

基于 $p-q-r$ 变换和数学形态滤波的电压暂降检测算法

丁 宁,徐永海,肖湘宁

(华北电力大学 电气与电子工程学院,北京 102206)

摘要: 针对适用于动态电压恢复器的电压暂降检测进行了分析研究,提出一种基于 $p-q-r$ 变换和数学形态滤波的快速检测方法。利用单相电压构造三相系统,通过坐标变换将电压的基波分量转换成直流分量,通过数学形态滤波器对非直流量进行滤波,得到相应的暂降幅值和相位跳变。由于改进的方法中用参考电压代替了 PLL 环节,从而减少锁相过程中的延时以及误差;同时利用数学形态滤波器代替传统的低通滤波器,基于该方法的滤波主要是布尔运算和少量的加减运算,与一般低通滤波器相比,计算简单且延时短。仿真结果证明了该方法的快速性和有效性。

关键词: 电压暂降; 检测; $p-q-r$ 理论; 数学形态滤波器

中图分类号: TM 714

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2011)03-0089-05

0 引言

电压暂降的幅值、持续时间和相位跳变是标称电压暂降的最重要的 3 个特征量。现有的检测特征量的方法有很多,但仍存在一定问题。有效值法、峰值电压法、基波分量法、基于无功功率理论的 $dq0$ 变换方法、小波分析及 Dyn 测度等方法不能计算相位跳变^[1-5],无法直接应用在动态电压恢复器(DVR)的电压暂降补偿上;单相电压变换平均值法、傅里叶算法在检测时存在一个周期的延时,实时性较差;缺损电压法由于其方法固有特点,实际应用较困难^[6];动态预测法中存在求导运算,而电力系统中的电压、电流并非理想正弦信号,求导结果很容易产生误差,影响检测结果^[7];瞬时 $d-q$ 变换方法及其改进算法应用

较广泛,但由于其普遍含有锁相环(PLL)和低通滤波器,降低了系统的响应速度,影响了检测的实时性^[8-10]。

本文提出一种基于 $p-q-r$ 理论的方法,用单相电源构造三相系统,并通过坐标变换将电源的基波分量转换成直流分量进行计算,能够快速得到暂降幅值及相位跳变。计算过程中参考电压实时获得,省去了 PLL 环节。由于 $p-q-r$ 理论算法简单,实现方便,在统一电能质量调节器中已有一定的应用^[11],也有文献提出将其应用在电压暂降的检测中^[12],但由于其不存在滤波的功能,无法准确提取电压中的基波含量,需将其与优良的滤波器结合,达到良好的检测效果。传统方法中采用的低通滤波器,滤波效果较好,但是存在一定程度的时间延迟。文献[13]将数学形态滤波器和低通滤波器进行了对比,证明数学形态滤波器在精度和实时性上都有一定的优势。本文首次将 $p-q-r$ 理论和数学形态滤波器相结合,能够将传统电压暂降检测方法中的 PLL 和低通滤波器引起的误差和延时降低,大幅提高电压暂降的检测速度,从而提高 DVR 的补偿效果。

收稿日期:2010-05-15;修回日期:2010-12-30

基金项目:“十一五”国家科技支撑计划项目(2007BAA12B03)
Project supported by the Scientific and Technical Supporting Programs of China during 11th Five-year Plan Period (2007BAA12B03)

1 理论分析

1.1 $p-q-r$ 理论^[14]

与 $d-q$ 变换方法相同,利用三相电压波形相同、相位相差 120° 的特点,在单相系统中构造虚拟三相电压。

假设系统中 a 相电压为 $u_a = u_1 + u_h$, 其中 u_1 为基波电压, u_h 为电压的畸变成分。以 a 相电压为参考, 延时 60° 得到 $-u_c$, 根据 $u_b = -u_a - u_c$ 求得 u_b 。

$a-b-c$ 坐标系上的电压可以通过式(1)转换到 $\alpha-\beta-0$ 坐标系上。

$$\begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

通过 $\alpha-\beta-0$ 坐标系上的参考电压 $u_{\alpha\text{REF}}$ 和 $u_{\beta\text{REF}}$, 可将 $\alpha-\beta-0$ 坐标系上的电压变换到 $p-q-r$ 坐标系上, 即

$$\begin{bmatrix} u_p \\ u_q \\ u_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \frac{u_{\alpha\text{REF}}}{u_{\alpha\beta\text{REF}}} & \frac{u_{\beta\text{REF}}}{u_{\alpha\beta\text{REF}}} \\ 0 & -\frac{u_{\beta\text{REF}}}{u_{\alpha\beta\text{REF}}} & \frac{u_{\alpha\text{REF}}}{u_{\alpha\beta\text{REF}}} \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中, $u_{\alpha\beta\text{REF}} = \sqrt{u_{\alpha\text{REF}}^2 + u_{\beta\text{REF}}^2}$ 。

$p-q-r$ 变换的物理意义如图 1 所示^[15]。参考电压相量 $\mathbf{U}_{\text{REF}}$ 绕 α 轴在 $\alpha-\beta$ 平面上旋转角度 $\theta(t) = \arctan(u_{\beta\text{REF}}(t)/u_{\alpha\text{REF}}(t))$ 。 p 轴与参考电压相量 $\mathbf{U}_{\text{REF}}$ 在一条直线上, q 轴在 $\alpha-\beta$ 平面上与 p 轴垂直。 r 轴与 $\alpha-\beta-0$ 坐标系中的 0 轴相同。因此, p 轴和 q 轴相应地在 $\alpha-\beta$ 平面绕 α 轴和 β 轴旋转 $\theta(t)$ 。

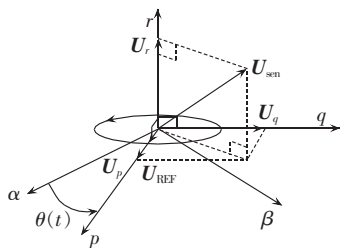


图 1 $p-q-r$ 变换的物理意义

Fig.1 Physical meaning of $p-q-r$ transformation

感应出的电压 $\mathbf{U}_{\text{sen}}$ 在任何时刻都可通过 $p-q-r$ 变换分解成 p 轴分量 U_p 、 q 轴分量 U_q 和 r 轴分量 U_r 。 U_p 和参考电压向量 $\mathbf{U}_{\text{REF}}$ 相角相同, U_q 超前参考电压 $\mathbf{U}_{\text{REF}}$ 90° 。 U_r 垂直于 $\alpha-\beta$ 平面, 与 $\mathbf{U}_{\text{sen}}$ 的零序分量有关。一般情况下, 如果电网中没有直流电压, 则 U_p 和 U_q 含有直流分量和交流分量, U_r 只含有交流分量。 U_p 和 U_q 的直流分量由三相电压的正序分量获得, 交流分量由三相电压的非理想状态获得, 如负序分量或谐波分量等。 U_r 是由三相电压的零序分量得到的。

如果三相电压和三相参考电压同相, 那么电压 $\mathbf{U}_{\text{sen}}$ 和参考电压相量 $\mathbf{U}_{\text{REF}}$ 方向相同。这种情况下, 当 U_p 只包含与 $|\mathbf{U}_{\text{sen}}|$ 恒相等的直流分量时, U_q 和 U_r 不存在。如果三相电压滞后三相参考电压角度 ϕ , 则电压 $\mathbf{U}_{\text{sen}}$ 也滞后 $\mathbf{U}_{\text{REF}}$ 角度 ϕ 。此时, U_p 和 U_q 只包含直流分量, 瞬时值分别为 $u_p = |\mathbf{U}_{\text{sen}}| \cos \phi$, $u_q = |\mathbf{U}_{\text{sen}}| \sin \phi$, U_r 不存在。当三相电压含有负序分量时, $\mathbf{U}_{\text{sen}}$ 按照椭圆形轨道旋转。此时, U_p 和 U_q 不仅包含直流分量, 同时还有 2 倍角频率的交流分量, 由于没有零序分量, $U_r = 0$ 。当三相电压中存在谐波, 同时 $\mathbf{U}_{\text{sen}}$ 的幅值和角速度 ω 随时间变化时, U_p 和 U_q 包含大于 2 倍角频率的交流分量, 由于没有零序分量, U_r 仍等于 0。当三相电压中含有零序分量时, U_r 为交流变量。

2.2 参考电压获得

根据上述理论可知, 参考电压与系统电压同相时, 暂降幅值和相位跳变分别为 $|\mathbf{U}_{\text{sen}}| = \sqrt{u_p'^2 + u_q'^2}$, $\phi = \arctan(u_q'/u_p')$, 同时, 利用实时获得的参考电压可以代替传统方法中的 PLL 环节, 避免由其产生的误差和时间延迟。如何得到正确的参考电压十分重要。由于电压暂降时, 系统电压会发生畸变, 本文采用如图 2 所示方法得到稳定正弦正交的参考电压^[11]。

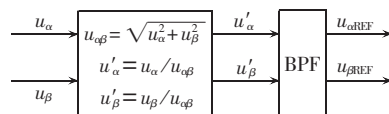


图 2 参考电压的获得

Fig.2 Reference voltage acquirement

三相对称电压经 $abc-\alpha\beta$ 变换后得到正交电压 u_α 和 u_β 。当电压发生暂降时, u_α 和 u_β 不再正交, 经过图 2 所示的变换后, 得到正交的参考电压。由于计算的 u'_α 和 u'_β 不一定为正弦量, 故需要通过带通滤波器得到相应的基波分量, 即 $u_{\alpha\text{REF}}$ 和 $u_{\beta\text{REF}}$ 。

2.3 数学形态滤波^[16]

数学形态滤波是建立在数学形态学基础上, 利用结构元素在信号中不断移动, 考察信号各部分之间的相互关系, 提取有用特征的方法。其基本运算包括膨胀、腐蚀以及由此引出的开、闭运算等。形态运算主要是布尔运算和少量的加减运算, 与一般低通滤波器相比, 计算简单且延时短。电力采样信号一般为二维, 以下给出一维信号的数学形态变换。

设待处理信号 $f(n)$ 是采样得到的一维多值信号, 其定义域为 $D[f] = \{0, 1, 2, \dots, N\}$; $g(x)$ 为一维结构元素序列, 其定义域为 $D[g] = \{0, 1, 2, \dots, P\}$; 其中 P 和 N 为整数。则腐蚀与膨胀运算分别定义为

$$(f \ominus g)(n) = \min \{f(n+x) - g(x) : x \in D[g]\} \quad (3)$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

$$(f \oplus g)(n) = \min \{f(n-x) + g(x) : x \in D[g]\} \quad (4)$$

$$n = 1, 2, \dots, N$$

其中, $\ominus$ 为腐蚀运算; $\oplus$ 为膨胀运算。

数学形态学开运算、闭运算的定义分别为

$$(f \circ g)(n) = (f \ominus g \oplus g)(n) \quad (5)$$

$$(f \cdot g)(n) = (f \oplus g \ominus g)(n) \quad (6)$$

其中, $\circ$ 为开运算, $\cdot$ 为闭运算。

形态运算有以下 3 个重要性质。

a. 对于开运算和闭运算,有

$$(f \circ g) \circ g = f \circ g \quad (7)$$

$$(f \cdot g) \cdot g = f \cdot g \quad (8)$$

由式(7)(8)可以得到,形态开运算和形态闭运算作为复合的形态运算,不仅是递增的、位移不变的,还具有等幂性。换言之,信号经过一次形态滤波后不再为相同结构元素的形态运算所改变,从而避免对信号作多次相同结构元素的开或者闭运算。

b. 扩展性和反扩展性。对开运算和闭运算,恒存在:

$$f \circ g \subseteq f \subseteq f \cdot g \quad (9)$$

c. 设结构元素包括原点 $(0,0)$,则有

$$f \ominus g \subseteq f \subseteq f \oplus g \quad (10)$$

式(10)表明,通过设计合适的结构元素 g ,使其对信号 f 进行腐蚀后能消除噪声点,而对腐蚀结果进行膨胀,则能恢复有用信息,达到去噪的目的。

数学形态学中开运算可用于过滤信号上方的峰值噪声,闭运算可用于平滑或抑制信号下方的波谷噪声。开闭运算都有低通滤波器的特性,滤波效果和变换效果、结构元素的尺寸和形状都有关系。由于开闭运算有其固有的缺点,故对其有如下改进:交替滤波器、混合滤波器和交替混合滤波器。

交替滤波器:

$$[(f)oc(g)](n) = (f \circ g \cdot g)(n) \quad (11)$$

$$[(f)co(g)](n) = (f \cdot g \circ g)(n) \quad (12)$$

混合滤波器:

$$[(f)hf(g)](n) = (f \circ g + f \cdot g)(n)/2 \quad (13)$$

交替混合滤波器:

$$[(f)ah(g)](n) = [(f)oc(g) + (f)co(g)](n)/2 \quad (14)$$

当结构元素的长度相同时,交替滤波器和混合滤波器计算速度相近,交替混合滤波速度较慢。结构元素长度增加将使这种差异更为明显。通常交替滤波器的输出会有固定的偏移,这是因为开(闭)运算的输出信号总是位于原信号的下(上)方。为了解决这种现象,通常采用混合滤波器对信号进行滤波。

2.4 暂降检测中结构元素参数的确定

根据 $p-q-r$ 理论,电压基波正序分量在经过变换后由 p 轴和 q 轴上的直流分量表示。通过选取合适的结构元素及相应长度,经过滤波运算,能够提取输出中的直流部分,从而得到暂降幅值和相位跳变。

在结构元素的选择上,要使其尽可能小,同时结构要尽可能接近待分析信号的图形特点^[17]。根据待分析信号的特点,由于要保留的是直流成分,故采用直线型结构元素。

由形态运算特性可得,要想消去波峰和填充波谷,只需结构元素的大小超过波峰和波谷的宽度即可。

考虑系统电压的一般情况,电压存在 3、5、7、11 次谐波,三相电压经过 $p-q-r$ 变换后,除直流分量以外主要含 2、4、6、10 次谐波。其中 2 次谐波的周期最长,为 0.01 s,半波周期为 0.005 s^[13]。因此,结构元素的宽度必须大于 64 个采样点(采样频率为 12.8 kHz)。如果结构元素长度越长,则滤波器的低通能力越强,滤波效果越好,但是动态响应时间和计算量也随着增大,综合考虑滤波效果和动态响应时间,结构元素的长度取为 65。对于直线形结构元素,不同的结构元素值对滤波后信号会产生一个直流偏移量,为了减少形态运算的计算量并减少偏移量,结构元素的值选择为 0,即 $g(n) = \{0, 0, \dots, 0\}, n = 1, 2, \dots, 65$ 。

2.5 算法流程

综上所述,采用 $p-q-r$ 变换结合数学形态滤波器对电压暂降进行检测的方法流程图如图 3 所示。

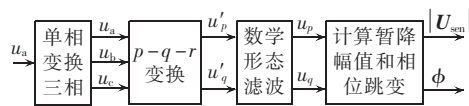


图 3 $p-q-r$ 变换检测算法流程图

Fig.3 Block diagram of sag detection based on $p-q-r$ transformation

3 仿真分析

对于 DVR 而言,通常要同时检测暂降幅值及其相位跳变,故下文仅对能够实现幅值及相位同时检测的方法进行仿真分析。由于实际系统中,电压并不是理想的正弦波形,同时三相之间并不能完全满足对称要求,并且电压波形中不免会产生纹波、振荡等电能质量扰动现象,因此含有求导等运算的动态预测法、改进单相 $d-q$ 变换方法等算法,不适合于在实际电力系统中应用,本文只针对瞬时电压 $d-q$ 变换(A)及其改进的 2 种算法,即单相 $d-q$ 变换(B)和改进的 $\alpha\beta-dq$ 坐标变换^[5](C),及本文提出的基于 $p-q-r$ 变换与数学形态滤波结合的电压暂降检测算法,在 PSCAD 中进行了仿真比较分析。由于相位跳变的检测结果与电压暂降幅值的检测结果趋势相同,故文中仅从电压暂降的幅值检测角度对 4 种方法进行了比较。

3.1 无谐波情况下的检测方法比较

搭建仿真模型,设定在 0.087~0.163 s 发生幅值 50%、相位跳变 30° 的电压暂降事件,初始波形如图 4 所示。

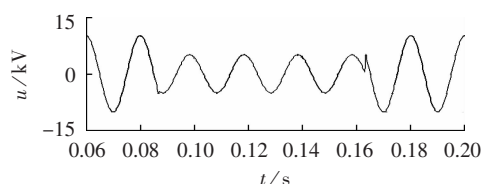


图 4 系统电压波形

Fig.4 Waveform of system voltage

4 种方法的检测波形如图 5 所示,其中 $d-q$ 变换及其改进算法中,滤波器采用巴特沃兹二阶低通滤波器,截止频率为 60 Hz^[6]。

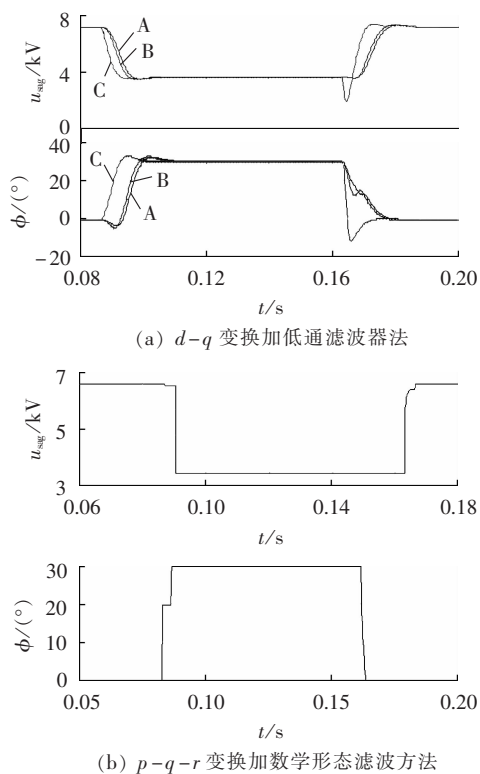


图 5 4 种方法无谐波时检测结果比较

Fig.5 Comparison among four detection methods without harmonics

由图 5 可知,在暂降开始时刻,基于瞬时电压 $d-q$ 变换及其改进的 2 种算法检测到暂降(认为均方根值下降到额定电压的 90% 即为发生了电压暂降)的最短时间为 3 ms,得到暂降幅值的延迟时间最短为 6 ms,延迟时间会随着暂降幅值的不同而变化,而基于 $p-q-r$ 变换算法检测到暂降的时间和得到幅值的时间均为 3 ms,不会由于暂降幅值变化而变大。在暂降结束时刻,前 3 种算法的检测到恢复的最短时间为 5 ms,基于 $p-q-r$ 变换算法为 2 ms,很容易看出基于 $p-q-r$ 变换算法的检测速度要快很多,这是由于基于 $p-q-r$ 变换算法省略了 PLL,同时,检测中没有加入低通滤波器,这样在很大程度上减少了检测中的延时。但基于 $p-q-r$ 变换的检测算法在暂降的开始和结束时会产生一定的波动。

3.2 有谐波情况下的检测方法比较

搭建仿真模型,基本参数与无谐波时相同。在电压暂降开始时注入谐波成分(3 次谐波含量为 5%,5 次谐波含量为 2%),4 种方法检测波形如图 6 所示。

由图 6 可知,基于改进的 $\alpha\beta-dq$ 坐标变换检测方法,由于固有算法缺陷,当系统电压中存在谐波时,无法准确提取电压的基波分量,检测精度大幅降低。其他 2 种基于 $d-q$ 变换的检测方法能够检测到电压暂降的幅值和相位,但信号中存在一定的 2 次谐波

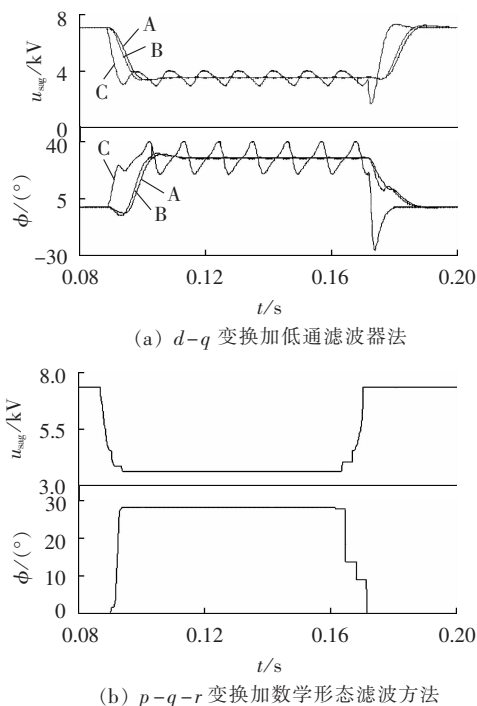


图 6 4 种方法有谐波时检测结果比较

Fig.6 Comparison among four detection methods with harmonics

分量,同时检测暂降发生有约 4 ms 的时间延迟,与无谐波时情况相同,该延时会根据暂降幅度的不同而变化。提高滤波器的截止频率能够减少时间延迟,但同时会减低检测精度。

由图 6(b)可以看出,改进的基于 $p-q-r$ 理论结合数学形态滤波器的电压暂降检测方法能够准确地提取基波分量,延时约为 3 ms,在滤波效果和实时性上能够满足 DVR 补偿的需要。

4 结论

适用于 DVR 的电压暂降检测方法需要有良好的快速性和可靠性,能够在暂降发生时刻准确并迅速地检测到暂降的发生及幅值与相位跳变大小。现有的电压暂降检测算法由于 PLL 和低通滤波器的存在,一定程度上影响了检测的实时性,本文中提出的基于 $p-q-r$ 理论和数学形态滤波器的检测方法,能够消除 PLL 的影响,并减小低通滤波器产生的检测延时,适合于工程应用。

参考文献:

- [1] 肖湘宁. 电能质量分析与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2006: 155-156.
- [2] FITZER C, BARNES M. Voltage sag detection technique for a dynamic voltage restorer[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2004, 40(1): 203-212.
- [3] 李长伟, 赵剑锋. 一种简单便捷的动态电压扰动检测方法[J]. 电气技术, 2007(9): 32-35.
- LI Changwei, ZHAO Jianfeng. A simple and convenient detection method of dynamic voltage disturbance[J]. Electric Technical, 2007 (9): 32-35.

- [4] CHUNG J, POWERS E J, GRADY W M, et al. An automatic voltage sag detection using a discrete wavelet transform and CFAR detector[C]//Power Engineering Society Summer Meeting. Austin, TX, USA: [s.n.], 2001: 689-693.
- [5] 刘应梅, 白晓民, 王文平, 等. 基于 Dyn 测度的电压暂降检测方法[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 45-49.
LIU Yingmei, BAI Xiaomin, WANG Wenping, et al. A dynamics-based method for voltage sags detection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 45-49.
- [6] TUNABOYLU N S, COLLINS J E R, CHANEY P R. Voltage disturbance evaluation using the missing voltage technique[C]//Proceedings of the IEEE Eighth International Conference on Harmonics and Quality of Power. Athens, Greece: IEEE, 1998: 577-582.
- [7] 王智勇, 吴正国, 侯新国. 基于动态预测的 DVR 检测算法[J]. 电工技术学报, 2007, 22(1): 125-131.
WANG Zhiyong, WU Zhengguo, HOU Xinguo. A novel detection algorithm based on dynamic forecast for dynamic voltage restorer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2007, 22(1): 125-131.
- [8] 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.
- [9] 杨亚飞, 颜湘武, 娄尧林. 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 Yafei, YAN Xiangwu, LOU Yaolin. A new method to detect voltage sag characteristics[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 41-44.
- [10] 袁川, 杨洪耕. 改进的电压凹陷特征量实时检测方法[J]. 继电器, 2005, 33(22): 57-60.
YUAN Chuan, YANG Honggeng. The advanced method of real-time detection of voltage sag characteristics[J]. Relay, 2005, 33(22): 57-60.
- [11] 谭智力, 李勋, 陈坚, 等. 基于简化 $p-q-r$ 理论的统一电能质量调节器控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(36): 85-91.
TAN Zhili, LI Xun, CHEN Jian, et al. A new control strategy of UPQC by using simplified $p-q-r$ theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(36): 85-91.
- [12] 龙云. 电压凹陷检测与补偿控制策略的研究[D]. 成都: 四川大学电气信息学院, 2006.
LONG Yun. Research on the detection and control of voltage sag[D]. Chengdu: Sichuan University, 2006.
- [13] 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.
- [14] LEE S, KIM H, SUL S, et al. A novel control algorithm for static series compensators by use of pqr instantaneous power theory[J]. Power Electronics, 2004, 19(3): 814-827.
- [15] KIM H, LEE S, SUL S. Reference wave generation in dynamic voltage restorers by use of pqr power theory[J]. Digital Object Identifier, 2004(3): 1452-1457.
- [16] 陈平, 李庆民. 基于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(11): 60-65.
CHEN Ping, LI Qingmin. Design and analysis of mathematical morphology-based digital filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(11): 60-65.
- [17] 欧阳森, 王建华, 宋政湘, 等. 基于数学形态学的电力系统采样数据处理方法[J]. 电网技术, 2003, 27(9): 61-65.
OUYANG Sen, WANG Jianhua, SONG Zhengxiang, et al. A new power system sampled data processing method based on morphology theory[J]. Power System Technology, 2003, 27(9): 61-65.

(编辑: 李玲)

作者简介:

丁宁(1985-), 女, 河北保定人, 硕士, 研究方向为电能质量分析与控制(E-mail: dingning1101@126.com);

徐永海(1966-), 男, 河南新野人, 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, 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。

Voltage sag detection based on $p-q-r$ theory and morphological filter

DING Ning, XU Yonghai, XIAO Xiangning

(School of Electrical and Electronic Engineering, North China

Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: The voltage sag detection based on $p-q-r$ theory and morphological filter is studied for DVR. A three-phase system is constructed with the single-phase voltages and its fundamental components are converted to DC components by coordinate transformation. The AC components are removed by a morphological filter and the sag magnitude and phase angle jump are then calculated. The PLL is replaced by the reference voltages to reduce the correlated delay and error. As there are mainly Boolean operations and a few addition or subtraction operations in the morphological filter, the computation is easier than that of normal low-pass filters, resulting in shorter time delay. Simulative results prove the rapidity and reliability of the proposed method.

Key words: voltage sag; detection; $p-q-r$ theory; morphological filter