

基于新型磁控电抗器的静止无功补偿装置

赵国生¹, 孙可钦¹, 姚珂²

(1. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 河南南阳供电公司, 河南 南阳 473000)

摘 要: 目前的磁阀式磁控电抗器磁阀的存在使得电抗器绕组匝数大大增加, 为了克服这种缺陷, 提出一种新型的磁控电抗器的模型, 给出了该新型电抗器的电路拓扑结构、磁阀大小的选择原则, 由该磁控电抗器的场路耦合方程对其进行了电流谐波分析, 得到了其谐波电流表达式, 同时通过建立该磁控电抗器的 MATLAB 仿真模型, 并对该磁控电抗器的工作电流波形进行了仿真与验证. 最后讨论了利用该新型磁控电抗器实现静止无功补偿的电路结构、相应的控制电路及控制流程.

关键词: 磁控电抗器, 静止无功补偿, 谐波电流, 仿真模型

中图分类号: TM477

文献标志码: A

doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2012.06.018

0 引言

随着电力机车、交流电弧炉、轧钢机以及其它大型半导体变流装置等冲击性负荷得到越来越广泛的应用, 其带来的冲击无功分量和高次谐波分量直接导致了系统的电压闪变与波动, 给电网造成了严重的影响, 研制具有响应速度快、补偿性能好的静态无功补偿装置具有十分重要的意义. 目前在 10 kV 及以上电压等级电网中应用广泛的静态无功补偿装置有基于 TCR 型 SVC 和基于磁控电抗器(MCR)型 SVC, 虽然响应速度较快, 但产生的谐波较为严重. 基于磁控电抗器(MCR)型 SVC 装置响应速度可以做到小于 200 ms, 其产生谐波含量较少, 安全可靠, 正越来越多地被广大用户所接受, 目前广泛采用的是磁阀式磁控电抗器^[1-6].

但目前广泛采用的磁阀式磁控电抗器存在着以下缺点: ①由于磁阀, 使得阀部磁密已接近饱和, 但铁芯柱磁密很低, 这样为了产生与电源电压相等的感应电动势, 必须大大地增加绕组线圈的匝数, 制造成本大大增加; ②造成在磁控电抗器的额定电流状态下的磁阀及铁芯柱的磁密过高导致电抗器铁损增加, 其损耗指标接近其额定容量的 2.5%. 为了解决这些问题, 笔者将对目前的磁控电抗器结构进行改进, 提出一种新型磁控电抗器

结构, 并将该磁控电抗器应用于静态无功补偿装置中, 采用该结构的磁控电抗器, 制造成本及设备损耗减小.

1 新型磁控电抗器结构

新型磁控电抗器的电路拓扑结构如图 1 所示:

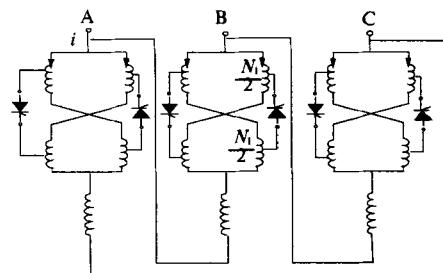


图 1 新型磁控电抗器电路拓扑结构

Fig. 1 Structure of circuit topology of new magnetic controllable reactor

新型磁控电抗器的每相采用一个铁芯电抗器与一个磁阀式磁控电抗器(MCR)串联的结构, A、B、C 三相中的绕组采用三角形连接. 该新型磁控电抗器的铁芯和线圈的单相结构如图 2 所示.

新型磁控电抗器的每相有三个铁芯柱, 其中铁芯柱 I、II 上含有几个截面积较小的段(分布式磁阀), 而第三个铁芯柱上不含磁阀, 上、下磁轭采用与铁芯柱主截面相同的截面积. 两个相邻铁芯柱 I、II 上的绕组交叉连接组成后再与第三

收稿日期:2012-06-06;修回日期:2012-09-01

作者简介:赵国生(1965-),男,河南南阳人,郑州大学副教授,博士,主要从事磁控电抗器和有源电力滤波器方面的研究, E-mail: zgs410@zzu.edu.cn

个铁芯柱上的绕组串联构成三相中的一相,铁芯柱 I、II 上的绕组分上下两部分,每部分上都留有抽头,上、下两部分的抽头上连接着晶闸管,同一相两个铁芯柱上绕组引出抽头连接的晶闸管的极性相反,铁芯柱 I、II 上的绕组交叉连接后形成的绕组相当于图 1 中每相的交叉连接绕组,第三个铁芯柱上的绕组相当于图 1 中的铁芯电抗器绕组.图 2 中两个晶闸管与该 I、II 铁芯柱上的绕组产生电动势构成单相可控全波整流电路,改变晶闸管的触发角即可调整绕组中流过的直流控制电流,该直流控制电流在工作绕组中与交流工作电流叠加,但不流入第三个铁芯柱上的绕组与系统^[1,4-5].

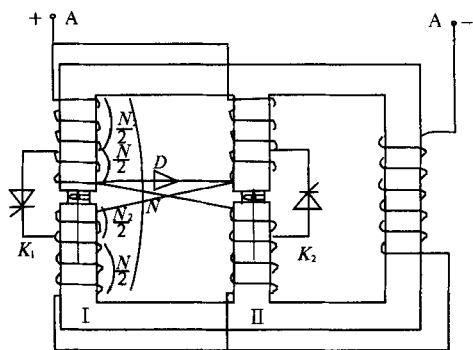


图 2 铁芯和线圈的单相结构

Fig. 2 Structure of the single phase iron and coils

在不加触发角情况下,虽然铁芯柱 I、II 上的绕组产生的感应电动势较小,但第三个铁芯柱上的绕组(相当于一个电抗器)的感应电动势起到了支撑作用,故总的线圈匝数可以选取的很小;当新型磁控电抗器工作在额定状态时,由于铁芯柱 I、II 上的绕组匝数较少,使得磁阀与磁轭部分的工作磁密得到有效的降低,因此大大减小了磁控电抗器的铜损及铁损.

2 磁阀大小的选择

在图 2 所示的新型磁控电抗器的铁芯结构中,磁阀的截面积选择及磁阀高度的确定取决于电抗器的容量大小.设 I、II 两柱每柱铁芯的磁阀高度为 L ,磁阀宽度为 δ ,磁阀截面积为 A_δ ,铁芯柱及磁轭截面积为 A ,当磁阀式磁控电抗器工作绕组中通过的电流为 i 时,由于磁阀部位的磁阻远大于铁芯的磁阻,根据安倍环路定律可得, $Ni = H L$,因此有 $H = N i / L$,设所选择铁芯材料的磁化曲线为 $B = f(H)$,则磁阀磁密为

$$B = f(Ni/L). \quad (1)$$

设磁阀面积为 A_δ ,铁芯面积为 A ,则铁芯磁通为

$$\begin{aligned} \Phi &= A_\delta \cdot B + k \cdot A \cdot A_\delta \mu_0 H \\ &= A_\delta f(Ni/L) + k \cdot A \cdot A_\delta \mu_0 \cdot Ni/L. \end{aligned} \quad (2)$$

式中: k 为气隙影响系数,当阀柱比为 1:4 时可近似取值为 1.2,所以磁阀式磁控电抗器产生的感应电动势为

$$\varepsilon = NA_\delta \cdot \frac{df(Ni/L)}{dt} + K(A - A_\delta) \mu_0 N^2 / L \cdot \frac{di}{dt}. \quad (3)$$

上式中第一项为磁性材料磁化曲线所决定的非线性项,第二项为空气所决定的线性项.由于新型磁控电抗器的感应电动势是其磁阀式磁控电抗器的感应电动势与串联铁芯电抗器的感应电动势之和,通常取第三个铁芯柱的截面积与 I、II 铁芯柱的截面积相等,设第三个铁芯柱上线圈匝数为 N_L ,其磁阀大小与宽度可由下式求出:

$$\begin{aligned} U &= (N + 2N_L) A_\delta \cdot \frac{df(Ni_0/L)}{dt} + K(A - A_\delta) \mu_0 \cdot \\ &\quad (N + 2N_L) N / L \cdot \frac{di_0}{dt}. \end{aligned} \quad (4)$$

3 电流谐波分析

设磁控电抗器支路流过的工作电流为 i ,直流控制回路电流为 I_d ,控制绕组与工作绕组的匝数都为 N ,根据安培环路定律有

$$\begin{cases} N(i + I_d) = f(B_1) \cdot \delta; \\ N(i - I_d) = f(B_2) \cdot \delta. \end{cases} \quad (5)$$

式中: $f(B_1)$ 、 $f(B_2)$ 分别为左右铁芯的磁场强度; δ 为每个铁芯柱磁阀长度,以上两式相加得

$$i = (f(B_1) + f(B_2)) \cdot \delta / 2N. \quad (6)$$

设直流控制电流在每个铁芯柱上产生的直流磁密为 B_0 ,交流工作绕组在每个铁芯柱上产生的交流磁密为 $B_m \cos \omega t$,则有

$$\begin{cases} B_1 = B_0 - B_m \cos \omega t, \\ B_2 = -B_0 - B_m \cos \omega t. \end{cases} \quad (7)$$

定义铁芯的饱和度为

$$\beta = 2 \cos^{-1} \left(\frac{B_m - B_0}{B_m} \right). \quad (8)$$

由于两铁芯绕组工作的对称性,

$$\begin{cases} H_1(\omega t) = -H_2(\omega t + \pi); \\ H_2(\omega t) = -H_1(\omega t + \pi). \end{cases} \quad (9)$$

所以,电抗器电流中无直流分量和偶次谐波分量为奇函数,设其表达式为

$$i(\omega t) = \sum_{n=0}^{\infty} I_{(2n+1)m} \cos(2n+1)\omega t. \quad (10)$$

式中: $I_{(2n+1)m}$ 为各奇次谐波电流幅值.

$$I_{(2n+1)m} = \frac{2}{\pi} \int \frac{\delta}{2N} (f(B_1) + f(B_2)) \cos(2n+1) d(\omega t) \quad (11)$$

对上式进行积分后,得

$$I_{(2n+1)m} = \frac{\delta B_m}{2(\pi+1)\pi N \mu_0} \left(\frac{\sin n\beta}{2n} - \frac{\sin(n+1)\beta}{2(n+1)} \right). \quad (12)$$

其基波电流幅值为

$$I_{1m} = \frac{\delta B_m}{2\pi N \mu_0} (\beta - \sin\beta). \quad (13)$$

三相磁控电抗器采用三角形接线,其三次及其倍数次谐波无法通过. 因此,其电流表达式为

$$i(\omega t) = \sum_{n=0(n \neq 3k+1)}^{\infty} \frac{\delta B_m}{2(\pi+1)\pi N \mu_0} \left(\frac{\sin n\beta}{2n} - \frac{\sin(n+1)\beta}{2(n+1)} \right) \cos(2n+1)\omega t. \quad (14)$$

4 仿真分析

新型磁控电抗器可以用图3所示的仿真模型来进行模拟仿真:

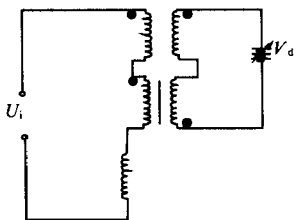
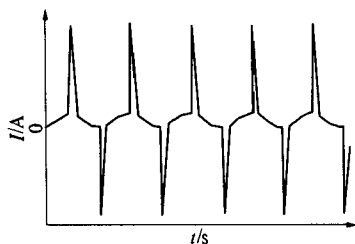
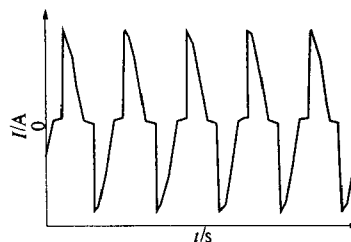


图3 新型磁控电抗器的仿真模型
Fig.3 Simulation model of new magnetic controllable reactor

在图3所示仿真模型中,上部的两个串联变压器构成的整体为磁阀式磁控电抗器的仿真模型,它可以看成是两个变压器交流绕组同极性串联,其二次侧反极性串联后再加以可控直流电流. 下边的串联电抗器为新型磁控电抗器中铁芯固定的电抗器模型,它相当于一个电感为 L 的固定电抗器. 其可控直流电压 V_d 相当于磁阀式磁控电抗器改变不同触发角 α 后形成的可变电压源. 图4(a)、(b)给出了增大触发角 α 后流过磁控电抗器中的电流变化情况的仿真结果.



(a) 触发角 $\alpha = 175^\circ$ 时



(b) 触发角 $\alpha = 155^\circ$ 时

图4 触发角 $\alpha = 175^\circ, 155^\circ$ 时, 流过磁控电抗器的电流波形

Fig.4 Current waveform of MCR at $\alpha = 155^\circ, 175^\circ$

在触发角 $\alpha = 155^\circ$ 下, 计算与仿真所得的流过磁控电抗器的谐波电流的结果比较如下表1(表中某次谐波结果的百分比是该次谐波电流有效值与基波电流有效值之比, 以百分数表示):

表1 $\alpha = 155^\circ$ 时计算与仿真所得的磁控电抗器谐波电流含量计算值和仿真值

Tab.1 magnetic controlled controlled reactor harmonic current content after calculation and simulation

when $\alpha = 155^\circ$					
谐波电流百分比	3次	5次	7次	11次	13次
计算结果	44%	27%	11%	7%	5%
仿真结果	45%	27%	12%	7%	5%

(1) 从表1可以看出, 在同一触发角下, 磁控电抗器的电流仿真波形中的谐波电流含量的傅立叶谐波分析结果与表达式(14)中的结果相接近.

(2) 通过图4的仿真结果比较可以看出, 改变磁控电抗器的触发角, 可以平滑地调节磁控电抗器绕组中流过的电流.

(3) 从图2的新型磁控电抗器的单相结构图及公式(4)中可以分析出, 由于第三柱铁芯柱中的磁通是铁芯柱 I、II 磁通之和, 第三柱铁芯柱上每匝线圈产生的感应电动势是铁芯柱 I、II 上每匝线圈感应电动势的 2 倍, 改进型磁控电抗器可以减少其线圈的总匝数, 进而降低磁控电抗器自身损耗.

5 基于新型磁控电抗器的静止无功补偿^[7-8]

基于新型磁控电抗器的静止无功补偿装置的电路结构如图5所示.

设滤波器 FC 提供固定的无功 Q_c , 可控电抗器提供感性无功 Q_L , Q_F 为负荷产生的无功. 根据变电站的实际无功补偿要求, 当要求实现无功功率恒定时, 只要做到 $Q_F + Q_L + Q_c = \text{定值}$ 即可. 当要求实现功率因数恒定时, 需要计算出其有功功率, 然后按式(15)即可计算出磁控电抗器需要产

生的无功功率 Q_L , 进而实现电网的功率因数恒定的要求. 当控制系统对无功补偿的要求确定以后, 满足补偿要求的任一时刻磁控电抗器支路需要产生的无功功率 Q_L 便可计算出来, 设当前的功率因数为 $\cos\phi$, 功率因数的要求值为 $\cos\phi_N$, 则有

$$Q_L = P(\tan\phi - \tan\phi_N) - Q_F - Q_C. \quad (15)$$

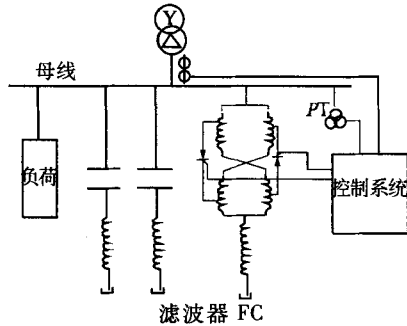


图5 基于新型磁控电抗器的静止无功补偿装置电路结构

Fig.5 Circuit structure of static reactive based on new magnetic controllable reactor

磁控电抗器支路流过的无功电流为

$$I_L = Q_L / (\sqrt{3} * U). \quad (16)$$

设每相串联的固定铁芯电抗器的电抗值为 L , 固定电抗器的电压降为 $\omega L I_L$, 则磁控电抗器的压降为

$$U_{MCR} = U - \omega L (P(\tan\phi - \tan\phi_N) - Q_F - Q_C) / (\sqrt{3} * U). \quad (17)$$

取额定容量时 ($\alpha = 180^\circ$) 磁控电抗器的电压降与电网电压之比为 η , 空载时 ($\alpha = 0^\circ$) 磁控电抗器的电压降与电网电压之比为 λ , 则磁控电抗器的额定电流与空载电流分别为

$$I_N = (1 - \eta) U / \omega L, I_0 = (1 - \lambda) U / \omega L. \quad (18)$$

当晶闸管的触发角为 α 时磁控电抗器流过的电流 I_L 可以表示为

$$I_L = I_0 + I_N * (\beta - \sin\beta) / 2\pi = (P(\tan\phi - \tan\phi_N) - Q_F - Q_C) / (\sqrt{3} U). \quad (19)$$

式中: β 为对应晶闸管触发角 α 时的磁饱和度, 它与晶闸管的触发角 α 关系为

$$\cos\alpha = \frac{2}{\pi} (\sin \frac{\beta}{2} - \frac{\beta}{2} \cos \frac{\beta}{2}) - 1. \quad (20)$$

由以上关系式即可求出任意时刻满足补偿要求的晶闸管的触发角 α .

控制软件的控制流程如图6所示:

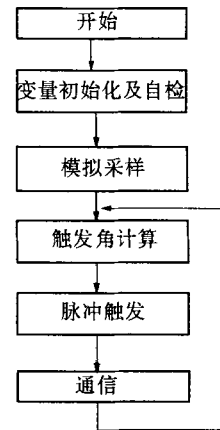


图6 控制流程
Fig.6 Control flow

6 结论

提出了一种新型磁控电抗器, 对该磁控电抗器的电路结构、铁芯结构及该基于新型磁控电抗器的静态无功补偿装置进行了介绍, 并从理论上对磁控电抗器的工作原理、触发角计算、铁芯磁阀的选取及工作电流中的谐波进行了数学分析及模拟仿真分析, 最后对控制电路及控制流程进行了介绍. 所提的新型磁控电抗器通过减小绕组的匝数可以减少磁控电抗器的自身功率损耗.

参考文献:

- [1] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉: 武汉水利电力出版社, 1999.
- [2] 赵晶, 余梦泽. 新型高压磁控电抗器的电压/无功控制效果分析[J]. 供用电, 2008, 25(5): 35-37.
- [3] 周立霞, 尹忠东. 可控电抗器及其谐波抑制的研究[J]. 现代电力, 2006, 23(2): 10-14.
- [4] 陈柏超, 田翠华. 谐波双级饱和磁控电抗器研究[M]. 电工技术学报, 2006, 21(1): 19-23.
- [5] 尹忠东, 刘虹, 陈柏超, 等. 磁阀式可控电抗器的研究[J]. 变压器, 1998, 35(7): 1-5.
- [6] 清华大学工业自动化系. 饱和电抗器原理与设计[M]. 北京: 清华大学, 1977.
- [7] 郑研, 王克文. 静止无功补偿装置的理想补偿电流[J]. 郑州工业大学学报: 自然科学版, 2001, 22(4): 107-109.
- [8] 余梦泽, 陈柏超, 田翠华, 等. 采用磁控电抗器的静止型高压动态无功补偿装置[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1770-1774.

(下转第91页)

- matic Assembly System of Saw Chain[J]. Applied Mechanics and Materials, 2012, 141: 239-243.
- [6] EMILY M S. From Russia with TRIZ[J]. Mechinal Engineering, 2003, 125: 18-20.
- [7] 袁峰. 面向需求的机械产品原理方案创新设计关键技术研究[D]. 天津: 天津大学机械工程学院, 2007.
- [8] ALTSHULLER G S. The Innovation Algorithm, TRIZ, Systematic Innovation and Technical Creativity[M]. Worcester: Technical Innovation Center, INC, 1999.
- [9] GLAZUNOV V N. The Search of Principles of Action in Technical Systems, "Methods of Problem Analysis and Decision Searching in Techniques" Book 4[M]. Moscow: Echnoi Transport, 1990.
- [10] SAVRANSKY S D. Engineering of Creativity[M]. Boca Raton: CRC Press, 2000.

Research on and Design for Feeding Device of Transmission Piece Based on TRIZ

YUAN Feng, DING Ze-xin, ZHU Jun

(School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: According to the actual demands of design for feeding device of transmission piece in the automatic assembly system of saw chain, the design conflicts are described based on TRIZ. Then the design technical conflicts and physical conflicts are studied in order to find out corresponding TRIZ conflict matrix and solution principles. As a result, several feasible directions for the innovative design are worked out, by which the conflicts among "reliability", "productivity" and "the weight of movement objects" and the problem of institutions "fast and slow of movement speed" are solved. Finally, a specific solution for feeding device of transmission piece is identified, which will shorten the whole system's research and development time. The feasibility of the scheme is proved by the successful trial of its physical prototype.

Key words: transmission piece; feeding device; TRIZ; conflict; innovative solution

(上接第78页)

Static Reactive Compensation Device Based on the Novel Magnetic Controllable Reactor

ZHAO Guo-sheng¹, SUN Ke-qin¹, YAO Ke

(1. School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China; 2. Nnayan Electric Power Supply Company, Nanyang 473000, China)

Abstract: In order to overcome the defects of the magnetic valve type controllable reactor such as more winding turns and higher copper loss currently, a novel magnetic controllable reactor is proposed in this paper. The circuit topology structure of the reactor and the selection principle of the magnetic valve size are given. The current harmonic analysis of the proposed magnetic controllable reactor is made, a MATLAB simulation model of the magnetic controllable reactor is established, and some simulation results are given in the paper. Finally, the circuit structure that realized static reactive power compensation are discussed.

Key words: magnetic controllable reactor; static reactive power compensation; harmonic current; the simulation model