

含储能系统及风电的电力系统动态经济调度*

龚建原¹, 卢继平¹, 章耿勇², 王波¹, 尹远³

(1. 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;
2. 中国南方电网超高压输电公司, 广州 510620; 3. 四川省电力公司信息通信公司, 成都 610041)

摘要: 风电的随机性和波动性给传统的调度带来困难, 为此在模型中引入储能系统, 分析了储能系统对含风电的电力系统经济调度的影响, 尤其是对系统调峰的影响。将含风电和储能系统的经济调度描述为一个非线性优化问题, 建立了一个风电场与储能系统相配合的清洁经济调度模型, 其目标函数在传统火电机组运行费用的基础上兼顾了火电的排污成本, 寻求经济和环保总成本的最优解, 采用粒子群算法对该模型进行求解。通过6机系统算例分析, 表明该模型能够有效地控制储能系统的出力; 储能系统的引入可明显降低系统的运行费用, 尤其是火电机组调峰的费用, 且提高了风能利用率。

关键词: 电力系统; 风力发电; 动态经济调度; 储能系统; 粒子群优化算法

中图分类号: TP15; TK89

文献标志码: A

文章编号: 1672-6693(2013)06-0140-07

随着化石能源的枯竭以及全球变暖的加剧, 人们逐渐将目光转向了风能等可再生能源。风力发电作为风能利用的主要形式, 在过去十几年里发展十分迅速^[1-3]。

风电作为一种特殊的电能, 其一次能源是风。目前国内外学者对于风速的预测做了大量的研究工作^[4-6], 但是预测水平仍然在很大程度上难以满足工程的实际需要。风的随机性和间歇性必然会导致风电场出力的波动性^[7]。当大规模风电并网后, 如何在传统调度中合理地考虑并利用好风电这一特殊的电能, 成为经济调度研究中需要关注的问题。文献[8]以丹麦电网为例, 从电网运行费用、可靠性以及环境着手, 研究了大风场接入后对电力系统经济调度的影响; 文献[9]假设风速服从 Weibull1 分布, 以风速为随机变量构建了静态不确定性的优化模型, 该目标函数中包括了因高估风能产生的备用费用, 又包括了因弃风而产生的惩罚费用; 文献[10]是在文献[9]的基础上建立了考虑风速随机分布的优化潮流模型, 研究了不同概率密度函数对优化结果的影响; 文献[11]利用风速和负荷预测误差的概率分布函数来描述系统中存在的不确定性因素, 建立了基于风险备用约束的含风电场电力系统动态经济调度新模型; 文献[12]在考虑系统安全的基础上, 涉及了风电接入后由于机组启停所造成的损耗, 建立了一个基于传输线安全限制的机组组合和经济调度新模型。

随着能量储存技术的迅速发展, 越来越多的储能系统(Energy storage system, ESS)在电力系统中得到了应用^[13-14]。由于风场出力的反调峰特性^[15], 以及传统火电机组在不同出力下边际成本的不同, ESS 接入后能够在负荷较高时释放储存的电能, 从而起到调峰作用。这对提高风能利用率, 降低系统运行成本提供了新的思路。

本文在传统经济优化调度模型的基础上, 研究了 ESS 接入后, 电力系统的经济调度问题。为体现风电在环境方面的贡献, 其目标函数兼顾火电机组的排污费用, 建立了含大型风电场和 ESS 的清洁经济调度数学优化模型, 并设计了与该优化模型相对应的基于粒子群优化(Particle swarm optimization, PSO)的算法。最后, 通过6机系统的算例分析了 ESS 对含风电的经济调度问题的影响, 验证了本文所提模型的有效性。

1 含大型风电场和储能系统的清洁经济调度模型

图1给出含风电和ESS的系统结构图。本文中的ESS是指具有峰谷调节功能的储能装置, 可将电能与其他形式之间的能量进行转换。

* 收稿日期: 2013-09-08 网络出版时间: 2013-11-20 14:46

资助项目: 输配电及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(No. 2007DA10512712205)

作者简介: 龚建原, 男, 硕士, 研究方向为电力系统及其自动化, E-mail: gongdian@gmail.com; 通讯作者: 卢继平, E-mail: lujiping@cqu.edu.cn

网络出版地址: http://www.cnki.net/kcms/detail/50.1165.N.20131120.1446.201306.145_055.html

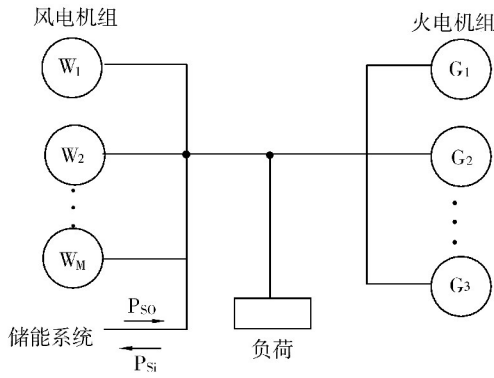


图1 系统结构

1.1 目标函数

基于系统运行费用最小的调度模型中,目标函数是在调度周期内火电机组运行费用、排污费用、风电场运行费用、系统备用以及ESS运行成本的总和最少。

$$\min F = \sum_{t=0}^T (F_{Gt}(P_{Gt}) + F_{Wt}(P_{Wt}) + F_{Rt} + F_{St} + F_{Pt}) \quad (1)$$

(1)式中 F 为研究周期内系统购电的总成本; T 为研究周期, $t=0, 1, 2, 3, \dots, T$ 。

1)火电机组的发电成本 F_{Gt} 。火电厂运行成本一般表示为机

$$F_{Gt}(P_{Gt}) = \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_{Gt} + c_i P_{Gt}^2) \quad (2)$$

2)风电的购入成本 F_{Wt} 。根据《可再生能源法》的要求,风电应全额上网,由调度原因所造成的弃风行为,电网公司应与风场相应的补偿。因此风电的购入成本应包括2个部分,即风场的营运成本和弃风的补偿成本

$$F_{Wt}(P_{Wjt}) = \sum_{j=1}^M C_w P_{Wjt} + C_{at} \sum_{j=1}^M (P_{Wf,jt} - P_{Wjt}) \quad (3)$$

(3)式中, C_w 为风电场的运行成本; C_{at} 为对于风电场弃风的补偿成本。

3)旋转备用成本 F_{Rt} 。对于承担旋转备用的机组,应给予一定经济补偿,成本为

$$F_{Rt} = C_{\mu} \left[\sum_{j=1}^M (1 - E_{Wjt}) P_{Wf,jt} + (1 - E_{Lt}) L(t) \right] \quad (4)$$

(4)式中 C_{μ} 为系统的备用容量价格, E_{Wjt} 为预测出力的可信度, $L(t)$ 为系统预测负荷, E_{Lt} 为预测负荷的可信度。

4)排污费用 F_{St} 。随着环境问题的日益加剧,各国政府都不断加强对污染物排放的控制,这也是积极推进风电等清洁能源的原因。文献[16]提出一个名义环境成本来对火电机组的污染物排放来进行量化。火电机组在

$$F_{St} = \sum_{i=1}^N C_{EPi} (\alpha_i + \beta_i P_{Gt} + \gamma_i P_{Gt}^2) \quad (5)$$

(5)式中 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 为排污特性曲线参数,可通过二次拟合得到;系数 C_{EPi} 的物理意义为名义环境补偿成本。

火电机组排污费用的引入使得污染物有了货币价值。系数 C_{EPi} 取值为零时表示不考虑污染物排放,此时的调度问题就退化为传统的经济调度; C_{EPi} 取值越高表示环境保护的管制越严厉,在调度时更能优先考虑风电。

5) ESS 运行成本 F_{Pt} 。ESS 所储存的风电的费用已经包含在2)中,其充放电过程一般不消耗一次能源。因此在完成投资回报后,运行成本仅包括维护成本,且不同储能形式的维护成本有所不同^[17-18]。

1.2 储能约束

电能不能直接储存,一般都是通过 ESS 转换成其他形式的能量储存起来。不论储能形式如何,ESS 都具有容量大小以及充放电功率的约束。

$$1) \text{ESS 充放电功率约束} \quad Psi_{\min} \leq Psi_t \leq Psi_{\max} \quad (6)$$

$$Pso_{\min} \leq Pso_t \leq Pso_{\max} \quad (7)$$

(6)、(7)式中, Psi_{\max} 和 Pso_{\max} 分别为 ESS 所允许的最大充放电功率; Psi_{\min} 和 Pso_{\min} 为最小充放电功率。由于大多数 ESS 都不允许同时充放电,则

$$Psi_t \cdot Pso_t = 0 \quad (8)$$

$$2) \text{ESS 能量平衡约束。各时段 ESS 充放电能量为} \quad \begin{cases} Asi_t = \int \eta_i \cdot Psi_t dt \\ Aso_t = \int \eta_o \cdot Pso_t dt \end{cases} \quad (9)$$

(9)式中 η_i 和 η_o 分别为 ESS 的充电、放电效率系数。各时段末 ESS 储存能量的表达式为

$$As_t = As_{in_i} + \sum_{k=1}^t Asi_k - \sum_{k=1}^t Aso_k \quad (10)$$

(10)式中 As_{in_i} 为 ESS 的初始储能。

3)ESS 容量约束。不论储能形式如何,ESS 的储能总有一个最大值 As_{\max} 和最小值 As_{\min}

$$As_{\min} \leq As_t \leq As_{\max} \tag{11}$$

(11)式中 As_t 为 ESS 在某单位时段 t 初始时储存的能量。

1.3 风场出力约束

由于电网的结构及风电的某些特性,对于不同的网络,其所容纳的风电容量也不相同,即存在极限穿透功率^[19],调度部门常以此为借口进行弃风。

$$\sum_{j=1}^M P_{Wjt} \leq P_{\omega} l m_t \tag{12}$$

(12)式中, $P_{\omega} l m_t$ 为系统在 t 时刻所能接纳的最大风电功率。

1.4 常规约束

除了 ESS 约束和风场出力约束之外,还应包括以下常规的约束。

1) 功率平衡约束

$$\sum_{i=1}^N P_{G_{it}} + \sum_{j=1}^M P_{W_{jt}} + P_{SO_t} - P_{Si_t} = L(t) \tag{13}$$

(13)式中 $L(t)$ 为系统在某单位时段 t 的预测负荷。

2) 旋转备用约束

$$\sum_{i=1}^N \min(P_{G_{it}}^{\max} - P_{G_{it}}, Ru_i \cdot T_{10}) \geq Sru(t) \tag{14} \quad \sum_{i=1}^N \min(P_{G_{it}} - P_{G_{it}}^{\max}, Rd_i \cdot T_{10}) \geq Srd(t) \tag{15}$$

(14)、(15)式中 $Sru(t)$ 和 $Srd(t)$ 分别为 t 时刻系统上、下旋转备用需求; Ru_i 和 Rd_i 分别为火电机组 i 的爬坡和滑坡速率; T_{10} 表示旋转备用响应时间为 10 min。

3) 机组出力约束。火电机组的出力约束 $P_{G_{in},i} \leq P_{G_{it}} \leq P_{G_{max},i}$ (16)

风场 j 的出力约束为 $0 \leq P_{W_{jt}} \leq P_{W_{f,jf}}$ (17)

4) 爬坡约束
$$\begin{cases} P_{G_{it}} - P_{G_{i,t-1}} \leq Ru_i \\ P_{G_{i,t-1}} - P_{G_{i,t}} \leq Rd_i \end{cases} \tag{18}$$

2 优化问题的求解

含风电场和 ESS 的清洁经济优化调度模型是一个含等式和不等式约束的非线性优化问题,本文采用较为成熟的粒子群优化算法^[20]求解。

2.1 算法的基本思想

PSO 求解就是将一群初始化的随机粒子通过迭代寻找最优解的过程。在寻优过程中,群体中任何一个粒子 n 都由 2 个向量决定:位置和速度。在迭代过程中,粒子通过寻找到的 2 个“极值”来更新自己,一个是粒子本身所搜索到的最优解 $pBest$;另一个是整个种群搜索到的最优解 $gBest$ 。由这 2 个最优解,粒子可利用 (16) 和 (17) 式来更新自己的位置和速度。

在 d 维搜索目标的可行解空间上,对于第 i 个粒子,其位置可表示为 $X_i = (X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{id})$,速度表示为 $V_i = (V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{id})$,具体更新方式如下

$$V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (pBest_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (gBest_{id}^k - X_{id}^k) \tag{19}$$

$$X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^k \tag{20}$$

(19)、(20)式中, ω 为惯性权重,其作用是保持运动惯性,平衡全局与局部搜索能力,可利用 (21) 式来求; C_1 和 C_2 为学习因子,通常取 2; r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 内的随机数。

$$X_i = \begin{bmatrix} P_{G1,1} & \dots & P_{G1,24} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{GN,1} & \dots & P_{GN,24} \\ P_{W1,1} & \dots & P_{W1,24} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{WN,1} & \dots & P_{WN,24} \\ P_{Si1} & \dots & P_{Si24} \\ P_{SO1} & \dots & P_{SO1} \end{bmatrix} \tag{22}$$

$$\omega = \omega_{\max} - k \cdot (\omega_{\max} - \omega_{\min}) / k_{\max} \tag{21}$$

(21)式中, ω_{\max} 和 ω_{\min} 分别为预定义的最大与最小惯性权重, k_{\max} 为最大进化代数。

2.2 PSO 算法流程

本文所描述的优化调度问题实际上是讨论在调度周期内如何安排风场出力、火电机组出力以及 ESS 充放电功率,以达到系统运行费用最低。其决策变量是 $P_{G_{it}}$ 、 $P_{W_{jt}}$ 、

Psi_i 和 Pso_i 。因此,对于含 N 台火电机组、 M 个风电场以及 1 套 ESS 的电力系统来说,其粒子维数为 $24 \times (N + M + 2)$,粒子 i 的位置矩阵表示为左式:

各时段各变量变化后的值应满足各种约束条件。PSO 算法步骤如下:1)确定 PSO 基本参数值;2)初始化 m

表 1 火电机组参数

参数	G_1	G_2	G_3	G_4	G_5	G_6
a	0.41	0.40	0.33	0.37	0.34	0.39
b	350	430	310	400	380	400
c	5 000	5 000	10 000	10 000	10 000	5 000
$\alpha(\times 10^{-6})$	7.49	6.638	5.586	4.38	5.586	6.38
$\beta(\times 10^{-4})$	5.54	6.047	5.094	3.55	5.094	5.72
$\gamma(\times 10^{-6})$	4.09	2.543	4.257	5.326	4.257	3.198
$P_{G \max}$	70	150	250	150	150	150
$P_{G \min}$	25	45	60	50	50	50
R_{Gu}	25	30	55	35	30	25
R_{Gd}	25	30	55	35	20	25

表 2 风场及 ESS 参数

$P_{W \max}$	As_{\min}	As_{\max}	Psi_{\max}	Pso_{\max}
230	0	550	70	80

个粒子的速度和位置,即随机生成 m 组 $24 \times (N + M + 2)$ 维的位置矩阵和速度矩阵;3) 计算 m 个粒子的适应度值,记录各粒子的位置和个体极值,将 m 个粒子极值中适应度最优的个体的位置和适应度值储存于全局极值中;4) 根据 (19) 和 (20) 式更新粒子的速度和位置;5) 更新粒子的个体极值和全局极值:如果粒子当前的适应度值由于个体极值,则用粒子的位置和适应度值更新为当前值;如果 m 个粒子中适应度值最优的粒子的适应度值优于全局极值,则全局极值更新为适应度值最优的粒子的位置和适应度值;6) 检查是否达到终止条件,是则迭代终止输出结果;否则转 4) 继续迭代。

3 算例与分析

3.1 某区域电网的基本参数

表 3 风场的预测出力和系统的负荷

t	风能	负荷	t	风能	负荷
1	162	559	13	142	591
2	163	491	14	148	631
3	166	472	15	97	663
4	168	464	16	72	688
5	162	459	17	42	707
6	170	452	18	42	713
7	168	442	19	54	727
8	168	459	20	63	706
9	149	461	21	74	687
10	134	491	22	77	694
11	125	530	23	103	678
12	125	562	24	131	634

以某区域电网为例,对所提出的含风电场和储能系统的安全经济调度模型和优化方法进行测试。该电网中火电机组、风场以及 ESS 的参数如表 1 和表 2 所示;该套 ESS 已经完成投资回报,不考虑维护费用。风电场在研究周期内各时段的负荷及风场出力如表 3 所示。风场在研究周期内各时段预测出力的准确度为 0.85;其运营成本为 0.055 万元/MW;火电机组的名义环境补偿成本为 0.004 万元/吨^[13]。

3.2 计算结果及分析

本文基于 PSO 来求解含 ESS 和大规模风电场并网电力系统经济调度问题。表 4 是系统不含 ESS 时各机组的出力,其最优成本为 731.705 万元。

表 5 是 ESS 并入系统后在调度周期内各机组的出力,最优成本为 709.743 万元。表中的黑体部分表示由于 ESS 充放电过程的影响所导致的火电机组和风电场的出力的不同。

图 2 为 ESS 的充放电过程及火电机组的出力变化情况。在 $t=1 \sim 14$ h,风场出力较为充足,但是系统负荷较低,在传统调度模式下,由于火电机组最小出力的限制,通常会让风场进行弃风;ESS 接入后能把多余的风能储存起来,在负荷较高而风能不足时释放电能。对比表 3 和表 4,ESS 的接入后,在调度周期内,风电场增发了 527 MWh,提高了风能利用率。

表 4 不考虑 ESS 时各机组的经济调度结果

时段	机组出力						
	G1/MW	G2/MW	G3/MW	G4/MW	G5/MW	G6/MW	W/MW
1	50	45	155	62	80	55	112
2	61	45	136	50	50	50	98
3	55	45	128	50	50	50	94
4	52	45	124	50	50	50	93
5	50	45	122	50	50	50	92
6	48	45	119	50	50	50	90
7	44	45	115	50	50	50	88
8	50	45	122	50	50	50	92
9	51	45	123	50	50	50	92
10	62	45	137	50	50	50	98
11	70	45	158	50	51	50	106
12	70	45	171	50	64	50	112
13	70	45	183	50	75	50	118
14	70	45	196	54	88	51	126
15	70	45	213	69	104	65	97
16	70	45	226	81	117	77	72
17	70	48	239	92	129	87	42
18	70	49	240	93	131	88	42
19	70	49	240	94	131	89	54
20	70	45	233	87	124	83	63
21	70	45	225	80	116	76	74
22	70	45	226	81	117	77	77
23	70	45	215	71	107	67	103
24	70	45	197	55	89	52	127

表 5 考虑 ESS 时各机组的经济调度结果

时段	机组出力						
	G1/MW	G2/MW	G3/MW	G4/MW	G5/MW	G6/MW	W/MW
1	50	45	155	62	80	55	152
2	61	45	136	50	50	50	148
3	55	45	128	50	50	50	146
4	52	45	124	50	50	50	145
5	50	45	122	50	50	50	142
6	48	45	119	50	50	50	144
7	44	45	115	50	50	50	142
8	50	45	122	50	50	50	145
9	51	45	123	50	50	50	135
10	62	45	137	50	50	50	124
11	70	45	158	50	51	50	117
12	70	45	171	50	64	50	118
13	70	45	183	50	75	50	136
14	70	45	196	54	88	51	144
15	70	45	210	66	101	63	97
16	70	45	210	66	101	63	72
17	70	45	218	73	109	70	42
18	70	45	219	75	111	71	42
19	70	45	220	75	111	72	54
20	70	45	212	69	104	65	63
21	70	45	210	66	101	63	74
22	70	45	210	66	101	63	77
23	70	45	210	66	101	63	103
24	70	45	197	55	89	52	127

由图 3 火电机组的边际成本可知,在 $t=15\sim 24$ h 期间,由于风场出力的不足,火电机组不得不以较高的运行成本进行发电。ESS 接入后,可以在负荷较高时将储存的风能释放出来,从而起到一个调峰的作用,降低了火电机组运行费用,间接降低了总运行费用。算例接入 ESS 后,系统 24 h 的运行费用降低了 21.962 万元,经济效益十分可观。

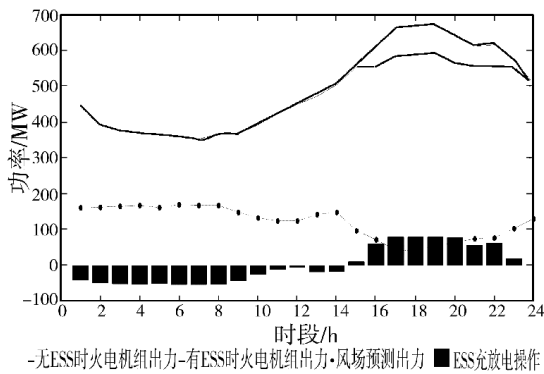


图 2 火电机组出力及 ESS 充放电过程

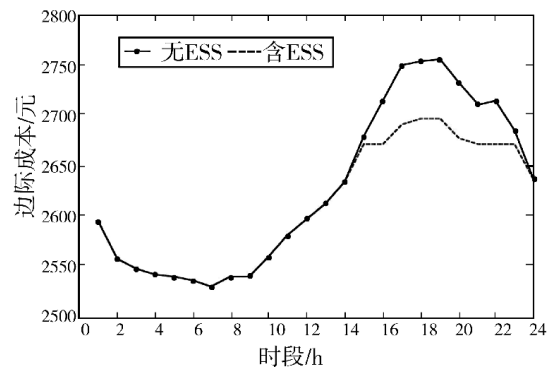


图 3 火电机组的边际成本

4 结语

本文在兼顾环境保护的情况下,研究了 ESS 对含大型风电场电力系统的经济调度的影响,建立了相应的数学优化模型,采用 PSO 优化算法对该模型进行求解。通过 6 机系统的仿真计算表明:所建立的模型能够控制

ESS在各个时段的充放电功率,该模型具有一定的实用性;此外,ESS的引入,可进行峰谷调节,降低系统总的运行费用,一定程度上降低风电波动的影响,提高了风能利用率。

模型中没有考虑线路损耗,在确定火电场提供的旋转备用容量时也没有考虑风速概率分布的影响,这将在以后的研究工作中展开。

参考文献:

- [1] US Department of Energy. IEA wind energy 2009 annual report [EB/OL]. [2010-09] <http://www.eere.energy.gov/>.
- [2] National Renewable Energy Laboratory. Large-Scale offshore wind power in the United States [EB/OL]. [2010-09] <http://www.nrel.gov/>.
- [3] 袁铁江,晁勤,李义岩. 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 T J,Chao Q,LI Y Y. Short-term wind power output forecasting model for economic dispatch of power system incorporating large-scale wind farm[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(13):23-27.
- [4] Potter C W,Negnevitsky M. Very short-term wind forecasting for wind power generation[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2006,21(2):965-972.
- [5] 杨秀媛,肖洋,陈树勇. 风电场风速和发电功率预测研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(11):1-5.
Yang X Y,Xiao Y,Chen S Y. Wind speed and generated power forecasting in wind farm[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(11):1-5.
- [6] 张宜阳,卢继平,孟洋洋. 基于经验模式分解和混沌相空间重构的风电功率短期预测[J]. 电力系统自动化,2012,36(5):24-28.
Zhang Y Y,Lu J P,Meng Y Y. Wind power short-term forecasting based on empirical mode decomposition and chaotic phase space reconstruction[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(5):24-28.
- [7] 周明,冉瑞江,李庚银. 风电并网系统可用输电能力的评估[J]. 中国电机工程学报,2010,30(22):14-21.
Zhou M,Ran R J,LI G Y. Assessment on available transfer capability of wind farm incorporated system[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(22):14-21.
- [8] Ummels B C,Gibescu M,Pelgrum E. Impacts of wind power on thermal generation unit commitment and dispatch [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2010, 22(1):44-51.
- [9] John H,David C,Yu K B. An economic dispatch model in cooperating wind power[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2008,23(2):603-611.
- [10] 孙元章,吴俊,李国杰. 基于风速预测和随机规划的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2009,29(4):41-47.
Sun Y Z,Wu J,LI G J. Dynamic economic dispatch considering wind power penetration based on wind speed forecasting and stochastic programming [J]. Proceedings of the CSEE,2012,1(5):47-55.
- [11] 周玮,孙辉,顾宏. 计及风险备用约束的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报,2012,1(5):47-55.
Zhou H,Sun H,Gu H. Dynamic economic dispatch of wind integrated power systems based on risk reserve constrain[J]. Proceedings of the CSEE,2012,1(5):47-55.
- [12] Daneshi H, Srivastava A K. Security-constrained unit commitment in a system with wind generation and compressed air energy storage[J]. IET Generation, Transmission & Distribution 2012,6(2):167-175.
- [13] 韩涛,卢继平,乔梁. 大型并网风电场储能容量优化方案[J]. 电网技术. 电网技术,2010,34(1):170-173.
Han T,Lu J P,Qiao L. Optimized scheme of energy-storage capacity for grid-connected large-scale wind farm[J]. Power System Technology,2010,34(1):170-173.
- [14] Wiik J,Gjerde J O,Gjengedal T, et al. Steady state power system issues when planning large wind farms[C]. IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, New York, USA,2002.
- [15] Salman K, Anita L J. Windmill modeling consideration and factors influencing the stability of a grid-connected wind power-based generator [J]. IEEE Trans on Power Systems,2003,18(2):793-802.
- [16] 袁铁江,晁勤,吐尔逊·伊不拉音. 电力市场环境下的含风电机组的环境经济调度模型及其仿真[J]. 电网技术, 2009,33(6):67-71.
Yuan T J,Chao Q,Tuerxun Yibulayin. An environmental/economic dispatch model for power grid containing wind power generation units and its simulation in electricity market environment [J]. Power System Technology, 2009,33(6):67-71.
- [17] 胡国珍,段善旭,蔡涛,等. 基于液流电池储能的光伏发电系统容量配置及成本分析[J]. 电工技术学报,2012,27

(5):260-267.

Hu G Z, Duan S X, Cai T, et al. Sizing and cost analysis of photovoltaic generation system based on vanadium redox battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5):260-267.

[18] Yu Y X, Singh H C. Adequacy and economy analysis of distribution systems integrated with electric energy storage and renewable energy resources[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4):2332-2341.

[19] 雷亚洲, 王伟胜, 印永华, 等. 一种静态安全约束下确定电力系统风电准入功率极限的优化方法[J]. 中国电机工程

学报, 2001, 21(6):25-29.

Lei Y Z, Wang W S, Yin Y H, et al. An optimization method for determining wind power penetration limit power system under static security constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(6):25-29.

[20] 纪震, 廖惠连, 吴青华. 粒子群算法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009:64-70.

Ji Z, Liao H L, Wu Q H. Particle swarm optimization and application[M]. Beijing: Beijing Science Press, 2009: 64-70.

Environmental and Economic Dispatch of Grid Connected Large-scale Wind Farm Energy and Storage System

GONG Jian-yuan¹, LU Ji-ping¹, ZHANG Geng-yong², WANG Bo¹, YIN Yuan³

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System
Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044;

2. EHV Power Transmission Company, China Southern Power Grid, Tianhe Road, Guangzhou 510620;

3. Information and Communication Company, SEPC, Chengdu 610041, China)

Abstract: Due to random and fluctuant nature of wind power, difficulty of economic dispatch (ED) is increased. As a result, the energy storage system (ESS) is proposed for power system. This paper presents a simulation method that can assess the impact of ESS on ED problem especially on the power system in peak load shaving. The ED problem with wind power and ESS is formulated as a nonlinear optimization problem. We constructed an optimized economic and environment-friendly model, in which the effect of wind farm and ESS is considered. Besides traditional operation cost, the thermal unit's pollution discharge is introduced in this model in order to seek the best solution for the total costs of economy and environmental protection. The ED model is optimized by particle swarm optimization (PSO) method. A case which contains 6 thermal units and a large-scale wind farm is present to study the impacts of ESS. The results show that the model is correct and the introduction of ESS is effective to reduce operation cost and utilize wind power as much as possible.

Key words: power system; wind power; dynamic economic dispatch; energy storage system; particle swarm optimization

(责任编辑 欧红叶)