

基于 WAMS 的电力系统受扰轨迹预测

宋方方^{1,2}, 毕天姝^{1,2}, 杨奇逊^{1,2}

(1. 华北电力大学电力系统保护与动态安全监控教育部重点实验室, 北京市 102206)

(2. 华北电力大学四方研究所, 北京市 102206)

摘要: 基于相量测量单元(PMU)上传的实时功角数据,应用曲线拟合理论,提出了一种电力系统事故后功角轨迹快速预测的新方法。该方法从一个简单电力系统调速控制模型出发,推导出了功角与时间关系的数学模型,即功角随时间呈正弦衰减变化。由此提出了利用三角函数曲线拟合技术,对功角受扰轨迹进行预测。对 IEEE 9 节点系统与华北电网进行了仿真计算,结果验证了该方法的有效性。此外,与多项式曲线拟合法的对比分析表明,该方法优于传统的多项式曲线拟合法,具有更好的预测效果。

关键词: 广域测量系统(WAMS); 轨迹预测; 功角; 曲线拟合; 电力系统

中图分类号: TM711; TM712

0 引言

随着“西电东送,全国联网”工程的实施,电网规模越来越大,结构也日益复杂;“厂网分开,竞价上网”的电力体制改革的推进、分布式电源的接入以及各种新型输电技术的采用也使得电网的动态行为更加复杂多变。这导致现代电力系统发生不可预测事故的概率更大。一旦发生事故,如果处理不及时或处理不当,将有可能造成大面积停电。由事故造成的暂态失稳是影响系统安全稳定运行、甚至导致大停电灾难的最重要的原因之一。1994 年至 2003 年间发生在美国的几次大停电都是有利的实证^[1]。因此,对现代电网来说,电力系统暂态稳定控制的研究仍是一项艰巨而有重要意义的工作。

由于事故后的网络拓扑、系统元件模型和参数很难实时获得,目前的紧急控制算法大多根据离线事故预想分析得到,无法考虑所有事故类型和系统各种运行方式。但在事故后,如果能够实时、正确地预测系统未来发展趋势,则有望在系统失稳之前,采取相应紧急控制措施来维持系统稳定。对电力系统关键量的轨迹预测是进行实时暂态稳定控制的一个首要前提。

广域测量系统(WAMS)的出现和通信技术的发展,为进行新一代大电网暂态稳定控制的研究注入了活力。WAMS 可以在同一参考时间下捕捉到互联大系统各点的实时动态过程,且数据更新速度

达到 ms 级,为电力系统全网数据的同步采集、实时记录、远距离传输和广域系统的受扰轨迹预测提供了可能。

近年来,基于 WAMS 的受扰后功角轨迹预测已成为国内外研究热点之一。文献[2-4]提出了基于多项式拟合^[2-3]和自回归^[4]的功角曲线外推方法;文献[5-10]提出了基于人工智能技术的预测方法;这些方法充分利用了 WAMS 提供的实时功角数据,原理简单,易于实现。然而,这些方法大多从经验出发,没有很好地从电力系统暂态稳定的机理上进行分析。文献[11-14]提出了另一种思路,即采用系统简化模型,利用相量测量单元(PMU)量测量不断修正该模型参数,达到快速预测的目的。这种方法考虑了系统的运行特性,对于功角轨迹的首摆变化趋势预测精度较高,但是该方法的假设条件严格,影响了它对实际系统(特别是负荷多变系统)的长期预测效果。

本文从系统调速器模型出发,推导功角-时间函数关系,提出一种基于三角函数系对功角受扰轨迹进行拟合预测的新方法,为电力系统紧急控制研究提供一些有益的探讨。

1 功角-时间函数关系的导出

WAMS 可实时同步测量全系统中各发电机的功角,这使如下思路可行,即构造一个能反映这些数据变化规律的函数,拟合故障后功角摇摆曲线,进而预测受扰轨迹。基于该思路,本文首先推导了故障后的功角-时间关系。

一个典型汽轮发电机的速度控制系统框图^[15]如图 1 所示。

收稿日期: 2005-09-20; 修回日期: 2006-02-15。

国家自然科学基金资助项目(50607005);教育部科学技术研究重点项目(106052);新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0216);长江学者和创新团队发展计划(IRT0515)。

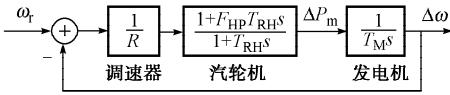


图1 典型汽轮发电机速度控制系统

Fig. 1 Block diagram of typical speed control system of steam generator

用纯增益 $K_G = 1/R$ 表示调速器,用发电机的总惯量表示发电机。汽轮机是串联复合单再热型,它的传递函数可近似表示为:

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta V_{cv}} = \frac{1 + F_{HP} T_{RH} s}{1 + T_{RH} s}$$

式中: ΔT_m 为汽轮机转矩扰动值; ΔV_{cv} 为控制阀位置扰动值; F_{HP} 为由高压涡轮机产生的功率在总汽轮机功率中所占比例; T_{RH} 为再热器的时间常数; s 为拉普拉斯算子。

汽轮发电机的传递函数可用下式表示:

$$\frac{\Delta \omega}{\omega_r} = \frac{1 + F_{HP} T_{RH} s}{T_{RH} T_M R s^2 + (T_M R + F_{HP} T_{RH}) s + 1} \quad (1)$$

式中: T_M 为发电机机械起动时间; ω_r 为发电机转速的参考值; $\Delta \omega$ 是发电机实际转速与参考值的偏差。

因此,

$$\Delta \omega = \frac{(1 + F_{HP} T_{RH} s) \omega_r}{T_{RH} T_M R s^2 + (T_M R + F_{HP} T_{RH}) s + 1} \quad (2)$$

对式(2)进行拉普拉斯反变换,可得:

$$\Delta \omega = \sqrt{A^2 + B^2} e^{-at} \sin(bt + c) \quad (3)$$

式中:

$$A = \frac{\omega_r}{b} - \frac{(T_M R + F_{HP} T_{RH}) F_{HP} T_{RH} \omega_r}{2 T_{RH} T_M R b}$$

$$B = F_{HP} T_{RH} \omega_r$$

$$a = \frac{T_M R + F_{HP} T_{RH}}{2 T_{RH} T_M R}$$

$$b = \frac{\sqrt{4 T_{RH} T_M R - (T_M R + F_{HP} T_{RH})^2}}{2 T_{RH} T_M R}$$

$$c = \arctan \frac{B}{A}$$

又由转子运动方程可知:

$$\frac{d\delta}{dt} = \Delta \omega \quad (4)$$

则有:

$$\begin{aligned} \delta &= \int \Delta \omega dt + \delta_0 = \\ &\int \sqrt{A^2 + B^2} e^{-at} \sin(bt + c) dt + \delta_0 = \\ &D e^{-at} \sin(bt + h) + k \end{aligned} \quad (5)$$

式中: D , h 和 k 均为常数。

由式(5)可以看出,发电机功角随时间变化的轨迹是一条衰减的三角函数曲线。

目前,随着控制技术的发展,调速控制系统性能

日益改善,失灵区缩小,各环节的时间常数减少,因此,研究调速控制系统对电力系统暂态稳定性的研究具有重要意义。通常,电力系统中大扰动的暂态仿真只有十几秒的范围,可以假设主蒸汽压力在这个过程中保持不变,汽轮机输出功率由其汽门开度控制,汽轮机的汽门开度由调速器控制^[16];而且,在这个过程中发电机转速变化不会像电气量那样变化剧烈,据 PMU 现场实测数据得知,其变化一般不超过 0.2%。因此,在电力系统暂态稳定分析中,一般可以采用速度控制系统的线性化模型。

这个推导结果也可以用实际的物理现象来验证。互联同步发电机之间是通过彼此的相互作用力保持同步的。在稳态条件下,每台发电机的输入机械转矩和输出电磁转矩平衡,转速保持不变。如果系统受到干扰,这种平衡被破坏,每台发电机的转子将按旋转体的运动定律加速或减速。在它们各自加速和减速过程中,由于机械转矩与输出转矩相比时大时小,因此它们的转速也时增时减,进而功角也呈振荡形式。与此同时,每台发电机之间也存在相互作用力,若某台发电机一时比其他发电机转得快,则它的转子位置相对于那些转得慢的发电机功角会超前。按功角特性关系,由此所产生的角度差将把较慢的发电机所带的部分负荷转移给较快的发电机^[15],从而会使快的机组减速,慢的机组加速。总之,从这些物理现象上看,每台发电机的功角随时间呈振荡趋势。

因此,本文选取三角函数来拟合发电机功角受扰轨迹,进而预测功角的未来发展趋势。

2 在线功角轨迹预测算法

根据数学理论,一个周期函数 $f(t)$ 只要满足狄利克雷条件^[17],则可以展开成三角多项式形式的傅里叶级数,即

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos kt + b_k \sin kt \quad (6)$$

由前面的分析可知,功角摇摆轨迹是一条衰减的三角函数曲线,能够满足狄利克雷条件。因此,总可以用有限形式的三角多项式对功角受扰曲线进行拟合:

$$\hat{\delta}(t) = \sum_{k=0}^{\infty} a_k \cos kt + b_k \sin kt \quad (7)$$

式中: $\hat{\delta}(t)$ 为功角的估计值; n 为三角函数的拟合阶数; a_k , b_k 为三角函数系数。

从式(7)可知,拟合的关键是确定三角函数系数 a_k 和 b_k 。由于 PMU 子站每隔 10 ms 或 20 ms 上传一个发电机内电势相角,即发电机的绝对功角 δ_i ,因此,通过不断记录每次数据,可以得到受扰后一段时

间内每台发电机功角数据,即受扰后功角的历史数据和当前数据可通过 PMU 获得。式(7)中三角函数系数就是利用这些历史数据,通过最小二乘算法来计算的。

3 仿真结果

本文提出的算法经过了多个系统、多个不同地点和多种故障类型的仿真实验,本文只给出 IEEE 9 节点系统和华北电网的部分结果。

3.1 IEEE 9 节点系统仿真算例(算例 1)

本文所提出的算法利用 IEEE 9 节点典型系统进行了仿真验证,系统结构如图 2 所示。

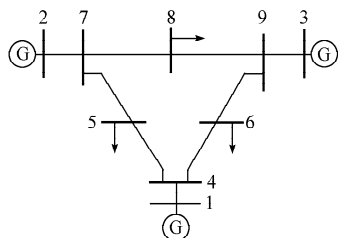


图 2 IEEE 9 节点系统
Fig. 2 IEEE 9-bus system

假设故障为线路 5-7 的首端发生三相短路,故障的持续时间分别为 0.1 s 和 0.3 s。三角函数拟合中各系数的求解以及对轨迹的预测是由 MATLAB 编程实现的。本文把从 BPA 仿真得到的功角数据当成实际从 PMU 上测量得到的数据,仿真步长为 10 ms(即 $\Delta t=10$ ms)。

故障切除时间分别为 0.1 s 和 0.3 s 时,相应的系统状态分别为稳定和失稳。在验证中,采用了故障发生后的 30 个历史数据来计算三角函数系数。拟合阶数 n 取 2。随着时间窗的滚动,利用前 30 个数据可不断地预测后面 30 个数据。一些故障后功角轨迹预测曲线如图 3~图 6 所示。

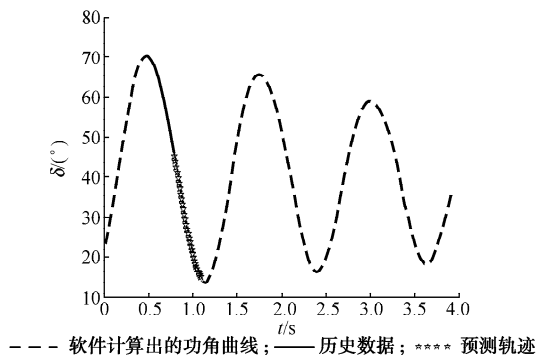


图 3 0.5 s 采样时受扰曲线拟合结果
Fig. 3 Result of perturbed trajectory fitting sampling at 0.5 s

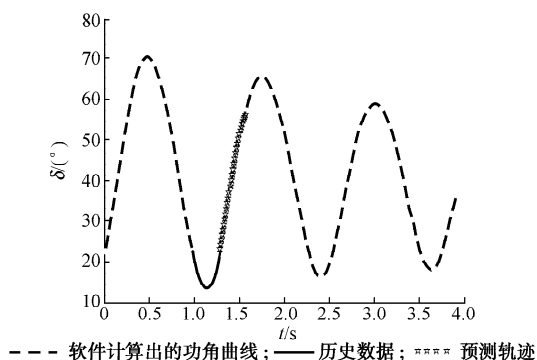


图 4 1 s 采样时受扰曲线拟合结果
Fig. 4 Result of perturbed trajectory fitting sampling at 1 s

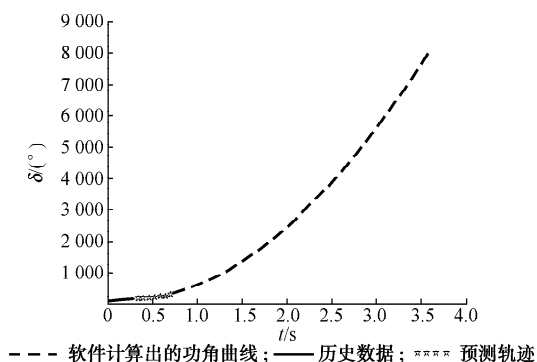


图 5 0 s 采样时受扰曲线拟合结果(算例 1)
Fig. 5 Result of perturbed trajectory fitting sampling at 0 s in case 1

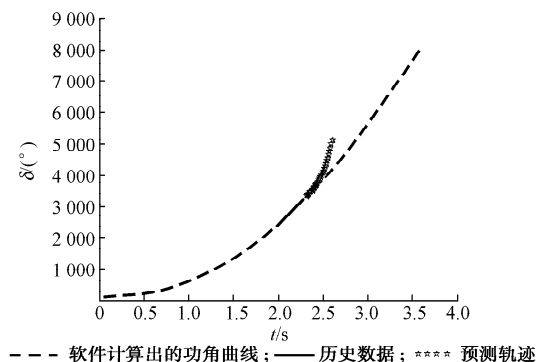


图 6 2 s 采样时受扰曲线拟合结果(算例 1)
Fig. 6 Result of perturbed trajectory fitting sampling at 2 s in case 1

上述各图中的曲线均以故障切除时刻为 0 时刻绘制(下同)。虚线代表由 BPA 计算出的功角曲线(即功角的实测值),实线是算法所需的历史数据,星线是算法预测出来的受扰后轨迹。

图 3、图 4 是故障持续时间为 0.1 s 时的功角摇摆曲线。该算例系统稳定,因此功角的摇摆变得越来越小。从图中可以看出,应用滚动时间窗算法,即使是在曲线的拐点处,未来每个时间点的预测结果的精度都比较高。因此,该算法可以更有效地应用

于多摆失稳的情况。

图5、图6是故障持续时间为0.3 s时的部分有代表性的功角摇摆曲线。从图中可以看出,预测精度比图3、图4中的要低。原因在于在该算例中,系统是一摆失稳,主要是由于系统同步转矩不足造成转子角非周期滑移,功角一直不断增大,曲线中含有的非周期分量很大,而前面稳定算例中,转子角增加到一最大值后减少,并在系统阻尼的作用下做减幅振荡直到稳定状态,曲线中含有的周期分量比较大。三角函数系拟合法更适合于对周期信号的拟合,因此稳定算例中的曲线更适合应用三角函数系拟合。当遇到这类一摆失稳的算例时,可适当牺牲预测长度来保证预测精度。

3.2 华北电网仿真算例(算例2)

华北电网结构比较复杂,地域广阔,所以故障后系统中的各个发电机功角轨迹更加多变。本文在不同短路地点进行了多次故障仿真验证。这里以大同—西万之间的双回线上的故障仿真计算作为示例。假设该双回线的一回首端发生三相接地短路,经过0.1 s后故障切除,则大同站某台发电机功角的仿真结果如图7、图8所示。

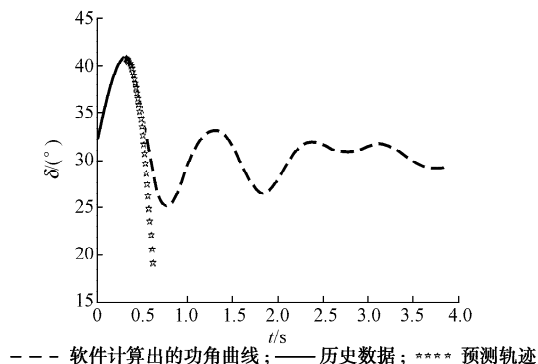


图7 0 s采样时受扰曲线拟合结果(算例2)

Fig. 7 Result of perturbed trajectory fitting sampling at 0 s in case 2

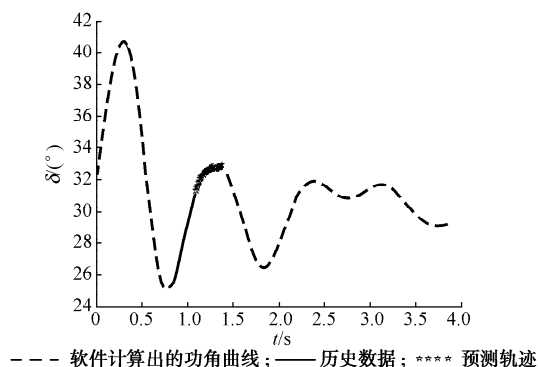


图8 0.8 s采样时受扰曲线拟合结果(算例2)

Fig. 8 Result of perturbed trajectory fitting sampling at 0.8 s in case 2

从图中可以看出,三角函数拟合法对于功角轨迹中的摇摆预测准确度较高,对于实际复杂系统也是如此。

3.3 多项式曲线拟合法

为更好地说明所提出的三角函数拟合技术的有效性,给出了在与3.1节相同的仿真系统和扰动情况下,采用多项式曲线拟合的结果,以便比较。

图9、图10是故障持续时间为0.1 s时采用多项式曲线拟合的功角摇摆曲线。从图中可以看出,图9、图10的预测精度明显比图3、图4中的低。

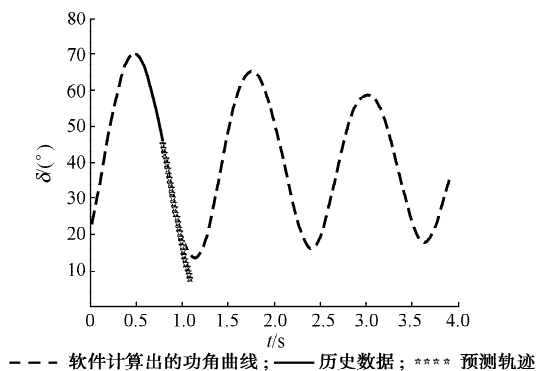


图9 0.5 s采样时受扰曲线多项式拟合结果

Fig. 9 Result of perturbed trajectory polynomial fitting sampling at 0.5 s

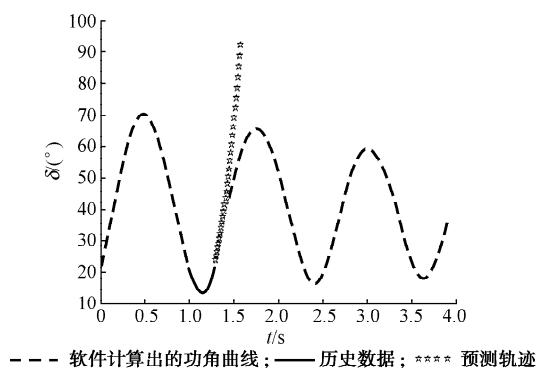


图10 1 s采样时受扰曲线多项式拟合结果

Fig. 10 Result of perturbed trajectory polynomial fitting sampling at 1 s

图11、图12是故障持续时间为0.3 s时采用多项式曲线拟合的功角摇摆曲线。从图中可以看出,图11、图12中的预测趋势在一些情况下(如图12)是不正确的,而图5、图6中的预测趋势是正确的。

因此,可以看出,利用三角函数拟合技术,可以预测大约300 ms的未来功角数据,应用时间滚动窗算法,能正确预测多摆失稳;另外,将图3~图6和图9~图12进行比较发现,采用三角函数拟合曲线比多项式拟合曲线精度更高,因此该算法更适于对系统受扰轨迹的预测。

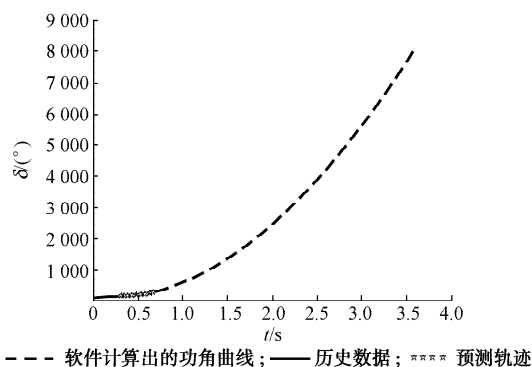


图 11 0 s 采样时受扰曲线多项式拟合结果

Fig. 11 Result of perturbed trajectory polynomial fitting sampling at 0 s

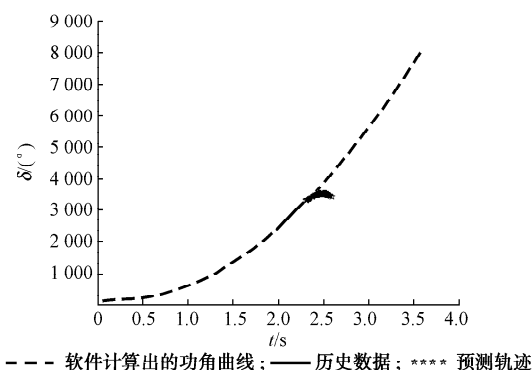


图 12 2 s 采样时受扰曲线多项式拟合结果

Fig. 12 Result of perturbed trajectory polynomial fitting sampling at 2 s

4 结语

本文对电力系统暂态过程中的调速控制系统模型进行了详细分析,由此推导说明了功角-时间关系是一条衰减的三角函数曲线,从而提出了一种基于三角函数系拟合预测电力系统受扰轨迹的新方法。将该方法和多项式拟合法的进行了对比分析,结果表明:所提出的方法预测精度更高,更能满足电力系统暂态轨迹快速预测的要求,为进一步研究电力系统暂态稳定的判别和实时闭环稳定控制奠定了基础。

参考文献

- [1] 程浩忠,陈章潮,谢小荣,等. 暂态失稳引起大停电的可能性与对策研究. 电力系统自动化,1998,22(9):50-54.
CHENG Haozhong, CHEN Zhangchao, XIE Xiaorong, et al. Countermeasure and possibility of blackout from transient instability. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(9): 50-54.
- [2] 吕志来,张保会,哈恒旭. 基于 PMU 的电力系统暂态稳定实时快速预测的研究. 继电器,2000,28(1):3-5.
LÜ Zhilai, ZHANG Baohui, HA Hengxu. Real-time transient

stability prediction for multi-machine power system based on phasor measurement units. Relay, 2000, 28(1): 3-5.

- [3] 苏建设,陈陈. 基于 GPS 同步量测量的时间序列法暂态稳定预测. 电力自动化设备,2001,21(9):7-9.
SU Jianshe, CHEN Chen. Transient stability prediction using time-series based on GPS synchronized measurement. Electric Power Automation Equipment, 2001, 21(9): 7-9.
- [4] 郭强,刘晓鹏,吕世荣,等. GPS 同步时钟用于电力系统暂态稳定性预测和控制. 电力系统自动化,1998,22(6):11-13.
GUO Qiang, LIU Xiaopeng, LÜ Shirong, et al. Application of GPS synchronized clock to power system transient stability predictand and control. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(6): 11-13.
- [5] 刘玉田,林飞. 基于相量测量技术和模糊径向基网络的暂态稳定性预测. 中国电机工程学报,2000,20(2):19-23.
LIU Yutian, LIN Fei. Application of PMU and fuzzy radial basis function network to power system transient stability prediction. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(2): 19-23.
- [6] 苏建设,廖培金,周佃民. 基于 GPS 同步量测量的模糊神经网络用于暂态稳定预测研究. 继电器,2001,21(9):13-15.
SU Jianshe, LIAO Peijin, ZHOU Dianmin. Power systems transient stability prediction by using fuzzy neural network based on GPS synchronized measurements. Relay, 2001, 21(9): 13-15.
- [7] 林飞,刘玉田,邱夕照. 基于模糊神经网络的电力系统暂态稳定控制决策. 电工技术学报,2001,16(2):83-87.
LIN Fei, LIU Yutian, QIU Xizhao. Power system transient stability decision making based on fuzzy neural networks. Transactions of China Electrotechnical Society, 2001, 16(2): 83-87.
- [8] 张琦,韩祯祥,曹绍杰,等. 用于暂态稳定评估的人工神经网络输入空间压缩方法. 电力系统自动化,2001,25(2):32-35.
ZHANG Qi, HAN Zhenxiang, TSO S K, et al. Input dimension reduction in neural network training for transient stability assessment. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(2): 32-35.
- [9] AH KING T F, RUGHOOPUTH H C S. Real-time transient stability prediction using neural tree network// Proceedings of IEEE International Conference on System, Man and Cybernetics, Vol 3, Oct 22-25, 1995, Vancouver, Canada. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 1995: 2182-2187.
- [10] ROVNYAK S, KRETSINGER S, THORP J, et al. Decision trees for real-time transient stability prediction. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1417-1426.
- [11] LIU C W, THORP J. New methods for computing power system dynamic response for real-time transient stability prediction. IEEE Trans on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications, 2000, 47(3): 324-337.
- [12] 彭疆南,孙元章,王海风. 基于广域测量数据和导纳参数在线辨识的受扰轨迹预测. 电力系统自动化,2003,27(22):6-11.
PENG Jiangnan, SUN Yuanzhang, WANG Haifeng. Research on the perturbed trajectories prediction based on wide area measurement and on-line admittance matrix identification. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 6-11.
- [13] 张鹏飞,薛禹胜,张启平,等. 基于 PMU 实测摇摆曲线的暂态

- 稳定量化分析. 电力系统自动化, 2004, 28(20): 17-20.
- ZHANG Pengfei, XUE Yusheng, ZHANG Qiping, et al. Quantitative transient stability assessment method using phasor measurement. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 17-20.
- [14] 赵庆生, 刘笙, 陈陈. 基于相量测量与能量分析的在线失稳预警. 电力系统自动化, 2003, 27(14): 9-12.
- ZHAO Qingsheng, LIU Sheng, CHEN Chen. Real-time instability prediction based on energy approach and phasor measurement units. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(14): 9-12.
- [15] KUNDUR P. Power system stability and control. Beijing: China Electric Power Press, 2001: 285.
- [16] 汤涌. 电力系统全过程动态(机电暂态与中长期动态过程)仿真技术与软件研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2002.
- TANG Yong. The studies on techniques and software of power system full dynamic (electric-mechanical transient mid-term and long-term dynamic) simulation[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2002.
- [17] 邱关源. 电路. 北京: 高等教育出版社, 2000: 403.
- QIU Guanyuan. Electric circuits. Beijing: Higher Education Press, 2000: 403.

宋方方(1977—), 女, 博士研究生, 主要从事电网广域测量和安全稳定控制的研究工作. E-mail: songfangfang4291@sina.com

毕天姝(1973—), 女, 副教授, 主要研究方向为电力系统保护与控制、人工智能在电力系统中的应用和故障诊断等. E-mail: tsbi@ncepubj.edu.cn

杨奇逊(1937—), 男, 教授, 博士生导师, 中国工程院院士, 主要研究方向为电力系统保护与控制、变电站自动化等.

Perturbed Trajectory Prediction Method Based on Wide Area Measurement Systems

SONG Fangfang^{1,2}, BI Tianshu^{1,2}, YANG Qixun^{1,2}

(1. Key Laboratory of Power System Protection and Dynamic Security Monitoring and Control Under Ministry of Education, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

(2. Sifang Research Institute, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: A novel method for perturbed trajectory prediction of post-fault rotor angle is presented in this paper, which is based on phasor measurement unit (PMU) measurements and trigonometric function curve fitting technique. A mathematical relationship of post-fault rotor angle and time is derived from a speed-governing system, which reveals that the perturbed trajectory of the post-fault rotor angle can be expressed by attenuation trigonometric functions. Using curve fitting technique and trigonometric function, a least square method to predict the perturbed trajectory is proposed. Numerical simulations are conducted in IEEE 9-bus system and the simplified north China grid to test the effectiveness of the proposed method. The proposed method can give more reasonable and more promising prediction results as compared with polynomial curve fitting technique.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50607005), the Key Project of Chinese Ministry of Education (No. 106052), Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-05-0216), Program for Changjiang Scholars and Innovative Research Team in University (No. IRT0515).

Key words: wide area measurement system (WAMS); trajectory predictions; rotor angle; curve fitting; power systems