

300 Mvar 调相机大轴保护方案的研究

胡帅¹, 刘杰², 王廷旺¹, 周勇¹

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 乌鲁木齐 830011;

2. 国网新疆电力有限公司检修公司, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 针对目前调变组保护装置未配置调相机大轴保护的现状, 分析了调相机轴电压产生原因及其带来的危害, 阐述了调变组保护装置增配大轴保护的必要性, 提出基于轴电压、轴电流复合判据的大轴保护方案, 对方案的数据采集、处理、保护逻辑以及可实施性进行了阐述。该方案对轴电压持续异常或轴电流越限可即时发出告警或跳闸, 同时可以为运行单位合理安排调相机检修计划或事故后综合分析提供参考数据。

关键词: 调相机; 继电保护; 大轴; 轴电压

文章编号: 1007-1881(2021)01-0050-06

DOI: 10.19585/j.zjdl.202101008

中图分类号: TM761

文献标志码: B

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research on Shaft Protection Scheme for 300 Mvar Synchronous Condenser

HU Shuai¹, LIU Jie², WANG Tingwang¹, ZHOU Yong¹

(1. State Grid Xinjiang Electric Power Research Institute, Urumqi Xinjiang 830011, China;

2. Maintenance Company of State Grid Xinjiang Electric Power Company, Urumqi Xinjiang 830002, China)

Abstract: The synchronous condenser-transformer unit protection device is not equipped with shaft protection. The paper analyzes the causes and hazards from shaft voltage of synchronous condenser and expounds on the necessity of shaft protection for the unit. Besides, it proposes a shaft protection scheme based on an integrated criterion of shaft voltage and shaft current and expounds its data acquisition, processing, protection logic, and actionability. The scheme can trigger an alarm or tripping for continuous shaft voltage abnormality or current overlimit and can provide a reference basis for the operation unit to arrange a maintenance plan or post-accident analysis on the synchronous condenser.

Keywords: synchronous condenser; relay protection; shaft; shaft voltage

0 引言

近年来, 随着远距离、大容量特高压跨区直流输电项目的不断投运, 调相机因良好的瞬时无功支撑能力和暂态响应特性而被广泛应用于特高压直流换流站^[1-3]。运行经验证明, 调相机在向系统提供稳态无功补偿并提高系统短路容量方面发挥了巨大的作用^[4]。

300 Mvar 调相机是近年来国内换流站配套工程常用机型, 均采用 SFC(静止变频启动装置)拖动至 3 150 r/min, 惰走后同期并网^[5]。目前, 调变组保护装置不仅配置有针对调相机拖动过程低频状态的启机保护和注入式转子接地保护, 而且有正常运行后工频状态的主、后备保护^[6]和双套不同工作原理的转子接地保护。大轴作为重要的转动机械部件, 在调相机整套启动和正常运行时调

变组保护装置均未对其配置任何电气量保护。

调相机主体结构与发电机基本相同。在机组启动以及正常运行时, 大轴均会因磁路不对称、轴向磁通、静止励磁系统等因素叠加不同频率和幅值的电压^[7-9]。过高的轴电压将击穿轴承油膜造成大轴对轴瓦持续放电, 加速润滑油老化和机械磨损^[10]。为此, 大型调相机型式试验导则中明确规定: 非励端对励端轴电压应约等于励端轴对地电压, 且该值不得大于 10 V^[11]; 励极同步发电机技术要求规定轴电压大于 20 V 应查明原因^[12]。

调相机与发电机的不同在于调相机在启机直至并网过程中不需要汽轮机的拖动, 调相机大轴不需考虑蒸汽静电效应所产生累积电荷的影响。因调相机无原动机拖动, 机组固有频率与电网振荡频率可能引起的大轴共振现象可忽略, 调相机大轴也无需加装扭振保护。调相机依靠 SFC 拖动

至 3 150 r/min 后惰走并网, 整个过程持续时间短且轴电压经实测未发生明显变化, 调相机整套启动期间不需增设专门的大轴保护功能。

目前, 关于 300 Mvar 调相机轴电压的治理没有统一的设计要求和指导意见, 为防止轴电压过高而发生轴承电腐蚀现象, 各主机制造厂采取了很多措施, 如: 盘车端加装两块碳刷后一点接地、励磁端轴承座加装绝缘垫、励磁端加装 RC (电阻-电容电路) 接地模块^[9]以及将轴电压、轴电流集中接入至调相机一体化监测装置等。虽然这些措施在实际应用后取得了一定效果, 但仍存在很多问题, 如调相机两侧接触碳刷与大轴接触不良后不能即时被发现; 励磁端 RC 接地模块与盘车端接地因地排敷设质量而造成两侧地电位不一致; 调相机本体至调相机一体化监测装置距离较远, 轴电压、轴电流远距离传输后信号衰减和受外部干扰较大, 监测数值与实际值存在较大偏差; 调相机轴电压异常判别完全依赖于运行人员经验。鉴于存在以上问题, 大轴以及轴承电腐蚀事件仍然时有发生^[13]。根本原因是在机组轴电压持续恶化的过程中没有用于即时发出预警或作用于停机的相应手段, 因此, 有必要研发一种状态监测智能且灵敏可靠的大轴保护。

本文在不改变调相机主机结构的基础上, 改进现有轴电压、轴电流监测回路, 提出基于轴电压、轴电流复合判据的调相机大轴保护方案, 该保护可实现在接地碳刷和电压监视碳刷接触不良或回路断线时的即时预警, 以及轴电压持续升高或轴电流超标时发出告警或跳闸指令。

1 调相机轴电压、轴电流故障特征

轴电压是电机运行过程中在转轴两端或轴的局部区域产生的电势差^[14], 大轴、轴承和基座一旦形成闭合的回路后, 大轴对地就能产生持续的轴电流。轴电流的大小取决于轴电压和回路电阻, 轴电压越高, 轴电流越大^[15]。当轴电流密度超过 0.2 A/mm², 大轴轴颈的滑动表面与轴瓦就可能遭到损坏^[16]。目前各种异常工况下调相机轴电压、轴电流监测数据的具体分析尚未见报道, 本文借鉴发电机大轴异常状况的研究成果来开展调相机大轴相同影响因素的研究分析。文献[17]对转子偏心引起的轴电压进行了分析和实验室

证, 得出转子偏心时轴电压信号以一、三、五等奇次谐波为主, 基波占主要组成部分。文献[18]对静态励磁系统引起的轴电压进行仿真分析, 得到静态励磁系统引起轴电压的成分是以共模电压基波及三、五、七次高频奇次谐波分量组成。文献[16]认为轴向磁通产生的单极电动势所引起的轴电流较小, 不会造成严重的设备损坏。

文献[16, 20]对轴电流监测二次回路和滤波电路进行了详细阐述, 两者均一致认为轴电流是以基波和三次谐波为主, 同时混叠多次谐波的电气量。

考虑调相机与发电机的定、转子结构以及主励磁方式相同, 因此以往发电机在正常运行状态下的静态励磁系统以及转子偏心轴电压的分析同样适用于调相机。综上所述, 正常运行时调相机轴电压可认为是以基波为主, 三、五、七次高频奇次谐波叠加的电气量, 轴电流是以基波和三次谐波为主的电气量。

2 调相机大轴保护方案

2.1 数据测量

以往轴电压、轴电流多由主机碳刷直接引出或引出电缆穿 TA (电流互感器) 后经 4-20 mA 变换器送至调相机一体化监测装置。为了扩展轴电压、轴电流数值的可识别范围, 调相机轴电压通过安装在大轴励磁端的碳刷直接引入保护装置进行 A/D 转换的数据采样。考虑励磁端轴承基座绝缘垫的绝缘性能下降时轴电压击穿油膜后可能带来设备损伤, 励磁端接地碳刷引出线经无源 RC 电路 (电阻 $R=500\ \Omega$, 电容 $C=10\ \mu\text{F}$) 接地, 如图 1 所示。500 Ω 的电阻可以将轴电流限制在毫安级, 10 μF 的电容并联于电阻两端主要用于限制静止励磁系统带来的高频脉冲电压^[7]。为减少以往因大轴两侧不同接地点电位差所带来的轴电压测量误差, 励磁端接地碳刷经 RC 回路引出后, 在盘车端大轴一点接地处可靠连接。调相机轴电流可通过盘车端接地碳刷引出线, 经穿心 TA 进行数据测量, TA 安装于励磁端接地点上侧, 变比为 10/1。

2.2 数据处理

从轴电压、轴电流的测量接线形式可将调相机轴电压回路等效为一个一阶 RC 并联电路, 电

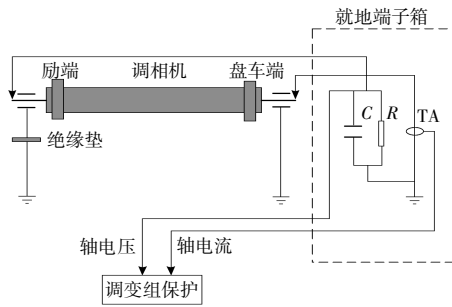


图 1 大轴保护接线示意

路如图 2 所示, U 为调相机轴电压, R 和 C 分别为无源 RC 电路的电气元件, I 为轴电流。根据图 2 所示的电路可知, 轴电流有效值及其模值如公式(1)所示:

$$\begin{cases} \dot{i} = \frac{\dot{U}}{R // \frac{1}{j\omega C}} = \frac{\dot{U}}{R} (1 + j\omega CR) \\ |\dot{I}| = \frac{U \cdot \sqrt{1 + (\omega CR)^2}}{R} \end{cases} \quad (1)$$

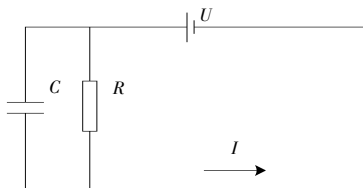


图 2 轴电压回路原理

上文提到文献[16, 20]表明三次谐波是轴电流产生后比较明显的电气特征量, 因此, 开展轴电压、轴电流有效值以及轴电流三次谐波分量的计算能够准确判断出大轴确因轴电压升高而出现异常。

根据目前某换流站 1 号、2 号调相机(生产厂家为东方电气, 设备型号为 TT-300-2 型)轴电压运行监测的统计数据可知, 调相机在拖动、空载、满负荷状态下机组轴电压有效值基本维持在 0~7 V。综合考虑轴电压可能出现的最大值以及调变组保护装置采样插件的采样精度, 调变组保护装置中关于轴电压的监测量程可设定为 0~50 V。本文建议调相机大轴根据轴电压有效值范围划分为三个状态, 即正常、告警、跳闸。机组正常运行时轴电压的有效值为 0~10 V, 告警状态

时数值范围为 10~20 V, 跳闸状态时数值范围为 20~50 V。根据公式(1), $C=10 \mu\text{F}$, $R=500 \Omega$, 可计算出大轴在各运行工况下轴电流有效值的变化范围, 如表 1 所示。

表 1 各阶段轴电压、轴电流数值范围

大轴状态	轴电压/V	轴电流/A	轴电流二次值/mA
正常	0~10	0~0.372	0~37.2
告警	10~20	0.372~0.744	37.2~74.4
跳闸	20~50	0.744~1.860	74.4~186.0

前期文献研究表明轴电压和轴电流信号均可认为是周期性、不规则的畸变信号, 因此, 轴电流信号 $f(t)$ 满足狄利赫里条件, 可以进行快速傅里叶变换。对 $f(t)$ 的每个周期均匀进行 N 个点的采样, 得到离散的序列 $f(n)$, $f(k)$ 为 $f(n)$ 的傅里叶变换, 如公式(2)所示:

$$\begin{cases} f(k) = \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cos\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) - j \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \sin\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \\ A_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \cos\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \\ B_k = \frac{2}{N} \sum_{n=0}^{N-1} f(n) \sin\left(\frac{2\pi}{N} kn\right) \end{cases} \quad (2)$$

式中: A_k 为谐波余弦项系数; B_k 为谐波正弦项系数。

可得轴电流三次谐波幅值 I_3 如公式(3)所示:

$$\begin{cases} I_3 = \sqrt{A_3^2 + B_3^2} \\ A_3 = \frac{2}{N} \text{Re}[f(3)] \\ B_3 = -\frac{2}{N} \text{Im}[f(3)] \end{cases} \quad (3)$$

2.3 判据的实现方法

2.3.1 启动元件

大轴对轴瓦发生油膜击穿时, 大轴对地均会出现较高的轴电压和轴电流。根据隐极发电机监测数据可知, 当轴瓦油膜击穿之前, 轴电压都会保持在相对高且稳定的电位值。一旦轴瓦油膜被击穿, 轴电流会因油膜被击穿面积的扩大而缓慢增大, 整个过程持久且缓慢。传统的微机保护多考虑突变量启动元件, 但该启动元件因有效信息持续时间短, 不适合用于设备状况渐进恶化的保

护场景。鉴于以上分析，大轴保护可采用基于轴电压或轴电流有效值判断的稳态量启动元件。轴电压有效值 U_z 或轴电流有效值 I_z 大于整定值 U_{set} 或 I_{set} ，则开放大轴保护。

参照表 1 中大轴运行数据且考虑一定的量值裕度，分别取 0.95 倍的轴电压和轴电流告警状态临界低值作为启动元件固定整定值，即轴电压大于 9.5 V 或轴电流大于 35.34 mA 时，保护开放。

2.3.2 保护逻辑

大轴保护逻辑由碳刷故障告警逻辑、过压定时限告警逻辑、过流定时限跳闸逻辑组成，如图 3 所示。

碳刷与大轴良好接触才能保证测量时轴电压、轴电流的数据准确。为防止大轴保护因碳刷接触不良而失效，保护中依据轴电压、轴电流连续采样值设置了碳刷故障告警逻辑。当两者采样数值任一项有效值为零且持续时间超过 15 s，即可判定碳刷接触不良或测量回路断线，保护延时 t_0 报碳刷故障告警。

为了在轴电压逐渐增大的过程中保护装置即时告警，大轴保护中设计了过压定时限告警逻辑。在轴电压持续增大且油膜尚未大面积被击穿

时，轴电流因幅值过小而无法被保护装置准确采样，此时根据轴电压有效值可判断出当前大轴的状态。当轴电压增大到预设值时，保护装置发出过压定时限告警。鉴于 DL/T 2024—2019《大型调相机型式试验导则》中轴电压不得大于 10 V 的要求，轴电压告警值可固定设置为 10 V，当启动元件动作且轴电压大于 10V 时，保护延时 t_1 发过压定时限告警信号。

当轴电压继续升高且轴承油膜被大面积击穿时，轴电流数值会随之逐渐增大。通过快速傅里叶变换可求得轴电流三次谐波幅值。考虑到调相机生产厂家安装工艺以及配套主励磁的差别，调相机轴电流三次谐波的含有率难免也存在差异。因此，轴电流三次谐波保护整定值可参照调相机满负荷运行时轴电流的实测值进行整定。因保护整定需留有适当的裕度，轴电流三次谐波定值可整定为机组满负荷运行时调变组装置轴电流三次谐波分量实测值的 1.3 倍。轴电流有效值可参照表 1 中跳闸状态最低轴电流有效值的 1.05 倍进行定值固化整定，也可根据机组实际状况进行定值调整。鉴于以上分析，当轴电压有效值达到告警或跳闸状态时，轴电流有效值或其三次谐波任

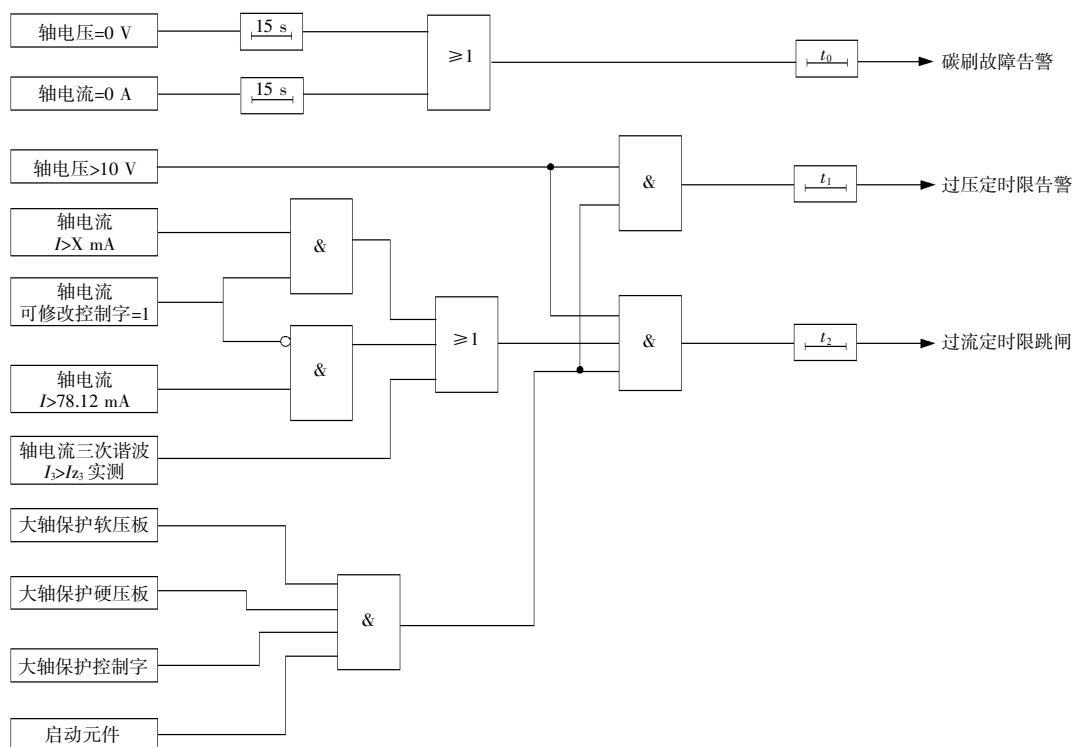


图 3 大轴保护逻辑

意一项幅值达到整定值时, 保护延时 t_2 发过流定时限跳闸信号。

3 抗干扰措施

本方案需要重点考虑的电磁干扰侵入点主要有: 两侧碳刷引出线、励磁端 RC 回路、盘车端 TA 以及轴电流、轴电压至保护装置测量电缆。以下为针对电磁干扰问题所提出的解决办法。

(1) 调相机盘车端的闲置区域装设密封且外壳接地良好的金属就地端子箱。就地端子箱内设接线端子排和截面积不小于 100 mm^2 且与主地网相连的等电位铜排。调相机碳刷引出线采用屏蔽电缆穿金属管后接入就地端子箱端子排, 金属管与地网可靠焊接。碳刷引出线电缆的屏蔽层接入就地端子箱的等电位铜排。励磁端 RC 回路、盘车端电流互感器及其二次回路均安装在盘车端的就地端子箱内。

(2) 轴电压、轴电流分别由就地端子箱转接至保护装置。转接电缆采用线芯不小于 2.5 mm^2 的屏蔽电缆, 沿途增设护套进行屏蔽, 电缆屏蔽层两端分别采用截面积不小于 4 mm^2 的多股铜质软导线, 可靠连接在两侧的等电位铜排。

(3) 保护装置采用软件滤波, 重点关注所需频段信号, 减少高次谐波的干扰。另外, 保护装置设置多重指令, 可以极大地避免单重指令在受干扰时容易错误的现象。

4 可行性分析

前提调研中发现, 国内在运的调相机均未配置大轴保护, 一些保护生产厂家虽然曾对大型火电机组提出过大轴保护方案, 但皆因所需外部配合回路无具体的配置要求或研发思路未被相关安装、调试单位准确把握而未被广泛应用。

目前各主机制造厂所生产的调相机两侧均安装有碳刷, 大轴一点接地碳刷均安装在盘车端, 励磁端碳刷主要用来实现调相机一体化监测装置的数据取用。文中所提到的轴电压、轴电流检测回路正是基于主流调相机制造现状, 在不改变调相机主机制造工艺的前提下, 只需加装就地端子箱以及相关的 RC 电路和 TA 回路, 即可实现轴电压、轴电流数据的安全取用。

该大轴保护方案在现有调变组保护装置上经

以下技术改造后便可实现应用:

(1) 软件方面, 在现有的调变组保护装置中增设大轴保护启动元件, 逻辑判别程序以及出口方式定义。

(2) 硬件方面, 配置专用的轴电压、轴电流采样插件, 配置相应的功能压板、出口压板。

5 结语

本文介绍了 300 Mvar 调相机轴电压产生机理以及大轴保护的研究现状, 分析了调相机大轴异常后的电气故障特征量, 在此基础上提出了基于调变组保护装置可实现的大轴保护研究思路。所提出的调相机电气量检测回路及实施办法, 定义了三种调相机大轴运行状态(正常、告警、跳闸), 根据数学模型计算出各运行状态理论检测数据范围, 创新性地提出了基于轴电压、轴电流检测的碳刷故障监测及保护跳闸逻辑, 最后, 对保护方案在实施过程中的抗干扰措施给出了具体的指导意见。

本文所提方案在不改变调相机主机结构的基础上, 通过规范大轴电气量检测回路即可完成数据的有效采集, 实现方法简单可靠。文中大轴保护逻辑判据所需外部接入信号较少, 逻辑易于实现且监测范围广。综上所述, 本文关于调相机大轴保护的分析和研究可以为设备研发、现场应用提供新的思路, 具有一定的实践指导意义。

参考文献:

- [1] 王雅婷, 张一驰, 周勤勇, 等. 新一代大容量调相机在电网中的应用研究[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 22-28.
- [2] 常海军, 霍超, 刘福锁, 等. 提高弱送端电网暂态电压稳定水平的调相机优化配置研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(6): 90-95.
- [3] 王强, 李天然, 唐小波, 等. 应对多馈入直流换相失败的同步调相机布点方法[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(1): 222-226.
- [4] 李志强, 种芝艺, 黄金军. 快速动态响应同步调相机动态无功特性试验验证[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(23): 6878-6885.
- [5] 桑建斌, 包明磊, 李玉平, 等. 300 Mvar 调相机继电保护的分析和改进[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(6): 217-222.
- [6] 余斌, 肖政军, 宁春海, 等. 大型调相机的继电保护配置及非全相保护研究[J]. 湖南电力, 2019, 39(4): 22-26.

- [7] 姜彤,周春阳,徐永金,等.汽轮发电机中静止励磁轴电压的分析与抑制[J].电力系统保护与控制,2012,40(6):142-146.
- [8] 冉毅.大型汽轮发电机轴电压控制技术[D].成都:西南交通大学,2019.
- [9] 薛敏.发电机轴电压的测量与防治[J].安徽电力,2016,33(1):6-9.
- [10] 周青.发电机轴电压和轴电流的危害及其防护[J].电机技术,2016(5):38-41.
- [11] 大型调相机型式试验导则:DL/T 2024—2019[S].北京:中国电力出版社,2019.
- [12] 隐极同步发电机技术要求:GB/T 7064—2017[S].北京:中国标准出版社,2017.
- [13] 史德利,顾守录,王英志,等.汽轮发电机轴电压轴电流在线监测装置的研制[J].大电机技术,2016(4):15-18.
- [14] 李和明,武玉才,李永刚.转子绕组匝间短路对电机轴电压的影响[J].中国电机工程学报,2009,29(36):96-100.
- [15] 张翔.大型透平发电机轴电压在线监测系统[J].电力建设,2008,29(12):80-82.
- [16] 王维俭.电气设备继电保护原理及应用[M].2版.北京:中国电力出版社,2001.
- [17] 武玉才.发电机故障的交叉特性分析及机电联合故障诊断研究[D].保定:华北电力大学,2010.
- [18] 许焕清,王宏华,王成亮.千兆瓦静态励磁发电机高频轴电流调谐滤波器研究[J].电测与仪表,2017,54(13):105-109.
- [19] 高旭峰.汽轮发电机组轴电压产生的原因、危害及防范措施[J].电力建设,2004,25(10):8-11.
- [20] 徐海潮.发电机轴电流检测器[J].电测与仪表,1997,34(375):18-20.
- [21] 程明,田伟杰,王伟,等.新型同步调相机的关键技术及研究进展[J].电力工程技术,2020,39(2):2-9.
- [22] 刘春晖,钱文晓,杨朋威,等.新一代300 Mvar调相机失磁运行特性及保护研究[J].电力工程技术,2019,38(6):154-159.

收稿日期:2020-11-04

作者简介:胡帅(1987),男,工程师,从事电力设备在线监测与故障诊断工作。

(本文编辑:徐 晗)