

中小型火电机组运行技术丛书

电气分册

辽宁省电力行业协会 组编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

中小型火发电机组运行技术丛书

电气分册

刘朋杰 主编



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是《中小型火电机组运行技术丛书》中的一册。全书分为“理论基础、电气设备、自动装置与继电保护、设备的运行”四篇,“理论基础”中介绍了电工基础、常用电工仪表、电子技术、电气绝缘与安全知识、电气试验等内容;“电气设备”中介绍了电力系统和发电厂概述、汽轮发电机、变压器、厂用电动机、高压断路器、电流互感器和电压互感器、过电压及保护装置等内容;“自动装置与继电保护”中介绍了二次回路与控制、自动装置、继电保护等内容;“设备的运行”中介绍了电气设备的运行、电气设备启动与停运、电气事故处理、电气设备倒闸操作等内容。

本书适用于火力发电厂从事电气专业的工作人员、管理人员及相关行业技术人员阅读,也可供大专院校相关专业的师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

中小型火电机组运行技术丛书. 电气分册/辽宁省电力行业协会组编. —北京:中国电力出版社, 2005
ISBN 7-5083-3579-1

I. 中… II. 辽… III. ①火力发电—发电机—机组—电力系统运行②火电厂—电气设备 IV. TM621.3②TM621.7

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 104702 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>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 1 月第一版 2006 年 1 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 27.75 印张 682 千字
印数 0001—3000 册 定价 43.00 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

前言

qianyan

近几年来,随着我国电力改革的不断深入,电力格局发生较大变化,中小型火电厂新产品、新技术、新工艺不断得到推广应用,自动化水平不断提高;同时电厂运行人员变动较大,运行岗位新职工迅速增加。因此,尽快提高运行人员技术水平,是确保机组和电网安全、经济运行的当务之急。

为提高运行人员的技术素质,做好运行人员技术培训,我们组织编写了这套《中小型火电机组运行技术丛书》,作为中小型火电机组(200MW及以下机组)运行技术人员的岗位培训教材。全套丛书包括锅炉分册、汽轮机分册、电气分册和电厂化学分册共四个分册。

本册为电气分册。书中结合发电厂生产设备运行和运行人员的实际情况,从应用实际出发,介绍了火力发电厂发电机及电气系统方面的有关知识和实用技术。全书共分四篇,内容包括理论基础、电气设备、自动装置与继电保护、设备的运行。“理论基础”中介绍了电工基础、常用电工仪表、电子技术、电气绝缘与安全知识、电气试验等内容;“电气设备”中介绍了电力系统和发电厂概述、汽轮发电机、变压器、厂用电动机、高压断路器、电流互感器和电压互感器、过电压及保护装置等内容;“自动装置与继电保护”中介绍了二次回路与控制、自动装置、继电保护等内容;“设备的运行”中介绍了电气设备的运行、电气设备启动与停运、电气事故处理、电气设备倒闸操作等内容。本书对运行人员掌握应知理论知识和应会技能操作,将起到一定的作用。

本书由刘朋杰主编,其中第一篇由张冬然、李国栋、查明编写,第二篇由刘朋杰、张冬然、杨守春编写,第三篇由董志恒、任晓敏、赵国辉编写,第四篇由张冬然编写。全书由刘朋杰统稿,由王世阁、张亚祥、郝常骥等在电气设备运行专业有丰富实践经验的专家审阅。他们为本书提出了很多宝贵意见,在此表示衷心的感谢。

在本书编写过程中,得到了很多单位和个人的大力支持和帮助,在此一并表示感谢。

由于编写时间仓促,加上编者水平有限,难免会有不少疏漏之处,恳请读者批评指正。

编者

2005年8月

目 录

mulu

前言

第一篇 理 论 基 础

第一章 电工基础	3
第一节 直流电路	3
第二节 直流电路的基本定律和公式	6
第三节 直流电路计算	8
第四节 交流电路	11
第二章 常用电工仪表	19
第一节 概述	19
第二节 电流表、电压表	20
第三节 功率表	21
第四节 电能表	22
第五节 常用便携式仪表	24
第三章 电子技术	29
第一节 半导体二极管及三极管	29
第二节 放大电路	33
第三节 直流稳压电源	41
第四节 晶闸管电路	44
第五节 门电路和组合逻辑电路	50
第四章 电气绝缘与安全知识	52
第一节 概述	52
第二节 电气设备绝缘	57
第三节 电气设备接地	59
第四节 电业安全基本知识	61
第五章 电气试验	72
第一节 概述	72
第二节 电气设备预防性试验	74

第二篇 电 气 设 备

第六章 电力系统和发电厂概述	83
第一节 火力发电厂生产过程的基本知识	83
第二节 电力系统的基本知识	86
第三节 发电厂主接线和厂用电接线	91
第四节 发电厂电气运行方式	94
第五节 直流电源系统与事故保安电源	99
第七章 汽轮发电机	111
第一节 同步发电机的基本原理	111
第二节 汽轮发电机的冷却方式	118
第三节 发电机的励磁系统及自动调节	120
第四节 汽轮发电机的分类及运行参数	132
第五节 同步发电机的运行特性	134
第八章 变压器	139
第一节 变压器的基本原理	139
第二节 变压器的冷却方式	142
第三节 变压器的分类及运行参数	143
第四节 干式变压器	150
第五节 变压器的并列运行	155
第九章 厂用电动机	159
第一节 异步电动机的基本工作原理	159
第二节 异步电动机的铭牌数据	162
第三节 三相异步电动机的工作特性	163
第四节 同步电动机	165
第五节 直流电动机的原理和结构	166
第六节 电动机调速	169
第十章 高压断路器	172
第一节 高压断路器的基本知识	172
第二节 少油断路器	175
第三节 真空断路器	179
第四节 SF ₆ 断路器	184
第五节 几种常见的操动机构	187
第十一章 电流互感器和电压互感器	191
第一节 电流互感器	191
第二节 电压互感器	195
第十二章 过电压及保护装置	200
第一节 过电压基本知识	200

第二节	避雷针及避雷线	201
第三节	避雷器	202

第三篇 自动装置与继电保护

第十三章	二次回路与控制	209
第一节	二次回路的基本概念	209
第二节	断路器控制回路	219
第三节	信号系统	225
第四节	微机监控系统	235
第十四章	继电保护	240
第一节	继电保护的基本知识	240
第二节	几种常用的电磁式继电器	242
第三节	输电线路保护	246
第四节	发电机保护	263
第五节	电力变压器保护	272
第六节	电动机保护	278
第七节	微机保护概述	285
第八节	继电保护及自动装置的运行	305
第十五章	自动装置	307
第一节	备用电源自动投入及重合闸装置	307
第二节	同步发电机的同期并列	313
第三节	按频率自动减负荷装置	320

第四篇 设备的运行

第十六章	电气设备的运行	329
第一节	汽轮发电机的运行	329
第二节	变压器的运行	347
第三节	厂用电机的运行	353
第四节	断路器的运行	356
第十七章	电气设备的启动与停运	359
第一节	汽轮发电机的启动与停运	359
第二节	变压器的启动与停运	362
第三节	厂用电机的启动和停运	363
第十八章	电气事故处理	367
第一节	电气事故处理的一般原则	367
第二节	电气设备故障查找的步骤和方法	370
第三节	电力系统事故处理	372

第四节	输电线路事故处理	376
第五节	发电厂母线故障处理	378
第六节	发电机事故处理	380
第七节	变压器事故处理	394
第八节	电动机事故处理	400
第九节	断路器故障处理	404
第十九章	电气设备倒闸操作	409
第一节	倒闸操作的基本内容	409
第二节	倒闸操作的基本要求	409
第三节	倒闸操作的原则及程序	412
第四节	倒闸操作中的注意事项	414
第五节	线路的倒闸操作	417
第六节	母线的倒闸操作	420
第七节	变压器的倒闸操作	422
第八节	发电机的操作	425
第九节	防误装置	431
附录	发电机设备检修项目、周期及标准	435
参考文献		436

《中小型火电机组运行技术丛书》

第一篇

理 论 基 础



第一章

电 工 基 础

|| 第一节 直 流 电 路

一、电路的概念

电路是将电气设备和元件,按照一定的方式连接起来构成电流的通路。一个完整的电路,通常总是由电源、负载和导线三个基本部分组成的。

在分析和研究实际电路的工作情况时,总是把构成电路的实际设备与元件改变成抽象的模型来表示。这些理想化的模型叫作理想电路元件。用统一规定的设备和元件图形符号画出的电路模型图叫作电路原理图。

二、电流

1. 电流的概念

电流是带电粒子在外加电场作用下定向运动形成的。在金属导体中,电流是由导体中的自由电子作有规则的定向运动形成的;而在电解液和被电离后的气体的导电过程中,电流是由正、负离子在电场力作用下沿着彼此相反方向运动所形成的。

2. 电流强度

衡量电流大小的物理量叫作电流强度。它等于单位时间内通过导体某一横截面的电量,常用字母 I 来表示。如果把电流强度写成数学表达式,则有

$$I = \frac{Q}{t}$$

式中 I ——电流, A;

Q ——电量, C;

t ——时间, s。

若在 1 秒钟 (s) 内通过导体横截面的电量是 1 库仑 (C), 则通过导体的电流是 1 安培, 该单位用字母 A 表示。

3. 电流的方向

习惯上以正电荷运动的方向作为电流方向。电流的实际方向是客观存在的, 是自由电子流动形成的。

三、电压

1. 电压的概念

在电场中, 如果电场力使电荷移动一段距离, 则电场力对电荷做了功。为了衡量电场力对电荷做功的能力, 我们引入电压这一物理量, 用字母 U 表示。电压的定义是: 如果电场力把正电荷 q 从 a 点移到 b 点所做的功为 W , 则电场中 a 点到 b 点的电压为

$$U_{ab} = \frac{W}{q}$$

由理论分析和实验都可以证明：电场力移动电荷所做的功与路径无关，而只与始末位置有关。所以电场中两点间的电压只与这两点的位置有关。

电压的单位是伏特，用字母 V 表示。我们规定：电场力把 1 库仑 (C) 的电量从 a 点移到 b 点，如果所做的功为 1 焦耳 (J)，那么 a、b 两点间的电压就是 1 伏特 (V)，简称伏。

2. 电压的方向

电压是有方向的。人们规定：电场力移动单位正电荷做功的方向为电压的实际方向。为了计算和研究问题方便，电压也和电流一样，人为选定一个正方向，并规定：当电压的实际方向与所选正方向一致时，则电压值为正；当电压的实际方向与所选正方向相反时，则电压值为负。

四、电位

由于电压是指电路中某两点而言的，因此，在分析比较复杂的电路时，特别是在分析电子电路时，要一一说明电路中每两点间电压，往往感到很复杂、繁琐。如果利用电位则显得方便。

如果在电路中任选一点作为参考点，并设其电位为零，那么电路中某点的电位就是该点到参考点之间的电压。电位用字母 φ 表示，电路中 a 点的电位记作 φ_a ，参考点为 O 点，则 a 点的电位为

$$\varphi_a = U_{aO}$$

电位的单位与电压相同，也是伏特。

电路中，参考点选得不同，各点的电位也不同。电路中任意两点 ab 之间的电压等于 a、b 两点的电位差，即

$$U_{ab} = \varphi_a - \varphi_b$$

参考点不同时，电路中各点的电位虽然不同，但任意两点间的电位差（电压）却保持不变。也就是说，电路中任意两点间的电压与参考点的选择无关。

五、电动势

电场力总是使正电荷从高电位移向低电位的。要维持电路中的电流持续不断，就必须有一种非电场力将正电荷从低电位移到高电位，这个任务是由电源来完成的。

在电源内部，由于其他形式能量的作用，产生一种对电荷的作用力，叫作电源力。在电源内部，电源力把正电荷从低电位移到高电位所做的功叫电动势，用字母 E 表示；并规定：电动势的方向由低电位端到高电位端。电动势的单位与电压的单位相同，也是伏 (V)。

当电路开路时，电源正负极间的电压等于电源的电动势，即

$$U = E$$

六、电阻和电导

(一) 电阻的概念

电阻是衡量电流在导体内流动时所受阻力的，用字母 R 表示。

电阻的单位是欧姆，用符号 “ Ω ” 表示。电阻较大的单位是千欧 (k Ω) 和兆欧 (M Ω)。

电阻换算表达式为 $1\text{k}\Omega = 10^3\Omega$

$$1\text{M}\Omega = 10^6\Omega$$

(二) 影响金属导体电阻大小的因素

1. 导体的电阻与导体材料的性质和导体本身的长度、截面积有关

实验证明,在一定温度下,导体的电阻与导体的长度、截面积和材料的性质关系可以表示为

$$R = \rho \frac{L}{S}$$

式中 R ——导体电阻, Ω ;

L ——导体长度, m;

S ——导体截面面积, mm^2 ;

ρ ——导体材质的电阻系数, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$ 。

2. 导体的电阻与温度有关

温度不同时,金属导体的电阻也不同。温度升高时,金属导体的电阻随之增大。这是因为温度升高时,金属中的原子和分子的热运动加剧,增加了自由电子在运动过程中与原子和分子碰撞的机会。当导体温度升高时,导体电阻随之变化。在 $0 \sim 100^\circ\text{C}$ 范围内,金属导体电阻的相对变化与温度变化成正比,即

$$\frac{R_2 - R_1}{R_1} = \alpha(t_2 - t_1)$$

式中 R_1 ——温度为 t_1 时的电阻;

R_2 ——温度为 t_2 时的电阻;

α ——电阻温度系数。

3. 电导

电导也反映导体阻碍电流的能力,不过电导是从反面来反映导体阻碍电流的能力。

电导是电阻的倒数,用符号 G 表示,即

$$G = \frac{1}{R}$$

电导的单位为西门子,简称西,用符号 S 表示。

七、电能和电功率

1. 电能

电能就是电流在一段时间内所做的功。当负载两端外加一个电压时,负载中就有电流流过。此时负载得到的电能 W 为

$$W = IUt$$

式中 U ——电压, V;

I ——电流, A;

t ——时间, s;

W ——电能, J。

电能的单位为焦耳,用 J 表示。如果负载两端电压为 $1V$,通过的电流为 $1A$,则在 $1s$ 内,该负载所消耗的能量为 $1J$ 。电能的另一个单位为千瓦时 ($\text{kW} \cdot \text{h}$)。

2. 电功率

电功率简称功率,它是衡量电流做功快慢的物理量,用字母 P 表示。它的大小等于 $1s$

内电流所做的功，即

$$P = \frac{W}{t}$$

也即

$$P = UI$$

如果电压为 1V，电流为 1A，则功率为 1W（称为瓦特，简称瓦）。

功率的单位还有千瓦（kW）和兆瓦（MW）。

$$1\text{kW} = 10^3\text{W}$$

$$1\text{MW} = 10^6\text{W}$$

对于电阻元件，它所消耗的功率可表示为

$$P = UI = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$

3. 电流的热效应

电流通过电阻时，电阻会发热，这种现象称为电流的热效应。若加在电阻两端的电压为 U ，通过的电流为 I ，则在时间 t 内，电阻消耗的电能为

$$W = UIt = I^2 Rt = \frac{U^2}{R}t$$

第二节 直流电路的基本定律和公式

一、欧姆定律

1. 一段电阻电路的欧姆定律

电路内如果加在电阻 R 两端的电压 U 发生变化，电路中的电流 I 也跟着变化，而且这种变化是成正比的，即电压与电流的比值是一个常数。这个常数就是电阻，写成表达式即为

$$R = \frac{U}{I}$$

2. 全电路的欧姆定律

在一个闭合电路中，电流与电源的电动势成正比，与电路中的内电阻和外电阻之和成正比。这个规定称为“全电路欧姆定律”，即

$$I = E / (R + R_0)$$

式中 I ——电流，A；

E ——电源电动势，V；

R ——负载电阻， Ω ；

R_0 ——电源的内阻， Ω 。

二、基尔霍夫定律

1. 基尔霍夫第一定律（KCL）

直流电流通过导体时，在相同时间内通过导体任意截面的电量是相等的。否则，将会在导体的某一段上造成电荷的堆积，引起电路中各点电位的改变，从而破坏了电路的稳定直流状态。因此，在一条无分支电路上，不论各段导体的粗细如何，电流总是处处相等的。这个定律称“电流连续性原理”。

基尔霍夫第一定律又称为基尔霍夫电流定律，其内容是：对于电路中任意节点 a ，流入

节点 a 的电流等于从节点 a 流出的电流。

2. 基尔霍夫第二定律 (KVL)

基尔霍夫第二定律又称为基尔霍夫电压定律,其内容是:从回路中任意一点出发,沿任意方向绕行回路一周,回路中电动势的代数和恒等于回路中电阻上电压降的代数和,即

$$\sum E = \sum (IR)$$

上式称为回路电压方程。

应用 KVL 建立回路电压方程的方法和步骤如下:

- (1) 首先选定各支路电流的正方向。
- (2) 确定回路的绕行方向 (顺时针和逆时针均可)。
- (3) 确定电动势的正、负号。
- (4) 确定电压的正、负号。
- (5) 建立方程式。

三、电阻的串并联

(一) 电阻的串联

电阻的串联是将几个电阻依次相连,中间没有分支电路的连接方式。

电阻串联有以下几个特点 (以两个电阻串联为例):

- (1) 根据基尔霍夫第一定律,通过两个电阻的电流是同一个电流 I , 即

$$I_1 = I_2 = I$$

- (2) 根据基尔霍夫第二定律,串联电阻两端的总电压 U 等于两个电阻上电压的和,即

$$U = IR_1 + IR_2 = U_1 + U_2$$

- (3) 总电阻 R 等于各个串联电阻之和,即

$$R = R_1 + R_2$$

这个总电阻 R 也称为串联电阻的等效电阻。

- (4) 各个串联电阻上的电压与电阻成正比,即

$$U_1 = (R_1/R)U, U_2 = (R_2/R)U$$

上式称为分压公式。

- (5) 电路消耗的总功率等于各个电阻消耗的功率之和,即

$$P = P_1 + P_2$$

(二) 电阻的并联

电阻的并联,是将几个电阻的一端连在一起,另一端也连在一起的连接方式。

电阻并联有以下几个特点 (以两个电阻并联为例):

- (1) 根据基尔霍夫第二定律,各电阻两端的电压是同一电压,即

$$U_1 = U_2 = U$$

- (2) 根据基尔霍夫第一定律,总电流等于各个并联电阻中电流之和,即

$$I = I_1 + I_2$$

- (3) 总电阻的倒数等于各个电阻的倒数之和,即

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$$

(4) 各并联电阻上的电流与电阻成反比, 即

$$I_1 = \frac{R_2}{R_1} I_2, I_2 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} I$$

上式称为分流公式。

(5) 电路消耗的总功率等于各个电阻消耗的功率之和, 即

$$P = P_1 + P_2$$

§ 第三节 直流电路计算

一、支路电流法

支路电流法是以支路电流为未知量, 直接应用基尔霍夫定律列出电路方程式, 从而求解支路电流的方法。支路电流法是分析计算复杂电路的最基本的方法。

用支路电流法求解电路时, 可按以下步骤进行:

- (1) 标出各支路电流的正方向。
- (2) 根据基尔霍夫第一定律, 对 $(n-1)$ 个独立节点列节点电流方程。
- (3) 选择回路和它的绕行方向, 根据 KVL 列出 $m(m-n+1)$ 个电压方程。
- (4) 联立求解方程, 求出各支路电流。

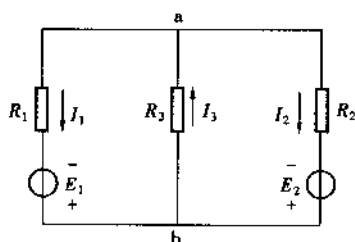


图 1-1 例 1-1 电路图

例 1-1 如图 1-1 所示电路中, 已知 $E_1 = 130\text{V}$, $R_1 = 1\Omega$, $E_2 = 117\text{V}$, $R_2 = 0.6\Omega$, $R_3 = 24\Omega$ 。求各支路电流。

解: 根据 KCL 列节点 a 方程

$$I_1 + I_2 = I_3$$

根据 KCL 列回路电压方程:

$$\text{左边网孔 } I_1 R_1 = -I_3 R_3 + E_1$$

$$\text{右边网孔 } -I_2 R_2 - I_3 R_3 = -E_2$$

联立方程代入数据, 得

$$I_1 + I_2 = I_3$$

$$I_1 + 24I_3 = 130$$

$$0.6I_2 + 24I_3 = 117$$

求解方程组得

$$I_2 = -5\text{A}; I_1 = 10\text{A}; I_3 = 5\text{A}$$

I_2 为负值, 表明所设正方向与实际方向相反。 E_2 为反电动势, 表示这个电池被充电。

二、节点电压法

所谓节点电压法, 就是在具有两个以上节点的复杂电路中, 首先求出节点电压, 然后再求出各支路电流的方法。

例 1-2 如图 1-2 所示电路中, 有 2 个节点, 3 条支路。各支路电流正方向如图示。求各支路电流。

解: 根据 KVL, 对 E_1 支路, 有

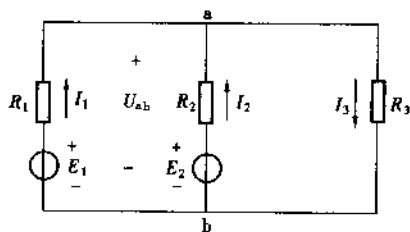


图 1-2 例 1-2 电路图

$$U_{ab} = E_1 - I_1 R_1$$

即

$$I_1 = \frac{E_1 - U_{ab}}{R_1}$$

对 E_2 支路, 有

$$U_{ab} = E_2 - I_2 R_2$$

即

$$I_2 = \frac{E_2 - U_{ab}}{R_2}$$

对 R_3 支路, 有

$$U_{ab} = I_3 R_3$$

即

$$I_3 = \frac{U_{ab}}{R_3}$$

三、叠加原理

叠加原理应用到具体电路中, 就是当电路中具有几个电源时, 电路中的电流等于各电源单独作用(或分组作用)时产生的电流的代数和。各电源单独作用时, 应保持电路内所有的电阻(包括电源内部电阻)不变。用叠加原理解题步骤如下(以两条支路的电路为例):

- (1) 选定各支路的电流正方向。
- (2) 求 E_1 单独作用时, 各支路的电流。
- (3) 求 E_2 单独作用时, 各支路的电流。

应用叠加原理要注意下述几点:

- (1) 叠加原理适用于线性电路的电流和电压的分析、计算。求功率时不能用叠加原理, 因为在功率计算中 P 与 U 、 I 是二次方关系。
- (2) 考虑单独电源作用时, 电路中的全部电阻, 包括全部电源的电阻, 都应保持不变。
- (3) 叠加时应注意电流的方向。

叠加原理的应用, 就是把复杂电路简化为具有单一电源的串、并联电路进行计算。方法虽然可行, 但计算较繁, 有时并不省事。因而直接用叠加原理作为计算电路的方法不常采用。只有在一些特殊情况下, 例如某一些电路已计算完毕, 但新的任务要求增加一个电源, 并计算该电源对原电路某条支路中电流的影响时应用叠加原理才比较方便, 只要把新电源单独作用在某支路中产生的电流叠加到原有的结果上就行了。

例 1-3 如图 1-3 所示电路中, $E_1 = 130V$, $E_2 = 117V$, $R_1 = 1\Omega$, $R_2 = 0.6\Omega$, $R_3 =$

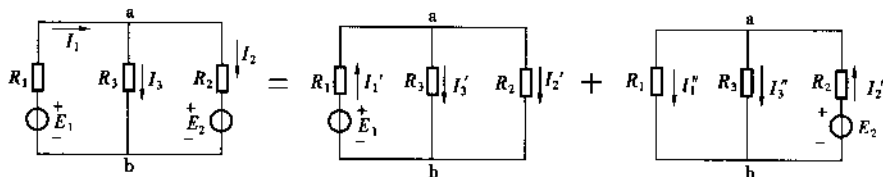


图 1-3 例 1-3 电路图

24Ω , 求 I_1 、 I_2 、 I_3 。

解:
$$R' = R_1 + \frac{R_2 R_3}{R_2 + R_3} = 1 + \frac{24 \times 0.6}{24 + 0.6} = 1.59(\Omega)$$