

风火电打捆输电系统风火电配置比例研究

曹喜民, 刘天琪, 李兴源
(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘 要: 针对风火打捆外送的风火电比例配置问题,以机组总运行成本最低和输电功率最大为目标建立电源出力配置模型.采用考虑系统约束条件的等微增率法进行求解,并在不同风火电配置比例、不同弃风率情况下对单位煤耗、系统输电通道利用率、单位发电成本和单位发电的氮氧化物排放量等指标进行计算分析.在此基础上深入讨论了氮氧化物排放价格对系统单位发电成本的影响,结果表明,当氮氧化物排放价格达到一定值时,风电机组与火电机组可平等参与日前发电调度,实现系统的经济性和环保性.

关 键 词: 风电;火电;电源出力配置;配置比例;等微增率法

中图分类号: TM 715

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2015)02-0166-05

Wind/Thermal Power Allocation Ratio for Transmitting Wind Power Bundled with Thermal Power

CAO Xi-min, LIU Tian-qi, LI Xing-yuan

(School of Electric Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China. Corresponding author: LIU Tian-qi, professor, E-mail: tqliu@scu.edu.cn)

Abstract: In order to determine the allocation ratio of wind/thermal power unit, the power output configuration model was developed based on the goal of minimizing operating costs and maximizing the transmission power. The model was solved by the equal incremental principle which considers the system constraints. The unit coal consumption, transmission channel utilization, the unit cost of power generation and nitrogen oxide emissions per unit of power generation were calculated and analyzed under the conditions of different wind/thermal power allocation ratios and wind power abandoned rates. On this basis, the impact of nitrogen oxide emissions prices on the unit cost of power generation was discussed in depth. The results show that when the price of nitrogen oxides emissions reached a certain level, wind power and thermal power can equally participate power generation scheduling, thus achieving both economical and environmental benefits of the system.

Key words: wind power; thermal power; power output configuration; allocation ratio; equal incremental principle

我国能源分布不均的格局要求采用大容量、远距离输电方式以满足负荷中心用电需求,而规划建设的大型风电场和煤炭能源基地均主要集中在“三北”地区.风电和火电打捆外送不仅可以解决大规模风电远距离送出的客观要求,而且在提高输电功率稳定性和输电通道利用率等方面具有优势^[1].但风火打捆外送系统风火电配置比例对系统运行的影响需要进一步研究.风火打捆外送

系统稳定性方面已有一些研究^[2-5],其中文献[5]研究了风火电配置比例对风火打捆交直流混联外送系统功角暂态稳定性的影响,但较少涉及风火电配置比例对系统经济性与环保性的影响.现有的风火打捆外送系统研究中风火电配置比例通常只考虑风电波动性与火电机组调峰能力,一般取值为1:2^[2,4],但对于影响系统的单位煤耗、氮氧化物排放量等指标均未进行讨论,因此,需要

对此问题进行深入研究。

本文以机组总运行成本最低和输电功率最大为目标建立风火打捆外送系统电源出力配置模型,在运用考虑系统约束的等微增率法对电源出力配置模型进行求解的基础上,对不同风火电配置比例和弃风率情况下系统运行效果评价指标进行了计算与分析,并讨论了引入氮氧化物排放价格后,风火电配置比例对风火打捆系统单位发电成本的影响。

1 数学模型

1.1 目标函数

本文以火电机组与风电机组运行总成本最低和外送系统输电功率最大为目标建立数学模型。

根据火电机组与风电机组运行总成本最低构建如下目标函数:

$$\min f = f_1 + f_2. \quad (1)$$

式中: f 为火电机组与风电机组总的运行成本; f_1, f_2 分别为火电机组与风电机组总的运行成本。

火电机组总的运行成本通过下式计算:

$$f_1 = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N g \times F_i(P_{i,t}). \quad (2)$$

式中: T 为研究所划分的时段数; N 为风火打捆系统可用发电机总数; $P_{i,t}$ 为火电机组 i 在 t 时刻的有功功率; 用 a_i, b_i 和 c_i 表示机组 i 的耗量特性曲线系数; g 为单位煤耗成本; $F_i(P_{i,t})$ 为火电机组 i 在有功功率为 $P_{i,t}$ 时的煤耗:

$$F_i(P_{i,t}) = a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i. \quad (3)$$

风电机组总的运行成本表达式为

$$f_2 = \sum_{t=0}^T h \times P_{\text{wind},t}. \quad (4)$$

式中: h 为单位风电出力的运行成本; $P_{\text{wind},t}$ 为风电在 t 时刻的风电功率。

输电功率最大目标函数:

$$\max P_t = \sum_{i=1}^N P_{i,t} + P_{\text{wind},t}. \quad (5)$$

式中: P_t 为 t 时刻研究系统内风电机组与火电机组总的有功功率。

1.2 约束条件

风火打捆输电系统约束条件主要包括输电功率约束、机组出力上下限约束、爬坡速率约束等。考虑到输电线路最大输电功率,线路的传输功率不能大于其传输极限,所以该约束条件为

$$P_t \leq P_{t,\max}. \quad (6)$$

式中: P_t 为输电功率; $P_{t,\max}$ 为传输极限。

考虑常规电源出力与风电机组出力不可能超过其出力上下限,所以该约束条件如下:

$$P_{i,k}^{\min} \leq P_{i,k} \leq P_{i,k}^{\max}, i \in N, \quad (7)$$

$$0 \leq P_{\text{wind},k} \leq P_{\text{wind}}^{\max}. \quad (8)$$

式中: $P_{i,k}^{\min}, P_{i,k}^{\max}$ 表示火电机组出力下限和上限; P_{wind}^{\max} 表示风电机组出力上限。

机组增减出力需要满足机组爬坡速率约束:

$$-P_{i,D} \leq P_{i,t} - P_{i,t-1} \leq P_{i,U}. \quad (9)$$

式中, $P_{i,U}, P_{i,D}$ 分别为机组 i 增减出力上限和下限。

1.3 考虑系统约束的等微增率法

已知机组的耗量特性 $F_i(P_{i,t})$, 则微增率表达式为 $dF_{i,t}(P_{i,t})/P_i$, 若所研究机组微增率相等, 则总的燃料消耗量最小, 这就是等耗量微增率准则。根据负荷曲线与发电机组出力最小约束确定机组启停状态, 基于等耗量微增率准则得出各个机组在各个时段的机组出力分配公式^[6]:

$$P_{i,t} = \frac{(\lambda_t - b_i)}{2a_i}. \quad (10)$$

当 $P_t < \sum_{i=1}^N P_{i,\max}$ 时,

$$\lambda_t = (2P_t + \sum_{i=1}^N \frac{b_i}{a_i}) / \sum_{i=1}^N \frac{1}{a_i}. \quad (11)$$

当 $P_t > \sum_{i=1}^N P_{i,\max}$ 时,

$$\lambda_t = (2 \times \sum_{i=1}^N P_{i,\max} + \sum_{i=1}^N \frac{b_i}{a_i}) / \sum_{i=1}^N \frac{1}{a_i}. \quad (12)$$

式中: λ_t 为系统在 t 时段耗量微增率; N 为 t 时段运行机组数; P_t 为系统在 t 时刻负荷; $P_{i,t}$ 为机组 i 在 t 时刻出力。

以上仅仅考虑了输电功率约束, 并没有考虑机组爬坡速率约束, 对此方法进行改进, 使其包含此两项约束, 改进方法如下: t 时段机组 i 的增减出力约束范围内所能分配的最大出力 $\bar{P}_{i,t}$ 和最小出力 $\underline{P}_{i,t}$ 为

$$\left. \begin{aligned} \bar{P}_{i,t} &= P_{i,U}, \\ \underline{P}_{i,t} &= P_{i,D}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

系统爬坡时, 如果 $P_{i,t} - P_{i,t-1} > \bar{P}_{i,t}$, 则将机组出力定为 $P_{i,t} = \bar{P}_{i,t} + P_{i,t-1}$, 并将系统总负荷减去 $P_{i,t}$, 将剩余负荷与其他机组按式(11)重新进行分配, 如此迭代循环, 直到所有机组分配的出力都满足出力限制约束; 系统降出力运行时, 如果 $P_{i,t-1} - P_{i,t} > \underline{P}_{i,t}$, 则将机组出力定为 $P_{i,t} = P_{i,t-1} - \underline{P}_{i,t}$, 其余操作与系统爬坡时相同。本文在风火电不同配置比例、不同弃风率情况下, 根据等微增率法来确定风火打捆系统各个机组 24 小时的出力

分配,利用下节给出的系统运行效果评价指标进行计算和分析.

2 系统运行效果评价指标

针对风火打捆输电系统,本文考虑火电机组单位发电煤耗、风火大捆输电系统单位发电成本、单位发电氮氧化物排放量和计及氮氧化物排放惩罚价格的单位发电成本等指标.

1) 单位发电煤耗 e_u 为

$$e_u = \frac{F_u}{P_u}.$$
 (14)

式中: F_u 为火电机组总的煤耗量; P_u 为火电机组的发电总量.

2) 单位发电成本 c_e 为

$$c_e = \frac{C_F + C_W}{P_u + P_W}.$$
 (15)

式中: C_F 为系统火电机组发电煤耗总成本; C_W 为系统风电机组发电总成本; P_W 为系统风电机组总的输出电量.

3) 单位发电氮氧化物排放量 e_g 为

$$e_g = \frac{F_{GP}}{P_u + P_W}.$$
 (16)

式中, F_{GP} 为发电机组氮氧化物排放量,由于氮氧化物是火电机组运行中排放的主要污染气体,其输出功率可用二次函数计算^[7],其具体表达式为

$$F_{GP} = \sum_{i=1}^N \sum_{t=1}^T [\alpha_i + \beta_i P_{i,t} + \gamma_i P_{i,t}^2].$$
 (17)

式中, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为第 i 台火电机组污染物排放特性系数.

4) 计及氮氧化物价格的单位发电成本 c_{eg} 为

$$c_{eg} = \frac{C_F + C_W + c \times P_W}{P_u + P_W}.$$
 (18)

式中, c 为火电机组单位发电所排放氮氧化物的价格.

3 算例分析

本文采用风火打捆外送系统,其火电机组耗量参数及出力上下限如表 1 所示;风电场在各时段风火打捆输电时风火电不同配置比例下的预测出力见图 1^[8].

表 1 机组特性参数
Table 1 Unit parameters

机组	出力极限/MW		机组耗量参数/(t·h ⁻¹)			污染物排放系数×10 ⁷ /(t·h ⁻¹)		
	P_{\max}	P_{\min}	c	b	a	α	γ	β
G ₁	500	200	35	0.18	0.000 15	2.543	5.638	-6.047
G ₂	800	320	60	0.14	0.000 12	5.326	3.380	-3.550
G ₃	700	280	60	0.14	0.000 11	4.091	6.490	-5.554
G ₄	1 000	400	80	0.12	0.000 08	4.257	4.586	-5.094

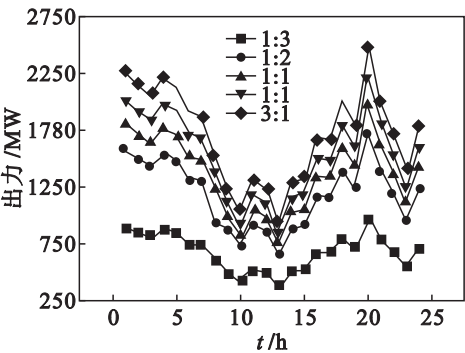


图 1 不同风火比例下的风电出力曲线
Fig. 1 Wind power output curves with different wind/thermal power allocation ratios

火电配置比例及弃风率对系统运行指标的影响,本文分别在风火配置比例为 1:3,1:2,2:2,2:1,3:1,弃风率为 0,5%,10% 时,利用本文建立的数学模型对其火电机组出力进行分配,进而对系统运行的火电机组单位煤耗、系统输电通道利用率、单位氮氧化物排放量和单位发电成本进行计算分析,结果如图 2 所示.

由图 2a 可以看出,随着弃风率的增加,火电机组出力水平升高,单位煤耗减小;而随着风电在系统中比例增大,单位煤耗呈现出先增大后减小的趋势,这是由于不同风火电配置比例影响了火电机组的出力水平导致的,并且在原有的研究中风火电配置比例取 1:2 时单位煤耗并不是最优的.

参照美国能源署的煤价^[9],取煤价为 62.47 \$/t,取风电价格为 80 \$/(MW·h). 为了研究风

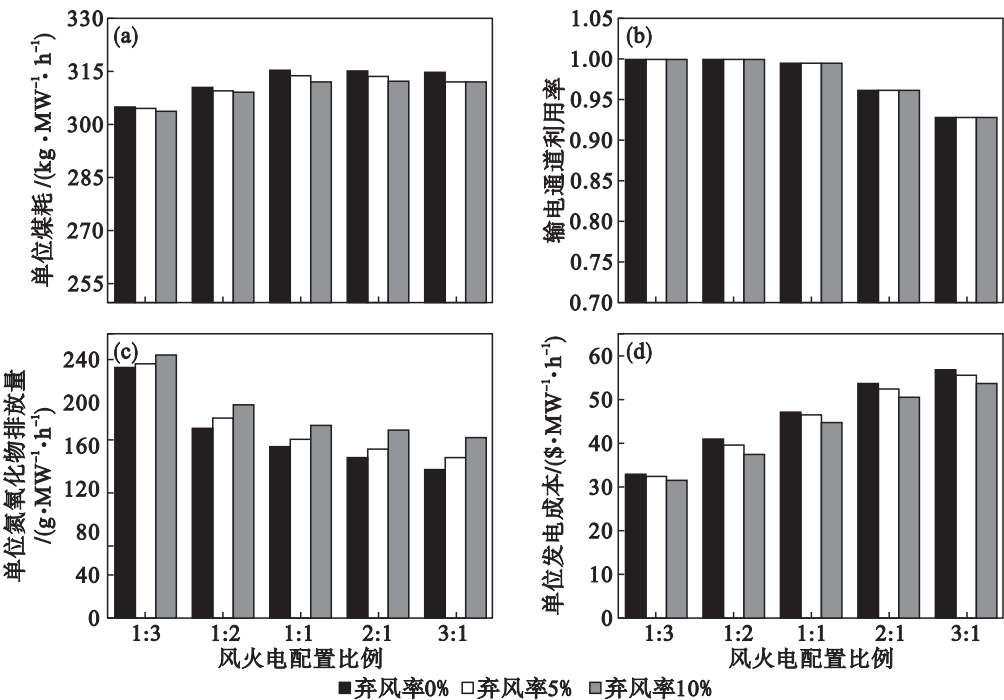


图 2 不同风火电配置比例下的系统运行指标
Fig. 2 System operation indicators with different wind/thermal power allocation ratios

由图 2b 容易看出,风火电配置比例为 1:3 和 1:2 时系统输电通道能够充分利用,风火电配置比例继续增大时,输电通道利用率逐渐减小;但在机组开停机不变的情况下,不同弃风率对系统输电通道利用率的影响不大。

由图 2c 可以看出,单位氮氧化物排放量随着风火电配置比例的增加逐渐减少;同时弃风率的增加会使单位氮氧化物排放增加,这是因为弃风率的增加提高了火电机组出力水平,进而增加了氮氧化物排放量。由图 2d 较易得出单位发电成本随着风火电配置比例的增加而逐渐升高的结论,这是由于没有考虑火电机组运行中氮氧化物排放价格导致风电与常规能源在竞争中不具备优势;由图 2c 和图 2d 单位氮氧化物排放量与单位发电成本随风火电配置比例的变化规律可以看出,原有研究中取风火电配置比例为 1:2^[7-8]并不一定是最优的,其最优比例需要考虑环保性与经济性等多种因素后确定。

图 3 为在引入氮氧化物排放成本后,在不同风火电配置比例和不同弃风率情况下氮氧化物价格分别为 30,50,60,70 和 80 \$/MW·h 时系统的单位发电成本。由图 3 可以看出随着氮氧化物价格的增加,系统单位发电成本升高,风火电配置比例小的发电系统单位发电成本增加较配置比例大的系统快;在氮氧化物价格为 30 和 50 \$/MW·h 时,风火电配置比例大的系统单位发电成本要比配置比例小的系统高;在氮氧化物价格为

60 \$/MW·h 时,不同风火电配置比例下系统单位发电成本相等;当氮氧化物的价格为 60 \$/MW·h 以上时,风火电配置比例大的系统,单位发电成本明显比配置比例小的系统单位发电成本低,且随着氮氧化物排放价格的上升,风火电配置比例对单位发电成本的影响更加明显,因此引入氮氧化物排放成本使风电与其他常规机组在价格机制下平等参与竞争成为可能,风电在参与日前发电调度竞争中的竞争力取决于氮氧化物的排放价格。

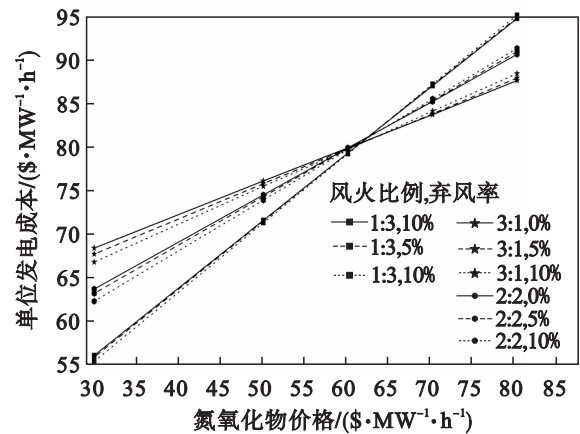


图 3 不同氮氧化物排放价格下的单位发电成本
Fig. 3 Cost of unit power generation with different cost of NO_x emission

4 结 论

1) 原有研究中风火电配置比例取 1:2 并不

一定是最优的,其最优比例需要考虑环保性、经济性以及国家政策等多种因素后确定.

2) 除国家政策外,氮氧化物排放价格是决定风电与火电竞争的决定因素,进而提供了风电与其他常规机组在价格机制下平等参与竞争的可能.

参考文献:

[1] 汪宁渤,丁坤,陟晶,等. 风电火电打捆联合外送是解决风电市场瓶颈的有效途径[J]. 电力技术,2010,19(13):1-4.
(Wang Ning-bo,Ding-Kun,Zhi Jing,et al. The transmission of combined electricity generated from wind and thermals is an effective way to solute the market bottleneck in wind power development [J]. *Electrical Power Technology*, 2010, 19 (13):1-4.)

[2] 郭东杰,王灵梅,韩西贵,等. 基于 PSS 和 SSSC 的风火打捆输电系统暂态稳定性研究[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(19):61-65,71.
(Guo Dong-jie,Wang Ling-mei,Han Xi-gui,et al. Study on transient stability of wind & thermal power transmission system based on PSS and SSSC[J]. *Power System Protection and Control*,2012,40(19):61-65,71.)

[3] 郭小江,赵丽莉,汤奕,等. 风火打捆交直流外送系统功角暂态稳定研究[J]. 中国电机工程学报,2013,36(22):19-25.
(Guo Xiao-jiang,Zhao Li-li,Tang Yi,et al. Study on angle transient stability for wind-thermal-bundled power transmitted by AC/DC system[J]. *Proceedings of the CSEE*,2013,36 (22):19-25.)

[4] 陈树勇,陈会员,唐晓骏,等. 风火打捆外送系统暂态稳定切机控制[J]. 电网技术,2013,37(2):514-519.

(Chen Shu-yong,Chen Hui-yuan,Tang Xiao-jun,et al. Generator tripping control to uphold transient stability of power grid outwards transmitting thermal-generated power bundled with wind power [J]. *Power System Technology*, 2013,37(2):514-519.)

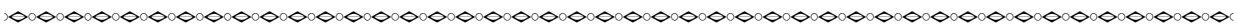
[5] 汤奕,赵丽莉,郭小江. 风电比例对风火打捆外送系统功角暂态稳定性影响[J]. 电力系统自动化,2013,37(20):34-40.
(Tang Yi,Zhao Li-li,Guo Xiao-jiang. Impact of wind power penetration on angle transient stability of wind-thermal combined system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013,37(20):34-40.)

[6] 刘天琪,邱晓燕. 电力系统分析理论[M]. 北京:科学出版社,2005.
(Liu Tian-qi,Qiu Xiao-yan. Power system analysis [M]. Beijing:Science Press,2005.)

[7] Ah King R T F, Rughooputh H C S, Deb K. Stochastic evolutionary multi-objective environmental /economic dispatch [C]// 2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation. Vancouver,2006:946-953.

[8] 袁铁江,晁勤,吐尔逊·伊不拉音,等. 大规模风电并网电力系统动态清洁经济优化调度的建模[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):7-13.
(Yuan Tie-jiang,Chao Qin,Toerxun Yi-bu-la-yin,et al. Optimized economic and environment friendly dispatching modeling for large-scale wind power integration [J]. *Proceedings of the CSEE*,2010,30(31):7-13.)

[9] US Energy Information Administration. Average cost and quality of fossil fuels; electric power monthly with data for December[EB/OL]. (2010-12-04)[2013-05-18]. <http://www.eia.doe.gov/cneaf/electricity/epm/tablel.html>.



(上接第 161 页)

[7] Li C M,Xu C Y,Gui C F,et al. Distance regularized level set evolution and its application to image segmentation[J]. *IEEE Transactions on Image Processing*, 2010, 19 (12):3243-3254.

[8] Bresson X,Esedoglu S,Vanderghelynst P,et al. Fast global minimization of the active contour/snake model[J]. *Journal of Mathematical Imaging and Vision*,2007,28:151-167.

[9] Osher S,Rudin L. Feature-oriented image enhancement using

shock filters[J]. *SIAM Journal on Numerical Analysis*,1990,27:919-940.

[10] Zhao H,Chan T,Merriman B,et al. A variational level set approach to multiphase motion[J]. *Journal of Computational Physics*,1996,127:179-195.

[11] Wang X,Huang D,Xu H. An efficient local Chan-Vese model for image segmentation [J]. *Pattern Recognition*, 2010,43(3):603-618.