

五

普通高等教育“十二五”规划教材

电气工程及其自动化专业

电机与电力电子 实验及仿真指导书

李朝生 主 编

廖德利 副主编



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



普通高等教育“十二五”规划教材

电机与电力电子 实验及仿真指导书

主 编 李朝生

副主编 廖德利

编 写 林 琳 范冬萍

主 审 程 明



中国电力出版社

CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书为普通高等教育“十二五”规划教材。

本书为了满足应用型本科院校电机实验与电力电子实验及仿真教学使用的需求而编写。本书分为电机与电力电子实验和电机与电力电子仿真上、下两篇，共有12章，包括电机学实验、异步电动机拖动控制实验、异步电动机调速实验、电力电子技术实验、电力电子技术课程设计、MATLAB概述、SIMULINK基础、变压器仿真、三相异步电动机仿真、三相同步发电机仿真、直流电动机仿真和电力电子电路仿真等内容。

本书主要作为应用型本科院校电气工程及其自动化专业的电机学实验与电力电子技术实验教学用书，也可作为高专高职院校的实验实训教学教材，并可为大学生自学电机学实验、电力电子技术实验等提供帮助。

图书在版编目（CIP）数据

电机与电力电子实验及仿真指导书 / 李朝生主编. —北京：中国电力出版社，2012.5

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5123-3103-7

I. ①电… II. ①李… III. ①电机—试验—高等学校—教学参考资料②电力电子技术—实验—高等学校—教学参考资料 IV. ①TM306②TM1-33

中国版本图书馆CIP数据核字（2012）第109772号

中国电力出版社出版、发行

（北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>）

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2012年7月第一版 2012年7月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 16开本 15.5印张 371千字
定价 28.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签，刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

本书是与牛维扬、李祖明主编的《电机学（第二版）》和李先允主编的《电力电子技术》配套的实验实训辅助教材。

本书分上、下两篇。上篇为电机与电力电子实验，共有五章，包括电机学实验、异步电动机拖动控制实验、异步电动机调速实验、电力电子技术实验和电力电子技术课程设计等内容。下篇为电机与电力电子仿真，共有七章，包括MATLAB概述、SIMULINK基础、变压器仿真、三相异步电动机仿真、三相同步发电机仿真、直流电动机仿真和电力电子电路仿真等内容。

本书由李朝生、廖德利、林琳和范冬萍编写。其中，第3、4、5章由廖德利编写，第9章第4节由林琳编写，第1、2、10、12章和第9章其他部分由李朝生编写，第6、7、8、11章由范冬萍编写。全书由李朝生统稿。

本书承蒙东南大学程明教授主审，提出了许多中肯的宝贵意见，在此表示诚挚的谢意。本书的出版也得到施耐德电气公司和浙江求是科教设备有限公司的大力支持，在编写本书的过程中参考和使用了部分兄弟院校的教材及国内外文献资料，对原作者也一并表示诚挚的谢意。在本书的编写过程中，还得到房淑华博士、郭健博士、颜建虎博士、金平博士、王坚博士的指导，分别对第8~12章提出了不少宝贵意见和建议，编者受益匪浅，此外，还得到南京工程学院电力工程学院其他老师的指点、帮助，在此，谨致谢意。

由于编者水平有限，加之编写时间比较仓促，书中疏漏和不妥之处在所难免，尚希广大读者和同行专家不吝指正。

编 者

2012年2月于南京方山

目 录

前言

上篇 电机与电力电子实验

第 1 章 电机学实验	1
1.1 认识实验	1
1.2 三相变压器空载、短路实验	5
1.3 变压器同名端测定实验	9
1.4 三相变压器的连接组和不对称短路实验	12
1.5 单相变压器并联运行实验	18
1.6 三相异步电动机的工作特性测定	20
1.7 三相异步电动机的降压起动实验	25
1.8 双速异步电动机实验	28
1.9 单相异步电动机实验	30
1.10 同步发电机特性测定实验	33
1.11 同步发电机并网及功率调节实验	36
1.12 三相同步发电机的参数测定实验	40
1.13 直流发电机实验	44
1.14 直流电动机调速实验	46
第 2 章 异步电动机拖动控制实验	51
2.1 三相异步电动机的点动和自锁控制实验	51
2.2 三相异步电动机的正、反转控制实验	53
2.3 电动机的两地控制实验	56
2.4 电动机的顺序起动控制实验	58
2.5 三相笼型异步电动机的降压起动控制实验	61
2.6 三相绕线式异步电动机起动控制实验	63
2.7 三相异步电动机的制动控制实验	65
第 3 章 异步电动机调速实验	68
3.1 异步电动机调速实验要求	68
3.2 变频器的认识实验	69
3.3 电动机控制器实验	73
3.4 软起动器实验	75
3.5 异步电动机变频调速系统实验	79
3.6 转速开环恒压频比 (U/f) 控制变频调速系统实验	80

3.7	异步电动机带速度传感器矢量控制系统实验	82
3.8	异步电动机无速度传感器矢量控制系统实验	85
第4章	电力电子技术实验	87
4.1	单结晶体管触发电路及单相半波可控整流电路实验	87
4.2	正弦波与锯齿波同步移相触发电路实验	90
4.3	单相桥式半控整流电路实验	92
4.4	单相桥式全控整流与有源逆变电路实验	94
4.5	三相半波可控整流电路与三相桥式半控整流电路实验	97
4.6	三相桥式全控整流电路实验	100
4.7	单相交流调压电路实验	103
4.8	电力晶体管(GTR)驱动电路与特性实验	106
4.9	功率场效应晶体管(MOSFET)特性与驱动电路实验	113
4.10	绝缘栅双极型晶体管(IGBT)特性与驱动电路实验	116
4.11	直流斩波电路设计实验	120
4.12	单相交直交变频电路实验	123
4.13	半桥型开关稳压电源的性能实验	125
第5章	电力电子技术课程设计	128
5.1	电力电子课程设计目的和要求	128
5.2	电力电子课程设计选题	129
5.3	电力电子课程设计的内容	130
5.4	电力电子课程设计实例	130

下篇 电机与电力电子仿真

第6章	MATLAB 概述	135
6.1	MATLAB 语言简介	135
6.2	MATLAB 的安装	136
6.3	MATLAB 的应用窗口	137
6.4	M 文件简介	144
第7章	SIMULINK 基础	147
7.1	SIMULINK 的工具箱	147
7.2	SIMULINK 的基本操作	157
7.3	模块及信号线的基本操作	158
7.4	SIMULINK 系统建模与运行仿真	163
第8章	变压器仿真	168
8.1	变压器的磁路计算	168
8.2	单相变压器空载合闸时的瞬态过程仿真	170
8.3	单相变压器二次侧突然短路仿真	173
8.4	三相变压器空载合闸仿真	176

8.5	三相变压器对称短路仿真	179
8.6	三相变压器连接组别仿真	182
8.7	三相变压器并联运行仿真	184
第 9 章	三相异步电动机仿真	187
9.1	三相异步电动机人为机械特性仿真	187
9.2	三相异步电动机直接起动的仿真	189
9.3	三相绕组异步电动机转子串电阻起动仿真	192
9.4	三相异步电动机缺相起动仿真	194
9.5	三相异步电动机能耗制动仿真	195
9.6	三相异步电动机反接制动仿真	197
第 10 章	三相同步发电机仿真	199
10.1	同步发电机的功角特性仿真	199
10.2	同步发电机起动仿真	203
10.3	同步发电机突然发生三相对称短路仿真	205
第 11 章	直流电动机仿真	212
11.1	直流电动机的机械特性仿真	212
11.2	直流电动机的直接起动仿真	218
11.3	直流电动机电枢串电阻分级起动仿真	222
11.4	直流电动机反接制动仿真	224
第 12 章	电力电子电路仿真	228
12.1	单相桥式二极管整流仿真	228
12.2	单相桥式晶闸管全控整流仿真	230
12.3	三相桥式全控整流仿真	232
12.4	降压变换器电路仿真	234
	参考文献	237

上篇 电机与电力电子实验

第1章 电机学实验

1.1 认识实验

一 电机实验基本要求

为确保电机实验时人身设备的安全,顺利完成电机实验,学生必须首先了解 BMEL-II 电机系统教学实验台,同时满足以下要求。

(1) 学生应认真预习并撰写预习报告。在进入实验室前,应带齐预习报告、实验指导书、理论课教材,以及必要的文具。

(2) 进入实验室后,首先应抄录试验台编号、实验机组铭牌和编号、机组电源和负载的规格和编号、各种仪表的量程和编号。

(3) 实验开始前,学生应认真听取指导老师对实验所作的讲解;教师在讲解结束后应回答学生在预习和听讲中遇到的问题,待没有问题后方可宣布实验开始。

(4) 实验时女生应将发辫及长发挽起,注意衣服及所用导线等不要卷入电机的转动部分,更不允许用身体去接触电机转动部分。

(5) 学生完成接线或改接线路后,必须经指导教师检查,经允许后,方可合上电源。

(6) 实验过程中,如需要较长时间讨论问题,应将电源切除。

(7) 在线路有电时,尽可能单手操作。

(8) 实验过程中发现不正常现象,如设备冒烟、有焦味、声音异常,应立即断开电源并迅速离开实验台,同时请指导老师到现场检查处理。

(9) 正常情况下需要停机,应先将负载减小,然后再拉开开关。

(10) 实验完成后,在将设备摆放整齐后方可离开实验室。

(一) 实验前的准备

实验前应复习教科书有关章节,认真研读实验指导书,了解实验目的、项目、方法与步骤,明确实验过程中应注意的问题(有些内容可到实验室对照实验预习,如熟悉组件的编号、使用及其规定值等),并按照实验项目准备记录抄表等。

实验前应写好预习报告,经指导老师检查认为确实做好了实验前的准备,方可开始做实验。

认真做好实验前的准备工作,对于培养学生的独立工作能力,保证实验安全、顺利进行,提高实验质量和保护实验设备都是很重要的。

(二) 实验的进行

1. 建立小组,合理分工

每次实验都以小组为单位进行,一般每组由2~4人组成。实验过程中,接线、调节负载、保持电压或电流、记录数据等工作每人应有明确的分工,以保证实验操作协调,记录数据准确可靠。

2. 选择组件和仪表

实验前认真读图，熟悉该次实验所用的仪表、组件，记录电机铭牌和选择仪表量程，然后依次排列组件和仪表以便测取数据。

3. 按图接线

根据实验线路图对所选组件、仪表进行接线，线路力求简单明了，接线原则一般是先接串联主回路、再接并联支路。为查找线路方便，同一回路可用相同颜色的导线。

4. 起动电机并观察仪表

在正式实验开始之前，先熟悉仪表刻度，并记下倍率，然后按一定规范起动电机，观察所有仪表是否正常（如指针正、反向是否超满量程等）。如果出现异常，应立即切断电源，并排除故障；如果一切正常，即可正式开始实验。

5. 测取数据

预习时，对电机的实验方法及所测数据的大小做到心中有数。正式实验时，根据实验步骤逐次测取数据。

6. 指导教师审阅实验数据

实验完毕，须将数据交指导教师审阅。经指导教师认可后，才允许拆线并把实验所用的组件、导线及仪器等物品整理好。经指导教师允许后方可离开实验室。

（三）实验报告

实验报告是根据实测数据和在实验中观察、发现的问题，经过自己分析研究或分析讨论后写出的心得体会。

实验报告要写在一定规格的报告纸上，且应简明扼要、字迹清楚、图表整洁、结论明确。

实验报告包括以下内容。

（1）实验名称、专业班级、学号、姓名、实验日期、室温。

（2）列出实验中所用组件的名称及编号、电机主要铭牌数据等。

（3）绘出实验时所用组件的线路图，并注明仪表量程、电阻器阻值、电源端编号等。

（4）数据的整理、计算和分析。

（5）根据记录及计算的数据用坐标纸画出曲线，曲线要用曲线尺或曲线板连成光滑曲线，不在曲线上的点仍按实际数据标出。

（6）根据数据和曲线进行计算和分析，说明实验结果与理论是否符合，可对某些问题提出一些自己的见解并最后写出结论。

（7）每次实验后，要求每人独立完成一份报告，按时送交指导教师批阅。

二 实验安全操作规程

为了顺利完成大功率电机实验，确保实验时人身安全与设备安全，要牢固树立“安全第一”的思想，严格遵守如下安全操作规程。

（1）实验时，必须熟悉和掌握切断电源的方法，人体不可接触带电线路。接线或拆线都必须在切断电源的情况下进行。接线前和拆线前要检查实验装置上各开关、旋钮，使其置于关断或初始位置，合理设置各仪表的挡位。学生独立完成接线或改接线路后，首先进行自检和小组内学生互检，然后必须经指导教师检查和允许，方可进行通电实验。

（2）每次接通电源时，操作者要提醒组内其他同学引起注意后方可进行。实验中如发生

事故,应立即切断电源,经查清问题和妥善处理故障后,才能继续进行实验。

(3) 电机的起动和停止要按正确的步骤进行。异步电动机如直接起动,则应先检查功率表及电流表的电流量程是否符合要求、有否短路回路存在,以免损坏仪表或电源。直流电动机不允许直接起动,不允许在励磁电流过小时起动及运行。

(4) 总电源或实验台控制屏上的电源接通应由实验指导人员来控制,其他人只能在指导人员允许后才可操作,不得自行合闸。

三 综合实验装置的认识

(一) 主要设备

1. 主要设备选用

变压器选用 DJ12A 型三相心式变压器,额定容量为 $P_N=2\text{kVA}$, $U_N=380/220\text{V}$, $I_N=3/5\text{A}$, Yy 接法。三相异步电动机/直流发电机机组:异步电动机选用 Y100L1-4 型三相笼型异步电动机;其额定值为 $P_N=2.2\text{kW}$, $U_N=380\text{V}$, $I_N=5\text{A}$, $n_N=1430\text{r/min}$, Y 接法(若采用 Δ 接法,额定电压则为 220V)。直流发电机 G: $P_N=1.5\text{kW}$, $U_N=230\text{V}$, $I_N=6.52\text{A}$, $n_N=1500\text{r/min}$, $U_f=220\text{V}$, $I_f=0.49\text{A}$ 。

直流电动机/直流发电机机组:被测直流电动机选用 Z2-32 型他励直流电动机, $P_N=2.2\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=12.5\text{A}$, $n_N=1500\text{r/min}$, $U_f=220\text{V}$, $I_N=0.61\text{A}$;直流发电机的额定值为 $P_N=1.5\text{kW}$, $U_N=230\text{V}$, $I_N=6.52\text{A}$, $n_N=1500\text{r/min}$, $U_f=220\text{V}$, $I_f=0.49\text{A}$ 。

直流电动机/三相同步发电机:直流电动机 M 的额定值为 $P_N=3\text{kW}$, $U_N=220\text{V}$, $I_N=12.5\text{A}$, $n_N=1500\text{r/min}$, $U_f=220\text{V}$, $I_f=0.505\text{A}$;三相同步发电机 G 的额定值为 $P_N=2.75\text{kW}$, $U_N=400\text{V}$, $I_N=3.96\text{A}$, $n_N=1500\text{r/min}$, $U_f=220\text{V}$, $I_f=2.4\text{A}$ 。

BT2-120 型三相可调电阻箱,每相最大电阻为 265Ω 、最大电流为 6.5A ,可作为纯阻性负载使用,也可在一些实验线路(如串电阻降压起动线路)中作为可调电阻使用。实验导线包括电流线、电压线和调速实验专用导线等几种。电流线较粗,串联在主回路中。电压线较细,并联在电压回路中,也用在部分实验的控制回路中。

2. 主控屏

主控屏位于面板的左上方和下部,包括以下模块。

左上方有 3 个模块,按左到右排列分别是:①BMEL-001A 电源控制,转速显示,扭矩仪;②BMEL-006C 三相心式变压器;③BMEL-010 可调电阻:三相可调电阻和单相可调电阻。

下部有 6 个模块,按左到右排列分别是:①BMEL-004B 异步电机一直流电机机组;②BMEL-003B 直流电机机组;③BMEL-007B 直流电机电枢电源;④BMEL-008B 直流电机励磁电源;⑤BMEL-005B 同步电机一直流电机机组;⑥MCL-001 扩展板。

3. 仪表挂箱

- (1) BMEL-31B 交流电压表;
- (2) BMEL-32B 交流电流表;
- (3) BMEL-33B 功率—功率因数表;
- (4) BMEL-34C 直流电压—电流表;
- (5) BMEL-35B 旋转指示—并车开关;
- (6) BMEL-30B 开关箱。

(二) 开启及关闭电源的方法和注意事项

实验中, 开启及关闭电源都在控制屏上操作。

1. 电源总开关的操作

(1) 将电源控制屏的电源线接入对应的三相电源, 开启电源前要检查控制屏下面“双路直流电源”的“电枢电源”开关及“励磁电源”开关, 还有“同步电机励磁电源”的开关都须在关断的位置。控制屏桌面左端安装的调压器旋钮必须在零位, 即必须将它向逆时针方向旋转到底。

(2) 检查无误后, 合上控制屏左侧端面上的三相带漏电保护的空气开关(电源总开关), 此时控制屏的控制部分(所有仪表都将有显示, 定时器兼报警记录仪工作)、屏上的电源插座及照明都将得电。“停止”按钮指示灯亮, 表示实验装置的进线接到电源, 但还不能输出电压。此时在电源输出端进行实验电路接线操作是安全的。

当发生漏电、过载、短路等故障时, 电源总开关有可能自动断开。

2. 三相交流电源的操作

(1) 按上述步骤合上电源总开关, 按下“起动”按钮, “起动”按钮指示灯亮, 表示三相交流调压电源输出插孔 A、B、C 上已通电。

(2) 适当旋转调压器旋钮, 在 0~450V 范围内调节输出线电压。电压大小由控制屏左上方的三只交流电压表指示。

(3) 实验中如果需要改接线路, 必须按下“停止”按钮切断交流电源, 以保证实验操作的安全。实验完毕, 还需关断“电源总开关”, 并将控制屏桌面左端安装的调压器旋钮调回到零位。将直流电动机的“电枢电源”开关以及“同步电机励磁电源”开关拨回到最小位置。

当发生漏电、过载、短路等故障时, 交流电源有可能自动断开。

3. 直流电动机电源的操作

直流电源由交流电源变换而来, 开启直流电源, 必须先完成开启交流电源, 即开启“电源总开关”并按下“起动”按钮。在此之后, 将分为以下几种情况进行使用。

(1) 按常规起动直流他励电动机的步骤: 打开“励磁电源”开关, 可获得 0~250V、最大电流为 3A 的可调的直流电源输出, 调节电位器和负载回路的电阻使得励磁回路的电流达到额定值; 将电枢电压的调节电位器逆时针旋到底, 再打开“电枢电源”开关, 可获得 0~250V、最大电流为 20A 的可调的直流电源输出, 调节电位器至电枢电压达到额定值使得电机正常运转(注: “励磁电源”在刚打开时会发出“欠励”告警声光指示, 随着励磁电流的增大将消失)。停机时, 必须先关电枢电源, 后关励磁电源。

(2) 单独使用“励磁电源”的步骤: 因为本套装置的“双路直流电源”专为直流他励电动机设计了“欠励”保护功能, 所以在打开“直流励磁电源”开关后若回路电流没有达到“欠励”限定值(约 0.15A), 以上装置都将发出告警指示。

(3) 单独使用“电枢电源”的步骤: 先打开“电枢电源”开关, “欠励”告警, 且无电压输出, 按下“电源选择切换”按钮告警消失, 再打开“励磁电源”开关, 此时电枢电源才能正常输出。

励磁电源电压及电枢电源电压都可以由同一只直流电压表指示。当该电压表下方的“电压指示切换”开关拨向“电枢电压”时, 指示电枢电源电压; 当将它拨向“励磁电压”时, 指示励磁电源电压。

4. 同步电机励磁电源的操作

同步电机的直流励磁电源也是由交流转换而来的, 所以在开启“同步励磁电源”之前,

必须先开启“电源总开关”并按下“起动”按钮。

在此之后，将控制屏左侧端面上的单相调压器旋钮逆时针旋到底，然后打开同步电机励磁开关，通过调节控制屏左侧端面上的单相调压器旋钮来调节“同步励磁电源”的输出电压，并可通过一只交流电压指示表指示。

1.2 三相变压器空载、短路实验

一 实验目的

- (1) 通过空载和短路实验，测定三相变压器的变比和参数。
- (2) 通过负载实验，测取三相变压器的运行特性。

二 预习要点

- (1) 如何用“双表法”测三相功率，空载和短路实验应如何合理布置仪表？
- (2) 三相心式变压器的三相空载电流是否对称，为什么？
- (3) 如何测定三相变压器的铁损耗和铜损耗？
- (4) 变压器空载和短路实验应注意哪些问题？电源应加在哪一方较合适？

三 实验项目

- (1) 测定变比。
- (2) 空载实验：测取空载特性 $U_0=f(I_0)$, $P_0=f(U_0)$, $\cos\varphi_0=f(U_0)$ 。
- (3) 短路实验：测取短路特性 $U_k=f(I_k)$, $P_k=f(I_k)$, $\cos\varphi_k=f(I_k)$ 。
- (4) 纯电阻负载实验：保持 $U_1=U_{1N}$, $\cos\varphi_2=1$ 的条件下，测取 $U_2=f(I_2)$ 。

四 实验设备及仪器

- (1) BMEL 系列电机系统教学实验台。
- (2) 交流电压表、电流表、功率、功率因数表。
- (3) 三相变压器，三相可调电阻器，开关板。

五 实验方法

1. 测定变比

实验线路如图 1-1 所示，变压器选用三相心式变压器，将调压器旋钮逆时针方向旋转到底，并合理选择各仪表量程。合上交流电源总开关，即按下绿色“闭合”开关，顺时针调节调压器旋钮，使变压器空载电压 $U_0=0.5U_N$ ，测取高、低压线圈的线电压 U_{AB} 、 U_{BC} 、 U_{CA} 、 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca} ，记录于表 1-1 中。

表 1-1 变比测量数据

U (V)		K_{AB}	U (V)		K_{BC}	U (V)		K_{CA}	$K=1/3 (K_{AB}+K_{BC}+K_{CA})$
U_{AB}	U_{ab}		U_{BC}	U_{bc}		U_{CA}	U_{ca}		

注 表中， $K_{AB}=U_{AB}/U_{ab}$, $K_{BC}=U_{BC}/U_{bc}$, $K_{CA}=U_{CA}/U_{ca}$ 。

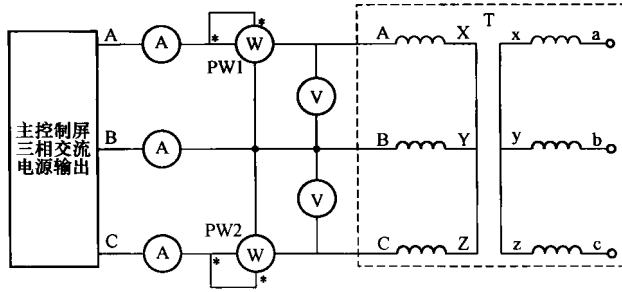


图 1-1 三相变压器开路实验接线图

2. 空载实验

一般来说，变压器的空载试验是在低压侧进行的，但由于实验室变压器电压等级低，容量小，变比不大，为了方便，变压器空载实验也可以在高压侧进行。实验线路如图 1-1 所示，A、V、W 分别为交流电流表、交流电压表、功率表，实验数据记录于表 1-2 中。功率表接线时，需注意电压线圈和电流线圈的同名端，避免接错线。

表 1-2

三相变压器空载实验数据

序号	实验数据							计算数据				
	U_0 (V)			I_0 (A)			P_0 (W)		U_0 (V)	I_0 (A)	P_0 (W)	$\cos\phi_0$
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_{A0}	I_{B0}	I_{C0}	P_{01}	P_{02}				
1												
2												
3												
4												
5												
6												
7												
8												
9												
10												

3. 短路实验

实验线路如图 1-2 所示，变压器高压线圈接电源，低压线圈 a、b、c 之间用两根线直接短路。

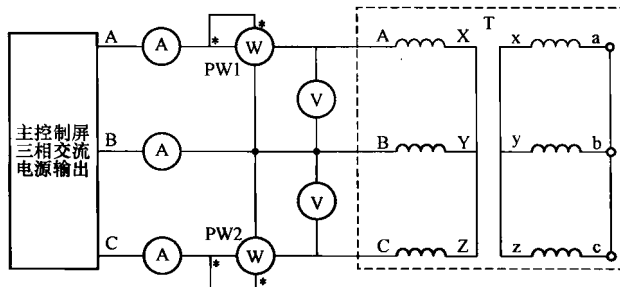


图 1-2 三相变压器短路实验接线图

接通电源前, 将交流电压调到输出电压为零的位置, 接通电源后, 逐渐增大电源电压, 达到 20V 左右, 使变压器的短路电流 $I_k=1.1I_N$ 。然后逐次降低电源电压, 在 $(1.1\sim 0.5)I_N$ 的范围内, 测取变压器的三相输入电压、电流及功率, 共取几组数据, 记录于表 1-3 中, 其中 $I_k=I_N$ 点必测。实验时, 记下周围环境温度 ($^{\circ}\text{C}$), 作为线圈的实际温度。

表 1-3 三相变压器短路实验数据 ($T=^{\circ}\text{C}$)

序号	实验数据								计算数据			
	U_k (V)			I_k (A)			P_k (W)		U_k (V)	I_k (A)	P_k (W)	$\cos\phi_k$
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C	P_{k1}	P_{k2}				
1												
2												
3												
4												
5												

4. 纯电阻负载实验

由于变压器高压侧额定电压为 380V, 低压侧电压只有 220V 左右, 所以负载实验在高压侧进行。实验线路如图 1-3 所示, 变压器一次侧接电源, 电源电压为 380V, 二次侧经开关 S 接三相负载电阻 R_L 。

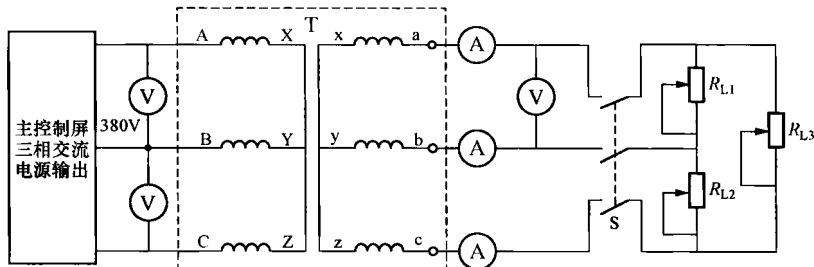


图 1-3 三相变压器负载实验接线图

(1) 将负载电阻 R_L 调至最大, 合上开关 S 接通电源, 调节交流电压, 使变压器的输入电压 $U_1=U_{1N}$ 。

(2) 在保持 $U_1=U_{1N}$ 的条件下, 逐次增加负载电流, 从空载到额定负载范围内, 测取变压器三相输出线电压和相电流, 共取几组数据, 记录于表 1-4 中, 其中 $I_2=0$ 和 $I_2=I_{2N}$ 两点必测。

表 1-4 $U_{AB}=U_{1N}=380\text{V}; \cos\phi_2=1$ 时的测量数据

序号	U (V)				I (A)			
	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_2	I_1	I_a	I_b	I_c
1								
2								
3								
4								
5								

注 表中, $I_1 = (I_a + I_b + I_c) / (3K)$ 。

六 注意事项

在三相变压器实验中，应注意电压表、电流表和功率表的合理布置。做短路实验时操作要快，否则线圈发热会引起电阻变化。

七 实验报告

1. 计算变压器的变比

根据实验数据，计算出各项的变比，然后取其平均值作为变压器的变比，即

$$K_{AB}=U_{AB}/U_{ab}, K_{BC}=U_{BC}/U_{bc}, K_{CA}=U_{CA}/U_{ca} \quad (1-1)$$

2. 根据空载实验数据作空载特性曲线并计算励磁参数

(1) 绘出空载特性曲线 $U_0=f(I_0)$, $P_0=f(U_0)$, $\cos\varphi_0=f(U_0)$ 。

式中

$$U_0=(U_{AB}+U_{BC}+U_{CA})/3 \quad (1-2)$$

$$I_0=(I_{A0}+I_{B0}+I_{C0})/3 \quad (1-3)$$

$$P_0=P_{01}+P_{02} \quad (1-4)$$

$$\cos\varphi_0=\frac{P_0}{\sqrt{3}U_0I_0} \quad (1-5)$$

(2) 计算励磁参数。从空载特性曲线查出对应于 $U_0=U_N$ 时的 I_0 和 P_0 值，并由式 (1-6) 求取励磁参数，即

$$r_m=\frac{P_0}{3I_0^2}, Z_m=\frac{U_0}{\sqrt{3}I_0}, X_m=\sqrt{Z_m^2-r_m^2} \quad (1-6)$$

3. 绘出短路特性曲线和计算短路参数

(1) 绘出短路特性曲线 $U_k=f(I_k)$, $P_k=f(I_k)$, $\cos\varphi_k=f(I_k)$ 。

式中

$$U_k=(U_{AB}+U_{BC}+U_{CA})/3 \quad (1-7)$$

$$I_k=(I_A+I_B+I_C)/3 \quad (1-8)$$

$$P_k=P_{k1}+P_{k2} \quad (1-9)$$

$$\cos\varphi_k=\frac{P_k}{\sqrt{3}U_kI_k} \quad (1-10)$$

(2) 计算短路参数。从短路特性曲线查出对应于 $I_k=I_N$ 时的 U_k 和 P_k 值，并由下式算出实验环境温度 $\theta^\circ\text{C}$ 时的短路参数

$$r'_k=\frac{P_k}{3I_N^2}, Z_k=\frac{U_k}{\sqrt{3}I_N}, X'_k=\sqrt{Z_k^2-r_k'^2} \quad (1-11)$$

折算到低压方

$$Z_k=\frac{Z'_k}{K^2}, r_k=\frac{r'_k}{K^2}, X_k=\frac{X'_k}{K^2} \quad (1-12)$$

换算到基准工作温度的短路参数为 $r_{k75^\circ\text{C}}$ 和 $Z_{k75^\circ\text{C}}$ ，计算出阻抗电压。

$$U_k=\frac{\sqrt{3}I_N Z_{k75^\circ\text{C}}}{U_N} \times 100\% \quad (1-13)$$

$$U_{kr} = \frac{\sqrt{3}I_N r_{k75^\circ\text{C}}}{U_N} \times 100\% \quad (1-14)$$

$$U_{kx} = \frac{\sqrt{3}I_N X_k}{U_N} \times 100\% \quad (1-15)$$

$I_k=I_N$ 时的短路损耗 $P_{kN}=3 I_N^2 r_{k75^\circ\text{C}}$ 。

4. 画等效电路

利用由空载和短路实验测定的参数，画出被试变压器的“Γ”型等效电路。

5. 变压器的电压变化率 ΔU

(1) 根据实验数据绘出 $\cos\varphi_2=1$ 时的特性曲线 $U_2=f(I_2)$ ，由特性曲线计算出 $I_2=I_{2N}$ 时的电压变化率 ΔU ，即

$$\Delta U = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \times 100\% \quad (1-16)$$

(2) 根据实验求出的参数，算出 $I_2=I_N$ ， $\cos\varphi_2=1$ 时的电压变化率 ΔU ，即

$$\Delta U = \beta(U_{kr} \cos\varphi_2 + U_{kx} \sin\varphi_2) \quad (1-17)$$

6. 绘出被试变压器的效率特性曲线

(1) 用间接法算出在 $\cos\varphi_2=0.8$ 时，不同负载电流时的变压器效率

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + I_2^2 P_{kN}}{I_2 P_N \cos\varphi_2 + P_0 + I_2^2 P_{kN}} \right) \times 100\% \quad (1-18)$$

式中： $I_2 P_N \cos\varphi_2 = P_2$ ， P_N 为变压器的额定容量； P_{kN} 为变压器 $I_k=I_N$ 时的短路损耗； P_0 为变压器的 $U_0=U_N$ 时的空载损耗。

变压器效率记录于表 1-5 中。

表 1-5 测量数据 ($\cos\varphi_2=0.8$, $P_0=$ W, $P_{kN}=$ W)

I_2	P_2 (W)	η
0.2		
0.4		
0.6		
0.8		
1.0		

(2) 计算被试变压器 $\eta=\eta_{\max}$ 时的负载系数 $\beta_m = \sqrt{\frac{P_0}{P_{kN}}}$ 。

1.3 变压器同名端测定实验

一 实验目的

- (1) 掌握实验设计的原理与方法。
- (2) 掌握用实验方法测定三相变压器绕组极性。
- (3) 掌握用实验方法判别变压器的连接组。

二 预习要点

(1) 什么是同名端？为什么要研究同名端？

(2) 按照实验项目要求，设计出各项实验方案。方案在实验前 2 周交任课教师审阅，并且在实验前实验方案必须得到教师同意。

(3) 设计实验方案时间由老师安排，班长或课代表首先将全班同学按 2 人一组分组，最多分成 24 组，每组同学共同完成方案设计和实验。设计实验方案时，可以与老师联系到实验室了解熟悉实验设备及仪器仪表；各小组间可以相互讨论，同时必须认真学习、查阅和研究相关理论，做到理论依据充分。初始方案作为评定本实验以及全部课程实验成绩的主要依据，各实验小组提交方案不得完全相同。

(4) 对连接组验证实验，操作步骤首先按不同组别分别拟订，待各组别实验方案全部完成后须进行优化，以保证在 2h 的时间内完成全部实验项目；实验数据记录表格按不同组别分别准备。

三 实验设备及仪器

(1) BMEL-II 系列电机系统教学实验台。

(2) 交流电压表，三相变压器。

四 实验项目及要求

(一) 标记绕组端头

1. 实验任务

一台三相双绕组心式变压器，其高、低压各绕组的 12 个端头已经引到 BMEL-II 系列电机系统教学实验台主控制屏上的接线板，但绕组接线端没有标记，如图 1-4 所示。试利用该实验台配备的设备和仪表，设计简单的实验方案，判断出这些端头所属的相并标出首、尾端字母，如图 1-5 所示。

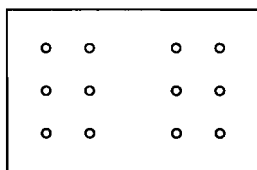


图 1-4 接线端无标记的变压器接线板

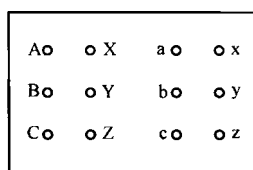


图 1-5 接线端有标记的变压器接线板

2. 实验要求

(1) 运用通电检查法，按照 BMEL-II 系列电机系统教学实验台画出实验接线图，并选择测量仪表的量程。

(2) 拟订实验操作步骤以及注意事项。

(3) 拟订实验记录表格。

(4) 按照拟订方案进行实验。

(5) 根据实验结果，将事先准备好的写有各相绕组首、尾端名称的标签贴在接线板上，供测定极性时使用。

(6) 绕组端头标注。为了表述方便，特别规定：①三相绕组按照 A、B、C 标注；②三相高、