

基于高可用自动化网络的保护系统及其可靠性分析

侯伟宏¹, 张沛超¹, 胡炎¹, 苏永春²

(1. 上海交通大学电气工程系, 上海 200240; 2. 江西省电力科学研究院, 江西 南昌 330096)

摘要: 随着基于 IEC 61850 的数字化变电站系统的进一步发展, 传统变电站内的信号和控制电缆将逐步被过程总线所代替。IEC 已经将工作重心逐渐转移到过程总线上, 结合制订 IEC 61850 Ed 2.0, IEC 开始深入研究并制订诸如 IEC 62439-3、IEEE 1588-2008 等标准。阐述了 IEC 62439-3 标准的典型技术特征, 及其支持网络无扰恢复的技术原理。将 IEC 62439-3 应用于过程总线, 并与传统保护系统相比, 分析采用不同过程总线的全数字化保护系统的结构, 利用可靠性框图对不同结构的保护系统可靠性参数进行详细的计算和分析。针对过程层总线宜采用的网络结构给出了建议。

关键词: IEC 61850; IEC 62439-3; 并行冗余协议; 高可用无缝环; 保护系统; 可靠性

Reliability analysis for protection systems based on high availability automation network

HOU Wei-hong¹, ZHANG Pei-chao¹, HU Yan¹, SU Yong-chun²

(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;

2. Jiangxi Electric Power Research Institute, Nanchang 330096, China)

Abstract: With the further development of the substation automation system based on IEC 61850, the process bus will be widely used in the substation to replace the traditional signal and control cable. IEC has shifted its focus to the process bus. Combined with the formulation of IEC 61850 Ed 2.0, IEC begins to study and develops some standards such as IEC 62439-3, IEEE 1588-2008, etc. This paper describes the typical technical characteristics of IEC 62439-3 standard, and introduces the main technical principles of the network bumpless recovery. It applies IEC 62439-3 to the process bus. By comparing with the traditional protection system, the paper analyzes alternative all-digital protection systems which employs different process bus architectures. Finally, the reliability block diagrams are used to calculate and analyze the reliability indices of different protection systems, and network structure that fits for process bus is proposed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No.50807037).

Key words: IEC 61850; IEC 62439-3; parallel redundancy protocol; high availability seamless ring; protection system; reliability

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)18-0044-05

0 引言

随着数字化变电站系统应用的不断深入^[1-2], 传统变电站内过程层的信号和控制电缆将逐步被过程总线^[3]所代替。但将过程总线技术全面应用于数字化变电站中, 至少仍有如下问题亟待解决: (1) 网络的无扰恢复 (Bumpless Recovery)。根据 IEC 61850-5^[4], 采样值传输、母差保护等功能必须实现无扰恢复, 即交换机、光纤等发生任意单点故障后, 通信网络皆可零延时恢复, 从而使应用层感受不到扰动。而现有协议都无法做到这点, 如 RSTP 的恢

复时间为秒数量级^[5], MRP 为 100 ms 数量级^[6], 等等。(2) 可靠性。数字化方案的可靠性不能低于传统方案。(3) 成本。数字化方案的成本应与传统方案有可比性。由于数字化变电站中采用了交换机等很多新型电子装置^[7], 故其可靠性、成本等问题比较突出。

在近几年的 IEC 61850 变电站建设中, 国内外的主要精力花在设备的互操作, 以及 MMS 和 GOOSE 等服务的可靠性等方面。随着数字化程度的深入, IEC 将工作重心逐渐转移到过程总线上, 结合制订 IEC 61850 Ed 2.0, 开始深入研究并制订诸如 IEC 62439-3^[6]、IEEE 1588-2008^[8]等标准。

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50807037)

本文首先介绍了 IEC 62439-3 标准的主要技术特征, 阐释了其支持网络无扰恢复的技术原理。然后分别建立了常规保护和采用过程总线的全数字化保护系统的可靠性模型, 并对其可靠性进行了横向分析与比较。其中, 根据过程总线的不同, 又将全数字化保护系统分为基于单网、并行冗余协议和高可用无缝环网协议等三种典型情况。

1 IEC 62439-3 简介

1.1 IEC 62439-3 概述

IEC 62439 的全称是“高可用自动化网络(High Availability Automation Networks)”^[6], 该标准对网络冗余做出了专门的规定。其中与 IEC 61850 密切相关的是 IEC 62439-3 部分, 即并行冗余协议(Parallel Redundancy Protocol, PRP)和高可用无缝环(High Availability Seamless Ring, HSR)^[6,9]。

基于 PRP 和 HSR 的网络具有优异的故障恢复性能, 而且能够适用于各种规模的变电站总线和过程总线拓扑, 在 IEC 61850-9-2 Ed 2.0 中, IEC 将以基于 PRP 或 HSR 的网络作为变电站总线和过程总线的技术导则。

1.2 并行冗余协议

1.2.1 网络拓扑

基于 PRP 网络内含有两种节点: 单端口节点(Single Attached Node, SAN)和双端口节点(Doubly Attached Node, DAN), 节点根据需要可选择地接入单个网络或双网中。网络拓扑如图 1 所示。

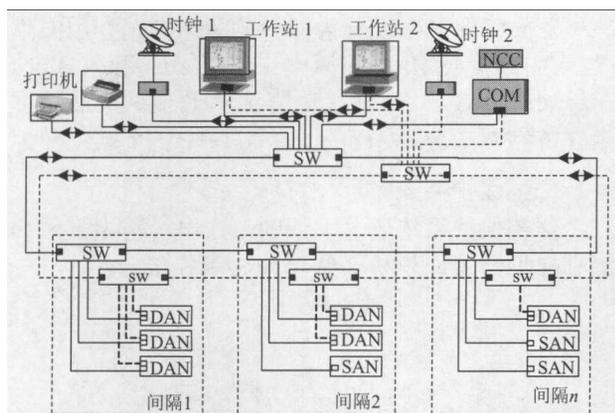


图 1 PRP 拓扑示例

Fig.1 Example of PRP topology

并行冗余的双网在物理上是完全隔离的, 且双网可以采用不同的网络拓扑, 如 A 网采用环型拓扑, B 网采用星型拓扑。正常情况下, 双网并列运行, 在故障情况下双网可以实现零延时切换。

1.2.2 节点结构

并行冗余网络内的双端口节点内具有一个链路冗余实体(Link Redundancy Entity, LRE)和两个以太网控制器。其中链路冗余实体是节点双端口机制实现机构, 其功能是连接上层应用和下层传输。两个以太网控制器具有完全相同的 MAC 地址和 IP 地址。节点内部结构如图 2 所示。

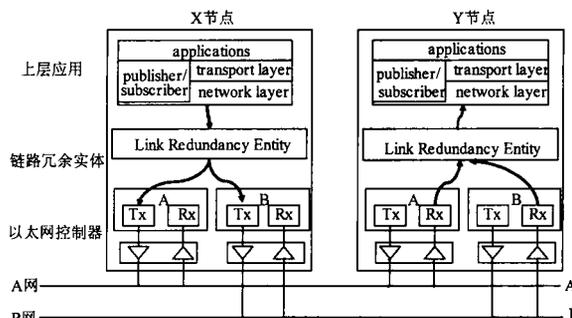


图 2 双端口节点结构

Fig.2 Doubly attached node structure

发送数据时, 发送节点 LRE(图 2 中的 X 节点)将来自应用层的数据帧复制后同时发往 A、B 端口; 接受数据时, 接收节点 LRE(图 2 中的 Y 节点)同时接收 A、B 端口的数据帧, 保留第一个接收到的数据帧并剔除重复数据帧。如果网络或节点某一端口出现故障, 接收节点 LRE 仍然可以收到从另一组网络传输来的数据。

1.3 高可用无缝环

1.3.1 网络拓扑

PRP 根据网络节点数据帧的不同流向作为各自独立的虚拟网络结构, 这便形成了高可用无缝环网(HSR)。该网络要求所有的网络节点必须是“可交换型终端节点”。HSR 网络是由各节点之间以手拉手方式形成的环网。网络拓扑如图 3 所示。

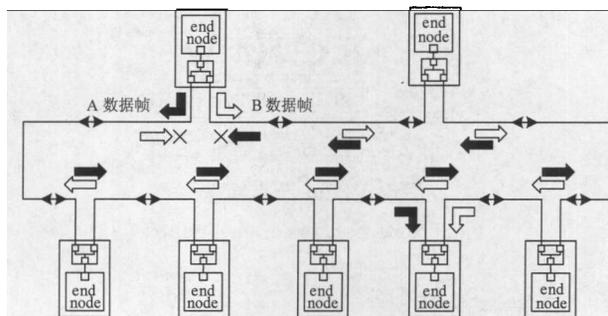


图 3 HSR 拓扑示例

Fig.3 Example of HSR topology

该网络内具有两条虚拟的通信链路, 故对单点故障具有无扰恢复能力, 可靠性较高。其突出特点在于无需外置交换机, 这将显著降低网络投资。

1.3.2 节点结构

HSR 网络的节点必须配置两个端口，并且内嵌交换逻辑以执行数据转发功能。节点结构如图 4 所示。

发送数据时，发送节点（图 4 中的 X 节点）同时发送两组相同的数据帧，这两组数据帧在网络上按照相反的方向传输；接收数据时，接收节点（图 4 中的 Y 节点）交换逻辑将该数据帧按照数据流向转发到下一个节点。当节点收到自身发出的数据帧时，它会删除数据帧以避免数据在网络中成环。

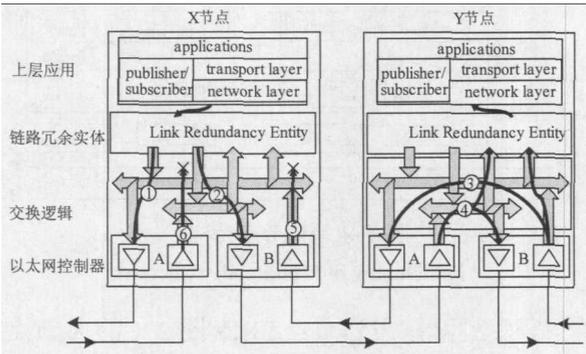


图 4 HSR 节点结构

Fig.4 Node structure in HSR

1.4 冗余盒

为了支持 IEC 62439-3 中的各种应用及构成灵活的组网方式，还需要一种特殊的网络装置：冗余盒（RedBox）。该装置用于将单端口节点接入 PRP 网络内以及实现 HSR 网络的互联。节点结构如图 5 所示。

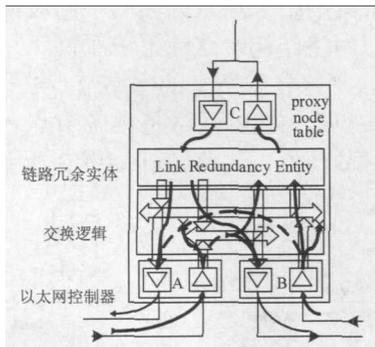


图 5 RedBox 节点结构

Fig.5 Node structure of the RedBox

2 可靠性分析

与传统保护系统相比，全数字化保护系统一般由合并单元、交换机、网络介质、保护装置、同步时钟等构成。下文图表中采用以下缩写符号：TS-同步时钟；MU-合并单元；SW-交换机；EM-网络介质（如光纤等）；RedBox-冗余盒；IED-数字保护

装置；CB-操作箱；WIRE-电缆；PR-传统保护装置。

为使可靠性分析具有横向可比较性，本文采用如下假设：

1) 皆以一次系统采用 3/2 接线方式的线路保护作为研究对象；

2) 所有元件故障分布是指数分布。即在元件故障率为 λ_i 时，可靠性函数为：

$$R_i(t) = p_i(t) = e^{-\lambda_i t} \quad (1)$$

3) 采用表 1 中的元件可靠性数据。

在表 1 中，传统保护和操作箱的典型 T_{MTTF} 取为 100 年^[10]；由于 I/O 下放，数字化保护装置可靠性较传统保护更高，取其 T_{MTTF} 为 150 年（则故障率为 0.006 7/年）；由于合并单元基于硬件实现，假定其 T_{MTTF} 可达到 150 年^[11]；HSR 网络节点内的交换模块基于硬件实现，可靠性较高，取其 T_{MTTF} 为 150 年；根据现有厂家提供的数据，交换机的 T_{MTTF} 最高为 50 年，即故障率为 0.02/年。

表 1 元件可靠性数据

Tab.1 Reliability data of the components

数字保护元件	故障率 λ / y	传统保护元件	故障率 λ / y
TS	0.006 7	PR	0.01
IED	0.006 7	CB	0.01
MU	0.006 7	WIRE	0.001
SW	0.02		
EM	0.001		
RedBox	0.006 7		

下面将保护系统分为四种典型结构，利用文献 [7, 12-13] 提出的可靠性框图（Reliability Block Diagram, RBD）、邻接矩阵法和最小路集法计算系统可靠性函数 $R_{sys}(t)$ 。

2.1 传统保护系统

传统保护系统通过大量的二次电缆将电气量传输到保护装置，保护系统结构如图 6 所示。

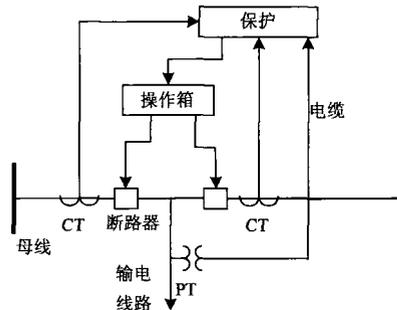


图 6 传统保护系统

Fig.6 Traditional protection system

根据系统结构图, 得传统保护系统可靠性框图如图 7。图中假设一套典型保护系统所需导线(含模拟量和开关量)数量约为 20 根。



图 7 传统保护系统可靠性框图

Fig.7 RBD of the traditional protection system

根据系统可靠性框图, 得可靠性函数为:

$$R_{sys1}(t) = p_{WIRE}^{20} \times p_{PR} \times p_{CB} \quad (2)$$

由式(1)、(2)及表 1 数据, 计算系统 T_{MTTF} 得:

$$T_{MTTF} = \int_0^{\infty} R_{sys}(t) dt = 25(\text{年})$$

2.2 采用单网的全数字化保护系统

在全数字化保护系统内, 合并单元将采样信号打上时标后以多播方式发布到过程总线, 保护装置从过程总线获取采样和控制信息。对于采用单网的数字化保护系统, 其系统结构如图 8 所示。

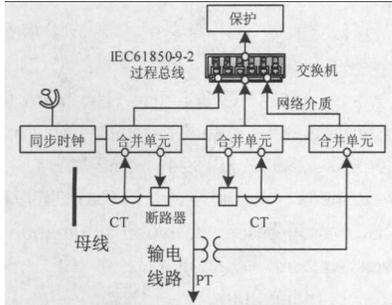


图 8 基于单网的数字化保护系统

Fig.8 Digital protection system with single network

根据系统结构图, 得系统可靠性框图如图 9。

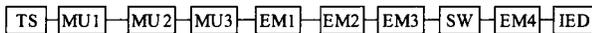


图 9 基于单网的数字化保护系统可靠性框图

Fig.9 RBD of the single network digital protection system

根据系统可靠性框图, 得可靠性函数:

$$R_{sys2}(t) = p_{TS} \times p_{SW} \times p_{IED} \times p_{MU}^3 \times p_{EM}^4 \quad (3)$$

由式(1)、(3)及表 1 数据, 计算系统 T_{MTTF} 得:

$$T_{MTTF} = \int_0^{\infty} R_{sys}(t) dt = 17.39(\text{年})$$

2.3 基于 PRP 网络的保护系统

在将 PRP 网络应用于过程总线后, 全数字化保护系统的系统结构如图 10 所示。

根据系统结构图, 得系统可靠性框图如图 11。

根据系统可靠性框图, 得可靠性函数:

$$R_{sys3}(t) = p_{TS} \times p_{MU}^3 \times [1 - (1 - p_{EM}^4 \times p_{SW})^2] \times p_{IED} \quad (4)$$

由式(1)、(4)及表 1 数据, 计算系统 T_{MTTF} 得:

$$T_{MTTF} = \int_0^{\infty} R_{sys}(t) dt = 22.51(\text{年})$$

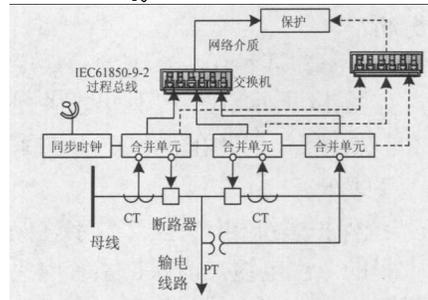


图 10 基于 PRP 的保护系统

Fig.10 Protection system based on PRP

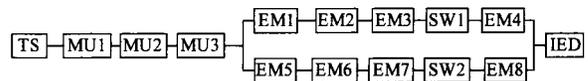


图 11 基于 PRP 的保护系统可靠性框图

Fig.11 RBD of the protection system based on PRP

2.4 基于 HSR 网络的保护系统

采用 HSR 网络的保护系统结构上是由“可交换型节点”之间以手拉手方式形成无缝的环网。系统结构如图 12。

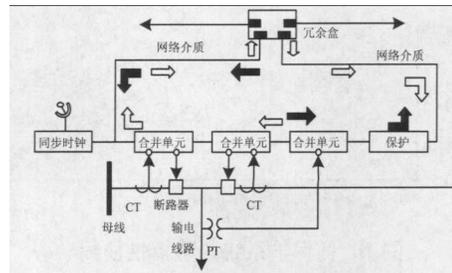


图 12 基于 HSR 的保护系统

Fig.12 Protection system based on HSR

由于高可用无缝环网内具有两条虚拟的通信链路, 因此环网正常通信时链路的可靠性为:

$$p = \sum_{i=0}^1 C_n^i p_{EM}^{n-i} (1 - p_{EM})^i \quad (5)$$

其中, n 为环网内的节点数。

故保护系统可靠性框图如图 13。

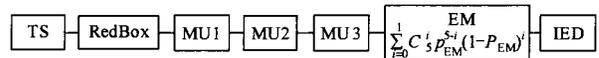


图 13 基于 HSR 的保护系统可靠性框图

Fig.13 RBD of the protection system based on HSR

根据系统的可靠性框图, 得可靠性函数:

$$R_{sys4}(t) = p_{TS} \times p_{RED} \times p_{MU}^3 \times [p_{EM}^5 + 5 \times p_{EM}^4 (1 - p_{EM})] \times p_{IED} \quad (6)$$

由式(1)、(6)及表1数据,计算系统 T_{MTTF} 得:

$$T_{MTTF} = \int_0^{\infty} R_{sys}(t)dt = 25.63(\text{年})$$

2.5 结果分析

综合以上计算,四种保护系统的可靠度随时间的变化情况如图14所示。图15列出了各保护系统的 T_{MTTF} (单位:年)以及在 $t=1000\text{h}$ 的系统可靠度。计算结果表明:

1) 与传统保护系统相比,虽然数字化保护系统中减少了大量的二次电缆,但保护系统内包含了更多的电子设备,使得结构更为复杂。在不考虑网络冗余时,数字化保护系统的可靠性会较低。

2) 初看起来,基于PRP协议采用并行冗余网络,其可靠性应最高。但“最贵的不一定是最可靠的”。当交换机的可靠性还不够高时,PRP系统的可靠性不一定高于HSR系统,甚至会低于常规保护系统。

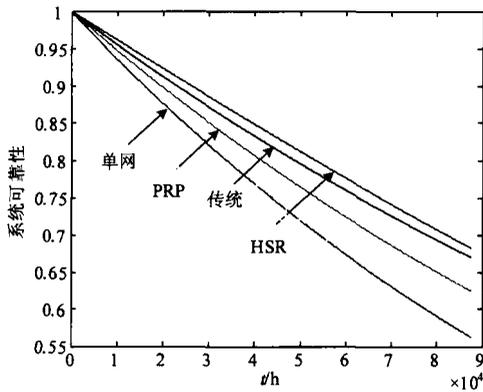


图14 各保护系统的可靠性曲线

Fig.14 Reliability curves of alternative protection systems

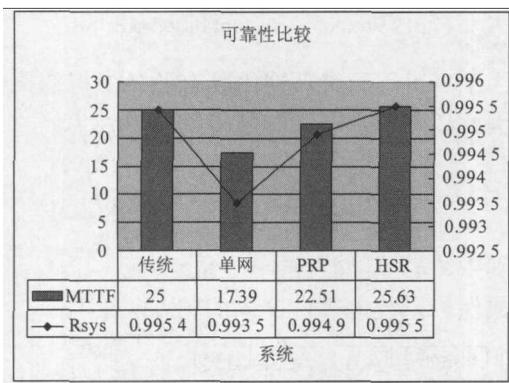


图15 各保护系统可靠性比较

Fig.15 Comparison of the reliability between the alternative protection systems

3) HSR系统由于取消了外置交换机,系统具有最高的可靠性;同时,系统造价也得以显著降低。但当HSR系统中出现单点网络故障时,虽然网络可

以无扰恢复,但数据传输至位于网络末端的装置将有较大时延。另一方面,由于数据的双向传输特性,HSR系统的有效负载将减少一半。综合这些特性,HSR网络非常适合于间隔内的过程总线。

3 结论

1) 采用单网结构的全数字化保护系统的可靠性可能低于传统保护系统。

2) 采用PRP或HSR网络结构后,全数字化保护系统都将支持网络的无扰恢复特性。同时,由于装置的双网口具有相同的MAC地址和IP地址,有助于降低工程配置和维护的工作量。

3) 采用HSR网络结构后,全数字化保护系统可在提升系统可靠性的同时,降低系统造价。综合HSR网络的各种特性,HSR网络非常适合应用于间隔内的过程总线。

参考文献

- [1] 高翔, 张沛超. 数字化变电站主要技术特征和关键技术[J]. 电网技术, 2006, 30(24): 67-71. GAO Xiang, ZHANG Pei-chao. The main features and key technologies of digital substation[J]. Power System Technology, 2006, 30(24): 67-71.
- [2] Keiichi Kaneda, Setsuo Tamura, Nobuhisa Fujiyama, et al. IEC 61850 based substation automation system[C]. // Power System Technology and IEEE Power India Conference. India: 2008.
- [3] IEC 61850-9-2 specific communication service mapping (SCSM) sampled analogue values Over ISO 8802-3 [S]. 2005.
- [4] IEC 61850-5 communication requirements for functions and device models[S]. 2003.
- [5] IEEE.802.1W-IEEE standard for local and metropolitan area networks: media access control (MAC) bridges-amendment 2: rapid reconfiguration[S]. 2001.
- [6] IEC 62439 industrial communication networks: high availability automation networks [S]. 2008.
- [7] 张沛超, 高翔. 全数字化保护系统的可靠性及元件重要度分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 47-52. ZHANG Pei-chao, GAO Xiang. Analysis of reliability component important for all-digital protection systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(1): 47-52.
- [8] IEEE 1588-2008 IEEE standard for a precision clock synchronization protocol for networked measurement and control systems[S]. 2008.
- [9] Hubert Kirmann, Mats Hansson, Peter Müri. IEC 62439 PRP: bumpless recovery for highly available, hard real-time industrial networks[C]. //12th IEEE Conference Emerging on Technologies & Factory Automation. 2007.

(下转第53页 continued on page 53)

和相应系数矩阵 B , 表 6 是按照公式 (4) 计算得到最终评价结果。

4 结论

依据协调度定义, 当 $Co=1$ 时, 认为处于系统发展的最高状态, 即实现电网发展同社会、经济、资源与环境协调发展的理想状态; 当 $Co=0$ 时, 认为处于系统发展的最差状态。按照这一准则依据表 4 所示 2003~2007 年测算结果得到如下结论。

从静态角度看, 2003~2005 年该区域电网发展协调度为 0.637~0.838, 协调性较高; 2006~2007 年协调性分别达到了 0.889, 0.968, 说明该电网发展与社会、经济、资源及环境之间达到了很高的协调, 说明该区域电网发展各相应环节正在向世界先进水平接近。

从动态角度看, 2003~2007 年间, 该区域电网发展协调性评价各个指标虽然有波动, 但是整个系统的评价值趋于增大, 该区域电网发展与社会、经济、资源和环境向着协调方向发展。

参考文献

- [1] 李宝国. 管理系统工程[M]. 北京: 中国人民大学出版社, 1995.
LI Bao-guo. Management engineering[M]. Beijing: China Renmin University Press, 1995.
- [2] 张雪平, 殷国富. 基于层次灰色关联的产品绿色度评价研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (17): 76-80.
ZHANG Xue-ping, YIN Guo-fu. Research on evaluation method of product green degree based on layered grey relation[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (17): 76-80.
- [3] 彭英. 电信运营企业资本性支出的灰色关联分析[J]. 统计与决策, 2006 (8): 74-75.
PENG Ying. Telecom enterprise capital expenditures

relational grade analysis[J]. Statistics and Decision, 2006 (8): 74-75.

- [4] 张福伟, 刘丽娟. 电力与国民经济协调持续发展评估[J]. 华北电力大学学报: 社会科学版, 2006 (3): 49-52, 61.
ZHANG Fu-wei, LIU Li-juan. Evaluation on sustainable development of electric power in accordance with national economy[J]. Journal of North China Electric Power University: Social Sciences, 2006 (3): 49-52, 61.
- [5] 张福伟, 耿兴初. 电力与社会协调持续发展评估[J]. 中国电力, 2001, 34 (4): 1-4.
ZHANG Fu-wei, GENG Xing-chu. Evaluation on sustainable development of electric power assort with society[J]. Electric Power, 2001, 34 (4): 1-4.
- [6] 李敬如. 关于协调电网建设与土地资源利用的对策建议[J]. 电力技术经济, 2009, 21 (1): 5-9.
LI Jing-ru. Countermeasures and suggestions on balancing between power grid construction and land use[J]. Electric Power Technologic Economics, 2009, 21 (1): 5-9.
- [7] 刘佳, 韦钢, 吴伟力. 应用 PCA-C²R 模型综合评判电网规划方案[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36 (20): 20-24.
LIU Jia, WEI Gang, WU Wei-li. Comprehensive evaluation of power system planning based on PCA-C²R model[J]. Power System Protection and Control, 2008, 36 (20): 20-24.

收稿日期: 2009-09-29; 修回日期: 2009-10-23

作者简介:

李金超 (1978-), 男, 博士, 讲师, 研究方向为电力经济管理、预测与决策; E-mail: gsyjch@163.com

牛东晓 (1962-), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力负荷预测技术、电力市场理论、综合评价理论方法。

(上接第 48 页 continued from page 48)

- [10] Anderson P M, Agarwal S K. An improved model for protective system reliability[J]. IEEE Trans Rel, 1992, 41(3): 422-426.
- [11] Lars Andersson, Klaus-Peter Brand, Christoph Brunner, et al. Reliability investigations for SA communication architectures based on IEC 61850[C]. //Power Tech IEEE. Russia: 2005.
- [12] Rausand M, Hoyland A. System reliability theory: models, statistical methods, and applications[M]. John Wiley Sons, 2004.
- [13] Peichao Zhang, Levi Portillo, Mladen Kezunovic. Reliability and component importance analysis of all-digital protection systems[C]. //IEEE PES T&D

Meeting. Dallas (USA): 2005.

收稿日期: 2009-09-28

作者简介:

侯伟宏 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为数字化变电站系统的可靠性分析;

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; E-mail: pczhang@sjtu.edu.cn

胡炎 (1975-), 男, 博士, 主要研究方向为电网调度以及电力信息系统及其安全性分析;

苏永春 (1973-), 男, 博士, 从事智能电网及智能变电站相关课题的研究。