

一种变电站用智能化检修调试平台的研制

陈昊¹,王抗¹,张海华¹,周永荣²

(1. 国网江苏省电力有限公司 检修分公司,江苏 南京 211102; 2. 国网电力科学研究院有限公司,江苏 南京 211106)

摘 要:为解决变电站内仪器设备搬运困难、带电区域与检修区域共存、常规测试电源不满足要求的问题,设计了动态平衡机构及控制方法、带电设备感知安全隔离方案以及自备可调柔性试验电源。研制了一款适用于变电站内工作的多功能检修调试工作平台,实现智能供电、带电区域隔离等功能。在江苏电网多座 220 kV 及以上变电站的实际应用验证了该平台的有效性与安全性。

关键词:检修;调试;动态平衡机构;带电区域隔离;智能供电

中图分类号:TM77 **文献标志码:**B **文章编号:**1671-5276(2020)05-0165-04

Development of Intelligent Maintenance and Debugging Platform for Substation

CHEN Hao¹, WANG Kang¹, ZHANG Haihua¹, ZHOU Yongrong²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Maintenance Branch Company, Nanjing 211102, China;

2. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China)

Abstract: It is hard to handle the instruments and equipment, in the substation and the operating area and overhaul area exist together in it, so the conventional test power supply is used to hardly satisfy the test requirements. Dynamic balance structure with corresponding control method, isolating scheme based on live equipment perception and self-provided adjustable flexible test power supply is designed in this paper. A multi-function maintenance and debugging platform with features is developed, which is used to implement, smart power supply, electric area isolation and so on. The efficiency, and safety of the platform are verified in the practice test at the 220 kV and over substations of Jiangsu power grid.

Keywords: maintenance; debugging; dynamic balance structure; electric area isolation; smart power supply

0 引言

随着坚强智能电网的发展,变电站电气设备工作的可靠性对保证整个电力系统安全稳定运行愈加重要,稍有不慎便会引发诸如印度大停电、巴西大停电的严重事故^[1-2]。因此,需要按一定周期对变电站电气设备,例如一次设备、二次保护装置等进行检修和调试^[3-4]。变电站检修调试工作的质量和效率直接决定着电网供电的可靠性。近年来,随着变电站智能运检技术的兴起和新型精密仪器的频繁使用,检修和调试工作相关的装备也在不断更新换代^[5-7],但仍存在以下 3 方面的问题:

1) 变电站内建筑、设备密集^[8],作业空间狭窄,需要携带精密仪器转移工作面,跨越坡度最高可达 60°。现有智能运检装备运输主要针对常规平稳路况,平稳性控制能力有限,不具备在复杂地形中自动控制倾斜角,实现精密仪器平稳越障的能力,占用了大量停电检修时间;

2) 变电站电气环境复杂^[9],多项停电检修、调试工作同时进行,停电、带电区域相互交错,现有智能运检装备的安全措施手段主要依靠布置实体围栏,不具备主动隔离

带电区域的功能,作业人员易误入带电区域,存在安全隐患,2018 年变电站内因误入带电间隔发生的人员伤亡案例多达 40 起;

3) 变电站设备、试验仪器存在电源需求多样化的特征,现有智能运检装备不具备自适应电源供电能力。此外,装备输出电源的电能质量不能满足精密仪器工作要求,导致复杂故障模拟困难,甚至试验结果可能出现偏差,造成继电保护装置误动或拒动,对电网的安全稳定运行造成严重威胁。

在此背景下,需要研制一种变电站用智能化检修调试平台,实现继电保护、电气试验仪器平稳越障,带电区域安全感知以及平台智能供电,提升检修调试工作效率和安全性。

1 总体研究思路

本项目从一次设备检修、继电保护装置调试的现场工作需求出发,对精密仪器平稳越障技术、带电区域安全感知技术和平台智能供电技术 3 个方面分别展开研究,总体工作思路见图 1。

基金项目:国网江苏省电力公司 2018 年科技项目(J2018023)

第一作者简介:陈昊(1980—),男,江苏南京人,研究员级高工,博士,从事变电站智能运检研究。

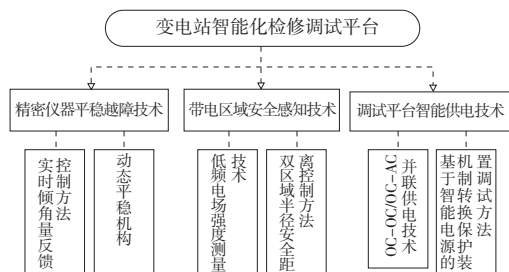


图1 总体研究思路

2 精密仪器平稳越障技术

2.1 倾角量获取

本文提出了实时倾角量反馈控制方法,利用装置内置陀螺仪,使装置每次进入运动状态后,置初始倾角基准值,此后,按50次/s的速率采集载重面与水平面的绝对倾角 $\beta_{i,k}$ ($i \in N, k=1,2,3,4,5$),每5次倾角平均值计算出控制用绝对倾角 α_i :

$$\alpha_i = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 \beta_{i,k} \quad i \in N \quad (1)$$

易见, α_i 每秒更新10次,进一步引入调节速率理想值 r_j ($j=1,2$),动态调节 α_i 的调节速度。此外,为减小累计误差的影响,如装置在连续运动,每1min重置倾角基准值;如装置经历了停止状态,则每次重新进入运动状态时,重置倾角基准值。

2.2 动态平衡机构与控制策略

平台的动态平衡机构如图2所示。

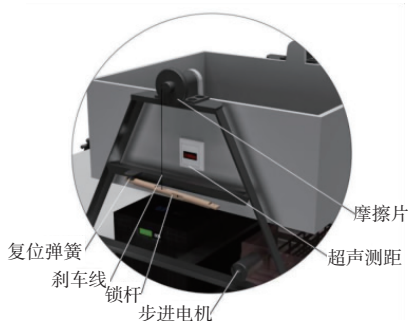


图2 动态平衡机构

当陀螺仪检测到 α_i ,控制步进电机增速或减速运转,调节锁杆压紧复位弹簧,拉紧或放松刹车线,调节阻尼,实现载重面倾角控制。当 α_i 接近0°时,即满足 $\alpha_i \in [-\varepsilon, \varepsilon]$ 时,步进电机处于锁止状态, ε 为锁止灵敏角,推荐值为2°。

所提出的实时倾角量反馈控制方法包括门限控制和柔性控制两种实用化控制策略,通过内部控制字来进行选择。

门限控制策略:当陀螺仪检测到 α_i 超过 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 时,增加阻尼,以 r_1 速率调节;当 α_i 拉回 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 以内且电机不处于锁止状态时,步进电机转速减慢,微调阻尼,以 r_2 速率调节。

根据门限控制策略, i 时刻的调节速率为:

$$r = \begin{cases} r_1 & \text{如 } \alpha_i \notin [-5^\circ, 5^\circ] \\ r_2 & \text{如 } \alpha_i \in [-5^\circ, -2^\circ] \cup [2^\circ, 5^\circ] \\ 0 & \text{如 } \alpha_i \in [-2^\circ, 2^\circ] \end{cases} \quad (2)$$

其中 $r_1 \gg r_2$ 。

柔性控制策略:当陀螺仪检测到 α_i 超过 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 时,增加阻尼,基于机制转换函数(式(3))过渡到以 r_1 速率调节;当 α_i 拉回 $[-5^\circ, 5^\circ]$ 以内且电机不处于锁止状态时,步进电机转速减慢,微调阻尼。柔性控制引入了机制转换函数,如图3所示(本刊黑白印刷,相关疑问咨询作者)。

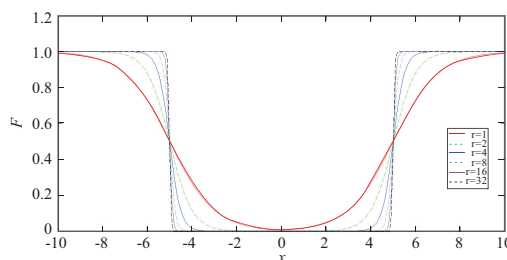


图3 机制转换函数

机制转换函数表达式如式(3)所示。

$$F(\alpha_i; \Delta, \gamma) = \frac{1}{1 + \exp[-\gamma(|\alpha_i| - \Delta)]} \quad (3)$$

其中: Δ 为离群点阈值参数; γ 为转换速度参数,一般取为正整数,且满足 $\gamma = \frac{1}{\Delta}$,以保持 $|\alpha_i| = 0$ 时, $F \rightarrow 0$; $|\alpha_i| = \Delta$ 时, $F = 0.5$,处于两种机制的中间; $|\alpha_i| \rightarrow \infty$ 时, $F = 1$ 。

根据柔性控制策略,基于机制转换函数, i 时刻的调节速率如式(4)所示:

$$r = \begin{cases} r_2 + \frac{r_1 - r_2}{1 + \exp[-\gamma(|\alpha_i| - \Delta)]} & \text{如 } \alpha_i \notin [-2^\circ, 2^\circ] \\ 0 & \text{如 } \alpha_i \in [-2^\circ, 2^\circ] \end{cases} \quad (4)$$

其中:阈值 Δ 建议值为5°;转换速度参数 γ 的建议值为500。

门限控制策略实现了对绝对倾角的动态控制,其优势在于响应时间短(1s以内完成),调整精度亦满意。柔性控制策略的优势在于调整更为精准,调节过程更为柔和,超调幅度小,能保证载重面倾斜度能以适宜的速度调整至5°以内。两种策略根据现场实际需要选择。两种策略均能有效提高继电保护测试仪、电气试验仪器转移工作面时的运输安全性和工作效率。

3 带电区域感知技术

智能变电站内电气环境复杂,室外一次设备检修、室内保护装置调试时都要进行带电区域隔离,根据户外设备场、保护室的不同特点采取了差异化的隔离方式。

3.1 二次保护室内的带电区域感知

本文提出一种双区域半径安全距离控制方法,基于布置于停电工作区域周围的收发一体可移动超声传感器组,通过感知超声波返回时间计算平台与带电区域的距离,建

立一种双区域半径控制机制:达到低阈值 T_1 时声光报警;达到高阈值 T_2 时闭锁平台同时强制断开动力电源。通过告警信号控制字 QL 和告警回路压板 LP1 实现不同告警方式的选择。

通过对平台实时空间定位,实现了对带电区域的主动隔离,确保继电保护调试工作中平台不会误入带电的运行屏位,如图 4 所示。

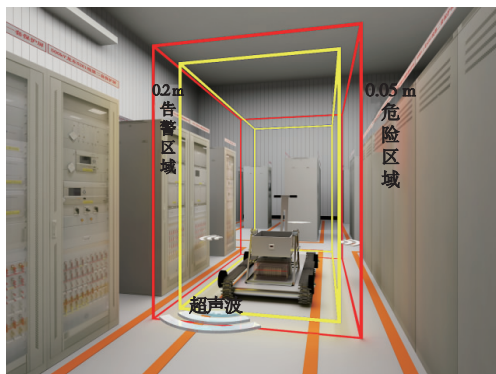


图 4 调试工作中的带电区域隔离

3.2 户外设备场的带电区域感知

户外设备场内带电体多,空间复杂程度远在保护室之上。当平台在户外设备场的一次设备检修工作中使用时,除了应用上述双区域半径安全距离控制方法之外,同时开启电场强度测量功能,进一步强化带电区域感知能力。基于微电流感知的低频电场强度测量技术,通过对电场测量模块中 U 型铜质导体微电流的感知,获取测点的电场强度,实现了对带电设备距离的准确测量,并基于预置的安全距离告警值,在平台逼近安全距离时,平台会给出告警信号。紧急情况下直接闭锁平台同时强制断开动力电源,确保在一次设备检修工作中实现对高压带电区域的主动隔离,如图 5 所示。

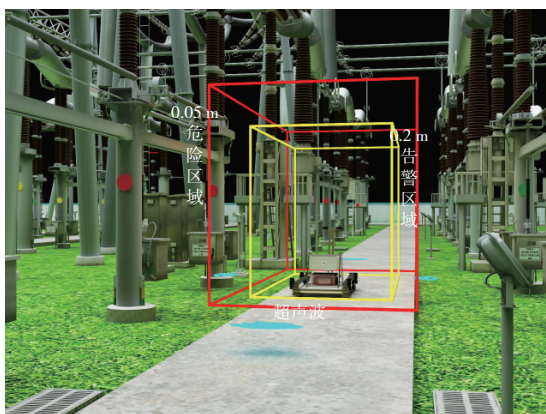


图 5 检修工作中的带电区域隔离

4 智能供电技术

变电站设备、试验仪器的电源需求越来越具有多样化的特征^[10]。电气试验工作的主要场地,户外设备场的检修电源箱经常在电压等级、电能质量上不能满足精密仪器

的要求。继电保护工作的主要场地(如继电保护室),经常不能提供合适的电源,限制了精密试验仪器基本功能的使用。针对此问题,基于 DC-DC/DC-AC 并联供电技术,设计了一种多端柔性输出供电电路,如图 6 所示。电路中 Boost 载波模块输出平台自身使用的低压/中压直流电,逆变滤波模块输出外接试验仪器使用的高压交流电,通过电力电子为精密仪器提供高电能质量电源;功率调节模块并联有一定数量的功率管,通过调节并联功率管数量实现仪器用电的功率自适应调节与高电能质量电源输出。

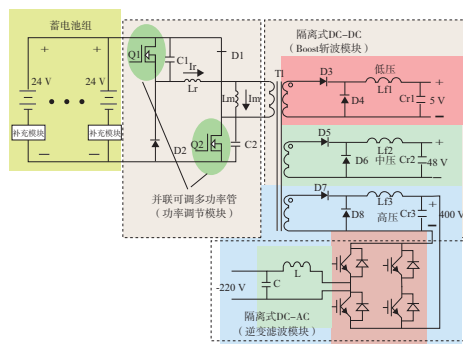


图 6 多端柔性输出电路

以继电保护工作为例,基于多端柔性输出电路,可以提供多组交流、直流量输出。电源方便切换,不仅可以为精密试验仪器提供电源,还可以增强试验仪器模拟复杂工况下的电压、电流多次变化、开入量翻转过程的能力,提升了继电保护装置的复杂网故障模拟能力。以 500 kV 线路保护装置为例,可模拟 15 种新增故障类型^[11],如线路故障跳闸后零序电流、同塔双回线转换故障等,提升了继电保护工作质量。

特别一提的是,本平台解决的供电问题不仅出现在常规运维检修工作中,在设备投运验收工作等电源问题更为凸显的场景中,智能供电技术的效用将更为彰显。

5 智能化检修调试平台的应用

本文研制的变电站检修调试平台已在江苏电网多座 220 kV、500 kV、1 000 kV 变电站一次设备电气试验、二次保护装置调试工作中获得现场应用。

1) 平稳越障技术应用效果:平台实测最大载重达 100 kg,能实现常规楼梯攀爬、变电站跨电压等级陡坡越障、变电站二层架构窄梯攀爬与狭小平台转弯。以应用门限控制策略为例,继电保护测试仪、电气试验仪器等精密仪器转移工作面时运输时间平均减少 35%;

2) 带电区域感知技术应用效果:应用本成果以来,未发生一起一次设备检修工作人员误入带电间隔事故以及保护调试工作人员误入运行继电保护屏柜的事故;

3) 平台智能用电应用效果:装置实现了 3 种直流量、3 种交流量的同时输出,电能质量大幅超过国家标准要求,提升了保护调试工作故障模拟能力,可以模拟 15 种新型复杂工况故障,提升了继电保护调试工作质量;产品投入使用后,未发生一起定值校验不准确、故障类型模拟不足导致的继电保护事故。

6 结语

变电站智能化检修调试平台的应用能够保证精密试验仪器在变电站内平稳越障,平台具备带电区域感知、智能供电的功能。工程应用结果验证了平台的有效性,显著提升了变电站电气试验、继电保护工作效率,进一步提升了工作的安全性。基于本平台的核心技术可以进一步改进、转化应用到其他领域,如精密仪器、优质电源、工业生产、生活日用、医疗器械等领域,满足这些领域人员和物品平稳转移、精密仪器安全运输及设备多元用电需求。

参考文献:

- [1] DING T, LI C, YAN C, et al. A bilevel optimization model for risk assessment and contingency ranking in transmission system reliability evaluation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 3803-3813.
- [2] CUI Hantao, LI Fangxing, FANG Xin, et al. Bi-level arbitrage potential evaluation for grid-scale energy storage considering wind power and IMP smoothing effect [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(2): 707-718.
- [3] 杨晓辉,尹玉君,寇晓适. 基于风险评估的特高压受端电网输

- 电设备检修策略研究[J]. 电力工程技术, 2017, 36(2): 1-5.
- [4] 张煦,张向伍. 计及运行工况影响的电力设备检修策略分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(1): 74-80.
- [5] 陈昊,徐晶冉,徐雯,等. 一种多功能变电检修测试平台的研制[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(5): 239-242.
- [6] 徐晶冉,徐雯,朱振伟,等. 适应复杂工况的可攀越式继电保护测试平台[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(3): 53-56.
- [7] 刘勇,陈海滨,刘方. 基建现场巡检无人机智能感知系统的研究与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(15): 155-161.
- [8] 陈昊,张海华,陈玮光. 基于 UWB/SINS 组合的行人导航研究[J]. 导航定位与授时, 2020, 7(2): 65-71.
- [9] 郭雄,万保权. 输变电工程的电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2009.
- [10] TAN F., CHEN H., ZHANG Z., et al. A control strategy of modular multilevel converters for motor operating at low frequency [C]. Guangzhou: 2018 International Conference on Power System Technology, 2018: 2371-2376.
- [11] 陈昊,李颖,张钊,等. 单相接地故障零序电流增益分析[J]. 现代电力, 2013, 30(5): 46-49.

收稿日期: 2019-06-24

(上接第 153 页)

屈服强度极限,理论上说材料已经破坏,由于采用线弹性材料,计算结果可能较实际结果偏大,但为了保险起见,实际结构设计时应在翼轴与内部蜂窝接触部位附近加固,防止蜂窝结构破坏。

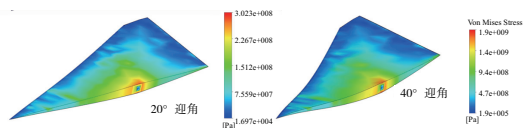


图 12 大迎角下的等效应力分布云图

4 结语

本文采用 CFD/CSD 流固耦合法对一种典型全动平尾进行了气动弹性数值模拟。给出了不同迎角下平尾的气动弹性响应,并分别针对流场和结构响应做出了分析,结果表明:

1) 除 0°迎角迅速收敛至平衡位置以外,其余各迎角时的气动力和结构响应曲线均出现波动,随时间变化逐渐衰减至平衡位置。迎角越大,初始振幅越大,气动力减小的比例越大,结构应力越大,但随时间衰减得越快。

2) 结构变形导致下表面压力分布发生变化。靠近翼根部分前缘上偏,压力增大。靠近翼尖部分前缘下偏,压力减小。后缘均上偏,压力减小。整体压力减小,升力系数降低。迎角越大,现象越明显。

3) 靠近翼轴处应力较为集中,而翼轴上的应力较小。平尾存在弯曲/扭转耦合现象,随时间逐渐收敛至平衡位

置,但相对初始位置的变形随迎角增大而增大。

参考文献:

- [1] LAUTEN W T, LEVEY G M, ARMSTRONG W O. Investigation of an all-movable control surface at a mach number of 6.86 for possible flutter [J]. Technical Report Archive & Image Library, 1958, 14(5): 19-22.
- [2] HEEG J, ZEILER T A, POTOTZKY A S, et al. Aerothermoelastic analysis of a NASP demonstrator model [C]. California: 34th Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 1993.
- [3] MCNAMARA J J, CROWELL A R, FRIEDMANN P P, et al. Approximate modeling of unsteady aerodynamics for hypersonic aeroelasticity [J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(6): 1932-1945.
- [4] MCNAMARA J J, FRIEDMANN P P. Aeroelastic and aerothermoelastic analysis in hypersonic flow: past, present, and future [J]. AIAA Journal, 2011, 49(6): 1089-1122.
- [5] MCNAMARA J J, FRIEDMANN P P, POWELL G K, et al. Three-dimensional aeroelastic and aerothermoelastic behavior in hypersonic flow [C]. Texas: 46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Dynamics & Materials Conference, 2005.
- [6] GUPTA K K, VOELKER L S. Aeroelastic simulation of hypersonic flight vehicles [J]. AIAA Journal, 2012, 50(3): 717-723.
- [7] 林谢昭,胡振明. 流固耦合模型的适应性 POD 降阶方法研究现状[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(4): 78-83.
- [8] 张华,马东立,马铁林. 弹性变形对柔性机翼气动特性影响分析[J]. 北京航空航天大学学报, 2008, 34(5): 487-490.
- [9] 曾宪昂,徐敏,安效民,等. 基于 CFD/CSD 耦合算法的机翼颤振分析[J]. 西北工业大学学报, 2008(1): 79-82.

收稿日期: 2020-06-12