

电力系统应急通信网络及其抗毁性分析

高强, 刘献伟, 邱丽君

(华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003)

Emergency Communication Network in Power System and Its Invulnerability Analysis

GAO Qiang, LIU Xian-wei, QIU Li-jun

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University,
Baoding 071003, Hebei Province, China)

ABSTRACT: Considering practical demand of current emergency communication in power system, a frame of emergency communication network for power system, which consists of a 3-layer structure and possesses two data sharing centers, is proposed. Based on existing resources of communication network in power system and fully utilizing worldwide interoperability for microwave access (WIMAX) technique and satellite communication in-vehicle technology, an emergency communication network among provincial power corporation, regional power companies and urban power companies is designed. The concepts of network connectivity and virtual node are presented, and a connectivity-based invulnerability evaluation model of communication network is expounded. By use of the connectivity-based invulnerability evaluation model, the invulnerability of the designed emergency communication network in power system and that of the existing emergency communication network in power system are compared and analyzed, thus the superiority of emergency communication network for power system is validated.

KEY WORDS: emergency communication; power system; invulnerability; connectivity; virtual node

摘要: 针对当前电力系统应急通信的实际需求, 提出了具有3层结构和2个数据共享中心的电力应急通信网络框架。依托电力系统现有通信网络资源, 充分利用微波存取全球互通(WIMAX)技术和卫星通信车载技术, 设计了网省公司与地、市级电力公司(变电站)之间的应急通信网络。介绍了网络连通度和虚拟节点的概念, 阐述了基于连通度的网络抗毁性评价模型。利用该评价模型对比分析了设计的电力应急通信网络和现有电力通信网络的抗毁性能, 证明了电力应急通信网络的优越性。

关键词: 应急通信; 电力系统; 抗毁性; 连通度; 虚拟节点

0 引言

近年来, 国内自然灾害频发, 电网及其通信系统经历了数次严峻考验。2008年1月, 华中、华东、南方等区域遭遇了罕见的持续低温、雨雪和冰冻极端天气, 区域内多条主干光缆纤芯断裂, 导致省网主干光纤中断^[1]。2008年5月12日, 汶川地区发生8.0级地震。四川电网处于震中地区的电力设施损失殆尽。电力系统通信对于电网的安全运行起着至关重要的作用。在飓风、雨雪、霜冻、洪水和地震等紧急情况下, 一旦电力通信网络发生故障, 会直接影响电网的稳定, 造成重大的经济损失。

目前, 对于应急通信的研究已取得一定成果。文献[2-3]对卫星通信、移动通信、光纤通信和互联网通信等现代应急通信方式进行了详细论述。文献[4-9]对电力系统突发灾害的特点进行分析, 研究了电力系统应急管理的理论和技术对策。文献[10]提出了电力应急管理平台的概念和框架。文献[11-12]对无线混合网络进行分析和研究, 论述了将该模型应用于灾害评估和应急通信的可行性。文献[13]介绍了无线传感器网络体系结构, 设计了面向应急通信需求的无线传感器网络信息服务系统。

与传统通信系统相比, 应急通信具有时间的突发性、地点的不确定性和环境的复杂性等特点^[14-15], 因此, 应急通信对信息的传输和交换都提出了更高的要求。主要体现在动态的拓扑结构、足够的可靠带宽、传输信息的多样化和网络的抗毁性能等方面。本文将在电力应急通信网络需求分析的基础上, 提出电力系统应急通信网络总体结构框架, 设计基于微波存取全球互通(worldwide interoperability for microwave access, WIMAX)技术和应急通信车等无

线通信方式的网省电力公司与地、市级电力公司(变电站)之间的应急通信网络,最后利用基于连通度的网络评价模型对该网络的抗毁性能进行分析。

1 电力系统应急通信网络需求分析

1.1 网络业务需求分析

电力通信网承载的业务分为语音业务(行政电话和调度电话)、数据业务(电力调度自动化 EMS、广域相量测量等实时监控业务和电力交易支持系统、电能量计量系统 TMR 等调度运行管理业务)^[16]和多媒体业务(视频会议和厂站监控等)。由于应急通信的特殊要求,应急通信网络只承载了语音业务、部分数据业务和多媒体业务。

1) 语音业务。满足国家电网公司总部、网省电力公司、地市级电力公司、变电站及电厂之间的语音通信,确保行政电话和调度电话的畅通,保障重要语音通信和指挥通信。语音业务对速率要求不高,但是必须保证实时性和可靠性。

2) 数据业务。主要包括 2 类实时监控业务:一类用于事发现场和网省应急指挥中心之间;另一类用于网省应急指挥中心和国家电网应急指挥中心之间,将各网省电力公司实时监控数据传送到国家电网应急指挥中心。这两类数据占用的信道带宽不大,数据一般是分布采集、分层传输、集中汇聚^[17]。

3) 多媒体业务。包括:①满足应急条件下国家电网公司和网省电力公司之间的视频会议要求;②实现网省电力公司与下属的地市级电力公司、发电厂和部分变电站之间的视频通信;③保障网省电力公司与突发事件现场的多媒体通信。

1.2 网络性能需求分析

作为一种特殊的通信网络,电力系统应急通信网络应该具备快速反应能力、较强的网络抗毁性和一定的经济性能:1) 由于灾害事件的突发性和破坏性,事发现场往往不具备现成的有线通信系统。应急通信网络需要提供事发现场与网省电力公司之间的信息通道,具备实时的语音、数据和视频传输能力,为电力调度和人力、物力分配提供科学依据。

2) 电力应急通信网络需要具备较好的抗毁性能,保证在自然灾害面前具备一定的网络生存能力。3) 应急通信网络需要有一定的经济性能。

2 电力系统应急通信网络结构设计

电力系统应对灾害的应急通信网络采用 3 层体

系结构,即分为国家电网公司总部层、网省电力公司层和地(市)级电力公司(变电站)层,如图 1 所示。该网络是一个 3 层的树形结构,具有国家电网公司和网省电力公司二级数据中心。电力应急通信网络作为电力行业专用应急通信网络,属于国家应急通信网络的范畴。国家电网应急指挥中心通过现有电力光纤网络、大型应急通信车、直升机等方式与网省公司应急指挥中心连接。网省公司与地、市级电力公司(变电站)之间的网络则采用现有光纤网、微波、载波通信网、小型应急通信车及 WIMAX 通信方式。

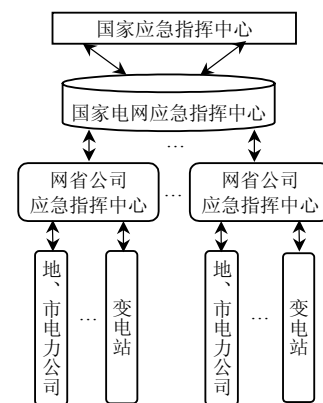


图 1 电力系统应急通信网络结构

Fig. 1 Structure of power emergency communication network

3 网省公司与地、市级电力公司及变电站之间的网络

3.1 网络结构设计

由于网省电力公司与地、市级电力公司(变电站)之间的网络连接技术和设备参差不齐,在发生紧急情况时,现有通信网络就显得脆弱。需要设计建立一个空中与地面相结合、固定和机动相结合、有线与无线相结合、公众网与专用网相结合的全天候立体应急通信网络。

图 2 为网省电力公司与地、市级电力公司(变电站)之间的网络结构图。该网络在公网、电力光纤网、微波网、载波通信网等现有通信网络的基础上,充分利用 WIMAX 和小型应急通信车等现代无线通信技术,形成一个全天候立体通信网络。

3.2 WIMAX 通信技术

WIMAX 是基于 802.16 标准的无线城域网接入技术,包括 802.16、802.16a、802.16c、802.16d、802.16e、802.16f、802.16g 和 802.16h 等一系列标准。其中,802.16、802.16a 和 802.16d 属于固定宽带无线接入空中接口标准,而 802.16e 属于移动宽带无线接入空中接口标准。

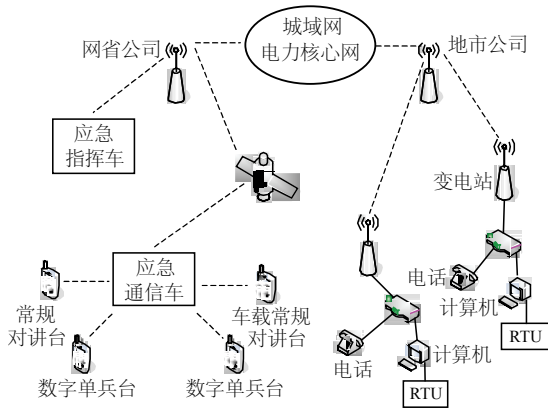


图2 网省电力公司与地、市级电力公司(变电站)之间的网络结构
 Fig. 2 Structure of network between provincial and municipal power companies or substations

在图2所示的网络结构中，地、市级电力公司与变电站之间的 WIMAX 网络采用基于 802.16-2004 标准的点到多点固定无线接入方案。其优势在于：空中接口是标准化的，设备之间具备互操作性，设备成本低；采用正交频分复用(OFDM)、多入多出(MIMO)技术，增强了抗多径衰落的能力，能够实现非视距传输，提高了频谱利用率^[18]。地、市级 WIMAX 网络采用以电力公司为中心的星状网结构，变电站接口为以太网 RI-45 和电话 R-11 两种，实现语音、数据和图像的实时传输。而网省电力公司与地、市级电力公司之间的网络链接则通过现有的城域网、公网和电力通信网等骨干网络实现。

3.3 应急指挥车

应急通信指挥车是车载移动应急指挥中心，与固定监控中心共享数据，具有快速加载、远程调用和信息分析处理功能，能够对现场情况进行实时监控、显示、分析及综合处理，结合电力通信网数据库的相关信息进行态势分析、预测和预警，为事件处置和应急指挥提供决策性依据^[19]。在紧急情况下，应急通信指挥车可以发挥临时指挥中心的作用，支持指挥中心与现场工作人员之间的语音、数据和视频通信。

3.4 应急通信车

以应急通信为目的的车载站是一个小型化的卫星通信地球站，除了容量小一些，基本具备大型固定地球站的所有功能。车载卫星通信是近年来发展起来的一种通信方式，能够传输语音、数据、图像等信息，可提高应急综合保障能力，具有机动灵活、交互性强、同步性好、组网方便、传输类型多等优点。

应急通信车与各作业点之间通过数字超短波、常规对讲等单兵通信方式组建突发事件现场无线宽带网络，完成现场数据采集和传输。车载天线采用 1.2 m “动中通”天线，具有较高的天线效率和增益，满足宽带卫星通信的需要。系统可提供 2~8 Mbit/s 速率的语音、数据和图像的点对点或点对多点卫星通信，将现场信息传输至后方指挥中心。

4 网络抗毁性分析

4.1 通信网络抗毁性的概念

抗毁性(Invulnerability)是评价通信网络可靠性的重要指标。通信网络抗毁性的定义是：当网络中出现确定性或者随机性故障时(如链路或节点故障)，网络维持或恢复其性能到一个可接受程度的能力^[20]。网络连通度是衡量网络抗毁性的一个重要参数，它将网络的抗毁性能量化，反映了整个网络中链路的连接情况和冗余设计。

4.2 基于连通度的网络评价模型

在一个大型的通信网络中包含若干小型局域网，每个局域网通过一条或多条链路与其他局域网连接，如图3所示。图中，每个局域网内部都有多台工作站互联，局域网之间通过连接设备构成一个大型的通信网络。对于这样的通信网络，文献[21]提供了一种基于连通度的网络分析模型。

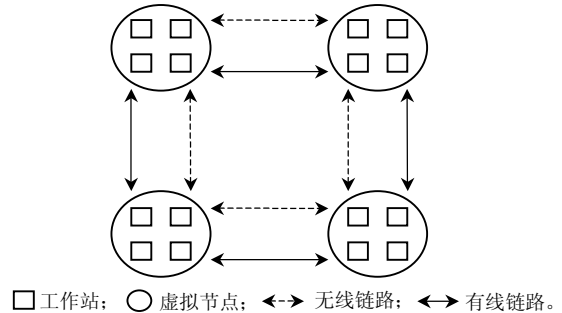


图3 大型通信网络与局域网之间的结构图
 Fig. 3 Structure diagram between large-scale network and local area network

为了便于分析，把每个局域网都抽象成虚拟节点。如果网络有 m 个虚拟节点，虚拟节点之间具有多条链路，源节点最多经过 $m-2$ 个中间节点到达目标节点。把各虚拟节点的工作站数构成一个矩阵 $N_{1 \times m}$ ，节点 i 的工作站数为 $N_{[i]}$ ，则虚拟节点工作站矩阵为

$$N = (N_{[1]} N_{[2]} \cdots N_{[m]}) \quad (1)$$

虚拟节点之间的链路数构成一个对称矩阵 $T_{m \times m}$ ，虚拟节点 i 与 j 之间的链路数用 $T_{[i,j]}$ 表示。若

i 与 j 之间无直接链路连接, 则 $T_{[i,j]}=0$; 若 $i=j$, 则 $T_{[i,j]}=1$ 。则有

$$T = \begin{bmatrix} T_{[1,1]} & T_{[1,2]} & \cdots & T_{[1,m]} \\ T_{[2,1]} & T_{[2,2]} & \cdots & T_{[2,m]} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ T_{[m,1]} & T_{[m,2]} & \cdots & T_{[m,m]} \end{bmatrix}$$

假设虚拟节点 1 内的每一个工作站与虚拟节点 2 内的每一个工作站都要求建立通信路径。若在虚拟节点 1 与虚拟节点 2 之间只有 1 条链路, 则通信路径共有 $N_{[1]} \times N_{[2]}$ 条。若虚拟节点 1 还可以经过虚拟节点 3 中继到达虚拟节点 2, 则在虚拟节点 1 与虚拟节点 2 之间可能建立的通信路径有 $N_{[1]} \times (T_{[1,2]} + T_{[1,3]} \times T_{[3,2]}) \times N_{[2]}$ 条。

连通度 G 是网络中所有虚拟节点之间可能通信路径的平均数, 即 $G=P/S$, 其中 P 为虚拟节点内每个工作站与其他虚拟节点内工作站可能建立的通信路径总条数, S 为虚拟节点内每个工作站与其他虚拟节点内各工作站都建立一条通信路径的总数, 可以表示为

$$S = \sum_{j_1=1}^m \sum_{j_2=j_1+1}^m N_{[j_1]} \times N_{[j_2]} \quad (2)$$

源虚拟节点与目标虚拟节点直接相连的可能路径数为

$$P_0 = \sum_{j_1=1}^m (N_{[j_1]} \sum_{j_2=1, j_2 \neq \{j_1\}, j_2 > j_1}^m T_{[j_1, j_2]} N_{[j_2]}) \quad (3)$$

源虚拟节点经过 1 个中间虚拟节点到达目标虚拟节点的可能路径数为

$$P_1 = \sum_{j_1=1}^m (N_{[j_1]} \sum_{j_2=1, j_2 \neq \{j_1\}}^m (T_{[j_1, j_2]} \sum_{j_3=1, j_3 \neq \{j_1, j_2\}, j_3 > j_1}^m T_{[j_2, j_3]} N_{[j_3]})) \quad (4)$$

源虚拟节点经过 $m-2$ 个中间虚拟节点到达目标虚拟节点的可能路径数为

$$P_{m-2} = \sum_{j_1=1}^m N_{[j_1]} \left(\sum_{j_2=1, j_2 \neq \{j_1\}}^m T_{[j_1, j_2]} \left(\sum_{j_3=1, j_3 \neq \{j_1, j_2\}}^m T_{[j_2, j_3]} \cdots \sum_{j_m=1, j_m \neq \{j_1, \dots, j_m\}, j_m > j_1}^m T_{[j_{m-1}, j_m]} N_{[j_m]} \right) \right) \quad (5)$$

整个网络的连通度为

$$G = \left(\sum_{i=1}^{m-2} P_i \right) / S \quad (6)$$

4.3 应急通信网络抗毁性分析

参照基于连通度的网络抗毁性评价模型, 网省电力公司与地、市级电力公司(变电站)之间的网络可以简单抽象为图 4 所示的结构。图中: 虚拟节点 A

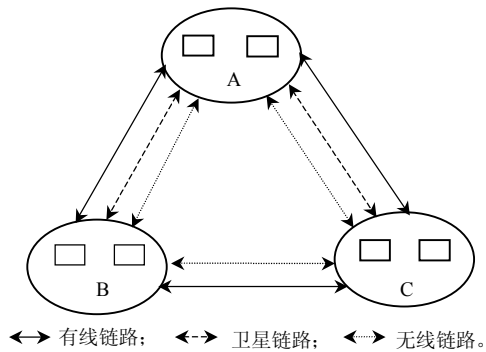


图 4 等效网络

Fig. 4 Equivalent network

由网省电力公司固定和移动应急指挥中心组成; 虚拟节点 B 由地、市级电力公司指挥中心和应急通信车组成; 虚拟节点 C 由变电站和应急通信车组成。

虚拟节点的工作站数矩阵和虚拟节点之间的链路数矩阵分别为

$$N = [2 \quad 2 \quad 2], \quad T = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 3 \\ 3 & 1 & 2 \\ 3 & 2 & 1 \end{bmatrix}$$

则有

$$S = \sum_{j_1=1}^m \sum_{j_2=j_1+1}^m N_{[j_1]} \times N_{[j_2]} = 2 \times 2 + 2 \times 2 + 2 \times 2 = 12$$

网省电力公司与地、市级电力公司(变电站)之间的应急通信网络连通度分析, 见表 1。

表 1 网络连通度分析

Tab. 1 Analysis of network connectivity

源节点通过 1 条中间路径 到达目标节点	源节点通过 2 条中间路径 到达目标节点
路径 P_0	路径 P_1
A→B $2 \times 3 \times 2 = 12$	A→C→B $2 \times 3 \times 2 \times 2 = 24$
A→C $2 \times 3 \times 2 = 12$	A→B→C $2 \times 3 \times 2 \times 2 = 24$
B→C $2 \times 2 \times 2 = 8$	B→A→C $2 \times 3 \times 3 \times 2 = 36$

由表 1 分析可知, $P_0 = 12 + 12 + 8 = 32$, $P_1 = 24 + 24 + 36 = 84$ 。整个网络的连通度 G 为

$$G = \left(\sum_{i=1}^{m-2} P_i \right) / S = (P_0 + P_1) / S = (32 + 84) / 12 = 9.67 \quad (7)$$

连通度 G 从宏观上评价了网省电力公司与地、市级电力公司(变电站)之间应急通信网络的抗毁性。

4.4 现有电力通信网络的抗毁性分析

目前, 网省电力公司与地、市级电力公司(变电站)之间的电力通信网络仍是以光纤等有线方式为主, 个别网省电力公司装备了通信车, 具备了移动应急通信方式。其等效网络比图 4 所示减少了无线链路。采用同样的分析能力, 现有电力通信网络抗毁性连通度为

$$G = \left(\sum_{i=1}^{m-2} P_i \right) / S = (P_0 + P_1) / S = (20 + 32) / 12 = 4.33 \quad (8)$$

分析式(7)(8)的数值可以得出, 本文设计的网省电力公司与地、市级电力公司(变电站)之间的通信网络在抗毁性方面具有明显的优势, 网络的生存性更强, 满足了电力应急通信网络对于抗毁性的要求。

5 结论

1) 本文设计了网省电力公司与地、市级电力公司(变电站)之间的应急通信网络框架, 阐述了网络结构层次的划分和采用的通信技术, 为电力应急通信研究提供了一种平台。

2) 引入基于连通度的网络分析模型, 对设计的应急通信网络以及现有的电力通信网络进行对比分析, 证明应急通信网络在抗毁性方面具有明显优势。

参考文献

- [1] 中电联. 电力系统受低温雨雪冰冻灾害影响情况报告[R]. 北京: 中国电力企业联合会, 2008.
- [2] 李文峰, 韩晓冰, 汪仁, 等. 现代应急通信技术[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2007: 11-111.
- [3] 徐贵宝, 王雅娜. 应急通信发展策略探讨[J]. 电信软科学研究, 2003(10): 42-50.
- [4] 谢强, 李杰. 电力系统自然灾害的现状与对策[J]. 自然灾害学报, 2006, 15(4): 126-131.
Xie Qiang, Li Jie. Current situation of natural disaster in electric power system and countermeasures[J]. Journal of Natural Disasters, 2006, 15(4): 126-131(in Chinese).
- [5] 胡学浩. 美加联合电网大面积停电事故的反思和启示[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 2-6.
Hu Xuehao. Rethinking and enlightenment of large scope blackout in interconnected North America power grid[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 2-6(in Chinese).
- [6] 王鹏. 强外力骚扰电力系统及其防护[J]. 电网技术, 2006, 30(3): 27-31.
Wang Peng. Power system under external force harassment and its safeguard[J]. Power System Technology, 2006, 30(3): 27-31(in Chinese).
- [7] 田世明, 陈希, 朱朝阳, 等. 电力应急管理理论与技术对策[J]. 电网技术, 2007, 31(24): 22-27.
Tian Shiming, Chen Xi, Zhu Chaoyang, et al. Theory of electric power emergency management and its technological countermeasures [J]. Power System Technology, 2007, 31(24): 22-27(in Chinese).
- [8] 胡敏. 输电线路大范围冰灾事故分析及对策[J]. 高电压技术, 2005, 31(4): 14-15.
Hu Min. Analysis and countermeasures for large area accident cause by icing on transmission line[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(4): 14-15(in Chinese).
- [9] 谢强, 张勇, 李杰. 华东电网 500 kV 任上线 5237 线飓风致倒塔事故调查分析[J]. 电网技术, 2006, 30(10): 60-63.
Xie Qiang, Zhang Yong, Li Jie. Investigation on tower collapses of 500 kV Renshang 5237 transmission line caused by down burst [J]. Power System Technology, 2006, 30(10): 60-63(in Chinese).
- [10] 田世明, 陈希, 朱朝阳, 等. 电力应急管理平台研究[J]. 电网技术, 2008, 32(1): 26-30.
Tian Shiming, Chen Xi, Zhu Chaoyang, et al. Study on electric power emergency management platform[J]. Power System Technology, 2008, 32(1): 26-30(in Chinese).
- [11] Hoang N N, Gyoda K, Okada K, et al. On the performance of a hybrid wireless network for emergency communications in disaster areas [C]. The Third International Conference on Networking and Services, Athens, Greece, 2007.
- [12] Fujiwara T, Iida N, Watanabe T. A hybrid wireless network enhanced with multihopping for emergency communications[C]. IEEE International Conference on Communications, Hamamatsu, Japan, 2004.
- [13] 马晓, 谢东亮. 无线传感器网络在应急通信系统中的应用[J]. 电网技术, 2007(11): 27-31.
- [14] Marra F J. Theoretical perspectives on emergency communications [C]. IEEE Transactions on Professional Communication, MD, USA, 1989.
- [15] 张雪丽. 应急通信标准化和技术热点分析[J]. 电网技术, 2007(11): 10-14.
- [16] 彭清卿, 向力, 卢长燕, 等. 国家电力调度数据网组网研究[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(8): 10-14.
- [17] 黄晓莉, 许海铭. 国家电力数据通信网络建设方案[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 82-87.
Huang Xiaoli, Xu Haiming. Construction scheme for the state power date communication network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 82-87(in Chinese).
- [18] 崔鸿雁, 蔡云龙, 刘宝玲. 宽带无线通信技术[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008: 96-97.
- [19] 张友胜, 赵钊. 移动应急指挥中心系统设计[J]. 无线电通信技术, 2008, 34(3): 48-51.
Zhang Yousheng, Zhao Zhao. System design for mobile emergency command center[J]. Radio Communications Technology, 2008, 34(3): 48-51(in Chinese).
- [20] Ellison B D, Fisher R, Linger H, et al. Survivable network systems: an emerging discipline[R]. Software Engineering Institute, Carnegie Mellon University, 1997.
- [21] 陈忠学, 靳蕃, 邹盛唐, 等. 短波网基于节点的抗毁性评估[J]. 通信技术, 2000, 110(3): 26-28.
Chen Zhongxue, Jin Fan, Zou Shengtang, et al. Invulnerability assessment of HF communication networking based on nodes [J]. Communications Technology, 2000, 110(3): 26-28(in Chinese).



高强

收稿日期: 2008-12-23.

作者简介:

高强(1960—), 男, 教授, 博士研究生, 主要研究方向为通信与信号处理;

刘献伟(1983—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统应急通信, E-mail: lxw.1983@163.com;

邱丽君(1982—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统通信。

(责任编辑 李兰欣)