

# 基于 PD 控制的谐振接地系统的研制

庞清乐<sup>1</sup>, 孙同景<sup>1</sup>, 穆健<sup>2</sup>, 程丽平<sup>1</sup>

(1. 山东大学控制科学与工程学院, 山东 济南 250061; 2. 聊城大学物理系, 山东 聊城 252059)

**摘要:** 针对偏磁式消弧线圈很难实现对消弧线圈的精确控制, 提出了基于 PD 的控制系统。通过对偏磁式消弧线圈机理的分析, 建立了该系统的数学模型, 并且利用遗传算法对 PD 控制器的参数进行了优化。通过 Matlab 仿真比较该系统 and 传统开环系统的阶跃响应, 说明该系统具有较快的响应速度、较高的精度和较强的鲁棒性。

**关键词:** 消弧线圈; PD 控制器; 补偿; 自动调谐

**中图分类号:** TM475; TM76 **文献标识码:** A **文章编号:** 1003-4897(2006)01-0062-04

## 0 引言

在我国的 6~35 kV 的电网中, 中性点经消弧线圈接地方式被广泛采用<sup>[1]</sup>。偏磁式消弧线圈由于其固有的优良特性而得到推广应用<sup>[2]</sup>, 它是通过调节直流偏磁电流的大小改变交流等值磁导, 从而实现电感的连续可调<sup>[3]</sup>。偏磁式消弧线圈的控制原理是: 在电网正常运行状态下, 跟踪检测电网电容电流, 消弧线圈的励磁电流维持一个很小的值或为 0, 消弧线圈远离谐振点。电网发生单相接地后, 快速施加励磁, 调谐消弧线圈的电感电流实现全补偿。接地消除后, 回到跟踪检测状态。以往对消弧线圈的控制大都采用开环控制, 由于励磁电流与消弧线圈电感电流之间不是严格的线性关系, 存在非线性; 同时, 消弧线圈本身的电气参数也有可能发生变化, 所以会产生误差, 不能充分发挥消弧线圈的作用。由于电磁干扰的存在, 使消弧线圈的电感电流易受干扰的影响而发生变化, 从而使系统的鲁棒性不好。本文提出了基于 PD 控制的消弧线圈控制系统, 通过分析偏磁式消弧线圈的机理, 建立了控制对象的数学模型。通过设计 PD 控制, 使消弧线圈控制系统具有较高的精度和较强的鲁棒性。

## 1 自动调谐原理

### 1.1 电容电流的自动跟踪检测

#### 1.1.1 自动跟踪检测的启动

实时检测中性点电压, 若中性点电压的变化量超过某一整定值, 且在此后连续的一段时间间隔内一直保持在该变化值。说明电网的参数发生了变化, 需要重新检测, 则启动自动跟踪检测。

#### 1.1.2 自动检测方法

目前, 电容电流检测的方法一般有: 中性点位移电压法、中性点电流法和注入信号法等<sup>[4]</sup>。由于信号注入法需要附加信号源, 大多采用中性点位移电压法。对于高度平衡电网, 中性点电压较低, 难以保证测量精度。因此, 需要在某一相的母线上附加一个电容, 使电网的不平衡度增加, 中性点电压也相应增加, 从而提高测量精度。但是, 对于有一定不平衡度的电网, 附加电容势必会造成中性点电压过高而超过 15% 的相电压, 这时, 应取消附加电容。通过实时检测中性点电压, 若低于某一整定值, 则通过控制有载开关投入附加电容; 而当中性点电压高于该整定值时, 则断开附加电容。从而实现对于不同不平衡度的电网均能实现较高的测量精度, 且不至于中性点电压过高。

为了提高测量精度, 考虑电网的阻尼率, 采用三点法进行检测<sup>[5]</sup>。其原理为: 电网正常运行时, 补偿电网的中性点位移电压为:

$$U_0 = \frac{U_{un}}{\sqrt{v^2 + d^2}} \quad (1)$$

其中:  $U_{un}$  为电网的自然不平衡电压;  $d$  为补偿电网的阻尼率;  $v$  为电网的脱谐度,  $v = (\mathcal{L} - \mathcal{L}_1) / \mathcal{L} = 1 - \mathcal{L}_1 / \mathcal{L}$ 。通过改变励磁电流的大小, 使消弧线圈工作在不同的电感电流:  $\mathcal{L}_1$ 、 $\mathcal{L}_2$ 、 $\mathcal{L}_3$ , 分别测出对应的中性点电压:  $U_1$ 、 $U_2$ 、 $U_3$ , 将数值代入式 (1), 得:

$$\begin{cases} U_1 = \frac{U_{un}}{\sqrt{d^2 + (1 - \mathcal{L}_1 / \mathcal{L})^2}} \\ U_2 = \frac{U_{un}}{\sqrt{d^2 + (1 - \mathcal{L}_2 / \mathcal{L})^2}} \\ U_3 = \frac{U_{un}}{\sqrt{d^2 + (1 - \mathcal{L}_3 / \mathcal{L})^2}} \end{cases} \quad (2)$$

解方程组 (2)即可计算出电网的单相接地电容电流。

### 1.2 励磁电流启动和返回判据

当中性点电压在持续的一段时间间隔内均大于  $0.4U$  (相电压)时,则判断系统发生了单相接地故障,此时停止检测电容电流,迅速施加励磁电流,使电网处在全补偿状态。若中性点电压在持续的一段时间间隔内均小于  $0.4U$  时,则判断单相接地故障消失,系统退出全补偿状态,远离谐振点运行。

## 2 消弧线圈的 PD 控制设计

### 2.1 消弧线圈补偿系统结构

消弧线圈补偿系统的结构如图 1 所示。由接地变压器 B、消弧线圈 L、电压互感器 PT、电流互感器 CT、电源变压器 BT、晶闸管 SCR、触发电路 GT、PD 控制器和核心控制器等组成。其中接地变压器的接入是为了人为引出中性点。PD 控制器可以由集成电路或单片机系统来实现,根据输入的误差  $U$  确定触发电路的输入电压。晶闸管整流电路提供励磁电流,通过控制晶闸管的触发角来调节励磁电流的大小,从而实现对消弧线圈电感电流的调节。核心控制器由 DSP 系统组成,实现对中性点电压和消弧线圈电感电流的实时检测、计算电网的电容电流和在电网发生单相接地故障时输出控制电压。单刀双掷开关 K2 用来选择手动调节还是自动调节,在核心控制器发生故障时可以切换到手动方式,根据经验值调节电位器 R,实现对消弧线圈的控制。

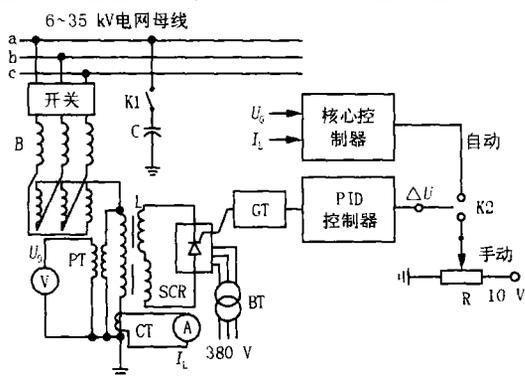


图 1 消弧线圈系统结构

Fig 1 Structure of arc-suppression coil system

### 2.2 消弧线圈控制的数学模型

消弧线圈控制系统的工作原理为:首先将预先检测的电网电容电流通过比例环节  $K_C$  转化为电压信号,用来作为触发电路的控制输入,触发电路输出的不同信号对应于晶闸管的不同触发角,从而对应

于不同的整流输出电流(即励磁电流),通过励磁电流对消弧线圈电感电流的控制,也就对应于不同的消弧线圈电感电流,实现对消弧线圈电感电流的控制。实际上触发电路和整流电路都是非线性的,但在按线性系统规律分析设计时,把这两个电路作为比例环节  $K_i$ 。励磁电路可以看作非线性磁放大器,相当于一阶惯性加纯滞后的环节  $K_1 e^{-Ls} / (T_C s + 1)$ ,其中  $K_1 = I_L / I_d$ ,  $T_C = L_d / R_d$ ,  $L_d$  是励磁线圈的电感,  $R_d$  是励磁回路的电阻,  $L$  为时间滞后常数。开环控制系统的结构图如图 2 所示。

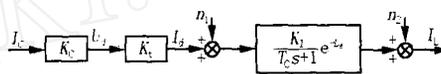


图 2 开环控制系统的结构

Fig 2 Structure of open-loop control system

### 2.3 系统的 PD 控制器设计

#### 2.3.1 PD 控制器参数的整定

系统 PD 控制的结构图如图 3 所示。设开环控制的参数取为:  $K_C = 1/7$ ,  $K_i = 7$ ,  $K_1 = 1$ ,  $T_C = 0.1$ ,  $L = 0.01$ 。

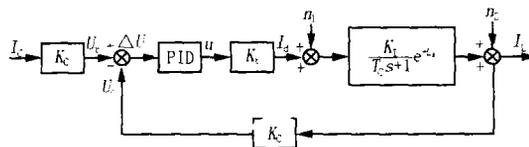


图 3 PD 控制系统的结构

Fig 3 Structure of PD control system

PD 控制器的传递函数为:

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (3)$$

其中:  $K_p$  是比例增益;  $K_I$  和  $K_D$  分别是积分系数和微分系数。根据 Ziegler-Nichols 的经验公式对 PD 参数进行整定:  $K_p = 1.2 T_C / (K_I L) = 1.71$ ,  $T_I = K_p / (2L) = 83.5$ ,  $T_D = K_p L / 2 = 0.0086$ 。

#### 2.3.2 PD 控制器参数的优化

通过以上方法整定的参数并不理想,下面通过遗传算法 (Genetic Algorithm) 对其进行优化<sup>[6]</sup>。参数优化的性能指标为:

$$J = \int_0^{\infty} |e(t)| dt \quad (4)$$

且满足约束条件:  $\sigma < \sigma_s$  (5)

其中:  $e(t)$  为控制系统阶跃响应的输出误差;  $\sigma$  为系统阶跃响应的超调量;  $\sigma_s$  为设定的最大超调量。利用遗传算法对参数  $K_p$ 、 $T_I$ 、 $T_D$  进行优化的步骤如下:

1) 确定每个参数的大致范围和编码长度,进行编码。根据 Ziegler - Nichols 方法整定的参数确定

用遗传算法进行优化的参数范围为： $K_p$  (0, 4),  $T_I$  (0, 160),  $T_D$  (0, 0.02)。编码方式采用二进制编码方式,参数的实际值与其编码值的关系如下式:

$$X = X_{min} + \text{bin}(X_{max} - X_{min}) / (2^L - 1) \quad (6)$$

其中: $X$ 为欲编码的参数; $\text{bin}$ 是参数 $X$ 的二进制编码, $X$ 的范围为( $X_{min}$ ,  $X_{max}$ ); $L$ 为编码长度。将表示三个参数的二进制数首尾连接,就形成一个个体。

2)确定适应度函数为: $f = 1/J$

3)初始化种群。随机产生 80 个个体作为初始种群。

4)分别对种群进行复制、交叉、变异操作,形成新的种群。其中复制概率  $P_r$  为 0.27,交叉概率  $P_c$  为 0.7,变异概率  $P_m$  为 0.03。

5)确定循环终止条件。当前种群中个体的最大适应度大于设定值,且超调量满足约束条件,则循环终止。将得到的最佳个体进行解码即可得到优化的参数。

通过遗传算法优化后的参数为: $K_p = 1.5$ ,  $T_I = 15$ ,  $T_D = 0.005$ 。

### 2.3.3 控制系统的仿真

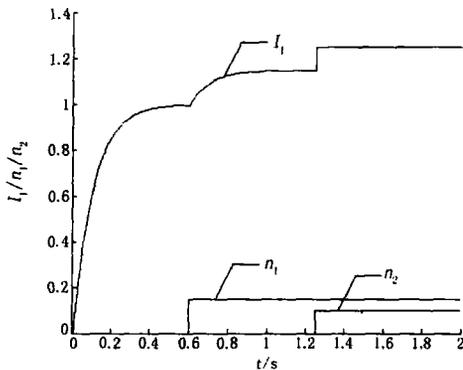


图 4 开环控制系统的阶跃响应

Fig 4 Step response of open-loop control system

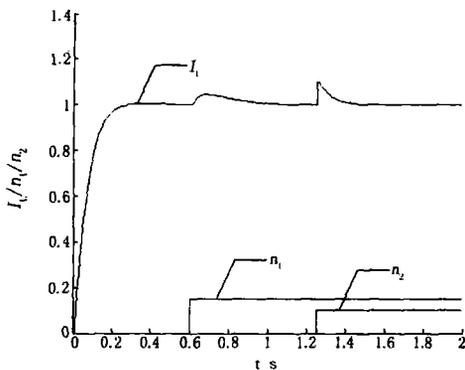


图 5 PD控制系统的阶跃响应

Fig 5 Step response of PD control system

对开环控制系统和 PD 控制系统分别施加阶跃信号,并且在励磁回路和消弧线圈回路分别施加幅值分别为 0.15 和 0.1 的阶跃干扰信号  $n_1$ 、 $n_2$ ,利用 Matlab6.5 分别进行仿真,输出响应如图 4 和图 5 所示。由图可知,采用 PD 控制的系统的阶跃响应的上升时间减小,能使消弧线圈的电感电流迅速达到目标值;同时,PD 控制可以消除各种干扰信号的影响,使输出稳定在目标值。

### 3 核心控制器的软、硬件设计

图 6、图 7 分别为核心控制器的软、硬件框图。硬件电路主要由中性点位移电压  $U_0$  模拟输入通道、消弧线圈电感电流  $I_L$  模拟输入通道、励磁控制电压控制  $U$  输出通道、中断信号产生电路、串行通讯通道、开关量输出和 DSP 系统组成。

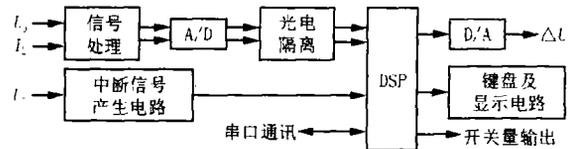


图 6 核心控制器硬件结构图

Fig 6 Block diagram of the hardware of the controller

DSP 通过实时采样  $U_0$  和  $I_L$  实现电容电流的测量。在电网正常运行时,若  $U_0$  超过某一整定值,母线不投入附加电容,否则投入附加电容。当  $U_0$  大于 0.4U 时,判断为发生了单相接地故障,产生中断。在中断服务子程序中,迅速施加励磁电流,使补偿系统快速进入全补偿状态。当  $U_0$  小于 0.4U 时,使励磁电流为 0,退出中断。

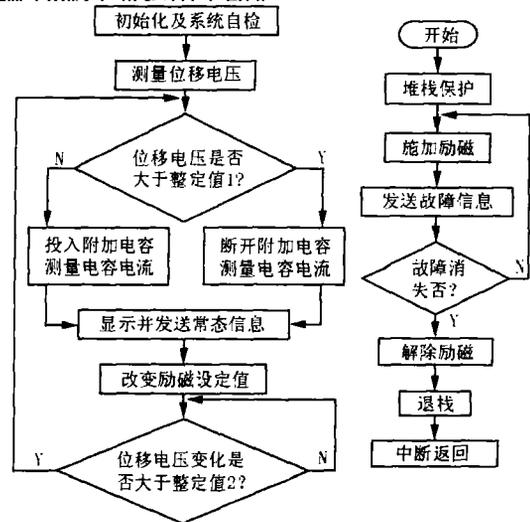


图 7 软件结构框图

Fig 7 Block diagram of the software

## 4 结论

基于 PD控制的谐振接地系统克服了基于传统开环控制系统响应速度慢、易受干扰的缺点。在单相接地故障状态下,能迅速施加励磁电流;在系统参数发生变化和干扰存在时,使被控制的消弧线圈电感电流保持在设定值不变,从而使系统具有较强的鲁棒性。仿真结果表明,该系统的动态调谐效果良好,具有较高的推广价值。

## 参考文献:

- [1] 刘虹,尹忠东,陈柏超,等. 新型可控自动消弧成套装置的应用研究[J]. 电力系统自动化, 1998, 22(2): 9-12  
LU Hong, YN Zhong-dong, CHEN Bo-chao, et al Application Research on a New Type Automatic Controllable Arc Extinguishing Apparatus[J]. Automation of Electric Power Systems, 1998, 22(2): 9-12
- [2] 蔡旭,刘勇. 三相五柱偏磁式接地消弧变压器及其自动调谐[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(2): 83-88  
CAI Xu, LIU Yong. Magnetic Bias Based Arc-suppression Transformer with Three Phases and Five Columns and Its Tuning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(2): 83-88
- [3] 李达义,陈乔夫,贾正春. 基于磁通可控的可调电抗器的新原理[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(2): 116-120  
LI Da-yi, CHEN Qiao-fu, JIA Zheng-chun. A Novel Principle of Adjustable Reactor Based on Magnetic Flux Controllable[J]. Proceedings of CSEE, 2003, 23(2):

116-120.

- [4] 蔡旭,刘杰. 偏磁式消弧线圈的动态调谐装置[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(15): 53-56  
CAI Xu, LIU Jie. Dynamic Resonance Adjustment Device of Arc-Suppression Coil with Magnetic Bias[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(15): 53-56
- [5] 陈忠仁,吴维宁,陈家宏. 配电网自动消弧装置的测量跟踪问题[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(10): 84-87.  
CHEN Zhong-ren, WU Wei-ning, CHEN Jia-hong. Measuring and Tracing of Automatic Arc-suppression Devices in Distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(10): 84-87.
- [6] 张立群,李东海,唐多元,等. 基于参数稳定空间的PD控制器设计[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2004, 44(2): 274-277.  
ZHANG Li-qun, LI Dong-hai, TANG Duo-yuan, et al. Tuning PD Controllers Based on Stable Region[J]. Journal of Tsinghua University, Sci & Tech, 2004, 44(2): 274-277.

收稿日期: 2005-05-13; 修回日期: 2005-07-06

## 作者简介:

庞清乐(1971-),男,博士研究生,工程师,研究方向为计算机先进控制及其在配电网保护中的应用;

E-mail: stefan@163.com

孙同景(1949-),男,博士生导师,教授,研究方向为计算机先进控制与系统;

穆健(1971-),男,讲师,研究方向为智能控制与机械自动化。

## Development of resonance grounding system based on PD control

PANG Qing-le<sup>1</sup>, SUN Tong-jing<sup>1</sup>, MU Jian<sup>2</sup>, CHENG Li-ping<sup>1</sup>

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China;

2. Department of Physics, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

**Abstract:** It is difficult for arc-suppression-coil with magnetic bias to control accurately. PD based control system is presented. Through analyzing the mechanism of the system, its mathematical model is set up. The PD controller parameters are optimized by using Genetic algorithm. The result of step response of the proposed system is compared with the conventional opened-loop control system through MATLAB simulation. The simulation results show that the proposed system has fast response rate, high precision and strong robustness.

**Key words:** arc-suppression coil; PD controller; compensation; automatic tuning

欢迎投稿 欢迎订阅 欢迎刊登广告