

瞬时电压闪变监测及定量评估方法研究

韩松¹, 邱国跃¹, 彭小俊²

(1. 贵州大学电气工程学院, 贵州 贵阳 550003; 2. 南方电网贵州电力试验研究院, 贵州 贵阳 550001)

摘要: 简要介绍了目前电能质量监测中电压波动和闪变的测量方法, 并分析了存在的一些问题。提出了一种瞬时电压闪变监测及定量评估方法, 该方法首先采用 Prony 方法将电压信号分解为基频和间谐波频率两部分, 然后借助 Hilbert 变换从 Prony 线性拟合结果中提取电压包络线, 即而获得电能质量评估中瞬时电压闪变严重程度的定量信息。数值仿真算例初步验证了该方法的有效性。

关键词: 瞬时电压闪变; 间谐波; Prony 方法; Hilbert 变换; 电能质量评估

An investigation on quantitative evaluation and detection of instantaneous voltage flicker

HAN Song¹, QIU Guo-yue¹, PENG Xiao-jun²

(1. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang 550003, China;

2. Guizhou Electric Power Testing and Research Institute of China Southern Power Grid, Guiyang 550001, China)

Abstract: This paper simply describes the main methods for detection of voltage fluctuation and flicker, and some existing problems. It introduces an applicable method for the quantitative evaluation and detection of the instantaneous flicker level. The technique based on Prony Analysis and Hilbert Transform develops the envelope of the voltage waveform from actual non-stationary voltage signal. Three cases are studied by numerical simulation and preliminary prove this method effective.

This project is supported by National Natural Science Foundation of the Education Department of Guizhou Province(No.2003132).

Key words: instantaneous voltage flicker; interharmonic; Prony analysis; Hilbert transform; evaluation of power quality

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2008)16-0033-05

0 引言

随着电力系统中冲击性负荷的增加, 电网中存在的电压波动、电压闪变也日趋严重。闪变逐渐受到电力配电市场中供应方和购电者的重视, 成为电能质量扰动的一种重要类型。为了抑制和治理电压波动和闪变, 电网投入了一些静止补偿设备, 这些补偿设备的研制和整定均需要准确详尽的电压闪变严重程度的定量信息, 以提供合适的评估准则和正确的治理决策。

目前, 广泛讨论和研究的闪变评价指标多为基于统计型的评价指标, 如短时闪变严重度和长时闪变严重度等^[1,2]。IEC给出的闪变仪就是基于统计性指标的。这些指标基于白炽灯的光通量或人的视觉感受角度定义, 从信号统计的角度反映了闪变强弱的定性特点, 但很难确切地给出闪变的具体参数和

定量信息, 故而对闪变的定量评估方法、治理措施、装置研制指导作用不明显。

常见的闪变调制波检波方法可分为3种, 即半波有效值法、平方解调法和全波整流法^[1]。半波有效值检波是一种平均效果, 易受到基波电压和基波频率的影响; 平方解调和全波整流都需要设计频带很严格的低通滤波器或者带通滤波器, 恰当地将直流、工频以及工频谐波滤去, 同时滤波器造成的延时较大, 动态响应速度较慢。实质上, 对电压波动和闪变的评价和测量的方法就是对电压波形包络线的幅度和频率的检测。这种电压包络线通常称为瞬时电压闪变度 Instantaneous Flicker Level (IFL)^[3]。IFL的频率可以是一个单独的频率或是一个频带^[4]。

文献[3]的研究表明, 当一个电压波形包含间谐波时, 由于间谐波频率成分和基频成分的周期往往并不是同步的, 使得测得的均方根值和峰值发生波动, 会导致测量和评价的不准确。然而, 实际的电网信号往往是非平稳的, 含有噪声和间谐波的。传

基金项目: 贵州省教育厅自然科学基金(2003132)

统的数字信号处理方法和手段中,许多学者利用快速傅立叶变换、卡尔曼滤波、小波变换对平稳信号做了深入的研究^[5-9],但在非平稳信号处理的计算精度和耗时等方面,还存在一些值得改进和扩展的问题,文献[10]基于Hilbert谱分析方法在该方面做了一些有意义的探索。

本文提出了一种瞬时电压闪变监测及定量评估方法,该方法首先采用Prony方法将电压信号分解为基频和间谐波频率两部分,然后借助Hilbert变换从Prony线性拟合结果中提取电压包络线,即而获得电能质量评估中瞬时电压闪变的严重程度的定量信息,瞬时电压闪变度IFL。

1 算法描述

1.1 电压闪变信号的数学模型

根据扰动原因的不同,闪变有周期性和非周期性之分,其中对人们生活影响较大的为周期性电压闪变。周期性电压闪变可看成是对正弦电压的低频调制,即可表示为一个幅值调制的信号,如式(1)所示。

$$v(t) = \left[A_0 + \sum_{i=1}^m A_i \cos(\omega_{fi}t + \phi_{fi}) \right] \cos(\omega_0 t + \phi_0) = \quad (1)$$

$$A_0 \cos(\omega_0 t + \phi_0) + \sum_{i=1}^m A_i' \cos(\omega_{Hi}^- t + \phi_{Hi}^-) + \sum_{i=1}^m A_i' \cos(\omega_{Hi}^+ t + \phi_{Hi}^+)$$

式中: A_0 、 ω_0 、 ϕ_0 为基频分量的幅值、频率和相角; A_i 、 ω_{fi} 、 ϕ_{fi} 为调制前间谐波频率分量的幅值、频率和相角; A_i' 为调制后间谐波频率分量的幅值、 ω_{Hi}^- 、 ϕ_{Hi}^- 、 ω_{Hi}^+ 、 ϕ_{Hi}^+ 分别为调制后呈现的两个高、低间谐波频率分量的频率和相角。其中调制电压的幅值 A_i 一般小于基波幅值的10%和角频率 ω_{fi} 一般为1~10 Hz。

1.2 信号的分解

Prony分析法在某种程度上可以说是一种超越快速傅立叶分析FFT的时频分析方法。它可以提取出信号中含有的模态,衰减系数,相位,频率以及幅值等信息。它是以采样数据是一系列指数函数的线性组合来建立模型的。实质上它就是一种借助AR (Autoregressive) 自回归和 ARMA (Autoregressive moving average) 去均值自回归的最小方差线性预测算法^[11]。

Prony方法假定数据模型是一组 p 个具有任意振幅、相位、频率和衰减因子的指数函数,其离散时间函数形式为

$$\hat{x}(k) = \sum_{i=0}^n A_i e^{(\alpha_i + j\omega_i)k\Delta t + j\phi_i} = \sum_{i=1}^p h_i z_i^k \quad (2)$$

将其用作样本数据 $x(1), \dots, x(p)$ 的模型。更一般地, h_i 和 z_i 假定是复数,且 $h_i = A_i \exp(j\phi_i)$, $z_i = \exp[(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t]$, 其中 A_i 为振幅, θ_i 为相位, α_i 为衰减因子, f_i 为频率, Δt 表示采样间隔。

该方法的计算步骤简单介绍如下:

Step 1: 决定适合待分析数据的线性预测模型参数; 构建线性预测模型, 如式(3)所示。

$$\begin{bmatrix} z_1^0 & z_2^0 & L & z_p^0 \\ z_1^1 & z_2^1 & L & z_p^1 \\ M & M & O & M \\ z_1^{p-1} & z_2^{p-1} & L & z_p^{p-1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ M \\ h_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}[1] \\ \hat{x}[2] \\ M \\ \hat{x}[p] \end{bmatrix} \quad (3)$$

Step 2: 计算由第一步形成的多项式的根, 同时得到预测系数, 这些系数可以计算出每个指数成分的衰减系数和正弦函数频率, 如式(4)、式(5)所示。

$$\phi(z) = \prod_{m=1}^p a[m] z^{p-m} \quad (4)$$

$$\sum_{m=0}^p a[m] x[n-m] = \sum_{i=0}^p h_i z_i^{n-p} \sum_{m=0}^p a[m] z_i^{p-m-1} = 0 \quad (5)$$

Step 3: 在第二步求解的同时, 可以得到另一线性方程, 借助它, 可以得到各指数成分的幅值和正弦函数初相角, 如式(6)、式(7)所示。

$$\begin{bmatrix} \hat{x}[p] & \hat{x}[p-1] & L & \hat{x}[1] \\ \hat{x}[p+1] & \hat{x}[p] & L & \hat{x}[2] \\ M & M & O & M \\ \hat{x}[2p-1] & \hat{x}[2p-2] & L & \hat{x}[p] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a[1] \\ a[2] \\ M \\ a[p] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{x}[p+1] \\ \hat{x}[p+2] \\ M \\ \hat{x}[2p] \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\begin{cases} f_i = \tan^{-1} [\text{Im}\{z_i\} / \text{Re}\{z_i\}] / 2\pi T \\ \alpha_i = \ln |z_i| / T \\ A_i = |h_i| \\ \theta_i = \tan^{-1} [\text{Im}\{h_i\} / \text{Re}\{h_i\}] \end{cases} \quad (7)$$

这样可以得到:

$$\hat{x}(k) = \sum_{i=0}^p A_i' \cos(\omega_i k \Delta t + \phi_i) \quad (8)$$

在 N 个采样点上, 为了得到相对精确的Prony分析估计值 \hat{x}_k , 可借助式(9)与真实值 x_k 之间的线性方差LSE来控制拟合精度。

$$LSE = \sum_{k=0}^{N-1} (e_k)^2 = \sum_{k=0}^{N-1} (x_k - \hat{x}_k)^2 \quad (9)$$

1.3 包络线的形成

一个时间信号 $x(t)$ 的 Hilbert 变换为

$$HT(X(t)) = Y(t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{X(\tau)}{t-\tau} d\tau = X(t) * / \pi t \quad (10)$$

$X(t)$ 与 $Y(t)$ 可组成一复共轭对, 得到解析信号

$$Z(t) = X(t) + jY(t) = a(t)e^{j\theta(t)} \quad (11)$$

对于离散的时间信号可以用下式表示:

$$z(k) = x(k) + jy(k) \quad (12)$$

借助 Hilbert 变换就可以得到基频分量的包络线, 对于一个实数函数 $x(t) = \cos(\omega t)$ 来说, 它的 Hilbert 变换值等于 $y(t) = \sin(\omega t)$ 。

这样信号的包络线可以通过下式获得^[4]:

$$|z(k)| = \sqrt{\left[\sum_{i=0}^n A_i' \cos(\omega_i k\Delta t + \phi_i)\right]^2 + \left[\sum_{i=0}^n A_i' \sin(\omega_i k\Delta t + \phi_i)\right]^2} \quad (13)$$

$$= \sqrt{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n A_i' A_j' \cos((\omega_i - \omega_j)k\Delta t + (\phi_i - \phi_j))}$$

1.4 算法流程图

瞬时电压闪变度IFL的计算方法如图1所示, 根据闪变信号调制波的幅值和频率范围, 可知闪变信号为典型的幅值低频调制的窄带信号。故首先借助数字低通滤波去除高次谐波, 既而使用Prony分析对信号进行分解和线性拟合, 其间利用到自动定阶和阶数预设技术, 同时采用线性方差控制计算精度和速度。最后借助Hilbert变换从线性拟合值中获取瞬时电压闪变度IFL, 从而完成电压闪变的该项指标评估。

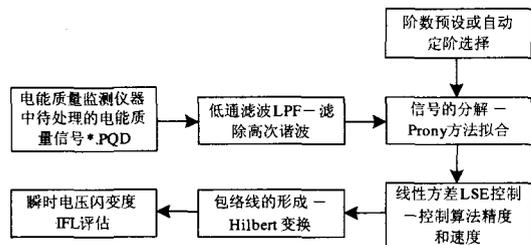


图 1 算法流程图

Fig.1 Algorithm flow chart

2 算例仿真

采用上述方法对瞬时电压闪变监测和评估中涉及的三个方面(单一调制频率电压闪变, 多个调制频率电压闪变, 以及幅值变化情形下的电压闪变)进行数值仿真。

2.1 单一调制频率、低带宽的电压闪变

一个单一低带宽间谐波调制的电压信号, 可用式(14)表示。

$$v(t) = [1 + 0.15 \cos(0.16\omega_0 t)] \cos(\omega_0 t) \quad (14)$$

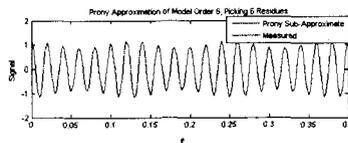
其中: $\omega_0 = 100\pi$ 即基频50 Hz。

由表1看出, Prony分析结果得到了一个标么幅值为1的50 Hz且衰减系数约等于零 (-1.6×10^{-9}) 的基频分量, 和幅值均为0.075的 42 Hz, 58 Hz的两个低频间谐波分量, 且衰减系数亦近似为零。

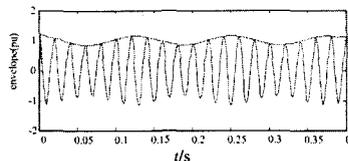
表1 单一调制频率低带宽下闪变信号的Prony估计值

Tab.1 Prony estimation of single LFB AM voltage flicker signal

序号	幅值	衰减系数	频率	相位
1	1	-1.6×10^{-9}	50	0
2	0.075	-1.9×10^{-10}	42	0
3	0.075	-6.5×10^{-9}	58	0



(a) 闪变信号和 Prony线性拟合值



(b) 闪变信号的包络线形成

图2 单一调制频率低带宽下电压闪变信号的包络检测

Fig.2 Envelope detection of a single LFB AM voltage flicker signal

观察图2(a)发现, 6阶Prony分析的线性估计值与原信号值几乎完全重合, 同时线性方差LSE小于 6×10^{-17} , 说明估计效果是准确的。观察图2(b)发现, 基于Hilbert变换的包络线形成效果非常好, 准确地表现了单一低带宽间谐波调制的电压信号变化趋势。

2.2 多个调制频率、宽带的电压闪变

一个宽频带间谐波的负荷电流引起的电压闪变信号, 可用式(16)表示。

$$i(t) = \sin(\omega_0 t) [1 + r \sin(\omega_m t) + r^2 \sin^2(\omega_m t) + r^3 \sin^3(\omega_m t) + r^4 \sin^4(\omega_m t)] \quad (16)$$

其中 $r = 0.4, f_m = 5 \text{ Hz}$ 即 $\omega_m = 10\pi$

表2 宽频带间谐波电流引起的闪变信号的Prony估计值

Tab.2 Prony estimation of WFB AM current signal

序号	幅值	衰减系数	频率	相位
1	1.1	4.8×10^{-2}	50	-90
2	0.23	-3.2×10^{-2}	55	-30
3	0.21	-4.2×10^{-2}	45	150
4	0.047	-6.3×10^{-3}	40	120
5	0.047	-1.3×10^{-2}	60	-60
6	0.008	-3.5×10^{-3}	65	60
7	0.0079	-1.3×10^{-3}	35	-120
8	0.0016	-1.6×10^{-4}	70	30
9	0.0016	-1.4×10^{-3}	30	-150

由表2看出,基于Prony分析的信号分解结果中,得到了一个标么幅值约为1.1,频率50 Hz,衰减系数(4.0×10^{-3})约等于零的基频分量,幅值均约为0.22的55 Hz, 45 Hz的两个间谐波分量,幅值均为0.047的40 Hz, 60 Hz的两个间谐波分量,幅值均为0.0016的35 Hz, 65 Hz的两个间谐波分量,且这些成分的衰减系数都近似为零。

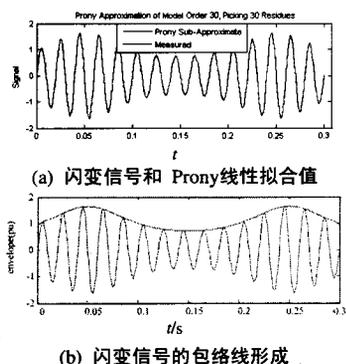


图3 多个调制频率宽频带下电压闪变信号的包络检测

Fig.3 Envelope detection of a multi WFB AM voltage flicker signal

观察图3(a)发现,30阶Prony分析的线性估计值与原信号值十分接近,同时线性方差LSE小于 4×10^{-3} ,说明估计效果是比较准确的。观察图3(b)发现,基于Hilbert变换的包络线形成效果是令人满意的,准确地表现了一个多调制频率、宽频带下电压闪变信号的电压闪变信号的变化趋势。

2.3 调制波幅值变化情形下的电压闪变

电压闪变呈现非平稳信号特征时的数学表达可以用一个调制波幅值变化的式(17)来近似表达。

$$v(t) = [1 + A \cos(0.2\omega_0 t)] \cos(\omega_0 t) \quad (17)$$

式中: $\omega_0 = 100 \pi$ 即基频50 Hz,

$$A = \begin{cases} 0.025, & 0 \sim 0.1 \text{ s} \\ 0.1, & 0.1 \sim 0.2 \text{ s} \\ 0.05, & 0.2 \sim 0.4 \text{ s} \end{cases}$$

观察图4(a)发现,30阶Prony分析的线性估计值与原信号值比较接近,图4(b)中可以更清晰地看到,线性方差LSE小于 1×10^{-2} ,信号分解效果较好。观察图3(b)发现,基于Hilbert变换的包络线形成效果是令人满意的,较为准确地表现了一个调制波幅值变化情形下的电压闪变信号的变化趋势。

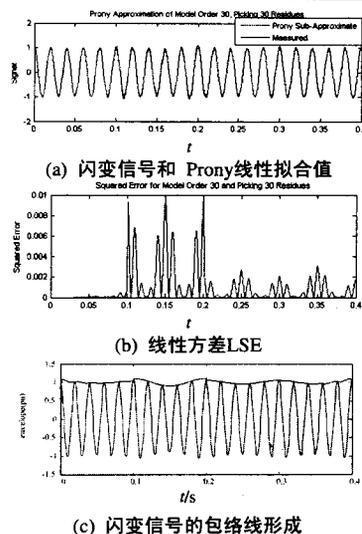


图4 调制波幅值变化情形下的电压闪变信号的包络检测
Fig.4 Envelope detection of a voltage flicker signal with varied amplitude modulation

3 讨论

1) 数值仿真计算中发现,自动定阶方法由于阶数取值往往过大,导致计算耗时较长,建议采用模型阶数预设方法进行Prony分析和线性估计,阶数一般可以采用10~30阶即可保证工程精度和计算速度,同时,可借助自动定阶法进行离线结果校核。

2) 调制波幅值变化情形下的电压闪变分析仿真试验中,在0.1~0.2 s期间拟合误差偏大到 10×10^{-3} ,说明Prony估计和原始信号的拟合效果准确性受调制波幅值变化的影响还是比较大的,这一点将进一步研究予以改进。

3) Hilbert方法能快速提取波动的包络,对于不含谐波及其他扰动的简单闪变,Hilbert法计算闪变参数是准确的。但当工频基波上混有暂态谐波分量时,需要经过低通滤波去除高次谐波,得到波动信号。仿真结果发现滤波后的包络与实际包络有一定移位,所以滤波器非零相位也是下一步研究工作的重点之一。

总的来说,本文推荐的方法具有以下优点:由于使用Hilbert变换,具有一定的处理平稳和非平稳信号的能力;能够准确地处理含有高、低频带下单一和多个间谐波调制的闪变信号;离散采样点较少,易于实现。

4 结论

本文提出了一种瞬时电压闪变监测及定量评估

方法。该方法可以从实际电网的非平稳信号中获取电能质量评估中瞬时电压闪变的严重程度的定量信息,对电压闪变的治理策略及装置研制起到一定的指导作用,具有一定的工程参考价值。

参考文献

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
XIAO Xiang-ning. Analysis and Control for Power Quality[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2004.
- [2] 孙树勤. 电能质量技术丛书第四分册电压波动与闪变[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
SUN Shu-qin. Voltage Fluctuation and Flicker, Volume 4, Power Quality Technical Series[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1999.
- [3] Tayjasanant T, Wang W, Li C, et al. Interharmonics-flicker Curves[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2003,20(2): 1017-1024.
- [4] Leonowicz Z, Lobos T, Rezmer J. Advanced Spectrum Estimation Method for Signal Analysis in Power Electronics[J]. IEEE Trans Ind Electron, 2003,50(3):1-6.
- [5] Feilat E A. Detection of Voltage Envelope Using Prony Analysis-Hilbert Transform Method[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(4): 2091-2093.
- [6] AL-Hasawi W M, ELNaggar K M. A Genetic Based Algorithm for Voltage Flicker Measurement[A]. In: IEEE/Melecon[C]. Cairo(Egypt): 2002. 600-604.
- [7] ZHAO Gang, SHI Wei, LIN Hai-xue. A Study on Calculation of Short Term Flicker Severity[J]. Power System Technology, 2001, 25(11): 15-18.
- [8] Abdel Galil T K, El Saadang E F, Salama M M A. Online Tracking of Voltage Flicker Utilizing Energy Operator and Hilbert Transform[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2004, 19(2): 861-867.
- [9] 马玉龙, 刘连光, 张建华. IEC闪变测量原理的数字化实现[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 92-95.
MA Yu-long, LIU Lian-guang, ZHANG Jian-hua. Research of Digital Flicker Meter Based on IEC Standard [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(11): 92-95.
- [10] 周兆经, 周文晖, 李青. 采用小波分解和同步检波的电压闪变信号检测新方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001,13(6): 23-27.
ZHOU Zhao-jing, ZHOU Wen-hui, LI Qing. A New Method for the Detection of Voltage Flicker Using Wavelet Transform and Synchronous Detection[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2001,13(6): 23-27.
- [11] 王志群, 朱守真, 周双喜. Hilbert变换求取电压闪变有关参数[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(5): 34-37, 66.
WANG Zhi-qun, ZHU Shou-zhen, ZHOU Shuang-xi. Parameter Estimation of Voltage Flicker Through Hilbert Transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(5): 34-37, 66.
- [12] 胡广书. 数字信号处理——理论算法与实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 1997
HU Guang-shu. Digital Signal Process—Theory, Algorithm and Realization[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 1997.

收稿日期: 2007-05-12; 修回日期: 2008-06-29

作者简介:

韩松(1978-), 男, 在读博士研究生, 讲师, 主要兴趣在于电力系统广域监测与稳定控制, 电能质量监测等; E-mail: ee.shan@gzu.edu.cn

邱国跃(1958-), 男, 副教授, 主要从事电力系统运行与控制方面的教学与研究管理工作;

彭小俊(1974-), 男, 硕士, 工程师, 主要从事电能质量监测与控制装置的调试和研究工作。

(上接第 32 页 continued from page 32)

- [2] 李东东, 陈陈. 风力发电机组动态模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 115-119.
LI Dong-dong, CHEN Chen. A Study on Dynamic Models of Wind Turbine Generator Sets[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(3): 115-119.
- [3] Vladislav, Akhmatov. Variable-Speed Wind Turbines with Doubly-Fed Induction Generators, Part I: Modelling in Dynamic Simulation Tools[J]. Wind Engineering, 2002, 26(2): 52-58.
- [4] 冯双磊, 赵海翔, 任普春. 基于 PSCAD / EMTDC 的双馈式变速恒频风电机组动态模型仿真[J]. 电网技术, 2007, 31(17): 30-35.

FENG Shuang-lei, ZHAO Hai-xiang, REN Pu-chun, et al. PSCAD/EMTDC Based Simulation Study on Dynamic Model of Doubly-Fed Variable Speed Wind Turbine [J]. Power System Technology, 2007, 31(17): 30-35.

收稿日期: 2008-03-29; 修回日期: 2008-05-06

作者简介:

樊艳芳(1971-), 女, 讲师, 主要从事风力发电及电力系统稳定性分析研究; E-mail: fyy_xj@sohu.com

晁勤(1959-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事电力系统综合自动化和并网风力发电系统稳定性等方面的研究。