

动态电力系统

〔加拿大〕 余耀南 著

水利电力出版社

内 容 提 要

本书介绍了电力系统动态性能方面一些专门问题的最新研究成果,也反映了作者多年教学和科研的成果。

本书可供电力系统的科技人员以及高校师生和研究生参考。

动 态 电 力 系 统

[加拿大] 余耀南 著

何大愚 刘肇旭 周孝信 译 郑肇骥校

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

850×1168毫米 32开本 7.875印张 207千字

1985年3月第一版 1985年3月北京第一次印刷

印数0001—4630册 定价2.20元

书号 15143·5620

译者的话

余耀南先生是国际电工界一位有名望的学者。他出生于中国，1936年毕业于日本东京工业大学，1962年获博士学位。1960年定居于加拿大并任教于哥伦比亚大学，1976年后为该校名誉教授。1974、1977年分别被邀请到英国和日本讲学，1978年被美国IEEE选为特别会员。

余先生关心祖国的“四化”建设事业，曾三次回国讲学。他治学严谨，受到国内电力同行们的尊敬。1979年首次回国讲学于水利电力部电力科学研究院，向国内同行系统地介绍了自己多年的研究成果和电力系统动态过程研究的进展。1980年受聘为电力科学研究院的名誉技术顾问。1983年又受聘为湖南大学名誉教授。这些年来，余先生经常向电力科学研究院及有关单位提出建设性的技术意见、寄赠资料并积极为国内培养研究人员。

余先生早期曾研究过电机理论，后专心致力于电力系统动态性能的研究。曾发表过40多篇论文。这本书是他多年教学和研究心得的总结，同时综述了欧美在这方面的研究成果。因此本书可作为当前电力系统稳定和机电过渡过程同类书籍的续篇，对我国从事联合电力系统和大型输电系统的科技工作者将有着重要的参考价值。

本书由何大愚（序言及第一、五、七章）、刘肇旭（第二、三章）、周孝信（第四、六章）三同志合译。郑肇骥同志对全部译稿作了校对。

中译本能及时翻译和出版，受到了有关部门的支持和帮助。在此谨表感谢！

译文中不妥之处，盼望得到读者的指正。

译者

1983年12月

序 言

本书可供大学高年级学生、研究生和希望了解电力系统动态过程的在职工程技术人员应用。本书旨在填补涉及大型电力系统动态性能的当代文献和引用数字计算机及现代控制理论以前的古典电力系统稳定书籍之间的空白。

由于大型电力系统互联的发展,电力系统工程学已发生较大变化,出现了很多新的电力系统动态问题。其中有低频的联网振荡,电容补偿输电线的次同步谐振所产生的扭转振荡,以及为研究大型电力系统动态过程而推导的动态等值。虽然这些动态问题的大部分已经解决,但为了取得更好和更经济的效果,还应再改进解决的方法。

本书讨论了这些问题的分析方法及其控制器的设计,但以基础概念和基本原理为重点,不论述技术细节。本书内容,读者具有初等矩阵代数和一些电机、电力系统的知识就可阅读前几章。随着内容的深入将逐步引用控制理论和计算技术。本书取材于作者多年在不列颠哥伦比亚大学本科及研究生院授课的教学资料。

本书共七章。第一章介绍现代电力系统和电力系统动态问题。第二章为电力系统动态研究所需的基本模型。以后各章分别论述各个专门的电力系统动态问题。第三章为低频的联网振荡和相位补偿型的附加控制。第四章为用以稳定单机以及多机、多模式系统的线性最优控制。第五章为电容补偿输电线的次同步谐振所产生扭转振荡的控制。第六章为用以研究大型电力系统动态过程而推导的外部系统动态等值。第七章为电力系统的暂态稳定控制。后两章的主要内容仍在迅速发展,因此本书只能为读者作初步介绍。为了便于读者,附录中引入了一些计算机程序和子程序。

作者对IEEE允许从他们的出版物中翻印许多图表，对加拿大NSERC的财政支持，对学术出版社（Academic Press）的帮助均表示感谢。书中应用了许多专家发表的大量文献，因此用书中所附参考文献这个合适的方式来表示谢意。作者特别感谢Brian J. Cory 博士，他审阅了手稿并提出了许多宝贵意见。还应感谢许多鼓励并促进过作者作这次努力的先辈和专家们，其中有中国电力科学研究院的 陈中熙 先生；中国的高景德教授；日本的 Shigeo Takata 教授；澳大利亚的 Fred Evans 教授和 John Anderson 教授；美国的 R.H.Park 先生、C.Concordia 先生和 O.I.Elgerd 教授；以及加拿大的 H.Ellis 博士、P.Kunder 博士、A.M.El-Serafi 博士、Eugene Hill 博士和 T.H.D.Lee 博士。作者还感谢在不列颠哥伦比亚大学的同事们所提出的意见和建议，感谢作者过去的学生们在本书编写中所起的作用。最后，如无我儿余元博士和我妻熊文翔的帮助，我想手稿的完成也将会是不可能的。

目 录

译者的话

序 言

第一章	电力系统和动态问题	1
1-1	发电厂的基本部件	2
1-2	现代大型电力系统	7
1-3	电力系统动态过程的问题	12
1-4	总结	18
	习题	18
	参考文献	19
第二章	电力系统动态研究的基本模型	21
2-1	同步电机的基本方程	21
2-2	磁链、电抗和时间常数	31
2-3	低阶同步发电机模型	38
2-4	高阶同步发电机模型	44
2-5	励磁机和电压调节器模型	48
2-6	水力功率和调速器模型	52
2-7	汽轮机和调速器模型	57
2-8	总结	61
	习题	62
	参考文献	63
第三章	低频振荡及附加控制	65
3-1	研究低频振荡用的一个电力系统模型	65
3-2	初始电流、电压和转矩角	70
3-3	用附加励磁改善系统的阻尼	73
3-4	附加励磁控制的发展	82
3-5	用调速器控制改善系统阻尼	88
3-6	总结	90

习题	91
参考文献	92
第四章 电力系统的线性最优稳定化	94
4-1 线性最优控制 (LOC) 的原理	94
4-2 黎卡梯 (Riccati) 矩阵方程的解	99
4-3 一个二阶系统的LOC设计	102
4-4 LOC设计的早期经验	105
4-5 用主导特征值位移法进行LOC设计	107
4-6 特征值分配法的LOC设计	116
4-7 LOC设计和试验的其它进展	123
4-8 总结	132
习题	133
参考文献	134
第五章 次同步谐振和扭转振荡	136
5-1 次同步谐振 (SSR) 及其防止措施	136
5-2 研究SSR用的统一机电模型	141
5-3 励磁控制的可行性和其它研究	151
5-4 SSR的线性最优励磁控制	158
5-5 总结	166
习题	167
参考文献	168
第六章 外部电力系统的动态等值	169
6-1 基于特征值的动态等值	170
6-2 基于同调法的动态等值	174
6-3 估计的动态等值	178
6-4 使用人为扰动的估计	182
6-5 一种多机电力系统模型	189
6-6 一个13台机系统的动态等值	195
6-7 总结	201
习题	202
参考文献	203
第七章 李亚普诺夫稳定和暂态稳定控制	205

7-1 李亚普诺夫直接法及其应用	205
7-2 电力系统暂态稳定的电厂控制	212
7-3 电力系统暂态稳定的系统控制	219
7-4 总结	222
参考文献	223
附录 计算机程序	225

第一章 电力系统和动态问题

随着大型电力系统互联的出现，已暴露出了很多电力系统新的动态问题^[1]，其中包括，例如，互联大型电力系统的低频振荡^[1~5]，带有电容补偿输电线的火力发电厂中透平机的次同步扭转振荡^[6~9]，以及其他问题^[10~22]。当工程师们面临一个疑难问题时，他们的责任就是要想出新的和改进的分析方法去解决这个问题。另一方面，一旦有了一个新方法，他们将用它再次检验此问题，以便找到更好和更经济的解答。

大型电力系统开始互联时，正是数字计算机和现代控制理论开始发展的时期。虽然这两件事似乎巧合得象一架车的两个轮子，而它们却确实一直同时在进展着。在这点上，电力系统分析和控制方面的最新发展只是现代计算和控制技术出色地应用于诸如空间工程和经济系统等方面的其中一个具体应用例子而已。

大型电力系统互联的目的是使发电和输电更经济、可靠。现代电力系统中的检修或事故用的旋转备用或冷备用的发电容量，已由几十年前占总容量的25%或更多，大幅度地降低到现在少得多的比例，这就是经济方面的证明。由于在系统内能够顺利地把电能从一个地区传输至另一地区，互联系统的可靠性也提高了。但同时，多个地区之间的多重互联又会使系统更容易失去稳定，这不仅是由于多地区互联的复杂性，而且还由于各个地区的旋转备用都大量减少的缘故。

在互联系统不断扩展时期，电力系统部件的新发展和新设计也是令人注目的。例如，太平洋西北电网和西南电网之间的高压直流联络线，远距离输电线的串联电容补偿，快速励磁系统，具有较大标么值的电抗和较小惯性常数的新型同步发电机的设计等都给已经复杂化了的大型互联电力系统又增加了一些复杂性。

然而，越来越被引起重视的动态电力系统问题并不是没有希望而无法处理。相反地，当电力系统的规模和复杂性继续增长时，工程经验也在积累着，同时控制和计算技术也在发展着。因此，对一个新的疑难问题总会有新的思想和新的方法去解决它。

电力系统的规划和运行，包含许多方面的工程问题^[23~28]，它包括负荷预测，能源研究，电厂和输电线的建设和建设，系统保护，每日和每小时的电量调度等。本书的内容只涉及最重要的方面之一，即电力系统的动态过程或电力系统的动态行为和控制问题，这可看作对古典电力系统稳定研究^[30~40]的发展。本章将介绍现代电力系统及其动态问题，其第一节为发电厂的基本部件。

1-1 发电厂的基本部件

为了解电力系统的动态行为，并设计一个控制系统，以改进其性能，必须熟悉发电厂的基本部件，尤其是那些对电力系统动态行为有显著影响的部件。

机-电能量转换

虽然从太阳能、核聚变等其他形式的能量直接转换为电能的研究一直在进展着，发电的一次能源仍然是化石燃料、水力和核能，其中也有极少量的潮汐和风力，这些能量或者已具有机械能的形式如水力、潮汐和风力，或者必须在机-电能量转换的最后过程之前，先经过汽轮机转换成机械能，例如燃料和裂变材料。因此，发电厂的基本重要部件为水轮机和汽轮机、发电机、控制能量进入透平机的调速器以及控制发电机电能输出的励磁系统和电压调节器。发出电能的大部份经输电线送往负荷中心，但一些电能要供给本地区使用，而且发电和输电过程中还会有些损耗。

发电厂的基本部件示于图 1-1 中，图中左侧是透平机和带有速度反馈 $\Delta\omega$ 的调速器。图中间示出了发电机 SG，励磁机 EX，以及带有电压反馈 ΔV_t 的电压调节器 VR，而变压器和输电线则

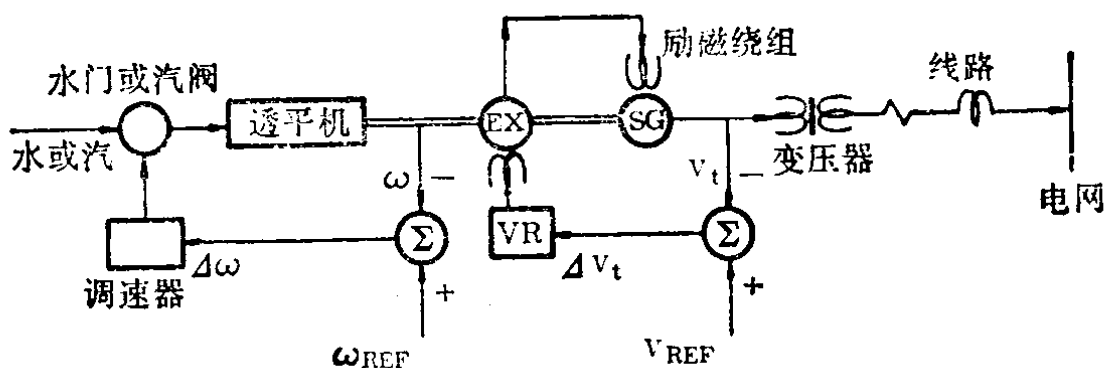


图 1-1 发电厂的基本部件

示于右侧。

汽轮机

蒸汽-机械能量转换是一个热力过程。在这个过程中，蒸汽经过通常安装在同一个轴上的高压、中压和低压透平机汽缸而膨胀做功。锅炉中出来的高压和高温蒸汽经过汽轮机叶片转换成机械能再传输到轴上。透平机还有另一些重要部件：控制蒸汽输入量的控制阀，用于将蒸汽从高压汽缸中直接引入蒸汽冷凝器的中间截止阀，造成蒸汽流时延的高压汽缸前的汽室，引起另一时延的高、中压汽缸之间的再热器，以及引起蒸汽流再一时延的中、低压汽缸之间的跨接管。实际使用中还有许多其他类型的汽轮机^[35]。

水轮机

水轮是最古老和最重要的原动机之一，它已为人类服务了几千年。对于大型发电机，水轮已发展为容量大至数百兆瓦的现代水轮机。在大多数情况下，水库中水的位能在进水管中转换成动能，然后传送给透平机轴。

水轮机有许多类型。反击式的卡普兰（Kaplan）水轮机具有可控导水叶和可调节的转轮叶片，它在很低和中等的水头下效率很高。法兰西斯（Francis）水轮机也是反击式的，它却在中等和高水头下有效。冲击式的皮尔墩（Pelton）水轮机则在很高的水头下有效。水轮机的传递函数见文献^[35]。

调速器

发电厂调速器的功能是保持恒定转速，通常是透平发电机组的同步转速。由于输出电功率的增加而引起的速度减低，将给调速器送入一个速度信号以增大输入透平机的机械功率。当速度升高时则减少机械功率的输入，从而保持恒定转速。

在大型互联系统中，一个地区系统的主力电厂的调速器也可具有对该地区功率和频率控制的功能。调速器不仅反应各地区间按计划功率交换，同时也反应由于地区负荷变化所引起的系统频率的改变。调速器的另一用途，是实现附加的调速器控制以改进电力系统的稳定性。

对火力和水力发电厂都有两种类型的调速器：机械液压调速器和电气液压调速器。在文献[35]中可找到更多细节。一个这样的系统示于图 1-2 中。

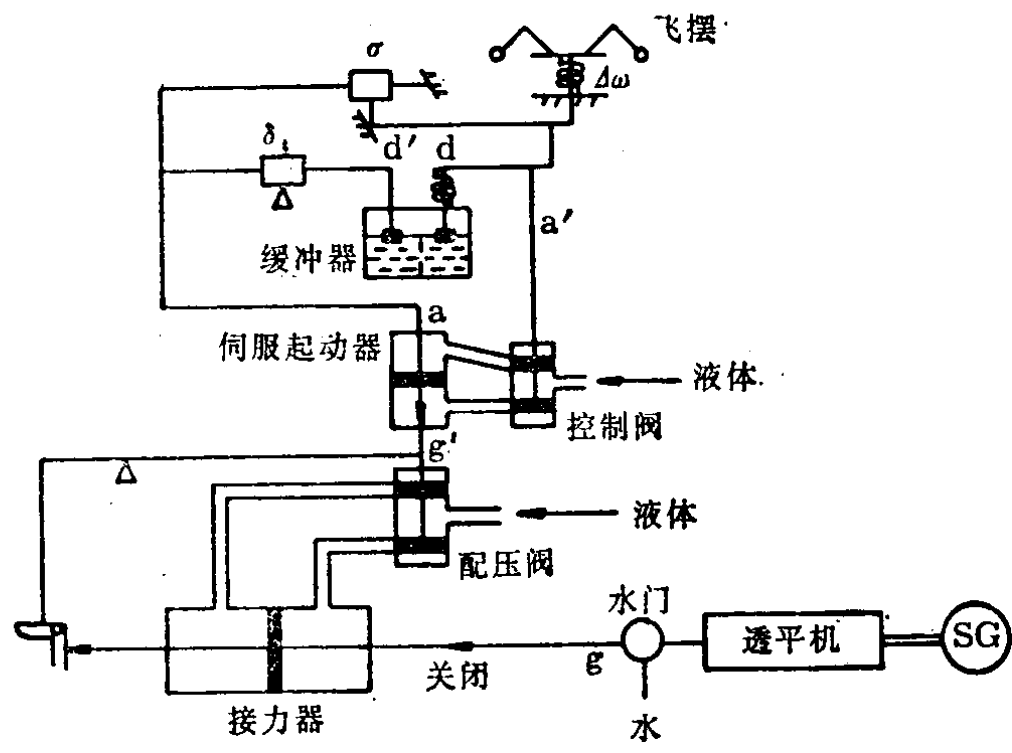


图 1-2 用于水电厂的调速器

用于水电厂的调速器

图 1-2 示出了水电厂的机械液压调速器^[36]。在正常运行中上部的飞摆被弹簧保持在一定位置上，当飞摆感到速度升高 $\Delta\omega$ ，则控制阀的竖杆 a' 将抬起，控制阀中有压力的液体将进入伺服起

动器并将“a”向下推。此时，配压阀的竖杆 g' 也被向下推；配压阀中的液体进入接力器并将其推向左方，使水门关小以减少水能输入。全部机械系统也能按反方向工作，当转速降低时增加水能输入。图中所示的缓冲器是用以稳定起动器本身。此调速器和水力功率的传递函数将在第二章中导出。

同步发电机

机械-电气能量转换是在发电机中进行的，通常是三相同步电机，其原理是基于法拉第的感应定律，其基本部件是：（1）电枢绕组，（2）磁场，（3）以力或转矩的形式输入的机械能，它使电枢绕组对磁场产生相对运动。

必须注意，只要发电机电枢绕组对磁场有一相对运动，电枢绕组中就会有感应电压。如果发电机有负荷，也就会有与原动机机械转矩相反的一个电气转矩。

用于产生大量电能的三相同步发电机，具有两个同步旋转磁场：一个是转子上的直流磁场，由一个磁场绕组正常以同步速度机械地旋转着；另一个是定子上由三相电枢绕组产生的交流磁场。各电枢绕组之间电气相距 120° ，而且各相电流之间的时间相位差为 120° 。有三相励磁的三相绕组的旋转磁场将在第二章中予以分析。现在，应注意两个磁场间的差别。定子上三相交流磁场的速度完全由系统频率所决定，而且由于电磁场的性质，在电机的气隙中及其周围立即出现磁场。另一方面，转子或直流磁场的速度要受旋转系统的惯量和阻尼的影响。只是在稳态情况下，当机械能输入和电能输出加上系统损耗完全处于平衡时，旋转系统才会既无加速度又无减速度。在此情况下，两个旋转的磁场，一个直流的和一个交流的将一起同步运动。这两个磁场被电机的气隙隔开，交流磁场的北极对着直流磁场的南极，而交流磁场的南极则对着直流磁场的北极。然而，当系统中发生干扰时，输入和输出的能量平衡被破坏，南极对北极和北极对南极的磁场联结将受到震动，从而可能产生稳定问题。

励磁机和电压调节器

多年来，同步电机磁场绕组的直流励磁一直是由整流子型的旋转励磁机提供的。但是现在应用可控硅的静止励磁和其他励磁系统业已实现，其反应速度比整流子型的快得多。计算机模拟用的静止励磁和电压调节器的传递函数和方框图可以在文献[37]中找到。

图1-3中示出一个旋转励磁机和电压调节器系统^[38]。同步发电机SG的端电压由电压互感器PT取得，经过整流和滤波，再与参考电压 V_{REF} 比较后得出电压偏差 Δv_t 。经放大器AMPL放大后的信号用以控制励磁机磁场，而励磁机的输出又用以控制发电机的励磁。负反馈的功能在于使励磁在端电压低于参考电压时增大，高于参考电压时则减小。还有一个稳压变压器ST用以稳定励磁系统本身。此励磁系统的传递函数和方框图将在第二章中阐明。

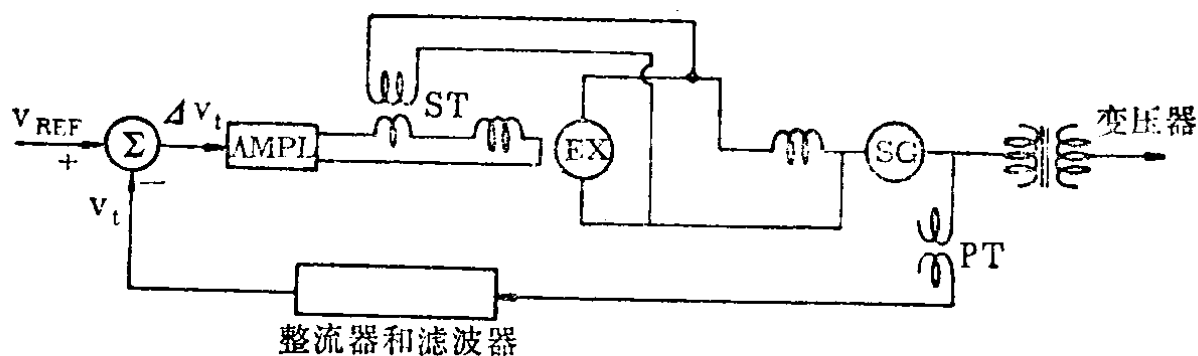


图 1-3 旋转励磁机和电压调节器系统

虽然励磁机和电压调节器系统的原来功能是在同步发电机端维持一个规定的恒定电压，但借助于附加励磁控制，此系统也可用以改进电力系统的动态和暂态稳定。这些课题将在以后的章节中叙述。

1-1的小结

本节中简要介绍了发电厂的基本部件，它们对研究电力系统动态过程是很重要的：水轮机和汽轮机将水力或蒸汽力转换为机械力，调速器控制透平机的水力或蒸汽力，发电机进行机-电能量的转换，而励磁机和电压调节器则控制电力的输出。虽然调速

器主要用以维持同步发电机的恒定转速，励磁系统用以维持预先规定的端电压，它们又都可以用以控制电力系统稳定。这将在以后各章中叙及。模拟这些系统部件（透平机、发电机、调速器和励磁系统）的细节，将在第二章中阐述。在此之前，下一节将介绍一些现代的电力系统。

1-2 现代大型电力系统

在电力系统发展的早期阶段中，建设的烧油或烧煤的电厂只用以向本地区负荷供电。随着河流中、上游水力发电厂的建设，发电厂距离地区负荷越来越远。高压输电线建成后，为了更经济和更可靠地发电并传输电能，便将大小发电厂互相联接起来，这样，电力系统就开始形成。由于这个趋向的继续，大小电力系统也互相联结起来，然后就形成了全国的和国际性的大型电力系统。举例如下。

北美电力系统

几乎所有美国和加拿大在北美的电力系统都联成一个系统，叫作NERC，即全国电力可靠性委员会（National Electric Reliability Council），它包括九个“区域电网”，如图1-4所示^[39]。只有很少几个孤立地区电网未接入此系统。在北美西部系统及北美东部系统之间，只有一个弱联系，前一系统只包括WSCC区域网，但它却有一个很大的地理面积；后一系统包括了除WSCC以外的全部NERC系统。各区域之间的联系数量也示于图中。主要输电电压或是交流500千伏或是直流 ± 400 千伏^[39,40]。

大型电力系统互联的过程是很有意思的。以不列颠哥伦比亚省水电局为例，加拿大不列颠哥伦比亚省（British Columbia, Canada）中有很多相当小的电力公司，但它们逐步联结成两个主要的地区电力系统，即：不列颠哥伦比亚水电局和西库提奈（West Kootenay）电力系统，后来，又与许多其它地区电网联结而形成太平洋西北联合电力系统。此后，由太平洋西北联合

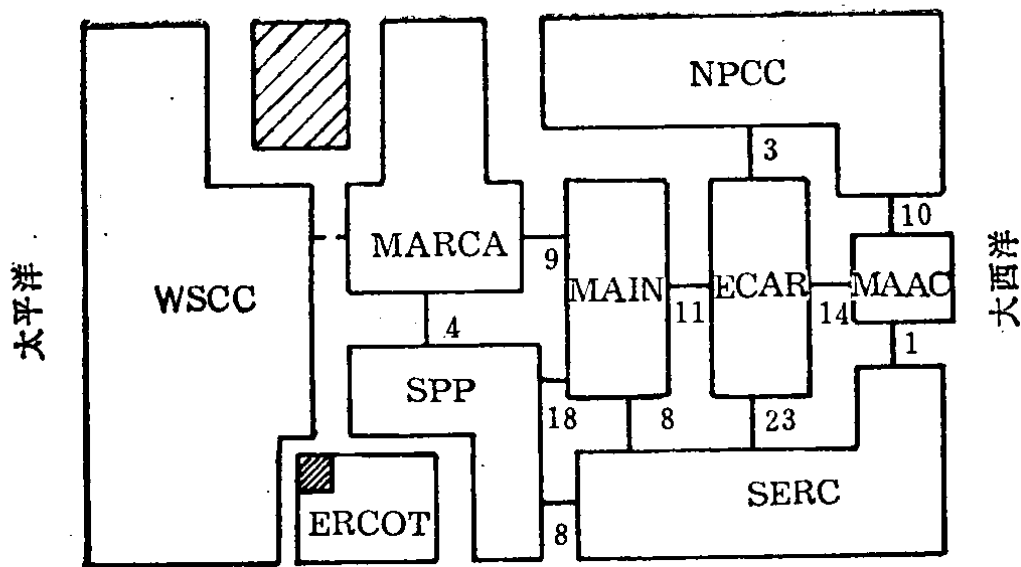


图 1-4 北美电力系统

(录自文献[39], 承IEEE惠允, 1977年版权)

WSCC, Western Systems Coordinating Council

(西部系统协调委员会)

MARCA, Mid-Continent Area Reliability Coordinating Agreement

(中部大陆地区可靠性协调委员会)

NPCC, Northeast Power Coordinating Council

(东北电力协调委员会)

ERCOT, Electric Reliability Council of Texas

(得克萨斯电力可靠性委员会)

SPP, Southeast Power Pool

(东南电力联网)

MAIN, Mid-America Interpool Network

(中美州互联电网)

ECAR, East Central Area Reliability Coordinating Agreement

(东部中心地区可靠性协调委员会)

MAAC, Mid-Atlantic Area Council

(中大西洋地区委员会)

SERC, Southeastern Electric Reliability Council

(东南电力可靠性委员会)

电力系统和西南联合电力系统互联而形成一个大区域的电力系统, 一直从加拿大不列颠哥伦比亚省北部延伸到墨西哥的边界, 并且由太平洋海岸伸至科罗拉多州 (Colorado) 和其它内陆地区, 这就形成了WSCC系统。

英国大联网

在英国所有电厂初期联网成功后, 又完成了“大联网”, 并

且将输电电压由275千伏升至400千伏^[41]。根据CEGB（中央发电局）的报告^[41]，英国大联网联结五个区域：西北、东北、西南、东南部和中部。这五个地区网及其总部示于图1-5中。大联网以交流275千伏线路与苏格兰相连，并以直流±100千伏电缆跨海峡与法国相连。

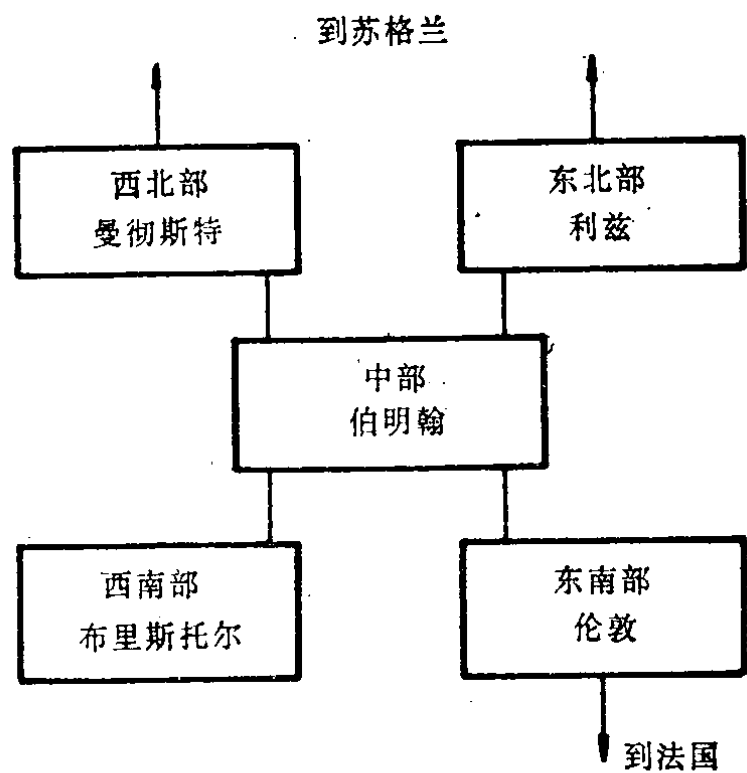


图 1-5 英国大联网

西欧电力系统

西欧电力系统主要由交流400千伏线路互联在一起，如图1-6所示^[42]。另外还有直流联系，如丹麦和瑞典之间的直流±250千伏，以及丹麦和挪威之间的±250千伏。芬兰、奥地利和南斯拉夫也与东欧电网联结。比利时则或经荷兰与西德联结或与法国联结，但并不同时联结。

日本电力系统

如图1-7所示^[43]，日本电力系统中有九个区域网，西南部为九州电力系统，东北部为北海道系统。除了东北电网和北海道电网之间用275千伏直流联系以外，日本电力系统的主要输电电压为交流500千伏。注意，由于日本东北电力系统的频率是50赫，