

# 易立创静态电机及绕组分析仪

## 测试技术在电机、变压器、线圈故障诊断的应用

刁孟军

(北京捷润新特自动化控制技术有限责任公司, 北京 100300)

**摘要** 论述静态电机及绕组分析仪测试技术的核心理念。重点介绍了静态电机及绕组分析仪测试的核心方法, 及对于各种电机、变压器、线圈故障的诊断和故障解决方法。

**关键词** 浪涌;局放测试技术;匝间短路评判

### 1 引言

随着经济建设的发展和电气化程度的提高, 电机设备已被广泛应用于工业生产的各个领域, 及时准确地发现电机设备潜在的和现有的故障是保证生产安全运行的重要措施。电机设备是组成供、用电系统的基本元件, 在运行中受到电、热、机械、周围环境等各种因素的作用使其性能逐渐劣化, 最终导致故障; 发生故障, 即便停止工作的时间极短, 也会造成很大的损失。故障类型也多种多样: 既有缓变故障和突变故障, 又有电气故障和机械故障; 既有线性系统故障, 又有非线性系统故障, 其关系错综复杂, 给电机设备故障的有效、快速诊断带来困难。

许多电机维护和可靠性计划都专注于在线测试方法。换句话说, 当电机运行时, 其温度、振动、电流和其他条件会持续监测。

可以生成实时数据和警报。对于许多大型泵电机来说, 这是关键信息, 但它不是唯一的来源。离线测试提供了有价值的信息, 可以纳入用户的维护和可靠性计划。

离线测试也称为静态电机测试, 离线测试可以通过测试高于操作电压来发现绝缘弱点。比在线操作电压下测量的问题和绝缘问题提供更早的预警, 当测试电压超过电机的峰值运行电压时, 它被称为过压测试, 是及早发现绝缘故障的关键。过压测试包括浪涌测试、部分放电 (PD) 测量和直流 (DC) 高压 (hipot) 测试。

美国电力研究协会 (EPRI) 对电机故障的研究表明, 电机故障的 53% 与机械部份有关, 47% 来源于电气故障 (不包括新电机和修理后电机的本身缺陷)。

机械故障一直是采用传统的振动分析方法和红外检测方法进行检测, 但电气故障则使用毫欧测试, 绝缘测试、高压测试、浪涌比较测试、局部放电测试法, 使用的仪器多, 测试工作繁琐。

长期以来, 许多设备维护部门、技术人员和工程师依靠绝缘电阻和直流电阻测试法来检测电机故障, 而很少执行电气故障预知维修程序 (PdM), 直至 1986 年易立创公司成立, 研发出一款 ITIG 系列静态电机及绕组分析仪测试技术, 这项技术不仅帮助您的客户解决电机特定问题, 还帮助客户解决逆变器和 VFD 驱动问题。此仪器用于诊断问题、质量保证、电机可靠性程序和各种维护计划。

### 2 电机故障诊断的测量方法

电机的测试方法分为三大类:

动态电气测试 (DET): 是指带电设备的电气评估;

动态机械测试（DMT）：指带电设备的机械评估；

静态电气测试（SET）：指不带电设备的电气评估。

## 2.1 动态（在线）电气测试

动态电气测试包括电压计、安培计、功率计及数据采集器等常规测试仪表。主要测试电压不平衡或做电压降测试，检测转子条故障，测试系统功率及功率因数。

此外，还包括一些分析仪器，如电源质量分析仪，用于检测电源质量；动态效率仪，用来精密估算电机效率曲线；动态电机电路分析，也称之为电机电流特征分析法（MCSA），用于对带电设备进行分析，重点是转子条测试、电源质量、效率等一些基本电气故障。

## 2.2 动态机械测试

动态机械测试主要是采用红外分析法与振动分析法，需要大量的实践经验。分析人员可用振动测试仪或 FFT 分析仪来解决设备故障，检测连接问题、不对中问题、负载问题，并可用来提示转子条、绕组或气隙是否存在问题。

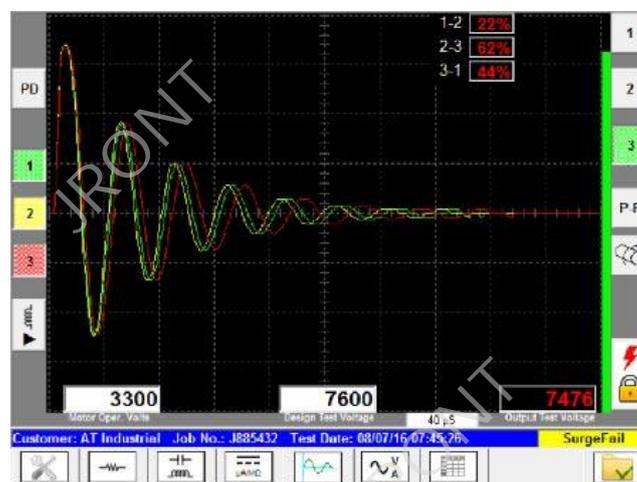
## 2.3 静态（离线）电气测试

常规静态电气测试包括欧姆表、毫欧表、高压绝缘测试仪、LCR 测试仪（电阻、电容、电感）、浪涌比较测试。这些检测方法所带来的问题是：某些大电机绕组非常低，以至于所用的欧姆表无法足够精确地检测故障，同时，如果存在高阻故障（高于简单绕组电路）还会漏检；许多时候，电机虽然出现故障，而电阻却仍然保持平衡。

ITIG 系列静态电机及绕组分析仪测试技术，采用静态电气测试（SET）是一种基于浪涌和局放分析检测的仪器，用于检测绕组故障（匝间、绕组及相间短路等），绝缘电阻故障及转子故障（转子偏心，气隙、转子断条或铸造缺陷）。

浪涌测试是最常见的电机测试之一，可以发现电机绕组中的匝间绝缘弱点。如果未检测到，匝间绝缘弱点将首先导致匝间短路，然后接地绝缘层击穿，这将导致灾难性的电机故障。在浪涌测试期间，电压脉冲会施加到绕组上。这会导致每个电机相位中的衰减波，并由测试仪记录和显示。

如果存在匝间绝缘损坏，则在测试的相或线圈之间会出现波频差。



如图 1：浪涌测试（图片由易立创仪器公司提供）

差值以百分比计算，可以设置百分比差值的故障限值（图 1）

直流耐压测试提供了有关接地绝缘层击穿的重要信息。直流耐压测试包括阶跃电压测试和斜坡测试，用于指示如果存在弱点，则接地绝缘层会在哪个电压下开始击穿。

### 预测性维护

超过工作电压的浪涌测试或耐压测试失败意味着应安排对电机进行修理或更换，但不必立即将其取出。如果按照说明和标准进行测试，则直流耐压或浪涌测试失败不会损坏绕组。

PD（局部放电）测量是绝缘破坏的最早指标。最好将其用作预测性维护工具，以随时间推移趋势测量。如果首次检测到 PD（局部放电）的电压（称为重复 PD 起始电压（RPDIV））在一段时间内下降，则表示绝缘击穿（图 2）。

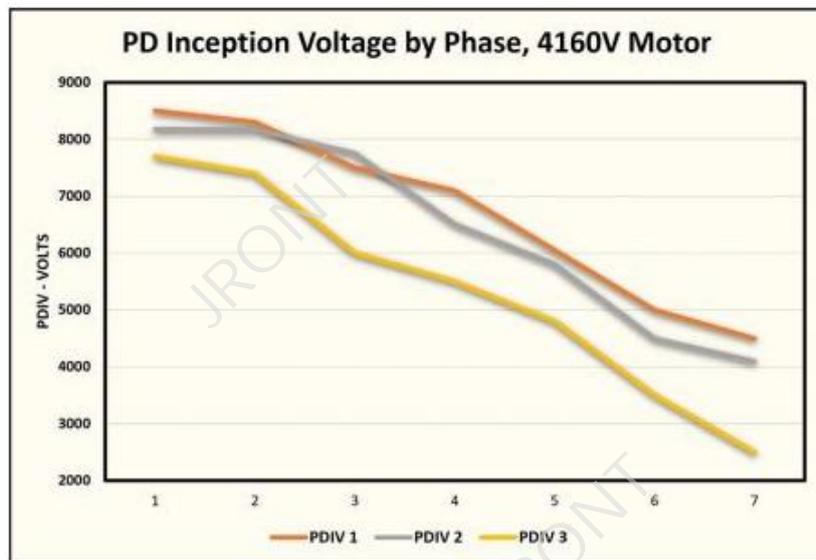


图 2: PDIV 图表

### 电机数据

测试电机会生成大量数据，因此数据存储和分析是这项工作的重要组成部分。有些设施管理着数百甚至数千个电机。除测试结果外，资产管理人員还需要一个测试仪，该测试仪可以导入和存储电机数据，例如电机 ID 号，资产号，位置/说明和其他电机规格。

### 报告

高级静态测试仪可以生成测试报告，并允许用户查看标准报告软件中的测试摘要。借助 Excel 或其他电子表格和数据库软件，趋势分析可显示绝缘系统的逐渐变化，并帮助用户提前发现问题。此外，可以比较具有相似规格的电机组，以便“坏曲线”脱颖而出并可以解决。

### 便携式

并非所有电机都可以在中心位置进行测试。先进的静态电机测试仪是便携式的，并且具有坚固，独立的外壳。它们专为测试设施或现场应用中的各种电机而设计。对于更高的电压，便携性变得更加关键。可以使用由测试仪控制的电源组，测试电压高达 40 kV (kV)。

电压测试范围广泛

根据使用的类型和电机，测试电压的范围很大。交流（AC）电机，直流（DC）电机、发电机和各种变压器都可以离线测试。除了上述过电压测试外，静态电动机测试还可以包括低电压测试，以更全面地了解电机的绝缘状况。

其他测试包括：

绝缘电阻：例如欧姆，介电吸收比（DAR），极化指数（PI）

绕组电阻测量

电容，电感，阻抗和相角测量

转子影响检查（RIC）测试以查找鼠笼式转子问题

### 3 MCA 电机电路分析技术应用

自 1950 年代以来，一直存在低压和高压电机电路分析（MCA）方法，而低压 MCA 技术在 1980 年代开始在商业上应用。自 1980 年代中期以来，MCA 技术已在所有行业的预测维护（PdM）和运动诊断程序中变得越来越普及。虽然这些技术的描述是“低”和“高”电压，但它们描述的是仪器输出的类型，而不是测试的电机的类型。

#### 4.1 电机的故障分类

电机定子绕组可能有 4 种基本的故障类型：匝间短路，在同一绕组匝间产生的故障；线圈间短路，在同一相的线圈产生的故障；相间短路，不同相线圈之间产生的故障；接地故障，在线圈与地或相地之间出现的故障。

转子故障有三种基本类型：1) 转子断条，由于启动次数过于频繁、过热、转子拖动或其它问题引起；2) 铸造缺陷，存在于铸造转子中；3) 气隙问题，气隙偏心引起旋转设备的振动，影响电机设备零部件的可靠性。

#### 4.2 MCA 测试的评估

MCA 技术利用电阻、电感、阻抗、倍频测试值 I/F、阻抗角（相角）、及绝缘值，全面评估电机的整体性能：

\*电阻：相间电阻不平衡不应超过 5%。如果存在不平衡，但 I/F 和相角平衡，可能表示接头松动。如果 I/F 及相角不平衡，则存在着严重的绕组或导线故障。

\*阻抗及电感：反映定子绕组与转子故障。直接指示定子三相平衡与否。但当 Z、L 不平衡而 R、I/F 平衡，说明转子故障（由于互感作用）。

\*相角和 I/F 值：指示绕组短路（匝间、层间和相间）的基本标志。各相间相角读数差异应在 1 度以内（例如：74、75、76 良；74、76、76 坏），I/F 读数应在 -15% 到 -50% 范围内（频率加倍时电流缩减），相间差异为 2% 以内（例如：-44、-45、-46 是良；-44、-47、47 是坏）。如果检测到较小偏差，则是早期匝间故障的迹象。

\*转子测试：通过一定次数的改变转子的位置，读取一系列电感或阻抗值，恒定不变，则转子状况是可接受的，反之则说明转子的缺陷。

\*绕组温度 根据 IEEE 标准，默认参考温度为 20° 绕组温度用于将绕组电阻和电阻兆欧为参考温

度。这样，这些值可以随着时间的推移进行比较，以达到趋势的目的，尽管绕组温度发生了变化。

根据IEEE标准，默认参考温度为20度的绕组电阻和40度的阻搞。IEEE43在40° C处使用兆欧作为最小兆欧值。这些默认的参考温度是可变的。例如，MIL规范用户的绕组电阻参考温度为25° C。

如果温度超出IEEE43标准规定的10° C到60° C范围，则在兆欧值前面出现一个波浪号。这是为了提醒用户温度补偿公式在这个范围之外是不准确的。

RPDIV 是 IEC61934 标准中描述的电压作为跟踪的值

\*兆欧测量是对地面绝缘电阻的测量。测量通常在 1 分钟后在 1000V 下进行，但也可以根据 ANSI/EASAAR100 和 IEEE43 标准在较低或较高的电压下进行。

\*介电吸收比(DAR)是在 60 秒时用 megohms 测量的值除以 30 秒时用兆欧测量的值的比值。

\*极化指数(PI)是在 10 分钟时用 megohms 测量的值除以 1 分钟时用兆欧测量的值的比率。在测试过程中，数据每 30 秒存储一次，或者每分钟存储一次，并生成一个图形。

### 4.3 MCA 测试的标准

#### 4.3.1 IEEE 电机的评判

电机三相平衡评判标准（偏差）			
测试项目	良好	缺陷	故障
电感 L	5%	10%	15%
阻抗 Z	2%	3%	5%
I/F	0	2	>3
相角 Fi	0	1	2

#### 4.3.2 IEEE 变压器的评判

- 电阻 R: 0.250 Ω 以上时，三相偏差不应超过 5%；低于 0.250 Ω 时，不应超过 7.5%
- 阻抗 Z: 不应超过 5%。故障的变压器不平衡可能会超过 100%
- 电感 L: 不应超过 5%
- 相角 Fi: 相互差异在 1 度以内
- I/F: 相互差异不应超过 2

### 4.4 MCA 在维护程序中的地位

传统 PdM 实践经验一般集中在机械部分，因为机械故障一般均为长期故障。而对于电气部分，在故障发生之前则很少可见到警示信息。故障发生率也取决于大量因素，包括：匝间短路量、启动次数、负载情况、绝缘结构类型、污染及工作环境、电源质量、瞬时特性等等。

电机电路分析 MAC 技术为检测电机系统电气故障提供了一种全新的方法。故障的发生发展可能非常快，或者慢到几个月。例如：一台 5HP 电机，有异物卡入一个绕组的相邻两匝之间（后来发

现，该异物是由于突发性故障产生的轴承零件），电机迅速短路，并在 1 分钟时间内接地。在另外一例中：一台 400HP 压缩机电机，存在相间短路故障，引起 33%阻抗不平衡，但却仍然“有害运行”了三个月之久，因为该电机是软启动，所以启动时没有出现故障。MCA 可以成为颇具实用价值的 PdM 工具。

#### 4.5 MCA 测试的频率

表 1: MCA-PdM 频率

电机类型	清洁/干燥环境	中等环境	脏/湿环境
3 相, 非重要	12 个月	9 个月	6 个月
3 相一般产品	6 个月	6 个月	3 个月
3 相, 重要	3 个月	2 个月	11 个月
DC 电机	6 个月	6 个月	3 个月
变压器	12 个月	9 个月	6 个月

一旦检测出故障以后，测试的频率就应增加。或者如果电机非常重要，则电机应当尽快送去维修。

#### 4.6 MCA 对能源的影响

根据 EPRI 的研究表明，“机械设备的效率可通过适当的维护手段普遍提高 10~15%”。这些维护工作包括：预防性、预知性、事前及定期检修维护工作。尤其是，“通过持之以恒地实施，MCA 将有助于避免电机故障，使事前维修或更换成为可能，在总体上提高电机系统的能源效率”。

单从能源费用本身，并不能就证明电机维护程序的价值。但是，结合生产率及伴随的可靠性成本，MCA 程序立刻就显出价值所在。试举例说明：一条占企业总产量 10%的生产线上的一台 100hp 主驱动电机，每年工作 6,000 小时。如果企业全部停产时，费用为每小时\$25,000。在突发性故障停机事件中，需 6 小时更换电机，2 小时启动。所增加的总费用，不计算产生的废品成本，将达到\$24,875 每年。这笔费用中 3.1%是由于能源耗费的增加，1.2 是由于电机寿命的缩短，2.1%是由于所需费用的增加，而占绝大部分（93.6%）是由于产量的减少，即停机损失。

### 5 MCA 测试实例

MCA 技术在 4160 伏感应电机和 13.8 kV 同步电动机上的同时应用。

Electrom iTIG III D12 (iTIG) 用于电阻，电感，阻抗，相角，电容，Q 因子，转子影响测试，绝缘电阻，极化指数，介电吸收，高电压测试，电涌比较测试和 PD 浪涌。

测试的电机类型为绕线感应电机和同步电机。它们是 ODP, WP11 和 TEWAC 装置，尺寸从 300 到 4500 马力以及 900 到 1800 rpm 转速不等。

测试设备有功率因数校正电容器，需要进行低压或高压测试时将其断开。尽管可以在这些引线上进行测试，但由于测试将并行评估电缆和电机，因此断开了电机引线的连接，以便仅评估电机绝缘系统。

4,160 伏感应电机

评估的第一台机器是 ODP 300 hp, 885 rpm, 4160 Vac 绕线电机（类似于图 1），在视觉上有一定程度的污染。尽管没有具体的测试结果表明污染是一个问题，但不平衡的局部放电（PD）水平可能是绝缘退化的早期指标。



图 1. 300 hp, 885 rpm, 4,160 Vac 感应电机

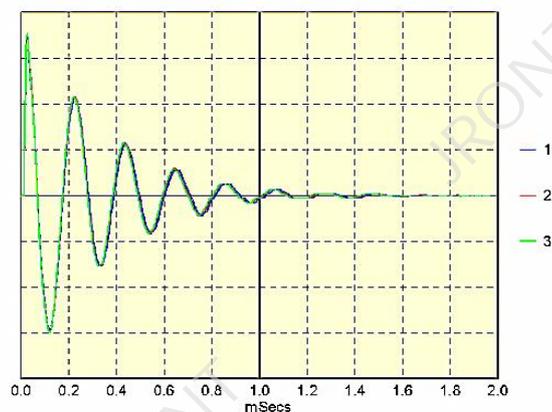
表 I 中的低压 MCA 结果显示绕组平衡，并具有良好的绝缘电阻结果。

	T1-T2	T1-T3	T2-T3
Resistance (Ohms)	1.1530	1.1528	1.1526
Impedance (Ohms)	369.3	369.0	367.9
Inductance (mH)	58.47	58.43	58.26
Phase Angle (degrees)	84.2	84.3	84.3
Q Factor	9.85	9.93	9.89
Partial Discharge (pC)	24460	16306	16306
Insulation Resistance (1000V corrected to 40°C)	8,333 Megohms, 0.03 uAmps		
High Potential Test	10,300 V, 1.54 uAmps		
Capacitance	0.128 nF		
Capacitance D Factor	0.437		

Table II. High and Low-voltage MCA  
表二 高和低电压 MCA 测试 (iTIG)

**AC Off-line Surge -**

Recommended Voltage: 8923  
 Voltage Reached:  
 8936 / 9057 / 9213  
 Wave Difference L1-L2: 7.8%  
 Wave Difference L2-L3: 2.8%  
 Wave Difference L3-L1: 9.7%  
 PD - pC:  
 24460 / 16306 / 16306



Tests (iTIG).

Fig. 2. Surge-comparison test and PD test of the 300 hp motor (iTIG).

300 hp 电动机 (iTIG) 的浪涌比较测试和 PD 测试最终结论是计划在接下来的三到六个月内进行大修。

### 13, 800 VOLT 同步电机

4, 500 马力、1, 800 rpm、13.8 kV 同步电机与图 4 中显示的装置相似。经确定，转子在进行任何其他测试之前将进行绝缘阻力测试。由于值似乎相对较低，团队决定使用低压 MCA 和 IRP 来评估转子（见图 5，了解其中一个转子的发现）。



图 4 4, 500 马力, 1, 800 转/小时, 13.8 kV 同步电机

因为机器连接盒里有避雷器，所以没有连接。此外，转子引线断开，以测试定子和转子，以减少转子对定子的影响，并保护转子电子。如果可能的话，低电压和高电压 mca 设备都能够调整转子的位置。

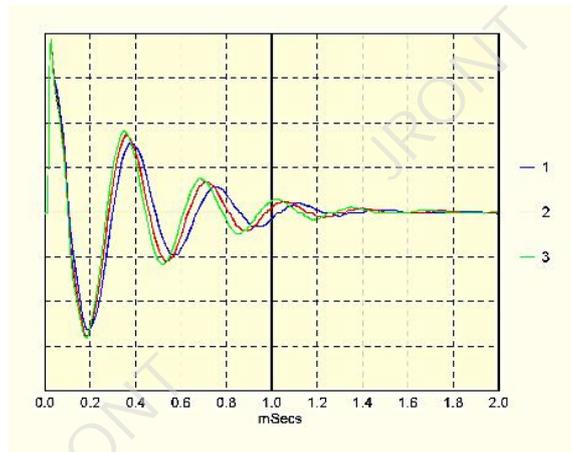


图 5 浪涌测试结果显示，由于转子位置 (iTIG) 导致不平衡

已知定子的状态有水分和油污染，并且线圈存在电晕和局部放电问题。在这些条件下，预计会出现表 III 所显示的 PD 失衡。

	T1-T2	T1-T3	T2-T3
Resistance (Ohms)	0.7195	0.7186	0.7204
Impedance (Ohms)	519.2	437.7	437.7
Inductance (mH)	81.23	68.77	76.42
Phase Angle (degrees)	79.4	80.8	79.9
Q Factor	5.35	6.19	5.62
Partial Discharge (pC)	21,742	10,871	8153
Insulation Resistance (1000V corrected to 40°C)	25000 Megohms, 0.01 uAmps		
High Potential Test	0.62 uAmps at 11,000 V		
Capacitance	0.051		
Capacitance D Factor	-0.701		

表 III 定子的高低电压 MCA 测试 (iTIG)

综上所述

低压和高压 MCA 测试的发现与同步电动机转子的主要区别之一，其中高压测试已经含盖绝缘系统测试。但是要满足 13.8KV 系统所需要的浪涌电压和高电位电压，需要配置便携电源



图 9.带移动电源套件的 iTIG 单元，适用于浪涌和高电压测试情况，最高 40 kV

使用 11,000 伏的电压与应使用的 18,500 伏的电压是根据先前的预测性维护测试得出的。在这两种情况下，高压 MCA 器件都需要接入具有合理输出电压。使用的仪器具有内置功率调节器，可减少功率质量问题对测试结果的影响。

#### 案例应用：

对于具有电机控制中心 (MCC) 的设施，可以通过远程电源电缆直接对电机进行测试。但是，有几个警告。

必须关闭电机电源并断开电源。进行的测试和测量将包括电机、电源线和所有连接/接头。连接到电源线或电机输入电源的组件必须断开或短路，这取决于它们可以承受的电压和要测试的电压。这些组件包括电流互感器、电涌放电器、功率因数电容器和过滤器。

从 MCC 到电机的电源线增加了浪涌测试电路的电容。电缆越长，电容越高。总电容 (包括电机电容) 越高，达到所需测试电压所需的能量就越多。电缆还增加了一些电阻和电感。这意味着电缆上的电压下降，电机中的实际测试电压低于测试仪显示的电压。如果无法达到所需的电压，则可能需要直接在电机接线盒处对电机进行测试。或者，需要具有更高输出电压的测试仪或电源组。



图 3 电机控制中心

如果出现测试故障，则可能是电机绕组、电源线或接头故障。要找出原因，必须直接在电机接线盒上对电机进行测试。

#### MCC 可以进行哪些测试？

测试通常包括绕组电阻、兆欧/PI、直流耐压和浪涌测试。局部放电测试通常不适用于 MCC，因为局部放电尖峰在通过电力电缆时会衰减。此外，电缆中以及电路中任何电缆链接处都可能存在局部放电。

因此，局部放电试验应直接在电机接线盒上进行。有些人不建议进行 MCC 的高压直流耐压测试，会导致电缆中出现树状结构。如果出现这个问题，可以降低直流耐压电压，或使用斜坡测试代替阶跃电压测试。

静态电机测试为资产管理都提供了更多的信息，以使其泵保持运转。为了防止计划外停机并协助可靠性和预测性维护计划，资产管理使用静态电机测试仪比在线测试更快、更早地发现绝缘薄不良的情况。

#### 参考文献：

[1]张小兴.纯电动汽车驱动电机静态检测分析[J].汽车实用技术,2021,46(12):1-3+10.

[2]张祺.电机定子槽内线圈接地故障快速查找方法[J].今日制造与升级,2022(07):60-62.

[2]李天辉,庞先海,范辉,甄利,顾朝敏,董驰.基于 IEMD 和 GA-WNN 的断路器分合闸线圈故障诊断方法[J].中国电力,2022,55(05):111-121.