

基于二阶带通滤波器的单相锁相环技术研究

荆世博¹, 辛超山¹, 薛静杰¹, 张增强²

(1. 国网新疆电力有限公司经济技术研究院, 新疆 乌鲁木齐 830000;

2. 国网新疆电力有限公司综合能源服务公司, 新疆 乌鲁木齐 830000)

摘要: 并网系统中, 由于存在大量电力电子器件, 导致并网逆变器输出的电压中存在直流分量和高频谐波, 传统锁相环的环路滤波器难以完全滤除输入信号的谐波, 将在锁相环输出信号中产生相位偏移。针对这一现象, 首先, 构造了一个二阶带通滤波器(Biquad filter, BF)来有效抑制输入电压信号中直流分量和高频谐波, 锁相环中的正交信号通过构造二阶广义积分器(SOGI)来获得; 然后, 对二阶带通滤波器特性进行分析, 设计了二阶带通滤波器参数; 最后, 通过 Matlab/Simulink 软件对包含直流分量、高频分量、畸变、跳变等情况的电压信号进行仿真。仿真结果表明, 基于二阶带通滤波器的锁相环能够很好抑制直流分量和高频分量, 有效消除因参数设置不合理产生的相位偏移。

关键词: 二阶滤波; 直流分量; 高频分量; 相位偏移

中图分类号: TM743 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2021)02-0054-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20210211

Research on Single-phase Phase Locked Loop Technology Based on Second-order Bandpass Filter

Jing Shibo¹, Xin Chaoshan¹, Xue Jingjie¹, Zhang Zengqiang²

(1. State Grid Xinjiang Economic Research Institute, Urumqi 830000, Xinjiang, China;

2. State Grid Xinjiang Comprehensive Energy Service Company, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

Abstract: In the grid-connected system, due to the existence of a large number of power electronic devices, there are DC components and high-frequency components in voltage output by the grid-connected inverter. The loop filter of the traditional phase-locked loop is difficult to completely filter the harmonics of input signal, and a phase shift occurs in output signal of the phase-locked loop. In response to this phenomenon, a second-order bandpass filter is constructed to effectively suppress the DC component and high-frequency harmonics in input voltage signal. The quadrature signal in the phase-locked loop is obtained by constructing a second-order generalized integrator (SOGI). The characteristics of second-order bandpass filter are analyzed, and its parameters are designed. Finally, through the Matlab/Simulink software, the simulation for the conditions including DC components, high-frequency components, distortion, jumps etc. are carried out. The simulation results show that the phase-locked loop based on second-order bandpass filter can well suppress the DC component and high-frequency component, and effectively eliminate the phase shift caused by unreasonable parameter settings.

Key words: second-order filtering; DC component; high-frequency component; phase shift

0 引言

单相并网逆变器作为分布式电源并网的关键, 其性能将直接影响整个系统的性能, 在并网的过程中, 单相锁相环的精度将决定并网效果^[1-3]。对于单相并网系统, 最简单的锁相方法是通过过零检测来获得输入信号周期和相位信息; 但该方法在每个

工频周期只能进行一次调整, 且谐波的叠加将影响检测精度, 甚至导致锁相失败。在单相并网锁相系统中, 由于不存在静止的三维坐标系, 无法借助 Clark 变换来产生正交坐标系, 需要通过积分变换生成正交信号。

针对单相锁相环的以上问题, 文献[4]提出采用二阶广义积分器(second-order generalized integrator, SOGI)的方法构建正交信号实现锁相, 且该方

法对高频分量有较好的滤波作用,但对直流分量抑制效果较差。文献[5]通过对输入电压信号延时 $T/4$ 周期,来构造虚拟正交信号达到锁相目的;但这种方法从原理上就存在动态响应慢的问题,且在电网频率偏离其额定值或存在谐波时,输出信号将不再正交。文献[6]将解耦双同步坐标系(DDSRF-PLL)应用于单相系统,但 DDSRF-PLL 同样无法消除谐波的影响。文献[7]利用相邻时刻采样数据构造鉴相器,从而生产正交分量,并通过双滤波器来滤除高频分量;但该方法结构复杂,且输入信号中含有谐波将影响锁相性能。文献[8]采用输入信号与二次微分信号累加来滤除由于移相造成的二倍频谐波,并得出鉴相器输出信号;但该方法只分析了鉴相器对二倍频谐波的滤除作用,未考虑高频分量。文献[9]利用带有滤波特性的微分环节,来构建正交信号,此方法在系统增加两个二阶滤波器,能有效滤除高频分量但对直流分量抑制能力不足。

下面提出一种基于双二阶带通滤波器环节的锁相环。该方法充分利用二阶带通滤波器对直流分量和高频谐波的滤波作用,通过设计滤波器带宽,抑制和消除直流分量和高频谐波,保证特定频率的信号正常通过二阶带通滤波器,能有效抑制传统锁相环因谐波造成的输出信号相位偏移问题,实现快速和准确锁相。

1 并网点电压信号直流分量和高频谐波分析

并网点电压为标准正弦波形时,可通过过零检测、虚拟乘法器、虚拟两相等多种控制方法实现对电网电压的跟踪和锁相。实际情况中并网点电网往往含有直流和直流分量,造成锁相困难或难以锁相。

当并网点电压在某一时刻叠加直流分量,即

$$u = \begin{cases} 0 & t=0^- \\ U & t=0^+ \end{cases}, t=0^+ \text{ 时刻,输入信号的直流分量由}$$

于压控振荡器(voltage controlled oscillator, VOC)的积分作用,产生偏差信号,将导致锁相失败;若并网点电压中含有 2、3、……等高频谐波,即 $u_s = U_1 \sin(\omega t + \varphi) + \sum_{n=2}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \varphi_n)$,由于环路滤波器(loop filter, LF)难以完全消除高频谐波和压控振荡器的积分放大特性,将导致锁相的相位产生偏差^[10]。

2 二阶带通滤波器的滤波特性

二阶带通滤波器的传递函数如式(1)所示。

$$G(s) = \frac{A(\omega_0) \frac{\omega_0}{Q} s}{s^2 + \frac{\omega_0}{Q} s + \omega_0^2} \quad (1)$$

式中: ω_0 为二阶带通滤波器中心频率; Q 为品质因数; ω_0/Q 为系统带宽,用 B_w 表示。

带宽决定着滤波器分离信号中相邻频率成分的能力——频率分辨力。可通过求解上下截止频率(通常取 -3 dB 对应的频率)来得到滤波器的通带带宽。将 $s = j\omega$ 带入二阶带通滤波器的传递函数中,可得 $G(s) = \frac{jA(\omega_0) B_w \omega}{(\omega_0^2 - \omega^2) + jB_w \omega}$,令滤波器幅值 $A(\omega) = 0.707$,求得上下截止频率,可得二阶带通滤波器带宽 B_w 。

根据式(1)可知,当二阶带通滤波器品质因数 Q 不变,增大中心频率可缩小二阶带通滤波器带宽,有效滤除直流分量和高频谐波。图 1 为二阶带通滤波器品质因数 Q 不变,中心频率 ω_0 增大时系统伯德图。

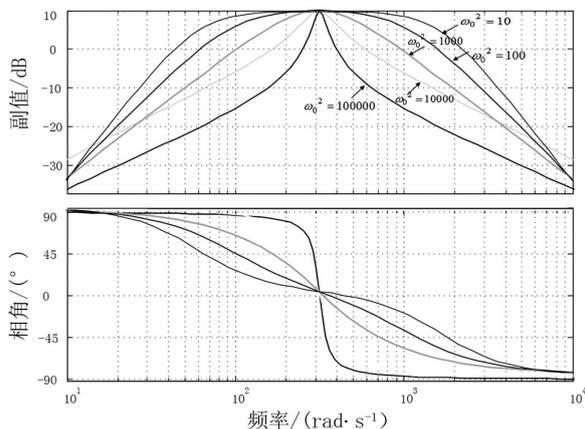


图 1 Q 不变, ω_0 不同取值的伯德图

3 基于二阶带通滤波器的锁相环结构及参数设计

3.1 锁相环结构

三相软件锁相环基于三相电压 U_a 、 U_b 、 U_c 经 Clark 变换,从静止坐标转换为两相正交向量 U_α 、 U_β 的方法来实现锁相。单相并网锁相系统中,不存在静止的坐标系下的三相电压,无法经 Clark 变换生

成含有相角的正交向量,故采用二阶广义积分器来实现 Clark 和 park 变换的作用,生成含有相角的正交分量。二阶广义积分器原理如图 2 所示。图中: v 为输入电网信号; k 为影响系统带宽的增益; ω 为固定不变频率; v' 和 v_q 为输入信号 v 经变换后生成的正交向量^[4]。

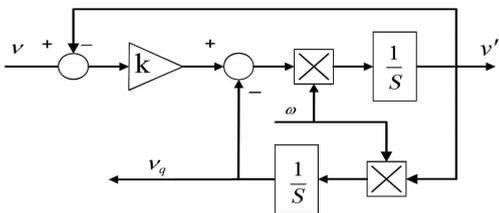


图 2 二阶广义积分器

以 v 为输入信号,以 v' 和 v_q 为输出信号,可得图 2 中 SOGI 的传递函数为

$$\begin{cases} \frac{v'}{V}(s) = \frac{k\omega s}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \\ \frac{v_q}{v}(s) = \frac{k\omega^2}{s^2 + k\omega s + \omega^2} \end{cases} \quad (2)$$

基于二阶广义积分器可构造出如图 3 所示的含有二阶带通滤波器的单相锁相环(single-phase-locked loop, SPLL),图中 $G_1(s)$ 为二阶带通滤波器; $G_2(s)$ 为 SOGI。

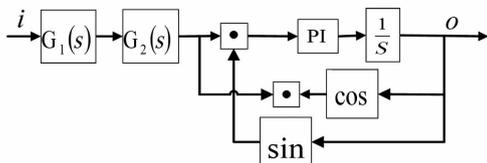


图 3 含有二阶带通滤波器的单相锁相环结构

3.2 二阶带通滤波器参数要求

式(1)并网电压频率中 ω_0 为 50 Hz;为尽可能滤除其他频次电网谐波,带通滤波器的带宽定为 1 Hz;增益系统 $A(\omega)$ 定为 3;令 $s = j\omega$,二阶带通滤波器幅频和相频特性伯德图如图 4 所示。

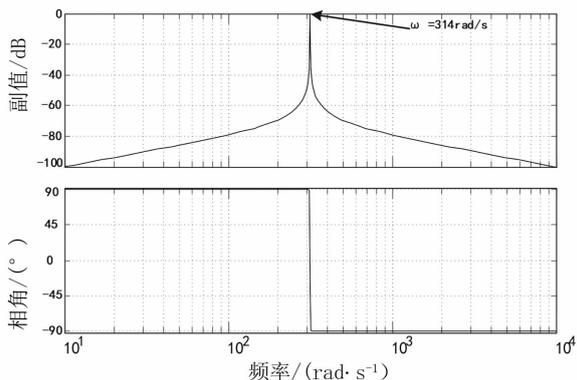


图 4 二阶带通滤波器伯德图

3) 锁相环的 PI 控制器设计

图 3 中 PI 控制器环节可以表示为图 5 的控制图,图 5 中忽略了系统反馈的延时环节, ω_0 为并网电压频率,即 $\omega_0 = 50$ Hz; k_p 为比例积分控制器比例系数; k_i 为比例积分控制器积分系数。

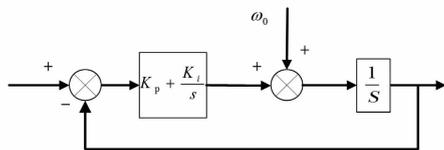


图 5 SPLL 中 PI 控制器框

PI 控制器的闭环传递函数为

$$H(s) = \frac{k_p s + k_i}{s^2 + k_p s + k_i} \quad (3)$$

对式(3)进行频域分析,取 k_p 为 10.08, k_i 为 10.24,系统伯德图如图 6 所示。

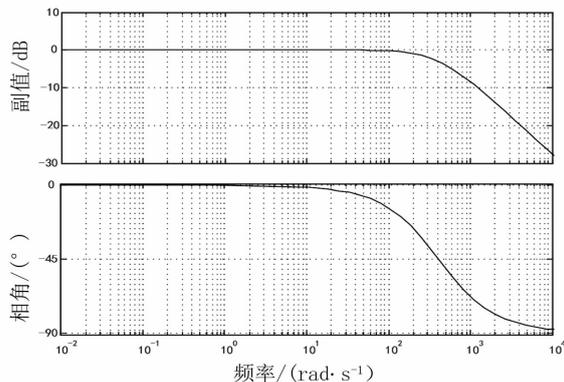


图 6 PI 控制器伯德图

通过图 6 锁相环的 PI 控制器的伯德图,可以看出单相锁相环的系统是稳定的,分析伯德图的幅频特性曲线,PI 控制器具有低频滤波特性,在输入信号频率大于 ω_0 时,输出信号幅值将小于 0 dB,说明该传递函数具有低通特性,对高频具有抑制作用^[11]。

4 仿真实验

通过仿真,验证所提出的基于二阶带通滤波器对输入信号的滤波作用和单相锁相的锁相效果。在 Matlab/Simulink 中搭建了基于二阶带通滤波器的仿真模型,完成了输入信号中含有高频谐波和直流分量情况以及幅值、相位和频率在 $T = 4.9$ s 时突变和谐波畸变等不同工况下的仿真。

取输入信号幅值为 1,并网电压频率为 50 Hz,采用步长 $h = 1 \times 10^{-5}$ s 来进行仿真。

1) 输入信号含有直流分量和谐波

图 7 波形为输入信号中含有直流分量和谐波的

仿真结果图。图中并网电压为理想状态下并网点电压波形;输入波形为含有直流分量和谐波信号的畸变信号;输出相角和波形为输入信号经二阶带通滤波器和锁相后得到的输出信号。

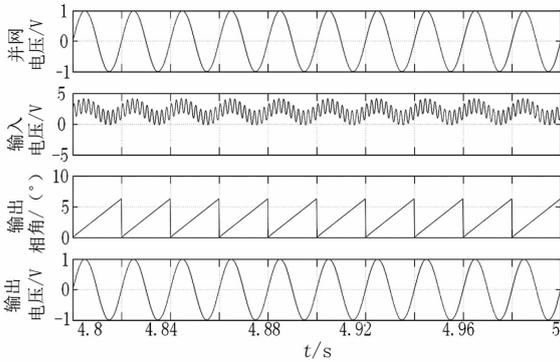


图 7 含直流分量和谐波仿真

从图 7 中可以看出,基于二阶带通滤波器的锁相环具有较好的稳态性能,能够有效滤除高频谐波和直流分量。

2) 输入信号发生幅值、相位和频率突变波形

图 8、图 9、图 10 分别为并网点电压发生幅值、相位和频率突变时,锁相环在 Matlab/Simulink 中的仿真图。从图中可以看出在并网电压波形发生幅值、相位和频率突变时,基于二阶带通滤波器的单相锁相环都能够很短时间内跟踪并锁定并网电压信号,且对输入信号中的直流分量有很好的抑制作用。

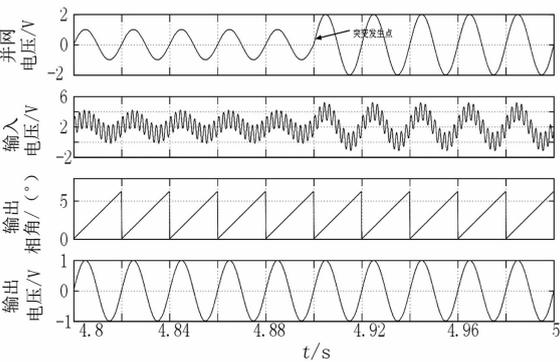


图 8 输入信号幅值突变仿真

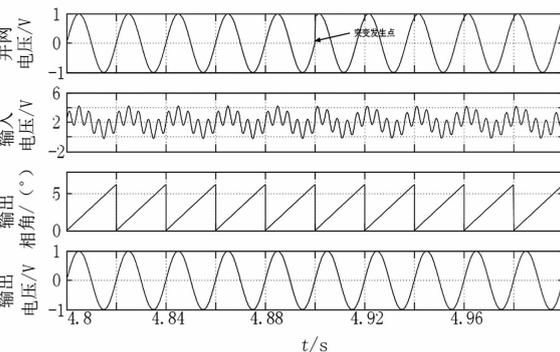


图 9 输入信号相位突变仿真

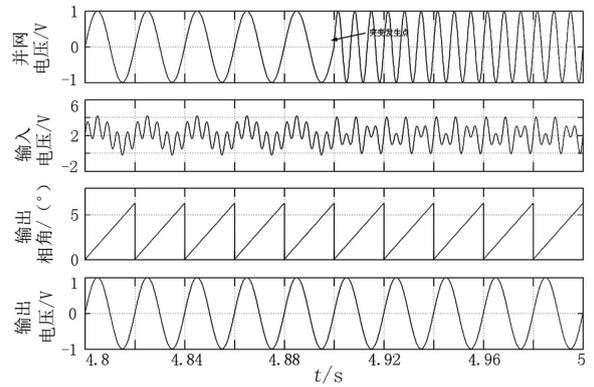


图 10 输入信号频率突变仿真

如图 11 所示,含有直流分量和高频谐波的电压波形,在传统锁相环系统中,初始 1~2 s 时间内,能够快速且准确地跟踪电压波形,但受限于环路滤波器参数设计的优劣和压控振荡器积分放大作用,传统的锁相环并不能很好地持续跟踪和准确地锁相,随着系统运行时间的延续,锁相环输出的电压波形将发生相位偏移,且随着时间的延长,相位的偏移将逐渐扩大。图 12 为输入信号经二阶带通滤波器处理后,锁相环输出电压仿真波形,在并网电压信号进入锁相环系统之前,基于二阶带通滤波器的锁相环对电压信号进行预处理,有效抑制电压信号中叠加的直流分量和高频谐波,提高锁相的精度,通过仿真验证了所提方法的准确性。

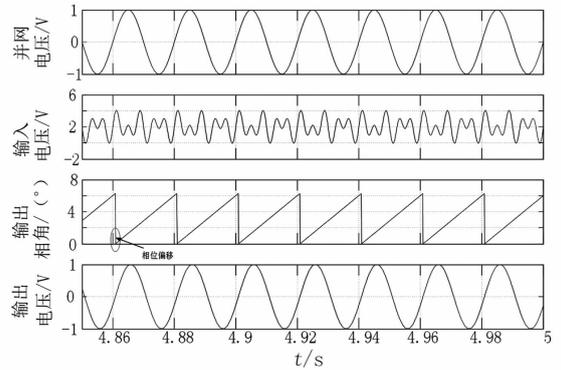


图 11 无二阶带通滤波器输入信号仿真

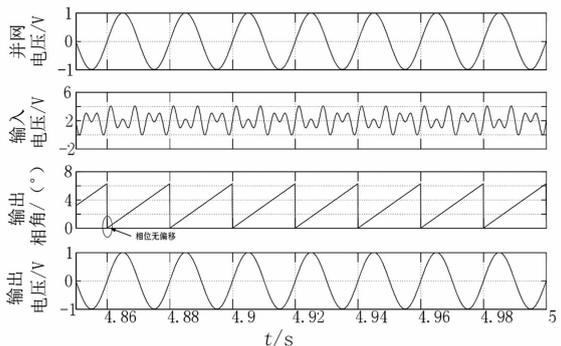


图 12 基于二阶带通滤波器输入信号仿真