

139

21 世纪高等院校教材

电气工程基础

(下册)

刘 笙 主编



A0969972

科学出版社

2002

内 容 简 介

本书是为适应国家教育部 1998 年颁布的“普通高校工科专业目录以及引导性专业目录”中“电气工程及其自动化”和“电气工程与自动化”专业所编写的专业基础课教材。内容包括引论及基本概念、电力设备的理论及模型、网络分析与运行控制、暂态分析与控制、电力系统绝缘与过电压以及计算机监控及输电系统新技术等 6 篇,共 22 章。全书分为上、下两册,上册包括第一至十一章,下册包括第十二至二十二章。

本教材对原有的“电力系统稳态分析”、“发电厂电气及计算机监控”、“电力工程”以及“高电压技术”等课程教材进行了有机整合并更新了体系,增加了抽水蓄能、电压稳定、直流输电与柔性交流输电等新章节,反映了电力工业技术的整体性、综合性以及时代发展趋势,构思新颖、循序渐进。

本书主要作为“电气工程及其自动化”或“电气工程与自动化”专业的基础课程教材,亦适合电气工程技术人员及工程师作为参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

电气工程基础(上、下册)/刘笙主编. —北京:科学出版社,2002
(21 世纪高等院校教材)

ISBN 7-03-010438-2

I. 电… II. 刘… III. 电气工程-高等学校-教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2002)第 033578 号

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2002 年 8 月第一次印刷 印张: 23 1/4

印数: 1—3 000 字数: 450 000

定价: 54.00 元(含上、下册)

(如有印装质量问题,我社负责调换〈环伟〉)

编委会名单

主 编 刘 笙

编 委 岑文辉 朱子述

顾 洁 金之俭

杨镜非 谢 宁

前 言

“中共中央国务院关于深入教育改革全面推进素质教育的决定(1999.6.13)”中指出:“调整 and 改革课程体系、结构、内容,建立新的基础教育课程体系……。改变课程过分强调学科体系,脱离时代和社会发展以及学生的实际情况,抓紧建立更新教学内容的机制,加强课程的综合性和实践性,重视实验课教学,培养学生实际操作能力。”《电气工程基础》一书就是为了贯彻“决定”的指导精神,为适应专业调整后而成立的“电气工程及其自动化”和“电气工程与自动化”专业教学需要而编写的一部专业基础教材。本书是对原有的四门专业课程内容(《电力系统稳态分析》、《发电厂电气及计算机监控》、《电力工程》、《高电压技术》)进行有机整合并更新体系的一种尝试。

本书包括6篇,共22章。第一篇为引论及基本概念,包括第一、二章;第二篇为电力设备的理论及模型,包括第三至七章;第三篇为网络分析与运行控制,包括第八至十一章;第四篇为暂态分析与控制,包括第十二至十六章;第五篇为电力系统的绝缘与过电压,包括第十七至二十章;第六篇为计算机监控及输电系统新技术,包括第二十一、二十二章。全书分为上、下两册,上册由第一至十一章组成,下册由第十二至二十二章组成。

本书具有以下特点:(1)通过新旧中国电力工业的发展对比,体现德育和智育的统一。旧中国电力工业历尽坎坷,步履蹒跚。新中国电力工业蓬勃向上,发展迅速。改革开放使电力工业腾飞。书中所列举的事实是进行爱国主义教育的生动素材。(2)知识结构反映电力工业技术的整体性及综合性。教材改革前,稳态与暂态、短过程动态与长过程动态(暂态稳定与频率变化过程)、过电压与过电流、电气设备、发电机运行等内容分割在多本教材中,既没有整体概念,又有重复现象。该教材对上述内容进行了整合。(3)知识结构反映了电力工业的时代发展趋势。本教材含抽水蓄能、电压稳定、直流输电、柔性交流输电等新内容。(4)教材配套建设。本教材与即将出版的习题集、CAI教学辅导软件配套建设,用以提高教学效率。

本书主要作为电气工程及其自动化专业和电气工程与自动化专业的专业基础课教材。其中一些章节可因材施教,供自学用。本书亦可作为电气工程研究和专业技术人员的参考读物。

本教材由编写组集体创作。其中第三、四、五章由岑文辉编写,第十六、十八章由朱子述编写,第十七、十九、二十章由金之俭编写,第七、八、十四章由顾洁编写,

第十二、十三章由杨镜非编写,第二十一章由谢宁编写。第一、二、六、九、十、十一、十五、二十二章由刘笙编写。刘笙任主编。吴际舜教授审阅了全书,并提出了许多宝贵的修改意见。在编写过程中得到了我校(上海交通大学)电力学院教学改革指导委员会、李福寿教授以及陈章潮教授的热心指导。张焰教授做了大量的组织工作。上海市电力公司钱重耀高级工程师提供了有关电力工业发展的素材。在此一并向指导和帮助本书编写的各位领导、专家致以衷心的感谢。

由于编写时间仓促,加之编者学术水平及教学经验有限,书中不妥之处在所难免,诚挚希望使用本书的师生、工程技术人员提出宝贵意见。

编 者

2001年12月

目 录

前言

第四篇 暂态分析与控制

第十二章 电磁暂态过程与三相短路电流计算	1
第一节 电力系统短路的概念	1
一、短路的原因和分类	1
二、短路后果和预防措施	2
三、短路计算的目的	2
四、短路计算的简化假设	3
第二节 无穷大功率电源供电系统三相短路电流的分析计算	4
一、无穷大电源	4
二、三相短路的暂态过程	4
三、短路冲击电流、最大有效值电流和短路功率	8
第三节 同步发电机突然三相短路电磁暂态过程	12
一、发电机物理描述	12
二、同步发电机正常运行	12
三、同步发电机机端突然三相短路电流波形	17
四、三相短路物理过程	20
五、三相短路电流计算	22
第四节 实用计算	26
一、运算曲线概念	26
二、运算曲线应用	27
参考文献	28
第十三章 不对称故障分析	29
第一节 对称分量法	29
一、对称分量法物理解释	29
二、对称分量法的应用	34
第二节 电力系统中元件的序参数计算	41
一、三相输电线的零序参数	42
二、变压器的零序参数和等值电路	56
三、同步电机的序参数	66
第三节 电力系统序网的建立	67

第四节 不对称短路分析	71
一、简单不对称短路分析	71
二、简单不对称短路时网络中的电流和电压计算	87
三、电压和电流对称分量经变压器后的相位变化	91
四、各种不对称短路电流值与三相短路电流值的比较	108
参考文献	110
第十四章 导体的发热及电动力计算与电气设备选择	111
第一节 导体的发热问题	111
第二节 均匀导体的发热计算	114
一、均匀导体的长期发热及载流量的确定	114
二、均匀导体的短时发热计算	118
第三节 均匀导体短路时的电动力	123
一、两平行导体间的电动力	123
二、三相导体短路时的电动力	125
第四节 电气设备选择的一般条件	129
一、按正常工作条件选择电气设备	129
二、按短路情况校验热稳定及动稳定	131
第五节 母线及绝缘子与穿墙套管的选择	133
一、母线的材料及类型和敷设方式	133
二、绝缘子与穿墙套管的选择	140
第六节 高压开关电器的选择	143
一、断路器的选择	143
二、隔离开关的选择	144
三、高压熔断器的选择	144
第七节 限流电抗器的选择	146
一、按额定电压和额定电流选择	146
二、电抗百分值的选择	146
三、短路热稳定和动稳定校验	147
参考文献	150
第十五章 机电动态与稳定性	151
第一节 机电动态	151
第二节 电力系统的功角稳定	152
一、电力系统的静态稳定	152
二、电力系统的暂态稳定	157
三、电力系统的振荡与失步	161
第三节 电力系统的电压稳定	162
一、电力系统的静态电压稳定	162
二、电力系统的暂态电压稳定	166

第四节 电力系统的频率稳定	172
一、功率缺额与系统频率的下降	173
二、系统频率变化的动态过程	173
三、自动低频减载	175
参考文献	176
第十六章 线路和绕组中的波过程	177
第一节 单相均匀无损耗线路上的行波	177
一、波动方程	177
二、波动方程解的物理意义——前行波和反行波	178
第二节 波的折射和反射	181
一、计算节点电压的等值电路(彼德逊法则)	181
二、由几条线路同时来波时的节点电压计算	184
第三节 波通过串联电感和并联电容	185
第四节 波在有限长线段上的多次折反射	188
第五节 波在平行多导线系统中的传播	191
第六节 波的衰减和变形	194
第七节 单相变压器绕组中的波过程	195
一、起始电位分布	196
二、稳态电位分布	198
三、过渡过程	198
第八节 三相变压器绕组中的波过程	201
一、星形接法且中性点接地(Y_0)	201
二、星形接法且中性点不接地(Y)	201
三、三角形接法	202
第九节 冲击电压在绕组间的传递	202
一、静电分量	203
二、磁分量	203
参考文献	203

第五篇 电力系统的绝缘与过电压

第十七章 电力系统的绝缘	204
第一节 气体放电及气体绝缘电气设备	204
一、均匀电场中的气体放电	204
二、放电类型	207
三、影响气体放电过程的各种因素	208
四、空气间隙的击穿电压	213
五、高电气强度气体 SF_6 及气体绝缘设备	214
第二节 绝缘子和沿面放电	216

一、绝缘子类型	216
二、干湿状态下绝缘子的沿面放电	217
三、长绝缘子串的电压分布	217
四、沿套管表面的放电	218
五、污秽绝缘子的沿面放电	220
第三节 液体及固体电介质的电气特性和电气设备的内绝缘	222
一、液、固体电介质的电气特性	222
二、绝缘的老化	224
三、电气设备的内绝缘	227
参考文献	232
第十八章 电力系统过电压	233
第一节 稳态过电压的电路基础	233
一、电感-电容效应	233
二、基波铁磁谐振过电压	234
三、参数谐振过电压	236
第二节 稳态过电压举例	236
一、空载长线的电容效应	236
二、单相接地时的健全相电压升高	240
第三节 暂态过电压的电路基础	242
一、直流电源合闸于 $L-C$ 串联回路	242
二、直流电源合闸于 $R-L-C$ 回路	248
三、交流电源合闸于 $R-L-C$ 回路	249
第四节 暂态过电压举例	252
一、空载线路的合闸过电压	252
二、空载线路的拉闸过电压	254
第五节 雷电侵入波过电压的保护	256
一、避雷器直接装设在变压器端口	256
二、被保护设备与避雷器间有一段距离	257
参考文献	259
第十九章 电力系统中性点接地方式	260
第一节 电力系统的中性点	260
第二节 中性点不接地系统	261
第三节 中性点直接接地系统	262
第四节 中性点经电阻接地	263
一、高电阻接地	264
二、低电阻接地	264
第五节 中性点经电抗器接地	265
第六节 中性点谐振接地	266

一、基本原理	266
二、消弧线圈的配置与运行	269
第七节 中性点接地变压器	270
第八节 各种接地方式的比较	272
参考文献	273
第二十章 交流电气装置的绝缘配合	274
第一节 影响绝缘水平的因素	274
一、按系统最高电压划分范围	274
二、中性点接地方式	274
第二节 绝缘配合的方法	275
一、惯用法	275
二、统计法	276
第三节 架空送电线路的绝缘配合	276
第四节 变电所电气设备的绝缘配合	278
一、雷电过电压下的绝缘配合	278
二、操作过电压下的绝缘配合	278
参考文献	279

第六篇 计算机监控及输电系统新技术

第二十一章 计算机在电力系统中的应用	280
第一节 发电厂的计算机监控系统	280
一、计算机监控系统的发展历史	280
二、计算机监控系统的组成	281
三、计算机监控系统的特点和功能	283
四、计算机控制系统的分类	284
第二节 发电厂计算机监控系统的数据采集及处理	287
一、模拟量通道	288
二、开关量通道	291
第三节 发电厂生产过程的监视与控制	291
一、运行参数的监视	291
二、运行参数的制表打印	292
三、屏幕显示	293
四、报警分析	293
五、运行参数的趋势预测	294
第四节 变电站的计算机监控系统	294
一、监控系统的基本功能	295
二、监控系统的功能结构	296
三、监控系统的组态	297

四、监控系统的信息处理及远方终端	297
五、监控系统的交流采样方法	298
第五节 电网调度管理自动化	299
一、SCADA 功能	299
二、电网控制和管理	300
参考文献	303
第二十二章 远距离输电与电网互联	304
第一节 远距离输电概念	304
第二节 交流远距离输电	305
一、交流远距离输电基本特征	305
二、线路的理想功率极限	307
三、输电线受端 PU 曲线分析	310
四、交流远距离输电的参数补偿	311
第三节 直流输电	316
一、直流输电系统的接线方式与构成	317
二、直流输电系统的工作原理	321
三、直流输电系统的基本调节方式	329
四、高压直流输电技术的发展	331
第四节 灵活交流输电	332
一、晶闸管控制的串联电容器(TCSC)	333
二、静止调相机(STATCOM)	341
三、统一潮流控制器(UPFC)	349
第五节 电网互联	353
一、电网互联的经济效益	353
二、电网互联方法	354
三、我国全国联网的格局	355
参考文献	357

第四篇 暂态分析与控制

第十二章 电磁暂态过程与三相短路电流计算

本章主要阐述电力系统三相突然短路电流及其实用计算、冲击电流、短路电流、最大有效值。

第一节 电力系统短路的概念

电力系统运行在正常状态时,其运行参数(电流、电压、频率、功率等)是在允许的范围之内。当系统在运行中发生故障时(尽管出现的几率很小,仍然会发生一些故障),电力系统的运行状态将发生急剧的变化。由于系统中包含有惯性元件,所以系统从一种运行状态变化到另一种运行状态,需要一个过程。如雷电和操作过电压或工频过电压是从 $1\mu\text{s}$ 到十几毫秒。从十几毫秒到十几分钟由磁起电过程,是本章讨论的重点。虽然这个过程很短暂,但产生的影响却十分严重,轻者危及设备的安全或使设备无法正常工作,重者将使正常供电遭到破坏,即导致电力系统的灾变,对整个国民经济造成极大的损失,因此应给予高度重视。

一、短路的原因和分类

在电力系统可能发生的各种故障中,对系统危害最大而且发生概率最高的是短路故障。所谓短路,是指电力系统中相与相或相与地之间的非正常接通。在电力系统正常运行时,除中性点外,相与相或相与地之间是相互绝缘的。如果由于绝缘破坏而构成通路,电力系统就发生短路故障。

通常引起绝缘破坏的原因有:绝缘材料的自然老化;机械损伤;开关操作冲击;雷电或操作过电压;人为的误操作。另外,鸟、兽、树、风筝、飞机或起重机等跨接在裸露的载流部分或毁坏支撑设备,以及风、雪、雹等自然灾害都会引起短路。

凡造成电力系统运行不正常的任何连接和各种操作均称为电力系统的故障,故障的类型很多。在三相系统中,可能发生的短路(如图 12-1 所示)分别为:单相接地短路、两相接地短路、三相短路、两相相间短路。

三相短路时系统(包括短路点)仍然是对称的,称为对称短路故障,除此之外其他几种短路,称为不对称短路故障。电力系统短路故障大多数发生在架空线部分,在额定电压为 110kV 以上的架空线路中发生,单相短路故障占绝大多数。除了短路故障外,本章还将讨论线路一相或两相,断线故障。当断路器的一相或两相跳

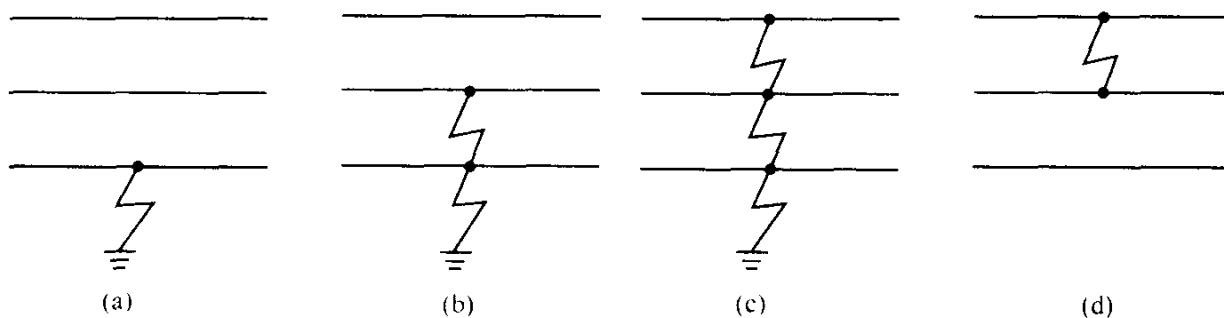


图 12-1 三相线路故障类型

(a) 单相接地 (b) 两相接地 (c) 三相短路 (d) 两相短路

闸,形成断线故障。例如,在采用单相重合闸的线路上,当发生单相短路的那一相断路器跳闸后,即形成一相断开、两相运行的运行状态或称非全相运行,架空线路一相或两相导线断裂,也会形成断线故障。电力系统中除了同一地点故障以外,还可能在相同或不同地点先后或同时发生故障,称为多重故障。

二、短路后果和预防措施

发生短路时,短路点相与相或相与地之间往往经过一定的电阻(如外物、电弧等)接地(称为“过渡电阻”)。如不经电阻接地,短路则称为“金属性短路”。相同条件下,金属性短路电流较非金属性短路电流大。

短路时,短路点及附近电力设备流过的短路电流可能达到额定电流的几倍甚至几十倍,它极大地超出了线路或电气设备在设计时的热稳定承受能力,引起导体及绝缘体的严重发热而损坏;同时在短路刚开始,电流瞬时值达到最大,导体间将受到强大的电动力,可能引起导体或线圈变形以至损坏;短路时电力网的电压突然降低,短路点附近电压降低最多,这又会影晌用电设备的正常工作。短路故障的最严重结果是使并列运行的发电机失去同步,引起系统解列和大面积停电。另外,不对称短路时架空线中不对称电流所产生的不平衡磁通,会对邻近的通信线路造成严重干扰。

在电力系统设计和运行时,为了降低短路故障的发生概率,必须采取适当的措施,例如采用合理的防雷设施,降低过电压水平;使用结构完善的配电装置,加强运行维护管理等。短路故障发生时,应迅速采取措施使发生短路部分与系统其他正常部分隔离开来并使无故障部分恢复正常运行。由于架空线路的短路大多数是瞬时性的,当故障点与电源隔离后,短路点电弧即可熄灭,并恢复正常绝缘能力。此时,可采用重合闸措施,使系统恢复正常运行。

三、短路计算的目

在发电厂、变电所及整个电力系统的设计和运行中,选择合理的电气接线图,

选用合适的电器设备包括断路器等,配置及调整继电保护自动装置以及选择限制短路电流措施等,都必须有短路故障的计算结果作依据。短路计算的任务主要有以下几个方面:

① 为选择有足够机械稳定性和热稳定度的电气设备,例如断路器、互感器、瓷瓶、母线、电缆等,必须以短路计算为依据。这里包括计算冲击电流以校验电气设备的电动力稳定度;计算若干时刻的短路电流周期分量以校验电气设备的热稳定度;计算指定时刻的短路电流有效值以校验断路器的断流能力等。

② 为了正确地整定各种继电保护和自动装置参数,必须对电力网中发生的各种短路进行计算和分析。不仅计算故障点的电流值,还必须计算短路电流在电力网络中的分布情况,及各节点的电压值。

③ 在设计和选择发电厂和电力系统电气主接线时,为了比较各种不同方案的接线图,确定是否需要采用限制短路电流的措施等,要进行必要的短路电流计算。

④ 进行电力系统暂态稳定计算,研究短路对用户工作的影响等,也要进行短路分析计算。

⑤ 为了确定输电线路发生故障对通讯线路的干扰,也需进行短路故障的计算。

四、短路计算的简化假设

在实际工程中,根据一定的任务进行短路计算时,必须首先确定计算条件。所谓计算条件,一般包括短路发生时系统的运行方式、短路的类型和发生地点,以及短路发生后所采取的措施等。从短路计算的角度来看,系统运行方式是指系统中投入运行的发电机、变压器、输电线路、用电负荷的多少、各自的运行参数以及它们之间的相互连接情况。计算不对称短路时,还应考虑变压器中性点接地方式。对于不同的计算目的,所采用的计算条件也是不同的。

为了简化计算工作,常采用以下一些简化假设:

① 短路过程中各发电机转子之间不发生摇摆,并认为所有发电机的电势都同相位且数值恒定。(对于短路点而言,由此计算所得的电流数值稍微偏大。)

② 负荷或当作恒定阻抗,或当作某种临时附加电源。

③ 不计磁路饱和。系统各元件的参数是恒定的、非时变的、现行的,可以应用迭加原理。

④ 系统为对称的三相系统。除不对称故障处出现局部不对称以外,系统其余部分通常作对称处理。

⑤ 忽略高压输电线的电阻和电容,忽略变压器的电阻和励磁电流(三相三柱式变压器的零序等值电路除外),即发电机、输电线路、变压器等各元件均用纯电抗表示,故障中发电机电抗用暂态电抗表示。

第二节 无穷大功率电源供电系统三相短路电流的分析计算

一、无穷大电源

无穷大电源是一种理想电源,它的特点是:①电源功率为无穷大。当外电路发生任何变化时,系统频率不发生变化,即系统频率恒定。②电源的内阻抗为零。电源内部无电压降,电源的端电压恒定。

实际上,真正的无穷大电源是没有的,它只是一个相对的概念,某一电源(或多个电源并联)其功率大于其他电源 10 倍以上,就可将此电源近似认为是无限大电源。

二、三相短路的暂态过程

本节将分析无穷大电源供电的三相电路在某点 f 发生突然对称短路的暂态过程,如图 12-2 所示。

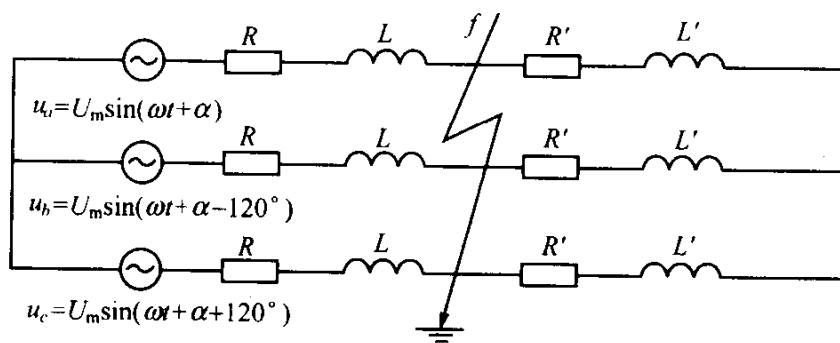


图 12-2 无穷大电源供电的三相电路

短路发生前,电路处于稳态状态。由于是对称故障,进行以 a 相为例分析。其电压和电流的表达式是

$$u_a = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (12-1)$$

$$i_a = I_{m0-} \sin(\omega t + \alpha - \theta_{0-}) \quad (12-2)$$

式中

$$I_{m0-} = \frac{U_m}{\sqrt{(R + R')^2 + \omega^2(L + L')^2}}$$

$$\theta_{0-} = \tan^{-1} \frac{\omega(L + L')}{(R + R')}$$

u_a 、 i_a 分别 a 相电压和电流的瞬时值； I_{m0-} 为短路前的电流幅值； U_m 为电源的电压幅值； α 为电源电势的初相角。

f 点发生突然三相短路时，这个电路被分成两个独立的回路。左边的回路仍与电源相连，右边的回路是无源回路。先观察右边电路，磁场中储存的能量转换为热能被电阻消耗，电流也逐渐衰减到零。最大电流在故障初瞬时，即正常运行时的电流，显然不会对电气设备产生危害，所以不再对他进行分析。在左边电路中，每相阻抗由原来的 $(R + R') + j\omega(L + L')$ 变成 $R + j\omega L$ ，由于阻抗减小，电流增大。

假设短路发生在 $t = 0$ 时刻，则对 a 相回路电压方程为

$$L \frac{di_a}{dt} + Ri_a = U_m \sin(\omega t + \alpha) \quad (12-3)$$

上式是一常系数非齐次线性微分方程。根据常微分方程理论，其解为相应的齐次方程特解加通解，即有

$$i_a = I_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) + Ce^{-t/T} \quad (12-4)$$

式中， I_m 是稳态短路电流（也称为周期分量）的幅值； $\theta = \tan^{-1}(\omega L/R)$ ； C 为积分常数，其值由初始条件决定，即短路电流直流分量（也称非周期分量）的起始值； T 为直流分量电流衰减时间常数决定直流分量衰减的速度， $T = L/R$ 。

现在来决定积分常数 C 。由于在电感性的电路中，通过的电感电流不能够突变，短路瞬间前的电流 i_{a0-} 应该等于短路瞬间后的电流 i_{a0+} ，即令 $t = 0$ ，有

$$\begin{aligned} i_{a0-} &= i_{a0+}, \\ I_{m0-} \sin(\alpha - \theta_{0-}) &= I_m \sin(\alpha - \theta) + C \end{aligned} \quad (12-5)$$

由此解得

$$C = I_{m0-} \sin(\alpha - \theta_{0-}) - I_m \sin(\alpha - \theta) \quad (12-6)$$

将式(12-6)代入式(12-4)，得 a 相短路电流表达式：

$$i_a = I_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) + [I_{m0-} \sin(\alpha - \theta_{0-}) - I_m \sin(\alpha - \theta)]e^{-t/T} = i_{pa} + i_{na} \quad (12-7)$$

式中， i_{pa} 为短路电流周期分量， i_{na} 为短路电流非周期分量。

由于三相对称，求 b 相和 c 相的短路电流时只需将式(12-7)中的 α 分别用 $\alpha - 120^\circ$ 和 $\alpha + 120^\circ$ 代替即可。现将三相短路电流表达式综合如下：

$$\begin{aligned} i_a &= I_m \sin(\omega t + \alpha - \theta) + [I_{m0-} \sin(\alpha - \theta_{0-}) \\ &\quad - I_m \sin(\alpha - \theta)]e^{-t/T} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 i_b &= I_m \sin(\omega t + \alpha - 120^\circ - \theta) + [I_{m0} \sin(\alpha - 120^\circ - \theta_{0-}) \\
 &\quad - I_m \sin(\alpha - 120^\circ - \theta)] e^{-t/T} \\
 i_c &= I_m \sin(\omega t + \alpha + 120^\circ - \theta) + [I_{m0} \sin(\alpha + 120^\circ - \theta_{0-}) \\
 &\quad - I_m \sin(\alpha + 120^\circ - \theta)] e^{-t/T}
 \end{aligned} \tag{12-8}$$

[例 12-1] 有如图 12-2 的无限大功率电源供电的三相电路 $u_a = 1 \cdot \sin(\omega t + 30^\circ)$, $u_b = 1 \cdot \sin(\omega t - 90^\circ)$, $u_c = 1 \cdot \sin(\omega t + 150^\circ)$, $R = 0.01\Omega$, $L = 0.026\text{H}$, $R' = 0.04\Omega$, $L' = 0.104\text{H}$, 求在点三相短路后 a 、 b 、 c 三相短路电流。

解:

$$u_{a0} = 1 \cdot \sin(\omega t + 30^\circ), \alpha = 30^\circ$$

$$\begin{aligned}
 I_{a0} &= \frac{u_{a0}}{\sqrt{(R + R')^2 + \omega^2(L + L')^2}} = \frac{1}{\sqrt{(0.01 + 0.04)^2 + \omega^2(0.026 + 0.104)^2}} \\
 &= 0.0245\text{A}
 \end{aligned}$$

$$\theta_{0-} = \tan^{-1} \frac{\omega(L + L')}{R + R'} = \tan^{-1} \frac{\omega(0.026 + 0.104)}{0.01 + 0.04} \approx 90^\circ$$

$$I_a = \frac{u_a}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}} = \frac{1}{\sqrt{0.01^2 + \omega^2 \cdot 0.026^2}} = 0.1224\text{A}$$

$$\theta = \tan^{-1} \frac{\omega L}{R} = \tan^{-1} \frac{\omega \cdot 0.026}{0.01} \approx 90^\circ$$

$$T = L/R = 2.6\text{s}$$

$$C_a = I_{a0} \sin(\alpha - \theta_{0-}) - I_a \sin(\alpha - \theta) = 0.0848$$

$$C_b = I_{a0} \sin(\alpha - \theta_{0-} - 120^\circ) - I_a \sin(\alpha - \theta - 120^\circ) \approx 0$$

$$C_c = I_{a0} \sin(\alpha - \theta_{0-} + 120^\circ) - I_a \sin(\alpha - \theta + 120^\circ) = -0.0849$$

利用公式可得

$$i_a = 0.1224 \sin(\omega t - 60^\circ) + 0.0848 e^{-t/2.6}$$

$$i_b = 0.1224 \sin(\omega t - 120^\circ) + 0 \cdot e^{-t/2.6}$$

$$i_c = 0.1224 \sin(\omega t + 60^\circ) - 0.0849 \cdot e^{-t/2.6}$$

图 12-3(a)~(c) 是 a 、 b 、 c 三相在短路前后的电流。