

文章编号: 1007-4929(2015)07-0076-05

基于 DSP 和 ARM 的人机交互绞盘式太阳能喷灌机控制系统设计

王昌伟¹,朱德兰^{1,2},张林^{2,3},王斌¹,刘柯楠¹,陈昕³

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100;2. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院,陕西 杨凌 712100;3. 西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:针对目前市场上传统的采用水涡轮驱动的绞盘式喷灌机存在的能耗大,对灌溉水泥沙含量要求高,调速装置结构复杂及 PE 管易牵折等问题,联合采用高性能光伏 MPPT 控制永磁无刷电机,基于 DSP 和 ARM 两款微处理器,借助现代传感检测、无线传输及可视化触控技术,设计了一种人机交互绞盘式太阳能喷灌机智能控制系统。通过对系统的性能测试验证表明:修正步长的 P&O 法能有效地提高系统 MPPT 速度和准确度,增加光伏组件转换率;系统调速性能平稳,动态响应快;系统工作性能可靠,灌溉质量高,推广应用前景广阔。

关键词:绞盘式喷灌机;太阳能;DSP;ARM;永磁无刷电机

中图分类号:S277.9⁺4;S214 文献标识码:A

Design of Human-machine Interaction Auto-control System of Solar-powered Hose Reel Sprinkler Based on DSP and ARM

WANG Chang-wei¹, ZHU De-lan^{1,2}, ZHANG Lin^{2,3}, WANG Bin¹, LIU Ke-nan¹, CHEN Xin³

(1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;
2. Institute of Water Saving Agriculture in Arid Areas of China, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China;
3. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling 712100, Shaanxi Province, China)

Abstract: Because the traditional hose reel sprinkler driven by hydraulic turbine has the shortcomings of high energy and water consumption, high requirements for silt content of irrigation water, complex structure of speed regulating device and easy break of PE pipe of current market, this article designs an intelligent human-machine interaction control system of solar-powered hose reel sprinkler, of which the reel is driven through high performance photovoltaic brushless PM motor and hydraulic turbine based on DSP and ARM, and the modern sensor technology, wireless transmission technology and visual touch technology use are used. It's showed that variable step length P&O method can effectively improve the MPPT speed and accuracy, the system can provide a stable speed characteristic and fast dynamic response and improve the conversion rate of PV module; the unit has high irrigation quality and reliable work performance through verifying the performance. In general, the system has broad application and promotion prospects.

Key words: hose reel sprinkler; solar power; DSP; ARM; brushless PM motor

卷盘式喷灌机作为一种农田灌溉设备,工作时,主要通过水涡轮驱动回收 PE 管及喷头车来完成灌溉。上述喷灌机自 20 世纪 90 年代引入我国,虽然具有性能可靠、节水节能、对作物地形适应性强等优点,被公认为是最理想的喷灌机械之一,但是长时间缺乏创新改进^[1,2]。从目前市场上的大多数卷盘式

喷灌机配置及作业条件来看,主要存在如下突出问题:现有的喷灌机很少采用电驱动,在回收卷管的动作上自动化程度低,运行速度易出现波动,导致喷洒效果较差,无法实现精准灌溉;采用水涡轮驱动,入机压力大,损耗大,工效低;机组对灌溉水质要求较高,当水源中泥沙含量较高时,水中所含的泥沙容易

收稿日期:2015-01-05

基金项目:水利部“948”计划项目(201436);教育部、国家外国专家局“111”计划项目(B12007)。

作者简介:王昌伟(1988-),男,硕士研究生,从事喷灌机组太阳能驱动动力及控制系统研究。E-mail:wcw510@163.com。

通讯作者:朱德兰(1969-),女,教授,博士生导师,从事节水灌溉理论与新技术方面研究。E-mail:dlzhu@126.com。

夹在水涡轮片和内壁之间,导致水涡轮不能正常旋转工作;机组调速装置与脱档装置通过连杆机构调节水涡轮隔舌的开启度实现调速,同时通过连杆机构使变速箱中的啮合齿轮脱离实现脱档,这些连杆装置及其关联结构造成整机结构复杂;喷灌机工作牵引时,因无法清楚判断 PE 管伸长状态,可能造成过度牵引而拉折^[3,4]。

随着人类对于能源需求的与日俱增和化石燃料资源的不可再生消耗,整个社会的发展正面临能源瓶颈的制约和环境污染的威胁。太阳能作为一种新型清洁能源,以其良好的清洁性、绝对的安全性、资源的丰富性、潜在的经济性、寿命长和免维护性等优点,能像常规电源一样为干旱地区的农业灌溉提供可靠的电力资源,加之近年来光伏转换效率的不断提高和组件价格的逐年下降,已成为解决喷灌及其附属设备动力问题的最佳选择,为光伏农业的发展创造了有利条件^[5,6]。

绞盘式喷灌机作为一种高效农业节水灌溉机具,对其进行智能化控制是目前国内的主攻方向之一。为克服上述绞盘式喷灌技术中存在的缺点与不足,从优化机组结构和智能定量控制角度入手,西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院成功研发出一款集光、机、电一体化及太阳能高效利用于一体的可视化水涡轮和太阳能电机联合驱动的 PJT65-250 型绞盘式喷灌机,配套电机功率 250 W,采用 18 mm 的 50PYC 型垂直摇臂式喷枪,其设计最大运行速度 50 m/h。电力联合驱动时,采用基于 DSP 控制的光伏永磁同步调速电机驱动,利用流量传感器、压力传感器、速度传感器、电子尺等现代传感检测技术,在水源参数稳定或波动较小时,可实现设定速度的普通模式运行,在水源参数不稳定或波动较大时,可实现设定喷灌强度的精准模式运行;系统控制上,不仅满足传统的手/自动一体调节,而且可实现系统工作的无线远程传输指示和人机交互触控式操作,操作简单,可广泛地用于多种复杂状况下农牧场、农林经济作物的自动灌溉。

1 系统结构及其工作原理

为实现上述喷灌机的自动化控制,系统结构如图 1 所示。整套系统由上部的基于 DSP 的直流无刷绞盘驱动电机调速控制系统和下部的基 ARM 的喷灌机人机交互触控系统两部分组成。喷灌机交互式触控系统主要基于 ARM 32 位 Cortex-M3 内核的 STM32F103 微控制器和无线接收发模块设计完成,用于完成卷管缠绕层数、流量压力及速度的检测控制,机组初始参数的设定和运行状态的显示,以及系统工作的无线远程传输指示。该系统以太阳能为动力,采用离网式独立结构,为提高光伏组件转换效率,系统引入最大功率点跟踪(MPPT)技术。机组工作前,首先确定其运行模式,然后通过电位器或触控屏手动设定作业运行速度或喷灌强度(工作流量)。运行时,系统根据各传感器采集信号由 DSP 调速控制器按照矢量控制策略对驱动电机进行闭环控制,尤其是当电子尺检测到当前管道缠绕层数发生变化时,系统会根据设定比例系数对转速进行自动修正,实现跨级调速,消除由于软管在绞盘上缠绕直径的变化及输水软管附带水体质量变化带来的阻力变化对喷洒质量造成的影响。当安装在末端卷管的继电器开关触发时,系统无

线发出指示报警信号,提醒操作人员停止对喷头车继续牵引,起到一定的保护作用。

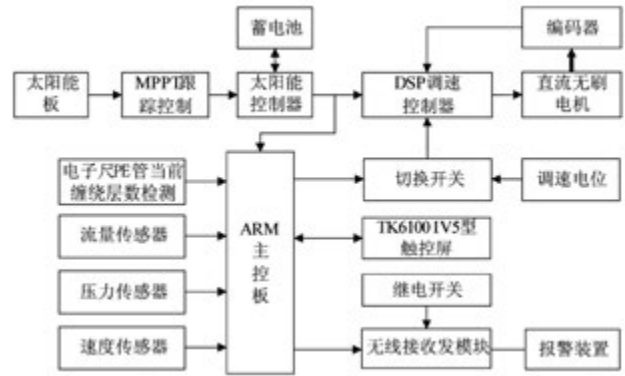


图 1 系统结构框图

2 光伏发电系统容量配置设计

对于独立光伏发电系统,光伏组件设计原则是要满足光照最差、太阳能辐射量最小季节的需求。但这势必会造成一定浪费,考虑加大蓄电池的设计容量,使蓄电池处于浅放电状态来弥补光照最差季节发电量不足对蓄电池造成的损害。系统配置设计主要包括以峰值日照时数、年辐射总量及年辐射总量和斜面修正系数等为参考的计算方法。本文采用以 T_m 为依据的简易算法,可参考下式计算:

$$N = K \frac{P T}{T_m} \tag{1}$$

$$C = \frac{\eta}{\eta_1 \eta_2} \frac{P T D}{V} \tag{2}$$

式中: P 为负载功率,W; T 为负载工作时间,h; T_m 为峰值日照时数,h; N 为光伏组件功率; D 为连续阴雨天数,d; C 为蓄电池容量,Ah; V 为系统电压,V; K 为损耗系数,损耗系数主要有线路损耗、控制器接入损耗、电池组件表面脏污及安装倾角不兼顾转换效率等因素所加的系数,计算时可根据需要在 1.6~2 之间选取; η 为放电率修正系数,根据蓄电池容量-放电率修正曲线,对于一般 50~200 h⁻¹的慢放电率光伏蓄电池,修正系数可在 0.95~0.8 之间选取; η_1 为低温修正系数,根据蓄电池温度-容量修正曲线,一般 0℃时取 0.95~0.9,-10℃时取 0.9~0.8,-20℃时取 0.8~0.7; η_2 为最大放电深度,浅循环型蓄电池取 50%,深循环型蓄电池取 75%^[7]。

据上所述,设机组日工作 8 h,最大连续阴雨天气为 2 d,考虑常见的太阳能组件和蓄电池规格、转换效率、系统工作电压及富裕度,根据式(1)和式(2)可算出:系统配套峰值电压 30.2 V、开路电压 36 V 光伏组件功率 4×250 W,4×180 Ah 的 6-QA-180 型蓄电池。为提升系统性能保证电源的安全可靠供应,系统选用带 485 通远程监控功能的 CM6048 型太阳能控制器对其充放电过程进行管理,并利用触控屏对当前发电状态参数加以解析显示。

3 太阳能驱动调速系统设计

3.1 太阳能驱动调速系统结构

如图 2 所示为太阳能驱动调速系统拓扑结构。系统选用

TI 公司的 32 位定点 TMS320F2812 DSP 作为电气传动主控芯片,其主电路可分为三级:第一级为智能太阳能光伏发电系统,在 DC-DC 环节基于 Buck 斩波电路实现 MPPT 控制,有效解决光伏发电系统利用效率偏低的问题,提高光伏组件转换利用

率;第二级为 IPM 智能功率变换电路,采用高性能 IGBT 模块;第三级为永磁无刷电机驱动系统,电机采用高性能正弦波永磁同步电机 PMSM,配合上级完成电机的空间矢量脉宽调制。为完善系统安全机制,系统设有保护信号检测。

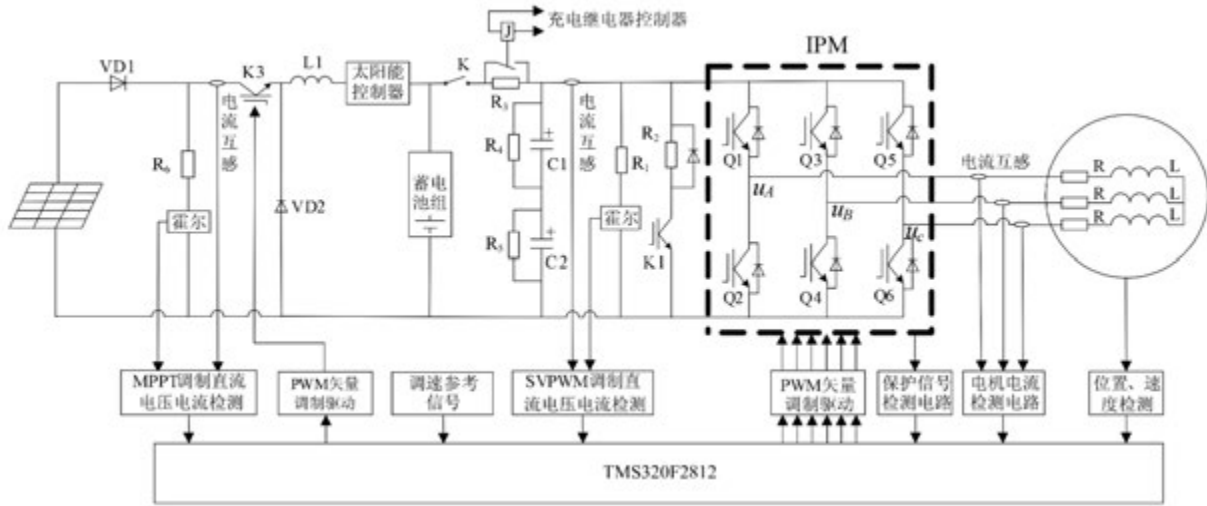


图 2 太阳能驱动调速系统拓扑结构

值得注意的是电机在启动前,太阳能控制器通过充电电阻 R_3 向电容 C1 和 C2 充电,以防止充电电流过大。当 C1 和 C2 上的电压达到额定电压时,继电器 J 吸合,将 R_3 短路,防止 R_3 消耗电能。为防止电机制动时,直流母线上的电容电压抬升导致器件故障,通过控制功率开关 K1 的导通,将能量通过 R_2 制动电阻泄放。根据永磁无刷电机的用途,电机电流矢量控制的方法也有所不同,常见的有 $i_d=0$ 控制、最大转矩/电流控制、弱磁控制、 $\cos \varphi=1$ 控制、恒磁链控制及最大输出功率控制^[8]。为了使伺服系统更加简单高效,本系统采用使定子电流励磁分量 $i_{sd}=0$ 的控制方法,即 $i_d=0$ 控制法。

3.2 系统硬件电路设计

对于 PMSM 电机的调速系统控制可参考张斌等人设计^[8],主要包括主驱动电路、信号检测与调理电路、QEP 电路及信号保护回路等的设计。

(1)主驱动电路设计。因 IPM 集成模块在系统性能和可

靠性方面均比普通的 IGBT 有很大程度的提高,而且 IPM 的通态损耗和开关损耗比较低,且内部集成了逻辑、控制、检测和保护电路,易于驱动。因此上述三相逆变系统选用 IPM 模块作为其功率器件。按逆变器的暂态冲击电流为 $(1.5 \sim 2) I_{max}$,确定选用三菱公司生产的 PM15CHA(CMA)060 型 IPM 模块,最大耐压 600 V,集电极安全电流 15 A,完全满足系统设计要

求。模块具有的保护功能,也可为 DSP 提供保护信号。IPM 驱动采用 2 片美国国际整流器公司生产的 IR2110S 型专用 IGBT 电源驱动芯片。工作时上管驱动采用外部自举电容上电,仅利用一路 15 V 电源供电,从而减小了控制变压器的体积和电源数目,降低了产品成本,且使系统的可靠性提高。从系统安全角度考虑,选用一款单通道的高速光耦合器 6N137 对主电路与控制电路之间的强、弱电实现电气隔离。如图 3 所示为 IGBT 光耦隔离驱动电路。

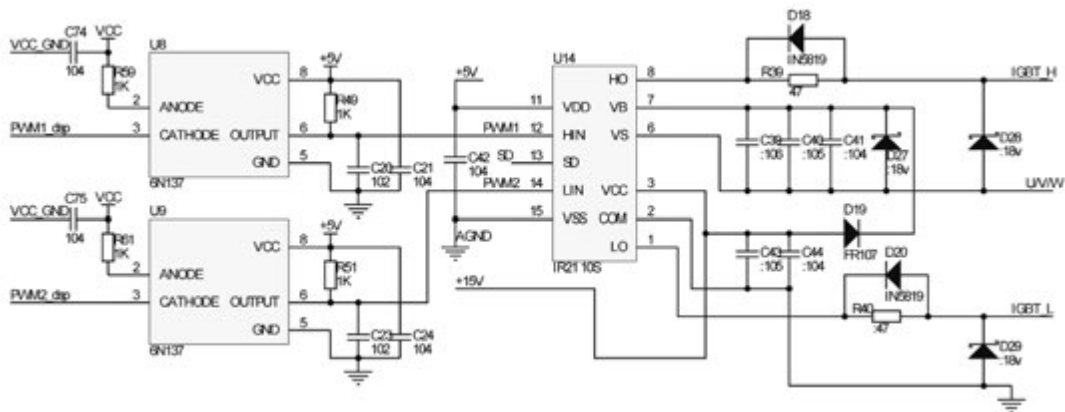


图 3 IGBT 光耦隔离驱动电路

(2)信号检测与调理电路设计。为实现永磁同步电机的矢量调制,必须对电机交直流电压电流信号进行采样。以 V 相电

枢电流采样电路为例,电流采样采用 CS010GT 型开环霍尔电流感应器,其原边额定输入电流为 10 A,副边额定输出电压为

2.5±1(±5%)。因其三相电流对称,可简化为两相电流的检测,经运放 LM358AD 调理为 0~3 V 范围的电压信号后送入 DSP 模数转换端口。同时,为最大限度地提高组件光电转换效率,第一级电路采用闭环的高线性度霍尔电流电压元件。

(3)QEP 电路设计。在现代伺服系统中,位置检测和转速测量技术是提高控制系统精度的关键技术。DSP 中的 QEP 电路被使能后,可以对引脚 CAP1/QEP1 和 CAP2/QEP2 上输入的正交编码脉冲信号进行译码和计数。由于光电编码器为 NPN 集电极开路输出,控制输出为 5 V 的脉冲信号,无法直接满足 DSP 端口电压要求,电路设计上选用一款 PNP 输入、3 状态输出的 AM26LS32ACDR 四路差动线路接收驱动器。

(4)信号保护回路设计。为防止系统运行不正常,过热导致线路板的烧坏。如图 4 所示为所设计的驱动信号故障保护电路,电路选用 Texas Instruments 公司生产的 SN74HC 00D 及 SN74HC 01D 三引脚与非门逻辑元件对 6 路 PWM 脉冲信号进行分析,当系统上下臂发生直通故障时,发光二极管 LED3 亮指示当前系统出现故障,要求系统立即切断主线路,对线路及器件进行监视保护。

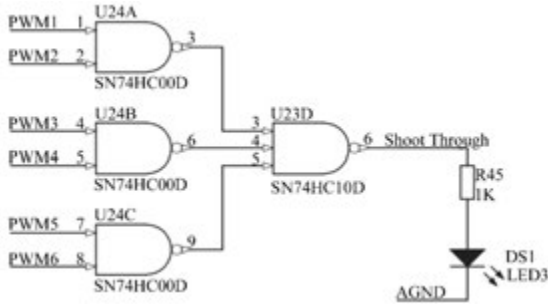


图 4 驱动信号故障保护电路

3.3 系统软件设计

调速控制系统软件主要由 3 部分组成:初始化程序、主程序、中断服务子程序。系统初始上电或者系统复位后首先执行初始化程序,实现对 DSP 内部各功能模块工作模式的设定和初始状态的检测,完成后开启中断,系统执行主程序。当中断发生时,执行相应的中断服务子程序,主要的中断有定时器中断服务子程序、捕获中断子程序和外部中断保护子程序。定时器中断子程序负责完成内环电流环和外环位置环速度环的控制等。外部中断功率保护子程序可在主电路故障或过温时关闭 PWM,避免主电路烧毁。为防止 A、B 脉冲信号带来的累计误差,外部中断保护子程序用来捕获光电编码器的 Z 脉冲,为角度计算提供基准。

因光伏组件输出特性的非线性,为充分发挥 DSP 的性能,考虑通常定步长的干扰观测法(P&O 法)只能在动态响应和减小稳态震荡之间取一个折中,不能同时实现两者的最优化。故 MPPT 控制算法软件设计上采用一种修正变步长的 P&O 法,该方法适用于天气温度环境变化较快的场合,具有控制精确高、响应速度快等优点^[9]。

4 基于 ARM 的人机交互触控系统设计

随着自控技术的发展,用户对系统的控制要求也越来越

高。为了便于用户对整个系统的操作与监视,触摸式人机界面以它反应速度快、操作简单、可靠性高等特点,在工业控制领域已得到广泛的应用,在农业领域也逐渐成为农业仪器设备设计过程中的主流^[10]。根据系统具备的运行模式选择、喷灌速度调节及定时设定等功能,本系统设备采用威纶通 TK6100IV5 型 4 线模拟电阻式触摸屏,并选取杭州固特 STM32F103RCT6 型核心嵌入式主控板作为硬件平台,完成下位机通讯软件的设计,实现嵌入式系统在人机交互式界面中的应用。如图 5 所示为使用台湾威纶科技公司开发的 WEINVIEW HMI 组态图控软件 EasyBuilder8000 编辑的智能喷灌机控制系统界面,用于喷灌机的运行操作控制和运行状态参数显示。



图 5 智能喷灌机控制系统主控制界面

5 系统主控电路设计

如图 6 所示为太阳能绞盘式喷灌机主控制系统简易电路。为保证控制信号远距离传输的可靠性,无线控制装置采用一种低发射功率、高灵敏接收的 PTR2000 型无线收发一体模块构成。电路中切换开关 1QC 用于机组运行的手/自动切换,手动方式下,机组的运行转速可通过调速电位器调节改变 AI1 端参考调速电压大小实现;微碰开关 SQ1 起无线传输装置触发作用,实现系统远程报警指示。

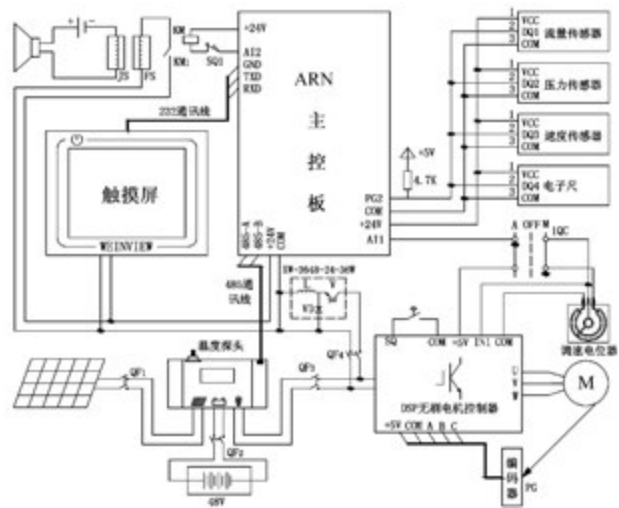


图 6 系统主控电路示意图

6 系统仿真分析与测试

为全面验证系统特性,下面分别对所选配光伏组件采用的

修正步长扰动观测法 MPPT 控制和驱动调速系统的动态性能进行 Simulink 仿真分析。

图 7 所示采用修正变步长 P&O 法电压及功率跟踪启动试验波形,可看出:电流受光照变化影响较大,启动后 0.2 s,当光照强度从 $1\,000\text{ W/m}^2$ 突变为 800 W/m^2 时,系统出现较大波动,但随着系统向最大功率点靠近及步长的逐渐变小,系统输出很快趋于平稳。相较不采取任何措施,这种方法不仅能有效提高组件太阳能转换效率,而且能同时提高 MPPT 响应速度和准确性。

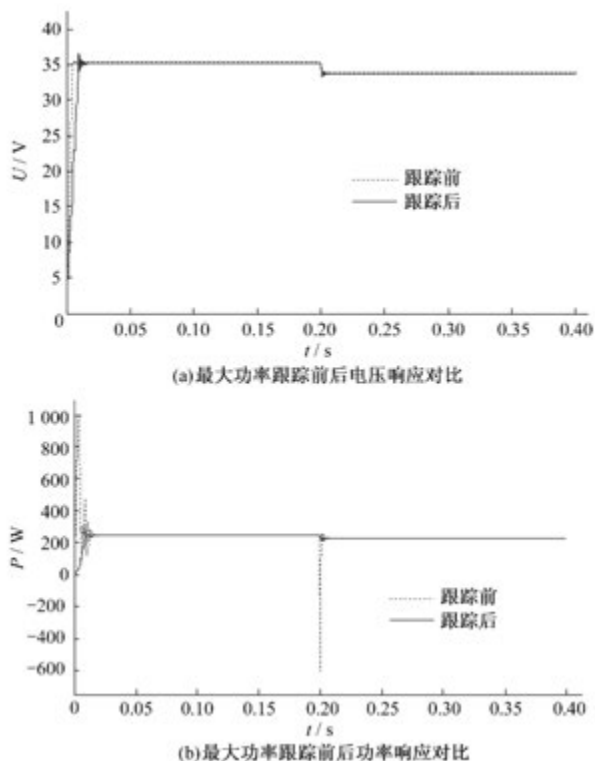


图 7 光伏电池电压及功率跟踪响应对比曲线

图 8 所示为 PMSM 电机矢量控制仿真结果,可看出:电机以空载启动,0.03 s 后转速稳定,当 0.1 s 时加载 $4\text{ N}\cdot\text{m}$ 负载转矩 T_L ,转速略微波动后,随着 T_e 与 T_L 平衡,转速很快达到二次稳定,系统总体调速性能平稳,动态响应快。

最后,通过对样机无线通信的可靠性及系统实用性进行为期半年的不定期大田灌溉测试验证,结果表明:所监测的整个灌溉时段内无线通信成功率 100%;系统实际运行速度与设定运行速度基本吻合,调节误差最大不超过 5%,当叠加度为 40%时,机组组合喷洒均匀系数 C_u 平均保持在 92%左右,灌溉质量高;光伏系统运行高效,组件 MPPT 效率达到 98%。水涡轮和太阳能电机的联合驱动也使得机组工作适用性和可靠性进一步提升,整体性能满足设计和生产需求,推广应用前景广阔。

7 结 语

本文介绍了一种基于 DSP 和 ARM 的人机交互绞盘式太阳能喷灌机智能控制系统,该系统不仅能满足机组运行的高精度智能控制,实现农业精准化灌溉,而且将 MPPT 控制光伏发

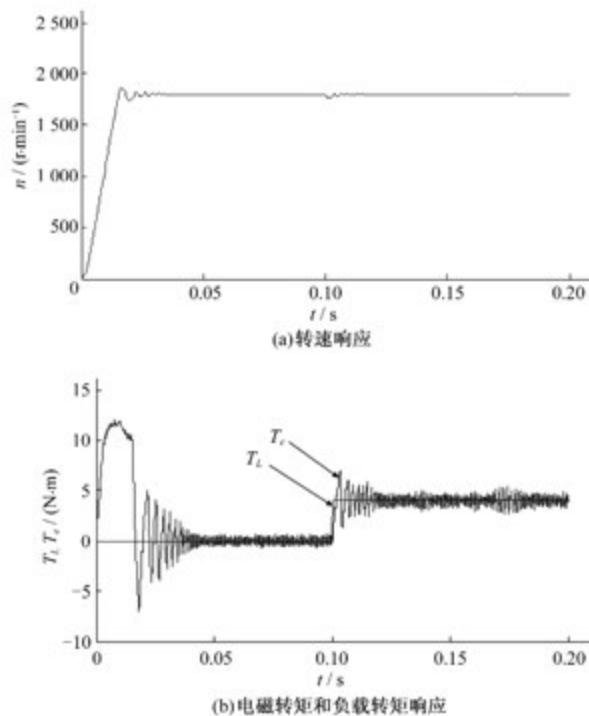


图 8 PMSM 矢量控制下的各参数系统响应

电技术与先进的节水灌溉技术相结合,有效提升了绞盘式喷灌机适用性,促进环保型光伏农业的发展。系统人机交互式触控界面的开发和工作状态无线传输指示的应用,也使得机组的操作灵活性和工作可靠性进一步提升,对降低人力投入,简化机组操作有着非常实际的意义。最后,虽然通过对整机长期的运行验证,系统整体性能满足设计需求,但处于其他非技术性限制,机组作业时仍需借助牵引装置的牵引,无法完全实现其自动化,不过相对于现有市场上的机型仍有很大的提高,技术优势明显,推广应用前景广阔。

参考文献:

- [1] 孙文峰,程亨曼,李孝存,等.我国喷灌设备现状与市场前景分析[J].农机化研究,2005,(1):63-64.
- [2] 李英能.浅论我国喷灌设备技术创新[J].排灌机械,2001,19(2):3-7.
- [3] 张会娟,朱瑞祥,吴峰,等.卷管式喷灌机绞盘速度自动控制系统的研究[J].农机化研究,2007,(1):3-7.
- [4] 李伟,韩智雷,邱志鹏,等.一种节能电控卷盘式喷灌机:中国,CN103947514[P].2004-07-30.
- [5] 刘文科.迅速发展的光伏农业[J].中国农村科技,2014,(8):54-55.
- [6] 林荣玉,高兴,司黎晶,等.太阳能技术在我国农业灌溉中的应用[J].宁夏农林科技,2011,52(10):3-4,7.
- [7] 李钟实.太阳能光伏发电系统设计施工与应用[M].北京:人民邮电出版社,2013.
- [8] 张斌,费树岷,王东晓.基于DSP2812的永磁同步电机控制系统设计[J].工业控制计算机,2009,22(9):61-63.
- [9] 杨天明,丁喆.基于扰动观察法的光伏发电系统MPPT控制算法研究[J].电源技术,2013,37(1):69-70,143.
- [10] 贾晓,王成,乔晓军,等.大田灌溉系统终端驱动及触摸式人机界面[J].农业工程学报,2008,24(S2):133-137.