

动态电压质量问题检测方法

罗小莉,杨 宇

(国网南京自动化研究院,江苏 南京 210003)

摘要:就目前电能质量问题中常见的电压波动(骤升、骤降、闪变、谐波)检测技术进行了探讨。对经典的和目前众多热点研究的电压波动检测技术进行了分析,包括锁相技术中的过零锁相和软件锁相环(SPLL),以及波动特征量检测中的均方根值法、dq0 变换法、改进窗口傅里叶变换法及研究最多的小波变换法,并对各种算法的优、缺点和适用范围作了分析、比较。过零锁相即硬件锁相(PLL)由鉴相器、环路滤波器、压控振荡器及分频器组成,其原理和结构较简单,但动态性能较差,且在畸变电压输入时锁相效果变差;软件锁相环是一种基于瞬时无功理论的锁相方式,其结构比较简单、动态响应速度快、能准确地锁定电源电压的基波正序分量,对谐波有很强的抑制作用,一般无需滤波环节。最后,对电压波动检测技术进行了总结。

关键词:检测; 软件锁相环; dq0 变换; 小波变换

中图分类号: TN 93 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2007)01-0115-04

1 动态电压质量

近年来,电能质量问题已经日益成为电力部门和用户普遍关注的问题,高质量电力供应已成为现代社会生产、生活正常进行的基本条件。为了提高电能质量,必须对电能质量问题进行诊断、定位和分类。测量计算的电气量主要有:三相电压、电流有效值;电网频率;电压、电流中各次谐波含量及谐波总含量;各次谐波的功率及畸变功率;波形及波峰因数;电压、电流中的负序和零序分量;在出现电压闪变情况下,对闪变的性质进行分析,并记录闪变暂态过程中的电压波形。常见的动态电压质量问题的波形和分类分别如图 1 和表 1 所示(表中 A_{dx} 为典型频谱成分、 t_{dx} 为典型持续时间、 U_{dx} 为典型电压幅值),其检测方法,通常主要包括相位的跟踪和波动特征量的提取,以下分别介绍它们各自的实现方法^[1-2]。

2 锁相技术

任何一种电能质量补偿装置都需要实时跟踪电网电压/电流的相位,因此锁相技术应运而生。常用的锁相环一般包括硬件锁相和基于瞬时无功功率理

表 1 电力系统电磁现象的种类和特征

Tab.1 Category and character of electromagnetism phenomenon

种类	A_{dx}	t_{dx}	U_{dx}
电磁瞬态冲击	纳秒级	5 ns 上升	<50 ns
	微秒级	1 μ s 上升	50 ns~1 ms
	毫秒级	0.1 ms 上升	>1 ms
电磁瞬态振荡	低频	<5 kHz	0.3~50 ms
	中频	5~500 kHz	20 μ s
	高频	0.5~5 MHz	3 μ s
即时电压波动	中断	0.5~30 周期	<0.1 p.u.
	暂降	0.5~30 周期	0.1~0.9 p.u.
	升高	0.5~30 周期	1.1~1.8 p.u.
瞬时电压波动	中断	30 周期~3 s	<0.1 p.u.
	暂降	30 周期~3 s	0.1~0.9 p.u.
	升高	30 周期~3 s	1.1~1.4 p.u.
暂时电压波动	中断	3 s~1 min	<0.1 p.u.
	暂降	3 s~1 min	0.1~0.9 p.u.
	升高	3 s~1 min	1.1~1.2 p.u.
长期电压波动	持续中断	>1 min	0
	欠电压	>1 min	0.8~0.9 p.u.
	过电压	>1 min	1.1~1.2 p.u.
电压不平衡		稳态	0.5%~2%
波形失真	直流偏移	稳态	0~0.1%
	谐波成分	稳态	0~20%
	间谐波	稳态	0~2%
	缺口噪声	稳态	0~1%
电压波动	<25 Hz	断续	0.1%~7%
频率偏差		<10 s	

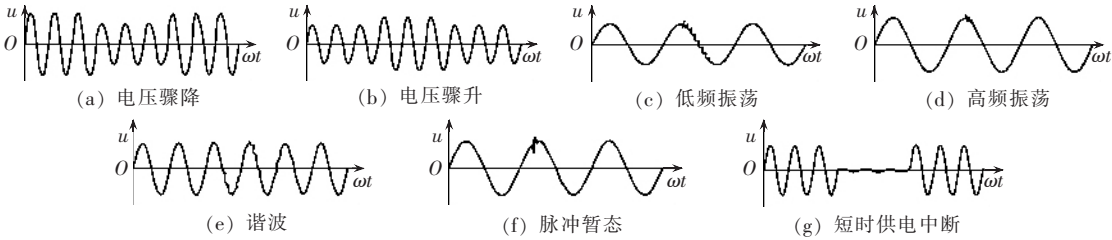


图 1 典型电能质量扰动波形

Fig.1 Typical waves of power quality disturbances

论的软件锁相。采用过零比较的方法,其动态性能较差,且在畸变电压输入时锁相效果变差。

2.1 硬件锁相

硬件锁相即过零比较方式,图 2 示出过零比较锁相方式的结构。

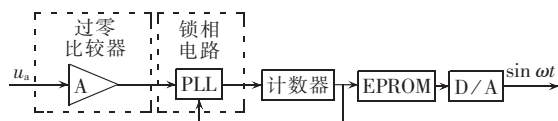


图 2 过零比较锁相方式

Fig.2 Zero-crossing phase locked method

采用过零比较将输入电压转换为方波,送锁相环(PLL)芯片,得到电压的相位信息。若要得到一个同相位的标准信号,可将信号信息存储在 EPROM、FLASH 等存储芯片中,利用相位信息读出其中数据,经 D/A 变换即可。

PLL 一般由鉴相器、环路滤波器、压控振荡器及分频器组成,其结构框图如图 3 所示。

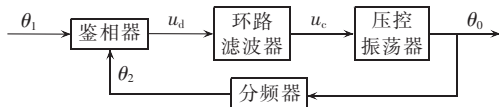


图 3 锁相环基本结构图

Fig.3 Basic structure of phase locked loop

其基本工作原理是鉴相器将电网电压和控制系統内部同步信号的相位差信号转变成电压,经过环路滤波器滤波后控制压控振荡器,从而改变系統内部同步信号的频率和相位,使之与电网电压一致^[3]。

这种方案原理和结构都较简单,在工程上得到了大量的应用。但采用这种方法,一个工频周期只能比较 2 次,动态性能较差。并且,当电网侧电压中有较高的谐波含量或三相不平衡时,就不能准确地确定基波正序的过零点,从而对锁相精度造成影响^[4]。

2.2 软件锁相环

软件锁相环(SPLL)是一种基于瞬时无功理论的锁相方式,其结构比较简单、动态响应速度快,能准确地锁定电源电压的基波正序分量,对谐波有很强的抑制作用,已得到了广泛的应用。图 4 示出 SPLL 方式的基本结构^[5]。

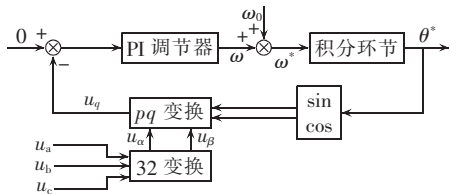


图 4 SPLL 的基本结构

Fig.4 Basic structure of SPLL

基于瞬时无功理论的 SPLL 的基本原理是先将三相输入电源电压 u_a, u_b, u_c 经 pq 变换得到 u_q , 变换所使用的角度是锁相环的输出 θ^* , u_q 的大小表征了输入电压相位 θ 和锁相输出相位 θ^* 之间的差值,它与 0 相减后的值经一比例积分(PI)调节器调节后可

视为误差信号 ω , ω 与一扰动角频率 ω_0 相加后得到角频率 ω^* , 该角频率再经一积分环节后得到最终输出的相位 θ^* 。整个流程构成一个负反馈,通过调节 PI 调节器可达到锁相的目的。

未捕获频率时, u_q 是一交流分量,捕获频率且相位差不为零时, u_q 是一直流分量,它的大小代表锁相输入、输出之间的相位差信息。在频率、相位完全捕获的情况下, $u_q=0$, 即 u_q 是恒定的直流分量,且不随电源电压幅值的变化而变化。因此,在频率和相位完全捕获的情况下($u_q=0$)通过 PI 环节调节 u_q 可达到锁相的目的。由于在数字电路中正弦和余弦的值是通过查表得到的, θ^* 的值不能太大,因此每一个工频周期复位一次。

当三相输入电源电压中含有零序、负序和谐波分量时,零序分量经 32 变换后其值为 0,对结果没有影响。经由基波正序分量转换为直流分量,其他分量经过 pq 转换都是频率较高的分量,如经高频滤波将这些高频分量滤波, SPLL 的输出就不受负序、零序和谐波的影响。这就确保了 SPLL 能够准确锁定畸变输入电压的基波正序分量。因系统中存在 2 个积分环节,对高频分量有较强的抑制作用,所以一般无需额外的滤波环节。由于它能方便地用于计算补偿电压,因此 SPLL 目前引起了广泛的关注。

3 扰动检测

动态电压扰动识别方法按照扰动特征量提取方法的不同可分为 5 种。

3.1 有效值法(均方根值法)

电压有效值法是利用时域一个周期数字均方根运算实现的。为了实时检测电压有效值骤变,实际中常采用一个周期数据序列的滑动平均计算。

$$U(k) = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=k-N+1}^{i=k} u_i^2} \quad (1)$$

为加速检测过程,实用的简便方法是取半个周期的采样数据量进行滑动平均处理。但此方法只能取半个周期整数倍的采样数据,否则将受到频移振荡分量影响^[4]。该方法只注重对电压幅值的监测,且至少需要半个周期的历史数据,将引起一定的时延,因此它不能准确地给出电压骤降的起止时刻,更不能反映电压骤降时可能出现的相角跳变和不对称^[6]。

3.2 基于瞬时无功功率理论的 $dq0$ 变换方法

该方法是目前最常采用的算法,其基本原理是对 abc 坐标系下的三相电量(电压或电流)进行 Park 变换,将 abc 坐标系下的三相电量转换成 $dq0$ 坐标系下的相应分量,即

$$F_{dq0} = PF_{abc} \quad (2)$$

$$P = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} A & B & C \\ D & E & F \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$A = \cos \omega t, B = \cos(\omega t - 120^\circ), C = \cos(\omega t + 120^\circ)$$

$$D = -\sin \omega t, E = -\sin(\omega t - 120^\circ), F = -\sin(\omega t + 120^\circ)$$

假设待检测电压为 $u_s(t) = u_1 + u_h$, 且 $u_1 = U \sin(\omega t + \varphi)$ 为基波分量, u_h 为含有谐波、电压波动、高频振荡等成分的畸变分量。经过 Park 变换之后, $dq0$ 坐标系下的直流分量对应的即为 abc 坐标系下的基波分量 u_1 。通过低通滤波得到 $dq0$ 坐标系下的直流分量再经过 Park 反变换, 便可得到所需的电压骤降基波特征量。但上述方法只适用于三相电路, 同时没有考虑电压骤降时可能随之出现的相位跳变问题。由于滤波器通带和阻带之间的频率间隔较小, 所以滤波器的设计比较困难, 且时延较大, 对该方法的实时性会带来影响。

3.3 基于滑动时间窗口变换

文献[7]提出了一种基于滑动时间窗口的电网电压基波分量检测方法, 在电网电压中有谐波、频率偏差、频率变动及噪声的情况下, 能够实时准确地检测出电网电压基波分量的幅值和相位, 可方便地实现该基波信号的移相计算, 为电网电压提供一种动态的同步方法。

该方法与定义在整个时间轴上的傅里叶级数分解方法不同, 其区别在于在时间轴 t 上的每一时刻 $t = t_0$, 建立一个以 $t = t_0 - T_0$ 为原点的观察坐标系 τ , 来实时计算电网电压信号相对于这个滑动坐标系的基波分量。 T_0 为滑动坐标系中基函数的周期; $\omega_0 = 2\pi / T_0$ 为该基函数的角频率, 则电网电压相对于滑动坐标系的傅里叶级数的表达式为

$$u_s^*(\tau, t_0) = \sum_{n=1}^{\infty} \{a_n(t_0) \cos n\omega_0\tau + b_n(t_0) \sin n\omega_0\tau\} \quad (4)$$

当滑动坐标系的基函数周期 T_0 与电网电压周期 T 相等时, 滑动坐标系方法的基波估值与实际值精确相等。在 T 与 T_0 相差不大时, 估值与实际值相差很小。在一般的应用场合中, 使用额定周期作为 T_0 之值, 就能满足精度的要求。

3.4 改进的 $abc-dq$ 变换算法

传统的 $dq0$ 变换法需要通过低通滤波器或滑动窗分离直流分量, 存在延时。为提高系统的实时性, 可采用下式计算 dq 轴上的直流分量

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_d \\ \bar{u}_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} + \frac{1}{2\omega} \begin{bmatrix} u'_q \\ -u'_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} U_1 \sin \phi_1 \\ -\sqrt{2} U_1 \cos \phi_1 \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中 u'_d, u'_q 为对 u_d, u_q 求微分。

很容易得到基波正序分量的相角信息为

$$\sin \phi_1 = \frac{\bar{u}_d}{\sqrt{(\bar{u}_d)^2 + (\bar{u}_q)^2}} \quad (6)$$

$$\cos \phi_1 = \frac{-\bar{u}_q}{\sqrt{(\bar{u}_d)^2 + (\bar{u}_q)^2}} \quad (7)$$

该方法不仅能准确检测出电压骤降发生的起止时刻和电压幅值骤降的深度, 而且可以准确检测出基波正序分量相角的跳变, 具有准确、实时的特点。但由于引入了微分算子, 对电压采样值的准确度要求较高, 且当电压中含有谐波时, 同样无法避免由于加入滤波器所带来的延时, 它通常比较适合得到相

角的初值。

3.5 小波变换

传统的基于离散傅里叶变换的处理电力系统扰动信号方法的主要缺点是不能同时进行时间和频率分析以及不能应用于非平稳信号的分析。作为傅里叶变换改进的窗口傅里叶变换, 改变了傅里叶变换的缺陷, 但是它对于信号而言相当于一个带宽固定的带通滤波器, 不能根据不同的需要对信号做多尺度的分析, 而小波变换的方法则可以通过伸缩和平移等运算功能对函数或信号进行多尺度细化分析, 解决了傅里叶变换不能解决的许多难题。将小波变换方法应用于检测电力系统的扰动, 具有以下优点:

- a. 在检测信号随时间的动态变化时非常有效, 在信号变化快速的时间间隔内, 该方法能放大感兴趣的区域, 以获得一个更清晰的信号特征;
- b. 能同时表示出 4 种扰动的时间和频率信息;
- c. 可广泛应用于多种扰动的定位, 在那些对供电质量要求较高的场合, 本方法是传统的扰动检测方法的更新换代方法。

文献[8]基于小波奇异信号检测理论, 提出了一种双小波 (db1 小波和 db24 小波) 电能质量扰动的分类、检测方法。该方法先用 db1 小波低频分解系数将检测时易受噪声影响的电压凹陷、凸起和间断检测出来, 然后用 db24 小波分解并提取高频重构信号, 将暂态脉冲、暂态振荡及正常信号鉴别出来, 同时实现扰动的各项指标测定。

文献[9]提出了一种基于小波——神经网络的电压瞬时脉冲扰动识别的新方法。选用 db4 小波并将扰动波形进行 4 尺度的小波分解, 以分解后各层的能量作为 3 层概率神经网络 (PNN) 的输入特征矢量, 对电压瞬时脉冲扰动进行检测。

很多国内外的文献中都采用了小波变换来实现电压波动特征量的检测^[10-15], 仿真试验都取得了不错的效果。其中, 小波基的选择和特征量的提取是其中的难点, 有待进一步研究。

4 结论

综上所述, 动态电压质量问题已经得到了广泛的重视, 不同的补偿和解决方式也广泛应用在不同的场合中。由于不同的应用要求对待检测量, 检测的实时性、准确性等不尽相同, 因此应该有针对性的选择合适的方法。从目前的研究现状看, 基于瞬时无功率理论的 SPLL 以及各种改进的小波分析方法相对于其他方法有着更多的优越性, 获得了越来越多的应用。但是, 由于电能质量问题本身的复杂性和不可预测性, 最终实现的效果不佳。为了满足越来越多的电能质量补偿设备的应用要求, 在现有研究基础上进行改进, 深入研究电压波动的成因、波形的特点、设备灵敏度的要求等, 再结合人工智能和图形、图像处理理论, 从而在快速性、准确性上获得进一步的提高, 相

信在电能质量检测技术上会有更多新的进展。

参考文献:

- [1] FITZER C, BARNES M, GREEN P. Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(1): 203-212.
- [2] FLORIO A, MARISCOTTI A, MAZZUCHELLI M. Voltage sag detection based on rectified voltage processing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(4): 1962-1967.
- [3] 据兴宝, 徐至新, 邹建龙, 等. 基于 DSP 的三相软件锁相环设计[J]. 船电技术, 2004, 24(4): 11-14.
JU Xing-bao, XU Zhi-xin, ZOU Jian-long, et al. Design of SPLL based on DSP[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2004, 24(4): 11-14.
- [4] 李彦栋, 王凯斐, 卓放, 等. 动态电压恢复器锁相技术和控制策略的研究[J]. 电力电子技术, 2004, 38(2): 24-26.
LI Yan-dong, WANG Kai-fei, ZHUO Fang, et al. Study of phase locked technique and control strategies of dynamic voltage restorer[J]. Power Electronics, 2004, 38(2): 24-26.
- [5] 李彦栋, 王凯斐, 卓放, 等. 新型软件锁相环在动态电压恢复器中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(8): 42-45.
LI Yan-dong, WANG Kai-fei, ZHUO Fang, et al. Application of soft phase locked loop technique in dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2004, 28(8): 42-45.
- [6] 赵国亮, 刘宝志, 肖湘宁, 等. 一种无时延的改进 $d-q$ 变换在动态电压扰动识别中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 53-57.
ZHAO Guo-liang, LIU Bao-zhi, XIAO Xiang-ning, et al. Application of improved $d-q$ transform without time delay in dynamic voltage disturbance identification[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 53-57.
- [7] 李国勇, 刘汉奎, 徐殿国, 等. 一种电网电压基波分量的实时检测方法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 83-88.
LI Guo-yong, LIU Han-kui, XU Dian-guo, et al. A real-time method for detecting the fundamental component of line voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 83-88.
- [8] 李天云, 陈晓东, 赵为红, 等. 几种短时电能质量扰动分类和检测的双小波分析法[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 26-30.
LI Tian-yun, CHEN Xiao-dong, ZHAO Wei-hong, et al. Double wavelets measurements and classification of short duration power quality disturbances[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 26-30.
- [9] 王晶, 东洪春, 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.

- WANG Jin, SHU Hong-chun, CHEN Xue-yun. Surge disturbance detection using wavelet-based neural network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(6): 50-54.
- [10] 杨亚飞, 颜湘武, 姜尧林. 一种新的电压骤降特征量检测方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 41-44.
YANG Ya-fei, YAN Xiang-wu, LOU Yao-lin. A new method to detect voltage sag characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 41-44.
 - [11] 马振国, 李鹏, 杨以涵, 等. 基于小波多分辨率分析法的电能质量检测[J]. 华北电力大学学报, 2003, 30(3): 13-16.
MA Zhen-guo, LI Peng, YANG Yi-han, et al. Power quality detecting based on wavelet-multiresolution method[J]. Journal of North China Electric Power University, 2003, 30(3): 13-16.
 - [12] 石敏, 吴正国, 尹为民. 基于双小波的短时电压波动信号检测[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 17-21.
SHI Min, WU Zheng-guo, YIN Wei-min. Detection of short duration voltage variation signal based on double wavelet[J]. Power System Technology, 2005, 29(6): 17-21.
 - [13] 王克星, 宋政湘, 陈德桂. 基于小波变换的配电网电压暂降的干扰源辨识[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(6): 29-34.
WANG Ke-xing, SONG Zheng-xiang, CHEN De-gui. Interference source identification of voltage sag in distribution system based on wavelet transform[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(6): 29-34.
 - [14] 朱峰峰, 任震, 黄雯莹. 基于两个实值小波变换定量检测电能质量扰动的新方法[J]. 电网技术, 2003, 27(11): 52-54.
ZHU Feng-feng, REN Zhen, HUANG Wen-ying. A new method to quantitatively detect power quality disturbance based on two real wavelet transforms[J]. Power System Technology, 2003, 27(11): 52-54.
 - [15] 周晖, 齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术, 2006, 30(6): 23-29.
ZHOU Hui, QI Zhi-ping. A survey on detection algorithm and restoring strategy of dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 23-29.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

罗小莉(1964-), 女, 江苏南京人, 高级工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统自动化;

杨宇(1980-), 男, 湖北松滋人, 工程师, 硕士, 主要研究方向为电力系统自动化(E-mail: yangyu@nari-china.com)。

Detection methods for dynamic voltage quality

LUO Xiao-li, YANG Yu

(Nanjing Automation Research Institute, Nanjing 210003, China)

Abstract: Several common detecting techniques for voltage fluctuations such as swells, sags, flickers and harmonics are discussed. Classical and modern detecting techniques for them are analyzed, including zero-crossing PLL (Phase Locked Loop) and SPLL (Software PLL) in the phase locked method, and root mean square method, $dq0$ transformation method, improved window Fourier transformation as well as widely used wavelet transformation in the fluctuation character extraction. The merit and disadvantage of each algorithm are compared. The zero-crossing PLL i.e. hardware PLL, is comprised of PFD (Phase-Frequency Detector), loop filter, VCO (Voltage Control Oscillator) and frequency divider. It is really simple but poor in dynamic performance, and even worse in phase lock effect with distorted input voltage. Based on the instantaneous reactive power theory, the SPLL is simple, high speed and can exactly lock the fundamental positive sequence of source voltage, with strong suppression for harmonic and needless filter. Finally, detecting techniques for voltage fluctuation are concluded.

Key words: detection; software phase locked loop; $dq0$ transformation; wavelet transformation