

补偿电容器自动投入的研究

广东省电力勘测设计院 熊 森

一、引言

在电力系统中,用电设备最理想的工作电压就是它的额定电压。但是实际运行中,往往很难保持所有的用电设备都在额定电压附近工作,因为用户端的电压是随着电力网中电压损耗的大小而变的。影响电压损耗的因素有:负荷变动引起电力网中电压损耗改变;主要电器设备因检修或故障而退出工作,造成电力网阻抗改变,从而引起相应的电压损耗改变;接线方式的改变引起电力网中功率分布的改变和阻抗的改变,从而造成电压损耗的改变等等。

但是引起用户端电压降低的另一个重要原因是系统中无功功率不足。

在电力系统中,发电机和高压输电线是很重要的无功功率电源,但是仅仅依靠它们所发的无功功率,远远满足不了负荷的需要,所以在系统中总要设置一些无功补偿设备来补充无功功率。作为无功补偿电源的主要设备是静电电容器和同步调相机。

静电电容器补偿原理简单,使用方便,运行经济,投资省,在110KV以下的电力网络中应用最为普遍。调相机由于投资大,经济上远不如静电电容器,因此,只有在220KV以上的系统中,在一次变电所才采用。

然而,由于静电电容器缺乏反应快速性和控制连续性,以及电容器容易损坏和损坏后的电容器难于处理(三氯联苯作为介质的电容器)等问题,使运行单位大伤脑筋,迫切希望采取有效措施来解决。

静电电容器目前存在的问题归纳起来就是:

1. 反应的速动性很差;

由于静电电容器传统的控制方式是手动投入,夜间变电所的值班人员睡觉了,这时,除三班制工厂外,绝大部分用电设备和照明负荷都没有,电压和功率因数 $\cos\varphi$ 就会上升,但值班人员已睡觉,没有人把静电电容器切除,这样的结果可能会引起过补偿,从而使电压更加升高,甚至超过额定电压。过高的电压对用电设备是有害的,会损坏用电设备。很明显,这时静电电容器补偿不但没有利,只有害处,但由于没有自动切除装置,仍处于运行状态。也就是说,静电电容器不能随着电压变化迅速地投入或切除。

2. 使用寿命短;

由于静电电容器的速动性差，基本上是长期带电运行，投上去后，很少切除，因而很容易老化变质。这可用下面的例子来说明：假定一只电灯泡的使用寿命是3000小时，如果每天用4小时，则可用2年；如果每天用1小时，则可用3年。

因此，静电电容器如果能够按照电压和功率因数变化自动投入或切除；在需要它的时候投入，在不需要它的时候切除。那么，必然会大大延长电容器的使用寿命。

静电电容器的价格与调相机比是经济的、便宜的，但就它本身的价值来讲还是相当昂贵，以目前我院设计的110KV某变电站来说，电气设备投资是90万元，柜式静电电容器的投资就占10万元，（仅一期工程的3000千乏）占电气设备的总投资的九分之一，这还是相当可观的。因此，延长电容器的使用寿命，具有巨大的经济价值。

对于静电电容器上述缺点进行研究后，认为可设计一套检查变电站功率因数 $\cos \varphi$ 和母线电压的静电电容器自动投入装置，当功率因数或电压低过规定值时，将静电电容器自动投入；当电压超过规定值时，将静电电容自动切除，从而解决了静电电容器的速动性和使用寿命问题。

二、电容器补偿电压的原理

在谈自动投入装置之前，为了便于对装置理解，先介绍静电电容器补偿电压的原理，看看它是怎样起到补偿电压作用的。

电力网络中，用“电压偏移”这个概念来描述电压变化的情况。“电压偏移”的定义是指网络中某点的实际与该网络额定电压的差。一般用千伏表示，也可以用对额定电压百分数表示。例如在额定电压为10KV的母线上，其实际电压为9.5KV，则该处的电压偏移为0.5KV或-5%。

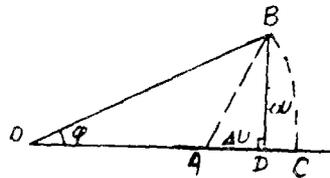
图一中，设：线路的始端电压是 U_1 ，线路的末端电压是 U_2 。

则：向量 $\Delta \dot{U} = \dot{U}_1 - \dot{U}_2$

$\Delta \dot{U}$ 是线路始端和末端的向量差，称为“电压降”。图中， \overline{OA} 和 \overline{OB} 分别是 U_2 和 U_1 。 \overline{AB} 叫“电压损耗”，它是线路始端和末端电压绝对值的差，用符号 ΔU 表示。静电电容器补偿的就是电压损耗 ΔU 。

ΔU 的定义虽然是这样的，但实际计算时，却是取与线段 \overline{AC} 接近的另一个线段 \overline{AD} 。

请看图一。按 ΔU 的定义，以 O 为原点，以线段 \overline{OB} 为半径，作圆弧交线段 \overline{OA} 的延长线上于 C 点，则：



图一 电压向量

$$\Delta U = \overline{OC} - \overline{OA} = \left| \dot{U}_1 \right| - \left| \dot{U}_2 \right| = \overline{AC}$$

但实际应用中，为了简化计算起见，求 ΔU 是经过图一中的 B 点，向 \overline{OA} 的延长线作垂线，得到垂足 D ，以垂线 \overline{BD} 代替圆弧 \overline{BC} ，这样 ΔU 就等于：

$$\Delta U = \overline{OD} - \overline{OA} = \left| \dot{U}_1 \right| - \left| \dot{U}_2 \right| = \overline{AD}$$

而不在是线段 \overline{AC} 了。换句话说，按照定义 ΔU 应该是线段 \overline{AC} ，实际计算时，则是取线段 \overline{AD} 作为 ΔU 。

若设 \dot{U}_1 和 \dot{U}_2 的相位角为 φ

P 、 Q 、 U 分别为线路始端的有功功率、无功功率和电压； R 是线路的电阻， X 是线路的感抗。根据公式：

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

从图一可推导出：

$$\Delta U = \sqrt{3} (IR \cos \varphi - IX \sin \varphi) = \frac{PR + QX}{U}$$

$$\delta U = \sqrt{3} (IX \cos \varphi + IR \sin \varphi) = \frac{PX - QR}{U}$$

为了简化起见，推导过程从略，上式列出的仅是结果。

式中： ΔU 称为电压降落的纵分量，即电压损耗； δU 称为电压降落的横分量。

这里所说的纵和横都是相对 \dot{U}_2 而言；与 \dot{U}_2 同相的称为“纵”，直垂于 \dot{U}_2 的称为“横”。

在计算变电所的电压损耗时，通常可以近似地只考虑电压降落的纵分量 ΔU ，而把电压降落的横分量 δU 忽略。

分析一下 $\Delta U = \frac{PR + QX}{U}$ 这个计算公式，可以看出影响 ΔU 的因素有 4 个，即有功功率 P 、无功功率 Q 、电阻 R 及电抗 X ，因此，在理论上可以借改变有功及无功来调压，也可以借改变电阻和电抗来调压。

静电电容补偿电压就是借改变电抗来调压的，设静电电容的容抗为 X_C ，则电压损耗 $\Delta U = \frac{PR + Q(X_L - X_C)}{U}$ 电抗 $(X_L - X_C)$ 显然小于未加电容时的电抗 X_L ，因此 ΔU 下降了，这就达到了补偿电压的目的。

补偿电容器接在线路上有两种接线方式：串联或并联。上面推导的公式是用于串联方式的。

如果是并联方式，则 ΔU 的表达式为：

$$\Delta U = \frac{(Q - Q_c) X_L}{U}$$

式中 Q_c 为并联补偿电容器的容量， Q 为线路原来输送的无功功率。由上式可以看出。电压损耗 ΔU 与 $(Q - Q_c)$ 成正比，如果 Q_c 容量越大， $Q - Q_c$ 的值差越小，则 ΔU 越小。因此，起到补偿电压的作用。

三、电压损耗对用电设备的影响

前面已经谈到电压损耗引起的电压偏移对用电设备有影响：电压降低对用户有影

响,因补偿过度而引起电压升高对用户同样有影响。这些影响表现在哪些方面,影响有多大?这就是本节所要讨论的。知道了这些影响,要消除它,这就是装设补偿电容器自动投入装置的原因。

变所的负荷主要是电动机和照明设备。那我们就这两种设备来分析一下电压偏移对用电设备的影响。

电动机特别是异步电动机在电力系统中所占的比重很大,通常在50%以上。

异步电动机的电阻和电源是一个常数,对于这种负荷,其有功功率和无功功率与电压的平方成正比,即

$$P = I^2 R = \frac{U^2}{R} \quad Q = I^2 X = \frac{U^2}{X}$$

当异步电动机的外加电压为额定电压时,电动机中的磁路是饱和的。当电压稍微降低时,励磁电流 I_u 将减少很多。也就是说,电动机中励磁所消耗的无功功率 $Q_u = I_u^2 X_u$ 将显著减小。当电压很低时,由于电动机磁路没有饱和, I_u 随电压的变化不如饱和时来得厉害,而此时转差率随电压降低增大很多;电动机所取的电流增大,漏抗损失也随着增大,因而无功功率随着电压降低反而增加。换句话说,随着端电压降低,电动机吸收的无功功率增加,这是一个方面。

另一方面,当端电压太低时,电动机可能由于转矩太小而停止工作,或者带重载的电动机起动不了。由于一定的机械荷载下,电动机的出力基本上不受电压的影响,所以电压越低,电流越大,使电动机绕组的温度升高,加速绝缘的老化。反之,端电压过高,同样是加速电动机绝缘老化,严重的还会烧线圈。

照明负荷主要是白炽灯,即通常的电灯,白炽灯对电压变动的敏感性大。当端电压变化时,其光通量、发光效率和寿命都会起变化。统计数字说明:当电压较额定值降低5%时,光通量要减少18%,这就是家庭用电灯总感觉不亮的原因。当电压较额定电压高5%时,其寿命要降为一半,这就是电压升高,经常烧灯泡的原因。

四、电容补偿自动投入装置的构成

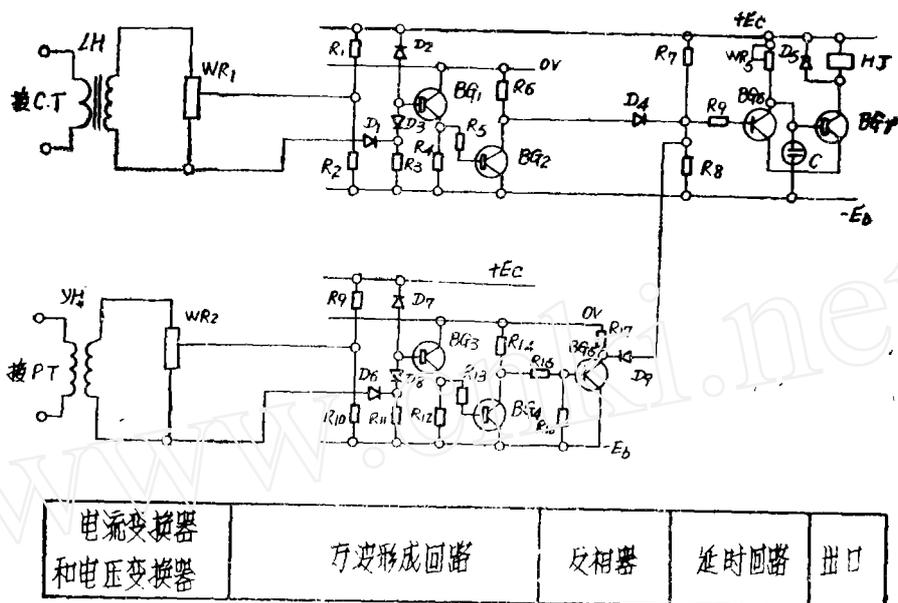
这种自动投入装置可按功率因数 $\cos \varphi$ 和电压绝对值两种因素分别自动投入。

功率因数 $\cos \varphi$ 是反映电压、电流的相位关系,它受负荷性质影响,如果感性负荷比重大,统统的无功功率又不足,那么功率因数就低。电压绝对值与系统的无功功率也有关系。前面分析中已指出:用电设备所消耗的无功功率与电压平方成正比,即

$Q = \frac{U^2}{X}$,当系统中没有足够的无功电源时,不得不降低整个系统的电压水平以减少无功功率的消耗量,这就是说,电压绝对值和功率因数都与无功功率有关系,但不是正比关系。正因为不是正比关系,就可能出现这样的情况:由于感性负荷多,功率因数 $\cos \varphi$ 降低很多时,电压不一定降很多。因此,单从电压绝对值大小,尚不能判断无功的多少,现在引入功率因数 $\cos \varphi$ 这个因数,就能更准确地判断系统需要无功的情况。

(一) 投功率因 $\cos \varphi$ 数自动投入:

当变电所的功率因数 $\cos \varphi$ 降低到规定值时 (比如降到 0.75) 装置启动, 把补偿电容器投入。原理接线图见图二。



图二 比相自动投入原理图

它是由变换器, 方波形成回路、反相器、延时回路、出口等几个部分组成。

变电所的电压和电流经电压互感器和电流互感器输入。图中的电流变换器 L_H 把电流变换成与它成比例的弱电流, 在二次侧负荷电位器 WR_1 上取得正比电压, 输入到方波形成回路。电压变换器 YH 把电压变换成与它成比例的弱电压, 输入到另一个方波形成回路。

1. 方波形成回路:

三极管 BG_1 、 BG_2 和 BG_3 、 BG_4 分别构成两个方波形成回路。它的作用是将输入信号放大, 并将输入正弦波变为输出方形波, 便于进行相位比较。输入、输出波形变化见图三。

反映电压的方波形成器的输入、输出波形如图三(b)所示。

2. 反相器:

图二中的 BG_5 构成反相器, 其作用是把电压方波反相 180° , 其波形见图(c), 以便和电流方波进行比相。电流方波经二极管 D_4 输出, 电压方波经二极管 D_5 输出, 迭加比相后, 加到延时回路 BG_6 的基极上。迭加比相后的波形见图三(d)所示。

3. 延时回路:

延时回路由 BG_6 和 BG_7 电容 C 构成, 它是一个充电式时间电路, 它的作用是鉴别

动作波形：如果是动作波形输入电容器C充满电，使BG₇翻转，起动作出口合闸继电器HJ。如果输入的不是动作波形，电容器C充不满电，延时回路没有输出。

动作波形和非动作波形用时间来区别。

设功率因数 $\cos\varphi$ 的整定值是0.7，就是说，当变电所的功率因数低于0.7时，自动投入装置应动作，将补偿电容器投入。

如大家所知：工频是50周/秒

$$\text{每个周波} \frac{1}{50} = 0.02 \text{秒}$$

一个周波是 360°

换算成时间， 360° 是0.02秒，每度是0.06毫秒，

若 $\cos\varphi = 0.7$ ，则 $\varphi = 45^\circ$ （从三角函数表查知）

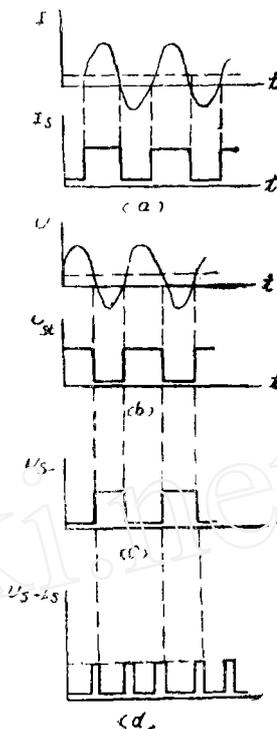
$$54^\circ \times 0.06 = 2.7 \text{毫秒}$$

选择电容器C的充电时间是2.7毫秒。

凡是大于2.7毫秒，延时元件动作。

凡是小于2.7毫秒，延时元件不动作。

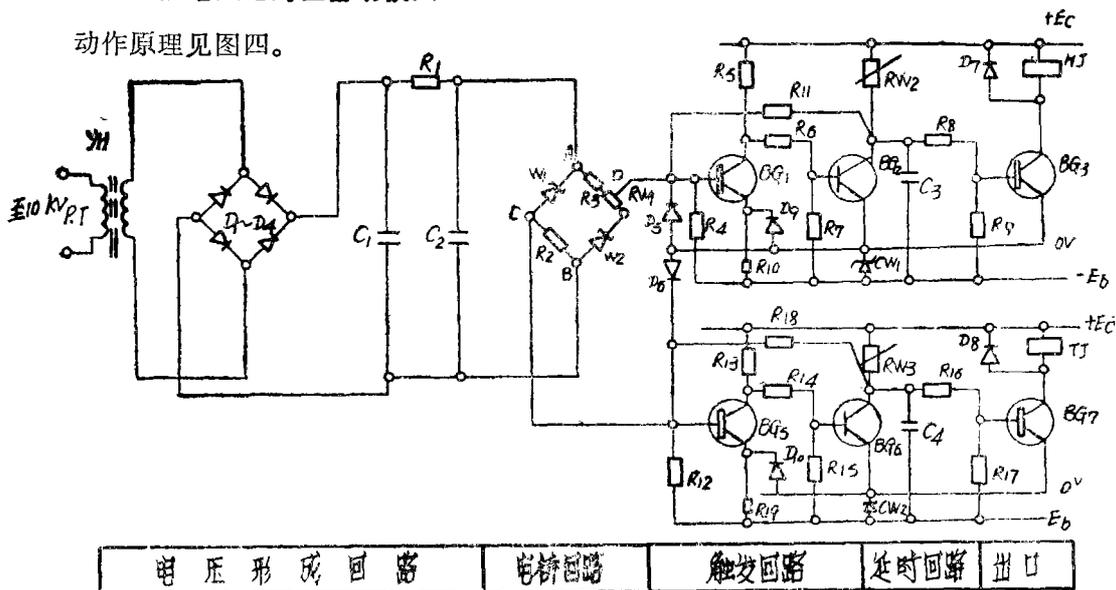
这样就保证了小于或等于0.7的 $\cos\varphi$ 输入波形才能使装置动作。



图三 比相波形图

(二) 按电压绝对值自动投入

动作原理见图四。



图四 比电压自动投入原理图

它由电压形成回路，电桥回路，触发回路，延时回路及出口回路等五个部分组成。

1. 电压形成回路：

它由电抗变换器 YH 和整流桥、滤波回路等构成，它的作用是把母线电压互感器上来的电压变为弱电压，经整流滤波后送到电桥回路。

2. 电桥回路：

电桥回路由稳压管 W_1 、 W_2 和电阻 R_2 、 R_3 ，电位器 RW_1 组成，调整 RW_1 可使 C 、 D 两点电位相等，电桥没有输出信号，当 $10KV$ 电压互感器的电压升高或降低时，稳压管 W_1 和 W_2 上的电压不变，电阻 R_2 、 R_3 和电位器 RW_1 上的电压则跟随变化。 $10KV$ 母线电压波动由 U_{AB} 反映。

如果 U_{AB} 电压升高，则 C 点电位升高， D 点电位下降，电桥输出电压 U_{CD} 是正值。这个输出电压分别加到三极管 BG_1 和 BG_5 的基极上， BG_5 由截止变导通， BG_5 截止，起动延时回路，三极管 BG_1 基极上感受到的是负电位，因而仍然保持截止状态。如果 U_{AB} 电压降低，则 C 点电位下降， D 点电位上升，电桥输出电压 U_{CD} 是负值，这个电位使三极管 BG_1 由截止变导通， BG_5 仍维持截止状态。 BG_1 导通，使 BG_2 截止，起动电容器 C_3 组成的延时回路。

3. 延时回路：

由三极管 BG_2 和电容器 C_3 （ BG_6 和 C_4 ）组成，正常时，由于 BG_2 导通， C_3 处于放电状态，当 BG_2 截止时， C_3 开始充电，当达到整定时间， BG_3 导通，起动合闸出口继电器 HJ 。这里延时回路的作用是躲过瞬时性电压波动，一般整定30秒即可满足要求。

五、装置的应用范围

本文所介绍的装置接线，适用于变电所的补偿电容器组使用。

就负荷性质而言，以工业负荷为主体的变电所，由于异步电动机容量所占的比重较大，装置中的功率因数判据（即比相判据）将发挥主要作用，以照明负荷为主体的变电所，装置中的接电压绝对值判据将发挥主要作用。

这两种判据，对装置的出口来说是并联接线的，它们的关系不是互相制约而是相辅相成。因此，无论那一种判据发挥主要作用，都不会影响装置的可靠性。