

基于时序生产模拟仿真的宁夏电网风光优化配比研究

张军¹, 许晓艳², 黄永宁¹, 曹阳³, 顾雨嘉¹

(1. 宁夏电力公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750001; 2. 中国电力科学研究院, 北京 100192;
3. 河海大学, 江苏 南京 210098)

摘要: 宁夏风和光资源丰富, 风电和光伏发电发展并驾齐驱。建立了含新能源发电的电网年度时序生产模拟仿真模型, 以电网节能减排效益最大为目标, 综合考虑了风光出力特性、负荷特性、机组调峰特性、不同种类供热机组热电耦合特性等因素。在建立模型的基础上, 仿真研究了2015年宁夏电网新能源发电接纳能力, 得到了综合考虑新能源限电率和电网节能减排效益的风光优化配比。该结果可为地区风电和光伏发电建设、电力系统调度以及政府相关政策制定提供指导。

关键词: 时序生产模拟; 接纳能力; 风光配比

Optimal proportion study of wind and PV capacity in Ningxia power grid based on time sequence simulation

ZHANG Jun¹, XU Xiao-yan², HUANG Yong-ning¹, CAO Yang³, GU Yu-jia¹

(1. Ningxia Electric Power Research Institute, Yinchuan 750001, China; 2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China; 3. Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Ningxia's wind power and PV power both developed rapidly these years. The grid annual time sequence production simulation model containing renewable energy is established, whose target is to maximize energy conservation and emissions reduction benefits, the model considers wind and PV output, load characteristic, unit peak load regulation characteristic and thermal electricity couple characteristic of different heating units. Based on the model, Ningxia power grid renewable energy accommodation capability in 2015 is simulated, and optimized proportion of wind power and PV power considering renewable energy curtailment ratio and energy conservation and emissions reduction benefits is gained. The results provide guidance to the construction of wind and PV power, power system dispatching and policy making.

Key words: time sequence production simulation; accommodation capability; wind power and PV power proportion

中图分类号: TM61; TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0081-06

0 引言

大力发展风能和太阳能等可再生能源是我国的重大战略决策^[1-3], 也是我国经济社会可持续发展的客观要求^[4-5]。在政策的鼓励下, 近年来我国东北和西北等风光资源丰富地区掀起了建立大规模新能源电站的浪潮。以宁夏为例, 截止2012年底, 宁夏风电装机容量达到2 646.4 MW, 光伏装机容量达到530.83 MW, 对于充分利用当地风光资源、实现节能降耗目标十分有利^[6]。但由于新能源发电规划和电网建设规划没有精确地统筹考虑而互相脱节, 在实际生产运行期间频繁发生因调峰、网架以及无功电压等约束造成的新能源发电受限现象, 造成了可再生能源的严重浪费, 同时也对电网的安全稳定运行产生一定的影响。另外, 风电和光伏发电出力在

时间和空间上均具有互补性^[7-9], 与相同容量风电或光伏发电相比, 风光联合运行对电网调峰和调频的影响较低。因此, 有必要从电力电量平衡的角度对规划水平年新能源发电接纳能力进行分析, 在此基础上, 综合考虑新能源限电率和电网节能减排效益, 优化电网风光容量配比。

目前, 国内外学者应用了各种方法对新能源发电年度接纳能力进行研究分析, 较为常用的分析手段主要有以下三种: 典型日分析法、随机生产模拟方法及时序生产模拟方法。典型日分析法^[10-11]得到的结果是最严重情况下的新能源平衡情况, 计算结果过于保守, 不利于提高新能源实际上网电力电量; 随机生产模拟^[12-13]算法的核心是将时序负荷曲线转化为持续负荷曲线, 忽略了与时序相关的约束, 例如机组启停机约束、最小开机时间、机组爬坡率

约束等,从而无法全面分析生产成本,难以满足含新能源发电的电力系统运行分析评估;基于时序的生产模拟^[14]是指在给定的负荷条件下,模拟各发电机组的运行状况,并计算发电系统生产费用的一种时序仿真方法,其将系统负荷、新能源发电出力看作随时间变化的时间序列,能够计及时序变化特性。

本文建立了计及风电、光伏发电的年度时序生产模拟仿真模型,模型以电网节能减排效益最佳为目标,综合考虑风光出力特性、负荷特性、机组调峰特性、不同种类供热机组热电耦合特性等因素。基于时序生产模拟仿真模型,分析2015年宁夏电网不同风光容量配比下新能源发电接纳情况,综合比较提出风光最优配比,分析结果对于宁夏电网风电和光伏装机容量规划、低碳电力要求下的网源协调规划具有重要的指导意义。

1 宁夏电网风光发展现状

1.1 风电

宁夏处于甘肃、内蒙、辽宁大风带,风能资源较为丰富,开发潜力大。根据宁夏风能资源评价报告普查结果,宁夏风能资源总储量为22 530 MW,适宜风电开发的风能资源储量为12 140 MW。截止2012年底,宁夏风电装机容量为2 646.4 MW,其中,接入330 kV电压等级的风电场21座,容量为1 828.7 MW,接入220 kV及以下电压等级的风电场11座,容量为817.7 MW。2012年风电发电量为34.49亿 kWh,占全网发电量的3.43%,风电年利用小时数为1 913 h。

1.2 光伏发电

宁夏太阳能资源丰富,有着得天独厚的优越条件,太阳能开发利用潜力巨大。截止2012年底,宁夏光伏装机容量为530.83 MW,其中,接入330 kV电压等级的光伏电站18座,容量为340.5 MW,接入220 kV及以下电压等级的光伏电站9座,容量为190.33 MW。2012年光伏发电量为6.68亿 kWh,占全网发电量的0.66%,光伏发电年利用小时数为1551 h。

2 含风光发电的时序生产模拟模型

2.1 目标函数

为提高电网的节能减排效益,含新能源发电的时序生产模拟模型的目标函数为系统二氧化碳排放量最低,如式(1)所示。

$$F = \min \sum_{j=1}^{N_j} \sum_{t=1}^T \{ \alpha_j Y_j(t) + \beta_j Z_j(t) + a_j P_j(t) + b_j \} \cdot \gamma \quad (1)$$

式中: j 表示第 j 台机组; N_j 表示参与优化各类机组的台数; T 为优化时间总长度; Y_j 为二进制变量,表示机组 j 启动状态,1 表示正在启动,0 表示不在启动状态; Z_j 也为二进制变量,表示机组 j 停机状态,1 表示正在停机,0 表示不在停机状态; $P_j(t)$ 为机组 j 在 t 时段的出力; α_j 为机组 j 启机煤耗; β_j 为机组 j 停机煤耗; a_j 为机组 j 煤耗随功率变化斜率; b_j 为机组 j 煤耗常数; γ 为二氧化碳排放系数。

2.2 约束条件

2.2.1 常规机组约束

1) 机组爬坡率约束

$$P_j(t+1) - P_j(t) \leq \Delta P_{j,\text{up}} \quad (2)$$

$$P_j(t) - P_j(t+1) \leq \Delta P_{j,\text{down}} \quad (3)$$

式中, $\Delta P_{j,\text{up}}$ 、 $\Delta P_{j,\text{down}}$ 分别为第 j 台机组的上爬坡率和下爬坡率。

2) 机组出力约束

$$X_j(t) \cdot P_{j,\text{min}} \leq P_j(t) \leq X_j(t) \cdot P_{j,\text{max}} \quad (4)$$

式中: $P_{j,\text{min}}$ 、 $P_{j,\text{max}}$ 分别为机组 j 的最小出力值和最大出力值; X_j 为二进制变量,表示机组 j 运行状态,1 表示正在运行,0 表示不在运行状态。

3) 机组最小启停机时间约束

$$Y_j(t) + Z_j(t+1) + Z_j(t+2) + \dots + Z_j(t+k) \leq 1 \quad (5)$$

$$Z_j(t) + Y_j(t+1) + Y_j(t+2) + \dots + Y_j(t+k) \leq 1 \quad (6)$$

式中, k 由机组最小启机或者最小停机时间参数决定,其反映了最小启机或停机的时间步长。此约束的考虑,主要是由于受到机组的物理特性及机组启停机煤耗成本的制约,机组不能频繁的启停。

4) 供热机组供热期出力特性约束

$$P_{j,\text{BY}}(t) = C_{j,b} \cdot H_j(t) \quad (7)$$

$$H_j(t) \cdot C_{j,b} \leq P_{j,\text{CQ}}(t) \leq P_{j,\text{max}} - H_j(t) \cdot C_{j,v} \quad (8)$$

式中: $H_j(t)$ 为 t 时段热负荷大小; $C_{j,b}$ 、 $C_{j,v}$ 为供热机组热电耦合系数。

本文考虑两种类型供热机组,背压式供热机组和抽气式供热机组^[15]。式(7)和式(8)分别为供热期内背压机组出力和抽气机组出力约束公式。

2.2.2 系统电力平衡约束

1) 区域负荷平衡约束

$$\sum_{j=1}^{N_j} P_j(t) + P_w(t) + P_v(t) = P_l(t) \quad (9)$$

式中: $P_l(t)$ 为系统总用电负荷; $P_w(t)$ 为 t 时刻接纳的风电出力; $P_v(t)$ 为 t 时刻接纳的光伏发电出力。

2) 系统正/负旋转备用容量约束

$$-\sum_{j=1}^{N_j} P_{j,\max} - C_N(t) \leq -P_l(t) - S_p \quad (10)$$

$$\sum_{j=1}^{N_j} P_{j,\min} + C_N(t) \leq P_l(t) - S_N \quad (11)$$

式中: S_p 、 S_N 分别为系统正/负旋转备用; $C_N(t)$ 为风光发电各时段的可信容量; 将各时段风光出力可信容量纳入常规机组开机容量计算范畴, 能够更好地平衡风力发电和光伏发电。

3) 系统风电、光伏出力约束

$$0 \leq P_w(t) \leq N_w \cdot P_w^*(t) \quad (12)$$

$$0 \leq P_v(t) \leq N_v \cdot P_v^*(t) \quad (13)$$

式中: N_w 、 N_v 分别表示风电和光伏的装机容量; $P_w^*(t)$ 、 $P_v^*(t)$ 分别为根据历史出力推导的风电出力和光伏出力归一化值^[16]。

3 宁夏电网风光优化配比研究

在宁夏电网新能源发电规划装机容量确定的基础上, 可仿真比较不同风光配比下新能源发电接纳情况, 即改变式 (12) 和式 (13) 中 N_w 和 N_v 的数值, 比较结果中的新能源发电限电量以及环境综合效益, 从而确定最优的风光容量配比。

2015 年宁夏最大用电负荷预测为 14 230 MW, 风光规划总容量按 9 000 MW 考虑。考虑直流调峰电源, 2015 年宁夏电网统调火电机组共 74 台, 容量共 34 057 MW, 其中 47 台为凝汽式机组, 容量为 26 832 MW, 27 台为供热机组, 容量为 7 225 MW。非供热期火电机组的调峰能力为其装机容量的 40%, 供热期 (每年 11 月 1 日到次年 4 月 15 日) 供热机组最低技术出力为装机容量的 70% 之间, 系统选取网内最大一台火电机组的容量 (1 000 MW) 作为备用。

3.1 风光容量配比 7:2 时新能源发电接纳情况仿真

若规划的新能源发电按照风电装机容量 7 000 MW、光伏发电装机容量 2 000 MW 进行分配, 利用第 2 章所述的时序生产模拟模型, 可仿真得到新能源发电接纳情况, 如图 1~图 5 所示。

图 1 为火电机组开机容量, 全年常规机组开机容量最大值为 31 304 MW, 最小值为 19 739 MW。

图 2 为每周新能源平均限电率, 结果显示供热期新能源限电率较高, 而非供热期新能源限电率很低。

图 3 为全年按日平均各时段含直流送出等效负荷和新能源限电量间的关系, 夜间晚 9 点到早 7 点, 新能源限电量较大, 其他时段新能源限电量很小。

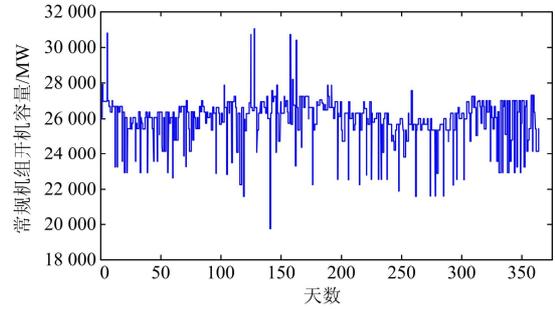


图 1 火电机组开机容量

Fig. 1 Operating capacity of thermal power units

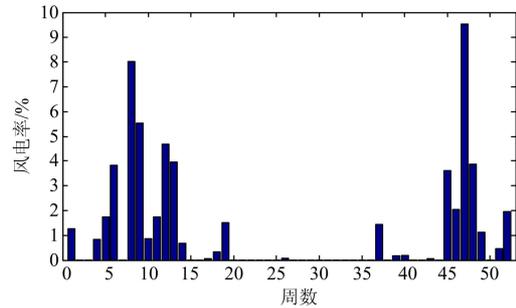


图 2 新能源限电率

Fig. 2 Curtailment rate of wind and PV power

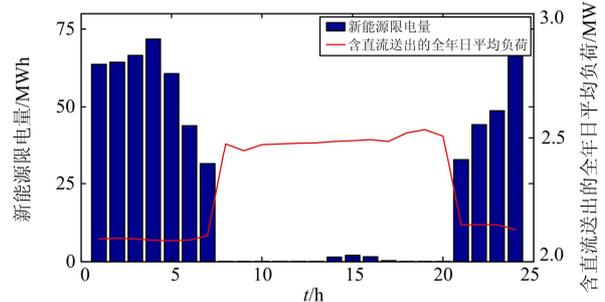


图 3 新能源限电量及平均负荷

Fig. 3 Curtailment energy of renewable energy and average load

图 4 和图 5 分别为不同火电机组每周的平均负荷率以及每小时各类型机组运行台数。可以看出供热期供热机组开启台数稳定, 负荷率较高, 而机组的调峰能力下降, 导致新能源限电率较高。

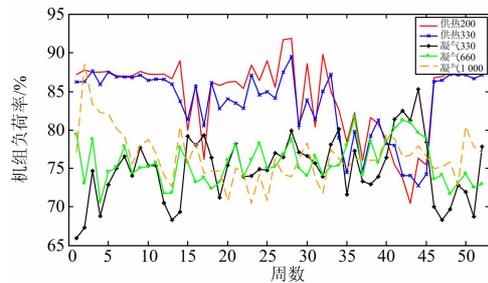


图 4 各类型机组负荷率

Fig. 4 Load rate of different type of units

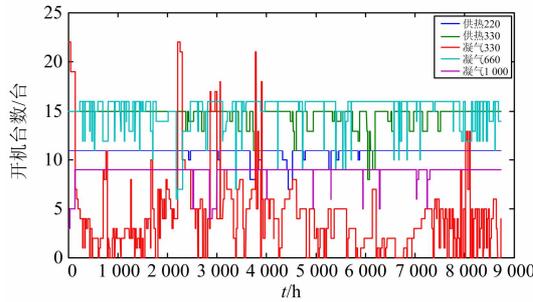


图 5 各类型机组启停台数

Fig. 5 Start/stop counts of different types of units

3.2 不同风光容量配比下新能源发电接纳情况对比分析

图 6 为 9 000 MW 新能源发电在不同风电容量, 即不同风光配比下的新能源限电率和二氧化碳排放量变化曲线。随着风电装机容量的逐渐增加(光伏装机容量的逐渐减少), 二氧化碳排放量逐渐减少, 而新能源的限电率却在逐渐增加。

对新能源限电率和二氧化碳排放量两个指标

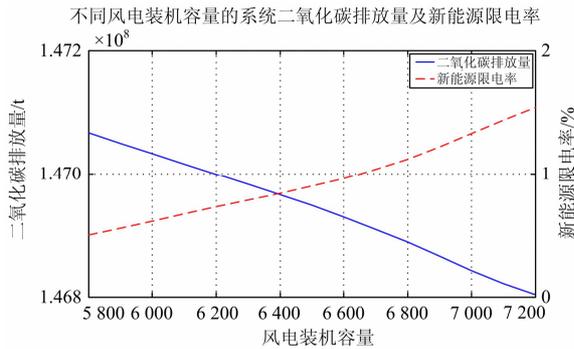


图 6 二氧化碳排放量及新能源限电率

Fig. 6 Carbon dioxide emissions and curtailment rate of renewable energy

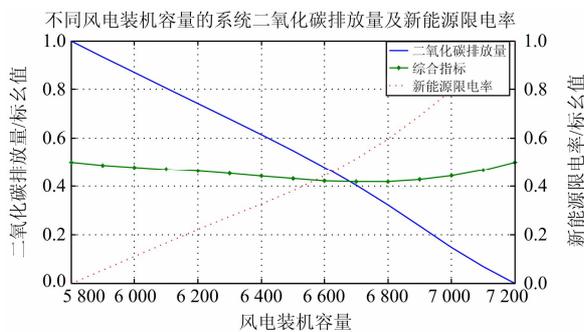


图 7 二氧化碳排放量及新能源限电率(归一化处理后)

Fig. 7 Carbon dioxide emissions and curtailment rate of renewable energy (after normalized)

进行归一化, 得到图 7。若二氧化碳排放量与新能源限电率两者权重相同, 综合指标最低点即为风电、光伏的最佳配比装机容量。2015 年新能源发电装机容量为 9 000 MW 时, 风电装机容量为 6 700 MW、光伏装机容量为 2 300 MW 为宁夏电网风光最佳配比, 此时, 二氧化碳排放量约为 1.47 亿吨, 新能源限电率为 1.03%, 火电机组利用小时数为 5 483 h, 满足火电机组运行经济性的要求。

3.3 宁夏电网风光最佳配比分析

本文还对新能源装机容量分别为 5 000 MW 和 7 000 MW 两种情况下的风光最优配比进行分析, 综合 3.2 节的结论, 可得到风光容量最佳配比汇总表, 如表 1 所示。

表 1 不同装机容量的风光最优配比

Table 1 Optimized ratio between wind power and PV power under different installed capacity

新能源总装机容量/MW	风光配比		风电占总装机容量比例	风电占总装机容量比例
	容量/MW	容量		
5 000	3 700	1 300	2.85	74%
7 000	5 100	1 900	2.68	73%
9 000	6 700	2 300	2.91	74%

不同新能源发电装机容量下的风光最佳比例系数和风电占总装机容量比例均相差不大, 其中风光最佳比例系数在 2.57~3.11 之间, 风电占新能源总装机最佳比例在 75%左右。对各组案例的风光最佳配比容量进行一次曲线拟合, 如图 8 所示。

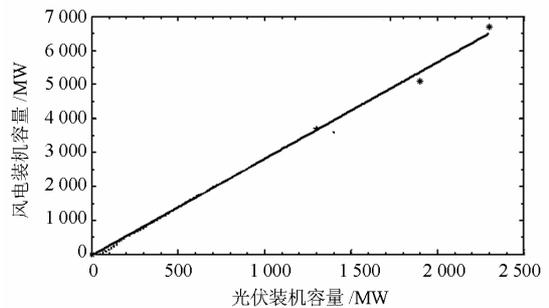


图 8 风光最优配比一次拟合曲线

Fig. 8 Linear fitting curve of optimized ratio between wind power and PV power

由图 8 可知, 假设风电装机容量为 Y , 光伏装机容量为 X , 则风电和光伏发电容量函数关系式为 $Y=2.9938 \cdot X$, 因此, 宁夏电网风/光最佳比例系数为 2.993 8, 即每装 1 000 MW 光伏发电, 最佳配置的风力发电容量为 2 994 MW。

4 结论

本文针对宁夏电网新能源发电规划运行存在的实际问题,开展含新能源发电的时序生产模拟模型研究,并在此基础上研究2015年宁夏电网新能源发电接纳情况及风光最优配比,得出结论如下:

(1) 含新能源发电的时序生产模拟模型以电网节能减排效益最佳为目标,综合考虑风光出力特性、负荷特性、机组调峰特性、不同种类供热机组热电耦合特性等因素,模拟各发电机组全年运行状况,模型将系统负荷、新能源发电出力看作随时间变化的时间序列,能够计及时序变化特性。

(2) 风光最优配比与研究地区的负荷特性、电源调峰特性等因素相关。以社会环境效益最佳(二氧化碳排放量最小)与新能源限电率综合最小为原则,兼顾火电机组运行经济性,评估分析宁夏电网风光最佳配比,在两者权重相同情况下,2015年风光最佳比例系数为2.9938,即每装1000MW光伏发电,最佳配置的风力发电容量为2994MW。

参考文献

- [1] GWEC. Global wind power capacity statistic 2011[R]. Brussels: GWEC, 2012.
- [2] EPIA. Global market outlook for photovoltaic 2013-2017[R]. Brussels: EPIA, 2012.
- [3] 尹明, 王成山, 葛旭波, 等. 中德风电发展的比较与分析[J]. 电工技术学报, 2010, 25(9): 157-162, 182.
YIN Ming, WANG Cheng-shan, GE Xu-bo, et al. Comparison and analysis of wind power development between China and Germany[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(9): 157-162, 182.
- [4] 中国电力企业联合会. 中国新能源发电发展研究报告[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2012.
China Electricity Council. Chinese renewable energy development and research reports[M]. Beijing: China Water Power Press, 2012.
- [5] 国家能源科技“十二五”规划[R]. 北京: 国家能源局, 2011.
12th Five-Year Plan of National energy science and technology[R]. Beijing: National Energy Administration, 2011.
- [6] 宁夏电网2013年运行方式报告[R]. 银川: 宁夏电力调度控制中心, 2012.
2013 operation report of Ningxia Power Grid[R]. Yinchuan: Ningxia Electric Power Dispatching Control Center, 2012.
- [7] PATEL M R. 风能与太阳能发电系统—设计、分析与运用[M]. 2版. 北京: 机械工业出版社, 2009.
PATEL M R. Wind and solar power generation system—design, analysis and application[M]. Second Edition. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [8] 宋洪磊, 吴俊勇, 冀鲁豫, 等. 风光互补独立供电系统的多目标优化设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 104-111.
SONG Hong-lei, WU Jun-yong, JI Lu-yu, et al. Multi-objective optimal sizing of stand-alone hybrid wind/PV system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 104-111.
- [9] 张学清, 梁军, 张利, 等. 计及风光电源的一种地区电网电动汽车充电调度方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 28-35.
ZHANG Xue-qing, LIANG Jun, ZHANG Li, et al. Approach for plug-in electric vehicles charging scheduling considering wind and photovoltaic power in Chinese regional power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 28-35.
- [10] ZONG W G. Size optimization for a hybrid photovoltaic-wind energy system[J]. Electrical Power and Energy Systems, 2012, 42: 448-451.
- [11] 杨龙, 胡少强, 杨苹. 广东电网可再生能源接纳能力研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(15): 110-115.
YANG Long, HU Shao-qiang, YANG Ping. Research on Guangdong Power Grid's capacity of renewable energy integration[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(15): 110-115.
- [12] ALSAYED M, CACCIATO M, SCARCELLA G, et al. Multicriteria optimal sizing of photovoltaic-wind turbine grid connected systems[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2013, 28(2): 370-379.
- [13] 杨楠, 刘涤尘, 孙文涛, 等. 基于调峰平衡约束的光

- 光伏发电穿透功率极限研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(4): 1-6.
- YANG Nan, LIU Di-chen, SUN Wen-tao, et al. Research about photovoltaic power's penetration limit based on the peak load balance constraint[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(4): 1-6.
- [14] 程浩忠, 高赐威, 马则良, 等. 多目标电网规划的分层最优化方法[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(10): 11-16.
- CHENG Hao-zhong, GAO Ci-wei, MA Ze-liang, et al. The lexicographically stratified method for multi-object optimal electric power network planning[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(10): 11-16.
- [15] 杜继成. 基于线性规划的 Balmorel 模型及其在风电并网中的应用研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2011.
- DU Ji-cheng. Linear programming algorithm based Balmorel model and its application to wind power integration[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2011.
- [16] 刘纯, 吕振华, 黄越辉, 等. 长时间尺度风电出力时间序列建模新方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(1): 7-13.
- LIU Chun, Lü Zhen-hua, HUANG Yue-hui, et al. A new method to simulate wind power time series of large time scale[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(1): 7-13.
-
- 收稿日期: 2013-12-18; 修回日期: 2014-03-10
- 作者简介:
- 张 军 (1972 -), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统运行与控制技术;
- 许晓艳 (1984 -), 女, 通信作者, 硕士, 工程师, 主要从事新能源发电并网及优化调度运行技术的研究; E-mail: xyxu@epri.sgcc.com.cn
- 黄永宁 (1963 -), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事电力系统分析与实验。