

无刷双馈电机笼型转子磁场调制能力分析*

刘昊青, 王淑红, 白崧儒

(太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 笼型转子无刷双馈电机(BDFM)由于其简单且特殊的转子结构,使得转子磁场谐波含量大,直接影响转子的磁场调制能力。从电机内部磁场入手,提出了一种快速计算 BDFM 转子磁场的方法,分析了转子磁场与转子短路环个数及短路环分布的关系。以短路环个数及短路环分布跨距为参数,建立 MATLAB 计算程序对转子磁场调制能力进行分析,研究了转子的极限调制能力。最后,通过 Flux 电磁场有限元分析软件建立电机模型并对所提方法进行了验证。研究结果有助于优化转子结构设计。

关键词: 无刷双馈电机; 笼型转子; 磁场调制能力; 短路环数; 短路环分布; 有限元分析

中图分类号: TM 346 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)01-0048-06

doi: 10.12177/emca.2019.133

Analysis of Magnetic Field Modulation Capability of Cage Rotor of Brushless Doubly-Fed Machine*

LIU Haoqing, WANG Shuhong, BAI Yinru

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: Because of its simple and special rotor structure, the cage rotor brushless doubly-fed machine (BDFM) has rich magnetic field harmonic content, which directly affects the rotor's magnetic field modulation capacity. From the internal magnetic field of the motor, a fast method to calculate the rotor magnetic field of the BDFM is proposed, and the influences of the number and distribution of short circuit rings on the rotor magnetic field are analyzed. Taking the number and span of short circuit rings as the parameters, the MATLAB calculation program is established to analyze the modulation capacity of the rotor. The ultimate modulation capacity of the rotor is studied. The electromagnetic field finite element analysis software Flux is used to establish the motor model for verification. The results are helpful to the optimization design of rotor structure.

Key words: brushless doubly-fed machine (BDFM); cage rotor; magnetic field modulation capacity; number of short circuit rings; short circuit ring distribution; finite element analysis

0 引言

无刷双馈电机(BDFM)是一种新型的交流励磁电机,因为没有碳刷和滑环,且所需变频器容量小,具有可靠性高、成本低等优点,所以在风力发电和船舶轴带发电等领域有广阔的应用前景。

BDFM 定子有 2 套极数不同的绕组,彼此之间没有直接耦合,而是通过转子对定子 2 套绕组的磁耦合作用来实现电机的机电能量转换^[1-4]。BDFM 转子可以有不同的结构形式,一般分为 3 类:(1)笼型和绕线型转子结构;(2)磁阻转子结构;(3)磁阻和笼型或绕线型绕组相结合的复合

收稿日期: 2019-10-18; 收到修改稿日期: 2019-11-12

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51477110)

作者简介: 刘昊青(1993—),男,硕士研究生,研究方向为特种电机。

王淑红(1965—),女,博士,教授,研究方向为特种电机理论与控制技术。

白崧儒(1983—),男,博士,研究方向为特种电机理论与控制技术。

转子结构^[5]。笼型转子由于结构和制造工艺简单,且具有较好的起动能力和异步运行性能,受到了国内外学者的广泛关注。

笼型转子 BDFM 与其他结构相比,存在的主要问题是转子磁场调制能力较差、谐波含量高,导致电机功率密度和效率较低。通过改变转子结构来提高转子调制效果的研究较多。文献[6]采用绕组来代替同心式笼型中的短路环。文献[7]提出了一种等距笼型转子结构。文献[8]提出了串联式笼型转子结构。文献[9]提出了一种内外回路两两各自串联并自闭合的混联式转子结构。文献[10]通过去掉内侧和外侧短路环的比较,证明了对磁场调制起主要作用的是外侧的短路环。文献[11]提出了 2 种短路环不等距分布的方案,其外侧方案能够提高调制能力,内侧方案能够削弱谐波含量。但针对同心式笼型转子短路环个数对调制效果的影响,以及同心式笼型转子的极限调制能力,均尚未有分析。

本文针对笼型转子 BDFM,从 BDFM 内部磁场角度入手,在理想情况下,推导了转子气隙磁密分布,以转子短路环个数及跨距为参数,分析了转子调制定子磁场产生的转子磁场在气隙中的分布情况,以及各次谐波分量;计算了使转子达到最大调制效果时转子短路环的跨距,并通过有限元软件进行了验证。

1 BDFM 转子气隙磁密推导

本文仅研究转子短路环对定子磁场的调制效果。由于有限元软件计算所耗时间长,分析比较复杂,所以提出一种精度合适且计算快速的解析方法,代替有限元得到转子气隙磁场。在推导过程中,忽略其他因素,并作如下假设:

- (1) 不计定转子开槽的影响,认为气隙是均匀的;
 - (2) 定子绕组电流产生的气隙磁场在空间中按正弦分布;
 - (3) 不考虑定转子铁心饱和;
 - (4) 忽略转子短路环电阻。
- 笼型转子结构图如图 1 所示。

BDFM 定子含有 A、B、C 三相功率绕组和 U、V、W 三相控制绕组。 $t=0$ 时定、转子的位置关系如图 2 所示。其中,A 为定子功率绕组 A 相绕组

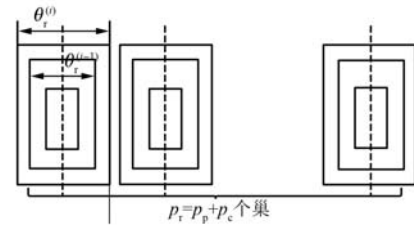


图 1 笼型转子结构图

轴线, U 为定子控制绕组 U 相绕组轴线, α 为 A 相绕组轴线与 U 相绕组轴线的机械夹角, ε 为 A 相绕组轴线与转子坐标系的机械夹角。

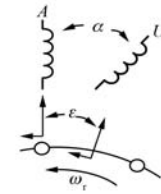


图 2 $t=0$ 时定、转子参考系的位置关系

设笼型 BDFM 在稳态状态下功率绕组电流为

$$\begin{cases} i_A = \sqrt{2}I_{sp} \cos(\omega_p t + \gamma) \\ i_B = \sqrt{2}I_{sp} \cos(\omega_p t - 2\pi/3 + \gamma) \\ i_C = \sqrt{2}I_{sp} \cos(\omega_p t - 4\pi/3 + \gamma) \end{cases} \quad (1)$$

控制绕组电流为

$$\begin{cases} i_u = \sqrt{2}I_{sc} \cos(\omega_c t + \beta) \\ i_v = \sqrt{2}I_{sc} \cos(\omega_c t \pm 4\pi/3 + \beta) \\ i_w = \sqrt{2}I_{sc} \cos(\omega_c t \pm 2\pi/3 + \beta) \end{cases} \quad (2)$$

式中:超同步运行时取“+”,亚同步运行时取“-”; γ, β 为各自电流在初始时刻下的初始相位角; I_{sp}, I_{sc} 为各自电流的有效值; ω_p, ω_c 为各自电流的角频率。

设空气的磁导率为 μ_0 、电机气隙的有效长度为 δ ,则在转子坐标系下,由功率绕组和控制绕组磁势建立的气隙磁密分别为^[12]

$$b_{sp} = \mu_0 \frac{f_{sp}}{\delta} = B_{spm} \cos[\omega t + \gamma - p_p(\theta - \varepsilon)] \quad (3)$$

$$b_{sc} = \mu_0 \frac{f_{sc}}{\delta} = B_{scm} \cos[\omega t \mp \beta + p_c \alpha + p_c(\theta - \varepsilon)] \quad (4)$$

设一个巢内短路环跨距由内到外依次为

$2\theta_r^{(1)}, 2\theta_r^{(2)}, \dots, 2\theta_r^{(i)}$, 则对于第 k 个巢内短路环在转子坐标系中的位置坐标分别为

$$\theta_{rk}^{(i)+} = \frac{2\pi(k-1)}{p_p + p_c} + \theta_r^{(i)} \quad (5)$$

$$\theta_{rk}^{(i)-} = \frac{2\pi(k-1)}{p_p + p_c} - \theta_r^{(i)} \quad (6)$$

由磁通连续性可知, 对第 1 个巢的第 1 个环, 忽略转子短路环电阻时, 其匝链的转子磁通与定子磁通大小相等, 方向相反, 则有:

$$2lr\theta_r^{(1)}b_{rk}^{(1)} = - \int_{-\theta_{rk}^{(1)-}}^{\theta_{rk}^{(1)+}} (b_{sp} + b_{sc}) d\theta \quad (7)$$

同理, 对于第 2 个短路环, 则有:

$$2lr[(\theta_r^{(2)} - \theta_r^{(1)})b_{rk}^{(2)} + \theta_r^{(1)}b_{rk}^{(1)}] = - \int_{-\theta_{rk}^{(2)-}}^{\theta_{rk}^{(2)+}} (b_{sp} + b_{sc}) d\theta \quad (8)$$

对于第 $i-1$ 个环, 则有:

$$2lr[(\theta_r^{(i-1)} - \theta_r^{(i-2)})b_{rk}^{(i-1)} + (\theta_r^{(i-2)} - \theta_r^{(i-1)})b_{rk}^{(i-2)} + \dots + \theta_r^{(1)}b_{rk}^{(1)}] = - \int_{-\theta_{rk}^{(i-1)-}}^{\theta_{rk}^{(i-1)+}} (b_{sp} + b_{sc}) d\theta \quad (9)$$

对于第 i 个环, 则有:

$$2lr[(\theta_r^{(i)} - \theta_r^{(i-1)})b_{rk}^{(i)} + (\theta_r^{(i-1)} - \theta_r^{(i-2)})b_{rk}^{(i-1)} + \dots + \theta_r^{(1)}b_{rk}^{(1)}] = - \int_{-\theta_{rk}^{(i)-}}^{\theta_{rk}^{(i)+}} (b_{sp} + b_{sc}) d\theta \quad (10)$$

用式 (10) 减去式 (9), 整理可得第 k 个巢第 i 个短路环与第 $i-1$ 个短路环间的转子气隙磁密为

$$b_{rk}^{(i)} = \frac{- \int_{\theta_{rk}^{(i)-}}^{\theta_{rk}^{(i)+}} (b_{sp} + b_{sc}) d\theta + \int_{\theta_{rk}^{(i-1)-}}^{\theta_{rk}^{(i-1)+}} (b_{sp} + b_{sc}) d\theta}{2lr[\theta_r^{(i)} - \theta_r^{(i-1)}]} \quad (11)$$

巢与巢之间的转子气隙磁密, 为转子全部短路环流过电流产生的气隙磁密在该位置处之和。只考虑每个巢的第 i 个环, 其与定子功率绕组建立的气隙磁场交链的磁链为

$$\psi_{rp} = \frac{lD_r}{2} B_{spm} \int_{\theta_{rk}^{(i)-}}^{\theta_{rk}^{(i)+}} \cos[\omega t + \gamma - p_p(\theta - \varepsilon)] d\theta = - \frac{lD_r B_{spm}}{p_p} \cdot \cos\left[\omega t + \gamma - p_p\left(\frac{2\pi(k-1)}{p_p + p_c} - \varepsilon\right)\right] \cdot \sin(p_p\theta_r^{(i)}) \quad (12)$$

感应电动势为

$$E_{rpik} = - \frac{d\psi_{sp}}{dt} =$$

$$E_{rpik} \sin\left[\omega t + \gamma - p_p\left(\frac{2\pi(k-1)}{p_p + p_c} - \varepsilon\right)\right] \quad (13)$$

同理可得第 k 个巢的第 i 个短路环在定子控制绕组气隙磁场的感应电动势为

$$E_{rck} = - \frac{d\psi_{sc}}{dt} = E_{rpik} \sin\left\{\omega t + \beta - p_c\alpha - p_c\left[\frac{2\pi(k-1)}{p_p + p_c} - \varepsilon\right]\right\} \quad (14)$$

由于转子结构对称, 故每个巢内的同一号短路环阻抗相等, 产生的感应电流与感应电动势相位相同。

转子气隙磁密为

$$B_{\beta k} = \sum_{k=1}^{p_r} B_{rk-}^{(i)} = - \frac{\mu N}{\delta} \left[\frac{\sum_{k=1}^{p_r} I_{rk-}^{(i)}}{\pi - \theta_k^{(i)}} + \frac{\sum_{k=1}^{p_r} I_{rk-}^{(i-1)}}{\pi - \theta_k^{(i-1)}} + \dots + \frac{\sum_{k=1}^{p_r} I_{rk-}^{(1)}}{\pi - \theta_k^{(1)}} \right] \quad (15)$$

由于各个巢相同位置的短路环电流相位依次相差 $2\pi/(p_p+p_c)$, 对于 (p_p+p_c) 个巢, 其电流矢量之和为零, 因此, 可知各个巢之间部分转子气隙磁密为 $B_{\beta k} = 0$ 。

根据上述分析结果, 可将各个巢各个短路环间的转子气隙磁密绘制成一个阶梯波。对气隙磁密阶梯波进行傅里叶级数展开, 可得转子磁场各次谐波的幅值表达式。通过 MATLAB 程序计算, 可以在给定定子 2 套绕组电流有效值时, 得到转子短路环在气隙中产生的磁密波形, 以及其各次谐波的分量。

2 转子磁场调制效果分析

本文以功率绕组极对数 $p_p=2$ 、控制绕组极对数 $p_c=4$ 、转子为 6 个巢的电机为例, 进行分析计算。在电机额定转速下, 分别给定定子 2 套绕组电流, 计算转子各次谐波磁场含量。

2.1 短路环均匀分布时转子磁场调制效果分析

2.1.1 仅对功率绕组激励

给定功率绕组电流, 令定子功率绕组产生的气隙磁密 $B_{spm} = 1$ T, 利用 MATLAB 程序解析计算, 得到转子短路环均匀分布时转子调制 p_p 对极

磁场产生的谐波分量,如表 1 所示。

表 1 转子调制 p_p 对极磁场产生的谐波分量 T

环数\极对数	$2(p_p)$	$4(p_c)$	8	10	14
1	0.455 9	0.394 8	0.197 4	0.091 2	0.065 1
2	0.610 8	0.440 4	0.027 4	0.091 2	0.065 1
3	0.649 9	0.439 6	0.017 3	0.111 5	0.022 1
4	0.666 9	0.436 0	0.037 4	0.115 9	0
5	0.676 2	0.433 0	0.048 4	0.116 5	0.012 7
6	0.682 1	0.430 5	0.055 3	0.116 1	0.020 8

表 1 中,环数表示转子每个巢内短路环的个数,横行表示该结构转子调制功率绕组磁场,在气隙中产生的转子谐波磁场分量。由表 1 可以看出,转子调制功率绕组磁场,会同时产生 p_p 对极和 p_c 对极磁场分量。因为转子电阻远小于电抗,转子产生的 p_p 对极磁场与定子 p_p 对极磁场相位相差接近 180° ,所以几乎不产生转矩^[12],只对磁场饱和有影响,这里暂不考虑产生的 p_p 对极分量。由以上计算可知,与定子功率绕组产生的磁场磁密峰值为 1 T 时,经转子调制可产生约 0.4 T 的 p_c 对极分量。从 2 个环开始,随着每巢内短路环个数的增加,调制效果下降,8、10、14 极对数磁场含量上升,说明均匀分布的短路环并不能使转子调制能力达到最大。

2.1.2 仅对控制绕组激励

令定子控制绕组产生的气隙磁密 $B_{scm} = 1$ T,解析计算得到转子短路环均匀分布时,转子调制 p_c 对极磁场产生的谐波分量,如表 2 所示。

表 2 转子调制 p_c 对极磁场产生的谐波分量 T

环数\极对数	$2(p_p)$	$4(p_c)$	8	10	14
1	0.394 9	0.342 0	0.171 0	0.079 0	0.056 4
2	0.440 4	0.342 0	0.098 7	0.023 6	0.016 9
3	0.439 6	0.357 4	0.141 3	0.058 4	0.014 2
4	0.436 0	0.366 5	0.161 2	0.066 9	0.033 6
5	0.433 0	0.372 3	0.172 3	0.069 3	0.045 3
6	0.430 5	0.376 2	0.179 2	0.069 7	0.052 8

由以上计算可知,转子调制控制绕组磁场产生的 p_p 对极分量与调制功率绕组磁场产生的 p_c 对极分量对同一转子结构而言是相同的,产生的谐波磁场分量随环数的变化趋势也相同。

2.2 短路环不均匀分布时转子磁场调制效果分析

以转子调制定子功率绕组磁场产生的 p_c 对极磁场最大为条件,或以转子调制定子控制绕组磁场产生的 p_p 对极磁场最大为条件,计算转子短路环的分布跨距,可以得到相同的结果(精确到 0.001 rad),如表 3 所示。

表 3 转子短路环跨距及调制效果

环数	第 i 个短路环的跨距/rad						调制量
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	θ_5	θ_6	
1	0.362	—	—	—	—	—	0.433 5
2	0.239	0.384	—	—	—	—	0.445 9
3	0.186	0.296	0.389	—	—	—	0.448 3
4	0.160	0.249	0.323	0.391	—	—	0.449 1
5	0.136	0.214	0.279	0.337	0.391	—	0.449 5
6	0.122	0.192	0.249	0.300	0.347	0.392	0.449 7

表 3 中,环数表示每个巢内短路环的个数,调制量表示转子调制定子 $p_p(p_c)$ 对极磁场产生的转子 $p_c(p_p)$ 对极磁场分量,与定子 $p_p(p_c)$ 对极磁场之比。可以看出,调整短路环的跨距能够改善转子的调制效果,最大约为 0.45,转子短路环个数为 3 时,调制量已接近最大,继续增加短路环个数对转子调制效果的提升越来越小。

3 仿真实验验证

以实验室的 1 台 4/8 极 72/60 槽笼型 BDFM 为例,该电机转子巢数为 6,每个巢内有 5 个短路环。样机转子短路环均匀分布(转子 I)与按最大调制能力计算得出的转子结构(转子 II、转子 III)如图 3 所示,其定子结构均相同。

给定子的其中一套绕组励磁,另一套绕组开路,分别在转子正常和转子开路下仿真,得到定子合成磁场和定子磁场,由于不计铁心饱和,磁路线性,用合成磁场减去定子磁场即可得到转子磁场。以转子 I 为例,转子磁场在气隙中的分布理论计算结果与有限元仿真对比如图 4 所示。

比较可知,理论分析方法能较好地表达转子磁场在气隙中的分布,反映转子磁场随转子短路环跨距的变化情况,说明本文所提理论方法可行。对于定子 2 套绕组同时激励时的转子磁场,其谐波含量与定子 2 套绕组磁场的大小、相位均有关,

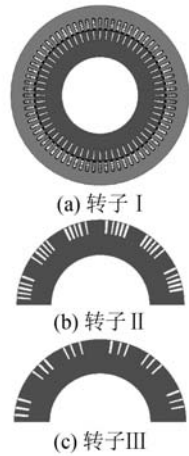


图3 Flux有限元仿真模型

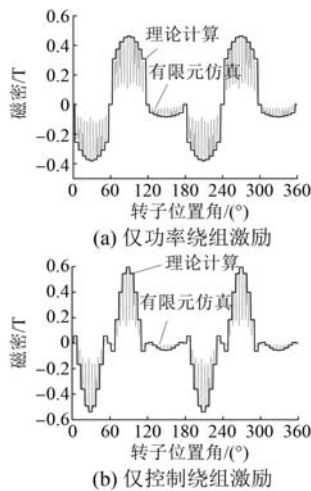


图4 转子磁场分布图

无法统一分析。

据此计算转子磁场调制 p_p 对极磁场和 p_c 对极磁场产生的各次谐波分量与有限元仿真结果对比,分别如图5、图6所示。

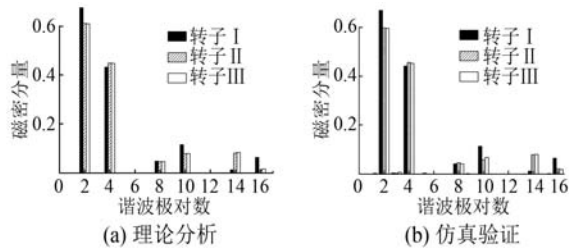


图5 转子调制 p_p 对极磁场产生的谐波含量比较(仅功率绕组激励)

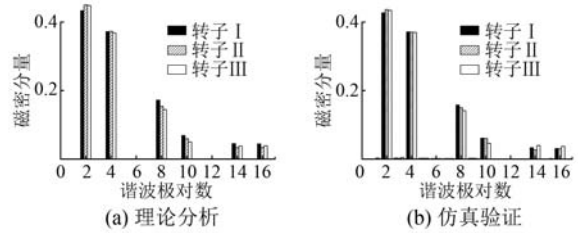


图6 转子调制 p_c 对极磁场产生的谐波含量比较(仅控制绕组激励)

有限元仿真与理论结果基本吻合,验证了理论分析的正确性。说明 II、III 号转子结构能够提高转子对定子磁场的调制能力,而且对降低转子无用次空间谐波具有一定作用。这对于提高 BDFM 的功率密度、减小转子的谐波漏抗、降低电机的谐波损耗具有重要意义。

4 结 语

本文从笼型 BDFM 的内部磁场入手,提出了一种计算快速且精度合适的 BDFM 转子磁场的解析方法,分析了同心式笼型转子对定子磁场的调制效果,并按照磁场调制效果最大的原则,计算了同心式笼型转子短路环的分布情况。结果表明:通过改变同心式笼型转子短路环的分布能够提高转子的调制能力,并削弱无用次谐波;同心式笼型转子的极限调制能力仅为 0.45。

【参考文献】

[1] WILLIAMSON S, FERREIRA A C, WALLACE A K. Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. 1. Analysis [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1997, 144(2): 111.

[2] WILLIAMSON S, FERREIRA A C. Generalised theory of the brushless doubly-fed machine. 2. Model verification and performance [J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 1997, 144(2): 123.

[3] 张爱玲,熊光煜,刘振富,等.无刷双馈电机能量传递关系和功率因数特性的实验研究[J].中国电机工程学报,2011,31(6):92.

[4] 王凤翔,张凤阁.磁场调制式无刷双馈交流电机[M].长春:吉林大学出版社,2004.

[5] 阚超豪,鲍习昌,王雪帆,等.无刷双馈电机的研究现状与最新进展[J].中国电机工程学报,2018,38(13):3939.

- [6] RUNCOS F, CARLSON R, SADOWSKI N, et al. Performance and vibration analysis of a 75 kW brushless double-fed induction generator prototype [C]//Conference Record of the 2006 IEEE Industry Applications Conference Forty-First IAS Annual Meeting, 2006.
- [7] 邓先明, 方荣惠, 王抗, 等. 等距笼型转子无刷双馈电机的有限元分析[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(4): 507.
- [8] MCMAHON R, TAVNER P, ABDI E, et al. Characterising brushless doubly fed machine rotors [J]. IET Electric Power Applications, 2013, 7(7): 535.
- [9] 欧先朋, 韩力, 韩雪峰, 等. 两种不同笼型转子结构无刷双馈电机的稳态运行性能对比[J]. 电工技术学报, 2017, 32(23): 61.
- [10] 韩力, 高强, 罗辞勇, 等. 无刷双馈电机笼型转子结构对磁场调制的影响[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(2): 161.
- [11] 郑凌娟, 陈建生, 章玮. 无刷双馈电机的转子导条不等间距优化设计[J]. 机电工程, 2013, 30(10): 1229.
- [12] 白崑儒, 王淑红, 张爱玲, 等. 笼型无刷双馈电机稳态下转矩角的物理含义[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(2): 197.

(上接第 40 页)

- [2] ORTEGA R, LORIA PEREZ J A, NICKLASSON P J, et al. Passivity-based control of Euler-Lagrange systems[M]. London: Springer, 1998.
- [3] ORTEGA R, ESPINOSA G. Torque regulation of induction motors[J]. Automatica, 1993, 29(3): 621.
- [4] ORTEGA R, CANUDAS C, SELEME S I. Nonlinear control of induction motors: torque tracking with unknown disturbance [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1993, 38(11): 1675.
- [5] MARINO R, PERESADA S, TOMEI P. Adaptive output feedback control of current-fed induction motors with uncertain rotor resistance and load torque [J]. Automatica, 1998, 34(5): 617.
- [6] MARINO R, PERESADA S, TOMEI P. Global adaptive output feedback control of induction motors with uncertain rotor resistance [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1999, 44(5): 967.
- [7] 马良河, 姜建国. 异步电机的一类无源性快速渐进跟踪控制器[J]. 中国矿业大学学报, 2002, 31(5): 385.
- [8] 马良河, 姜建国. 负载转矩未知时变情形下异步电动机的无源性跟踪控制[J]. 电工技术学报, 2004, 19(1): 12.
- [9] ZHU G, KADDOURI A, DESSAINT L A, et al. A nonlinear state observer for the sensor-less control of a permanent-magnet AC machine[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(6): 1098.

[期刊简介]

《电机与控制应用》(原《中小型电机》)创刊于 1959 年,是经国家新闻出版总署批准注册,由上海电器科学研究所(集团)有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。

期刊定位于电机、控制和应用三大板块,以中小型电机为基础,拓展新型的高效节能和微特电机技术,以新能源技术和智能控制技术引领和提升传统的电机制造技术为方向,以电机系统节能为目标开拓电机相关应用,全面报道国内外的最新技术、产品研发、检测、标准及相关的行业信息。

本刊每月 10 日出版,国内外公开发行,邮发

代号 4-199。在半个多世纪的岁月中,本刊为我国中小型电机行业的技术进步与发展做出了巨大的贡献,在中国电机及其应用领域享有很高的声誉。

依托集团公司雄厚的技术实力和广泛的行业资源,《电机与控制应用》正朝着专业化品牌媒体的方向不断开拓创新,在全国科技期刊界拥有广泛的知名度,是“中国学术期刊综合评价数据库来源期刊”、“中国科学引文数据库来源期刊”、“中国学术期刊(光盘版)全文收录期刊”,得到了业内人士的普遍认可,备受广大读者的推崇和信赖,多次被评为中文核心期刊、中国科技核心期刊、全国优秀科技期刊。