

基于自由偶次谐波原理的偏磁式消弧线圈研究新方法

赵 永, 张建文, 蔡 旭

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

摘要: 目前偏磁式消弧线圈的研究是将励磁绕组电源简化为恒流源模型, 得出消弧线圈的工作特性, 但现场实践表明, 消弧线圈实际工况中的偶次谐波电流分量已经大到不可以忽略, 因此忽略偶次谐波电流而将励磁电流简化为恒流源在一定程度上影响了分析结果的准确度。针对此种研究方法的缺陷, 考虑偶次谐波电流的实际影响, 笔者提出了基于自由偶次谐波原理研究偏磁式消弧线圈工作特性的新方法, 通过数学建模, 得到了消弧线圈的调节特性和伏安特性。研究结果表明, 基于自由偶次谐波原理的研究方法能够反映实际工况, 并为偏磁式消弧线圈的优化设计提供了一个新的解决思路。

关键词: 偏磁; 消弧线圈; 自由偶次谐波; 调节特性; 伏安特性

中图分类号: TM475

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2010)06-0014-04

New Method to Study Arc-suppression Coil with Magnetic Bias Based on Free Even-order Harmonic Principle

ZHAO Yong, ZHANG Jian-wen, CAI Xu

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

Abstract: In conventional research on arc-suppression coil with magnetic bias, exciting winding source is simplified as constant current source model to achieve the working characteristics of the arc-suppression coil. However, field practice indicates that even-order harmonic current induced by AC source is too large to be ignored, so the above simplification will reduce the accuracy of analysis results to a certain degree. Therefore, a novel method of research on characteristics of arc-suppression coil with magnetic bias based on free even-order harmonic principle is presented considering the influence of even-order harmonic current. Regulating characteristic and volt-ampere characteristic of arc-suppression coil are obtained through mathematical modeling. The results indicate that the proposed method can reflect actual situation, and play a new role in the optimization design of arc-suppression coil with magnetic bias.

Key words: magnetic bias; arc-suppression coil; free even-order harmonic; regulating characteristic; volt-ampere characteristic

0 引言

偏磁式消弧线圈^[1]是一种随调式消弧线圈, 它的基本工作原理是通过改变励磁绕组中的直流偏磁电流, 使铁心的磁导率发生改变, 从而实现工作绕组电感的连续调节。按照励磁方式的不同, 偏磁式消弧线圈可分为他励式和磁阀式^[2-4]两种。

文[5-8]提出了一种新结构的偏磁式消弧线圈及其控制方法, 为便于工程应用研究, 文献将励磁绕组电源简化为恒流源模型, 通过数学建模, 找出消弧线圈电感电流随励磁绕组中的控制电流的变化规律(即调节特性), 消弧线圈电感值按调节特性由控制

电流唯一确定, 只需精确地提供励磁绕组中的控制电流就可以准确地调整消弧线圈电感(注: 下节所提到的消弧线圈, 如无特殊说明, 均指偏磁式消弧线圈)。

但在实际应用中, 文[5-8]的研究方法存在以下不足: ①将励磁绕组电源简化为恒流源模型, 虽然在工程中可以应用, 但现场实践表明, 消弧线圈的实际工况中的偶次谐波电流分量已经大到不可以忽略, 因此忽略偶次谐波电流而将励磁电流简化为恒流源在一定程度上影响了分析结果的准确度, 此外, 简化模型分析无法得知偶次谐波电流的特性; ②感应电流的存在使得控制绕组电阻呈现非线性特征, 导致给定电压信号不能精确对应控制电流大小。

收稿日期: 2009-09-28; 修回日期: 2009-12-29

基金项目: 国家重点新产品计划项目(2002ED620004)。

作者简介: 赵 永(1984—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为消弧线圈的设计、小电流接地与选线。

针对这些问题,在文[5-8]的研究基础上,笔者考虑偶次谐波电流的实际影响,提出了基于自由偶次谐波原理研究消弧线圈工作特性的新方法,通过数学建模,得到了消弧线圈的调节特性和伏安特性,成功地解决了这些问题。

1 自由偶次谐波原理

定义励磁绕组两端的直流电压为控制电压,按照工程实际情况,此控制电压相当于一个恒压源,在工作绕组电压恒定不变的条件下,定义消弧线圈电感电流同励磁绕组控制电压的关系曲线为调节特性曲线。以励磁绕组控制电压为研究变量,通过数学建模,研究偏磁式消弧线圈的调节特性及其他相关特性。由于励磁绕组中的感应偶次谐波电流可在绕组中自由流通,而励磁绕组的控制电压相当于恒压源,不受偶次谐波电流分量的影响,故称此种工作方式自由偶次谐波方式。以励磁绕组控制电压为研究对象,不仅能得出偶次谐波电流的特性,还易于得出偏磁式消弧线圈的调节特性和伏安特性;此外,由于控制系统的信号源由单片机系统实现,且单片机系统的D/A通道输出的信号一般是电压型的,而笔者的研究对象即是控制电压,故不需要再将电压信号转换成电流信号,避免了现有的偏磁式消弧线圈给定电压信号不能精确对应控制电流大小的问题。

2 偏磁式消弧线圈数学建模

2.1 模型简介

课题组所开发的偏磁式消弧线圈样机是基于文[8]中的理论模型,为便于对比,笔者使用基于自由偶次谐波原理的新方法来对该理论模型进行分析研究。图1为偏磁式消弧线圈的理论模型。从图1中可看出,铁心的边柱上布置了两级减小截面的部分,可降低工作电流谐波含量。工作绕组由3个线包组成,分别布置在两个边柱和中间柱上,其接线为两边柱绕组并联,然后同中柱绕组串联。

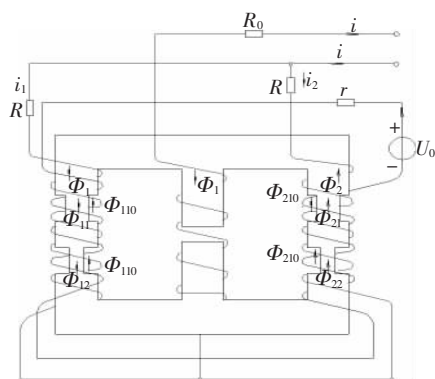


图1 偏磁式消弧线圈的理论模型

图1中,励磁绕组电阻为 r ,匝数为 N_1 ,绕组的控制电压为 U_0 ,流过控制回路的电流为 I_0 ,边柱每个交流绕组电阻为 R ,匝数 N_j ,电流分别为 i_1, i_2 ;中柱交流绕组电阻为 R_0 ,匝数为 N_2 ,电流 $i_L=i_1+i_2$;边柱大截面面积 S_1 ,长度 l_1 (含铁轭部分),左边柱主磁通 Φ_1 ,右边柱主磁通 Φ_2 ;边柱中截面面积 S_2 ,长度 l_2 ,中截面处气隙等效截面面积 $S_{01}=k_2(S_1-S_2)$,式中 k_1 为气隙截面扩散系数,左边柱中截面磁通 Φ_{11} ,右边柱中截面磁通 Φ_{21} ,边柱小截面面积 S_3 ,长度 l_3 ,边柱小截面处气隙等效截面面积 $S_{02}=k_2(S_1-S_3)$,式中 k_2 为气隙截面扩散系数,左边柱小截面磁通 Φ_{12} ,右边柱小截面磁通 Φ_{22} ;中柱截面面积 S_0 ,长度 l_0 ,气隙长度 l_q ;边柱交流绕组漏磁系数 σ_1 ,中柱交流绕组漏磁系数 σ_2 ,直流绕组漏磁系数 σ_3 ,工作绕组电压 $U=U_m \sin \omega t$,有效值为 U_L 。

2.2 磁化曲线

冷轧硅钢和热轧硅钢都属于软磁材料,它们的磁滞回线狭窄,其上升分支与下降分支都靠近基本磁化曲线,计算它们的磁路都用基本磁化曲线来取得 B 与 H 的关系^[8-9]。考虑到硅钢片磁化曲线的共性,可将其简化为两段折线。分析实际问题时,折线的转折点坐标取为 $(H_s/4, B_s)$,这样得到的折线更逼近磁化曲线, B_s 为硅钢片饱和磁通密度, H_s 为硅钢片饱和磁场强度, $\tan \alpha_0 = \mu_0^{-1}$, $\tan \alpha_1 = H_s B_s^{-1}/4$,简化后, $B=g(H)$ 曲线可用式(1)描述

$$B=g(H)=\begin{cases} H/\tan \alpha_1 & H < H_s/4 \\ (H-B_s \tan \alpha_1)/\tan \alpha_0 + B_s & H > H_s/4 \end{cases} \quad (1)$$

在本次建模中,取 $B_s=2 \text{ T}$, $H_s=10 \ 000 \text{ A/m}$,使用MATLAB画出 $B-H$ 曲线,见图2。

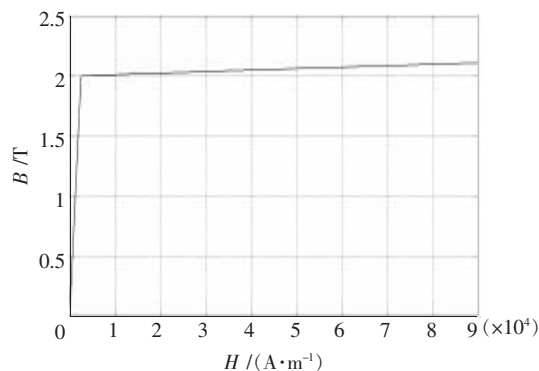


图2 $B-H$ 曲线

2.3 数学建模

2.3.1 交流绕组电势平衡方程

$$\begin{aligned} & [N_j(1+\sigma_1)+N_2(1+\sigma_2)] \frac{d\Phi_1}{dt} + \\ & N_2(1+\sigma_2) \frac{d\Phi_2}{dt} + Ri_1 = U_m \sin \omega t \end{aligned} \quad (2)$$

$$N_2(1+\sigma_2)\frac{d\Phi_1}{dt} + [N_1(1+\sigma_1)+N_2(1+\sigma_2)]\frac{d\Phi_2}{dt} + Ri_2 = U_m \sin \omega t \quad (3)$$

2.3.2 直流绕组电势平衡方程

$$(1+\sigma_3)N_1\left(\frac{d\Phi_1}{dt} - \frac{d\Phi_2}{dt}\right) + rI_0 = U_0 \quad (4)$$

2.3.3 磁路方程

设磁化曲线 $B=g(H)$, 且设铁心大截面处不饱和, 由安培环路定则和磁通连续性原理可得式(5)~(14)

$$l_1 H_1 + l_2 H_{11} + l_3 H_{12} + l_0 H_0 + l_q H_q = N_1 i_1 + N_2 i_L + N_1 I_0 \quad (5)$$

$$l_1 H_2 + l_2 H_{21} + l_3 H_{22} + l_0 H_0 + l_q H_q = N_1 i_2 + N_2 i_L - N_1 I_0 \quad (6)$$

$$\Phi_1 = S_1 g(H_1) \quad (7)$$

$$\Phi_2 = S_1 g(H_2) \quad (8)$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_0 = S_0 g(H_0) \quad (9)$$

$$\Phi_0 = k_3 S_0 \mu_0 H_q \quad (10)$$

$$\Phi_1 = S_2 g(H_{11}) + S_{01} \mu_0 H_{11} \quad (11)$$

$$\Phi_2 = S_2 g(H_{21}) + S_{01} \mu_0 H_{21} \quad (12)$$

$$\Phi_1 = S_3 g(H_{12}) + S_{02} \mu_0 H_{12} \quad (13)$$

$$\Phi_2 = S_3 g(H_{22}) + S_{02} \mu_0 H_{22} \quad (14)$$

以励磁绕组的控制电压 U_0 为输入量, 电感电流 i_L 为输出量, 其他变量作为状态量, 通过数值分析方法, 可以得到控制电压 U_0 和电感电流 i_L 之间的关系曲线, 定义此曲线为偏磁式消弧线圈的调节特性曲线。维持 U_0 恒定的条件下, 可以求出电感电流 i_L 随 U_L 的变化关系曲线, 即偏磁式消弧线圈的伏安特性。

3 模型求解

数学建模中使用的是一台 10 kV 级别偏磁式消弧线圈的样机参数, 其额定工作电压为 6 062 V, 图 3 为 MATLAB 求解数学模型得到的偏磁式消弧线圈的调节特性曲线。

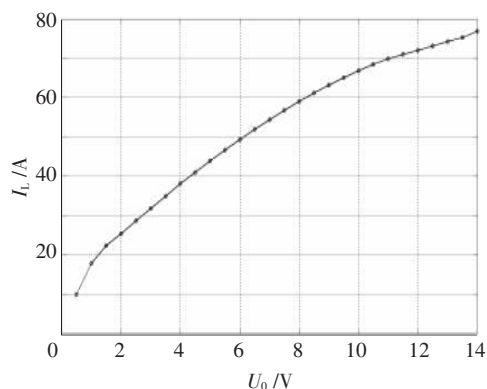


图 3 调节特性曲线

从图 3 可看出, 电感电流随励磁绕组控制电压的增加而增大, 电感电流调节范围为 10~75 A,

可调电感电流上下限之比为 7.5。

图 4 和图 5 分别是控制电压 U_0 为 6 V 时, 电感电流 i_L 和励磁电流 I_0 的频谱图。从图 4、5 中可以看出, 交流工作绕组不仅含有基波电流, 还含有一系列奇次谐波电流, 主要是 3 次、5 次和 7 次谐波。励磁绕组中不仅含有直流电流分量, 还含有一系列偶次谐波电流分量, 主要是 2 次、4 次、6 次和 8 次谐波, 其中 2 次谐波含量较多。

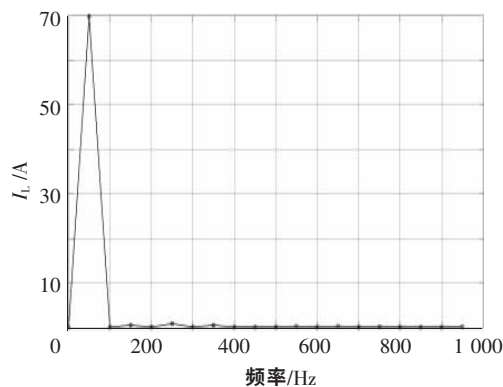


图 4 工作电流频谱图

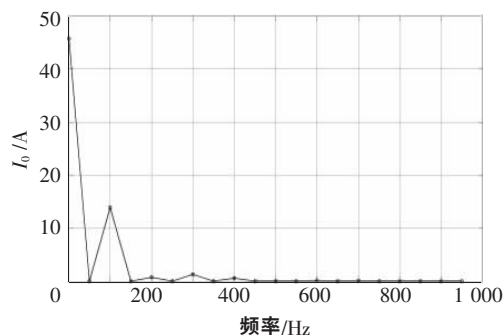


图 5 励磁绕组电流频谱图

定义谐波含量 $THD = \frac{I_x}{\sqrt{I_1^2 + I_x^2}}$, 其中 I_1 为基波

电流, I_x 为谐波电流总量。根据 MATLAB 可得到交流工作绕组总的谐波电流含量 THD 变化曲线, 见图 6。

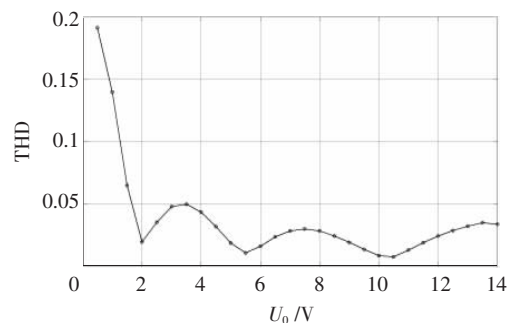


图 6 工作绕组电流谐波含量

从图 6 可以看到, 初始部分谐波含量较大, 最大可达 19%, 但有效使用段的谐波含量始终保持在

5%以下。

通过计算励磁绕组电流的平均值,可以求得励磁绕组的控制电压和电流的关系曲线,即励磁绕组的伏安特性,见图7。如果忽略励磁绕组的偶次谐波电流,则其伏安特性应该为一条通过原点的直线。但从图7可以看出,励磁绕组的伏安特性并不是一条通过原点的直线,说明励磁回路电阻呈现非线性,这是由于励磁绕组中存在着感应电流分量造成的。

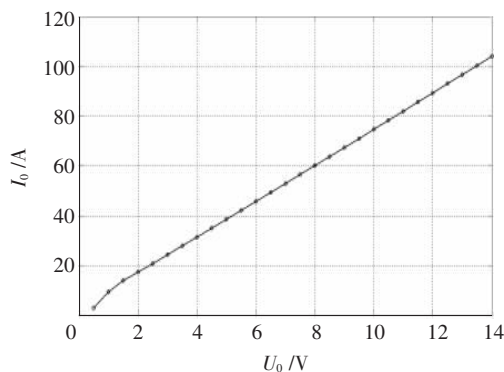


图7 励磁绕组伏安特性

图8为不同控制电压下工作绕组的伏安特性,工作电压 U_L 的变化范围为30%~100%的额定电压,从图8可以看出,伏安特性近似呈现直线,消弧线圈的电抗可以用额定电压下的电抗表示,它对应于电网单相接地后的状态,可用额定电压下补偿电流随励磁绕组控制电压变化的关系曲线,即调节特性曲线对消弧线圈进行控制。

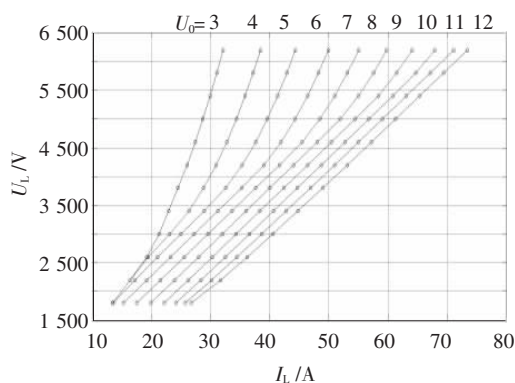


图8 工作绕组伏安特性

建模结果表明:基于自由偶次谐波原理的研究方法,以励磁绕组控制电压为研究变量,考虑了偶次谐波电流分量的实际影响,得出的消弧线圈调节特性和伏安特性更加符合实际工况,在一定程度上提

高了原方法的准确度。基于控制电压和电感电流的调节特性,可以直接为单片机提供电压信号,解决了现有的偏磁式消弧线圈由于励磁绕组电阻呈现的非线性特征而导致的给定电压信号不能精确对应控制电流大小的问题。

4 结语

基于自由偶次谐波原理的偏磁式消弧线圈研究方法,成功地解决了现有的偏磁式消弧线圈研究方法存在的两大不足,即将励磁绕组电源简化为恒流源模型得到的消弧线圈的特性不能很好地反映实际工况和给定电压信号不能精确对应控制电流大小的问题。自由偶次谐波工作方式允许偶次谐波电流在绕组中自由流通,考虑了其实际影响,由此得出的消弧线圈的特性能够真实地反映实际工况。基于控制电压和电感电流的调节特性,可以直接为单片机提供电压信号,无须电压电流信号转换,控制更为简单。基于自由偶次谐波原理的研究方法,为偏磁式消弧线圈的设计优化提供了一个新的解决思路,有关基于自由偶次谐波原理的偏磁式消弧线圈的优化设计研究将另文讨论。

参考文献:

- [1] ДОРОЖКОЛИ. Compare Analysis with Different Structure of Controllable Reactors[J]. Электрические станции(Power Plant), 1988(4): 19-24.
- [2] 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.
- [3] 赵志强,李众祥,张喜乐. 磁阀式可控并联电抗器模型试验研究[J]. 电力自动化设备, 2007, 27(1): 68-70.
- [4] 钱建华,陈柏超. 基于磁阀式可控电抗器的无功补偿系统[J]. 电力系统及其自动化学报, 2003, 15(2): 66-70.
- [5] 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.
- [6] 蔡旭,刘勇,胡春强,等. 新型偏磁式谐振接地与保护[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 44-49.
- [7] 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.
- [8] 蔡旭. 偏磁式消弧线圈及其动态控制系统的研究[D]. 徐州: 中国矿业大学, 2000.
- [9] 郭满生,梅桂华,刘东升,等. 直流偏磁条件下电力变压器铁心B-H曲线及非对称励磁电流[J]. 电工技术学报, 2009, 24(5): 46-51.