

电气系统综合实验（下）

电力系统动态模拟实验

实验指导书

上海交通大学

电气工程实验教学中心

2021 年 9 月

电力系统调度自动化实验

一、实验目的

1. 了解电力系统自动化的遥测，遥信，遥控，遥调等功能。
2. 了解电力系统调度的自动化。

二、原理与说明

电力系统是由许多发电厂，输电线路和各种形式的负荷组成的。由于元件数量大，接线复杂，因而大大地增加了分析计算的复杂性。作为电力系统的调度和通信中心担负着整个电力网的调度任务，以实现电力系统的安全优质和经济运行的目标。随着微电子技术、计算机技术和通信技术的发展，综合自动化技术也得到迅速发展。

电网调度自动化是综合自动化的一部分，它只包括远动装置和调度主站系统，是用来监控整个电网运行状态的。为使调度人员统观全局，运筹全网，有效地指挥电网安全、稳定和经济运行，实现电网调度自动化已成为调度现代电网的重要手段，其作用主要有以下三个方面：

1、对电网安全运行状态实现监控

电网正常运行时，通过调度人员监视和控制电网的周波、电压、潮流、负荷与出力；主设备的位置状况及水、热能等方面的工况指标，使之符合规定，保证电能质量和用户计划用电、用水和用汽的要求。

2、对电网运行实现经济调度

在对电网实现安全监控的基础上，通过调度自动化的手段实现电网的经济调度，以达到降低损耗、节省能源，多发电、多供电的目的。

3、对电网运行实现安全分析和事故处理

导致电网发生故障或异常运行的因素非常复杂，且过程十分迅速，如不能及时预测、判断或处理不当，不但可能危及人身和设备安全，甚至会使电网瓦解崩溃，造成大面积停电，给国民经济带来严重损失。为此，必须增强调度自动化手段，实现电网运行的安全分析，提供事故处理对策和相应的监控手段，防止事故发生以便及时处理事故，避免或减少事故造成的重大损失。

二、电网调度自动化的基本内容

现代电网调度自动化所设计的内容范围很广，其基本内容如下：

1、运行监视

调度中心为了掌握电网正常运行工况、异常及事故状态，为了安全、经济调度和控制提供依据，必须对电网实现以保证安全运行为中心的运行监视，所以称为安全监视。按部颁有关法规、规程的要求和调度的需求，主要内容为：

网调、省调要监视电网的频率、电压、潮流、发电与负荷容量、电量、水情河水位等参数；监视断路器、隔离开关、带负荷调压变压器调压分接头以及发电机组等设备的自动调节装置的工作位置状态，主要保护河岸全自动装置的动作状态等信息。

地、县调和集控站运行监视的内容相对少一些，但对于大型的地调，所需的信息量仍然较多。

运行监视的内容通过屏幕显示、动态调度模拟屏、打印、拷贝、记录及绘图等多种手段完成。

2、经济调度

电网经济调度的任务是在满足运行安全和供电质量要求的条件下，尽可能提高电网运行的经济性，合理地利用现有能源和设备，以最少的燃料消耗（或费用、成本），保证安全发供电。

经济调度的各种内容，需要同运行监视、自动控制、安全分析密切结合才能付诸实施。

3、安全分析

进行安全分析是对电网在正常和异常运行的状态进行分析及对事故发生前的状态预测和事故发生后的状态分析，是保证电网安全稳定运行的重要内容。

当电网发生事故后，在实现事故顺序记录、事故追忆等功能的基础上，通过分析，跟踪事故的发展、参数的变化，保护和自动装置及断路器的动作情况，从而提出事故处理的对策，以达到缩短事故处理时间，防止事故扩大的目的。

在地区电网发生事故时，还可以通过对配电网的故障分析和实现在线预操作，及时处理事故，改善地区电网的安全运行水平。

此外，通过调度员的培训模拟，进行事故预想与事故演习，有效地提高调度人员运用调度自动化系统处理事故的临战能力。

4、自动控制

电网调度自动控制是在运行监视的基础上，对电网的安全与经济运行实施调节或控制。

控制信号自上而下发送给厂、所或下级调度。这类控制范围很广，但主要是对断路器及其它发送发变电设备，例如，发电机、调相机、带负荷调

压变压器、电力补偿设备等，通过调度人员实现遥控、遥调或自动实现相应的闭环控制或调节。

上述电网调度自动化基本内容是紧密相关的，不论哪一级调度中心都必须以实现电网的全面运行监视为前提，根据各自的特点和需要，积极充实完善，以达到实现电网调度自动化的目的。

三、 电网调度自动化的基本功能

1、 数据采集与安全监控（SCADA）

它主要包括：通过远动系统实现数据采集；通过计算机系统实现数据处理与存储；通过人机联系系统中的屏幕显示（CRT）与动态调度模拟屏，对电网的运行工况实现在线监视，并具有打印制表、越限报警、模拟量记录、事件顺序记录、事故追忆、画面拷贝、系统自检及远动通道质量监测功能。在实现监视的基础上，通过计算机、远动与人机联系系统，对断路器、发电机组与调相机组、带负荷调压变压器、补偿设施等实现遥控与遥调，以及发送时钟等指令。

2、 自动发电控制（AGC）和经济调度控制（EDC）

它们是对电网安全经济运行实现闭环控制的重要功能。在对电网频率调整的同时，实现经济调度控制，直接控制到各调频电厂，并计入线损修正，实现对互联电网联络线净功率频率偏移控制；对于非调频厂，则按日负荷曲线运行；对于有条件的电厂还应实现自动电压和无功功率控制（AVC）。

3、 安全分析与对策（SA）

在实现网络结构分析和状态估计的条件下进行的实时潮流计算和安全状态分析。

四、 电网调度自动化系统的基本组成

电网调度自动化系统由调度主站（调度中心）、厂站端、通信三大部分组成，但按其功能可分为：

1、 数据与信息的采集系统：

前置机、远动终端、调制解调器、变送器。

2、 数据与信息的处理系统：

主控计算机、外存储器、输入输出设备、计算机信道接口。

3、 数据与信息的传输系统：

主站与厂站通信：有线、载波、光纤、短波、微波及卫星地面站。

主站与主站通信：有线、光纤、微波及卫星地面站。

4、 人机联系系统：

彩色屏幕显示器、打印机、拷贝机、记录仪表、绘图机、调度模拟屏、调度台。

5、 监控对象的相关系统：

发电机组的成组自动操作与功率自动调节装置、机炉协调控制器、带负荷调压变压器分接头、电压与电流互感器、断路器的控制与信号回路、继电保护与按全自动装置的出口信号回路。

6、 不停电电源系统：

交一直流整流器、直—交流逆变器、配套的直流蓄电池组。

7、 安全环保系统：

防雷与接地、防火与灭火、防电磁干扰与防静电干扰、防噪声与防震、空调与净化、防盗与防鼠。

五、电网调度自动化系统结构及组成

1. 主/备前置通讯机

通讯前置机负责数据采集、规约解释、数据处理以及接收并处理系统的控制命令。

2. 主/备服务器

服务器存放整个系统的实时数据、历史数据及应用数据，为主/备前置通讯机、调度员工作站、后台工作站提供数据库服务，充当应用服务器。服务器另外对各工作站的工作状态进行监控,管理计算机网络设备和 SCADA 系统终端设备(如打印机、显示器、投影仪等),监控系统的任务进程，提供事件/事故报警，监视网络通讯等。

3. WEB 浏览服务器

本系统中配置 WEB 服务器提供 WEB 主页实时画面公布。这种方式使得网上的工作站无需任何专用程序支持，使用 Windows 内置的 IE 浏览器即可浏览实时数据。

4. 系统时钟同步（GPS）

接收全球定位系统（GPS）的时间作为系统的标准时间和系统频率，完成系统的时钟统一。

网络系统内时钟同步：

GPS 时钟通过主备数采机接入 SCADA 系统。系统以数采机时钟为标准时钟，采用系统提供的校时功能完成网络各节点间的时钟同步。数采机支持识别 GPS 时钟故障，防止误接收，并能产生报警。

与 RTU 时钟同步：

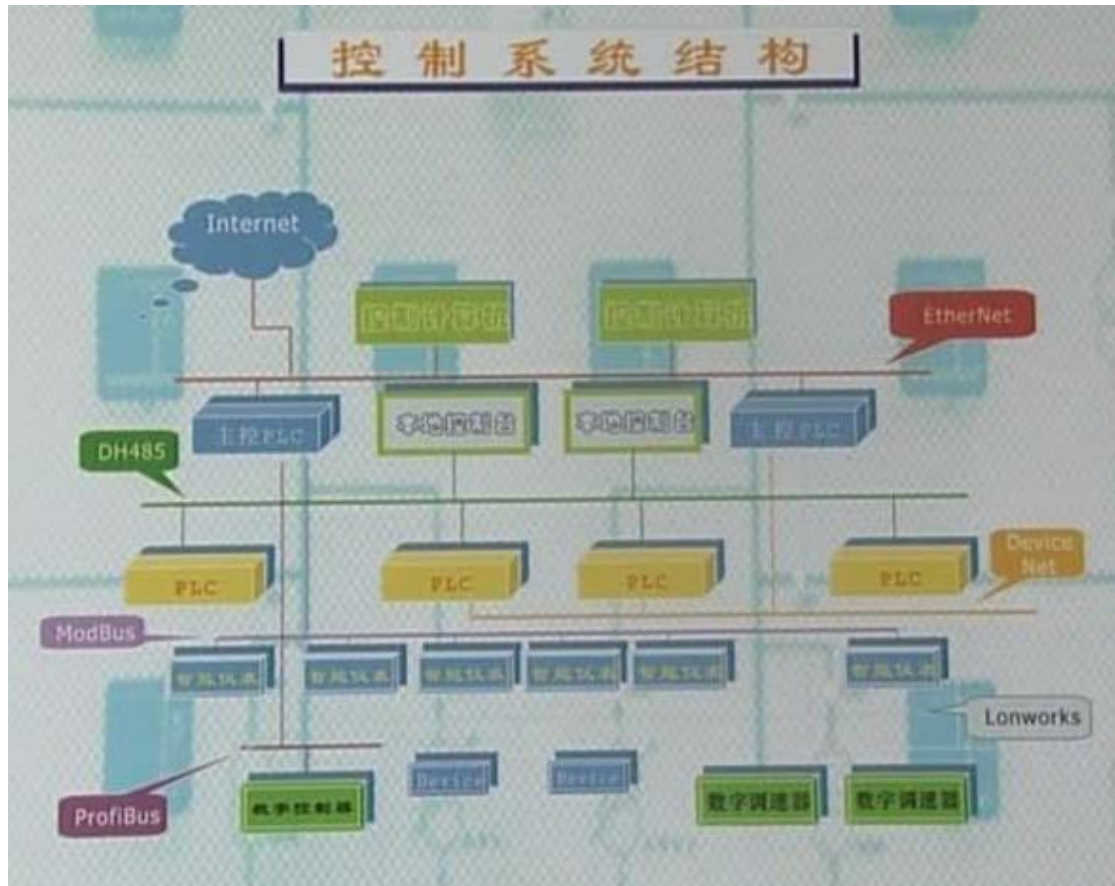
通过数采机与 RTU 通讯的方式校时，完成主站系统与 RTU 时钟同步。

5. Nport 通讯服务器

Nport Server 又称多串口网络通讯服务器，支持 TCP/IP 协议，可直接挂接在网络上，相当于网络组中的一员，便于主/备前置机的切换。它完全替

代了以往的通道控制板和串行通道板。并且，该设备支持多种编程语言，操作及其简便。

具体实际应用如下图所示：



“PS-5G 型电力系统微机监控实验台”相当于电力系统的调度和通信中心。针对五个发电厂的安全、合理分配和经济运行进行调度，针对电力网的有功功率进行频率调整，针对电力网的无功功率的合理补偿和分配进行电压调整。

微机监控实验台对电力网的输电线路、联络变压器、负荷全采用了微机型的标准电力监测仪，可以现地显示各支路的所有电气量。开关量的输入、输出则通过可编程控制器来实现控制，并且各监测仪和 PLC 通过 RS-485 通信口与上位机相联，实时显示电力系统的运行状况。

所有常规监视和操作除在现地进行外，均可以在远方的监控系统上完成，计算机屏幕显示整个电力系统的主接线的开关状态和潮流分布，通过画面切换可以显示每台发电机的运行状况，包括励磁电流、励磁电压、通过鼠标的点击，可远方投、切线路或负荷，还可以通过鼠标的操作增、减有功或无功功率，实现电力系统自动化的遥测、遥信、遥控、遥调等功能。运行中可以

打印实验接线图、潮流分布图、报警信息、数据表格以及历史记录等。

四、实验报告要求

1. 调度自动化常用的通信协议(或规约)及控制总线有哪几种?
2. 详细说明各种实验方案和实验步骤。
3. 比较各项的实验数据, 分析其产生的原因。

五、思考题

1. 电力系统无功功率补偿有哪些措施? 为了保证电压质量采取了哪些调压手段?
2. 何为发电机的一次调频、二次调频?
3. 电力系统经济运行的基本要求是什么?

复杂电力系统运行方式实验

一、实验目的

1. 了解和掌握对称稳定情况下, 输电系统的网络结构和各种运行状态与运行参数值变化范围。
2. 理论计算和实验分析, 掌握电力系统潮流分布的概念。
3. 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相结合, 提高学生的感性认识。

二、原理与说明

现代电力系统电压等级越来越高, 系统容量越来越大, 网络结构也越来越复杂。仅用单机对无穷大系统模型来研究电力系统, 不能全面反映电力系统物理特性, 如网络结构的变化, 潮流分布, 多台发电机并列运行等等。

“PS-5G 型电力系统微机监控实验台”是将五台“WDT-III C 型电力系统综合自动化实验台”的发电机组及其控制设备作为各个电源单元组成一个可变环型网络, 如图 4 所示:

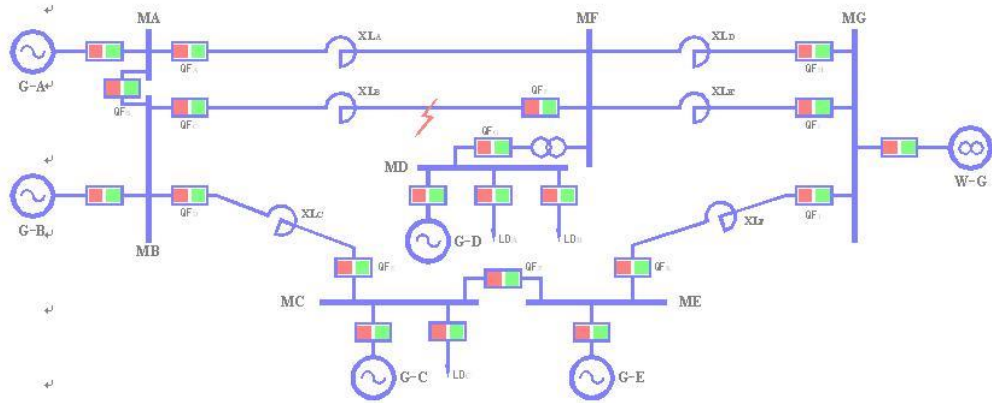


图 4 多机系统网络结构图

此电力系统主网按 500kV 电压等级来模拟，MD 母线为 220kV 电压等级，每台发电机按 600MW 机组来模拟，无穷大电源短路容量为 6000MVA。

A 站、B 站相联通过双回 400km 长距离线路将功率送入无穷大系统，也可将母联断开分别输送功率。在距离 100km 的中间站的母线 MF 经联络变压器与 220kV 母线 MD 相联，D 站在轻负荷时向系统输送功率，而当重负荷时则从系统吸收功率（当两组大小不同的 A，B 负荷同时投入时）从而改变潮流方向。

C 站，一方面经 70km 短距离线路与 B 站相联，另一方面与 E 站并联经 200km 中距离线路与无穷大母线 MG 相联，本站还有地方负荷。

此电力网是具有多个节点的环形电力网，通过投切线路，能灵活的改变接线方式，如切除 XLC 线路，电力网则变成了一个辐射形网络，如切除 XLF 线路，则 C 站、E 站要经过长距离线路向系统输送功率，如 XLC、XLF 线路都断开，则电力网变成了 T 型网络等等。

在不改变网络主结构前提下，通过分别改变发电机有功、无功来改变潮流的分布，可以通过投、切负荷改变电力网潮流的分布，也可以将双回路线改为单回路线输送来改变电力网潮流的分布，还可以调整无穷大母线电压来改变电力网潮流的分布。

在不同的网络结构前提下，针对 XLB 线路的三相故障，可进行故障计算分析实验，此时当线路故障时其两端的线路开关 QFC、QFF 跳开（开关跳闸时间可整定）。

三、实验项目与方法

1. 网络结构变化对系统潮流的影响

在相同的运行条件下，即各发电机的运行参数保持不变，改变网络结构，观察并记录系统中运行参数的变化，并将结果加以比较和分析。

实验方案同学们自己设计，并记录下各开关状态。

表 7-1

网络结构变化

前

	G-A	G-B	G-C	G-D	G-E	MC	MD
U							
I							
P							
Q							
COSØ							

	QFA	QFC	QFD	QFG	QFH	QFI	QFJ
U							
I							
P							
Q							
COSØ							

表 7-2

网络结构变化后

	G-A	G-B	G-C	G-D	G-E	MC	MD
U							
I							
P							
Q							
COSØ							

	QFA	QFC	QFD	QFG	QFH	QFI	QFJ
U							
I							
P							
Q							
COSØ							

2. 投、切负荷对系统潮流的影响

在相同的网络结构下各发电机向系统输送一定负荷，投入各地方负荷 LD_A 、 LD_B 和 LD_C 。观察并记录系统中运行参数的变化并将结果加以分析和比较。

网络结构和各发电机输出功率大小由同学们自己设计，并记录下各开关状态。

表 7-3

投地方负荷前

	G-A	G-B	G-C	G-D	G-E	MC	MD
U							
I							
P							
Q							
COSØ							

	QFA	QFC	QFD	QFG	QFH	QFI	QFJ
U							
I							
P							
Q							
COSØ							

表 7-4

投地方负荷后

	G-A	G-B	G-C	G-D	G-E	MC	MD
U							

I							
P							
Q							
COSØ							

	QFA	QFC	QF D	QF G	QFH	QFI	QFJ
U							
I							
P							
Q							
COSØ							

注：LD_A 负荷的性质可以通过台后三刀三掷开关切换。即纯电阻负荷，感性负荷，纯电感负荷。

3. 短路对电力系统暂态稳定的影响

同学们自己设计网络结构，发电机运行参数以及切除故障线路的保护动作时间，分析比较实验结果。

注意：在此多机电力系统中，三相短路时故障电流很大，故线路保护动作时间整定在 0.1 ~ 0.3 秒以内。

四、实验报告要求

1. 整理实验数据，分析比较网络结构的变化和地方负荷投，切对潮流分布的影响，并对实验结果进行理论分析

五、思考题

1. 合母联开关需满足哪些条件？
2. 系统构成环网运行时的联络线选择根据什么原则选定？

变电站继电保护设计综合实验

变电站是电力系统的重要组成部分，它直接影响整个电力系统的安全与经济运行，是联系发电厂和用户的中间环节，起着变换和分配电能的作用。

随着微机保护装置的应用普及，继电保护二次系统的自动化水平得到不断提高。许多由人工处理的模拟信息转化为大量的数字信息，通过综合分析数据，进一步保障系统安全运行。了解变电站保护的基本配置(变压器保护与出线保护)

变电站继电保护的作用如下：

变配电站继电保护能够在变配电站运行过程中发生故障，迅速有选择性发出跳闸命令将故障切除或发出报警，从而减少故障造成的停电范围和电气设备的损坏程度，保证电力系统稳定运行。

变电站继电保护的基本工作原理：

变配电站继电保护是根据变配电站运行过程中发生故障时出现的电流增加、电压升高或降低、等现象超过继电保护的整定值（给定值）或超限值后，在整定时间内，有选择的发出跳闸命令或报警信号。

变电站继电保护按保护性质分类

- (1) 电流速断保护
- (2) 电流延时速断保护
- (3) 过电流保护
- (4) 过电压保护
- (5) 低电压保护
- (6) 低周波减载
- (7) 单相接地保护
- (8) 差动保护
- (9) 距离保护
- (10) 方向保护
- (11) 高频保护
- (12) 过负荷
- (13) 瓦斯保护
- (14) 温度保护
- (15) 主保护
- (16) 后备保护
- (17) 辅助保护
- (18) 互感器二次线路断线报警
- (19) 跳闸回路断线
- (20) 自动重合闸
- (21) 备用电源互投
- (22) 同期并列与解列

变电站继电保护按被保护对象分类

（1）发电机保护

发电机保护有定子绕组相间短路，定子绕组接地，定子绕组匝间短路，发电机外部短路，对称过负荷，定子绕组过电压，励磁回路一点及两点接地，失磁故障等。出口方式为停机，解列，缩小故障影响范围和发出信号。

（2）电力变压器保护

电力变压器保护有绕组及其引出线相间短路，中性点直接接地侧单相短路，绕组匝间短路，外部短路引起的过电流，中性点直接接地电力网中外部接地短路引起的过电流及中性点过电压、过负荷，油面降低，变压器温度升高，油箱压力升高或冷却系统故障。

（3）线路保护

线路保护根据电压等级不同，电网中性点接地方式不同，输电线路以及电缆或架空线长度不同，分别有：相间短路、单相接地短路、单相接地、过负荷等。

（4）母线保护

发电厂和重要变电所的母线应装设专用母线保护。

（5）电力电容器保护

电力电容器有电容器内部故障及其引出线短路，电容器组和断路器之

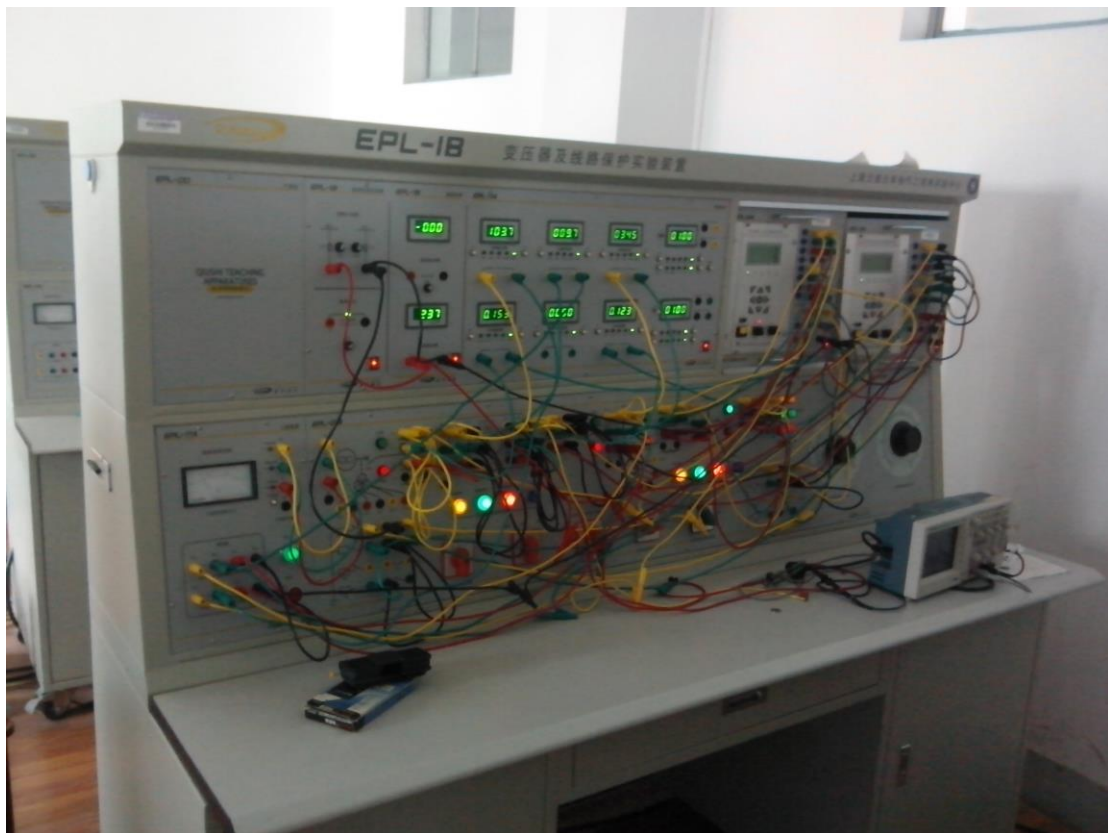
间连接线短路，电容器组中某一

故障电容切除后引起的过电压、电容器组过电压，所连接的母线失压。

（6）高压电动机保护

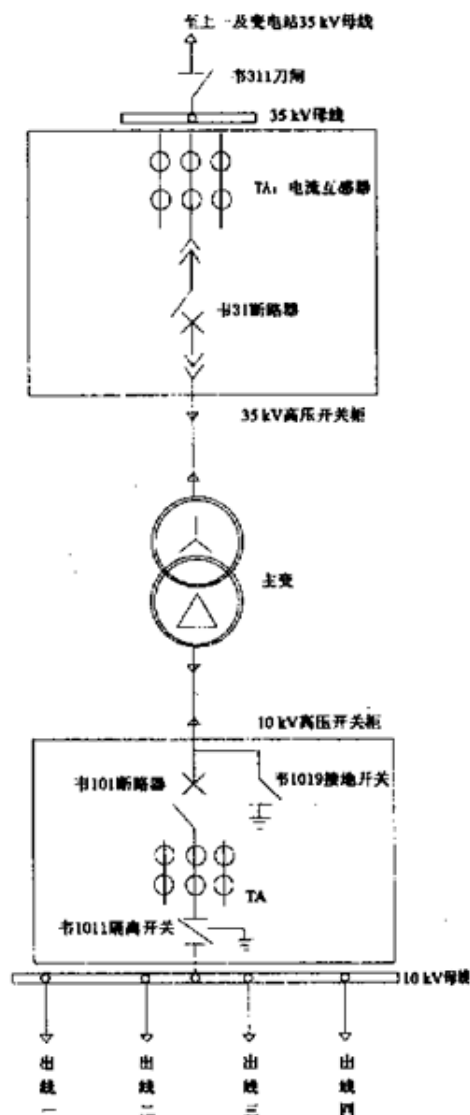
高压电动机有定子绕组相间短路、定子绕组单相接地、定子绕组过负荷、定子绕组低电压、同步电动

机失步、同步电动机失磁、同步电动机出现非同步冲击电流。



根据以往所学过并掌握的知识自己搭建一个基本的变电站保护电路
(变压器保护与出线保护)进行分析研讨(如下图)

35 kV隔离开关 GW ₅ -35GD/630	
高压开关柜: KYN10/40.5	电流互感器: LCZ-35
	开关型号: ZN23-40.5
35 kV高压电缆 YJV22-35/3×50	
S ⁹ -1250/35 1250 kVA 35/10.5 kV U _{10.5} =6.5 Y, d ₁₁	
10 kV高压电缆 YJV-3×70	
10 kV高压开关柜: XGN1-10	接地开关: JN-10
	真空断路器: ZN28A-10/630-20 kA
	电流互感器 LZZJ-10
	旋转式隔离开关 GN30-10
10 kV出线高压断路器 柜 (4台同型号 : XGN2)	



要求:哪里发生故障必须由相应的保护动作,而不应出现拒跳或越级跳闸的现象造成事故扩大的重大后果.

实验要求:

1. 本次实验接线顺序 A 站始终在前 B 站始终在后,调节 A 站阻值发现流过 B 站的电流始终不变,为什么?试画图解释
2. 变压器差动实验若采用 Y / Δ -11 的方法高低压侧测得的线电压为 100/33, 现采用 Δ / Y-5, 则高低压侧测得的实测线电压为 100/100, 为什么?
3. 设计保护原理接线图:(包括监视表计的位置)
4. 对实验数据进行分析

上海交通大学

电力系统动态模拟设计任务书

所属课程:

课程代码: _____

面向专业: 电气系统自动化

学院(系): 电气工程系

实 验 室: 电气工程实验中心 代号: _____

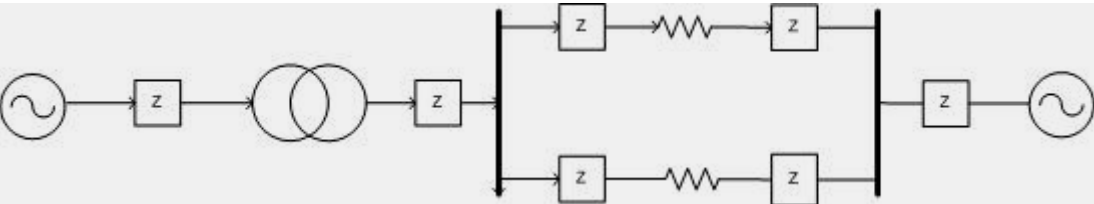
年 月 日

一、 设计目的

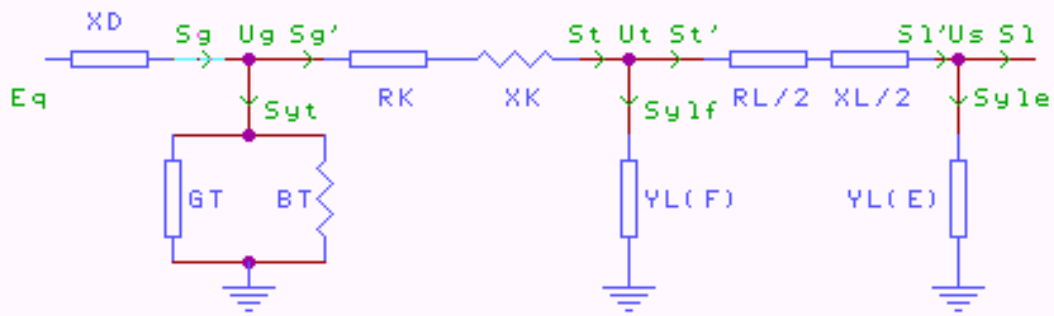
电力系统专业综合实验以电力系统动态模拟基本原理为依据，主要研究电力系统运行中的物理特性，能准确地再现电力系统运行中所出现的各种现象，以便本专业学生直观地了解电力系统运行的基本规律，掌握原型参数与模型参数之间的折算理论，通过课堂讲授、实验等环节使大四学生运用以往所学的专业基础知识在此得到充分全面地施展与应用。

二、 设计内容

1) 原、模型系统之间等值参数的建立并校验误差



参 数 类别	RT	XT	GT	BT	r _L	X _L	b _L	xd
原型								
模型								
误差								



2) 原、模型系统之间潮流计算并校验误差:

三、设计目标

按如下表格完成设计的最终目的

地点	类别	原型	模型	误差
	参数			
发电机侧	P			
	Q			
	U			
	δ			
变压器侧	P			
	Q			
	U			
	δ			
系统侧	P			
	Q			
	U			
	δ			

四、实验原理及原始计算数据、所应用的公式(如公式下标不清楚可直接用文字说明)

五、计算过程

六、对数据结果分析讨论：

七、原、模型参数

1 原型电力系统一些参数

1. G 发电机

QFS — 300S — 353 兆伏安， $V=18$ 千伏， $I=11320$ 安， $\cos\theta=0.85$ ， $X_d=2.264$ ， $X_d'=0.269$ $X_d''=0.199$ ，

2. T 变压器

SSP—360000/220, $S_e=360$ 兆伏安, $Y_o/\Delta-11$

$V=236\pm 2\times 2.5\%/18$ 千伏, $U_k\%=13.55$, $\Delta P_k=1259.1$ 千瓦,

$\Delta P_o=203.5$ 千瓦, $I_o\%=0.319$

3. L 输电线路

LLJJQ—400 壹百公里阻抗 $r=8\Omega$, $x=41\Omega$, $b=280\times\exp-6$ S

动模实验室匹配的设备

1. 模拟发电机铭牌参数: $s_e=15$ KVA, $u_e=230$ V, Δ 接法, $x_d=1.67$
 $T'd_o=1.8''$
2. 模拟变压器: 三台单相 5 KVA 构成一组三相 15KVA 变压器 (参数可调) $\Delta P_k=96$ 瓦 $\Delta P_o=97.2$ 瓦 $I_o\%=1.688$
3. 模拟线路: 220KV 的等值模拟线路 (参数可调)

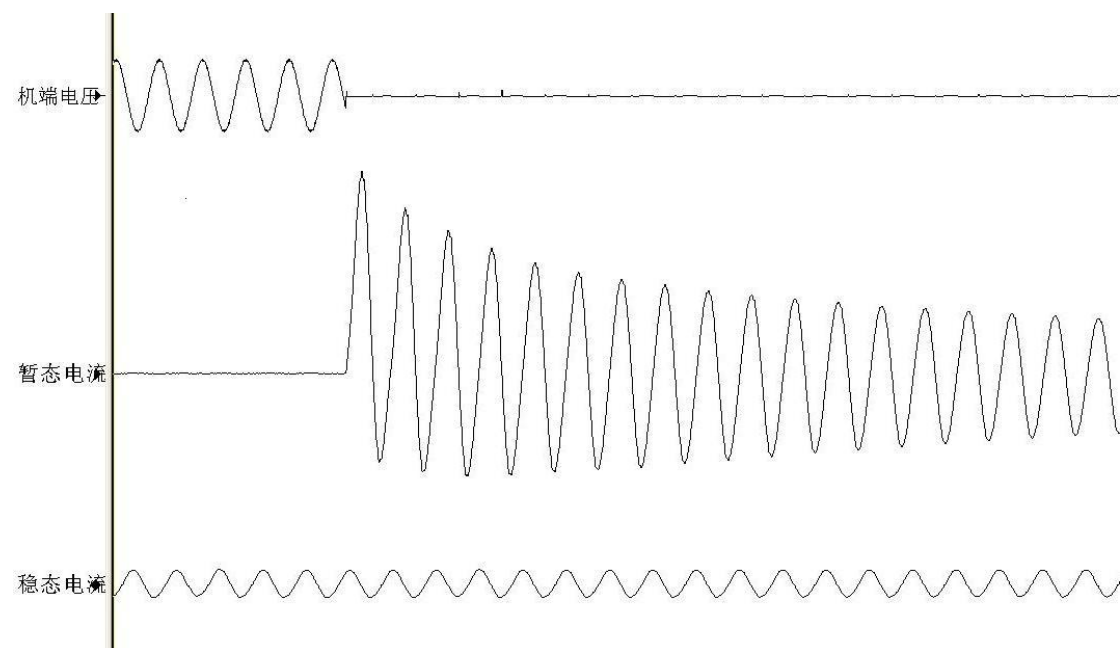
八、设计问答:

- 1) 简述建模基本原理(相似定理)及模拟比(m_s 、 m_u 、 m_z) 原型参数、模型参数(运行参数)、铭牌参数、标么值及线路平均额定电压的基本定义。
- 2) 在建模及潮流校合实验中, 已知原型的阻抗基准 $Z_J=(U_T*U_T)/S_G$ 模型的阻抗基准 $Z_j=(U_t*U_t)/S_g$ 在容量比 $M_s=S_G/S_g$ 电压比 $M_u=U_T/U_t$ 及阻抗比 $M_z=1$ 为确定的条件下,证明原型的阻抗基准 Z_J 和模型的阻抗基准 Z_j 数值相等.

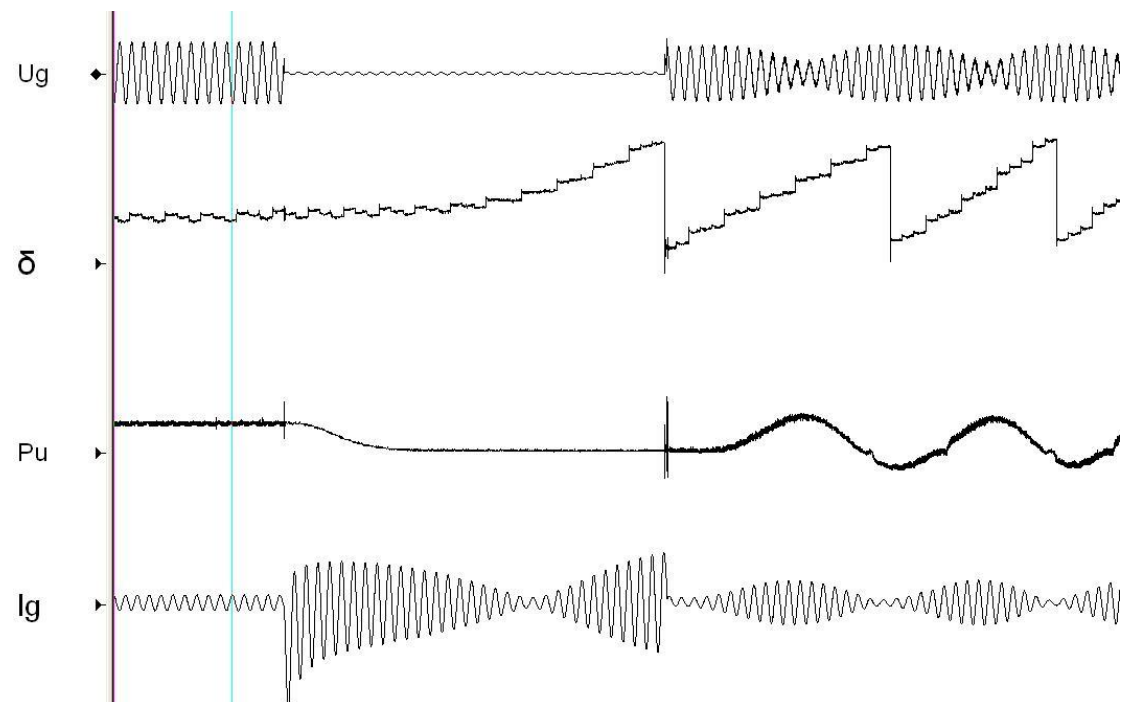
--

系统动态参数波形

1. 发电机机端短路 U、I 的暂态波形



2. 系统故障暂态失稳



3. 系统低频振荡

