

# 铁心异常时基于异频电流激励法的定子铁心损耗试验分析

盛明珺<sup>1</sup>, 王晓兰<sup>1</sup>, 刘守豹<sup>1</sup>, 徐 铭<sup>2</sup>, 宋佳骏<sup>1</sup>, 胡思宇<sup>1</sup>

(1. 大唐水电科学技术研究院有限公司, 广西 南宁 530007;

2. 中国长江电力股份有限公司技术研究中心, 湖北 宜昌 443000)

**摘 要:** 为防止发电机在运行中因片间绝缘损坏, 造成短路, 引起局部过热, 甚至危及机组的安全运行, 需要对发电机的定子铁心进行损耗试验。对于试验方案在进行大型机组试验时存在绕线困难等问题, 提出了一种采用异频电流激励法进行发电机定子铁心损耗试验的方法。建立铁心存在短路缺陷情况下的有限元仿真模型, 通过对比工频大电流激励和异频小电流激励下铁心的发热情况, 论证了异频小电流可以替代工频大电流进行铁心损耗试验。

**关键词:** 缺陷铁心; 损耗试验; 有限元方法; 异频小电流

中图分类号: TM31 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)11-0078-07

doi: 10.12177/emca.2022.113

## Stator Core Loss Test Analysis Based on Different Frequency Current Excitation Method Under Abnormal Iron Core Condition

SHENG Mingjun<sup>1</sup>, WANG Xiaolan<sup>1</sup>, LIU Shoubao<sup>1</sup>, XU Ge<sup>2</sup>, SONG Jiajun<sup>1</sup>, HU Siyu<sup>1</sup>

(1. Datang Hydropower Science & Technology Research Institute Co., Ltd., Nanning 530007, China;

2. Technology Research Center of China Yangtze Power Co., Ltd., Yichang 443000, China)

**Abstract:** Due to the damage of insulation between blades during operation, a short circuit may occur in the generator, causing local overheating, and even endangering the safe operation of the unit. It is necessary to conduct a loss test on the stator core of the generator. The current test scheme has problems such as difficulty in winding when conducting the large-scale unit tests. A method of using the different frequency current excitation method to test the loss of the stator iron core of the generator is proposed. The finite element simulation model of the iron core with short-circuit defects is established. By comparing the heating conditions of the iron core under the conditions of power frequency large current excitation and different frequency small current excitation, it is demonstrated that different frequency small current can replace the power frequency large current to carry out iron core loss test.

**Key words:** defective iron core; loss test; finite element method (FEM); different frequency small current

## 0 引 言

发电机定子铁心是发电机的重要组成部分,

定子铁心是由硅钢片叠合组装成的, 由制造和检修出现的问题, 以及运行中出现的正常损耗, 均可能导致铁心的片间绝缘损坏, 造成短路, 在短路区

收稿日期: 2022-06-02; 收到修改稿日期: 2022-09-08

作者简介: 盛明珺(1980—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为发电机故障诊断。

王晓兰(1995—), 女, 硕士, 助理工程师, 研究方向为水电大数据。

刘守豹(1983—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统暂态分析与工程电磁场数值计算。

域形成局部过热的情况<sup>[1-6]</sup>。根据统计,由定子绕组绝缘破坏带来的绕组短路故障占发电机实际运行中故障总数的 30%~40%<sup>[7-8]</sup>。因此,为了保障运行安全,在进行交接或预防性试验时均要进行定子铁心损耗试验<sup>[9-13]</sup>。

传统的试验方式是基于工频大电流激励法进行的,在定子铁心上缠绕激励线圈,并在线圈中通入工频电流,激励电流大小根据绕线匝数有所不同,但是总体来看发电机容量越大,需要的激励电流越大。此时,铁心内部会产生交变磁通,铁心在交变磁通中产生涡流和磁滞损耗,铁心发热,温度会快速升高<sup>[14-18]</sup>。若铁心中片间绝缘受损或劣化,劣化部分会产生较大的局部涡流,温度快速上升,从而找出过热点<sup>[19]</sup>。试验时在铁心上缠绕测量绕组,测出铁心中不同时刻的磁感应强度,并根据测得的励磁电流、电压计算出铁心的有功损耗<sup>[20-22]</sup>。把测量、计算结果与设计要求相比较,来判断定子铁心的制造、安装整体质量。

由于发电机容量越大,需要的励磁电流越大,试验时的绕线工作就变得十分艰难。为了降低发电机定子铁心损耗试验的工作难度,本文提出通过增加激励电流频率提高铁心感应涡流幅值,从而采用异频小电流取代工频大电流的替代方案。为了对该方法的可行性进行研究,本文采用有限元仿真的方式,建立铁心存在缺陷情况下的分析模型,通过对工频大电流和异频小电流下的异常铁心发热情况进行分析,验证了采用异频小电流在铁心异常情况下的仿真结果与工频大电流存在相似性,论证了采用异频电流法开展发电机定子铁心损耗试验的可行性。

## 1 理论分析

根据法拉第电磁感应定律,变化磁场中感应电动势的计算公式为

$$e = -N \frac{d\Phi}{dt} \quad (1)$$

式中: $e$  为感应电动势; $N$  为线圈匝数; $\Phi$  为磁通量; $t$  为时间。

假设磁通量  $\Phi$  随着时间按照正弦规律变化,即有:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (2)$$

式中: $\Phi_m$  为主磁通的最大值; $\omega$  为角频率。

将式(2)代入式(1)得到:

$$e = -N\omega\Phi_m \cos \omega t \quad (3)$$

感应电动势  $e$  的最大值为

$$E_m = N\Phi_m \omega \quad (4)$$

其有效值为

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} E_m = \sqrt{2} \pi f N \Phi_m \quad (5)$$

式中: $f$  为激励电源频率。

式(5)的近似计算公式为

$$E = 4.44 f N \Phi_m \quad (6)$$

$\Phi_m$  的磁路表达式为

$$\Phi_m = \frac{I}{R_m} \quad (7)$$

式中: $I$  为励磁电流; $R_m$  为磁路的磁阻。

因此式(6)可改写为

$$E = 4.44 f N \frac{I}{R_m} \quad (8)$$

在发电机定子铁心中,如果感应电流在微小回路的电阻为  $R$ ,其发热量  $P$  的计算式为

$$P = E^2 / R = \left( 4.44 f N \frac{I}{R_m} \right)^2 / R \quad (9)$$

由此可见,采用交变磁场对定子铁心进行加热,在试验对象及空间材料保持不变的前提下,铁心发热量与激励线圈匝数、激励电流频率、激励电流幅值的平方成正比。

因此,从理论上讲,在保持定子铁心发热量不变的情况下,通过增加励磁电流的频率,可以减小电流幅值,从而减小励磁线圈的截面积和质量。

## 2 方案设计

根据相关理论,设计仿真模型,如图 1 所示。试验设计具体说明如下:

(1) 采用有限元仿真软件 ANSYS Maxwell 建立铁心缺陷情况下时变电磁场仿真模型。

(2) 采用工频大电流通过激励线圈,得到工频大电流下,异常铁心的磁通密度分布、涡流分布和发热量分布的仿真结果。

(3) 进一步地,增加电流频率,减小电流幅值,即在激励线圈中通入异频小电流,进行仿真及分析。

(4) 设置结果观察线及观察点,对仿真结果

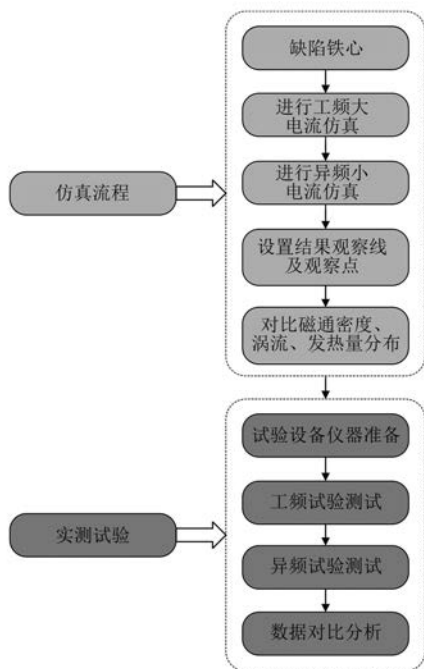


图1 仿真及实测试验方案设计图

进行局部放大观察。

(5) 对比两种电流激励下的磁通密度、涡流、发热分布情况,检验其一致性和可行性。

(6) 进行规定环境变量下,工频试验。

(7) 进行规定环境变量下,异频试验。

(8) 对比铁心异常情况下两种激励下的电量信息及温升情况,验证异频电流开展铁心损耗试验的可行性。

### 3 仿真试验及分析

根据上述方案,进行缩比模型建立,进一步地进行仿真和实测试验,并对结果进行分析。

#### 3.1 有限元仿真模型的建立

为了对铁心存在缺陷情况下异频小电流激励法与工频大电流激励法的相似性进行分析,采用有限元仿真软件 ANSYS Maxwell 建立时变电磁场仿真模型,对应的仿真模型如图2所示。

图2(a)为模型的三维视图,模型的内直径7 mm,外直径10 mm,硅钢片厚度0.5 mm,硅钢片的片间距离0.2 mm,激励线圈直径0.4 mm,固定钢构厚度为0.2 mm。将缺陷部分放大如图2(b)所示,铁心缺陷为硅钢片间出现短路,其中固定钢构为导电导磁材料,其与硅钢片导通,连接中间、

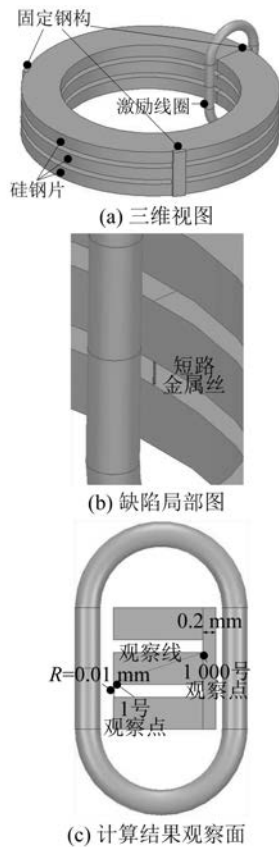


图2 仿真模型

下层硅钢片的短路金属丝为铜质圆柱体,半径为0.01 mm。仿真结果的观察面如图2(c)所示,观察线位于中间硅钢片,由于铁心缺陷情况下场量变化更加剧烈,故将观察点的数量设置为1 000个。

#### 3.2 仿真结果

进行仿真时,在激励线圈中通过50 Hz、13.68 A的工频大电流,仿真得到观察面上的场量分布情况如图3所示。由图3可知,中层和下层铁心在存在短路点的情况下,感应电流及发热区域均集中在短路导体与铁心的连接处。

进一步地,为了对铁心存在缺陷情况下采用异频小电流法进行测试有效性验证,在激励线圈中通入1 000 Hz、1.368 A的异频小电流,得到观察面上的场量结果如图4所示。由图4可知,在异频小电流作用下的磁通密度与工频大电流时的磁通密度差异较为明显,但是涡流、发热量分布情况较为类似,均在短路导体与铁心的连接处出现明显发热区域。

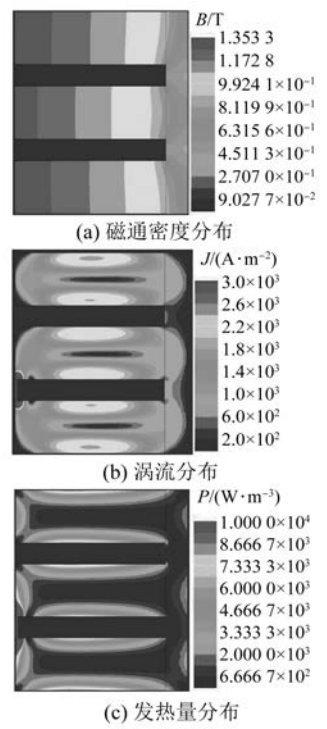


图3 铁心缺陷时工频大电流激励下的仿真结果

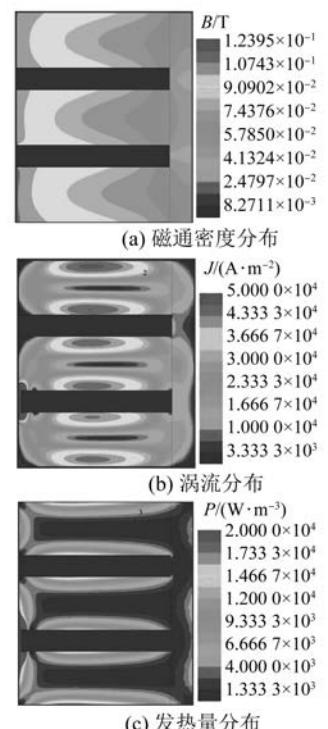


图4 铁心缺陷时异频小电流激励下的仿真结果

3.3 仿真结果分析

为了对两种情况下的场量分布情况进行量化分析,激励电流幅值减小后观测线上场量分布于正常电流下的分布如图5~图7所示。图5为观察线上磁通密度分布情况;图6为观察线上的涡流分布情况,并对不同区间的观察点变化情况进行了放大显示;图7为观察线上的发热量分布情况,同样对不同区间的观察点进行了放大显示。

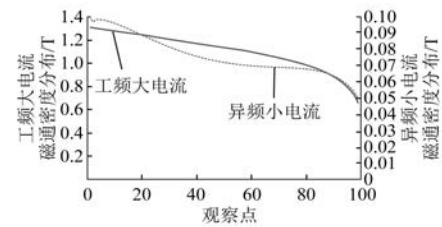


图5 磁通密度分布

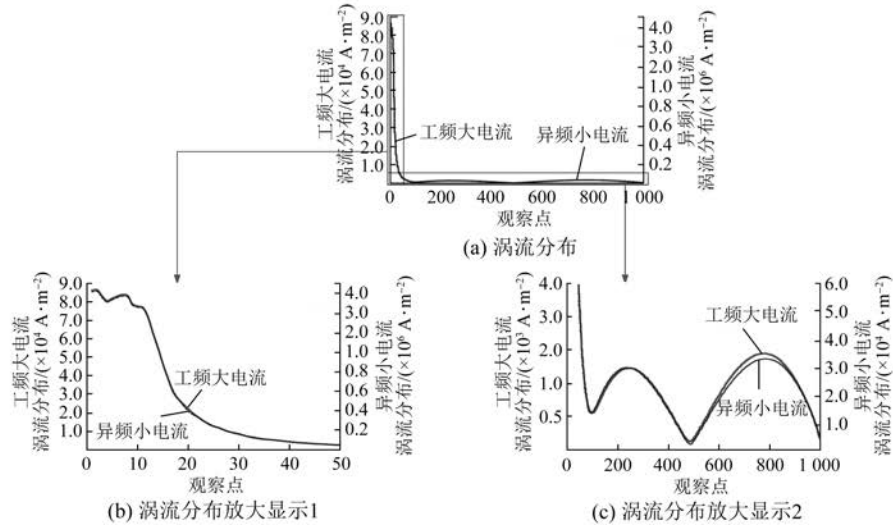


图6 涡流分布及其放大显示

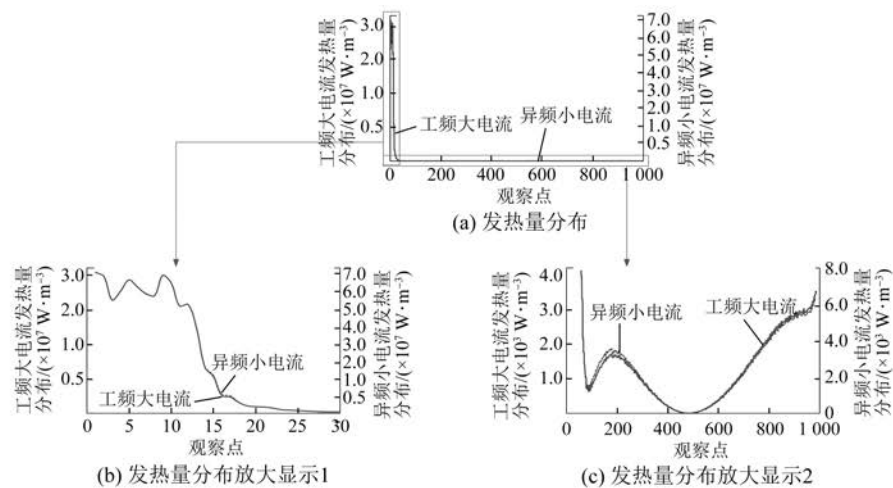


图 7 发热量分布及其放大显示

由图 5~图 7 可知,铁心在短路点涡流分布和发热量均发生畸变,但是从整体分布趋势来看,缺陷铁心在通入工频大电流和异频小电流的情况下,除了磁通密度有较为明显的差异外,涡流分布和发热量分布均有较好的相似性。

3.4 试验及分析

为进一步验证采用异频电流法开展定子铁心损耗的可行性,开展试验测试。试验采用的具体参数如表 1 所示,发电机型号为 M2BAX100LA4。

表 1 发电机主要参数表

| 参数名称                               | 参数值        |
|------------------------------------|------------|
| 额定功率/kW                            | 2.2        |
| 额定频率/Hz                            | 50         |
| 额定电流/A                             | 4.45       |
| 额定电压/V                             | 380        |
| 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> )        | 1 437      |
| 定子铁心外径/m                           | 0.170(实测值) |
| 定子铁心内径/m                           | 0.130(实测值) |
| 定子铁心长度/m                           | 0.095(实测值) |
| 硅钢片代号                              | 50W600     |
| 定子槽深/m                             | 0.015(实测值) |
| 磁场强度(1.4 T 下)/(A·m <sup>-1</sup> ) | 400(查表值)   |

主要测试设备与仪器如图 8 所示。为模拟铁心异常情况,采用刀片将定子铁心端部的漆膜刮掉,通过焊锡将硅钢片人为短路,制造故障点。

试验时试验室温度 24 ℃、湿度 35%。在



图 8 测试设备及仪器

1.4 T 磁场强度的情况下,激励线圈 30 匝,开展该发电机定子铁心损耗试验工频激励电压为 4.2 V,激励电流为 7.3 A。为了加快试验,将激励电压升高至 20.4 V,激励电流 22.0 A,发热有功功率为 148.3 W。

试验结果如表 2 和表 3 所示。在定子铁心吸收有功功率相同的情况下,故障点与其他区域的温差明显,且这种差异在通电之初就表现出来。不同频率下持续通电 15 min 后的热成像图片如图 9 所示。由图 9 可知,在定子铁心吸收有功功率相同和频率不同时,最高温度点均位于人为制造的缺陷点处,表明采用异频电流激励法对于定子铁心短路缺陷点位的检测有效。

4 结 语

(1) 保持定子铁心发热量不变的情况下,通过增加励磁电流的频率,可以减小电流幅值,从而减小励磁线圈的截面积和质量。

(2) 存在短路点时,在激励线圈中通入工频大电流和异频小电流,均会在短路导体与铁心的

表 2 铁心异常时工频激励下电特征参数及温升情况

| 时间/min | 测量电压 $U/V$ | 激励电流 $I/A$ | 电源频率 $f/Hz$ | 有功功率 $P/W$ | 功率因数    | 故障点最高温度/ $^{\circ}C$ | 铁心其他位置温度/ $^{\circ}C$ | 环境温度/ $^{\circ}C$ |
|--------|------------|------------|-------------|------------|---------|----------------------|-----------------------|-------------------|
| 1      | 20.3       | 21.9       | 50          | 146.7      | 0.328 9 | 32.7                 | 29.4                  | 24                |
| 5      | 20.3       | 21.9       | 50          | 146.7      | 0.328 9 | 38.4                 | 32.8                  | 24                |
| 10     | 20.3       | 21.9       | 50          | 146.7      | 0.328 9 | 43.4                 | 34.8                  | 24                |
| 15     | 20.3       | 21.9       | 50          | 146.7      | 0.328 9 | 45.3                 | 37.4                  | 24                |

表 3 铁心异常时 300 Hz 激励下电特征参数及温升情况

| 时间/min | 测量电压 $U/V$ | 激励电流 $I/A$ | 电源频率 $f/Hz$ | 有功功率 $P/W$ | 功率因数    | 故障点最高温度/ $^{\circ}C$ | 铁心其他位置温度/ $^{\circ}C$ | 环境温度/ $^{\circ}C$ |
|--------|------------|------------|-------------|------------|---------|----------------------|-----------------------|-------------------|
| 1      | 57.0       | 4.27       | 300         | 148.2      | 0.610 7 | 38.7                 | 30.9                  | 24                |
| 5      | 57.0       | 4.27       | 300         | 148.2      | 0.610 7 | 41.6                 | 34.2                  | 24                |
| 10     | 57.0       | 4.27       | 300         | 148.2      | 0.610 7 | 46.0                 | 36.0                  | 24                |
| 15     | 57.0       | 4.27       | 300         | 148.2      | 0.610 7 | 49.5                 | 37.6                  | 24                |

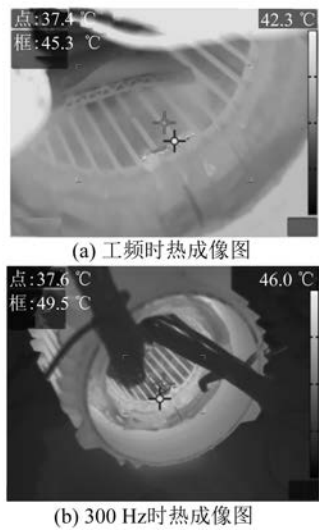


图 9 铁心异常情况下两种激励电流 15 min 热成像图

连接处集中出现感应电流及发热区。

(3) 在铁心存在短路缺陷的情况下,采用异频小电流法开展发电机定子铁心损耗试验能够保证铁心发热分布与工频大电流激励时除了磁通密度分布存在明显差异外,在涡流分布和发热量分布上基本一致,理论上证明了异频小电流对工频大电流的可替代性。

(4) 在定子铁心吸收有功功率相同的情况下,故障点与其他区域的温差明显,且这种差异在通电之初就表现出来。在频率不同时,最高温度点均位于人为制造的缺陷点处,采用异频电流激励法对于定子铁心短路缺陷点位的检测效果确切。

【参考文献】

[ 1 ] 孟大伟,王晓慧. 电机定子铁心片间短路故障分析的解析法[J]. 电机与控制学报,2021,25(3): 77.

[ 2 ] HAMZEHBABMANI H, ANDERSON P, HALL J, et al. Eddy current loss estimation of edge burr-affected magnetic laminations based on equivalent electrical network-part I: fundamental concepts and FEM modeling[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014,29(2): 642.

[ 3 ] 宗和刚,白连平,张利. 旧电机定子铁心老化检测和评价方法的研究[J]. 电机与控制应用,2016,43(5): 79.

[ 4 ] ELDIEB A, ANAYI F. Evaluation of loss generated by edge burrs in electrical steels [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2016,52(5): 15934283.

[ 5 ] 王团结,张少鹏. 水轮发电机定子端部过热故障分析与诊断[J]. 电工技术,2020(21): 159.

[ 6 ] 田井呈,邓自清,王飞宇,等. 异步电动机定子铁心 3D 等效热路模型研究[J]. 电机与控制应用, 2016,43(2): 42.

[ 7 ] SURYA G N, KHAN Z J, BALLAL M S, et al. A simplified frequency-domain detection of stator turn fault in squirrel-cage induction motors using an observer coil technique [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2017,64(2): 1495.

[ 8 ] GRUBIC S, ALLER J M, LU B, et al. A survey on testing and monitoring methods for stator insulation systems of low-voltage induction machines focusing on turn insulation problems [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2008,55(12): 4127.

- [9] 马振华, 黄浩. 大型水轮发电机定子铁心磁化试验及分析[J]. 小水电, 2017(6): 37.
- [10] ELDIEB A, ANAYI F. Evaluation of loss generated by edge burrs in electrical steels [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2016, 52(5): 15934283.
- [11] SIDDIQUE A, YADAVA G S, SINGH B. A review of stator fault monitoring techniques of induction motors[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2005, 20(1): 106.
- [12] LEE K, HONG J, LEE K, et al. A stator-core quality-assessment technique for inverter-fed induction machines [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 46(1): 213.
- [13] 钟珍华, 钟必胜. 沐若水电站水轮发电机定子铁损试验工艺探讨[J]. 湖南水利水电, 2015(6): 78.
- [14] 王劲松, 吴宇辉. 发电机定子铁心片间短路故障诊断系统[J]. 华北电力技术, 2004(2): 34.
- [15] 关建军, 于庆斌, 钟浩文. 发电机定子铁心 EL CID 试验分析与探讨[J]. 大电机技术, 2005(5): 19.
- [16] WU Y, LI X, BADCOCK R A, et al. AC loss simulation in HTS coil windings coupled with an iron core [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2022, 32(6): 4701505.
- [17] SATO T, ENOKIZONO M. Evaluation of stator core loss of high speed motor by using thermography camera [J/OL]. AIP Advances, 2018, 8: 047609. <https://doi.org/10.1063/1.4994212>.
- [18] GUAN W, ZHANG D, YANG M, et al. Flux and loss distribution in iron cores with hybrid T-joint[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2019, 29(2): 18449094.
- [19] 丁舜年. 大型电机的发热与冷却[M]. 北京: 科学出版社, 1992.
- [20] BERTENSHAW D R, SMITH A C, HO C W, et al. Detection of stator core faults in large electrical machines[J]. IET Electric Power Applications, 2012, 6(6): 295.
- [21] 王秀兰. 大型电机铁心故障实验检测与数值仿真分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2016.
- [22] 林海鹏. 大型发电机定子铁心片间短路检测系统设计[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2013.

(上接第 39 页)

- [10] GUAN B, DI C, KE Z, et al. A numerical model for single-point bearing faults analysis in submersible induction motors [J/OL]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2022. <https://doi.org/10.1002/tee.23691>.
- [11] DALVAND F, DALVAND S, SHARAFI F, et al. Current noise cancellation for bearing fault diagnosis using time shifting [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(10): 8138.
- [12] KRIZHEVSKY A, SUTSKEVER, I, HINTON G E, et al. ImageNet classification with deep convolutional neural networks [J]. Communications of the ACM, 2017, 60(6): 84.

## [主要栏目]

- |              |           |             |
|--------------|-----------|-------------|
| • 控制与应用技术    | • 研究与设计   | • 故障诊断与保护   |
| • 新能源发电与局域电网 | • 新能源汽车技术 | • 发电机组及其控制  |
| • 测试技术与测控系统  | • 材料与工艺   | • 电机生产及质量管理 |
| • 电力电子变流器技术  | • 智能制造    | • 节能应用      |
| • 实用技术成果     |           |             |

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