

# 基于新型励磁控制的电励磁同步电机飞轮储能系统 直接转矩控制

刘 洋

(中国铁道科学研究院集团有限公司机车车辆研究所, 北京 100081)

**摘要:**电励磁同步电机飞轮储能系统放电过程中,稳定输出直流侧电压、提高电机功率因数是系统的基本要求。稳定直流侧电压的关键在于电机定子磁链的控制。本文采用空间电压矢量调制型直接转矩控制方法,直接将定子磁链作为控制变量,实现了变速、变负载情况下直流侧电压的基本稳定。同时,提出一种新型转子励磁电流控制方法,该方法基于转子磁场定向,以控制电机定子电压与电流矢量反向为目标,实现电机单位功率因数发电运行,且对电机参数依赖性小。仿真及在平台上的试验结果表明,提出的方法有效减少了系统在变速、变负载情况下直流侧电压的跌落,提高了系统的动态响应,并使同步电机的功率因数达到 0.97,有效提高了系统效率。

**关键词:**电励磁同步电机;飞轮储能;励磁电流控制;直接转矩控制;单位功率因数

**DOI:** 10.12067/ATEEE1808023      **文章编号:** 1003-3076(2019)04-0005-08      **中图分类号:** TK02;TM91

## 1 引言

近年来,同步电机飞轮储能系统由于其功率密度大、循环寿命长、可控制为单位功率因数运行等优点<sup>[1-3]</sup>,在大功率场合得到越来越多的应用,如能源互联网<sup>[4]</sup>、轨道交通<sup>[5]</sup>、舰船电力系统<sup>[6]</sup>、电动汽车<sup>[7]</sup>、风力发电系统<sup>[8]</sup>等。

飞轮储能系统放电过程中,其输出直流侧电压随电机转速、负载而变化<sup>[9-12]</sup>,一般采用双端口稳压方法,即同时控制同步电机定子侧稳压和直流侧稳压<sup>[13]</sup>。文献[14]通过调节混合励磁转子的电励磁部分电流来改变磁场大小,达到稳定发电机端电压的目的;文献[15]通过与永磁磁阻发电机并联的电力电子装置,适当补偿励磁所需的无功电流,保持发电机端电压的稳定。文献[16]采用全功率型 PWM 整流器,在永磁同步发电机高速阶段馈入具有弱磁性质的直轴电流,在稳定发电机端电压的同时,有效扩展了发电机的高速运行区域。分析可知,稳定发电机定子电压的关键在于磁场调节。

电励磁同步电机(Electrically Excited Synchron-

ous Motor, ESM)在控制上存在三个自由度,分别来自对定子电流的直轴分量、交轴分量和励磁电流的控制<sup>[17]</sup>。相比磁场定向控制通过控制定子电流来间接控制定子磁链和电磁转矩,直接转矩控制(Direct Torque Control, DTC)则直接将定子磁链和电流电磁转矩作为控制变量,进一步提高系统的动态响应能力<sup>[18,19]</sup>。文献[20]采用转矩及磁链滞环型传统直接转矩控制牵引电励磁同步电机,同时根据负载变化调节励磁电流抵消电枢反应,实现电机单位功率因数运行,但其控制结构十分复杂。另外传统 DTC 的转矩及定子磁链脉动较大。空间电压矢量调制型直接转矩控制(Direct Torque Control Space Vector Modulation, DTC-SVM)可有效减小转矩及磁链脉动,同时得到恒定的开关频率<sup>[21-23]</sup>。文献[21]将 DTC-SVM 引入电励磁同步电机调速系统,同时根据是否弱磁,分别采用外/内功率因数为 1 策略进行励磁侧控制。但其励磁电流参考值计算环节需要定子磁链、转矩,以及电机定子电感、定子与励磁绕组互感,对参数敏感度高。另外,相比于电励磁同步电机调速系统,惯性储能系统能量释放过程短,对外

环控制目标(直流侧电压)动态响应的要求更为严格,需要另外采取措施提高系统动态响应<sup>[3]</sup>。

本文将 DTC-SVM 策略引入电励磁同步电机控制中,通过对定子磁链的直接控制维持电机端电压基本稳定,并通过功率前馈辅助直流侧电压的闭环调节,进一步提高系统动态响应。并提出一种新型转子励磁电流控制策略,在同步电机转子磁场定向坐标系下计算励磁电流参考值,在减小对电机参数敏感度的同时,实现了电励磁同步电机单位功率因数运行。

## 2 系统数学模型

电励磁同步电机飞轮储能系统的等效原理图如图1所示,由于电机漏感通常较小,一般在回路中串入泵升电感  $L_p$  提高输出直流电压。飞轮储能系统的储能回路由外接三相电源和整流器(并联接在直流母线上)组成。

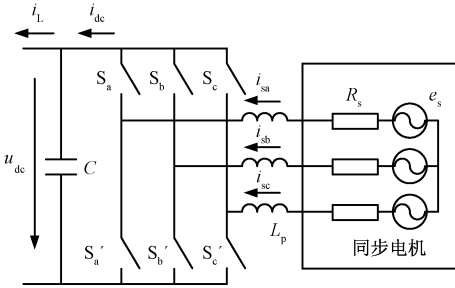


图1 同步电机飞轮储能系统等效图

Fig. 1 Equivalent diagram of ESM based inertia wheel energy storage system

将电励磁同步电机等效为定子感应电势  $e_s$  与定子电阻  $R_s$  的串联,其与泵升电感  $L_p$ 、三相全桥电路、直流侧电容  $C$  一起组成电压型 PWM 整流器。在三相静止对称坐标系中,由开关函数  $s_k$  描述的电压型 PWM 整流器模型为:

$$\begin{cases} C \frac{du_{dc}}{dt} = \sum_{k=a,b,c} i_{sk} s_k - i_{Lp} \\ L_p \frac{di_{sk}}{dt} + R_s i_{sk} = e_{sk} - u_{dc} (s_k - \frac{1}{3} \sum_{j=a,b,c} s_j) \end{cases} \quad (1)$$

式中,当上桥臂导通、下桥臂关断时  $s_k = 1$ ,反之  $s_k = 0, k=a, b, c$ 。

## 3 同步电机直流馈电系统直接转矩控制

### 3.1 同步电机 DTC-SVM 策略

图2为电励磁同步电机 DTC-SVM 原理图。

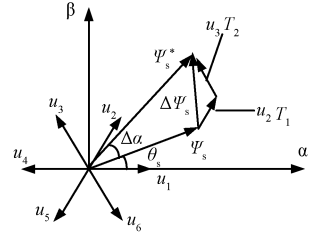


图2 DTC-SVM 原理图

Fig. 2 Principal diagram of DTC-SVM

在图2中,  $u_1 \sim u_6$  为变流器的空间电压矢量。根据目标定子磁链幅值给定  $|\Psi_s^*|$ , 转矩增量角  $\Delta\alpha$ , 以及定子磁链观测器得到的磁链角  $\theta_s$ , 可以得到目标定子磁链矢量  $\Psi_s^*$  在  $\alpha, \beta$  轴上的分量:

$$\begin{cases} \Psi_{s\alpha}^* = |\Psi_s^*| \cos(\theta_s + \Delta\alpha) \\ \Psi_{s\beta}^* = |\Psi_s^*| \sin(\theta_s + \Delta\alpha) \end{cases} \quad (2)$$

则定子磁链目标矢量  $\Psi_s^*$  与当前矢量  $\Psi_s$  之间的磁链误差矢量  $\Delta\Psi_s$  可表示为:

$$\begin{cases} \Delta\Psi_{s\alpha} = \Psi_{s\alpha}^* - \Psi_{s\alpha} \\ \Delta\Psi_{s\beta} = \Psi_{s\beta}^* - \Psi_{s\beta} \end{cases} \quad (3)$$

同步电机有如下定子电压矢量方程:

$$u_s = R_s i_s + \frac{d\Psi_s}{dt} \quad (4)$$

在数字控制系统中,设 PWM 周期为  $T_s$ , 联立式(3)、式(4),将微分算子  $d$  换为增量  $\Delta$ , 且  $\Delta t = T_s$ , 得到定子电压参考值在  $\alpha, \beta$  轴上的分量如下:

$$\begin{cases} u_{s\alpha}^* = \frac{1}{T_s} \Delta\Psi_{s\alpha} + R_s i_{s\alpha} \Rightarrow k_p \Delta\Psi_{s\alpha} + R_s i_{s\alpha} \\ u_{s\beta}^* = \frac{1}{T_s} \Delta\Psi_{s\beta} + R_s i_{s\beta} \Rightarrow k_p \Delta\Psi_{s\beta} + R_s i_{s\beta} \end{cases} \quad (5)$$

根据式(5)进行 SVPWM 调制,使合成电压矢量在一个 PWM 周期  $T_s$  内作用产生定子磁链误差矢量  $\Delta\Psi_s$ 。其中,合成电压矢量在  $\Psi_s$  矢量法向方向上的分量使得  $\Psi_s$  矢量在  $T_s$  周期内转过  $\Delta\alpha$  角度。电励磁同步电机的电磁转矩  $T_{em}$  可写成<sup>[22]</sup>:

$$T_{em} = \frac{3}{2} \frac{n_p}{L_{sl}} \Psi_s \Psi_{\delta} \quad (6)$$

由于阻尼绕组的存在,电机气隙磁链  $\Psi_{\delta}$  是一个大惯量环节,在数个 PWM 周期内可认为其在空间上不动<sup>[22]</sup>。通过转矩增量角  $\Delta\alpha$  可准确地控制转矩。同时,合成电压矢量在  $\Psi_s$  矢量方向的分量可改变  $\Psi_s$  矢量幅值,从而准确地控制定子磁链幅值。实际控制系统中,式(5)中的  $1/T_s$  通常用比例环节替代,通过



$T_{em}^*$ ,同时减轻了  $u_{dc}$  外环的计算压力,提高系统的动态响应。在 DTC-SVM 控制内环中,电磁转矩  $T_{em}$  闭环控制输出转矩增量角  $\Delta\alpha$ ,结合定子磁链观测器得到的  $\Psi_s$  矢量幅值和角度,经过 DTC-SVM 计算,对电磁转矩进行直接闭环控制。同时,根据定子磁链幅值给定  $|\Psi_s^*|$ ,通过 DTC-SVM 的合成电压矢量调节定子磁链幅值,对定子磁链幅值进行直接控制。

## 4 仿真验证

图5所示为电励磁同步电机飞轮储能及负载系统,负载由逆变器和电机模拟。系统仿真在 Power-sim 平台下进行,电励磁同步电机额定电压 690V,频率 50Hz,极对数  $n_p = 2$ ,  $R_s = 3.78\text{m}\Omega$ ,  $L_{sd} = 3.0\text{mH}$ ,  $L_{sq} = 1.6\text{mH}$ ,  $R_f = 2.12\Omega$ ,飞轮转动惯量  $33\text{kg}\cdot\text{m}^2$ 。设置电机初始转速为 1500r/min,直流侧电压参考值  $u_{dc}^* = 680\text{V}$ ,定子磁链幅值给定  $|\Psi_s^*| = 1.0\text{Wb}$ 。

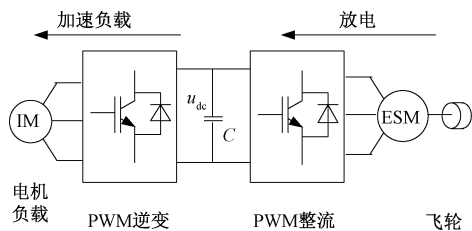


图5 储能及负载系统示意图

Fig. 5 Block diagram of energy storage and load system

### 4.1 DTC-SVM 仿真结果

仿真结果中,0~0.2s 为系统准备阶段;从 0.2s 起,飞轮储能系统开始向直流侧供电。

图6、图7分别为功率前馈实施与否两种情况的仿真结果。图6中没有实施功率前馈,直流侧电压  $u_{dc}$  外环输出  $\Delta i_{dc}^*$  出现超调,  $u_{dc}$  跌落较多;图7显示,由于功率前馈的存在,  $\Delta i_{dc}^*$  很快趋于收敛,  $u_{dc}$  的跌落因此减少。对比可知,功率前馈提高了系统的动态响应。

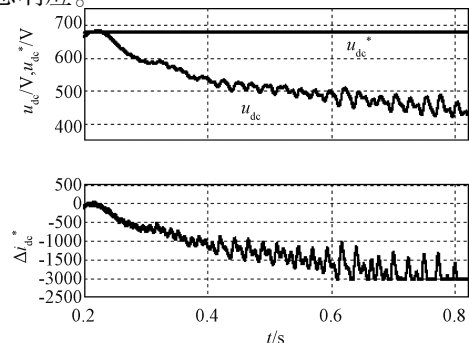


图6 直流侧电压参考、实际值及闭环输出(无功率前馈)

Fig. 6  $u_{dc}^*$ ,  $u_{dc}$ , and  $\Delta i_{dc}^*$  (without feedforward)

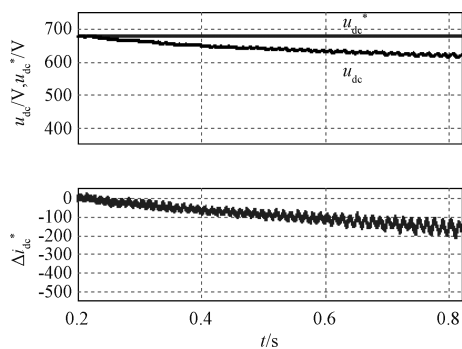


图7 直流侧电压参考、实际值及闭环输出(带功率前馈)

Fig. 7  $u_{dc}^*$ ,  $u_{dc}$ , and  $\Delta i_{dc}^*$  (with feedforward)

图8所示为同步电机定子磁链  $\Psi_s$  轨迹,可知 DTC-SVM 策略准确控制了定子磁链矢量。

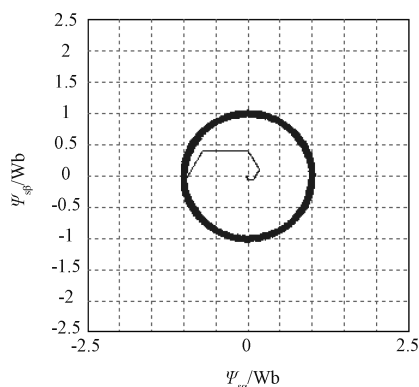


图8 同步电机定子磁链轨迹

Fig. 8 ESM stator flux trajectory

图9显示,在系统放电过程中,同步电机转速由初始值 1500r/min 降至 1275r/min 左右。由于 DTC-SVM 策略通过空间电压矢量使定子磁链转过某一微小角度来直接控制转矩,因此转矩仿真波形上存在一定的脉动。

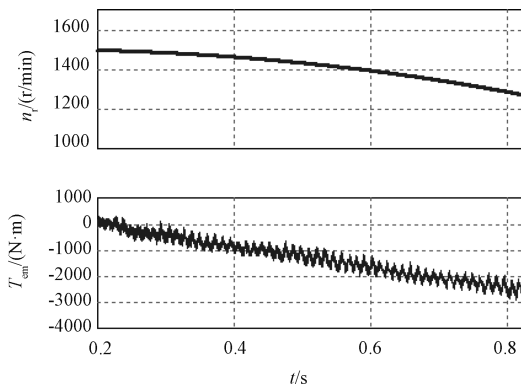


图9 同步电机转速、转矩

Fig. 9 ESM speed and torque



## 4.2 励磁电流控制仿真结果

图 10 所示为系统放电过程中同步电机励磁电压  $u_f$ 、电流  $i_f$  仿真波形。系统仿真时,考虑到实际工况中当同步电机空载或轻载时相电流幅值较小,而所用的电流传感器量程较大,导致检测较小电流时误差较大,这时根据式(9)计算出来的励磁电流参考值  $i_f^*$  存在波动、跳变。因此在仿真中设计当同步电机相电流大于一定值时投入转子励磁电流控制,否则  $u_f$  维持为 20V。

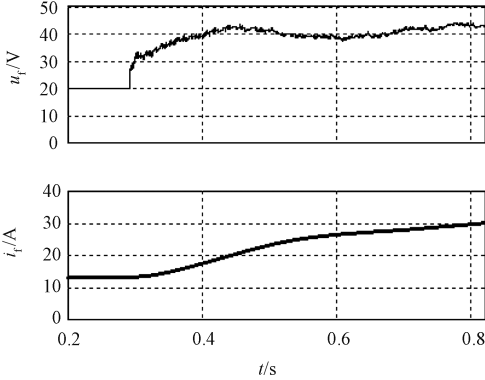


图 10 同步电机励磁电压、电流  
Fig. 10 ESM field voltage and current

图 11 所示为同步电机 A 相电压、电流仿真波形,其中电流波形显示时取反。由图 11 可知,二者相位基本相同,即同步电机单位功率因数运行。

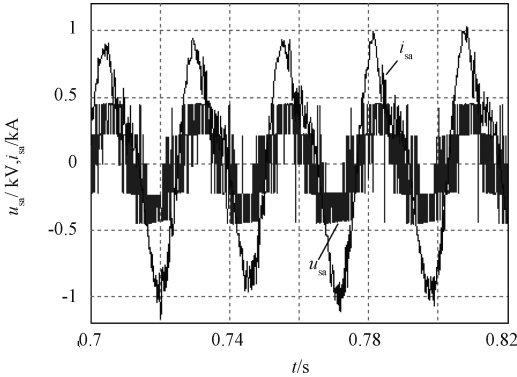


图 11 同步电机 A 相电压、电流  
Fig. 11 ESM phase voltage and current

## 5 试验结果

试验中,同步电机在转速 1500r/min 时开始馈电,直流侧电压参考值  $u_{dc}^* = 680V$ ,  $u_{dc}$  外环 PI 控制器  $k_p = 2.0$ ,  $k_i = 2.0$ , DTC-SVM 控制的  $T_{em}$  闭环  $k_p = 0.001$ ,  $k_i = 0.001$ ,  $|\Psi_s^*| = 1.0Wb$ , 励磁电压闭环  $k_p = 2.1$ ,  $k_i = 4.0$ , 电机参数与仿真参数相同。

### 5.1 DTC-SVM 试验结果

图 12 所示为功率前馈实施与否情况下,飞轮储

能系统放电过程中直流侧电压  $u_{dc}$  波形:没有功率前馈时,  $u_{dc}$  从初始 680V 降至 500V 左右;实施功率前馈后,  $u_{dc}$  降至 600V 左右。可见功率前馈有效提高了直流侧电压的稳定性。

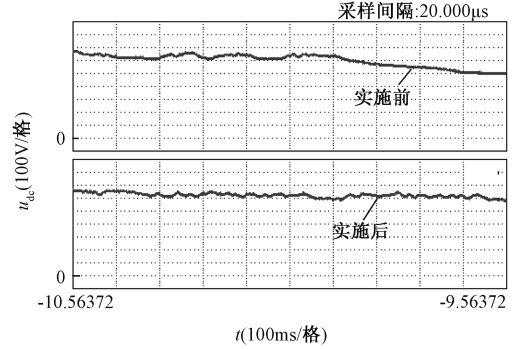


图 12 实施功率前馈前后直流侧电压对比  
Fig. 12 Comparison of DC-link voltage without/with feedforward

以  $\Psi_{sc}$  为横坐标、 $\Psi_{sb}$  为纵坐标的同步电机定子磁链轨迹如图 13 所示,可以看到 DTC-SVM 准确控制了定子磁链幅值。

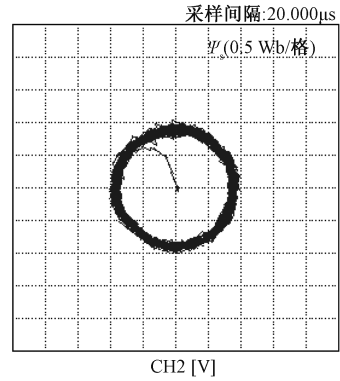


图 13 同步电机定子磁链轨迹  
Fig. 13 ESM stator flux trajectory

图 14 所示为同步电机转速  $n_r$  与电磁转矩  $T_{em}$  波形。由于系统存在空载损耗,所以在负载起动时同步电机的初始转速降为 1350r/min,并最终降为 1125r/min 左右。

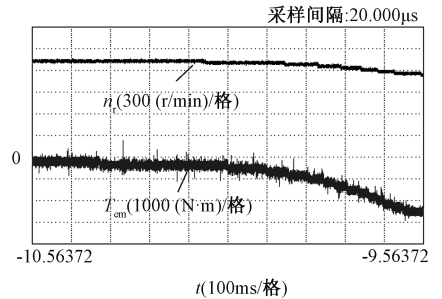


图 14 同步电机转速、电磁转矩  
Fig. 14 ESM speed and torque

5.2 励磁电流控制试验结果

图 15 所示为同步电机励磁电压  $u_f$  与电流  $i_f$  波形。与仿真中所述情况相同,当同步电机相电流大于一定值时投入转子励磁电流控制。另外,为滤除 A/D 采样毛刺,对  $u_f$ 、 $i_f$  的采样信号加入了一阶低通滤波处理,因此其波形较为平滑。

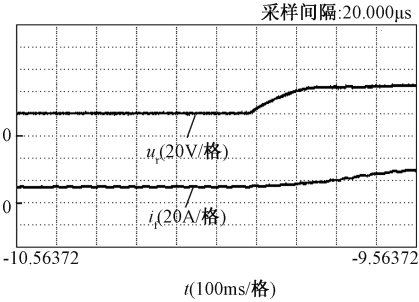


图 15 同步电机励磁电压、励磁电流  
Fig. 15 ESM field voltage and current

图 16 所示为同步电机 A 相电流  $i_{sa}$  和电压  $u_{sa}$  波形,可以看到二者相位反相。根据图 16 采集的波形数据计算出同步电机的有功功率为 182kW、视在功率为 188kV·A、功率因数为 0.97。因此,采用本文提出的方法有效减少了系统无功,提高了系统效率。

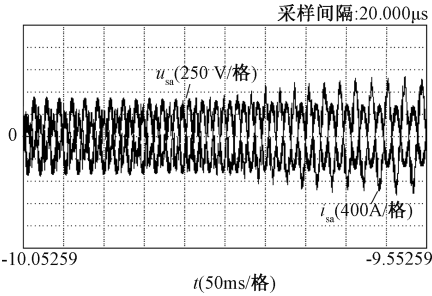


图 16 同步电机相电压、电流  
Fig. 16 ESM phase voltage and current

6 结论

本文采用空间电压矢量调制型直接转矩控制方法,直接将同步电机定子磁链作为控制变量,可有效稳定飞轮储能系统中由于储能同步电机转速、系统负载变化带来的输出直流侧电压波动。另外,提出了一种新型转子励磁电流控制方法,使同步电机定子电压、电流矢量反相,实现单位功率因数发电运行。该方法在转子磁场定向坐标系下进行计算,减小了对电机参数的依赖性。仿真和试验结果表明,提出的方法提高了系统的动态响应,并使同步电机

的功率因数达到 0.97,减少了系统无功。

参考文献 (References):

[ 1 ] 李万杰,张国民,艾立旺,等 (Li Wanjie, Zhang Guomin, Ai Liwang, et al.). 高温超导飞轮储能系统研究现状 (Review on advanced flywheel energy storage system with large scale) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (10): 19-31.

[ 2 ] Piller Group GmbH. UNIBLOCK UBTD + diesel rotary UPS [EB/OL]. www. piller. com, 2015.

[ 3 ] 戴兴建,姜新建,王秋楠,等 (Dai Xingjian, Jiang Xinjian, Wang Qiunan, et al.). 1 MW/60 MJ 飞轮储能系统设计与实验研究 (The design and testing of a 1MW/60 MJ flywheel energy storage power system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2017, 32 (21): 169-175.

[ 4 ] 朱永强,赵娜,王福源,等 (Zhu Yongqiang, Zhao Na, Wang Fuyuan, et al.). 能源互联网中多种储能的协调 (Energy storage coordination among various energy networks in energy internet) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (10): 10-16.

[ 5 ] 胡婧娴,林仕立,宋文吉,等 (Hu Jingxian, Lin Shili, Song Wenji, et al.). 城市轨道交通储能系统及其应用进展 (Energy storage for urban rail transportation) [J]. 储能科学与技术 (Energy Storage Science and Technology), 2014, 3 (2): 106-116.

[ 6 ] 纪锋,付立军,王公宝,等 (Ji Feng, Fu Lijun, Wang Gongbao, et al.). 舰船综合电力系统飞轮储能控制器设计 (Controller design of flywheel energy storage for vessel integrated power systems) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2015, 35 (12): 2952-2959.

[ 7 ] 汤延祺,朱焜秋 (Tang Yanqi, Zhu Huangqiu). 车载飞轮储能系统及其关键技术研究 (Development and key technologies of flywheel energy storage system for vehicle) [J]. 电机与控制应用 (Electric Machines & Control Application), 2016, 43 (5): 38-46.

[ 8 ] 陈斌,范林源,张俊武,等 (Chen Bin, Fan Linyuan, Zhang Junwu, et al.). 基于飞轮储能装置的双馈风电机组并网系统联合调频控制研究 (Research on joint frequency modulation control of the grid-connected system for DFIG based on flywheel energy storage device) [J]. 电工技术 (Electric Engineering), 2018 (12): 71-73, 76.

[ 9 ] 刘学,姜新建,张超平,等 (Liu Xue, Jiang Xinjian,

- Zhang Chaoping, et al.). 大容量飞轮储能系统优化控制策略 (Optimization control strategies of large capacity flywheel energy storage system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2014, 29 (3): 76-82.
- [10] 杜玉亮, 郑琼林, 郭希铮, 等 (Du Yuliang, Zheng Trillion Q, Guo Xizheng, et al.). 飞轮储能系统反向制动发电问题研究 (Research on problem of regenerative braking process of flywheel energy storage system) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (7): 157-162, 176.
- [11] 杜玉亮, 郑琼林, 郭希铮, 等 (Du Yuliang, Zheng Trillion Q, Guo Xizheng, et al.). 飞轮储能系统弱磁控制研究 (Research on flux-weakening control of flywheel energy storage system) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2013, 47 (9): 60-62.
- [12] 郭伟, 王跃, 李宁 (Guo Wei, Wang Yue, Li Ning). 永磁同步电机飞轮储能系统充放电控制策略 (Control strategy for flywheel energy storage system with permanent magnet synchronous machine) [J]. 西安交通大学学报 (Journal of Xi'an Jiaotong University), 2014, 48 (10): 60-65.
- [13] 沈建新, 缪冬敏 (Shen Jianxin, Miao Dongmin). 变速永磁同步发电机系统及控制策略 (Variable speed permanent magnet synchronous generator systems and control strategies) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2013, 28 (3): 1-8.
- [14] 阳朝辉, 黄守道, 刘娇 (Yang Zhaohui, Huang Shoudao, Liu Jiao). 宽范围稳压的组合转子同步发电机 (The hybrid rotor synchronous generator operating constant voltage over a wide range of speeds) [J]. 微特电机 (Small and Special Electrical Machines), 2008, 8: 26-28.
- [15] 吴义勇, 孙旭东, 柴建云 (Wu Yiyong, Sun Xudong, Chai Jianyun). 永磁磁阻发电机的电压控制 (Voltage control of permanent-magnet reluctance generator) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2006, 25 (4): 63-66.
- [16] Miao Dongmin, Shen Jianxin. Simulation and analysis of a variable speed permanent magnet synchronous generator with flux weakening control [A]. Proceedings of the 1st International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA' 2012) [C]. Nagasaki, Japan, 2012. 1-6.
- [17] Cs Szabo, Maria Imecs I I Incze. Double-field orientation of unity power factor synchronous motor drive [A]. 14th International Conference on Intelligent Engineering Systems (INES) [C]. 2010. 237-242.
- [18] 张兴华, 陈鹏飞 (Zhang Xinghua, Chen Pengfei). 内置式永磁同步电机的效率最优直接转矩控制 (Optimal-efficiency direct torque control of interior permanent magnet synchronous motors) [J]. 电工电能新技术 (Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy), 2017, 36 (7): 57-62.
- [19] Casadei D, Profumo F, Serra G, et al. FOC and DTC: Two viable schemes for induction motors torque control [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2002, 17 (5): 779-787.
- [20] 李崇坚 (Li Chongjian). 交流同步电机调速系统 (Adjusting speed system of synchronous motor) [M]. 北京: 科学出版社 (Beijing: Science Press), 2006.
- [21] 周扬忠, 胡育文, 黄文新 (Zhou Yangzhong, Hu Yuchen, Huang Wenxin). 低转矩磁链脉动型电励磁同步电机直接转矩驱动系统的研究 (Research on a direct torque control for electrically excited synchronous motor drive with low ripple in flux and torque) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2006, 26 (7): 152-157.
- [22] 谭国俊, 景巍, 叶宗彬 (Tan Guojun, Jing Wei, Ye Zongbin). 空间矢量调制型凸极同步电动机直接转矩控制 (Direct torque control of salient pole synchronous motor using space vector) [J]. 系统仿真学报 (Journal of System Simulation), 2008, 20 (1): 233-236.
- [23] 吴轩钦, 谭国俊, 景巍, 等 (Wu Xuanqin, Tan Guojun, Jing Wei, et al.). 基于改进型磁链观测器直流励磁同步电机控制 (DC-excited synchronous motor control based on improved flux observer) [J]. 电机与控制学报 (Electric Machines and Control), 2011, 15 (7): 26-32.

**Direct torque control of electrically excited synchronous motor based on novel excitation control in flywheel energy storage system**

LIU Yang

(Locomotive & Car Research Institute, China Academy of Railway Science Corporation Limited,  
Beijing 100081, China)

**Abstract:** In the discharging mode of electrically excited synchronous motor based flywheel energy storage system, stabilizing the output DC-link voltage and increasing the ESM power factor are basic needs. The key to a stabilizing DC-link voltage is the control of stator flux. In this paper, the voltage space vector modulation based direct torque control scheme (DTC-SVM) is adopted, in which the stator flux is directly regulated, to maintain a stable DC-link voltage while the speed and load varied. Meanwhile, aiming to make the stator voltage and current vector in opposite direction and finally run the motor with unity power factor, a novel rotor excitation current control method is proposed under the rotor-oriented reference frame, in which the dependency of the motor parameter is weakened. Simulation and experiment results show that, the proposed scheme effectively reduced the DC-link voltage drop with the speed and load varying, and increased the power factor to 0.97, which has effectively improved the specific energy.

**Key words:** electrically excited synchronous motor; flywheel energy storage; excitation current control; direct torque control; unity power factor