



21 世纪电力系统及其自动化规划教材

电力系统暂态过程

常鲜戎 赵书强 编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

TM712/7

2010

21 世纪电力系统及其自动化规划教材

电力系统暂态过程

常鲜戎 赵书强 编

机械工业出版社

本书是高等学校电气工程及其自动化专业电力系统及其自动化方向的专业课教材。

本书包括传统的电力系统电磁暂态过程分析和机电暂态过程分析的基本知识,同时为服务于已具有特高压、大电网的我国电力系统,添加了对特高压交流远距离输电所特有的短路暂态分量的分析和功率输送的分析,以及近年颇受关注的电压稳定性分析的相关知识。

本书既可供高等学校电力类有关专业师生使用,也可供从事电力系统工作的工程技术人员参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

电力系统暂态过程/常鲜戎,赵书强编. —北京:机械工业出版社,2010.1

21世纪电力系统及其自动化规划教材

ISBN 978-7-111-29025-4

I. 电… II. ①常…②赵… III. 电动系统-系统暂态稳定-教材 IV. TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 205161 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 贡克勤 责任编辑: 贡克勤 版式设计: 霍永明

封面设计: 王伟光 责任校对: 魏俊云 责任印制: 乔宇

北京京丰印刷厂印刷

2010年1月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·14.5印张·357千字

标准书号: ISBN 978-7-111-29025-4

定价: 27.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066

门户网: <http://www.cmpbook.com>

销售一部: (010) 68326294

教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售二部: (010) 88379649

读者服务部: (010) 68993821

封面防伪标均为盗版

21世纪电力系统及其自动化规划教材 编委会

主任委员：熊信银

副主任委员：尹项根 韩学山 李庚银 刘宪林

李 扬 陈少华 贡克勤 杨德先（兼秘书）

委 员：（以姓氏笔划排序）

尹项根	毛承雄	车仁飞	文明浩	文劲宇
叶俊杰	刘学东	刘宪林	孙丰奇	许 珉
李 扬	李庚银	吴耀武	陆继明	张 利
张 波	杨国旺	杨宛辉	杨淑英	杨德先
陈 卫	陈少华	罗 毅	房俊龙	易长松
赵书强	赵玉林	赵丽平	娄素华	栗 然
盛四清	常鲜戎	梁振光	韩学山	游志成
熊信银	魏 萍			

前 言

本书的主旨是在《电力系统分析基础》教材的基础上，向从事电力系统及其自动化专业方向学习的高等学校学生提供电力系统暂态过程分析方面的知识。

同步发电机突然短路后的暂态行为是决定电力系统暂态过程的重要因素，本书首先在电机学等学科知识的基础上进一步阐述了同步发电机突然短路后的物理过程及短路电流的近似分析，建立了基于派克变换的同步发电机基本方程，并以此分析了同步发电机的短路过程和参数。然后，本书介绍了同步发电机基本方程的拉普拉斯运算形式以及如何应用基本方程的拉普拉斯运算形式分析突然三相短路电流。

鉴于计算机使用的日益普及，本书专列了一章，介绍了应用计算机计算电力系统故障的内容，并介绍了基本计算原理和计算机流程框图。

得益于电力工业的高速发展，我国电力系统已具有特高压、大电网的规模。为使从事电力系统及其自动化专业方向学习的学生了解特高压电网所特有的一些短路暂态分量及其分析和计算的方法，本书编写了第三章的内容。为使学生了解特高压交流电网远距离功率输送的知识，本书编写了第七章的内容。

电力系统机电暂态过程是电力系统暂态过程的重要组成部分，本书第四~第六章介绍了电力系统机电暂态过程的基本概念和各元件机电特性，以及电力系统机电稳定性的基本分析与计算方法。另外，还介绍了在这一领域的一些新的研究成果和分析、计算方法。

电力系统电压稳定性是近年颇受关注的问题，为使学生增加对电力系统电压稳定性的了解，本书第八章介绍了电压稳定性的基本概念和基本的分析、计算方法以及提高电压稳定性的基本措施。书中带*的为选修内容。

本书书稿经华北电力大学的李庚银教授主审，华北电力大学的栗然教授和河北农业大学的霍利民教授、黄丽华教授也参加了本书的审稿工作。各位教授提出的宝贵意见对本书提供了巨大的帮助，在此表示衷心的感谢。

本书的第一~三、六~八章由常鲜戎编写，第四五章由赵书强编写。由于编者水平有限，书中的错误和不足之处敬请读者批评指正。

编 者

目 录

前言	机电特性	115
第一章 同步发电机突然三相	第一节 电力系统运行稳定性的	
短路的分析	基本概念	115
第一节 短路的一般概念	第二节 同步发电机组的机电特性	117
第二节 同步发电机突然三相短路后	第三节 发电机励磁系统与原动机系统	
的物理过程及短路电流的	的数学模型	124
近似分析	第四节 负荷特性	130
第三节 同步发电机的基本方程	思考题与习题	133
第四节 同步发电机的暂态参数	第五章 电力系统的静态稳定性	135
和等效电路	第一节 简单电力系统的静态稳定性	135
第五节 同步发电机的次暂态参数	第二节 简单电力系统静态稳定性分析	
和等效电路	的小干扰法	137
第六节 同步发电机的三相短路电流	第三节 自动调节励磁系统对静态稳定性	
第七节 基本方程的拉普拉斯运算形式	的影响	144
第八节 自动调节励磁装置对短路电流	第四节 实际电力系统的静态	
的影响	稳定性分析	148
思考题与习题	第五节 提高系统静态稳定性的措施	150
64	思考题与习题	152
第二章 电力系统故障的	第六章 电力系统的暂态稳定性	153
计算机算法	第一节 电力系统的暂态稳定性概述	153
第一节 概述	第二节 简单电力系统暂态稳定性分析	155
第二节 电力系统故障计算的等效网络	第三节 发电机组转子运动方程的	
第三节 对称短路计算	数值解法	159
第四节 简单不对称故障计算	第四节 发电机组自动调节系统对暂态	
第五节 复杂故障的计算方法	稳定性的影响	167
思考题与习题	第五节 复杂电力系统的暂态	
90	稳定性分析	175
第三章 特高压交流远距离输电线	第六节 电力系统异步运行的概念	185
路的短路暂态过程	第七节 提高系统暂态稳定性的措施	188
第一节 概述	思考题与习题	193
第二节 各种暂态分量的基本分析	第七章 特高压交流远距离	
第三节 用拉普拉斯运算法计算三相短路	功率输送	196
暂态过程	第一节 概述	196
第四节 用拉普拉斯运算法计算不对称	第二节 长线的稳态方程	196
短路暂态过程	第三节 沿长线的功率传送	201
思考题与习题	第四节 提高远距离输电线路的功率极限	
114	和改善运行特性的措施	205
第四章 电力系统运行稳定性的		
基本概念和各元件的		

思考题与习题	207	第三节 电压稳定性分析方法	214
第八章 电力系统的电压稳定性	208	第四节 提高电压稳定性的措施	223
第一节 概述	208	思考题与习题	224
第二节 简单电力系统的电压 稳定性分析	210	参考文献	225

第一章 同步发电机突然三相短路的分析

第一节 短路的一般概念

一、短路的原因、类型及后果

短路是电力系统的严重故障之一。所谓短路，是指一切不正常的相与相或相与地（对于中性点接地的系统）之间发生通路或同一相绕组之间的匝间非正常连通的情况。

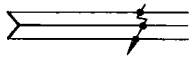

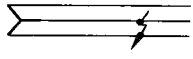
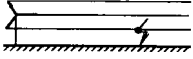
产生短路的原因很多，主要有如下几个方面：①元件损坏，例如绝缘材料的自然老化，设计、安装及维护不良所带来的设备缺陷发展成短路等；②气象条件恶化，例如雷击造成的闪络放电或避雷器动作，架空线路由于大风或导线覆冰引起电杆倒塌等；③人为事故，例如运行人员带负荷拉隔离开关，线路或设备检修后未拆除接地线就加上电压等；④其他，例如鸟兽跨接在裸露的载流部分等。

三相系统的短路基本类型有：三相短路，两相短路、两相接地短路和单相接地短路。其中：三相短路称为对称短路，系统各相与正常运行时一样仍处于对称状态；其他类型的短路称为不对称短路。

电力系统的运行经验表明，在各种类型的短路中，单相短路占大多数，两相短路较少，三相短路的机会最少。三相短路虽然很少发生，但情况较严重，应给以足够的重视。而且，从短路计算方法来看，一切不对称短路的计算，在采用对称分量法后，都可以归结为对称短路的计算。因此，对三相短路的研究是有重要意义的。

短路基本类型的示意图和代表符号见表 1-1。

表 1-1 短路基本类型的示意图和代表符号

短路类型	示意图	符号
三相短路		$f^{(3)}$
两相接地短路		$f^{(1,1)}$
两相短路		$f^{(2)}$
单相接地短路		$f^{(1)}$

随着短路类型、发生地点和持续时间的不同，短路的后果可能只破坏局部地区的正常供电，也可能威胁整个系统的安全运行。短路的危险后果一般有以下几个方面：

- 1) 短路故障使短路点附近的支路中出现比正常值大许多倍的电流，由于短路电流的电动力效应，导体间将产生巨大的机械应力，可能破坏导体和它们的支架。
- 2) 比设备额定电流大许多倍的短路电流通过设备，会使设备发热增加，可能烧毁设备。
- 3) 短路电流在短路点可能产生电弧，引发火灾。
- 4) 短路时系统电压大幅度下降，对用户造成很大影响。严重时会导致系统电压崩溃，造成电网大面积停电。
- 5) 短路故障可能造成并列运行的发电机失去同步，破坏系统稳定，造成大面积停电。这是短路故障的最严重后果。
- 6) 发生不对称短路时，不平衡电流可能产生较大的磁通在邻近的电路内感应出很大的电动势，干扰附近的通信线路和信号系统，危及设备和人身安全。
- 7) 不对称短路产生的负序电流和电压会对发电机造成损坏，破坏发电机的安全，缩短发电机的使用寿命。

二、短路计算的任务和若干简化假设

在电力系统和电气设备的设计和运行中，短路计算是解决一系列技术问题所不可缺少的基本计算。短路计算主要应用在以下几个方面：

- 1) 选择有足够机械稳定性和热稳定度的电气设备，如断路器、互感器、绝缘子、母线、电缆等，必须以短路计算作为依据。这包括：计算冲击电流以校验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设备的热稳定度，以及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) 为了合理地配置各种继电保护和自动装置并正确整定其参数，必须对电力网中发生的各种短路进行计算和分析。在这些计算中不但要知道故障支路的电流值，还必须知道故障时电流在网络中的分布情况及节点的电压值。
- 3) 在设计和选择发电厂和电力系统电气主接线时，为了比较不同方案的接线图、确定是否需要采取限制短路电流的措施等，都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，也包含一部分短路计算的内容。

此外，确定输电线路对通信的干扰，对已发生故障进行分析，都必须进行短路计算。

在实际工作中，根据一定的任务进行短路计算时，必须首先确定计算条件。这包括：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，系统运行方式指的是系统中投入运行的发电、变电、输电和用电设备以及它们之间相互连接的状况；计算不对称短路时，还应包括中性点的运行状态。对于不同的计算目的，所采用的计算条件是不同的。

由于同步发电机是电力系统最重要的元件，它的运行特性对电力系统的运行状态有决定性的影响。为了分析电力系统的电磁和机电暂态过程，需根据理想同步电机内部各电磁量的关系，建立同步电机的较精确而完整的数学模型，为电力系统暂态过程的研究准备必要的基

基础知识。

为便于分析，在电磁和机电暂态过程研究中常采用以下简化假设：

1) 忽略磁路饱和、磁滞、涡流等的影响，认为电机铁心部分的磁导率为常数，因而可以应用叠加原理。

2) 电机转子的结构分别相对于直轴和交轴对称。

3) 定子的 a、b、c 三相绕组的空间位置互差 120° 电角度，在结构上完全相同，它们均在气隙中产生正弦分布的磁动势。

4) 电机空载、转子恒速旋转时，转子绕组的磁动势在定子绕组所感应的空载电动势是时间的正弦函数。

5) 定子和转子的槽和通风沟不影响定子和转子的电感，即认为电机的定子和转子具有光滑的表面。

符合上述假设条件的电机称为理想同步电机。实验表明，依据理想同步电机的计算结果能满足一般工程计算的精度要求。

此外，在电磁暂态过程分析中还假设：

1) 在电磁暂态过程期间同步发电机保持同步转速，即只考虑电磁暂态过程，不考虑机械暂态过程。

2) 发生短路后励磁电压保持不变，即不考虑短路后发电机端电压降低引起的强行励磁（本章第八节的情况）。

3) 短路发生在发电机的出线端口。如果短路发生在出线端外，可以把外电路的阻抗看作定子绕组电阻和漏抗的一部分，故短路后的物理过程和出线端口短路是完全一样的。

在具有阻尼绕组的凸极同步电机中，共有 6 个有磁耦合关系的线圈。在定子方面有静止的三个相绕组 a、b 和 c，在转子方面有一个励磁绕组 f 和用来代替阻尼绕组的等效绕组 D 和 Q。转子三个绕组随转子一起旋转，绕组 f 和绕组 D 位于直轴 d 方向，绕组 Q 位于交轴 q 方向。对于没有装设阻尼绕组的隐极同步电机，其实心转子所起的阻尼作用也可以用等效的阻尼绕组来表示。

第二节 同步发电机突然三相短路后的物理过程及短路电流的近似分析

在电力系统实用短路计算中介绍了在电源的电压幅值和频率保持恒定的情况下，三相电路发生三相短路的情形。实际上，电力系统发生短路时，作为电源的发电机内部也处于暂态过程，因而不能保持其端电压和频率不变。一般认为，由于电力系统短路作用的时间较短，而发电机转子的惯量较大，在分析短路电流时可以近似地认为发电机转子保持同步转速，即频率保持恒定，但通常应计及发电机的电磁暂态过程，即发电机端电压不能保持恒定。

本节在实测的短路电流波形基础上，应用同步发电机的双反应原理和超导回路的磁链守恒原理，对短路后的物理过程和短路电流的表达式作近似分析。

一、空载时突然三相短路的电流波形

图 1-1 所示为同步发电机在转子有励磁电流而定子回路开路即空载运行情况下，定子三

相绕组端部突然三相短路后的电流实测波形。其中，图 1-1a 为定子三相电流，一般称为短路电流，图 1-1b 为励磁回路电流。用波形分析方法分析定子三相短路电流，可知三相的短路电流均含有直流电流分量。图 1-2a 为三相短路电流包络线的均分线，即短路电流中的直流分量。各相的直流分量大小不等，但衰减规律相同。图 1-2b 为分解得到的交流分量，其峰值（正向最大值和负向最大值之差）为三相短路电流包络线间的垂直距离（三相相等）。交流分量含有按两个时间常数衰减的分量，一般将时间常数小的称为 T_d'' ，大的称为 T_d' 。交流分量最终衰减至稳态短路电流。

图 1-1b 示出的励磁回路电流波形表明，定子三相短路后励磁回路电流中出现了交流电流，它最后衰减至零，其衰减时间与定子电流直流分量的衰减时间相同。此外，图中交流电流的对称轴线，即直流电流，在刚短路后较正常值 i_{f101} 大，最后衰减至 i_{f101} ，其衰减时间与定子电流交流分量的相同。励磁回路电流的上述变化是由于励磁回路和定子以及转子阻尼回路间存在磁耦合的缘故。

由图 1-1 所示的波形还可以看出，无论是定子短路电流还是励磁回路电流，在突然短路瞬间均不突变，即三相定子电流均为零，励磁回路电流等于 i_{f101} ，这是因为在感性回路中电流（或磁链）是不会突变的。

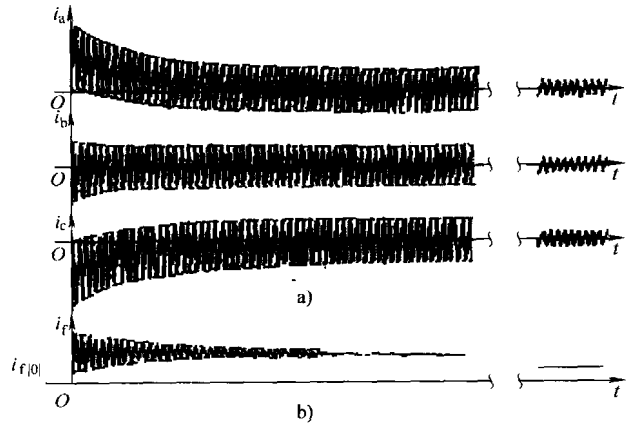


图 1-1 同步发电机定子三相绕组端部三相短路后的电流实测波形
a) 定子三相电流 b) 励磁回路电流

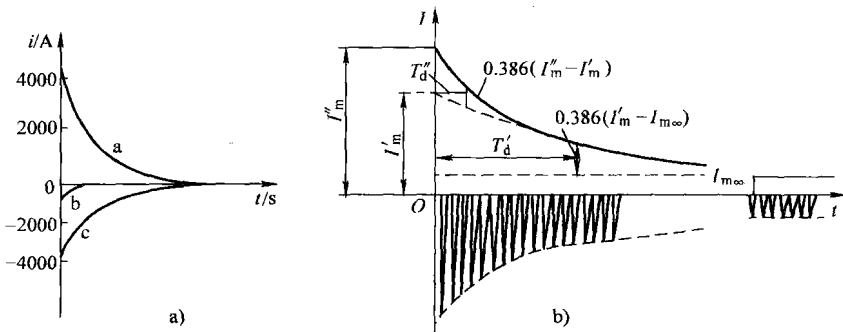


图 1-2 短路电流波形分解
a) 三相直流分量 b) 交流分量

二、空载短路电流分析

从同步发电机的电流波形可看出，定子短路电流和励磁回路电流包括直流分量和交流分量，下面从电机内部物理过程分析产生这些分量的机理。在分析中，主要应用超导体闭合回

路磁链守恒、任意闭合回路磁链不能突变原理以及同步电机电枢反应原理。

(一) 定子短路电流分量

同步发电机空载运行时，只有励磁电流 i_{f101} 产生磁通，扣除漏磁通后，穿过主磁路的主磁通 ϕ_0 交链定子三相绕组，主磁通空间位置如图 1-3 所示。图中 θ 为主磁通（即转子直轴）与 a 相磁链轴线的夹角，后者与 a 相正电流磁动势方向相反。由于转子以同步转速旋转，主磁通交链定子三相绕组的磁链随着 θ 的变化而变化，可表示为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{a0} &= \psi_0 \cos\theta \\ \psi_{b0} &= \psi_0 \cos(\theta - 120^\circ) \\ \psi_{c0} &= \psi_0 \cos(\theta + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

式中 ψ_0 ——与主磁通 ϕ_0 对应的磁链（下标 0 表示主磁通、主磁链）。

若在 $t=0$ 时刻定子突然三相短路，令该时刻与转子位置相对应的 θ 为 θ_0 ，则短路后主磁通交链三相磁链的表达式为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{a0} &= \psi_0 \cos(\theta_0 + \omega_0 t) \\ \psi_{b0} &= \psi_0 \cos(\theta_0 + \omega_0 t - 120^\circ) \\ \psi_{c0} &= \psi_0 \cos(\theta_0 + \omega_0 t + 120^\circ) \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

图 1-4 所示为主磁通交链三相磁链的波形。

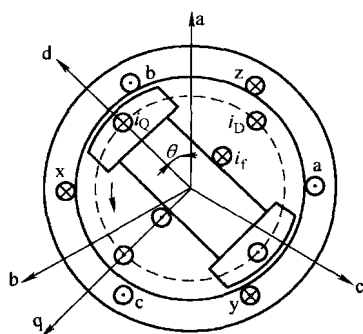


图 1-3 主磁通空间位置

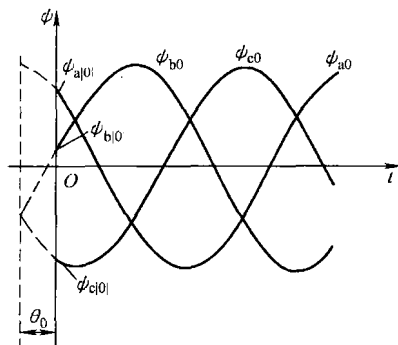


图 1-4 主磁通交链三相磁链的波形

由图 1-4 知，在短路瞬间三相磁链的瞬时值分别为

$$\left. \begin{aligned} \psi_{a|01} &= \psi_0 \cos\theta_0 \\ \psi_{b|01} &= \psi_0 \cos(\theta_0 - 120^\circ) \\ \psi_{c|01} &= \psi_0 \cos(\theta_0 + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

若忽略定子三相回路的电阻，即假设它们为超导体，则根据磁链守恒原理，三相回路的磁链将一直保持为 $\psi_{a|01}$ 、 $\psi_{b|01}$ 和 $\psi_{c|01}$ 。由此可推论，短路后三相回路将感应电流，其产生的磁链 ψ_{ai} 、 ψ_{bi} 和 ψ_{ci} 应满足以下关系：

$$\left. \begin{aligned} \psi_{ai} + \psi_{a0} &= \psi_{a|01} \\ \psi_{bi} + \psi_{b0} &= \psi_{b|01} \\ \psi_{ci} + \psi_{c0} &= \psi_{c|01} \end{aligned} \right\}$$

图 1-5 所示为 a 相电流应产生的磁链 ψ_{ai} 。图中虚线为其包含的两个分量：一个是恒定

的, 等于 ψ_{a101} ; 一个是交变的, 与 ψ_{a0} 大小相等, 方向相反。类似分析可得 ψ_{b1} 和 ψ_{c1} , 它们也含有恒定分量和交流分量。不难理解, ψ_{a1} 、 ψ_{b1} 和 ψ_{c1} 的交变分量是三相对称的, 而恒定分量总是不相等的。

由上可见, 产生 ψ_{a1} 、 ψ_{b1} 和 ψ_{c1} 的三相短路电流均含有基频 (50Hz) 交流电流和直流。三相的基频交流电流显然也是三相对称, 即幅值相等, 相位相差 120° 。由于在图 1-3 规定的磁链正方向与定子电流磁动势正方向相反, 因此三相交流电流分别与 ψ_{a0} 、 ψ_{b0} 和 ψ_{c0} 同相位, 三相的直流电流与 ψ_{a101} 、 ψ_{b101} 和 ψ_{c101} 反相。

三相的直流可合成为一个在空间静止的磁动势, 而在空间旋转的转子, 其直轴与交轴的磁阻 (后面将说明是暂态磁阻) 是不相同的, 所以静止磁动势所遇到的磁阻是

周期变化的, 其周期为 180° 电角度, 频率为二倍于基频。因而, 为产生恒定的磁链, 磁动势不应是恒定的, 而是大小随磁阻作相应的变化, 即直流电流的大小不是恒定的, 而是按二倍基频波动。也可以理解为定子三相中除了大小不变的直流量外, 还有一个二倍频的交流电流。二倍频交流电流的幅值取决于直轴和交轴磁阻之差, 其幅值较小, 故在波形中不易被观察到。

(二) 励磁回路电流分量

短路前励磁回路的励磁电流 i_{f101} 是恒定的, 它由励磁电源强制产生, 定子短路后依旧存在。除此之外, 突然短路后定子电流的电枢反应将引起励磁回路感生其他电流分量。

定子三相基频交流电流可合成为一个与转子同步旋转的电枢反应磁动势, 若忽略定子绕组电阻, 该磁动势为纯去磁的, 它穿入励磁绕组且与主磁通方向相反。假设励磁绕组为超导体, 为了保持自身磁链守恒, 励磁回路中必然感生一附加的 (或称自由的) 直流电流分量, 其方向与原有的励磁电流 i_{f101} 相同, 即加强励磁回路原有磁链, 以抵消定子基频交流电流电枢反应的作用。

定子电流中直流分量产生的在空间静止的磁场与转子的相对速度为同步转速; 定子电流的二倍频交流电流, 产生的以两倍同步转速旋转的磁场, 与转子的相对速度也是同步转速, 这两种电枢反应均会在励磁回路中感应基频交流电流分量。这也可理解为励磁回路为保持自身磁链守恒感生基频交流电流, 以抵消穿入的交变磁场。

上述的励磁回路附加直流分量和基频交流分量与图 1-1b 所示的波形是一致的。

(三) 阻尼回路电流分量

凸极同步发电机转子磁极上两端短路的阻尼条和隐极机实心转子铁心中涡流回路在正常稳态运行时是没有电流的, 而在暂态过程中会感生电流。为了分析简便, 一般将阻尼条构成的回路和铁心中涡流回路等效为两个绕组, 一个与励磁绕组同轴向, 一般称为直轴阻尼绕组 D, 另一个则为交轴阻尼绕组 Q。

定子短路前等效阻尼绕组 D 和 Q 中均无电流。不难理解, 短路后 D 绕组和励磁绕组一样会感生直流电流和基频交流电流, 而 Q 绕组中只有基频交流电流而没有直流电流, 这是因为假设定子回路电阻为零, 定子基频交流电流只有直轴方向的电枢反应。

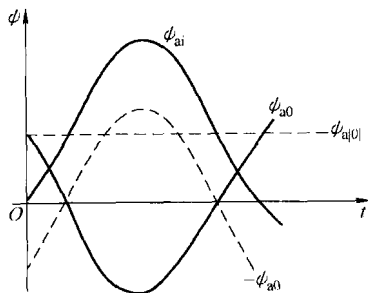


图 1-5 a 相电流应产生的磁链

(四) 定子和转子回路（励磁和阻尼回路的统称）电流分量的对应关系和衰减

在以上分析中，先讨论定子电流分量，然后说明这些分量分别引起转子回路的电流分量，这只是为了叙述的方便，事实上，短路后定子和转子回路电流同时出现，是相互依存、相互影响的。

定子回路短路电流的基频交流分量和转子回路的自由直流分量是互相依存和影响的，转子的自由直流电流由于转子回路有电阻而最终衰减为零，定子的基频交流和它的衰减时间常数相同，由初始值 I'' 衰减为稳态值 I_∞ 。这对分量的衰减时间常数主要决定于转子回路的电阻和等效电感。转子直轴有相互耦合的励磁和阻尼回路 D，故衰减过程有两个时间常数，其大小与两个回路的参数有关。同步发电机的实际情况往往是较大的一个时间常数 T_d' 主要与励磁绕组参数有关。

定子回路短路电流的直流和二倍频交流分量在转子回路中感生基频交流分量，后者也反过来影响前者。前面曾提到定子直流电流大小的波动（即分解出的二倍频交流电流）是由于转子直轴和交轴的磁阻不同造成的，这里所指的磁阻并非稳态运行情况下电枢反应经过的直轴和交轴主磁路磁阻。由于转子回路感生的基频交流电流是为了抵消定子直流分量的电枢反应，因而此电枢反应被迫绕过转子回路，即在直轴方向走励磁和 D 阻尼回路的漏磁路径，交轴方向走 Q 阻尼回路的漏磁路径，对应的磁阻称为暂态磁阻。

定子回路实际有电阻，定子的直流分量（含二倍频分量）以及与之相对应的转子回路基频交流电流最终均衰减至零，它们的衰减规律相同，其时间常数一般用 T_a 表示。 T_a 主要决定于定子绕组的电阻和等效电感。图 1-2a 中的 T_a 大约为 0.2s 左右。

表 1-2 列出了定子和转子回路各种电流分量的对应关系。

表 1-2 定子和转子回路各种电流分量的对应关系

定子回路	稳态短路电流 I_∞	基频交流电流初始与稳态值之差 $I'' - I_\infty$	直流电流 i_d 二倍频电流 $i_{2\omega}$
励磁回路	励磁电流 i_{f101}	自由直流电流 i_{fa}	基频交流电流 $i_{f\omega}$
D 阻尼回路		自由直流电流 i_{Da}	基频交流电流 $i_{D\omega}$
Q 阻尼回路		自由直流电流 $i_{Qa} \approx 0$	基频交流电流 $i_{Q\omega}$

三、空载短路电流基频交流分量的初始和稳态有效值

工程上关心的是发电机定子短路电流，若能求得其中的基频交流电流，则短路全电流也基本能确定了，因为若略去倍频分量，则直流分量的起始值在空载短路情况下与基频交流分量的短路瞬时值大小相等，方向相反。

(一) 稳态值

基频交流分量的稳态值即稳态短路电流。若忽略定子电阻，稳态短路电流的电枢反应只有直轴分量，其表达式为

$$I_\infty = I_{d\infty} = E_{q101} / X_d \quad (1-2)$$

式中 E_{q101} ——对应励磁电流 i_{f101} 的空载电动势有效值；

X_d ——直轴同步电抗 ($X_d = X_\sigma + X_{ad}$)。

(二) 初始值

基频交流分量初始值的分析比较复杂，为了简明起见先不计阻尼回路的作用。

1. 不计阻尼回路时基频交流分量初始值 I' (或 I'_d)

前面曾指出, 短路瞬间励磁回路为抵消定子基频交流电流电枢反应而感应自由直流分量 i_{fa} , 图 1-6a 所示为相应的磁通。图中, ϕ_R 为 I' 产生的电枢反应磁通, ϕ'_σ 为其定子漏磁通, ϕ_0 和 $\phi_{f\sigma}$ 为励磁电流 $i_{f|0|}$ 产生的主磁通和励磁漏磁通; $\Delta\phi_0$ 和 $\Delta\phi_{f\sigma}$ 为对应于 i_{fa} 的主磁通增量和励磁漏磁通 $\Delta\phi_0$ 、 $\Delta\phi_{f\sigma}$ 和 ϕ_R 的关系为

$$\Delta\phi_0 + \Delta\phi_{f\sigma} = \phi_R$$

根据图 1-6a 可以写出 I' 的表达式为

$$I' = I'_d = E_{q0} / X_d \quad (1-3)$$

E_{q0} 为对应于 $\phi_0 + \Delta\phi_0$ 的空载电动势, 即短路后瞬时的空载电动势, 由于 i_{fa} 的出现而突然增加。式 (1-3) 虽然简明但无法用来计算 I' , 因为 E_{q0} 、 $\Delta\phi_0$ 乃至 i_{fa} 均是未知的量。

图 1-6b 与 a 等效, 它更能表达物理过程。图中表明, 由于 $\Delta\phi_0 + \Delta\phi_{f\sigma}$ 的抵消作用, 励磁回路仍保持原有的磁通 $\phi_0 + \Delta\phi_{f\sigma}$, 而定子的电枢反应磁通 $\phi'_R = \phi_R - \Delta\phi_0$ 在穿过气隙后被挤到励磁绕组的漏磁路径。现在电枢反应磁通经过的磁阻比原来的主磁通磁阻大, 若将对应电枢反应的等效电压降表示为 $I'X'_{ad}$, 则 X'_{ad} 显然比 X_{ad} 小。令电机直轴等效电抗为 $X'_d = X_\sigma + X'_{ad}$, 则

$$I' = I'_d = E_{q|0|} / X'_d \quad (1-4)$$

X'_d 称为直轴暂态电抗, 它较 X_d 小得多, 可通过试验求得。用式 (1-4) 即可计算不计阻尼回路时的初始基频交流电流, 它显然大于稳态电流 I_∞ 。 I' 称为暂态电流。

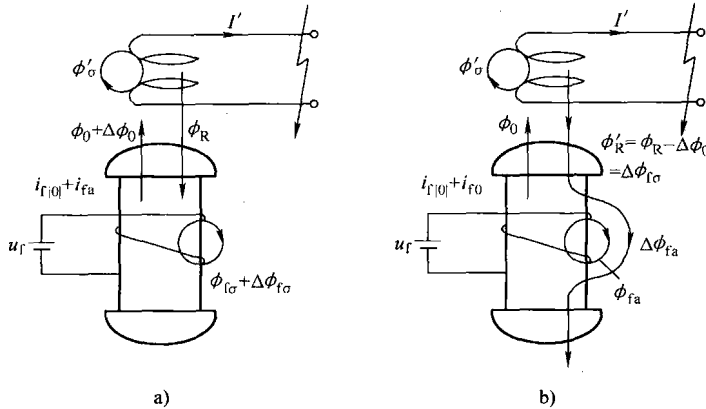


图 1-6 短路瞬时定子基频交流和励磁回路直流分量的磁通
a) 主磁通增加 b) 电枢反应走漏磁路径

2. 计及阻尼回路时基频交流分量初始值 I'' (或 I''_d)

在短路瞬间直轴阻尼回路 D 也会感生自由直流电流, 以抵消定子基频交流电流电枢反应的穿入。图 1-7a 所示为相应的磁通, 其中 $\Delta\phi_0$ 由励磁回路和 D 阻尼回路共同产生, $\Delta\phi_{D\sigma}$ 为 D 回路的漏磁通。磁通平衡关系为

$$\left. \begin{aligned} \Delta\phi_0 + \Delta\phi_{f\sigma} &= \phi_R \\ \Delta\phi_0 + \Delta\phi_{D\sigma} &= \phi_R \end{aligned} \right\}$$

图 1-7b 与图 1-6b 是对应的, 只是电枢反应磁通穿过气隙后被迫走 D 阻尼回路和励磁回路的漏磁路径, 相应的等效电压降为 $I''X''_{ad}$, X''_{ad} 较 X'_{ad} 更小。令电机直轴等效电抗为 $X''_d = X_\sigma$

+ X''_{ad} ，则初始电流为

$$I'' = I''_d = E_{q101} / X''_d \quad (1-5)$$

X''_d 称为直轴次暂态电抗，它比 X'_d 还小，也可通过实测得到。 I'' 称为次暂态电流，它大于 I' ，更大于 I_∞ 。

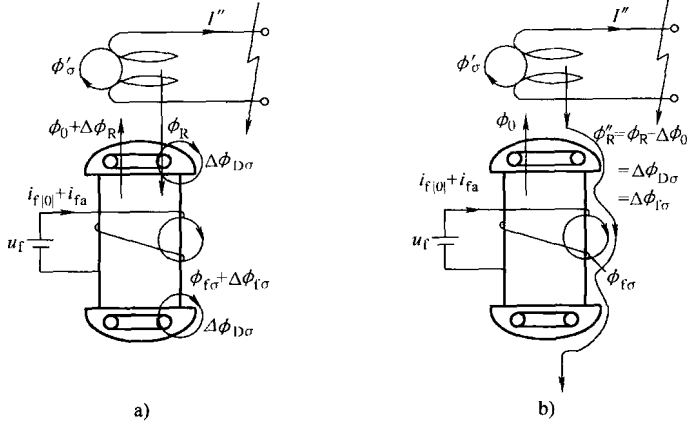


图 1-7 计及阻尼回路后的磁通
a) 主磁通增加 b) 电枢反应走漏磁路径

通过以上讨论可以清楚地看到，同步发电机短路电流的基频交流电流幅值变化的根本原因是在定子三相绕组空间内有闭合的转子回路。这些闭合回路在暂态过程中改变着定子电枢反应磁通的路径，而使定子绕组的等效电抗发生变化，即由 $X''_d(X'_d)$ 变为 X_d 。如果短路不是发生在发电机的端口，而是发生在发电机外电路电抗 X 之后，则电流表达式 (1-2)、式 (1-4) 和式 (1-5) 中的电抗 X_d 、 X'_d 和 X''_d 均应加上 X 。当外电抗 X 比发电机电抗大得很多时，则 $X_d + X \approx X'_d + X \approx X''_d + X \approx X$ ，即短路电流的基频交流电流幅值几乎不变。换句话说，当短路发生在离电源较远处，可以近似地认为电源电压为恒定。在目前讨论的空载情况下短路，电源电压为 E_{q101} ，则短路电流的基频交流电流有效值为 E_{q101} / X_0 。

四、空载短路电流的近似表达式

(一) 基频交流分量的近似表达式

根据图 1-2b 和式 (1-2)、式 (1-4) 和式 (1-5)，基频交流电流幅值的变化可用下式表达：

$$I_m(t) = \sqrt{2} E_{q101} [(1/X''_d - 1/X'_d) e^{-t/T''_d} + (1/X'_d - 1/X_d) e^{-t/T'_d} + 1/X_d]$$

相应的三相交流基频电流瞬时值应与式 (1-1) 相位一致，即

$$\left. \begin{aligned} i_{pa}(t) &= I_m(t) \cos(\theta_0 + \omega_0 t) \\ i_{pb}(t) &= I_m(t) \cos(\theta_0 + \omega_0 t - 120^\circ) \\ i_{pc}(t) &= I_m(t) \cos(\theta_0 + \omega_0 t + 120^\circ) \end{aligned} \right\}$$

式中 i_{pa} ——空载短路时 a 相基频电流瞬时值；
 i_{pb} ——空载短路时 b 相基频电流瞬时值；
 i_{pc} ——空载短路时 c 相基频电流瞬时值。

(二) 全电流的近似表达式

如果忽略二倍频交流分量，则直流分量的起始值和基频交流分量的初始瞬时值大小相等，方向相反，短路电流的全电流表达式为

$$i_a = \sqrt{2}E_{q101} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{\frac{-t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{\frac{-t}{T_d}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega_0 t + \theta_0) - \frac{\sqrt{2}E_{q101}}{X_d''} \cos\theta_0 e^{\frac{-t}{T_a}}$$

$$i_b = \sqrt{2}E_{q101} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{\frac{-t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{\frac{-t}{T_d}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega_0 t + \theta_0 - 120^\circ) - \frac{\sqrt{2}E_{q101}}{X_d''} \cos(\theta_0 - 120^\circ) e^{\frac{-t}{T_a}}$$

$$i_c = \sqrt{2}E_{q101} \left[\left(\frac{1}{X_d''} - \frac{1}{X_d'} \right) e^{\frac{-t}{T_d'}} + \left(\frac{1}{X_d'} - \frac{1}{X_d} \right) e^{\frac{-t}{T_d}} + \frac{1}{X_d} \right] \cos(\omega_0 t + \theta_0 + 120^\circ) - \frac{\sqrt{2}E_{q101}}{X_d''} \cos(\theta_0 + 120^\circ) e^{\frac{-t}{T_a}}$$

五、负载时短路电流基频交流分量初始值

如果同步发电机在带负载情况下定子端突然三相短路，从物理概念上不难推论短路电流中仍会含有前述的各种分量，当然分量的表达式将有所变化，只有稳态短路电流的表达式仍为 E_{q101}/X_d 。以下介绍工程实用上最需计算的基频交流电流的初始值。

短路前同步发电机带有负载，即短路发生前已有电枢反应磁通 ϕ_{R101} 。一般情况下负载电流不是纯感性的，它的电枢反应磁通可按双反应原理分解为 ϕ_{Rd101} 和 ϕ_{Rq101} 。图 1-8a 所示为短路前的磁通。

对应的定子电压平衡关系为

$$\dot{E}_{q101} - j \dot{I}_{d101} X_{ad} - j \dot{I}_{d101} X_\sigma = \dot{E}_{q101} - j \dot{I}_{d101} X_d = \dot{U}_{q101}$$

$$0 - j \dot{I}_{q101} X_{aq} - j \dot{I}_{q101} X_\sigma = 0 - j \dot{I}_{q101} X_q = \dot{U}_{d101}$$

其相应的相量图如图 1-8b 所示。

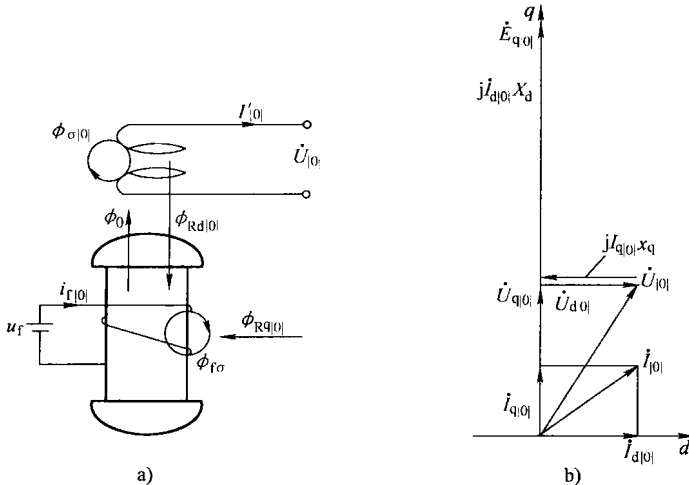


图 1-8 短路前的磁通和相应的相量图

a) 磁通 b) 定子电压、电流相量图

(一) 不计阻尼回路时基频交流分量初始值 I'

假设定子回路电阻为零时，短路瞬间的定子基频交流分量初始值显然只有直轴电枢反