

# 基于多代理系统的在线静态安全预警系统

刘意川, 张沛超

(上海交通大学电气工程系, 上海 200030)

**摘要:** 静态安全预警对于大停电的预防起到了至关重要的作用。采用多代理系统(MAS)技术, 满足了静态安全预警系统对计算实时性及系统架构的可伸缩性的要求。该系统采用PSS/E作为计算内核, 以Python语言对PSS/E进行二次开发, 使其能自动对静态安全问题进行计算, 并将系统功能封装在不同的代理内。代理之间通过KQML语言进行通信。仿真计算表明, 本系统计算速度快, 能满足在线运行需要, 具有较高的实用价值。

**关键词:** 静态安全预警; 多代理; PSS/E; Python; KQML

## MAS based online steady state security and warning system

LIU Yi-chuan, ZHANG Pei-chao

(Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China)

**Abstract:** Steady state security and warning is very important to the prevention of cascading outages of power systems. MAS (multi agent system) technology is adopted to meet the real time requirement and achieve flexibility. The system makes use of PSS/E as the computational tools. Using Python to control PSS/E modules and wrap them into different agents. KQML is employed as the communication language between agents. The simulation system demonstrates that the MAS based online steady state security and warning system can work well under different system conditions.

**Key words:** steady state security and warning system; multi-agent system; PSS/E; Python; KQML

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)10-0019-05

## 0 引言

美加“8.14”大停电<sup>[1]</sup>以来, 如何对电网安全性进行在线监视、为调度员提供全面而又及时的电网运行信息变得极为重要。

大停电一般分为两个阶段<sup>[2]</sup>。首先是慢动态过程, 然后是快速的暂态过程并最终导致大停电。暂态过程十分短暂, 要对其进行实时监视、控制非常困难。而静态过程持续时间较长, 调度员有足够的时间来评估系统状态, 采取措施增强系统安全水平并预防可能出现的大停电事故。因此本文只讨论针对大停电前第一阶段的静态安全预警系统。

PSS/E<sup>[3]</sup>是Siemens PTI公司推出的大型电力系统仿真软件, 具有稳定、强大的电力系统仿真计算功能, 并支持二次开发。国内很多网、省电力公司都引入了PSS/E, 发挥了较大作用。但PSS/E主要被应用于离线分析, 且主要采用人机交互方式, 不能被直接应用于电力系统在线静态安全预警。

本文充分利用PSS/E已有的分析计算功能<sup>[4]</sup>,

用Python语言<sup>[5]</sup>对其进行二次开发, 使其能够进行静态安全预警计算。对于大型电网, 由于静态安全预警计算量很大, 为了保证实时性, 本文采用多代理系统MAS (multi agent system)<sup>[6]</sup>技术实现并行计算。并引入了知识查询与操作语言KQML (Knowledge Query and Manipulation Language)<sup>[7]</sup>语言, 实现了系统结构的可伸缩性, 可以根据实时性要求, 任意向系统中加入计算机增强计算能力而不用改变系统的结构。

## 1 系统整体结构

### 1.1 系统结构及特点

在线监视系统对实时性要求很高, 本文采用多代理系统实现静态安全预警的并行计算。

MAS系统是一种分布式系统。其主要任务是要创建一群自主的Agent, 每个Agent都具有与其它Agent进行自主协调、协作和协商的能力, 实现问题的并行求解。如果系统需要对某个功能进行修改, 只需修改相应的Agent设计; 如果系统需要新增功

能,也只需增加完成该功能的应用 Agent,再修改协调 Agent 的协调机制,实现了系统结构的可伸缩性。

由图 1 可见,本系统底层采用 PSS/E 中已有的功能模块<sup>[8]</sup>作为计算内核,通过 Python 语言对 PSS/E 进行二次开发,使其能自动对静态安全问题进行计算,并将上述计算功能封装成多个代理。每个代理可以分布在不同的机器上运行,代理之间通过 KQML 语言进行通信。KQML 是一种基于消息的通信协议,其本身也是一种独立的信息交换和协议语言,具有独立于网络传输机制、独立于内容语言及实体等优点<sup>[9]</sup>。

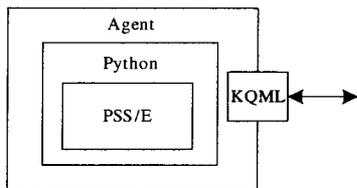


图 1 计算代理的结构

Fig.1 Architecture of the computational Agent

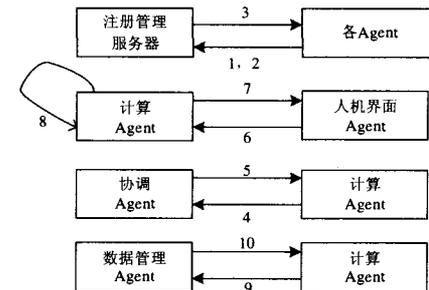


图 3 Agent 协作关系图

Fig.3 Agent collaboration diagram

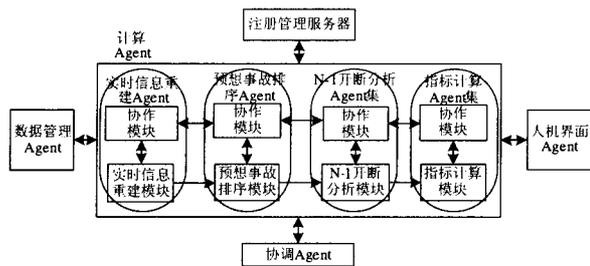


图 2 基于 MAS 的静态安全预警系统体系结构

Fig.2 Architecture of the MAS based steady state security and warning system

## 1.2 系统各 agent 功能

图 2 是基于 MAS 的静态安全预警系统体系结构。该系统主要包括如下 Agent:

**注册管理服务器:**接收处理各 Agent 新建时发出的注册信息,在静态安全预警系统中记录各 Agent 的网络地址,提供现有 Agent 列表。

**人机界面 Agent:**调度员通过人机界面 Agent 与静态安全预警系统互联。

**实时信息重建 Agent:**负责与 EMS/DTS 的接口,进行实时信息重建。

**预想事故排序 Agent:**进行预想事故排序,并按要求得到初选事故集。

**“N-1”开断分析 Agent:**对初选事故集中的事故进行“N-1”开断分析。

**指标计算 Agent:**计算各种静态安全脆弱度及裕度指标。

**协调 Agent:**记录各个计算 Agent 的运算功能,发送及接收关于 Agent 功能的询问,对指定 Agent 功能的询问做出回答。

**数据管理 Agent:**接收、储存实时信息重建数据、预想事故排序数据及“N-1”开断结果数据,并对这些数据进行集中管理和智能化检索。实现应用和数据分离,保证系统的开放性。

## 1.3 Agent 之间的协作

各 Agent 之间的协作关系如图 3 所示。

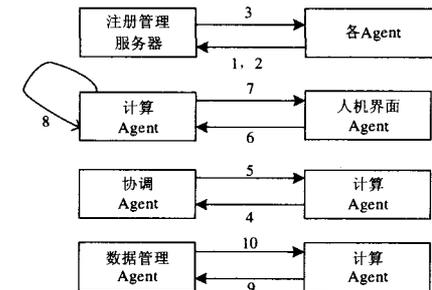


图 3 Agent 协作关系图

Fig.3 Agent collaboration diagram

- (1) 注册: 各 Agent 在注册管理服务器注册;
- (2) 地址询问: 询问某个 Agent 的网络地址;
- (3) 地址回应: 回答针对某个 Agent 的网络地址的询问;

(4) 功能询问: 计算 Agent 向协调 Agent 询问具有后续计算能力的 Agent;

(5) 功能回应: 协调 Agent 将具有所需计算能力的 Agent 列表发还询问 Agent ;

(6) 用户请求: 用户对静态安全预警系统提出请求;

(7) 系统反馈: 静态安全预警系统对用户请求的反馈;

(8) 信息交互: 计算 Agent 间相互传递的信息;

(9) 数据广播: 计算 Agent 将得到的计算结果如预想事故排序结果等发布至数据管理 Agent;

(10) 获取数据: 计算 Agent 从数据管理 Agent 中获取计算所需数据。

## 1.4 Agent 之间的网络通信机制

静态安全预警系统采用 RMI-IIOP<sup>[10]</sup>技术作为代理间的网络通信机制,提供对代理的透明访问,用户只需理解代理间的接口,不必关心其语言实现、位置和所运行的操作系统。RMI-IIOP 兼有 Java 的远程方法调用 RMI (Remote Method Invocation) 较

少的资源占用量及灵活易用性和更成熟的公共对象请求代理体系结构 CORBA (Common Object Request Broker Architecture) 技术的健壮性。在 RMI-IIOP 之上, 代理间通过 KQML 进行信息的共享和交换。

## 2 计算 Agent 功能与设计

如图 2 所示, 每一类计算 Agent 都由负责通讯及智能信息处理的协作模块及负责具体运算的相应计算模块组成, 计算模块间存在调用的先后顺序, 下一级 Agent 需要上一级 Agent 提供数据进行计算, 上下级计算 Agent 通过数据管理 Agent 共享问题求解的初始和中间结果, 以支持其他 Agent 的进一步求解。

计算 Agent 间通过协作来实现并行计算功能。运算顺序靠前的 Agent 的协作模块通过协调 Agent 及注册管理服务获得了所有下一级运算 Agent 的地址, 并向下一级运算 Agent 的协作模块发出计算任务的邀请。收到邀请的 Agent 可以根据自身计算资源的空闲情况对邀请作出肯定或否定的答复。上级 Agent 收到答复后, 协作模块根据答复情况进行计算任务分割, 并给相应 Agent 发送与其计算能力相符的子任务。例如预想事故排序 Agent 计算得出初选事故集后, 向位于不同电脑中的“N-1”开断分析 Agent 发出计算邀请。收到邀请的 Agent 根据情况对邀请作出答复。预想事故排序 Agent 收到答复后, 根据各个开断分析 Agent 的计算能力, 将初选事故集中的事故“N-1”计算任务分别发送给各个开断分析 Agent。通过分布在不同电脑中的计算 Agent 进行并行计算, 提高了静态安全预警速度。

下面将对计算 Agent 中关键的计算模块进行介绍。

### 2.1 预想事故排序代理

预想事故预处理模块对输入的系统信息进行预想事故排序。允许用户定义、编辑和修改用于静态安全研究的事故集合、设置预想事故排序的范围以及确定研究的电网子系统或指定需要监测的线路。允许用户定义和修改各种计算参数, 如是否包含会产生孤立母线的预想事故及线路过载的判据等。

本文利用性能指标 PI<sup>[11]</sup> 对预想事故进行排序。从排序后得到的预想事故列表选取对系统静态安全影响较大的事故形成初选故障集。

### 2.2 N-1 断线分析代理

本文采用灵敏度法<sup>[12]</sup>对由预想事故排序得到的初始故障集进行断线分析。以下给出考虑“N-1”开断后, 利用 AC 灵敏度矩阵计算断线后状态变量

的方法。

假设开断线路为节点  $i$  和  $j$  间的线路, 则节点  $i$  和  $j$  的节点功率变化量  $\Delta P_i, \Delta Q_i, \Delta P_j, \Delta Q_j$  由下式求得:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_i \\ \Delta Q_i \\ \Delta P_j \\ \Delta Q_j \end{bmatrix} = H^{-1} \begin{bmatrix} P_{ij} \\ Q_{ij} \\ P_{ji} \\ Q_{ji} \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中  $H$  为  $4 \times 4$  的矩阵,  $P_{ij}, Q_{ij}, P_{ji}, Q_{ji}$  为开断前的线路功率。则“N-1”开断后节点电压的修正量由下式求得:

$$\begin{bmatrix} \Delta V \\ \Delta \theta \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中:  $\Delta V, \Delta \theta$  为开断后节点电压幅值和相角的修正量,  $S$  为灵敏度矩阵, 是电网开断前潮流计算迭代结束时的雅克比矩阵  $J$  的逆阵。

由  $\Delta V, \Delta \theta$  求得开断后节点电压幅值  $V$  和相角  $\theta$ , 即可得到各支路“N-1”开断后的线路电流幅值和相角的修正量  $\Delta I, \Delta \delta$ 。

### 2.3 指标计算代理

指标计算模块计算脆弱度指标 VI (Vulnerability Index) 和边界指标 MI (Margin Index)<sup>[13]</sup>, 给出系统静态安全综合信息, 指出静态安全的薄弱环节。脆弱度指标和边界指标从发电机, 母线和线路三方面描述了系统的静态安全状态。鉴于篇幅有限, 这里只介绍线路的部分脆弱度指标和边际指标。

$$VI_{Pf,i} = \frac{W_{Pf,i}}{2N} \left( \frac{Pf_i}{S_{i,max}} \right)^{2N} \quad (3)$$

$$VI_{Qf,i} = \frac{W_{Qf,i}}{2N} \left( \frac{Qf_i}{S_{i,max}} \right)^{2N} \quad (4)$$

$$VI_{Qc,i} = \frac{W_{Qc,i}}{2N} \left( \frac{Qc_i}{Q_\Sigma} \right)^{2N} \quad (5)$$

$$VI_{line\_ang,i} = \frac{W_{line\_ang,i}}{2N} \left( \frac{La_i}{La_{i,max}} \right)^{2N} \quad (6)$$

$$MI_{Sf,i} = 1 - \frac{Sf_i}{S_{i,max}} \quad (7)$$

$$MI_{line\_ang,i} = 1 - \frac{La_i}{La_{i,max}} \quad (8)$$

其中:  $VI_{xx}$  为不同参数的 VI;  $MI_{xx}$  为不同参数的 MI;  $W_{xx}$  为不同参数的权重;  $N$  一般取 1;  $Pf_i, Qf_i, Sf_i$  为线路  $i$  的有功, 无功和视在功率;  $Qc_i$

为线路  $i$  的充电功率;  $Q_{\Sigma}$  为所有发电机的无功输出之和, 或整个系统的无功供给;  $La_i$  为线路  $i$  的母线电压相角差;  $La_{i,max}$  为线路  $i$  的母线电压相角差极限。

下面给出圆特性以及四边形特性距离 III 段动作裕度公式。

$$Z_{OA} = PoRch \cdot \cos(LinAng - AngLod) \quad (9)$$

$$Z_{OA} = \frac{\tan(LinAng) \sec(AngLod)}{\tan(LinAng) - \tan(AngLod)} \cdot RisPhRch \quad (10)$$

其中:  $PoRch$  为  $Mho$  特性圆直径;  $AngLod$  为负荷功率因数角;  $LinAng$  为线路阻抗角;  $RisPhRch$  为相间距离电阻定值。

假定被监视线路  $i$  首端保护安装处的测量电压为  $V_i$ , 电流为  $I_i$ , 则测量阻抗  $Z_j$  由公式(11)计算得到:

$$Z_j = \frac{V_i}{I_i} \quad (11)$$

定义被监视线路首端距离保护 III 段的保护裕度  $M_i$  由下式得到:

$$M_i = \frac{Z_j}{Z_{OA}} \quad (12)$$

### 3 知识查询与操作语言 KQML

KQML 的核心是预先定义的行为词 (performative)。采用 ASCII 字符串表示的行为词具有可读性好、方便程序分析 (特别是对许多知识库程序) 以及可以在许多内部应用消息调用机制的平台之间传递等优点。KQML 语言具有可扩展性, 针对不同应用领域的 MAS 系统, 可以自己定义新的行为词, 只要这些行为词仍然符合 KQML 规范并具有一定的实际功能即可。

下面是本文用到的一个 KQML 的消息实例:

```
(ask-one:
sender Ranker 1
: receiver Facilitator
: language Prolog
: ontology Agent
: content " Available ( N-1, X)"
: reply-with id1)
```

在这一消息中, ask-one 是 KQML 的一个用于询问的行为词, 发送者为预想事故排序代理 Ranker 1, 接收者为协调代理 Facilitator。询问的内容是寻找可用的具有 N-1 计算功能的代理。

协调代理 Facilitator 的一个可能的回答是:

```
(tell:
sender Facilitator
: receiver Ranker 1
: language Prolog
: ontology Agent
: content "Available ( N-1, N-1 Agent 1)"
: in-reply-to id1)
```

在这一消息中, tell 是 KQML 的一个用于告知信息的行为词, 发送者为协调代理 Facilitator, 接收者为预想事故排序代理 Ranker 1。告知的内容是下一个可用的具有“N-1”计算功能的代理名, 即 N-1 Agent 1。

这样就完成了代理功能询问及功能回应。预想事故代理 Ranker 1 的功能请求被透明地完成了, 而不必了解复杂的实现过程。

### 4 PSS/E 实现

Python 是一种面向对象的、通用、开放的编程语言, 本文采用 Python 对 PSS/E 进行二次开发, 将系统功能封装成代理。实时信息重建 Agent 将信息转换为适合 PSS/E 计算的数据后, 主要静态安全算法都通过 Python 由 PSS/E 负责实现。计算流程见图 4。

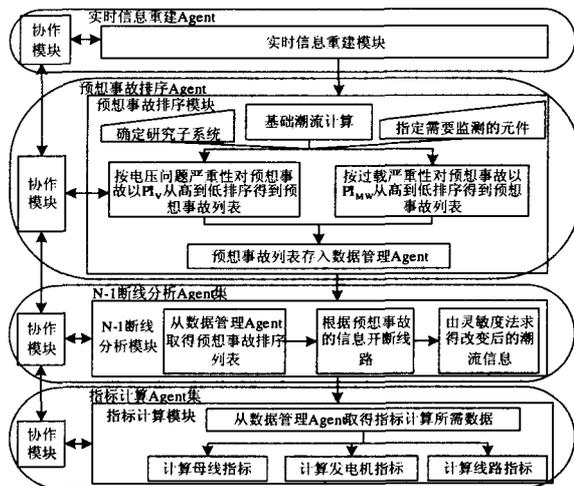


图 4 PSS/E 计算流程图

Fig.4 PSS/E process diagram

### 5 算例分析

本文采用 4 台配置为 Pentium 4、CPU 1.5 G、内存 512 M 的计算机 (编号为 a, b, c, d) 对我国某区域大型电力系统 2004 年数据进行静态安全分析计算。该系统共有 3058 条母线、2135 条

支路及 464 台发电机,耗时小于 45 秒。因篇幅有限,原始数据及系统图略。

各代理于各计算机中的配置如下:数据管理代理、实时信息重建代理及电网数据位于计算机 a 上;注册管理服务器及协调代理、预想事故排序代理位于计算机 b; N-1 开断分析代理集与指标计算代理集同时分布于两台计算机 c 与 d 中。

设置所有的权重为 1,电压变动极限为 0.075 p.u.,线路电压相角差极限为 40 度。为模拟电网的不同运行方式,将原始数据的无功负载削减为原来的 90%。表 1 列出了预想事故排序前 10 位的支路在无功负载削减前后的脆弱度指标。

表 1 预想事故排序前 10 位的支路的脆弱度指标

Tab.1 VIs of top 10 branches on the contingency rank

事故 编号	原无功负荷			0.9 倍无功负荷		
	VI	VI Bus	VI QG_Sum	VI	VI Bus	VI QG_Sum
1	384.55	12.56	88.47	365.82	8.40	73.07
2	384.50	12.55	88.45	365.77	8.39	73.06
3	383.14	12.92	89.07	364.33	8.43	73.82
4	380.92	12.18	88.04	362.35	7.96	72.76
5	382.01	12.40	89.08	362.65	8.03	73.12
6	381.13	12.11	87.91	362.69	7.93	72.75
7	380.64	11.88	87.99	361.99	7.69	72.67
8	379.89	11.80	87.19	363.89	8.34	73.52
9	379.89	11.80	87.19	361.57	7.72	72.03
10	379.96	11.80	87.20	361.56	7.73	72.03

表 2 预想事故排序前 10 位的支路的脆弱度指标

Tab.2 VIs of top 10 branches on the contingency rank

事故 编号	原有功负载及机组有功出力			0.9 倍有功负载及机组有功出力		
	VI	VI PG_Sum	VI PB_Sum	VI	VI PG_Sum	VI PB_Sum
1	384.55	198.4	3.63	318.36	160.5	2.96
2	384.50	198.4	3.63	318.33	160.5	2.96
3	383.14	198.3	3.60	317.81	160.5	2.95
4	380.92	198.3	3.56	316.33	160.5	2.88
5	382.01	198.3	3.51	316.75	160.5	2.86
6	381.13	198.3	3.45	316.47	160.5	2.82
7	380.64	198.3	3.45	315.85	160.5	2.82
8	379.89	198.3	3.38	315.47	160.5	2.76
9	379.89	198.3	3.38	315.47	160.5	2.76
10	379.96	198.3	3.38	315.50	160.5	2.76

从表 1 可以看出无功负荷削减后系统的系统脆弱度指标 VI 降低,说明系统无功负荷的削减有利于系统的静态安全。无功负荷削减后系统的母线电压脆弱

度指标 VI\_Bus 大幅度降低,说明系统无功负荷减少后有助于母线电压的稳定。发电机无功出力脆弱度指标 VI\_QG\_Sum 的降低说明系统的无功出力将随着无功负荷的减少而降低。

表 2 将系统的有功负载及机组的有功出力设为原来的 90%,将静态安全系统计算得出的脆弱度指标与改变前的脆弱度指标进行比较。从表 2 可以看出,改变后系统脆弱度指标 VI 降低,系统静态安全性有所提升。线路上传输的有功减少,反映在线路有功传输脆弱度指标 VI\_PB\_Sum 上,由于有功出力的减少,发电机有功出力脆弱度指标 VI\_PG\_Sum 的降低表明了系统有功出力的减少,发电侧安全性的提升。

以上表明,本系统利用多代理技术实现并行处理后,计算速度快,能够满足在线安全预警的需要。

## 6 结论

本文研究了基于 MAS 的在线静态安全预警系统,系统具有如下特点:

(1)通过 Python 语言对 PSS/E 进行二次开发,实现了静态安全分析的自动化、智能化。将不同的静态安全计算功能封装进代理,通过多代理技术实现了并行计算及系统的可收缩性。

(2)代理之间通过 KQML 语言进行通讯,透明地完成了代理间识别、连接及互相传递信息的任务。

(3)通过各个计算代理间的协作自主地进行计算任务分配,完成静态安全计算,实时提供全面的系统安全信息。

## 参考文献

- [1] MacCalley J. Operational Defense of Power System Cascading Sequences: Probability, Prediction & Mitigation[J]. Power Systems Engineering Research Center (PSerc) Seminars (Tele-Seminar), 2003.
- [2] US-Canada Power System Outage Task Force: Final Report on the August 14, 2LE Blackout in the United States and Canada: Causes and Recommendations[EB/OL]. <http://reports.energy.gov/2004>.
- [3] Power Technologies Inc (PTI). PSS/E - 27 User Manual Documentation[Z]. 2000.
- [4] Power Technologies Inc(PTI). PSS/E - 27 Program Operation Manual Online Documentation[Z]. 2000.
- [5] van Rossum G, Jr Drake F L. Python Documentation[Z]. 2004.
- [6] Yuan Soe-Tsyr. Computer Aided Multi-agent System Engineering[A]. In: Proceedings of International Conference on Multi Agent Systems[C]. 1998.481 - 482.

(下转第 30 页 continued on page 30)

## 6 结束语

电力系统的运行工况复杂,要得到系统和干扰的精确数学模型几乎是不可能的,这使传统 APF 难以取得理想的控制效果。基于  $H_{\infty}$  控制理论的 APF 将这些不确定因素计入设计方案,仿真结果表明,模型具有很好的鲁棒性,可以改善电力系统的动态特性,提高系统的动态稳定。利用 Matlab 程序包,可方便地实现基于  $H_{\infty}$  控制理论的 APF 控制器的设计。

### 参考文献

- [1] 周林,庄华,栗秋华,等. 单相有源电力滤波器的控制方法[J]. 重庆大学学报, 2007,(1):36-39.  
ZHOU Lin, ZHUANG Hua, LI Qiu-hua, et al. Control Method for Active Power Filters for Single-phase[J]. Journal Chongqing University, 2007,(1):36-39.
- [2] 申铁龙.  $H_{\infty}$ 控制理论及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,1996.  
SHEN Tie-long.  $H_{\infty}$  Control Theory and Application[M]. Beijing: Qinghua University Press,1996
- [3] 雷绍兰,颜伟,王官洁,等. 统一潮流控制器的  $H_{\infty}$ 鲁棒控制器设计[J]. 中国电力, 2002,(6):52-54.  
LEI Shao-lan, YAN Wei, WANG Guan-jie, et al. Design for Unified Power Flow  $H_{\infty}$  Controller[J]. Electric Power,2002,(6):52-54.
- [4] A Comparative Study of Shunt Hybrid and Shunt Active Power Filters for Single-phase Applications: Simulation and Experimental Validation[Z].
- [5] 蔡超豪,李川,刘宁. 应用  $H_{\infty}$ 控制理论进行电力系统稳定器的设计[J]. 东北电力技术,2000, (7):2-5, 12.  
CAI Chao-hao, LI Chuan, LIU Ning. Design for Power System Stabilizer Based on  $H_{\infty}$  Control Theory[J]. Northeast Electric Technology, 2000, (7):2-5, 12.
- [6] 蔡超豪,郑俊哲.  $H_{\infty}$ 控制理论和 MATLAB 工具箱应用于电力系统稳定器设计[J]. 沈阳工程学院学报, 2005, (1):47-50.  
CAI Chao-hao, ZHENG Jiu-zhe.  $H_{\infty}$ Control Theory and Matlab Toolbox for Power System Stabilizer[J]. Shenyang College for Journal of Engineering, 2005, (1):47-50.
- [7] Mathematics and Computers in Simulation, 2006.
- [8] 周兴家,沈沉,梅生伟,等. 并联型有源滤波器  $H_{\infty}$ 控制设计[J]. 电力自动化设备,2006, (8):49-52.  
ZHOU Xing-jia, SHEN Chen, MEI Sheng-wei, et al. Design Shunt Active Power Filters for Single-phase Based on  $H_{\infty}$  Control Theory[J]. Electric Power Equipment Automation, 2006, (8):49-52.
- [9] Design and Application Research on Arc-suppression Coil with Thyristor Series Capacitors[J]. Automation of Electric Power Systems.
- [10] Study on the Arc-suppression Coil in 10kV System of Loyang Thermal Power Plant[J]. Power System Technology,1999.
- [7] Finin T, Fritzson R, McKay D, et al. KQML as an Agent Communication Language[A]. In: Proceedings of the Third International Conference on Information and Knowledge Management (CIKM'94)[C].1994.
- [8] Power Technologies Inc(PTI) . PSS/ E - 27 Program Application Guide Online Documentation[ Z ] . 2000.
- [9] External Interfaces Working Group ARPA Knowledge Sharing Initiative, Specification of the KQML Agent Communication Language[Z]. 1992.
- [10] Akira, Andoh Simon Nash. RMI Over IOP[Z]. JavaWorld.com, 1999.
- [11] Ejebe G C, Wollenberg B F. Automatic Contingency Selection[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1979,98(1): 97-104.
- [12] 王锡凡,方万良,杜正春.现代电力系统分析[M].北京:科学出版社, 2003.
- [13] Song H, Kezunovic M. Static Analysis of Vulnerability and Security Margin of the Power System[A]. In: Proc IEEE PES Transmission & Distribution Conference & Exposition[C]. Texas:2006.147-152.

收稿日期: 2008-04-08

作者简介:

赵莹(1984-),女,研究生,研究方向为电力系统运行分析与控制。E-mail: zyl@ncepu.edu.cn

收稿日期: 2007-09-20; 修回日期: 2007-10-23

作者简介:

刘意川(1982-),男,硕士研究生,主要研究方向为继电保护以及人工智能; E-mail:yichuanl@sju.edu.cn

张沛超(1970-),男,博士,副教授,主要研究方向为继电保护、电网调度自动化以及人工智能。

(上接第 23 页 continued from page 23)