

# 家用电器永磁同步电机恒功率控制

李军学, 杜荣法, 姜 泽

(卧龙电气驱动集团有限公司, 浙江 上虞 312300)

**摘 要:** 在永磁同步电机(PMSM)无传感器控制技术的基础上,提出了家用电器 PMSM 的恒功率控制算法。计算功率后通过卡尔曼滤波得到精确的功率值,并设计具有跟踪功能的功率控制环路,自适应地实现 PMSM 的最大功率控制。完成了控制器和驱动器的设计。实际测试结果表明,该方法可使洗衣机电机保持最大功率运行。

**关键词:** 永磁同步电机; 最大功率控制; 功率控制环; 自适应控制; 弱磁控制

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)12-0049-05

doi: 10.12177/emca.2020.131

## Constant Power Control of Permanent Magnet Synchronous Motor for Household Electrical Appliances

LI Junxue, DU Rongfa, JIANG Ze

(Wolong Electric Group Co., Ltd., Shangyu 312300, China)

**Abstract:** Based on the sensorless control technology of permanent magnet synchronous motor (PMSM), a constant power control algorithm for the PMSM of household electrical appliances is put forward. In the proposed method, the calculated motor power is adjusted with Kalman filtering to achieve high precision, and a power control loop with power tracking functionality is designed, so as to adaptively realize the maximum power control of the PMSM. The design of controller and motor drive is implemented. Test results show that, with the proposed method, the washing machine motor can keep working at the maximum power status.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor; maximum power control; power control loop; adaptive control; field-weakening control

## 0 引 言

永磁同步电机(PMSM)具有高转矩密度和高功率密度等特点,并且结构简单、噪声低,因而广泛应用于高性能控制领域。在家用电器行业,如空调风机和洗衣机,PMSM 的应用越来越多,份额越来越大,年需求量超过一亿台。

对于 PMSM 来说,其高速阶段的性能是一个非常重要的技术指标。既要满足功率和转矩能力的需要,又要尽量减少设计的余量,以提高效率和

节约成本。目前家用电器电机市场基本都是采用恒转速控制策略。该方法算法简单实用,但是对电机的功率控制大多不做要求,电机的功率余量大、性能下降。因此,这种方式往往不能充分地利用电机的功率输出能力,造成不必要的浪费。

文献[1]提出 PMSM 的控制方法和控制思路;文献[2]提出用超前角的思想进行弱磁控制的方法,通过超前角来控制电机的  $d$ 、 $q$  轴电流,实现电机的弱磁控制;文献[3]提出一种 PMSM 恒功率区运行的弱磁控制方法,有效拓宽了电机调

收稿日期: 2020-07-31; 收到修改稿日期: 2020-08-24

作者简介: 李军学(1984—),男,工程师,研究方向为永磁同步电机驱动控制。

杜荣法(1972—),男,工程师,研究方向为永磁电机系统集成技术。

姜 泽(1982—),男,硕士,高级工程师,研究方向为电机与驱动控制技术、系统集成技术。

速范围,减少了电机的起动时间,提升了电机的工作效率。但是上述文献中并没有对恒功率控制的精度和最大效率进行研究,无法解决功率利用率和精度的实际问题。

针对上述问题,本文提出一种基于功率控制环的最大功率控制策略,以实现 PMSM 的功率精度控制。功率控制环路采取自适应的策略,自动调整转速和速度变化率。实际测试表明,电机能够在近似最大功率的状态下可靠运行。

## 1 PMSM 工作原理和控制方法

### 1.1 PMSM 控制方法

采用三电阻控制方式的电机控制模型如图 1 所示<sup>[4]</sup>。功率逆变部分采用 IGBT 或者 MOSFET 器件。电机模型包含电机内阻  $R$ 、反电动势  $e$  和电机电感  $L$ <sup>[1-2]</sup>。

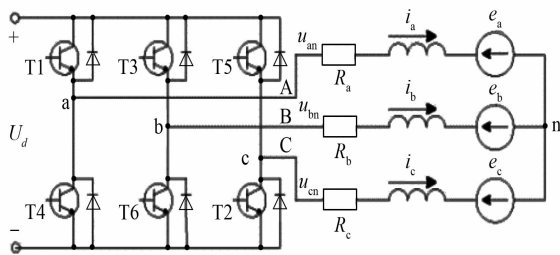


图 1 采用三电阻控制方式的电机控制模型

电机的等效电压方程<sup>[3]</sup>为

$$U_d = RI_d - \omega_{est} L_q I_q + E_d \quad (1)$$

$$E_d = U_d - RI_d + \omega_{est} L_q I_q \quad (2)$$

式中： $U_d$  为  $d$  轴施加的电压； $I_d$ 、 $I_q$  为  $d$ 、 $q$  轴电流； $\omega_{est}$  为转速； $L_d$ 、 $L_q$  为  $d$ 、 $q$  轴电感； $E_d$  为  $d$  轴感应电动势。

位置角度方程为

$$\theta_n = \theta_{n-1} + \omega_{est} T_s \quad (3)$$

式中： $\theta_n$  为转子位置； $T_s$  为控制周期。

### 1.2 PMSM 弱磁控制

PMSM 采用永磁材料励磁,在提高效率和功率密度的同时,也带来了励磁不可调节的缺点。在基速以下还可以通过提高脉宽调制(PWM)占空比、提高电压来提高转速。但是对于家用电器,例如洗衣机,其脱水转速非常高,通常达 15 000 r/min 以上,当转速达到 5 000 r/min 时,电动势即达到电机的最高值。此时占空比将达到最

大,无法通过提高电压来获得更高的转速。由文献[2]可知,在  $dq$  坐标系下,电机的等效电压公式如下:

$$U_s = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} \quad (4)$$

$$U_d = RI_d - \omega_{est} L_q I_q \quad (5)$$

$$U_q = RI_q + \omega_{est} (L_d I_d + \psi_f) \quad (6)$$

式中： $U_s$  为电机等效电压； $U_q$  为  $q$  轴施加的电压； $\psi_f$  为永磁体磁链。

由式(2)可知,当转速增大时,反电动势变大,要想继续获得更大的转速,必须抑制反电动势的增大。根据式(4)~式(6),可以通过施加反向的  $d$  轴电流  $I_d$  来减小  $U_s$ ,实现弱磁控制。

弱磁控制最常用的方法是查表法,但是此方法具有很大的缺陷:(1)只能用于恒定负载的电机系统,如压缩机、风机,而洗衣机系统的负载变化范围太大,无法通过查表方式进行;(2)弱磁控制的效率和能力无法保证。

经过研究,提出采用基于超前角控制的最大功率弱磁控制方法,通过对超前角进行调节,在保证转速的前提下,输出更大的电压  $U_s$ ,从而得到更大的输出功率。其控制原理即电压极限椭圆如图 2 所示。

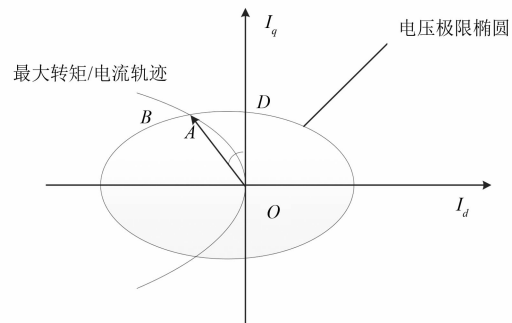


图 2 电压极限椭圆轨迹

电流 PI 调节器饱和的原因主要是定子端相电压达到了逆变器提供的最高电压,而逆变器输出的最高电压一般是由直流侧电压决定的。因此,当 PMSM 弱磁运行时, $I_d$  必然与电机端电压值和直流侧电压值有关,可以利用电机端电压控制电流超前角  $\beta$ ,构成对 PMSM 的闭环弱磁控制。基于此,可得 PMSM 超前角弱磁控制系统框图如图 3 所示。

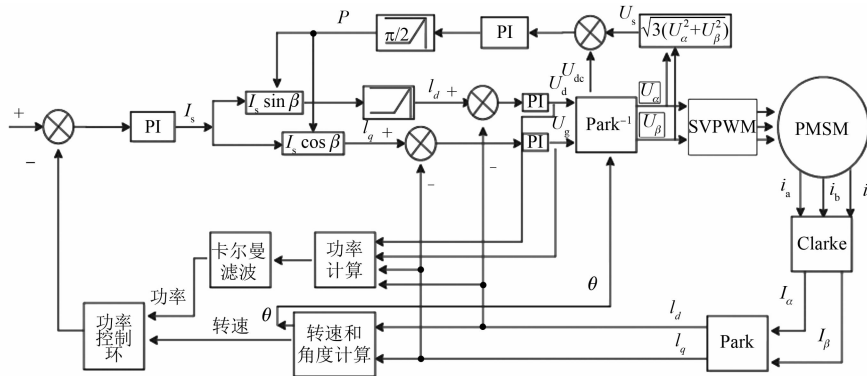


图3 PMSM超前角弱磁控制系统框图

该系统增加了一个带电压 PI 调节器的反馈环,由电机端电压和检测到的直流侧电压  $U_{dc}$  之间的偏差,通过电压 PI 调节器来控制  $\beta$ 。在弱磁时,适当增大  $\beta$ ,可以反向增加  $d$  轴电流  $I_d$ ,对气隙磁通产生去磁作用,达到弱磁扩速的目的。增大电流超前角,可以提高转速;减小电流超前角,可以降低转速。

当  $U_s$  低于  $U_{dc}$  时,由于饱和环节的作用,电压 PI 调节器处于正向饱和,输出电流超前角  $\beta$  为零,  $I_d = I_s \sin \beta$ ,  $I_s = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$ ,相当于  $I_d = 0$  控制,此时电机不进入最大功率控制。

电动机转速提高,电机端电压逐步升高,当  $U_s > U_{dc}$  时,电压 PI 调节器输入为负值,调节器开始退饱和,电流超前角  $\beta$  输出负的相位移角度,  $I_d = I_s \sin \beta$  产生负的电流分量,此时电机进入弱磁调速状态。

(3)在调速过程中,注意对  $I_d$  需有一定的限制  $I_{lim}$ 。定义最大去磁电流  $I_{d\_max} = \psi_f / L_q$ ,  $\text{abs}(I_d) < I_{d\_max}$ ;同时考虑电流沿电流极限圆达到  $I_q = 0$  时,  $I_{d\_max} = I_{lim}$ 。根据这两个条件,弱磁控制时  $I_d$  的极限值为

$$\begin{cases} I_d = I_{d\_max}, & I_{d\_max} < I_{lim} \\ I_d = I_{lim}, & I_{d\_max} > I_{lim} \end{cases} \quad (7)$$

本文中 PMSM 超前角弱磁控制系统采用数字式控制。因为控制回路中电流 PI 调节器输出的参考电压值反映了对逆变器直流侧电压的利用率,所以可以将电流 PI 调节器的输出值作为电压反馈回路的输入控制量,从而省去控制系统中的电压传感器和采样电路环节。采用该控制方案,各 PI 调节器参数都是在一定的直流侧电压利用

率的情况下整定的。虽然直流侧电压的变化会影响 PI 调节器的性能,但通常其变化范围不大,并且电压 PI 调节器具有一定的鲁棒性,因此基本可以保证电机的稳定运行。

## 2 功率计算和最大功率控制环

### 2.1 功率计算和精度调整

由于没有母线电流测量或者传感器,因此功率计算通过等效变换公式计算<sup>[2]</sup>:

$$P = U_d I_d + U_q I_q \quad (8)$$

但是电流在进行 Clarke 和 Park 坐标变换时是等幅变换,计算出来的功率是实际功率的 1.5 倍,因而实际功率值为

$$P_0 = P \times \frac{2}{3} = (U_d I_d + U_q I_q) \times \frac{2}{3} \quad (9)$$

以上计算的功率存在一定的偏差,是因为电机控制的角度和转速都有一定偏差。故需要进行功率的调整。具体调整方法如下。

采用电机转过一周后的变量计算功率,公式变为

$$P_a = (U_{d0} I_{d0} + U_{q0} I_{q0}) \times \frac{2}{3} \quad (10)$$

式中:  $P_a$  为实际功率值;  $U_{d0}$ 、 $U_{q0}$  分别为电机旋转一周后的  $d$ 、 $q$  轴感应电压;  $I_{d0}$ 、 $I_{q0}$  分别为电机旋转一周后的  $d$ 、 $q$  轴电流。

对计算后的功率值进行卡尔曼滤波。卡尔曼滤波是一种利用线性系统状态方程,通过系统输入输出观测数据,对系统状态进行最优估计的算法。因为观测数据包括系统中的噪声和干扰的影响,所以最优估计也可看作是滤波过程。

### 2.2 最大功率控制环的设计

为了使电机一直在最大功率状态下运行,采用自适应调节的参数设计功率控制环路,如图4所示。

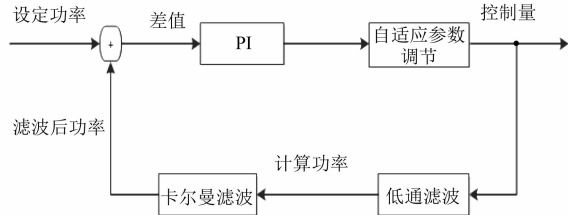


图4 最大功率控制环

通过加速度的PI调节,可以使电机在加速过程中不超过功率限值。同时通过参数的自整定和卡尔曼滤波,可以使当前的运行功率无限接近最大目标功率。

图5所示为电机最大功率运行状态。图5中,电机在运行到接近最大功率时,加速度下降,达到最大功率后电机不再加速。

在实际运行过程中,负载出现突变时,功率会超过最大功率,此时应先降速,功率下降到目标值以下时再重新加速,实现功率保护。图6所示为功率突然上升时的处理机制。

从图6可以看出,当输出功率突然变大时转

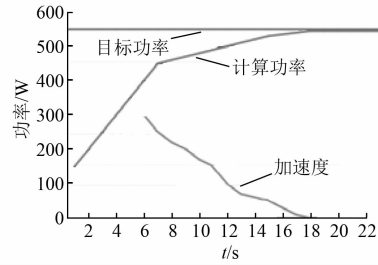


图5 电机最大功率运行状态

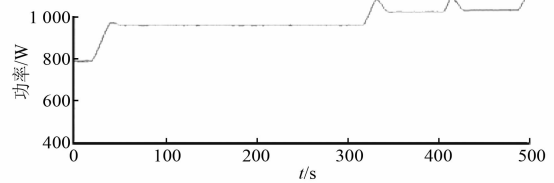


图6 功率突然上升处理机制

速开始下降,稳定一段时间后,功率再继续上升;如果功率仍然过大,则会继续降速,直到功率不再高于限值。

## 3 控制器和驱动器设计

### 3.1 控制系统硬件结构设计

控制系统原理图如图7所示。控制系统的硬件设计包括5个模块。

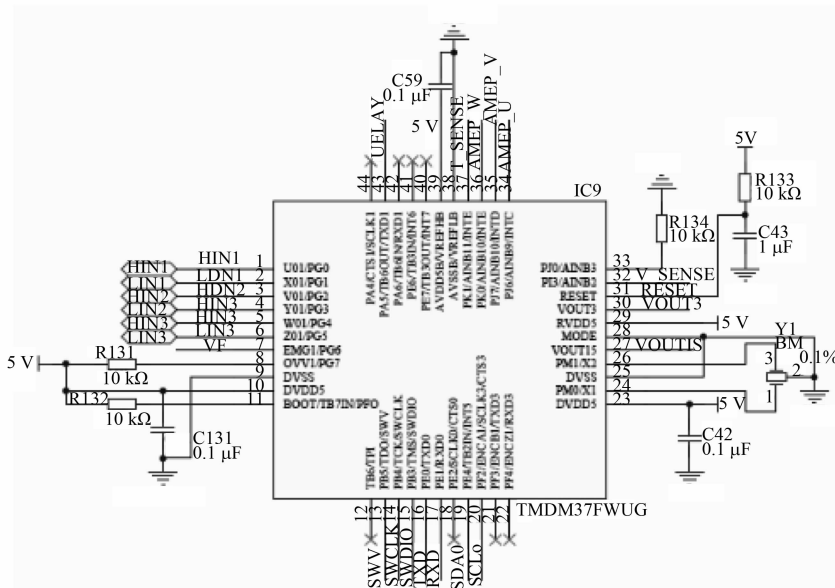


图7 控制系统原理图

(1) 电源模块:主要处理输入 220 V/50 Hz 交流电的整流和滤波处理。包括 220 V 整流出

310 V 高压直流电和开关电源输出 15 V 和 5 V 电压。

(2) 主控微控制单元(MCU)芯片及其外围设计:主要设计芯片的管脚分配、晶振和烧写仿真接口。

(3) 通信电路模块:主要是与上位机的通信电路。

(4) 智能功率模块(IPM)电路:主要是 IPM 管脚的定义和设计。

(5) 运放电路模块:主要是实现采样电阻和采样电路的信号运放功能。

图 8 所示为控制器样品。

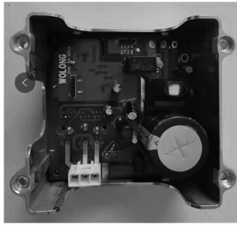


图 8 控制器样品

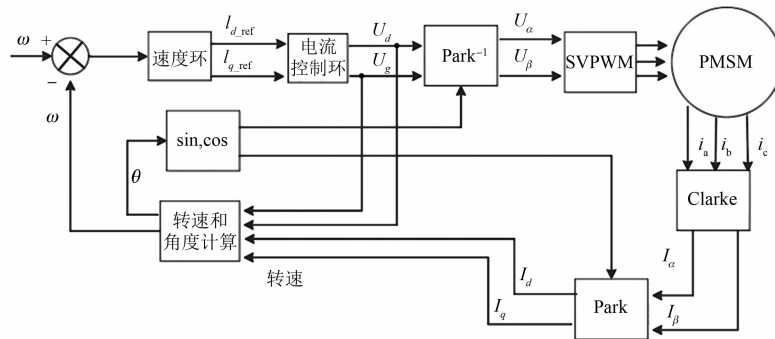


图 9 驱动系统控制框图

## 4 实际应用和测试数据

测试电机选用卧龙电气驱动集团有限公司的洗衣机专用二代 PMSM,电机转子采用内嵌结构,有一定凸极效应,定子绕组采用集中绕组方式,可以有效提升电机的绕组效率。电机主要参数为:相电阻  $3.45 \Omega$ ,  $d$  轴电感  $17.5 \text{ mH}$ ,  $q$  轴电感

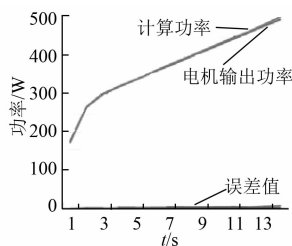


图 10 不同转矩下计算功率与输出功率对比

## 3.2 驱动器设计

驱动器设计主要分为软件设计和硬件设计。软件设计包括上位机软件通信和基于 ARM 内核的 32 位 MCU 控制程序。上位机软件通过 RS232 串口与驱动器进行通信,可以实现参数的读取、设定、保存等功能。

电机控制算法采用传统三环控制,即电流环、速度环与位置环。电流环采用 PMSM 矢量控制策略;速度环采用 PI 调节器;位置环采用 PI 调节器,同时在位置指令中加入了  $L_q$  补偿功能。驱动系统控制框图如图 9 所示。

硬件设计主要完成了主板和显示板的原理图及印刷电路板(PCB)设计工作。主板将控制部分与驱动部分整合在一块 PCB 中,结构简单,使得生产与装配更简便,并采用双层板布线,设计紧密。主频为  $80 \text{ MHz}$ , 32 位 MCU, ARM 架构 M3 内核。

$21.9 \text{ mH}$ ,电机的极槽配合选择 8 极 12 槽结构。在测功机上逐渐加载,对比计算功率和输出功率,如果如图 10 所示。

对比所得数据可知,经过处理后,功率误差非常小,平均相对误差约为 1%。

## 5 结 语

本文提出了一种基于功率控制环的最大功率控制策略。通过逐周期滤波和卡尔曼滤波实现 PMSM 的功率计算和高精度校准,使得平均相对误差约为 1%。最大功率控制环采取自适应控制策略,自动调整转速和速度变化率等电机运行参数。实际测试结果证实了该方法的可行性。

(下转第 64 页)

刀盘传动系统,当一台或两台电机被负载拖动时,母线上的电压会稍有增加,但增加的值不影响系统安全运行。同时,随着转速的升高,系统需要的功率越大,母线电压逐渐下降,且当母线电压降低到约  $1.35U$  ( $U$  为电源线电压) 时维持稳定。

## 5 结 语

多传动结构的变频器系统,可以容许更高的 PMSM 反电动势。因此,在设计 PMSM 时,必须充分分析传动系统负载性质、调速范围以及传动系统结构,选择合理的 PMSM 反电动势,在保证反电动势不损坏变频器的前提下,尽可能提高电机的空载反电动势值,从而提高 PMSM 的功率因数和传动系统效能。

### 【参考文献】

[ 1 ] 龚文忠. 永磁同步电机在全断面隧道掘进机上的应用[J]. 自动化博览,2014(增刊1): 50.

[ 2 ] 龚文忠,年晓红. 基于永磁同步电机的全断面隧道

(上接第 31 页)

[ 13 ] 李耀华,杨启东,苏锦仕,等. 基于电压矢量利用率的永磁同步电机模型预测转矩控制备选电压矢量集合[J]. 电机与控制应用,2020,47(4): 10.

[ 14 ] 李耀华,赵承辉,秦玉贵,等. DTC 与 MPTC 自适应切换的表贴式永磁同步电机控制策略[J]. 电机与控制应用,2020,47(2): 9.

[ 15 ] 李耀华,师浩浩,孟祥臻. 表面式永磁同步电机直接转矩控制系统简化预测控制策略[J]. 电机与控制学报,2020,24(4): 96.

[ 16 ] 李耀华,苏锦仕,秦辉,等. 永磁同步电机有限状态集模型预测转矩控制系统研究[J]. 电机与控制应用,2019,46(12): 8.

[ 17 ] 李耀华,杨启东,曲亚飞,等. 自适应变电压矢量 PMSM 直接转矩控制开关表[J]. 电机与控制学报,2019,23(9): 75.

(上接第 53 页)

### 【参考文献】

[ 1 ] 赵佳奇. 永磁同步发电机无速度传感器控制[J]. 控制工程,2016,23(11): 1752.

[ 2 ] 刘雨石,乔鸣忠,朱鹏. 基于 SVPWM 过调制的超前角弱磁控制永磁同步电机的研究[J]. 电机与控制

掘进机刀盘驱动系统的研究[J]. 科技与创新,2016(12): 14.

[ 3 ] 陈瑜. 永磁同步电动机功率因数及其设计原则[J]. 机电技术,2007,30(3): 55.

[ 4 ] 王兵,何孝祖,陈瀚,等. 永磁同步电机再生能量回馈分析研究[J]. 电工电气,2019(7): 9.

[ 5 ] 赵瑞林. 共用直流母线变频器方案的设计[J]. 自动化技术与应用,2013,32(11): 75.

[ 6 ] 谢仕宏,孟彦京,高钰淇,等. 小电容变频器及感应电机回馈能量分析[J]. 电工技术学报,2020,35(4): 734.

[ 7 ] 王家校. 基于共直流母线的变频器对拖试验系统设计[J]. 电力电子技术,2014,48(7): 10.

[ 8 ] 胥良,宋立伟,李子健,等. 节能型能量回馈式电动车用电机对拖试验系统[J]. 电工技术学报,2007,22(8): 161.

[ 9 ] 侯黎平. 对拖测试平台回馈能量利用研究[D]. 株洲: 湖南工业大学,2018.

[ 10 ] 王兆安,刘进军. 电力电子技术[M]. 北京: 机械工业出版社,2009.

[ 18 ] 李耀华,秦辉,苏锦仕,等. 表贴式永磁同步电机有限集模型预测转矩控制成本函数研究[J]. 电机与控制应用,2019,46(9): 12.

[ 19 ] 李耀华,刘卫国. 零电压矢量在 PMSM 直接转矩控制系统中的应用[J]. 电力电子技术,2010,44(9): 50.

[ 20 ] 胡育文,高瑾,杨建飞,等. 永磁同步电机直接转矩控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社,2015.

[ 21 ] 李耀华,刘洋,孟祥臻. 一种表面式永磁同步电机有限状态集模型预测直接转矩控制[J]. 电机与控制学报,2020,24(8): 33.

[ 22 ] 李耀华,杨启东,刘洋,等. 表面式永磁同步电机模型预测直接转矩控制备选电压矢量集合研究[J]. 电机与控制学报,2020,24(10): 87.

应用,2018,45(2): 28.

[ 3 ] 魏海峰,韦汉培,张懿,等. 一种永磁同步电机恒功率区运行的弱磁控制方法[P]. CN201510644129.0, 2015-10-08.

[ 4 ] 廉晨龙,姜泽,魏君燕. 一种无传感一体式高效变频电机系统设计[J]. 微电机,2015,48(9): 54.