

快速自励式消弧线圈研究及应用

张建文, 蔡 旭

(上海交通大学 电气工程系, 上海 200030)

摘要: 提出一种快速自励式消弧线圈, 其是磁饱和可控电抗器。消弧线圈需要在单相接地故障发生后 2 个工频周期内达到设定的补偿效果, 为了加速消弧线圈的动态响应过程, 增加了加速环节。通过主辅励磁协调工作, 使消弧线圈在 2 个工频周期达到额定值。同时, 通过改变消弧线圈铁芯结构, 解决了在零励磁情况下电感的非线性问题, 减少了铁磁谐振对电网造成的危害; 并且通过中柱增加扼流绕组缓冲了消弧线圈对电网的冲击。描述了消弧线圈的励磁系统数字控制实现, 应用了最新的 DSP+FPGA 组合控制, 实现了消弧线圈快速补偿。

关键词: 消弧线圈; 自励式; 可控电抗器; 快速响应

中图分类号: TM 475

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2006)09-0078-04

0 引言

消弧线圈^[1]的作用是当电网发生单相接地故障后, 快速投入使用, 提供一电感电流 i_L 补偿接地电容电流 i_C , 使接地电流减小, 也使得故障相接地电弧两端的恢复电压速度降低, 达到熄灭电弧的目的。当消弧线圈正确调谐时, 不仅可以有效地减少产生弧光接地过电压的概率, 还可以有效地抑制过电压的幅值, 同时也最大限度地减小了故障点热破坏作用及接地网的电压升高等。

该消弧线圈隶属于自励式消弧线圈, 自励式消弧线圈采用全静态结构, 具有可靠性高、调节范围宽且可在承受高电压时调节电感值的特点。基本工作原理都是利用直流励磁磁化铁芯, 改变铁芯磁导率, 实现电感量连续变化。自励式消弧线圈则利用电网电压本身经绕组自耦变压后由晶闸管整流获得, 其控制及工作绕组有机结合在一起, 有利于减少损耗, 简化结构。同时, 为加快消弧线圈动态响应速度, 增加了加速环节, 从而满足消弧线圈快速补偿作用。消弧线圈在结构^[2-3]上也有改进, 使其在零励磁时为线性电感, 防止发生铁磁谐振而造成电网过电压。通过中柱增加扼流绕组缓冲了消弧线圈对电网的冲击。

1 消弧线圈结构及其控制原理

快速自励式消弧线圈实际上是基于磁阀式可控电抗器^[4-6], 其工作回路如图 1 所示, 由中柱上一个绕组及边柱上 4 个交叉并联绕组作为主要回路, 其中 V_{T1} 、 V_{T2} 为主控晶闸管, V_D 为续流二极管, 加速环节由辅助开关 V_{T3} 、 V_{T4} 以及 V_{D1} 、 V_{D2} 共同完成。当加速环节不工作时, 电网一旦发生单相接地故障, 消弧线圈端电压发生突变, 控制系统检测到, 在电源电压正半周触发晶闸管 V_{T1} , 电源经变比为 $k = N_1/N$ 的线

圈自耦变压以后提供直流控制电压, 在回路产生直流励磁电流 I_{f1} 、 I_{f2} , 同理在电源负半周期, 给晶闸管 V_{T2} 触发脉冲, 同样可以产生与 I_{f1} 、 I_{f2} 方向相同的励磁电流。在 1 个工频周期轮流导通晶闸管 V_{T1} 、 V_{T2} , 起到全波可控整流作用, 产生的 I_{f1} 、 I_{f2} 使铁芯内的小截面部分饱和。电抗器绕组中流过 2 部分电流, 一部分是直流励磁电流 I_{f1} 、 I_{f2} , 在绕组中循环; 另一部分是工频交流, 流过电抗器。通过控制晶闸管触发角, 改变其中的励磁电流, 从而控制铁芯中小截面的饱和程度, 得以平滑地改变流经电抗器的电流。

磁阀式动态响应时间 t_s ^[3] (即消弧线圈从空载到额定容量时间) 为

$$t_s = \frac{1-k}{2k} T \quad (1)$$

式中 T 为工频周期。

从式(1)可知增大抽头比 k 可减小 t_s , 提高电抗器的响应速度, 但抽头比 k 增大将造成调节特性恶化, 调节比 $\Delta i_L / \Delta \alpha$ 太大, 使消弧线圈控制困难。为此, 需要有变化的抽头比, 暂态时 k 大, 稳态时 k 小。加入加速环节, 电网一旦发生故障, 消弧线圈两端电压突加, 若电压处于正半周, 以触发角 $\alpha = 0^\circ$ 触发主、辅晶闸管 V_{T1} 、 V_{T3} , 由于电抗器自耦合作用, a 点电位高于 c 点电位, V_{T1} 、 V_{T3} 导通, 而此时 b 点电位一定低于 a 点电位, 二极管 V_{D1} 处于反向电压作用下截止, 此时励磁电流流向如图 2 所示。当电压为负半周则触发导通主、辅晶闸管 V_{T2} 、 V_{T4} , 二极管 V_{D2} 反向阻断。综合这 2 个过程相当于增大了 k 。当然, 不

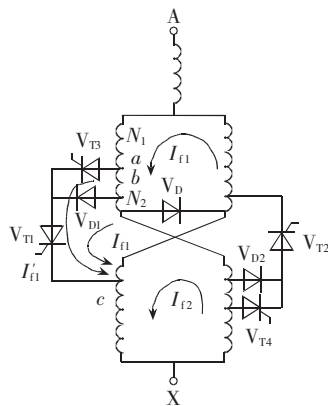


图 1 自励式消弧线圈电路
Fig.1 Circuit of self-excitation arc suppression coil

能一直在大 k 下工作,当直流励磁达到要求值,则不再触发辅助晶闸管 V_{T3} 、 V_{T4} 。按照一定触发角触发主晶闸管,此时 b 点电位高于 c 点电位,二极管 V_{D1} 导通,同理 V_{D2} 伴随 V_{T2} 同时导通和同时关断,消弧线圈在小 k 下工作。其中励磁电流流向见图 3。

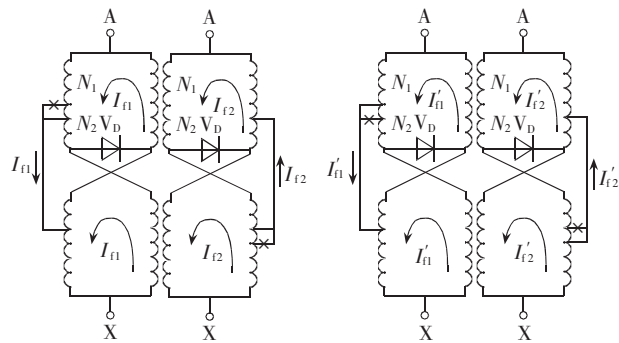


图 2 正常工作励磁电流流向 图 3 带加速环节励磁电流流向
Fig.2 Direction of excitation current during normal operation Fig.3 Direction of excitation current with speedup tache

图 4 为消弧线圈结构示意图。

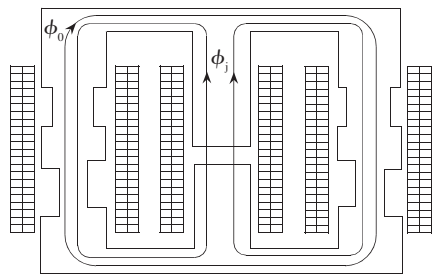


图 4 自偏磁式消弧线圈结构
Fig.4 Structure of arc suppression coil with magnetic bias

这种结构的特点是偏磁磁通经 2 个边柱和上下轭铁构成回路;交流工作磁通经 2 个边柱、上下轭铁汇集到中柱构成回路;铁芯的边柱上布置了 2 级减小截面的部分,这 2 部分为铁芯磁化区,称中截面部分为第 1 级磁化区,小截面部分为第 2 级磁化区,它们工作在不同的饱和度下。

设置 2 级磁化区可有效降低工作电流谐波含量,铁芯中间柱上布置有气隙 δ_0 ,该气隙的存在不仅可以改善低偏磁强度下的工作电流波形,也保证了消弧线圈在零偏磁时仍为线性电感,避免由于电感非线性而产生危险的铁磁谐振过电压。中柱交流绕组的作用一是减少中柱上及气隙处的漏磁,二是减缓电抗电感电流对电网的影响 [2]。

2 控制回路的实现

根据上述的工作原理,使用 DSP、FPGA 共同完成消弧线圈电感量的快速调节 [7-9],实现消弧线圈励磁系统的数字化控制。

2.1 DSP 模块设计 [10]

DSP 作为励磁调节器的主控制器,实现了励磁系统的协调控制。一般消弧线圈要求在接地故障发生 2 个周期之内达到额定值,那么要求辅助晶闸管

V_{T3} 、 V_{T4} 在 2 个周期内完成加速。当然,实际中 V_{T3} 、 V_{T4} 导通时间还与消弧线圈需要的励磁电流有关,由于晶闸管的非自关断性, V_{T3} 、 V_{T4} 导通时间可以分为 5 个档次,不同的励磁电流选择不同 V_{T3} 、 V_{T4} 触发次数。这个需要和消弧线圈的补偿电感量对应。

消弧线圈作为谐振接地系统的一部分,DSP 通过 CAN 完成与系统其他部分通信,比如接收电容电流检测系统得到的电容电流值。通过励磁系统控制消弧线圈电感量,实际中是通过触发角控制的。在 DSP 中存有检测的电容电流与励磁系统的晶闸管导通角的对应关系,DSP 通过查值计算方法依据接收的电容电流值得到经过数据标定后的导通角。这里使用十进制数 2 500 代表 $\pi/2$,将数字化的导通角输出到脉冲发生机构。DSP 程序流程图见图 5。

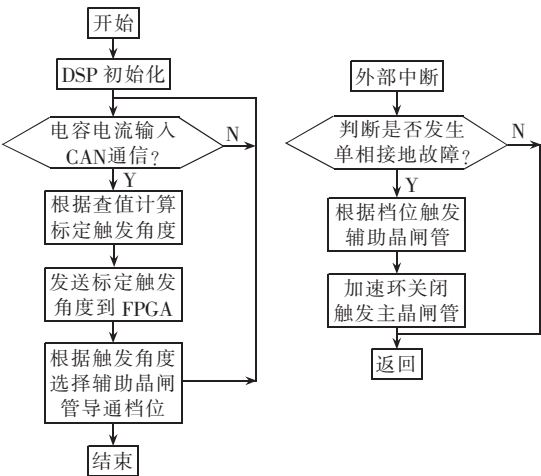


图 5 DSP 程序流程图
Fig.5 Flowchart of DSP program

2.2 FPGA 模块设计

FPGA 模块主要完成信号隔离传输、逻辑运算和触发脉冲生成等功能,接收 DSP 传送的标定后的触发角度,以及主辅励磁系统的使能信号,使用同步信号经光耦隔离后输入 FPGA 作为脉冲生成的基准信号,软件实现晶闸管触发器的数字逻辑,大大简化了硬件电路,而且触发精度大为提高。实验脉冲波形如图 6 所示(图中 1 为输入电压的同步信号,2 为输出的触发脉冲信号)。

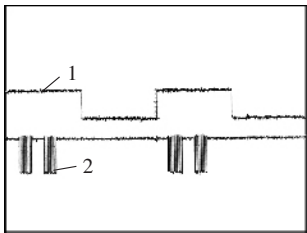


图 6 $\alpha=30^\circ$ 触发脉冲实验波形
Fig.6 Experiment waveforms with the trigger pulse $\alpha=30^\circ$

2.3 控制器各环节硬件设计

晶闸管触发系统由同步、移相、脉冲形成、脉冲放大等环节构成。其同步电路、采样通道调制电路

和脉冲放大电路由模拟器件构成,移相和脉冲生成由 FPGA 及软件实现。图 7 是消弧线圈端电压同步电路, u_a 经过电压比较器输出宽度为 180° , 相差 180° 的过零信号 TB_A+ 和 TB_A-。

由于 FPGA 输出的数字脉冲是 TTL 电平, 直接触发晶闸管功率不够, 因此, 必须经过脉冲放大环节, 如图 8 所示。

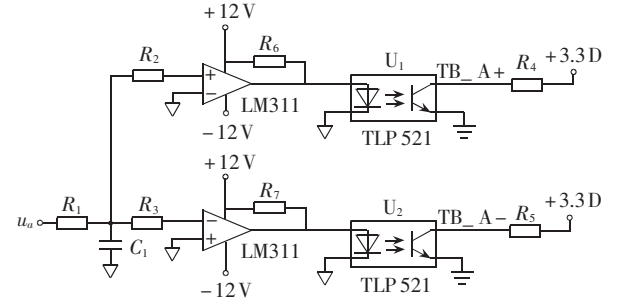


图 7 同步电路
Fig.7 Synchronization circuit

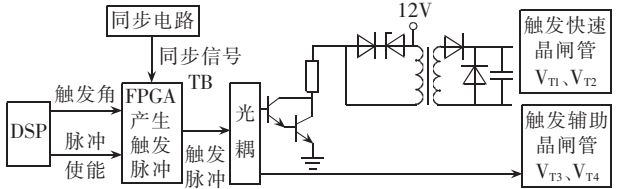


图 8 脉冲放大
Fig.8 Amplification of pulses

3 偏磁消弧线圈仿真计算及试验对比分析

为了更好地评价该消弧线圈特性, 首先对其特性进行了仿真分析, 并且设计出 220 V、2 kV·A 低压物理模型。以下是仿真分析与物理模型试验结果。

3.1 动态特性仿真与实验对比分析

根据上述工作原理使用 Matlab 进行仿真, 如图 9 所示。

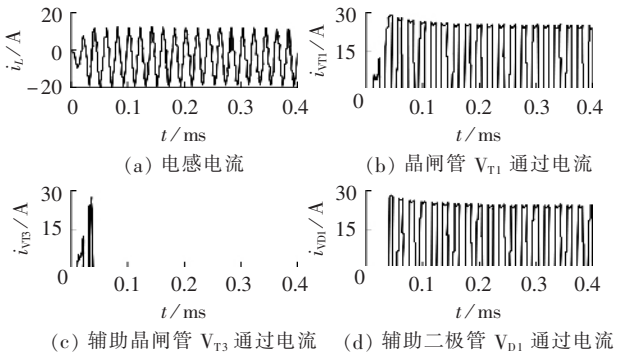


图 9 消弧线圈动态响应仿真波形
Fig.9 Simulation waveforms of arc suppression coil dynamic response

图 9(a) 是电感电流的变化情况, 可以看出电流在 2 个周期之内达到了额定值, 图 9(b) 显示了在主晶闸管 V_{T1} 流经的电流, 它也上升很快, 图 9(c) 是辅助晶闸管 V_{T3} 流经的电流, 只有在前 2 个周期起作用, 随后就不再触发导通, 图 9(d) 是辅助二极管

V_{D1} 流经电流, 开始不起作用, 在 2 个周期以后随着主晶闸管一起导通。

然后, 在低压模型上做试验, 图 10 为试验录制的实际波形, 波形中最上面的是电感电流动态响应波形(1), 其次是主晶闸管 V_{T1} 、 V_{T2} 触发脉冲波形(2), 再次是辅助晶闸管 V_{T2} 、 V_{T4} 的触发脉冲波形(3), 最后的是主晶闸管 V_{T1} 的电压波形(4)。试验电流波形和仿真电感电流的动态响应是一样的, 在试验和仿真中都验证了消弧线圈动态响应时间小于 $2T$ 。

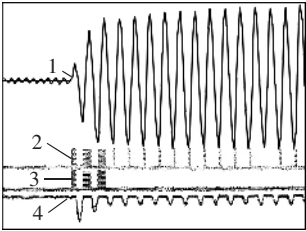


图 10 电抗器动态响应试验波形
Fig.10 Experiment waveforms of reactor dynamic response

3.1 静态特性仿真与实验对比分析

图 11 是在与低压物理模型相同条件下, 利用仿真模型所获得的在触发角 $\alpha=0^\circ$ 、 90° 时电感电流及晶闸管上电压的仿真波形, 图 12 是对低压消弧线圈模型, 利用 TDS 7104 数字示波器在触发角 $\alpha=0^\circ$ 、 90° 时的实录波形, 图上包含了触发脉冲(1)、晶闸管上电压(2)以及电感电流(3)的试验波形。

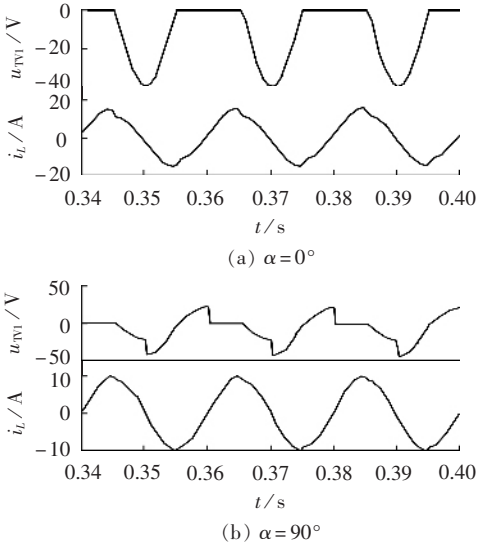
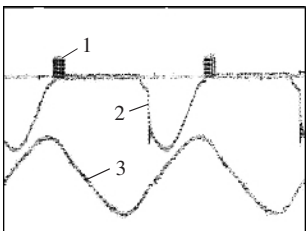
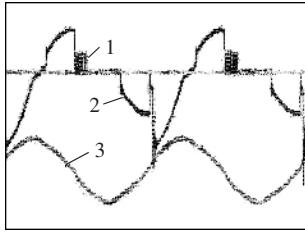


图 11 $\alpha=0^\circ$ 、 90° 电感电流和晶闸管电压仿真波形图
Fig.11 Simulation waveforms of inductance current and SCR voltage when $\alpha=0^\circ$ and 90°



(a) $\alpha=0^\circ$



(b) $\alpha = 90^\circ$

图 12 $\alpha = 0^\circ$ 、 90° 电感电流和晶闸管电压试验波形
Fig.12 Experiment waveforms of inductance current and SCR voltage when $\alpha = 0^\circ$ and 90°

偏磁消弧线圈仿真及模拟试验的控制特性曲线如图 13 所示(图中 1 是实际控制特性曲线;2 是仿真控制特性曲线),仿真时考虑了一定的漏磁因素,可以看出它们也是基本一致的,电抗器控制特性曲线是非线性的。

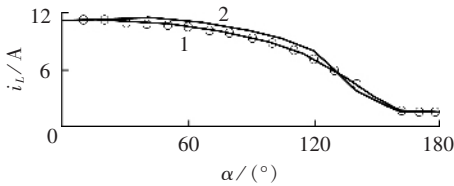


图 13 电抗器控制特性曲线

Fig.13 The control characteristic curve of reactor

4 结语

本文描述了一种新型复励式消弧线圈,通过主、辅励磁协调工作,使消弧线圈在 2 个工频周期达到额定值,满足消弧线圈快速补偿要求。同时,改进了消弧线圈铁芯的结构,解决了在零励磁情况下电感的非线性问题,排除了铁磁谐振,并且通过中柱上扼流线圈减缓了消弧线圈对电网的影响。励磁系统全数字化控制,利用该控制系统在消弧线圈低压模型上实验与仿真分析进行比较,验证了消弧线圈的优良特性。

参考文献:

[1] ДЮРЖКОЛИ. Compare analysis with different structure of controllable reactors [J]. Электрические станции (Power Plant), 1988(4):19-24.

[2] 蔡旭. 新型偏磁式消弧线圈及其控制[J]. 电力系统自动化, 2002,26(10):32-35.
CAI Xu. A new arc-suppression coil with magnetic bias and its control[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(10): 32-35.

[3] 蔡旭,谢桂林. 偏磁式消弧线圈工作机理研究二[J]. 华北电力大学学报,2001,28(1):10-14.
CAI Xu,XIE Gui-lin. Study on arc-suppression coil with magnetic bias[J]. Journal of North China Electric Power University, 2001,28(1):10-14.

[4] 陈柏超. 新型可控电抗器饱和和电抗器理论及应用[M]. 武汉: 武汉水利电力大学出版社,1999.

[5] 陈柏超,陈维贤. 磁阀式可控电抗器的数学模型及特性[J]. 武汉水利电力大学学报,1995,28(3):293-298.
CHEN Bai-chao,CHEN Wei-xian. A mathematic model of the magnetic valve type controllable reactor and its characteristic [J]. Wuhan University of Hydr & Electric Engineering,1995, 28(3):293-298.

[6] 刘虹,伊忠东,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.
LIU Hong,YI Zhong-dong,CHEN Bai-chao,et al. The study on a new appliance of automation arc-suppression [J]. Automation of Electric Power Systems,1998,22(2):9-12.

[7] 石鸿凌,姜琳峰,孙洪. 基于 CPLD 的可控电抗控制器[J]. 信息与电子工程,2003,1(3):56-59.
SHI Hong-ling,JIANG Lin-feng,SUN Hong. The variable reactor control system based on CPLD[J]. Information and Electronic Engineering,2003,1(3):56-59.

[8] 陈云治,保延翔. CPLD 应用技术与数字系统设计[M]. 北京: 电子工业出版社,2003.

[9] 侯伯亨,顾新. VHDL 硬件描述语言与数字逻辑电路设计[M]. 西安:西安电子科技大学,1997.

[10] 王维俊,江渝,邓力. TMS320LF240x DSP C 语言开发应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2003.

(责任编辑: 柏英武)

作者简介:

张健文(1981-),男,浙江衢州人,硕士研究生,研究方向为消弧线圈仿真与设计(E-mail:icebergzjw@sjtu.edu.cn);
蔡旭(1964-),男,江苏徐州人,教授,长期从事供电安全、微机保护、电能质量控制等方面的研究开发工作。

On high-speed self-excitation arc suppression coil and its application

ZHANG Jian-wen,CAI Xu

(Shanghai Jiaotong University,Shanghai 200030,China)

Abstract: A high-speed self-excitation arc suppression coil based on magnetic saturation controllable reactor is presented. To compensate the current within two power periods when a single-phase grounding fault occurs,a speedup section is designed additionally to speed up its dynamic respond process. Through the coordination of the main and auxiliary excitations,the arc suppression coil reaches the rated value within two power periods. The core structure of the arc suppression coil is improved to solve the nonlinearity of voltage with zero-excitation. The harm of ferro-resonance is thus reduced. The choking winding is added to the medium column to mitigate the impact of the arc suppression coil on the power system. The implementation of digital control strategy based on DSP(Digital Signal Processor) and FPGA(Field Programmable Gate Array) for fast compensation is described.

This project is supported by the National Key New Product Plan(2002ED620004).

Key words: arc suppression coil; self-excitation; controllable reactor; fast response