

DOI: 10.7667/PSPC150809

考虑网络传输约束的并网光伏发电消纳容量计算

欧阳聪, 刘明波

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 光伏发电出力具有间歇性和不确定性, 其并网接入给电力系统运行带来了巨大的挑战。针对大规模并网光电消纳容量计算问题, 构建了一种考虑网络传输约束的消纳分析模型。该模型以最大化光伏电站接入总容量为优化目标, 以光伏电站容量及常规机组的启停状态和出力为决策变量, 考虑网络传输约束和抽水蓄能电站的特定约束, 其本质属于一个混合整数线性规划问题, 可采用 CPLEX 解法器高效求解。并将所提方法应用于某省级电网光伏发电消纳容量计算, 验证了其合理性, 且光伏电站消纳能力还受其接入位置和出力系数的影响。

关键词: 并网光伏发电; 网络传输约束; 消纳容量; 机组组合; 混合整数线性规划

Computing of accommodation capacity of grid-integrated photovoltaic generation considering network's transmission constraints

OUYANG Cong, LIU Mingbo

(School of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The output of photovoltaic generation has intermittency and uncertainty and hence its grid integration brings about the big challenge to power system operation. Aiming at how to calculate accommodation capacity of large-scale grid photovoltaic generation, this paper builds an analytical model considering network's transmission constraints. In this model, the objective is to maximize the capacity of the integrated photovoltaic power stations, outputs of photovoltaic stations and start/stop states and output of the conventional units are defined as the decision variable and meanwhile the network transmission constraints and particular constraints of the pumped storage power stations are considered. In essence, this is a mixed-integer linear programming problem, which can be efficiently solved by CPLEX solver. The results on a provincial power grid show that this model is reasonable and the accommodation capacity of photovoltaic power stations is also affected by their locations and output coefficients.

Key words: grid-integrated photovoltaic generation; network transmission constraint; accommodation capacity; unit commitment; mixed-integer linear programming

0 引言

近年来, 光伏发电等可再生能源发电受到了广泛关注, 在世界各国呈迅猛发展的态势^[1-3]。2013年全球光伏市场新增装机容量达到 38.7 GW, 累计装机容量达到 140.6 GW, 其中我国新增装机容量为 12 GW, 同比增长了 232%, 接近欧洲 2013 年新增装机容量的总和。我国的并网光伏发展呈现了“分散开发, 低压就地接入”与“大规模集中开发, 中高压接入”并举的特征^[4]。随着光伏发电的大量接入, 一方面降低了碳排放和污染气体排放, 增强了电网运行的环境友好性, 另一方面光伏发电出力所

具有的不确定性给电力运行带来了巨大的挑战^[5-9], 降低了电力系统运行的可靠性, 其消纳能力会受到常规发电机组的旋转备用容量、爬坡能力和网络传输能力的限制。

目前, 对光伏电源最大接入容量的研究方法主要有两种, 一种利用各种潮流和稳定计算软件对接入一定量光伏的电网系统进行稳定性和安全性仿真, 校核系统的安全特性, 对光伏发电接入容量不断进行修正, 最后求得最大接入容量^[10-12]。该方法在实际工程中运用较多, 但需要反复验算。另一种是采用数学优化方法, 将最大光伏接入容量问题描述为有约束优化问题。文献[13]提出了基于遗传算

法求解多个光伏电源同时接入配电网的极限功率计算方法；文献[14]提出了求解并网光伏电站极限容量的机会约束模型；文献[15]提出了考虑调峰约束的求解极限光伏容量的计算方法；文献[16]提出了考虑风光互补特性的并网光伏电站容量计算方法。从求解最大光伏容量的角度来看，不仅需要考虑常规发电机组出力约束、爬坡率约束、旋转备用约束等，加入网络传输约束后，光伏电站的接入地点也是影响接入容量的因素之一。此外，储能元件，如蓄电池^[17-18]和抽水蓄能^[19]等的存在也会影响光伏的接入容量。

本文从电力系统调度运行的角度，研究并网光伏发电消纳能力问题，并建立了用于消纳分析的混合整数线性规划模型，以光伏电站接入容量为优化目标，以光伏发电接入容量及常规机组的启停状态和出力为决策变量，考虑常规发电机组爬坡能力和旋转备用及网络传输能力，并考虑了抽水蓄能电站的调节作用。从月/周/日三个时间尺度来计算并网光伏发电消纳容量。

1 光伏发电出力特性

光伏发电是基于半导体的光生伏打效应将太阳能辐射直接转换成电能。光伏电池阵列发出的直流电经过逆变器转换为符合要求的交流电后，直接或通过变压器接入电网^[20-21]。典型并网光伏发电系统如图 1 所示。

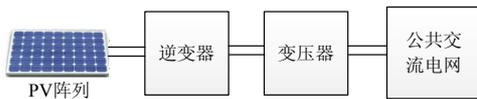


图 1 典型并网光伏发电系统的基本结构

Fig. 1 Basic structure of the typical grid-integrated PV generating system

考虑光伏出力的最大功率跟踪策略，光伏电池的出力系数可以表示为

$$\alpha = f\left(\frac{R_{TC}}{R_{STC}}\right)[1 + \gamma(T_{TC} - T_{STC})] \quad (1)$$

式中： f 为光伏电池的损耗系数； R_{TC} 为实际光辐射强度； R_{STC} 为标准测试条件下的光辐射强度， 1000 W/m^2 ； γ 为光伏电池功率温度系数； T_{TC} 为实际环境温度； T_{STC} 为标准测试条件下的环境温度，取 $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 。

由式(1)可知，获得光伏照射强度水平和历史的温度水平，便可得到光伏电站日/周/月出力特性，在计算光伏最大消纳能力时，应该选取 8 月份光照强度最大的月份进行仿真，如图 2~图 4 所示。

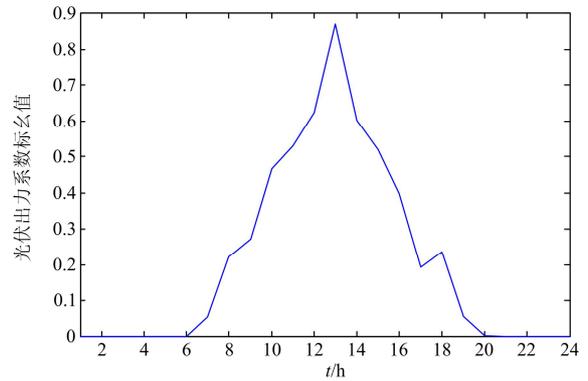


图 2 珠海光伏发电日出力系数曲线

Fig. 2 Coefficient curve of daily output of photovoltaic generation in Zhuhai

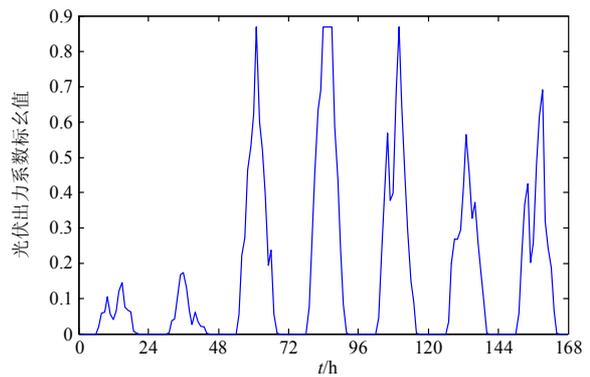


图 3 珠海光伏发电周出力系数曲线

Fig. 3 Coefficient curve of weekly output of photovoltaic generation in Zhuhai

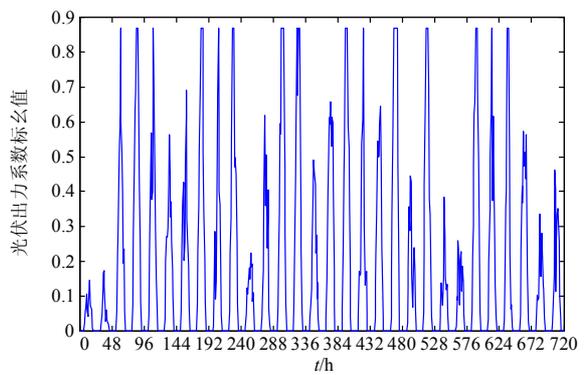


图 4 珠海光伏发电月出力系数曲线

Fig. 4 Coefficient curve of monthly output of photovoltaic generation in Zhuhai

由图 2 可知，光伏的出力时刻跟太阳的运行轨迹是基本吻合的，为早上 7 时至晚上 20 时，早晚的输出功率低，晴天于中午 13 时达到最大出力。由图 3 可知，光伏输出功率受天气影响非常明显，晴天

可以达到较高的出力系数, 最高能接近 90%, 阴天最高出力系数可能低于 20%。由图 4 可知, 光伏输出功率具有很强的波动性, 不同日之间的输出功率也有较大差距。

2 光伏发电消纳容量计算模型

2.1 优化目标

优化目标为最大化光伏接入容量:

$$\max \sum_{s=1}^{N_S} C_s \quad (2)$$

式中: C_s 表示第 s 个光伏电站的接入容量; N_S 表示光伏电站数目。

2.2 约束条件

(1) 功率平衡方程

在每个时间段内所有机组发电的总功率与光伏电站输出功率之和等于系统负荷的总功率, 即

$$\sum_{g=1}^{N_G} I_{gt} P_{gt} + \sum_{s=1}^{N_S} P_{st} = \sum_{d=1}^{N_L} P_{dt}, \quad t=1,2,\dots,T \quad (3)$$

式中: I_{gt} 表示第 g 台常规机组在第 t 个时段的启停状态, 等于 1 表示开机状态, 等于 0 表示停机状态; P_{gt} 表示第 g 台常规机组在第 t 个时段的出力; P_{dt} 表示第 d 个负荷节点在第 t 个时段的负荷功率; N_G 为常规机组数目; T 为总时段数; N_L 为负荷节点数目。

光伏电站 s 在第 t 个时段的出力 P_{st} 可表示为

$$P_{st} = \alpha_{st} C_s \quad (4)$$

式中, α_{st} 表示第 s 个光伏电站在第 t 个时段的出力系数标幺值。

(2) 常规机组出力上下限约束

$$I_{gt} P_{g \max} \geq P_{gt}, \quad g=1,2,\dots,N_G; \quad t=1,2,\dots,T \quad (5)$$

$$P_{gt} \geq I_{gt} P_{g \min}, \quad g=1,2,\dots,N_G; \quad t=1,2,\dots,T \quad (6)$$

式中, $P_{g \max}$ 和 $P_{g \min}$ 分别表示第 g 台常规机组出力的上下限。

(3) 旋转备用容量约束

该约束表示光伏发电出力降到很低的情况下, 已开机的常规机组的出力依然能够满足电网负荷要求, 即

$$\sum_{g=1}^{N_G} I_{gt} P_{g \max} \geq (1+\delta) \sum_{d=1}^{N_L} P_{dt} + \mu \sum_{s=1}^{N_S} P_{st}, \quad t=1,2,\dots,T \quad (7)$$

式中: δ 为负荷预测误差; μ 为光伏出力的最大变化率。

(4) 常规机组爬坡速率约束

$$u_g \geq P_{gt} - P_{g(t-1)}, \quad g=1,2,\dots,N_G; \quad t=1,2,\dots,T \quad (8)$$

$$d_g \geq P_{g(t-1)} - P_{gt}, \quad g=1,2,\dots,N_G; \quad t=1,2,\dots,T \quad (9)$$

式中, u_g 和 d_g 分别表示第 g 台常规机组的爬坡和滑坡速率。

(5) 常规机组最小启停时间约束

开机时间约束为

$$\sum_{n=t}^{t+T_g^{\text{on}}-1} I_{gn} \geq T_g^{\text{on}} (I_{gt} - I_{g(t-1)}) \quad (10)$$

$$t=1,2,\dots,T-T_g^{\text{on}}+1$$

$$\sum_{n=t}^T I_{gn} - (I_{gt} - I_{g(t-1)}) \geq 0, \quad t=T-T_g^{\text{on}}+2,\dots,T \quad (11)$$

停机时间约束为

$$\sum_{n=t}^{t+T_g^{\text{off}}} (1-I_{gn}) \geq T_g^{\text{off}} (I_{g(t-1)} - I_{gt}), \quad t=1,2,\dots,T-T_g^{\text{off}}+1 \quad (12)$$

$$\sum_{n=t}^T [1-I_{gn} - (I_{g(t-1)} - I_{gt})] \geq 0, \quad t=T-T_g^{\text{off}}+2,\dots,T \quad (13)$$

式中, T_g^{on} 和 T_g^{off} 分别表示第 g 台常规机组的最小开机时间和最小停机时间。

(6) 网络传输约束

$$-P_{l \max} \leq P_{lt} \leq P_{l \max}, \quad l=1,2,\dots,N_L; \quad t=1,2,\dots,T \quad (14)$$

式中: P_{lt} 表示第 l 条线路在第 t 个时段的传输功率; $P_{l \max}$ 为第 l 条线路的最大传输功率。

根据直流潮流方程, 第 l 条线路在第 t 个时段的传输功率可表示为

$$P_{lt} = \sum_{g=1}^{N_G} E_{lg} P_{gt} + \sum_{s=1}^{N_S} F_{ls} P_{st} - \sum_{d=1}^{N_L} H_{ld} P_{dt} + \sum_{r=1}^{N_R} G_{lr} (P'_{rt} - P''_{rt}) \quad (15)$$

式中, E_{lg} 、 F_{ls} 、 H_{ld} 和 G_{lr} 分别为第 l 条线路与第 g 台常规发电机机组、第 s 座光伏电站、第 d 个负荷和第 r 座抽水蓄能电站之间的功率传输系数。

2.3 抽水蓄能电站约束

抽水蓄能电站在每个时段可工作在抽水、发电和停机状态, 在整个运行周期内, 用于抽水的能量必须与发电能量保持平衡, 即

$$\sum_{t=1}^T I_{rt} P'_{rt} + \xi \sum_{t=1}^T I_{rt} P''_{rt} = 0, \quad r=1,2,\dots,N_R; \quad t=1,2,\dots,T \quad (16)$$

式中: I_{rt} 表示第 r 个抽水蓄能电站在时间段 t 的启停状态, 等于 1 表示开机状态, 等于 0 表示停机状态; N_R 表示抽水蓄能电站的数目; ξ 为转换效率; P'_{rt} 和 P''_{rt} 分别表示第 r 个抽水蓄能电站在时间段 t 的发电功率和抽水功率, 且应该满足如下约束:

$$I_{rt} P'_{rt} \geq 0, \quad r=1,2,\dots,N_R; \quad t=1,2,\dots,T \quad (17)$$

到第二个高峰, 随后稍有下降, 夜晚 9 点左右达到负荷的第三个峰值, 深夜负荷降低, 达到最低谷。本文对日光伏发电消纳容量进行了计算, 结果如表 2 所示。

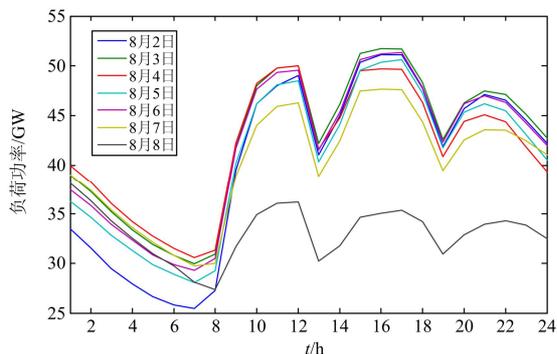


图 6 某省级电网在一周内的日负荷曲线

Fig. 6 Daily load curve of a provincial grid in a week

表 2 日最大光伏接入容量

Table 2 Daily maximum photovoltaic accommodation capacity

	深圳/ MW	东莞/ MW	佛山/ MW	珠海/ MW	总计/ MW
8 月 5 日	2 954.1	5 601.4	1 584.6	2 526.1	12 666.2

从日机组组合的结果来看, 在日时间尺度下, 晴天和阴天的光伏出力系数的差异很大程度上决定了最终光伏接入容量的结果。从光伏消纳能力来看, 应该选择晴天光照最佳日来计算, 即 8 月 5 日, 日机组组合下该省级电网最大的光伏接入容量为 12 666.2 MW。

由图 7 可知, 光伏机组的大规模接入, 在午间光伏发电大发时, 出现白天的等效负荷低于夜间的情况, 此时抽水蓄能机组进行蓄能“填谷”, 在夜间光伏出力减小时再发电“调峰”。

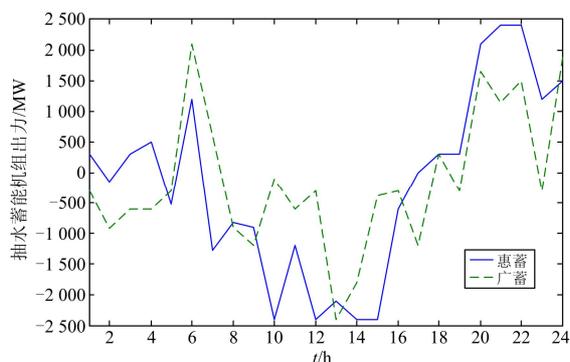


图 7 抽水蓄能机组日出力曲线

Fig. 7 Daily output curves of pumped storage power stations

3.2 周最大接入光伏容量

对 8 月第一周(2~8 日)的光伏发电消纳容量进行了计算, 结果如表 3 所示。

表 3 周最大光伏接入容量

Table 3 Weekly maximum photovoltaic accommodation capacity

	深圳/ MW	东莞/ MW	佛山/ MW	珠海/ MW	总计/ MW
2~8 日	2 946.3	5 620.5	1 557.0	2 542.2	12 666.0

在周机组组合的结果中, 不同气候下的出力系数对光伏接入容量的影响效果较日机组组合小了很多。周机组组合下该省级电网最大的光伏接入容量为 12 666.0 MW。

由图 8 可知, 晴天光伏机组出力大发时, 抽水蓄能机组在日间抽水“填谷”, 在夜间发电“调峰”。阴天光伏机组出力不足时, 抽水蓄能机组在日间发电“调峰”, 夜间负荷低估时抽水“填谷”。

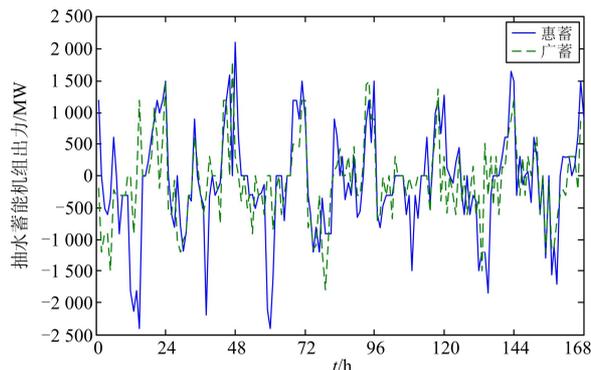


图 8 抽水蓄能机组周出力曲线

Fig. 8 Weekly output curves of pumped storage power stations

3.3 月最大接入光伏容量

对 2013 年 8 月份的光伏发电消纳容量进行了计算, 结果如表 4 所示, 抽水蓄能机组出力曲线如图 9 所示。

在月机组组合中, 光伏接入点的传输线路容量很大程度上决定了该接入点的光伏消纳容量, 东莞的光伏接入容量可以达到 5 703 MW, 而佛山的光伏接入容量只有 424 MW。系统的最大光伏接入容量为 11 526 MW。

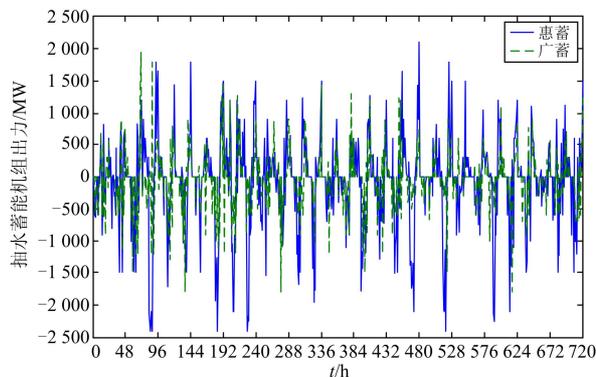


图 9 抽水蓄能机组月出力曲线

Fig. 9 Monthly output curves of pumped storage power stations

表 4 月最大光伏接入容量

	深圳/ MW	东莞/ MW	佛山/ MW	珠海/ MW	总计/ MW
8 月份	2 855.8	5 703.5	424.3	2 542.4	11 526.0

4 结论

1) 提出了考虑网络约束的大型光伏电站接入的算法,以仿真周期内可接入光伏电量为优化求解目标,并考虑了抽水蓄能电站的作用,提高了电网对光伏的消纳能力。

2) 系统负荷特性、光伏电站接入位置、常规机组特性和光伏的出力特性共同决定了光伏最大接入容量。

3) 光伏机组的大规模接入改变了系统的等效负荷,晴天大发时抽水蓄能机组白天抽水夜晚发电,起到“削峰填谷”的作用。

参考文献

- [1] 于佼, 胡杨, 刘星, 等. 大型光伏电站变结构低电压穿越控制策略研究[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(5): 64-69.
YU Jiao, HU Yang, LIU Xing, et al. Research on low voltage ride through of large-photovoltaic power plants[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(5): 64-69.
- [2] 徐军, 王琨, 翟登辉, 等. 一种基于新型载波同相层叠 PWM 方法的飞跨电容型光伏发电并网技术[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 134-139.
XU Jun, WANG Kun, ZHAI Denghui, et al. Grid-connected photovoltaic power generation technology with flying capacitor inverter based on novel carrier-based disposition PWM method[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 134-139.
- [3] 刘兴杰, 郭栋, 王凯龙. 基于电气外特性的光伏发电系统模型等效方法[J]. 电工技术学报, 2014, 29(10): 231-238.
LIU Xingjie, GUO Dong, WANG Kailong. Equivalent modeling method for PV system based on its electric external characteristics[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(10): 231-238.
- [4] 赵争鸣, 雷一, 贺凡波, 等. 大容量并网光伏电站技术综述[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(12): 101-107.
ZHAO Zhengming, LEI Yi, HE Fanbo, et al. Overview of large-scale grid-connected photovoltaic power plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(12): 101-107.
- [5] 丁明, 王伟胜, 王秀丽, 等. 大规模光伏发电对电力系统影响综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 1-14.
DING Ming, WANG Weisheng, WANG Xiuli, et al. A review on the effect of large-scale PV generation on power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 1-14.
- [6] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32.
- [7] EFTEKHARNEJAD S, VITTAL V, HEYDT G T, et al. Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28(2): 893-901.
- [8] 杨秋霞, 刘大鹏, 王海臣, 等. 光伏并网发电与电能质量调节统一控制系统[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 69-74.
YANG Qiuxia, LIU Dapeng, WANG Haichen, et al. A combined control approach for grid-connected photovoltaic and power quality regulatory systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 69-74.
- [9] 魏磊, 姜宁, 于广亮, 等. 宁夏电力系统接纳新能源能力研究[J]. 电网技术, 2010, 34(11): 176-181.
WEI Lei, JIANG Ning, YU Guangliang, et al. Research on Ningxia power grid's ability of admitting new energy resources[J]. Power System Technology, 2010, 34(11): 176-181.
- [10] PAPADOPOULOS M, MALATESTAS P, HATZIARGYRIOU N, et al. Simulation and analysis of small and medium size power systems containing wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(4): 1453-1458.
- [11] CHEN J, FAN R, DUAN X, et al. Penetration level optimization for DG considering reliable action of relay protection device constraints[C] // International Sustainable Power Generation and Supply, Nanjing, China, 2009.
- [12] 王一波, 李晶, 许洪华. 考虑电网安全稳定约束的光伏电站最大安装容量计算与分析[J]. 太阳能学报, 2008, 29(8): 971-975.
WANG Yibo, LI Jing, XU Honghua. Analysis of the maximum installed capacity of PV station constrained by power system security and stability[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2008, 29(8): 971-975.

- [13] 丁明, 刘盛. 基于遗传算法的多个光伏电源极限功率计算[J]. 电网技术, 2013, 37(4): 922-926.
DING Ming, LIU Sheng. Calculation of maximum penetration level of multi PV generation systems based on genetic algorithm[J]. Power System Technology, 2013, 37(4): 922-926.
- [14] 王一波, 许洪华. 基于机会约束规划的并网光伏电站极限容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 22-28.
WANG Yibo, XU Honghua. Research of capacity limit of grid-connected photovoltaic power station on the basis of chance-constrained programming[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 22-28.
- [15] 杨楠, 刘涤尘, 孙文涛, 等. 基于调峰平衡约束的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 Dichen, SUN Wentao, 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.
- [16] 蒋平, 严栋, 吴熙. 考虑风光互补的间歇性能源准入功率极限研究[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1965-1970.
JIANG Ping, YAN Dong, WU Xi. Research on penetration level of intermittent energy considering wind and PV hybrid system[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1965-1970.
- [17] 邱培春, 葛宝明, 毕大强. 基于蓄电池储能的光伏并网发电功率平滑控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 29-33.
QIU Peichun, GE Baoming, BI Daqiang. Battery energy storage-based power stabilizing control for grid-connected photovoltaic power generation system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 29-33.
- [18] 况达, 滕欢, 王博堃, 等. 基于改进遗传算法的蓄电池容量配置及充放电策略研究[J]. 高压电器, 2015, 51(6): 90-96.
KUANG Da, TENG Huan, WANG Bokun, et al. Capacity allocation and charging-discharging strategies study of storage battery based on improved genetic algorithm[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(6): 90-96.
- [19] SOLOMON A A, FAIMAN D, MERON G. Properties and uses of storage for enhancing the grid penetration of very large photovoltaic systems[J]. Energy Policy, 2010(38): 5208-5222.
- [20] 姚致清, 赵倩, 刘喜梅. 基于准同步原理的逆变器并网技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 123-126, 131.
YAO Zhiqing, ZHAO Qian, LIU Ximei. Research on grid-connected technology of inverter based on quasi synchronous principle[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 123-126, 131.
- [21] 于群, 国翠, 曹娜, 等. 光伏电站对送出输电线路选相元件的影响研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 79-85.
YU Qun, GUO Cui, CAO Na, et al. Research of the photovoltaic plant influence on the outgoing transmission line phase selector[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 79-85.
- [22] GAMS Development Corporation. GAMS, the solvers' manual[EB/OL]. <http://www.gams.com/solvers/allsolvers.pdf>.

收稿日期: 2015-05-13; 修回日期: 2015-07-17

作者简介:

欧阳聪(1990-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统优化与控制; E-mail: ouyangcong28@163.com

刘明波(1964-), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统优化与控制。E-mail: epmbliu@scut.edu.cn

(编辑 魏小丽)