

基于 dq 变换与小波变换的电能质量扰动检测与识别方法

张秀娟,徐永海,肖湘宁

(华北电力大学 电力工程学院,北京 102206)

摘要:提出了一种基于 dq 变换和小波变换相结合的电能质量扰动检测与识别方法,该方法利用 dq 变换有效值的特征和小波变换对突变信号的敏感性,能对电压暂降、暂升等 10 种电能质量扰动进行检测与识别,具有较高的识别正确率,并能计算出各种扰动的特征参量。同时,还对部分多种扰动同时发生的情况进行了初步探讨和仿真研究,并取得了较好的检测识别效果。

关键词: dq 变换; 小波变换; 电能质量; 检测与识别

中图分类号: TM 761

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2005)07-0001-05

0 引言

电能质量扰动的检测和识别是近年来电能质量问题研究的一个热点。目前,国内外学者已经提出了一系列行之有效的检测和识别方法,如基于小波变换或与人工神经网络(ANN)^[1~4]、专家系统、模糊数学等相结合的电能质量扰动的检测方法^[5]。文献[6]将 dq 变换和 ANN 相结合进行电能质量扰动的检测与识别。该方法由单相电压构造一个虚拟的三相系统以进行 dq 变换并提取特征量,和 ANN 结合进行电能质量扰动的检测与识别,此方法对电压暂降、电压暂升和电压间断的识别率可达 100%,并且可以给出扰动发生的时刻、幅值与相位跳变幅度,但文中忽略了延时 60° 构造三相的影响。本文提出了一种基于 dq 变换和小波变换相结合的电能质量扰动检测和识别方法,可有效解决延时 60° 构造三相出现的镜像扰动,且算法简单,检测精度较高。该方法能够对 10 种常见电能质量扰动进行检测与识别,并给出相关特征参量的计算结果,文中对几种常见的多种扰动同时出现的情况也进行了初步讨论。

1 电能质量扰动的 dq 变换和小波变换

1.1 dq 变换在电能质量扰动中应用

文献[6]简要阐述了单相延时 60° 构造三相的 dq 变换法,并得到 dq 变换结果为: $u_d=\sqrt{3}U, u_q=0$,因此可以通过 u_d 直接求取电压暂降、暂升和间断的电压瞬时值。本文讨论了几种常见的电能质量扰动电压信号的 dq 变换及其结果,而对于相位跳变和频率偏移扰动则予以特殊考虑。

1.1.1 相位跳变

假设 a 相发生相位跳变, $\sqrt{2}U_a \sin(\omega t + \alpha)$ 是其基波分量,其中 U_a 和 α 分别为电压有效值和相位

跳变角度。采用延时 60° 的方法构造 b, c 相电压后进行 dq 变换可得:

$$u_d = \sqrt{3} U_a \cos \alpha \quad (1)$$

$$u_q = -\sqrt{3} U_a \sin \alpha \quad (2)$$

将 dq 变换结果进行处理,可得电压有效值为

$$u_{\text{rms}} = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \quad (3)$$

由 u_d 和 u_q 可以准确求出相位跳变的大小为

$$\alpha = \arcsin \left[-\frac{\sqrt{3} u_q}{3 U_a} \right] = \arcsin \left[-\frac{u_q}{\sqrt{u_d^2 + u_q^2}} \right] \quad (4)$$

1.1.2 频率偏移

设 a 相发生频率偏移,角频率的变化为 $\Delta\omega$, $u_a = \sqrt{2} U \sin(\omega + \Delta\omega) t$,采用延时 60° 的方法构造 b, c 相电压后进行 dq 变换结果为

$$u_d = \sqrt{3} U \cos \Delta\omega t \quad (5)$$

$$u_q = -\sqrt{3} U \sin \Delta\omega t \quad (6)$$

由 u_q 得:

$$\Delta\omega t = \arcsin \left(-\frac{\sqrt{3} U_q}{3 U} \right) \quad (7)$$

从而频率的变化量 Δf 为

$$\Delta f = \frac{\Delta\omega}{2\pi} = \frac{1}{2\pi t} \arcsin \left(-\frac{\sqrt{3} U_q}{3 U} \right) \quad (8)$$

1.2 小波变换的优缺点

小波变换分析法具有良好的时-频局部化特性,通过对小波变换局部模极大值进行线性分析,可以检测信号的奇异点,即可检测出所对应的暂态扰动的起止时刻。电能质量扰动可以分为暂态扰动和稳态扰动。很多文献根据小波变换对奇异点的敏感性检测暂态电能质量的起止时刻,但当扰动信号为平滑信号时,小波变换无法检测出扰动的结束时间。本文根据 dq 变换的有效值判断扰动的起止时刻,并结合小波变换对信号奇异点的敏感性区分振荡和谐波扰动,克服了扰动发生、终止在工频相角为 0° 或 180°

附近时,利用小波方法可能检测不到或误判断的不足,能对 10 种常见的电能质量扰动进行检测与识别(见图 1),本文同时对几种常见的多种扰动同时发生的情况也进行了初步探讨。

2 扰动检测与识别

2.1 单项扰动发生时电能质量扰动的检测与识别

本文对正常工作时相电压有效值为 220 V 的系统进行仿真,采样频率为 12.6 kHz,给出典型的 10

种电能质量扰动波形及 dq 变换后的电压有效值。其中除噪声扰动外,其他扰动均加了 0.5 % (46 dB) 的噪声。单项扰动发生时的程序流程图如图 2 所示。

2.1.1 相位跳变和频率偏移的检测与识别

由式(4)和式(7)可知,当相位跳变和频率偏移出现时,根据 dq 变换所得的 u_d 和 u_q 可以检测出相位跳变和频率偏移是否发生,并计算出它们的幅值大小。由于相位跳变和频率偏移的计算方法相近,因此其仿真结果有着密切的联系,从图 3 可以很直

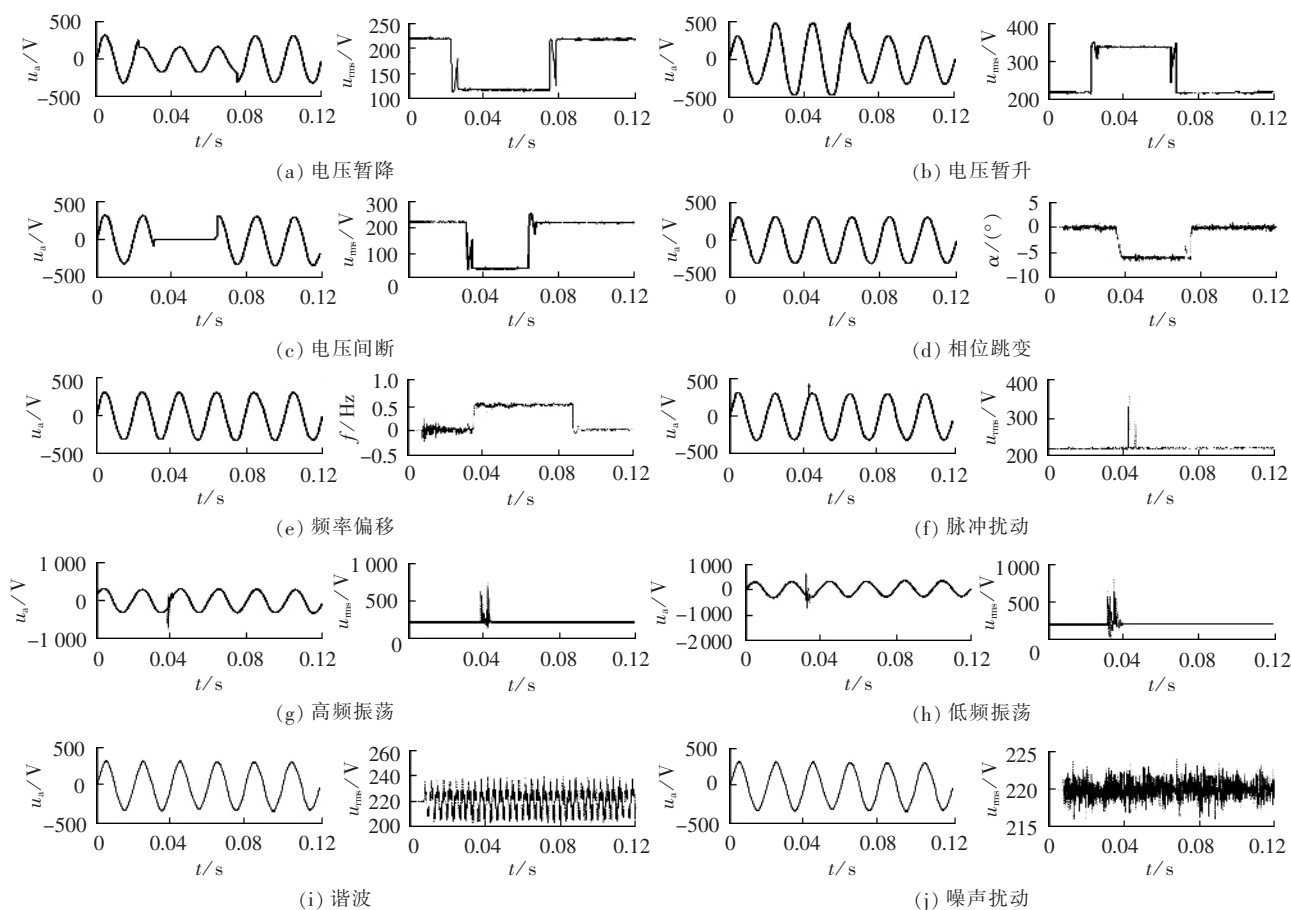


图 1 10 种电能质量扰动及 dq 变换有效值波形

Fig.1 Ten power quality disturbances and their virtual value waveforms by dq conversion

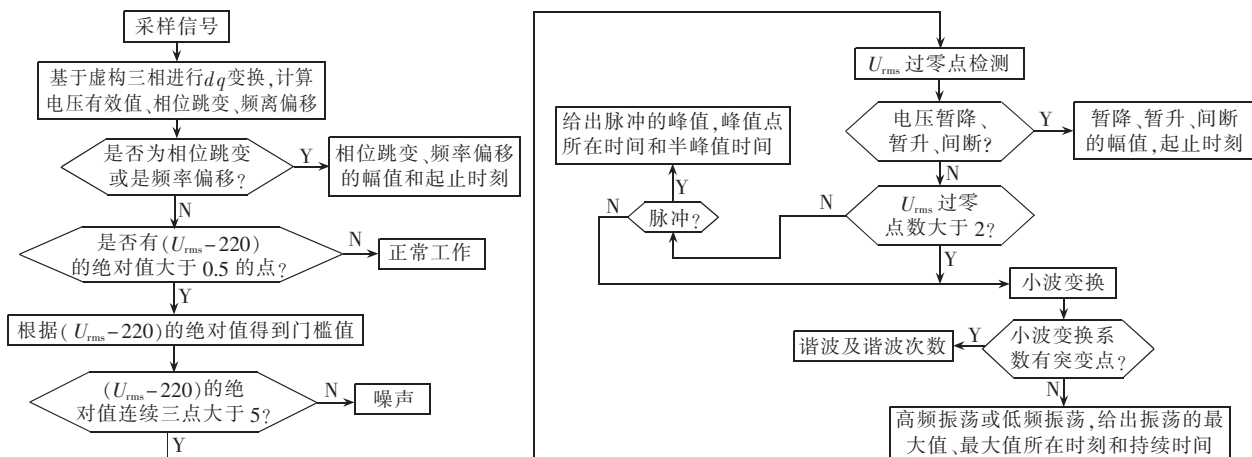


图 2 dq 变换和小波变换相结合的电能质量扰动识别简化框图

Fig.2 The workflow of power quality disturbance identification combining dq conversion and wavelet transform

观地看出。为将两种扰动加以检测和区别,同时考虑延时 60° 产生的镜像扰动和噪声的影响,选取某一点后 42 个点($1/6$ 周期内)的相位值都大于 0.2° 或是都小于 -0.2° 为相位跳变的起始点,即相位跳变的识别基值为 $\pm 0.2^\circ$ 。由于频率偏移时,相位跳变值随时间增大,因此选取扰动的开始发生后第 43 点到第 84 点的相位跳变值求取相位跳变的平均值,然后根据频率偏移发生时相位跳变波形的特点和仿真经验,选取相位跳变发生后某一区域的 42 个点,若其中与相位跳变平均值的差值大于 0.5 的点数小于等于 5,则认为是相位跳变发生。同时由于频率偏移幅值一般都很小,当检测到的频率偏移幅值大于 1 时,也认为是相位跳变发生。否则,认为该扰动不是相位跳变。

由于频率偏移基本上都是三相同步发生,本文对单相延时 60° 构造三相计算的频率偏移波形和由三相数据进行 dq 变换得到的频率偏移波形进行了比较,前者得到的频率偏移波形为二次谐波曲线,这是单相数据延时 60° 构造三相进行 dq 变换不可避免的误差,而后者得到的频率偏移波形为一条直线,如图 3 所示,两种情况下(原始信号均含有 0.5 % 白噪声)的检测结果见表 1。由表 1 可知,三相数据进行频率偏移检测无论从时间定位还是偏移幅度计算都要优于单相检测结果。

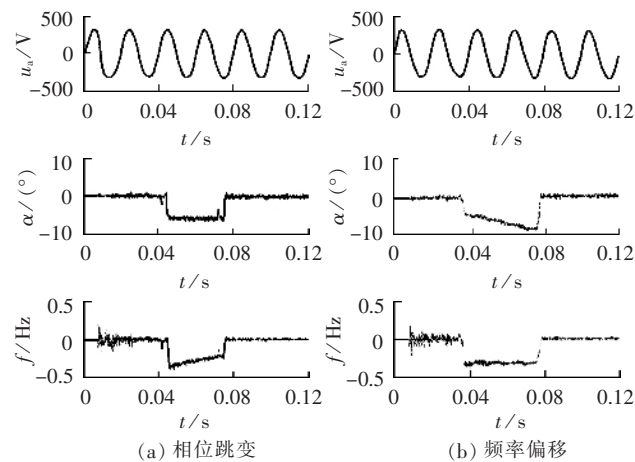


图 3 相位跳变和频率偏移的关系
Fig.3 The relationship between phase angle jump and frequency deviation

表 1 单相数据构造三相与三相数据分别进行 dq 变换所得频率偏移检测数据
Tab.1 The frequency deviation detection data by dq conversions from single-phase data and three-phase data

频率偏移	各种扰动参量	理论值	检测值	绝对误差
单相	起始时间/s	0.035 0	0.035 3	0.000 3
	终止时间/s	0.072 0	0.072 1	0.000 1
	偏移幅值/Hz	0.500 0	0.481 1	0.018 9
三相	起始时间/s	0.035 0	0.035 1	0.000 1
	终止时间/s	0.072 0	0.072 1	0.000 1
	偏移幅值/Hz	0.500 0	0.499 4	0.000 6

因电压暂降、暂升和电压间断的持续时间一般大于半个周期,单相延时 60° 构造三相的 dq 变换方

法产生的镜像扰动可能会影响检测结果。为避开镜像扰动的影响,本方法对电压有效值(U_{ms})设置一定的阈值计算过零点。在扰动发生开始计数后 $1/6$ 周期内计算过零点个数。由图 1 可知,除谐波和振荡扰动,其他扰动过零点的数目都小于 2。由于镜像扰动的影响,电压暂降、暂升、电压间断和脉冲的有效值波形可能在扰动发生后的 60° 处有一个毛刺出现,因而这几种扰动 U_{ms} 波形的过零点数可能相同,但可以根据这几种扰动的持续时间加以区分。从仿真结果看,电压暂降、暂升和电压间断的幅值明显与其他扰动不同,且有相似性,故通过电压有效值可判断测得扰动发生及结束时间。根据 IEEE 规定电磁现象的特征参数,以 U_{ms} 与 220 差值的绝对值是否超过 22 为电压暂降、暂升和电压间断发生与结束的标志,用 U_{ms} 求平均值得到电压暂降、暂升和电压间断的幅度。

2.1.3 脉冲暂态、谐波和振荡的检测与识别

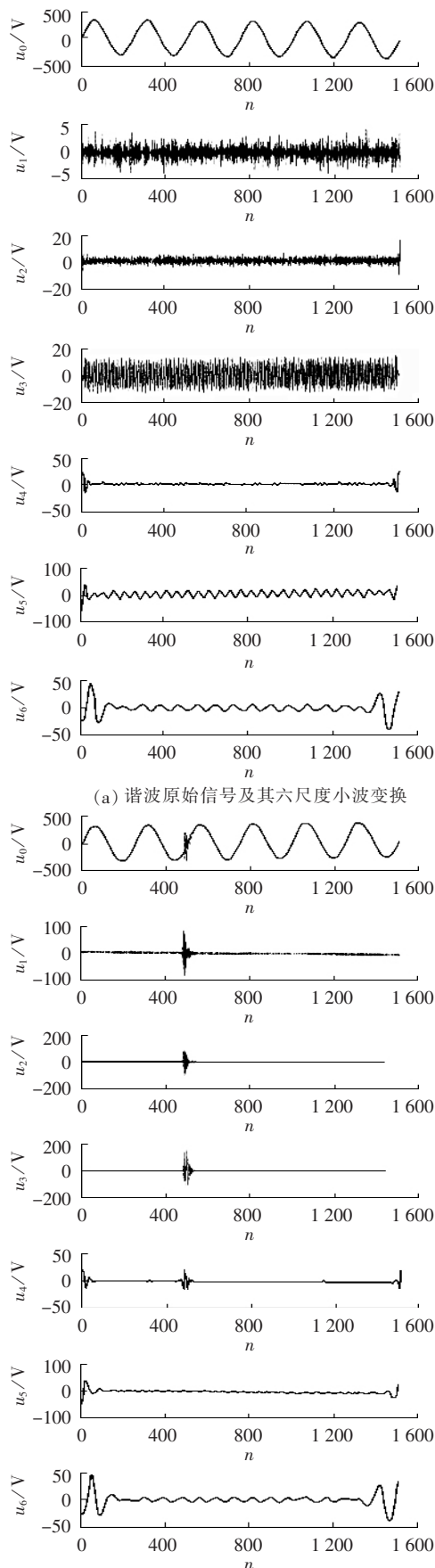
根据脉冲暂态、谐波、振荡和噪声扰动 U_{ms} 的不同特点,以 U_{ms} 与 220 差值的绝对值是否超过 5 为前 3 种扰动发生的标志,差值低于 5 而大于 0.5 的为噪声扰动,否则判断为正常工作。同时根据 U_{ms} 的过零点区分脉冲暂态和谐波、振荡等扰动。

高频振荡和低频振荡是暂态扰动,进行小波变换后各尺度尤其是第一和第二尺度上的小波变换系数在扰动发生时刻有明显的突变;而谐波为稳态扰动,且谐波次数一般不大,小波变换第一、二尺度上系数没有突变。因此,可利用小波变换对奇异点的检测,根据小波变换系数是否有突变判别振荡和谐波扰动。振荡和谐波扰动的小波变换见图 4(图中纵坐标 $u_0, u_1 \sim u_6$ 分别为谐波原始信号及其六尺度小波变换信号;横坐标 n 为采样点数,采样频率为 12 600 个/s)。利用 U_{ms} 在扰动发生后过零点个数可以区分高、低频振荡。

需要指出的是,相位跳变常常和电压暂降伴随发生,根据本文所提出的方法,相位跳变和电压暂降同时发生时和相位跳变单独发生时均能够检测出来,且其识别率高。

由于脉冲持续时间极短,而单相延时 60° 构造三相的 dq 变换方法产生的镜像扰动是在扰动发生经过 $1/6$ 周期开始,所以,脉冲扰动的检测及其特征参数的检测计算是在扰动开始的 $1/6$ 周期内完成,完全可以不必考虑镜像扰动的影响。而对于谐波和高、低频振荡的检测则是根据 dq 变换和小波变换相结合来进行,且振荡的峰值一般发生在扰动发生后的很短时间内,所以在判断扰动为振荡后,可以根据扰动发生后 $1/6$ 周期内 dq 变换的 U_{ms} 得到振荡峰值等特征参量。

利用 Matlab 语言编制程序产生不同种扰动信号,其中除噪声扰动外,信号中均含有 0.5 % 即 46 dB 的噪声。检测结果见表 2。



(b) 振荡原始信号及其六尺度小波变换

图 4 原始信号及其小波变换系数波形
Fig.4 The original signals and their wavelet transform coefficients

表 2 检测和识别结果
Tab.2 The results of detection and identification

检测项目	样本数	正确识别样本数	正确率/%
电压暂降	25	25	100
电压暂升	24	24	100
电压间断	24	24	100
脉冲	31	31	100
频率偏移	22	21	95.5
相位跳变	22	22	100
谐波	26	25	96.2
噪声	20	20	100
低频振荡	30	28	93.3
高频振荡	36	33	91.7

从表 2 结果可以看出本文所提方法在不区分振荡为高频振荡或低频振荡情况下,识别率达到 95 % 以上,区分高、低频振荡时的识别率达 91 % 以上。

2.2 多种扰动同时发生时扰动的检测与识别

用 dq 变换和小波变换相结合的方法还可以判断部分多种扰动同时发生的情况,如谐波和电压暂降、暂升和电压间断、振荡等同时发生以及振荡和电压暂降同时发生的情况。前者主要原理是谐波属于稳态扰动,在只有谐波发生时,信号的小波变换系数没有突变,而电压暂升、暂降、间断和振荡属于暂态扰动,在这些扰动发生时,信号的小波变换系数会有突变,对于这种情况,首先根据有效值 U_{ms} 判断谐波是否发生,之后根据其他暂态扰动信号小波变换系数的变化和 dq 变换的 U_{ms} 波形的特征判断其他扰动是否发生;后者首先判断振荡是否发生,再根据电压暂降扰动的特征进行判断。由表 3 检测结果可见,由于受到谐波的影响,由检测的电压有效值 U_{ms} 波形得出的电压幅值误差比单项扰动发生时要大一些。

表 3 谐波与电压暂降、电压暂升、电压间断和振荡同时发生时的仿真结果

Tab.3 The simulative results when harmonics, oscillations and other disturbances are all existing

检测项目	扰动参量	理论值	检测值
谐波和电压暂降同时发生时 电压暂降检测	起始时间/s	0.037 2	0.037 3
	终止时间/s	0.087 1	0.087 1
	暂降程度/%	36.20	36.693
谐波和电压暂升同时发生时 电压暂升检测	起始时间/s	0.032 1	0.032 1
	终止时间/s	0.087 5	0.087 7
	暂升程度/%	136.2	136.042 2
谐波和电压间断同时发生时 电压间断检测	起始时间/s	0.043 1	0.043 2
	终止时间/s	0.076 5	0.076 6
谐波和振荡暂态同时发生时 振荡的检测	起始时间/s	0.045 0	0.044 8
	峰值时间/s	0.045 9	0.045 9
	峰值/V	36.489 3	36.489 3

实际信号中,电压暂降开始时常常伴有振荡出现。高频振荡与低频振荡和电压暂降同时发生时的检测结果见表 4。虽然振荡和电压暂降同时发生,但由于振荡和延时 60° 的影响,检测出的电压暂降起

始时间有时和理论值相差较多,且计算得到的电压暂降幅度的误差比单项扰动发生情况下要大一些,减小误差的方法还有待于进一步研究。

表 4 振荡和电压暂降同时发生时的检测结果
Tab.4 The detection results when oscillation and voltage sag are both existing

检测项目	扰动参量	理论值	检测值
高频	起始时间/s	0.023 1	0.023 3
	终止时间/s	0.023 5	0.023 5
	峰 值/V	172.815 4	172.815 4
	起始时间/s	0.023 1	0.023 3
	终止时间/s	0.075 3	0.075 4
	暂升程度/%	71	71.933 2
低频	起始时间/s	0.032 5	0.032 8
	终止时间/s	0.033 7	0.033 7
	峰 值/V	117.647 4	117.647 4
	起始时间/s	0.032 5	0.033 3
	终止时间/s	0.092 1	0.092 2
	暂升程度/%	72	71.386 0

3 结论

与目前的电能质量扰动检测方法相比,本文所提出的 dq 变换和小波变换相结合的电能质量扰动检测与识别方法不仅能够检测和识别多种单项扰动,具有较高的识别率,而且能够对多种扰动同时发生的情况进行识别。对于单项扰动,所提方法在不区分高频振荡和低频振荡时,扰动识别率可达 95 % 以上,当进行高频振荡和低频振荡区分时,扰动识别率达 91 % 以上。根据各种扰动的特征提取相应的特征量,本文实现了多种扰动同时发生时的扰动检测与识别,取得了较好的识别效果,为多扰动复杂问题的识别研究提供了一种有效的方法。

参考文献:

[1] BORRAS D,CASTILLA M,MORESO N,*et al.* Wavelet and neural structure:A new tool for diagnostic of power system disturbances[J]. **IEEE Trans. on Industry Applica-**

tions,2001,37(1):184-190.
[2] SANTOSO S,POWERS E J,GRADY W M, *et al.* Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier. Part I:Theoretical foundation[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**,2000,15(1):222-228.
[3] SANTOSO S,POWERS E J,GRADY W M,*et al.* Power quality disturbance waveform recognition using wavelet-based neural classifier. Part II: Application[J]. **IEEE Trans. on Power Delivery**,2000,15(1):229-235.
[4] 蒋 斌,罗小平,颜钢锋. 基于半复小波的电力系统扰动检测新方法[J]. 电力系统自动化,2003,27(6):47-50.
JIANG Bin,LUO Xiao-ping,YAN Gang-feng. A new method of disturbance detection in power systems based on half-complex wavelet transform[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2003,27(6):47-50.
[5] 张秀娟,徐永海,肖湘宁. 电能质量扰动小波变换检测与识别方法的发展[J]. 电力自动化设备,2003,23(9):67-71.
ZHANG Xiu-juan,XU Yong-hai,XIAO Xiang-ning. Development of wavelet-transform based power quality disturbance detection and identification[J]. **Electric Power Automation Equipment**,2003,23(9):67-71.
[6] 徐永海,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.
XU Yong-hai,XIAO Xiang-ning,YANG Yi-han. Power quality disturbance identification using dq conversion-based neural classifier[J]. **Automation of Electric Power Systems**,2001,25(14):24-28.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

张秀娟(1978-),女,河北唐山人,硕士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用(E-mail:evrajuan@sina.com);
徐永海(1966-),男,河南新野人,副教授,从事电力系统谐波、电能质量等方面的研究工作;
肖湘宁(1953-),男,湖南澧县人,教授,博士研究生导师,主要从事电力系统谐波、电能质量、现代电力电子技术及其应用等方面的教学与科研工作。

Power quality disturbance detection and identification based on dq conversion and wavelet transform

ZHANG Xiu-juan,XU Yong-hai,XIAO Xiang-ning

(School of Electrical Engineering,North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: A method combining dq conversion and wavelet transform to detect and identify power quality disturbances is proposed,which makes use of the characteristics of dq conversion's virtual value and the sensitivity of wavelet transform to sudden-change singals. It can identify ten kinds of power quality disturbances with high correctness ratio,such as voltage sag and rise,and calculate the eigenvalues of each disturbance. Some concurrent disturbances are discussed and simulated and the results show that the detection and identification are effective.

This project is supported by the Special Fund for Doctoral Science and Research by the Ministry of Education of China(20010079002).

Key words: dq conversion; wavelet transform; power quality; detection and identification