

多机电力系统动态结构特性分析 及降阶方法研究

电力系统及其自动化专业研究生 张庆民 指导教师 黄 眉 刘 取

电力系统规模庞大, 动态结构复杂, 为了进行稳定性分析和稳定性控制, 降阶与模型简化十分必要。尤其需要指出的是, 对稳定性分析来说, 特征值的分析方法十分有用, 但是当系统中机组很多时, 就会出现“维数灾难”, 直接用原模型计算困难很大, 甚至无法进行计算。为此不可避免地要进行降阶和模型简化。随着我国电力系统的规模不断扩大, 降阶与模型简化的要求越来越迫切。本文的主要任务是: 从分析已有降阶方法出发, 通过研究电力系统的动态结构特性, 从而探讨改进途径或寻求新方法, 为分析多机系统稳定性提供简单算法。

电力系统线性模型的主要降阶方法有: 集结法、奇异摄动法、特征值迭代算法及选择模态分析法。虽然这些方法各有特点, 但这些方法的共同不足是, 在能满足精度要求的前提下, 对原系统没有作充分简化, 故计算工作量较大。选择模态分析法提出用参与矩阵 P 来选择模式的相关状态量和较不相关状态量, 从而对较不相关状态量所组成的子系统进行适当简化, 然而欲求出参与矩阵必须求出左右特征向量, 如果知道左右特征向量, 那么也就没有必要进行降阶计算了, 此外, 经验也很难对 P 阵有较精确的了解, 因此这种方法的应用范围仍是有限的。另外所有这些降阶方法都不是很适宜计算系统中所有转子摇摆模式。本文正是针对这些问题展开工作的。

为了对原模型进行充分简化, 文中初步研究了电力系统的动态结构特性, 研究表明, 电力系统的动态结构特性主要有两个方面: 其一是状态变量的变化快慢及衰减快慢不同; 其二是机组的分散特性。本文重点研究了机组分散特性。由于机组的分散特性导致了机组与模式的关联特性, 即控制一台机只对少数几个模式作用较大的特性。文中对这种特性的物理机理进行了初步的研究, 并采用模式的衰减系数对等效 PSS 增益的灵敏度 $\partial\sigma/\partial G$ 来判别机组与模式的关联程度。 $\partial\sigma/\partial G$ 的计算较简单, 只求一次古典二阶等值模型的左右特征向量就可以算出。研究表明, $\partial\sigma/\partial G$ 能较准确地反映机组与模式的关联强弱, 这为分析及应用机组分散特性提供一种简单方法。研究还表明, 如果系统中机组的地理位置越分散, 且容量数值大小也分散, 那么这个系统的机组与模式关联特性越突出。这种特性为模型简化提供了可行途径。

在进行电力系统稳定控制设计时, 往往需要分析系统中所有转子摇摆模式的稳定性, 如何用简单方法求出系统中所有转子摇摆模式十分重要, 这也是人们一直所关心的课题。为此本文根据机组与模式的关联特性, 对集结法和古典二阶等值降阶方法进行了综合和改进, 从而发展成为集结二阶等值降阶方法。这种方法从集结法出发, 通过线性

变换导出降阶模型的简化求解方法。即对不同的模式采用不同的简化模型计算,又通过迭代把不同简化模型的信息集结在同一个模型中,运用这个模型不仅可以同时简化求解所有转子摇摆模式,而且还可以简化求解动态响应。文中对华中十八机系统和西北九机系统进行了计算比较,结果表明:此方法计算准确度满足工程精度要求,且节省机时,比已有的奇异摄动、选择模态分析等方法更适宜分析全系统的动态特性。文中还对该方法的应用范围及迭代收敛性进行了讨论。

在励磁系统参数调试时,往往需要重点研究某些特定机组的动态特性,为此本文还提出外部系统分割等值降阶方法。由机组与模式的关联特性分析可知,一台机的关联模式是少数,因此通过研究少数模式的稳定性就可以了解这台机组励磁系统参数整定的是否合适,故外部系统中与这少数模式不关联的机组都可以删去,从而建立降阶模型。文中以华中十八机系统为例进行了计算比较,结果表明,该方法精度好、省机时,而且能分析指定机组的励磁系统相关模式,是一种很实用的降阶方法。

本文的主要结论为:

(1) 文中提出的集结二阶等值降阶方法可以同时简化求解系统中所有转子摇摆模式,计算准确度满足工程精度要求,且节省机时,比已有的选择模态分析等方法更适宜分析全系统的动态稳定情况。

(2) 在多机电力系统中,存在着机组—模式关联特性,系统中机组越分散,这种特性越突出。

(3) 用灵敏度 $\partial\sigma/\partial G$ 来判别机组与模式的关联特性是可行的,这不仅计算简单,而且能较准确地反映机组控制对模式的影响。

(4) 文中所提出的外部系统分割等值降阶方法能较准确地计算某些机组的关联模式,且计算省机时,是一种很实用的降阶方法。

答辩日期: 1985 年 12 月 20 日

最优励磁控制器若干问题的分析研究

电力系统及其自动化专业研究生 吴壬华 指导教师 王仲鸿

随着电力系统的不断扩大和快速励磁调节器的陆续投入,电力系统的稳定运行问题已成为远距离输电系统中的一个重要问题。用线性二次型性能指标的最优控制理论设计的多变量反馈励磁调节器 (Optimal Excitation Controller, 习惯上简称 EOC), 可以很好地满足远距离输电系统的多方面技术要求, 提高系统的稳定性和改善系统的动态响应。

最优励磁控制器的发展经历了三个研究阶段。基本原理研究阶段的特征是所研究的问题为单机对无穷大系统的励磁最优控制问题; 多机分散控制研究阶段主要是研究多机系统在分散控制结构约束下的励磁最优控制问题; 现场试验阶段主要是解决将最优励磁控制理论运用工业实践中所产生的问题。最优励磁控制器进入现场试验研究阶段还是近

一、二年来的事。当前,只有解决好了最优励磁控制器在工业试验中所提出的问题,才能促进其朝工业应用方向发展,同时使理论上的研究更具有实际意义,促进理论上的进一步发展。因此,现阶段最优励磁控制器研究的前沿问题之一是工业试验研究。

从1984年7月以来,清华大学和天津电气传动设计研究所、西北电管局合作,两次在甘肃省碧口水电厂1#机组上进行了最优励磁控制器现场试验研究。现场试验的结果基本上是满意的,目前该最优励磁控制器工业装置已投入了试运行。但通过现场试验也发现了许多有待于我们去解决的问题。文章总结了现场试验中所提出的问题,其中的两个基本问题是:最优励磁控制器各反馈通道偏差量的获取方法和各反馈通道放大倍数的整定方法。这两个问题是关系到能否将线性最优控制理论真正运用到电力系统励磁控制中,并且取得效益的关键性问题。本文拟解决这两个基本问题,为现场试验研究做一点工作。

本文对这两个问题的研究具有从实践到实践的特点。即本文拟解决的问题是现场试验中提出的实际问题。为解决这两个问题,我们进行了三个方面的研究,这三个方面是:最优励磁控制规律研究、动模实验研究和数字仿真研究;而研究的结果将为下次现场试验做准备。本文主要总结了为解决这两个基本问题而进行的三个方面的研究成果。

文章扼要地介绍单机对无穷大系统的状态方程的建立过程,线性二次型性能指标的最优控制理论。讨论了权矩阵 Q 和 R 的选择问题,证明了 Q 和 R 分别选择成对角矩阵和单位矩阵并不影响受控系统的一般性质。并通过计算研究了励磁最优控制规律随系统运行点、权矩阵以及系统参数的变化规律,得出了几点有关励磁最优控制规律的特点。文章分析了产生讨论最优励磁控制器各反馈通道偏差量的获取方法的原因和影响因素。提出了两类偏差量的定义,指出各反馈通道偏差量的获取方法实际就是动偏差环节时间常数的选择方法。研究结果表明,动偏差环节时间常数的选择和系统对暂态过程的快速性要求、系统低频振荡的周期以及最优增益的高低三点有关,并得出了选择动偏差环节时间常数的实用方法。文章还分析了产生讨论最优励磁控制器各反馈通道放大倍数的整定方法的原因和影响因素。通过将数学模型和实际系统进行对比分析,发现模型上的综合点和实际装置上的综合点不一致,从而定义了调节器内部、外部放大倍数的概念。指出各反馈通道放大倍数的整定方法实际就是各通道外部放大倍数的实测方法。经过分析推导,得出了空载实测整定基值的实用方法及计算公式。

数字仿真和动模实验的研究结果表明,本文所得出的两个实用方法具有较广泛的适用性,有效地解决了最优励磁控制器在现场试验中提出的这两个基本问题。

答辩日期:1986年2月21日

大型水轮发电机定子接地故障分析及其保护

电力系统及其自动化专业研究生 陈小月 指导教师 王维俭

发电机最常见的故障之一是定子一点接地。定子接地往往是其它故障的先声,防止它发展成相间、匝间短路或烧伤铁芯的有效措施是提高定子接地保护水平。当定子接地

时,故障电流越小和保护灵敏度越高,故障点的损坏程度和修理时间就越小。随着单机容量的不断增加,它在系统中的地位重要,造价昂贵,定子结构复杂,修复困难,所以对于大型发电机定子接地故障电流和保护性能都提出了严格要求:

(1) 大型发电机定子接地故障电流必须限制在安全电流以内:安全电流的值如下:

6.3 kv及以下	4 安
10.5 kv	3 安
13.8~17.75 kv及以上	2 安
18kv 及以上	1 安

(2) 大型发电机必须装设 100%的定子接地保护。

(3) 定子绕组任一点经较高过渡电阻接地故障时,保护装置应灵敏动作。

(4) 满足前三个基本要求的前提下,如果保护装置还能区分故障发生在发电机内部绕组中或外部引线上,则更有利于故障的处理。

现有的定子接地保护都是由两部分组成:第一部分就是最简单的零序过电压或过电流保护,构成第二部分的有以下两种方式:

(1) 外加电源方式(包括外加直流电源和外加交流电源)。

(2) 利用发电机固有的三次谐波构成的方式。

本文主要研究方式(2),它由几种方案实现,这些方案在水轮发电机上取得了一定的运行经验,但在水轮发电机上遇到一些问题。因此本文要解决的问题之一是三次谐波电压定子接地保护能否用于水轮发电机。

上述 100%的定子接地保护,存在一个共同的问题:无论是单元接线,还是扩大单元接线的发一变组,定子接地保护都不能区分内部故障还是外部故障。这对于单元接线的发电机问题不大;对于扩大单元接线的发电机,如果不能区分发电机内外故障,当一台机内部故障时,另一台机的定子接地保护也将动作发信号或跳闸。而这种接线在我国一些水电站(例如葛洲坝大江电站)得到应用,因此定子接地保护的选择性问题也亟待解决。

本文首先从三个方面—过电压、安全接地电流和接地保护—论述了与定子接地保护密切相关的大型发电机中性点接地方式,建议凡电容电流超过安全电流的大型发电机均采用中性点经消弧线圈接地方式(欠补偿或谐振接地)。

本文以一台 125MW、13.8kv 国产水轮发电机为例,按照其定子绕组的实际分布,绘出其三次谐波线圈电势矢量图,推导出三次谐波等值电路,利用有源两端口网络理论计算了三次谐波电压分布,详细分析了三次谐波电压定子接地保护在水轮发电机上应用时所遇到的问题,然后又对扩大单元接线的水轮发电机进行了类似的分析研究,得出相应的几点结论:

(1) 水轮发电机的三次谐波线圈电势矢量图完全不同于汽轮发电机的,其三次谐波电压分布只能用分布参数等值电路求解。

(2) 在所分析的单元接线水轮发电机的三次谐波电压定子接地保护方案中,以 $k_z|\dot{u}_n| \leq |\dot{u}_n + k_p \dot{u}_t|$ 灵敏度最高, $|\dot{u}_t|/|\dot{u}_n| \geq b$ 次之, $|\dot{u}_n| \leq a$ 最低。(注: $\dot{u}_n$ 、 $\dot{u}_t$ 为发电机中性点和机端的三次谐波电压, k_z 、 k_p 、 b 、 a 按正常运行工况进行整定)。

- (3) 单元接线的水轮发电机的三次谐波电压 u_n 、 u_t 虽随运行工况而变化, 但正常运行时, $|\dot{u}_t|/|\dot{u}_n|$ 基本不变, 恒小于 1, $\widehat{\dot{u}_t \dot{u}_n}$ 也基本不变, 接近于 180° 。
- (4) 扩大单元接线的两发电机在正常运行时, 其中一机 (其三次谐波电势小者) 可能出现 $|\dot{u}_t|/|\dot{u}_n| > 1$ 的异常情况。
- (5) 三次谐波电压定子接地保护用于扩大单元接线的诸发电机时为取得选择性一定要另加选择性元件。
- (6) 两台发电机并联运行时, 使三次谐波电压定子接地保护的灵敏度普遍降低。但若避开某些恶劣运行工况, 情况会有好转。
- (7) 由于 u_n 、 u_t 随运行工况而变化, 为正确整定以 $k_2|\dot{u}_n| \leq |\dot{u}_n + k_p \dot{u}_t|$ 为判据的保护, 必须实测发电机在各种有功、无功负荷下 $\dot{u}_t$ 、 $\dot{u}_n$ 的幅值和相位 (对于其它简单的保护方案只须测幅值)。

本文最后从两个方面研究了定子绕组接地时产生的波过程: 第一, 从发电机的波速和波阻抗入手, 用发电机定子绕组的等值模型进行理论分析; 第二, 在扩大单元接线的水轮发电机上实测定子绕组一点接地时产生的行波。研究结果表明, 利用发电机定子绕组一点接地时的行波所构成的保护具有选择性与灵敏度。

答辩日期: 1986 年 5 月 27 日

电网规划可靠性分析的概率流法

电力系统及其自动化专业研究生 李凤玲 指导教师 孙绍先

作为电网工程的一个重要方面——电网优化规划迫切需要提供一种定量的可靠性分析计算方法, 以便回答: 现在电网保证供电的水平如何? 现在电网的薄弱环节在何处? 如何使电网在现有的可靠性水平基础上实现富有成效的提高和改进? 由于电网问题难度较大, 这一直成为电网工程界所关心的课题和探讨的方面。

作者在有关网流法的理论研究、算法研究和实际应用方面都做了十分有意义的工作。

本文介绍的方法, 明确地提出了广义最小割的思想以及把广义最小割与最大可行流结合起来的分析方法。用这一方法, 可以比较满意地回答电网规划中所提出的有关问题, 同时还可以得出以下三种定量指标:

1. 用于评价电网整体可靠性水平的指标, 包括: 系统损失负荷的概率 $LOLP_s$ 、系统发生负荷损失的期望时间 $LOLE_s$ 以及系统负荷需求不能满足的期望电力 EUD_s 等指标。

2. 用于描述电网中各地区损失负荷程度的指标, 包括: 地区 i 损失负荷的概率 $LOLP_i$ 、地区 i 发生负荷损失的期望时间 $LOLE_i$ 以及地区 i 需求不能满足的期望电力 EUD_i 等指标。

3. 用于诊断系统损失负荷的原因和确定系统薄弱环节的指标, 包括: 地区 i 发

电能力不足的概率

此外,还介绍了
电网的优化分析及规

算法上,采用了
在满足必要的计算精
量计算在计算机上得

采用本文介绍的
林省电力系统的可靠

地区 i, j 之间传输能力不足的概率 $ITC_{i,j}$ 等指标。

述指标进行经济效益分析及优化规划的分析方法。从而,为
提供了理论依据。

可分解与蒙特卡洛模拟随机交替地结合方法,这一结合可以
出上极其有效地缩短了计算时间,从而使得电网可靠性的定

方法所编制的 FORTRAN 计算机语言程序业已用于吉
优化规划分析,效果是较为满意的。

答辩日期:1986 年 5 月 30 日

静止无功补偿器在输电系统中配置地点的选择

电力系统及其自动化专业研究生 储炳南 指导教师 周荣光

静止无功补偿器在电
其效果在很大程度上受到
System) 装设地点很有影响
方法也缺乏较严格的论证。

在输电系统中,SVS 主
源分布的特点势必造成远距离
穷大系统,本文比较详细地研

SVS 的作用不同,选择地
映,本文采用的是基于严格的特
机转子运动相对应的一对共轭复根

影响动态稳定极限和低频振荡的因素很多,但都难以用明确的数学式表达出来,本文综合运用了对分法、抛物线插值法和变换法这些直接搜索方法对 SVS 的最佳地点进行了寻优。为了使地点比较有意义,原则上,在每一地点都选择一组与其相适应的最好参数配合。通过计算和分析,可以得出下述结论:SVS 最佳配置地点与输电系统的运行电压水平、控制方式和参数、负荷的地点及大小等诸多因素有密切关系,所以是一个多变量、非线性而且目标函数又不能用数学式表达的寻优问题,本文综合运用三种最简单的优化方法,有效地解决了这一复杂问题;无负荷情况下,以提高动态稳定功率极限为目标的实际 SVS 最佳地点与所谓理想 SVS 的最佳地点十分接近,所以工程上可以认为 SVS 的最佳配置地点是使其两侧的功率极限相等的点,即 $P_{1m} = P_{2m}$; 负荷与 SVS 共母线,而且随 SVS 移动情况下,以发电机输出功率极限为目标时,在工程上 SVS 的地点可按配置点两侧同时达到各自的功率极限的原则来选取,此时两个功率极限之间的关系是 $P_{1m} = P_{m2} + P_L$, 其中 P_{1m} 是发电机至 SVS 装设点段的功率极限(发电机以 E_q' 和 X_{d1} 表示), P_{2m} 是装设点至无穷大系统段的功率极限, P_L 是负荷在正常

中的应用将日益广泛,用于高压或超高压输电系统时,
点的影响,因此,寻求一个合适的 SVS (Static Var
System),目前有关 SVS 配置地点的文献不是很多,有关的

提高线路的输送能力及平息系统的低频振荡。我国能
容量输电的格局,这种格局常常可以简化为单机对无
这种典型的简单输电系统中 SVS 配置地点问题。

标准也不一样。系统的输送能力可用稳定极限来反
析的动态稳定极限。系统的低频振荡可用与发电
 $i\omega$ 来反映, α 越大振荡衰减越快。

状态下吸收的有功功率; SVS 位于发电机和负荷之间时, 如以提高发电机输出功率为目标, 则可将负荷移置到 SVS 母线和无穷大系统, 然后按负荷与 SVS 共母线的情况处理, 即 SVS 地点可按 $P_{1m} = P_{2m} + P_{LS}$ 来选择, 其中 P_{LS} 为移置到 SVS 母线上的负荷有功功率; SVS 附加信号太强虽则能够有效地抑制低频振荡, 但同时也易于使控制系统本身出现不稳定现象, 使系统稳定极限显著下降, 因此, 提高功率极限和提高平息低频振荡能力是有矛盾的; SVS 兼顾提高功率极限和平息低频振荡时, 其地点可只按功率极限来选择; SVS 的出现使系统出现一种突然崩溃的去稳定方式。

答辩日期: 1986 年 6 月 14 日

静止无功补偿器及其调控系统动态过程分析

电力系统及其自动化专业研究生 周 勤 指导教师 张宝霖 倪以信

本文提出了电力系统静止无功补偿器 (SVS) 的电磁暂态数学模型, 根据此数模编制了 SVS 电磁暂态仿真程序。在以往的 SVS 数字仿真研究中一般采用准稳态数学模型, 即将 SVS 视为一与其调控系统输出量成正比变化的导纳, 因而无法研究 SVS 及其调控系统的暂态过程的特点, 为此, 有必要建立 SVS 的电磁暂态数学模型。

在 SVS 电磁暂态数模中, 本文采用理想变电路模型, 并用坐标转换的方法进行 Y_0/Δ 接法变压器两侧电量计算, 由于 Y_0/Δ 接法变压器两侧 abc 坐标量的转换不可逆, 因此我们采用坐标转换的方法, 引入 $\alpha\beta$ 坐标量进行中间过渡, 变压器两侧 $\alpha\beta$ 量的转换是可逆的, 因不涉及零序量, 所以通过这种转换的方法使两侧电量的计算可双向进行, 同时还降低了节点伴随矩阵的阶数, 避免病态矩阵引起计算误差, 大大方便了系统与 SVS 的接口计算。

本文用所编制的计算机程序, 对 SVS 调控系统的动态特性进行了研究, 仿真计算结果表明, 对于采用比例—积分调节方式的调控系统, 当参数选择不当, 放大倍数过大或积分时间常数过小时, 调节过程中会出现可控硅控制电抗器电流 i_c 及 SVS 母线电压 U 的持续振荡现象, 将影响 SVS 对电压闪变进行有效的抑制, 因此, 应通过对参数的优化选择来避免这种振荡的产生。

由于 SVS 为一离散、随机控制系统, 因此对所出现的持续振荡现象用古典控制理论等方法难以进行分析, 只有采用数字仿真的方法才能准确地加以描述。

本文对于轧钢机这种冲击性负荷, 通过理论分析与仿真计算, 比较了几种控制方式对电压闪变的抑制效果, 其中以测负荷无功 q_L 前馈加测母线电压 U 反馈的混合控制抑制电压闪变最为适宜。

本文通过用解析法进行推导及仿真计算证明 SVS 在短路故障—故障清除过程中会出现过电流现象, 最严重时过电流可达 3 倍于稳态时晶闸管全导通状态电流峰值的数值, 过电流的产生与短路及故障清除时间有密切关系, 其持续时间可达数周以至更长。

对于以电流为同步信号及以电压为同步信号的两种脉冲点火系统, 本文比较了两

在小干扰及大干扰情况下的动态特性,较为全面地评价了 R.H. Lasseter 等人提出的以电流为同步信号的脉冲点火系统模型的性能,理论分析与仿真计算结果表明,在小干扰时,以电流为同步信号的点火系统抗干扰能力比以电压为同步信号的点系统要强,表现在积分起点及过程不受外部系统扰动的影响。但在大干扰时,前者的抗干扰能力不及后者,表现在短路故障过程中误触发机率比较高。

本文所提供的仿真程序即可做为研究供电系统 SVS 动态特性的专用程序,也可与电力系统电磁暂态仿真程序 (EMTP) 接口计算,形成 EMTP 中 SVS 之模块。

答辩日期: 1986 年 6 月 14 日

大型汽轮发电机组低励失步事故计算分析

电力系统及其自动化专业研究生 肖 遥 指导教师 王维俭

低励、失磁是发电机运行中常见的故障。据统计:在我国电力系统运行中,低励、失磁故障占发电机各类故障总数的一半以上。1985 年 10 月 29 日,我国华北系统某 20 万 kw 汽轮发电机组因低励造成失步,严重损坏了发电设备,引起了发电机生产、运行、管理等各部门的普遍关注。目前我国已有同类机组共 37 台正式投入运行,‘七五’计划期间还将有 70~80 台相继投入运行,构成我国电力工业主力机组的一部分。因此,对这次事故的原因及事故过程进行理论上的计算分析,已成为提高国产机组可靠性研究的一项刻不容缓的任务。

本文引用电机过渡过程的基本理论及分析方法,导出了单机无限大系统低励、失磁过程中各电气量的数学表达式,从而从理论上进一步阐明了低励、失磁后异步运行中各电气量的物理特性。理论分析表明:低励较之全失磁,其失步前所维持的等有功过程的时间要长,但一旦低励失步后,其电磁功率中除了平均异步功率及 S (滑差) 的二次谐波分量外,还含有 S 的一次谐波分量,因之会使发电机组产生强烈的振动。所以,低励较之全失磁过程,其对发电机的危害要大得多。

针对本次事故的具体情况,论文在事故调查委员会调查结果的基础上,以全状态方程的方式利用数字机对事故过程中所可能出现的几种情况进行了数字仿真,从而对事故过程中的各电气量进行了分析。在此基础上,文章对事故的原因及事故发展的过程作了进一步的分析,澄清了本次事故中几个重要的问题,为大机组可靠性研究提供了极有价值的资料。文中附有计算结果曲线。

对本次事故分析的结论:在自动励磁调节器退出运行且不人工调节励磁的条件下加负荷超过其静稳极限,最终将使发电机因低励而失步;异步运行中的振动会使励磁电压进一步下降而使失磁保护跳系统线路开关;振动可能使热工方面保护(轴向位移)动作跳发电机变压器组出口开关;发一变出口开关与系统线路开关跳闸时间间隔不超过 2.56 秒。此外还对本次故障录波,厂用电系统动作情况及负荷供电情况进行了分析。

为了防止类似事故的发生,文章最后对发电机组继电保护及监测系统提出了改进措

施。

本文采用了 I.M.Canay 改进的发电机等值电路模型来进行事故仿真计算,提高了计算精度,特别是转子各量的计算精度。在附录中,对 I.M.Canay 给出的改进发电机等值电路及其参数测算方法作了全面的证明。

答辩日期:1986 年 12 月 11 日

用系统辨识技术在线测试励磁控制系统 参数的研究

电力系统及其自动化专业研究生 荆朝阳 指导教师 孙绍先 沈善德

本文分析了励磁控制系统参数在线测试和调试方法研究的历史和现状。采用了 PRBS 伪随机信号和 FFT 辨识技术进行频域测试与调试。该方法具有对系统扰动小、测试速度快,具有信息滤波等优点。在动态模拟机组上针对“三机励磁系统”作了参数测试工作。利用所编制的动态拟合软件与测试的频域曲线相配合可求出模型参数,比用 Bode 图手工作图求解更为准确,且适合于高阶系统。这一方法还在 1500kw 汽轮发电机组上作了现场在线测试试验。测试结果经校验表明该方法的测试结果是可信的。在线调试参数方面,在动态模拟实验室以 PSS 为对象进行了在线调试,方法是建立在严格的系统辨识和控制理论的基础上。试验结果表明该方法是成功的,且具有普遍意义。

答辩日期:1987 年 5 月 7 日

发电机组可靠性数据统计分析方法的研究 及其数据管理系统

电力系统及其自动化专业研究生 王先中 指导教师 郭永基

本文结合发电机组历史数据的特点,它的可靠性模型和数理统计理论,详细地探讨了机组故障数据的统计分析方法,并编制了程序。其中对机组的可修特性和截尾数据处理的仔细考虑克服了以往这方面的不足。文章还介绍了为满足发电设备可靠性数据统计实用需要而建立的《发电设备可靠性数据管理系统》。故障数据统计分析程序,作为该系统的一个应用程序亦得到介绍。文中给出了某电网运用《发电设备可靠性数据管理系统》的例子和某些机组故障数据分析的初步结果。

答辩日期:1987 年 6 月 4 日

优化潮流 Newton 算法的研究及其在无功 优化中的应用

电力系统及其自动化专业研究生 严 正 指导教师 相年德

本文利用最优化方法中的 Newton 法来求解电力系统的优化潮流问题。在算法上结合电力系统的 PQ 解耦特性,对越界的不等式约束采用了主迭代之后进行试验迭代的分层处理模式,改善了主迭代过程的收敛稳定性。在试验迭代中,本文应用稀疏矢量技术,避免了重新形成完整因子表的过程,提高了确定起作用不等式约束的效率。在主迭代中提出了一种新的处理有功电源和无功电源约束的拟乘子罚函数算法,减缓了主迭代过程的振荡现象。本文还对 Jacobi 阵和 Hesse 阵进行了简化处理,简化工作不影响计算结果的精确性,但缩短了形成 Jacobi 阵和 Hesse 阵的计算时间。无功优化的计算实例证明本文的算法是行之有效的。

答辩日期:1987 年 6 月 4 日

电力系统调度培训仿真器一些问题的研究

电力系统及其自动化专业研究生 李文平 指导教师 王仲鸿

电力系统调度培训仿真器是培训运行人员的有效工具,其特点是周期短、效率高、安全经济。本文介绍了培训仿真器的发展情况和功能要求,着重讨论了系统模型与仿真算法等软件技术。在快速分解法基础上推导了动态潮流的算法,可用于求解系统中因故障或操作等原因造成较大净加/减速功率时的系统潮流。该法将不平衡功率用电机与负荷的频率、电压调节效应进行修正,并取消了平衡节点的概念。此外,在 PDP-11/73 小型机上设计了一个简单的培训仿真器模型,能够进行简单的培训仿真、操作控制和图形显示等功能。对于程序接口、数据结构和人机会话等功能也作了探讨。

关键字:培训仿真器,动态潮流。

答辩日期:1987 年 6 月 8 日

输电网中长期规划——“支路追加法” 和“后向混合整数规划法”

电力系统及其自动化专业研究生 祁达才 指导教师 王仲鸿

输电网中长期规划的任务是:规划何时、何地、架设多少条何种电压等级的线路来

经济、可靠地消除系统各阶段原有线路出现的潮流过载现象。它可分为单阶段的静态决策和多阶段的动态决策两个问题。本文提出了“支路追加法”和“后向混合整数规划法”，并用之构成解决中长期规划的主要手段。前者利用追加连支修改节点阻抗矩阵的思想，将静态决策问题用一个 0—1 整数规划模型表达，求解较为迅速。它也具有解决含孤立节点的网络规划的能力。后者则是针对动态决策问题而提出的，方法是：先形成最终网，然后逐阶段向前推移，在求解各阶段决策时，考虑了前面各阶段潮流的影响，从而得到中长期规划的投资方案。本文编制了相应的软件，计算实例表明了这两种方法的实用性。

答辩日期：1987 年 6 月 8 日

考虑励磁特性的大型变压器微机保护

电力系统及其自动化专业研究生 刘怀东 指导教师 王维俭 杨 钺

现代大型电力变压器使用优质冷轧硅钢片，涌流二次谐波含量和涌流间断角减小，传统的涌流制动方案遇到了困难。为了解决这一问题，本论文对基于励磁特性的大型变压器计算机保护在 TP68K16 位微型计算机上进行了离线分析研究，在 2 KVA 单相双绕组模型变压器上进行了空投、内部短路、外部短路和匝间短路试验，证明新的保护在原理上是可行的。基于新原理的继电器动作灵敏可靠，动作时间半周波至 3/4 周波。

论文对算法作了改进，提出了变压器单侧漏电感及铁芯饱和励磁特性的涌流动态测量法，讨论了测量误差对保护的影响。研究证明，算法中窗口长度以半周波为佳，采样频率取 1000Hz 和 600Hz 对保护影响很小。

答辩日期：1987 年 6 月 8 日

直流输电微处理机控制器的研制——硬件部分

电力系统及其自动化专业研究生 李远东 指导教师 张宝霖

为了适应实验室现代化的要求，我们给学校现有的电力系统动态模拟设备配备一套直流系统微处理机控制器，作为实现实验室计算机控制、管理过程中的一部分。

68000 系列的十六位微处理机用作控制主机，控制器能实现 0.1° 分辨率的控制。控制器能控制直流系统实现：起动、停机、定电流、定最小触发滞后角、定熄弧角运行 and 功率反转。

本文是一篇实验研究报告，叙述了实验室直流模型控制系统的方案选择、控制器类型选择、控制用机类型选择、软件和硬件分工，以及硬件部分的设计、控制样机的调试和实施过程。论文的最后，还给出了控制器联接到实验室直流模型上所做的控制器

性能检验实验结果及结果分析。

答辩日期：1987 年 6 月 9 日

大电力系统动态等值

电力系统及其自动化专业研究生 杨攀峰 指导教师 文学宏

本文通过对几种动态等值方法的比较，选择了适合于大电力系统暂态稳定计算的同调等值方法。推导了同调等值法整个过程的数学模型，并编制了实用计算程序。在程序中，同调组的判别采用了两种方法，一种方法是基于发电机的摇摆曲线，另一种方法是基于系统的弱连系。采用了恒等功率技术消去相关发电机母线，电流变换器法消去其余母线。发电机模型聚合采用了传递函数拟合的方法，用 powell 优化方法确定等值模型参数。本文所编制的动态等值程序能够方便地用于不同的稳定程序和不同的数学模型。对西北系统（18 台发电机，75 个节点，139 条线路）的实例计算表明，本文所提供的程序能够大大地化简原系统，节省计算时间，并能够得到相当满意的计算结果。

答辩日期：一九八七年六月九日

直流输电的微机控制器研制—软件部分

电力系统及其自动化专业研究生 李 华 指导教师 周荣光

把直流输电技术引入到交流系统中去，是电力系统发展史上的一个重大事件。当前，无论是在国内，还是在国外，直流工程的发展十分迅速，为了掌握直流输电这门日益发展的新技术，研究交直流混合输电系统的运行规律，在实验室中建设一套完整的直流模型势在必行。本论文的任务就是研制这套直流模型的微机控制器。在文章中，详细地综述了直流控制系统的发展历史，比较了各种控制方式的优缺点，并在此基础上，提出了直流模型的控制系统，详尽地描述了微机控制器所实现的各种控制方式和控制功能，简明地介绍了微机控制器软件的组成，进行了直流模型的静态稳定性分析，最后还进行了直流模型的试验，实验结果表明：微机控制器的运行特性基本上满足设计要求。

答辩日期：1987 年 6 月 9 日

高海拔地区染污绝缘子交流放电特性的研究

高电压工程专业研究生 赵铁滨 指导教师 张仁豫 薛家麒

我国海拔高于 1000 米的山地和高原占全国土地总面积的一半以上。西南、西北等

高海拔地区已建有 110、220、330 千伏高压输电线路。据统计, 这些地区现有的工业和线路经过的盐碱、沙漠、矿区引起的污染已对线路外绝缘形成威胁, 高海拔地区线路污闪对运行部门来说已是个现实问题。随着我国西南、西北地区能源的开发利用, 这些地区的高压输电线路将有巨大发展, 立即开展高海拔地区染污绝缘放电特性的研究有很重要意义。

高海拔地区线路和设备外绝缘问题, 要考虑气象参数对雷电冲击、操作冲击和运行电压的影响, 从绝缘表面状态来看, 有干闪、湿闪和污闪三个方面。尽管气象参数对超高压长间隙放电的影响问题还未完全解决, 但根据已发表的文献, 国外、国内在干闪和湿闪受气象参数影响方面已做了许多工作, 唯独气压对污闪影响的研究国外发表文章很少, 国内尚是空白。

本文采用人工污秽试验方法研究了四种悬式绝缘子在 360~760mmHg 气压范围内的污闪性能。试验结果表明, 染污绝缘子闪络电压随气压减小而降低, 气压越低, 污闪电压下降趋势越大, 污闪电压与气压的关系可近似表示为: $U = U_0 (P/P_0)^n$, $n = 0.44$; 绝缘子沿泄漏路径污闪梯度和临闪时泄漏电流间的关系随气压减小而下降, 可表示为 $E = E_0 (P/P_0)^{0.65} I^{-0.67}$, 低气压下应考虑绝缘子形状对 $E \sim I$ 关系的影响。

本文从交流污闪放电机理方面分析了低气压下染污绝缘子放电特性。在已有交流污闪临界条件计算程序中引入气压的影响, 计算了 X-4.5 悬式绝缘子在各气压下的污闪电压, 理论计算与试验结果相近。染污绝缘子交流闪络电压随气压减小而下降是污层表面局部电弧伏安特性下降、交流电弧恢复条件容易得到满足和电弧弧径增大使剩余污层表面电阻相对减小综合作用的结果。

本文给出了高海拔地区污秽绝缘增强系数 K' ($K' = e^{0.11n(H-1)}$), 并提出了高海拔地区要求的泄漏比距 λ_h' 为 $\lambda_h' = \lambda \cdot K'$, 将 λ_h' 与现有高海拔地区线路运行情况作了比较, 修正值与实际选用的泄漏比距相近。本文最后讨论了高海拔地区系统污闪报警电流值的确定问题。

此外, 本文用光电测雾方法研究了低气压室中雾的特点及其对污闪试验结果的影响。采用升压法, 常压下雾量变化在 2.7~9.7g/m³ 时, 低气压下 (460mmHg) 雾量变化在 0.8~7.3g/m³ 时, 污闪电压基本保持不变。当设备条件合适时, 在低气压室内既抽真空又起蒸汽雾是可行的。

答辩日期: 1986 年 1 月 29 日

DPF 加速阶段等离子体参量测量

高电压工程专业研究生 王新新 指导教师 杨津基

等离子体焦点 (DPF) 是用比较简单的方法产生高温、高密度等离子体的一种装置, 用来探索和研究核聚变。由于等离子体焦点能产生大剂量的脉冲中子, 粒子束和 x 射线, 它也被广泛地用来作为“源”进行脉冲中子照相, 中子治疗, 材料及生物组织

辐射, x 射线光刻以及核武器的模拟等工作。

本论文所研究的等离子体焦点加速阶段是指等离子体电流鞘层向内电极头部加速运动的过程。在加速段, 等离子体的行为以及各种参数对焦点形成有着重要的影响, 有关等离子体参量的测量对进一步研究和提高焦点装置的各项指标和性能, 选择最优的运行条件等都起着重要的意义。

本文用光谱和高频磁探针的方法对等离子体焦点加速阶段进行了初步的研究。本实验所用的焦点装置主要参数是: 贮能电容器组容量 81 微法, 最高充电电压 50KV, 内电极直径 66mm, 内电极长度 260mm, 外电极直径 120mm。

通过测量焦点装置放电时所产生的氢等离子体中氢原子 H_β 线的 Stark 展宽轮廓的半高宽波长 $\Delta\lambda_{1/2}^\circ$, 由公式 $\Delta\lambda_{1/2}^\circ = 2.50 \times 10^{-13} \alpha_{1/2} N_e^{2/3}$, 求得电子密度 N_e 。我们沿内电极轴向布置了七个测量点 (测量点间距离 35mm), 在放电室内氢气压强为 2, 3, 4, 5 Torr, 放电总电流 380KA 的条件下, 测量了加速段电子密度的轴向分布。测得电子密度是 $0.6 \times 10^{16} \text{cm}^{-3} \sim 6.8 \times 10^{16} \text{cm}^{-3}$, 它随气压的增大而增大。电子密度在加速段后期 (靠近内电极端部区域) 比加速段前期 (绝缘子区域) 大得多, 这表明加速段是一个逐渐压缩的过程。本文还对电子密度的测量误差作了详细的讨论, 在本实验中, 电子密度的测量误差约是 17%。误差主要由于实验中拍摄谱线所用的感光板感光特性不一致引起的。

进行磁探针测量时, 我们沿内电极轴向布置了三个测量点 ($Z = 65\text{mm}, 145\text{mm}, 220\text{mm}$), 探针径向位置 r 可以灵活改变。通过测量不同位置 Z 上磁探针信号出现的时间间隔, 可求得等离子体电流鞘层的轴向平均速度 $\bar{V}_z$ 。将磁探针输出的 dB/dt 信号通过积分电路对时间进行积分, 可求得加速段磁场分布 $B(r, t)|_z$ 。根据所得到磁场分布, 通过 Maxwell 方程可求得加速段等离子体电流密度分布, 还可估算沿轴向不同区域等离子体电流损耗。测量结果: 当放电室内氢气压强为 1.5~3Torr, 放电总电流 380KA 时, 电流鞘层轴向平均速度 $\bar{V}_z$ 是 $3.5 \times 10^8 \text{cm/s} \sim 2.3 \times 10^7 \text{cm/s}$, $\bar{V}_z$ 在加速段后期比前期大得多, 它随气压的减小而增大。磁场强度基本上不随气压变化, 这是由于放电总电流基本上不随气压变化所决定的。磁场强度是 10^4Gauss 的数量级, 随半径的增大而减小。在加速段前期电流损耗较大。电流密度的计算结果表明: 加速阶段存在着一个等离子体电流鞘层, 鞘层内电流密度特别大。

答辩日期: 1986 年 5 月 30 日

气体放电中激光诊断技术研究

高电压工程专业研究生 熊金虎 指导教师 杨津基

等离子体焦点装置 (DPF) 是 60 年代发展起来的一种产生高温 (几百—几千 eV), 高密度 ($10^{17} \sim 10^{21} \text{cm}^{-3}$)、短寿命 (5—100ns) 等离子体的装置。这种装置可作为脉冲中子源和脉冲 x 射线源, 同时, 又是探索受控热核聚变的一种简单工具。

等离子体焦点装置实质上是一种快脉冲大电流放电装置。对焦点装置放电发展过程的研究,有助于揭示高温等离子体的内部特性,有助于研究 x 射线发射和中子发射的机制。为此,我们研制了激光测量系统,为测量 DPF 加速阶段和箍缩阶段的电子密度,研究等离子体发展过程作准备。DPF 的电子密度的激光干涉诊断,在国内尚未见报道。

本文的主要工作,是研制激光测量系统,实验中,逐次解决了激光电源的设计组装,激光测量方案选择,测量系统与放电装置的同步等问题。根据等离子体的参数,选用了 $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ 倍频激光器,采用电光调 Q 方式,获得了脉宽为 10 ns,单个脉冲倍频光能量为 15 mJ 的激光输出,基本满足实验要求。

对于激光调 Q 装置的设计,着重考虑了调 Q 电压波形前沿的下降时间问题。调 Q 电压前沿的下降时间对激光脉宽有一定影响,通过实验,测得调 Q 电压前沿下降时间为 22.5 ns,在此条件下,得到了较为满意的激光输出(脉宽 10 ns)。

我们的激光测量系统,要用来测量 DPF 箍缩阶段的电子密度。DPF 箍缩阶段寿命一般为 100 ns 左右,这就要求测量系统与放电装置能很好地同步运行。实验中,采用 DPF 触发、时延装置、激光调 Q 电源、激光器等构成闭环同步系统,以 DPF 的 di/dt 信号作为触发装置的触发信号。这一同步装置(系统)的时延调节范围为 0 - 750 ns,时间分散性为 23.9 ns。保证了放电装置与测量系统能有效地同步运行。

由于 DPF 放电室尚未改装完毕,本测量系统先应用于火花放电中,实验中测量的是火花间隙的放电发展过程。放电装置放电电压为 10 KV,电流 130 A,放电时间(半高宽) $2.44 \mu\text{s}$ 。在放电发展期间,放电通道附近将产生电火花及冲击波,我们分别采用纹影法和双曝光全息干涉法,测量了几个不同时刻冲击波的传播情况和电弧通道的电子密度,结果表明最大电子线密度为 $2.33 \times 10^{18} \text{cm}^{-2}$,冲击波平均传播速度为 2970 m/s,证明了所研制的激光测量系统是成功的。

答辩日期:1986 年 6 月 10 日

真空开关开断后重击穿现象的试验研究

高电压工程专业研究生 张罗平 指导教师 钱家骊 王伯翰

真空开关是一种新型高压开关电器,它具有许多独特的优点,如体积小,结构简单,适于频繁操作等。这种开关不仅克服了传统的油开关在使用和维护当中存在的许多缺陷,而且节省了操作能耗,因而在电力系统中得以广泛应用。然而,目前国产真空开关的性能还不够完善,在运行当中偶尔出现重击穿现象,这个问题是真空开关制造厂及用户十分关心的问题。为了解决重击穿问题,本文从触头运动特性、电气特性及时间特性几方面对真空开关的开断过程进行了比较全面的试验研究。

1. 本文采用模拟试验方法设计的试验线路,可以模拟真空开关工频开断的整个过程。通过在模拟试验线路上进行大量的试验,获得了真空开关开断后重击穿现象的统计

规律。试验中采用瞬态数字记录仪拍摄到单次及多次重击穿现象的全过程,为分析重击穿机理提供了依据。本文在试验研究过程中还把光测技术应用于高压开关触头运动的测量中,自行研制出一种光纤光栅行程测量仪,从而使高压开关电气试验中同时监测触头运动状态的试验方法成为可行的方法,为开关电器动态性能的试验提供了一种新的测量手段。

2. 研究结果表明,真空开关开断后出现的重击穿现象是动态真空绝缘破坏的典型现象,它不仅取决于真空开关开断电路的电压及电流参数,还取决于触头的运动特性及真空灭弧室的结构。试验结果进一步证明了真空绝缘破坏的机理主要在于场发射引起击穿和微粒碰撞引起击穿,在动态真空绝缘中,微粒引起击穿的作用更为显著。

3. 利用真空开关开断过程的模拟试验电路,不仅能够有效地观测到真空开关在试验条件下的重击穿现象,还能推算出运行条件下的重击穿率。统计结果表明,真空开关开断后的重击穿率与试验电压的关系具有 Weibull 分布的形式,即

$$P = \begin{cases} e^{-(1-U/U_b)^{k_1}} & 0 < U \leq U_b \\ 1 & U > U_b \end{cases}$$

式中, P 为重击穿率, U_b 为真空间隙的动态极限击穿电压, U 为工频试验电压, k_1 为电流影响系数, k_1 的值与开断电流有关。这一关系式从统计意义上描述了动态真空绝缘的击穿电压特性,它对真空开关绝缘试验研究具有重要的意义。

4. 利用光纤光栅行程测量仪对真空开关的开断过程进行测试,发现触头弹跳现象十分严重。国产 ZN—10 型真空开关的正常开距为 12.4mm,测得开断时的最大开距为 19.5mm,最小开距为 8.4mm。国产 ZN—6 型真空接触器的试验开距为 4mm,测得开断时的最大开距为 5.8mm,最小开距为 3 mm。从而可知,开断过程中波纹管的最大伸缩长度超过了静态变形量的 45~75%,这将引起波纹管工作寿命大幅度降低,导致真空灭弧室过早损坏。此外,利用光纤光栅行程测量仪可带电监测触头运动的优点,本文同时测量了真空开关开断过程中间隙两端的电压波形及触头行程波形,发现触头弹跳到最小开距时重击穿现象出现得最为频繁,这表明真空开关开断过程中的触头弹跳现象是引起重击穿现象的原因之一,因此在真空开关的设计制造中应尽力避免出现严重的触头弹跳现象。

5. 根据真空开关重击穿频数分布的统计结果,可以发现重击穿频数随时间的变化规律符合指数分布:

$$f(t) = A \cdot \exp(-t/T) \quad t \geq 0$$

式中 A 为频数幅值系数, T 为频数分布衰减时间常数, t 以触头分离时刻为时间零点。此式是重击穿频数分布的近似表达式,它描述了动态真空绝缘的时间特性,表明了随时间增加重击穿率基本按指数规律减小。从试验结果发现,开断电流增加可使 T 值增加。对于被试开关,实测 $T = 20 \sim 23\text{ms}$ 。

6. 目前,关于真空开关动态绝缘特性的试验方法还没有列入 IEC 国际电工协会标准或国家标准,一般对高压开关产品只进行静态绝缘特性试验。由于真空开关动态绝缘性能与静态绝缘性能之间具有明显的差别,仅靠静态绝缘性能试验还不足以保证真空