[电动机]

一种基于微机保护装置的低压电动机抗晃电再起动设计方案

文/江苏金智科技股份有限公司　张　洁　丁　宁

分析了晃电对工业系统高低压母线的影响和治理现状，指出在微机保护装置中实现对低压电动机的抗晃电再起动具有现实意义，提供一种基于微机保护装置的低压电动机抗晃电再起动设计方案，详述了硬件核心模块、软件处理流程及相关技术细节。经现场测试和实际应用表明，本方案晃电时间设定范围广、动作时间精确、再起动方式灵活，无须额外增加投资和维护成本，具有可靠精确、经济高效的特点。

晃电是供电系统因雷击、短路重合闸和大型设备起动等内外部原因导致的电压短时波动，电压幅值跌落至额定值的90%～0%深度范围内，持续时间从几毫秒至数十秒不等。对连续生产型企业，晃电可能引发生产过程紊乱、生产或设备事故、威胁操作人员人身安全等各种危害，必须采取措施以降低其带来的影响已成为业内人士的共识。一般地，发电厂、石化和钢铁等企业的用电系统分高压（10 kV/6 kV）和低压（380 V）两级，以电动机为主要负荷，晃电在不同电压等级的影响程度不同，应对措施也不同。

高压电动机的供电开关为断路器，晃电时不会主动跳开，母线失电后电动机群之间将以异步发电机和电动机两种运行方式进行机械能和电能能量交换，形成以秒级速度下降的母线残压，利用这个特点，快切装置通常能在几百毫秒之内以较小的冲击平稳地切换到备用电源供电。工业系统抵御晃电的第一道防线，就是利用快切装置大幅降低晃电对系统的影响时间，这在高压系统已经得到广泛应用并被验证确实有效。

低压系统的电动机数量众多，出于经济因素考虑，供电开关主要是采用塑壳断路器+交流接触器方式。普通交流接触器是对电压极为敏感的设备，晃电故障下通常在几十毫秒内就自动断开，具体时间受电压跌落的幅值大小、持续的时间长短和失电初始时刻电压相角三个因素的影响，其时间下限已经穿透常用电源开关的合闸时间，更谈不上快切装置的切换了。低压电动机群在晃电发生后迅速地与供电系统隔离，以各自的特性曲线自由衰减，母线电压幅值下降很快，上述的第一道防线在低压系统失去防御作用。

近十余年来，各高校、企业用户和电力设备制造商针对低压母线晃电的治理进行了大量理论研究和实际应用工作，主要可分为两大类：

1）使接触器的主触点在晃电发生后的一定时间内保持吸合，主要实现方式有给普通接触器增加辅助不间断电源设备（UPS）、使用智能抗晃电接触器等。这种保持接触器不释放的方式可视为抗晃电的第二道防线，其优点与高压系统类似，使电动机群通过母线进行能量转补，延缓电动机转速及母线电压的下降速度，快切装置可利用全系统的残压进行快速切换。但这类方案往往存在增加投资、改造和运行维护复杂、产品和技术不够成熟以及控制方式不够灵活等问题，实际应用并不广泛。

2）由接触器在晃电时自由释放，在晃电结束电压恢复时使接触器自动再合上，称为抗晃电再起动控制。主要实现方式有在接触器控制回路增加延时释放继电器，增加分散的再起动控制器或集中的再起动控制柜，在继电保护装置中增加再起动功能等，以上可看作抗晃电的第三道也是最后一道防线。上述前几项措施中，都需要额外增加用户的投资和运行、维护成本，并可能存在晃电时间范围小、动作时间误差大和再起动方式单一等问题。随着电气化水平的不断发展，低压电动机继电保护装置取代了传统的电流互感器、热偶、电能表、按钮和变送器等元件，集电动机保护、控制、测量和通信功能于一体，已经得到广泛的使用。在装置中实现对电动机的抗晃电再起动控制已经逐渐成为经济、主流的解决方案。借用装置已有的交流量采集、起停控制资源和逻辑计算处理能力，设计实现灵活、快速、精确和可靠的再起动控制方案，守好抗晃电的最后一道防线，具有重要的意义。

再起动功能要求及应用方案简述

低压电动机保护装置的典型应用接线图如图1所示（除再起动功能测试回路以外）。在接触器的控制回路中，装置的停车出口为常闭继电器，保护跳闸或控停电动机时打开，断开接触器（KM）控制回路使电动机跳闸；起动出口为常开继电器，控起电动机时发出闭合脉冲，导通接触器控制回路使其辅助触点自保持，电动机起动。微机保护装置的抗晃电再起动，就是复用此“起动出口”，检测到晃电后根据需要控制电动机起动。

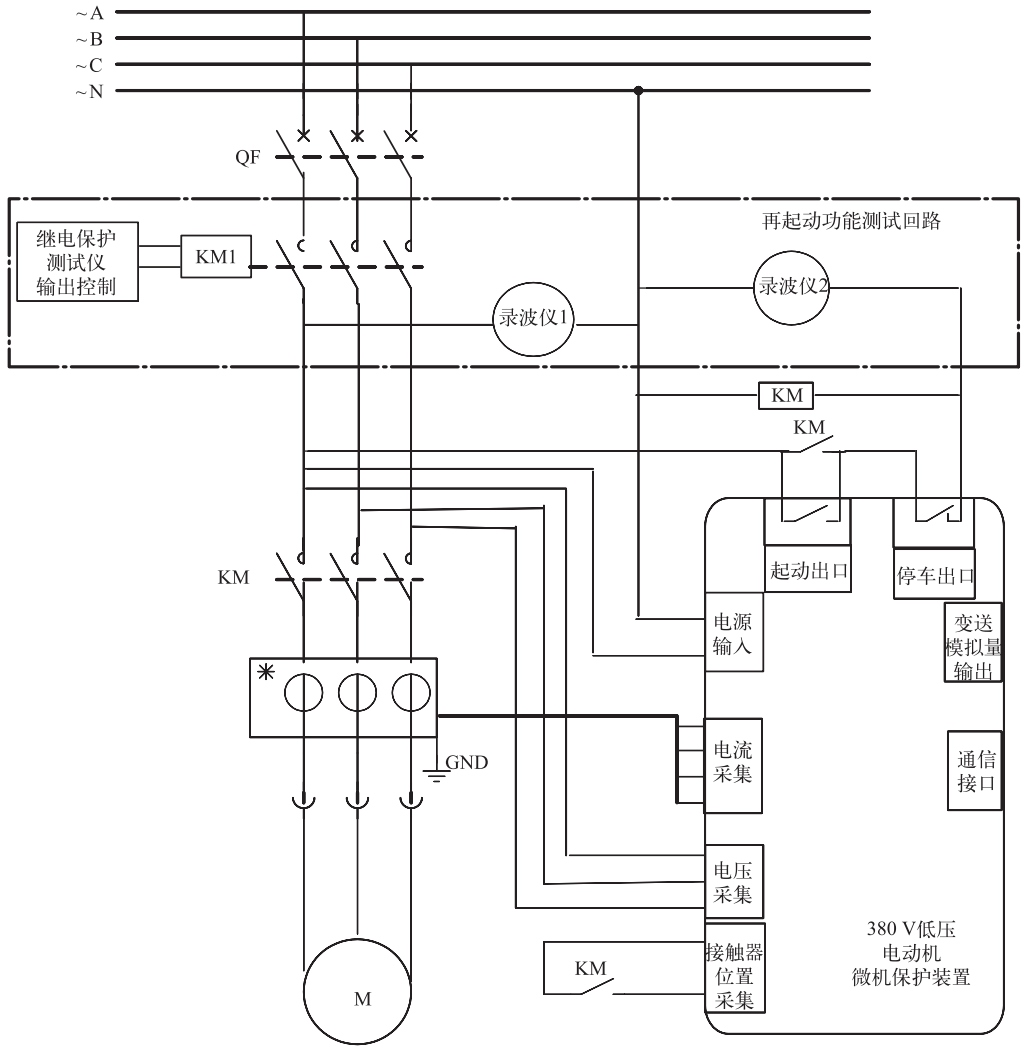

图1　低压电动机微机保护装置典型接线图

实际应用中系统需要根据晃电时间长短对电动机采取不同的再起动方式：较短时间的晃电（通常在0.5～1 s），电动机因惯性作用转速下降不明显，电压恢复时电动机起动电流带给系统的冲击较小，要求立即再起动电动机；较长时间的晃电（数秒内），电动机转速下降较多，电压恢复时电动机起动电流大，多台电动机群起动必然会给系统带来较大的冲击，需按照生产工艺的要求及根据系统的容量大小，对每台电动机独立设定延时实现逐批再起动电动机；晃电时间过长，给生产带来的影响已无可避免，盲目再起动电动机已无意义，要求不再重起电动机。另外，要求在有故障导致保护动作、有控停命令时均不应再起动电动机。

根据以上需求分解设计再起动的方案为：设置立即起动晃电时间和延时起动晃电时间两段定值，记录接触器因晃电而释放的时刻t_1和晃电结束电压恢复的时刻t_2，根据两者差值T_{sd}（$=t_2-t_1$）的大小进行不同的再起动方式处理。在立即起动晃电时间内，立即合起动出口；在延时起动晃电时间内，经过设定延时合起动出口；超过延时起动晃电时间，不再响应。由于保护装置的供电电源通常也取自低压380 V交流系统，所以装置也可能经历完全失电过程，为保证装置能准确计算出晃电间隔时间T_{sd}，需要通过硬软件结合实现。

硬件设计方案

本文中微机保护装置的CPU是TI公司C2000系列的一款32位DSP控制处理器。器件的主频达150 M，外设集成度高、存储量大、功耗低，满足保护装置对各类数据采集和处理的需求。再起动功能的实现主要涉及电动机电流和电压、接触器位置信号的采集、起动继电器的控制输出和晃电时间的计算等。其中，电动机电流和电压经TA、TV后送至模拟量采集电路进行滤波、放大处理，送入DSP的A/D模块进行采样，最后由离散傅里叶算法还原；接触器的位置等信号在开关量采集电路中经过光耦隔离，由I/O总线送至DSP读取；DSP也通过I/O总线送出对起动继电器的控制信号，经光耦隔离后控制继电器。以上设计在微机保护装置中已经非常成熟和典型，故不再详述。重点讨论涉及再起动功能的电源和实时时钟两个关键模块。

保护装置硬件功能框图如图2所示。

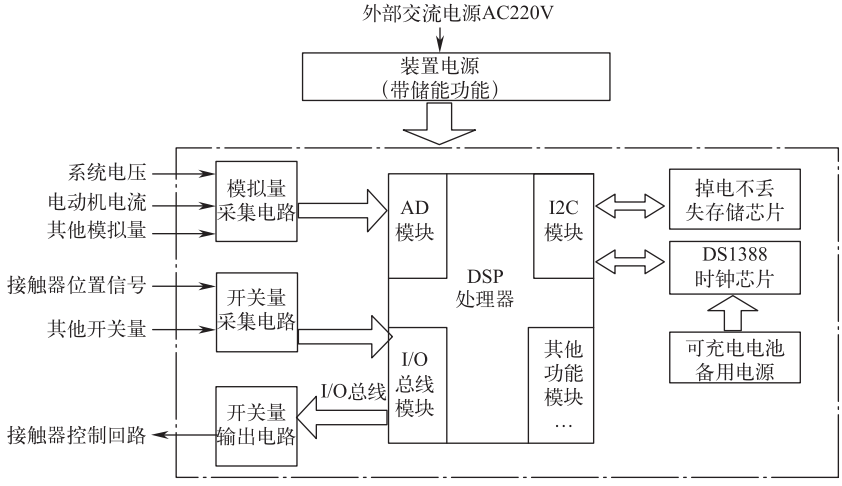

图2　保护装置硬件功能框图

1. 电源模块

装置电源为集成装置内部的开关电源，将外部输入的AC 220 V强电通过整流、变压和稳压转换5 V、3.3 V等各种等级的电压给各模块电路供电。为实现再起动功能，电源模块的对应设计目标是保证装置可靠地记录因晃电而导致接触器释放的时刻t_1。

对接触器的研究及经验显示，接触器的合闸线圈维持电压是额定幅值的70%～80%，电压幅值暂降至此范围以下接触器可能会释放；另一方面晃电导致电压暂降至释放区间后，接触器维持吸合时间受晃电持续时间、幅值降低深度和初始时刻相角的影响，通常在几十毫秒内就自动断开，极端情况下不到一个工频周期，长也不会超过数百毫秒，任何

工况下不会超过1 s。针对此特性电源模块按两点参数设计：1）支持30%～120%额定电压宽范围输入，当大部分电压下降型晃电发生时（30%额定电压以下），装置仍可正常工作，无影响地记录接触器释放时刻t_1；2）通过超级电容实现短时储能功能，在电压消失型晃电发生时保证装置仍正常工作1 s，也可靠地记录下t_1时刻。

2. 实时时钟模块

实时时钟是实现再起动功能的重要模块。本文中装置选用的是DALLAS公司的I2C接口的DS1388时钟芯片，它是DS1338的升级版，可提供年、月、日、时、分、秒的时钟/日历，闰年自动补偿，通过I2C总线与CPU接口。它的优越性在于时间的读写准确度可以精确到10 ms，满足再起动功能对时间计算准确度的要求；另一方面芯片提供了主、备电源输入管脚和自动切换机制，图2中，DS1388的工作电源来自电源模块的3.3 V输出，备用电源来自可充电的锂电钮扣电池，当晃电导致完全失电持续时间超过1 s，电源模块的3.3 V输出不能稳定供电后，DS1388可探测到工作电源低于门槛电压，立即自动无缝切换至由电池供电，DS1388的时钟部分可持续不间断工作。晃电结束时，装置电源模块供电恢复正常，CPU即可从DS1388里读出当前时间t_2，装置就如同未曾失电一样，从而以计算从t_1时刻至当前t_2的时间间隔，确定晃电持续时间。

软件设计方案

图3为再起动逻辑的软件设计流程图。根据要求设置两个关键的时间定值：立即再起动晃电时间T_1和延时再起动晃电时间T_2，$T_1<T_2$。

1. 装置正常运行时逻辑过程

图3装置正常运行过程中，再起动逻辑分为两步走：

1）记录t_1时刻。装置通过判断电动机电压已经低于设定值且无其他保护跳闸和停车命令，接触器位置由合变为分，认为是一次晃电的开始，将此时刻及接触器状态等信息写入掉电不丢失的EEPROM中。如文中此前已讨论的装置硬件设计方案中所述，无论发生何种类型的晃电这一步都能可靠地得到执行。

2）记录t_1后，装置一直计算当前时间与t_1时刻的间隔时间$\triangle t$，在最大允许失电时间T_2内（$\triangle t<T_2$）一直判断系统电压是否恢复至设定值以上，若有，则记录恢复时刻t_2并计算晃电时间$T_{sd}=t_2-t_1$。按照文中前述的应用需求，若$T_{sd}<T_1$执行立即再起电动机逻辑；若$T_1<T_{sd}<T_2$，则执行延时再起电动机逻辑；$\triangle t$超过T_2以后，无论系统电压是否恢复都不再重起电动机。判断过程中，一旦有装置发出保护跳闸事件或接收到控停电动机命令，中止逻辑不再起动电动机。这一步的执行分两种情况：①晃电中CPU一直未失去电源，则能正常执行；②晃电时间长达几秒至几十秒，CPU已失电至不能正常工作，则不能完整执行第二步。这种情况下，装置将在再次来电时转入“装置刚上电时的逻辑过程”，完成第二步的逻辑。

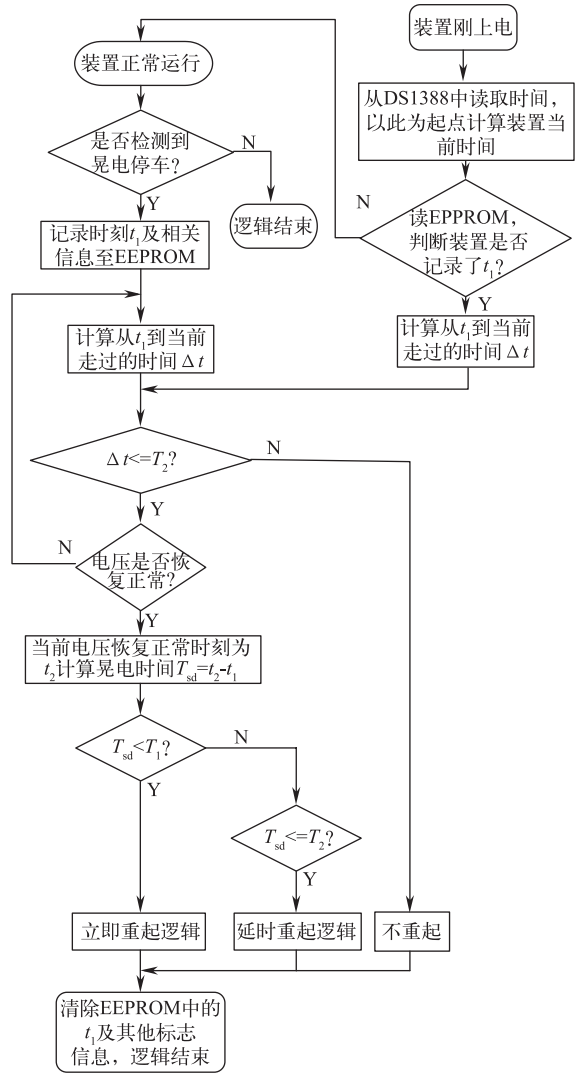

图3　再起动逻辑软件流程图

2. 装置刚上电时逻辑过程

装置每次刚上电时，从DS1388中读出当前时间。若掉电不丢失的EEPROM记录了时间t_1，表明之前记录了一次晃电，恢复立即计算从t_1到此刻所历经的时间间隔Δt，其后装置转入正常运行时的逻辑，完成装置正常运行时逻辑过程中的第二步。

其他技术细节

1. 装置时间和时钟时间的同步

再起动功能记录的绝对时刻t_1、t_2及保护功能的事件记录和录波的时标等属于装置时间，需要实时更新。若每次从I2C接口的时钟芯片读取势必影响效率，所以装置时间如此处理：DSP每次刚上电开始工作时，从DS1388中读取精确到10 ms的时间值并以此作为初值，随后基于一个频率为150 M的内核计数器计算出精确到1 ms的装置时间。上电过后装置时间和RS1388时间各自同步行走，互不影响。当DSP记录t_1时刻至掉电不丢失的EEPROM中时，也将装置当前时间写入DS1388刷新时钟芯片时间，以消除DSP和DS1388两者因晶振特性不同带来的轻微误差。

2. 关键定值的整定范围

最小晃电识别时间，指装置能辨别的晃电最小持续时间。研究表明接触器的最快释放时间可能达到20 ms以下，再起动最小晃电辨别时间应尽可能小。石化等企业相关技术规范提出了最小晃电辨别时间10 ms的要求，保护装置对数字信号快速处理能力完全可以满足以上要求。最小晃电识别时间对应立即再起动晃电时间T_1的下限，另外T_1时间的上限一般与装置电源储能供电时间对应，在立即再起动晃电时间内装置能保持供电正常不失电，这个时间与装置电源的储能持续时间相对应，本方案中为前文所述的1 s。所以立即再起动晃电时间T_1范围宜为0.01～1.00 s。

最大晃电允许时间指能支持的最大晃电时间，通常是延时再起动的动作范围。若再起动的实现方式是通过大功率储能（如给接触器的控制回路加储能电源，给微机保护装置加UPS辅助电源）的方式，则此时间受限于所储能量的大小，储能电源提供的时间越长，则成本、体积增加得越多。本方案中装置完全失电后电池仅需给时钟芯片供电，所以可设定的时间范围理论上是电池放电时间，长达数十日。但实际应用中，在晃电数秒后已不再要求再起动电动机，工程上遇到的最长的时间要求是等待电厂的保护段电源柴油发电机的起动时间60 s。这个时间对应延时再起动晃电时间T_2的上限，所以延时再起动晃电时间宜为0.01～60.00 s。

3. 再起动动作时间准确度

未经历装置失电时，再起动动作时间误差由电压恢复傅里叶计算时间长度与继电器动作时间决定，即装置固有延时误差。经历装置失电时，有一个固定的装置上电恢复正常工作的时间，包括电源的建立、CPU晶振的起振等时间。为了消除这个误差，可以通过装置上电即输出IO管脚变位和示波器配合实验测得这个时间数值，然后在延时再起动相关定值及计算时间中减掉这个固定时限以消除误差。经过测试，无论是否经历装置断电过程，再起动动作时间的误差均控制在固有延时误差范围内，即小于30 ms。

试验验证及运行效果

1. 试验验证

为验证按照本文所述方案设计的装置动作可靠性，某工程现场用户设计实验环境如图1中的点画线部分所示。实验对象为一台2 kW的电动机，通过继电保护测试仪控制实验接触器KM1的分合时间，来模拟系统不同时间长度的晃电。录波仪1记录系统电压，录波仪2记录接触器的线圈电压。图4为瞬时晃电立即再起动波形，晃电时间维持100 ms，装置未经历断电，接触器线圈在系统恢复供电后第21 ms得电。图5为晃电至装置断电延时再起动动作波形，断电时间持续4 s装置经历了完全失电，再起动延时定值设置为1 s，接触器线圈在系统恢复供电后第1 021 ms得电。

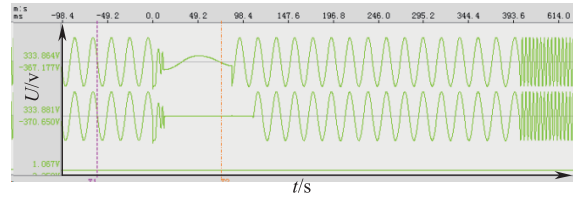

图4　立即再起动测试波形

图5　延时再起动测试波形

2. 现场运行情况

按本方案实施的低压电动机保护装置，在全国各大电厂、石油和化工企业的低压系统得到广泛使用，抗晃电再起动功能多年运行稳定可靠。

结束语

本文论述了一种基于微机保护装置的电动机抗晃电再起动设计方案，与现有的方案相比有以下优点：只需在装置中设置相关定值，无须增加投资和接线，经济高效；晃电允许设置时间范围广，不受限制；再起动动作时间精确，误差小于30 ms；动作方式灵活，可立即再起动或延时再起动，两者可独立投入或同时投入。经试验和多年工程投运现场验证，可靠稳定。随着低压微机保护装置的逐步广泛应用，这种软硬件结合的再起动设计方案具有较好的参考意义和实用价值。EA

（收稿日期：2021-10-19）

（上接第63页）

（3）通信平台

宋南变电所户外开关场占地面积约4 600 m^2，安装一个无线AP箱即可，在整个站内巡检区域采用一个无线AP建立完整的无线网络，安装位置选择主控楼楼顶，无遮挡，靠近设备区，能够达到良好的覆盖效果。网络布局如图15所示，AP箱安装位置如图16所示。

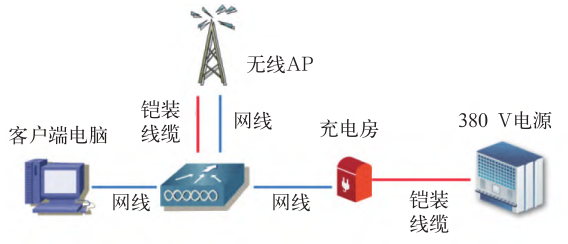

图15　网络布局示意图

图16　AP箱安装位置示意图

结束语

智能巡检系统的应用可改变传统运维方式，实现变电站高效化、智能化管理要求，降低人工巡检的劳动强度及巡检次数，提升目标巡检区域设备运行的安全性和运维效率，对变电所智能化推广具有重要意义。本文以供电公司110 kV宋南变电所智能巡检系统为设计对象，通过对智能巡检系统的设置研究，形成一套典型的变电站智能巡检系统设计方案，为油田变电所无人值守管理模式的大背景下智能巡检系统的设计提供了一定的工程技术经验。EA

（收稿日期：2021-11-05）