

大电流母线的 理论基础与设计

西安交通大学 吴励坚 主编

水利电力出版社

内 容 提 要

本书系统地阐述电力系统中载流4kA及以上的大电流母线(敞露母线和封闭母线)的工作原理和设计方法,分电磁原理、散热原理、力学原理和设计四篇。

书中电磁部分包括电磁场原理,导体电感,圆管和方管导体的集肤效应和邻近效应,三相电路的转移阻抗,敞露母线的电动力,大电流母线附近钢结构的感应发热,铝壳离相封闭母线的交流稳态和短路暂态电磁分析;散热部分包括传热原理,敞露双槽母线的热计算,自冷和风冷封闭母线的热计算和最优化设计;力学部分包括梁的理论,母线的单频、双频两种简化模型振动原理,刚支和弹支多跨梁振动的数值解,固有频率和主频率理论和计算,母线应力及支点反力的计算和几种实用计算曲线,封闭母线的力学计算;设计部分包括大电流母线的类型、特点和设计方法。书中还介绍了母线的电磁、热学、力学试验方法。

本书可供电力工程技术人员和大专院校电气专业师生参考。

大电流母线的理论基础与设计

西安交通大学 吴励坚 主编

*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

水利电力印刷厂印刷

*

787×1092毫米 16开本 32印张 726千字

1985年12月第一版 1985年12月北京第一次印刷

印数0001—2350册 平装定价7.45元

书号 15143·5735

前 言

现今的大型发电厂和大功率供电线路中,都要用到工作电流为几千安到几万安的大电流母线。与一般电流较小的母线相比,它的截面较大,电磁场较强,对其运行可靠性要求较高。随着电流的增大,就出现了新的母线结构型式,如封闭母线和大跨距悬挂式双槽形母线等。因此,虽然母线的基本理论和传统的设计方法早在本世纪二、三十年代就已形成,但伴随着新型式母线的出现,母线的理论也随之发展,设计方法也因电子计算机的应用而更趋先进。

然而到目前为止,还没有一本全面论述大电流母线理论基础和设计方法的书。专业人员和学者若要了解这些内容,必须查阅大量分散的资料和文献。在我国大型发电厂的建设过程中,本书的作者以及其它许多同志曾长期进行过各种大电流母线的研究工作。总结这些研究成果,并整理前人的研究成果,写出一本比较系统而全面的书供有关工程技术人员阅读参考,便自然地成为我们义不容辞的责任。

大电流母线的理论基础包括电工原理、传热学、力学以及工程数学的某些主要内容(鉴于高电压现象和绝缘结构牵涉专门的知识,本书不包括这方面的内容),本书以电力系统中的各种大电流母线为主体,全面阐述其电磁、热、力的有关理论分析和设计方法,构成一个完整体系。

我们希望,读者通过本书不仅能够掌握大电流母线的原理和设计方法,还能从理论上提高一步,掌握上述基础理论的正确运用,这样在遇到工程中的新问题时(这些新问题是层出不穷的),也能独立地加以研究和解决。同时,希望这本书对高等院校的本科生和研究生在理论联系实际(包括数学)和理解基本理论的某些重要概念方面也能有所帮助。

本书总论和第一篇的大部分由西安交通大学吴励坚编写,其中§2-9中的方管电抗部分由西安交通大学黄景仪编写,第三章由中南勘测设计院杨瑞棠编写;第二篇由西安交通大学刘咸定编写;第三篇由西安交通大学徐建学编写;第四篇由西北电力设计院梁传寿、姚成开和杨瑞棠编写。全书由吴励坚主编。

前三篇初稿完成后,曾经西安交通大学电工原理教研室、热工教研室和理论力学教研室分别初审;全书由孙绍先同志、杨德晔同志、蒋洪滔同志、戴庆来同志、张道民同志和孔庆东同志审阅;邱景安同志也对本书的写作给予了不少帮助。作者们在此对上述同志表示衷心感谢!

由于我们是第一次撰写这样的书,水平有限,尽管经过审稿和多次修改,一定还存在许多缺点和错误,希望读者批评指正。

编 者

1983年11月

主要符号表

A	向量磁位		
A	吸收率	Q	绝对压力, 压强
a	短路电流交流分量衰减部分的系数, 槽形母线双槽宽度, 导温系数		无功功率, 无功功率损耗, 热流量, 单位时间的传递热量, 作用力
B	磁感应强度 (磁通密度)	q	电荷, 单位面积的无功功率损耗, 射距, 热流密度, 单位长度作用力
b	轴偏, 槽形母线单槽宽度	R	半径, 支点反力, 热阻, 气体常数, 反射率
C	电容, 刚度, 热稳定系数	R₀	1000m长导体的直流电阻
c	厚度, 比热	Re	雷诺数
c_p	空气定压比热	r	电阻, 半径, 距离
D	微分算子 ($= \frac{d}{dt}$), 直径, 穿透率	S	波印亭向量
d	直径, 距离	S	波印亭向量的模, 相间距离
E	电场强度, 电动势 (有效值), 弹性 模量, 辐射力	$\tilde{S}$	复功率
e	电动势 (瞬时值)	s	面积, 截面积, 相对距离
F	表面积, 剪力	T	周期, 时间常数
f	频率, 函数, 风冷封闭母线热计算每 分段的长度	T_R	外壳环流互感时间常数
G	相间净距	T_L	外壳涡流感应时间常数
Gr	格拉晓夫数	t	时间
g	重力加速度, 几何平均距离	U	电压 (有效值), 直流电压
H	磁场强度, 绝缘子高度	u	电压 (瞬时值)
h	相对磁场强度, 槽形母线单槽高度	V	体积
I	电流 (有效值), 直流电流	v	速度, 波速
i	电流 (瞬时值)	W	截面系数 (截面模量), 流量
J	电流线密度, 惯性矩	w	截面周长, 流速, 线圈匝数
K	交流损耗系数	x	电抗
K_f	集肤效应系数	y	位移
K_l	邻近效应系数	z	阻抗, 电磁波的透入深度
L	电感, 总长度, 跨距	α	电阻温度系数, 换热系数, 特性参数 (ωT_c)
L_R	外壳与导体的互电感	β	刚度比, 容积膨胀系数, 特性参数 (ωT_R)
l	长度, 定性尺寸, 跨距	γ	电导率
m	质量	δ	电流密度
M	互感, 弯矩, 质量	ϵ	介电常数, 黑度
M_B	运行费, 投资	η	相对总位移
Nu	努谢尔特数	θ	温度
P	有功功率, 有功功率损耗	Θ	绝对温度
Pr	普朗特数	λ	导热系数
p	单位表面积的有功功率损耗, 气体的		

μ	磁导率, 动力粘性系数	Φ	磁通 (有效值)
μ_0	真空磁导率, 机械内阻尼系数	φ	电位, 初相角, 辐射角系数, 功率因数角
ν	运动粘性系数, 泊桑比, 电动力密度	φ_m	标量磁位
ρ	电荷密度, 电阻率, 质量密度, 曲率半径	χ_0	机械外阻尼系数
σ	电荷面密度, 应力	ψ	全磁通 (磁链)
τ	温升	ω	角频率, 扇性面积
ϕ	磁通, 函数		

主要下标意义

0	基准, 初始, 真空, 无钢, 黑体, 直流	M	母线
20, 60, 75	20°C, 60°C, 75°C	m, max	最大值 (正弦电流幅值), 流体平均值
A, B, C	三相的相别	N	内部, 内表面
a	直流, 实部, 导体管内	n	法线分量, 自然
b	虚部, 表面	R	经过涡流或环流屏蔽后的剩余
c	环流, 临界, 槽间	RR	经过环流和涡流双重屏蔽后的剩余
D	对流	S	支点, 支点序号, 太阳
d	交流, 短路	t	切线分量
e	涡流, 额定, 当量	W	外部, 外表面
F	辐射	w	壁面
f	流体	xu	允许
G	支持构件	x	相同
g	钢, 工作, 外壳与导体间的夹层	x, y, z	直角坐标系
J	绝缘子	r, θ , z	圆柱坐标系
K	外壳	Z	支持

目 录

前 言

主要符号表

总 论	1
§ 0-1 母线结构的演变和大电流母线的技术特点	1
§ 0-2 大电流母线的类型和应用	2
§ 0-3 通过母线的短路电流	4

第一篇 大电流母线的电磁原理

引 言	6
第一章 母线的电磁原理	7
§ 1-1 电磁场的基本方程	7
§ 1-2 稳定电磁场	12
§ 1-3 时变电磁场	18
§ 1-4 同轴母线的电磁场和电磁参数	26
§ 1-5 电感的基本概念	32
§ 1-6 长直圆导体电流引起的电感和感应电动势	34
§ 1-7 任意截面长直导体电流引起的电感和几何均距	39
§ 1-8 短直导体及矩形回路的电感	49
§ 1-9 铁磁物体中的交变电磁场	55
§ 1-10 母线的短路电动力	59
第二章 敞露母线的电磁理论	60
§ 2-1 圆导体的集肤效应	60
§ 2-2 圆管导体的集肤效应	67
§ 2-3 邻近效应概述	76
§ 2-4 圆导体的邻近效应	81
§ 2-5 圆管导体的邻近效应	92
§ 2-6 方管导体和双槽母线的集肤效应和邻近效应	102
§ 2-7 三相回路的阻抗和电容	110
§ 2-8 敞露母线的短路电动力	114
第三章 大电流母线附近钢构的感应发热	121
§ 3-1 大电流母线附近钢结构的磁化	121
§ 3-2 长直母线周围的无钢磁场强度	123

§ 3-3 横越钢条的表面磁场强度	125
§ 3-4 其他布置方式的钢条表面磁场强度	128
§ 3-5 横越钢条中的损耗和它所造成的母线附加电阻	131
§ 3-6 简单闭合钢构回路中的感应环流	132
§ 3-7 复杂闭合钢构网络中的感应环流	136
§ 3-8 闭合钢构回路中的损耗和它所造成的母线附加电阻	142
§ 3-9 电磁屏蔽	144
§ 3-10 空气中钢条发热的温升	147
§ 3-11 混凝土中钢筋的温升	151
第四章 离相封闭母线的工频稳态	160
§ 4-1 概述	160
§ 4-2 单相不连式的外壳涡流	160
§ 4-3 完纯圆导体间的邻近效应和电轴、镜像法	163
§ 4-4 三相不连式的外壳涡流	166
§ 4-5 单相全连式的电磁分析	172
§ 4-6 三相全连式的电磁分析	177
§ 4-7 外壳损耗	182
§ 4-8 壳内外磁场	184
§ 4-9 离相封闭母线的阻抗和电容	185
第五章 离相封闭母线短路暂态的电磁分析	187
§ 5-1 概述	187
§ 5-2 长直圆管对管内磁场的屏蔽	188
§ 5-3 不连式封闭母线在两相短路时透入壳内的邻相剩余磁场和母线电动力	189
§ 5-4 不连式封闭母线在三相短路时透入壳内的邻相磁场和母线电动力	197
§ 5-5 全连式封闭母线在两相短路时的外壳环流和剩余电流	198
§ 5-6 全连式封闭母线在两相短路时透入壳内的邻相磁场和母线电动力	201
§ 5-7 全连式封闭母线在三相短路时的剩余电流	205
§ 5-8 全连式封闭母线在三相短路时透入壳内的别相剩余磁场和母线电动力	210
§ 5-9 导体横向运动引起的电动力	214
§ 5-10 外壳电动力	218
第六章 大电流母线的电磁测量	228
§ 6-1 交流(工频)稳态磁场强度的测量	228
§ 6-2 交流(工频)稳态电流的测量	231
§ 6-3 交流稳态电压降、阻抗和功率损耗的测量	233
§ 6-4 母线附近钢结构的电磁测量	234
§ 6-5 短路试验中的电流和磁场强度测量	236
§ 6-6 中频模拟	236
第一篇 参考文献	238

第二篇 大电流母线的热计算

引 言	241
第七章 母线的传热原理	242
§ 7-1 热量传递的三种基本方式	242
§ 7-2 导热	243
§ 7-3 对流换热概说	246
§ 7-4 自然对流换热	249
§ 7-5 管内强制对流换热	253
§ 7-6 热辐射的基本概念	254
§ 7-7 辐射换热	256
§ 7-8 太阳辐射	260
§ 7-9 母线的冷却和短路热稳定	262
第八章 自冷母线的热计算	264
§ 8-1 敞露母线的热计算	264
§ 8-2 自冷封闭母线对流换热计算的准则方程	266
§ 8-3 自冷封闭母线的热计算	268
§ 8-4 自冷封闭母线的最优化设计	273
§ 8-5 自冷母线的热试验	280
第九章 风冷封闭母线的热计算	283
§ 9-1 风冷封闭母线的热平衡方程组	283
§ 9-2 风冷封闭母线的最优化设计	288
§ 9-3 风冷封闭母线的热试验	296
第二篇 参考文献	300

第三篇 大电流母线的力学原理

引 言	301
第十章 母线的力学原理	304
§ 10-1 静力梁理论和母线静力计算法	304
§ 10-2 单频(一自由度)系统振动理论	308
§ 10-3 双频(二自由度)系统振动理论	313
§ 10-4 梁振动理论	317
§ 10-5 梁自由振动的数值解	323
§ 10-6 梁强迫振动的差分数值解	332
§ 10-7 地震响应的计算略述	337
第十一章 敞露母线的短路动力特性	341
§ 11-1 母线等效单频系统算法	341
§ 11-2 母线等效双频系统算法	349
§ 11-3 刚支母线分布参数系统计算法	354
§ 11-4 弹支母线分布参数系统计算法	359

§ 11-5	短路动应力各算法的评述	362
§ 11-6	双槽母线的槽间应力、扇性应力和合成应力	363
§ 11-7	各种型式母线的力学特点	367
第十二章	封闭母线的短路动力特性	372
§ 12-1	封闭母线分布参数系统短路运动微分方程及解	372
§ 12-2	封闭母线集中参数系统短路运动微分方程及解	377
§ 12-3	封闭母线短路动力特性	380
§ 12-4	外壳自由振动	386
§ 12-5	外壳短路应力	390
第十三章	力学试验和测量	394
§ 13-1	绝缘子和弹性元件静力学参数的测量和计算	394
§ 13-2	母线的固有频率和振型的测量	400
§ 13-3	敞露母线原型短路试验及动应力测量	402
§ 13-4	封闭母线原型短路试验的力学测量	405
第三篇	参考文献	407

第四篇 大电流母线的选型与设计

引 言	409
第十四章 大电流母线型式的比较和选择	412
§ 14-1 大电流母线的导体和绝缘子	412
§ 14-2 敞露式大电流母线的结构特点及使用范围	416
§ 14-3 离相封闭母线的类型和结构特点	418
§ 14-4 选择母线型式的技术经济比较方法	423
第十五章 大电流敞露母线的设计	426
§ 15-1 导体截面尺寸的选择	426
§ 15-2 母线固有振动频率计算	435
§ 15-3 支持式母线系统的短路机械强度计算	441
§ 15-4 悬挂式母线系统的机械强度计算	447
§ 15-5 钢构损耗发热计算	452
§ 15-6 减少钢构损耗和发热的措施	475
第十六章 离相封闭母线的设计	479
§ 16-1 离相封闭母线截面尺寸的选择	479
§ 16-2 离相封闭母线的固有频率计算	487
§ 16-3 离相封闭母线的机械强度计算	489
第四篇 参考文献	502

总 论

§ 0-1 母线结构的演变和大电流母线的技术特点

发电厂和变电所中广泛地使用母线（或称汇流排）连接各种电机和电器，以传输电流和功率，并通过配电装置分配电能。我国电力系统的标准工业频率（简称工频）是50Hz。母线一般是用电导率高的铝、铜型材制成（又称硬母线）^①，用耐高电压的绝缘子（一般是瓷质）支持。由于铝的成本低，现在除要求高机械强度等特殊情况下才用铜导体外，普遍使用铝导体。母线大部分装设在户内，但也有一部分在户外。它是电站内部的电力线路，应满足安全和经济运行的要求。因此电力设计人员正确设计母线有重要的意义。

母线的工作状况与它所承载的电流和电压有关。母线电流对母线工作状态的影响涉及电磁学、热学和力学三种物理现象，其中最主要的是：①导体中的电流分布和功率损耗；②导体的散热和温升；③短路时导体和绝缘子承受的电力和机械应力。合理的设计应使温度和应力不超过允许值，同时总投资费和总运行费之和最小。关于母线电压所引起高压电场和绝缘的问题，不属本书讨论范围。

电流较小的母线具有扁平的矩形截面，即所谓矩形母线或平板母线，用支柱式绝缘子支持，材料起初是高纯度的铜，在铝工业发展后逐渐被高纯度的电解铝代替。矩形截面的优点是散热面比圆形的大，并且它的平面便于螺栓连接。我国最大的单片矩形母线承载的工作电流可达2kA左右。当工作电流较大时可采用2~4片组成的多片矩形母线，片间留有宽度等于片厚的通风间隙。但4片矩形母线的载流能力一般不过四千多安。矩形母线常被用于容量为50MW及以下的发电机或容量为60MVA及以下的降压变压器10.5kV侧的引出线及其配电装置。

在各级电压的电站中，以发电机电压（在我国常用的有10.5、13.8、15.75、18、20kV等）的母线电流最大。随着发电机额定功率的增大，其额定电压增高不多，而额定电流越来越大。目前我国电力系统中主力发电机的容量多数为100~350MW，其工作电流约为5~13kA。正在设计的600MW发电机，其额定电压约为20kV，工作电流约达23kA。国外大型发电机容量达1000MW以上，工作电流达36kA以上。这样大容量的发电机，一般都是经过引出母线与升压变压器（在发电厂中称主变压器）直接连接（即“单元制”接线），把电能送入高压电网内。这种连接母线的长度，在火电厂中一般较短，约为20~40m，在水电厂中由水利工程总体布置决定，其变化范围约为20~200m，甚至更长。此外，供电给大功率负荷（例如冶金企业）的10kV电力线路电流也很大，通常也使用硬母线，

① 户外采用的多股绞线又称软母线，不属于本书讨论范围。

其长度更大些，甚至可达1km左右。

输送较大工频电流的母线，具有以下一些技术特点：①由于截面增大，电流集肤效应强烈，多片矩形已不是合理的截面形状，而让位于某种接近于空心圆管的形状；②母线的强磁场能使附近的钢结构受到电磁感应而产生大量功率损耗和发热；③随着发电机组容量和电力系统容量的增大，故障时通过母线的短路电流也相应增大，这又引起导体间的巨大电动力；④现代供电的高度可靠性对母线提出了封闭的要求；⑤由于母线散热的困难增加和有色金属消耗的增加，在电流特别大的情况下（例如15kA以上），宜于采用强制冷却的措施。这些情况加在一起，引起母线形式结构的变化——起初是截面形式的改变，以后是结构的改变。母线形式结构随电流增大而演变的过程可大体表示如下：

矩形→多片矩形→双槽形及其它（类似空心管形）→外壳不连式离相封闭

闭母线→外壳全连式离相封闭母线→风冷封闭母线

在本书中，我们将把工作电流在3kA以上并采用类似空心管形导体的母线称为大电流母线。

§ 0-2 大电流母线的类型和应用

大电流母线可分为两大类：敞露母线和封闭母线，分述如下。

一、敞露母线

在我国大电流敞露母线的导体主要采用两根轧制的槽铝组成，即所谓双槽形母线。这两根槽铝形成一个空心方管，中间留有间隙以加强散热。不同尺寸的双槽母线可用于2kA到9kA线路。虽然从减小集肤效应的角度来看，这种母线不如圆管。但它的四个平面可供两端作电气连接之用。特别是具有圆角的双槽母线集肤效应比方角的小，更为优越。除了双槽形母线外，可供使用的其它截面形状还有由四片矩形导体拼成的菱形和圆管形等，但实际应用不多。

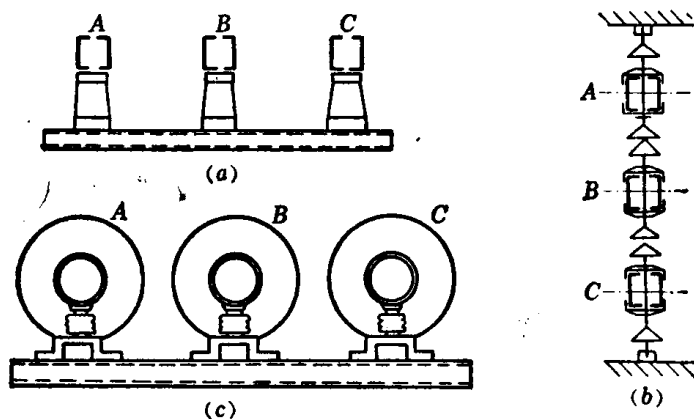


图 0.2.1 支持式、悬挂式、离相封闭式母线
(a)支持式；(b)悬挂式；(c)离相封闭式

敞露母线按照导体的支持方式又分两类，即支持式和悬挂式。

(一) 支持式母线

支持式母线的导体是用适合于母线工作电压的支持式绝缘子固定在钢构架或墙板等建筑物上。最常见的是三相导体位于一个平面上，即并排布置，每相导体用一个绝缘子支持，如图0.2.1(a)。根据厂房布置的情况，三

相导体的平面多数是水平的，也有时是垂直的，此外，有时也可以做成三角形布置。

(二) 悬挂式母线

悬挂式母线的导体是利用高压架空线路用的悬式绝缘子吊挂在建筑物上。一般是三相

垂直排列，如图0.2.1(b)。在局部地点，也可以根据厂房布置的需要做成三相水平或等边三角形或其它排列形式。由于悬挂式绝缘子有很大的抗拉强度（X-4.5C型为4500kg），悬挂式母线可设计成6~10m的大跨距，这时双槽形导体的机械强度得到充分利用，而使支点减少，由于绝缘子击穿而发生故障的机会也减少。此外，这种母线结构简单，安装方便，附近钢构发热损耗也比较小。因此在水电厂和大功率供电线路中常被采用作较长的母线。在火电厂中，由于主厂房布置的限制，一般不用这种母线。

敞露母线多用于电流在8kA以下的母线。大体说来3~6kA的使用外胶装绝缘子的敞露母线附近钢结构发热虽已显著，但尚可不采取专门措施（如电磁屏蔽，断开钢构回路等）。大于6kA时则必须采取措施。而使用内胶装绝缘子的母线由于绝缘子高度较低，钢结构离母线较近，5kA时已需采用专门措施。

二、离相封闭母线

敞露母线暴露在环境中，容易受到人、动物（如老鼠、蛇等）以及其它物体的偶然接触而发生接地和短路。绝缘子还因容易受到灰尘和潮气污染而使绝缘子性能下降。这些情况在母线全长都会发生。定期清扫也要相当多的工作量。

由于供电可靠性日益重要，对母线和其它原来是敞露的电器（如隔离开关等）逐渐提出了封闭的要求。在二、三十年代，曾经把每相母线装设在单独的水泥洞内或用水泥隔板隔开，以避免相间短路。这种结构虽然提高了可靠性，但是建筑复杂，维修不便。当时电流水平不过是三千多安。到四十年代以后，随着电流的加大，国外开始采用金属外壳的封闭母线，其金属壳接地。这种封闭母线在制造厂中制成约3~6m的段，大大减少了现场施工的工作量，提高了母线质量而缩短了工期。最初的金属壳是用高电阻的非磁性钢（锰钢）做成，其截面是方形，好象长方形的箱子，里面装着绝缘子支持的双槽母线。此后改用电阻率低的铝壳。起初三相放在一个箱内，用隔板隔开，叫做隔相母线。后来发现当一相对箱子接地时的电弧会把箱子烧穿，接着发展为两相对地短路，因此改成每相有一个单独的外壳，叫做离相封闭母线，这样一相接地就不会直接发展成为两相对地短路，而一相接地的电流很小，机组仍可继续运行，一面进行处理。以后逐渐改用圆筒形。母线导体则随着电流增大而逐渐过渡到圆管形或八边形截面（分两半）。由于母线电流在铝壳上感应出轴向电动势，其值在短路时可达到100~200V，对人身有危险，因此每一制造段外壳的两端做成与邻段绝缘，同时将每段接地，叫做不连式或分段绝缘式外壳。这种外壳的每一段上由于邻相电流的感应（邻近效应）而产生涡流，并造成一定的功率损耗。但短路时的外壳涡流，却起了阻止邻相磁场进入壳内的屏蔽作用，从而大大减小了短路时作用于母线上的电动力。到五十年代，又有了较大的改进，这就是随着铝的氩弧焊技术的完善，把沿长度各段外壳在现场焊接起来并在两端把三相外壳同铝板焊接起来，形成三相全连式的外壳，简称全连式。全连式封闭母线的出现，又解决了大电流母线的另一个关键问题——钢构发热，因为三相外壳回路中由于电磁感应而产生环流，环流数值大约等于母线电流但方向相反，这就使壳外的磁场大部分消失。全连式离相母线的出现标志着现代母线结构的完善化。它把铝壳的全部优点都发挥出来了，这就是：①彻底解决了随着电流不断加大所产生的比较突出的钢结构发热问题；②不连式封闭母线的母线电动力虽然减轻了，但更大

的电动力却被转移到外壳上，而全连式母线的外壳环流和涡流起了双重的电磁屏蔽作用，从而进一步减轻了母线的电动力，同时外壳上的电动力也很小；③进一步提高了密封性；④封闭外壳可作为通风冷却用的管道，成为风冷母线，使尺寸减小。壳内空气经过风机和水冷却器进行闭式循环，通常由两边相进风，由中相出风（或相反）。在边相与中相外壳间的联管中装有消离子栅，以免当一相母线发生导体接地故障时电弧产生的离子扩散到邻相引起两相接地短路。

离相封闭母线由于有这许多重要的优点，虽然成本比较敞露母线高，有色金属消耗也多，但目前仍被广泛采用。在我国，主要用作电流在8~9kA以上的母线，见图0.2.1(c)。

§ 0-3 通过母线的短路电流

一、电力系统的短路电流及其参数

当母线发生短路，或者发电机或变压器发生短路时，就有比正常工作电流大许多倍的短路电流从电源经过大电流母线流到短路点。这种短路电流常达100kA以上，要对母线产生力的（机械的）和热的效应。为此必须校验母线承受短路电流作用的能力，即校验母线的动稳定性和热稳定性。关于短路电流的计算，读者可参阅有关书籍。大体说来，它由工频的交流分量和直流衰减分量组成，其中交流分量又由于同步发电机的转子纵轴电磁特性而包含次暂态衰减、暂态衰减和稳态三个分量，并由系统中的线路、变压器和发电机等的综合参数以及发电机的自动励磁调节器决定，直流衰减分量是伴随交流分量产生的自由分量，由交流分量的初相角（即短路初瞬间的相角）和系统的综合电磁特性决定^[48]。它可一般地表示为

$$i = I_m \left\{ \left[\left(1 - \frac{x_d''}{x_d'} \right) e^{-t/T_d''} + \left(\frac{x_d''}{x_d'} - \frac{x_d''}{x_d} \right) e^{-t/T_d'} + \frac{x_d''}{x_d} \right] \times \sin(\omega t + \varphi) - e^{-t/T_a} \sin \varphi \right\} \quad (0.3.1)$$

式中 $I_m = \sqrt{2} I''$ —— 短路电流交流分量的初始幅值， I'' 为初始有效值；

x_d'' 、 x_d' 、 x_d —— 系统的次暂态、暂态、稳态电抗；

T_d'' 、 T_d' 、 T_a —— 交流次暂态、交流暂态、直流分量衰减时间常数；

ω —— 工频角频率，等于 $2\pi \times 50 = 314$ ；

t —— 短路后时间；

φ —— 交流分量初始角。

暂态时间常数 T_d' 通常达几秒，就力效应而言，可近似地把它所对应的暂态分量并入稳态分量，剩下次暂态分量以时间常数 T_d'' 所决定的速率衰减。这样短路电流可表示为

$$i = I_m \left\{ \left[a e^{-t/T_d''} + (1-a) \right] \sin(\omega t + \varphi) - e^{-t/T_a} \sin \varphi \right\} \quad (0.3.2)$$

$$a = 1 - \frac{x_d''}{x_d'}$$

图0.3.1是一个电力系统的示意图，表示一个发电厂和一个降压变电站的接线。 I 是

发电站中连接发电机和升压变压器（主变压器）的大电流母线，II是供电给厂用变压器的分支母线（厂用分支母线），III是供电给大功率负荷的大电流母线线路。

如果通过大电流母线的短路电流是从系统经过变压器而来，例如当母线I的发电机端（1点）短路或母线III某处（4点）短路时，一般地说，短路电流的交流分量基本不衰减，即 $\alpha = 0$ 。

如果短路电流是由发电机直接供给的，例如母线I的变压器端（2点）短路，则通过母线的短路电流交流分量是明显衰减的。根据我国机组统计资料， $\alpha \approx 0.35$ 左右^①。至于 T_a' 的值，对于大型汽轮发电机约为0.2s左右，对于大型水轮发电机约为0.07s左右^[47]。

如果短路发生在厂用分支母线上（3点），则经过厂用分支母线的短路电流将是系统和发电机来的电流总和。由此可知，厂用分支母线的工作电流虽然不大，它在短路时却需承受比主母线大得多的电动力，因为电动力与电流平方成正比。

直流分量衰减时间常数 T_a 是短路点前面的系统综合电感与电阻之比 (L/r) ^[48]，它的变化范围为0.05~0.5s。在功率较小的分支电网中，即电气上距离大容量发电机较“远”的地点， T_a 约为0.05s左右。对于大电流的母线，即电气上距离发电机较“近”的场合， T_a 大多数在0.1~0.3s之间。

二、两相短路和三相短路

10~20kV系统一般是三相三线制。可能发生两相和三相短路，后者称为对称短路。一般地说，两相短路与三相短路电流交流幅值的比是 $I_m^{(2)}/I_m^{(3)} = \sqrt{3}/2$ ^[48]，其平方之比是3/4。在单相分支线路（例如供电给单相变压器的母线）上，则只可能发生两相短路。在以后的叙述中， I_m 将代表 $I_m^{(3)}$ 。

两相短路时，两个短路相导体中的短路电流瞬时值数值相等方向相反，如同单相电路中一样。三相短路时，三相电流交流分量的幅值相等，但初相角互相差120°。如以 j 表示相别（A、B、C），则

$$i_j = I_m \{ [ae^{-t/T_a'} + (1-a)] \sin(\omega t + \varphi_j) - e^{-t/T_a} \sin \varphi_j \} \quad (0.3.3)$$

$$\varphi_B = \varphi_A - 120^\circ, \varphi_C = \varphi_B - 120^\circ = \varphi_A - 240^\circ$$

如果忽略整个交流分量的衰减，则

$$i_j = I_m [\sin(\omega t + \varphi_j) - e^{-t/T_a} \sin \varphi_j] \quad (0.3.4)$$

在热稳定校验时，必须知道短路持续时间 t_d ，它是继电保护动作时间与断路器跳闸时间的和。

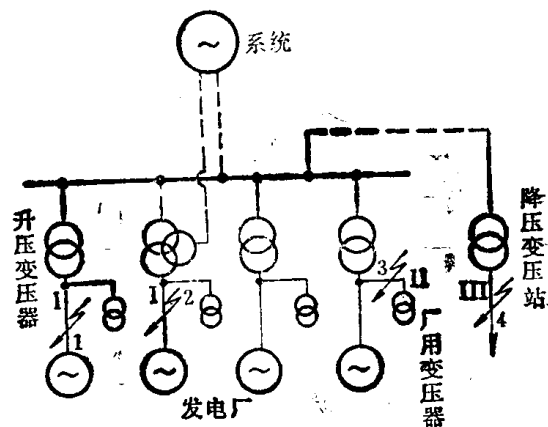


图 0.3.1 电力系统示意图

① 现代的自动励磁调节是快速的，在短路开始阶段就显示出来。因此它的影响可通过 I_m 和 T_a' 的取值来反映。

第一篇 大电流母线的电磁原理

引 言

本篇全面阐述大电流母线的电磁原理和试验。在阐明与大电流母线有关的电磁学基本理论和导体电感理论之后，分述：敞露母线的电磁分析，以集肤效应和邻近效应为重点；大电流母线附近的钢结构感应发热，包括交变磁化和闭合电路两种情况；封闭母线的电磁分析，以涡流和环流计算为重点。最后介绍大电流母线的电磁测量方法。

第一章 母线的电磁原理

本章前四节简述宏观电磁场的基本原理。第一节叙述电磁场的基本方程及其物理意义。第二节叙述几种稳定电磁场——静电场、恒定磁场及恒定电流场的特征，位场和拉普拉斯场的概念以及不同媒质分界面上的边界条件。第三节导出理想电介质和导电媒质中的时变场方程和正弦平面波的解，阐明坡印亭向量这一重要概念，最后引到缓变场的概念。第四节以同轴母线为例说明交直流条件下的母线电磁场和母线的电磁参数。

第五至第八节叙述电感。第五节阐述电感的概念。第六节阐述长直圆导体及其回路的电感（包括外电感和内电感）和感应电动势。第七节把上节内容扩充到任意截面，并阐明互几何均距和自几何均距的概念。第八节阐述利用向量磁位的概念推导出来的短直导体电感公式。

第九节简述铁磁物体中交变电磁场的特性以及铁磁导体流过正弦电流时的内阻抗和损耗。

第十节说明母线电力的基本概念。

§ 1-1 电磁场的基本方程

为了使读者便于理解以后各章的内容，这里简略地阐述一下有关的电磁场基本知识。更详细的阐述可查阅有关场论和电磁场理论的书籍。

作为物质存在的一种特殊形式的电磁场，在本质上是电场和磁场两方面构成的一个统一场，单独的电场或磁场只不过是统一电磁场在特定条件下的表现。因此电磁场的一般形式是时变（即随时间变化的）电磁场，并以电磁场基本方程组描述之。基本方程组以麦克斯韦第一、第二方程为主体，并可用向量的积分和微分两种形式写出。

一、积分形式的电磁场基本方程组和辅助关系式

1. 方程 积分形式的电磁场基本方程组包括下列四式：

$$\oint_l \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = i_c + i_v + \int_s \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} \quad (1.1.1)$$

$$\oint_l \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = - \int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{s} = - \frac{d\phi}{dt} \quad (1.1.2)$$

$$\oint_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{s} = q \quad (1.1.3)$$

$$\oint_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{s} = 0 \quad (1.1.4)$$

式中 l ——有向积分路径长度 (m);

s ——有向积分曲面面积 (m^2);

$\oint$ ——闭合路径或封闭曲面积分符号;

H ——磁场强度 (简称磁强) 向量 (A/m);

B ——磁感应强度 (或称磁通密度) 向量, 特斯拉 (T 或 Wb/m^2);

E ——电场强度 (简称电强) 向量 (V/m);

D ——电位移强度向量 (C/m^2);

q ——封闭曲面 s 内的净电荷 (C);

i_e ——沿正向穿过曲面 s 的净传导电流 (A);

i_v ——沿正向穿过曲面 s 的净徙动电流 (A);

ϕ ——沿正向穿过曲面的磁通 (Wb);

t ——时间 (s)。

上面各式中的 l 和 s 都是有向的, 即分别取定了正方向 (参考方向) 和正侧。它们的微元 dl 和 ds 都是向量, 分别以切线和法线的正方向为其方向。对于一个封闭曲面 s , 一般规定取外侧为正方向, 因此其微分 ds 应指向外法线方向。符号 “ $\cdot$ ” 表示向量运算中的点乘或标量乘法。例如 $H \cdot dl = H \cos \theta (H, dl) dl = H_t dl$, 其中 $\theta(H, dl)$ 表示向量 H 和 dl 之间的夹角^①, H_t 为 H 沿 dl 方向的切线分量; $B \cdot ds = B \cos \theta (B, ds) ds = B_n ds$, 其中 $\theta(B, ds)$ 表示向量 B 和 ds 之间的夹角, B_n 为 B 沿 ds 方向的法线分量。根据场论定义, 式 (1.1.1) 左方是向量 H 沿闭合路径 (或称环路) l 按其正方向的标量线积分即环量, 右方末项是向

量 $\frac{\partial D}{\partial t}$ 穿过曲面 s 按其正方向的标量面积分即通量。式 (1.1.2) 中的两个积分也具有相似的意义。 $i_e + i_v$ 是按正方向穿过 s 的电流。在式 (1.1.1) 和 (1.1.2) 两式中, 曲面 s 是环路 l 所包围 (或限定) 的任意曲面, 且 l 的正方向与 s 的正方向必须符合右手螺旋定则, 即假定一个右手螺旋沿 l 的正方向旋转, 则螺旋前进的方向就是 s 的正方向。

式 (1.1.1) 中电流 i_e 和 i_v 可以分别表示成相应的电流密度向量 δ_e 和 δ_v (A/m^2) 的通量, 即

$$i_e = \int_s \delta_e \cdot ds \quad \text{和} \quad i_v = \int_s \delta_v \cdot ds$$

式 (1.1.2) 中表明磁通 ϕ 是磁感应强度 B 在曲面 s 上的通量。

穿出封闭曲面的电流与曲面内净电荷间有下列关系式

$$\oint_s (\delta_e + \delta_v) \cdot ds = i_e + i_v = -\frac{\partial q}{\partial t} \quad (1.1.5)$$

① 本书中约定, 以第一个向量 H 为基线, 按反时针方向计量的第二个向量 dl 的角度, 以下同。