

## 基于变压器可控负载原理的新型消弧线圈

程路<sup>1</sup>, 陈乔夫<sup>1</sup>, 张宇<sup>1</sup>, 卜开伟<sup>2</sup>, 杨玮明<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省武汉市 430074; 2. 武汉中元华电科技有限公司, 湖北省武汉市 430079)

**摘要:** 介绍了当前消弧线圈技术的发展以及存在的问题, 提出了一种宽范围自动连续可调且谐波污染小的新型消弧线圈设计原理。其核心是基于可控电流源负载的变压器, 通过控制变压器二次侧电流实现变压器一次侧等效电抗的调节, 二次侧电流的跟踪控制由电压型脉宽调制(PWM)逆变器实现。采用变压器二次侧多支路的方法可以实现装置的大容量。文中详细分析了该方案的原理, 并介绍了整个装置的控制系統。800 kVA 样机试验证明了原理的正确性和方案的可行性。

**关键词:** 消弧线圈; 变压器; 电流控制; 逆变器; 多支路

**中图分类号:** TM475

### 0 引言

消弧线圈是一种广泛应用于 6 kV~35 kV 电网的单相接地故障电流抑制装置。其实质是并接于电网中性点与地之间的可调电感装置, 发生接地故障时, 电感提供与电容电流大小接近、方向相反的感性电流, 以补偿电容电流, 使流过故障点的总电流变得很小或接近于 0, 起到熄灭电弧的作用。

目前, 已发展出很多种基于不同原理来改变电感的消弧线圈装置<sup>[1-6]</sup>, 较典型的有调匝式、调气隙式、直流偏磁式、投切电容式及晶闸管调感式。这些方法都有一定的应用, 但也存在一些缺陷, 例如: 调匝式和投切电容式电感不能连续调节; 调气隙式响应速度慢、精度低; 直流助磁式电抗调节范围窄、噪声大; 晶闸管调感式谐波污染较严重。这些缺点影响了消弧线圈的性能<sup>[7]</sup>, 使其应用受到一定的局限。

本文提出了一种基于变压器理论和电力电子装置的新型消弧线圈, 其原理及实现方式与前述的各种方法均不相同。通过控制变压器二次侧负载, 可以改变变压器一次侧的等效输入阻抗, 从而达到调节电抗的目的, 这就是本方案的原理。试验证明, 该消弧线圈具备电抗能大范围连续线性调节、谐波污染小的优良特性, 应用前景广泛。

本文的结构如下: 首先分析了带可控电流源负载的变压器阻抗特性, 给出了可调电抗的表达式; 然后介绍了基于该原理的消弧线圈的系统结构, 并给出了解决大容量问题和电容电流检测的方法; 接着介绍了整个装置的控制系統; 最后, 给出了实验数据及波形, 验证了原理的正确性。

### 1 原理分析

如图 1 所示, 设并联变压器的一次、二次侧绕组匝数分别为  $N_1$  和  $N_2$ , 匝比  $k = N_1/N_2$ , 其二次侧带有一可控电流源负载。

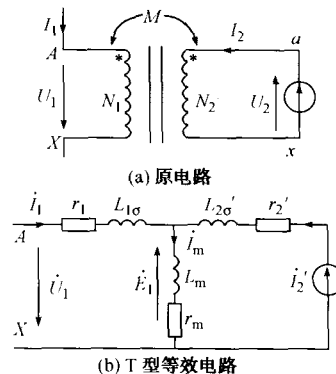


图 1 带电流源负载并联变压器电路及其 T 型等效电路  
Fig. 1 Circuit of parallel transformer with current source load and its equivalent T-type circuit

依据图 1(b) 所示的 T 型等效电路, 可以建立一次侧电压平衡方程式如下:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 = & (r_1 + j\omega L_{1\sigma}) \dot{I}_1 + (r_m + j\omega L_m) \dot{I}_m = \\ & (r_1 + j\omega L_{1\sigma}) \dot{I}_1 + (r_m + j\omega L_m) (\dot{I}_1 + \dot{I}_2') \end{aligned} \quad (1)$$

式中:  $\dot{U}_1$  为变压器一次侧电压;  $\dot{I}_1, \dot{I}_2', \dot{I}_m$  分别为变压器一次侧电流、二次侧折算到一次侧的电流和励磁电流;  $r_1, L_{1\sigma}$  分别为一次侧绕组电阻和一次侧漏电感;  $r_m, L_m$  分别为励磁电阻和励磁电感;  $\omega = 2\pi f$ , 为电网角频率。

若二次侧的可控电流源负载的电流满足:

$$\dot{I}_2 = k \dot{I}_2' = -k\alpha \dot{I}_1 \quad (2)$$

式中： $\alpha$  为一实常数，表示可控电流源的电流系数，其值域为 $[0, 1]$ 。

将式(2)代入式(1)得：

$$\dot{U}_1 = (r_1 + j\omega L_{1\sigma})\dot{I}_1 + (1 - \alpha)(r_m + j\omega L_m)\dot{I}_1 \quad (3)$$

因  $r_m \ll \omega L_m$ ，忽略励磁电阻，则有：

$$\dot{U}_1 = (r_1 + j\omega L_{1\sigma})\dot{I}_1 + (1 - \alpha)j\omega L_m\dot{I}_1 \quad (4)$$

此时从一次侧端口 AX 看进去的变压器等效阻抗为：

$$Z_{AX} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{I}_1} = r_1 + j\omega L_{1\sigma} + (1 - \alpha)j\omega L_m \quad (5)$$

则一次侧的等效电抗为：

$$X_L = \omega L_{1\sigma} + (1 - \alpha)\omega L_m = X_{1\sigma} + (1 - \alpha)X_m \quad (6)$$

式中： $X_{1\sigma} = \omega L_{1\sigma}$ ，为一次侧绕组漏抗； $X_m = \omega L_m$ ，为励磁电抗。

由式(6)可见，此时变压器呈现的电抗值为一变量，其值与二次侧电流系数  $\alpha$  成线性关系。通过控制改变  $\alpha$  的大小，可以实现电抗值的连续调节。当  $\alpha$  从 0 变化到 1 时，电抗值从  $X_{1\sigma} + X_m$  变化到  $X_{1\sigma}$ 。

文献[8]提出了一种基于磁通可控的可调电抗器的原理，与本文的原理分析有相似之处，都是通过控制变压器副边的电流实现阻抗的调节。不同之处在于：文献[8]的分析基于串联变压器，一次侧端电压  $U_1$  可变化，因此，改变二次侧注入电流时，变压器主磁通确实呈现随  $\alpha$  的增大而近似线性减小的关系。而对于并联变压器，一次侧电压  $U_1$  为固定值，忽略一次侧漏抗上的压降，感应电势  $E_1$  与  $U_1$  平衡，即

$$\dot{E}_1 = -j4.44f\Phi_m N_1 = \dot{U}_1 - \dot{I}_1 Z_1 \approx \dot{U}_1 \quad (7)$$

主磁通在较大范围内近似不变(随  $\alpha$  的增大略微有所下降)，仅当  $\alpha$  接近 1，变压器呈现的电抗很小， $\dot{I}_1$  很大，漏抗上的压降  $\dot{I}_1 Z_1$  很大，主磁通才急剧减小。因此，文献[8]推导的磁通可控原理对于并联变压器并不适用。

对于并联变压器，该原理的实质是：将并联变压器视为二端口网络，当负载改变时，输入阻抗也随之改变。二次侧负载为一受控电流源且满足条件(2)时，端口输入阻抗可简化为式(5)所示，从图 1(b)的电路分析可以得到上述结论。

二次侧受控电流源可由一电压型逆变器实现，该逆变器实质上即为变压器二次侧的负载。通过带有闭环调节的电流跟踪控制方案，可以精确地实现式(2)所要求的条件。

## 2 系统结构与配置

图 2 为基于上述电抗调节原理的消弧线圈拓扑结构图。

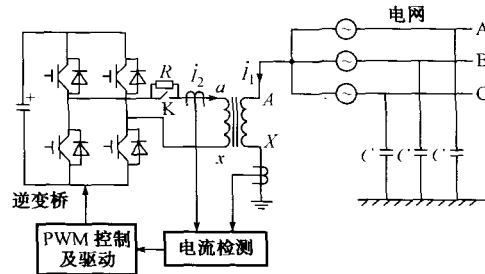


图 2 系统拓扑结构  
Fig. 2 Topology of the system

电抗器的一次侧并接于电网中性点与地之间，二次侧接一单相逆变桥。依据前述的原理，通过控制逆变器的输出电流，可以实现电感的调节，使电感电流与电容电流抵消，实现消弧线圈的功能。逆变桥选择 IGBT 作为开关器件以获得良好的正弦输出电流，提高电流跟踪的精度，并减小对电力系统的谐波污染。为了以小容量功率器件实现装置大容量，采用了一种副边多绕组的电抗器结构，如图 3 所示。

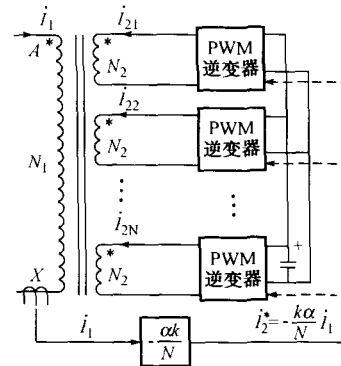


图 3 副边多绕组电抗器结构  
Fig. 3 Structure of reactor with multiple secondary windings

该电抗器的每个二次侧绕组设计成相同的形状和匝数，故它们的参数也基本一致。假设一次侧绕组和各个二次侧绕组之间的互感系数为  $M_1, M_2, \dots, M_N$ ， $N$  为二次侧绕组个数。理论和实验证明各互感系数近似相等，即

$$M_1 \approx M_2 \approx \dots \approx M_N = M \quad (8)$$

若二次侧各绕组的电流分别为  $\dot{I}_{21}, \dot{I}_{22}, \dots, \dot{I}_{2N}$ ，则一次侧电势平衡方程式为：

$$\begin{aligned} \dot{U} = & (r_1 + j\omega L_{11})\dot{I}_1 + j\omega M\dot{I}_{21} + j\omega M\dot{I}_{22} + \dots + \\ & j\omega M\dot{I}_{2N} = [r_1 + j\omega(L_{11} - kM)]\dot{I}_1 + \\ & j\omega kM \left( \dot{I}_1 + \frac{\dot{I}_{21}}{k} + \frac{\dot{I}_{22}}{k} + \dots + \frac{\dot{I}_{2N}}{k} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

式中:  $L_{11}$  为一次侧绕组自感。

若控制使得二次侧各绕组电流满足:

$$\dot{i}_{21} = \dot{i}_{22} = \dots = \dot{i}_{2N} = -\frac{k\alpha}{N}\dot{i}_1 \quad (10)$$

则式(9)可简化为:

$$\dot{U}_1 = (r_1 + j\omega L_{1\sigma})\dot{I}_1 + j\omega L_m(1-\alpha)\dot{I}_1 \quad (11)$$

对比式(11)和式(4)可知,副边多绕组电抗器的阻抗与单绕组电抗器的阻抗具有相同的表达式。采用副边多绕组的方案,可以减小每个逆变单元的输出电流,也就是降低了单个逆变单元的容量。通过比较式(2)和式(10)可以证明:每个逆变单元输出电流的大小与副方支路数成反比。因此,可以选用小容量的电力电子器件实现整个装置的大容量,这样既可以提高开关器件的频率,也降低了整体成本。

可调电感要实现消弧线圈的功能,另一个设计关键就是电网对地电容的检测。本装置采用注入信号法检测电网对地分布电容<sup>[9]</sup>。采用图2所示的拓扑结构,通过复用变压器副边的一条逆变器回路,可以在不增加任何硬件装置的情况下,方便地采用注入信号法的原理简单准确地检测对地电容值。

### 3 控制系统

如图2所示的系统结构,变压器副边所连接的逆变器的直流侧为一电容器,并没有外接直流电源,在电网没有单相接地故障时(正常状态下),电网三相对称,中性点电压很低(理论上为0),控制系统利用外加很低的直流电压(几十伏)逆变产生变频正弦电流信号注入电网检测对地电容,并根据检测到的电容值计算前述的二次侧电流系数 $\alpha$ ,以使投入补偿状态时的电抗值(见式(6))满足需要补偿的电容电流的要求。一旦电网发生单相接地故障,中性点电压偏移(偏移电压值随接地点、接地类型的不同而不同),此时控制系统立即切换至故障电流补偿状态。其切换过程是:中性点偏移电压通过充电电阻 $R$ 对逆变器的直流侧电容充电,几个周期之后,控制逆变器投入到电抗器二次侧(断路器 $K$ 闭合),此时控制系统将电容检测获得的 $\alpha$ 值乘以系数 $-k/N$ 后与电抗器一次侧采样电流 $\dot{I}_1$ 相乘,作为逆变器的指令电流信号 $\dot{I}_2^* = -(k\alpha/N)\dot{I}_1$ ,通过带有PI调节器的电流闭环控制方案,可以实现输出电流跟踪此指令电流变化。电流控制方案的框图如图4所示。

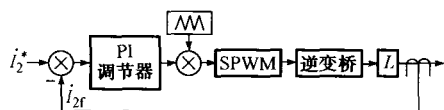


图4 电流控制方案框图  
Fig. 4 Block diagram of current controller

电压型PWM逆变器的电流控制方式一般有3种<sup>[10]</sup>,采用三角波比较的电流控制方法,虽然没有滞环控制所具备的强鲁棒性,但是具有结构简单、开关器件的频率固定的优点。同时,采用单极倍频SPWM技术可以有效降低开关器件的频率。

控制系统采用了一套基于DSP和CPLD逻辑的全数字控制方式,数字控制的动态响应性能和电流跟踪精度虽不及模拟方式,但是具备算法灵活性强、调试和通信方便的优点。影响数字控制系统性能的关键有2个<sup>[10-11]</sup>:一是电流信号的强弱和采样的精度及速度;二是SPWM的载波频率。信号越强,采样精度越高,速度越快;同时,脉冲间隔时间越短,则电流跟踪的效果越好。

本装置采用了一种副边多绕组的电抗器结构来提高系统容量,因而需要一块主控DSP板实现整体的运算和协调。该主控DSP板监测电网中性点电压值,正常时,DSP通过CAN总线传送“电容检测”指令给复用为电容检测的逆变器支路,该支路注入一变频正弦信号检测电网对地电容值;当主控板检测到中性点电压超过预设值(如1kV),则认为电网发生单相接地故障,DSP将上次计算得到的 $\alpha$ 值和“补偿”指令同时传给所有的逆变桥支路,控制各逆变桥的输出电流满足式(10),以使电抗器呈现的电抗满足补偿电容电流的要求。通过SCI端口与工控机通信,可以实时地将系统信息显示出来,便于操作人员监控。

### 4 实验

消弧线圈样机按800kVA容量设计,电抗器二次侧绕组数 $N=12$ ,一次侧绕组匝数 $N_1=606$ 匝,二次侧绕组匝数 $N_2=45$ 匝,匝比 $k=606:45$ ,实验测得一次侧漏电抗 $X_{1\sigma}=4.6\Omega$ ,励磁电抗 $X_m=181.0\Omega$ 。充电电阻 $R=5\Omega(200W)$ ,功率器件采用SEMIKRON公司1200V,300A系列IGBT,开关频率设为10kHz。模拟试验接线图如图5所示。

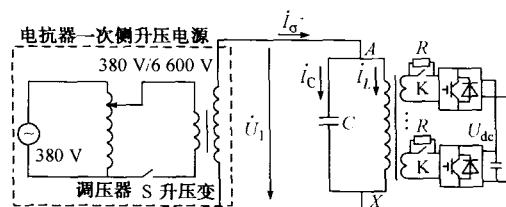


图5 试验接线示意  
Fig. 5 Experimental circuit

由于实验条件限制,采用了一系列标称值为 $8.0\mu F \sim 8.2\mu F$ 的电力电容器并联来模拟实际电缆对地分布电容,其与电抗器并联来模拟消弧线圈

运行工况。采用了一个调压器及升压变压器来改变并联支路端电压,模拟故障时电网中性点对地电压。

图 6 为不同系数  $\alpha$  下根据实验数据拟合的电抗器伏安特性曲线。当  $\alpha$  确定时,伏安特性基本成线性。图 7 为系数  $\alpha$  从 0.51 变化到 0.75 时,根据实验数据拟合的电抗器阻抗变化特性曲线  $X_L = f(\alpha)$ ,可见电抗值随  $\alpha$  的增大线性减小,与理论分析吻合。

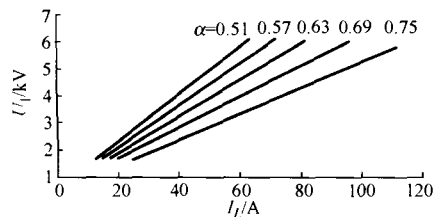


图 6 电抗器伏安特性曲线  
Fig. 6 Voltage-ampere curve of the reactor

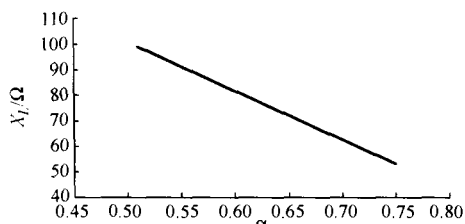


图 7 电抗值与二次侧电流系数  $\alpha$  关系曲线  $X_L = f(\alpha)$   
Fig. 7 Curve of the reactor  $X_L = f(\alpha)$

表 1 为模拟中性点电压在额定值 6 kV 附近,电流系数  $\alpha$  按脱谐度  $\gamma = (I_C - I_L) / I_C = -3\%$  设置,所记录的几种不同电容工况下的实验数据。从表 1 数据可知,电感电流略大于电容电流,与预设的过补偿状态吻合,系统控制精度满足既定要求。

表 1 预设  $\gamma = -3\%$  时几种不同电容工况下的试验数据  
Table 1 Experimental results under different capacitor state when setting  $\gamma = -3\%$

电容检测值/ $\mu\text{F}$	电压 $U_1/\text{V}$	电容电流 $I_C/\text{A}$	电感电流 $I_L/\text{A}$	残余电流 $I_0/\text{A}$	脱谐度 $\gamma/(\%)$
32.6	6 020	62.6	63.5	2.20	-1.4
40.9	6 150	80.5	82.6	3.55	-2.6
49.0	6 030	94.5	97.3	4.25	-3.0
57.2	5 960	110.0	113.0	4.93	-2.7
65.5	5 120	108.0	110.0	4.55	-1.9

图 8 为 Tektronix 公司 TDS2002 型示波器记录的某种工况下 ( $U_1 = 5\ 010\ \text{V}$ ,  $C = 32.6\ \mu\text{F}$ ,  $\gamma = -3\%$ ) 中性点电压(即图 5 中的  $\dot{U}_1$ )、电感电流(即图 5 中  $\dot{I}_L$ )和接地残流(即图 5 中的  $\dot{I}_0$ )过渡过程波形。试验过程为:将电压  $U_1$  调至 5 kV,闭合开关 S 后,在经过了共约 100 ms 的程序判断过压延迟、逆变桥充电延迟和断路器动作延迟后,断路器开关 K

闭合,逆变桥投入到补偿状态,残余电流立即减小,实测稳态残余电流约为 1.84 A。

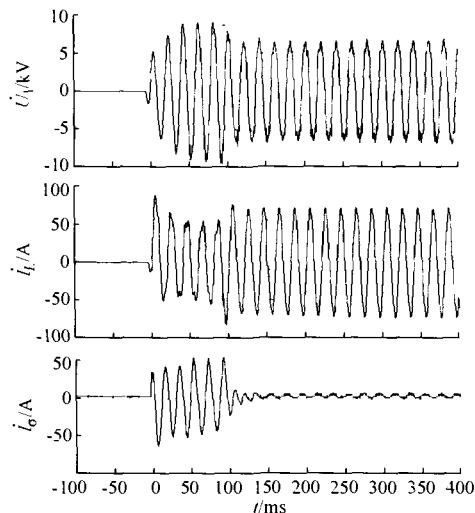


图 8 中性点电压、电感电流和残余电流暂态波形  
Fig. 8 Transient waveforms of neutral voltage, inductive current and residual current

图 9 为该工况下逆变器直流母线电压和输出电流暂态波形。因试验中采用的充电电阻较大 ( $5\ \Omega$ ),故程序设定的充电时间较长(约 80 ms),进一步减小充电电阻可缩短电容充电时间,提高装置的响应速度。

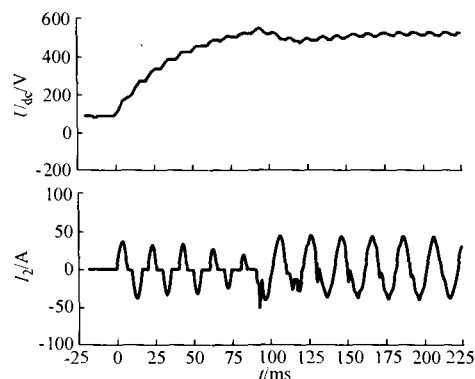


图 9 逆变器直流母线电压和输出电流暂态波形  
Fig. 9 Transient waveforms of inverter's DC voltage and output current

图 10 为稳态下电感电流波形,可见电感电流基本成正弦,谐波含量很小。

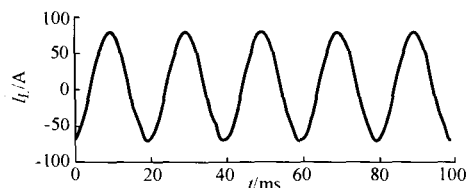


图 10 稳态下的电感电流波形  
Fig. 10 Inductive waveform on steady state

## 5 结语

本文对基于变压器可控负载理论的自动调谐消弧线圈的工作原理及实现方法进行了详细的分析,给出了一种新型的电抗调节方法。理论推导和实验结果表明,基于该方法实现的自动跟踪补偿消弧线圈具有电抗调节范围广、谐波污染少的特点,应用前景广泛。

## 参考文献

- [1] 陈忠仁,吴维宁,张勤,等. 调匝式消弧线圈自动调谐新方法. 电力系统自动化,2005,29(24):75-78.  
CHEN Zhongren, WU Weining, ZHANG Qin, et al. New automatic tuning method for multi-tap arc-suppression coil. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(24): 75-78.
- [2] 蔡旭. 新型偏磁式消弧线圈及其控制. 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. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(10): 32-35.
- [3] 陆国庆,姜新宇,欧阳旭东,等. 高短路阻抗变压器式自动快速消弧系统. 电网技术,2000,24(7):25-28.  
LU Guoqing, JIANG Xinyu, OUYANG Xudong, et al. An automatic rapid arc suppression system based on transformer with high short circuit impedance. Power System Technology, 2000, 24(7): 25-28.
- [4] 刘艳村,鲁铁成,文习山,等. 基于 TSC 控制技术的快速响应自动消弧装置. 电力系统自动化,2004,28(20):88-93.  
LIU Yancun, LU Tiecheng, WEN Xishan, et al. Automatic arc-suppression equipment with fast response based on TSC control technique. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(20): 88-93.
- [5] 纪飞峰,王崇林,牟龙华,等. 基于对称法和相位法的新颖消弧线圈. 电力系统自动化,2004,28(22):73-77.  
JI Feifeng, WANG Chonglin, MOU Longhua, et al. New type of arc suppression coil based on symmetry and phase tuning principle. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(22): 73-77.
- [6] 王崇林,梁睿,刘建华,等. 基于变耦电抗法的新颖消弧线圈. 电力系统自动化,2005,29(20):81-84.  
WANG Chonglin, LIANG Rui, LIU Jianhua, et al. New type arc suppression coil based on changing magnetic coupling to adjust inductance. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(20): 81-84.
- [7] 陆国庆,姜新宇. 影响消弧线圈应用效果的重要性能. 电网技术,2001,25(11):62-65.  
LU Guoqing, JIANG Xinyu. Influence of main performance of arc-suppression coil on its applied effect. Power System Technology, 2001, 25(11): 62-65.
- [8] 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. 中国电机工程学报,2003,23(2):116-120.  
LI Dayi, CHEN Qiaofu, JIA Zhengchun. A novel principle of adjustable reactor based on magnetic flux controllable. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(2): 116-120.
- [9] 曾祥君,于水源,尹项根,等. 基于注入信号法的消弧线圈自动调谐新技术. 电力系统自动化,2000,24(10):38-41.  
ZENG Xiangjun, YU Yongyuan, YIN Xianggen. Novel technique for Peterson coil tuning based on injecting current. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(10): 38-41.
- [10] BUSO S, MALESANI L, MATTAVELLI P. Comparison of current control techniques for active filter applications. IEEE Trans on Industrial Electronics, 1998, 45(5): 722-729.
- [11] JINTAKOSONWIT P, FUJITA H, AKAGI H. Control and performance of a full-digital-controlled shunt active filter for installation on a power distribution system. IEEE Trans on Power Electronics, 2002, 17(1): 132-140.

程路(1981--),男,博士研究生,研究方向为可调电抗、电力电子在电力系统中的应用。E-mail: lcheng@smail.hust.edu.cn

陈乔夫(1946--),男,教授,博士生导师,研究方向为电力谐波抑制、FACTS技术及变压器理论。

张宇(1980--),男,博士研究生,研究方向为电力电子在电力系统中的应用。

## Novel Arc-suppression Coil Based on the Theory of Transformer with Controllable Load

CHENG Lu<sup>1</sup>, CHEN Qiaofu<sup>1</sup>, ZHANG Yu<sup>1</sup>, BU Kaiwei<sup>2</sup>, YANG Weiming<sup>1</sup>

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

(2. Wuhan Zhongyuan Huadian Science & Technology Co Ltd, Wuhan 430079, China)

**Abstract:** By introducing the current development and problems of arc-suppression coils, a novel automatic tuning arc-suppression coil based on the theory of transformer with controllable current source load is proposed, which has the properties of linear reactance tuning capacity and little harmonics pollution. Its principle is that the equivalent reactance of the transformer's primary winding can be regulated by controlling the current of the transformer's secondary winding, which can be implemented via a voltage source PWM inverter. Moreover, a large capacity apparatus can be realized with the multiple secondary windings structure adopted. The paper analyzes the principle of this new approach and presents the whole control system. The experimental results of an 800 kVA pilot apparatus have proved the validity of the theory as well as the feasibility of the scheme proposed.

**Key words:** arc-suppression coil; transformer; current control; inverter; multiple secondary windings