

# 电动汽车双馈电机转子电流最小化控制

丁惜瀛<sup>1</sup>, 王优胤<sup>2</sup>, 杨树平<sup>1</sup>, 王健<sup>1</sup>

- (1. 沈阳工业大学 电气工程学院, 辽宁省 沈阳市 110870;
2. 华北电力大学 电气与电子工程学院, 河北省 保定市 071003)

## Minimal Control Strategy for the Rotor Current of Double-Fed Machine Used in Electric Vehicle

DING Xi-ying<sup>1</sup>, WANG You-yin<sup>2</sup>, YANG Shu-ping<sup>1</sup>, WANG Jian<sup>1</sup>

- (1. School of Electrical Engineering, Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, Liaoning Province, China;
2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China)

**ABSTRACT:** A doubly-fed induction motor (DFIM) based driving system for electric vehicle is proposed. When the vehicle goes in low speed, the operation state of DFIM is similar to synchronous machine operated in sub-synchronous condition, and its characteristic curve is rigid; when the vehicle goes in high speed, the operation state of DFIM is similar to synchronous machine operated in super-synchronous condition, this moment electric energy is simultaneously fed to both stator and rotor, so the speed adjustable range of DFIM is wide and its dynamic response is rapid; when frequency converter is out of order, DFIM can be still used as induction motor. To remedy the defect of DFIM that under low speed operation the bi-direction flow of electric energy makes the current in both rotor and stator and as well as the driving power of the motor too high, the reactive power control is adopted to reduce reactive power of rotor, thus the minimization of rotor current is attained and rated capacity of switch elements used in driving device can be correspondingly reduced, so the loss in DFIM is lower than that in other kinds of induction motors in the same capacity grade. Operation performance of the proposed driving system is simulated by Matlab/Simulink, and simulation results show that proposed control strategy is correct and feasible.

**KEY WORDS:** electric vehicle; doubly-fed induction motor; direct torque control (DTC); reactive power control

**摘要:** 提出了一种基于双馈电机的电动汽车驱动系统。该系统低速运行状态类似同步机, 特性硬; 超同步运行时定、转子同时输入能量, 调速范围宽、动态响应快; 变频器发生严重故障的情况下, 电机仍可作为感应电机使用。针对双馈电机定、转子能量双向流通使低速电机电流及驱动功率过大的缺点, 采用无功功率控制的方法, 降低转子无功功率, 实现

了转子电流最小化, 减小了驱动装置中开关元件的容量等级, 获得了较同等级异步电机更低的损耗。利用 Matlab/Simulink 对系统的运行性能进行了分析, 结果验证了该控制策略的正确性和可行性。

**关键词:** 电动汽车; 双馈电机; 直接转矩控制; 无功功率控制

## 0 引言

电机驱动系统是电动汽车(electric vehicle, EV)的关键部件, 在车载蓄电池尚未突破的前提下, 它决定着整车的运行性能, 国内外对此研究大都限定在异步电机、永磁电机及开关磁阻电机上。本文研究一种基于双馈电机的电动汽车驱动系统, 采用直接转矩控制方案, 灵活实现异步、同步、双馈运行方式, 可获得较异步电机更高的调速范围和动态响应速度, 制动状态下能量回馈率高、机械特性硬、抗干扰性强<sup>[1-3]</sup>; 而且在一套逆变器发生严重故障的情况下, 电机仍可作为一般的感应电机使用<sup>[4]</sup>, 对于野外工作的汽车来说, 相当于整个驱动装置存在一个不用增加设备的“冗余”系统。

双馈感应电机自 1899 年问世以来, 最初作为高速电机来研究, 电源同时由定、转子 2 侧提供, 并且以双同步速方式运行<sup>[5-7]</sup>。在近 20 a 中, 双馈电机更多地被应用在变速恒频发电机和转差能量回馈系统<sup>[8-14]</sup>。

文献[15-16]最早提出了将双馈电机作为电动汽车驱动系统的动力装置, 并采用双馈差速级联思想, 得出了在各种工况下的测试结果; 文献[17]提出了一种电动汽车双馈差速驱动模型的实现方法, 在汽车转向时, 能流通过相互连接的 2 个双馈电机

的转子转速较慢的电机，流向转速较快的电机，为较快的电机提供额外的能量需求。

向量控制和直接转矩控制是双馈电机 2 种最重要的控制方法。电动汽车的电机驱动系统按整车控制器提供的转矩命令控制电机的运转，直接转矩控制技术可以直接接受指令；直接转矩控制具有快速转矩反应时间和控制精度，通常比脉宽调制快 10 倍，直接转矩控制的磁链闭环能够优化电机磁通，提高电机和驱动器的总能量利用率<sup>[18-20]</sup>。

由于双馈电机定、转子都有供电源，所以它的能流情况非常复杂，能量既可以从定子侧流入流出，亦可以从转子侧流入流出。电动汽车一方面对驱动能量及节能的要求非常苛刻；另一方面用于电机驱动控制的逆变装置及 DC/DC 电路的容量将影响车辆的成本和空间，而这是大批量生产汽车的重要指标。为此本文采用无功功率控制，使转子无功功率减到最小，实现转子电流最小化控制方案，减小驱动装置中的开关元件容量等级，降低电机的铜耗和逆变器的容量，为系统的应用提供理论依据。

### 1 双馈电机能流与转子电流分析

#### 1.1 电动汽车中双馈电机的能流分析

由于道路状况的复杂性，电动汽车对双馈电机驱动系统的要求比较苛刻，要求双馈电机能够提供较高的起动转矩，能够在较大的调速范围内比较快地调速，并且能够有效地回馈电能。电机在稳态运行时，定子旋转磁场和转子旋转磁场在空间是保持相对静止的。当定子旋转磁场在空间以 $\omega_0$ 的速度旋转时，则转子磁场相对于转子的旋转速度为

$$\omega_s = \omega_0 - \omega = \omega_0 - (1-s)\omega_0 = s\omega_0 \quad (1)$$

式中： $\omega_0$ 为定子侧电动势角频率； $\omega_s$ 为转差角频率； $\omega$ 为转子旋转的角频率； $s$ 为转差率。

如果双馈电机的转子旋转速度低于同步转速，那么转子旋转磁场与转子的旋转方向相同；如果转子旋转速度大于同步转速，那么 2 者的旋转方向相反。双馈电机通过控制施加在转子上电动势的频率来控制转速。

从功率传送的角度看，可以认为是通过控制转子侧转差功率的大小与流向来实现对双馈电机转速的调节。忽略机械损耗和杂散损耗，双馈电机在任何工况下的功率为

$$P_m = sP_m + (1-s)P_m \quad (2)$$

式中： $P_m$ 为从电机定子传入转子(或由转子传出给

定子)的电磁功率； $sP_m$ 为输入或输出转子电路的功率，即转差功率； $(1-s)P_m$ 为电机轴上输出或输入的功率。

一般情况下，汽车的运行状态包括停车、起步、加速、匀速、减速、倒车等工况。根据这 6 种运行状态设计工作模式，按照电磁功率和转差功率的流动方向，可确定电动汽车中双馈电机的运行状态如图 1 所示，图 1 中： $T_e$ 、 $n$ 分别为电机转矩、转速； $n_1$ 为同步转速。

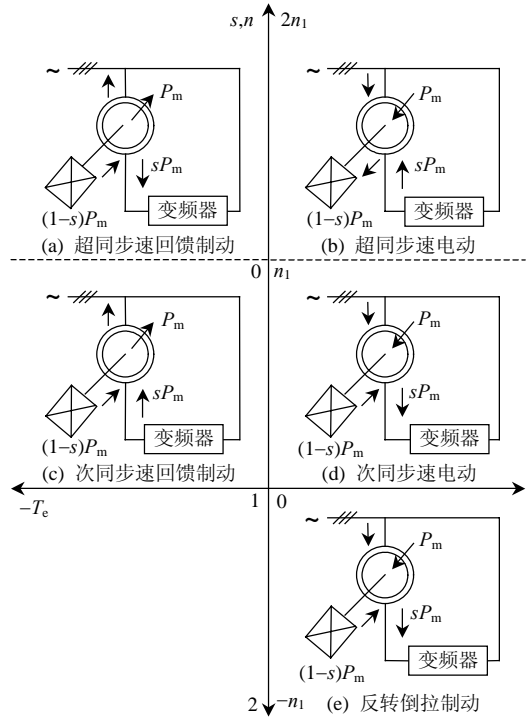


图 1 双馈电机 5 种运行状态的功率流向

Fig. 1 Power flow of double-fed motor in five statuses

1) 次同步速电动运行状态( $0 < s < 1$ ): 此时电动汽车在电机动力驱动下较低速行驶，电机轴上带有反抗性负载，电机从定子侧输入功率，轴上输出机械功率，而转差功率在扣除转子损耗后从转子侧馈出。电动汽车可能的运行状态包括起步、加速、匀速。这种状态下功率流程如图 1(d)所示。

2) 次同步速回馈制动运行状态( $0 < s < 1$ ): 电动汽车较低速行驶，且电机在汽车拖动下在第 3 象限做回馈制动运行，并产生制动性电磁转矩加快减速停车过程，电机定子侧输出功率给电源，转子侧电源输入功率给电机。电动汽车可能运行状态有减速、停车。功率流程如图 1(c)所示。

3) 超同步速电动运行状态( $s < 0$ ): 电动汽车高速行驶，电机给汽车提供动力。电机轴上的输出功率是由定子侧和转子侧 2 部分输入功率合成。电机处于定、转子双输入功率的状态，汽车运行状态有

匀速、加速。其功率流程如图 1(b)所示。

4) 超同步回馈制动运行状态( $s < 0$ ): 双馈电机在发动机牵引下超过同步转速运行, 一般给蓄电池充电。电机工作于发电状态, 电机功率由负载通过电机轴输入, 经过机电能量变换分别从电机定子侧与转子侧输出。其功率流程如图 1(a)所示。

5) 反转倒拉制动运行状态( $s > 1$ ): 双馈电机由电动汽车牵引做反转运行, 向蓄电池回馈能量, 由定子侧电源输入电机定子的功率和由负载输入电机轴的功率 2 部分合成转差功率, 并从电机转子侧输出。其功率流程如图 1(e)所示。

### 1.2 转子电压对转子电流的影响

双馈电机的一个突出优点是电机在调速的同时, 能够独立调节定子侧无功功率, 合理地选择转子电流的控制方式, 使系统获得某种能量指标的最优。转子电压对转子电流的影响如图 2 所示。图中:  $I_1$  为定子侧电流向量;  $I_2$  为转子侧电流向量;  $U_2$  为转子侧电压向量;  $I_m$  为励磁电流向量;  $X_2$ 、 $R_2$  为转子回路每相漏感和电阻;  $E_{20}$  为转子反电势。

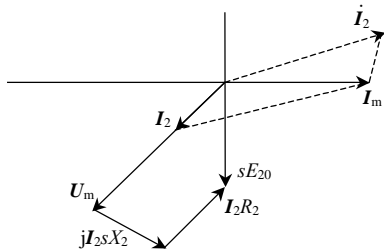


图 2 转子电压对电流的影响

Fig. 2 Effect of rotor voltage on rotor current

当转子磁链向量与转子电流向量成  $90^\circ$  时, 转子电流中无功分量为零, 而转子有功电流分量取决于负载, 则转子电流达到最小值。此时产生转矩的转子电流只有有功电流, 即转子电流的有功分量最大。如系统额定运行, 电动机的输出转矩可以大于额定转矩, 而定子电流小于定子额定电流。由于在一定负载下转子电流最小, 定子电流亦较小, 因此效率提高。

### 1.3 转子磁链与转子电流夹角的计算

在复平面中 2 个向量  $\alpha$ 、 $\beta$  的点乘公式为

$$\alpha \cdot \beta = |\alpha| |\beta| \cos \theta \quad (3)$$

设  $\alpha = (I_{rd}, I_{rq})$ ,  $\beta = (\psi_{rd}, \psi_{rq})$ , 则有

$$\cos \theta = \frac{I_{rd}\psi_{rd} + I_{rq}\psi_{rq}}{\sqrt{I_{rd}^2 + \psi_{rd}^2} \sqrt{I_{rq}^2 + \psi_{rq}^2}} \quad (4)$$

式中:  $\theta$  为转子磁链与转子电流夹角;  $\alpha$  为转子电流

d-q 轴夹角;  $\beta$  为转子磁链 d-q 轴夹角;  $I_{rd}$  为转子电流 d 轴分量;  $I_{rq}$  为转子电流 q 轴分量;  $\psi_{rd}$  为转子磁链 d 轴分量;  $\psi_{rq}$  为转子磁链 q 轴分量。

转子磁链向量与转子电流向量是否垂直, 可通过判断该夹角余弦值是否大于 0 来进行。

## 2 转子电流最小化直接转矩控制

### 2.1 电机运行状态简介

直接转矩控制通过操纵空间开关电压向量实现磁链、转矩、转速的控制。若保持转子电流和转子磁链空间向量始终成垂直状态, 须判断转子磁链的旋转方向, 并选择合适的开关电压向量, 动态调整转子磁链, 使其正转或逆转, 保持与转子电流成  $90^\circ$ 。转子磁链与电机同向旋转时, 电机处于亚同步运行状态; 转子磁链与电机逆向旋转时, 电机处于超同步运行状态。

### 2.2 亚同步运行时转子电压对转子电流位置的影响

亚同步运行时, 当转子电流向量滞后转子磁链向量  $90^\circ$ , 施加一个与转子磁链向量夹角小于  $90^\circ$  的转子电压向量, 将使转子电流向量与转子磁链向量的夹角小于  $90^\circ$ ; 而施加一个与转子磁链向量夹角大于  $90^\circ$  的转子电压向量, 将使转子电流向量与转子磁链向量的夹角大于  $90^\circ$ 。因此通过施加合适的转子电压空间向量能够使转子电流向量与转子磁链向量相互垂直。

如图 3 所示, 将转子磁链按空间向量的旋转方向分为  $S_1 \sim S_6$  6 个区段。为了使转子电流空间向量与转子磁链空间向量垂直, 每个区段可以在转子电压向量  $U_1 \sim U_6$  之间选用 2 个, 一个用来减小转子磁链与转子电流之间的夹角; 另一个用来增大夹角, 轮流控制以实现转子磁链空间向量和转子电流空间向量垂直, 保持了转子电流为最小值。

每个转子电压空间向量对应逆变器一组开关状态。图 4 绘出了转子磁链在 a、b、c 3 轴的投影,

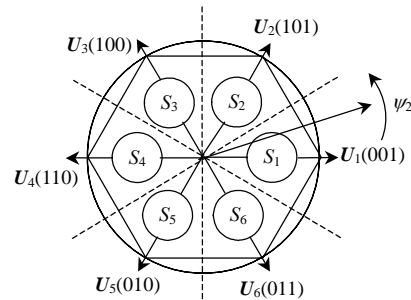


图 3 亚同步时转子电压向量和转子磁链向量

Fig. 3 Rotor voltage vector and flux linkage space vector diagram at sub-synchronization speed

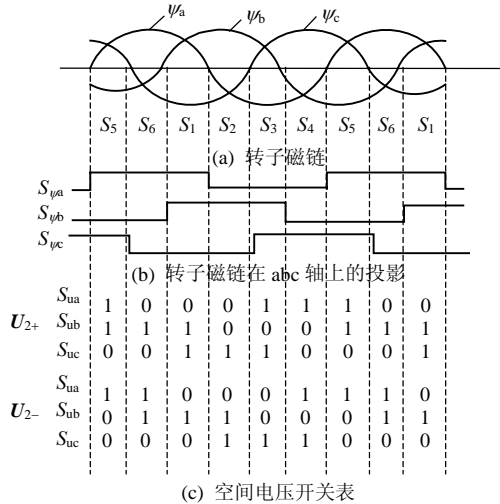


图 4 转子电压开关状态选择

Fig. 4 Selection on switch of rotor voltage vector

通过磁链的过零点来确定它们所需施加的电压空间向量。

图 4 中  $\psi_a$ 、 $\psi_b$ 、 $\psi_c$  及  $S_{\psi a}$ 、 $S_{\psi b}$ 、 $S_{\psi c}$  分别代表三相转子磁链值和转子磁链空间向量在 a、b、c 3 轴上投影的开关状态，当磁链向量在 a 轴上的投影值大于零时为  $S_{\psi a}=1$ ，投影值小于零时为  $S_{\psi a}=0$ ，b、c 轴亦如此。 $S_{ua}$ 、 $S_{ub}$ 、 $S_{uc}$  分别代表转子逆变器三相桥臂开关状态， $U_{2+}$  代表使转子电流与转子磁链向量夹角增加的转子电压空间向量， $U_{2-}$  代表使转子电流与转子磁链向量夹角减小的转子电压空间向量。

从图 4 可以推出亚同步时逆变器功率开关器件的开关状态与磁链开关状态的关系，得到对应的开关电压选择表，如表 1 所示。

表 1 亚同步工况下转子磁链与转子电压向量  
Tab. 1 Rotor flux-linkage and rotor voltage vector at sub-synchronization speed

区段	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
$U_{2+}$	$U_5$	$U_6$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$
$U_{2-}$	$U_6$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$

区段的判别通过转子磁链空间向量在 a、b、c(对称三相坐标轴)3 个投影轴的投影过零点来确定。当转子磁链空间向量在 a 轴上的投影从负过零变正瞬间，转子磁链从  $S_1$  区段过渡到  $S_2$  区段，相应的电压空间向量变为  $U_3$  和  $U_4$ ，以此类推。

2.3 超同步运行时转子电压对转子电流位置的影响

由电机学磁场旋转理论可知：电机的定子磁链和转子磁链同步旋转，超同步运行时，转子本体的转速大于定子磁链的旋转速度，所以转子磁链的旋转速度与转子旋转方向相反。双馈电机直接转矩控制以转子坐标为基准，因此施加的转子电压空间向量应使磁链反转。

功率器件的开关状态、磁链开关状态与亚同步时的分析方法相同，由此推出在超同步时，开关状态选择如表 2 所示。

表 2 超同步工况下转子磁链与转子电压向量  
Tab. 2 Rotor flux-linkage and rotor voltage vector at sup-synchronization speed

区段	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$
$U_{2+}$	$U_5$	$U_6$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$
$U_{2-}$	$U_6$	$U_1$	$U_2$	$U_3$	$U_4$	$U_5$

3 仿真分析

3.1 转子电流最小化方法系统结构

双馈电机定子采用未经过优化的直接转矩控制，转子采用前面介绍的电流最小化直接转矩控制方法。系统定、转子侧均使用转速、转矩、磁链三环控制方案，见图 5。图中  $T_e^*$ 、 $n^*$  分别为电机转矩给定信号及转速给定信号。

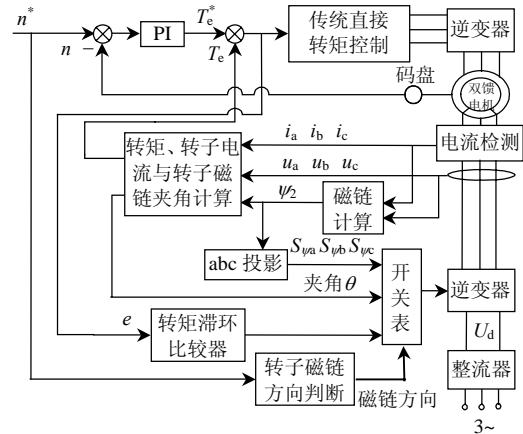


图 5 转子电流最小化方法系统结构

Fig. 5 System structure of minimize rotor current

在亚同步状态下，电机转速低于给定值时速度调节器输出增加，通过拉大定、转子磁链间的夹角增大转矩。当给定转矩大于实际转矩时，定子逆变器输出零电压向量，定子磁链停止旋转，减小磁通角，使电机电磁转矩下降。在超同步状态下，当电机转速低于给定转速时，定子侧的控制方式与亚同步状态相同，此时由于转子磁链的旋转方向变为顺时针方向，应施加顺时针方向的电压向量；当给定转矩大于实际转矩时，转子施加逆时针方向的电压向量。

3.2 转子电流最小化方法仿真分析

利用 1 台双馈电机进行仿真实验。仿真条件如下：电机在转速给定值为 600 r/min，负载为 10 N·m 的条件下启动，并在  $t=0.25$  ms 时给定转速为 1500 r/min，系统仿真总时间为 0.5 s。

图 6 是未采用转子电流最小化方法时双馈驱动系统的机械特性及定、转子电流曲线。图 7 是采用

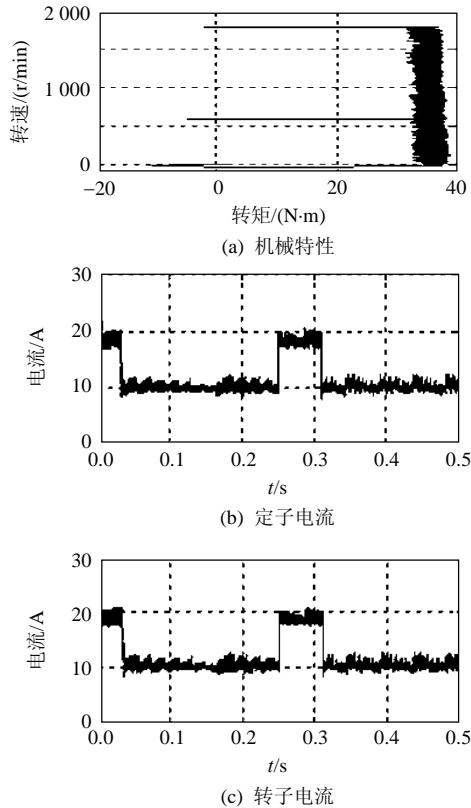


图6 双馈运行直接转矩控制系统仿真结果

Fig. 6 Simulating results of double-fed direct torque control system

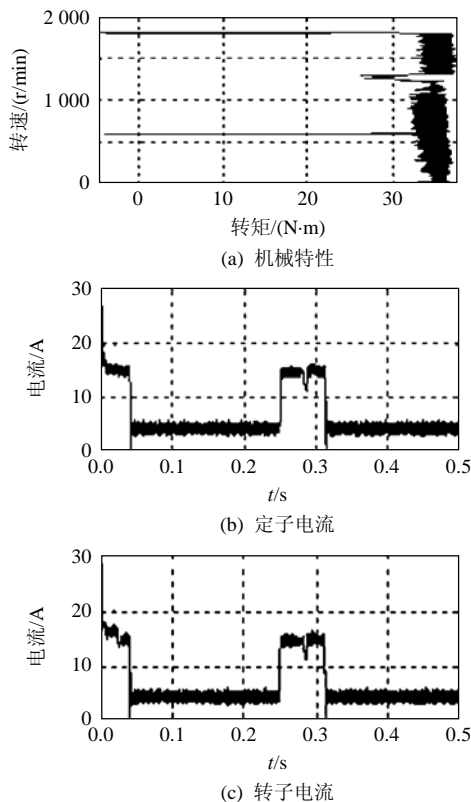


图7 转子电流最小化控制方法仿真结果

Fig. 7 Simulation results of minimize the rotor current

转子电流最小化后系统的响应曲线。从图6和7的对比中可以看出: 转子电流最小化方法在获得与传

统直接转矩控制方案同样的机械特性和调速性能的同时, 降低了定子侧和转子侧的电流。

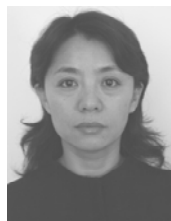
## 4 结论

本文提出的定、转子双侧直接转矩控制转子电流最小化控制方案能够降低定子电流和转子电流, 降低电机的铜耗、逆变器的容量和系统驱动成本, 提高能量利用效率。仿真结果证明了该控制策略的有效性。

## 参考文献

- [1] Herschdorfer J. Theory of the double field induction motor[J]. Archivfure lectrotechnik, 1932(26): 620-625.
- [2] Baghzouz Y, Azam M. Harmonic analysis of slip power recovery drives[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1992(28): 50-56.
- [3] Vicatos M S, Tegopoulos J A. Steady state analysis of a doubly-fed induction generator under synchronous operation[J]. IEEE Trans Energy Conversion, 1989(4): 495-501.
- [4] 魏巍, 李兴源, 李青芸, 等. 基于空间脉宽调制控制技术的双馈风力发电机动态性能研究[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 124-129. Wei Wei, Li Xingyuan, Li Qingyun, et al. Study on dynamic performance of doubly-fed wind turbine based on space pulse width modulation control[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 124-129(in Chinese).
- [5] Zhou D S. Experimental evaluation of a rotor flux oriented control algorithm for brushless doubly-fed machines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1997, 12(1): 72-78.
- [6] 张文娟, 高勇, 杨媛. 双馈异步发电机的不同目标优化控制[J]. 电网技术, 2009, 33(7): 109-114. Zhang Wenjuan, Gao Yong, Yang Yuan. Different objectives optimal control for doubly-fed induction generator[J]. Power System Technology, 2009, 33(7): 109-114(in Chinese).
- [7] 吴胜, 周理兵, 黄声华, 等. 双馈电机的交/直/交控制[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 146-151. Wu Sheng, Zhou Libing, Huang Shenghua, et al. Study of doubly-fed induction machine with AC/DC/AC converter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 146-151(in Chinese).
- [8] 秦涛, 吕跃刚, 徐大平. 采用双馈机组的风电场无功功率控制技术[J]. 电网技术, 2009, 33(2): 105-110. Qin Tao, Lü Yuegang, Xu Daping. Reactive power control of wind farm adopting doubly-fed induction generators[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 105-110(in Chinese).
- [9] Vicatos M S, John A. A doubly-fed induction machine differential drive model for automobiles[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(6): 225-230.
- [10] 秦小平, 王克成. 感应电动机的双馈调速和串级调速[M]. 北京: 机械工业出版社, 1990: 36-79.
- [11] 张新燕, 王维庆. 风力发电机并网后的电网电压和功率分析[J]. 电网技术, 2009, 33(17): 130-134. Zhang Xinyan, Wang Weiqing. Analysis on voltage and power of power grid connected with wind turbine generators[J]. Power System Technology, 2009, 33(17): 130-134(in Chinese).
- [12] Zhang X, Qu W L. A novel compensation method of stator flux estimation in low speed region[C]. Electrical Machines and Systems, Beijing, China, 2003.

- [13] 高景德. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993: 618.
- [14] 梁亮, 李建林, 许洪华. 电网故障下双馈感应式风力发电系统的无功功率控制策略[J]. 电网技术, 2008, 32(11): 70-73.  
Liang Liang, Li Jianlin, Xu Honghua. Reactive power control strategy for doubly-fed induction wind power generation system under fault in power network[J]. Power System Technology, 2008, 32(11): 70-73 (in Chinese).
- [15] Vicatos M S, Tegopoulos J A. Doubly-fed induction machine differential cascade part I: configuration and analysis in the steady state[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999, 14(9): 361-366.
- [16] Murphy J M D. Doubly-Fed induction machine differential cascade part II: Verification by test[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(9): 367-372.
- [17] Vicatos M S, Tegopoulos J A. A doubly-fed induction machine differential drive model for automobiles [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(2): 225-230.
- [18] Depenbrock M. Direct self control (DSC) of inverter-fed induction machines[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 1998, 13(3): 420-429.
- [19] Nik I N R, Mohamed Y A H. An improved stator flux estimation in steady-state operation for direct torque control of induction machines[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(1): 110-117.
- [20] 杨树平. 混合动力汽车双馈电机能流分析及优化控制[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.



丁惜瀛

收稿日期: 2010-03-17。

作者简介:

丁惜瀛(1964—), 女, 硕士, 教授, 研究方向为电力电子与电力传动、电动汽车电机控制等,  
E-mail: xiyding@163.com;

王优胤(1988—), 男, 本科, 研究方向为电动汽车电机控制;

杨树平(1978—), 男, 硕士, 研究方向为电动汽车电机控制;

王健(1985—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电动汽车电机控制。

(责任编辑 王晔)