

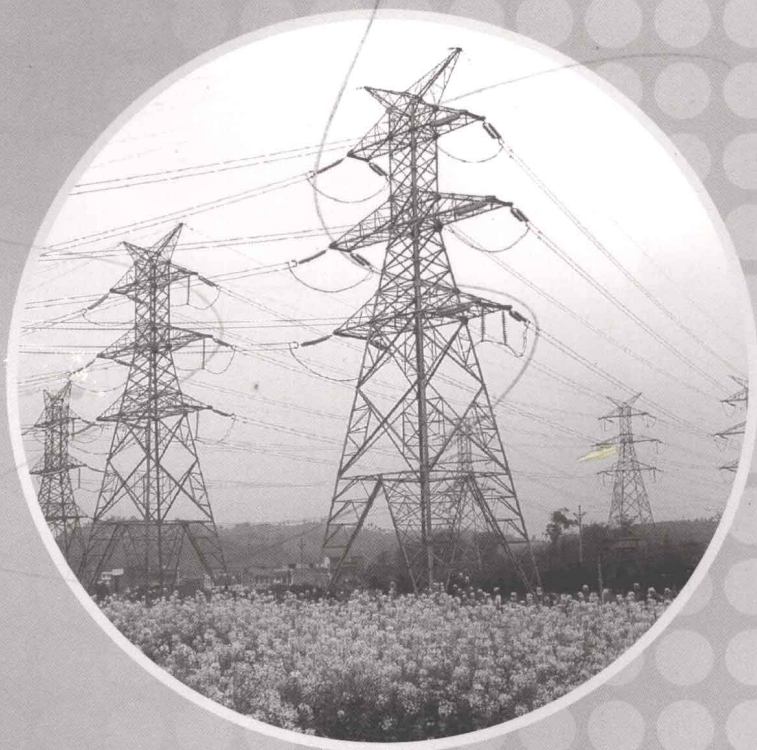
高等学校实验课系列教材

电力系统及自动化 实验指导书

DIANLI XITONG JI ZIDONGHUA SHIYAN ZHIDAOSHU

●主编 詹红霞 ●副主编 雷霞 邢运民 ●主审 王军

EXPERIMENTATION



重庆大学出版社

<http://www.cqup.com.cn>

电力系统及其自动化
实验指导书

1. *Journal of the American Medical Association*, 2000; 283: 2689-2693.

Abstract



100

电力系统及自动化 实验指导书

主 编 詹红霞
副主编 雷 霞 邢运民
主 审 王 军

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书系高等学校“电气工程与自动化”专业的专业实验课教材,内容涵盖“电力工程”、“电机学”、“电力系统自动化”、“电力系统继电保护”、“电力系统分析”等课程的主要实验项目、实验原理和实验方法。

全书共分3章,第1章介绍了电力系统静态、暂态稳定性实验;第二章阐述了继电保护基本原理和微机保护、常规保护的部分实验;第3章讲述了电力系统自动化的主要内容及相关实验。

该书原理阐述简明扼要,实验指导突出可操作性,适用于高等学校电气工程与自动化类师生使用,也可供电力系统工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

电力系统及自动化实验指导书/詹红霞主编. —重庆:
重庆大学出版社,2008.7

(高等学校实验课系列教材)

ISBN 978-7-5624-4253-0

I. 电… II. 詹… III. 电力系统—高等学校—教学参考
资料 IV. TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 127311 号

电力系统及自动化实验指导书

主 编 詹红霞

副主编 雷 霞 邢运民

主 审 王 军

责任编辑:彭 宁 姚正坤 版式设计:彭 宁

责任校对:谢 芳 责任印制:赵 晟

*

重庆大学出版社出版发行

出版人:张鸽盛

社址:重庆市沙坪坝正街174号重庆大学(A区)内

邮编:400030

电话:(023) 65102378 65105781

传真:(023) 65103686 65105565

网址:<http://www.cqup.com.cn>

邮箱:fxk@cqup.com.cn (市场营销部)

全国新华书店经销

四川省内江市兼升印务有限公司印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:9.75 字数:243千

2008年7月第1版 2008年7月第1次印刷

印数:1—3 000

ISBN 978-7-5624-4253-0 定价:18.00元

本书如有印刷、装订等质量问题,本社负责调换
版权所有,请勿擅自翻印和用本书
制作各类出版物及配套用书,违者必究

前言

实践教学是高等教育结构中的重要组成部分,它承担着科学研究、知识创新、教学改革和教书育人等学校的主体工作,它对于学生综合素质的培养具有不可替代的作用,尤其是对于学生创新能力的培养,具有其独特的地位和作用。

本书是根据加强实践教学环节、拓宽专业知识面的教学改革需要而编写的专业综合实验教材,涉及电力系统工程的各个方面,诸如电力系统主设备的电气特性、电力系统综合自动化、电力系统继电保护和微机保护、同步发电机的正常和非正常运行、电力系统静态、暂态稳定性分析等。为加深对课程内容的理解,书中大部分章节附有复习思考题,附录给出了阅读正文有关章节时所需的参考资料。

本书内容的编写力求深入浅出,理论联系实际,重实际应用,并且重点突出,层次分明,逻辑性强,便于自学。

本书由西华大学詹红霞担任主编,西华大学雷霞、邢运民担任副主编。其中第1章电力系统分析由邢运民编著,第2章电力系统继电保护和附录部分由詹红霞编著,第3章电力系统自动化由雷霞编著。全书由詹红霞统编与定稿。本书由西华大学王军教授主审,她对本书提出了很多宝贵意见和建议。此外,西华大学的叶凯、张涛、戴玉松也参加了部分文稿的校对工作,在此一并表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,加之时间仓促,书中错误及不当之处在所难免,敬请读者批评指正。

编 者

2007年8月

目 录

第 1 章 电力系统分析	1
1.1 一机一无穷大系统稳态运行方式实验	1
1.2 电力系统功率特性和功率极限实验	3
1.3 电力系统暂态稳定实验	9
1.4 单机带负荷实验	13
1.5 复杂电力系统运行方式实验	15
1.6 电力系统三相短路实验	19
1.7 电力系统不对称短路实验	20
第 2 章 电力系统继电保护	24
2.1 常规继电器的特性实验	24
2.1.1 电磁型电流、电压继电器的特性实验	24
2.1.2 LG-11 型功率方向继电器的特性实验	33
2.1.3 方向阻抗继电器的特性实验	38
2.1.4 LCD-4 型差动继电器的特性实验	50
2.2 输电线路电流、电压常规保护实验	55
2.3 电磁型三相一次重合闸装置实验	68
2.4 输电线路的电流、电压微机保护实验	76
2.5 输电线路距离保护实验	85
2.6 变压器差动保护实验	97
第 3 章 电力系统自动化	108
3.1 同步发电机准同期并列实验	108
3.2 同步发电机励磁控制系统实验	112
3.3 电力系统调度自动化实验	122
附 录	127
附录 I 发电厂、变电所二次系统的基本概念	127
附录 II 继电保护的 task、作用原理以及组成	128

附录Ⅲ	DJZ-Ⅲ型试验台的特点及其应用	129
附录Ⅳ	DJZ-Ⅲ型试验台使用的注意事项	133
附录Ⅴ	DJZ-Ⅲ型试验台二次系统的构成及光字牌说明	133
附录Ⅵ	ZNB-Ⅱ型智能多功能表使用说明	134
附录Ⅶ	微机保护装置的使用方法	137
附录Ⅷ	WBJK-Ⅱ型微机保护集中控制台	144
参考文献		147

第 1 章

电力系统分析

1.1 一机一无穷大系统稳态运行方式实验

(1) 实验目的

- 1) 了解和掌握对称稳定情况下输电系统的各种运行状态与运行参数的数值变化范围。
- 2) 了解和掌握输电系统稳态不对称运行的条件;不对称度运行参数的影响;不对称运行对发电机的影响等。

(2) 实验原理

电力系统稳态对称和不对称运行分析,除了包含许多理论概念之外,还有一些重要的“数值概念”。当不同电压等级的输电线路在典型运行方式下,其以相对值所表示的电压损耗、电压降落等的数值范围,是用于判断运行报表或监视控制系统测量值是否正确的参数依据。因此,除了结合实际的问题让学生理解此类“数值概念”外,实验也是一种很好的、更为直观且易于形成深刻记忆的手段之一。实验用的一次系统接线图如图 1.1 所示。

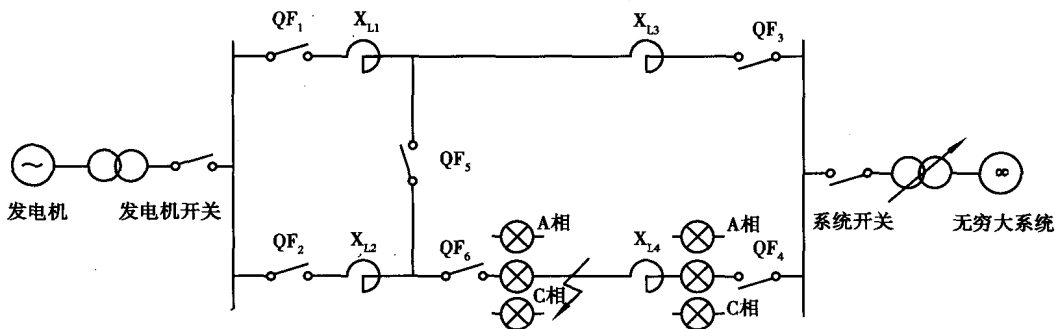


图 1.1 一次系统接线图

本实验系统是一种物理模型。原动机采用直流电动机来模拟,当然,它们的特性与大型原动机是不相似的。原动机输出功率的大小,可通过给定直流电动机的电枢电压来调节。实验系统用标准小型三相同步发电机来模拟电力系统的同步发电机,虽然其参数不能与大型发电

机相比,但也可以看成是一种具有特殊参数的电力系统的发电机。发电机的励磁系统可以通过外加直流电源来进行手动调节,也可以切换到台上的微机励磁调节器来实现自动调节。实验台的输电线路是用多个接成链型的电抗线圈来模拟,其电抗值满足相似条件。“无穷大”母线就直接采用实验室的交流电源,因为它是由实际电力系统供电的,因此它基本上符合“无穷大”母线的条件。

为了进行测量,实验台设置了测量系统,以测量各种电量(电流、电压、功率、频率)。为了测量发电机转子与系统的相对位置角(功率角),在发电机轴上装设了闪光测角装置。此外,台上还设置了模拟短路故障等控制设备。

(3)实验内容

1)单回路稳态对称运行实验

在本章实验中,原动机采用手动模拟方式开机,励磁采用手动励磁方式。启机、建压、并网后,调整发电机电压和原动机功率,使输电系统处于不同的运行状态(输送功率的大小,线路首、末端电压的差别等);观察和记录线路首、末端的测量表计值及线路开关站的电压值,并计算、分析、比较不同运行状态下的电压损耗、电压降落、沿线电压变化、两端无功功率的方向(根据沿线电压大小比较判断)等运行参数变化的特点及数据范围。

2)双回路对称运行与单回路对称运行比较实验

按实验1)的方法进行实验2)的操作,只是将原来的单回路改成双回路运行。将实验1)的结果与实验2)进行比较和分析。

表 1.1

	P	Q	I	U_F	U_z	U_α	ΔU	$\Delta \dot{U}$
单回路								
双回路								

注: U_z ——中间开关站电压;
 ΔU ——输电线路的电压损耗;
 $\Delta \dot{U}$ ——输电线路的电压降落。

3)单回路稳态非全相运行实验

确定实现非全相运行的接线方式。断开一相,输入与单回路稳态对称运行时相同的功率,比较其运行状态的变化。

具体操作方法如下:

①首先按双回路对称运行的接线方式(不含 Q_{F5});

- ②输送的功率与实验1)中单回路稳态对称运行的输送功率值一样;
- ③微机保护定值整定:动作时间0 s,重合闸时间100 s;
- ④在故障单元,选择单相故障相,整定故障时间为 $0\text{ s} < t < 100\text{ s}$;
- ⑤进行单相短路故障,此时微机保护切除故障相,准备重合闸,这时迅速跳开“Q_{F1}”、“Q_{F3}”开关,即只有一回线路的两相在运行。观察此状态下的三相电流、电压值,并与实验1)进行比较;
- ⑥故障100 s以后,重合闸成功,系统恢复到实验1)状态。

表 1.2

	U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C	P	Q	S
全相运行值									
非全相运行值									

(4) 实验报告要求

- 1) 整理实验数据,说明单回路送电和双回路送电对电力系统稳定运行的影响,并对实验结果进行理论分析。
 - 2) 根据不同运行状态的线路首、末端和中间开关站的实验数据,分析、比较不同运行状态下运行参数变化的特点和变化范围。
 - 3) 比较非全相运行实验的前、后实验数据,分析输电线路输送功率的变化。
- [思考题]
- 1) 影响简单系统静态稳定性的因素是哪些?
 - 2) 提高电力系统静态稳定有哪些措施?
 - 3) 何为电压损耗、电压降落?
 - 4) “两表法”测量三相功率的原理是什么? 它有什么前提条件?

1.2 电力系统功率特性和功率极限实验

(1) 实验目的

- 1) 初步掌握电力系统物理模拟实验的基本方法。
- 2) 加深理解功率极限的概念,在实验中体会各种提高功率极限措施的作用。
- 3) 通过对实验中各种现象的观察,结合所学的理论知识,培养理论结合实际及分析问题

的能力。

(2) 实验原理

所谓简单电力系统,一般是指发电机通过变压器、输电线路与无限大容量母线联接而且不计各元件的电阻和导纳的输电系统。

对于简单系统,如发电机至系统 d 轴和 q 轴总电抗分别为 $X_{d\Sigma}$ 和 $X_{q\Sigma}$,则发电机的功率特性为

$$P_{E_q} = \frac{E_q U}{X_{d\Sigma}} \sin \delta + \frac{U^2}{2} \times \frac{X_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \sin 2\delta$$

当发电机装有励磁调节器时,发电机电势 E_q 随运行情况而变化。根据一般励磁调节器的性能,可认为保持发电机 E'_q (或 E') 恒定。这时发电机的功率特性可表示成

$$P'_{E_q} = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta' + \frac{U^2}{2} \times \frac{X'_{d\Sigma} - X_{q\Sigma}}{X'_{d\Sigma} \cdot X_{q\Sigma}} \sin 2\delta'$$

或

$$P'_E = \frac{E'_q U}{X'_{d\Sigma}} \sin \delta'$$

这时功率极限为

$$P'_{Em} = \frac{E'_q U}{X_{d\Sigma}}$$

随着电力系统的发展和扩大,电力系统的稳定性问题更加突出,而提高电力系统稳定性和输送能力的最重要手段之一,就是尽可能提高电力系统的功率极限。从简单电力系统功率极限的表达式看,要提高功率极限,可以通过发电机装设性能良好的励磁调节器,以提高发电机电势、增加并联运行线路回路数;或通过串联电容补偿等手段,以减少系统电抗,使受端系统维持较高的运行电压水平;或输电线采用中继同步调相机、中继电力系统等手段以稳定系统中继点电压。

(3) 实验内容

1) 无调节励磁时,功率特性和功率极限的测定

① 网络结构变化对系统静态稳定的影响(改变 x):

在相同的运行条件下(即系统电压 U_x 、发电机电势 E_q 保持不变,即并网前 $U_x = E_q$),分别测定输电线单回线和双回线运行时,发电机的功一角特性曲线,以及功率极限值和达到功率极限时的功角值。同时观察并记录系统中其他运行参数(如发电机端电压等)的变化。将两种情况下的结果加以比较和分析。

实验步骤如下:

- a) 输电线路为单回线;
- b) 发电机与系统并列后,调节发电机,使其输出的有功和无功功率为零;
- c) 功率角指示器调零;
- d) 逐步增加发电机输出的有功功率,而发电机不调节励磁;
- e) 观察并记录系统中运行参数的变化,填入表 1.3 中;
- f) 输电线路为双回线,重复上述步骤,将运行参数填入表 1.4 中。

表 1.3 单回线

δ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
I_A	0									
U_Z										
U_F										
I_{fd}										
Q	0									

表 1.4 双回线

δ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
I_A	0									
U_Z										
U_F										
I_{fd}										
Q	0									

注意：

a)有功功率应缓慢调节,每次调节后,需等待一段时间,观察系统是否稳定,以取得准确的测量数值。

b)当系统失稳时,减小原动机出力,使发电机拉入同步状态。

②发电机电势 E_q 不同,对系统静态稳定的影响:

在同一接线及相同的系统电压下,测定发电机电势 E_q 不同时 ($E_q < U_x$ 或 $E_q > U_x$) 发电机的功—角特性曲线和功率极限。

实验步骤如下:

a)输电线为单回线,并网前 $E_q < U_x$;

b)发电机与系统并列后,调节发电机,使其输出有功功率为零;

c)逐步增加发电机输出的有功功率,而发电机不调节励磁;

d)观察并记录系统中运行参数的变化,填入表 1.5 中;

e)输电线为单回线,并网前 $E_q > U_x$,重复上述步骤,将运行参数填入表 1.6 中。

2)手动调节励磁时,功率特性和功率极限的测定

给定初始运行方式,在增加发电机有功输出时,手动调节励磁保持发电机端电压恒定,测定发电机的功—角曲线和功率极限,并与无调节励磁时所得的结果比较分析,说明励磁调节对功率特性的影响。

表 1.5 单回线(并网前 $E_q < U_x$)

δ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
I_A	0									
U_Z										
U_F										
I_{fd}										
Q	0^-									

表 1.6 单回线(并网前 $E_q > U_x$)

δ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
I_A	0									
U_Z										
U_F										
I_{fd}										
Q	0^+									

实验步骤如下:

- a)单回线输电线路;
- b)发电机与系统并列后,使 $P=0, Q=0, \delta=0$,校正初始值;
- c)逐步增加发电机输出的有功功率,调节发电机励磁,保持发电机端电压恒定或无功输出为零;
- d)观察并记录系统中运行参数的变化,填入表 1.7 中。
- e)将输电线路改为双回线,重复上述实验步骤,并将运行参数填入表 1.8 中。

表 1.7 单回线(手动调节励磁)

δ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
I_A	0									
U_Z										
U_F										
I_{fd}										
Q	0									

表 1.8 双回线(手动调节励磁)

δ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
I_A	0									
U_z										
U_F										
I_{fd}										
Q	0									

3) 自动调节励磁时,功率特性和功率极限的测定

将自动调节励磁装置接入发电机励磁系统,测定功率特性和功率极限,并将结果与无调节励磁和手动调节励磁时的结果比较,分析自动励磁调节器的作用。

①微机自并励(恒流或恒压控制方式):

实验步骤自拟,并将运行参数分别填入表 1.9 和表 1.10 中。

表 1.9 单回线(微机自并励方式)

δ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
I_A	0									
U_z										
U_F										
I_{fd}										
Q	0									

表 1.10 双回线(微机自并励方式)

δ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
I_A	0									
U_z										
U_F										
I_{fd}										
Q	0									

②微机他励(恒流或恒压控制方式):

实验步骤自拟,并将运行参数分别填入表 1.11 和表 1.12 中。

表 1.11 单回线(微机他励方式)

δ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
I_A	0									
U_Z										
U_F										
I_{fd}										
Q	0									

表 1.12 双回线(微机他励方式)

δ	0°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°	90°
P	0									
I_A	0									
U_Z										
U_F										
I_{fd}										
Q	0									

注意事项:

- 调速器处于停机状态时,如果“输出零”灯不亮,不可开机;
- 实验结束后,通过励磁调节使无功输出为零,通过调速器调节使有功输出为零;解列之后,按下调速器的停机按钮,使发电机转速至零;跳开操作台所有开关之后,方可关断操作台上的操作电源开关。

(4) 实验报告要求

- 根据实验装置给出的参数以及实验中的原始运行条件,进行理论计算。将计算结果与实验结果进行比较。
- 认真整理实验记录,通过实验记录分析的结果对功率极限的原理进行阐述。同时对理论计算和实验记录进行对比,说明产生误差的原因。并作出 $U_Z(\delta)$, $P(\delta)$ 和 $Q(\delta)$ 特性曲线,对其进行描述。

- 分析、比较各种运行方式下发电机的功—角特性曲线和功率极限。

[思考题]

- 功率角指示器的原理是什么? 如何调节其零点? 当日光灯供电的相发生改变时,所得的功角值会发生什么变化?
- 多机系统的输送功率与功角 δ 的关系和简单系统的功—角特性有什么区别?
- 自并励和他励的区别和各自特性是什么?
- 自动励磁调节器对系统静态稳定性有何影响?

5) 实验中,当发电机濒临失步时,应采取哪些挽救措施才能避免电机失步?

1.3 电力系统暂态稳定实验

(1) 实验目的

1) 通过实验,加深对电力系统暂态稳定内容的理解,使课堂理论教学与实践结合,提高学生的感性认识。

2) 通过实际操作,使学生从实验中观察到系统失步现象,并掌握正确处理失步的措施。

3) 用数字式记忆示波器测出短路时短路电流的非周期分量波形图,并进行分析。

(2) 实验原理

电力系统暂态稳定就是指电力系统受到较大的扰动之后,各发电机能否继续保持同步运行状态。在各种扰动中,以短路故障的扰动最为严重。

正常运行时发电机功率特性为: $P_1 = (E_0 \times U_0) \times \sin \delta_1 / X_1$;

短路运行时发电机功率特性为: $P_2 = (E_0 \times U_0) \times \sin \delta_2 / X_2$;

故障切除发电机功率特性为: $P_3 = (E_0 \times U_0) \times \sin \delta_3 / X_3$;

对这三个公式进行比较,可以知道,功率特性与阻抗和功一角特性有关。而系统保持稳定条件是切除故障角 $\delta_c < \delta_{\max}$, $\delta_{\max}$ 可由等面积原则计算出来。本实验就是基于此原理,由于不同短路状态下,系统阻抗 X_2 不同,同时切除故障线路不同也使 X_3 不同, $\delta_{\max}$ 也不同,使对故障切除的时间要求也不同。

在故障发生及故障切除时通过强励磁增加发电机的电势,使发电机功率特性中 E_0 增加,使 $\delta_{\max}$ 增加,相应故障切除的时间也可延长;由于电力系统发生瞬间单相接地故障较多,发生瞬间单相故障时采用自动重合闸,使系统进入正常工作状态。这两种方法都有利于提高系统的稳定性。

(3) 实验内容

1) 短路对电力系统暂态稳定的影响

① 短路类型对暂态稳定的影响:

本实验通过对操作台上的短路选择按钮的组合,可进行单相接地短路、两相相间短路、两相接地短路和三相短路试验。

固定短路地点、短路切除时间和系统运行条件,在发电机经双回线与“无穷大”电网联网运行时,某一回线发生某种类型短路,经一定时间切除故障成单回线运行。短路的切除时间在微机保护装置中设定,同时要设定重合闸是否投切。

在手动励磁方式下,通过调速器的增(减)速按钮调节发电机向电网的出力,测定不同短路运行时能保持系统稳定的发电机所能输出的最大功率,并进行比较,分析不同故障类型对暂态稳定的影响。将实验结果与理论分析结果进行分析比较。 $P_{\max}$ 为系统可以稳定输出的极限,注意观察有功表的读数,当系统处于振荡临界状态时,记录有功表读数,最大电流读数可以从 YHB—Ⅲ型微机保护装置读出,具体显示为:

GL-××× 三相过流值;

GA-××× A相过流值;

GB-××× B 相过流值;

GC-××× C 相过流值。

微机保护装置的整定值代码如下:

01——过流保护动作延迟时间;

02——重合闸动作延迟时间;

03——过电流整定值;

04——过流保护投切选择;

05——重合闸投切选择。

另外,短路时间 T_D 由面板上“短路时间”继电器整定,具体整定参数详见表 1.13。

表 1.13

整定值代码	01	02	03	04	05	T_D
整定值	0.5 s	—	5.00 A	ON	OFF	1.0 s

微机保护装置的整定方法如下:

按压“画面切换”按钮,当数码管显示『PA—』时,按压触摸按钮“+”或“-”输入密码,待密码输入后,按下按键“ Δ ”,如果输入密码正确,就会进入整定值修改画面。进入整定值修改画面后,通过“ Δ ”,“ ∇ ”先选 01 整定项目,再按压触摸按钮“+”或“-”选择当保护时间(s);通过“ Δ ”,“ ∇ ”选 03 整定项目,再按压触摸按钮“+”或“-”选择当过电流保护值;通过“ Δ ”,“ ∇ ”选 04 整定项目,再按压触摸按钮“+”或“-”选择当过电流保护投切 ON;通过“ Δ ”,“ ∇ ”选 05 整定项目,再按压触摸按钮“+”或“-”选择重合闸投切为 OFF。

表 1.14 短路切除时间 $t=0.5$ s(短路类型:单相接地短路)

QF_1	QF_2	QF_3	QF_4	QF_5	QF_6	$P_{\max}/W$	最大短路 电流/A
1	1	1	1	0	1		
0	1	0	1	0	1		
1	1	0	1	1	1		
0	1	1	1	1	1		

注:0 表示对应线路开关断开状态 1 表示对应线路开关闭合状态)

表 1.15 短路切除时间 $t=0.5$ s(短路类型:两相相间短路)

QF_1	QF_2	QF_3	QF_4	QF_5	QF_6	$P_{\max}/W$	最大短路 电流/A
1	1	1	1	0	1		
0	1	0	1	0	1		
1	1	0	1	1	1		
0	1	1	1	1	1		