

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.180705

考虑稳态和动态有功平衡约束的新能源消纳综合评估方法

盛四清¹, 邱昊¹, 张文朝², 张振宇³, 王吉利³, 柯贤波³

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北 保定 071003; 2. 北京科东电力控制系统有限责任公司, 北京 100192; 3. 国家电网公司西北分部, 陕西 西安 710048)

摘要: 随着新能源占比的增大, 电网调峰能力和频率稳定问题已成为新能源消纳的主要制约因素, 提出一种考虑调峰、频率稳定以及机组调节性能等稳态、动态平衡条件约束下的新能源消纳能力综合评估方法。考虑联络线调峰, 计算电网的新能源渗透率。通过应力和寿命之间的关系计算出机组频繁调节下的寿命损耗, 分析对新能源接纳能力的影响。并把频率稳定作为重要约束条件, 分析不同类型扰动例如一般扰动和严重故障限制下的新能源消纳水平。分析结果揭示了不同因素下的交互制约关系, 提高了评估新能源消纳能力的系统性和适应性, 并给出了相关建议。

关键词: 新能源消纳能力; 调峰; 频率稳定; 机组频繁调节

Comprehensive assessment method of new energy consumption considering steady and dynamic active power equilibrium constraints

SHENG Siqing¹, QIU Hao¹, ZHANG Wenchao², ZHANG Zhenyu³, WANG Jili³, KE Xianbo³

(1. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;
2. Beijing Kedong Power Control System Limited Liability Company, Beijing 100192, China;
3. Northwest Division of State Grid Corporation of China, Xi'an 710048, China)

Abstract: With the increase of the proportion of new energy sources, the peak load capacity and frequency stability of power grid have become the main constraint factors for the new energy consumption. This paper presents a comprehensive assessment method of new energy dissipation capacity under the constraints of steady and dynamic equilibrium conditions such as peak adjustment, frequency stability and unit regulation performance. The new energy permeability of the power grid considering the connection line peak adjustment is calculated, and the life loss under the frequent regulation of the unit is calculated by the relationship between the stress and the life to analyze the influence of the new energy acceptance capacity; the frequency stability is regarded as an important constraint condition, then the new energy consumption level under different types of disturbance such as general disturbance and serious fault is analyzed. The analysis reveals the interaction constraints under different factors and improves the systematicness and adaptability of the assessment of new energy consumption capacity. And relevant suggestions are given.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2018YFB0904200).

Key words: new energy consumption capability; peak load regulation; frequency stability; frequent regulation of units

0 引言

近年来, 我国新能源持续迅猛发展, 在电网中

渗透率日益增大。但因其随机性和不稳定性, 导致电网调峰能力不足以及引发频率安全稳定等各方面的问題, 从而成为制约新能源发展的阻力^[1]。

文献[2-5]从调峰、频率稳定、静态电压稳定、网络约束多个层面展开了新能源消纳的研究。在调峰方面, 文献[6-9]通过分析常规电源构成、出力范围及联络线出力计划, 根据负荷峰谷差, 利用电网调峰裕度来计算电网中风电的可接纳容量。调峰能

基金项目: 国家重点研发计划“智能电网技术与装备”专项(2018YFB0904200)“促进可再生能源消纳的风电/光伏发电功率预测技术及应用”; 国家电网公司西北分部科学技术项目(SGNW0000DKJS1800074)

力一直是新能源消纳的一项重要约束，目前相关研究已较为丰富。

频率安全稳定则是近年来研究的重点，逐渐成为新能源消纳的重要约束。高比例新能源的渗透降低了系统的转动惯量，对频率调节产生了较大的影响^[10-11]。文献[12]以系统频率恢复情况作为动态稳定约束条件，以运行下限不超过 49.5 Hz 为标准确定了满足动态扰动不失稳条件下的光伏电站穿透功率极限。文献[13]根据风速数据模拟风电功率波动情况，并以±0.2 Hz 作为频率波动限制对风电渗透极限展开分析，而文献[14]则直接模拟火电机组 5% 的功率变化，并以 1% 的频率偏差作为限制求解风电渗透极限。文献[15-17]以频率作为动态约束条件，在保证系统稳定运行的基础上采用频率约束方法和时域仿真分析相结合的手段确定了风电场最大可接入容量。但上述文献对不同类型扰动对频率稳定影响以及频率偏差允许值的研究不够全面，加之不同电网的扰动量级存在差异并且是不断发展变化的，因此需要统筹考虑各种扰动类型和量级。

新能源的大规模接入显著增加了常规机组的调节压力，因此电网运行中也开始考虑机组本身的寿命损耗等因素。文献[18]以 600 MW 汽轮机为例研究了火电机组负荷频繁波动和寿命损耗的关系，指出由于新能源消纳导致负荷波动率的增加从而大幅加剧了寿命损耗。文献[19]以含风电的电网为例，从温度变化和热应力两个角度估算了机组频繁调节过程中寿命损耗，从而制定调度计划。现有研究中大都忽视了新能源高占比引起的机组调节能力不足问题，因此应在整体消纳能力上予以考虑。

针对频率稳定问题中缺乏对不同类型扰动的整体性分析以及机组调节能力对新能源消纳的限制，本文选用频率稳定、机组调节能力作为动态平衡的判据，并以调峰能力作为稳态平衡约束条件，借鉴前文中介绍的从调峰角度评估新能源最大消纳能力的过程，提出了一种电网考虑稳态和动态有功平衡约束的新能源消纳能力综合评估方法。引言应阐述所研究对象的必要性，然后总结目前研究该对象所用的方法和存在的不足之处，进而引出本文研究的内容。

1 多约束下的综合评估方法

1.1 综合评估方法

对电网新能源消纳能力综合评估的基本思路是，考虑各不同扰动如一般扰动以及严重故障的限制，作为频率稳定约束；加入了新能源，火电，负荷及联络线等因素，作为调峰约束；并计及火电机

组调节能力制约，获取不同约束下新能源渗透率，进行分析评价。评估方法如图 1。

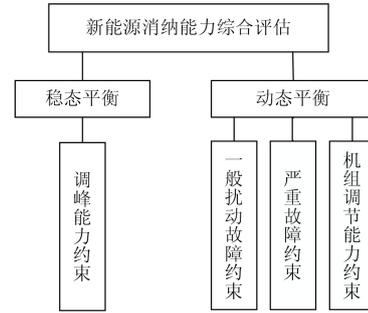


图 1 新能源消纳能力评估方法

Fig. 1 Evaluation method of new energy consumptive capability

1.2 稳态平衡约束

新能源具有独特的资源特性，比如波动性和一定程度的反调峰特性，增大了电网的调峰压力，从而限制了新能源消纳水平。

本节采用一套考虑联络线的以调峰能力为约束的新能源接纳能力分析方法：设定新能源在负荷高峰时刻出力为零，在已知高峰负荷、联络线传输功率以及考虑备用容量的条件下通过有功功率平衡求解出火电机组的开机容量。此时再假定新能源在负荷低谷时刻出力满发，根据火电机组出力范围确定常规机组的最小出力值，并结合低谷负荷求解新能源出力，最后确定在一定量弃风弃光条件下新能源最大渗透率。需要注意的是，本文均用新能源渗透率作为指标评价新能源消纳能力。

1) 设高峰负荷为 P_{Lmax} ，此时需满足式(1)。

$$P_{Lmax} = P_{Gmax} - P_{Tie} \quad (1)$$

依此可计算出火电机组最大出力 P_{Gmax} ，式中 P_{Tie} 为联络线传输功率。

则电源保留一定备用容量的开机容量为

$$P_{GM} = P_{Gmax} + P_{res} \quad (2)$$

式中， P_{res} 为备用容量。

2) 低谷负荷时，火电和新能源总出力为 P_{Gmin} ，此时需满足式(3)。

$$P_{Gmin} - \gamma P_{Tie} = P_{Lmin} \quad (3)$$

式中： P_{Lmin} 为最小负荷； γ 为联络线功率调整系数。则最大新能源出力为

$$P_{new} = P_{Gmin} - \beta P_{GM} \quad (4)$$

式中： β 为最小出力率； βP_{GM} 表示火电机组最小出力，从而可以确定调峰约束下的新能源最大渗透率为

$$P_{pvp} = \frac{P_{new}}{P_{Lmax} + P_{Tie}} / (1 - \rho) \quad (5)$$

式中: P_{pvp} 为新能源渗透率; ρ 为弃风弃光率。

1.3 动态平衡约束

1.3.1 机组调节能力约束

新能源出力的快速波动势必会引起常规机组特别是火电机组的频繁调节。实际运行中, 机组在调节过程中转子承受交变热应力的作用, 经过一定周次的循环, 就会在金属表面出现疲劳裂纹并逐渐扩展以致断裂, 此时循环的周次称为致裂周次^[20]。产生的应力越大, 致裂周次越少, 寿命损耗也就越严重。本节借鉴文献[19]中估算机组寿命损耗的方法: 通过应力的计算可以求解出致裂周次, 两者关系可用下面的 Langer 公式来表示。

$$N_c = \left(\frac{0.25 E_Y \ln \frac{1}{1 - \varphi}}{\sigma_a - \sigma_\omega} \right)^2 \quad (6)$$

式中: N_c 为致裂周次; E_Y 为材料的弹性模量; φ 为材料的断面收缩系数; σ_ω 为材料的疲劳强度极限值; σ_a 为计算点的应力, 可用式(7)表示。

$$\sigma_a = \frac{E_Y \alpha}{1 - \mu} \Delta t_m \quad (7)$$

式中: α 为转子材料膨胀系数; μ 为泊松比; Δt_m 为温度差, 其与温升率 η 的关系如式(8)。

$$\Delta t_m = \frac{\eta}{4a} R^2 \quad (8)$$

式中: a 为材料导温系数; R 为转子半径上的金属厚度。

根据负荷变动率与温变率之间的关系, 再结合式(6)一式(8)可以计算出转子的致裂周次 N_c , 从而估算出调节一次的寿命损耗 $d_c = 1 / N_c$ 。之后根据线性损伤累计法则, 将每次调节造成的寿命损耗相加可得机组频繁多次调节后的总损耗率。

为了使汽轮机在机组服役年限内安全经济地运行, 需将机组分配给频繁调节的寿命作为约束条件以限制新能源的接纳规模。

1.3.2 频率稳定约束

分析频率稳定问题应考虑火电机组调速器的动态作用。含调速器作用的发电机带负荷的系统模型框图如图 2。

图中: ΔP 为功率不平衡量; ΔP_G 为发电机组由于频率变化引起的功率变化; ΔP_D 为负荷功率变化量; T_G 为调速器的时间常数; K_G 为发电机组的调节效应系数; T_J 为发电机组的惯性时间常数; K_D

为负荷频率调节效应系数。

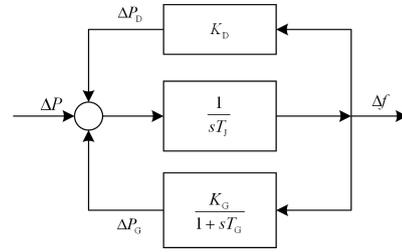


图 2 含调速器模型框图

Fig. 2 Block diagram of model containing governor

正是因为风电和光伏发电机组无法提供惯量支撑, 导致系统等效转动惯量 T_J 的下降, 根据图 2 可推断出 T_J 下降会导致系统抵抗不平衡扰动能力下降, 使得频率稳定问题更加突出。参照相关技术规范 and 一般运行经验, 对频率稳定整定值要求如下:

1) 在电网受到一般扰动时, 例如发生任一电机跳闸、直流单极故障等, 频率偏差应当满足电网运行要求(一般不超过 ± 0.2 Hz)。

2) 当出现较严重故障(例如 $N-2$ 故障)时, 包括直流双极闭锁等故障, 会出现较大的功率不平衡量, 此时考虑安控措施(例如切机, 切负荷)动作后, 不能引起高频保护或低频减载动作, 即频率偏差不超过允许值(一般为 ± 1.0 Hz)。

3) 发生变电站全停等极端故障时采取低频减载、高周切机等措施使系统频率能恢复到允许的范围内继续运行而不发生频率崩溃。本文暂重点考虑了前两项要求, 对极端故障下频率稳定问题将另做研究。整定值要求对应的频率段如图 3。

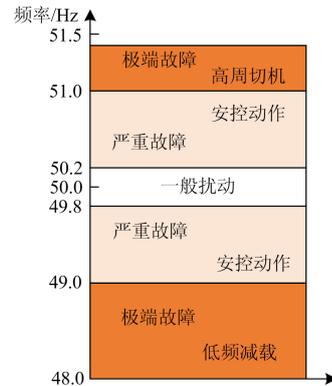


图 3 频率整定值要求

Fig. 3 Requirement of frequency setting value

2 消纳能力评估

2.1 考虑调峰的消纳能力评估

本文默认电网为送电型电网, 联络线外送功率

模式为恒功率外送 ($\gamma = 1$)，并设置联络线传输功率为定值 0.3，火电机组的最大技术出力标幺值为 1.0，高峰负荷时机组出力按照最大出力计算，根据上节公式可得高峰负荷为 0.7，此时以典型日负荷曲线估算出低谷负荷约为 0.5，该典型日负荷曲线如图 4。

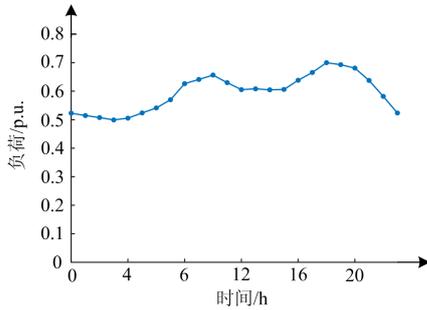


图 4 典型日负荷曲线

Fig. 4 Typical daily load curve

认定火电机组最小技术出力为 0.4 且备用容量为总容量的 5%，并在设置 5%弃风弃光的条件下由 1.2 节公式便可计算出新能源最大渗透率为 40%。

2.2 考虑机组调节的消纳能力评估

一般情况下机组寿命损耗有 10%左右分配给机组负荷波动^[17]。由于风电波动出现小分钟级大幅波动的概率较低，本文取 10~20 min 左右的时间间隔，做了如下仿真：火电机组跟随新能源波动从初始状态以-2.5%机组负荷变化率减少 24 min，再以 2.5%的负荷变动率增长 21 min，紧接着以 3.5%变化率增长 16 min，最后以 5%负荷变化率减少 10 min。根据文献[20]中的材料参数，可求得每个阶段寿命损耗如表 1。

表 1 不同变负荷过程的寿命损耗

Table 1 Life loss under different load changing process

负荷变动率	-2.5%	+2.5%	+3.5%	-5%
寿命损耗/%	6.9×10^{-5}	6×10^{-5}	6.3×10^{-5}	7.5×10^{-5}

以机组服役年限 20 年，年运行 310 天，并且一天内相同的机组调节过程以 6 次计，根据前文提到的线性累积原则计算可估算得总寿命损耗： $(6.9 \times 10^{-5} + 6 \times 10^{-5} + 6.3 \times 10^{-5} + 7.5 \times 10^{-5}) \times 310 \times 20 \times 6 = 9.93\%$ ，已较为接近分配的寿命极限。

根据上面分析做出大致的估计：新能源占比过高会导致机组调节幅度越大，此时寿命损耗越严重，且当火电机组负荷变动率不超过 5%/min 时，寿命损耗均在可接受范围内。本节依此限制新能源渗透率：当时间尺度较小时，例如在 10 min 内波动 6 次，此时新能源功率波动幅度较小，设为 2%/min，以火电机组调节负荷率不超过 5%为标准可估算得新能源渗透率为 71.4%；当选取的时间尺度较大时，

例如在 1 h 内波动 6 次，此时新能源功率波动幅度随之增大，设为 10%，并同样以上述标准可估算得新能源渗透率为 33.3%。

2.3 考虑频率稳定的消纳能力评估

通过 PSD-BPA 仿真软件建立单机带集中负荷模型进行模拟计算，其中：发电机备用容量取为 5%，惯性时间常数 T_J 取为 8.0 s，负荷有功频率因子 K_D 取为 1.8。仿真发生一般扰动故障以及严重故障时的频率变化过程，以此分析频率稳定问题对新能源消纳能力的限制。

2.3.1 一般扰动故障计算分析

不同规模的电网在发生一般扰动时可能会产生不同的功率不平衡量，本节选取 3 种功率缺额量，分别是 1%、1.5%和 2%来模拟一般扰动，并以频率最大变化量不越过 0.2 Hz 作为标准进行仿真，结果如图 5。

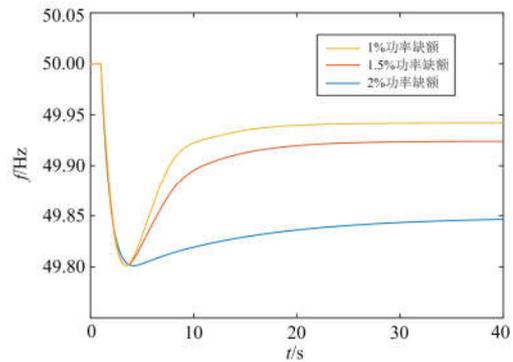


图 5 不同扰动量下的频率变化曲线

Fig. 5 Frequency variation curves under different disturbances

以频率曲线最低点为 49.8 Hz 作为极限条件时，通过各曲线对应的源程序中新能源和常规机组各自出力可计算得：在发生 1%功率缺额的一般扰动故障情况下允许的新能源渗透率为 73.8%；设置 1.5%功率缺额的初始条件下新能源渗透率被限制到 55.2%；当出现 2%功率缺额情况时频率稳定约束下的最大新能源渗透率为 34%。

2.3.2 严重故障计算分析

发生严重故障时，需要考虑由于电网规模不同导致功率缺额的差异。严重故障一般会配置安控装置，但安控整定经常会留有一定的不平衡量，一般为 2%~3%，在这里选取较大值 3%。本节设置 3 种功率缺额量 15%、20%和 25%来模拟严重故障，并经过 300 ms 延时后相应切 12%、17%及 22%的负荷量。为了使得低频减载不动作，此时最低频率门槛标准设为 49.0 Hz，仿真结果如图 6。

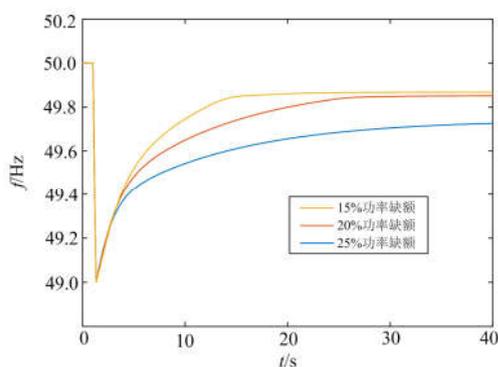


图 6 严重故障时不同功率缺额下的频率变化曲线

Fig. 6 Frequency variation curves due to different loss of generation under severe faults

以频率曲线最低点为 49 Hz 作为极限条件时, 通过各曲线对应的源程序中新能源和常规机组各自出力可计算得: 在发生 15% 功率缺额的严重故障情况下允许的新能源渗透率为 63%; 加大初始功率缺额到 20% 时, 新能源渗透率被限制到 49.8%; 当功率缺额高达 25% 时频率稳定约束下的最大新能源渗透率为 36.6%。

2.4 综合评估分析

将前几小节中不同约束下确定的新能源渗透率汇总如表 2。

表 2 不同约束下新能源渗透率范围

Table 2 Range of new energy permeability under different constraints

约束条件	调峰	调节能力	一般扰动故障	严重故障
渗透率范围	40%	33.3%~71.4%	34%~73.8%	36.6%~63%

根据表 2 可以得到, 各因素确定的新能源渗透率范围互有交叉, 亦即各约束条件均在一定程度上限制新能源的消纳能力, 仅考虑某一种约束显然具有局限性。例如对于直流馈入量较大或大功率机组较多的地区, 发生故障时频率控制的难度较高, 频率稳定问题会成为限制新能源消纳的主要因素; 在环境条件恶劣的情况下, 火电机组的调节速度难以适应新能源出力大幅度快速变化, 此时机组调节能力可能会成为主要约束; 而在用电极不平衡的地区显然调峰能力会成为主要制约。所以本文提出的综合评估方法能够合理全面地分析新能源消纳能力。

3 结论

本文立足于调峰能力、机组调节性能、频率稳定问题对新能源消纳水平的影响, 提出了一套考虑稳态和动态有功平衡约束的新能源消纳能力的综合评估方法。

通过此方法计算得到的结果表明: 新能源的随机性和波动性以及负荷特性的变化增大了调峰压力和常规机组调节压力, 同时由于扰动量级的不同使得频率控制更有难度, 所以调峰能力、机组调节性能、频率稳定问题均可能在一定程度上限制新能源的消纳水平; 并且各约束条件确定的新能源渗透率范围互有交叉, 不同因素会有交互影响, 不同的约束相互制约, 证明了综合评估的必要性。本文提出的综合评估方法能够全面持续地评估电网新能源消纳能力, 弥补了以往系统性不足的缺点。

目前实际运行的电网中, 负荷峰谷差较大, 机组调节能力尚有欠缺, 因此新能源消纳想要达到比较高的比例(50%)还是具有一定难度。所以, 今后的研究重点和发展方向在于加强机组灵活性改造, 联络线调频, 普及负荷需求侧管理策略以及储能技术, 大力开展虚拟同步机等新能源友好技术, 以提高新能源消纳水平。

参考文献

- [1] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 1-9. SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. The analysis and solution of the key factors of new energy consumption[J]. Proceedings of the CSU-EPSCA, 2017, 37(1): 1-9.
- [2] 张顺, 葛智平, 郭涛, 等. 大规模新能源接入后系统调峰能力与常规电源开机方式关系研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(1): 106-110. ZHANG Shun, GE Zhiping, GUO Tao, et al. Research on relationship between the capacity of systematic peak regulation and conventional power startup mode after access to large-scale new energy[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(1): 106-110.
- [3] 牛东晓, 李建锋, 魏林君, 等. 跨区电网中风电消纳影响因素分析及综合评估方法研究[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1087-1093. NIU Dongxiao, LI Jianfeng, WEI Linjun, et al. Study on technical factors analysis and overall evaluation method regarding wind power integration in trans-provincial power grid[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1087-1093.
- [4] 吴冠男, 张明理, 徐建源, 等. 适用于评估风电接纳能力的时序生产模拟算法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 151-157. WU Guannan, ZHANG Mingli, XU Jianyuan, et al. Time series production algorithm for evaluating wind power accommodation capacity[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 151-157.
- [5] NGUYEN N, MITRA J. Reliability of power system with

- high wind penetration under frequency stability constraint[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(1): 985-993.
- [6] 刘畅, 吴浩, 高长征, 等. 风电消纳能力分析方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(4): 61-66.
LIU Chang, WU Hao, GAO Changzheng, et al. Study on analysis method of accommodated capacity for wind power[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(4): 61-66.
- [7] 孙荣富, 张涛, 梁吉. 电网接纳风电能力的评估及应用[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(4): 86-90.
SUN Rongfu, ZHANG Tao, LIANG Ji. Evaluation and application of wind power in power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(4): 86-90.
- [8] 张涛, 李家珏, 张延峰, 等. 计及电网调峰约束的风电接纳调度方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 74-80.
ZHANG Tao, LI Jiayu, ZHANG Yanfeng, et al. Research of scheduling method for the wind power acceptance considering peak regulation[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 74-80.
- [9] 孙云涛, 宋依群. 基于调峰能力评估的省间调峰互济交易模式[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 86-91.
SUN Yuntao, SONG Yiqun. Peak load regulation trading mode for trans-provincial aid based on evaluation of system regulation capability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 86-91.
- [10] NGUYEN N, MITRA J. An analysis of the effects and dependency of wind power penetration on system frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(1): 354-363.
- [11] 李军徽, 冯喜超, 严干贵, 等. 高风电渗透率下的电力系统调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(2): 163-170.
LI Junhui, FENG Xichao, YAN Gangui, et al. Survey on frequency regulation technology in high wind penetration power system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(2): 163-170.
- [12] 徐岩, 闫少波. 基于静态和动态约束的弱电网光伏穿透功率极限研究[J]. 可再生能源, 2013, 31(10): 25-29.
XU Yan, YAN Shaobo. The research of PV power station penetration limit in weak grid based on static and dynamic stability constraints[J]. Renewable Energy Resources, 2013, 31(10): 25-29.
- [13] 刘建平, 吴锡昌, 王旭斌, 等. 考虑频率约束的孤网风电渗透率极限评估[J]. 电网与清洁能源, 2015, 31(11): 93-100.
LIU Jianping, WU Xichang, WANG Xubin, et al. An assessment of wind power penetrations limited with frequency constraint in an isolated system[J]. Power System and Clean Energy, 2015, 31(11): 93-100.
- [14] LUO C L, HAMED G F, HADI B, et al. Estimation of wind penetration as limited by frequency deviation[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2007, 22(3): 783-791.
- [15] NAHID A M, YAN R F, TAPAN K S. A new tool to estimate maximum wind power penetration level: in perspective of frequency response adequacy[J]. Applied Energy, 2015, 154: 209-220.
- [16] 张俊, 晁勤, 段晓田, 等. 动态约束下的风电场最大可接入容量研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(3): 62-66.
ZHANG Jun, CHAO Qin, DUAN Xiaotian, et al. Research on maximum access capacity of wind farm based on dynamic constraints[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(3): 62-66.
- [17] AHMADI H, GHASEMI H. Maximum penetration level of wind generation considering power system security limits[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(11): 1164-1170.
- [18] 赵洪山, 林西阔, 刘然, 等. 考虑符合快速频繁调节的汽轮-发电机组轴系扭转寿命损耗分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(8): 143-149.
ZHAO Hongshan, LIN Youkuo, LIU Ran, et al. Torsional life loss assessment of turbine-generator shaft system with quick and frequent load regulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(8): 143-149.
- [19] 李一铭, 李文沅, 颜伟, 等. 基于机会约束规划模型降低机组寿命损耗的日调度计划[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1885-1890.
LI Yiming, LI Wenyuan, YAN Wei, et al. Daily generation scheduling for reducing losses of unit's lives based on the chance constrained programming model[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1885-1890.
- [20] 张保衡. 大容量火电机组寿命管理与调峰运行[M]. 北京: 水利水电出版社, 1988.

收稿日期: 2018-06-08; 修回日期: 2018-08-25

作者简介:

盛四清(1965—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: sqsheng@ncepu.edu.cn

邱昊(1993—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: qhzs111@126.com

张文朝(1978—), 男, 教授级高级工程师, 研究方向为电力系统分析、稳定与控制。E-mail: zwenchao72@126.com

(编辑 姜新丽)