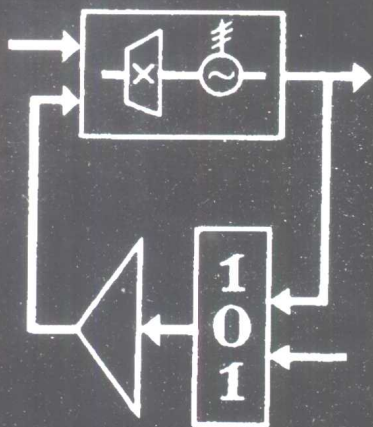




同步发电机的励磁调节

[俄] A.A. 尤尔甘诺夫 著
B.A. 科日夫尼科夫

王晓玲 常林 译 苏为民 校

РЕГУЛИРОВАНИЕ
ВОЗБУЖДЕНИЯ
СИНХРОННЫХ
ГЕНЕРАТОРОВ



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

同步发电机的励磁调节

[俄] A. A. 尤尔甘诺夫 著
B. A. 科日夫尼科夫
王晓玲 常林 译 苏为民 校



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书叙述了电站外部电路等值化、励磁调节系统的模型和对运行在电力系统中的同步发电机稳定性分析的独特方法。详细介绍了现代的和未来的励磁调节器,以及在投入工作和运行过程中检查和调整调节器的设备。提供了解决励磁调节器装置设计、研究和诊断问题的综合 IBM 程序。

本书可供专门从事励磁系统研制和运行的工程师及科学工作者、调试单位的工作人员、大专院校电力专业学生的阅读。

图书在版编目 (CIP) 数据

同步发电机的励磁调节/(俄)尤尔甘诺夫,(俄)科日夫尼科夫著;王晓玲,常林译. —北京:中国电力出版社,2000.9

ISBN 7-5083-0348-2

I. 同… II. ①尤…②科…③王…④常… III. 同步发电机-励磁调节器 IV. TM341

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 32186 号
北京市版权局著作权合同登记图字: 01—2000—2190 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 [http://www. cepp. com. cn](http://www.cepp.com.cn))

水电印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2000 年 9 月第一版 2000 年 9 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 5.75 印张 124 千字
印数 0001—2000 册 定价 11.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

序

现代电力系统机组容量大、输出电压高、响应速度快，因而电网的安全稳定运行，就显得越来越重要。励磁系统是同步发电机的重要组成部分，它不仅直接影响发电机的运行特性，还对电力系统的稳定性起着重要的作用。

随着国内俄罗斯大机组的不断引进，在电力系统内 200~800MW 容量的火电机组目前已达 20 余台，了解和吸收俄罗斯机组励磁系统的特点，就成为重要的工作。近年来，国内在关于励磁系统原理和技术方面，以及励磁系统对电网的影响和作用方面的技术书籍出版不多，特别是关于俄罗斯机组励磁系统介绍的书籍就更加缺少，本书的翻译出版就是希望在这方面做些有益的工作。

本文作者是俄罗斯技术科学副博士，从事俄罗斯发电机组励磁系统的研制及生产试验工作，具有丰富的理论知识和生产实践经验。作者在书中系统地介绍了同步发电机励磁系统的数学模型，同步发电机的静态稳定性的评价方法，励磁调节器的构成原理及数学模型，以及提高励磁系统可靠性和有效性的方法等方面的内容，对从事电力系统科研、设计、生产运行和调试的工程技术人员具有很高的参考价值，也可供大专院校电力系统专业的师生参考。

我院高级工程师王晓玲、常林、苏为民三位同志承担了全书内容的翻译校对工作，并和原作者一起探讨了许多技术性的问题，为本书中文版的出版作出了积极的努力。我们聘请国内知名励磁专家、哈尔滨电站成套设备设计研究所教授级高级工程师李基成先生对全书进行了审核并作跋，特此致谢。此外还要特别感谢两位俄罗斯作者对本书的中文翻译和出版工作给予的大力支持和帮助。

华北电力科学研究院院长 赵 鹏

前言

电力技术的发展总是要求综合解决理论和实践的课题，其中研究和开发提高线路输送能力的课题占有重要的位置。许多科学和设计单位富有成效地解决了这个课题，所进行的研究工作对电力系统稳定性的理论和实践均有重要的贡献。

这些研究工作的主要成果之一，就是在前苏联电站同步发电机中采用了强力式励磁调节，并以最低的投资费用保证了发电机在常规和非常规情况下的运行能力，提高了电能输送过程中的稳定性和可靠性，以及无功功率分配和将电网损耗降到最低的问题。因此，从40年代起在前苏联实行的技术政策，在当前的90年代看来是很有远见的。这一政策规定组建学术团体，建立当时最先进的研究基地（电力系统数字模拟-物理模型）。

对远距离输电稳定性的研究早在战前的年代就已开始。前苏联的励磁调节基础理论是由一批诸如：A. A. 戈列夫，П. C. 日丹诺夫和 A. C. 列别捷夫等著名学者奠定基础的。然而大规模的研制工作是从50年代开始的，由于建设了古比雪夫-莫斯科和斯大林格勒-莫斯科输电线路，而在当时用电磁式惯性励磁系统不可能保证这些线路的稳定性，因此建立了快速离子励磁，随后是晶闸的励磁系统。这些工作不仅在前苏联，而且在世界上都曾是创始性的。其研究结果，尤其是对远距离输电的水轮发电机稳定性研究，以及励磁系统的结构和特性问题分析，至今仍有意义。

理论基础沿两个有时相互对立、但始终相互补充的学术方向发展，它们可称作“莫斯科动力学院（МЭИ）学派”和“列宁格勒工业大学（ЛПИ）学派”。对此下列学者做出了很大的学术贡献：B. A. 维尼柯夫、Г. P. 贺尔岑伯克、И. A. 格列鲍夫、И. A. 格鲁捷夫、M. Л. 列文斯坦、И. B. 李特根斯、C. A. 索瓦洛夫、H. И. 索科洛夫、O. B. 谢尔巴乔夫等等。

他们出版了一系列学术专著和教科书^[1-8]，形成了反映70年代理论研究水平的完整理论，并培育出整整一代工程师和科学工作者。特别应当指出，俄罗斯学者对重要技术课题处理方法的独创性，使得他们大大超前于国外同行。如果说西方先进国家直到80年代为止还坚持这样的论点，即认为在运行稳定的大型电力系统中采用比例型惯性励磁系统是完全可以胜任的，那么在前苏联则早已提出了研究和采用按运行参数导数稳定的励磁调节任务，并称之为“强力式调节”。电力事业的发展充分证明了这一概念的正确性，现在它已被世界上所有主要电气公司所运用。

但是，虽然装有强力式自动励磁调节器（APB）的发电机在长时间中成功的运行，但也出现了一些反常的情况，例如，在一些运行和调试单位为了减少调试工作内容和所谓“提高”设备可靠性对APB流程进行减化，减少功能组件数量，然而经设备研制人员连续进行的设计监督表明，在未对可能的后果进行充分分析的情况下，进行频繁的变更将在实践中导致相反结果。此外，还遇到这样的情况：电厂人员没有简易的分析软件和检查、调整励

磁系统的设备,不能优质地完成全部的技术操作规程工作。其结果可能是损坏贵重的设备和造成中断供电的严重系统事故。

多年来作者在从事于励磁调节方面的科研和工程工作中确信:当前的迫切任务是,既要 APB 和励磁机进行改进,又要消除理论和设计、调试和设备运行之间的脱节现象。

遗憾的是,80 年代由于不断再版其他名著而急剧减少了出版励磁调节问题的学术专著。原版著作仅有 И. Л. 奥希波夫和 Ю. Г. 沙卡利亚娜的教科书^[9],《电力事业中的微处理机》^[10],М. Л. 列文斯坦和 О. В. 谢尔巴乔夫的教学参考书^[11],这是一些发行量很小的、具有真正悲剧命运的书籍。它们早在 1966 年就已写成,但直到 1994 年才问世。因此,作者许多超越当时的有价值的观点未被技术界所了解,并被付之实现。但在国外文献资料中曾提到过安德尔松和福阿特的书籍^[12]。

由于技术刊物和文集的大量文章都是讨论具体问题的,并在篇幅上受到限制。而停止出版完整的图书索引资料,又使新一代研究人员经常片面地了解问题,实践工程师也缺少简述问题实质的技术参考书。

鉴于此,向读者推荐本书,其内容包括有:

- (1) 全面系统地阐述了目前在俄罗斯使用的励磁系统和 APB 的结构、功能和特点;
- (2) 简要介绍了在电力系统运行的发电机、励磁系统和 APB 的数学描述方法;
- (3) 介绍了线性化条件下对电站静态稳定性影响的快速评估方法,以及现有调节系统运行过程中出现大、小扰动时,对它们进行快速检查、调整的方法;

列出了研究励磁调节系统稳定性的 IBM 实用程序包的功能。

为了理解所述材料,读者无须通晓专门的数学章节和自动调节理论。只要熟悉运算子分析基础和频率法就足够了。

作者希望本书能够对从事电力系统设计、自动调节系统研制和运行的工程师、以及大学电气专业的学生提供有益的帮助。

作者感谢本书编辑科学院院士 И. А. 格列鲍夫、审稿技术科学博士 С. В. 斯莫洛维克教授和技术科学副博士 М. Л. 鲍加齐科夫提出的许多宝贵意见,使得本书的叙述更加清晰。此外,还对在书稿出版准备工作中给予作者非常宝贵帮助的 Г. В. 柳巴米洛娃和 В. С. 彼得洛夫致以谢意。

作者

符 号 说 明

P_z, Q_z ——电站总的有功和无功功率	e, B, H ——额定励磁单位, 等于电机在额定转速下带额定负载且定子电压为额定值时的单位电气参数
P, Q ——电站等效发电机的有功和无功功率	$\frac{e, B, H}{e, B, X, X_s} = E_{qn} = U_{fn}$
I_a, I_r ——等效发电机定子的有功和无功电流	$S_u = \frac{\Delta U_r}{\Delta Q} \times 100\%$ ——无功电压调差系数
i_d, i_q ——定子的纵、横轴电流	K_{0u}, K_{1u} ——励磁调节器发电机电压偏差和一阶导数的增益系数
U_r, U_c ——发电机和无穷大功率母线的等效电压	K_{1if} ——励磁调节器励磁电流一阶导数的增益系数
$\Theta_r, \Theta_{on}, \Theta$ ——输电内角、外角和全角	K_{of}, K_{1f} ——励磁调节器的频率偏差和一阶导数的增益系数
μ ——定子回路与励磁回路磁耦合系数	K_f ——考虑到频率偏差和导数通道总作用的等效系数
σ ——相关漏磁系数, 附加到磁耦合系数中	B_{HOM} ——电压额定值
T_{d0}, T'_d ——纵轴-空载时间常数和暂态时间常数	B_u ——输入
ω_0 ——电机的同步角频率	B_{ux} ——输出
f ——电机电动势频率	r ——发电机
f_n ——定子电压频率	e, B ——励磁单位
T_j ——机组转子惯性时间常数, s	e, H ——电压单位
$H_j = \frac{T_j}{\omega_0}$ ——电机的转动惯量	e, T ——电流单位
p ——微分符号	$e, T, B / c$ ——励磁电流单位, s
s ——转子转差率	$e, T, p / c$ ——转子电流单位, s
E_q ——电机横轴电抗后的电动势	o, e ——标么值
E'_q ——电机纵轴暂态电动势	$pot.$ ——转子
U_f ——施加在励磁回路的电压	$U_{a, rot}$ ——转子基准电压
e, B, X, X_s ——空载励磁单位, 等于额定转速下定子空载且达到额定定子电压下的单位电气参数	

目 录

序

前言

符号说明

第 1 章 运行在电力系统中的同步电机励磁调节系统数学模型	1
1.1 电站外部电路的等效方法	1
1.2 用于研究电站内部及外部机组相对运动的数学模型	3
1.3 发电机自动电压调节系统的结构	7
第 2 章 电压偏差的极限允许放大系数	10
2.1 稳定性的条件	10
2.2 比例调节 ($K_{1u}=K_{1f}=K_f=0$)	11
2.2.1 高值电压调节倍数情况下振荡稳定性极限值	12
2.2.2 极限允许方式	16
2.3 稳定参数对电压极限放大倍数的影响	17
2.4 发电机电抗对静态稳定性的影响	18
第 3 章 励磁调节的同步电机静态稳定性	21
3.1 静态稳定性的快速评价方法	21
3.1.1 非周期稳定性极限	22
3.1.2 机电振荡的稳定极限	25
3.1.3 推荐使用的方法	27
3.2 采用稳定措施时的静态稳定性	27
3.3 内部机组相对运动	31
第 4 章 同步电机自动励磁调节器	34
4.1 同步电机强力式励磁调节的发展	34
4.2 APB-CДП11 的功能和构成	35
4.2.1 调节器的功能	35
4.2.2 调节器的构成	36
4.3 调节器的标准电路	38
4.3.1 同步滤波器	38

4.3.2 相敏整流器	39
4.3.3 可控积分器	40
4.3.4 快速存储器	40
4.4 APB-CДП1型调节器各单元的结构和工作原理	41
4.4.1 电压单元	41
4.4.2 无功电流单元	42
4.4.3 频率和保护单元	44
4.5 自动励磁调节器 APB-CДП1的数学模型	45
4.6 强力式励磁调节器发展的第四阶段	49
4.7 APH的功能和组成	50
4.8 APH各单元的构造和工作	51
4.8.1 测量单元	51
4.8.2 转子电流变送器	52
4.8.3 反馈单元	53
4.8.4 运算单元	53
4.9 APH的数学模型	53
第5章 现代同步发电机励磁系统的数学描述	56
5.1 静止晶闸管励磁系统	56
5.2 晶闸管控制系统的数学模型	58
5.3 静止晶闸管励磁系统的简化数学模型	59
5.4 无刷励磁系统	59
5.5 无刷二极管励磁机的简化数学模型	62
5.6 改进的高频励磁系统	65
第6章 提高励磁调节可靠性和效率的方法	68
6.1 励磁调节系统检查和调整的方法及试验装置	68
6.2 双通道励磁调节系统	70
第7章 应用程序包《模型》简介	72
7.1 概述	72
7.2 程序包模块简介	73
参考文献	77
跋	80

运行在电力系统中的同步电机 励磁调节系统数学模型

1.1 电站外部电路的等效方法

同步发电机静态稳定性理论是在最简单的电力系统“电机-线路-无穷大功率母线”上完整地建立起来的。许多作者都对该系统进行了详尽分析。对于复杂系统的稳定性的研究，通常推荐采用同样的方法进行，包括分析微分方程组、频率法、 D -域划分法、计算变量的复数幅值、直接计算特征方程的根和各种变换方法。

但是，复杂系统微分方程的总阶数，尤其是在考虑励磁调节时，会更急剧地增长。现代的计算方法和数字计算机的使用，虽在一定程度上可以克服别尔曼诺夫“繁琐的因次论”，但是它们的能力还是受到限制。此外，随着微分方程阶数的增长，计算时间也相应增加，提高了对电子计算机存储量和计算速度的要求。而另一方面，即使得出了算题的解，面对出现的大量信息，研究人员不得不花费精力去整理和理解其含义。结果，使得选择最佳调节规律和系数的问题变得极为复杂。

一般采用逐步逼近法，给定除一个电站外全部电站的调节系数，并确定这个电站的最佳调节规律。然后，把它记录下来，为下一个电站重复计算，等等。这种经验方法工作量很大，且没有任何获得解的保证，采用这种方法将得到一般的而不是特殊的解。

为了解决这些困难，研究人员在 И. А. 格鲁捷夫领导下研究提出了微分方程组降幂数学法，并寻找出给定的整函数的极值，同时求出特征方程所有的根^[13,14]。作为其结果是编制了专用程序《查询》^[15]。但是，即使在这种情况下，根据获得的结果，仍然很难对具体电站的 APB 设计和调整提出建议。

所有这些方法只能供那些经过专门数学训练、水平很高的研究人员使用，而且还需花费很大精力。此外，调度管理和电站运行人员等用户还会相当尖锐地提出评估励磁调节器调整质量和具体电站运行是否稳定的问题。而上述计算能力可以得到的关于外部线路、其他电站发电机参数、系统内过电流和负荷的信息量又是相当有限的。

基于这种情况使得科研人员总在寻求比较简单的，同时又可靠的电力系统线路和运行方式的等效方法^[16~20]。最理想的是用“无限大功率母线”等效线路代替被研究电站的全部外部电路。这样就可最有效地利用该电站在具体条件下积累的全部研究经验。

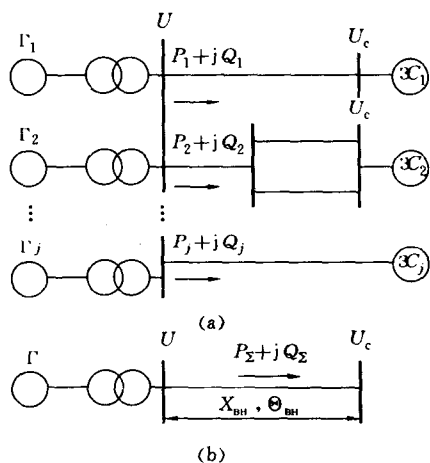


图1.1 计算的输电线路
(a) 原始电路图; (b) 等效电路图

在研究制定这种方法^[21]时,已特别注意到接入电力系统的电站的稳定性、选择和调整励磁调节系统时,绝大部分情况下被研究设备相对于大型电网同频率运行是关键所在。因此可以用振荡中心电压 U_c 相位不变的母线替代整个联合电网,用阻抗为 X_{BH} 的线路替代复杂的电气接线。这时,原始接线 [图1.1 (a)] 的全部变换,可严格由等效电路 [图1.1 (b)] 反映出来。就电站母线而言,外部线路状态、负荷和连接的任何变化都可视为相位不变的电压 U_c 模数值的变更,而数值 U 、 P_z 、 Q_z 在两种接线中是相等的。困难的是求出等效电路的参数 X_{BH} 。如已知 X_{BH} 的数值,即可按当地信息计算出不变的 U_c 值。

现在,让我们来研究已知的等效电路有功和无功率方程

$$P_z = \frac{UU_c}{X_{BH}} \sin \Theta_{BH} \quad (1.1)$$

$$Q_z = \frac{U^2 - UU_c \cos \Theta_{BH}}{X_{BH}} \quad (1.2)$$

将式 (1.1) 和式 (1.2) 平方后再相加,整理后得

$$I_z^2 X_{BH}^2 - 2Q_z X_{BH} + U^2 - U_c^2 = 0 \quad (1.3)$$

考虑两种不同的运行方式,带入式 (1.3) 后,再求其差,得出带有一个未知数 X_{BH} 的二次方程。

$$(I_{z1}^2 - I_{z2}^2) X_{BH}^2 - 2(Q_{z1} - Q_{z2}) X_{BH} + U_1^2 - U_2^2 = 0 \quad (1.4)$$

式中

$$I_z^2 = \frac{P_z^2 + Q_z^2}{U_i^2}; \quad P_z = \sum_{j=1}^n P_{ji}; \quad Q_z = \sum_{j=1}^n Q_{ji}$$

在电站正常运行时,应以最短的时间完成式 (1.4) 所要求的两种运行状态的转换,并记录这两种状态下 U_i 、 P_z 、 Q_z 数值。实际上,最简便的方法是当 $i=1$ 时,电站母线电压按最大允许值考虑,当 $i=2$ 时,考虑发电机消耗无功条件,母线电压按最低允许值考虑。进行调度计算时,应根据实验结果用专门的程序,例如^[22,23],完成计算。求 X_{BH} 的全部计算都可以用有名值或标么值 (o. e.) 进行。

求出 X_{BH} 之后,可用两种方法给定电站的运行方式。

(1) 给定 P 、 U_r 和 U_c 数值,计算无功功率 Q ,在近似调度计算中采用本方法。

(2) 给定 P 、 Q 和 U_r 数值,用式 (1.3) 求出下列等效母线上的电压模数

$$U_c = \sqrt{(U_r - X_{BH} I_r)^2 + (X_{BH} I_q)^2} \quad (1.5)$$

在计算具体电站运行方式和稳定性极限时,采用式 (1.5)。

求 X_{∞} 和运行方式的全部计算都是自动完成的, 可用应用程序包 IIIII《模型》的程序块《 X_{∞} 计算》和《方式计算》进行计算。

采用简化的接线, 至少可把计算时间缩短到 $\frac{1}{20}$, 在计算中通过自动改变功率值使改变计算条件的过程自动化, 可以精确地得到被研究电站所需的励磁调节特性曲线, 因而提高了计算的准确性和根据计算提出的建议的可靠性。

采用《区域》程序^[24]对俄罗斯西北电网的原始模型进行计算(该电网拥有68台发电机、252个枢纽站和355条线路), 同时用《检索》程序对一个简化模型进行计算(该简化模型是一个试验网络, 由电网设计院设计, 共接有7台功率不同的发电机), 将两种计算结果进行比较后, 可评估所采用方法的准确性。

在第一种情况下, 主要电站的 X_{∞} 标么值为: 列宁格勒核电站1期和2期分别为0.276和0.374; 波斯科夫核电站为0.2; 科利核电站为0.49。在 X_{∞} 相对计算值变化 $\pm 5\%$ 以及在完整接线和等效接线中的励磁调节器模型相同的条件下, 这些电站的稳定性范围实际上是重合的。在独联体20多个电站和保加利亚科兹洛杜核电站进行的实验表明, X_{∞} 的计算误差不超过5%。在基准功率等于接到电站母线的发电机视在总功率时, 等效外阻抗的标么值为0.1~0.5。这种情况下, X_{∞} 是一个恒定参数, 只有在电站母线上有新线路投入运行时或在检修方式下才可能引起微弱的变化。而开关站以后的线路变化对其数值影响不大。

ABB 公司在设计电力系统稳定器中, 采用了确定至电力系统中心的等效阻抗 X_{∞} 使外部电路等值化的思想^[26]。然而, 与准确计算 X_{∞} 不同的是, 确定等效 X_{∞} 的方法是这样的: 根据实际运行情况, 事先估计给出三个 X_{∞} 值, 然后由已知的 P_{Σ} 、 Q_{Σ} 、 U 值变换式 (1.1) 和式 (1.2) 得出下式

$$\Theta_{\infty} = \arctg \frac{P_{\Sigma}}{U^2/X_{\infty} - Q_{\Sigma}}$$

计算出不同的相位角 Θ_{∞} , 将它们随时间的变化与在同一点上测得的相位角变化作比较。当某个计算相位角值和测得的相位角值重合得最好时, 就可以选择这个 X_{∞} 值, 作为外部阻抗的固定值。但这种方法有很严重的缺陷:

1. 实际上不能仅根据部分信息获得真实相位角的准确值。
2. 为了证明二者相同, 必须等待外部电路出现相当剧烈的扰动。
3. 难以在每个具体的情况下评估出选择的 X_{∞} 值与实际值相差多少, 这种方法的误差总是在变化。

我们所推荐的外部电路等效方法比较简单、可靠, 并可保证较高的精确性。这种方法被成功地用于研制励磁调节设备, 建议广泛应用于电站、科研和设计单位。

1.2 用于研究电站内部及外部机组相对运动的数学模型

励磁调节系统的主要任务之一是使电站稳定运行。相对于等效系统全部发电机的共同运行, 在文献中被称为“外部相对运动”。同时, 在公用母线上运行的单台发电机相对于 U 都是稳定的, 机组相互之间交换电能, 并进行所谓的内部相对运动。各种调节规律都具有内在

矛盾, 导致一种振荡完全平复后, 会突出另一种振荡。要对各种调节器进行比较, 必须研究外部和内部机组的相对运动。所以, 必须具有相当完整又复杂的、可反映两种运动规律的模型, 或者具有两个比较简单的对象模型: 一个用于外部机组相对运动情况, 另一个用于内部机组相对运动情况, 以便研究任一调节器的效果或调节规律。

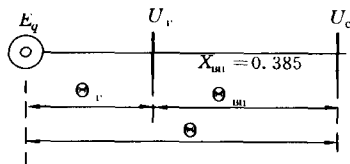


图1.2 被研究的输电线路主要计算方案

$$\begin{aligned} X_d &= X_q = 2.488; \quad X_{d\Sigma} = X_d + X_m; \\ \alpha &= X_d' / X_{d\Sigma}; \quad X_d' = 0.368; \quad X_{d\Sigma}' = X_d' + X_m; \\ \mu_r &= (X_d - X_d') / X_d; \\ T_{d0} &= 5.87 \text{ s}; \quad \sigma_r = 1 - \mu_r; \\ \sigma &= 1 - \mu; \quad \mu = (X_d - X_d') / X_{d\Sigma}; \\ T_{d'} &= T_{d0} X_d' / X_d; \quad T_d' = T_{d0} X_{d\Sigma}' / X_{d\Sigma}; \\ T_j &= 6.49 \text{ s}; \quad H_j = T_j / \omega_0 \end{aligned}$$

在发电机参数符合电站等效发电机参数^[3]、并经过 X_m 与电力系统连接条件下, 这种外部运动模型可以借助于“电机—线路—母线”(见图1.2)的派克—格列夫方程来描述。根据以前的理论和实验研究, 可以区分出决定因素并忽略次要环节。通常^[1,3]忽略电阻、变压和滑差电势、以及自动校正等因素。同步电机转子上存在阻尼回路, 可以在转子运动方程中引入与相位角(阻尼力矩)一阶导数成正比的项, 予以近似表达。其确定方法在^[27,28]中叙述。

根据这些假设, 描述输电系统工作的方程组具有以下形式^[5]

$$\begin{aligned} X_{q\Sigma} i_q &= U_c \sin \Theta \\ X_{d\Sigma} i_d + E_q &= U_c \cos \Theta \\ (1 + p T_{d0}) E_q + p T_{d0} (X_d - X_d') i_d &= U_f \\ T_j p \delta + D p \Theta + P &= M, \\ p \Theta &= \omega s, \quad p = d/dt \\ P &= \frac{E_q U_c}{X_{d\Sigma}} \sin \Theta + \frac{U_c^2 (X_d - X_q)}{2 X_{d\Sigma} X_{d\Sigma}} \sin 2 \Theta \end{aligned} \quad (1.6)$$

线性化的方程组为

$$\begin{aligned} X_{q\Sigma} \Delta i_q &= U_c \cos \Theta_0 \Delta \Theta \\ \Delta E_q + X_{d\Sigma} \Delta i_d &= -U_c \sin \Theta_0 \Delta \Theta \\ p T_{d0} (X_d - X_d') \Delta i_d + (1 + p T_{d0}) \Delta E_q &= \Delta U_f \\ H_j p^2 \Delta \Theta + D p \Delta \Theta + \frac{\partial P}{\partial \Theta} \Delta \Theta + \frac{\partial P}{\partial E_q} \Delta E_q &= 0 \\ H_j &= T_j / \omega_0 \end{aligned} \quad (1.7)$$

经过不复杂的转换, 方程组(1.7)可以转化为两个方程:

$$\Delta E_q = \frac{\Delta U_f + p \mu T_{d0} U_c \sin \Theta_0 \Delta \Theta}{1 + p T_d'} \quad (1.8)$$

$$\Delta \Theta = - \frac{U_c \sin \Theta_0}{H_j X_{d\Sigma} p^2 + D X_{d\Sigma} p + E_{q0} U_c \cos \Theta_0 + U_c^2 \cos 2 \Theta_0 (X_d - X_q) / X_{q\Sigma}} \Delta E_q \quad (1.9)$$

式中

$$\mu = \frac{X_d - X_d'}{X_{d\Sigma}'}$$

$$T'_d = T_{d0} \frac{X'_d + X_{bh}}{X_d + X_{bh}} = T_{d0} \frac{X'_{d\Sigma}}{X_{d\Sigma}}$$

对于水轮发电机，应使用方程 (1.9)，对于汽轮发电机 $X_d = X_q$ 则运动方程可简化为：

$$\Delta\Theta = - \frac{U_c \sin\Theta_0}{H_j X_{d\Sigma} p^2 + D X_{d\Sigma} p + E_q U_c \cos\Theta_0} \Sigma E_q \quad (1.10)$$

依此调节对象（并网工作的同步发电机）可以用图1.3框图形式表示。在此图中，非周期环节 W_f 表示励磁回路，强制环节 W_c 表示电枢反应，而振荡环节 W_{osc} 表示水轮发电机式 (1.9) 或汽轮发电机式 (1.10) 转子运动。

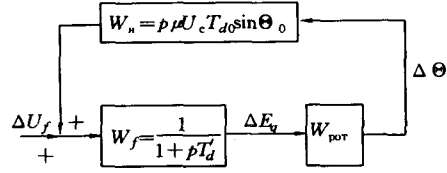


图1.3 用于研究电站外部机组相对运动的框图

至于内部机组相对运动，在最近40年中由 B. M. 马秋希内^[29,30]分析描述过，对于多台发电机经输电线在无穷大功率母线并联运行的系统，可用系统特性状态方程来描述其行为，而研究由此方程得到的计算行列式表明“系统的特征多项式可被分成 n 个因子 (n ——电站的电机数)，其中一个为等效发电机的特征值，其余的 ($n-1$) 是相同的，并反映某两台发电机的相对运动”^[30]。

上述论点完全正确，然而后来^[31]却根据这个论点作出不充分的具体假设：为了分析内部相对运动的稳定性，只要将计算电站母线认为是无穷大功率母线即可。由此而推论：在电站任意数量的发电机（其中包括两台）内部机组振荡时，公用母线上的电压 U 幅值和相位不变。实际上此电压可能是振荡的。并列工作的发电机台数越少，电压振荡就越大。

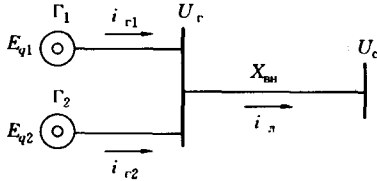


图1.4 用于研究内部机组相对运动的等效电路

为了建立正确的计算模型，我们来研究一下两台接入公用母线，并经过阻抗为 X_{bh} 的线路在无穷大功率系统工作的两台发电机系统（图1.4）。这时，我们首先取一台发电机的总视在功率为基准功率。在为外部机组运动所做的假设中，可以列出下列方程组：

第一台发电机相对于其 d 轴和 q 轴的方程：

$$X_{q1} i_{q1} = -U_{rd} = U_r \sin\Theta_{r1}$$

$$X_{d1} i_{d1} + E_{q1} = U_{rq} = U_r \cos\Theta_{r1}$$

$$(1 + pT_{d01}) E_{q1} + pT_{d01} (X_{d1} - X'_{d1}) i_{d1} = U_{f1} \quad (1.11)$$

$$T_{j1} p s_1 + P_1 = M_{\tau 1}$$

$$p\Theta_1 = \omega_0 s_1, \quad p = d/dt$$

第二台发电机相对于其 d 轴和 q 轴的方程：

$$X_{q2} i_{q2} = -\bar{U}_{rd} = U_r \sin\Theta_{r2}$$

$$X_{d2} i_{d2} + E_{q2} = \bar{U}_{rq} = U_r \cos\Theta_{r2} \quad (1.12)$$

$$(1 + pT_{d02}) E_{q2} + pT_{d02} (X_{d2} - X'_{d2}) i_{d2} = U_{f2}$$

$$T_{j2} p s_2 + P_2 = M_{\tau 2}$$

$$p\Theta_1 = \omega_0 S_2$$

第二台发电机坐标系转换成第一台发电机坐标系的方程:

$$\begin{aligned} i_{q2} &= \bar{i}_{d2} \sin\Theta_{12} + \bar{i}_{q2} \cos\Theta_{12}; \quad \bar{U}_{rq} = -U_{rd} \sin\Theta_{12} + U_{rq} \cos\Theta_{12} \\ i_{d2} &= \bar{i}_{d2} \cos\Theta_{12} - \bar{i}_{q2} \sin\Theta_{12}; \quad \bar{U}_{rd} = U_{rd} \cos\Theta_{12} + U_{rq} \sin\Theta_{12} \end{aligned} \quad (1.13)$$

外部电路方程:

$$\begin{aligned} U_{rd} &= U_d + i_{q1} X_{\text{mi}}; \quad U_d = -U_c \sin\Theta_1 \\ U_{rq} &= U_q - i_{d1} X_{\text{mi}}; \quad U_q = U_c \cos\Theta_1 \end{aligned} \quad (1.14)$$

电流平衡方程:

$$i_{q1} = i_{q1} + i_{q2}; \quad i_{d1} = i_{d1} + i_{d2} \quad (1.15)$$

如果假设 Γ_1 和 Γ_2 是具有相同参数的汽轮发电机, 那么在方程 (1.11) ~ (1.15) 中应规定:

$$X_{d1} = X_{q1} = X_{d2} = X_{q2} = X_d, \quad T_{d01} = T_{d02} = T_{d0}, \quad T_{j1} = T_{j2} = T_j$$

那么, 线性化之后方程转换为下列形式:

$$A \times X [\Delta E_{q1}, \Delta E_{q2}, \Delta\Theta_1, \Delta\Theta_{12}] = V [\Delta U_{f1}, \Delta U_{f2}, 0, 0] \quad (1.16)$$

式中 X 为状态变量偏移量组成的向量; V 为控制向量; A 为具有下列系数的 4×4 方阵:

$$\begin{aligned} a_{11} &= 1 + pT'_{ds}; \quad a_{12} = p \frac{X_{\text{mi}}}{X_d} \mu_s T_{d0} \cos\Theta_{120} \\ a_{13} &= -p\mu_s T_{d0} U_c \sin\Theta_{10}; \quad a_{14} = -p \frac{X_{\text{mi}}}{X_d} \mu_s T_{d0} E_{q20} \sin\Theta_{120} \\ a_{21} &= p \frac{X_{\text{mi}}}{X_d} \mu_s T_{d0} \cos\Theta_{120}; \quad a_{22} = 1 + pT'_{ds} \\ a_{23} &= -p\mu_s T_{d0} U_c \sin\Theta_{20} \\ a_{24} &= p\mu_s T_{d0} (U_c \sin\Theta_{20} - \frac{X_{\text{mi}}}{X_d} E_{q10} \sin\Theta_{120}) \\ a_{31} &= U_c \sin\Theta_{10} + \frac{X_{\text{mi}}}{X_d} E_{q20} \sin\Theta_{120}; \quad a_{32} = \frac{X_{\text{mi}}}{X_d} E_{q10} \sin\Theta_{120} \\ a_{33} &= H_j X_{ds} p^2 + E_{q10} U_c \cos\Theta_{10}; \quad a_{34} = \frac{X_{\text{mi}}}{X_d} E_{q10} E_{q20} \cos\Theta_{120} \\ a_{41} &= -\frac{X_{\text{mi}}}{X_d} E_{q20} \sin\Theta_{120}; \quad a_{42} = U_c \sin\Theta_{20} - \frac{X_{\text{mi}}}{X_d} E_{q10} \sin\Theta_{120} \\ a_{43} &= H_j X_{ds} p^2 + E_{q20} U_c \cos\Theta_{20} \\ a_{44} &= -H_j X_{ds} p^2 - E_{q20} U_c \cos\Theta_{20} - \frac{X_{\text{mi}}}{X_d} E_{q10} E_{q20} \cos\Theta_{120} \end{aligned}$$

式中

$$\Delta\Theta_{12} = \Delta\Theta_1 - \Delta\Theta_2; \quad H_j = T_j / \omega_0$$

$$X_{d\Sigma} = X_d + X_{\text{mi}}; \quad X_{ds} = X_{d\Sigma} + X_{\text{mi}} = X_d + 2X_{\text{mi}}; \quad \mu_s = \frac{X_d - X'_d}{X_{ds}}$$

$$T'_{ds} = T_{d0} \left[1 - \frac{X_{d\Sigma}}{X_d X_{ds}} (X_d - X'_d) \right]$$

假设两台发电机的初始状态相同 ($E_{q10}=E_{q20}=E_{q0}$; $\Theta_{10}=\Theta_{20}=\Theta_0$), 变换公式 (1.16), 重新得到两个方程的方程组:

$$\Delta E_{q1} - \Delta E_{q2} = \frac{\Delta U_{f12} + p\mu U_c T_{d0} \sin \Theta_0 \Delta \Theta_{12}}{1 + T'_{dr}} \quad (1.17)$$

$$\begin{aligned} \Delta \Theta_{12} &= - \frac{U_c \sin \Theta_0}{H_j X_{ds} p^2 + E_{q0} U_c \cos \Theta_0 + 2E_{q0}^2 X_m / X_d} (\Delta E_{q1} - \Delta E_{q2}) \\ &= - \frac{U_c \sin \Theta_0}{H_j X_{ds} p^2 + E_{q0} U_{c0} \cos \Theta_{r0} X_{ds} / X_d} (\Delta E_{q1} - \Delta E_{q2}) \end{aligned} \quad (1.18)$$

在这种情况下, 调节系统结构框图 (图1.5) 在形式上与图1.3完全相同, 但具有另外的参数, 即单个的状态变量转换为其差值和相对角 Θ_{12} 的偏差。

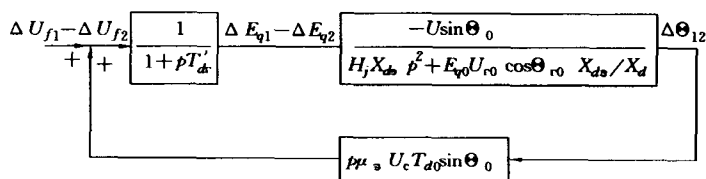


图1.5 用于研究电站内部发电机相对运动的结构框图

建议用上式研究内部机组相对运动的稳定性。在拟定相应结构图时, 假设两台并列工作的发电机采用了相等的参数和重合的稳定状态, 以利于内部机组振荡的稳定性。因此, 如果所研究的励磁调节规律不能保证这种结构, 应无条件地放弃此调节规律。在得到肯定的结果时, 可以按方程 (1.11) ~ (1.15) 进行更精确的繁重方案计算。

应当注意到: 在这种情况下励磁回路的时间常数与外部电路的参数无关, 在所有方式下都是恒定的, 且数值总是小于 T_d (图1.6列出了时间常数与 X_m 的关系曲线。可见在 $X_m=0$ 时, $T'_d=T'_{dr}$; 而在空载方式下, 当 $X_m=\infty$ 时, $T'_d=T_{d0}$)。正因为如此, 内部机组振荡的频率总是高于外部振荡频率。

分析图1.5的结构证明以前得出的下列结论是正确的: “如果全部发电机按一个公用参数稳定, 则内部机组相对运动的稳定性范围包括了稳定参数坐标的全部平面, 且稳定性的总的范围由主要机组相对运动决定”^[31]。这些公用参数是在具有电流补偿时发电机的电压和电压频率。下面将研究其它调节参数对内部机组稳定性的影响。

1.3 发电机自动电压调节系统的结构

将描述励磁机和励磁调节器的环节补充到对象模型中, 就可以得到研究外部运动的完整结构框图。第一步假设自动调节器和励磁机无惯性, 这样由调节器实现的调节规律, 即可以反映它们的作用。

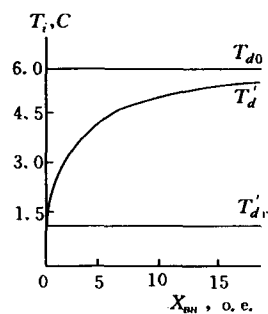


图1.6 励磁绕组时间常数与外部阻抗的关系曲线

独联体国家生产的全部发电机都安装了 CД II1 型自动调节器, 这是一种按电压偏差、励磁电流导数、电压频率偏差及其导数来稳定运行的比例—微分调节器。其运算可由下列方程 (见第 4 章 4.6) 准确地反映出来:

$$\Delta U_f = \Delta U_{APB} = - (K_{0u} + K_{1u} p) \Delta U_r - K_{1if} W_{1if} p \Delta I_f + K_f W_f \Delta f_u \quad (1.19)$$

如第 4 章所述, 这个等式正确地反映出在机电振荡频率范围内调节器的性能。这时, 系数 $K_f \cong 0.5 K_{0f}$, 具有 e. B. H. / Hz 或 e. B. X. X. / (rad·s⁻¹) 因次, 是总作用系数, 在选择调节器设定刻度 (K_{0f} , K_{1f}) 时, 总是按相互对等的条件进行选择, 这样, 该系数就可按 Δf_u 信号正确反映电压频率偏差和导数实际通道的共同作用。

为获得调节系统结构图, 1.19 中的全部变量都必须以两个独立变量 ΔE_q 和 $\Delta \Theta$ 组合形式列出^[32]。

转子电流导数与同步电抗后偏差电势 ΔE_q 导数相对应。

对于 ΔU_r 和 Δf_u , 解出式 (1.7) 前两个方程和描述发电机内角的定子线性化方程组成的方程组, 就得出这些变量的等式:

$$\begin{aligned} X_q \Delta i_q &= \Delta U_r \sin \Theta_{r0} + U_{r0} \cos \Theta_{r0} \Delta \Theta_r \\ \Delta E_q + X_d \Delta i_d &= \Delta U_r \cos \Theta_{r0} - U_{r0} \sin \Theta_{r0} \Delta \Theta_r \end{aligned} \quad (1.20)$$

为求一致性, 我们将求出凸极电机的解。这时, 应在方程 (1.7) 和方程 (1.20) 中把 X_d 换成 X_q , 把 E_q 和 ΔE_q 换成 E_Q 和 ΔE_Q , 可以列关系式将它们联系起来^[3]:

$$\begin{aligned} E_Q &= \frac{X_{q2}}{X_{d2}} E_q + \frac{X_d - X_q}{X_{d2}} U_c \cos \Theta_0 \\ \Delta E_Q &= \frac{X_{q2}}{X_{d2}} \Delta E_q - \frac{X_d - X_q}{X_{d2}} U_c \sin \Theta_0 \Delta \Theta \end{aligned} \quad (1.21)$$

解出方程组后, 根据 $\Delta \Theta_m = \Delta \Theta - \Delta \Theta_r$, 得出下列等式:

$$\Delta U_r = (1-a) (\cos \Theta_{r0} \Delta E_q - M_r \Delta \Theta) \quad (1.22)$$

$$\Delta \Theta_m = \frac{(1-a)}{U_{r0}} (\sin \Theta_{r0} \Delta E_q + L_r \Delta \Theta) \quad (1.23)$$

式中 a ——描述与系统相关的系数;

其中: $a = X_d / X_{d2}$;

$$M_r = E_{q0} \sin \Theta_{r0} + \frac{X_d - X_q}{X_{q2}} U \sin (\Theta_0 + \Theta_{r0});$$

$$L_r = E_{q0} \cos \Theta_{r0} + \frac{X_d - X_q}{X_{q2}} U \cos (\Theta_0 + \Theta_{r0}).$$

这些系数取决于发电机型式和初始状态。

发电机电压频率偏差值 Δf_u 与发电机和系统电压向量间外角偏差导数成比例, 即:

$$\Delta f_u = m p \Delta \Theta_m$$

式中: m 取决于频率测量单位的系数。如果用 Hz 作测量单位, 则 $m = 1/2\pi$, 如果用 rad/s 作测量单位, 则 $m = 1$ 。