

发 电 机 变 压 器 母 线

晶 体 管 继 电 保 护 装 置

机 械 工 业 出 版 社

本书主要讨论大型发电机、变压器和超高压母线的晶体管继电保护装置，全书共分十三章，对各种保护装置的工作原理和装置特点进行了分析，对各种故障发生的原因作了叙述，推荐采用各种合适的保护方式，并列出实际装置的原理线路图。

本书可供继电保护专业人员和高等院校有关专业的师生参考。

**发电机变压器母线
晶体管继电保护装置**

许昌继电器研究所 等编
清华大学电机工程系

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南里一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 $15 \frac{1}{2}$ · 字数 376 千字

1983 年 10 月北京第一版 · 1983 年 10 月北京第一次印刷

印数 00,001—10,000 · 定价 1.95 元

*

统一书号: 15033 · 5483

前 言

为了适应国民经济发展的需要,采用大容量机组和超高压输电是一个重要的方面。晶体管继电保护装置由于其动作快、灵敏度高、体积小、重量轻、调试方便、抗震性好等优点,我国正在逐步推广使用。本书专门介绍大型发电机、变压器的晶体管继电保护装置和新近研制的半周波母线保护装置,还讨论了晶体管保护的巡回检测和抗干扰问题。

本书是最近几年许昌继电器研究所和兄弟单位合作科研成果的总结,有关继电保护和晶体管的基础知识不在本书介绍。本书的读者对象为具有一定理论水平和实践经验的专业设计和运行人员,也可作为高等院校有关专业的教学参考书。

本书编写人员有:许昌继电器研究所的周慧新、何光华、钟锡龄、涂东泽、陈祥霖、王孝纾、杜桂娥、陈爱钦、陈汉中、杨国翊等同志;广西水电局设计院李健宗同志和清华大学电机工程系王维俭同志。

本书在编写过程中还得到许多兄弟单位的大力支持和帮助,在此向他们表示衷心的感谢。

由于我们水平有限,而且这方面的科研工作尚在发展中,因此,难免有错误或不足之处,请读者提出宝贵意见。

目 录

绪论	1	§ 3-9 变压器差动保护防止涌流误动的方案	65
第一章 发-变组定子接地保护装置	2	§ 3-10 谐波制动的变压器差动保护	68
§ 1-1 定子绕组单相接地故障	2	§ 3-11 变压器纵联差动保护的整定	71
§ 1-2 定子接地故障电流的分析和发电机中性点接地方式	2	第四章 发电机定子绕组的匝间短路保护装置	73
§ 1-3 最简单的发-变组定子接地保护——零序电压保护	4	§ 4-1 定子绕组匝间短路故障和断线故障	73
§ 1-4 100%定子接地保护的方案综述	6	§ 4-2 匝间短路故障的电量分析	73
§ 1-5 双频式 100%定子接地保护	10	§ 4-3 匝间短路保护灵敏度的分析	75
§ 1-6 经电弧电阻 R_{fd} 接地时定子接地故障分析	18	§ 4-4 单元件式横差保护	77
§ 1-7 利用三次谐波电压的 100%定子接地保护装置的灵敏度提高问题	21	§ 4-5 零序电压原理的匝间短路保护	81
第二章 发电机转子回路接地保护装置	26	第五章 主变零序接地保护装置	82
§ 2-1 转子回路接地故障及其对发电机的危害	26	§ 5-1 主变零序接地保护的作用	82
§ 2-2 转子一点接地保护方案的综述	26	§ 5-2 两台以上变压器并联运行时的保护要求	82
§ 2-3 测量转子回路对地导纳的转子一点接地保护	30	§ 5-3 零序接地保护装置	84
§ 2-4 原有转子二点接地保护存在的问题	36	§ 5-4 利用中性点放电间隙的主变零序接地保护装置	86
§ 2-5 汽轮发电机转子回路二点接地故障时的定子电压二次谐波分析	37	第六章 发电机的异常运行分析及其保护要求	89
§ 2-6 BD-14 型汽轮发电机转子二点接地保护	44	§ 6-1 发电机正常运行边界	89
第三章 发电机变压器纵联差动保护装置	50	§ 6-2 发电机异常运行状态的保护装置	93
§ 3-1 发电机的相间故障	50	第七章 发电机的反时限过流保护装置	94
§ 3-2 纵联差动保护的基本原理	51	§ 7-1 概述	94
§ 3-3 防止外部故障误动作的措施	52	§ 7-2 发电机承受负序电流能力的判据	95
§ 3-4 发电机纵联差动保护装置	54	§ 7-3 负序反时限过流保护	101
§ 3-5 比例制动式发电机纵联差动保护的整定	56	§ 7-4 定子过负载保护	107
§ 3-6 变压器纵联差动保护的特点	59	§ 7-5 转子过负载保护	110
§ 3-7 单相变压器励磁涌流的产生原因及特性	59	第八章 低励磁保护装置	112
§ 3-8 三相变压器的励磁涌流	60	§ 8-1 发电机低励磁运行对发电机和系统的危害	112
		§ 8-2 失磁过程的物理现象和失磁时机端阻抗轨迹的分析	113
		§ 8-3 失磁试验资料分析	118
		§ 8-4 失磁保护继电器-容性阻抗继电器	124

§ 8-5 汽轮发电机静稳极限特性的确定.....128	连接元件电流的区别164
§ 8-6 水轮发电机静稳极限特性的确定.....131	§ 11-4 对母线保护装置的基本要求167
§ 8-7 反应发电机静稳极限特性的阻抗继电器.....134	§ 11-5 母线保护的构成原理167
§ 8-8 反应系统电压的三相低电压继电器.....136	§ 11-6 各元件电流相位比较母线保护 ...169
§ 8-9 系统振荡和外部短路时低励磁保护的误动作及其对策.....137	§ 11-7 相位比较制动差电流母线保护 ...176
§ 8-10 转子低电压元件在系统振荡、外部故障和低励磁状态下的动作分析及整定原则141	§ 11-8 半周波动作的电压差动母线保护180
§ 8-11 低励磁保护在水轮发电机和调相机上的应用148	§ 11-9 半波动作的电流差动母线保护187
第九章 发-变组后备保护装置150	§ 11-10 母线的附加保护.....191
§ 9-1 后备保护的任任务.....150	§ 11-11 双母线保护.....194
§ 9-2 系统分析实例.....150	§ 11-12 单母线、分段单母线和 1.5 断路器母线保护.....198
§ 9-3 后备保护方案的讨论.....152	§ 11-13 BMH 型母线保护装置199
§ 9-4 发-变组后备阻抗保护152	第十二章 继电保护巡回检测装置 207
第十章 逆功率保护装置155	§ 12-1 概述207
§ 10-1 概述155	§ 12-2 检测的几种形式207
§ 10-2 逆功率继电器155	§ 12-3 手动检测和自动检测209
第十一章 高压和超高压母线的晶体管母线保护装置 160	§ 12-4 交流检测的几种方式210
§ 11-1 概述160	§ 12-5 直流检测的几种方式212
§ 11-2 电流互感器暂态过程引起铁心饱和和对母线保护的影响161	§ 12-6 ZBX-1 型保护巡检装置(无触点).....213
§ 11-3 电流互感器差回路电流与母线各	§ 12-7 ZBX-2 型保护巡检装置(有触点)222
	第十三章 提高晶体管继电保护装置的可靠性 229
	§ 13-1 二次回路的干扰电压229
	§ 13-2 弱电元件的质量和寿命239
	§ 13-3 回路设计和制造工艺240

绪 论

由于技术和经济的原因，世界各国电力系统中单机容量迅速增大，一些主要的工业国家，单机容量的增长速度超过了系统总容量的增长速度，大型机组在电力系统中的比重显著提高，因此大容量发电机、变压器和母线的安全运行将直接影响着电力系统的安全。

大型机组的显著特点是热容量裕度相对减小，这是采用新型冷却方式和不断提高材料利用率的结果。大型机组的新型继电保护装置必须为这些机组提供可靠的保护，例如负序反时限保护、定子和转子的反时限过负载保护等。

大型机组的直径由于制造上的困难不能太大，随着单机容量的增大，势必增加轴向长度，这就会加大振动，加速绝缘磨损，增加了发生定子绕组单相接地故障和转子一点接地故障的可能性，因此对大型机组要求有更完善的定子和转子的接地保护。

发电机的电抗参数随着容量增大而增大，因此大型机组的保护装置必须用更大的注意力防止稳定运行的破坏。

机组容量越大，它在系统中的地位就越重要，对保护装置在可靠性、快速、灵敏度等方面的要求就越高，这促使大型机组保护的新原理新装置不断产生，同时使原有的机组保护装置的性能不断完善。

本书编写方法是从电量分析入手，弄清正常情况和故障情况下电量的不同特征，导出各种保护的判据，最后介绍相应的保护装置。由于大型机组保护装置的研究工作还在进一步深入开展，因此本书所介绍的一些保护装置仅为上阶段科研试制工作成果的总结，希望对正在运行或设计大型机组保护的同志有所帮助。

第一章和第二章讨论故障电流小的定子和转子接地保护；第三章、第四章和第五章讨论故障电流大的相间和匝间短路保护，也包括了主变高压侧接地保护；从第六章起到第十章讨论发电机的异常运行和相应的各种保护；第十一章专门介绍了各种母线的保护方案和装置。为提高晶体管继电保护的可靠性，第十二章讨论了巡回检测装置，第十三章讨论了抗干扰问题和一些与提高可靠性有关的措施。

第一章 发-变组定子接地保护装置

§ 1-1 定子绕组单相接地故障

定子绕组的单相接地是最常见的发电机内部故障，主要是由于绕组对地（铁心）绝缘的损坏引起的。

单相接地对发电机的危害主要表现在故障点电弧将进一步扩大定子线圈绝缘损坏的范围，如及时发现，将发展成严重的相间或匝间短路，同时铁心也会被电弧严重烧伤，铁心的烧伤程度与接地故障点的电容电流大小及持续时间的长短有关。以前曾以 5 安作为标准，认为接地故障电流超过 5 安时铁心将严重烧伤，为此必须使接地保护动作用于立刻跳闸；在 5 安以下时，铁心烧伤很轻微，容易修复，因此接地保护仅仅反映于信号。实际运行经验证明：即使接地故障电流超过 5 安，如果持续时间很短，铁心损坏也很轻；反之，即使接地故障电流小于 5 安，如果不及时处理，持续时间过长，铁心也会严重损坏。

大型机组采用轴向冷却通道，它的定子铁心结构复杂，修复比径向冷却通道的中小型机组困难得多。从这一观点出发，大型机组定子接地故障电流应限制在一个较小的数值，例如以定子铁心两层叠片不致因故障电弧而烧接在一起为准则，则接地电流不应超过 1.0~1.5 安，在这样小的故障电流作用下，铁心根本不用检修。

§ 1-2 定子接地故障电流的分析和发电机中性点接地方式

在中性点不接地的发电机中，定子单相接地故障电流是经过定子绕组和其它元件对地电容而流通的（图 1-1），因此要知道接地故障电流的大小，就必须先知道这些电容的大小。

汽轮发电机定子绕组三相对地电容为

$$3C_f = \frac{\epsilon_r Z_1 (Zh_1 + b_1) l \times 10^{-5}}{36 \pi \Delta} \mu F \tag{1-1}$$

式中 ϵ_r 为介质系数 ($\epsilon_r = 4 \sim 5$)； Δ 为定子线棒绝缘厚度； Z_1 为定子槽数； h_1 为定子槽高； b_1 为定子槽宽； l 为定子铁心长度。

以国产 QFS-300-2 型 30 万千瓦汽轮发电机为例，

$$Z_1 = 54, h_1 = 5.75 \text{cm}, b_1 = 3.22 \text{cm}, l = 542 \text{cm}, \Delta = 0.60 \text{cm}$$

$$3C_f = (4 \sim 5) \frac{54 \times (2 \times 5.75 + 3.22) \times 542 \times 10^{-5}}{36 \pi \times 0.60} = 0.254 \sim 0.318 \mu F$$

对于低转速的水轮发电机，可按下式计算

$$3C_f = \frac{KS^{3/4}}{(U_e + 3600)n^{1/3}} \mu F$$

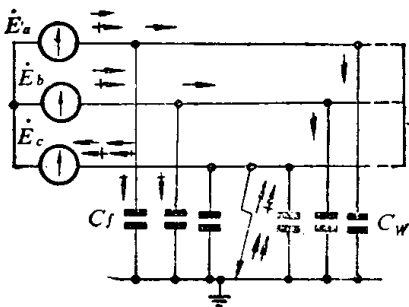


图1-1 发电机定子单相接地故障电流回路

C_f —发电机定子绕组每相对地电容
 C_w —外接元件每相对地电容

式中 S 为发电机容量 (千伏安); U_e 为发电机额定线电压 (伏); n 为转速 (转/分); K 为决定于绝缘等级的系数, 对于 B 级绝缘, 当温度为 25°C 时, $K \approx 40$ 。

知道电容以后, 接地故障电流可以从图 1-1 来确定, 假设 C 相机端发生接地故障, 则 C 相电容的电压为零, 即没有电流通过; 此时 A 相电容电压为 $\dot{E}_a - \dot{E}_c$, 相应的接地电流为

$$\dot{I}_a = \frac{\dot{E}_a - \dot{E}_c}{-j\frac{1}{\omega C_f}} = j\omega C_f(\dot{E}_a - \dot{E}_c)$$

同理,

$$\dot{I}_b = j\omega C_f(\dot{E}_b - \dot{E}_c)$$

接地点故障电流是 I_a 和 I_b 的总和, 所以接地电流为

$$I_d = |\omega C_f[(\dot{E}_a - \dot{E}_c) + (\dot{E}_b - \dot{E}_c)]| = |\omega C_f(\dot{E}_a + \dot{E}_b + \dot{E}_c - 3\dot{E}_c)|$$

即

$$= |\omega C_f(-3\dot{E}_c)| = 3\omega C_f E_\phi$$

$$I_d = 3\omega E_\phi C_f$$

(1-2)

上例

$$E_\phi \approx \frac{18}{\sqrt{3}} \times 10^3 \text{ V}$$

$$3C_f = 0.254 \sim 0.318 \mu\text{F}$$

$$I_d = 0.845 \sim 1.04 \text{ A}$$

国产 60 万千瓦汽轮发电机的单相接地电流 (包括外接电容) 约为 3.6~4.2 安。考虑到机组大, 为确保定子铁心不受损伤, 应该使接地故障电流尽量减小 (例如减到 1.0~1.5 安), 这样做的好处是: 由于接地故障电流小, 允许发生接地故障后继电保护只发出信号而不需跳闸, 等到负荷转移后再行停机, 以避免突然切除大机组而造成的系统波动。

减小故障电流, 在很大程度上也减少了发展为严重故障 (相间或匝间短路) 的可能性。

接地故障后, 由于故障电流小, 发电机损坏

小, 因此检修快, 停电时间短。

这些好处大大超过为减小故障电流而增加的设备费用。

为了减小故障电流, 通常在发电机中性点与地之间增设一个电感线圈 (消弧线圈), 即发电机以消弧线圈接地方式运行。在正常工作时, 由于发电机中性点对地电位为零, 消弧线圈没有作用, 在发电机发生接地故障 (见图 1-2) 时, 中性点对地电位 (零序电压) 为

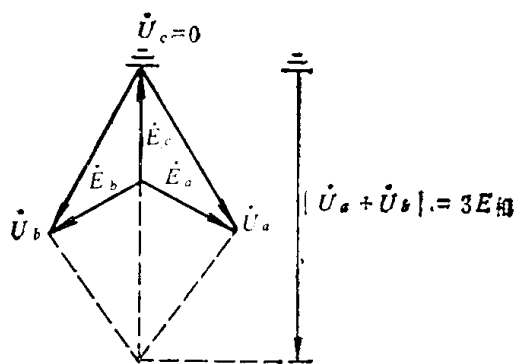


图1-2 机端单相接地时, 中性点对地电位

$$|\dot{U}_0| = \left| \frac{1}{3} (\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c) \right| = \left| \frac{1}{3} (\dot{U}_a + \dot{U}_b) \right| = \left| \frac{1}{3} \times 3E_\phi \right| = E_\phi$$

$$U_c = 0 \text{ (c 相接地)}$$

这个 $U_0 = E_\phi$ 的电压就作用在消弧线圈上, 产生了接地故障点的电感性电流。

$$I_L = \frac{E_\phi}{\omega L}$$

(1-3)

中性点经消弧线圈接地的发电机, 发生接地故障后的接地电流就是式 (1-2) 的电容电流与式 (1-3) 的电感电流之差, 这个差值应在 1.0~1.5 安以下。

顺便指出, 为了防止发电机定子三相回路的容抗和消弧线圈的感抗在数值上相等而发生串联谐振, 并由此引起的谐振过电压, 对汽轮发电机来说, 一般应选择适当的消弧线圈的电感 L , 使

$$I_L < 3\omega E_\phi (C_f + C_w)$$

这叫做欠补偿方式, 其所以这样选择, 是因为发电机对地电容 C_f 随温度升高而增大, 当我们按上式来决定 I_L 和选择 L 时, 上式中的 C_f 应取发电机的冷态数值, 这样在发电机带负载运行时, C_f 数值增大, 更不会造成串联谐振; 此外欠补偿方式的发电机中性点电压比过补偿方式要小些。若考虑切除个别外接元件, 会使 C_w 减小, 为不致造成串联谐振, 也有采用过补偿方式的。但大型发电机均为单元接线, C_w 变化很小宜采用欠补偿方式。

国外广泛采用发电机中性点经配电变压器接地的方式, 它有利于减小过电压, 但增大了接地电流。

§ 1-3 最简单的发-变组定子接地保护——零序电压保护

当定子绕组的某一相的任意一点发生接地故障时, 发电机中性点电位就要发生偏移, 即产生零序电压 U_0 , 这个电压有多大将说明如下:

图 1-3 中设 a 相绕组离中性点 α 处发生接地 (α 为由中性点至接地点的匝数占每相绕组总匝数的百分数), 由图 1-4 可知

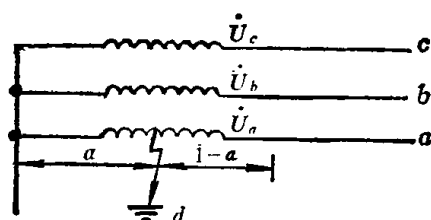


图1-3 定子绕组某一相的任意一点发生接地故障

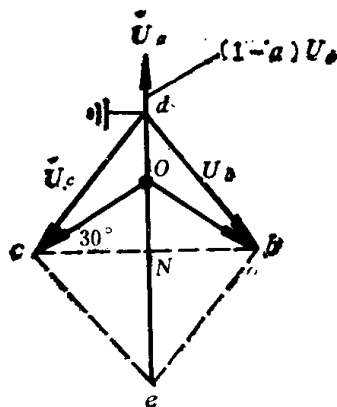


图1-4 图1-3的零序电压向量图

$$|\dot{U}_a| = (1 - \alpha) U_\phi \quad |\dot{U}_b| = \overline{db} = |\dot{U}_c| = \overline{dc}$$

作 $ce \parallel db$, $be \parallel dc$, 则 $\square dceb$ 为一菱形, 因此

$$cb \perp de, \text{ 且 } \overline{N_e} = \overline{dN}, \text{ 得}$$

$$|\dot{U}_b + \dot{U}_c| = \overline{de} = \overline{dO} + \overline{ON} + \overline{Ne} = 2(\overline{dO} + \overline{ON})$$

今

$$\overline{dO} = \alpha U_\phi \quad \overline{ON} = U_\phi \sin 30^\circ = \frac{1}{2} U_\phi$$

所以

$$|\dot{U}_b + \dot{U}_c| = 2 \left(\alpha + \frac{1}{2} \right) U_\phi$$

由对称分量原理得零序电压为

$$U_0 = \frac{1}{3} |\dot{U}_a + \dot{U}_b + \dot{U}_c| = \frac{1}{3} |1 - (1 - \alpha) U_\phi + 2 \left(\alpha + \frac{1}{2} \right) U_\phi| = \frac{1}{3} |3\alpha U_\phi|$$

即

$$3U_0 = 3\alpha U_\phi \quad (1-4)$$

可见在机端接地时 $\alpha = 1$, $3U_0 = 3U_\phi$ (电压互感器开口三角输出 100 伏);
在中性点接地时 $\alpha = 0$ $3U_0 = 0$ (电压互感器开口三角输出 0 伏);
在绕组的二分之一处接地时, $\alpha = 0.5$, $3U_0 = 1.5U_\phi$ (电压互感器开口三角输出 50 伏)。
单相接地位置与 $3U_0$

(二次电压) 的关系见图 1-5。

最简单的定子接地保护乃基于接地故障时产生零序电压这一原理。装置很简单, 只要一个过电压继电器接在机端电压互感器开口三角副绕组上即可, 也可以接在发电机中性点的单相电压互

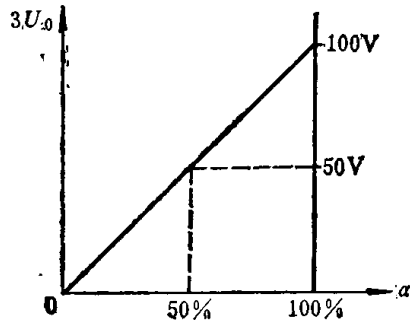


图1-5 单相接地位置与 $3U_0$ (二次电压) 的关系

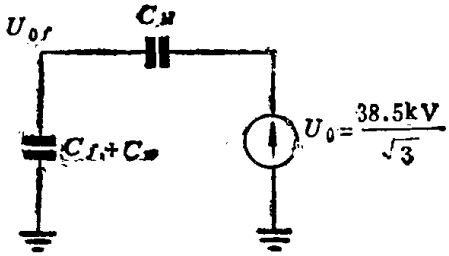


图1-6 高压侧发生接地故障时, 发电机侧零序电压

感器上, 因为单相接地故障电流在定子绕组中引起的压降, 完全可以略去不计, 这样发电机机端的零序电压就和中性点的零序电压一样了。保护装置的動作电压应该符合下列规定:

1. 当高压侧 (系统中性点不接地) 发生接地故障时, 大于发电机侧的零序电压 U'_{0f} , 这个电压可以分析计算如下。

例如在图 1-6 中 38.5 千伏侧发生单相接地故障, 故障点零序电压 U_0 应该等于相电压 $\frac{38.5 \text{ 千伏}}{\sqrt{3}}$, 高压侧的零序电压通过变压器高低压绕组间的耦合电容 C_M 传到发电机侧, 发电机侧零序电压 U'_{0f} 的大小将由 C_M 和 $C_f + C_w$ 的大小决定。

由图 1-6 可得

$$U'_{0f} = \frac{C_M}{C_f + C_w + C_M} U_0$$

变压器绕组间耦合电容 C_M 可粗略地求出

$$C_M = K_M \sqrt{S_B} \times 10^{-4} \mu\text{F/相} \tag{1-5}$$

式中 系数 $K_M = 5.5(35\text{kV})$, $5.3(110\text{kV})$, $5.2(154\text{kV})$, $4.7(220\text{kV})$, $3.8(330\text{kV})$; S_B 为变压器三相容量 (MVA)。以 10.5/38.5kV、31.5MVA 的升压变压器为例,

$$C_M \approx 5.5 \sqrt{31.5} \times 10^{-4} = 0.003 \mu\text{F/相}$$

已知 $C_f + C_w = 0.16 \mu\text{F/相}$, 所以

$$U_{0f} = \frac{0.003}{0.16 + 0.003} \times \frac{38.5}{\sqrt{3}} = 0.41 \text{ kV}$$

在发电机机端电压互感器开口三角绕组输出的二次零序电压为

$$3U'_{0f} = 0.41 \times \frac{100/3}{10.5/\sqrt{3}} \times 3 = 6.75 \text{ V}$$

式中 $\frac{100}{3}$ 伏 / $\frac{10.5}{\sqrt{3}}$ 千伏是电压互感器原边对开口三角副边的变比, 因此发电机机端单相接地时一次零序电压为 $\frac{10.5}{\sqrt{3}}$ 千伏, 开口三角绕组输出电压为 3 倍的 $\frac{100}{3}$ 即 100 伏。

如果系统中性点直接接地,则高压侧发生单相接地故障时,将有很大零序电流,此时系统的零序电流保护装置很快动作以切除故障,发电机的定子接地保护(一般带有延时,其时限的大小应与系统接地保护配合)不会误动作,只有在某些特殊情况下,例如当变压器高压侧套管闪络接地时,定子接地保护才可能误动(详见§1-5)。

如果发电机切除而变压器继续运行,这时 C_f 没有了,由公式(1-5)可知 U'_{0f} 将很大,为此应在切除发电机的同时退出定子接地保护,亦即应该将定子接地保护用的电压互感器接在发电机机端,而不是接在变压器的低压绕组侧,这样做可使发电机与电压互感器同时切除。

2. 在正常运行时,机端电压互感器开口三角绕组就有几伏不平衡电压,其波形主要为三次谐波电压,其次为基波和其它高次谐波。产生三次谐波电压的主要原因是发电机气隙磁场中含有三次谐波分量。因为三次谐波电压不影响发电机线电压的波形,因此在设计和制造发电机时较多地考虑消除五次七次谐波,较少注意三次谐波。总之每台发电机总是有少量的三次谐波电压 U_3 存在,其数量一般不超过10%,水轮发电机比汽轮发电机要大些(详细分析见附录)。

零序电压原理的定子接地保护装置动作值应为

$$U_{d.z} = 3 \cdot K_k \sqrt{U'_{0f}{}^2 + U_3^2} \quad (1-6)$$

式中 U_3 为发电机正常运行中三次谐波电压的二次值; U'_{0f} 为系统侧单相接地故障时发电机侧零序电压的二次值。

K_k 是可靠系数,一般可取1.3~1.5。

根据式(1-6),整定的 $U_{d.z}$ 值通常为15~30伏,假设 $U_{d.z} = 20$ 伏,由公式(1-4)知道,当发电机在距中性点20%的地方($\alpha = 20\%$)发生单相接地故障,故障零序电压为20伏,保护装置处于动作边缘,因此有20%的死区。 $U_{d.z} = 15 \sim 30$ 伏,保护死区就有15~30%那么大。

对于中性点附近15~30%的定子接地保护死区,以前认为是没有关系的,因为发电机定子绕组是全绝缘的(机端和中性点绝缘强度一样),而中性点附近经常承受的电压很低,因此不会在中性点附近发生接地故障。但是近几年来,国内外运行经验都证明,由于机械损伤或水内冷绕组的漏水等原因,发电机中性点附近是有可能发生接地故障的。特别需要提出的是当中性点附近某点绝缘已破坏或接近破坏而未被发现时,若在机端附近又发生一点接地故障,中性点电位骤然升至额定相电压,将导致发电机定子绕组两点接地的严重故障。因此各国都在研制新型的100%定子接地保护装置。

对于一般容量不太大的发电机,如果采用很好的三次谐波阻波电路,零序电压保护可达95%的保护区,简单可靠。

§ 1-4 100%定子接地保护的方案综述

消除原有定子接地保护死区的方案大致有三类:

1. 在发电机或电压互感器的中性点附加直流电压

如图1-7所示,直流电源取自机端电压互感器YH的二次电压,经整流变压器ZB和全波整流桥和滤波元件(C_2)后加到电压互感器一次中性点和地之间。在发电机正常运行时,

由于没有通路，继电器 J 中没有电流流过；当发电机定子回路发生一点接地故障时，上述直流电压将使直流电流流经继电器 J 并使之动作。

图 1-7 中的 FX(放电间隙)和 WY(稳压管)都是起阻止过电压作用的。

为了在 YH 一次熔丝熔断时防止中性点出现零序电压，及由此引起的误动，附加了电感 L 和旁路电容 C₃以阻止交流分量通过继电器。C₁为隔离电容。

这一方案的突出优点是既简单，又灵敏。当然灵敏度受正常运行时绝缘电阻水平的限制，例如在水内冷发电机中，灵敏度就不能很高。经初步分析，此方案还存在以下两方面的问题：

(1) 对于发电机中性点接消弧线圈的情况，消弧线圈必须经隔直电容接地，后者的电容应足够大，使消弧线圈仍起补偿的作用，这时隔直电容的容量(伏安数或 $U_{\text{相}}^2 \omega C$)比较大。另一种办法是在消弧线圈与地之间增设可控硅开关电路。正常运行时，消弧线圈被开关电路断开，发电机中心点按不接地方式运行。在发生一点接地故障时，可控硅开关电路自动接通，消弧线圈仅起补偿电容电流的作用。但这样做相当严重地影响了一次运行的可靠性，而且原有简单优点也被部分抵消。

由于电压互感器一次中性点不接地，因此这组 YH 就很难测量各相对地电压了。

(2) 应该考虑在发电机定子单相接地故障时另外两相对地电压骤然升高 $\sqrt{3}$ 倍。这将使 YH 的两个健全相可能发生激磁涌流现象，在隔离电容 C₁上产生过电压，特别是在发电机经电弧发生间歇性接地故障时，电容 C₁上的过电压数值和持续时间可能相当大。为此有人建议增设一个电阻，并使之在发生上述过电压时自动地与 C₁并联。但是，这样做将使保护装置进一步复杂化。因此这不是可取的方法。

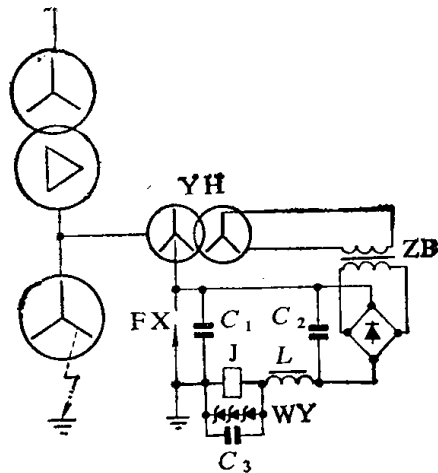


图1-7 附加直流电源的100%定子接地保护装置

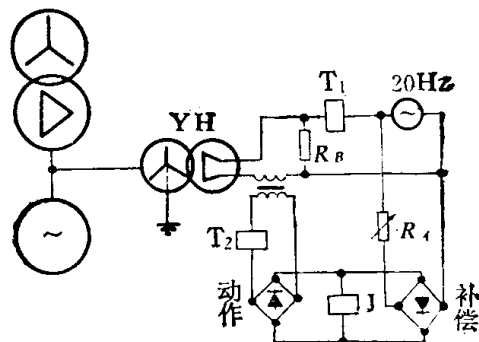


图1-8 附加低频电压（20赫）的100%定子接地保护装置
T₁T₂为20赫带通滤波器 J 为继电器

此外，一次与二次回路存在电气上的直接联系，这也给人以不够安全的感觉。

2. 附加非工频（20 赫，25 赫或 100 赫等）交流电源

如图 1-8 所示，附加 20 赫电压接入电压互感器的开口三角副绕组，形成 20 赫零序电源。

正常运行时，20 赫零序电源由 YH 原绕组经发电机三相对地电容构成回路，产生不大的 20 赫零序不平衡电流，为使继电器 J 不动作，可以调节电位器 R₁产生 20 赫补偿电流，使其等于不平衡电流，这时二组整流桥形成环流而继电器 J 没有电流流过。

当发电机定子回路任何一点接地时，20 赫回路阻抗变小，动作电流大于补偿电流，继电器 J 动作。

这种方案能达到保护无死区的要求，灵敏度也要受发电机正常运行时绝缘电阻水平的限制，能适用于发电机中性点各种实际的接地方式。但是需要附加非工频电源，因此保护装置的可靠性还受附加电源的影响（100 赫附加电源由 50 赫电压全波整流取得，比 20 或 25 赫电源简单些）。

3. 利用发电机固有的三次谐波电压。如前所述，所有发电机一定有少量三次谐波电势（ E_3 ）。在正常运行中，在机端有三次谐波电压 U_{3W} ，在中性点有三次谐波电压 U_{3n} 。

发电机中性点绝缘时的三次谐波等值电路如图 1-9 所示，且有

$$\frac{U_{3W}}{U_{3n}} = \frac{C_f}{C_f + 2C_w} \quad (1-7)$$

由式 (1-7) 可知，在正常运行情况下恒有

$$U_{3W} \leq U_{3n} \quad (1-8)$$

若发电机中性点经消弧线圈接地（图 1-10），假设消弧线圈电感为完全补偿方式，即

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad C = 3(C_f + C_w)$$

由图 1-10 可推出

$$\frac{U_{3W}}{U_{3n}} = \frac{7C_f - 2C_w}{18(C_f/2 + C_w)} \quad (1-9)$$

当 $C_w = 0$ 时有

$$\frac{U_{3W}}{U_{3n}} = 7/9 \quad (1-10)$$

所以

$$U_{3W} \leq \frac{7}{9} U_{3n} \quad (1-11)$$

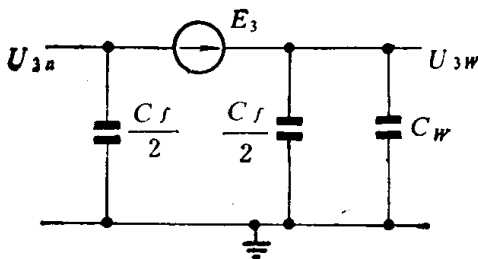


图1-9 中性点绝缘时三次谐波电压等值线路图

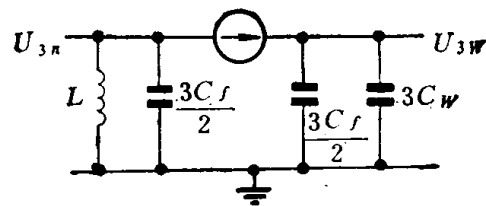


图1-10 中性点经消弧线圈接地时三次谐波电压等值线路图

可见，在正常运行情况下，机端三次谐波电压 U_{3W} 总是小于中性点三次谐波电压 U_{3n} 的。

当发电机定子绕组内部距中性点 $\alpha\%$ 处发生金属性单相接地时，不管中性点是消弧线圈接地或不接地，恒有（如图 1-11 所示）

$$U_{3n} = \alpha E_3 \quad (1-12)$$

$$U_{3W} = (1 - \alpha) E_3 \quad (1-13)$$

当中性点发生金属性接地故障时，

$$U_{3n} = 0$$

$$U_{3W} = E_3$$

当机端发生金属性单相接地故障时，

$$U_{3n} = E_3$$

$$U_{3W} = 0$$

当发电机内部定子绕组中点（ $\alpha = 50\%$ ）发生金属性单相接地故障时，

$$U_{3n} = U_{3W} = 0.5E_3$$

由以上分析可知，若取定子接地保护装置的动作电压 U_{dz} 为

$$U_{dz} = U_{3W}$$

而制动电压为

$$U_{zd} = U_{3n}$$

则当接地故障发生在 $\alpha \leq 0.5$ 处时， $U_{dz} \geq U_{zd}$ ，此时保护装置动作，这就消除了原有定子接地保护的死区。

由附录 7 知道， U_{3W} 和 U_{3n} 的大小将随运行方式的改变而改变，因此国内外有些人曾误认为不能以三次谐波电压为保护动作因素。实际上我们并非孤立地使用 U_{3n} 或 U_{3W} 的大小，而是将 $|U_{3n}|$ 与 $|U_{3W}|$ 进行比较，

若 $|U_{3W}| > |U_{3n}|$ ，即 $\frac{|U_{3W}|}{|U_{3n}|} > 1$ ，则保护动作；

若 $|U_{3W}| \leq |U_{3n}|$ ，即 $\frac{|U_{3W}|}{|U_{3n}|} \leq 1$ ，则保护制动。

比值 $\frac{|U_{3W}|}{|U_{3n}|}$ 是基本不随运行方式而变化的。例如一台发电机的实测数据见表 1-1；

表 1-1

P (MW)	Q (Mvar)	U_{3W} (V)	U_{3n} (V)	U_{3W}/U_{3n}	P (MW)	Q (Mvar)	U_{3W} (V)	U_{3n} (V)	U_{3W}/U_{3n}
5	0	1.98	2.58	0.767	62	0	3.02	4.00	0.755
7	30	2.12	2.76	0.767	63	30	2.8	3.74	0.755
9	60	2.10	2.72	0.770	63	60	2.58	3.48	0.743
12	90	2.04	2.66	0.767	62	90	2.24	3.02	0.743
32	0	2.38	3.14	0.759	85	0	3.42	4.50	0.760
41	30	2.44	3.28	0.745	85	30	3.24	4.36	0.743
44	60	2.34	3.12	0.761	87	60	3.00	4.04	0.743
45	90	2.20	3.00	0.735	87	90	2.74	3.72	0.736

上述三种保护方案都能达到保护无死区的目的，利用发电机固有三次谐波电压的保护方案不需要外加电源，因此比较简单可靠。但是这种方案的保护装置灵敏度不能太高，一般在发电机中性点附近经几千欧过渡电阻接地时保护装置就可能拒动。外加交流或直流电源的保护方案正好相反，它的缺点是必须增设电源及由此产生的一系列问题，优点是保护装置可以做得很灵敏，但在水内冷大机组上常常不能将灵敏度整定得很高，否则在正常运行时将发生误动作。下面将着重介绍三次谐波电压的保护装置。

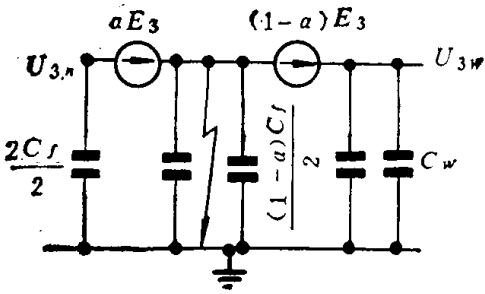


图1-11 发电机定子单相接地时三次谐波电压等值图

§ 1-5 双频式 100% 定子接地保护

通过上面对基波零序电压及发电机固有三三次谐波电压的分析，利用机端的零序电压（基波和三次谐波电压）作为动作因素，利用中性点零序电压（三次谐波电压）作制动因素，构成 100% 的定子接地保护。

本节将阐述两种利用三次谐波构成的 100% 定子接地保护方案。

一、双频分离式 100% 定子接地保护装置

1. 一次接线图（图 1-12）

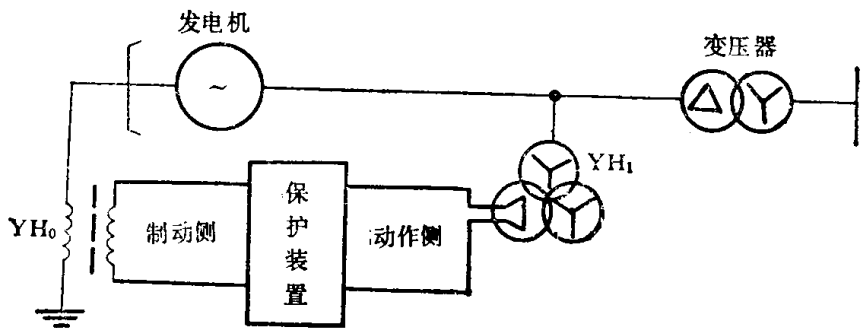


图1-12 一次接线图

当机端单相接地时， $U_0 = U_\phi$ ，在 YH_1 的开口三角绕组输出 100 伏，在中性点 YH_0 二次侧也输出 100 伏。

2. 保护原理方框图（图 1-13）

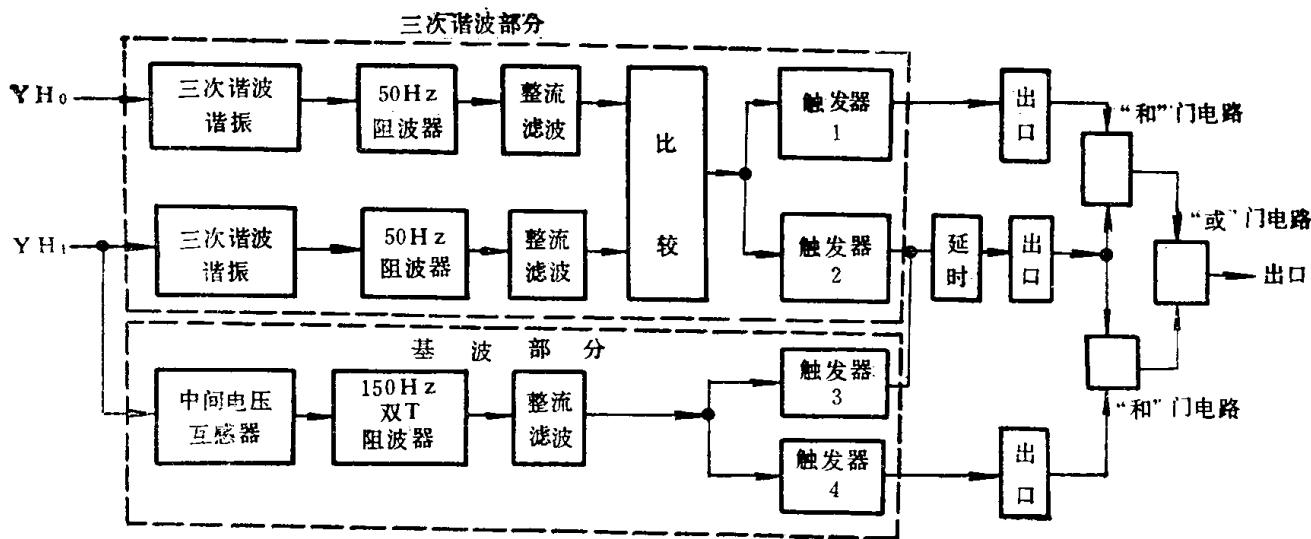


图1-13 保护原理方框图

- (1) 加 150 赫双 T 阻波器，可以使基波部分保护扩大到 95% 左右。
- (2) 触发器 1 和触发器 4 是为了防止个别元件损坏时引起误动而增设的。

3. 设计思想

- (1) 利用发电机侧基波零序电压作为动作因素，用延时或变压器高压侧接地保护的闭

锁接点来防止由于高压侧接地故障引起定子接地保护误动，构成发电机定子绕组 90~95% 的单相接地保护。

关于高压侧发生接地故障时，防止定子接地保护误动作的措施大致有：

- 1) 一般使定子接地保护的基波动作电压大于高压侧接地短路时定子侧的零序电压，并在延时上与高压侧零序保护相配合。
- 2) 如果认为上述做法使定子接地保护死区太大，则可以降低定子接地保护的基波动作电压，但必须用高压侧零序电流保护的接点来闭锁定子接地保护。
- 3) 如高压侧无零序电流保护接点，则只能改用高压侧零序电压保护的接点，这时，在下述情况下定子接地保护可能误发动作信号，但不会造成误跳闸。

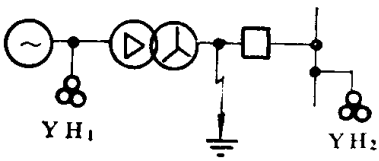


图1-14 变压器高压侧引出端单相接地

如图 1-14，变压器高压引出端单相接地，高压侧零序接地保护使高压开关跳闸，高压系统恢复正常，高压侧零序电压保护返回，但故障并未切除。若灭磁速度较慢，定子接地保护就可能误动作。

(2) 利用发电机机端三次谐波电压作为动作因素，利用发电机中性点的三次谐波电压作为制动因素，构成定子绕组中性点侧约 50% 的单相接地保护。

4. 装置的接线

图 1-15 示出了电压形成回路。电压形成回路有两个作用：1) 将 YH 的强电交流系统和弱电直流系统隔开；2) 根据各种保护装置动作原理的要求进行相应的电量变换。本装置的电压形成回路由两个相同的电抗变压器 $DKB_{1\sim 2}$ 和一个中间电压互感器 ZYH 组成，其中 $DKB_{1\sim 2}$ 分别与 C_1 及 C_2 组成三次谐波串联谐振， L_1 、 L_2 分别与 C_3 、 C_4 组成 50 赫滤波器，设外加电压为 U ，电感上的电压为 U_L ，在串联谐振时有：

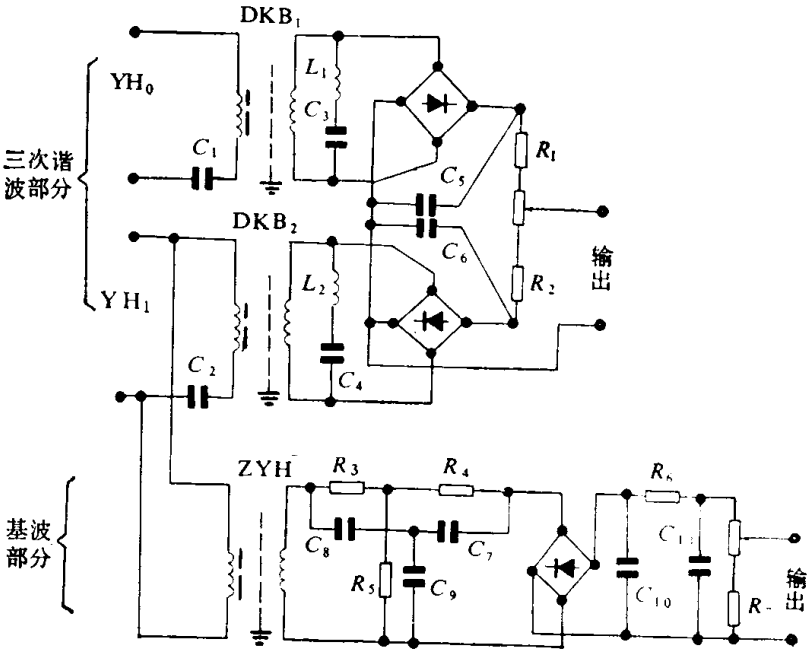


图1-15 电压形成回路

图 1-15 示出了电压形成回路。电压形成回路有两个作用：1) 将 YH 的强电交流系统和弱电直流系统隔开；2) 根据各种保护装置动作原理的要求进行相应的电量变换。本装置的电压形成回路由两个相同的电抗变压器 $DKB_{1\sim 2}$ 和一个中间电压互感器 ZYH 组成，其中 $DKB_{1\sim 2}$ 分别与 C_1 及 C_2 组成三次谐波串联谐振， L_1 、 L_2 分别与 C_3 、 C_4 组成 50 赫滤波器，设外加电压为 U ，电感上的电压为 U_L ，在串联谐振时有：

$$\frac{U_L}{U} = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}} = Q \tag{1-14}$$

式中 Q 为品质因数。当 Q 很大时，电感上的电压将大大超过外加电压。我们就是为了利用串联谐振而使参数满足 150 赫谐振条件的。因此一次输入很小的 150 赫电压，将在 DKB 一次侧产生较大的电压，此时二次就有较大的 150 赫电压输出；但是当有其它频率信号输入时，特别是有 50 赫的电压输入时，由于存在 L_1 、 C_3 和 L_2 、 C_4 组成的 50 赫滤波，所以二次

输出电压很小。

基波部分的中间电压互感器 ZYH 二次侧采用 150 赫双 T 阻波电路，它的滤过比大于 10，这样使基波零序电压的整定值由原来的 15~30% 减小到 5~10%，扩大了基波零序电压的动作区。关于双 T 电路的原理简述如下：

电路在特定频率 150 赫时得到最大的阻抗，从而使该频率的输出量近于零，图 1-16 为 RC-双 T 电路及其等效电路。

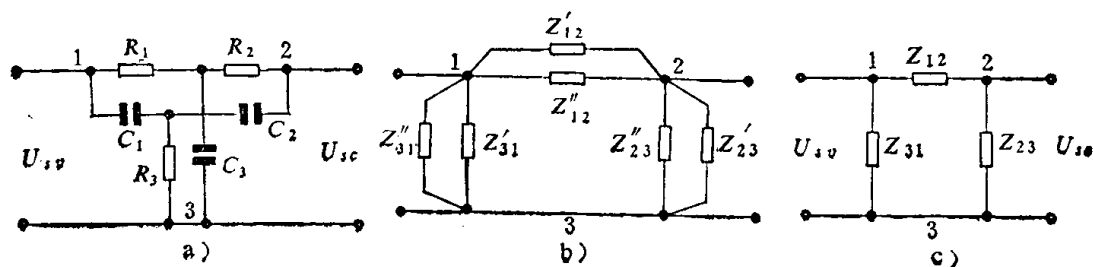


图1-16 RC-双 T 电路及其等效电路

a) RC-双 T 电路 b) 双 T 电路等效电路 I c) 双 T 电路等效电路 II

图中

$$R_1 = R_2 = 2R_3 = R$$

$$C_1 = C_2 = \frac{1}{2}C_3 = C$$

利用星形电路化为三角形电路的变换，将上述双 T 电路变成 π 形电路，将 R_1 、 R_2 、 C_3 组成的星形电路化成 Z'_{12} 、 Z'_{23} 、 Z'_{31} 的三角形电路，得

$$Z'_{12} = 2R(1 + j\omega RC)$$

$$Z'_{23} = Z'_{31} = R - j\frac{1}{\omega C}$$

由 C_1 、 C_2 、 R_3 组成的星形，算得对应于三角形的 Z''_{12} 、 Z''_{23} 、 Z''_{31} 为

$$Z''_{12} = \frac{-2}{\omega^2 C^2 R} (1 + j\omega CR) \quad (1-15)$$

$$Z''_{23} = Z''_{31} = R - j\frac{1}{\omega C} \quad (1-16)$$

把 Z'_{12} 、 Z'_{23} 、 Z'_{31} 与 Z''_{12} 、 Z''_{23} 、 Z''_{31} 合并成 Z_{12} 、 Z_{23} 、 Z_{31} ，得

$$Z_{12} = Z'_{12} // Z''_{12} = \frac{2R(1 + j\omega CR)}{1 - \omega^2 C^2 R^2} \quad (1-17)$$

$$Z_{23} = Z_{31} = Z'_{23} // Z''_{23} = \frac{1}{23\omega C} (1 + j\omega CR) \quad (1-18)$$

为了在某一频率下使输出电压 U_{3c} 为零，而 $Z_{23} = Z_{31}$ 不可能为零，故只有使全部输入电压 U_{1v} 消耗在 Z_{12} 上，才能使 $U_{3c} = 0$ ，这必须有 $Z_{12} = \infty$ ，即

$$1 - (\omega RC)^2 = 0 \quad \omega RC = 1 \quad \omega = \omega_0 = \frac{1}{RC}$$

也即要求双 T 回路滤去

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \text{ 的谐波分量}$$