



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110308326 A

(43)申请公布日 2019.10.08

(21)申请号 201910638014.9

(22)申请日 2019.07.15

(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 郝捷 张颖 李明贤 唐震 刘新元 郑惠萍 熊连松 王玮茹 曲莹 程雪婷 薄利明 郭文博 段伟文 李蒙赞

(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 25/00(2006.01) G06F 17/16(2006.01)

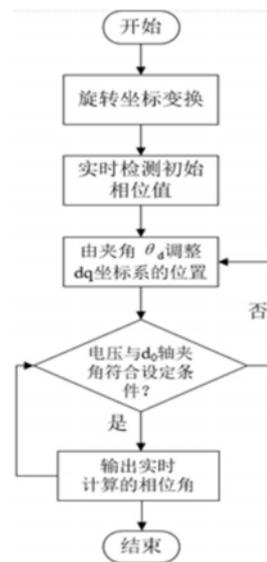
权利要求书1页 说明书6页 附图4页

(54)发明名称

一种可提高开环测相算法抗噪声性能的方法

(57)摘要

本发明公开了一种可提高开环测相算法抗噪声性能的方法,可有效提高电压相位检测精度。首先对基于dq坐标变换的开环锁相方法的抗噪性能进行量化分析,推导出测相精度受噪声干扰最小的dq旋转坐标系位置:电压矢量与d轴重合。提出将电压矢量与d轴的夹角反馈至同步旋转变换矩阵中,实现实时调整dq坐标系位置的目的。再通过跟踪电压矢量与d轴的夹角,设置判断条件,满足判断条件则输出电压同步相位角。确保在dq坐标系中,电压矢量与d轴几乎重合,有效提高了电压同步相位的检测精度。与传统开环锁相方法相比,本发明可降低系统对滤波器的带宽要求,有助于减少锁相过程中的动态响应时间,有助于后续测相方案中滤波器的参数设计。



1. 一种可提高开环测相算法抗噪性能的方法,其特征在于,包括电压检测模块,同步旋转坐标变换模块,电压同步相位计算模块和夹角反馈模块;具体步骤如下:

(1) 电压检测模块用于检测高频噪声干扰下电网中三相对称电网电压 $U=[U_a \ U_b \ U_c]$ ;

(2) 将利用电压检测模块检测出的三相对称电网电压输入至同步旋转坐标变换模块,将交流电压变换为直流分量 $U_d$ 、 $U_q$ ;

(3) 电压同步相位计算模块实时采集同步旋转坐标变换模块输出的电压直流分量,通过公式实时计算三相对称电压初始相位角的检测值 $\theta_d$ ,其值即为电压矢量与d轴的夹角;

(4) 夹角反馈模块实时采集电压同步相位计算模块输出的初始相位检测值 $\theta_d$ ,输出至同步旋转坐标变换模块;

(5) 同步旋转坐标变换模块根据采集到的电压矢量与d轴的夹角信息,满足判断条件则执行dq坐标系旋转角度的调整,将dq坐标系的旋转角度增加 $\theta_d$ ,保证电压矢量与d轴的夹角接近于0,从而提高噪声干扰下电压相位的检测精度;不满足判断条件,则重复步骤(4);

(6) 输出三相电压同步相位角信息。

2. 根据权利要求1所述的可提高开环测相算法抗噪性能的方法,其特征在于,步骤(5)中,设定d轴与电压矢量夹角的判断条件: $\theta_{d0} < 0.1\theta_d$ ,即:若基于夹角信息反馈调整后的 $d_0q_0$ 坐标系中,电压矢量与 $d_0$ 轴的夹角 $\theta_{d0}$ 小于0.1倍的上一个调整周期中电压矢量与d轴的夹角 $\theta_d$ ,则视为满足判断条件。

3. 根据权利要求1所述的可提高开环测相算法抗噪性能的方法,其特征在于,步骤(5)中,调整后的同步坐标旋转矩阵为:

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

电压信号 $U$ 在同步dq旋转坐标系下的表达式为:

$$\begin{cases} U_{d0} = U \cos(\theta - \theta_d) \\ U_{q0} = U \sin(\theta - \theta_d) \end{cases}$$

式中: $\omega$ 、 $\theta$ 分别为同步频率和初始相位角实际值; $\theta_d$ 为由电压相位计算模块捕获的电压初始相位角的检测值; $U_{d0}$ 、 $U_{q0}$ 分别为三相电压矢量经同步旋转坐标变换后在dq坐标中,在d轴、q轴对应的电压直流分量值; $T_{abc/dq}(\omega t + \theta_d)$ 为根据电压相位检测值对dq坐标系进行逆时针旋转,旋转角度为 $\omega t + \theta_d$ 。

4. 根据权利要求1所述的可提高开环测相算法抗噪性能的方法,其特征在于,步骤(6)中,由相位计算模块输出三相电压同步相位角信息:

$$\varphi = \omega t + \theta_d + \arctan\left(\frac{U_{q0}}{U_{d0}}\right) + \theta_{ex} = \omega t + \theta + \theta_{ex}$$

式中: $\theta_{ex}$ 为相位补偿角。

## 一种可提高开环测相算法抗噪性能的方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于电网电压同步相位检测领域,特别涉及一种在高频噪声干扰下提高电压同步相位检测精度的快速开环测相方法。

### 背景技术

[0002] 在分布式能源并网中,需要为变流器控制系统提供一个电压参考相位,电压相位同步检测效果直接影响系统控制策略的性能。因此快速、准确地获取电压相位信息对提高并网变流器的控制性能尤为关键。近年来,随着越来越多的电力电子设备投入运行,导致采集到的电网电压信号含有高频随机噪声。噪声会对电压同步相位的精准检测产生较大干扰,成为实现并网逆变器高性能控制的不利因素。因此,要求锁相方法具有良好的抗噪性能来抑制噪声对锁相结果的干扰。

[0003] 目前的锁相技术可分为开环锁相、闭环锁相两种方案,开环锁相方法消除了闭环锁相的闭环PI调节过程,克服了闭环锁相实时性不足的缺点,可实现电压同步相位的快速检测,常应用于电网环境较好和测相精度要求不高的场合。

[0004] 王宝诚等.分布式发电系统电网同步锁相技术[J].中国电机工程报,其中提出的过零鉴相法是目前最常用的开环锁相方法,其基本原理是将检测的电压信号过零点作为基准点,实时计算电压信号各时刻的相位角。但电网中含有高频噪声干扰时,会影响过零点的准确检测,从而导致相位检测出现误差。熊连松等.单相电力信号同步相位的快速捕获方法研究[J].中国电机工程学报,其中提出基于dq同步坐标变换的开环锁相方法,将电压信号代入同步旋转坐标系变换为电压直流分量,经简单计算即可快速捕获单相电压信号的同步相位。单相电压信号完成旋转坐标变换至少需要两相正交信号,但高频噪声在虚拟正交电压信号构造过程中会被进一步放大,使锁相结果产生稳态误差。熊连松等.不对称电网同步相位的快速开环捕获方法研究[J].中国电机工程学报,该文献对不平衡三相电网相位快速开环检测展开研究,通过提取不平衡电压的正负序分量,将其进行dq坐标变换完成电压同步相位的检测,显著提高了不对称电压相位的检测速度。可实现三相电压同步相位的快速检测,保证电压相位信息的实时性,可应对频率、相位跳变等问题,但仍然没有量化分析开环算法的抗噪性能。

[0005] 为抑制噪声对测相精度的干扰,上述文献中通过加装低通滤波器衰减高频随机噪声,降低滤波器带宽可抑制高频噪声的干扰,但同时使系统动态性能受到限制。文献LEE K J,LEE J P,SHIN D S,et al.A novel grid synchronization PLL method based on adaptive low-pass notch filter for grid-connected PCS[J].IEEE Transactions on Industrial Electronics,文献SONG H S,NAM K.Instantaneous phase-angle estimation algorithm under unbalanced voltage-sag conditions[C]//Proceedings of IEEE Generation Transmission and Distribution,Seattle,USA:IEEE,和文献SVENSSON J.Synchronization methods for grid-connected voltage source converters[C]//Proceedings of IEEE Generation,Transmission and

Distribution.Seattle,USA:IEEE,针对某种特定电网条件改进低通滤波器的参数设计,例如基于加权最小二乘估计的开环锁相方法、基于低通滤波变换的相位检测器等。然而滤波器的使用不足以完全抑制高频噪声对测相结果的干扰,且会牺牲系统的动态性能。鲜有文献对锁相方法的抗噪性能展开量化分析,因此,有必要深入研究开环锁相方法抗噪性能的影响因素,并从算法本身进行改进,提高算法自身的抗噪性能。

## 发明内容

[0006] 本发明的目的在于在尽可能保证开环测相方法快速性的原则下,提供一种提高噪声干扰下电压测相精度的开环锁相方法,仅通过对dq坐标系位置的调整,即可在噪声干扰下提高电压同步相位的检测精度。

[0007] 为实现上述技术目的,本发明采取的技术方案为:一种可提高开环测相算法抗噪性能的方法,针对噪声干扰下,致力于提高电压相位检测精度,包括电压检测模块,同步旋转坐标变换模块,电压同步相位计算模块,夹角反馈模块。首先通过相位计算模块得出电压  $U = [U_a \ U_b \ U_c]$  在噪声干扰下,三相对称电压初始相位角的检测值  $\theta_d$ ,将其由夹角反馈模块输入到同步旋转坐标变换模块,将dq坐标系的同步旋转角度增加  $\theta_d$ ,符合设定判断条件则利用相位计算模块计算电压同步相位角,即可提高电压相位的检测精度。

[0008] 下面对本发明提出的基于dq坐标变换的开环锁相方法的基本原理及本发明的详细步骤进行说明。三相对称的电网电压信号U可采用下式进行描述:

$$[0009] \quad U = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m \sin(\omega t + \theta) \\ U_m \sin(\omega t - 2\pi/3 + \theta) \\ U_m \sin(\omega t + 2\pi/3 + \theta) \end{bmatrix}$$

[0010] 式中,  $U_m$ 、 $\omega$ 、 $\theta$ 分别为电网电压的幅值、同步频率和初始相位角实际值;  $U_a$ 、 $U_b$ 、 $U_c$ 分别为三相对称电压a、b、c对应的电压矢量;  $U_m$ 为a、b、c三相电压的幅值。

[0011] 将电压U进行同步旋转坐标变换,可得电压直流分量表达式、电压同步相位角为:

$$[0012] \quad \begin{cases} U_d = U_m \cos \theta \\ U_q = U_m \sin \theta \end{cases} \quad \varphi = \omega t + \theta = \omega t + \arctan\left(\frac{U_q}{U_d}\right) + \theta_{ex}$$

[0013]  $U_d$ 、 $U_q$ 分别为三相对称电压经过同步旋转坐标模块变换后在dq坐标系中,在d、q轴对应的电压直流分量。设定三相电网电压初始相位角  $\theta \in [0, 2\pi)$ , 而所求  $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ , 因此需增加相位补偿角  $\theta_{ex}$ , 使相位满足  $\theta \in [0, 2\pi)$ 。判断条件如下:

$$[0014] \quad \theta_{ex} = \begin{cases} 0 & U_d > 0, U_q > 0 \\ 0 & U_q = 0 \\ 0 & U_d = 0, U_q > 0 \\ \pi & U_d < 0, U_q \neq 0 \\ \pi & U_d = 0, U_q < 0 \\ 2\pi & U_d > 0, U_q < 0 \end{cases}$$

[0015] 在不考虑谐波和噪声干扰的理想电网电压条件下,将三相对称电网电压信号代入上述公式即可快速准确地检测出三相对称电网电压的同步相位角。

[0016] 本发明提出的在噪声干扰下dq坐标系旋转角度的调整方法如下：

[0017] 1) 电压检测模块用于检测高频噪声干扰下电网中三相对称电网电压 $U = [U_a \ U_b \ U_c]$ 。

[0018] 2) 将利用电压检测模块检测出的三相对称电网电压输入至同步旋转坐标变换模块,将交流电压变换为直流分量 $U_d$ 、 $U_q$ 。

[0019] 3) 电压同步相位计算模块实时采集同步旋转坐标变换模块输出的电压直流分量,通过相位计算模块计算出三相对称电压初始相位角的实时检测值: $\theta_d$ ,其值即为电压矢量与d轴的夹角。

[0020] 4) 夹角反馈模块实时采集电压同步相位计算模块输出的初始相位检测值,输出至同步旋转坐标变换模块。

[0021] 5) 同步旋转坐标变换模块根据采集到的电压矢量与d轴的夹角信息,满足判断条件则执行dq坐标系旋转角度的调整:将dq坐标系的旋转角度增加 $\theta_d$ ,保证电压矢量与d轴的夹角接近于0,从而提高噪声干扰下电压相位的检测精度,不满足判断条件,则重复步骤4)。

[0022] 6) 由相位计算模块输出三相对称电压的同步相位角信息。

[0023] 对上述步骤5)中的dq坐标系旋转角度的调整进行详细说明:

[0024] 通过对基于dq坐标变换的开环测相方法的抗噪性能进行分析,得出当电压矢量 $U$ 与d轴重合时,此时高频噪声对该开环测相方法的测相精度干扰最小,将同步坐标变换模块采集到的夹角信息,输入到dq坐标变换矩阵中,增加dq坐标系旋转角度,从而使电压矢量 $U$ 与d轴始终几乎重合。

[0025] 考虑到高频噪声值随机变化,难以保持d轴与电压矢量始终重合,设定d轴与电压矢量夹角的判断条件: $\theta_{d0} < 0.1\theta_d$ 。即:若基于夹角信息反馈调整后的 $d_0q_0$ 坐标系中,电压矢量与 $d_0$ 轴的夹角 $\theta_{d0}$ 小于0.1倍的上一个调整周期中电压矢量与d轴的夹角 $\theta_d$ ,则视为满足判断条件。

[0026] 本发明具有以下有益效果:

[0027] 在不利用滤波器抑制噪声的前提下,对基于dq坐标变换的开环测相方法的算法进行改进,通过实时调整dq坐标系的旋转角度,确保电压矢量与d轴始终保持几乎重合。从而提高噪声干扰下电压同步相位的检测精度,增强开环测相算法的抗噪性能。可有效抑制电压信号中高频噪声对相位检测结果的干扰,可降低系统对低通滤波器的带宽要求,有助于简化后续滤波器的参数设计过程。

## 附图说明

[0028] 图1基于dq坐标变换的OPL-SRF电压矢量图;

[0029] 图2实时调整dq坐标系的旋转角度;

[0030] 图3改进开环测相算法的流程图;

[0031] 图4实时调整dq坐标系的电压相位开环检测算法;

[0032] 图5采用改进算法的初始相位角响应过程;

[0033] 图6采用本发明改进算法电压相位角响应波形;

[0034] 图7加装滤波器滤除噪声后电压相位角响应过程。

### 具体实施方式

[0035] 以下结合附图对本发明作进一步详细描述。

[0036] 本发明公开的是一种在高频随机噪声干扰下,提高基于dq坐标变换开环锁相方法电压测相精度的方案。下面首先对其基本原理进行说明。

[0037] 三相对称的电网电压信号U可采用下式进行描述:

$$[0038] \quad U = \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_m \sin(\omega t + \theta) \\ U_m \sin(\omega t - 2\pi/3 + \theta) \\ U_m \sin(\omega t + 2\pi/3 + \theta) \end{bmatrix}$$

[0039] 式中, $U_m$ 、 $\omega$ 、 $\theta$ 分别为电网电压的幅值、同步频率和初始相位角。

[0040] 将电压信号U代入同步旋转坐标变换模块,即:

$$[0041] \quad \begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = T_{abc/dq}(\omega t) \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix}$$

[0042] 其中,

$$[0043] \quad T_{abc/dq}(\omega t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin \omega t & \sin(\omega t - 2\pi/3) & \sin(\omega t + 2\pi/3) \\ \cos \omega t & \cos(\omega t - 2\pi/3) & \cos(\omega t + 2\pi/3) \end{bmatrix}$$

[0044]  $T_{abc/dq}(\omega t)$ 为对三相对称交流电压进行同步旋转坐标变换的变换矩阵,将交流电压变换成直流电压。

[0045] 图1所示为电压矢量U在dq同步旋转坐标系中的矢量图,电压信号U与d轴之间的夹角即为三相电压信号的初始相位角,电压信号在dq旋转坐标系下的电压直流分量表达式、三相电压同步相位角为:

$$[0046] \quad \begin{cases} U_d = U_m \cos \theta \\ U_q = U_m \sin \theta \end{cases} \quad \varphi = \omega t + \theta = \omega t + \arctan\left(\frac{U_q}{U_d}\right) + \theta_{ex}$$

[0047] 设定三相电网电压初始相位角 $\theta \in [0, 2\pi)$ ,而所求 $\theta \in [-\pi/2, \pi/2]$ ,因此需增加相位补偿角 $\theta_{ex}$ ,使相位满足 $\theta \in [0, 2\pi)$ 。判断条件如下:

$$[0048] \quad \theta_{ex} = \begin{cases} 0 & U_d > 0, U_q > 0 \\ 0 & U_q = 0 \\ 0 & U_d = 0, U_q > 0 \\ \pi & U_d < 0, U_q \neq 0 \\ \pi & U_d = 0, U_q < 0 \\ 2\pi & U_d > 0, U_q < 0 \end{cases}$$

[0049] 本发明一种可提高开环测相算法抗噪性能的方法,具体改进步骤如下:

[0050] 1) 电压检测模块用于检测高频噪声干扰下电网中三相对称电网电压 $U = [U_a \ U_b \ U_c]$ 。

[0051] 2) 将利用电压检测模块检测出的三相对称电压输入至同步旋转坐标变换模块,将

交流电压变换为直流分量 $U_d$ 、 $U_q$ 。

[0052] 3) 电压同步相位计算模块实时采集同步旋转坐标变换模块输出的电压直流分量，实时计算三相对称电压的同步相位角实时检测值 $\theta_d$ ，其值即为电压矢量与d轴的夹角。

[0053] 4) 夹角反馈模块实时采集电压同步相位角计算模块输出的初始相位检测值 $\theta_d$ ，输出至同步旋转坐标变换模块。

[0054] 5) 根据夹角反馈模块输出的夹角检测信息 $\theta_d$ ，调整dq坐标系旋转角度，如图2所示，调整后的同步坐标旋转矩阵为：

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

[0056] 式中： $\omega$ 为同步频率； $\theta_d$ 为由电压相位计算模块捕获的电压相位角的检测值；

[0057]  $T_{abc/dq}(\omega t + \theta_d)$ 为根据电压相位检测值对dq坐标系进行逆时针旋转，旋转角度为 $\omega t + \theta_d$ 。

[0058] 6) 调整dq坐标系的旋转角度后，步骤1)所示的电压信号 $U$ 在同步dq旋转坐标系下的表达式为：

$$[0059] \begin{cases} U_{d0} = U \cos(\theta - \theta_d) \\ U_{q0} = U \sin(\theta - \theta_d) \end{cases}$$

[0060] 式中： $\theta$ 为初始相位角实际值； $U_{d0}$ 、 $U_{q0}$ 分别为三相电压矢量经同步旋转坐标变换后在dq坐标中，在d轴、q轴对应的电压直流分量值。

[0061] 7) 同步旋转坐标变换模块根据采集到的电压矢量与d轴的夹角信息，满足判断条件则执行dq坐标系旋转角度的调整，执行步骤8)。将dq坐标系的旋转角度增加 $\theta_d$ 。保证电压矢量与d轴的夹角接近于0，从而提高噪声干扰下电压相位的检测精度；不满足判断条件，则重复步骤5)。

[0062] 8) 由相位计算模块输出三相电压同步相位角信息：

$$[0063] \varphi = \omega t + \theta_d + \arctan\left(\frac{U_{q0}}{U_{d0}}\right) + \theta_{ex} = \omega t + \theta + \theta_{ex}$$

[0064] 改进后的开环测相方法如图4所示。

[0065] 步骤5)中的相位跟踪流程如图3所示，其判断条件为： $\theta_{d0} < 0.1\theta_d$ 。即：若基于夹角信息反馈调整后的 $d_0q_0$ 坐标系中，电压矢量与 $d_0$ 轴的夹角 $\theta_{d0}$ 小于0.1倍的上一个调整周期中电压矢量与d轴的夹角 $\theta_d$ ，则视为满足判断条件，可进行下一步的命令执行。

[0066] 图5、图6分别为采用本发明后，在高频噪声干扰下，对电压初始相位角，电压同步相位角的检测波形，仿真结果表明，本发明算法可有效提高电压相位的检测精度。

[0067] 图7所示为3种电压相位响应波形，自上而下其工况条件分别为：(1)不加滤波器且不采用本发明所提算法；(2)仅加装滤波器(截止频率为1kHz)；(3)采用本发明所提算法且加装滤波器(截止频率为5kHz)。

[0068] 不加装滤波器时测相误差较大，相位波形波动较大；在0.5s时，仅使用低通滤波器滤除高频噪声可使相位波形相对光滑、平缓，提高电压测相精度，但对滤波器的带宽要求较

高,会牺牲测相过程的动态性能;本发明所提算法对相位计算过程进行改进,实现对噪声的衰减,适当增大低通滤波器的截止频率亦可获得较高的相位检测精度。降低系统对低通滤波器的带宽要求,有助于减少锁相过程中的动态响应时间,保证后续开环锁相过程的快速性。

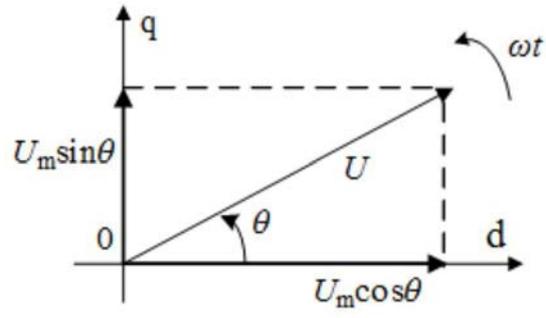


图1

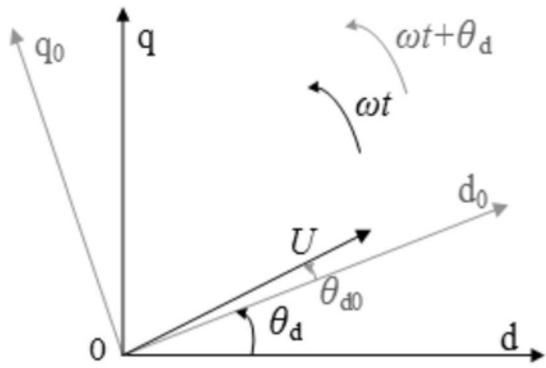


图2

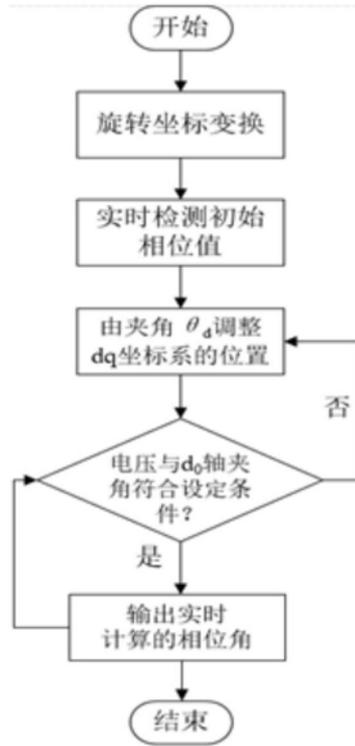


图3

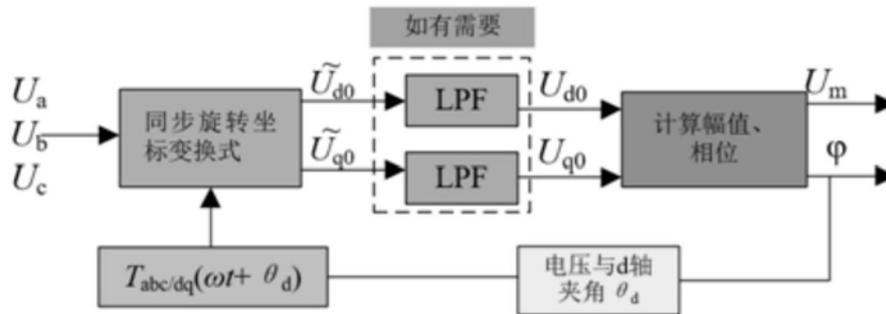


图4

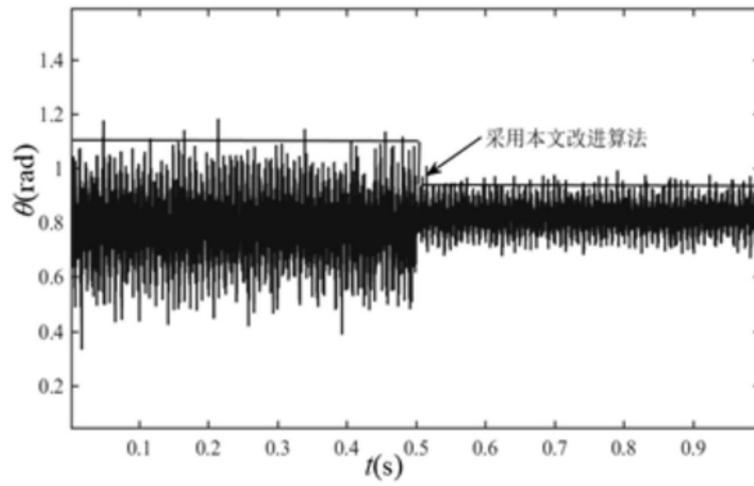


图5

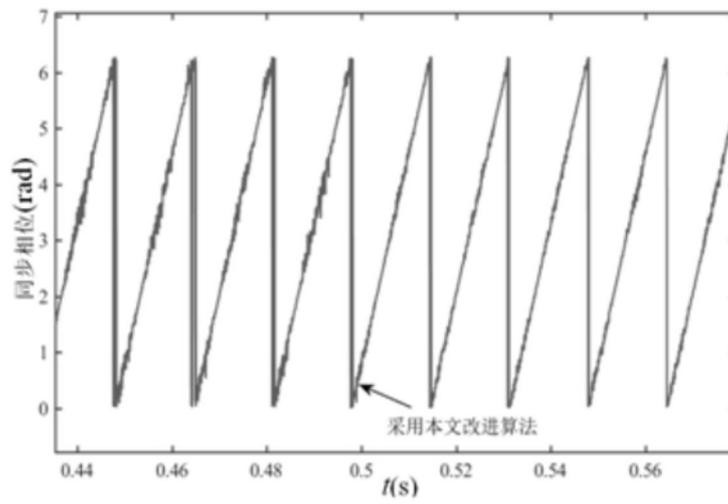


图6

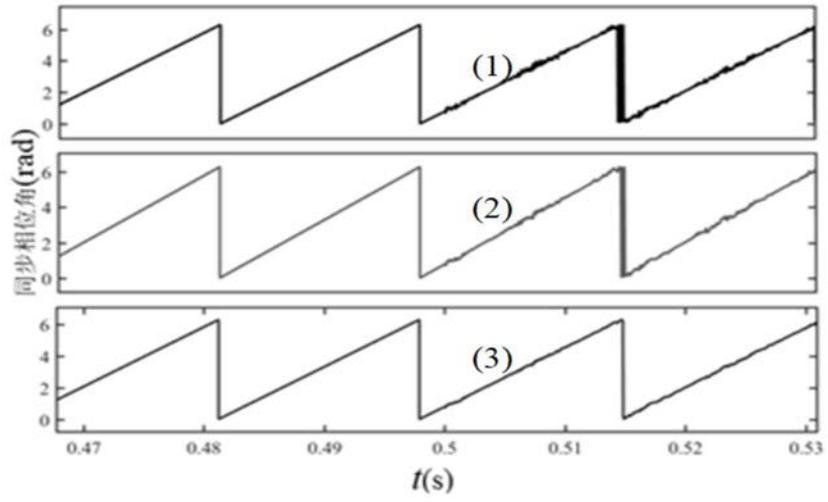


图7