

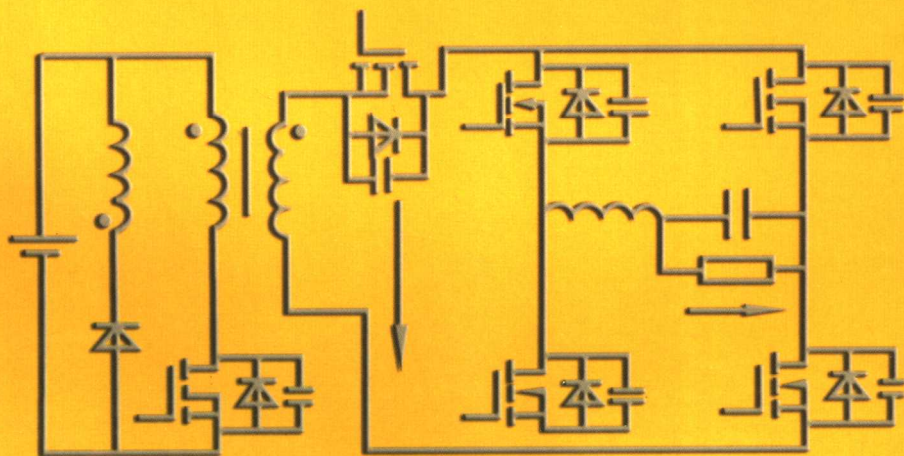
电能变换技术丛书

# 通信高频

第2版

# 开关电源

黄小军 黄济青 编著



本书内容包含：各种基本的直流变换器的特点、原理、计算、驱动、控制、保护；通信用高频开关整流器的实用方案及其发展；单相和三相的功率因数校正；单级变换器；大功率直流变换级中软开关的应用及发展；三电平变换器；电磁元件设计及 PSPICE 仿真；通信电源的数字控制技术，以及不间断电源、防雷、局站电源系统的监控等相关技术。

本书适合于通信、电力电子、工业自动化类专业的大学生、研究生及相关技术人员阅读，可供教学、自学和参考之用。

## 图书在版编目 (CIP) 数据

通信高频开关电源/黄小军, 黄济青编著. —2 版. —北京:  
机械工业出版社, 2007.9 (电能变换技术丛书)  
ISBN978-7-111-13945-4

I. 通... II. ①黄...②黄... III. 通信系统—高频—开关电源  
IV. TN86

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 007287 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 王 玫 张沪光 版式设计: 张世琴

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 陈 沛 责任印制: 李 妍

北京瑞德印刷有限公司印刷 (三河市明辉装订厂装订)

2007 年 9 月第 2 版·第 1 次印刷

184mm×260mm·19.25 印张·473 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-13945-4

定价: 30.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639、88379641、88379643

编辑热线电话: (010) 88379767

封面无防伪标均为盗版

# 序

电能是当今最重要的能源形式。很难想像失去电能支撑的文明世界如何运行。在所有的动力资源中，电能使用最方便，适用范围非常广，并且是清洁的。电能变换则是用好电的主要技术手段之一。

供人类使用的电能都是通过一些方法生产或收集得来的。世界上绝大部分的电能来自发电厂（站），例如水电站、火力发电厂和核电站，发电站是交流电网的源头。燃油发电机是防备电网故障或远离电网的应急和补充。风力发电、潮汐发电等是自然能与电能之间的有效转换。太阳电池是太空最理想的发电装置。燃料电池、锂离子电池、镍氢电池、镍镉电池、铅酸蓄电池等是经过电化学反应而产生电能的固定或移动式电能载体。形形色色的干电池是一次性的微小电能载体。所有称得上“电池”的都是直流电的储蓄体。

直接从电网或电池汲取的原生态的电能（姑且称之为原电）在某种意义上都是“粗电”。在大多数情况下，使用这些“粗电”都不能尽如人意，譬如电网上的电就不一定好使。电网是共用的，宏观上有高峰期和低谷期之分，电网在高峰期和低谷期的电压存在差异；由于不同用户从电网支取电能的时机和电量的不确定性和偶然性，特别是大型设备的起动和停止，足以给电网造成随机的瞬时冲击和定式落差；由于雷电、风暴、炎热等自然因素造成电网扰动甚至供电瞬时中断等，都将给敏感用户带来麻烦：设备运转失常、系统效率降低、计算机数据丢失、逻辑功能混乱，严重时还将造成系统硬件损坏，使系统工作陷于瘫痪。为此需要稳压器和 UPS 对电网下载的粗电进行整合和修补。

由于电池自身具有的电容性，电压瞬时波动可能比电网要小。不过电池在工作中也有不少问题，最常见的是电池电量随工作时间的延长或用电量的加大会逐渐衰竭；另外，单体电池的电压较低，很少以其自然形态直接拿来使用，多数是串联或串并联组合，但很难保证串联或串并联组合中的每个单体的特性一致。为此，必须实施合理的充电、放电和监控。

太阳电池用来将阳光转换成电能，但阳光的照射会因向背、阴晴、昼夜、四季而不均衡，为此，需要对转换的电能进行收集储存，再经 DC/DC 或 DC/AC 变换，获得稳定的直流电和交流电；风力等自然能发电同样受自然因素牵制，借助风力等自然力传动的发电机输出的电力经常处于不稳定状态，也必须实行调整控制。

不管是电网、电池还是相对独立的供电系统，都存在电磁环境问题。即在运行中因环境电磁干扰（如雷电、汽车点火引发），或共享电源母线的“惹事”负载设备的电磁干扰，或 DC/DC、DC/AC 变换装置自身的电磁干扰，都能搅得“四邻不安”。

今天的电网面临的承载非常严酷。由于功率半导体开关器件的长足进步、控制技术日益先进，变流设备的功率等级提升极快；又由于采用变流举措的负载设备日益增多，其复杂的负载性质带来的负面影响突出。基于这些因素的电网存在功率因数低下、波形畸变、浪涌、相位丢失等不良境况。因此，电能质量控制刻不容缓，电力补偿、有源滤波、柔性输配电等电能变换技术在电网和用户之间能起到较佳的缓冲匹配作用。

能源问题在本世纪仍占据瞩目位置，人们追求在节约电能方面有卓越贡献的高效能供电

设备和用电方法。在现实中,相当一部分电能消费是以驱动电动机的形式进行的,如机床、电动工具、电动汽车、城市轻轨、传动系统、机器人、风机、水泵、纺机、空调等等。直接用粗放的原电驱动,免不了要引入串联阻抗或并联阻抗,以控制和调节电动机的运行状态,而这些不得已介入的阻抗会白白消耗电能。为了将这些消费掉的非常可观的电能拣回来,利用现代电能变换技术对电动机实行变频调速控制,具有很好的节电潜力。

照明用电据称占全球总体用电量的 20%,节电潜力巨大,起源于欧美的绿色照明浪潮大有席卷全球之势。绿色照明的主题词:最小耗电产生最大流明。除了新型电光源和新型发光介质外,以全新的电能变换技术装备的电子镇流器将是实现绿色照明的主要角色。

生产力越发展,技术越进步,环境问题越加突出。电能的生产、变换、使用在很大程度上影响到环境。电能的生产一般伴随二氧化碳、二氧化硫气体排放,前者是地球温室效应的参与者,后者是酸雨的成因,两者对环境危害都很大。少一点电能生产却能换得环境少一点恶化。生产发展必然要增加电力的需求,关键在于节约电力,减少电力的浪费。这要求我们的电源装置、电能变换系统提高效率。另外,干净的电磁环境也要求电能变换设备在电磁兼容性方面达标。节约电能、电磁兼容、无环境污染的绿色供电势在必行。

21 世纪将是科学技术突飞猛进的时代,技术进步定会牵动电能变换技术需求急速膨胀。“电能变换技术丛书”在这一时刻呈献给读者,意在诠释电能变换技术的最新应用。但是电能变换技术是实用性极强的技术,服务于各种领域,内容异常丰富,丛书限于规模实难尽述。不过,我们仍然企望借助几个具有典型意义的层面,如高频功率变换、变频传动、电能质量控制等在学术、产业都呈热点的几个方面展示多彩的电能变换技术应用。丛书主要供中等技术水平的科技人员阅读,在概念和应用实例方面照顾到其他层面的科技人员。丛书的读者定位为电源技术、运动控制、电力电子、电子技术、信息技术、能源转换、过程控制等应用领域的工程技术人员,以及科技爱好者们。读者如能从“电能变换技术丛书”中得到启示,并能在自己的工作实践中获得应用,编者将足以自慰。本丛书从立意到选题到写作内容,定有不足之处,欢迎读者批评斧正。

**“电能变换技术丛书”编辑委员会**

# 前 言

由于应用程控交换、移动通信、计算机和 Internet 等设备与技术的通信事业在国民经济发展速度中处于领先地位,又值电力电子技术的迅速发展,通信电源作为通信设备的基本设施,得到了“质”和“量”两方面的发展机会。

20 世纪 80 年代中期,国外超大规模集成电路生产工艺的发展,研制出场控型全控半导体器件——功率场效应晶体管 (MOSFET) 和绝缘栅双极型晶体管 (IGBT),正在取代 20 世纪 70 年代推出的半控器件——普通晶闸管。高频开关电源的研制生产有了良好的物质基础,使各种高频开关变换电路拓扑得到了极为广泛应用和迅速发展。

为减小开关损耗,发展了软开关电路,可提高电路的效率,应用很广。

为提高功率因数和减小谐波电流,为使用电环境“绿化”,单相有源功率因数校正的电路功率因数可达 0.99 以上,应用已甚普遍。三相有源功率因数校正由于电路复杂,应用不多,如何简化三相功率因数校正电路是个热点。

随着局站中直流 48V 基础电源系统从传统采用集中供电方式逐步转向采用分散供电,开关型整流器单机的功率将逐步向减小的方向发展,进入通信机房,进入通信机。

计算机监控已成为不可缺少的功能:监测电源的各种参数及工作状态;完善对蓄电池的监控;将环境空调、高压系统、备用油机发电机及安全、火灾用摄像机进行现场全面监控等。

本书既系统地叙述基本理论,全面介绍新技术,又符合当前实用情况,内容精炼、讲解清晰,有利于提高学习效率。适合于通信、电力电子、工业自动化类专业大学生、研究生及相关技术人员阅读,可供教学、自学和参考之用。

本书共分 11 章。第 1 章对通信电源系统进行介绍。

第 2 章内容是常用功率半导体器件。

第 3 章为变换器的基本理论,对各种基本直流变换器电路的特点、原理、波形、计算作了细致、深入的分析和叙述。为减少重复,前面介绍的电路中出现过的概念,在后面往往只是引用;这样可以突出重点,保持精炼。

第 4 章的控制电路都采用当前常用的典型芯片为代表来讲述各项功能,使读者建立起完整又实用的变换器基本电路的概念。

第 5 章详细介绍了软开关技术。

第 6 章以介绍通信用高频开关整流器为主体,结合应用新的电路介绍了功率因数校正技术以及功率因数校正的主要电路拓扑。

第 7 章为变换器设计,主要为电磁元件设计、PSPICE 仿真等,为设计工作者所需。

第 8 章的不间断电源中介绍了新型的串并联调整技术。

第 9 章为防雷,设备在实际运行中,由于雷电所引起的损坏占有相当大的比重,应引起注意。

第 10 章的通信电源的数字控制技术中,主要介绍了数字信号处理器 (DSP) 和可编程

逻辑器件 (PLD) 在电源系统数字控制中的应用。

第 11 章为监控, 涉及各种物理量的传感器 (如霍尔电流传感器、温度传感器等) 转换成电的模拟量, 由数字电路、单片机的硬件和软件处理后, 通过串行接口与上级监控 (PC) 通信。

本书的素材来自大量的参考资料, 在此一并表示感谢。对北京邮电大学李朔生教授和须振健教授给予本书的大力支持表示感谢。书中内容若发现有不足和错漏之处, 敬请广大读者提出指正, 在此表示衷心的感谢!

作 者

# 目 录

|                        |    |
|------------------------|----|
| 序                      |    |
| 前言                     |    |
| 第1章 绪 论                | 1  |
| 1.1 通信电源的功能和重要性        | 1  |
| 1.1.1 通信设备对通信电源的要求     | 1  |
| 1.1.2 通信电源不间断供电的重要性    | 2  |
| 1.1.3 环境影响电网质量的体现      | 2  |
| 1.2 通信局站电源系统及变换器类型     | 3  |
| 1.2.1 集中供电通信电源系统       | 3  |
| 1.2.2 分散供电通信电源系统       | 4  |
| 1.2.3 混合供电通信电源系统       | 4  |
| 1.2.4 变换器类型            | 4  |
| 1.3 通信直流电源的发展概况        | 5  |
| 1.4 大功率高频开关电源(整流器)系统简介 | 6  |
| 1.5 通信用开关型整流器技术要求      | 7  |
| 第2章 常用功率半导体器件及工作状态     | 9  |
| 2.1 功率场效应晶体管           | 9  |
| 2.1.1 功率 MOSFET 简介     | 9  |
| 2.1.2 MOSFET 的主要特性及参数  | 9  |
| 2.2 绝缘栅双极型晶体管          | 13 |
| 2.3 晶闸管                | 14 |
| 2.3.1 普通型晶闸管           | 14 |
| 2.3.2 双向晶闸管            | 15 |
| 2.4 快恢复二极管             | 16 |
| 2.5 肖特基二极管             | 17 |
| 第3章 直流变换器基本电路          | 19 |
| 3.1 直流变换器概述            | 19 |
| 3.1.1 直流变换器的功能         | 19 |
| 3.1.2 直流变换器的组成         | 19 |
| 3.1.3 主电路方案间的关系        | 20 |
| 3.2 降压型直流变换器主电路        | 20 |
| 3.2.1 工作原理             | 21 |
| 3.2.2 电感电流连续状态(CCM)    | 22 |
| 3.2.3 电感电流临界状态         | 23 |
| 3.2.4 电感电流不连续状态(DCM)   | 23 |
| 3.2.5 功率开关管及续流二极管的选择   | 24 |
| 3.2.6 输出脉动电压峰-峰值       | 24 |
| 3.2.7 变换器的效率           | 24 |
| 3.2.8 同步整流器的应用         | 25 |
| 3.3 单端正激型直流变换器         | 26 |
| 3.3.1 主电路特征            | 26 |
| 3.3.2 电感电流连续状态分析       | 26 |
| 3.3.3 临界状态             | 29 |
| 3.3.4 输出电压             | 29 |
| 3.3.5 变压器储能的回馈         | 29 |
| 3.3.6 单端正激型直流变换电路的计算   | 30 |
| 3.3.7 单端正激电路特点         | 31 |
| 3.4 反相型直流变换器           | 31 |
| 3.4.1 原理及要点简述          | 31 |
| 3.4.2 电感电流连续状态分析       | 31 |
| 3.4.3 几种危险状态           | 32 |
| 3.4.4 临界电感             | 33 |
| 3.4.5 半导体器件参数          | 33 |
| 3.4.6 脉动电压的峰-峰值        | 33 |
| 3.5 单端反激型直流变换器         | 34 |
| 3.5.1 单端反激型直流变换器的特征    | 34 |
| 3.5.2 变压器磁动势连续状态分析     | 34 |
| 3.5.3 临界电流和临界电感        | 36 |
| 3.5.4 输出电压             | 37 |
| 3.5.5 单端反激型直流变换电路的计算   | 38 |
| 3.6 升压型直流变换电路          | 39 |
| 3.6.1 电路特点             | 39 |
| 3.6.2 工作原理             | 39 |
| 3.6.3 电感电流连续状态分析       | 40 |

|                                  |    |                                          |     |
|----------------------------------|----|------------------------------------------|-----|
| 3.7 Cuk 型直流变换器 .....             | 41 | 4.5 低压降线性稳压器与开关电源联<br>合使用 .....          | 63  |
| 3.7.1 隐含升压型和降压型机理 .....          | 41 | 4.5.1 低压降线性稳压器 .....                     | 63  |
| 3.7.2 脉动电压补偿原理 .....             | 42 | 4.5.2 低压降与开关电源串联使用 .....                 | 64  |
| 3.8 Sepic 型直流变换器 .....           | 42 | 4.6 过电压保护 .....                          | 64  |
| 3.8.1 工作原理 .....                 | 43 | 4.7 SG1525A 电压型控制芯片 .....                | 64  |
| 3.8.2 Sepic 型直流变换器的电压比 .....     | 43 | 4.7.1 SG1525A 的特点 .....                  | 64  |
| 3.9 推挽型直流变换器 .....               | 44 | 4.7.2 工作原理 .....                         | 65  |
| 3.9.1 电路特点 .....                 | 44 | 4.8 UC1842、UC1846 电流型控制<br>芯片 .....      | 67  |
| 3.9.2 工作原理 .....                 | 44 | 4.8.1 UC1842 脉宽调制器及应用<br>实例 .....        | 68  |
| 3.9.3 推挽电路的磁状态 .....             | 45 | 4.8.2 UC1846 电流控制型脉宽调<br>制器 .....        | 69  |
| 3.9.4 输出电压(平均值) .....            | 46 | 4.9 脉冲频率调制 .....                         | 71  |
| 3.9.5 临界电感 .....                 | 46 | 4.9.1 脉冲频率调制的基本思想 .....                  | 71  |
| 3.9.6 推挽型直流变换电路的计算 .....         | 46 | 4.9.2 脉冲频率调制的原理 .....                    | 71  |
| 3.10 半桥型直流变换器 .....              | 47 | 4.9.3 脉冲频率调制的特点及应用 .....                 | 74  |
| 3.10.1 电路的构成 .....               | 47 | <b>第 5 章 软开关技术</b> .....                 | 75  |
| 3.10.2 工作原理 .....                | 48 | 5.1 软开关技术概述 .....                        | 75  |
| 3.10.3 半桥型变换电路的计算 .....          | 48 | 5.1.1 开关损耗的产生 .....                      | 75  |
| 3.10.4 电路特点 .....                | 49 | 5.1.2 软开关技术的提出 .....                     | 75  |
| 3.11 全桥型直流变换器 .....              | 49 | 5.1.3 软开关技术的分类 .....                     | 76  |
| 3.11.1 工作原理 .....                | 49 | 5.2 全谐振变换器 .....                         | 77  |
| 3.11.2 全桥型直流变换电路的计算 .....        | 50 | 5.2.1 基本串联谐振电路 .....                     | 77  |
| 3.11.3 电路特点 .....                | 51 | 5.2.2 串联负载串联谐振变换器 .....                  | 78  |
| 3.12 钳位、缓冲电路 .....               | 51 | 5.2.3 基本并联谐振电路 .....                     | 86  |
| 3.12.1 过电压吸收 .....               | 51 | 5.3 变频控制的准谐振变换器 .....                    | 87  |
| 3.12.2 缓冲电路 .....                | 52 | 5.3.1 零电流谐振开关 .....                      | 87  |
| 3.12.3 能量恢复吸收电路 .....            | 53 | 5.3.2 零电压谐振开关 .....                      | 89  |
| <b>第 4 章 控制电路</b> .....          | 55 | 5.3.3 多谐振开关 .....                        | 89  |
| 4.1 驱动电路 .....                   | 55 | 5.3.4 零电流开关准谐振降压型变<br>换器 .....           | 90  |
| 4.1.1 对驱动电路的要求 .....             | 55 | 5.3.5 半桥式零电流准谐振变换器 .....                 | 95  |
| 4.1.2 集成电路直接驱动 .....             | 56 | 5.3.6 零电压开关准谐振升压型变<br>换器 .....           | 99  |
| 4.1.3 加设驱动功率放大级驱动 .....          | 56 | 5.3.7 零电压开关准谐振降压型变<br>换器 .....           | 101 |
| 4.1.4 变压器耦合驱动 .....              | 56 | 5.4 恒频控制的 ZCS PWM 和 ZVS<br>PWM 变换器 ..... | 103 |
| 4.1.5 光耦合驱动器 .....               | 57 | 5.4.1 降压型 ZCS PWM 变换器 .....              | 103 |
| 4.2 脉宽调制器原理 .....                | 57 |                                          |     |
| 4.2.1 脉宽调制 .....                 | 57 |                                          |     |
| 4.2.2 脉冲分配 .....                 | 58 |                                          |     |
| 4.2.3 主电路与 PWM 比较器组合<br>增益 ..... | 58 |                                          |     |
| 4.3 稳压系统 .....                   | 59 |                                          |     |
| 4.3.1 硅稳压二极管及基准电压 .....          | 59 |                                          |     |
| 4.3.2 晶体管直流线性稳压电路 .....          | 60 |                                          |     |
| 4.4 稳流和限流 .....                  | 62 |                                          |     |

|                                        |     |                                               |     |
|----------------------------------------|-----|-----------------------------------------------|-----|
| 5.4.2 降压型 ZVS PWM 变换器 .....            | 107 | 6.4.5 三相隔离型 PFC .....                         | 163 |
| 5.4.3 正激型零电压 PWM 变换器 .....             | 109 | 6.4.6 带隔离型无损缓冲的三相单开关的<br>反激型 AC-DC 变换电路 ..... | 166 |
| 5.4.4 移相全桥 ZVS PWM 直流变<br>换器 .....     | 112 | 6.4.7 一种外接式功率因数校正<br>方法 .....                 | 170 |
| 5.5 恒频控制零转换 PWM<br>变换器 .....           | 119 | 6.5 大功率 DC-DC 变换级 .....                       | 176 |
| 5.5.1 ZVT PWM 变换器 .....                | 119 | 6.5.1 双管单端正激型直流变换器<br>拓扑 .....                | 176 |
| 5.5.2 ZCT PWM 变换器 .....                | 123 | 6.5.2 双正激型直流变换器拓扑 .....                       | 177 |
| 5.6 ZVZCS 移相全桥直流变换器 ..                 | 127 | 6.5.3 双管正激型变换器的回能吸<br>收电路 .....               | 179 |
| 5.6.1 用小隔直电容和反向阻断型开<br>管的 ZVZCS .....  | 128 | 6.6 整流模块并联运行 .....                            | 180 |
| 5.6.2 二次侧有源钳位的 ZVZCS 移<br>相全桥变换器 ..... | 128 | 6.6.1 负载均分的要求及措施 .....                        | 180 |
| 5.7 并联辅助开关管的近似 ZVS<br>关断 .....         | 129 | 6.6.2 均流方法 .....                              | 181 |
| <b>第 6 章 高频开关整流器</b> .....             | 131 | 6.7 开关型整流器的部分性能 .....                         | 182 |
| 6.1 高频开关整流器电路的组成 .....                 | 131 | 6.7.1 市电电压变化范围 .....                          | 182 |
| 6.1.1 影响主电路方案的因素 .....                 | 131 | 6.7.2 杂音电压 .....                              | 183 |
| 6.1.2 高频开关整流器常用电路的<br>组成 .....         | 131 | 6.7.3 效率 .....                                | 184 |
| 6.1.3 研究和发展方向 .....                    | 132 | 6.7.4 外特性 .....                               | 186 |
| 6.2 功率因数的定义及其校正 .....                  | 133 | <b>第 7 章 变换器设计</b> .....                      | 188 |
| 6.2.1 功率因数的定义及参数 .....                 | 133 | 7.1 高频磁心材料 .....                              | 188 |
| 6.2.2 不良功率因数的成因及危害 .....               | 134 | 7.1.1 磁心材料的参数 .....                           | 188 |
| 6.2.3 功率因数校正及其分类 .....                 | 135 | 7.1.2 铁氧体磁心 .....                             | 189 |
| 6.3 单相高功率因数预调级 .....                   | 138 | 7.1.3 非晶、微晶磁心 .....                           | 191 |
| 6.3.1 升压型功率因数校正电路<br>原理 .....          | 138 | 7.1.4 恒磁导率磁粉心 .....                           | 192 |
| 6.3.2 平均电流型 Boost 单相 PFC .....         | 139 | 7.2 高频变压器的设计 .....                            | 193 |
| 6.3.3 单相零电压开通高功率因数预<br>调级 .....        | 144 | 7.2.1 确定变压器的铁心 .....                          | 193 |
| 6.3.4 改进的零电压开通升压型变换器<br>主电路拓扑 .....    | 148 | 7.2.2 各绕组的匝数 .....                            | 195 |
| 6.4 三相网侧整流及三相预调级 .....                 | 151 | 7.2.3 变压器磁路中的气隙 .....                         | 196 |
| 6.4.1 三相输入无源功率因数解决<br>方案 .....         | 151 | 7.2.4 漆包线铜导线的直径及并绕<br>根数 .....                | 196 |
| 6.4.2 三相单开关管高功率因数预<br>调级 .....         | 154 | 7.2.5 绕组的布置 .....                             | 198 |
| 6.4.3 三相六开关高功率因数预<br>调级 .....          | 159 | 7.3 高频电流取样互感器的设计 .....                        | 201 |
| 6.4.4 三相三开关高功率因数预<br>调级 .....          | 161 | 7.3.1 高频电流取样互感器的应用与<br>特点 .....               | 201 |
|                                        |     | 7.3.2 高频电流取样互感器的设计<br>要点 .....                | 202 |
|                                        |     | 7.4 高频交流电感、滤波电感和储<br>能电感的设计 .....             | 204 |
|                                        |     | 7.4.1 磁心的选择 .....                             | 204 |
|                                        |     | 7.4.2 绕组计算 .....                              | 204 |
|                                        |     | 7.5 温升及散热 .....                               | 205 |

|                                       |     |                                       |     |
|---------------------------------------|-----|---------------------------------------|-----|
| 7.5.1 温升 .....                        | 205 | 8.6.3 串并联有源滤波 .....                   | 231 |
| 7.5.2 温度极限 .....                      | 206 | 8.7 串并联调整式 UPS .....                  | 231 |
| 7.5.3 散热的原理 .....                     | 206 | 8.7.1 电路特点 .....                      | 231 |
| 7.5.4 铝型材散热器 .....                    | 206 | 8.7.2 电路工作要点 .....                    | 232 |
| 7.5.5 散热器的稳定温升计算 .....                | 207 | <b>第9章 雷击与电涌防护</b> .....              | 234 |
| 7.6 PSPICE 仿真简要 .....                 | 208 | 9.1 雷击与电涌 .....                       | 234 |
| 7.6.1 绘制本 PSPICE 仿真电路的<br>要点 .....    | 208 | 9.1.1 电涌的产生及危害 .....                  | 234 |
| 7.6.2 电路输入文件 .....                    | 209 | 9.1.2 模拟电涌波形 .....                    | 235 |
| 7.7 设计举例 .....                        | 211 | 9.2 防雷器件及装置 .....                     | 236 |
| 7.7.1 单相 PFC 升压电感设计 .....             | 212 | 9.2.1 避雷器 .....                       | 236 |
| 7.7.2 移相桥高频主变压器设计 .....               | 213 | 9.2.2 氧化锌压敏电阻 .....                   | 237 |
| 7.7.3 滤波电感设计 .....                    | 214 | 9.2.3 硅雪崩二极管 (SAD) .....              | 239 |
| <b>第8章 交流不间断电源</b> .....              | 216 | 9.2.4 气体放电管 .....                     | 239 |
| 8.1 UPS 运行方式及系统结构 .....               | 216 | 9.2.5 抗干扰滤波器 .....                    | 240 |
| 8.2 单相逆变器及正弦脉宽调制 .....                | 217 | 9.3 电源系统防雷 .....                      | 242 |
| 8.2.1 基本逆变电路 .....                    | 217 | 9.3.1 线路出入局站的防雷规定 .....               | 242 |
| 8.2.2 对称开关状态输出波形 .....                | 217 | 9.3.2 通信电源系统设备的防雷 .....               | 242 |
| 8.2.3 正弦脉宽调制 .....                    | 218 | 9.4 接地系统 .....                        | 243 |
| 8.2.4 四象限运行 .....                     | 219 | 9.4.1 接地的各种作用 .....                   | 243 |
| 8.3 三相桥式正弦脉宽调制逆变<br>电路 .....          | 221 | 9.4.2 联合接地装置 .....                    | 244 |
| 8.3.1 不隔离的三相桥式 SPWM 逆变<br>电路 .....    | 221 | <b>第10章 通信电源的数字控制技术</b> .....         | 246 |
| 8.3.2 隔离的三相桥式 SPWM 逆变<br>电路 .....     | 222 | 10.1 电源设备的数字控制 .....                  | 246 |
| 8.4 高频耦合的工频变换器 .....                  | 222 | 10.1.1 数字控制的意义 .....                  | 246 |
| 8.4.1 由高频直流变换与低频逆变桥组<br>成的低频逆变器 ..... | 222 | 10.1.2 数字控制与模拟控制的比较 .....             | 246 |
| 8.4.2 移相控制高频耦合四象限低频逆<br>变器 .....      | 224 | 10.2 基于单片机的数字控制 .....                 | 247 |
| 8.4.3 占空比扩展高频脉冲直流环节逆<br>变器 .....      | 225 | 10.2.1 单片机简介 .....                    | 247 |
| 8.4.4 正激型隔离双向变换逆变器 .....              | 226 | 10.2.2 单片机在通信电源数字控制中<br>的应用 .....     | 247 |
| 8.5 串联补偿式稳压与串联有源<br>滤波 .....          | 227 | 10.3 基于数字信号处理器 (DSP)<br>的数字控制 .....   | 248 |
| 8.5.1 串联补偿式稳压 .....                   | 227 | 10.3.1 DSP 系统简介 .....                 | 248 |
| 8.5.2 串联型有源滤波 .....                   | 229 | 10.3.2 DSP 芯片 .....                   | 250 |
| 8.6 并联型有源滤波 .....                     | 229 | 10.3.3 DSP 在通信电源数字控制中的<br>应用 .....    | 251 |
| 8.6.1 功能和不同应用 .....                   | 229 | 10.4 基于可编程逻辑器件的数字<br>控制 .....         | 255 |
| 8.6.2 三相并联型有源滤波器并联于<br>网侧应用 .....     | 230 | 10.4.1 可编程逻辑器件介绍 .....                | 256 |
|                                       |     | 10.4.2 可编程逻辑器件在通信电源数<br>字控制中的应用 ..... | 257 |
|                                       |     | 10.5 数字控制方式的选择 .....                  | 266 |
|                                       |     | <b>第11章 通信电源和环境的监控</b>                |     |

|                                 |     |                          |     |
|---------------------------------|-----|--------------------------|-----|
| 系统 .....                        | 267 | 11.2.5 监控系统管理 .....      | 273 |
| 11.1 电源设备监控的必要性、现状<br>和发展 ..... | 267 | 11.3 局站监控系统的基本原理 .....   | 275 |
| 11.2 监控系统的总体介绍 .....            | 267 | 11.3.1 监控系统的基本原理 .....   | 275 |
| 11.2.1 监控系统的结构 .....            | 267 | 11.3.2 软件组成 .....        | 276 |
| 11.2.2 监控系统的功能 .....            | 269 | 11.4 设备监控单元 .....        | 279 |
| 11.2.3 监控系统的监控内容 .....          | 271 | 11.4.1 四种参量的采集方法 .....   | 279 |
| 11.2.4 监控系统的一般要求 .....          | 273 | 11.4.2 信号采集所需的一些部件 ..... | 280 |
|                                 |     | 参考文献 .....               | 291 |

# 第 1 章 绪 论

现代社会各方面都离不开现代化的通信。而任何一种现代通信设备如程控交换机、光通信、无线通信、Internet 等，一刻都离不开电。通信电源是确保通信系统正常运行的关键设备，常称为是整个电信网的“心脏”。

## 1.1 通信电源的功能和重要性

### 1.1.1 通信设备对通信电源的要求

复杂的通信设备和系统对通信电源的组成和性能在多方面提出了高的要求。

1) 直流供电和（或）交流供电 现代通信设备普遍是电子电路和计算机电路，需要多种直流电压供电。作为一个（通信）设备，内部也可设有变换电源（整流、变换等），因此（通信）设备的外部可分为直流供电或交流供电两类。通常，大型通信设备和大型计算机等专用设备用直流供电，考虑的是可靠性最高；小型通用型设备用交流供电，取其机动性好。

2) 不间断供电 对通信设备的不间断供电极为重要（后述）。由蓄电池直接保证不间断的直流供电系统的可靠性最高；交流不间断供电系统也能做到不间断供电，但可靠性低于直流不间断供电系统。

3) 电压准确、稳定 对于要求不高的一般数字电路为  $5V \pm 0.25V$ ，对于 12 位 A/D 转换器（若要保证其分辨率），其基准电压必须有 0.02% 的精确度，对于保证不间断供电的蓄电池的长期浮充电压通常应为  $(2.23V \pm 0.02V) / \text{只}$ ，否则价格很贵的蓄电池的寿命会缩短。

4) 杂音电压小 对通信的干扰小，例如，语音通信时的杂音小，图像通信时的条纹干扰小，数字通信时的误码率低等。

5) 高的效率 节能、减小电源设备的发热、提高可靠性、减小设备的体积与重量都要求高效率，许多电路技术（软开关、回能吸收等）的发展都是为了高效率。

6) 少污染 不影响电网供电质量（绿化），输入功率因数高、输入谐波电流小、采用软启动减小冲击电流。

7) 自动保护 一旦出现不正常现象，如输入、输出电压或电流过大、温升过高等应立即采取切断电源等保护措施，避免故障的扩大，并要保证系统的正常供电。

8) 防雷、防过电压 雷击和电网的操作过电压是环境的偶发因素，但并非少见，而且是使设备意外损坏的重要因素。

9) 自动监测和集中控制 可节省人力和提高系统可靠性。通信系统已实现的是一些通信局站和区域的集中监控，正在向城市集中监控方向努力，目标是全国集中监控。

10) 其他 在规定的环境温度和湿度范围内能正常工作、故障率低、寿命长等。

### 1.1.2 通信电源不间断供电的重要性

1) 电话局直流不间断供电系统的重要性 电话局的交换机采用直流供电,其主要原因是获得最高的可靠性,最大可能地保证不间断供电。如果电话交换机出现即使是极短暂的瞬间停电,此交换机所连接的所有正在通话电话将全部“挂断”。紧接下来的是谁都要反复不止地重新拨号呼叫,使话务量过大,交换机远远超载而阻塞。这种状态无法自然恢复,要在总技术负责人指挥下,分片逐步接入。由于每次混乱惊慌状态逐步平息都需要较长的时间,完全接通电路需要半天的时间,这是过去国内外有过教训的。在电话不通的时间里,火警、匪警、医疗急救等信息全部中断,扩大社会混乱和损失,所以是一个极为重大的事故。消除这种隐患,是系统设计、设备研制生产、维护管理人员的共同职责。

2) 计算机系统不间断供电的重要性 现代通信设备和系统中极为普遍地应用计算机技术。即使电源是瞬间停电,也会对计算机带来可恢复和不可恢复的损害。未保存的信息会丢失,正在执行的程序会出错,甚至某些程序会被破坏。即使是普通的个人计算机,在突然停电后再开机,也要进行较长时间的扫描各区的硬盘程序、纠错等操作,才能恢复正常运行。对大型计算机来说,情况很复杂,恢复更困难。例如,大型计算机的硬盘存储器,是一台称为硬盘机的独立的设备,其读数的磁头与硬盘之间不允许直接接触,要有一薄层微米数量级的空气层隔开,这薄层空气层是由交流电动机带动的高压气泵产生的高速气流随时吹进去的。一旦交流市电停电,高压气泵停止运行,磁头与硬盘间因失去空气层而直接接触,磁头会将硬盘刮坏,机器损坏,程序、数据丢失,损失严重。

### 1.1.3 环境影响电网质量的体现

市电电网是暴露在室外和公用的系统,会受到雷击、过载、轻载、短路和操作等电压骤变的影响。电源系统和电源设备要经受这些冲击,并保证通信设备的安全。

1) 电涌 电网电压有效值短期内达 110% 额定值以上,过电压持续时间为一个周期 (20ms) 至数个周期,主要由电网中大型电气设备跳闸时,电感储能释放所产生。电涌 (浪涌) 又可作为各种过电压的广义名称。

2) 高压尖峰 电压峰值可高达 6kV,持续时间为 0.1~10ms,主要由雷击、电弧放电、静态放电、大型电气设备的开关操作引起。

3) 暂态过电压 峰值电压可高达 20kV,持续时间为 1~100 $\mu$ s 的脉冲电压,由雷击等产生。

4) 电压跌落 电压有效值小于额定值的 80%~85% 之间的低电压状态,持续一个周期 (20ms) 至数个周期,由点焊机、大型电动机起动或大型电力变压器接入等所造成。

5) 噪声电压 线路上的射频干扰 (RFI) 和电磁干扰 (EMI),由广播发射、微波辐射、大型电机电刷火花、大型断路器动作、汽车发动机的高频点火放电等引起。

6) 频率偏移 电网频率超过  $\pm 3$ Hz 以上,主要由柴油发电机、水轮发电机等转速不稳所引起。

7) 持续低压 电网电压有效值长期低于额定值,主要由线路过载等引起。

8) 市电中断 电网供电中断,持续大于两个周波至数小时,主要由电网的断路器跳闸、电网故障等引起。

## 1.2 通信局站电源系统及变换器类型

本书的内容虽然重点在高频开关电源，但对整个系统也应有所了解。

50Hz 正弦波交流市电常是电能最方便和廉价的来源。从市电种类（10kV 或 220V/380V 三相交流）和性能（不很稳定、有间断、有危险和干扰）变换到通信电路所需种类（多种直流电压和交流）和性能（稳定、可靠、安全），以及备用能源或独立获得能源，需要的专门全套电源设备统称为“通信电源”。“电源”两字（Power Supply, PS）也包含内部“无能源”，而只是进行“功率处理”的设备。

### 1.2.1 集中供电通信电源系统

以集中供电方式的通信电源系统为例，见图 1-1。

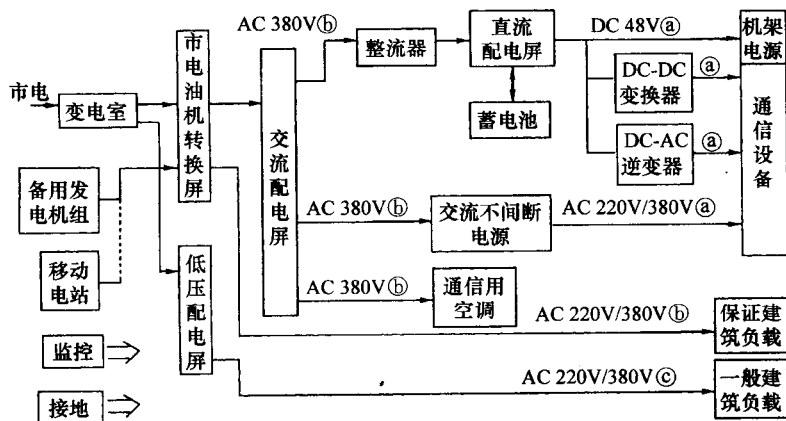


图 1-1 集中供电通信电源系统示意框图

注：③ 不间断；⑤ 可短时间中断；③ 允许中断。

1) 变电室 县级以上电信局争取高压进线，大中型局站设有变电室。

a) 高压开关柜：安装在高压室，对高压进线系统操作、保护和计量。

b) 降压电力变压器：安装在变压器室，将三相 10（或 6）kV、50Hz 交流电变为三相 220V/380V、Y（星形）联结、有中性线（并接地的）三相四线制低电压。

2) 低压配电屏 安装在低压室，具有操作、保护、计量和功率因数校正等功能。供局站的一般建筑负载用电，见图 1-1 中③允许中断。其分为动力和照明用电。

a) 动力用电：三相三线制，线电压 380V，对称用电。

b) 照明用电：三相四线制，相线对中性线可引出单相 220V 电压。

3) 备用发电机组 通常为柴油发动机（油机）带动的三相交流发电机组，安装在油机室。当市电停电时能自动开机发电作为备用电源。对于市电可靠而功率相对较小的几个局站，为减少投资，可以合用一个车载移动电站取代固定的机组。

4) 市电油机转换屏 可以选择有市电供电或备用发电机组(含移动电站)供电,以保证交流配电屏及保证建筑负载的可靠用电,见图 1-1 中⑤,可短时间中断。

5) 交流配电屏 与各整流器组和直流配电屏并列安装在电力室,供操作、保护和计量,提供向通信直流系统供电的各整流器组、交流不间断电源和通信用空调的可短时间中断的交流“保证用电”,见图 1-1 中⑥。

6) 整流器 是将交流变为直流(AC-DC) 48V 的大功率开关电源,多台(数台~100 台)并联运行,输出大电流,是保证通信机电质质量的关键,是本书的重点之一。

7) 直流配电屏 分路、保护、计量及对小电流分路(DC-DC, DC-AC)的操作。

8) 蓄电池 1~4 组蓄电池安装在蓄电池室;通过直流配电屏与整流器和用电设备相连。蓄电池的输出电压为直流不间断电压,见图 1-1 中④。

9) 变换器(DC-DC) 将直流 48V 电压变为其他数值的不间断直流电压。

10) 逆变器(DC-AC) 将直流 48V 电压变为不间断交流电压。

11) 交流不间断电源(AC-AC) 将交流电压变为不间断交流电压。

12) 通信用空调 通信电源供给通信设备的电功率大量消耗在通信机内,要靠空调将热量散到室外,可短时间中断见图 1-1⑦。

13) 机架电源 多种 DC-DC 变换、铃流发生器(DC-AC, 变为 25Hz 交流)等。

14) 监控 要求对系统中所有设备的主要参数都进行监控,并将数据送到监控中心。

15) 接地 为工作、保护和防雷所不可缺,每台设备和机房都需可靠接地。

电源系统的总价值(机架电源除外)约占电信局站总投资的 20%。

### 1.2.2 分散供电通信电源系统

将大功率的直流电源系统分为较小功率的多套电源系统,分散安装到通信机房附近或通信机房内,将 DC-DC 及 DC-AC 电源改用较小功率的多台电源,安装到通信机内,以减小低压大电流线路的压降和缩小故障所影响的范围,提高可靠性。

### 1.2.3 混合供电通信电源系统

市电质量差和可利用太阳能的地区,增设了太阳电池方阵,将太阳能转换为电能,输出直流电压,经直流控制屏中专用的 DC-DC 变换器变换电压后,对通信机供电,作为市电停电时的备用电源和市电正常时的补充电源。

### 1.2.4 变换器类型

以上通信局站电源系统所应用的、以半导体器件作为大功率开关的,可称为变换器的电源设备,按输入和输出电能种类(直流或交流)可分为四类:

1) 交流变为直流(AC-DC) 称为整流器或交流-直流变换器。

2) 直流变为交流(DC-AC) 称为逆变器。

3) 直流变为(另一性能的)直流(DC-DC) 称为直流变换器。

4) 交流变为交流(AC-AC) 视用途分为交流不间断电源和变频器。

a) 交流不间断电源:保证输出交流电压不间断之用。

b) 变频器:例如用于变频调速,改变频率调节交流电动机的转速等。

### 1.3 通信直流电源的发展概况

1) 功率半导体器件的换代 20 世纪 70~80 年代,我国晶闸管整流器的生产和应用逐渐成熟。晶闸管是半控型器件(不能控制关断),需低频变压器,电感体积、重量大。80 年代以来,国外应用微电子工艺的功率半导体器件发展,高频化场控型全控器件问世,开关速度快的功率场效应晶体管(MOSFET),耐压高、电流大的绝缘栅双极型晶体管(IGBT)的容量与性能提高,高频开关电源的发展才具有了良好物质条件。

2) 电路换代与发展 整流器的电路从低频的相控整流换代为高频开关电源。开关变换器的功率上限和开关频率提高。20 世纪 90 年代,数千瓦的大功率变换器的开关频率在 20~450kHz 之间,市售小功率变换器的开关频率在 100kHz~1MHz 之间。

a) 体积与重量:采用高频开关技术,用高频变压器和电感比用 50Hz 变压器和电感时,电磁元件的体积和重量(在中小功率范围内)约减小两个数量级,整流器的体积和重量约减小一个数量级。例如,48V、50A 的开关整流器体积仅相当于一台普通示波器,称为整流器模块,多台可放在一个列架上。

b) 通信用开关整流器中高频变换器方案:随着提高设备的效率和减小体积重量的趋势,发展了软开关技术。目前国内较成熟的变换技术先进方案大体有三种:

① 在硬开关的脉宽调制(PWM)技术基础上,以 MOSFET 和 IGBT 并联运行,等效于性能更优的开关器件,或视为用 MOSFET 使 IGBT 软关断的方案(专利)。

② 软开关的准谐振调频电路方案,开关频率可高达 450kHz。

③ 移相控制-零电压开关-脉宽调制(PS-ZVS-PWM)电路方案。

这三种方案的性能、体积、重量相仿,最大效率都略高于 92%。

目前通信用开关电源单机(模块)有 48V、30A(25A)、50A、100A、200A 等产品。多台开关整流器并联能组成 100~10000A 的直流系统,性能满足技术要求,且能满足市电电压变化范围较大的国情。

c) 电路的发展:电路研究开发的方向如下:

① 软开关的工作机理有零电压开关(ZVS)或零电压转换(ZVT)和零电流开关(ZCS)或零电流转换(ZCT)等,电路方案很多。目前研究的方向有:在空载时能实现零电压开关的 PWM 边沿谐振变换器电路、零电压开关的正激型变换器电路等。

② 高输入功率因数、低输入谐波(绿化)变换器:单相的电路已较成熟,三相的电路已掀起研究发展热潮;包括多开关、单开关、单级变换器等。

③ 三电平变换器:在开关管耐压上限已定时,能够输入较高的电压。

④ 同步整流器:能输出很低的电压(CPU 所需的 1V 电源),仍旧能高效率(90%)。

3) 监控 已是必备的功能。一般监测电压、电流、功率因数、温度、工作状态等。判断蓄电池的新方法是用测量电池的动态电导来判断电池尚能放出的容量。监控正向着全面监控的方向发展,将环境空调、高压系统、备用油机发电机及安全、火灾用摄像机进行全面现场监控,并组成各级监控网。

4) 直流系统供电的分散化 由于全密封的阀控型蓄电池能防止酸气漏出,局站直流电源设备正向着与通信设备安装在同一机房,并进一步分成几个小系统与通信机安装在一起的

方向发展；小功率的开关电源分散到通信机内的电源印制板上或通信印制板上。

5) 加强保护 开关型整流器中晶体管耐压裕量较小，除了加强整流器模块自身的过电压保护外，还应特别加强进线的雷电和操作过电压保护，在进局、进楼、进机房、进机架处设置系统的雷电及浪涌吸收装置。

6) 联合接地 接地系统已从过去的分散接地，改变为采用联合接地，就是将工作接地、保护接地及防雷接地共同合用一组地线。在大楼建筑中，建楼时就应将大楼建筑结构中的钢筋连通成一个笼形屏蔽体。

## 1.4 大功率高频开关电源（整流器）系统简介

通信局站直流系统成套产品，以 DUM14 大功率智能高频开关电源为例（见图 1-2），由 1 或 2 架交流配电屏、1~10 架高频开关电源和 1~3 架直流配电屏组成。

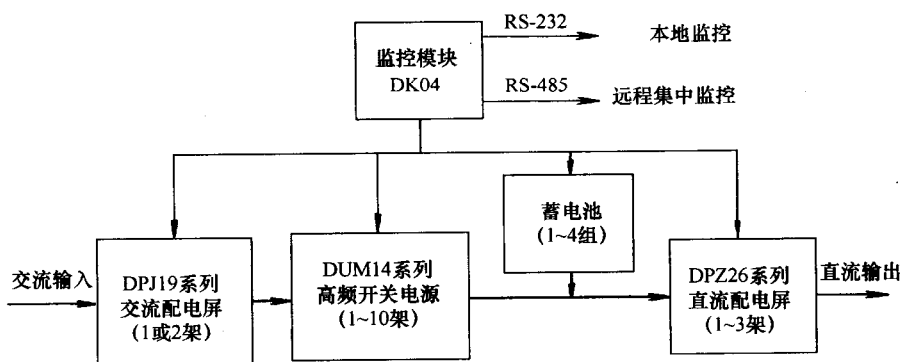


图 1-2 DUM14 高频开关电源系统构成框图

1) 机柜 又称机架（简称“架”）。高  $(2+0.11)$  m，宽 0.6m 或 0.8m，深 0.6m。

2) 高频开关电源 按输出电流大小可选 1~10 架，每架可装 10 台（容许少装）DMA10-48/100 型（48V、100A）高频开关整流模块，每架输出电流可达 1000A。按需要可多架并联使用，见图 1-3，最多 10 架并联，最大输出 10000A。机柜上部有交流配电模块，各交流分路设有三相断路器（有短路保护和灭弧能力强的三相开关），分别操作各整流模块的输入是否给电。

3) 监控模块 一个直流系统只需一个 DK04 监控模块，全面监控整个直流系统，最多可监控 100 个整流模块。监控模块安装在 1<sup>#</sup> 机架的整流器模块 1 的上面。通过 RS-232 或 RS-485 接口实现远程集中（微机）监控。

4) 交流配电屏 按交流电流大小可选 1 或 2 架，每架电流为 400A 或 630A（两种规格）。两路三相 380V、50Hz 交流输入（到每架），一用一备（市电或油机发电机组备用）。三相五线制（三根相线、中性线及地线），用图 1-3（左上角）“从交流配电屏来”的馈线上的五条短斜线所表示，由低压断路器自动切换，也可人工切换。

具有防雷、事故照明、电压电流数字显示（有模拟量信号接口送往 DK04 监控模块）。

5) 直流配电屏 按直流输出电流可选 1~3 架。每架额定输入电流为 2200A 或 3300A