

文章编号:1005-0523(2011)05-0014-04

三相不平衡时的PWM整流器锁相环设计

章勇高,高彦丽,刘 焕,龙立中

(华东交通大学电气与电子工程学院,江西 南昌 330013)

摘要:获取电网相位是三相PWM整流器运行和控制的前提。软件锁相环具有设计方便、适应性强的优点,能够快速获取电网电压不平衡时的相位。分析三相电压不平衡时电网相位关系,讨论基于瞬时无功理论的软件锁相环设计原理和二次椭圆型陷波器的设计。建立了软件锁相环的MATLAB仿真模型和三相PWM整流器的实验装置,仿真和实验结果证明具有二次陷波器的软件锁相环的有效性。对于其它电力电子装置的锁相环设计具有借鉴价值。

关键词:软件锁相环;电压不平衡;二次陷波器;三相PWM整流器

中图分类号:TN713.4

文献标志码:A

三相PWM整流器广泛应用于电力传输及传动系统中。它能够灵活地控制网侧功率因数,实现能量双向传输的功能。通常情况下,均假设三相电网电压平衡,然而各种原因造成的电压不平衡却时有发生,会在直流电压中产生谐波,降低供电质量,并向电网注入谐波电流,造成电网污染^[1-3]。

目前大多数解决方法都是在控制策略上滤除不平衡时负序分量的影响,本文提出直接在获取电网信息的锁相环中消除负序分量的作用。锁相环有两种:硬件锁相环和软件锁相环。硬件锁相环通过锁相环芯片对某相电压跟踪比较,输出与其频率相等相位差恒定的信号,实现锁相。该方法具有简单易行的优点,但在三相电压不平衡时,由一相电压获取三相相位信息将大大影响锁相精度。软件锁相环具有在线修改控制算法,不必改动硬件电路的优点^[4-5]。

软件锁相环的设计方法主要有^[6-7]:过零比较法、最小二乘法和瞬时无功理论法。过零比较锁相环与传统硬件锁相环的原理一致,不同的是比较后的方波信号经过数字采集计算得到频率和相位信息,因此电压不平衡时其锁相精度较低。最小二乘法动态响应速度快,能准确地锁定正序电压的相位,但对谐波的抑制较差。而基于瞬时无功理论的软件锁相环主要通过软件编程方法对三相电压进行综合处理,从而准确获取各种畸变电压的相位信息。

围绕网侧电压不平衡时三相PWM整流的锁相问题,详细谈论了三相电压不平衡下的电网相位关系,提出了增加一个二次陷波器的基于无功功率理论的软件锁相环。讨论了软件锁相环以及相应陷波器的设计。建立MATLAB仿真模型进行仿真验证。同时搭建了三相PWM整流装置,实验结果验证设计的软件锁相环的有效性。

1 三相不平衡下的相位关系

三相对称电压 v_a, v_b, v_c 可以表示为

$$\begin{bmatrix} v_a & v_b & v_c \end{bmatrix} = E \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \varphi) & \cos(\omega_0 t + \varphi - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\omega_0 t + \varphi + \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (1)$$

收稿日期:2011-02-01

基金项目:江西省科技厅工业支撑计划项目(2010ZDG02400);华东交通大学科学研究项目(10DQ06)

作者简介:章勇高(1975—),男,副教授,博士,研究方向为电力电子变换与控制。

式中: E 为幅值; φ 为初始相位; ω_0 为电网频率, 此时只有正序。

当三相电压不平衡时, 可看成正序、负序和零序分量的合成, 其表达式为^[4]

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = E^p \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \varphi^p) \\ \cos(\omega_0 t + \varphi^p - 2\pi/3) \\ \cos(\omega_0 t + \varphi^p + 2\pi/3) \end{bmatrix} + E^n \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \varphi^n) \\ \cos(\omega_0 t + \varphi^n + 2\pi/3) \\ \cos(\omega_0 t + \varphi^n - 2\pi/3) \end{bmatrix} + E^0 \begin{bmatrix} \cos(\omega_0 t + \varphi^0) \\ \cos(\omega_0 t + \varphi^0) \\ \cos(\omega_0 t + \varphi^0) \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中: 上标 $p, n, 0$ 分别为正序、负序和零序分量

根据无功功率理论, 当含有零序、负序和正序分量的三相不平衡电压经 3-2 旋转变换后, 其零序分量为 0, 则在两相同步旋转系 dq 分量 v_d, v_q 表达式为

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_d^p \\ v_q^p \end{bmatrix} + \mathbf{R}(-2\theta) \begin{bmatrix} v_d^n \\ v_q^n \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: $\mathbf{R}(\theta)$ 为旋转坐标变换矩阵

$$\mathbf{R}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

可见, 在 (d, q) 坐标系中, 原正序分量变换成直流分量, 而负序分量变换成二次谐波分量。若能在 dq 变换后滤除负序分量带来的二次谐波分量, 即可获得正序 dq 分量 $[v_d, v_q]^T$, 从而有效检测到不平衡电压的正序分量相位信息, 实现快速锁相。

2 基于无功功率理论的软件锁相环

软件锁相环是由数字鉴相器、环路滤波器和压控振荡器组成, 以瞬时无功理论为基础的软件锁相环原理^[8]为: 三相输入电压 v_a, v_b, v_c 经旋转变换和滤波器后, 得到的 q 轴电压分量 v_q 与输入电压频率 ω_0 和锁相输出频率 ω^* 之间的误差信号 ω 密切相关, 其锁相结果是使得 q 轴电压 v_q 恒为零, 从而锁定相位和频率信息, 其锁相原理如图 1 所示。

设电网初始相位差 θ , 频率为 ω_0 , 锁相输出频率为 ω^* , 以 v_q 为控制对象, 其表达式为

$$v_q = \sqrt{3} E \sin((\omega^* - \omega_0)t - \theta) \quad (5)$$

则当频率不相等时, v_q 为一交流输出电压; 当频率相等, 相位不为零时, v_q 为一直流电压, 但其值与相位差有关; 当频率相等, 相位角等于零时, v_q 恒等于零, 其大小不随电源电压幅值的变化而变化。因此, v_q 恒等于零说明系统实现频率和相位锁定。

相位锁定只有在频率相等时才有意义, 假设正序分量 $v_i(t)$ 和锁相输出电压 $v_0(t)$ 表示为

$$v_i(t) = E_i \sin(\omega_0 t) \quad v_0(t) = E_0 \cos[\omega^* t + \theta(t)] \quad (6)$$

式中: E_i 和 E_0 分别为幅值, 相位差与频率差 ω 之间的关系为

$$\theta(t) = k \int_0^t \omega(t) dt \quad (7)$$

式中: k 为线性比例系数, 根据三相电压不平衡时的旋转变换关系, q 轴分量 $v_q(t)$ 可看成直流电压和二次谐波分量的合成, 表达式为

$$v_q(t) = \frac{1}{2} k_m E_i E_0 (\sin(2\omega_0 t + \theta(t)) + \sin(\theta(t))) \quad (8)$$

式中: k_m 为比例系数。将二次谐波滤除后, 得到相位差与 q 轴分量的关系为

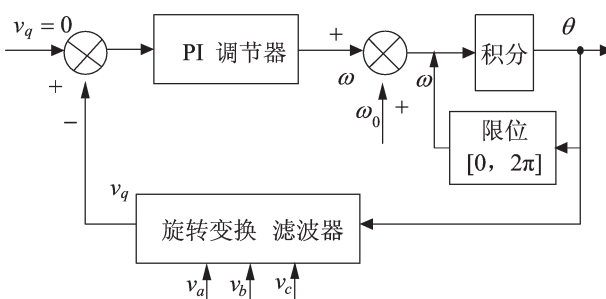


图1 基于瞬时无功理论的软件锁相环原理

Fig.1 SPLP based on instantaneous reactive power theory

$$v'_q(t) = \frac{1}{2} k_m E_i E_0 \sin(\theta(t)) \quad (9)$$

在线性范围内,假设线性比例为 $k = \tan \alpha$,则控制特性方程为

$$\omega^*(t) = \omega_o + \tan \alpha \cdot v'_p(t) = \omega_o + k v'_q(t) \quad (10)$$

根据以上分析,可得如图2所示的软件锁相环相位控制的数学模型。其中: $k_d = \frac{1}{2} k_m E_i E_0$, $F[p] = \omega_o + k v'_q(t)$ 。

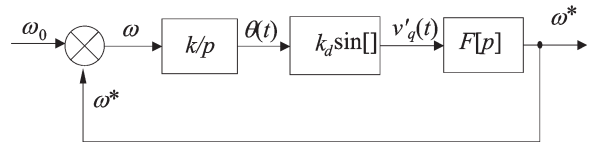


图2 软件锁相环相位控制数学模型

Fig.2 Phase-controlling model of SPLL

3 椭圆型陷波器设计

应用广泛的三种陷波器原型为巴特沃斯滤波器、切比雪夫滤波器以及椭圆滤波器。其中椭圆滤波器具有设计阶数最小的优点,适合在DSP中软件实现。本系统DSP采样频率 $f_s = 5 \text{ kHz}$,滤波器技术指标为通带截止频率 50 Hz ,通带衰减 1 dB ,阻带截止频率 $f_1 = 100 \text{ Hz}$,阻带衰减 80 dB 。则滤波器的转折角频率 ω_1 为

$$\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{f_s} = 0.04\pi \quad (11)$$

4 仿真与实验验证

建立带有二次陷波器软件锁相环MATLAB仿真模型,电网电压三相平衡与三相不平衡时的锁相过程如图3和图4所示。

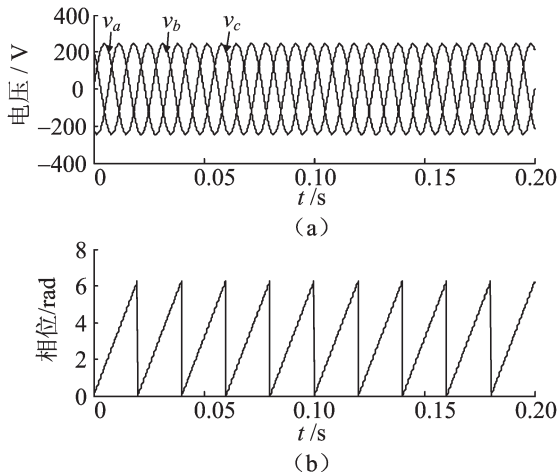


图3 三相电压平衡时锁相过程

Fig.3 Phase lock process under balance power grid

图3说明三相电压平衡时系统能够快速准确进行锁相。图4表明,三相电压不平衡时基本能够准确锁相,只是在0.05 s之前出现一些误差,原因是系统启动时电压初相位是任意的,而初始化中给定一个固定相位,软件锁相环开始需要调整控制,最终实现锁相。仿真结果证明了设计的基于瞬时无功理论的软件锁相环能够较好的实现不同电网电压的锁相。

对设计的软件锁相环应用于三相PWM整流器中进行实验验证。搭建1 kVA的三相整流器平台,直流侧接 12Ω 的纯电阻负载,实验波形如图5所示,曲线1为电压,曲线2为电流。实验结果表明输入电流很好

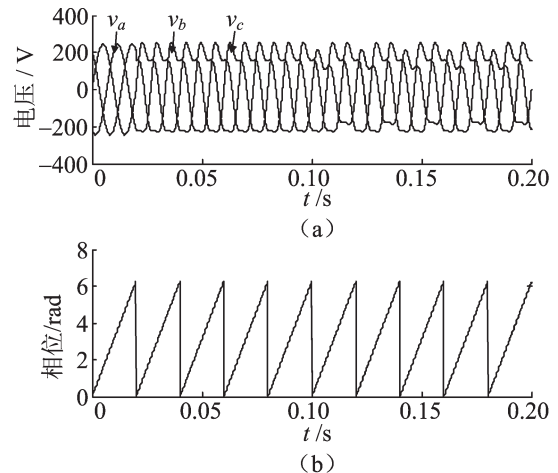


图4 三相电压不平衡时锁相过程

Fig.4 Phase lock process under unbalance power grid

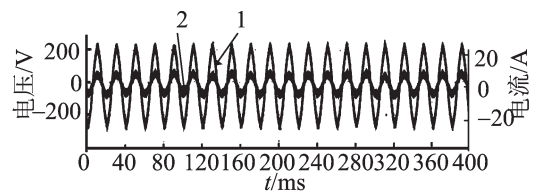


图5 整流器交流侧电流、电压

Fig.5 AC voltage and current of PWM rectifier

地跟踪了电网电压,实现了整流器的单位功率因数运行,说明了软件锁相环的实用性。

5 结论

三相PWM整流器正常运行的前提是对输入电网电压的快速准确锁相,三相电压不平衡导致整流器输入电流和输出电压叠加大量的二次谐波。一般考虑在控制系统中增加滤波消除电压不平衡的影响,本文在锁相环的设计中从根本上消除电压不平衡的影响,基于瞬时无功理论的软件锁相环适用于考虑三相电压不平衡的锁相。

三相不平衡时的相位不仅有正序直流分量,而且具有二次谐波特性的负序分量,因此在锁相环中增加一个二次谐波陷波器滤除负序分量。考虑到软件锁相环的DSP实现,设计了一个阶次最小化的椭圆型滤波器。仿真结果证明设计的软件锁相环能够快速有效地对三相平衡电压进行锁相,三相不平衡电压在2.5个周期内完全实现了锁相。基于瞬时无功理论的带有二次陷波器的软件锁相环在三相PWM整流器中得到了实验验证。仿真和实验结果验证了软件锁相环的有效性和可行性。

参考文献:

- [1] 周晖,齐智平. 动态电压恢复器检测方法和补偿策略综述[J]. 电网技术,2006,30(6):23-29.
- [2] 陈宏志,王旭,刘建昌. 电网不平衡条件下PWM整流器的并联控制方法[J]. 电机与控制学报,2009,113(15):702-706.
- [3] WU X H, PANDA S K, XU J X. Analysis of the instantaneous power flow for three-phase PWM Boost rectifier under unbalanced supply voltage conditions [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2008,23(4):1679-1691.
- [4] 马学军,陈息坤,康勇. 一种新的基于DSP的高精度UPS锁相技术[J]. 电工电能新技术,2001,24(4):59-62.
- [5] 王照峰,王仕成,苏得伦. 锁相环电路的基本概念及应用研究[J]. 电气应用,2005,24(8):46-48.
- [6] 李建林,许洪华. 风力发电系统低电压运行技术[M]. 北京:机械工业出版社,2009:129-148.
- [7] 朱义胜,董辉. 信号处理滤波器设计[M]. 北京:电子工业出版社,2004:250-484.
- [8] 邓成,王文海. 基于DSP的UPS软件锁相技术[J]. 湖南工程学院学报,2006,16(3):58-60.

A Design of Soft Phase Lock Loop in Three-phase PWM Rectifier under Unbalance Power Grid

Zhang Yonggao, Gao Yanli, Liu Huan, Long Lizhong

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

Abstract: The operation and control of three-phase PWM rectifier is implemented based on obtaining the phase shift of grid voltage accurately. Soft phase lock loop (SPLL) is appropriate to track the phase shift of three-phase unbalance voltage because of its simplicity and flexibility. The paper analyzes the phase shift under unbalance three-phase power grid, studies the principle of SPLL based on instantaneous reactive power theory and designs the secondary harmonic elliptic notch filter. The Matlab simulation mode of the designed SPLL and a three-phase PWM rectifier valid the SPLL with the secondary harmonic elliptic notch filter. This paper has the reference of design of PLL for other power electronic application.

Key words: soft phase lock loop; unbalance power grid; secondary harmonic notch filter; three-phase PWM rectifier