connected wind farm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(7): 104-107.
- [16] 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): 1-3.
- BAI Xuefei, WANG Lihong, DU Ronghua. Influence on peak regulation capability to Inner Mongolia Power Grid with large scale incoming of wind power field[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2010, 28(1): 1-3.
- [17] 刘德伟, 黄越辉, 王伟胜, 等. 考虑调峰和电网输送约束的省级系统风电消纳能力分析[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(22): 77-81.
- LIU Dewei, HUANG Yuehui, WANG Weisheng, et al. Analysis on provincial system available capability of accommodating wind power considering peak load dispatch and transmission constraints[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(22): 77-81.
- [18] LONG Hongyu, XU Ruilin, XU Kunyao. Optimal dispatch between Combined Heating & Power(CHP) and wind turbines through Electric Heat Pumps(EHPs)[C]//2012 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (E3E). Venice, Italy: [s.n.], 2012: 1043-1047.
- [19] LONG H, XU K, HE J. More wind power integration with adjusted energy carriers for space heating in Northern China[J]. Energies, 2012, 5(9): 3279-3294.
- [20] 龙虹毓, 马建伟, 吴楷, 等. 含热电联产和风电机组的电网节能调度[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(11): 18-22.
- LONG Hongyu, MA Jianwei, WU Kai, et al. Energy conservation dispatch of power grid with mass cogeneration and wind turbines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(11): 18-22.
- [21] 龙虹毓, 徐瑞林, 马建伟, 等. 基于采暖需求侧管理的风电机组节能调度[J]. 太阳能学报, 2012, 33(4): 609-613.
- LONG Hongyu, XU Ruilin, MA Jianwei, et al. Energy conservation regulation of wind turbines based on space heating end use management[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2012, 33(4): 609-613.
- [22] 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.
- [23] PIERLUIGI M. Cogeneration systems with electric heat pumps: energy-shifting properties and equivalent plant modelling[J]. Energy Conversion and Management, 2009, 50(8): 1991-1999.
- [24] 张宏宇, 印永华, 申洪, 等. 基于序贯蒙特卡洛方法的风电并网系统调峰裕度评估[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(1): 32-37.
- ZHANG Hongyu, YIN Yonghua, SHEN Hong, et al. Peak-shaving margin evaluation associated with wind power integrated system based on sequential Monte-Carlo method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(1): 32-37.
- [25] BOWDEN G J, BARKER P R, SHESTOPAL V O, et al. The Weibull distribution function and wind power statistics[J]. Wind Engineering, 1983, 7(2): 85-98.
- [26] 程靖. 威布尔分布的参数估计[J]. 巢湖学院学报, 2007(3): 20-23.
- CHENG Jing. Parameters estimation Weibull distribution[J]. Journal of Chaohu College, 2007(3): 20-23.

作者简介:

龙虹毓(1979-), 男, 重庆人, 博士后, 主要从事电力系统运行研究(E-mail: h.y.long2008@hotmail.com)。

(下转第54页 continued on page 54)

- [25] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Colorado, USA:[s.n.], 2003:4989-4996.
- [26] 夏向阳, 罗安, 商红忠. 并联混合型有源电力滤波器的建模[J]. 高电压技术, 2007, 33(9):146-149.
XIA Xiangyang, LUO An, SHANG Hongzhong. Modeling of parallel hybrid active power filter[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(9):146-149.
- [27] 叶小军, 曾江, 王克英, 等. 并联有源电力滤波器双滞环电流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(9):60-64.
YE Xiaojun, ZENG Jiang, WANG Keying, et al. Double hysteresis current control strategy for shunt active power filter[J]. Power

System Protection and Control, 2009, 37(9):60-64.

作者简介:

周雪松(1964-), 男, 江西南昌人, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、电力系统自动化等;

田程文(1984-), 男, 山西朔州人, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用、电力系统继电保护(E-mail:chengwentian0602@163.com);

马幼捷(1964-), 女, 天津人, 教授, 博士, 研究方向为电力系统的分析与控制、风力发电技术等。

SHAPF model based on LADRC and its current tracking control

ZHOU Xuesong, TIAN Chengwen, MA Youjie, LIU Sijia, ZHAO Jian, LIU Jin

(Tianjin Key Laboratory for Control Theory & Applications in Complicated Systems,
Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: A state-space model is established based on PWM(Pulse Width Modulation) theory for the three-phase SHAPF(Shunt Hybrid Active Power Filter) used in middle- and high-voltage distribution systems and a current tracking controller based on LADRC(Linear Auto Disturbance Rejection Control technique) is designed for it, which estimates and compensates the general disturbance caused by all unknown internal dynamics and external disturbances to achieve the real-time tracking of command current. Its control algorithm is simple and easy to implement in practical projects. Simulative and experimental results validate the correctness of the established model and the control performance of the designed controller superior to PI controller.

Key words: shunt hybrid active power filter; linear auto disturbance rejection control technique; total harmonic distortion; state-space model; rapidity; active filters; current control

(上接第 34 页 continued from page 34)

Analysis of peak-load regulation capability based on combined dispatch of wind power and thermal power

LONG Hongyu¹, XU Ruilin², HE Guojun², ZHAO Yuan³, XIE Kaigui³, ZHANG Xu³

(1. Postdoctoral Workstation of Chongqing Electric Power Corporation, Chongqing 401123, China;

2. Chongqing Electric Power Research Institute, Chongqing 401123, China;

3. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: A method of wind-thermal power combined dispatch is presented, which regards the cogenerations and the centralized water-source heat pumps as the joint heat-source and carries out the coordinated control of joint heat-source and wind power to smooth the fluctuation of wind power output. It takes the minimized fluctuation of wind power output as its object and converts the transmission distance between heat source and heating end-user into the feeding time, which is then used as the key parameter of the combined dispatch. The insufficiency of daily peak-load regulation is calculated to reflect the impact of randomness of grid-connected wind power output on the peak-load regulation capability of grid, which verifies the effectiveness of the combined dispatch method in reducing wind power fluctuation and increasing grid-connected wind power capacity.

Key words: wind power; grid connection; wind-thermal power combined dispatch; cogenerations; water-source heat pump; peak-load regulation