



变配电室 值班电工

高级

谭延良 诸德宏 主编



化学工业出版社



变配电室 值班电工

高级

谭延良 诸德宏 主编

王兆华 谭斐 副主编 李金伴 主审



化学工业出版社

· 北京 ·

本书是根据《变配电室值班电工国家职业标准》的要求编写，主要内容包括：电工电子基础、电气设备原理、机械识图、母线倒闸操作、异常运行、变电设备异常及事故处理、设备维护、变电运行管理、组织管理、各级值班人员的技术培训等。为便于自学和培训使用，书中有大量例题和习题。

本书实用性强，可作为变配电站（所）值班电工的培训教材，也可供各级培训中心、职业学校相关专业的师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

变配电室值班电工：高级/谭延良，诸德宏主编. —北京：
化学工业出版社，2010.2
ISBN 978-7-122-07444-7

I. 变… II. ①谭…②诸… III. 变电所-配电系统-电工-
基本知识 IV. TM63

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 239619 号

责任编辑：李玉晖

文字编辑：孙 科

责任校对：宋 玮

装帧设计：尹琳琳

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）

印 刷：北京永鑫印刷有限责任公司

装 订：三河市万龙印装有限公司

787mm×1092mm 1/16 印张 16 $\frac{1}{4}$ 字数 437 千字 2010 年 5 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899

网 址：<http://www.cip.com.cn>

凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：45.00 元

版权所有 违者必究

前 言

变电站（所）运行值班电工是电力系统中的“智能”型工种，是供电企业主要工种之一。变电站（所）运行稳定与否，直接影响到电网安全运行。变电站（所）值班电工的技术素质将直接影响电网运行的质量。为了提高变配电值班电工的技术素质，编写了本书。

本书首先介绍了值班电工的基本知识，包括复杂直流电路和单相正弦交流电路的分析计算、不对称三相交流电路的分析计算；从基本的电子元件入手，介绍了基本的放大电路、集成运算放大器以及数字逻辑电路的基本应用；同时介绍了电量变送器的原理、操作方法和值班电工应具备的机械制图常识。这些均为高级值班电工和技师岗位培训的考核内容。本着“以职业活动为导向、以职业技能为核心”的原则，介绍了高级值班电工母线倒闸操作、变电所异常运行、事故处理、设备维护和变电运行管理的基本内容；以及技师在异常运行、事故处理、设备交接与验收、组织管理以及对初、中、高级值班电工的技术培训方面的要求。

全书由谭延良、诸德宏担任主编，负责全书内容与章节的确定以及全书的统稿。本书第1、2、3章及附录I由谭斐、陈山、康梅编写；第4、5、10、14、15章由王兆华、黄丽、汪陆浩编写；第6、8、9、12章及附录II、III由谭延良、谭梧浩编写；第7、11、13章由诸德宏、盛碧琦编写。全书由李金伴老师主审，李老师在审阅过程中，对初稿提出了很多宝贵意见，在此表示衷心的感谢。同时对所引用参考文献的各位作者也表示衷心感谢。

由于编者水平有限，时间又十分仓促，不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编者

2009年10月于江苏大学

目 录

第 1 篇 电工电子基础	1
第 1 章 电工基础	2
1.1 复杂直流电路的分析计算	2
1.1.1 等效电源定理	2
1.1.2 Y 电阻网络与 Δ 电阻网络的等效 变换	6
1.2 单相正弦交流电路的分析与计算	7
1.2.1 分析正弦交流电路的一般步骤	7
1.2.2 复阻抗的串联和并联	7
1.2.3 功率因数的提高	8
1.3 谐振电路的分析	10
1.3.1 串联谐振 (电压谐振)	10
1.3.2 并联谐振 (电流谐振)	12
1.4 不对称三相交流电路的分析计算	13
1.4.1 Y 连接的三相不对称负载	13
1.4.2 Δ 连接的三相不对称负载	15
1.4.3 三相不对称负载的功率计算	16
练习与思考	18
第 2 章 模拟电路基础	21
2.1 半导体基础知识	21
2.1.1 本征半导体	21
2.1.2 杂质半导体	22
2.1.3 PN 结	23
2.2 半导体二极管	24
2.2.1 半导体二极管的结构	24
2.2.2 二极管的伏安特性	25
2.2.3 理想二极管	26
2.2.4 二极管的主要参数	26
2.3 稳压管	28
2.4 半导体三极管	29
2.4.1 晶体管的基本结构	29
2.4.2 晶体管的电流放大作用	30
2.4.3 晶体管的特性曲线	31
2.4.4 晶体管的主要参数	32
2.4.5 晶体管微变等效电路	35
2.5 基本放大电路	36
2.5.1 放大电路的基本概念	36
2.5.2 共射极单管放大器	37
2.5.3 共集电极放大器 (射极输出器)	44
2.5.4 功率放大器	47
2.6 集成运算放大电路	47
2.6.1 运算放大器的组成	48
2.6.2 集成运放的符号、外引线与 参数	48
2.6.3 集成运放的电路模型与传输 特性	50
2.6.4 集成运放的基本运算电路	51
2.6.5 电压比较器	57
练习与思考	59
第 3 章 数字电路基础	62
3.1 概述	62
3.1.1 数字电路及其特点	62
3.1.2 脉冲信号	62
3.2 基本逻辑门电路和组合逻辑电路	63
3.2.1 基本逻辑门电路	63
3.2.2 组合逻辑门电路	65
3.2.3 组合逻辑电路分析	66
3.2.4 组合逻辑电路的设计	69
3.2.5 组合逻辑电路的应用举例	70
3.3 双稳态触发器	71
3.3.1 基本 RS 触发器	72
3.3.2 同步 RS 触发器	73
3.3.3 主从型 JK 触发器	74
3.3.4 D 触发器	75
3.3.5 触发器功能转换	77
练习与思考	77
第 4 章 有关电气设备	79
4.1 电流、电压变送器	79
4.1.1 电压变送器	79
4.1.2 电流变送器	80
4.2 功率变送器	80
4.2.1 直流功率变送器	81
4.2.2 交流功率变送器	81
4.2.3 功率变送器的接线	82
4.3 电量变送器	83
4.4 频率变送器	84
4.5 功率总加器	85

4.6 交流变送器和小电流接地选线变送器	86	5.1 机械制图	89
4.6.1 交流变送器	86	5.1.1 机械制图的一般规定	89
4.6.2 小电流接地选线变送器	86	5.1.2 投影与视图	92
4.7 变送器的误差精度与补偿	87	5.1.3 剖视图、断面图和辅助视图	95
4.7.1 影响变送器精度的主要因素	87	5.2 零件图	98
4.7.2 提高变送器精度的措施	87	5.2.1 零件图的作用及内容	98
4.7.3 变送器的发展方向	88	5.2.2 零件图表达方案的选择	99
练习与思考	88	5.2.3 零件图的尺寸标注	100
第5章 机械制图	89	5.2.4 读零件图	100
		练习与思考	101
第2篇 高级工	103		
第6章 母线倒闸操作	104	8.4 母线故障处理	142
6.1 单母线倒闸操作	104	8.4.1 母线过热故障的处理	142
6.2 双母线倒闸操作	106	8.4.2 母线失压故障的处理	142
练习与思考	108	8.4.3 母线绝缘子损坏故障的处理	143
第7章 异常运行	109	练习与思考	143
7.1 直流系统的异常运行	109	第9章 设备维护	144
7.1.1 直流系统的异常运行处理	109	9.1 电动机维护	144
7.1.2 蓄电池的异常运行及处理	111	9.1.1 三相异步电动机绕组基础知识	144
7.2 继电保护及电气二次回路的异常运行	115	9.1.2 三相异步电动机绕组展开图画法	146
7.2.1 继电保护的基本要求	115	9.1.3 三相异步电动机的绕组常见故障及处理	151
7.2.2 继电保护及自动装置异常运行及故障处理	116	9.1.4 三相异步电动机的常见故障及处理	157
7.2.3 二次回路的异常运行及故障处理	117	9.2 电气试验	160
7.3 电容器的异常运行	121	9.2.1 电气试验的一般工作程序	160
7.3.1 电力电容器的连接方式	121	9.2.2 非破坏性试验	161
7.3.2 运行中的电容器检查	122	9.2.3 破坏性试验	162
练习与思考	123	9.3 工具和仪器的正确使用	163
第8章 事故处理	126	9.3.1 电气安全用具	163
8.1 断路器故障处理	126	9.3.2 常用仪器的使用与保养	165
8.1.1 断路器“拒合”	126	练习与思考	169
8.1.2 断路器“拒跳”	128	第10章 变电运行管理	171
8.1.3 断路器误动作	130	10.1 变电所规章制度	171
8.1.4 断路器在运行中的发热处理	132	10.1.1 变电所人员岗位职责	171
8.1.5 真空断路器的故障处理	132	10.1.2 变电所运行管理制度	172
8.1.6 SF ₆ 断路器的故障处理	132	10.1.3 设备管理制度	177
8.1.7 断路器操动机构故障的处理	132	10.2 运行值班人员的工作	179
8.2 电压互感器故障处理	136	10.2.1 运行值班工作	179
8.2.1 电压互感器的运行	136	10.2.2 各种记录及填写标准	180
8.2.2 电压互感器的故障处理	137	10.2.3 工作考核	181
8.3 电流互感器故障处理	139	练习与思考	181
8.3.1 电流互感器的运行	139		
8.3.2 电流互感器的故障处理	140		

第3篇 技师	183
第11章 异常运行	184
11.1 变压器有载调压装置的监视	184
11.1.1 有载调压器的结构	184
11.1.2 有载分接开关的运行与操作 要求	185
11.1.3 有载分接开关的异常运行和故障 处理	186
11.1.4 有载调压开关故障处理举例	188
11.1.5 防止有载分接开关故障扩大的 措施	190
11.2 常用继电器的测试检查	191
11.2.1 继电器的一般检查	191
11.2.2 电流和电压继电器的调试	191
11.2.3 时间继电器的调试	194
11.3 电网故障类型的分析判断	195
11.3.1 电网短路故障的类型、现象、 原因与危害	195
11.3.2 三相短路电流、短路容量的 计算	196
11.3.3 小接地电流系统单相接地 分析	198
11.3.4 提高电力系统稳定性措施	199
练习与思考	201
第12章 变电设备异常及事故处理	203
12.1 电气事故类型及处理原则	203
12.2 变电所所用电源中断事故处理	204
12.2.1 所用变压器运行方式	204
12.2.2 变电所发生事故时的现象、原因 及处理	205
12.3 变电所母线失压事故处理	206
12.4 变电所所用电压失压事故处理	208
12.5 电容器投退及故障处理	209
12.5.1 并联电容器的投退要求	209
12.5.2 电容器异常运行的处理	210
12.6 消弧线圈故障处理	211
12.7 避雷器故障处理	213
练习与思考	214
第13章 设备交接与验收	216
13.1 电气设备验收规定	216
13.2 设备交接内容与一次设备验收时的试 操作	217
13.3 一次设备的交接与验收	217
13.4 二次设备的交接与验收	220
练习与思考	224
第14章 组织管理(技师)	227
14.1 质量管理	227
14.1.1 供电电压的影响	227
14.1.2 供电频率的影响	227
14.1.3 三相不对称及非正弦波的 影响	228
14.2 技术管理	228
14.2.1 设备评级	228
14.2.2 一次设备的检修管理	229
14.2.3 一次设备的试验管理	229
14.2.4 设备档案管理	231
14.3 劳动保护安全措施	232
14.3.1 安全教育	232
14.3.2 建立健全安全生产责任制	232
14.3.3 制订和执行安全生产的组织 措施	234
14.4 反事故技术措施方案的制订	235
14.4.1 防止电气设备误操作事故	235
14.4.2 防止电瓷绝缘污闪事故	236
14.4.3 加强过电压保护及接地工作的 技术措施	236
14.4.4 预防互感器事故	237
14.4.5 断路器反事故措施	237
14.4.6 继电保护反事故措施	238
练习与思考	239
第15章 技术培训	241
15.1 培训	241
15.2 各级值班人员的岗位要求	242
15.2.1 初级工岗位要求	242
15.2.2 中级工岗位要求	243
15.2.3 高级工岗位要求	243
15.3 各级值班人员的考核内容	244
15.3.1 初级工考核内容	244
15.3.2 中级工考核内容	245
15.3.3 高级工考核内容	245
练习与思考	245
附录	247
附录 I 逻辑代数	247
附录 II 主要电气设备完好标准	248
附录 III 设备评级标准	251
参考文献	254

第 1 篇 电工电子基础

第 1 章 电路的基本概念和基本定律

本章主要介绍电路的基本概念和基本定律。首先介绍电路的基本概念，包括电路模型、电路元件、电路的功率和能量守恒定律等。然后介绍电路的基本定律，包括基尔霍夫定律、欧姆定律、叠加定理、戴维南定理和诺顿定理等。最后介绍电路的功率和能量守恒定律，包括有功功率、无功功率和复功率等。

第 1 篇 电工电子基础

本章主要介绍电路的基本概念和基本定律。首先介绍电路的基本概念，包括电路模型、电路元件、电路的功率和能量守恒定律等。然后介绍电路的基本定律，包括基尔霍夫定律、欧姆定律、叠加定理、戴维南定理和诺顿定理等。最后介绍电路的功率和能量守恒定律，包括有功功率、无功功率和复功率等。

本章主要介绍电路的基本概念和基本定律。首先介绍电路的基本概念，包括电路模型、电路元件、电路的功率和能量守恒定律等。然后介绍电路的基本定律，包括基尔霍夫定律、欧姆定律、叠加定理、戴维南定理和诺顿定理等。最后介绍电路的功率和能量守恒定律，包括有功功率、无功功率和复功率等。

第 1 章 电工基础

1.1 复杂直流电路的分析计算

在电路计算中,有时只需计算电路中某一支路的电流,如果用前面讲过的方法求解,就会产生一些不必要的计算。为了简化计算,常应用等效电源的方法,把需要计算电流的支路单独划出进行计算。例如在图 1.1(a) 中,把电阻 R_L 的 ab 支路单独划出,而电路的其余部分就成为一个有源二端网络。所谓有源二端网络,就是具有两个出线端且含有电源的部分电路。这个有源二端网络对于所划出的支路来说,相当于一个电源,因为这条支路中的能量就是由它供给的。因此,可以用一个电源来等效地代替有源二端网络,而所求支路中的电流 I 及端电压 U 不变。

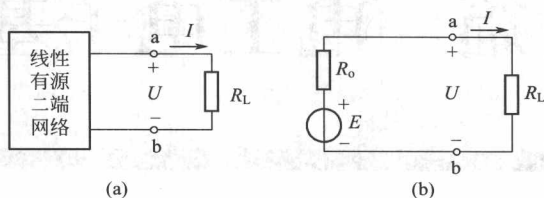


图 1.1 戴维南定理

这就是等效电源定理,它包括戴维南定理和诺顿定理。

1.1.1 等效电源定理

(1) 戴维南定理 将有源二端网络等效为电压源的方法叫做戴维南定理。它指出:任何一个线性有源二端网络,对于外部电路来说,可以用一个电动势 E 和内阻 R_0 串联的电压源来等效代替。等效电压源的电动势 E 等于线性有源二端网络的开路电压 U_{oc} , 内阻 R_0 是相应的无源二端网络的等效电阻。

所谓相应的无源二端网络的等效电阻,就是将无源二端网络中所有的理想电源(理想电压源和理想电流源)均除去时二端网络的入端电阻。除去理想电压源,即 $U_s=0$, 理想电压源所在处短路;除去电流源,即 $I_s=0$, 理想电流源所在处开路。

【例 1.1】 图 1.2 所示电路中,已知 $E_1=140\text{V}$, $E_2=90\text{V}$, $R_1=20\Omega$, $R_2=5\Omega$, $R_3=6\Omega$, 试用戴维南定理求电流 I_3 。

【解】 把所求支路 R_3 从电路中断开,剩余部分即为一有源二端网络,如图 1.3(a) 所

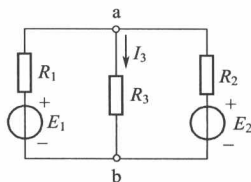


图 1.2 例 1.1 的图

示。根据戴维南定理，该有源二端网络可用一个电压源来等效代替，再接上所求支路，如图 1.3(b) 所示。等效电源的电动势 E 等于图 (a) 中的开路电压 U_{oc} ，由图 1.3(a) 有

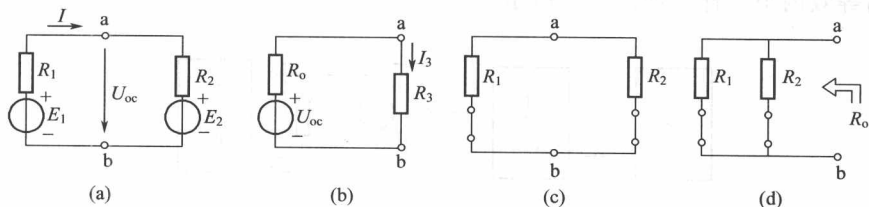


图 1.3 例 1.1 解的图

$$I = \frac{E_1 - E_2}{R_1 + R_2} = \frac{140 - 90}{20 + 5} = 2\text{A}$$

于是

$$U_{oc} = E_1 - IR_1 = 140 - 2 \times 20 = 100\text{V}$$

等效电源的内阻 R_o 可由图 1.3(c) 求得。为了方便求解，可用图 1.3(d) 来代替图 1.3(c)。在图 1.3(d) 中，对 a、b 两端而言， R_1 和 R_2 为并联关系，因此

$$R_o = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{20 \times 5}{20 + 5} = 4\Omega$$

最后由图 1.3(b) 求出

$$I_3 = \frac{U_{oc}}{R_o + R_3} = \frac{100}{4 + 6} = 10\text{A}$$

结果与用其他方法求得的一样。

由该例可以看出，利用戴维南定理解题，可以归纳为：

- ① 断开所求支路，构建一个有源二端网络；
- ② 求有源二端网络的开路电压 U_{oc} ；
- ③ 求有源二端网络除源后的无源二端网络的入端电阻 R_o ；
- ④ 利用欧姆定律或基尔霍夫定律求出电流。

【例 1.2】 用戴维南定理求解图 1.4(a) 所示电路的戴维南等效电路。

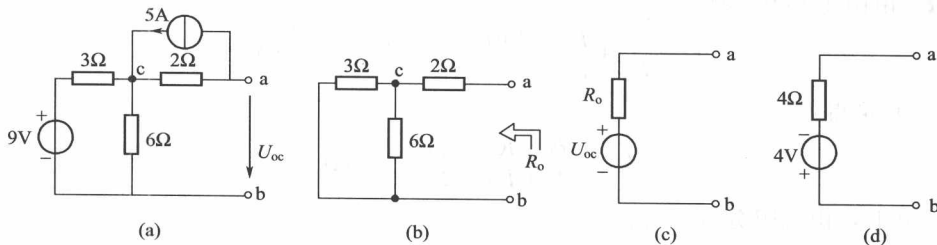


图 1.4 例 1.2 的图

【解】 先由图 1.4(a) 求得戴维南等效电路的开路电压，即

$$U_{oc} = U_{ac} + U_{cb} = -5 \times 2 + \frac{9}{3+6} \times 6 = -4\text{V}$$

再由图 1.4(b) 求得戴维南等效电路的内阻，即

$$R_o = 2 + \frac{3 \times 6}{3+6} = 4\Omega$$

则图 1.4(a) 电路的戴维南等效电路如图 1.4(c) 所示，或用图 1.4(d) 表示。

(2) 诺顿定理 诺顿定理也是关于有源二端网络等效变换的定理。诺顿定理指出：任何

一个线性有源二端网络,对于外部电路来说,可以用一个电激流 I_S 和内阻 R_o 并联的电流源来等效代替。等效电流源的电激流 I_S 等于线性有源二端网络的短路电流 I_o , 内阻 R_o 的含义同戴维南等效内阻一样。如图 1.5 所示。

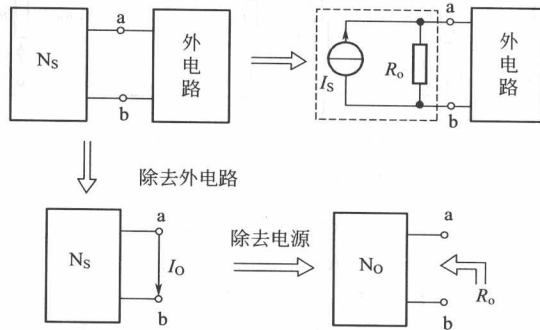


图 1.5 诺顿定理图

由于电压源与电流源之间可以等效变换,因此,任一线性有源二端网络不仅可以用电压源等效代替,也可以用电流源代替。

【例 1.3】 用诺顿定理求图 1.6(a) 中的电流 I_3 , 其中 $E_1 = 140\text{V}$, $E_2 = 90\text{V}$, $R_1 = 20\Omega$, $R_2 = 5\Omega$, $R_3 = 6\Omega$ 。

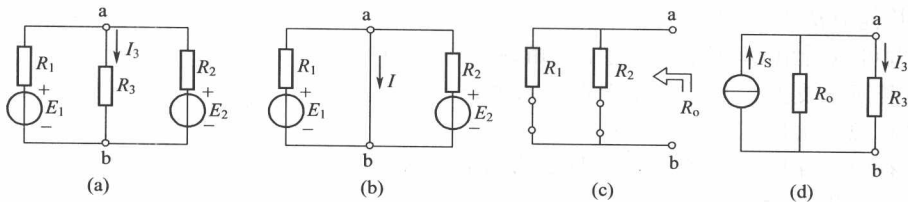


图 1.6 例 1.3 的图

【解】 由图 1.6(b) 可得:

$$I_S = \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} = \frac{140}{20} + \frac{90}{5} = 7 + 18 = 25\text{A}$$

由图 1.6(c) 可得:

$$R_o = \frac{R_1 \times R_2}{R_1 + R_2} = \frac{20 \times 5}{20 + 5} = 4\Omega$$

根据图 1.6(d), 由电阻分流可得:

$$I_3 = \frac{R_o}{R_o + R_3} I_S = \frac{4}{4 + 6} \times 25 = 10\text{A}$$

由此可见,用诺顿定理和与戴维南定理所解得的结果完全一致。

应用等效电源定理需要注意的事项如下。

① 等效电源定理只对线性有源二端网络等效,不适合非线性的二端网络。但外电路不受此限制,即既可以是线性电路也可以是非线性电路。因为等效电源的参数 (U_{oc} 和 R_o) 仅与被取代的线性有源二端网络的结构及元件参数有关,而与外电路无关。

② 等效是对外电路而言的,而等效电源定理与有源二端网络内部的电压、电流以及功率关系一般是不等的。

【例 1.4】 如图 1.7 所示的线性有源二端网络,用内阻为 $1\text{M}\Omega$ 的电压表去测量网络的

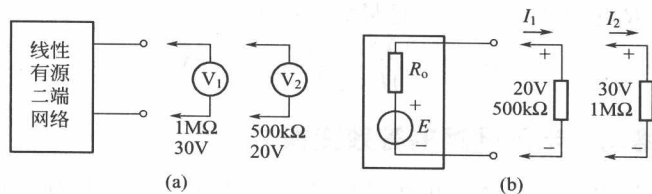


图 1-7 例 1.4 的图

开路电压时为 30V；用内阻为 500kΩ 的电压表去测量网络的开路电压时为 20V。试求该线性有源二端网络的等效参数。

【解】 用电压表测量网络开路电压的等效电路如图 1.7(b) 所示。由图可知

$$\frac{E}{R_o + 500} \times 500 = 20$$

$$\frac{E}{R_o + 1000} \times 1000 = 30$$

联立解之

$$E = 60\text{V}, R_o = 1\text{k}\Omega$$

由本例可以看出，戴维南定理还可以用来校正非理想电压表测量的电压。

【例 1.5】 电路如图 1.8 所示， R_L 可调，求为何值时，它吸收的功率最大？并计算出该最大功率。

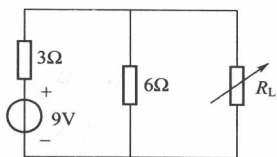


图 1.8 例 1.5 的图

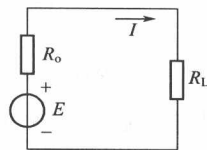


图 1.9 等效图

【解】 根据戴维南定理，对负载 R_L ，图 1.8 所示电路可等效为图 1.9 所示的电路，其中 E 为等效电压源中理想电压源的电压， R_o 为等效电压源的内阻， R_L 为负载电阻。由图 1.9 可得负载功率为

$$P_L = I^2 R_L = \left(\frac{U_s}{R_o + R_L} \right)^2 R_L$$

当 $R_o = 0$ 或 ∞ 时， R_L 上不获得功率，只有当 R_o 为 $0 \sim \infty$ 之间的某一数值时，才能获得最大功率。

$$\frac{dP_L}{dR_L} = \frac{E^2 [(R_L + R_o)^2 - 2R_L(R_L + R_o)]}{(R_L + R_o)^4} = E^2 \frac{R_o - R_L}{(R_o + R_L)^3}$$

令 $\frac{dP_L}{dR_L} = 0$ ，则

$$R_L = R_o \quad (1.1)$$

即当负载电阻等于电源内阻时，负载上获得的功率最大。当电路满足式(1.1)时，即负载与电源（信号源）相匹配。此时的最大功率为

$$P_{L,\max} = \left(\frac{E}{R_o + R_L} \right)^2 R_L \Big|_{R_L=R_o} = \frac{E^2}{4R_o} \quad (1.2)$$

图 1.8 所示电路的戴维南等效电路参数

$$E = \frac{9}{3+6} \times 6 = 6\text{V}$$

$$R_o = 3 // 6 = 2\Omega$$

由图 1.8、式(1.1)、式(1.2)可知：

当 $R_o = R_L = 2\Omega$ 时, R_L 获得最大功率, 且最大功率为

$$P_{L\max} = \frac{E^2}{4R_o} = \frac{6^2}{4 \times 2} = 4.5 \text{ W}$$

1.1.2 Y 电阻网络与 Δ 电阻网络的等效变换

在计算电路时, 将串联与并联的电阻化简为等效电阻, 最为简便。但有的电路, 如图 1.10(a), 这些电阻既非串联, 也非并联, 此时就不能简单地用电阻的串联、并联来化简。

在图 1.10(a) 中, 如果能将 a、b、c 三端间连成的三角形 (Δ 形) 的三个电阻等效变换为星形 (Y 形) 连接的另外三个电阻, 则电路的结构形式就变换为如图 1.10(b) 的形式, 此时电路中的电阻就成为了简单的串、并联关系, 这样, 电流 I 、 I_1 的计算就变得简单了。

Y 形连接的电阻与 Δ 形连接的电阻等效变换的条件是: 对应端 (如 a、b、c) 流入或流出的电流 (如 I_a 、 I_b 、 I_c) 一一相等, 对应端间的电压 (如 U_{ab} 、 U_{bc} 、 U_{ca}) 也一一相等, 如图 1.11 所示。

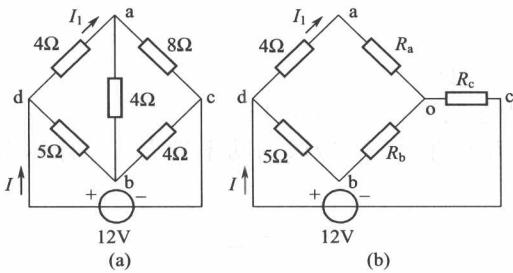


图 1.10 Y- Δ 等效变换 (一)

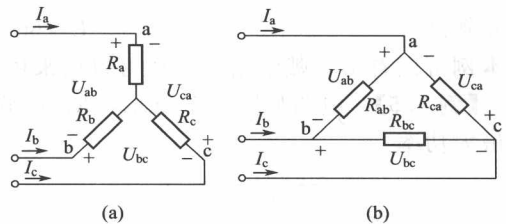


图 1.11 Y- Δ 等效变换 (二)

在满足上述条件后, 在 Y 形和 Δ 形两种接法中, 对应的任意两端间的等效电阻也必然相等。设某一对应端 [如图 1.11(b) 的 c 端] 开路时, 其余两端 (a 和 b) 间的等效电阻为

$$R_a + R_b = \frac{R_{ab}(R_{bc} + R_{ca})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}$$

同理可得:

$$R_b + R_c = \frac{R_{bc}(R_{ca} + R_{ab})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}$$

$$R_c + R_a = \frac{R_{ca}(R_{ab} + R_{bc})}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}}$$

对上述 3 式联立求解, 可得到:

将 Y 形连接等效变换为 Δ 形连接时

$$\left. \begin{aligned} R_{ab} &= \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_c} \\ R_{bc} &= \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_a} \\ R_{ca} &= \frac{R_a R_b + R_b R_c + R_c R_a}{R_b} \end{aligned} \right\} \quad (1.3)$$

将 Y 形连接等效变换为 Δ 形连接时

$$\left. \begin{aligned} R_a &= \frac{R_{ab} R_{ca}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} \\ R_b &= \frac{R_{bc} R_{ab}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} \\ R_c &= \frac{R_{ca} R_{bc}}{R_{ab} + R_{bc} + R_{ca}} \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

当 $R_a=R_b=R_c=R_Y$ ，即电阻的 Y 形连接在对称情况下，由式(1.3) 可见

$$R_{ab}=R_{bc}=R_{ca}=R_{\Delta}=3R_Y \quad (1.5)$$

即变换所得的 Δ 形连接也是对称的，但每边的电阻是原 Y 形连接时的 3 倍。

反之，

$$R_Y=\frac{1}{3}R_{\Delta} \quad (1.6)$$

通常，Y 形连接也称为 T 形连接， Δ 形连接也称为 π 形连接。

【例 1.6】 计算图 1.10(a) 所示电路中的电流 I 、 I_1 。

【解】 将连接成 Δ 形 abc 的电阻变换为 Y 形连接的等效电路，其电路如图 1.10(b) 所示。则

$$R_a=\frac{4 \times 8}{4+4+8}=2\Omega$$

$$R_b=\frac{4 \times 4}{4+4+8}=1\Omega$$

$$R_c=\frac{8 \times 4}{4+4+8}=2\Omega$$

于是

$$I=\frac{12}{[(4+R_a) \parallel (5+R_b)]+R_c}=\frac{12}{[(4+2) \parallel (5+1)]+2}=2.4\text{A}$$

$$I_1=\frac{5+R_b}{(4+R_a)+(5+R_b)}I=\frac{5+1}{(4+2)+(5+1)} \times 2.4=1.2\text{A}$$

1.2 单相正弦交流电路的分析与计算

1.2.1 分析正弦交流电路的一般步骤

分析正弦交流电路的一般步骤为：

① 将电路用相量模型表示，即电路结构不变，电路参数全部用复阻抗 Z 表示，电压、电流、电动势分别用相应的相量 \dot{U} 、 \dot{I} 、 \dot{E} 表示。

② 标出电压、电流、电动势的参考方向。

③ 将复阻抗 Z 看作电阻，将电压、电流、电动势看作直流量，用分析直流电路的方法对电路进行分析计算（注意：用复数进行运算），也可以用相量图求解。

事实上，在正弦交流电路中，以相量形式表示的欧姆定律和基尔霍夫定律都与直流电路有着相似的表达形式。因而在直流电路中由欧姆定律和基尔霍夫定律推导出来的支路电流法、叠加定理、节点电压法和等效电源定理等都可以扩展到正弦交流电路中去。

1.2.2 复阻抗的串联和并联

由于正弦交流电路中的复阻抗 Z 与直流电路中的 R 相对应，因而直流电路中的电阻串联也可以扩展到正弦交流电路中来，用于复阻抗的串、并联计算。

对于图 1.12 复阻抗的串联，其总复阻抗等于各个分阻抗之和，即

$$Z=Z_1+Z_2+\cdots+Z_n \quad (1.7)$$

对于图 1.13 复阻抗的并联，其总复阻抗的倒数等于各个分阻抗的倒数之和，即

$$\frac{1}{Z}=\frac{1}{Z_1}+\frac{1}{Z_2}+\cdots+\frac{1}{Z_n} \quad (1.8)$$

需要指出的是：式(1.9)、式(1.10)是复数运算，而非实数运算。因此，在一般情况

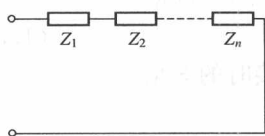


图 1.12 复阻抗的串联

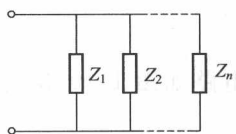


图 1.13 复阻抗的并联

下, 当阻抗串联时, $|Z| \neq |Z_1| + |Z_2| + \dots + |Z_n|$; 当阻抗并联时, $|\frac{1}{Z}| \neq |\frac{1}{Z_1}| + |\frac{1}{Z_2}| + \dots + |\frac{1}{Z_n}|$ 。只有当阻抗角相等时, 上述二式才能成立。

【例 1.7】 在图 1.14 所示电路中, 已知: $Z_1 = 3 + j4\Omega$, $Z_2 = 8 - j6\Omega$, $\dot{U} = 220 \angle 0^\circ \text{ V}$, 求各电流 \dot{I}_1 、 \dot{I}_2 、和 \dot{I} , 并画出相量图。

【解】

$$Z_1 = 3 + j4 = 5 \angle 53.1^\circ \Omega$$

$$Z_2 = 8 - j6 = 10 \angle -36.9^\circ \Omega$$

$$\text{故 } \dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z_1} = \frac{220 \angle 0^\circ}{5 \angle 53.1^\circ} = 44 \angle -53.1^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{Z_2} = \frac{220 \angle 0^\circ}{10 \angle -36.9^\circ} = 22 \angle 36.9^\circ \text{ A}$$

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 44 \angle -53.1^\circ + 22 \angle 36.9^\circ = 49.2 \angle -26.5^\circ \text{ A}$$

相量图如图 1.14(b) 所示。

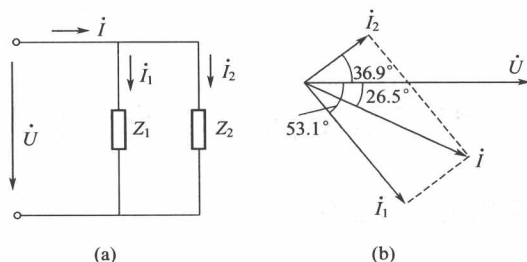


图 1.14 例 1.7 的电路图和相量图

【例 1.8】 图 1.15 是利用工频测量某电感线圈等效参数的电路。已知: 电压表读数为 220V, 电流表读数为 5A, 功率表读数为 500W, 外接限流电阻 $R = 18\Omega$ 。试求电感线圈的等效参数 R_L 、 L 。

【解】 因为 $P = I^2(R + R_L)$

$$\text{所以 } R_L = \frac{P}{I^2} - R = \frac{500}{25} - 18 = 2\Omega$$

电路的阻抗值为

$$|Z| = U/I = 220/5 = 44\Omega$$

线圈的感抗为

$$X_L = \sqrt{|Z|^2 - (R + R_L)^2} = \sqrt{44^2 - 20^2} = 39.2\Omega$$

故电感量为

$$L = X_L/\omega = 39.2/314 = 0.125\text{H}$$

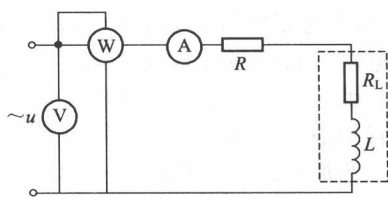


图 1.15 例 1.8 的图

1.2.3 功率因数的提高

实际用电器的功率因数都在 1 和 0 之间, 例如白炽灯的功率因数接近 1; 荧光灯功率因数为 0.45 左右; 异步电动机功率因数额定运行时可达 0.9 左右, 而空载时会降到 0.2 左右; 交流电焊机的功率因数只有 0.3~0.4, 交流电磁铁的功率因数甚至低到 0.1。由于电力系统

中接有大量的感性负载,线路的功率因数一般不高,为此需提高功率因数。

(1) 提高功率因数的意义

1) 使电源设备得到充分利用 一般交流电源设备(发电机、变压器)都是根据额定电压 U_N 和额定电流 I_N 来进行设计、制造和使用的。它能够供给负载的有功功率为 $P_1 = U_N I_N \cos\varphi$ 。当 U_N 、 I_N 为定值时,若 $\cos\varphi$ 低,则负载吸收的功率低,因而电源供给的有功功率 P_1 也低,这样电源的潜力就没有得到充分发挥。例如,额定容量 $S_N = 100\text{kV}\cdot\text{A}$ 的变压器,若负载的功率因数 $\cos\varphi = 1$,则变压器达到额定值时,可输出有功功率 $P_1 = 100\text{kW}$;若负载的 $\cos\varphi = 0.2$,则变压器达额定值时只能输出 $P_1 = 20\text{kW}$,若增加输出,则电流过载。显然,这时变压器没有得到充分利用。因此,提高负载的功率因数,可以提高电源设备的利用率。

2) 降低线路损耗和线路压降 输电线上的损耗为 $P_1 = I^2 R_1$ (R_1 为线路电阻),线路压降为 $U_1 = R_1 I$,而线路电流 $I = P_1 / (U \cos\varphi)$ 。由此可见,当电源电压 U 及输出有功功率 P_1 一定时,提高 $\cos\varphi$,可以使线路电流减小,从而降低了传输线上的损耗,提高了传输效率;同时,线路上的压降减小,使负载的端电压变化减小,提高了供电质量;或在相同的线路损耗下,节约了材料。

由此可见,在电力系统中,功率因数 $\cos\varphi$ 的高低是关系到电源设备能否得到充分利用、输电效率能否得到提高的重要问题。因此国家供电规程规定,工厂企业单位的功率因数不得低于 0.9。由于大多数电气设备为感性负载,且功率因数很低,因此必须提高功率因数。

(2) 提高功率因数的方法 提高功率因数的方法除了提高用电设备本身的功率因数,例如正确选用异步电动机的容量,减少轻载和空载以外,主要方法是在不改变负载特性的前提下,在电源两端并联电容器对无功功率进行补偿,如图 1.16(a) 所示。在感性负载 RL 支路并联电容 C 后,负载参数 R 和 L 不变,负载的端电压 U 不变,因此负载的电流

$$I_{RL} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + X_L^2}}$$

不会发生变化;而电路中只有电阻消耗有功功率,则有功功率为

$$P = I_{RL}^2 R$$

也不会发生变化。但是并联电容器 C 后,由图 1.16(b) 可知,总电压 \dot{U} 和总电流 \dot{I} 的相位差 φ 减小了,功率因数 $\cos\varphi$ 增大了。这是感性负载所需要的无功功率由电容器补偿了一部分。

需要指出的是:并联补偿电容器并不能改变负载本身的功率因数,而是改变整个线路总电压和总电流之间的相位差,提高整个系统或电网的功率因数。

(3) 补偿电容的计算 由图 1.16(b) 可知,并联电容后,电容支路的电流 I_C 为

$$I_C = I_{RL} \sin\varphi_{RL} - I \sin\varphi$$

即

$$I_C = \frac{P \sin\varphi_{RL}}{U \cos\varphi_{RL}} - \frac{P \sin\varphi}{U \cos\varphi} = \frac{P}{U} (\tan\varphi_{RL} - \tan\varphi)$$

又由于

$$I_C = \frac{U}{X_C} = 2\pi f C U$$

所以

$$C = \frac{P}{2\pi f U^2} (\tan\varphi_{RL} - \tan\varphi) \quad (1.9)$$

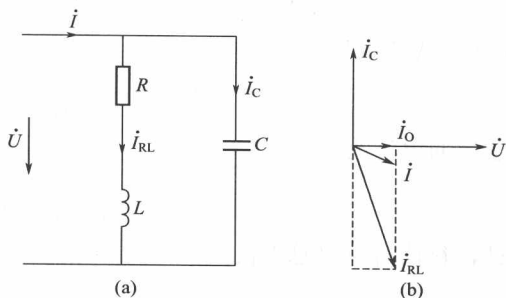


图 1.16 并联电容器补偿功率因数的方法

在电力系统中,通常用补偿电容器的无功功率 Q_C 来表示其大小,称为补偿电容器的容量,单位为乏(var)。由式(1.9)可得满足补偿要求的电容器的容量为

$$Q_C = P(\tan\varphi_{RL} - \tan\varphi) \quad (1.10)$$

补偿电容器一方面补偿了一部分感性负载运行所需要的无功功率。使得负载与电源之间的能量交换减少,提高了电源的利用率。同时随着电容的增加,功率因数 $\cos\varphi$ 增大,总电流 I 随之减小。

【例 1.9】 设有一感性负载的功率 $P=15\text{kW}$, 功率因数 $\cos\varphi_{RL}=0.55$, 接在电压 $U=220\text{V}$ 、频率 $f=50\text{Hz}$ 的交流电源上。如果要求将功率因数提高到 $\cos\varphi=0.9$, 求补偿电容的容量及电容值,并计算补偿前后的电流值。

【解】 由题意可知,补偿前 $\cos\varphi_{RL}=0.55$, 则 $\varphi_{RL}=56.6^\circ$, $\tan\varphi_{RL}=\tan 56.6^\circ=1.52$; 补偿后 $\cos\varphi=0.9$, 则 $\varphi=25.8^\circ$, $\tan\varphi=\tan 25.8^\circ=0.48$

由式(1.10)得:

$$Q_C = P(\tan\varphi_{RL} - \tan\varphi) = 15 \times (1.52 - 0.48) = 15.6\text{kvar}$$

由式(1.9)得:

$$C = \frac{P}{2\pi f U^2} (\tan\varphi_{RL} - \tan\varphi) = \frac{15}{2\pi \times 50 \times 220^2} (1.52 - 0.48) = 1026\mu\text{F}$$

补偿前的电流为

$$I_{RL} = \frac{P}{U \cos\varphi_{RL}} = \frac{15 \times 10^3}{220 \times 0.55} = 124.0\text{A}$$

补偿后的电流为

$$I = \frac{P}{U \cos\varphi} = \frac{15 \times 10^3}{220 \times 0.9} = 75.8\text{A}$$

可见,补偿后电路总电流大大降低了。

1.3 谐振电路的分析

在具有电感和电容元件的电路中,由于电感的感抗和电容的容抗都与频率有关,所以电路两端的电压与其中的电流一般是不同相的。如果调节电路的参数或电源的频率而使它们同相,这时电路就会发生谐振现象。研究谐振的目的就是要认识这种客观现象,并在生产上充分利用谐振的特征,同时又要预防它所产生的危害。按发生谐振的电路的不同,谐振现象可分为串联谐振和并联谐振。

1.3.1 串联谐振 (电压谐振)

(1) 谐振条件 在 RLC 串联电路中 (如图 1.17 所示), 由于电路的阻抗

$$Z = R + j(X_L - X_C)$$

当调节电路参数,使得

$$X_L = X_C \text{ 或 } 2\pi fL = \frac{1}{2\pi fC} \quad (1.11)$$

时,则

$$\varphi = \arctan \frac{X_L - X_C}{R} = 0$$

即电源电压 u 与电路中的电流 i 同相,这时电路就发生了谐振。因为该谐振发生在串联电路中,所以称为串联谐振。

式(1.11)是电路发生谐振的条件 (或称为电路固有的谐振频率),由此可得谐振频率为