

基于广域相量测量系统的电网一次调频能力预测

张琦兵¹, 徐春雷¹, 刘栋², 王波², 闪鑫²

(1. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210024; 2. 南瑞集团有限公司, 江苏 南京 211003)

摘要:机组的一次调频能力对电网频率波动后快速恢复具有重要作用,文中关注电网实时的一次调频能力,提出了一种基于广域相量测试系统(WAMS)同步相量测量装置(PMU)数据的电网一次调频能力预测方法。该方法基于WAMS的各发电机组一次调频性能历史统计信息,从时间维度和频差维度两方面统一考虑,在单机贡献电量预测的基础上,计算得到电网在1 min内能快速调出的机组出力。该功能已在江苏电网WAMS中投入实际运行,可为电网的调度控制提供辅助决策。

关键词:广域相量测量系统;同步相量测量装置;一次调频;预测

中图分类号:TM734

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)02-0064-05

0 引言

随着特高压交、直流电网的不断建设,华东电网已形成特高压交、直流大功率混合馈入的大型受端电网。当发生直流双极闭锁等大功率输电断面失去时,受端电网频率会快速跌落,因此,如何快速稳定和恢复频率是受端电网面临的一大挑战。机组一次调频响应速度快,是应对电网频率跌落的重要防线,对电网的频率稳定和恢复具有重要作用。在一次调频研究方面,前期主要集中在一次调频的在线监测^[1-2]、性能评估^[3-7]、特性分析^[8-10]、稳定性影响及策略^[11-15]。但机组一次调频能力与机组的参数设置和运行状态有关,电网并不具备实时控制能力,如何对电网的一次调频能力进行预测,辅助调度员的紧急控制是值得研究的问题。针对该问题,文献[16]利用方差分析,提出了用于衡量电力系统一次调频能力的指标,系统电网的一次调频情况与实时开机方式有关,由于电网在不同时刻的机组出力不同,所以用电网的历史调频性能这单一指标不能准确反映电网一次调频实时能力。

近年来,随着特高压的建设和风光储等新能源电站在电网中的不断接入,对于新型电网的一次调频也有不少研究^[17-19]。文献[17]针对特高压线路闭锁对电网造成的频率扰动,分4个时段赋以适当权重,对机组的一次调频进行评价。文献[18-19]分别对于新能源接入后机组一次调频能力和新能源电站本身的一次调频能力进行研究,目前对于电网本身的调频能力,电力工作者关注较少。

收稿日期:2018-11-07;修回日期:2018-12-11

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“适应电网主动调度需求的全局分析和防控关键技术研究与应用”

文中提出一种电网一次调频能力预测的方法,该方法基于广域相量测量系统(WAMS)中机组历史的一次调频性能信息,综合时间维度和最大频差维度,对历史信息赋予不同的权值,对发电机组的实时调频能力进行预测,形成了不同最大频差时电网秒级下能调出的出力,有助于电网的调度控制。

1 江苏电网 WAMS 系统和一次调频

同步相量测量装置(PMU)具备相量采集功能,上送的数据带有时标且频率高,基于PMU数据采集的WAMS对于电网的动态分析具有较大意义。

江苏电网WAMS系统建于2005年,截止2016年6月底,共有155套PMU,采集点覆盖所有的500 kV变电站和220 kV及以上的发电厂及其机组。基于PMU的采集数据,WAMS系统主要部署了一次调频实时监测、电网扰动分析、机组励磁监视、低频振荡分析等应用功能。自2015年7月开始,江苏电网机组一次调频辅助服务的性能考核以PMU数据源为准,在PMU数据缺失或异常时,以数据采集与监视控制系统(SCADA)数据源作为补充。电网频率波动时,若频率变化值越过发电机组的设置死区,机组的一次调频将动作,储存的能量会在短时间内释放、吸收,起到稳定和恢复电网频率的作用。由于发电机一次调频的动作时间较短,机组出力在短期内会快速变化,相对于SCADA的秒级数据,PMU数据的采集频率能达到25 Hz,所以利用PMU数据进行发电机组一次调频性能评价将更加精准。

江苏电网对发电机组一次调频参数设置有明确要求,死区为0.033 3 Hz,限幅为机组额定出力的±6%,转速不等率为5%,根据机组的参数设置,可以绘制机组的一次调频特性曲线如图1所示。

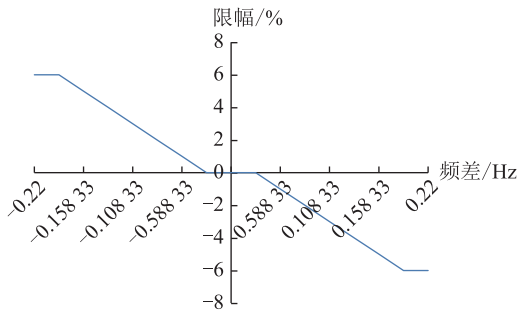


图1 江苏电网机组一次调频特性曲线

Fig.1 Characteristic curve of primary frequency regulation in Jiangsu power grid

当电网发生频率波动时,WAMS对机组的出力变化进行逐点积分,并按照图1的机组调频特性曲线计算出机组的理论贡献电量,分15 s,30 s,45 s和60 s 4个时间段计算实际积分电量与理论贡献电量的比值,然后对机组的性能进行统计评价和运行考核。目前,对常规燃煤机组、供热燃气机组一次调频响应指数要求为:0~15 s,0~30 s,0~45 s 必须达到0.4,0.6,0.7。

2 一次调频能力预测方法

对于每次电网的频率波动,WAMS一次调频实时监测模块会基于PMU数据对并网机组进行调频性能分析,积累了大量机组历史调频性能统计信息。该统计信息包含频率波动的时间、最大频差(以下简称频差)大小、15 s,30 s,45 s,60 s时间内机组的实际积分电量,将第*n*台机组的调频性能记为:

$$\begin{cases} G^n = \{G_1^n, \dots, G_i^n, \dots, G_k^n\} \\ G_i^n = (T_i, \Delta f_i, w_i^{15}, w_i^{30}, w_i^{45}, w_i^{60}) \quad i = 1, 2, \dots, k \end{cases} \quad (1)$$

式中: G^n 为第*n*台机组,下角标*i*表示第*i*次的调频性能; T_i 为频率发生波动的时间,为国际标准时间; Δf_i 为最大频差大小; $w_i^{15}, w_i^{30}, w_i^{45}, w_i^{60}$ 分别为机组在频率波动后15 s,30 s,45 s,60 s后的实际积分电量。

根据上述信息,文中从时间维度和频差维度两个方面对历史数据进行权值分配,综合历史性能,预测各发电机组在不同频差下1 min内的电量贡献与出力变化,从而得到当前电网在1 min内各时间点一次调频性能。

2.1 权值分配原则

历史调频事件权值分配基于的主要原则如下:原则一,时间越近,即 T_i 越大,权值越大;原则二,实际最大频差与预测频差越接近,权值越大。

原则一主要是考虑随着运行考核对机组的影响,机组的调频性能不断的变化,越接近预测时刻的调频数据越能反映机组的实际情况。原则二是因为各机组在不同频差时的性能表现各有差异,历史频差越接近预测频差,权值理应更大。

2.2 数据归一化处理

式(1)中的 T_i 和 Δf_i 构成了在复平面上的点,根据2.1中的原则说明,设当前时间和所预测的频差为坐标的原点,则至原点越近的相量权值越大。由于 T_i 和 Δf_i 单位不同,数据大小存在较大差异,需要进行归一化处理。

日期本身不是数字,所以首先需要将日期以数字形式表示。以当前时间为基准点,将 T_i 转换为频率波动时刻到当前时间的月数,近似计算方法为:

$$T'_i = \left\lceil (T_{\text{now}} - T_i) / 30 \right\rceil \quad (2)$$

式(2)中分母30是近似取每个月为30 d,向上取整保证了 T'_i 大于等于1,然后可以利用对数的归一化处理方法:

$$T_i^* = \frac{\ln T'_i}{\ln(\max T'_i)} \quad (3)$$

频差的归一化处理方法,首先求出历史频差与预测频差的差值:

$$\Delta f'_i = -\Delta f_i + \Delta f_e \quad (4)$$

式中: Δf_e 为当前所预测的频差。

频差的数值本身较小,一般在0.033 3~0.2 Hz,作差后数值会更小,在归一化处理时适当放大。

$$\Delta f_i^* = \arctan(10\Delta f'_i) \times 2/\pi \quad (5)$$

2.3 权值计算方法

经过归一化处理后, T_i^* , Δf_i^* 在复平面上离原点的距离记为:

$$D_i = \sqrt{T_i^* T_i^* + \Delta f_i^* \Delta f_i^*} \quad (6)$$

根据离原点越近,权值越大的反比例关系,可以采用反比例方式计算各历史信息点的权值为:

$$R_i = \frac{1}{\text{sum}(1/D_i) D_i} \quad (7)$$

2.4 一次调频预测

历史统计的贡献电量是基于不同频率波动的,在进行预测之前,需要对贡献电量按照图1所示的频率特性曲线进行调整。然后根据式(7)计算出每次历史调频的权值向量,可以计算预测机组 G^n 在 Δf_e 频差时15 s内的贡献电量:

$$w_e^{15} = [w_1^{15}, \dots, w_i^{15}, \dots, w_k^{15}] [R_1, \dots, R_i, \dots, R_k]^T \quad (8)$$

根据式(8)也可以计算出30 s,45 s,60 s机组

的贡献电量,从而可以计算机组在各时刻能增加的出力。机组一次调频能力预测出来后,根据机组运行状态(是否开机)、一次调频投入的状态及机组的功率状态(温控模式或满功率下不具备一次调频能力或一次调频能力弱)对全网进行总加,即可获得全网在各频率和时间内能调出的出力。

3 算例分析

为了对预测方案进行计算分析,文中获取了2015年6月~2016年6月江苏电网WAMS历史实际频率扰动的数据,分别对单机的调频能力和电网调频能力进行分析。

3.1 机组一次调频能力预测

文中选择了1台1000 MW的机组进行单机算例分析,如表1所示为该机组1年内21次一次调频动作时WAMS系统记录的性能统计信息。表1中2016-06-01和2015-09-29的频差极值分别为-0.076 Hz, -0.072 Hz,可见同一台机组在不同时间的调频性能是不一致的。

表1 单机历史调频信息

Table 1 History data of primary frequency regulation

响应时间	频差极值 /Hz	实际贡献电量/(kW·h)			
		15 s	30 s	45 s	60 s
2016-06-17	-0.141	66.65	130.83	196.16	263.46
2016-06-01	-0.076	17.07	34.33	64.68	103.21
2016-06-17	-0.085	35.35	86.28	153.17	225.15
2016-04-27	-0.072	31.53	65.82	98.78	127.42
2016-03-19	-0.067	17.61	26.69	22.02	7.29
2015-12-13	-0.069	16.68	35.5	61.07	83.64
2015-10-21	-0.072	36.22	78.88	132.54	194.58
2015-10-20	-0.236	106.56	237.79	374.32	513.77
2015-09-29	-0.072	18.99	38.02	52.5	60.06
2015-09-24	-0.069	18.95	49.99	88.6	123.51
2015-09-19	-0.439	154.68	341.86	540.11	743.26
2015-07-13	-0.199	119.67	269.52	421.05	567.61
2015-07-11	-0.071	17.53	31.15	45.14	60.56
2015-06-24	-0.061	14.57	30.26	55.72	87.55
2015-06-18	-0.058	16.79	24.38	27.22	27.22
2015-06-16	-0.074	25.84	53.74	80.4	80.4
2015-06-12	-0.051	13.17	28.28	44.43	44.43
2015-06-10	-0.065	28.15	51.21	77.91	112.01
2015-06-07	-0.051	0.85	-9.56	-19.73	-25.15
2015-06-07	-0.062	18.13	35.42	63.48	107.03
2015-06-02	-0.058	4.84	-11.48	-51.75	-93.66

按0.02 Hz的频率步长,预测了机组在-0.04~-0.2 Hz时的调频性能。基于表1中的历史信息,根据文中第2节的方法,对数据进行归一化处理,得

到了各次调频动作的权值,对于-0.1 Hz频差的计算结果如表2所示,从表2可知,计算得到的结果完全遵循2.1中的原则二。

表2 -0.1 Hz时数据处理结果

Table 2 Data processing results of -0.1 Hz

T_i^*	Δf_i^*	D_i	R_i
0.255 958	0.247 707	0.356 193	0.094 793
0.255 958	-0.149 95	0.296 648	0.113 82
0.255 958	-0.094 79	0.272 945	0.123 705
0.511 916	-0.173 8	0.540 616	0.062 456
0.594 316	-0.202 92	0.628 004	0.053 765
0.767 874	-0.191 37	0.791 362	0.042 666
0.850 274	-0.173 8	0.867 856	0.038 906
0.850 274	0.596 369	1.038 567	0.032 511
0.885 469	-0.173 8	0.902 365	0.037 418
0.885 469	-0.191 37	0.905 913	0.037 271
0.885 469	0.817 386	1.205 062	0.028 019
0.947 157	0.496 801	1.069 541	0.031 569
0.947 157	-0.179 69	0.964 052	0.035 024
0.974 523	-0.236 73	1.002 864	0.033 668
0.974 523	-0.253 14	1.006 863	0.033 534
0.974 523	-0.161 94	0.987 886	0.034 179
0.974 523	-0.290 05	1.016 773	0.033 208
0.974 523	-0.214 33	0.997 815	0.033 838
0.974 523	-0.290 05	1.016 773	0.033 208
0.974 523	-0.231 19	1.001 57	0.033 712
1	-0.253 14	1.031 542	0.032 732

在表2权值的基础上,可以计算得到不同频差下各个时刻的贡献电量和功率增量,计算结果如图2和图3所示。

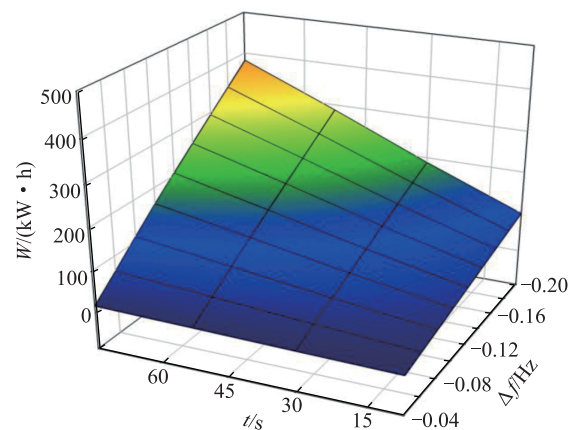


图2 不同频差下贡献电量计算结果

Fig.2 Energy contribution with different frequency

图4所示为该机组在2016年8月某次频率波动后一次调频响应情况,该次频率波动的极值为-0.114 Hz,由图4可以看出,该机组的功率波动在起始阶段较为准确,15 s,30 s的误差分别为3%,

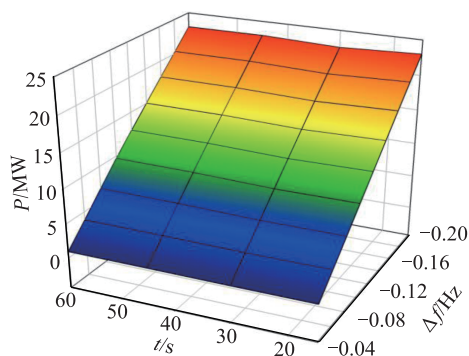


图3 不同频差下功率增量计算结果

Fig.3 Power increment of different frequency

1.8%。到后期(45 s),由于每次系统频率的变化都不一样,按固定频差进行预测的功率增量误差加大,45 s 预测的误差为 25%。

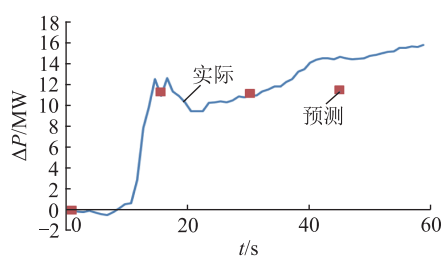


图4 机组的实际频率响应比较

Fig.4 Comparison of the actual response frequency of generator

3.2 电网一次调频能力预测

根据机组的预测结果,综合开停机方式、一次调频投入等信号,可以得出不同频差下短时能调出的出力和贡献电量,-0.1 Hz 和-0.2 Hz 下的计算结果如表 3 所示。

表3 江苏电网一次调频能力评估计算结果
Table 3 Ability of primary frequency regulation estimate of Jiangsu Power Grid

项目	预估值				
	15 s	30 s	45 s	60 s	
0.1 Hz	贡献电量 / (kW·h)	5 087.4	11 503.9	18 325.7	26 345.6
	出力变化 / MW	1 221	1 380.5	1 466.1	1 580.7
0.2 Hz	贡献电量 / (kW·h)	7 296.1	1 6381.0	25 841.5	36 584.1
	出力变化 / MW	1 751.1	1 965.7	2 067.3	2 195.0

4 结语

基于 WAMS 大量的机组一次调频性能统计历史信息,文中提出一种预测机组调频能力和电网调频能力的方案,该方案设定 2 个权值分配基本原则,

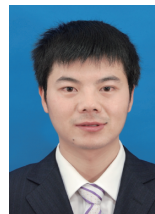
实现时间维度和频差维度的归一化处理。文中根据实际历史数据,对江苏电网中的机组和电网本身的调频性能进行了计算预测,通过机组实际频率波动变化的分析,结果表明与实际情况符合度较高,说明该方案的有效性。该方案已在江苏电网 WAMS 中部署运行,能为电网的调度控制提供辅助决策。

参考文献:

- [1] 郑涛,高伏英. 基于 PMU 的机组一次调频特性参数在线监测[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(11):57-61.
ZHENG Tao, GAO Fuying. On-line monitoring and computing of unit PFR characteristic parameter based on PMU[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11):57-61, 71.
- [2] 刘洋, 张道农, 孙铭泽, 等. 基于 WAMS 的发电机组一次调频在线监测与考核系统设计[J]. 电力科学与技术学报, 2016, 31(3):16-21.
LIU Yang, ZHANG Daonong, SUN Minge, et al. Design of on-line monitoring and assessment system for generator unit primary frequency regulation based on WAMS[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2016, 31(3):16-21.
- [3] 高林, 戴义平, 王江峰, 等. 机组一次调频参数指标在线估计方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16):62-69.
GAO Lin, DAI Yiping, WANG Jiangfeng, et al. An online estimation method of primary frequency regulation parameters of generation units[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16):62-69.
- [4] 陈文浩, 杨梓俊, 李雪松. 发电机组一次调频性能测评[J]. 江苏电机工程, 2008, 27(3):54-56.
CHEN Wenhao, YANG Zijun, LI Xuesong. Evaluation of primary frequency modulation performance of generator set[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2008, 27(3):54-56.
- [5] 竺炜, 谭喜意, 唐颖杰, 等. 汽轮发电机组一次调频性能的分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(24):52-55.
ZHU Wei, TAN Xiyi, TANG Yingjie, et al. Analysis and research on primary frequency modulation of the turbine generation unit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(24):52-55.
- [6] 张艳军, 高凯, 曲祖义. 基于发电机组出力曲线特征的一次调频性能评价方法[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(7):99-103.
ZHANG Yanjun, GAO Kai, QU Zuyi. An evaluation method of primary frequency modulation performance based on characteristics of unit output power curves[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(7):99-103.
- [7] 李端超, 陈实, 陈中元, 等. 发电机组一次调频调节效能实时测定及补偿方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2):70-72.
LI Duanchao, CHEN Shi, CHEN Zhongyuan, et al. Real time measurement and reward method of the efficiency of generator unit primary frequency regulation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2):70-72.
- [8] 段南, 李国胜, 王玉山. 大型火电机组一次调频功能投入的研究[J]. 华北电力技术, 2003(10):1-4.

- DUAN Nan, LI Guosheng, WANG Yushan. Research on primary frequency modulation function operating on large fossil-fuel power plants[J]. North China Electric Power, 2003(10):1-4.
- [9] 王蕊, 刘肇旭, 宋新立, 等. 基于 Matlab 的大型火电机组一次调频特性仿真[J]. 电网技术, 2009(14):42-46.
- WANG Rui, LIU Zhaoxu, SONG Xinli, et al. Matlab-based simulations of primary frequency control for large thermal generating unit[J]. Power System Technology, 2009(14):42-46.
- [10] 都亮, 刘俊勇, 肖兰, 等. 基于电力网络一次调频动态模型建立及仿真[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(9):1-6.
- DU Liang, LIU Junyong, XIAO Lan, et al. Grid-based PFR dynamic modeling and its simulation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(9):1-6.
- [11] 于达仁, 郭钰锋, 徐基豫. 发电机组并网运行一次调频的稳定性[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9):59-63.
- YU Daren, GUO Yufeng, XU Jiyu. The primary frequency regulation stability of parallel turbo-generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9):59-63.
- [12] 金娜, 刘文颖, 曹银利, 等. 大容量机组一次调频参数对电网频率特性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(1):91-95, 100.
- JIN Na, LIU Wenying, CAO Yinli, et al. Influence on the grid frequency characteristic by the parameters of primary frequency modulation of large capacity generator units[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(1):91-95, 100.
- [13] 高林, 戴义平, 马庆中, 等. 特高压线路解列后区域互联电网一次调频稳定性研究[J]. 电网技术, 2009, 33(20):27-32.
- GAO Lin, DAI Yiping, MA Qingzhong, et al. Research on stability of primary frequency regulation of interconnected power system after trip-out of ultra high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2009, 33(20):27-32.
- [14] 范冠男, 刘吉臻, 孟洪民, 等. 电网限负荷条件下风电场一次调频策略[J]. 电网技术, 2016, 40(7):2030-2037.
- FAN Guannan, LIU Jizhen, MENG Hongin, et al. Primary Frequency control strategy for wind farms under output-restricted condition[J]. Power System Technology, 2016, 40(7):2030-2037.
- [15] 刘明松. 考虑暂态频率偏移的一次调频旋转备用优化方法[J]. 电网技术, 2011, 35(8):129-133.
- LIU Mingsong. An optimization method for spinning reserve in primary frequency control considering transient frequency deviation[J]. Power System Technology, 2011, 35(8):129-133.
- [16] 于达仁, 郭钰锋. 电网一次调频能力的在线估计[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3):72-76.
- YU Daren, GUO Yufeng. The online estimate of primary frequency controllability in electric power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3):72-76.
- [17] 梁肖, 施壮, 黄少雄, 等. 安徽电网火电机组一次调频性能评价方法研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2018(3):55-58, 62.
- LIANG Xiao, SHI Zhuang, HUANG Shaoxiong, et al. Research and development of an analysis system of frequency modulation performance of anhui power grid unit[J]. Automation & Instrumentation, 2018(3):55-58, 62.
- [18] 王琦, 郭钰锋, 万杰, 等. 适用于高风电渗透率电力系统的火电机组一次调频策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(04):974-984, 1274.
- WANG Qi, GUO Yufeng, WAN Jie, et al. Primary frequency regulation strategy of thermal units for a power system with high penetration wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(4):974-984, 1274.
- [19] 李新, 杨苒晨, 邵雨亭, 等. 级联型储能系统中虚拟同步发电机控制及电池自均衡策略[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(9):180-187.
- LI Xin, YANG Ranchen, SHAO Yuting et al. Strategy of virtual synchronous generator control and battery balancing in cascaded hbridge based energy storage system [J]. Automation of Electric Power Systems. 2018, 42(9):180-187.

作者简介:



张琦兵

张琦兵(1985),男,硕士,高级工程师,从事电力系统自动化相关的生产和研究工作(E-mail:zqb_312@163.com);

徐春雷(1976),男,硕士,高级工程师,从事电力系统自动化相关的生产和研究工作;

刘栋(1983),男,学士,工程师,从事电网调度自动化分析与控制技术研究。

Ability of primary frequency regulation estimate based on wide area measurement system

ZHANG Qibing¹, XU Chunlei¹, LIU Dong², WANG Bo², SHAN Xin²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company, Nanjing 210024, China;

2. NR Group Corporation, Nanjing 211000, China)

Abstract: The primary frequency regulation of generator is important to frequency rapid recovery of power grid, this paper focuses on the ability of primary frequency regulation, an estimate scheme based on WAMS data is proposed. Based on enormous WAMS history statistic data, date and frequency difference two factors are considered. the ability of primary frequency regulation of single generator and power grid is estimated, the program is running in Jiangsu WAMS and providing decision support for power grid dispatching control.

Keywords: WAMS; PMU; primary frequency regulation; estimate

(编辑 杨卫星)