

基于灵敏度的孤网动态频率偏移峰值分析和 调速系统参数优化

张刘杰¹, 肖仕武¹, 黄松柏²

(1. 华北电力大学新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206; 2. 百色新铝电力有限公司, 广西 百色 533000)

摘要: 孤网在扰动下频率波动在一定范围以内, 是孤网稳定运行的一个重要条件。针对含高阶调速系统的孤网, 分析了零极点分布对超调量和频率偏移峰值的影响, 并提出了孤网频率偏移峰值的估算表达式。在此基础上, 利用特征根灵敏度方法, 计算得到了零极点对调速器PI、转速测量时间常数、功率反馈时间常数、负荷前馈系数、调差系数的灵敏度幅值和相位。从机理上揭示了调速器参数对频率偏移峰值的影响关系, 提出了降低频率偏移峰值的调速器参数优化方案以及保证孤网频率稳定的参数调整建议, 并在PSCAD/EMTDC电磁暂态仿真软件上进行了验证。

关键词: 孤网; 零极点; 超调量; 频率偏移峰值; 灵敏度

Dynamic frequency offset peak analysis and speed control system parameter optimization of isolated networks based on sensitivity

ZHANG Liujie¹, XIAO Shiwu¹, HUANG Songbai²

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Baise New Aluminum Power Limited Company, Baise 533000, China)

Abstract: The frequency fluctuation of the isolated network under disturbance is within a certain range, which is an important condition for the stable operation of the isolated network. In this paper, the influence of the zero-pole distribution on the peak value of the frequency offset is analyzed for the isolated network with high-order speed control system, and the estimation expression of the peak value of the isolated network frequency offset is given. On this basis, using the method of eigenvalue sensitivity, the sensitivity amplitude and phase of zero pole to governor PI, speed measurement time constant, power feedback time constant, load feed-forward coefficient and modulation coefficient are calculated. The influence relationship of governor parameters on the frequency offset peak is revealed. The governor parameter optimization scheme for reducing the frequency offset peak value and the parameter adjustment suggestion for ensuring the stability of the isolated network frequency are proposed and verified by PSCAD/EMTDC electromagnetic transient simulation software.

This work is supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities (No. 2018ZD01).

Key words: isolated network; zero-pole; overshoot; frequency offset peak; sensitivity

0 引言

随着智能电网的建设, 以特高压为骨架的大电网同步互联已经成为我国电力系统的现状^[1]。然而孤立运行的电网在国内依然普遍存在, 主要原因有: (1) 地区电网与主网弱联时, 单一故障导致联络线断开, 地区电网成为了孤网^[2]; (2) 高耗能企业为降低

成本, 建立自备电厂脱离主网运行^[3]; (3) 由于位置偏远无法接入大电网而孤网运行; (4) 运行在孤岛模式的微电网^[4]。孤网分布范围较小, 一般可以等效为单机带负荷系统; 孤网容量小, 一旦发生扰动导致发电功率和负荷功率的不平衡, 极易造成频率波动, 频率稳定是其主要的稳定问题。在孤网频率动态变化过程中, 频率偏移峰值是一个重要指标, 即使动态过程中频率稳定, 但如果频率偏移峰值超过一定界限, 会引发关键设备低频保护、高频保护等

主要保护动作,或低频减载、高频切机等紧急控制措施动作^[5],进而引发连锁切机、切负荷,最终导致孤网崩溃,文献[6-9]提出了一系列保证电网安全稳定运行的方法和措施。因此,如何保证在大扰动下孤网频率稳定,尤其把频率偏移峰值限制在安全范围内,是保证孤网安全运行的一个重要问题。

频率响应是一个动态过程,频率偏移峰值是由含调速系统的发电机及负荷组成的动态系统的超调量决定。调速系统对频率动态特性及频率偏移峰值有重要影响,应具有符合要求的动态响应特性,文献[10]给出了国家标准规定的汽轮发电机运行频率限制。对于简单低阶动态系统可以直接求出频率偏移峰值及阻尼水平的解析表达式,但调速系统作为一个高阶系统,难以给出频率偏移峰值的解析解。文献[11]通过广域量测数据和模型降阶的方法对频率偏移最低值进行了预测;文献[12]基于根轨迹的思想,分析了单一参数对频率偏移的影响;文献[13-15]通过仿真试验和运行经验,提出了改善孤网频率特

性的措施,但没有从机理上解释措施的合理性。

本文从孤网的频率特性出发,分析了零极点的分布特点对含高阶调速系统的孤网频率动态特性的影响,提出了孤网频率偏移峰值的估算表达式。在此基础上,进一步计算了零极点对调速系统参数的灵敏度幅值和相位,揭示了调速系统参数对频率偏移峰值的影响机理。最后提出了调速系统参数优化方案及调整建议,并通过单机带负荷模型验证了方案的正确性。

1 孤网运行的频率响应

频率响应由发电机组以及调速器的特性决定。对大部分孤网而言,多台发电机间电气联系紧密,可认为刚性连接,因此可等效为单机带负荷模型进行分析;另外,对于中间再热式汽轮机,为克服功率滞后、提高机组对负荷的适应性,增强系统抗内扰的能力,调速系统多采用功频控制方式^[16]。图1为功频调速系统控制框图。

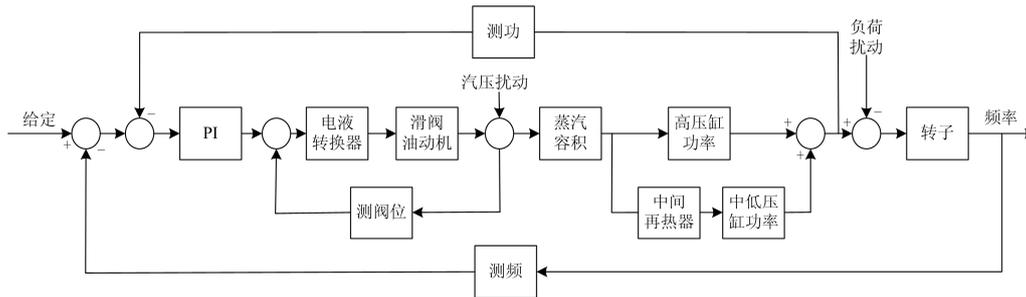


图1 功频调速系统框图

Fig. 1 Digital electric hydraulic control system

图1主要包括功频调速器、中间再热式汽轮机、发电机三个部分。功频调速器的输入输出信号关系如式(1)~式(3)所示^[17]。

$$\Delta P_{GV} = -\Delta f \cdot G_f(s) - \Delta P_E \cdot G_E(s) \quad (1)$$

$$G_f(s) = \frac{1}{1+sT_w} \cdot \frac{1}{R} \cdot (K_p + \frac{K_I}{s} + K_2) \quad (2)$$

$$G_E(s) = \frac{1}{1+sT_R} \cdot (K_p + \frac{K_I}{s}) \quad (3)$$

式中: ΔP_{GV} 为阀门开度; Δf 为以 50 Hz 为基准值的频率标幺值; ΔP_E 为发电机电磁功率标幺值; $G_f(s)$ 、 $G_E(s)$ 分别为频率反馈、功率反馈所经过的传递函数; T_w 为转速测量时间常数; R 为调差系数; K_p 、 K_I 分别为 PI 比例和积分倍数; T_R 为功率反馈时间常数; K_2 为负荷前馈系数,对于采用锅-汽-机组成的单元制机组,为实现一次调频的快速性,其调节系统控制逻辑设置了负荷前馈控制。

汽轮机为中间再热式,其控制框图如图2所示。

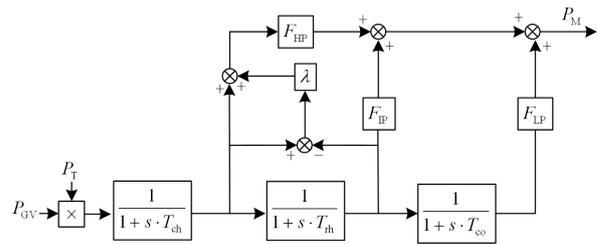


图2 汽轮机框图

Fig. 2 Steam turbine block diagram

通常低压连通管容积的影响可以忽略^[18],经化简后汽轮机传递函数为

$$G_{tur}(s) = \frac{1+s(1+\lambda)F_{HP}T_{RH}}{(1+sT_{CH})(1+sT_{RH})} \quad (4)$$

式中: $G_{tur}(s)$ 为汽轮机传递函数; λ 为高压缸功率过调系数; F_{HP} 为高压缸功率比例; T_{RH} 为再热器时

间常数; T_{CH} 为蒸汽容积时间常数。

发电机传递函数为

$$G_{gen}(s) = \frac{1}{2Hs + K_L} \quad (5)$$

式中: $G_{gen}(s)$ 为发电机传递函数; H 为惯性时间常数; K_L 为负荷频率调节效应系数。

对于单机系统, 发电机电磁功率始终等于负荷功率, 因此可得负荷扰动下的频率响应模型为

$$\Delta f = -\frac{[1 + G_E(s) \cdot G_{tur}(s)] \cdot G_{gen}(s)}{1 + G_f(s) \cdot G_{tur}(s) \cdot G_{gen}(s)} \cdot \Delta P_L \quad (6)$$

式中, ΔP_L 为标么值下的负荷扰动。

2 孤网的频率偏移峰值分析

控制系统的响应特性主要包括两个方面: 静态特性和瞬态特性。由一次调频的原理可知, 频率偏移稳态值只由调差系数决定, 即

$$\Delta f_\infty = R \times \Delta P_L \quad (7)$$

频率动态偏移峰值不仅与调差系数有关, 还取决于超调量的大小, 即

$$\Delta f_{max} = (1 + \sigma_p) \times R \times \Delta P_L \quad (8)$$

超调量越大, 频率偏移峰值越大。在电网遭受大功率扰动时, 一旦频率偏移超过了门槛值, 则低频、高频保护随即动作。为避免频率偏移过大导致低频、高频保护动作, 有必要分析调速系统参数对超调量的影响关系, 从而降低频率偏移峰值, 增强电网的自动控制能力。

2.1 基于零极点分布的高阶系统超调量分析

对于高阶系统, 难以直接给出超调量的解析解, 常利用闭环主导极点进行估算^[19]。假设高阶系统的传递函数为

$$\Phi(s) = \frac{M(s)}{D(s)} = \frac{K \prod_{j=1}^m (s - z_j)}{\prod_{i=1}^n (s - p_i)} \quad (9)$$

式中: $M(s)$ 、 $D(s)$ 分别为闭环零点、闭环极点多项式; K 、 z_j 、 p_i 分别为增益、闭环零点和闭环极点。

假设式(9)所示高阶系统只有一对共轭主导极点为 $p_{1,2} = -\sigma \pm j\omega_d$, 则在阶跃输入下, 经拉式反变换后, 系统输出的近似表达式为

$$h(t) \approx 1 + 2 \left| \frac{M(p_1)}{p_1 \dot{D}(p_1)} \right| e^{-\sigma t} \cos \left(\omega_d t + \angle \frac{M(p_1)}{p_1 \dot{D}(p_1)} \right) \quad (10)$$

对式(10)求导可得峰值时间 t_p 为

$$t_p = \frac{1}{\omega_d} \left(\pi - \sum_{j=1}^m \psi_j + \sum_{i=3}^n \theta_i \right) \quad (11)$$

式中:

$$\begin{cases} \psi_j = \angle(p_1 - z_j) \\ \theta_i = \angle(p_1 - p_i) \end{cases} \quad (12)$$

根据峰值时间以及定义, 超调量可用式(13)进行计算。

$$\sigma_p = \frac{\prod_{i=3}^n |p_i| \cdot \prod_{j=1}^m |p_1 - z_j|}{\prod_{j=1}^m |z_j| \cdot \prod_{i=3}^n |p_1 - p_i|} \cdot e^{-\sigma t_p} \quad (13)$$

式中: p_1 为闭环主导极点; p_i 为闭环非主导极点; z_j 为闭环零点。

式(13)表征了超调量与零极点相对位置的关系, 忽略指数项变化的影响, 超调量的大小由零极点的分布特点决定。为简化分析, 可对闭环零极点进行适当筛选, 筛选原则为使得式(13)分子分母近似抵消的点可以忽略, 即

- 1) 若闭环非主导极点或闭环零点均相对地远离闭环主导极点和原点, 则此类极点或零点可忽略;
- 2) 若闭环极点和闭环零点构成一对偶极子, 则此类极点和零点可忽略。

可以利用筛选后剩余的极点和零点进行近似计算。结合自动控制原理可得如下结论:

- 1) 闭环零点的作用在于提高系统反应速度, 且越靠近虚轴, 作用越大; 另外, 若闭环零点距虚轴较近, 则会大大增大超调量;
- 2) 闭环非主导极点的作用在于降低系统的反应速度, 且越靠近虚轴, 反应速度越慢; 另外, 若这些极点距虚轴较近, 则会大大减小超调量。

2.2 孤网的频率偏移峰值

由式(8)可知, 在已知调差系数时, 频率偏移峰值由超调量决定, 超调量取决于式(6)的传递函数。某电厂 350 MW、功率因数 0.85 的火电机组发电机及其调速器参数如表 1 所示, 对于一特定孤网, 负荷频率调节效应系数 K_L 为常数, 其数值不会对结果产生影响, 为简化分析, 将其设置为 0。

表 1 发电机组及调速器参数

Table 1 Parameter values of generator and governor						
参数	T_w	R	K_p	K_1	K_2	T_R
数值	0.819 s	0.05	0.667	0.033 3	0.85	0.321 s
参数	λ	F_{HP}	T_{RH}	T_{CH}	H	K_L
数值	0.95	0.317 6	13	0.35	7.5 s	0

$$\begin{cases} a_0 = \frac{K_1}{T_R T_{RH} T_{CH}} \\ a_1 = \frac{1 + K_p + (1 + \lambda) F_{HP} T_{RH} K_1}{T_R T_{RH} T_{CH}} \\ a_2 = \frac{T_R + T_{RH} + T_{CH} + (1 + \lambda) F_{HP} T_{RH} K_p}{T_R T_{RH} T_{CH}} \\ a_3 = \frac{T_R T_{RH} + T_R T_{CH} + T_{CH} T_{RH}}{T_R T_{RH} T_{CH}} \end{cases} \quad (17)$$

除解析根外, 闭环极点方程的系数矩阵如式(18)所示。

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -b_0 & -b_1 & -b_2 & -b_3 & -b_4 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{cases} b_0 = \frac{K_1}{R \times 2HT_w T_{CH} T_{RH}} \\ b_1 = \frac{K_p + K_2 + (1 + \lambda) F_{HP} T_{RH} K_1}{R \times 2HT_w T_{CH} T_{RH}} \\ b_2 = \frac{2HR + (K_p + K_2)(1 + \lambda) F_{HP} T_{RH}}{R \times 2HT_w T_{CH} T_{RH}} \\ b_3 = \frac{T_w + T_{CH} + T_{RH}}{T_w T_{CH} T_{RH}} \\ b_4 = \frac{T_w T_{CH} + T_w T_{RH} + T_{CH} T_{RH}}{T_w T_{CH} T_{RH}} \end{cases} \quad (19)$$

由图 3 可知, 影响频率响应的零极点主要包括 5 个, 按其对响应的影响关系分类分别是: 一对共轭主导极点; 一个闭环零点; 一对近虚轴零极点。分别对应于式(16)和式(18)的某些特征根, 因此按这种分类关系分别计算其对参数的灵敏度有利于分析参数对频率响应的影响。

其中, 闭环零点单独由转速测量时间常数 T_w 决定, T_w 增大, 闭环零点左移。共轭主导极点和近虚轴零极点对参数的灵敏度如图 5 和图 6 所示。

3.2 参数变化对频率偏移峰值的影响分析

一个参数变化往往导致多个极点和零点变化, 因此参数对频率响应的影响应综合考虑。对于确定的发电机组和汽轮机, 其参数一般难以调整, 因此着重分析调速器参数的影响。分析可得调速器参数对式(6)主要零极点的移动方向及超调量变化趋势的影响关系, 如表 4 所示。

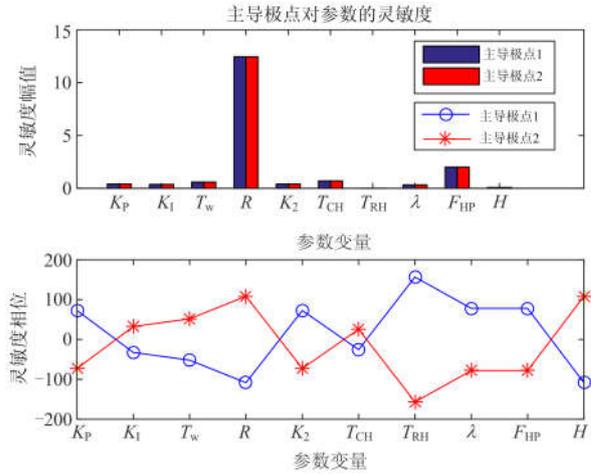


图 5 共轭主导极点参数灵敏度

Fig. 5 Parameter sensitivity of conjugate dominant pole

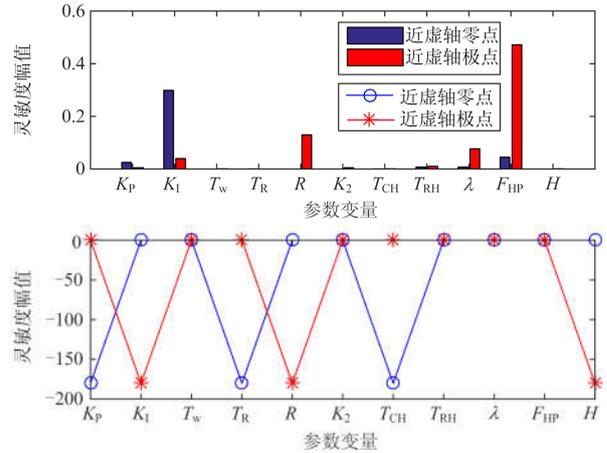


图 6 近虚轴零极点参数灵敏度

Fig. 6 Parameter sensitivity of near-virtual axis zero-pole

表 4 调速器参数对零极点及超调量的影响

Table 4 Impact of parameters on zero-pole and overshoot

对象	K_p	K_1	T_w	T_R	R	K_2
	增大	增大	增大	增大	增大	增大
主导极点 1	右上	右下	右下	不变	左下	右上
闭环零点	不变	不变	右	不变	不变	不变
近虚轴零点	左	右	不变	左	不变	不变
近虚轴极点	右	左	不变	不变	左	右
超调量	变化微小	变化微小	增大	减小	增大	减小

4 参数优化方案及仿真验证

从频率稳定性的角度, 频率响应过程中频率偏移峰值越小, 阻尼越大, 频率的稳定性越好, 参数

变化不仅会影响频率偏移峰值,也会相应地影响阻尼水平。由于参数变化会同时影响系统的零点和极点,而且参数对两者的影响并非都是同向的,因此对参数的优化方案应综合考虑。在参数优化时遵循两个原则:(1)在保证阻尼水平的前提下,减小超调量;(2)优化灵敏度较大的参数。

超调量的大小主要受零点的影响,调整参数使零点左移,有利于降低超调量,根据上述参数灵敏度可得降低频率偏移峰值的参数优化方案如下:

- 1) 减小调差系数 R ;
- 2) 减小转速测量环节时间常数 T_w ;
- 3) 增大功率反馈时间常数 T_R 。

在 PSCAD/EMTDC 电磁暂态仿真软件上,基于表 1 的发电机组及调速器参数搭建了单机带负荷模型,对不同参数优化方案进行了仿真,仿真结果如图 7 所示。结果表明了优化方案的准确性。

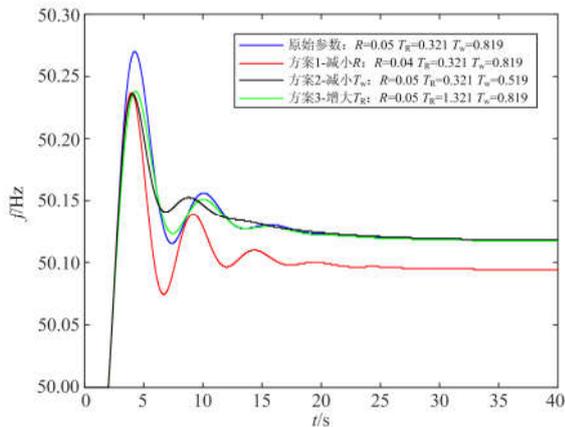


图 7 不同方案下的仿真结果

Fig. 7 Simulation results under different schemes

另一方面,主导极点移动到虚轴右侧时,会使系统失稳。由表 4 可知,比例倍数 K_p 、积分倍数 K_I 、负荷前馈系数 K_2 增大时,主导极点均向右移,若其调整过大,有可能使得主导极点移动至虚轴右侧,从而导致系统失稳。因此,对于进行参数调整时,应注意参数的调整方向,以避免系统失稳,调速器参数调整建议如下:

- 1) PI 参数的比例倍数 K_p 和积分倍数 K_I 对超调量影响不大,但若其过大,会导致系统失稳;
- 2) 增大负荷前馈系数 K_2 虽有利于减小超调量,但调整不应过大。

5 结论

本文基于含高阶调速系统的孤网频率响应,得到了孤网频率偏移峰值的估算表达式。求得了频率

响应传函的零极点对调速参数的灵敏度幅值和相位,从机理上分析了调速系统参数对频率偏移峰值的影响。为孤网运行企业提出了降低频率偏移峰值的调速器参数优化方案以及调整建议。

降低频率偏移峰值的优化方案如下:

- 1) 减小调差系数 R ;
- 2) 减小转速测量环节时间常数 T_w ;
- 3) 增大功率反馈时间常数 T_R 。

调速器参数调整建议如下:

- 1) PI 参数的比例倍数 K_p 和积分倍数 K_I 对超调量影响不大,但若其过大,会导致系统失稳;
- 2) 增大负荷前馈系数 K_2 虽有利于减小超调量,但调整不应过大。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005.
- [2] 张健铭, 毕天姝, 刘辉, 等. 孤网运行与频率稳定研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(11): 149-154. ZHANG Jianming, BI Tianshu, LIU Hui, et al. Review of frequency stability for isolated power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(11): 149-154.
- [3] 王玉, 许和平, 王怀明, 等. 电解铝重载孤网紧急控制优化方法[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 121-126. WANG Yu, XU Heping, WANG Huaiming, et al. Emergency control optimization measures for isolated power grid with heavy load of electrolytic aluminum[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(21): 121-126.
- [4] PALIZBAN O, KAUHANIEMI K. Microgrid control principles in island mode operation[C] // 2013 IEEE Grenoble Conference, June 6-16, 2013, Grenoble, France: 1-6.
- [5] 李碧君, 李兆伟, 吴雪莲, 等. 基于能量变化的暂态频率安全紧急控制决策方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 150-157. LI Bijun, LI Zhaowei, WU Xuelian, et al. Research on decision method of transient frequency safety emergency control based on energy change[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 150-157.
- [6] 夏彦辉, 董宸, 孙丹, 等. 小規模电网安全稳定实时控制系统研制与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 67-73. XIA Yanhui, DONG Chen, SUN Dan, et al. Development and application of safe and stable real-time control system for small-scale power grids[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 67-73.

- [7] 陈刚, 罗建裕, 李亚平, 等. 应对大功率缺失故障的负荷分散调频控制策略研究[J]. 智慧电力, 2018, 46(10): 38-42.
CHEN Gang, LUO Jianyu, LI Yaping, et al. Research on load decentralized frequency modulation control strategies for high power missing faults[J]. Smart Power, 2018, 46(10): 38-42.
- [8] 江渝, 向竑宇, 钟力强. 基于协调一致算法的微电网频率二次调整策略[J]. 广东电力, 2018, 31(7): 66-71.
JIANG Yu, XIANG Yunyu, ZHONG Liqiang. Frequency adjustment strategy of microgrid frequency based on coordinated algorithm[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(7): 66-71.
- [9] 陈祺炜, 蒋平. 基于 DEA/TOPSIS 模型的孤网黑启动方案评估[J]. 广东电力, 2018, 31(2): 70-75.
CHEN Qiwei, JIANG Ping. Evaluation of black start scheme in isolated network based on DEA/TOPSIS model[J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(2): 70-75.
- [10] 电网运行准则: DL/T1040—2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [11] 刘克天. 电力系统频率动态分析与自动切负荷控制研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2014.
- [12] 李飞, 肖仕武, 王琮, 等. 孤网发电机调速系统参数定量调整理论分析[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21): 103-108.
LI Fei, XIAO Shiwu, WANG Zong, et al. Analysis of parameter quantitative adjustment of algebraic generator speed control system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(21): 103-108.
- [13] 张静. DEH 系统孤网运行控制系技术解决方案[J]. 热力透平, 2009, 38(1): 65-67.
ZHANG Jing. Solution for DEH system in isolated network running[J]. Thermal Turbine, 2009, 38(1): 65-67.
- [14] 李俊. 火电厂单机带孤网运行的控制策略[J]. 中国电力, 2008, 41(11): 51-54.
LI Jun. Control strategy of single power unit with isolated operation in thermal power plant[J]. Electric Power, 2008, 41(11): 51-54.
- [15] 周志平, 孙新良, 付晨鹏, 等. 电力系统孤网运行动态特性试验[J]. 电网技术, 2008, 32(2): 78-81.
ZHOU Zhiping, SUN Xinliang, FU Chenpeng, et al. Insular power system dynamic characteristic examination research[J]. Power System Technology, 2008, 32(2): 78-81.
- [16] 王爽心, 葛晓霞. 汽轮机数字电液控制系统[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004: 27-35.
- [17] 中国电科院《中国版本 BPA 暂态稳定程序用户手册》5.0 版[Z].
- [18] 于达仁, 毛志伟, 徐基豫. 汽轮发电机组的一次调频动态特性[J]. 中国电机工程学报, 1996, 16(4): 221-225.
YU Daren, MAO Zhiwei, XU Jiyu. The primary frequency modulation dynamic characteristics of turbine generator sets[J]. Proceedings of the CSEE, 1996, 16(4): 221-225.
- [19] 邹伯敏. 自动控制原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 2007: 77-83.
- [20] 刘涛, 宋新立, 汤涌, 等. 特征值灵敏度方法及其在电力系统小干扰稳定分析中的应用[J]. 电网技术, 2010, 34(4): 82-87.
LIU Tao, SONG Xinli, TANG Yong, et al. Eigenvalue sensitivity method and its application in power system small interference stability analysis[J]. Power System Technology, 2010, 34(4): 82-87.
- [21] NESS V J E, BOYLE J M, IMAD F P. Sensitivities of large multiple-loop control systems[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1965, 10(7): 308-315.
- [22] YU Deyang, ZHAO Jixing, LIU Hui, et al. A matrix-perturbation-theory-based optimal strategy for small-signal stability analysis of large-scale power grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(3): 353-363. DOI: 10.1186/s41601-018-0107.
- [23] 倪以信, 陈寿孙, 张宝霖. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [24] 王锡凡, 方万良, 杜正春. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003.

收稿日期: 2019-03-19; 修回日期: 2019-04-30

作者简介:

张刘杰(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统运行分析与控制; E-mail: 1367492649@qq.com

肖仕武(1974—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行分析与控制、电力系统故障分析与继电保护。E-mail: xiaoshiwu@263.net

(编辑 周金梅)