

高等学校交流讲义

电力系统电磁暂态过程

張鍾俊編

只限学校内部使用



中国工业出版社



本书叙述电力系统电磁暂态过程的分析及计算方法。着重分析静止电路和同步电机的电磁暂态过程；较详细地讨论电力系统简单故障及复杂故障的具体计算方法；并对远距离输电短路时的电磁暂态过程及同步电机的自励磁现象进行扼要的分析。

本书可作为高等学校发电和高压专业有关课程的教学用书，也可供电力系统设计及运行工程技术人员参考。

电力系统电磁暂态过程

張鍾俊編

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑(北京阜外月坛南露房)

中国工业出版社出版(北京佟麟阁路丙10号)

(北京市书刊出版事业许可证出字第110号)

中国工业出版社第二印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 $12^{3/4}$ ·字数306,000

1961年8月北京第一版·1961年12月北京第二次印刷

印数3,234—4,113·定价(10-6)1.55元

*

统一书号: 15165·675(水电-98)

序

电力系统电磁暂态过程是发电厂、电力网及电力系统专业的一門专业课程，应该为其他专业課打好理論基础，并应该直接为本专业的工程实践服务。因之，本課程必須以理論分析与实际計算并重，通过这一課程的学习，进一步鍛炼学生的独立分析能力，并培养較熟练的計算技巧。

在理論分析方面，較原有的“电力系统短路”課程扩大和提高，以适应电力系统迅速发展的需要。在实际計算能力方面，要求能进行簡單故障或复杂故障的分析計算，并能熟悉計算工具的应用。

本书內容基本上与1959年教学計划內所規定的电力系统暂态过程教学时数（电力系统电磁暂态过程和机电暂态过程总学时共126学时，其中包括实验課18学时，习题課4学时）相适应。书中前面四章（第1~4章）着重解决理論分析能力的提高，而第5~7章着重培养計算能力。书中第4、8、9三章內容，一般沒有包括在原先的“电力系统短路”課程以內，各校可視实际情况灵活掌握。估計全部讲授时数可控制在52学时左右。实验課和习题課另占12小时。課外习题時間約需30小时左右。书中編有数字例题20个，可供习题課的应用。每章后的思考題是为了巩固概念用的，可供学生課外复习或小組討論之用。

书中沒有叙述計算工具（直流及交流計算台等）的构造和具体使用方法，各校可根据設備实际情况，在实验課中进行。

书中亦沒有列入习题；一部分习题可在本书末的参考文献(7)中选取。

本书緒論由黃家裕同志执笔，其他各章由張钟俊同志执笔。在編写过程中，曾进行专题討論。全书由黃家裕同志担任校閱；吳际舜同志（第2~3章）及岭文輝同志（第2、6、9三章）亦分別校閱各章。此外，胡树章和秦书勤同学負責全部例题的核算工作。

由于編者学术水平的限制，并对书中某些問題沒有深入的研究，因之本书质量受到一定的限制。希望兄弟学校在試用过程中，不断提出批評和建議，共同改进，共同提高。

上海交通大学

发电厂、电力网及电力系统教研組

1961年5月

目 录

序言	
緒論	4
第一章 三相静止电路的电磁暂态过程	7
§1-1 三相电路对称短路时的暂态过程	7
§1-2 双繞組变压器短路时的暂态过程	13
第二章 同步电机基本方程	23
§2-1 同步电机的回路方程和磁鏈方程	23
§2-2 坐标变换	27
§2-3 戈列夫-派克方程	33
§2-4 同步电机的稳态运行特性	37
§2-5 具有阻尼繞組同步电机的基本方程	41
§2-6 同步电机的运算电抗	43
第三章 同步电机三相短路电磁暂态过程	47
§3-1 沒有阻尼繞組同步电机的突然三相短路	47
§3-2 沒有阻尼繞組同步电机三相短路时的电流算式	54
§3-3 具有阻尼繞組同步电机的突然三相短路	58
§3-4 强行励磁对同步电机三相短路电磁暂态过程的影响	69
第四章 同步电机的不对称短路	74
§4-1 不对称短路时高次諧波的形成	75
§4-2 用 α 、 β 、0 坐标系統表明的戈列夫-派克方程	77
§4-3 同步电机端二相短路时电磁暂态过程分析	80
§4-4 同步电机端单相短路时的短路电流算式	88
§4-5 同步电机的逆序电抗	91
第五章 电力系统序网和各序参数的計算	94
§5-1 不对称三相电路中对称分量法的应用	95
§5-2 架空綫路的阻抗	99
§5-3 電纜的阻抗	108
§5-4 架空綫路的容納	110
§5-5 电力系统序网的建立	114
第六章 电力系统的故障分析	119
§6-1 简单不对称短路的复合序网及順序等效定則	120
§6-2 电流分布系数和轉移阻抗	125
§6-3 电压和电流对称分量經变压器的变换	129
§6-4 非全相运行的复合序网	131
§6-5 复故障的复合序网	133
§6-6 順序导出网络	137
第七章 电力系统短路电流实用計算法	141

§7-1	基本假设	142
§7-2	短路电流非周期分量的实用计算	143
§7-3	起始次暂态电流和冲击电流的实用计算	144
§7-4	运算曲线法	149
§7-5	三相短路时运算曲线的应用	154
§7-6	不对称短路时运算曲线的应用	160
第八章	远距离输电线路短路时电磁暂态过程	164
§8-1	远距离输电线路的等效网络	164
§8-2	远距离输电线路三相短路电磁暂态过程分析	166
§8-3	输电线路三相短路电磁暂态过程的简化计算	175
§8-4	输电线路不对称短路暂态过程计算	178
第九章	同步电机的自励磁	181
§9-1	同步电机的复数运算用网络	181
§9-2	同步电机接有集中电容负荷时的自励磁条件	184
§9-3	同步电机自励磁的物理过程	189
§9-4	自励磁边界曲线的简化绘制	191
附录		194
§1	标么值	194
§2	拉氏变换	198
§3	古尔维茨判据	202
参考书		205

緒 論

发电厂中生产的电能通过电力网输送给用户，输送到用户的电能，又按用户的需要变换成其他种类的能。

动力系统就是生产、输送和使用各种能量的元件的总体。因之，动力系统不仅包括发电机、变压器、输电线及负荷，还应该包括锅炉、水库、原动机及厂用辅助机械等。

图1示动力系统的简要示意图。

电力系统是动力系统的一部分，包括发电机、变压器、输电线及负荷。

电力系统中的各元件，经常处于各种不同性质的能量变换和输送的运动过程中。在转动的电力系统元件中，例如在发电机和电动机中，运动过程主要由定子磁场和对它具有相对位移的转子磁场的相互作用所引起。这种运动过程，称为机电过程。在变压器、输电线等电力系统元件中，运动过程并不牵涉到角位移等机械

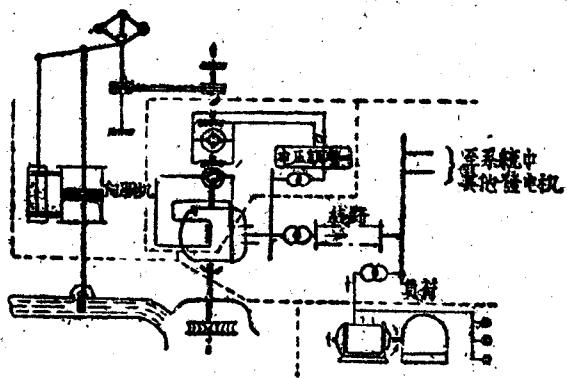


图1 动力系统简要示意图

量，这时产生的运动过程，称为电磁过程。原动机及调速器中的运动过程，以及原动机管道中发生着的流体运动过程，则称为机械过程。

事实上，上述的三种过程之间，存在着相当错综的联系。例如，当发电机端发生短路时，除了电流、电压、功率、电磁转矩等发生变化外，转速和角位移也同时发生变化，并影响原动机的功率输入。也就是说，这三种过程实际上是同时进行的。

电力系统中的电磁过程与机电过程是“电力系统暂态过程”课程的主要对象。

电力系统的运行情况用各元件的运行参数来表明。元件的运行参数是表明元件输入端和输出端能量变换和输送过程变化的物理量，例如各支路的电流、功率、各结点的电压、发电机转矩、转速、角位移等。系统的运行参数与元件参数不同。元件参数只是在上述能量变换和输送过程中表现该元件特性的物理量，如发电机、变压器、输电线的阻抗，发电机和电动机的惯性常数等。

工农业生产与人们的日常生活，要求电力系统可靠地供给高质量的电能，即要求各元件的运行参数(额定电压、额定频率等)经常稳定在正常工作所容许的范围内。究竟这要求能否满足呢？事实上，由于运行着的电力系统经常存在着或小或大的扰动，如负荷的波动，工质温度和压力的变化，设备的操作，以及发生短路故障等，因此就有两类问题要加以研究。一类问题研究电力系统在遭受极微小的扰动时它的运动过程的性质，即运行参数能否在遭受极微小的扰动后，恢复到原来的正常数值。这类问题通常称为电力系统的静态稳定问题。另一类问题研究电力系统在遭受大扰动时它的运动过程的性质。电力系统的动态稳定，是这类问题中的一个。

上述两种电力系统运动过程，都属于电力系统暂态过程的范畴。因此，电力系统暂态过程是研究电力系统运动过程规律的科学。

当然，在掌握了电力系统的运动规律以后，还必须能动地改造客观世界。例如，当我们发现某一电力系统在某一运行方式下静态不稳定时（即在小扰动下运行参数不能恢复到原来的正常数值），就可采用元件参数的补偿、励磁调整装置等措施来提高运行的静态稳定性。又如，在设计电力系统的主接线时，通过计算发现短路电流的数值太大，就可采用电抗器、母线分段或其他措施来消除短路电流过大的危险性。

由于电能的生产、输送和使用过程，实际上是同时进行的。所以前面提及的三种运动过程（机电、电磁和机械运动过程）之间具有极为紧密的相互影响。一般地讲，在分析电力系统的运动过程时，应该同时考虑到各元件中的电磁过程（功率、电压、电流等的变化），机电过程（转矩、转速等的变化）甚至机械过程。可是，不能由此得出结论，凡是在分析电力系统中的运动过程时，必须经常考虑到所有各运动过程间的联系。实践证明，我们可以根据我们需要解决的具体工程技术问题，采用一些合理的假设，忽略一些元件间的相互影响，抓住客观事物发展过程中的主要矛盾来进行研究。这样不仅便于研究，更重要的还在于能够紧紧地抓住客观事物的本质。

这种分析方法，可以从下例中得到说明。

图 2a 示电力系统某一发电机在遭受大扰动后运行参数变化的波形图：定子电流 I 、空载电势 E_0 、暂态电势 E'_0 及发电机功角 δ 对时间的变化曲线。图 2b~2d 是采用各种不同假设的计算结果。

比较图 2b 与图 2a 可以看到，其中的定子电流曲线，是相当接近的，因此按转速和功角不变的条件而求得的定子电流值，可用于选择电气设备等。二图中功角 δ 曲线间虽然存在着很大的差别，但是对选择电气设备而言， δ 的准确与否，不起作用。比较图 2c 与图 2a，可以看到二者的功角 δ 曲线相当接近，因此按 E'_0 恒定、且不计算定子电流非周期分量的条件而求得的功角 δ ，一般可用以判断发电机间能否保持同步运行。如果要求功角 δ 具有更高准确度的计算结果，那末可以采用计算及电势变化，但仍不计算定子电流非周期分量的假设。图 2d 即示采用这一假设后所得的、与实际过程更为接近的计算结果。

图 2b 是按戈列夫-派克方程来求得的计算结果，其中不仅考虑了电磁过程而且也考虑了机电过程。所得的结果与实验波形图非常近似，二者间所存在的微小差别，只是由于进行计算时，没有计入电机中的磁饱和现象而引起。

由上面的例子可见，在进行工程问题的研究

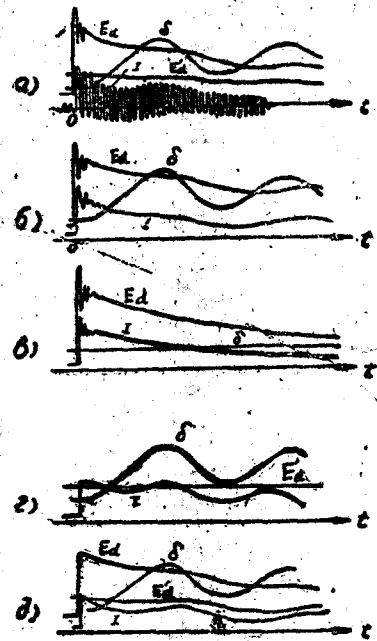


图 2 采用不同简化条件研究电力系统运行参数变化的比较

a) 暂态过程的实验波形图；b) 考虑了电磁过程和机电过程的计算结果；c) 假定转速和功角 δ 不变的计算结果；d) 假定 E'_0 维持恒定并不计算定子电流非周期分量的计算结果；e) 计算及电势变化，但仍不计算定子电流非周期分量的计算结果。

时，应该根据研究的具体对象，采用一些假设，使复杂的问题简化地进行分析计算，获得一个能够满足实际工程需要的近似解答。

随着生产发展的需要，电力系统日益扩大和复杂化，一些过去不考虑的因素，将根据研究对象性质的不同，可能会对电力系统运动过程显示着重大的而且有时是决定性的意义。譬如，为选择电器而计算短路电流时可将发电机转子间的功角 δ 当做不变，但在为整定互型系统中的继电保护装置，而进行短路电流的计算时，有时必须考虑系统中发电机转子间的摇摆。又如，自从电力系统中出现了超高压远距离输电线路以来，也必须考虑线路电容及串联电容对电力系统电磁过程的影响。这些电容的影响不仅表现在量的方面，而且也表现在运动过程的性质方面。当线路电容与发电机的电抗配合得不恰当时，可能输电系统会产生自励磁现象。再如，随着电力系统容量的扩大，运行可靠性要求的提高，就有必要研究电力系统的异步运行问题，以便利用同步电机的异步运行方式来提高系统运行的可靠性。在研究异步运行时，电力系统中的机电及电磁过程固然要研究，因为这是研究的主要对象；并由于需要研究的时间阶段大大超过零点几秒。连原动机及其调速器的机械过程甚至于变频器中的机电过程与机械过程，有时也必须加以考虑。这种工程实际的需要，在一定的程度上推动了电力系统运动过程的理论发展，丰富了电力系统暂态过程这门科学内容。

必须指出，在解决工程技术问题时，不应该单纯地追求数学上、理论上的严格性、完整性，以及考虑到影响电力系统运动过程的所有因素。这样做往往会使问题无法解决，或者解答的形式极为繁琐而失去工程意义。当然，不正确的简化和假设或把问题孤立起来研究，必然会导致错误的结论。应该一方面重视严格的理论对解决实际问题的指导意义，但一方面也必须从实际出发根据具体对象的具体条件，利用理论来进行具体的分析。

本书内容主要讨论电力系统的电磁暂态过程，即在发电机转速当做不变的条件下研究电力系统的运动过程，包括小扰动和大扰动的运动过程。发电机是电力系统中最主要和最复杂的元件。发电机本身定子和转子之间具有相对运动，它一边与变压器及线路相联，而另一边又与原动机直接耦合。因之，本课程的内容是环绕发电机的电磁暂态过程而安排的。通过本课程的学习，要求学生能够牢固地掌握静止电路及同步电机电磁暂态过程的物理本质，打下牢固的理论基础，并且能够熟练地掌握电力系统短路电流的计算方法。前者主要反映在第一、二、三、四章内，后者则主要反映在第五、六、七章内。第八、九章扼要分析远距离输电线路的电磁暂态过程及同步电机的自励磁现象，反映这门科学的新发展的内容。

输电线路及变压器中有关电磁波运动过程的研究，不包括在本课程范围内，这类问题，由高压工程的有关书籍专门讨论。

第一章 三相静止电路的电磁暂态过程

在现代电力系统中，不同元件联结在一起，其中出现的暂态过程是非常复杂的。在进行分析时，应该针对具体情况，采用一定的假设来简化问题。在本章中，我们进行三相静止电路发生三相短路时的电磁暂态过程分析，假设电力系统中电源频率恒定及电势的幅值恒定不变，并不考虑线路电容及负荷的影响。

在电工原理中，我们已学过具有集中参数线性电路的暂态过程^①。应用最广的暂态过程分析方法有经典法、拉氏变换法和福里哀变换法(或频率法)。在本章中，我们应用经典法进行分析，因为它能够最清楚地说明暂态过程的物理概念，而拉氏变换法将从第三章起再开始广泛的应用，因为它可以很简便地进行暂态过程的演算工作。这样安排是为了能够全面地掌握这两种有力的分析武器。虽然福里哀变换法实质上是拉氏变换法的特殊情况，但也有其独特的用途，目前在暂态过程分析中应用日广。可是，为了适当地控制本书的篇幅，今后都不采用。

下面先分析三相静止电路的电磁过程，以便对三相电路中的周期分量、非周期分量、冲击电流等术语获得明确的物理概念。然后对双绕组变压器对称短路时的暂态过程进行分析，推求出双绕组变压器的时间常数算式及其等效网络；并开始应用磁链守恒原理来解释自由电流的根源，以便为同步电机的暂态过程分析建立部分的物理基础。

§1-1 三相电路对称短路时的暂态过程

在本节中，我们首先分析简单三相 $R-L$ 电路中发生突然对称短路的暂态过程。所谓对称短路，是指短路后仍旧是三相对称电路的那种短路方式。为了简化分析起见，发电机内部的暂态过程暂不考虑，即假设这一电路是由无限大功率电源供电的。所谓无限大功率电源，就是它的电压为一恒定振幅和恒定频率的正弦电压波，并且不具有任何内电抗。事实上，无论电力系统多大，它的电源总有一个确定的容量，并具有一定的内电抗，因而发电机的端电压值并不能绝对保持不变。可是，当电力系统短路点很远时，虽然短路点的电压将在短路后突然降低，短路支路中电流将突然增大，但这些变化并不显著地引起电源电压的变化。

如图1-1所示，当在 K 点突然发生了三相短路时，这个电路即被分成二个独立的回路，其中一个仍与电源相接，而另一个变为短接回路。在短接回路中，电流从它原先的

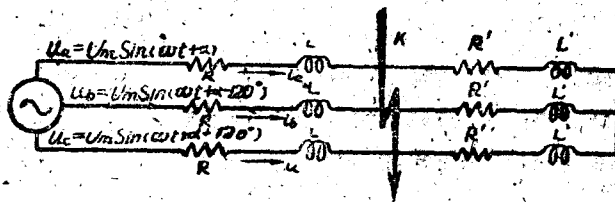


图 1-1 简单三相电路的突然对称短路

① 参阅电工理论基础，第十二册，第十二章，上海交通大学电工原理教研组编，人民教育出版社出版。

数值(称为初值)不断地衰减,一直衰减到磁场中所储藏的能量全部变为电阻中所消耗的热能为止。在与电源相联的一个回路中,因为它的阻抗比原先小,所以其中的稳态电流值必将增大。同时,电流和电压间的相角,一般也要改变。对这一回路,每相中电流的瞬时值,应该满足下列微分方程:

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} = (R + Lp)i = Z(p)i \quad (1-1)$$

或
$$i = \frac{u}{Z(p)} \quad (1-2)$$

式中 $p = \frac{d}{dt}$ ——对时间进行微分的运算符号。

下面先就a相中的暂态电流进行分析。式(1-1)的稳态分量电流,由电工原理,我们知道是微分方程(1-1)的特解,等于:

$$i_{\infty} = i_n = \frac{U_m}{Z} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) = I_{nm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) \quad (1-3)$$

式中 i_n ——短路电流的周期分量;

$Z = R + j\omega L$ ——短路回路每相的阻抗;

φ_k ——短路电流和电压间的相角;

α ——电压的合闸相角,决定于 $t=0$ 时电压值的角度;

$$I_{nm} = \frac{U_m}{Z} \text{——稳态短路电流的最大值。}$$

式中 i_{∞} 的下角注 ∞ 代表 $t \rightarrow \infty$ 即稳态时的瞬时电流值。

短路电流中的自由分量衰减的时间常数可从微分方程(1-1)的特征方程:

$$R + Lp = 0. \quad (1-4)$$

的根的倒数求得。从上式解 p , 得:

$$p = -\frac{R}{L} = -\frac{1}{T_a},$$

式中 $T_a = \frac{L}{R}$ ——短路回路的时间常数。

所以短路电流的自由分量电流为:

$$i_{\alpha} = C e^{-\frac{t}{T_a}}. \quad (1-5)$$

这里的自由分量,称为非周期分量,因为它是不断减小的直流分量。非周期分量的减小速度,与电路中 R/L 的比值有关,即与时间常数 T_a 有关。就a相而言,式(1-1)微分方程的通解是:

$$i_{\alpha} = I_{nm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + C e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (1-6)$$

式中 C 是积分常数,其值由初始条件所决定。

在含有电感的电路中,根据楞次定律,刚短路前电流的瞬时值(用下角注 $|0|$ 表明)必须与短路发生瞬间电流值(用下角注 0 表明)相等,即通过电感的电流是不能突变的,因之,

$$i_{|0|} = i_{n0} + i_{\alpha 0} = I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_k) + C = I_{m0} \sin(\alpha - \varphi)$$

式中 $i_{|0|} = I_{m0} \sin(\alpha - \varphi)$ ——短路前一瞬间的电流瞬时值;

i_{n0} ——短路发生瞬间($t=0$)短路电流周期分量的瞬时值;

$i_{\alpha 0}$ ——短路发生瞬间($t=0$)短路电流非周期分量的瞬时值。

所以:
$$C = i_{\alpha 0} = i_{101} - i_{n0} = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_k) \quad (1-7)$$

将式(1-7)代入(1-6), 便得:

$$i_a = I_{nm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k) + [I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_k)] e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (1-8)$$

由上式可见, 短路电流的通解, 由下列两部分所组成:

a) 周期分量 $I_{nm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$, 即微分方程(1-1)的特解;

b) 非周期分量 $[I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_k)] e^{-\frac{t}{T_a}}$, 即微分方程(1-1)的补充函数。

这是从数学分析而求得的电流算式。必须指出, 在决定补充函数的积分常数 C 时, 也就是在决定短路电流自由分量的初值 $i_{\alpha 0}$ 时, 我们曾应用一个重要的条件, 即电感性电路中电流不能突变或磁链不能突变的条件。在电力系统暂态过程的分析中, 这一条件称为磁链守恒原理。应用这一原理, 可以很清晰地说明电感性电路短路时出现的电流自由分量的物理本质。

图1-2示短路开始瞬间上述短路电流各分量的矢量关系。 i_{101} 为 i_a 在时间轴上的投影; i_{n0} 为 i_{na} 在时间轴上的投影; $i_{\alpha 0}$ 为 $(i_a - i_{na})$ 在时间轴上的投影。在发生短路以前, 通过电路的电流是稳态电流 i_a (其瞬时值算式为 $I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi)$), 而短路后的稳态电流则为 i_{na} (其瞬时值算式为 $I_{nm} \sin(\omega t + \alpha - \varphi_k)$)。为了要使通过电感 L 的电流瞬时值在短路前后瞬间保持不变, 即电感 L 中的磁链保持不变, 电路中必须产生一个非周期分量 [其初值 $i_{\alpha 0} = I_m \sin(\alpha - \varphi) - I_{nm} \sin(\alpha - \varphi_k)$]。但由于这一电路中并无直流电势的作用, 所以这样产生的非周期分量必须按指数律而衰减。电路的电阻 R 愈大, 非周期分量的衰减速度也愈快。由于 a 相电流自由分量的初值 $i_{\alpha 0}$ 与短路的合闸相角 α 有关, 所以, 当矢量 $(i_a - i_{na})$ 与时间轴平行时, $i_{\alpha 0}$ 值最大; 当它与时间轴垂直时, $i_{\alpha 0}$ 为零, 即自由分量不存在。

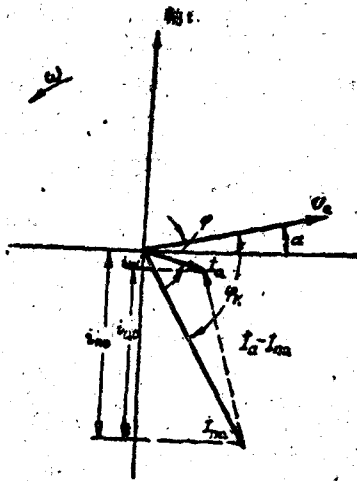


图 1-2 电路突然短路时 a 相中电流分量的矢量图

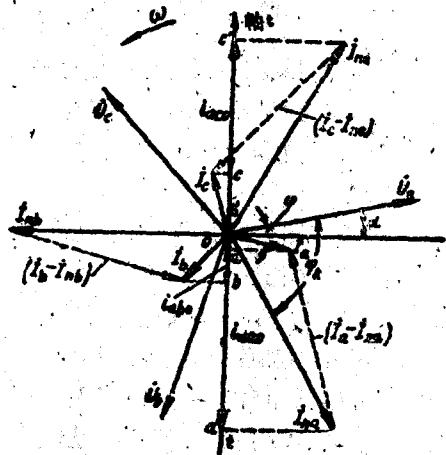


图 1-3 简单三相电路对称短路时各相电流分量的矢量图

在后一情形中，短路前一瞬间 a 相电流值与 q 相稳态短路电流在 $t=0$ 时的数值恰好相等。但在三相电路中，发生这种情形的只有其中一相。

图1-3示电流各个分量的矢量图，而图1-4则示出每相电流变化的情形。由图1-3可见， b 相中电流的非周期分量最小。有了非周期分量，短路电流曲线便不会和时间轴对称，非周期分量曲线本身就是短路电流曲线的“曲线对称轴”。我们可以应用这一“对称”性质来把非周期分量从短路电流曲线中分出，如图1-4中最后一图所示。

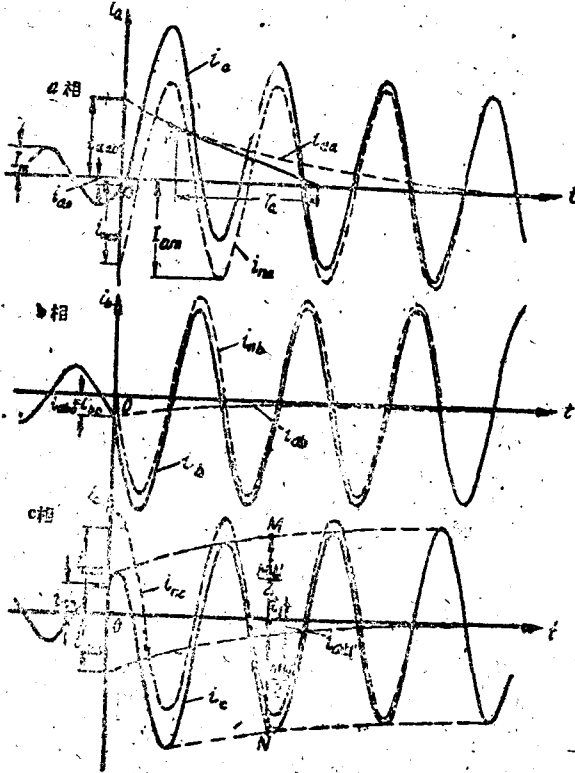


图1-4 简单三相电路突然对称短路时各相电流的波形图

在依指数律衰减的曲线(代表电流非周期分量的曲线)上任一点，其切距是和该曲线的时间常数成正比的(参阅图1-4a相)。应用这一特性，我们可以从电流非周期分量曲线找出电路的时间常数。为了使所得的结果可以更加准确，切线应作在曲线的起始(更陡些)部分。

由式(1-7)和图1-3可见，短路电流非周期分量的可能最大值，不但和合闸相角 α 有关，并且和电路原先的情况有关。

在实际的情况中，一般短路前和短路后的电流都是滞后的。由图1-2可见，自由分量值最大，也就是短路的最恶劣情况，将发生在 $i_{10} = 0$ (就是电路原先空载)，和 i_{na} 与时间轴平行的情形中($\varphi_k = 90^\circ$ ，即在几乎纯感抗的电路中)。在这一情形中，最大的电流自由分量出现在电压瞬时值刚经过零值($\alpha = 0$)而发生短路时。

这时，式(1-8)可改写为：

$$i_a = -I_{nm} \cos \omega t + I_{nm} e^{-\frac{t}{T_a}} \quad (1-9)$$

图1-5示在最恶劣短路情况下，短路电流的波形图。

事实上，当三相电路中发生突然对称短路时，只有一相电流可能处在最恶劣情况下。在选择电器时，短路电流的计算，应该根据最严重的情况进行，即根据最恶劣的一相作为计算用的数据。

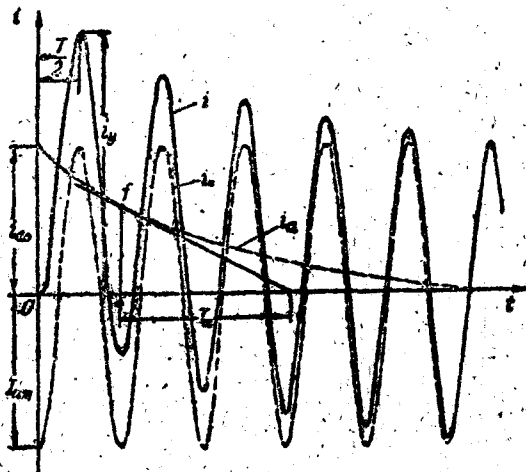


图1-5 非周期分量最大时短路电流的波形图

必须指出，虽然三相短路称为对称短路，但实际上只有短路电流的周期分量才是对称的，而各相短路电流的非周期分量则并不相等。

短路电流在最恶劣短路情况下的最大瞬时值，称为冲击电流，如图1-5中的 i_y 所示。这一电流最大值约在短路后半周期时出现。当 $f=50$ 赫时，这个时间约为自短路开始后 0.01 秒。

由式(1-9)可得：

$$i_y = I_{nm} + I_{nm} e^{-\frac{0.01}{T_a}} = I_{nm} (1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}}) = k_y I_{nm} \quad (1-10)$$

式中 $k_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{T_a}}$ 称为冲击系数。冲击系数值的变动范围为：

$$1 < k_y < 2 \quad (1-11)$$

在近似的计算中，取 $T_a = 0.05$ 秒，于是 $k_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{0.05}} = 1.8$ 。

冲击电流是用来校核电气设备短路时机械应力时的一个参数。在检查电气设备（例如断路器）的电动稳定度时，还需要计算短路电流的最大有效值 I_t 。

在短路过程中，任一时间的短路电流有效值 I_t ，由下式所决定：

$$I_t = \sqrt{I_{nt}^2 + I_{at}^2} \quad (1-12)$$

式中 $I_{nt} = I_n = \frac{I_{nm}}{\sqrt{2}}$ —— 短路电流周期分量的有效值，与 t 无关；

$I_{at} = i_{at}$ —— 短路电流非周期分量的有效值，随着 t 的增大而减小。在计算时，可以近似地当做等于在所取计算周期中点的瞬时值。

① 参阅：“发电厂和配电站的电气设备”第一卷，第370页，普季丹诺夫、塔腊索夫著，陈以福译，前燃料工业出版社出版。

当短路发生在最恶劣的情况下时，在短路后的第一个周期内，短路电流的有效值最大。在这一情形中， $t=T/2, I_{at}=(k_y-1)\sqrt{2}I_n$ ，由式(1-12)，便可求得短路电流的最大有效值为：

$$I_y = \sqrt{I_n^2 + [(k_y-1)\sqrt{2}I_n]^2} = I_n\sqrt{1+2(k_y-1)^2}$$

在式(1-11)所示的 k_y 值范围内， I_y/I_n 值的范围为：

$$1 < \frac{I_y}{I_n} < \sqrt{3} \quad (1-13)$$

【例题1】图1-6示某三相线路中发生对称短路时短路电流某一相的波形图。试从这一波形图求出短路电流周期分量的幅值和非周期分量衰减的时间常数。

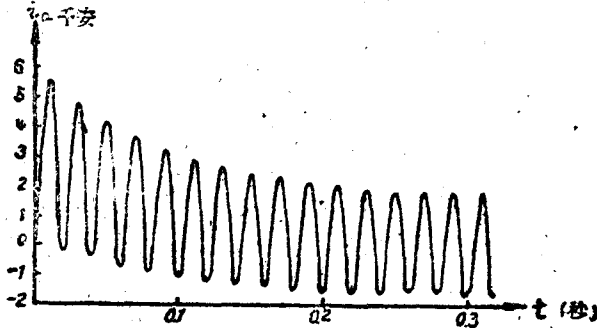


图1-6 短路电流某一相的波形图

【解】：先作出电流波形图的包络线。将包络线间的垂直线等分，即可求得非周期分量曲线，如图1-7，a为了准确地求得非周期分量的最大值 i_{a0} 及其衰减的时间常数 T_a ，通常须用半对数坐标纸另作一图，或取纵坐标为非周期分量 i_{at} 的对数 $\lg i_{at}$ ，横坐标为时间 t 。非周期分量曲线于是便成为一条直线，如图1-7，b所示。

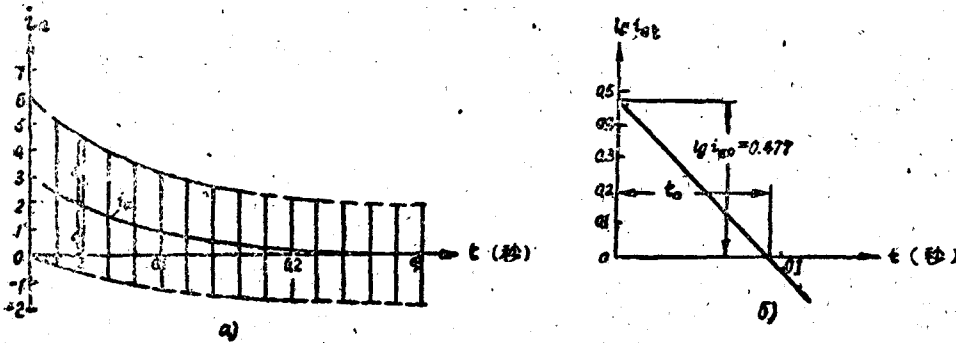


图1-7 a)从短路电流波形图求非周期分量曲线；b)求 i_{a0} 和时间常数 T_a 。

因为

$$i_{at} = i_{a0} e^{-\frac{t}{T_a}}$$

所以

$$\ln i_{at} = \ln i_{a0} - \frac{t}{T_a}$$

或

$$\frac{\lg i_{at}}{\lg e} = \frac{\lg i_{a0}}{\lg e} - \frac{t}{T_a}$$

令在 $\lg i_{at} = 0$ 时， $t = t_0$

即可由上式求得,

$$T_a = \frac{t_0 \lg e}{\lg i_{a0}} = \frac{0.4343 t_0}{\lg i_{a0}}$$

由图1-76, 求得,

$$\lg i_{a0} = 0.477, t_0 = 0.094 \text{秒}.$$

故

$$i_{a0} = 10^{0.477} = 3 \text{千安},$$

$$T_a = 0.094 \times \frac{0.4343}{0.477} = 0.086 \text{秒}.$$

【例題2】在图1-8所示的網絡中, 母綫电压可以当做不变, 等于6.3千伏。設在点 k 发生了对称短路。如果設計要求冲击电流不得超过20千安, 問并行敷設的電纜綫路最多容許几条?

电抗器和电纜的参数如下:

电抗器: 6 千伏, 200安, $x = 4\%$, 額定功率1.68瓩/相

电纜: 长度1250米, $x = 0.083$ 欧/公里, $r = 0.37$ 欧/公里。

【解】电抗器的电阻和电抗分别为:

$$x = \frac{4}{100} \times \frac{6000}{\sqrt{3} \times 200} = 0.695 \text{欧},$$

$$r = \frac{1680}{(200)^2} = 0.042 \text{欧}.$$

电纜的电阻和电抗分别为:

$$x = 1.25 \times 0.083 = 0.104 \text{欧},$$

$$r = 1.25 \times 0.37 = 0.463 \text{欧}.$$

一条电纜綫路(包括电抗器)的电阻、电抗和阻抗分别为:

$$x = 0.695 + 0.104 = 0.799 \text{欧},$$

$$r = 0.042 + 0.463 = 0.505 \text{欧},$$

$$s = \sqrt{0.799^2 + 0.505^2} = 0.95 \text{欧}.$$

短路电流非周期分量衰减的时间常数为:

$$T_a = \frac{0.799}{314 \times 0.505} = 0.00506 \text{秒}.$$

短路电流冲击系数为:

$$k_y = 1 + e^{-\frac{0.01}{0.00506}} = 1.14$$

短路周期分量的容許值, 按式(1-10), 为:

$$I_n = \frac{20}{\sqrt{2} \times 1.14} = 12.4 \text{千安},$$

因之, 到点 k 的組合阻抗应大于:

$$z_x = \frac{6.3}{\sqrt{3} \times 12.4} = 0.293 \text{欧}.$$

故容許并行敷設的電纜綫路不得超过 $\frac{0.95}{0.293} = 3.2$ 条, 即总共可以容許并行敷設三条电纜綫路。

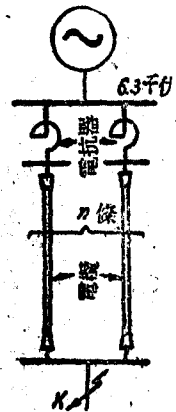


图 1-8 例題 2 的綫路

§1-2 双繞組变压器短路时的暂态过程

当变压器的磁路不饱和时, 繞組中电流和电压間的关系是綫性的, 即仍可用常系数的微分方程来表明。

設变压器的初級繞組接到无限大的功率电源, 短路发生在变压器次級繞組的出綫端,

如图1-9所示。为了简化计算起见，设变压器的初级绕组和次级绕组具有相同匝数，或先把变压器初级和次级的参数归算到同一电压级。根据图中所示的电流方向（图中只画出三相变压器的一相），即可应用基尔霍夫定律写出下列微分方程：

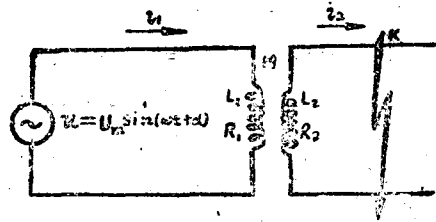


图 1-9 在接到无限大功率电源的变压器次级绕组出线端发生突然短路

$$\left. \begin{aligned} u &= R_1 i_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ 0 &= R_2 i_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

式中 u , i_1 和 i_2 都是时间的函数。

令 $p = \frac{d}{dt}$ ，上式便可简写成：

$$\left. \begin{aligned} u &= z_{11}(p)i_1 + z_{12}(p)i_2 \\ 0 &= z_{21}(p)i_2 + z_{22}(p)i_2 \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

式中 $z_{11}(p) = R_1 + pL_1$ ——回路 1 (初级绕组) 的自运算阻抗；

$z_{22}(p) = R_2 + pL_2$ ——回路 2 (次级绕组) 的自运算阻抗；

$z_{12}(p) = z_{21}(p) = -pM$ ——回路 1 和 2 间的互运算阻抗。

从式(1-15)中消去 i_2 ，得：

$$u = \left[z_{11}(p) - \frac{z_{12}^2(p)}{z_{22}(p)} \right] i_1 = z_k(p) i_1 \quad (1-16)$$

式中 $z_k(p)$ ——变压器的运算短路阻抗或运算漏阻抗。

必须指出，在这里及以后的分析中，凡阻抗前加上“运算”二字的，表明这一阻抗是用运算符号 $p = \frac{d}{dt}$ 所表明的阻抗的一般形式。无论对稳态或暂态，都可用 $z(p)$ 来表明电路的阻抗。在稳态的分析中， $z(p)$ 是一个复数，它可以用 $j\omega$ 代替 p (ω 是交变电压 u 的角频率) 后很简便地求得。

由式(1-16)可见，由于回路 2 短接的缘故，回路 1 的阻抗便从 $z_{11}(p)$ 改变为短路阻抗：

$$\begin{aligned} z_k(p) &= z_{11}(p) - \frac{z_{12}^2(p)}{z_{22}(p)} = R_1 + pL_1 - \frac{p^2 M^2}{R_2 + pL_2} = R_1 + p \left[L_1 - \frac{p^2 M^2}{R_2 + pL_2} \right] \\ &= R_1 + p \frac{L_1 R_2 + p(L_1 L_2 - M^2)}{R_2 + pL_2} = R_1 + pL_1 \frac{1 + pT_{20}\sigma}{1 + pT_{20}} \end{aligned} \quad (1-17)$$

式中 $T_{20} = \frac{L_2}{R_2}$ ——回路 1 开路时回路 2 的时间常数(下角注 0 是表明回路 1 开路的符号)；

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} \quad \text{— 漏磁系数。}$$

当回路 2 的电阻 R_2 很小时，时间常数 T_{20} 很大。在这一情形中，

$$z_k(p) \approx R_1 + pL_1\sigma \quad (1-18)$$

因之，回路 2 短接时回路 1 的等值感抗，近似地等于回路 1 的漏感抗 $pL_1\sigma$ 或 $j\omega L_1\sigma$ 。这就是说，回路 2 的短接将使回路 1 的电感从 L_1 减小到 σL_1 。漏磁系数 σ 愈小，回路 2 短接所引起的感抗的减小愈显著。

式(1-17)还可写成下列形式：

$$\begin{aligned} z_k(p) &= R_1 + pL_1 \frac{1 + pT_{20}\sigma}{1 + pT_{20}} = \frac{R_1 [1 + p(T_{10} + T_{20}) + p^2 T_{10} T_{20} \sigma]}{1 + pT_{20}} \\ &= \frac{L_1 T_{20} \left[\sigma p^2 + p \left(\frac{1}{T_{10}} + \frac{1}{T_{20}} \right) + \frac{1}{T_{10} T_{20}} \right]}{1 + pT_{20}} \end{aligned} \quad (1-19)$$

$$\text{式中 } T_{10} = \frac{L_1}{R_1}, \quad T_{20} = \frac{L_2}{R_2}.$$

微分方程组(1-15)的通解应为：

$$\left. \begin{aligned} i_1(t) &= i_{\infty 1} + C_1 e^{-\frac{t}{T'}} + C_2 e^{-\frac{t}{T''}} \\ i_2(t) &= i_{\infty 2} + C_3 e^{-\frac{t}{T'}} + C_4 e^{-\frac{t}{T''}} \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

式中 $i_{\infty 1}$ 和 $i_{\infty 2}$ —— 回路 1 和回路 2 中电流的稳态分量；

C_1 、 C_2 、 C_3 和 C_4 —— 由初始条件决定的积分常数；

T' 和 T'' —— 自由分量衰减的时间常数。

$\frac{1}{T'}$ 和 $\frac{1}{T''}$ 就是特征方程：

$$D(p) = \begin{vmatrix} z_{11}(p) & z_{12}(p) \\ z_{21}(p) & z_{22}(p) \end{vmatrix} = 0 \quad (1-21)$$

之根。上式也可写成：

$$D(p) = z_{22}(p) \left[z_{11}(p) - \frac{z_{12}^2(p)}{z_{22}(p)} \right] = z_{22}(p) z_k(p) = 0 \quad (1-22)$$

把式(1-19)代入上式，得：

$$D(p) = L_1 L_2 \left[\sigma p^2 + p \left(\frac{1}{T_{10}} + \frac{1}{T_{20}} \right) + \frac{1}{T_{10} T_{20}} \right] = 0 \quad (1-23)$$

解之，得：

$$\left. \begin{aligned} -p_1 &= -\frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10} T_{20}} (1 - q) = -\frac{1}{T'} \\ -p_2 &= -\frac{T_{10} + T_{20}}{2\sigma T_{10} T_{20}} (1 + q) = -\frac{1}{T''} \end{aligned} \right\} \quad (1-24)$$

$$\text{式中 } q = \sqrt{1 - \frac{4\sigma T_{10} T_{20}}{(T_{10} + T_{20})^2}}$$

在一般的电力变压器中， $\sigma \approx 0$ ， $q \approx 0$ ，所以，在两个时间常数 T' 和 T'' 中， T'' 比 T' 小得多。在这一情形中，