

参攷系理论及感应电动机系统分析

杨 顺 昌 编

M343
0

重庆大学出版社

参考系理论及感应电动机系统分析

杨 顺 昌 编

责任编辑 王 孝 祥

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店重庆发行所经销

重庆电力印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 1/32 印张: 5.25 字数: 118千

1987年11月第一版 1987年11月第一次印刷

印数1—2,500

标准书号: ISBN7-5624-0026-1 统一书号: 15408·24
TM·5 定 价: 0.90元

内 容 简 介

坐标变换理论在交流电机的分析中占有极为重要的地位。本书系统地介绍了适用于静止和旋转电路的一般化变换的变换方程,用计算机仿真解释了在不同参考系中变量变化的规律,并在一般化参考系中讨论了感应电机的空载起动特性,以及从不同参考系观察电机负载转矩突变时电机的动态特性;用降阶方程预估了感应电机的大扰动特性以及饱和的仿真;最后比较详细地讨论了整流-逆变系统,并建立了该系统的简化方程。

本书可作为电机专业、工业自动化专业研究生的教材,以及上述专业本科生的选修课教材;亦可供从事电机与拖动方面的工程技术人员参考之用。

序 言

在交流电机的电压方程中常含有随时间变化的所谓时变电感,这给电机运行的分析带来极大的不便。本世纪廿年代,在同步电机运行的分析中, R. H. Park 引入了坐标变换,因而使同步电机的电压方程变成了一组常系数的微分方程,这种变换引起了电机运行分析方法的“革命”。以后,在感应电机运行的分析中,又有 H. C. Stanley, G. Kron, D. S. Brereton 等人提出了各种变换,这些变换对深入分析交流电机的各种运行状态起了很大的作用,但是这些变换被认为是孤立的,彼此无联系的。直到1965年, P. C. Krause 开始系统地研究电机的坐标变换理论,并发表了他的第一篇文章“对称感应电机的仿真”,文中提出了所谓的一般化变换,这种变换可以将电机的定、转子绕组上的变量变换到任意旋转速度下的参考系上,因此,这种一般化变换概括了感应电机的所有实变换。以后, P. C. Krause 用一般化变换研究了多种电机和电机系统(如电力系统、拖动系统等)的运行问题,并且发表了大量的文章。本书不打算介绍 R. H. Park 等人的变换,因为这些变换在任何一本电机暂态分析的书籍中都能找到,在此编者仅想系统地介绍 P. C. Krause 的一般化变换及其在感应电机和系统分析中的应用。

本书共分五章。第一章首先讨论一般化变换的变换方程;然后利用静止电路讨论这种变换的基本概念和方法,以及这种变换与已知的各种变换之间的关系;最后得到了静止

电路在一般化参考系中的电压方程，并且用计算机仿真解释了在不同参考系中变量变化的规律。第二章介绍转子变量在一般化参考系中的变换，从而得到对称感应电机在一般化参考系中的电压方程和转矩方程；然后讨论了感应电动机的空载起动特性；最后介绍了从不同的参考系观察电机的起动特性和负载转矩突变时电机的动态特性。第三章介绍感应电机的线性化方程和降阶方程，并预估感应电机的大扰动特性。第四章讨论一般化参考系中感应电机的计算机仿真，饱和的仿真以及降阶模型的仿真。第五章讨论了参考系理论在系统分析与仿真中的应用，比较详细地讨论了整流-逆变系统，并建立了该系统的简化方程。

由于本人水平有限，错误之处难免，敬请读者批评指正！

杨顺昌

一九八六年十月

目 录

序 言

第一章 参考系理论	1
1—1 概述	1
1—2 变换方程	3
1—3 静止电路变量变换到任意参考系	8
1—4 常用的参考系	19
1—5 参考系之间的变换	21
1—6 平衡组的变换	22
1—7 平衡稳态相量关系	24
1—8 平衡稳态电压方程	28
1—9 从几个不同的参考系观察变量	32
第二章 对称感应电机理论	39
2—1 概述	39
2—2 用电机变量表示的电压方程	40
2—3 用电机变量表示的转矩方程	44
2—4 转子变量的变换	45
2—5 任意参考系变量的电压方程	48
2—6 任意参考系变量的转矩方程	56
2—7 常用的参考系	57
2—8 标么值	58
2—9 无载起动特性	60
2—10 从不同的参考系观察起动特性	69
2—11 负载转矩突变时的动态特性	76
第三章 感应电机的线性化方程和降阶方程	80

3—1	感应电机的线性化方程·····	80
3—2	感应电机的降阶方程·····	88
3—3	用降阶方程预估感应电机的大扰动特性·····	95
3—4	线性化降阶方程·····	99
第四章	感应电机的计算机仿真·····	106
4—1	任意参考系中对称感应电机的仿真·····	106
4—2	同步电机的仿真·····	109
4—3	交流电机饱和的仿真·····	113
4—4	降阶模型的仿真·····	120
第五章	参考系理论在电力系统及拖动系统的分析和仿真中的应用·····	124
5—1	概述·····	124
5—2	电力系统·····	124
5—3	整流—逆变拖动系统·····	127
5—4	用同步旋转参考系表示的逆变器运行情况·····	137
5—5	整流—逆变系统的简化方程·····	145
参考文献	·····	152
附录	常用的三角恒等式·····	158

第一章 参考系理论

1—1 概述

描述感应电机和同步电机的电压方程常含有一些随转子位置角变化的时变电感，因此，这些方程是变系数的。为了求解的方便，常采用变量变换的方法去减少这些方程的复杂性。以往采用过的数种变量变换，在最初被认为是彼此独立的^[1~4]，后来知道所有的实变换都是可以统一的^[5,6]，这个统一的变换是将电机的变量变换到旋转于任意角速度的参考系上。而所有使用过的实变换，只要在这个一般化变换中简单地规定参考系的旋转速度就可得到。

在二十世纪廿年代末，R.H.Park^[1]引入一种分析电机的新方法。他建立了一种变量变换，实际上这种变换是用随转子旋转的假想绕组上的变量去代替同步电机定子绕组的变量（如电流、电压、磁链等）。换言之，他将定子变量变换到固定于转子的参考系上。R.H.Park的变换引起了电机分析方法的“革命”。这个变换能消除同步电机的电压方程中所有的时变电感。

二十世纪卅年代末，在感应电机的分析中，H.C. Stanley²也采用了变量变换。他指出：感应电机运行时，由于电路处于相对运动所引起的电压方程中的时变电感，可以采用把转子绕组变量变换到假想的静止绕组上去的办法予以消除。实际上，这是将转子变量变换到固定于定子的参考

系上。

G. Kron^[3] 又引入一种变换, 这种变换是将定、转子的变量同时变换到随旋转磁场同步旋转的参考系上。G. Kron 用这种方法消除了对称感应电机的时变电感, 这个参考系被称为所谓的同步旋转参考系。

D. S. Brereton^[4] 使用了另一种变换, 这种变换同样可以消除感应电机的时变电感, 他是采用将定子变量变换到转子参考系的方法, 这个变换基本上是 Park 变换在感应电机上的应用。

Park、Stanley、Kron、Brereton 等人提出的每一种变换都是为了适合某种特殊用途。直到1965年, P. C. Krause 提出了一种一般化变换^[5], 它包含了已知的所有感应电机的实变换, 这种变换是把定、转子变量变换到任意旋转速度下的参考系上, 从而消除时变电感。在此以前, Park 等人的每一种变换都是被单独地推导和处理的, 而 P. C. krause 的任意参考系方法, 只要简单地规定任意参考系的速度, 就可得到所有已知的实变换。以后又发现同步电机的定子变量同样能被变换为任意参考系上的量^[6]。然而, 仅当参考系被固定在转子上(即 Park 变换)时, 同步电机的时变电感才被消除。但在同步电机运行的分析中, 任意参考系不能提供象在感应电机分析中所得到的那些优点。

本章首先建立一般化变换, 暂不考虑电机方程的复杂性, 将此变换用来描述电阻、电感、电容等电路元件, 且研究许多变换的特性。用这样的方法, 有关一般化变换的一些基本概念和方法就能迅速而简明地建立起来。因此, 这一章所涉及到的交流电机分析是比较简单的。

1-2 变换方程

在交流电机的分析中, 变量变换用来消除时变电感。然而在各种静止恒定参数的电力系统元件的分析中也常采用变量变换。例如, 在研究大电力系统暂态和动态稳定性时采用的许多计算机程序中, 所有电力系统元件(除同步机外)的变量都用同步旋转参考系表示。因此, 变压器、输电线、负载、电容器组和静止无功补偿器等变量都需变换为同步旋转参考系上的量。同样, 在电力拖动和高压交直流系统中, 与整流、逆变有关的变量也常被表示为同步旋转参考系中的量。

对上述的这些元件, 已知的实变换也同样被包含在任意参考系的变换中。这个变换已用于感应电机和同步电机的定子变量和感应电机的转子变量中, 但是, 为了便于分析, 这一章仅考虑与静止电路有关的变量变换, 待以后分析感应电机时, 再修正这种分析去适应感应电机转子变量的变换。

把三相静止电路元件的变量变换成任意参考系的变换可以表示为

$$\mathbf{f}_{qd0s} = \mathbf{K}_s \mathbf{f}_{abc} \quad (1-1)$$

式中

$$(\mathbf{f}_{qd0s})^T = [f_{qs} \ f_{ds} \ f_{0s}] \quad (1-2)$$

$$(\mathbf{f}_{abc})^T = [f_{as} \ f_{bs} \ f_{cs}] \quad (1-3)$$

$$\mathbf{K}_s = \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta + 2\pi/3) \\ \sin\theta & \sin(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{pmatrix} \quad (1-4)$$

而
$$\theta = \int_0^t \omega(\xi) d\xi + \theta(0) \quad (1-5)$$

式中 ξ 是积分变量。

其逆变换为

$$(\mathbf{K}_s)^{-1} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 1 \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & \sin(\theta - 2\pi/3) & 1 \\ \cos(\theta + 2\pi/3) & \sin(\theta + 2\pi/3) & 1 \end{pmatrix} \quad (1-6)$$

上面的方程中， f 能表示电压、电流、磁链或电荷等。上标T表示矩阵的转置，下标S表示与静止电路相关的变量或变换。角位移 θ 必定是连续的，而与变量变换有关的角速度可以是任意的，参考系可以旋转于任何恒定或变化的角速度下或者保持静止。任意参考系的含意是基于这种参考系的角速度可以是任意的，而任意选择的目的是为了简化系统方程的解或者是为了满足系统的某些限制。变量变换可以用于任何波形和时间相序的变量，然而，我们将会发现前面给出的变换特别适合于abc相序。

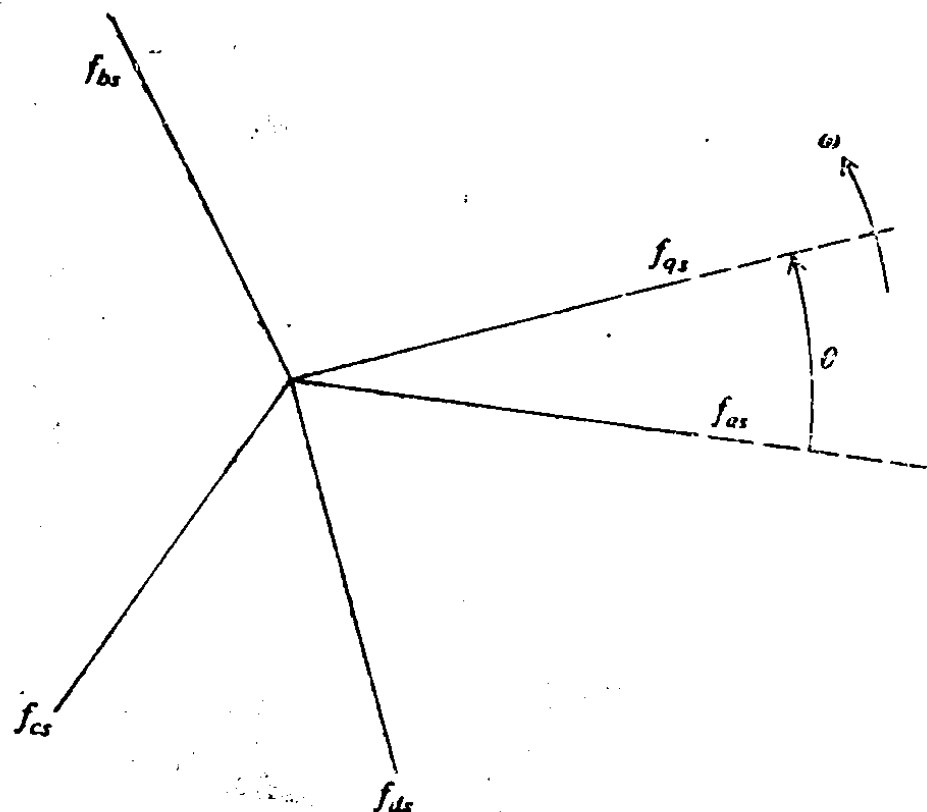


图1—1 由三角关系 述静止电路的变换

~ 4 ~

尽管任意参考系的变换仅仅是一种数学上的变量变换，并不需要什么物理含意，但是，按图1—1所示的变量间的三角关系去理解变换方程是很方便的。这可解释如下：变换的方程式中的 f_{qs} 和 f_{ds} 变量可认为是沿相互垂直轴线的“有向”变量，而且是在 ω 角速度下旋转的；图上的 f_{as} 、 f_{bs} 和 f_{cs} 是沿彼此位移 120° 的静止轴线的“有向”变量。如果 f_{as} 、 f_{bs} 和 f_{cs} 沿 f_{qs} 方向分解，那么式（1—1）的第一行即可得到；而如如果 f_{as} 、 f_{bs} 和 f_{cs} 沿 f_{ds} 方向分解，则可得第二行。要特别注意， 0_s 变量与任意参考系是无关的，而零变量仅仅与 abc 变量有数学关系，但与 θ 无关。不要混淆 f_{qs} 、 f_{bs} 和 f_{cs} 与相量的关系，它们可以是任何时间函数的瞬时值。当交流电机使用这种变换时，用图1—1解释是特别方便的。交流电机中 f_{qs} 、 f_{bs} 和 f_{cs} 的方向可被认为是定子绕组磁轴的方向，而 f_{qs} 和 f_{ds} 的方向可被认为是由变量变换所得到的新绕组磁轴的方向。

在 abc 变量中，总的瞬时功率可以表示为

$$P_{abc} = u_{as} i_{as} + u_{bs} i_{bs} + u_{cs} i_{cs} \quad (1-7)$$

在 qd0 变量中表示的总的瞬时功率必须等于在 abc 变量中表示的总的瞬时功率，因此，将式（1—1）代到式（1—7）得

$$P_{qd0s} = P_{abc} = \frac{3}{2} (u_{qs} i_{qs} + u_{ds} i_{ds} + 2 u_{0s} i_{0s}) \quad (1-8)$$

系数 $3/2$ 来源于变量变换中所采用的变换矩阵的常数。虽然 qs 和 ds 电压、电流、磁链和电荷等的变化规律决定于参考系的速度，但是，总的瞬时功率的变化规律与参考系无关。换言之，总的瞬时功率的变化规律是相同的，而与计算它所选择的参考系无关。

式(1—8)证明如下:

式(1—7)可写成

$$P_{abc s} = [V_{abc s}]^T [i_{abc s}]$$

其中

$$[V_{abc s}]^T = [(K_s)^{-1} (V_{qd0s})]^T$$

$$[i_{abc s}] = (K_s)^{-1} [i_{qd0s}]$$

所以

$$\begin{aligned} P_{abc s} &= [V_{abc s}]^T [i_{abc s}] \\ &= [(K_s)^{-1} (V_{qd0s})]^T (K_s)^{-1} [i_{qd0s}] \end{aligned}$$

经过运算,并参考附录的三角恒等式,即得(1—8)式。

注意:绝不能采用下式计算总的瞬时功率

$$v_{qs} i_{qs} + v_{ds} i_{ds} + v_{0s} i_{0s}$$

因为此处所用的 K_s 并非恒功率变换的缘故。

例一 为了熟悉这种变换,使

$$f_{as} = \cos t \quad f_{bs} = \frac{1}{2}t \quad f_{cs} = -\sin t$$

我们首先求 f_{qs} 、 f_{ds} 和 f_{0s} 的表达式。由式(1—1)得

$$\begin{aligned} f_{qs} = \frac{2}{3} \left[\cos t \cos \theta + \frac{1}{2}t \cos \left(\theta - \frac{2}{3}\pi \right) \right. \\ \left. - \sin t \cos \left(\theta + \frac{2}{3}\pi \right) \right] \end{aligned} \quad (1-9)$$

$$\begin{aligned} f_{ds} = \frac{2}{3} \left[\cos t \sin \theta + \frac{1}{2}t \sin \left(\theta - \frac{2}{3}\pi \right) \right. \\ \left. - \sin t \sin \left(\theta + \frac{2}{3}\pi \right) \right] \end{aligned} \quad (1-10)$$

$$f_{0s} = \frac{1}{3} \left(\cos t + \frac{1}{2}t - \sin t \right) \quad (1-11)$$

现在假定 $\theta(0) = -\frac{\pi}{12}$ 及 $\omega = 1$ 弧度/秒。在 $t = \frac{\pi}{3}$ 秒时，

计算式 (1-9) ~ 式 (1-11)，并表示 f_{as} 、 f_{bs} 、 f_{cs} 、 f_{qs} 和 f_{ds} 变量之间的关系。由式 (1-5) 得

$$\theta = \int_0^{\pi/3} 1 d\xi + \theta(0)$$

$$\theta_{t=\pi/3} = \pi/3 - \pi/12 = \pi/4 \quad (1-12)$$

代入式 (1-9) ~ 式 (1-11) 后，即得

$$f_{qs} = \frac{2}{3} \left[\cos \frac{\pi}{3} \cos \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \frac{\pi}{3} \cos \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{3}\pi \right) - \sin \frac{\pi}{3} \cos \left(\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3}\pi \right) \right]$$

$$= \frac{2}{3} \left[\frac{1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{3} (0.2588) - \frac{\sqrt{3}}{2} \times (-0.9659) \right] = 0.8836 \quad (1-13)$$

$$f_{ds} = \frac{2}{3} \left[\cos \frac{\pi}{3} \sin \frac{\pi}{4} + \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{3} \sin \left(\frac{\pi}{4} - \frac{2}{3}\pi \right) - \sin \frac{\pi}{3} \sin \left(\frac{\pi}{4} + \frac{2}{3}\pi \right) \right]$$

$$= \frac{2}{3} \left[\frac{1}{2} \times \frac{1}{\sqrt{2}} + \frac{1}{2} \times \frac{\pi}{3} (-0.9659) - \frac{\sqrt{3}}{2} \times 0.2588 \right] = -0.2509 \quad (1-14)$$

$$f_{0s} = \frac{1}{3} \left[\cos \frac{\pi}{3} + \frac{1}{2} \frac{\pi}{3} - \sin \frac{\pi}{3} \right]$$

$$= \frac{1}{3} \left[\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \frac{\pi}{3} - \frac{\sqrt{3}}{2} \right] = 0.0525 \quad (1-15)$$

在 $t = \pi/3$ 秒和 $\theta = \pi/4$ 时, 变量间的三角关系表示在图1—2和图1—3上。在图1—2a中描述了 f_{as} 沿 f_{os} 和 f_{ds} 分解的情况。式(1—13)的第一项是 f_{as} 沿 f_{os} 方向的分量, 式(1—14)中的第一项是 f_{as} 沿 f_{ds} 方向的分量。注意: 在图1—2b和1—2c中 f_{ds} 方向的分量是负值。所有分量的合成表示在图1—3上。

1—3 静止电路变量变换到任意参考系

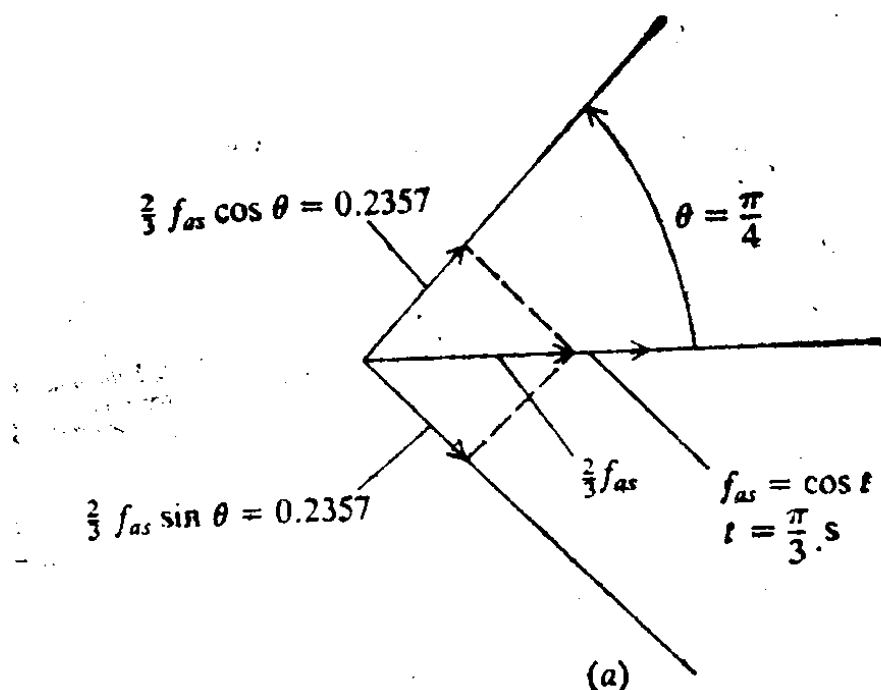
现在分别讨论电阻、电感和电容的电路元件。

电阻元件: 对于三相电阻电路

$$\mathbf{V}_{abcS} = r_s \mathbf{i}_{abcS} \quad (1-16)$$

由式(1—1)得

$$\begin{aligned} \mathbf{V}_{qd0S} &= \mathbf{K}_s \mathbf{V}_{abcS} \\ &= K_s r_s (\mathbf{K}_s)^{-1} \mathbf{i}_{qd0S} \end{aligned} \quad (1-17)$$



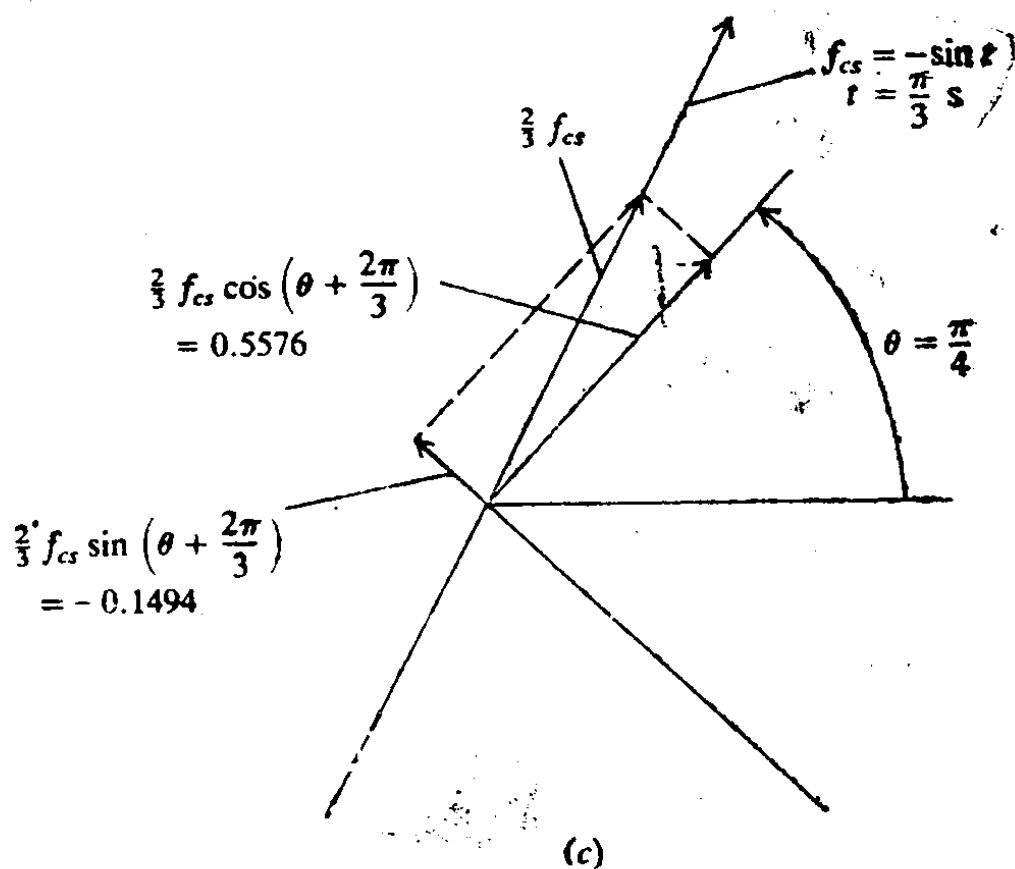
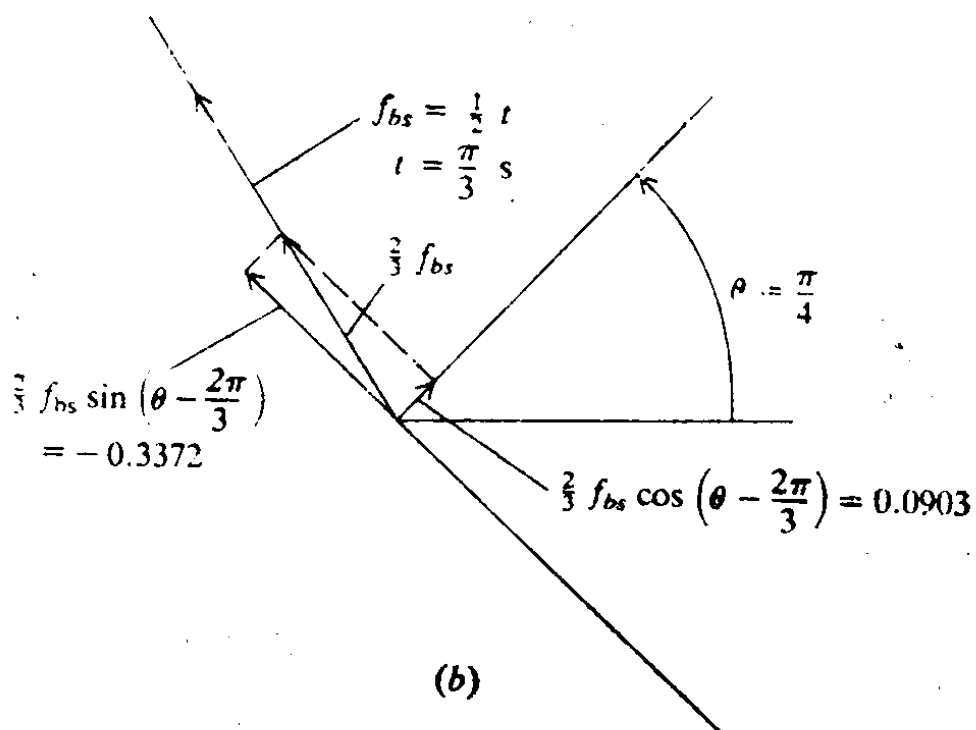


图1—2 f_{as} 、 f_{bs} 和 f_{cs} 沿 f_{qs} 和 f_{ds} 方向的分解
(a) f_{as} 的分解 (b) f_{bs} 的分解 (c) f_{cs} 的分解

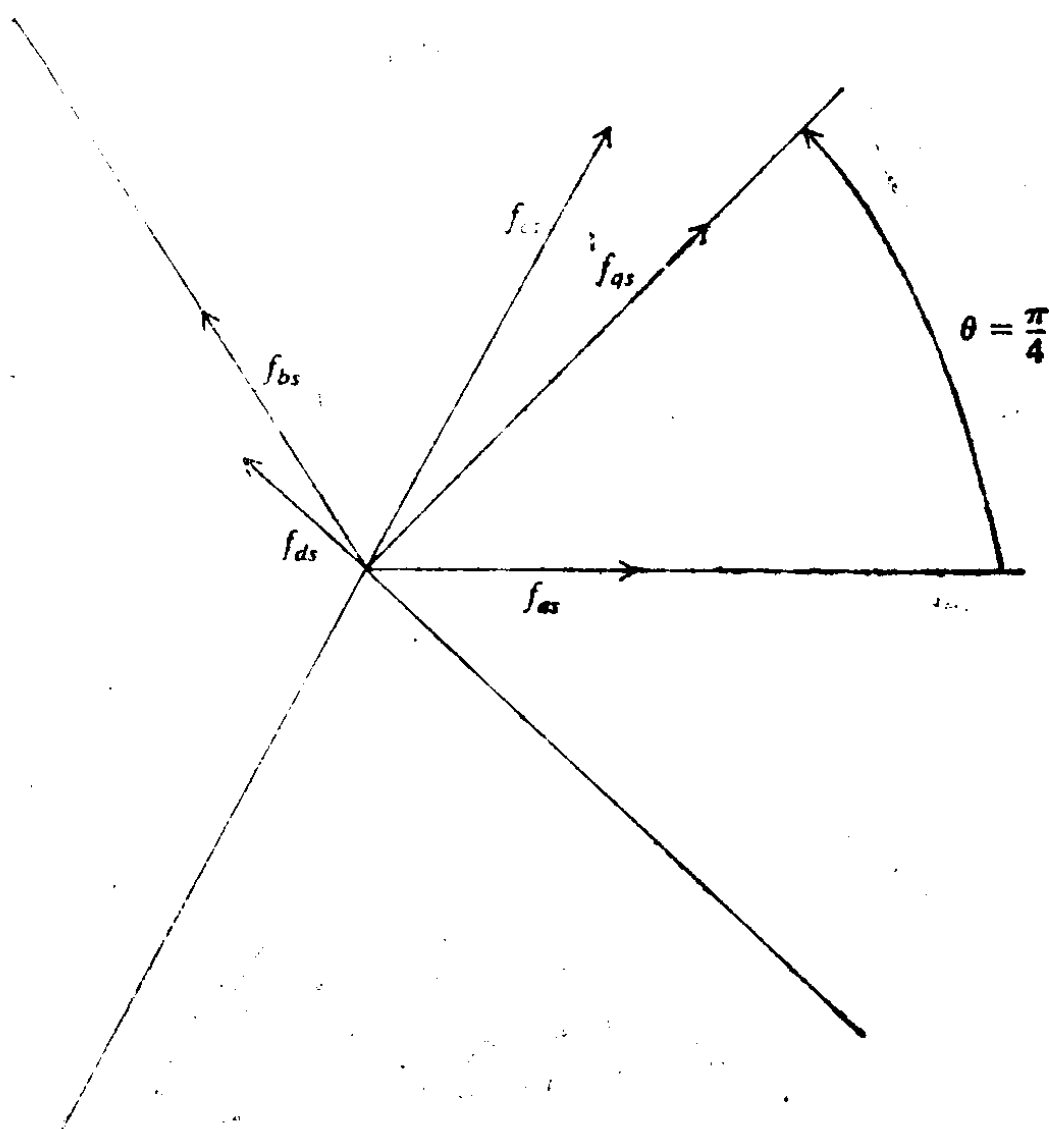


图1—3 图1—2的合成

在讨论以前，规定电阻矩阵是必要的，所有的同步电机和感应电机的定子绕组都设计成各相具有相同的电阻。同样地，变压器、电容器组、输电线等所有电力系统的元件也都设计成各相有相同的电阻，甚至电力系统的负载分配，亦要求各相尽可能相等。因此，如果对角线矩阵 $\mathbf{r}_s$ 的非零元素是相等的，那么

~10~