

电励磁双凸极电机起动全过程励磁控制策略

魏佳丹 周 波

(南京航空航天大学自动化学院, 南京, 210016)

摘要:电励磁双凸极电机由于励磁电流可控制,用于起动工作时理论上能够调节励磁电流实现恒功率控制。但是由于双凸极电机的非线性特性导致其反电势为不规则方波形状,类似直流电机采用相电压反馈控制励磁电流实现恒功率控制困难较大。本文在双凸极电机恒转矩起动阶段,恒流控制励磁电流,根据起动机转速反馈实现控制模式的平稳切换;在恒功率阶段利用三相端电压整流值间接测量反电势来控制励磁电流,实现双凸极电机弱磁控制,保证恒功率阶段电机的出力最大。仿真和实验结果验证了该方法的有效性。

关键词:电励磁双凸极电机;恒转矩;恒功率;端电压整流输出值;弱磁控制

中图分类号:TM351

文献标志码:A

文章编号:1005-2615(2014)04-0538-06

Flux Control for Start Process of Doubly Salient Electrical Motor

Wei Jiadan, Zhou Bo

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China)

Abstract:In the process of starting, the electro motive force(EMF) of doubly salient electrical motor (DSEM) can be maintained for the constant power control by the flux weakening in theory as the flexible flux. However, the nonlinear magnetic characteristics of DSEM cause EMF to be anomalous square-wave. It is difficult to control the excitation current by the close-loop of EMF as DC motor. In this paper, the excitation current of DSEM is constantly controlled in the process of constant torque. The flux weakening control method with the feed back of the rectified voltage for three terminal phases is given. The switch process from the state of constant torque to constant power is smooth and the maxim output of DSEM is maintained in the process of constant power. Simulation and experimental results confirm the theory of the flux weakening method.

Key words: doubly salient electrical motor; constant torque; constant power; rectified voltage of three terminal phases; flux weakening

电励磁双凸极电机是在永磁双凸极电机基础上用励磁绕组取代永磁体的一种新型电机,它集中了永磁双凸极电机的优良电气特性以及励磁电流可控的突出优点,使其具有构成航空、车载起动发电机的潜质^[1-2]。

根据航空发动机的阻转矩特性,通常起动过程采用恒转矩结合恒功率的起动控制方式,在恒转矩阶段起动/发电机恒输出恒定转矩克服发动机的最

大阻转矩;达到点火速之后,发动机自行运行,起动/发电机恒功率升速运行拖动发动机达到慢车速。相比较直接采用恒转矩拖动发动机达到慢车速的控制方式,增加恒功率阶段控制能够有效降低起动/发电机的输出功率,减小系统容量、体积和重量,并且不影响发动机的起动时间,能够满足发动机的起动特性需求。电励磁双凸极起动发电机作为一种新型类似他励直流电机的无刷直流电机,相比较开关磁阻

基金项目:国家重点基础研究发展计划(“九七三”计划)(2007CB210302)资助项目;江苏省科技支撑计划(BE2011179)资助项目。

收稿日期:2013-04-10;**修订日期:**2013-12-09

通信作者:魏佳丹,男,副教授,E-mail:weijiadan@nuaa.edu.cn。

电机,虽然在功率密度等方面稍逊一些,但是电励磁双凸极电机励磁电流可控的突出优点,使得恒功率弱磁升速控制和发电调压控制实现简单,可靠性高,并且技术较为成熟,成为当前构成航空、车载等直流起动发电系统的重要选择。

理论上,电励磁双凸极电机励磁电流可调,恒转矩阶段,恒定控制励磁电流,控制相电流维持输出转矩恒定;恒功率阶段,调节励磁电流弱磁升速,无需像永磁电机那样通过电机结构^[3-4]、控制方法^[5-6]以及拓扑改进^[7]来实现弱磁控制。但是,由于双凸极电机的非线性特性使其反电势为非理想方波形式,恒功率阶段无法像他励直流电机那样直接通过反电势闭环来控制励磁电流实现弱磁功能^[8-9]。文献[10]针对电励磁双凸极电机采用类似开关磁阻电机的 APC 控制方式,通过提前开通角的控制,能够有效改善电励磁双凸极电机转速升高之后的输出转矩特性,并且一定程度上实现电机转速扩展的功能,但是该方法没有有效利用电励磁双凸极电机励磁电流可控的优点。

因此,文献[11,12]针对定子双馈电双凸极电机(即电励磁双凸极电机)的高速运行恒功率弱磁控制进行了分析,分别通过绕组正负向电流的差值和转速的变化量间接控制励磁电流实现对绕组反电势的控制,以达到弱磁升速的目的。该方法中绕组正负向电流的差值量及转速变化量与励磁电流增量之间只有定性的变化关系,没有严格的数学联系,因此难以在弱磁全过程实现恒功率控制。文献[13,14]提出的混合励磁双凸极电机在起动过程中同样存在如何控制励磁电流实现恒功率弱磁的问题,电励磁双凸极电机励磁电流可控的突出优点在弱磁升速阶段没有能够很好地得到利用。

本文针对一台 6/4 结构的电励磁双凸极起动发电机,从理论上推导了起动过程电机输出转矩与相电流、励磁电流的关系,分析了通过三相绕组端电压整流值反馈实现弱磁控制的方法,并与双凸极电机提前角度的弱磁控制方法进行了比较,解决了电励磁双凸极电机由于反电势不规则难以实现恒功率弱磁控制的难点。仿真和实验研究了双凸极电机起动全过程的控制方法,实现了起动过程基速以上的恒功率弱磁控制,有效地提高了电励磁双凸极电机起动过程的转速范围。本文提出的端电压整流值反馈弱磁控制方法具有一般性,对于反电势为不规则形状的电励磁、混合励磁类电机的弱磁控制过程的设计具有指导意义。

1 电励磁双凸极电机弱磁控制原理分析

1.1 双凸极电机工作原理

电励磁双凸极电机起动过程中采用三相全桥变换器,如图 1(a)所示,全桥变换器采用三相六状态换流模式,三相绕组导通规律如图 1(b)所示,电励磁双凸极电机绕组电感采用分段线性电感模型,在绕组磁链的上升区通正电流、下降区通负电流、平顶区作为换向区间,在每个导通区间电机三相绕组两两通电工作^[14]。

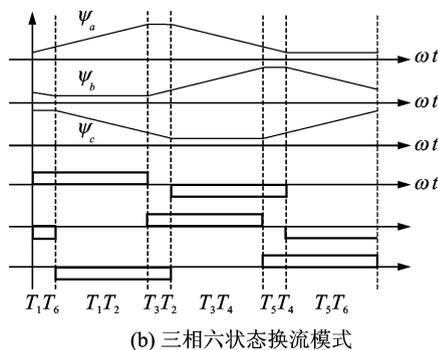
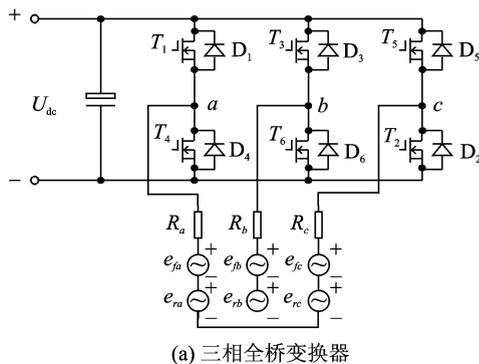


图 1 三相全桥电路及其导通规律

Fig. 1 Three-phase full-bridge converter and conduction mode

恒转矩起动阶段,三相电流斩波控制在给定值,励磁电流恒流控制在额定值,在 T_1, T_2 导通区间,A 相和 C 相上的端电压为

$$\begin{cases} U_a = i_a R + e_{fa} + e_{ra} \\ U_c = i_c R + e_{fc} + e_{rc} \end{cases} \quad (1)$$

式中: $e_{fa} = i_f \frac{dL_{af}}{d\theta}$, $e_{fc} = i_f \frac{dL_{cf}}{d\theta}$ 为励磁电势;

$e_{ra} = i \frac{dL_{a\omega}}{d\theta}$, $e_{rc} = -i \frac{dL_{c\omega}}{d\theta}$ 为磁阻电势; θ 为电机转

子位置的机械角度,且在该区间 $\frac{dL_{af}}{d\theta} = -\frac{dL_{cf}}{d\theta}$,

$\frac{dL_{a\omega}}{d\theta} = -\frac{dL_{c\omega}}{d\theta}$ 均为恒定值,与转速无关, $R_a = R_c = R$

为绕组电阻。A, C 两相输出转矩为^[15]

$$\begin{cases} T_a = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + i_a i_f \frac{dL_{af}}{d\theta} \\ T_c = \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} + i_c i_f \frac{dL_{cf}}{d\theta} \end{cases} \quad (2)$$

在该区间电机输出合成转矩为

$$T_e = T_a + T_c = i_a i_f \frac{dL_{af}}{d\theta} + i_c i_f \frac{dL_{cf}}{d\theta} \quad (3)$$

式中: $i_a = -i_c = i$ 。令 $\frac{dL_{af}}{d\theta} = -\frac{dL_{cf}}{d\theta} = k$, 则

$$T_e = T_a + T_c = 2i i_f k \quad (4)$$

可见, 电机输出转矩与相电流、励磁电流成正比, 因此恒转矩起动阶段, 控制相电流、励磁电流的幅值即可维持电机的输出转矩恒定。随着转速的上升, 电枢电压达到最大值, 此刻只有降低励磁电流、减小磁通、维持反电势不变, 转速才能上升, 即起动机的运行状态进入恒功率阶段。通过弱磁升速会使起动机转矩相应地下降, 为使起动机输出最大功率, 调节励磁电流维持电机绕组的反电势恒定在最大功率点, 即可实现起动机出力最大的恒功率升速。

1.2 反电势控制方法

电机 A 相绕组反电势为

$$E_a = e_{\dot{a}} + e_{ra} = i_f \frac{dL_{af}}{d\theta} \omega + i_a \frac{dL_a}{d\theta} \omega \quad (5)$$

式中: ω 为电机转速。可见, 随着转速的上升, 若相电流继续维持在恒定值, 磁阻电势 $i_a \frac{dL_a}{d\theta} \omega$ 随着转速线性上升, 为使 A 相反电势恒定, 必须控制励磁电流, 减小励磁电势 $i_f \frac{dL_{af}}{d\theta} \omega$ 。但是由于电枢反应及定转子端部局部饱和特性的影响, 使得双凸极电机的相绕组反电势为非理想方波形式, 通过每相绕组端电压的测量获得绕组反电势要求电机引出中线, 双凸极电机中点电位的不断变化使得单相绕组的端电压为不规则交流^[16], 难以直接利用, 因此必须通过其他方法来获得绕组反电势以实现弱磁控制。

双凸极电机起动过程的三相六状态工作区间均有两相绕组两两导通, 在图 1 所示的 T_1, T_2 导通区间, 两相绕组串联工作, 两相绕组端电压为

$$U_{rec} = U_a - U_c = 2iR + E_o \quad (6)$$

式中: E_o 为两相绕组的反电势之和 $E_o = e_{\dot{a}} + e_{ra} - e_{\dot{c}} - e_{rc}$ 。可见, 端电压与两相绕组反电势之差为内阻上的分压值, 式中相电流 i 为定值, 检测端电压即可获得绕组反电势, 并且本系统中电励磁双凸极电机三相绕组两两工作方式, 将三相绕组端电压通过整流输出, 即在每个工作区间测得的仍为两相绕组的端电压, 无需考虑电机中点电位的变化情况, 将该

三相绕组端电压整流值该作为反馈量调节励磁电流, 即可实现维持三相绕组反电势恒定的弱磁控制, 使起动机在恒功率阶段出力最大。

2 起动过程弱磁控制系统实现

系统控制框图如图 2 所示, 由功率变换器、电励磁双凸极电机、数字控制器 3 部分组成, 数字控制器通过软件实现起动过程中相电流、励磁电流、控制模式切换、弱磁控制等功能。

根据转速反馈来判断起动机的控制模式, 当起动机转速小于额定转速 n^* 时, 起动机工作于恒转矩阶段, 相电流通过滞环控制在给定的 2 倍额定值 i_g^* , 以加快起动速度; 励磁电流通过 PWM 发生器和斩波器恒流控制在额定饱和值 i_f^* , 起动机输出恒定转矩拖动机组升速。

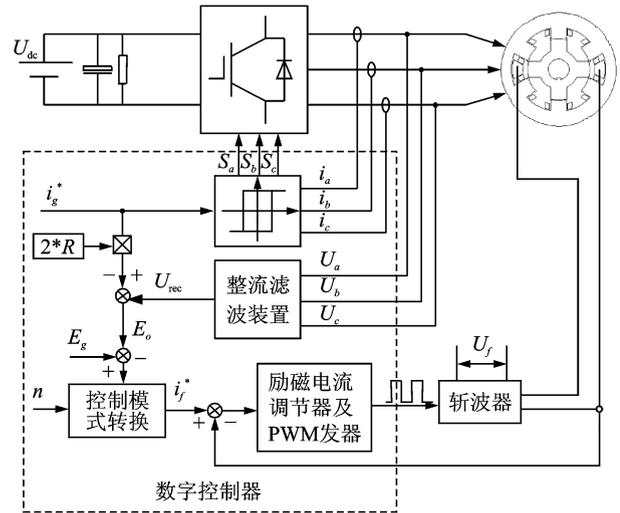


图 2 系统控制框图

Fig. 2 Control system of DSEM

当起动机达到额定转速 n^* 时, 转速反馈控制的起动模式转换模块将起动机从恒转矩阶段切换到恒功率模式, 相电流仍然给定为 i_g^* , 励磁电流的控制从恒流给定值 i_f^* 切换到弱磁控制模式, 检测三相端电压整流值, 再减去相电流给定值乘以 2 倍的电机绕组内阻获得两相绕组反电势之和 E_o , 将 E_o 与给定值 E_g 比较来控制励磁电流, 实现绕组反电势维持在额定值的恒功率弱磁控制。

根据图 2 构建基于数字信号处理器+复杂可编程逻辑器件 (DSP+CPLD) 电励磁双凸极电机起动实验平台, 由 DSP 捕获单元计算起动机的转速, AD 采样单元采样起动过程励磁电流、三相绕组端电压整流值, 并通过 DA 输出相电流限幅值; CPLD 单元

实现启动过程中的相电流换向逻辑以及相电流滞环控制。根据启动机的转速反馈由 DSP 软件实现启动系统的工作模式切换,当启动机转速低于额定转速 1 500 r/min 时,启动过程为恒转矩阶段,相电流通过模拟滞环控制在 8 A,恒流控制励磁电流在 8 A;当启动机转速达到 1 500 r/min 后,此时输出功率为最大值,为保证启动机恒定功率弱磁升速,通过采样端电压整流值与软件给定值(26 V)相比较控制励磁电流幅值,即可保证启动机在转速上升过程中绕组反电势维持在额定值。

3 仿真结果分析

电励磁双凸极启动/发电机仿真参数如表 1 所示,相电流额定值为 4 A,励磁电流饱和值为 8 A。

表 1 电励磁双凸极启动/发电机参数

Tab. 1 Parameters of DSEM starter/generator

参数	参数值	参数	参数值
结构	6/4	额定功率/W	200
额定电压/V	28	额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
相绕组自感	0.21	相绕组自感	0.42
最小值/mH		最大值/mH	
互感最大值/mH	3.47	互感最小值/mH	0.63
相绕组内阻/Ω	0.4	励磁绕组自感/mH	27.1
励磁绕组内阻/Ω	0.5		

图 3 为励磁电流不作弱磁控制,励磁电流恒流控制在额定值 8 A 时,2 倍的额定电流启动,即相电流给定为 8 A,电机启动转速与相电流仿真曲线,整个启动过程为恒转矩控制。可见随着电机转速上升, t_1 时刻由于相绕组反电势不断增大,达到最大转速后,绕组反电势接近母线电压,相电流无法维持在额定值,电机转速无法继续上升,只能达到 1 725 r/min。因此在电励磁双凸极电机启动过程为提高转速范围必须采用弱磁控制。

图 4 为采用提前角度等效弱磁控制方式下^[11-12]本启动发电机最大启动转速随提前角的变化规律,在三相六状态换流控制模式下,提前角从 0°变化到 6°,启动机转速随着提前角的增加而逐渐提高,提前角为 6°时,电机转速达到最大值 2 085 r/min,随着提前角的进一步增大,电机转速逐渐下降,提前角度控制方式下的弱磁控制最大扩速比为 1.21。

图 5(a)为采用端电压整流反馈弱磁控制的启动过程中电机转速、相电流、励磁电流、输出转矩、输出功率、端电压整流输出电压的仿真波形。在转速上升到额定转速 1 500 r/min 之前相电流、励磁电流

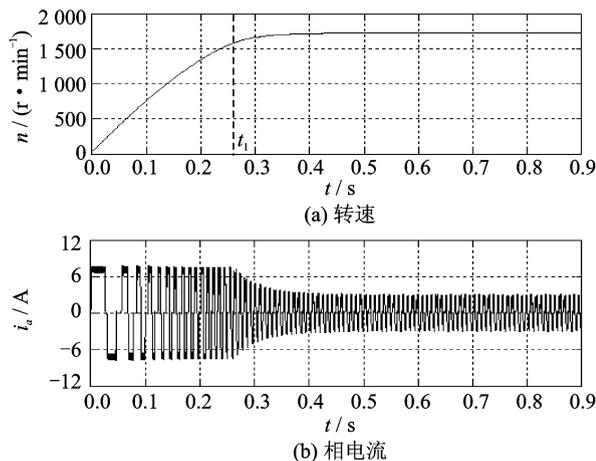


图 3 励磁恒流控制启动机转速、相电流曲线

Fig. 3 Speed and phase current waves at constant current control of excitation

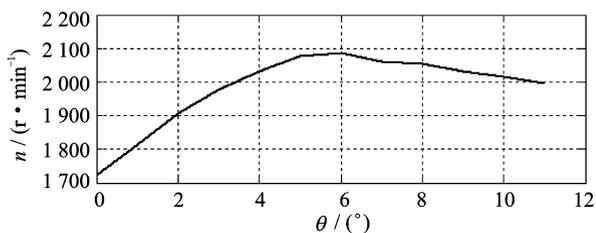


图 4 电机最大启动转速随提前角度变化曲线

Fig. 4 The max speed for the control of angle advanced

恒流控制,三相端电压整流输出电压逐渐上升;达到额定转速后通过控制模式切换模块从恒转矩控制切换至恒功率模式,由端电压整流值反馈来调节励磁电流,维持电机绕组反电势恒定,同时使相电流在整个启动过程中维持在额定值,实现恒功率阶段电机出力最大的弱磁控制。采用端电压整流值反馈弱磁控制后启动机转速可达 4 000 r/min 以上,弱磁扩速比提高到 2.32,相比较提前角度控制,转速范围几乎扩大一倍,有效地提高了启动机的转速,以满足启动过程发动机的特性需求。

4 实验结果

试验电励磁双凸极启动/发电机参数如表 1 所示,图 6~8 为启动过程启动机转速、励磁电流、端电压整流值和相电流波形。图中: $t_2 \sim t_3$ 为恒转矩控制阶段,励磁电流恒流控制在 8 A,相电流通过滞环控制限幅在 8 A,端电压整流输出值随着转速线性上升; t_3 时刻启动机转速达到 1 500 r/min,根据转速反馈控制模式切换到恒功率弱磁模式,励磁电流通过端电压整流值反馈控制,软件实现的两种控制模

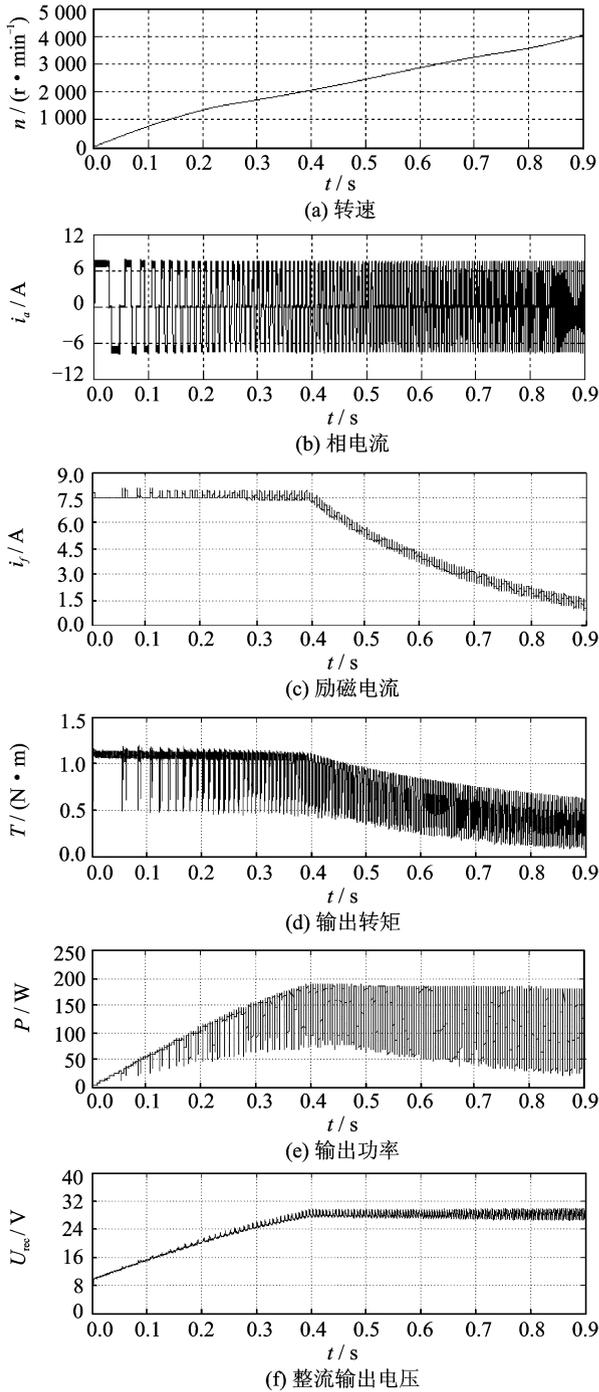


图5 恒功率弱磁控制仿真波形

Fig. 5 Simulation waveforms for flux weakening

式切换过程平稳; $t_3 \sim t_4$ 为恒功率阶段, 端电压整流值基本维持在 26 V 左右, 励磁电流随着转速的上升逐渐下降, 实现恒功率弱磁控制, 该阶段相电流仍然维持在额定值; t_4 时刻, 起动机转速上升到 4 000 r/min 左右, 扩速比达到 2.32。可见, 在电励磁双凸极电机起动过程中采用端电压整流值反馈实现弱磁的方法能够有效地扩大起动机的转速范围, 以适应不同的发动机负载特性。

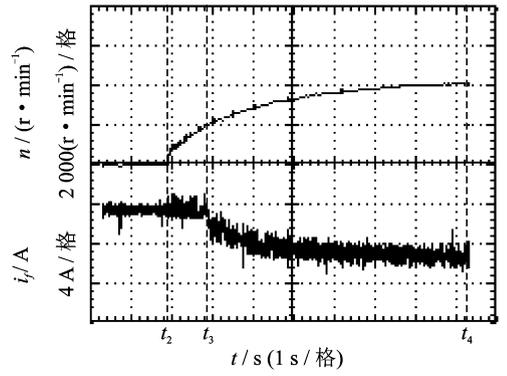


图6 起动转速与励磁电流波形

Fig. 6 Waveforms of speed and excitation current

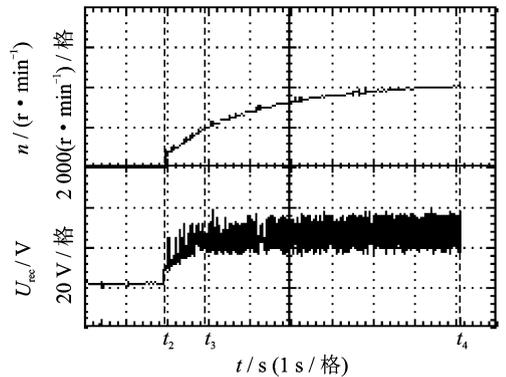


图7 起动转速与端电压整流值波形

Fig. 7 Waveforms of speed and rectified voltage of three terminal phases

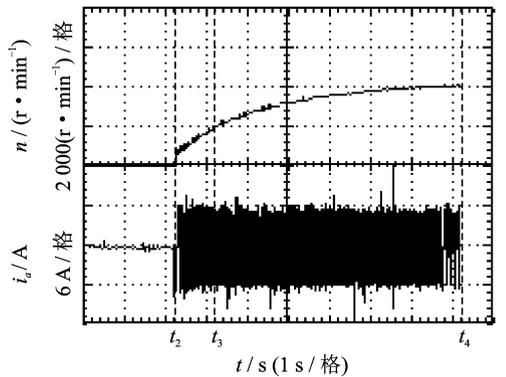


图8 起动转速与相电流波形

Fig. 8 Waveforms of speed and phase current

5 结 论

(1) 研究了电励磁双凸极电机起动过程的控制方法, 重点分析了恒功率阶段通过励磁电流实现反电势恒定的弱磁控制规律。

(2) 在电励磁双凸极电机恒功率起动阶段, 提出一种通过电机三相端电压的整流输出值反馈来控制励磁电流, 实现恒功率阶段的弱磁控制的方法, 解决

了电励磁双凸极电机由于反电势不规则,难以直接测量实现恒功率弱磁控制的难点。

(3)电励磁双凸极电机启动过程采用的端电压整流值反馈弱磁控制方法具有一般性,可扩展应用到其他反电势为不规则形状的电励磁、混合励磁类电机的弱磁启动控制过程。

参考文献:

- [1] 任海英,周波. 双凸极启动/发电机一体化设计与实现[J]. 中国电机工程学报,2006,26(24):153-158.
Ren Haiying, Zhou Bo. Integral design and implementation of doubly salient starter/generator[J]. Proceedings of CSEE, 2006, 26(24): 153-158.
- [2] 戴卫力,王慧贞,严仰光. 无刷直流启动/发电系统的启动控制[J]. 南京航空航天大学学报,2007,39(4):423-428.
Dai Wei li, Wang Hui zhen, Yan Yangguang. Starting control of novel brushless DC starter-generator system[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2007,39(4): 423-428.
- [3] 严岚,贺益康,杨德荣. 一种复合转子永磁无刷直流电机恒功率弱磁控制德研究方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(11):155-159.
YAn Lan, He Yikang, Yang Derong. The approach of the flux weakening operating study for a BLDCM with hybrid rotor structure[J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(11):155-159.
- [4] 陈益广,王颖,沈勇环,等. 宽调速可控磁通永磁同步电机磁路设计和有限元分析[J]. 中国电机工程学报,2005,25(20):157-161.
Chen Yiguang, Wang Ying, Shen Yonghuan, et al. Magnetic circuit design and finite element analysis of wide-speed controllable-flux PMSM[J]. Proceedings of CSEE, 2005,25(20):157-161.
- [5] 窦汝振,温旭辉. 永磁同步电动机直接转矩控制的弱磁运行分析[J]. 中国电机工程学报,2005,25(12):117-121.
Dou Ruzhen, Wen Xuhui. Analysis of field weakening operation for the direct torque control of PMSM[J]. Proceedings of CSEE, 2005,25(12):117-121.
- [6] 周扬忠,胡育文,黄文新. 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[J]. 中国电机工程学报,2006,26(7):152-157.
Zhou Yangzhong, Hu Yuwen, Huang Wenxin. Research on a direct torque control for electrically excited synchronous motor drive with low ripple in flux and torque[J]. Proceedings of CSEE, 26(7):152-157.
- [7] Lawler J S, Milton Bailey J, McKeever J W, et al. Extending the constant power speed range of the brushless DC motor through dual-mode inverter control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(3): 783-793.
- [8] 方一鸣,陆金波,王益群,等. 具有弱磁调速的他励直
流电机非线性多输入多输出控制器的设计[J]. 中国电机工程学报,2003,23(8):172-177.
Fang Yiming, Lu Jinbo, Wang Yiqun, et al. The design of nonlinear MIMO controller for a separately excited DC motor with field weakening[J]. Proceedings of CSEE, 2003,23(8):172-177..
- [9] Liu Zuozong, Luo Fanglin, Rashid M H. Speed nonlinear control of DC motor drive with field weakening[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(2):417-423.
- [10] 孟小利,庞相涛,王慧贞,等. 电励磁双凸极电机角度提前控制的分析研究[J]. 南京航空航天大学学报,2004,36(5):623-627.
Meng Xiaoli, Pang Xiangtao, Wang Huizhen, et al. Analysis of angle-advance control double-salient electro-magnetic motor[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2004,36(5):623-627.
- [11] 常莹,程明,孔祥新. 定子双馈电双凸极电机恒功率弱磁控制的研究[J]. 微电机,2006,39(9):1-5.
Chang Ying, Cheng Ming, Kong Xiangxin. Investigation of flux weakening control for stator doubly-fed doubly-salient motor[J]. Micromotors, 2006,39(9):1-5.
- [12] 程明,束亚刚. 定子双馈电双凸极电机的高速弱磁控制[J]. 电机与控制学报,2010,14(12):23-27.
Cheng Ming, Shu Yagang. Flux weakening control for stator-doubly-fed doubly salient motor[J]. Electric Machines and Control, 2010,14(12):23-27.
- [13] 陈志辉,周楠. 混合励磁双凸极电机三维有限元仿真与数字电压调节技术[J]. 中国电机工程学报,2010,30(27):26-31.
Chen Zhihui, Zhou Nan. 3-D finite element simulation and digital voltage regulation of a doubly salient hybrid excitation generator[J]. Proceedings of CSEE, 2010,30(27):26-31.
- [14] 朱孝勇,程明,花伟,等. 新型混合励磁双凸极永磁电机磁场调节特性分析及实验研究[J]. 中国电机工程学报,2008,28(3):90-95.
Zhu Xiaoyong, Cheng Ming, Hua Wei, et al. Investigation of flux regulation performance and experimental validation for a novel hybrid excited doubly salient permanent magnet machine[J]. Proceedings of CSEE, 2008, 28(3):90-95.
- [15] 周波,相蓉,王川云,等. 电磁式双凸极电机电磁特性的理论分析[J]. 航空学报,2003,24(4):355-359.
Zhou Bo, Xiang Rong, Wang Chuanyun, et al. Theoretical mnalysis on the electro-magnetic characteristics for doubly salient electro-magnetic machines[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2003,24(4):355-359.
- [16] 魏佳丹,周波,姜雷. 基于全桥变换器的电励磁双凸极电机中点电位的研究[J]. 中国电机工程学报,2007,27(30):82-86.
Wei Jiadan, Zhou Bo, Jiang Lei. Research on neutral point voltage of doubly salient electro-magnet Motor by full-bridge converter[J]. Proceedings of CSEE, 2007,27(30):82-86.

