基于目标优先的变电站仿真智能评价方法

张 帆[1]，金红核[2]，袁 成[2]，胡 炎[1]，邰能灵[1]，林 尉[2]，陈康铭[2]，崔鹏程[2]

（1.上海交通大学电子信息与电气工程学院电气工程系，上海 200240；2.上海市超高压输变电公司，上海 200063）

摘要：提出一种基于目标优先的变电站仿真智能评价方法，利用目标优先的逻辑方法，把变电站事故处理的操作评价过程抽象成地图线路搜索系统一样的直观逻辑，并以此实现了地下变电站仿真培训系统的智能评价体系。该系统能够灵活地完成诸如变电站正常和事故巡视、倒闸操作、事故处理的培训任务的智能评估，给予学员全面、客观的操作评价。在此基础上，利用电能质量指标作为智能评估理论的辅助判据，进一步提高了评判的客观性。本系统的构建有效地提高了变电站仿真培训的效果。

关键词：地下变电站；专家系统；目标优先；智能评价；电能质量

The objective orientated intelligent evaluation system for the simulation training of substation

ZHANG Fan[1]，JIN Hong-he[2]，YUAN Cheng[2]，HU Yan[1]，TAI Neng-ling[1]，
LIN Wei[2]，CHEN Kang-ming[2]，CUI Peng-cheng[2]

（1.Department of Electrical Engineering，Shanghai JiaoTong University，Shanghai 200240，China；
2. EHV Power Transmission Company of Shanghai Municipal Electric Power Company，Shanghai 200063，China）

Abstract：This paper presents an intelligent evaluation scoring system based on objective orientated theory．This theory abstracts the scoring system into a path searching system of a digital map based on which intelligent assessment system of simulation training system for underground substation is realized.The system is flexible in all kinds of substation operation training, such as summarizing equipment inspection，switching operation and accident handling，then gives students a comprehensive and objective assessment. Furthermore， the paper uses the power quality indicators as auxiliary criteria of intelligent assessment system， which makes the judgment of the evaluation system more reasonable．This scoring system holds outstanding practical value for the engineering training of the simulation substation software．

Key words：underground substation；expert system；objective orientated；intelligent evaluation；power quality

中图分类号： TM631+.2 文献标识码：A 文章编号： 1674-3415(2010)19-0033-06

0 引言

在新型变电站系统中，由于各电气设备之间的联系越来越紧密，电气设备的构造日趋精密复杂，对变电站运行人员的操作技能水平都提出了更高更严格的要求。国内大型变电站的运行人员在上岗前都要接受长期的培训。仿真培训是一种简单有效的操作技能培训方式。因此，变电站仿真技术已成为现代化变电站中不可或缺的一项关键技术。其中，培训系统的智能性将极大地影响到变电站运行人员对新型变电站运行操作的认知程度，进而将直接影响电力系统运行稳定性和故障处理效率。

变电站仿真培训的内容主要有正常日常巡视、倒闸操作和事故处理三个方面，在笔者研制的培训系统中，培训任务比例分别为 1:2:2。目前国内出现的仿真培训软件，在一定程度上采用了专家系统的智能分析原理，使系统能对学员进行的正常巡视操作和倒闸操作进行智能评估。如智能专家系统和神经网络分析法的运用（Expert System）[1-3]，利用加权函数的纯数学原理进行评估[4-5]，列项进行打分的评估方法[6-7]等等。在解决正常巡视和倒闸操作培训方面，以上理论已经能够对学员做出的操作进行精确的正误推理。在目前的技术条件下，针对智能培训任务也有了不同的实现形式，如利用三维技术完成变电站仿真[8]，利用多智能体解决调度操作票的

基金项目：上海市曙光计划资助项目（07SG11）；新世纪优秀人才支持计划(NCET-08-0356)

辅助指导[9]，以及利用模糊理论完成电能质量量化任务[10]。然而，除了事故处理的实例[11]以及专家系统的理论体系[12-13]外，在事故处理的评价方面，至今还没有一种全面的方法能结合智能系统对学员的事故处理操作进行客观的评价。主要原因是，针对一个具体的变电站事故，不同学员分析和看待该事故的角度存在差异，具体的处理方法也就各有差别，因此即使是经验丰富的教练员也无法制定出一个针对某一事故的处理标准。

本文首次提出一种基于目标优先的逻辑概念，根据大型 500 kV 地下变电站的实际情况，实现了学员对变电站事故处理的量化评估。利用该方法研制的仿真培训系统能够全面完成正常巡视、倒闸操作和事故处理三个模块的自动智能评价工作，对于完成变电站操作培训任务具有重要的实用价值。

1 智能评价系统构架简介

本仿真系统的智能评价模块如图 1 所示。首先由教练员设置考核题目类型，如果选择了正常巡视或倒闸操作考核，智能评价系统所调用的专家系统包含左分支的操作探测器和智能打分模块；如果教练员选择事故处理考核，则仿真评价系统需要调用右侧的目标优先逻辑分析模块。而任何考核的操作，最终都要由智能打分模块对学员成绩进行量化评定。

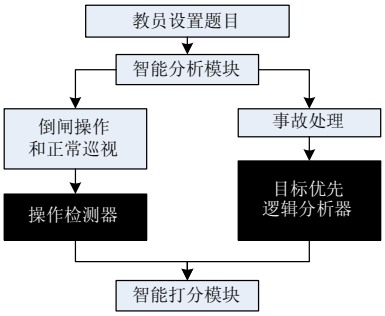

图 1 地下变电站仿真评价系统框图

Fig.1 Block diagram of underground substation simulation and evaluation system

图 2 为学员机电气设备正常或故障汇报功能界面，在学员巡视变电站和处理事故过程中，所有设备正常/异常的状态汇报信息以及对设备的操作信息都是通过该操作平台完成，需要信息收集进行整合，并传输至专家系统数据库待评价使用。对巡视、倒闸操作采用点记录方式，对规程中的巡视点、操作点逐一记录，与标准答案一致则计入得分。事故处理将需要结合地下变电站对辅机系统的操作考核，所以必须对处理事故中进行的倒负荷操作、辅机起停操作等记录进行整合，该系统平台以时间为序，记录了学员整个操作过程中所做的所有操作。图中左侧为故障设备登记表，界面规格完全按照实际某变电站电力设备故障汇报 PMS 系统构建。构建逻辑如图 2 所示，收集信息录入专家系统的 ACCESS 数据库。

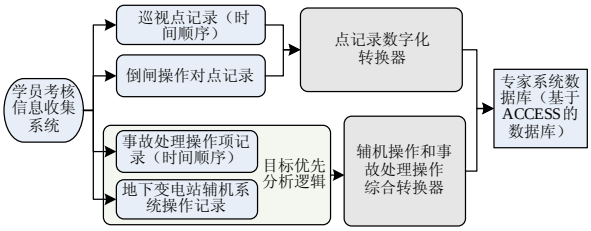

图 2 电力设备综合汇报器操作信息收集系统

Fig.2 Operating information collecting system comprehensive reporting device electrical equipment

图 2 右侧分别显示学员汇报的故障设备信息和所有学员进行的操作记录，所有信息都存入数据库中，作为智能评分系统的基础数据使用。

2 目标优先的原理分析

2.1 目标优先原理的评价分析

故障处理评价主要对学员的故障处理能力及反应进行模拟培训。使学员在故障发生时，根据故障现象进行故障分析和处理事故。各个变电站运行人员对事故处理的具体措施无法建立统一规范的模板。在实际的变电站仿真培训过程中，各个学员处理各种运行事故的方法操作思路、操作步骤各有差别，而其结果可能都是正确地处理了该事故，正误与否完全需要教练员人工判定。目标优先的基本思想就是着重评价事故处理过程中的主要目标和次要目标，而不过多关注处理过程中的具体过程。只要主要目标和次要目标圆满完成，而在事故处理过程中又没有违反变电站操作规程中的事故处理规程，则认为该学员处理事故方法有效。如果学员处理事故后达成了主要目标和次要目标，但进行了违反变电站事故处理规程的操作，这如同日常生活中所常见的地图线路搜索系统（如图 3 所示），图中从起点至终点之间的线路并非唯一，这就代表了处理变电站事故的步骤并非唯一。而在地图线路搜索系统中，路线 C 却无法构成起点到终点的有效连通，这就类似于在变电站事故处理过程中，不能违反变电站相关的事故处理规程。例如误拉合开关，带负荷误拉合隔离刀闸，带地线合闸，带电挂地线或合接地刀闸，误入带电间隔等。一旦违反事故处理规程，则可以判断学员的事故处理步骤是不完全合格的。

目标优先的评价逻辑正是源自线路搜索的思路，是一种注重结果、兼顾过程的评价逻辑。在变电站事故处理过程中，教练员关注的是学员根据故障现象正确分析故障性质，准确找到故障点，并迅速无误地处理故障的能力。处理步骤顺序在实际培训过程中将不是关注重点，教员检查学员的操作顺序，主要目的是考查学员是否有违反电力系统操作的基本规程。因此，目标优先的评价逻辑首先检测学员操作完成后系统的运行状态。如果事故处理后的运行状态和教员所要求的运行状态一致，则完成目标优先的逻辑判定，认为学员达成了事故处理的目标。

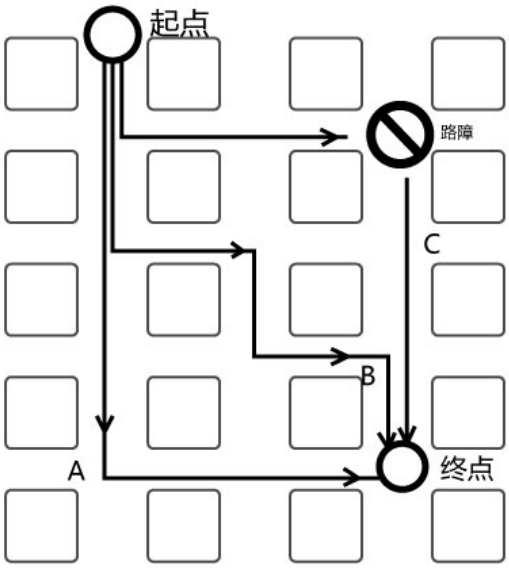

图 3 地图线路搜索示意图

Fig.3 Path searching theory of a digital map

然而，在电力系统的操作规程中相比地图线路搜索原理要复杂得多，判断一个学员操作是否符合要求也并非像线路选择最短距离一样直观也并非一个直观的评价过程，完成目标优先判定也并不代表学员操作一定要准确无误。在完成目标优先逻辑判定之后，系统将全面检查学员各个操作步骤的有效性。在本评价系统的数据库中，学员的每一步操作都被作为一个事件点，被按照时间顺序记录在数据库操作事件表内。操作事件表的数据构成包括：

用一个大括号表示如下：[设备名称][设备ID][电压等级][设备类型][地理位置信息][操作前状态][操作动作][操作结果][操作时刻][是否待检][包含故障项][故障等级]。智能评价系统的专家规则库中，包含了针对变压器、母线、电源线路、站用电源、直流电源等电气元件故障的处理总则。表 1 是操作事件记录表部分信息截取。

在完成了目标优先的逻辑判断之后，规则库中的每个规则都要对操作事件记录表的各个事件点进行巡检。巡检过程将调用变电站主接线拓扑函数获取电气元件连接信息，并访问电气元件状态数据库，获取各元件运行状态信息。一旦发现诸如非同期合闸，带地线合闸，变压器无保护运行、过负荷运行超过额定时间，空充电线路强送电等等违规处理操作时，在最终评价得分中应该扣去相应的分数。表 2 是部分专家规则库整理的文字形式，在程序中将调用各条规程对操作事件记录表数据进行巡检。

表 1 操作事件记录表（部分）

Tab.1 Operation event recorder （partial）

Name	ID	Vot	Type	动作	时间
6001 开关	111000003	66 kV	断路器	分闸	7.9 16:10:29
6003 开关	111000005	66 kV	断路器	分闸	7.9 16:11:16
6001I 隔离	112000003	66 kV	隔离开关	分闸	7.9 16:11:59
6003I 隔离	112000005	66 kV	隔离开关	分闸	7.9 16:12:32
2001 母联	111000007	220 kV	断路器	分闸	7.9 16:13:02
2201 母差	211000007	220 kV	母差	至 II	7.9 16:13:12
6006I 隔离	112000005	66 kV	隔离开关	合闸	7.9 16:13:42

表 2 计算机数据库中存储的知识规则库

Tab.2 Knowledge stored in the computer database

针对情况（if）	禁止或必要操作（then）
母线失压	必须断开连接该母线的所有断路器
影响人身安全故障	必须立即切除、必要时停止设备运行
在任何情况下	除非不可避免，否则必须保证站用电不失压
设备退出	先分闸断路器，后分隔离开关
设备投入	先合隔离开关，后合闸断路器
一次手动操作执行未成功	决不允许再次手动操作
任何情况下合闸	防止非同期并列和系统解列
针对情况	禁止操作或必要操作

2.2 目标优先评价实例

以下是为某仿真培训系统中利用目标优先逻辑对学员进行评价的实例。

例一，如图 4 是某多电压等级变电站中 10～66 kV 系统的主接线图，运行方式为 1 号主变受甲线电

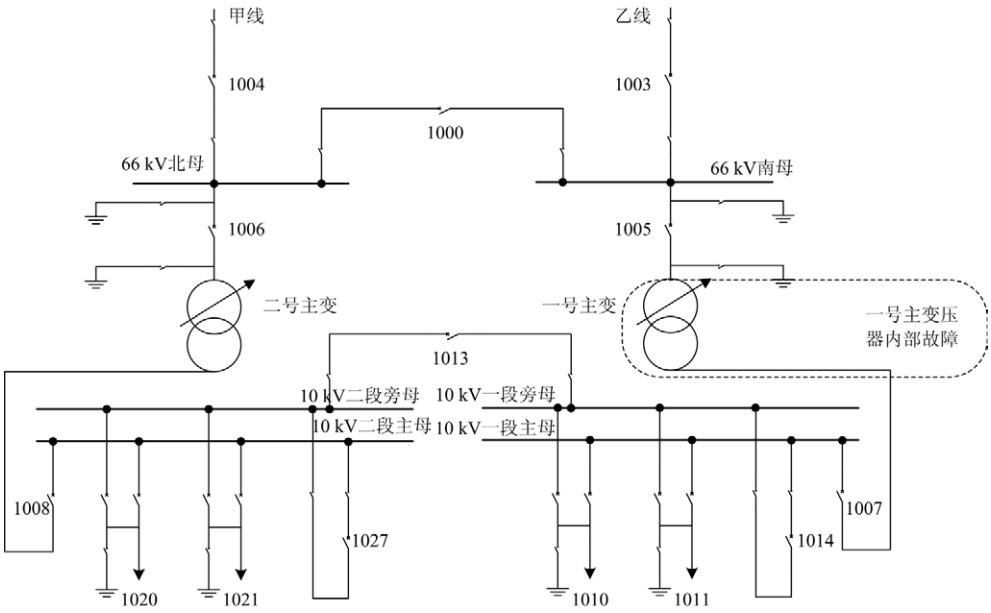

图 4 带有变压器内部故障的主接线图

Fig.4 Main electric diagram with an internal transformer fault

源带 10 kV 一段负荷，2 号主变受乙线电源带 10 kV 二段负荷，66 kV 内桥 1000 断路器热备用，10 kV 分段断路器 1013 冷备用。预想某一运行时刻发生一号主变压器内部故障，重瓦斯保护动作。

变压器内部故障较为严重，按照变电站事故处理原则必须停运一号主变，转检修操作。这时评价系统运用目标优先逻辑原则，分层次设定了优先级如下：

1) 一号主变压器在所有操作结束时是否退出运行，即断路器 1003、1007 是否在事故处理后处于分闸位置；一号主变压器两侧是否装设接地线，一号主变二次交直流电源是否拉开。

2) 1000 断路器是否被拉开，1013 分段断路器是否处于合位（完成本步骤说明倒负荷工作完成，将一号主变的负荷倒由二号主变承担）。

目标优先逻辑按照优先级顺序进行判定，学员必须先完成优先级最高的所有操作目标，才能完成下一优先级的目标（注：在有的操作中，各个目标可能不存在优先级概念）。当系统检测到学员完成了上述所有目标操作任务后，则评价系统判定学员获得某基准得分。

然而，仅仅使用目标优先逻辑是不能完全满足评价要求的。在图 4 的例子中，系统完成目标优先逻辑检索后，还要对操作事件记录表进行事件点巡检。如果在巡检过程中发现，学员先进行 1013 断路器的合闸操作和 1000 断路器的分闸操作，再断开 1003 和 1007 断路器，则违反了变电站倒闸操作规程。因为一号主变在带故障的情况下，是不允许直接带电合闸的，必须先退出一号变压器，再进行倒负荷操作。学员如上操作就相当于在图 3 的地图寻线过程中，选择了线路 C，通过了不允许通过的路径。违反了规定的操作需要扣除相应的分数（由教员设定分值），即在基础分中减去违规操作分。因此，如果学员违反了一些关键操作准则，将直接导致培训不合格。

例二，如图 5 所示，运行方式仍与例一相同。预想某一运行时刻 10 kV 配电线发生同相两点接地故障。

此类线路故障通过事故现象（监控微机显示 10 kV 某相相电压为 0，其余两相升高到 1.732 倍，消谐装置显示接地，开口三角为 100 V 左右），判断事故非站内事故，终端逻辑原则如下（即需要学员操作最终到达的电气运行终态）：

1) 将配线 1010 和 1011 对应的断路器全部分闸，停止这两条配线供电；

2) PT 停运前将一号主变过流保护退出。

系统若检测到学员最终完成以上两步操作目标，目标优先逻辑系统即判定学员操作基本合格，如果学员在操作过程中，系统电压没有明显升高，操作没有违反变电站事故及异常处理规程，即通过了操作事件记录表巡检（每通过一条巡检即在基础分上加分），则事故处理评价系统可判定该次操作考核结果为优秀。

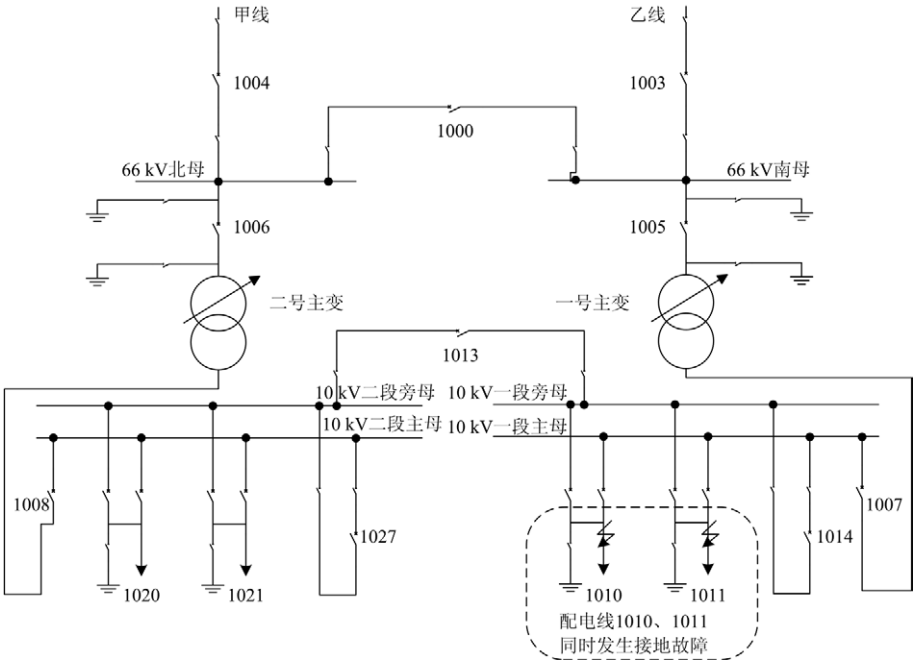

图 5 配电线同相两点接地故障主接线图

Fig.5 Main electric diagram with two-point grounding in the same phase

综上所述，目标优先评价逻辑是一种关注学员操作是否达到预期目标的评价逻辑。无论操作过程中采取了怎样的方法，只要操作最终的电气运行状态是正确的，并且操作过程中不违反操作规程，就算是一次合格的操作。这样的判断逻辑能够很好地抽象出事故处理的操作好坏，但也需要有一些辅助逻辑作为支撑，否则可能导致评价结果失信。

3　目标优先评价逻辑的辅助判据

目标优先逻辑的优点在于无论学员怎么处理故障，该逻辑都始终抓住关键环节，即学员对变电站事故处理的结果是否符合操作要求，而不过分计较操作的中间过程如何。只要能够合理地处理事故，则评价学员的操作符合规定。

但是仅仅关注处理结果是不够的，如图 4 的例子就指出，先分闸断路器 1003 和 1007，再合闸 1013 小车断路器的顺序不允许颠倒，否则也将操作判为不合格。如此，目标优先逻辑规则，必须建立一个辅助的规程库对学员的中间操作过程进行监控，一旦有违反变电运行事故处理一般原则的操作，就记录下来并计入最终评价结果。

本系统所使用的辅助判据有以下三种。

3.1 操作事件记录表巡检器

本模块把所有与变电站事故处理相关的处理原则存入计算机数据库，在学员操作过程中，始终利用这些规则进行监督。一旦有违反规则的操作产生，则记录并参与最终的终端逻辑评价。存储形式如表 2 所示，在学员操作过程中，不能违反禁止操作和遗漏必要操作的内容，否则巡检器会在最终评价中扣除相应的分数。

3.2 电能质量检测器

变电站仿真系统培训过程中，学员的某些错误操作在没有教员监视的情况下，可能难以被察觉，但从电能质量指标的角度看，计算机可以发现学员操作所导致的一些电压扰动或越限。所以，系统通过采用电能质量检测装置监测变电站各节点的电能质量指标，判断学员操作正误是可行的。在实际运用中发现，电能质量检测器作为目标优先逻辑的智能评价辅助判据是完全可行的。

在仿真系统中，得到变电站各个节点的电压、频率数值是非常容易的。本系统实时检测各节点的电压偏差、频率偏差、三相电压不平衡度（三相电压不平衡度参考 A、B、C 三相的ΔV_a、ΔV_b 、ΔV_c ）进行评估。实现方程简述如式（1）、式（2）所示。

$$\Delta V = \left| V - V' \right| \tag{1}$$

$$\Delta f = \left| f - f' \right| \tag{2}$$

其中：V、f分别是电压、频率标准值；V'、f'是实际值；ΔV、Δf表示偏差量。

需要注意的是，在事故处理过程中，有的节点

电压质量受事故影响，其电能质量不可能由学员简单的操作恢复到故障前水平，这些节点是不能参与电能质量检测器评价的，在教练员设置变电站事故时，可选择将这些数据节点屏蔽，否则将影响评价结果的公正性。

3.3 事故处理计时器

变电站事故处理往往要求操作人员在较短暂的时限内完成正确的处理事故，处理的时间从一个侧面反应了学员处理事故的能力和对变电站操作的熟练程度。在终点逻辑原则中，处理时间作为一个重要因素参与到智能评价中。如果学员没有在规定的时限内完成操作则同样要扣除相应的分数，在一些紧急事故中，时间因素显得尤为重要，在目标优先的逻辑评价中，应该占有更高的权重。

4 结论

变电站仿真培训评价的难点在于其过于灵活，诸如事故处理这样的培训项目，每个学员都可能采用完全不同的操作方法来处理事故，利用计算机来评价各种方法的优劣是一大难点。本文提出目标优先的逻辑方法，把变电站事故处理的操作评价过程抽象成地图线路搜索系统一样的直观逻辑，并以此实现了地下变电站仿真培训系统的智能评价体系；提出了利用电能质量标准、操作执行时间标准作为学员操作评价的辅助依据，进一步完善了终点逻辑的推理评价。本文的研究内容对于完善变电站仿真系统具有积极的经济意义，是一种行之有效的智能评价方法。

参考文献

[1] 唐胜利，何祖威，常涛. 电站仿真机中智能培训功能的实现[J]. 系统仿真学报，2000，12（3）：278-281.
TANG Sheng-li，HE Zu-wei，CHANG Tao. The implementation of intelligent training in power plant simulator[J]. Journal of System Simulation，2000，12（3）：278-281.

[2] 李朝晖，孙宏斌，潘哲龙. 调度员培训模拟器智能培训评估方案的分析[J]. 广东电力，2001，14（2）：35-37.
LI Zhao-hui，SUN Hong-bin，PAN Zhe-long. Intelligent trainee evaluation methods in dispatcher training simulator[J]. Guangdong Electric Power，2001，14（2）：35-37.

[3] 王积新，董朝霞. 基于SOFM的调度员培训仿真系统智能评估[J]. 计算机与数字工程，2005，33（9）：35-37.
WANG Ji-xin，DONG Zhao-xia. An intelligent evaluation of DTS based self-organizing feature map[J]. Computer and Digital Engineering，2005，33（9）：35-37.

[4] 项曙光，岳金彩，李玉刚. 过程仿真培训成绩的自动评定及其实现（I）-仿真培训成绩的评分方法[J]. 计算机仿真，1999，16（1）：69-71.
XIANG Shu-guang，YUE Jin-cai，LI Yu-gang. Automation determination and realization of training score in process simulation and training system（Ⅰ）—the calculation method of operator’s training score[J]. Computer Simulation，1999，16（1）：69-71.

[5] 项曙光，岳金彩，李玉刚. 过程仿真培训成绩的自动评定及其实现（II）-培训成绩自动评分的实现[J]. 计算机仿真，1999，16（2）：6-10.
XIANG Shu-guang，YUE Jin-cai，LI Yu-gang. Automation determination and realization of training score in process simulation and training system（II）—realization of automation determination of training score[J]. Computer Simulation，1999，16（2）：6-10.

[6] 徐晓慧. 变电站仿真培训中缺陷查找及处理的自动评分系统[J]. 电力自动化设备，1999，19（4）：47-49.
XU Xiao-hui. An automatic scoring system for equipment defect search and treatment in substation’s simulation training course[J]. Electric Power Automation Equipment，1999，19（4）：47-49.

[7] 范永胜，程芳真，眭喆，等. 电站仿真机的培训评分系统研究[J]. 系统仿真学报，2000，12（3）：282-286.
FAN Yong-sheng, CHENG Fang-zhen，SHUI Zhe，et al. Study on the scoring system of power plant training simulator[J]. Journal of System Simulation, 2000，12（3）：282-286.

[8] 谢成，胡炎，邰能灵，等. 基于可扩展对象库的变电站三维仿真平台[J]. 电力系统自动化，2009，33（6）.
XIE Cheng，HU Yan，TAI Neng-ling，et al. A tridimensional substation simulation platform based on extensible object collection[J]. Automation of Electric Power Systems，2009，33（6）.

[9] 周明，任建文，李庚银，等. 基于多智能体的电网调度操作票指导系统研究与实现[J]. 中国电机工程学报，2004，24（4）：58-63.
ZHOU Ming，REN Jian-wen，LI Geng-yin，et al. A multi-agent based dispatching operation instructing system in electric power systems[J]. Proceedings of the CSEE，2004，24（4）：58-63.

[10] 唐会智，彭建春. 基于模糊理论的电能质量综合量化指标研究[J]. 电网技术，2003，27（12）：85-88.
TANG Hui-zhi，PENG Jian-chun. Research on synthetic and quantificated appraisal index of power quality based on fuzzy theory[J]. Power System Technology，2003，27（12）：85-88.

[11] 刘元津，吴涛，李志文，等. 变电运行与事故处理——基本技能及实例仿真[M]. 北京：中国水利水电出版社，2002：46-77，84-101.
LIU Yuan-jin，WU Tao，LI Zhi-wen，et al. Substation operation and handling of accident - the basic skills and examples of simulation[M]. Beijing: Chinese Water Conservancy and Hydropower Press，2002：46-77，84-101.

（下转第 45 页 continued on page 45）

analyses for power station equipment[J]. Proceedings of the CSEE，2005，25 （23）：119-123.

[5] 苏鹏声，王欢. 电力系统设备状态监测与故障诊断技术分析[J]. 电力系统自动化，2003，27（1）：61-65.
SU Peng-sheng，WANG Huan. Technology analysis of state monitoring and fault diagnosis in electric power systems[J]. Automation of Electric Power Systems，2003，27（1）：61-65.

[6] 刘有为，李光范，高克利，等. 制定《电气设备状态维修导则》的原则框架[J]. 电网技术，2003，27（6）：64-67.
LIU You-wei，LI Guang-fan，GAO Ke-li，et al. Fundamental frame to draft guide for condition maintenance of electric power equipment[J]. Power System Technology，2003，27（6）：64-67.

[7] 张怀宇，朱松林，张扬，等. 输变电设备状态检修技术体系研究与实施[J]. 电网技术，2009，33（13）：70-73.
ZHANG Huai-yu，ZHU Song-lin，ZHANG Yang，et al. Research and implementation of condition-based maintenance technology system for power transmission and distribution equipments[J]. Power System Technology，2009，33（13）：70-73.

[8] 郭基伟，柳纲，唐国庆，等. 电力设备检修策略的马尔科夫决策[J]. 电力系统及其自动化学报，2004（4）：6-10.
GUO Ji-wei，LIU Gang，TANG Guo-qing，et al. Markov decision process on electrical equipments maintenance optimization[J]. Proceedings of the EPSA，2004（4）：6-10.

[9] Paul H B，David P W. Life cycle cost tutorial[C]. // Fifth International Conference on Process Plant Reliability. Houston（USA）: 1996.

[10] Paul H B. Life cycle cost & reliability for process equipment[C]. //Eighth Annual Energy Week Conference & Exhibition. Houston（USA）: 1997.

[11] 宋保维. 系统可靠性设计与分析[M]. 西安：西北工业大学出版社，2000.

[12] 张晨. 基于可靠性的设备经济寿命与预防性维修周期的研究[D]. 南京：南京理工大学，2006.
ZHANG Chen. Research on equipments' economic life and preventive maintenance cycle based on reliability[D]. Nanjing：Nanjing University of Science & Technology，2006.

[13] 曹晋华，程侃. 可靠性数学引论[M]. 北京：高等教育出版社，2006.

[14] 何剑，程林，孙元章，等. 条件相依的输变电设备短期可靠性模型[J]. 中国电机工程学报，2009，29（7）：39-46.
HE Jian，CHENG Lin，SUN Yuan-zhang，et al. Condition dependent short-term reliability models of transmission equipment [J]. Preceedings of the CSEE，2009，29（7）：39-46.

[15] 李剑涛，蒋里强，黄立波. 装备最佳预防性维修间隔时间研究[J]. 装备指挥技术学院学报，2004，15（3）：26-29.
LI Jian-tao，JIANG Li-qiang，HUANG Li-bo. Study on the interval in the best equipment preventive maintenance[J]. Journal of Institute of Command and Technology，2004，15（3）：26-29.

收稿日期：2009-10-23

作者简介：

王　一（1985-），女，硕士研究生，主要研究方向为电力系统继电保护和控制、状态检修技术；

王慧芳（1974-），女，博士，副教授，主要研究方向为电力系统继电保护和控制、设备全寿命周期理论；E-mail: huifangwang@zju.edu.cn

张　亮（1962-），高级工程师，主要研究方向为变电设备检修管理。

（上接第 38 页　continued from page 38）

[12] 肖登明. 电力设备在线监测与故障诊断 [M]. 上海：上海交通大学出版社， 2005：43-69.
XIAO Deng-ming. Electrical equipment on line monitoring and fault diagnosis[M]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University Press，2005：43-69.

[13] Thomas Dean，James Allen，Yiannis Aloimonos. 人工智能-理论与实践[M]. 北京：电子工业出版社，2004：138-139，143-149.
Thomas Dean，James Allen，Yiannis Aloimonos. Artifical intelligence theory and practice[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry，2004：138-139，143-149.

收稿日期：2009-10-08；　修回日期：2010-01-10

作者简介：

张　帆（1984-），男，硕士研究生，主要研究方向为电力系统继电保护；Email: zhfanddd@sjtu.edu.cn

邰能灵（1972-），男，教授，博士生导师，主要研究方向为继电保护及电力市场；

胡　炎(1975-)，男，博士，高工，主要研究方向为电力二次系统安全防护、电力系统和保护仿真、调度自动化技术等。