

异步电机定子绕组匝间短路故障诊断研究

陈 众, 伍雅娜, 冷 鹏, 汤 俊

(长沙理工大学 湖南省智能电网运行与控制重点实验室, 湖南 长沙 410114)

摘 要: 将负序电流作为异步电机定子绕组匝间短路的故障特征量, 在提取时易受谐波、噪声等因素的影响, 而频谱分析也较为复杂, 故障诊断的可靠性和高效性难以兼顾。为可靠高效地诊断异步电机定子绕组匝间短路, 在多次派克变换的基础上, 提出故障特征量 I_{pg} 以反映故障。首先根据故障后的电机磁场推导出故障后定子中存在的电流频次; 然后得到非理想工况下, 利用多次派克变换提取故障特征量 I_{pg} 的表达式; 最后建立故障后异步电机的多回路数学模型, 对理想工况和非理想工况下定子不同严重程度的匝间短路进行仿真。分析结果表明, I_{pg} 和故障严重程度正相关且对电压源不平衡这类非理想工况呈现鲁棒性, 用 I_{pg} 诊断异步电机定子匝间短路具有高灵敏性与高可靠性。

关键词: 异步电机; 定子绕组匝间短路; 派克变换; 多回路数学模型; 故障诊断

中图分类号: TM 343 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)05-0120-06

Diagnosis of Inter-Turn Faults in Stator Windings of Asynchronous Motor

CHEN Zhong, WU Yana, LENG Peng, TANG Jun

(Hunan Province Key Laboratory of Smart Power Grid Operation and Control, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: When the negative sequence current is taken as the fault characteristic quantity of inter-turn faults in stator windings of asynchronous motor, its extraction is easily affected by harmonics and noises and the spectrum analysis is rather complicated, so it is difficult to balance the reliability and efficiency of fault diagnosis. In order to diagnose inter-turn faults in stator windings of asynchronous motor reliably and efficiently, on the basis of multiple Park's transformations, the fault characteristic quantity I_{pg} was put forward to reflect the fault. The current frequency in the stator after the fault was deduced according to the motor magnetic field after the fault firstly. Then the expression of fault characteristic quantity I_{pg} extracted by multiple Park's transformations was obtained under non-ideal working conditions. Finally, the multi-loop mathematical model of asynchronous motor after fault was established, and the inter-turn fault of stator with different severity under ideal and non-ideal conditions was simulated. The analysis results showed that the I_{pg} was positively correlated with the severity of the fault and had robustness to non-ideal conditions such as voltage source imbalance, and it was highly sensitive and reliable to diagnose the stator inter-turn fault of asynchronous motor by I_{pg} .

Key words: asynchronous motor; stator winding inter-turn fault; Park's transformation; multi-loop mathematical model; fault diagnosis

作者简介: 陈 众(1974—), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统运行与控制、电力系统仿真。

伍雅娜(1995—), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统仿真、电机故障判别技术。

冷 鹏(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统仿真。

0 引言

运行经验表明,定子绕组匝间短路为异步电机最常见的一类故障,发生率占电机总故障的38%^[1]。轻微的匝间短路一经出现,若不及时辨识,往往会在很短的时间内演变成接地短路、相间短路等严重故障,因此必须对异步电机定子故障进行实时可靠的诊断^[2-4]。

学者们为诊断定子匝间短路提出了多种能反映故障的特征量,主要有:负序视在阻抗^[5-6],序阻抗^[7-8],负序电流^[9-11],电流频谱^[12-15],平均瞬时功率频谱^[16-17]等。其中负序视在阻抗对电压源不平衡具有鲁棒性,应用神经网络技术动态、适当地设置阈值后能较好地适应各种工况,但设置阈值前需获取大量样本数据对神经网络进行训练,在实际工程中难以实现;序阻抗对电压源不平衡免疫,且有高灵敏度和可靠性,但在计算不精确时容易造成误判;定子负序电流能直观灵敏地反映故障,有较好的效果,但传统的负序电流提取方法本身存在局限性,易受谐波、噪声等影响;电流频谱和平均瞬时功率频谱中的某些频率分量随短路严重程度波动明显,与定子电流波形综合分析诊断时有较好效果,但故障参数较多且谱分析技术略复杂。

将负序电流作为故障特征量难以精确提取,从而影响诊断可靠性,而频谱分析的高复杂度也将影响诊断的高效性,故以派克变换为基础,提出能可靠高效反映匝间短路的特征量 F_{pg} 。首先根据故障后的电机磁场推导出故障后定子中存在的电流频次;然后对因故障而产生的电流频次依次进行派克变换使其转为直流,通过对变换结果进行滤波等处理得到故障特征量 F_{pg} ;最后基于多回路理论建立故障后的电机模型进行仿真。分析结果验证了将 F_{pg} 作为故障特征量的可行性。

1 异步定子匝间短路故障理论分析

1.1 定子匝间短路时定子电流分析

在理想情况下,异步电机正常运行时,气隙中三相合成磁动势为正向旋转、转速恒定、幅值恒定的正圆形磁动势,在定子中感应出正序电流。当定子绕组发生匝间短路故障时,绕组附

加了短路环,合成磁动势发生畸变,感应出故障后的定子电流。短路环中的环流 i_r 产生的脉振磁动势将在定子侧感应出正序和负序分量,在转子侧感应出电流 i_r ^[10]。由文献[16,18]推导可得, i_r 产生的磁动势在定子坐标系中的表达式为

$$F_r(\alpha, t) = \sum_{\nu} \sum_n F_{\nu, n} \cos \{ [1 + (n \pm \nu) \cdot (1 - s)] 2\pi f t - n\alpha \} \quad (1)$$

式中: α ——短路匝的空间电角度;

ν ——定子谐波次数,对于短距线圈 $\nu = 1/p, 2/p, \dots$, (p 为极对数)对于整距线圈 $\nu = 1/p, 2/p, \dots$, 且 $\nu \neq 2, 4, \dots$;

n ——转子谐波次数, $n = 6k + 1, k = 0, 1, \dots$;

$F_{\nu, n}$ —— n 次谐波磁动势的幅值;

s ——转差率;

f ——电源频率。

由式(1)可知,当定子绕组发生匝间短路故障时,定子电流中除存在正、负序分量还存在频率为 $[1 + (n \pm \nu)(1 - s)]f$ 的谐波分量。故找出能直观灵敏反映负序和谐波分量大小的特征量,即可有效诊断定子匝间短路故障。

1.2 以派克变换为基础的定子匝间短路故障特征量的选取

派克变换为分析电机模型常用的一种数学方法,根据磁势等效原理,将abc坐标变换到dq坐标。坐标变换原理图如图1所示^[19]。

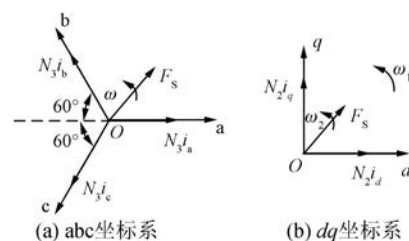


图1 坐标变换原理图

在abc坐标系中,绕组匝数为 N_3 ,通以频率为 ω 的交流电时,产生角频率为 ω 的合成旋转磁动势 F_s 。在dq坐标中,绕组匝数为 N_2 ,dq轴以 ω_1 的角频率旋转,通以角频率为 ω_2 的交流电时,会产生同样的 F_s 。令d轴与a轴重合,根据磁势等效原理,则有派克变换方程:

$$P_{2R}^{3S} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\omega_1 t) & \cos(\omega_1 t - 120^\circ) & \cos(\omega_1 t + 120^\circ) \\ -\sin(\omega_1 t) & -\sin(\omega_1 t - 120^\circ) & -\sin(\omega_1 t + 120^\circ) \end{bmatrix} \quad (2)$$

令 abc 坐标系中角频率为 ω 的三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 幅值为 I_m , 初始相角为 θ_s , 根据式(2)进行派克变换, 整理可得:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{3}{2}} I_m \begin{bmatrix} \cos[(\omega - \omega_1)t - \theta_s] \\ \sin[(\omega - \omega_1)t - \theta_s] \end{bmatrix} \quad (3)$$

令 $I_p = \sqrt{i_d^2 + i_q^2}$, 可得:

$$\begin{cases} \omega_2 = \omega - \omega_1 \\ I_p = \sqrt{3/2} I_m \end{cases} \quad (4)$$

由此可看出:

(1) 令 $\omega_1 = \omega$ 时, $\omega_2 = 0$, 即 dq 坐标中流过直流。为了简化后续计算, 变换角频率为 ω 的电流时可选定 $\omega_1 = \omega$ 。

(2) I_p 与 I_m 正相关, 且与时间无关, 据此可将 I_p 作为反映 I_m 的特征量。

电机故障时定子中存在多频次电流, 那么对某一频次进行派克变换后 i_d 、 i_q 也存在多频次, 因此提取反映故障后负序和谐波分量的特征量时需进行多次派克变换处理, 例如当电机转差率为 0.047 时, 有如下步骤。

(1) 根据前文, 当转差率为 0.047 时, 定子中存在 $-f$ 、 f 、 $1.48f$ 、 $2.43f$ 、 $2.91f$ 等频次的电流分量。

(2) 令 $x=1$, N 为负序和谐波次数组成的矩阵, 此时 $N = \begin{bmatrix} -1 & 1.48 & 2.43 & 2.91 & \cdots \end{bmatrix}$, 一共 y 列, y 值随 ν 和 k 的取值而变化。

(3) 取 $\omega_1 = N(x) \times 2\pi f$ 进行派克变换, 则定子电流的 $N(x)$ 次分量对应变换为 i_{dx} 、 i_{qx} 中的直流分量。

(4) 滤波 i_{dx} 、 i_{qx} 中的直流分量 i_{dx}^z 、 i_{qx}^z , 计算反映 $N(x)$ 次电流分量的 F_{px} 。

(5) 若 $x < y$, 则 $x = x + 1$, 重复步骤(3)、(4)和(5), 否则执行步骤(6)。

(6) 可得特征量 F_p 为

$$F_p = \sum_{x=1}^y F_{px} \quad (5)$$

经多次派克变换处理后得到的特征量 F_p 与定子匝间短路故障所产生的负序和谐波分量密切相关, 能在避免复杂谱分析的情况下, 直观灵敏反映故障, 故有利于故障诊断。

由于工程中电机工作于非理想工况(定子电压无法保证绝对平衡等), 正常运行时 F_p 不等于零, 所以实际中计算得到的特征量 F_p 应为

$$F_p = F_{pg} + F_{p0} \quad (6)$$

式中: F_{pg} ——由故障引起的特征量;

F_{p0} ——正常运行下的特征量。

先得出正常运行时的 F_{p0} , 再实时计算 F_p , 最后根据式(6)实时计算真正由定子匝间短路故障引起的特征量 F_{pg} , 可减少因工况不理想而造成的误判, 故选取 F_{pg} 作为故障特征量, 可以有效实现异步电机定子匝间短路故障诊断。

2 多回路数学模型的建立

采用多回路理论对绕线式异步电机进行建模, 以定子并联支路数为 1, 定、转子均为星型连接的结构为例。假定发生故障前为理想电机, 短路支路在定子 A 相绕组上, 短路电阻为 R_f , 流过短路电阻的电流为 i_f , 故障情况下, 定子 A 相可分为两条支路: 故障支路①和正常支路②, 定、转子绕组连接图如图 2 所示。

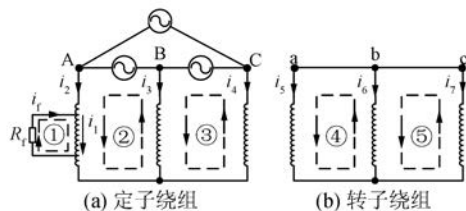


图 2 定、转子绕组连接图

根据瞬态分析, 在磁线性假设条件下, 假定方向按电动机惯例处理, 可列出支路 i 的电压和磁链方程:

$$\begin{cases} u_i = R_i i_i + p\psi_i \\ \psi_i = L_i i_i + \sum_{j \neq i}^m M_{ij} i_j \end{cases} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (7)$$

式中: R_i ——支路 i 的电阻;

i_i ——流过支路 i 的电流;

p ——微分算子;

L_i ——支路 i 的自感;

m ——电机中的支路数, 此时支路数 $m=7$;

M_{ij} ——支路 i 与支路 j 之间的互感系数。

式(7)用矩阵表示为

$$\mathbf{U} = \mathbf{R}\mathbf{I} + \mathbf{p}\boldsymbol{\psi} \quad (8)$$

$$\boldsymbol{\psi} = \mathbf{L}\mathbf{I} \quad (9)$$

式中: $\mathbf{U}$ ——支路电压矩阵;

$\mathbf{R}$ ——支路电阻矩阵;

$\mathbf{I}$ ——支路电流矩阵;

$\mathbf{L}$ ——支路互感矩阵。

根据所选回路,列出支路回路转换矩阵 $\mathbf{H}_T$:

$$\mathbf{H}_T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

将式(8)左乘 $\mathbf{H}_T$, 可得:

$$\mathbf{H}_T \mathbf{U} = \mathbf{R} \mathbf{H}_T \mathbf{I} + \mathbf{H}_T \mathbf{p} \boldsymbol{\psi} \quad (11)$$

考虑到故障支路电压 u_1 满足:

$$u_1 = -i_f R_f \quad (12)$$

定、转子支路电流 $\mathbf{I}$ 与回路电流 $\mathbf{I}_H$ 满足:

$$\mathbf{I} = \mathbf{H}_T^T \mathbf{I}_H \quad (13)$$

将式(9)、式(12)和式(13)代入式(11),选择回路电流 $\mathbf{I}_H$ 为状态变量,整理可得瞬态过程分析的状态方程为

$$\mathbf{p} \mathbf{I}_H = \mathbf{L}_H^{-1} (\mathbf{U}_H - \mathbf{R}_H \mathbf{I}_H) \quad (14)$$

其中: $\mathbf{L}_H = \mathbf{H}_T \mathbf{L} \mathbf{H}_T^T$;

$$\mathbf{U}_H = [0 \ U_{AB} \ U_{BC} \ U_{ab} \ U_{bc}]^T;$$

$$\mathbf{R}_H = \mathbf{H}_T \mathbf{R} \mathbf{H}_T^T + \mathbf{H}_T \mathbf{p} \mathbf{L} \mathbf{H}_T^T + \mathbf{R}_f \mathbf{B} \mathbf{H}_T^T;$$

$$\mathbf{B} = [1 \ -1 \ \text{zeros}(1 \ 5); \text{zeros}(4 \ 7)];$$

$\text{zeros}(X \ Y)$ 为 $X \times Y$ 的零矩阵。

故障后各支路间互感和漏感的计算可根据文献[19]得出。求解状态方程,可得定、转子回路电流,再根据式(13)进行回路支路电流转换,即可得到各支路电流。

3 仿真及结果分析

3.1 仿真模型

根据多回路数学模型,基于 m 语言调用 MATLAB 异步电机模型库的第 15 号电机进行仿真。电机基本参数如表 1 所示。分别对理想工况和非理想工况下 A 相发生不同严重程度的故障进行仿真。

表 1 异步电机参数

参数名称	参数值
额定功率/kW	4
定子额定电压/V	380
额定频率/Hz	50
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 430
极对数	2
定子电阻/Ω	1.405 3
转子电阻/Ω	1.395 4
定子漏感/H	0.005 8
转子漏感/H	0.005 8
定转子互感/H	0.114 8
转动惯量/(kg·m ²)	0.013 1
转矩阻尼系数	0.003 0

3.2 定子电流仿真结果分析

异步电机定子电流的仿真波形如图 3 所示,其中故障参考系数为 μ 。 μ 值为支路短路匝数与支路总匝数之比,可反映故障严重程度。图 3(a) 为理想工况下的定子电流波形图;图 3(b) 为理想工况下定子 A 相发生 $\mu=0.05$ 的匝间短路时定子电流波形图;图 3(c) 为电压不平衡时定子 A 相发生 $\mu=0.05$ 的匝间短路时的定子电流波形图;图 3(d) 为电压不平衡时的定子电流波形图。

由图 3 可得:

(1) 故障后定子的三相电流均有增大,这是气隙中增加了环流 i_f 产生的磁动势造成的;定子 A 相电流增大最明显,这是电压未改变而 A 相阻抗相对变小造成的。

(2) 电压不平衡时发生故障,定子电流大于理想工况下发生故障,这是三相电流受工况不理想和内部故障 2 种因素影响造成的,故利用以电流为基础推导出的特征量诊断故障时,需滤除非理想工况造成的影响。

(3) 电压不平衡区别于内部故障,三相电流不会同时大于额定值,而是电压大的相电流超过额定值,电压小的相电流低于额定值,因此可直接从电流波形判断出非电机内部故障,然后得到正常运行下的特征量 I_{p0}^* 以计算 I_{pg}^* 。

3.3 故障诊断分析

异步电机在理想和非理想工况下,特征量与故障严重程度的关系如图 4 所示,其中特征量的

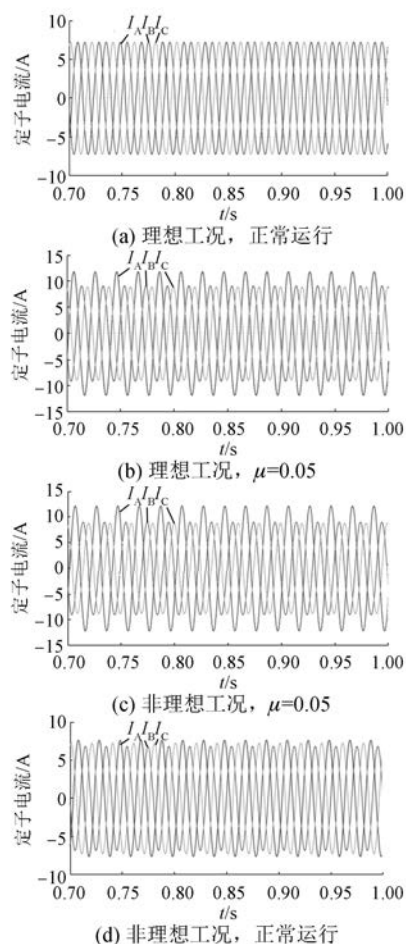


图3 定子电流仿真波形图

计算中,由于多回路数学模型中电感取值较为理想,谐波含量极少,故 ν 取5、7, k 取0、1。

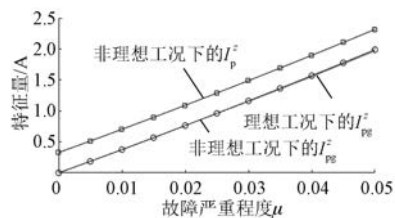


图4 特征量与故障严重程度的关系

由图4可看出,理想工况下由故障引起的特征量 I_{pg}^z ,非理想工况下计算所得的 I_p^z 和 I_{pg}^z 都随故障迅速改变,且与故障严重程度正相关,几乎呈线性关系;滤除非故障因素后,非理想工况下的 I_{pg}^z 与理想工况下的 I_{pg}^z 差异很小,证明了第1节分析的正确性。

由分析可知, I_{pg}^z 对异步电机定子匝间短路呈

高灵敏性,能迅速捕捉故障,且对电压源不平衡这类非理想工况具有鲁棒性,用 I_{pg}^z 的值诊断故障不会受非故障因素的影响。故通过实时监测 I_{pg}^z 的值对异步电机定子匝间短路进行诊断是高效可行的。

4 结 语

本文通过磁势分析,推导了异步电机定子匝间短路故障后的定子电流情况。据此,应用派克变换得到了用于诊断匝间短路的故障特征量 I_{pg}^z ,并建立了多回路数学模型进行仿真验证,结果表明:

(1) 非理想工况(定子电压不平衡等)下定子电流的波形区别于定子匝间短路的波形,可先从电流波形初步判断是否发生内部故障,然后再利用故障特征量 I_{pg}^z 精确诊断。

(2) 故障特征量 I_{pg}^z 随短路程度加重而灵敏地增大,且适用于非理想工况(定子电压不平衡等)下发生的定子匝间短路故障,能够在避免复杂谱分析的情况下可靠高效地诊断异步电机的定子绕组匝间短路故障。

【参考文献】

- [1] 马宏忠.电机状态监测与故障诊断[M].北京:机械工业出版社,2008:786-788.
- [2] GANDHI A, CORRIGAN T, PARSA L. Recent advances in modeling and online detection of stator inter-turn faults in electrical motors [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1564.
- [3] 魏书荣,张路,符杨,等.基于拟序阻抗的海上双馈电机定子绕组匝间短路早期故障辨识[J].中国电机工程学报,2017,37(1):273.
- [4] SINGH G, NAIKAN V N A. Infrared thermography based diagnosis of inter-turn fault and cooling system failure in three phase induction motor [J]. Infrared Physics and Technology, 2017, 87: 134.
- [5] SOTTILE J, KOHLER J L. An on-line method to detect incipient failure of turn insulation in random wound motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1993, 8(4): 762.
- [6] 许伯强,李和明,孙丽玲,等.异步电动机定子绕组匝间短路故障检测方法研究[J].中国电机工程学报,2004,24(7):181.

- [7] CHENG S W, ZHANG P J, HABETLER T G. An impedance identification approach to sensitive detection and location of stator turn-to-turn faults in a closed-loop multiple-motor drive [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(5): 1545.
- [8] LEE S B, TALLAM R M, HABETLER T G. A robust, on-line turn-fault detection technique for induction machines based on monitoring the sequence component impedance matrix [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2003, 18(3): 865.
- [9] 方芳, 杨士元, 侯新国, 等. 派克矢量旋转变换在感应电机定子故障诊断中的应用 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 99.
- [10] 马宏忠, 张志艳, 张志新, 等. 双馈异步发电机定子匝间短路故障诊断研究 [J]. 电机与控制学报, 2011, 15(11): 50.
- [11] 王攀攀, 史丽萍. 利用微粒群算法提取的正负序分量检测感应电机定子故障 [J]. 电力自动化设备, 2015, 35(2): 91.
- [12] STAVROU A, SEDDING H G, PENMAN J. Current monitoring for detecting inter-turn short circuits in induction motors [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2001, 16(1): 32.
- [13] 李俊卿, 王栋. 双馈感应发电机转子匝间短路时定子电流谐波分析 [J]. 电力系统自动化, 2014, 38(21): 71.
- [14] 王志兴. 双馈风力发电机绕组匝间短路故障的建模与分析 [D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- [15] 李俊卿, 李忠徽, 全宗义. 基于信息融合的双馈风机定子匝间短路故障诊断 [J]. 电机与控制应用, 2017, 44(8): 99.
- [16] NANDI S. Detection of stator faults in induction machines using residual saturation harmonics [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2006, 42(5): 1201.
- [17] 马宏忠, 张艳, 魏海增, 等. 基于转子平均瞬时功率的双馈异步发电机定子绕组匝间短路故障诊断 [J]. 电力自动化设备, 2018, 38(4): 151.
- [18] 方红伟, 夏长亮, 修杰. 定子绕组匝间短路时发电机电磁转矩分析 [J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(15): 83.
- [19] 陈众. 电机模型分析及拖动仿真——基于 MATLAB 的现代方法 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2017.

收稿日期: 2018-12-18

[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,国内外公开发行人,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。

携手节能减排 悠享生活空间

让你我从点滴做起



《电机与控制应用》杂志社宣