

新型单相电压暂降实时检测方法及其实现

杨达亮, 卢子广, 杭乃善

(广西大学 电气工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: 针对单相系统电压暂降的检测, 提出一种用相电压虚构出三相电压信号的新型检测方法。根据单相交流电压信号离散数据, 利用相线电压相量关系, 通过移相角度 30° 虚构出三相电压信号。所提出的检测方法幅值变化延时仅为电网工频周期的 $1/12$, 理论延时为 1.67 ms , 与目前延时 3.33 ms 的瞬时电压 dq 分解法和延时 5.0 ms 的 $\alpha\beta$ 检测法相比, 实时性进一步提高。根据给定的 30° 相位差选择离散数据的间隔, 并对采样频率的选取进行深入分析, 以提高检测精度。针对检测延时时间、“检测异常”情况进行仿真, 结果验证了所提方法的正确性和有效性。

关键词: 电压暂降; 电能质量; 电力系统; 电压控制; 仿真

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2015.02.018

0 引言

在众多电能质量问题中, 电压暂降(voltage sag)是最严重的电能质量问题之一^[1]。对电压暂降特征量的实时、准确检测是快速、有效进行电压暂降补偿的前提。目前, 电压暂降的检测方法很多, 主要有有效值计算法、 dq 变换法、小波变换法及动态预测法等^[2-6]。其中 dq 变换法实现简单, 实时性好, 得到广泛应用^[7]。通常实用的检测和控制算法存在 4 ms 的延时时间^[8], 文献[8]通过改进, 将延时时间控制在 2 ms 以内。

同时, 在电力系统中发生的电压暂降多为单相事件^[9]。因此, 如何针对单相系统进行电压扰动的检测显得尤为重要。目前主要的方法是通过虚构三相系统, 采用 dq 变换进行电压暂降参数检测^[10], 一般称为瞬时电压 dq 分解法; 或虚构正交的 $\alpha\beta$ 系统, 通过 $\alpha\beta/dq$ 变换计算电压暂降的特征量^[11], 通常称为 $\alpha\beta$ 检测法。由于移相, 当电压信号发生暂降时, 虚构的电压幅值变化需要延时 $1/6$ 或 $1/4$ 工频周期才能检测出来, 理论延时分别为 3.3 ms 和 5.0 ms , 给实时控制带来不利影响。有文献为提高实时检测性能, 采用求导或差分的方式^[12-13], 但由于引入微分算子, 算法本身的求导或差分运算会放大信号中存在的噪声和干扰, 引入较大误差, 实际测量中难以应用。

本文针对单相系统电压暂降信号的检测, 提出一种新型检测方法, 根据单相交流电压信号离散数据, 通过移相角度 30° 虚构出对称的三相电压信号, 幅值变化延时仅为电网工频周期的 $1/12$, 理论延时为 1.67 ms 。文中给出了具体实现方法和仿真结果,

结果验证了此方法的正确性和有效性。

1 新型算法检测原理

设一个信号周期时间为 T , 采样的数据样本数为 N , 将算法的数据采样时刻与超前时刻数据和滞后时刻的数据关系表示如图 1 所示, 以当前最新数据为第 N 个样本数, 则之前的第 $1, 2, \dots$ 等历史数据可以看作是相位超前得到的数据, 而相位滞后的数据只能通过下一时刻或时延更长的时刻才能得到。以移相角度分别为 60° 和 90° 为例, 其延时分别为 $1/6$ 或 $1/4$ 个信号周期。在这期间的信号数据是不可信的, 称之为“检测异常”。

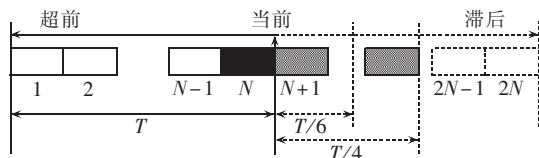


图 1 采样实时数据与超前、滞后数据示意图

Fig.1 Schematic diagram of previous, real-time and following sampling data

从图 1 可以看出, 相位超前和相位滞后来构建虚拟信号都会存在“检测异常”现象, 其时间长度等于构建的虚拟信号与实际检测信号之间的相位差。因此, 提高检测实时性的关键在于减少二者之间的相位差, 而不在于此数据的超前或滞后。传统的检测算法主要从相位滞后的角度来实现信号虚构。本文从相位超前角度出发, 提出一种新的构建虚拟信号方法, 以减少延时时间, 提高检测实时性能。

根据三相电源系统的相电压和线电压相量图关系, 如果知道被测电压 u_a , 则其线电压 u_{ab} 可由 u_a 求出。在具体实现过程中, 由图 1 的数据关系, 可知 u_a 的当前数据和历史数据, 可以构造出当前的 u_{ab} 数据, 由 u_a, u_{ab} 数据可以立即求出 u_b, u_c 的数据。这样, 虚

收稿日期: 2014-02-20; 修回日期: 2014-10-10

基金项目: 广西科技攻关计划项目(桂科攻 1348007-4)

Project supported by Guangxi Scientific and Technological Brainstorm Project(1348007-4)

拟的三相对称系统(u_a, u_b, u_c)便构造出来。忽略计算时间,相比之前延时 1/6 或 1/4 工频周期的检测算法,由于构建虚拟线电压时相位超前 30° ,其延时仅为工频周期的 1/12,可有效缩短检测算法发生“检测异常”的时间,进一步提高电压信号检测的实时性。特别要指出的是,由于是利用单相系统的实测数据来虚构出三相系统,因此,此三相系统总是“稳定”和“对称”的,可直接利用常规 dq 变换法进行暂降幅值和相位等特征量计算。

如果单相系统中存在畸变和干扰,则虚构的三相系统也存在谐波,采用低通滤波器方案会带来一定的延时。这时可考虑已有的三相系统电压暂降研究成果^[7],实现补偿指令的快速提取。

2 算法实现过程

在实际应用中,通常采用离散化的方式,下面讲述其数字化实现过程,以便于用嵌入式处理器进行编程。

设信号的频率为 f ,采样频率为 f_s ,则相邻 2 个采样点之间的相位差为:

$$\delta = \frac{f \times 360}{f_s} \tag{1}$$

设 1 个信号周期内采样的点数为 N ,即 $N=f_s/f$,则式(1)可写成:

$$\delta = \frac{360}{N} \tag{2}$$

若 2 个采样数据之间相差的角度为 φ ,则可得其在采样数据序列中的位置间隔应为:

$$n = \frac{\varphi}{\delta} = \varphi \frac{N}{360} \tag{3}$$

上式的计算结果有可能出现小数,而在实际的采集数据中,不可能出现小数。为此,可采取相应的措施进行处理,以相位相差 30° 为例,选择不同的采样频率时其对应的数据间隔如表 1 所示。

表 1 不同采样频率的数据
Table 1 Data for different sampling frequencies

f_s/kHz	N	$\delta/(^\circ)$	30° 间隔点 n
18	360	1	30
12.8	256	1.4063	21.33
12	240	1.5	20
10	200	1.8	16.67
9	180	2	15
7.2	144	2.5	12
6.4	128	2.8125	10.67
6	120	3	10
3.2	64	5.625	5.33

从表 1 中可知,采样频率为 18、12、9、7.2、6 kHz 时, 30° 数据之间的间隔为整数,而采样频率为 12.8、10、6.4、3.2 kHz 时,计算结果出现小数,从而带来计

算误差。由于实际计算中是由已知的采样数据来查找超前 30° 的数据,是根据 2 个数据的间隔来查找,因此,在选择采样频率时要考虑这一因素带来的影响。另外,如果考虑计算结果出现小数的可能性,为进一步减少计算误差,可采用线性内插的办法进行处理。

3 仿真结果及数据分析

为验证上面所提检测算法,在 MATLAB/Simulink 环境下进行仿真,并对仿真结果进行数据分析。

3.1 延时时间分析

按文献[13]的实验条件和方法,将本文检测方法与其他方法进行实验对比,进一步分析其真实的延时时间。

设被检测电压信号的数学解析表达式为:

$$u = \begin{cases} 220\sqrt{2} \sin(\omega t) & t < 0.04 \text{ s 或 } t > 0.12 \text{ s} \\ 110\sqrt{2} \sin(\omega t) & 0.04 \text{ s} \leq t \leq 0.12 \text{ s} \end{cases}$$

其中, $\omega = 2\pi f = 314 \text{ rad/s}$,为工频角频率,以下仿真情况相同。电压 u 在 0.04~0.12 s 时间内发生了幅值暂降 50% 的跳变,持续时间为 4 个工频周期。信号的采样频率为 3.2 kHz,即每个信号周期采样 64 个数据(文献[13]采样频率为 3.2 kHz)。将初始采样点序号从 0 开始编排,由于每个信号周期采样 64 个数据,8 个周期共采样数据 512 个,序号为 0 到 511。关注从暂降开始到检测出暂降幅值这段时间的数据,其实际采集数据如表 2 所示。

表 2 3.2 kHz 采样频率下不同检测方法的数据
Table 2 Data for different detection methods with 3.2 kHz sampling frequency

数据采样 序号	电压数据/V		
	本文方法	瞬时电压 dq 分解法	$\alpha\beta$ 检测法
126	310.5994	310.7025	311.1526
127	312.3537	311.2683	311.1237
128	285.0518	301.5047	310.1232
129	255.9888	289.6628	306.8960
130	225.8221	275.9623	301.4975
131	195.4702	260.6808	294.0224
132	165.1248	244.1664	284.6075
133	155.5080	226.8558	273.4349
134	155.5378	209.2998	260.7377
135	155.5639	192.1973	246.8083
136	155.5854	176.4294	232.0099
137	155.6015	162.8372	216.7925
138	155.6114	155.5214	201.7119
139	155.6149	155.5368	187.4486
140	155.6118	155.5491	174.8142
141	155.6023	155.5578	164.7192
142	155.5866	155.5627	158.0691
143	155.5654	155.5636	155.5627
144	155.5396	155.5603	155.5747

定义其实际延时时间为:

$$t_d = \frac{T}{N} (N_2 - N_1) \tag{4}$$

其中, T 为电压信号周期; N 为每个信号周期采样点数; N_1 和 N_2 分别为实际电压开始跌落和能检测出跌落时刻对应的采样点。

对照表 2, 可计算出各检测算法的实际延时时间如表 3 所示。由表中可知, 其实际采样数据计算得到的延时时间与理论分析结果是相符的, 仅存在 1 个采样点的计算误差。

表 3 3.2 kHz 采样频率下不同检测算法延时时间
Table 3 Time delays for different detection methods with 3.2 kHz sampling frequency

检测算法	延时点	实际延时/ms	理论延时/ms
本文算法	6 个采样点	1.875 0	$T/12(1.67)$
瞬时电压 dq 分解法	11 个采样点	3.437 5	$T/6(3.33)$
$\alpha\beta$ 检测法	16 个采样点	5.000 0	$T/4(5.0)$

要指出的是, 有些文献只采用采样点个数或采样周期来评估检测算法的实时性, 而没有考虑实际的采样频率, 这是不全面的。从上面的分析也可以看出, 实际延时时间不仅与采样点个数有关, 还与点和点之间的时间间隔(采样频率)有关。

3.2 “检测异常”仿真

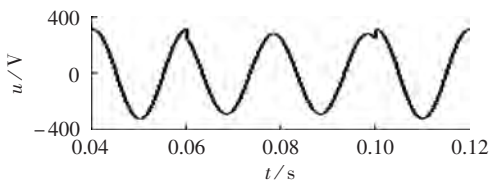
设被检测电压信号的数学解析表达式为:

$$u = \begin{cases} 220\sqrt{2} \cos(\omega t) & t < 0.06 \text{ s 或 } t > 0.10 \text{ s} \\ 198\sqrt{2} \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{6}\right) & 0.06 \text{ s} \leq t \leq 0.10 \text{ s} \end{cases}$$

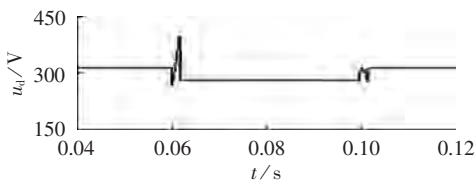
电压 u 在 0.06~0.10 s 时间内发生了幅值暂降 10%、相角 30° 的跳变, 持续时间为 2 个工频周期, 电压暂降的发生和结束都是瞬时的。

采用不同的检测方法时的电压幅值暂降仿真结果如图 2 所示。

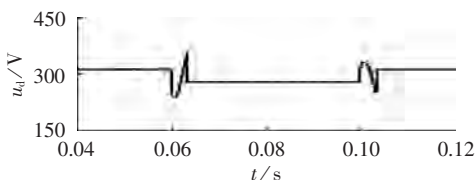
从图 2 中可以看出, 虽然暂降的幅值不大, 仅有



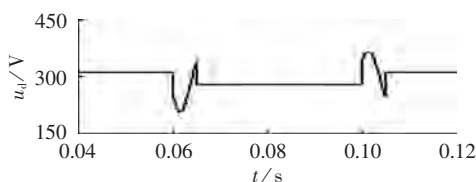
(a) 电压暂降波形



(b) 本文检测方法



(c) 瞬时电压 dq 分解法



(d) $\alpha\beta$ 检测法

图 2 相角 30° 跳变、幅值 10% 暂降的检测结果
Fig.2 Results of detection for 10% voltage-sag and 30° angle-shift

10% 的下降, 但 3 种方法都可以有效检测出电压暂降的幅值。从图中可以发现, 从信号暂降开始到被检测到暂降幅值这一延时时间内, 出现“检测异常”现象, 在暂降结束的时候同样出现“检测异常”现象, 二者时间一致, 这一现象的持续时间与采用的检测算法有关。对比发现, 采用本文提出的方法延时时间最小, 而采用瞬时电压 dq 分解法的延时时间次之, $\alpha\beta$ 检测法延时时间最长, 与理论分析完全一致。

由 dq 轴电压分量可以计算出电压暂降的相位跳变结果^[10], 其检测延时时间与幅值延时一致, 这里不再赘述。

4 结语

本文针对单相系统电压暂降检测实时性问题提出了一种新型检测方法, 可实现移相角度 30°, 检测延时仅为电网工频周期的 1/12, 实时性得到进一步提高。文中给出了具体实现办法和仿真结果, 结果表明此方法的有效性。

参考文献:

[1] 陶顺, 肖湘宁, 刘晓娟. 电压暂降对配电系统可靠性影响及其评估指标的研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 63-69.
TAO Shun, XIAO Xiangning, LIU Xiaojuan. Study on distribution reliability considering voltage sags and acceptable indices [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 63-69.

[2] 雷何, 高山, 林新春, 等. 基于包含谐波模型的加权最小二乘估计算法的电压暂降检测方法[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(9): 36-41.
LEI He, GAO Shan, LIN Xinchun, et al. Voltage sag detection based on weighted least-squares estimation algorithm with harmonic models [J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(9): 36-41.

[3] 彭春萍, 陈允平, 孙建军. 动态电压恢复器及其检测方法的探讨[J]. 电力自动化设备, 2003, 23(1): 68-71.
PENG Chunping, CHEN Yunping, SUN Jianjun. Study of dynamic voltage restorer and its detecting method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23(1): 68-71.

[4] 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.

[5] 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 Zhiping. A survey on detection algorithm and restoring strategy of dynamic voltage restorer[J]. Power System Technology, 2006, 30(6): 23-29.
- [6] 冯小明, 杨仁刚. 动态电压恢复器的形态学- dq 变换综合检测算法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(11): 193-198.
- FENG Xiaoming, YANG Rengang. A novel integrated morphology- dq transformation detection algorithm for dynamic voltage restorer[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(11): 193-198.
- [7] 薛尚青, 蔡金锭. 三相电压跌落检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 91-97.
- XUE Shangqing, CAI Jinding. An advanced detection method for three-phase voltage sag[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 91-97.
- [8] BAE B, JEONG J, LEE J, et al. Novel sag detection method for line-interactive dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(2): 1210-1211.
- [9] MIDDLEKAUFF S W, COLLINS E R J. System and customer impact: considerations for series custom power devices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(1): 278-282.
- [10] 肖湘宁, 徐永海, 刘昊. 电压凹陷特征量检测算法研究[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(1): 19-22.
- XIAO Xiangning, XU Yonghai, LIU Hao. Research on the detection method of voltage sag characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(1): 19-22.
- [11] 杨亚飞, 颜湘武, 楼尧林. 一种新的电压骤降特征量的检测方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 41-44.
- YANG Yafei, YAN Xiangwu, LOU Yaolin. A new method to detect voltage sag characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 41-44.
- [12] 瞿硕, 黄纯, 江亚群, 等. DVR电压暂降检测新方法[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 234-239.
- QU Shuo, HUANG Chun, JIANG Yaquin, et al. A new detection method of voltage sag applied in DVR[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 234-239.
- [13] 曹立志, 王小君, 和敬涵, 等. 基于DSP的电压暂降检测方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(13): 78-83.
- CAO Lizhi, WANG Xiaojun, HE Jinghan, et al. Research of voltage sag detection methods based on DSP[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(13): 78-83.

作者简介:



杨达亮

杨达亮(1976—),男,广西桂平人,副教授,博士,研究方向为主动配电网电能质量及电能转换关键技术(E-mail: yangdl@gxu.edu.cn);

卢子广(1963—),男,广西贵港人,教授,博士研究生导师,研究方向为分布式发电和运动控制;

杭乃善(1949—),男,广西南宁人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统稳定和电力电子技术应用。

Method and realization of real-time single-phase voltage sag detection

YANG Daliang, LU Ziguang, HANG Naishan

(College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: A method of voltage sag detection for single-phase system is presented, which forms the fictitious three-phase voltage signals based on the single-phase voltage signals. Based on the sampled discrete data of single-phase voltage signals, the fictitious three-phase voltage signals are created by 30° phase-angle shift according to the phasor relationship among phase voltages. The time delay of the proposed detection method is just $1/12$ grid period and the theoretical time delay is 1.67 ms. Compared with the 3.33 ms delay of the instantaneous voltage dq conversion method and the 5.0 ms delay of the $\alpha\beta$ detection method, it has better real-time performance. The interval of discrete data is set according to 30° phase-angle shift. The sampling frequency is analyzed in detail for improving the detection accuracy. The correctness and effectiveness of the proposed method are verified by the results of detection delay simulation and “detection abnormality” simulation.

Key words: voltage sag; power quality; electric power systems; voltage control; computer simulation