

● 黄家裕 岑文辉 编著
● 上海交通大学出版社

同步电机基本理论 及其动态行为分析



内 容 简 介

本书是一本关于同步电机基本理论及其动态行为分析的基础教材,着重讨论基本数学模型、概念和分析方法。主要内容为:同步电机基本方程(Park方程)及其规范化,综合相量概念的应用,等值电路及其参数计算;发电机的正常运行、突然三相短路、自励磁和次同步谐振等各种方式分析;电力系统暂态稳定和静态稳定分析等。书中还介绍了三相短路、失磁异步运行和自励磁三种运行方式计算机数字仿真的模型、方法、步骤和算例,以及应用派克方程基本形式和发电机线性化端口方程与网络方程联立求解的暂态稳定程序的模型、方法和步骤。书后附有习题 27 道。

本书可作为电力系统及其自动化专业以及有关专业本科生、研究生 40 学时左右的选修课或必修课的教材或教学参考书。亦可供电力系统有关专业的科技人员参考。

同步电机基本理论 及其动态行为分析

出版 上海交通大学出版社
(淮海中路 1984 弄 19 号)
发行 新华书店上海发行所
印刷 常熟文化印刷厂
开本 850×1168 (毫米) 1/32
印张 9.25
字数 234000
版次 1989 年 4 月 第一版
印次 1989 年 5 月 第一次
印数 1—1750
科目 192—265
ISBN 7-313-00407-9/TM·3

定价: 2.10 元

前 言

同步发电机是电力系统中最重要和最复杂的元件，它的行为对于电力系统的动态过程有举足轻重的影响。半个多世纪以来，各国电工界学者对同步电机的基本理论和行为分析给予充分的重视并进行了大量的研究工作。随着电力系统容量和地域的增大、输电电压的增高、单机容量的增大、经济性要求的提高和新技术的采用等，这一领域还不断出现新的课题，如低频振荡、异步运行、次同步谐振以及系统扰动对大型汽轮发电机轴列扭矩的影响等。

当今，电子计算机得到广泛的应用。有了这一代表现代科学技术的工具，派克(Park)方程的作用得到了更好的发挥；在同步电机基本理论和动态行为分析这一领域中，许多课题的研究工作已经或都将提高到一个新的水平。

过去，进行这一领域的研究工作多用解析方法，数学公式多而冗长；有的专著在阐述中对于物理概念注意和讨论不够。这对开展研究工作，以及掌握这一领域的有关内容增加了困难。在本书中，除了严格的数学分析和公式推导以外，注意了计算机的应用，并给物理概念以充分的重视。希望这将有助于这一领域有关内容的学习和研究工作的深入。

本书在内容的安排中突出了以下各个方面。

在同步电机基本方程的阐述中，扩大了综合相量概念的应用。用综合相量图解释并表示派克方程。在动态过程中，发电机的定子变量（电流等）仍旧可用综合相量表示。综合相量不受模值恒定、转速恒定的约束。在电力系统分析中，网络变量亦可用综合相量表示。

反映了发电机数学模型建立的全过程。其中包括派克方程的推导、规范化、等值电路、参数测试和从试验参数计算等值电路参数等内容,以便于实际使用。

从发电机基本数学模型出发分析各种运行方式。稳态运行方式是动态分析所需的全系统方程组的初值。各种动态过程分析则是在不同边界条件和初值下求解全系统方程组,如三相短路的边界条件是发电机端电压等于零。静稳定(包括自励磁和次同步谐振等)则是研究发电机的线性化模型。

在各种行为分析中结合了计算机的应用。各种运行方式用解析方法进行分析研究都较繁复;如利用计算机求其数值解则甚方便。本书中介绍了同步发电机突然三相短路、失磁异步运行、自励磁三种运行方式计算机数字仿真的方法和步骤,以及机电振荡研究中复数转矩系数的计算等。在书中,解析方法也受到重视,并从中得到许多重要的概念、结论和公式,如突然三相短路和自励磁等内容。

对派克方程与磁路饱和的关系进行了讨论。这一内容安排在附录中。

本书的编写希望能在同步电机基本理论及其动态分析领域中为电力系统有关专业的本科生、研究生和工程技术人员打下初步的基础,以便具有进行较深入的工作的能力。

本书的主要内容在上海交通大学电力系统及其自动化专业硕士研究生(40学时)课程中使用过多次,一部分内容在本科生的教学中也使用过。与课程配合还安排有动态模拟试验和发电机典型运行方式的计算机数字仿真作业。

本书可作为电力系统及其自动化专业和相关专业本科生、研究生选修课或必修课的教材或教学参考书,亦可供电力系统有关专业的科技人员参考。

本书的第四、五章由岑文辉编写,其他各章由黄家裕编写。

由于编者水平有限,书中不乏错误和不妥之处,恳请读者批评
指正。

编 著 者

1988年1月于上海交通大学

目 录

第一章 同步电机的基本方程及其规范化	1
1-1 派克变换和基本方程	1
1-2 综合相量及其应用	14
1-3 基本方程的规范化	22
1-4 暂态电势、暂态电感和次暂态电势、次暂态电感	32
1-5 功率方程、电磁转矩方程和转子运动方程	34
第二章 同步发电机的正常运行	40
2-1 同步发电机正常运行的方程式和相量图	40
2-2 同步发电机正常运行的功率方程	44
2-3 发电机的运行限额图	47
2-4 计及饱和隐极发电机正常运行方式分析	52
2-5 计及饱和凸极发电机正常运行方式分析	57
第三章 突然三相短路	61
3-1 三相短路方式分析	61
3-2 派克方程的等值电路及其参数计算	76
3-3 “ d 轴三个互感系数相等”简化假设的应用	86
3-4 T_a' 、 T_d' 和 x_d' 的近似表达式	88
3-5 关于定子电压方程中变压器电势的讨论	90
3-6 小滑差方式下三相短路试验	92
3-7 饱和 x_{ad} 和 x_{aq} 的计算	96
3-8 同步发电机在三相短路时的电磁转矩	98
3-9 突然三相短路方式的数字仿真	105

第四章 电力系统暂态稳定分析	110
4-1 发电机数学模型	110
4-2 发电机调节系统数学模型	117
4-3 输电网络的数学模型	123
4-4 负荷数学模型	124
4-5 故障/操作的模拟	128
4-6 发电机差分方程组和线性化端口方程	136
4-7 发电机调节系统差分方程组	140
4-8 负荷的差分方程组和线性化端口方程	142
4-9 发电机转子运动方程的求解	144
4-10 暂态稳定解算方法和步骤	145
4-11 同步发电机失磁与异步运行方式的动态仿真	148
第五章 电力系统静态稳定分析	156
5-1 分析电力系统静态稳定的基本方法	156
5-2 简单电力系统的静态稳定分析	161
5-3 转子作小值振荡时发电机的电磁转矩	165
5-4 电气弹簧系数 K_e 和电气阻尼系数 D_e 的计算	172
5-5 发电机三阶线性化模型	174
第六章 发电机的自励磁方式	180
6-1 自励磁产生的条件	180
6-2 关于同步自励磁的讨论	184
6-3 两机系统自励磁电压计算	195
6-4 关于两机系统自励磁试验	198
6-5 关于异步自励磁的讨论	198
6-6 发电机稳态异步运行的近似表达式	203
6-7 自励磁方式的数字仿真	206
第七章 电力系统的次同步谐振	215
7-1 基本概念	215
7-2 研究系统及其方程组	218

7-3 研究系统的静稳定分析	221
第八章 其他坐标系统简介和不对称短路方式分析	233
8-1 其他坐标系统简介	233
8-2 网络变量的坐标变换	241
8-3 两相短路方式的分析	245
8-4 相对中线短路方式的分析	254
8-5 两相对中线短路的分析	257
习 题	262
附 录	275
附录 A 有关的三角恒等式	275
附录 B 派克方程与磁路饱和的关系	277
附录 C 有关的傅里叶级数	281
参考文献	283

第一章 同步电机的基本方程及其规范化

本章讨论同步电机的基本方程即派克方程。派克方程是同步电机行为分析的有力工具。在数字计算机得到广泛应用的今天,更显示出其强大的生命力。

在讨论派克方程时,除数学推导以外,还应用了综合相量(Generalized Phasor)的概念,这有助于对派克方程的理解和掌握。

在电力系统分析中较多应用标么制,对同步电机行为分析也不例外。与静止元件相比,同步电机基本方程的规范化(Normalization)稍麻烦些,要注意定子系三相绕组的特点。

此外,本章还介绍了功率方程、电磁转矩方程和转子运动方程等。

1-1 派克变换和基本方程

令所研究的为一凸极同步电机。它有六个绕组,其中三个定子绕组 $x-a$ 、 $y-b$ 、 $z-c$,一个励磁绕组 $F-F'$,两个阻尼绕组 $D-D'$ 和 $Q-Q'$ 。图 1-1 为其结构示意图,图 1-2 为其电路图。图 1-1 中的绕组系单匝等效绕组。

在图 1-1 中标明了各绕组电流、电势及绕组轴线的正方向,如在绕组中有图示方向的电流通过,轴线方向为其磁势方向。规定转子逆钟向旋转,则定子三相绕组轴线的相对位置应如图所示:沿转子旋转方向, b 相轴线超前 a 相 $\frac{2\pi}{3}$ 弧度, c 相轴线滞后 a 相 $\frac{2\pi}{3}$

弧度。励磁绕组 $F-F'$ 的轴线称直轴或 d 轴，超前 d 轴 $\frac{\pi}{2}$ 弧度的称交轴或 q 轴。 d 轴也是直轴阻尼绕组 $D-D'$ 的轴线， q 轴是交轴阻尼绕组 $Q-Q'$ 的轴线，定子 d 轴与 a 轴间的角度为转子角位移，用 θ 表示。

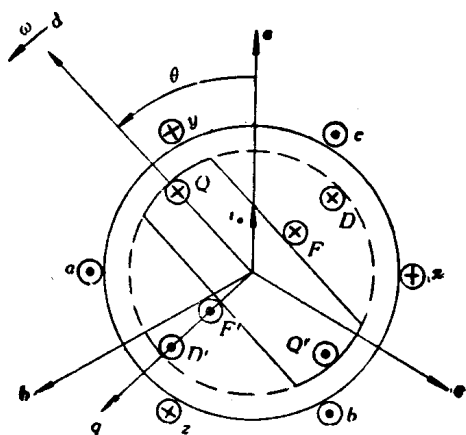


图 1-1 同步电机结构示意图

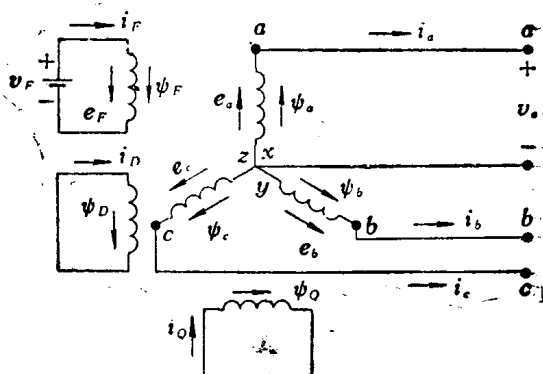


图 1-2 同步电机电路图(各绕组电阻未表示)

1-1-1 简化假设

为了简化分析,通常认为被研究的同步电机满足下列条件:

(1) 定子三相绕组结构上完全相同,它们在空间相差 $\frac{2\pi}{3}$ 电弧度。并且,如某瞬间一相绕组中有电流 i 流过,该绕组产生沿空气隙正弦分布的磁势波,或者说只计及磁势波的基波。

(2) 电机转子绕组,对直轴或交轴而言结构上对称,转子各绕组也产生沿空气隙正弦分布的磁势波,或者说也只计及磁势波的基波。

(3) 电机沿直轴或交轴的磁路其磁阻是常数。这样,由正弦分布的磁势波产生的磁密波也是正弦分布的。并且忽略磁路饱和的影响,即只计磁路空气隙部分的磁阻。磁路饱和的影响在以后是可以计及的。此外磁滞的影响略去不计,转子涡流的影响用等效阻尼绕组反映。

由于只计及磁场的基波,因此它们可以用空间相量来表示。如电流 i_a 可在 a 轴上用空间相量 $\dot{i}_a$ 表示 (参阅图 1-1)。绕组 a 匝链的磁链 ψ_a 、电势 e_a 以及电压 v_a 亦可在 a 轴上用空间相量表示。空间相量可以合成和分解。

凡是满足上列假设条件的同步电机,通常称为理想同步电机。

1-1-2 用 a 、 b 、 c 分量表示的磁链方程和电压方程

先讨论同步电机用 a 、 b 、 c 分量表示的磁链方程和电压方程。参阅图 1-1 和图 1-2。

从图 1-1 可看出,图中六个绕组相互间有磁的耦合,而这些绕组的自感系数和相互间的互感系数绝大部分是转子角位移 θ 的函数。这样,每一个绕组的磁链也是转子角位移 θ 的函数。电机的磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \\ \psi_F \\ \psi_D \\ \psi_Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & L_{ab} & L_{ac} & L_{aF} & L_{aD} & L_{aQ} \\ L_{ba} & L_{bb} & L_{bc} & L_{bF} & L_{bD} & L_{bQ} \\ L_{ca} & L_{cb} & L_{cc} & L_{cF} & L_{cD} & L_{cQ} \\ \hline L_{Fa} & L_{Fb} & L_{Fc} & L_{FF} & L_{FD} & L_{FQ} \\ L_{Da} & L_{Db} & L_{Dc} & L_{DF} & L_{DD} & L_{DQ} \\ L_{Qa} & L_{Qb} & L_{Qc} & L_{QF} & L_{QD} & L_{QQ} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \\ i_F \\ i_D \\ i_Q \end{bmatrix} \quad (1-1)$$

其中: L_{jk} 为自感, 当 $j=k$,
为互感, 当 $j \neq k$ 。

式中的电流 i 和磁链 ψ 都是瞬时值。

在理想电机假设条件下, 式 1-1 的电感系数矩阵中各元素与 θ 的关系如下:

定子绕组自感系数 L_{aa} 、 L_{bb} 、 L_{cc} :

$$\left. \begin{aligned} L_{aa} &= L_s + L_m \cos 2\theta \\ L_{bb} &= L_s + L_m \cos 2\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ L_{cc} &= L_s + L_m \cos 2\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

定子绕组相互间的互感系数 L_{ab} 、 L_{bc} 、 L_{ca} :

$$\left. \begin{aligned} L_{ab} &= L_{ba} = -M_s - M_m \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{6}\right) \\ L_{bc} &= L_{cb} = -M_s - M_m \cos 2\left(\theta - \frac{\pi}{2}\right) \\ L_{ca} &= L_{ac} = -M_s - M_m \cos 2\left(\theta + \frac{5}{6}\pi\right) \end{aligned} \right\} \quad (1-3)$$

可以证明

$$L_s \approx 2M_s, \quad L_m = M_m.$$

定子绕组与转子绕组之间的互感系数 L_{aF} 、 L_{bF} 、 L_{cF} 等:

$$\left. \begin{aligned} L_{aF} = L_{Fa} &= M_F \cos \theta \\ L_{bF} = L_{Fb} &= M_F \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ L_{cF} = L_{Fc} &= M_F \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{aligned} \right\} \quad (1-4)$$

和

$$\left. \begin{aligned} L_{aD} = L_{Da} &= M_D \cos \theta \\ L_{bD} = L_{Db} &= M_D \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ L_{cD} = L_{Dc} &= M_D \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{aligned} \right\} \quad (1-5)$$

及

$$\left. \begin{aligned} L_{aQ} = L_{Qa} &= -M_Q \sin \theta \\ L_{bQ} = L_{Qb} &= -M_Q \sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) \\ L_{cQ} = L_{Qc} &= -M_Q \sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

转子绕组的自感系数 L_{FF} 、 L_{DD} 、 L_{QQ} ，它们都是常数：

$$\left. \begin{aligned} L_{FF} &= L_F \\ L_{DD} &= L_D \\ L_{QQ} &= L_Q \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

转子绕组相互间的互感系数 L_{FD} 、 L_{FQ} 、 L_{DQ} ：

$$\left. \begin{aligned} L_{FD} = L_{DF} &= M_R \\ L_{FQ} = L_{QF} &= 0 \\ L_{DQ} = L_{QD} &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

可将式 1-1 简写成下式：

$$\begin{bmatrix} \psi_{a\delta\delta} \\ \psi_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{a\delta\delta} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (1-9)$$

其中： $\psi_{a\delta\delta} = [\psi_a \psi_b \psi_c]^T$ ，定子磁链列矢量；

$\psi_{FDQ} = [\psi_F \psi_D \psi_Q]^T$ ，转子磁链列矢量；

$i_{a\delta\delta} = [i_a i_b i_c]^T$ ，定子电流列矢量；

$i_{FDQ} = [i_F i_D i_Q]^T$, 转子电流列矢量。

$L_{SS}, L_{SR}, L_{RS}, L_{RR}$ 为式 1-1 电感系数矩阵的子矩阵, 维数都是 3×3 。

在图 1-2 中也标明了电线 i 、磁链 ψ 、电势 e 和电压 v 等变量的正方向。按照图 1-1 和图 1-2 中标明的变量正方向, 这六个绕组的电压方程为:

$$\left. \begin{aligned} v_a &= -p\psi_a - r i_a \\ v_b &= -p\psi_b - r i_b \\ v_c &= -p\psi_c - r i_c \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

和

$$\left. \begin{aligned} v_F &= p\psi_F + r_F i_F \\ 0 &= p\psi_D + r_D i_D \\ 0 &= p\psi_Q + r_Q i_Q \end{aligned} \right\} \quad (1-11)$$

式中: $p = \frac{d}{dt}$,

r, r_F, r_D, r_Q 为各绕组的电阻。

需要说明的是, 这里的变量和参数都用有单位值表示, 但单位都没有注明。

由于式 1-1 磁链方程中的自感系数和互感系数绝大部分是转子角位移 θ 的函数, 显然用式 1-1、1-10 和 1-11 来分析同步电机的行为是相当困难的。

1-1-3 定子绕组电流 i 、电势 e 和电压 v 正方向的改变

通常, 正常运行的同步发电机发出有功功率, 并且还发出无功功率(感性); 因此, 为分析发电机的行为, 将定子绕组的电流 i 、电势 e 和电压 v 的正方向改变(反向)较为方便。这样, 发电机电压、电流的 d 分量、 q 分量将都是正值。磁链 ψ 的正方向不变。

方向改变后, 电路图中 a 相绕组的 i 、 e 和 v 的正方向将如图 1-3 所示。至于定子三相绕组的联接, 需将图 1-3 中标明负极性

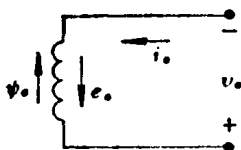


图 1-3 将绕组 a 的电流 i_a 、电势 e 和电压 v 的正方向改变

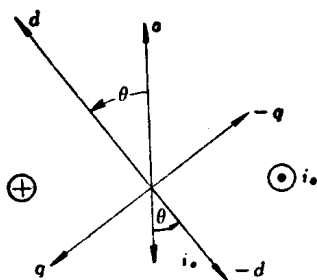


图 1-4 方向改变后结构示意图
中绕组 a 的电流 i_a 正方向

的端点联成中性点，而标明正极性的端点为出线端。在结构示意图中，以 a 相为例，电流 i_a 等变量的正方向将如图 1-4 所示。绕组 a 的轴线正方向不改变，它仍是磁链 ψ_a 的正方向。与 a 相轴线相反的方向，或称 $-a$ 轴方向，是 i_a 的正方向，也是 e_a 、 v_a 的正方向。角位移 θ 是 d 轴与 a 轴间的角度或 $-d$ (负 d) 轴与 $-a$ (负 a) 轴间的角度。

定子的电流 i 、电势 e 和电压 v 正方向改变后，磁链方程、式 1-9 和定子电压方程、式 1-10 将改变为：

磁链方程：

$$\begin{bmatrix} \psi_{ab\sigma} \\ \psi_{FDQ} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{SS} & L_{SR} \\ L_{RS} & L_{RR} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -i_{ab\sigma} \\ i_{FDQ} \end{bmatrix} \quad (1-12)$$

定子电压方程：

$$\left. \begin{aligned} v_a &= p\psi_a - r i_a \\ v_b &= p\psi_b - r i_b \\ v_c &= p\psi_c - r i_c \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

转子电压方程仍如式 1-11 所示。

1-1-4 派克变换和变换后的发电机方程

派克变换是一种线性变换，是定子量的变量，包括定子的电流、磁链、电势和电压。

定义派克变换的变换矩阵 $\mathbf{P}$ 和逆变换矩阵 $\mathbf{P}^{-1}$ 为:

$$\mathbf{P} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (1-14)$$

和

$$\mathbf{P}^{-1} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix} \quad (1-15)$$

对定子电流 i_a 、 i_b 和 i_c 进行变换得 i_d 、 i_q 和 i_0 ，它们间的关系为:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ -\sin \theta & -\sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1-16)$$

其中 i_d 、 i_q 、 i_0 为定子电流的 d 轴分量、 q 轴分量和零序分量。

进行逆变换，电流间的关系为:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 1 \\ \cos\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \\ \cos\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2}{3}\pi\right) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} \quad (1-17)$$

式 1-16 和 1-17 可简写为:

$$\mathbf{i}_{dq0} = \mathbf{P} \mathbf{i}_{abc} \quad (1-18)$$

和

$$\mathbf{i}_{abc} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{i}_{dq0} \quad (1-19)$$

其中, $\mathbf{i}_{dq0}$ 为 i_d, i_q, i_0 的列矢量。

对磁链 ψ 、电势 e 和电压 v 亦有与式 1-16 和 1-17 相似的变换式和逆变换式, 如下所示:

$$\psi_{dq0} = \mathbf{P} \psi_{abc} \quad (1-20)$$

$$\psi_{abc} = \mathbf{P}^{-1} \psi_{dq0} \quad (1-21)$$

其中, ψ_{dq0} 为 ψ_d, ψ_q, ψ_0 的列矢量。

$$\mathbf{e}_{dq0} = \mathbf{P} \mathbf{e}_{abc} \quad (1-22)$$

$$\mathbf{e}_{abc} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{e}_{dq0} \quad (1-23)$$

$$\mathbf{v}_{dq0} = \mathbf{P} \mathbf{v}_{abc} \quad (1-24)$$

$$\mathbf{v}_{abc} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{v}_{dq0} \quad (1-25)$$

其中, $\mathbf{e}_{abc}$ 为 e_a, e_b, e_c 的列矢量; $\mathbf{e}_{dq0}$ 、 $\mathbf{v}_{abc}$ 、 $\mathbf{v}_{dq0}$ 则分别为 e_d, e_q, e_0 、 v_a, v_b, v_c 和 v_d, v_q, v_0 的列矢量。

新的变量(如 i_d, i_q, i_0)是将实际变量(如 i_a, i_b, i_c)投影于不同的轴线后相加再乘以某一系数而得到的。如(参阅图 1-5):

i_d 等于将 i_a, i_b, i_c 投影于 d 轴的反方向相加后乘以 $\frac{2}{3}$, i_d 称为三相电流的 d 轴分量或 d 分量;

i_q 等于将 i_a, i_b, i_c 投影于 q 轴的反方向相加后乘以 $\frac{2}{3}$, i_q 称为三相电流的 q 轴分量或 q 分量;

i_0 等于将 i_a, i_b, i_c 直接相加后除以 3, 或者说等于将 i_a, i_b, i_c 分别投影于 a 轴、 b 轴、 c 轴的反方向相加(不是几何相加)后除以 3, i_0 称为零序分量。

电流 i_a, i_b, i_c 和 i_d, i_q, i_0 都表示磁势。

图 1-5 中示出了三相电流 i_a, i_b, i_c 和 d 轴、 q 轴分量 i_d, i_q 。