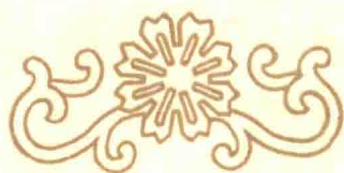


871083
RMT
1

1963年铁路科学技术论文报告会文集

I

铁道电气化



1963年铁路科学技术論文报告会文集

第 1 輯

鐵 道 电 气 化

铁道电气化专业会議学术委員会选編

人 民 鐵 道 出 版 社

1964年·北京

1963年铁路科学技术论文报告会文集

第 1 輯

鉄 道 电 气 化

铁道电气化专业会议学术委员会选編

人民铁道出版社出版、发行

(北京市霞公府甲24号)

北京市书刊出版业营业许可证出字第 010 号

人民铁道出版社印刷厂印

书号 1965 开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ 印张 $6 \frac{3}{8}$ 字数 150 千

1 9 6 4 年 11 月 第 1 版

1 9 6 4 年 11 月 第 1 版 第 1 次印刷

印数 0001—720 册 定价 (科六) 0.85 元

目 录

牵引变电所25千伏电压互感器组相电压不平衡的问题·····	1
宝凤段接触网馈电线阻抗继电器运行中的几个问题·····	14
电气化铁道远动系统结构方案比较·····	23
高速运行时接触网振动的理论分析·····	34
我国铁路电气化区段的电计算问题·····	47
复线电气化铁路接触网上下行串联供电方案及其主要参数的计算公式·····	54
异步劈相机的对称分析法·····	62
异步劈相机中空间高次谐波磁场对启动的影响·····	73
6Y ₂ 机车劈相机直接起动的研究·····	89

牵引变电所25千伏电压互感器组 相电压不平衡的問題

铁道部第三设计院 赵乾剑

内 容 提 要

本文根据现场实测资料和交流电气化铁道供电系统的特点,通过理论分析、数学计算和科学实验等工作,揭示和论证了引起电压互感器组相电压不平衡的原因,掌握其变化规律。并在此基础上,确认电压互感器组的接线方式采用开口三角形比星形更为合理和经济;试验成功新型电压回路断线闭锁装置,解决了宝凤段牵引变电所现存的问题。

文中涉及的内容为交流电气化铁道供电系统所特有的一个新问题。

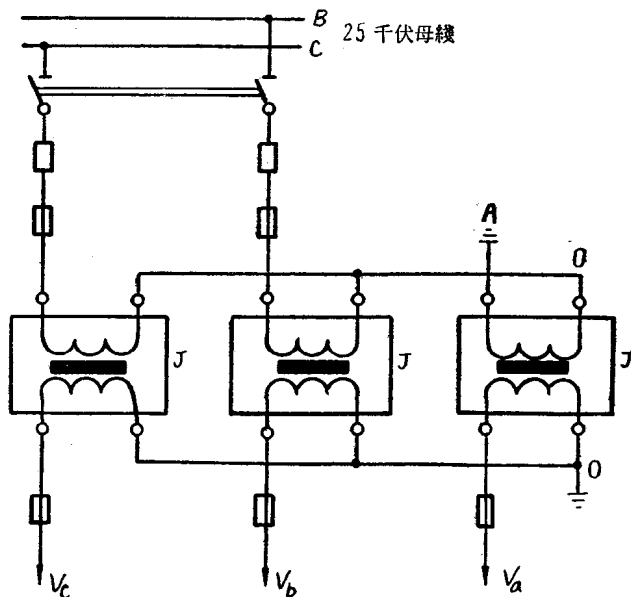
一、存在的問題和研究目的

我国第一条电气化铁路干线:宝(鸡)成(都)线的宝(鸡)凤(州)段全长92公里,已于1961年正式投入运营。宝凤段采用25千伏工频单相交流制,由三个牵引变电所供电。

牵引变电所投入运营后,大部份电气设备工作正常,基本上保证了安全供电。但部份设备也出现了一些问题,或多或少地影响供电的可靠。本文研究的对象即为其中之一。

大家知道,牵引变电所内为了给继电保护和测量装置的电压源,在25千伏母线上,装设由三台单相双绕组电压互感器(JDJ-25)、按星形接线方式连接的电压互感器组,将电压由25千伏变为100伏。由于牵引变压器次边的一相必定是接地的,迫使电压互感器组原边绕组星形接线的一端也是接地的,如图1-1所示。

按“ Δ/Δ ”接线方式连接的电压互感器组投入运营后,经多次测定,即使在牵引变电所正常供电时,次边三相相电压 V_a 、 V_b 和 V_c 也是很不平衡的,存在一个很大的零序电压 V_0 。表1-1所列61年初秦岭牵引变电所内实测结果之一,图1-2为稍加修正后的相应



J——单相油浸式双绕组电压互感器

图1-1 25千伏电压互感器组接线方式图

的电压向量图。

表 1-1

次边电压	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	V_a	V_b	V_c	V_o
测量值(伏)	112	112	110	94	78	43	30

这现象的出现是出乎意料的。因为由三个阻抗特性相差不太大的单相电压互感器组成的星形负荷，由基本上平衡的25千伏三相电源供电，按理负荷上的三相相电压也应是平衡的。但实测结果却是极不平衡的。在目前我国尚缺乏牵引变电所运营经验的情况下，就会引起对25千伏配电装置是否存在不正确之处的怀疑。此外，由于电压互感器组三相相电压在正常供电时就很不平衡，存在一个不小的零序电压，就使所装的依靠断线时出现零序电压而起动的电压回路断线闭锁装置不能投入运营，扩大了接触网馈电线主保护装置——距离保护装置误动作的范围。〔1〕

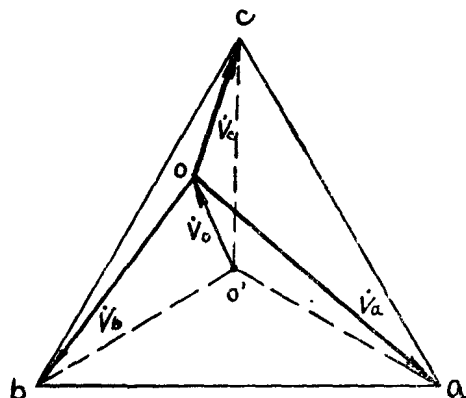


图 1-2

为使变电所运营可靠和为今后变电所的设计、施工打下基础，对上述现象和问题进行深入研究是有价值的。通过研究，达到下列目的：

1. 揭示引起电压互感器组相电压不平衡的原因；
2. 进行相电压不平衡的数学计算，找出其变化规律；
3. 提出适合电气化铁道供电系统特点的电压回路断线闭锁装置；
4. 确定合理的电压互感器组结线方式；
5. 进行相应的实验室和现场实验，验证上述各点的正确性。

二、相电压不平衡的原因分析和变化规律

原因分析：电力系统中的电压互感器组也有相电压不平衡的现象，〔2、3、4〕但其结线方式为中点共同接地的双星形“ Y_0/Y_0 ”，与宝凤段的“ Y/Y_0 ”不同。因此，引起相电压不平衡的原因也截然相异，不能套用。

综合比较宝凤段牵引变电所25千伏电压互感器组相电压不平衡的实测数据，可明显地看出下述很有启发性的现象：

1. 电压互感器组次边线电压基本上是对称平衡的；
2. 次边三相相电压是很不平衡的，零序电压值可达正常相电压值的1/2，落在线电压三角形内；
3. 只要原边形结线的一端接地，不同的次边结线方式（Y、 Y_0 、 Y_0/Y_0 ）下的相电压不平衡度是相同的；
4. 相电压不平衡度与接触网的供电状态（开断、空载、有牵引负荷或地区负荷）无关；

5. 但是,当取消牵引变压器次边和电压互感器组原边的接地点、两点间直接用导线连接供电时,电压互感器组次边三相相电压几乎是平衡的。

由此可见,电压互感器组相电压不平衡与接触网的供电状态、互感器组次边的结线方式无关,而与互感器组原边一端接地直接有关。所以首先可肯定,相电压不平衡的原因是在变电所内,且在互感器组原边的25千伏侧;其次互感器组原边一端接地,使25千伏母线和互感器组原边中点的对地分布电容对互感器组每一绕组的作用,各不相同,如图2-1所示。

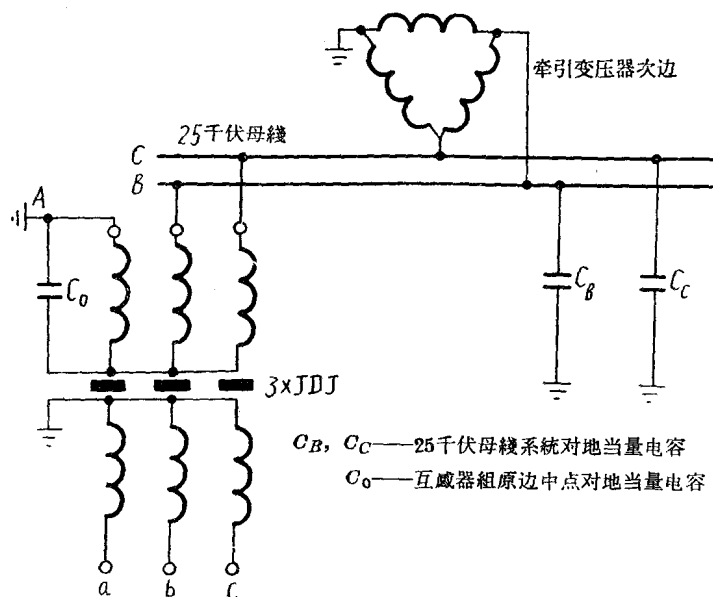


图2-1 考虑对地分布电容后的电压互感器组电路图

对图2-1可作如下的分析:

1. 由于牵引变压器次边绕组结线方式为三角形,所以25千伏供电系统为中性点不接地系统,其相电压是不稳定的,以至接于其上的星形结线方式的电压互感器组的相电压就存在出现不平衡的可能性。

2. 25千伏母线系统对地当量电容 C_B 和 C_C 接于互感器组原边的相间,并分别与互感器组原边互相串联的A、B相绕组和A、C相绕组组成二个并联回路。由于25千伏供电系统的线电压已由电力系统电压决定,基本上是不变的,所以因并联回路可能发生电流谐振而使线电压突变,从而引起相电压不平衡是不可能的。此外当量电容 C_B 和 C_C 值是不大的,引起线电流的不平衡极微小,从而因电源内阻而引起的线电压不平衡也是微不足道的,不可能引起相电压的很大不平衡。为证实这点,曾在实验室做过模拟试验,结果是:无论外加线电压或并联电容量如何变化,都未发现相电压有不平衡的现象。所以可以断言,当量电容 C_B 和 C_C 对电压互感器组相电压是没有大影响的。

3. 电压互感器组原边绕组中点对地当量电容 C_0 ,并联于互感器组接地互感器的原边绕组。根据变压器理论可知,电容 C_0 由互感器原边绕组末端(X、Y、Z)套管及其连接导线对地分布电容 C_x 、部份互感器绕组线匝对地分布电容和互感器线匝间的分布电容等组成。

从电工原理知道,任何一个其输入端组和输出端组已给定的无源四端网络的特性,可以

由三个独立的恒定系数来表示。单相电压互感器在考虑其线匝对地电容时为一四端网络，就可用一个“ Π ”形当量电路来代替。“ Π ”形电路二柱元件为电容，横梁元件为阻抗。因此可绘出考虑线匝对地电容时互感器组原边的当量电路，如图2-2所示。所谓电容 C_0 就是指电容 C_C 、 C_{A2} 、 C_{B2} 和 C_{C2} 之总和。

由于电压互感器的负荷是不大的，其特性类似空载变压器。〔5〕据秦岭牵引变电所实测，当电压互感器JDJ-25原绕组开路，从次边测量并归算到原边之平均空载阻抗特性如表2-1所示。

可见互感器原绕组阻抗值极大（10兆欧左右，有负荷时将稍为减小），阻抗角比 90° 小很多。所以 C_0 值虽然不会很大，而对互感器原绕组的并联作用仍是很显著的，使接地相的合成阻抗特性与不接地两相的阻抗特性之间有极大的差异。这就完全有可能使互感器组三相相电压有较大的差别。所以可认为，电压互感器组原边中点对地当量电容 C_0 是引起相电压不平衡的最主要原因。

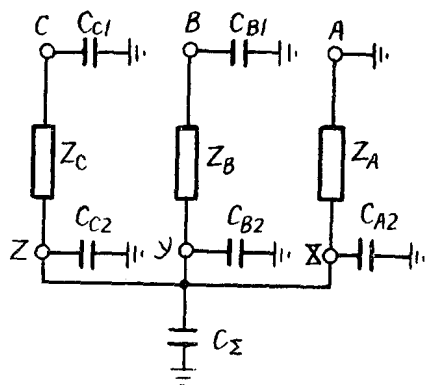


图 2-2

表 2-1

次 边 电 压 (伏)	次 边 阻 抗 (欧)	原边归算阻抗 (兆欧)	阻 抗 角 (度)
40	165	10.3	48
60	180	11.2	50
80	175	11.0	52
100	150	9.45	61

4. 其他原因。(1) 互感器组是由三个单相电压互感器 JDJ-25 组成的。由于在制造技术和磁路漏磁情况的不同，加之次边三相负荷不平衡等原因，各相绕组的阻抗特性是会有些差别的，尤其当外加电压与额定值相差很大时，更为显著。各相阻抗特性的差别也会引起相电压的一些不平衡。(2) 25千伏供电系统由于牵引负荷是单相的，其线电压不会绝对平衡，这也会引起互感器组相电压的一些不平衡。(3) 当互感器铁芯磁饱和时，有二种现象不能忽略：a. 互感器组原边是接成无中线的星形，相电流中不包含三的倍数次谐波，近似正弦电流。当铁芯饱和时，被该电流产生的磁通曲线就成为平顶波。因此，绕组中感应的电势是非正弦的，为尖顶波，其中包含三次谐波电压，亦即零序电压，也会造成相电压的不平衡。b. 电容 C_0 和接地相的电压互感器原边绕组形成一个典型的电流铁磁谐振回路，在合适的外加电压或 C_0 值下，会出现电流铁磁谐振和中点振荡现象，引起相电压极大的畸变。如在实验室模拟试验中曾发现过中点振荡现象，各相相电压有效值相等，都为正常相电压值的1.5倍；同时周期地发出振动音响。但是考虑到 JDJ-25 是按35千伏电压级设计的，再加牵引变电所二次电压回路负荷并不大，互感器铁芯是不会饱和的。所以上述三次谐波零序电压的影响是很小的，电流铁磁谐振和中点振荡也是不能发生的。

综上所述，可认为牵引变电所电压互感器组相电压不平衡的主要原因，是由于电压互感器组原边的结线方式为“ Δ ”，其中点的对地当量电容 C_0 显著地改变了接地相的阻抗特性，造成电压互感器组三相阻抗特性不相同，从而引起相电压的不平衡。

变化规律：为了在数量上计算相电压的不平衡度和解释现场存在的现象，进行相电压不平衡变化规律的数学计算是必要的。

相电压不平衡度，可用一个零序电压向量 $\dot{V}_0$ 来表示。因此掌握 $\dot{V}_0$ 的变化规律就可直接了解相电压不平衡的规律。

正确计算电压互感器组零序电压 $\dot{V}_0$ 的变化规律是麻烦的。〔6〕但根据上述分析，并为简化计算，可作如下假定：

1. 互感器组相电压不平衡的原因是其原边中点的对地当量电容 C_0 ，且 C_0 是理想的，无损耗的；

2. 互感器组的三个单相电压互感器的阻抗特性相同，等于 $Z e^{j\theta}$ ；

3. 25千伏供电系统是平衡的，并根据电工原理将牵引变压器次边三角形电势源 $\dot{E}_{AB}$ 、 $\dot{E}_{BC}$ 和 $\dot{E}_{CA}$ 化为等值星形电势源 $\dot{E}_A$ 、 $\dot{E}_B$ 和 $\dot{E}_C$ ；

4. 互感器组原边 A 相接地。

这样就可画出如图 2—3 所示的电压互感器组原边绕组之当量计算电路。

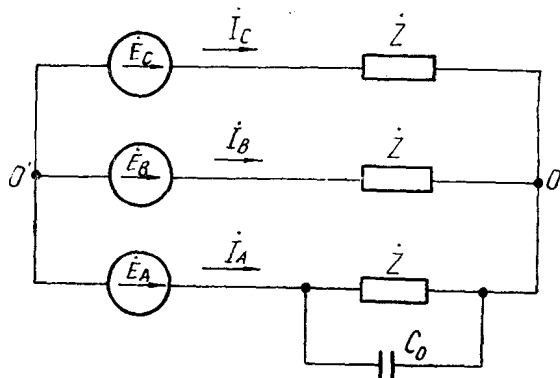


图 2—3 当量计算电路

接地相之合成阻抗特性 $\dot{Z}_\Sigma = Z_\Sigma e^{j\theta_\Sigma}$ ，可根据图 2—4 求得如下：

$$\theta_\Sigma = \tan^{-1} \frac{I_{AH} \sin \theta - I_{AC_0}}{I_{AH} \cos \theta} = \tan^{-1} \left(\tan \theta - \frac{Z \omega C_0}{\cos \theta} \right); \quad (2-1)$$

$$Z_\Sigma = \frac{V}{I_A} = Z \frac{\cos \theta_\Sigma}{\cos \theta}. \quad (2-2)$$

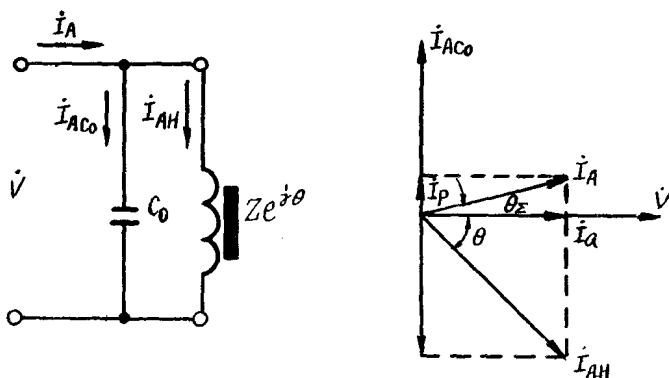


图 2—4 互感器组接地相电路及向量图

令 $\dot{V}_0$ 为图 2—3 中点 0 和 0' 间之电位差（即零序电压），应用克希荷夫定律得：

$$\dot{E}_A = \dot{I}_A \dot{Z}_\Sigma + \dot{V}_0; \quad (2-3)$$

$$\dot{E}_B = \dot{I}_B \dot{Z} + \dot{V}_0; \quad (2-4)$$

$$\dot{E}_C = \dot{I}_C \dot{Z} + \dot{V}_0; \quad (2-5)$$

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0. \quad (2-6)$$

解上述方程式组并作适当的三角运算后可得：

$$\begin{aligned}\dot{V}_0 &= \frac{\dot{E}_A}{Z_\Sigma} + \frac{\dot{E}_B}{Z} + \frac{\dot{E}_C}{Z} \\ &= \dot{E}_A \frac{1 - p(m\dot{F} + n\dot{G})}{1 + 2p(m\dot{F} + n\dot{G})}, \quad (2-7)\end{aligned}$$

上式中

$$p = \frac{Z_\Sigma}{Z} = \frac{\cos \theta_\Sigma}{\cos \theta}, \quad (2-8)$$

$$m = \cos \theta; \quad (2-9)$$

$$n = \sin \theta; \quad (2-10)$$

$$\dot{F} = \cos \theta_\Sigma + j \sin \theta_\Sigma; \quad (2-11)$$

$$\dot{G} = \sin \theta_\Sigma - j \cos \theta_\Sigma. \quad (2-12)$$

公式 (2-7) 是一个较复杂的复数圆系方程，即向量函数 $\dot{V}_0 = f(\theta_\Sigma)$ ， $\theta_\Sigma = \text{常数}$ 首端的轨迹是一个圆。例如，当 $\theta = 60^\circ$ 时，向量函数 $\dot{V}_0$ 和变数 θ_Σ 之对应特殊点数值列于表 2-2，相应之圆图绘于图 2-5。

表 2-2

点 号	θ_Σ	$\dot{V}_0$
1	90°	$\dot{E}_A$
2	80°	$0.41\dot{E}_A / -18^\circ$
3	60°	0
4	30°	$0.23\dot{E}_A / 143^\circ$
5	0	$0.38\dot{E}_A / 139^\circ$
6	-30°	$0.55\dot{E}_A / 134^\circ$
7	-60°	$\dot{E}_A / 120^\circ = \dot{E}_C$
8	-80°	$1.98\dot{E}_A / 54^\circ$
9	-90°	$\dot{E}_A$

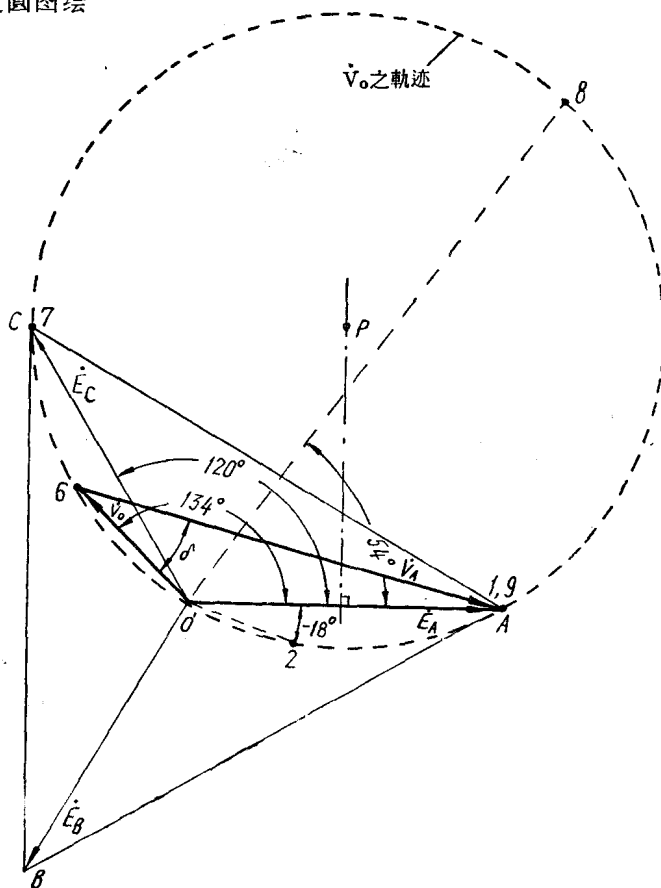


图 2-5 $\theta = 60^\circ, 90^\circ \leq \theta_\Sigma \leq 90^\circ$ 时 $\dot{V}_0$ 之轨迹图

因为无论 θ 等于何值, 当 $\theta_x = \theta$ (即 $C_0 = 0$) 时, $\dot{V}_0 = 0$; 又当 $\theta_x = -90^\circ$ (即 $C_0 = \infty$) 时, $\dot{V}_0 = \dot{E}_A$ 。所以, 圆系方程是以向量 $\dot{E}_A$ 为共弦的。

欲证明 $\dot{V}_0 = f(\theta_x)$ 为常数首端的轨迹是一个以向量 $\dot{E}_A$ 为弦的圆, 需要满足二个条件, 即:

1. $\dot{V}_0$ 和 $\dot{V}_A$ 之和为一常向量。这点已经满足, 因为 $\dot{V}_0 + \dot{V}_A = \dot{E}_A$ 。
2. $-\dot{V}_0$ 和 $\dot{V}_A$ 之夹角 δ 为常数角。经数学推算得: 当 $\tan \theta_x - \tan \theta < 0$, 即 $0 < C_0 < \infty$ 时, $\delta = (90^\circ - \theta)$, 与 θ_x 等于某一值无关。

知道常向量 $\dot{E}_A$ 和夹角 δ , 就可利用求解复数圆方程之图解法^[7], 求出圆图的圆心和直径。求得之解为: 圆系的直径等于 $\frac{\dot{E}_A}{\cos \theta}$; 圆心位于向量 $\dot{E}_A$ 逆时针 90° 的中垂线上。

验证: 为校验上述原因分析和变化规律之正确性, 进行了下列实验和计算。

1. 电容 C_0 的测定。在秦岭牵引变电所用高频三电压表法和西林电桥法分别测得两个有关对地电容的参量: (1) 图 2-6 (a) 所示, 一个单相电压互感器对地当量电容 C'_3 , 平均为 270 微微法。(2) 图 2-6 (b) 所示, 星形结线方式互感器组整体对地当量电容 C'_0 , 平均为 800 微微法。(测量中发现, 互感器一端或互感器组某一端接地不影响 C'_3 或 C'_0 的值)。

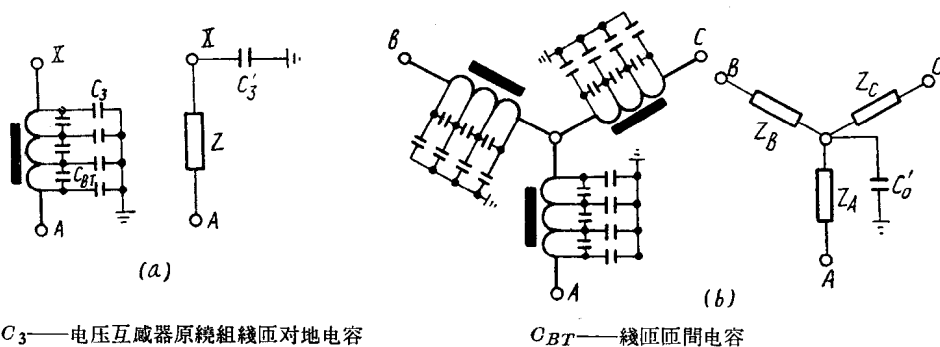


图 2-6

根据图 2-2, 若近似地取 $C_{A2} = C_{B2} = C_{C2} = \frac{C'_3}{2}$, 则根据 C_0 的组成, 可取 $C_0 = 3 \frac{C'_3}{2} + C_x = (405 + C_x)$ 微微法; 或取 $C_0 = \left(\frac{1}{2} \sim \frac{3}{5}\right) C'_0 = 400 \sim 480$ 微微法。所以可确定 C_0 为 400~500 微微法。

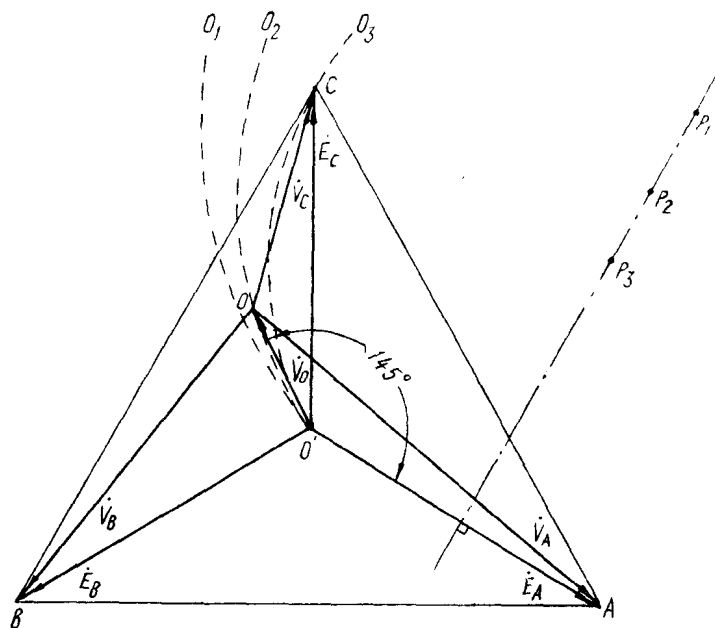
2. 计算结果与实测数据进行比较。利用公式 (2-7) 及其解, 可从两方面来进行实测计算, 验证电容 C_0 确是引起互感器组相电压不平衡的原因。

(1) 反证法: 根据实测之不平衡相电压值和电容 C_0 值, 求电压互感器之阻抗特性并与实测阻抗特性比较。

某次实测次边不平衡相电压值及根据图 2-7 (使三个相电压交于一点) 修正后的数据和归算到原边的数据示于表 2-3。

根据图 2-7 上向量 $\dot{V}_0$ 首端所在的位置, 可找出电压互感器的阻抗角 θ 为 65° 左右。

知道 $\dot{V}_0 = 6.5 / 145^\circ = 0.45 \dot{E}_A / 145^\circ$ 千伏和 $\theta = 65^\circ$ 直接用公式 (2-7) 来求 θ_x 是有困难的。这时可参考表 2-2 之数据用试探法求之。设 $\theta_x = -10^\circ$, 经计算得 $\dot{V}_0 = 0.454 \dot{E}_A / 144^\circ = 6.55 / 144^\circ$ 千伏, 与图 2-7 上所示之实测值很接近。这表明接地互感器的合成阻抗角 θ_x 为 -10° 左右。



圆弧 $\widehat{O'O_1}$ 为 $\theta=70^\circ$ 时 $\dot{V}_O$ 之轨迹;
圆弧 $\widehat{O'O_2}$ 为 $\theta=65^\circ$ 时 $\dot{V}_O$ 之轨迹;
圆弧 $\widehat{O'O_3}$ 为 $\theta=60^\circ$ 时 $\dot{V}_O$ 之轨迹。
图 2-7 实测不平衡相电压向量图

表 2-3

次	电 压 (伏)	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	V_a	V_b	V_c	V_o
边	实 测 值	100	100	105	85	70	37	—
	修 正 值	100	100	100	81	65	35	$26/145^\circ$
原	电 压 (千伏)	V_{AB}	V_{BC}	V_{CA}	V_A	V_B	V_C	V_O
	归 算 值	25	25	25	20.2	16.2	8.75	$6.5/145^\circ$

已知 θ 、 θ_Z 和 C_0 值就可根据公式
(2-1) 求出互感器原绕组的阻抗
值:

$$Z = \frac{\cos \theta (\tan \theta - \tan \theta_Z) 10^6}{\omega C_0},$$

当 $C_0=400$ 微微法, 求得 $Z=7.85$ 兆欧, 与表 2-1 实测值相接近。

由此可建立一个近似概念如下:
若三个原绕组阻抗特性为 $8e^{j65^\circ}$ 兆欧的单相电压互感器, 按“ Δ/Δ ”结线方式连接。当 $C_0=400$ 微微法时, 就会产生一个零序电压 $\dot{V}_O$, 其值可达 $0.45E_A$ 千伏。

(2) 正证法: 根据互感器原边绕组阻抗特性 $Ze^{j\theta}$ 及当量电容 C_0 值,

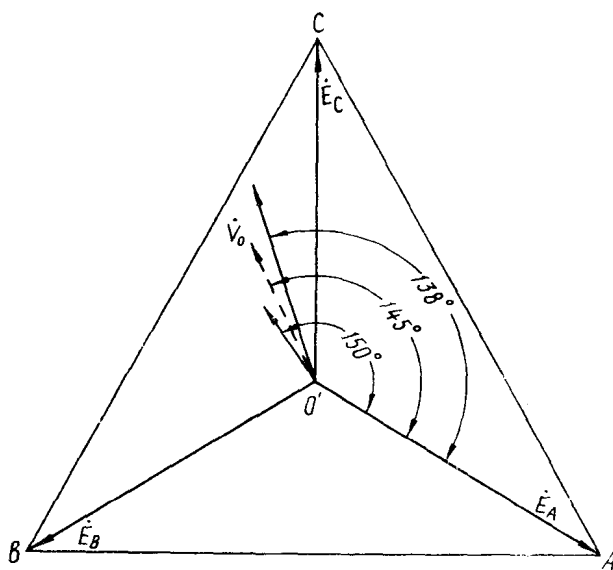


图 2-8

求出 $\dot{V}_0$ 与实测的 $\dot{V}_0$ 比较。

取 $\theta=65^\circ$ 、 Z 的变化上、下限值取 $5\sim 10$ 兆欧和 $C_0=400$ 微微法, 根据公式(2-7)求得相应之 $\dot{V}_0$ 值为 $0.255\dot{E}_A/150^\circ$ 和 $0.653\dot{E}_A/138^\circ$ 千伏, 如图2-8所示。可看出, 求得之 $\dot{V}_0$ 分别位于实测值 $\dot{V}_0=0.45\dot{E}_A/145^\circ$ 千伏的二侧, 其量一大一小, 但都落在线电压三角形内, 完全符合现场实测情况。

根据上述实例计算, 可得出相电压不平衡所引起的零序电压 $\dot{V}_0$ 的方位和牵引变压器次边接地相号的关系为:

若A相接地, 则 $\dot{V}_0$ 偏向C相——引前接地相 120° 的那一相;

若B相接地, 则 $\dot{V}_0$ 偏向A相;

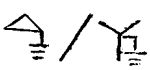
若C相接地, 则 $\dot{V}_0$ 偏向B相。

这些规律的正确性, 也为实验室的模拟实验所证实。

应再次指出, 零序电压 $\dot{V}_0$ 的计算结果只能是近似的, 数量级的。但通过这些计算, 足够证实 C_0 值虽然不大, 已可使相电压发生极大的不平衡, 而其不平衡度接近现场实测值, 其变化规律能解释现场所存在的一切现象。

3. 推论。根据上述分析可推定, 按“ $\triangle/\gamma$ ”结线方式连接的互感器组次边相电压必定是平衡的。表2-4为秦岭变电所内实测的次边电压值证实了这点。

表 2-4

结 线 方 式 \ 次 边 电 压 (伏)	V_{ab}	V_{bc}	V_{ca}	V_a	V_b	V_c
	175	180	179	102	100	100

三、电压回路断线闭锁装置

对断线闭锁装置的基本要求为:

1. 足够的灵敏度;
2. 动作时间应小于距离保护装置的第一段动作时间;
3. 不反映被保护系统的电压畸变;
4. 不论是电压互感器原边或次边回路故障, 都应正确动作。

电力系统所采用的断线闭锁装置, 如BZ-21、BZ-22型电压回路断线闭锁装置, 其设计原理是基于下列现象的, 即当三相平衡系统内出现断线时, 必定出现零序电压, 借此来启动闭锁装置。

宝凤段牵引变电所由于电压互感器组按“ $\triangle/\gamma$ ”结线, 在正常不断相时就存在一个不小的零序电压。从前面分析已知, 引起这个零序电压的主要原因是互感器组原边中点对地电容 C_0 。因此欲消除它是不可能的; 或采用补偿措施, 如在次边人为地加添电阻负荷或三角形结线的第三补偿绕组, 也是很麻烦、不经济且效果不明显的。在这种情况下, 就不能采用BZ-21或BZ-22型电压回路断线闭锁装置, 应另求按其他原理设计的新型断线闭锁装置。

在实验室曾做过若干个电压回路断线闭锁装置方案的实验, 并到秦岭牵引变电所做过现场实验, 比较结果认为如图3-1所示, 按电压差动原理的断线闭锁装置是最简单可行的。

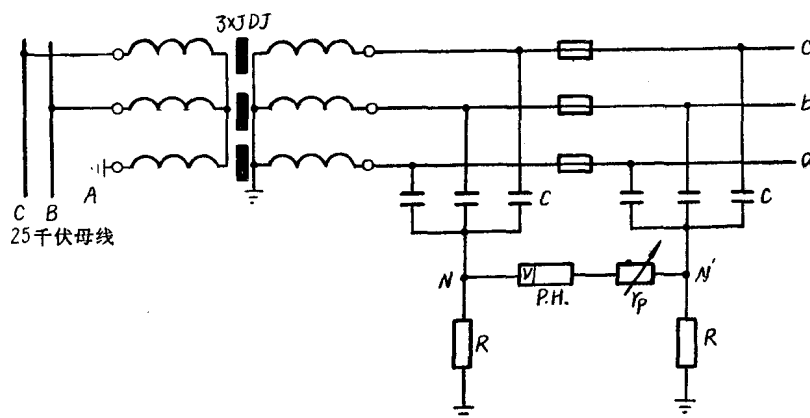


图 3-1 “丕/色” 結綫方式时，断綫閉鎖装置原理图

电压继电器绕组 $P.H.$ 跨接于电压 $\dot{V}_N$ 和 $\dot{V}'_N$ 之差压 $\dot{V}'_{NN}$ 上。正常时， $\dot{V}_N$ 和 $\dot{V}'_N$ 大小相等，相位相同， $\dot{V}'_{NN} = 0$ ，继电器不动作；断相时， $\dot{V}'_N$ 变化很大， $\dot{V}'_{NN} \neq 0$ ，继电器动作，通过它的正接点闭锁距离保护装置，反接点发出信号。

差压 $\dot{V}'_{NN}$ 经演算由下式决定：

$$\dot{V}'_{NN} = \frac{j3b_c(3\dot{V}_0 - kp\dot{V}'_0)}{g + q(g + G + jkb_c)}, \quad (3-1)$$

式中

$$b_c = \omega C;$$

$$g = \frac{1}{r_P};$$

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

$$q = \frac{G + j3b_c}{G + jkb_c};$$

$\dot{V}_0$ ——互感器组正常时之零序电压；

$\dot{V}'_0$ 和 k 值与断相情况有关，列于表 3-1。

表 3-1

断 相 情 况	k	$\dot{V}'_0$
正 常	3	$\dot{V}_0$
断 一 相	2	$\frac{1}{2}$ (未断的二相相电压向量和)
断 二 相	1	未断相相电压
断 三 相	0	0

当三相全断时，公式 (3-1) 可大大简化：

$$\begin{aligned} \dot{V}'_{NN} &= \frac{j3b_c \dot{V}_0}{g + (g + G) \frac{G + j3b_c}{G}} \\ &= \frac{r_P}{R + r_P} \cdot \frac{j \frac{3}{x_C} \dot{V}_0}{\frac{1}{R} + \frac{1}{r_P + R} + j \frac{3}{X_C}} \end{aligned} \quad (3-2)$$

表 3-2

项 目	断相情况	正 常	断 a	断 b	断 c	断 a、b	断 b、c	断 c、a	断 a、b、c
差 压 $V_{NN'}$ (伏)		0	17	20	17	36	34	38	8
继电器动作情况		不动	动	动	动	动	动	动	动

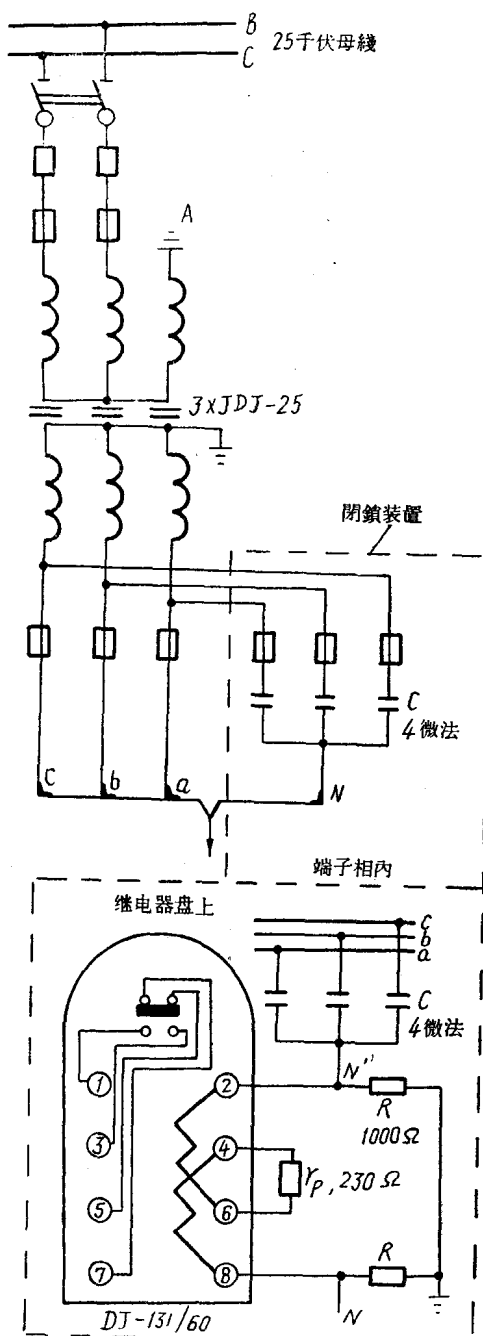


图3-2 推荐采用的断线闭锁装置

继电器的整定计算，应按各种断相情况下所引起的差压中最小的一个来进行。根据现场实验已知，断三相时之差压为最小，所以可按公式（3—2）来进行继电器的整定计算。为方便起见，取 $R=1000\Omega$ ， $C=4$ 微法， $\dot{V}_0$ 取实测值，继电器最小工作电压可适当事先规定。这样，利用公式（3—2）就可决定电阻 r_P 之大小（ r_P 值应包括继电器绕组之阻抗）。然后再验算 $I_P = \dot{V}_{NN'}/r_P$ 是否大于继电器的最小动作电流。

图 3—2 所示的断线闭锁装置安装结线图，曾在秦岭牵引变电所运营中的电压互感器组上进行过实验。实验时，继电器二个绕组串联（其阻抗为 70 欧），继电器的调节指针在 15 伏处； $r_P=160$ 欧，这时继电器的最小动作电压为 5 伏，最小动作电流约为 20 毫安。当 $\dot{V}_0$ 取 30 伏，继电器最小工作电流调整为 20 毫安时，按公式（3—2）算得之 $r_P=300$ 欧，而图 3—2 所用为 230 欧，足够使继电器可靠动作。实验结果列于表 3—2，可见这个方案是可行的，值得推荐采用。

推荐方案之优缺点如下：

优点：

设备简单经济，容易实现；

能反映所有断线状况；

灵敏度和动作时间合乎要求。

缺点：

不能反映电压互感器组原边故障状况（这样的事故极少）。

四、合理的电压互感器组结线方式

根据电力铁道供电系统的特点及牵引变电所继电保护装置和测量系统的性质，不可能也不需要到地的相电压。所以，采用开口三角形结线方式的电压互感器组，在技术上是完全能满足要求的。这时只需两个单相电压互感器接于任意两个相

间电压上即可。

电压互感器组在原设计中采用星形结线方式的主要目的，是想直接采用一般的电压回路断线闭锁装置。现已证实，这样的设想是行不通的。

据最近文献报导，〔8、9〕在苏联的交流牵引变电所设计中，已采用开口三角形结线方式的电压互感器组。

所以，建议在今后牵引变电所设计中，电压互感器组采用开口三角形的结线方式。这时相应的电压回路断线闭锁装置，可采用类似图 3—1 的原理，只略加改变，如图 4—1 所示就可以了；而继电器整定计算所采用的公式（3—2）也应改为：

$$\dot{V}_{N'N} = \frac{\dot{V}_{BC}}{R + \tau} \frac{j \frac{\dot{V}_{BC}}{X_0}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R + \tau_p} + j \frac{2}{x_c}} \quad (A \text{ 相接地时})。 \quad (4-1)$$

总之，在牵引变电所中采用开口三角形结线方式的电压互感器组，在技术上能完全满足要求，并可节省投资费千余元。

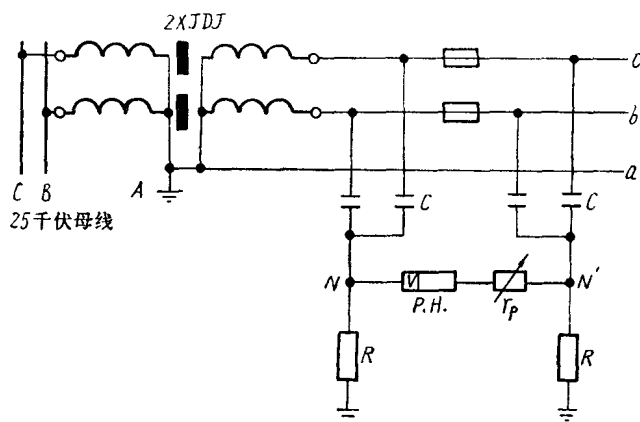


图1-4 “V/V” 结线方式时，断线闭锁装置原理图

五、结 论

1. 宝凤段牵引变电所25千伏电压互感器组，由于其原边结线方式采用一端接地的星形“ $\star$ ”，其中点对地存在着一个当量电容 C_0 ，它并联于一端接地的电压互感器原边绕组上，造成电压互感器组原边绕组相阻抗特性间的极大差异，从而引起相电压的不平衡。因此，电容 C_0 是引起相电压不平衡的主要原因。经测定，该值约为400微微法。

因相电压不平衡而引起的零序电压 $\dot{V}_0$ ，取决于电压互感器的阻抗特性 $Z e^{j\theta}$ 和电容 C_0 的大小，以及牵引变压器次边接地相的相角。

2. 针对宝凤段秦岭、凤州牵引变电所现状，以及经过几个新型电压回路断线闭锁装置的设计计算和实验，并考虑经济可靠，推荐现场对图 3—2 所示的断线闭锁装置进行试运营，考验其可靠性并积累经验，使其完善定型，然后再正式投入运营。

3. 根据电力铁道供电系统的特点及继电保护、测量装置的要求，再考虑到“ $\star/V_{\triangle}$ ”结线方式存在相电压不平衡的很难补救的缺点，建议今后在设计牵引变电所25千伏电压互感器组时，采用开口三角形结线方式；同时可采用图 4—1 所示的基于电压差动原理的电压回路断线闭锁装置。

参 考 文 献

- [1] 李定邦:《宝凤段接触网饋电綫阻抗继电器运行中的几个問題》。本論文集。
- [2] 徐允驊:《在不接地系統中表用变压器采用中性点共同接地的双星形結綫时引起的异常現象》。《电业技术通訊》, 1956, № 7。
- [3] A. Boyajian, O. P. Mccarty:《Physical Neutral Instability》。《Trans. AIEE》, 1931, 第317~327頁。
- [4] C. W. Lapierre:《Theory of Abnormal Line-to Neutral Transformer Voltage》。《Trans. AIEE》, 1931, 第328~346頁。
- [5] 张道光:《电流互感器和电压互感器》。水利电力出版社。
- [6] О. М. Богатырев:《Расчет цепей с нелинейными инерционными элементами》。《Электричество》, 1961, № 1。
- [7] К. А. А. 克鲁格:《电工原理》, 上册。
- [8] И. Я. Рышковский, С. Н. Засорин:《Электрические станции и тяговые подстанции》。Трансжелдориздат, 1959。
- [9] Н. И. Сидоров:《Новые в энергоснабжении электрифицированных железных дорог》。Трансжелдориздат, 1960。

作者附言:

本科研专题是铁道部頒科研项目311号的一个組成部份。311号由北京铁道科学院主持, 铁道部第三設計院为主要合作单位。唐山铁道学院、华北铁路工程局和西安铁路局等也曾参加过部份試驗工作。铁道科学研究院参加本科研专题的主要人員为魏潤生同志。

作者在此对所有曾对本文有过貢獻的同志們, 致以謝意。