



现代电力系统丛书

动态电力系统的理论和分析

倪以信 陈寿孙 张宝霖 著



清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

现代电力系统丛书

动态电力系统的理论和分析

倪以信 陈寿孙 张宝霖 著

清华大学出版社

(京)新登字 158 号

内 容 简 介

本书系统地叙述了电力系统动态行为的机理、数学模型和分析方法。

全书内容分为上、下两篇。上篇介绍电力系统动态分析中常用元件的数学模型,涉及到同步机、励磁系统、原动机与调速系统、负荷、网络、直流输电系统、静止无功补偿器等;下篇重点阐述动态电力系统的基本理论和分析方法。

本书力求突出问题的物理本质和规律,对于各种分析方法的介绍思路清楚、简明扼要,便于自学。本书可以作为电力系统及其自动化专业的研究生教材,也可供本专业高年级学生以及电力系统科研人员和工程技术人员参考。

书 名: 动态电力系统的理论和分析

作 者: 倪以信 陈寿孙 张宝霖 著

出版者: 清华大学出版社(北京清华大学学研大厦,邮编 100084)

[http:// www. tup. tsinghua. edu. cn](http://www.tup.tsinghua.edu.cn)

印刷者: 北京密云胶印厂

发行者: 新华书店总店北京发行所

开 本: 787×1092 1/16 印张: 25.75 字数: 591 千字

版 次: 2002 年 5 月第 1 版 2002 年 5 月第 1 次印刷

书 号: ISBN 7-302-05142-9/TM·37

印 数: 0001~4000

定 价: 38.00 元

现代电力系统丛书编委会

主 编 高景德

副 主 编 张凤祥 卢 强 陈寿孙

编 委 (按姓氏笔划)

卢 强 陈寿孙 张凤祥 张宝霖

庞家驹 周孝信 相年德 高景德

倪以信 韩祯祥 韩英铎

责任编辑 范铁夫 刘元元

致 读 者

我国社会主义现代化建设的蓬勃发展,正在促进电力系统以空前的规模和速度扩大。到20世纪末,我国各大区已建成以500kV超高压电网为主网,单机300~600MW为主力机组,装机容量达4万~5万MW的大型电力系统。超高压直流输电技术将进一步得到应用,大型电力系统间的互联将得到发展,随着三峡水电工程的兴建,西部地区电源的进一步开发,更高电压的输电系统和全国性的联网也将提上日程。对电力系统安全性、经济性和电能质量提出了更高的要求。实践证明,电力系统的规划设计、运行管理、分析和控制手段的现代化是满足这一要求的最佳途径,许多现代科学技术成果迅速在电力系统中得到推广应用,计算机技术、现代应用数学、现代控制理论、电力电子技术、人工智能等日益广泛深入地应用于电力系统,正在促使这一传统产业迅速走向高科技化。在电力系统安全经济水平和现代化水平提高的同时,电力系统学科也得到更新、丰富与发展。当前,亟需一批反映电力系统学科新进展、新成果的一系列专著,为此我们组织编写了这套《现代电力系统丛书》。

丛书旨在反映当代国内外电力系统学科的最新发展和科学技术的水平。丛书将以现代科学的新理论、新方法在电力系统中的应用为主要内容,特别对在我国电力系统中已获得应用或将获得应用的最新成果进行重点介绍。

本丛书由科学出版社和清华大学出版社出版。希望本丛书对我国电力系统的发展、电力系统学科水平的提高、科技人员知识结构的改善将有所贡献。

编 委 会

前 言

现代电力系统的迅速发展提出了一系列动态过程中的新问题,近几十年来,电力系统科技人员努力运用现代科学的理论、技术和工具去研究、分析和解决这些问题,并取得了丰硕的成果。这些成果一方面有助于电力系统的安全稳定运行,另一方面也促进了动态电力系统理论和分析方法的发展。

电力系统动态行为的机理与规律、数学模型与分析方法、监护与控制对策是电力系统规划、设计、运行的基础,对电力系统安全稳定运行有重要的意义和指导作用。在这一领域内,国内外曾出版过少量专著和教材,但对于电力系统复杂动态过程中的理论问题和电力系统动态分析新方法的介绍则嫌不足。自20世纪70年代末至今,我们在清华大学开设了《电力系统分析》、《动态电力系统》等研究生课程,本书既总结了前人的成果,又汇入了我们所在科学研究小组多年来所取得的研究成果,它是编著者多年来教学和研究实践的总结。

本书对动态电力系统的理论、分析方法及其新进展作了系统、全面、深入的阐述和介绍,而电力系统稳态分析和故障分析等方面的内容则将在本书的姊妹篇《高等电力网络分析》一书中加以介绍。

本书分为上、下两篇。上篇共7章,主要介绍电力系统动态分析中常用元件的数学模型。第1章对于电力系统的核心——同步电机的数学模型作了较系统详尽的阐述,以期读者对电力系统元件的建模过程、相应的假定及模型的局限性有深入的了解。第2章至第5章分别介绍了励磁系统、原动机与调速器、负荷和网络元件的数学模型。第6、第7章结合电力电子技术在电力系统的广泛应用,分别推导了直流输电系统的数学模型和静止无功补偿器的数学模型,第7章还推导了新型的静止无功电源(SVG)的数学模型。下篇共8章,重点阐述动态电力系统的基本理论和分析方法。其中第8、第9章分别介绍了电力系统在大扰动下暂态稳定分析时域仿真法和暂态能量函数法。第10、第11章分别介绍了电力系统在小扰动下的静态稳定和动态稳定的基本概念和分析方法。第12、第13章分别阐述了电力系统低频振荡和电力系统次同步振荡的机理、特点、数学模型、分析方法及对策。第14章介绍了电力系统动态等值的方法。第15章简要介绍了交直流输电系统的分析。编著者在写作中力求突出问题的物理本质和规律,并做到深入浅出。对于各种分析方法的介绍力求思路清楚、简明扼要,以便于正确使用及进一步发展。

本书所介绍的各种分析方法绝大多数都由编著者所在科研小组编写了相应的计算机软件,这些软件形成了电力系统动态分析软件包,并已在一些电力系统研究中得到了应用。

本书中的许多研究成果是由王宗淦教授、张宝霖教授、周荣光教授、陈寿孙教授、倪以信教授、文学宓教授、郑汉楚、张中华等老师所组成的科研小组及他们指导的许多研究生共同工作所取得的。在本书编著过程中高景德教授给予了热情鼓励和悉心指导,周荣光

HAC38/10

教授对全书提出了许多宝贵意见,焦连伟和曾江等博士进行了校对,清华大学电机工程系和电力系统及其自动化教研组的领导与同志们给予了大力支持,在此谨表示衷心的感谢。

本书有关的研究工作曾得到国家自然科学基金、“七五”攻关项目、教委重点博士点基金、教委优秀青年教师基金、教委霍英东青年教师基金的支持,并得到电力部及东北电业管理局等生产部门的帮助,在此一并表示感谢。

在本书的编写过程中,我们虽对体系的安排、素材的取舍、文字的叙述尽了努力,但由于编著者水平有限,缺点和错误在所难免,恳切期望读者给予批评和指正。

编著者

2001年3月

目 录

前言	V
----------	---

上篇 电力系统元件数学模型

1 同步电机数学模型	1
1.1 abc 坐标下的有名值方程	1
1.1.1 理想电机	1
1.1.2 电压方程	3
1.1.3 磁链方程	3
1.1.4 功率、力矩及转子运动方程	6
1.1.5 小结	8
1.2 派克变换	8
1.2.1 经典派克变换	8
1.2.2 正交派克变换	14
1.3 $dq0$ 坐标下的有名值方程	15
1.3.1 电压方程	15
1.3.2 磁链方程	16
1.3.3 功率、力矩及转子运动方程	18
1.3.4 小结	19
1.4 同步电机标么制	20
1.4.1 引言	20
1.4.2 各绕组的基值	21
1.4.3 确保标么值互感可逆的约束(第一约束)	22
1.4.4 保留传统的标么电机参数的约束(第二约束)	25
1.4.5 标么值计算实例	27
1.5 $dq0$ 坐标下的标么值方程	29
1.5.1 电压方程	29
1.5.2 磁链方程	30
1.5.3 功率、力矩及转子运动方程	33
1.5.4 算例	37
1.6 d 轴和 q 轴等值电路、运算电抗及实用参数	39
1.6.1 q 轴等值电路、运算电抗及实用参数	39
1.6.2 d 轴等值电路、运算电抗及实用参数	41

1.7	同步电机实用模型	45
1.7.1	引言	45
1.7.2	三阶实用模型	46
1.7.3	五阶实用模型	52
1.7.4	二阶模型	56
1.8	小结	59
2	励磁系统数学模型	61
2.1	引言	61
2.2	直流励磁机数学模型	62
2.2.1	励磁机基本方程	63
2.2.2	励磁机有名值传递函数导出	64
2.2.3	标么值传递函数导出	65
2.3	交流励磁机数学模型	67
2.4	典型励磁系统数学模型	69
2.5	小结	71
3	原动机及调速器数学模型	72
3.1	引言	72
3.2	原动机数学模型	72
3.2.1	汽轮机数学模型	72
3.2.2	水轮机数学模型	74
3.3	典型调速器数学模型	76
3.3.1	水轮机调速器数学模型	76
3.3.2	汽轮机调速器数学模型	78
3.4	小结	80
4	负荷数学模型	81
4.1	引言	81
4.2	负荷静态模型	81
4.3	负荷动态模型	83
4.3.1	考虑到感应电动机机械暂态过程的负荷动态模型	83
4.3.2	考虑到感应电动机机电暂态过程的负荷动态模型	85
4.3.3	考虑到感应电动机电磁暂态过程的负荷动态模型	87
4.4	小结	89
5	网络元件数学模型	90
5.1	引言	90

5.2	输电线路准稳态模型	90
5.2.1	abc 相坐标准稳态模型	90
5.2.2	012 对称分量准稳态模型	92
5.2.3	xy 同步坐标实数域的准稳态模型	94
5.3	输电线路电磁暂态模型	94
5.3.1	abc 相坐标电磁暂态模型	95
5.3.2	dq 旋转坐标电磁暂态模型	95
5.3.3	xy 同步坐标电磁暂态模型	97
5.4	变压器准稳态模型	97
5.5	变压器电磁暂态模型	100
5.5.1	abc 相坐标电磁暂态模型	101
5.5.2	xy 同步坐标电磁暂态模型	101
5.5.3	变压器接线对电磁暂态模型的影响	103
5.6	小结	105
6	直流输电系统数学模型	106
6.1	引言	106
6.2	整流器的工作原理及数学模型	107
6.3	逆变器的工作原理及数学模型	110
6.4	双端直流输电系统的数学模型	112
6.5	直流系统的基本调节方式	115
6.6	小结	117
7	静止无功补偿器数学模型	118
7.1	引言	118
7.2	TCR 的工作原理和数学模型	119
7.3	静止无功电源 SVG 的工作原理和数学模型	121
7.3.1	SVG 的工作原理与电流电压波形	121
7.3.2	SVG 的准稳态数学模型	126
7.4	小结	131
 下篇 动态电力系统理论与分析 		
8	时域仿真法暂态稳定分析	135
8.1	引言	135
8.2	简化模型时域仿真法暂态稳定分析	136
8.3	发电机节点的处理和机网接口计算	140
8.3.1	考虑凸极效应的直接解法	141

8.3.2	考虑凸极效应的迭代解法	143
8.4	负荷节点处理	145
8.5	常微分方程的数值解法	147
8.5.1	基本概念	147
8.5.2	改进欧拉法	152
8.5.3	隐式梯形积分法	154
8.6	网络操作与故障处理	156
8.7	基于改进欧拉法和迭代解法的暂态稳定分析	162
8.8	基于隐式梯形积分法的暂态稳定分析	166
8.8.1	发电机转子运动方程	168
8.8.2	发电机转子绕组暂态方程	169
8.8.3	发电机定子绕组电压方程	169
8.8.4	原动机和调速器微分方程	170
8.8.5	励磁系统微分方程	173
8.8.6	动态负荷基本方程	174
8.9	时域仿真法暂态稳定分析的研究动向	178
8.10	小结	180
9	电力系统暂态能量函数法暂态稳定分析	181
9.1	引言	181
9.2	单机无穷大系统的直接法暂态稳定分析	182
9.3	多机系统直接法暂态稳定分析的数学模型	185
9.3.1	同步坐标下的暂态能量函数和临界能量	185
9.3.2	惯量中心(COI)坐标下的暂态能量函数和临界能量	188
9.4	相关不稳定平衡点法(RUEP)暂态稳定分析	191
9.5	势能边界法(PEBS)暂态稳定分析	194
9.6	扩展等面积法(EEAC)暂态稳定分析	199
9.7	综合法直接暂态稳定分析	204
9.8	李雅普诺夫直接法及李雅普诺夫函数	208
9.9	结构保留模型的直接暂态稳定分析	210
9.10	直接法的研究动向	214
9.11	小结	215
10	电力系统静态稳定分析的基本概念与方法	216
10.1	引言	216
10.2	单机无穷大系统的功角静态稳定	216
10.3	单负荷无穷大系统的电压静态稳定	221
10.4	复杂系统静稳功率极限的实用算法	225

10.5	复杂系统临界电压的实用算法	226
10.6	多机系统静态稳定性分析	228
10.6.1	多机系统静态稳定分析数学模型	229
10.6.2	多机系统静态稳定分析	232
10.7	小结	234
11	电力系统动态稳定分析的基本概念与方法	235
11.1	引言	235
11.2	单机无穷大系统的线性化模型	235
11.3	多机系统的线性化模型	239
11.4	多机系统动态稳定分析的特征分析法	252
11.4.1	特征根和特征向量的物理意义和数学性质	253
11.4.2	特征根与状态变量的相关性——相关因子	256
11.4.3	特征根和机电回路的相关比	256
11.4.4	特征根对参数变化的灵敏度	257
11.4.5	多机系统动态稳定分析的步骤	258
11.5	小结	259
12	电力系统低频振荡	260
12.1	引言	260
12.2	单机无穷大系统的低频振荡	260
12.2.1	发电机采用经典二阶模型时系统的低频振荡	260
12.2.2	发电机采用三阶实用模型、计及励磁系统动态时系统的低频振荡	262
12.3	多机系统低频振荡的数学模型及特征分析法	266
12.3.1	多机系统低频振荡特征根的特点	266
12.3.2	多机系统低频振荡的数学模型及特征分析法	268
12.4	低频振荡分析的选择模式分析法	270
12.4.1	SMA法的基本原理	270
12.4.2	SMA法特征根和特征向量的计算	272
12.4.3	SMA法中相关因子、机电回路相关比及特征根灵敏度计算	276
12.5	低频振荡分析的自激法	279
12.5.1	自激法的原理	279
12.5.2	多机系统自激法分析的数学模型	283
12.5.3	自激法的主要优缺点	286
12.6	低频振荡的对策及PSS设计简介	287
12.6.1	单机无穷大系统的PSS设计	287
12.6.2	基于SMA法的PSS设计	289

12.6.3	基于自激法的 PSS 设计	291
12.7	小结	291
13	电力系统的次同步振荡及轴系扭振	292
13.1	引言	292
13.2	多质块弹性轴系	293
13.2.1	双质块弹性轴系及扭振自然频率	293
13.2.2	多质块轴系模型	294
13.2.3	多质块轴系模式的解耦	295
13.3	感应发电机效应	298
13.4	机电扭振相互作用	300
13.5	暂态力矩放大作用	303
13.6	装置引起的次同步振荡	304
13.7	简单系统中串补电容引起 SSO 的数学模型	310
13.8	多机系统 SSO 的线性化数学模型	314
13.8.1	状态方程形式的系统数学模型	314
13.8.2	扫频-复数力矩系数法 SSO 的分析数学模型	320
13.9	SSO 的分析方法简介	323
13.10	抑制 SSO 的对策与 SSO 监护简介	327
13.10.1	抑制 SSO 的对策	327
13.10.2	SSO 的监护	328
13.11	小结	329
14	电力系统动态等值	330
14.1	引言	330
14.2	同调等值法	331
14.2.1	同调机组判别	331
14.2.2	同调发电机母线的化简	335
14.2.3	网络化简	339
14.2.4	同调发电机的动态聚合	340
14.2.5	同调等值法的计算步骤	346
14.3	模式等值法	347
14.4	估计等值法简介	348
14.5	小结	349
15	交直流输电系统分析	350
15.1	交直流输电系统潮流计算	350
15.2	交直流输电系统暂态稳定分析	353

15.3 小结.....	356
附录 I 同步电机定子各相绕组的自感及互感系数.....	357
附录 II 同步电机电磁力矩计算公式.....	359
附录 III 同步电机实用四阶模型.....	361
附录 IV 同步电机实用六阶模型.....	364
附录 V 矩阵特征值的 QR 算法.....	368
参考文献.....	389

上篇 电力系统元件数学模型

1 同步电机数学模型

1.1 abc 坐标下的有名值方程

1.1.1 理想电机

同步电机是电力系统的核心,它是一种集旋转与静止、电磁变化与机械运动于一体,实现电能与机械能变换的元件,其动态性能十分复杂,而且其动态性能又对全电力系统的动态性能有极大影响,因此应对它作深入分析,以便建立用于研究分析电力系统各种物理问题的同步电机数学模型。

为了建立同步电机的数学模型,必须对实际的三相同步电机作必要的假定,以便简化分析计算。通常假定:

(1) 电机磁铁部分的磁导率为常数,既忽略掉磁滞、磁饱和的影响,也不计涡流及集肤作用等的影响。

(2) 对纵轴及横轴而言,电机转子在结构上是完全对称的。

(3) 定子的3个绕组的位置在空间互相相差 120° 电角度,3个绕组在结构上完全相同。同时,它们均在气隙中产生正弦形分布的磁动势。

(4) 定子及转子的槽及通风沟等不影响电机定子及转子的电感,即认为电机的定子及转子具有光滑的表面。

满足上述假定条件的电机称为理想电机。这些假定在大多数情况下已能满足实际工程问题研究的需要,下面的同步电机基本方程推导即基于上述理想电机的假定。当需要考虑某些因素(如磁饱和等)时,则要对基本方程作相应修正。

图1-1是双极理想电机的示意图,图中标明了各绕组电磁量的正方向。必须特别强调的是,后面导出的同步电机基本方程是与图1-1中所定义的电磁量正方向相对应的。

下面对图1-1中所定义各电磁量正方向作必要的说明。定子 abc 三相绕组的对称轴 a, b, c 空间互差 120° 电角度。设转子逆时针旋转为旋转正方向,则其依次与静止的 a, b, c 三轴相遇。定子三相绕组磁链 Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c 的正方向分别与 a, b, c 三轴正方向一致。定子三相电流 i_a, i_b, i_c 的正方向如图1-1所示。正值相电流产生相应相的负值磁动势和磁链。这种正方向设定与正常运行时定子电流的去磁作用(电枢反应)相对应,有利于分析计算。而定子三相绕组端电压的极性与相电流正方向则按发电机惯例来定义,即正值

电流 i_a 从端电压 u_a 的正极性端流出发电机, b 相和 c 相类同。

转子励磁绕组中心轴为 d 轴, 并设 q 轴沿转子旋转方向领先 d 轴 90° 电角度。在 d 轴上有励磁绕组 f 及一个等值阻尼绕组 D , 在 q 轴上有一个等值阻尼绕组 Q 。上述假定一般能满足多机电力系统分析的需要。对于汽轮机实心转子, 转子 q 轴的暂态过程有时需用两个等值阻尼绕组来描写, 即除了与次暂态(又称超瞬变)过程对应的时间常数很小的等值阻尼绕组 Q 外, 还应考虑与暂态过程对应的时间常数较大的等值阻尼绕组 g , 该绕组在暂态过程中的特点与 d 轴的励磁绕组 f 对应, 只是无电源激励。为简便起见, 后面的分析将不考虑 g 绕组存在。 q 轴有 g 绕组时的分析可参考 d 轴的分析, 并令励磁电压为零即可。

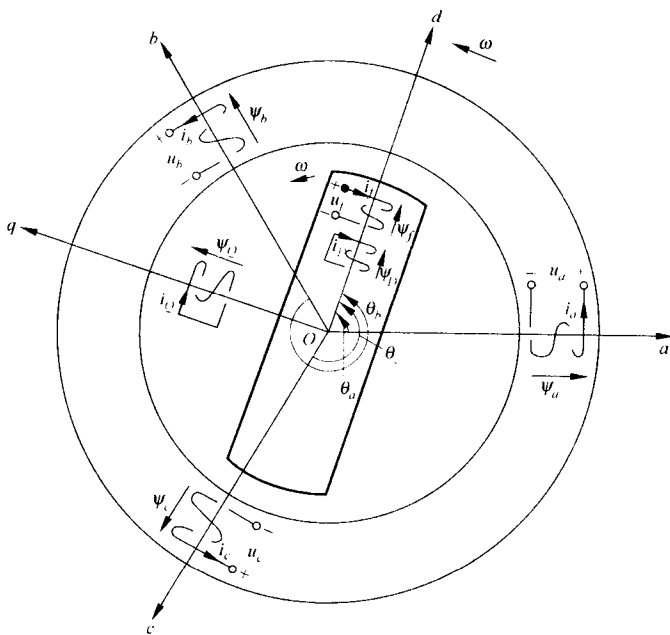


图 1-1 双极理想电机的示意图

设 d 轴的 f 绕组、 D 绕组和 q 轴的 Q 绕组的磁链正方向分别与 d 轴、 q 轴正方向一致, f 绕组、 D 绕组、 Q 绕组的正值电流产生相应绕组的正值磁动势和磁链, D 阻尼绕组、 Q 阻尼绕组端电压恒为零(短路), 励磁绕组电流 i_f 由其端电压 u_f 的正极性端流入励磁绕组, 与稳态运行时方向一致, 转子 d 轴在空间领先 a, b, c 三轴的电角度分别为 $\theta_a, \theta_b, \theta_c$, 则

$$\theta_b = \begin{cases} \theta_a + 240^\circ \\ \theta_a - 120^\circ \end{cases}$$

$$\theta_c = \begin{cases} \theta_a + 120^\circ \\ \theta_a - 240^\circ \end{cases}$$

当讨论三角函数值时, θ_b 或 θ_c 的两种表达形式有相同的值, 因而后面将不加区分。

下面将以上述电机绕组结构及电磁量正方向定义为基础, 导出 a 相、 b 相、 c 相坐标下同步电机有名值方程。方程中各变量及参数的单位均采用法定计量单位。

1.1.2 电压方程

由前面所设定子绕组电压、电流及磁链正方向,可写出定子各相绕组电压方程为

$$\begin{cases} u_a = p\Psi_a - r_a i_a \\ u_b = p\Psi_b - r_a i_b \\ u_c = p\Psi_c - r_a i_c \end{cases} \quad (1-1)$$

式中, $p = d/dt$, 为对时间的导数算子; r_a 为定子各相绕组的电阻。电压单位为 V, 电流单位为 A, 电阻单位为 Ω , 磁链单位为 Wb, 时间单位为 s。

由前面所设转子各绕组的电压、电流及磁链正方向,可写出转子各绕组的电压方程为

$$\begin{cases} u_f = p\Psi_f + r_f i_f \\ u_D = p\Psi_D + r_D i_D \equiv 0 \\ u_Q = p\Psi_Q + r_Q i_Q \equiv 0 \end{cases} \quad (1-2)$$

式中, r_f, r_D, r_Q 分别为 f, D, Q 绕组的电阻。

可把式(1-1)与式(1-2)合并,写成矩阵形式的 abc 坐标下的电压方程,即

$$\mathbf{u} = p\boldsymbol{\Psi} + \mathbf{r}\mathbf{i} \quad (1-3)$$

式中, $\mathbf{u} = (u_a, u_b, u_c, u_f, u_D, u_Q)^T$;

$$\boldsymbol{\Psi} = (\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c, \Psi_f, \Psi_D, \Psi_Q)^T$$

$$\mathbf{r} = \text{diag}(r_a, r_a, r_a, r_f, r_D, r_Q);$$

$$\mathbf{i} = (-i_a, -i_b, -i_c, i_f, i_D, i_Q)^T.$$

这里需特别注意的是式(1-3)中绕组电流矢量 $\mathbf{i}_{(6 \times 1)}$ 中的前 3 个元素 i_a, i_b, i_c 前有负号,这是由于定子绕组端电压和相电流正方向按发电机惯例设定而引起的。

1.1.3 磁链方程

由图 1-1 所设定的各绕组电流及磁链正方向,可建立起绕组磁链方程,写成矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \\ \Psi_f \\ \Psi_D \\ \Psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{af} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bf} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cf} & L_{cD} & L_{cQ} \\ L_{fa} & L_{fb} & L_{fc} & L_{ff} & L_{fD} & L_{fQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{Df} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{Qf} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_a \\ -i_b \\ -i_c \\ i_f \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix}$$

$$\stackrel{\text{def}}{=} \begin{bmatrix} \mathbf{L}_{11(3 \times 3)} & \mathbf{L}_{12(3 \times 3)} \\ \mathbf{L}_{21(3 \times 3)} & \mathbf{L}_{22(3 \times 3)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -\mathbf{i}_{abc} \\ \mathbf{i}_{fDQ} \end{bmatrix} \quad (1-4)$$

可简写成

$$\boldsymbol{\Psi} = \mathbf{L}_{(6 \times 6)} \mathbf{i} \quad (1-5)$$

式(1-4)中 \mathbf{L}_{11} 为定子绕组的自感(对角元)和互感(非对角元); \mathbf{L}_{22} 为转子绕组的自感和互感;而 \mathbf{L}_{12} 和 \mathbf{L}_{21} 为定子绕组与转子绕组相互间的互感。电感单位为 H。电感矩阵 $\mathbf{L}_{(6 \times 6)}$