

独立电力系统过渡过程
的
电子计算机计算

K. K. 凯特聂尔
〔苏〕 H. A. 科兹洛娃 著
B. M. 辛特尤列夫
朱耀忠 许巧保 译 秦钢 校

国防工业出版社

统过渡过程
计算机计算

特 聂 尔
兹 洛 娃 著

B. M. 辛特尤列夫

朱耀忠 许巧保 译 秦钢 校

国防工业出版社

译 序

本书是作者在里加工业大学长期研究的成果总结, 比较精练地阐述了独立电力系统过渡过程的计算方法, 并用 FORTRAN IV 语言给出了具体计算例题。第一章的内容为交流电机在 d 、 q 、 0 坐标系中的方程组; 第二章为交流电机过渡过程的计算; 第三章是动力系统过渡过程的计算; 第四章是独立电力系统过渡过程在电子计算机上的计算。原书中发现的一些印刷错误在翻译时已作了改正, 个别地方译者作了注释。原书中作者根据具体情况增减了符号的下标使表达更加简明。例如机械时间常数 T_M , 在需要区别用于发电机或电动机时, 就分别用 $T_{M\tau}$ 和 $T_{M\pi}$ [见式(4.1.8)和(4.1.9)] 表示。又如异步电动机的定子纵轴电压和横轴电压在式(1.4.13)中用符号 $u_{\sigma d}$ 和 $u_{\sigma q}$ 表示, 而在鼠笼式异步电动机中因不必讨论转子电压问题, 故在式(1.4.20)中就分别用 u_d 和 u_q 表示, 希望读者注意。

本书可供电力系统及电机工程研究人员参考, 亦可作为高等学校电气工程有关专业教师、研究生和高年级学生的参考书。

序言、第一章、第二章中的 § 2.5~§ 2.8 及第四章由朱耀忠同志翻译; 第二章中的 § 2.1~§ 2.4、§ 2.5、第三章、结论和附录由许巧保同志翻译, 全书由秦钢同志校阅。

由于水平有限, 书中难免会有错误, 请读者指正。

一九八三年

目 录

缩写符号	1
序言	2
第一章 交流电机的算法	7
§ 1.1 理想电机	7
§ 1.2 同步电机在 a 、 b 、 c 坐标系和 d 、 q 、 0 坐标系中的完整方程组	8
§ 1.3 同步电机在 d 、 q 、 0 坐标系中的简化方程组	22
§ 1.4 异步电机在 a 、 b 、 c 坐标系和 d 、 q 、 0 坐标系中的完整方程组	25
§ 1.5 异步电动机在 d 、 q 、 0 坐标系中的简化方程组	38
§ 1.6 静态负载的算法	39
§ 1.7 d 、 q 、 0 坐标系中同步发电机完整方程组的程序	44
§ 1.8 d 、 q 、 0 坐标系中鼠笼式异步电动机 完整方程组的程序	47
§ 1.9 d 、 q 、 0 坐标系电阻-电感混合负载程序	49
第二章 交流电机的过渡过程	51
§ 2.1 关于组织计算的一般介绍	51
§ 2.2 同步发电机的突然短路	54
§ 2.3 整步过程	64
§ 2.4 动态稳定性	67
§ 2.5 异步电动机的起动过程	69
§ 2.6 异步电动机的换接状态	72
§ 2.7 短路状态	76
§ 2.8 异步负载的等效	78

§ 2.9	同步发电机在不对称静态负载下的运行	95
第三章	用元件的简化和完整方程组进行动力系统 过渡过程计算的算法	101
§ 3.1	对于简化方程组和完整方程组算法的一般见解	101
§ 3.2	根据简化方程组用节点电压法计算以节点阻抗 (Z) 表示的动力系统	102
§ 3.3	根据简化方程组用节点电压法计算以节点导纳 (Y) 表示的动力系统	112
§ 3.4	用元件的完整方程组进行过渡过程计算的算法	122
第四章	独立电力系统过渡过程在电子 计算机上的模拟	133
§ 4.1	根据简化方程组计算以节点阻抗 (Z) 表示的典 型独立电力系统	133
§ 4.2	根据简化方程组计算以节点导纳 (Y) 表示的典 型独立电力系统	143
§ 4.3	根据完整方程组计算典型独立电力系统	146
§ 4.4	典型独立电力系统过渡过程的电子计算机计算	150
§ 4.5	根据完整方程组计算独立电力系统的不对称状态	157
结论		165
附录		169
参考文献		193

缩 写 符 号

AM	——	异步电机
CM	——	同步电机
АД	——	异步电动机
СГ	——	同步发电机
CH	——	静态负载
о. е.	——	标么值
вос	——	恢复
ост	——	剩余
рад	——	弧度
с	——	秒
н. м.	——	牛·米
к. з.	——	短路

序 言

独立电力系统 (AЭЭС) 与大容量电力系统 (ЭЭС) 的不同之点是: 独立电力系统中的发电机容量不很大并和负载相接近, 以及相对来说不很长的配电网路。运输设备(船舶、军舰、飞机、铁路等)的、工厂的、农业的和其他电力系统均属于这种电力系统。

现阶段独立电力系统发展的特点出现了新的质的变化, 这首先是与电气机械迅速地增加有关, 因而电站总容量和发电机单机容量也随之增大; 电站操作工作大大复杂化, 因而要求广泛地采用自动化措施; 对电能质量和独立电力系统运行的可靠性要求均提高了, 特别是在把原子能变换成热能的装置中, 因此要求大大提高设计质量。

在现代, 要提高设计研究质量, 只有在广泛应用计算技术的基础上才能实现。因此有必要简单地讨论一下建立独立电力系统数学模型的方法在设计研究中的作用。利用电力系统的数学模型能够在模拟计算机和数字计算机上对电力系统的正常运行状态和发生故障时的动态性能进行评价, 而这些情况由于经济上的理由或受到特殊的生产条件限制, 在实际装置中常常是不能进行试验的。

应该指出, 广义地说, 数学模型还应包括对描述现象或过程的微分方程组进行积分而得到的解析关系。然而下面我们的主要注意力将集中于利用数字计算机建立电力系统的模型问题, 因为它是一种最通用的研究手段, 不仅可以对高阶

非线性微分方程组求解，并且可使编制工作程序的过程自动化。

在数字计算机上实现的数学模型能够在考虑到大量最重要因素的基础上解决最广泛的课题，同时确定许多相互联系的变化特性。换句话说，我们能够得到最接近客观事物的所研究过程的图景。

同时，作者并不轻视工程计算-理论研究方法的作用。同样也不认为数学模拟能完全排除进行实物的、物理的或混合模拟试验的必要性。但是在实际计算经验积累的过程中，在数学模拟与试验对比的过程中，反映实际现象的可靠性将会增加，同时将扩大数学模型的应用范围。

现在已确定了一系列与电力系统数学模拟方法的进一步发展有关的问题，其中最重要的是：

- 1) 分析独立电力系统在正常运行和有故障时的过渡过程和稳定状态的性能。必须完成这些计算首先是因为对保护系统动作的可靠性要求提高了；有故障时这种保护系统应该保证不间断地、有选择地断开配电线路损坏的区段；在正常运行的动态扰动条件下，对开关设备的误动作要保证能同时保护。

- 2) 操纵人员的教育和训练（根据电力系统数学模型详细制定训练计划）。

- 3) 分析独立电力系统的工作状态，以寻找最重要参数的优化值，自动稳定系统的结构和确定控制规律。

- 4) 建立控制论的模型^[6~9, 17]。

在自动调节理论中，与类似装置相对应的是具有标准模型的自动调节系统。显然，后者的作用在控制论中是由电力系统的数学模型完成的，它允许一系列“失败”，然后给出

开关执行装置的最优解。

自然，在目前的条件下解决独立电力系统设计问题时，上面所列问题的含义可以是各种各样的。例如，练习器的结构显然与独立电力系统的设计工艺无关，而第一组问题的解决给出了获得标准计算方法的可能性。这种方法在提高质量的同时，能够使与独立电力系统的保护系统的结构有关的设计工作自动化。后两组问题要复杂得多，因为它们与优化过程附加算法研究及选择最优算法的必要性有联系。但是在这里独立电力系统数学模型显然仍是主要环节，所以在控制论中和解决电力系统工作状态优化任务时，独立电力系统数学模型的建立是核心问题。

众所周知，即使是对独立电力系统的个别元件（发电机、电动机等）的过渡过程的研究也是相当困难的，因为其动态性能是由高阶非线性微分方程组来描述的。当元件在电力系统中连接起来后，困难就更大。

与此相联系，在实际研究时采取了一系列假设，其中最主要的是在研究电磁过渡过程时忽略变压器电势，从而排除了定子交流中的非周期性分量。由此引起的误差一般不作定量分析。所以在第一章和第二章中推导了电力系统元件（发电机、异步电动机和无源元件）的微分方程组。此外，研究了它们在数字计算机上实现的程序，并根据完整方程和简化方程对一系列典型过渡过程的计算结果进行了比较。异步拖动是独立电源最主要的负载。由于数量极大，在实际中完全考虑它们是不可能的，似乎也没有这个必要。因此本书第二章中给出了等效参数法的基础，这种方法可以根据已得到的程序连续地把几个并联在配电板母线上的用户“转向”，等效成一个，这种方法的误差将用实际计算例题来估计。

书中首次给出了用派克-高列夫 (Park-Γорев) 方程对独立电源系统的不对称状态进行计算的结果, 它证实了对不对称回路方程组直接采用派克变换的可能性。这使得能在旋转坐标系中用方程组来描写整流变流机, 从而综合成统一的交-直流电力系统模型。类似装置在军舰上的使用越来越多, 并且在可控整流器工作时确定其交流侧的电压波形, 以便评价它对一系列重要用户作用的影响, 已成为日益迫切的任务。

独立电源系统能表征为含有许多非线性的和多自由度的系统。显然, 对这种系统的过渡过程进行定性和定量的分析是很困难的。为了解决与电力系统的动态分析有关的研究工作的自动化问题, 现在已完成了大量的程序。但它们的主要缺点是与具体计算系统有关, 这就失去了算法的共性, 限制了其应用范围。同时, 即使在应用算法语言的条件下, 编写每个程序的工作量都是非常之大的, 这是由于算法的复杂性, 必须求解微分方程组和大规模的数学计算。

同时必须注意, 配电网结构可以随工作状态的改变和切断一系列用户或电源而变化。用电力系统结构模型的方法和用创立专用数学支持系统 (该系统能够自动建立数学模型) 的方法, 可以在很大程度上减小类似课题的程序编写工作量^[26]。在这种情况下, 动力系统性能的算法完全反映着供电系统的结构图, 而在系统中各元件的电磁和机械过程, 用相应的独立微分方程组表示。

将独立电力系统的研究和设计方法用于船舶电力系统中过渡过程的数学描述, 在参考文献[10~12]和其他著作中有所反映。由于大大简化了课题的程序化过程, 因而可以按动力系统元件的完整方程和简化方程对复杂的配电系统进行计算, 评价所得的误差并与试验结果进行比较。但是即使在这

些条件下，类似课题仍是很复杂的，它要求仔细地查对所研究对象的参数，调整计算方法和整理试验结果。在技术科学博士维列金尼科夫（Л. П. Веретенников）教授领导下所完成的研究工作，提供了正确处理类似问题的典范。只有由各种团体完成一系列的、针对在不同条件下的各种对象的类似工作之后，换句话说，只有广泛的实践鉴定，才能最后确定这种或那种算法形式的应用范围。

本书包含着作者在各代数字电子计算机上对船舶动力系统工作状态建模所积累的经验。给出了在动力系统中各种元件的简化方程和完整方程的基础上创建专用数学支持系统方面所获得的成果。结构建模方法的应用，使得能够定型课题的程序和作极大的简化。在典型动力系统的例子中给出了对动态对称和不对称状态建模的结果。

作者们并不认为对书中所述材料的研究已彻底完成，因此作者们感谢读者把意见和要求寄来。

作 者

第一章 交流电机的算法

§ 1.1 理想电机

每个作者应用的交流电机微分方程组是不同的。方程式的形式与磁链向量；选择的电压向量方向；选择的 d 、 q 、 0 坐标系方向；电机的工作状态（发电机或电动机）及其他因素有关。因此，有必要在研究独立电力系统（АЭЭС）计算机算法之前，先导出本书中所用的独立电力系统元件模型的完整方程组和简化方程组。

伴随电机中过渡过程的现象是非常复杂的。这是由于：磁化曲线与电机原先的磁状态有关；磁势在空间的分布曲线含有高次谐波，并且在电机运行中是不稳定的；电机的参数与绕组中电流的大小及转速有关，而有效电阻还与温度有关。考虑所有这些相互关系，势必导出非常复杂的非线性方程组，而某些量用解析式表达简直是不可能的。

用数学方法来描述交流电机中所发生的过程只能或多或少地近似解决。这时往往采用比较简单的理想条件代替复杂的实际条件来进行研究，并且一般说来假设程度取决于所要解决的问题的性质。

目前应用最普遍的方程组是根据下列假定得到的^[1、13、32等]：1）磁路不饱和；2）不考虑磁滞现象和铁损耗；3）磁势和磁感在空间为正弦分布（忽略高次谐波）；4）漏磁电抗与转子位置无关。

这些假定可以辨别出复杂现象中的主要方面，并排除次要方面。当必须考虑上述列举的某个或某些假定因素时，一般仍利用理想电机进行研究，然后根据试验决定的关系来修正电机的参数或修正所得的最后结果。

忽略磁路饱和与铁损耗后，可以应用磁势和磁通间的线性关系，从而使研究大大简化。这时空载特性曲线将是直线，亦即可以认为它与横坐标轴夹角的正切正比于气隙磁阻。当磁路不饱和时，几个磁势的合成作用既可用各磁势相加求合成磁势的方法，也可用各磁势产生的磁通相加的方法来确定。当无铁损耗时，电流和磁势与产生它们的磁通同相位。

此外，忽略磁路饱和与铁损耗后，可以在研究每个给定转子位置或给定转速的电机时采用叠加法。

叠加法是：当有几个原因（电流或电压）在电机中共同作用时，对任一绕组所产生的结果（电流或电压），等于这些原因单独作用时在该绕组所产生的结果的叠加。

用上述假定的理想电机来代替后，可使电机实际的图景保持在容许误差范围内，因为理想电机能够得到对工程计算精度来说具有足够精确的方程组。

§ 1.2 同步电机在 a 、 b 、 c 坐标系和 d 、 q 、 0 坐标系中的完整方程组

船舶交流发电机最普遍的形式是凸极转子同步发电机。隐极同步发电机和异步电机方程组可以作为一种特殊情况从凸极同步电机的方程组中得到。

为了研究旋转电机的过渡过程，特别是同步电机的过渡过程，必须写出定子和转子的电压方程及转子的机械运动方程。这些方程的形式与坐标系中轴的方向和回路中电流方向

的选择有关。

对电机来说，基本的工作状态既可以是发电机，也可以是电动机。但是同步电机主要用于产生电能，所以，后面主要对发电机状态进行分析。

所研究的同步电机在定子上有三相对称绕组，转子上有励磁绕组和阻尼绕组。阻尼绕组通常用沿电机纵轴方向和横轴方向的两个等效短路闭合回路来代替。假定三相绕组接在母线上，励磁绕组接到直流电源。相电压用 u_a 、 u_b 、 u_c 表示；励磁电压用 u_B 表示。

在这种情况下同步电机可以用六个磁耦合回路系统来代表：三个在空间静止的定子相绕组回路，三个旋转的转子回路——励磁绕组和二个阻尼绕组；在阻尼绕组上没有任何外加电压。

凸极同步电机的数学模型为下列微分方程组：

$$\left. \begin{aligned} u_a &= r_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ u_b &= r_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ u_c &= r_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \\ u_B &= r_B i_B + \frac{d\psi_B}{dt} \\ 0 &= r_D i_D + \frac{d\psi_D}{dt} \\ 0 &= r_Q i_Q + \frac{d\psi_Q}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1.2.1)$$

式中 ψ_a, ψ_b, ψ_c ——相绕组 a, b, c 的总磁链;

u_a, u_b, u_c ——相电压瞬时值;

i_a, i_b, i_c ——相电流瞬时值;

r_a, r_b, r_c ——相绕组的有效电阻, 在定子对称时 $r_a = r_b = r_c = r$;

u_B, ψ_B, i_B, r_B ——加在励磁绕组上的电压、励磁绕组的磁链、电流及电阻;

ψ_D, i_D, r_D ——纵轴阻尼绕组的磁链、电流和电阻;

ψ_Q, i_Q, r_Q ——横轴阻尼绕组的磁链、电流和电阻。

电机转子的运动方程为:

$$M_r = M_{\Sigma} + J \frac{d\omega}{dt} \quad (1.2.2)$$

式中 M_r ——原动机转矩;

M_{Σ} ——电磁转矩;

$J \frac{d\omega}{dt}$ ——动态转矩;

ω ——转子旋转角速度;

J ——旋转质量的转动惯量。

a 相绕组的磁链表达式为:

$$\psi_a = L_a i_a + M_{ab} i_b + M_{ac} i_c + M_{aB} i_B + M_{aD} i_D + M_{aQ} i_Q \quad (1.2.3)$$

式中 L_a ——相绕组的电感;

$M_{ab}, M_{ac}, M_{aB}, M_{aD}, M_{aQ}$ ——定子 a 相绕组与 b, c 相绕组、励磁绕组和阻尼绕组之间的互感。

M_{aD} 和 M_{aQ} 变化的特征与 M_{aB} 变化的特征是类似的, 因此可以写出,

$$\begin{aligned}\psi_a = & (l_0 + l_2 \cos 2\gamma) i_a + \left[-m_0 + m_2 \cos \left(2\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \right] i_b \\ & + \left[-m_0 + m_2 \cos \left(2\gamma + \frac{2\pi}{3} \right) \right] i_c + M_B \cos \gamma i_B \\ & + M_{DC} \cos \gamma i_D + M_a \sin \gamma i_Q\end{aligned}\quad (1.2.4)$$

式中 M_D, M_Q ——定子相绕组与阻尼绕组间互感的最大值。
对 ψ_b, ψ_c 和 ψ_B 可以得到类似的表达式。

纵轴及横轴阻尼绕组的磁链方程可写为：

$$\psi_D = M_{Da} i_a + M_{Db} i_b + M_{Dc} i_c + M_{DB} i_B + L_{Di} i_D \quad (1.2.5)$$

$$\psi_Q = M_{Qa} i_a + M_{Qb} i_b + M_{Qc} i_c + L_{Qi} i_Q \quad (1.2.6)$$

式中 M ——阻尼绕组与其他绕组之间的互感。

即使用计算机来求解所得的方程组也是相当困难的。所以我们必须把在 a, b, c 坐标系中的凸极同步电机方程组加以变换，以获得常系数方程。为此，通常采用双反应理论的基本原理。

按照双反应理论，可以用两组等效绕组来研究同步电机：一组沿转子纵轴，另一组沿转子横轴。在一般情况下，每组等效绕组由一个定子绕组和几个转子绕组组成。

在一系列情况下，根据双反应理论，在不稳定状态时同步电机的方程组是简单的常系数线性微分方程组。这时，我们用的不是定子量，而是它们在旋转的纵轴和横轴上的投影。换句话说，我们完成了由静止坐标系到旋转坐标系的变换，即把作周期变化的变系数微分方程组在数学上等效地变换成了常系数微分方程组或系数作缓慢变化的微分方程组。

按照双反应理论，我们不是研究气隙中的实际磁通，而是研究其纵轴和横轴分量。这时要假定纵轴磁场和横轴磁场的磁导率是常数（因为研究理想电机时认为：气隙中的磁

感应作正弦分布, 并忽略铁的饱和)。这时电枢反应纵轴磁通和横轴磁通正比于相应的纵轴和横轴电枢电流。当电枢绕组磁轴分别与转子的 d 轴和 q 轴重合时, 则由纵轴和横轴电枢反应磁场所产生的磁链 Ψ_{ad} 和 Ψ_{aq} 可表示为:

$$\psi_{ad} = L_{ad} i_d \quad (1.2.7)$$

$$\psi_{aq} = L_{aq} i_q \quad (1.2.8)$$

式中 L_{ad} 、 L_{aq} ——与纵轴和横轴电枢反应磁通相应的电枢绕组电感;

i_d 、 i_q ——纵轴和横轴电枢电流瞬时值。

当由周期性系数的方程变成常系数方程时, a 、 b 、 c 坐标系已变换到转子上的 d 、 q 、 0 坐标系, 并且 d 轴落后于 q 轴 90° 。此时 a 、 b 、 c 坐标系中的变量 (如 i_a 、 i_b 、 i_c) 变成 d 、 q 、 0 坐标系中的新变量 (如 i_d 、 i_q 、 i_0)。为了实现这种变换常用图 1.1 所示的通用向量法。

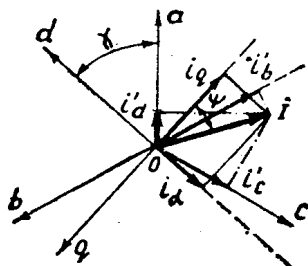


图 1.1 a 、 b 、 c 坐标系和 d 、 q 、 0 坐标系的电流通用向量

通用电流向量在 a 、 b 、 c 轴上的投影为相电流 i_a 、 i_b 和 i_c , 而在转子轴上的投影为电流 i_d 和 i_q 。在一般情况下, 当定子绕组为星形带中线接法时, 有:

$$i_a + i_b + i_c = 0$$

而

$$-\frac{1}{3}(i_a + i_b + i_c) = i_0$$

式中 i_0 ——电枢电流的零序分量。

当 $i_0 \neq 0$ 时，相电流可表示为：

$$\left. \begin{aligned} i_a &= i'_a + i_0 \\ i_b &= i'_b + i_0 \\ i_c &= i'_c + i_0 \end{aligned} \right\} \quad (1.2.9)$$

这时带撇的电流符号不包含电流的零序分量，并为：

$$i'_a = i_a - i_0$$

$$i'_b = i_b - i_0$$

$$i'_c = i_c - i_0$$

它们可以用通用向量 I 在 a 、 b 、 c 轴上的投影来表示，而且：

$$i'_a + i'_b + i'_c = 0$$

根据图1.1可得：

$$\left. \begin{aligned} i'_a &= I \cos\left(\psi + \frac{\pi}{2} - \gamma\right) = -I \sin(\psi - \gamma) \\ i'_b &= I \cos\left(\psi + \frac{\pi}{2} - \gamma + \frac{2\pi}{3}\right) = -I \sin\left(\psi - \gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ i'_c &= I \cos\left(\psi + \frac{\pi}{2} - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) = -I \sin\left(\psi - \gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1.2.10)$$

纵轴和横轴电流为：