

7M34
5562

清华大学学术专著

交流电机 及其系统的分析

高景德 王祥珩 李发海 著

清华大学出版社

内 容 简 介

本书是作者在清华大学从事交流电机及其系统的教学、科学研究及研究生培养等工作的基础上,结合近年技术的发展和应编写而成的。全书共七章。

本书在第一章内,以凸极电机为研究对象,从单个线圈元件出发,讨论了交流电机的基本电磁关系,单个线圈的电感系数以及将它们组成回路方程的方法等。在第二、三和第五章内,研究并讨论了三相同步电机与异步电机的电磁关系及参数、运行性能及分析方法等。第四章研究了自控式同步电动机的数学模型、控制方式及矢量控制等。第六章研究了鼠笼式异步电动机磁场定向矢量控制,双馈调速和转矩直接控制等。第七章讨论了交流电机绕组内部不对称问题。

本书可供电机及其控制方面的研究生作为教材和供有关专业科技人员参考之用,也可作为高等院校有关专业学生和教师的参考书。

(京)新登字158号

交流电机及其系统的分析

高景德 王祥珩 李发海 著

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

通县人民文学印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 19.75 字数: 566千字

1993年8月第1版 1993年8月第1次印刷

印数: 0001—4000

ISBN 7-302-01251-2/TM·15

定价: 22.00元

前 言

交流电机单机容量的增大,应用领域的日益广泛,再加上电力电子技术、计算机技术、微电子技术及控制理论的发展和应用,已使交流电机及其系统的运行条件更为复杂,自动化程度日益提高,运行要求更为严格。新的研究课题不断提出,新的研究成果不断涌现,要求有能反映这种新需要及新成果的交流电机及其系统的专著。

根据科学技术发展的趋势和我国电机工业技术进步的需要,近年,清华大学电机工程与应用电子技术系电机教研组对交流电机及其系统的理论及分析方法开展了研究,并取得了一些新的研究成果。现在这个教研组的工作领域已由“电机”拓宽为“电机及其控制”,要求有能适应这一新情况的教材及专著。

针对上述两方面的需要,我们撰写了《交流电机及其系统的分析》。本书第一次系统地论述了以单个线圈元件为基础的多回路理论,这种方法可按照所研究的电机回路的联接情况,组成相应的回路,不仅可以分析过去难于分析的电机绕组内部不对称问题,而且可以方便地分析以电机为核心的某些系统的运行问题。

这本书是在我们教研组过去已写的书籍和近年科学研究成果的基础上编写而成的,是许多同志工作成果的积累和概括。本书第一章至第三章、第五章及第七章由王祥珩同志撰写,第四章及第六章由李发海同志撰写,全书由高景德同志统一规划,修改补充。我们教研组的张麟征、杨秉寿、郑逢时、朱东起、周明宝、姜建国、黄立培、邱阿瑞、李永东等同志和曾作为或正作为博士生、硕士生的张龙照、曹立宇、徐松、孙卫宁、焦书立、李崇坚、李耀华、胡军、徐砚星等同志先后都为本书做出了贡献。

在编写本书的过程中,我们参阅了不少已有的书籍和论文,利用

了不少我们教研组过去撰写的书籍和论文。主要的已经列入了本书的参考文献,以便读者了解本书内容的主要来源和进一步查阅某些感兴趣的问题,同时也表示对这些书籍及论文的作者的感谢。

最后应该说明,本书试图探索的撰写体系是否合适,尚需经过实践的考验和进一步的完善。书中还难免存在其它的缺点和错误。我们衷心欢迎读者给以批评指正。请将宝贵意见寄(邮编 100084)北京清华大学电机工程与应用电子技术系。

作 者

1992 年 3 月

目 录

绪论	VII
第一章 交流电机原理及参数	1
§ 1-1 交流电机回路的电磁关系	1
§ 1-2 交流电机回路的自感系数和互感系数	6
§ 1-3 单个线圈产生的气隙磁场及其电感系数	8
§ 1-4 电机定子回路的电感系数	18
§ 1-5 电机转子回路的电感系数	22
§ 1-6 电机定、转子回路间的电感系数	32
§ 1-7 饱和对参数的影响	34
§ 1-8 漏磁场引起的电感系数	36
§ 1-9 交流电机电磁转矩和转子运动方程	39
§ 1-10 单相异步电机的参数和性能分析	43
第二章 同步电机的电磁关系及参数	56
§ 2-1 同步电机的基本电磁关系	57
§ 2-2 同步电机在 $d, q, 0$ 坐标系统的基本关系式	76
§ 2-3 同步电机的标么值系统	87
§ 2-4 同步电机基本方程的标么值形式、运算电抗和 电磁转矩	93
§ 2-5 同步电机突然三相短路和瞬变参数	105
§ 2-6 同步电机的稳态小值振荡和转矩系数	129
第三章 同步电机及其系统的某些运行状态的分析	152
§ 3-1 同步电机坐标系统的转换	152
§ 3-2 同步电机的稳态两相短路及负序电抗	166
§ 3-3 同步电机的突然两相短路	179

§ 3-4	同步电机与电容相联系统的分析	193
§ 3-5	同步电机带整流负载系统的分析	204
§ 3-6	同步电机的静态稳定和励磁调节对静态稳定的影响	217
第四章	自控式同步电动机及其控制系统	233
§ 4-1	自控式同步电动机的分类及应用范围	234
§ 4-2	交直交电流型自控式同步电动机调速系统	239
§ 4-3	交直交电流型自控式同步电动机的数学模型	258
§ 4-4	交直交电流型自控式同步电动机稳态运行性能 计算及参数的影响	286
§ 4-5	交直交电流型自控式同步电动机的调速系统	301
§ 4-6	交交电流型和电压型自控式同步电动机	312
§ 4-7	交交电压型自控式同步电动机的矢量控制	331
第五章	异步电机的电磁关系及某些运行方式的分析	349
§ 5-1	异步电机的基本关系式及参数	350
§ 5-2	异步电机在 $d, q, 0$ 坐标系统中的基本关系式 和参数	365
§ 5-3	异步电动机起动过程的分析	375
§ 5-4	异步电动机在重投入过程中的过渡过程	384
§ 5-5	计及惯性影响时,异步电动机与串联电容相联时的自激	400
第六章	异步电动机与电力电子装置组成的调速系统的 分析	418
§ 6-1	主相绕组用晶闸管控制的单相电容电动机的 分析	419
§ 6-2	定子每相绕组与双向晶闸管串联的三相异步 电动机的分析	428
§ 6-3	鼠笼式异步电动机的磁场定向控制	445
§ 6-4	鼠笼式异步电动机的转矩直接控制	469
§ 6-5	磁通脉宽调制(PWM)控制技术	486

§ 6-6 绕线式异步电动机双馈调速系统	490
§ 6-7 开关磁阻电动机控制系统	515
第七章 交流电机内部不对称的分析	525
§ 7-1 鼠笼式三相异步电机转子绕组故障的分析	527
§ 7-2 凸极同步电机定子绕组不对称时的回路参数 计算	544
§ 7-3 多支路凸极同步电机空载时定子绕组内部 故障的分析	548
§ 7-4 多支路凸极同步电机联网带载时的定子绕组内部 故障分析	570
§ 7-5 大型水轮发电机定子绕组内部故障的简化计算 ...	579
附录一 考虑齿槽效应的气隙磁导系数	584
附录二 等效气隙长度表示式	586
附录三 定子端部漏磁场引起的电感系数的计算	588
附录四 海氏运算法	599
附录五 变压器的基本关系式和等值电路	601
参考文献	605
名词索引	610

第一章

交流电机原理及参数

交流电机是机械能转换为电能(发电机)或电能转换为机械能(电动机)的主要装备。根据使用要求的不同,已经形成了各种容量、多种品种的同步电机和异步电机。虽然这些电机的结构原理和运行性能是多种多样的,但就其定子而言,主要是由一个个线圈元件联接而成的三相或单相等绕组;就其转子而言,有凸极或圆柱两种结构形式,其绕组有用导条和端环形成的,有用单个线圈联接而成的,其中凸极转子的同步电机形成不均匀的气隙,并使这种电机的电磁关系更复杂一些。从电机转子绕组结构看,同步电机既有阻尼绕组,又有励磁绕组,也更具有代表性。再就交流电机的电磁关系来看,它们都是一些由单个线圈组成的有相对运动的互感回路。因此,了解和建立了一个线圈的电流、磁链和电压等的关系式后,即可根据同步电机或异步电机的具体结构和工作状况列出相应的回路方程,并可据此分析和计算其运行性能。基于上述考虑,本章将把凸极同步电机作为交流电机的结构模型,把单个线圈作为基本单元来研究和讨论交流电机的电磁关系,包括单个线圈的电感系数及由它们组成的回路的电感系数等基本问题。这是交流电机多回路理论和方法的基础。对它进行深入的理解和掌握是阅读本书其它部分的基础和关键。

§ 1-1 交流电机回路的电磁关系

交流电机是具有铁心的电路结构,它与一般静止电路的不同点是其定子和转子之间有相对运动,电机回路的有些电感系数与转子位置有关,即是时变参数。但在研究交流电机的基本电磁关系时,许

多研究和分析静止电路的原理和法则仍可利用。

以图 1-1-1 的互感电路为例,按图示正方向和电流、磁链按右手螺旋法则规定的情况下,有以下的磁链和电压方程:

$$\phi_1 = L_1 i_1 + M_{12} i_2$$

$$\phi_2 = M_{21} i_1 + L_2 i_2$$

$$u_1 = p\phi_1 + r_1 i_1$$

$$u_2 = -p\phi_2 - r_2 i_2$$

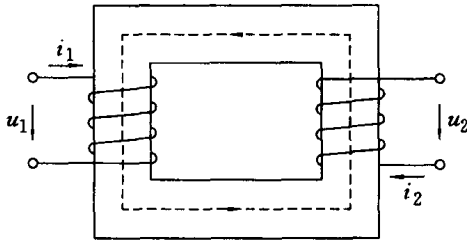


图 1-1-1 互感电路

这些简单而基本的电路电磁关系和概念,在我们讨论交流电机的电磁关系时,将会经常用到。

就电磁关系而言,凸极同步电机具有更普遍的意义。气隙均匀的隐极同步电机可视为气隙不均匀的凸极同步电机的特例。如果考虑隐极同步电机实心转子铁中的涡流效应时,则可用阻尼绕组来代替其作用。因之,根据凸极同步电机推导出来的一些原理和概念,在一定条件下,对隐极同步电机,均可加以利用。至于异步电机,它不仅具有均匀的气隙,而且其转子结构在电的方面和磁的方面对转子任意轴线均对称,因此,在许多情况下,异步电机也可作为凸极同步电机的特例来研究。

在分析凸极同步电机运行问题时,首先需要对定子和转子回路分别列出电压方程和磁链方程。对于定子方面,在三相对称的情况下,通常都把其各相绕组作为一个回路来分析。但当定子绕组内部不对称时,把相绕组作为回路来研究就会遇到困难,这时就需要按照具

体问题来选择回路了。例如定子绕组发生内部故障时，短路部分就需要单独作为一个回路来研究。正常运行的单相电机，虽然仍可把相绕组作为一个回路来研究，但有些单相电机结构特殊，例如在研究集中绕组（即 $q=1$ ）的单相电机时，其谐波磁场的作用必须考虑，否则就会产生较大的误差。因此，以一个线圈为基本单元来讨论凸极同步电机各回路的电磁关系更具有普遍意义。下面我们就从定子和转子两方面来具体分析凸极同步电机各回路的电磁关系。

一、定子回路

在实际分析交流电机的运行问题时，在其定子上可能有多个回路，其中的某一回路可能是一个相绕组，也可能为绕组的一个支路、还可能是一个线圈或几个线圈连接而成的特殊电路。以其中的某一回路 K 为例，假定这个回路的电流、磁链和电压的正方向如图 1-1-2 所示，即正值的电流产生负值的磁链，正值的电流在负载方向产生正值的电压降。它和图 1-1-3 中所示的定子 K 回路的电流的正方向和其轴线 K 的正方向，也即 K 回路磁链的正方向，是一致的。

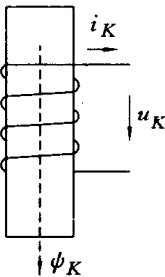


图 1-1-2 定子回路的 i 、 u 、 ψ 正方向关系

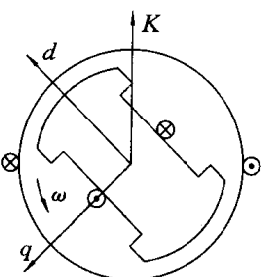


图 1-1-3 电机定、转子电流的正方向规定

在上述规定下，可以写出定子任意回路 K 的电压方程为

$$u_K = p\psi_K - r_K i_K \quad (1-1-1)$$

式中 u_K, ψ_K, r_K, i_K 分别为 K 回路的端电压、磁链、电阻和电流；

$p = \frac{d}{dt}$ 为算子。

二、励磁回路

选择转子纵轴 d 及横轴 q 的方向如图 1-1-3 所示，纵轴 d 与磁极的中心线一致，横轴 q 沿转子旋转方向领先纵轴 $\pi/2$ 电弧度。选择励磁回路 j 的磁链的正方向与 d 轴的正方向一致。励磁回路 j 的电流的正方向如图 1-1-3 所示，即规定正值的励磁电流产生正值的励磁回路磁链。励磁电压的正方向如图 1-1-4 所示，即向绕组方向看时，电压降的正方向与励磁绕组电流的正方向一致。

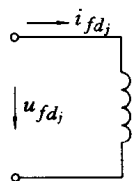


图 1-1-4 励磁绕组电压、电流的正方向规定

根据上面所规定的各量的正方向，可写出励磁回路 j 的电压方程为

$$u_{fd_j} = p\psi_{fd_j} + r_{fd_j}i_{fd_j} \quad (1-1-2)$$

式中 $u_{fd_j}, \psi_{fd_j}, r_{fd_j}, i_{fd_j}$ 分别为励磁回路 j 的端电压、磁链、电阻和电流。

三、阻尼回路

凸极同步电机的阻尼条在结构上或者是全部地短接起来，或者是部分地短接起来，这些阻尼条组成一个网形的电路，其中电流回路的选择方法可以是任意的。根据所分析问题的需要，可看作每一极上有一个等效纵轴阻尼回路和一个等效横轴阻尼回路，也可按照实际的网形电路选取回路。阻尼回路各量正方向的规定与励磁回路相似。

本书将按照实际的网形回路来分析阻尼回路，如图 1-1-5 所示。

以第 i 个阻尼回路为例，其电压方程为

$$0 = p\psi_i + r_i i_i - r_c(i_{i-1} + i_{i+1}) \quad (1-1-3)$$

式中 ψ_i, r_i, i_i 分别为第 i 条阻尼回路的磁链、电阻和电流；

r_c 为阻尼条电阻；

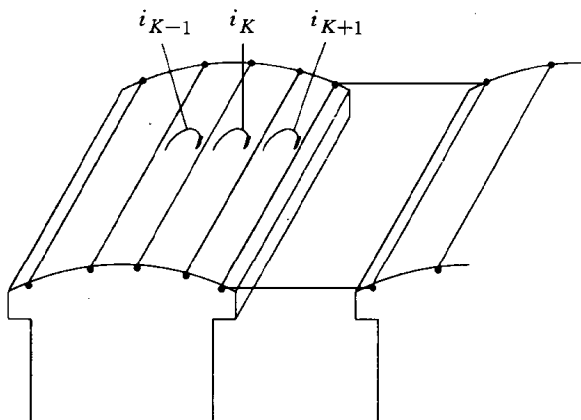


图 1-1-5 凸极同步电机的阻尼回路示意图

i_{i-1} 和 i_{i+1} 分别为第 $i-1$ 和第 $i+1$ 条阻尼回路的电流。

电压方程(1-1-1)、(1-1-2)和(1-1-3)中均包含有回路磁链这个重要的量。根据电路原理, 这些磁链与电流的关系式(磁链方程)可列写如下:

$$\begin{bmatrix} \psi_{s_1} \\ \vdots \\ \psi_{s_n} \\ \psi_{fd_1} \\ \vdots \\ \psi_{fd_j} \\ \vdots \\ \psi_1 \\ \vdots \\ \psi_i \\ \vdots \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -L_{s_1} & \cdots & -M_{s_1 s_n} & M_{s_1 fd_1} & \cdots & M_{s_1 fd_j} & \cdots & M_{s_1 1} & \cdots & M_{s_1 i} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \\ -M_{s_n s_1} & \cdots & -L_{s_n} & M_{s_n fd_1} & \cdots & M_{s_n fd_j} & \cdots & M_{s_n 1} & \cdots & M_{s_n i} & \cdots \\ -M_{fd_1 s_1} & \cdots & -M_{fd_1 s_n} & L_{fd_1} & \cdots & M_{fd_1 fd_j} & \cdots & M_{fd_1 1} & \cdots & M_{fd_1 i} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \\ -M_{fd_j s_1} & \cdots & -M_{fd_j s_n} & M_{fd_j fd_1} & \cdots & L_{fd_j} & \cdots & M_{fd_j 1} & \cdots & M_{fd_j i} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \\ -M_{1s_1} & \cdots & -M_{1s_n} & M_{1fd_1} & \cdots & M_{1fd_j} & \cdots & L_1 & \cdots & M_{1i} & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \\ -M_{is_1} & \cdots & -M_{is_n} & M_{ifd_1} & \cdots & M_{ifd_j} & \cdots & M_{i1} & \cdots & L_i & \cdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{s_1} \\ \vdots \\ i_{s_n} \\ i_{fd_1} \\ \vdots \\ i_{fd_j} \\ \vdots \\ i_1 \\ \vdots \\ i_i \\ \vdots \end{bmatrix}$$

或写成

$$[\psi] = [L][I] \quad (1-1-4)$$

式中 L 为自感系数;

M 为互感系数;

各下标分别表示所属回路(其中 $s_1, s_2, \dots, s_n$ 表示定子回路序号, $1, 2, \dots, i, \dots$ 表示阻尼回路序号, $fd_1, \dots, fd_j, \dots$ 表示励磁回路序号)。

上式中相应的互感系数是可逆的,即

$$\begin{aligned} M_{s_1 s_2} &= M_{s_2 s_1}, M_{fd_j s_n} = M_{s_n fd_j}, M_{s_n i} = M_{i s_n}, \\ M_{1 i} &= M_{i 1}, \dots \end{aligned}$$

§ 1-2 交流电机回路的自感系数和互感系数

电机参数是研究电机运行性能的关键参量,而电机的自感系数及互感系数又是电机最基本的参数,它是表征某些回路电流产生某一回路磁链的重要参量。某一回路的磁链一般均与其它回路的电流有关,如式(1-1-4)所示。在电感矩阵 $[L]$ 的各元素中,有定子回路的电感系数,转子各回路的电感系数以及定子和转子回路间的电感系数。

在交流电机回路中通以电流后,由电流产生的磁链,按其性质可分为两种,一种是漏磁链,与它对应的电感系数可认为与转子位置无关,且为一恒值;另一种磁链,也是磁链中的主要部分,将通过气隙同时链及定子回路和转子回路。当转子旋转而引起磁阻变化时,与这种磁链对应的电感系数将发生相应的变化。在研究这些电感系数时,可以应用磁路的磁导分析法和磁场分析法。我们在这里主要讨论磁路的磁导分析法。用磁导分析法研究电感系数时,将不考虑铁磁饱和的影响,即认为磁路的磁阻不随磁通密度的大小而变化,铁心的磁阻归算到气隙中,即将气隙适当放大来考虑铁心磁阻的影响。在需要考虑饱和时,可根据电机的运行条件,利用适当选择参数值的方法来处理。另外,在分析中,还将忽略磁滞和涡流等次要因素的影响。

在本章中,电机的齿槽效应应用气隙的卡氏系数表征,不考虑气隙磁阻的齿谐波变化。需要计及齿谐波的电感系数时,可参阅附录一。

如果用磁场分析的方法研究电机的电感系数时,饱和及齿槽的

作用可以在电磁场计算中考虑,显然,这将较大地增加计算的工作量。这方面已有专门论述的著作,本书不多叙述。

在用磁导分析法计算电机回路的电感系数时,根据电感系数的基本概念,我们将首先分析电机的气隙磁通势和气隙磁导。有了这些数值后,即可求出电机的气隙磁场,从而得到电机回路的自感或互感磁链,并得到相应的电感系数。

如前所述,我们是从单个线圈出发,按照由线圈组合成任意回路的途径来研究电机回路的电感系数,所以,在分析气隙磁势时,也以单个线圈的气隙磁通势为基础来讨论这一问题。这时气隙磁通势将包括整数次谐波和分数次谐波,其次数为 $\frac{1}{P}, \frac{2}{P}, \frac{3}{P} \dots$,其中 P 为电机的极对数。

我们知道,磁路的磁通势 F 、磁路的磁导 Λ 和磁路的磁通 Φ 的关系式为

$$F\Lambda = \Phi$$

对于均匀磁路 $\Lambda = \mu \frac{S}{l}$, S 为磁路截面积, l 为磁路长度, μ 为磁导率。

如果要求单位截面积的磁通(即磁路的磁密),则有

$$F\lambda = B \quad (1-2-1)$$

对于均匀磁路 $\lambda = \mu \frac{1}{l}$ 表示单位面积的磁导,称为导磁系数。

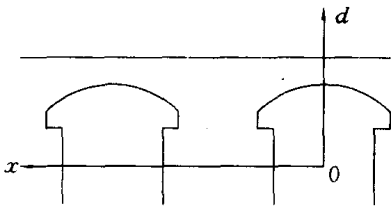


图 1-2-1 凸极同步电机的转子坐标

在凸极同步电机的磁路中,由于气隙的不均匀,气隙的位置不同,气隙的长度就不同,气隙磁导 Λ_g 和单位面积的磁导 λ_g 也不同,并与磁通势和转子的位置有关。下面讨论这一问题。

我们以 $\lambda_g(x)$ 表示单位面积的磁导,并称它为气隙导磁系数,其中 x 为建立在转子上的坐标。如图 1-2-1 所示。由于转子对称于 d 轴,在距离 d 轴为 x 处的气

隙长度将与距离 d 轴为 $-x$ 处的气隙长度相等,因而也具有相同的导磁系数,即 $\lambda_\delta(x) = \lambda_\delta(-x)$ 。又因为对称于磁极轴线的导磁系数在每个极下的分布情况相同,因而又有 $\lambda_\delta(x) = \lambda_\delta(\pi \pm x)$ 。因之导磁系数是变量 x 的偶函数,且只有偶次谐波,其一般表达式为

$$\lambda_\delta(x) = \frac{\lambda_0}{2} + \sum_l \lambda_{2l} \cos 2lx \quad l = 1, 2, \dots \quad (1-2-2)$$

凸极同步电机气隙不均匀,如果其等效气隙长度 $\delta(x)$ 已知,则其导磁系数 $\lambda_\delta(x)$ 为

$$\lambda_\delta(x) = \frac{\mu_0}{\delta(x)} \quad (1-2-3)$$

并可根据傅氏级数求得如下的表示式:

$$\lambda_0 = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \lambda_\delta(x) dx = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\mu_0}{\delta(x)} dx \quad (1-2-4)$$

$$\lambda_{2l} = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \lambda_\delta(x) \cos 2lxdx = \frac{4}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \frac{\mu_0}{\delta(x)} \cos 2lxdx \quad (1-2-5)$$

根据凸极同步电机结构的特点,其极靴部分和极间部分的等效气隙长度 $\delta(x)$ 可以分别处理。在极靴部分,可以认为其磁力线全部沿径向通过气隙,并可按其几何尺寸给出等效气隙长度的表达式。根据作图法和分析法可知极间部分的磁场的分布情况与磁通势所加的位置有关,因此,将按磁通势零值正处在极间中心线和磁通势最大值正处在极间中心线上两种情况分别给出等效气隙长度的表示式。等效气隙长度 $\delta(x)$ 的具体表示式见附录二。

有了气隙磁通势和气隙导磁系数就可求出气隙磁场,并进而求得回路的磁链和相应的电感系数。

§ 1-3 单个线圈产生的气隙磁场及其电感系数

如前所述,组成定子各回路的基本单元是定子绕组的单个线圈。无论定子绕组如何联接,无论定子绕组处于何种形式的不对称状况,其定子回路都是由相应的单个线圈所组成。因此,研究和了解单个线

圈的气隙磁场(主磁场)有普遍意义。电机内,除存在气隙磁场(主磁场)外,还存在漏磁场,有关漏磁场及与其相应的电感系数问题,我们将在 § 1-8 中讨论。

下面讨论单个线圈通电流后产生的气隙磁场及其电感系数。

一、单个线圈通电流后产生的气隙磁通势

设定子线圈 AA' 通电流 i , 产生矩形波磁通势, 如图 1-3-1 所示。对这个矩形波磁通势进行谐波分析, 在整个电机圆周 $[-P\pi, P\pi]$ 区

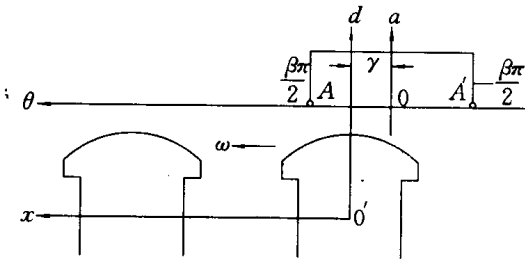


图 1-3-1 定子线圈 AA' 通电流产生的气隙磁通势

间,有

$$F(\theta) = \sum_n a_n \cos \frac{n}{P} \theta \quad n = 1, 2, \dots \quad (1-3-1)$$

因为矩形波磁势对线圈 AA' 的轴线对称, 所以上式只有余弦项。式中

$$a_n = \frac{1}{P\pi} \int_{-P\pi}^{P\pi} F(\theta) \cos \frac{n}{P} \theta d\theta = \frac{2}{n\pi} i w_k \sin \frac{n\beta\pi}{2P} \quad (1-3-2)$$

式(1-3-2)中, P 为极对数; β 为线圈短距比; w_k 为线圈匝数; θ 为沿电机周向的电角度。

可以看出, 在单个线圈通电流产生的矩形波磁通势中, 分数次谐波和低次谐波是很强的。

式(1-3-1)中的磁通势基波为 $a_1 \cos \frac{\theta}{P}$, 其周期为 $2P\pi$; P 次谐波磁通势为 $a_P \cos \theta$, 其周期为 2π ; kP 次谐波磁通势为 $a_{kP} \cos k\theta$, 其周期为 $2\pi/k$ 。若以惯用的周期为 2π 电角度的空间波作为基波时, 则可将

式(1-3-1)改写为

$$F(\theta) = \sum_k F_k \cos k\theta \quad k = \frac{1}{P}, \frac{2}{P}, \frac{3}{P} \dots \quad (1-3-3)$$

式中 $F_k = \frac{2}{kP\pi} i\omega_K \sin \frac{k\beta\pi}{2} = \frac{2}{kP\pi} i\omega_K k_{yk}$;

$k_{yk} = \sin \frac{k\beta\pi}{2}$ 为线圈的短距系数。

由于凸极机的气隙不均匀,同样的气隙磁通势产生的气隙磁密将随着转子位置的不同而不同。以磁通势在 d 轴上或在 q 轴上为例,显然,其磁路中的气隙很不相同,产生的气隙磁场也很不一样。为了便于分析起见,我们将把定子磁通势分成 $F_{dk}(x)$ 和 $F_{qk}(x)$ 两个分量,以使它们作用的位置不随转子位置的变化而变化,从而使与这两个磁通势对应的气隙保持不变。这就要把定子坐标系中所写的气隙磁通势的关系式(1-3-3)转换到转子坐标系中。因 $\theta = x + \gamma$ (见图 1-3-1),图中 x 坐标建立在转子上,以 d 轴位置为零点, γ 为转子位置角,它是转子 d 轴顺转动方向领先定子坐标系轴线的电角度,有

$$\gamma = \int_0^t \omega dt + \gamma_0$$

式中 γ_0 为转子 d 轴与定子坐标系轴线间在 $t=0$ 时的电角度,即 $t=0$ 时的转子初始位置角;

ω 为电机的转速。

当转子匀速转动时, $\gamma = \omega t + \gamma_0$, 将 θ 换为 $x + \gamma$, 则式(1-3-3)变为

$$F(\theta) = \sum_k F_k \cos k(x + \gamma) = \sum_k [F_{dk}(x) + F_{qk}(x)] \quad (1-3-4)$$

其中 $F_{dk}(x) = F_k \cos k\gamma \cos kx = F_{dkm} \cos kx$ (1-3-5)

$F_{qk}(x) = -F_k \sin k\gamma \sin kx = -F_{qkm} \sin kx$ (1-3-6)

可以看出, $F_{dk}(x)$ 的幅值

$$F_{dkm} = F_k \cos k\gamma = \frac{2}{kP\pi} i\omega_K \sin \frac{k\beta\pi}{2} \cos k\gamma$$

即其幅值与电流的大小及转子位置角 γ 有关,而且幅值的位置正好