

电气化铁道  
供电系统

曹建猷 著

电气化铁道

# 供电系统

曹建猷著

中国铁道出版社

1987年·北京

## 电气化铁道供电系统

曹建猷 著

中国铁道出版社出版、发行

北京顺义燕华营印刷厂印

开本：850×1168<sup>1</sup>/<sub>32</sub> 印张：6.625 字数：171 千

1983年2月第1版 1987年9月第3次印刷

印数：4,801—7,800册 定价：1.40元

## 内 容 简 介

本书是作者通过多年的教学实践和系统地总结了运行经验写成的,对我国交流电气化铁道供电系统的基本原理、分析方法以及供电计算的全部过程作了全面而又深刻的论述。内容包括牵引变电所和牵引网的供电方式、列车电流和列车能耗、牵引变电所容量计算、牵引网阻抗计算及电压损失计算、牵引变电所中的电压损失计算、牵引网电压改善方法、牵引网中的短路电流、负序电流、牵引变电所的换相联接、供电系统的设计与运行、交流牵引网对沿线通信线的影响、地中电流以及地区供电等,书末还附有供电计算的应用概率及输电线参数计算公式等。

本书可作高等学校铁道电气化专业的教材使用,也可作相关专业的研究生课程基本部分的教材以及实际工作者之用。

## 前 言

本书是为适应教学 and 实际工作需要而写的。电气化铁道供电系统涉及的问题很多，书中只对一些主要的问题进行了讨论，力求切合实用。我国决定在电气化铁道中采用先进的工频单相交流制的时间较早，因此面临一系列新的技术课题，必须一一自行解决。这就形成了我国颇具特色的一套经验。六十年代初期曾写过一本书，那时我们经验不多，对一些问题只是从理论方面进行探讨。现在这本书是从七十年代中期写的一本讲义发展而来的。近几年电气化铁道进程加快，这本讲义比较地受到技术界的欢迎，这就产生了把它整理出版以供需要。整理中对有些章节作了较大的修订，并且加写了有关剩余负序电流、负序电压计算和相间短路的内容。另外还对 AT 供电方式作了介绍。能在我国第一条电气化铁道——宝鸡—凤州段运行二十周年之际，集中一段时间完成这个工作，是一件十分愉快的事。

全书共分十六章。前四章是介绍情况。第一章到第三章介绍供电系统的结构，包括从电力系统、牵引变电所到牵引网的各个方面。第四章介绍电力机车和它的牵引特性。这些，都是为以后讨论问题所必需的。

第五章是牵引变电所容量计算。牵引变电所主变压器容量的确定，历来是电气化铁道初步设计的一个中心问题。书中围绕这个问题，对各种技术条件作了比较详尽的论述。

第六章是牵引网阻抗计算。由于牵引网阻抗是探讨一系列供电系统问题的基础，所以书中通过介绍计算方法，着重说明了牵引网阻抗的特性和内在关系。

第七章到第九章讨论牵引网中的电压损失，并列出了改善牵引网电压水平的几种实用方法。

第十章和第十一章，都是讨论负序电流。第十章详细地介绍了负序电流问题，从基本原理开始，一直到实际计算。第十一章介绍牵引变电所换相联接的方法，并且分析了负序电流在换相联接后的行为。两章前后衔接，提供了求解负序电流问题的一个完整过程。

第十二章介绍牵引网短路的计算方法，包括接触网对地短路和相间短路，涉及一边供电、越区供电和两边供电时的各种可能情形。

第十三章简要地介绍了供电设计的程序与内容，以及经济运行问题。

第十四章讨论通信干扰。书中在进行分析和对计算方法作了必要的介绍之后，重点讨论了吸流变压器和自耦变压器即AT供电方式。我国采用的是前一种供电方式。后一种供电方式在技术上有某些先进性，在日本广为流行。

第十五章介绍了地中电流的情况。第十六章有选择地讨论了地区供电中的几个现实技术问题。

本书的对象主要是大学生和实际工作者。作为大学教科书，本书可供一学期课程使用。书中一些主要章节的内容，也可用作相关专业的研究生课程基本部分的教材。

本书在形成过程中，承电化工程局电气化勘测设计处和电气化工程处提供了许多实际资料，西安铁路局和成都铁路局提供了许多实际运行数据。电气化勘测设计处并为本书写了第十三章第一节的内容。第十四章的前两节和附录A的前两节分别由我的同事张进思和宋毓芬提供了初稿。在此，作者一并表示感谢。

作 者

1981年10月于西南交通大学

## 目 录

|   |                  |    |
|---|------------------|----|
| 0 | 第一章 电力系统         | 1  |
|   | 第一节 电力系统概况       | 1  |
|   | 第二节 电力系统的参数和短路容量 | 3  |
|   | 第三节 电力系统的电压波动    | 8  |
| 0 | 第二章 牵引变电所        | 10 |
|   | 第一节 交流电力牵引和牵引变电所 | 10 |
|   | 第二节 三相牵引变电所      | 12 |
|   | 第三节 单相牵引变电所      | 16 |
|   | 第四节 三相一二相牵引变电所   | 18 |
| 0 | 第三章 牵引网          | 20 |
|   | 第一节 牵引网的组成       | 20 |
|   | 第二节 牵引网的供电方式     | 21 |
|   | 第三节 接触网的容许电流     | 23 |
|   | 第四章 列车电流和列车能耗    | 26 |
|   | 第一节 电力机车及其牵引特性   | 26 |
|   | 第二节 列车电流曲线和列车能耗  | 28 |
| ✓ | 第五章 牵引变电所容量计算    | 31 |
|   | 第一节 正常运行时的容量计算   | 31 |
|   | 第二节 紧密运行时的容量计算   | 39 |
|   | 第三节 变压器容量选择      | 40 |
| 0 | 第六章 牵引网阻抗        | 47 |
|   | 第一节 牵引网导线的参数     | 47 |
|   | 第二节 牵引网的等效电路     | 50 |

|             |                    |            |
|-------------|--------------------|------------|
| 第三节         | 单线牵引网的阻抗           | 52         |
| 第四节         | 复线牵引网的阻抗           | 64         |
| <b>第七章</b>  | <b>牵引网中的电压损失</b>   | <b>70</b>  |
| 第一节         | 电压损失计算和牵引网的等效阻抗    | 70         |
| 第二节         | 单线牵引网中的电压损失        | 72         |
| 第三节         | 复线牵引网中的电压损失        | 74         |
| <b>第八章</b>  | <b>牵引变电所中的电压损失</b> | <b>78</b>  |
| 第一节         | 单相牵引变电所中的电压损失      | 78         |
| 第二节         | 三相牵引变电所中的电压损失      | 79         |
| <b>第九章</b>  | <b>牵引网电压的改善方法</b>  | <b>84</b>  |
| 第一节         | 提高变电所母线电压          | 84         |
| 第二节         | 采用串联电容补偿           | 85         |
| 第三节         | 降低牵引网阻抗            | 89         |
| <b>第十章</b>  | <b>负序电流</b>        | <b>90</b>  |
| 第一节         | 牵引负荷在电力系统中引起的负序电流  | 90         |
| 第二节         | 负序电流电路             | 94         |
| 第三节         | 牵引变电所负载的负序功率       | 98         |
| 第四节         | 电力系统的负序容量          | 101        |
| <b>第十一章</b> | <b>牵引变电所的换相联接</b>  | <b>106</b> |
| 第一节         | 单相牵引变电所的换相联接       | 106        |
| 第二节         | V接线牵引变电所的换相联接      | 108        |
| 第三节         | 三相牵引变电所的换相联接       | 109        |
| 第四节         | 剩余负序电流             | 111        |
| <b>第十二章</b> | <b>牵引网中的短路电流</b>   | <b>123</b> |
| 第一节         | 单线牵引网中的短路电流        | 123        |
| 第二节         | 复线牵引网中的短路电流        | 126        |
| 第三节         | 牵引网中的相间短路          | 128        |
| <b>第十三章</b> | <b>供电系统的设计与运行</b>  | <b>135</b> |
| 第一节         | 供电系统的设计            | 135        |



|        |                         |     |
|--------|-------------------------|-----|
| 第二节    | 供电系统的经济运行 .....         | 138 |
| ○ 第十四章 | 交流牵引网对沿线通信线的影响 .....    | 144 |
| 第一节    | 牵引网的静电影响和电磁影响 .....     | 144 |
| 第二节    | 危险电压和杂音干扰 .....         | 151 |
| 第三节    | 吸流变压器一回流线装置 .....       | 156 |
| 第四节    | 自耦变压器供电方式 .....         | 162 |
| 第五节    | 阻尼装置 .....              | 171 |
| 第十五章   | 地中电流 .....              | 172 |
| 第一节    | 牵引回路中的地中电流 .....        | 172 |
| 第二节    | 地中电流计算 .....            | 174 |
| 第三节    | 地中电流对地下金属管道和电缆的影响 ..... | 176 |
| 第十六章   | 地区供电 .....              | 178 |
| 第一节    | 27.5kV 侧的负序电压 .....     | 178 |
| 第二节    | 10kV 配电装置中的三次谐波 .....   | 181 |
| 参考文献   | .....                   | 185 |
| 附录 A   | .....                   | 187 |
| 附录 B   | .....                   | 194 |
| 附表     | .....                   | 200 |

## 第一章 电力系统

### 第一节 电力系统概况

电力系统是由若干发电厂和高压输电线联成的强大供电网。作为工业、农业、交通运输和城市的强大电源，它具有极大的经济性和可靠性。低质煤炭产区就地发电比较经济，水力资源更可以有效地利用电能的形式输送至各地。这些，都促成了电力网的发展。大电力系统同因地制宜的地方中、小型发电厂相结合，是我国发展电力的两种形式。这样，就可以在我国社会主义现代化建设中最大限度地和最有效地利用动力资源。

电气化铁道用电量较大。在我国，电气化铁道无例外地是由电力系统供电。这样，就不但保证了电气化铁道供电的可靠性，而且保证了电气化铁道供电的经济性。

图1·1举例说明电气化铁道由电力系统供电的情形。

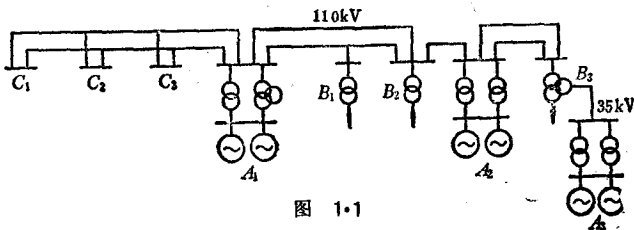


图 1·1

图中 $C_1$ 、 $C_2$ 和 $C_3$ 表示三个牵引变电所。它们通过两路 110 kV 输电线接至电力系统中发电厂 $A_1$ 的 110kV 母线。 $A_2$ 和 $A_3$ 是电力系统中的另外两所发电厂。 $B_1$ 、 $B_2$ 和 $B_3$ 表示地方变电所。

发电厂  $A_1$  经过两路 110kV 输电线与地方变电所  $B_2$  联接。后者又经过单回输电线接至相距不远的发电厂  $A_2$ 。变电所  $B_3$  用三卷变压器，其 35kV 电压与发电厂  $A_3$  联接，110 kV 母线则与发电厂  $A_2$  联通。

由于牵引变电所经输电线直接同发电厂  $A_1$  联接，它们同  $A_1$  的“电距离”要比同  $A_2$  或  $A_3$  的为近。所以牵引负荷由发电厂  $A_1$  担负着较大比例的份额。也就是，发电厂  $A_1$  所担负的牵引负荷与其容量之比，要比较远的发电厂  $A_2$  与  $A_3$  的为大。

由于必须保证铁路运输不间断地运行，电气化铁道按国家规定为一级电力负荷。因此，牵引变电所必须由两路输电线供电，且两路输电线要有各自的杆塔和走线，这样来保证在一路输电线发生故障时牵引变电所电力不致长时间中断。

图 1·1 中的三个牵引变电所都是由电力系统一边供电，也就是牵引变电所的电力是由电力系统从一个方向送来。图 1·2 表示另一种情形：牵引变电所  $C$  同时从两边分别由发电厂  $A_1$  和  $A_2$  供电。若发电厂  $A_1$  通过输电线  $D_1$  与发电厂  $A_2$  或  $A_2$  以远的电网联接，则形成由电力系统“环形供电”。这时牵引变电所  $C$  将处于电力系统中的一个环路之中。

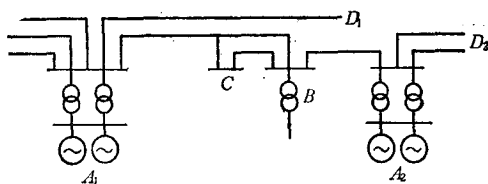


图 1·2

由一边供电、两边供电或环形供电，决定于电力系统具体情况。两边供电或环形供电一般比一边供电有更高的可靠性和更好的供电质量，后者主要表现在电网电压波动的幅度较小。

电力系统中有时安有同步调相机，用来调节无功负荷。为了

同一个目的，有时安设静电电容器。

解放以前，我国电力工业十分落后。当年曾喧腾一时的南京发电厂，设计容量才3万kW。而且设备和图纸还依赖进口。江南唯一的一条输电线，电压才33kV。而现在，国产发电机单机容量即高达30万kW，远距离输电线路已采用500kV超高电压，电力系统容量一般有数十至数百万kW，彻底改变了过去那种半封建半殖民地的落后状态。

## 第二节 电力系统的参数和短路容量

发电机、变压器和输电线是构成电力系统的主要元件。为了进行电气化铁道供电系统的计算与设计，其常用参数列举于下。

### 一、发电机

发电机的常用参数是它们的次暂态电抗 $X_d''$ 〔注〕和负序电抗 $X_2$ ，其平均值列于表1·1。

发电机电抗

表1·1

| 发电机类型 | $X_d''$ | $X_2$ |
|-------|---------|-------|
| 汽轮发电机 | 12.5%   | 16%   |
| 水轮发电机 | 20%     | 25%   |

### 二、变压器

对于大型变压器，其电抗 $X_0$ 的百分值与其阻抗电压 $U_d\%$ 相等，且只同高压侧的额定电压有关。其平均值列于表1·2。

单相变压器电抗的百分值与三相变压器相同。三相变压器和接成三相的单相变压器，其负序电抗和正序电抗相等。

〔注〕 突然短路时发电机表现的电抗的初始值。

变压器电抗

表1·2

|          |       |
|----------|-------|
| 变压器的电压级  | $X_s$ |
| 110kV变压器 | 10.5% |
| 35kV变压器  | 7.5%  |

三卷变压器的电抗还同高、中、低压线圈的排列有关。对于常见的110kV三卷变压器，其电抗平均值如表1·3。

110kV三卷变压器电抗

表1·3

| 线圈排列  | $X_1$  | $X_2$  | $X_3$  |
|-------|--------|--------|--------|
| 高一中一低 | 10.75% | -0.25% | 6.75%  |
| 高一低一中 | 10.75% | 6.75%  | -0.25% |

表1·3中的 $X_1$ 、 $X_2$ 和 $X_3$ 分别代表高压、中压和低压线圈的电抗。有时给定三卷变压器阻抗电压的百分值 $U_{d12}$ 、 $U_{d23}$ 和 $U_{d13}$ 。这时变压器电抗的百分值可按下式计算：

$$X_1 = \frac{1}{2}(U_{d12} + U_{d13} - U_{d23})$$

$$X_2 = \frac{1}{2}(U_{d12} + U_{d23} - U_{d13})$$

$$X_3 = \frac{1}{2}(U_{d13} + U_{d23} - U_{d12})$$

由于互感的影响，电抗有时出现负值，如表1·3所示。

以上关于变压器的数据，是变压器的标准设计数据。变压器也可以有非标准设计。

### 三、输 电 线

架空输电线的电抗 $X$ 的有名值( $\Omega$ )主要同线路长度 $l$ (km)有关，而同导线截面、电压等级关系不大。其单位长度值或称单位值，用 $x$ 表示，可按下式计算：〔注〕

〔注〕参看附录B，输电线参数计算公式。

$$x = 0.145 \lg \frac{d}{R_s} \quad \Omega / \text{km}$$

其中， $d$  代表三相导线的相互距离，距离不等时可取

$d = \sqrt[3]{d_{ab} d_{bc} d_{ca}}$ ，称为几何平均距离； $R_s$  代表导线的等效半径或当量半径，通常由

制造厂给定。由于对数的性质（图1.3），在实际应用的范围内当比值  $a = \frac{d}{R_s}$  不同时， $x$  的值变化很小。所以在供电计算中一般可取输电线单位电抗的平均值  $x = 0.4 \Omega / \text{km}$ 。

对于 10kV 以下的线路，可取  $x = 0.35 \Omega / \text{km}$ 。

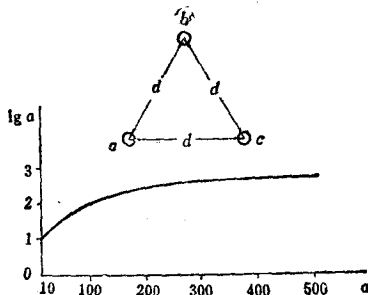


图 1.3

#### 四、标么值

以上所列发电机、变压器和输电线的电抗，是归算到各自的额定容量  $S_n$  的百分值，或是有名值。归算到基准容量  $S_i$  和基准电压  $U_i$  的标么值按下式计算。

发电机： 
$$X_{i*} = \frac{X_n \%}{100} \frac{S_i}{S_n} \quad (1.1)$$

变压器： 
$$X_{*i} = \frac{X_n \%}{100} \frac{S_i}{S_n} \quad (1.2)$$

输电线： 
$$X_* = X \frac{S_i}{U_i^2} \quad (1.3)$$

式中  $S_n$  —— 额定容量 (MVA)；

$S_i$  —— 基准容量 (MVA)；

$U_i$ ——基准电压 (kV)。

供电计算通常取基准容量  $S_j = 100 \text{ MVA}$ 。对于发电机,  $S_e$  等于其额定功率  $P_e$  除以额定功率因数  $\cos \varphi$ , 即  $P_e / \cos \varphi$ 。例如发电厂设有两台  $50 \text{ MW}$  发电机和一台  $25 \text{ MW}$  发电机, 额定功率因数  $\cos \varphi = 0.8$ , 则发电厂的额定容量

$$S_e = \frac{2 \times 50 + 25}{0.8} \approx 156.5 \text{ MVA}$$

三台发电机并联运行时, 其次暂态电抗的标么值, 按(1·1)式将为

$$X_d'' = \frac{12.5}{100} \times \frac{100}{156.5} = 0.080$$

(1·3) 式中所用的基准电压  $U_i$ , 按输电线所在的电压级列于表1·4。

基 准 电 压

表1·4

|                 |     |     |    |      |
|-----------------|-----|-----|----|------|
| 电压级 (kV)        | 220 | 110 | 35 | 25   |
| 基准电压 $U_i$ (kV) | 230 | 115 | 37 | 27.5 |

例如, 若为  $35 \text{ kV}$  输电线, 则采用  $U_i = 37 \text{ kV}$ 。

## 五、短 路 容 量

电力系统的短路容量是选择牵引变电所  $110 \text{ kV}$  开关设备所必须的。在第十章中可以看到, 它也是估计电力系统的负荷能力的重要依据。

我们把电力系统元件的电抗归算到同一的基准容量 ( $100 \text{ MVA}$ ) 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的标么值  $X_{*\Sigma}$ 。电力系统在牵引变电所进线点 (通称负载点) 短路时的短路容量便等于

$$S^* = \frac{S_j}{X_{*\Sigma}} \text{ MVA} \quad (1.4)$$

式中  $S_j$ ——基准容量 (MVA)；

$X_{*2}$ ——电力系统的等效电抗标么值。

电力系统的短路容量同电力系统的发电容量有关，还同负载点所在地点有关。一般电力系统的发电容量越大，短路容量越大；负载点距离电力系统电源越远，短路容量越小。负载点距离电力系统电源的远近，可用等效输电线路长度来表示。由于实际中一般不是用一条输电线将负载点与一个单一的发电厂联通，所以等效输电线路长度只是从概念上表示负载点与电力系统电源的“电距离”。

设令  $l$  代表等效 110 kV 输电线长度，那么，在各种长度  $l$  时，电力系统的短路容量  $S'$  同系统容量  $S_s$  的关系可示于表 1·5。

电力系统的短路容量  $S'$ 

表 1·5

| $l$ (km)       |      | 0    | 10   | 20   | 50  | 100 |
|----------------|------|------|------|------|-----|-----|
| $S_s$<br>(MVA) | 125  | 550  | 470  | 410  | 300 | 205 |
|                | 250  | 1100 | 820  | 660  | 410 | 255 |
|                | 625  | 2700 | 1490 | 1030 | 530 | 295 |
|                | 1250 | 5500 | 2060 | 1270 | 590 | 310 |

由表 1·5 可知，只是当负载点离电力系统电源较近时，短路功率  $S'$  的值受系统容量的影响才较大。而离电源愈远，短路功率  $S'$  受系统容量的影响愈小。

通常在电力系统容量很大时使用 220kV 以至 330kV 输电线。从 (1·3) 式可知，输电线阻抗同电压平方成反比。100km 220 kV 输电线的阻抗只相当于 25km 110kV 输电线。所以若改由 220 kV 输电线供电，将大大缩短负载点与电力系统电源的电距离。

实际中，牵引变电所一般由 110 kV 电网供电。电力系统的短路容量通常在 400MVA 与 1600MVA 之间。由 220kV 电网供电时，电力系统的短路容量将加大。



### 第三节 电力系统的电压波动

为了分析电力系统的电压状态，考虑图1·4(a)所示的简单情况。图中表示一个单一的发电厂和输电线，C表示牵引变电所负载点。

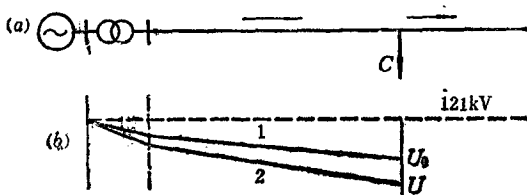


图 1·4

发电机母线电压由自动电压调节器保持在额定电压，所以升压变压器的空载电压为 121 kV，比输电线标准电压 110 kV 高 10%。牵引变电所空载时，发电厂原有的负载电流在升压变压器和输电线中产生的电压损失如图 1·4 (b) 中折线 1 所示，负载时的电压状态如折线 2 所示。图中  $U_0$  代表着电力系统在牵引变电所负载点原有的电压水平，电压差  $\Delta U = U_0 - U$  表示由于牵引负荷而引起的电压波动量。这个波动量是牵引负荷电流在线路阻抗（包括升压变压器和输电线）中造成的附加电压损失。由于电力负载的变化，实际  $U_0$  不是常值。但是在在大系统中，一般  $U_0$  变化不大。 $\Delta U$  的值也很小。只是在专供牵引变电所的输电线路很长时，由于牵引负荷而引起的电压波动  $\Delta U$  才具有可观的数值。一般说来，距离发电厂较近的牵引变电所，系统电压水平较高，电压波动也较小。而远离发电厂的牵引变电所，电压水平较低，电压的波动也较大。因此我们在牵引变电所的设计、安装与运行中，应选用合适的牵引变压器分接电压。

牵引变压器高压侧的电压分接头有多种，例如  $110 \pm 2 \times 2.5\%$