

基于 Buck 变换器的无刷直流电机转矩控制仿真*

张巍 李刚 奚培锋

(1.上海理工大学机械工程学院 上海 200093; 2.上海市智能电网需求响应重点实验室 上海 200063)

摘要: 无刷直流电动机(BLDCM)存在转矩脉动的突出缺点,提出了一种基于直流环节电压控制和模糊 PID 控制器的新型混合控制策略,以抑制无刷直流电机的转矩脉动。电路拓扑包含功率因数校正降压转换器和逆变器。降压转换器通过控制直流电路电压来降低换向转矩脉动,使用模糊 PID 控制器和脉冲宽度调制(PWM)技术的逆变器在导通区域提供适当的电流。Buck 变换器降低了通过控制直流环节电压换向转矩脉动,逆变器使用模糊 PID 和 PWM 技术提供导通区域的电流。该方法能够消除传导区转矩脉动,削弱换相区转矩脉动,仿真结果表明,该策略具有功率因数校正功能,可有效抑制转矩脉动,提升电机运行的鲁棒性。

关键词: 无刷直流电机;转矩脉动;Buck 电路;模糊 PID

中图分类号: TN710 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.99

Torque control simulation of Brushless DC motor based on Buck converter

Zhang Wei Li Gang Xi Peifeng

(1. School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China;

2. Shanghai Key Laboratory of Smart Grid Demand Response, Shanghai 200063, China)

Abstract: The brushless DC motor (BLDCM) has the outstanding shortcomings of torque ripple. A new hybrid control strategy based on DC link voltage control and fuzzy PID controller is proposed to suppress the torque pulse of the brushless DC motor. The circuit topology contains power factor corrected buck converter and inverter. The buck converter reduces commutation torque ripple by controlling the DC circuit voltage, and an inverter using a fuzzy PID controller and pulse width modulation (PWM) technology provides the appropriate current in the conduction region. The Buck converter reduces the commutation torque ripple by controlling the DC link voltage. The inverter uses the fuzzy PID and PWM technology to provide the current in the conduction region. This method can eliminate the torque ripple in the conduction region and weaken the torque ripple in the commutation region. The simulation results show that the strategy has a power factor correction function, which can effectively suppress torque ripple. Improve the robustness of motor operation.

Keywords: brushless DC motor; torque ripple; buck circuit; fuzzy PID

0 引言

由于低惯性,高转矩,高可靠性和快速响应,无刷直流电动机(BLDCM)广泛用于家庭和工业应用,然而,BLDCM 具有转矩波动的突出缺点,其可以增加振动和噪音,阻碍 BLDCM 获得高性能并限制其在高精度情况下的应用。所以 BLDCM 的转矩脉动已成为一个重要的研究点。对于 BLDCM 来说,转矩波动主要有 2 种:换相转矩波动和传导转矩波动。换相转矩波动是由于在换相时刻非换相相电流变化引起的转矩波动。文献[1]提出脉冲宽度调制(PWM)

不同,BLDCM 非导通相产生电流,并引起电机的电磁转矩脉动产生。文献[2]提出了在换相期间插入一个缓冲期,在此期间将下一个导通相提前导通,通过对缓冲区进行 PWM 调节来减小转矩脉动的思想,但忽略了电阻对换相电流的影响,文献[3]提出了通过控制换相过程开通角来抑制 BLDCM 脉动,根据转速和电流的变化实时计算开通角,适用于电动机不同转速情况下的运行,但是计算比较繁琐,不易精确控制。文献[4-6]研究了非理想反电势对转矩脉动的影响,并通过调节电机电流抑制转矩波动。传导转矩脉动是由于 PWM 斩波的存在,使得相电流发生变化而带

来的转矩波动。BLDCM 的一种新颖的降低换向转矩脉动策略是基于 Z 源逆变器提出,Z 源逆变器对于 BLDCM 驱动系统具有降压和升压的功能,通过 Z 源逆变器和有源电路引入的矢量调节电压占空比,减小换向转矩脉动,但电压调整速度较慢,文献[7-10]提出了基于准 Z 源网络的 BLDCM 控制策略通过所需电压将换向转矩脉动在较宽的速度范围内降低电源,但它也需要电源选择电路。

本文提出了一种 Buck 变换器电路和基于模糊 PID 控制的逆变器相结合的方法来抑制转矩脉动。在换相期间,由 Buck 变换器提供的期望直流电压驱动换向电流以相同的速率变化,换向转矩脉动大大减小,因为当断开和导通相位以相同的电流速率变化时,基本上没有转矩脉动。在导通区域,降压转换器和逆变器提供满足速度要求的适当直流电压,使转矩保持平稳。降压转换器电路保持电压恒定,而逆变器以 PWM 调制方式调节电流。仿真结果表明,该策略可以在较宽的速度范围内大幅降低转矩脉动,具有很好的功率因数校正和直流电压调节的快速响应。

1 换相过程分析

通常情况下 BLDCM 主要由转子永磁体、定子绕组以及位置传感器组成,其中定子绕组可采用星形或三角形连接,本文以定子绕组采用星形连接的 BLDCM 为研究对象,并且假设电机的三相完全对称,三相绕组的阻抗,感抗完全相同,且三相绕组两两之间的互感相同。BLDCM 的功率电路如图 1 所示,包含直流电源、滤波电容、由开关管 T1-T6 组成的三相全桥逆变器及 BLDCM 本体。

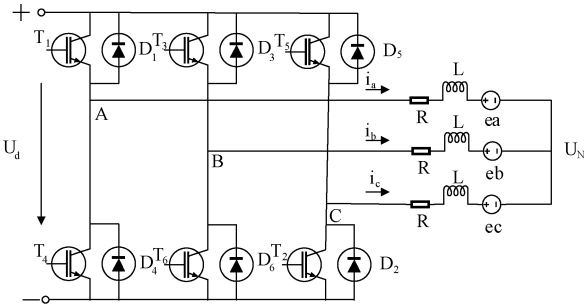


图 1 BLDCM 电路

由此可知:

$$\begin{bmatrix} U_A \\ U_B \\ U_C \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & L \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} U_N \\ U_N \\ U_N \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: U_A, U_B, U_C 为电机三相端电压; U_N 为三相绕组的 中性点电位; R 为三相等效阻抗,包括了相绕组阻抗,开关管 阻抗以及传输电路中的阻抗; L 为三相等效感抗,则电磁转

矩如式(2)所示

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} \quad (2)$$

式中: T_e 是电磁转矩; ω 是电机机械角速度。

由于反电动势是恒定的,设定幅值为 E_m 。当电机工 作在三相六状导通方式时,受到绕组电感的影响,电流换相 时有延迟,以功率开关管由 T1 导通变为 T3 导通,T2 一直 处于导通转态,电路由 A 相导通切换为 B 相绕组导通为 例,换相过程中:

$$e_a = e_b = -e_c = E_m \quad (3)$$

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4)$$

则换相期间的电磁转矩为:

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega} = -\frac{2E_m i_c}{\omega} \quad (5)$$

由式(5)可知,换相期间电磁转矩与非换相相电流成正 比,即非换相电流保持恒定,则可消除换相转矩脉动。

下面以 A 相换到 B 相为例,可得到式(6)。

$$\begin{cases} 0 = R i_a + L \frac{d i_a}{d t} + e_a + U_N \\ U_d = R i_b + L \frac{d i_b}{d t} + e_b + U_N \\ 0 = R i_c + L \frac{d i_c}{d t} + e_c + U_N \end{cases} \quad (6)$$

由式(6)得到

$$U_N = \frac{1}{3}(U_d - E_m) \quad (7)$$

由于电路中的电阻非常小,可以忽略不计,由此可 得式(8)。

$$\begin{cases} \frac{d i_a}{d t} = -\frac{U_d + 2E_m}{3L} \\ \frac{d i_b}{d t} = \frac{2(U_d - 2E_m)}{3L} \\ \frac{d i_c}{d t} = -\frac{U_d - 4E_m}{3L} \end{cases} \quad (8)$$

由式(6)可得:

$$U_d = 4E_m \quad (9)$$

将(9)带入式(8)可得:

$$\frac{d i_a}{d t} = -\frac{d i_b}{d t} \quad (10)$$

由此可知如果 $U_d = 4E_m$, 则换向期间转矩脉动将为 0,并且换向相和开关相电流将在换向区域中以相同的速率 变化。

2 对 BLDCM 提出的控制策略

2.1 Buck 转换器的 BLDCM 驱动系统

本文提出了一种带 Buck 转换器的 BLDCM 驱动系统 的电路,如图 2 所示,它由 Buck 转换器和电压源逆变器组 成。降压转换器执行电压调节和功率因数校正功能,电压

源逆变器执行换向和电流调节功能。

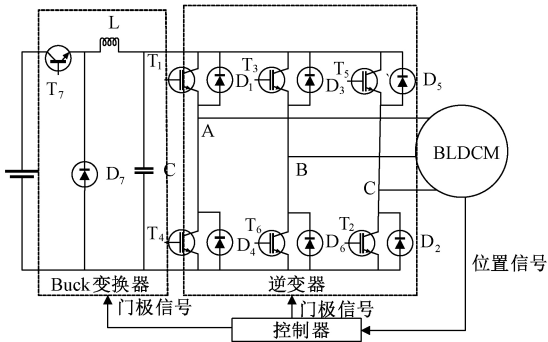


图 2 Buck 变换器的 BLDCM 驱动系统

在换向期间,根据以上分析,动态直流电压对 BLDCM 的要求是 $U_d = 4E_m$ 与 BLDCM 的速度成正比,在此间隔的电压调整任务将 Buck 变换器,同时执行功率因数校正功能,此时电压源逆变器只起换向作用,即它相当于一个电子换向器

典型的电阻负载下的 Buck 电路拓扑结构如图 3 所示。假设输入电压为 V_d , 输出电压为 V_o , 开关管开关周期为 T_s , 一个周期内的开通时间为 t_{on} , 占空比为 D 。则根据 Buck 变换器的工作原理,其输入电压与输出电压之间的关系如式(11)所示。

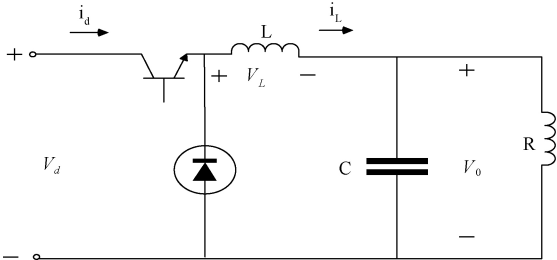


图 3 Buck 变换器的原理

$$V_o = \frac{1}{T_s} \int_0^{T_s} V_o(t) dt = \frac{1}{T_s} \left(\int_0^{t_{on}} V_d dt + \int_{t_{on}}^{T_s} 0 dt \right) = \frac{t_{on}}{T_s} V_d = DV_d \quad (11)$$

BLDCM 通常由交流电源通过二极管桥式整流器和直流电容器提供,但它会产生较大的输入电流谐波,降低输入交流电源的功率因数。因此, BLDCM 驱动需要一个有源功率因数校正电路,从而去除谐波。Buck 变换器适用于输入电压高于输出电压的情况,而且在实际应用中已得到广泛的应用。本文提出的 Buck 变换器(如图 2 所示)结合直流电压调节和功率因数校正,提供与 BLDCM 速度成比例的所需直流电压,同时提高输入交流电源的功率因数。

在传导区域,所提出的 Buck 变换器在输入交流电源处继续改善功率因数,输出电压继续为 $4E_m$ 。电压源逆变器以速度环中的模糊 PID 控制器和电流环中的 PI 控制器为

基础,在双闭环控制策略中调节电机转速,从而使输出的电压为稳态电压。

本文提出的控制策略结合 Buck 变换器和模糊 PID 控制的逆变器可以提高电压响应的速度,减少电压源逆变器的操作频率和产生适当的脉冲宽度,从而使电机几乎未受死区影响,更能适应电机的非线性特征来保持电机的平稳运行。

2.2 模糊 PID 控制

PID 控制器是一种经典的闭环反馈控制,它纠正了所需值与实际值之间的误差,在现代工业控制领域中普遍应用的优势在于操作简单,易于实现,功能清晰,效果好于多数线性系统^[11]。最好的控制系统应该有满意的性能,例如小的上升时间、小的超调和小的稳态误差。然而,传统的 PID 控制器难以实现良好的性能,在非线性、时变和耦合系统以及复杂系统中具有参数不确定性。同时,传统的 PID 控制器不能改变参数以适应操作条件^[12]。由于 BLDCM 驱动器是一个非线性的、时变的耦合系统,本文将模糊 PID 控制器应用于 BLDCM 的逆变器中,用模糊逻辑自适应调整 PID 参数。模糊 PID 控制器的配置如图 4 所示。

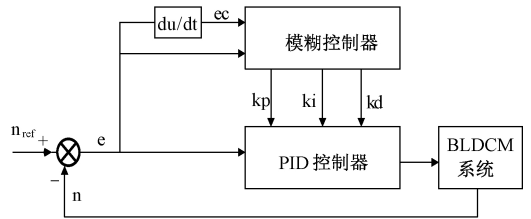


图 4 模糊 PID 控制器配置

模糊控制器的增益参数 k_p, k_i 和 k_d 是根据误差和差分误差在线调整的。模糊控制器主要由两个输入端和三个输出端组成,其中误差 e 及其差分误差 e 是输入, PID 控制器的增益参数 k_p, k_i 和 k_d 是输出。模糊控制器可以根据经验、输入输出数据和模糊集理论建立的 PID 参数与 BLDCM 驱动响应特性之间的非线性关系自适应地调整 PID 参数。模糊控制器主要由 4 个部分组成:模糊界面,知识库,决策单元和解模糊界面^[13]。

模糊界面通过缩放因子和隶属函数将清晰的输入数据转换为适当的模糊集。知识库包括数据库和模糊控制规则库 2 种。在模糊规则库的辅助下,决策单元将输入模糊集合转换为输出模糊集合,这个去模糊化接口将模糊集的输出转化为实际控制值。

在本文中,输入和输出变量的范围是 $[-3, 3]$, 输入和输出变量的模糊化域都被分为 7 个模糊集:负大(NB),负中(NM),负小(NS),零(ZO),正小(PS),正中(PM)和正大(PB)^[14]。

根据系统的特性和专家经验得到模糊控制规则。在 Mamdani 控制规则和快速响应的情况下进行,其中 $e(k)$ 是

误差的第 k 个时刻, $\Delta e(k)$ 是第 k 个时刻的误差变化。Mamdani max-min 方法用于模糊推理, 加权平均法用于去

模糊化^[15]。所以得到关于 k_p, k_i, k_d 3 个参数各自整定的控制规则表, 如表 1 所示。

表 1 模糊 PID 控制规则表

e	ec						
	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	K _p , K _i , K _d						
NB	PB/NB/PS	PB/NM/ZO	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	PS/ZO/NM	ZO/ZO/PB
NM	PB/NB/PS	PM/NM/ZO	PM/NM/NB	PM/NS/NM	PS/NS/NB	ZO/ZO/NS	ZO/ZO/ZO
NS	PB/NM/ZO	PM/NM/NS	PS/NS/NM	PS/NS/NM	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PS/ZO
ZO	PB/NS/ZO	PS/NS/NS	PS/ZO/NS	ZO/ZO/NS	NS/PS/NS	NS/PM/NS	NM/PM/ZO
PS	PS/NS/ZO	PS/NS/ZO	ZO/ZO/ZO	NS/PS/ZO	NS/PS/ZO	BM/PM/ZO	NM/PM/ZO
PM	ZO/ZO/PB	ZO/ZO/PS	NS/PS/PS	NS/PS/PS	NM/PM/PS	NM/PB/PS	NB/PB/PM
PB	ZO/ZO/PM	NS/ZO/PM	NS/ZO/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PS	NB/PB/PS

3 仿真结果

在 Matlab/Simulink 环境下, 严格遵照电气原理搭建速度模糊自适应 PID 控制器, 其仿真模型如图 5 所示。

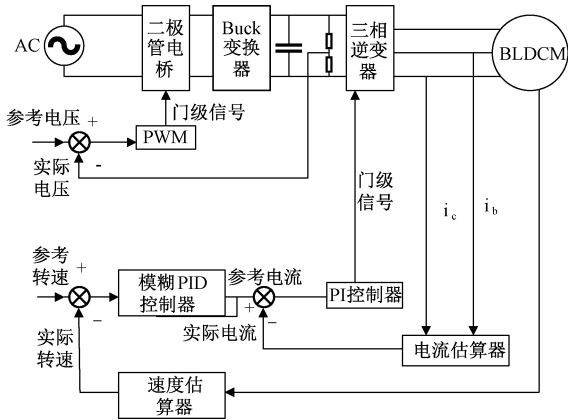


图 5 速度模糊自适应 PID 控制器

直流电路电压由降压变换器调节与 PWM 控制。电机转速来源于转子位置, 由霍尔效应传感器提供。一个双闭环的速度和电流是应用于驱动系统, 采用模糊 PID 控制器控制速度和生成参考电流, 用 PI 控制器调整相电流, 表 2 为进行仿真设定的电机参数。

表 2 电机参数

参数名称	数值
额定转速 $n/(r/min)$	2 000
等效电感 L/H	0.024
额定电流 i/A	1.3
额定电压 U_N/V	220
额定功率 P_N/W	40
额定转矩 $T_N/(N\cdot m)$	1.5
极对数 p	2

转速 $n=2\ 000\ r/min$, 负载转矩为 $1.5\ N\cdot m$, 电机分别在普通 PID 控制和模糊 PID 控制下的转速仿真波形如图 6 所示。

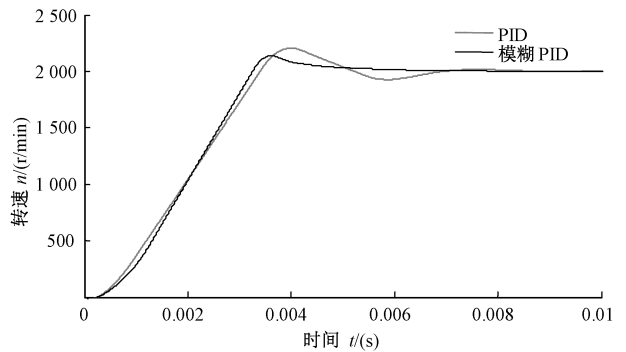


图 6 PID 控制系统和模糊 PID 的转速响应

转速 $n=2\ 000\ r/min$, 负载转矩为 $1.3\ N\cdot m$, 普通 PID 控制和模糊 PID 的转矩仿真波形如图 7 和图 8 所示

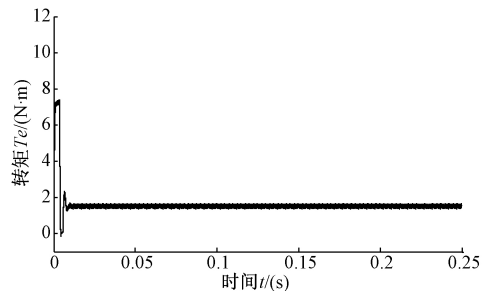


图 7 PID 转矩稳态响应

转速 $n=2\ 000\ r/min$, $0.05\ s$ 负载转矩由 $1.5\ N\cdot m$ 变为 $0.75\ N\cdot m$, 普通 PID 和模糊 PID 控制的转矩仿真波形如图 9 和图 10 所示。

从图 6 可知, Buck 变换器结合模糊 PID 控制系统转速

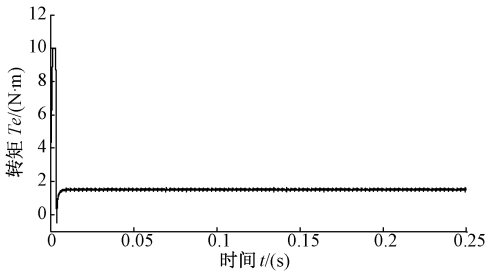


图 8 模糊 PID 转矩稳态响应

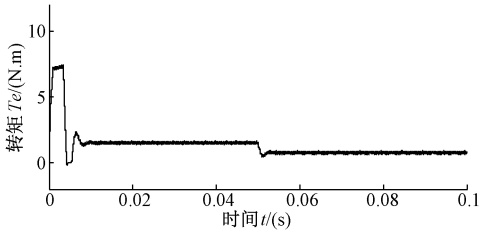


图 9 PID 控制系统转矩动态响应

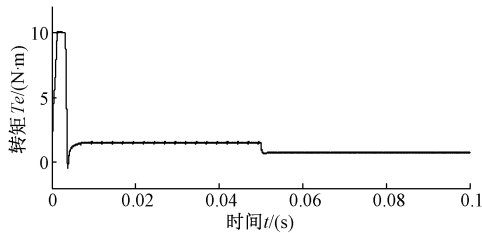


图 10 模糊 PID 系统转矩动态响应

表 3 PID 控制和模糊 PID 控制比较

方法	速度响应时间 t/s	转矩波动率/%	转矩动态响应时间 t/s
PID 控制	0.008	25	0.010
模糊 PID 控制	0.005	10	0.005

的上升速度更快,时间更短达到稳态,且响应速度更快而且超调量也很小。

由图 7 和图 8 对比可得到,相对传统 PID 系统,Buck 变换器结合模糊控制的 PID 系统,转矩的响应速度更快,而且转矩脉动也相对小一些。

由图 9 和图 10 对比可知在 0.05 s 时突然减小负载转矩使其有了一定的震荡,相对于传统 PID 系统转矩稳态响应,Buck 变换器结合模糊 PID 响应速度更快能在较短的时间内恢复到稳定状态,而且转矩脉动相对更小。

如表 3 所示,经过以上分析仿真结果可以看出,相对传统 BLDCM 的 PID 控制系统,Buck 变换器结合模糊 PID 控制的 BLDCM 具有更好的响应特性,而且转矩脉动也相对较小。

4 结 论

本文提出一种将直流环节电压控制与 PWM 相结合的新型混合控制策略去抑制转矩脉动的技术。一个降压转换器被添加在逆变器前面,它提供了适当的直流环节电压,是三相电动势的 4 倍。降压转换器提供的期望电压可以有效抑制换相过程中产生的转矩脉动。在传导区域中,输出电压为 Buck 变换器保持不变,逆变器在模糊 PID 控制下用 PWM 方法提供电机的期望电流。逆变器的占空比为 1/2 左右,所以逆变器可以在频率较低下工作。本文所提出的方法可以抑制转矩脉动,扩大 BLDCM 驱动系统的转速范围,校正功率因数,降低开关频率。仿真结果表明,该系统具有良好的转速、转矩稳定特性,转矩脉动小,具有较强的抗干扰能力,对以后的电机控制具有一定的参考价值。

参考文献

- [1] 周美兰,高肇明,吴晓刚,等.五种 PWM 方式对直流无刷电机系统换相转矩脉动的影响[J].电机与控制学报,2013,17(7):15-21.
- [2] 石坚,李铁才.无刷直流电动机低转矩脉动超前换相控制方法[J].中国电机工程学报,2012,32(30):112-117.
- [3] CARLSON R, LAJOIE-MAZENC M, FAGUNDES J C D S. Analysis of torque ripple due to phase commutation in brushless DC machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1992, 28(3): 632-638.
- [4] 朱剑波.无刷直流电机控制系统的仿真与分析[J].国外电子测量技术,2013,32(12):25-30.
- [5] 盛田田,杨晓琳,顾聪,等.一种使用重叠换相法的无刷直流电机平均转矩控制[J].中国电机工程学报,2015,35(15):3939-3947.
- [6] ZHANG X F, LU Z Y. A new BLDC motor drives method based on Buck converter for torque ripple reduction [C]. Proceedings of 2006 CES/IEEE 5th International power Electronics and Motion Control Conference. IEEE, 2006: 1-4.
- [7] 阚志忠,张海存.基于双向 Buck-Boost 的无刷直流电动机转矩脉动抑制[J].微特电机,2010,38(1):40-44.
- [8] 陈基锋,张晓峰,吴小康,等.基于统一式的无刷直流电机换相转矩脉动抑制新策略[J].电工技术学报,2011,26(4): 51-56.
- [9] 夏鲲,朱琳玲,曾彦能,等.基于准 Z 源网络的永磁无刷直流电机换相转矩脉动抑制方法[J].中国电机工程学报,2015,35(4):971-978.
- [10] 夏鲲,杨益华,杨淑英,等.基于 Z 源变换器的无刷直流电机转矩脉动抑制[J].系统仿真学报,2013,25(11): 2540-2545.

- [11] 刘慧博,王静,吴彦合.无刷直流电机模糊自适应 PID 控制研究与仿真[J].控制工程,2014,21(4):583-587.
- [12] 梁新涛.基于模糊控制的永磁同步电机控制研究[J].机电信息,2014(33):114-116.
- [13] 原杰,赵永瑞,周茂浩,等.永磁同步电机模糊 PID 控制建模与仿真[J].系统仿真技术,2013,9(4):361-365.
- [14] 杜荣华,朱昭,舒雄,等.无刷直流电机自适应模糊 PID 控制及仿真[J].长沙理工大学学报(自然科学版),2014,11(2):60-66.
- [15] 吕东阳,王显军.基于模糊 PID 控制的电机转台伺服系

统[J].计算机应用,2014,34(S1):166-168,185.

作者简介

张巍(通信作者),博士,讲师,主要研究方向为能源互联网、电力系统规划与优化运行。

E-mail:24482427@qq.com

李刚,硕士在读研究生,主要研究电机运动控制方向。

E-mail:254475204@qq.com

奚培锋,高级工程师,智能电网电力系统规划与优化运行。

E-mail:2325981@qq.com