

基于倾角的输电线路弧垂三维模型算法研究

陈思明¹ 闫斌¹ 周小佳¹ 王雪春²

¹(电子科技大学 四川 成都 611731)

²(乐山电业局 四川 乐山 614000)

摘要 架空输电线路的弧垂高度是线路安全运行的关键指标。为了实现有效的输电线路弧垂监测,基于悬链线方程、力学模型和几何学模型,建立导线在三维空间内的监测模型。使用 Matlab 工具实现计算模型,实时监测输电线路的弧垂变化,根据导线倾角计算出的弧垂高度判断导线的运行状态,由监控人员进行统一管理,指挥巡检人员进行线路检修和导线防舞处理。实验结果表明,建立的舞动模型能够快速准确地计算出弧垂高度和偏移量,精确地反映了弧垂的变化趋势,极大地提高了计算效率,可以保证输电线路的安全运行。

关键词 弧垂 悬链线 倾角 舞动模型 Matlab

中图分类号 TP391 文献标识码 A DOI: 10.3969/j.issn.1000-386x.2014.03.022

STUDY ON THREE-DIMENSIONAL MODEL ALGORITHM FOR TRANSMISSION LINE SAG BASED ON INCLINATION

Chen Siming¹ Yan Bin¹ Zhou Xiaojia¹ Wang Xuechun²

¹(University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 611731, Sichuan, China)

²(Leshan Electric Power Bureau, Leshan 614000, Sichuan, China)

Abstract The sag height of overhead transmission lines is an essential indicator for safe operation of the line. In order to achieve effective transmission line sag monitoring, the paper establishes a monitoring model of wires in three-dimensional space based on catenary equation, mechanical model and geometry model. Besides it implements a computational model by Matlab tools. It real-timely monitors the changes of transmission lines sag, judges the conductor operational status by sag height calculated from wire inclination, managed unitarily by monitoring personnel to assign inspection personnel with line maintenance work and wire anti-vibration handling. Experimental results show that the vibration model can quickly and accurately calculate the sag height and offset, and can precisely reflect the sagging trend. Therefore it greatly improves the computational efficiency and can ensure the safe operation of the transmission lines.

Keywords Sag Catenary Inclination Vibration model Matlab

0 引言

随着国家城市化进程的推进,各地的电能需求不断增加,给现有的输配电网带来了巨大负担,加上高压架空输电线路长期处于人烟稀少的野外,环境恶劣、气候变化大,并且覆冰、舞动等情况时有发生,使线路的正常运行受到了严重威胁,加重了电力部门的线路巡检压力。输电线路的弧垂监测是保证线路正常运行的关键^[1-4],它能反映出导线承受的机械载荷和输电容量与弧垂高度间的关系。目前,国内外各研究机构对于输电线路弧垂的监测进行了大量研究,取得了许多卓有成效的成果^[5-9],包括视频监控、图像采集、应力及温度监测等方法,但是这些方法由于设备要求高、成本大或者安装不便等原因都未能大规模应用,这就要求研究者能建立一个参数采集简单、又能满足精度要求的监测模型。

本文基于这样的目的提出了在动态环境下基于导线倾角的弧垂高度监测模型,根据悬链线方程和悬挂点的倾角变化推导出导线弧垂的实时空间坐标,并使用 Matlab 工具实现该模型,

实验结果高效准确。

1 弧垂监测模型

1.1 静态二维模型

架空输电线路就是将导线悬挂于两杆塔之间进行电力输送,通常导线只受自重力影响呈自然下垂状态,如图1所示。

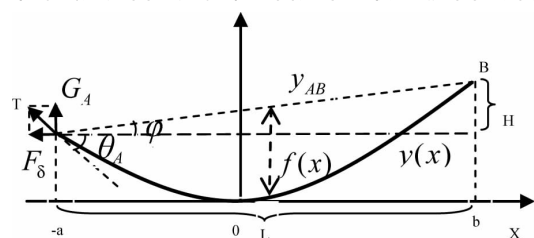


图1 悬挂点不等高图

收稿日期: 2012-11-08。陈思明,硕士生,主研领域:输电线路在线监测,电力物联网。闫斌,讲师。周小佳,副教授。王雪春,工程师。

由悬链线方程整理得如图 $y(x)$ 方程:

$$y(x) = \frac{\sigma}{g} \left[\cosh\left(\frac{g}{\sigma}x\right) - 1 \right] \quad (1)$$

式中: σ 表示导线最低点的水平应力 (N/mm^2); g 表示导线的自重比载 ($\text{N}/(\text{m} \cdot \text{mm}^2)$)。

由 A、B 两点过导线 $y(x)$, 且高差为 H , 档距为 L , $f(x)$ 表示导线上各点与悬挂点连线间的距离, 即对应点的弧垂, 整理得:

$$f(x) = \frac{H}{L}(x+a) - \frac{\sigma}{g} \left[\cosh\left(\frac{g}{\sigma}x\right) - \cosh\left(\frac{g}{\sigma}a\right) \right] \quad (2)$$

式中: a 表示低端悬挂点 A 与导线最低点的水平距离;

由图 1 和式 (1) 推出以下方程组:

$$\begin{cases} a = \frac{L}{2} - \frac{\sigma}{g} \sinh^{-1} \left(\frac{2\sigma \sinh\left(\frac{Lg}{2\sigma}\right)}{H} \right) \\ b = L - a \\ y'(-a) = -\sinh\left(\frac{g}{\sigma}a\right) = \tan\theta_A \end{cases} \quad (3)$$

式中: θ_A 表示低端悬挂点 A 的与水平面间的夹角。

由于 σ/g 反映了已知条件下的悬链线形状和弧垂高度, 将其当做一个未知量。由于方程组 (3) 无法直接求 σ/g 的解析解, 先采用牛顿迭代法求取 a 的近似值, 再计算 σ/g 。为了方便求值 a 的初值取 $L/2$, 经过多次迭代就能得出逼近真实 a 值的近似值, 然后求出 σ/g 值确定方程式 (1)、式 (2)、式 (3)。

再由悬链线方程和导线的受力分析^[10,11] 可得, 当导线两悬挂点不等高时, 导线的最低点不在中间, 而是偏向悬挂点低的一端, 并且由于导线自重及负载等原因会出现伸长现象, 因此得到以下结论:

当 $x = \frac{\sigma}{g} \sinh^{-1} \left(\frac{H}{L} \right)$ 时, 导线的弧垂高度 $f(x)$ 最大;

导线的实际长度为 $l = \sqrt{\left(\frac{2\sigma \sinh\left(\frac{Lg}{2\sigma}\right)}{2\sigma} \right)^2 + H^2}$ 。

1.2 舞动三维模型

导线的舞动是导致线路断路和杆塔垮塌的主要原因之一, 从导线的舞动幅度能大致推断舞动的危险度, 通过倾角的变化能实时监测导线的舞动幅度, 为电力部门进行线路维护提供可靠信息。

(1) 当导线两悬点等高时, 即 $H=0$, 档距为 L , 垂直方向倾角为 θ , 舞动角度为 φ , 如图 2 所示。

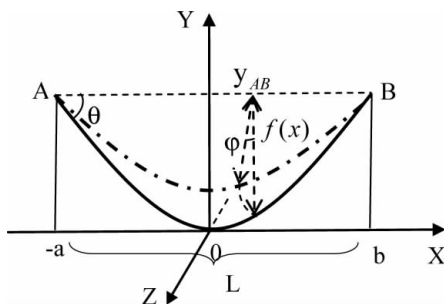


图2 悬点等高导线舞动图

曲线 y_1 是 A、B 间导线舞动前的状态, 处于 XOY 平面上。当 y_1 舞动到点划线位置时, 偏移角度为 φ , 可以看作导线 y_1 绕 A、B 连线 y_{AB} 旋转 φ 角度后形成的曲线, 此时导线在三维坐标系内的坐标均有变化, 求舞动 φ 角度后的导线方程推导过程如下:

由 $H=0$, y_1 绕 y_{AB} 旋转时, 导线上各点的 x 坐标没有发生变化, 所以只需要考虑导线在 y, z 轴上的坐标变化。当导线舞

动至 φ 角度时, 导线沿 y 轴垂直方向的弧垂高度为:

$$f_{\text{高}} = y_{AB} - y = f(x) \cos\varphi \quad (4)$$

舞动导线沿 z 轴水平方向的偏移量为:

$$f_{\text{偏}} = |z| = |y_{AB} - y| \tan\varphi = f(x) \sin\varphi \quad (5)$$

悬点等高情况下的导线舞动模型方程组为:

$$\begin{cases} y = \frac{\sigma}{g} \left(\cosh\left(\frac{g}{\sigma}a\right) - 1 \right) - \frac{\sigma}{g} \left[\cosh\left(\frac{g}{\sigma}a\right) - \cosh\left(\frac{g}{\sigma}x\right) \right] \cdot \cos\varphi \\ |z| = \frac{\sigma}{g} \left| \cosh\left(\frac{g}{\sigma}a\right) - \cosh\left(\frac{g}{\sigma}x\right) \right| \sin\varphi \end{cases} \quad (6)$$

由方程组 (6) 可以得到导线各点在舞动状态下的空间坐标, 根据坐标判断导线的舞动程度以及是否处于危险状态等。

(2) 当导线两悬点不等高时, 高差为 H , 档距为 L , 垂直方向倾角为 θ , 如图 3 所示。

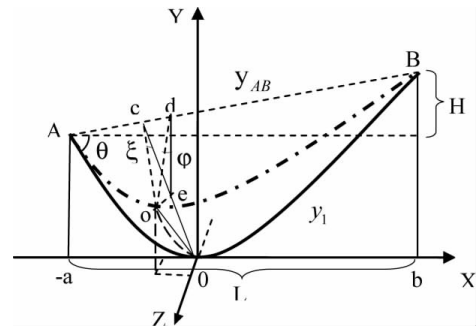


图3 悬点不等高导线舞动图

由于导线舞动的中心轴 AB 不在水平面上, 当舞动发生时, 各点的 x, y, z 轴坐标均发生变化。假设 A 点低于 B 点, 当导线最低点从原点处舞动至 o 点时, 测量得到的舞动倾角 $\angle ode$ 为 φ , 线 oc 垂直于 AB, $\angle ocd$ 为 ξ , 则导线舞动后的模型推导过程如下:

设导线舞动后的某点 o 坐标为 (x, y, z) , 则导线舞动后的垂直高度 $f_{\text{高}}$ 和偏移量 $f_{\text{偏}}$ 为:

$$f_{\text{高}} = y_{AB} - y = (y_{AB} - y_1) \cos\varphi \quad (7)$$

$$f_{\text{偏}} = |z| = |y_{AB} - y| \tan\varphi \quad (8)$$

由三角形 $\triangle ocd$, $\triangle ode$, $\triangle cde$ 的边角关系可以推导出以下关系式:

$$\begin{cases} \sqrt{z^2 + \left[(y_{AB} - y) \cdot \cos\left(\arctan \frac{H}{L}\right) \right]^2} \\ = (y_{AB} - y) \cdot \cos\left(\arctan \frac{H}{L}\right) + \frac{|z|}{\tan \frac{\pi - \xi}{2}} \\ |z| = |y_{AB} - y| \cdot \tan\varphi \end{cases} \quad (9)$$

设舞动后的点 (x, y, z) 对应于静止时的点 (x_1, y_1, z_1) , $z_1=0$, 整理得:

$$\begin{aligned} f(w) &= w + \frac{1}{p - \frac{H}{L}} \cosh w - \frac{p}{\frac{\sigma}{g} \left(p - \frac{H}{L} \right)} x - \\ &\quad \frac{c}{\frac{\sigma}{g} \left(p - \frac{H}{L} \right)} - \frac{1}{p - \frac{H}{L}} = 0 \end{aligned} \quad (10)$$

式中: w, p, c 等符号均为化简方程所设的可求得量, 具体如下:

$$\xi = \arctan \frac{\tan\varphi}{\frac{L}{\sqrt{H^2 + L^2}}}$$

$$c = \frac{H}{L}a + \frac{\sigma}{g} \left(ch \left(\frac{g}{\sigma}a \right) - 1 \right)$$

$$w = \frac{g}{\sigma}x + \frac{H}{\sigma \sqrt{H^2 + L^2} \tan \frac{\pi - \xi}{2}} |z|$$

$$p = \frac{\tan \frac{\pi - \xi}{2}}{\frac{H}{\sqrt{H^2 + L^2}} \times \tan \varphi} + \frac{1}{\frac{HL}{H^2 + L^2}}$$

① 将方程(10)中的 x 看作已知量,由于不能求得 w 的解析解,因此采用牛顿迭代法进行计算求出 w 近似值。设 w 初值为 $(g/\sigma)x$ 进行若干次迭代后,当 $w_n - w_{n-1} < |\varepsilon|$ (ε 很小)时, w_n 就是所求近似值。

$$w_n = \frac{g}{\sigma}x + \frac{g}{\sigma \tan \frac{\pi - \xi}{2}} \cdot \frac{H}{\sqrt{H^2 + L^2}} |z|$$

② 将 w_n 带入:求出 z ,再代入式(1)和式(9),计算得到舞动导线的空间位置坐标。

2 模型应用分析

取型号为 LGJ-240/30 的导线作为架空输电线,其计算重量为 922.2 kg/km,线胀系数为 $19.6 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$,弹性模量为 73.0 GPa,计算拉断力为 75 620 N。根据以上模型计算出导线在不同档距下的弧垂计算值和导线偏移量,并与理论值进行比较。如下表 1 所示,弧垂计算值与理论值的误差均小于 1%,满足实际工程需求,并且导线偏移量的大小随着档距和风偏角的增加而增加,直接反映了导线的舞动程度。

表 1 不同档距下弧垂理论值与计算值

档距 (m)	风偏角 (°)	弧垂理论值 (m)	弧垂计算值 (m)	导线偏移量 (m)
500	10	23.071	23.239	4.024
550	10	25.275	25.437	4.406
600	10	27.478	27.635	4.789
650	10	29.581	29.833	5.171
700	10	31.783	32.032	5.554
750	10	33.985	34.231	5.936
750	12	33.985	34.231	7.107
750	15	33.985	34.231	8.848

为了更直观地看到导线的状态,本文使用 Matlab 工具将导线实时曲线进行绘图模拟。取一段输电线路档距 L 为 500 m,两悬点高差 H 为 5 m,低端悬挂点 A 处的倾斜角 θ 为 10° ,风偏角 φ 为 10° 。根据舞动模型画出导线静态情况下的曲线 $f_1(x)$ 和舞动时的曲线 $f(x)$,从而模拟现场导线的舞动情况,如图 4 和图 5 所示。

根据 Matlab 所画出舞动曲线图,能直观地看到导线的舞动幅度,得到档距内导线各点的舞动高度和偏移量等信息,并根据倾角传感器采集速率得到舞动频率,实时监测输电导线的弧垂及舞动情况。电力部门只需要在监控中心通过采集的现场倾角数据利用上述模型计算就能得到导线弧垂的三维实时信息,根据这些信息线路巡检和维护的安排,保证线路安全运行,是一种十分有效的监测方式。

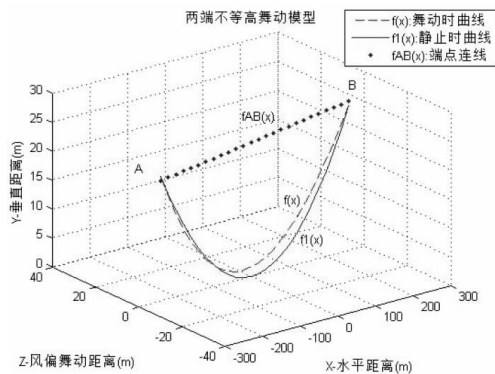


图 4 悬点不等高舞动仿真图

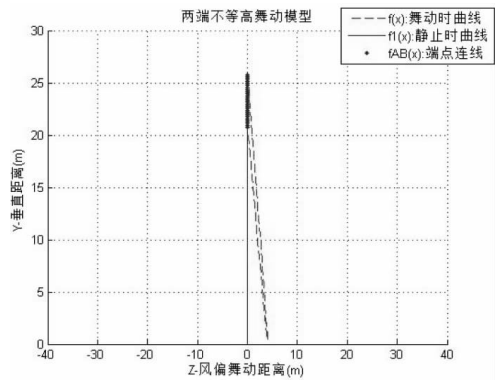


图 5 悬点不等高舞动侧面仿真图

3 结 语

本文针对架空输电线路弧垂的监测,建立了能够对导线的弧垂静态高度和舞动状态进行实时监测的三维空间模型。该模型经过 Matlab 仿真的结果精度较高,能模拟出导线现场的舞动状态。根据舞动状态可以判断导线是否处于安全运行范围内,当弧垂高度过大时,说明导线载荷过大,可能有覆冰或温度过高;当弧垂高度过小时,会导致导线的拉力过大,容易使导线断裂;当导线舞动频率过大时则可能导致杆塔垮塌,造成巨大的经济损失。因此,电力部门可以根据监测到的问题类型和程度进行预警,并安排人员巡检,采取相应措施进行线路检修和导线防舞处理^[12-14],保证输电线路的安全运行。

参 考 文 献

- [1] 徐青松,季洪献,王孟龙. 输电线路弧垂的实时监测[J]. 高电压技术, 2007, 33(7): 206-209.
- [2] 黄新波,孙钦东,程荣贵. 导线覆冰的力学分析与覆冰在线监测系统[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 98-101.
- [3] 王少华,蒋兴良,孙才新. 输电线路导线舞动的国内外研究现状[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 11-14.
- [4] 刘红伟,李俊峰,王常飞. 1000 kV 特高压输电线路在线监测管理平台的应用[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(23): 98-102.
- [5] Nigel O, Buchan P G. Conductor galloping: 2. Torsional mechanism[J]. IEEE Trans. on Power Apparatus and System, 1981, 100(2): 708-720.
- [6] Den Hartog J P. Transmission line vibration due to sleet[J]. Trans. AIEE, 1932, 51(Part 4): 1074-1086.
- [7] 李敏,蔡伟. 超高压输电线路铁塔静态图像遥测技术应用[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(18): 45-49.

(下转第 87 页)

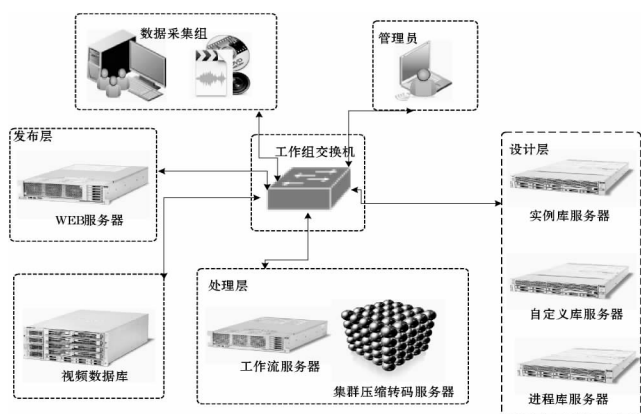


图2 工作流解决方案拓扑图

设计层。数据采集过程中,涉及到各种工具的使用,如配备同步直播工作站提供多路视频信号切换以及各种格式文件的实时编码;配备编辑工作站,利用非线性编辑软件对采集的视频等资源进行剪辑与加工,包括快速编辑、分段剪辑、添加字幕和注释信息等。此方案可以实现在现场直播同时,完成视频内容采集存储在数据库中进行再编辑处理。

其次,设计层中用户自定义完成的进程提交到与之相匹配的工作流服务器系统中。其中,集群压缩转码系统用来将生成的工作流交付与管理员进行创建、修改、排序、删除、定义类别等。同时,集群压缩转码系统通过对后期编辑系统输出的视频等资源进行快速的各种格式的编码,成品压缩为适合网络传输的高质量、低码流的各种格式的文件生成高质量、低码流的课件视频文件,用于离线点播下载和发布;同时存储后的文件通过直播服务器实现对存储后的文件的直播。

最后,最终结果将通过Web服务器发布到用户终端。此方案和用户终端结合紧密,当有新的资源发布时,用户终端将自动得到消息。提示即可获得最新内容,并按顺序播放所有内容。用户只需要提前订阅相关资源,就能够不断地自动接受到系统提供的最新的内容。无论离线还是直播模式,用户都能够便捷地在任何地点与时间访问自己的订阅内容。

4 方案应用情况

西安交通大学网络公开课平台于2011年建设,目前发布了西安交通大学公开课程30门合计231讲。平台总点击率达逾77万人次^[9]。该平台采用了三层架构的工作流方案来实现。为了保证在各个应用层面的可伸缩性和可扩展性,按JavaEE规格,采用Java编程语言和服务器端Java技术EJBs、Servlet实现业务逻辑;采用面向对象的组件技术,并基于跨平台业界标准;基于JavaEE架构系统,提供面向服务的框架应用,具有较高的可靠性和较高的安全性等特征。

该平台的后台管理是整个平台顺利运转的保障,其主要功能包括:系统管理、用户管理、视频管理、视频分类管理、视频发布、管理员操作、统计操作、日志管理等。平台的前台展示应用方面,系统可同时满足iOS、Android等平台,满足iPad、iPhone、平板电脑以及手机终端等不同移动终端的要求。

5 结 语

以上提出一种在高校开放教育资源平台建设中普遍适用的

基于视频工作流的资源采集三层架构。这个架构组合了自我匹配和自我学习的方法,在工作流清楚理解视频处理任务的基础上,可以实现视频发布的全自动化。但是,现实中,完全的全自动不太可能,在必要的环节上必须要人工参与;此外,在某些重要的任务上也需要通过管理员介入提供反馈消息来帮助提高和加强系统的工作流实施效果。

互联网技术的发展对高等教育模式提出了巨大的挑战^[10]。高校开放教育资源平台在为用户免费提供许多世界顶尖大学和其他机构教育资源的同时,也提供了中国高等教育与国际接轨的机会。通过它,不但能将国内教育、文化等方面的优秀学术资源提供给全球网络用户,还能促进国内外高校之间的协作,推动高校教学质量的提升^[11]。所以,提高视频共享速度与质量的技术对高校教研发展是有重要意义的。

参 考 文 献

- [1] 高等教育观察. 中国大学网络公开课暴露出教育“短缺”[EB]. http://www.herrank.org/her/newsdetail_502.html.
- [2] 倪叶青. 高校开放共享资源库现状和分析[J]. 计算机时代, 2009(7): 23-24.
- [3] 国立中兴大学开放课程平台[EB]. http://140.120.2.227/nchu_oc/OCW/index.php.
- [4] MIT Open Courseware [DB/OL]. <http://ocw.mit.edu/about/>.
- [5] 俞毅. 教育资源库建设的现状、问题及发展趋势[J]. 黑龙江教育学院学报, 2008(6): 26-28.
- [6] 宫天然. 美国名校网络公开课的启示与借鉴[J]. 首都师范大学学报, 2011(6): 142-144.
- [7] 何象林, 孔鸿滨, 姚绍文. 基于语义的工作流数据模式研究[J]. 计算机科学, 2009, 36(4B): 37-44.
- [8] 伍铁明, 姚绍文, Lu Zhongyu. 构造可扩展工作流的语义机制模型[J]. 计算机应用研究, 2009, 26(6): 2341-2343.
- [9] 西安交通大学网络公开课[EB]. <http://oc.xjtu.edu.cn/>.
- [10] Shun Han Rebekah Wong. Which platform do our users prefer: website or mobile app? [J]. Reference Services Review, 2012, 40(1): 103-115.
- [11] 谭凤. MIT ocw的成功之道对我国精品课程建设的启示[J]. 中国电力教育, 2008(2): 168-170.

(上接第84页)

- [8] 王孔森, 盛戈峰, 刘亚东, 等. 基于输电线路轴向张力的导线弧垂在线监测系统[J]. 华东电力, 2011, 39(3): 339-343.
- [9] A Real-Time Conductor Sag Measurement System Using a Differential GPS [J]. IEEE Transactions On Power Delivery, 2012, 27(2): 475-480.
- [10] 邵天晓. 架空送电线路的电力学计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [11] 朱宽军, 刘超群, 任西春. 架空输电线路舞动时导线动态张力分析[J]. 中国电力, 2005, 38(10): 40-44.
- [12] 王鹏举. 导线舞动的原因及对策[J]. 东北电力技术, 2005(7): 13-16.
- [13] 何铿, 赵高煜. 安装防振锤的分裂导线自由振动的有限元计算[J]. 工程力学, 2003, 20(1): 101-104.
- [14] Burns M R. Distribution line hazards that affect reliability and the conductor repairs and solutions to avoid future damage [C]//2003 IEEE Rural Electric Power Conference, May 4-6, 2003: C1/I-C1/13.