

基于 WAMS 量测数据的低频振荡机理分析

杨东俊^{1,2}, 丁坚勇¹, 周宏^{1,2}, 董明齐²

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北省武汉市 430071; 2. 华中电网有限公司技术中心, 湖北省武汉市 430077)

摘要: 正确认识电网低频振荡的产生机理, 对预防和控制低频振荡的产生和传播具有重要意义。针对华中电网广域测量系统(WAMS)记录的一次区域间低频振荡事件, 采用 Prony 方法分析振荡各阶段特征, 并结合电网历史小干扰事件频率分布统计情况, 应用强迫振荡理论说明振荡的产生机理。分析结果表明, 采用强迫振荡理论能够对本次振荡各阶段的现象作出合理的解释, 迅速找到并切除扰动源是抑制此类低频振荡的有效措施。

关键词: 电力系统稳定; 广域测量系统; 低频振荡; 强迫振荡

中图分类号: TM712

0 引言

近年来, 随着中国电网互联规模的不断扩大, 区域间的低频振荡现象越来越频繁, 已逐渐成为威胁电网安全稳定运行的重要因素之一^[1-2]。对于低频振荡的机理存在多种解释, 其中理论上较为完善且应用较多的是 1969 年 Demello 提出的负阻尼机理^[3], 认为低频振荡的原因是由于励磁系统放大倍数的增加, 产生了负阻尼作用, 抵消了系统固有的正阻尼, 使得系统的总阻尼很小或为负。负阻尼机理也是当前电网中电力系统稳定器(PSS)设计与布置普遍采用的理论依据^[4-6]。

2008 年华中电网广域测量系统(wide area measurement system, WAMS)记录到一次低频振荡事件, 此次振荡波及范围广泛, 河南、湖北、湖南、江西、重庆等省市均同时监测到振荡波形。目前, 华中电网大型机组普遍安装了 PSS, 根据振荡近期运行方式计算结果, 在小干扰稳定计算中没有发现弱阻尼振荡模式, 采用常规的电力系统负阻尼振荡理论难以解释此次振荡产生的机理。

强迫振荡理论对一些非负阻尼功率振荡有较好的解释, 此类理论认为: 当系统受到持续周期性功率扰动的频率接近系统功率振荡的固有频率时, 会引起大幅度的功率振荡, 扰动所引起的响应不仅与电力系统本身的特性有关, 也与扰动的变化规律有关^[7-10]。目前, 专家学者们从多种不同的角度研究强迫振荡产生的原因, 例如: 文献[11-13]分别以汽轮机和锅炉扰动为扰动源分析引发强迫性共振低频振荡的机理; 文献[14]从能量角度的共振机理分析

电力系统低频振荡等。

本文基于 WAMS 的测录数据, 应用强迫性振荡理论, 结合电网历史小干扰事件频率分布统计情况和振荡波形的 Prony 分析, 分析电网低频振荡特征, 说明振荡机理, 为预防和抑制此类低频振荡事件、保障电网的安全稳定运行提供参考。

1 强迫振荡理论

1.1 小扰动方程及其特性

对于单机无穷大系统, 发电机采用经典二阶模型, 将转子运动方程在工作点附近线性化可得到二阶常系数微分方程如下:

$$M\Delta\ddot{\delta} + D\Delta\dot{\delta} + K\Delta\delta = \Delta P_m \quad (1)$$

式中: M 为转子惯性常数; D 为发电机阻尼系数; K 为发电机同步转矩系数; δ 为发电机功角; ΔP_m 为机械功率变化。

设 ΔP_m 受持续的周期性扰动, $\Delta P_m = P_0 \cos \omega t$, P_0 为扰动幅值, ω 为扰动频率; 令系统自然振荡频率 $\omega_n = \sqrt{K/M}$, 阻尼比 $\xi = D/(2\omega_n M)$; 同时代入式(1), 并进行标准化处理可得:

$$\Delta\ddot{\delta} + 2\xi\omega_n\Delta\dot{\delta} + \omega_n^2\Delta\delta = \frac{P_0}{M}\cos \omega t \quad (2)$$

微分方程通解为:

$$\Delta\delta_1(t) = A_0 e^{-\xi\omega_n t} \cos(\omega_d t + \varphi_0) \quad (3)$$

式中: $\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2}$; A_0 和 φ_0 是由初始条件决定的 2 个积分常数。 $A_0 e^{-\xi\omega_n t}$ 为随时间变化的振幅, 若系统受到扰动后, ξ 为负数则呈增幅振荡, ξ 为正数则呈减幅振荡。

微分方程的特解为:

$$\Delta\delta_2(t) = \frac{P_0}{M\sqrt{(\omega_n^2 - \omega^2)^2 + 4\xi^2\omega_n^2\omega^2}} \cos(\omega t - \varphi) \quad (4)$$

式中： $\varphi = \arctan \frac{2\xi\omega_n\omega}{\omega_n^2 - \omega^2}$ ；微分方程特解表示稳态振荡阶段的振荡特性，其振荡频率与扰动频率相同。

方程(2)的解可表示为：

$$\Delta\delta(t) = \Delta\delta_1(t) + \Delta\delta_2(t) \quad (5)$$

根据强迫振荡理论，动态系统在受到周期性强迫振动前以自然振荡频率 ω_n 进行自由振动，周期性强迫振动力图以它的频率 ω 强加于系统，这种情况下实际运动是 ω 及 ω_n 两个频率振动的某种叠加，即为式(5)所体现的物理性质^[15]。在初始阶段，自由振动和强迫振动都是突出的，该阶段即为瞬态阶段。然而，在足够长的时间以后，由于系统阻尼的存在，自由振动将逐渐消失，唯一存在的运动就是强迫振动，它将以频率 ω 无衰落地持续振动，这个阶段即为稳态振荡阶段。以下进一步阐述稳态振荡阶段与瞬态振荡阶段的性质。

1.2 稳态振荡阶段的特性

微分方程的特解(式(4))体现了强迫振荡稳态阶段的特性，其振荡的特征波形如图1所示。

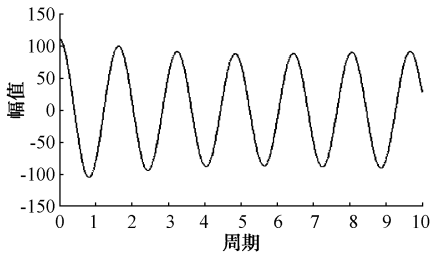


图1 稳态振荡阶段特征曲线
Fig.1 Characteristic curve of oscillation in steady-state phase

式(4)的幅值为：

$$F = \frac{P_0}{K\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4\xi^2\frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \quad (6)$$

以 P_0/K 表示扰动产生的静位移，振荡放大倍数 $N = F/(P_0/K)$ ，则有：

$$N = \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{\omega^2}{\omega_n^2}\right)^2 + 4\xi^2\frac{\omega^2}{\omega_n^2}}} \quad (7)$$

式(7)反映了当扰动频率接近自然振荡频率时所产生的扰动放大效果。例如：自然振荡频率 $\omega_n = 0.7 \text{ Hz}$ ，阻尼比 $\xi = 0.1$ ，可得到如图2所示的共振曲线。

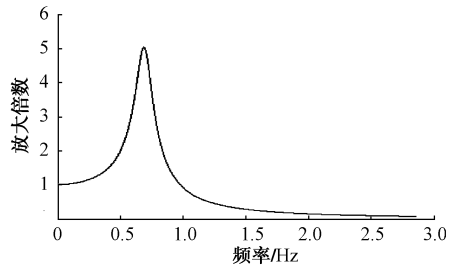


图2 小扰动共振曲线
Fig.2 Resonance curve of a small disturbance

图2曲线表明，自然振荡频率附近的小扰动具有较高的放大倍数，同时由式(7)可以看出，阻尼比越大，放大倍数则越小。

1.3 瞬态振荡阶段的特性

如上所述，瞬态振荡阶段的特性是由微分方程(2)的通解和特解共同决定的，有阻尼状态下，强迫振荡方程的完全解为：

$$\Delta\delta(t) = A_0 e^{-\xi\omega_n t} \cos(\omega_d t + \varphi_0) + F \cos(\omega t - \varphi) \quad (8)$$

图3显示有阻尼情况下扰动频率与自然振荡频率有差异情况下的振荡特征波形，它的起始阶段呈现拍频特征，随着拍频逐渐衰减最终进入等幅振荡的稳态振荡阶段。

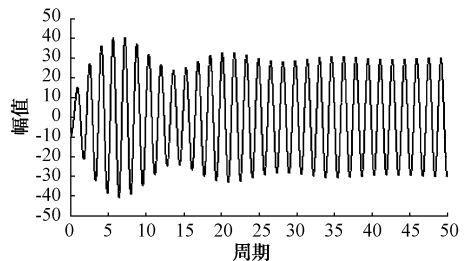


图3 有阻尼振荡曲线 ($\omega \approx \omega_n$)
Fig.3 Curves of oscillation with damping ($\omega \approx \omega_n$)

2 WAMS 实测低频振荡现象分析

2.1 振荡现象描述

2008 年华中电网 WAMS 记录了一次低频振荡，湖北、河南、湖南、江西省均显示有 100 MW ~ 200 MW 左右的功率波动，频率约 0.6 Hz ~ 0.7 Hz，振荡持续时间近 2 min，此后振荡自然平息。当时 220 kV 及以上系统无任何异常操作。

根据调度记录，振荡起始和结束时间与河南豫西地区 110 kV 某电厂小系统非同期并网和解列的时间完全吻合，初步认定该小系统非同期并网是引起华中电网功率振荡的主要原因。

2.2 振荡数据的初步分析

图4为河南500 kV嵩获一线有功功率振荡波形,振荡波形大致可以分为3个阶段:瞬态阶段、稳态阶段、衰减阶段。瞬态阶段存在明显拍频;而后,逐步过渡到稳态阶段;稳态阶段持续时间较长;衰减阶段时间非常短,几乎无明显衰减过程。

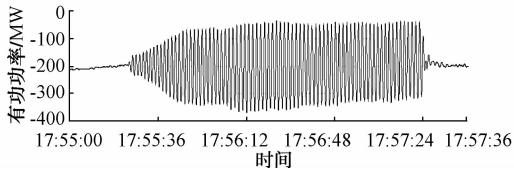


图4 河南电网嵩获一线有功功率振荡曲线
Fig. 4 Curve of power oscillation on Songhuo No. 1 line in Henan power grid

文献[16]指出,日常小扰动在本质上是对系统的随机激励,在系统响应中包含其动态行为的特征信息,对这些动态响应的特征进行统计,可以找出系统的固有振荡模式。根据WAMS对华中电网小扰动事件监测统计结果,振荡事件当月华中电网小扰动频率分布如图5所示,扰动频率的高峰出现在0.5 Hz~0.7 Hz之间,该次振荡主导频率正好在此范围内。由此判断,此次低频振荡的扰动频率与电网固有振荡频率的部分模式接近,具有产生强迫振荡的可能性。

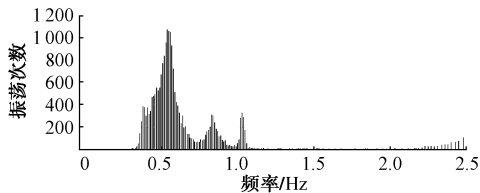


图5 华中电网小扰动频率分布
Fig. 5 Distribution diagram of small interfering frequency in Central China power grid

2.3 振荡的主要特征

依据上述测量数据及其初步分析结果,可以得出此次低频振荡具有以下特征:

- 1) 根据振荡时间判断,本次振荡是由电厂小系统110 kV非同期并网所引起;
- 2) 振荡传播范围广泛,华中各省(市)500 kV电网均不同程度监测到周期性同步振荡;
- 3) 不同地区稳态阶段的振荡主导频率基本相同,振荡主导频率与电网部分固有振荡频率模式接近;
- 4) 振荡平息速度快,随着扰动源切除,各地区500 kV层面的功率振荡均迅速平息。

3 实测波形的理论分析

在并网前小系统处于孤网运行状态,与河南主网没有电气联系,并网和其后的近2 min振荡过程小系统仅通过单回110 kV线路与河南主网及华中电网相连,系统模型可以等值为单机无穷大系统模式,理论上可以采用式(1)的模型进行近似分析。在华中WAMS的监测点中,嵩获一线离振荡源的电气距离相对较近,受其他因素干扰较小。以下进一步分析嵩获一线的振荡波形。

通过图4的测录波形可以看出,振荡波形瞬态阶段出现了明显的拍频,进入稳态阶段后其振荡幅值较为稳定,其现象与图3有阻尼强迫振荡($\omega \approx \omega_n$)所表现出的特征一致。

从式(4)所表述的稳态振荡阶段性质可以看出,当 $P_0=0$ 时,有 $\Delta\delta_2(t)=0$,说明在稳态阶段扰动源切除时,振荡将迅速平息;与此次振荡事件中,当引起扰动的小系统切除时,WAMS测录波形表现出衰减阶段时间非常短的现象吻合。

在上述理论分析中,对于电网的自由振动是由单一的固有自然振荡频率 ω_n 所表征,而在实际系统中,自由振动通常都有许多不同频率的振动方式,因此在振荡的初始阶段,理论振荡波形与实际波形会存在一定的差异。

4 振荡波形的 Prony 分析

研究低频振荡首先需要得到振荡信号的振荡特征,主要是振荡频率和衰减。在确定振荡特征方面,Prony算法是一种较好的分析方法。Prony算法能根据采样值直接估算信号频率、衰减和初相位,采用Prony算法进行实测数据的处理可以得到准确的实测振荡模式和特征[17]。

本文采用WAMS高级应用功能中的Prony分析方法分别对嵩获一线有功功率振荡的瞬态阶段、稳态阶段、衰减阶段的WAMS实测波形进行拟合,拟合结果与实测结果一致,说明拟合曲线的特征可以反映实测振荡波形的特征。然后,根据得到的特征值进一步分析振荡机理。本次振荡数据采样间隔为0.02 s,各阶段的拟合曲线与实测曲线吻合(见附录A)。各阶段Prony分析前5个振荡模式如下。

4.1 振荡各阶段 Prony 分析结果

4.1.1 瞬态阶段 Prony 分析结果

取振荡前40 s时间瞬态阶段实测数据进行Prony分析,分析结果如表1所示。

表 1 瞬态阶段 Prony 分析结果
Table 1 Prony analysis results of transient phase

频率分量	频率/Hz	幅值/MW	占比	阻尼比	相位/(°)
f_1	0.64	17.48	0.87	-0.02	-128.00
f_2	0.68	54.30	0.58	0.00	-106.60
f_3	0.65	103.91	0.12	0.06	80.16
f_4	1.29	4.54	0.03	0.00	137.32
f_5	1.30	18.89	0.01	0.05	-29.91

4.1.2 稳态阶段 Prony 分析结果

在振荡趋于稳态阶段取 40 s 数据进行 Prony 分析,分析结果如表 2 所示。

表 2 稳态阶段 Prony 分析结果
Table 2 Prony analysis results of steady-state phase

频率分量	频率/Hz	幅值/MW	占比	阻尼比	相位/(°)
f_1	0.63	180.65	1.10	0.00	5.76
f_2	0.63	149.94	0.46	0.01	127.18
f_3	1.26	4.75	0.05	0.00	115.29
f_4	0.67	143.75	0.04	0.13	-148.19
f_5	0.88	13.67	0.02	0.04	116.11

4.1.3 衰减阶段 Prony 分析结果

在振荡衰减阶段取 10 s 数据进行 Prony 分析,分析结果如表 3 所示。

表 3 衰减阶段 Prony 分析结果
Table 3 Prony analysis results of decay phase

频率分量	频率/Hz	幅值/MW	占比	阻尼比	相位/(°)
f_1	0.93	157.47	0.57	0.10	67.73
f_2	0.72	280.61	0.49	0.27	-96.07
f_3	0.53	55.55	0.46	0.08	-53.25
f_4	1.22	92.92	0.22	0.13	138.05
f_5	0.42	13.34	0.18	0.06	-1.12

4.2 各阶段特征值分析

1)根据瞬态振荡阶段分析结果,占比最高的频率分量为 0.64 Hz,0.68 Hz 和 0.65 Hz,其中 0.64 Hz 和 0.68 Hz 的阻尼比都很小。根据强迫振荡理论,在此阶段自由振荡频率和强迫振荡频率在瞬态阶段都较为突出。

2)根据稳态阶段分析结果,0.63 Hz 为唯一的主导振荡频率,占比最大,阻尼比很小,呈无衰减地持续振荡状态。

3)在振荡衰减阶段,扰动源已经切除,从分析结果可以看到,振荡频率中已经没有 0.6 Hz~0.7 Hz 的频率分量,并且由于系统本身阻尼较强,衰减阶段时间非常短,振荡迅速平息。

5 结语

中国当前大型区域电网在规划和建设过程中对系统负阻尼引起的低频振荡已有考虑,如采用 PSS

等技术手段提高系统阻尼,对抑制低频振荡的产生起到了较好的效果。但是,由持续周期性扰动引起的强迫型低频振荡由于其产生原因多样、传播迅速、扩散范围广,以及即使系统本身阻尼特性较好,由于其共振特性也可能产生较大倍数的功率放大等特点,使调度部门难以预测和及时作出准确判断和处理,是电网安全稳定的潜在威胁。通过对本次振荡的分析可以得到以下结论:

1)根据对 WAMS 测录数据的理论分析结果表明,采用强迫振荡理论能够对本次振荡各阶段的现象作出合理的解释。

2)对 WAMS 监测结果进行长期跟踪分析,有助于调度部门增强对小扰动引起振荡的防范意识和提高振荡发生时的判断、处理能力,对保障电网的安全稳定运行具有较高的参考价值。

3)通过实测结果及其理论分析可以看到,对于强迫振荡引发的低频振荡最有效的处理措施是迅速找到并切除扰动源,因此如何对扰动源作出及时、准确的判断将是值得进一步研究的课题。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 王梅义,吴竟昌,蒙定中. 大电网系统技术, 2 版. 北京:中国电力出版社,1995.
- [2] 李丹,苏为民,张晶,等. “9·1”内蒙古西部电网振荡的仿真研究. 电网技术,2006,30(6):41-47.
LI Dan, SU Weimin, ZHANG Jing, et al. Simulation study on West Inner Mongolia power grid oscillations occurred on September 1st, 2005. Power System Technology, 2006, 30(6): 41-47.
- [3] DEMELLO F. Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(4): 316-329.
- [4] 倪以信,陈寿孙,张宝霖. 动态电力系统的理论和分析. 北京:清华大学出版社,2002.
- [5] KUNDUR P. Power system stability and control. New York, NY, USA: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [6] 方思立,朱方. 电力系统稳定器的原理及其应用. 北京:中国电力出版社,1996.
- [7] 袁季修. 电力系统安全稳定控制. 北京:中国电力出版社,1996.
- [8] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论. 电网技术,2006, 30(10):29-33.
TANG Yong. Fundamental theory of forced power oscillation in power system. Power System Technology, 2006, 30(10): 29-33.
- [9] 王铁强,贺仁睦,徐东杰,等. 电力系统低频振荡机理的研究. 中国电机工程学报,2002,22(2):21-25.

- WANG Tieqiang, HE Renmu, XU Dongjie, et al. The mechanism study of low frequency oscillation in power system. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 21-25.
- [10] VOURNAS C D, KRASSAS N, PAPADIAS B C. Analysis of forced oscillations in a multimachine power system// Proceedings of International Conference on Control, March 25-28, 1991, Edinburgh, UK.
- [11] 韩志勇, 贺仁睦, 徐衍会. 汽轮机压力脉动引发电力系统低频振荡的共振机理分析. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 47-51.
HAN Zhiyong, HE Renmu, XU Yanhui. Study on resonance mechanism of power system low frequency oscillation induced by turbo-pressure pulsation. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 47-51.
- [12] 徐衍会, 贺仁睦, 韩志勇. 电力系统共振机理低频振荡扰动源分析. 中国电机工程学报, 2007, 27(17): 83-87.
XU Yanhui, HE Renmu, HAN Zhiyong. The cause analysis of turbine power disturbance inducing power system low frequency oscillation of resonance mechanism. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(17): 83-87.
- [13] 韩志勇, 贺仁睦, 徐衍会. 由汽轮机压力脉动引发的电力系统共振机理低频振荡. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 14-18.
HAN Zhiyong, HE Renmu, XU Yanhui. Power system low frequency oscillation of resonance mechanism induced by turbo-pressure pulsation. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 14-18.
- [14] 韩志勇, 贺仁睦, 徐衍会, 等. 基于能量角度的共振机理电力系统低频振荡分析. 电网技术, 2007, 31(8): 14-16.
- HAN Zhiyong, HE Renmu, XU Yanhui, et al. Analysis on power system low frequency oscillations originated in resonance mechanism from viewpoint of energy. Power System Technology, 2007, 31(8): 14-16.
- [15] 弗伦奇 A P. 振动与波. 徐绪笃, 译. 北京: 人民教育出版社, 1981.
- [16] 邱夕兆, 于占勋, 雷鸣, 等. 山东电网基于 WAMS 的低频振荡统计与评估. 电力系统自动化, 2008, 32(6): 95-98.
QIU Xizhao, YU Zhanxun, LEI Ming, et al. WAMS based statistics and assessment of low frequency oscillation in Shandong power grid. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(6): 95-98.
- [17] 王卫国, 贺仁睦, 王铁强, 等. 分析电力系统低频振荡的试验方法. 电力系统自动化, 2001, 25(22): 28-30.
WANG Weiguo, HE Renmu, WANG Tieqiang, et al. Experimental method for analyzing power system low frequency oscillation. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(22): 28-30.

杨东俊(1975—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统及其自动化. E-mail: ydj@cc.sgcc.com.cn

丁坚勇(1957—), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统规划及可靠性。

周宏(1961—), 男, 博士研究生, 教授级高级工程师, 主要研究方向: 电力企业战略规划及电网安全稳定。

Mechanism Analysis of Low-frequency Oscillation Based on WAMS Measured Data

YANG Dongjun^{1,2}, DING Jianyong¹, ZHOU Hong^{1,2}, DONG Mingqi²

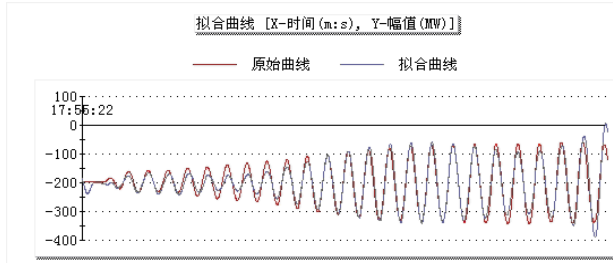
(1. Wuhan University, Wuhan 430071, China;

2. Technology Center of Central China Power Grid Co. Ltd., Wuhan 430077, China)

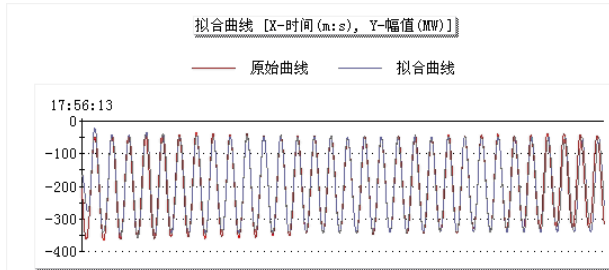
Abstract: A correct understanding of the mechanism of low frequency oscillation in the power grid is of great significance to the prevention and control of the production and dissemination of low-frequency oscillation. Based on an interregional low-frequency oscillation event in the Central China power grid recorded by the wide area measurement system (WAMS), the Prony method is used to analyze the characteristics of various stages of oscillation. Combining with the small interfering frequency distribution statistical analysis, the forced oscillation theory is used to explain the oscillation mechanism. The results show that forced oscillation theory is able to reasonably explain the phenomenon of this oscillation at all stages, and quickly locating and removing the disturbance source is an effective measure to suppress such low-frequency oscillations.

Key words: power system stability; WAMS; low-frequency oscillation; forced oscillation

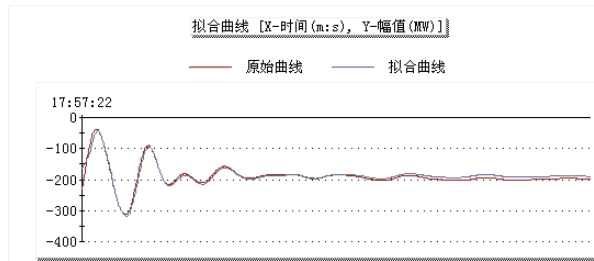
附录 A 振荡各阶段 Prony 拟合曲线和实测曲线对比



图A1 瞬态阶段拟合曲线和实测曲线对比
Fig.A1 Fitting curves versus actual curves of transient phase



图A2 稳态阶段拟合曲线和实测曲线对比
Fig.A2 Fitting curves versus actual curves of steady-state phase



图A3 衰减阶段拟合曲线和实测曲线对比
Fig.A3 Fitting curves versus actual curves of decay phase