

# 一种基于派克变换的电压跌落检测改进离散算法

肖冰, 梁军, 路平, 负志皓

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 以派克变换为基础, 提出一种数字化的实时检测电压跌落的新算法, 用复化积分提高检测直流分量的计算精度, 该方法不仅能实时检测电压跌落的幅值、持续时间和相位跳变信息, 还能实时提供动态电压恢复器所需的电压补偿指令信号。采用 Matlab 对电压跌落检测算法进行仿真。仿真结果表明该方法检测结果稳定, 具有很高的计算精度。

关键词: 电压跌落; 派克变换; 数字化; 谐波; 检测

中图分类号: TM714.2 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2005)13-0050-04

## 0 引言

动态电压恢复器 (DVR——Dynamic voltage restorer) 是近年来发展起来的一种用于配电网中保护敏感负荷免受电压跌落影响的先进装置<sup>[1]</sup>。为了进一步提高其性能, 必须对其检测电压跌落的算法做深入研究, 加以改进。根据基本原理, DVR 在工作时首先必须通过某种电压检测方法来获取电压补偿的指令信号, 然后由这个指令信号去控制逆变器的电力电子开关的开通和关断, 从而输出所需要的电压补偿信号来抵消由电压跌落所产生的跌落电压, 达到电压补偿的目的, 见图 1。显然, 电压补偿效果与 DVR 所采用的电压检测方法有很大关系。

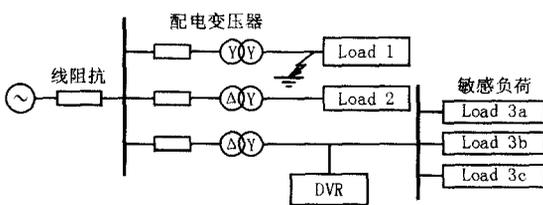


图 1 电力网中 DVR 的典型设置

Fig 1 Typical configuration of a DVR in a power network

目前可用于检测电压跌落并且可兼顾动态实时性和检测准确度的方法, 主要有基于瞬时无功功率理论的拉克变换 ( $0$  变换) 方法、派克变换 ( $dq0$  变换) 方法和小波分析法<sup>[2]</sup>。

$0$  变换方法实现起来比较简单, 但只适用于系统电压为三相正弦对称且负载对称的情况, 否则将存在比较大的检测误差。 $dq0$  变换方法能适用于任意非正弦、非对称三相电路。另外, 采用这两种变换方

法, 要想得到基波有功电压、电流分量时都需要低通滤波环节, 这将导致检测的快速性受到一定程度的影响。传统的  $dq0$  变换方法有瞬时电压  $dq0$  变换半周期平均值法<sup>[3]</sup>和瞬时电压  $dq0$  变换 LPF (低通滤波器) 法<sup>[4,5]</sup>, 它们的检测原理图分别为图 2 (a) 和 (b)。

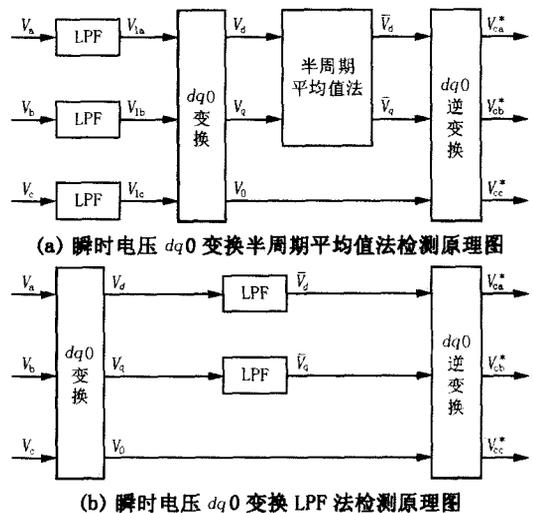


图 2 两种传统的  $dq0$  变换检测方法原理图

Fig 2 Principles of two traditional  $dq0$  transformation detection methods

小波变换 (WT) 是一种变分辨率的时频联合分析方法, 它在时频分析领域具有不可比拟的优点<sup>[6]</sup>。理论上用这种方法可以检测供电电压的突变, 得到跌落的幅值、持续时间和相位, 但一般要把 WT 和神经网络相结合才能实现。由于 WT 计算量大, 计算延迟时间长, 母小波选择困难, 以及神经网络难于在实时系统中实现等原因, 使得 WT 不适合应用于电压跌落的实时补偿装置中<sup>[1,7]</sup>。

基于目前所用检测方法的种种局限性,本文以派克变换理论为基础,提出一种基波电压正序分量的离散检测新算法,对  $dq0$  坐标系下直流分量的提取作了改进,用复化积分代替了滤波器滤除谐波。该方法具有动态响应时间为半个工频周期,检测结果精度高而且稳定,易于在 DSP 编程实现等优点。采用 Matlab 对电压跌落检测算法进行研究。实验结果表明该方法能正确地检测电压跌落的幅值、持续时间和相位跳变的信息。

## 1 基于派克变换的电压跌落检测离散算法

在电力系统中,若三相电压的采样输入用  $u_a(n)$ 、 $u_b(n)$  和  $u_c(n)$  表示,根据对称分量法有

$$\begin{cases} u_a(n) = \sqrt{2} \sum_{k=1} [U_{+k} \sin(\frac{2}{N}nk + \varphi_{+k}) + U_{-k} \sin(\frac{2}{N}nk + \varphi_{-k}) + U_{0k} \sin(\frac{2}{N}nk + \varphi_{0k})] \\ u_b(n) = \sqrt{2} \sum_{k=1} [U_{+k} \sin(\frac{2}{N}nk + \varphi_{+k} - \frac{2}{3}) + U_{-k} \sin(\frac{2}{N}nk + \varphi_{-k} + \frac{2}{3}) + U_{0k} \sin(\frac{2}{N}nk + \varphi_{0k})] \\ u_c(n) = \sqrt{2} \sum_{k=1} [U_{+k} \sin(\frac{2}{N}nk + \varphi_{+k} + \frac{2}{3}) + U_{-k} \sin(\frac{2}{N}nk + \varphi_{-k} - \frac{2}{3}) + U_{0k} \sin(\frac{2}{N}nk + \varphi_{0k})] \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $N$  为一个工频周期的采样点数,  $n$  对应为采样点的计数值 ( $n = 0, 1, 2, \dots, N - 1$ );  $U_{+k}$ 、 $U_{-k}$ 、 $U_{0k}$ 、 $\varphi_{+k}$ 、 $\varphi_{-k}$ 、 $\varphi_{0k}$  分别表示基波 ( $k=1$ ) 及  $k$  次谐波电压的正序、负序和零序分量有效值和初相角。根据派克变换理论,取变换矩阵

$$C = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \frac{2}{N}n & \cos(\frac{2}{N}n - \frac{2}{3}) & \cos(\frac{2}{N}n + \frac{2}{3}) \\ -\sin \frac{2}{N}n & -\sin(\frac{2}{N}n - \frac{2}{3}) & -\sin(\frac{2}{N}n + \frac{2}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\text{有变换后电压} \begin{bmatrix} u_{1d}(n) \\ u_{1q}(n) \\ u_{10}(n) \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} u_a(n) \\ u_b(n) \\ u_c(n) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=1} [U_{+k} \sin[\frac{2}{N}n(k-1) + \varphi_{+k}] + U_{-k} \sin[\frac{2}{N}n(k+1) + \varphi_{-k}]] \\ \sqrt{3} \sum_{k=1} [-U_{+k} \cos[\frac{2}{N}n(k-1) + \varphi_{+k}] + U_{-k} \cos[\frac{2}{N}n(k+1) + \varphi_{-k}]] \\ \sum_{k=1} \sqrt{2} U_{0k} \sin(\frac{2}{N}nk + \varphi_{0k}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{u}_{1d} \\ \tilde{u}_{1q} \\ \tilde{u}_{10} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_{1d} \\ \tilde{u}_{1q} \\ \tilde{u}_{10} \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} U_{+1} \sin \varphi_{+1} \\ -U_{+1} \cos \varphi_{+1} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (k=1) \quad (4)$$

不难发现,只有基波电压正序分量在派克变换下转换成  $d$  轴、 $q$  轴上的 2 个直流分量,而此时 0 轴分量为 0。而要得到的仅是基波电压正序分量,故不需要进行 0 轴变换,因此可将变换矩阵  $C$  写成

$$C = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \frac{2}{N}n & \cos(\frac{2}{N}n - \frac{2}{3}) & \cos(\frac{2}{N}n + \frac{2}{3}) \\ -\sin \frac{2}{N}n & -\sin(\frac{2}{N}n - \frac{2}{3}) & -\sin(\frac{2}{N}n + \frac{2}{3}) \end{bmatrix} \quad (5)$$

还有下式

$$\begin{bmatrix} \tilde{u}_{1d}(n) \\ \tilde{u}_{1q}(n) \end{bmatrix} = \sqrt{3} \begin{bmatrix} \sum_{k=2} [U_{+k} \sin[\frac{2}{N}n(k-1) + \varphi_{+k}]] + \sum_{k=1} [U_{-k} \sin[\frac{2}{N}n(k+1) + \varphi_{-k}]] \\ \sum_{k=2} [-U_{+k} \cos[\frac{2}{N}n(k-1) + \varphi_{+k}]] + \sum_{k=1} [U_{-k} \cos[\frac{2}{N}n(k+1) + \varphi_{-k}]] \end{bmatrix} \quad (6)$$

式 (4) 对应为要检测的直流分量,式 (6) 则是要滤除的波动分量。设式 (6) 中的波动分量的最小公共周期为  $T_c$ , 则取  $N_1 = NT_c / T$  ( $T$  为工频周期), 设置两个分别存放  $N_1$  个数据的缓冲区, 随采样计数值  $n$  循环更新并存放  $u_{1d}(n)$  和  $u_{1q}(n)$ , 其中, 当前计数值  $n$  对应的单元记为  $l = N_1 - 1$ , 对应的前第  $N_1$  个采样点单元记为  $l = 0$  时, 利用正弦函数的正交完备性, 把区间  $[0, T_c]$  等分为  $N_1$  个小区间, 并用复化 Simpson 积分公式计算积分值, 得复化 Simpson 积分

算式如下：

$$\begin{bmatrix} \bar{u}_{1d} \\ \bar{u}_{1q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3N_1} \left[ \sum_{l=0}^{\frac{N_1}{2}-1} u_{1d}(2l) + 2 \sum_{l=1}^{\frac{N_1}{2}} u_{1d}(2l-1) \right] \\ \frac{2}{3N_1} \left[ \sum_{l=0}^{\frac{N_1}{2}-1} u_{1q}(2l) + 2 \sum_{l=1}^{\frac{N_1}{2}} u_{1q}(2l-1) \right] \end{bmatrix} \quad (7)$$

此即复化积分的检测方法。根据式(4),由式(7)的计算结果即可计算基波电压正序分量的有效值和相位角。

$$U_{+1} = \frac{1}{\sqrt{3}} \sqrt{(\bar{u}_{1d})^2 + (\bar{u}_{1q})^2}, \quad \varphi_{+1} = -\arctan \frac{\bar{u}_{1d}}{\bar{u}_{1q}} \quad (8)$$

然后对所得到的直流分量进行逆变换,就可以得到对应采样计数值  $n$  的三相基波电压正序分量为

$$\begin{bmatrix} u_{+1a}(n) \\ u_{+1b}(n) \\ u_{+1c}(n) \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} \cos \frac{2}{N} n & -\sin \frac{2}{N} n \\ \cos(\frac{2}{N} n - \frac{2}{3}) & -\sin(\frac{2}{N} n - \frac{2}{3}) \\ \cos(\frac{2}{N} n + \frac{2}{3}) & -\sin(\frac{2}{N} n + \frac{2}{3}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{2} U_{+1} \sin(\frac{2}{N} n + \varphi_{+1}) \\ \sqrt{2} U_{+1} \sin(\frac{2}{N} n + \varphi_{+1} - \frac{2}{3}) \\ \sqrt{2} U_{+1} \sin(\frac{2}{N} n + \varphi_{+1} + \frac{2}{3}) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)所得结果可以用于各种电压跌落补偿装置中,对电压跌落进行补偿。该方法的检测原理如图3所示。

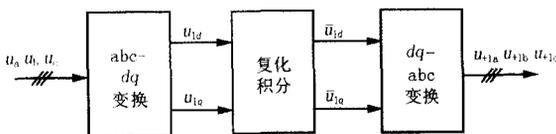


图3 基波电压正序分量检测原理图

Fig 3 Principle of fundamental positive-sequence voltage detection

## 2 计算机仿真验证

利用 Matlab 的 Simulink 动态仿真软件,建立故障的仿真模型,产生电压跌落。在 Simulink 菜单下的 Parameters 菜单项,设置 Relative tolerance 为  $10^{-5}$ , solver 设置为 ode23tb。根据式(6),最小公共周期  $T_c$  为  $1/2$  工频周期,采样频率为 12 800 Hz,则  $N = 256$ ,  $N_1 = 128$ 。

设跌落前系统电压三相对称平衡,幅值为 1 (这里电压幅值都标么化), a 相电压相角为  $70^\circ$  在  $0.05 \sim 0.1$  s 内发生了三相不对称电压跌落,而且产生了三次和五次谐波,基波及各次谐波参数如表 1 所示。图 4 为系统电压波形。

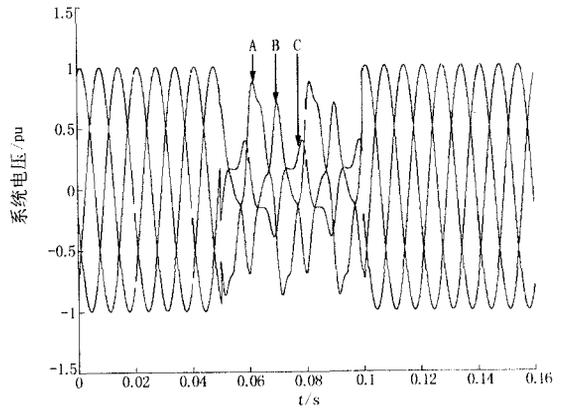


图4 系统电压波形

Fig 4 System voltage waveform

图 5 为改进算法和瞬时电压  $dq0$  变换半周期平均值法及瞬时电压  $dq0$  变换 LPF 法得到的基波正序幅值的变化。图 6 为基波正序相角的变化。

表 1 发生电压跌落时基波及各次谐波参数

Tab 1 Parameters of fundamental wave and harmonics during voltage sag

谐波次数	各相	幅值 / p. u	相位 / (°)
基波	A	0.8	40
	B	0.5	-90
	C	0.3	140
三次	A	0.1	10
	B	0.15	-100
	C	0.12	140
五次	A	0.08	20
	B	0.05	-80
	C	0.02	160

在图 5、图 6 中,曲线 1、2、3 所对应的检测方法依次为本文改进算法、瞬时电压  $dq0$  变换半周期平均值法和瞬时电压  $dq0$  变换 LPF 法。由此两图可以看到,改进算法和瞬时电压  $dq0$  变换 LPF 法的响应时间基本相同,为半个工频周期;瞬时电压  $dq0$  变换半周期平均值法的响应时间约为 1 个工频周期。由于滤波器的响应时间约为半个工频周期,故瞬时电压  $dq0$  变换 LPF 法的响应时间约为半个工频周期;而瞬时电压  $dq0$  变换半周期平均值法本身的算法需要半个工频周期的时间,故其响应时间约为 1 个工频周期。曲线 1 和 3 基本重合,但曲线 3 在电压跌落期间基波正序幅值和相角均有波动,如图 7 所示。

这是由于三相电压存在谐波时滤波器无法滤除全部谐波,在谐波的影响下产生波动。故检测结果稳定程度不如改进算法高。

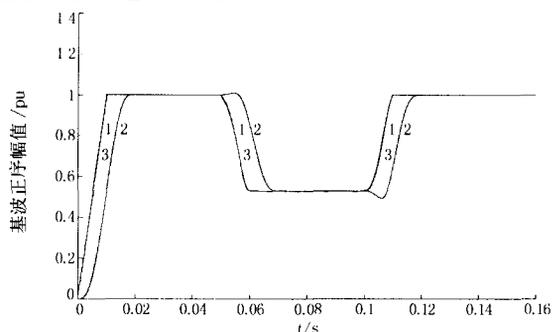


图 5 基波正序幅值的变化

Fig 5 Changes of fundamental positive-sequence amplitude

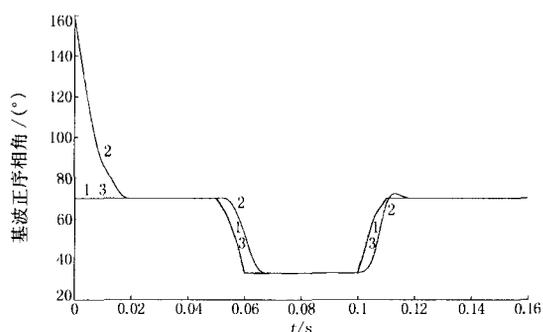


图 6 基波正序相角的变化

Fig 6 Changes of fundamental positive-sequence phase

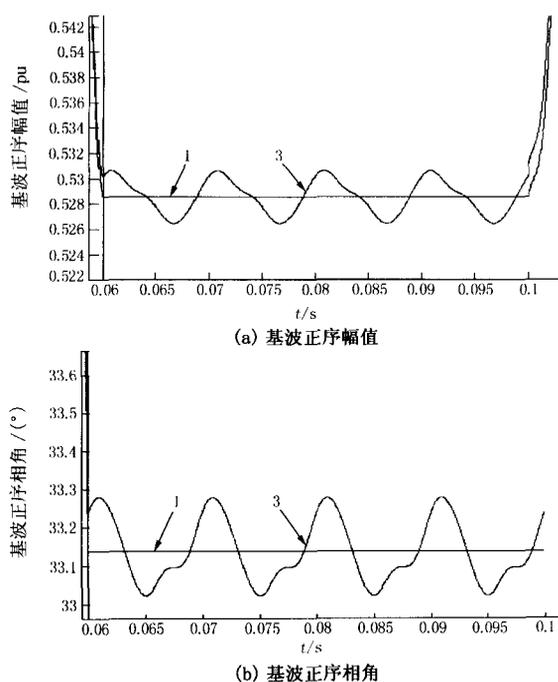


图 7 两种检测方法在电压跌落期间的计算结果对比

Fig 7 Comparison of two detection methods during voltage sag

由仿真结果可见,本文改进算法的响应时间为半个工频周期,具有很高的计算精度,检测结果稳定,易于编程实现。而传统的基于派克变换的方法需要使用滤波器,增加了响应时间,且滤波器设计复杂,与改进方法相比实现困难。

### 3 结论

由于电压跌落还伴随不对称和相位跳变现象,以及负荷对电压质量的高标准要求,对检测算法提出了很高的要求。本文在基于派克变换理论的基础上提出的数字化检测方法,对  $dq0$  坐标系下直流分量的提取作了改进,用复化积分代替了滤波器滤除谐波,该方法可以提高基波电压正序分量的检测精度,在一定程度上缩短了响应时间,同时能提供 DVR 所需的电压补偿指令信号,而且不受电压波动和畸变的影响,检测结果稳定,仿真分析验证了该方法的正确性。在工程的编程实现上,复化积分较滤波器实现更容易,CPU 的运算量更小,可以节约宝贵的运算时间使设备具有更快的响应速度。该方法也同样适用于基波电流检测。

### 参考文献:

- [1] Fitzer C, Bames M, Green P. Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer [J]. IEEE Trans on Ind Appl, 2004, 40 (1): 203-212
- [2] 金燕云, 罗毅, 涂光瑜. 配电系统电压跌落问题的研究 [J]. 继电器, 2003, 31 (10): 56-62  
JN Yan-yun, LUO Yi, TU Guang-yu. Study of Voltage Sags in Power Distribution System [J]. Relay, 2003, 31 (10): 56-62
- [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 Chun-ping, CHEN Yun-ping, SUN Jian-jun. Study of Dynamic Voltage Restorer and Its Detecting Method [J]. Electric Power Automation Equipment, 2003, 23 (1): 68-71.
- [4] 徐永海. 基于 dq 变换的电能质量扰动分析与调节技术研究 (博士学位论文) [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002  
XU Yong-hai. Study of Power Quality Disturbance and Conditioning Technology Based on dq Transformation, Doctoral Dissertation [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2002

(下转第 59 页 continued on page 59)

[J]. Journal of Chongqing University, 1994, 17 (3): 60-68

- [5] 李庚银,陈志业,杨以涵,等. 有源补偿器直流侧电压控制系统 [J]. 华北电力大学学报, 1997(7): 1-7.  
LI Geng-yin, CHEN Zhi-ye, YANG Yi-han, et al A Study of DC Voltage Control System for an Active Power Filter[J]. Journal of North China Electric Power University, 1997(7): 1-7.
- [6] 孙扬声. 自动控制理论 [M]. 北京:水利电力出版社, 1986.  
SUN Yang-sheng Theory of Automatic Control[M]. Bei-

jing: Hydraulic and Electric Power Press, 1986

收稿日期: 2004-10-10; 修回日期: 2004-11-15  
作者简介:

刘 飞 (1970 - ),男,博士研究生,研究方向为有源电力滤波器和无功补偿; E-mail: elec\_hust@tom.com  
杨立付 (1962 - ),男,工程师,研究方向为电力工程;  
邹云屏 (1945 - ),男,教授,博士生导师,研究方向为电力电子电路、装置与系统及应用基础研究。

### Control algorithm of DC voltage for a hybrid active filter applied to high voltage system

LU Fei<sup>1</sup>, YANG Li-fu<sup>2</sup>, ZOU Yun-ping<sup>1</sup>, LI Hu<sup>1</sup>

(1. Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Yueyang Power Industry Bureau, Yueyang 414000, China)

**Abstract:** This paper presents the close loop control strategy of DC voltage for a hybrid active filter which is used in high voltage grid. The approximate mathematical model is developed with averaging and small signal perturbation method. The stability of the control system and requirements to parameters of the controller are analyzed in detail. The theoretical analysis is verified by simulation and experiment to show the possibility of the proposed control algorithm applied to the hybrid active filter.

**Key words:** hybrid active power filter; DC voltage; close loop control

(上接第 53 页 continued from page 53)

- [5] 赵剑锋,蒋平,唐国庆. 配电系统串联型电能质量补偿器的研究 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13 (3): 13-16.  
ZHAO Jian-feng, JIANG Ping, TANG Guo-qing Research on Series Power Quality Compensator in Distributed System [J]. Proceedings of the EPSA, 2001, 13 (3): 13-16
- [6] 彭玉华. 小波变换与工程应用 [M]. 北京:科学出版社, 1999.  
PENG Yu-hua Wavelet Transform and Engineering Applications[M]. Beijing: Science Press, 1999.

- [7] Parsons A C, Grady W M, Powers E J. A Wavelet - based Procedure for Automatically Determining the Beginning and End of Transmission System Voltage Sags[A]. Proc IEEE-PES Winter Meeting 1999. 1310-1315.

收稿日期: 2004-10-10; 修回日期: 2004-10-22  
作者简介:

肖 冰 (1980 - ),女,硕士研究生,研究方向为电力系统运行与控制; E-mail: ice\_119\_angel@mail.sdu.edu.cn  
梁 军 (1956 - ),男,教授,主要从事电力系统运行与控制方向的研究。

### An improved discrete method for detecting voltage sag based on Park transformation

XIAO Bing, LIANG Jun, LU Ping, YUN Zhi-hao

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061)

**Abstract:** This paper proposes a new digital real-time method which is used to detect voltage sags based on Park transformation. With complex integral algorithm, the accuracy of direct current component detecting will be improved. It can not only detect the amplitude and duration and phase jump information of voltage sags, but also provide the needed compensation command signal for dynamic voltage restorer. Matlab is adopted to simulate the algorithm of detecting voltage sags. The simulation result indicates that the method is stable in detecting voltage sags and possesses very high calculation accuracy.

**Key words:** voltage sag; Park transformation; digital; harmonic; detection