

3 输电系统的最优控制和最优分散控制(1976—2000)



3.1 往事追叙

1976年后,教研组内开展了学术交流活动。言茂松老师首先在教研组开了“电力系统的最优控制”讲座,系统介绍国外20世纪60年代末—70年代初电力系统的最优控制方面的文献(随后言老师出版了一本32开本的关于电力系统最优控制文献综述内容的书)。此前,50—60年代所流行的经典控制理论是以比例-积分-微分(PID)控制和单变量反馈控制为基础的;我参与或领导了多次实际电力系统稳定控制研究,采用了多种稳定措施,验证手段都是靠动模物理实验研究,缺乏理论指导下的优化设计办法。苏联学者提出的靠发电机机端电压一次微分加二次微分反馈的“强力励磁调节器”,可以使远端电厂的静态稳定极限达到发电机机端电压恒定的静稳极限,这是非常吸引人的结果,但是并没有给出严格的优化设计方法;60年代后期国际上兴起了以多变量控制为基础的现代控制理论,然而当时我们基本处于与世界隔绝的状态。见到国外最优控制理论在电力系统中的应用研究,特别是全状态量反馈的最优控制设计方法恰恰是我们所需要和追求的。于是,我根据言茂松老师介绍的文献,在实验室工程师冯庚烈的配合下,在教研组的模拟计算机上得到了单机对无限大系统中最优励磁控制如何可以明显提高电力系统稳定的结果。当时清华还没有数字计算机,求解 Riccati 方程是向荣智健先生借的小笔记本电脑再辅以算图的办法进行的。随后陈书君、卢强陆续参加进来,仍在模拟计算机上进行研究。再后王仲鸿老师参加进来,由他设计了单机对无限大系统最优励磁控制求解 Riccati 方程的程序,才开始到北大用数字计算机进行数字仿真研究。

当时我们对输电系统最优控制的研究基本是把国外文献已经用了的方法——全状态反馈最优控制、部分输出量反馈次最优控制用在单机对无限大系统的稳定控制。我们的创新只是把国外新发展的最优控制理论的一般方法用于我们所面临和熟悉的电力系统稳定问题,把提高静态稳定、动态稳定、暂态功角稳定等问题,采用最优励磁控制、最优快关汽门控制、电制动控制及它们的综合控制横扫一遍。《最优励磁控制用于改善远距输电系统的稳定性》(《清华大学学报》,1978, No. 2, p. 68-85.)是我们教研组发表的第一篇学术论文,也是国内发表的第一篇现代控制理论用于电力系统的论文。我作为第一作者是因为当时在教研组是我最先带人开展了最优控制的理论联系实际的研究;另外当时的主要研究手段还是模拟计算机,清华还没有数字计算机,教研组里有一台大型模拟计算机,教师中也只有我在用。此后,我们组发表了国内这个领域的一系列研究论文,基本是我和卢强、王仲鸿分别作为第一作者的。

加拿大籍学者余耀南先生是国际上电力系统最优控制的先驱,曾来清华大学讲学,他对我们取得的研究成果给予了充分肯定。我们的成果汇集于专著《输电系统最优控制》,1982年在科学出版社出版,获得1982年中国科技图书一等奖。我们对于输电系统最优控制研究的积极意义是在国内开创了一个范例,把控制理论界的比较新的进展用到电力系统中,解决了电力系统的老大难问题;而且结合电力系统运行的需要研发了工业装置;更重要的是,还通过多次电力系统现场试验去客观地进行了验证。可惜,随后的一些研究者尽管也学习国外先进的理论成果用来分析我们的实际问题,但比较多地追求在SCI或其他核心期刊上发表文章的数量,较少有研究者追求工程实际应用和所带来的实际社会效益,“依样画葫芦”“削足适履”“照猫画虎”、理论脱离实际的研究也并不少见,以致相关的文章发表了成百上千篇而鲜有真正的工业应用者。

最优控制的工业应用是1982年我从德国进修回来之后的事。由王仲鸿和卢强分别率领研究生和合作单位的工程技术人员在碧口水电站先后共做了6次现场试验(我参加了第1次现场试验),每次现场试验都是通过不断增加碧口水电站出力直到达到线路静稳极限使发电机失步来比较最优励磁与普通PID励磁的优越性。经过不断改进,包括纠正设计制造中的错误,克服了工业装置设计和现场整定中的一些问题,才实现了由天津电气传动所制造的模拟式最优励磁控制器(OEC)工业装置的完善和成功投运,大幅提高了碧口水电站的外送静稳极限。西北电管局调度局对项目给予了持续的热情支持。没有研究组全体成员执着的求实精神,



没有合作单位的支持,项目是很难坚持到最后取得圆满成功(图 3-1)。这是国内外最优控制理论用于电力系统工程实际并取得显著实效的首例。项目通过了由西安交通大学夏道止教授和中国电力科学研究院方思立高工主持的鉴定,获得了 1990 年国家科技进步奖三等奖。由于项目参加单位除了研发单位清华大学外,还有装置制造单位天传所、应用立项单位西北电管局总调、装置运行单位碧口水电站等,因名额有限,若要充分包括各方面“有功之臣”是个很大的难题。我当时既是项目的负责人之一又是系主任,出面负责与各合作单位协调获奖者名单,名额不够分,就自然而然、不假思索地把我自己名字刷掉了。所以作为这个国家奖的率先研究者和组织者,我并不是主要获奖者,而只得到了主要完成者证书。其实,工程实施的最优励磁 OEC 的原理框图依然是依据我在模拟计算机上仿真时用的框图,并没有大的改动。但是把理论的东西变成工程现实,并且能够实现工程应用,竟然花了近十年的努力。考虑到在 6 次碧口电厂现场试验中王仲鸿老师负责了 5 次试验直到成功,所以把王老师列为第一获奖人。后来由组内年青老师崔文进负责,研究组曾与河北工学院电工厂合作搞了一台数模混合式最优励磁系统。最优励磁控制曾在一段时间内在国内被推广到其他电站,在行业内具有较大影响力。但是,由于当时没有预见到微机励磁会发展那么快,没有及时把模拟式改为微机式,特别是只注意研究没有注意转化成产品,所以最优励磁控制并没有得到大范围推广;同时研究组内卢强教授与孙元章博士的兴趣转到研究“非线性励磁”,而我的兴趣是搞多机系统中最优控制的应用——分散协调控制,所以线性最优控制的研究就被这两个新的分支所取代了。



图 3-1 最优励磁控制的主要合作者

(a) 自左至右: 卢强,崔文进,王仲鸿,韩英铎; (b) 右起第 1 人为天传所项斌亮工程师

卢强、王仲鸿和我合作的《输电系统最优控制》专著与高景德先生在电机过渡过程和异步机群的自激等方面的著作合在一起申报并获得了国家自然科学奖二等奖,卢强列为第二获奖人,王仲鸿老师也列入获奖人。因为要考虑高先生的其他合作者如郭永基等,我作为系主任和这项申报的组织者与筹划者,没有列入获奖者名单。

由于“线性最优励磁控制”在多机系统里应用时需要全状态量反馈,在信息技术还不够发达的当时是不可能实现的。为了解决多机系统中控制器的最优或次最优设计的问题,我在20世纪80年代后期转而搞多机系统的最优分散协调控制。问题是从实际中来的,方法来自控制理论领域。这在陈准金等的博士论文中体现出来。成果集中于专著《电力系统的最优分散协调控制》一书,1997年由清华大学出版社出版,该书我写了第一稿,陈准金博士完成了终稿。当时全国联网还没提上日程,区域间低频振荡还未突出,广域监测系统(WAMS)技术也还没有问世,所以这部分理论工作多少年来一直束之高阁。在IT设备被大量普及以及WAMS被广泛采用的今天,最优分散协调控制可以作为广域分散控制的理论基础。

3.2 代表性论文(目录)

- [1] 韩英铎,卢强,冯庚烈,陈书君. 最优励磁控制用于改善远距输电系统的稳定性. 清华大学学报,1978, No. 2, p. 68-85.
- [2] 韩英铎,王仲鸿,卢强,冯庚烈. 远距输电系统中大型汽轮发电机组的综合控制. 清华大学科学报告, QH79023(No. 34), 1979年7月.
- [3] 卢强,王仲鸿,韩英铎. 最优快速汽门控制及其动态物理模拟实验研究. 中国科学, 1980, Vol. 4, No. 7, p. 923-938.
- [4] 王仲鸿,韩英铎,崔文进,童陆园. 最优励磁调节器特性的综合分析. 清华大学学报, 1987, Vol. 27, No. 1, p. 20-29.
- [5] 陈准金,韩英铎. 多机电力系统分散最优励磁控制器的研究. 控制理论与应用, 1989, Vol. 6, No. 3, p. 31-38.
- [6] 陈准金,韩英铎,王仲鸿. 多机电力系统分散输出反馈励磁控制器的研究, 2-权矩阵的协调选择. 中国电机工程学报, 1990, Vol. 10, No. 25, p. 37-41.

4 复杂电力系统频率动态过程 研究(1980—1997)

4.1 往事追叙

频率是电力系统运行最重要的指标之一。随着电力系统容量的日益扩大,正常运行情况下电力系统频率质量得到了改善,抗扰能力也相应地有所提高;然而随着大机组的不断増加以及单个机组和输电元件容量的日益加大,系统可能遭受的冲击也加大了。此外由于新的透平的惯性时间常数一般有所降低,一些原有的小机组可能退出一次调节,一些大机组出于经济考虑可能采用滑参数运行,一些负荷对频率的依赖关系减弱,等等,这些因素使得整个电力系统的频率调节能力有不断恶化的可能;维持系统频率稳定的问题也更加突出。我国湖北、贵州、广东、北京等地的电网系统都发生过部分系统的频率崩溃事故,国外系统也屡有发生,其后果及所带来的经济损失均十分严重。

自动按频率减负荷装置是目前防止频率崩溃的最有效措施。但从原理上它是一种试探性控制,该装置运行中过去常常存在“频率悬停”、超调、过切、误动等问题,其抑制频率下降的作用并不理想。

经典的电力系统频率稳定分析都是采用“单机模型”,即认为电力系统的频率动态是“铁板一块”,到处都是一样的。传统电力系统经典著作中,例如,苏联电力系统稳定领域著名学者维尼科夫的名著《电力系统机电过渡过程》中在讲电力系统的频率稳定问题时,都是把整个所研究的系统作为一个统一的刚体来研究,当整个系统中出现有功缺额时系统的频率变化、负荷的频率调节效应也是全系统统一考虑的。在此基础上整定低频减载装置时也是将全系统作为一个整体来考虑的。这

此图显示了1978年4月13日西德Isar核电站跳掉66万kW机组时,测得的西欧电力系统中距离电站分别为60km、210km、280km的母线瞬时频率。

对于整个西欧、南欧和北欧都联在一起的一个庞大的、参数未知的复杂大电网,文献又很少涉及其频率动态问题,下手解决这个问题实在很困难。我的优势是做过大量电力系统动态物理模拟实验,还研究过首钢冲击负荷对华北电力系统的影响问题,对研究问题的物理本质是清楚的。本来Hosemann教授是希望我在一个月内看完资料然后同我讨论如何开展研究的,但我在一个月内不仅看完了他提供的资料,还按照传统的单机模型做出了些结果并拿去同他讨论,他看了很高兴,但表示这种简化模型的结果不是他想要的,他想要的是在多机模型下的结果。他主动提出如果我愿意,可以再完成一篇博士论文,因为他知道我在国内有过研究生的经历。我请示了当时的电机系领导杨秉寿教授和文学宓教授,他们指示如果不会拖延进修时间,“顺手牵羊”拿个博士学位回来也是可以的。于是我就在Hosemann教授的指导下作起了关于复杂电力系统频率动态过程的博士论文研究。我参考了Hosemann教授和前面一位博士研究生提出的电相似理论的合理思路,纠正了该博士采用均匀长线模型所存在的问题,首次给出了同时考虑电力系统频率动态过程的时间分布和空间分布的两维描述;首次提出把这一复杂的具有集中参数的电力大系统机电过渡过程问题经过电相似变换简化成具有分布参数的等值非均匀长线的过渡过程计算问题;根据实际电力系统结构的不同特点建立了“指数线”和“贝塞尔线”两种非均匀长线动态等值模型,定义了一些特征参数,给出了若干典型网络拓扑下频率动态过程的解析表达式和参数辨识方法;初次在理论分析和数值计算两方面研究了频率变化在电力系统中传播速度的问题。

因所在的巴伐利亚州有规定,博士研究生注册时间不满4年是不允许答辩的,于是Hosemann教授建议我将总共2年的洪堡研究奖学金项目时间留下6个月先回国,等满足注册的时间要求后再到西德答辩,又考虑到我到时间是否能够回到西德答辩实际是个未知数,Hosemann教授又特准我将部分研究成果在我1982年回国前发表在西德著名刊物《电工技术文献》(*Arch. f. Elektrotechn.* 1982)上;完整的结果写成德国的工程科学博士论文《借助于非均匀线等值的扩展式电力系统中功率-频率动态过程的计算》(*Berechnung der Wirkleistungs-Frequenz Ausgleichsvorgaenge in ausgedehnten Netzen mit Hilfe inhomogener Ersatzleitungen*),在校系两级领导的大力支持下,我获批准于1986年3月专程去德国通过了答辩。我去西德进修前,因为校内的科研工作也很忙,根本没有抽出时间学德语,以我到德国后仅在歌德语言学



院学过半年初级班德语的水平,啃德文文献已经非常吃力,写出德语化的论文实际上是不可能的。程式先生给了我很大帮助,我每写好一章就去程先生家和他讨论,他热心地帮我修改。我的论文寄给 Hosemann 教授后他又逐字逐句帮我修改文字(图 4-2、图 4-3)。两位老先生一丝不苟的精神使我终身难忘!



图 4-2 博士答辩后按当地习俗坐彩车游街, Hosemann 教授蹬车,我坐车



图 4-3 与 Hosemann 教授在一起,2002 年祝贺他 80 寿辰,中间为 Hosemann 教授

根据三峡水电站建设将形成的华中-华东联网的新情况,由我负责了“七五”国家重点科技攻关项目的子课题——“多大区互联系统频率动态过程的分析及低频减载装置的整定”。在我西德研究的基础上,我和当时的研究生闵勇、洪绍斌、何学农等人一起进一步从理论和实际两方面系统地研究了我国多地区互联电力系统中在有功缺额冲击下的频率动态过程的特点、规律、计算方法,低频减载装置的整定原则、整定方法和校验准则;根据复杂电力系统动态频率具有时空分布的新机理提出了“电力系统同频聚合动态等值”“虚拟转子法”等新概念和新原理,克服了此前人们沿用的“周期法”测动态频率的局限性以及一些电力系统分析软件在动态频率处理时的错误;并与东北电网合作立项进行了该系统的频率动态特性分析,给出的低频减载整定方案得到工程实施,提高了东北电力系统的频率稳定水平;以闵勇为首的研究生们还开发了具有 5 万多条语句的适用于分析复杂电力系统频率动态过程及优化整定低频减载系统的电力系统中期稳定软件包,填补了国内空白,并成功地用于国内多处区域电网和省级电网,使这些电网的频率稳定安全控制达到新

水平。主要成果都是与东北电管局合作完成的,项目得到时任东北电网调度局局长的老同学丁道齐的大力支持,高元楷教授级高级工程师、王漪工程师在项目推进和工程实施中都发挥了重要作用,大家合作愉快,并一起获得 1992 年国家科技进步奖二等奖。

4.2 代表性论文(目录)

- [1] Hosemann G., Han Ying-duo. Analysis of Power-Frequency Dynamic Process in Extended Transmission Systems. Archiv fuer Elektrotechnik 65 (1982), p. 327-339.
- [2] 韩英铎. 电力系统中功率-频率动态过程及借助于非均匀线动态等值,(1)-指数线. 清华大学学报,1989, No. 5.
- [3] 韩英铎. 电力系统中功率-频率动态过程及借助于非均匀线动态等值,(2)-贝塞尔线. 清华大学学报,1989, No. 5.
- [4] 韩英铎, 闵勇, 洪绍斌. 复杂扩展式电力系统功率频率动态过程分析. 电力系统自动化,1991 年第 Z1 期.
- [5] 韩英铎, 闵勇, 洪绍斌. 复杂扩展式电力系统中低频减载装置的整定. 电力系统自动化,1992, Vol. 16, No. 1, p. 34-39.
- [6] 韩英铎, 闵勇, 何学农, 胡琳, 周金明. 电力系统动态频率的新概念和新算法. 电力系统自动化,1993 年第 10 期.
- [7] 韩英铎, 王仲鸿, 闵勇, 何学农. 电力系统中动态频率的定义及虚拟转子法动态频率测量方案. 清华大学学报,1993, Vol. 33, No. 1.
- [8] 闵勇, 丁仁杰, 熊炜华, 韩英铎. 信号幅值变化时的电力系统动态频率测量. 清华大学学报(自然科学版),1997 年第 7 期.