

基于 FNET 实测数据分析川渝电网频率动态特性

刘凯, 刘克天, 王晓茹, 范成围

(西南交通大学电气工程学院, 四川 成都 610031)

摘要: 电力系统频率动态监测网(FNET)在川渝电网实现了对频率的同步测量。基于FNET实测频率数据,评价了近几年川渝电网频率质量;呈现了川渝电网频率的时空分布特性;采用统计学方法研究了扰动后川渝电网的频率恢复能力;利用TLS-ESPRIT辨识方法提取川渝电网低频振荡信息,观测到0.25 Hz模式下成都和攀枝花之间的弱阻尼低频振荡现象。相关结论有助于认识川渝电网频率质量和动态特性,完善川渝电网稳定控制方案。

关键词: 频率监测网(FNET); 频率质量; 时空分布特性; 频率恢复能力; 低频振荡; TLS-ESPRIT

Frequency dynamics analysis of Sichuan-Chongqing Power Grid based on the FNET data

LIU Kai, LIU Ke-tian, WANG Xiao-ru, FAN Cheng-wei

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: Frequency Monitoring Network (FNET) has realized the synchronous measurement of system frequency in Sichuan-Chongqing Power Grid. Based on the FNET measured data of Sichuan-Chongqing Power Grid, this paper evaluates the frequency quality of the power grid in recent years. The frequency time-space distribution characteristic of Sichuan-Chongqing Power Grid is presented and the frequency disturbance recovery capacity is evaluated by using statistic method. With disturbance data from FNET, this paper determines the dominant modes of the system according to the TLS-ESPRIT identification method and observes the weak damping and low frequency oscillation phenomenon between Chengdu and Panzhihua under the 0.25 Hz mode. The conclusions contribute to understanding the frequency quality and dynamics of Sichuan-Chongqing Power Grid as well as improving the control scheme of system frequency.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 90610026).

Key words: frequency monitoring network (FNET); frequency quality; time-space distribution characteristic; frequency recovery capacity; low frequency oscillation; TLS-ESPRIT

中图分类号: TM712 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)03-0134-07

0 引言

频率是电力系统运行的重要参数之一^[1]。在电力系统中,稳态运行是相对的、短暂的,而动态过程则是绝对的、大量的。动态频率特性是指电力系统的发电功率与负荷功率的平衡条件破坏后,系统频率随时间的变化过程^[2]。

随着“西电东送、全国联网”的逐步实施,大电网的互联在提高电力系统运行经济性的同时使整个互联系统的动态特性变得更为复杂,特别是大量远距离大功率输电线路及系统间弱联络关系的出现,增加了系统发生事故甚至出现大面积停电的概率^[3]。

近年来,广域测量系统的出现在一定程度上缓解了目前对大规模互联电力系统进行动态分析与制定相应控制措施的困难^[4-6]。电力系统频率动态监测网(Frequency Monitoring Network, FNET)实现了对大规模电力系统频率的同步测量^[7],频率测量准确度达到 ± 0.0005 Hz。在成都、重庆、攀枝花三地普通用户的220 V电源插座上安装FNET频率动态记录仪,通过Internet将频率测量数据实时传输到位于成都的数据服务器,以较低的成本实现了电网高精度频率动态实时测量。

频率蕴含大量信息,在电力系统安全稳定监视、紧急控制、阻尼控制以及扰动分析等领域有着广阔的应用前景^[7-8]。基于川渝频率动态监测网FNET实测数据,本文进行了川渝电网稳态频率、动态频率、

低频振荡特性分析, 对基于实测数据分析电网的安全经济运行进行了有益的探索。

1 川渝电网频率质量评价

1.1 频率质量评价指标

电力系统频率是电能质量的三大指标之一, 是电力系统运行的关键控制对象。对川渝电网频率质量进行评价, 主要从以下三个指标进行:

1) 频率的均值指标

我国电力系统的基准频率为 50 Hz。

2) 频率合格率指标

我国有关技术规程 GB/T15945-1995 规定, 电力系统的频率控制在 50 ± 0.2 Hz 以内的时间应该达到 98% 以上^[9]。

3) 频率分布指标

频率分布指标统计系统频率偏离基准频率的偏差的均方根 σ ^[10], 反应了频率分布的离散程度。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (f_i - f_0)^2} \quad (1)$$

式中: f_0 为基准频率; f_i 为不同时刻频率。表 1 为北美互联电网频率分布指标控制目标^[10]。

表 1 北美互联电力系统年频率分布指标控制目标
Table 1 Frequency control target of power grid in North America

电力系统名称	美国东部	美国西部	美国德克萨斯
年频率控制目标	0.018 Hz	0.022 8 Hz	0.020 Hz

1.2 川渝电网频率质量评价

北美电力可靠性委员会指出理想情况下电网频率呈正态分布^[11]。图 1、图 2 分别给出川渝电网 2007 年 12 月和 2011 年 12 月的 FNET 实测频率分布图; 表 2 给出相关频率评价指标统计。可见, 2011 年 12 月的频率呈近似的正态分布, 频率均值与 50 Hz 相差 0.000 3 Hz; 而 2007 年 12 月的频率呈非正态分布, 频率均值与 50 Hz 相差 0.009 Hz, 相比之下, 频率均值指标趋好。

2007 年 12 月频率分布指标为 0.026 2, 如果与表 1 中北美互联电网三个地区频率控制目标相比较, 川渝电网该月的频率分布未达标。2011 年 12 月频率分布指标为 0.018 6, 已达到美国西部和美国德克萨斯两个地区的控制要求, 与要求最严格的美国东部控制目标也十分接近; 因此频率分布指标亦趋于改善。

在频率合格率指标上, 合格率均已达到 100%。为了更好地评价两者的频率合格率, 本文统计了 ± 0.1

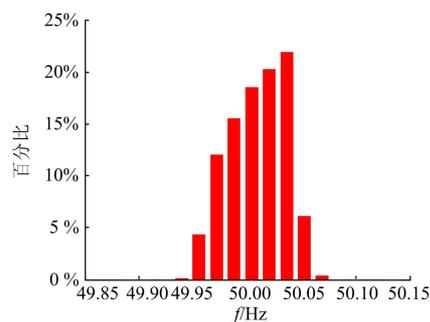


图 1 川渝电网 2007 年 12 月频率分布图

Fig. 1 Frequency distribution of Sichuan-Chongqing Power Grid in December of 2007

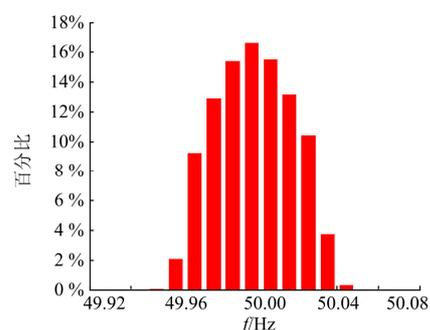


图 2 川渝电网 2011 年 12 月频率分布图

Fig. 2 Frequency distribution of Sichuan-Chongqing Power Grid in December of 2011

表 2 频率评价指标统计

Table 2 Statistics of frequency evaluation index

年份	均值指标	分布指标	0.2 合格率
2007	50.009 0	0.026 2	100%
2011	49.999 7	0.018 6	100%
年份	0.1 合格率	0.05 合格率	0.025 合格率
2007	99.999 7%	96.721 1%	54.198 2%
2011	100%	99.983 1%	78.760 6%

Hz、 ± 0.05 Hz、 ± 0.025 Hz 的合格率。从表中可见 2011 年的指标均优于 2007 年, 且在 ± 0.025 Hz 的合格率上, 2011 年比 2007 年提升约 25 个百分点。

由此可见, 川渝电网的频率在均值指标、合格率指标和分布统计指标上都较为满意, 2011 年较 2007 年频率质量改善明显。

1.3 电网频率质量的经济性

频率质量能够体现出系统的经济性。发电厂提高频率运行所多发的电能以各种不同的形式被用户消耗掉并由用户承担费用^[12], 月能源浪费和月用户电费额外支出的计算方式如式 (2)、式 (3) 所示^[10]。月能源浪费量=频率均值偏差 (Hz) \times 负荷频率调

$$\text{节系数 (kW/Hz)} \times 31 \text{ (天)} \times 24 \text{ (h/天)} \times \text{标准煤耗 (T/kWh)} \quad (2)$$

$$\text{月用户额外支付电费} = \text{频率均值偏差 (Hz)} \times \text{负荷频率调节系数 (kW/Hz)} \times 31 \text{ (天)} \times 24 \text{ (h/天)} \times \text{电费 (元/kWh)} \quad (3)$$

式中，标准煤耗率按 325×10^{-6} T/kWh，电费按 0.6 元/kWh。川渝电网负荷频率调节系数若按照 61.2 MW/0.1 Hz 计算，则 2007 年 12 月能源浪费量折合标准煤为 1 332 吨，用户额外支付电费 246 万元。

2 川渝电网频率扰动检测

随着电力系统互联，电网结构日趋复杂，掌握扰动后系统的动态特性十分重要^[13-15]。根据扰动时系统频率的变化情况将系统的扰动分为三类^[16]：发电机跳闸扰动（包括负荷陡增）、负荷丢失扰动（包括发电出力突然增加）、传输线短路等其他扰动。系统受到这些扰动时，发电和负荷的有功功率将失去平衡，系统频率随之发生变化。基于此特点编写频率扰动检测程序，比较系统频率变化率绝对值与事先设定的阈值，若大于阈值，判定系统发生了较大的扰动，检测结果如图 3 所示。

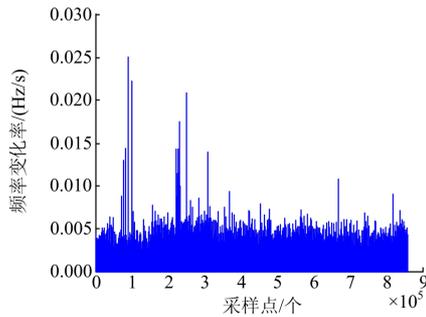


图 3 系统频率变化率绝对值

Fig. 3 Absolute value of frequency change rate of the system

利用此检测算法，结合三类扰动事故频率动态过程的差异，本文对川渝电网某月的 FNET 数据进行统计分析。算法在该月共辨识出了 28 个发电机跳闸事故，5 个负荷丢失事故和若干个其他类型的扰动事故。图 4、图 5 为川渝电网典型的发电机跳闸事故和负荷丢失事故的频率动态曲线。

3 川渝电网频率动态特性分析

3.1 川渝电网频率时空分布的 FNET 监测

系统发生有功功率扰动时，系统各点频率动态变化过程具有时空分布特性^[13]，该特性是互联大电网区别于简单电力系统的重要特性之一。安装在川渝电网的 FNET 系统实现了对系统频率的实时监

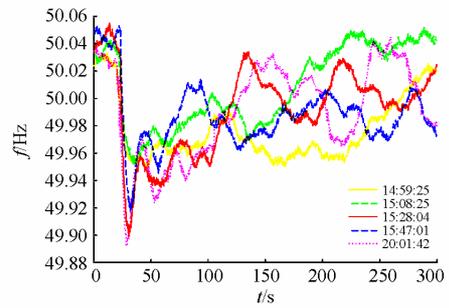


图 4 川渝电网典型的发电机跳闸频率动态特性

Fig. 4 Typical generation-loss events in Sichuan-Chongqing

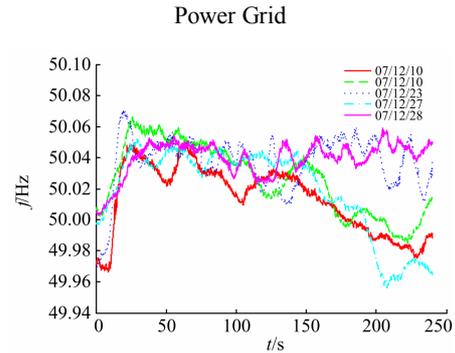


图 5 川渝电网典型负荷丢失频率动态特性

Fig. 5 Typical load-drop events in Sichuan-Chongqing

测，并且系统在出现扰动时观测到了频率时空特性分布。图 6 为 2008 年 3 月 16 日 13:00:55~ 13:01:15 FNET 所记录的攀枝花、重庆、成都三地频率数据的动态变化过程。从图中可以发现，扰动发生在攀枝花附近，该地区的频率最先响应。在约 1 s 之后，扰动以机电波^[17]的形式传播到了成都和重庆，两地的频率随之响应。

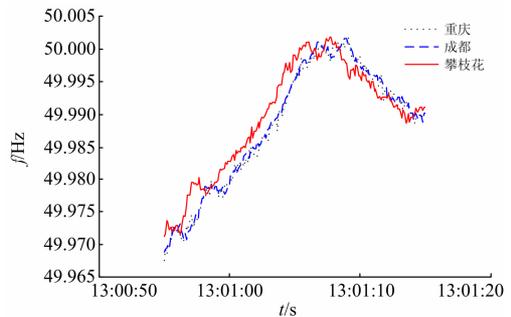


图 6 川渝电网频率时空特性

Fig. 6 Temporal and spatial distribution of Sichuan-Chongqing Power Grid by FNET

扰动瞬间，扰动功率在各发电机之间的分配主要由扰动地点与各发电机之间的电气距离决定^[18]，

而攀枝花与扰动点电气距离很近, 分配到的扰动功率较大, 使得其频率最先做出响应, 从而产生了电网频率的时空分布。

3.2 川渝电网频率恢复能力研究

扰动控制性能标准用来衡量控制区有效运用事故备用容量恢复系统的能力^[10]。由于所采取的控制行为都直接反映于系统的频率上, 故可以通过频率数据来检验系统的扰动控制水平。频率恢复特性 (Frequency Restoration Characteristic, FRC) 为大扰动后短时间内 (如 5 min) 系统频率的恢复能力。国外学者通过 FRC 研究系统扰动控制能力, 其定义为^[16]

如果 $f_1 < 50$ Hz,

$$FRC = \frac{\Delta f - \max(0, (f_1 - f_2))}{\Delta f} \times 100\% \quad (4)$$

如果 $f_1 > 50$ Hz,

$$FRC = \frac{\Delta f - \max(0, (50 - f_2))}{\Delta f} \times 100\% \quad (5)$$

式中: f_1 是扰动前频率; f_2 是为扰动发生后 5 min 时的频率; Δf 是扰动过程中频率最大下降量。例如, 扰动前频率为 50 Hz, 扰动发生后频率最低跌落到 49.8 Hz, 5 min 后频率恢复回到 49.98 Hz, 则 FRC 值为 90%。FRC 值越大, 频率恢复越接近 50 Hz, 恢复能力越好。

统计川渝电网某月发生的 28 次发电机跳闸事故后 1~5 min 的 FRC 值, 计算出平均值、中位数和标准差如表 3, 其中均值、中位数表征电网频率的恢复能力, 标准差表征各扰动 FRC 的离散程度。

表 3 川渝电网频率恢复特性统计

Table 3 Statistics of frequency restoration characteristic in Sichuan-Chongqing Power Grid

	1 min	2 min	3 min	4 min	5 min
均值	59.11%	73.96%	81.23%	91.46%	94.35%
中位数	59.49%	77.45%	91.76%	100%	100%
标准差	0.194 8	0.064 1	0.221 0	0.149 6	0.151 0

可见, 系统频率逐渐接近 50 Hz, 在 4~5 min 内基本能够恢复到 90% 以上, 效果令人满意。

4 川渝电网低频振荡模式辨识

4.1 低频振荡机理

电力系统发电机经输电线并列运行时, 在较大扰动下会发生电机转子间的相对摆动, 并在缺乏阻尼时引起线路母线电压、功率等发生近似等幅或者增幅的振荡^[9], 并且振荡频率较低, 一般在 0.2~2.5 Hz。

自 2001 年以来, 四川二滩水电站向川渝和华中电网送电过程中多次发生了低频振荡现象。研究表明, 在一定的系统运行条件下, 重负荷、长距离输电、自动电压调节器产生的负阻尼分量抵消甚至超过了系统本身提供的正阻尼, 导致系统在受到扰动后容易发生不易衰减甚至增幅的低频振荡^[20]。

4.2 川渝电网低频振荡模式辨识

Prony 算法易受观测点附近负荷突变等因素造成的测量噪声的干扰, 且算法阶数的选取困难, 对实测信号数据进行模式辨识的效果不够理想^[21]。本文采用 TLS-ESPRIT 算法, 即基于总体最小二乘法—旋转不变技术的信号参数估计方法, 进行川渝电网扰动后的低频振荡模式的辨识。该算法是一种基于子空间的高分辨率信号分析法, 直接以测量数据构成的矩阵为基础, 把信号空间分解为信号子空间和噪声子空间, 对噪声具有很强的抗干扰能力, 已在低频振荡信号辨识中得到应用^[22]。

以往对低频振荡的研究多以功角为对象^[19], 而 FNET 提供了精确且丰富的频率数据, 本文选取发电机跳闸事故后的频率动态数据为研究对象, 分析其低频振荡现象。

4.2.1 数据处理

图 7 是利用扰动辨识算法提取的川渝电网某次扰动后系统的频率变化情况, 提取扰动后的原始数据。在进行模式辨识前需要对原始数据进行处理。

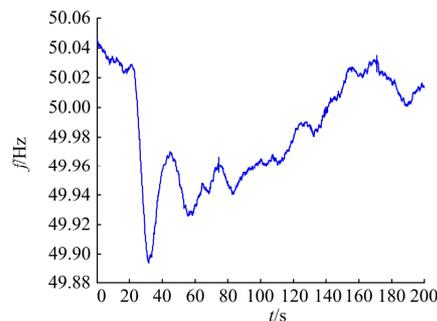


图 7 川渝电网某次扰动后系统的频率变化

Fig. 7 Frequency measurement of Sichuan-Chongqing Power Grid in a disturbance event

图 8 中的虚线部分为具体处理方式。扰动后的原始频率数据首先通过低通滤波 (10 个点的移动平移法) 去除高频噪音的影响, 然后再通过低通滤波 (30 个点的移动平移法) 获得信号的整体变化趋势^[16]。从已去除噪声的频率数据中去除信号整体变化的影响, 得到用于模式辨识的振荡数据, 见图 9。

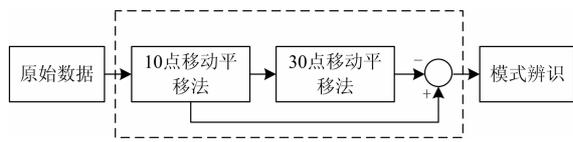


图 8 数据处理流程图

Fig. 8 Data preprocessing of oscillation mode analysis

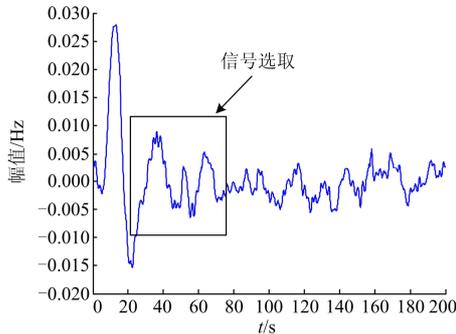


图 9 数据处理后的信号曲线

Fig. 9 Signal curve after data processing

4.2.2 信号主导模式辨识分析

为了去除发电机跳闸过程中的信号干扰。分析数据需从图 9 中尖峰后 20 s 算起。利用 TLS-ESPRIT 算法辨识并提取系统振荡模式。表 4~表 6 分别是重庆、成都、攀枝花三地幅值最大的前六个模式，其中模式 0.25 Hz 属于区域间低频振荡模式，攀枝花该模式的阻尼比为 0.023，属于弱阻尼范畴^[23]，而三地各主导模式中存在一些负阻尼，需对其进行抑制。

表 4 重庆主导振荡模式

Table 4 Main oscillation modes in Chongqing

模式	幅值	频率	阻尼比	相位
1	0.012 698	0.035 858	0.040 417	146.19
2	0.002 018	0.082 97	-0.001 66	134.37
3	0.001 984	0.143 179	0.027 283	148.41
4	0.001 855	0.198 717	0.051 507	-114.7
5	0.001 302	0.253 963	0.054 183	-0.229
6	0.001 281	0.062 452	-0.010 28	51.407

表 5 成都主导振荡模式

Table 5 Main oscillation modes in Chengdu

模式	幅值	频率	阻尼比	相位
1	0.012 362	0.036 146	0.038 751	141.35
2	0.002 216	0.113 55	0.032 386	120.8
3	0.002 114	0.082 519	0.001 638	141.07
4	0.001 629	0.062 981	-0.002 82	39.028
5	0.001 124	0.141 665	0.019 101	149.57
6	0.000 516	0.233 674	0.043 548	-140.1

表 6 攀枝花主导振荡模式

Table 6 Main oscillation modes in Panzhihua

模式	幅值	频率	阻尼比	相位
1	0.012 49	0.035 336	0.039 226	158.08
2	0.008 255	0.141 891	0.086 436	177.74
3	0.006 892	0.127 438	0.053 567	51.621
4	0.001 061	0.066 128	-0.022 59	0.191 3
5	0.000 815	0.085 313	-0.020 79	147.23
6	0.000 78	0.255 997	0.022 77	49.045

利用 TLS-ESPRIT 算法提取的模式还原信号并与输入信号进行对比，图 10 中虚线是初始信号，实线是用辨识算法提取的振荡信息还原的曲线，可见两条曲线重合效果较好，表明提取的振荡模式可信。

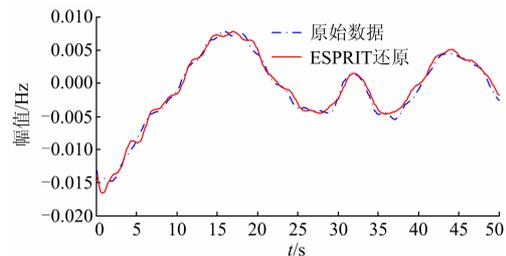


图 10 信号辨识算法拟合效果

Fig. 10 Effect of signal identification fitting

根据表 4~表 6 中模式 0.25 Hz 的幅值和相位画出重庆、成都、攀枝花三地极坐标图，如图 11，从图中可见，攀枝花与成都的相位差接近 180°，两地存在 0.25 Hz 模式下的弱阻尼低频振荡。

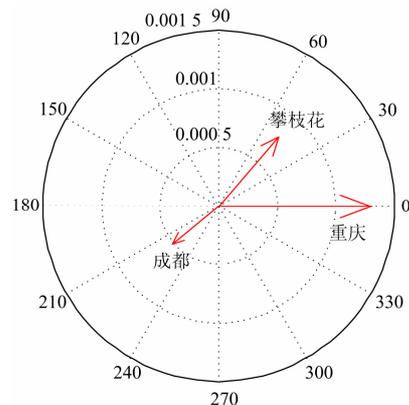


图 11 模式 0.25 Hz 幅值、相位图

Fig. 11 0.25 Hz mode shape, amplitude and phasor diagram

5 结语

本文利用频率监测网 (FNET) 所测量的川渝电网频率，研究了川渝电网频率质量及频率动态特性，以及川渝电网低频振荡现象，主要结论如下：

1) 川渝电网的频率在均值指标、合格率指标和分布统计指标上都较为满意, 2011 年 12 月较 2007 年 12 月频率质量改善明显。

2) FNET 监测表明: 系统发生较大扰动时, 频率呈明显的时空分布, 离扰动点电气距离越近频率响应越快越激烈。

3) 对川渝电网扰动后频率恢复情况进行统计性分析, 得出系统频率在 4~5 min 内平均恢复率达 90%以上, 恢复能力好。

4) TLS-ESPRIT 算法可以很好地进行川渝电网扰动后的低频振荡模式辨识。利用该算法提取某次扰动下重庆、成都、攀枝花三地低频振荡的主导模式。结果显示: 攀枝花与成都在 0.25 Hz 模式下的相位差接近 180°, 两地在该模式下存在弱阻尼的低频振荡现象。

参考文献

- [1] 刘维烈. 电力系统调频与自动发电控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [2] 熊森. 实用变电所二次接线[M]. 北京: 科学普及出版社, 1984.
- [3] 赵渊, 吴小平, 谢开贵. 基于频率动态特性的电力系统频率失稳概率评估[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 212-220.
ZHAO Yuan, WU Xiao-ping, XIE Kai-gui. Probabilistic assessment for frequency instability of power system based on frequency dynamic characteristic[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 212-220.
- [4] 戚军, 江全元, 曹一家. 采用时滞广域测量信号的区间低频振荡阻尼控制器设计[J]. 电工技术学报, 2009, 24(6): 154-159.
QI Jun, JIANG Quan-yuan, CAO Yi-jia. Design of damping controller for inter-area low-frequency oscillation using time-delay wide-area measurements[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(6): 154-159.
- [5] 彭静, 卢继平, 汪洋, 等. WAMS 中的通信网络平台构建[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(12): 62-67.
PENG Jing, LU Ji-ping, WANG Yang, et al. Communication infrastructure design for WAMS[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(12): 62-67.
- [6] 张恒旭, 李常刚, 刘玉田, 等. 电力系统动态频率分析与应用研究综述[J]. 电工技术学报, 2010, 25(11): 169-176.
ZHANG Heng-xu, LI Chang-gang, LIU Yu-tian, et al. Reviews on power system dynamic frequency analysis and its application[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 25(11): 169-176.
- [7] LIU Yi-lu. A US-wide power systems frequency monitoring net-work[C] // Power Engineering Society General Meeting, 2006. IEEE, 2006: 8.
- [8] Kunder P. 电力系统稳定与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
- [9] GB/T15945-1995 电能质量电力系统频率允许偏差[S]. GB/T15945-1995 quality of electric energy supply-permissible deviation of frequency for power systems[S].
- [10] 高翔, 严正, 李端超, 等. 现代电网频率控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [11] Jaleeli N, Van S L. NERC'S new control performance standards[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1999, 14(3): 1092-1096.
- [12] 张忠林. 关于电网频率若干问题的浅析[J]. 东北电力技术, 1996(10): 16-20, 12.
- [13] Tsai S S, Zhang L, Phadke A G, et al. Study of global frequency dynamic behavior of large power systems[C] // IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, New York, USA, 2004, 1: 328-335.
- [14] 张恒旭, 刘玉田. 电力系统动态频率响应时空分布特征量化描述[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 64-70.
ZHANG Heng-xu, LIU Yu-tian. Quantitative description of space-time distribution features of dynamic frequency responses[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 64-70.
- [15] 王晓茹. 大规模电力系统频率动态分析[J]. 南方电网技术, 2010, 4(1): 11-17.
WANG Xiao-ru. Analysis of frequency dynamics in large-scale power systems[J]. Southern Power System Technology, 2010, 4(1): 11-17.
- [16] DONG Jing-yuan, ZUO Jian, WANG Lei, et al. Analysis of power system disturbances based on wide-area frequency measurements[C] // Power Engineering

- Society General Meeting, 2007. IEEE, 2007: 1-8.
- [17] 王德林, 王晓茹. 电力系统中机电扰动的传播特性分析[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 18-24.
WANG De-lin, WANG Xiao-ru. Characteristic analysis of electromechanical disturbance propagation for power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(19): 18-24.
- [18] Anderson P M, Fouad A A. Power system control and stability[M]. 2nd ed. Piscataway, NJ, USA: IEEE Press, 2003.
- [19] 倪以信. 动态电力系统的理论和分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
- [20] 张贤达. 现代信号处理[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002: 119-125.
- [21] 王辉, 苏小林. Prony 算法的若干改进及其在低频振荡监测中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 140-145.
WANG Hui, SU Xiao-lin. Several improvements of Prony algorithm and its application in monitoring low-frequency oscillations in power system[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(12): 140-145.
- [22] 董超, 刘涤尘, 廖清芬, 等. 基于数学形态学滤波技术和 TLS-ESPRIT 算法的低频振荡模式辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 114-118.
DONG Chao, LIU Di-chen, LIAO Qing-fen, et al. Research on identifying low frequency oscillation modes based on mathematical morphology filtering technique and TLS-ESPRIT algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 114-118.
- [23] 国家电网公司. 国家电网公司 750 kV 输变电示范工程建设总结试验调试分册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.

收稿日期: 2013-06-27; 修回日期: 2013-08-06

作者简介:

刘凯(1989-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统自动化;

刘克天(1980-), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统频率稳定分析与控制; E-mail: liuketian@tom.com

王晓茹(1962-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统保护和安全稳定控制方面的教学与研究工作。