

改进的电压凹陷特征量实时检测方法

袁川, 杨洪耕

(四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 该文提出了一种改进的电压凹陷特征量实时检测方法, 利用待测的电压量作为 u 轴分量, 用待测量和延时量的代数运算结果构造 u_d 轴分量, 通过 u_d - dq 变换和低通滤波得到凹陷特征量, 比延时 60° 的方法的构造过程简单、计算量小; 改进方法的延时可以和采样步长准确对应, 在现有硬件条件下能够大大减小检测凹陷特征量的延时, 最小延时可以达到补偿过程中的采样步长, 在每个周期的采样点足够多时, 可以认为这种方法没有延时, 从而提高了补偿的实时性和精确性, 适合工程应用。仿真结果证明了这种方法的有效性。

关键词: 电压凹陷; u_d - dq 变换; 实时检测

中图分类号: TM714 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)22-0057-04

0 引言

电压凹陷是目前电力系统中最严重的电能质量问题之一。电压凹陷是指在系统频率时电压有效值 (RMS) 瞬时减小到额定值的 10% ~ 90% 的范围内, 持续时间从半个工频周期到几秒钟^[1]。引起电压凹陷的原因有短路故障、大型电动机启动和再加速等^[2]。随着控制和自动化过程中对电压凹陷敏感的电力电子设备的激增, 电压凹陷导致生产过程中断的范围不断扩大, 给工业用户带来了巨大的经济损失。因此对电压凹陷进行补偿, 确保敏感负荷不受其干扰就成为越来越受关注的问题^[3,4]。动态电压恢复器 (DVR) 是比较有效的凹陷补偿装置, 在对凹陷进行补偿时, 需要得到电压凹陷的特征量, 即起止时刻、电压幅值、电压相位, 而实时性成为确定这些量的关键问题^[5], 有很多确定特征量的方法^[6], 传统的有效值、峰值、基波计算法的实时性较差, 且得不到电压相位, 基于 dq 变换的方法^[5]能检测单相电压的特征量, 但仍需要 60° 的延时。

本文提出一种基于 u 坐标系到 dq 坐标系的瞬时变换的改进检测方法, 能够大大减小检测凹陷特征量的延时, 延时可以和采样步长准确对应, 适合工程应用。它的最小延时可以达到补偿过程中的采样步长, 在每个周期的采样点足够多时, 可以认为这种方法没有延时, 从而提高了补偿的实时性和精确性。并且这种方法用已知量构造未知量的方法比延时 60° 的方法简单, 检测算法的计算量比延时 60° 的方法小。

1 u_d - dq 变换单相检测原理^[7]

设待测电压的瞬时值表达式为:

$$u = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \phi) \quad (1)$$

将其作为 u 轴分量, 并将其延时 90° 作为 u_q 分量, 可以得到

$$u_q = u = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \phi) \quad (2)$$

$$u_d = \sqrt{2}U \sin(\omega t + \phi - 90^\circ) = -\sqrt{2}U \cos(\omega t + \phi) \quad (3)$$

利用 u 坐标系到 dq 坐标系的变换, 即^[8]:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t) & -\cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u \\ u_q \end{bmatrix} \quad (4)$$

将式 (2)、(3) 中的 u 分量代入式 (4) 可以得到

$$u_d = \sqrt{2}U \sin(\phi) \quad (5)$$

$$u_q = \sqrt{2}U \cos(\phi) \quad (6)$$

由式 (5)、(6) 即可以求出待测电压相量的幅值和相位。实际检测时 u 中通常含有畸变分量和高频分量, 在进行 u_d - dq 变换时这些畸变分量会变成交流分量, 通过低通滤波器后即可得到式 (5)、(6) 中的直流分量。

2 改进的 u_d - dq 变换检测原理

第 1 节中介绍的 u_d - dq 变换检测原理利用待测电压延时构造出 u 坐标系中的分量进行 dq 变换从而得到凹陷的特征量, 至少需要 $1/4$ 个周期的延时。要提高检测方法的实时性, 关键就是要尽量减小利用待测电压构造 u_q 轴分量的延时。

如图 1 所示, 图中的 U 为待测的电压相量, U_d 、

U 分别为 U_x 、 U_y 轴分量的相量。要由 U_x 轴分量得到 U_y 轴分量,可以通过 U_x 轴和 U_y 轴间夹角的平分线处的电压相量得到,同样 U_y 轴和 U_x 轴间夹角的平分线处的电压相量可以通过它和 U_x 轴间夹角的平分线处的电压相量得到,其推导过程如下:

$$U_x + U_y = 2 \cos \left(\frac{90^\circ}{2} \right) \times U \left(\phi - \frac{90^\circ}{2} \right)$$

$$U_x + U_y \left(\phi - \frac{90^\circ}{2} \right) = 2 \cos \left(\frac{90^\circ}{2^2} \right) \times U \left(\phi - \frac{90^\circ}{2^2} \right)$$

$$U_x + U_y \left(\phi - \frac{90^\circ}{2^{n-1}} \right) = 2 \cos \left(\frac{90^\circ}{2^n} \right) \times U \left(\phi - \frac{90^\circ}{2^n} \right)$$

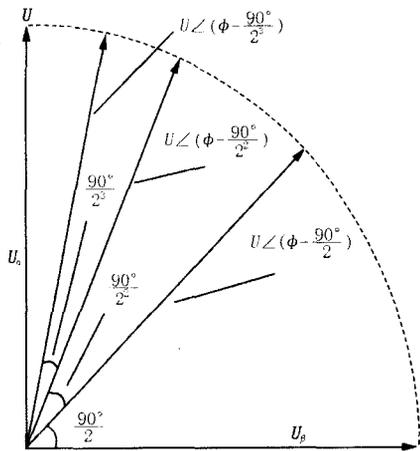


图 1 改进检测方法的原理图

Fig 1 Schematic diagram of the advanced test method

设 $U_n = U \left(\phi - \frac{90^\circ}{2^n} \right)$, 则可以得到

$$U_{n-1} = 2 \cos \left(\frac{90^\circ}{2^n} \right) U_n - U \quad (7)$$

最后可以得到

$$U_x = U_0 = \left[2^n \prod_{i=1}^n \cos \left(\frac{90^\circ}{2^i} \right) \right] U_n - \left\{ 1 + \sum_{j=1}^{n-1} \left[2^j \cos \left(\frac{90^\circ}{2^j} \right) \right] \right\} U \quad (8)$$

U_x 在 $n=1$ 时按式 (7) 计算, $n=2, 3, \dots$ 时按式 (8) 计算, 式 (8) 用 U_x 和 U_n 得到 U_x , U_n 是 U_x 延时 $90^\circ/2^n$ 得到的, 检测中的最小 $90^\circ/2^n$ 由一个周期中的采样点决定, 比如一个周期中的采样点为 128, 则采样点间的时间间隔为 $0.02/128$ s, 相位间隔为 $360^\circ/128$, 即检测中的延时最小可取为 $90^\circ/2^5$, $n=5$, 最小延时就是 $1/128$ 个工频周期。笔者开始曾想过在文献 [5] 提出的利用单相延时 60° 构造三相进行检测的基础上做相同的改进, 即对 60° 进行逐次等分以减少延时, 但由于硬件上实现时采样点一般

都是 2 的 n 次方倍, 对 60° 进行多次等分后需要的延时不能与采样点对应, 误差会很大, 只有大大提高采样点数才能减小误差, 这样又会大大增加硬件成本, 甚至不能实现。而用 90° 等分则能让最小延时和采样间隔准确对应, 在不增加硬件成本的前提下可以大大减小延时, 这样使这种方法更适合于工程实际应用。在一个周期采样点为 128 的情况下最小延时为 $1/128$ 个工频周期, 可以认为没有延时。将式 (8) 写成瞬时的形式如下

$$u = \left[2^n \prod_{i=1}^n \cos \left(\frac{90^\circ}{2^i} \right) \right] u_n - \left\{ 1 + \sum_{j=1}^{n-1} \left[2^j \cos \left(\frac{90^\circ}{2^j} \right) \right] \right\} u \quad (9)$$

其中: $u_n = \sqrt{2} U \sin(\omega t + \phi - 90^\circ/2^n)$, 式 (9) 看上去很复杂, 实际上在设计硬件时根据一个周期的采样点数可以确定 n 的最大值 N , 选定一个 $n \leq N$, 从而式 (9) 中 u_n 和 u 的系数就可以确定, 式 (9) 即是简单的算术运算。例如一个周期采样点数为 128, 则 $N=5$, 选定 $n=N$, 则可将式 (9) 写为:

$$u = 20.380 u_5 - 20.356 u \quad (10)$$

其中: $u_5 = \sqrt{2} U \sin[\omega(t - 0.02/128) + \phi]$

3 仿真分析

由于实际的电压凹陷多为单相事件^[5], 因此本文利用 Matlab 对单相凹陷的检测和补偿进行仿真, 仿真中设定系统电压为 220 V, 频率为 50 Hz, 凹陷持续时间为 0.06~0.12 s, 凹陷深度为 40%, 相位跳变为 -30° 。DVR 有多种控制方法, 为了简单清楚起见, 本文将凹陷电压补偿回凹陷前电压的幅值和相位。仿真时设定一个周期的采样点为 128 个, 低通滤波器选用 2 阶、截止频率为 100 Hz 的 Butterworth 滤波器。做了文献 [5] 中延时 60° 的检测方法 (下称方法 1) 和本文中提出的检测方法 (设定延时为 $0.02/128$, 即采用式 (10) 检测, 下称方法 2) 的结果对比。

3.1 凹陷电压无畸变时

当凹陷电压无畸变时, 凹陷电压波形如图 2 所示。

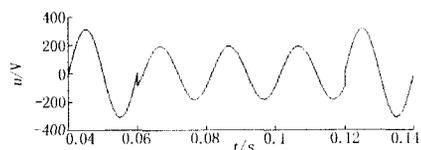


图 2 无畸变的凹陷电压波形

Fig 2 Voltage sag waveform without distortion

图 3、4 分别为检测的电压幅值和相位,其中实线、虚线分别表示方法 1、2 的检测结果(后面的图如果没有特别说明,则标注方法与图 3 相同)。由图 3 可知,在凹陷开始、结束时方法 2 检测的幅值响应更快,更早达到稳态,更能准确地反映电压幅值的变化,在凹陷的稳态期间两种方式的检测结果一致。仿真时方法 1、2 检测到的凹陷开始时间分别为 0.0617 s、0.0604 s,凹陷结束时间分别为 0.1236 s、0.1213 s,可见采用方式 2 检测能够使 DVR 更及时对凹陷进行补偿并在电压恢复后减少不必要的补偿。

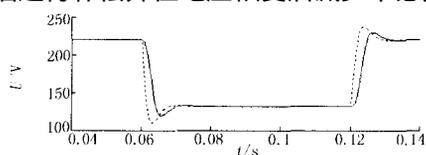


图 3 检测到的电压幅值

Fig 3 Detected voltage magnitude

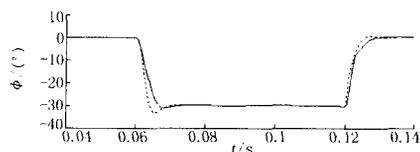


图 4 检测到的电压相位

Fig 4 Detected voltage phase

图 5 为用方法 2 检测补偿后的结果。由图可以看出凹陷得到了及时有效的补偿。

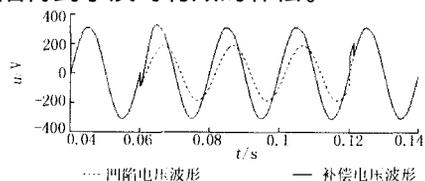


图 5 凹陷电压和补偿电压波形

Fig 5 Waveform of sag voltage and compensated voltage

3.2 凹陷电压有畸变时

凹陷期间电压有畸变时,电压波形如图 6 所示,利用方法 1、2 检测出的电压幅值和相位分别如图 7、8 所示,由图可以看出,在凹陷期间方法 2 检测的结果波动比方法 1 大,这是因为方法 2 在利用式 (9) 构造 u 时 u_n 和 u 的系数通常都很大,这样可能对谐波成分有放大的作用,造成了检测误差,解决的办法是减小式 (9) 中 n 的值或降低低通滤波器的截止频率,但这都会增大延时。由图 7 可以看出此时利用方法 2 检测的凹陷起止时间仍然比方法 1 准确,因此凹陷期间电压有畸变时可以利用方法 2 检测凹陷起止时间和进行凹陷开始时暂态过程中的补

偿,利用方法 1 进行凹陷稳态期间的补偿,即将两种方法结合起来。方法 2 比方法 1 容易受谐波的干扰,这还有待于进一步的研究改进。

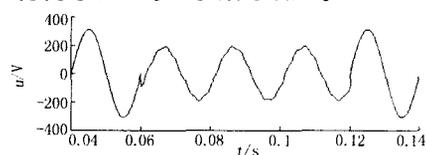


图 6 有畸变的凹陷电压波形

Fig 6 Voltage sag waveform with distortion

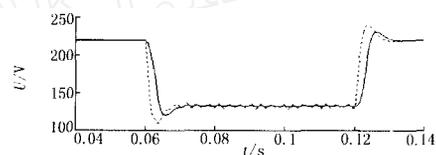


图 7 检测到的电压幅值

Fig 7 Detected voltage magnitude

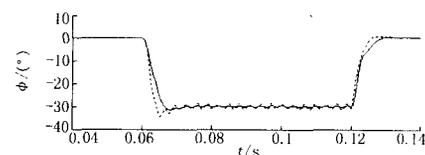


图 8 检测到的电压相位

Fig 8 Detected voltage phase

3.3 电压有高频振荡时

高频振荡变化快、时间短,难以利用串联补偿装置进行有效补偿,因此,对这样的扰动电压,应控制补偿装置不进行补偿^[5]。图 9 为有高频振荡的电压波形,图 10 为利用方法 1、2 检测到的电压幅值,可以看出方法 1、2 都能避免高频振荡的干扰,检测的电压幅值只有很小的波动,只要设定了一定的凹陷补偿阈值就可以避免补偿装置的误动作。

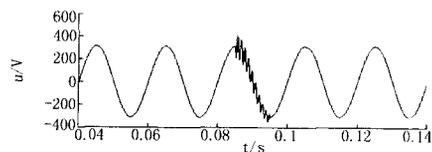


图 9 有高频振荡的电压波形

Fig 9 Voltage waveform with high frequency oscillation

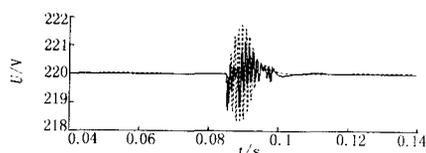


图 10 检测到的电压幅值

Fig 10 Detected voltage magnitude

4 结论

本文提出了一种改进的电压凹陷特征量实时检测方法,利用待测的电压量作为 α 轴分量,再用式(9)构造轴分量,通过 α - dq 变换和低通滤波得到凹陷特征量,构造过程简单,计算量小;延时能与采样步长准确对应,适合工程应用,能够大大减小检测凹陷特征量的延时,最小延时可以达到补偿过程中的采样步长,在每个周期的采样点足够多时,可以认为这种方法没有延时,从而提高了补偿的实时性和精确性。改进方法的不足之处是当电压波形有畸变时稳态检测效果没有延时 60 的方法好,有一定的波动,这是需要进一步深入研究改进的地方。

参考文献:

- [1] ZHAN Chang-jiang, Anulampalan A, et al Dynamic Voltage Restorer Based on 3-dimensional Voltage Space Vector PWM Algorithm [A]. Power Electronics Specialists Conference, PESC IEEE 32nd Annual Canada: 2001. 533-538
- [2] 吴玉蓉,刘会金,孙丽萍,等. 电能质量问题中的电压跌落 [J]. 电力建设, 2002, 23(8): 64-67.
WU Yu-rong, LU Hui-jin, SUN Liping, et al Voltage Sags in the Problems of Power Energy Quality [J]. Electric Power Construction, 2002, 23(8): 64-67.
- [3] Vilathgamuwa D M, Wijekoon H M. Control and Analysis of a New Dynamic Voltage Restorer Circuit Topology for Mitigating Long Duration Voltage Sags [A]. Industry Applications Conference, 37th IAS Annual Meeting Pennsylvania: 2002. 1105-1112
- [4] Vilathgamuwa D M, Perera A A D R. Voltage Sag Compensation with Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(3): 928-936
- [5] 肖湘宁,徐永海,刘连光. 考虑相位跳变的电压凹陷动态补偿控制器研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1): 64-69.
XIAO Xiang-ning, XU Yong-hai, LU Lian-guang Research on Mitigation Methods of Voltage Sag with Phase-Angle Jump [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(1): 64-69.
- [6] 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 Xiang-ning, XU Yong-hai, LU Hao Research on the Detection Method of Voltage Sag Characteristics [J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(1): 19-22.
- [7] 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.
- [8] 孙树勤. 无功补偿的矢量控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.
SUN Shu-qin Vector Control of Reactive Power Compensation [M]. Beijing: China Electric Power Press, 1998.

收稿日期: 2005-03-10

作者简介:

袁川(1980-),男,硕士研究生,研究方向为有源滤波器和动态电压恢复器的检测与控制; E-mail: eliteyuan@163.com

杨洪耕(1949-),男,博士,教授,多年从事电能质量监测和控制技术方面的教学与研究工作。

The advanced method of real-time detection of voltage sag characteristics

YUAN Chuan, YANG Hong-geng

(Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: This paper proposes an advanced method of real-time detection of voltage sag characteristics. It uses voltage to be detected as voltage component of axis. It utilizes the voltage and its delayed value to construct voltage component of axis. Thus voltage sag characteristics can be got through α - dq transformation and low-pass filter. The method is simpler to construct unknown value and has less computation than method which has 60° delay. Delay of the method can be exactly corresponded to the sample step. Therefore, advanced method can reduce delay of the detection of sag characteristics greatly under current hardware condition. The smallest delay of the method equals to sample step. The method can be considered as real-time if the sample points are enough more. As a result, the method improves the real-time quality and precision of compensation. Simulation results illustrate the effectiveness of the method.

Key words: voltage sag; α - dq transformation; real-time detection