

「断路器」

一起大批量水泵停机事故的分析及改进方式

文/上海城投水务工程项目管理有限公司 杜丽华

泵站直流电源输出线路复杂、庞大，直流母线接地可以是常见故障。在直流母线单点接地时，继电保护一般要求不能因此误动。在此案例中，由于综保开关量输入BI门槛电压（起动）值选择较低，直流输出电压调整值较高，控制电缆导线对地分布电容的存在，当直流母线发生正对地故障时，即瞬时触发了事故发生，此干扰信号将联接在直流母线上的所有断路器综保分闸（或合闸）命令使能，导致大批正在正常运行的水泵停机事故。

事故过程

在某大型原水泵站中，因正常开起一台变频机泵失败，维护人员对该台变频器检修排查，发现6 kV断路器综保没有接收到开泵命令信号，故机泵无法起动。

维护人员将此6 kV断路器手车放至冷备用位置，随后在变频器侧对断路器进行合闸试验，即短接DI-2（+56 V），DI-3（-56 V）端子，该变频机泵的6 kV断路器合闸成功，但同一时刻该支线所有正在对外供水的其余七台同型号变频机泵6 kV断路器却接收到分闸命令（且综保都没有任何报错信息），从而造成这些机泵瞬时非正常停机。

该变频机泵试验合闸成功与大批量水泵停机几乎同时发生，事故前泵站没有其他操作，直流屏也无报错信息，说明直流系统运行正常，推测事故与此短接动作有直接关联。

经过多次分析、讨论，最终多方认定直流电源112 V输出正对地短路可能性最大，理论上亦能解释大批量停机事故。

6 kV断路器综保开关量输入BI接口电路原理

图1为综保直流输入电路的一种形式（只画出

一路输入电路）。当图1中外部控制线路的接点K闭合时，综保BI内部光耦的发光二极管点亮，光敏晶体管饱和导通，该低电平信号再传送给处理器的数据总线，从而CPU判断该路有信号输入；外部接点断开时，光耦中的发光二极管熄灭，光敏晶体管截止，CPU判断该路没有信号输入。

开关量输入BI的直流输入电压为112 V，BI门槛电压（起动）设计值为56 V。

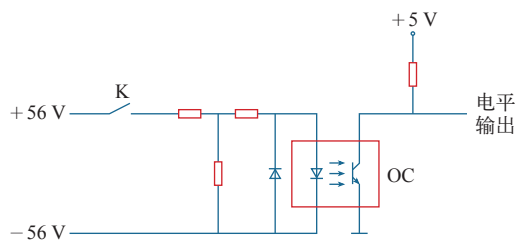


图1 开关量输入BI电路

事故分析

图2电路实际由两个部分组成，左侧是直流屏输出电压112 V，电阻 R_1 、 R_2 是直流屏绝缘监测，右侧接点K是断路器分闸（或合闸）外部控制命令，电容C是控制电缆导线对地分布电容，单路BI是综保与外部接口电路。

外部接点K未闭合前，BI内部的光耦OC无电流流过，相当短路，故电位 $U_A = -56\text{ V}$ 。

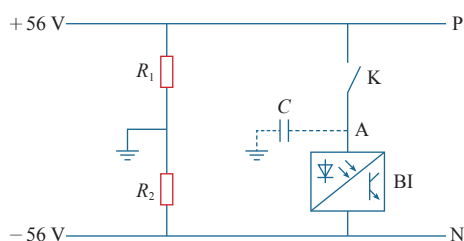


图2 6 kV断路器综保BI分闸（或合闸）电路

当图2直流电源发生正端接地故障时， U_N 电位即由 -56 V 变化到 -112 V ，此时BI两端正向电压 $U_{AN} = -56\text{ V} - (-112\text{ V}) = 56\text{ V}$ ，此正向 56 V 电压正巧与BI的门槛电压值相等，因此BI使能。此时尽管外部控制命令K接点没有闭合，但因受此干扰，BI已经有效动作，并将此信号送到综保CPU，并由CPU对外发出指令，控制 6 kV 断路器分闸。

因直流电源正对地短接，分布电容 C 与BI的等效输入电阻 R 构成 RC 充电回路， RC 电路的时间常数 $\tau = RC$ ，充电电流路径是电源正端→地→分布电容 C →BI→电源负端。

分布电容 C 上充电电压 u_c 按指数规律变化，即从 -56 V 一直充到 -112 V ，综保BI两端电压 $u_R = 56e^{-t/\tau}$ 按指数规律下降，其电压从 56 V 下降到 0 V 。综保BI两端电压 u_R 随时间变化曲线见下图3。

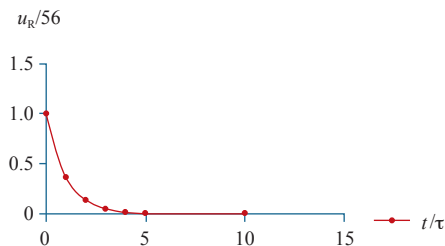


图3 综保BI两端电压 u_R 随时间变化曲线

在 $t=0$ 时，加在综保BI上的电压 u_R 最大，为 $U/2 = 56\text{ V}$ ，以后便随着时间 t 逐渐衰减。从式中 $U/2$ 可以看出：如果综保BI的门槛电压高于直流电压 U 的一半（即 $>U/2$ ）时，综保BI便不会发生误动作；如果综保BI的门槛电压等于或低于直流电压的一半（即 $\leq U/2$ ）时，就有可能发生误动作。

电容 C 越大，电压衰减得也就越慢。只要加在综保BI上的电压在衰减过程中高于综保BI门槛电压的时间足够长，且超过了综保BI的动作时间，则综保BI就会发生误动作。

由于直流电源负载了泵站所有断路器综保BI，在直流电源发生正对地短接时，若此单路BI

是分闸命令，则会造成大批水泵在没有准备的情况下停机；相反的，若此单路BI是合闸命令，则会造成大批合闸，但因其他条件不满足，此开机“命令”没有引起后果。但这些误分和误合指令的变位信号都被监控记录。

在此还需要进一步分析，当图3直流电源负端接地时，尽管 U_A 电位也有变化，但由于BI接口内部OC电流的单向特性，发光二极管电流不可能逆向流动，因此直流电源即使负端接地时，此干扰也不会对BI造成误动。

改进措施

针对上述直流电源正对地干扰引起的断路器分闸（或合闸）误动，经过分析讨论，提出四种解决方法。①延长综保BI软件滤波时间。②调低直流屏输出电压，即从 112 V 调到 110 V 或更低。③增加一副综保BI接点，即由单接点变为双出口。④提高综保BI门槛电压，即增加一个电阻。

延长滤波时间，可抵抗正对地干扰，但 RC 充电时间值 $\tau = RC$ 不易计算，若时间值设置过长，将会影响真实故障跳闸时间，甚至引起越级跳闸。

当然直接将直流屏输出电压调低，也可以抵抗这种干扰，但考虑到直流系统所带负载复杂、庞大，为了稳妥起见，不建议选择该措施。

双出口接点法仅是隔离干扰，但施工比较复杂，工作量大，代价也大，故也不建议选择。

该综保开关量输入BI特性：额定输入电压：DC $24 \sim 110\text{ V}$ ，耗用电流： $1.6 \sim 1.9\text{ mA}$ 。显然综保BI门槛电压 56 V 正巧对应直流输出电压 112 V 的50%，当直流输出电压发生正对地短路时，直流 56 V 电压加入BI，因为BI内部光耦响应速度极快，该临界电压正巧使BI使能动作。若将BI门槛电压从 56 V 提高到 65 V ，需要串入电阻 R ，求解 R 的最大值 $R_{\max} = (65 - 56) \times 1000 / 1.6 = 5.6\text{ k}\Omega$ ，最小值 $R_{\min} = (65 - 56) \times 1000 / 1.9 = 4.7\text{ k}\Omega$ ，因此电阻 R 的取值只要在 $R_{\min}$ 和 $R_{\max}$ 之间任意取值，都可满足门槛电压 65 V 上下，或者说门槛电压只要大于 56 V ，且有一定安全余量即可。同时考虑灵敏度和抗干扰，取中值 $5.2\text{ k}\Omega$ ，电阻功率 $P = RI^2 = 5.2 \times 1.732 = 0.01556\text{ W}$ 。

在有条件时，很容易用电压表确认门槛电压值。碳膜电阻价廉，只要将电阻与控制导线焊接，外加绝缘套管即可接入综保BI端子排。

（下转第63页）

3. 变压器—电动机组起动压降分析

(1) 35 kV母线压降要求

设计规范要求,一般情况下,对于频繁起动的电动机,母线电压不应低于90% U_e ,不频繁起动时不宜低于85% U_e ;采用变压器—电动机组起动方式,35 kV母线无论分列运行还是单母线带全部负荷运行,35 kV母线电压相对值均大于0.85,C2装置大容量电动机属于不频繁起动设备,故满足母线压降要求。

(2) 大电动机起动机端电压要求

依据大电动机技术协议要求和厂家提供的试验数据,只要电动机端电压不低于75% U_e ,就能满足起动转矩和起动时间要求。采用变压器—电动机组起动方式,电动机机端电压相对值 $U_{sm}=0.8499$,远远大于0.75,因此满足电动机的起动要求。

通过起动压降计算数据可知,变压器的二次电压调整高低对35 kV母线的电压降低影响不大,但对电动机的机端电压有较大影响,电压过低会造成电动机起动转矩下降,起动时间延长,因此,适当调高变压器的二次电压,有利用电动机起动。电动机起动时变压器二次电压理论保证值要求不低于5 300 V。综合分析,C2装置大容量电动机采用变压器—电动机组全压起动方式,完全满足35 kV变电站供电系统的电压降低范围和生产装置机组起动要求。

实际应用情况

1. 大电机实际起动数据

从35 kV变电站故障录波记录波形分析,当变压器—电动机组的变压器二次电压调整在6 300 V时,大电动机起动会造成35 kV I段母线电压降低7%左右,电动机的起动时间约为16 s左右,35 kV

侧起动电流最大达到560 A左右;当变压器—电动机组的变压器二次电压调整在6 000 V时,大电动机起动会造成35 kV I段母线电压降低6%左右,电动机的起动时间约为19 s左右。

2. 保证大电动机正常启动采取的主要措施

根据起动大电动机时电压水平计算结果及供电系统的具体情况,为起动大电动机采取了以下措施:

1) 变压器—电动机组的变压器选用有载调压,通过调节变压器分接开关,将变压器低压侧电压控制在6 300 V左右,有利于电动机起动。

2) 线路变压器组配置光纤纵差保护;电动机本身配置磁平衡差动保护、低电压保护、接地、过负荷保护等,以提高设备故障时保护的可靠性与灵敏性。

3) 对35 kV变电站进线、母联及上级变电站的电流保护进行核算,确保上下级之间保护配合,保证保护的可靠性与选择性。

4) 35 kV变电站在系统单电源或单母线运行方式时,尽量避免起动大电动机,以减少对供电系统、配电设备造成过大冲击电流致使保护误动,增加变电站全停风险。

结束语

在35 kV变电站主变压器容量受限的条件下,结合供电系统的实际情况及C2装置大电动机的起动要求,在对比分析了大电动机四种配电方案后,确定了C2回收装置大容量电动机供电方案,并通过计算分析,论证了变压器—电动机组起动方案的可行性。实际运行情况也证明采用变压器—电动机组供电方式是最佳方案。EA

(收稿日期:2017.05.30)

(编辑:白文亭)

(上接第59页)

以上四种措施中,延长滤波时间是用躲过门槛电压作用持续时间;调低直流屏输出电压和增加一个电阻措施,这些是用躲过门槛电压值;而双出口接点法仅是隔离干扰。

事故结论

直流屏电源出线复杂、庞大,正对地或负对地短路可能经常发生,直流屏在设计时已经考虑,即在其输出的正或负端接地时,仍能保证输

出额定电压110 V,这就是容错设计。同理,用户也希望综保BI能够对此容错,并有一定安全余量。

在继电保护交接试验中,增加对直流母线单点接地试验,以此确认上述事故分析及其应对措施,保障泵站继电保护正常运行。

综保BI容错试验以往不被重视,但此试验对泵站安全运行意义重大,应在今后的泵站建设中予以足够重视。EA

(收稿日期:2017.05.30)

(编辑:白文亭)