

建筑电气与智能化系列

# 现代建筑电气 供配电设计技术

● 李英姿 洪元颐 主编



中国电力出版社  
[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

建筑电气与智能化系列

TU85/63

2008

# 现代建筑电气供配电 设计技术

主编 李英姿 洪元颐  
参编 王 佳 张少军 栾 茹  
岳云涛 陈亚爱  
主审 石萍萍 孙成群 高满茹



中国电力出版社

[www.cepp.com.cn](http://www.cepp.com.cn)

本书以国家民用建筑电气设计标准和规范为依据,全面介绍了建筑供配电设计所涉及的系统设计、设备选型、工程计算、保护控制和电气安全等内容。全书针对建筑供配电设计的基本要求、主接线和配电系统设计、负荷计算、变压器选择、变电所设计、短路计算、电气设备和线缆的选择、继电保护控制和自动装置、建筑防雷和系统过电压以及电气接地系统等内容进行详细的论述,并在部分章节中给出了具体的工程设计施工图和详细的工程计算范例。

本书突出工程实践和理论知识的应用,可以作为学习建筑电气和智能建筑专业知识的配套学习材料,可以供从事建筑电气设计、施工、监理、维护管理和其他相关专业的工程技术人员阅读,也适合高等院校有关专业作为工程实践教学环节和毕业设计的指导材料。

### 图书在版编目(CIP)数据

现代建筑电气供配电设计技术/李英姿,洪元颐主编. —北京:中国电力出版社,2008  
(建筑电气与智能化系列)

ISBN 978-7-5083-6411-7

I. 现… II. ①李…②洪… III. ①房屋建筑设备-供电-电气设备-建筑设计②房屋建筑设备-配电系统-电气设备-建筑设计 IV. TU85

中国版本图书馆CIP数据核字(2007)第184566号

中国电力出版社出版发行

北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>

责任编辑:齐伟 责任印制:陈焊彬 责任校对:付珊珊

北京丰源印刷厂印刷·各地新华书店经售

2008年1月第1版·第1次印刷

787mm×1092mm 1/16·22.75印张·562千字·11插页

定价:58.00元

#### 敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

本社购书热线电话(010-88386685)

# 前 言

随着建筑物功能的强大，先进技术的发展，建筑电气施工图纸也越来越趋于复杂化。本书的内容主要包括建筑供配电与电气设计中涉及的系统设计、设备选择、工程计算、保护控制、电气安全等主要领域内的基本原理、设计方法和要求，使读者能够比较全面地了解电气设计的主要内容。通过部分章节后面的典型工程实例，可以使读者尽快地掌握电气设计的方法和思想。

第一章重点介绍变压器，包括变压器的基本构造与工作原理、运行特性、铭牌、参数测定、干式变压器特性以及不同类型变压器的选用。特别着重介绍了配电变压器在并联运行、不对称运行和瞬变过程出现的不同工况。

第二章重点介绍建筑供配电系统的负荷计算，包括设备功率的计算、用需要系数法和单位面积法计算负荷，单相负荷、季节负荷、冲击负荷的计算，以及功率损耗、无功补偿、变压器容量和备用电源容量的计算。

第三章重点介绍供配电系统的设计要求，涉及建筑物负荷等级的确定、供电电压及其输送能力、保证供电电能质量的措施等，为供配电的系统设计提供设计依据。

第四章重点介绍供配电的系统设计，内容包括供电区域的规划设计、供电系统中性点运行方式、变电所高低压主接线、高低压配电系统设计、无功补偿的设计要求和滤波器的设置。同时给出了若干个住宅、写字楼、综合楼、商场、宾馆和体育馆的典型建筑供配电系统设计实例。

第五章重点介绍变配电所的确定和电气设备的布置，内容包括变配电所的型式和布置要求、配电装置的布置要求、10kV 配电工程典型设计，最后给出以独立变电所和地下变电所为典型变电所布置的实例。

第六章重点介绍短路电流计算，内容包括无穷大功率电源、三相短路的过渡过程和短路电流计算、两相不对称短路和接地短路电流的计算、异步电动机和系统运行方式切换对短路电流的影响、变压器低压侧短路时折算到高压侧穿越电流的换算关系和短路电流的效应，最后给出短路电流计算的实例分析。

第七章重点介绍电气设备的选择，内容包括电气设备选择的原则和开关设备的技术术语、高低压电气设备选择、部分低压电器的保护特性配合、保护电器选择的通用要求等内容。

第八章重点介绍导线和电缆的选择，内容包括电缆的用途和分类、导线和电缆型号的选择原则，按允许载流量（发热条件）、允许电压损失和经济电流密度选择导线和电缆截面积，以及导线及电缆选择的实例。

第九章重点介绍继电保护与控制，内容包括继电保护的作用与要求、线路保护、变压器保护、备用电源自动投入装置、控制电源的确定、断路器的控制和信号回路和变电站综合自

动化技术，并提供了典型的供配电系统继电保护和自动化装置的工程实例。

第十章重点介绍建筑物的防雷保护，内容包括雷电活动的型式及特性、建筑物防雷装置的组成及其作用、建筑物防雷分类及保护措施、雷击电磁脉冲防护的基本措施和建筑物的综合防雷实例。

第十一章重点介绍建筑接地系统，内容包括电气设备的接地、建筑物的电击防护措施、等电位联结、接地装置、接地电阻的计算、特殊场所的安全保护等。

本书由北京市建筑设计研究院洪元颐策划并提供资料，由北京建筑工程学院李英姿和北京市建筑设计研究院洪元颐共同担任主编，李英姿并负责撰写了其中的第二、四、九章，王佳撰写了第一、十、十一章，张少军撰写了第七、八章，栾茹撰写了第五章，岳云涛撰写了第三章，北方工业大学的陈亚爱撰写了第六章。本书由石萍萍、孙成群和高满茹同志担任主审，在此对以上人员表示由衷的感谢。

全书在编写过程中，参阅了大量的参考书籍和国家有关最新规范和标准电气工程施工图，将其中比较成熟的内容加以引用，并作为参考书目列于本书之后，以便读者查阅。同时对参考书籍的原作者表示衷心的感谢。

由于目前建筑电气施工技术发展迅速，而作者的认识和专业水平有限，加之时间仓促，书中必定存在有不妥、疏忽之处，敬请专家和读者批评指正。

编 者

# 目 录

前言

## 第一章 变压器的选择 ..... 1

### 第一节 变压器的结构与工作原理..... 1

一、电力变压器的用途和分类..... 1

二、变压器的基本结构和工作原理  
..... 1

三、变压器等效电路..... 2

四、变压器相量图..... 2

五、三绕组变压器..... 2

### 第二节 变压器的运行特性..... 3

一、空载电流和空载损耗..... 3

二、变压器励磁涌流..... 3

三、短路阻抗..... 4

四、变压器短路电流..... 4

五、变压器的负载损耗..... 4

六、变压器的效率..... 5

七、变压器的电压调整率..... 5

### 第三节 变压器的铭牌..... 7

一、额定容量..... 7

二、联结组别..... 8

三、绝缘水平..... 9

四、冷却方式与温升..... 9

五、调压方式 ..... 10

### 第四节 变压器的参数测定 ..... 11

一、变压器空载试验 ..... 11

二、变压器空载试验电路 ..... 12

三、变压器局部放电试验 ..... 12

### 第五节 变压器的并联运行 ..... 13

一、变压器并联运行的条件 ..... 13

二、变比不等的变压器并联运行 ... 13

三、联结组别不等的变压器并联

运行 ..... 13

四、短路阻抗不等的变压器并联

运行 ..... 13

### 第六节 三相变压器的不对称运行 ... 14

一、相序的等效电路 ..... 14

二、Yyn 联结变压器带单相负荷

运行 ..... 14

### 第七节 变压器的瞬变过程 ..... 15

一、空载合闸 ..... 15

二、不对称运行及其影响 ..... 15

### 第八节 干式变压器 ..... 16

一、铁心 ..... 16

二、高压绕组和低压绕组 ..... 16

三、绝缘方式 ..... 17

四、变压器的冷却方式 ..... 18

### 第九节 不同类型变压器的选用 ..... 18

一、Dyn11 变压器 ..... 18

二、有载调压变压器 ..... 18

三、三绕组变压器 ..... 18

四、接地变压器 ..... 18

五、隔离变压器 ..... 19

### 第十节 变压器运行 ..... 19

一、测试 ..... 19

二、特殊试验 ..... 20

三、绕组电阻测量 ..... 20

四、短路阻抗和负载损耗测量 ..... 20

五、空载损耗和空载电流测量 ..... 21

## 第二章 负荷计算 ..... 23

### 第一节 设备功率的计算 ..... 23

一、不同工作制用电设备的设备

功率 ..... 23

二、照明负荷 ..... 24

三、空调负荷 .....	25	第九节 变压器容量的计算 .....	55
四、水泵设备负荷 .....	28	一、按变压器的效率最高时的负荷率 来计算容量 .....	55
五、消防负荷 .....	30	二、按计算负荷来确定变压器容量 .....	56
六、运输设备负荷 .....	32	三、变压器型式的选择 .....	57
七、厨房和餐厅负荷 .....	33	四、干式变压器的过载能力 .....	58
八、弱电机房负荷 .....	33	五、专用变压器 .....	59
九、娱乐设施负荷 .....	34	第十节 备用电源容量的计算 .....	59
十、变电所负荷 .....	34	一、柴油发电机组 .....	59
第二节 需要系数法确定计算负荷 ..	35	二、蓄电池 .....	62
一、需要系数的确定 .....	35	三、EPS 选择 .....	62
二、用电设备组的计算负荷 .....	38	第十一节 建筑物电气负荷计算的 实例 .....	64
三、配电干线和配电所的计算负荷 .....	39		
四、总变电所的计算负荷 .....	40		
第三节 单位面积法确定计算负荷 ..	40		
一、单位面积功率法 .....	40		
二、单位指标法 .....	43		
三、北京地区单位面积和单位指标 .....	43		
第四节 单相负荷的计算 .....	43		
一、计算原则 .....	43		
二、精确换算 .....	43		
三、近似估算 .....	44		
四、照明支路的负荷计算 .....	45		
第五节 季节负荷的计算 .....	47		
第六节 冲击负荷的计算 .....	47		
一、临时性负荷 .....	47		
二、冲击负荷 .....	48		
三、冲击电流计算 .....	48		
第七节 功率损耗的计算 .....	48		
一、线路损耗 .....	48		
二、变压器中的功率损耗计算 .....	49		
第八节 无功补偿的计算 .....	50		
一、功率因数 .....	50		
二、无功功率 .....	51		
三、无功补偿量的计算 .....	52		
四、电力电容器的选择 .....	54		
		第三章 建筑供配电的设计要求 .....	66
		第一节 建筑物负荷等级的确定 .....	66
		一、相关规定 .....	66
		二、由供电电压和负荷量需求确定 等级 .....	67
		三、由建筑物功能确定等级 .....	69
		四、由建筑物内的电气设备确定 等级 .....	69
		第二节 供电电压及其输送能力 .....	73
		一、供电电压的确定 .....	73
		二、额定电压 .....	73
		三、输送能力 .....	75
		第三节 保证供电电能质量的措施 ..	76
		一、电能质量体系 .....	76
		二、改善电压偏移的措施与电压 调整 .....	77
		三、控制电压波动和电压闪变 .....	81
		四、降低不对称度的方法 .....	82
		五、频率偏差 .....	82
		六、抑制谐波的措施 .....	83
		七、保证供电可靠性的措施 .....	87

<b>第四章 建筑供配电系统设计</b> .....	88	二、写字楼	117
<b>第一节 供电区域的规划设计</b> .....	88	三、综合楼	117
一、总变电所的确定 .....	88	四、商场	117
二、开闭站设立 .....	89	五、宾馆	117
三、电力线路的走向 .....	89	六、体育馆	117
<b>第二节 供电系统中性点运行方式的     设计</b> .....	92	<b>第五章 变配电所的确定和电气     设备的布置</b> .....	118
一、中性点不接地的应用 .....	92	<b>第一节 变配电所的型式确定</b> .....	118
二、中性点直接接地的应用 .....	94	一、独立式变电所 .....	118
三、中性点经消弧线圈(电阻) 接地的应用 .....	95	二、地下变电所 .....	118
<b>第三节 变电所高低压主接线设计</b> .....	96	三、附设变电所 .....	118
一、主接线设计的原则 .....	96	四、户外变电所 .....	118
二、单母线不分段的应用 .....	97	五、箱式变电站 .....	119
三、单母线分段的应用 .....	98	<b>第二节 箱式变(预装式变电站)</b> .....	122
四、单母线带旁路的应用 .....	99	一、欧式箱变 .....	122
五、无母线接线的应用 .....	99	二、埋地式欧式箱变 .....	135
六、主接线的应用 .....	103	三、美式箱变 .....	137
<b>第四节 高低压配电系统设计</b> .....	105	四、中式箱变 .....	142
一、配电系统设计的原则 .....	105	五、高压开关设备 .....	143
二、低压配电系统的接地型式选择 .....	106	六、成套开关设备 .....	146
<b>第五节 无功补偿的设计要求</b> .....	108	<b>第三节 变电所的布置要求</b> .....	146
一、并联电容器接入电网的基本 要求 .....	108	一、一般要求 .....	146
二、并联电容器的接线方式 .....	109	二、变电所布置对相关专业的要求 .....	147
三、并联电容器的配套设备和连接 .....	110	三、高层建筑物内变电所的特殊 要求 .....	150
四、并联电容器装置设备 .....	110	四、变压器室布置 .....	151
五、并联电容器的保护装置和投切 装置 .....	113	五、高压配电室布置 .....	152
<b>第六节 滤波器的设置</b> .....	114	六、低压配电室布置 .....	153
一、无源功率滤波器的应用 .....	114	七、电力电容器装置 .....	153
二、有源电力滤波器的应用 .....	115	八、控制室 .....	153
<b>第七节 典型建筑供配电系统设计     实例</b> .....	117	<b>第四节 10kV 配电工程典型设计</b> .....	154
一、住宅 .....	117	一、设计对象 .....	154
		二、主要技术原则 .....	154
		三、10kV 和 380/220V 架空配电 线路设计 .....	155



四、电缆敷设设计·····	156	二、零序网络的确定·····	191
五、10kV 配电工程典型设计技术 导则目录·····	156	三、元件的零序电抗·····	191
六、10kV、380/220V 架空配电线路 典型设计技术导则目录·····	159	四、单相接地故障的短路 电流计算·····	191
七、电缆敷设典型设计技术导则 目录·····	160	五、两相接地故障的短路 电流计算·····	193
第五节 典型变电所布置·····	161	六、低压系统的单相短路 电流计算·····	194
一、独立变电所·····	161	第六节 异步电动机对短路冲击电流 的影响·····	195
二、地下变电所·····	161	第七节 系统运行方式切换对短路电 流的影响·····	196
<b>第六章 短路电流计算</b> ·····	168	第八节 变压器低压侧短路时折算到 高压侧穿越电流的换算关系·····	196
第一节 无穷大功率电源的特征·····	168	·····	196
一、特征·····	168	第九节 短路电流的效应·····	197
二、系统的短路容量·····	169	一、短路时的最大电动力·····	197
第二节 三相短路的过渡过程·····	169	二、短路动稳定校验·····	198
一、系统短路前的状态·····	169	三、短路电流的发热·····	199
二、系统短路后的状态·····	169	四、短路热稳定校验·····	202
三、系统短路的过渡过程·····	170	第十节 短路电流计算的实例分析 ·····	202
四、短路相关物理量·····	170	一、三相短路电流计算·····	202
第三节 三相对称短路电流的计算 ·····	172	二、两相短路电流计算·····	208
一、正序阻抗的定义·····	173	三、单相接地短路电流计算·····	209
二、元件正序阻抗·····	173	四、短路电流的力效应和热效应 ·····	210
三、标幺值法·····	175	<b>第七章 电气设备的选择</b> ·····	211
四、有名单位制法·····	176	第一节 电气设备选择的原则和开关 设备的几个术语·····	211
五、短路容量法·····	177	一、电气设备选择的一般原则·····	211
六、实用运算曲线法·····	178	二、关于开关设备的几个术语·····	211
第四节 两相不对称短路电流 的计算·····	186	三、开关设备的功能·····	212
一、对称分量法·····	186	第二节 高压电气设备·····	213
二、负序阻抗的定义·····	187	一、高压开关电器的选择·····	213
三、元件负序电抗·····	187	二、高压熔断器·····	214
四、序阻抗法·····	188		
五、估算法·····	190		
第五节 接地短路电流的计算·····	191		
一、零序阻抗的定义·····	191		

三、高压隔离开关·····	217	四、导线和电缆截面积的选择原则 ·····	249
四、高压负荷开关·····	218	第三节 按允许载流量(发热条件) 选择导线和电缆截面积·····	251
五、高压断路器·····	219	一、三相系统相线截面积的选择 ·····	251
六、高压绝缘子·····	220	二、中性线和保护线截面积的选择 ·····	253
七、高压开关柜选择·····	221	第四节 按允许电压损失选择导线和 电缆截面积·····	253
八、电流互感器的选择·····	222	一、线路电压损失的计算·····	254
九、电压互感器的选择·····	224	二、各种情况下的允许电压损失值 ·····	258
第三节 低压电器设备·····	225	第五节 按经济电流密度选择导线和 电缆截面积·····	259
一、断路器·····	225	第六节 电力电缆的选择·····	260
二、熔断器·····	228	一、电力电缆的选择主要考虑的 因素·····	260
三、接触器·····	230	二、电力电缆的选择举例·····	261
四、热继电器·····	232	第九章 继电保护与控制·····	262
五、漏电保护器·····	234	第一节 继电保护的作用与要求·····	262
六、低压起动器·····	236	一、电力系统继电保护的概念与 作用·····	262
七、四极开关及应用·····	238	二、继电保护的基本原理、构成与 分类·····	262
第四节 部分低压电器的保护特性 配合·····	243	三、对继电保护的基本要求·····	264
一、前后级低压断路器选择性的 配合·····	243	四、电流保护的接线方式·····	266
二、低压熔断器的选择与整定·····	244	第二节 线路保护·····	268
第五节 保护电器选择的通用要求 ·····	244	一、过电流保护·····	268
第八章 导线和电缆的选择·····	246	二、电流速断保护·····	271
第一节 电缆的分类·····	246	三、零序电流保护·····	273
一、常用中低压电缆分类·····	246	四、无选择电压监视装置·····	274
二、架空导线及电气设备用电线的 分类·····	246	五、线路综合保护·····	275
第二节 导线和电缆型号的选择原则 ·····	248	第三节 变压器保护·····	278
一、常用架空线路的导线型号 及选择·····	248	一、故障类型·····	278
二、常用电力电缆型号及选择原则 ·····	248	二、过电流保护·····	279
三、常用的绝缘导线型号及选择 ·····	249		

三、电流速断保护·····	279	三、线状雷电的特性·····	311
四、零序电流保护·····	280	四、球雷的特性·····	312
五、过负荷保护·····	281	五、雷电活动的规律·····	312
六、温度保护·····	281	第二节 建筑物防雷装置的组成及 其作用·····	313
七、瓦斯保护·····	281	一、接闪器·····	313
八、差动保护·····	282	二、引下线·····	314
九、变压器保护接线总图·····	284	三、接地装置·····	314
十、电力变压器的保护·····	284	四、跨步电压的防护及接触电压 的防护·····	314
第四节 备用电源自动投入装置·····	287	第三节 建筑物防雷分类及保护措施 ·····	315
一、基本形式·····	287	一、建筑物防雷分类·····	315
二、对 APD 装置的基本要求·····	287	二、建筑物的防雷保护措施·····	316
三、APD 装置的接线·····	288	三、其他防雷措施·····	324
第五节 电源·····	292	第四节 雷击电磁脉冲防护的基本 措施·····	325
一、变电所用电源·····	292	一、防雷区 (LPZ) 的划分·····	325
二、操作电源·····	293	二、屏蔽、接地和等电位连接的 要求·····	325
三、备用电源·····	293	三、电涌保护器 (SPD) 的设置 要求·····	328
四、不间断电源系统·····	294	四、电涌保护器 (SPD) 的主要 性能指标·····	328
五、直流操作电源的设计·····	294	五、安装各级电涌保护器 (SPD) 的指标要求·····	329
第六节 断路器的控制和信号回路 ·····	295	六、电涌保护器 (SPD) 的选用 原则·····	329
一、控制开关·····	295	七、选用电涌保护器 (SPD) 的 注意事项·····	333
二、断路器控制信号回路·····	296	第五节 建筑物的综合防雷实例·····	333
三、闪光装置·····	299	一、建筑物年预计雷击次数计算 举例·····	333
四、信号系统·····	299	二、利用滚球法计算避雷针的保 护范围·····	334
第七节 变电站综合自动化·····	302		
一、变电站综合自动化的概念·····	302		
二、变电站自动化的发展过程·····	303		
三、变电站综合自动化的功能·····	305		
四、变电站综合自动化系统的结构 ·····	308		
第八节 建筑供电系统保护实例 ·····	310		
<b>第十章 建筑物的防雷保护</b> ·····	311		
第一节 雷电活动的形式及特性·····	311		
一、雷电的形成·····	311		
二、雷电参数·····	311		

<b>第十一章 建筑接地</b> .....	337	五、等电位连接在住宅中的应用	342
<b>第一节 电气设备的接地</b> .....	337	<b>第四节 接地装置</b> .....	344
一、概述 .....	337	一、接地装置 .....	344
二、常用设备的接地 .....	337	二、接地电阻 .....	344
三、电气设备接地技术原则 .....	337	三、接地的类型和要求 .....	345
四、接地装置的技术要求 .....	338	<b>第五节 接地电阻的计算</b> .....	346
<b>第二节 建筑物的电击防护措施</b> .....	339	一、土壤电阻率 .....	346
一、直接电击的防护措施 .....	339	二、自然接地体的利用 .....	346
二、间接电击的防护措施 .....	340	三、人工接地装置工频接地电阻的	346
三、防止直接和间接电击的防护	340	计算 .....	346
措施 .....	340	四、冲击接地电阻的计算 .....	347
四、TT 系统的防护 .....	340	五、接地装置的接地电阻值不符合	348
<b>第三节 等电位联结</b> .....	341	要求时的改进措施 .....	348
一、总等电位联结 .....	341	<b>参考文献</b> .....	349
二、辅助等电位联结 (SEB) .....	341		
三、局部等电位联结 (LEB) .....	342		
四、等电位联结的综合应用 .....	342		

# 第一章 变压器的选择

## 第一节 变压器的结构与工作原理

### 一、电力变压器的用途和分类

电力变压器按用途可分为升压和降压（配电）变压器，如图 1-1 所示。按相数，可分为单相和三相变压器；按绕组数可分为双绕组、三绕组和自耦变压器；按绝缘介质，可分为油浸式变压器、干式变压器和 SF<sub>6</sub> 气体绝缘变压器等。

### 二、变压器的基本结构和工作原理

电力变压器是用来变换交流电压和电流，并传输交流电能的一种静止电器。以单相变压器为例，其工作原理如图 1-2 所示。当匝数为  $N_1$  的一次绕组 AX 接到频率为  $f$ 、电压为  $u_1$  的交流电源上时，空载电流在铁心中产生主磁通  $\Phi_m$ ，从而在一、二次绕组中感应出电动势  $e_1$  和  $e_2$ ；匝数为  $N_2$  的二次绕组 ax 端产生电压  $u_2$ ，当二次绕组接有负荷  $Z$  时，一、二次侧绕组中流过交流电流  $i_1$  和  $i_2$ 。

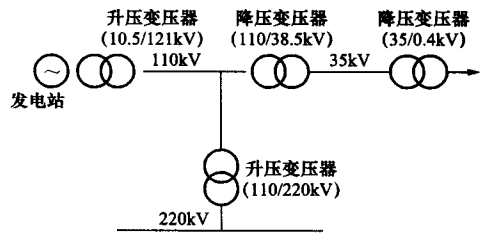


图 1-1 电力变压器用途举例

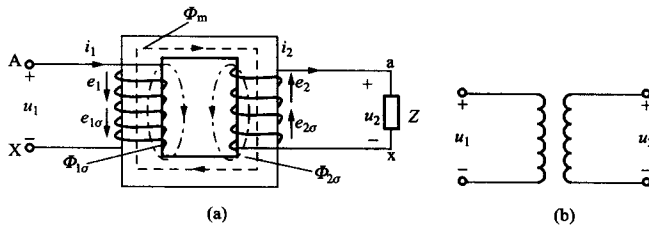


图 1-2 变压器的结构

(a) 变压器结构示意图；(b) 变压器的符号

为了分析变压器的基本原理，可首先按理想变压器来考虑，即忽略励磁磁动势、绕组的电阻和电抗的影响，由电压方程式  $E_1 = 4.44f N_1 \Phi_m \approx U_1$  和  $E_2 = 4.44 N_2 \Phi_m \approx U_2$  得电压变换关系  $K = E_1/E_2 \approx U_1/U_2 = N_1/N_2$ 。

$K$  称为变压器的变比，由磁动势平衡关系式  $\dot{I}_1 N_1 = \dot{I}_2 N_2$ ，从而得变压器传输电能的容量为

$$S_1 = U_1 I_1 = U_2 I_2 = S_2$$

式中  $I_1$ ——一次绕组的电流 (A);  
 $I_2$ ——二次绕组的电流 (A)。

当实际变压器需要励磁磁动势为  $\dot{I}_1 N_1 + \dot{I}_2 N_2 = \dot{I}_0 N_1$ , 则电流变换关系为

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 - \frac{1}{K} \dot{I}_2$$

式中  $\dot{I}_0$ ——一次绕组的空载电流 (A)。

如果考虑电源在变压器的电阻  $r_1$  和  $r_2$  以及电抗  $x_{1\sigma}$ 、 $x_{2\sigma}$  产生的压降, 根据基尔霍夫第二定律, 其电压方程式为

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 r_1 + j \dot{I}_1 x_{1\sigma}$$

### 三、变压器等效电路

变压器的电压和电流的关系可通过等效交换, 将绕组画为一个电路来描绘, 以便于计算。图 1-3 所示的等效电路是由折合了参数的绕组 (包括负荷阻抗) 与励磁电路并联后再与绕组串联的电路。

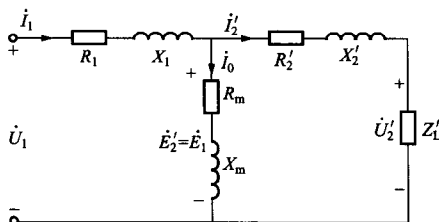


图 1-3 双绕组变压器的等效电路

### 四、变压器相量图

变压器的电压和电流的关系用相量图来表示比较直观。它是将二次侧电路参数用变比  $K$  折合到一次侧后 (或反之) 绘制的, 如图 1-4 所示。其绘制步骤如下。

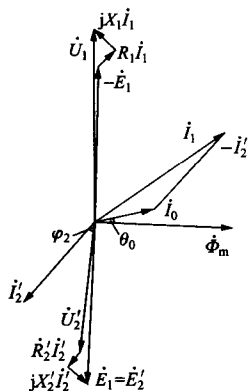


图 1-4 双绕组变压器接感性负载时相量图

- (1) 选一水平正向相量为磁通  $\Phi_m$ 。
- (2) 画出超前  $\Phi_m$  为  $\theta_0$  角的励磁电流  $\dot{I}_0$ 。
- (3) 画出滞后  $\Phi_m$  为  $90^\circ$  的一、二次绕组的电动势  $\dot{E}_1$ 、 $\dot{E}_2'$ 。
- (4) 根据负荷性质即由  $\cos \varphi_2$  画出二次电流  $\dot{I}_2'$ , 再以  $\dot{I}_0$  和  $\dot{I}_2'$  合成一次电流  $\dot{I}_1$ 。
- (5)  $-\dot{E}_1$  加  $\dot{I}_1 R_1 + j \dot{I}_1 X_1$  得到  $\dot{U}_1$ ,  $\dot{E}_2'$  减  $\dot{I}_2' R_2' + j \dot{I}_2' X_2'$  得到  $\dot{U}_2'$ 。

### 五、三绕组变压器

三绕组变压器每相有 3 个绕组。其一次绕组的容量必大于或等

于二、三次绕组的容量、3个绕组的容量百分比按高压、中压和低压顺序有100/100/100、100/100/50和100/50/100等3种。此时，二、三次侧不能都处于满载运行状态。一般三次绕组电压较低，多用于近距离供电或接补偿设备。三绕组变压器有3个电压比和3个阻抗值。

## 第二节 变压器的运行特性

### 一、空载电流和空载损耗

当变压器二次绕组开路，一次绕组施加额定频率的额定电压时，一次绕组中所流过的电流称为空载电流  $I_0$ ， $I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0r}^2}$ 。通常  $I_0$  以额定电流的百分数表示，即  $I_0\% = (I_0/I_{1N}) \times 100\%$ ，变压器容量越大，其值越小。

空载电流的无功分量  $I_{0r}$  的波形是含有奇次谐波的非正弦波形，各次谐波的大小见表 1-1 所示。

表 1-1 励磁电流谐波分量

谐波分量	冷轧硅钢片 (基波%)	谐波分量	冷轧硅钢片 (基波%)
基波	100	7次谐波	5~10
3次谐波	40~50	9次谐波	3~6
5次谐波	10~25	11次谐波	1~3

空载电流的有功分量  $I_{0a}$  是相当于空载损耗的分量，忽略一次绕组电阻损耗的空载损耗又称为铁耗，空载损耗  $P_0$  的计算式为

$$P_0 = K_0 p_1 G_1$$

式中  $P_0$ ——空载损耗 (W)；

$K_0$ ——附加损耗系数，由于结构和工艺的原因所引起的损耗增大，取 1.15~1.3；

$p_1$ ——对应于铁心磁通密度的单位损耗 (W/kg)；

$G_1$ ——铁心重量 (kg)。

### 二、变压器励磁涌流

当变压器空载合闸到线路时，由于磁饱和而产生很大的瞬间励磁电流，称为励磁涌流。励磁涌流大大地超过稳态的空载电流，甚至可达到额定电流的 5 倍以上。

励磁涌流与合闸时铁心的饱和磁通  $\Phi_r$ 、电压相位角  $\varphi$  有关。合闸时电压波形瞬时过零，即  $\varphi = 0^\circ$ ， $\Phi_m$  在半个周波后再次过零时；且有同向  $\Phi_r$  时，铁心内的磁通峰值将增加到  $2\Phi_m + \Phi_r$ ，励磁电流达到极高数值，

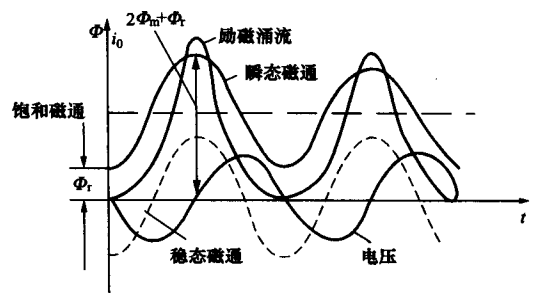


图 1-5 空载合闸时的励磁涌流

同时电流波形产生严重畸变，这便是励磁涌流。见图1-5。变压器容量越大，其持续时间越长，可达5~10s。在三相变压器中总有一相要产生这种过渡现象。这样，差动继电器有可能误动作，有时需重合闸几次。在差动保护的整定中应避免励磁涌流的影响。

### 三、短路阻抗

在变压器二次绕组短路情况下，使一次绕组流通额定电流而施加的电压，称为阻抗电压 $U_z$ 。通常 $U_z$ 以额定的百分数表示，即 $U_z(\%) = U_z/U_{1N} \times 100\%$ 。阻抗电压百分比由电抗、电阻电压百分比 $U_x$ 、 $U_r$ 组成。中小容量变压器 $U_x/U_r$ 为1~5，大容量的为10~15。通常，阻抗电压的百分比 $U_z(\%)$ 即为短路阻抗的百分比。短路阻抗的大小与变压器的成本和性能、系统稳定和供电质量有关。

标准系列电力变压器的短路阻抗值见表1-2。

表1-2 双绕组变压器标准短路阻抗

电压等级/kV	6~10	35	60	110	220
短路阻抗(%)	4~4.5	6.5~8	8~9	10.5	12~24

### 四、变压器短路电流

绕组内的电流与漏磁通相互作用时，即产生与电流的二次方成正比的电磁力，当与纵向漏磁通作用时，使内、外绕组产生压缩和拉伸的纵向力，与横向漏磁作用时产生轴向力。正常运行时，产生的电磁力并不大。

当变压器二次绕组突然短路时，其短路电流峰值为

$$i_{sm} = \sqrt{2}K_s I_s$$

式中  $i_{sm}$ ——绕组内短路电流峰值 (kA)；

$I_s$ ——稳态短路电流 (kA)；

$K_s$ ——冲击系数，中小容量的变压器为1.2~1.4，大容量的变压器为1.7~1.8；

$S_s$ ——系统容量数，见表1-3。

表1-3 系统的短路容量

电压等级/kV	6, 10	35	60	110
$S_s$ /MVA	500	1500	3000	8000
电压等级/kV	220	330	500	
$S_s$ /MVA	15000	30000	50000	

短路电流的大小取决于变压器的阻抗，往往可以达到额定电流的十几倍到几十倍，则短路电磁力可为正常运行时的几百到上千倍。因此要考虑线圈的结构型式及压装强度，以减少由于变压器绕组变形、松散而导致变压器损坏的事故。

### 五、变压器的负载损耗

当一、二次绕组流通额定电流时，在变压器中产生的损耗为负载损耗 $P_{Cu}$ ，此外，变压



器的损耗还应加入附加损耗（导线组的涡流损耗，并联导线的环流损耗、结构损耗和引线损耗）。

电阻损耗  $P_{Cu}$  又称为铜损耗（W），其计算方法如下

$$P_{Cu} = K_r j^2 G$$

式中  $K_r$ ——（75℃时）绕组系数，铜为 2.4，铝为 12.86；

$j$ ——电流密度（A/mm<sup>2</sup>）；

$G$ ——绕组总重量（kg）。

## 六、变压器的效率

变压器效率的计算公式为

$$\eta = \frac{\text{输出功率}}{\text{输出功率} + \text{空载损耗} + \text{负荷损耗}} \times 100\%$$

在任意负荷时（负荷系数以  $K_2 = I_2/I_{2N}$  表示）

$$\eta = \frac{K_2 S_{2N} \cos\varphi_2}{K_2 S_{2N} \cos\varphi_2 + p_0 + K_2^2 p_{KN}} \times 100\%$$

式中  $p_0$ ——空载试验时输入的有功功率（kW）；

$K_2$ ——负载系数；

$p_{KN}$ ——短路试验电流为额定值时输入的有功功率（kW）；

$\cos\varphi_2$ ——负载功率因数。

当  $K_2$  为最大效率的负荷系数时，中小型变压器  $\eta$  在 95% 以上，大型变压器  $\eta$  在 99% 以上。

## 七、变压器的电压调整率

变压器在负荷运行时，由于阻抗降压，使得二次电压随负荷电流和负荷功率因数的变化而变化。相应变压器的电压调整率为

$$\varepsilon\% = \frac{U_{2N} - U_2}{U_{2N}}\% = K_2 (R_K \cos\varphi_2 + X_K \sin\varphi_2)$$

式中  $R_K$ ——短路电阻（Ω）；

$X_K$ ——短路电抗（Ω）。

当  $\cos\varphi_2 = 1$  时， $\varepsilon = K_2 R_K$ ，因为  $R_K < X_K$ ，故  $\varepsilon$  最小；当  $\cos\varphi_2 = 0$  时， $\varepsilon = K_2 X_K$ ，此时变压器短路阻抗标么值  $X_K$  最大，故  $\varepsilon$  最大。

表 1-4 所示为北京供电局常用 SCB10、10kV 级变压器产品的技术参数，表 1-5 为 10kV 级 SCB10YB 系列变压器技术参数。

表 1-4 北京供电局常用 SCB10、10kV 级变压器产品的技术参数

容量 /kVA	空载损耗 /W	负荷损耗 (120℃) /W	短路阻抗 (120℃) (%)	空载电流 (%)
315	标准值	830	4	1.0
	设计值	828	3.99	0.434