

交流电机的暂态分析

对称分量法的应用

W.V. 萊昂著

水利电力出版社

統一書號：15143·1872

定價 1.90 元

交流电机的暂态分析

对称分量法的应用

W.V. 萊昂著

孙紹先譯

水利电力出版社

內 容 提 要

本书应用了瞬时值的对称分量法来研究各种感应电机和同期电机的各种稳态及暂态的运行情况。对各种电机的分析都从基本原理出发并给出了普通的微分方程式。对于对称分量法、纵轴横轴分量法、前进后退分量法之间的关系，也有所阐述。书中给出六十几个常见的典型问题的分析及其结果；此外，还有四十几个示范例题。

本书可供电机设计研究人员、运行人员和高等工业学校电机专业师生阅读参考之用。

WALDO V. LYON

TRANSIENT ANALYSIS OF ALTERNATING CURRENT MACHINERY

AN APPLICATION OF THE METHOD OF SYMMETRICAL
COMPONENTS

The Technology Press of M.I.T. and John Wiley & Sons, Inc.

1954

交流电机的暂态分析

(对称分量法的应用)

根据美国麻省理工学院出版部外英公司联合出版1954年纽约版翻译

孙 绍 先 译

2299D6:3

水利电力出版社出版 (北京西郊科学路二里内)

北京市书刊出版业营业许可出字第105号

水利电力出版社印刷厂排印

新华书店科技发行所发行 各地新华书店经售

850×1168毫米开本 * 114页 * 291千字 * 定价(第10类)1.90元

1960年1月北京第1版

1960年4月北京第1次印刷(0001—5,670册)

前 言

自从佛台斯鳩引用对称分量法分析多相感应电机的不平衡运行以来，已有三十五年了。其間又出版了几本教科书和很多科技論文，都专门討論这一方法对各种工程問題的应用。所有这些应用都是研究与电机及其所接系統有关的稳态运行特性，而且对称分量都是把交流电流及电压以及系統的参数按复数表示法来进行分解的。虽然佛台斯鳩自己也預知他的分解方法对暫态下的电流及电压也能加以应用，但是到现在为止还没有看到关于这方面分析方法的有系統的发展。

这本书是作者在过去十到十二年来对研究生授課的講稿和討論所积累的结果。它說明如何应用对称分量法来决定多相电机各种运行情况下的暫态运行特性。稳态的也好，暫态的也好，三相电流瞬时值的对称分量都是对時間发生变化的复量，而且在每一个分量里都含有一个或者二个旋轉矢量；至于究竟是一个或者二个，则取决于所研究的实际运行条件。

这种分析是以电机及所接电力系统內的克希荷夫微分方程式为基础而进行的。当这些方程式是常系数的微分方程式时，就可代入一普遍公式来求解。要想获得这种直线化的特性，則必須假定电机具有某种“理想”特性，至于为什么要加以这种或那种限制条件的原因，书中也有詳細的討論。如果把出现在克希荷夫微分方程式里的实际电流和电压分別以它們瞬时值的对称分量代入后，原来的微分方程式就可以被分开成为正序的及負序的微分方程式。这些分量方程式之間的关系是由靜子和轉子端点条件所决定的。电机共有两种类型，一种是具有均匀气隙的，另一种是具有凸极的；对于每一种类型的电机，都推导出来了序量的基本方程式。因为我們是沿着經典式的路綫来求解微分方程式的普遍解

答公式，所以就不要求讀者了解拉氏變換的方法。當對結果作數目字計算時，也不會因為我們採用了這樣的公式而有所妨礙。

在假定條件的範圍以內，所做出的理論分析是嚴格的，因此讀者如果和其他簡單而近似的求解方法作一比較，即可更清楚地知道那些方法的精確性是如何了。

書中採用了標么制，使方程式得到了普遍化，並且所有的結果都是用儀表可以量出的量來表示的。

縱軸和橫軸分量以及前進和後退分量都可直接由對稱分量推導出來。

我們採用了阻尼常數 K 而未採用時間常數 T 。阻尼常數 K 是電阻與額定頻率下自電抗的比值。

書中詳細地給出大約有60種典型問題的普遍分析法，而且所得的結果都寫成這樣的文字公式，使得在具體應用時只需把系統參數的數值代入公式就能得出所求的結果。這些問題包括：串聯和并聯電容器的影響，阻尼繞組的影響，梯形網絡的應用，電阻對追逐現象的影響，以及加速度對電磁轉矩的影響等。書中還有40個左右的數目字示范例題。電機在暫態情況下的運行特性是和這樣多的控制因素之間的相互作用有關，以致若想採用一個簡單形式的公式來求得普遍結論，有時候是不可能的。

W. V. 萊昂

1954年3月

目 录

符号說明表	7
第一章 静止电路	9
1-1 引言	9
1-2 克希荷夫定律	10
1-3 克希荷夫方程式	11
1-4 暂态阻抗	12
1-5 耦合电路	16
1-6 通解	16
1-7 具有电容性負荷的变压器	20
1-8 特性方程式的等根情况	22
1-9 重迭原理	23
1-10 重迭原理——开关断开的影响	32
第二章 电压和电流瞬时值的对称分量	39
2-1 引言	39
2-2 电压	40
2-3 电流	42
2-4 瞬时功率	44
2-5 两相的对称分量	45
2-6 正弦波电压和电流的三相平衡系统	46
2-7 平衡的两相系统	50
2-8 普通不平衡的三相系统	51
2-9 阻抗和阻抗降落的分解	53
第三章 理想圆柱轉子式电机的微分方程式	55
3-1 引言	55
3-2 “理想”圆柱轉子式电机的特性	55
3-3 靜子和轉子的磁鏈	56
3-4 气隙里最大的磁通密度	61

3-5	三相靜子和三相轉子的克希荷夫微分方程式	62
3-6	轉矩	65
3-7	轉子的等值參數	70
3-8	穩態運行方式	72
3-9	參數的量測	77
3-10	參數的計算	80
第四章	轉子靜止時感應電動機的暫態情況	82
4-1	引言	82
4-2	同時加以平衡的電壓	83
4-3	起動轉矩	87
4-4	依次施加相電壓	91
4-5	用縱軸和橫軸分量表出的轉矩方程式	94
第五章	轉速恆定時感應電機里的暫態情況	98
5-1	基本方程式的變換	98
5-2	示范例題	102
5-3	靜子端頭上發生對稱的短路	105
5-4	轉子的轉速和轉子的電阻對暫態電流的影響	109
5-5	在暫態過程時的气隙磁通	111
5-6	短路時的暫態轉矩	114
5-7	暫態轉矩對轉子轉速的影響	116
5-8	電動機再接入電源	117
5-9	轉矩的計算	119
5-10	相電壓的反序	121
5-11	轉矩的計算	123
5-12	靜子方面不對稱的情況	124
5-13	轉子方面不對稱的情況	131
5-14	三相感應電動機和提高功率因數的電容器	132
5-15	數字示范例題	138
5-16	气隙磁通	140
第六章	轉速恆定、轉子具有激磁的均勻气隙電機	144
6-1	引言	144
6-2	三相短路	145

6-3	短路时的轉矩	149
6-4	把同期电机接到无穷大汇流条上	150
6-5	綫-綫短路	152
6-6	自激	156
6-7	容性負荷和綫-綫的短路	158
6-8	三相短路	166
6-9	靜子方面接入电容器时的影响	170
6-10	不对称激励下的暫态轉矩	177
6-11	靜子和轉子双方都不对称	179
6-12	梯形网络	184
6-13	求解的普遍方法	195
第七章	凸极的同期电机。轉速恆定	199
7-1	均匀气隙	199
7-2	不均匀气隙	199
7-3	正序和負序的磁鏈	203
7-4	零序磁鏈	206
7-5	气隙磁通密度的最大值	207
7-6	克希荷夫方程式	208
7-7	微分形式的靜子方程式	209
7-8	轉矩方程式	213
7-9	稳态运行情况	215
7-10	稳态轉矩	219
7-11	参数的測量	219
7-12	三相短路	223
7-13	“時間常数”跟“阻尼常数”之間的关系	229
7-14	短路轉矩	230
7-15	同期电机接到无穷大汇流条上	232
7-16	两个电机的同期并列	238
7-17	普遍移置公式	240
7-18	同期发电机跟感应电机	241
7-19	凸极电机上接入电容器	248
7-20	单相負荷	253
7-21	阻屈繞組	256

7-22 参数的量測	263
7-23 梯形网络	266
第八章 轉速变更情况下的感应电机和同期电机	276
(甲) 感应电机	276
8-1 轉速变更的影响	276
8-2 忽略靜子电阻的情况	278
8-3 轉差突然变化	284
8-4 轉差按正弦变化	287
8-5 轉子在平均位置前后作搖摆运动	290
8-6 突然加以負荷轉矩	293
8-7 具有串联电容器的感应电动机	299
(乙) 具有均匀气隙的同期电机	306
8-8 轉子具有对称的激磁	306
8-9 具有不对称激磁的轉子	310
8-10 搖摆	312
8-11 利用微分分析仪求轉矩的解答	314
8-12 凸极电机	316
8-13 搖摆	321
8-14 应用微分分析仪求解的方程式	322
8-15 搖摆: 計入靜子电阻的影响	323
附录一 微分分析仪上的解答	339
附录二 常系数微分方程式的求解方法	343
习题	349
参考文献	353

符号說明表*

		章节
v	电压的瞬时值	2-2
a, b, c	多相系統里表示相別应用的下标	2-2
$0, 1, 2$	表示零序、正序、負序用的下标	2-2
ψ, ψ^2	旋轉符号(120度及240度)	2-2
i	电流的瞬时值	2-3
V_a, I_a	电压和电流的最大值	2-6
V_{a1}, I_{a1}	正序矢量的最大值(复数)	2-6
V_a, I_a	矢量的最大值(不平衡系統)	2-3
*	表示共軛值用的上标星号	2-8
λ	磁鏈	3-3
α, β	表示靜子或轉子用的下标	3-3
x_a, x_β	多相的自电抗或同期电抗	3-3
M'	两相之間互感的最大值	3-3
φ	轉子对靜子的位置角	3-3
A, B	靜子的相数及轉子的相数	3-3
ρ	表示归算到轉子方面的靜子电流所用的下标	3-5
P	极的数目	3-6
T	沿轉动方向的电磁轉矩	3-6
K	轉矩公式里应用的单位換算常数	3-6
D	微分算子	3-6
x_m	互电抗或激磁电抗	3-6
τ	ωt , 即($2\pi \times$ 频率 $\times$ 秒)	3-6
N	每相內的繞組匝数	3-7
n	实际轉速与同期轉速的比值	3-7
s	轉差	3-8
k	阻尼常数, 电阻和同期电抗的比值	3-8
σ	漏磁系数	3-8
Z	单位阻抗值, 額定电压与額定电流的比值	3-8

*—除第一章外(第一章內所用的符号是在单相电路分析里常用的符号), 按它們在书中出現的先后次序排列的。

C_1, C_2, C_3 补函数用所采用的积分常数(它的下标与特性根的下标 4-2

相对应)

i_{sd}, i_{sq}	轉子电流的纵軸及橫軸分量	4-4
Z_α, Z_β	靜子及轉子的自阻抗	4-4
$F(D), f(D)$	微分算子函数	5-1
'	表示暫态电抗所用的上标一撇($x' = \sigma x_\alpha$ 及 $b' = r/x'$), 当一撇具有其他意义时正文中有說明	5-2
δ	阻尼系数	5-6
J_m, J	质量的轉动慣量	5-7
Z_α, Z_β	阻抗的运算算子	5-13
$()_0$	表示一个量在 $\tau=0$ 时的值	5-13
c	表示电容时所采用的下标	5-14
x_c	容抗或电容性电抗	5-14
K	容抗与同期电抗的比值, x_c/x_s	5-14
d, q	表示纵軸与橫軸量时所采用的下标	7-3
x_d, x_q	纵軸电抗与橫軸电抗	7-3
x_i	对二次諧波的电抗或磁阻电抗	7-3
i_d, i_q	纵軸电流及橫軸电流	7-7
θ	功率角	7-9
$\bar{\gamma}$	表示橫軸上轉子繞組用的下标	7-21
G	感应轉矩常数	8-2
ψ	搖摆的振幅	8-5
b	搖摆频率的标么值	8-5
B	慣性轉矩常数	8-6
M	同期轉矩常数	8-8
H	額定轉速下每千伏安容量內所儲存的动能	8-8
N	磁阻轉矩常数	8-12
C_β, C_γ	感应轉矩常数	8-12

第一章 靜止电路

1-1 引 言

不論是电的或者机械的系統，当运行情况发生变化时，电流及电压或速度及位移，都不能突然变化而达到与新的运行情况相适应的新值。变化时必有一个过渡期間，在这一过渡期間內，各量都有暫态值出現，除了最簡單的情况外，每量的暫态值都包含几个分量。在一般情况下，各暫态分量都或快或慢地以不同的速度逐漸衰減，最后則完全消失。然而在这一过程之內，举例來說，总的合成电流和电压可能达到异常的或甚至达到危害性的瞬間值。反过來說，也可以故意設計一个系統，利用它的暫态值使发生預期的有益效果。其次，尽管新的穩态运行情况也許会是穩定的，可是暫态值也可能使这一系統趋于不穩定，这样就会終止它的正常工作。从暫态的这些影响的簡單总结里就可以看出：暫态行徑的研究和暫态如何控制的研究是一个重要的工程問題。在电机工程的出版物里已經出現了很多关于暫态的文章，此后我們將引用这些文献。

发生暫态的基本原因，是系統內所儲存的动能和位能。在电的系統之內，这些能量是存在电場和磁場里面的，它們的大小可用电感和电流表示出来，例如 $\frac{1}{2}Li^2$ ， $M_{12}i_1i_2$ ；或用电容和电位表示出来，例如 $\frac{1}{2}Cv^2$ 。如果磁場是存在于磁性物质(例如鉄)之內，則电感 L 和 M 并不是定值，而是跟产生磁場的电流强度有关系。这时，这个系統就是非直綫性的系統，对它进行分析时所遇到的算学困难是如此之大，以致一般在習慣上都假定 L 和 M 是定值，并且對它們都給定这样的数值，以使分析的結果相当合

理。这就需要有比較試驗結果和数字計算結果所得的經驗。

我們將要討論的唯一的机械系統就是交流旋轉电机，其中有动能分量，它等于轉动慣量和角速度平方的乘积的二分之一，即为 $\frac{1}{2}J\omega^2$ 。但对于这些电机运行特性的分析，主要将是关于它們的电气特性。

1-2 克希荷夫定律

任何企图想改变一个系統里面的动能或位能的大小或其分布的时候，必有反作用力出現，这种反作用力是阻止系統內任何一部分里在微量的時間之內有大于微量的能量变化。当几个周期性力加到一个系統上的时候，在稳态运行情况下就出現几个反作用力，因为这时系統各部分所儲存的能量有一个循环的变化。在一个

电的系統里，反作用力是几个反作用电势， $L\frac{di}{dt}$ 或 $M\frac{di}{dt}$ 及 $\frac{1}{C}\int idi$ 。当电流是正弦地变化时，这些电势一般可用矢算法表出为 $j\omega I$ 及 $-j\omega I$ 。在由某一运行情况轉变到另一运行情况的时间之內，又出現了附加的反作用电势，后者是用来阻止动能和位能有任何突然的变化。在所有这些情况下，电势和电流的瞬时值一定要滿足两个克希荷夫定律：

(1) 繞行閉环內沿相同方向所取全部电势瞬时值的代数和必等于零。

(2) 流入任一节点的全部电流瞬时值的代数和必等于零。

在由电阻、自感和互感，以及电容等元件所組成的系統里，每一元件內电流和它两端电压之間瞬时值的关系是：

$$v = ri, \quad v = L \frac{di}{dt}, \quad v = M_{12} \frac{di_2}{dt}, \quad v = \frac{1}{C} \int idt. \quad (1.1)$$

在每一上述的关系里， v 和 i 二者表示它們在电路里的大小和方向。就是說： v 是沿电流流动方向的电压降。互感系数 M_{12} ，可

为正也可為負。如果由電流 i_2 在電路 I 里所產生的磁通，和電流 i_1 在電路 I 里所產生的磁通同方向時， M_{12} 就是正數。如果 M_{12} 是正數時，電壓降 v_1 是和電流 i_2 同方向的。

1-3 克希荷夫方程式

在繪制電路圖時，一般在習慣上都用箭頭來表示所假定的每一電流的正方向，如圖1-1內所示。電勢 e_1 及 e_2 的正極用加(+)號來表示。當圖1-1內的開關 S 閉合後，各電勢的克希荷夫方程式是：

$$\begin{aligned} Ri + 2L \frac{di}{dt} - L \frac{di_1}{dt} - e_2 + e_1 &= 0, \\ -L \frac{di}{dt} + (r + R_1)i_1 + (L_1 + L_2) \frac{di_1}{dt} - R_1 i_2 - e_1 &= 0, \\ -R_1 i_1 + (R_1 + R_2)i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} &= 0. \end{aligned}$$

當採用馬克思威爾的環電流時，就象圖1-1的情況一樣，可以不必寫出各個克希荷夫的電流方程式了，因為環電流表明的是第二定律所包含的同樣原理。如果這些電阻和電感都不受電流大小的影響或者也不受電流變化方式的影響時，這些克希荷夫方程式就都是常系數的

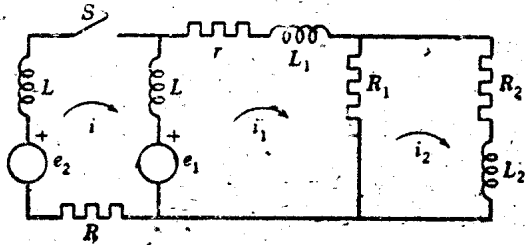


圖 1-1

綫性微分方程式。這種型式方程式的解答共有兩部分：補函數和特別積分。補函數，或者暫態電流，滿足使外加電勢等於零時的方程式。就是說：暫態電流的變化方式只是取決於電路的常數，而與外加電勢的數值無關。從另一方面來說，特別積分則是一個特解，它滿足所寫出的方程式。

當所加的電勢是定值的直流電勢或周期性的電勢時，特別積

分就是稳态的解答。当所加的电势是正弦波时，则电流也是正弦波；不然的话，它们的波形就会不同，尽管二者的谐波分量可能都包含相同的频率。

1-4 暂态阻抗

暂态电流包含有数个分量，它们的普遍形式是 $i = I e^{pt}$ 。当电流是这样的形式时，对方程式 (1.1) 里所给的电势和电流之间的关系就变成：

$$v = r I e^{pt}, \quad v = L p I e^{pt}, \quad v_1 = M_{12} p I_2 e^{pt}, \quad v = \frac{1}{C p} I e^{pt}.$$

因为可以把 v/i 的比值叫做是一个阻抗，这些元件的暂态阻抗 $Z(p)$ 是：

$$\text{对电阻 } r \text{ 来说:} \quad Z(p) = \frac{v}{i} = r,$$

$$\text{对自感 } L \text{ 来说:} \quad Z(p) = \frac{v}{i} = L p,$$

$$\text{对互感 } M_{12} \text{ 来说:} \quad Z(p) = \frac{v_1}{i_2} = M_{12} p,$$

$$\text{对电容 } C \text{ 来说:} \quad Z(p) = \frac{v}{i} = \frac{1}{C p}.$$

计算这些元件串联、并联和他种组合联接的总结果阻抗的法，则基于两个克希荷夫定律。数个元件串联接在一起的暂态阻抗等于几个阻抗的和。例如电阻、电感、电容各元件串联接在

一起的暂态阻抗 $Z(p)$ 是 $Z(p) = R + Lp + \frac{1}{Cp}$ 。

这一阻抗的式子又可写成有理的分数形式：

$$Z(p) = \frac{LCp^2 + RCp + 1}{Cp}.$$

对一般情况而言，如果有几个阻抗 $Z_1(p), Z_2(p) \dots$ 等串联接在一起，总结果阻抗 $Z(p)$ 是：

$$Z(p) = Z_1(p) + Z_2(p) + \dots.$$

如果有两个阻抗 $Z_1(p)$ 和 $Z_2(p)$ 并联接在一起，它们的组合阻抗 $Z(p)$ 是：

$$Z(p) = \frac{Z_1(p) \cdot Z_2(p)}{Z_1(p) + Z_2(p)}.$$

举例来说，如果 $Z_1(p) = R_1 + Lp$ ，和 $Z_2(p) = R_2 + \frac{1}{Cp}$ ，

它们并联的组合阻抗是：

$$Z(p) = \frac{(R_1 + Lp)(R_2 + 1/Cp)}{R_1 + Lp + R_2 + 1/Cp}.$$

如果把分子分母都乘以 Cp 后，再把分子各项乘开，此式即可得到一个较好的形式，因此有：

$$Z(p) = \frac{R_2 LC p^2 (R_1 R_2 C + L) p + R_1}{LC p^2 + (R_1 + R_2) Cp + 1}.$$

如果 $R_1 = R_2 = R$ ，及 $L = R^2 C$ 时，上式的阻抗具有一种有趣而重要的特性；因为如果把所列各关系代入后，则有：

$$Z(p) = \frac{R(LC p^2 + 2RC p + 1)}{LC p^2 + 2RC p + 1} = R.$$

所以这样并联的两支，对所有的 p 值来说，都好像是一个电阻 R 一样。如果 $p=0$ 时，电流有一个定值 I 。当稳态的交流电流通过时，以 $j\omega$ 来代替 p 后，就得出复数值的阻抗。因此，不论在稳态或暂态情况下，这个并联的二支，就好像是一个电阻 R 一样。更普遍一些，我们能够证明：如果任何形式的电压 v 接到这个并联的二支阻抗上时，电压所供给它们的总电流的瞬时值也是 v/R 。

如果有数个阻抗 $Z_1(p)$ ， $Z_2(p)$ ， $Z_3(p)$... 并联接到一起时，它们的组合阻抗可由下式给出：

$$\frac{1}{Z(p)} = \frac{1}{Z_1(p)} + \frac{1}{Z_2(p)} + \frac{1}{Z_3(p)} + \dots.$$

串-并联组合的阻抗可用这些原理的组合方法来求出。举例来说，对图1-2内排列的组合电路，它的两端点之间的阻抗 $Z(p)$ 是：