

基于 CIM 设计的电力系统状态估计模型

许凯宁¹, 程新功¹, 刘新锋², 徐希霖³, 种衍师³

(1. 济南大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250022; 2. 山东电子职业技术学院, 山东 济南 250014;
3. 枣庄供电公司, 山东 枣庄 277000)

摘要: CIM 提供了能量管理系统信息在物理层面的逻辑视图。在对 CIM 进行扩展的基础上, 提出了最小二乘法状态估计的软件模型。提供了三种类型的接口来实现数据的输入和输出功能。根据网络元件的互联关系和开关状态建立了拓扑模型。对面向对象的状态估计模型进行分析, 扩展出建立模型所需要的类及其属性。最后给出了一个实例, 将根据模型所设计的状态估计软件应用到枣庄地区郭里集电网中。得到的运行结果证明, 所设计的最小二乘法状态估计 CIM 模型完全能够满足实际的需要。

关键词: 能量管理系统; 电力系统; IEC61970 标准; 统一建模语言 (CIM); 状态估计

Model design of electric system state estimation based on CIM

XU Kai-ning¹, CHENG Xin-gong¹, LIU Xin-feng², XU Xi-jin³, CHONG Yan-shi³

(1. University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. Shandong College of Electronic Technology, Jinan 250014, China;
3. Zaozhuang Power Supply Company, Zaozhuang 277000, China)

Abstract: Common Information Model (CIM) provides a logical view of the physical aspects of energy management system information. This paper proposes a software model that extends CIM for the least square based state estimation. Three types of interfaces are included to realize input and output functions. Topology model is established according to the network elements interconnections and the states of switches. An object oriented state estimation is performed using the model in which extended classes with their relative properties are built. The CIM based state estimation model is applied to Zaozhuang power networks. It is proved effective by the operation results.

Key words: energy management system; power system; IEC61970 standard; common information model; state estimation

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)24-0123-06

0 引言

国际电工委员会的 IEC61970 EMS-API 系列标准, 其目标是为了减少向 EMS 中增加新应用所需要的费用和时间^[1], 保护对 EMS 中正在有效工作的现有应用的投资。该系列标准的核心内容就是 CIM 以及一组公共服务^[2-4]。

随着国内应用软件的广泛使用, 用户以“更实用”, “更方便”, “更经济”为原则, 提出了更高的运行模式要求, 以更符合用户使用的特点^[5-7]。在已有的基础上设计实现一套基于 IEC61970 中 CIM 和 CIS 标准的面向对象的应用软件不仅条件成熟, 而且也是满足用户最新需求的迫切需要, 是各个 EMS 厂家寻求自身发展的必然选择。

状态估计作为电力系统应用的一个重要组成部分, 是电力系统调度、控制、安全评估等方面的基础^[8]。自从将状态估计算法引进到电力系统领域后,

在电力系统状态估计所涉及的各个方面^[9-12], 取得了丰硕的研究成果, 大大提高了电力系统状态估计的技术水平。本文在对 CIM 进行扩展的基础上提出了基于最小二乘法的状态估计软件模型。

1 状态估计 CIM 建模分析

传统的状态估计算法是最小二乘法, 其数学模型为:

$$z = Hx + v \quad (1)$$

其中: z 为 $m \times 1$ 维的量测向量, H 为 $m \times (2n-1)$ 维的量测系数矩阵, 是只与网络拓扑关系和元件参数相关的常数矩阵, x 为 $(2n-1) \times 1$ 维的列状态向量, v 为 $m \times 1$ 维的列噪音矩阵, n 为电力系统的节点数。

目标函数:

$$\min J(x) = (z - H\hat{x})^T R^{-1} (z - H\hat{x}) \quad (2)$$

加权最小二乘(WLS)线性状态估计解式:

$$\hat{x} = (H^T R^{-1} H)^{-1} H^T R^{-1} z \quad (3)$$

其中：增益矩阵为

$$G = H^T R^{-1} H$$

由状态估计最小二乘法的模型我们知道，要想得到完整的状态估计运行结果，有一些数据是必须事先得到的，例如系统的节点信息、支路信息等电网模型数据，采集的实时数据信息，包括有功注入，无功注入等。要得到这些信息，并实现状态估计的功能需要完成以下步骤：

首先，需要定义电网模型及实时数据的输入输出接口，实现输入输出功能。电网模型包含了系统中所有的设备对象、量测对象等和状态估计计算相关的电网信息。

其次，按导入的电网模型中定义的网络元件互连关系和当前的开关刀闸状态判别电网实时接线方式，进行网络拓扑。

最后，根据已知的系统量测信息，导入电网模型信息以及网络拓扑后的系统状态，进行状态估计计算并输出结果。

状态估计过程的时序图如图 1 所示，它描述了以基于 CIM 的可扩展标记语言(XML)接口为输入接口的各个对象之间传递消息的时间顺序，图中的数字代表时间上的先后顺序。

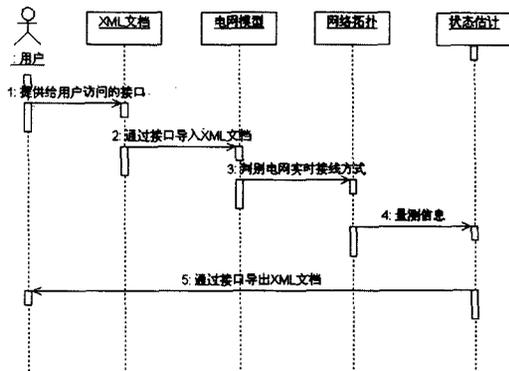


图 1 状态估计时序图

Fig.1 Sequence diagram of state estimation

2 模型的实现

电线包作为核心包与拓扑包的扩展，建立了输电和配电网的电气特性信息的模型。对状态估计的 CIM 建模，主要是在电线包的基础上进行扩展。

2.1 数据输入输出模型的实现

输入的数据为状态估计所需要的数据，主要包括电网模型数据和实时数据。输出的数据主要是状

态估计运行后所得到结果。数据输出功能针对的不仅仅是 SCADA/EMS 系统，任意应用系统都可以通过接口获取数据。完善的电网模型数据可以由 EMS 提供。通常来说，电网模型数据只需一次性导入到程序中即可，可采用基于 CIM 的 XML 接口将其一次性导入。而实时数据，例如母线上的电压、有功量测、无功量测等则主要来自于 SCADA。本文主要建立了三种类型的接口，用来实现和状态估计软件之间数据的输入输出功能，它们分别是 XML 接口、专用数据库接口以及 CIS 接口。XML 接口可以和 EMS、SCADA 等不同的系统连接，用 XML 文件作为载体得到实时数据，安全性好。专用数据库接口可以直接对数据库进行访问，速度快，实时性好。CIS 接口利用了组件技术，比文件方式灵活且速度快，更加符合发展的趋势。用户可以根据自己在安全性、快速性、灵活性等方面的需求并结合实际情况，选择适合自己的接口方式。三种接口的具体表述如下：

① 用 XML 来表述 CIM 并作为信息交换的载体。在数据输入端，提供 CIM 模型到本地模型的映射，通过读入并解析符合 CIM/RDF Schema 文档的 CIM/XML 文本文件^[13]，将其转换为内部程序所需格式，就可以得到电网结点模型和实时数据进行计算。在数据输出端，提供本地模型到 CIM 模型的映射，根据程序内部数据库的结构和内容，按照 CIM 数据模型的结构，转化为 CIM 对象，生成 CIM/XML 文本文件并输出。定义该类型接口为 XML 接口类 (XMLInterface)。

② 专用数据库访问接口，该接口可以提供给 SCADA 系统专用。数据库按照 CIM 的要求来定义和建立，同时也和状态估计软件中的设备类定义相同。在数据输入端，用户通过接口直接访问数据库，并从数据库中读入实时数据。定义该类型接口为数据库接口类(DatabaseInterface)。

③ 利用组件技术。在数据输入端，根据生产方提供的接口组件访问服务器功能，通过 CIS 接口得到实时数据。在数据输出端，应用对象提供 CIS 组件接口服务器功能，给其它系统或者应用对象提供状态估计计算结果以及电网母线模型。将这种类型的接口定义为 CIS 接口类(CISInterface)。

考虑到上述 3 个类的相似性，定义数据输入类(DataInput)为上述各类的父类，上述各类既继承了数据输入类的属性，同时又有自己的固有属性。同理，我们可以得到数据输出类(DataOutput)及其继承关系，如图 2、3 所示。数据输入类和数据输出类包含数据名称、数据类型和数据信息等固有属性，实

现了电网模型、实时数据以及运行结果数据的输入输出功能。

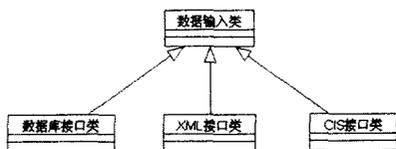


图2 数据输入 CIM 模型
Fig.2 Data input CIM model

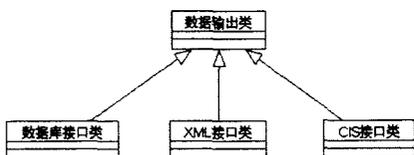


图3 数据输出 CIM 模型
Fig.3 Data output CIM model

2.2 拓扑模型的实现

拓扑模型表述了状态估计所需的设备是如何连接在一起的。

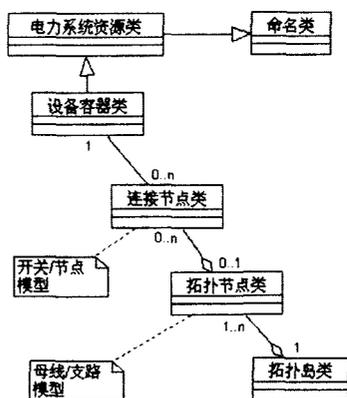


图4 状态估计拓扑模型
Fig.4 State estimation topology CIM model

拓扑模型主要由连接节点类(Connectivity Node)、拓扑岛类(TopologicalIsland)、拓扑节点类(TopologicalNode)等类组成。连接节点是指在这些点上导电设备的端点通过零阻抗连接在一起；拓扑节点是指在当前网络状态下通过闭合开关连接在一起的一组连接节点,它能够随着当前的网络状态(即开关、断路器等改变状态)的变化而变化；拓扑岛则是网络的一个电气连接的子集,它会随着当前的网络状态(即隔离开关、断路器等改变状态)的变化而变化。CIM 第 301 部分拓扑包中已建立了完善的拓扑模型,所以参照该模型直接得到状态估计的

拓扑模型如图 4 所示。

2.3 状态估计模型的实现

最小二乘法状态估计程序框图如图 5 所示。

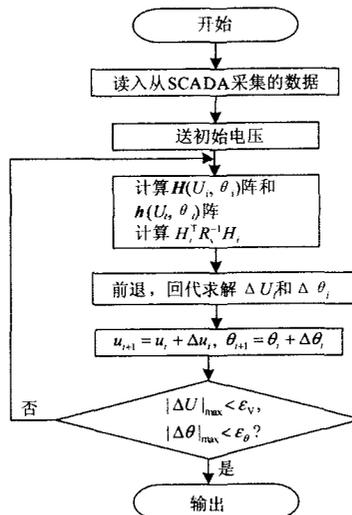


图5 最小二乘法状态估计程序框图

Fig.5 Least squares state estimation program diagram

由最小二乘法的数学模型可以知道,对节点、支路、有功以及无功的计算是形成 H 阵与 z 阵所不可缺少的。因此,为了满足状态估计计算的需要,在原 CIM 的基础上扩展出状态估计类(StateEstimator),并定义了计算节点(computeNode)、计算支路(computeBranch)、计算有功量测(computeMVar)、噪声矩阵(noiseMatrix)等必要的参数作为状态估计类的固有属性。详细的描述如表 1 所示。

表 1 扩展的状态估计类属性的描述

Tab.1 Description of extended state estimation class properties

属性	类型	描述
computeNode	Numeric	计算节点
computeBranch	Numeric	计算支路
computeMVar	Numeric	计算有功量测
computeMV	Numeric	计算无功量测
activeMatrix	Matrix	有功信息矩阵
reactiveMatrix	Matrix	无功信息矩阵
errorsMatrix	Matrix	残差矩阵
noiseMatrix	Matrix	噪声矩阵

由于不同的厂家使用的状态估计软件不同,因此节点和支路的格式可能不同,因此在状态估计类的基础上再扩展出一个应用节点类(AppNode)和一个应用支路类(AppBranch),并定义了必要的节点支路信息以解决这个问题。应用节点类定义了节点注入有功(injectionMW)、节点注入无功(injection Mvar)、电

压最大值(maxValue)、节点的可观测性状态(observabilityFlag)等计算时所必要的节点信息作为固有属性。详细的描述如表 2 所示。

表 2 扩展的应用节点类属性的描述

Tab.2 Description of extended appnode class properties

属性	类型	描述
injectionMW	Activepower	节点注入有功
injectionMVar	Reactivepower	节点注入无功
maxValue	Numeric	电压最大值
minValue	Numeric	电压最小值
observabilityFlag	Boolean	节点的可观测性状态

应用支路类定义了电压器变比(ratio), 支路潮流(powerFlow), 当前支路是否连通(inConnective)等计算时所必要的支路信息作为固有属性。详细的描述如表 3 所示。

表 3 扩展的应用支路类属性的描述

Tab.3 Description of extended appbranch class properties

属性	类型	描述
ratio	Float	电压器变比
powerFlow	Flow	支路潮流
inConnective	Boolean	当前支路是否连通
atsupplyterminalPower	Flow	支路首端潮流
terminalPower	Flow	支路末端潮流

为了方便状态估计类的使用, 仅仅扩展出应用节点类和应用支路类还不够。节点类型、节点编号、节点电压、支路电阻等基本的节点信息和支路信息应该被更详细地表述出来。因此, 在继承应用节点类和应用支路类的基础上得到节点信息类(NodeInfo)和支路信息类(BranchInfo)。节点信息类定义了节点类型(nodeType)、节点编号(nodeNumber)、节点电压(Voltage)、节点相角(phaseAngle)等节点的基本信息作为固有属性。详细的描述如表 4 所示。

表 4 扩展的节点信息类属性的描述

Tab.4 Description of extended node info class properties

属性	类型	描述
nodeType	NumericType	节点类型
nodeNumber	Numeric	节点编号
conductance	Conductance	电导
susductance	Susductance	电纳
Voltage	Voltage	节点的电压
phaseAngle	AngleRadians	节点的相位角

支路信息类定义了支路首端节点(headNode)、支路电阻(resistance)、支路电抗(reactance)等支路的基本信息作为固有属性。详细的描述如表 5 所示。

表 5 扩展的支路信息类属性的描述

Tab.5 Description of extended branch info class properties

属性	类型	描述
atsupplyterminalPower	Node	支路首端节点
terminalNode	Node	支路末端节点
resistance	Resistance	电阻
reactance	Reactance	电抗

这样, 便构成了完整的状态估计 CIM 模型, 如图 6 所示。

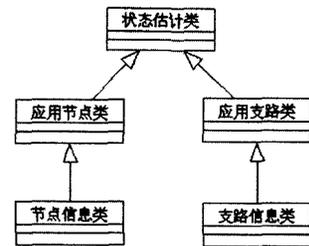


图 6 状态估计 CIM 模型

Fig.6 State estimation CIM model

状态估计计算结束后, 再调用数据输出类中数据输出方式输出结果。

数据输入输出模型、拓扑模型以及状态估计模型之间的关系如图 7 所示, 图中箭头代表了各模型中类的继承方向。首先通过数据输入模型中所定义的接口输入电网节点模型以及实时数据; 其次在网络拓扑模型中根据开关刀闸的开合状态和网络设备元件的投切状态将得到的结点模型进行网络拓扑, 从而得到电网母线模型及其相关的数据; 然后再将拓扑后得到的数据用于状态估计模型中最小二乘法状态估计计算; 最后将得到的运算结果通过数据输出模型中定义的接口输出。

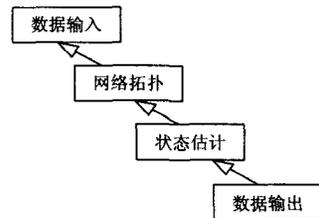


图 7 应用对象之间的继承关系

Fig.7 The inheritance relationship between application objects

3 软件的实现

将根据模型所设计的状态估计软件移植到枣

庄地区郭里集区域电网中。从SCADA采集的实时数据通过数据输入类中定义的接口传输到电网模型中。郭里集、周村、孟庄、税郭四个变电站被用来对状态估计软件进行测试和分析。所得到的运行结果如表6所示。郭里集区域电网运行界面如图8所示, 图中黑色的方框代表断路器是连通的, 白色方框代表断路器是断开的。

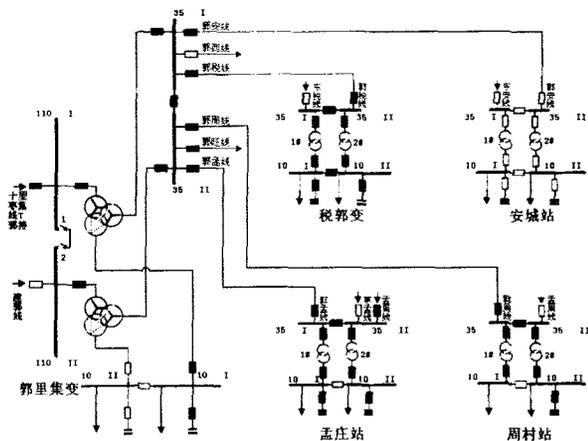


图8 郭里集区域电网运行界面

Fig.8 Running interface of Guoliji region

由表6可以知道, 状态估计前潮流运算的母线电压残差均值为1.8364 kV, 而状态估计后的母线电压残差均值为0.1909 kV。由此可见, 状态估计前潮流运算得到的某些母线上的电压幅值与实际的测量值有较大的差距, 状态估计后的幅值更加接近量测值。这说明本文所设计地基于CIM的状态估计模型能够很好地与实际电网结合, 具有实际的应用价值。

表6 状态估计前后潮流运算结果比较

Tab.6 Voltage amplitude comparison pre and post state estimation

	电压幅值量测		
	状态估计前潮	状态估计后潮	
	kV	流/kV	流/kV
郭里集110 kV	113	120	113.5
郭里集35 kV	38	41	38.3
郭里集10 kV	10.4	11.2	10.2
税郭35 kV	37.7	40	37.4
税郭10 kV	10.8	11	10.6
孟庄35 kV	38	41	38.4
孟庄10 kV I 段	10.6	11.5	10.4
孟庄10 kV II 段	10.6	11.3	10.7
周村35 kV	37.5	40.6	37.3
周村10 kV I 段	10.6	11.8	10.5
周村10 kV II 段	10.8	11.3	10.9

4 结论

随着电力系统一体化的不断发展和完善, 对于CIM的研究的不断加深, 将为电力及其相关行业的开发利用提供极大的便利。针对目前状态估计软件所面临的问题, 本文在对CIM研究的基础上进行了扩展, 设计了基于CIM的状态估计模型, 并将其做成软件应用到枣庄电网郭里集区域的四个变电站中。运行结果证明, 所设计的面向对象的状态估计CIM模型完全能够满足实际的需要。通过CIM/CIS标准接口, 可以将本文所设计的模型做成软件移植到其它区域电网中去, 从而达到节约成本, 增强通用性的目的。

参考文献

- [1] 辛耀中. 新世纪电网调度自动化技术发展趋势[J]. 电网技术, 2001, 25(12):1-10.
XIN Yao-zhong. Development Trend of Power System Dispatching Automation Technique in 21st Century[J]. Power System Technology, 2001, 25(12):1-10.
- [2] Draft IEC 61970: Energy Management System Application Program Interface (EMS-API)-Part 301: Common Information Model(CIM).Draft 6[S].
- [3] Draft IEC61970: Energy Management System Application Program Interface (EMS-API)-Part 302: Common Information Model(CIM) Financial, Energy Scheduling, and Reservation. Draft 2[S].
- [4] Draft IEC61970: Energy Management System Application Program Interface (EMS-API)-Part 303: Common Information Model(CIM) SCADA. Draft 2[S].
- [5] 张慎明,刘国定.IEC61970标准系列简介[J].电力系统自动化,2002,26(14):1-6.
ZHANG Shen-ming, LIU Guo-ding. Introduction of Standard IEC 61970[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002,26(14):1-6.
- [6] 潘毅,周京阳,吴杏平,等. 基于电力系统公共信息模型的互操作试验[J].电网技术,2003,27(10):31-35.
PAN Yi, ZHOU Jing-yang, WU Xing-ping, et al. Interoperability Test Based on Common Information Model[J]. Power System Technology, 2003, 27(10): 31-35.
- [7] 孙宏斌,吴文传,张伯明,等.IEC61970标准的扩展在调度控制中心集成化中的应用[J].电网技术,2005,29(16): 21-25.
SUN Hong-bin, WU Wen-chuan, ZHANG Bao-ming, et al. Application of Extension of IEC61970 Standard in Control Center Integration[J]. Power System Technology, 2005,29(16):21-25.
- [8] 于尔铿. 电力系统状态估计[M]. 北京: 水利电力出版

社,1985.
 YU Er-keng. Power System State Estimation[M]. Beijing: Hydraulic and Electrical Engineering Publishing House, 1985.

[9] 兰华, 李积捷. 电力系统状态估计算法的研究现状和展望[J].继电器, 2007,35(10):78-82.
 LAN Hua, LI Ji-jie. Status Quo and Prospect of Algorithm of Power System State Estimation[J]. Relay, 2007,35(10):78-82.

[10] 张海波, 李林川. 电力系统状态估计的混合不良数据检测方法[J].电网技术,2001,25(10):17-20.
 ZHANG Hai-bo, LI Lin-chuan. A Hybrid Approach for Detection of Bad Data in Power System State Estimation[J]. Power System Technology, 2001,25(10): 17-20.

[11] 刘浩, 刘玉田. 模糊数学在状态估计不良数据检测辨识中的应用[J].电力系统及其自动化学报,1996,8(3):52-59.
 LIU Hao, LIU Yu-tian. The Application of Fuzzy

Mathematics at Bad Data Detection and Identification of State Estimation[J]. Journal of Shandong Institute of Architecture and Engineering, 1996,8(3):52-59.

[12] 张兴民,毛玉华,等. 利用图论方法进行多不良数据检测与辨识[J].中国电机工程学报,1997,7(1):69-72.
 ZHANG Xing-min, MAO Yu-hua, et al. Detection and Identification of Multi-bad Data Using Graph Theory[J]. Proceedings of the CSEE, 1997,7(1): 69-72.

[13] Draft IEC61970: Energy Management System Application Program Interface (EMS-API)-Part 501: CIM RDF Scsema[S].

收稿日期: 2008-12-22; 修回日期: 2009-06-17

作者简介:

许凯宁(1983-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统无功优化; E-mail: xkn_ujn_edu@sina.com
 程新功(1973-),男,副教授,硕士生导师,主要从事电压无功优化的研究工作。

(上接第 75 页 continued from page 75)

[15] 张蓓.四川电网发输电设备检修计划的协调优化(工程硕士论文)[D].重庆:重庆大学,2008.
 ZHANG Bei. Coordination Optimization of Generation and Transmission Maintenance Scheduling for Sichuan Power Grid, Thesis[D]. Chongqing: Chongqing University,2008.

收稿日期: 2008-12-17; 修回日期: 2009-03-05

作者简介:

颜伟(1968-),男,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统优化运行与控制;
 温元喜(1977-),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统优化运行与控制; E-mail:wenyuanxi@yahoo.com.cn
 张蓓(1972-),女,硕士,从事电力系统运行调度工作。

(上接第 117 页 continued from page 117)

[3] GB 1208-2006,电流互感器[S].

[4] 电力工业部:电安生[1994]191号电力系统继电保护及安全自动装置反事故措施要点[S].

[5] 郭志忠.电子式电流互感器研究评述[J].继电器, 2005, 33(14): 11-14, 22.
 GUO Zhi-zhong. Comment on the Research of Electronic Current Transformers[J]. Relay, 2005, 33(14): 11-14, 22.

[6] 黄学卫,董玉玲,董丽丽.数字化变电站中的非常规互感器[J].电力系统保护与控制, 2009, 37(8): 89-92.
 HUANG Xue-wei, DONG Yu-ling, DONG Li-li. Unconventional Mutual Inductor of Digital Station[J].

Power System Protection and Control, 2009, 37(8): 89-92.

收稿日期: 2009-06-17; 修回日期: 2009-08-21

作者简介:

王泐(1972-),女,工程师,硕士,主要从事电力系统分析、运行与控制的教学研究与管理工
 作;
 及洪泉(1972-),男,高级工程师,博士,主要从事光学电流互感器及其在电力系统中的应用以及电力系统分析、运行与控制的研究和管理工
 作。E-mail: Jihongquan@126.com