

过 功 率 继 电 器

浙江省电力中心试验所 张朝庭

华东电网随着工农业用电的增涨，日趋扩大，电力系统的稳定问题，显得非常突出和十分重要。新一杭一上220千伏超高压输电系统，采用了电气制动和远方高频起动的切机自动装置，作为提高稳定的重要手段。这些自动装置中的起动元件都要使用过功率继电器，用以判断输送的有功功率的大小和方向。最近，即将在杭郊线实现两相运行，需要过功率继电器起以下的作用：

×××电厂：反映本厂送出的有功功率属于某一数值时，创造好机组由调相自动转为发电运行的必要条件。

①变和②变：反映上海和江苏电网向浙江电网倒送的有功功率超过某一稳定极限时，使重合闸装置在发生永久性单相接地短路时，能实现非全相（两相）运行三分钟。

①变和③变：反映相邻线跳闸后，本线路输送的功率在某一方向（倒送）超过一定的稳定极限时，联锁切除部分负荷。重合闸装置也要依靠过功率继电器实现方向性。④变过功率方向解列。

因此，采用过功率继电器是提高电力系统稳定措施中的重要手段之一，也是自动解列的一种方式。

过功率继电器可以用一般感应式功率继电器改制，也可以用上海继电器厂出的LLG—1正流型另序功率继电器改制，现仅介绍后者的改制原理及其特性，供参考。

（一）过功率继电器工作原理

按绝对值比较的正流式功率方向继电器，如图一的原理接线，即上海继电器厂造的LLG—1型另序功率继电器原理图。

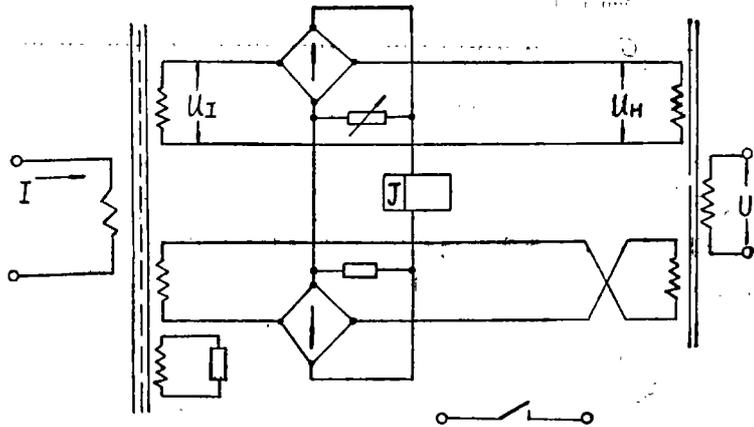


图 一

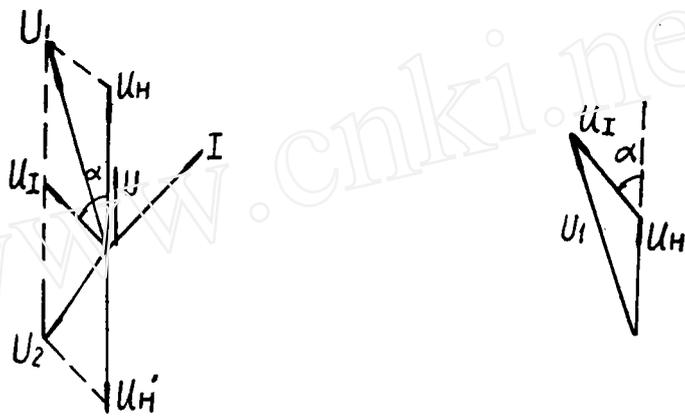


图 二

从图二的向量分析，利用余弦定律，可得以下的解析式：

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_1 &= \sqrt{U_1^2 + U_H^2 - 2U_1 U_H \cos(\pi - \alpha)} \\
 &= \sqrt{U_1^2 + U_H^2 + 2U_1 U_H \cos \alpha} \\
 &= \sqrt{U_H^2 + 2U_1 U_H \cos \alpha + U_1^2 \cos^2 \alpha - U_1^2 \cos^2 \alpha + U_1^2} \\
 &= \sqrt{(U_H + U_1 \cos \alpha)^2 + U_1^2 (1 - \cos^2 \alpha)} \dots \dots \dots (1)
 \end{aligned}$$

同理，

$$\begin{aligned}
 \dot{U}_2 &= \sqrt{U_H^2 + U_1^2 - 2U_1 U_H \cos \alpha} \\
 &= \sqrt{(U_H - U_1 \cos \alpha)^2 + U_1^2 (1 - \cos^2 \alpha)} \dots \dots \dots (2)
 \end{aligned}$$

在设计参数时，使 $U_H \gg U_1$ \dots \dots \dots (3)

则(1)、(2)两式根号内的第二项，可以忽略不计，因而得，

$$\dot{U}_1 = U_H + U_1 \cos \alpha \dots\dots\dots (4)$$

$$\dot{U}_2 = U_H - U_1 \cos \alpha \dots\dots\dots (5)$$

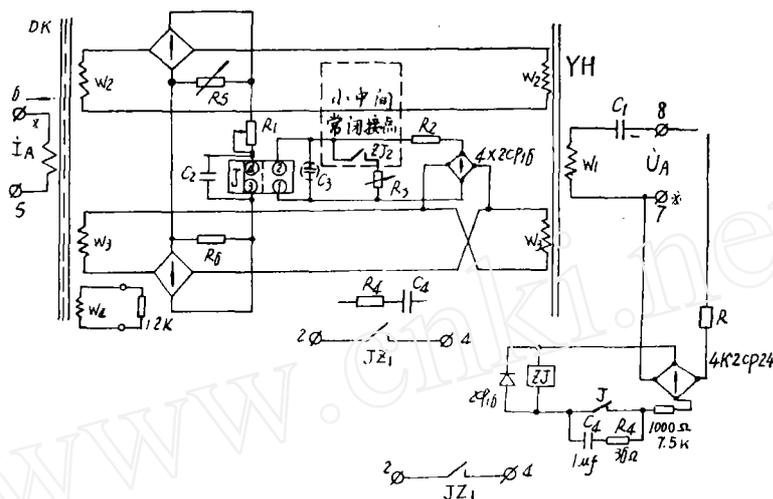
经过正流后，按绝对值比较 $|\dot{U}_1| - |\dot{U}_2|$

执行元件为极化继电器，因此继电器动作具有方向性，设动作电流为 I_{cp}

$$(4) - (5) \text{ 即得: } I_{cp} = KI \cos \alpha \dots\dots\dots (6)$$

经过改制后的正流型过功率继电器原理接线见图(三)，改制的原理分析如下：

(它实际上是一只低有功电流方向继电器)



J ——极化继电器 (JH-1Y) 只用常闭接点。
 ZJ ——小中间继电器 JZX-2F 型，常开接点 ZJ₁ 作为出口，常闭接点 ZJ₂ 旁路助磁。

图 三

从(6)式不难看出，若使 $\cos \alpha$ 为功率因数 $\cos \varphi$ ，继电器就可以反映有功电流了。

电抗变压器DK的二次电压超前一次电流约90°，如果继电器按0°接线，即电流、电压都接在同名相上，就须使变压器YH的二次电压也接近相电压的90°，也就是说使功率继电器的最大灵敏角为0°。为此目的，可以在变压器YH一次侧串联电容器C₁进行移相。原变压器一次侧阻抗不足300欧，根据计算和实际试验的结果，串联的电容量为4微法即可满足要求。串联了电容器后，相电压的大部分降落在电容器上，只有约30%的电压加在变压器线圈上，从而使继电器的热稳定也满足了要求。在此必须指出，如果采用并联电容器或使用其它方式接线，如按90°接线和调正电抗变压器W₄线圈的负载电阻的办法虽然也能做到继电器的最大灵敏角为0°，但继电器的热稳定仍存在很大问题，

这是因为厂家设计的参数勿需考虑正常运行方式，平时继电器端子上只有很小的不平衡另序分量，被保护线路接地短路时虽然另序分量很大，但也是短时出现至多数秒钟后即消逝了，变压器线圈，线径细（仅0.2毫米），阻抗小。如果不是本文介绍的方法移相，而直接接到电压互感器的二次电压上，显然是不允许持续运行，要遭到烧坏的。

串联了移相电容器以后，变压器的二次电压减小了，在一般二次电流额定值为5安的情况下，仍然满足（3）式的基本要求，但动作功率误差稍大一点，运行上是许可的。如要提高动作功率的精确度，可降低电抗变压器的二次电压，即减少电抗变压器一次线圈匝数或在电抗变压器二次侧接分压电阻，经过分压以后的电压才接到比较回路中。

以上的分析仅解决了继电器能反映有功电流的问题，在运行电压不变的特定条件下，才可以反映有功功率。实际上，运行电压是在变化的，这就是正流式按绝对值比较不能简单的作成反映有功（或无功）功率的原因。

采用非线性电感或乘法器能消掉（1）、（2）式的根号，使之成为 $KU_1U_2 \cos \alpha$ ，可反映有功功率，但很复杂。感应式功率方向继电器由于空间上已成 90° ，如在时间（相位）上再相差一定的角度，就可反映功率的方向了，但要反映给定的动作功率大小，还需增加辅助变流器和阻容元件，而且动作功率调正是阶梯式的，不及正流式过功率继电器调正方便特性好，动作干脆，返回系数不是很高，动态特性比较好。

仔细分析过功率继电器在使用上的特点是很有必要的。它不同于一般功率方向继电器，前者是正常运行状态下要求功率在某一方面超过一定数值时才动作，在线路发生短路时不允许动作；后者只允许被保护线路发生短路时才动作（特别是另序方向继电器）。正常运行方式下电压变化幅度是有限的，否则系统安全运行上是不许可的。系统调度给定的电压运行范围是 $0.8U_H \sim 1.1U_H$ 。

我们将极化继电器JH—1Y型的两组线圈分开，原来为降低动作伏安，提高灵敏度使两组线圈串联，现在作如下改接：一组4200匝接成反映有功电流；另一组8800匝接交流电压助磁，使其反映运行电压。这个助磁是接在变压器YH二次线圈中的任何一个上，再经硅二极管2CP16全波正流和滤波。

于是继电器的动作电流由以下两部分组成：

$$I_{CP} = I_{CP1} + I_{CP2} \\ = K_1 I \cos \varphi + K_2 U$$

$$\text{假设 } I_{CP} = IU \cos \varphi$$

$$\text{即 } IU \cos \varphi = K_1 I \cos \varphi + K_2 U \dots \dots \dots (7)$$

当电压 U 在某一给定范围内变化时，改变系数 K_1 、 K_2 ，使（7）式两端十分近似相等是可能的。

因为当运行电压降低时，助磁电流减小，要求的动作有功电流就大，电压升高，助磁电流相应加大，要求的动作的有功电流也相应减小，调正电阻 R_2 改变系数 K_2 ，即助磁电流的大小，就可以做到在一定的电压波动范围内反映有功功率的大小。电阻 R_2 一次调正好后，改变动作功率的正定大小，勿需再调正了。正定动作功率调正电阻 R_1 ，改变系数 K_1 ，而且存在比例的线性关系。

电容器 C_2 、 C_3 是滤波，防止接点抖动，使动作干脆。

由于极化继电器返回系数本来就很低，加上电压助磁后，返回系数更加降低了，因而一经动作之后，只要电压仍然变化不大，即使电流降到零，继电器仍然保持在动作状态。为了使继电器返回，需依靠外部的重动中间继电器（即过功率继电器接点闭合才能起动的中间继电器）常开空接点，使助磁线圈旁路后才能返回。返回系数的大小可以调正电阻 R_3 。电阻 R_3 即使调正为零，重动中间继电器接点短接了助磁线圈，继电器也不会立即返回，还要等有功电流降低到某一数值后才会返回。根据运行上的要求，在额定电压，功率因数为 0.8 时，调正电阻 R_3 ，使返回系数（重动中间继电器接点闭合后）为 0.85。

必须指出，继电器的返回系数与运行电压和功率因数有关，在调正返回系数时，最好与重动中间继电器配合一道进行，这样做是有好处的，可以消除继电器抖动现象，也符合真实的运行情况。

如果重动中间继电器实际上没有空接点，现场施工接线不方便。希望过功率继电器本身就解决返回系数的问题，则增加一只小型中间继电器就能达到要求，此小型中间继电器线圈可以从助磁回路得到供电（ $U_H = 120$ 伏， $R = 2000$ 欧的继电器），或从变压器 YH 的一次相电压经过正流滤波后得到供电，（ $U_H = 24$ 伏， $R = 250$ 欧继电器）。极化继电器常开接点接通小中间继电器，后者的接点一方面作输出的实际过功率继电器接点，另一付常开接点作返回用，旁路助磁线圈代替重动中间继电器的接点。小中间继电器的线径最好 0.12 毫米以上，且必须符合二次回路绝缘水平的要求，即交流耐压 2000 伏一分钟，因为它的接点要去控制 220 伏中间继电器，所以这个要求是必须的。小中间继电器仍然可以安装在原继电器盒内。

从回路简单和可靠的观点出发，不希望再增加一只小中间继电器，只消利用原有保护盘上的重动中间继电器（一般情况都有的），就需要对极化继电器的接点采取消弧的措施。因为电磁中间继电器在回路断开时，瞬间过电压很严重，一般 $DZS-145$ 型或 $DZ-17$ 型电磁中间继电器匝数 4000 以上，电感很大，瞬变过电压是由 $L \frac{di}{dt}$ 所决定，220 伏的中间继电器，瞬变电压可达 1 万伏以上，因而使极化继电器的接点冒火花，影响使用寿命，甚至动作后就不返回了。为此在极化继电器的接点上并联了 R_4 、 C_4 的阻容消弧回路，大大地降低了瞬变电压的数值，保证接点动作安全可靠。

继电器在本线路短路时是不会动作的。这是因为短路时，功率因数角变为线路的阻抗角（220 千伏约 80° ），余弦函数值降低到 0.175，动作电流 $I_{CP} = \frac{P}{U \cos \varphi} = \frac{P}{0.175U}$ 显著的增大，再加上短路时，电压大幅度下跌，助磁电流大大地降低，促使动作电流剧增，实际上，继电器在短路时不可能动作了。本文介绍的继电器比用感应式功率继电器改制的过功率继电器躲过短路不动作的本领强。

一般感应式继电器动态（冲击）动作值比较低，正流型比较好一些，由于电容器 C_3 的存在，动态（冲击）动作值还是接近正定值，这是有好处的。无论电压互感器是接在线路侧或是母线侧（即继电器投入运行时，电压线圈总是带电的），在线路单相自

动重合闸过程，不管线路电流的合闸相角是多大，继电器的动作功率总是接近正定值约90%。否则，实际运行功率因数低，即视在功率较大，然而重合闸过程中，电流合闸相角如果刚好与电压同相，动作功率显然比正定值降低很多。

(二)动作功率正定

设要求正定的动作功率为 P_y ，CT变比为 k_{IT} ，PT变比为 k_{TH} 继电器端子上的动作功率为单相功率二次值 P_{CP}

$$P_{CP} = \frac{P_y}{3 k_{TH} \cdot k_{IT}} = IU \cos \varphi \dots\dots\dots (8)$$

$$I_{CP} = \frac{P_{CP}}{U \cos \varphi} \dots\dots\dots (9)$$

例： $P_y = 50$ 兆瓦， $k_{TH} = \frac{220000}{100}$ $k_{IT} = \frac{600}{5}$

$$P_{CP} = \frac{50 \times 10^6}{3 \times 2200 \times 120} = 63.2 \text{ 瓦}$$

首先，必须使两回路完全对称，调正平衡电阻 R_6 ，使电流为零，电压为 $\frac{100}{\sqrt{3}}$ 伏时，极化继电器工作线圈上的电压为零。

改变移相器，调正相角，使相角表上读出的 $\cos \varphi = 0.8$ 。分别调正电压为 $\frac{100}{\sqrt{3}}$ ， $0.8 \times \frac{100}{\sqrt{3}}$ 和 $1.1 \times \frac{100}{\sqrt{3}}$ 伏，反复调正助磁电阻 R_2 ，使在三种电压值的动作功率（按（9）式计算）尽可能接近相等，最好在额定电压值下调到完全相等。 R_2 调正好后，今后就固定不变了。

正定动作功率调正电阻 R_1 ，分别固定 $\cos \varphi$ 为不同值，使电压为 $\frac{100}{\sqrt{3}}$ 伏，按（9）式计算的动作电流与继电器的实际动作电流相同。

返回系数的调正，改变电阻 R_3 ，最好配合重动中间继电器一道进行，须注意极化继电器接点断开瞬间的功率才是返回功率，并非重动中间继电器返回后的功率，因为有的中间继电器有延时的。调正返回系数的过程中，不应出现重动中间继电器抖动的现象。

(三)试验记录

按华东总调字第 号正定单进行正定试验
 装设地点 × × × 电厂，作用：调相改发电
 一次三相动作功率 100,000 瓩，CT变比 600/5，PT变比 220000/100
 继电器端子上的动作功率 126 瓦。
 继电器接线方式：同名相的相电压和相电流，即 0° 接线
 继电器编号：06 试验日期：1974年4月5日

1. 绝缘电阻,

交直流间以及各端子对壳的绝缘电阻:

1000伏摇表不低于500兆欧

2500伏摇表一分钟后不低于100兆欧。

2. 参数调正结果:

极化继电器(4200匝)动作电流1.21毫安,返回电流0.6毫安

助磁电阻 $R_2 = 33 + 5.6$ 千欧

正定电阻 $R_1 = 5.1 + 1.3$ 千欧

返回电阻 $R_3 = 0.3$ 千欧(配合小中间继电器试验)

「附」小中间继电器的动作相电压30伏,返回电压12伏

功率继电器出口接点ZJ₁,为常开接点(代替3GJ常闭接点)。

极化继电器仅使用常闭接点。

3. 动作特性:

按要求电压变化范围 $0.8U_H \sim 1.1U_H$, $U_H = \frac{100}{\sqrt{3}}$ 伏

功率因数	电压(伏)	动作电流(安)	动作伏安	返回电流(安)	返回系数	动作功率 P_{cp} (瓦)	备注
1	63	1.93		2.1	1.09	121.5	动作指小中间继电器 动作(即极化继电器 常闭接通)返回指小 中间返回(即极化继 电器动作,常闭接点 断开)
	58	1.98		2.42	1.22	119.5	
	46	2.2		3.05	1.39	102.5	
0.9	63	2.1		2.4	1.14	119.0	
	46	2.4		3.45	1.44	100.0	
0.8	63	2.4		2.7	1.12	121.0	
	46	2.8		4.05	1.45	103	
0.7	63	2.82		3.15	1.12	124	
	46	3.3		4.75	1.44	106.5	
0.6	63	3.45		3.8	1.1	130	
	46	4.02		5.5	1.37	111	
0.5	63	4.3		4.5	1.05	135.5	
	46	5.0		6.8	1.36	115	
0.4	63	5.4		5.6	1.04	136	
	46	6.2		8.5	1.37	114	

固定电压 U_H (一直加入)功率因数0.8,反复冲击拉合电流10次以上,

(四) 结论:

极化继电器可能因返回不良,希运行中加强监视(此情况已向总调反映)。