

继电保护整定计算与实验

吕继绍 主编

华中工学院出版社

内 容 提 要

本书主要讲述继电保护的整定计算和试验方法。

全书共分两篇。第一篇讲述了各种继电保护的整定计算方法，并集录例题、习题、思考题共三百余道。第二篇介绍了进行继电保护调试的几种常用测试仪器及几个实验的指示书。并附有继电保护大型作业指示书。

本书除可供电力系统及其自动化专业、发电厂及电力系统专业本科学生学习外，也可供电力类本科其他有关专业及电力类中专学生学习，还可供从事继电保护工作的工程技术人员参考。

继电保护整定计算与实验

吕 继 绍 主 编

责任编辑 李 德

华中工学院出版社出版

(武昌喻家山)

湖北省新华书店发行 各地新华书店经售
湖北省沔阳县印刷厂印刷

开本：787×1092 1/16 印张：9.875 字数：245,000

1983年12月第一版 1983年12月第一次印刷

印数：1-10,000

统一书号：15255-015 定价：1.10元

前 言

本书是为电力类有关专业学生提高电力系统继电保护课程的实践能力而编写的。

全书共分两篇。第一篇为各种继电保护的整定计算方法、例题、习题及思考题。第二篇为进行继电保护调试的常用测试仪器及实验指示书。并附有继电保护大型作业指示书。

本书由华中工学院电力系统及其自动化教研室吴希再、邹祖英、曾克娥和吕继绍四同志编写，由吕继绍主编。

本书在编写过程中，得到湖北省水电局有关部门提供的大量参考资料，在此表示衷心感谢。

由于编者的理论水平及实践经验所限，书中难免存在缺点和错误，敬希读者批评指正。

编 者

1983.8

符号说明

一、设备名称

<i>B</i>	变压器	<i>LJ</i>	电流继电器
<i>CT</i>	电流互感器	<i>PT</i>	电压互感器
<i>DK</i>	电抗器	<i>SJ</i>	时间继电器
<i>DKB</i>	电抗变压器	<i>XJ</i>	信号继电器
<i>DL</i>	断路器	<i>YB</i>	电压变换器
<i>F</i>	发电机	<i>YJ</i>	电压继电器
<i>FLL</i>	负序电流滤过器	<i>ZCH</i>	自动重合闸
<i>FYL</i>	负序电压滤过器	<i>ZKJ</i>	阻抗继电器
<i>GJ</i>	功率方向继电器	<i>ZJ</i>	中间继电器
<i>LB</i>	电流变换器		

二、晶体管元件

<i>D</i>	二极管	<i>T</i>	三极管
<i>SCR</i>	可控硅管	<i>Z</i>	稳压管

三、符号下角注

<i>A, B, C</i>	三相(原方)	<i>p</i>	保护、原方、极化
<i>a, b, c</i>	三相(副方)	<i>po</i>	准备动作
<i>ac</i>	精确工作	<i>pu</i>	动作
<i>ap</i>	非周期	<i>per</i>	周期
<i>AR</i>	自动重合闸	<i>PT</i>	电压互感器
<i>b</i>	平衡、分支、基准	<i>r</i>	继电器
<i>ba</i>	基本侧	<i>re</i>	返回
<i>C</i>	配合	<i>rel</i>	可靠、裕度
<i>cal</i>	计算	<i>res</i>	制动、剩余
<i>con</i>	接线	<i>s</i>	副方、系统
<i>CT</i>	电流互感器	<i>sen</i>	灵敏
<i>di</i>	去游离	<i>set</i>	整定
<i>er</i>	误差	<i>so</i>	合闸
<i>G, g</i>	发电机	<i>sof</i>	跳闸
<i>i</i>	输入、内部	<i>ss</i>	自启动
<i>K</i>	短路	<i>st</i>	同型
<i>L, l</i>	线路、长度、负荷	<i>T, t</i>	变压器、跳闸
<i>m</i>	测量	<i>unb</i>	不平衡
<i>ms</i>	最灵敏	<i>w</i>	工作
<i>N, n</i>	额定	<i>μ</i>	励磁
<i>o</i>	输出、外部		

四、符号上角注

- | | |
|------------|-------------------|
| (1) 单相接地短路 | (2.0) 两相接地短路 |
| (2) 两相短路 | (1.1) 两点接地 |
| (3) 三相短路 | I、II、III 一、二、三段保护 |

目 录

前言
符号说明

第一篇 整定计算、例题与思考题

第一章 继电保护常用的基础知识	(1)
1-1 变换器与对称分量滤波器	(1)
1-2 继电保护常用的晶体管电路	(3)
1-3 举例说明	(5)
习题	(9)
思考题	(11)
第二章 输电线路相间短路的电流电压保护	(12)
2-1 整定计算公式	(12)
2-2 举例说明	(16)
习题	(20)
思考题	(24)
第三章 输电线路接地短路的零序电流电压保护	(26)
3-1 整定计算公式	(26)
3-2 举例说明	(28)
习题	(32)
思考题	(36)
第四章 输电线路的距离保护	(37)
4-1 整定计算公式	(37)
4-2 分析圆特性方向阻抗继电器静态运行特性的方法	(38)
4-3 举例说明	(41)
习题	(45)
思考题	(48)
第五章 输电线路的高频保护	(49)
5-1 整定计算公式	(49)
5-2 举例说明	(54)
习题	(61)
思考题	(62)
第六章 输电线路的三相自动重合闸	(63)
6-1 三相自动重合闸装置的整定计算	(63)
6-2 举例说明	(65)
习题	(67)
思考题	(68)
第七章 电力变压器的保护	(69)
7-1 电力变压器的故障及应装设的保护	(69)
7-2 变压器保护的整定计算	(70)
7-3 举例说明	(75)
习题	(81)
思考题	(83)
第八章 同步发电机的保护	(85)
8-1 同步发电机的故障及应装设的保护	(85)
8-2 同步发电机保护的整定计算	(86)
8-3 举例说明	(90)

习题	(95)
思考题	(96)
第九章 母线保护	(98)
9-1 装设母线保护的一般原则	(98)
9-2 母线保护的整定计算	(98)
9-3 举例说明	(99)
习题	(102)
思考题	(103)

第二篇 常用测试仪器及实验指示书

第一章 常用测试仪器	(105)
1-1 时间测量仪器	(105)
1-2 相位测量仪及移相器	(108)
1-3 SC10型示波器	(114)
1-4 BX-1型波形分析仪	(118)
第二章 实验指示书	(120)
2-1 电磁型电流电压保护实验	(120)
2-2 线路晶体管电流保护实验	(122)
2-3 功率方向继电器特性实验	(126)
2-4 方向阻抗继电器特性实验	(128)
2-5 电磁型三相一次自动重合闸实验	(131)
2-6 变压器差动保护实验	(133)

课 程 作 业

附录一	短路保护的最小灵敏系数	(142)
附录二	由LXHM与LXH型零序电流互感器构成的发电机接地保护参数表	(143)
附录三	DL-20C系列电流继电器的技术数据	(143)
附录四	DD-11系列接地电流继电器的技术数据	(144)
附录五	DL-11/b, DL-13/1c型电流继电器的技术数据	(144)
附录六	DY-20C系列电压继电器的技术数据	(144)
附录七	DS-110, DS-120系列时间继电器的技术数据	(145)
附录八	DXM-2A型直流信号继电器的技术数据	(145)
附录九	DXM-3型直流信号继电器的技术数据	(146)
附录十	DZB-10B系列中间继电器的技术数据	(146)
附录十一	DZS-10B系列中间继电器的技术数据	(147)
附录十二	DZ-700型中间继电器的技术数据	(147)
附录十三	感应型阻抗继电器的技术数据	(148)
附录十四	DL-6型负序电流继电器的技术数据	(148)
附录十五	DY-4型负序电压继电器的技术数据	(148)
附录十六	整流型保护继电器的技术数据	(149)
习题答案		(151)
参考文献		(152)

第一篇 整定计算、习题和思考题

第一章 继电保护常用的基础知识

1-1 变换器与对称分量滤过器

一、变换器(YB、LB、DKB)的工作特点

在继电保护中，为了引入电流、电压，除了采用电压互感器(PT)和电流互感器(CT)外，还广泛采用电压变换器(YB)，电流变换器(LB)和电抗变压器(DKB)(如图1-1-1)。采用这些铁芯元件，一方面是为了适应半导体电路的需要，将高电压、大电流变换成低电压；另一方面，也是为了利用铁芯元件的特性以改变原方、副方电量的相位；此外，还利用它们使强电与弱电元件隔离。这三种铁芯元件都可以用图1-1-2的T型等效电路来表示。图中 Z'_1

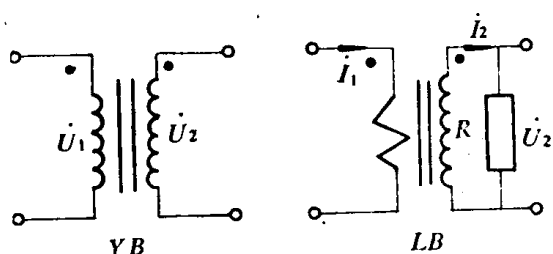


图1-1-1 三种铁芯元件的表示法

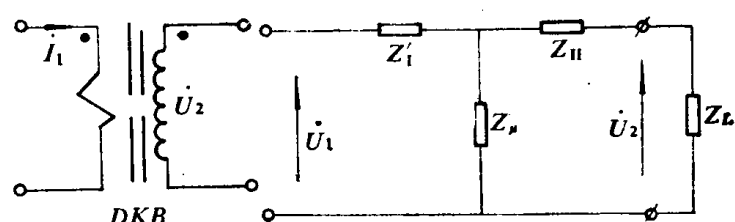


图1-1-2 变换器T型等效电路

为折合到副方的原方漏抗， Z_{II} 为副方漏抗， Z_{μ} 为折合到副方的励磁阻抗， Z_L 为负载阻抗。三种铁芯元件的等效电路虽然相同，但由于工作特点不同，表现在等效电路中的参数亦不同。三种变换器的工作情况和参数特点如表1-1所列。

表1-1 三种变换器的工作情况和参数特点

变换器类型	电压变换器YB	电流变换器LB	电抗变压器DKB
变换形式	$\dot{U}_1 \rightarrow \dot{U}_2$	$\dot{I}_1 \rightarrow \dot{U}_2$	$\dot{I}_1 \rightarrow \dot{U}_2$
原方接法	接PT副方	接CT副方	接CT副方
副方输出电量	\dot{U}_2	\dot{U}_2	\dot{U}_2
二次负载	Z_L 大	Z_L 小	Z_L 大
励磁阻抗	Z_{μ} 大	Z_{μ} 大	Z_{μ} 小
漏抗 Z'_1, Z_{II}	忽略不计	忽略不计	不能忽略

从表1-1中可见，LB和DKB都是将一次电流变换成二次电压的铁芯元件，由于LB铁芯无气隙，DKB铁芯有气隙，使得它们的工作参数有差别，从而在变换性能上也有所区别。其工作特点如表1-2中所列。表中M表示DKB原方与副方绕组间的互感系数， ω 表示基

波的角频率, T_1 表示原方电流衰减的时间常数, n_{LB} 表示电流变换器变比。

表1-2

LB和DKB的工作特点

变换器类型	一次电流与二次电压的相位关系	直流分量的影响	高次谐波分量的影响
LB	$\dot{U}_2 \approx \frac{\dot{I}_1}{n_{LB}} R$ 相位相同	铁芯未饱和时直接传递直流分量	$u_2 = R(I_{1m} \sin \omega t + I_{2m} \sin 2\omega t + \dots + I_{nm} \sin n\omega t)$ 二次电压与一次电流波形相同
DKB	$\dot{U}_2 \approx Z_\mu \dot{I}_1 \approx j \dot{I}_1 \times X_\mu$ X_μ 副方电压超前一次电流近 90°	$u_2 = -\frac{M}{T_1} I_m e^{-\frac{t}{T_1}}$ 起抑制直流分量作用	$u_2 = M(I_{1m} \omega \cos \omega t + I_{2m} 2\omega \cos 2\omega t + \dots + I_{nm} n\omega \cos n\omega t)$ 按谐波频率的倍数放大高次谐波

二、几种常用对称分量滤过器的接线与参数匹配

1. 零序分量滤过器 要构成零序电压(电流)滤过器, 必须将三相电压(电流)相加。其接线如图1-1-3。

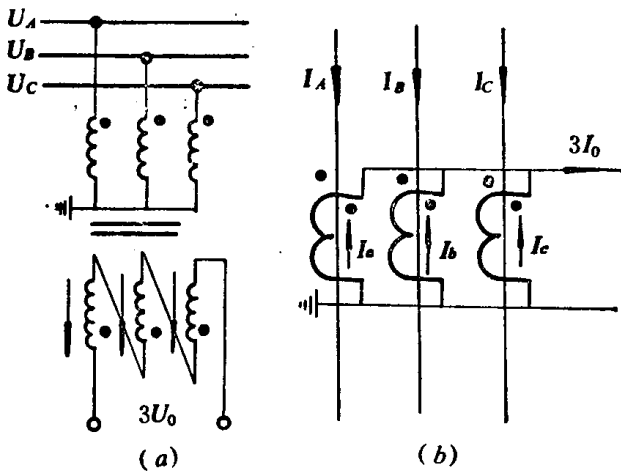


图1-1-3 零序分量滤过器接线

(a) 零序电压滤过器; (b) 零序电流滤过器

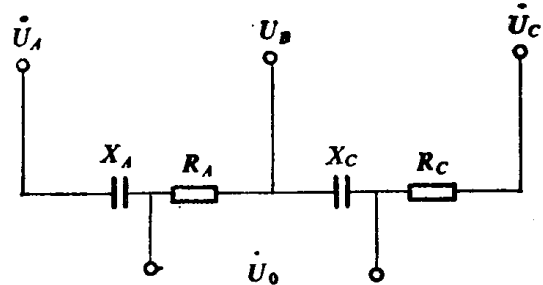


图1-1-4 负序电压滤过器接线

2. 负序分量滤过器 要构成负序分量滤过器, 不但要消除零序分量, 还要消除正序分量。

(1) 常用的负序电压滤过器如图1-1-4所示。为消除零序电压分量, 图中接入线电压; 为消除正序电压分量, 图中电容电阻的值应该符合下列关系:

$$X_C = \sqrt{3} R_C, \quad R_A = \sqrt{3} X_A \quad (1-1-1)$$

$$\dot{U}_0 = 1.5 \dot{U}_{AB2} e^{j60^\circ} = 1.5 \sqrt{3} \dot{U}_{A2} e^{j30^\circ} = K_2 \dot{U}_{A2} \quad (1-1-2)$$

(2) 图1-1-5为一常用的LB-DKB接线的负序电流滤过器。为消除零序电流分量, 在DKB中取 $W_B = W_C$, 引入相电流差 $\dot{I}_B - \dot{I}_C$, 则

$$\dot{U}_2 = jX_\mu (\dot{I}_B - \dot{I}_C) = jX_\mu [(\dot{I}_{B1} - \dot{I}_{C1}) + (\dot{I}_{B2} - \dot{I}_{C2})]$$

在LB中, 选 $W_0 = \frac{1}{3} W_A$, 则 $\dot{U}_R = \frac{\dot{I}_A - \dot{I}_0}{n_{LB}} R = \frac{\dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2}}{n_{LB}} R$ 。

为消除正序电流分量, 应使

$$\frac{R}{n_{LB}} - \sqrt{3} X_\mu = 0, \quad (1-1-3)$$

因此

$$\dot{U}_0 = \dot{U}_R - \dot{U}_2 = \frac{2R}{n_{LB}} \dot{I}_{A2} = K_2 \dot{I}_{A2}, \quad (1-1-4)$$

式中, $K_2 = 2R/n_{LB}$ 。

3. 正序分量滤过器 正序分量滤过器与负序分量滤过器的结构完全相同, 只是移相的方向不同。因此, 只需在负序分量滤过器接线图上, 将输入三相的电压(电流)的相序倒换即可。

4. 正负序复合电流滤过器 构成复合电流滤过器只需消除零序电流分量。为此, 原理接线之一可与图1-1-5相同, 在参数选择上应使 $R/n_{LB} \approx \sqrt{3} X_{\mu}$, 则 $K_1 \dot{U}_{A_1} \approx 0$ 。这时

$$\dot{U}_0 = K_1 \left(\dot{I}_{A_1} + \frac{K_2 \dot{I}_{A_2}}{K_1} \right) = K_1 (\dot{I}_{A_1} + K \dot{I}_{A_2}), \quad (1-1-5)$$

式中, $K_1 = \frac{R}{n_{LB}} - \sqrt{3} X_{\mu}$; $K_2 = \frac{R}{n_{LB}} + \sqrt{3} X_{\mu}$;

$K = \frac{K_2}{K_1}$, 称复合系数, 通常 $K > 1$ 。

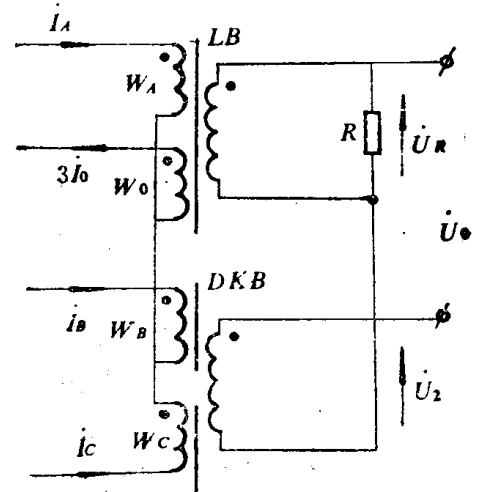


图1-1-5 LB-DKB接线的负序电流滤过器

1-2 继电保护常用的晶体管电路

一、继电触发器参数的计算

以保护中常用的继电触发器(如图1-1-6所示)为例说明其参数计算。

1. 三极管集电极电阻的选择 为了延长三极管的使用寿命, 通常按下式选用 R_1 和 R_2 :

$$I_c = \frac{E_c}{R_1} \leq \frac{I_{CM}}{5 \sim 10}, \quad \text{即 } R_1 \geq (5 \sim 10) \frac{E_c}{I_{CM}}, \quad (1-1-6)$$

式中, I_{CM} —— 三极管最大允许的集电极电流。

2. 偏流电阻 R_p 的选择 按保证 T_1 深度饱和导通选择, 即

$$\frac{E_c - U_D - U_{be1}}{R_p} \geq (2 \sim 3) \frac{E_c - U_{ce1}}{\beta_1 R_1},$$

略去三极管、二极管的电压降, 则

$$R_p \leq \frac{R_1 \beta_1}{2 \sim 3}, \quad (1-1-7)$$

式中, β_1 —— 三极管 T_1 临界导通时的放大倍数。

3. R_3 和 R_4 的选择 按保证 T_2 深度饱和导通及可靠截止条件选择, 即把 T_2 作反相器进行计算。

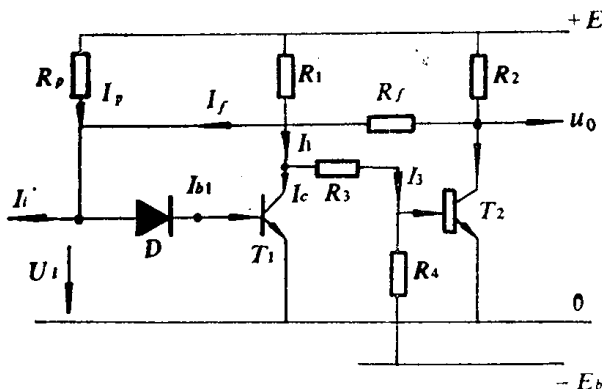


图1-1-6 继电触发器的原理图

根据 T_2 饱和导通的条件(见图1-1-7) $I_{b2} \geq (2 \sim 3) \frac{I_c}{\beta_2}$, 则

$$I_{b2} = I_3 - I_4 = \frac{E_c - U_b}{R_1 + R_3} - \frac{U_b - (-E_b)}{R_4} \geq (2 \sim 3) \frac{I_c}{\beta_2},$$

略去 U_b , 整理后得:

$$R_3 \leq \frac{E_c R_4 \beta_2}{\beta_2 E_b + (2 \sim 3) I_c R_4} - R_1, \quad (1-1-8)$$

式中, β_2 —— 三极管 T_2 临界导通时的放大倍数。

根据 T_2 可靠截止的条件(见图1-1-8) $I_{cb0} \leq I_4 - I_3$ 。由于 T_1 导通, U_{c1} 约为0.2伏。因此, 经 R_3 、 R_4 分压后 U'_b 为负值。所以,

$$I_4 - I_3 = \frac{-(U'_b - E_b)}{R_4} - \frac{U_{c1} + U'_b}{R_3} \geq I_{cbo},$$

$$R_3 \geq \frac{(U_{c1} + U'_b)R_4}{E_b - U'_b - I_{cbo}R_4}, \quad (1-1-9)$$

式中, I_{cbo} ——最高工作温度下 T_2 的反向饱和电流。

综合以上两条件, 即可求出 R_3 。但计算时, 必须注意 E_b 、 U'_b 应采用绝对值; 在 R_3 、 R_4 未求出前, U'_b 无法求出。故先估计一个 U'_b , 待求出 R_3 、 R_4 后再修正。

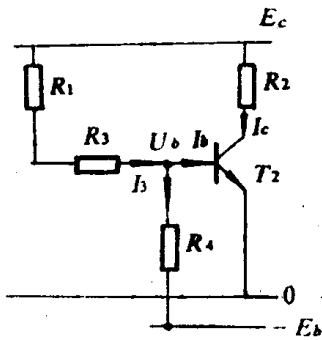


图1-1-7 T_2 饱和导通时的电路

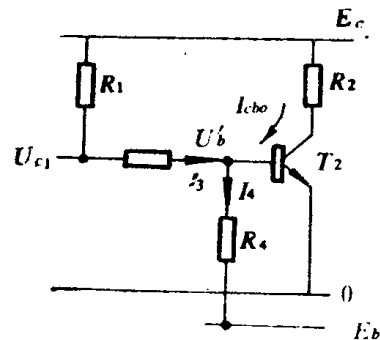


图1-1-8 T_2 截止时的电路

4. 反馈电阻 R_f 的选择 按保证触发器的继电器特性有一定的宽度来选择,

$$R_f \approx \frac{E_c}{I_f} = \frac{E_c}{(I_{pu} - I_{re}) + (I_{b1(b)} - I_{b1(c)})}, \quad (1-1-10)$$

式中, I_{pu} 、 I_{re} ——继电器触发的动作电流和返回电流; $I_{b1(b)}$ ——三极管 T_1 从截止区开始进入导通区时的电流, $I_{b1(b)} \approx E_c / \beta_1 R_1$; $I_{b1(c)}$ ——三极管 T_2 从导通区开始进入截止区时的电流, $I_{b1(c)} = \frac{E_c}{\beta_1 R_1} - \frac{E_c}{\beta_1 \beta_2 R_2} \left(\frac{R_3}{R_1} + 1 \right) - \frac{E_b R_3}{\beta_1 R_4 R_1}$ 。

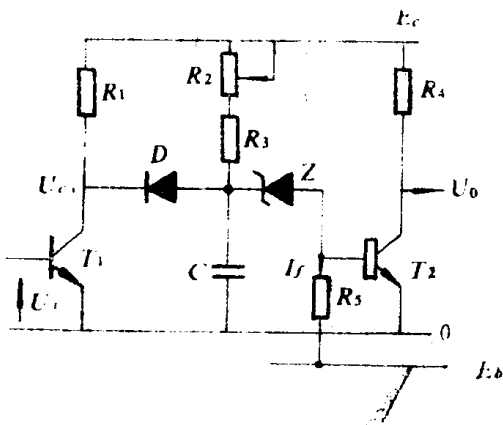


图1-1-9 充电式延时动作瞬时返回的时间电路图

二、时间电路整定时间的计算

时间电路分两大类, 一类是延时动作瞬时返回的时间电路, 另一类是瞬时动作延时返回的时间电路。由于这两种电路的结构不同, 在计算整定时间时, 也略有差异。下面以几种常用的时间电路为例说明时间电路整定时间的计算。

(一) 延时动作瞬时返回的时间电路

1. 充电式时间电路(图1-1-9) 由图可见, 当三极管 T_1 由导通变截止时, 电容 C 开始充电, 延时 t 时间后三极管 T_2 由截止变导通, 输出信号, 故充电时间按下式计算:

$$= (R_2 + R_3)C \ln \frac{E_c - U}{E_c - U_c} \approx RC \ln \frac{E_c}{E_c - U_c}, \quad (1-1-11)$$

式中, U —— T_1 导通时, C 上的电压, $U = U_D + U_{c1}$; U_c —— T_1 截止时, C 上的电压, $U_c = U_Z + U_{be2}$; R ——充电电阻, $R = R_2 + R_3$; U_D ——二极管 D 的正向压降; U_Z ——稳压管 Z 的击穿电压; 各参数单位为: C (法拉), R (欧), E 、 U (伏), t (秒)。

由式(1-1-11)可见, 时间 t 可通过调节 R 、 C 或改变 U_Z 来实现, 但通常采用调节 R 的办

法。采用此办法时，应保证能使 T_2 饱和导通。

2. 充放电式时间电路(图1-1-10) 当 T_1 由截止变导通时，2点电位 U_2 为负， T_2 立即截止，但 T_3 仍处于导通状态。这时，电容 C 一方面经 D_1 、 T_1 、 R_3 、 R_4 放电，另一方面又由 E_c 经 R_3 、 R_4 、 D_1 、 T_1 向电容 C 充电，使 U_2 升高，经 t 时间后， T_2 导通， T_3 截止，输出高电位，其充放电的关系为

$$t = (R_3 + R_4)C \ln \frac{2E_c}{E_c - U_2}, \quad (1-1-12)$$

式中， $U_2 = U_{D2} + U_{be2}$ ；其他参数的代表意义与式(1-1-11)相同。

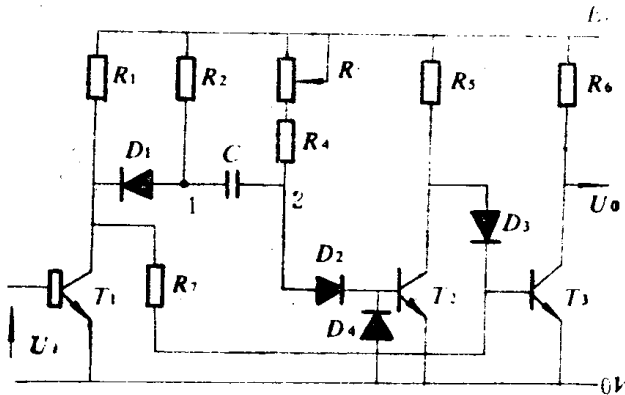


图1-1-10 充放电式时间电路

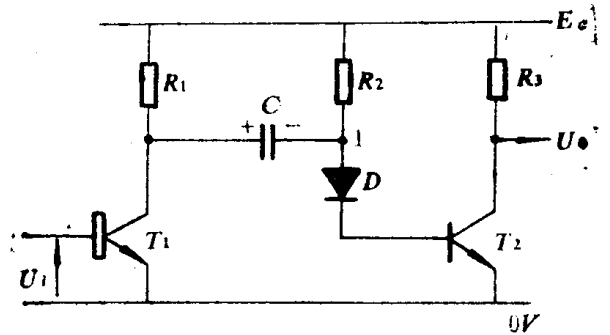


图1-1-11 短时记忆电路

(二) 瞬时动作延时返回的时间电路

1. 短时记忆电路(图1-1-11) 当 T_1 由截止变导通时，因电容 C 两端电压不能突变， C 正极变为0伏，1点电位 U_1 变为 $-E_c$ ， T_2 很快截止，输出高电位，然后电源经 R_2 、 T_1 向 C 充电，经 t 时间后， U_1 电位升高， T_2 恢复导通。 T_2 截止 U_o 输出高电位的时间为

$$t = R_2 C \ln 2. \quad (1-1-13)$$

2. 脉冲展宽电路(图1-1-12) 当 T_1 由截止变导通时，电容 C 经 R_2 、 T_1 放电， T_2 立即截止，输出高电位。当 T_1 由导通又变为截止时，1点电位经 t 时间后才能击穿稳压管 Z ，使 T_2 重新导通。其展宽的时间为

$$t = (R_1 + R_2)C \ln \frac{E_c}{E_c - U_Z}. \quad (1-1-14)$$

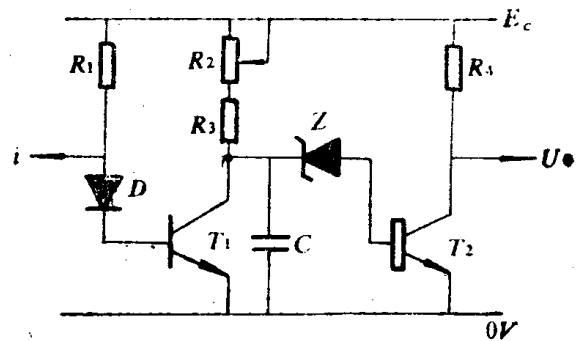


图1-1-12 脉冲展宽电路

1-3. 举例说明

例一、在图1-1-13所示电路中，已知电流变换器(LB)的匝数 $W_1 = W_2$ ， $W_3 = W_4$ ，二次负载电阻 $R_1 = R_2 = R$ ，电抗变压器(DKB)的匝数 $W_2 = W_3$ ，励磁阻抗 $X_\mu = \sqrt{3} R / n_{LB}$ 。试证明，当线路上同一点发生三相短路和两相短路时，电路的输出电压 U_o 相等。

证明：1. 三相短路时 三相短路电流对称，如图1-1-14(a)所示，对DKB，因接入A相电流，其副方电压为

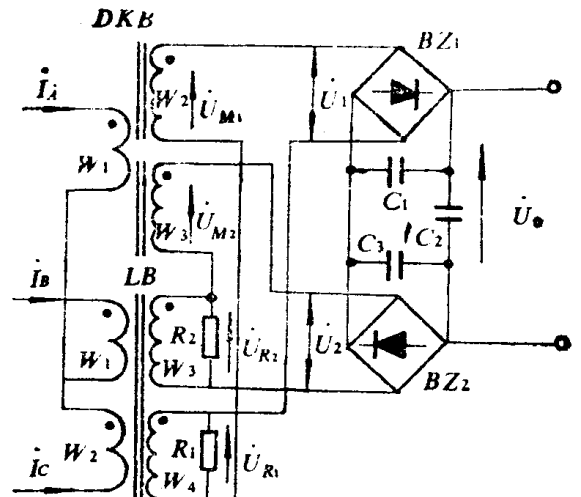


图1-1-13 例题1-1的电路图

$$\dot{U}_{M1} = \dot{U}_{M2} = \dot{I}_A^{(3)} X_\mu e^{j90^\circ};$$

对LB, 因接 $\dot{I}_B^{(3)} - \dot{I}_C^{(3)}$ 电流, 其副方电压为

$$\dot{U}_{R1} = \dot{U}_{R2} = \frac{\dot{I}_{BC}^{(3)}}{n_{LB}} R = \frac{\sqrt{3} \dot{I}_A^{(3)} e^{-j90^\circ}}{n_{LB}} R = \dot{I}_A^{(3)} X_\mu e^{-j90^\circ}.$$

由图接线可知

$$\dot{U}_1 = \dot{U}_{M1} - \dot{U}_{R1} = 2\dot{I}_A^{(3)} X_\mu e^{j90^\circ}, \dot{U}_2 = \dot{U}_{M2} + \dot{U}_{R2} = 0,$$

则

$$U_0 = |\dot{U}_1| + |\dot{U}_2| = 2\dot{I}_A^{(3)} X_\mu.$$

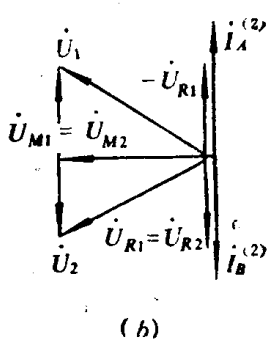
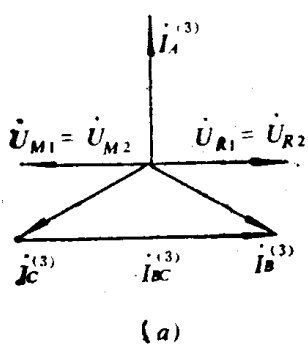


图1-1-14 相间短路时的电流电压相量图

(a)三相短路时; (b)AB两相短路时

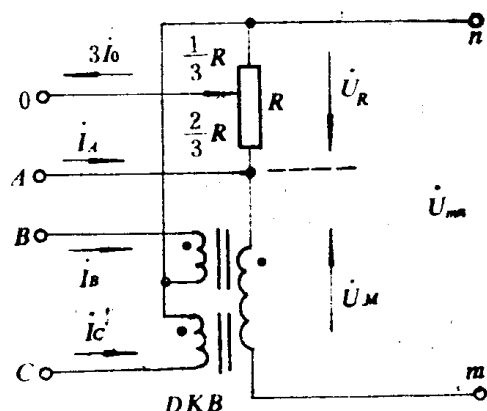


图1-1-15 $I_{A1} + KI_{A2}$ 型复合电流过滤器接线图

2. AB两相短路 AB两相短路时, $\dot{I}_A^{(2)}$ 和 $\dot{I}_B^{(2)}$ 的方向相反, 大小等于 $\frac{\sqrt{3}}{2} \dot{I}_A^{(3)}$,

如图1-1-14(b)所示。

对DKB, $\dot{U}_{M1} = \dot{U}_{M2} = \dot{I}_A^{(2)} X_\mu e^{j90^\circ}$; 对LB, $\dot{U}_{R1} = \dot{U}_{R2} = \dot{I}_B^{(2)} \frac{R}{n_{LB}}$ 。

由于 \dot{U}_M 与 \dot{U}_R 的相位相差 90° , 由图可见

$$|\dot{U}_1| = |\dot{U}_{M1} - \dot{U}_{R1}| = \sqrt{(\dot{I}_A^{(2)} X_\mu)^2 + \left(\dot{I}_B^{(2)} \frac{R}{n_{LB}}\right)^2} = \dot{I}_A^{(3)} X_\mu,$$

$$|\dot{U}_2| = |\dot{U}_{M2} + \dot{U}_{R2}| = \sqrt{(\dot{I}_A^{(2)} X_\mu)^2 + \left(\dot{I}_B^{(2)} \frac{R}{n_{LB}}\right)^2} = \dot{I}_A^{(3)} X_\mu,$$

显然, $U_0 = |\dot{U}_1| + |\dot{U}_2| = 2\dot{I}_A^{(3)} X_\mu$ 。

例二、图1-1-15为用于相差高频保护中的 $I_{A1} + KI_{A2}$ 型复合电流过滤器的接线图。当仅在输入端A, 0上引入A相短路电流 $\dot{I}_K^{(1)}$ 时, 用高内阻电压表测得输出电压为 $\dot{U}_{mn}^{(1)}$ 。

1. 若在输入端输入三相对称电流 $\dot{I}_K^{(3)} = \dot{I}_K^{(1)}$ 时, 写出用 $\dot{U}_{mn}^{(1)}$ 表示的 $\dot{U}_{mn}^{(3)}$ 的关系式。

2. 若在输入端输入BC两相短路电流 $\dot{I}_K^{(2)} = \dot{I}_K^{(1)}$ 时, 写出用 $\dot{U}_{mn}^{(1)}$ 表示的 $\dot{U}_{mn}^{(3)}$ 的关系式。

解: 当输入端分别通入正序、负序、零序电流时, 输出端可得

$$\dot{U}_{mn1} = -j(\dot{I}_{B1} - \dot{I}_{C1}) X_\mu + \frac{2}{3} \dot{I}_{A1} R - \frac{1}{3} (\dot{I}_{B1} + \dot{I}_{C1}) R = (R - \sqrt{3} X_\mu) \dot{I}_{A1} = K_1 \dot{I}_{A1},$$

$$\dot{U}_{mn2} = -j(\dot{I}_{B2} - \dot{I}_{C2}) X_\mu + \frac{2}{3} \dot{I}_{A2} R - \frac{1}{3} (\dot{I}_{B2} + \dot{I}_{C2}) R = (R + \sqrt{3} X_\mu) \dot{I}_{A2} = K_2 \dot{I}_{A2},$$

$$\dot{U}_{mn0} = -j(\dot{I}_{B0} - \dot{I}_{C0}) X_\mu + \frac{2}{3} \dot{I}_{A0} R - \frac{1}{3} (\dot{I}_{B0} + \dot{I}_{C0}) R = 0.$$

当 $R \approx \sqrt{3} X_\mu$ 时, 输出电压为

$$\dot{U}_{mn} = \dot{U}_{mn1} + \dot{U}_{mn2} + \dot{U}_{mn0} = K_1 \dot{I}_{A1} + K_2 \dot{I}_{A2} = K_1 \left(\dot{I}_{A1} + \frac{K_2}{K_1} \dot{I}_{A2} \right) =$$

$$= K_1(I_{A1} + KI_{A2})。$$

当在输入端A, 0输入A相短路电流 $i_K^{(1)}$ 时, $I_{A1}^{(1)} = I_{A2}^{(1)} = I_{A0}^{(1)} = \frac{1}{3}i_K^{(1)}$, 这时,

$$\dot{U}_{m'n}^{(1)} = K_1(1+K)i_{A1}^{(1)} = \frac{1}{3}K_1 i_K^{(1)}(1+K)。$$

所以
$$i_K^{(1)} = \frac{3\dot{U}_{m'n}^{(1)}}{K_1(1+K)}。$$

当在输入端输入三相短路电流时, $i_K^{(3)} = i_{A1}^{(3)}, i_{A2}^{(3)} = i_{A0}^{(3)} = 0, \dot{U}_{m'n}^{(3)} = K_1 i_{A1}^{(3)} = K_1 i_K^{(3)}。$

又
$$i_K^{(3)} = i_K^{(1)}, \quad \text{则} \quad \frac{\dot{U}_{m'n}^{(3)}}{K_1} = \frac{3\dot{U}_{m'n}^{(1)}}{K_1(1+K)},$$

所以
$$\dot{U}_{m'n}^{(3)} = \frac{3\dot{U}_{m'n}^{(1)}}{1+K}。$$

当在输入端BC引入两相短路电流 $i_K^{(2)}$ 时, $i_{A1}^{(2)} = -i_{A2}^{(2)} = \frac{1}{\sqrt{3}}i_K^{(2)}, i_{A0}^{(2)} = 0,$

$$\dot{U}_{m'n}^{(2)} = K_1(I_{A1} - KI_{A2}) = K_1 \frac{1}{\sqrt{3}}i_K^{(2)}(1-K),$$

$$i_K^{(2)} = \frac{\sqrt{3}\dot{U}_{m'n}^{(2)}}{K_1(1-K)}, \quad i_K^{(2)} = i_K^{(1)}, \quad \frac{\sqrt{3}\dot{U}_{m'n}^{(2)}}{K_1(1-K)} = \frac{3\dot{U}_{m'n}^{(1)}}{K_1(1+K)},$$

所以
$$\dot{U}_{m'n}^{(2)} = \frac{3}{\sqrt{3}} \frac{1-K}{1+K} \dot{U}_{m'n}^{(1)} = \sqrt{3} \frac{1-K}{1+K} \dot{U}_{m'n}^{(1)}。$$

例三、继电触发器的原理图如图 1-1-6 所示。已知 $E_c = 18$ 伏, $E_b = 1.5$ 伏, $I_{pu} = 60$ 微安, $I_{re} = 50$ 微安, 最高工作温度为 52°C , T_1, T_2 均采用 3DG 6D, $\beta_1 = \beta_2 = 30$ 。试决定 R_1, R_2, R_3, R_4, R_p 和 R_f 的大小。

解: 1. R_1, R_2 的计算 按式 (1-1-6) 来选取 R_1 和 R_2 , 查手册知 3DG6D 的集电极的最大工作电流 $I_{CM} = 20$ 毫安。

即
$$R_1 = R_2 > (5 \sim 10) \frac{E_c}{I_{CM}} > 10 \times \frac{18}{20} = 9 \text{千欧},$$

现取 $R_1 = R_2 = 15$ 千欧。

2. 偏流电阻 R_p 的选择 按保证 T_1 深度饱和导通选择, 即

$$\frac{E_c - U_D - U_{be1}}{R_p} \geq (2 \sim 3) \frac{E_c - U_{ce1}}{\beta_1 R_1}$$

当略去 U_D, U_{be1} 和 U_{ce1} 时,

$$R_p \leq \frac{\beta_1 R_1}{2 \sim 3} \leq \frac{30 \times 15}{2} = 150 \text{千欧},$$

选 $R_p = 150$ 千欧。

3. R_3 和 R_4 的计算 从式(1-1-8)、(1-1-9)得

$$\frac{(U_{ces1} + U'_b)R_4}{E_b - U'_b - I_{cb0}R_4} \leq R_3 \leq \frac{E_c \beta_2 R_4}{\beta_2 E_b + (2 \sim 3)I_c R_4} - R_1。$$

查手册知, 25°C 时, 3DG6D的 $I_{cb0} = 0.01$ 微安。根据每升高 8°C , I_{cb0} 增大一倍计算, 52°C 时, $I_{cb0}(52^\circ\text{C}) = 0.01 \times 2^{(52-25)/8} \approx 0.1$ 微安。

当 T_2 截止时, U'_b 由 R_3 和 R_4 分压决定, 且在 0.2 伏 (即 U_{ces1}) 与 -1.5 伏 (即 $-E_b$)

之间。由于 R_3 和 R_4 待求，所以只能事先假设 $U'_b =$ 某值，然后求出 R_3 与 R_4 ，再进行校核。现设 $U'_b = -0.7$ 伏（代入公式时应采用绝对值），并将 I_{c2} 、 U_{ce2} 、 R_1 和 β_2 的数值代入式(1-1-8)和式(1-1-9)得：

$$\frac{(0.2+0.7)R_4}{1.5-0.7-0.1 \times 10^{-3}R_4} \leq R_3 \leq \frac{18 \times 30 \times R_4}{30 \times 1.5 + (2 \sim 3) \times 1.2R_4} - 15,$$

先取 $R_4 = 51$ 千欧，则 $57.74 \leq R_3 \leq 105.47$ 。选用 $R_3 = 62$ 千欧。

校核： T_2 截止时， $U_{R3}/U_{R4} = 0.9/0.8 = 1.13$ ， $R_3/R_4 = 62/51 = 1.22$ 。基本满足要求。

4. 反馈电阻 R_f 的计算 按保证触发器的继电特性有一定的宽度来选择。当 T_1 处于临界导通状态时：

$$I_{b1(b)} = \frac{I_{c1(b)}}{\beta_1} \approx \frac{E_c}{\beta_1 R_1} = \frac{18}{30 \times 15} = 40 \text{ 微安。}$$

当 T_2 从导通进入放大区时， I_{b1} 的临界值为

$$I_{b1(c)} = \frac{I_{c1(c)}}{\beta_1} \approx \frac{I_1 - I_{b2(c)}}{\beta_1},$$

$$\text{式中, } I_{b2(c)} = \frac{E_c U_{ce2}}{\beta_2 R_2} \approx \frac{E_2}{\beta_2 R_2}; \quad I_1 = \frac{E_c - U_{be2} - I_{b2(c)} R_3 - I_4 R_3}{R_1} \\ \approx \frac{E_c}{R_1} - \frac{E_c R_3}{\beta_2 R_2 R_1} - \frac{E_b R_3}{R_4 R_1}.$$

$$\text{所以 } I_{b1(c)} = \frac{E_c}{\beta_1 R_1} - \frac{E_c}{\beta_1 \beta_2 R_2} \left(\frac{R_3}{R_1} + 1 \right) - \frac{E_b R_3}{\beta_1 R_4 R_1}.$$

将有关数据代入，得

$$I_{b1(c)} = 40 - \frac{18}{30 \times 30 \times 15} \left(\frac{65}{15} + 1 \right) - \frac{1.5 \times 65}{30 \times 51 \times 15} = 40 - 7.11 - 4.25 = 28.64 \text{ 微安,}$$

$$\text{又 } \Delta I = I_{pu} - I_{re} = 60 - 50 = 10 \text{ 微安,}$$

$$\text{所以 } R_f = \frac{E_c}{I_f} = \frac{E_c}{\Delta I + I_{b1(b)} - I_{b1(c)}} = \frac{18}{10 + 40 - 28.64} = 843 \text{ 千欧。}$$

取 $R_f = 820$ 千欧。

必须指出，由于计算时忽略了一些次要因素，同型号晶体管的参数也有差别。因此，计算得出的数据不十分准确，部分参数必须在调试中才能确定。

例四、图1-1-16为充电式时间电路原理接线图。已知三极管 T_1 、 T_2 采用3DG6D，放大倍数 $\beta_1 = \beta_2 = 25$ ，电容 C 为47微法，稳压管 Z 采用2CW15 ($U_z = 8$ 伏)。试确定接线图中 R_1 、 R_2 、 R_3 和 R_4 的阻值，应使时间电路的时限能在0.5~3.5秒内调整。

解：1. 查手册知3DG6D的最大工作电流 $I_{CM} = 20$ 毫安。

$$R_4 \geq \frac{(5 \sim 10) E_c}{I_{CM}} > \frac{10 \times 18}{20} = 9 \text{ 千欧,}$$

现选取 $R_4 = 15$ 千欧。这时， $I_{c2} = \frac{E_c}{R_4} = \frac{18}{15} = 1.2$ 毫安。

2. 计算 R_2 、 R_3 的值 因

$$t = (R_2 + R_3)C \ln \frac{E_c}{E_c - U_z},$$

式中,
$$\ln \frac{E_c}{E_c - U_z} = \ln \frac{18}{18 - 8} = \ln 1.8 = 0.588.$$

所以
$$R_2 + R_3 = \frac{t}{0.588c} = \frac{t}{0.588 \times 47 \times 10^{-6}} = 36232 t.$$

当 $t = 3.5$ 秒时, $R_2 + R_3 = 3.5 \times 36232 = 126.81$ 千欧; 当 $t = 0.5$ 秒时, $R_2 + R_3 = 0.5 \times 36232 = 18.12$ 千欧。选择 $R_3 = 15$ 千欧为固定电阻, $R_2 = 120$ 千欧为可变电阻。

校验 T_2 能否饱和导通, 因

$$\beta = \frac{I_{c2}}{I_{b2}} = \frac{1.2 \times 10^{-3}}{\frac{E_c - U_z}{R_2 + R_3}} = \frac{1.2 \times 10^{-3}}{\frac{18 - 8}{126.8 \times 10^3}} = 15.22 < \beta_2 = 25, \text{ 满足要求。}$$

3. 选 R_1 应保证使 T_1 饱和导通, 当 $R_2 + R_3 = 18.12$ 千欧时,

$$I_{c1} = \frac{E_c}{R_2 + R_3} = \frac{18}{18.12} = 0.993 \text{ 毫安,}$$

$$I_{b1} = \frac{I_{c1}}{\beta_1} = \frac{0.993}{25} = 39.72 \text{ 微安,}$$

$$R_1 \approx \frac{E_c}{I_{b1}} = \frac{18}{0.039} = 453 \text{ 千欧。}$$

选 $R_1 = 500$ 千欧。

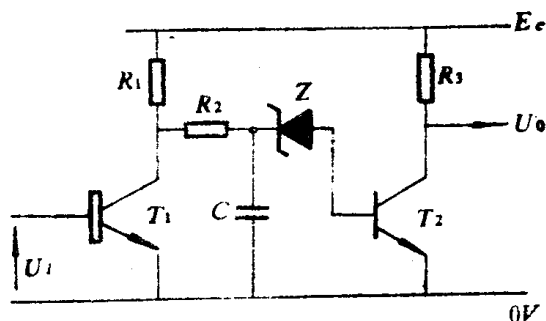


图1-1-16 例题四的时间电路图

习 题

一、在图1-1-17中已知: 系统电抗 $X_{1\Sigma} = X_{2\Sigma} = 11$ 欧, $X_{0\Sigma} = 22$ 欧; 电压互感器变比 $n_{PT} = 1100$ 。试求: 在变电站出线端单相接地短路时, 变电站测到的零序电压 U_{mn0} 是多少?

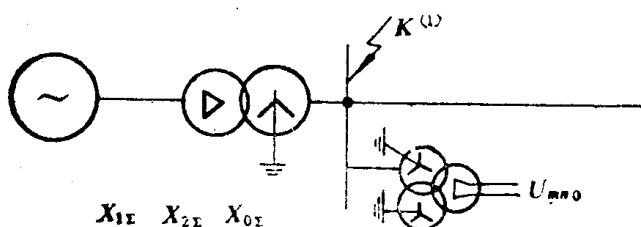


图1-1-17 习题一系统图

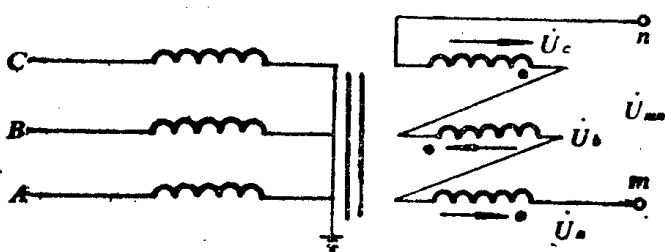


图1-1-18 习题二PT接线图

是多少?

2. 加至输入端 A 、 B 、 C 上的三相电压各是多少伏?

四、图1-1-19所示为一三相式负序电流滤波器的接线图。已知 DKB 上的 $W_3 = \frac{1}{2} W_2$,

$X_c = \sqrt{3} R$ 。当三相都通入正序电流或负序电流时, 试用相量分析法求出加至三相整流桥的

二、某技术工作者在实现零序电压滤波器接线时, 将电压互感器副方开口三角形侧 b 相绕组的极性接反 (如图1-1-18所示), 若已知电压互感器的原方相间电压为 105 千伏, 原方绕组与开口三角形绕组之间的变比为 $n_{PT0} = \frac{110/\sqrt{3}}{1/10}$, 求在正常

情况下 mn 两端的电压。

三、在图 1-1-4 所示负序电压滤波器接线中, 已知 $C_A = 36$ 微法, $C_C = 21$ 微法; 出口端发生两相短路时, 在输入端加入不对称电压的情况下, 用高内阻电压表测得滤波器的输出电压为 75.3 伏。问

1. 接到滤波器上的电阻 R_A 、 R_C 应

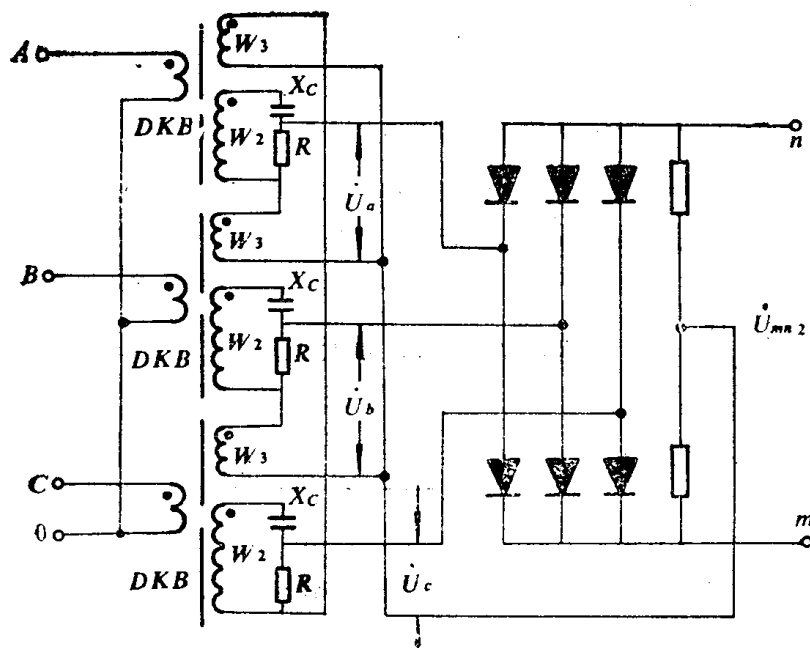


图1-1-19 三相式负序电流滤过器原理图

$$U_{mn}^{(2)} = \frac{1}{3} U_{mn}^{(1)} = 11.3 \text{ 伏};$$

3. 当发生BC两相短路，B、C端子流过2安短路电流时，输出电压 $U_{mn}^{(2)} = 1.34 U_{mn}^{(1)} = 45.8 \text{ 伏}$ 。

六、继电器触发的原理接线图如图1-1-6所示。已知 $E_c = 18 \text{ 伏}$, $E_b = 0 \text{ 伏}$, $K_{\tau e} = 0.9$; 最高工作温度为 55°C ; T_1 、 T_2 均采用3DG6D, $\beta_1 = \beta_2 = 20$ 。试决定 R_1 、 R_2 、 R_3 、 R_4 、 R_p 和 R_f 的大小。

七、图1-1-20为继电保护的出口电路。已知 $E_c = 18 \text{ 伏}$, $E_b = -1.5 \text{ 伏}$; $R_1 = 5 \text{ 千欧}$, 继电器 J 的内阻 $R = 3 \text{ 千欧}$, 三极管 T_1 、 T_2 的放大系数 $\beta_1 = \beta_2 = 30$; 在最高工作温度 60°C 时, $I_{cbo} = 1 \text{ 微安}$ 。试求 R_2 和 R_3 。

八、试设计一延时动作、瞬时返回的时间电路，要求动作时限可在0.5秒~3秒内调整，已知： $E_c = 18 \text{ 伏}$, $E_b = -1.5 \text{ 伏}$ ；原理图如图1-1-9所示；三极管采用3DG6D, $\beta = 50$ ；稳压管采用2CW15, 反向击穿电压 $U_z = 8 \text{ 伏}$ ； C 为47微法，负偏置电阻 $R_6 = 100 \text{ 千欧}$, $R_1 = R_4 = 18 \text{ 千欧}$ 。试决定 R_2 和 R_3 的大小。

九、一时间电路如图1-1-21所示。已知：电容 $C = 47 \text{ 微法}$ ；稳压管 Z 采用2CW15 ($U_z = 8 \text{ 伏}$)；三极管 T 采用3DG6D, $\beta = 30$ ；继电器 J 的内阻 $R = 1 \text{ 千欧}$ 。问：

1. 为使时间能在0.25~0.75秒内可调，电阻 R_1 , R_2 应为多少千欧？

2. 时间电路能否在0.25~1秒内调整？为什么？

电压 \dot{U}_a 、 \dot{U}_b 、 \dot{U}_c 的值。

五、在图1-1-15所示的复合电流 $(I_{A1} + KI_{A2})$ 滤过器的原理接线图中，已知电抗变压器的转移电抗为 X_M ；滤过器的系数 $K = 8$ ；当发生单相接地短路时，在A、0端子上流过的短路电流为2安时，输出电压 $U_{mn}^{(1)} = 34 \text{ 伏}$ 。

试证明：

1. 滤过器输出电压 $\dot{U}_{mn} = (I_{A1} + KI_{A2})(R - \sqrt{3} X_M)$;

2. 当发生三相短路，输入端子A、B、C流入三相对称短路电路流2安时，输出电压为

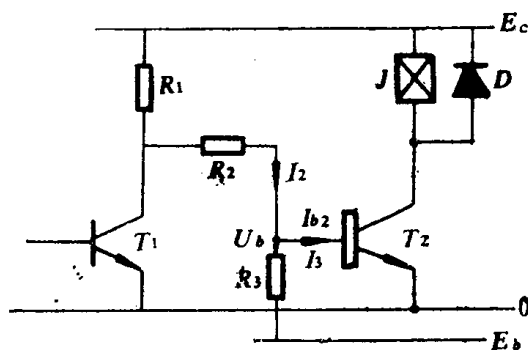


图1-1-20 出口电路原理图

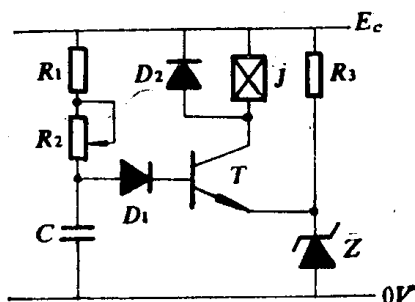


图1-1-21 习题九的时间电路

继电

②

十、根据图1-1-22所示逻辑图绘出相应的晶体管电路图和接点电路图。

思考题

- 1、电压互感器与电力变压器有何异同之处？
- 2、电压互感器和电流互感器在作用原理上有什么主要差别？

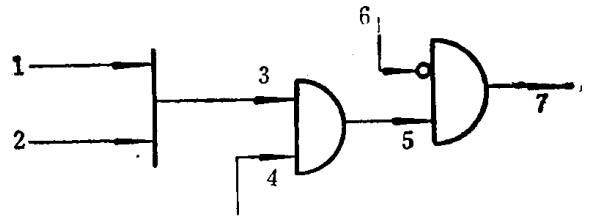


图1-1-22 复合逻辑电路图

- 3、电压变换器、电流变换器和电抗变压器的作用是什么？在使用上各有什么特点？
- 4、何谓电流互感器的10%误差曲线？它是如何作出的？
- 5、PT、CT的暂态过程对保护有什么影响？
- 6、对称分量滤过器的基本原理是什么？继电保护为什么要采用它？
- 7、零序电流和零序电压是用什么方法取得的？
- 8、负序电压可以用哪些方法取得？试绘出它的原理图，并用相量图分析它的工作原理。
- 9、试用相量图证明，将负序电压滤过器的三相输入电压任两相对换，即可得到正序电压滤过器。

10、试用相量图分析图1-1-23所示负序电流滤过器的作用原理，并说明电容C的相位误差补偿作用。已知 $W_0 = 1/3W_A$ ； $W_B = W_C$ 。

11、试证明图1-1-4所示负序电压滤过器的参数必须满足条件： $R_A = \sqrt{3}X_A$ ， $X_C = \sqrt{3}R_C$ 。

12、在图1-1-4中，若 $R_A \neq \sqrt{3}X_A$ 或 $X_C \neq \sqrt{3}R_C$ ，它的输出电压 U_0 是什么电压？它在继电保护电路中有什么作用？

13、在图1-1-4所示负序电压滤过器的接线中，为了

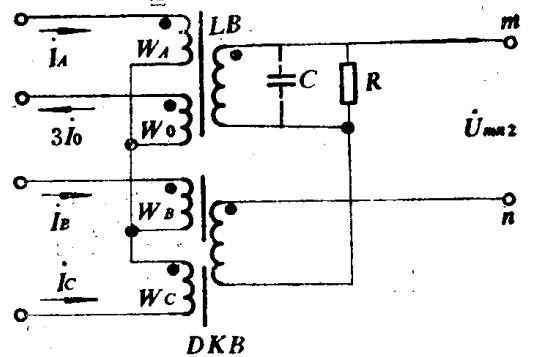


图1-1-23 负序电流滤过器的原理图

使 \dot{U}_0 落后 $\dot{U}_{A2} 90^\circ$ ，三相输入电压应如何接入？

14、在图1-1-24所示负序电流滤过器接线中，当分别通入正序、负序电流时，试用相量图分析其输出电压 \dot{U}_{mn2} ，并说明电阻 R_C 的作用。

15、在图1-1-25所示零序电流滤过器接线中，若有一相CT副方的极性接错，正常运行时，中性线上有无电流？若一相CT副方断线呢？

16、什么叫继电特性？什么叫继电触发器？

17、改变继电触发器的反馈电阻对继电特性有什么影响？

18、继电触发器和零指示器有什么区别？

19、在继电保护中，常用的时间电路有几类？试根据分类情况绘出它们的特性图和符号图。

20、放电式和充电式时间电路各有什么优缺点？

21、继电保护电路中常用的门电路有哪几种？试绘出它们的符号图。

22、出口电路的作用是什么？在构成保护装置时应满足哪些要求？

23、何谓无触点出口电路和有触点出口电路？各有什么优缺点？

24、信号回路的作用是什么？对它有什么要求？为什么？

25、试证明正逻辑或门电路就是负逻辑与门电路，正逻辑与门电路就是负逻辑或门电路。

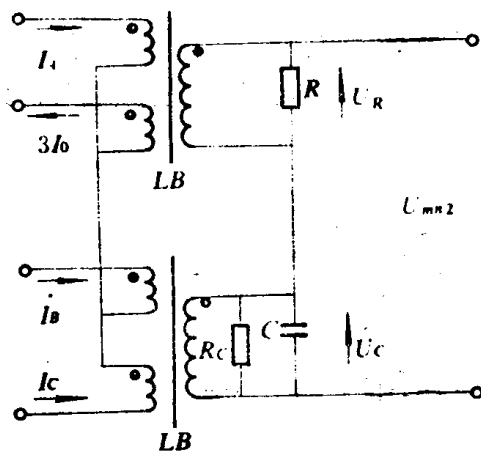


图1-1-24 负序电流滤过器的原理图

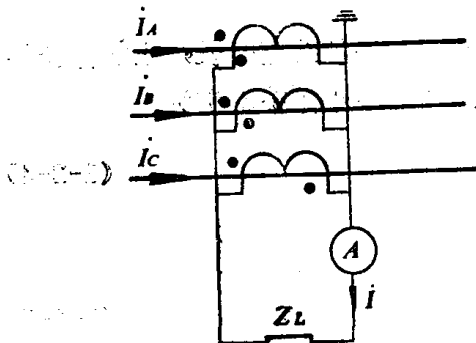


图1-1-25 零序电流滤过器的接线