

大规模风电接入电力系统调度模式的经济性比较

张 粒 子, 周 娜, 王 楠

(华北电力大学电气与电子工程学院, 北京市 102206)

摘要: 由于风电出力的间歇性和反调峰性, 如果以弃风量最小为目标进行电力调度, 则可能导致火电机组出力严重偏离经济运行区, 致使系统煤耗量增加。结合国内可再生能源发电的相关政策和节能发电调度的基本目标及准则, 针对基于弃风量最小和能耗最小的 2 种发电调度模式, 分别构建了相应的优化调度模型; 研究并提出了含风电系统发电调度的经济性评价指标, 包括风电利用率、可用风电单位价值、系统能耗和调峰容量等; 采用 10 机测试系统, 在不同风电接入量的条件下, 对 2 种调度模式的利弊和适用性进行了定量分析, 得出结论为能耗最小调度模式下电力系统运行经济性比弃风量最小调度模式好。

关键词: 风电系统; 调度模式; 优化模型; 节能降耗

0 引言

风力发电是一种技术较成熟的可再生能源发电形式, 在世界各国得到了迅速的发展。由于目前在风电出力的间歇性和反调峰特性以及预测准确性和蓄能技术上的制约, 风电接入给基于电源可控性和负荷可预测性的发电计划制定带来了挑战^[1]。如何制定科学、合理的含风电系统的发电调度计划, 促进电力系统的节能减排和风电发展, 成为研究热点。

目前, 对含风电系统发电调度的研究主要集中在风电功率预测^[2-3]和调度模型^[4-5]等方面, 而对含风电系统发电调度模式的适用性分析和经济性评价的研究则较少。文献[6]设计了适用于风电运行管理的扁平化调度模式; 文献[7]分别从风电出力特性的角度和电力系统安全稳定运行的角度提出了 5 种风电计划的编制模式。但上述文献均未构建调度模型和提出经济性评价指标, 也没有对不同调度模式进行量化比对分析, 所述调度模式的适用性有待进一步探讨。此外, 现有含风电系统发电调度模式的优化模型研究多基于发电能耗最小的目标, 却很少计及风电接入后引起机组启停所增能耗的影响。文献[8]针对风电接入电网后调度面临的节能降耗与风电利用效率之间的矛盾, 建立了计及风电接纳能力的电网调度决策模型, 但也未考虑风电接入后火电机组启停的影响。在中国, 随着小火电机组的关停, 火电机组以大容量、高参数的机组为主, 启停能耗普遍较高, 不考虑机组启停状态变化, 难以客观、准确地评价风电接入对系统能耗的影响。

在上述背景下, 本文分别以弃风量最小和能耗最小为目标函数建立相应的机组组合模型, 研究了含风电系统发电调度的经济性评价指标, 并通过对 10 机测试系统的定量计算, 分析了 2 种发电调度模式的经济性。

1 含风电系统的发电调度模式和模型及其求解方法

1.1 含风电系统的发电调度模式

1) 弃风量最小调度模式

《可再生能源法(修正案)》^[9]指出: 全额保障性收购电网覆盖范围内符合并网技术标准的可再生能源并网发电项目的上网电量, 发电企业有义务配合电网企业保障电网安全。对于风力发电而言, 即在保障电力系统安全运行的情况下, 尽可能接纳风电, 使风力发电企业的弃风量最小, 本文将其简称为弃风量最小调度模式。

2) 能耗最小调度模式

以系统煤耗最小为目标的传统调度方式能够最大化降低系统煤耗, 符合节能发电调度的节能、经济原则。按能耗最小调度模式进行风电调度就是在保障电力系统安全运行的情况下, 使电力系统的化石能源消耗量最小。

1.2 含风电系统的发电调度模型

1) 目标函数

基于能耗最小的风电调度模型中, 目标函数是调度周期内火电机组的运行能耗和启停能耗最小。

$$\min F = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (U_{i,t} O_{Ci} (P_{i,t}) + U_{i,t} (1 - U_{i,t-1}) S_{Ci,t}) \tag{1}$$

收稿日期: 2011-03-11; 修回日期: 2011-07-12。

式中: T 为时段数; N 为火电机组数; $U_{i,t}$ 为机组 i 在时段 t 的运行状态变量, $U_{i,t}=0$ 表示停机, $U_{i,t}=1$ 表示运行; $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在时段 t 的功率变量; $O_{Ci}(P_{i,t})$ 为运行机组的运行耗量, 一般表示为机组功率的二次函数, 即 $O_{Ci}(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i$, 其中 a_i, b_i, c_i 为运行耗量参数; $S_{Ci,t}$ 为机组 i 在时段 t 的启动耗量, 与停机时间的长短相关。

基于弃风量最小的风电调度模型中, 目标函数是调度周期内在可能弃风的情况下风电的实际被调用量最大, 即

$$\min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N (U_{i,t} O_{Ci}(P_{i,t}) + U_{i,t} (1 - U_{i,t-1}) S_{Ci,t}) + \beta \sum_{t=1}^T (P_{W,t}^* - P_{W,t}) \quad (2)$$

式中: $P_{W,t}$ 为时段 t 风电场实际被调用的风电功率总量; $P_{W,t}^*$ 为时段 t 风电场预测可被调度的风电功率总量; β 为优先系数, 数倍于火电系统总煤耗的最大值。

2) 火电机组技术约束

火电机组容量约束:

$$U_{i,t} P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq U_{i,t} P_{i,\max} \quad (3)$$

最小启停时间约束:

$$\begin{cases} (U_{i,t-1} - U_{i,t})(T_{i,t-1} - T_{i,\text{on}}) \geq 0 \\ (U_{i,t} - U_{i,t-1})(T_{i,t} - T_{i,\text{off}}) \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

爬坡率约束:

$$\begin{cases} P_{i,t-1} - P_{i,t} \leq \Delta P_{i,\text{down}} \\ P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq \Delta P_{i,\text{up}} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{i,\min}$ 和 $P_{i,\max}$ 分别为机组 i 的最小和最大出力; $T_{i,\text{on}}$ 和 $T_{i,\text{off}}$ 分别为机组 i 的最小连续运行和停机时间; $\Delta P_{i,\text{up}}$ 和 $\Delta P_{i,\text{down}}$ 分别为机组 i 的上、下爬坡限制。

3) 风电机组技术约束

实际调用的风电电量约束:

$$0 \leq P_{W,t} \leq P_{W,t}^* \quad (6)$$

4) 系统耦合约束

功率平衡约束:

$$\sum_{i=1}^N U_{i,t} P_{i,t} + P_{W,t} = P_{L,t} \quad (7)$$

式中: $P_{L,t}$ 为时段 t 系统的负荷需求。

旋转备用约束:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^N U_{i,t} (P_{i,t}^U - P_{i,t}) \geq P_{\text{Lut}} + A_{\text{USR},t} \\ \sum_{i=1}^N U_{i,t} (P_{i,t} - P_{i,t}^D) \geq A_{\text{DSR},t} \end{cases} \quad (8)$$

式中: $P_{i,t}^U$ 和 $P_{i,t}^D$ 分别为机组 i 在时段 t 的最大可用出力和最小可用出力; P_{Lut} 为未纳入风电时系统需

要的上旋转备用量, 一般取为系统负荷的 5% ~ 10%; $A_{\text{USR},t}$ 和 $A_{\text{DSR},t}$ 分别为由于风电接入而增加的上、下旋转备用量, 由风电备用比例系数 r 与 $P_{W,t}$ 相乘得到, 其中 r 一般取 0.1 ~ 0.2^[10]。

系统的旋转备用容量与调用风电量相关, 当 2 种模式的风电调用量不同时, 系统旋转备用容量大小不一致(备用设置的合理性分析见附录 A)。

目标函数(式(1))和约束(式(3)—式(8))组成了含风电系统能耗最小调度模型; 目标函数(式(2))和约束(式(3)—式(8))组成了含风电系统弃风量最小调度模型。

1.3 求解方法

含风电系统的发电调度模型是一个多变量、非线性、混合整数规划问题。当前, 基于分支定界算法的混合整数规划(MIP)商业软件在一定程度上已具备解决大规模优化问题的能力, 因此, 通过巧妙构建 MIP 模型并采用商业软件进行优化计算, 已成为求解机组优化问题的主要方法。鉴于此, 本文参照文献[11]的方法, 对模型的目标函数及约束条件进行线性化处理, 将其转换成线性混合整数的形式, 直接对含风电系统能耗最小调度模型和弃风量最小调度模型进行求解。

2 含风电系统发电调度的经济性评价指标

电力系统接入并消纳风电, 一方面有利于电力系统的节能减排, 另一方面风电企业也因此受益。因此, 本文从风电企业的发电收益和电力系统运行经济性 2 个角度建立相应的经济性评价指标, 对含风电系统的发电调度模式的经济性进行比较分析。

2.1 风力发电企业的收益评价指标

由于国内风电上网价格执行标杆电价, 实际被调用的风电越多, 风力发电企业获利越多。风电的利用率 η 定义为某一调度周期内系统中被调用的风电总量与风电企业可发的风电总量的比值:

$$\eta = \frac{\sum_{t=1}^T P_{W,t}}{\sum_{t=1}^T P_{W,t}^*} \quad (9)$$

从式(9)可知, 某种调度模式下风电利用率越高, 表明实际调用的风电量越大, 风电企业的收益越多。

2.2 电力系统经济运行评价指标

在不同的调度模式下, 风电的利用率、系统的能耗水平等不尽相同。为了表征不同调度模式对含风电系统调度效果的影响, 本文提出了可用风电的单位价值、系统能耗、系统调峰能力 3 项评价指标。

1) 可用风电的单位价值

风电对于火电系统的价值主要体现在节约系统总煤耗上。定义无风电接入时系统总煤耗与风电接入后系统总煤耗之差为风电价值 C_v , 则系统中可用风电的单位价值 C 可以用式(10)表示。某种调度模式下可用风电的单位价值越大, 则风电的利用效率越高, 该调度模式对降低系统能耗的效果越明显。

$$C = \frac{C_v}{\sum_{t=1}^T P_{W,t}^*} \quad (10)$$

2) 系统能耗

某一调度周期内, 火电系统的能耗主要由火电机组的运行能耗和启停能耗组成。运行能耗 O_c 、启停能耗 S_c 、总能耗 T_c 的计算表达式如下:

$$O_c = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i \quad (11)$$

$$S_c = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N S_{Ci,t} \quad (12)$$

$$T_c = O_c + S_c \quad (13)$$

为体现不同调度模式的能耗差异程度, 本文给出了能耗差异率指标 γ , 即弃风量最小调度模式的能耗 T_{C1} 与能耗最小调度模式的能耗 T_{C2} 的差值与能耗最小模式的能耗比值, 如式(14)所示。能耗差异率越大, 则 2 种调度模式下系统的能耗差距越大。

$$\gamma = \frac{T_{C1} - T_{C2}}{T_{C2}} \quad (14)$$

3) 系统调峰能力

文献[12]指出: 国内电力系统的调峰问题主要集中在负荷低谷时段, 风电接入系统后, 由于风电出力的波动性和反调峰性, 系统的低谷调峰问题更加突显。火电机组的调峰能力越充足, 则电力系统由于调峰问题遭受的经济损失期望值越小, 运行经济性越好。系统低谷下调峰能力 $P_{R,t}$ 计算如下:

$$P_{R,t} = \sum_{i=1}^N (P_{i,t} - P_{i,t}^D) \quad (15)$$

3 模型对比分析

3.1 理论分析

当系统的风电接入量较少时, 2 种调度模式均全额接纳风电, 优化调度模型一致, 故结果也应相同; 当风电接入量增加到一定值时, 虽然弃风量最小调度模式仍能全额接纳风电, 但能耗最小调度模式为实现系统能耗最小则可能出现经济性弃风, 显然能耗最小调度模式的节能效果比弃风量最小调度模式好; 当风电接入量继续增加, 弃风量最小调度模式为保证系统安全运行不得不选择弃风(本文称为技

术性弃风), 而能耗最小调度模式则存在技术弃风和经济弃风, 但火电机组还存在一定的经济运行优化空间, 故两者的调度效果存在差异, 但较前一种情况的差异会小些; 最终风电接入量增加到某个限值后, 能耗最小调度模式下火电机组的经济运行优化空间接近于 0, 2 种调度模式的弃风量接近, 此时 2 种调度模式的调度效果将趋于一致。

3.2 算例分析

3.2.1 仿真参数

本文采用 10 机测试系统进行仿真计算, 10 台机组参数、负荷等数据见文献[13], 未纳入风电时的旋转备用取系统总负荷的 10%, 风电备用比例系数取 0.1。国内某风电场 24 时段可用风电出力预测值如表 1 所示, 后续分析中的增加风电接入量水平均以此风电场预测值 P_e 为基准成倍数增加。

表 1 风电场各时段的功率预测值
Tab. 1 Prediction value of a wind farm for 24 hours

时段	功率预测值/MW	时段	功率预测值/MW	时段	功率预测值/MW
1	92.40	9	30.65	17	33.53
2	91.99	10	22.81	18	7.92
3	92.76	11	15.47	19	0
4	88.01	12	20.22	20	13.80
5	82.25	13	56.39	21	16.97
6	72.46	14	69.99	22	84.52
7	69.99	15	79.97	23	93.13
8	56.39	16	91.67	24	92.64

3.2.2 算例验证

1) 风电利用率对比分析

2 种模式在不同风电接入水平下, 风电的利用率曲线如图 1 所示。可知, 弃风量最小调度模式的风电利用率整体上大于能耗最小调度模式的风电利用率, 故弃风量最小调度模式下风电被调用量较多, 风电企业的收益较多。

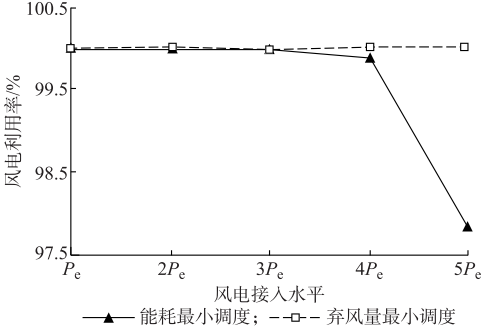


图 1 风电利用率对比

Fig. 1 Comparison of the rate of wind power utilization

2)可用风电的单位价值对比分析

2种调度模式下可用风电的单位价值如图2所示。可用风电的单位价值均呈现出先升后降的趋势,表明2种模式下可用风电的单位价值存在一个极值点,使单位风电降低系统能耗的效果最佳。同时,随着风电接入的增加,2种调度模式的可用风电单位价值的大小呈现出先一致,然后差异增大,最后趋于一致。这是由于当风电接入量较少时,2种调度模式都能全额接纳风电,调度效果一致;随着系统风电接入量增加,能耗最小调度模式下火电机组经济运行的优化空间先增大后变小,最后接近于0。可见,算例仿真结果与理论分析结论一致。

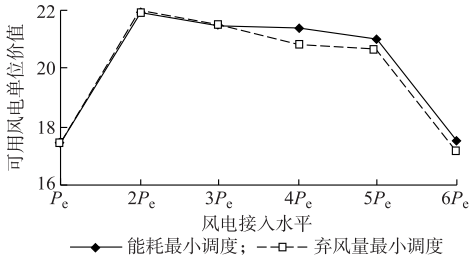


图2 可用风电单位价值对比
Fig. 2 Comparison of the value of per-megawatt available wind power

3)系统能耗的对比分析

不考虑火电机组启停能耗,2种调度模式下系统运行能耗水平如图3所示。弃风量最小调度模式的运行能耗整体上大于能耗最小调度模式的运行能耗。当风电接入水平超过某一临界值时,弃风量最小调度模式为了最大限度地接纳风电,导致通过风电节约的煤耗量无法弥补由于火电机组偏离经济运行区域而增加的煤耗,而能耗最小调度模式会进行适当的弃风,保证系统的能耗最小。

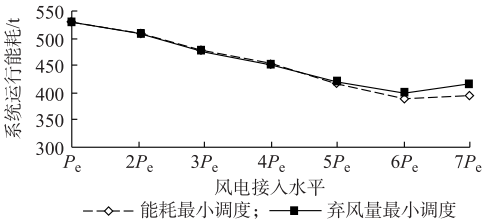


图3 不考虑机组启停能耗下的系统运行能耗对比
Fig. 3 Comparison of total energy consumption for different levels of wind power without startup consumption

考虑火电机组的启停能耗,不同风电接入水平下,2种调度模式的总能耗如表2所示,启停能耗、运行能耗如图4所示。可知:①弃风量最小调度模式下的启停能耗高于能耗最小调度模式,这是由于弃风量最小调度模式为最大限度地接纳风电导致频

繁启停机组,而能耗最小调度模式可进行适当的弃风避免频繁启停机组以保证整体能耗最小;②弃风量最小调度模式的运行能耗低于能耗最小调度模式,这是由于弃风量最小调度模式中有些机组频繁启停,导致长时间开机的机组所带负荷较大,更接近于机组的经济运行点,降低了运行能耗;③结合表2的2种调度模式的系统总能耗数据和①,②的分析说明,弃风量最小调度模式相对于能耗最小调度模式,所节约的运行能耗不足以抵消由于机组频繁启停而增加的启停能耗。

表2 不同风电接入水平下的系统总能耗对比
Tab. 2 Comparison of the total energy consumption for different levels of wind power

风电接入水平	系统总能耗/t	
	能耗最小调度模式	弃风量最小调度模式
P_e	548.840	548.84
$2P_e$	512.490	512.49
$3P_e$	484.220	484.22
$4P_e$	452.920	461.75
$5P_e$	429.540	429.94
$6P_e$	418.245	419.71

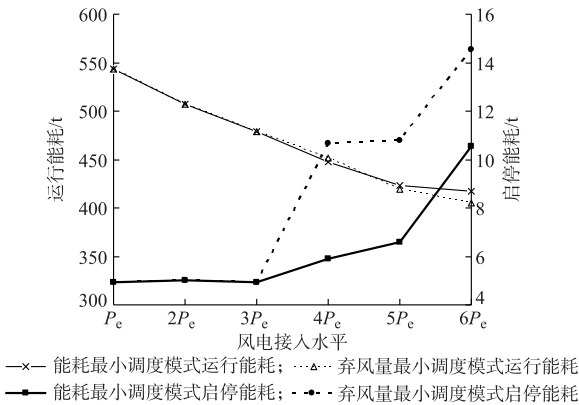


图4 启停能耗与运行能耗对比
Fig. 4 Comparison of total production and startup energy consumption for different levels of wind power

随着国内关停小火电政策的落实和节能发电调度的推进,大容量、高启停能耗的大火电机组将逐步承担起以前小机组所肩负的调峰任务。为模拟这一变化带来的影响,本文将算例中机组3—机组10的启停机能耗水平增加到原来的20倍。不同火电机组启停机能耗水平下,2种调度模式的能耗差异率变化曲线如图5所示。当系统的火电机组启停机能耗较高时,2种模式的能耗差异率较系统火电机组启停机能耗较低时要大得多。由于国内发电资源以大容量火电机组为主,故大规模风电并网后采用能耗最小调度模式时,系统节能优势明显。

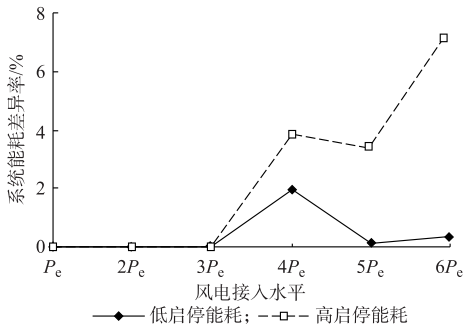


图5 不同启停能耗水平下系统能耗差异率对比
Fig.5 Comparison of the rate of energy consumption difference under different startup energy consumptions

4) 系统调峰能力对比分析

2种模式下系统的下调峰容量如图6所示。负荷低谷时期,能耗最小调度模式的系统下调峰容量大于弃风量最小模式,故能耗最小调度模式更有利于提高系统运行的经济性。

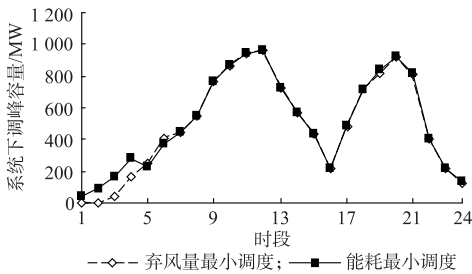


图6 火电机组提供低谷调峰容量水平对比
Fig.6 Comparison of peaking regulation capacity

4 结语

通过上文分析得到如下结论:弃风量最小调度模式下风力发电企业的发电收益比能耗最小调度模式下多;能耗最小调度模式下可用风电单位价值更高、系统能耗更低、系统下调峰能力更强,故其运行经济性比弃风量最小调度模式好。

但是,单纯以能耗最小为目标的风电调度模式,没有考虑风电的减排效益,还可能产生“煤电倒流”、节煤却费水等现象。因此,更有利于经济可靠运行的含风电系统发电调度模式还需进一步探索研究。

附录见本刊网络版(<http://aeprs.sgepri.sgcc.com.cn/aeprs/ch/index.aspx>)。

参考文献

[1] 雷亚洲. 与风电并网相关的研究课题[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(8): 84-89.
LEI Yazhou. Studies on wind farm intergration into power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(8): 84-89.

[2] 王彩霞, 鲁宗相, 乔颖, 等. 基于非参数回归模型的短期风电功率预测[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(16): 78-83.
WANG Caixia, LU Zongxiang, QIAO Ying, et al. Short-term wind power forecast based on non-parametric regression model [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34 (16): 78-83.
[3] 袁铁江, 晁勤, 李义岩, 等. 大规模风电并网电力系统经济调度中风电场出力的短期预测模型[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(13): 23-27.
YUAN Tiejia, CHAO Qin, LI Yiyan, et al. Short-term wind power output forecasting model for economic dispatch of power system incorporating large-scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(13): 23-27.
[4] 颜拥, 文福拴, 杨首晖, 等. 考虑风电出力波动性的发电调度[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(6): 79-88.
YAN Yong, WEN Fushuan, YANG Shouhui, et al. Generation scheduling with fluctuation wind power [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(6): 79-88.
[5] 周玮, 彭显, 孙辉, 等. 含风电场的电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 13-18.
ZHOU Wei, PENG Yu, SUN Hui, et al. Dynamic economic dispatch in wind power integrated system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 13-18.
[6] 侯佑华, 房大中, 白永祥, 等. 大规模风电运行的调度模式设计[J]. 中国电力, 2010, 43(8): 67-72.
HOU Youhua, FANG Dazhong, BAI Yongxiang, et al. Dispatch model designing for large scale wind power[J]. Electric Power, 2010, 43(8): 67-72.
[7] 韩自奋, 陈启卷. 考虑约束的风电调度模式[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 89-92.
HAN Zifen, CHEN Qijuan. Wind power dispatch model based on constraints [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 89-92.
[8] 李智, 韩学山, 杨明, 等. 计及接纳风电能力的电网调度模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 15-19.
LI Zhi, HAN Xueshan, YANG Ming, et al. Power system dispatch considering wind power grid integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 15-19.
[9] 全国人民代表大会常务委员会关于修改《中华人民共和国可再生能源法》的决定[EB/OL]. [2009-12-26]. http://www.gov.cn/flfg/2009-12/26/content_1497462.htm.
[10] CHEN C L. Optimal wind-thermal generating unit commitment[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2008, 23(1): 273-280.
[11] CARRIÓN M, ARROYO J M. A computationally efficient mixed-integer linear formulation for the thermal unit commitment problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2006, 21(3): 1371-1378.
[12] 陈启鑫, 康重庆, 夏清. 碳捕集电厂的运行机制研究与调峰效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 22-28.
CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing. Operation mechanism and peak-load shaving effects of carbon-capture power plant [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30 (7): 22-28.
[13] KAZARLIS S A, BAKIRTZIS A G, PETRIDIS V. A genetic

algorithm solution to the unit commitment problem[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1996, 11(2): 83-92.

张粒子(1963—),女,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统分析和电力经济。

周娜(1985—),女,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:电力系统优化运行。E-mail: zhounancepu@126.com

王楠(1983—),男,博士,主要研究方向:电力系统优化运行、电力系统经济调度。

Economic Comparison for Different Generation Scheduling with Large Scale Wind Power Connected Power System

ZHANG Lizi, ZHOU Na, WANG Nan

(North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Due to the intermittent and anti-peaking nature of wind power, a generation scheduling aimed at minimizing wind power curtailment may cause thermal units significantly deviating from their optimal economic operating area, which will increase the coal consumption in the power systems. By combining the policies about renewable resources generation and the basic aim or criterion of energy saving generation dispatch, an optimal dispatching model is built corresponding to two wind power dispatching modes, i. e., minimizing the wind power shedding or minimizing the coal consumption, respectively. Economic evaluation indices of wind power dispatching modes are proposed, including the rate of wind power utilization, the value of per megawatt available wind power, energy consumption and peaking capacity. Finally, the two dispatching modes are analyzed and compared under different levels of wind power in the power grid in a ten-unit test system. The results indicate that the wind power dispatching mode based on minimization of energy consumption is more economical than that of minimizing wind power curtailment.

Key words: wind power system; dispatching mode; optimization model; energy saving and consumption reduction

附录 A

假设系统预测 t 时段的风电出力为 P_{WFt} ，此时能耗最小调度模式下风电计划出力为 P_{W1} ，弃风量最小调度模式下风电计划出力为 P_{W2} ，则有 $P_{W1} \leq P_{W2} \leq P_{WFt}$ ， P_{WAt} 为 t 时段系统的实际可用风电出力。

1) $P_{W1} \leq P_{W2} \leq P_{WFt} \leq P_{WAt}$ ， P_{W1} 是能耗最小调度模式下的最优风电接纳量，故能耗最小调度模式下实际弃风量比预计弃风量多；由于弃风量最小调度模式最大化接纳风电，需要火电机组下调提供负旋转备用，故弃风量最小调度模式需要的负旋转备用比能耗最小调度模式多。

2) $P_{W1} \leq P_{W2} \leq P_{WAt} \leq P_{WFt}$ ， P_{W1} 是能耗最小调度模式下的最优风电接纳量，故能耗最小调度模式下实际弃风量比预计弃风量少；由于弃风量最小调度模式最大化接纳风电，需要火电机组下调提供负旋转备用，故弃风量最小调度模式需要的负旋转备用比能耗最小调度模式较多。

3) $P_{W1} \leq P_{WAt} \leq P_{W2} \leq P_{WFt}$ ，能耗最小调度模式实际调度的风电量与计划的风电出力相同，而弃风量最小调度模式的实际调度的风电出力小于计划的风电出力，应该利用旋转备用进行弥补。因此，能耗最小调度模式下由于风电接入而额外需要的备用容量小于弃风量最小调度模式下由于风电接入而额外需要的备用容量。

4) $P_{WAt} \leq P_{W1} \leq P_{W2} \leq P_{WFt}$ ，能耗最小调度模式和弃风量最小调度模式实际调度的风电量均为 P_{WAt} ，都小于计划的风电出力。能耗最小调度模式需要的旋转备用量为 $(P_{W1} - P_{WAt})$ ，弃风量最小调度模式需要的需要的旋转备用量为 $(P_{W2} - P_{WAt})$ ，显然，能耗最小调度模式需要的旋转备用量小于弃风量最小调度模式需要的旋转备用量。

综上所述，整体而言由于风电接入而需要额外增加的备用容量能耗最小调度模式小于弃风量最小调度模式。本文中设置能耗最小调度模型中由于风电接入增加的额外旋转备用容量 $A_{SR1} = rP_{W1}$ ，设置弃风量最小调度模型中由于风电接入增加的额外备用容量 $A_{SR2} = rP_{W2}$ ，由于 $P_{W1} \leq P_{W2}$ ，故 $A_{SR1} \leq A_{SR2}$ ，与上述分析得出的结论一致，故本文对两种不同的风电调度模式旋转备用容量设置具有一定的合理性。