

# 一种变频器和工频电网之间同步切换的方法

张少云, 刘 斐, 张铁军, 陈 刚

(株洲变流技术国家工程研究中心有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘 要:** 工频旁路运行是变频器的一种重要运行方式, 变频器与工频电网间切换若不当, 则会引起很大的电流冲击和严重的电磁干扰。文章提出了一种软件估算工频电源频率的方法, 介绍了一种使用三相锁相环使变频器的输出频率和相位与工频电源的相同的方法, 以改善工频切换性能。

**关键词:** 变频器; 锁相环; 旁路切换

中图分类号: TM921.51

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2011)03-0051-03

## A Method of Synchronization Switching between Frequency Converter and Grid

ZHANG Shao-yun, LIU Fei, ZHANG Tie-jun, CHEN Gang

(Zhuzhou National Engineering Research Center of Converters Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** Bypass mode is one of the important running modes of frequency converters. It may incur current surge and serious electromagnetic interference (EMI) if the switching method between frequency converter and grid is incorrect. It presents a calculation method of power frequency with software, and introduces a way to improve switching performance using phase lock loop which make the output frequency and phase angle of inverter are the same.

**Key words:** frequency converter; phase lock loop; bypass switching

### 0 引言

由于在节能减排以及改善电机运行性能等方面效果显著, 变频器的应用越来越广泛。在不少运行工况下, 变频器除调速外还承担软启动任务, 将电机供电经变频器切换到工频电网。电机在运行过程中会产生反向电动势, 电源切换时相位若不重合, 叠加在电机绕组上的最大电压可达到2倍额定电压值之高, 这会给电机绝缘带来损伤。为避免电源切换带来的电冲击, 常规办法是切除变频器后先等待一段时间, 待转子电流基本衰减完毕后再将电机接入工频电网。如果等待时间过短, 转子电流未衰减完毕, 会对接触器及其它设备带来一定的电压冲击; 如果等待时间过长, 电机的转速则下

降, 会带来比较长时间的电流冲击<sup>[1-2]</sup>。

为了减小工频切换时电流或电压的冲击, 本文提出了一种在切换前先使变频器输出电压的相位和频率与工频电网的相一致, 然后停止变频器工作并立刻闭合旁路接触器以完成切换过程的方法。该方法需要一个三相锁相环节。与常规变频器锁相不同的是, 该锁相环节关注锁相的调节过程, 对单次调节量有很大要求, 一方面因为在锁相完成前变频器的输出已经存在, 一旦频率调节不当, 会导致变频器和电机在拖动和制动状态间频繁变化; 另一方面因为锁相环都采用dq变换, 锁相时间太长会导致三相锁相环节变得复杂, 而缩短锁相时间的最好办法就是在变频器输出频率和相位与工频电网的基本相同、频率相差很小时再启动锁相环。本文介绍了一种基于软件计算工频电网频率的方法, 在输出频率略小于电网频率且相位相同时启动三相锁相环, 当锁相完成后再进行电源的切换。

收稿日期: 2011-04-05

作者简介: 张少云(1982-), 男, 工程师, 主要从事大功率电力电子变流器装置的研究开发及系统设计工作。

### 1 基于瞬时无功理论的锁相环<sup>[3-4]</sup>

基于瞬时无功理论的锁相环其基本原理如图1所示,图中三相输入电压 $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$ 先经3/2变换转换到静止的 $\alpha\beta$ 坐标系,再由 $\alpha\beta$ 坐标系转换到与输出电压同步的旋转dq坐标系,得到对应的d轴和q轴电压( $u_d$ 和 $u_q$ )。变换用到的角度锁相的输出 $\theta$ (即逆变器输出电压的相位角), $u_q$ 的大小反映了输入电压和输出电压的相位差信息,因此可以利用 $u_q$ 值经过一个比例积分调节器后对当前频率( $\omega_0$ )进行修正以达到锁相的目的。

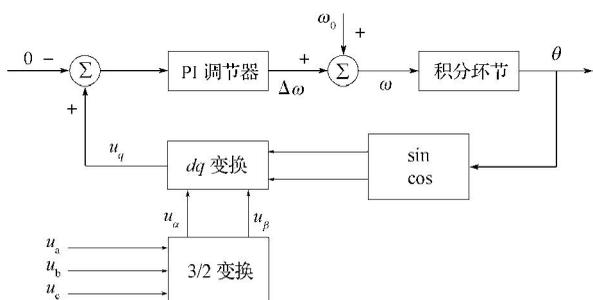


图1 锁相环流程图  
Fig.1 Flow chart of PLL

设三相电源电压中仅含有三相基波正序分量,即:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= U \cos(\omega_1 t + \varphi) \\ u_b &= U \cos(\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi) \\ u_c &= U \cos(\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中:U——电网相电压幅值; $\omega_1$ ——电源角频率; $\varphi$ ——初相角。

3/2变换后,得:

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

再经2/2变化,得:

$$\begin{bmatrix} u_d \\ u_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \omega t & \sin \omega t \\ -\sin \omega t & \cos \omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (3)$$

化简可得:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= \frac{3}{2} U \times \cos[(\omega_1 - \omega) \times t + \varphi] \\ u_q &= \frac{3}{2} U \times \sin[(\omega_1 - \omega) \times t + \varphi] \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

可以看出, $u_q$ 的大小反映出锁相输出的相位差信息。在电网频率和锁相环输出频率相同的情况下(即 $\omega_1 = \omega$ ), $u_q$ 的输出为恒定的直流分量,此时相位角若也

相同(即 $\varphi=0$ ),则 $u_q=0$ 。因此通过PI(比例积分)环节调节 $u_q$ ,可达到锁相的目的。

对三相电压采用该锁相技术,在相位差较大时,锁相是非线性过程;但在相位差较小的情况下,可近似为线性过程。

### 2 频率计算

进行频率计算的目的是为了在锁相开始前即知道电源频率,锁相过程的PI调节使输出角频率 $\omega$ 尽量稳定

且超调量小。用 $u_{\Delta\omega}$ 表述 $\frac{du_d}{dt}$ 和 $\frac{du_q}{dt}$ 合成向量的幅值,则由式(4)可以得出:

$$u_{\Delta\omega} = \sqrt{\left(\frac{du_d}{dt}\right)^2 + \left(\frac{du_q}{dt}\right)^2} = \frac{3}{2} U \times |\omega_1 - \omega| \quad (5)$$

由于U可以通过其它常用方法计算,而 $\omega$ 是已知,因此由式(5)可以计算出 $\omega_1$ 。

以上计算均基于理想波形。在实际运行中,一方面由于整流电路的存在,电源中往往含有一定的谐波分量,且硬件电路的采集结果中往往会含有高频白噪声;另一方面,微分环节对高频信号会有放大作用,因此计算结果是否有效成为关注的重点。

设三相电源含有零序及各次谐波分量,即:

$$\left. \begin{aligned} u_a &= \frac{U_0}{3} + \sum U_n \times \cos(n\omega_1 t + \varphi_n) \\ u_b &= \frac{U_0}{3} + \sum U_n \times \cos(n\omega_1 t - \frac{2}{3}\pi + \varphi_n) \\ u_c &= \frac{U_0}{3} + \sum U_n \times \cos(n\omega_1 t + \frac{2}{3}\pi + \varphi_n) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

式中: $U_0$ ——电压零序分量幅值; $U_n$ ——第n次谐波相电压幅值; $\varphi_n$ ——第n次谐波的初相角。

对于零序分量,显然 $u_d=0, u_q=0$ 。

对于正序分量,有:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= \frac{3}{2} \sum U_n \times \cos[(n\omega_1 - \omega) \times t + \varphi_n] \\ u_q &= \frac{3}{2} \sum U_n \times \sin[(n\omega_1 - \omega) \times t + \varphi_n] \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

由式(7)可以看出,正序分量除所需要的频率为 $(\omega_1 - \omega)$ 的信号外,还含有大量的高频信号,且高频信号的幅值被放大。通过对式(7)进行微分计算可得:

$$\left. \begin{aligned} \frac{du_d}{dt} &= -\frac{3}{2} \sum U_n (n\omega_1 - \omega) \times \sin[(n\omega_1 - \omega) \times t + \varphi_n] \\ \frac{du_q}{dt} &= \frac{3}{2} \sum U_n (n\omega_1 - \omega) \times \cos[(n\omega_1 - \omega) \times t + \varphi_n] \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

随着输出频率临近电网频率,由式(8)可以看出,

带来影响的谐波信号频率基本为工频电压频率的整数倍,计算需用到的有效信号渐渐趋向于直流;而无用信号的频率远远大于有效信号,可以通过高阶滤波器滤除无用信号。虽然使用滤波器会带一定的相位偏移,但对 $\frac{du_d}{dt}$ 和 $\frac{du_q}{dt}$ ,由于采用同样的滤波器,其相位偏移是相同的,由式(5)可知,该相位偏移不会对频率计算带来影响。

先分析简单的2阶巴特沃斯滤波器,其特征角频率为 $\omega_n$ ,由文献[5]可知其幅频特性:

$$|A(j\omega)| = \left( \sqrt{1 + \left( \frac{\omega}{\omega_n} \right)^4} \right)^{-1}$$

综合式(8)可得 $|A(j\omega)| \times \omega$ 的幅频特性在过渡带内以20dB/10倍频衰减。

取滤波器的特征角频率为 $5\pi$ ,且电网谐波含量满足国标GB/T 14549-93《电能质量 公用电网谐波》要求,当电网频率和锁相环输出频率差为0.5 Hz时,频率计算误差小于0.02 Hz,完全能满足电源切换控制要求。

### 3 测试过程

#### 3.1 软件流程

在恒压频比控制的异步电机驱动系统中进行电源同步切换软件测试,程序中采用了2阶巴特沃斯滤波器,其特征角频率 $\omega_n=5\pi$ ,即对应于2.5 Hz频率。有关电源切换部分的程序基本流程如图2所示。

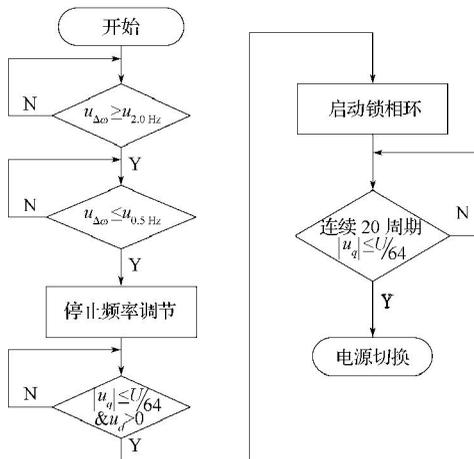


图2 软件流程图

Fig. 2 Flow chart of the software

#### 3.2 试验结果

电源切换试验所用电源额定电压为1 140 V,频率

50 Hz;电机额定电压为1 140 V,额定功率315 kW。在电机空载、变频器带输出正弦波滤波器的情况下进行试验,电机电流波形如图3所示。

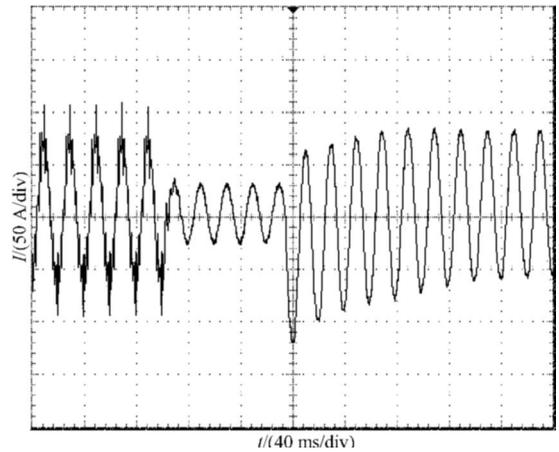


图3 电源切换过程电流波形图

Fig. 3 Current waveform during power switching

为保证变频器的安全,在变频器停止工作后才发出闭合旁路接触器的指令。接触器的合闸时间较长,存在几个周期内电机无输入电源阶段,由于转子电流衰减,存在电流冲击,但冲击量已非常小。如果在控制上延迟2个周期才停止变频器的输出,则可使该电流冲击更小。

### 4 结语

变频器和电网间的同步切换其实质是要求变频器的输出频率及相位与工频电网的完全相同,因此三相锁相环是一个很重要的环节。但是传统的三相锁相环可能会带来变频器直流电压的波动。本文利用锁相环程序中部分数据计算出电网频率,再利用局部软件方法实现了软切换。该方法程序量小且无需频率检测硬件电路,实际应用证明能完全满足客户的要求。

#### 参考文献:

- [1] 朱洪波,于庆广,李锴,等. 高压变频器与工频电源之间软切换方式的研究[J]. 电力系统自动化,2004,28(6): 91-93.
- [2] 徐甫荣. 关于变频器的输出切换问题探讨[J]. 电气传动自动化,2002,24(4): 19-23.
- [3] 王兆安,李民,卓放. 三相电路瞬时无功理论的研究[J]. 电工技术学报,1992(3): 55-59.
- [4] 李彦栋,王凯斐,卓放,等. 新型软件锁相环在动态电压恢复器中的应用[J]. 电网技术,2004,28(8): 42-45.
- [5] 康光华. 电子技术基础: 模拟部分[M]. 4版. 北京: 高等教育出版社,1999.