

升降型动臂势能回收用永磁发电机控制系统*

王滔¹ 王庆丰²

(1. 湖南大学机械与运载工程学院, 长沙 410082;

2. 浙江大学流体动力与机电系统国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 势能回收可有效降低动臂频繁上下往复作业过程的能耗。其中, 永磁发电机是实现回收功能的关键部分, 其性能对能量转换和运动控制具有重要影响。因此结合应用工况的特点, 对势能回收用永磁发电机控制系统进行研究和设计。针对系统输入输出参数存在较大波动, 提出分别在电流控制环引入增益自适应、在转速控制环引入负载估计及补偿的控制方法。基于液压加载的永磁发电机控制系统台架进行了试验研究。结果表明, 系统具有良好的电流和速度控制性能, 且抗干扰能力得到显著改善。

关键词: 工程机械 势能回收 永磁发电机 控制系统 增益自适应 扰动补偿

中图分类号: TH137 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)11-0034-06

引言

动臂作为基本作业机构, 被广泛应用于挖掘机、叉车、装载机、起重机等工程机械。动臂下放作业通常会释放大量重力势能, 在传统驱动回路中, 该部分能量主要转换成热量耗散在液压阀口上, 不仅造成了能源的浪费, 还会导致发热、噪声、振动和寿命下降等危害^[1]。

势能回收是改善上述状况的有效途径。根据储能元件的不同, 常见的回收方式可分为液压式和电气式。液压式回收采用液压蓄能器作为储能元件^[2-5], 其功率密度高, 可快速存储、释放能量; 然而其能量密度低, 在实际应用中受到一定限制, 需要在系统设计时充分考虑空间布置。电气式回收采用电池或超级电容作为储能元件, 其装机体积较小, 且能量再次利用方便^[6]。考虑成本因素, 通常适用于已装备电储能元件的混合动力或电动工程机械上。

本文的研究对象为电气式势能回收, 目前国内已有较多的相关文献。Minav 等提出了电动叉车动臂势能回收系统方案, 并研究了不同电机和储能元件对回收效率的影响^[7-8]。Ochiai 等提出了利用安装在回油路的液压马达-发电机对混合动力挖掘机多个液压执行器能量进行回收的方案^[9]。Ahn 等提出了带旁路节流的势能回收系统, 在负载变化情况下通过调节节流阀开口来改善发电机运行效

率^[10]。国内浙江大学对混合动力挖掘机动臂势能回收进行了较多研究, 提出了包括节流阀和蓄能器辅助的多种方案和控制策略, 以同时保证良好的节能性和操作性^[11-14]。然而, 目前上述文献均处于系统方案设计及控制层面, 尚未对内部关键元件的控制展开研究。

图 1 所示为动臂势能回收系统的结构示意图。随着动臂的下放, 液压缸无杆腔的压力油驱动液压马达及永磁发电机旋转, 再由整流器将发电机输出

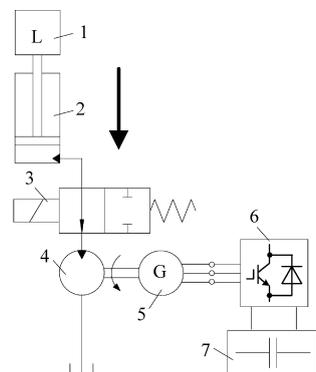


图 1 动臂势能回收系统结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of boom potential energy recovery system

1. 动臂负载 2. 液压缸 3. 液压阀 4. 定量马达 5. 永磁发电机 6. PWM 整流器 7. 超级电容

的交流电转换成直流电存储于超级电容中。同时, 利用 PWM 整流器控制发电机的电磁转矩和转速,

收稿日期: 2013-10-19 修回日期: 2013-12-09

* 国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2010AA044401)、流体动力与机电系统国家重点实验室开放基金资助项目(GZKF-201305)和中央高校基本科研业务费资助项目

作者简介: 王滔, 讲师, 博士, 主要从事液压系统节能研究, E-mail: twang001@126.com

实现对动臂下放速度的调节。可见永磁发电机控制系统是动臂势能回收的关键组成,承担着能量转换和运动控制的双重任务。

调速永磁发电机已在风力发电领域获得了广泛应用,通常采用双闭环控制对发电机转速进行实时调节以捕获最大功率点^[15-18]。对于动臂势能回收,风力永磁发电机的控制方法可提供一定的借鉴,但同时还须考虑其自身的工况特点,有针对性地进行研究和设计。

1 控制系统结构

为了保证动臂势能回收过程具有良好的动态性能,永磁发电机控制系统采用了矢量控制方法,其系统结构如图 2 所示。虚线框内的控制单元通过 PWM 整流器控制永磁发电机的绕组电流,实现对液压马达入口压力能到超级电容母线存储电能这一转换过程的调节。系统控制结构包括 2 层,第 1 层为永磁发电机的绕组电流闭环控制,由于电流矢量直接决定了电磁转矩,因此也可视为转矩控制;第 2 层为永磁发电机的转速闭环控制,处于电流控制环的外层,其输出即永磁发电机的目标电磁转矩。

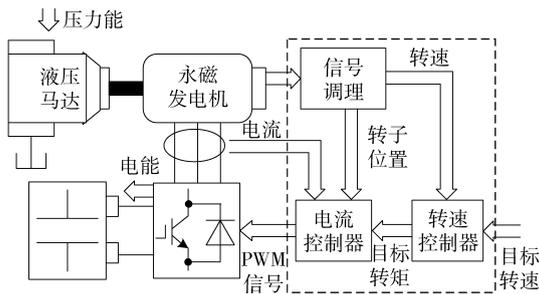


图 2 势能回收用永磁发电机控制系统结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of permanent magnet generator control system for potential energy recovery

对于势能回收用永磁发电机,输入的机械能表现为液压马达入口处的压力和流量,输出的直流电能表现为超级电容的母线电压和充电电流。在输入端,当负载变化时,液压马达入口压力也随之变化,即发电机驱动转矩将发生波动;在输出端,随着超级电容荷电状态的不同,直流母线电压通常不是确定的,往往在一定范围内变化。因此,在永磁发电机控制系统设计中除常规发电功能外,还需对其输入输出波动予以考虑,保证满足势能回收工况的应用需求。系统设计采取由内到外的方法,即先研究电流控制环,再将电流环作为已知的环节研究转速控制环。

2 电流控制环研究

永磁发电机的电气动力学建模通常基于以下假

设:忽略铁芯损耗及饱和效应,永磁体电导率为零,反电动势波形为理想正弦波。本文采用了面贴式永磁发电机,在转子旋转坐标系中,其定子绕组的交、直轴电压平衡方程以及电磁转矩表达式分别为

$$L_s \frac{di_q}{dt} = -R_s i_q - \omega_e L_s i_d - \omega_e \psi_f + k_{dc} u_q \quad (1)$$

$$L_s \frac{di_d}{dt} = -R_s i_d + \omega_e L_s i_q + k_{dc} u_d \quad (2)$$

$$T_e = 1.5 p \psi_f i_q \quad (3)$$

式中 L_s ——绕组电感 R_s ——绕组电阻

i_q, i_d ——交、直轴电流

u_q, u_d ——交、直轴电压

ω_e ——旋转磁场的电角速度

ψ_f ——永磁体磁链 p ——极对数

k_{dc} ——表征超级电容电压变化的系数

根据电压方程可见,交、直轴电流之间因反电动势而存在耦合,对此可增加相应的解耦项进行补偿,将电流控制环分解成 2 个近乎独立的一阶系统。其中直轴目标电流为零,交轴目标电流与目标转矩呈线性关系。考虑超级电容母线电压的波动,定义在额定电压时, k_{dc} 等于 1.0。为降低电压变化对系统性能的影响,在此设计了增益自适应控制,其控制电压的统一表达式为

$$u_l = u_a + u_s \quad (4)$$

其中 u_a 和 u_s 分别为自适应控制项和用于保证系统稳定性的比例反馈项,具体表达式为

$$u_a = \frac{1}{\hat{k}_{dc}} \left(L_s \frac{di_l^*}{dt} + R_s i_l^* + E_l \right) \quad (5)$$

$$u_s = k_p e_l \quad (6)$$

式中 \hat{k}_{dc} ——电压变化系数的估计值

i_l^* ——交、直轴电流的控制目标量

E_l ——反电动势补偿项

e_l ——电流控制偏差

k_p ——比例系数

下标 l 表示 q, d 。

根据电压平衡方程,反电动势补偿项在交轴和直轴分别为 $\omega_e L_s i_d + \omega_e \psi_f$ 和 $-\omega_e L_s i_q$ 。电流控制偏差可表示为

$$e_l = i_l^* - i_l \quad (7)$$

参数自适应律采用梯度算法,即

$$\frac{d\hat{k}_{dc}}{dt} = -\lambda u_a e_l \quad (8)$$

式中 λ ——自适应增益

综合上述自适应控制方案,可得到如图 3 所示的电流环框图。

简要分析电流控制环的稳定性。在自适应过程

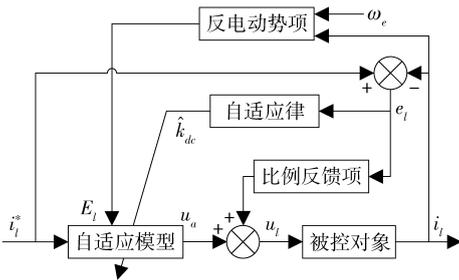


图3 永磁发电机电流环框图

Fig. 3 Block diagram of current loop of permanent magnet generator

中,参数估计偏差为

$$\tilde{k}_{dc} = k_{dc} - \hat{k}_{dc} \quad (9)$$

定义非负定函数

$$V = \frac{1}{2} L_s e_l^2 + \frac{1}{2\lambda} \tilde{k}_{dc}^2 \quad (10)$$

对其微分并代入相关表达式后计算可得

$$\dot{V} = L_s e_l \dot{e}_l + \frac{1}{\lambda} \tilde{k}_{dc} \dot{\tilde{k}}_{dc} = -R_s e_l^2 - k_{dc} k_p e_l^2 \quad (11)$$

其中 R_s 、 k_{dc} 和 k_p 等参数均为正数,根据稳定性理论,控制误差将收敛于零。

3 转速控制环研究

永磁发电机和液压马达同轴连接,其转子旋转运动的动力学方程为

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{p_h D_m}{2\pi} + T_e - B_m \omega_m \quad (12)$$

式中 J_m ——转子总转动惯量

p_h ——液压马达入口压力

B_m ——粘滞阻尼系数

ω_m ——转子机械角速度

D_m ——液压马达排量

T_e ——电磁转矩

由于处于发电工况, T_e 通常为负值。相比于机械系统的时间常数,电流控制环和编码器转速反馈的频响很高,均可视为比例环节。因此永磁发电机转速环的控制对象为一阶系统,可采用比例积分控制器实现无差控制。转速控制器的输出即目标电磁转矩,具体表示为

$$T_{ew} = \left(K_{sp} + \frac{K_{si}}{s} \right) (\omega_m^* - \omega_m) \quad (13)$$

式中 K_{sp} ——速度控制的比例系数

K_{si} ——速度控制的积分系数

ω_m^* ——控制目标值

考虑到负载变化导致的液压马达入口压力波动,对永磁发电机控制系统的抗干扰能力提出了较高要求,因此在控制器设计中增加了负载估计及补

偿环节。根据转子动力学方程,并考虑到粘滞阻尼系数很小且不易确定,液压马达输出轴的驱动转矩可估计为

$$\hat{T}_{dr} = \left(J_m \frac{d\omega_m}{dt} - T_e \right) G_{lp}(s) \quad (14)$$

式中 $G_{lp}(s)$ ——低通滤波器,用于过滤转速微分引入的噪声

在比例积分控制的基础上利用驱动转矩的估计值构建负载补偿。图4所示为转速控制环框图,其中 T_{dr} 为驱动转矩的实际值,即扰动量。

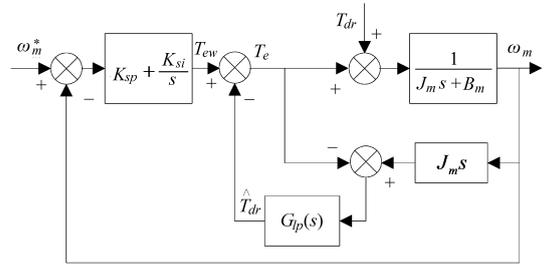


图4 永磁发电机转速控制环框图

Fig. 4 Block diagram of speed loop of permanent magnet generator

根据控制框图,可以得到转速控制系统的闭环传递函数

$$\frac{\omega_m(s)}{\omega_m^*(s)} = \frac{K_{sp}s + K_{si}}{J_m s^2 + (K_{sp} + B_m - B_m G_{lp}(s))s + K_{si}} \quad (15)$$

通过极点配置选择合适的比例系数和积分系数,可得到综合性能良好的转速控制。考虑到建模误差及不确定性,在实际应用中还需要对控制参数进行适当调整。另外,永磁发电机实际转速对扰动量的传递函数为

$$\frac{\omega_m(s)}{T_{dr}(s)} = \frac{(1 - G_{lp}(s))s}{J_m s^2 + (K_{sp} + B_m - B_m G_{lp}(s))s + K_{si}} \quad (16)$$

相比于控制器带宽,负载波动通常表现在低频段,此时低通滤波器趋向于1;代入式(16)后,可得实际转速对扰动量的传递函数趋向于零。由此说明,采用扰动补偿后,负载波动对转速控制的影响将有效降低。

4 试验验证

图5所示为液压模拟加载的永磁发电机试验台架原理图,图6所示为实物图。其中永磁发电机参数如下:极对数2,绕组电感1.56 mH,绕组电阻0.0874 Ω ,永磁体磁链0.402 Wb。液压系统最大流量和压力分别为100 L/min和28 MPa。超级电容容量为6.25 F,工作电压范围为250~400 V。控制单

元采用 DS1104 数字信号处理平台, 可将 Simulink 环境下的图形化程序直接转换成可执行实时代码, 适用于控制系统的设计和调试。电流控制环的采样时间为 0.1 ms , 速度控制环的采样时间为 1 ms 。

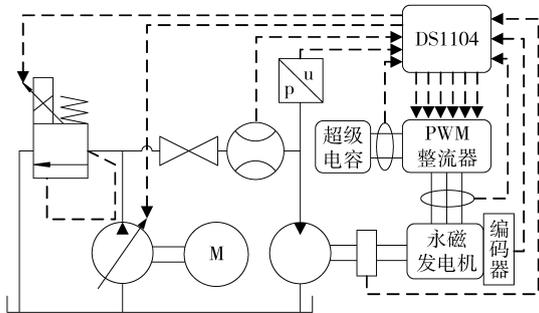


图 5 基于液压加载的永磁发电机试验台架原理图

Fig. 5 Schematic diagram of test bench for permanent magnet generator with hydraulic load



图 6 基于液压加载的永磁发电机试验台架实物图

Fig. 6 Pictures of test bench for permanent magnet generator with hydraulic load

动臂下放时, 液压缸回油腔在重力负载作用下产生背压, 该压力与回油流量的乘积即为可回收势能; 动臂提升时, 回油背压几乎为零, 即无能量可供回收。为了采用试验系统研究势能回收永磁发电机的控制特性, 一方面通过比例溢流阀调节液压马达入口压力以模拟实际负载压力, 另一方面通过变量泵和永磁发电机调节液压马达流量以模拟实际回油流量。

(1) 电流环

将比例溢流阀的设定压力适当调高, 保证无溢流。此时变量泵的输出流量全部用于驱动液压马达, 系统工作在恒流量变压力状态, 压力大小由永磁发电机输出的电磁转矩决定。电流控制参数如下: k_s 为 0.009 , λ 为 5.0 。图 7 所示为超级电容电压为额定值时的交轴电流阶跃响应曲线, 可见响应快速性好, 无超调, 虽然电流采样中引入了一些噪声, 但总体上具有较高的稳态精度。

进一步考察当超级电容电压变化时的电流响应性能。为了提供对比, 设计了交叉项解耦的比例积分电流控制器并进行了测试, 其比例系数和积分系数分别为 0.009 和 0.55 。图 8 所示为当超级电容电压为 70% 额定值时, 交轴电流分别在两种控制方法下的响应对比曲线。可见引入增益自适应后, 电流控制性能在稳定性和准确性方面均具有较好的改进。

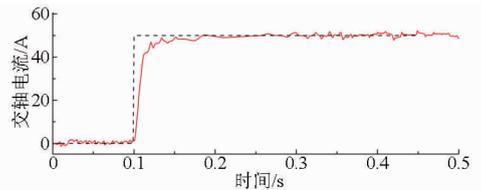


图 7 超级电容电压为额定值的电流阶跃响应曲线

Fig. 7 Current step response when the voltage of super capacitor is equal to rating value

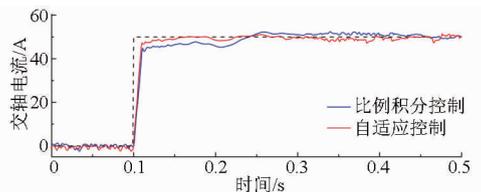


图 8 超级电容电压为 70% 额定值的电流阶跃响应曲线

Fig. 8 Current step response when the voltage of super capacitor is equal to 70% of rating value

(2) 速度环

将比例溢流阀的设定压力适当调低, 保证总会存在溢流。此时变量泵的输出流量部分用于驱动液压马达, 系统工作在变流量恒压力状态, 流量大小由液压马达的转速决定。相关参数如下: 转子总转动惯量 $0.032 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$, 转速控制器的比例系数和积分系数分别为 0.6 和 12 。

图 9 和图 10 分别为永磁发电机控制系统的阶跃和斜坡响应曲线, 可见其响应时间和超调量均较小, 稳态和斜坡跟踪精度高。为了考察速度控制的抗干扰能力, 通过改变液压马达入口压力以模拟负载变化, 并对有无扰动补偿的转速响应进行对比, 试验结果如图 11 所示, 可见采用扰动补偿后转速波动可下降 50% 以上, 系统抗干扰性能得到显著提高。

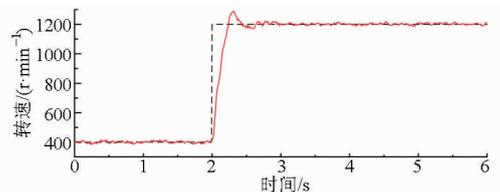


图 9 势能回收永磁发电机速度阶跃响应曲线

Fig. 9 Speed step response of permanent magnet generator for potential energy recovery

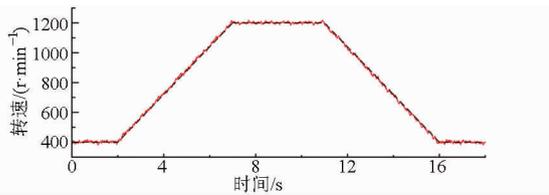


图10 势能回收永磁发电机速度斜坡响应曲线

Fig.10 Speed ramp response of permanent magnet generator for potential energy recovery

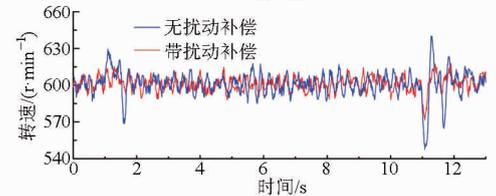
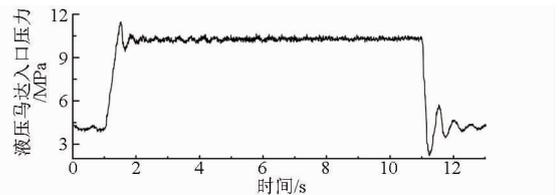


图11 负载变化时有无补偿的速度响应对比

Fig.11 Comparison of speed responses with and without compensation when load changes

5 结论

(1) 设计了动臂势能回收用永磁发电机控制系统。针对输出端的母线电压波动,提出在电流环引入增益自适应的措施;针对输入端的转矩波动,提出在转速环引入负载估计及补偿的措施。

(2) 试验结果表明,所设计的控制系统具有良

好的电流和速度控制性能,以及较高的抗干扰能力,为进一步应用于动臂势能回收提供了有力支撑。

参 考 文 献

- 张彦廷,王庆丰,肖清. 混合动力液压挖掘机液压马达能量回收的仿真及试验研究[J]. 机械工程学报, 2007, 43(8): 218-223.
Zhang Yanting, Wang Qingfeng, Xiao Qing. Simulation and experimental research on energy regeneration with hydraulic motor for hybrid drive excavator[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(8): 218-223. (in Chinese)
- Liang X, Virvalo T. An energy recovery system for a hydraulic crane[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 2001, 215(6): 737-744.
- Sun W, Virvalo T. Accumulator-pump-motor as energy saving in hydraulic boom[C] // Proceedings of the 8th Scandinavian International Conference on Fluid Power, Tampere, 2003: 297-309.
- Nyman J, Bärnström J, Rydberg K. Use of accumulators to reduce the need of electric power in hydraulic lifting systems[C] // Proceedings of the 8th Scandinavian International Conference on Fluid Power, 2003: 311-326.
- 赵丁选,陈明东,戴群亮,等. 油液混合动力液压挖掘机动臂势能回收系统[J]. 吉林大学学报:工学版, 2011, 41(1): 150-154.
Zhao Dingxuan, Chen Mingdong, Dai Qunliang, et al. System of arm potential energy recovery in hybrid hydraulic excavator[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(1): 150-154. (in Chinese)
- 林添良,叶月影,刘强. 挖掘机动臂闭式节能驱动系统参数匹配[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 21-26.
Lin Tianliang, Ye Yueying, Liu Qiang. Parameter matching for a closed-loop energy-saving system based on excavators[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 21-26. (in Chinese)
- Minav T, Pyrhönen J, Laurila L. Permanent magnet synchronous machine sizing: effect on the energy efficiency of an electrohydraulic forklift[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(6): 2466-2474.
- Minav T, Virtanen A, Laurila L, et al. Storage of energy recovered from an industrial forklift[J]. Automation in Construction, 2012, 22: 506-515.
- Ochiai M, Rye S. Hybrid in construction machinery[C] // Proceedings of the 7th JFPS International Symposium on Fluid Power, 2008: 41-44.
- Ahn K, Truong Q. Development of energy saving hybrid excavator using hybrid actuator[C] // Proceedings of the 7th International Conference on Fluid Power Transmission and Control, 2009: 205-209.
- 林潇,管成,裴磊,等. 混合动力液压挖掘机动臂势能回收系统[J]. 农业机械学报, 2009, 40(4): 96-101.
Lin Xiao, Guan Cheng, Pei Lei, et al. Research on the system of arm potential energy recovery in hybrid hydraulic excavators[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(4): 96-101. (in Chinese)
- Lin T, Wang Q, Hu B, et al. Research on the energy regeneration systems for hybrid hydraulic excavators[J]. Automation in Construction, 2010, 19(8): 1016-1026.
- Wang T, Wang Q. Design and analysis of compound potential energy regeneration system for hybrid hydraulic excavator[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I, Journal of Systems and Control Engineering, 2012, 226(10): 1323-1334.
- Wang T, Wang Q, Lin T. Improvement of boom control performance for hybrid hydraulic excavator with potential energy recovery[J]. Automation in Construction, 2013, 30: 161-169.
- Chinchilla M, Arnaltes S, Burgos J. Control of permanent-magnet generators applied to variable-speed wind-energy systems connected to the grid[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(1): 130-135.

- 16 Qiao W, Qu L, Harley R. Control of IPM synchronous generator for maximum wind power generation considering magnetic saturation[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(3): 1095 – 1105.
- 17 Li S, Haskew T A, Xu L. Conventional and novel control designs for direct driven PMSG wind turbines[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(3): 328 – 338.
- 18 Fernandez L M, Garcia C A, Jurado F. Operating capability as a PQ/PV node of a direct-drive wind turbine based on a permanent magnet synchronous generator[J]. Renewable Energy, 2010, 35(6): 1308 – 1318.

Control System of Permanent Magnet Generator for Boom Potential Energy Recovery

Wang Tao¹ Wang Qingfeng²

(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China

2. State Key Laboratory of Fluid Power Transmission and Control, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: Potential energy recovery can significantly reduce the boom energy consumption produced by frequent rising and lowering operations. As a critical component, the performance of the permanent magnet generator applied in energy recovery has a strong influence on energy conversion and motion control. Therefore, it is necessary to research and design the control system of the generator. Since there exist input and output parametric fluctuations, adaptive control and disturbance compensation were proposed in the current loop and the speed loop, respectively. Experiments were implemented on a test bench which is loaded with hydraulic approach. The results show that the good current and speed control performances were realized, and anti-disturb capability was also improved.

Key words: Construction machinery Potential energy recovery Permanent magnet generator Control system Gain adaptive Disturbance compensation

(上接第 285 页)

Remote Sensing Inversion of Nitrogen Content Based on SVM in Processing Tomato Early Blight Leaves

Yin Xiaojun¹ Zhang Qing² Zhao Qingzhan¹ Wang Chuanjian¹ Ning Chuan¹

(1. Institute of Information Science and Technology, Shihezi University, Shihezi 832000, China

2. Key Laboratory of Digital Globe, Institute of Remote Sensing and Digital Earth of CAS, Beijing 100094, China)

Abstract: Support vector machine was used to invert nitrogen content of processing tomato early blight leaves in Xinjiang. The spectrum characteristic of processing tomato of difference disease level was analyzed. Then nitrogen content was found to be strong correlation with the spectral reflectivity on 218 ~ 357 nm, 384 ~ 587 nm, 1 033 ~ 1 141 nm, 1 499 ~ 2 500 nm, because the correlation coefficients were more than 0.8. The vegetation index, SR705, ND705, GMI – 2, RI – half, and PTEBc were chosen through K – CV cross-validation, and SVM model was used to invert the nitrogen content with the vegetation index. The results show that the precision the SVM model of radial basis function kernel was the highest in linear kernel, polynomial kernel, radial basis function kernel and Sigmoid kernel. The value of MSE was 0.012 4. The value of R was 85.916%. The value of average relative error was 0.175. SVM model with multi-vegetation index improved the precision of inverting nitrogen content of processing tomato early blight leaves.

Key words: Processing tomato Early blight Nitrogen content Spectrum index Inversion Support vector machine