

双SRM牵引采煤机功率平衡系统^①

李晓豁, 张飞虎, 付伟丽, 曹江卫

(辽宁工程技术大学 机械工程学院, 阜新 123000)

摘要: 为解决开关磁阻采煤机双电动机同步牵引时功率输出不平衡的问题, 设计了电流交叉耦合控制算法与转速给定调节控制方法相结合的功率平衡控制系统, 应用 MATLAB/SIMULINK 建立了系统的模型, 并进行仿真实验。实验证明, 当牵引电动机承受大小为额定负载 10% 的扰动时, 加入该系统后两台开关磁阻电动机 (SRM) 的输出转矩差值比现有的系统降低了 7%, 同步转速最大降幅减小了 3.5%, 过渡过程时间减少了 1.5s。结果表明, 设计的功率平衡控制系统与现有系统相比, 不但提高了双 SRM 的同步精度, 而且显著改善了整个牵引调速系统的抗扰动性能。

关键词: 开关磁阻采煤机; 同步牵引; 功率平衡; 仿真

Power Balance System for Dual-SRM Driven Shearers

LI Xiao-Huo, ZHANG Fei-Hu, FU Wei-Li, CAO Jiang-Wei

(College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: To solve the unbalanced power output problem of dual-SRM synchronous driven shears, a power balance control system has been designed based on current cross-coupling algorithm and speed setting regulation control. The control system model has been established by using MATLAB/SIMULINK and simulation experiments have been accomplished. When a disturbance (its magnitude is 10% of the rated load) is applied on the drive-motor, compared with current system, the torque output difference of dual-SRM controlled by the designed system has been lowered by 7%, the maximum decrease of synchronous speed has been reduced by 3.5% and the transient time has been decreased by 1.5s. The results show that the designed power balance control system has improved both the synchronous accuracy of dual-SRM and the anti-disturbance capability of entire speed regulation system.

Key words: SRD shearer; synchronous drive; power balance; simulation

开关磁阻电动机调速系统 (SRD) 具有结构简单、坚固、价格便宜、启动转矩大、启动电流小、四象限运行方便、“堵转”不烧电动机、节能等优点, 非常适合煤矿井下的采掘机械使用^[1,2]。我国使用的 SRD 采煤机多采用双开关磁阻电动机 (SRM) 同步牵引方式, 由于其控制系统调整不准确, 存在反馈偏差、电动机参数不完全一致等原因, 致使两台电动机存在实际的功率偏差, 经常出现电动机过载烧毁的现象^[3,4]。为解决这一问题, 目前在开关磁阻采煤机中, 采取保持一台 SRM 输出功率不变, 调节另一台 SRM 的转速给定,

使其输出功率与前一台电动机相同的方法。应用实践证明, 这种方法可将井下采煤工况下的两台 SRM 功率输出差值控制在 10% 以内, 在一定程度上减少了牵引电动机因过载而烧毁的现象。为了加速 SRD 采煤机在我国的推广应用, 进一步延长牵引电动机的使用寿命, 需要改进现有的功率调节方法, 研究新的控制系统, 进一步减小双牵引电动机的输出功率的差值, 提高其工作的可靠性。为此, 本文提出一种能实现上述目标的新的功率平衡控制系统。

① 基金项目: 国家自然科学基金(59774033); 国家煤矿安全监察局安全生产科技发展指导性计划(06-292)

收稿时间: 2011-03-16; 收到修改稿时间: 2011-04-12

1 现有功率平衡控制系统及其存在的问题

1.1 现有功率平衡的控制原理

开关磁阻电动机的输出功率 P_L 与瞬时转矩 T 、转速 n 成正比, 因为两 SRM 同步运行, 转速相同, 所以只要输出转矩相同, 就能保持输出功率相等。由于 SRM 的数学模型十分复杂, 其瞬时转矩是电流 I 与定子相对角 θ 的二元函数, 无法用精确的表达式表示, 难以计算。大量的实验表明, 不同转速下 SRM 输出的平均转矩与绕组平均电流的平方基本保持线性关系^[5]。所以, 可以用电动机绕组的平均电流反馈作为功率平衡电路的功率或转矩的间接检测量。

现有的功率平衡电路原理图如图 1 所示。其控制原理是: 使一台 SRM 为主电动机, 其功率输出由速度给定、负载转矩及电动机本身参数决定^[6], 另一台 SRM 为从电动机, 为使其与主电动机输出功率相同, 将其绕组电流与主电动机的绕组电流相比较, 根据比较结果调节其速度给定。因为两电动机刚性连接, 实际转速同步保持不变, 所以转速给定越大, 相应输出功率越大。

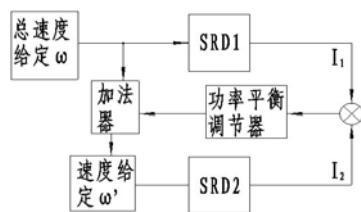


图 1 双 SRM 功率平衡控制系统原理图

1.2 现有功率平衡控制存在的问题分析

实践证明, SRD 采煤机在煤矿井下工作时, 该系统可将两台 SRM 的功率或转矩输出差值控制在 10% 以内, 减少了牵引电动机过载烧毁现象的发生。然而, 由于其采用主从控制方式, 功率平衡调节的参考标准完全基于主电动机的工作状态。这样, 一旦主电动机出现问题, 如在明显低于额定功率或明显高于额定功率的状态工作时, 仍以主电动机的输出功率为参考调节从电动机的输出功率, 就可能造成因整体牵引功率过小而影响采煤机的正常工作、或因整体牵引功率过大而烧毁电路和电动机。

2 改进的功率平衡控制系统及其原理

为了弥补现有控制方法的不足, 并保证两台 SRM

输出功率或转矩的差值更小、功率平衡调节过程更迅速, 本文将电流交叉耦合控制算法^[7]和现有控制方式相结合, 设计出一种新的功率平衡调节方案, 其控制系统原理如图 2 所示。

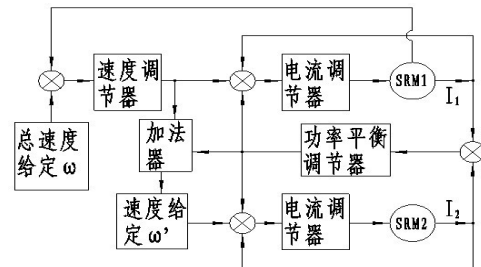


图 2 改进的功率平衡控制系统原理图

在该控制系统中, 每台 SRM 均为速度、电流双闭环控制。由于两台 SRM 同步运行, 转速相同, 所以总速度给定在同步主端。为使双 SRM 运行过程中转矩误差尽可能小, 应用交叉耦合控制算法, 对两台电动机的电流内环进行补偿, 构成转矩同步误差的反馈^[8], 从而有效减小转矩同步误差, 提高同步精度。引入交叉耦合补偿之后, 当 SRM1 的输出功率 P_1 大于 SRM2 的输出功率 P_2 时 (即绕组电流均值 I_1 大于 I_2), 通过功率平衡调节器对 SRM1 和 SRM2 分别施加负、正电流补偿信号, 同时功率平衡调节器通过加法器使 SRM2 的转速给定增加 (即 SRM2 的转速给定和绕组电流同时增加, 而 SRM1 的绕组电流减小), 使两者的输出功率或转矩迅速达到平衡状态, 调节进入稳态。当 P_1 小于 P_2 时, 调节过程正好相反。

3 双 SRM 功率平衡控制系统的仿真

为了验证改进的功率平衡控制系统的可行性, 并试验其能否达到预期控制效果, 本文采用 MATLAB/SIMULINK 来模拟双 SRM 电动机同步运行的情况。SRM 的参数如下: 额定电压 $U = 1140 \text{ V}$, 额定功率 $P = 22 \text{ kW}$, 额定转速 $n = 1200 \text{ r/min}$, 转动惯量 $J = 0.26 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 粘滞摩擦系数 $D = 0.02 \text{ N} \cdot \text{m} \cdot \text{s/rad}$, 设定开通角 $\theta_1 = 34^\circ$, 关断角 $\theta_2 = 55^\circ$, 斩波频率 $f = 1.2 \text{ kHz}$ 。系统测速反馈系数 $K_t = 0.0067 \text{ V} \cdot \text{min/r}$, 电流反馈系数 $K_i = 0.072 \text{ V/A}$, 转速环滤波时间常数 $T_{m} = 0.01 \text{ s}$, 电流环滤波时间常数 $T_{oi} = 0.002 \text{ s}$ 。

3.1 现有系统

(1) 仿真模型

参照单 SRM 双闭环调速系统模型,以经典控制理论为基础建立的双 SRM 电动机同步运行系统的 SIMULINK 仿真模型^[9,10]如图 3 所示。

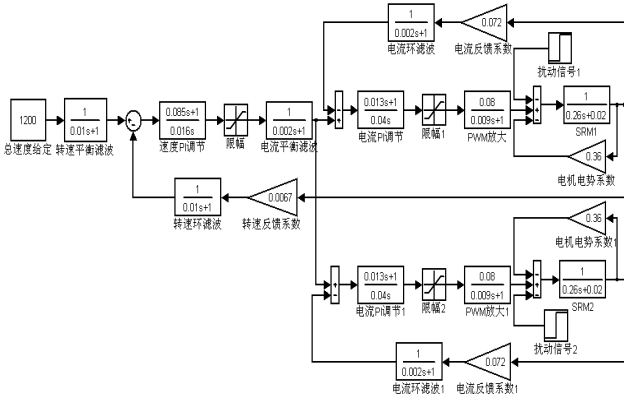
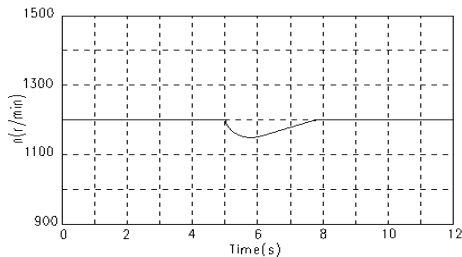


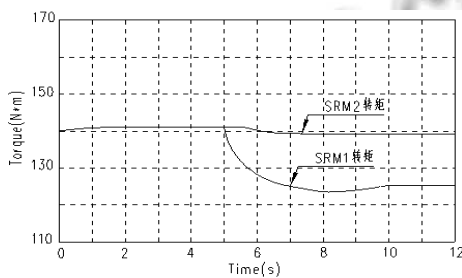
图 3 现有系统的仿真模型

(2) 仿真结果分析

初始设定系统在额定功率和额定转速下运行, 每台 SRM 的负载转矩 $T_L = 141 \text{ N} \cdot \text{m}$, 在 $t = 5 \text{ s}$ 时对牵引电动机 1 施加 $15 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的阶跃负载转矩, 仿真得到两台电动机的速度变化曲线和转矩误差曲线分别如图 4(a)、图 4(b)所示。



(a)



(b)

图 4 现有系统的仿真结果

由图 4(a)可以看出, 对 SRM1 突加 $15 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的阶跃负载后, 现有系统两台电动机的同步转速显著下降, 最大降幅为 5%, 从初始施加扰动负载到达到最大降幅

的时间为 0.8 s , 从最大降幅时刻恢复到额定转速需要 2.2 s 。

图 4(b)表明, 对 SRM1 突加 $15 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的阶跃负载后, SRM1 的输出转矩显著下降, 最大降幅为 14%, 扰动开始时刻与最大降幅时刻间隔 3 s ; 而 SRM2 对负载扰动的响应不迅速, 较 SRM1 迟滞 0.8 s , 且 SRM2 的输出转矩变化很小, 最大降幅只有 1%, 达到最大降幅后保持不变。SRM1 的输出转矩在达到最大降幅后略有上升, 然后保持不变, 之后两台电动机便一直处于功率不平衡状态下运行, 两电动机输出的转矩或功率差值大约在 12% 左右。

3.2 改进系统

(1) 仿真模型

改进系统(加入改进功率平衡控制的双 SRM 电动机同步运行控制系统)的 SIMULINK 仿真模型如图 5 所示。

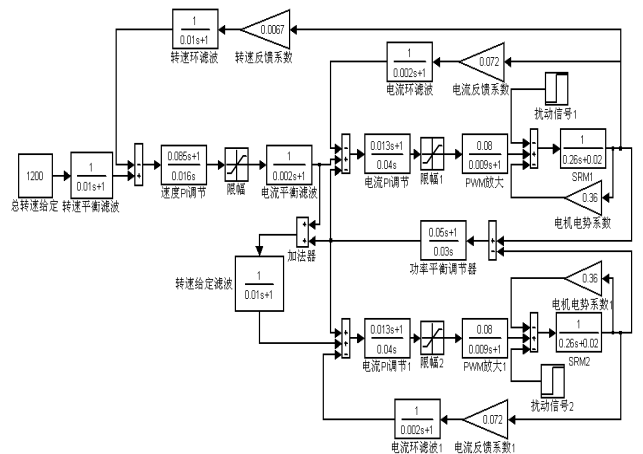
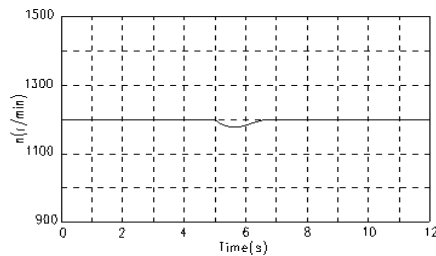


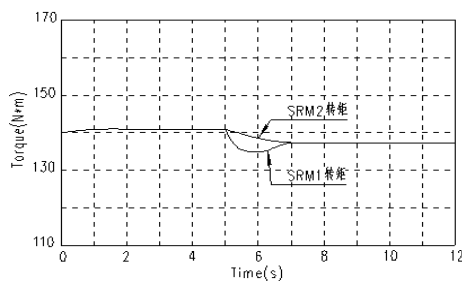
图 5 改进系统的仿真模型

(2) 仿真结果分析

设定系统在额定功率和额定转速下运行, 每台 SRM 的负载转矩 $T_L = 141 \text{ N} \cdot \text{m}$, 在 $t = 5 \text{ s}$ 时, 对电动机 1 突然施加 $15 \text{ N} \cdot \text{m}$ 的阶跃负载转矩, 仿真求得两台电动机的速度变化曲线和转矩误差曲线分别如图 6(a)、图 6(b)所示。



(a)



(b)

图 6 改进系统的仿真结果

由图 6(a)可见,改进功率平衡控制的系统在对 SRM1 突加 $15\text{N}\cdot\text{m}$ 的阶跃负载后,两台电动机的同步转速下降很小,最大降幅只有 1.5%,从施加扰动负载时刻到达最大降幅时刻的时间仅为 0.5s,从最大降幅时刻恢复到额定转速的时间仅需 1s,整个调速系统的抗扰动性能显著提高。

从图 6(b)可以看出,该系统在对 SRM1 突加 $15\text{N}\cdot\text{m}$ 的阶跃负载后,SRM1 的输出转矩先下降后上升,最大降幅为 5%,从开始施加扰动负载到达到最大降幅的时间仅为 0.8s,之后其输出转矩快速上升,从最大降幅上升到稳定输出转矩的时间为 1.1s;SRM2 对负载扰动的响应亦十分迅速,从施加扰动时刻起,其输出转矩一直下降,最大降幅为 3%,此时达到和 SRM1 的输出转矩相等,即两电动机达到输出功率平衡状态。整个功率平衡调节过程在不到 2s 的时间内完成,且整个过程中两台电动机的输出转矩误差始终控制在 5%以内。与现有功率平衡调节系统相比,该控制系统不但减小了双 SRM 的输出转矩误差,而且调节过程更迅速,同时提高了同步精度和动态性能。

4 结论

采用电流交叉耦合控制算法与转速给定调节控制相结合的方法,设计了双 SRM 电动机同步牵引采煤机的功率平衡控制系统,并建立了该系统的仿真模型。

完成了阶跃扰动仿真实验,给牵引电动机施加额定负载 10%的扰动后,现有系统两台 SRM 的输出转矩差为 12%,同步转速最大降幅 5%,过渡过程需 3s;采用改进的控制系统后,两台 SRM 输出转矩差控制在 5%以内,同步转速最大降幅仅为 1.5%,过渡过程时间只需 1.5s,整个功率平衡调节过程不到 2s 就完成。所以,该系统不但提高了双 SRM 牵引的同步精度,而且改善了整个牵引调速系统的抗扰动性能。

参考文献

- 1 李晓璐,李萍,刘春生.采煤机在牵引方向上的动力学行为研究.黑龙江科技学院学报,2002,12(4):1-4.
- 2 Gobbi R, Ramar K. Optimization Techniques for a Hysteresis Current Control to Minimize Torque Ripple in Switched Reluctance Motors. IET Electr. Power Appl, 2009,3:453-460.
- 3 Torrey DA, Lang JH. Modeling a Nonlinear Variable Reluctance Motor Drive. IEEE Proc B, Elec Power Application,1990,137(5):314-326.
- 4 刘旭,潘再平.煤矿输送机用开关磁阻电动机驱动系统.煤炭学报,2009,34(2):280-283.
- 5 潘浩.基于嵌入式系统的双开关磁阻电动机同步控制系统设计[硕士学位论文].天津:天津大学,2008.
- 6 闫志平,赵春良,高超.双开关磁阻电动机功率平衡的解决方案.煤矿机械,2003,11:44-46.
- 7 刘坤,方一鸣,赵莹.同步控制及其在结晶器振动中的应用.控制工程,2007,14(3):328-331.
- 8 王宝军,李春华,肖洋.电牵引采煤机模糊控制系统调速特性的仿真.煤炭学报,2007,32(7):778-780.
- 9 李威震,于敬玲.基于 MATLAB 的双闭环可逆直流调速系统的仿真研究.计算机仿真,2004,21(11):42-44.
- 10 李墨翰,李玉忍.基于滑模变结构的开关磁阻电机控制仿真.计算机仿真,2009,26(12):351-355.