

电力系统暂态过程

P.魯登堡著

上 册

水利电力出版社

電力系統暫態過程

P. 魯登堡著
張鍾俊譯

上 冊

水利電力出版社

电力系统暂态过程

P·魯 登 堡著
张 鍾 俊译

下 册

水利电力出版社

Р. РЮДЕНБЕРГ
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
ИЗД. ИНОСТР. ЛИТ. МОСКВА 1955

电力系统暂态过程 上册
根据苏联外文書籍出版社1955年莫斯科版翻譯
張鍾俊譯

1131D326

水利电力出版社出版(北京西郊科學路二里園)

北京市影印出版業登記證 京出字第105号

北京市通州区印刷厂印刷 新华書店發行

787×1092 $\frac{1}{16}$ 开本 * 17 $\frac{1}{2}$ 印張 * 396千字 * 定价(第10类)2.40元

1959年5月北京第1版

1959年5月北京第1次印刷(0001—6,180册)

218/30

Р. РЮДЕНБЕРГ
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ
ИЗД. ИНОСТР. ЛИТ. МОСКВА 1955

电力系统暂态过程 下册
根据苏联外文书籍出版社1955年莫斯科版翻译
张 鍾 校译

2045D592

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许可证出字第105号
水利电力出版社印刷厂排印 新华书店发行

787×1092 $\frac{1}{32}$ 开本 * 1/16印张 * 332千字 * 定价(第10类)2.00元

1959年7月北京第1版

1959年7月北京第1次印刷(0001—3,680册)

原 序

最近十年来电气暂态现象的理论发展得很快,并且已成为电工主要部门之一。对电力系统的设计和运行,暂态过程的重要性一般已达到与正常运行情况下的稳态过程并驾齐驱的地步。尤其是某些偶然性起源的暂态过程,例如电力网中短路、并列运行发电机失去稳定以及输电线路上的雷电作用等所产生的暂态过程,已具有这样重要的意义,以致对现代动力系统的設計發生了决定性的影响。

所谓暂态过程,是指电力网与其中所接电机和电器经过某些扰动后的运行情况。至于这一扰动是预先布置的还是偶然性的,以及系统在暂态过程后能否抵达某一新的正常状态还是出现过电压或过电流的不正常运行,原则上并無区别。

在本书中,只涉及集中参数电路中的暂态现象。分佈参数线路中的电磁波过程,拟另写专书讨论。书中也沒有討論到通訊技术方面的問題。但本书中得到的某些結果也可在这一领域中应用。书中材料、例题及研究方法,是根据本人工程上和教学上的經驗而选定的。

章节的内容根据电机学、电器学、輸电和配电学等課程的各部分分列,但也根据本人十二年来在哈佛大学講授暫态过程的次序而編写。

书中材料排列的次序,是按教学用書的要求由簡單的問題逐漸引入較复杂的問題而安排的。涉及不同現象的各章,尽可能独立地敘述,竭力减少前文的引用,以便这書也可供参考之用。

本人三十余年的工程經驗和更長年月的教学經驗使本人确信,对复杂問題最好还是

記得它的最簡單的方法。准确的和复杂的解答方法,对从事应用数学者和科学研究工作者,比起对現場工程师来,更为合适;即使是后者的工作是建立在科学理論基础上时,也不例外。对工程师來說,了解被研究現象的物理本質和簡略討論所得的結果,比起数学上的严格性和研究方法的普遍性,更其重要。

在本书中,数学分析只用作輔助工具。每一問題用对它最恰当的方法来解答,即对綫性問題用解析法,而对非綫性問題則用圖解法。因之,不同的暫态过程采用不同的方法来討論。这样一来,对所有工程实践上必需的改进了的方法或新方法,讀者可以順便地熟悉起来。

选择了这样地叙述暫态过程理論的方法后,从前只有少数工程师們能够接受的專門課程,現在已能为每一个工程师所接受了。几乎本书中涉及的任一問題,無需特殊的数学基础,讀者都可領会并探討它技术上的要点。

現在已有运算微积分及用它来进行暫态过程計算的許多教本,在本书末附录中已列出了好几本。讀者如感兴趣,可以应用这些書本作为研究复杂暫态現象数学方法的补充。現在这些运算微积分只直接应用于綫性問題。本书主要内容是綜述电力系統中各种暫态現象的物理本質,并不着重叙述所用的数学方法。

电工中有很多專門部分与暫态过程理論具有密切的关系,甚至于以后者为基础。如旋轉电机的整流、离子器件的换流、电力系統短路(对称分量)、自动調整和自动控制、

繼電保護及并列运行的穩定性等就是最典型的例子。由于所有这些問題已有不少專書出版，所以本書中只涉及它們的基本內容，特別是有关暫态过程的基本內容。

本書中列有許多可以作为練習的数字例題。它們大部分是从現場中搜集来的，因而可以作为从原理上的現象过渡到表征实际系統中的現象的桥梁，并使讀者立即获得所进行分析的数字概念。

書中許多波形圖和量度数据，大部分是著者在企業部門工作时所取得的。这些材料也有助于暫态过程理論和实践的联系。

本書正文中并不引用参考文献，但每章末都列有許多重要的論文。由于各國技术雜誌上已發表过很多有关暫态过程的論文，因而每章末所列的文獻并不是詳尽無遺的，它們只可供讀者对某一問題作进一步研究时的参考。

本書某些章节与作者“電工裝置中暫态現象”1933年的德文第三版相同，但有关集中参数部分的内容已在本書中大加扩充。

魯登堡

1950年1月于培尔蒙城

俄文譯本序

魯登堡所著本書的內容為暫態過程的理論，無論對電能生產和電能分配技術方面的問題或電力系統設計或運行的問題，這種理論近年來已日益重要。

由於實際上的需要，最近十年來暫態過程理論獲得了很大發展。用線性微分方程來研究暫態過程的解析方法已有所改進（運算微積法、矩陣法等），而對非線性微分方程則創造了特種研究方法，特別是逐次漸近法和數字積分法，因而使許多重要的技術問題獲了解決。

計算機器的出現，特別是快速數字計算機的出現，促使複雜過程的研究，其中也包括電力系統的研究，進入到新的階段。

雖然對電力系統暫態過程的研究已有豐富的資料；但本書依然是最好書籍之一，它對暫態過程現象的物理本質，闡述得非常清楚。

本書中所牽涉的暫態過程理論，範圍極廣。具有分佈參數系統中的過程，著者擬另寫專書，因而本書中沒有對它進行討論。

在本書中，著者用比較簡單的方法闡明了最複雜的現象，並估計出所討論問題的數字答案；對一系列的實際問題，這些答案已完全够用。

必須指出，在明晰地描寫被討論現象的物理狀況時，著者並沒有應用現代電工中廣泛採用的某些數學方法。例如，著者沒有應

用對稱分量法，並完全不用運算微積法。同步電機中的暫態過程，也沒有應用坐標變換法來討論。在非線性電路的分析中，著者沒有應用現代的非線性振盪理論，因而幾乎沒有超出敘述性的範圍，特別在磁飽和的固定電路的分析中。

魯登堡的原著已經過許多次的修訂。第一版是在德國 1923 年出版的。三年後又有修訂版問世，該版於 1931 年首次譯成俄文（當時的書名為“電工裝置中的暫態現象”）；1933 年又有德文增訂本出版。

本書是根據 1950 年著者在美國出版的版本譯出的。其中材料與以前各版本的相差甚大：有關集中參數電路中暫態過程的章節幾乎擴大一倍，而有關電磁波過程的章節則全部除去。

在俄文譯本準備付印時，譯者取得了 1953 年在西德出版的德文第四版。美國版本和西德版本的內容，完全相同。但在個別地方，德文的敘述方式較好。在俄文譯本校對時，曾吸收了一些最重要的改進。

總的來說，本書反映了著者多年的工程經驗和教學經驗；對現場工作人員和新從事電力系統複雜現象研究的科學工作者，會有很大的幫助。

在翻譯本書時，例題中原用的 60 赫芝，已換用了我國 50 赫芝的標準周率。

目 录

原序.....	1	引言.....	1
俄文譯本序.....	3		

第一編 簡單电路

第一章 电感性电路的接通和切断.....	3	§ 3-1. 突然合閘.....	14
§ 1-1. 用短接方法將电源从电 路中切除.....	3	§ 3-2. 外加电势光滑变化.....	16
§ 1-2. 电路中接进一个电势恒 定的电源.....	4	第四章 諧振現象.....	20
§ 1-3. 电路中接进一个电势交 变的电源.....	5	§ 4-1. 电压諧振.....	21
§ 1-4. 从具有分路电阻的电路 中将电源切除.....	7	§ 4-2. 电流諧振.....	23
第二章 电容性电路中的充电和 放电过程.....	9	第五章 振盪迴路中的自由电流 和自由电压.....	25
§ 2-1. 电容器放电.....	10	§ 5-1. 频率和衰减.....	25
§ 2-2. 电容器由电势恒定的电 源充电.....	11	§ 5-2. 电流和电压.....	27
§ 2-3. 电容器由电势交变的电 源充电.....	11	§ 5-3. 电路参数.....	29
第三章 切换过程的一般規律.....	14	第六章 振盪迴路的合閘.....	31
		§ 6-1. 合閘到电势恒定的电源.....	31
		§ 6-2. 合閘到电势交变的电源.....	33
		第七章 突然跳閘后的高頻振盪.....	38
		§ 7-1. 幅值和起始相角.....	39
		§ 7-2. 直流电路的跳閘.....	40
		§ 7-3. 交流电路的跳閘.....	42

第二編 磁 耦 电 路

第八章 静止电路中的互感.....	47	第十二章 多相繞組的自由旋轉磁場.....	75
§ 8-1. 对称迴路中的自由电流.....	47	§ 12-1. 靜子和轉子磁場的穿鏈.....	75
§ 8-2. 具有阻尼繞組的直流电 磁鉄.....	49	§ 12-2. 不对称的靜子和轉子电路.....	79
§ 8-3. 不对称迴路中的自由电流.....	50	第十三章 三相电机的突然短路.....	83
§ 8-4. 励磁繞組跳閘时阻尼繞 組对过程的影响.....	53	§ 13-1. 感应电动机的短路.....	84
第九章 变压器中的暫态电流.....	55	§ 13-2. 轉动的感应电动机合閘 到电力網中.....	86
§ 9-1. 帶載变压器原級繞組的 合閘.....	55	§ 13-3. 同步电机的短路.....	87
§ 9-2. 次級繞組的突然短路.....	56	第十四章 电力系统中的短路电流.....	93
第十章 塊狀鉄芯中的渦流.....	59	§ 14-1. 电机中的短路电流.....	93
§ 10-1. 微分方程及其解.....	59	§ 14-2. 电力網中的短路电流.....	99
§ 10-2. 時間常数及磁場分佈.....	61	第十五章 短路电流的机械效应和 热效应.....	104
第十一章 旋轉电机中的換向磁阻.....	65	§ 15-1. 机械力.....	105
§ 11-1. 塊狀導綫中的渦流.....	65	§ 15-2. 热效应.....	111
§ 11-2. 电樞槽中的阻尼棒.....	72	第十六章 整流式电机中的固有振盪.....	118
		§ 16-1. 降算衰减和自激振盪.....	118

§ 16-2. 耦合电路	119	§ 16-3. 快速灭磁	121
--------------	-----	--------------	-----

第三編 轉动質量的慣性效应

第十七章 电动机的加速过程	126	§ 20-3. 强制的机械振盪	155
§ 17-1. 光滑起动	126	§ 20-4. 感应电动机的自由振盪	157
§ 17-2. 分級起动	129	第二十一章 同步电机操作冲量	161
§ 17-3. 起动期間發出的热量	131	§ 21-1. 不准确整步后的振盪	161
第十八章 直流电动机的起动	132	§ 21-2. 發电机在功率冲量下的 稳定	162
§ 18-1. 电枢电路中不加电阻时 的起动	133	§ 21-3. 短路后的重整步	167
§ 18-2. 分激电动机的起动損耗	136	第二十二章 电力系統中發電机的併 列运行	170
§ 18-3. 电容效应	138	§ 22-1. 負荷冲量的分佈	170
第十九章 感应电动机的起动	141	§ 22-2. 發电机和感应电动机共 存时的振盪	174
§ 19-1. 鼠籠式电动机的加速時間	141	第二十三章 动力系統中原动机調速 器的相互作用	180
§ 19-2. 电力網电压水平驟降时 电动机轉速的降落	144	§ 23-1. 具有間接作用調速器的 原动机	180
§ 19-3. 繞組中的热損耗	147	§ 23-2. 动力系統中的功率振盪	181
第二十章 交流电机的机械振盪	149	§ 23-3. 負荷突变后的頻率振盪	184
§ 20-1. 交流發电机中的整步功率	150		
§ 20-2. 自由振盪的固有頻率和 衰減	153		

第四編 大地影响

第二十四章 中性点不接地系統中入 地短路电流	189	第二十九章 高压綫路对隣近綫路的 靜电干扰	235
§ 24-1. 电力網中的电流分佈	189	§ 29-1. 單导綫綫路	235
§ 24-2. 地中散流	192	§ 29-2. 双导綫綫路和三相綫路	237
第二十五章 接地	197	§ 29-3. 三相綫路接地短路	239
§ 25-1. 兩接地电极問題	198	第三十章 經地返回的交流电流	242
§ 25-2. 棒形或索形电极	199	§ 30-1. 电流密度的分佈	242
§ 25-3. 复杂的接地体	202	§ 30-2. 地中的低频电流場	245
§ 25-4. 土壤的發热	205	§ 30-3. 高频电流的分佈	247
第二十六章 中性点接地的三相电力 系統	208	§ 30-4. 地面上边空間中的磁場	249
§ 26-1. 直接接地和經电阻接地	208	第三十一章 通訊綫路上的感应干扰	251
§ 26-2. 中性点經感抗接地	210	§ 31-1. 大地的理想导电表面	251
§ 26-3. 对称分量	215	§ 31-2. 地中电流的远距作用	253
第二十七章 輸电綫路上的架空地綫	218	§ 31-3. 双导綫綫路和三相綫路	254
§ 27-1. 架空地綫	218	第三十二章 地中自由电流	257
§ 27-2. 長接地体	223	§ 32-1. 按指数律变化的电流	257
第二十八章 大气电場及其对綫路的 影响	225	§ 32-2. 电流的瞬时增大	261
§ 28-1. 架空地綫的屏蔽作用	225	附 录	263
§ 28-2. 多导綫綫路	229	1. 使用符号一覽表	263
§ 28-3. 大气电場的变化	231	2. 一般参考書	264
		附圖 1 指数函数	265
		附圖 2 多層綫圈的电感	266

目 录

第五編 变化电阻

第三十三章 导体的发热.....	267	§35-1. 电感性电路和电容性电路.....	282
§33-1. 温度的升高.....	267	§35-2. 下垂的伏安特性.....	286
§33-2. 电阻的間接变化.....	271	§35-3. 温升的稳定性.....	288
第三十四章 熔絲的熔化.....	273	第三十六章 自激振荡.....	290
§34-1. 熔化和汽化.....	274	§36-1. 自激条件.....	291
§34-2. 电流密度平方对時間的积分.....	277	§36-2. 自激的建立过程.....	293
第三十五章 电路中的半导体.....	282		

第六編 断路时的电弧

第三十七章 电弧的基本特性.....	298	§41-2. 短路电流的非周期分量.....	349
第三十八章 电感性直流电路的切断.....	304	§41-3. 开关器中首先断路的极.....	349
§38-1. 电阻开关器.....	304	§41-4. 接地短路的切除.....	351
§38-2. 具有电弧的开关器.....	307	第四十二章 电容电路中的电弧复燃.....	352
§38-3. 具有并联电阻的电弧.....	313	§42-1. 直流电源供电电路中电容的充电 和放电过程.....	352
第三十九章 交流电路的切断.....	317	§42-2. 交流电源供电电路中的交替充电 过程.....	358
§39-1. 电压和电流对時間的变化.....	317	第四十三章 振荡电路中的火花放电.....	362
§39-2. 电弧中的能量损耗.....	322	第四十四章 振荡电路的切断.....	366
§39-3. 油中灭弧.....	324	§44-1. 复燃电压.....	366
§39-4. 大容量开关器.....	327	§44-2. 电流和能量.....	373
第四十章 断路后电压的恢复过程.....	333	§44-3. 間歇电弧接地短路.....	375
§40-1. 电路电压的快速增大.....	334	第四十五章 含有电弧电路中的不衰减 自由振荡.....	379
§40-2. 复杂振荡.....	340		
第四十一章 三相电路的切断.....	348		
§41-1. 电势和电流的降落.....	348		

第七編 靜止电路中的磁飽和

第四十六章 磁飽和直流电路的励磁和 灭磁过程.....	385	§49-1. 电机和整流器中电压和 电流的波形.....	413
§46-1. 他激的励磁过程.....	385	§49-2. 变压器、电抗器和綫路所引起的 波形畸变.....	416
§46-2. 直流电机的自激.....	388	§49-3. 三相电力系统中的諧波.....	420
§46-3. 涡流对磁通变化的时滞作用.....	392	第五十章 非調和振荡.....	423
第四十七章 磁飽和交流电路中的合閘电流.....	394	§50-1. 自由振荡的畸变.....	424
第四十八章 振荡电路中的磁飽和.....	401	§50-2. 暫态运行情况中的强制振荡.....	428
§48-1. 鉄諧振.....	401	§50-3. 稳态运行情况和高次諧波.....	430
§48-2. 电阻和感抗的影响.....	406	§50-4. 分諧波的諧振.....	432
§48-3. 单相断綫.....	408		
第四十九章 高次諧波.....	411		

第八編 具有飽和磁路的旋轉电机

第五十一章 三相发电机的持續短路 439	§53-3. 电感負荷所引起的电流冲量..... 463
§51-1. 帶載发电机的短路..... 439	§53-4. 一般情形..... 464
§51-2. 电路中电阻对穩态短路 电流的影响..... 441	第五十四章 阻尼繞組和轉子漏磁对暫态 过程的影响 468
§51-3. 二相短路和单相短路..... 443	§54-1. 电路和磁路的相互作用..... 468
§51-4. 电抗器的影响..... 447	§54-2. 基本方程的解..... 469
第五十二章 发电机和电动机电路中的电容 451	§54-3. 图解法..... 472
§52-1. 发电机的磁飽和..... 451	§54-4. 阻尼繞組的时间常数..... 475
§52-2. 漏抗的影响..... 453	第五十五章 励磁調整和电压調整 477
§52-3. 电阻和外部磁化电流的影响..... 455	§55-1. 負荷卸除后的电压升高..... 477
第五十三章 同步发电机中的暫态过程 459	§55-2. 冲击励磁..... 480
§53-1. 电流和电压对時間的变化..... 459	§55-3. 自动励磁調整..... 482
§53-2. 电容負荷所引起的电压升高..... 461	§55-4. 串激励磁机..... 487

引 言

在过去年代中，动力系统是按照正常运行的要求来设计及建设的。仔细地研究了所用材料的特性及正常运行情况中电机、电器和线路的状态后，便可顺利地得到有关输送功率、电压水平和输电距离的数据。但运行经验指出，操作过程及另外一些预先布置的和偶然发生的运行情况，会产生某些造成严重破坏系统正常运行的现象。过去进行的许多研究工作，就是要说明这些现象，并探索防止它们严重后果的措施。

在研究任一电力系统的运行情况时，必须将稳态运行现象和操作过程或系统状态变化时所发生的暂态现象分开来讨论。后者的变化主要由系统某一部分中能量的增大或减少所引起。现代电力系统各部分能量和能量密度的不断提高，促使电气方面和机械方面暂态过程的重要性不断地提高。现在电力系统中暂态过程的控制问题，已与稳态运行时各种现象的控制问题并重了。

除了操作过程所引起的暂态过程外，在电力系统中，特别是在高压大型电力系统中，往往由于接地、导线短路、断线、雷电、误操作和其他难以避免的原因，引起了偶然性的暂态现象。所有这些事故，几乎都会导致电力系统正常运行情况的严重破坏，使其中出现很大的过电流和过电压，有时也产生了频率不正常和波形完全畸变了电流。这些现象与稳态运行时由高次谐波及电路某些部分谐振而产生的寄生振荡所导致的扰动相似。

每一操作过程都要使电力网中的电压、电流以及其中所接电机的转速发生变化，因而也使其中的能量发生变化。即使能量是集

中在某一地点的，例如集中于发电机的磁场中、电容器中的电场中或电机转子的质量中，经过了操作过程，电力系统的各部分中要同时发生储藏能量的变化。一般地讲，这种储藏能量变化所致的暂态过程，衰减得较慢，有时可能长达7秒。这种过程称为缓变暂态过程或近似稳态运行，因为这时电力网中的电压和电流分布，与稳态运行时的很相似。

但是我们知道，电磁现象实际上是以很大的一定速度（即光速，等于300,000公里/秒）而传播的，而电流沿金属导线的传播速度要慢些，不会超过光速。因此，在操作过程后，电流值和电压值不可能在电力网的所有各部分同时发生变化。实际上这种电压值和电流值的变化，是从进行操作过程地点以很大的速度传播于整个电力网中，因而电力网中任一点的电场和磁场都变化得极快。在大部分电力网中，在实际上出现缓变暂态过程时，上述现象已完全衰减掉。但是，电压波和电流波的分布也可能成为运行情况严重破坏的原因。这种导线上行波所产生的现象，称为快速暂态过程。

在大部分电路中，例如在线路的电阻或电容中以及磁通只通过空气的线路电感中，电压和电流是成正比例的，同时电压变量和电流变量也是成正比例的。但实际电路中往往还应用着不遵从这种比例关系的元件，例如放电间隙。这种元件的电阻并不恒定，即不遵从欧姆定律。在磁饱和的铁芯中，磁通也不和励磁电流成正比例。在电压和电流之间或它们的诱导函数之间不成线性关系的电路中，即在伏安特性是曲线的电路中，可能产生很特殊的现象。这些现象主要由操作过

程所引起，它們有时会危害系统的正常稳态运行。

本書討論電力系統中通常出現的暫態過程；選擇其中最基本的和重要的現象，用比較簡單的敘述方式和明确的前提來說明其物理內容。書中並不包括已經被前人所解釋過的所有現象；同樣地，也不可能對電力系統實際運行中會遇到的複雜現象的次要問題，進行詳盡的討論。採用了恰當抉擇的近似的分析方法，我們便可獲得比較簡單的結論。書中的許多波形圖和數字例題，可作為這種推導的佐證，也可用作闡明現象的數字概念。書末所附的曲綫圖，則可用以節省實際計算的工作量。

根據暫態過程的基本定律，可以得到許多有關動力系統及其元件設計及運行的指示和法則。但書中並不討論電機、電器、儀表和電力網設計的結構問題。

在討論各種暫態過程的本質時，我們必須應用數學方法來進行研究，因為只有應用數學才能很簡潔地得到許多量間的複雜的相互關係。在解決每一問題時，我們只採用對它適用的最簡單的數學方法，並以不超過微積分學為限。微積分是不可能避免不用的，因為暫態過程是一種隨着時間而變化的現象，而這些變化只有應用無限小的分析法才能精確地進行研究。在討論較複雜現象的某些章節中，還需應用偏微分方程和有限差方程。對電力系統設計和運行實踐中遇到的暫態現象，不一定要應用更深的數學來研究。

如果在實際問題中綫性關係不存在，那末許多解析方法便不能應用。在這種情形中，宜於應用圖解法。它可以同時解決具有非綫性特性的穩態運行和暫態運行問題。此外，圖解法還可使一目了然地看出答案的特性和參數變化時答案的變化情況。當原始數據是由實驗中得來時，例如當磁化特性或電阻——溫度曲綫已知時，圖解法答案的準確性決不比用任一解析法所得到的來得低。

在研究任一直流系統或交流系統的暫態過程時，一般地當做它的穩態運行特性是已知的。在極少的情形中，穩態運行現象與暫態運行現象具有這樣的密切關係，因而必須一起來研究。例如，地中電流與短路暫態電流間的關係非常密切，並且地中電流空間分佈的規律，即使在穩態情況下，也比較地接近暫態運行時的規律。

在研究含有正弦函數和余弦函數的振盪現象時，採用復數符號法可以使計算工作大為簡化。在本書中廣泛地應用下列數學公式：

$$e^{j\omega t} = \cos \omega t + j \sin \omega t, \quad (1)$$

其中 $j = \sqrt{-1}$ 是單位虛數，而 $e = 2.718$ 是自然對數之底。

式(1)左邊指數函數的微分和積分，要比式(1)右邊兩個函數的微分和積分簡單得多（因為對指數函數取微分或積分，是一個同樣的指數函數）。因此，隨時間 t 以頻率 ω 按余弦律或正弦律變化的交變電流 i 並不寫成：

$$i = I \cos \omega t \text{ 或 } i = I \sin \omega t,$$

而是寫成下列形式： $i = I e^{j\omega t}$ 。

由於上式中包含着兩個三角函數（參閱式1），因而可以使所有計算大為簡化，以至常縮成短短的幾行，最後結果中出現的指數函數，不難分成實數部分和虛數部分。這時實數部分是總答案中的余弦函數分量，而虛數部分則是它的正弦函數分量。指數函數、余弦函數和正弦函數都叫做調和函數。

雖然在研究穩態運行時，例如諧振現象時，應用復數符號法已顯得非常簡便；但是只有在研究更其複雜的現象、如衰減振盪和多相電機的自由旋轉磁場（特別是後者）時，復數符號法才充分地顯出了它的優越性。

在本書中，採用了兩種單位制：公尺—公斤—秒(MKS)制和公分—克—秒(CGS)制（至於是靜電單位還是電磁單位，要根據具體情況而定）。所以這樣採用的緣故是為了簡化數字的計算。

第一編 簡單电路

第一章 电感性电路的接通和切断

首先討論接通和切断最簡單电路后其中發生的电流变化。圖 1 所示的为只由定值电阻 R 和定值电感 L 所組成的最簡單电路。

在任一時間 t , 电势值 e 是已知的。設进行切换操作前瞬間 ($t=0$) 及切换操作过后很久时 ($t=\infty$) 的电流值 i 是已

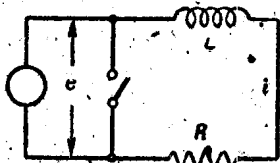


圖 1

知的。这两个电流值可按大家熟悉的稳态电流計算法則求得。

由一个稳定状态过渡到另一稳定状态的期間, 外加电势 e 与电路中的电压降相平衡, 即与电阻中电压降 Ri 和电感中电压降 $L \frac{di}{dt}$ 相平衡。因之, 圖 1 电路中所产生的暂态电流, 应在任一切换操作后滿足下列方程:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = e \quad (1-1)$$

这是一个帶有恒定系数的一阶綫性微分方程, 其解法大家都是熟悉的。它的解答中含有一个积分常数, 这常数可按具体問題的起始条件来决定。

§ 1-1. 用短接方法將电源从电路中切除

当电源用电鍵短接时(圖 1), 暂态电流与時間的关系最簡單。这时电路与外加电源已在电的方面相互分开, 因而电源也可除去。

在电鍵合閉瞬間, RL 电路中通过的电流还是原先的电流 I , 即当 $t=0$ 时,

$$i_0 = I. \quad (1-2)$$

在电鍵合閉后, 加到这一电路中的电势变为零。因而微分方程 (1-1) 变成下列形式:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = 0, \quad (1-3)$$

$$\text{或} \quad \frac{di}{dt} + \frac{R}{L} i = 0. \quad (1-4)$$

分开变数便可对这一方程进行积分:

$$\int \frac{di}{i} + \frac{R}{L} \int dt = 0, \quad (1-5)$$

$$\text{即} \quad \ln i + \frac{R}{L} t = K = \ln I. \quad (1-6)$$

为了滿足与時間 $t=0$ 相对应的起始条件 (1-2), 积分常数 K 应等于 $\ln I$ 。于是, 式 (1-6) 可写成下列形式:

$$\ln \frac{i}{I} = -\frac{R}{L} t. \quad (1-7)$$

$$\text{解 } i, \text{ 得: } i = I e^{-\frac{R}{L} t} = I e^{-\frac{t}{T}} \quad (1-8)$$

在上式中, e 为自然对数的底, 而

$$\frac{L}{R} = T \quad (1-9)$$

則称为迴路的时间常数, 以秒来計算。圖 2 示出按公式 (1-8) 所作的电流与時間关系曲綫。尺寸更大的这种指数函数的曲綫, 見本書末。

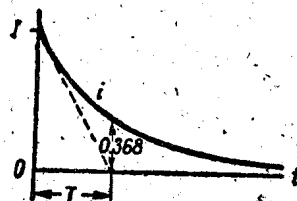


圖 2

由式 (1-8) 可見, 在每一簡單的短接迴路中, 电流按指数律而衰減, 其衰減速度完全由時間常数 T 所决定。这一衰減电流的起始值就是迴路剛短接前的电流 I 。不管短接

前电路中的电流是恒定电流还是交变电流， i_0 总是等于刚短接前电路中电流的瞬时值。

令式(1-8)的 $t = \infty$ ，得到暂态电流的稳定值为，

$$i_{\infty} = 0. \quad (1-10)$$

经过了等于时间常数 T' 的一段时间，暂态电流将减小到

$$i = Ie^{-1} = \frac{1}{2.718} I = 0.368 I,$$

即减小到它起始值的36.8%；而在经过了 $2T'$ 或 $3T'$ 一段时间，暂态电流则减小到它起始值的 e^{-2} 或 e^{-3} ，即减小到13.5%或5.0%。当我们从衰减电流的波形图来决定时间常数时，就可利用上述关系。

指数函数的次切距是一常数。在我们的例子中，由图2可见，次切距为：

$$\frac{i}{\frac{di}{dt}} = \frac{Ie^{-t/T}}{(I/T)e^{-t/T}} = T. \quad (1-11)$$

图2中的次切距是对 $t=0$ 而作的。这种作出次切距的几何方法，在按波形图决定时间常数时，也可利用。

由式(1-8)可见，在上述电路中，电阻愈大，电流衰减得愈快；电感愈大，电流衰减得愈慢。实际上遇到的直流电路，例如电机的励磁绕组，往往具有电流的衰减可以持续到数秒钟之久的电感。

对匝数 $w=2000$ 、电流 $I=10$ 安时产生磁通 $\Phi=0.06$ 伏·秒的励磁绕组，它所具有的电感等于：

$$L = \frac{w\Phi}{I} = \frac{2000 \times 0.06}{10} = 12 \text{ 亨}.$$

如果这一绕组的电阻 $R=11$ 欧，那末其时间常数：

$$T' = \frac{12}{11} = 1.09 \text{ 秒}.$$

因之，这一绕组中电流的衰减需要3秒以上的時間。

在本附录，附有按线圈长度和内外半径来决定无铁芯线圈电感的曲线。

§ 1-2. 电路中接进一个电势恒定的电源

如果在一个含有电阻 R 和电感 L 的通路中（原先没有电流通过的），突然地接进一个恒定电势

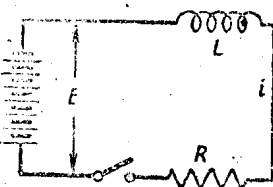


图 3

$$e = E, \quad (1-12)$$

例如接进一个电池，如图3所示，那末电流对时间的变化规律将较为复杂。在 $t=0$ 时，暂态电流的起始值等于：

$$i_0 = 0, \quad (1-13)$$

而微分方程(1-1)将按(1-12)改写为下列形式：

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E. \quad (1-14)$$

其中右边一项是表示扰动力的一个常数 E 。

这一方程可用下述人为的方法来求解。如果把电流 i 写为两个分量之和：

$$i = i' + i'', \quad (1-15)$$

那末第一个分量 i' 应该是微分方程(1-14)的特解。

因之，方程(1-14)可以分成两个独立的微分方程如下：

$$L \frac{di'}{dt} + Ri' = E, \quad (1-16)$$

$$L \frac{di''}{dt} + Ri'' = 0;$$

它们二者之和就是原方程(1-14)。

方程(1-16)是不难求解的。如果令 t 为使电流可以当做已经抵达稳态的时间，那末由于外加电势 E 是恒定的缘故，

$$\frac{di'}{dt} = 0, \quad (1-17)$$

因而从方程(1-16)中的第一式，得

$$i' = \frac{E}{R} = I. \quad (1-18)$$

所以, 电流分量 i' 就是用一般直流电路计算法则所求得的稳态电流值。

第二个电流分量 i'' 的变化规律, 由方程 (1-16) 中的第二式所决定。这方程与不含电源的短接迴路中暂态电流的方程 (1-3) 完全相同。因之, 它的解与式 (1-8) 相似, 即:

$$i'' = Ke^{-(R/L)t}. \quad (1-19)$$

但式中的积分常数 K 还是未知的, 因为它须由本题的起始条件来决定。

当电键合闸时, 即当 $t=0$ 时, 暂态电流应等于零 (参阅式 1-13)。应用式 (1-15)、(1-18) 和 (1-19), 这一条件可写为:

$$i_0 = \frac{E}{R} + K \cdot 1 = 0. \quad (1-20)$$

解 K , 得:

$$K = -\frac{E}{R}. \quad (1-21)$$

合併式 (1-15)、(1-18)、(1-19) 和 (1-21), 得到总暂态电流 i 的算式如下:

$$i = \frac{E}{R} (1 - e^{-(R/L)t}) = I (1 - e^{-t/T}). \quad (1-22)$$

在上式中, 时间常数 T 仍由式 (1-9) 决定。

圖 4 示出按式 (1-22) 画出的电流增大规律。电流并不是由起始的零值躍升到極限值 I 的, 而是光滑地增大到極限值的。时间常数愈長, 即迴路中电感对电阻的比值愈大, 电流增大得愈慢。

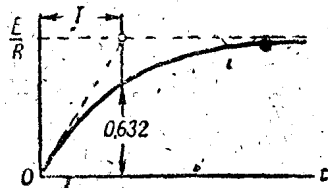


圖 4

可以应用下列任一方法由波形圖决定时间常数: 从座标原点作一切綫, 求这一切綫和漸近綫的交点, 如圖 4 所示; 或者在曲綫上决定

电流瞬时值为極限值 63.2% 时的時間; 因为由

$$\frac{i}{I} = 1 - e^{-1} = 0.632 = 63.2\%.$$

可知, 这一時間与迴路的时间常数相等。当時間等于时间常数的兩倍或三倍时, 电流將抵达稳态值的 86.5% 或 95.0%。因之, 在經過了等于 $3T$ 的时间后, 可以認為电流几乎已經抵达稳态了。

要电流更快地抵达它的稳态值, 可以增加迴路中的电阻, 因为这將使时间常数减小。但要同时保持原先的电流稳态值, 就必须將电源的电势与电阻一样倍数地增大 (参阅式 1-22)。

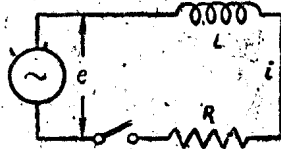


圖 5

§ 1-3. 电路中接进一个电势交变的电源

在一个含有电阻和电感的电路中 (圖 5), 突然地接进一个交变电势

$$e = E \cos(\omega t + \psi), \quad (1-23)$$

式中 E 为电势的幅值, $\omega = 2\pi f$ 为电势的角频率, 而 ψ 为起始相角。

这一电路中暂态电流的起始值仍等于零:

$$i_0 = 0. \quad (1-24)$$

俟后电流的变化, 仍由微分方程 (1-1) 所决定。在現在的情形中, 这方程可写成下列形式:

$$L \frac{di}{dt} + Ri = E \cos(\omega t + \psi). \quad (1-25)$$

方程右边一項是外加电势, 用余弦时间函数来表明。

这一微分方程仍可用上节所述的人为方法来解出。令

$$i = i' + i'' \quad (1-26)$$

其中 i' 为过了很久時間后这一电路中的稳态