

10 kV 配电带电作业机器人绝缘防护设计

鲁守银¹, 史向东¹, 苏建军²

(1. 山东电力研究院, 山东 济南 250002; 2. 山东济宁供电公司, 山东 济宁 272400)

Insulation Protection Design of Live working Robot for 10 kV Distribution Power Systems

LU Shou-yin¹, SHI Xiangdong¹, SU Jianju²(1. Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China;
2. Shandong Jining Power Supply Company, Jining 272400, China)

摘要:介绍了一种适用于 10 kV 配电系统的高压带电作业机器人系统的绝缘防护设计问题。在对机器人作业时可能出现的最大过电压值进行分析的基础上,根据目前人工带电作业情况和国家行业的有关标准确定了合适的绝缘安全裕度和机器人所需的绝缘耐受电压值,给出了机器人的绝缘设计,试验运行情况表明:其性能满足设计要求。

关键词:带电作业; 机器人; 绝缘防护; 配电系统

中图分类号: TM755; TP242.2 **文献标识码:** A

Abstract: In the paper, the insulation protection design of live working robot for 10 kV distribution power systems is introduced. According to manual live working situation, the relevant national standards, and the analysis of the maximum overvoltage, the suitable insulation safe margin, the withstand voltage level of robot and the insulation design of the robot are given. The testing results show that the performance of the robot meets the requirement of the design.

Key words: live working; robot; insulation protection; distribution power system

1 引言

配电带电作业技术已成为保证供电设备安全、可靠运行,提高电网经济效益和用户服务质量的一个重要检修手段。从 20 世纪 80 年代起,许多国家都先后开展了带电作业机器人的研究,如日本^[1]、西班牙^[2]、美国^[3]、加拿大^[4]等国家先后开展了对带电作业机器人的研究。

由于高压带电作业机器人的作业对象是 10 kV 的高压带电线路或电气设备,因此,带电作业机器人必须采取合理有效的绝缘配合,以保证带电作业机

器人必备的绝缘水平。为了协调带电作业机器人的设备造价、维护费用和因绝缘故障所引起的损失三方面的关系,必须综合考虑机器人在作业过程中可能承受到的各种电压,保护装置的特性和机器人绝缘对各种作用电压的耐受特性,合理地确定机器人必要的绝缘水平,这就是机器人的绝缘配合。

在本文中,讨论了我国第 1 台高压带电作业机器人的绝缘防护问题。在进行该机器人的绝缘配合设计时,按如下思路进行:①确定机器人作业时可能出现的最大过电压值;②根据实际情况计算出安全裕度;③求出机器人所需的绝缘耐受电压值;④进行绝缘设计,确定绝缘尺寸,使其满足所需耐受电压值;⑤进行绝缘试验,检验其安全裕度是否已足够。

2 高压带电作业机器人总体设计

该机器人的功能:以主从遥控方式,利用机械臂末端夹持手所携带的相应专用工具,可以完成 10 kV 线路的带电断、接引,带电更换绝缘子,带电更换跌落开关等。并且,该机器人所能完成 10 kV 线路带电作业工作的种类和质量跟机械臂末端夹持手所携带的专用工具也是密切相关的。如携带断线钳时,可以剪断导线;携带液压扳手时,可以拧螺母。

该样机主要由如下部分组成:移动升降系统、机器人本体、专用工具及动力源等组成。其中移动升降系统由拖动汽车和升降机构组成;机器人本体包括控制系统、6 自由度作业机械臂、主手控制装置以及绝缘操作斗等。机器人进行带电作业时,操作人员在绝缘斗内进行操作,采用人机交互智能控制技术来控制作业机械臂完成相应的带电作业工作。该样机

收稿日期:2005-10-11; 修回日期:2005-11-30

基金项目:国家电力公司重点科研项目(编号 SPKJ010-27) 山东省优秀中青年科学家奖励基金项目(编号 01BS38)

作者简介:鲁守银(1968-),男,山东嘉祥县人,教授,目前研究领域为电力系统控制、带电作业、机器人控制、鲁棒控制、复杂控制系统等。



图1 高压带电作业机器人外形

的系统总体见图1。

3 机器人作业时的最大过电压、绝缘耐受电压值和安全裕度

根据《带电作业安全规程》中规定：“雷电天气时不允许进行带电作业”，该机器人在工作时，可能受到的作用电压主要为：最高工作电压、暂时过电压、操作过电压。最高工作电压是指制造厂根据设备的绝缘条件、保证它可以长期运行的最高相电压(或线电压)的有效值。暂时过电压又称短时过电压，它包括工频电压升高和谐振过电压两类。工频电压的升高幅值不大，所以对电气设备绝缘和带电作业绝缘没有很大的威胁。但因其持续时间长、能量较大，所以在考虑带电作业机器人的泄露电流时，应依此为依据。操作过电压又称内过电压，它是由系统内的正常操作、切除故障操作或因故障(如弧光接地等)所造成的过电压。这种过电压的特点是幅值高、持续时间短、衰减快。

考虑绝缘配合通常有两种方法：惯用法和统计法。惯用法是一种传统的习惯用法，其基本出发点是使电气设备绝缘的最小击穿电压值高于系统可能出现的最高过电压值，并留有一定的裕度。惯用法的适用范围主要是非自恢复绝缘和220 kV及以下的电压等级。统计法的基本思想是：根据操作过电压与绝缘放电电压的统计分布规律，将绝缘受到一次操作过电压时发生放电的概率限制到可以接受的微小程度(如 10^{-5})，以此来选择绝缘的尺寸。

在考虑带电作业机器人的绝缘配合问题时，以惯用法为主，同时参考了人工带电作业的有关国家标准。根据绝缘配合惯用法，系统最大过电压、绝缘耐受电压与安全裕度之间的关系为： $A = \frac{U_w}{U_{0,max}}$ =

$$\frac{U_w}{U_N \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \cdot K_r \cdot K_0}$$

其中： A 为安全裕度； U_w 为绝缘的耐受电压(kV)； $U_{0,max}$ 为系统最大过电压(kV)， K_r 为电压升高系数； K_0 为操作过电压倍数； U_N 为额定工作电压(kV)。

在选择带电作业工器具的绝缘配合时，一般选取安全裕度为1.1~1.5，在这里选取安全裕度 $A =$

1.2，可以得到带电作业机器人的绝缘耐受电压 $U_w = 45$ kV。而国标GB/T18037-2000规定的10 kV带电作业工具设计依据的过电压水平为44 kV，所以带电作业机器人的绝缘耐受电压满足绝缘安全要求。

4 机器人绝缘与电气隔离设计

4.1 绝缘设计

在整个机器人系统中，机器人的一次降压是通过机械作业手臂末端绝缘连接件来实现的，一旦降压失效，强大的电流就有可能对机器人上操作人员和设备造成损害，所以在控制平台设计中，必须设计出可靠的二级绝缘，以保证操作人员和控制平台的绝缘，以及设备之间的相互绝缘。这里控制平台的二级电气绝缘采用全新设计的绝缘支撑，机器人的所有部件通过绝缘支撑连接在控制平台上，实现部件和控制平台钢结构之间的绝缘，人站在绝缘斗中，这样的设计不仅实现了各部件和控制平台钢结构的二级绝缘和各部件之间的相互绝缘，同时也保证了操作人员的三级绝缘。真正达到了中间电位作业的要求，从而可靠地保证操作人员和设备的安全。机器人本体结构见图2，连接部件的绝缘支撑简图见图3。

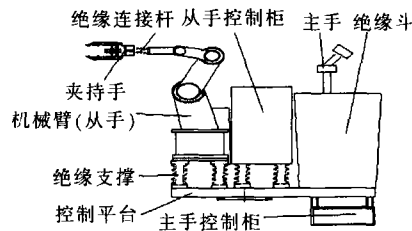


图2 机器人本体结构布置示意图

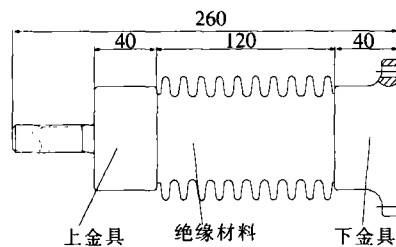


图3 绝缘支撑简图

在高压带电作业中，采用的是中间电位作业，控制平台的二次绝缘主要通过绝缘支撑和支柱绝缘子来实现，对绝缘支撑和支柱绝缘子的机械性能的计算和校核，这里略去，只讨论其绝缘性能。

图3和图4为绝缘支撑和绝缘支柱绝缘子，绝

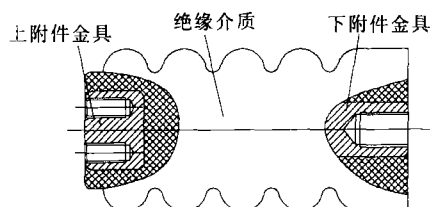


图4 支柱绝缘子图

表 1 绝缘材料参数

密度/kg.m ⁻³	抗弯强度/Mpa	抗压强度/Mpa	平行层击穿电压/kV	吸水率/%
≥1.8	≥241.6	≥241.6	≥15	≤0.5~0.75

缘材料主要用缠绕环氧玻璃布棒,主要参数见表 1。

对于绝缘支撑来说,层间绝缘已经满足,主要解决的是表面放电。为了保证 10 kV 高压绝缘可靠,绝缘支撑中间绝缘材料部分的长度设计为 120 mm,并且制成波纹形状,使表面放电距离达到 220 mm。

通过绝缘支撑的连接,实现了机器人各部件之间的绝缘和控制平台的二次绝缘。绝缘斗直接和控制平台钢结构连接,机器人的操作人员站在绝缘斗中,实现三次绝缘,从而保证带电作业人员安全。

4.2 电气隔离设计

机械臂夹持手采用液压驱动,由一绝缘油管从安装于作业平台上的液压泵浦供油,保证了夹持手与泵浦间的绝缘。

采取交流伺服电机驱动的作业机械臂的电源通过绝缘隔离变压器供电,保证作业中机械臂一次绝缘防护失败情况下,10 kV 线路不会经机械臂的供电回路对地放电,也保证了两臂操作两相时,不会产生相间短路故障,也避免了供电回路对控制系统的冲击。该隔离变压器为一对多型、满足两两电气隔离、高绝缘等级的专用绝缘隔离变压器,见图 5。该变压器为干式变压器,绝缘层额定绝缘等级为 10.5 kV,1 组一次绕组, Y₀ 接线,二次绕组有 3 组,均为 Y₀ 接线,绕组叠放次序由内到外(以 A 相为例)为: a₁, a₂, a₃, A, 各层绕组之间以及与铁心之间都以绝缘层隔离。该变压器可以同时保证机械臂与地之间、两臂之间、机械臂与电源发电机之间的电气隔离。

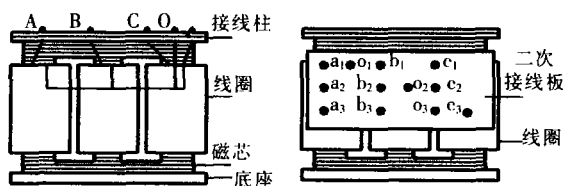


图 5 隔离变压器外观示意图

另外,为了保证控制信号传输过程中的电气隔离,主控模块、从控模块和液压模块以及专用工具之间的信号传输均采用无线传输方式。

5 高压试验情况

5.1 机器人绝缘部件绝缘试验

在室温 25 ℃,相对湿度为 38%的条件下,对夹持手绝缘件一端加 45 kV 电压 1 min,另一端测泄漏电流;200 mm 绝缘液压油管(内有液压油)一端加

45 kV 电压 1 min,另一端测泄漏电流;绝缘支撑件 1 一端加 45 kV 电压 1 min,另一端测泄漏电流;绝缘支撑件 2 一端加 45 kV 电压 1 min,另一端测泄漏电流。实验结果,见表 2。

表 2 机器人绝缘部件泄漏电流

实验项目	夹持手绝缘件	绝缘液压油管	绝缘支撑件 1	绝缘支撑件 2
实验电压/kV	45	45	45	45
泄漏电流/μA	80	37	92	128

5.2 高压带电作业机器人绝缘试验

在室温 25 ℃,相对湿度为 38%的条件下,根据《电业安全工作规程(发电厂和变电所电气部分)》第 6 章(带电作业)第 14 节(带电作业工具的保管与试验)中规定:对高压带电作业机器人进行耐电压试验,在高压带电作业机器人左手末端加 45 kV 电压一分钟,左臂、右臂、升降臂、汽车底盘、绝缘斗内、绝缘液压油管 6 个测试点测泄漏电流。试验严格按照有关规定执行,实验结果见表 3。

表 3 高压带电作业机器人泄漏电流

测试点	左臂	右臂	升降臂	汽车底盘	绝缘斗内	油管
泄流值/μA	129	75	88	88	0	88

6 结语

关于带电作业机器人的绝缘配合问题,目前国内尚无可资借鉴的标准或规定,笔者在综合考虑 10 kV 高压电网的绝缘防护要求、人工带电作业的绝缘要求的基础上,探讨了高压带电作业机器人的绝缘配合问题,给出了带电作业机器人的绝缘防护措施,并通过实验室试验和工业现场运行验证了其绝缘防护措施的安全可靠性。

参考文献:

- [1] Satorunio, Yoshiaga Maruyam. Remote-operated Robotic System for Live-line Work [A]. The 5th International Conference on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live Line Maintenance [C]. Nevada, USA, 1993, Esmo-93: 425-435.
- [2] Aracil R, Penin L F, Feme M, et al. Robtet: A New Teleoperated System for Live-line Maintenance [A]. 6th IEEE Int. Conf. on Transmission and Distribution Construction, Operation and Live-line maintenance [C]. Ohio, USA: IEEE Press, ESMO-95, 1995.
- [3] Electric Power Research Institute (EPRI) USA. Live-line Repair with TOMCAT [R]. EPRI Journal, July/August, USA: EPRI, 1987.
- [4] Cote J, Peletier M. Telemanipulator Design and Optimization Software [A]. The SPIE, Telmanipulator and Telepresence Technologies II[C], Marcos Salganicoff, 1995(2590): 64-73.