

电力系统 暂态解析论

〔日〕 健坂善次 著

DIANLIXITONGZHANTAIJIEXLUN

机械工业出版社

本书是日本电力系统解析理论方面的重要著作之一。全书主要介绍：电力系统重要组成部件的特性、模型及分析方法；故障和潮流计算方法；过电压波过程分析；电力系统稳定性分析；自励磁、负阻尼振荡、轴扭振等现象以及交直流连接系统的动态特性分析。在附录中还汇总了为理解正文所必要的基础知识。

本书主要供从事电力系统、电机运行方面的研究人员和工程技术人员阅读，也可供高等院校电力、电机专业的师生参考。

本书翻译由蒋建民(1、2、3、9、10章、序言及附录)、金基聖(4、5、7章)、王仁洲(6、8章)担任。周荣光教授、王仲鸿副教授、童陆园、孙元章、崔文进、涂必强、杨丕棠分别审校了本书的有关章节，最后由蒋建民审校了全书。

原水电部副总工程师沈根才同志、清华大学黄蔚教授、韩英铎教授对本书的翻译工作给予了热情的支持和帮助，谨此致谢。

電力系統過渡解析論

関根泰次 著

才一ム社 1984

• • •

电力系统暂态解析论

〔日〕 関根泰次 著

蒋建民 金基聖 王仁洲 译

•

责任编辑：秦起佑 贾欣 责任校对：宁秀娥

封面设计：郭景云 版式设计：冉晓华

•

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

北京通县电子外文印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

•

开本787×1092¹/₁₆·印张39¹/₄·插页2·字数958千字

• 1989年12月北京第一版·1989年12月北京第一次印刷

印数 0,001—1,308 定价：34.30元

•

科技新书目：204—017

ISBN 7-111-01621-1/TM·206



中译本序言

如同生物没有氧气就不能生存一样，现代社会若没有电能也是不能存在的。而且随着社会的进步，其作用也日益增大。可以说，电能是维持现代社会的血液，而输送电能的电力系统则相当于人的血管。

实际上，电力系统是地球上存在的所有系统中最大的系统之一，它的建设需要庞大的资金、劳力和时间。

贵国把电力系统作为国家发展的重要支柱之一，在其发展和完善方面投入了很大的力量，这是世界共知的，我认为这个方针非常正确。

在此意义上说，担负电力系统规划、建设、运行业务的电力技术人员任重而道远。众所周知，能适应社会需求的电力系统，并不是一朝一夕就能建成的，只有在不断的努力和研究的基础上才有可能建成。

本书为从事上述工作的技术人员而编写，书中论述了电力系统的特性，尤其是在所论述的暂态特性分析方法中，特别详细地讲述了那些实际有效的方法。因此，本书中译本的出版，若能对中国的专家们也有所裨益，这对我来说，将感到莫大的喜悦。

本书由曾在我的研究室做过研究工作的黑龙江省电力试验研究所的金基聖先生以及东北电管局蒋建民先生、华北电力学院王仁洲副教授翻译。中译本是他们非常热诚地、不辞辛苦地工作的结果。在翻译过程中，他们从不同的专业角度敏锐地指出了原书中的许多印刷错误，使中译本比原著更好，对此深表谢意。

関根泰次

1988年1月于东京

译 序

蒋建民、金基聖、王仁洲三位同志合译了関根泰次先生所著的《电力系统暂态解析论》,这是一件很有意义的事。他们三位,还是1982至1984年在日本访问和学习期间,就商定了要将这本书介绍给国内。他们三人当时分别在京都大学、东京大学和新泻大学,金基聖同志曾就学于関根先生,并参与了这本原著的一些工作。

関根泰次先生是日本知名的电力系统方面的学者,1959年以来,一直执教于东京大学。他是在日本取得工学博士学位后,又去美国学了两年系统工程的。他经常参加日本电力部门关于电力系统方面种种问题的研究和讨论,并一直作为日本的代表,参加国际大电网会议和国际电网计算会议,是一位理论与实践紧密结合的学人。

関根先生曾在六十年代之初,就提出要以发、送、变电工学为父,以系统工学为母,创立电力系统工学的主张,也就是想用新兴的系统工程学的方法来研究电力系统。这是一个很有生命力的主张。在电力系统这个领域中,应用系统工程学的方法,可以有两个方面。一个方面是电力系统的发展战略和规划方面,需要应用系统分析的方法,要系统地分析电力系统的战略条件(包括国民经济发展的用电需要,一次能源平衡与动力资源开发条件和发供电设备的制造技术与供应条件),根据电力系统发展的综合性规律,提出电力系统发展的战略方案及规划。电力系统像有机体一样,它是一直在生长壮大,新陈代谢的,在它的发展中是具有很多客观存在的综合性规律的。另一方面,则是电力系统的技术特性的计算与分析。这方面,过去的计算与分析方法是很多的,但是,由于电力系统的不断扩大,不仅计算的数量大大增加,而且由于高电压的出现,由于交流与直流并列的出现,由于不对称电路的出现,等等,很多过去可以忽略的因素现在不能忽略了,因此,需要返回到最基本的元件包括发电机、送电线、变压器的物理特性上去,从新研究;需要运用电子计算机;需要使计算方法和计算公式符合于电子计算机的语言和思维。関根先生二十多年来所致力的是这后一方面的系统工程的应用。从这一意义来说,这本书正是関根先生二十多年来致力于“电力系统工程”开发的最新成果。

関根先生博文广识,他在这本书中对近十几年来国际大电网会议上所议论的重大问题大都有所论及。可以说,这是一本最新的关于电力系统计算的著述。

関根先生执教多年,有丰富的教学经验。在这本书中,他注意了将“现在还在使用的电力系统分析技术通俗易懂地介绍给普通的学生及技术工作者”,他在论述复杂的理论问题时,对本质问题采用了通俗讲解,对公式推理注意了系统严密,这大大有助于读者理解和建立系统观念。

関根先生又是一直参与日本电力系统的发展研究的人,对实践中存在的种种问题很熟悉。因而在这本书中,介绍某些新的解析论和基本公式时,特别注意了阐明其所表达的物理意义,并且对电力系统动态特性的研究,明确了“影响电力系统动态特性的最主要的因素是同步电机,不充分地了解同步电机的特性,谈论电力系统的特性是完全无意义的”。这就从物理意义上阐明了电力系统动态特性的最基本的性质。

我国现在正在建设500kV的电力系统，电网发电容量已超过1400万kW，不久将达到2000~3000万kW；并且在华东和华中两个大电网之间，建立了葛洲坝到上海的±500kV的直流线路，在西北与华北电网之间，也将建立直流送电线。一些大电力系统所出现的问题，如低频振荡等等，已经陆续出现或即将出现。関根先生这本书的中译本的出版，将大大帮助我们迅速掌握关于大电力系统暂态分析的计算理论，并对这些问题的掌握和解决有所裨益。

沈根才

一九八五年

八月六日

序

这是一部论述电力系统暂态现象解析方法的著作。

当电子计算机还处在初期发展阶段,即在第一代和第二代的电子计算机时期,人们就开始用电子计算机进行电力系统分析。可以说,电子计算机在电力系统中的应用,是其在大规模系统的应用中进展最快的一个领域。随着电子计算机计算技术的发展,作为其基础的解析理论也朝着新的方向取得了前所未有的进展。最近,现代控制论等的令人瞩目的发展也给电力系统解析理论的发展以很大的影响。

这一发展趋势并非一时流行而已。应当说,这是一种历史潮流,今后也将沿其方向进一步发展。因此,必须就电力系统与电子计算机之间的关系加以冷静地考虑。电力系统的数据传输或发电厂的集中控制设备,都是以电子计算机技术为基础的具有高级判断功能的硬件。此外,在中央调度室里还装设了控制机,它们起着全系统的中枢神经的作用。用电子计算机对发电厂的电力设备进行监控,也都是以电子计算机技术为基础的。因此,电子计算机及其技术也应当被看作电力系统的一部分。电子计算机除用于在线控制外,还用于电力系统及其组成设备的规划和设计方面。不仅如此,在运行方式研究等离线计算方面,电子计算机也得到极其广泛的应用。由此可见,如果没有电子计算机,电力系统是不堪设想的。

实际上,电力系统是以利用各种物理现象的技术为基础而建立起来的。这些物理现象如原子能发电和火力发电那样,将核能、化学能先转换成热能和机械能,再转换成电能的能量转换过程;如超高压输电那样,为了有效地输送大功率电能而以极高的电压输电的高电压现象;甚至在不久的将来如超导发电机和超导电缆那样的超导现象等等。应当说,电子计算机使这些技术成果与功能进一步得以发挥。可是,如果对于电力系统的一些重要现象以及对利用这些物理现象所制造的电力机械的特性没有充分了解的话,也不可能恰当地使用电子计算机。

回顾对电力系统各种问题的研究过程,可以发现其中汲取了许多现代控制论和解析技术的成果,现已发表了许多内容丰富的论文,如用状态空间理论以及用李雅普诺夫稳定理论进行电力系统稳定性分析等等。这些解析理论的巧妙实在令人眼花缭乱,心悦诚服。可是从现实的观点来看,仅仅讲述理论使人感到很空洞,这是因为论文中对于描述这些理论的基本方程式以及这些方程式所表达的物理现象说明不够。此外,这些方程式是在什么样的条件下产生的?论文中把这些问题也全部省略了,因而使人感到仅仅是就事论事而已。对于十分了解这些基本方程式及其物理现象的人来说,也许并不感到空洞,否则就只会感到这些论文很华丽,很巧妙,而理解却是肤浅的。细想一下真正重要的还是这些基本方程式所描述的物理现象、现代控制论以及稳定性理论等。这些艳丽的花朵也只是在有了这样的根之后才有真正的意义。现在已可简便地应用的这些基本方程式和物理现象都是许多前人经过长期努力所取得的成果,但对其本质的理解并非易事。

本书的目的,除了把现在所用的电力系统解析技术通俗易懂地介绍给普通的学生及技术

工作者之外，还有更主要的目的。其第一个目的如上所述，作一回顾。对于现在还在继续发展的现代控制论等深奥的基础理论，用便于理解的方法对其本质加以论述。

对电力系统的复杂公式，过去几乎没有直接解析的方法。除了用直观的与剖析的方法之外，别无他法。这种情况在电子计算机已普遍使用的现在已经是不可想像的事了。当我们读到现在已可称为古典的四、五十年前的文献时，会感到那时完全不用电子计算机而只用大脑与手所得出的结果与用现代计算机所得出的结果极其一致，令人感到惊奇，从而不得不对前人的劳动肃然起敬。由于电子计算机的发展，并且在其使用已经极为方便的今天，人们常常会被电子计算机的计算结果弄得眼花缭乱，容易丧失前人所具有的透彻的洞察力及对事物本质的深刻理解，为使这种现象不再发生也是作者的一个心愿。

本书的第2个目的是，从现在常见的大规模电力系统的立场出发，用新的观点对前人通过艰苦劳动所得来的成果重新加以研究。同步电机和感应电机的自励磁等现象在三、四十年前就曾论述过。但是，现在如果想对这些问题进行研究时，却很难找到论述这些问题的书籍，结果不得不重新一篇篇地翻阅过去的论文资料。通常在手册等工具书中只记载着研究这些问题的结论。若仅根据这些结论，当遇到新的现象时，就会感到没有提供能够应用的可靠基础。之所以这样，大概是由于日本的电力系统还没有遇到这些现象，也可能是只应用这些理论，甚至连足够的基础还没有建立起来吧。在当时的历史条件下，这种事情在其他的学科中也或多或少的发生过，从某种意义上来说也是难免的。

在此情况下，当遇到新的现象时，人们容易采取的办法是向研究过或经历过那些现象的人请教。但是常常出现的问题是，这样的人或者已不在人间了，或者在很久之前就退休了，从而无人可以求教。再者，即便这些问题在以前曾一度被研究过，但由于当时的系统与现在的系统已大不一样，在过去认为可以忽略且无关重要的一些因素，而现在则无论如何也必须加以考虑。此外，由于情况的不同，还会产生完全不同的结果。在此情况下，仅仅生硬地照搬过去的研究结果是危险的。因此，无论如何也要用现代的观点对过去的研究成果加以修正，使之可以应用于现在。编写本书的一个动机，是因为在很长的历史演变之中，过去曾经被论述过的许多现象，现在又以新的形式表现出来。

本书的第3个目的，是向读者介绍一些方法。在电力系统分析的领域内，过去用手和大脑作分析时，有些方法是无法采用的，但是，现在已开发出便于计算机使用的新方法。过电压波过程的分析，在过去很长时期内用的是以反射和透射概念为基础的网状图法。在人们用纸和笔就可以进行分析的时代，用这些概念可以巧妙地解释复杂的物理现象，这也是一种有效地运用人的思维的方法。但是，对于计算机来说，这些概念未必是便利而有效的，电力系统的结构越复杂，这个问题越突出。因此，便于在计算机上使用的贝瑞隆（Bergeron）等方法已成为研究过电压波过程的主要方法。也就是说，目前便于计算机使用的一些思维方法要比便于人们思维的方法更为有效。现在计算机还不习惯人们的思维方法，而人们却必须按照计算机的思维方法进行思考。我们姑且不去谈论这样做是否会抹杀人的作用。但是，这的确是学术界正在发生的一种变化。可是，因为计算机自己并不会去学习人的思维方法。因此，迄今为止，还是要把人的思维方法改到与计算机的思维方法相一致，计算机给出的结果还必须进一步加以解释，以便于人们理解。第6.3节所述的相分量法等也是基于这种考虑而产生的，也可以说是用新的解析方法代替了老的对称分量法。

这样，不管喜欢与否，现在有必要再次回到原来的出发点，把迄今为止我们的思考方法

再进行整理，这就是编写本书的着眼点。因此，本书的取材看上去如同一、二十年前曾经见到过的样子，但其处理方法绝对不同于以前。

本书由正文十章及附录组成，大致可以分为如下四个部分。第2章到第5章为第一部分，介绍构成电力系统的一些主要部件，如同步发电机及其控制装置、输电线、变压器、交直流换流器等。在这些章节中对电力系统的一些重要特性及其模型和描述方法加以论述，作为理解后面各章所提到的一些问题的基础知识。

第二部分是第6章的内容。进行电力系统暂态过程的分析必须求出初始值，该章主要介绍决定初始值的稳态分析法，故障计算和潮流计算的方法是其核心。故障计算法在以前广泛采用的是对称分量法，除最近广泛使用的相分量法外，本章还论述了交直流系统的故障计算法。但是，对称分量法等以前在许多书中都已有介绍，因此，凡已在其他书中详细地论述过的内容，本书将尽量省略。

第三部分论述的是最近在电力系统分析方面占有相当大比例的过电压波过程分析（第7章）、稳定性分析（第8章）以及已出版的书中较少论述的电力系统不稳定现象，如自励磁现象、负阻尼现象和轴扭振现象（第9章）。关于过电压波过程分析，在作者的前一著作《电力系统解析理论》（1971年，电气书院）中已概要地作了介绍，不过本书还将进一步详细地加以论述。关于稳定性计算，在前一著作中已论述过的李雅普诺夫等方法，本书已全部省略，而集中讲解直接模拟法和小干扰动态特性分析。关于电力系统不稳定振荡现象，则侧重对物理现象的理解，并在此基础上介绍现在所用的分析方法。

第四部分为附录，它汇总了为理解正文所必需的基础知识。

除书中所列举的现象外，由于种种原因，电力系统中出现的一些异常现象，例如交流系统电压不稳定现象、交直流连接系统的电压不稳定现象、谐波不稳定现象以及零点漂移现象等都省略了。其中多数是由于还没有进行充分的研究而省略掉的。关于这些现象，还想找其它机会进行论述。

在编写本书时，曾参考了许多文献及公开和未公开的资料。把这些文献资料都一一加以记载是困难的。但是，有助于理解书中内容的文献已在第1章的末尾列出。当然还有许多重要文献未列出，因为不是按照文献的水平来选登的，而是以有助于读者的理解作为标准选登的。

除参考文献外，在编写本书的过程中，直接或间接地承蒙各方面的支持与帮助，要把他们的名字全都写出来也是困难的。下面几位给予了特别的帮助，现将他们的名字写下来以表谢意（尊称略，按五十音图的顺序排列）。

植田清隆（电力中央研究所）、有働宗幸（东芝公司）、大浦好文（东京电力公司）、奥山贤一（日立公司）、铃木 浩（三菱电机）、谷口治人（电力中央研究所）。

另外，本书的例题除上面的铃木 浩之外，还麻烦了长尾待士（电力中央研究所）、林敏之（电力中央研究所）以及作者的研究室的小佐野峰忠、金基聖、栗原郁夫、驹井研二、高崎昌洋、松岡成居、村田晃伸、横山明彦，在此一并致以深切的谢意。

著者

1983年12月12日

目 录

第1章 总论..... 1	程式和等值电路 (I)49
1.1 同步电机和电力系统其他主要 元件的基本特性..... 1	2.3.6 用电机参数表示的派克方 程式和等值电路 (II)52
1.2 稳态分析和初始值计算..... 3	2.3.7 派克方程式的其它表示形式57
1.3 过电压波过程分析..... 4	2.3.8 运算阻抗59
1.4 稳定性分析..... 5	2.3.9 杰克逊-韦凯斯特 (Jackson -Wilester)模型65
1.5 电力系统的负阻尼现象、自励 磁现象和轴扭振现象..... 5	2.3.10 饱和的影响..... 65
1.6 直流输电..... 6	2.4 电压、电流为正弦波时的特性..... 66
参考文献..... 7	2.4.1 旋转速度恒定时派克方程式..... 66
第2章 同步电机..... 9	2.4.2 以同步速度旋转时的感应电势..... 67
2.1 同步电机的构造..... 9	2.4.3 三相短路电流..... 69
2.2 同步电机的基本方程式 (忽略 阻尼作用) 9	2.4.4 电流为正弦波时同步电机的 电压—阻抗的对称分量和 同步电机的基本方程式.....72
2.2.1 电感..... 9	2.4.5 对称正弦电压电流下的稳态 矢量图..... 77
2.2.2 磁链..... 13	2.4.6 稳态下的功率—相角差特性..... 81
2.2.3 感应电势和端电压..... 13	2.4.7 同步电机的相分量等值电路..... 83
2.2.4 $d\psi-q\psi=0$ 分量..... 14	第3章 电源控制装置..... 86
2.2.5 $a-b-c$ 坐标和 $d\psi-q\psi=0$ 坐标的一般性质..... 16	3.1 自动电压调整装置..... 86
2.2.6 $d-q=0$ 坐标系统和纵轴与 横轴电感..... 22	3.1.1 自动电压调整装置的 基本构成..... 86
2.2.7 派克 (Park) 方程式..... 28	3.1.2 自动电压调整装置的各种类型..... 86
2.2.8 机端接有串联三相对称阻抗的 同步电机的派克方程式..... 32	3.1.3 同步电机的励磁方式..... 87
2.2.9 标么值法、派克方程式和运动 方程式..... 36	3.1.4 自动电压调整装置的方块图..... 88
2.3 同步电机的基本方程式 (考虑 阻尼作用) 43	3.2 火力及原子能发电机的调速器..... 92
2.3.1 阻尼回路和电感..... 43	3.2.1 火力及原子能发电机的 转速控制装置..... 92
2.3.2 磁链和电压电流方程式..... 44	3.2.2 机械油压式调速器的基 本模型..... 96
2.3.3 能量流和转矩..... 45	3.2.3 单式机械油压调速器..... 99
2.3.4 电机参数..... 46	3.2.4 复式机械油压调速器..... 99
2.3.5 用电机参数表示的派克方	3.2.5 西屋系列机械油压式调速

目 录

器.....	99	5.2.3	加控制极信号并考虑换流电 抗时的工作特性.....	183	
3.2.6	电液式调速器.....	101	5.2.4	整流器的电压-电流特性.....	186
3.2.7	火电厂和原子能电厂用的 调速器的一般模型.....	102	5.2.5	整流器交流侧的电流、有功 功率、无功功率和功率因数.....	187
3.3	汽轮机系统.....	103	5.3	逆变器的工作特性.....	190
3.3.1	汽轮机系统.....	103	5.3.1	逆变器的工作原理.....	190
3.3.2	高压蒸汽管道所引起的延时.....	104	5.3.2	逆变器的电压-电流特性.....	191
3.3.3	各种双轴式汽轮机的传递函数.....	105	5.3.3	逆变器交流侧的电流、有功 功率、无功功率和功率因数.....	192
3.3.4	汽轮机的通用模型.....	107	5.4	直流输电系统的基本控制特性.....	193
3.4	水轮发电机的转速控制装置.....	107	5.4.1	定电流控制和定余裕角控制.....	193
3.4.1	机械油压式调速器.....	107	5.4.2	直流输电系统工作状态 决定法.....	194
3.4.2	电液式调速器.....	109	5.4.3	潮流反转.....	195
3.5	水系统.....	109	5.4.4	换流变压器的分接头控制.....	196
第4章	输电线与变压器.....	111	第6章	稳态分析及初始值计算.....	197
4.1	输电线.....	111	6.1	对称分量法.....	197
4.1.1	架空线的电感.....	111	6.1.1	构成电力系统各元件的 序阻抗和序网络.....	197
4.1.2	导线及大地的电阻.....	141	6.1.2	电力系统的序网络.....	204
4.1.3	电阻及电感的频率特性.....	141	6.1.3	故障算法.....	205
4.1.4	静电电容.....	148	6.1.4	并行双回输电线的故障分析.....	216
4.2	变压器.....	156	6.2	克拉克坐标法.....	228
4.2.1	无漏磁变压器、理想变压器 和漏抗.....	156	6.2.1	电压、电流的 α 、 β 、 0分量和 α 、 β 、0回路.....	228
4.2.2	单相双绕组变压器的一般等 值电路.....	160	6.2.2	与对称分量法的关系.....	230
4.2.3	三相双绕组变压器的一般等 值电路.....	162	6.2.3	利用克拉克坐标法进行 故障计算.....	231
4.2.4	单相和三相三绕组变压器的 一般等值电路.....	163	6.3	相分量法.....	239
4.2.5	多绕组变压器的等值电路.....	167	6.3.1	对称分量法的局限性和 相分量法.....	239
4.2.6	V形接法变压器.....	175	6.3.2	故障前的系统状态.....	243
4.2.7	励磁导纳的处理方法.....	177	6.3.3	单相接地短路故障.....	248
4.2.8	移相变压器.....	177	6.3.4	多相故障.....	254
第5章	交直流换流器.....	180	6.3.5	移相变压器的处理方法.....	263
5.1	直流输电系统和交直流换流器.....	180	6.4	用节点方程式进行潮流计算.....	265
5.2	整流器的工作特性.....	181	6.4.1	潮流计算和基本方程式.....	265
5.2.1	不加控制极信号且忽略换流 电抗时的工作特性.....	181	6.4.2	牛顿-拉夫逊法.....	268
5.2.2	不加控制极信号并考虑换流 电抗时的工作特性.....	183			

6.5 交直流连接系统的潮流计算和故障计算.....276	非线性元件时的计算步骤.....385
6.5.1 潮流计算的基本考虑方法.....276	8.3 根据状态方程式进行动态特性分析.....391
6.5.2 交直流连接系统的潮流计算(I).....277	8.3.1 多机系统的方程式.....391
6.5.3 交直流连接系统的潮流计算(II).....281	8.3.2 同步电机动态特性和多机系统的状态方程式.....394
6.5.4 交直流连接系统的对称故障计算.....286	8.3.3 控制装置的状态方程式及将其引入多机系统状态方程式中405
6.5.5 交直流连接系统的非对称故障计算.....289	8.3.4 状态方程式分析法举例.....409
第7章 贝瑞隆 (Bergeron) 冲击波分析法.....298	8.3.5 频率响应轨迹法.....444
7.1 贝瑞隆等值电路.....298	8.3.6 S 矩阵法.....450
7.1.1 分布参数线路的贝瑞隆等值电路.....298	第9章 自励磁振荡、负阻尼振荡和低频轴扭振.....463
7.1.2 无耦合集中参数元件.....311	9.1 同步机转矩.....463
7.1.3 耦合集中参数元件.....313	9.1.1 同步机转矩的计算公式.....463
7.1.4 多条分布参数线路及其模态分析.....317	9.1.2 正阻尼转矩、负阻尼转矩和同步转矩的性质.....470
7.1.5 集中参数元件的模态分量.....324	9.2 同步机的负阻尼现象和振荡现象.....472
7.1.6 贝瑞隆方程式的解法.....325	9.2.1 负阻尼现象和振荡现象的定性说明.....472
7.1.7 开关的处理方法.....341	9.2.2 负阻尼现象和振动现象的定量分析.....478
7.1.8 非线性元件的处理方法.....347	9.3 感应电机和同步电机的自励磁现象.....486
第8章 稳定性分析.....359	9.3.1 感应电机和同步电机自励磁现象的机理.....486
8.1 稳定性计算的基本方程式.....359	9.3.2 感应电机自励磁现象的分析.....488
8.1.1 描述发电机内部状态的微分方程式.....359	9.3.3 同步电机的自励磁现象.....493
8.1.2 基本方程式的性质.....360	9.3.4 用于说明同步电机自励磁现象的等值电路.....498
8.1.3 系统方程式.....367	9.4 负阻尼现象与自励磁现象的统一处理方法.....503
8.1.4 由系统方程式的解计算发电机内部各量的式子.....372	9.4.1 负阻尼和自励磁方程式的推导.....503
8.2 暂态摇摆的数值计算.....374	9.4.2 发生负阻尼和自励磁的范围.....511
8.2.1 计算步骤.....374	9.4.3 根据状态方程式所作的分析.....513
8.2.2 当有自动电压调节器 (AVR) 和调速器时的计算步骤.....376	9.5 轴扭振现象.....518
8.2.3 例题.....377	9.5.1 轴扭振现象和基本方程式.....518
8.2.4 含有非线性负荷、饱和铁心等	

目 录

9.5.2 特征振荡及其增长.....521	A - 2 导纳矩阵.....564
9.5.3 轴扭振特性和剪切应力.....522	A - 3 因电路的变更而引起的 导纳矩阵变化.....566
9.5.4 轴疲劳和寿命消耗.....523	A - 4 消去浮游节点.....567
9.6 自励磁振荡与轴扭曲振荡的复 合共振.....525	B 逆矩阵计算.....568
9.6.1 复合共振现象及其基本方程 式.....525	B - 1 高斯 (Gauss) 消去法.....568
9.6.2 复合共振的产生范围.....526	B - 2 LU分解.....570
9.6.3 用状态方程式进行分析.....527	B - 3 分块法.....576
9.6.4 电气系统与机械系统相互干 扰机理的定性说明.....531	B - 4 元件追加法(支路追加法).....579
9.7 轴扭振与复合共振的产生原因 及其抑制方法.....533	C 常微分方程式的数值解法.....584
9.7.1 轴扭振与复合共振的产生原 因.....533	C - 1 常微分方程式的数值解法.....584
9.7.2 复合共振的抑制方法.....535	C - 2 欧拉 (Euler) 法.....585
第10章 交直流连接系统的动态特 性分析.....53	C - 3 改进欧拉法.....585
10.1 用断续回路法和等值直流电源法 分析直流系统的故障.....539	C - 4 龙格-库塔(Runge-Kutta)法... 586
10.1.1 用断续回路法进行分析.....539	C - 5 龙格-库塔-吉尔(Runge- Kutta-Gill)法.....589
10.1.2 用等值直流电源法进行分析.....541	C - 6 预测算子-修正算子法.....589
10.2 交直流连接系统的动态特性分析.....542	C - 7 梯形法.....590
10.3 直流系统的状态方程式.....545	C - 8 应用例子.....592
10.4 交直流连接系统的轴扭振现象.....548	D 特征值与特征向量.....600
附 录.....563	D - 1 特征值与特征向量.....600
A 节点方程式和导纳矩阵.....563	D - 2 简单线性回归式.....602
A - 1 节点方程式.....563	D - 3 多重线性回归式.....603
	D - 4 有重根的情况.....604
	D - 5 线性回归式的收敛特性.....604
	D - 6 状态方程式的一般解.....604
	D - 7 干涉矩阵.....605

第1章 总 论

1.1 同步电机和电力系统其他主要元件的基本特性

影响电力系统动态特性的最主要的元件是同步电机。不了解同步电机的特性,谈论电力系统的特性是完全无意义的。可是,要真正了解同步电机的特性是很难的,若只靠在大学里学到的那些知识,一旦遇到实际问题往往会束手无策。当然,在电力系统发生的诸多现象中,有许多现象前人已经进行了仔细地研究,因此,如果利用这些研究所得到的方程式或结果的话,大多数的问題都能得到解决。不过,为了从本质上理解实际发生的现象,也还是必须了解同步电机的基本原理。

关于同步电机,在很早以前就已经出版了以查尔斯·凯柯德(Charles Concordia)的名著《同步电机》[Synchronous Machine (John Wiley, 1951)⁽²⁾]为代表的许多书籍。但是,这些书主要供同步电机专家参考,而对一般读者而言,有许多地方是很难理解的。

在反映同步电机特性的回路方程式中,所用到的电感是因转子旋转而随时间变化的时变常数(time variant constant),一般象这样的时变电路的解析方法,在普通的大学里几乎是不讲授的。实际上,只是在参量电路等特殊情况下才使用时变电路,一般不常用它。由于上述情况,往往在处理同步电机的问题时并没有了解同步电机的特性,也不掌握必要的基础知识,这也是不得已的做法。把这种时变电路变换成常系数电路的好方法是同步电机解析中使用最为广泛的派克方程,但要正确理解派克方程的物理含义还会遇到若干困难。

根据经验,作者也认为同步电机很难理解。在大学里,每周2~3个小时多则几个小时的学习并不能正确地了解同步电机,这是很自然的事。另外,简明易懂的书也太少了。譬如说,过去常把 $d-q$ 轴解释为固定在转子上随转子一同旋转的轴。以往的许多教科书也是这样写的,就是在手册中也是这样介绍的。但是,因为 d 轴绕组与 q 轴绕组是垂直相交的,且二者永远以相同的速度旋转,故 d 轴绕组与 q 轴绕组间的相对速度恒为零。根据上述说法,

就无法解释与 d 轴交链的磁力线 ϕ_d 在 q 轴绕组内感应出电压 $\phi_d \frac{d\theta}{dt}$,而与 q 轴交链的磁力线

ϕ_q 在 d 轴绕组中感应出电压 $\phi_q \frac{d\theta}{dt}$ 。如果 d 轴绕组和 q 轴绕组都固定在转子上随转子一同旋

转,这就很难用因相对速度而感应出电压的方法来说明。可见听过这样讲解的学生中,有人不理解也是必然的。

对于专家们来说,不言自明地是很好理解的问题,对于初学者来说却有很大的困难。严格地说, d 轴与 q 轴是固定在定子上的,不过这样的 d 轴、 q 轴存在着无数个,随着转子的旋转,只不过是逐个地选择出每一时刻与转子轴相对应的 d 轴及 q 轴。也就是说,在 t 时刻

选用的 d 轴 q 轴的绕组与在 $t + \Delta t$ 时刻选用的 d 轴 q 轴的绕组各不相同。因此, 在 d 轴绕组和 q 轴绕组中流过的电流也各不相同, 就是说时刻 t 的 d 轴电流和 q 轴电流与时刻 $t + \Delta t$ 的 d 轴电流和 q 轴电流是在完全不同的回路中流动着。这个问题约在30年前于 E. W. 卡姆巴克 (E. W. Kimbark) 的著作《电力系统稳定性》第3卷《同步电机》[Power System Stability Vol. III Synchronous Machines (John Wiley, 1956)] 等书中已经论述过了 (见该书的第62页), 不知是什么原因 (或者没有必要说明, 认为是理所当然的事), 在那之后所写的书中几乎全都没有注意这个问题。

对于初学者来说, 上述的解释是很难理解的。因此, 本书试图就这一问题作些简单易懂的说明, 使用固定在定子上的 d 轴和 q 轴的概念, 本书把它叫作 $d\varphi$ — $q\varphi$ 轴, 这是一个初步尝试, 也许因难懂而遭到非议。但是, 根据作者的经验, 这种方法学生很容易理解。当然, 对于已经正确地理解了 d 轴、 q 轴概念的读者也可不必阅读书中的第2.2.4小节和第2.2.5小节。

在第6.1节中使用的对称分量法是迄今为止最为广泛使用的电力系统故障计算方法, 但这种方法也是因有同步电机存在才成为必要的。如果没有同步电机就完全没有理由使用对称分量法。另一方面, 如6.3节所述, 当线路参数不对称, 或者说采用不对称线路时, 使用对称分量法反而不方便。因此, 在分析同步电机连接在参数不对称的系统中的问题时要加以注意。象这类问题在以往的书籍中多半没有涉及, 本书注意到了这一点, 将在第2章中加以论述。

最近, 同步电机所装备的自动电压调节器和调速器的性能有了很大的改进, 对电力系统的暂态过程有很大的影响。另一方面, 自从20世纪初开始形成电力系统以来, 已研制出了各种型式的控制装置, 迄今在电力系统中还使用着。因此, 在大规模电力系统的分析中必须考虑这些因素时, 也应该节省不必要的计算时间和存贮容量, 在必要的范围内尽量采用简化模型。各国大力开展了这方面的工作, 其中由美国电气和电子工程师学会 (IEEE) 研究出来的模型^{(3)~(5)} 现今还被世界各国广泛地使用着, 日本也以IEEE的模型为基础采用了适合本国国情的模型⁽⁷⁾, 本书便以现在在日本使用的模型为主加以介绍 (见第3章)。

当分析非常慢的长时间的电力系统的不稳定现象时, 也还必须考虑火电厂的锅炉、原子能发电厂的原子炉或者水电厂的水工系统的动态特性。在将来的电力系统中这些因素将会起更为重要的作用。不过, 锅炉和原子炉的动态特性要比自动电压调节器和调速器等控制装置更复杂, 并包含大量的非线性元件。此外, 把实测结果与模型进行对比的研究也不充分, 迄今还没有被公认的统一的模型。至于汽轮机, 因为它与调速器的动作密切相关, 而其特性也并不复杂。因此, 本书中也简单地加以说明。

输电线的特性对电力系统特性分析有很大的影响, 不过有关输电线的参数很早以前就有了各种计算方法。这些结果在手册和输电工程学的专门书籍中均已有论述。但是, 当分析电力系统的过电压时, 必须知道从直流到数十kHz的范围内输电线的频率特性, 在此情况下大地的电导率也有很大影响。对于这种现象, 实际上未知的参数还很多, 其分析方法今后还有不少方面必须进一步进行研究。

500kV和超高电压 (UHV) 的输电线上不进行线路换位, 许多线路的参数是不对称的。在这种场合下对于线路参数的物理含义如不了解的话, 不仅得不到结果, 还有可能产生错误。特别是在现在, 当我们研究苏联、美国等国家所采用的各种各样形式的多相、多导体输电方

式时, 必须返回到原先的出发点来对这些问题重新认识。

在输电线路的分析中使用对称分量法、相分量法等各种方法(如后面所述), 在这些方法的分析中必须进行各种坐标变换。为了搞清楚电力系统现象的物理性质, 必须很好地理解在变换后的坐标空间内线路参数的含义。本书就是从这个观点出发来论述各种必要的问题的(第4.1节), 以便顺利地分析电力系统的各种物理现象。

在电力系统的各个地方都装设变压器。关于变压器, 除布鲁姆(Blume)等人的著作⁽⁸⁾外, 很早以前就有许多书论述过。这些变压器在工频范围内只用漏抗便可以表示, 忽略励磁电感并没有什么关系, 但有时就必须考虑各个绕组的电感和绕组间的互感。绕组的电感和互感往往比漏感大 10^5 倍以上, 因此, 在一起处理这些电感时就得不到必要的计算精度, 这就要在推导出精确的等值电路上下功夫。特别是用第6.3节中叙述的相分量法根据变压器的接线方式推导等值电路时, 对于这点更应注意。第4.2节就是从此观点出发, 把变压器的表示方法重新作一整理。

构成电力系统的另一个重要因素是负荷。负荷所消耗的有功功率、无功功率随电压和频率的变化而有复杂的变化关系, 实际上负荷包含着各种各样的机器, 并且其工作状态时时刻刻在变化着。因此, 正确地掌握负荷特性的实际状态是很难的事。但是, 负荷特性对电力系统的状态有着很大的影响, 是不能忽视的。特别是近年来, 力图把电力系统的功能最大限度地发挥出来时, 负荷特性有着更重要的作用。为此, 各国都以学会和其他学术机构为中心进行了理论的和实验的研究。此外, 国际大电网会议(CIGRE)等国际组织也为探明负荷特性做了很大的努力。遗憾的是迄今为止能够充分地反映负荷的实际情况的正确表示方法尚未建立起来。根据不同的目的, 现在采用恒定阻抗特性、恒定功率特性、恒定电流特性或者这些特性的组合等表示方法。因此, 在本书中不列特别章节来叙述负荷特性, 但这并不意味着负荷特性不重要, 只不过是至今尚未整理出充分的资料。作者期望在不久的将来能有机会对此问题作一论述。

1.2 稳态分析和初始值计算

暂态现象一般是指当一个稳定状态变化到另一个稳定状态时所产生的现象。因此, 暂态解析就归结为稳态分析和初始值计算。在电力系统的情况下就归结为潮流计算和故障分析。

在电力系统的故障分析中, 使用对称分量法在很早以前就已成为常识了, 即便是在输、配电工程学的教科书中为此也用了很大的篇幅, 甚至在电路教科书中也为此设立专门的一章。对称分量法是一种除电力系统之外其他的领域无法使用的计算技术, 这一点在电路理论的教科书中也属于特别给予处理的部分。但是, 用这种对称分量法不能对现在正计划建设的超高压线路进行严密的分析。起初, 将如第2章所述, 因有同步电机存在而不得不使用对称分量法, 在这个对称坐标空间中巧妙地把同步电机的特性进行相序分离, 以便能以此为基础进行分析。当输电线进行换位, 变压器是对称结构的情况下, 在对称坐标空间内能对这些电力系统的组成元件进行相序分离, 这便发挥了对称分量法的威力。但是, 在超高压输电线路上进行导线换位是困难的, 并且线路的不对称情况也很显著。这样就无法在对称坐标空间内把输电线路的特性进行相序分离了, 即便是对同步电机来说是适用的, 但对输电线路来说变

成了不适用的方法。因此,说得极端点,在输电工程学的最尖端的领域内,很多年来已成为常识的对称分量法已不能使用了。

在电子计算机发达的今天,也没有必要使用对称分量法进行相序分离。相序分离的方法对于掌握现象的物理含义是方便的,但在计算技术上系数矩阵的非对角线元素是否为零仅是在计算工作量方面有差别,使用其他方法有时也有效果。相分量法⁽⁹⁾、⁽¹⁰⁾便是按照这一考虑开发出来的方法。但是,这种方法迄今在出版的书籍中还没有论述过,因此,在第6.3节中对这种方法作了简要介绍。

关于潮流计算法,现在已有各种更新的方法,但还是以牛顿-拉夫逊(*Newton-Raphson*)法为基础,关于这一点在作者以前的著作“电力系统解析论”中已论述过了,本书仅在第6.4节中对此方法作一简单叙述。

交直流连接系统的潮流计算情况也相同。不过,关于故障计算法特别是交流侧发生事故时的故障计算法曾做过许多努力,希望把这类故障也包括在适用于交流系统的对称分量法中,例如曾试图用等值对称阻抗来表示从交流侧所看到的交直流变换器,但是,现在看来似乎这种考虑方法还不大成功。如果对称分量法的最大优点在于为了表示同步电机的特性,在对称坐标空间内将其特性进行相序分离,而交直流变换器的特性不能在对称坐标空间内进行相序分离。既然这样,这种尝试不得不以失败而告终。因此,在本书中打算简要论述现在所使用的直接解析法^{(11)~(13)},不过作者认为这是一个今后应当进一步进行深入探讨的领域。

1.3 过电压波过程分析

在作者的前一著作⁽¹⁾中对过电压分析的网状图法(包括符号图法)、简化回路法以及贝瑞隆法作了介绍。1971年当该书出版时,这三种方法还在相对发展时期,其中贝瑞隆法作为最新的一种方法还无法给予确切的评价。即使在日本,实际上还不能说这种方法已应用得很好了,对这种方法用较多的篇幅加以论述确实是要有点勇气的。但在此后的十年中贝瑞隆法有了令人瞩目的发展,在现在当说到过电压分析时,毫无异议地当推贝瑞隆法。真正首先采用贝瑞隆法的是H.W.道莫(H.W. Dommel)和支持其工作的美国邦那威尔电管局(Bonneville Power Administration或简称BPA),对于他们取得的业绩应给予很高评价。后来,BPA以贝瑞隆法为中心开发了包括电力系统所有组成元件的电力系统电磁现象分析程序,即通称的EMTP程序(Electromagnetic Transient Program),现在不仅仅在美国,而且在世界其它各国该程序都得到了广泛的应用。为了研制EMTP程序,BPA用了十年时间(EMTP的研究工作现在还在进行中),作者并不了解其详细情况,但认为一定投入了大量的研究资金和人力。同时也感到,在美国电力系统的软件开发计划已真正成为国家的计划(BPA开始属于美国的内务部,后来属于能源部)。当然,如果单从计算技术上看,EMTP程序还有许多应当加以改善的地方,是否果真能够把电力系统的众多现象都包括在一个软件包中,或者说这种做法是否恰当,这个问题还有争议。尽管这样,当今世界上尚没有能与EMTP相媲美的电力系统分析用软件包。在实际系统的分析过程中,EMTP取得了辉煌的成果,收到了能代替在系统中进行实际测试的效果。在美国的电气和电子工程师学会中开设了以EMTP

程序为主要内容的技术人员讲习班,该讲习班的教材⁽¹⁴⁾在日本的专家中也很受欢迎。这个教材的卷尾所列举的文献是有关贝瑞隆法的优秀论文集,希望有兴趣的读者一定阅读一下。

在本书第7章中对作者以前的著作⁽¹⁾中所论述的问题加以充实,全面地反映了近十年间的发展,对于线路参数的频率特性、多回线路、开关、非线性元件的处理方法等问题增添了详细的例题加以解说。

1.4 稳定性分析

电力系统的稳定性问题是一个老问题,也是一个新问题,以前提出了各式各样的分析方法,就是在现在仍然在研究以所谓的等面积法为基础的能量函数法、李雅普诺夫法等主要的新的稳定判别法。另外,与过去相比,由于自动电压调节装置和转速控制装置等控制装置的进步,以及各种稳定措施的采用,电力系统本身的稳定性也大有提高。但是,电力系统的运行状态尽量接近其稳定极限的倾向也显著起来。其结果是在以往只要研究静态稳定极限,或者只要研究暂态过程中开始的2~3个周期的摇摆的暂态稳定极限便可以了,而近来则必须考虑从2~3秒到20~30秒,有时长达数十秒的所谓中期振荡,甚至还必须考虑锅炉及汽轮机等的长时间的振荡,在现实中已出现了这些重要课题。这样一来,所研究的时间范围更广泛了,系统的规模也更大了,因此便有必要去研究各种设备以及前面所说的各种控制装置的动作情况。此外,还要在此基础上进一步分析1000个左右的节点数、1200个以上的支路数、数百台发电机这样大规模的系统。

为了分析这样的系统稳定性,对于在小干扰下的动态特性分析、除以往用的劳斯-霍尔威兹法、根轨迹法和特征值法之外,又继续提出了一些新的稳定判别法。这些方法各有优缺点,必须根据分析的目的来选用适当的方法。

尽管提出了这些新方法,可是为了得到更多更正确的稳定性数据,还不得不依靠以往使用的直接模拟法。对于从事电力系统分析的人来说,用直接模拟法分析稳定性是最基本的分析项目。我们先不管在实际中是否使用这种方法,作为一种基础训练则必须以模拟法为基础。随着计算机硬件的发展,现在为了用更短的时间使用直接模拟法去分析规模更大的电力系统,相继开发了用于并行处理(Parallel Processing)、专用信息处理机(Processor)等方面的计算方法。要使用这些方法,必须很好地理解直接模拟的基本原理才能达到目的。根据这个观点,本书把对直接模拟法的论述放在主要位置上。有关能量函数法和线性近似系统的各种稳定判别法在作者的以前著作⁽¹⁾中已有论述,在此不再重复。但是,对于在日本研究出来的频率响应法和S矩阵法本书将加以论述,这是因为这些方法在作者的过去的著作出版之后才研究出来,在大规模电力系统的分析上取得了成效,而在已出版的书籍中尚没有介绍之故。

1.5 电力系统的负阻尼现象、

自励磁现象和轴扭振现象

同步电机承受各式各样的力矩,对于这些力矩从前有许多人进行过理论的和实验的研究,可以认为有关的研究课题都研究过了。其研究结果也都在各种书刊中介绍过。但是,除同步