



通信系统时延抖动对基于行波法的 电力线路故障定位影响分析

李明贞¹, 刘建明^{1,2}, 王航¹, 周文俊¹

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072;

2. 中国电机工程学会, 北京 100761)

摘要: 为研究通信系统时延抖动对基于行波法的电力线路故障定位影响, 提出了一种基于泊松分布的随机时延抖动计算模型, 分析了单节点和多节点情况下的通信网络随机时延抖动特性, 结果表明, 在单节点通信链路中, 当标记数据流权重较低时, 随机时延抖动随通信负荷的增大而增大, 且通信负荷较轻时, 标记数据流权重对随机时延抖动的影响不大。在多节点通信链路中, 整体时延抖动低于各节点时延抖动的代数和, 且负荷较重的节点位置对整体时延抖动有影响。因通信时延抖动会对基于行波法的电力线路故障定位引起较大误差, 在通信结构和定位方案设计时, 应考虑随机时延抖动及其影响因素。

关键词: 随机时延; 时延抖动; 分组传送网; 故障定位; 行波法

中图分类号: TM73

文献标识码: A

doi: 10.11959/j.issn.1000-0801.2018132

Analysis of time delay jitter of communication system on fault location of power line based on traveling wave method

LI Mingzhen¹, LIU Jianming^{1,2}, WANG Hang¹, ZHOU Wenjun¹

1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China

2. Chinese Society for Electrical Engineering, Beijing 100761, China

Abstract: In order to study the time delay jitter of communication system on fault location of power line, a mathematical model of the delay jitter based on Poisson distribution was presented. The characteristic of the random delay jitter for single and multiple node cases were analyzed. Results show the delay jitter is remarkable when the communication load is high, and is insensitive when the communication load is low in the single node case. The total delay jitter is lower than the sum of the jitter in the queues on a path, and the position of the heavy load node in the path has a large influence on the total path jitter. The delay jitter with its influencing factors should be taken into account to perform optimal network design.

Key words: random delay, delay jitter, packet transport network, fault location, traveling wave method

收稿日期: 2017-09-20; 修回日期: 2018-03-01

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863”计划)基金资助项目(No. 2011AA05A116)

Foundation Item: National High-Tech R&D Program (863 Program) (No. 2011AA05A116)

1 引言

目前电力线路故障定位系统的通信方式主要有3种:电力线载波通信、光纤通信和无线移动通信^[1-3]。电力线载波通信(PLC)技术^[1]以电力线作为传输媒体,利用载波方式将模拟或数字信号变成高频信号,通过电力线实现远距离传输。光纤通信^[2]是以光波作为信息载体,以光导纤维作为传输介质的通信方式。无线移动通信^[3]采用分组交换技术,通过架空线/电力线路故障诊断设备中的通信模块实现数据通信。

随着通信技术的发展,高速数据传输技术在电力线路故障定位系统中越来越多地被应用。但目前大部分研究工作主要集中在网络通信方案、通信方式、网络时延特性分析等,很少关注电力通信网络的时延抖动问题。参考文献[4]研究了区域保护与控制系统网络拓扑方案,参考文献[5]研究了PTN(packet transport network, 分组传送网)传输继电保护业务的通信机制,参考文献[6]研究了线路纵差保护的PTN时分复用业务时延特性。但对于电力线路故障定位这类需要实时交互的服务,时延抖动是服务质量(quality of service, QoS)的一个重要参数,时延变化的评估有助于控制分组丢失率和缓冲区溢出,有利于提高故障定位精度。

本文提出了一种基于泊松分布数据流的随机时延抖动计算模型,由于时延抖动与数据传输路径上所有节点的时延有关,而时延主要来自网络核心路由器入口缓冲区队列时延,因此,此类时延与分组到达速率、分组尺寸、节点数量以及设备吞吐量有关。假设所有的数据流服从泊松分布,数据流的到达时间服从负指数分布,对单节点和多节点网络建模,可分别计算出其时延抖动。对时延抖动分布的规律分析表明,真实的时延抖动小于数据队列中各时延抖动的直接相加。在单节点无限缓冲区的情况下,

通信负荷较轻时,标记数据流权重对随机时延抖动的影响不大;但是当通信负荷较大时,若此时标记数据流权重较低,则通信时延抖动较高。在多节点通信网络中,若某节点的通信负荷比其他节点重,节点位置对整体时延没有影响,但是对整体时延抖动有重大的影响。在标记数据流较小且通信负荷较重时,时延抖动对基于行波法(特别是单端行波法)的故障定位模式影响很大,为有效减少时延问题产生的影响,降低定位误差到可接受的范围,在定位方案设计之初考虑时延与抖动对行波法故障定位的影响,有助于进一步提高定位精度。

2 电力通信中的随机时延抖动

2.1 时延抖动

时延抖动^[7]是指相邻两个同类型数据分组在连续时刻时延的变化量。这种变化量对时延敏感业务的影响较为突出。在不考虑保护倒换和路径恢复的情况下,端到端时延抖动 J 可以由时延定义:

$$J_j = T_{j+1} - T_j \quad (1)$$

$$J = E[|T_{i+1} - T_i|] \quad (2)$$

其中, T_j 表示第 j 个数据流通过数据队列的时延; J_j 是两个连续数据流之间的时间差; J 是所有数据流的平均时延抖动。由式(1)和式(2)可以看出,时延抖动应与数据传输路径上所有节点的时延有关,而时延主要来自网络核心路由器入口缓冲区队列时延。此类时延与分组到达速率、分组尺寸、节点数量以及设备吞吐量有关。

2.2 故障定位系统中时延抖动的随机性

目前,电力线路故障定位系统多采用效率较高的统计复用技术来实现数据通信。这种复用技术使得数据传输的固定时延变成了随机时延。在这种情况下,即使采用标签交换的二层



半分组交换技术,也无法在路径确定的条件下保证收发端业务的同步。进一步分析,造成时延抖动随机性的因素主要有两个:同类型数据经不同中间节点穿越通信网络,到达缓冲区的时刻不确定,造成数据到达分布呈现出随机性;对标记分组数据和背景数据的封装尺寸不同,使得缓冲区中等待处理的数据队列长度未知,造成标记分组的等待时间不确定,进而使时延抖动呈现随机特性。

在电力系统中,光纤通道传输继电保护信息要求较高的是线路纵联差动保护(以下简称线路纵差保护)。该保护方式通过计算通信通道被保护线路各侧的电流差值来判别区内外故障。当传输通道存在较大不确定时延抖动时,会严重影响线路两侧电气量信息采集的实时性,降低继电保护系统的速动性、灵敏性,进而威胁电力线路安全。因此,携带纵联差动保护信号的数据通信业务在传输过程中所产生的随机时延抖动是不可忽视的。参考文献[8]规定电力系统 2 MHz 信号的数字接口抖动不得超过 0.2 UI(高频)、1.5 UI(低频),其中,1 UI=488 ns。

3 随机时延抖动数学模型

3.1 单节点随机时延抖动模型

在单节点无限缓冲区的情况下,假设有 K 个到达队列的数据流,它们具有不同的到达时间和分组长度。取特定的数据流 k 为标记流。由于分组到达的随机特性,这里假设所有的数据流服从参数为 λ_m 的泊松分布,数据流的到达时间服从参数为 μ_m 的负指数分布。定义 $\lambda = \sum_{m=1}^K \lambda_m$ 为总流量到达率, λ_k 为标记流量到达率,背景流量到达率 $\lambda_0 = \lambda - \lambda_k$ 。

(1) 当 $\lambda_k \ll \lambda$ 时,数据流 k 很小,数据流 k 的分组数据被来自其他数据流的大量分组分离,使得两个连续分组传输时延的相关性可以忽略,并假

设 T_j 和 T_{j+1} 是两个独立变量。此时,时延抖动服从参数为 η 的负指数分布,其中 $\eta = \mu - \lambda$, 即:

$$J = E[T_{j+1} - T_j] = \frac{1}{\eta} \quad (3)$$

(2) 当 $\lambda_k \cong \lambda$ 时,数据流 k 很大,其他数据流可以忽略,定义 t_j 为数据组 j 的到达时间, $I_j = t_j - t_{j-1}$ 为时间间隔, r_j 为数据组 j 的起始时间, W_j 为数据组 j 的等待时间, S_j 为数据组 j 的服务时间, $T_j = W_j + S_j$ 为数据组 j 的时延。

因此,有:

$$W_{j+1} = \begin{cases} 0, & r_j \leq t_{j+1} \\ W_j + S_j - (t_{j+1} - t_j), & r_j > t_{j+1} \end{cases} \quad (4)$$

$$T_{j+1} - T_j = \max(S_{j+1} - T_j, S_{j+1} - I_{j+1}) \quad (5)$$

由于随机变量 T_n 、 S_{n+1} 和 I_{n+1} 是相互独立的,且都服从负指数分布,则有:

$$\begin{aligned} J &= E[T_{n+1} - T_n] \\ &= \int_0^\infty I(i) \left\{ \int_0^\infty S(s) \left[\int_0^i |s-x| T(x) dx + \int_i^\infty T(x) dx \right] ds \right\} di \end{aligned} \quad (6)$$

其中, $T(x) = \eta e^{-\eta x}$, $S(s) = \mu e^{-\mu s}$, $I(i) = \lambda e^{-\lambda i}$ 。

由式(6)可得:

$$J = \eta \mu \lambda (A + B) \quad (7)$$

$$A = \frac{1}{\mu^2} \left(\frac{1}{\lambda \eta} - \frac{1}{\eta \mu} \right) \quad (8)$$

$$B = \frac{1}{\mu^2} \frac{1}{\eta \mu} \quad (9)$$

由式(7)~式(9)可得,当数据流 k 很大时,时延抖动的估计值为:

$$J = E[T_{j+1} - T_j] = \frac{1}{\mu} \quad (10)$$

(3) $\lambda_k < \lambda$, 数据流 k 位于极大值和极小值之间时,设背景流量服从参数为 λ_0 的泊松分布,

则总流量负载率为:

$$\rho = \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\lambda_k + \lambda_0}{\mu} \quad (11)$$

其中, λ_k 为数据流 k 的泊松分布参数。则数据流 k 的时延抖动为:

$$J_k = E[T_j^k - T_{j-1}^k] \quad (12)$$

其中, T_j^k 表示数据流 k 的第 j 个分组数据的时延。由于电力线路故障定位通信系统属于轻载系统, 在此类系统中, 只有当数据流 k 的分组数据 P_j 离开后, P_{j+1} 才会到达。 P_j 和 P_{j+1} 的平均到达时间为 $\tau_k = 1/\lambda_k$ 。时延 T_j 大于 τ_k 的概率约为 0。因此有:

$$J_k \cong \frac{1}{\eta} f(\tau_k, \eta) \quad (13)$$

其中:

$$f(\tau_k, \eta) = 1 - e^{-\eta\tau_k} (\eta\tau_k + e^{-\eta\tau_k}) \quad (14)$$

式 (14) 中, $1 - f(\tau_k, \eta)$ 可以看作数据流 k 的两个连续分组数据的相关度估计。可以看出, 式 (13) 满足数据流 k 的多种状态。如果数据流 k 很小, $\lambda_k \cong 0$, $\tau_k \cong \infty$, 那么 $J_k \cong 1/\eta$, 与式 (3) 的结论一致。如果数据流 k 很大, $\lambda_k \cong \lambda$, 那么 $\eta\tau_k \cong (1-\rho)/\rho$, 则有:

$$J \cong \frac{1}{\eta} \left[1 - e^{(\rho-1)/\rho} \left(\frac{1-\rho}{\rho} + e^{(\rho-1)/\rho} \right) \right] \quad (15)$$

当 $\rho \cong 0$ 时, $J \cong 1/\eta$, 这说明当 ρ 很小时, 时延抖动不取决于分组数据的相关度。当 $\rho \cong 1$ 时, $\eta\tau_k \cong 0$, $J \cong 1/\mu$, 与式 (10) 的结论一致。

3.2 多节点随机时延抖动模型

单纯分析一个独立节点无法与工程实际相吻合, 端到端通信的随机时延抖动必然与传输路径中所有串联节点有关, 其结构如图 1 所示。在多节点串联结构中, 分组数据通过队列的时延相互关联。在整个通信网络中, 由于数据队列的服务时间与下一个路由的到达时间有关, 队列之间也存在很强的相关性^[9]。传统的排队理论难以精确的计算这些复杂的相关性影响。

设 $\lambda_k^{(n)}$ 为数据流 k 在节点 n 的分组数据到达率, $\lambda_0^{(n)}$ 为背景数据流在节点 n 的分组数据到达率, 所有分组数据的服务时间服从参数为 μ 的负指数分布, $T_j^{(n)}$ 为分组数据 j 通过节点 n 的时延, 则数据流 k 的时延抖动为:

$$J_k^{(N)} = E \left[\sum_{n=1}^N T_{j+1}^{(n)} - T_j^{(n)} \right] \quad (16)$$

由式 (16) 可知:

$$J_k^{(N)} \leq \sum_{n=1}^N J_k^n \quad (17)$$

其中, J_k^n 表示由式 (13) 和式 (14) 计算出的数据流 k 在节点 n 的时延抖动。这说明, 将数据队列中的时延抖动直接相加将高于真实的时延抖动。设 $q_i^{(n)}$ 为数据流 k 在节点 n 的缓冲区占有率, 则数据流 k 的分组数据自相关函数为:

$$\begin{aligned} E[q_i^{(n)} q_{i+1}^{(n)}] &= \frac{1}{(L^{(n)})^2 + (R^{(n)})^2} \times \left((L^{(n)})^2 + \frac{\lambda_k^{(n)} (R^{(n)})^2}{\lambda_k^{(n)} + \mu / (R^{(n)})^2} \right) \end{aligned} \quad (18)$$

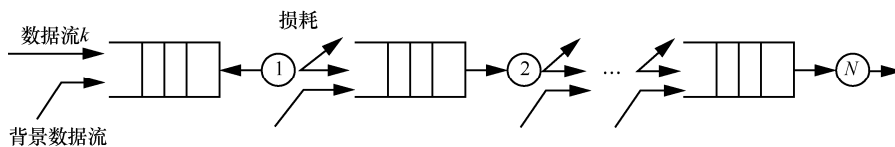


图 1 多节点串联结构



其中, $L^{(n)} = \rho^{(n)} / (1 - \rho^{(n)})$ 表示数据队列的均值, $(R^{(n)})^2 = \rho^{(n)} / (1 - \rho^{(n)})^2$ 表示数据队列的方差。

定义如下:

$$K[\lambda_k^{(n)}, \eta^{(n)}] = 1 - E[q_i^{(n)} q_{i+1}^{(n)}] \quad (19)$$

此时, N 个节点的随机时延抖动可近似用式(20)表示:

$$J_k^{(N)} \approx \frac{1}{\eta^{(1)}} f(\tau_k, \eta^{(1)}) + \sum_{n=2}^N \frac{1}{\eta^{(n)}} K[\lambda_k^{(n)}, \eta^{(n)}] f(\tau_k^{(n)}, \eta^{(n)}) \quad (20)$$

其中, $\eta^{(n)} = \mu(1 - \rho^{(n)})$, $\lambda_k^{(n)} = 1/\tau_k^{(n)}$ 。

3.3 模型的验证

设分组数据的长度 $L=1$ KB, 光纤接入网带宽为 1 Gbit/s, 电力通信网的业务比例为 3% 左右, 即 $C=30$ Mbit/s, 一个分组数据的平均服务时间为 $1/\mu = L/C$, 则 $\mu = 3.75$ kbit/s, 分别在通信负荷 $\rho=0.1$ 、 0.5 、 0.9 时, 可以得出单节点的随机时延抖动, 如图 2 所示。

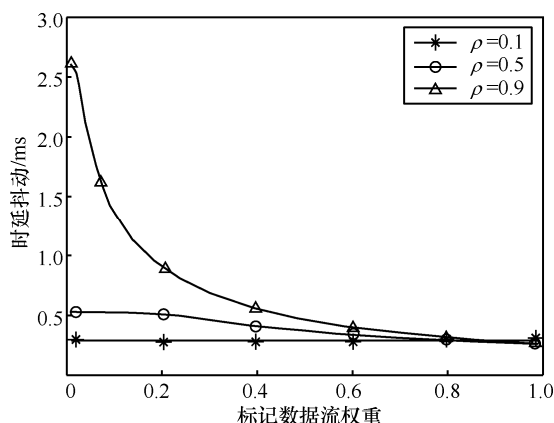


图2 单节点随机时延抖动 λ_k / λ

随着通信负荷的增大, 在标记数据流权重较低时, 随机时延抖动较大, 但随着标记数据流权重的增大, 随机时延抖动有降低的趋势。对于通信负荷较轻时 ($\rho=0.1$), 标记数据流权重对随

机时延抖动的影响不大; 但是当通信负荷增大到 $\rho=0.9$ 时, 若此时标记数据流权重较低, 则通信时延抖动较高, 这种情况下可能不满足 QoS 的要求。

对于多节点的模型, 设共有 4 个队列节点串联结构, 进行 2 次仿真, 第一次设置通信负荷分别为 $\rho_1=0.2$ 、 $\rho_2=0.5$ 、 $\rho_3=0.5$ 、 $\rho_4=0.8$; 第二次设置通信负荷分别为 $\rho_1=0.8$ 、 $\rho_2=0.5$ 、 $\rho_3=0.5$ 、 $\rho_4=0.2$, 结果如图 3 所示。

从图 3 中可以看出, 在一条通信链路中, 某节点的通信负荷比其他节点重, 节点位置对整体时延没有影响, 但是对整体时延抖动有重大的影响。这表明时延抖动与其他 QoS 评价指标的特性不同, 设计通信链路时, 应考虑时延抖动指标和重负荷节点位置的影响。

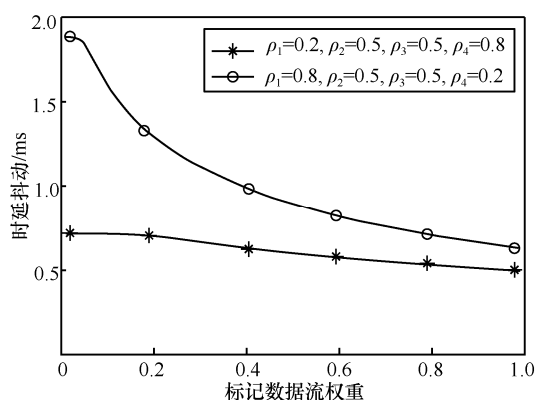


图3 多节点随机时延抖动 λ_k / λ

4 时延抖动对行波法故障定位的影响

目前基于行波法的故障定位研究较多^[10-12], 其基本原理是通过检测故障线路上的暂态行波在母线与故障点之间的传播时间进行故障测距, 由于暂态行波的传播速度接近光速, 基于行波法的故障定位模式存在噪声消除和波头时刻提取的问题。现有研究一般计入了通信系统的时延, 但绝大部分未计入时延抖动, 这将直接影响故障定位精度。

设故障定位装置存在 4 个通信节点, 如第 3.2

节中的多节点随机时延抖动模型。在理想情况下,标记数据流权重为1,单节点的随机时延抖动 $J^{(1)} = 1/\mu = 0.2667$ ms,各节点相互独立,整体的随机时延抖动 $J = 1.0667$ ms。单端行波法的定位误差为电磁波传播速度与时延抖动的乘积。在极端情况下,数据流很小 $\lambda_k \ll \lambda_0$,通信负荷 $\rho = 1$,单节点的随机时延抖动 $J^{(1)} = 1/\eta$ 接近无穷大。在第3.2节设置的通信负荷情况下,随机时延抖动的变化范围为0.5~1.9 ms。因此,这种情况下随机时延抖动均对定位精度影响较大。

现今实际采用的双端行波法、多端行波法、中心频率提取算法等方法^[10-12],能够有效减少时延问题产生的影响,降低定位误差到可接受的范围,在定位方案设计之初考虑时延与抖动对行波法故障定位的影响,有助于进一步提高定位精度。

5 结束语

本文提出了一种基于泊松方程的电力通信随机时延抖动模型,分析了单节点和多节点下的随机时延抖动特性。结果表明,在单节点通信链路中,当标记数据流权重较低时,随机时延抖动随通信负荷的增大而增大,且通信负荷较轻时,标记数据流权重对随机时延抖动的影响不大。在多节点电力通信链路中,整体时延抖动低于各节点时延抖动的代数和,且负荷较重的节点位置对整体时延抖动有影响。通信系统时延抖动对基于行波法的故障定位有较大影响,在通信结构和定位方案设计时,应考虑随机时延抖动及其影响因素。

参考文献:

- [1] 邱小宁. 浅谈电力线载波通信现状与发展趋势[J]. 广西电力, 2001, 24(4): 59-60.
QIU X N. Initial discussion on present status and developing tendency of power line carrier communication[J]. Guangxi Electric Power Technology, 2001, 24(4): 59-60.
- [2] RAO M V K, PEN R, CLINARD K N, et al. Development and evaluation of a distribution automation system for an Indian utility[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1): 452-458.
- [3] LIN C E, LI C C, HOU A S, et al. A real time remote control architecture using mobile communication[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2003, 52(4): 97-103.
- [4] 杨贵, 孙磊, 李力, 等. 区域保护与控制系统网络拓扑方案研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 101-107.
YANG G, SUN L, LI L, et al. Research on regional protection and control system network topology[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 101-107.
- [5] 高强, 尹永飞. PTN 技术传输继电保护业务若干问题的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 57-62.
GAO Q, YIN Y F. Study on some problems of PTN transmission in relay protection services[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 57-62.
- [6] 许俊现, 高会生, 汪洋. 用于线路纵差保护的 PTN 时分复用业务时延分析[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 56-62.
XU J X, GAO H S, WANG Y. A delay time analysis of time division multiplexing services over PTN applied to line longitudinal differential protection[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 56-62.
- [7] 方子希, 高会生. 抗时延抖动的线路纵差保护分组传输通道配置参数影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(12): 82-87.
FANG Z X, GAO H S. An impact analysis of the configuration parameters against delay jitter of line comparison pilot protection in packet transport channel[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 82-87.
- [8] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. 电力系统同步数字系列(SDH)光缆通信工程设计技术规定: DL/T 5404-2007[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
National Development and Reform Commission. Power system synchronous digital series (SDH) design technical specification for optical cable communication engineering: DL/T 5404-2007[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [9] DAHMOUNI H, GIRARD A, SANSO B. An analytical model for jitter in IP networks[J]. Journal of Annals of Telecommunications, 2012, 67(1-2): 81-90.
- [10] 刘洋, 曹云东, 侯春光. 基于经验模态分解及维格纳威尔分布的电缆双端故障定位算法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(16): 4086-4093.
LIU Y, CAO Y D, HOU C G. The cable two-terminal fault location algorithm based on EMD and WVD[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(16): 4086-4093.



- [11] 桂勋, 刘志刚, 韩旭东, 等. 基于高压输电线电压沿线分布规律的故障双端测距算法[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(19): 63-69.

GUI X, LIU Z G, HAN X D, et al. An accurate algorithm of two-terminal fault location based on the distribution of line voltage along HV transmission line[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(19): 63-69.

- [12] 季涛, 孙同景, 徐丙垠, 等. 配电混合线路双端行波故障测距技术[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(12): 89-94.

JI T, SUN T J, XU B Y, et al. Study on fault location of distribution mixed feeders based on double terminal method of traveling waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(12): 89-94.

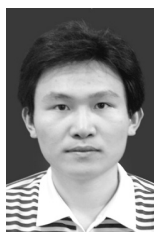
[作者简介]



李明贞(1991-), 男, 武汉大学电气工程学院博士生, 主要研究方向为电力电缆的运行维护技术和管理策略等。



刘建明(1955-), 男, 武汉大学电气工程学院博士生导师、教授级高级工程师, 中国电机工程学会高级会员, CIGRE 会员, 主要研究方向为电力通信、物联网、智能电网技术。



王航(1989-), 男, 武汉大学电气工程学院博士生, 主要研究方向为电缆局部放电和绝缘老化。



周文俊(1959-), 男, 博士, 武汉大学电气工程学院教授(二级)、博士生导师, IEEE 高级会员, 主要研究方向为防雷接地和高电压绝缘与测试, 已发表论文 130 余篇。