

一台300MW 汽轮发电机严重烧损的故障分析

——从继电保护角度看故障的起因和发展

刘 华 河南电力调度通信局继电科 郑州 (450052)

【摘要】 1996年10月, S火电厂一台300MW 发电机严重烧损(被迫返厂处理); 同时, 发电机出口20kV 母线TV 小间a相母线接地刀闸静触头烧熔成球状。两处故障点, 谁是首发点? 故障的起因和发展如何? 从继电保护角度对该问题进行了分析, 指出故障首发在机内, 并提出了改进意见。

【关键词】 汽轮发电机 故障 继电保护 分析

1 基本情况概述

S火电厂#2发电机(型号为QFSN-300-2-20)完成168h试运行及停机消缺后于1996年10月19日6:05冲转, 6:46并网。8时交接班时, 有功为10MW, 无功为6MW, 电压为20kV, 正在逐渐增大出力。8时30分, 控制盘上“发电机1、2TV断线”光字牌灯亮, 值班人员检查TV及二次保险均正常, 通知保护人员进行检查。9时, 发电机有功增至130MW, 在这半小时内, “发电机1、2TV断线”信号多次

断续发出, 保护人员正在查找该信号发出原因。9时零8分(此时“发电机1、2TV断线”光字牌灯未亮), 控制盘出现声光信号, 发电机差动、变压器差动、发变组差动、发电机匝间保护、发电机定子接地保护、远方跳闸等保护动作停机。发电机故障录波器因软件调试问题未投入使用; 线路故障录波器启动, 录波图显示, 主变高压侧开关60ms三相跳闸。

事故后检查发现, 故障发生在发电机机内和机端a相TV小间两处。发电机机内C相#24线棒及b相#23线棒完全烧断, 断口各约160mm; 发电机出口20kV母线TV小间a相

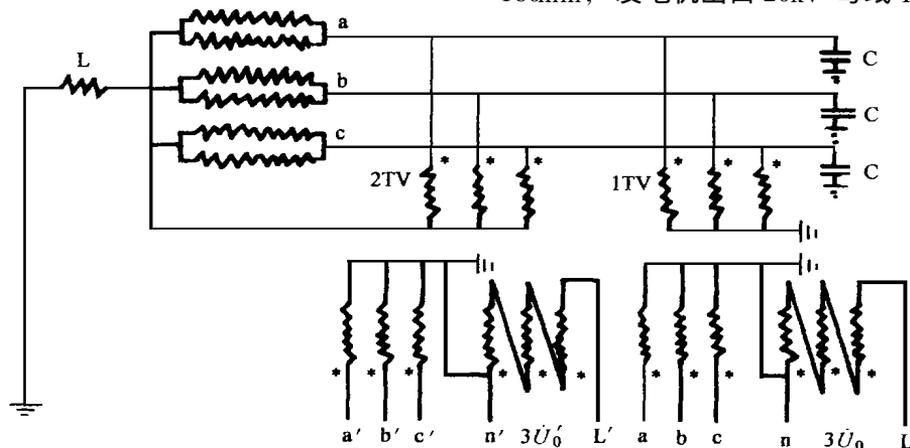


图1 发电机系统电压互感器回路

图中 L——消弧线圈, 其电抗 $X_L = 4582\Omega$ C——发电机电压系统每相等值电容, 其电抗 $X_C = -15193\Omega$

1TV——第一组电压互感器, 变比 $(20/\sqrt{3}) / (0.1/\sqrt{3}) / (0.1/3)$ 2TV——第二组电压互感器, 变比同1TV

母线接地刀闸静触头烧熔成球状 (这个触头的放电呈散射状, 不是针对某一点放电)。

从继电保护的角度看, 因为发电机内部有故障, 发电机差动、发电机匝间保护、发电机定子接地保护动作都是正确的; 同时, 因为伴有发电机出口母线故障, 在发变组差动和变压器差动保护范围内, 发变组差动、变压器差动保护动作也是正确的。但面对两处故障点, 谁是首发点? 故障的起因和发展又如何? 由于事故前唯一的现象是从 8 30 至 9 08 这段时间内多次出现“1、2TV 断线”的继电保护信号, 本文仅从继电保护的角度对此问题进行分析。

2 故障分析

2.1 b、c 绕组相间短路

发电机匝间保护、发电机定子接地保护及断线闭锁继电器所用电压互感器回路如图 1 所示:

c 相# 24 线棒所在分支共 10 匝, # 24 线棒是距中性点 1 匝处的线棒, 它和 b 相# 23 线棒的中性点处发生匝间和相间短路时, 其有关电路示意图见图 2:

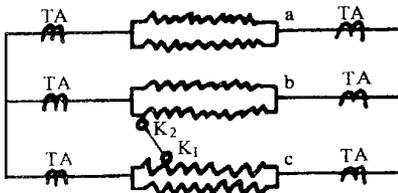


图 2 发电机 c 相# 24、b 相# 23 线棒短路示意图

图 2 中, K_1 为 c 相的# 24 线棒, K_2 为 b 相的# 23 线棒, TA 为发电机差动保护用电流互感器

2.1.1 计算 K_1 和 K_2 点短路所产生的零序电压时, 可以认为是 c 相分支 $\alpha = 0.1$ 处发生匝间短路。经分析^[3], 故障分支零序电势为

$$E_0 = |(E_a + E_b + E_c)/3| \quad \alpha E/3$$

E —— 额定相电压

此时发电机零序等效电路见图 3。

图 3 中 X_{f0} 为发电机的零序电抗, $E_0 = E_0/2$ 。因为 $X_{f0} = 0.0835\Omega$, 与 X_c, X_L 相比小得

多, 可以略去, 故图 (b) 可以简化为图 (c)。机端零序电压为

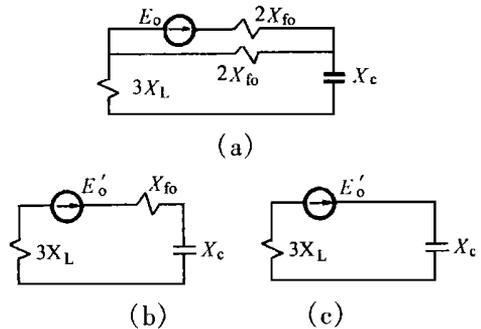


图 3 发电机匝间短路, 发电机系统零序等效电路及其简化

(a) 发电机系统零序等效电路, (b)、(c) 简化电路

$$U_{xc} = E_0 * X_c / (X_c + 3X_L) = 0.525 E_0$$

当 $\alpha = 0.1$ 时, $E_0 = \alpha E/3 = 0.1E/3$,

$$E_0 = E_0/2 = 0.0167E, U_{xc} = 0.525 E_0 = 0.0175E,$$

1TV 测得零序电压: $|3\dot{U}_0| = |\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c| = |3\dot{U}_{xc}| = 0.525E$ (对地电压)

2TV 测得零序电压: $|3\dot{U}'_0| = |\dot{U}'_a + \dot{U}'_b + \dot{U}'_c| = |3\dot{E}'_0| = 0.05E$ (对发电机中性点电压)

2.1.2 由图 2 可见, 短路电流流过发电机 b 相中性点处差动 TA, 同时流过发电机 c 相中性点处差动 TA, 即发电机差动回路中有短路电流流过, 对发电机纵差保护而言, 该故障表现为 bc 两相短路。

当发电机定子绕组具有 2 个并联分支, 其中一个分支的 α 处发生匝间短路时, 其非故障分支电流 I_h 和短路匝内的电流 I_α , 可由图 4 所示电路作定性分析^[2] (定量分析另文发表)

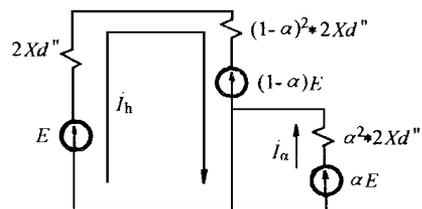


图 4 发电机匝间短路定性分析用等效电路

$$I_h = \alpha E / \{2X_d [(1 - \alpha)^2 + 1]\}$$

$$I_\alpha = \alpha E / (\alpha^2 * 2X_d) = E / (\alpha * 2X_d)$$

当 $\alpha = 0.1, X_d = 0.1833\Omega, E = 20/\sqrt{3} \text{ kV}$

时

$$I_h = 1.74 \text{ kA}$$

$$I_\alpha = 314.97 \text{ kA}$$

已知发电机额定电流 $I_n = 10.19 \text{ kA}$, 故 $I_\alpha/I_n = 314.97/10.19 = 30.9$

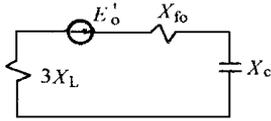


图5 发电机c相#24线棒熔断后, 发电机系统零序等效电路

2.2 c相绕组 $\alpha = 0.1$ 处接地

当c相分支 $\alpha = 0.1$ 处发生接地故障时,

$$1\text{TV 测量电压: } \dot{U}_a = \dot{E}_a - 0.1\dot{E}_c, \dot{U}_b = \dot{E}_b - 0.1\dot{E}_c, \dot{U}_c = \dot{E}_c - 0.1\dot{E}_c, 3\dot{U}_0 = |\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c| = |-0.3\dot{E}_c| = 0.3E$$

$$2\text{TV 测量电压: } \dot{U}_a = \dot{E}_a, \dot{U}_b = \dot{E}_b, \dot{U}_c = \dot{E}_c, 3\dot{U}_0 = |\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c| = 0$$

机端三次谐波电压 $U_{s3} = (1 - 0.1)E_3 = 0.9E_3$, 中性点三次谐波电压 $U_{n3} = 0.1E_3$, $U_{s3}/U_{n3} = 9$

2.3 c相绕组熔断

发电机c相#24线棒发生熔断故障, 发电机系统零序等效电路见图5。

$$E_0 = (I * X_{f0} * \sum X_1 * \sum X_2) / [X_{f0} * (\sum X_1 * \sum X_2) + 3 \sum X_1 \sum X_2]$$

式中 E_0 ——熔断状态下的零序电势^[3]

I ——故障前三相对称负荷电流

$\sum X_1$ ——发电机正序电抗(取同步电抗)与外部系统正序电抗之和

$\sum X_2$ ——发电机负序电抗与外部系统负序电抗之和

$$\text{已知 } I = 4.415 \text{ kA}, \sum X_1 = 2.61 \Omega, \sum X_2 = 0.56 \Omega, \sum X_{f0} = 0.0835 \Omega, X_c = -15193 \Omega,$$

$$X_L = 4582 \Omega$$

$$\text{所以 } E_0 = 0.116 \text{ kV} = 0.01E$$

$$U_{xc} = 10.5E_0 = 0.105E$$

$$1\text{TV 测得零序电压: } 3U_0 = |\dot{U}_a + \dot{U}_b +$$

$$\dot{U}_c| = |3\dot{U}_{xc}| = 0.315E$$

$$2\text{TV 测得零序电压: } 3U_0 = |\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c| = |3\dot{E}_0| = 0.03E$$

2.4 机端a相引线单相接地

发电机机端a相发生接地时,

$$1\text{TV 测量电压: } \dot{U}_a = 0, \dot{U}_b = \dot{E}_b - \dot{E}_a, \dot{U}_c = \dot{E}_c - \dot{E}_a, \dot{U}_0 = \frac{1}{3} |\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c| =$$

$$\frac{1}{3} |-3\dot{E}_a| = E$$

$$2\text{TV 测量电压: } \dot{U}_a = \dot{E}_a, \dot{U}_b = \dot{E}_b, \dot{U}_c =$$

$$\dot{E}_c, \dot{U}_0 = \frac{1}{3} |\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c| = 0$$

2.5 机端出口a相对中性点短路

该发电机额定容量为300MW, 额定电压为20kV, 额定电流为10.19kA, 功率因数为 $\cos\phi = 0.85$, 超瞬变电抗 $X_d = 0.1833 \Omega$, 负序电抗 $X_2 = 0.2237 \Omega$, 零序电抗 $X_{f0} = 0.0835 \Omega$,

单相出口对中性点短路时故障电流 I_k 为

$$I_k = 3 * E / (X_d + X_2 + X_{f0}) = 3 * 20 / [\sqrt{3} (0.1833 + 0.2237 + 0.0835)] = 70.62 \text{ kA}$$

本次故障220kV侧录波器录波为 $I_A = 1.48 \text{ A}$, $I_B = 1.54 \text{ A}$, $I_C = 0.21 \text{ A}$, $3I_0 = 0.12 \text{ A}$, I_A 与 I_B 基本反向, 开关3个周波跳闸, TA变比为1200/1, 即变压器高压侧电流为 $I_A = 1776 \text{ A}$, $I_B = 1848 \text{ A}$, $I_C = 252 \text{ A}$, $3I_0 = 144 \text{ A}$, 取 $\dot{I}_A = 1848 \text{ A}$, $\dot{I}_B = -\dot{I}_A$, $\dot{I}_C = 0$, 则高压侧电流经Y/ Δ -11变压器传变到低压侧为 $\dot{I}_a = 25820 \text{ A}$, $\dot{I}_b = -12910 \text{ A}$, $\dot{I}_c = -12910 \text{ A}$ 。

因为 $I_a = 2I_b = 2I_c$, 显然, a相电流所流经回路的阻抗较b、c相小, 考虑到发电机c相#24线棒和b相#23线棒烧损严重, 且#24线棒靠近中性点, #24线棒接地, 对于电流回路而言, 相当于中性点接地, 系统向发电机提供的故障电流流过路径见图6。

即发电机内部c相#24线棒处绝缘损坏, 发生接地后, 机端a相又出现接地故障, 故障电流经两个接地点(相当于a相分支被短接), 再通过发电机b、c相线圈构成回路; b相#23线棒紧邻c相#24线棒, 此时, 该两线棒发生短路,

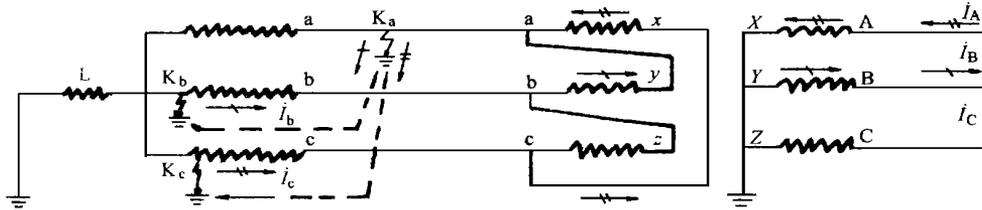


图 6 系统向发电机提供的故障电流分布

表 1 有关保护动作情况

故障类型	1TV 测量电压 $3U_0$	2TV 测量电压 $3U_0$	差动电流	差动保护 $0.4I_n$	匝间保护 $0.06E$	定子接地保护 $0.45E, U_{s3}/U_{n3} > 1$	断线闭锁继电器 $\Delta U_0 > 0.74E$
# 24、# 23 线棒短路	$0.525E$	$0.05E$	$30.9I_n$	Y	N	Y	N
# 24 线棒稳定接地	$0.3E$	0	0	N	N	基波: N 3 次谐波: Y	N
# 24 线棒熔断	$0.32E$	$0.03E$	0	N	N	N	N
机端 a 相接地	$3E$	0	0	N	N	Y	Y

注: 表中 Y——表示保护动作; N——表示保护不动作。

3 有关保护动作情况分析

本发电机保护为许昌继电器厂生产的集成电路型保护, 其中匝间保护为 JL Y-11 型, 动作值 2V 即 $0.06E$, 时间 0.1s, 使用第二组电压互感器 2TV。定子接地保护为 JD-12 型, 定值为: 基波零序电压 15V 即 $0.45E$, 动作时间 4s。使用第一组电压互感器 1TV。该保护由两段构成, 一段 (简称基波部分) 采用基波零序电压原理, 利用发电机机端基波零序电压作为动作量, 用延时来躲过因高压侧接地故障而引起定子接地保护误动。另一段 (简称三次谐波部分) 利用发电机机端三次谐波电压 U_{s3} 作为动作量, 用发电机中性点三次谐波电压 U_{n3} 作为制动量, 动作判据为 $U_{s3}/U_{n3} > 1$ 。

断线闭锁继电器为 JBS-11 型, 其两组电压变换器分别接于发电机出口的 1、2 组电压互感器上。其灵敏度为当电压互感器二次电压不低于 50V 时, 断开一相或两相, 装置可靠动作; 动作时间为在输入端施加三相额定电压 100V、50Hz 时, 断开一相或两相, 执行元件动作时间小于 10ms。

1996 年 11 月 14 日, 现场实测数据如下:

JBS-11 的两组电压线圈均加入三相对称电压, 幅值为 $U_a = U_b = U_c = 55V, U_a = U_b$

$= U_c = 55V$, 然后, 降低 U_c , 当 $U_c = 12.5V$ 时, JBS-11 动作。用同样的方法做 b 相, 当 $U_b = 12V$ 时, JBS-11 动作。

$$\text{显然 } \Delta U_0 = |3\dot{U}_0| - |3\dot{U}'_0| = |\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c| - |\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}'_c|$$

$$\text{当 } \Delta U_0 = 55 - 12 = 43V, \text{ 即 } \Delta U_0$$

$$43 / (100 / \sqrt{3}) = 0.74E \text{ 时, JBS-11 动作。}$$

发电机差动保护为 JCD-12 型 (单相式), 定值按躲最大负荷下差回路不平衡电流整定, $I_{op} = 0.4I_{2n} = 2A$, (I_{2n} 为 TA 二次额定电流), TA 变比为 12000/5。

根据上述计算, 有关保护动作情况如表 1。

4 综合分析意见

4.1 本次故障时, 发电机差动、变压器差动、发变组差动、发电机匝间保护、发电机定子接地保护均动作, 由于定子接地保护动作时间整定为 4s, 说明在主变高压侧开关跳闸前的 4s, 发电机系统发生了稳定接地。如果该接地点发生在机端 a 相, 那么 1、2TV 断线闭锁继电器就会达到动作值而动作, 同时报出 1、2TV 断线信号, 并不能复归。而事实上, 开关跳闸前的几秒内并没有出现 1、2TV 断线信号。如果接地点发生在机内, 那么, 1、2TV 断线闭锁继电器达不到动作值, 不会动作。当时的运行记录正说明了这一

点。因此认为接地或短路故障应首先发生在机内。

4.2 如果先发生C相#24线棒和b相#23线棒之间的相间短路且接地,那么定子接地保护和发电机差动保护均能达到定值,不需要机端a相故障,定子接地保护和发电机差动保护就能出口跳闸。因此,可以认为在发电机开关跳闸之前即9 07 56(9 08减去4s)之前,发电机内部并没有发生稳定短路。

4.3 在c相#24或b相#23线棒熔断的故障下,发电机匝间保护、定子接地保护及断线闭锁继电器均达不到定值而没有反应。考虑到c相#24线棒及b相#23线棒完全烧断各约160mm,因此,笔者认为故障的起因可能是#24线棒导线有制造缺陷,如裂纹、断股。发电机投运后,由于温度的和端部线圈振动的影响,在断股弧光和负荷电流的作用下,使制造缺陷发展,导致运行中过热、熔断、拉弧,进而破坏绝缘。绝缘破坏到一定程度,发生不稳定接地。不排除#23线棒也存在断股。只不过#23线棒断股后运行中过热、熔断、拉弧、破坏绝缘,直至发生不稳定或稳定接地时,不会造成1、2TV测量电压变化,即不会造成断线闭锁继电器动作发出1、2TV断线信号。

4.4 断线闭锁继电器JBS-11,反应的是1TV和2TV不平衡电压(即电压矢量和)的差值,因此,在c相#24线棒发生多次不稳定接地的暂态过程中,据过电压理论,暂态电压为稳态电压的2.5~3.5倍,取2.5倍,此时 $\Delta U_0 = 2.5 * 0.3E = 0.75E$,大于JBS-11断线闭锁继电器 $0.74E$ 的动作值,JBS-11动作,发出1、2TV断线信号。这是发电机跳闸前30多分钟时间内,多次发出1、2TV断线信号的原因。

4.5 由于定子接地保护动作时间为4s,差动保护动作时间为0s,即在差动保护动作前的4s发电机内部定子绕组稳定接地,定子接地保护启动,计时到4s时,又发生机端a相接地故障,这样定子接地保护、发电机差动保护、变压器差动保护、发变组差动保护、匝间保护一起动作,开关跳闸。

4.6 因为c相#24线棒接地后又发生a相机端接地故障,相当于a相分支被短接,故匝间保护动作。

4.7 根据220kV侧故障录波图,可知系统向变压器低压侧提供的短路电流 $I_a = 25820A$, $I_b = I_c = 12910A$,只有发电机c相#24线棒或中性点处发生接地后,机端又出现a相接地故障,故障电流才会如此分布。据2.5节计算,系统向故障点提供25.82kA电流,加上发电机单相出口对中性点短路时发电机提供的短路电流70.62kA,共计96.44kA,这么大的故障电流也是加剧发电机烧坏的一个重要原因。

5 几点建议

5.1 发电机在线监测报警装置(如过热报警装置、放电报警装置以及漏氢报警装置等)有的没有购置,有的没有安装,有的没有投运;发电机的故障录波器在此次故障中没有投入运行,对故障分析造成很多困难。建议运行单位对于200MW及以上发电机,在投入运行之前必须安装调试好上述的故障录波及在线监测装置,并在启动前投入运行。

5.2 目前,该机定子接地保护在启动元件动作且时间元件到整定时间后才报出信号。应加以改进,增加启动元件动作后立即报出信号的回路。

5.3 由2.1节及2.2节计算可知,当分别发生发电机c相#24线棒和b相#23线棒之间匝间短路、#24线棒接地故障时,匝间保护和定子接地保护基波部分均达不到定值而不能动作。因此,应加强大机组继电保护装置整定计算的研究,运行部门也应根据现场实测值进行保护装置的整定。

5.4 在c相#24或#23线棒熔断的故障下,发电机差动保护、匝间保护、定子接地保护及断线闭锁继电器均达不到定值而没有反应。这是很危险的。这种主保护的不安全、不完善状况必须改进。对于该机,我们正在研究改进方案。但笔者认为,对于新的发电机,厂家应改变发电机中性点侧的引出方式,引出4个端子,装设高灵敏

度的横差保护和不完全电流差动保护,代替目前的差动和匝间保护,以解决匝间短路保护灵敏度和定子绕组分支断开等问题;或采用原理先进的新型微机保护更新现有的保护。

参考文献

1 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用, 中国电

力出版社, 1996.

2 王维俭, 候炳蕴. 大型机组继电保护理论基础(P51). 水利电力出版社, 1982.

3 王维俭, 候炳蕴. 大型机组继电保护理论基础, 第二版(P61、102). 水利电力出版社, 1989.

4 许昌继电器厂. 大型发电机-变压器组集成电路成套保护装置.

FAULT ANALYSIS FOR ONE 300MW TURBO- GENERATOR WHICH DAMAGED SERDUSLY —THE CAUSE AND DEVELOPMENT OF THE FAULT AS VIEWED FROM RELAY PROTECTION

L i u H u a (Relay Section of the Henan Power Dispatch and Communication Bureau, 450052, Zhengzhou, China)

Abstract On Oct 1996, a 300MW generator was severely burnt in the thermal power plant S M eanw hile the static contact of phase A bus earth switch in TV cabinet of 20kV bus at the generator outlet was burnt into a ball In the two fault points, which is the first start point? What is the cause? These questions are analyzed as viewed from relay protection It is shown that the first fault is in the generator, and thus some suggestions for improvement are presented

Keywords Turbo-generator Fault Relay protection Analysis

(上接26页) 长远意义, 各种装置的数据以及软件产生的数据文件都有必要遵循 COM - TRADE 标准, 这样才能更快推动数据交换的普及应用。

RESEARCH ON TRANSIENT DATA EXCHANGE AND FAULT REPRODUCTION

L i u J ianfei, X ia Ruihua, Q in L ijun, Chen Gangjie, L iu W anshun

(North China University of Electric Power, 100085, Beijing, China)

Abstract The IEEE COM TRADE standard and features are introduced The principles of power system fault dynamic record technique are analyzed The paper presented the method of fault data record in section and realized the fault reproduction

Keywords transient data exchange fault reproduction electric power system COM TRADE standard

(上接37页) 比采用单片机有便优越的开发环境. 采用单片机时如果遇到双精度浮点数运算, 解方程等复杂运算要花费大量的时间和精力, 而且难以保证程序的正确性. 在8086单板机上这些事可以让高级语言去做. 8086只有40只管脚, 用普通的双面板加工工艺很容易加工出仪

用的16位单板机. 用这种方法设计需要复杂运算的仪器不失为一个良好的途径. 其它单片机的C语言(C51, C96等)均不支持8字节双精度浮点数运算.

16BITS MICROPROCESSOR SYSTEM OF THE FAULT LOCATOR FOR 500kV LONG LINE

L in Jun (Electric Department of Fuzhou University, 350000, Fuzhou, China)

Abstract A 16bits microprocessor system of fault locator which is designed with 8086 CPU is introduced The system has larger spaces for program and data and can support complex long- line fault locating software The software, which is written in ASM 86 and C language and is composed of double- precision floating points and double- curve function, can be burnt in EPROM of the system and operates in an environment without operational system support

Keywords HV transmission line Fault locator 16 bits single chip processor