

改进瞬时对称分量法及其在 正负序电量检测中的应用

袁旭峰, 程时杰, 文劲宇

(电力安全与高效湖北省重点实验室(华中科技大学), 湖北省 武汉市 430074)

An Improved Method of Instantaneous Symmetrical Components and Its Detection for Positive and Negative Sequence Current

YUAN Xu-feng, CHENG Shi-jie, WEN Jin-yu

(Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Lab (Huazhong University of Science and Technology),
Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT : The definition of traditional symmetrical components is based on the concept of phase in which magnitudes and phases are needed during the computation. Hence, it is only suitable for steady-state analyses of unbalanced faults and systems. To solve this problem, this paper presents a new method to calculate the instantaneous symmetrical components in time-domain, and gives its corresponding equations and results. The principle of the proposed instantaneous symmetrical components is based on the rotary phases which are calculated by use of three phase instantaneous variables. As a result, positive, negative and zero sequence components can be obtained. Additional advantages of the proposed method include: without triangular function calculation, good real-time performance. With rapid computation speed, the method is suitable for the application of practical engineering. As an example, the proposed method is used for the detection of positive and negative sequence current for an unbalanced three phase power system. The simulation results verify the correctness of the proposed method.

KEY WORDS: instantaneous symmetrical components; Park transformation; synchronous reference frame method

摘要: 传统对称分量法在频域中定义, 用相量表示, 需要计算变量的模值和相位, 故只能应用于电力系统不对称故障的稳态分析, 而不能对暂态过程中的电量进行分析。针对该问题, 提出一种基于时域测量量的改进瞬时对称分量法, 并给出了相关计算公式和结果。所提方法的基本原理是利用三相电压或电流的瞬时值构造一个无延迟的旋转相量, 并以复数的形式直接计算三相电量的正序、负序和零序值。由于该

算法简单, 不需进行三角函数计算, 计算速度较快, 实时性好, 易于在工程上的实现。基于瞬时对称分量理论, 提出了一种新型的正、负序电流检测方法, 并用 PSCAD/EMTDC 仿真软件进行了验证, 结果表明所提方法是正确、可行的。

关键词: 瞬时对称分量法; 派克变换; 同步参考坐标法

0 引言

对称分量法是分析不对称故障的常用方法。传统的对称分量法定义在频域范围, 用相量表示, 在进行对称分量分析时, 需要计算各个相量的模值和相位, 故只能应用于电力系统不对称运行或不对称故障的稳态分析中。瞬时对称分量法则是在时域范围内定义的, 它利用电压或电流的瞬时值进行对称分量变换, 进而获得这些变量的正序、负序和零序分量, 其概念在文献[1-5]中均有提及。然而文献[1-5]所提方法获得的各个序分量是以复数的形式表示的, 当需要获得各个序分量的瞬时值时, 必须再经过一定的变换, 会带来一定的延时。文献[6-8]采用变换阵 T_+ 和 T_- 分别得到含2倍频谐波的序直流分量和负序直流分量, 滤除2倍频谐波, 并反变换得到各序分量。然而, 由于引入了滤波器, 影响对称分量变换的实时性。

本文提出一种改进瞬时对称分量分析方法, 利用电压或电流的瞬时值构造相应的无延时旋转相量, 然后再利用这些旋转相量进行对称分量变换, 进而获取各个序分量的瞬时值。将所提出的基于瞬时对称分量方法用于正、负序电流检测, 并用 PSCAD/EMTDC 仿真软件进行了验证。结果表明,

基金项目: 国家自然科学基金项目(50677025)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50677025).

所提的瞬时对称分量法在时域范围内对传统的对称分量法进行了扩展, 可以对三相瞬时电压或电流进行实时对称分量变换。该方法的提出扩大了对称分量法的应用范围, 使对称分量法不仅能够应用于电力系统的各种不对称运行及不对称故障的稳态分析及动态分析中, 也能应用在电力电子电路的动态电压或电流的控制和补偿中。

1 传统对称分量法

1.1 稳态条件下的对称分量法

在三相电路中, 对于任意一组不对称的三相相量(电压或电流), 可以分解为三组三相对称的相量, 当选择 a 相作为基准相时, 三相电流相量与其对称分量之间的关系(以电流为例)为

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_{a(1)} \\ \dot{I}_{a(2)} \\ \dot{I}_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $a = e^{j2\pi/3}$; $a^2 = e^{-j2\pi/3}$; $1 + a + a^2 = 0$; $a^3 = 1$; \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c 为三相电流相量; $\dot{I}_{a(1)}$ 、 $\dot{I}_{a(2)}$ 、 $\dot{I}_{a(0)}$ 分别为 a 相电流的正序、负序和零序分量, 且有:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{I}_{b(1)} \\ \dot{I}_{b(2)} \\ \dot{I}_{b(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a^2 \dot{I}_{a(1)} \\ a \dot{I}_{a(2)} \\ \dot{I}_{a(0)} \end{bmatrix}, & \begin{bmatrix} \dot{I}_{c(1)} \\ \dot{I}_{c(2)} \\ \dot{I}_{c(0)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a \dot{I}_{a(1)} \\ a^2 \dot{I}_{a(2)} \\ \dot{I}_{a(0)} \end{bmatrix} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\dot{I}_{b(1)}$ 、 $\dot{I}_{b(2)}$ 、 $\dot{I}_{b(0)}$ 分别为 b 相电流的正序、负序和零序分量; $\dot{I}_{c(1)}$ 、 $\dot{I}_{c(2)}$ 、 $\dot{I}_{c(0)}$ 分别为 c 相电流的正序、负序和零序分量; 下标 1 表示正序, 2 表示负序, 0 表示零序。由式(1)、(2)可知, 传统的对称分量法采用的是相量计算的形式, 计算相量时, 需要获取其幅值和相位。因此传统的对称分量法只能对不对称三相电量进行稳态分析。

1.2 传统瞬时对称分量法

文献[1-4]针对传统对称分量法的不足, 提出瞬时对称分量的概念, 并将其应用到不对称三相电量的动态和暂态分析中。为了与本文所提瞬时对称分量法相区别, 这里将其称为传统瞬时对称分量法。以三相电流为例, 传统瞬时对称分量法可描述为

$$\begin{bmatrix} i_{a(1)} \\ i_{a(2)} \\ i_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = S \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: i_a 、 i_b 、 i_c 分别为三相电流的瞬时值; $i_{a(1)}$ 、 $i_{a(2)}$ 、 $i_{a(0)}$ 分别为用复数形式表示的正序、负序和零序电流。利用移相算子 $S_x = e^{-jx^\circ}$, 可以将 $i_{a(1)}$ 、 $i_{a(2)}$ 、 $i_{a(0)}$

表示为如下的实数形式:

$$\begin{bmatrix} i_{a(1)} \\ i_{a(2)} \\ i_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_a + S_{120} i_b + S_{240} i_c \\ i_a + S_{240} i_b + S_{120} i_c \\ i_a + i_b + i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

或

$$\begin{bmatrix} i_{a(1)} \\ i_{a(2)} \\ i_{a(0)} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} i_a - \frac{1}{2}(i_b + i_c) + \frac{\sqrt{3}}{2} S_{90}(i_b - i_c) \\ i_a - \frac{1}{2}(i_b + i_c) - \frac{\sqrt{3}}{2} S_{90}(i_b - i_c) \\ i_a + i_b + i_c \end{bmatrix} \quad (5)$$

由式(3)、(4)、(5)可知, 由于传统瞬时对称分量法利用三相电流的瞬时值进行对称分量变换, 故可以用于三相电流的动态和暂态分析中。

2 改进的瞬时对称分量法

2.1 旋转相量

考虑式(3)所示的传统瞬时对称分量法, 其获得的正序、负序和零序电流是以复数形式表示的, 而式(4)、(5)采用移相算子进行对称分量变换又会引入延迟, 即采用当前数据 i_a 、 i_b 、 i_c 进行瞬时对称分量变换时实际上利用的是相位超前数据, 并不是根据 i_a 、 i_b 、 i_c 的实际瞬时值, 因此在实际工程上应用时, 特别是在延迟时间内发生扰动时可能产生误差^[9]。本文提出一种改进的瞬时对称分量计算方法, 即通过构造旋转相量的方法实时地获得三相电量的正序、负序和零序分量瞬时值。

令三相不对称电流的瞬时值为

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{am} \sin(\omega t + \phi_a) \\ I_{bm} \sin(\omega t + \phi_b) \\ I_{cm} \sin(\omega t + \phi_c) \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: i_a 、 i_b 、 i_c 分别为三相电流的瞬时值; I_{am} 、 I_{bm} 、 I_{cm} 分别为三相电流的幅值; ϕ_a 、 ϕ_b 、 ϕ_c 分别为三相电流的初相位。

设与三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 所对应的旋转相量分别为 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c , 则

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_a \\ \dot{I}_b \\ \dot{I}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{am} \cos(\omega t + \phi_a) + j I_{am} \sin(\omega t + \phi_a) \\ I_{bm} \cos(\omega t + \phi_b) + j I_{bm} \sin(\omega t + \phi_b) \\ I_{cm} \cos(\omega t + \phi_c) + j I_{cm} \sin(\omega t + \phi_c) \end{bmatrix} \quad (7)$$

由式(7)可知, 相量 \dot{I}_a 、 \dot{I}_b 、 \dot{I}_c 虚部的系数就是三相电流的瞬时值, 只要求出实部就可以确定这些向量。而相量实部的求取可以根据三角函数的关系式, 通过求导法或三角函数分解法完成。

2.2 求导法

分别对三相电流求导可得:

$$\begin{bmatrix} i'_a \\ i'_b \\ i'_c \end{bmatrix} = \omega \begin{bmatrix} I_{am} \cos(\omega t + \phi_a) \\ I_{bm} \cos(\omega t + \phi_b) \\ I_{cm} \cos(\omega t + \phi_c) \end{bmatrix} \quad (8)$$

可知,三相电流的导数是对应旋转相量实部的 ω 倍,由此可以利用导数构造三相电流的旋转相量。

在实际工程应用中,求导可以在离散数字量的基础上用差分来完成,即

$$\begin{bmatrix} I_{am} \cos(\omega t + \phi_a) \\ I_{bm} \cos(\omega t + \phi_b) \\ I_{cm} \cos(\omega t + \phi_c) \end{bmatrix} = \frac{1}{\omega} \begin{bmatrix} \frac{i_a(t) - i_a(t - \Delta t)}{\Delta t} \\ \frac{i_b(t) - i_b(t - \Delta t)}{\Delta t} \\ \frac{i_c(t) - i_c(t - \Delta t)}{\Delta t} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: Δt 为计算步长; $i_a(t)$ 、 $i_b(t)$ 、 $i_c(t)$ 分别为三相电流的当前步长的瞬时值; $i_a(t - \Delta t)$ 、 $i_b(t - \Delta t)$ 、 $i_c(t - \Delta t)$ 分别为上一步长三相电流的瞬时值。

2.3 三角函数分解法

由于差分方程只是求导的近似求解,不可避免地会引入误差,而且 Δt 越大,误差也越大。为此,引入三角函数分解法。 a 相电流的瞬时值可表示为

$$\begin{aligned} i_a(t) &= I_{am} \sin[\omega(t - \Delta t + \Delta t) + \phi_a] = \\ &= I_{am} \sin[\omega(t - \Delta t) + \phi_a] \cos \omega \Delta t + \\ &= I_{am} \cos[\omega(t - \Delta t) + \phi_a] \sin \omega \Delta t \end{aligned} \quad (10)$$

即

$$\begin{aligned} i_a(t) &= i_a(t - \Delta t) \cos \omega \Delta t + \\ &= I_{am} \cos[\omega(t - \Delta t) + \phi_a] \sin \omega \Delta t \end{aligned} \quad (11)$$

可得

$$I_{am} \cos[\omega(t - \Delta t) + \phi_a] = \frac{i_a(t) - i_a(t - \Delta t) \cos \omega \Delta t}{\sin \omega \Delta t} \quad (12)$$

又因为

$$\begin{aligned} I_{am} \cos(\omega t + \phi_a) &= I_{am} \cos[\omega(t - \Delta t + \Delta t) + \phi_a] = \\ &= I_{am} \cos[\omega(t - \Delta t) + \phi_a] \cos \omega \Delta t - \\ &= I_{am} \sin[\omega(t - \Delta t) + \phi_a] \sin \omega \Delta t \end{aligned} \quad (13)$$

将式(12)代入(13)整理可得

$$\begin{aligned} I_{am} \cos(\omega t + \phi_a) &= [i_a(t) - i_a(t - \Delta t) \cos \omega \Delta t] \cdot \\ &= \cot \omega \Delta t - i_a(t - \Delta t) \sin \omega \Delta t \end{aligned} \quad (14)$$

同理可得

$$\begin{aligned} I_{bm} \cos(\omega t + \phi_b) &= [i_b(t) - i_b(t - \Delta t) \cos \omega \Delta t] \cdot \\ &= \cot \omega \Delta t - i_b(t - \Delta t) \sin \omega \Delta t \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} I_{cm} \cos(\omega t + \phi_c) &= [i_c(t) - i_c(t - \Delta t) \cos \omega \Delta t] \cdot \\ &= \cot \omega \Delta t - i_c(t - \Delta t) \sin \omega \Delta t \end{aligned} \quad (16)$$

由式(14)~(16)可知,在使用这种方式构造旋转相量时,由于 $\omega \Delta t$ 实际上是常量,其三角函数值也是常量,因此实际使用时不需要进行三角函数计算,还可以有效避免求导法所带来的误差。

2.4 瞬时对称分量法

基于所构造的旋转相量,将式(7)代入式(1)、(2),经过整理可分别得到三相电量的正序、负序和零序分量的瞬时值:

$$\begin{bmatrix} i_{a(1)} \\ i_{b(1)} \\ i_{c(1)} \end{bmatrix} = \text{Im} \left\{ \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \right\} \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} i_{a(2)} \\ i_{b(2)} \\ i_{c(2)} \end{bmatrix} = \text{Im} \left\{ \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \right\} \quad (18)$$

$$\begin{bmatrix} i_{a(0)} \\ i_{b(0)} \\ i_{c(0)} \end{bmatrix} = \text{Im} \left\{ \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \right\} \quad (19)$$

式中 Im 表示对复数取虚部。改进的瞬时对称分量法具有图1所示的结构。

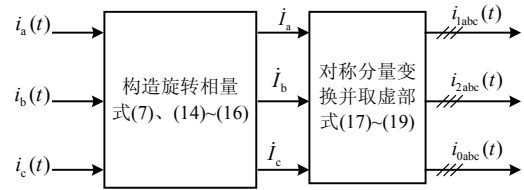


图1 改进瞬时对称分量变换

Fig. 1 Schematic diagram of the improved instantaneous symmetrical components

由上述推导可以看出,在求解旋转相量实部的过程中,使用了上一步长三相电量的瞬时值。如果在2个采样步长($t - \Delta t$ 和 t)间系统发生短路或断路故障时,则在两采样时刻电量的瞬时采样值 $i_a(t)$ 与 $i_a(t - \Delta t)$ 间会出现非模型误差。该误差经过式(12)的计算,由于分母 $\sin \omega \Delta t$ 的数值极小,使电量的瞬时值突然急剧放大,产生一个尖峰式的非模型误差。但是在下一个采样时刻,由于三相电量的采样值 $i_a(t + \Delta t)$ 和 $i_a(t)$ 均为故障后的值,计算结果不会产生这样的非模型误差,可见只需一个采样步长的时间就可以实现三相电量的对称分量实时变换。另外,利用电流突变时将在变换过程中产生尖峰这一特性,可以对电量以凹陷、凸起、中断等为特征的电流扰动进行检测和动态识别。然而,在进行无功电流和瞬时无功功率测量时,这种尖峰往往会带来

较大的误差。为此，在构造旋转变量的实部时，这种尖峰的影响可以采用限幅或其他数值计算措施来消除，以大大减小无功电流和瞬时无功功率测量的误差。

3 基于瞬时对称分量法的正、负序电量检测原理

3.1 基本思路

在进行 FACTS 设备的控制系统设计时，均假定电网三相平衡。当实际电网不平衡时，负序电流往往会对 FACTS 设备的正常工作产生不利的影响，恶化其控制性能。为解决此问题，文献[6]提出采用正、负序两套同步参考坐标法(synchronous reference frame method, SFR)的独立电流跟踪控制方案来消除负序电流的影响^[10-15]。由于正、负序电流在正、负序 SFR 中表现为直流量，因此可以实现对正、负序电流无差控制。然而，该方法在进行对称分量变换时使用了移相算子及低通滤波器，具有一定延迟。为解决该问题，作为一种应用实例，本文提出一种基于改进瞬时对称分量法的广义 dq 变换实现正、负序电流的检测。所提方法的基本思路是分别对三相电压和电流进行瞬时对称分量变换，以得到各自的三相正、负序电压和电流瞬时值。文中仅考虑三相三线制电网，因此零序电压、电流均为 0。

3.2 序电压矢量的同步参考坐标法

由于正序电压三相对称，且旋转方向与电网三相电压的旋转方向一致，因此可以直接使用同步参考坐标法实现 $abc-dq$ 变换^[16-17]。

首先将正序三相电压和电流信号进行 $\alpha\beta$ 变换，得到：

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha(1)} \\ u_{\beta(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & -\sqrt{\frac{1}{6}} & -\sqrt{\frac{1}{6}} \\ 0 & \sqrt{\frac{1}{2}} & -\sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_{a(1)} \\ u_{b(1)} \\ u_{c(1)} \end{bmatrix} = \mathbf{S}_{abc/\alpha\beta} \begin{bmatrix} u_{a(1)} \\ u_{b(1)} \\ u_{c(1)} \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha(1)} \\ i_{\beta(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{\frac{2}{3}} & -\sqrt{\frac{1}{6}} & -\sqrt{\frac{1}{6}} \\ 0 & \sqrt{\frac{1}{2}} & -\sqrt{\frac{1}{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a(1)} \\ i_{b(1)} \\ i_{c(1)} \end{bmatrix} = \mathbf{S}_{abc/\alpha\beta} \begin{bmatrix} i_{a(1)} \\ i_{b(1)} \\ i_{c(1)} \end{bmatrix} \quad (21)$$

在 $\alpha\beta$ 坐标中，同步旋转角 θ 可用式(22)求得：

$$\begin{bmatrix} \cos \theta \\ \sin \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u_{\alpha(1)} / \sqrt{u_{\alpha(1)}^2 + u_{\beta(1)}^2} \\ u_{\beta(1)} / \sqrt{u_{\alpha(1)}^2 + u_{\beta(1)}^2} \end{bmatrix} \quad (22)$$

使用同步旋转角 θ ，可以求得正序电流在电压同步参考坐标下的投影，即广义 dq 变换结果为

$$\begin{bmatrix} i_{d(1)} \\ i_{q(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{\alpha(1)}}{\sqrt{u_{\alpha(1)}^2 + u_{\beta(1)}^2}} & \frac{u_{\beta(1)}}{\sqrt{u_{\alpha(1)}^2 + u_{\beta(1)}^2}} \\ -\frac{u_{\beta(1)}}{\sqrt{u_{\alpha(1)}^2 + u_{\beta(1)}^2}} & \frac{u_{\alpha(1)}}{\sqrt{u_{\alpha(1)}^2 + u_{\beta(1)}^2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha(1)} \\ i_{\beta(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (i_{\alpha(1)}u_{\alpha(1)} + i_{\beta(1)}u_{\beta(1)}) / \sqrt{u_{\alpha(1)}^2 + u_{\beta(1)}^2} \\ (u_{\alpha(1)}i_{\beta(1)} - i_{\alpha(1)}u_{\beta(1)}) / \sqrt{u_{\alpha(1)}^2 + u_{\beta(1)}^2} \end{bmatrix} \quad (23)$$

同理，负序电流的广义 dq 变换结果为

$$\begin{bmatrix} i_{d(2)} \\ i_{q(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{u_{\alpha(2)}}{\sqrt{u_{\alpha(2)}^2 + u_{\beta(2)}^2}} & \frac{u_{\beta(2)}}{\sqrt{u_{\alpha(2)}^2 + u_{\beta(2)}^2}} \\ -\frac{u_{\beta(2)}}{\sqrt{u_{\alpha(2)}^2 + u_{\beta(2)}^2}} & \frac{u_{\alpha(2)}}{\sqrt{u_{\alpha(2)}^2 + u_{\beta(2)}^2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\alpha(2)} \\ i_{\beta(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (i_{\alpha(2)}u_{\alpha(2)} + i_{\beta(2)}u_{\beta(2)}) / \sqrt{u_{\alpha(2)}^2 + u_{\beta(2)}^2} \\ (u_{\alpha(2)}i_{\beta(2)} - i_{\alpha(2)}u_{\beta(2)}) / \sqrt{u_{\alpha(2)}^2 + u_{\beta(2)}^2} \end{bmatrix} \quad (24)$$

根据式(23)、(24)可知，在进行广义 dq 变换时，无需锁相环和进行三角函数计算，在工程上易于实现。广义 dq 变换对应的逆变换为

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha(1)} \\ i_{\beta(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (i_{d(1)}u_{\alpha(1)} - i_{q(1)}u_{\beta(1)}) / \sqrt{u_{\alpha(1)}^2 + u_{\beta(1)}^2} \\ (u_{\alpha(1)}i_{q(1)} + i_{d(1)}u_{\beta(1)}) / \sqrt{u_{\alpha(1)}^2 + u_{\beta(1)}^2} \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha(2)} \\ i_{\beta(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (i_{d(2)}u_{\alpha(2)} - i_{q(2)}u_{\beta(2)}) / \sqrt{u_{\alpha(2)}^2 + u_{\beta(2)}^2} \\ (u_{\alpha(2)}i_{q(2)} + i_{d(2)}u_{\beta(2)}) / \sqrt{u_{\alpha(2)}^2 + u_{\beta(2)}^2} \end{bmatrix} \quad (26)$$

3.3 正、负序电流检测原理框图

基于改进瞬时对称分量法的正、负序电流检测原理如图 2 所示。由图可知，正、负序电流检测方法具有正序和负序 2 个独立回路，每一个回路均由瞬时对称分量变换 $\rightarrow \alpha\beta$ 变换 \rightarrow 广义 dq 变换 \rightarrow 低通滤波器(LPF) \rightarrow 广义 dq 逆变换 $\rightarrow \alpha\beta$ 逆变换 \rightarrow 三相序电流基波分量等环节构成。其中，瞬时对称分量变换采用图 1 所示的改进瞬时对称分量模块；广义 dq 变换利用式(23)、(24)进行，广义 dq 逆变换分别采用式(25)、(26)；LPF 模块用以滤除 dq 分量中的非直流分量。由以上检测回路图可知，通过广义 dq 变换，可以分别得到三相电量的正、负序 dq 分量，而且由于检测回路中没有采用移相算子和低通滤波器，因此可以实时地获取三相电量得正、负序的 dq 分量。当电量中含有谐波分量时，则广义 dq 变换输出的 dq 分量含有非直流分量。通过加入图中所示的低通滤波器可滤除 dq 分量的非直流分量，获得电量基波分量所对应的 dq 直流分量，然后进

行广义 dq 逆变换和 $\alpha\beta$ 逆变换即可获得正、负序的基波分量。在三相三线制系统中, 零序分量为 0,

因此正序和负序电流的基波分量直接相加即可得到三相电流的基波分量。

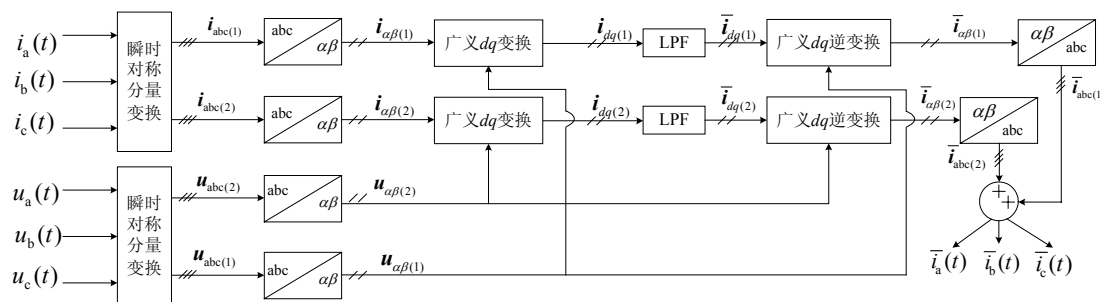


图2 基于瞬时对称分量法的正、负序电流检测原理图

Fig. 2 Principle diagram of sequence current detection based on instantaneous symmetrical components

4 仿真分析

利用仿真软件 PSCAD/EMTDC 对本文提出的改进瞬时对称分量法及正、负序电流检测方法进行仿真分析。在仿真系统中, 电源采用线电压为 382.867 2 kV、内电阻为 3.737 Ω 的三相电压源, 负载端为星型连接的电阻负载, 每相电阻值为 10 Ω 。

为验证基于改进瞬时对称分量法的正、负序电流检测方法在系统发生三相对称和不对称故障时的工作特性, 对一个三相对称电源, 在 0.5 s 时设置

了电压凹陷, 电源电压由原来的 382.767 2 kV 降为 200 kV, 持续时间 0.05 s; 在 1.0 s 时设置了两相短路故障, 持续时间 0.06 s; 在 1.5 s 时设置了单相断路故障, 持续时间 0.06 s; 在电流测量点注入三相谐波电流, 用来模拟三相电流的畸变。

基于瞬时对称分量法的正、负序及基波电流检测的仿真结果如图 3 所示。由图可知, 无论发生对称故障和不对称故障, 采用本文提出的瞬时对称分量法均可以实时实现三相电流的正、负序分解。同

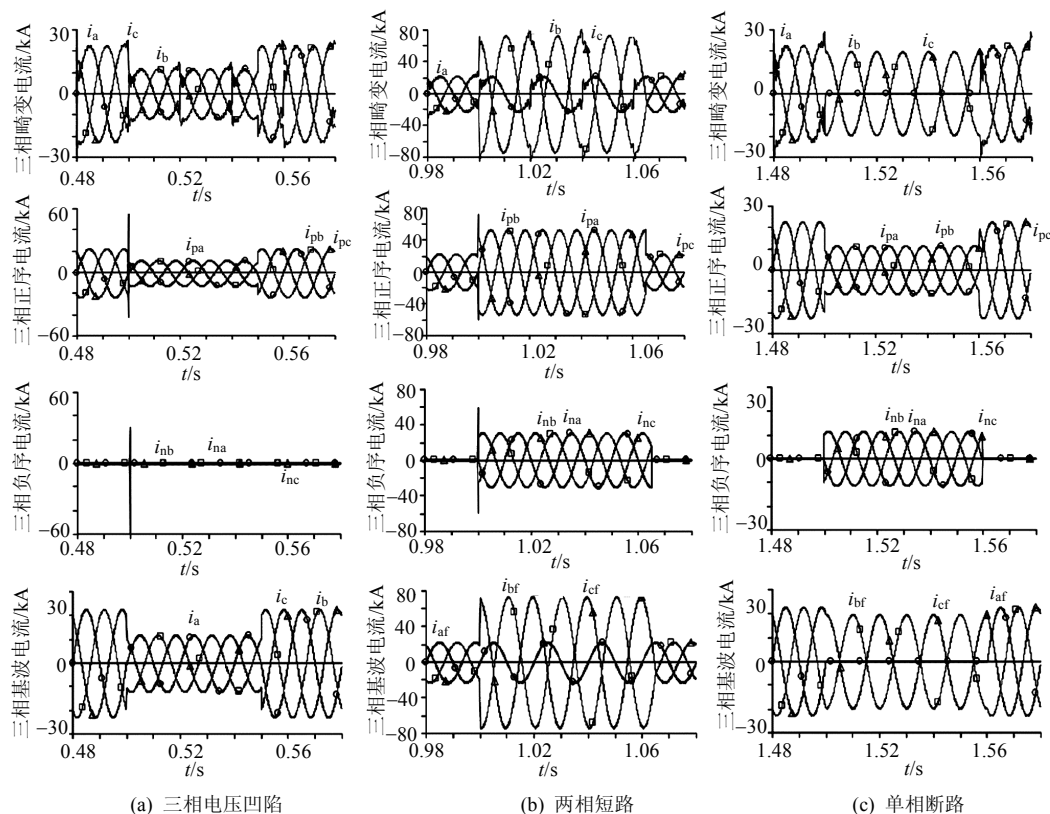


图3 基于瞬时对称分量法的正、负序及基波电流检测

Fig. 3 Positive, negative sequence and fundamental component currents detection based on instantaneous symmetrical components

时,在电流突变的过程中,正、负序分量均会产生持续时间一个步长的尖峰,这与前文分析结果吻合。为了降低尖峰值,文中采用了限幅措施。另外,采用本文的检测方法,不仅可以检测到电流的基波分量,而且可以无延迟地检测到正、负序电流。对检测到的正、负序电流进行广义 dq 变换即可以将其转换为直流分量,进而为各序电流控制提供快捷的参考信号。

在发生单相断路时,图4为传统瞬时对称分量法的仿真结果。可知,采用传统的瞬时对称分量法,在故障发生时,由于没有利用当前的实际电量参数,而是利用的相位超前数据,没有实时获得序分量。文中采用式(5)的移相算子 S_{90} ,如仿真结果所示引入了 $1/4$ 周波的延迟。而采用本文的改进瞬时对称分量法,则基本上不会引入延迟,图3(c)中的仿真结果进一步说明了这一点。

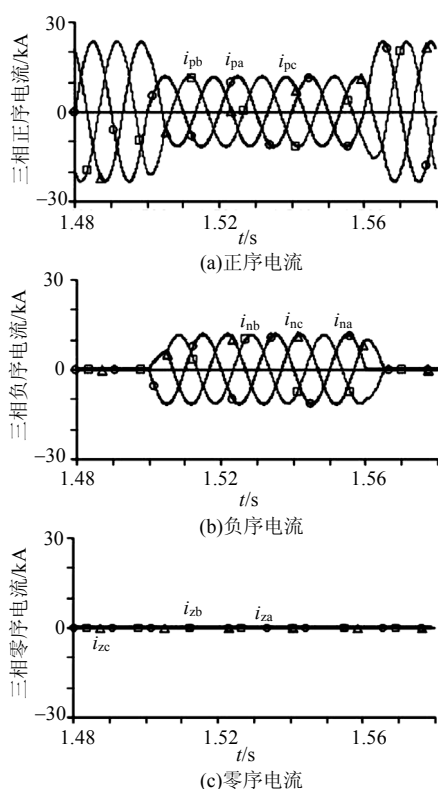


图4 在单相断路时传统瞬时对称分量变换结果
Fig. 4 Simulation results based on traditional instantaneous symmetrical components at single phase break fault

5 结论

针对传统对称分量法只适用于稳态分析的缺点及其不足,提出了一种改进的瞬时对称分量法,即利用电压或电流的瞬时值构造相应的无延时旋转

相量,然后再利用这些旋转相量进行对称分量变换,进而获得各个序分量的瞬时值。

(1) 该方法在时域范围内对传统的对称分量法进行了扩展,可以对三相瞬时电压或电流进行实时对称分量变换,扩大了对称分量法的应用范围,使对称分量法不仅能够应用在电力系统的各种不对称运行及不对称故障的稳态分析及动态分析中,也能应用在电力电子电路的动态电压或电流的控制和补偿中。

(2) 同时,改进瞬时对称分量法的核心思想在于构造无延时相量,而无延时相量则是通过三角函数分解法来实现。因此不仅适用于电压、电流等电量的瞬时对称分量变换,也适用于磁通等非电量的瞬时对称分量变换。

(3) 基于该理论,提出了一种新型的正、负序电流检测方法,并应用于三相不对称畸变电路仿真中,结果证明了瞬时对称分量法及正、负序电流检测方法的正确性。

参考文献

- [1] Iravani M R, Karimi-Ghartemani M. Online estimation of steady state and instantaneous symmetrical components[J]. IEE Proc-Gener. Transm. Distrib., 2003, 150(5): 616-622.
- [2] Arindam Ghosh, Avinash Joshi. A new approach to load balancing and power factor correction in power distribution system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(1): 417-421.
- [3] Gerardus C Paap. Symmetrical components in the time domain and their application to power network calculations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2000, 15(2): 522-528.
- [4] John S Hsu. Instantaneous phasor method for obtaining instantaneous balanced fundamental components for power quality control and continuous diagnostics[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1494-1500.
- [5] Masoud Karimi-Ghartemani, Houshang Karimi. Analysis of symmetrical components in time-domain[C]. The 48th Midwest Symposium on Circuits and Systems, Covington, Kentucky, USA, 2005.
- [6] 丁洪发,段献忠,何仰赞. 同步检测法的改进及其在三相不对称无功补偿中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(6): 17-20.
Ding Hongfa, Duan Xianzhong, He Yangzan. Improvement of synchronous detection method and application for VAR compensation of unbalanced three-phase systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(6): 17-20 (in Chinese).
- [7] 许树楷,宋强,朱永强,等. 用于不平衡补偿的变压器隔离式链式D-STATCOM的研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 137-143.
Xu Shukai, Song Qiang, Zhu Yongqiang, et al. Research on the transformer-isolated multilevel H-bridges D-STATCOM for unbalanced load compensation[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(9): 137-143 (in Chinese).
- [8] 白丹,蔡志开,彭力,等. 三相逆变电源不平衡负载研究[J]. 电

- 力系统自动化, 2004, 28(9): 53-57.
- Bai Dan, Cai Zhikai, Peng Li, et al. Study on the unbalanced load of a three-phase inverter[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(9): 53-57 (in Chinese).
- [9] 赵国亮, 刘宝志, 肖湘宁, 等. 一种无时延的改进 d-q 变换在动态电压扰动识别中的应用[J]. 电网技术, 2004, 28(7): 53-57.
- Zhao Guoliang, Liu Baozhi, Xiao Xiangning, et al. Application of improved d-q transform without time delay in dynamic voltage disturbance identification[J]. Power System Technology, 2004, 28(7): 53-57 (in Chinese).
- [10] 张崇巍, 张兴. PWM 整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [11] 张兴, 季建强, 张崇巍, 等. 基于内模控制的三相电压型 PWM 整流器不平衡控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(13): 51-56.
- Zhang Xing, Ji Jianqiang, Zhang Chongwei, et al. Study on internal model control based three-phase PWM rectifier under unbalanced input voltage condition[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(13): 51-56 (in Chinese).
- [12] Pascal Rioual, Hervé Pouliquen, Jean-Paul Louis. Regulation of a PWM rectifier in the unbalanced network state using a generalized model[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1996, 11(3): 495-502.
- [13] Hong-seok Song, Kwanghee Nam. Dual current control scheme for PWM converter under unbalanced input voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(5): 953-959.
- [14] Hong-Seok Song, In-Won Joo, Kwanghee Nam. Source voltage sensorless estimation scheme for PWM rectifiers under unbalanced conditions[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(6): 1238-1245.
- [15] Yongsug Suh, Thomas A Lipo. Modeling and analysis of instantaneous active and reactive power for PWM AC/DC converter under generalized unbalanced network[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2006, 21(3): 1530-1540.
- [16] 陈东华, 谢少军, 周波. 用于有源电力滤波器谐波和无功电流检测的一种改进同步参考坐标法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 62-67.
- Chen Donghua, Xie Shaojun, Zhou Bo. An Improved synchronous reference frame method for harmonics and reactive currents detection of active power filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 62-67 (in Chinese).
- [17] 纪飞峰, 周荔丹, 姚钢, 等. 基于同步对称分量法的静止无功补偿装置[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(3): 24-29.
- Ji Feifeng, Zhou Lidan, Yao Gang, et al. Static var compensator based on the method of synchronous symmetrical component [J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 24-29 (in Chinese).

收稿日期: 2007-04-13。

作者简介:

袁旭峰(1976—), 男, 博士研究生, 研究方向为高压直流输电的运行与控制, 及FACTS技术在电力系统中的应用, ee.xfyuan@gzu.edu.cn;

程时杰(1945—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为人工智能在电力系统中的应用;

文劲宇(1970—)男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统分析与控制。

(编辑 王剑乔)