

基于 DSP 控制的大功率抗三相不平衡负载光伏逆变电源

鞠洪新 苏建徽 张国荣 丁明

(1. 教育部光伏系统工程研究中心;2.合肥工业大学能源研究所,合肥 230009)

摘要: 详细介绍了一种可应用于三相不平衡负载的大功率光伏逆变电源控制系统,该系统采用了高速 DSP 控制芯片 TMS320LF2407A,通过分别反馈各相交流输出电压的采样值,并对其实施相应的独立控制,实现了三相电压的稳定输出,克服了由于三相负载不平衡而引起的波形畸变。

关键词: 大功率、三相、不平衡负载、光伏、逆变

中图分类号: TK51

文献标识: B

0 引言

三相逆变电源的一个最重要的基本性能就是维持三相电压的对称输出。正常情况下,用电设备应工作在三相负载电流平衡(数值大小一样),三相电压对称(三相相位互差 120 度)的条件下。但事实上,由于当前单相用电设备特别多,对于大量的单相设备而言,三相负载不平衡会引起某相电压升高,严重时甚至会烧毁单相用电设备。

由此,本文介绍了一种大功率光伏逆变电源系统,该电源系统可单相使用或三相使用,三相由完整的单相整合连接而成,封装在同一个模块。它与常规的三相逆变器相比,具有控制灵活,可以抗 100% 三相不平衡负载的显著优点。

1 三相逆变电源主电路分析

1.1 常规三相逆变主电路

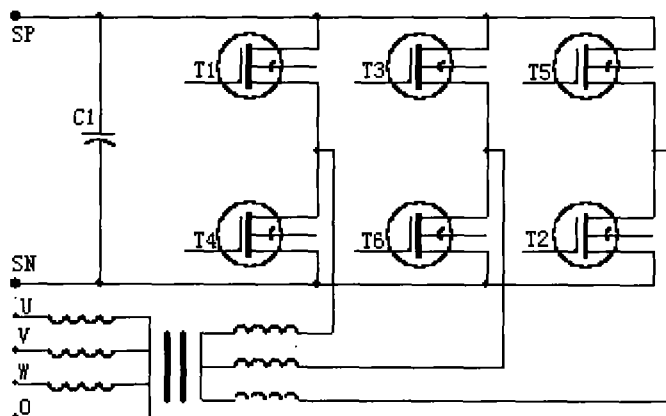


图 1 常规三相逆变主电路

Fig. 1 the main circuit of general three-phase inverter

常规的三相逆变主电路如图 1 所示。该电路通过 6 个开关管将太阳能电池或蓄电池提供的直流电逆变为三相交流电,输出侧采用 Y/Y₀ 型连接的三相变压器隔离。其优点是结构简单,所需器件较少,只使用一片控制芯片便可进行三相 PWM 调制。但当带三相不平衡负载运行时,其弊端就暴露无遗。

(1) 采用某一相反馈控制

三相负载完全平衡时,三相逆变器各相输出电压也完全对称,对负载和电源都不会产生不利影响。但当某一相负载突然增大或减小时,即三相负载不平衡时,由于逆变电源采用其中某一相电压进行反馈

控制,且逆变电源只能采用相同的调制比来调节三相交流电压输出,这样在三相四线制电路中,当三相负载不平衡时,会导致逆变变压器的三相磁通不平衡,使得变压器处于不对称运行状态。尤其在变压器采用 Y/Y_0 接法时,会由于变压器二次侧有零序电流,而一次侧没有零序电流相平衡,因此二次侧的零序电流成为激磁电流,产生零序主磁通,在各个绕组中感应出零序电势,使相电压中点发生移动,造成其中心点漂移、噪声增大等不良现象。中心点漂移会引起 A、B、C 三相输出电压发生畸变,有的相电压大于 220V,有的相电压则低于 220V,造成逆变电源所带的负载不能正常工作。当三相负荷不平衡度较小时,会影响供电设备的输出能力,增大线路损失,给用电设备带来许多不利的影响。而在三相负荷严重不平衡时,由于三相电压产生严重畸变,负荷最小的一相的电压最大,使得该相线路所带负荷会发生严重烧毁事故,

(2) 采用三相独立反馈控制

如果能够对三相相电压分别采样反馈,从而进行独立控制,即针对每一相分别采用相应的调制比进行调制,则表面上可以避免(1)中所产生的问题。实际上由于 PWM 调制输出的电压都是连接在同一个三相变压器的三个绕组上,而各相绕组之间存在一定的磁耦合关系。调节其中的任何一相电压,就改变了这一相对应绕组的磁通,就必然影响到其他两相的磁通,进而影响了其它两相的电压输出。也就是说,变压器绕组之间的相互耦合使得这种软件上的独立控制受到了限制,这样的拓扑结构也不可能具有很好的抗不平衡负载性能。

另外,三相负荷是否平衡,不仅关系到变压器供电的可靠性和稳定性,而且关系变压器供电的损耗率。

假设变压器的三相损耗分别为:

$$Q_a = I_a^2 R \quad Q_b = I_b^2 R \quad Q_c = I_c^2 R \quad (1)$$

其中: Q_a 、 Q_b 、 Q_c 分别为变压器的三相损耗;

I_a 、 I_b 、 I_c 分别为变压器二次负载相电流;

R 为变压器的相电阻,对三相变压器而言,各相的相电阻可以近似认为相等。

则变压器的损耗表达式如下:

$$Q_a + Q_b + Q_c \geq 3\sqrt{(I_a^2 R) \cdot (I_b^2 R) \cdot (I_c^2 R)} \quad (2)$$

由(2)式可知,变压器在负载不变的情况下,当 $I_a = I_b = I_c$,即三相负载平衡时,变压器的损耗最小,为

$$Q_a + Q_b + Q_c = 3I^2 R \quad (3)$$

而当变压器运行在带最不平衡负载时,即 $I_a = 3I$, $I_b = I_c = 0$ 时,变压器的损耗为

$$Q_a + Q_b + Q_c = (3I)^2 R = 9I^2 R = 3(3I^2 R) \quad (4)$$

通过比较可以看出,变压器处于三相负荷最大不平衡运行状态时的变损是处于平衡时的 3 倍。

从上述讨论可以得出,不论软件如何处理,常规的三相逆变主电路抗三相不平衡负载的能力都不太好,要想从根本的解决这个问题,就必须对三相变压器进行解耦。下面我们提出的这种主电路拓扑,就是对三相变压器进行了硬解耦,它与常规电路相比,具有抗 100%三相不平衡负载的功能。

1.2 独立式抗三相不对称负载的三相逆变主电路

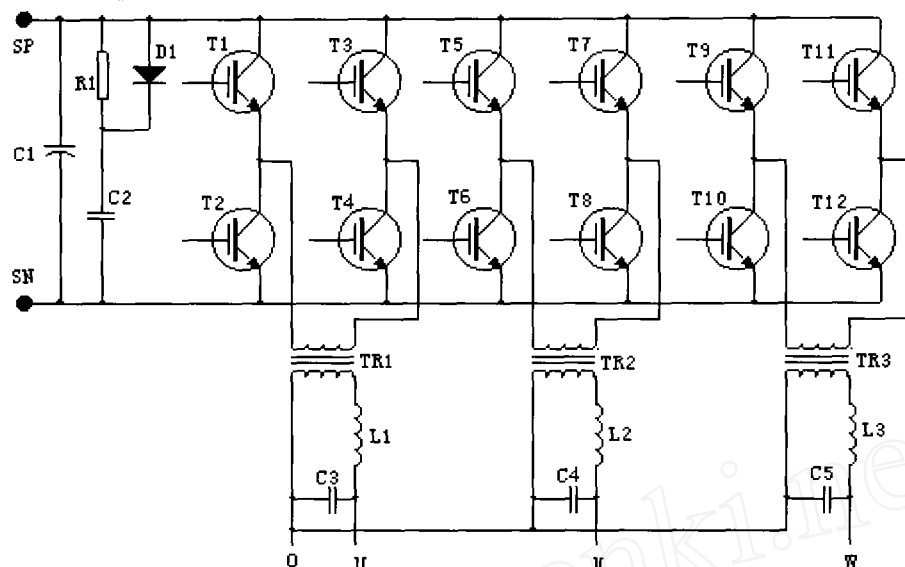


图2 抗三相不平衡负载的三相逆变主电路

Fig.2 the main circuit of three-phase inverter to resisting uneven load

图2 为独立式抗三相不平衡负载的三相逆变电源主电路拓扑结构图。系统主电路是由三个相互独立的单相逆变电路组合而成，电解电容 C_1 是直流侧共同的平波电容，其电容值的选择与负载额定功率、直流侧输入电压有关。电阻 R_1 ，二极管 D_1 以及无极性高频电容 C_2 组成了系统的吸收回路。当功率器件关断时，电容通过 D_1 充电，通过 R_1 放电。太阳电池或蓄电池提供的稳定直流电先经逆变电路逆变为高频交流电，再经过工频变压器升压和 LC 滤波电路滤波后得到标准的 220V/50Hz 正弦波。

这种拓扑结构直流侧使用了 12 个大功率 IGBT 器件，每四个分为一组，这样共分为三组，分别供三相逆变。输出侧采用了三个相互独立的单相变压器，相当于对三相变压器进行了完全解耦，这样该三相逆变器就是由三个相互独立的单相组合而成的三相，彻底解决了三相变压器由于三相之间相互耦合而带来的中心点移动等问题，适合大功率输出场合。对于该主电路，软件上可以灵活的通过对各相输出电压分别进行交流反馈值采样，然后对各相进行相应调节；硬件上也避免了三相变压器之间相互耦合而带来的问题，从而实现了逆变器三相电压在带不同负载时也可以稳定的输出，克服了由于三相负载不平衡引起的交流输出波形畸变等一系列问题。

2 系统实现

2.1 采用 DSP 的控制系统

对于这种组合式大功率抗三相不平衡负载的光伏逆变电源而言，不仅要求实时的高运算能力，还需要具备一定的事务管理能力。而普通的单片机，其运算速度不够快，外部资源也不丰富，尤其是对于本系统需要 12 路 PWM 输出口这一基本要求，仅采用一片单片机来实现甚至是不切实际的。

TMS320LF2407A DSP 具有专门用于电机控制的两个事件管理器模块 EVA 和 EVB。该模块每个都包括：两个 16 位通用定时器单元、比较单元、捕获单元以及正交编码脉冲电路、以及 8 个 16 位的脉宽调制(PWM)通道。这些丰富的功能单元使得三相反相控制、PWM 的输出波形控制、死区嵌入控制、及当外部故障引脚出现低电平时快速关闭 PWM 通道等控制的实现变得简单、方便。同时，它的 16 路 A/D、丰富的 I/O 接口以及诱人的处理速度，都使其成为近年来电机设计的首选。

本系统正是充分利用该芯片丰富的 PWM 输出通道，使其工作在中心对准互补模式，并软件设置 2.5us 的死区时间，启用外部可屏蔽的功率驱动保护中断，通过采样三相输出电压，对其分别实施独立

调制, 实现了三相输出。系统的基本结构框图如图 3 示。

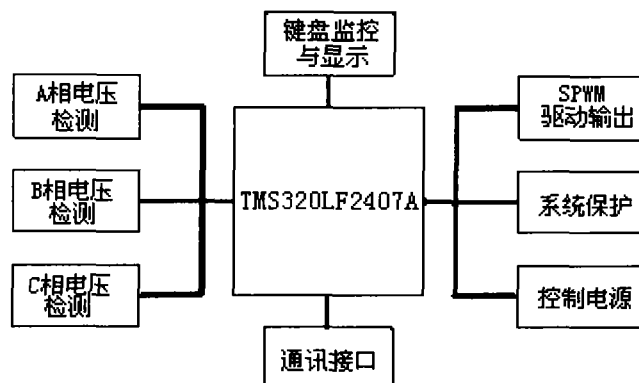


图 3 系统基本结构框图

Fig.3 The basic frame of system structure

2.2 系统控制结构

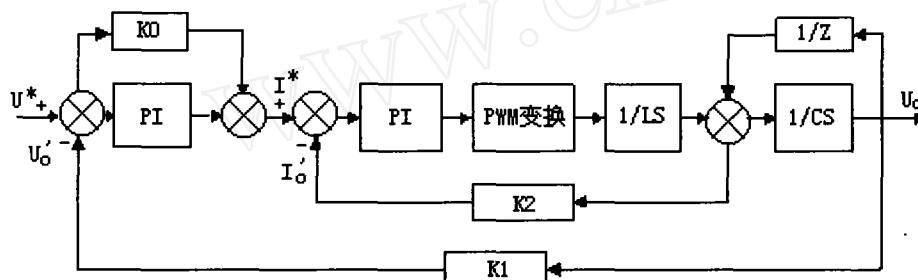


图 4 系统单相控制结构框图

Fig.4 The schematic of single-phase system control block

系统单相控制结构框图如图 4 所示。其中 U^* 为输入电压给定值, U_o 为交流输出电压值, U_o' 为交流输出电压的反馈值; I^* 为电流内环的给定值, I_o' 为交流电流反馈值; K_0 为电压前馈系数, K_1 为交流电压采样反馈系数, K_2 为交流电流采样反馈系数。

系统的控制结构采用电压外环和电流内环相结合的双环控制思想, 并引入了电压前馈控制, 这样是为了在满足系统稳定性和准确性的同时, 增强系统的快速性。电流环的启用增强了系统的带负载能力, 使得系统在需要大电流启动的场合能通过适当调整输出电压的大小来满足负载启动的大电流要求, 而不至于引起系统的过流保护。同时, 本系统还采用了新型数字式变比例系数和积分系数的 PI 调节器来实现交流稳定输出, 调节器可以根据反馈值与给定偏差的大小来自动改变比例系数和积分系数, 从而消除了积分饱和现象, 也大大减少了系统的超调量。此外, 为了避免产生较大的启动峰值电流, 在控制中还设置了电压软启动环节, 启动时电压逐次增加, 直至交流输出电压达到给定电压值。

对于三相输出模式, 还需在各相独立控制的基础上加入对其相位的控制, 即软件控制使三相输出电压相位互差 120 度。

2.3 系统功能扩展

本系统在实现单相和三相独立逆变输出的基础上, 充分发挥了 DSP 的功效, 对其功能进行了一些扩展和预留, 主要表现在系统还具有与电网自同步切换的功能, 兼有了一些后备式 UPS 或 EPS 的性能。当电网正常工作时, 负载由电网供电, 逆变器处于待机状态, 实时捕捉电网电压的相位和幅值; 当电网出现异常时, 首先通过同步环节, 实现逆变输出电压相位与电网电压相位的同步, 然后再将供电电源逐

渐切换至逆变电源,最终完成负载由逆变电源供电。其中切换方式可以根据负载对切换时间的要求分为晶闸管切换和继电器切换两种,晶闸管切换相对更加快速一些。

另外我们还在硬件上预留了一些功能,比如预留了 RS232 接口和上位机通信,以更好的对系统进行监控;利用 TMS320LF2407A 内部整合 CAN 模块这一宝贵资源,外接了一片 CAN 总线驱动芯片 PCA83C250,预留了 CAN 接口,以备以后进行现场总线通讯或并机使用。通过这些功能的扩展,本系统的功能更加全面,应用场合也更加广阔。

3 结语

大功率抗三相不平衡负载的光伏逆变电源利用 TMS320LF2407A DSP 芯片具有 12 路 PWM 输出通道的硬件资源优势,设计了一种双环调节系统。该系统利用三个单相逆变器,通过组合连接,实现了三相输出,并且具有了 100%抗不平衡负载的优良特性。这样,有利于逆变电源和负载的稳定运行,在带三相不平衡负载时,电流谐波小,噪声低,波形无畸变。

参考文献

- [1] 陈伯时主编。电力拖动自动控制系统。机械工业出版社,1997
- [2] 黄俊,王兆安。电力电子变流技术。机械工业出版社,1997
- [3] 刘和平,严利平,张学锋等。TMS320LF2407X DSP 结构、原理及应用。
- [4] TMS320LF/LC240xA DSP Controllers Reference Guide

作者简介

鞠洪新 [1979~],女,合肥工业大学能源研究所,博士研究生
苏建徽,合肥工业大学能源研究所所长,副教授,硕士生导师
张国荣,合肥工业大学能源研究所副所长,副教授,硕士生导师
丁明,合肥工业大学电气与自动化工程学院院长,教授,博导

A Photovoltaic Inverter of high-power and anti three-phase uneven loads

Based on DSP control

JU Hong-xin SU Jian-hui Zhang Guo-rong Ding Ming

(1.Engineering Research Center of Photovoltaic Systems, Education Ministry;

2.Energy Research Institute, Hefei University of Technology, Hefei 230009,China)

Abstract: In this paper, a high-power photovoltaic inverter applying to three-phase uneven load is introduced in details. This system adopts a high-speed digital signal processing control chip TMS320LF2407A and it implements the output of three-phase voltage steadily by adjusting the output of every phase according to sampling the AC output of it, so that it can overcome the waveform distort caused by three-phase uneven load.

Keyword: high-power、three-phase、uneven load、photovoltage、inverter

E-mail: ju_hx@126.com