交流电机的暂态分析

对称分量法的应用

W.V. 莱昂著

水利电力出版社

統一书号：15143·1872
定价 1.90 元

交流电机的暫态分析

对称分量法的应用

W.V.莱昂著
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穩态及暫态的运行情况。对各种电机的分析都从基本原理出发并給出了普通的微分方程式。对于对称分量法、縱軸橫軸分量法、前进后退分量法之間的关系，也有所闡述。书中給出六十几个常遇的典型問題的分析及其結果；此外，还有四十几个示范例題。

本书可供电机設計研究人員、运行人員和高等工业学校电机专业师生閱讀参考之用。

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

交流电机的暫态分析

(对称分量法的应用)

根据美国麻省理工學院出版部外莱公司联合出版1954年紐約版翻譯

孙 紹 先譯

2299 D6:3

水利电力出版社出版（北京西郊科学路二里沟）

北京市书刊出版业营业許可証出字第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　　各地新华书店經售

850×1168 1/32开本 * 11 5/16印張 * 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

自从佛台斯鸠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，都专門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。虽然佛台斯鸠自己也預知他的分解方法对暂态下的电流及电压也能加以应用，但是到現在为止还沒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結果。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暂态运行特性。稳态的也好，暂态的也好，三相电流瞬时值的对称分量都是对时間发生变化的复量，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，則取决于所研討的实际运行条件。

这种分析是以电机及所接电力系統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。要想获得这种直綫化的特性，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。如果把出現在克希荷夫微分方程式里的实际电流和电压分别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静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变換的方法。当对結果作数目字計算时，也不会因为我們采用了这样的公式而有所妨碍。

在假定条件的范圍以內，所做出的理論分析是严格的，因此讀者如果和其他簡单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确性是如何了。

书中采用了标么制，使方程式得到了普遍化，并且所有的結果都是用仪表可以量出的量来表示的。

纵軸和横軸分量以及前进和后退分量都可直接由对称分量推导出来。

我們采用了阻尼常数K而未采用时間常数T。阻尼常数K是电阻与額定頻率下自电抗的比值。

书中詳細地給出大約有60种典型問題的普遍分析法，而且所得的結果都写成这样的文字公式，使得在具体应用时只需把系統参数的数值代入公式就能得出所求的結果。这些問題包括：串联和并联电容器的影响，阻尼繞阻的影响，梯形网絡的应用，电阻对追逐現象的影响，以及加速度对电磁轉矩的影响等。书中还有40个左右的数目字示范例題。电机在暫态情况下的运行特性是和这样多的控制因素之間的相互作用有关，以致若想采用一个簡单形式的公式来求得普遍結論，有时候是不可能的。

W.V.萊昂

1954年3月

目　录

符号說明表*

		章节
v	电压的瞬时值	2-2
a,b,c	多相系統里表示相别应用的下标	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	电流的瞬时値	2-3
V_a, I_a	电压和电流的最大値	2-6
V_{a1}, I_{a1}	正序矢量的最大値(复数)	2-6
V_a, I_a	矢量的最大値(不平衡系統)	2-8
$*$	表示共軛値用的上标星号	2-8
λ	磁鏈	3-3
α,β	表示靜子或轉子用的下标	3-3
x_α, 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値	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($2\pi\times$頻率$\times$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値	3-7
s	轉差	3-8
k	阻尼常数，电阻和同期电抗的比値	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値	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。

		章节
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相对应)	4-2
$i_{\beta d}, i_{\beta q}$	轉子电流的纵軸及横軸分量	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
$'$	表示暂态电抗所用的上标一撇($x'=\sigma x_{\alpha 1}$及$k'=r/x'$),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
$Z_{\alpha 1}, Z_{\beta 1}$	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_d	5-14
$d; q$	表示纵轴与横軸量时所采用的下标	7-3
x_d, x_q	纵軸电抗与横軸电抗	7-3
x_2	对二次諧波的电抗或磁阻电抗	7-3
i_d, i_q	纵軸电流及横軸电流	7-7
θ	功率角	7-9
γ	表示横軸上轉子繞組用的下标	7-21
C	感应轉矩常数	8-2
ψ	摇摆的振幅	8-5
b	摇摆频率的标么值	8-5
B	慣性轉矩常数	8-6
M	同期轉矩常数	8-8
H	额定轉速下每千伏安容量内所儲存的动能	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，除了最簡单的情况外，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，举例来說，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。反过来說，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单总結里就可以看出：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，此后我們将引用这些文献。

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，以致一般在习慣上都假定L和M是定值，并且对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。

我們将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时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$\frac{1}{C}\int idt$。当电流是正弦地变化时，这些电势一般可用矢算法表出为jxI及$-jxI$。在由某一运行情况轉变到另一运行情况的时間之內，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满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：

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

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

为正也可为負。如果由电流 i_2 在电路 I 里所产生的磁通，和电流 i_1 在电路 I 里所产生的磁通同方向时，M_{12}就是正数。如果 M_{12} 是正数时，电压降 v_1 是和电流 i_2 同方向的。

1-3 克希荷夫方程式

在繪制电路图时，一般在习惯上都用箭头来表示所假定的每一电流的正方向，如图1-1内所示。电势 e_1 及 e_2 的正极用加(+)号来表示。当图1-1内的开关 S 閉合后，各电势的克希荷夫方程式是：

$$Ri+2L\frac{di}{dt}-L\frac{di_1}{dt}-e_2+e_1=0,$$

$$-L\frac{di}{dt}+(r+R_1)i_1+(L+L_1)\frac{di_1}{dt}-R_1i_2-e_1=0,$$

$$-R_1i_1+(R_1+R_2)i_2+L_2\frac{di_2}{dt}=0.$$

当采用馬克思威尔的环电流时，就象图 1-1 的情况一样，可以不必写出各个克希荷夫的电流方程式了，因为环电流表明的是第二定律所包含的同样原理。如果这些电阻和电感都不受电流大小的影响或者也不受电流变化方式的影响时，这些克希荷夫方程式就都是常系数的綫性微分方程式。这种型式方程式的解答共有两部分：补函数和特别积分。补函数，或者暫态电流，滿足使外加电势等于零时的方程式。就是說：暫态电流的变化方式只是取决于电路的常数，而与外加电势的数值无关。从另一方面来說，特別积分則是一个特解，它滿足所写出的方程式。

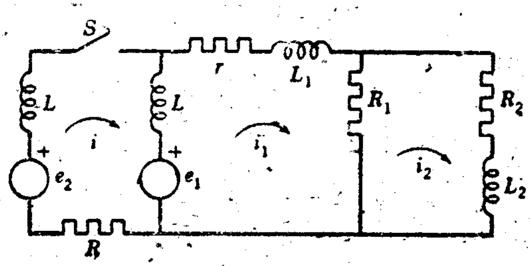

图 1-1

当所加的电势是定值的直流电势或周期性的电势时，特别积

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；不然的話，它們的波形就会不同，尽管二者的諧波分量可能都包含相同的周率。

1-4 暂态阻抗

暂态电流包含有数个分量，它們的普遍形式是 $i=I\epsilon^{pt}$。当电流是这样的形式时，对方程式（1.1）里所給的电势和电流之間的关系就变成：

$$v=rI\epsilon^{pt},\ v=LpI\epsilon^{pt}, v_1=M_{12}pI_2\epsilon^{pt}, v=\frac{1}{Cp}I\epsilon^{pt}.$$

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：

对电阻 r 来說： $Z(p)=\frac{v}{i}=r,$

对自感 L 来說： $Z(p)=\frac{v}{i}=Lp,$

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

对电容 C 来說： $Z(p)=\frac{v}{i}=\frac{1}{Cp}.$

計算这些元件串联、并联和他种組合联接的总結果阻抗的法則，則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 $Z_1(p)$，$Z_2(p)$…等串联接在一起，总結果阻抗 $Z(p)$ 是：

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

如果有两个阻抗 $Z_1(p)$和 $Z_2(p)$ 并联接在一起，它們的組合阻抗 $Z(p)$是：

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

举例来說，如果 $Z_1(p)=R_1+Lp$，和 $Z_2(p)=R_2+\frac{1}{Cp}$，它們并联的組合阻抗是：

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

如果把分子分母都乘以 Cp后，再把分子各項乘开，此式即可得到一个較好的形式，因此有：

$$Z(p)=\frac{R_2LCp^2+(R_1R_2C+L)p+R_1}{LCp^2+(R_1+R_2)Cp+1}.$$

如果$R_1=R_2=R$，及$L=R^2C$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，則有：

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

所以这样并联的两支，对所有的 p 值来說，都好象是一个电阻 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，不論在稳态或暂态情况下，这个并联的二支，就好象是一个电阻 R 一样。更普遍一些，我們能够证明：如果任何形式的电压 v 接到这个并联的二支阻抗上时，电压所供給它們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，它們的組合阻抗可由下式給出：

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

串-并联組合的阻抗可用这些原理的組合方法来求出。举例来說，对图1-2內排列的組合电路，它的两端点之間的阻抗 $Z(p)$是：