

计及退磁分析的电驱重构型车载充电系统<sup>\*</sup>

仇琳皓 於 锋 张宇豪

(南通大学电气与自动化学院 南通 226019)

**摘 要:** 电驱重构型车载充电(EDROC)系统通过将驱动系统组件复用为充电系统,分时执行电驱和充电功能,能够有效降低成本和充电设备的体积占用。然而,在高温工况下 EDROC 系统中的永磁同步电机(PMSM)存在不可逆退磁的风险。鉴于此,本文通过分析电机在不同条件下退磁程度,进而提出电机在充电工况下安全运行边界。首先,分析 EDROC 系统在直流充电和边跑边充模式下的绕组电流;其次,建立电机不可逆退磁模型;然后,针对不同充电模式,详细分析不同温度和充电电流下电机退磁程度,并以此建立电机在充电工况下的安全运行边界;最后,基于一台 2 kW 实验样机开展实验,验证本文不可逆退磁模型的准确性以及安全运行边界对 EDROC 系统安全运行的必要性。

**关键词:** 电驱重构型车载充电系统;退磁分析;电动汽车;六相电机

**中图分类号:** TN701 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8010

## Electric-drive-reconstructed onboard charger with demagnetization analysis

Qiu Linhao Yu Feng Zhang Yuhao

(School of Electrical Engineering and Automation, Nantong University, Nantong 226019, China)

**Abstract:** The electric-drive-reconstructed onboard charger (EDROC) can effectively reduce costs and occupy the volume of charging equipment by reusing the drive system components into charging system and executing the electric drive and charging functions in a time-sharing manner. However, there is a risk of irreversible demagnetization of permanent magnet synchronous motors in EDROC systems at high temperatures. In view of this, this paper analyzes the degree of demagnetization of the motor under different conditions, and proposes the safe and stable operating conditions of the motor under charging conditions. Firstly, the winding currents of the EDROC system under DC charging mode and in-motion charging mode are analyzed. And then, the irreversible demagnetization model of the motor is established. Moreover, for different charging modes, detailed analysis is conducted on the demagnetization degree of the motor under different temperatures and charging currents. Based on this, the indispensable conditions for safe and stable operation of motor under charging conditions is established. Finally, experiments were carried out based on a 2 kW laboratory prototype to verify the accuracy of the irreversible demagnetization model and the necessity of the conditions for safe and stable operation of the EDROC system.

**Keywords:** EDROC; demagnetization analysis; electric vehicle; six-phase machine

## 0 引 言

相较于传统燃油车,电动汽车作为一种可缓解能源短缺和生态污染问题的交通工具,面临续航困难的问题<sup>[1-3]</sup>。虽然可以通过安装充电桩等非车载充电系统实现高功率充电,但在充电桩数量不足和分布不均等限制因素的制约下,电动汽车的推广受限<sup>[4]</sup>。另一种解决方案是在电动汽车内部配备一套车载充电系统,使其能够连接电源插座直接进行充电。与非车载充电系统相比,车载充电系统更加便捷,

有更广阔的应用前景。

为解决传统车载充电系统体积大、成本高和结构复杂等缺点,有文献提出了一种电驱重构型车载充电(electric-drive-reconstructed onboard charger, EDROC)系统的设计,通过将电驱系统组件复用为充电系统,分时执行电驱和充电功能,进而实现功率变换器功能的集成并提高车载设备的利用率,能够有效降低成本和充电设备的体积占用<sup>[5-6]</sup>。此后,EDROC 系统成为研究热点,多种拓扑结构相继被提出<sup>[7-9]</sup>。

EDROC 系统中,电机绕组既可用于驱动电机,也可被重构为网侧滤波电感或储能电感。相较于传统运行系统,EDROC 系统多功能的实现势必导致电机电流复杂化,尤其在高温情况下存在不可逆退磁的风险,致使电机磁链减小,EDROC 系统控制效果降低,对电动汽车的安全造成隐患,同时电机寿命减短,影响电动汽车的使用年限。近年来,国内外学术领域对各类永磁电机的退磁展开了深入研究。Kim 等<sup>[10]</sup>分别研究了内嵌式和表贴式永磁无刷直流电机的退磁特性,并对其静态和动态性能进行比较;Jeong 等<sup>[11]</sup>对表贴式永磁同步电机(permanent magnet synchronous machine, PMSM)的退磁效应进行了分析,深入研究了退磁故障的检测方法。然而,该相关研究仅针对电驱模式。有团队对三相内嵌式 PMSM 在单相充电和三相充电工况下的退磁效应进行了分析,深入研究了定子电流产生的脉动磁场和旋转磁场对永磁体(permanent magnet, PM)退磁的影响,但研究只局限于交流充电模式<sup>[12]</sup>。同时,相较于三相电机,六相电机通过重构绕组结构,消除基波磁通产生的电磁转矩<sup>[13]</sup>,成为 EDROC 系统的首选。总体而言,现有文献缺乏对六相电机直流充电以及边跑边充模式 PM 退磁的详尽分析,同时尚未有文献对运行中的电动汽车如何避免退磁进行描述分析,完善该研究点对提高 EDROC 系统的安全性至关重要,为后续的研究工作提供技术支持。

本文针对以上研究存在的问题,通过分析直流充电以及边跑边充模式下流经电机绕组的电流,并结合有限元法(finite element method, FEM),分析其不可逆退磁。通过分别对比两种模式下温度和充电电流对电机退磁的影响,评估 EDROC 系统充电模式中的退磁风险,并提出电机在充电工况下的安全运行边界以提高电动汽车的安全性与可靠性,最后,通过实验验证电机退磁模型的准确性。

## 1 工作模式与拓扑的分析

本节基于 EDROC 系统,分析不同运行模式下系统的拓扑结构。如图 1 所示,六相 EDROC 系统由一个六相 PMSM,一个六相两电平逆变器、一个电池、一个电容、两组模式切换开关、一个直流源和一组车顶光伏板(vehicle roof photovoltaic panels, VRPPs)电机组成,包括 3 种运行模式:1)电驱模式,2)直流充电模式,3)边跑边充模式。已有文献对电驱模式的拓扑结构展开了详细分析<sup>[14]</sup>,本文不再赘述。

### 1.1 直流充电模式

当电动汽车处于直流充电模式时,图 1 中开关  $S_1$  闭合,直流电网被连接在六相 PMSM 两个中性点之间,两套三相绕组并联作为网侧电感,两套逆变器共享驱动信号,为电池充电。此时,该电路可以等效为串联的两个 Boost 电路,用于调节充电电流和电压,其简化电路如图 2 所示。图中下标  $X=A, B, C$ , 下标  $Y=U, V, W$ 。直流充电时,仅直流电流流经电机绕组,其电流表达式为:

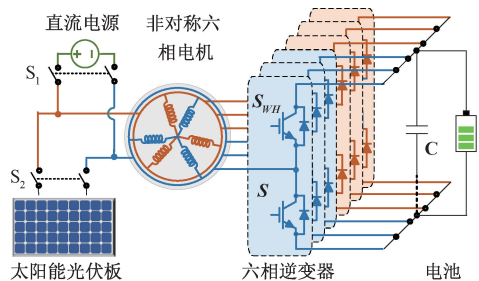


图 1 EDROC 系统电路拓扑

Fig. 1 Circuit topology of the EDROC system

$$i_s^T = \frac{1}{3} [-I_{dc} \quad -I_{dc} \quad -I_{dc} \quad I_{dc} \quad I_{dc} \quad I_{dc}] \quad (1)$$

式中:  $I_{dc}$  为直流源输出电流。

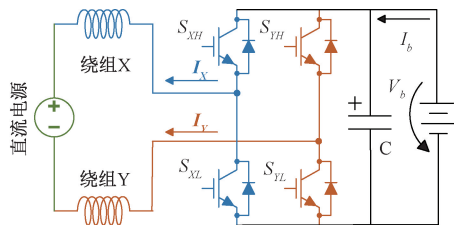


图 2 直流充电模式的简化电路

Fig. 2 Simplified circuit of DC charging mode

### 1.2 边跑边充模式

图 1 中开关  $S_2$  闭合时,电动汽车处于边跑边充模式,VRPPs 被连接在六相 PMSM 两个中性点之间,此时,VRPPs 等效为直流电源。由于 VRPPs 的接入,  $0_1$  轴电流回路形成,并且 VRPPs 的输出电流等于  $0_1$  轴电流的负 3 倍,因此可以通过控制  $0_1$  轴电流控制 VRPPs 的输出电流,进而实现 VRPPs 最大功率点跟踪(maximum power point tracking, MPPT)控制。此时,VRPPs 的输出电能驱动电机的同时还给电池充电。六相逆变器在运行过程中既是电机的驱动器,也是 VRPPs MPPT 运行的调节器。其简化电路与直流充电模式的简化电路一致。在边跑边充模式下,光伏板输出的直流电流和用于驱动电机的电驱电流同时流经电机绕组,其电流表达式为:

$$i_s = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} -I_{PP} \\ -I_{PP} \\ -I_{PP} \\ I_{PP} \\ I_{PP} \\ I_{PP} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} I_A \\ I_B \\ I_C \\ I_U \\ I_V \\ I_W \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中:  $I_{PP}$  为光伏板输出电流;  $I_X$  为  $X$  相电枢电流,  $X=A, B, C, U, V, W$ 。

## 2 不可逆退磁的分析计算

### 2.1 不可逆退磁分析

图 3 所示为 PM 的退磁曲线,在外加退磁场  $H_a$  的作

用下,永磁材料工作点  $a$  移动到膝点  $K$  以下,即使  $H_a$  减小或完全消除,后续工作点也不会沿原  $B-H$  曲线,而是沿回复线  $L_a$  移动,点  $a$  成为新的膝点。只要后续施加的外磁场不超过  $H_a$ ,PM 工作点就会继续沿  $L_a$  移动,反之,则产生更低的膝点和回复线。此时膝点以上退磁曲线已被永久消除,PM 出现不可逆退磁<sup>[15-16]</sup>。显然,不可逆退磁会导致 PM 的整体磁感应强度减小,为了更好地分析电机的退磁程度,定义退磁系数  $D_{coe}$  为:

$$D_{coe} = B_a / B_k \quad (3)$$

其中,  $B_a$  和  $B_k$  分别为退磁前后的剩余磁化强度。 $D_{coe}$  越小,退磁越严重,当 PM 完全退磁时,  $D_{coe}$  为 0。

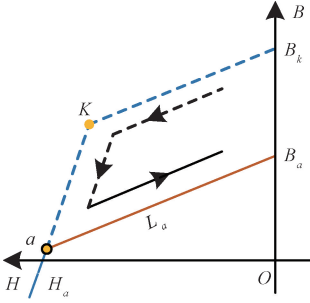


图 3 不可逆退磁曲线

Fig. 3 Irreversible demagnetization curve

PM 退磁曲线对温度敏感,基于一组描述参考温度为  $T_0$  时 PM  $B-H$  曲线的离散数据,引入参数  $B_i$ ,令  $B_i = B - \mu_0$ ,则任意温度下 PM 回复线的磁导率可以建模为<sup>[17]</sup>:

$$\mu(T) = \left. \frac{\partial B_i(H, T)}{\partial H} \right|_{H=0} + \mu_0 = \frac{P(T)}{Q(T)} \mu_i(T_0) + \mu_0 \quad (4)$$

其中,  $B_i(H, T)$  曲线可由双曲正切函数充分描述:

$$B_i(H, T) = P(T) \left( b_0 \tanh \left( \frac{H + Q(T) H_{ci}(T_0)}{Q(T) h_0} \right) + b_1 \tanh \left( \frac{H + Q(T) H_{ci}(T_0)}{Q(T) h_1} \right) \right) \quad (5)$$

$$P(T) = 1 + \alpha_1 (T - T_0) + \alpha_2 (T - T_0)^2 \quad (6)$$

$$Q(T) = 1 + \beta_1 (T - T_0) + \beta_2 (T - T_0)^2 \quad (7)$$

式中:  $\mu_0$  为真空磁导率,等于  $4\pi \times 10^{-7}$  H/m。  $H_{ci}(T_0)$  为温度为  $T_0$  时 PM 的本征矫顽力,  $\alpha_1$ 、 $\alpha_2$ 、 $\beta_1$  和  $\beta_2$  为 PM 对应的系数,可根据供应商提供的数据表获得。  $b_0$ 、 $b_1$  和  $h_0$ 、 $h_1$  可根据参考温度  $T_0$  下的 PM  $B-H$  曲线通过非线性拟合得出。

本文研究的电机 PM 材料为 NdFeB-35SH,在不同温度下的  $B-H$  曲线如图 4 所示。由图可知,温度越高,膝点横坐标的绝对值越小,过膝点后曲线的斜率越大。在高于  $120^\circ\text{C}$  的温度下, NdFeB-35SH 会发生较明显的不可逆退磁。因此,为了研究高温情况下的退磁现象,将最高温度设定为  $140^\circ\text{C}$  和  $150^\circ\text{C}$ 。

## 2.2 温度对不可逆退磁的影响

为了研究温度对不可逆退磁的影响,设定电机运行于

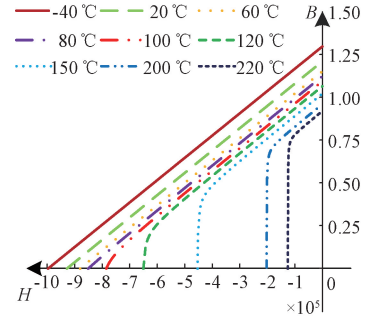


图 4 不同温度下 NdFeB-35SH 的  $B-H$  曲线

Fig. 4  $B-H$  curves of NdFeB35SH magnets at different temperatures

边跑边充模式,电驱电流为 9 A,转速为 1 200 rpm,VRPPs 的输出电流为 18 A。采用通过反电动势幅值来间接观察退磁程度的方法研究边跑边充模式<sup>[10]</sup>,其结果如图 5 所示。从图 5 中可以看出温度越高,反电动势幅值越小,表明温度越高,退磁程度越深。虽然这种方法能反应电机整体磁场的变化,但无法获取 PM 各部分的磁场强度,也无法直接量化退磁程度,因而不直观。

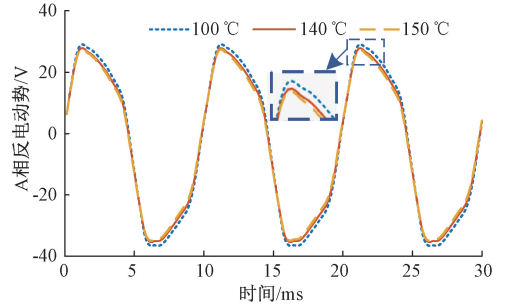


图 5 边跑边充模式在不同温度下的反电动势

Fig. 5 Back EMF at different temperatures under in-motion charging mode

采用截取瞬时状态下的部分 PM,观察其磁通密度进行分析的方案研究边跑边充模式<sup>[12]</sup>,其结果如图 6 所示。图中数据显示,所截取点磁通密度随温度升高而降低,表明温度越高,退磁程度越大。然而,此方法仅反映了所截取部分的磁通密度变化情况,忽略了其余 PM,结果存在一定的片面性。此外,该方法仅能展示磁场的变化,无法直接量化退磁程度。

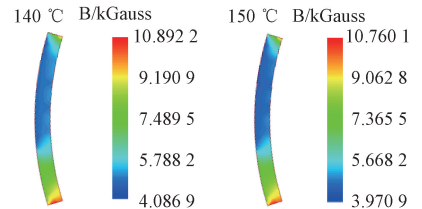


图 6 边跑边充模式在  $140^\circ\text{C}$  和  $150^\circ\text{C}$  下的磁密云图

Fig. 6 Flux density distribution at  $140^\circ\text{C}$  and  $150^\circ\text{C}$  under in-motion charging mode

采用对比电机整体最低退磁系数的方法,研究边跑边充模式的退磁现象,其结果如图 7 所示。图中 PM 显示结果为运行工况下截取的 6.14 ms 时的瞬时退磁结果,图例显示结果为整个运行过程中退磁系数的变化范围。由图可知温度越高,最低退磁系数越小,PM 越容易发生退磁。并且对比于以上两种观察方式,退磁系数量化了退磁程度,可以直接看出整个运行过程中电机整体的退磁情况,同时也给出了 PM 各部分的退磁程度,使退磁分析更加全面和直观。

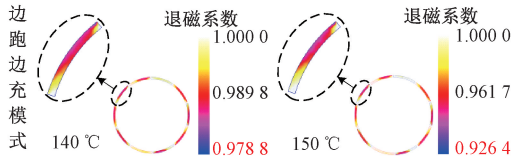


图 7 边跑边充模式在 140 °C 和 150 °C 下的退磁结果  
Fig. 7 Demagnetization results at 140 °C and 150 °C under in-motion charging mode

由于 PM 各个部分的瞬态退磁程度不同,采用最低退磁系数进行研究,还便于比较运行于不同模式电机的退磁情况。电驱模式和直流充电模式分别在 140 °C 和 150 °C 下的退磁结果如图 8 所示。其中,电驱模式中电驱电流幅值为 9 A,转速为 1 200 rpm,直流充电模式下直流电源的输出电流为 18 A。对比图 7 和 8 三种运行模式在不同温度下的最低退磁系数同样可得,温度越高,退磁程度越高。电驱模式和直流充电模式最低退磁系数的变化量相差不大,在 0.01 左右,约为边跑边充模式的 1/5。相较于电驱与直流两种模式,边跑边充模式的退磁程度更严重。这些现象表明绕组电流的大小会影响不可逆退磁的程度,且边跑边充模式的退磁更易受温度的影响。因此,在研究边跑边充模式时,需更加关注温度的变化。

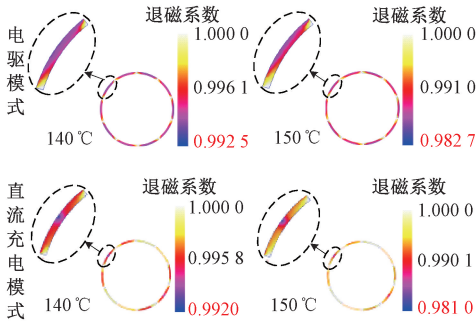


图 8 电驱模式和直流充电模式在 140 °C 和 150 °C 下的退磁结果  
Fig. 8 Demagnetization results at 140 °C and 150 °C under propulsion mode and DC charging mode

### 2.3 电流对不可逆退磁的影响

在温度 150 °C 下,分别对边跑边充和直流充电两种模式通入大小不同的充电电流,其最低退磁系数的变化趋势如图 9 所示。其中,边跑边充模式下的电机转速为 1 200 rpm,

电驱电流幅值为 9 A。由图可得,PM 的退磁程度随着充电电流的增大而加深。同时,边跑边充模式的斜率约为直流充电模式的 5 倍,表明边跑边充模式的退磁更容易受到充电电流的影响。相较于直流充电,由于额外的电枢电流流经绕组,边跑边充模式的整体退磁程度更严重,因而在高温情况下应当限制充电电流的大小以避免不可逆退磁。

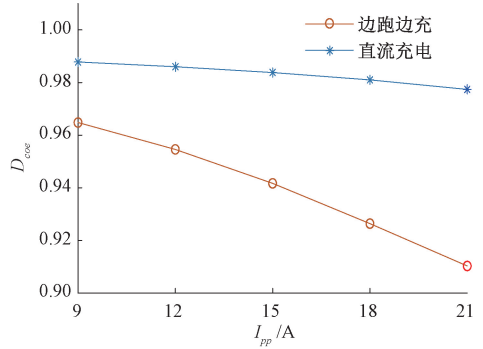


图 9 边跑边充模式和直流充电模式在不同充电电流下的最低退磁系数

Fig. 9 The lowest demagnetization coefficient for the in-motion charging mode and DC charging mode at different charging mode

### 2.4 安全运行边界的分析

由图 4 可知 100 °C 时电机处于临界不可逆退磁情况,以 100 °C 下电机未运行时的最低退磁系数为 100% (未发生退磁) 作为基础,对比电驱模式下,电驱电流为 9 A 时,不同温度下的最低退磁系数占临界退磁状态的最低退磁系数的百分比,其比值如图 10 所示。图 10 表明正常电驱时温度大于 90 °C,电机存在退磁现象。为避免 EDROC 系统运行过程中电机出现退磁现象,在温度超过 90 °C 时,立即停止充电并进行降温处理,以保证电机正常运行。

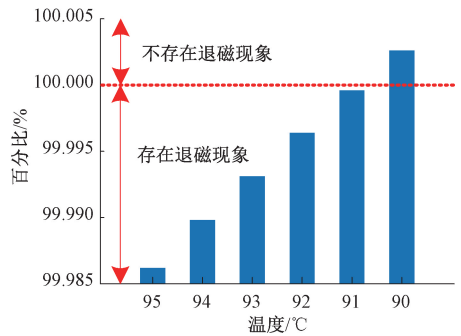


图 10 电驱模式在不同温度下最低退磁系数占临界退磁状态的百分比

Fig. 10 The percentage of the lowest demagnetization coefficient to the critical demagnetization state in electric drive mode at different temperatures

同样以 100 °C 下电机未运行时的最低退磁系数为 100% (未发生退磁) 作为基础,研究不同温度下 EDROC 系统在边跑边充模式下 VRPPs 的最大输出电流  $I_{pp}$ ,如图 11



所示。为防止电机出现退磁,在 85 ℃ 时,应限制输出电流小于 6 A。其余温度下 VRPPs 最大输出电流的大小如表 1 所示。

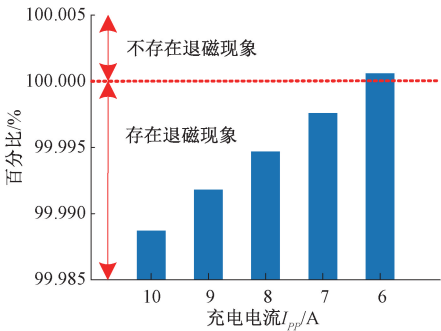


图 11 电驱模式在 85 ℃ 下最低退磁系数占临界退磁状态的百分比

Fig. 11 Percentage of minimum demagnetization coefficient to critical demagnetization state in electric drive mode at 85 ℃

表 1 不同温度下 VRPPs 的最大输出电流

Table 1 Maximum output current of VRPPs at different temperatures

温度/℃	VRPPs 的最大输出电流/A
89	2
88	3
87	4
86	5
85	6

3 实验分析

3.1 控制策略

直流充电和边跑边充两种充电模式的统一控制策略如图 12 所示<sup>[18]</sup>。该控制策略主要包括通过电池恒压恒流与 VRPPs MPPT 控制来调节  $i_{01}$  轴电流为电池充电,同时采用传统的矢量控制(field-oriented control,FOC)来调节机器转速。当系统通过直流电网对电池充电时,电池恒压恒流控制输出作为相电流参考值,当系统通过 VRPPs 对电池充电时,采用自适应扰动观测法(perturb and observe,P&O)实现 MPPT 控制,将其控制输出与电池恒压恒流充电控制输出中的较小值作为电机相电流的参考值。

3.2 实验平台

为验证不可逆退磁模型的准确性以及电动汽车建立安全运行边界的必要性,搭建六相永磁 EDROC 系统实验样机与测试平台,如图 13 所示。采用额定功率为 2 kW 的六相 PMSM 作为电动汽车的牵引电机,其关键参数如表 2 所示。采用两个额定 36 V/300 W 的光伏板(photovoltaic panels,PPs)串联模拟 VRPPs,采用最高 100 V 的直流电源模拟直流电网,利用磁粉制动器产生电机负载,利用锂电池

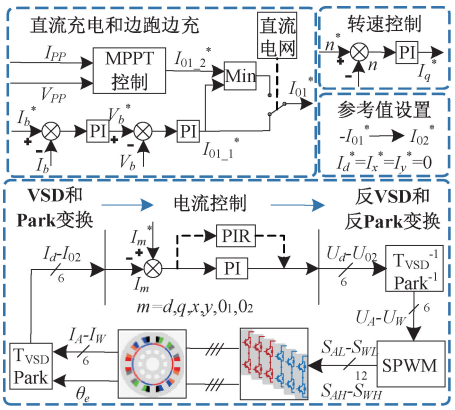


图 12 EDROC 系统控制框图

Fig. 12 Controller diagram of the EDROC system

储存电能。六相电压源逆变器(six-phase-voltage-source-inverter,SP-VSI)由 6 个 IGBT 模块组成。此外,采用电流传感器和电压传感器分别测量电流和电压,利用示波器显示各个数据的波形。基于上述实验平台对直流充电、边跑边充两种运行模式的退磁进行实验验证。



图 13 实验测试平台

Fig. 13 Experimental test platform

表 2 六相 PMSM 的主要参数

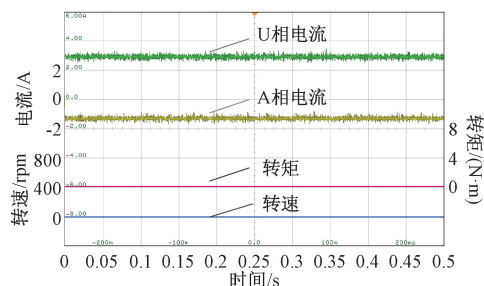
Table 2 Main parameters of six phase PMSM

参数	数值
额定功率/W	2 000
额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )	2 000
极对数	5
d 轴电感/mH	1.18
q 轴电感/mH	1.13
相电阻/Ω	0.3
定子磁链/Wb	0.082

3.3 模拟退磁实验结果

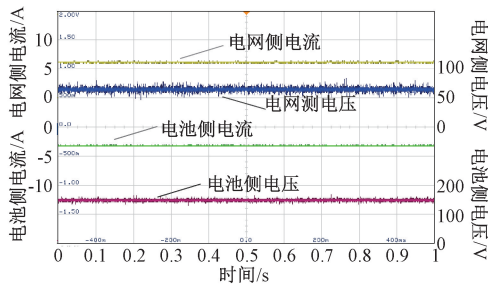
为验证 EDROC 系统在退磁工况下的性能,本文通过对  $d$  轴电流的控制,减小电机磁性来模拟退磁。图 14 为直流充电模式模拟退磁的实验结果。如图 14(a)所示,在充电过程中,A、B、C 三相和 U、V、W 三相流经的电流方向相反,转矩可以忽略不计,表明电机基本保持静止状态。如图 14(b)所示,直流电源的输出电压为 60 V,输出电流为

6 A, 电池侧电压为 150 V, 电流显示为 -3 A, 表示正在充电, 充电电流跟随设定值 3 A。如 14(c) 所示,  $i_d$  为 0.9 A,  $i_q$ 、 $i_x$  和  $i_y$  的值基本被控为零。综上所述, 模拟退磁工况下, EDROC 系统可以运行于直流充电模式。



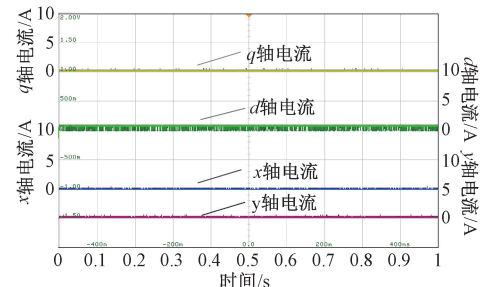
(a) A、U 相电流、转矩与电机转速

(a) A、U phase current, electromagnetic torque, and motor speed



(b) 电网测电流与电压、电池侧电流与电压

(b) Grid current and voltage, battery side current and voltage



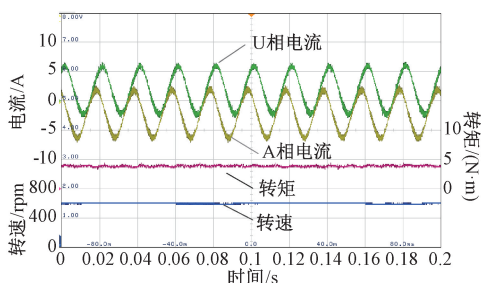
(c) q、d、x 与 y 轴电流

(c) q、d、x and y-axis currents

图 14 模拟退磁工况下直流充电模式实验波形

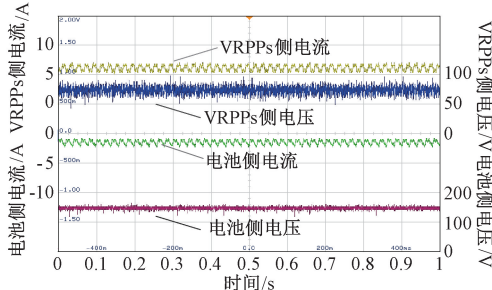
Fig. 14 Experimental waveform of DC charging mode under simulated demagnetization condition

图 15 为边跑边充模式模拟退磁的实验结果。实验过程中 VRPPs 的环境条件为  $1\ 050\ \text{W/m}^2$ 、 $25\ ^\circ\text{C}$ 。如图 15(a) 所示, 电机转速为 600 rpm, 负载为  $4\ \text{N}\cdot\text{m}$ , A、U 相电流相位差  $30^\circ$ , 且因输入的充电电流而产生直流偏置。如图 15(b) 所示, 在边跑边充运行过程中, VRPPs 输出电压为 60 V, 输出电流为 6 A, 电池侧电流为负, 表明电池正在充电, 电流为 2 A, 同时保持充电电压为 150 V, 基本满足充电要求。此外, 如图 15(c) 所示,  $i_d$  为 0.9 A,  $i_x$  和  $i_y$  的值基本被控为零, 子平面电流  $i_q$  可以跟踪参考值, 基本满足电驱运行的要求。综上所述, 模拟退磁工况下, EDROC 系统可以运行于边跑边充模式。



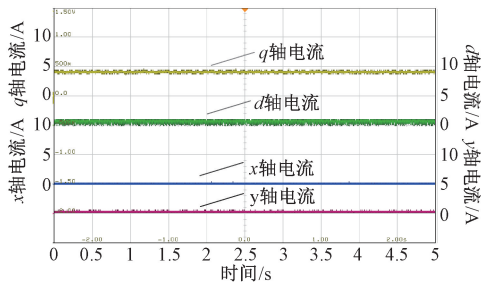
(a) A、U 相电流、电磁转矩与电机转速

(a) A、U phase current, electromagnetic torque, and motor speed



(b) VRPPs 输出电流与输出电压、充电电流与充电电压

(b) VRPPs output current and output voltage, charging current and charging voltage



(c) q、d、x 与 y 轴电流

(c) q、d、x and y-axis currents

图 15 模拟退磁工况下边跑边充模式实验波形

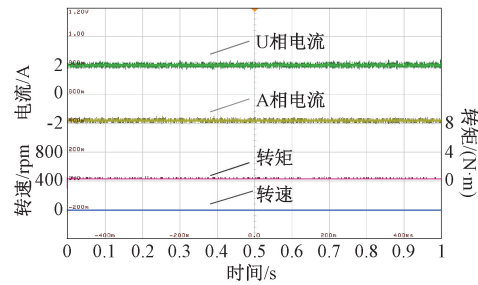
Fig. 15 Experimental waveform of in-motion charging mode under simulated demagnetization condition

### 3.4 安全运行边界内实验结果

为验证退磁对 EDROC 系统的影响, 在相同外在条件下, 对安全运行边界内直流充电和边跑边充模式开展实验, 并与模拟退磁工况对比。

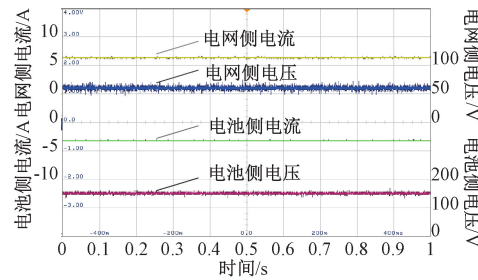
图 16 所示为安全运行边界内直流充电模式的实验结果, 对比退磁工况下, 图 16(b) 和 (c) 所示的电网和电池侧电压电流与子平面电流基本不变, 表明 EDROC 系统性能基本无变化。但对比图 16(a) 与图 14(a) 可得, 模拟退磁工况下绕组 A、U 相电流出现偏置, 表明退磁对电机绕组内电流产生影响, 电机内出现磁场变化。长时间运行于退磁工况影响电机的稳定性, 威胁 EDROC 系统安全。

图 17 为安全运行边界内边跑边充模式的实验结果。如图 17(a) 和 (c) 所示, 安全运行边界内边跑边充模式波形基本与模拟退磁工况下一致, 但从图 17(b) 中可以明显看出安全运行工况下 VRPPs 的输出电流和电池侧充电电流更加平稳, 而模拟退磁工况下出现了明显纹波, 表明



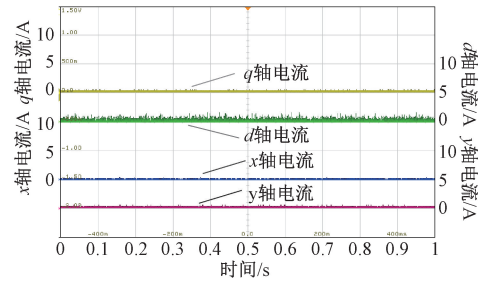
(a) A、U相电流、转矩与电机转速

(a) A、U phase current, electromagnetic torque, and motor speed



(b) 电网侧电流与电压、电池侧电流与电压

(b) Grid current and voltage, battery side current and voltage



(c) q、d、x与y轴电流

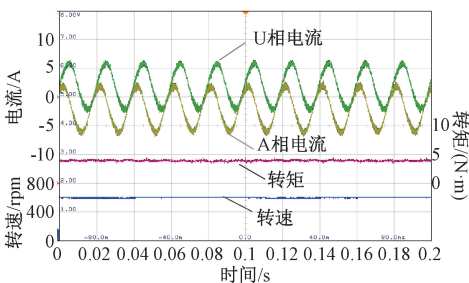
(c) q、d、x and y-axis currents

图 16 安全运行边界内直流充电模式实验波形

Fig. 16 Experimental waveform of DC charging mode under safe and stable operating conditions

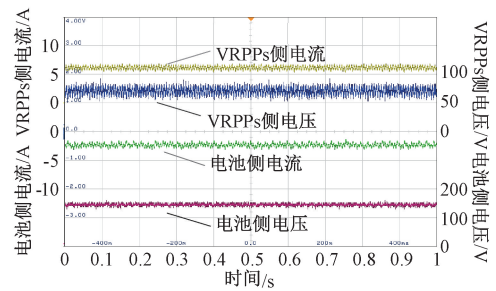
EDROC 系统控制性能降低,退磁对 EDROC 系统稳定性造成威胁。

对比图 16 中 4 幅图,直流充电模式电池侧充电电流基本不变,而边跑边充模式出现明显变化,可以得出退磁对运行于边跑边充模式的 EDROC 系统影响更大,且退磁影响电机电流,与退磁模型结论一致。基于上述实验对比,有必要为 EDROC 系统建立安全运行边界。



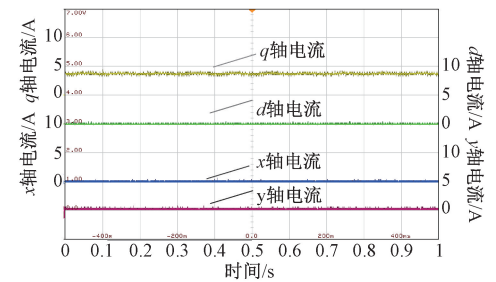
(a) A、U相电流、电磁转矩与电机转速

(a) A、U phase current, electromagnetic torque, and motor speed



(b) VRPPs输出电流与输出电压、充电电流与充电电压

(b) VRPPs output current and output voltage, charging current and charging voltage



(c) q、d、x与y轴电流

(c) q、d、x and y-axis currents

图 17 安全运行边界内边跑边充模式实验波形

Fig. 17 Experimental waveform of in-motion charging mode under safe and stable operating conditions

## 4 结 论

本文结合 FEM 研究了直流充电和边跑边充两种模式下的 EDROC 系统的不可逆退磁,基于温度和电流对 PM 不可逆退磁的影响,提出电机在充电工况下的安全运行边界。仿真结果表明,温度与电流和 PM 的不可逆退磁程度有关。此外,在相同条件下,边跑边充模式的退磁程度高于其他模式,并且更易受温度和电流的影响。在此基础上,为保证电动汽车电机正常运行,即边跑边充模式下电机不发生退磁,给出安全运行边界:在温度超过 90℃时,运行于边跑边充模式的 EDROC 系统应立即停止充电并进行降温处理,同时在温度低于 90℃的高温情况下,应限制 VRPPs 输出电流的大小。通过实验验证了电机退磁模型的准确性以及建立安全运行边界对 EDROC 系统安全运行的必要性。然而,由于实验器材的限制,本文提出的安全运行边界并没有开展高温情况下的实验验证,且未考虑采用六相电机的电动汽车在三相充电,单相充电等充电模式下的退磁,为后续的研究提供了新的思路。

## 参考文献

- [1] 於锋,程勋慧,王尧. 基于虚拟同步机技术的六相电驱复用型车载充电系统[J]. 电子测量技术, 2023, 46(23): 20-26.
- YU F, CHENG X H, WANG Y. Six-phase electric-drive-reutilized onboard charger based on virtual synchronous machine technology [J]. Electronic Measurement Technology, 2023, 46(23): 20-26.

- [2] 於锋,殷琪皓,佟明昊,等. 电动汽车用多相电驱重构型车载充电系统关键技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(13): 5281-5296.  
YU F, YIN Q H, TONG M H, et al. Review of key technologies of multi-phase machine-based electric-drive-reconstructed onboard chargers for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(13): 5281-5296.
- [3] 王义,刘欣,高德欣. 电动汽车大功率充电设备的多段恒流充电方法[J]. 电子测量技术, 2021, 44(24): 20-25.  
WANG Y, LIU X, GAO D X. Multi-stage current charging method for electric vehicle high-power charging equipment [J]. Electronic Measurement Technology, 2021, 44(24): 20-25.
- [4] 李在港,李文正,舒征宇,等. 基于紧迫性需求的电动汽车协调充电优化策略[J]. 国外电子测量技术, 2024, 43(5): 42-51.  
LI Z G, LI W ZH, SHU ZH Y, et al. Coordinated charging optimization strategy of electric vehicles based on urgent demand [J]. Foreign Electronic Measurement Technology, 2024, 43(5): 42-51.
- [5] GAO J L, SUN W, JIANG D, et al. Improved operation and control of single-phase integrated on-board charger system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(4): 4752-4765.
- [6] SHARMA S, AWARE M, BHOWATE A. Integrated battery charger for EV by using three-phase induction motor stator windings as filter[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2020, 6(1): 83-94.
- [7] TONG M, CHENG M, HUA W, et al. A single-phase on-board two-stage integrated battery charger for EVs based on a five-phase hybrid-excitation flux-switching machine [J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2020, 69(4): 3793-3804.
- [8] WANG S, LEHN W P. A 3-phase electric vehicle charger integrated with dual inverter drive[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2021, 8(1): 82-97.
- [9] RAHERIMIHAJA H J, ZHANG Q F, NA T P, et al. A three-phase integrated battery charger for EVs based on six-phase open-end winding machine [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 12122-12132.
- [10] KIM K H, HUR J. Dynamic characteristic analysis of irreversible demagnetization in SPM-and IPM-type BLDC motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2016, 53(2): 982-990.
- [11] JEONG J, LEE H, ORVIZ M, et al. Detection of trailing edge PM demagnetization in surface PM synchronous motors [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2023, 59(3): 3390-3399.
- [12] LI W L, FENG G D, LAI CH Y, et al. Demagnetization analysis of interior permanent magnet machines under integrated charging operation [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(5): 5204-5213.
- [13] HABIB A, SHAWIER A, ABDEI-KHALIK S M, et al. Predictive current control of six-phase IM-based nonisolated integrated on-board battery charger under different winding configurations [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(7): 8345-8358.
- [14] 刘自程,李永乐,郑泽东. 多相电机控制驱动技术研究综述[J]. 电工技术学报, 2017, 32(24): 17-29.  
LIU Z CH, LI Y L, ZHENG Z D. Control and drive techniques for multiphase machines; a review [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(24): 17-29.
- [15] 崔刚,熊斌,李振国,等. 转子温度空间分布差异诱发永磁电机局部失磁特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2437-2447.  
CUI G, XIONG B, LI ZH G, et al. Research on local demagnetization characteristics of permanent magnet motor induced by spatial distribution difference of rotor temperature[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2437-2447.
- [16] 谢颖,姜佳宁,蔡蔚,等. 表贴式高速永磁同步电机失磁故障及磁体选区渗重稀土研究[J]. 电机与控制学报, 2024, 28(2): 44-53.  
XIE Y, JIANG J N, CAI W, et al. Demagnetization failure of surface mount high speed permanent magnet synchronous motor and local infiltration of heavy rare earth[J]. Electric Machine and Control, 2024, 28(2): 44-53.
- [17] ZHANG Y, MCLOONE S, CAO W P. Electromagnetic loss modeling and demagnetization analysis for high speed permanent magnet machine[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(3): 1-5.
- [18] YU F, YIN Q H, ZHU ZH H, et al. A multi-energy interface electric-drive-reconstructed onboard charger for EVs with integrated control strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2024, 39(4): 4050-4061.

## 作者简介

仇琳皓,硕士研究生,主要研究方向为多相电驱复用型车载充电系统电磁转矩抑制。

E-mail:2312320020@stmail.ntu.edu.cn

於锋(通信作者),博士,教授,主要研究方向为新能源发电、永磁同步电机变频调速。

E-mail:yufeng628@ntu.edu.cn

张宇豪,硕士研究生,主要研究方向为太阳能电动汽车用电驱重构型车载充电系统电磁性能分析。

E-mail:2312310006@stmail.net.edu.cn