

# Status and Prospect of Power Disturbance Identification Research

Xiaofu Xiong, Wei Zheng

State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing  
Email: cqxxf@vip.sina.com, sinozhengwei@qq.com

Received: Dec. 20th, 2011; revised: Dec. 22nd, 2011; accepted: Dec. 29th, 2011

**Abstract:** Timely and accurate power system disturbance identification plays an essential role in the security and stability of power system. This paper reviews the status and problems of power disturbance recognition, points out the need to identify disturbance in the smart grid, and divides the disturbance research into three areas which include characteristic quantity determination, extraction method and disturbance source identification. The problems that should be solved in comprehensive disturbance recognition have been raised and the advantages of disturbance identification based on digital substation have been prospected.

**Keywords:** Disturbance Identification; Digital Substation; Supervisory Control and Data Acquisition; Wide Area Measurement; Frequency Monitoring Network; Fault Record

## 电网扰动识别研究现状与展望

熊小伏, 郑伟

重庆大学, 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆  
Email: cqxxf@vip.sina.com, sinozhengwei@qq.com

收稿日期: 2011年12月20日; 修回日期: 2011年12月22日; 录用日期: 2011年12月29日

**摘要:** 及时准确地对电网扰动进行识别, 在电力系统的安全稳定运行中具有举足轻重的作用。本文综述了电网扰动识别的现状及存在的问题, 指出智能电网开展扰动识别的必要性, 从扰动特征量确定、扰动特征量提取方法、扰动源识别三个方面对扰动研究进行了分类, 提出了系统开展扰动研究需要解决的问题, 并展望了在数字化变电站实施扰动识别的优势。

**关键词:** 扰动识别; 数字化变电站; 监控与数据采集; 广域测量; 频率监测网络; 故障录波

### 1. 引言

国外近年来几次大停电事故, 证明了大电网崩溃事故的发生往往不是系统单个元件故障的直接结果, 而是由系统在扰动后动态过程中的决策失误、潮流转移和继电保护的隐性故障导致的保护误动和拒动等连锁反应造成的。监测系统无法实时提供电力系统动态行为特征和状态的足够信息是导致事故发生的重要原因<sup>[1,2]</sup>。因此, 及时准确地对电网扰动进行识别, 在电力系统的安全稳定运行中具有举足轻重的作用。

电力系统中的扰动指的是由于系统运行条件的突然改变而引起的电压、电流、频率、功率等的波动。根据波动程度的不同, 可以分为小扰动和大扰动。小扰动持续时间长、波动幅度小、变化迅速, 一般表现为正常的参数波动; 大扰动持续时间短、波动幅度大, 对电力系统的运行影响较大。

智能电网扰动识别要求在没有人参与的情况下, 独立地从海量电网扰动信号中提取特征指标, 进行持续准确的分析, 以期得到扰动的类型、扰动源及扰动

源的位置等信息，并快速准确地进行相应处理。

对于运行部门而言，利用扰动识别的信息，可以快速确定控制措施，以恢复受扰动系统的正常运行或者将系统扰动隔离在最小范围内<sup>[3]</sup>，平复其对系统的影响，保证系统其余部分的正常运行；对于维护部门而言，扰动识别可以为设备检修、更换提供决策参考，并指出设备的缺陷及升级方案；借助扰动识别还可以准确、有效地查明故障原因，反演事故并校核保护整定，将用户停电的概率降至最低。

扰动识别的例子包括各种故障类型的识别，为提高电能质量而进行的扰动监测等，但目前还没有全面系统地进行电网扰动识别的研究。由于电网扰动类型多种多样，对系统安全稳定运行的影响也各异，因此，扰动识别的研究可以分阶段进行，重点研究对系统影响大、波及面广的大扰动进行识别。

本文综述了电网扰动识别的关键技术，并从数字化变电站的角度出发，展望了基于数字化变电站构建电网扰动识别系统的优势。

## 2. 扰动识别方法研究及应用现状

### 2.1. SCADA 系统与电网扰动识别

监控与数据采集(Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA)系统<sup>[4]</sup>一般由安装在控制中心的主站计算机、厂站侧的远程终端(Remote Terminal Unit, RTU)和连接厂站与控制中心的传输信道构成<sup>[5]</sup>。厂站侧 RTU 将测量得到的电流、电压、频率、支路潮流、开关与继电保护动作信息等数据经电力通信网络传输到控制中心。

电网中的大量厂站需要监测，目前 SCADA 系统还是只能以秒级(3~5 s)的速度刷新显示电网状态，且时标不统一<sup>[6]</sup>，只能提供反映系统设备投入与退出及部分事故信息，难以提供反映扰动原因及扰动位置的完整信息；通常，来自 SCADA 系统的信息只能作为电力系统静态安全监视的依据。

### 2.2. WAMS 系统与电网扰动识别

广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS)可看作仅针对稳态过程的传统 SCADA 系统的进一步延伸，弥补了 SCADA 系统只能提供稳态低采样密度的非统一时间断面信息的缺陷，其核心是控

制中心数据处理基站及基于其上的分析与应用。

WAMS 系统中分布于电力系统各个地点的相量测量单元(Phasor Measurement Unit, PMU)可以在同一参考时间框架内获取各种扰动下全网的动态过渡过程信息，此处 WAMS 系统相当于一个大的故障录波器，各 PMU 得到的本地动态过渡过程信息可以按 25 帧/秒的速度带时标上传至控制中心用于实时监视，也可在事故后传至控制中心用于事故分析<sup>[7-19]</sup>。

目前，利用 WAMS 系统所能反映的扰动类型主要包括短路故障扰动、发电机退出和切负荷扰动、无故障跳闸扰动<sup>[20,21]</sup>。WAMS 系统具有较高的数据刷新频率，这一优势使得其对电力通信网络和数据存储技术提出了很高的要求，巨大的设备成本投入，在一定程度上限制了 PMU 的覆盖范围。因此，WAMS 系统的有限测量数据还不能全面、完整的反映出电力系统的扰动状况，其可观测性是相对有限的。

### 2.3. FNET 系统与电网扰动识别

美国田纳西大学电力信息技术实验室开发的频率监测网络(Frequency Monitoring Network, FNET)系统，主要由高动态精度的频率扰动记录器(Frequency Disturbance Recorder, FDR)，信息管理系统(Information Management System, IMS)以及相关的应用软件组成。遍布全美各地的 FDR，只需接在用户端的 110 V 插座上即可完成采集并打上全球定位系统(Global Positioning Systems, GPS)时标，通过互联网向位于田纳西大学和弗吉尼亚理工大学的 IMS 上传采的电力系统频率、相角和电压幅值等信息，如图 1 所示<sup>[22]</sup>。

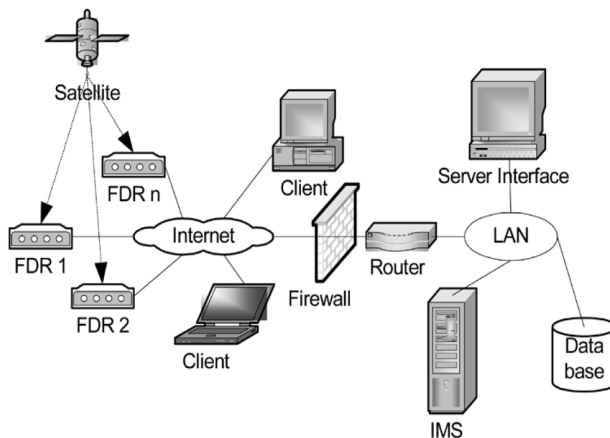


Figure 1. Frequency monitoring network system architecture  
图 1. FNET 系统结构图

FNET 系统可以看作是一个小成本的广域测量系统，其采集终端 FDR 成本低，系统通讯采用互联网，相比于其它系统，大大降低了设备投资。同时，FDR 的安装点非常灵活，无需电力部门的申报，在任何配网用户端的插座接入即可，可以说是一个完全开放的监测系统。但 FNET 系统进行扰动识别主要以频率的变化作为判据，局限性很大，目前见诸文献的主要是切机、切负荷的扰动识别，而且由于 FDR 布点稀疏，FNET 系统采用的三角测量定位扰动源的精度很低。

## 2.4. 故障录波系统与电网扰动识别

故障录波系统由分布于各变电站的故障录波器联网组成，通过电力通信网络向电网调度中心上传信息。故障录波器作为电力系统的“黑匣子”，其主要任务是记录电力系统大扰动如短路故障、系统振荡、频率崩溃、电压崩溃等发生后的有关系统电参量变化过程<sup>[23]</sup>。

目前故障录波器以记录故障扰动信息为主，对所记录的数据进行自动分析的功能较弱，且由于其布点的不充分性、所接设备信息的不完整性，使得要在故障录波系统的基础上实现扰动识别具有很大的难度。

综上所述，目前在扰动识别方面还缺乏系统的研究与应用成果，不能满足智能电网建设的需求。

随着我国智能电网的建设发展，需要从崭新的角度和方向对电网扰动识别进行思考和研究，使其成为智能电网技术的突破口之一，提高电力系统的全局可视化程度和安全稳定运行能力，实现智能电网自动预警、故障自愈、预防性控制等功能，降低大规模停电的风险，增强电网可靠性，避免系统崩溃，最大程度地提高设备的使用率。

## 2.5. 扰动识别与故障保护的区别

继电保护中的故障判别是在电网出现短路等故障后，根据各级各类保护装置的动作逻辑、断路器的状态变化信息以及故障录波器记录的信息等对故障的类型和元件进行判断和定位；扰动识别则是利用电网遭受扰动前后各种电气与非电气量的变化特征来识别扰动的类型、扰动源及扰动源的位置等。

故障保护对故障类型的识别，只是判别短路故障是三相短路、两相短路、单相短路接地还是两相短路

接地，目的是为了在最短时限内将故障部分或异常工况从系统中切除或消除，而对于故障的原因主要依靠事故后分析来完成；相比于故障保护，扰动识别侧重于识别各种扰动产生的原因，即扰动源的信息，例如不但要识别出短路故障，而且还要识别出该故障扰动是由雷击引起还是金属接地、树枝放电、绝缘子污闪等引起，然后实时向运行人员提供决策参考。

扰动识别的类型不仅仅局限于故障保护中对各种故障的判别，还包括发电机退出、切负荷扰动、无故障跳闸扰动、系统振荡等。

故障扰动是电网扰动的主要类型之一，因此，扰动识别的研究可以借鉴故障类型识别、故障定位等方法。

## 3. 扰动识别关键技术

电网遭受扰动时大多表现为其电气与非电气量发生变化，因此确定哪些参量用于扰动识别以及如何从混杂有干扰的信号中提取出所关心的信号是扰动识别的关键。

### 3.1. 表征扰动的指标量

在目前已有的研究中，用于扰动识别的指标量主要包括下列内容：

- 1) 母线相电压(根据各变电站配置的不同，需要监测各电压等级中母线的三相相电压最小值)和残压的幅值、均方根值、相移。可反映短路故障、电压闪变、继电器切除等原因引发的扰动；
- 2) 线路相电压、相电流及剩余电流的幅值、均方根值、相移。可反映雷击、树枝放电、金属接地等故障以及重负荷投切等扰动；
- 3) 扰动起始时间(持续时间)。可反映发电机退出，线路、继电器等切除时引发的系统扰动；
- 4) 故障电流幅值。可反映各种故障扰动；
- 5) 振荡频率及峰值。可反映低频振荡，负荷、线路、变压器和电容器组的投切等产生的扰动；
- 6) 电磁脉冲上升时间及峰值。可反映雷击、感性线路开合等扰动。

### 3.2. 指标量提取方法及技术难点

扰动特征指标的提取，即采用适当的算法对各类测量数据进行解析，获得表征扰动的指标量及其变

化。主要的方法有：傅立叶变换、小波变换、Prony 算法、S 变换、dq 变换、希尔伯特 - 黄变换等。

### 3.2.1. 傅里叶变换

傅里叶变换将信号从时域转化到频域，提取出信号所含各种频率成分的幅值及相位等特征指标，适合分析平稳信号，但其存在的频谱泄漏和栅栏现象等缺陷，使得其在分析非平稳信号时存在很大的难度。

### 3.2.2. 小波变换

小波变换是一种多尺度分析方法，变换过程可以看作是由一组低通滤波器和高通滤波器对信号进行滤波及二抽一的采样过程，在低频部分具有较高的频率分辨率和较低的时间分辨率，而在高频部分具有较低的频率分辨率和较高的时间分辨率。小波变换是用于扰动特征提取最为普遍的方法<sup>[24-26]</sup>，但其算法复杂、耗时长，容易受到噪音影响，所反映的高频信号前 2 个尺度往往无法正确提取某些扰动特征指标，难以对时域特征变化为主的扰动进行特征提取，而且多尺度判断的结果可能相互矛盾<sup>[27]</sup>。

### 3.2.3. Prony 算法

Prony 算法是离散快速傅里叶变换方法的一种扩展，它利用降阶模型来拟合实测数据，从系统的动态轨迹中提取关于特征根的信息。文献[28-31]通过 Prony 算法从给定信号中提取振荡模式的频率、阻尼、振幅和初相位角等特征指标，进而分析电力系统的振荡问题。使用 Prony 算法分析局部测量信号的缺点是难于确定系统中最主要的振荡模式，且 Prony 算法本身还存在算法复杂，计算耗时，噪声敏感的弱点<sup>[32,33]</sup>。

### 3.2.4. S 变换

S 变换是由连续小波变换和短时傅立叶变换结合发展起来的另一种时频分析方法，其引入了宽度与频率成反向变化的高斯窗，具有与频率相关的分辨率的良好时频特性，可以独立提取扰动信号各频率分量的幅值变化特征指标。文献[34]对电压扰动信号进行 S 变换，通过变换系数的变化特征清晰地表示出了各种扰动的特征指标。S 变换分解后的信息量较大，所提取的扰动特征没有统一的形式，制约了它的普及应用。

### 3.2.5. dq 变换

文献[35]通过对测量的某一相电压由单相延迟构

造三相，然后对三相电压进行 dq 变换，利用变换得到的 dq 电压求取电压的均方根值，将其作为扰动特征指标。dq 变换无法提取扰动信号的频率特征指标，而且基于 dq 变换进行扰动特征量提取时，要求扰动信号必须三相同步出现，这就给 dq 变换增加了应用的难度。

### 3.2.6. 希尔伯特 - 黄变换

希尔伯特 - 黄变换(Hilbert-Huang Transform, HHT)由经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)及希尔伯特变换(Hilbert Transform, HT)两部分组成，其核心部分是 EMD 分解。它的特点是可以通过 EMD 对非线性、非平稳的数据进行线性和平稳化处理，得到本征模态函数(Intrinsic Mode Functions, IMF)分量，再对数据进行 Hilbert 变换，得到瞬时频率及瞬时振幅，进而可得信号的 Hilbert 谱和 Hilbert 边界谱，以实现信号的时频分析<sup>[36]</sup>。HHT 的 EMD 过程可靠性较差，难以避免虚假成分，使得 IMF 分量的物理意义不明确<sup>[37]</sup>。

### 3.2.7. 其它方法

文献[20]借助于电力系统中的 PMU 实时测量获取的电压、电流、频率等数据，提取出电压突变量、电流相对突变量、频率偏差及发电机功角变化量作为扰动识别的特征指标。

文献[38]通过对扰动信号的小波包变换系数矩阵进行奇异值分解，将基频、扰动频率分量、噪声分解到不同的正交特征子空间，再与正常电压信号的奇异值作比值以抵消噪声能量的影响，最大限度地体现出扰动类型间的细微差别，以此作为扰动特征指标。

## 3.3. 扰动源、扰动源位置识别方法

### 3.3.1. 扰动源识别方法

电力系统中的各种故障是电网扰动的主要来源之一，识别故障原因成为了电网扰动源识别的研究热点。文献[39,40]利用马来西亚国家能源有限公司 2001~2006 年故障录波器记录的数据，分析雷击与树枝放电的特征区别，总结出可以采用中性线电流作为表征扰动的指标量，并用下式计算中性线电流的均方根值，

$$f_c(t, \lambda) = 1 - e^{-\lambda t} \Big|_{t=t_0-t_n}$$

其中  $f_c(t, \lambda)$  为均方根值,  $t$  为采样时间,  $\lambda$  为曲线梯度,  $t_0$  为采样起始时间,  $t_n$  为第  $n$  点采样时间, 该方法可以消除弧阻及频率响应的影响。然后采用外推法求出雷击和树枝放电的数学模型, 引入用于医学和安全领域的模式识别方法, 通过  $\lambda$  和电压暂降两参数进行聚类分析, 成功识别出雷击与树枝放电扰动源。同时, 在该项技术的后续研究中, 作者还综合考虑了电流互感器爆炸、金属接地、绝缘子污闪等扰动源, 结合专家系统的决策过程综合识别出上述各种类型的扰动, 决策树如图 2 所示, 其中  $\Delta t_f$  为中性线电流最后畸变到闪络开始的时间间隔。

对于同塔双回线及单回线的三相短路、两相短路、单相短路接地、两相短路接地以及两回线路间的短路故障类型的识别, 文献[41,42]提出了基于决策树的故障类型识别方法, 它仅需采集线路单端的电压、电流信息, 在利用检波器根据行波原理检测到故障起始时间后, 通过数据窗和半周离散傅里叶变换(Half-cycle Discrete Fourier Transform, HCDFT)计算出双回线路 6 个相电流(单回线时选取 1 个相电压和其余 2 个相电流)的前 10 次奇谐波的幅值和相角, 然后将

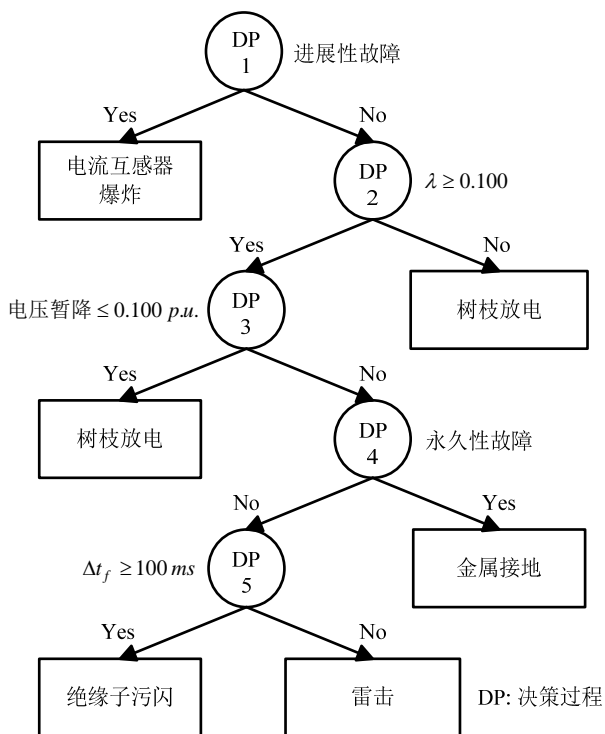


Figure 2. Decision tree of disturbance recognition  
图 2. 决策树法扰动识别

其输入到采用随机森林算法(Random Forest Algorithm)的决策树中完成故障类型的识别。相比于双回路的自适应 PMU 法<sup>[43]</sup>、反向传播网络法<sup>[44]</sup>、联合神经网络法<sup>[45]</sup>、人工神经网络法<sup>[46]</sup>和小波变换<sup>[47]</sup>, 文献[41]提出的方法具有最高的识别精度和低至 2.5 ms 的识别时间; 相比于单回路的小波变换和人工神经网络法<sup>[48]</sup>、模糊逻辑法<sup>[49]</sup>、模糊逻辑小波法<sup>[50]</sup>和模糊神经法<sup>[51]</sup>, 文献[42]提出的方法具有最高的识别精度和低至 2 ms 的识别时间。

电压闪变是电能质量扰动一种重要类型, 常见的闪变识别方法可分为 3 种, 即半波有效值法、平方解调法<sup>[52]</sup>和全波整流法<sup>[53]</sup>。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, 滤除直流、工频以及谐波, 滤波器造成的延时较大, 动态响应速度较慢<sup>[54,55]</sup>。文献[55]提出了基于数学形态滤波和 Hilbert 变换的电压闪变识别方法, 其中数学形态滤波方法能够有效的滤除电压闪变信号中含有的高次谐波, 白噪声等干扰, 滤波后的信号采用 Hilbert 变换方法能准确有效的计算出电压闪变的有关参数; 文献[56]将盲信号分离技术应用于电压闪变识别中; 文献[57]提出了一种基于时频原子方法的电压闪变识别方法; 对于 IEEE Std 1159-2009 规定的其余类型电能质量扰动, 诸如电压骤降、电压骤升、电压中断、电压暂态、过电压、欠电压、谐波、间谐波、电压切痕等, 也有大量的识别方法见诸文献: 最小二乘支持向量机和小波包分解<sup>[58]</sup>、小波能熵<sup>[59]</sup>、小波神经网络<sup>[60]</sup>、小波变换和人工神经网络<sup>[27]</sup>、S 变换<sup>[34]</sup>、dq 变换<sup>[35]</sup>、HHT<sup>[61]</sup>等。

### 3.3.2. 扰动源位置识别方法

扰动源识别不仅包括扰动类型识别还包括扰动的始发地点的识别。目前对于故障等大扰动的定位已较为成熟<sup>[62-98]</sup>, 而对低频振荡<sup>[99-108]</sup>等持续性或非持续性小扰动的引发地的识别还十分困难。

## 3.4. 进一步研究工作

### 3.4.1. 数据采集技术

电网扰动识别的第一步即系统数据的采集, 如何解决数据采集的频域覆盖与采样率有限的矛盾是实现扰动识别的基础。

### 3.4.2. 信号处理方法

研究简单实用的数学方法，以提高电网扰动识别的速度。一般说来，数学方法愈简单(单纯追求简化也会影响识别精度)，效果愈好，过长及过分复杂的数学公式使得识别过程耗费大量的时间及系统资源。

### 3.4.3. 处理速度及能力

在智能电网内广泛采用计算机进行信息处理的条件下，需要深入研究提高计算机计算速度及处理能力的方法。

### 3.4.4. 可靠性

电网扰动识别为实时在线应用的系统，常年的持续运行，对系统软、硬件的可靠性都提出了较高的要求，必须对其可靠性进行深入的研究。

### 3.4.5. 界面

电网扰动识别最终结果的输出应利用最新的可视化技术，使得系统易学易用易推广。

## 4. 基于数字化变电站实施扰动识别的展望

### 4.1. 数字化变电站特点

数字化变电站是建立在 IEC 61850 标准之上，能

够实现变电站内智能电气设备间信息共享和互操作的现代化变电站。

从物理上看，数字化变电站仍然分为一次设备和二次设备(包括保护、测控、监控和通信设备等)两个层面；从逻辑上看，数字化变电站各层次内部及层次之间采用高速网络通信，三个层次间的关系如图 3 所示<sup>[109,110]</sup>。

## 4.2. 在数字化变电站实施扰动识别的优势

### 4.2.1. 扰动信息全时精确

数字化变电站采用数字化电气量测系统(如光电式互感器或电子式互感器)采集电流、电压等电气量，增大了电气量的动态测量范围并提高了测量精度<sup>[111]</sup>。

### 4.2.2. 信息冗余取代装置冗余

随着数字化变电站的全面推广，电网各种信息都可以通过数字化电气量测系统进行采集，无需增加设备投入，对合并单元中各种数据进行深加工即可实现电网的扰动识别功能。

### 4.2.3. 信息利用无孤岛

在数字化变电站中，统一的 IEC 61850 标准，使得信息共享变得十分容易，因而对于扰动识别所需的

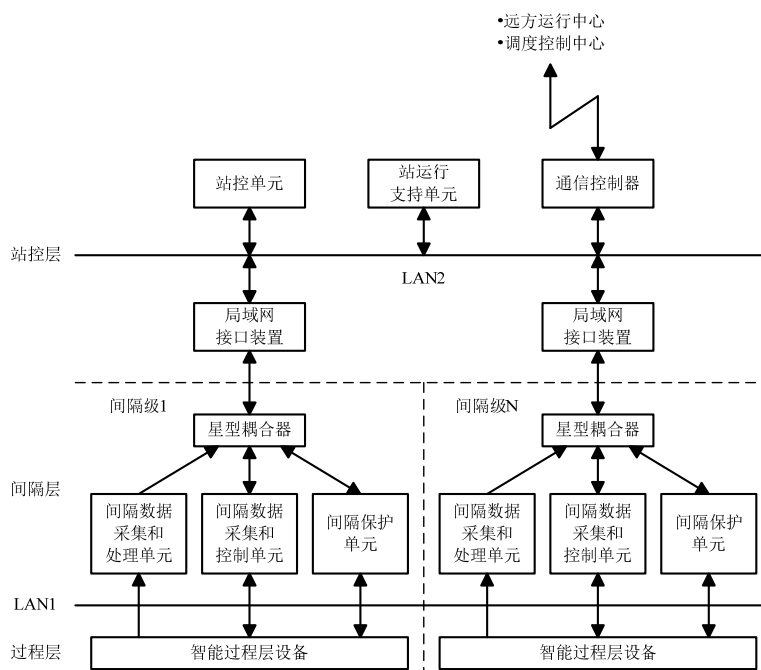


Figure 3. Digital substation architecture  
图 3. 数字化变电站结构图

各类信息可以进行有机整合,使得“信息孤岛”问题不复存在,大大提高扰动识别的准确性。

## 5. 结论

论述了扰动识别的研究意义,综述了电网扰动识别的现状及存在的问题,指出智能电网开展扰动识别的必要性。对扰动研究从扰动特征量确定、扰动特征量提取方法、扰动源识别三个方面进行了分类,并提出了系统开展扰动研究需要解决的问题,特别指出了数字化变电站实施扰动识别的优势。

## 6. 致谢

本文由高等学校学科创新引智计划(B08036),输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究重点项目(2007DA10512711102),输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室自主研究项目(2007DA10512709202)资助。

## 参考文献 (References)

- [1] 何飞跃. 电力系统网络化控制中的关键问题[J]. 电网技术, 2009, 33(1): 80-86.
- [2] S. Tamronglak, S. H. Horowitz, A. G. Phadke, et al. Anatomy of power systems blackouts preventive relaying strategies. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(2): 708-715.
- [3] M. M. Eissa, M. E. Masoud and M. M. M. Elanwar. A novel back up wide area protection technique for power transmission grids using phasor measurement unit. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(1): 270-278.
- [4] 王强, 韩英铎. 电力系统厂站及调度自动化综述[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(5): 61-69.
- [5] 于尔铿, 刘广一, 周京阳. 能量管理系统(EMS)[M]. 北京: 科学出版社, 1998: 42-45.
- [6] 吴海霞, 常勇. 低频率振荡广域监控研究现状及新进展[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1737-1744.
- [7] 常乃超, 兰洲, 甘德强等. 广域测量系统在电力系统分析及控制中的应用综述[J]. 电网技术, 2005, 29(10): 46-52.
- [8] C. W. Taylor, D. C. Erickson. Recording and analyzing the July 2 cascading outage. IEEE Computer Applications in Power, 1997, 10(1): 26-30.
- [9] J. W. Ballance, B. Bhargava and G. D. Rodriguez. Monitoring power system dynamics using phasor measurement technology for power system dynamic security assessment. Proceedings of 2003 IEEE Bologna PowerTech, Bologna, 2003, 3: 683-689.
- [10] R. O. Burnett, M. M. Butts, T. W. Cease, et al. Synchronized phasor measurements of a power system event. IEEE Trans on Power Systems, 1994, 9(3): 1643-1650.
- [11] J. F. Hauer. Validation of phasor calculations in the Macrodyne PMU for California-Oregon transmission project tests of March 1993. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1224-1231.
- [12] M. Yong. Phasor measurement applications in China. Yokohama: Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 Asia Pacific, 2002: 485-489.
- [13] H. Saitoh. GPS synchronized measurement applications in Japan. Yokohama: Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 Asia Pacific, 2002: 494-499.
- [14] M. Akke, D. Karlsson. Phasor measurement applications in Scandinavia. Yokohama: Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 Asia Pacific, 2002: 480-484.
- [15] C. Liu. Phasor measurement application in Taiwan. Yokohama: Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002 Asia Pacific, 2002, 1: 490-493.
- [16] B. Bhargava. Synchronized phasor measurement system project at Southern California Edison Co. Edmonton: Proceedings of IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, 1999: 16-22.
- [17] J. Rasmussen, P. Jorgensen. Synchronized phasor measurements of a power system event in Eastern Denmark. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(1): 278-284.
- [18] 王兆家, 岑宗浩, 陈汉中. 华东电网多功能功角实时监测系统的开发及应用[J]. 电网技术, 2002, 26(8): 73-77.
- [19] 闵勇, 丁仁杰, 韩英铎等. 一次系统事故的同步相量量测结果分析[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(7): 10-13.
- [20] 宋晓娜, 毕天姝, 吴京涛等. 基于 WAMS 的电网扰动识别方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(5): 24-73.
- [21] 秦晓辉, 毕天姝, 杨奇逊. 基于广域同步量测的电力系统扰动识别与定位方法[J]. 电网技术, 2009, 33(12): 35-41.
- [22] Z. A. Zhong, C. C. Xu, B. J. Billian, et al. Power system frequency monitoring network (FNET) implementation. IEEE Trans on Power System, 2005, 20(4): 1914-1921.
- [23] 陈昊琳, 张国庆, 郭志忠. 故障录波器发展历程及现状分析[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(5): 148-152.
- [24] J. Faiz, S. Lotfi-Fard. A novel wavelet-based algorithm for discrimination of internal faults from magnetizing inrush currents in power transformers. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(4): 1989-1996.
- [25] N. Zhang, M. Kezunovic. Transmission line boundary protection using wavelet transform and neural network. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(2): 859-869.
- [26] S. M. Brahma. Distance relay with out-of-step blocking function using wavelet transform. IEEE Trans on Power Delivery, 2007, 22(3): 1360-1366.
- [27] S. Santoso, E. J. Powers and W. M. Grady. Power quality disturbance identification using wavelet transforms and artificial neural networks. Las Vegas: Proceedings of 7th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 1996: 615-618.
- [28] D. J. Trudnowski, J. R. Smith, T. A. Short, et al. An application of prony methods in pass design for multi machine systems. IEEE Trans on Power System, 1991, 6(1): 118-126.
- [29] 芦晶晶, 郭剑, 田芳等. 基于 Prony 方法的电力系统振荡模式分析与 PSS 参数设计[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 31-34.
- [30] 肖晋宇, 谢小荣, 韩英铎等. 基于在线辨识的电力系统广域阻尼控制[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(23): 22-27.
- [31] 肖晋宇, 谢小荣, 韩英铎. 利用有限时间扰动后的响应辨识电力系统的主导特征值[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 1-5.
- [32] 穆钢, 王宇庭, 安军等. 根据受扰轨迹识别电力系统主要振荡模式的信号能量法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(19): 7-11.
- [33] 丁蓝, 薛安成, 李津等. 基于窗口滑动改进 Prony 算法的电力系统低频振荡识别[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(22): 24-28.
- [34] 占勇, 程浩忠, 丁屹峰等. 基于 S 变换的电能质量扰动支持向量机分类识别[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(4): 51-56.
- [35] 徐永梅, 肖湘宁, 杨以涵等. 基于 dq 变换和 ANN 的电能质量扰动辨识[J]. 电力系统自动化, 2001, 25(14): 24-28.
- [36] 李天云, 高磊, 赵妍. 基于 HHT 的电力系统低频振荡分析[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(14): 24-30.
- [37] 穆钢, 史坤鹏, 安军等. 结合经验模态分解的信号能量法及其在低频振荡研究中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(19): 36-41.

- [38] 李天云, 陈昌雷, 周博等. 奇异值分解和最小二乘支持向量机在电能质量扰动识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(34): 124-128.
- [39] A. A. M. Zin, S. P. A. Karim. The utilization of digital fault recorders in protection system analysis on Tenaga Nasional Berhad transmission system. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2007, 22(4): 2040-2046.
- [40] A. A. M. Zin, S. P. A. Karim. The application of fault signature analysis in Tenaga Nasional Berhad Malaysia. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2007, 22(4): 2047-2056.
- [41] A. Jamehbozorg, S. M. Shahrtash. A decision tree-based method for fault classification in double-circuit transmission lines. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2010, 25(4): 2184-2189.
- [42] A. Jamehbozorg, S. M. Shahrtash. A decision-tree-based method for fault classification in single-circuit transmission lines. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2010, 25(4): 2190-2196.
- [43] C. Chen, C. Liu and J. Jiang. A new adaptive PMU based protection scheme for transposed/untransposed parallel transmission lines. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2002, 17(2): 395-404.
- [44] C. Chen, C. Liu and J. Jiang. Counter-propagation network based fault classification for double-circuit lines. *Proceedings of 8th Mediterranean Electrotechnical Conference*, 1996: 657-660.
- [45] R. K. Aggrawal, Q. Y. Xuan, R. W. Dunn, et al. A novel fault classification technique for double-circuit lines based on a combined unsupervised/supervised neural network. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1999, 14(4): 1250-1256.
- [46] H. Khorashadi-Zadeh. Artificial neural network approach to fault classification for double circuit transmission line. *Sao Paulo: Proceedings of IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition Latin America*, 2004: 859-862.
- [47] A. H. Osman, O. P. Malik. Protection of parallel transmission lines using wavelet transform. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2004, 19(1): 49-55.
- [48] K. M. Silva, B. A. Souza and N. S. D. Brito. Fault detection and classification in transmission lines based on wavelet transform and ANN. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2006, 21(4): 2058-2063.
- [49] B. Das, J. V. Reddy. Fuzzy-logic-based fault classification scheme for digital distance protection. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2005, 20(2): 609-616.
- [50] O. A. S. Youssef. Combined fuzzy-logic wavelet-based fault classification technique for power system relaying. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2004, 19(2): 582-589.
- [51] H. Wang, W. W. L. Keerthipala. Fuzzy-neuro approach to fault classification for transmission line protection. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1998, 13(4): 1093-1104.
- [52] 高师湃, 李群湛, 贺建闽. 闪变测试系统研究[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(5): 22-25.
- [53] 赵学东, 孙树勤. 闪变仪中调制波的几种检波方法[J]. 电网技术, 1996, 20(4): 52-54.
- [54] 马玉龙, 刘连光, 张建华等. IEC 闪变测量原理的数字化实现方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(11): 92-95.
- [55] 舒泓, 王毅. 基于数学形态滤波和 Hilbert 变换的电压闪变测量[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 111-114.
- [56] 刘阳, 杨洪耕. 盲信号分离在电压闪变分析中的应用[J]. 电工技术学报, 2007, 22(3): 138-142.
- [57] 李明, 王晓茹. 采用时频原子方法的电压闪变检测[J]. 电网技术, 2010, 34(7): 94-97.
- [58] 张全明, 刘会金. 最小二乘支持向量机在电能质量扰动分类中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(1): 106-110.
- [59] 李庚银, 王洪磊, 周明. 基于改进小波能熵和支持向量机的短时电能质量扰动识别[J]. 电工技术学报, 2009, 24(4): 161-167.
- [60] 王晶, 束洪春, 陈学允. 检测电压瞬时脉冲扰动的小波-神经网络新方法[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(6): 50-54.
- [61] 李天云, 赵妍, 韩永强等. Hilbert-Huang 变换方法在谐波和电压闪变检测中的应用[J]. 电网技术, 2005, 29(2): 73-77.
- [62] G. B. Ancell, N. C. Pahalawaththa. Maximum likelihood estimation of fault location on transmission lines using traveling waves. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1994, 9(2): 680-689.
- [63] M. S. Choi, S. J. Lee, D. S. Lee, et al. A new fault location algorithm using direct current analysis for distribution system. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2004, 19(1): 35-41.
- [64] X. J. Zheng, K. K. Li, Z. Y. Liu, et al. Fault location using traveling wave for power network. *Proceedings of the IEEE/IAS 39th Annual Meeting*, 3-7 October 2004, 2426-2429.
- [65] Z. M. Radojevic, V. V. Terzija and M. B. Djuric. Numerical for overhead lines arcing faults detection and distance and directional. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2000, 15(1): 31-37.
- [66] T. Kawady, J. Stenzel. A practical fault location approach for double circuit transmission lines using single end data. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2003, 18(4): 1166-1173.
- [67] V. N. Gohokar, V. V. Gohokar. Fault location in automated distribution network. *Proceedings of IEEE International Symposium on Circuits and Systems*, 2005: 3898-3901.
- [68] H. Hizam, P. A. Crossley. Single ended fault location technique on a radial distribution network using fault generated current signal. *Proceeding International Journal Engineering Technology*, 2006, 3: 148-158.
- [69] M. Gilany, D. K. Ibrahim and E. T. Eldin. Traveling-wave-based fault-location scheme for multiend-aged underground cable system. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2007, 22(1): 82-89.
- [70] D. K. Ibrahim, E. S. T. Eldin, E. E.-D. A. El-Zahab, et al. Un-synchronized fault-location scheme for nonlinear HIF in transmission lines. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2010, 25(2): 631-637.
- [71] J. Izykowski, E. Rosolowski, P. Balcerek, et al. Accurate noniterative fault location algorithm utilizing two-end unsynchronized measurements. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2010, 25(1): 72-80.
- [72] C. A. Apostolopoulos, G. N. Korres. A novel algorithm for locating faults on transposed/untransposed transmission lines without utilizing line parameters. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2010, 25(4): 2328-2338.
- [73] M. A. Mirzai, A. A. Afzalian. A novel fault-locator system algorithm principle and practical implementation. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2010, 25(1): 35-46.
- [74] C.-S. Yu. An unsynchronized measurements correction method for two-terminal fault-location problems. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2010, 25(3): 1325-1333.
- [75] J. A. Jiang, J. Z. Yang, Y. H. Lin, et al. An adaptive PMU based fault detection/location technique for transmission lines I Theory and algorithms. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2000, 15(2): 486-493.
- [76] C. S. Yu, C. W. Liu, S. L. Yu, et al. A new PMU-based fault location algorithm for series compensated lines. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2002, 17(1): 33-46.
- [77] S. M. Brahma. Fault location on a transmission line using synchronized voltage measurements. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2004, 19(4): 2619-1622.
- [78] J. Suonan, G. Song, Q. Xu, et al. Time-domain fault location algorithm for parallel transmission lines using unsynchronized currents. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2006, 28(4): 253-260.
- [79] J. Izykowski, R. Molag, E. Rosolowski, et al. Accurate location of faults on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2006, 21(2): 627-633.
- [80] Y. Liao, S. Elangovan. Un-synchronized two-terminal transmission-line fault-location without using line parameters. *IEEE Proceedings-Generation Transmission and Distribution*, 2006, 153(6): 639-643.
- [81] E. G. Silveira, C. Pereira. Transmission line fault location using two-terminal data without time synchronization. *IEEE Trans on Power Systems*, 2007, 22(1): 498-499.
- [82] Y. Liao. Un-synchronized fault location based on distributed parameter line model. *Electric Power Components and Systems*, 2007, 35(9): 1061-1077.



- [83] Y. Liao, M. Kezunovic. Optimal estimate of transmission line fault location considering measurement errors. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2007, 22(3): 1335-1341.
- [84] M. M. Saha, J. Izykowski, E. Rosolowski, et al. ATP-EMTP investigation of a new algorithm for locating faults on power transmission lines with use of two-end unsynchronized measurements. Lyon: Proceedings of 2007 International Power Systems Transients (IPST 2007) Conference, 2007.
- [85] A. L. Dalcastagne, S. N. Filho, H. H. Zurn, et al. An iterative two-terminal fault-location method based on unsynchronized phasors. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2008, 23(4): 2318-2329.
- [86] Y. Liao, N. Kang. Fault-location algorithms without utilizing line parameters based on the distributed parameter line model. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2009, 24(2): 579-584.
- [87] Z. M. Radojevic, C. H. Kim, M. Popov, et al. New approach for fault location on transmission lines not requiring line parameters. Kyoto: Proceedings of 2009 International Power Systems Transients (IPST 2009) Conference. 2009.
- [88] G. Manassero Jr, E. C. Senger, R. M. Nakagomi, et al. Fault-location system for multiterminal transmission lines. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2010, 25(3): 1418-1426.
- [89] A. Girgis, D. Hart and W. Peterson. A new fault location technique for two and three terminal lines. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1992, 7(1): 98-107.
- [90] R. K. Aggarwal, D. V. Coury, A. T. Johns, et al. A practical approach to accurate fault location on extra high voltage teed feeders. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1993, 8(3): 874-883.
- [91] L. L. Lai, N. Rajkumar, E. Vasekar, et al. Wavelet transform and neural networks for fault location of a teed-network. Perth: Proceedings of International Conference Power Systems Technology, 2000: 807-811.
- [92] A. D. Tziouvaras, J. B. Roberts and G. Benmouyal. New multi-ended fault location design for two- or three-terminal lines. Amsterdam: Proceedings of 7th IEE Development in Power System Protection International Conference, 2001: 395-398.
- [93] C. Yu, C. Liu and Y. Lin. A fault location algorithm for transmission lines with tapped leg-PMU based approach. Vancouver: Proceedings of Power Engineering Society Summer Meeting, 2001: 915-920.
- [94] Y. Lin, C. Liu and C. Yu. A new fault locator for three-terminal transmission lines using two-terminal synchronized voltage and current phasors. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2002, 17(2): 452-459.
- [95] M. Abe, N. Otsuzuki, T. Emura, et al. Development of a new fault location system for multi-terminal single transmission lines. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1995, 10(1): 159-168.
- [96] S. M. Brahma. Fault location scheme for a multi-terminal transmission line using synchronized voltage measurements. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2005, 20(2): 1325-1331.
- [97] T. Nagasawa, M. Abe, N. Otsuzuki, et al. Development of a new fault location algorithm for multiterminal two-parallel transmission lines. *IEEE Trans on Power Delivery*, 1992, 7(3): 1516-1532.
- [98] T. Funabashi, H. Otaguro, Y. Mizuma, et al. Digital fault location for parallel double-circuit multi-terminal transmission lines. *IEEE Trans on Power Delivery*, 2000, 15(2): 531-537.
- [99] 邓集祥, 欧小高, 姚天亮. 基于小波能量系数的主导低频振荡模式检测[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(8): 141-146.
- [100] 鞠平, 谢欢, 孟远景等. 基于广域测量信息在线辨识低频振荡[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(22): 56-60.
- [101] 韩松, 何利铨, 孙斌等. 基于希尔伯特-黄变换的电力系统低频振荡的非线性非平稳分析及其应用[J]. *电网技术*, 2008, 32(4): 56-60.
- [102] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡分析[J]. *电网技术*, 1995, 19(12): 6-10.
- [103] 王铁强, 贺仁睦, 王卫国等. 电力系统低频振荡机理的研究[J]. *中国电机工程学报*, 2002, 22(2): 21-25.
- [104] 汤涌. 电力系统强迫功率振荡的基础理论[J]. *电网技术*, 2006, 30(10): 29-33.
- [105] 徐衍会, 贺仁睦, 韩志勇. 电力系统共振机理低频振荡扰动源分析[J]. *中国电机工程学报*, 2007, 27(17): 83-87.
- [106] 韩志勇, 贺仁睦, 马进等. 电力系统强迫功率振荡扰动源的对比分析[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(3): 16-19.
- [107] 余一平, 闵勇, 陈磊. 多机电力系统强迫功率振荡稳态响应特性分析[J]. *电力系统自动化*, 2009, 33(22): 5-9.
- [108] 余一平, 闵勇, 陈磊等. 基于能量函数的强迫功率振荡扰动源定位[J]. *电力系统自动化*, 2010, 34(5): 1-6.
- [109] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008: 14-24.
- [110] 高翔. 数字化变电站若干关键技术研究[D]. 浙江大学, 2008.
- [111] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术[J]. *电网技术*, 2006, 30(23): 67-87.