

交流电机理论中相量、矢量的概念辨析及空间矢量分析法的意义

魏祥林¹, 傅龙飞², 郝晓弘¹

(1. 兰州理工大学电信学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 兰州理工大学技术工程学院, 甘肃 兰州 730050)

摘要: 对交流电机理论中的相量和矢量, 分别从物理、数学和应用等角度进行了深入地探讨和辨析, 比较了两者之间的联系和区别, 明确指出两者之间的根本区别在于相量是标量而非矢量, 两者最大的共同点是都可以用复数来描述。进一步探讨了空间矢量分析法在电机分析和控制中的应用及其意义。

关键词: 电机分析; 相量; 矢量; 空间矢量分析法

0 引言

在交流电机理论中的“相量”、“矢量”、“标量”、“向量”等术语经常会使学习者感到纠结, 往往会将“相量”和“矢量”混为一谈, 造成理解和运用上的错误。究其原因是经典教材^[1-3]缺乏对“相量”和“矢量”的明确辨析, 有关文献^[4-7]对此是有所作为, 但它们的认识又各有偏颇。文献[4]的观点“把表示正弦量的矢量称为相量”说法不够准确, 言下之意相量善于矢量的一类。文献[5]中“空间矢量的旋转性也是由于电流在时间上按正弦规律变化而引起的”说法有误, 实际上各相电流的大小随时间变化可以是任意的, 只要相电流的大小变化, 则其合成空间矢量就是旋转的“正弦量的矢量称为相量”提法也不够严密。诸如问题不在详述。

笔者力图从物理、数学和应用等角度, 对相量和矢量从概念上做深入地辨析, 明确指出两者之间的区别和联系, 期望能以正视听, 对电机学习者有所帮助。

1 物理学中关于标量和矢量的定义

物理学认为, 空间物理量根据其在空间方向的有无可分为标量和矢量两大类。只有数值大小而无方向的物理量称之为标量; 既有数值大小又有方向的物理量称之为矢量^[8], 矢量又称之为向量。空间矢量通常用一个带箭头的线段来表示, 线段的长度

表示物理量的大小, 而其方向代表物理量的空间方向。

根据标量和矢量的定义, 我们不难做出判断: 电磁学中的电荷量、电压、电(动)势、电流、阻抗、功率、能量、磁通量、磁链等物理量均属于标量; 而磁(动)势、磁场强度、磁感应强度(磁密)、电场强度等物理量属于矢量。但是某些标量也常常带有“方向”二字, 如电流的方向, 这里的“方向”完全是指其物理意义, 即实际电流方向相对于其参考流向是为“+”还是“-”, 而不是空间方向。

2 数学中关于矢量(向量)的定义

线性代数中的定义: n 个有次序的数所组成的数组称为 n 维矢量(向量)量^[9], 它是矢量空间(也称为线性空间)中的基本构成元素, 是从纯数学角度上构造的、符合数学规则的矢量, 称之为数学构造矢量, 它可能不具有工程意义, 仅具有理论意义^[6]。

物理学和一般几何学中涉及的矢量概念严格意义上应当被称为欧几里得矢量或几何矢量, 因为它们的定义是建立在通常所说的欧几里得空间上的。

在数学上二维矢量与复数具有一一对应关系, 但不是完全等价关系, 即不能说矢量就是复数, 只能说矢量可以用复数来表示。电机内的磁场问题大多可以简化为二维的情况, 因此稳态分析和动态分析一般都是在电机剖面上作二维分析^[7]。

3 电工学中关于相量的定义

1893年8月,德国出生的美国电气工程师施泰因梅茨(C. P. Steinmetz, 1865 - 1923年)在第5届国际电气会议上作了《Complex qualities and their Use in Electrical Engineering》的报告^[10,11],第一次提出了利用相量法来分析正弦交流电路。

一个随时间按正弦或余弦规律变化的量,统称为正弦量^[1],正弦量 $x(t)$ 的可以描述为

$$x(t) = x_m \sin(\omega_1 t + \Psi_0) = \sqrt{2} X_2 \sin(\omega_1 t + \Psi_0) \quad (1)$$

式(1)中的三个常数 X_m 、 ω_1 和 Ψ_0 和分别称作正弦量 $x(t)$ 的振幅、角频率和初相角,即正弦量 $x(t)$ 的三要素;随时间变化的角度 $\omega_1 t + \Psi_0$ 称为正弦量 $x(t)$ 的相位,称 $X_2 = X_m / \sqrt{2}$ 作正弦量 $x(t)$ 的有效值。

对复指数函数 $X(t) = |X_m| e^{j(\omega_1 t + \Psi_0)}$ 按欧拉恒等式展开有

$$\begin{aligned} X(t) &= X_m e^{j(\omega_1 t + \Psi_0)} = \sqrt{2} X_2 e^{j\Psi_0} e^{j\omega_1 t} \\ &= \sqrt{2} X_2 \cos(\omega_1 t + \Psi_0) + j \sqrt{2} X_2 \sin(\omega_1 t + \Psi_0) \end{aligned} \quad (2)$$

显然,复指数函数的虚部 $I_m[X(t)]$ 为一正弦量,即正弦量为对应复指数函数的虚部,如式(3)所示。这样,就在正弦量与复指数函数之间建立了映射关系。

$$I_m[X(t)] = \sqrt{2} X_2 \sin(\omega_1 t + \Psi_0) \quad (3)$$

实际上,在线性电路中如果激励是正弦量,则电路中各支路的电压电流的稳态响应将是同频率的正弦量,因此在线性电路正弦稳态分析中,主要考虑各个正弦量的有效值 X_2 和初相角 Ψ_0 ,因此复指数函数中的 $X_2 e^{j\Psi_0}$ 具有重要的物理意义。

$X_2 e^{j\Psi_0}$ 它是以正弦量的有效值 X_2 为模,以初相角 Ψ_0 为辐角的一个复常数,将这个复常数定义为正弦量的相量^[1],记为 \dot{X}_2

$$\dot{X}_2 = X_2 e^{j\Psi_0} = X_2 \angle \Psi_0 \quad (4)$$

结合式(3)和式(4),我们有以下映射关系

$$\sqrt{2} X_2 \sin(\omega_1 t + \Psi_0) \Leftrightarrow \sqrt{2} X_2 e^{j(\omega_1 t + \Psi_0)} \Leftrightarrow X_2 e^{j\Psi_0} = \dot{X}_2 \quad (5)$$

式(5)中“ \Leftrightarrow ”表示映射关系,可见相量实质是一个用来表示正弦量的复常数,或者说可以将一个正弦量用相量来表示,但绝不能说正弦量就等于相量。

复数 $X_2 e^{j\Psi_0}$ 可以用复平面上一条有向线段表示,此有向线段称之为相量图,如图1所示。

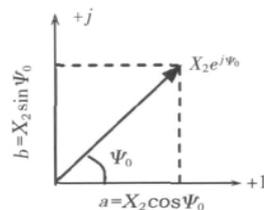


图1 正弦量的相量图

与正弦量对应的复指数函数 $X_m e^{j(\omega_1 t + \Psi_0)}$ 的辐角 $\omega_1 t + \Psi_0$ 是时间变量,故复指数函数在复平面上可以用旋转相量表示出来,如图2所示。图2表示的几何意义为:当旋转相量沿逆时针方向以恒速转动时,它在虚轴(称为时轴)上各瞬间的投影恰是正弦时间函数的各瞬时值^[6]。

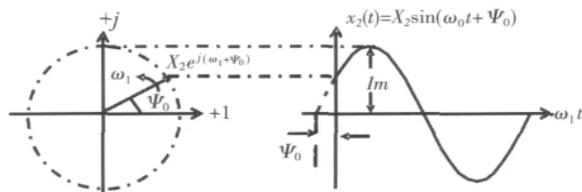


图2 正弦量与旋转相量的关系

由正弦量的定义可见标量,相量是用于表示正弦时变量的复常数,在空间只有大小,没有方向,因此相量是标量而非矢量。无论电压、电流的瞬时值按什么规律变化,它们在物理上是标量,决不能把正弦量和相量等同地认为是矢量。相量的相角 Ψ_0 和 $\omega_1 t + \Psi_0$ 是分别表示对应正弦量在零时刻和任意 t 时刻大小的,而不是该正弦量在空间的方向角。

只有正弦量才能用相量表示,非正弦量不可以。只有同频率的正弦量才能画在一张相量图上,不同频率不行。把正弦量用相量来表示,将描述正弦稳态电路的微分(积分)方程变换成复数代数方程,从而简化了电路的分析和计算,相量法是求解正弦稳态电路的简单方法,得到了广泛应用。同时,以相量法为基础的三相对称分量法,也是分析交流电机三相不对称稳态运行问题的有力工具。

4 电机理论中关于空间矢量的定义

1954年,匈牙利科学家柯伐煦(Kovacs)提出了空间向量法^[2],并导出在转速为任意值的旋转坐标系中,感应电机的空间向量电压方程,为感应电机的速度和转矩控制打下了理论基础。

关于空间矢量的定义,我们从交流电机的物理结构谈起,图3为一个简化了的理想对称三相交流电机的剖面图,所谓“简化了的理想电机”,即满足气隙均匀,磁路线性,铁耗可以忽略,定转子绕组为集中、整距、对称的多匝绕组等特点。图3中, θ_r 是定子A相绕组与转子a相绕组轴线之间的夹角,即转子的空间位置角,通常转子的角速度 $\omega_r = d\theta_r/dt$,其正方向为逆时针方向。我们可以把交流电机看成一组具有电磁耦合和相对运动的多绕组电路,此即交流电机的“动态耦合电路模型”,其中每一个定、转子绕组都是一个完整的电路,但同时不同绕组之间又存在着磁耦合,跟每个绕组相关的主要电磁量包括:绕组的端电压、流过的电流、电流产生磁动势、交链的磁链、磁链变化感应的反电势等等。根据各变量的物理意义我们知道只有磁动势等是矢量,而电压、电流、反电势、磁链等均为标量。如果我们给这些标量定义了它们的空间方向,则它们将变为空间矢量。

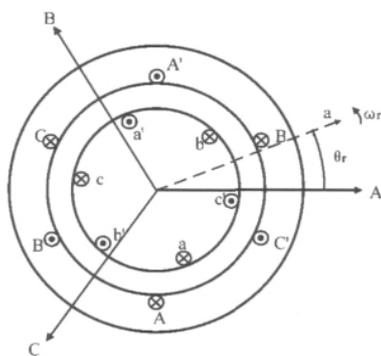


图3 简化的理想对称三相交流电机剖面图

以定子空间矢量的定义为例^[12]:在垂直于交流电机轴的一个复平面上,取定子三相绕组的轴线为A,B,C轴,它们在空间彼此互差 120° 电角度并且静止,它们在空间的位置分别用空间算子 $a^0 = 1, a^1 = e^{j2\pi/3}, a^2 = e^{j4\pi/3}$,来表示;把定子绕组中的时间变量

$x_A(t), x_B(t)$ 及 $x_C(t)$ (可以是电压、电流、磁链、磁动势等变量,且是时间的任意函数)看成三个矢量的模,这三个矢量分别位于对应绕组的轴线A,B,C轴上,当时间变量为正时,矢量的方向与各自轴线的方向一致,反之则取相反的方向;这样,就分别给时间变量 $x_A(t), x_B(t), x_C(t)$ 定义了空间方向,把它们就变成了既有大小、又有方向的空间矢量,分别描述为

$$\bar{x}_A(t) = a^0 x_A(t) = x_A(t) \quad (6)$$

$$\bar{x}_B(t) = a^1 x_B(t) = x_B(t) e^{j2\pi/3} \quad (7)$$

$$\bar{x}_C(t) = a^2 x_C(t) = x_C(t) e^{j4\pi/3} \quad (8)$$

$\bar{x}_A(t), \bar{x}_B(t)$ 和 $\bar{x}_C(t)$ 称之为定子相轴空间矢量,由于定子绕组在空间位置固定,故定子相轴空间矢量在空间的方向是固定不变的,并且都位于与电机轴相垂直平面内。

我们可以发现,空间矢量的定义其实是一种数学变换(映射),它将标量(时间变量)变换为空间矢量,在标量与空间矢量之间建立起了映射关系。

按照矢量求和运算法则,求 $\bar{x}_A(t), \bar{x}_B(t), \bar{x}_C(t)$ 三者之和^[13]

$$\begin{aligned} \bar{x}_s(t) &= k[\bar{x}_A(t) + \bar{x}_B(t) + \bar{x}_C(t)] \\ &= k[x_A(t) + a^1 x_B(t) + a^2 x_C(t)] \end{aligned} \quad (9)$$

$\bar{x}_s(t)$ 称之为定子变量 $x(t)$ 的合成空间矢量或 $x(t)$ 的综合空间矢量,简称定子 $x(t)$ 空间矢量。式(9)把三相系统中的三个标量变换成空间复平面上的一个综合空间矢量,此空间矢量也是位于相轴空间矢量所在复平面上,可以用一有向线段来表示。

式(9)中的常数 k 的值应根据具体物理背景来确定:当 $k = 2/3$ 能够保证合成空间矢量 $\bar{x}_s(t)$ 分别在A,B,C轴上的投影正好等于三相变量 $x(t)$ 的瞬时值^[14];而当 $k = \sqrt{2/3}$ 能够保证变换前后功率不变^[15]。由于 $x(t)$ 的瞬时值是变化的,故合成矢量 $\bar{x}_s(t)$ 在空间的方向是变化的,即空间矢量 $\bar{x}_s(t)$ 以变量 $x(t)$ 的变化角频率 $\omega_1(t)$ 的速度在旋转。

若取 $k = 2/3$,则定子电流(合成)空间矢量

$$\bar{i}_s(t) = 2/3[i_A(t) + ai_B(t) + a^2 i_C(t)] \quad (10)$$

此时,定子电流空间矢量 $\bar{i}_s(t)$ 及其在各相轴线上的投影如图4所示,其中 R_e 和 I_m 分别称之为复平面上的实轴和虚轴。 $\bar{i}_s(t)$ 在A,B,C轴上的投影正是三相电流的瞬时值^[13],数学推理为

$$\begin{aligned}
 R_e[\bar{i}_s(t)] &= R_e\{2/3[i_A(t) + ai_B(t) + a^2i_C(t)]\} \\
 &= 2/3[i_A(t) + ai_B(t) + a^2i_C(t)] \quad (11) \\
 &= 2/3\left[i_A(t) - \frac{1}{2}i_B(t) - \frac{1}{2}i_C(t)\right] \\
 &= 2/3\left\{i_A(t) - \frac{1}{2}[-i_A(t)]\right\} = i_A(t)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_e[a^2\bar{i}_s(t)] &= R_e\{2/3[a^2i_A(t) + i_B(t) + ai_C(t)]\} \\
 &= i_B(t) \quad (12)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 R_e[ai_s(t)] &= R_e\{2/3[ai_A(t) + a^2i_B(t) + i_C(t)]\} \\
 &= i_C(t) \quad (13)
 \end{aligned}$$

定子电压、磁链、磁动势空间矢量的表达式如式(14)、式(15)、式(16)所示。

$$\bar{u}_s(t) = 2/3[u_A(t) + au_B(t) + a^2u_C(t)] \quad (14)$$

$$\bar{\Psi}_s(t) = 2/3[\Psi_A(t) + a\Psi_B(t) + a^2\Psi_C(t)] \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 \bar{F}_s(t) &= 2/3[F_A(t) + aF_B(t) + a^2F_C(t)] \\
 &= 2/3[N_s i_A(t) + aN_s i_B(t) + a^2N_s i_C(t)] \quad (16) \\
 &= 2/3[i_A(t) + ai_B(t) + a^2i_C(t)]N_s \\
 &= N_s \bar{i}_s
 \end{aligned}$$

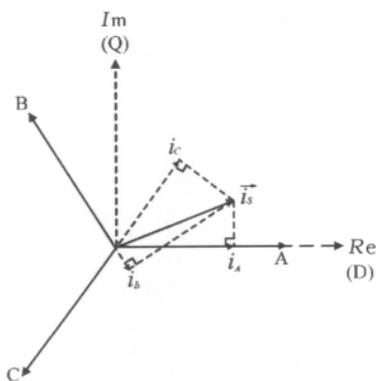


图4 定子电流合成空间矢量及其投影

按照定子空间矢量的定义方法,同样可以定义转子的相轴空间矢量 $\bar{x}_a(t)$, $\bar{x}_b(t)$, $\bar{x}_c(t)$ 及其合成空间矢量 $\bar{x}_r(t)$ 。注意:转子的相轴空间矢量 $\bar{x}_a(t)$, $\bar{x}_b(t)$, $\bar{x}_c(t)$ 的方向分别在转子各相绕组轴线 a, b, c 轴上,由于转子以 ω_r 的速度在旋转,故转子相轴矢量在空间是旋转的。

从式(16)看出,定子电流空间矢量 \bar{i}_s 和定子磁动势空间矢量 \bar{F}_s 仅差一有效匝数,但是必须指出:磁动势空间矢量是有确切物理意义的,而电流空间矢量 \bar{i}_s 物理上不存在,但它代表了物理上存在的 \bar{F}_s ,反映了定子三相电流瞬时值与定子空间磁通势

矢量间 \bar{F}_s 的关系^[13]。

按照以上定义的空间矢量,无论是相轴空间矢量、还是合成空间矢量,都是位于与电机轴相垂直平面内的,即都是二维平面矢量,都可以表示为复平面内的有向线段,都可以表示为一个复数。

当定子三相电流为对称正弦波时,即

$$\begin{cases}
 i_A(t) = I_s \cos(\omega_1 t + \Psi_s) \\
 i_B(t) = I_s \cos(\omega_1 t + \Psi_s - 2\pi/3) \\
 i_C(t) = I_s \cos(\omega_1 t + \Psi_s - 4\pi/3)
 \end{cases} \quad (17)$$

定子电流合成空间矢量 $\bar{i}_s(t) = I_s e^{j(\omega_1 t + \Psi_s)}$ 是一个复指数函数,是一个正向旋转的空间矢量,其运动轨迹为一个理想圆形,角速度等于同步角速度 ω_1 为常数^[15]。在这种情况下,电流空间矢量完全等同于旋转的时间相量,这就是为什么在此时相量图与矢量图完全一样的原因。然而,在其他情况下,空间矢量不能与时间相量相混淆。如果电流不是对称的正弦波,则定子电流空间矢量的稳态轨迹将是一个椭圆或者直线,在瞬态时的轨迹则是任意形状的^[13]。

5 相量与矢量的区别与联系

5.1 相量与矢量的区别

由相量的定义可以知道,相量是用于表示正弦时变量的复常数,它所表示正弦量在空间只有大小、没有方向,因此是标量而非矢量。矢量(向量)在空间既有大小、又有方向,其大小是可以随时间变化的任意函数,在空间有明确的方向。

相量的相角不是用来描述正弦量的空间方向,而是用来表示正弦量瞬时值大小的。

相量的正弦性是指其表示的变量的大小随时间按正弦规律变化,空间矢量的正弦性是指该矢量沿着空间圆周按正弦规律分布,即其分布是空间位置角的正弦函数。式(9)中的 $k = 2/3$ 时,合成空间矢量在各相绕组轴线上的投影分别提供各相变量的瞬时值,而旋转的时间相量在确定时间轴上的投影仅提供相应量的瞬时值。

相量分析法只能用于正弦稳态电路的分析,而不能用于动态分析。矢量分析法既可用于交流电机的稳态分析,又可用于交流电机的动态分析。

5.2 相量与矢量的联系

从两者的定义看,都是通过数学变换(映射)定义的,前者将正弦量时变量映射为相量,后者将标量映射为矢量;二维空间矢量和相量都是可以用复数来表示的,复数又可以用复平面上的有向线段来表示,故而两者又通过复数(复平面)而统一起来,从而出现了相矢量图,将时间空间统一起来^[16];如果给时间相量定义了空间方向,则其将变换为空间矢量,空间矢量的大小如果随时间按正弦规律变化,则将其大小表示为时间相量。

6 空间矢量分析法的意义

合成空间矢量的定义将三个时间变量复合成了一个空间矢量,建立了交流电机理论中的时空一致性。目前,空间矢量理论广泛应用于交流电机分析、功率定义和有源滤波等领域^[17]。下面我们以交流异步电机为例,说明空间矢量分析法在交流电机分析和控制中的应用及其意义。

6.1 简化了交流电机的数学模型

三相异步电动机在时间域的定子电压方程式为:

$$\begin{cases} u_A(t) = i_A(t) R_s + \frac{d\Psi_A(t)}{dt} \\ u_B(t) = i_B(t) R_s + \frac{d\Psi_B(t)}{dt} \\ u_C(t) = i_C(t) R_s + \frac{d\Psi_C(t)}{dt} \end{cases} \quad (18)$$

引入空间矢量的定义以后,定子电压方程式则可描述为:

$$\bar{u}_s(t) \bar{i}_s(t) R_s + \frac{d\bar{\Psi}_s(t)}{dt} \quad (19)$$

其中:

$$\begin{aligned} \bar{u}_s(t) &= [u_A(t) \ u_B(t) \ u_C(t)]^T \\ \bar{i}_s(t) &= [i_A(t) \ i_B(t) \ i_C(t)]^T \\ \bar{\Psi}_s(t) &= [\Psi_A(t) \ \Psi_B(t) \ \Psi_C(t)]^T \end{aligned}$$

前面已经说明 $\bar{u}_s(t)$, $\bar{i}_s(t)$, $\bar{\Psi}_s(t)$ 都是平面矢量,而平面矢量是二维矢量,它只有两个独立的参数,因此又可以进一步通过 $3s/2s, 2s/2r$ 等坐标变换来简化异步电机的数学模型。

6.2 电磁转矩的空间矢量表达式物理意义明确直观

用时间变量描述的三相异步电动机的电磁转矩表达式如式(20),该式计算量大、物理意义不够直观;而用空间矢量描述的电磁转矩表达式(21)相比式(20)简化了不少,而且物理意义更加明确直观,即:电磁转矩是由定、转子电流矢量(分别代表定、转子磁动势)矢量积。显然,电磁转矩是一个矢量积。其中 n_p 为电机极对数, L_{ms} 为定转子绕组之间的最大互感, $L_m = \frac{3}{2}L_{ms}$ 为定转子等效励磁电感。

$$\begin{aligned} T_e &= -n_p L_{ms} [(i_A i_a + i_B i_b + i_C i_c) \sin\theta \\ &\quad + (i_A i_b + i_B i_c + i_C i_a) \sin(\theta + 120^\circ) \\ &\quad + (i_A i_c + i_B i_a + i_C i_b) \sin(\theta - 120^\circ)] \end{aligned} \quad (20)$$

$$T_e = -n_p L_m \bar{i}_s \otimes \bar{i}_r \quad (21)$$

利用空间矢量的定义及其之间的关系,可以证明以下异步电动机的电磁转矩表达式是相互等价的,它们分别从不同角度解释了电磁转矩产生的物理机理的。

$$T_e = -n_p \bar{\Psi}_{sg} \otimes \bar{i}_r \quad (22)$$

$$T_e = -n_p \frac{1}{L_m} \bar{\Psi}_{sg} \otimes \bar{\Psi}_{rg} \quad (23)$$

$$T_e = n_p \bar{\Psi}_s \otimes \bar{i}_s \quad (24)$$

$$T_e = n_p \frac{3L_{ms}}{2L_r} \bar{\Psi}_r \otimes \bar{i}_s \quad (25)$$

$$T_e = n_p \frac{L_m}{L_r L_s - L_m^2} \bar{\Psi}_s \otimes \bar{\Psi}_r \quad (26)$$

其中: $\bar{\Psi}_{sg} = L_m \bar{i}_s$ 为定子电流矢量产生的励磁磁链, $\bar{\Psi}_{rg} = L_m \bar{i}_r$ 为转子电流矢量产生的励磁磁链, $\bar{\Psi}_s$ 和 $\bar{\Psi}_r$ 分别为定、转子全磁链, L_s 为定子等效自感, L_r 为转子等效自感。

6.3 奠定了交流电机高性能控制策略的基础

空间矢量概念的引入,不但简化了交流电机数学模型,而且使交流电机的控制变得更加有效。交流电机的两种高性能控制策略——矢量控制和直接转矩控制都是以空间矢量为基础的。

从转矩公式(21)~式(26)知道,要想控制转矩,必须控制两个空间矢量的幅值和相对位置(夹角)。按照是否按矢量关系控制转矩的不同^[18],异步电动机调速系统分为两大类:标量控制系统和高性能控制系统。

标量控制系统只控制一个磁通势的幅值和旋转速度,它们都是标量,故称这类系统为标量控制系

统。由于没有按矢量关系进行控制,无转矩控制内环,所以这类系统动态性能差。如恒压频比变频调速系统,只是从转速控制的需要来控制频率,如同直流调压调速。而矢量控制系统按矢量关系进行控制,它从转矩控制的需要控制频率,有转矩控制内环,动态性能好,如同双闭环直流调速系统。

参 考 文 献

- [1] 邱关源. 电路(4版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [2] 汤蕴璆, 史乃. 电机学(2版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [3] 陈伯时, 阮毅. 运动控制系统(3版) [M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [4] 秦萌青. 时间相量、空间矢量的概念及应用[J]. 山东工程学院学报, 1998, 12(1): 11-15.
- [5] 程小华. 电路和电机理论中相量、空间矢量的对比研究[J]. 防爆电机, 2005, 40(3): 1-3.
- [6] 董钟良. 交流电机分析中应用的相量和矢量[J]. 上海大中型电机, 2007, (2): 11-13.
- [7] 郑剑, 肖蕙蕙. 电机理论中的两类空间矢量及其特点研究[J]. 上海大中型电机, 2008, (4): 27-30.
- [8] 程守洙, 江之永. 普通物理学(5版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [9] 同济大学数学教研室编. 《线性代数》(3版) [M]. 北京: 高等教育出版社, 1996.
- [10] 雷银照. 我国供用电频率 50Hz 的起源[J]. 电工技术学报, 2010, 25(3): 20-26.
- [11] 戴庆忠. 电机史话(14): 第9章: 电机理论的发展[J]. 东方电机, 2001, (3): 67-84.
- [12] 佟纯厚. 近代交流调速系统(2版) [M]. 北京: 冶金工业出版社, 1995.
- [13] Vas. P. Sensorless Vector and Direct Torque Control [M]. Oxford University Press, 1998.
- [14] 丁荣军, 黄济荣. 现代变频技术与电气传动[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [15] 王成元, 夏加宽. 电机现代控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [16] Bimal K. Bose. Modern Power Electronics and AC Drives [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.
- [17] M. Depenbrock, 冯江华译. 超空间矢量: 空间矢量的一种型四参数扩展[J]. 交流技术与电力牵, 1999, (3): 13-18.
- [18] 马小亮. 异步电动机的矢量控制[J]. 电气传动, 2010, 12(1): 11-15.

作者简介:

魏祥林, 1978年生, 硕士, 讲师, 研究方向为电机控制。

傅龙飞, 1983年生, 讲师, 主要从电气自动化方向的教学和研究工作。

郝晓弘, 1960年生, 教授, 博士生导师, 研究方向为现代电气传动技术、智能电网技术。

· 信息点滴 ·

上海电气签约 24 台 2 MW 风电机组订单

近日, 上海电气与中国风电集团有限公司签署了安徽天长高邮湖风电场 24 套 W2000N-105-80 风电机组设备的采购合同和融资租赁合同, 由上海电气租赁公司以融资租赁方式向中国风电提供资金用于采购上海电气生产的风机及附属设备。该风电机组合同的签署, 开拓了产融结合全新商业模式, 也是国内风力发电机制造企业的首单厂商租赁业务。

上海电气租赁有限公司于 2005 年成立, 是电气集团金融服务平台中从事融资租赁业务的专业公司。截止 2011 年末, 租赁公司已累计促进集团内产品销售四十多亿元, 并保持公司资产质量总体良好。

通过不断优化与集团厂商“战略合作模式”, 提升租赁服务效率、建立风险共管和联动报价机制, 有效提升了集团厂商在国内市场的竞争力。

近年来, 天威卓创公司将变压器和风电用保护装置作为研发重点, 此前已先后开发出变压器用排油注氮式灭火装置和泡沫喷雾式灭火装置, 并以卓越的质量和良好的售后服务赢得口碑, 占领了市场。

20120204

阿联酋拟建第一座 24 h 不间断太阳能电站

据悉, 100% 能源集团正在研究在阿布扎比建立 24 h 不间断太阳能电站的可行性, 项目总监佩德罗称“此次计划能否成功完全取决于阿布扎比政府对于此次项目的支持以及银行贷款。”他同时表示, 若建造发电站的计划最终确认, 整个建造过程将需 5~10 年。

发电站将由一个中心集热装置以及其周边的太阳光反射镜组成, 此项技术的应用将能使太阳能得到储存并用于在黑夜以及阳光不好的时候发电, 真正地做到了 24 h 全天候不间断发电。

20120205