

发电机失步预测保护

电力系统及其自动化专业研究生 邓 志 指导教师 王维俭

远离系统的发电机和电厂，由于联系薄弱受到干扰后易发生失步故障，为有效地提高电力系统的稳定性，国内外已研制出各种类型的失步预测保护，这类保护能够在发电机失步之前发出失步的预告，为采取必要的稳定措施赢得较多的时间，早期的失步预测保护采用的失步判据过于简单，使动作边界和实际稳定边界相差较远，因而拒动或误动的可能性很大。83年，国外提出了以李亚普诺夫直接法为基础的发电机失步预测保护，直接法由于采用了比较复杂的判据，因而比以往的失步预测保护具有较小的误动可能性。但由于直接法固有的保守性，该保护仍存在一定的误动范围，影响了直接法作为失步预测保护的实际应用。为最大限度地减小直接法的保守性，从李亚普诺夫能量函数入手，在用 EMA 推导系统的能量函数时，摒弃以往的折线式的积分路径，结合系统的仿真结果，采用实际的稳定边界作为积分路径，得到了新的李亚普诺夫能量函数：

$$V(x_1, x_2) = \frac{1}{2} M \dot{x}_1^2 - P_m x_1 + P_{\max} [\cos \delta_{ss} - \cos(x_1 + \delta_{ss})] + \int_0^{(x_1, x_2)} D x_2 dx_1$$

其中：M、D 分别为发电机转动惯量和阻尼系数

$x_1 = \delta - \delta_{ss}$ 是发电机功角偏离平衡点的量

$x_2 = \dot{\delta}$ 是发电机转子的滑差，

$P_m, P_{\max}$ 分别是发电机机械功率和极限功率。

新的能量函数比以前的多了一项 $\int_0^{(x_1, x_2)} D x_2 dx_1$ 的与阻尼有关的积分量，它代表了发电机在运动过程中的损耗，由于这个量的引入，使得直接法构成的失步预测保护的動作边界和实际稳定边界十分接近，因而具有最小的保守性和误动可能性。

以上保护原理用微机实现，计算机采入发电机端的线电压 U_{ab}, U_{bc} ，线电流 I_a, I_b ，测速齿轮的信号。通过富氏变换，由 U_{ab}, U_{bc}, I_a, I_b 的采样值得求发电机的电压，电流的相量。这些量用于计算发电机的工况： $P_m, P_{\max}, \delta_0$ 等。这些量在故障后被当作常量用来计算李亚普诺夫函数值，要求较高，程序中采用去两头取中间求平均的方法来消除随机误差可能带来的影响。通过处理发电机测速齿轮的信号，得到发电机转子的频率，和转子的加速度值，当加速度值大于某一标准时，说明发电机受到干扰进入暂态运行，这时启动故障计算程序，在这个程序中不断计算发电机的能量函数值 V_K ，当 V_K 大于临界能量 b 时，认为发电机即将失步，发出失步的预告。

该保护经动模实验检验达到预期的要求，现正着手将该保护移植于单板上以满足实际生产的需要。

答辩日期：1988年11月11日

保护装置交流定值巡检的引进消化和微机化

电力系统及其自动化专业研究生 葛荣尚 指导教师 王维俭

电力系统继电保护装置已经从过去的电磁型、整流型发展到晶体管型和集成电路型（近年来又出现了微机型）。这些新型保护装置的性能比旧式保护有显著提高。但是组成晶体管和集成电路型保护的半导体元器件的抗干扰能力有限，易损坏，使保护系统的可靠性有所降低。为解决这个问题，需要定期对保护装置进行测试，以及时发现那些已经损坏而不能正常工作的保护，并使之退出运行进行维修。这部分工作一直是人工进行的。但是，人工测试由于工作量太大，容易出错等原因，测试周期较长，不足以及时发现有故障的保护。因此，人们迫切希望有一种自动测试装置，用以随时在线测试继电保护装置的好坏。微机自动巡检装置正是应这种实际需要而研制的。

微机自动巡回检测装置由 TP-801 型单板计算机和其它一些自制的硬件、软件构成，包括高精度数据采集和处理系统，高精度全软件控制的三相交流测试信号发生器，光电隔离系统以及实时时钟等。

数据采集系统可同时采样 4 路交流信号或 3 路交流加 1 路直流，每周期内每路信号采样 64 个点（基波）。采样数据用准同步递推方法处理成信号有效值、功率、阻抗等数值。准同步方法在软件处理上消除了由于定时不准而无法实现严格同步采样所带来的误差。采样系统的实测精度优于 0.5%。

交流测试信号发生器包括 3 路交流和 1 路直流输出。这 4 路信号的所有参数均可完全用软件控制（即程控）。这些参数包括：4 路信号各自的幅值；交流信号的频率；交流信号之间的相位差等。并可控制一开关使第 2 或第 3 路交流信号叠加到第 1 路上。3 路交流信号的频率可以不同，但它们都是基波的整数倍。频率控制精度为 0.25Hz（在 50Hz 附近），相位控制精度为 1° ，而幅值控制精度实测优于 0.5%（当输出 $\geq 0.1V$ 时）。

光电隔离系统的作用是传送计算机系统和被测保护之间的控制及状态信号，并使两者在电气上完全隔离开来，以防止外部强电干扰信号对计算机带来不利影响。

实时时钟系统可提供准确的测试定时以及精确测量保护装置的动作时间（分辨率为 0.1ms）。

对继电保护进行测试的全过程由计算机自动完成，即：先把保护出口断开，在输入端加上测试信号，对保护动作值及动作时间进行测试，测试完成后自动撤消测试信号，并恢复保护的出口。测试结果可随时打印或显示出来。可测试发变机组的全部集成电路型保护。

微机自动巡检装置的功能远超过近年引进的 BBC 公司生产的 GSZ-1000 型集成电路自动巡检装置，它可取代继电保护的定期人工测试。

答辩日期：1988 年 12 月 6 日

提高发电机全过程稳定性的计算机在线控制

电力系统及其自动化专业研究生 王永强 指导教师 刘 取

自动控制提高电力系统稳定性是非常有效而经济的措施,但目前在发电机上使用的控制都是按发电机全过程中的个别阶段设计的。本文综合了现有的几种控制措施,提出了发电机全过程稳定性控制的构想及方案,用计算机在线控制加以实现,并在动态模拟实验室进行实验验证了其可行性和有效性。

本文提出的发电机全过程稳定性控制包括小干扰稳定控制提高静态稳定性,大干扰下的控制提高暂态稳定性及发电机失步以后的再同期控制。本文对多种方案进行了比较,选择了简单实用的控制方案,编制了应用于发电机全过程的计算机在线稳定控制程序。在硬件构成上初步解决了信号传送及控制隔离的问题,尽可能地简化了控制设备,充分考虑了计算机本身的特点和进一步开发的可能性,为今后发电机的计算机在线综合控制设备的研制打下了良好基础。

本文的计算机在线控制用 PDP-11 计算机实现,程序用 FORTRAN 语言编制。动模实验结果表明:本文完成的计算机在线控制可以提高发电机的静态稳定性和静稳极限,有效地改善阻尼;在大干扰后的暂态,该控制可以显著地提高暂态稳定性,使得受发电机暂态稳定性限制的极限传输功率加大,极限切除时间延长;该控制在实验室进行的再同期实验也非常成功,对于发电机遭受大干扰后第一摆失步和后续摆动失步都很有效。控制程序还包括用计算机采样和计算的点制做的动态过程录波图,可以很方便地显示动态过程中各量的变化情况。此外,本文对再同期方案进行了进一步的探讨,在实验的基础上提出了一种能适用于多机系统的方法,从而使本文在单机系统上完成的发电机全过程计算机在线稳定控制能够很方便地推广到多机系统。

本文提出的控制方案与被控系统的数学模型基本无关,一定程度上带有人工智能的成分。该方案是针对发电机本身的物理过程提出的,因而受发电机运行参数变化的影响也比较小;此外,计算机在线控制使得对控制装置的参数进行闭环的在线调整成为可能,这就使得该控制方案可以有很好的鲁棒性和适应性,基本上不受发电机运行点变化的影响。此外,本文在选择小干扰稳定控制方案时,从现代控制理论的角度对励磁调节器的设计方法进行了探讨,提出从现代控制理论角度来看,现有的励磁调节装置,最优励磁控制器、电力系统稳定器和状态仿真最优控制在理论上有所相通之处,可以在一定范围内等价,提出了用极点配置法来设计励磁调节装置的方法并在计算机上进行仿真计算证实了其可行性。

答辩日期:1988 年 12 月 8 日

大规模输电网长期扩建规划——临界可行 结构匹配动态规划法

电力系统及其自动化专业研究生 王晓波 指导教师 韩英铎

输电网规划是电力系统规划设计的一个重要内容。输电网长期规划的任务是决定何时、何地、建设何种输电设施，其目标是以最省的投资获得最经济、最可靠的扩建方案。所得到的扩建网络应满足技术、经济、环境、政治等诸约束条件。输电网长期规划具有多目标性、不确定性、非线性性、整数性和多阶段性等特点，它是一个很复杂的工程问题和数学问题。

输电网规划的研究分为单阶段的静态规划和多阶段的动态规划。对于后者，以往的规划方法主要有两类：一类是逐年规划法，另一类是分枝定界动态规划法。逐年规划法在原理上比较粗糙，实际上是静态规划的简单串联，并没有全局寻优，因此难以保证得到较好的效果。分枝定界法在模型和方法上比较严格，理论上可以得到问题的最优解，但是计算工作量巨大，计算时间太长，所以很难实用。

本文针对输电网的特点，提出了临界可行的概念和相应的匹配算法，并在此基础上提出用“临界可行结构匹配法”来进行多阶段的动态规划，求动态投资费用最小的扩建方案，运行费用在此之后考虑。方法是：先对各个阶段分别进行静态规划，找出所有的静态临界可行结构；然后进行动态规划，各阶段的临界可行结构之间进行匹配，得到动态决策，从中找出贴现后的费用最省的方案。这样做极大地减少了动态规划的 计算时间，而且绝大多数情况下可以得到问题的最优方案。另外，该方法还使得长期规划分为静态规划和动态规划前后分立而又有机结合的两个子任务。从工程意义上来看，静态规划是对各个阶段进行基本输电形态分析，动态规划是从全局上统筹考虑，将各阶段的方案进行协调。

临界可行性和匹配运算是输电网长期规划新颖的、重要的概念。计算实例表明，临界可行结构匹配法在工程实用上为大规模输电网的长期规划提供了行之有效的算法。可以认为，对于输电网动态整数规划既要避免“维数灾”、又要求得最优解这一长期未能很好解决的难题，本文的工作具有突破性的进展。

答辩日期：1988 年 12 月 10 日

水火联合电力系统短期优化调度

电力系统及其自动化专业研究生 王春燕 指导教师 相年德

本文综述了电力系统经济调度的历史和发展现状，总结了多年以来不断发展的几种优化方法，通过分析、比较并结合电力系统的特点和实际，确定了本论文的研究方法。

电力系统的经济调度,就是在满足系统负荷、满足运行约束的条件下,寻找一种系统运行方式,使得整个系统在此运行方式下所消耗的能量最少。经济调度应用的前提,是整个系统的总装机容量大于系统的总负荷容量。

本文优化的目标函数是整个系统火电发电费用最小,考虑了系统功率平衡,火电机组上下限,水电厂发电用水量上下限,水电厂功率上下限、水电站库容上下限、库容动态平衡等约束,计及了网损、水电厂水头的效益影响。系统模型以机组组合已知为前提。数学模型中,对火电厂微增率和水电厂 $P-Q$ 曲线均采用的是分段线性化模型。实践证明,这种模型不仅计算速度快,而且对实际情况有较好的适应性。在算法上,采用分解与协调的方法,将整个优化问题分解为水电子系统和火电子系统,对两个子系统分别寻优,通过火电系统微增率 $\lambda(t)$ 和火电剩余功率的协调达到全局最优。本文采用每调整一次水网修正一次 $\lambda(t)$ 的及时协调方法。火电子系统利用等微增率原则进行优化。在水火协调过程中,本文采用等值火电的方法,即将整个火电子系统等值为一条 $q-\lambda$ 曲线参加计算,这样不仅使机组检修、机组出力的上下限的处理变得十分简单,而且大大加快了水火协调的计算速度;水电子系统利用简化梯度法进行寻优,把简化梯度法应用于网络理论上求解水电子系统,这在国内尚属首次。由于网流法计算简洁、速度快,根据梯级电站的特点,水网络采用了分级有序的方式排列节点及弧,这样,不仅简化了程序,而且加快了计算速度。故本文采用最小费用最大流法,求得一较优的初使可行解,并对该方法做了改进。由于水网络的弧之间不仅有电联系,而且有水的联系,为防止计算振荡,应采用一种全网寻优方法。简化梯度法对具有线性约束的非线性优化问题较有效,本文采用了为适用日调度的简化梯度法求得全局最优解。

通过对四水二火例的计算,证明本算法是正确的。根据东北电网实际情况,设计了实用的日调度程序。通过对实际数据的计算,效果令人满意。

答辩日期:1988年12月12日

电网扰动对发电机机轴的影响

电力系统及其自动化专业研究生 龙 燕 指导教师 王维俭

本文主要分析的是系统单相接地,单相断开,单相重合,永久性故障三相切除这一相继的系统扰动引起的电压、电流、电磁转矩的变化情况,为扭振的研究打下一定的基础。

本文采用的系统模型是单机对无穷大电网,线路为单回线。励磁调节系统的数学模型是一个二维的状态方程,速度调节系统的数学模型是一个四维的状态方程。考虑变压器两侧相位的转换,即推导出了变压器两侧电量的转换矩阵。

A 相接地发生在发电机侧变压器的输出端。用 $dq0$ 系统进行计算。已知无穷大电网侧的电压,列出线路上的三个电压方程以及 A 相电压为零的电压方程,再加上发电机本身关于励磁绕组和阻尼绕组的三个方程,共七个方程,通过边界条件,消去一些电

流量, 还有七个电流量, 用梯形法对其求解。从而可求得机端电压和电磁转矩的数值解。结果表明, 电磁转矩基本以 $2f$ 频率变化, 它的峰值较大, 对于不同转角位置的短路将产生不同的电磁转矩最大值, 而且电磁转矩的最大值并不一定发生在故障后的第一个周期内。0.15秒后 A 相跳开, 通过边界条件, 可把线路上的电压方程简化为一个二维方程, 再加上发电机本身的三个方程, 共五个方程, 消去一些电流量后, 还有五个电流量, 故可用梯形法求解。从而也可求得机端电压和电磁转矩的数值解, 结果表明, 电磁转矩仍基本上以 $2f$ 频率变化, 但由于定子电流的减小, 电磁转矩的峰值明显减小。0.1 秒后 A 相重合, 因故障为永久性故障, 所以, A 相重合后故障依然存在, 故 A 相重合的计算过程与 A 相接地的计算过程相同, 只是两者的初始值不一样。结果表明, 单相重合时合闸冲击电流较小, 所以, 对发生率较高的单相故障情况, 在故障消除后无需灭磁而可立即合闸并网。因故障为永久性故障, 故, 一段时间后, 三相全部断开, 此时三相电流为零值, 输出功率自然也为零值, 因而电磁转矩也为零值。

从动模实验获得的波形与计算获得的波形比较来看, 基本上能较好地符合, 证明本文采用的各数学模型和分析方法是可行的。

静测法是很实用的测电机参数的一种方法, 该方法简单、可行, 而且精确度也较高。

答辩日期: 1989 年 5 月 30 日

电力系统调度员培训仿真器教员支持功能的研制

电力系统及其自动化专业研究生 周 红 指导教师 顾永昌

电力系统调度员培训仿真器 (OTS) 是现代大电网培训调度员的行之有效的工具。国外研制 OTS 已有十余年的历史, 功能上日趋完善, 实现的手段也随着计算机技术的发展而日趋成熟。我国从事 OTS 方面的研究是近几年才开始的, 以实际系统为对象, 研制实用的仿真器尚属首次, 具有很大的经济意义和实用价值, 同时也有很大的学术价值。

设计研制 OTS 时, 技术上须保证三点:

- 真实性: 所使用的数学模型应能忠实地代表所仿真的电力系统的物理特性。
- 相同性: 培训中心与学员接触的介面与真实电力系统调度控制中心完全相同。
- 灵活性: 培训机要有灵活的支持功能。

OTS 在功能结构上可以划分为三块相对独立的部分, 即电力系统模型、控制中心模型和教员台。

本文重点探讨了 OTS 中教员台的培训支持功能的实现: 在培训前能够灵活地生成教员所需的教案。培训中一方面能监视电力系统的运行, 随时设置故障, 控制培训的进行; 另一方面, 能够充当下级调度或地方厂站值班员完成来自电话的学员的调度指令。在培训结束后, 还可以对学员的行为进行评估。本文除完成教员台支持培训的功能

外,还对事件的处理进行了研究,如开关的开关,发电机出力的调节,负荷的变更,变压器分接头的改变,电压的调节等。处理的结果将改变电力系统的状态,作用于电力系统模型。

按一定目的,在指定时间操作一次电力系统元件,称作发生一个事件。一组事件按一定主题组合在一起,构成一个教案。教员台培训支持功能实现的关键在于组织事件,本文所采用的方法是用统一的格式来表达电力系统常见的操作。每个事件既能全面地表达电力系统操作所需的对象的元件编号,操作后状态或变化量,又能设定该操作发生的时间,可分培训绝对时间、相对时间、相继事件及立即发生事件四种时间方式。

本文所开发的培训支持功能和各种电力系统操作的处理基本上满足了由数据库支持的多任务系统组成的调度培训仿真器的需要,成果是切实可行的。

答辩日期:1989年6月15日

石油钻机电气拖动控制系统的设计和实验研究

电力系统及其自动化专业研究生 陈益强 指导教师 陈寿孙

本文结合新型石油钻机电力驱动系统生产开发的实际工作,研究了由弱电力系统供电的可控整流拖动控制系统中的一些问题。

在现场调研和文献综述的基础上,首先用实验的方法研究了由柴油发电机组单独供电的新型石油钻机电力拖动系统中的谐波问题。指出该系统是个弱电力系统,主要表现在其电源的内电抗非常大,电源的有功容量与负荷相当。由于该弱电力系统的可控硅换流器交直流侧都没有安装滤波设备,系统的谐波问题非常严重。而一次系统的谐波信号会窜入二次系统,从而使控制系统不稳定。在控制系统设计中,由于采取了必要的滤波措施,有效地遏止了谐波窜入二次系统,系统能够稳定地控制和运行。同时也证明了二次系统不安装滤波设备这种运行方式是可行的。

文章还讨论了电流连续性问题。电流脉动以致出现断续,将会使电动机换向困难、损耗增加,温升、噪音都严重起来。虽然主回路没有安装平波电抗器,但通过选用串激电动机,其励磁绕组串在主回路内,大大地改善了电流波形。其最小连续平均电流为额定电流的1.814%,满足工业上的指标要求。

文章还提出并实现了新型的调速方法。常用的用测速电机测速的方法,虽然精度较高,但由于电动机运行环境比较恶劣、电机机轴的限制以及测速信号长距离传递易受电信号干扰等原因,不宜采用。所提出的速度模拟方案被证明信号取得方便,简单可靠。

文章还对几种不可逆的调速方案进行了比较。指出:双闭环控制方案能够充分地利用SCR换流系统、串激直流电动机的过载能力,实现起动的最佳过渡过程,具有最大扭矩限制的无级可调性,具有宽广的调速范围,能够很好地满足石油钻井工艺的要求。

最后,在小扰动法的基础上,推导了控制系统的数学模型。通过计算机辅助分析和动态模拟实验研究,讨论了双闭环控制的小扰动稳定问题、大干扰稳定问题以及系统控制的静态特性,并据此设计和实现了新型石油钻机电力拖动系统的控制系统。

答辩日期:1989年6月17日

电力系统调度培训仿真器负荷发电模型及其软件研究

电力系统及其自动化专业研究生 陈继红 指导教师 王世纛

随着现代电力系统的发展和日益复杂,电力系统调度员培训仿真器(OTS)日益成为培训系统人员的重要工具,并且对电力系统的安全运行发挥着日益重要的作用。近十年来,国外OTS的研制进展很快,各国电力公司自1977年以后相继装设了电力系统调度员培训仿真器或者具有研制OTS的经验。但在我国,OTS的研制和使用仍然是个空白。本文结合国外OTS的研制技术和我国电力系统的具体特点,提出了OTS中支持动态潮流计算的负荷发电模型,并编制了相应的软件,提出了本软件与OTS其它软件的接口关系。利用本软件本文给出了实例计算。

实际电力系统的负荷是时刻变化的,每天的负荷变化曲线都不一样。在电力系统的实时负荷数据不能被OTS直接使用的情况下,如何利用计算机和建立数学模型,仿真出不同日期的负荷曲线和培训中各变电所的实时负荷,是负荷模型和其软件要解决的主要问题。要真实地模拟不同日期的各种负荷曲线和一天中不同时刻的变电所实时负荷,是很不容易的,因为既不可能将一年365天每天各个时刻的变电所负荷输入到计算机中,负荷对时间的函数关系也没有一个简单的公式可循。但模拟电力系统的各种负荷工况是非常重要的,它为电力系统培训仿真设置了仿真环境。本文提出的负荷模型利用离线准备好的典型日负荷曲线、典型变电所负荷数据,和培训日期的季节特点及负荷水平,基本上模拟了不同培训日期的日负荷曲线和培训中各变电所的负荷变化,其软件为OTS的动态潮流计算提供了负荷数据。

实际系统中当负荷在低谷和高峰之间变化时,为保证电力的正常供应,发电机的出力应作相应调整,有些发电机要投入运行,有些发电机要退出运行。为保证能源的合理利用,洪水季节水电机组应优先承担负荷,火电机组用来调节高峰负荷。枯水季节火电机组应优先承担负荷,水电机组用作调峰。发电运行计划模型就是要根据日负荷曲线和该日期的季节特点,确定全天不参与负荷分配机组和参与负荷分配的机组投入退出顺序、出力变化顺序,并将某一时间下的负荷合理分配至各发电机承担。发电运行计划模型的最大困难就是它在各种负荷工况下所确定的发电机出力应使潮流计算收敛,线路功率和节点电压不能超限。本文提出的发电运行计划模型利用实际调度的基本原则,基本上解决了OTS中各发电机的合理组合和负荷的合理分配问题,其软件能够在各种负荷工况下,为动态潮流计算提供相应的发电机出力数据,并用将发电机节点设置成PV节点,离线准备多套PV节点电压和进行有功地区平衡校验的方法较好地解决了潮流

计算收敛和功率电压越限问题。

用上述软件对具有 400 个节点规模的东北电网进行实例计算, 结果表明, 该软件能够支持 OTS 的正常运行, 模拟基本符合实际。

答辩日期: 1989 年 6 月 27 日

电力系统调度员培训仿真器故障仿真之研究

电力系统及其自动化专业研究生 刘乐林 指导教师 倪以信

随着电网规模的不断扩大, 以及高度技术化和日益复杂化, 对运行人员的技能要求在不断提高, 以确保电力系统的高质量运行。以传统方式培训新老调度运行人员已不能满足实际需要, 这就促进了各类培训仿真器的开发和研制。

培训调度运行人员要解决的根本问题就是要使运行人员获得在正常情况、预警情况、事故情况和恢复情况下, 系统运行和操作经验, 在实际系统中要提供这样的培训机会是不可能的, 而调度员培训仿真器 (OTS) 能提供逼真的动态仿真, 起到与实际系统中培训几乎相等的效果, 又不影响电力系统的正常运行, 因此, OTS 在国外获得了广泛的应用, 并取得了令人满意的成果。

OTS 在我国属首创, 尤其是我国电网处在发展阶段中, 联系较弱, 自动监控系统不完备, 稳定问题突出, 而调度人员又大都缺乏事故处理经验, 不能及时、正确地处理一些紧急意外情况, 甚至会误处理而造成重大事故。由此可见, 为我国调度运行人员研制培训仿真器, 对他们进行故障培训, 提供紧急情况下的感受和现场处理措施, 不断强化调度运行人员素质, 已势在必行, 而且具有重大实用价值、经济意义和生产背景。

故障培训是 OTS 的重点之一, 因为系统在正常情况下, 运行人员只需进行正常的操作和调度控制, 较为容易培训。但在系统出现故障时, 系统受到大扰动, 情况复杂, 需要调度运行人员在故障情况下, 根据获取的故障信息, 迅速判断故障原因, 找出对策, 果断、正确地处理, 尽快排除故障, 恢复供电。

本论文的研究课题正是 OTS 故障仿真, 以东北电网为研究对象, 针对东北电力系统的实际特点, 参考电网历史上出现过的多次事故记录, 在征询东北调度局调度室和继电室有关专业人员的情况下进行研制。

该课题主要任务有四: 第一, 故障及继电保护动作模拟 (生成故障并产生故障信息); 第二, 安全自动装置动作模拟; 第三, 系统恢复强送处理模拟; 第四, 故障仿真与 OTS 接口。

实际电力系统故障形式复杂多样, 本课题针对东北电力系统实际特点, 并结合 OTS 具体要求, 在计算机 (SEL—32/67) 上进行 OTS 故障仿真。主要内容如下:

1. OTS 故障仿真针对实际电力系统故障特点, 建立线路、母线、变压器、发电机及电抗器故障保护动作模型。
2. 为反映电力系统故障对自动装置的动作情况, 对自动重合闸、连切 (发电机、

线路等)装置及安全自动装置(如电流保护或过载解列)进行模拟。

3. 为真实再现电力系统的故障行为,还对继电保护和断路器的拒、误动进行模拟。

4. 实际电力系统故障后恢复,需要进行强送处理,本文对(线路、母线)强送进行处理模拟。

5. OTS 故障软件的突出之处,是建立故障仿真数据库,利用数据库技术建立各种数据查找关系(如,由线路查得两端开关编号,再由开关编号查得该处设置哪些保护与自动装置)。OTS 故障仿真作为 OTS 整体的一部分,正是通过数据库(计算机操作系统的)控制命令(如,定时激活和挂起运行文件)实现(软件)接口,并共享数据。

6. 本文是采用两种方法把事件(故障)引入培训过程,进行故障培训的方法。方法一,教员离线设定事件,规定事件发生时间,按规定时间,在实时培训时,让事件自动发生;方法二,在实时培训时,由教员或学员干预,设置事件,即时或定时让事件发生。

本文所介绍的 OTS 故障仿真软件尚属初级阶段,有待于改进和提高。尤其是在电力系统实时仿真方面,故障仿真必须与完整的实时动态的仿真软件,即暂态、中期和长期稳定分析软件结合起来,使得继电保护与安全自动装置的动作,由实时稳定计算决定,以达到高水平的故障仿真。

总之,OTS 故障仿真软件研究的具体目标是作为一种教学工具,培训运行人员处理故障的能力。该课题正是本着这一目标研制的。本部分软件(初级阶段)与 OTS 的其它部分配合,曾在 1989 年 1 月份全国调度员训练班上作了示范表演,受到肯定,并征求他们的意见,加以改进和提高,业已完成的 OTS 故障仿真软件无论在功能上还是在使用灵活上都比当时有较大提高,能基本满足调度运行人员故障培训的需要,为电力系统培养高素质的调度运行人员提供了有力的培训工具。

答辩日期:1989 年 6 月 27 日

电力系统调度员培训仿真器人机接口的研制

电力系统及其自动化专业研究生 李东仙 指导教师 黄 眉

电网调度培训仿真器(OTS)是七十年代后期在欧美等发达国家首先发展起来的。主要用于对调度员进行电力系统稳态运行和事故处理能力的培训。OTS 一般由电力系统模型(PSM)、控制中心模型(CCM)及教员控制台(IP)三部分组成。OTS 的功能要求主要有三个方面即 PSM 的真实性、CCM 的相同性和 IP 的灵活性。OTS 的硬件发展经历了单机结构、双机结构及多机结构等三个阶段,随着 OTS 的功能要求的提高及计算机技术的发展,OTS 的硬件配置必然向着分布式多处理机的结构发展。

东北电网调度培训仿真器 (NEPSOTS) 是国内第一台电网调度培训仿真器, 目前是在实时计算机 'Gould Sel 32/6705' 上实现的 (将来要移植到 VAX), 已具备基本的培训功能。本文主要研究了东北电网调度培训仿真器人机接口系统的硬件配置和软件开发问题。

在硬件配置方面, 兼顾了仿真器对 CCM 相同性的要求和 NEPSOTS 的实际情况, 选择了具有图形存贮功能的长岛 863—2 火屏幕彩色图形终端, 使众多的静态画面 (目前为 84 幅) 可存于终端本身, 而不存于 Sel 机内存中, 这大大地改善了单机结构的 NEPSOTS 的运行环境, 从而使其总体性能得到较好实现。此外长岛的汉字功能、与多种计算机的接口功能都从各方面满足了仿真器要求。

在静态画面的编辑方面采用了 IBM 的全屏幕编辑功能和通过接口将编辑画面在长岛上即时显示的功能, 方便了图形的生成, 大大加快了图编速度。

在人机接口软件的研制方面, 主要对人机会话功能、动态信息显示功能和事故报警功能进行了探讨和研究。

人机会话功能模块引入了中断响应、汇编语言读键盘等功能改进了调图方法、简化了调图步骤, 设计了简短合理的人机会话命令五大类共 90 个, 在调图速度方面也进行了一些探讨如改系统定时激活为计时中断以提高中断响应速度等。动态显示功能模块就是示 PSM 的潮流及开关状态。主要解决了数据定点及输出通道的冲突、中断响应中断点收尾不善等引起的显示错误问题, 在动态数据展示的易读性方面进行了一些探讨。报警处理模块分析了多种故障情况, 采取了自动跳画面报警方式。

总之, NEPSOTS 人机接口系统为学员和教员提供了较为简单方便、清晰易读的 PSM 状态监视功能。

答辩日期: 1989 年 6 月 27 日

实时数据库在电网调度培训仿真器中的应用

电力系统及其自动化专业研究生 梁汉泉 指导教师 牛梦菊

电网调度培训仿真器 (即 OTS, Operator Training Simulator) 是七十年代, 随着数字计算机技术发展而发展起来的一种新型电网调度培训工具。其基本思想是用数字计算机为电网调度人员提供一个从电网控制中心看上去, 完全相同的环境。调度员能够从中积累经验, 提高应付事故的能力。由于它具有经济、灵活、培训过程系统化、科学化等特点, 受到电网调度部门的广泛欢迎, 渐渐成为培训电网调度员的重要手段。从七十年代后期开始, 欧美、日本、香港等发达国家和地区的电力公司大都先后研制了电网调度培训仿真器, 投入运行以后取得了令人满意的培训效果。我国在这方面起步较晚, 1987 年东北电管局和清华大学协作研制的东北电网调度培训仿真器为我国第一部。本文将以研究开发其中的实时数据库为基础, 探讨有关 OTS 数据库的一些问题。

数据库是电网调度培训仿真器的重要组成部分,担负着数据的管理和维护,OTS中各任务模块之间的数据接口的组织和协调的任务。本论文基于对东北电网数据的分析,说明了OTS中使用数据库的必要性和数据库在电网OTS中的重要作用,分析了电网OTS实时数据库的特点和要求。根据软件开发所用的Concert 32/6705计算机有支持外存数据库的TOTAL数据库管理系统,没有支持实时数据库的系统软件,但支持建立供多任务共享数据的内存共享分区Data Pool这样的实际情况,论文提出了建立两个数据库的方案。利用TOTAL数据库管理系统建立外存数据库存放东北电网OTS原始数据;以Data Pool为基础建立一个专用实时数据库实现各任务模块之间的数据接口。实时数据库用E—R图、数据关系表格,Data Pool数据字典实现的关系型数据模型,满足了东北电网OTS所要求的快速性,同时保证了实时数据库和各任务程序具有较高的独立性,从而使整个OTS能够较好地实现未来发展的功能扩展和数据扩展的需要、提高了整个OTS的生命力。实时数据库除数据模型之外,还开发了初始化、数据查询、并发控制、“快照”和重演五个功能模块。初始化模块实现了从外存数据库提取数据,给实时数据库装载的功能。数据查询模块的主要功能是显示实时数据库中所有数据的内容和在线修改部分非电网结构参数。并发控制采用封锁的办法保证了实时数据库数据在多任务运行环境下的时间一致性。“快照”和重演模块利用磁带机存放重演数据的方法,实现了根据指定重演起始时间进行重演的功能。

本文所完成的东北电网OTS实时数据库经受了联调、试运行的考验,基本满足了东北电网OTS开发和运行方面的要求,形成了一个性能较好的运行、开发环境。

答辩日期:1989年6月27日

弱电力系统供电可控整流拖动控制系统的设计 and 实验研究

电力系统及其自动化专业研究生 黄岭柏 指导教师 周荣光

本文工作结合为兰州石油化工机器厂设计柴油机供电的SCR驱动钻机的控制系统,研究了波形畸变对SCR驱动系统的影响,以及串激机拖动控制方案及其参数配置问题。

柴油发电机供电的SCR系统是一个弱电力系统。由于换流器的谐波作用,系统中交直流波形均有不同程度的畸变。特别在系统主电路未装设滤波和平波设备的条件下,波形的畸变完全反映到换流器和直流串激机的反馈和控制信号中,使控制系统受到信号谐波的影响。本文通过实验研究了波形畸变对控制系统的不良影响及其消除限制方法。本文还实验研究了系统运行状态和换流电抗与波形畸变程度的关系及其对系统稳定性的作用。研究结果说明,只要柴油发电机的电气参数在正常的范围内,系统二次部分配置上合适的滤波器,则尽管主电路不装设滤波和平波设备也不会影响系统的正常功能。

石油钻机钻井作业要求牵引电机应在广泛的转速和力矩运行范围内保证良好的控制调节性能和稳定性。在如此大的运行区域内,串激直流电动机本身的数学模型是非线性

的。理论上只能定性地分析其性能。本文参照他激电机调速控制设计了串激机调速控制方案, 定性地分析选择了速度电流双闭环控制作为串激机的调速控制方案。然后通过实验, 具体地研究控制方案的配合和参数配置问题。参考 SCR 系统的性能指标, 为兰石厂设计了控制系统。

本文还提出了一种新颖的理想三相全控桥数学模型。利用开关函数的概念使换流器数学模型大大地简化。使计算机数值分析硅桥瞬态特性和过程变得方便可行。本文利用这种模型分析了换流器冷状态开路条件下的瞬态过程, 为冷状态预检测提供了理论依据。

本文考虑到现场实际情况和设计要求, 提供了一套速度静止检测方法。避免了信号长距离传输可能带入的干扰和减小电动机轴向长度及占地空间。实验证实静止速度模拟检测方法在很大的范围内都可以保持良好的精度和线性度。

在动模实验中, 本文还探索了信号检测反馈的新方法和新途径。结合现场可能提供的条件确定了电流电压诸信号的测量途径, 并设计了相应的应用装置。

答辩日期: 1989 年 6 月 17 日

配电系统多阶段规划方法研究

电力系统及其自动化专业研究生 马 昕 指导教师 王世嫫

配电系统是把电力系统或电源与用户设施联接起来的重要环节, 它的结构是否合理将直接影响向用户供电的质量。配电系统多阶段规划的任务就是要确定能够满足未来某一时期负荷增长需求的配电网最佳发展战略, 包括变电站的最佳布点、容量及投入运行时间和馈成最佳分布及投入运行时间, 并满足一定的电压要求和可靠性要求。配电系统多阶段规划是保证配电网在满足负荷增长需求条件下, 以较高质量发展的必要条件, 因而, 也是保证国民经济高速发展的必要条件。

本文综述了迄今已有的配电规划的各种优化方法, 对所采用的数学模型和求解方法作出了评价。从对各种方法的分析中可总结出以下两点:

1. 模型越来越准确, 但实用性降低。
2. 规划中没有考虑可靠性条件, 而可靠性要求是对一个配电网的基本要求。

考虑到我国配电网规划中不确定性因素很多的特点, 作者认为规划方法应以实用为好。将准确性与实用性综合考虑之后, 本文提出了一个实用的、具有滚动性的多阶段规划方法, 并编制了相应程序。规划分为两步:

1. 目标年规划, 确定最优目标网。
2. 中间年规划, 确定变电站最佳投入运行时间和馈成分布, 得到一组过渡网, 形成从现有网到目标网的近似最优发展战略。

数学模型采用混合整数规划模型, 目标函数为:

$$\text{Min } z = \sum_{i=1}^{NS} \sum_{\lambda=1}^{J_1} (F_i \lambda S_i \lambda + C_i \lambda P_i \lambda) + \sum_{j=1}^{NF} C_j P_j$$

约束条件有：节点功率平衡约束，设备容量约束和逻辑约束。

为避免维数爆炸，加快求解速度，本文在分析了一般分支定界解法后，提出了一种启发式方法，与网络最小费用流法相配合，求解混合整数规划模型。

辐射网条件和电压条件在本文模型中是作为检验条件考虑的。在模型得到最优网络后，检验辐射网条件和电压条件是否满足，若满足则最优解可行，否则，将用启发式方法修正最优解。此后，用故障模式及后果分析法计算网络的供电可靠中，为规划者提供一个参考。

作为实例，对石家庄铁路西侧配电网进行了十年规划，这是一个具有 7 个变电站，14 种可选容量，两百多负荷点，近三百条可选成路的配电网。计算结果表明，本文的方法基本解决了模型准确性与实用性的矛盾，具有一定实用性，并较全面地解决了配电网规划问题，计算速度较一般分支定界法快，能得到较好的近似最优解。

答辩日期：1989 年 6 月 9 日

柴油发电机的微机保护与安全监测

电力系统及其自动化专业研究生 郭 耀 指导教师 黄益庄

柴油发电机微机保护与安全监测装置 (MPSM) 是我专业三个科研组共同承担兰州石油化工机械厂关于石油电驱动钻机供电系统科研生产制造项目中的一个组成部分。本系统的完成，将标志着我国从此结束了不能国产电驱动钻机的历史，标志着我国电驱动钻机的最高水平，并且达到了世界同类产品的最高水平。

针对石油电驱动钻机供电系统的结构：“三台柴油发电机 (370KVA/台) 并联运行，不经过变压器、电力滤波器，直接带可控硅控制的直流钻机负荷以及异步电动机等交流负荷，构成一个简单的 AC/SCR/DC 独立系统。”论文阐述了装置面临的问题必然是：发电机的电压、电流谐波严重，给微机保护的算法和保护整定值的计算带来了困难；发电机从启动到运行，频率变化范围较宽，对采样和频率跟踪提出了高的要求；孤立供电系统中负荷的切换和启、停，对电流、电压冲击大；微机保护与安全监测面临着严重的干扰问题。在没有任何国内外技术资料的情况下，论文分析了谐波对各种继电器构成的保护装置及测量仪表的影响，解决了谐波严重的情况下发电机保护与测量中存在的问题。MPSM 装置采用了以 MCS—51 系列单片微计算机为核心的先进的技术，采用了交流采样方案和光电隔离等技术以及合理的软件处理技术，实现了柴油发电机组的所有继电保护功能：电压、电流、功率和转速等保护。装置具有数据处理迅速（不到一个周波）、频率适用范围宽、硬件结构简单、可靠性高、抗干扰能力强、体积小、操作简单等特点。装置通过了两周的动模实验并已在川西南矿区安装、调试完毕，即将投入生产运行。

MPSM 装置是本电驱动钻机系统技术水平的标志，和世界上最先进的第四代产品相比，本装置实现并完成了其所有保护功能，并增加了过电流等保护，克服了国外同类

产品仅对发电机负荷状态下进行低电压无时限的短路保护而对空载下的发电机无任何短路保护存在的危险性,并根据我国励磁等装置的性能,调整了各保护的时限,提高了发电机的可靠性和带负荷能力。另外,还增加了报警音响、数字监测显示和故障显示等功能,大大提高了装置的自动化水平。

MPSM 装置的完成,填补了我国一项空白,它不但可以应用于电驱动石油钻机系统,而且可以推广应用于各类柴油发电机的保护与安全监测装置中。

答辩日期:1989年6月9日

真空断路器行程特性的研究

高电压工程专业研究生 柳文中 指导教师 王伯翰

真空断路器(VCB)的行程特性对其工作性能有很大影响,需用专门的仪器测量VCB的行程特性。本文设计的VCB行程特性测量仪是用光栅传感器把位移量转换成光信号,用光缆送至光电转换电路,产生电信号,去触发电计数电路,形成数据。所得的数据有两种处理方法:一是将数据(数字量)转换成模拟量,由光线示波器实时输出。另一种处理方法将数据采入单板机内存,进行数据处理,将结果打印出来,或用扫描示波器显示。该测量仪的分辨率是0.1mm。

借助于测量仪对如下几种VCB的行程特性进行了测量:1. ZN4—10VCB新产品;2. 处于使用中期的ZN4—10VCB;3. 超过使用寿命的ZN4—10VCB;4. Siemens VCB新产品。测量结果表明:ZN4—10VCB分断行程的过冲和回冲都很严重,减小开关分断弹簧的拉力,可以减小过冲和回冲,建议适当调整分断弹簧的拉力,分断弹簧拉力较大时,合闸行程有停滞或振动现象。SiemensVCB分闸行程虽也有反弹,但无过冲,特性较为理想。

本文用软件的方法研究了ZN4—10VCB使用油缓冲器和橡皮缓冲器时的行程特性,并配合以实验验证。软件的方法是根据开关机构建立物理模型,算出各个时刻的行程值。橡皮缓冲器有弹性和阻尼。增强弹性不能抑制回冲,增加阻尼虽可以减小过冲和回冲,但受材料选择的限制,难以实现。使用油缓冲器,行程特性有很大改善,无过冲,回冲也很小。

ZN4—10VCB分断过程中触头的过冲和回冲,来源于机构的缓冲机制,橡皮缓冲器由于有弹性变形的能力,可以储存并释放能量,造成动触头的振动,出现过冲和回冲。使用油缓冲器的VCB行程特性比较理想。

答辩日期:1988年12月8日

磁光材料温度特性测定及法拉弟效应冲击 电流传感器的研制

高电压工程专业研究生 宋 骏 指导教师 白秀庭

对于冲击电流的测量,通常是采用以电磁感应原理为基础的器件,如罗哥夫斯基线圈。但是,由于传感器件处于恶劣的电磁干扰环境中,这种器件往往受到种种干扰和限制。而近年来发展起来的法拉弟效应电流传感器,以光作为信号的传递媒介,具有极好的抗干扰性能,易于与计算机接口,是用计算机对电网进行控制,保护,运行所不可缺少的器件之一。具有广泛的应用前景。

在磁场的作用下,一束线偏振光通过磁光材料时,偏振面会发生旋转,旋转的角度 θ 与外加磁场的磁感应强度 B 成正比。即: $\theta = VBL$ 其中, V —Verdet 常数, L —通光路径长度。这一效应被称为法拉弟效应。由于 B 与产生 B 的电流 I 成正比,因此,测量出偏振光的旋转角度 θ ,即可推知电流 I 的数值。在本文的理论阐述部分,说明了法拉弟效应电流传感器的工作原理,包括光路设置,电子线路的一般形式及检测误差,并给出了非线性误差及偏置误差与偏转角 θ 大小的关系。

本工作的主要目的在于从工程应用的角度出发,研制适合于实际应用的法拉弟效应冲击电流传感器。采用磁光材料构成这种电流传感器的磁光传感单元时,磁光材料的 Verdet 常数及其温度系数是一个重要的物理量,它决定了电流传感器的灵敏度和温度稳定性。

由于目前缺乏这方面的资料和数据,首先建立了一套测量磁光材料 Verdet 常数及其温度特性的微机数据采集测量系统。其中包括了提供 $-15^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ 温度变化环境的烘箱/冰箱,提供磁场的电磁线圈,进行磁场测量、温度测量及偏转角 θ 测量的电子线路,和 Apple II 微机。在本文的附录部分,给出了所使用程序的清单。

在 LED 波长下,测定了八种国产磁光材料的 Verdet 常数,并且在 $-15^{\circ}\text{C} \sim +30^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内测定了这些磁光材料的 Verdet 常数的变化趋势和变化范围。测试结果发现,这些材料的温度特性都有一个共同的特点,Verdet 常数随温度的升高而降低。Verdet 常数变化的数量级是 $10^4\text{ppm}/^{\circ}\text{C}$ 。

利用其中之一的磁光材料构成了法拉弟效应冲击电流传感器。达到的性能水平如下:响应时间小于 $2\mu\text{s}$,灵敏度 $1.61\text{KA}/\text{V}$,测量电流范围 $0.5 \sim 25\text{KA}$,信噪比 48db ,在 $-15^{\circ}\text{C} \sim +80^{\circ}\text{C}$ 的温度范围内,误差 $+0.7\% \sim -2.2\%$,并且将测量结果与罗哥夫斯基线圈的测量结果进行了对比,结果表明,除了波头部分,两者的波形是完全一致的。在波头部分,后者带有大量的干扰信号,而前者波形清晰,不受电磁干扰的影响。可满意地应用于电力系统雷电流,故障电流,物理放电装置电容器放电电流等冲击电流的测量。

答辩日期:1988 年 12 月 8 日

电力变压器局部放电在线检测系统数字化 测量和控制部分的研究

高电压工程专业研究生 刘 浩 指导教师 谈克敏

为防止因局部放电发展而导致变压器发生事故,研制了一套在线电力变压器局部放电计算机检测系统。此系统测量局部放电引起的电流脉冲和超声波脉冲,应用电(一路)声(三路)联合测量,可以测量局部放电量、识别干扰并对局部放电点初步定位。系统使用光纤完成现场探测部分与主控室内计算机系统间的信号传递,可保证安全,并提高传输的信噪比。(电、声传感器部分及光纤传输部分由协作者完成)。

检测系统使用了 Super-pc/XT 微型计算机及高速 A/D 卡,采用 DMA 直接数模存取技术完成四通道同时采集,每通道采样间隔 $20\mu\text{s}$ 。检测系统对局部放电脉冲的时间分辨率为 $35\mu\text{s}$,连续采集时间可达 1.6s 。在现场探测部分设置了四路程控放大器,由计算机 RS-232 串行异步通讯端口发送的信号控制,可取得不同的放大倍数,使得输入端量程分别为 0.04V 、 0.2V 、 1V 、 5V 。经过极性转换之后,检测系统使用四通道峰值保持电路,以拾取脉冲信号的幅值,峰值保持器可选择工作于每个脉冲到来 $25\mu\text{s}$ 后置零方式,或工作于采集系统每次采样后置零方式。检测系统计算机软件可以完成:单次采集,可识别干扰的连续自动观测,控制程控放大器调节量程,数据存取磁盘操作以及检测结果的多种图形显示。在软件的帮助下,系统完成识别干扰,读取局部放电量 and 放电时刻,以及利用声电时延进行初步定位。

研制成的变压器局部放电在线检测系统,在实验室内分别在局部放电模型和配电变压器上进行了试验,验证了系统的功能,对放电点定位准确。在变压器厂内对大型电力变压器进行了局部放电测量试验之后,本系统又在 220KV 变电站对一台 110KV 电力变压器实行了在线检测,测量结果证明,检测系统性能可靠,使用安全。

答辩日期:1988 年 12 月 10 日

电力设备局部放电在线检测的光纤传输系统的研究

高电压工程专业研究生 邱锦波 指导教师 王弼长

为了及时发现电力设备中存在的隐患,需要对其局部放电进行在线检测。

本文对电力设备局部放电在线检测系统(OLDS)进行了总体设计。该系统将脉冲电流法和声发射法相结合去检测局部放电,因而具有一定的抗干扰能力和实现局部放电的定位。该检测系统主要包括电流传感器、超声传感器、多路光纤传输系统和进行信号处理及控制的微机系统。其电流传感器的检测回路类似于罗戈夫斯基线圈,可以方便地接在电力设备的接地线上,并采用两个传感器差动放大的方式排除外界电磁干扰的影响。