

三相磁阀式可控电抗器的分析研究

宋江保¹, 王贺萍², 张战永², 赵国生¹

(1. 郑州大学电气工程学院, 河南 郑州 450002; 2. 许继电气股份有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 提出了一种新型三相磁阀式可控电抗器, 介绍它的结构和工作原理, 然后对其进行电磁分析, 同时用 Ansoft 建立三个不同磁阀的长度和不同磁阀宽度的三相磁阀式可控电抗器二维仿真模型, 并对分析磁阀的长度及磁阀宽度对三相磁阀式可控电抗器的影响, 最后对磁阀的长度和磁阀宽度对电抗器的调节作用进行总结。

关键词: 磁阀式可控电抗器 (MCR); 三相; Ansoft; Maxwell 仿真

Analytical study of controllable reactor based on three-phase magnetism valve type

SONG Jiang-bao¹, WANG He-ping², ZHANG Zhan-yong², ZHAO Guo-sheng¹

(1. School of Electric Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450002, China;
2. XJ Electric Co.LTD, Xuchang 461000, China)

Abstract: This paper presents one kind of new three-phase magnetism valve type controllable reactor, introduces its structure and principle of work, then carries on the electromagnetism analysis to it, simultaneously establishes three three-phase magnetism valve type controllable reactor two-dimensional simulation model with different magnetism valve's length and width by Ansoft, and contrastively analyses the influence of magnetism valve length and magnetism valve width to the three magnetism valve type controllable reactor. Finally it gets the summary of control effect on the reactor by magnetism valve's length and width.

Key words: magnetism valve type controllable reactor (MCR); three-phase; Ansoft; Maxwell simulation

中图分类号: TM47 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)23-0020-04

0 引言

可控电抗器在电力系统中主要有两个方面的用途, (1)应用在超高压远距离输电线路中; 超高压远距离输电线路在空载或轻载时由于长线电容效应会引起工频电压升高, 通过并联电抗器可以抵消其电容效应, 但采用普通并联电抗器时有其自身缺陷, 即在线路满载或重负荷由于电抗不可调会影响电网的输送能力, 而采用可控电抗器可以达到空载或轻载时末端电压正常、满载时不影响电网输送能力的要求, 可控电抗器可以长期并联在电网中。(2)应用中、低压电网中用于无功补偿: 目前电网的无功补偿方式主要有: 开关(或晶闸管)投切电容器、晶闸管控制电抗器型(TCR型), 开关(或晶闸管)投切电容器型无功补偿装置容量不能连续可调而达不到理想的补偿要求, 且由于开关的使用寿命的限制而不能频繁地进行投切, 而晶闸管控制电抗器(TCR)型 SVC 无功补偿装置, 虽然响应速度快, 可连续调整出力, 但谐波含量比较大且价格昂贵, 其承受电网过电压的能力很差, 在使用 TCR 时必须

在补偿装置中加装滤波器。由于可控电抗器具有高度的可靠性、可连续调整出力、产生的谐波较小, 在谐波含量较小的情况下可以不加装滤波装置^[1,2]。由于磁控电抗器所用的晶闸管的容量很小, 晶闸管承受电压为电抗器两端电压的 0.03~0.05 之间, 产生的谐波电流较小。目前, 电力系统中所用的可控电抗器大多为磁阀式可控电抗器 (MCR)。

目前对 MCR 的研究主要集中在单相 MCR 上, 现有的单相 MCR 主要有单相三柱式和单相四柱式两种, 按其磁阀结构又可分为单级和多级磁阀两种^[3]。单相 MCR 以其独特的优点已经成功地应用于牵引变电站、消弧线圈等领域^[2], 而对三相磁控电抗器的研究起步较晚, 目前还未见文献有所报道。

三相 MCR 与三个单相组合式 MCR 相比不仅具有上述优点, 而且还减少了旁轭从而减少了铁芯材料的使用, 减少了占地面积, 从而减少了制造成本, 因而更加经济实用, 应用前景更好, 本文将提出一种三相 MCR, 对三相 MCR 的构造、工作原理及其电磁计算进行分析, 并用 Ansoft 建立三相 MCR 二维仿真模型^[4], 分析电抗器的磁场分布, 研究磁阀

长度及磁阀宽度对三相 MCR 的影响。

1 三相磁阀式可控电抗器结构及原理

1.1 三相磁阀式可控电抗器的结构

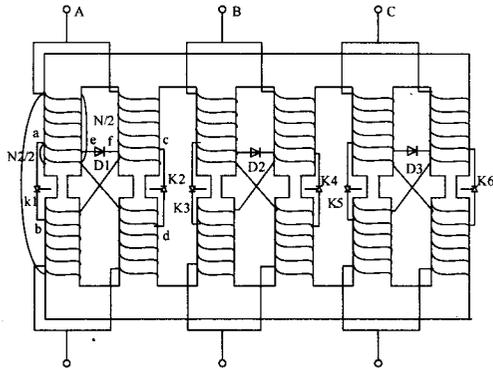


图 1 三相磁阀式可控电抗器结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of three-phase MCR structure

本文提出的三相磁阀式可控电抗器结构如图 1 所示, 其铁芯结构为三相六柱式铁芯, 每相的主铁芯由两个铁芯柱组成, 每柱的铁芯柱包含一个面积为 A_b , 长度为 $l-l_t$ 的柱及一个长度为 l_t 、其面积为 A_{b1} ($A_{b1} < A_b$) 的小截面段 (称为磁阀), 每相主铁芯的两个铁芯柱上分别对称地绕有两个匝数为 $N/2$ 的绕组 (单个半铁芯柱上的线圈总匝数为 N); 每个铁芯柱的上下两绕组各有一抽头比为 $\delta = N_2/N$ 的抽头, 它们之间接有可控硅 K_1 (K_2); 不同铁芯柱的上下两个绕组交叉连接后, 并联至电网电源, 二极管 D 则横跨在交叉端点。

1.2 三相磁阀式可控电抗器的原理

三相磁阀式可控电抗器的每相的工作原理同单相磁阀式可控电抗器一样基于直流偏磁可调, 通过改变晶闸管的导通角可以改变直流电流的大小, 进而改变铁芯的磁导率, 从而使通过其工作绕组的电流发生改变, 最终达到平滑调节电抗的目的。

现以其中一相为例加以说明, 当晶闸管 K_1 和 K_2 不导通时, 可控电抗器处于空载状态, 其工作电流很小。当电源电压处于正半周时, 晶闸管 K_1 承受正向电压, K_2 承受反向电压, 若 K_1 触发导通, 忽略晶闸管的正向压降, a 、 b 两点等电位, 外加电源经晶闸管整流后向两个匝数为 $N_2/2$ 的控制绕组提供直流控制电压和控制电流, 改变晶闸管的触发角可以改变控制电流的大小; 同理, 在电源电压负半周时, 晶闸管 K_2 承受正向电压, K_1 承受反向电压, 若 K_2 触发导通, 导通产生的控制电流 i_{k2} 与 K_1 导通产生的控制电流 i_{k1} 方向一致, 改变触发角可以改变该电流的大小, 即在电源的一个周期内, K_1 和

K_2 轮流导通起到了全波整流的作用, 二极管 D 在 K_1 和 K_2 导通和关断时起续流作用。

由以上分析可知, 电抗器绕组中流过两部分电流, 一部分是直流控制电流, 另一部分是工作电流 i_g , 直流控制电流所产生的直流控制磁通在每相的两个铁芯柱内闭合形成回路。每相的交流工作绕组产生的交流工作磁通与三相工作绕组中其它两相交流电流所产生的交流工作磁通在铁轭上相加为零, 所以不需要为交流磁路再提供旁柱铁芯。

2 三相磁阀式可控电抗器电磁分析

在对三相六柱心式电抗器的电磁分析时, 可假定三相电压对称, 其产生的三相磁路交流磁通大小相等, 相位互差 120° , 则有 $\phi_a + \phi_b + \phi_c = 0$ 。

三相六柱心式电抗器的结构如图 1 所示, 自左向右分别为 A 相, B 相, C 相, 每相在对应铁芯柱上的磁通依次为 ϕ_{a1} 、 ϕ_{a2} 、 ϕ_{b1} 、 ϕ_{b2} 、 ϕ_{c1} 、 ϕ_{c2} , 对应的磁势分别为 F_{a1} 、 F_{a2} 、 F_{b1} 、 F_{b2} 、 F_{c1} 、 F_{c2} , 对应的磁感应强度依次为 B_{a1} 、 B_{a2} 、 B_{b1} 、 B_{b2} 、 B_{c1} 、 B_{c2} , 流过的电流分别为 i_{a1} 、 i_{a2} 、 i_{b1} 、 i_{b2} 、 i_{c1} 、 i_{c2} , 控制电流分别为 I_{k1} 、 I_{k2} 、 I_{k3} 、 I_{k4} 、 I_{k5} 、 I_{k6} , 心柱高为 l , 磁阀长度为 l_t , μ 为铁芯的磁导率。

在晶闸管不导通时, 磁控电抗器相当于工作与空载状态, 此时流过电抗器工作绕组的电流很小 (仅需建立起空载磁动势即可), 由于磁阀段截面积相对比较小, 流过大部分磁通, 基本上都工作在饱和状态, 因而磁阻比较大, 而其它段工作在不饱和状态, 磁阻比较小, 可近似地认为 $\phi_{a1} = \phi_{a2}$, $\phi_{b1} = \phi_{b2}$, $\phi_{c1} = \phi_{c2}$, 其中 $\phi_a = \phi_{a1} + \phi_{a2}$, $\phi_b = \phi_{b1} + \phi_{b2}$, $\phi_c = \phi_{c1} + \phi_{c2}$ 。

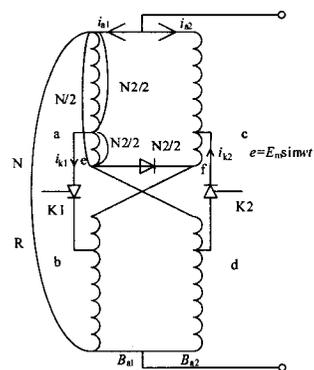


图 2 三相 MCR A 相电路图

Fig.2 Three-phase MCR A circuit diagram

在三相电抗器的晶闸管加触发脉冲导通时，A相绕组产生的磁动势可由图 2 分析得出：

$$F_{a1} = \frac{(1-\delta)N}{2} i_{a1} - \frac{\delta N}{4} I_{k1} - \frac{\delta N}{4} I_{k1} + \frac{(1-\delta)N}{2} i_{a1} = (1-\delta)N i_{a1} - \frac{\delta N}{2} I_{k1} = \frac{B_{a1}}{\mu} l_t \quad (1)$$

$$F_{a2} = \frac{(1-\delta)N}{2} i_{a2} - \frac{\delta N}{4} I_{k1} - \frac{\delta N}{4} I_{k1} + \frac{(1-\delta)N}{2} i_{a2} = (1-\delta)N i_{a2} - \frac{\delta N}{2} I_{k1} = \frac{B_{a2}}{\mu} l_t$$

晶闸管 K_1 导通时 A 相的电磁方程^[1]：

$$\frac{dB_{a1}}{dt} = \frac{\frac{E_m \sin \omega t}{(1-\delta)N} - \frac{Rf(B_{a1})l_t}{(1-\delta)N^2} + \frac{\delta Rf(B_{a2})l_t}{(1-\delta)N^2}}{\mu \frac{df(B_{a1})}{dB_{a1}} (A_b - A_{b1}) + A_{b1}} \quad (2)$$

$$\frac{dB_{a2}}{dt} = \frac{\frac{(1-2\delta)E_m \sin \omega t}{(1-\delta)N} + \frac{\delta Rf(B_{a1})l_t}{(1-\delta)N^2} - \frac{Rf(B_{a2})l_t}{(1-\delta)N^2}}{\mu \frac{df(B_{a2})}{dB_{a2}} (A_b - A_{b1}) + A_{b1}}$$

晶闸管 K_2 导通时 A 相的电磁方程：

$$\frac{dB_{a1}}{dt} = \frac{\frac{(1-2\delta)E_m \sin \omega t}{(1-\delta)N} - \frac{Rf(B_{a1})l_t}{(1-\delta)N^2} + \frac{\delta Rf(B_{a2})l_t}{(1-\delta)N^2}}{\mu \frac{df(B_{a1})}{dB_{a1}} (A_b - A_{b1}) + A_{b1}} \quad (3)$$

$$\frac{dB_{a2}}{dt} = \frac{\frac{E_m \sin \omega t}{(1-\delta)N} + \frac{\delta Rf(B_{a1})l_t}{(1-\delta)N^2} - \frac{Rf(B_{a2})l_t}{(1-\delta)N^2}}{\mu \frac{df(B_{a2})}{dB_{a2}} (A_b - A_{b1}) + A_{b1}}$$

晶闸管 K_1 导通时 A 相左侧的绕组流过的电流为：

$$i_{a1} = \frac{F_{a1}}{(1-\delta)N} = \frac{\delta F_{a2}}{(1-\delta)N} = \frac{2l_t A_b (1+\delta)}{(1-\delta)N\mu} - \frac{2l_t A_b \cos \omega t}{N\mu} \quad (4)$$

晶闸管 K_1 导通时 A 相右侧的绕组流过的电流为：

$$i_{a2} = \frac{F_{a2}}{N} = -\frac{2l_t A_b}{N\mu} - \frac{2l_t A_b \cos \omega t}{N\mu} \quad (5)$$

A 相绕组流过的直流控制电流为：

$$I_{k1} = \frac{\delta E_m (1 + \cos \alpha)}{\pi (1 + \delta) R} \quad (6)$$

其中： E_m 为加在 A 相两端的峰值电压； R 为 N 匝线圈的电阻值； α 为晶闸管 K_1 的触发角； B 、 C 两相的电磁方程与流过电流的均可参照 A 相的分析方法得出，在这里不再详述。

3 三相磁控电抗器电磁场分析

3.1 三相磁控电抗器的模型

建立三个厚度均为 54 cm、铁芯长宽均为 594 × 348、交流线圈匝数为 500 匝，所加电源电压为

8 486 V 工频交流电压、直流线圈匝数为 200 匝、但磁阀高度与宽度有所不同的三个三相磁阀式电抗器仿真模型，其中模型-1 磁阀宽 18 cm，长 36 cm；模型-2 磁阀宽 30 cm，长 36 cm；模型-3 磁阀宽 30 cm，长 12 cm，其中一个仿真模型（模型 1）如图 3 所示。

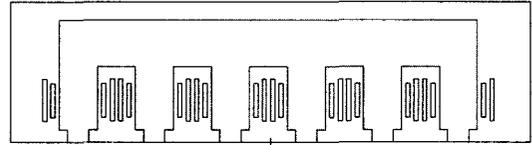


图 3 三相磁阀式可控电抗器仿真模型

Fig.3 Simulation model of three-phase MCR

设定铁芯材料及属性、线圈的材料及属性、边界条件^[5]、电源，同时设定求解参数后，对模型进行网格剖分，上图的三相 MCR 的网格剖分如图 4 所示。

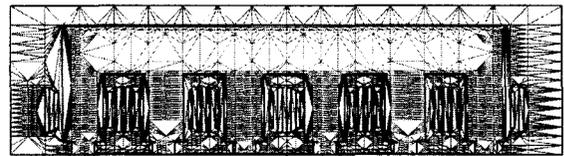


图 4 三相磁阀式可控电抗器网格划分

Fig. 4 Grid division of three-phase MCR

3.2 求解结果与分析

图 5 中： V_Ain1 、 V_Ain2 、 V_Bin1 、 V_Bin2 、 V_Cin1 、 V_Cin2 为三相 MCR 由左至右交流绕组中流过的电流，通入直流电流源的顺序为：200 A，100 A，10 A，20 A，30 A，50 A，70 A，0 A。

比较磁阀宽度相同、长度不同的模型-2 模型-3 的仿真结果可以看出，在直流电流小于 50 A 时，两者交流绕组流过的电流相差很小，但是当直流电流为 70 A 时，磁阀的长度较长的模型-2 中交流线圈流过的电流比较大，这说明此时磁阀的长度已经有调节作用，当所加的直流电流增大到 200 A 时，两者的交流线圈中的电流又相差不大，说明此时磁阀已高度饱和，磁阀已经失去调节作用。

表 1 在磁阀宽度不同的两模型中加不同的直流源时交流绕组流过的电流

Tab.1 The current which the AC winds go through when adds different DC sources in two different magnetism valve width models

	0	10	20	30	50	70	100	200
1	2. 2	3. 8	5. 3	9. 5	15. 5	21	28	35
2	2. 1	3	5. 2	8	14. 5	20	22	30

(下转第 40 页 continued on page 40)

16(4).
 [4] 薛禹胜. 电力市场稳定性与电力系统稳定性的相互影响[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(21): 1-6; 26(22): 1-4.
 XUE Yu-sheng. Interactions Between Power Market Stability and Power System Stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(21): 1-6; 26(22): 1-4.
 [5] Rudukevich A. Supply Function Equilibrium in Supply Markets: Learning All the Way TCA Technical Paper, 1999.
 [6] Fudenberg, Drew and David K. Levine The Theory of Learning in Games[M]. Cambridge, MA: The MIT Press, 1998.
 [7] Day C J, Hobbs B F, Pang Jong-Shi. Oligopolistic Competition in Power Networks: A Conjectured Supply Function Approach[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2002, 17(3): 597-606.
 [8] Aleksandr Rudkevich. Tabors Caramanis Supply

Function Equilibrium: Theory and Applications[A]. in: 36th Annual Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS'03) - Track 2[C]. Big Island, Hawaii: 2003.
 [9] 宋依群, 倪以信, 侯志俭, 等. 基于猜测供给函数均衡的发电公司策略行为[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(13).
 [10] Gerard Weisbuch. Complex Systems Dynamics: an Introduction Automata Networks[M]. Addison-Wesley, 1991.

收稿日期: 2008-12-09; 修回日期: 2009-04-16
 作者简介:

游义刚 (1977-), 男, 博士研究生, 研究方向为均衡理论在电力市场中的应用; E-mail: cn_youyi@sina.com
 周晓阳 (1956-), 男, 博士, 教授, 研究方向为复杂系统建模和分析、应用概率统计, 有电力市场的演化分析, 复杂自动机网络方法建模分析探索; 流体计算的格子 Boltzmann 方法研究; 经济和洪水数据的风险分析。

(上接第 22 页 continued from page 22)

在不同的直流控制电流下, 磁阀宽度不同、长度相同的模型-1 与模型-2 的仿真结果数据如表 1 所示 (表中电流单位为 A, 1 表示模型-1, 2 表示模型-2), 从表中可以看出磁阀越宽电抗可调范围越小。

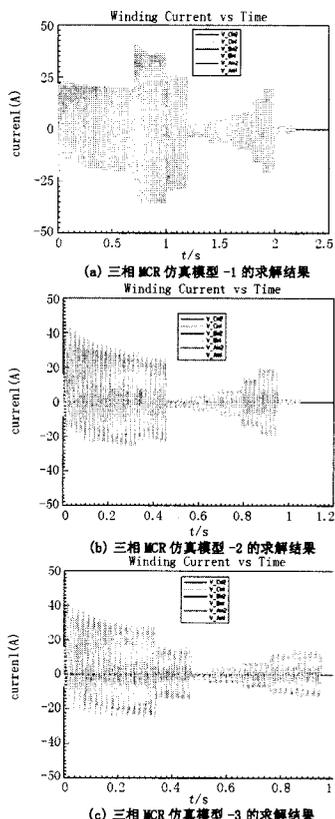


图 5 3 个三相 MCR 仿真模型的求解结果

Fig.5 The solution results of three three-phase MCR simulation models

4 结论

本文提出了一种新型三相磁阀式可控电抗器, 介绍了它的结构和工作原理, 同时对建立的三相磁阀式可控电抗器的分析模型进行了电磁计算及磁阀分析, 通过分析可以得出如下结论:

- (1) 磁路不饱和时情况下, 磁阀的高度调节作用不明显。
- (2) 在磁阀高度不变的情况下, 调节磁阀宽度, 磁阀越宽电抗可调范围越小。

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: 武汉水利电力大学出版社, 1999.
 [2] 宋子强, 赵巍然, 孙守海, 等. 磁控电抗器的原理及应用[J]. 江西电力职业技术学报, 2006: 7-8.
 [3] 陈柏超, 田翠华, 等. 谐波双级饱和磁控电抗器研究[J]. 电工技术学报 2006: 19-23.
 [4] 刘国强, 赵凌志, 蒋继娅 Ansoft 工程电磁场子有限元分析[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005.
 [5] Guru B S. 电磁场与电磁波[M]. Hizirolgu. H R 周克定, 张肃文, 等译. 北京: 机械工业出版社, 2000.

收稿日期: 2008-12-10; 修回日期: 2009-01-07
 作者简介:

宋江保 (1979-), 男, 硕士研究生, 研究方向为滤波器, 磁控电抗器; E-mail: 136258976@163.com
 王贺萍 (1973-), 女, 工程师, 主要从事无功补偿等电能质量技术的设计研究工作;
 张战永 (1966-), 男, 高级工程师, 主要从事中压变电电力系统技术以及电能质量技术的研究和管理工作。