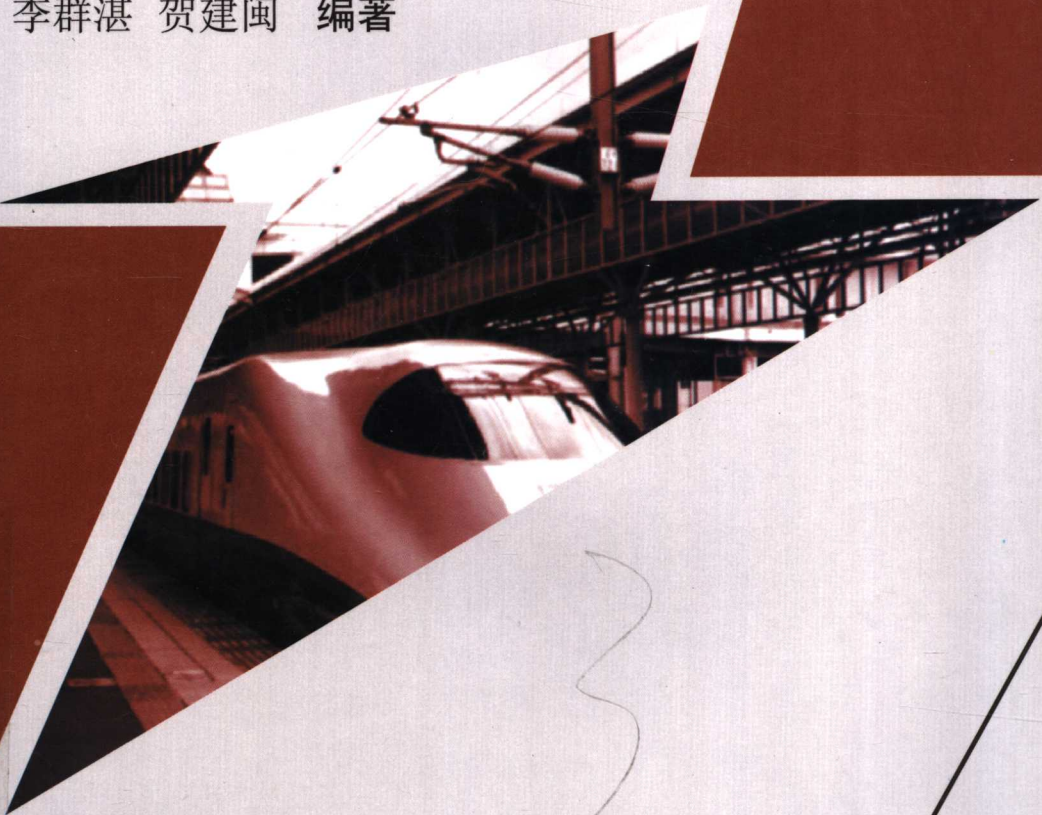


# 牵引供电系统分析

QIANYIN GONGDIAN XITONG FENXI


李群湛 贺建闽 编著



西南交通大学出版社  
[Http://press.swjtu.edu.cn](http://press.swjtu.edu.cn)



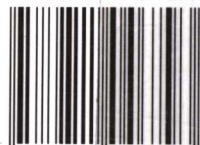
责任编辑 / 黄淑文

封面设计 / Design  本格设计

# 牵引供电系统分析

QIANYIN GONGDIAN XITONG FENXI

ISBN 978-7-81104-679-3



9 787811 046793 >

定价: 29.50 元

TM922.3/1

2007

# 牵引供电系统分析

李群湛 贺建闽 编著

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

## 内容提要

本书较系统地介绍了电气化铁路供电系统的基本理论与应用。全书分 11 章。第 1 章为绪论；第 2 章为电力牵引与电气计算；第 3 章为牵引变压器接线及其电气量分析；第 4 章为牵引变压器容量选择；第 5 章为牵引网阻抗；第 6 章为牵引网电压水平与改善方法；第 7 章为牵引变电所负序电流及其影响计算；第 8 章为牵引负荷的谐波影响及其抑制措施；第 9 章为并联无功补偿；第 10 章为通信干扰及其防护；第 11 章为 AT 供电系统；每章后列有习题，书后列有附录。

本书可以作为电气工程及其自动化、铁道牵引电气化与自动化本科生专业教材，亦可供相关专业的研究生、科技人员参考。

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

牵引供电系统分析 / 李群湛, 贺建闽编著. — 成都: 西南交通大学出版社, 2007.9  
ISBN 978-7-81104-679-3

I. 牵… II. ①李…②贺… III. 电力牵引—供电—系统分析 IV. TM922.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 139937 号

---

### 牵引供电系统分析

李群湛 贺建闽 编著

\*

责任编辑 黄淑文

封面设计 本格设计

西南交通大学出版社出版发行

(成都二环路北一段 111 号 邮政编码: 610031 发行部电话: 028-87600564)

<http://press.swjtu.edu.cn>

四川森林印务有限责任公司印刷

\*

成品尺寸: 170 mm × 230 mm 印张: 18.375

字数: 329 千字 印数: 1—3 000 册

2007 年 9 月第 1 版 2007 年 9 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-81104-679-3

定价: 29.50 元

图书如有印装问题 本社负责退换  
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

## 前 言

本书是继承与发展的结果。一代宗师曹建猷院士在借鉴前苏联与西方，特别是法国率先实现单相工频交流供电制的基础上，在开创我国先进牵引供电制的同时，为人才培养之急需，编撰了《电力铁道供电》讲义，后又出版专著。20世纪80年代之后，张进思教授接过旗帜，潜心研究教案，精心准备了新讲义。现在出版的这本书是作者与年轻的同事们在认真学习前人成就的基础上，结合近年来的教学与科学研究成果撰写而成的。

本书主要作为电气工程及其自动化专业铁道牵引电气化与自动化方向本科教学之用，亦可作为同类专业的成人培训用书，一些章节尚可供研究生教学参考。

全书分11章。绪论中首先介绍我国电气化铁路取电的公用电网——电力系统的概况，以及它对铁路的供电方式，然后是电气化铁路牵引供电方式的应用与设计概况。第2章介绍牵引计算基础与电气计算的相关内容，属全书的基础部分。第3章介绍牵引变电所的核心元件——牵引变压器接线形式及电气量分析，牵引变压器接线形式很重要，它直接影响供电特性，有时还直接按接线形式来对牵引变电所分类，如单相变电所、三相变电所等。紧接着，第4章讨论牵引变压器容量计算与确定。牵引变压器是有备用的贵重元件，使用寿命较长，其容量选择要考虑铁路的近、远期运量。牵引网是牵引供电系统的重要组成部分，运行环境恶劣且无备用，本书第5章主要讨论以阻抗为核心内容的牵引网电气计算。那里，以Carson导线—地回路为理论基础，给出轨、地电流，牵引网等效模型等。第6章以电压损失计算为基础，讨论牵引网电压水平计算及改善措施。电压水平直接影响列车的正常运行，应将其限制在合理范围内。现行的电气化铁路对三相电网而言，实质上属单相负荷，也是电网中产生负序电流与电压不平衡的主要根源，负序会产生许多不良影响，必须加以限制，为此，第7章重点分析负序问题。谐波问题亦很突出，大量使用的交-直型电力机车是特殊而丰富的谐波源，受到电力部门特别关注，对此，在第8章讨论谐波的影响、水平计算及抑制措施等。除负序、谐波两大技术课题外，无功问题也较突出，牵引供电部门还因功率因数低而时常遭遇罚款，并联无功补偿是解决无功、负序、网压乃至谐波的重要手段，这一内容写在第9章。第10章讨论电

气化铁路产生的通信干扰及防护措施。虽然光缆通信技术得到迅猛发展，但还是有必要了解干扰产生的机理及抑制干扰所采取的相应对策，并学习解决问题的思路。从积极防护出发，专家们提出了吸流变压器-回流线（BT）供电方式和自耦变压器（AT）供电方式。因高速、重载铁路运输的发展及光缆的普及，BT 供电方式因火花间隙的不良影响而在淡化，但 AT 供电方式仍被推崇。BT 供电方式在第 10 章简要介绍，而 AT 供电方式列在第 11 章专门讨论。以第 11 章为基础，可以进一步去研究开始使用的全并联 AT 供电系统。

电气化铁路新技术发展迅猛，如高速客运专线的交-直-动车组和电力机车，它代表了有源电力电子技术的最新发展，并且较好地解决了无功和谐波问题，由此看出，利用第 9 章的（无源）无功补偿原理，向有源技术迈进应是今后发展的方向。再如，计算机仿真技术的大力发展与普及，也应作为重要内容在书中体现，但考虑到学时限制及主要阅读对象是本科生，本书并未展开，把相关内容简要写在了附录里。有兴趣钻研的读者可去查阅相关文献与作者的其他论著。

书中有些章节带有探讨性质，不一定占用课时讲授，仅供有兴趣者参考，如 § 5.8 节、§ 8.4 节等。

本书的写作分工如下：李群湛负责第 1 章、第 2 章、第 7 章、第 8 章、第 9 章、习题与思考题及附录 B，贺建闽负责第 5 章、第 6 章、第 10 章、第 11 章，李群湛、贺建闽二人合写了第 3 章，张丽写了第 4 章，解绍锋参与了第 8 章，曹保江参与了第 7 章并提供了附录 A。全书由李群湛、贺建闽统稿。

在作者新编讲义近 10 年试用过程中，张进思教授一直关注并悉心指导，作者的同事黄彦全、曹保江、解绍锋、张丽、郭锴、易东、马庆安等提出了不少意见和建议，特别是曹保江、张丽和郭锴又认真整理了电子文件，还参加了修改工作；蒋先国、高宏等许多电气化铁路同仁还提供了宝贵资料。在此，一并表示感谢。

因水平所限，书中难免存在不足与错误，望同仁与读者不吝指正。

出版本书，是为了纪念我国铁道电气化事业创始人曹建猷院士诞辰 90 周年。他在 10 年前离开了我们，但他的精神永远激励我们前进。我们坚信，中国电气化铁路会迎来更加美好的明天。

作 者

2007 年 6 月

## 符号表

## 一、变 量

- A、B、C —— 三相系统电气量，作下标，表示原边（一次侧）对应相的电压、电流、阻抗等
- a、b、c —— 三相系统电气量，作下标，表示次边（二次侧）对应相的电压、电流、阻抗等
- o、 $\alpha$ 、 $\beta$  —— 两相系统电气量，作下标，多表示次边对应相的电压、电流、阻抗等
- A —— 列车运行能耗
- $t$  —— 列车运行时分，时域信号的时间
- $T$  —— 全天时分数，周期信号的周期
- $N$  —— 列车对数
- $p$  —— （带电）概率（Probability），导线周长（Perimeter），牵引侧端口编号
- $K$  —— 变压器变比（Transformation Ratio），各种系数（一般为实数）
- $E$  —— 电势（Electromotive Force）
- $i$  —— 电流即时值
- $I$  —— 电流，电流统计值（如平均值，有效值等）
- $\omega$  —— 绕组匝数，交流电压、电流的角频率
- $S$  —— 容量
- $\Gamma$  —— 年运量
- $\rho$  —— 导体电阻率（Resistivity）
- $\mu_0$ 、 $\mu$  —— 真空磁导率、材料相对磁导系数（Magnetic Conductivity）
- $d_{ij}$  —— 导线间距离（Distance）
- $D_g$  —— 导线—地回路等值深度
- $C$  —— 电容（Capacitance）
- $L$  —— 电感（Inductance）或单位长电感，供电臂长度（Length）
- $M_{ij}$  —— 互感（Mutual Inductance）或单位长互感
- $R$  —— 半径（Radius），电阻（Resistance）
- $r$  —— 单位长电阻

$X$  —— 电抗 (Reactance)

$x$  —— 单位长电抗, 列车在短回路中的位置

$Z, z$  —— 阻抗 (Impedance)、单位长阻抗

$Z_{ij}, z_{ij}$  —— 互阻抗 (Mutual Impedance)、单位长互阻抗

$\sigma$  —— 大地电导率

$G, g$  —— 电导 (Conductance)、单位长电导

$B, b$  —— 电纳 (Susceptance)、单位长电纳

$Y, y$  —— 导纳 (Admittance)、单位长导纳

$Z_0$  —— 导线特性阻抗

$\gamma$  —— 导线传播常数

$Z_E$  —— 牵引变电所接地电阻

$l$  —— 列车距变电所的距离

$\Delta \dot{U}, \Delta \dot{u}$  —— 电压降 (Voltage Drop)、单位长电压降

$\Delta U, \Delta u$  —— 电压损失 (Voltage Loss)、单位长电压损失

$z', z'_{ij}$  —— 单位长等效阻抗、单位长等效互阻抗

$\varphi$  —— 负荷功率因数角

$\psi$  —— 端口接线角

$a$  —— 旋转算子

$s$  —— 即时容量

+、(+) —— 作上标, 表示正序分量 (Positive Sequence Component)

-、(-) —— 作上标, 表示负序分量 (Negative Sequence Component)

$f$  —— 信号频率 (Frequency)

$h$  —— 谐波次数

$P$  —— 有功功率 (Active Power)

$Q$  —— 无功功率 (Reactive Power)

$\Delta P$  —— 功率损失 (Power Loss)

$\varepsilon$  —— 介电系数 (Dielectric Coefficient)

$\lambda$  —— 屏蔽系数 (Shielding Coefficient)

$D$  —— 短回路长度

## 二、缩写及常用术语

T —— 钢轨 (Track), 变压器 (Transformer)



- C —— 接触线 (Contact Wire), 接触网 (Catenary)  
OCS —— 接触悬挂系统 (Overhead Contact System)  
MW —— 承力索 (Messenger Wire)  
R —— 回流线 (Return Conductor)  
F —— 正馈线 (Positive Feeder)  
NF —— 负馈线 (Negative Feeder)  
BT —— 吸流变压器 (Booster Transformer)  
AT —— 自耦变压器 (Autotransformer)  
CC —— 同轴电缆 (Coaxial Cable)  
t —— 通信线 (Telecommunication Line)  
G —— 大地 (Ground)  
E —— 接地 (Earthing)  
SC —— 短路 (Short Circuit)  
S —— 系统 (System)  
 $\varepsilon$  —— 等效值 (Equivalent), 有效值 (Effective)  
B —— 基准量 (Base)  
N —— 额定值 (Nominal)  
C —— 电容器 (Capacitor)  
L —— 电抗器 (Inductor)  
HR —— 谐波含有率 (Harmonic Ratio)  
THD —— 总谐波畸变率 (Total Harmonic Distortion)  
SCC —— 串联电容补偿 (Series Capacitor Compensation)  
PRC —— 并联无功补偿 (Parallel Reactive Compensation)  
PCC —— 并联电容补偿 (Parallel Capacitor Compensation)  
ER —— 电气化铁路 (Electrified Railway)  
TPD —— 牵引供电 (Traction Power Supply)  
TSS —— 牵引变电所 (Traction Supply Substation)  
ATS —— 自耦变压器所 (Autotransformer Station)  
SP —— 分区所 (Sectioning Post)  
DPL —— 客运专线 (Dedicated Passenger Line)  
HSR —— 高速铁路 (High Speed Railway)

## 目 录

第 1 章 绪 论	1
§ 1.1 电力系统概述	1
§ 1.2 牵引供电系统的构成	6
§ 1.3 外部电源的供电方式	7
§ 1.4 牵引网的供电方式与供电回路	10
§ 1.5 牵引供电系统设计概述	15
习题与思考题	19
第 2 章 电力牵引与电气计算	20
§ 2.1 概 述	20
§ 2.2 电力机车牵引特性	20
§ 2.3 牵引计算	26
§ 2.4 馈线电流	28
§ 2.5 牵引网电压	39
习题与思考题	41
第 3 章 牵引变压器接线及其电气量分析	42
§ 3.1 概 述	42
§ 3.2 三相 YNd11 接线牵引变电所	42
§ 3.3 平衡接线牵引变电所	50
习题与思考题	59
第 4 章 牵引变压器容量选择	61
§ 4.1 概 述	61
§ 4.2 正常运行时的容量计算	62
§ 4.3 紧密运行时的容量计算	64
§ 4.4 校核容量与安装容量的确定	64
§ 4.5 变压器的负载能力	65
习题与思考题	68

<b>第 5 章 牵引网阻抗</b> .....	69
§ 5.1 概 述 .....	69
§ 5.2 牵引网的导线参数 .....	70
§ 5.3 Carson 理论 .....	75
§ 5.4 钢轨和地中电流 .....	81
§ 5.5 牵引网阻抗计算的简化电路模型 .....	85
§ 5.6 单线牵引网阻抗计算的一般方法 .....	86
§ 5.7 复线牵引网阻抗计算 .....	95
§ 5.8 牵引网阻抗计算的进一步讨论 .....	98
习题与思考题 .....	101
<b>第 6 章 牵引网电压水平与改善方法</b> .....	103
§ 6.1 概 述 .....	103
§ 6.2 电压损失的概念及计算方法 .....	103
§ 6.3 单线牵引网电压损失 .....	105
§ 6.4 复线牵引网电压损失 .....	108
§ 6.5 牵引变压器电压损失 .....	111
§ 6.6 牵引网电压水平 .....	116
§ 6.7 供电臂电压水平的改善 .....	116
习题与思考题 .....	123
<b>第 7 章 牵引变电所负序电流及其影响计算</b> .....	125
§ 7.1 牵引变电所负序电流 .....	125
§ 7.2 负序对电力系统及其元件的不良影响 .....	139
§ 7.3 负序的限值及在电力系统中的分布计算 .....	143
§ 7.4 降低负序影响的措施 .....	151
习题与思考题 .....	155
<b>第 8 章 牵引负荷的谐波影响及其抑制措施</b> .....	157
§ 8.1 牵引负荷谐波 .....	157
§ 8.2 谐波对电力系统的影响 .....	162
§ 8.3 限制谐波的标准 .....	164
§ 8.4 谐波的影响分类、叠加水平及计算 .....	171
§ 8.5 谐波影响的抑制措施 .....	173
习题与思考题 .....	178

第 9 章 并联无功补偿	179
§ 9.1 概 述	179
§ 9.2 牵引网的并联补偿	180
§ 9.3 牵引变电所的并联补偿	196
习题与思考题	215
第 10 章 通信干扰及其防护	217
§ 10.1 概 述	217
§ 10.2 静电感应电压	218
§ 10.3 电磁感应电势	221
§ 10.4 电磁感应电压	227
§ 10.5 危险电压的校验	230
§ 10.6 杂音干扰影响计算	232
§ 10.7 减少对通信线路影响的措施	233
§ 10.8 吸流变压器 (BT) 供电方式	234
习题与思考题	242
第 11 章 AT 供电系统	243
§ 11.1 概 述	243
§ 11.2 单线 AT 网络	244
§ 11.3 末端并联的复线 AT 网络	250
§ 11.4 AT 网络等效电路	257
§ 11.5 AT 网络短回路钢轨电流与电位计算	263
习题与思考题	264
附录 A 计算机仿真技术及其应用	266
附录 B 牵引供电系统优化设计探讨	271
参考文献	280

# 第1章 绪论

## §1.1 电力系统概述

### 1.1.1 电力系统简介

电力系统是电力工业的基本形态，它是发、输、变、配、用电的发电机、变压器、变流器、电力线路及各种用电设备等联系在一起组成的整体。发电机把机械能转化为电能，电能经过变压器、变流器和电力线路输送并分配到用户，经电动机、电炉和电灯等设备又将电能转化为机械能、热能和光能等。如果把发电厂的动力部分，如火电厂的锅炉、汽轮机、热力网和用热设备，水电厂的水轮机和水库，核电厂的核反应堆和汽轮机包括进来就称之为“动力系统”。电力系统中除发电机和用电设备外的部分称之为“电力网”。所以说电力网是电力系统的一个组成部分，而电力系统又是动力系统的一个组成部分。

现代电力系统都是三相的，但通常为简单、清晰，将其接线图画成单线图。动力系统、电力系统和电力网如图 1.1 所示。

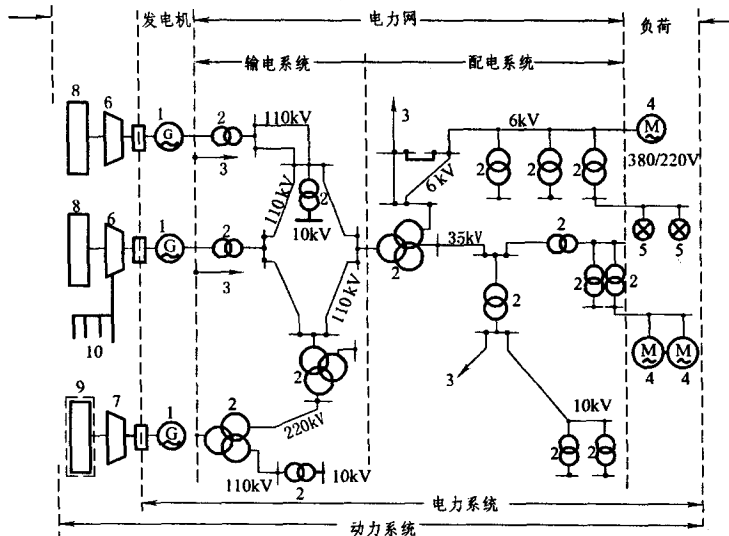


图 1.1 动力系统、电力系统和电力网

- 1—发电机；2—变压器；3—负荷；4—电动机；5—电灯；6—汽轮机；  
7—水轮机；8—锅炉；9—水库；10—热力网

由于电能与国民经济各部门及人民日常生活关系密切，同时电能不能大量储存，所以对电力系统运行有以下基本要求。

### 1. 保证供电可靠性

按电力负荷的种类及要求供电的连续性，一般将负荷分成三级。

一级负荷——对此类负荷中断供电，将导致人身生命危险，损坏设备，产生大量废品，给国民经济带来重大损失，使公共生活发生混乱。电力牵引负荷属于一级负荷。

二级负荷——对此类负荷中断供电，会造成大量减产，工业企业内部交通运输停顿，严重影响人民正常生活。

三级负荷——不属于一、二级负荷，停电影响不大的其他负荷。

一级负荷应由两个独立电源供电，其中任一电源容量都应在另一电源发生故障时，保证一级负荷的全部电力供应；在无法得到两个独立电源的情况下，应保证两路线路来自同一电源的不同母线，如电气化铁路的“双 T”供电方式。二级负荷一般用电源加备用电源供电，备用电源比电源低一个电压等级。三级负荷一般由单回路供电。

### 2. 保证良好电能质量

主要的电能质量指标是频率、电压及波形。

(1) 频率。我国额定频率为 50 Hz。《GB/T 15945-1995 电能质量 电力系统频率允许偏差》规定：3 000 MW 以下的系统频率偏差不大于  $\pm 0.5$  Hz；3 000 MW 以上系统，频率偏差不大于  $\pm 0.2$  Hz。

(2) 电压。《GB 12325-90 电能质量 供电电压允许偏差》一般要求电压偏差幅度不大于 10%。

(3) 波形。电力系统负荷中大量整流设备及非线性用电设备会产生高次谐波，使电力系统正弦波形发生波形畸变，对电力系统本身及用户造成很多不良影响。《GB/T 14549-1993 电能质量 公用电网谐波》给出了各级供电电压下，电网公共连接点电压波形畸变率限值如表 1.1 所示，注入公共连接点的谐波电流允许值如表 1.2 所示。

表 1.1 中国公用电网谐波电压（相电压）限值

电网电压 (kV)	电网电压总谐波畸变率 (%)	各次谐波电压含有率 (%)	
		奇次	偶次
0.38	5	4	2
6、10	4	3.2	1.6
35、66	3	2.4	1.2
110	2	1.6	0.8



表 1.2 注入公共连接点的谐波电流允许值

标准电压 (kV)	基准短路容量 (MVA)	谐波次数及谐波电流允许值 (A)																								
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	
0.38	10	78	62	39	62	26	44	19	21	16	28	13	24	11	12	9.7	18	8.6	16	7.8	8.9	7.1	14	6.5	12	
6	100	43	34	21	34	14	24	11	11	8.5	16	7.1	13	6.1	6.8	5.3	10	4.7	9.0	4.3	4.9	3.9	7.4	3.6	6.8	
10	100	26	20	13	20	8.5	15	6.4	6.8	5.1	9.3	4.3	7.9	3.7	4.1	3.2	6.0	2.8	5.4	2.6	2.9	2.3	4.5	2.1	4.1	
35	250	15	12	7.7	12	5.1	8.8	3.8	4.1	3.1	5.6	2.6	4.7	2.2	2.5	1.9	3.6	1.7	3.2	1.5	1.8	1.4	2.7	1.3	2.5	
66	500	16	13	8.1	13	5.4	9.3	4.1	4.3	3.5	9.2	7.5	0.2	3.2	6.2	0.3	8.1	1.8	3.4	1.6	1.9	1.5	2.8	1.4	2.6	
110	750	12	9.6	6.0	9.6	4.0	6.8	3.0	3.2	2.4	4.3	2.0	3.7	1.7	1.9	1.5	2.8	1.3	2.5	1.2	1.4	1.1	2.1	1.0	1.9	

注：220 kV 基准短路容量取 2 000 MVA。

### 1.1.2 电力系统元件参数和短路容量

发电机、变压器和输电线是构成电力系统的主要元件。各元件的等值电路及其参数计算是分析电力系统及牵引供电系统的基础。

#### 1. 发电机

厂家提供的发电机参数通常有：额定（线）电压  $U_N$  (kV)、三相额定容量  $S_N$  (MVA) 及次暂态电抗的标幺值  $X_G''\%$ 。则发电机电抗的有名值为

$$X_G'' = \frac{X_G''\%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \quad (\Omega) \quad (1.1)$$

#### 2. 变压器

双绕组变压器等值电路如图 1.2 所示。

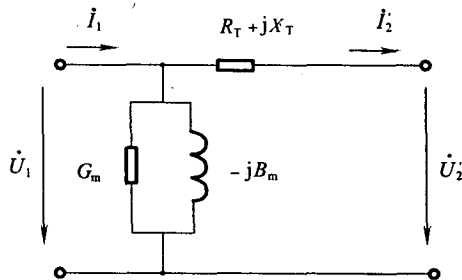


图 1.2 双绕组变压器等值电路

已知变压器参数一般为额定容量  $S_N$  (MVA), 额定线电压  $U_N$  (kV), 以及短路电压百分比  $U_d\%$ , 空载电流百分值  $I_0\%$  和三相有功空载损耗  $P_0$  (kW), 短路损耗功率  $P_k$  (kW), 则变压器短路电抗和电阻分别为

$$X_T = \frac{U_d\%}{100} \cdot \frac{U_N^2}{S_N} \quad (\Omega)$$

$$R_T = \frac{P_k}{1000} \cdot \frac{U_N^2}{S_N^2} \quad (\Omega)$$
(1.2)

并联电导和电纳分别为

$$G_m = \frac{P_0}{U_N^2} \times 10^{-3} \quad (S)$$

$$B_m = \frac{I_0\%}{100} \cdot \frac{S_N}{U_N^2} \quad (S)$$
(1.3)

由于  $R_T$ 、 $G_m$ 、 $B_m$  的值均相对很小, 故变压器表现出的主要是短路电抗  $X_T$ , 即电抗部分。在不影响计算精确度的情况下可仅计及  $X_T$  的值。

对三绕组变压器, 通常给出的短路电压百分值是指一个绕组开路、另外两个绕组按双绕组变压器的关系得到的分别为  $U_{d1-2}\%$ ,  $U_{d2-3}\%$ ,  $U_{d1-3}\%$ , 此时变压器电抗百分值可按式计算

$$U_{d1}\% = \frac{1}{2}(U_{d1-2}\% + U_{d1-3}\% - U_{d2-3}\%)$$

$$U_{d2}\% = \frac{1}{2}(U_{d1-2}\% + U_{d2-3}\% - U_{d1-3}\%)$$

$$U_{d3}\% = \frac{1}{2}(U_{d2-3}\% + U_{d1-3}\% - U_{d1-2}\%)$$
(1.4)

### 3. 输电线

通常给出的参数为每公里电抗  $z$  ( $\Omega/\text{km}$ ), 电网线电压  $U_N$  (kV), 线路长度  $L$  (km), 则输电线阻抗参数为

$$Z = z \cdot L (\Omega)$$
(1.5)

在需要涉及对地导纳时, 要将大地影响考虑进去, 这将在第 5 章讨论。更严格的还要考虑分布参数。

### 4. 电力系统短路容量

电力系统短路容量是选择牵引变电所一次侧电气设备所必需的, 它也是

估计电力系统负荷能力的重要依据。

在将电力系统元件的电抗归算到同一基准电压  $U_B$  和基准容量  $S_B$  后，便可以应用等效发电机原理将网络化简，得出电力系统到牵引变电所进线点的总电抗标么值  $X_{\Sigma}$ 。电力系统在牵引变电所进线点的三相短路容量为

$$S_{SC} = \frac{S_B}{X_{\Sigma}} \quad (\text{MV} \cdot \text{A}) \quad (1.6)$$

反过来，在已知系统短路容量的情况下，也可得出从牵引变电所看进电力系统的总电抗标么值为

$$X_{\Sigma} = \frac{S_B}{S_{SC}} \quad (1.7)$$

有名值为

$$X_{\Sigma} = \frac{U_B^2}{S_{SC}} \quad (\Omega) \quad (1.8)$$

电力系统的短路容量同电力系统的发电容量有关，还同负载中心所在地点有关。一般电力系统的发电容量越大，短路容量越大；负载中心距离电力系统电源越远，短路容量越小。

## 5. 电力系统数学模型

在已知电力系统各元件的参数和等值电路的基础上，按照它们的电气连接关系互连起来，便构成了电力系统的等值电路。但这时存在一个电压等级的归算问题，因为每一个元件在不同电压等级下所显现的电气参数值是不同的，所以不同电压等级的等值电路不能直接连接，必须归算到同一电压等级下进行分析。

可按下列公式进行归算

$$X = X'(K_1 \cdot K_2 \cdots K_n)^2 \quad (1.9)$$

$$U = U'(K_1 \cdot K_2 \cdots K_n) \quad (1.10)$$

$$I = I'(K_1 \cdot K_2 \cdots K_n) \quad (1.11)$$

式中  $X'$ ,  $U'$ ,  $I'$  —— 归算前的值；

$X$ ,  $U$ ,  $I$  —— 归算后的值；

$K_1, K_2, \dots, K_n$  —— 基准级与待归算级之间所有变压器变比。