

变频器输入缺相保护回路设计

The Design of a Input Phase Lack Protection Circuit for Frequency Converter

张微¹, 张友军¹, 陈昆鸿², 林乐斌¹, 王雅莉¹

1. 苏州大学机电工程学院 (江苏省, 苏州市, 215021)

2. 苏州士林电机有限公司 (江苏, 苏州市, 215009)

Zhang Wei, Zhang Youjun, Chen Kunhong, Lin Lebin, Wang Yali

1.College of Mechanical & Electrical Engineering, Soochow University (Suzhou, 215021)

2.Suzhou Shilin Electric Co., LTD (Jiangsu Province, Suzhou, 215009)

摘要: 变频器作为一个新兴产业正处于蓬勃发展之中, 其保护功能也越来越完善。本文介绍一种实用的变频器输入缺相保护回路, 在常规输入缺相保护回路基础上串联电容进行隔直; 分析了其数学模型, 并利用 Simtrix 仿真软件对线路进行仿真。此保护回路已经在最新开发的系列产品中得到了应用, 具有成本低、可靠性高、保护及时等特点。

关键字: 变频器 缺相检测 电容隔直 光耦隔离

Abstract: Frequency Converter as an emerging industry is booming, and its protecting function is becoming more and more perfect. In this paper, a practical input phase lack protection circuit for inverter is designed, which add capacitor for blocking DC current on the basis of general input phase lack protection loop; analyzing the mathematical model, and then simulating the circuit with the Simtrix. The protection circuit has been applied in the latest production with its characteristics of low cost, high reliability, and the timely manner in protection.

Keywords: Frequency converter, Phase lack detection, Capacitor blocking, Optical coupler isolation

[中图分类号] TN86 [文献标识码] A 文章编号: 1561-0349 (2014) 12-0035-04

0 前言

随着大功率产品的开发, 变频器采用单相供电方式, 功率会受到很大的限制。采用三相供电可以很好地增大输出功率, 减小直流母线电压纹波。在三相供电的情况下, 缺相会严重影响变频器可靠运转, 因此, 变频器一般都会自带缺相检测功能。缺相检测功能, 即当电源出现缺相的情况下, 能停止运转变频器, 以确保安全、并故障提示, 从而保证产品的可靠运行。如何对三相电源的缺相进行检测, 文献 [1] 主要论述了软件的实现方法, 对硬件原理论述较少, 且其软件实现在变频器轻载工作时误差较大; 文献 [2]、文献 [3] 虽然详细分析了其硬件结构, 但是实现方法过于复杂, 适用性小。为此, 本文将介绍一种低成本、高可靠性的检测电路来实现缺相保护。

1 缺相保护回路数学模型

图 1 为缺相线路图, 为分析方便, 假设三相相电压正弦对称, 即

$$\begin{aligned} u_a &= u_m \sin \omega t \\ u_b &= u_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ u_c &= u_m \sin(\omega t - 240^\circ) \end{aligned} \quad (1)$$

其中: $\omega = 2\pi f$, 为电源角频率, f 为电源频率。

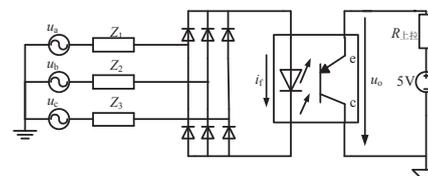


图 1 输入缺相线路保护回路

1.1 三相上电理论分析

为简化分析，忽略二极管压降，那么三相上电线路可以简化为图 2 所示。

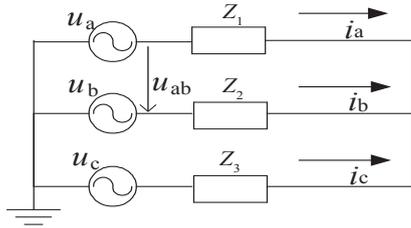


图 2 三相上电简化示意图

若三相负载对称 ($Z_1 = Z_2 = Z_3 = Z$)，则三相电流表达式如下：

$$\begin{aligned} i_a &= \frac{U_m}{|Z|} \sin(\omega t - \varphi) \\ i_b &= \frac{U_m}{|Z|} \sin(\omega t - 120^\circ - \varphi) \\ i_c &= \frac{U_m}{|Z|} \sin(\omega t - 240^\circ - \varphi) \end{aligned} \quad (2)$$

由式 2 可以看出，在三相上电时，每一相电流是幅值 $\frac{U_m}{|Z|}$ 的正弦波，相位移 φ 由阻抗 Z 决定，且三相电流相位依次相差 120° 。

图 3 给出了三相电流波形 i_a 、 i_b 、 i_c 与光耦驱动电流 i_f 在同一时刻，三相电流中为正的两相电流之和。此时光耦一次侧发光二极管始终导通，二次侧电压为低电平。

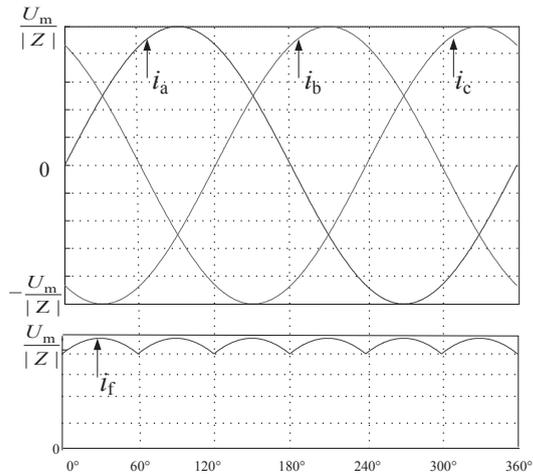


图 3 三相电流与光耦驱动电流示意图

1.2 单相上电理论分析

假设 C 相缺相，那么此时线路为单相全桥整流线路，则

$$i_a = \frac{u_{ab}}{2Z} = \frac{\sqrt{3}U_m}{2|Z|} \sin(\omega t - 30^\circ - \varphi) \quad (3)$$

由式 (3) 可以看出，相电流是幅值为 $\frac{\sqrt{3}U_m}{2|Z|}$ 的正弦波。经过单相全桥整流后的 i_f 为正弦半波。当电流为高时光耦导通，二次侧电压为低电平；当电流为零时光耦关断，二次侧电压为高电平。

2 缺相保护回路硬件设计

Z_1 、 Z_2 、 Z_3 选用贴片电阻与贴片电容的组合，贴片电阻可以限制驱动电流。贴片电容可以通过交流、隔离直流，防止光耦误导通。由于贴片电阻功率一般比较小，为了减小驱动电流，增加电容与增大电阻的效果一样，但电容做无用功，从而可以降低贴片电阻功耗。

2.1 贴片电阻阻值计算

贴片电阻具有耐潮湿、高温、体积小等特点。此线路中阻值的选取需要考虑以下因素：

- (1) 三相上电时（正常工作状态），所消耗的功耗尽量小；
- (2) 三相上电时，应保证光耦稳定导通，即光耦驱动电流足够大；
- (3) 单相上电时，需保证光耦能在导通与关断间来回切换。由单相上电的分析可知，线电压一定存在过零点，则光耦一次侧电流一定存在过零点。又电阻电流有效值为

$$I_R = I_a = \frac{U_m}{\sqrt{2}|Z|}, \text{ 则电阻功耗为:}$$

$$P = |I_R|^2 R = \left(\frac{U_m}{\sqrt{2} \sqrt{R^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}}} \right)^2 * R \quad (4)$$

其中： R 为贴片电阻阻值， C 为电容容值。

假设 C, φ 已知，并令 $\frac{1}{\omega^2 C^2} = K$ ，式 (4) 对未知量 R 求导得：

$$\frac{dP}{dR} = \frac{U_m^2}{2} \frac{K - R^2}{(R^2 + K)^2} \quad (5)$$

由式 (5) 可以看出，在 $R = \sqrt{K} = \frac{1}{\omega C}$ 时， P 取极大值；

当 $R < \frac{1}{\omega C}$ ， P 增大；当 $R > \frac{1}{\omega C}$ ， P 减小。所以，为了同时满足上述 3 点要求，需要将 R 设计得越小越好，最后结合温度、功耗等方面因素，选用阻值为 $51k\Omega$ ，额定功耗为 $1W$ 的贴片电阻。

2.2 隔直电容容值计算

隔直电容在单相上电时有滤除直流电的作用，防止缺相时不报警，由于变频器空间比较小，隔直电容选用贴片电容，容值 $C = 22nF$ ，工频电源频率 f 为 $50Hz$ ，则 $\frac{1}{\omega C} = 127.39k\Omega$ ，远远大于 $51k\Omega$ ，满足要求。

2.3 驱动光耦选型

驱动光耦是本电路的核心器件，其性能的好坏直接影响功能的稳定性。选用东芝公司的 TLP785 (BLL)，BLL 为 CTR(电流传输比例)等级，此型号具有 CTR 相对较高、饱和压降相对较低的特点。饱和压降最高不超过 0.4V，满足 CPU 输入低电平需要低于 0.8V 的要求。

3 电阻功耗分析

SIMetrix/SIMPLIS 是一款用于优化设计电力电子电路的高级仿真工具。其完美结合了精度与收敛性能，实现了电源电路的高速仿真。利用 SIMetrix 搭建如图 4 所示的仿真模型，分析贴片电阻的最高功耗。

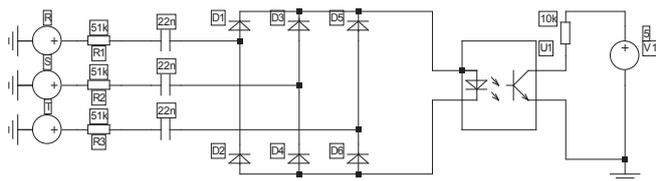


图 4 输入缺相仿真线路图

三相交流输入线电压有效值为 $U_{ab} = 440V$ 时的仿真结果示于图 5。

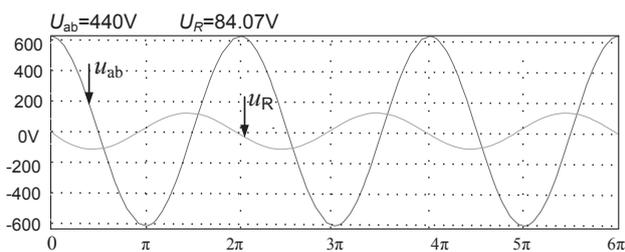


图 5 输入电压与电阻电压均方根

其中： U_{ab} 为输入线电压波形， u_R 为 51kΩ 电阻电压波形，其电压有效值为 84.07V。又根据上述公式理论计算：

相电压有效值为：

$$U_a = \frac{U_{ab}}{\sqrt{3}} = 254(V) \quad (6)$$

51kΩ 电阻电压有效值：

$$U_R = \frac{U_a R}{\sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{254 * 51}{\sqrt{51^2 + \left(\frac{10^6}{100\pi * 22}\right)^2}} = 84.44(V) \quad (7)$$

理论计算和仿真结果一致，则电阻功耗为：

$$P = \frac{U_R^2}{R} = \frac{84.44^2}{51} = 139.9(mW) \quad (8)$$

考虑到电网最高 10% 的电压波动，那么电阻最高功耗为：

$$P_{max} = P * 1.1^2 = 139.9 * 1.21 = 168.279(mW) \quad (9)$$

可以看出，电阻功耗远远小于其额定功耗 1W，满足要求。电容由于消耗无用功，不会产生很高的热量，所以不予考虑。

4 光耦 TLP785(BLL) 驱动电流分析

4.1 三相上电光耦驱动电流分析

三相上电时，三相相电流为幅值相同、相位相差 120° 的正弦波。因此，流过光耦一次侧的电流，为三相电流取绝对值后在上半平面的包络线。其最大值为相电流最大值，最小值为 $\frac{\sqrt{3}}{2}$ 倍最大值。线电压为 440V 上电时理论计算过程如下。

①线电压 440V 光耦驱动电流最大值

$$i_{fmax} = \frac{\sqrt{2}U_R}{R} = \frac{\sqrt{2} * 84.44}{51} = 2.34(mA) \quad (10)$$

②线电压 440V 光耦驱动电流最小值

$$i_{fmin} = i_{fmax} * \frac{\sqrt{3}}{2} = 2.03(mA) \quad (11)$$

4.2 单相上电光耦驱动电流分析

由以上分析可知，单相上电时，流过光耦一次侧的电流为 a、b 两相电流在上半平面的电流。其最大值为相电流最大值，最低值为 0。440V 上电时理论计算过程如下。

①线电压 440V 光耦驱动电流最大值

$$i_{fmax} = \frac{\sqrt{3}U_m}{2|Z|} = \frac{440 * \sqrt{2}}{2\sqrt{51^2 + \left(\frac{10^6}{100\pi * 22}\right)^2}} = 2.03(mA) \quad (12)$$

②线电压 440V 光耦驱动电流最小值

$$i_{fmin} = 0(mA) \quad (13)$$

5 光耦 TLP785(BLL) 二次侧电压分析

5.1 三相上电光耦二次侧电压分析

三相上电考虑光耦驱动电流最小值，分析此电流值能否使光耦稳定导通。图 7 为 TLP785(BLL) 的 CTR 随 i_f 的变化示意图。

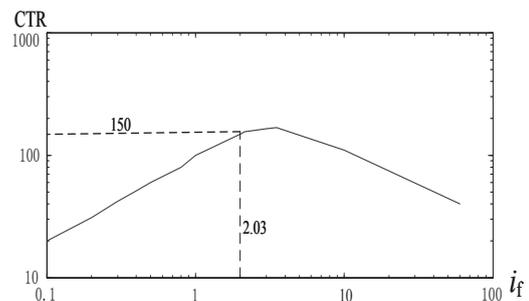


图 7 TLP785(BLL) i_f -CTR 变化示意

光耦 CTR 定义为在一定的驱动电流下，传输到二次侧的最大电流比值。实际电流随上拉电阻的阻值变化而变化，此线路中取 $R_{上拉} = 10k\Omega$ ，考虑最低驱动电流 $i_{fmin} = 2.03mA$ ，则输出端电压 $V_o = 5 - i_{fmin} * CTR * 10 = -25V$ ，光耦稳定导通，输出电压 V_o 钳位在 0V。

5.2 单相上电光耦二次侧电压分析

①若 $i_{\text{fmax}} = 2.03\text{mA}$ ，等于单相上电时的最低电流，因此光耦稳定导通。

②若 $i_{\text{fmin}} = 0\text{mA}$ ，即没有驱动电流，则 $V_o = 5\text{V}$ 。因此二次侧电压为高低电平。

5.3 实测光耦二次侧电压

实际搭建如图 4 所示电路，线电压有效值为 440V，三相、单相上电时，二次侧电压波形如图 8、图 9 所示。

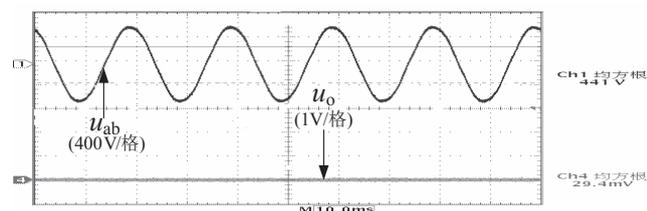


图 8 实测三相 440V 上电波形

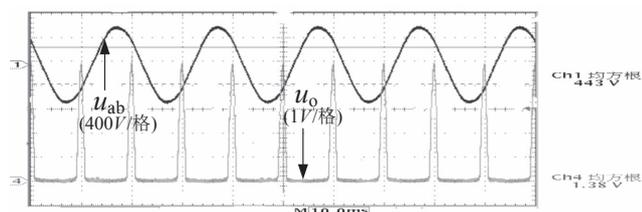


图 9 实测单相 440V 上电波形

可以看出，三相线电压 440V 上电时，光耦稳定导通，二次侧电压恒为 0V；单相 440V 上电时，光耦在导通与关断之间切换，二次侧出现高低电平，线路输出波形正常。此信号直接输入 CPU I/O 引脚，CPU 根据此变化判断系统是否处于缺相运行状态。

6 结束语

本文介绍了一种实用的缺相检测线路，详细分析了其工作原理，并利用 Simtrix 对其进行仿真，验证了理论计算的正确性，最后实际搭建线路测量相关波形，波形输出正常。此线路具有成本低、动作快、功耗低、可靠性高的特点，应用前景非常广阔。

参考文献

- [1] 赵莉, 姚颖. 变频器中缺相检测的软件实现方法 [M]. 微计算机信息, 2005.
- [2] 吴伟宾. 一种三相电源逆相、缺相检测电路. 电子产品世界. 2012. 5
Proceedings of the IEEE, 2000: 162-165.
- [3] 何礼高. 交流变频调速系统中的几种特殊功能设计. 变频器世界. 2000. 1

附注

基金项目: 1. 江苏省大学生实践创新训练计划项目; 2. 苏州大学生课外学术科研基金项目.

作者简介

张微 (1989—), 江苏南通人, 硕士研究生, 主要研究方向为电力电子。

张友军 (1970—), 安徽黄山人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为电力电子变换及其控制技术。

陈昆鸿 (1973—), 男, 苏州士林电机研发中心总经理, 研究方向为电力电子与电机控制。

风电并网装机容量大增 山西电网风力发电刷新纪录

近年来, 能源短缺、气候变化等全球性问题日益突出, 加快发展新能源已成为必然趋势。风电作为环保节能、可再生、无污染的新型能源越来越受到社会关注。

日前, 山西电网风力发电出力达 305.4 万千瓦, 刷新了 11 月 1 日 288 万千瓦的纪录, 再创今年新高, 占全网当日用电负荷 15.6%, 全日风电发电量达 6364 万千瓦时, 占山西电网当天总发电量 11.3%。目前, 全省风电并网装机容量已达 411 万千瓦。

随着风电并网装机容量不断增大, 风电在山西电网比重越来越大。由于风电的反调峰特性和风电出力的多变性, 使得电网日计划编制及实时调整压力与日俱增。

据悉, 省电力公司调控中心坚持提前安排计划, 严密监视相关断面, 保证大功率风电全额消纳。同时, 不断探索风电纳入日前计划, 提高风功率预测水平, 深层次挖掘风电涉网特性进行探索研究。

目前, 针对风电装机容量的快速增长, 结合风功率预测系统, 省电力公司大力开发风电场 AGC 闭环控制系统, 进一步加强运行管理, 确保迎峰度冬期间电网安全、稳定运行及清洁能源最大程度优先接纳。