

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.02.016

发电机定子绕组局放量化分级的新方法^{*}

何 亮,马立新^{*},刘宇宽

(上海理工大学 光电信息与计算机工程学院,上海 200093)

摘要:针对发电机定子绕组早期局部放电难以定量分析和无法根据放电程度判断其维修标准的问题,对定子绕组局部放电强度、时间和环境等方面进行了研究,提出了在发电机定子槽楔中安装紫外传感器的方法,构造了一种新型的紫外在线放电监测系统。该方法通过检测局部放电产生的紫外线有效地对定子绕组局部放电进行了实时监控。同时,针对局部放电程度建立了投影寻踪等级模型,并用格雷码加速遗传算法优化投影向量实现了量化分级处理,用小波包分解技术提取了放电特征量,利用实例对该方法进行了测试,并用 Matlab 软件进行了仿真。研究结果表明了该模型的可行性和有效性,能够实现实时检测定子绕组局部放电并对放电程度进行量化分级处理,有利于电力工作人员在发生放电故障之前解决安全隐患和延长发电机的使用寿命,对局部放电故障检测具有重要的实际应用价值。

关键词:定子绕组;局部放电;紫外检测;小波包分解;遗传投影寻踪

中图分类号:TM313;TP24

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)02-0184-05

New method for the quantification and classification of generator stator winding

HE Liang, MA Li-xin, LIU Yu-kuan

(Department of Electrical Engineering School of Optical-Electrical and Computer Engineering, University
of Shanghai for Science & Technology, Shanghai 200093, China)

Abstract: Aiming at the problem of difficulty to quantitatively analyze the partial discharge at the early stage of the generator stator winding, and to determine the maintenance standard based on the level of the discharge, the partial discharge intensity, time and environment of stator windings and so on were researched. A method to install UV sensor in generator stator slot wedge was proposed. A new type of UV on-line discharge monitoring system was constructed. The method could effectively detect the partial discharge of stator windings by detecting the ultraviolet generated by partial discharge. Meanwhile, aiming at the degree of partial discharge, projection pursuit grade model was established and gray code accelerating genetic algorithm was used to optimize the projection vector to achieve quantitative classification processing. Discharge characteristic was extracted by using wavelet packet decomposition. The method was tested by an example, and the simulation was carried out with MATLAB software. The results indicate that the model is feasible and effective, and can achieve real-time detection of partial discharge of the stator windings and to quantify the degree of discharge, which is helpful for the power staff to solve security risks before the failure happened the extension of the generator life and has important practical application value for partial discharge fault detection.

Key words: stator winding; partial discharge; UV detection; wavelet packet decomposition; projection pursuit

0 引 言

近年来随着科学技术的革新与进步,各大中小型

火力、水利等发电厂发电机组的不断投产,电力系统的发展越趋于高电压、大机组大电网发展趋势。电力系统中的电力设备日益增加使得电力设备所使用的绝缘

收稿日期:2016-09-12

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61205076);上海张江国家自主创新重点资助项目(201310-PI-B2-008)

作者简介:何亮(1990-),男,湖北黄冈人,硕士研究生,主要从事电气设备故障诊断与分级方面的研究。E-mail:he_liang1990@163.com

通信联系人:马立新,男,博士,教授。E-mail:malx_ail@sina.com

材料所承受的电气压力与日俱增,而设备使用的寿命往往取决于绝缘材料的绝缘强度。因此,发电机机组的安全性、可靠性、稳定性运行对整个电力系统起着至关重要的作用。在发电机定子制造过程中的不同位置都装有结缘结构,同时又受到定子绝缘材料和工艺结构的限制,在大型发电机定子绕组长期运行后,受到机械振动、电、化学效应及环境等因素的影响使得绝缘设备内部产生裂纹、气隙等。其绝缘性能渐趋劣化,劣化的过程与热、电、机械和环境因子紧密联系,而且对发电机寿命有很大的影响。在绝缘性能逐渐减弱的过程,发电机定子长时间在强电场下工作将更容易会产生局部放电甚至导致发电机定子绝缘故障。局部放电和放电位置是绕组绝缘状态的主要特征量,为了避免发生电机绝缘故障和延长发电机的使用寿命^[1],及早地监测局部放电和放电位置,并对放电程度进行有效的评估和及时地维修处理,可避免大事故的发生。因此,对发电机定子绕组局部放电的检测和状态评级研究对发电机乃至整个电力系统来说都是非常重要的^[2-3]。但发电机定子开始发生局部发电时,其放电量很小,难以测量和定位,针对这一困扰很久的难题,本研究采用在定子槽楔中安装紫外传感器并通过紫外光实时监测局部放电程度的方法,运用遗传优化投影跟踪算法建立模型并进行量化分级,相比与传统的超声波检测法、脉冲电流法等等,它具有检测精度高、抗干扰能力强、灵敏度较高、方便有效等优点^[4]。

在以往关于绝缘故障状态评定方式的研究中,一般缺少量化的明确标准,且往往发生一般性缺陷的情况占大多数,难以通过定性给定准确的故障评估大小,因此对一般性的缺陷的绝缘故障状态的量化评估就显得尤为必要了。本研究将利用紫外监测系统在实验室条件下采集到数据,结合遗传算法的投影跟踪理论,建立设备放电状态模型。应用 Matlab 软件进行实例仿真分析,以验证是否能够实现发电机定子局部放电的有效量化分级^[5]。

1 局部放电检测

1.1 紫外放电检测

紫外线检测是一种检测局部放电的新方法^[6]。通常在设备放电的过程当中伴随分子的能量交换,而在不同的电场强度下产生不同的放电方式。在放电过程中,空气中的电子释放和获得能量时会辐射出不同频段的光谱,其中包括紫外、可见光、红外 3 种频段的光谱。在定子绕组中,当局部放电故障产生时,产生的光谱中紫外区的辐射强度较高,因此可以通过检测“日盲”区光谱来检测放电信息,所以紫外线检测法可以归纳为弧光检测法的一种。这种方法关键是采用紫外传感器,即工作在特定波长范围的(去除可见光源)紫外线传感器,该传

感器能快速准确地发现局部放电的位置,通过检测装置可以对放电强度进行有效评估。而且,发电机定子绕组处于黑暗的封闭的环境,内部有很强的电磁干扰,但是没有紫外信号,所以不会受到外界环境影响。除此之外,它还具有反应时间极快、灵明度高的特点。

1.2 系统设计

系统的硬件部分结构如图 1 所示。

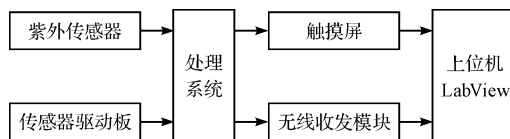


图1 结构图

本研究选用 UVM-30A 的韩国原装紫外线传感器,该型号传感器专为高可靠性和精确性测量紫外线指数(UVI)的场合所设计的,其通工作的波段采用日盲区 UV-C,检测到的波长范围为 200 nm ~ 370 nm 波段,因此太阳光对其几乎没有影响。

本研究设计的系统是利用紫外传感器采集故障点放电所产生的紫外波信号,经过驱动板 C10807 处理后是标准的方波,其频率和放电强度有一定的关系,处理系统对方波信号进行 AD 采样,采样率设置为 21 us,同时将采集到的数据存放在存储器中,并分析计算信号的周期、频率和放电幅值,将处理好的数据发送至现场触摸屏、GSM 模块和无线收发模块,其中无线收发模块与 LabView 上位机通讯。LabView 上位机可以接受多个监测点发送的数据,并对数据进行处理、保存到数据库以便查询。上位机界面如图 2 所示。



图2 上位机 Labview 界面

2 局放评级等级模型建立

2.1 局部放电特征参数提取

特征量几乎是所有的模式识别都不可避免的问题,因此,从在不同频率的分量里面提取所需要的特征参数是非常重要的。一个信号中有许多不同频率的分量,这些分量的成分就包含了信号的特征^[7]。小波包

分解技术是将信号无冗余、无疏漏地分解到各个频带内,分解进入各个频带的信号都存在能量,这些能量对于监测和检查设备的运行是非常有用的可以很好地代表电力系统信号的特征。

小波包分解算法如下:

$$\begin{aligned} d_l^{j,2k} &= \sum_n a_{n-2l} d_{nj+1,k} \\ d_l^{j,2k+1} &= \sum_n a_{n-2l} d_{nj+1,k} \end{aligned} \quad (1)$$

式中: a_{n-2l}, b_{n-2l} —小波包的分解共轭滤波器系数。

又由帕瓦塞尔恒等式可得:

$$E(j) = \sum_{k=1}^k d_{j,k}^2, j = 1, 2, \dots, 2^j \quad (2)$$

式中: $d_{j,k}$ — j 个子频带的小波包分解系数; $E(j)$ —该信号在此频带上的能量分布特征量。

本研究将采集到的信号进行二层小波包频带能量分解技术得到 4 种状态的频谱能量如表 1 所示。

表 1 定子绕组各状态频谱能量

能量 / 状态	E1	E2	E3	E4
正常运行	36.88	45.02	0.55	16.45
轻微放电	17.35	37.65	24.26	20.74
中度放电	12.94	39.06	9.19	38.81
严重放电	8.08	22.98	29.36	39.64

由表 1 可以得出发电机在没有发生放电和不同程度放电状态下的频谱能量有很大的差别^[8-9]。

本研究所使用的特征是和系数有关的能量。小波变换进行 3 个尺度的运算。近似小波系数(EA3)能量及细节小波系数(ED1-ED3)能量由式(3~4)计算出,分别是:

$$EA3 = \sum_{j=1}^N |CA3_j|^2 \quad (3)$$

式中: N —移动窗口的长度(根据采样点数量), $CA3$ —尺度 3 的近似小波系数。

$$EDi = \sum_{j=1}^N |CDi_j|^2, i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

式中: N —移动窗口的长度(根据采样点数量); $CDi(i=1,2,3)$ —尺度 1 到尺度 3 的细节小波系数 $CD1, CD2, CD3$,将获得的特征量归一化处理作为 PP 的输入值,最后获取目标函数最大值进而实现分级处理。

2.2 基于 GA-PP 的模式识别等级模型

本研究针对发电机绕组放电选取脉冲占空比、放电时间、测量距离和测量角度 4 个特征量,并采集 100 组放电样本数据。采集放电数据中随机选取的一组数据如表 2 所示。

表 2 放电样本数据

评估指标	占空比 / (%)	放电时间 / s	测量距离 / m	测量角度
测试数据	3.85	2	10	30

投影寻踪法应用于高维数据的处理和分析,将高维空间数据投影到低维子空间,建立目标函数,通过分析优化投影指标和在低维空间上的数据结构与特征,从而最终达到分析了高维数据的目的^[10]。该方法具有全局搜索能力强,可规模化等优点,为了检测发电机绕组放电状态,因此本研究采用其进行投影优化,建立投影寻踪等级模型,提出用格雷码加速遗传算法优化投影值作为最佳投影值,获取目标函数最大值对放电故障进行量化分级。建立局部放电量化评级的模型主要分为 6 步。具体流程如图 3 所示。

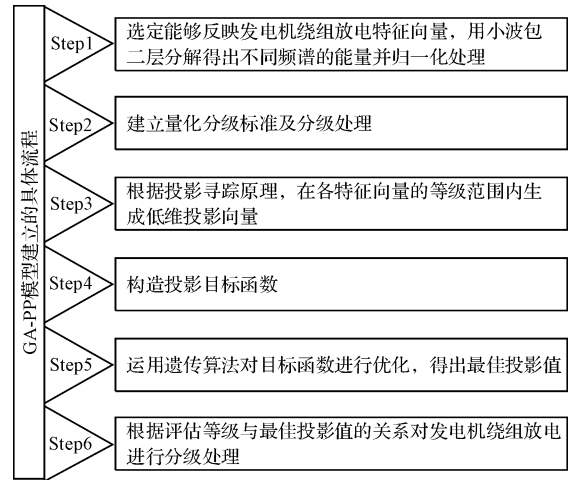


图 3 流程图

其中为消除各特征向量的量纲和统一各特征向量值的变化范围,需要进行极值归一化处理。采用下式进行数据处理:

$$x(i, j) = \frac{x^*(i, j) - x_{\min}(j)}{x_{\max}(j) - x_{\min}(j)} \quad (5)$$

式中: $x_{\max}(j), x_{\min}(j)$ —第 j 个特征向量值的大值和最小值; $x(i, j)$ —特征向量特征值的归一化的数据。本研究采集 100 组放电实验数据,样本集记为 $\{x(i, j), y(i)\}$, 这里 $i = 1, 2, \dots, 100; j = 1, 2, \dots, 4$ 。利用投影寻踪的方法把 P 维数据 $\{x(i, j) | j = 1, 2, \dots, p\}$ 综合成以 $a = \{a(1), a(2), a(3), \dots, a(p)\}$ 为投影方向的一维投影值 $z(i)$, 即:

$$z(i) = \sum_{j=1}^4 a(j)x(i, j), i = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

构造投影目标函数 $Q(a)$, 即:

$$Q(a) = S_z \cdot D_z \cdot |R_{zy}| \quad (7)$$

式中: S_z —投影值 $z(i)$ 的标准差, D_z —投影值 $z(i)$ 的局部密度, R_{zy} — $z(i)$ 与 $y(i)$ 的相关系数。

$$D_z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n (R - r(i, j)) \cdot u(R - r(i, j)) \quad (8)$$

$$S_z = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (z(i) - E(z))^2}{n - 1}} \quad (9)$$

$$R_{zy} = \frac{\sum_{i=1}^n [z(i) - E_z][y(i) - E_y]}{\left\{ \sum_{i=1}^n [z(i) - E_z]^2 \sum_{i=1}^n [y(i) - E_y]^2 \right\}^{1/2}} \quad (10)$$

式中: $E_z = \{z(i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ 的平均值, $E_y = \{y(i) \mid i = 1, 2, \dots, n\}$ 的平均值。

当各指标值得样本集给定时, 投影指标函数 $Q(a)$ 只随投影方向 a 的变化而变化。此时用格雷码加速遗传算法优化投影方向投影目标函数值, 通过求解投影目标函数最大值可估计出最优投影方向, 即

最大化目标函数:

$$\text{Max} Q(a) = S_z \cdot D_z \cdot |R_{zy}| \quad (11)$$

约束条件:

$$\text{s. t. } \sum_{j=1}^p a^2(j) = 1 \quad (12)$$

以下实验中将待评价的放电样本进行归一化处理, 计算得到投影值, 将投影值代入 GA-PP 模型即可得到此样本所属等级。其中 GA 优化 PP 算法流程如图 4 所示。

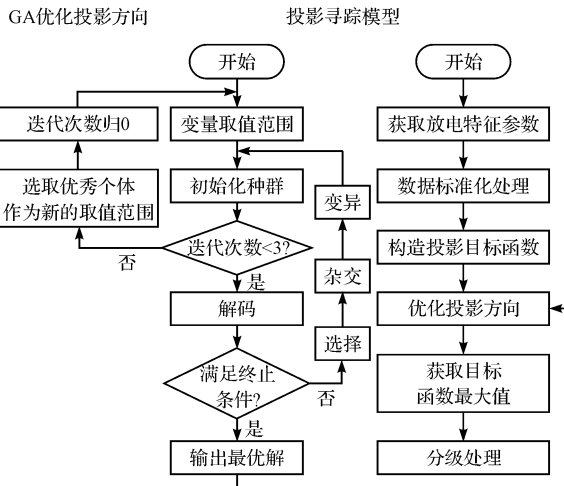


图4 流程图

3 实例分析

在实验条件允许的情况下, 本研究以机组型号为 GF, 额定功率为 200 kW 发电机为例, 实验采用高压帽模拟局部放电, 改变驱动电路的电流来调节高压帽的放电强度。高压电帽在定子某处模拟局部放电, 接收局部放电信号的紫外传感器安装在发电机定子槽楔的两槽之间, 分别在前后安装两个放电源并定义位置 1 和 2, 模拟局部放电并通过紫外传感器接收, 根据研究需要测试 100 组实验放电数据。模拟局部放电检测到的波形图如图 5、图 6 所示。其中位置 1 发生放电后紫外传感器检测的放电情况如图 5 所示; 位置 2 的位置发生

放电后, 传感器接收到的紫外信号并检测到的放电情况如图 6 所示。

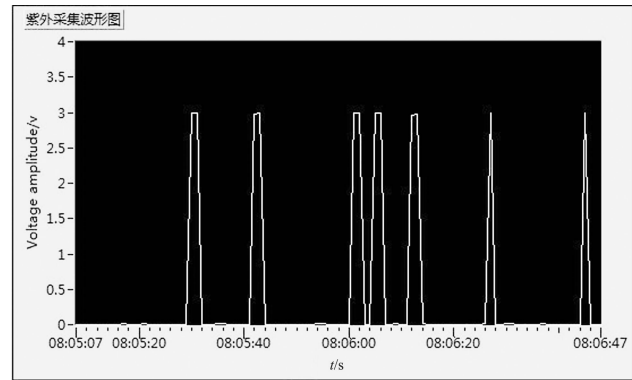


图5 位置1发送的信号

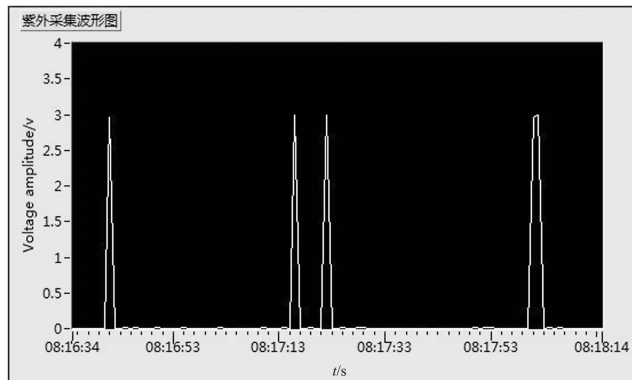


图6 位置2发送的信号

图 5 和 6 上位机检测到局部放电的情况, 横轴表示时间, 纵轴表示电压幅值。

本研究采用 Matlab 软件对紫外传感器检测到紫外信号进行分析。经过多次试验最终选定遗传算法参数: 初始群体规模 $n = 60$, 变异概率 $pm = 0.08$, 交叉概率 $pc = 0.80$, 最大遗传代数 $T = 60$ 。经过遗传投影得到最佳投影方向 $a^* = [1.5120, -1.2400, 0.5360, 1.1780]$, a^* 反映了局部放电的各特征量对评估等级的影响, 将 a^* 带入式 (5) 得到一维最佳投影值 $Z(i) = 1.5120 * x(i, 1) - 1.2400 * x(i, 2) + 0.5360 * x(i, 3) + 1.1780 * x(i, 4)$ 。

由 $Z(i)$ 投影值可以计算出与放电样本数据等级值 $y(i)$ 对应的分段函数, 如下

$$y(i) = \begin{cases} 4, & z^*(i) \leq 0.2 \\ 4 - \frac{4-3}{1.38-0.2}(z^*(i) - 0.2) & 0.2 < z^*(i) \leq 1.38 \\ 3, & 1.38 < z^*(i) \leq 1.42 \\ \vdots & \vdots \\ 2 - \frac{2-1}{1.95-1.80}(z^*(i) - 1.80) & 1.80 < z^*(i) \leq 1.95 \\ 1, & 1.95 \leq z^*(i) \end{cases} \quad (13)$$

本研究统计出放电特征值 CA3, CD1, CD2, CD3, 经过归一化处理后得到 [0.684 93, 0.684 921, 0.685 185, 0.732 347], 将其代入到 $Z(i)$ 可得 1.416 3。最后代入式(13), 即状态等级判断标准公式, 可得为 3.567 级, 在第 3 级与第 4 级之间。其他放电电晕量化评估方法根据放电严重程度只能人为的分为 4 种状态等级。从 1 级到 4 级为由轻到重的放电严重程度。1 级表示已经存在微弱放电状态, 应当引起注意。2、3 级表示已经存在故障, 应当采取措施, 避免造成电力事故。4 级状态存在发生非常严重的电力事故的风险, 应当立刻采取措施。

从表 3 可知, 本研究与其他等级评定的方法的比较, 自组织神经网络法基于自组织特征映射神经网络强大的聚类学习能力构建的电晕状态评估模型, 评估状态为 3 级, 通过 Matlab 平台仿真测试表明该模型具有较高预测准确度和稳定^[11]。模糊综合法利用模糊原理与层次分析法相结合的评价法, 评估状态也为 3 级^[12]。本研究方法不仅可以判定等级, 而且能反映处于该等级的程度, 分辨率更高, 评估结果更客观、合理。

由于评估等级为 3.567 级, 表示该高压电力设备存在放电故障, 而没有得到及时处理, 已经成为较严重的放电了。电力检修员工应立即进行电力设备的检修, 避免造成更大的电力事故。3 种方法诊断结果如表 3 所示。

表 3 3 种方法诊断结果

等级方法	等级
自组织神经网络法	3
模糊神经法	3
投影寻踪法	3.567

4 结束语

笔者由发电机定子绕组局部放电紫色检测实验研究得出, 局部放电产生的紫外线在定子里面有良好的传播性, 因此在定子槽楔上安装紫外传感器并实时监测局部放电强度是可行的, 有利于工作人员在发生绝缘故障之前消除安全隐患和延长发电机的使用寿命等^[13]。

本研究采用遗传投影寻踪理论, 建立局部放电量化等级模型, 运用 Matlab 仿真实验采集到的数据验证了该识别方法能够对放电强度进行有效量化分级, 验证了该方法的可行性。把该方法运用到电力系统中,

电网工作人员能够根据放电强度的大小诊断出故障, 从而采取相应的措施, 避免造成重大的电力事故, 对局部放电故障检测具有重要的实际应用价值^[14]。

参考文献 (References):

- [1] HU DONC, BELECM. Study of slot partial discharges in air-cooled generators [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2008, 15(6): 1675-1690.
- [2] ZHI D J, XIANG P, LI M W. Evaluation of the degradation of generator stator ground wall insulation under multi-stresses aging [J]. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2008, 23(2): 474-483.
- [3] 黄春睿. 发电机运行状态监测和定子绕组热故障诊断 [D]. 上海: 上海交通大学电子信息与电气工程学院, 2014.
- [4] 王 平, 许 琴, 王林泓, 等. 电力设备局部放电信号的在线检测系统研究 [J]. *电力系统保护与控制*, 2010, 38(24): 190-191.
- [5] 马立新, 周小波, 朱 润, 等. 紫外检测电晕放电强度量化分级 [J]. *光电工程*, 2016, 43(1): 1-5.
- [6] 马立新, 徐如钧, 陶博豪, 等. 放电故障紫外检测系统及其状态识别方法 [J]. *计算机测量与控制*, 2012, 20(7): 1803-1805.
- [7] 律方成. 基于活动轮廓模型的外绝缘紫外放电特征提取 [J]. *仪器仪表学报*, 2013, 34(5): 967-974.
- [8] 钟 崑, 彭 梁, 周永刚, 等. 基于小波包分析和支持向量机的锅炉结渣诊断 [J]. *浙江大学学报: 工学版*, 2016, 50(8): 1499-1506.
- [9] 孙萍萍. 基于小波包理论的激波信号去噪研究 [J]. *国外电子测量技术*, 2016, 37(7): 38-42.
- [10] 周 林, 栗秋华, 张 凤. 遗传投影寻踪插值模型在电能质量综合评估中的应用 [J]. *电网技术*, 2007, 31(7): 32-35.
- [11] 焦利民, 刘耀林, 任周桥. 基于自组织神经网络的空间点群聚类及其应用分析 [J]. *武汉大学学报: 信息科学版*, 2008, 33(2): 168-171.
- [12] 王 鹤, 曾 鸣, 陈 珊, 等. 基于模糊层次分析法的供电服务质量综合评级模型 [J]. *电网技术* 2006, 30(17): 92-96.
- [13] 张宏钊, 黄荣辉, 姚森敬, 等. 对嵌入式系统的电力设备紫外监测系统设计的分析 [J]. *电子设计工程*, 2016, 24(11): 112-114.
- [14] 寇晓适, 卢 明, 夏中原, 等. 紫外放电检测在电力系统设备状态检修的应用 [J]. *河南电力*, 2008(1): 1-5.

[编辑: 周昱晨]

本文引用格式:

何 亮, 马立新, 刘宇宽. 发电机定子绕组局放量化分级的新方法 [J]. *机电工程*, 2017, 34(2): 184-188.

HE Liang, MA Li-xin, LIU Yu-kuan. New method for the quantification and classification of generator stator winding [J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017, 34(2): 184-188.

《机电工程》杂志; <http://www.meem.com.cn>