

# 面向过程的交流潮流模型新息图法状态估计

白宏<sup>1</sup>, 郭志忠<sup>1,2</sup>, 陈贺<sup>3</sup>

(1. 哈尔滨工业大学电气工程系, 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 许继电力科学研究院, 北京 100085;  
3. 清华大学电机系, 北京 100084)

**摘要:** 提出了一种处理相量测量单元(PMU)量测值的新方法。基于交流潮流模型下的新息图法状态估计, 提出了一种过程的划分方法和面向过程的状态估计分析方法, 它能提供一个时间过程内的特征运行状态。首先, 根据是否有拓扑结构的变化将一个运行过程进行细分, 完成过程的划分之后, 可以得到表征过程内系统一般运行情况的期望运行状态、最大负荷和最小负荷时的极端运行状态。期望运行状态通过期望新息网络图来获得。IEEE-5节点系统用来说明本文所提方法的有效性。

**关键词:** 过程划分; 同步相量测量单元; 拓扑变化; 新息网络图; 状态估计

## Process-oriented innovation graph state estimation in the AC load flow model

BAI Hong<sup>1</sup>, GUO Zhi-zhong<sup>1,2</sup>, CHEN He<sup>3</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 2. EPRI of XJ Group, Beijing 100085, China; 3. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract:** The paper provides a method dealing with the measurements of the new advent device of PMU. Based on the innovation network graph in the AC load flow model approach, the division of a process and the process-originated state estimation is proposed, which can provide characteristic states within a process of time. In order to develop the new method, the operating process is divided into several sub-processes according to the topology change. In each process or sub-process, several characteristic state can be derived which can represent the average status of this process, the extreme status in the largest load flow and lightest load flow condition. In order to compute the expected state, an expected innovation network graph is derived. The IEEE-5 bus system is used to illustrate the effectiveness of the new method.

**Key words:** process partition; PMU; topology change; innovation network graph; state estimation

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)14-0028-05

## 0 引言

电力系统状态估计<sup>[1,2]</sup>是调度控制、安全评估等方面的基础,也是能量管理系统的核心组成部分。电力系统状态估计为电力系统在线分析和控制功能提供电网实时工况,状态估计的性能直接影响分析的准确性和控制的效果。随着电力系统的迅猛发展,状态估计已成为现代调度控制中心最重要的基石之一。在电力市场环境,由于电力市场必须依赖于可靠的电力系统状态信息进行实时电价计算,状态估计的重要性又得到了更大的提升。

传统状态估计主要基于监控和数据采集 SCADA (supervisory control and data acquisition) 系统提供的遥测量进行计算。随着相量测量装置 PMU

(phasor measurement unit) 在电网中的推广应用, PMU 已成为电力系统重要的数据来源之一。

PMU 具有高密度采样和同步测量的能力,更新周期短,实现了节点状态的可直接观测。如果在电力系统中合理布置一定数目的 PMU, 就能够实现电力系统的动态观测, 从而使得对大规模电力系统实施稳定控制成为了可能。在不久的将来, 基于 PMU 量测装置的 WAMS 系统将逐步取代 SCADA 的作用。

在状态估计中如何处理 PMU 所带来的海量的量测数据是当前必须面对和必须解决的重要问题<sup>[3-9]</sup>。传统意义的状态向量是一个建立在时间断面上的概念,但实际上单一时间断面的状态并不能准确反映网络在一个运行时段上的整体运行状况。如

果只考虑连续过程中的一个时间断面,无法保证运行控制的整体最优性。为避免仅利用某一时刻的测量信息评价系统工况的片面性,应从整体观点出发,面向过程对电力系统进行评价。面向过程的思想为 PMU 数据在状态估计中的应用提供了一条很好并且实用的出路<sup>[10-14]</sup>。

基于面向过程的思想,本文提出了基于 PMU 量测数据的交流潮流模型下的新息图法<sup>[15]</sup>过程划分的方法,在完成过程的划分之后,提出了过程内分别表征电力系统极端运行情况和平均运行情况的极端运行网络图和期望运行网络图,通过对这几个新息网络图的解算,可以得到表征电力系统在这个运行时段内典型的特征状态,以便给控制中心提供有效的决策依据。

## 1 过程的划分

WAMS 的采样速率较之于 SANDA 系统有很大提高,因而在时段 $[t_b, t_e]$ 内同时处理这些所有的量测数据成为了一个难题。基于面向过程的思路为处理这些海量的量测量提供了一条出路。

要完成面向过程的状态估计方法的计算,对一段时间过程进行划分——即确定某一运行时段内电力系统运行波动不大,可以看成是一个运行过程,是一个首要的问题。最简单的方法可以借鉴传统的周期式触发方式的状态估计,人为地规定一段时间即为一个过程,针对这个过程的所有量测数据进行状态的提取。比如说 10 min 或者 20 min 就可以认为是一个过程。显然,这种确定过程的方法是粗糙的,不细致的,因而本文根据电力系统运行的特点,给出了一种更为精细的电力系统运行过程的划分方法。

一般情况下,当电力系统有拓扑结构的变化或者大的负荷的突然变化等不良情况发生时,电网的状态会发生比较大的改变,所以可以认为这一时刻是两个过程的分界点。

因而,为了进行面向过程的状态估计分析,电力系统的时间过程可以这样划分:首先,可以根据电力系统运行的实际情况认为一段时间为一个过程,比如 20 min;接下来再根据系统是否发生拓扑变化以及突然的负荷变化进行过程的细分,如果在这段时间过程内系统没有发生这些不良情况,则认为是一个过程,如果有在这段时间过程内有任何一种或者同时的不良情况的发生,则不能把这 20 min 的情况视为一个过程,要以发生不良情况的时刻为分界线分为两个过程分别处理。图 1 给出了一个大概的示意图。

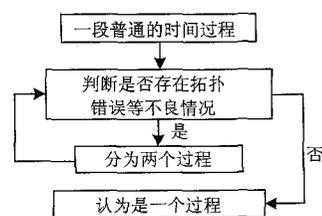


图 1 过程划分的大概示意图

Fig.1 The sketch map of the concept of process-oriented state estimation

在一个运行时段内,在相邻的两个采样时间间隔,根据量测量和预报量(或者前一时刻的量测量),可以形成新息网络图<sup>[14]</sup>。如果在一个时间段内采样  $n$  次,则可以形成  $n-1$  个新息网络图,称为新息图链,如图 2 所示。新息图对于识别拓扑结构变化等不良情况的能力强、速度快<sup>[16,17]</sup>,根据修正预估比可以很快地识别出拓扑结构的变化<sup>[14]</sup>,并且可以很好地区分突然断开和突然闭合的情况。因此,有了这些新息网络图,可以很容易地将一个时间过程进行细分。

## 2 新息图法过程状态特征的提取

完成过程的划分之后,为了更好地为安全分析服务,应该对过程内的整体运行水平进行评价,本文用最大负荷运行断面/最小负荷运行特征断面和期望运行特征断面来表征电力系统在一段时间内的运行情况。这几个状态特征的提取可以有很多种方法,比如最小二乘法,考虑到在过程划分的时候已经形成了新息图链,因而本文用新息图法来求解。

### 2.1 表征最大/最小负荷时的新息网络图

最大和最小负荷运行断面是运行过程中真实存在且具有典型性的时间断面。一般在一个时段内,系统的负荷达到最重时,系统的运行状况最为恶化,安全性最差,这是一种极端状态;相反在系统负荷最轻时,系统则运行在另一种极端状态。因而,面向过程的状态估计应该找到运行时段内负荷最重和最轻时的这两个典型运行断面,并对其状态量进行计算。

通过求解最大负荷和最小负荷时形成的这两个新息网络图<sup>[14]</sup>,分别如图3和图4所示,就可以得到一段时间过程内最大与最小负荷时的网络运行状态,从而为面向过程的分析控制进行服务。

### 2.2 表征过程平均运行状态的期望新息图

但是仅仅知道这两个状态量,并不能够表征整个时间过程的运行情况,为了实现面向过程的分析控制计算,还需要知道过程内电力系统的一个大致的运行情况,可以用期望运行状态来表示,下面介

绍基于交流潮流模型下的新息图法的期望运行状态的求取。

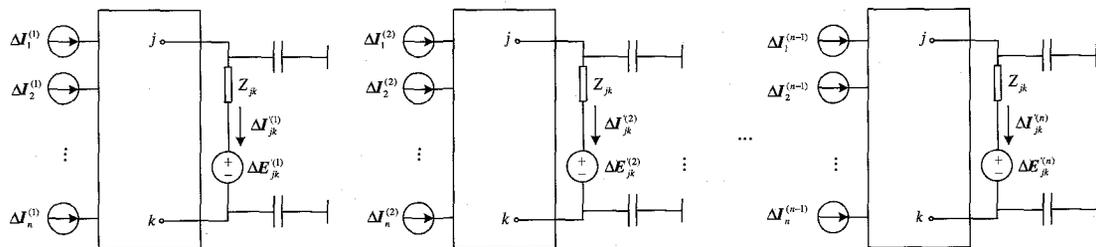


图 2 一个过程内的新息图序列

Fig. 2 An innovation graph sequences within time 0 to n

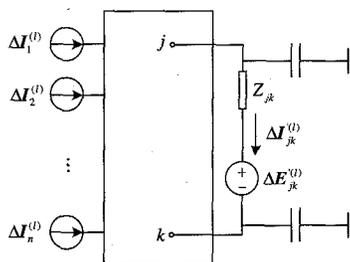


图 3 过程内最大负荷时的新息网络图

Fig.3 Innovation network graph with the heaviest load flow within a process

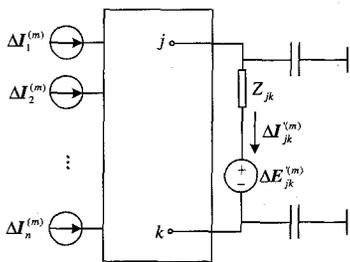


图 4 过程内最小负荷时的新息网络图

Fig.4 Innovation network graph with the lowest load flow within a process

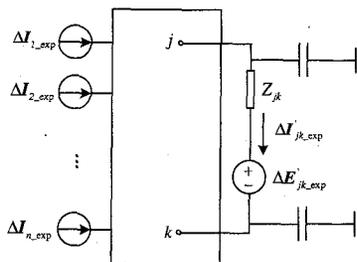


图 5 一个过程内的期望新息图

Fig.5 The expected innovation network graph in a certain process time

与极端过程特征断面不同，期望过程特征断面

则是一个数学上构造出的、虚拟的时间断面，其求解过程相对复杂。时段  $[t_b, t_e]$  内有多多个时间断面，为使多个时间断面的量测数据均在目标函数中有所体现，首先要求得过程内的期望新息值。由于新息网络图对于拓扑错误、坏数据等不良情况有很好的鲁棒性，因而使得子过程的划分很容易，如上一小节所述。在确定子过程之后，对于一个任意的过程，期望新息值可以通过下式计算得到：

$$\Delta I_{exp} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^{n-1} \Delta I_k \quad (1)$$

在这里， $\Delta I_{exp}$  是期望的新息值， $\Delta I_k$  是第  $k$  个新息图链中的新息值。由于  $\Delta I_k$  在没有不良情况发生时，它是符合电流定律的，因而  $\Delta I_{exp}$  在没有不良情况发生时，它也是应该符合电流定律的。因而期望的新息网络图可以形成，如图 5 所示。

由于得到的期望的新息网络图是排除拓扑错误等不良情况之后的新息图，因而图里的新息值应该是符合电流定律的。由图可以得到期望的连枝推算新息值以及期望的潮流修正值，如下公式所示：

$$\Delta I_{R-exp} = C \Delta I_{L-exp} + D \Delta I_{n-exp} \quad (2)$$

$$I_{C-exp} = I_{F-exp} + \Delta I_{R-exp} \quad (3)$$

其中： $\Delta I_{R-exp}$  是期望的连枝推算新息值， $\Delta I_{L-exp}$  是期望的连枝新息值， $\Delta I_{n-exp}$  是期望的节点新息值； $I_{C-exp}$  是期望的潮流修正值， $I_{F-exp}$  是期望的预报预估值。

得到期望的潮流修正值之后，这一时间过程内电网期望的状态值可以通过网络从参数和得到的期望潮流修正值得到：

$$V_{exp} = Y I_{C-exp} \quad (4)$$

其中： $V_{exp}$  为表征电网在一个时间过程内的期望状态量。

表 1  $k$  时刻前的运行过程特征状态计算结果Tab. 1 Results of the characteristic state of the running process before the time  $k$ 

节点号	期望运行	最大负荷时	最小负荷时
	电压值	电压值	电压值
	幅值	幅值	幅值
1	1.050000	1.050000	1.050000
2	1.038020	1.037820	1.039130
3	1.009236	1.008326	1.009006
4	1.008933	1.008025	1.009536
5	1.020280	1.019203	1.020971

表 2  $k$  时刻前的运行过程传统状态估计运行状态结果Tab.2 Results of the conventional state estimation of the running process before the time  $k$ 

节点号	过程开始时刻电压值		过程中间时刻电压值		过程终点时刻电压值	
	幅值	相角	幅值	相角	幅值	相角
1	1.050000	0.000000	1.050000	0.000000	1.050000	0.000000
2	1.038845	-0.042908	1.036913	-0.048309	1.036506	-0.049717
3	1.003933	-0.102043	1.004032	-0.101743	1.002613	-0.104643
4	1.002814	-0.108932	1.003032	-0.108609	1.001523	-0.111712
5	1.017731	-0.070423	1.017940	-0.070531	1.017006	-0.072608

通过仿真算例,对面向过程的状态估计和传统意义上的基于一个时间断面的状态估计进行了比较。从整体的观点来看,传统状态估计中状态量的获取存在着一定的随意性,三组状态量仅仅能够代表系统在三个单一时间点的运行状态。算例表明,面向过程的状态估计可以在一定意义上弥补这一缺陷,能够提供运行过程中比较全面的状态信息,三组状态量分别表示了运行过程内最重负荷和最轻负荷的运行状态以及代表系统在这一过程内的一般运行状态,可以帮助控制中心做出全局性的决策。

#### 4 结论

基于面向过程的思想,本文提出了一种处理海量 PMU 量测数据的状态估计新方法,它能够更加充分有效地利用高密度的 PMU 量测数据。利用交流潮流模型下的新息网络图可以很容易地完成过程的划分,进而在过程内得到较之传统意义的状态相量更加全面的电力系统运行状态信息:过程内最大最小负荷时的运行状态以及期望运行状态,可以为控制中心提供全局性信息,更好地为电力系统的监控及安全分析等方面提供服务。

#### 参考文献

[1] Monticelli A. State Estimation in Electric Power Systems - A Generalized Approach[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.

### 3 算例分析

本文用 IEEE-5 节点系统来说明所提方法的有效性。对于 IEEE-5 节点网络,模拟情况如下:在一段时间内,节点 3 和节点 4 的在一定范围内波动,在这段时间内的某一采样时刻  $k$ ,支路 2-4 突然故障断开。根据前文所述,对发生不良情况  $k$  时刻前、后划分为两个过程进行分析,为简便本文给出了  $k$  时刻之前(不包含  $k$  时刻)的这一过程的分析结果。

表 1 和表 2 分别给出了本文所提方法的运行结果和传统状态估计方法的运行结果。

- [2] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版社, 1985.
- [3] Thorp J S, Phadke A G, Karimi K J. Real Time Voltage Phasor Measurement for Static State Estimation[J]. IEEE Trans on PAS, 1985: 3908-3103.
- [4] Phadke A G, Thorp J S, Karimi K J. State Estimation with Phasor Measurements[J]. IEEE Trans on PWRs, 1986, 1(1): 233-241.
- [5] 王克英, 穆刚, 陈学允. 计及 PMU 的状态估计精度分析及配置研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 29-33.
- WANG Ke-ying, MU Gang, CHEN Xue-yun. Precision Improvement and PMU Placement Studies on State Estimation of a Hybrid Measurement System with PMUs[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 29-33.
- [6] Nuqui R F, Phadke A G. Phasor Measurement Unit Placement Based on Incomplete Observability[A]. In: IEEE Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2002. 888-893.
- [7] LI Sheng-fang, FAN Chun-ju, YU Wei-yong. A New Phasor Measurement Based Fault Location Algorithm for Transmission Lines[J]. Power System Technology, 2004, 28(17): 28-32.
- [8] Reynaldo F N. State Estimation and Voltage Security Monitoring Using Synchronized phasor Measure-

- ments[D]. Blacksburg (VA): Virginia Polytechnic Institute and State University, 2001.
- [9] Baldwin T L, Mili L, Boisen M B, et al. Power System Observability with Minimal Phasor Measurement Placement[J]. IEEE Trans on Power Systems, 1993,8(2):701-715.
- [10] 郭志忠. 电网自愈控制方案[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(10): 85-91.  
GUO Zhi-zhong. Scheme of Self-healing Control Frame of Power Grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(10): 85-91.
- [11] 方兴. 面向过程配电网优化研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2005.  
FANG Xing. The Research on Process Oriented Distribution System Optimization[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2005.
- [12] 陈得治. 配电网时间过程分析与控制研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.  
CHEN De-zhi. Time Process-based Analysis and Control Research in Distribution Network[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2006.
- [13] 蔡运清, 汪磊, Morison K, 等. 广域保护(稳控)技术的现状及展望[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 20-25.  
CAI Yun-qing, WANG Lei, Morison K, et al. Current State and Protect of Wide-area Protection (Dynamic Stability Control) Technologies[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 20-25.
- [14] Bai H, Zhou S Q, Guo Z Z. Innovation Network Graph State Estimation Based PMUs[A]. In: IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition Asia Pacific[C]. Dalian(China):2005.
- [15] 周苏荃, 柳焯. 负荷突变与拓扑错误及坏数据三者交叠情况下的识别问题[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(6): 6-10.  
ZHOU Su-quan, LIU Zhuo. The Identification of Three Simultaneous Anomalies of Sudden Load Change and Topology Error and Bad Data[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(6): 6-10.
- [16] 周苏荃, 柳焯. 新息图法识别多重网络结构动态变化[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(10): 67-72.  
ZHOU Su-quan, LIU Zhuo. Identification of Multiple Dynamic Network Structure Changes by the Innovation Graph Approach[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(10): 67-72.
- [17] 周苏荃, 柳焯. 新息图法拓扑错误辨识[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(4): 23-27.  
ZHOU Su-quan, LIU Zhuo. An Innovation Graph Approach to Topology Error Identification[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(4): 23-27.
- [18] 周苏荃, 柳焯. 新息图的智能特性[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(13): 15-19.  
ZHOU Su-quan, LIU Zhuo. The Intelligent Characteristics of the Innovation Graph[J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(13): 15-19.
- [19] 周苏荃. 电力系统信息图法状态估计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2000.  
ZHOU Su-quan. Power System State Estimation by Innovation Network Graph Approach[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2000.

收稿日期: 2007-10-15; 修回日期: 2008-03-31

作者简介:

白宏(1979-), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统状态估计和电力系统稳定控制; E-mail: baihong@hit.edu.cn

郭志忠(1961-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统稳定控制、电力市场和光学电流互感器方面的研究;

陈贺(1975-), 男, 博士, 从事电力系统稳定性分析和鲁棒控制及状态估计方面的研究。

## 《继电器》杂志更名为《电力系统保护与控制》

根据新闻出版总署文件(新出报刊[2008]647号)——关于同意《继电器》更名的批复, 同意《继电器》更名为《电力系统保护与控制》, 新编国内统一连续出版物号: CN41-1401/TM, 办刊宗旨及业务范围调整为: 关注科学发展, 理论联系实际, 面向应用, 为科研生产一线服务, 主要刊发涉及电力系统保护与控制专业领域的新技术、新成果及运行经验、技术改进、科学管理、技术规程、国外先进技术等方面的论文。

欢迎从事电力科研、设计及设备研制企事业单位的专业技术人员, 全国所有高校相关专业的师生, 发电厂、变电站所、输配电系统及供电企业的专业技术人员, 从事电力生产、建设及经营管理部门的相关人员积极投稿, 继续关注和支持本刊的建设和发展, 共同将《电力系统保护与控制》杂志办得越来越好!