

一种考虑电力系统频率安全的新能源并网限值评估方法

皇甫成,邱婷,梁吉,汪鸿

(国网冀北电力有限公司,北京 100054)

A Sustainable Energy Penetration Limit Evaluation Method Considering Power System Frequency Security

HUANGFU Cheng, QIU Ting, LIANG Ji, WANG Hong

(State Grid Jibei Electric Power Company Limited, Beijing 100054, China)

ABSTRACT: A sustainable energy (new energy) penetration limit assessment method considering the frequency security of power system is proposed in this paper. In this method, the maximum frequency deviation expression of the system after renewable energy access is derived, and an approximate solution method for the extreme value point of power grid frequency deviation is given, and then based on the approximate results, the variation of the maximum frequency deviation of the power grid with changes of the inertia and the equivalent adjustment constant is evaluated under the capacity changes of new energy generating units. Furthermore, the frequency safety constraint model is established as the rigid constraint of sustainable energy penetration limit. Finally, the approximate model is tested on two test systems and the simulation results are compared. The simulation results show that the maximum new energy penetration level of the system as determined with the proposed method has high accuracy and can guarantee the stability and reliability of the system.

KEY WORDS: primary frequency response; sustainable energy; maximum frequency deviation; equivalent inertia constant

摘要: 提出一种考虑电力系统频率安全的新能源并网极限评估方法。该方法推导了可再生能源接入后的系统最大频率偏差表达式,并给出一种电网频率偏差极值点近似求解方法;基于近似结果评估了新能源装机容量变化的情况下,电网最大频率偏差随惯性及等效调节常数的变化情况。建立了频率安全约束模型,并以此作为新能源穿透极限的刚性约束。在2个测试系统上对近似模型进行了测试,并与仿真结

果进行了比较。仿真结果表明,该方法所确定系统最大新能源穿透水平具有较高准确性,能够保证系统稳定性和可靠性。

关键词: 一次频率响应;可再生能源;最大频率偏差;等值惯性因子

随着人们环境保护意识的增强及可再生能源发电技术的进步,在过去十几年中,以风电、光伏为代表的可再生能源装机容量水平在全球范围内获得了极大的发展^[1-3]。随着可再生能源利用成本的不断降低,其在运行经济性方面越来越具有竞争优势。但同时,考虑到其出力的随机性、不确定性,当前可再生能源的大规模并网仍面临较大挑战^[4-8]。

同时,风电、光伏等可再生能源发电机组由于缺少转动惯量,其大规模并网将导致系统惯性不足,给系统频率控制带来较大困难。频率偏离基准值将导致高频切机或低频切负荷等问题的发生,造成较为严重的系统安全问题。因此,电力系统运行过程中,最大频率偏差是评估系统稳定性及可靠性的一个重要指标。为确保频率偏差在安全限值内,就需要对可再生能源最大并网水平进行适当限制。

以往研究主要从系统最小备用容量^[9-13]、网络阻塞^[14-15]、电压稳定^[16-17]、热稳定限值^[18]、暂态稳定限值^[16-20]、谐波限值^[21]、风电火电出力协调^[22-23]等方面进行分析。文献[9]提出一种大规模新能源接入后适用于不同负荷水平的旋转备用容量确定方法,考虑了机组N-1故障情况。文献[14]提出一种考虑网络

基金项目:国家自然科学基金项目(51707196)。

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China(51707196).

阻塞的孤岛系统最大风电发电容量评估方法。文献[16]提出一种评估风电容量对系统电压影响的迭代评估策略。考虑到风速及负荷需求的不确定性,文献[17]提出一种基于盒式不确定集的鲁棒优化方法,并以此确定系统能够消纳的最大风电容量。文献[18]提出一种考虑系统频率稳定及线路热稳定极限的风电消纳容量评估方法,并分别对恒转速风机及双馈感应风电机组进行了分析。文献[20]提出一种考虑暂态稳定约束的风电并网限值评估策略,考虑了发电机故障情况下系统的电压稳定及频率稳定限值约束。文献[21]提出一种考虑系统电压谐波限值约束情况下,适用于辐射状配电网中分布式发电极限发电容量评估的解析方法。文献[22]提出一种分支定界法与动态规划法相结合的风火电协调调度策略,并将其应用于最大风电并网容量评估方面。综上,目前在大规模可再生能源接入极限的频率安全评估方面研究较少,尚缺乏统一的数学模型。

本文提出一种考虑电力系统频率安全的可再生能源接入极限评估方法,推导了在可再生能源接入后的系统最大频率偏差表达式,基于灵敏度因子计算出电网频率偏差极值点近似值,并基于近似结果评估了在新能源装机容量变化的情况下,电网最大频率偏差随惯性因子及等效调节常数的变化情况。建立了频率安全约束模型,并以此作为新能源穿透极限的刚性约束。在2个测试系统上对近似模型进行了测试,结果表明,该方法所确定的系统最大新能源穿透水平具有较高准确性,能够保证系统的稳定性和可靠性。

1 电力系统一次频率响应特性

在电力系统正常运行过程中,发用电之间需要保持实时平衡,这主要依靠4个模块有序配合完成:系统惯性响应、一次频率控制、二次频率控制及三次频率控制。其中,系统惯性响应主要依靠负荷及其他设备阻尼特性完成;一次频率控制主要依靠发电机调速器动作,通过调整原动机输入完成。一般来说,以上2个过程执行完成后,系统频率特性曲线已经过了最大频率偏差点,并进入频率恢复阶段。二次、三次频率控制分别指自动发电控制(automatic generation control, AGC)及有功经济调度,主要作用是将扰动后系统频率拉回基准值并使

得系统运行经济性最优。

由以上分析可知,系统最大频率偏差主要与系统惯性响应及一次频率控制相关。图1给出了电力系统一次频率控制的一般数学模型^[24-25]。

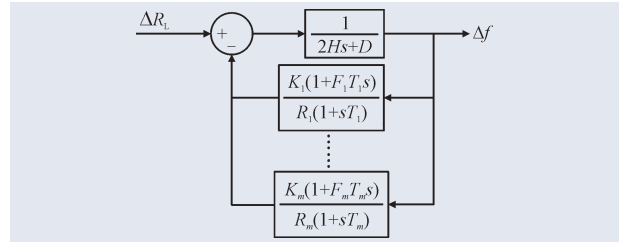


图1 电力系统一次频率响应模型

Fig.1 Primary frequency response model of the power system

假定扰动为阶跃函数形式,由图1可知,扰动后电力系统频率偏差 Δf 可以表示为

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_L}{s \left(2Hs + D + \sum_{i=1}^m \frac{K_i(1+F_i T_R s)}{R_i(1+sT_i)} \right)} \quad (1)$$

式中: ΔP_L 为系统扰动变量; H 为系统等值惯性系数; D 为负荷阻尼系数; R_i 为调速器的速度调节率; T_i 为调速器时间常数; F_i 为高压涡轮级功率占汽轮机总功率的比例系数; K_i 为机械功率增益系数; s 为频域算子。

由于最大频率偏差对调速器时间常数 T_i 的灵敏度较小,因此,式(1)中假定所有调速器时间常数均为同一常数 T_R ^[24]。

表达式(1)可以进一步表示为

$$\Delta f = -\frac{\Delta P_L(1+sT_R)}{2HT_R s(s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2)} \quad (2)$$

其中:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{D + \sum_{i=1}^m \frac{K_i}{R_i}}{2HT}} \\ \zeta = \frac{2H + DT_R + T_R \sum_{i=1}^m \frac{K_i F_i}{R_i}}{2 \sqrt{2HT_R \left(D + \sum_{i=1}^m \frac{K_i}{R_i} \right)}}$$

对式(2)取逆拉普拉斯变换,可以得到频率偏差的时域表达式为

$$\Delta f(t) = -\frac{\Delta P_L}{2HT_R \omega_n^2} [1 + \alpha e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_n \sqrt{1-\zeta^2} t + \varphi)] \quad (3)$$

其中:

$$\alpha = \sqrt{\frac{1 - 2T\zeta\omega_n + T^2\omega_n^2}{1 - \zeta^2}}$$

$$\varphi = \arctan\left(\frac{\omega_n\sqrt{1 - \zeta^2}T}{1 - \zeta\omega_n T}\right) - \arctan\left(\frac{-\sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta}\right)$$

当频率偏差达到最大值时,表达式(3)对时间导数应为0。据此可以得到最大频率偏差表达式为

$$\Delta f(t_0) = -\frac{\Delta P_L}{D + \sum_{i=1}^N \frac{K_i}{R_i}} \left(1 + e^{-\zeta\omega_n t_0} \sqrt{\frac{T_R}{2H} \sum_{i=1}^N \frac{K_i(1 - F_i)}{R_i}} \right) \quad (4)$$

其中:

$$t_0 = \frac{1}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}} \arctan\left(\frac{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}{\zeta\omega_n - 1/T}\right)$$

通过式(1)~式(3)分析,得到了系统最大频率偏差表达式(4),其将作为可再生能源并网最大限值评估的重要依据,具体方法如下所示。

2 考虑频率安全约束的可再生能源并网限值评估

由式(4)可知,系统最大频率偏差受系统惯性因子及其他调节系数的影响,这些系数将在可再生能源并网后发生相应改变。由于可再生能源并网将导致部分常规机组退出运行,因此,系统总的惯性系数将相应下降;同时,系统整体调节系数将呈增大趋势。假定常规机组惯性系数下降值为 n_{cov} ,可再生能源对系统惯性值的贡献为 n_{sus} ,这样,在可再生能源接入后,系统惯性系数 H_{new} 及等值调节常数 R_{new} 可表示为

$$H_{new} = H(1 - n_{cov} + n_{sus}) = nH \quad (5)$$

$$R_{new} = R/(1 - n_{cov} + n_{sus}) = R/n \quad (6)$$

式中, n 为等值惯性因子; R 为不考虑可再生能源接入时的系统等值调节常数。

将式(5)、式(6)代入式(4)中,可以得到考虑可再生能源接入后的最大频率偏差表达式:

$$\Delta f(t_0) = -\frac{\Delta P_L}{D + n \sum_{i=1}^N \frac{K_i}{R_i}} \left(1 + e^{-\zeta\omega_n t_0} \sqrt{\frac{T_R}{2H} \sum_{i=1}^N \frac{K_i(1 - F_i)}{R_i}} \right) \quad (7)$$

其中:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{D + n \sum_{i=1}^N \frac{K_i}{R_i}}{2nHT}}$$

$$\zeta = \frac{2nH + DT_R + T_R n \sum_{i=1}^m \frac{K_i F_i}{R_i}}{2 \sqrt{2nHT_R \left(D + n \sum_{i=1}^m \frac{K_i}{R_i} \right)}}$$

为保证系统安全性,最大频率偏差 $\Delta f(t_0)$ 一般不允许超过规定的安全阈值 Δf_s ,即:

$$\Delta f(t_0) \leq \Delta f_s \quad (8)$$

由式(7)可知,当系统运行方式确定后, $\Delta f(t_0)$ 的大小将只与 n 及 ΔP_L 相关。由于 $\Delta f(t_0)$ 与 n 之间的数学关系较为复杂,难以直接求解,因此,本文提出一种基于灵敏度因子的近似求解方法,具体如下。

首先假定负荷阻尼系数 $D=0$,此时 ω_n 及 ζ 可以简化为

$$\omega_n = \sqrt{\frac{n \sum_{i=1}^m \frac{K_i}{R_i}}{2nHT}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m \frac{K_i}{R_i}}{2HT}} \quad (9)$$

$$\zeta = \frac{2nH + T_R n \sum_{i=1}^m \frac{K_i F_i}{R_i}}{2 \sqrt{2nHT_R \left(n \sum_{i=1}^m \frac{K_i}{R_i} \right)}} = \frac{2H + T_R \sum_{i=1}^m \frac{K_i F_i}{R_i}}{2 \sqrt{2HT_R \left(\sum_{i=1}^m \frac{K_i}{R_i} \right)}} \quad (10)$$

由式(9)、式(10)可知, ω_n 及 ζ 的大小均与 n 无关,因此,由式(7)可知, $\Delta f(t_0)$ 与 n 之间将变为简单的倒数关系。此时,结合式(8)频率安全限值约束即可得到 n 的最小值为

$$n \geq -\frac{\Delta P_L}{\Delta f_s \sum_{i=1}^N \frac{K_i}{R_i}} \left(1 + e^{-\zeta\omega_n t_0} \sqrt{\frac{T_R}{2H} \sum_{i=1}^N \frac{K_i(1 - F_i)}{R_i}} \right) \quad (11)$$

实际情况下,虽然 D 不为0,但其数值相对 $\sum_{i=1}^N \frac{K_i}{R_i}$ 及 $\sum_{i=1}^m \frac{K_i F_i}{R_i}$ 来说一般非常小,因此, ω_n 及 ζ 取值大小受 D 影响较小;同时,已有研究表明,最大频率偏差取值对 D 灵敏度非常小^[24],因此,忽略负荷阻尼系数 D 对最终结果精度的影响,可以近似用式(11)作为 n 取值依据。

3 实例验证

分别以IEEE 6母线测试系统及以IEEE RTS测试系统^[26-28]进行分析,以验证本文方法的实用性。通过改变 n 的取值来模拟不同新能源并网水

平,以新能源出力突变作为系统主要扰动类型。最大允许系统频率偏差为 ± 0.1 Hz。

3.1 IEEE 6 母线测试系统结果

IEEE 6 母线测试系统一次结构如图 2 所示^[14]。

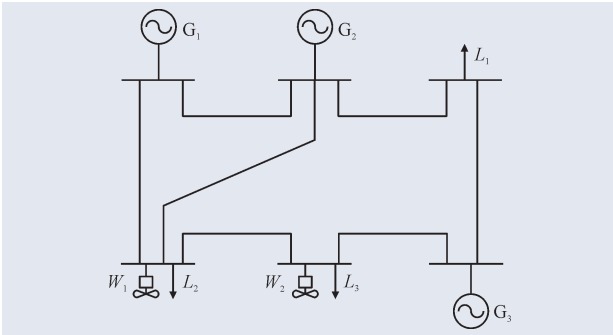


图 2 IEEE 6 母线测试系统一次接线图

Fig.2 Primary wiring diagram of the IEEE 6-bus system

系统包括 3 台火电机组及 2 台新能源发电机组。发电机及调速器相关参数取值如表 1 所示,负荷阻尼系数取值为 0.5,扰动大小取为 2 MW。

表 1 6 母线测试系统动态参数

Table 1 Dynamic parameters of the 6-bus testing system

| 发电机编号 | K | T_w/s | H/s | F_H | R |
|-------|------|---------|-------|-------|------|
| 1 | 0.9 | 8 | 7 | 0.15 | 0.04 |
| 2 | 0.95 | 7 | 5.5 | 0.35 | 0.03 |
| 3 | 0.98 | 9 | 3.5 | 0.25 | 0.03 |
| W_1 | | | 0.5 | | |
| W_2 | | | 0.5 | | |

在不同新能源并网水平下,本文方法计算结果与电网实际仿真结果的对比如图 3 所示,本文方法计算误差如图 4 所示。

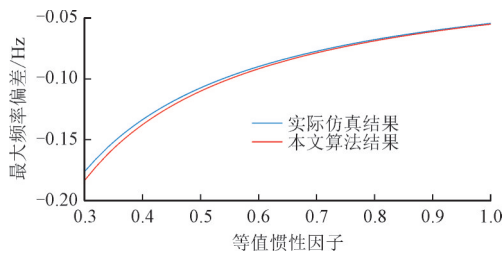


图 3 本文方法与实际仿真结果比较

Fig.3 Comparison between the proposed method and actual simulation results

由仿真结果可知:

1) 随着系统等值惯性因子的下降,在相同的扰动水平下,最大频率偏差逐渐增大,说明随着新能源并网发电水平的提高,电网抗扰动能力逐渐下降,运行稳定性变差。

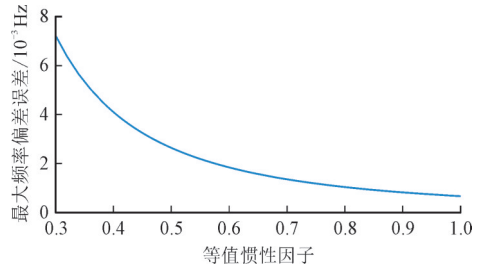


图 4 本文方法拟合误差曲线

Fig.4 Error curve of the proposed method

2) 本文方法计算结果与电网实际仿真结果基本一致,在电网正常运行情况下,本文方法的仿真误差在 10^{-3} Hz 以内,证明了本文方法的有效性。

3) 随着系统等值惯性因子的下降,本文方法拟合误差逐渐增大,这主要是由于随着新能源并网发电水平的提高,系统等值调节常数增加的缘故。

4) 由图 3 可知,为保证系统频率安全,系统等值惯性因子最大可以下降至正常水平的 46%,这对应于最大容许风电接入水平限值。

3.2 IEEE RTS 测试系统结果

IEEE RTS 测试系统网架结构图如文献[26-27]所示,本文在节点 13、节点 7 添加一个容量为 600 MW 及 350 MW 的风电场。负荷阻尼系数 $D=1$, $T=8$ s,扰动大小取为 10 MW,发电机及调速器参数取值如表 2 所示。

表 2 24 母线测试系统动态参数

Table 2 Dynamic parameters of the 24-bus testing system

| 发电机编号 | H/s | R | F_H |
|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 5.62 | 0.035 | 0.12 |
| 2 | 3.14 | 0.059 | 0.15 |
| 3 | 6.40 | 0.096 | 0.51 |
| 4 | 6.74 | 0.097 | 0.45 |
| 5 | 5.71 | 0.024 | 0.26 |
| 6 | 6.03 | 0.097 | 0.58 |
| 7 | 5.97 | 0.096 | 0.12 |
| 8 | 4.57 | 0.054 | 0.32 |
| 9 | 5.62 | 0.082 | 0.29 |
| 10 | 3.68 | 0.023 | 0.48 |
| 11 | 5.82 | 0.048 | 0.50 |
| 12 | 3.13 | 0.092 | 0.19 |
| 13 | 4.11 | 0.081 | 0.34 |

在不同新能源并网水平下,本文方法计算结果与电网实际仿真结果的对比如图 5 所示,本文方法计算误差如图 6 所示。

由仿真结果可知:

1) 与 6 母线测试系统相比,IEEE RTS 测试系统的最大频率偏差虽然进一步增大,但本文方法的

仿真误差仍然保持在 10^{-3} Hz 以内,进一步证明了本文方法的有效性。

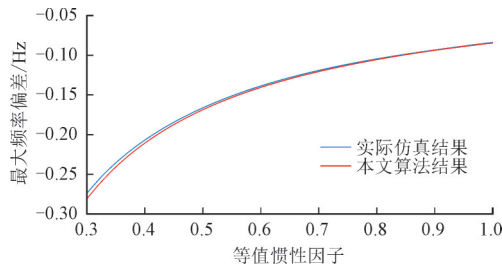


图5 本文方法与实际仿真结果比较

Fig.5 Comparison between the proposed method and actual simulation results

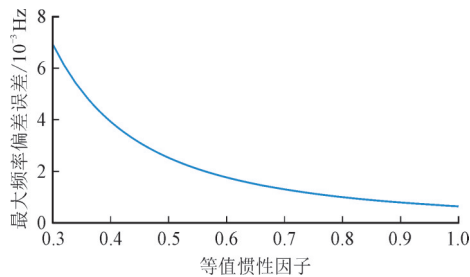


图6 本文方法拟合误差曲线

Fig.6 Error curve of the proposed method

2) 由图 5 可知,为保证系统频率安全,系统等值惯性因子最低可以下降 16%,这对应系统最大容许风电接入水平限值。

4 结语

本文提出了一种考虑电力系统频率安全的电网可再生能源接入极限评估方法,给出了可再生能源接入后系统最大频率偏差表达式。评估了新能源装机容量变化的情况下,电网最大频率偏差随惯性及等效调节常数的变化情况。建立了频率安全约束模型,并以此作为新能源穿透极限的刚性约束。仿真结果表明,本文方法计算简单快速,拟合效果具有较高精度,能够保证系统稳定性和可靠性。

参考文献

[1] LI B, XU T, FANG Y. On-line security assessment and control decision support for large amount wind power integrated power system[C]//Proceedings of 11th International Conference on Developments in Power Systems Protection, Birmingham, UK, 2012:1-6.
[2] 杨汾艳, 刘正富, 李海波, 等. 基于潮流路由器技术的多时间尺度可再生能源消纳方法[J]. 广东电力, 2019,

32(11):1-11.

YANG Fenyang, LIU Zhengfu, LI Haibo, et al. Absorption method for multi-time scale renewable energy based on power flow router technology[J]. Guangdong Electric Power, 2019, 32(11):1-11.

[3] 袁玉湘, 赵守和. 日本分布式可再生能源并网应对策略[J]. 供用电, 2018, 35(9):62-68.

YUAN Yuxiang, ZHAO Shouhe. Japan's countermeasures for distributed renewable energy generation parallel in the power grid[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(9):62-68.

[4] 侯贺军, 罗春辉, 武学伟, 等. 计及 PEV 聚合器的含可再生能源电力系统 AGC 调节功率的协调调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1):63-70.

HOU Maojun, LUO Chunhui, WU Xuewei, et al. Coordinated dispatching of AGC regulation power considering PEV aggregator in power system with large-scale renewable energy sources[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1):63-70.

[5] 张高航, 李凤婷, 周强, 等. 考虑风电并网友好性的日前分层调度计划模型[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6):124-130.

ZHANG Gaohang, LI Fengting, ZHOU Qiang, et al. Day-ahead hierarchical dispatching model considering friendliness of wind power[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(6):124-130.

[6] 王甜婧, 许阔, 朱永强. 主动配电网的源-网-荷多层博弈经济调度策略[J]. 电力系统保护与控制, 2018(4):10-19.

WANG Tianjing, XU Kuo, ZHU Yongqiang. Economic dispatch strategy of active distribution network based on source-network-load multi-layer game[J]. Power System Protection and Control, 2018(4):10-19.

[7] 童家麟, 吕洪坤, 李汝萍. 国内光热发电现状及应用前景综述[J]. 浙江电力, 2019, 38(12): 25-30.

TONG Jialin, LÜ Hongkun, LI Ruping. Review on status and application prospect of domestic CSP generation[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(12): 25-30.

[8] 樊新东, 杨秀媛, 金鑫城. 风电场有功功率控制综述[J]. 发电技术, 2018, 39(3):268-276.

FAN Xindong, YANG Xiuyuan, JIN Xincheng. An overview of active power control in wind farms[J]. Power Generation Technology, 2018, 39(3):268-276.

[9] CHIA-AN C. YUAN-KANG W. ZHAO-GUO P. et al. Determination of maximum wind power penetration in an isolated island system by considering spinning reserve[C]//

- Industrial & Commercial Power Systems Technical Conference, 1-8. 2014.
- [10] 韩晓娟,艾瑶瑶,李相俊. 储能在电网中的应用价值及其商业模式[J]. 发电技术, 2018(1):77-83.
HAN Xiaojuan, AI Yaoyao, LI Xiangjun. Application value of energy storage systems in the power grid and its commercial modes[J]. Power Generation Technology, 2018(1): 77-83.
- [11] 刘兴宇,温步瀛,江岳文. 考虑用户侧响应的含风电电力系统旋转备用效益研究[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2):27-34.
LIU Xingyu, WEN Buying, JIANG Yuewen. Study on the spinning reserve benefit considering demand response in power system containing wind power[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2):27-34.
- [12] 刘怡君,夏晨杰,关惠方,等. 电力市场下风电电力系统旋转备用风险-成本模型[J]. 电力工程技术, 2019, 38(1): 42-48.
LIU Yijun, XIA Chenjie, GUAN Huifang. Risk-cost model of spinning reserve of power system incorporated wind power in electricity market[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1):42-48.
- [13] 王小蕾,顾佳,周佳威. 风储联合系统的储能容量优化配置[J]. 浙江电力, 2018, 37(9):14-17.
WANG Xiaolei, GU Jia, ZHOU Jiawei. Optimal capacity configuration of cogeneration system of wind power and energy storage[J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(9):14-17.
- [14] KALDELIS J K. KAVADIAS K A, FILIOS A E. A new computational algorithm for the calculation of maximum wind energy penetration in autonomous electrical generation systems[J]. Applied Energy, 2009,86(7): 1011-1023.
- [15] 昌力,庞伟,严兵,等. 可再生能源跨区现货市场技术支持系统设计[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 158-165.
CHANG Li, PANG Wei, YAN Bing, et al. Design of renewable energy inter-regional spot market operation support system[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 158-165.
- [16] TAMIMI A A. PAHWA A. STARRETT S. et al. Maximizing wind penetration using voltage stability based methods for sizing and locating new wind farms in power system[C]// Proc. 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, 2010.
- [17] AYRES H M, FREITAS W, DE ALMEIDA M C, et al. Method for determining the maximum allowable penetration level of distributed generation without steady-state voltage violations[J]. IET Gener Transm Distrib, 2010,4(4):495-508.
- [18] VITTAL E. MCCALLEY J D. AJJARAPU V, et al. Wind penetration limited by thermal constraints and frequency stability[C]. NAPS'07. 39th North American, 2007.
- [19] 和萍,武欣欣,陈婕,等. 含风电和光伏发电的综合能源系统的低频振荡[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1):22-29.
HE Ping, WU Xinxin, CHEN Jie, et al. Low frequency oscillation of an integrated energy system with wind and solar power generation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1):22-29.
- [20] VITTAL E. A static analysis of maximum wind penetration in Iowa and a dynamic assessment of frequency response in wind turbine types[D]. Ames, USA: Iowa State University, 2008.
- [21] BHOWMIK A, MAITRA A, HALPIN S M. et al. Determination of allowable penetration levels of distributed generation resources based on harmonic limit considerations[J]. IEEE Trans Power Deliv, 2003, 18(2): 619-624.
- [22] CHEN Chunlung. Optimal wind-thermal generating unit commitment[J]. IEEE Trans Energy Convers, 2008,23(1): 273-280.
- [23] 张超,王维庆,王海云,等. 风火打捆外送系统220 kV电网次同步振荡监控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018(1):138-144.
ZHANG Chao, WANG Weiqing, WANG Haiyun, et al. Study on monitoring and control strategy of subsynchronous oscillation for 220 kV power grid in wind-thermal-bundled transmission system[J]. Power System Protection and Control, 2018(1):138-144.
- [24] AHMADI H. GHASEMI H. Security-constrained unit commitment with linearized system frequency limit constraints[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014(4): 1536-1545.
- [25] AIK D L H. A general-order system frequency response model incorporating load shedding: Analytic modeling and applications[J]. IEEE Trans Power Systems, 2006,21(2): 709-717.
- [26] WANG S, SHAHIDEHPOUR S, KIRSCHEN D, et al. Short-term generation scheduling with transmission and environmental constraints using an augmented lagrangian relaxation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1995,

(下转第98页)

汽车充/放电对有源配电网电压水平影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(2):526-536.

LI Xue, CHEN Haojie, DU Dajun. Study on the impact of charging/discharging strategy of electric vehicles on voltage level of active distribution system considering multi-period and variable correlations[J]. Proceeding of the CSEE, 2018, 38(2): 526-536.

- [36] 郑伟,陈仕彬,梁福波,等.基于PSO-PSA的光伏系统最大功率点跟踪技术[J].热力发电, 2018, 47(2):78-84.

ZHENG Wei, CHEN Shibin, LIANG Fubo, et al. Maximum power point tracking technology based on hybrid algorithm of PSO and PSA for photovoltaic systems[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 78-84.

- [37] 石玉东,蒋卓臻,高红均,等.促进风电消纳的配电网分布式电源与电动汽车充电站联合鲁棒规划[J].可再生能源, 2018, 36(11):62-68.

SHI Yudong, JIANG Zhuozhen, GAO Hongjun, et al. A joint robust planning of distributed generation and electric vehicle charging stations in distribution network to promote accommodation of wind power[J]. Renewable Energy Resources, 2018, 36(11):62-68.

- [38] 周步祥,刘治凡,黄河,等.基于GRASP-PR混合算法的电动汽车有序充电优化[J].电测与仪表, 2020, 57(2): 7-13.

ZHOU Buxiang, LIU Zhifan, HUANG He, et al. Orderly charging optimization of electric vehicles based on

GRASP-PR hybrid algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(1): 7-13.

- [39] 陈静鹏,朴龙健,艾芊.基于改进贪心算法的大规模电动汽车充电行为优化[J].电力自动化设备, 2016, 36(10):38-44.

CHEN Jingpeng, PIAO Longjian, AI Qian. Charging optimization based on improved greedy algorithm for massive EVs[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(10):38-44.

- [40] 胡振兴,刘渝根,张勇,等.500 kV升压站雷电侵入波过电压影响因素分析[J].电瓷避雷器, 2018, 38(9): 70-76.

HU Zhenxing, LIU Yugen, ZHANG Yong, et al. Analysis of influencing factors of lightning intrusion wave overvoltage in 500 kV booster station[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018, 38(9):70-76.

收稿日期:2020-07-18。

作者简介:

孟宪珍(1976—),女,本科,高级工程师,研究方向为配电网规划;
张艳(1975—),女,本科,高级工程师,研究方向为电网规划与投资分析;

安琪(1986—),男,本科,工程师,研究方向为电网规划与电力系统稳定分析;

许叶林(1990—),男,本科,工程师,研究方向为配电网规划;

李庆波(1985—),男,本科,工程师,研究方向为配电网规划。

(编辑 冯露)

(上接第90页)

10(3):1294-1301.

- [27] Reliability test system task force of the application of probability methods subcommittee. IEEE reliability test system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6): 2047-2054.

- [28] FU Y, SHAHIDEHPOUR M, ZUYIL. Security-constrained unit commitment with AC constraints[J]. IEEE Trans on

Power Systems, 2005, 20(3): 1538-1550.

收稿日期:2020-09-24。

作者简介:

皇甫成(1981—),男,博士,高级工程师,研究方向为电网经济运行及线损管理等。

(编辑 董小兵)