

# 采用固态继电器的电网综合补偿系统研究

杨杰<sup>1</sup>, 赖声礼<sup>1</sup>, 吴淑泉<sup>1</sup>, 李心广<sup>2</sup>

(1. 华南理工大学电信学院, 广东 广州 510640; 2. 广州大学物理与电子系, 广东 广州 510405)

**摘要:** 首先介绍了固态继电器的工作原理, 并在综合补偿系统中采用固态继电器代替普通继电器, 克服普通继电器存在的缺点。针对目前电网中存在的功率因数低和三相不平衡问题, 提出一种同时对无功功率和三相不平衡进行综合补偿的方法。实际运行表明该综合补偿系统能有效地提高供电质量。

**关键词:** 固态继电器; 无功功率; 三相不平衡; 综合补偿

**中图分类号:** TM58; TM714.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2002)06-0004-03

## 1 引言

随着我国科学技术的不断进步, 电网中冲击性、非线性负荷容量不断增长, 使得电网功率因数低、三相不平衡、高次谐波放大等电能质量问题日益严重。功率因数低, 加大了电力网络损耗, 引起系统电压下降<sup>[1]</sup>, 浪费了能源, 还带来安全隐患。电网的三相不平衡, 不但可以引起电机及变压器的发热和附加损耗, 严重时还会引起继电保护和自动装置的误动<sup>[2]</sup>。因此对电网的无功功率和三相不平衡进行综合补偿是当前迫切需要解决的问题。采用传统电磁继电器作为投切电容器的器件, 涌流冲击大, 电磁干扰严重。本文提出的采用固态继电器投切电容器组的电网综合补偿系统, 能对电网的无功功率和三相不平衡进行有效的补偿, 并且能防止投切电容器瞬间的涌流冲击, 减小电磁干扰。

## 2 固态继电器(SSR)原理与应用

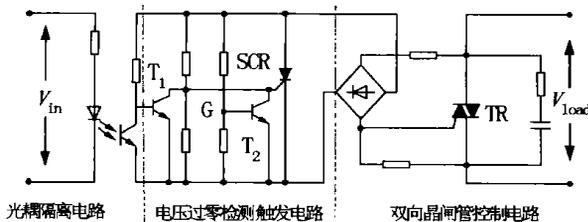


图1 交流过零导通型固态继电器电路原理图

固态继电器(SSR)是由半导体元件组成的无触点开关元件。与电磁继电器相比, 具有工作可靠、寿命长、对外界干扰小、抗干扰能力强、开关速度快、能与集成电路兼容等优点<sup>[3]</sup>。SSR按负载可以分为: 交流型和直流型; 按触发方式可分为: 过零导通型、相控型、峰值导通型、软启动型。交流过零导通型

SSR原理如图1所示, 主要由光耦隔离电路、电压过零检测触发电路、双向晶闸管控制电路三部分构成。无输入信号时, 三极管 $T_1$ 导通,  $T_2$ 截止, 可控硅SCR不导通, 双向晶闸管TR不导通。有输入信号后,  $T_1$ 截止, 若此时负载电压 $V_{load}$ 大于过零电压, 则 $V_G$ 大于 $T_2$ 的导通阈值电压 $V_{be2}$ ,  $T_2$ 导通, SCR不导通, TR不导通; 只有当负载电压小于过零电压时,  $V_G < V_{be2}$ ,  $T_2$ 截止, SCR导通, TR门极才能获得正反两个方向的触发脉冲而导通, 接通负载回路。输入信号停止后, SCR关断, 但TR仍保持导通, 直到负载电流小于TR的维持电流后TR才关断, 切断负载回路。

采用交流过零导通型SSR作为投切电容器的器件, 可以实现电压过零点投切电容器, 有效地减少了投切电容器时电磁干扰和涌流冲击。随着SSR技术的不断发展, SSR不论是耐压还是抗涌流冲击的能力都得到提高。同时由于技术成熟, 其价格也不断地下降。在无功补偿系统中采用SSR替代传统的继电器必将成为一个发展的趋势。由于补偿回路电流比较大, 并且电容器投切时存在一定的残余电压等原因, 本综合补偿系统中采用专用于无功补偿的交流过零导通型SSR作为投切电容器的器件。该系列SSR驱动电流为5mA, 负载回路最大工作电流为70A, 最大工作电压为660V。

## 3 综合补偿系统

### 3.1 综合补偿原理

下面用对称分量法推导出同时对无功功率和三相不平衡进行综合补偿的计算公式。不平衡负荷 $Y_1^{ab}$ 、 $Y_1^{bc}$ 、 $Y_1^{ca}$ 由平衡三相电压供电, 如图2所示。电压以A相电源电压为参考量有:  $\dot{V}_a = \dot{V}$ ;  $\dot{V}_b = a^2 \dot{V}$ ;

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(69772007)

$\dot{V}_c = a\dot{V}$ , 其中  $a = e^{j120^\circ} = -1/2 + j\sqrt{3}/2$ 。图中

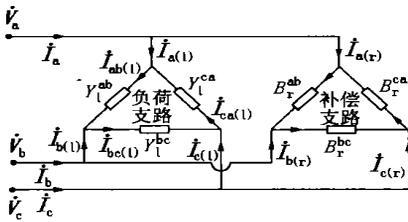


图2 进行综合补偿后电路原理图

$$\begin{cases} Y_1^{ab} = G_1^{ab} + jB_1^{ab} \\ Y_1^{bc} = G_1^{bc} + jB_1^{bc} \\ Y_1^{ca} = G_1^{ca} + jB_1^{ca} \end{cases} \quad (1)$$

负荷支路的相电流为

$$\begin{cases} \dot{I}_{ab(1)} = Y_1^{ab} \dot{V}_{ab} = Y_1^{ab} (1 - a^2) \dot{V} \\ \dot{I}_{bc(1)} = Y_1^{bc} \dot{V}_{bc} = Y_1^{bc} (a^2 - a) \dot{V} \\ \dot{I}_{ca(1)} = Y_1^{ca} \dot{V}_{ca} = Y_1^{ca} (a - 1) \dot{V} \end{cases} \quad (2)$$

负荷支路的线电流为

$$\begin{cases} \dot{I}_{a(1)} = \dot{I}_{ab(1)} - \dot{I}_{ca(1)} = [Y_1^{ab}(1 - a^2) - Y_1^{ca}(a - 1)] \dot{V} \\ \dot{I}_{b(1)} = \dot{I}_{bc(1)} - \dot{I}_{ab(1)} = [Y_1^{bc}(a^2 - a) - Y_1^{ab}(1 - a^2)] \dot{V} \\ \dot{I}_{c(1)} = \dot{I}_{ca(1)} - \dot{I}_{bc(1)} = [Y_1^{ca}(a - 1) - Y_1^{bc}(a^2 - a)] \dot{V} \end{cases} \quad (3)$$

负荷支路线电流的对称分量为

$$\begin{cases} \dot{I}_{0(1)} = (\dot{I}_{a(1)} + \dot{I}_{b(1)} + \dot{I}_{c(1)}) / \sqrt{3} \\ \dot{I}_{1(1)} = (\dot{I}_{a(1)} + a\dot{I}_{b(1)} + a^2\dot{I}_{c(1)}) / \sqrt{3} \\ \dot{I}_{2(1)} = (\dot{I}_{a(1)} + a^2\dot{I}_{b(1)} + a\dot{I}_{c(1)}) / \sqrt{3} \end{cases} \quad (4)$$

将式(3)代入式(4)可得:

$$\begin{cases} \dot{I}_{0(1)} = 0 \\ \dot{I}_{1(1)} = \sqrt{3}(Y_1^{ab} + Y_1^{bc} + Y_1^{ca}) \dot{V} \\ \dot{I}_{2(1)} = -\sqrt{3}(a^2 Y_1^{ab} + Y_1^{bc} + aY_1^{ca}) \dot{V} \end{cases} \quad (5)$$

类似地,可以得到补偿支路的线电流的对称分量为

$$\begin{cases} \dot{I}_{0(r)} = 0 \\ \dot{I}_{1(r)} = \sqrt{3}j(B_r^{ab} + B_r^{bc} + B_r^{ca}) \dot{V} \\ \dot{I}_{2(r)} = -\sqrt{3}j(a^2 B_r^{ab} + B_r^{bc} + B_r^{ca}) \dot{V} \end{cases} \quad (6)$$

进行补偿后,希望功率因数为1,这就要求三相系统正序线电流的虚部为0,即

$$\text{Im}[\dot{I}_{1(1)} + \dot{I}_{1(r)}] = 0 \quad (7)$$

同时,进行补偿后希望三相系统是平衡的,这就要求三相系统线电流不含负序分量,即

$$\dot{I}_{2(1)} + \dot{I}_{2(r)} = 0 \quad (8)$$

结合式(7),并将式(8)分成实部和虚部形式,可得

$$\begin{cases} \text{Im}[\dot{I}_{1(1)} + \dot{I}_{1(r)}] = 0 \\ \text{Im}[\dot{I}_{2(1)} + \dot{I}_{2(r)}] = 0 \\ \text{Re}[\dot{I}_{2(1)} + \dot{I}_{2(r)}] = 0 \end{cases} \quad (9)$$

其中 Im、Re 分别为复数的虚部和实部运算符。将式(6)代入式(9),求解  $B_r^{ab}$ 、 $B_r^{bc}$ 、 $B_r^{ca}$ ,得到理想补偿电纳的计算公式

$$\begin{bmatrix} B_r^{ab} \\ B_r^{bc} \\ B_r^{ca} \end{bmatrix} = \frac{1}{3V} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -\sqrt{3} \\ 1 & -2 & 0 \\ 1 & 1 & \sqrt{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \text{Im}[\dot{I}_{1(1)}] \\ \text{Im}[\dot{I}_{2(1)}] \\ \text{Re}[\dot{I}_{2(1)}] \end{bmatrix} \quad (10)$$

利用式(4)的逆变换,将式(10)变回到相坐标系中去,若没有零序电流,则得

$$\begin{cases} B_r^{ab} = -\frac{1}{3V} [\text{Im}\dot{I}_{a(1)} + \text{Im}a\dot{I}_{b(1)} - \text{Im}a^2\dot{I}_{c(1)}] \\ B_r^{bc} = \frac{1}{3V} [\text{Im}a\dot{I}_{a(1)} - \text{Im}a\dot{I}_{b(1)} - \text{Im}a^2\dot{I}_{c(1)}] \\ B_r^{ca} = -\frac{1}{3V} [\text{Im}\dot{I}_{a(1)} - \text{Im}a\dot{I}_{b(1)} + \text{Im}a^2\dot{I}_{c(1)}] \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可见,综合补偿电纳可以由负荷支路线电流向量  $\dot{I}_{a(1)}$ 、 $\dot{I}_{b(1)}$ 、 $\dot{I}_{c(1)}$  确定。再根据综合补偿电纳即可求出补偿电容器的容量。在实际运用中,只要检测电网电压和负荷三相线电流,就可求出综合补偿所需电容器的容量。

### 3.2 系统构成与控制

电网综合补偿系统如图3所示,检测单元由A/D采样及保持电路构成,检测单元主要完成三相电流和三相电压的检测。执行单元包括固态继电器和电力电容器组。计算单元采用华邦W77E58单片机,计算单元经外围驱动电路控制固态继电器达到投切电力电容器的目的。

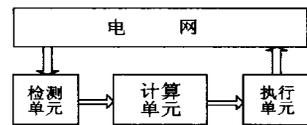


图3 电网综合补偿系统结构框图

由于采用电容器作为补偿执行器件,难以实现无功和三相不平衡的连续补偿。为了达到较理想的补偿效果,本系统采用模糊控制算法。为了确定电容器的分组,首先电网对象进行采样监测,取得  $n$  组三相电流和电压数据,计算出与之对应的  $n$  组补偿电容器的理想值。利用模糊C均值(FCM:Fuzzy c-means)聚类算法,对空间中的  $n$  个点进行聚类,并找出每一类的中心点。如果一共分成  $c$  类,则这  $c$  个中心点所代表的电容器值将作为实际电路中电容器分组的主要参考依据。下面是通过检测某电网参数

后得到的电容器分组情况:

表1 电容器分组

组号	类型	补偿位置	容量(kvar)
1	三相	三相	45
2	三相	三相	45
3	单相	AB	15
4	单相	BC	30
5	单相	CA	30
6	单相	AB	15
7	单相	BC	15
8	单相	CA	15

在实际运行中,每隔3min检测一次电网的电流和电压,经过计算后,可以得到要补偿的电容器容量,通过模糊算法的判断得出相应的补偿开关量,由此开关量去控制固态继电器完成投切电容器的动作。

### 3.3 谐波放大的抑制

该综合补偿系统在某电网试验时,发现补偿以后出现了电流高次谐波放大。特别是7次谐波,放大了约4倍,有必要采取措施,抑制谐波放大。出现谐波放大,主要是由于补偿电容器的容抗和系统感抗发生了并联谐振,加装串联电抗器是抑制谐波放大的有效措施。根据公式<sup>[4]</sup>:

$$m > 1/h^2 \quad (12)$$

可以设计出串联电抗器的大小。式(12)中 $m$ 为串联电抗器的基波感抗 $X_L$ 和电容器的基波容抗 $X_C$ 之比,即 $m = X_L/X_C$ , $h$ 为所要抑制的谐波中最低谐波的次数。在该电网主要出现5次以上电流谐波放大,即 $h=5$ ,得到 $m > 4\%$ ,实际应用中取 $m=5\%$ 设计电抗器。加装了合理设计的电抗器后,谐波放大得到有效的抑制,谐波含量符合国家规定。同时,电抗器还可以起到抑制电网中的浪涌电流,保护SSR和电力电容器的作用。

### 3.4 实际运行效果

图4、图5是该综合补偿系统投入实际运行后,电网的功率因数和三相不平衡的变化情况。补偿前的功率因数平均只有0.855,三相不平衡度平均约为7.99%。补偿以后功率因数平均达到了0.999,三相不平衡度减小到2.79%左右,电能质量得到了明显的改善。从图5(b)中看出,综合补偿后,还存在一定的三相不平衡。这主要由于采用投切电力电容器的方法,难以对电网进行实时跟踪补偿,三相不平衡度不可能减小到零左右。

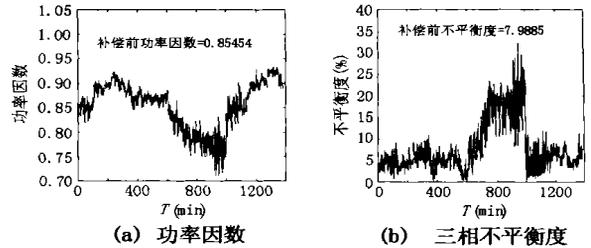


图4 补偿前功率因数和三相不平衡度

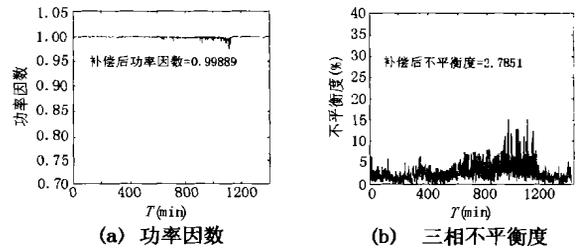


图5 补偿后功率因数和三相不平衡度

## 4 结论

在目前的无功补偿系统中经常会发生补偿电容器烧毁的事故。经分析,其中一部分是由于投切电容器的瞬间冲击涌流过大造成的。本综合补偿系统采用交流过零型SSR,实现电压过零投切电容器,有效地减少了冲击涌流,保护了补偿电容器。值得注意的是,由于补偿电容器支路的电路直接流过SSR,会造成一定的功率损耗,因此SSR的散热问题显得尤为重要,必要时必须加装散热片和工业风扇为SSR通风散热。

### 参考文献:

- [1] 靳龙章,丁毓山. 电网无功补偿实用技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,1997.
- [2] 林海雪. 电力系统的三相不平衡[M]. 北京:中国电力出版社,1998.
- [3] 李惠敏,彭红华,郝久玉. 固态继电器在气动控制中的应用[J]. 电力电子技术. 1999,4(2):48-49.
- [4] 吕润余. 电力系统高次谐波[M]. 北京:中国电力出版社,1998.

收稿日期: 2001-11-20; 改回日期: 2001-12-25

作者简介: 杨杰(1974-),男,博士研究生,研究方向为数字信号处理与电力电子技术; 赖声礼(1939-),男,博士生导师,主要研究方向为生物电磁学,电网质量监控; 吴淑泉(1945-),男,副教授,主要研究方向为专用集成电路设计与数字信号处理; 李心广(1963-),男,副教授,在职博士研究生,研究方向为电力电子与计算机应用。

(下转第49页)

60份故障报告,故障报告内容丰富,包括断路器、故障点公里数、保护动作元件、故障电流、故障电压、故障事件记录、故障发生时间、故障波形、谐波分析等;事件报告、自检报告的显示及打印;自动刻度校正功能,无须手动调节;自动保存最新的5组定值,包括整定时间;自动负荷记录功能,无须人工抄表;故障录波和负荷录波功能,增加了对故障的分析手段;与上位机通信可实现定值的远方修改、采样值及故障报告的上传功能,满足自动化的要求。

## 6 结论

利用32位DSP开发的WKH-891新一代电铁馈线保护装置软硬件可靠、技术先进、辅助功能强大、自适应能力强,2000年5月通过了部级鉴定,已经

供货200余套,运行情况良好,是电气化铁道系统更新换代的理想产品。

## 参考文献:

- [1] 贺威俊,张淑琴,等. 晶体管与计算机继电保护原理[M]. 成都:西南交通大学出版社,1990.
- [2] 曹建猷. 供电系统[M]. 北京:中国铁道出版社,1993.

收稿日期: 2001-11-07

作者简介: 雷杭州(1973-),男,本科,助理工程师,铁道电气化牵引供电系统继电保护; 黄淑文(1974-),女,本科,助理工程师,铁道电气化牵引供电系统继电保护; 董晓冬(1973-),男,本科,助理工程师,铁道电气化牵引供电系统继电保护; 郭勤俭(1964-),男,硕士,高级工程师,铁道电气化牵引供电系统继电保护。

### Research on the new generation of WKH891 electrification railway feeder line protection

LEI Hang-zhou<sup>1</sup>, HUANG Shu-wen<sup>1</sup>, DONG Xiao-dong<sup>1</sup>, GUO Qin-jian<sup>1</sup>, ZHONG Xiao-ning<sup>2</sup>

(1. Xuchang Relay Research Institute, Xuchang 461000, China;

2. Changsha Nonferrous Metallurgy Design Institute, Changsha 410013, China)

**Abstract:** The feature and configuration are introduced for the new generation of electrification railway feeder line protection. Its main protective principle and criterion are analyzed. The protection is equipped with perfect protective functions and powerful auxiliary functions, and it passed the ministerial appraisal in May 2000. The protection has been delivered for over 200 sets with good operation in site.

**Keywords:** feeder line; protection; DSP

(上接第6页)

### Study on integrated compensation system using solid state relay

YANG Jie<sup>1</sup>, LAI Sheng-li<sup>1</sup>, WU Shu-quan<sup>1</sup>, LI Xi-rong<sup>2</sup>

(1. College of Electronic and Information, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China;

2. Dept. of Physics & Electronics, Guangzhou University, Guangzhou 510405, China)

**Abstract:** The principle of the solid state relay is introduced in this paper. The solid state relay is applied in this integrated compensation system for conquering the disadvantage of the general relay. In order to solve the low power factor and three-phase imbalance problems in power system, a method of integrated compensation which can compensate reactive power and three-phase imbalance at the same time is brought forward also. Practical operation shows that this integrated compensation system can improve the quality of power energy.

**Keyword:** solid state relay; reactive power; three-phase imbalance; comprehensive compensation

(上接第46页)

### Design and realization of new generator-transformer fault record system's network based on ethernet

YANG Jun, ZHANG Zhe, JIANG Wei-liang, JIE Ping

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** To satisfy the development of automatization of power plants, especially to adapt to the requirement of condition based maintenance, communication network is strictly demanded by the generator-transformer fault record system. According to generator-transformer fault record system's requests and functions, in this paper is described the application of Ethernet in it, emphasized on the selection of communication protocol, the IEC 60870-5-101 standard and related technique.

**Keywords:** generator-transformer fault record system; NET/BIOS protocol; IEC 60870-5-103 standard