引用格式:牛成玉, 傅仲文, 于 龙. 一种新型微电网谐波与正负序检测方法[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(2): 242—246
Niu Chengyu, Fu Zhongwen, Yu Long. A novel detection method for harmonics and positive-negative sequence decomposition for microgrid [J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(2): 242—246

一种新型微电网谐波与正负序检测方法

牛成玉 傅仲文* 于 龙
(河北工业大学电气工程学院,天津 300130)

摘 要 电流谐波与电压不平衡是影响微电网电能质量的两个重要因素。针对目前谐波检测与电压正负序分离方法存在的问题,提出一种基于动态相量的谐波与正负序分量检测方法;该方法既可以用于电流谐波检测,也可用于电压畸变或不平衡条件下的正负序分量分离。采用动态相量法下的Park变换矩阵,简化控制;并且省去了传统检测方法的滤波器与陷波器装置。最后对该方法进行了对比分析,并在有源滤波器仿真中进行了验证分析,仿真结果显示了所提方法的正确性、可行性。

关键词 谐波检测 正负序检测 动态相量法 Park变换 有源滤波器
中图法分类号 TM714; **文献标志码** A

随着电力电子技术的发展,各种电力电子装置得到广泛应用;特别在具有电力系统特征的微电网中,存在许多电能变换装置,将给微电网产生大量谐波,影响微电网的正常运行;并且在微电网中负荷与各种分布式电源直接相连,负荷既存在单相负荷又有三相负荷,电网电压也将不平衡,不平衡电压将影响到微电网稳定性。

谐波检测方法通常有频域下的离散傅里叶变换和时域下基于瞬时功率理论的pq法、ip-iq法、FBD(Fryze Buchholz Dpenbrock)功率理论法[1,2]。此外还有各种智能算法,例如基于最小均方的自适应滤波、人工神经网络等[3,4]。离散的傅里叶变换可以实现较高的精度;但其响应速度较慢。智能算法可以实现谐波检测某些特性的改善,但是设计与实现较为复杂,没有得到广泛的应用。在实际中pq法,ip-iq法等基于坐标变换方法可以较好地实现谐波检测,得到广泛的应用;但是此类方法应用中需要低通滤波器来实现基波分量的提取,而滤波器的带宽对谐波检测的快速性与精确度都产生影响。

微电网的电能质量问题除了谐波问题,还存在由于负荷不平衡或者故障导致的电压不平衡问题。对于电压不平衡问题,现在的主要解决方法是通过对正负序分量分别控制,实现消除负序产生的谐波与功率波动[5—7]。目前常用的基波正负序分离方法有对称分量法、旋转坐标变换法、广义双二阶积分[7]。对称分量法,是利用对信号进行移相,再按照对称分量矩阵得到正负序,存在多个延时环节。旋转坐标变换法,利用正负两个Park旋转变换,利用在正的旋转坐标下,正序分量变为直流量,负序分量变为2倍基波的交流量,通过陷波器可以提取出其中的正序分量,所以在正序检测需要陷波器环节。

广义双二阶积分利用系统对特定的频率下的移相特性,并且具有滤波功能,可以省去锁相环与滤波器,但其含有多个积分环节减弱了系统快速性[8]。

本文提出一种基于动态相量的谐波与正负序分量检测方法,根据动态相量法可以将电压与电流量用其傅里叶展开的低次项系数代替;并且由于采用实部与虚部分开控制,采用动态相量法下简化的Park变换矩阵简化控制,避免了复杂的Park旋转变换。在检测过程中,谐波与负序分量经过Park变换可相互抵消,因此该方法不仅可以对谐波进行检测,还可以对不平衡电压中的正负序进行检测,并且省去了传统检测方法的滤波器与陷波器装置。

1 动态相量法

传统相量法是建立在系统稳态的条件下,电路中的电压、电流均为正弦量,把正弦量用幅值和相角表示,不考虑瞬时变量中的旋转分量,简化计算。动态相量是针对非正弦变量,以时变傅里叶变换为基础的相量形式[9,10]。

对时域中快速变换的信号 $x(\tau)$,在任意一个 $\tau \in (t, t+T)$ 区间,其傅里叶级数表达式为:

2017年5月18日收到
第一作者简介:牛成玉(1991—),硕士研究生。研究方向:智能电网与新能源。E-mail:1085553262@qq.com。
* 通信作者简介:傅仲文(1957—),男,教授。研究方向:智能电网与新能源。E-mail: fuzw@hebut.edu.cn。

$$x(\tau)=\sum_{k=-\infty}^{\infty}X_k(t)\mathrm{e}^{\mathrm{j}k\omega\tau} \tag{1}$$

$$X_k(t)=\frac{1}{T}\int_t^{t+T}x(\tau)\mathrm{e}^{-\mathrm{j}k\omega\tau}\mathrm{d}\tau=\langle x\rangle_k \tag{2}$$

式中, ω 为基波角频率; $X_k(t)$ 为 k 次谐波的傅里叶系数,也称第 k 阶动态相量,记为 $\langle x\rangle_k$ 。

由此得到动态相量下基波的傅里叶系数如式(3)所示。

$$\langle x\rangle_1=\langle x\rangle_{1\mathrm{R}}+\mathrm{j}\langle x\rangle_{1\mathrm{I}} \tag{3}$$

式(3) 中, $\langle x\rangle_{1\mathrm{R}}=\frac{1}{T}\int_t^{t+T}x(\tau)\cos\theta\mathrm{d}\tau$;

$\langle x\rangle_{1\mathrm{I}}=-\frac{1}{T}\int_t^{t+T}x(\tau)\sin\theta\mathrm{d}\tau$。

(1)共轭特性:

$$\langle x\rangle_k^*=\langle x\rangle_{-k}=(\langle x\rangle_{-k}^{\mathrm{R}}+\mathrm{j}\langle x\rangle_{-k}^{\mathrm{I}}) \tag{4}$$

(2)微分特性:

$$\left\langle\frac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}\right\rangle_k=\frac{\mathrm{d}\langle x\rangle_k}{\mathrm{d}t}+\mathrm{j}\omega\langle x\rangle_k \tag{5}$$

(3)卷积特性:

$$\langle x_1x_2\rangle_k=\sum_{i=-\infty}^{\infty}\langle x_1\rangle_{k-i}\langle x_2\rangle_i \tag{6}$$

2 谐波检测与正负序分离原理

电力系统中电压与电流畸变时,其时域表示如式(7)所示,其中既含有不平衡分量又有谐波分量。

$$\begin{cases}x_a=x_a^++x_a^-+x_0+\sum\limits_n(x_a^{n+}+x_a^{n-})\\x_b=x_b^++x_b^-+x_0+\sum\limits_n(x_b^{n+}+x_b^{n-})\\x_c=x_c^++x_c^-+x_0+\sum\limits_n(x_c^{n+}+x_c^{n-})\end{cases} \tag{7}$$

式(7)中的谐波分量如式(8)所示。

$$x(t)=A_3\sin(3\omega t)+\cdots+A_n\sin(n\omega t) \tag{8}$$

根据动态相量法,按照式(3)可以得到其一阶傅里叶系数。由于三角函数的正交性,傅里叶展开中基波对应的傅里叶系数,只能来自系统中的基波分量(包括正序与负序)。其虚部计算如式(9)所示。

$$\int_t^{t+T}x(\tau)\sin\theta\mathrm{d}\tau=\int_t^{t+T}A_1\sin(\omega\tau)\sin\theta\mathrm{d}\tau \tag{9}$$

其一阶傅里叶系数只与基波分量相关,所以计算中只考虑基波的傅里叶系数,能够排除直流与谐波的影响,实现谐波消除,简化计算。

对不平衡产生的基波负序分量则需进一步处理,传统的 Park 变换如式(10)所示。

$$T_{\mathrm{p}}=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}\cos\theta & \cos\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\\-\sin\theta & -\sin\left(\theta-\frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta+\frac{2}{3}\pi\right)\end{bmatrix} \tag{10}$$

由动态相量的共轭特性与卷积特性,并考虑到存在负序分量,得到只含有基波傅里叶系数的 Park 变换方程如式(11)。

$$\begin{bmatrix}\langle x_d\rangle_0\\\langle x_q\rangle_0\end{bmatrix}=\langle T_{\mathrm{p}}\rangle_1\begin{bmatrix}\langle x_a\rangle_{-1}\\\langle x_b\rangle_{-1}\\\langle x_c\rangle_{-1}\end{bmatrix}+\langle T_{\mathrm{p}}\rangle_{-1}\begin{bmatrix}\langle x_a\rangle_1\\\langle x_b\rangle_1\\\langle x_c\rangle_1\end{bmatrix} \tag{11}$$

根据式(3),当输入信号为余弦函数

$$x(t)=A\cos(\omega t+\theta) \tag{12}$$

其可用动态相量法表示为[9]

$$\langle x(t)\rangle_1=\frac{1}{2}A(\cos\theta+\mathrm{j}\sin\theta) \tag{13}$$

式(13)中,正弦函数可以通过三角函数关系得到。将正弦函数、余弦函数的实部与虚部分开,代入式(11),从而得到状态相量下的 Park 变换,如式(14)、式(15),由此可以看出该矩阵是一个纯数字矩阵,从而简化 Park 变换计算,具有较强的实用性。在 Park 反变换矩阵中变换矩阵为 $\boldsymbol{T}_1$ 的转置矩阵 $\boldsymbol{T}_1^{\mathrm{T}}$ 。

$$\begin{bmatrix}\langle x_d\rangle_0\\\langle x_q\rangle_0\end{bmatrix}=\boldsymbol{T}_1\begin{bmatrix}\langle x_a\rangle_1^{\mathrm{R}}\\\langle x_a\rangle_1^{\mathrm{I}}\\\langle x_b\rangle_1^{\mathrm{R}}\\\langle x_b\rangle_1^{\mathrm{I}}\\\langle x_c\rangle_1^{\mathrm{R}}\\\langle x_c\rangle_1^{\mathrm{I}}\end{bmatrix} \tag{14}$$

式(14)中, $\boldsymbol{T}_1$ 为变换矩阵。

$$\boldsymbol{T}_1=\sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix}0 & -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{1}{2}\\1 & 0 & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2}\end{bmatrix} \tag{15}$$

以负序分量为例,系统中负序分量如式(16)所示。

$$\begin{cases}x_a^-=B\sin(\omega t+\varphi^-)\\x_b^-=B\sin\left(\omega t+\varphi^-+\frac{2\pi}{3}\right)\\x_c^-=B\sin\left(\omega t+\varphi^--\frac{2\pi}{3}\right)\end{cases} \tag{16}$$

经过傅里叶变换得到其实部与虚部分开的傅里叶表示,当 φ^- 为 0 时,其一阶动态相量系数如式(17)所示。

$$\frac{B}{2}\left[0\quad -1\quad \frac{\sqrt{3}}{2}\quad \frac{1}{2}\quad -\frac{\sqrt{3}}{2}\quad \frac{1}{2}\right]^{\mathrm{T}} \tag{17}$$

由式(15)、式(17)相乘,可以得到在正的 Park 变换过程中,负序分量得到消除。同理可得基波负序的检测中,正序分量在负的 Park 变换下也得到了消除。

当系统中谐波消除或正负序分离后,由式(1)得到傅里叶系数到时域函数的关系式,如式(18)

所示。

$$x(t) = X_1 e^{j\omega t} + X_{-1} e^{-j\omega t} = 2\langle x\rangle_1^R \cos(\omega t) - 2\langle x\rangle_1^I \sin(\omega t) \tag{18}$$

3　仿真分析

3.1　谐波检测与正负序检测对比分析

利用 MATLAB/Simulink 仿真软件构建谐波源与不平衡电压，分别对其不平衡电压下正负序电压分离和电流谐波检测进行仿真，并且将其与传统 dq 变换方法（即 Park 变换加滤波）进行对比。

由于传统的 dq 变换检测方法需要低通滤波器与陷波器，在不平衡电压正负序分离中，dq 变换法采用二阶广义积分器来代替陷波器，来消除二次谐波。在电流谐波检测中，dq 变换法采用截止频率 30 Hz低通滤波器。

对于电压不平衡系统，其线电压为 380 V，在0. 06 s 时，其中 A 相电压升高为额定的 1. 2 倍，在 0. 14 降落为额定的 0. 8 倍。仿真结果如图 1 和图 2 所示。

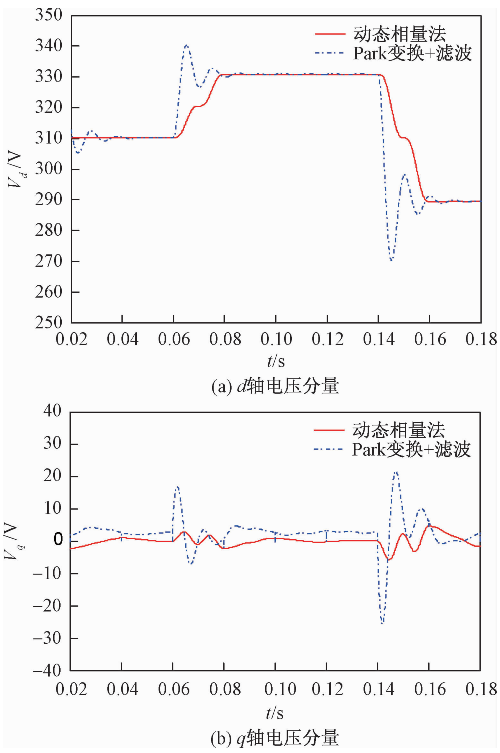


图 1　两种电压正序检测方法对比

Fig. 1　Comparison of two voltage positive sequence detection methods

从图 1 可以看出，采用传统的 dq 变换法（即 Park 变换加滤波）具有较好的快速性，可以快速得到系统的正序分量，但需要额外设置陷波器装置，并且在快速性下具有一定的超调量，会给系统绝缘造成一定损害。基于动态相量的检测方法，可以检测相对较快的检测出负序分量。图 2 为利用本文提出

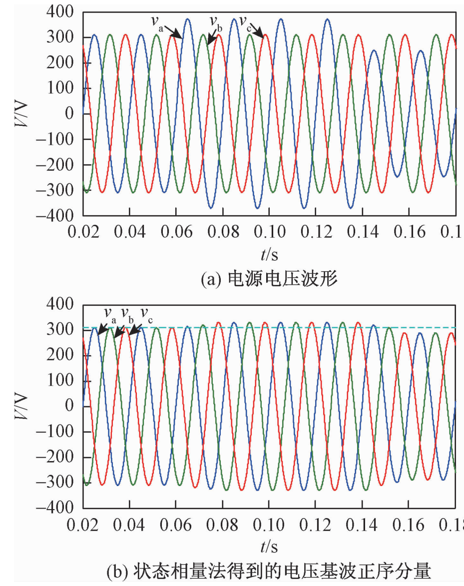


图 2　不平衡电压正序检测

Fig. 2　Simulated results of detect the positive sequence componentunder the condition of voltage unbalance

的方法得到的不平衡电压的正序分量。

对于电流谐波，采用不可控整流模拟，在 0. 01 s 加入增加不平衡负荷，结果如图 3、图 4 所示。

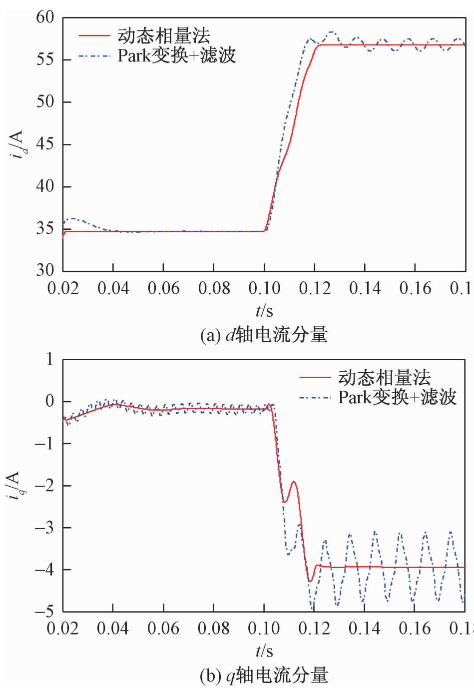
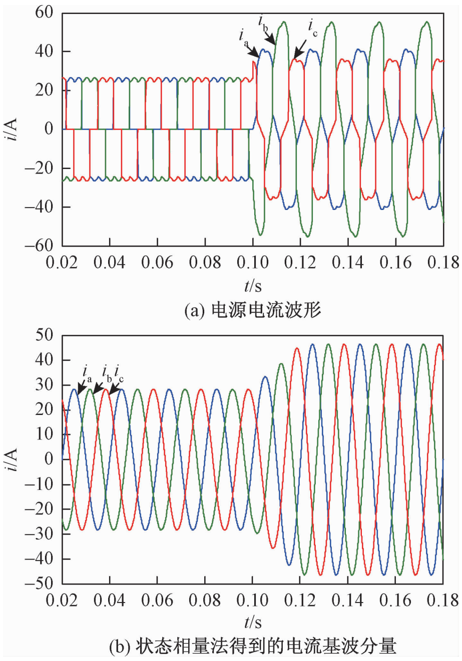


图 3　两种电流谐波检测方法对比

Fig. 3　Comparison of two current harmonic detection methods

由图 3 可以看出，传统的 Park 变换加滤波可以获得较好结果，但在不平衡负载加入时，i_d 和 i_q 存在较大的波动。同时受低通滤波器影响，截止频率越小滤波效果越好，但是快速性降低，相反截止频率越大快速性越好，滤波效果降低。基于动态相量的



(a) 电源电流波形

(b) 状态相量法得到的电流基波分量

图 4　电流谐波检测

Fig. 4　Simulated results of current harmonic detection

谐波检测虽然也需要一定的延时,但是其省去滤波环节,在电流仅含有谐波与电流畸变下都获得较好的 i_d 和 i_q 量,既可以有效地检测出基波分量。图 4 为基于动态相量法检测得到的基波电流可以看出当系统电流仅含有谐波与畸变时,该方法可以有效地得到基波电流,从而达到消除谐波的作用。

3.2　有源滤波器仿真分析

对于低压电网一般采用三相四线制供电方式,当负载包含非线性负载时,电流不仅存在负序电流分量和零序分量,也包含各种谐波电流分量。在 MATLAB 中建立三相四线制 APF 仿真模型[11],如图 5 所示,电源电压 220 V,两个直流侧电容值为 2 200 μF,直流电压 600 V,滤波电感 1 mH。非线性负载为带不同负载的三个单相不可控整流电路。仿真中采用本文提出的方法进行谐波检测。

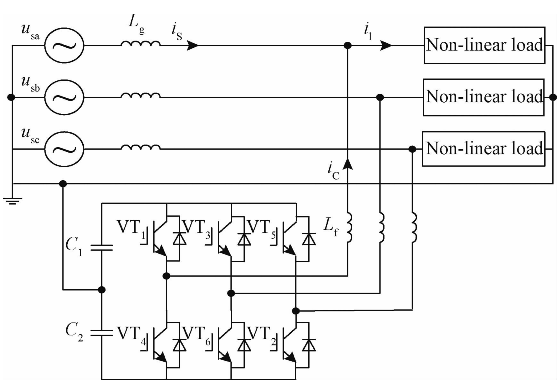
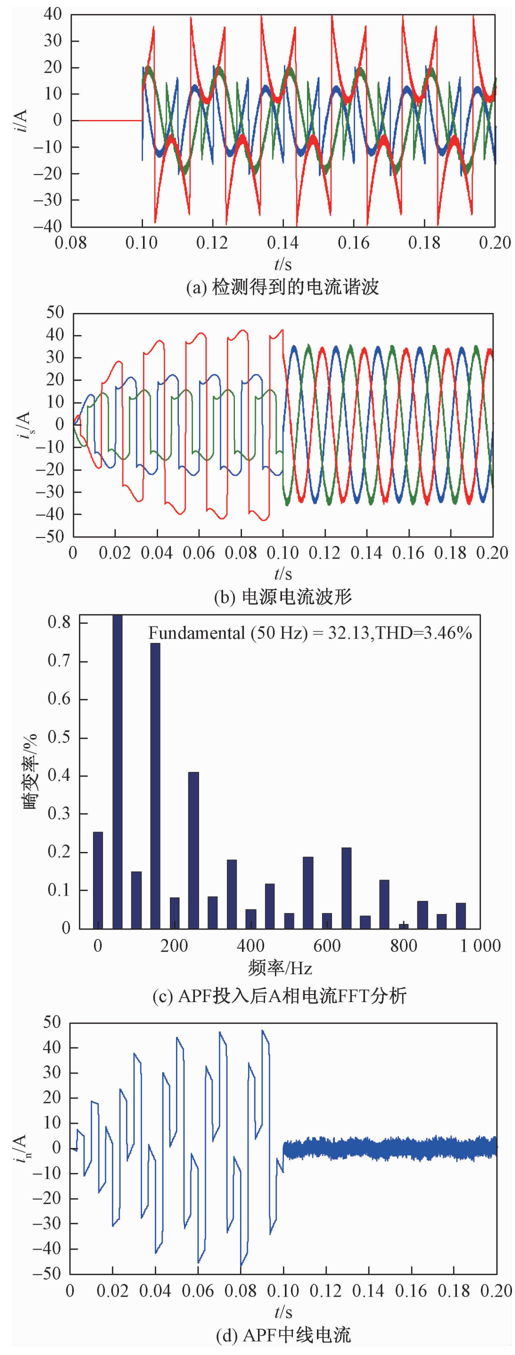


图 5　三相四线制有源滤波器拓扑

Fig. 5　Three-phase four-wire shunt APF

当 0.1 s 时将 APF 接入系统,仿真结果如图 6 所示。



(a) 检测得到的电流谐波

(b) 电源电流波形

(c) APF投入后A相电流FFT分析

(d) APF中线电流

图 6　APF 仿真结果

Fig. 6　Simulation results of APF

由图 6(a)可以看出,利用本文提出的方法可以快速检测到电流中谐波与不平衡分量。在图 6(b)中,0.1 s 前电源电流既包含谐波成分,又含有不平衡分量,APF 投入后电源电流变为正弦波,并且电源电流三相平衡。由图 6(c)知 APF 投入后 A 相电流畸变下降为 3.46%,电源电流符合电网规定的电流谐波 5% 的要求。从图 6(d)得到 APF 投入后,中线电流得到大大降低。根据 APF 仿真结果,验证了本

文所提出的谐波检测与正负序检测的有效性。

4 结论

本文提出一种基于动态相量的谐波检测与正负序分离方法,该方法不仅可以用于电流谐波的检测,也可以用于畸变电压、不平衡电压的正负序分离检测。与传统 dq 变换法进行对比,该方法可以实现谐波检测与负序分量消除,虽然需要一定的延时,但使用动态相量法下的 Park 变换矩阵,省去了传统检测方法的滤波器与陷波器装置,实现简化控制,仍具有一定的实用性。最后通过搭建三相四线制有源滤波器模型,验证了该方法的可行性与有效性。

参 考 文 献

1 施 烨, 吴在军, 窦晓波, 等. 基于自适应原理的改进型 FBD 谐波电流检测算法. 电网技术, 2014; 38(4): 1051—1058
Shi Ye, Wu Zaijun, Dou Xiaobo, *et al*. Adaptive theory based improved FBD algorithm for harmonic current detection. Power System Technology, 2014; 38(4): 1051—1058

2 李世光, 王文文, 肖佳宜, 等. 改进谐波检测法在三相四线制有源滤波器中的应用研究, 科学技术与工程, 2017; 17(11): 217—221
Li Shiguang, Wang Wenwen, Xiao Jiayi, *et al*. Application of improved harmonic detection method in three phase four wire active power filter. Science Technology and Engineering, 2017; 17(11): 217—221

3 郭旭航. 小波神经网络在电力谐波检测中的应用. 科学技术与工程, 2010; 10(11): 2784—2788
Guo Xuhang. Application of wavelet neural network to power harmonic detection. Science Technology and Engineering, 2010; 10(11): 2784—2788

4 王晓刚, 谢运祥, 帅定新. 智能控制方法应用于 APF 的综述与展望. 电网技术, 2008; 32(8): 35—41
Wang Xiaogang, Xie Yunxiang, Shuai Dingxin. Overview and prospect on application of intelligent control methods to active power filters. Power System Technology, 2008; 32(8): 35—41

5 赵 新, 金新民, 周 飞, 等. 基于比例积分-降阶谐振调节器的并网逆变器不平衡控制, 中国电机工程学报, 2013; 33(19): 84—92
Zhao Xin, Jin Xinmin, Zhou Fei, *et al*. Unbalanced control of grid-connected inverters based on proportion integraland reduced order resonant controllers. Proceedings of the CSEE, 2013; 33(19): 84—92

6 易桂平. 电网电压不平衡条件下微网恒功率控制策略研究. 电工技术学报, 2015; 30(14): 377—387
Yi Guiping. Micro-grid constant power control strategy analysis under grid voltage imbalance. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015; 30(14): 377—387

7 谢云至, 汪可友, 李国杰, 等. 不平衡情况下基于新型正负序分量检测的多电平逆变器控制策略. 电力系统保护与控制, 2014; 42(9): 74—80
Xie Yunzhi, Wang Keyou, Li Guojie *et al*. Control strategy of multilevel inverter based on a new method for detecting positive and negative sequence components under unbalanced grid voltage conditions. Power System Protection and Control, 2014; 42(9): 74—80

8 薛尚青, 蔡金锭. 基于二阶广义积分器的基波正负序分量检测方法. 电力自动化设备, 2011; 31(11): 69—73
Xue Shangqing, Cai Jinding. Detection of fundamental positive based on second-order and negative sequence components generalized integrator. Electric Power Automation Equipment, 2011; 31(11): 69—73

9 曾 正, 赵荣祥, 杨 欢. 含逆变器的微电网动态相量模型. 中国电机工程学报, 2012; 32(10): 65—71
Zeng Zheng, Zhao Rongxiang, Yang Huan. Dynamic phasors model of micro-grid with grid-connected inverters and simulation. Proceedings of the CSEE, 2012; 32(10): 65—71

10 高明海, 孙建军, 胡 伟, 等. 电网电压不平衡条件下并网逆变器的动态相量模型. 电测与仪表, 2016; 53(1): 106—111
Gao Minhai, Sun Jianju, Hu Wei, *et al*. Dynamic phasor model of grid connected inverter with unbalanced grid voltage. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016; 53(1): 106—111

11 周 晨, 郑益慧, 王 昕, 等. 基于双环控制器的电容分裂式三相四线 DSTATCOM. 电力自动化设备, 2014; 34(8): 114—121
Zhou Chen, Zheng Yihui, Wang Ting, *et al*. Control strategy based on dual-loop controller for split-capacitor-type three-phase-four-wire DSTATCOM. Power Automation Equipment, 2014; 34(8): 114—121

A Novel Detection Method for Harmonics and Positive-Negative Sequence Decomposition for Microgrid

NIU Cheng-yu, FU Zhong-wen*, YU Long
(Hebei University of Technology, Tianjin 300130, China)

[**Abstract**] Current harmonic and unbalanced voltage are two important factors that affect the power quality for microgrid. A novel dynamic phasors based method for both harmonics detection and positive-negative sequence decomposition is proposed. This method involved in a new Park transformation using the dynamic phasors, it can simplify the control structure, and can simplify the design work for a simple control and avoid LPF and BSF. Simulations on the proposed method and its application in APF are presented and show a satisfactory result.

[**Key words**] harmonic current detection positive sequence component detection dynamic phasor Park transformation active power filter