

水电厂励磁系统故障分析及改进措施研究

李大焱

(国投云南大朝山水电有限公司, 昆明 650213)

摘要: 励磁系统直接关系着水电厂电力生产工作进度和任务完成质量, 为此, 提出水电厂励磁系统故障分析及改进措施研究; 在故障分析阶段, 通过压力传感器进行磁系统故障录波, 并放大、滤波及隔离处理, 以此作为样本, 输入到人工神经网络当中, 实现励磁系统故障识别分析; 在故障改进阶段, 针对故障分析结果, 对常见的几种故障, 即功率柜故障、调节器故障、失磁故障、整流电源故障、熔断器爆裂故障、逆变灭磁失败故障等, 进行改进研究, 提出改进措施; 实验结果表明: 利用基于神经网络算法的方法分析水电厂励磁系统故障, 证明分析的准确性, 为后续改进措施的提出提供了可靠依据。

关键词: 水电厂; 励磁系统; 故障分析; 改进措施

Fault Analysis and Improvement of Excitation System in Hydropower Plant

Li Dayan

(SDIC Yunnan Dachaoshan Hydropower Co., Ltd., Kunming 650213, China)

Abstract: The excitation system is directly related to the progress of power production and task completion quality in hydropower plants. Therefore, the fault analysis and improvement measures of excitation system in hydropower plants are proposed. In the phase of fault analysis, the fault recording of magnetic system is carried out by pressure sensor, which is amplified, filtered and isolated. As a sample, it is input into artificial neural network to realize fault identification and analysis of excitation system. In the phase of fault improvement, according to the results of fault analysis, several common faults, namely power cabinet fault, regulator fault, loss of field fault, rectifier power fault, fuse burst fault, inverter de excitation fault, are studied and improved, and improvement measures are put forward. The experimental results show that the method based on neural network algorithm is used to analyze the excitation system fault of hydropower plant, which proves the accuracy of the analysis and provides a reliable basis for the subsequent improvement measures.

Keywords: hydropower plant; excitation system; fault analysis; improvement measures

0 引言

电力资源是我国基础性能源之一, 在我国生产活动中起到了关键作用, 因此电力生产至关重要。电力主要通过电厂产生, 电厂将自然资源通过某种装置转换为电能, 水电厂就是其中之一^[1]。在水电厂运行过程中, 励磁系统起到了关键作用, 具体包括维持机端电压、合理分配发电机间的无功负荷、根据运行要求对发电机实行最大励磁限制及最小励磁限制、在电力系统发生短路故障时, 能增大短路电流, 提高带时限继保护的灵敏性等。在此背景下, 励磁系统故障分析与改进对于保证水电厂正常供电, 提供水电厂电力生产质量都具有重要的现实意义^[2]。

对水电厂励磁系统故障研究有很多, 如在国内, 20世纪80年代初开始进行励磁系统故障研究工作, 如潘家口水电厂水利电力勘测设计研究院设计了一种励磁系统故障监测诊断装置, 并投入到励磁系统故障分析当中, 实现了其运行状态的监测, 及时发现故障问题; 华中科技大学与葛洲坝电厂合作共同研发了专门应用与励磁系统故障的监测与诊断系统, 以应对水电厂励磁系统故障问题。在国外,

20世纪60年代就开始了励磁系统故障的研究工作, 如美国ABB公司研制出基于故障录波器的UNITROL 6000设备, 该设备可实现上千故障的处理与存储。加拿大某公司研发了一套在线GEMS系统, 实现了对励磁系统运行状态的24小时在线的实时监测。

基于上述研究, 本文进行水电厂励磁系统故障分析及改进措施研究, 以期水电厂励磁系统故障解决提供建议和参考。最后经测试分析, 水电厂励磁系统故障分析准确性较高, 为故障改进工作提供了可靠依据, 从而提高水电厂电力生产质量。

1 水电厂励磁系统故障分析研究

水电厂励磁系统是供给同步发电机励磁电流的电源及其附属设备的统称, 主要包括调节器以及功率单元两个部分, 具体如图1所示。

由图1可知, 本文水电厂励磁系统故障主要发生在两个环节上, 故障主要包括功率柜故障、调节器故障等两种^[3]。此外还包括失磁故障、整流电源故障、熔断器爆裂故障、逆变灭磁失败故障等^[4]。每种故障发生后, 都会造

收稿日期: 2020-05-29; 修回日期: 2020-06-22。

作者简介: 李大焱(1983-), 男, 湖北孝感人, 本科, 工程师, 主要从事电气工程及其自动化方向的研究。

引用格式: 李大焱. 水电厂励磁系统故障分析及改进措施研究[J]. 计算机测量与控制, 2021, 29(1): 10-13.

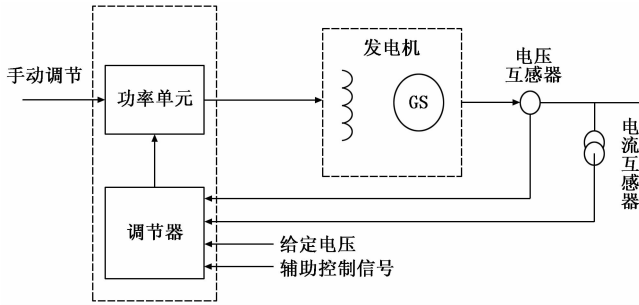


图 1 水电厂励磁系统组成结构

成励磁电压波形的变化。根据上述特点，基于励磁电压波形进行水电厂励磁系统故障分析，分析包括故障录波、处理、分析等三部分。

1.1 故障录波

得到励磁电压信号是进行故障分析的基础和前提，因此在故障分析中，首要解决的问题就是故障录波，也就是采集励磁电压信号。励磁电压信号采集主要通过电压传感器实现。电压传感器是一种通过测量电量参数，然后将其转换为直流电流、直流电压模拟信号输出的测量装置，主要用于设备或系统故障分析当中^[5]。

励磁系统通电，运行励磁系统的同时利用电压传感器采集其电压信号，然后按照如下流程：非电学量→敏感元件→转换元件→调理电路→电学量，将电压信号非电学量转换成易于传输或测量的电学量^[6]。

在上述电压传感器录波过程中，励磁电压信号调理至关重要，具体包括信号放大、滤波、隔离等。

1) 信号放大。采集到的电压信号中有的信号是弱信号，质量不高，因此需要将其放大，以提高分辨率。一般通过放大器来实现^[7]。

2) 信号滤波。信号在采集和传输过程中，受到环境以及自身设备的影响，会感染噪声，导致有用的电压信号被掩盖起来，不利于后续故障分析，因此需要进行信号滤波，除去不需要的频率成分。信号滤波方法有很多，如奇异值分解、小波变换、独立向量分析等。在这里采用高斯滤波器进行滤波。高斯滤波器基本思路是将高斯核函数与原始电压信号进行卷积运算，得到滤波后电压信号^[8]。

具体过程如下：

(1) 设励磁系统电压信号为 $f_k(m)$ ，采样点时间为 m ，高斯滤波权值为 $w_k(m, \sigma)$ ，迭代次数为 K 。

(2) 计算 $f_k(m)$ 的长度 L ，也就是取样点个数；

(3) 令初始迭代次数 $k = 0$ ；

(4) 计算电压信号的一阶导数 $f_k'(m)$ ，并将其累加，得到 $F = \sum_L f_k'(m)$ ，然后计算其平均值 F_{ave} ：

(5) 分别选择 $\sigma > F_{ave}$ 、 $\sigma > F_{ave}$ 、 $\sigma \approx F_{ave}$ 计算滤波器的加权系数。

(6) 分别选择 $\sigma > F_{ave}$ 、 $\sigma > F_{ave}$ 、 $\sigma \approx F_{ave}$ 对电压信号进行滤波，即对 $f(m)$ 进行加权平均。

(7) 判断是否满足迭代结束条件，即 $k = K$ 。满足，则输出结果；若不满足，则回到步骤 (4)，继续进行计算。

3) 信号隔离。避免传感器和水电厂励磁系统连接录波时出现电连接，需要进行隔离保护以及避免形成接地回路，引起误差^[9]。

1.2 励磁系统故障识别分析

励磁系统故障识别分析是本文研究的核心，即通过采集到的电压信号，分析出其故障类型，这对于后期进行故障改进具有重要的作用，能够提高故障改进效率和质量^[10]。本章节励磁系统故障识别主要基于神经网络算法来实现。神经网络算法是一种模拟人脑神经网络运行原理而产生的智能算法。神经网络算法由大量的节点（或称神经元）之间相互联接构成的多层网络，具体为输入层、隐含层和输出层，具有很强的自适应、自组织和实时学习的特点，在故障识别与分析领域发挥了重要作用^[11]。本文就基于神经网络算法进行励磁系统故障识别。神经网络包括学习和测试两个过程。

神经网络学习过程正向传播阶段是指将采集到的水电厂励磁系统故障电压信号从输入层输入，经过隐含层运算，最后在输出层输出结果。这时输出结果与期望值相对比，若误差小于设定的阈值，则完成神经网络训练；若得到的二者误差大于设定的阈值，则进入误差的反向传播阶段，不断调整各层网络之间的权值^[12]。误差信号反向传播阶段：将输出结果与期望值之间的误差信号从输出层输入，并按照隐含层、输入层顺序逆向传播。在这一过程中，会通过误差反馈不断调节神经网络的权值，以此来修正神经网络，使得输出的结果更接近期望输出^[13]。

神经网络测试过程：在上述神经网络学习过程结束后，会得到一个修正好的神经网络。在测试过程中，直接将测试样本输入到修正好的神经网络中，即可得到故障识别结果^[14]。

隐含层或输出层第 i 个单元的输出为：

$$y_i = f \times (\omega_{ij} x_j + g_i) \quad (1)$$

式中， f 为作用函数； ω_{ij} 为上一层第 j 个节点与该层第 i 个节点的连接权； x_j 为上一层第 j 个节点的输出； g_i 为上一层第 i 个节点的阈值。

f 通常采用 S 型函数 (Sigmoid) 作为转换函数。

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (2)$$

设学习过程中第 p 个样本中第 i 个节点的输出值为 y_{pi} ，期望输出值为 s_{pi} ，则有偏差：

$$E_p = \frac{\sum_{pi=1}^n (s_{pi} - y_{pi})^2}{2} \quad (3)$$

其中： n 为上一层节点总数。

通过自学习调整权值 ω_{ij} ，使得偏差 $E_p < e$ (学习过程中允许的误差)，来满足神经网络学习算法的误差要求^[15]。

在上述研究中提到故障类型水电厂励磁系统故障主要包括功率柜故障、失磁故障、调节器故障、整流电源故障、熔断器爆裂故障、逆变灭磁失败故障等几种^[16]，因此将这些故障作为每一种励磁系统运行状态下对应的输出向量，具体如表 1 所示。

表 1 励磁系统运行状态对应的人工神经网络理想输出

励磁系统运行状态	人工神经网络理想输出
功率柜故障	100000
调节器故障	010000
失磁故障	001000
熔断器爆裂故障	000100
整流电源故障	000010
逆变灭磁失败	000001
正常	000000

2 励磁系统故障改进措施

针对功率柜故障、失磁故障、调节器故障、整流电源故障、熔断器爆裂故障、逆变灭磁失败故障等，励磁系统故障改进措施如下。

2.1 功率柜故障改进措施

励磁系统是励磁系统最常见的故障之一，造成的原因主要有三种：风压低，风压继电器接点抖动；风温过高；电流不平衡。针对这三个原因处理方法有三个：调整风压继电器行程开关的角度；对比两个功率柜，检查测温电阻是否正常；检查是否有可控硅不导通或霍尔变送器测量误差^[17]。

2.2 调节器故障改进措施

调节器是励磁系统的主要组成结构，其故障主要表现在三个方面^[18]，以及具体处理方法如表 2 所示。

表 2 调节器故障

故障表现	故障处理方法
调节器硬件故障	更换对应的电路板，或将 A/B 套电路板互换。
调节器脉冲故障	更换通道接口板或单片机芯片；检查进入开关量总线板的同步信号是否正常。
调节器电源故障	检查电源输出是否正常；检查各插件是否正确进入插槽，对应的接线端子有无松动
调节器检测系统故障	更换对应的故障检测芯片；检查微机电源是否正常；更换 LOU 板。

2.3 失磁故障改进措施

失磁故障出现后面，励磁系统的电压值会在一段时间内急速下降到负值，并且同时电力和定子的电压伴有极大的波动，因此一旦出现失磁故障，先不要忙着查找原因，而是需要第一时间紧急停机，然后在做静态试验分析查找原因，最后根据查重到的原因进行故障排除^[19]。

2.4 熔断器爆裂故障改进措施

熔断器爆裂故障是相间短路之后本应熔断器迅速熔断，

机组出现跳闸而停止运行的故障。该故障发生后，应当立即关闭电源，然后对机部位进行全面检查，并更换合格的高压侧熔断器^[20]。

2.5 整流电源故障

整流电源故障包括交流电源消失、直流电源消失两种表现形式，因此故障处理方法也不同，具体如表 3 所示^[21]。

表 3 整流电源故障

电源故障	处理方法
交流电源消失	检查接触器线圈的接线回路；更换对应的交流接触器。
直流电源消失	检查确认外部直流电源是否消失或对应的保险丝是否熔断；更换对应的监测继电器或检查其线圈是否正确带电。

2.6 逆变灭磁失败故障改进措施

逆变灭磁失败是指励磁系统在停电后，机端电压仍大于 10% 额定值。造成这一现象的原因有：调节器脉冲输出混乱，未与可控硅对应；整流器阳极输入电源相序错误；有可控硅损坏，导致在转子回路中形成续流回路^[22]。针对这三种原因，改进措施有三个：检查各脉冲信号线是否正确接入对应的可控硅触发回路；检查输入电源相序，确保为正相序；做开环试验检查各可控硅是否正常^[23]。

3 仿真实验分析

3.1 实验样本

本实验样本分布情况如表 4 所示。其中，学习样本来自某水电厂数据库，测试样本来自霍尔电压传感器现场采集。

表 4 实验样本

励磁系统故障	学习样本数量/个	测试样本数量/个
功率柜故障	216	5
调节器故障	359	3
失磁故障	445	4
熔断器爆裂故障	248	5
整流电源故障	154	6
逆变灭磁失败	252	7
正常	452	3

3.2 故障信号采集

本实验中选择霍尔电压传感器采集测试样本数据（采集情况见表 4）。该电压传感器具体技术指标设置如表 5 所示。

3.3 神经网络训练

利用表 4 中样本对人工神经网络进行训练，神经网络输入层有 7 个神经元；隐含层神经元为 11 个，学习率为 0.25，迭代次数为 3 500；系统误差为 10^{-5} 。神经网络输入样本特征库如表 6 所示。

由表 6 可知，神经网络输入样本故障分为功率柜故障、调节器故障、失磁故障、熔断器爆裂故障、整流电源故障、以及

逆变灭磁失败故障情况，若样本中存在故障显示 1，反之则显示 0。需提取故障数据噪声，消除数据噪声对故障信号属性判断的干扰，完成神经网络输入样本故障数据的采集。

表 5 霍尔电压传感器技术参数

技术指标	技术参数	单位
型号	VSM5/25A	—
原边额定输入电流	5	mA
原边电流测量范围	7	mA
副边额定输出电流	25±0.5%	mA
匝数比	3000:1200	—
测量电阻(Vc=±15)	(±5)±10 mA 时:50~320	Ω
电源电压	±12~±15(±5%)	V
电流消耗	VC=±15 V 10+Is	mA
绝缘电压	在原边与副边电路之间 2.5 KV 有效值/50 Hz/1 分钟	—
线性度	0.2	%
精度	TA = 25 C VC=15 V <±0.7	%
失调电流	TA = 25 C <±0.15<>	mA
失调电流温漂	IP=0 TA = -10~+ 85 C ±0.2~±0.9	mA
响应时间	≤40	μs
工作环境温度	- 25~+85	℃
贮存环境温度	- 40~+100	℃
原边线圈内阻(TA = 25 C)	380	Ω
副边线圈内阻(TA = 70 C)	110	Ω

表 6 神经网络输入样本特征库(部分)

项目	样本	特征 1	特征 2	特征 3	特征 4	特征 5	...
功率柜故障	1	0	1	0	0	0	...
	2	0	0	1	0	1	...

调节器故障	1	0	0	0	1	0	...
	2	1	0	0	1	0	...

失磁故障	1	0	0	1	1	0	...
	2	0	1	0	0	0	...

熔断器爆裂故障	1	0	0	1	0	0	...
	2	0	0	0	0	0	...

整流电源故障	1	0	0	0	1	0	...
	2	0	1	0	0	0	...

逆变灭磁失败故障	1	1	0	1	0	0	...
	2	0	0	1	0	0	...

3.4 评估指标

本文评估指标选取 AUC 值作为评判标准，AUC 值为 ROC 曲线所覆盖的区域面积。AUC 越接近 1，故障分析效果越好。

假定 ROC 曲线由坐标为 $\{(x_1, y_1), (x_2, y_2), \dots, (x_m, y_m)\}$ 的点按序连接而形成 $(x_1 = 0, x_m = 1)$ ，则 AUC 可估算为：

$$AUC = \frac{\sum_{i=1}^{m-1} (x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} + y_i)}{2} \quad (4)$$

3.5 结果分析

将测试样本输入到训练好的神经网络当中，根据得到的结果绘制 ROC 曲线，如图 2 所示。

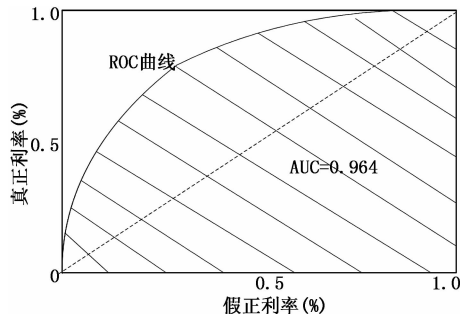


图 2 ROC 曲线与 AUC

按照上述公式 (4) 计算 AUC 值，得出 $AUC=0.964$ ，接近 1，由此说明本文水电厂励磁系统故障分析结果较为准确，证明了本文分析方法的有效性，为后期故障改进和排除提供了可靠的依据。

4 结束语

综上所述，励磁系统在水电厂电力生产中起到了关键作用，一旦出现故障，将直接影响电力输出。为此，为保证电力供应质量，励磁系统故障分析与改进具有重要的现实意义。本文经测试，水电厂励磁系统故障分析准确较高，为后续故障改进和排除提供了可靠的依据。然而，由于时间和精力有限，在本文研究中仍存在一些缺陷，即在实验阶段，选择的实验样本种类较少，因此分析结果不全面，具有一定的局限性，因此在未来的研究中，需要加入更多的实验样本，以使故障分析更加完整。

参考文献：

- [1] 张 帅, 涂阳文. 水电站励磁系统基于 ICPT 技术的优化改造 [J]. 水电能源科学, 2019, 37 (2): 153-156.
- [2] 程 琳, 姚方方, 谢 驰, 等. 六相无刷励磁系统的电枢电流谐波分析研究 [J]. 中国测试, 2018, 44 (7): 121-123.
- [3] 郝亮亮, 李佳慧, 李洪学, 等. 核电多相角形无刷励磁系统旋转二极管开路故障特征分析 [J]. 电力系统自动化, 2019, 43 (11): 112-120.
- [4] 尹 璇, 邓祥力, 贡鹏浩. 基于 MODWT 的变压器绕组轻微故障检测及分类研究 [J]. 电测与仪表, 2018, 56 (14): 103-109.
- [5] 申文伟, 何 峰, 鲍 新, 等. 中性点非有效接地系统电压互感器故障分析与治理措施研究 [J]. 高压电器, 2018, 54 (7): 200-205.

(下转第 19 页)