

动态电压恢复器检测算法的研究与仿真*

郝晓弘, 房善新, 陈 伟

(兰州理工大学 电信学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 介绍了动态电压恢复器的基本工作原理和现有的电压暂降检测方法, 在此基础上提出了一种基于最小二乘法的检测算法。该算法能够在电网电压出现三相不平衡暂降时, 快速分离出基波正序分量, 并结合补偿策略得到所需的电压补偿量, 实时性较强。

关键词: 电压暂降; 动态电压恢复器; 检测方法; 最小二乘法

中图分类号: TP2

文献标识码: A

Research and emulation of detection algorithm of dynamic voltage restorer

HAO Xiao Hong, FANG Shan Xin, CHEN Wei

(College of Electrical and Information Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: The paper introduced the ground principle of work and present voltage sag detection methods of dynamic voltage restorer. On this basis this paper proposed a sort detection method based on the least-squares method. It can separate from the fundamental wave positive-sequence and get the required voltage compensation to link the compensation strategy when the network voltage appeared the three phase unbalance voltage sag, the real-time character quite better.

Key words: voltage sag; dynamic voltage restorer; detection method; least-squares method

电压凹陷(Voltage sag/dip)也称电压暂降,是指供电电压有效值在短时间内突然下降又回升恢复的现象。电压中断是局限于某一个地区或区域,电压凹陷虽然没有电压中断严重,但其发生得更为频繁,电压凹陷能由数百公里以外的输电系统中的故障引起,由此对敏感负荷造成的危害与电压中断是相同的,甚至更严重^[1]。目前动态电压恢复器(DVR(Dynamic Voltage Restorer))以良好的动态性能和容量上的相对优势已成为治理动态电压暂降最经济、有效的装置之一。

在 DVR 的补偿过程中,需要实时地检测出电压暂降的幅值、起始时刻和可能随之出现的相角跳变,因此电压暂降检测成为 DVR 控制系统的一个关键环节。目前应用最多的检测方法有电压峰值检测法、傅里叶变换法、小波变换法、dq 变换法和 pqr 瞬时功率法^[2-6]。其中电压峰值法容易受噪声的干扰,需要有半个周波的历史数据,满足不了实时检测的需求;傅里叶变换法存在一

个周波的延迟,因而无法用于实时检测中;小波变换法计算量大,算法复杂且存在时延问题,不易在工程上实现;dq 和 pqr 变换法需要使用低通滤波器,提取电压正序基波,低通滤波器的时延特性给电压跌落的实时检测带来了困难,为了选择合适的低通滤波器,需要在滤波效果和时延两方面进行综合考虑。本文针对实际电网中存在的电压三相不平衡现象以及传统检测方法中存在的问题,提出一种基于最小二乘法的检测方法,利用最小二乘算法在三相不平衡系统中分离出正序分量,并利用完全电压补偿策略求出电网电压畸变需要的补偿量。由于该检测方法没有使用低通滤波器,故动态性能不受滤波延迟的影响,可以很好地满足动态电压恢复器对实时性的要求。

1 DVR 的基本工作原理

动态电压恢复器(DVR)是一种串联型补偿装置,是目前解决电压暂降最有效的电力电子装置。它串联在电源和敏感负荷之间,负荷正常运行时,DVR 被旁路,由系统提供电压;当发生电压凹陷时,DVR 可以在 ms 级

* 基金项目:甘肃省自然科学基金项目(0809RJZA006);甘肃省科技攻关项目(GS044-A52-001-24)

技术与方法 Technique and Method

内对电压凹陷进行有效补偿。例如,图 1 中 C 点发生短路故障时,母线 D 就会发生电压暂降。此时 DVR 的检测电路检测出电网电压所需的补偿量,由控制电路控制逆变器电力电子开关的开通与关断,逆变器的输出经滤波后向电网中注入补偿电压,从而保证敏感负荷端 B 点的电压保持在正常水平。

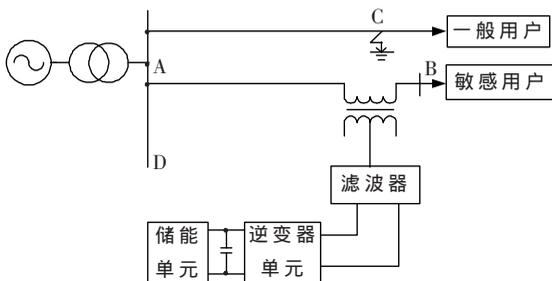


图 1 DVR 在电力系统中的配置图

2 检测算法

设一个三相系统电压的基波正序分量为:

$$\begin{cases} u_a = \sqrt{2} U \cos(\omega t + \varphi) \\ u_b = \sqrt{2} U \cos(\omega t + \varphi - 2\pi/3) \\ u_c = \sqrt{2} U \cos(\omega t + \varphi + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

将电压信号从 a-b-c 三相坐标系变换到 α-β 两相坐标系得:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & \sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \varphi) \\ \sin(\omega t + \varphi) \end{bmatrix} \quad (2)$$

再将 α-β 坐标系中的量变换到 d-q 旋转坐标系中得:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{3} U \begin{bmatrix} \cos \varphi \\ \sin \varphi \end{bmatrix} \quad (3)$$

由式(3)可知,如果可以得到 u_d 和 u_q 的值,就可以得到基波正序分量的有效值和相位角:

$$U = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \quad (4)$$

$$\varphi = \arctan \frac{u_q}{u_d} \quad (5)$$

对于三相不平衡输入电压,含有零序和负序分量。其中的零序分量经过 a-b-c 三相坐标系到 α-β 两相坐标系的变换后为零,因此对其不予考虑。可将实际的三相不平衡电压分为正序和负序之和。

$$U_{\text{输入}} = U_{\text{正}} + U_{\text{负}} \quad (6)$$

对式(6)两边进行 dq 变换,并乘旋转矩阵的逆矩阵,可以看出 $U_{\text{输入}}$ 经变换后的值,实际为实际输入电压从 a-b-c 三相坐标系到 α-β 两相坐标系的变换后的值,通过实际数据采样得到其具体的值,右边为旋转矩阵的逆矩阵和正序 dq、负序 dq 分量的乘积。

《微型机与应用》2010 年第 7 期

建立反应上述关系的公式:

$$y(t_i) = H(t_i)x(t_i) \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} \cos(\omega t) & \sin(\omega t) & \cos(\omega t) & \sin(\omega t) \\ -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) & -\sin(\omega t) & \cos(\omega t) \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} U_d^p & U_q^p & U_d^n & U_q^n \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

从而可得最小二乘法的残差方程为:

$$J[x(t_i)] = \sum_{j=0}^i \lambda (y(t_j) - H(t_j)x(t_j))^T \times (y(t_j) - H(t_j)x(t_j)) \quad (9)$$

其中 λ 为遗忘系数,根据加权最小二乘法的递推公式可得以下方程:

$$\begin{aligned} \hat{x}(t_i) &= \hat{x}(t_{i-1}) + k(t_i)[y(t_i) - H(t_i)] \\ r(t_i) &= \lambda I + H(t_i)p(t_{i-1})H(t_i)^T \\ k(t_i) &= p(t_{i-1})H(t_i)^T r(t_i)^{-1} \\ p(t_i) &= \lambda^{-1} p(t_{i-1}) - \lambda^{-1} p(t_{i-1}) \times H(t_i)^T r(t_i)^{-1} H(t_i) p(t_{i-1}) \end{aligned} \quad (10)$$

式中 $\hat{x}(t_i)$ 为 $x(t_i)$ 的估计值,方程的初始值 $x(t_0) = 0$, $p(t_0) = \pi_0 I$,其中 π_0 是一个给定的初始误差。从这些递推公式就可以求出 $\hat{x}(t_i)$ 。从而得到估计的幅值和相角为:

$$U = \frac{\sqrt{3}}{3} \sqrt{(\hat{U}_d^p)^2 + (\hat{U}_q^p)^2} \quad (11)$$

$$\varphi = \arctan(\hat{U}_q^p / \hat{U}_d^p) \quad (12)$$

实现了正序和负序的分离,从而可以求出电压暂降的特征值(起止时刻、幅值、相位跳变)。并对求出的正序分量进行反变换,得到电网电压的基波正序分量,根据完全电压补偿策略,由参考电压信号与得出的基波正序分量比较,从而得出电网电压的补偿量波形。整个检测算法原理如图 2 所示。

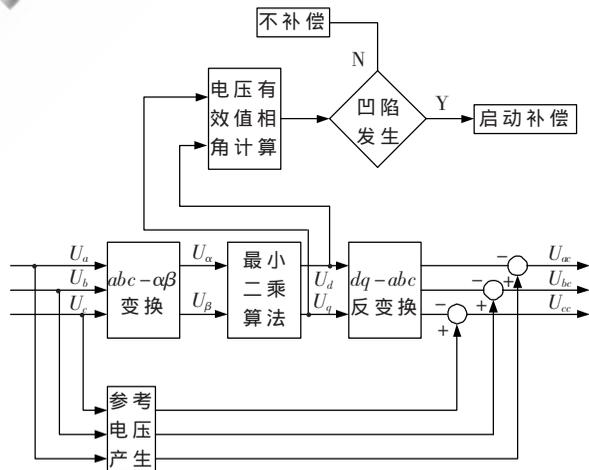


图 2 三相 DVR 补偿量检测算法原理

3 最小二乘法原理

假定变量 y 与 n 维的变量 $X = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ 是线性关系,即:

$$y = \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \dots + \theta_n x_n \quad (13)$$

$\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ 是常数参数集,假定 θ_i 是未知的,并且希

欢迎网上投稿 www.pcachina.com 81

技术与方法 Technique and Method

望通过不同时刻对 y 及 X 的观测值来估计出它们的数值。假设在 t_1, t_2, \dots, t_n 时刻对 y, X 的观测值序列已经被获得, 并且用 $y(i)$ 及 $x_1(i), x_2(i), \dots, i=1, 2, \dots, m$ 来表示这些被测数据之间的关系。

$$y(i) = \theta_1 x_1(i) + \theta_2 x_2(i) + \dots + \theta_n x_n(i) \quad (14)$$

其中 $i=1, 2, \dots, m$ 把方程整理为矩阵形式:

$$Y = X\theta \quad (15)$$

其中 $Y = [y(1) \ y(2) \ \dots \ y(m)]^T$

为了能估计出 n 个参数 θ_i , 必须要求 $m \geq n$ 且 X 的逆矩阵是存在的。对于 θ 的求取一般都用最小误差平方法。

现在定义误差矢量 $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)^T$ 并令 $\hat{\theta}$ 表示 θ 的估计值, 选择一组 $\hat{\theta}$, 使得指标函数为:

$$\varepsilon = Y - X\hat{\theta} \quad (16)$$

$$J = \sum_{i=0}^m \varepsilon_i = \varepsilon^T \varepsilon \quad (17)$$

J 为最小的值, 即要进行最小化。将 J 表示为:

$$J = (Y - X\hat{\theta})^T (Y - X\hat{\theta}) = Y^T Y - \hat{\theta}^T X^T Y - Y^T X \hat{\theta} + \hat{\theta}^T X^T X \hat{\theta} \quad (18)$$

将 J 对 θ 求微分, 并令其等于 0, 则可得使 J 趋于最小的估计 $\hat{\theta}$, 解后为:

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T Y \quad (19)$$

这个结果就称为 θ 的最小二乘估计。 ε 称为残差。

4 对该检测算法的仿真分析

利用 MATLAB7.0 对三相电压发生不平衡暂降的情况, 采用本文所提出的检测算法进行仿真。设跌落前系统电压三相对称平衡, 幅值为 220 V, a 相电压相角为 0, 在 0.02 s~0.07 s 内发生了三相不平衡电压暂降, a 相电压幅值跌落至 176 V, 相角跳变为 $\pi/4$, b 相电压幅值跌落至 154 V, 相角跳变为 $-5\pi/9$, c 相电压幅值跌落至 132 V, 相角跳变为 $2\pi/3$ 。图 3 为系统电压波形, 图 4 为用本文提出的检测算法得到的基波正序幅值和相角的变化波形, 图 5 为用完全电压补偿策略得到的补偿电压波形。

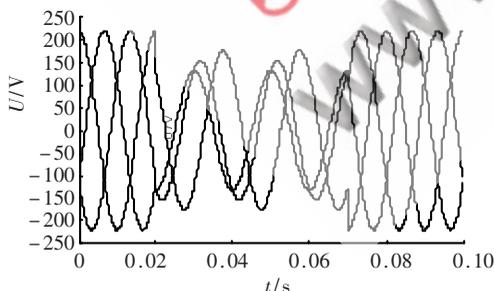


图3 系统电压波形

本文提出了一种三相不平衡电压暂降的检测算法, 通过对三相电压进行变换后, 经由最小二乘算法得到电压的基波正序分量, 进而得到电压暂降的幅值、相角等参数, 同时利用完全电压补偿策略求出了 DVR 所需的补偿信号。该方法原理简单, 物理意义清晰。仿真结果表

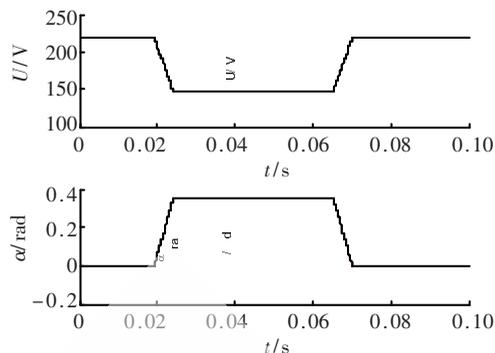


图4 基波正序幅值和相角变化

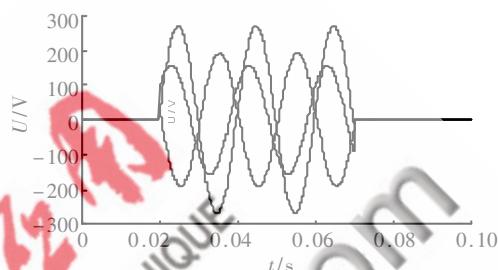


图5 补偿电压波形

明, 该方法具有很好的实时性, 满足了三相电压不平衡暂降检测的需要, 有望用于动态电压恢复器中。

参考文献

- [1] 肖湘宁, 徐永海, 刘昊. 电压凹陷特征量检测算法[J]. 电力自动化设备, 2002, 22(1):19-22.
- [2] 李天云, 赵妍, 李楠, 等. 基于 HHT 的电能质量检测新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(17):52-56.
- [3] SONG H S, NAM K. Instantaneous phase angle estimation algorithm under unbalanced voltage sag conditions[J]. IEEE Proceedings of Generation Transmission and Distribution, 2000, 147(6):409-415.
- [4] PARSONS A C, MACK W G, EDWARD J P. A Wavelet-based Procedure for Automatically Determining the Beginning and End of Transmission System Voltage Sags[C]. IEEE Proceedings of PES Winter Meeting, New York, USA, 1999, 2:1310-1315.
- [5] CHANG Jiang Zhan, FITZER C, RAMACHAN D V K, et al. Software phase locked loop applied to dynamic voltage restorer [C]. IEEE Proceedings of PES Winter Meeting, Columbus, USA, 2001, 2:1033-1038.
- [6] 肖湘宁, 徐永海, 刘连光. 考虑相位跳变的电压凹陷动态电压补偿控制器研究 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(1):64-69.

(收稿日期: 2009-09-15)

作者简介:

郝晓弘, 男, 1965 年生, 教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统自动化、电能质量分析与控制。

房善新, 男, 1983 年生, 硕士, 主要研究方向: 电力系统自动化、电力电子在电力系统中的应用。