文章编号:1674-2974(2024)10-0164-10 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2024219

基于多点电压电流信息融合的泵房设备故障诊断方法

孟志强 ,陈励勤†,陈燕东 ,罗军
(湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082)

摘 要:为了实现自来水厂泵房及其二次加压泵房中配电设备与水泵故障的快速在线诊断与报警,保障泵房设备的安全运行,提出一种基于多点电压与电流信息融合技术的泵房设备故障在线诊断方法.基于泵房设备配电系统与设备构成,从理论上系统地分析了泵房配电设备与水泵常见故障所具有的电压与电流特征及其相互影响机理,使用配电线路中多个关键节点的实时电压、电流测量值进行融合处理,提取泵房配电主回路供电电压超限、配电线路中空气开关或接触器触头开路、水泵电机绕组开路、水泵电机绕组不平衡与匝间短路、水泵堵转、电机与水泵连接机构断开6类故障的故障特征,实现这些故障的在线诊断.阐述了故障诊断方法的执行条件、实现原理及具体实现步骤.使用MATLAB/Simulink搭建仿真模型进行实验验证,仿真结果表明,本文方法能有效地诊断泵房设备故障,克服了现有人工排查耗时耗力与离线分析不及时的不足,为自来水厂及其二次加压泵房配电设备与水泵的安全运行提供有效保障.

关键词:配电设备;水泵电机;故障诊断;信息融合
中图分类号:TP277 **文献标志码**:A

A Method for Fault Diagnosis of Equipment in Pumping House Based on Multipoint Voltage and Current Information Fusion

MENG Zhiqiang, CHEN Liqin†, CHEN Yandong, LUO Jun
(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: To realize the rapid online diagnosis and alarm of the faults of power distribution equipment and water pumps in the pumping house of the water plant and its secondary booster pumping house so as to guarantee the safe operation of the pumping house system, an online diagnosis method of equipment in the pumping house is proposed based on the multipoint voltage and current information fusion. Based on the distribution equipment and pumps in the pumping house, the voltage and current characteristics of common faults in the power distribution equipment and water pumps in the pumping house, as well as the mutual influence mechanism of these faults, are systematically analyzed for the first time. The real-time voltage and current values of multiple key nodes in the distribution line are fused to extract the fault characteristics of six types of faults, including voltage overruns in the main circuit of the pumping house distribution, open air switches or contactors in the distribution line, open pump

* **收稿日期**:2023-11-30
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52077070), National Natural Science Foundation of China (52077070)
作者简介:孟志强(1964—),男,湖南益阳人,湖南大学教授,博士生导师
† 通信联系人,E-mail:1138626185@qq.com

motor windings, imbalanced pump motor winding, inter-turn short circuit, pump blocking, connection break between the motor and pump, so as to realize the online diagnoses of these six types of faults. The implementation conditions of the method, the principle of implementation, and the specific steps are elaborated. Finally, MATLAB/Simulink is used to build a simulation model, which is experimentally verified. The simulation results show that the method can effectively diagnose the pumping house equipment faults, overcome the shortcomings of time-consuming and untimely offline analysis in the labor-intensive manual diagnosis, and provide effective protection for the safe operation of the distribution equipment and pumps in the water plant and its secondary booster pumping house.

Key words: power distribution equipment; water pump motor; fault diagnosis; information fusion

近年来,城镇高层建筑逐渐增多,为满足高层楼宇、高地势地区的供水需求,除了使用高质量制水工艺确保水质符合国家自来水水质标准外[1],还需保障自来水厂及其二次加压供水泵房安全运行[2].若泵房配电系统中的设备出现故障,必然会影响正常供水,甚至出现停止供水的情况.因此,实时检测泵房配电系统中设备运行状态并及时诊断设备故障,对保障设备的正常运行具有重要的现实意义.

在工业过程及其系统中使用自动化监测技术与系统已成为趋势,泵房远程监控系统在国内外已得到应用.林述科[3]采用振动加速度传感器获取振动数据,通过最小反褶积技术增强数据特征,利用小波包分解提取节点特征值,结合压力、温度等信息,实现了矿井水泵房中电机轴承故障、水泵汽蚀、吸水口堵塞等故障的诊断.李奕辰[4]研究了一种二次供水泵房远程监控系统,将现代化水质分析仪器纳入系统中与供水设备一同管理,以提升二次供水泵房监控的自动化程度,但在故障管理方面仅仅提到了监控系统组网时的设备无法连接或设备调用不成功故障检测与警报,没有研究设备本身的故障诊断问题.刘阳[5]提出了一种城市智慧二次供水管理平台的设计方案,该方案设计的平台系统通过传感器采集进出水压力、流量、水泵状态等信息,实现现场泵房设备的启停控制,具有简单的温度报警、水淹报警等功能.顾士平[6]研究了一种水厂机泵故障诊断系统,采用失效模式与效果分析技术,运用振动、流量、电压、电流、功率等参数,实现泵轴变形、水泵汽蚀等故障和电机输出功率增加的综合分析,并能提供相应的解决策略.

到目前为止,没有相关文献研究泵房系统常见的空气开关或接触器开路、电机绕组开路、水泵堵转等配电设备和电机故障的实时监测与诊断技术.解决这些故障的方法主要是人工排查,这种方法实现故障定位较为困难,需要花费较大的人力,维修时间和停止供水时间较长,严重影响居民用水.

当泵房配电系统中的设备出现故障时,回路中的电气量——电压、电流值发生变化,且存在相互影响,而且,电气量在准确性、完备性和容错性等方面有着开关量无法比拟的优势[7].因此,本文以现有的自来水厂和二次加压供水泵房配电系统为研究对象,基于三相电路平衡原理和三相异步电机等效电路,分析配电系统中设备6类常见故障的电压、电流变化特征及其相互影响机理,使用多个关键节点的电压、电流信息,提出一种基于多点电压与电流信息融合分析的泵房配电系统设备故障在线诊断方法,克服了现有人工排查耗时耗力与离线分析不及时的不足.Simulink仿真实验验证了所提故障诊断方法的可行性,该方法对保障自来水厂和二次加压供水泵房的正常运行和安全供水具有重要的意义和工程应用价值.

1　电路原理图

1.1　水泵房配电系统

图1为现有自来水厂、二次加压泵站水泵房配电系统示意图,主要由异步电机G、变频器INV、智能电量采集装置AKW、空气开关QF、接触器KM和热继电器FR等设备构成,图1中所有下标数字为对应设备编号.AKW_i具有通信功能,实现三相电压/线电压、三相电流/线电流、功率因数、频率、有功功率、无功功率等电气参数的实时监测和计量,安装于主回路以及各回路电机的输入端.

1.2　三相异步电机等效电路图

异步电机及配电线路三相等效电路如图2所示.

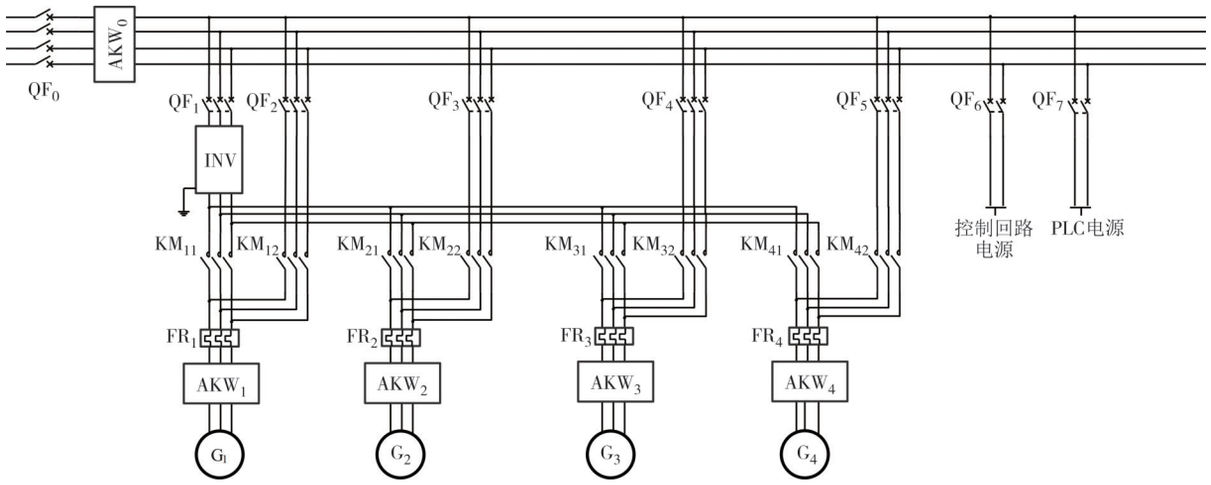


图1 水泵房配电系统示意图

Fig.1 Sketch map of power distribution system of water pumping house

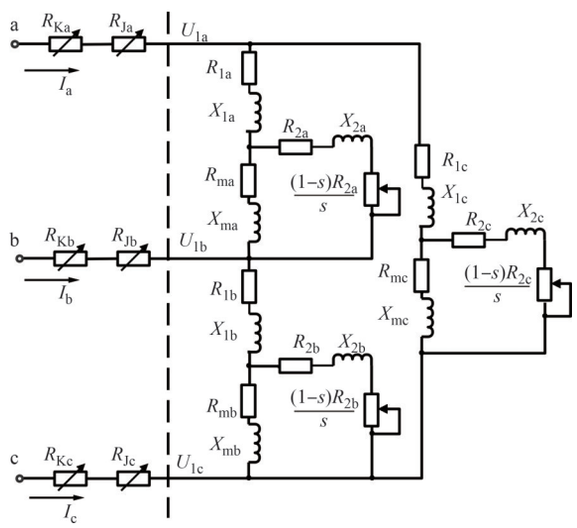


图2 异步电机及配电线路三相等效电路

Fig.2 Three-phase equivalent circuit of asynchronous motor and distribution line

三相异步电机的核心由三相绕组构成,采用异步电机单相T型等效电路[8]三角形连接表示的异步电机三相等效电路如图2虚线右侧所示.图2中,R_1、X_1分别为电机定子绕组的等效内阻和感抗;R_2、X_2分别为电机转子绕组及负载换算到定子侧的等效内阻和感抗;R_m、X_m分别为电机等效励磁内阻和励磁感抗;虚线左侧表示配电线路的等效电路.R_{Ki}(i=a,b,c)为每一相的空气开关等效电阻;R_{Ji}(i=a,b,c)为每一相的接触器等效电阻,a、b、c为供电主回路接入点,忽略连接线缆的电阻.理想情况下,空气开关、触头闭合时的等效电阻为零;空气开关、触头断开时的等效电阻为无穷大.I_a、I_b、I_c为电机输入线电流.

2 故障诊断原理

影响正常供水的泵房配电系统和设备主要故障有:配电主回路供电电压超限、配电线路中空气开关或接触器触头开路、水泵电机绕组开路、水泵电机绕组不平衡与匝间短路、水泵堵转、电机与水泵连接机构断开.其中电机绕组不平衡与匝间短路、水泵堵转等是一些文献关注的故障[9-12].

当系统中的设备发生故障时,关键节点的电压、电流幅值将发生变化.表1为6类常见设备故障类型以及回路电压、电流特征.根据回路中电压、电流的幅值可以区分故障类型,实现故障诊断.

表1 6类常见设备故障类型以及回路电压、电流特征

Tab.1 Common six types of equipment failure and voltage and current characteristics

故障序号	设备故障类型	主回路电压	回路电压	回路电流
1	配电主回路供电电压超限	过低或过高	过低或过高	—
2	配电线路中空气开关或接触器触头开路	正常	低或为零	为零
3	水泵电机绕组开路	正常	正常	为零
4	水泵电机绕组不平衡与匝间短路	正常	正常	不平衡
5	水泵堵转	正常	正常	大
6	电机与水泵连接机构断开	正常	正常	小

2.1 供电电压偏差与超限

2.1.1 供电电压偏差与平衡计算

《电能质量 三相电压不平衡》(GB/T 15543—2008)定义三相电压不平衡为:三相电压在幅值上不同或相位差不是120°,或兼而有之[13].本文主要考虑三相电压幅值上的不同,可以使用电压偏差δ_{Vi}进行评价.

$$\delta_{Vi}=\frac{U_i-U_N}{U_N}\times 100\% \quad (i=a,b,c) \tag{1}$$

式中:U_i为测量时间窗口(10个周波)内相电压测量值的平均值;U_N为系统标称相电压.

若δ_{Vi}满足:

$$\delta_{V_min}\leqslant\delta_{Vi}\leqslant\delta_{V_max} \quad (i=a,b,c) \tag{2}$$

$$\Delta V_{ij}=\left|\delta_{Vi}-\delta_{Vj}\right|\leqslant\varepsilon_1 \quad (i,j=a,b,c) \tag{3}$$

则主回路供电电压是三相平衡的.ε_1为设定正小数;δ_{V_min}、δ_{V_max}分别为设置的δ_{Vi}最小值和最大值.

2.1.2 供电电压超限

若主回路电压偏差δ_{Vi}满足:

$$\delta_{Vi}>\delta_{V_max}>0 \quad (i=a,b,c) \tag{4}$$

则供电电压超过上限.若满足:

$$\delta_{Vi}<\delta_{V_min}<0 \quad (i=a,b,c) \tag{5}$$

则供电电压超过下限.

在实际应用中,电压偏差限值(δ_{V_min}、δ_{V_max})可以根据设备和电网实际进行合理设置,作为供电电压超限故障判断的阈值.

2.2 电流不平衡率

在三相供电电压平衡条件下,电流不平衡率δ_{Ii}又称为用电负荷不平衡率,是描述三相电流幅值不相等程度和衡量设备是否发生过流故障的一个重要技术指标,一般使用绝对值定义:

$$\delta_{Ii}=\left|\frac{\bar{I}-I_i}{\bar{I}}\right|\times 100\% \quad (i=a,b,c) \tag{6}$$

$$\bar{I}=\frac{I_a+I_b+I_c}{3} \tag{7}$$

式中:I_i(i=a, b, c)为相电流;$\bar{I}$为三相电流平均值.

若某节点处的三相电流不平衡率δ_{Ii}满足:

$$\delta_{Ii}\geqslant\delta_{Imax} \quad (i=a,b,c) \tag{8}$$

则表明该节点后的水泵电机发生了重载过流故障,如水泵堵转或电机绕组匝间短路.δ_{Imax}为设定的正阈值.

2.3 配电线路中空气开关或接触器触头开路

由电机工作原理和图2可知,某一回路电机的三相输入电压和输入电流满足:

$$U_{1i}=0 \quad (i=a,b,c) \tag{9}$$

$$I_i=0 \quad (i=a,b,c) \tag{10}$$

表明该回路空气开关或接触器的三相触头发生了开路.

若回路空气开关或接触器的两相触头同时发生开路,则电机三相输入电流均为0,即满足式(10),由于此种情况下的电机定子绕组是一个等位体,故对应两开路相的端电压均等于未开路相输入端电压,且稳定.

若回路空气开关或接触器的某一相触头发生开路,使得电机缺相,由电机工作原理和图2可知:电机的对应相输入电流为0,即满足式(10),对应相输入端电压则等于另外两相输入线电压经T型等效电路(图2)的分压,明显低于正常输入端电压,使得电机三相端电压严重不平衡,即按式(11)计算的电机对应相输入端电压偏差δ_{V1i}满足:

$$\delta_{V1i}<\delta_{V1_min}<\delta_{V_min}<0 \quad (i=a,b,c) \tag{11}$$

式中:δ_{V1_min}为电机端电压偏差设定值.这一判断方法同样适用于三相定子绕组星形连接的三相异步电机.

2.4 水泵电机绕组开路

水泵电机绕组开路是指电机某一相定子绕组与电机输入端之间的连接断开.在电机三相输入端电压不为0的条件下,断开相的电流为0,即满足式(10).

2.5 水泵电机绕组不平衡与匝间短路

电机的单个绕组是由多匝绝缘线圈紧密叠合构成的.若线圈的绝缘破坏,将形成匝间短路,在电机三相输入端电压平衡条件下,匝间短路相的电流较大,使得电机三相绕组电流不平衡.即在电机三相端电压的电压偏差δ_{V1i}满足

$$\delta_{V_min}\leqslant\delta_{V1i}\leqslant\delta_{V_max} \quad (i=a,b,c) \tag{12}$$

$$\Delta V_{1ij}=\left|\delta_{V1i}-\delta_{V1j}\right|\leqslant\varepsilon_1 \quad (i,j=a,b,c) \tag{13}$$

条件下,按式(6)计算电机的三相电流不平衡率δ_{Ii},若满足:

$$\Delta I_{ij}=\left|\delta_{Ii}-\delta_{Ij}\right|>\varepsilon_2 \quad (i,j=a,b,c) \tag{14}$$

则出现电机绕组不平衡.ε_2为设定正小数.进一步比较δ_{Ii},寻找最大值δ_{Im}.

$$\delta_{Im}=\max\left\{\delta_{Ia},\delta_{Ib},\delta_{Ic}\right\} \tag{15}$$

则δ_{Im}所对应的相电机绕组发生了匝间短路.

2.6 水泵堵转

当水泵出现堵转时,电机负荷加重,在三相输入端电压平衡条件下,电机三相电流平衡且明显增大.若电机端电压满足式(12)、式(13),且按式(5)计算的电机电流平均值满足:

$$\alpha I_N \leqslant \bar{I} \leqslant I_{max} \quad (\alpha>1) \tag{16}$$

则表明水泵发生了堵转.α为设定值,I_N为电机的额定电流,I_{max}为设定的电机保护动作电流.

2.7 电机与水泵连接机构断开

电机与水泵连接机构断开使得电机空载,水泵停止旋转,电机产生很小的空载相电流.

若电机端电压满足式(12)、式(13),且电机电流平均值满足:

$$\bar{I} \leqslant \beta I_N \quad (\beta<1) \tag{17}$$

则表明电机与水泵连接机构断开.β为设定值.

3 故障诊断方法

3.1 方法执行条件

本方法对泵房配电系统配电主回路供电电压不平衡与超限,配电线路中空气开关或接触器触头开路、电机、水泵及其与电机的连接等故障进行有效诊断,需要满足4个执行条件:

1)泵房配电系统与设备故障标志FS为1时,不进行故障诊断.首次启动故障诊断前,该标志被初始化为0.在诊断程序运行中,一旦诊断出发生了某一类故障,该标志就被置为1.

2)搭建数据采集通信系统,建立泵房监控系统主计算机和每一台AKW$_i$的网络连接,并保证它们处于正常运行状态,获取关键节点的电压、电流数据用于故障诊断.

3)主计算机应能记录各台电机配电回路空气开关、接触器触头的状态,标志为SW$_i$(闭合标记为1,断开标记为0).断开状态表示对应电机供电回路未接通,不需进行故障诊断.

4)设备运行状态标志WS:泵房设备处于正常运行状态时标记为0;设备处于巡检或维修状态时标记为1,此状态下不进行故障诊断.

3.2 执行步骤

基于上述故障诊断原理,故障诊断方法在程序初始化后,共有11个步骤.诊断方法使用的各类标志符号取值和定义如表2所示.

表2 标志符号取值和定义

Tab.2 Definition and value of flags

标志	标志名称	取值	定义
FS	泵房配电系统与设备故障标志	0	泵房配电系统与设备正常
		1	泵房配电系统与设备故障
SW$_i$	空气开关、接触器状态标志	0	空气开关、接触器断开
		1	空气开关、接触器闭合
WS	设备运行状态标志	0	泵房设备正常运行
		1	泵房设备维修或巡检
NS$_i$	AKW入网标志	0	设备入网失败
		1	设备入网成功
UF$_1$	配电主回路供电电压超限状态标志	0	主回路供电电压未超限
		1	主回路供电电压超上限
		2	主回路供电电压低于下限
UF$_2$	配电主回路供电电压平衡状态标志	0	主回路供电电压平衡
		1	主回路供电电压不平衡
SF$_{ij}$	空气开关、接触器故障标志	0	空气开关、接触器正常
		1	空气开关或接触器开路
GF$_{1ij}$	电机绕组开路标志	0	电机绕组无开路
		1	电机绕组开路
GF$_{2i}$	电机绕组不平衡标志	0	电机绕组平衡
		1	电机绕组不平衡
GF$_{3ij}$	电机匝间短路标志	0	电机绕组无匝间短路
		1	电机绕组匝间短路
WP$_{1i}$	水泵堵转标志	0	水泵无堵转
		1	水泵堵转
WP$_{2i}$	电机与水泵连接机构断开标志	0	电机与水泵连接机构连接正常
		1	电机与水泵连接机构连接断开

注:i表示配电系统中实际的AKW、空气开关、接触器或电机编号;j表示配电相序.

步骤1:终端设备组网.主计算机向各节点设备AKW$_i$发送组网指令,并等待应答.若在设定时间内收到应答,表明该节点设备成功入网,则标记其入网标志NS$_i$=1;若某台节点设备连续n次(如3次)组网通信失败,表明该节点设备的入网失败,则NS$_i$=0,并报警处理.若没有节点设备成功入网,则返回步骤1重新进行组网;若有节点设备成功入网,则执行步骤2.

步骤 2:泵房配电系统与设备故障判断.若泵房配电系统与设备故障标志 FS=1,则返回步骤 1 重新执行.反之,执行步骤 3.

步骤 3:泵房设备状态检测.从泵房控制系统获取泵房设备运行状态标志 WS.若该标志为 1,表明设备处于巡检或者维修状态,则返回步骤 1 重新执行;若该标志为 0,表明设备处于正常运行状态,则执行步骤 4,判断各台电机是否投入运行.

步骤 4:电机供电回路连接判断.顺序读取各台电机配电回路空气开关与接触器的运行状态标志 SW_i.若 SW_i=0,表示该回路未投入运行,不需对该回路的设备进行故障诊断;若 SW_i=1,表示该回路设备处于运行状态,需对该回路的设备进行故障诊断.若所有回路的空气开关、接触器都为断开状态,则返回步骤 1;若有一个以上回路的空气开关、接触器为闭合状态,则执行步骤 5.

步骤 5:电气数据获取.主计算机采用轮询方式,顺序获取主回路 AKW_0、回路空气开关和接触器均处于闭合状态(SW_i=1)和成功入网(NS_i=1)的 AKW_i(i=1,2,3,4)采集的电压、电流数据,并按顺序将成功读取的 AKW 数据保存到对应节点的专用数据库或者存储空间.

AKW 数据获取采用连续多次通信方式.在规定时间内,若连续多次通信都不能获得某台 AKW 的正确返回数据,则表明该 AKW 断网,将其标记为入网失败,并进行报警处理.若 AKW_0 断网,或者所有 AKW_i(i=1,2,3,4)都断网,则返回步骤 1;否则,在轮询读取完所有 AKW_i 的数据后执行步骤 6.

步骤 6:配电主回路供电电压超限与平衡判断.从数据库读取 AKW_0 的三相电压,按式(1)计算主回路供电电压偏差 δ_{Vi}. δ_{Vi} 若满足式(2),则配电主回路电压是不超限的,UF_1=0;若满足式(3),则电机主回路电压是平衡的,UF_2=0;若满足式(4),则配电主回路供电电压超过上限,UF_1=1;若满足式(5),则配电主回路电压低于下限,UF_1=2.

若电机主回路电压不平衡,则标记 UF_2=1.对于超限与不平衡,在标记标志并报警后执行步骤 7,否则,只进行标志标记,然后执行步骤 7.

步骤 7:配电线路中空气开关或接触器触头开路诊断.从数据库按顺序读取所有回路空气开关和接触器均处于闭合状态,即 SW_i=1 的电机端电压和电流数据,并顺序完成所有回路的判断.

若某一台电机的电流满足式(10),端电压满足式(9),则该回路空气开关和/或接触器发生三相触头开路;若电流满足式(10),端电压满足:

$$U_{1a} = U_{1b} = U_{1c} \tag{18}$$

则该回路空气开关和/或接触器发生两相触头开路;若只有第 j 相电流满足式(10),就按式(1)计算电机的第 j 相输入端电压偏差 δ_{V1i};如果 δ_{V1i} 满足式(11),则该回路空气开关和/或接触器的 j 相触头发生开路.

若没有发生触头开路故障,就标记 SF_{1ij}=0 后进行下一回路判断;若判断出发生触头开路故障,就进行故障记录、标记 SF_{1ij}=1 并报警,然后进行下一回路判断.

所有无故障闭合回路判断完后执行步骤 8.

步骤 8:水泵电机绕组开路诊断.从数据库按顺序读取所有回路空气开关和接触器均处于闭合状态,且没有发生触头开路故障的电机电流数据,并顺序完成所有电机的判断.

若某台电机的三相电流均不满足式(10),则标记 GF_{1ij}=0,继续下一台电机电流判断;若某一相电流 I_i 满足式(10),则电机对应相定子绕组开路,记录该故障,标记 GF_{1ij}=1 并报警,然后继续下一台电机电流判断.

所有电机判断完后执行步骤 9.

步骤 9:水泵电机绕组不平衡与匝间短路诊断.从数据库按顺序读取所有空气开关和接触器均处于闭合状态,且没有发生触头与电机绕组开路故障的电机电压与电流数据,并顺序完成所有电机的判断.

分别按式(1)、式(6)计算所有电机端电压偏差 δ_{V1i} 和电流不平衡率 δ_{Ii}.

若某一台电机的 δ_{V1i} 不满足式(12)、式(13),即该电机的端电压是不平衡的,或在电机端电压平衡条件下的 δ_{Ii} 不满足式(14),则标记 GF_{2i}=0,GF_{3ij}=0,进行下一台电机判断;相反,在电机端电压平衡条件下,若 δ_{Ii} 满足式(14),则该电机发生绕组不平衡故障,标记 GF_{2i}=1,按式(15)计算最大 δ_{Im},对应相电机绕组发生匝间短路,标记 GF_{3ij}=1,记录该故障后报警,然后继续下一台电机判断.

所有电机判断完后执行步骤 10.

步骤10:水泵堵转诊断.按式(1)、式(7)顺序计算步骤8读取的所有电机端电压偏差δ_{V1i}和电流平均值$\bar{I}$.若某台电机的δ_{V1i}不满足式(12)、式(13),或者$\bar{I}$不满足式(16),则标记WP_{1i}=0,继续后续电机判断;相反,在δ_{V1i}满足式(12)、式(13),即电机端电压平衡条件下,若$\bar{I}$满足式(16),则该电机所驱动的水泵发生了堵转,记录该故障,标记WP_{1i}=1并报警,然后继续后续电机判断.

所有电机判断完后执行步骤11.

步骤11:电机与水泵连接机构断开诊断.按式(1)、式(7)顺序计算步骤8读取的所有电机端电压偏差δ_{V1i}和电流平均值$\bar{I}$.若某台电机的δ_{V1i}不满足式(12)、式(13),或者$\bar{I}$不满足式(17),则标记WP_{2i}=0,继续后续电机判断;相反,在δ_{V1i}满足式(12)、式(13),即电机端电压平衡条件下,若$\bar{I}$满足式(17),则该电机与水泵的连接机构断开,记录该故障,标记WP_{2i}=1,并报警,然后继续后续电机判断.

所有电机判断完后返回执行步骤1.

所有故障诊断结果均通过数据采集通信系统,实时上报到泵房监控系统并进行相应的处置.

4 实验验证

为验证本文提出的故障诊断方法的正确性与有效性,使用MATLAB/Simulink平台的相应设备模型,自建故障诊断模块和模拟故障控制模块,搭建了单电机泵房配电系统仿真模型,仿真模型示意图如图3所示.

三相电源输出相电压U_i=220 V(i=a,b,c);三相异步电机G的额定电压为380 V,额定功率为4 kW;

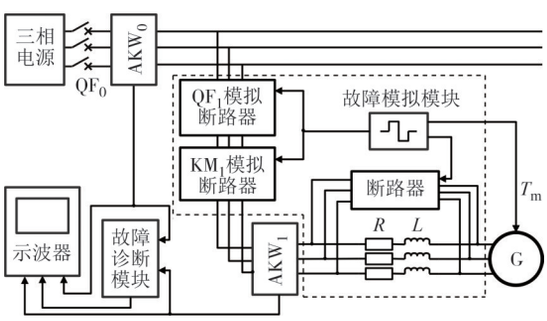


图3 泵房配电系统仿真模型示意图

Fig.3 Sketch map of simulation model of power distribution system in pumping house

AKW_i(i=0,1)使用平台中的测量模块代替,可测量三相电压、电流并保存数据.

故障模拟模块使用断路器模块代替图1中QF_1和KM_1;在电机模块G的输入端和AKW_1之间增加对称三相LR串联支路,使用断路器的通断模拟电机定子绕组的匝间短路与不平衡;使用不同幅值的阶跃函数模拟电机G的负载转矩T_m变化来模拟水泵正常运行、堵转、水泵与电机连接轴断开.在仿真开始时,断路器导通模拟正常状态的QF_1、KM_1和G;在1.5 s时,断开某一相断路器触头模拟QF_1、KM_1对应相的开路,闭合某一相断路器触头模拟G的对应相定子绕组匝间短路,使用不同幅值的阶跃函数跳变模拟水泵的堵转、水泵和电机连接轴的断开.

故障诊断模块是根据诊断方法搭建的故障诊断电路,输入是测量模块AKW_i(i=0,1)测量的电压、电流信号,输出为故障诊断结果.

因供电电压超限与空气开关或接触器的多相开路是显而易见的.故本节仅验证配电线中空气开关或接触器触头开路、水泵电机绕组开路、水泵电机绕组不平衡与匝间短路、水泵堵转、电机与水泵连接机构断开5类故障.故障诊断结果中,0表示正常,1表示故障.

4.1 配电线路中空气开关或接触器触头开路实验

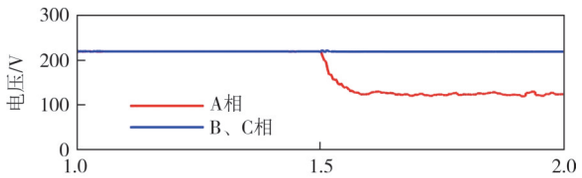
在电机G平稳运行后的1.5 s时刻,模拟电机回路QF_1和KM_1的A相开路故障,波形与诊断结果如图4所示.

从图4中可以看出,在1.0~1.5 s,电机端电压均维持在220 V左右,回路电流为8.2 A,电机平稳运行,回路空气开关或接触器正常;当t=1.5 s时,空气开关或接触器A相触头发生开路故障,U_{1a}下降,其偏差满足式(11),I_a下降且满足式(10),I_b和I_c上升,使得电机三相电压不平衡、三相电流不平衡,得到故障诊断结果A相为1,其他相为0.

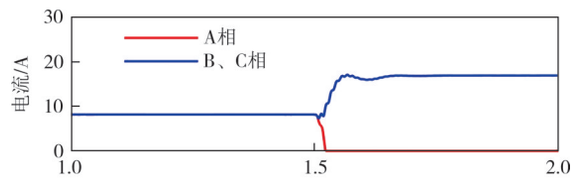
4.2 水泵电机绕组开路实验

在电机G平稳运行后的1.5 s时刻,模拟电机的A相绕组出现开路故障,其波形与诊断结果如图5所示.

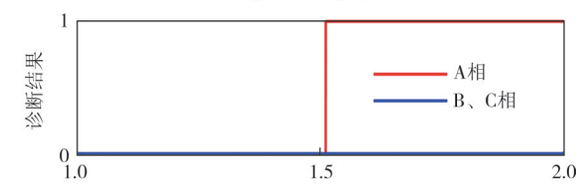
从图5中可以看出,在1.0~1.5 s,电机端电压均维持在220 V左右,回路电流为8.2 A,电机平稳运行.当t=1.5 s时,电机A相绕组开路,I_a下降,I_b、I_c上



(a)电机回路电压



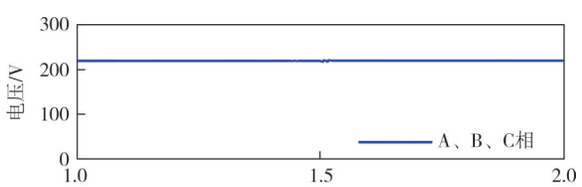
(b)电机回路电流



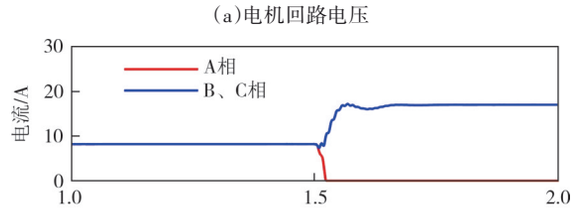
(c)故障诊断结果

图 4　空气开关或接触器 A 相开路波形与诊断结果

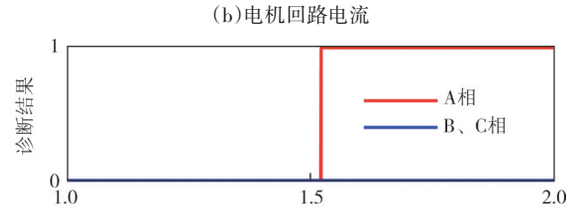
Fig.4　Waveform and diagnostic results of air switch or contactor phase A open circuit



(a)电机回路电压



(b)电机回路电流



(c)故障诊断结果

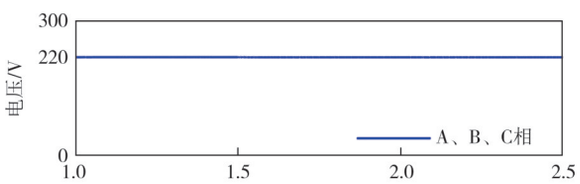
图 5　电机绕组 A 相开路波形与诊断结果

Fig.5　Waveform and diagnostic results of motor winding phase A open circuit

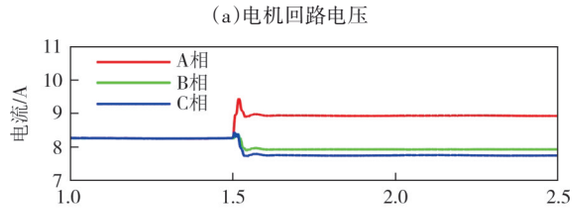
升.与空气开关或接触器开路故障不同的是,A 相绕组开路后,回路电压仍为 220 V,电机输入端三相电压是平衡的且不超限,满足式(12)、式(13);回路 A 相电流降为零,满足式(10).因此,得到的故障诊断结果为 A 相出现电机绕组开路故障.

4.3　水泵电机绕组不平衡与匝间短路实验

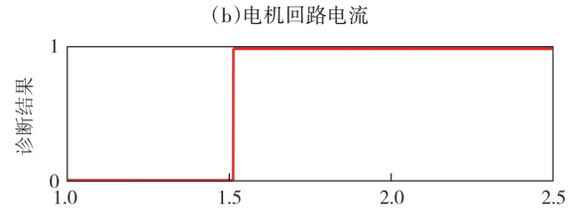
在电机平稳运行后的 1.5 s 时刻,模拟电机的 A 相绕组出现匝间短路故障,其波形与诊断结果如图 6 所示.电机在 t=1.5 s 时出现 A 相匝间短路,导致三相绕组不平衡.出现故障后,电机端电压均保持正常,满足式(12)、式(13),回路 A 相电流上升,B、C 相电流下降,三相电流不平衡率满足式(14),故障诊断结果为 1,且根据式(15)可得电机 A 相出现匝间短路.



(a)电机回路电压



(b)电机回路电流



(c)故障诊断结果

图 6　电机绕组不平衡波形与诊断结果

Fig.6　Waveform and diagnostic results of imbalanced motor windings

4.4　水泵堵转实验

通过加大电机的负载转矩模拟水泵堵转,相应波形和故障诊断结果如图 7 所示.

t=1.5 s 时,水泵的负载转矩 T_m 由 25 N·m 增加至 50 N·m,电机回路三相电压满足式(12)、式(13),电机回路三相电流上升并超过设定值,满足式(16),故障诊断结果为 1.

4.5　电机与水泵连接机构断开实验

通过使电机的负载转矩突变为零模拟电机与水泵连接机构断开,相应波形与故障诊断结果如图 8 所示.

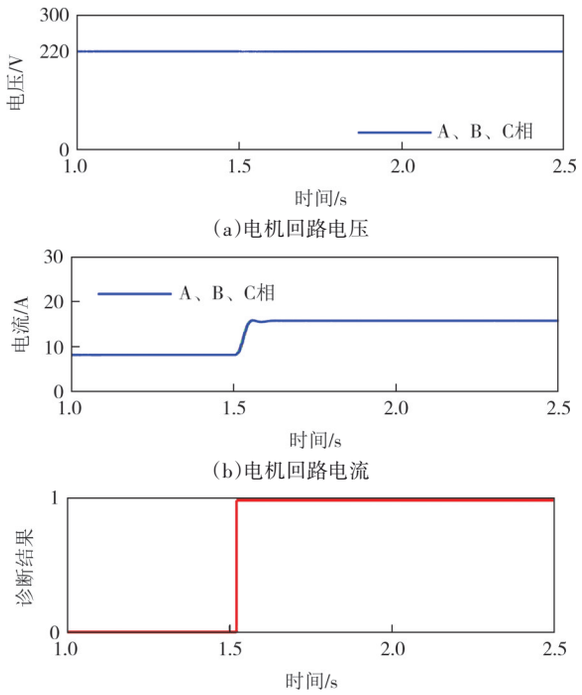


图7 水泵堵转波形与诊断结果

Fig.7 Waveform and diagnostic results of water pump plugging

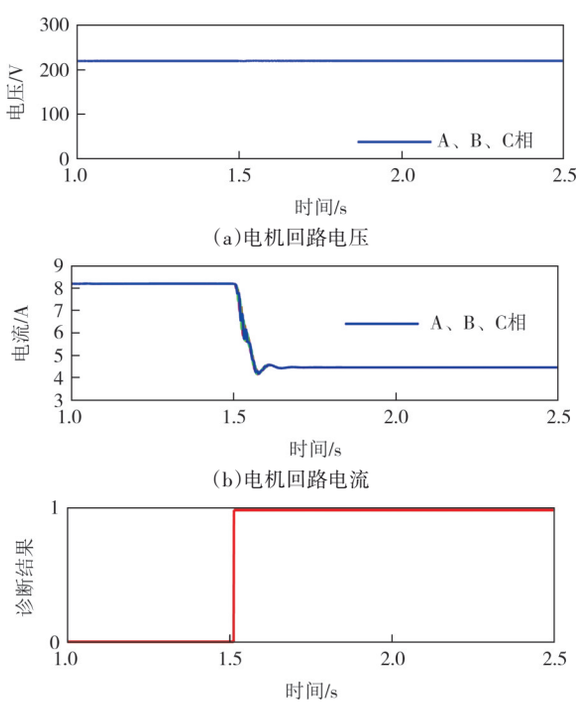


图8 电机与水泵连接机构断开波形与诊断结果

Fig.8 Waveform and diagnostic results of the motor and the water pump connection mechanism disconnected

在t=1.5 s时,水泵的负载转矩T_m由25 N·m变为0,电机回路三相电压满足式(12)、式(13),电机回路三相电流下降至4.4 A,满足式(17),故障诊断结果为1.

5 结 论

本文对泵房配电系统中空气开关、接触器、电机等关键设备故障情况下回路中关键节点的电压、电流特征及其相互影响关系进行了分析.基于上述分析结果,得出了这些设备几类常见故障的诊断原理,提出了一种基于多点电压与电流信息融合分析的泵房设备故障诊断方法,详细阐述了该方法的执行条件和实现步骤.通过MATLAB/Simulink仿真建模验证了故障诊断方法的可行性.

本文提出的泵房设备故障诊断方法可用于实现自来水厂及其二次加压泵站配电系统设备与电机故障的实时诊断与定位,对泵房的安全供水具有重要的现实意义和工程应用价值,同时,该故障诊断方法具有通用性,可以应用于其他机电系统.

参考文献

[1] 生活饮用水卫生标准:GB 5749—2022[S].北京:中国标准出版社,2022.
Standards for drinking water quality: GB 5749—2022 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2022. (in Chinese)

[2] 林吉赐,王耀红,邱熙.城市二次供水装置发展现状和展望[J].机电工程技术,2022,51(3):30-35.
LIN J C, WANG Y H, QIU X. Development status and prospect of urban secondary water supply equipment [J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2022, 51 (3): 30-35. (in Chinese)

[3] 林述科.矿井主排水泵房在线监控与故障诊断系统的设计与研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
LIN S K. Design and research of online monitoring and fault diagnosis system for main drainage pumping house in mine [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2022. (in Chinese)

[4] 李奕辰.二次供水泵房远程监控系统的设计与实现[D].成都:电子科技大学,2018.
LI Y C. Design and implementation of remote monitoring system for secondary water supply pumping house [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2018. (in Chinese)

[5] 刘阳. 城市智慧二次供水管理平台方案设计[J]. 自动化与仪表,2022,37(8):102-104.

LIU Y. Scheme design of urban smart secondary water supply management platform[J]. Automation & Instrumentation, 2022, 37(8):102-104.(in Chinese)

[6] 顾士平. 水厂机泵故障诊断系统在供水泵房的智能化应用[J]. 净水技术,2017,36(增刊1):153-158.
GU S P. Intelligent application of machine pump fault diagnosis system in water supply pumping station of waterworks [J]. Water Purification Technology, 2017 ,36(Sup.1): 153-158.(in Chinese)

[7] 陈哲,江晓燕,岑炳成,等. 基于多种算法融合的区域电网在线故障诊断[J]. 电力系统及其自动化学报,2019,31(12):10-15.
CHEN Z, JIANG X Y, CEN B C, et al. Online fault diagnosis of regional power grid based on fusion of multiple algorithms [J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2019, 31 (12) : 10-15. (in Chinese)

[8] 吴非, 符嘉晋. 三相不平衡对异步电动机的能效影响研究[J]. 内燃机与配件, 2020, 41(8): 83-86.
WU F, FU J J. Study on the influence of three-phase imbalance on the energy efficiency of asynchronous motor [J]. Internal Combustion Engine & Parts, 2020, 41(8): 83-86. (in Chinese)

[9] 陈众,伍雅娜,冷鹏,等. 异步电机定子绕组匝间短路故障诊断研究[J]. 电机与控制应用,2019,46(5):120-125.
CHEN Z, WU Y N, LENG P, et al. Diagnosis of inter-turn faults in stator windings of asynchronous motor [J]. Electric Machines & Control Application, 2019, 46(5): 120-125. (in Chinese)

[10] 吴宇恒,税爱社,路申易,等. 证据理论在泵房过程故障诊断中的应用研究[J]. 自动化与仪器仪表,2017(3):154-156.
WU Y H, SHUI A S, LU S Y, et al. Application research on evidence theory for the process fault diagnosis of pumps control system[J]. Automation & Instrumentation, 2017(3): 154-156. (in Chinese)

[11] 杨永德,莫芳,张会敏,等. 水泵房配电柜内连环故障检修与分析[J]. 电子制作,2021(16):73-74.
YANG Y D, MO F, ZHANG H M, et al. Troubleshooting and analysis of serial faults in power distribution cabinet of water pump room[J]. Practical Electronics, 2021(16): 73-74.(in Chinese)

[12] 林春阳. 泵站异步电动机运行维护与故障排除[J]. 电子技术, 2020, 49(10): 34-35.
LIN C Y. Operation maintenance and troubleshooting of asynchronous motor in pumping station [J]. Electronic Technology, 2020, 49(10): 34-35.(in Chinese)

[13] 电能质量 三相电压不平衡:GB/T 15543—2008[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
Power quality—three-phase voltage unbalance: GB/T 15543—2008[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.(in Chinese)