



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111521858 A

(43)申请公布日 2020.08.11

(21)申请号 202010562964.0

(22)申请日 2020.06.18

(71)申请人 国网山西省电力公司电力科学研究院

地址 030001 山西省太原市迎泽区青年路6号

(72)发明人 曲莹 郑惠萍 李明贤 唐震 郝捷 刘新元 张一帆 张谦 暴悦爽 高宏 皮军

(74)专利代理机构 江苏圣典律师事务所 32237 代理人 邓丽 王伟

(51)Int.Cl. G01R 19/00(2006.01)

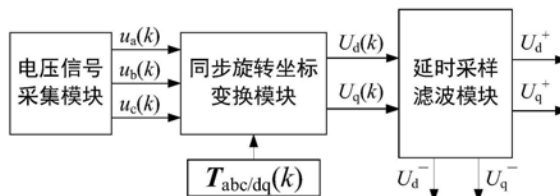
权利要求书2页 说明书8页 附图5页

(54)发明名称

一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法

(57)摘要

本发明属于电力电子领域,具体公开了一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法,包括:电网电压信号采集模块、同步旋转坐标变换模块、延时采样周期滤波模块、幅值与相位计算模块、同步旋转坐标逆变换模块。仅需要对不对称三相电压进行同步旋转坐标变换,然后利用延时采样周期滤波算法即可准确获得同步旋转坐标系下的直流分量,即正序分量。延时采样周期滤波模块通过对同步旋转坐标系上的电压分量采取延时两个采样周期来快速分离正序和负序电压分量。



1. 一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法,其特征在于,包括:电网电压信号采集模块、同步旋转坐标变换模块、延时采样周期滤波模块、幅值与相位计算模块、同步旋转坐标逆变换模块;

(1) 所述电网电压信号采集模块采集电网电压的三相不平衡电压信号,得到包含正序与负序分量的三相电网电压信号;

(2) 所述同步旋转坐标变换模块将包含正、负序分量的三相电网电压信号进行同步旋转坐标变换,得到两相旋转坐标系下的电压分量;

(3) 所述延时采样周期滤波模块对同步旋转坐标系下的电压分量分别采取延时一个和两个采样周期来快速提取直流分量与二倍频交流分量,即电网电压的正序与负序电压分量;

(4) 所述幅值与相位计算模块将两相旋转坐标系下的直流分量和二倍频交流分量电压分量,分别计算电网电压的实时幅值与相位;

(5) 所述同步旋转坐标逆变换模块将两相旋转坐标系下的直流分量以及二倍频交流分量电压信号变换为三相电网电压正、负序分量信号。

2. 根据权利要求1所述的一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法,其特征在于:所述步骤(3)中,同步旋转坐标系下的电压分量分别延迟 $T_s$ 和 $2T_s$ ,其中所述 $T_s$ 为采样周期;

所述同步旋转坐标系下的直流分量第 $k$ 次采样时的计算公式为:

$$U_d^+(k) = \frac{U_d(k) + U_d(k-2) - 2U_d(k-1) \cos(2\omega T_s)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

$$U_q^+(k) = \frac{U_q(k) + U_q(k-2) - 2U_q(k-1) \cos(2\omega T_s)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

所述同步旋转坐标系下的二倍频交流分量第 $k$ 次采样时的计算公式为:

$$U_d^{(2)}(k) = \frac{U_d(k+1) + U_d(k-1) - 2U_d(k)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

$$U_q^{(2)}(k) = \frac{U_q(k+1) + U_q(k-1) - 2U_q(k)}{2[\cos(2\omega T_s) - 1]}$$

3. 根据权利要求2所述的一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法,其特征在于:所述步骤(3)中,延时采样周期滤波模块包括延时模块与延时采样周期滤波算法;

所述延时采样周期滤波算法通过将同步旋转坐标系上的原始信号 $U_{d/q}$ 、延时一个采样周期的信号 $U_{d/q}(t-T_s)$ 、延时两个采样周期的信号 $U_{d/q}(t-2T_s)$ 进行数学运算,得到同步旋转坐标系下的直流分量和二倍频交流分量;

所述同步旋转坐标系下的直流分量第 $k$ 次采样时的构造公式为:

$$x_d^+(k) = \frac{x_d(k) + x_d(k-2) - 2x_d(k-1) \cos(2\omega T_s)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

$$x_q^+(k) = \frac{x_q(k) + x_q(k-2) - 2x_q(k-1) \cos(2\omega T_s)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

其中,  $x_d$ 表示d轴分量,  $x_q$ 表示q轴分量;

所述同步旋转坐标系下的二倍频交流分量第k次采样时的构造公式为:

$$U_d^{(2)} = U_m^- \cos(2\omega t + \delta) = \frac{U_d(k+1) + U_d(k-1) - 2U_d(k)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

$$U_q^{(2)} = U_m^- \sin(2\omega t + \delta) = \frac{U_q(k+1) + U_q(k-1) - 2U_q(k)}{2[\cos(2\omega T_s) - 1]}$$

4. 根据权利要求1所述的一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法,其特征在于:所述步骤(4)中,三相电网电压的正序分量相位计算公式为:

$$\varphi = \omega t + \theta = \omega t + \arctan\left(\frac{U_q}{U_d}\right) + \theta_{ex}$$

其中,  $\theta_{ex}$ 表示判断条件相位;

加入判断条件相位使得求出的相位在 $0 \sim 2\pi$ 之间,判断条件如下:

$$\theta_{ex} = \begin{cases} 0 & U_d > 0, U_q > 0 \\ 0 & U_d = 0 \\ 0 & U_d = 0, U_q > 0 \\ \pi & U_d < 0, U_q \neq 0 \\ \pi & U_d = 0, U_q < 0 \\ 2\pi & U_d > 0, U_q < 0 \end{cases}$$

三相电网电压正序与负序电压分量幅值计算公式为:

$$U_m^+ = \sqrt{(U_d^+)^2 + (U_q^+)^2}$$

$$U_m^- = \sqrt{(U_d^{(2)})^2 + (U_q^{(2)})^2}$$

5. 根据权利要求1所述的一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法,其特征在于:所述步骤(5)中,同步旋转坐标逆变换模块将两相旋转坐标系下的直流分量以及二倍频交流分量电压信号变换为三相电网电压正、负序分量信号,其中,变换公式为

$$\begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = T_{dq/abc}(\omega t) \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix}$$

同步旋转逆变换矩阵为 $T_{dq/abc}(\omega t)$ ,其中,

$$T_{dq/abc}(\omega t) = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

## 一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及电力电子领域,特别涉及一种快速准确提取旋转坐标系下二倍频交流分量的实用方法,适用于电网不平衡工况。

### 背景技术

[0002] 电网电压出现不平衡故障,会对并网逆变器系统的稳定运行造成很大的影响。快速准确地获取电网电压正序分量是并网电力电子系统正常运行、实现高性能控制、相位检测、频率检测等的关键问题。在三相不平衡电网电压条件下,快速准确地获取电压、电流的正序分量是保证并网逆变器正常运行的基本要求。三相不平衡电压在旋转坐标系上表现为直流分量与二倍频交流分量。通常需要设计滤波器算法以滤除该二倍频交流分量,来提取直流分量(对应静止坐标系下的正序分量)。现有的交流分量抑制方法多以使用低通滤波器为主,但实际应用中很难在动态响应速度和交流衰减能力之间做出理想的折中方案。延迟信号消除法可以有效地解决同步旋转坐标系下的二倍频波动问题,但该算法需要延时1/4个工频周期,增加了响应时间。滑动平均滤波方法滤除低频分量时同样存在响应速度缓慢的问题。

### 发明内容

[0003] 本发明针对现有不平衡工况下电压正序分量的提取速度缓慢的缺点,提供了一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法。

[0004] 本发明通过以下技术方案实现:

[0005] 一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法,仅需要对不对称三相电压进行同步旋转坐标变换,然后利用延时采样周期滤波算法即可准确获得同步旋转坐标系下的直流分量,即正序分量。延时采样周期滤波算法通过对同步旋转坐标系上的电压分量采取延时两个采样周期来快速分离正序和负序电压分量。

[0006] 本发明无需实时更新电网频率信息,即可迅速滤除不平衡电网电压的二倍频交流分量,且计算精度能够满足工程应用的要求,是一种简单有效的实用算法,且具有良好的应用价值。本发明公开的技术具有响应速度快、计算精度高、实现过程简单等优点,可在不平衡电网的环境下实现高性能的信号检测与电力设备控制。本发明所述一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法,包括:电网电压信号采集模块、同步旋转坐标变换模块、延时采样周期滤波模块、幅值与相位计算模块、同步旋转坐标逆变换模块。

[0007] 所述的电网电压信号采集模块,用于采集电网电压的三相不平衡电压信号,得到包含正序与负序分量的三相电网电压信号。

[0008] 所述的同步旋转坐标变换模块,用于将包含正、负序分量的三相电网电压信号进行同步旋转坐标变换,得到两相旋转坐标系下的电压分量。

[0009] 所述的延时采样周期滤波模块,用于对同步旋转坐标系下的电压分量分别采取延时一个和两个采样周期来快速提取直流分量与二倍频交流分量,即电网电压的正序与负序

电压分量。

[0010] 所述的二倍频交流分量提取方法和幅值与相位计算模块结合,将两相旋转坐标系下的直流分量和二倍频交流分量电压信号,分别计算电网电压的实时幅值与相位。所述的同步旋转坐标逆变换模块,用于将两相旋转坐标系下的直流分量以及二倍频交流分量电压信号变换为三相电网电压正、负序分量信号。

[0011] 本发明所述一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法,包括以下步骤:

[0012] (1) 不平衡三相电网电压信号由正序分量与负序分量组成,所述三相电压可通过如下公式表示:

$$[0013] \quad U = U^+ + U^-$$

[0014] 其中,正序与负序电压分量的表达式为:

$$[0015] \quad U^+ = \begin{bmatrix} u_a^+(t) \\ u_b^+(t) \\ u_c^+(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^+ \sin(\omega t + \theta) \\ U_m^+ \sin(\omega t - 2\pi/3 + \theta) \\ U_m^+ \sin(\omega t + 2\pi/3 + \theta) \end{bmatrix}$$

$$[0016] \quad U^- = \begin{bmatrix} u_a^-(t) \\ u_b^-(t) \\ u_c^-(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^- \sin(\omega t + \delta) \\ U_m^- \sin(\omega t + 2\pi/3 + \delta) \\ U_m^- \sin(\omega t - 2\pi/3 + \delta) \end{bmatrix}$$

[0017] 式中: $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 分别表示a,b,c相电压, $\omega$ 表示电压角频率,t为时间, $\theta$ 表示正序电压初始相位, $\delta$ 表示负序电压初始相位, $U_m$ 表示幅值。

[0018] (2) 将三相电网电压信号进行同步旋转坐标变换,得到两相旋转坐标系下的电压信号,其中所述数学变换方程为:

$$[0019] \quad \begin{bmatrix} U_d(t) \\ U_q(t) \end{bmatrix} = T_{abc/dq}(\omega t) \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix}$$

[0020] 式中: $U_d$ 表示d轴电压, $U_q$ 表示q轴电压, $T_{abc/dq}$ 表示同步旋转坐标变换矩阵。

[0021] 其中,

$$[0022] \quad T_{abc/dq}(\omega t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

[0023] (3) 通过步骤(2)得到不平衡三相电压在旋转坐标系下的电压分量,其表达式为:

$$[0024] \quad \begin{cases} U_d(t) = U_m^+ \cos \theta - U_m^- \cos(2\omega t + \delta) \\ U_q(t) = U_m^+ \sin \theta + U_m^- \sin(2\omega t + \delta) \end{cases}$$

[0025] (4) 将步骤(3)中的同步旋转坐标系下的电压分量分别延迟 $T_s$ 和 $2T_s$ ,得到 $U_d(t - T_s)$ ,  $U_d(t - 2T_s)$ ,  $U_q(t - T_s)$ ,  $U_q(t - 2T_s)$ ,其中所述 $T_s$ 为采样周期。通过联立求解 $U_d(t - T_s)$ ,  $U_d(t - 2T_s)$ ,  $U_q(t - T_s)$ ,  $U_q(t - 2T_s)$ 四个方程,可以得到同步旋转坐标系下的直流分量。

[0026] 其中,所述同步旋转坐标系下的直流分量第k次采样时的计算公式为:

$$[0027] \quad U_d^+(k) = \frac{U_d(k) + U_d(k-2) - 2U_d(k-1) \cos(2\omega T_s)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

$$[0028] \quad U_q^+(k) = \frac{U_q(k) + U_q(k-2) - 2U_q(k-1) \cos(2\omega T_s)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

[0029] (5) 同理步骤(4), 通过联立求解 $U_d(t-T_s)$ ,  $U_d(t-2T_s)$ ,  $U_q(t-T_s)$ ,  $U_q(t-2T_s)$  四个方程, 可以得到同步旋转坐标系下的二倍频交流分量。

[0030] 其中, 所述同步旋转坐标系下的二倍频交流分量第k次采样时的计算公式为:

$$[0031] \quad U_d^{(2)}(k) = \frac{U_d(k+1) + U_d(k-1) - 2U_d(k)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

$$[0032] \quad U_q^{(2)}(k) = \frac{U_q(k+1) + U_q(k-1) - 2U_q(k)}{2[\cos(2\omega T_s) - 1]}$$

[0033] 优选的是, 所述的延时采样周期滤波模块包括延时模块与延时采样周期滤波算法。所述延时采样周期滤波模块通过对旋转坐标系下的电压分量分别采取延时一个和两个采样周期来快速提取直流分量与二倍频交流分量, 即电网电压的正序与负序电压分量。

[0034] 所述延时采样周期滤波算法通过将同步旋转坐标系上的原始信号 $U_{d/q}$ 、延时一个采样周期的信号 $U_{d/q}(t-T_s)$ 、延时两个采样周期的信号 $U_{d/q}(t-2T_s)$  进行数学运算, 得到同步旋转坐标系下的直流分量和二倍频交流分量。

[0035] 其中, 所述同步旋转坐标系下的直流分量第k次采样时的构造公式为:

$$[0036] \quad x_d^+(k) = \frac{x_d(k) + x_d(k-2) - 2x_d(k-1) \cos(2\omega T_s)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

$$[0037] \quad x_q^+(k) = \frac{x_q(k) + x_q(k-2) - 2x_q(k-1) \cos(2\omega T_s)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

[0038] 式中:  $x_d$ 表示d轴分量,  $x_q$ 表示q轴分量。其中, 所述同步旋转坐标系下的二倍频交流分量第k次采样时的构造公式为:

$$[0039] \quad U_d^{(2)} = U_m^- \cos(2\omega t + \delta) = \frac{U_d(k+1) + U_d(k-1) - 2U_d(k)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

$$[0040] \quad U_q^{(2)} = U_m^- \sin(2\omega t + \delta) = \frac{U_q(k+1) + U_q(k-1) - 2U_q(k)}{2[\cos(2\omega T_s) - 1]}$$

[0041] (6) 步骤(4)所述的同步旋转坐标变换模块中同步旋转变换矩阵为 $T_{abc/dq}(\omega t)$ , 其中,

$$[0042] \quad T_{abc/dq}(\omega t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

[0043] 优选的是, 所述的幅值与相位计算模块将两相旋转坐标系下的直流分量和二倍频交流分量信号, 分别计算电网电压的实时幅值与相位。其中, 三相电网电压的正序分量相位计算公式为:

$$[0044] \quad \varphi = \omega t + \theta = \omega t + \arctan\left(\frac{U_q}{U_d}\right) + \theta_{ex}$$

[0045] 其中,  $\theta_{ex}$  表示判断条件相位。

[0046] 假设相位在  $0 \sim 2\pi$  之间, 但是根据步骤 (4) 得到两相旋转坐标系下的直流分量信号所得的相位可能不在这个区间内, 加入判断条件相位使得求出的相位在  $0 \sim 2\pi$  之间, 判断条件如下:

$$[0047] \quad \theta_{ex} = \begin{cases} 0 & U_d > 0, U_q > 0 \\ 0 & U_d = 0 \\ 0 & U_d = 0, U_q > 0 \\ \pi & U_d < 0, U_q \neq 0 \\ \pi & U_d = 0, U_q < 0 \\ 2\pi & U_d > 0, U_q < 0 \end{cases}$$

[0048] 三相电网电压正序与负序电压分量幅值计算公式为:

$$[0049] \quad U_m^+ = \sqrt{(U_d^+)^2 + (U_q^+)^2}$$

$$[0050] \quad U_m^- = \sqrt{(U_d^{(2)})^2 + (U_q^{(2)})^2}$$

[0051] (7) 所述的同步旋转坐标逆变换模块, 用于将两相旋转坐标系下的直流分量以及二倍频交流分量电压信号变换为三相电网电压正、负序分量信号。其中, 变换公式为

$$[0052] \quad \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = T_{dq/abc}(\omega t) \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix}$$

[0053] 同步旋转逆变换矩阵为  $T_{dq/abc}(\omega t)$ , 其中,

$$[0054] \quad T_{dq/abc}(\omega t) = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

[0055] 采用如上所述的二倍频交流分量提取方法, 可用于正序与负序分量的分离、电网同步相位检测、电能质量控制、不平衡电网故障穿越等并网逆变器控制等领域。与现有技术相比, 本发明具有以下优点:

[0056] (1) 本发明滤波方法只需进行一次同步旋转坐标变换, 就可以利用延时采样周期滤波模块滤除不平衡电网电压中的二倍频交流分量, 无需闭环检测方法中的参数调试过程;

[0057] (2) 本发明滤波方法具有响应速度快的优点, 极大地缩短了滤波过程中的动态响应时间;

[0058] (3) 本发明滤波方法具有算法简单、实用的优点, 其主要表现为易于实现, 特别是明显减少了计算负担;

- [0059] (4) 本发明的滤波方法具有占用内存少的优点,满足实时数字控制要求;
- [0060] (5) 本发明滤波方法具有精度高的优点,该方法不会因为检测装置的采样频率变化而变化;
- [0061] (6) 通过上述技术方案,当电网频率在国家标准允许的限值范围内波动时,本方法无需实时更新电网频率信息,即可快速准确地滤除不平衡电网中的二倍频交流分量,且计算精度能够满足工程应用的要求,是一种简单有效的实用算法,且具有良好的应用价值。

### 附图说明

- [0062] 为了更清楚地说明本发明实施例的技术方案,下面将对实施例中所需要使用的附图作简单地介绍,显而易见地,下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据这些附图获得其它的附图。
- [0063] 图1是本发明的提取方法的工作原理图;
- [0064] 图2是本发明的延时采样周期滤波算法模块原理图;
- [0065] 图3是本发明发生不平衡突变前后的三相电压信号波形;
- [0066] 图4是本发明的滤波前d轴分量;
- [0067] 图5是本发明的滤波前q轴分量;
- [0068] 图6是本发明的滤波后d轴分量;
- [0069] 图7是本发明的滤波后q轴分量;
- [0070] 图8是本发明的提取方法应用在正序分量提取;
- [0071] 图9是本发明的提取方法的正序分量提取结果;
- [0072] 图10是本发明的提取方法应用在同步相位捕获;
- [0073] 图11是本发明的提取方法的同步相位捕获结果。

### 具体实施方式

[0074] 以下结合附图对本发明作进一步说明。

[0075] 实施例

[0076] 如图1-11所示,本发明所述一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法,一种旋转坐标系下二倍频交流分量的提取方法,包括:电网电压信号采集模块、同步旋转坐标变换模块、延时采样周期滤波模块、幅值与相位计算模块、同步旋转坐标逆变换模块。包括以下步骤:

[0077] (1) 电网电压信号采集模块采集电网电压的三相不平衡电压信号,得到包含正序与负序分量的三相电网电压信号。不平衡三相电网电压信号由正序分量与负序分量组成,所述三相电压可通过如下公式表示:

$$[0078] \quad U = U^+ + U^-$$

[0079] 其中,正序与负序电压分量的表达式为:

$$[0080] \quad U^+ = \begin{bmatrix} u_a^+(t) \\ u_b^+(t) \\ u_c^+(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^+ \sin(\omega t + \theta) \\ U_m^+ \sin(\omega t - 2\pi/3 + \theta) \\ U_m^+ \sin(\omega t + 2\pi/3 + \theta) \end{bmatrix}$$



$$[0081] \quad U^- = \begin{bmatrix} u_a^-(t) \\ u_b^-(t) \\ u_c^-(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m^- \sin(\omega t + \delta) \\ U_m^- \sin(\omega t + 2\pi/3 + \delta) \\ U_m^- \sin(\omega t - 2\pi/3 + \delta) \end{bmatrix}$$

[0082] 式中： $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 分别表示a、b、c相电压， $\omega$ 表示电压角频率， $t$ 为时间， $\theta$ 表示正序电压初始相位， $\delta$ 表示负序电压初始相位， $U_m$ 表示幅值。

[0083] (2) 同步旋转坐标变换模块将包含正、负序分量的三相电网电压信号进行同步旋转坐标变换，得到两相旋转坐标系下的电压分量。其中所述数学变换方程为：

$$[0084] \quad \begin{bmatrix} U_d(t) \\ U_q(t) \end{bmatrix} = T_{abc/dq}(\omega t) \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix}$$

[0085] 式中： $U_d$ 表示d轴电压， $U_q$ 表示q轴电压， $T_{abc/dq}$ 表示同步旋转坐标变换矩阵。

[0086] 其中，

$$[0087] \quad T_{abc/dq}(\omega t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

[0088] (3) 通过步骤(2)得到不平衡三相电压在旋转坐标系下的电压分量，其表达式为：

$$[0089] \quad \begin{cases} U_d(t) = U_m^+ \cos \theta - U_m^- \cos(2\omega t + \delta) \\ U_q(t) = U_m^+ \sin \theta + U_m^- \sin(2\omega t + \delta) \end{cases}$$

[0090] (4) 延时采样周期滤波模块对同步旋转坐标系下的电压分量分别采取延时一个和两个采样周期来快速提取直流分量与二倍频交流分量，即电网电压的正序与负序电压分量。

[0091] 将步骤(3)中的同步旋转坐标系下的电压分量分别延迟 $T_s$ 和 $2T_s$ ，得到 $U_d(t-T_s)$ ， $U_d(t-2T_s)$ ， $U_q(t-T_s)$ ， $U_q(t-2T_s)$ ，其中所述 $T_s$ 为采样周期。通过联立求解 $U_d(t-T_s)$ ， $U_d(t-2T_s)$ ， $U_q(t-T_s)$ ， $U_q(t-2T_s)$ 四个方程，可以得到同步旋转坐标系下的直流分量。其中，所述同步旋转坐标系下的直流分量第 $k$ 次采样时的计算公式为：

$$[0092] \quad U_d^+(k) = \frac{U_d(k) + U_d(k-2) - 2U_d(k-1) \cos(2\omega T_s)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

$$[0093] \quad U_q^+(k) = \frac{U_q(k) + U_q(k-2) - 2U_q(k-1) \cos(2\omega T_s)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

[0094] (5) 同理步骤(4)，通过联立求解 $U_d(t-T_s)$ ， $U_d(t-2T_s)$ ， $U_q(t-T_s)$ ， $U_q(t-2T_s)$ 四个方程，可以得到同步旋转坐标系下的二倍频交流分量。

[0095] 其中，所述同步旋转坐标系下的二倍频交流分量第 $k$ 次采样时的计算公式为：

$$[0096] \quad U_d^{(2)}(k) = \frac{U_d(k+1) + U_d(k-1) - 2U_d(k)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

$$[0097] \quad U_q^{(2)}(k) = \frac{U_q(k+1) + U_q(k-1) - 2U_q(k)}{2[\cos(2\omega T_s) - 1]}$$

[0098] 如图2所示，所述的延时采样周期滤波模块包括延时模块Z与延时采样周期滤波算

法。所述延时采样周期滤波模块通过对旋转坐标系下的电压分量分别采取延时一个和两个采样周期来快速提取直流分量与二倍频交流分量,即电网电压的正序与负序电压分量。

[0099] 所述延时采样周期滤波算法通过将同步旋转坐标系上的原始信号 $U_{d/q}$ 、延时一个采样周期的信号 $U_{d/q}(t-T_s)$ 、延时两个采样周期的信号 $U_{d/q}(t-2T_s)$ 进行数学运算,得到同步旋转坐标系下的直流分量和二倍频交流分量。

[0100] 其中,所述同步旋转坐标系下的直流分量第 $k$ 次采样时的构造公式为:

$$[0101] \quad x_d^+(k) = \frac{x_d(k) + x_d(k-2) - 2x_d(k-1)\cos(2\omega T_s)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

$$[0102] \quad x_q^+(k) = \frac{x_q(k) + x_q(k-2) - 2x_q(k-1)\cos(2\omega T_s)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

[0103] 式中: $x_d$ 表示d轴分量, $x_q$ 表示q轴分量。

[0104] 其中,所述同步旋转坐标系下的二倍频交流分量第 $k$ 次采样时的构造公式为:

$$[0105] \quad U_d^{(2)} = U_m^- \cos(2\omega t + \delta) = \frac{U_d(k+1) + U_d(k-1) - 2U_d(k)}{2[1 - \cos(2\omega T_s)]}$$

$$[0106] \quad U_q^{(2)} = U_m^- \sin(2\omega t + \delta) = \frac{U_q(k+1) + U_q(k-1) - 2U_q(k)}{2[\cos(2\omega T_s) - 1]}$$

[0107] (6) 步骤(4)所述的同步旋转坐标变换模块中同步旋转变换矩阵为 $T_{abc/dq}(\omega t)$ ,其中,

$$[0108] \quad T_{abc/dq}(\omega t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

[0109] 所述的幅值与相位计算模块将两相旋转坐标系下的直流分量和二倍频交流分量信号,分别计算电网电压的实时幅值与相位。其中,三相电网电压的正序分量相位计算公式为:

$$[0110] \quad \varphi = \omega t + \theta = \omega t + \arctan\left(\frac{U_q}{U_d}\right) + \theta_{ex}$$

[0111] 其中, $\theta_{ex}$ 表示判断条件相位。

[0112] 假设相位在 $0 \sim 2\pi$ 之间,但是根据步骤(4)得到两相旋转坐标系下的直流分量信号所得的相位可能不在这个区间内,加入判断条件相位使得求出的相位在 $0 \sim 2\pi$ 之间,判断条件如下:

$$[0113] \quad \theta_{ex} = \begin{cases} 0 & U_d > 0, U_q > 0 \\ 0 & U_d = 0 \\ 0 & U_d = 0, U_q > 0 \\ \pi & U_d < 0, U_q \neq 0 \\ \pi & U_d = 0, U_q < 0 \\ 2\pi & U_d > 0, U_q < 0 \end{cases}$$

[0114] 三相电网电压正序与负序电压分量幅值计算公式为：

$$[0115] \quad U_m^+ = \sqrt{(U_d^+)^2 + (U_q^+)^2}$$

$$[0116] \quad U_m^- = \sqrt{(U_d^{(2)})^2 + (U_q^{(2)})^2}$$

[0117] (7)所述的同步旋转坐标逆变换模块,用于将两相旋转坐标系下的直流分量以及二倍频交流分量电压信号变换为三相电网电压正、负序分量信号。其中,变换公式为：

$$[0118] \quad \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix} = \mathbf{T}_{dq/abc}(\omega t) \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix}$$

[0119] 同步旋转逆变换矩阵为 $\mathbf{T}_{dq/abc}(\omega t)$ ,其中,

$$[0120] \quad \mathbf{T}_{dq/abc}(\omega t) = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ \cos(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t - 2\pi/3) \\ \cos(\omega t + 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

[0121] 采用如上所述的二倍频交流分量提取方法,可用于正序与负序分量的分离、电网同步相位检测、电能质量控制、不平衡电网故障穿越等并网逆变器控制等领域。

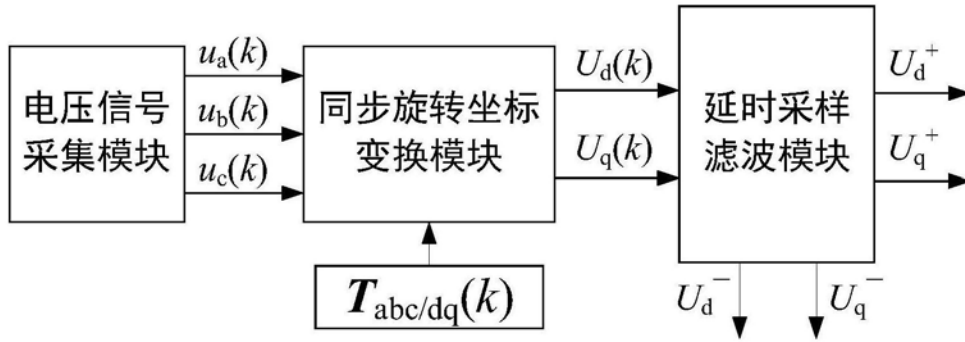


图1

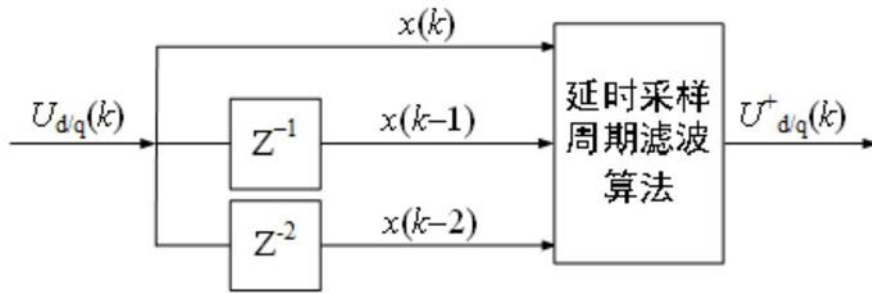


图2

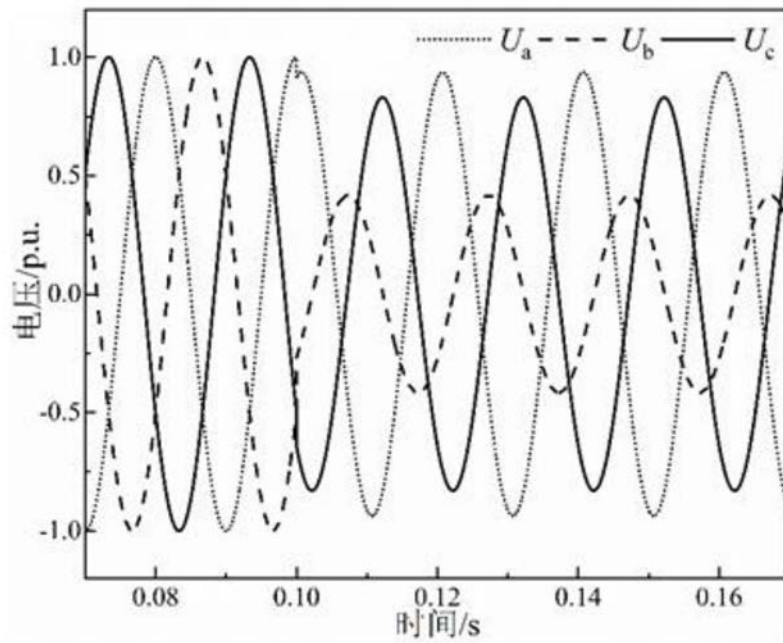


图3

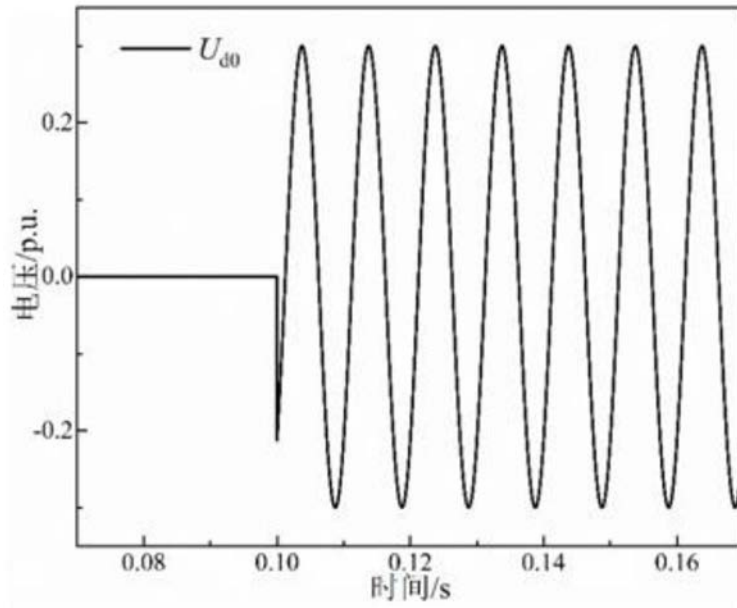


图4

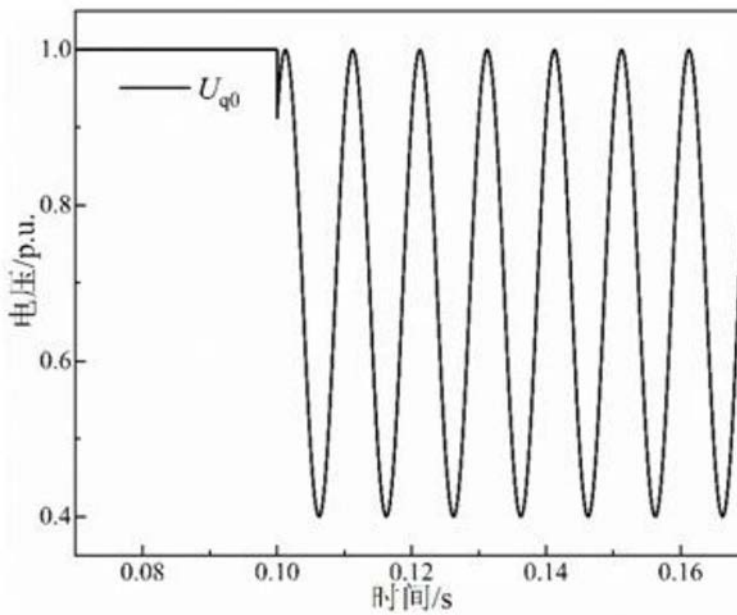


图5

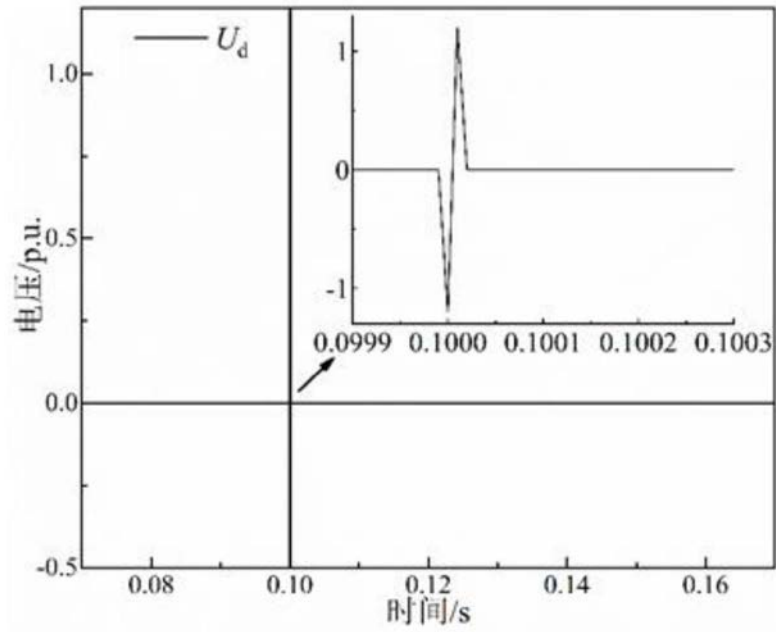


图6

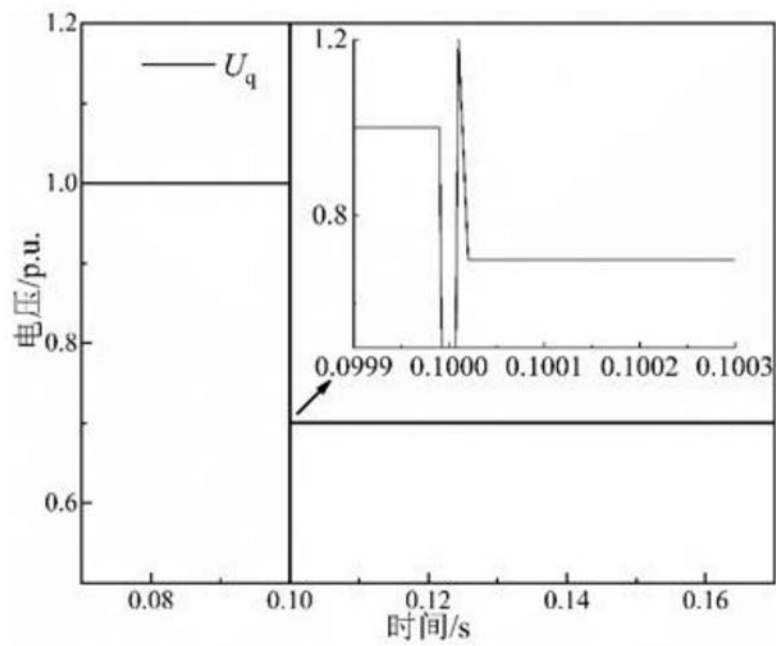


图7

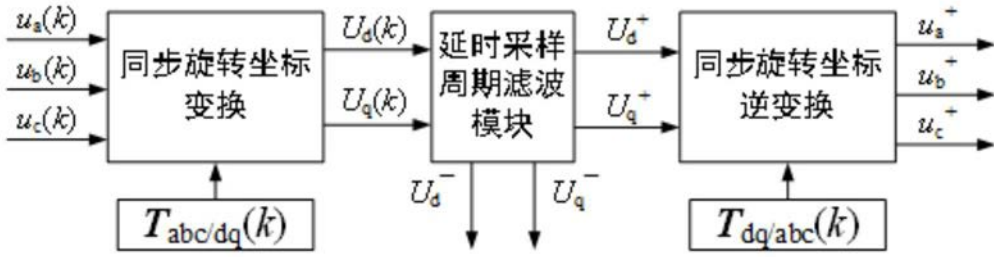


图8

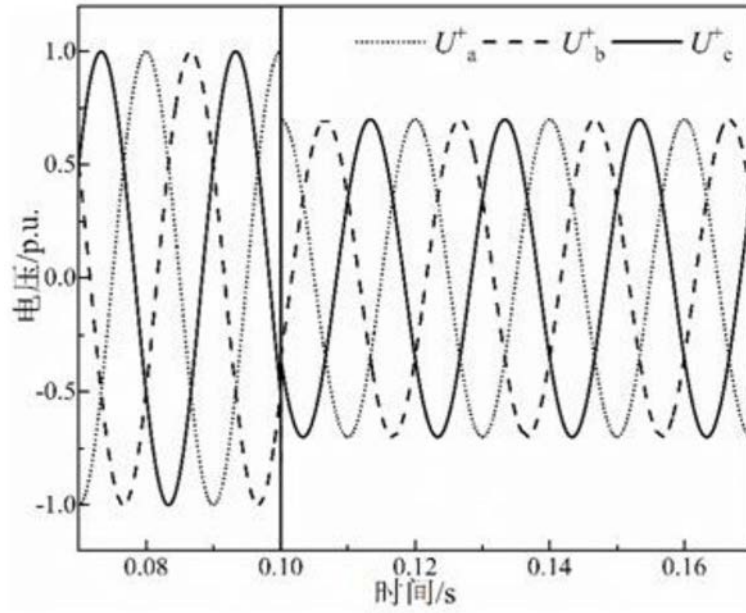


图9

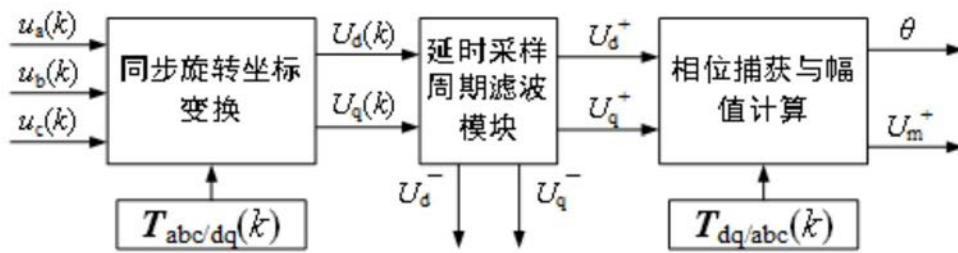


图10

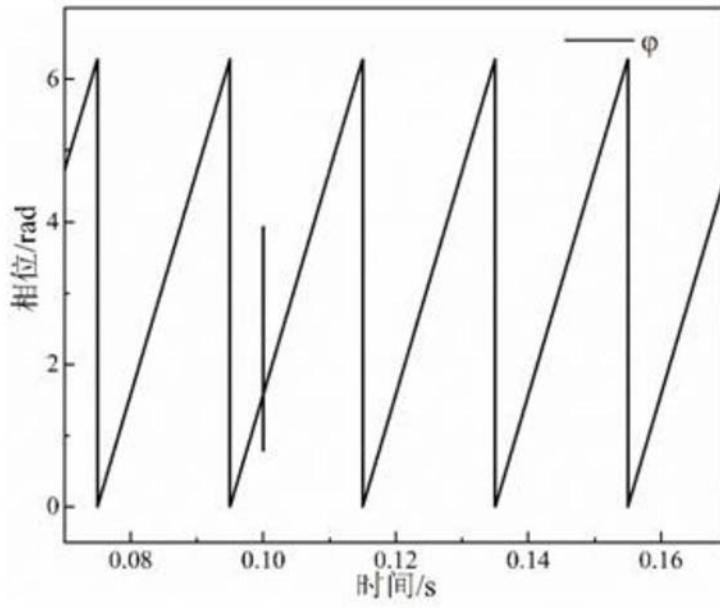


图11