

标积式原理的差动保护研究品的研究报告

山东工业大学 李家庭

许昌继电器研究所 黄国庆

一 保护的原理特点及构成

1. 原理

众所周知,作为差动保护来说,动作灵敏度向来是极其重要的。而目前国内外广泛采用的比率制动原理的差动保护在被保护设备内部短路时总存在或大或小的制动作用。这样,当短路故障发生在中性点附近,且考虑到过渡电弧电阻时,短路电流很小时,传统的比率制动式差动保护就会造成拒动作。

基于提高保护在区内故障时的动作灵敏度和可靠性,在此向大家介绍一种新原理的差动保护——标积式差动保护。

标积式差动保护的基本原理是利用标积量 $k \cdot |\dot{I}_1| \cdot |\dot{I}_2| \cos\varphi$ (φ 为 \dot{I}_1 与 \dot{I}_2 的相位差, K 为比例系数)作为区分内部和外部故障的判据。当内部故障时, $-90^\circ < \varphi < 90^\circ$, 标积量呈现出较大的动作量;当外部故障或正常运行时 $\varphi = 180^\circ$, 标积量表现为很大的制动作用。由此可见,在双侧电源的情况下,标积原理的差动保护在内部短路时将几乎无制动作用,必将具有较高的灵敏度。

2. 保护的构成

标积式差动保护,主要由三部分组成,详见图1。

2.1 主回路部分

它主要由“标积回路”和“差动回路”组成。“标积回路”包括“和”与“差”量的整流、加法器、减法器以及四象限模拟乘法器等电路环节,是为了实现保护的标积原理而设置的。“差动回路”由差电流整流和整定环节构成。二者输出至“比较”电路进行量值比较后,决定主回路是否动作。当区外故障时,为提高主回路动作行为的正确性,用“跟随”回路“与”主回路“出口A”,实现当区外故障时闭锁主回路出口的目的。

2.2 谐波制动部分

由“50Hz混频”电路与“100Hz选频”电路组成,二者通过电位配合以防止变压器空载合闸时保护误动作。闭锁方式采用A、B、C三相谐波制动回路“或”输出再分别闭锁A、B、C相三相的主回路。

2.3 出口电路部分。

出口电路拟采用“三取二”方式,这是由出口电路中的 Y_{AB} 、 Y_{BC} 、 Y_{CA} 逻辑电路

来完成的。这样可防止因一相元件损坏引起保护误动，还可防止因一相CT断线造成保护误动作。保护可能的拒动可由巡检装置及时发现并排除。

二 研究品的静态试验

1. 单元电路的测试

a. 四象限模拟乘法器BG314的输入—输出特性:

乘法器的输入信号为 U_x 和 U_y ，输出为 U_o ，则有关系式 $U_o = 0.1U_x \cdot U_y$ ，现将实测的输入—输出特性数据记录列于表1中。

表1

U_x (V)	0	0.54	1.20	1.80	2.40	3.20	3.90	4.50	5.10	6.30
U_y (V)	0	-0.58	-1.20	-1.30	-2.45	-3.30	-3.90	-4.60	-5.20	-6.50
U_o (V)	0.02	-0.03	-0.125	-0.55	-0.63	-1.00	-1.45	2.00	-2.50	-3.80
U_x (V)	0	-0.62	-1.20	-1.81	-3.25	-3.90	-5.20	-6.40	-7.05	-7.50
U_y (V)	0	-0.62	-1.20	-1.82	-3.30	-3.90	-5.20	-6.50	-7.15	-7.60
U_o (V)	0.02	0.03	0.20	0.34	1.02	1.50	2.60	6.00	-4.50	5.00

b. 四象限模拟乘法器BG314角度特性

在信号输入回路(电流)施加 $|\dot{I}_1| = 10A$ 、 $|\dot{I}_2| = 5A$ ，当 \dot{I}_1 与 \dot{I}_2 间夹角 φ 变化时，可测得BG314输出电压变化情况如表2所示。

(理论计算式为 $U_o = K \cdot |\dot{I}_1| \cdot |\dot{I}_2| \cos\varphi$)

表2

φ (度)	0	-10	-20	-30	-45	-60	-70	-82	-90	-105	-120	-135	-150	-160	-170
U_o (伏)	1.60	1.50	1.50	1.23	1.00	0.55	0.25	0	0.22	0.85	1.05	1.36	1.58	1.70	1.80
φ (度)		10	20	30	45	60	75	90	105	120	135	150	160	170	180
U_o (伏)		1.62	1.60	1.44	1.20	0.86	0.50	0	0.40	0.75	1.05	1.70	1.55	1.67	1.84

c. 低通滤波器幅频特性

施加输入电压 $U_i = 5V$ ，改变其频率，可测得低通滤波器的输出变化记于表3。

表3

f (Hz)	20	39	40	60	80	100	150	200
U_o (V)	10	7.07	6.90	2.90	1.50	0.97	0.41	0.02

d. 50Hz双T陷波器幅频特性

施加 $U_i = 5\text{V}$ ，改变频率测得陷波器输出变化记于表4

表4

f (Hz)	20	30	35	40	45	48	49	50	51	53	55	70	90	100	110	120
U_o (V)	4.98	4.80	4.50	4.00	2.05	1.46	0.80	0.15	0.25	1.70	2.70	4.30	4.80	4.90	4.95	4.95

e. 150Hz双T陷波器幅频特性

测试条件同d项。数据记于表5。

表5

f (Hz)	50	80	100	110	120	130	140	148	149	150	151	153	155	160	180	200
U_o (V)	5.00	4.90	4.80	4.40	4.00	3.30	2.10	0.80	0.52	0.23	0.25	0.85	1.20	2.00	3.60	4.30

2. 整组工作测试:

测试条件: 差回路输入电流(标积回路退出) 比较器门槛电平 $U_i = 4.80\text{V}$

a. 动作电流: $I_{d,1} = 0.68\text{A}$

b. 返回电流: $I_{f,1} = 0.62\text{A}$

c. 返回系数: $k_f = I_{f,1} / I_{d,1} = 0.91$

d. 动作时间: (测试条件: $1.2I_{d,1}$ 下测试) 10次测量结果为:

18.6ms, 18.0ms, 19.3ms, 17.8ms, 18.8ms, 18.1ms, 18.9ms, 20.0ms, 18.3ms, 19.1ms.

平均动作时间 $t_{d,1} = 18.69\text{ms}$

e. 二次谐波制动比的测定:

测试条件: 差回路施加50Hz 1.0V, 谐波制动回路施加100Hz 0.15V, 保护可靠闭锁, 且无触点竞赛现象发生, 即谐波制动回路制动速度不低于主回路动作速度。

三 “研究品” 的动态模拟试验报告

1. 试验目的

检验标积式差动保护“研究品”投入电力系统暂态过程中的动作行为, 以便对该保护“研究品”作出工业试验性鉴定。

2. 试验接线

见附图2 该试验是在30kVA发一变组上进行的, 通过发电机与变压器各一组CT(即图中的 CT_1, CT_2)引入被试继电器的电压形成回路I/V一次侧(仅A、C二相接入继电器, B相未接继电器), 图中 K_4, K_3, K_2, K_1 短路点, 分别代表继电器试验作区

外故障、区内变压器高压侧故障、区内变压器低压侧故障、区内发电机内部故障的故障点；开关1C由相角合闸器控制作变压器的空投试验。

3. 试验内容与记录（附试验录波图）

①区外故障（ K_4 点处短路）

考验“研究品”在空载额定电压和带负载额定电压的二种工况下作区外各种故障类型短路时的动作行为，其试验记录和录波图一并附在后续页（附一）。

②区内故障

试验条件同上，考验“研究品”在变压器高压侧（ K_3 点），变压器低压侧（ K_2 点）以及发电机内部（ K_1 点）进行各种故障类型短路时的动作行为，其试验记录和录波图一并附在后续页（附二）。

③空投变压器

考验“研究品”的谐波制动回路在各种故障相角下空投变压器时应可靠制动，保证继电器可靠不误动，其试验记录和录波图一并附在后续页（附三）。

4. 动态模拟试验结论

①. 区外故障时

在不同的工况作不同的故障类型的区外短路时，“研究品”均可靠不动作（见录波图1）。

②区内故障时

试验条件同上课时，在各种类型故障时“研究品”均正确动作。

a. 变压器高压侧短路

相间短路（空载）时保护动作时间为8ms（见录波图2）

匝间2.4%处短路时，保护动作时间为20~22ms（见录波图3）

b. 变压器低压侧短路

空载匝间2.7%短路，保护动作时间为10ms（见录波图4）

负载匝间2.7%短路，保护动作时间为15~12ms（见录波图5）

③空投变压器

在各种合闸角下“研究品”均能可靠制动（在 0° 合闸空投变压器时见录波图6）。

5. 遇到的问题与解决问题措施

①电压形成I/V变换器输出波形畸变

当模拟系统故障时，故障暂态过程中非周期分量加速I/V变换器的饱和，使其输出波形畸变（见录波图7）；尤其当区内故障暂态过程中，I/V变换器相当于一个“谐波源”引起谐波制动回路“误闭锁”，延缓了保护动作时间（严重时造成保护拒动），解决办法：

第一，减少I/V变换器的一次绕组匝数，降低一次侧安匝。

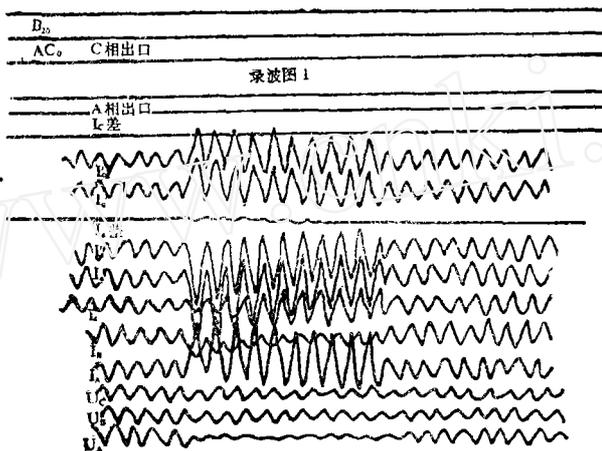
第二，减小I/V变换器二次并联电阻，减轻二次负担。经处理（I/V变换器二次侧并联电阻由 51Ω 减小到 12.5Ω ）后，I/V变换输出波形大大改善（见录波图8），

当区内故障时避免了I/V输出波形失真而引起的“谐波制动回路误闭锁”。

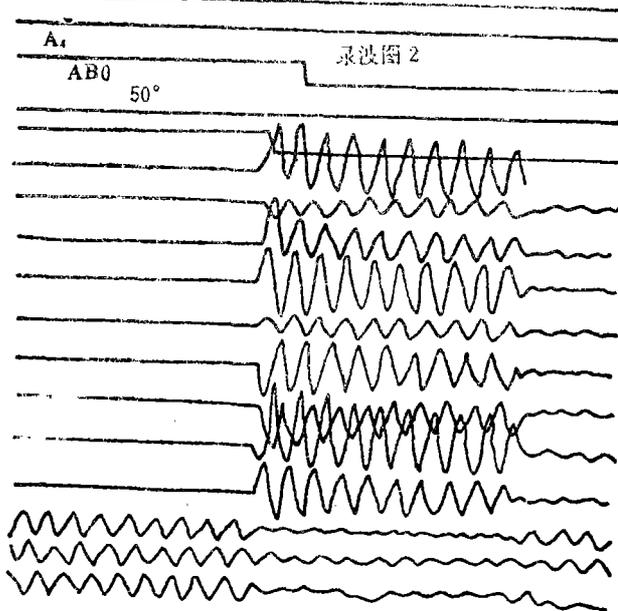
②故障暂态非周期分量对保护影响

故障暂态非周期分量（直流分量）很容易通过I/V变换器，当在区内故障时，暂态非周期分量将直接传递到二次谐波回路—相当于二次谐波分量，此时谐波制动回路同样会“误闭锁”，而延缓保护动作时间。

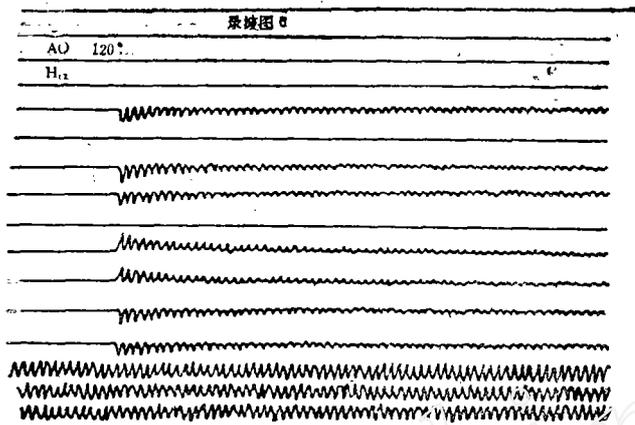
解决办法：在100Hz谐波回路输出端（即谐波回路低通滤波器输出）对地并接一个限幅二极管，限制直流分量通过，起到避免谐波制动回路“误闭锁”的作用，从而保证主回路快速动作于跳闸。但需注意到当空投变压器时，100Hz谐波分量应保证畅通，而



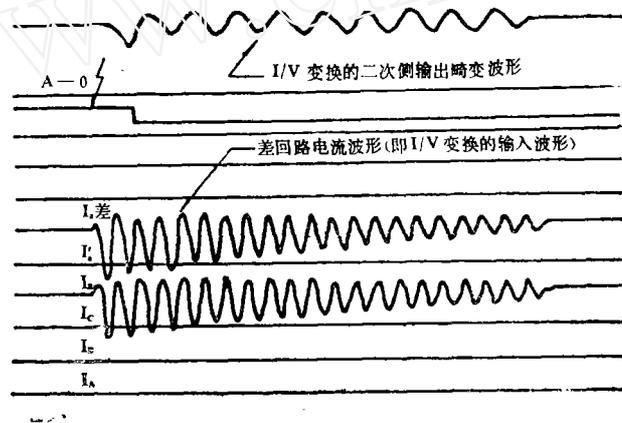
录波图 1 区外故障录波图



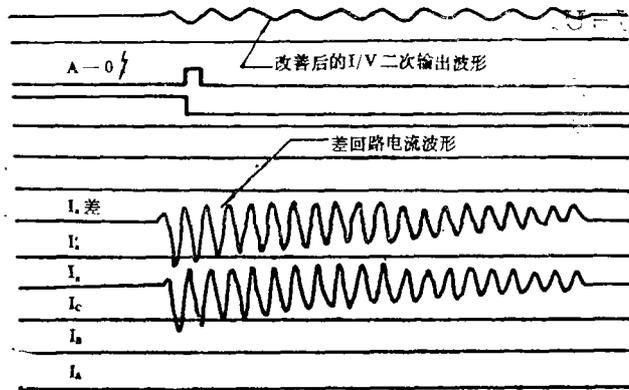
录波图 2 变压器高压侧AB0短路录波图 $I_0 = 0$ $U = U_0$



录波图 6 变压器空载合闸 (0°)



录波图 7 故障暂态时差电流波形与 I/V 二次侧畸变波形



录波图 8 暂态时差电流波形与改善后的 I/V 二次侧波形

不允许被该限幅二极管限幅，以保证空投变压器时谐波制动回路可靠“制动”。

③当空投变压器时，励磁涌流完全偏移于时间轴一侧后，对保护的影响

当空投变压器励磁涌流完全偏出于时间轴一侧后，“50Hz选频回路”中的整流电路将失去整流作用，其涌流波形负半周经整流电路后不再翻转，使下一级低通滤波电路不能正常工作，失去滤波作用，造成低通输出波形也近乎为一交流量（输出波形过零），致使谐波制动回路不能可靠制动。为此在“50Hz选频回路”中的整流电路后加一级“50Hz带阻陷波电路”，阻掉偏于时间轴一侧的涌流中的基波分量，此时“50Hz选频回路”的低通滤波器输出波形立即变得平滑起来，保证空投变压器时谐波制动回路正常工作，起到可靠闭锁主回路作用。值得注意的是这级“50Hz带阻”加的位置只能是在整流电路之后，反之它将会阻掉周期性的50Hz工频分量，造成区内故障时“50Hz选频回路”输出信号甚微，将会引起保护拒动；从而很明显地看出，这一级“50Hz带阻”对周期性50Hz工频分量不起阻波作用。

④为了进一步保证空投变压器时保护可靠不误动，就必须要求继电器主回路先返回，而谐波制动回路后返回（即开放），为此在“50Hz选频回路”输出末端串入一正向连接的二极管后输出，使该回路在涌流衰减后期输出甚微（或者甚至无输出），突出二次谐波分量作用，从而保证谐波制动回路可靠制动且返回时间滞后于主回路。但应注意该二极管的串入应不影响区内故障时谐波制动回路可靠开放（即在区内故障时二极管上的管压降的大小与“50Hz选频回路输出的信号大小相比小到忽略不计）。

四 “研究品”作为三绕组变压器保护特点

“标积式差动保护”不仅可以作为双绕组变压器的主保护，同样也可以作为三绕组变压器或多侧制动的差动保护，由于“标积”原理特点使这种转化关系变得非常方便，因为“标积式差动”继电器的逻辑电路部分只取被保护设备两侧电流的两电流“和”信号与两电流“差”信号，这两种电流信号的取得，是通过I/V变换器二次电压按一定方式组合后很方便得到。“标积式差动保护”用作双绕组变压器或三绕组变压器或多侧制动的差动保护的區別仅是I/V变换器数量不同，保护双绕组变压器仅需二组I/V变换器，保护三绕组变压器时仅需三组I/V变换器，保护多侧制动时差动保护，I/V变换器数量仅取决于制动侧数量（即与制动侧数量相等），但继电器的逻辑电路无需任何变动（完全一样）；现以三绕组变压器的“标积式差动保护”为例，来说明该继电器是如何获得被保护设备多侧电流的电流“和”信号与电流“差”信号的，图4表示了用“标积式差动保护”实现保护三绕组变压器电压形成回路接线，通过I/V变换二次侧特定连接方式，获得反映三侧电流的“和”输出信号与“差”输出信号，其逻辑电路部分与双绕组的“标积式差动保护”一样。今以三绕组“标积式差动保护”的电压形成回路加以讨论。

1. 变压器正常运行：

$$\text{“和”回路输出 } k\dot{I}_1 + k\dot{I}_2 + k\dot{I}_3 = k\dot{I}_1 + k\dot{I}_1 = 2k\dot{I}_1$$

$$\text{“差”回路输出 } k\dot{I}_1 - (k\dot{I}_2 + k\dot{I}_3) = k\dot{I}_1 - k\dot{I}_1 = 0$$

继电器标积回路输出制动量。

2. 变压器内部故障：

“和”回路输出 $k\dot{I}_1 - k\dot{I}_2 - k\dot{I}_3 = \text{小值}$ (反映电流差)

“差”回路输出 $k\dot{I}_1 + k\dot{I}_2 + k\dot{I}_3 = \text{大值}$ (反映电流和)

继电器标积回路输出动作量。

3. 变压器外部故障

① “K₁” 点处故障：

“和”回路输出： $k\dot{I}_1 + k\dot{I}_2 - k\dot{I}_3 = k\dot{I}_1 + k(\dot{I}_1 + \dot{I}_3) - k\dot{I}_3 = 2k\dot{I}_1$

“差”回路输出： $k\dot{I}_1 - k\dot{I}_2 + k\dot{I}_3 = k\dot{I}_1 - k(\dot{I}_1 + \dot{I}_3) + k\dot{I}_3 = 0$

继电器标积回路输出制动量。

② “K₂” 点处故障：

“和”回路输出： $k\dot{I}_1 - k\dot{I}_2 + k\dot{I}_3 = k\dot{I}_1 - k\dot{I}_2 + k(\dot{I}_1 + \dot{I}_2) = 2k\dot{I}_1$

“差”回路输出： $k\dot{I}_1 + k\dot{I}_2 - k\dot{I}_3 = k\dot{I}_1 + k\dot{I}_2 - k(\dot{I}_1 + \dot{I}_2) = 0$

继电器标积回路输出制动量。

③ “K₃” 点处故障：

“和”回路输出： $-(k\dot{I}_1 + k\dot{I}_2 + k\dot{I}_3) = -2k\dot{I}_1$

“差”回路输出： $-(k\dot{I}_1 - (k\dot{I}_2 + k\dot{I}_3)) = -(k\dot{I}_1 - k\dot{I}_1) = 0$

继电器标积回路输出制动量。

前述表达式中的“k”为I/V变换器的变换系数，其值大小取决于I/V变换的原、副绕组匝数比及并联电阻阻值（所有变换器的k值均相等）。由上述三种工况分析，标积回路部分动作行为均正确（同理继电器差动部分动作行为也均为正确）。

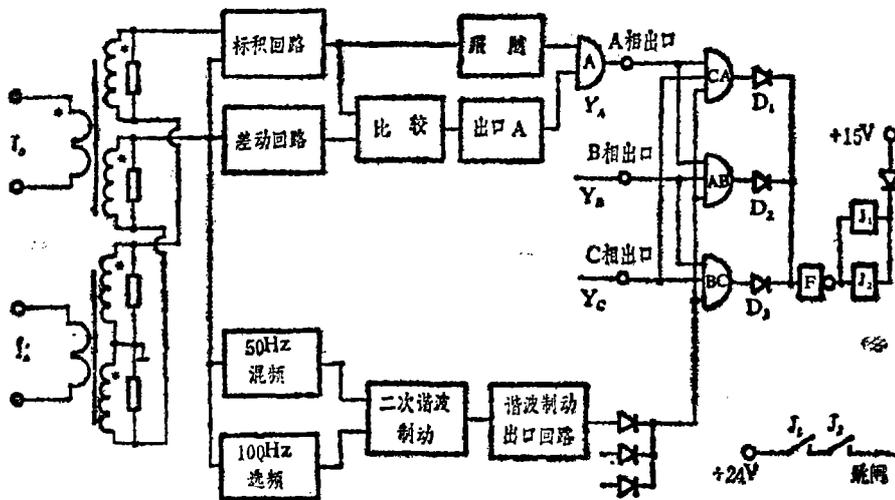


图1 原理接线框图

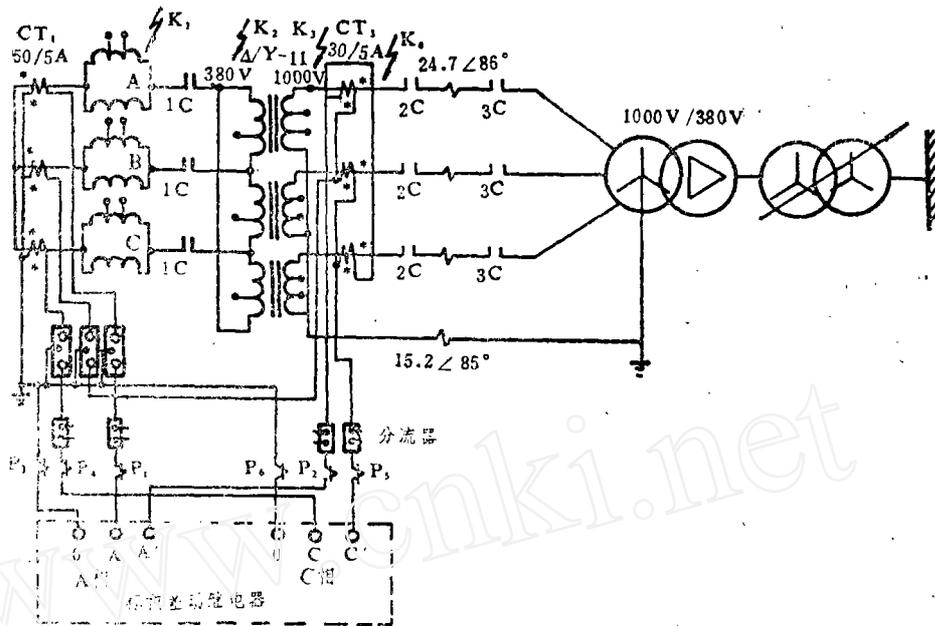


图2 动模试验接线示意图

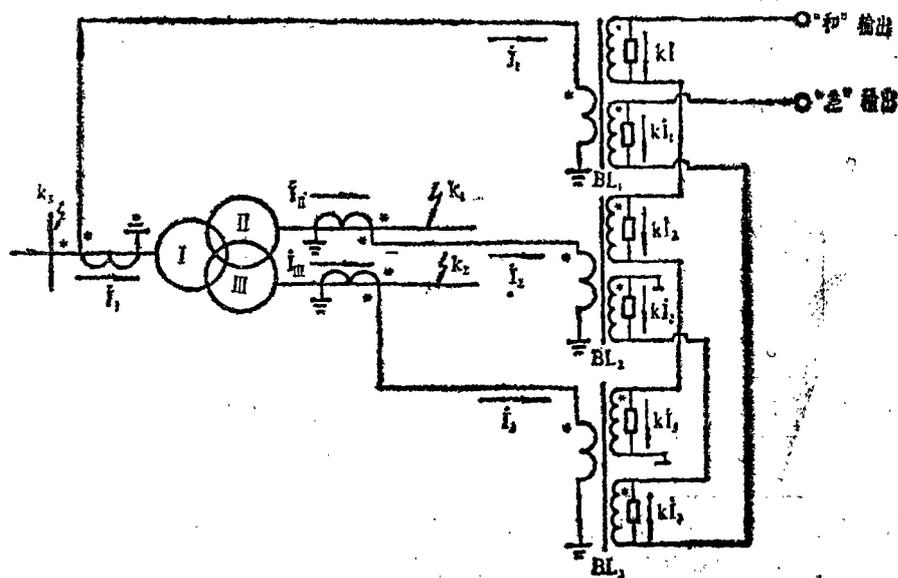


图3 用“标积式差动”原理实现三侧差动的电压形成回路原理接线图

五 结束语

标积式原理的差动保护“研究品”取得的成果，是和许昌继电器研究所领导亲切关

怀和支持分不开的，也和许继所动模室同志们对我们的工作支持分不开的，在这里向对我们工作给予全力协同和帮助的于生伟同志表示衷心感谢。我们并不满足目前取得的成果，我们将一如既往的不懈努力使“标积式差动保护”日趋完善。

附一

“研究品”在动态模拟区外故障时动作行为记录：

故障类型	故障角	A继电器 动作行为	C继电器 动作行为	录波图号	备注
A—0	60°	✓		B ₇	$I_f = 0.8I_c$ $U = U_c = 1000V$
B—0	任意		✓	B ₈	
C—0	0°	✓	✓	B ₉	
AB—0	30°	✓	✓	B ₁₀	
BC—0	任意	✓	✓	B ₁₁	
CA—0	270°	✓	✓	B ₁₂	
10ms C ₀ →CA ₀	240°	✓	✓	B ₁₄	转换性故障
A—B	30°	✓	✓	B ₁₅	
B—C	60°	✓	✓	B ₁₆	
C—A	40°	✓	✓	B ₁₇	
C—0	30°	✓	✓	B ₁₈	带12Ω过渡电阻
A—0	30°	✓		B ₁₉	带12Ω过渡电阻
ABC—0	210°	✓	✓	B ₁₃	
AC—0	0°	✓	✓	B ₂₀	见录波图1

说明：1. 故障类型：指单相接地、两相接地、三相接地、相间短路
2. 继电器动作行为用“✓”符号表示正确动作行为。

附二

“研究品”在动态模拟区内故障时动作行为记录：

变压器高压侧故障 (K₃)

故障类型	故障角	A相继电器动作行为及速度 (ms)	C相继电器动作行为及速度 (ms)	录波图号	备注
A相匝间 2.4%	0°	✓	✓	E ₁	I _f = 0.9I _e U = U _e = 1000V
	30°	✓	✓	E ₂	
A相匝间 2.4%	60°	✓	✓	E ₃	
	90°	✓	✓	E ₄	
A相匝间 2.4%	150°	✓	✓	E ₅	
	180°	✓	✓	E ₆	
A相匝间 2.4%	210°	✓	✓	E ₇	
	270°	✓	✓	E ₈	
A相匝间 2.4%	330°	✓	✓	E ₉	
A相匝间 2.4%	60°	✓	✓	I ₃	
	90°	✓	✓	I ₄	
C相匝间 2.4%	0°	✓	✓	E ₂₁	
	30°	✓	✓	E ₂₆	
C相匝间 2.4%	60°	✓	✓	E ₂₂	
	90°	✓	✓	E ₂₇	
C相匝间 2.4%	150°	✓	✓	E ₂₈	
	180°	✓	✓	E ₂₃	
C相匝间 2.4%	210°	✓	✓	E ₂₄	
	270°	✓	✓	E ₂₅	
C相匝间 2.4%	330°	✓	✓	E ₂₉	
	90°	✓	✓	I ₆	
C相匝间 2.4%	0°	✓	✓	I ₇	见录波图3
	60°	√22ms	√20ms	A ₃₂	
ABC—0	60°	V	V	A ₁₃	
AB—0	50°	V8ms	V8ms	A ₄	I _f = 0 见录波图2

发电机内部故障 (K₁)

故障类型	故障角	A相继电器动作行为、速度	C相继电器动作行为、速度	录波图号	备注
A ₂ %—B ₂ %	0°	✓	✓	H ₁	I _f = 0 U = U _e
	90°	✓	✓	H ₂	
A ₅ %—B ₅ %	30°	✓	✓	H ₆	
	120°	✓	✓	H ₇	
A ₂₀ %— B ₂₀ %	270°	✓	✓	H ₁₁	
A ₂ %—B ₂ %	0°	✓	√9ms	H ₃	I _f = 0.1I _e U = U _e
	60°	√10ms	✓	H ₄	
A ₅ %—B ₅ %	60°	✓	✓	H ₈	
	150°	✓	✓	H ₉	
A ₂₀ % —B ₂₀ %	90°	✓	✓	H ₁₂	

变压器低压侧故障 (K₂)

故障类别	故障角	A相继电器动作行为及速度 (ms)	C相继电器动作行为及速度 (ms)	录波图号	备注
C—A	90°	✓	✓	F ₄	I _f = 0
C—A	210°	✓	✓	F ₅	U = U _e = 400V
A相匝间 2.7%	0°	✓		G ₁	I _f = 0 U = U _c = 400 ^v
A相匝间 2.7%	60°	✓		G ₂	
C相匝间 2.7%	30°	✓	✓	G ₇	
C相匝间 2.7%	90°	✓	✓	G ₈	
C—A	0°	✓	✓	F ₉	
C—A	60°	✓	✓	F ₁₀	
A相匝间 2.7%	30°	✓		G ₄	见录波图5
A相匝间 2.7%	90°	✓		G ₅	
C相匝间 2.7%	0°	✓	✓	G ₁₀	
C相匝间 2.7%	60°	✓	✓	G ₁₁	
C相匝间 2.7%	300°	✓15ms	✓12ms	G ₁₂	
C相匝间 2.7%	240°	✓10ms	✓10ms	G ₉	

附三

“研究品”在动态模拟变压器空载合闸时动作行为记录:

(合闸角以AO的角为基准)

合闸角度	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°
录波图号	H ₈	H ₉	H ₁₀	H ₁₁	H ₁₂	H ₁₃	H ₁₄	H ₁₅	H ₁₆	H ₁₇	H ₁₈	H ₁₉

说明: 空载合闸变压器过程中, A、C两相的输出接点均由A、C两相谐波制动回路接点串联(“与”逻辑)工作。

结果: A、C相继电器在各种合闸角度时均能可靠制动(见0°合闸时的录波图6)