

核电厂安全级直流电动机控制中心设计研究

介绍了核电厂安全级（1E级）直流电动机控制中心的结构和功能，分析了安全级直流电动机控制中心至安全级直流电动阀线路电压降的计算方法。通过实例分析了安全级直流电动机控制中心的保护功能设置和设计，阐述了安全级直流电动机控制中心馈线电缆的选择方法。

陶 果 冯玉萍 滕 喆/上海核工程研究设计院



陶 果/高级工程师

安全级直流电动机控制中心在核电厂中用于给安全级直流电动阀供电，需在设计基准事故情况下保证供电的可靠性，确保阀门能够可靠动作，以保证电厂的安全^[1]。由于安全级直流电动机控制中心在核电厂运行和安全中所起的重要作用，需要合理设计系统的配电结构和保护，以满足下游电动阀的供电和保护需求。

目前针对交流电动阀的研究较多，针对直流电动阀的研究相对较少，为了保证安全级直流电动阀执行其安全功能，需要根据直流电动阀的结构特点和供电回路的特殊情况，结合直流电动阀的起动电流和对供电电压的要求来选择供电电缆。此外，需根据相关法规对安全级电动阀的保护和功能要求进行供电回路的保护设置。

关键词/Keywords

核电厂 ·
安全级 ·
控制中心 ·
起动电流 ·

安全级直流电动机控制中心的系统结构和功能

安全级直流电动机控制中心由相应的安全级直流母线供电，相应的供电电源分别来自由380 V交流电源供电的整流器以及处于满充电状态的安全级蓄电池组^[2]。直流母线通过带熔断器的隔离开关给安全级直流电动机控制中心的母线供

电，再通过带熔断器的隔离开关给电动阀供电。系统结构如图1所示。

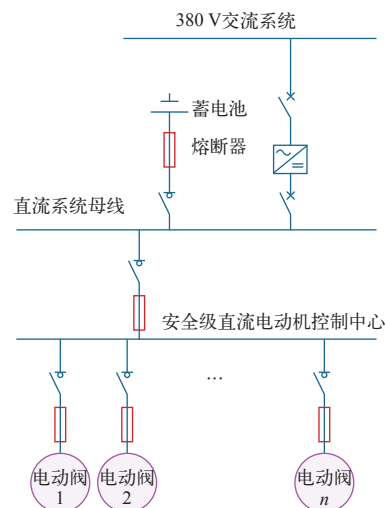


图1 安全级直流电动机控制中心单线图

安全级直流电动机控制中心馈线通过带熔断器的隔离开关保护，熔断器的额定值需与蓄电池供电回路的熔断器做到选择性配合。当正常运行时，安全级直流电动机控制中心母线由380 V交流电源通过整流器和直流系统母线供电；在设计基准事故工况下，若380 V交流母线失电，处于满充电状态的安全级蓄电池将开始给直流系统母线供电，不会中断向安全级直流电动阀的供电，以保证安全级直流电动阀的可靠动作。

安全级直流电动机控制中心馈线电缆电压降计算模型

安全级直流电动机控制中心给安全级直流电动阀供电。在选择安全级直流电动机控制中心至安全级直流电动阀门电装之间的馈线电缆规格时，电缆的载流量需要满足阀门电装（直流电动

机)堵转电流(大小等于起动电流)要求,以保证在堵转情况下电缆不损坏,电缆的载流量选择还需与保护装置配合,保证保护装置能够对电缆起到保护作用。此外,还需要校验阀门电装的端电压^[3],保证在事故工况下电动阀能够可靠动作,即需要保证在阀门起动时,阀门电装的端电压不低于80%的额定电压。

安全级直流电动阀采用复励直流电动机。由于阀门需要分闸和合闸操作,需要在安全级直流电动机控制中心内实现阀门电装电枢绕组的电流反向,以达到电动机正反转的目的。在安全级直流电动机控制中心内分别设置有阀门分闸和合闸的接触器,相应的触点闭合来实现阀门的分闸和合闸操作。由于只需电枢绕组电流反向,励磁绕组无须反向,因此供电电缆需要送至阀门电装的励磁绕组后返回安全级直流电动机控制中心,与分闸或合闸接触器触点串联后再送至阀门电装的电枢绕组。阀门电装的主接线示意图如图2所示。

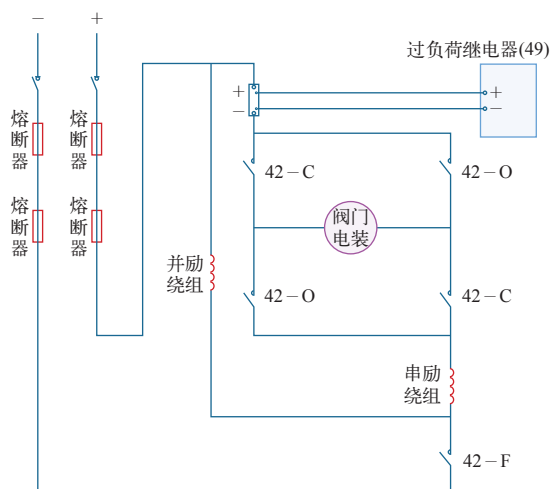


图2 阀门电装主接线示意图

图2中,42-C、42-O分别为合闸接触器的触点和分闸接触器的触点;42-F为总回路接触器的触点;49为过负荷继电器。当合闸操作时,两副42-C触点闭合,阀门电装正转,阀门闭合;当分闸操作时,两副42-O触点闭合,虽然此时励磁绕组的电流方向与合闸操作时相同,但是电枢绕组的电流反向,阀门电装反转,阀门打开。

若阀门电装的功率为 P_N ,额定电流为 I_N ,起动

电流为 $I_{st}=kI_N$,则在选择电缆截面时,需要满足起动电流的要求,即电缆在实际工况(考虑了温度、敷设方式等影响)下的载流量需大于 I_{st} ,且需与保护装置的额定值配合。

当电动机起动时,由于短时起动电流为额定电流的 k 倍,在此工况下,需核实安全级直流电动阀门电装的端电压不低于80%的额定电压。由图2可得,安全级直流电动机控制中心至阀门电装的线路压降计算公式为

$$\Delta u = 4kI_N R_m L / n / 1000 \quad (1)$$

式中, R_m 为线路单位长度电缆的电阻, Ω/km ; L 为安全级直流电动机控制中心至阀门电装之间的线路长度,m; n 为线路并联导线根数。

系统保护设置

为了保证系统和设备的可靠运行,并能够在故障情况下及时切断故障点,以免故障扩大化,需对安全级直流电动阀的阀门电装设置短路保护和过负荷保护。

由于大部分安全级直流电动阀布置于安全壳内,需通过安全壳电气贯穿件接到壳内。根据IEEE 741,需要针对安全壳电气贯穿件设置主保护和后备保护^[3],因此,需要给每个安全级直流电动阀的馈线回路配备两组短路保护装置,分别作为主保护和后备保护。由于安全级直流电动阀采用的是熔断器保护,为了满足贯穿件的保护要求,每个安全级直流电动阀回路都设置有两组熔断器串联,详见图2。

为了保证阀门在执行安全功能时以执行安全功能为先,即使阀门堵转时保护功能也不能够动作,在熔断器选型时需要保证熔断器能够在阀门电装的堵转电流(大小等于起动电流 I_{st})下不熔断。以阀门1为例,阀门电装的额定电流 $I_N=32\text{ A}$,起动电流 $I_{st}=kI_N=160\text{ A}$ 。熔断器的选型需能够满足起动电流 I_{st} 的要求,即熔断器的额定电流选取为160 A。

对于安全级直流电动阀来说,采用过负荷继电器来实现过负荷保护功能。由于阀门需要在设计基准事故情况下可靠动作,执行阀门的安全功

能,因此阀门电装的过负荷保护在设计基准事故情况下需被旁路。当阀门处于就地试验和维护情况时,过负荷继电器的辅助触点直接用于过负荷保护跳闸。过负荷继电器另有1副触点送至保护系

统,当阀门处于远程控制时,由保护系统根据电厂的实际工作状态来判断过负荷信号是否用于跳闸保护。以阀门1为例,阀门电装的熔断器选型和过负荷保护的控制原理如图3所示。

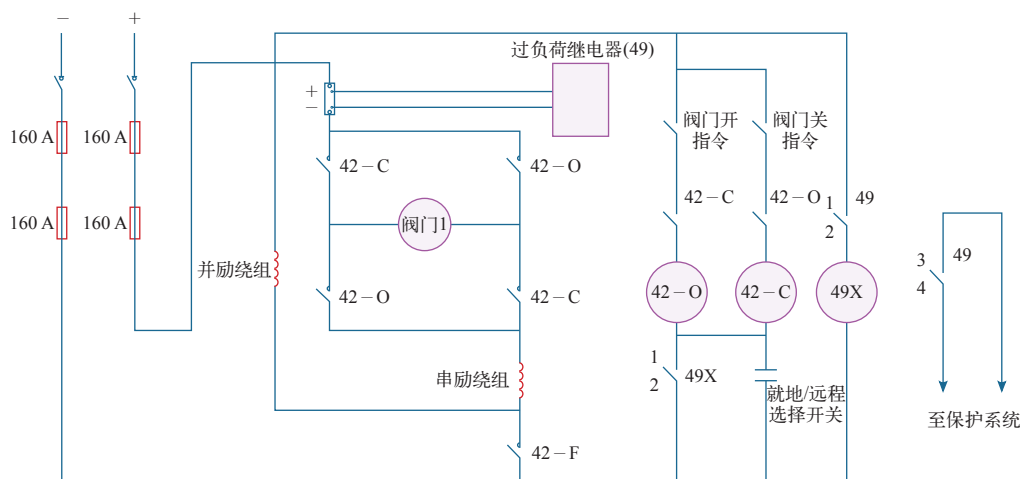


图3 阀门1的阀门电装保护和控制的示意图

由图3可见,当就地/远程选择开关处于就地位置时,过负荷继电器的(1,2)触点通过中间继电器49X的辅助触点(1,2)实现过负荷保护。当就地/远程选择开关处于远程位置时,49X的(1,2)触点被短接。过负荷继电器的(3,4)触点送至保护系统,由保护系统判断是否需要执行过负荷保护,然后通过阀门开指令和阀门关指令来实现所需要的操作。

安全级直流电动机控制中心馈线电缆选型

根据安全级直流电动机控制中心馈线电缆电压降计算模型,可以根据安全级直流电动阀阀门电装的起动电流来计算和选择馈线电缆的规格。

根据式(1)可得

$$R_m = \Delta u / (4kI_N L / n / 1000) \quad (2)$$

在计算得到 R_m 后,就可以根据不同规格电缆的单位长度电阻值来选择满足线路电压降的电缆规格。

以图1中的电动阀1为例,阀门电装的功率 $P_N = 7.04 \text{ kW}$,额定电压 $U_N = 220 \text{ V (DC)}$,额定电流为 $I_N = 32 \text{ A}$,起动电流倍数 $k = 5$,起动电流 $I_{st} = kI_N = 160 \text{ A}$ 。从载流量的角度来说,由于 $I_{st} = 160 \text{ A}$,且

保护熔断器的额定值为 160 A ,电缆的载流量需不小于 160 A ,需选择截面积为 70 mm^2 的电缆(已考虑环境温度对载流量的影响)。

由于需要满足阀门电装起动时端电压不低于80%的额定电压的要求,对于阀门1来说,还需要根据电压降的限制来选择电缆的规格。安全级直流电动阀主要在事故工况下起动,此时系统的供电是由安全级蓄电池提供的,且在蓄电池放电末期仍需要保证安全级直流电动阀的可靠动作,因此,在计算电压降时,需以蓄电池放电末期的电压作为系统电压来考虑。安全级直流系统的额定电压为 $\text{DC } 220 \text{ V}$,安全级直流电动阀的阀门电装额定电压也是 $\text{DC } 220 \text{ V}$,则阀门电装处的最小电压需不低于 $80\% \times 220 \text{ V} = 176 \text{ V}$ 。安全级蓄电池的放电终止电压为 $\text{DC } 185.5 \text{ V}$,考虑到蓄电池出线端至安全级直流电动机控制中心的电压降约为 $\text{DC } 4.5 \text{ V}$,则安全级直流电动机控制中心至安全级直流电动阀阀门电装的电压降需不超过 $\text{DC } 5 \text{ V}$ 。

安全级直流电动机控制中心至阀门1的电缆长度为 33.6 m ,先假定并联导体根数 $n = 1$,根据式(2)可得

$$R_m = \Delta u / (4kI_N L / 1000) \quad (3)$$

结合阀门1的额定电流和起动电流倍数可得阀门1的线路单位长度电阻 $R_m=0.233\ \Omega/\text{km}$ 。

在计算得出安全级直流电动机控制中心至安全级直流电动阀的电缆单位长度电阻后，根据不同截面电缆在不同导体温度下单位长度的电阻值，结合电缆的导体温度，可得到满足电压降要求所需的最小电缆截面积。不同截面电缆在 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 导体温度下的直流电阻如表1所示，对于阀门1来说，电缆的直流电阻需不大于 $0.233\ \Omega/\text{km}$ ，查下表可得所需的最小电缆截面积为 120 mm^2 。

表 不同规格电缆在 $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ 导体温度情况下的直流电阻

电缆规格/ mm^2	直流电阻/ $[(\Omega/\text{km})\cdot 90\text{ }^{\circ}\text{C}]$
10	2.346
16	1.479
25	0.936
95	0.249
120	0.196
150	0.161
185	0.128

最终，电缆截面积需取载流量选取结果和电压降计算结果之间的最大值，则安全级直流电动机控制中心至阀门1的电缆截面积选取为 120 mm^2 。

安全级直流电动机控制中心至其他安全级直流电动阀的电缆截面积可根据与阀门1相同的方法选取。

结束语

根据安全级直流电动阀的电气结构特点，结合线路电缆的敷设特点，建立了安全级直流电动机控制中心至安全级直流电动阀阀门电装之间线

路电压降计算模型，根据线路电压降计算模型得到满足电压降要求的电缆单位长度电阻值计算模型。以某一阀门为例，根据安全级阀门的保护要求，分析给出了阀门电装保护的设置要求和实现方法，对线路的电缆规格选择方法进行了分析。

本文的直流电动阀供电线路电压降计算模型和线路电缆规格的选型方法可用于类似结构直流电动阀阀门电装或直流电动机相关问题的研究和计算，在实际问题分析时，需根据具体情况考虑电缆敷设的环境温度和阀门电装引线对线路电阻的影响。阀门电装的保护设置和实现方法可用于安全级直流电动阀和安全级交流电动阀的阀门电装保护设计参考。

参考文献

[1] HAF 102. 核动力厂设计安全规定 [S]. 北京: 国家核安全局, 2004.

[2] IEEE 946—2004. IEEE recommended practice for the design of DC auxiliary power systems for generating stations [S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2005.

[3] 刘春娣, 王平. 直流系统电缆选择的探讨 [J]. 青海电力, 2010, 29 (3): 10-11.

[4] IEEE 741—2007 IEEE standard criteria for the protection of class 1E power systems and equipment in nuclear power generating stations [S]. New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2008.

(收稿日期: 2014—03—10) **EA**

.....

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告