

DOI: 10.7652/xjtuxb201410010

永磁同步电机飞轮储能系统充放电控制策略

郭伟, 王跃, 李宁

(西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安)

摘要: 针对飞轮储能系统(FESS)转动惯量大、采用传统矢量控制算法启动时在零速附近容易出现转速震荡的问题,提出了一种新的电机控制方法。该方法用理论计算转速替代模型参考自适应(MRAS)算法的观测转速,并用给定电流替代反馈电流对耦合项进行计算,减小电机转速振荡。在 FESS 放电时,需要根据负载所需功率调整电机输出功率,针对此问题,采用一种以维持直流母线电压恒定目标的电机控制方法,同时在 FESS 投入工作前,用电机当前转速作为传统 MRAS 算法 PI 控制器积分项的初始值,加快了 MRAS 无速度算法的收敛速度。仿真和实验结果表明,与传统控制方法相比,所提出的控制算法能减小电机启动时在零速附近的转速振荡,维持 FESS 放电时负载的正常工作,保证 FESS 快速可靠地进行状态切换。

关键词: 永磁同步电机;飞轮储能;矢量控制;模型参考自适应

中图分类号: TM351 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)10-0060-06

Control Strategy for Flywheel Energy Storage System with Permanent Magnet Synchronous Machine

GUO Wei, WANG Yue, LI Ning

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: When the flywheel energy storage system (FESS) begins to be charged at stationary state, due to the large inertia and low speed acceleration of the FESS, the speed may fluctuate in conventional vector control schedule. To solve this problem, a new strategy is proposed to reduce the speed fluctuation by taking the calculated speed instead of the observed speed from the model reference adaptive system (MRAS) algorithm and by replacing the feedback current with the reference current. When the FESS is discharged, the output power of the motor ought to be adjusted according to the load demand, and a motor control algorithm is advanced to keep the DC voltage at a certain level for this purpose. Before the FESS operating, the current motor speed is used as the initial integral value of the conventional PI controller to facilitate increasing the convergence rate of MRAS algorithm. Compared with the conventional control schedule, the proposed strategy enables to minimize the speed fluctuation near zero speed when the FESS is charged form stationary state, and to keep the normal load working when the FESS is discharged, thus the FESS is ensured to switch into another state quickly and reliably.

Keywords: permanent magnet synchronous motor; flywheel energy storage system; vector control; model reference adaptive system

收稿日期: 2014-03-07。 作者简介: 郭伟(1982—),男,博士生;王跃(通信作者),男,副教授。 基金项目: 国家“863 计划”资助项目(2012AA050206)。

网络出版时间: 2014-06-06

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20140606.1541.002.html>

自 20 世纪 90 年代以来,随着新材料和电力电子技术的进步,飞轮储能技术取得了长足发展。与其他储能方式相比,飞轮储能具有能量密度高、无过充放电问题、放电深度易测量、能量转换率高、使用寿命长等优点,在电力系统、电动汽车、航空航天及其他诸多领域获得了广泛的应用^[1]。与传统电机控制系统相比,飞轮储能系统(FESS)转动惯量很大,但其没有负载转矩,同时为了减小损耗,摩擦转矩通常也很小,可以忽略不计。FESS 的运行模式可分为充电模式、放电模式和惯性运行模式,电机转速通常由无速度观测算法得到。

FESS 由零转速开始充电启动时,由于电机转动惯量很大,系统会有较长时间位于零转速附近运行。由于转速很低,电机反电动势很小,模型参考自适应(MRAS)无速度算法得到的电机转速有误差且存在波动^[2],同时电机定子电流中含有谐波和畸变成分,并且在动态过程中矢量控制的耦合项部分影响不能忽略^[3]。传统的矢量控制方法利用 MRAS 观测所得电机转速和转子位置进行旋转坐标变换,并利用反馈的实际电流计算耦合项,由于以上用到的物理量均存在波动,据此结果对电机进行控制必然会导致电机转速出现波动甚至可能导致电机启动失败。

FESS 系统放电时,电机转速下降,其定子感应电动势也随之降低,为了保证负载的正常工作,FESS 要能够稳定直流母线电压,根据负载消耗功率确定电机的放电功率。文献[4]提出的电机控制算法将电压环控制器的输出直接作为电流环给定,没有考虑到电机转速变化对输出功率的影响,增加了设计电流环控制参数的复杂性;文献[5]从功率角度出发,将变流器的输出功率除以电机转速后得到电磁转矩,再以此计算电流给定,但其用于计算异步电机电流给定的方法过于复杂,不适用于永磁同步电机系统中。

模型参考自适应算法可分为基于磁链模型的 MRAS^[6]、基于电流模型的 MRAS^[7]和基于反电动势模型的 MRAS^[8],均需要经过一定的收敛时间后才能获得准确的电机转速。以往对 MRAS 的研究主要针对电机由零速开始启动的情况,电机启动后 MRAS 算法始终保持工作直至电机停止。若 FESS 较长时间处于惯性运行状态,为了减小损耗,其变流器与大部分控制电路应停止工作,当需要投入工作时,FESS 要能迅速切换至工作状态。由于 FESS 投入工作时电机转速可能不为 0,MRAS 算法要能快

速获得电机转速以免因转速观测不准引起状态切换失败或过流等问题。

针对以上问题,本文提出了飞轮储能系统中永磁同步电机控制策略:在 FESS 由零速开始启动时,将理论计算所得转速和转子位置取代 MRAS 观测结果用于矢量控制,并用给定电流替换实际电流计算耦合项,以此减小零转速附近的电机转速振荡;在 FESS 放电时提出一种适用于永磁同步电机的以维持直流母线电压恒定目标的电机控制方法,确保负载的正常工作;在 FESS 投入工作前,用电机当前转速作为传统 MRAS 算法 PI 控制器积分项的初始值,加快 MRAS 无速度算法的收敛速度,保证 FESS 快速可靠的投入运行。

1 飞轮储能系统结构

FESS 所处系统总体结构如图 1 所示,整个系统由电源、负载和 FESS 组成。FESS 的工作模式切换如图 2 所示,通常直流电压给定比整流器正常工作时的输出电压稍低,保证电源存在时 FESS 能处于充电工作模式。若 FESS 工作于充电模式,电机控制外环为转速环,转速环给定为电机的额定转速,若电机已充电至额定转速则表明充电完成,FESS 进入惯性运行模式;若 FESS 工作于放电模式,电机控制外环为电压环,由电机侧变流器稳定直流母线电压,当电机转速低于转速下限后停止放电。此外,若充电已完成或系统中既无电源也无负载,则 FESS 进入惯性运行模式,该模式下变流器和大部分控制电路停止工作,控制器仅检测直流母线电压以确定 FESS 何时再投入工作。

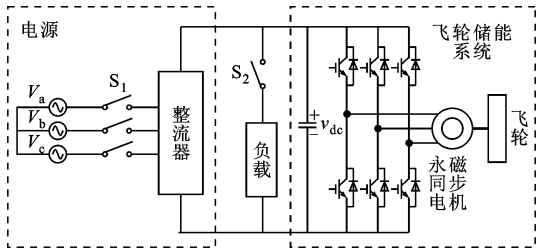


图 1 飞轮储能系统结构

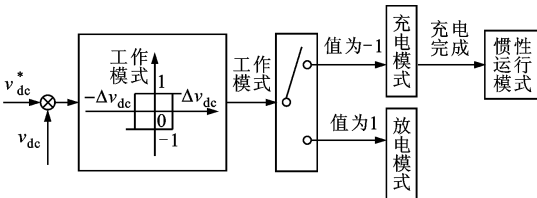


图 2 飞轮储能系统工作模式切换示意图

电机控制算法为基于转子磁场定向的矢量控制,采用 $i_{sd}=0$ 控制方案能实现最大转矩与电流比控制^[9],减小充放电过程中的能量损耗。在转子磁场定向的 dq 同步旋转坐标系下,表贴式永磁同步电机电压与电磁转矩方程如下

$$v_{sd} = R_s i_{sd} + L_s di_{sd}/dt - \omega_e L_s i_{sq} \quad (1)$$

$$v_{sq} = R_s i_{sq} + L_s di_{sq}/dt + \omega_e L_s i_{sd} + \omega_e \psi_f \quad (2)$$

$$T_e = 1.5 p \psi_f i_{sq} \quad (3)$$

式中: R_s 为定子绕组每相电阻; L_s 为定子绕组等效电感; v_{sd} 与 v_{sq} 分别为定子 d 轴与 q 轴端电压; i_{sd} 与 i_{sq} 分别为定子 d 轴与 q 轴电流; ω_e 为同步角速度; ψ_f 为转子磁链; T_e 为电磁转矩。

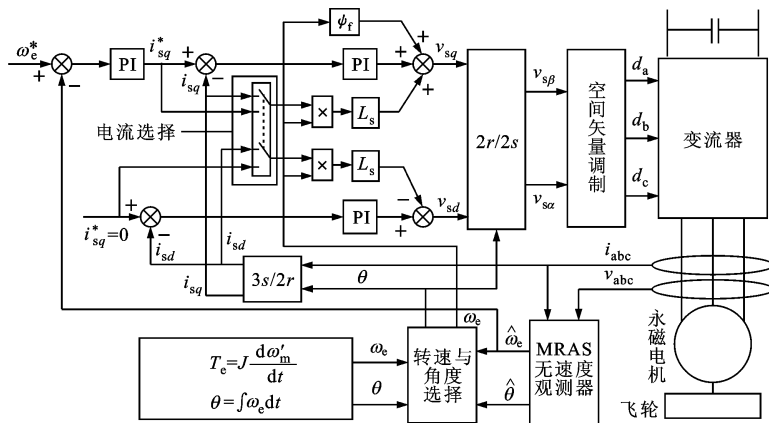


图3 FESS 充电控制系统框图

根据传统的电机控制方法,若利用 MRAS 观测结果对电机进行控制,采用 PI 控制器时,变流器输出电压 v_{sd} 与 v_{sq} 的给定值可表示为

$$v_{sd}^* = K_{pi}(i_{sd}^* - i_{sd}) + K_{ii} \int (i_{sd}^* - i_{sd}) dt - \hat{\omega}_e L_s i_{sq} \quad (4)$$

$$v_{sq}^* = K_{pi}(i_{sq}^* - i_{sq}) + K_{ii} \int (i_{sq}^* - i_{sq}) dt + \hat{\omega}_e L_s i_{sd} + \hat{\omega}_e \psi_f \quad (5)$$

式中: K_{pi} 与 K_{ii} 分别为电流控制环的比例系数和积分系数; $\hat{\omega}_e$ 为观测转速。采用 $i_{sd}=0$ 的控制方案时, $i_{sd}^*=0$, MRAS 观测转速可表示为实际转速与观测误差之和,即 $\hat{\omega}_e = \omega_e + \Delta\omega$, 故有

$$v_{sd}^* = K_{pi}(i_{sd}^* - i_{sd}) + K_{ii} \int (i_{sd}^* - i_{sd}) dt - (\omega_e + \Delta\omega) L_s i_{sq} \quad (6)$$

$$v_{sq}^* = K_{pi}(i_{sq}^* - i_{sq}) + K_{ii} \int (i_{sq}^* - i_{sq}) dt + (\omega_e + \Delta\omega) L_s i_{sd} + (\omega_e + \Delta\omega) \psi_f \quad (7)$$

当电机转速很低时,特别是在零速附近,由于反电动势很小,MRAS 观测转速有误差且存在波动。

2 FESS 充电控制

当 FESS 充电时,电机控制系统实际上就是转速控制系统,转速给定为电机的额定转速,当电机转速达到额定转速时,可认为 FESS 充电完成,转入惯性运行状态,其充电时的控制系统框图如图 3 所示。FESS 储存的能量与其机械角速度的平方成正比,为了提高系统的能量密度,飞轮的额定转速通常都会设置得很高,而高转速无疑会给速度传感器的安装和精度带来挑战,增加系统的成本,因而在 FESS 中通常采用无速度观测算法,本系统采用 MRAS 无速度算法。

这意味着由 $\Delta\omega$ 引起的 v_{sd} 与 v_{sq} 的误差不能忽略,若将此计算结果用于电机控制,将会引起 i_{sd} 与 i_{sq} 的波动,进而使电机电磁转矩与转速出现波动,甚至会导致启动失败,因而需要寻找适合于在零转速附近对电机进行控制的方法。

由于 FESS 转动惯量很大,由零速开始充电时,转速控制器有相当长一段时间处于输出饱和状态,此时 $i_{sq}^* = I_{max}$, 电机将以最大电磁转矩 T_{max} 加速,因为 FESS 没有负载转矩,根据公式 $T_e = J \frac{d\omega_m}{dt}$ 和 $\theta = \int \omega_e dt$ 便可计算出电机转速和转子位置,该理论计算结果不存在波动。另外,由于电流环响应速度较快,可认为实际电流即为给定电流,而此时的给定电流 i_{sd}^* 与 i_{sq}^* 均为定值,不存在波动。

根据以上分析,将给定电流替代实际电流,同时用理论计算所得电机转速计算耦合项,再将计算所得转子位置用于旋转坐标变换,即可减小零转速附近启动时变流器输出电压的波动,进而减小转矩和转速的波动。当电机转速增加到一定程度后,改用

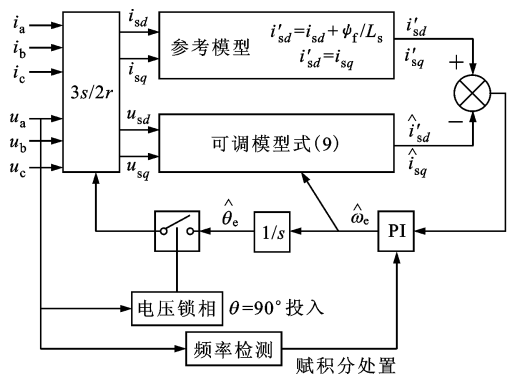


图 6 FESS 无速度观测方法

$$K_i \int_0^t (\hat{i}'_{sd} \hat{i}'_{sq} - \hat{i}'_{sq} \hat{i}'_{sd}) d\tau + \hat{\omega}_e(0) \quad (10)$$

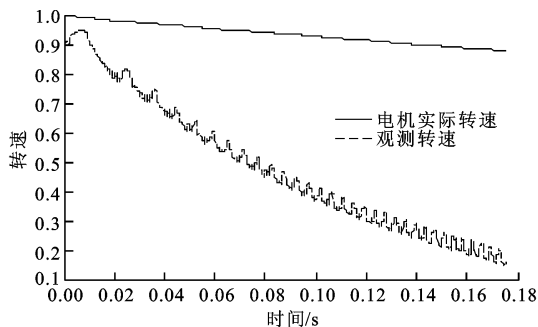
$$\hat{\theta} = \int \hat{\omega}_e dt \quad (11)$$

MRAS 观测的初始转速是 PI 控制器积分项的初始值,由式(9)、式(10)可见,若初始转速与实际转速有误差,该误差会因积分而在角度中累积。虽然 MRAS 具有抗干扰性能,在转速初值不准确的情况下,经过一段时间也能收敛至实际转速,但这就需要 PI 控制器具有较大的比例系数,而较大的比例系数会导致稳态时 MRAS 观测结果有较大的波动。图 7a 所示为 FESS 由额定转速投入放电状态时 MRAS 初始转速为 0.9 倍实际转速的仿真结果,由图可见此时无速度算法不能收敛至实际电机转速。若将比例系数扩大 2 倍,结果如图 7b 所示,无速度算法能够收敛至实际电机转速,转速波动为 0.05 倍额定速。若 MRAS 初始转速即为实际转速,采用图 7a 的比例系数,仿真结果如图 7c 所示,转速波动为 0.03 倍额定速。

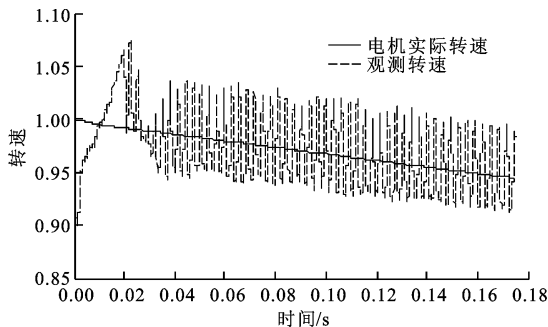
由以上仿真和分析可知,在 FESS 由惯性运行切换至充、放电工作模式时,若 MRAS 初始观测转速等于电机实际转速,不仅能够减小电流冲击,还可以采用较小的比例系数进而减小稳态时的转速波动。对于表贴式永磁同步电机,若变流器停止工作,此时定子中没有电流,只有转子磁链切割定子绕组,定子绕组感应电压频率即为电机的电气频率,而根据时空向量关系,电机 a 相绕组电压矢量刚好在空间上超前转子磁链 90° 电角度。在变流器投入工作前,通过检测 a 相电压的频率和相位,即可获得电机当前转速与转子磁链位置,以此作为初始值进行 MRAS 无速度观测。

5 实验结果

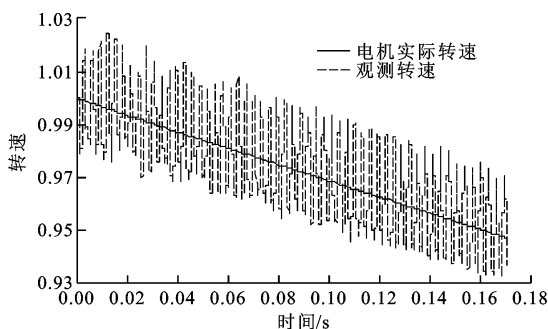
对 FESS 的控制进行实验验证,电机额定功率



(a) MRAS 初始转速为 0.9 倍实际转速



(b) 比例系数扩大 2 倍



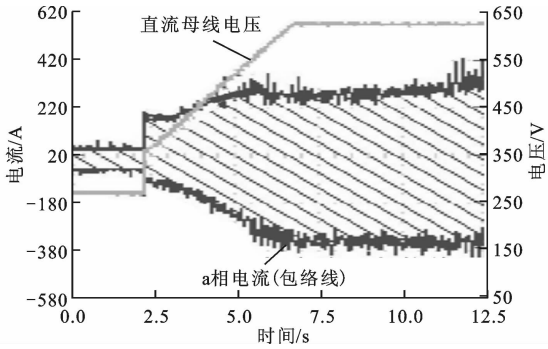
(c) 采用(a)中的比例系数并且初始转速为实际转速

图 7 MRAS 无速度观测仿真结果

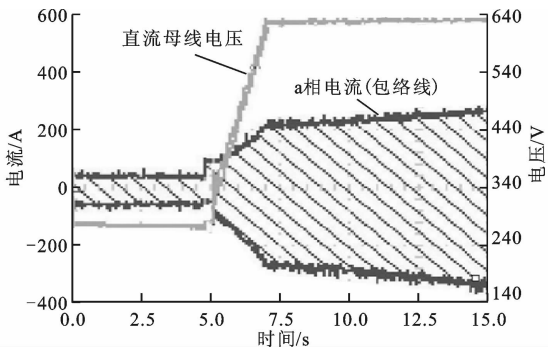
为 100 kW,额定转速为 12 000 r/min,额定相电压为 220 V,额定相电流为 151 A,系统转动转动惯量 $J=3.5 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ 。在直流母线电压为 300 V 时,将 FESS 充电至 5 000 r/min 之后惯性运行,然后以 50 kW 的恒定功率放电,同时将直流母线电压给定由 280 V 逐渐升高至 630 V,结果见图 8。

由图 8a 和图 8b 可见,在 FESS 切换至放电状态时,传统 MRAS 算法由于不能快速获得电机实际转速和初始转子位置,直流母线电压出现 100 V 左右近似阶跃的变化,同时电机定子电流也出现 140 A 的突变。采用本文算法时,直流母线电压变化由阶跃改为斜坡,定子电流突变减小为 40 A,本文方法可有效减小直流母线电压变化的斜率和定子电流突变的数值。由图 8 可以证明,所采用的放电

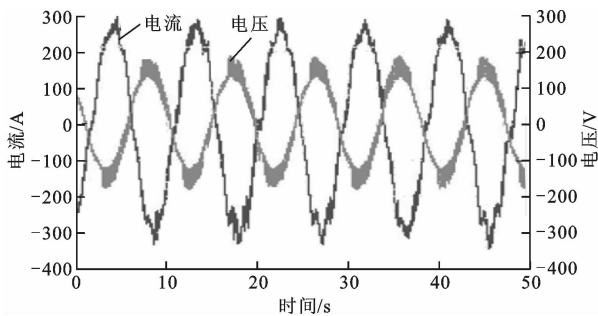
控制算法能维持直流母线电压在设定值,保证负载的正常工作。



(a)采用传统 MRAS 算法的波形



(b)采用本文 MRAS 算法的波形



(c)A 相电压与电流波形

图 8 飞轮储能系统放电实验波形

6 结 语

(1)针对飞轮储能系统转动惯量大、启动加速度慢的特点,分析了其在零转速附近运行时出现转速波动的原因,提出一种在零转速附近的电机控制方法,该方法能减小启动过程中的转速振荡。

(2)在 FESS 放电时,根据直流母线电压变化调整变流器输出功率以维持直流母线电压恒定,保证负载正常工作。

(3)针对模型参考自适应无速度观测算法,分析了在 FESS 由惯性运行切换至充、放电工作模式时获得准确电机转速和转子位置的必要性,并提出了

一种简单且行之有效的电机初始转速检测方法,实现了系统状态切换的快速性和可靠性。

参考文献:

- [1] 葛举生,王培红. 新型飞轮储能技术及其应用展望[J]. 电力与能源, 2012, 33(2): 181-184.
GE Jusheng, WANG Peihong. New type of flywheel energy storage technology and its forecast of application [J]. Power and Energy, 2012, 33(2): 181-184.
- [2] OHNISHI K, YOUZOU U, KUNIO M. Model reference adaptive system against rotor resistance variation in induction motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1986, 33(3): 217-223.
- [3] 曹建荣,虞烈,谢友柏. 感应电动机的解耦控制与矢量控制的解耦性质[J]. 西安交通大学学报, 2006, 33(6): 71-75.
CAO Jianrong, YU Lie, XIE Youbai. Decoupling and vector control of induction motor [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 33(6): 71-75.
- [4] KENNY B, KASCAK P, JANSEN R, et al. Control of a high-speed flywheel system for energy storage in space applications [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(4): 1029-1038.
- [5] CIMUCA G, SAUDEMONT C, ROBYNS B. Control and performance evaluation of a flywheel energy-storage system associated to a variable-speed wind generator [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(4): 1074-1085.
- [6] SCHAUDER C. Adaptive speed identification for vector control of induction motors without rotational transducers [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(5): 1054-1061.
- [7] DYBKOWSKI M, ORLOWAKA-KOWALAK T. Self-tuning adaptive sensorless induction motor drive with the stator current-based MRAS speed estimator [C]// Proceedings of IEEE EUROCON 2009. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2009: 804-810.
- [8] PENG F Z, TADASHI F. Robust speed identification for speed-sensorless vector control of induction motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1994, 30(5): 1234-1240.
- [9] SUL S K. Control of electric machine drive systems [M]. New Jersey, USA: John Wiley & Sons, 2011: 253-257.
- [10] 王兆安,杨君,刘进军,等. 谐波抑制和无功功率补偿 [M]. 北京:机械工业出版社, 2005: 220-242.

(编辑 杜秀杰)