

交流电机过渡历程及 运行方式的分析

高景德編著

科学出版社

交流电机过渡历程及 运行方式的分析

高景德編著

科学出版社

1963

內 容 簡 介

本书是作者在其另一专著“同步电机理論及其运行方式的分析”的基础上結合專門課程的讲授及培养研究生的工作編写而成的。书中系統地分析了交流电机的过渡历程及运行方式，兼顧了初学和提高的需要。书中也包括了作者近年来在这方面所获得的一些研究成果和見解。

本书包括：交流电机稳态不对称运行方式的分析；同步电机的基本理論及分析方法；同步电机过渡历程及运行方式的分析；同步电机电磁轉矩的分析；同步电机稳定运行的分析；同步电机励磁調节的分析；交流电动机过渡历程及运行方式的分析等七部分。

本书可供电机制造专业、电力系统专业的研究生和科学技术人員参考之用，亦可作为高等院校有关专业的高年級学生的参考书。

交流电机过渡历程及 运行方式的分析

高 景 德 編 著

*

科学出版社出版 (北京朝陽門大街 117 号)

北京市书刊出版业营业許可証出字第 061 号

中国科学院印刷厂印刷 新华书店总經售

*

1963 年 3 月第 一 版

书号：2689 字数：611,000

1963 年 3 月第一次印刷

开本：787×1092 1/16

(京) 0001—2,350

印张：29 2/3 插頁：3

定价：4.70 元

序 言

交流电机是应用极为广泛的一种电机。对这种电机的过渡历程及运行方式加以系统而深入的了解,就具有重要的现实意义。

近几十年来,交流电机过渡历程和运行方式的研究成果,极为丰硕,有关书刊及资料也为数极多,但适合我国高等学校师生和科学技术人员参考的书刊仍嫌不足。随着我国高等教育和科学技术的迅速发展和提高,这种需要就显得更加迫切。

本书是编著者近几年在清华大学结合电机专门课程的讲授和研究生培养工作编写而成。内容包括有:交流电机稳态不对称运行方式的分析,同步电机的基本理论及分析方法,同步电机过渡历程及运行方式的分析,同步电机电磁转矩的分析,同步电机稳定运行的分析,同步电机励磁调节的分析,交流电动机的过渡历程及运行方式的分析等七部分。

在编写本书时,编著者尽可能照顾到初学这门课程的读者,也尽可能注意到要求进一步提高水平的工作人员的需要,因而在内容的取舍方面,既尽量考虑到由浅入深的系统性,也尽量注意到某些专门问题和新的科学成就的介绍;既尽量注意到理论的完整性,也尽量考虑到实际应用的联系和必要数据的收集。但为了不使本书篇幅过大,有关电机学、电路学、运算微积等基本知识均不再多加叙述。需要时,读者不难找到相应的参考书籍。同时,对一些需要较多篇幅论述的、更为专门的问题或正在探讨而尚未得到成熟应用的新问题,例如,同步电机离子励磁系统的详细分析,电力系统动态模拟及计算技术的应用问题,电机参数的计算方法,以及同步电机的异步化或纵横轴励磁和绕组导线直接冷却电机等问题,均未加以论述。这些问题已有不少专门论著或论文可供参考。

为了便于读者查阅起见,在本书附录中介绍了标么值和一些常用的数学公式。前者在教科书中一般都论述得比较简单,故在本书中,特别加以介绍。

本书利用了不少国内外已有著作的结果,主要的已经分别列为各章的参考文献,以便使读者了解本书内容的主要来源和进一步探讨某些感兴趣的问题;同时也表示对原著者的感谢。本书还包括了编著者近年来在这方面所获得的一些研究结果和见解。

本书可供电机制造专业、电力系统专业的研究生和科学技术人员参考之用,亦可

作为高等院校有关专业高年级学生的参考书。

在编写本书的过程中,曾得到清华大学电机系不少同志的帮助和支持,特别是曾在清华大学进修的高宝贤及张盖凡同志和在清华大学协助进行这一课程的教学工作的郑逢时及张麟征等同志。他们都分别阅读或校核了本书的某些章节,并提出了宝贵的意见。编著者特向他们表示深切的感谢。

本书在编著过程中,虽经多次修改,但缺点、错误在所难免,欢迎读者批评、指正,并请将宝贵意见寄至北京清华大学电机系。

編 著 者

1962年7月

目 录

序言	v
第一章 交流电机稳态不对称运行方式的分析	1
§ 1.1 不对称运行方式分析的基本概念	1
§ 1.2 同步电机不对称运行方式的分析	6
§ 1.3 变压器不对称运行方式的分析	12
§ 1.4 具有对称阻抗的电力系统的不对称故障分析	22
§ 1.5 对称异步电机的不对称运行方式的分析	36
§ 1.6 不对称运行的影响及后果	52
第二章 同步电机的基本理论及分析方法	55
§ 2.1 交流电机的过渡历程	55
§ 2.2 空心变压器过渡历程的分析	56
§ 2.3 同步电机过渡历程分析的一些基本概念	63
§ 2.4 $d, q, 0$ 坐标系统及运算电抗	71
§ 2.5 同步电机的标么值系统	76
§ 2.6 $\alpha, \beta, 0$ 坐标系统	80
§ 2.7 同步恆速轉动坐标系统 d_c, q_c	81
§ 2.8 复数分量和正轉及反轉分量	83
§ 2.9 同步电机的输出功率及电磁轉矩	88
§ 2.10 同步电机轉子的运动方程式及慣性常数	92
§ 2.11 同步电机运算电抗的等值电路	97
第三章 同步电机过渡历程及运行方式的分析	103
§ 3.1 同步电机的突然三相短路	103
§ 3.2 同步电机三相短路的突然拉开	129
§ 3.3 同步电机在稳态对称运行方式时的等值电路	133
§ 3.4 稳态异步运行方式时的同步电机的等值电路	137
§ 3.5 稳态两相短路时的同步电机的等值电路及負序阻抗	144
§ 3.6 稳态单相对中点短路时的同步电机的等值电路及負序阻抗	153
§ 3.7 轉子中无励磁电源,但在定子中通以直流电流时的同步电机等值电路	163
§ 3.8 同步电机轉子不动时,定子中通以单相电流	174
§ 3.9 同步电机轉子不动时,定子各相中輪換通以单相电流	176
§ 3.10 同步电机轉子不动时,定子中通以不对称的三相电压及电流	177
§ 3.11 同步电机定子中通以三相电流时,无励磁电源的轉子的异步旋轉	189
§ 3.12 負序电抗的間接测定法	191

§ 3.13 同步电机的突然两相短路	194
§ 3.14 同步电机的突然单相对中点短路	202
§ 3.15 同步电机的突然两相对中点短路	208
§ 3.16 同步电机与电容相联运行时的分析	226
第四章 同步电机电磁转矩的分析	235
§ 4.1 同步电机突然短路后的脉振转矩	235
§ 4.2 同步电机突然短路后的平均电磁转矩	249
§ 4.3 计算平均电磁转矩的负序电阻	262
§ 4.4 同步电机的稳态小值振荡	266
§ 4.5 同步电机在微值干扰条件下的一些物理过程	283
§ 4.6 同步发电机的准整步, 自整步及自动重投入	293
第五章 同步电机稳定运行的分析	309
§ 5.1 同步电机的静态稳定及其分析方法	309
§ 5.2 几个同步电机相联时的静态稳定	320
§ 5.3 同步电机的动态稳定及其分析方法	327
§ 5.4 几个同步电机相联时的动态稳定问题	338
§ 5.5 同步电机参数的改善及其影响	344
§ 5.6 同步电机的磁路饱和及其在稳定计算中的计入	359
第六章 同步电机励磁调节的分析	367
§ 6.1 同步电机的励磁调节及其对稳定的影响	367
§ 6.2 同步电机的励磁系统	372
§ 6.3 直流励磁电机的特性	382
§ 6.4 同步电机的灭磁	390
§ 6.5 同步电机的复式励磁及电磁式电压校正装置	396
§ 6.6 具有振荡频率的交变励磁对同步电机振荡的限制作用	401
§ 6.7 具有自动励磁调节装置的同步发电机的静态稳定分析	409
§ 6.8 同步发电机在突然增加负载时的电压降落	424
第七章 交流电动机的过渡历程及运行方式的分析	441
§ 7.1 异步电机过渡历程分析的基本概念	441
§ 7.2 异步电动机起动的分析	450
§ 7.3 异步电动机在恒速时的过渡历程	463
§ 7.4 异步电动机与电容并联运行时的分析	482
§ 7.5 同步电动机的异步起动	487
§ 7.6 同步电动机的一些运行问题	503
§ 7.7 同步电动机与异步电动机的一些比较	511
附录一 标么值	519
附录二 某些常用的三角等式	529
附录三 某些常用的三角级数	530

第一章

交流电机稳态不对称运行方式的分析

§ 1.1 不对称运行方式分析的基本概念

在稳态对称运行条件下,电机的各相都是对称的,所以,在分析时,可以按单相问题处理,计算比较简单。在对称运行时,电机的性能也较好(例如:损耗少、效率高、转矩均匀等)。所以,大多数电机都是按照这样的运行情况来设计,同时,也尽量设法在这样的条件下来使用。

但是,在实际应用中,并不可能经常达到这样的目的。不对称运行总会出现,有的是由于负荷本身的变化所引起,例如,单相负荷的必然存在(例如,电气火车);有的则是由于事故所引起;例如,两相短路,一相接地,和一相断开等(由于雷闪、碰线、开关及保险丝出毛病等);也有可能是由于一些临时措施,例如,利用二相及地线送电,五相送电(双回路系统)等。电源电压的不对称对用户是不利的。例如,电压即使增高不多,也会大大减少电灯的寿命;反过来,如电压降低时,就会大大降低电灯的利用率;热丝电灯的电压变化 $\pm 10\%$ 时,其亮度变化约为 $+37\%$ 及 -30% ,使用寿命变化约为 -30% 及 500% 。再以异步电动机为例,不对称电压将减少其起动转矩、最大转矩和效率。因此,在设计电机时就应该很好地考虑这些因素,在使用电机时就应该适当地选择保护设备及其他对策。为此,首先就需对电机的不对称运行方式加以了解和计算。

分析稳态不对称运行方式的最常用的,也是最好的方法是对称分量法。大家知道,对称分量法就是把不对称的三相电流或电压分成另外三套对称的电流或电压的办法,例如

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \frac{1}{3} (i_a + a i_b + a^2 i_c), \\ i_2 &= \frac{1}{3} (i_a + a^2 i_b + a i_c), \\ i_0 &= \frac{1}{3} (i_a + i_b + i_c). \end{aligned} \right\} \quad (1.1-1)$$

上式中 $a = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} = e^{j120^\circ}$ 为使時間向量旋轉 120° 的算子。

从数学上講,就是把三个变数 i_a, i_b, i_c 換成另外三个变数 i_1, i_2 和 i_0 。但是經過这种变换后,不对称綫路就可以利用对称綫路的理論来研究了,而后者是較易計算的。

求出 i_1, i_2 和 i_0 諸值后,必要时,就可根据下式求出 i_a, i_b 和 i_c 的数值。

$$\left. \begin{aligned} i_a &= i_{1a} + i_{2a} + i_{0a} = i_1 + i_2 + i_0, \\ i_b &= i_{1b} + i_{2b} + i_{0b} = a^2 i_1 + a i_2 + i_0, \\ i_c &= i_{1c} + i_{2c} + i_{0c} = a i_1 + a^2 i_2 + i_0. \end{aligned} \right\} \quad (1.1-2)$$

上式中

$$\left. \begin{aligned} i_{1a} &= i_1, & i_{1b} &= a^2 i_1, & i_{1c} &= a i_1, \\ i_{2a} &= i_2, & i_{2b} &= a i_2, & i_{2c} &= a^2 i_2, \\ i_{0a} &= i_{0b} = i_{0c} = i_0. \end{aligned} \right\} \quad (1.1-3)$$

这一步手續,有时是无必要的,例如在选择某些保护設備时,只要知道 i_1, i_2 和 i_0 就够了,并不需要知道 i_a, i_b 和 i_c 的数值。

因之,对称分量法的基本概念就是:首先把不对称的系統分成对称的系統,其次,再分別利用分析对称系統的方法来研究分出的每一系統,最后如需要时,再將它們适当地相加起来,就得到原来不对称的系統。

这种办法的理論根据是重迭定律,因之,在理論上講,它只能用于直綫性綫路中,即其中的参数不随电流及頻率的大小等而变化(我国电力系統的法定基波为 50 周波)。实际上,有些非綫性綫路中,也可以近似地利用对称分量法,但利用时須特別加以注意。

对称分量法一般只用来計算基波,高次諧波大多忽略。因为它用的是時間向量的概念,也就是用向量来代表随時間而正弦形变化的量的办法。

这种把不对称电流或电压分成对称电流或电压的观念,早在 1912 年就为史陶克威士 (Stokvis) 所指出。但完整的对称分量法則是在 1918 年由方尔泰斯克犹 (Fortescue) 提出的,后来經過瓦格奈尔 (Wagner), 爱汶士 (Evans) 和其他很多人进一步的发展,現在对称分量的方法已經成为一种应用很广和理論上很成熟的方法了。

对称分量法不仅可以成功地应用于三相系統,而且也可以成功地应用于任何多相系統。但由于三相系統特別重要,所以,本书只討論三相系統,而且在这个基础上,就不难学习及掌握其他多相系統时的应用方法了。

对称分量法在分析复杂的电力系統时,最能表现出它的方便和有用,因为它提供了利用計算台的理論根据,并且可以利用較方便的測量方法代替計算方法,因而可以

大大节省计算工作量。对称分量法在分析电机不对称运行方面也有很多方便之处，这些问题我们都将在后边予以适当的介绍。

对称分量法不仅在分析稳态不对称运行方式时，应用起来极为方便，而且在过渡历程的分析中，在适当的条件或假定下，也可利用，例如，电力系统动态稳定计算和突然短路计算等问题中就可利用。这些，我们将在研究电机过渡历程时，逐步予以说明。

利用对称分量法时，应该特别注意分清被研究线路的性质：

- (1) 线路本身的阻抗是对称的，但电压或电流是不对称的；
- (2) 线路本身的阻抗是不对称的（电压或电流当然也不对称）。

用对称分量法分析前一类问题时，很方便，很有效，好处很大。用对称分量法分析后一类问题时，一般是相当复杂的。这两类问题都将加以研究，但将特别着重介绍第一类问题。

（一）具有对称阻抗的电路

在这种情况下（参阅图 1.1-1），阻抗是对称的，但电流和电压是不对称的，如将 i_a , i_b , i_c 和 $\dot{U}_a$, $\dot{U}_b$, $\dot{U}_c$ 分成其对称分量时，则

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_{1a} &= \dot{I}_{1a} Z_1, \\ \dot{U}_{2a} &= \dot{I}_{2a} Z_2, \\ \dot{U}_{0a} &= \dot{I}_{0a} Z_0, \\ \dot{U}_{1b} &= \dot{I}_{1b} Z_1, \\ \dot{U}_{2b} &= \dot{I}_{2b} Z_2, \\ \dot{U}_{0b} &= \dot{I}_{0b} Z_0, \\ \dot{U}_{1c} &= \dot{I}_{1c} Z_1, \\ \dot{U}_{2c} &= \dot{I}_{2c} Z_2, \\ \dot{U}_{0c} &= \dot{I}_{0c} Z_0. \end{aligned} \right\} \quad (1.1-4a)$$

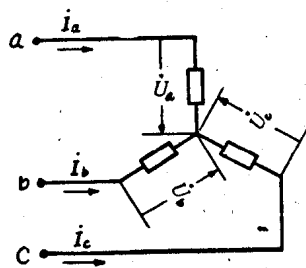


图 1.1-1

上式中 Z_1, Z_2 和 Z_0 为各相中的正序、负序和零序阻抗。它们可能互相相等，也可能互不相等，但不管怎样，每个序阻抗在各相中的值是完全相等的。例如，三相同步电机，其每相都分别具有 x_0, x_1 和 x_2 的电抗，但同时 $x_0 \neq x_1 \neq x_2$ 。而在三个同样的单相变压器联成 Y_0/Y_0 时，则不但每相分别具有 x_0, x_1 和 x_2 的电抗，而且 $x_1 = x_2 = x_0$ 。

在具有对称阻抗的电路中，由于各相序间没有依从关系[参阅 (1.1-4a) 式]，那就是说，每一相序电压只能产生本相序的电流。因之，其原来的线路可以利用另外三个如图 1.1-2 所示的对称的线路来代替。

为简便起见，我们以后将经常用 $\dot{I}_{0a}, \dot{I}_{1a}$ 和 $\dot{I}_{2a}$ ，即用 $\dot{I}_0, \dot{I}_1$ 和 $\dot{I}_2$ 来进行分析，因

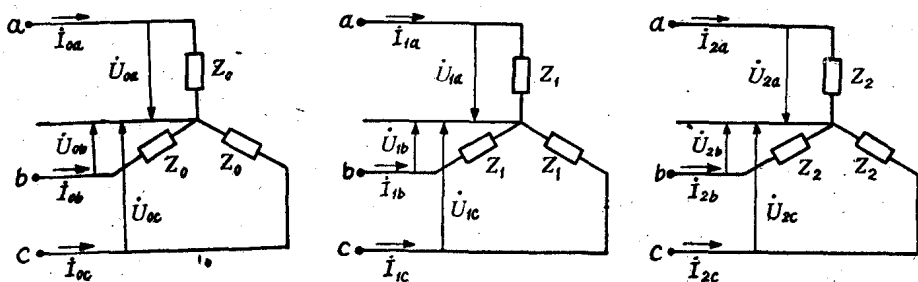


图 1.1-2

而有以下的关系式:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= \dot{I}_1 Z_1, \\ \dot{U}_2 &= \dot{I}_2 Z_2, \\ \dot{U}_0 &= \dot{I}_0 Z_0. \end{aligned} \right\} \quad (1.1-4)$$

因为上面的三个三相电路都是对称的, 因之都可以用如图 1.1-3 所示的单线图来代表。

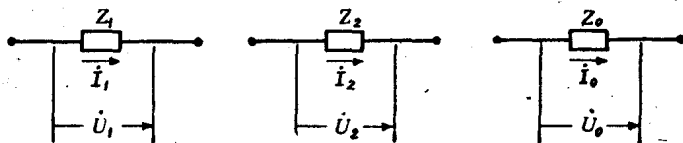


图 1.1-3

此种图示法称为三相电路的单线图, 它可大大简化画图的步骤。这种办法在讨论有关电力系统的问题时是经常利用的。它的理论基础是对称的三相系统可用单相的办法来分析。

(二) 无互感的不对称三相静止电路

在图 1.1-4 中, 令各相的阻抗分别为 Z_a, Z_b, Z_c 且 $Z_a \neq Z_b \neq Z_c$; 同时 $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ 及 Z_a, Z_b, Z_c 均不对称。

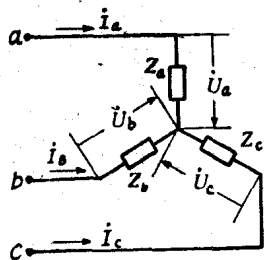


图 1.1-4

这种电路可用两种方法来研究:

(1) 先将 $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ 分为 $\dot{U}_1, \dot{U}_2$ 及 $\dot{U}_0$, 然后分别计算每组相序电压产生的电流(根据重迭定律)。此时, 每组相序的电压都是对称的, 但由于各相的阻抗不同, 因之, 每组相序电压所产生的电流都是不对称的, 计算也是相当繁复的。因此, 这种办法并没有什么好处, 还不如直接利用克希

荷夫 (Kirchhoff) 定律去解更为直接。

(2) 另一种方法较好, 它不但将不对称的电流、电压分成了对称分量, 而且也将不对称(或不相等)的三个阻抗分成了对称分量, 即将 Z_a, Z_b, Z_c 分为 z_0, z_1 及 z_2 :

$$\left. \begin{aligned} z_0 &= \frac{1}{3} (Z_a + Z_b + Z_c), \\ z_1 &= \frac{1}{3} (Z_a + aZ_b + a^2Z_c), \\ z_2 &= \frac{1}{3} (Z_a + a^2Z_b + aZ_c). \end{aligned} \right\} \quad (1.1-5)$$

上式中 z_0, z_1 及 z_2 称为零序、正序及负序的阻抗分量, 它们是复数算子, 而非向量。

在这种情况下, 不难证明:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_0 &= z_0 \dot{I}_0 + z_2 \dot{I}_1 + z_1 \dot{I}_2, \\ \dot{U}_1 &= z_1 \dot{I}_0 + z_0 \dot{I}_1 + z_2 \dot{I}_2, \\ \dot{U}_2 &= z_2 \dot{I}_0 + z_1 \dot{I}_1 + z_0 \dot{I}_2. \end{aligned} \right\} \quad (1.1-6)$$

前面已经指出, 在具有对称阻抗的电路中, 每相序电压只产生该相序的电流, 而与其他相序无关。但在具有不对称阻抗的电路中, 则完全是另一回事, 此时各相序间要相互发生作用, 即每一相序的电压除产生本相序的电流外, 还产生其他相序的电流。这是不难理解的, 因为它的阻抗是不对称的。例如, 对称的正序电压所产生的电流仍是不对称的电流, 此不对称电流即为各种相序电流之和。

当阻抗对称时, 即 $Z_a = Z_b = Z_c = Z$ 时, 则 $z_0 = Z, z_1 = z_2 = 0$, 因之

$$\dot{U}_0 = z_0 \dot{I}_0, \dot{U}_1 = z_0 \dot{I}_1, \dot{U}_2 = z_0 \dot{I}_2.$$

即在阻抗对称的电路中, 只有零序阻抗分量, 没有正序及负序阻抗分量。但必须特别注意, 这里所谓的正序、负序及零序阻抗分量(即 z_1, z_2 及 z_0)与前面在具有对称阻抗的电路中的正序、负序及零序阻抗(Z_1, Z_2 及 Z_0)在本质上是不同的。后者是对于正序、负序及零序电流的阻抗; 前者是把不对称阻抗成为正序、负序及零序的阻抗分量。

在很多情况下, 如电力系统中, 其中某些部分的阻抗是对称的, 而另一部分的阻抗则不对称。这时我们一般是利用上述的办法分别加以处理, 即具有对称阻抗的部分用具有对称阻抗的办法来处理, 具有不对称阻抗的部分用具有不对称阻抗的办法来处理, 最后再利用联接点的条件, 将他们的关系式写出而解之。

用对称分量表示时, 三相电路中总的有效功率为:

$$P = 3[U_1 I_1 \cos \theta_1 + U_2 I_2 \cos \theta_2 + U_0 I_0 \cos \theta_0]. \quad (1.1-7)$$

上式中 θ_1, θ_2 及 θ_0 分别为 $\dot{U}_1, \dot{I}_1; \dot{U}_2, \dot{I}_2$ 及 $\dot{U}_0, \dot{I}_0$ 间的相角。但每相中的有效功率

并不等于三相总有效功率的 $\frac{1}{3}$ 。此时由于各相不对称的关系,各相间的功率并不相等。

如果对于正序、负序及零序电流的电阻,各相都一样时,则

$$P = 3[I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 + I_0^2 r_0]. \quad (1.1-8)$$

但当各相的电阻不等时,则上式便不能应用。

一般只有发电机产生正序功率,同时不对称的线路将把正序功率转换为负序及零序功率。因之,线路中的不对称点起着负序及零序功率发电机的作用。

电流及电压的负序及零序不对称程度普通是用以下的比数来分别表示的:

$$\frac{U_2}{U_1}, \frac{U_0}{U_1} \quad \text{及} \quad \frac{I_2}{I_1}, \frac{I_0}{I_1}$$

因为在对称时只有正序电流或电压,故利用上述比数来表示不对称程度。

比数 $\frac{U_2}{U_1}$ 与 $\frac{U_0}{U_1}$ (或 $\frac{I_2}{I_1}$ 与 $\frac{I_0}{I_1}$) 同时说明其不对称情况,不能把它们合并起来,因为负序及零序电压或电流具有不同的特性。这些比可具有由 0 到 ∞ 的任何数值,实用中允许这些比数达到何种数值,则要根据研究对象的具体条件(同步电机、异步电机、变压器,还是输电线,以及他们的性能及结构等)来决定。

§ 1.2 同步电机不对称运行方式的分析

同步电机在运行中常常会发生不对称运行方式,这在上节中已经讨论过了,现在就来研究一些比较简单的同步电机的不对称情况,即短路发生在电机的出线头处,或者发生在对称的外部阻抗后边。但即使是这些简单的问题,如果用普通的方法来分析时,也还是很困难的,因为电机本身的阻抗在不对称运行时与对称运行时是不同的。对称运行时,同步电抗 x_s 是由定子漏磁及电枢反应(一个恒值的同步转速旋转的磁场)所决定,例如三相短路时的电流为 $\frac{E}{x_s}$ 。但在不对称运行时,由于定子绕组所

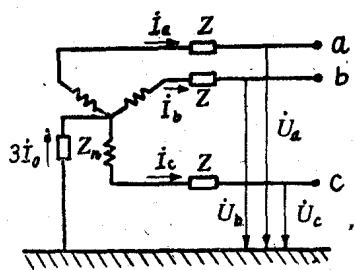


图 1.2-1

产生的已不是一个恒值的以同步转速旋转的磁场,而是一个大小变化的旋转磁场或者振荡磁场。因之,此时就不能简单的利用 E 及 x_s 来解决问题了,而必须应用对称分量的概念来研究。

如果电机的外部发生不对称时[参阅图(1.2-1)],则 $\dot{U}_a, \dot{U}_b, \dot{U}_c$ 及 $\dot{I}_a, \dot{I}_b, \dot{I}_c$ 均不对称。如将它们分成对称分量 $\dot{U}_0, \dot{U}_1, \dot{U}_2$ 及 $\dot{I}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ 后,则可分别加以

分析。

因为发电机发出的电势是对称的(假定定子绕组是对称的),即各相的电势大小相等而相角各差 120° ,故在电机中只产生正序电势,而无负序及零序电势。因为 $\dot{I}_1$ 为正序电流,故这一组三相电流应产生象对称运行时一样的电枢反应,相应地,电机每相的电抗即为同步电抗 x_s 。但是我们用对称分量法的语言来说时,就不说是同步电抗 x_s ,而说是电机的正序电抗 x_1 ,实际上 x_1 即 x_s ,于是得

$$\dot{E}_a - \dot{I}_1(Z_1 + Z) = \dot{U}_1 \quad (1.2-1)$$

上式中 Z_1 为电机的正序阻抗,

Z 为外部阻抗。

因为电机本身不发出负序电势,故电机中的负序电流实际上是由负序电压 $\dot{U}_2$ 产生的(负序电势是由电机外面的不对称所引起的),这组三相电流在电机中将遇到一定的阻抗,这个阻抗称为电机的负序阻抗。电机的负序阻抗不等于电机的正序阻抗,因为负序电流虽然也产生一个以同步转速旋转的磁场,但其转向与电机转子的转向相反,因而它将在转子中感应出二倍额定频率的交流电流(即 100 周波)的交流电流。由于电机转子是不对称的,所以,这个交流电流还要在定子中产生 150 周波的交流电流(正相序),而后者又要在转子中引起 200 周波的交流电流;这样往返作用的结果,将使定子及转子中产生无限多次的高次谐波电流。因此,负序阻抗相当于一种变压器作用的阻抗,其数值正象变压器短路时一样,主要取决于定子及转子绕组的漏磁。由于这些高次谐波的影响,同步电机的负序阻抗 Z_2 就随着电机外部情况的不同而不同,即其负序阻 Z_2 不是一个常数。不过为了简便起见,近似地还是把它当作常数。正序电流则完全不同,它将产生一个恒值的同步转速的与转子没有相对运动的旋转磁场,并在转子中不感应出电流,因之,正序电抗正象变压器开路时一样,主要决定于定子绕组的总磁链,即其互磁与漏磁之和(即 x_s)。

对于负序电压及负序电流,可得下列关系式:

$$\dot{U}_2 = -\dot{I}_2(Z_2 + Z) \quad (1.2-2)$$

上式中 Z_2 为电机的负序阻抗。

此处 $\dot{U}_2$ 及 $\dot{I}_2$ 均代表基波数值,高次谐波暂不考虑。

电机也不发出零序电势,电机中的零序电流也是由零序电压 $\dot{U}_0$ 产生的。零序电流也会遇到一定的阻抗,这个阻抗称为零序阻抗。因为三相中的零序电流是同相的,同时,电机定子的三个相绕组在空间又互相相差 120° ,因此在电机定子中产生的越过气隙进入转子的磁通很少,一般可以忽略不计。所以,零序电流在电机中遇到的电

抗主要是定子绕组的漏抗,但此一漏抗与正序及负序电流所遇到的定子绕组的漏抗不同,因为各相电流间的相角关系不同。

对于零序电压及电流,可得下列关系式:

$$\begin{aligned}\dot{U}_0 &= -\dot{I}_0(Z'_0 + Z) - 3\dot{I}_0 Z_n = -\dot{I}_0(Z'_0 + Z + 3Z_n) = \\ &= -\dot{I}_0(Z_0 + Z).\end{aligned}\quad (1.2-3)$$

上式中 Z'_0 为电机的零序阻抗;

$Z_0 = Z'_0 + 3Z_n$ 为电机及中线的总零序阻抗。

有了(1.2-1), (1.2-2)及(1.2-3)三个基本关系式后,就可进一步来具体分析同步电机的不对称运行方式了。

(一) 两相短路

这种运行方式在实际运行中是会经常碰到的,可能为电机外边某二线短路(如图 1.2-2a),也可能为单相负荷,或三相负荷断开一线(图 1.2-2b)。

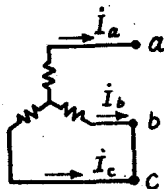


图 1.2-2a

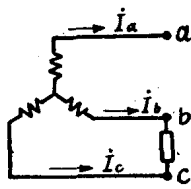


图 1.2-2b

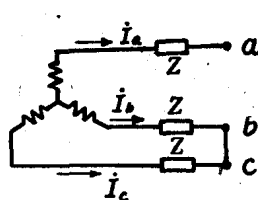


图 1.2-2c

在单相负荷时或三相负荷时断开一线(图 1.2-2b),电机外部阻抗是不对称的,但我们也可认为它是对称的,只要假定在 a 相中也存在着此单相负载阻抗的一半即可。这是可以的,因为 a 相无电流,认为 a 相有这一阻抗的存在并不影响研究的结果。因此,图 1.2-2b 之单相负荷就变成图 1.2-2c 的二相短路情况了。此时, Z 等于单相负荷阻抗的一半。

很明显,在二相短路时,短路点有如下的关系式:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= 0, \\ \dot{I}_c &= -\dot{I}_b, \\ \dot{U}_c &= \dot{U}_b. \end{aligned} \right\} \quad (1.2-4)$$

(1.2-1)式至(1.2-3)式中共有 6 个未知数 ($\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0$ 及 $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$),因此这些式子与(1.2-4)式的三个式子合起来就可求解了。解这些方程式时应先将(1.2-4)中的电压及电流分成相应的对称分量。

根据对称分量的基本关系式及(1.2-4)式的前二式,可得

$$\begin{aligned} \dot{I}_0 &= 0, \\ \dot{I}_1 &= j \frac{\dot{I}_b}{\sqrt{3}}, \\ \dot{I}_2 &= -j \frac{\dot{I}_b}{\sqrt{3}}. \end{aligned}$$

因之

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2,$$

又

$$\dot{U}_1 = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + a\dot{U}_b + a^2\dot{U}_c),$$

$$\dot{U}_2 = \frac{1}{3} (\dot{U}_a + a^2\dot{U}_b + a\dot{U}_c).$$

故根据(1.2-4)式第三式可知

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2,$$

代入(1.2-1)及(1.2-2)式可得

$$\dot{E}_a - \dot{I}_1(Z_1 + Z) = \dot{U}_1 = \dot{U}_2 = -\dot{I}_2(Z_2 + Z) = \dot{I}_1(Z_2 + Z).$$

解之,即得

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_a}{Z_1 + Z_2 + 2Z} = -\dot{I}_2 \quad (1.2-5)$$

于是

$$\dot{I}_b = -\dot{I}_c = \dot{I}_0 + a^2\dot{I}_1 + a\dot{I}_2 = \frac{-j\sqrt{3}\dot{E}_a}{Z_1 + Z_2 + 2Z}. \quad (1.2-6)$$

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_2 = \dot{I}_1(Z_1 + Z) = \dot{E}_a \frac{Z_2 + Z}{Z_1 + Z_2 + 2Z}. \quad (1.2-7)$$

因 $\dot{I}_0 = 0$, 故当电机中点直接或者通过阻抗接地时, 零序电压为:

$$\dot{U}_0 = -0 \times Z_0 = 0. \quad (1.2-8)$$

如中点不接地时, 则 $\dot{U}_0 = -0 \times \infty = \text{不定}$.

但这只是数学上的说法而已。实际上, 电机对地之间总会有一些漏电导和电容,

因之, Z_0 虽然很大, 但并非无限大, 因为 $\dot{I}_0$ 等于零, 故 $\dot{U}_0$ 仍等于零。

在不接地的系统中, 静电电压是存在着的, 但它与交流的零序电压根本不同。

有了 $\dot{U}_1, \dot{U}_2$ 后, 便可算出 $\dot{U}_a, \dot{U}_b$ 及 $\dot{U}_c$:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_a &= 2\dot{E}_a \frac{Z_2 + Z}{Z_1 + Z_2 + 2Z}, \\ \dot{U}_b &= \dot{U}_c = -\dot{E}_a \frac{Z_2 + Z}{Z_1 + Z_2 + 2Z}. \end{aligned} \right\} \quad (1.2-9)$$

(二) 单相接地

这种运行方式在实际运行中也是经常出现的,可能为电机外边某相碰地(图 1.2-3a),也可能是电机供给单相负荷或供给三相负荷而二线断开(图 1.2-3b)。

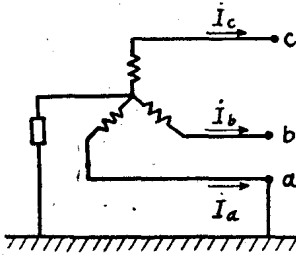


图 1.2-3a

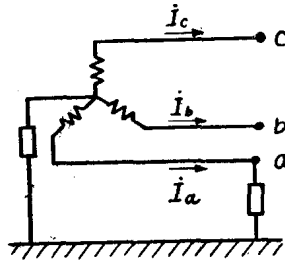


图 1.2-3b

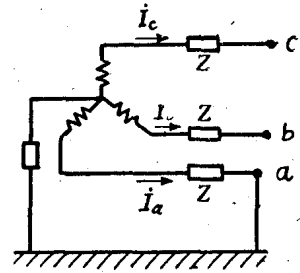


图 1.2-3c

在单相负荷或三相负荷而二线断开时(图 1.2-3b),电机的外部阻抗是不对称的。但我们可以认为它是对称的,只要假定在其他二相中也有同样的阻抗就行了。因为其他两相的电流为零,这样假定并不影响计算的结果。如是,图 1.2-3b 可当作图 1.2-3c 的单相短路来计算。

不难看出,在短路点有

$$\left. \begin{aligned} i_b &= 0, \\ i_c &= 0, \\ \dot{U}_a &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.2-10)$$

由此可得

$$i_0 = \frac{1}{3} i_a = i_1 = i_2,$$

$$\dot{U}_1 = -(\dot{U}_0 + \dot{U}_2).$$

而

$$\dot{U}_2 = -i_2(Z_2 + Z) = -i_1(Z_2 + Z),$$

$$\dot{U}_0 = -i_0(Z_0 + Z) = -i_1(Z_0 + Z),$$

故

$$\dot{U}_1 = i_1(Z_2 + Z_0 + 2Z) = \dot{E}_a - i_1(Z_1 + Z).$$

即

$$i_1 = \frac{\dot{E}_a}{Z_1 + Z_2 + Z_0 + 3Z} = i_2 = i_0. \quad (1.2-11)$$

于是得