

磁饱和式可控电抗器的工作特性及其仿真研究

陈 湘¹, 童 泽², 欧阳广³

(1. 湖南铁路科技职业技术学院, 湖南 株洲 4120032; 2. 湖南机电职业技术学院, 湖南 长沙 410151;
3. 湖南化工职业技术学院, 湖南 株洲 4120032)

摘要: 介绍了一种具有完全对称磁路结构的磁饱和式可控电抗器, 分析了该种可控电抗器的基本电路结构、工作原理和工作状态, 并理论分析了该种可控电抗器的工作特性, 主要是控制特性和谐波特性, 得出了该种可控电抗器输出电流及其波形畸变率与控制量, 即控制绕组所联结晶闸管触发角的非线性函数关系。通过对一小容量工业样机进行详细的仿真研究, 得出了更为具体的反映该种磁饱和式可控电抗器输出电流随饱和度变化的响应特性和谐波特性。仿真结果与理论分析相一致, 验证了仿真模型的正确性与精确性, 并由此表明了该种磁饱和式可控电抗器具有控制性能良好、输出电流谐波分量很低的工作特性。研究结果对于该类磁饱和式可控电抗器的工程设计与运行分析具有一定的理论指导与实践参考意义。

关键词: 磁饱和; 可控电抗器; 工作特性; 仿真

中图分类号: TM933.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)02-0053-04

Operational Characteristics and Simulation of the Magnetic-saturated Controllable Reactor

CHEN Xiang¹, TONG Ze², OUYANG Guang³

(1. Hunan Railway College of Science and Technology, Zhuzhou 412003, China;
2. Hunan Mechanical & Electrical Polytechnic, Changsha 410151, China;
3. Hunan Chemistry Technology Vocational College, Zhuzhou 412004, China)

Abstract: This paper introduces a magnetic-saturated controllable reactor with symmetrical magnetic structure, analyzes its basic circuit structure, operational mechanism and state, and theoretically analyzes its operational characteristics of control and harmonic. Furthermore, the nonlinear function relationship between the output currents and the firing angle of the GTO connected with the controllable winding of the controllable reactor is obtained. By simulation of a small-capacity industrial model machine, the response and harmonic characteristics of output current versus saturation are achieved. The simulation results are consistent with the theoretical ones, which verifies the correctness and accuracy of the simulation model, and demonstrates that this kind of controllable reactor has better controllability and lower harmonic component of output current.

Key words: magnetic saturation; controllable reactor; operational characteristics; simulation

0 引言

随着现代电力系统的不断发展, 对电抗器的性能要求越来越高, 在许多输配电场合希望电抗器的电抗值可快速调节或控制。如用于配电网中自动消弧线圈的电抗器^[1,2]、用于大型电机无级软启动的启动电抗器^[3]、用于故障限流的可控串联电抗器^[4]、用于超特高压输电线路限制容升和无功补偿的并联高压电抗器^[5], 都需要根据运行工况实时调节控制。在这些情况下, 可控电抗器作为一种特殊的电抗器, 可根据运行工况实时调节自身容量, 用以稳定系统电压和控制无功功率, 提高系统稳定性并改善电能质量。

笔者将研究一种具有代表性的磁饱和式可控电抗器(MCR), 介绍该种磁饱和式可控电抗器的基本电路结构、工作原理以及可能出现的各种工作状态, 并理论分析其在运行过程中所表征出的工作特性, 重点是控制特性与谐波特性。最后, 通过对一小容量工业样机进行详细的仿真研究, 验证理论分析的正确性, 并进一步揭示其特有的工作特性。

1 MCR 电路结构与工作原理

1.1 电路结构

图 1 给出了一种具有完全对称磁路结构的磁饱和式可控电抗器 MCR。该电抗器采用对称结构, 其目的是保证在任何情况下磁路都完全对称, 可以消

收稿日期: 2008-08-09; 修回日期: 2008-12-11

作者简介: 陈 湘(1967-), 女, 副教授, 主要从事电机传动及控制方面的的教学与科研工作。

除由磁路不对称所造成的损耗增加、噪音增加等不良影响。4 个铁心柱中两边的两个起导磁作用,中间的 2 个铁心柱相当于单相电抗器的分裂铁心柱,外部套有 4 个绕组,每个铁芯柱的上绕组的下部和下绕组的上部均设有抽头,抽头匝比为 δ ,每柱上下两个抽头间接有极性相反的晶闸管,且中间交叉连接点的两端接有一个续流二极管。设抽头间绕组为控制绕组,其他绕组为工作绕组,其中续流二极管及晶闸管触发控制电路构成了可控电抗器的控制部分,通过控制晶闸管的导通角可以控制电抗器本身的直流磁通,从而可以控制电抗器的容量。

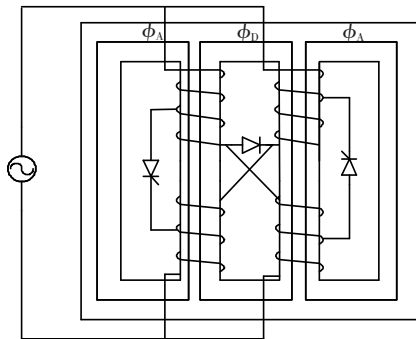


图1 MCR的结构原理图

1.2 工作原理

磁饱和式可控电抗器 MCR 的工作原理可由图 2 所示的在直流偏磁下铁心磁饱和的原理加以阐释。铁心电抗器的电抗可由下式确定

$$X_L = \omega N^2 A_c \mu \mu_0 / L_l \tag{1}$$

式(1)中, ω 表示角频率, N 表示绕组匝数, A_c 表示铁心柱截面积, μ 表示铁心磁导率, μ_0 表示空气磁导率, L_l 表示磁路长度。

磁饱和式可控电抗器的工作原理就是利用铁磁材料磁化曲线的非线性关系,通过改变铁磁材料的饱和度,达到平滑调节电抗器电抗值的目的。饱和度的改变是通过在交变的磁通上增加一个恒定直流分量来实现的。由图(2)可知

$$\phi(\omega t) = \phi_{dc} + \phi_s(\omega t) \tag{2}$$

式(2)中, ϕ_{dc} 和 $\phi_s(\omega t)$ 分别表示直流磁通量和未加入直流偏置时处于线性区的交变磁通量。

若直流磁通处于图 2 所示磁化曲线的负半轴,

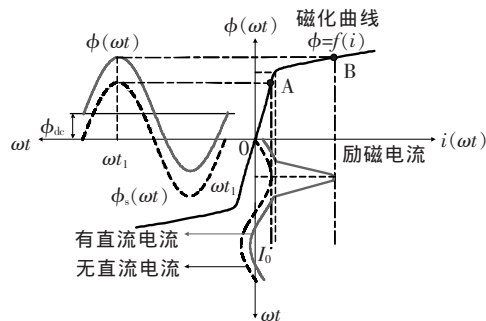


图2 直流偏磁下铁心磁饱和的原理图

则实际的交变磁通可表示为

$$\phi(\omega t) = -\phi_{dc} + \phi_s(\omega t) \tag{3}$$

当控制绕组中直流电流为零时, $\phi_{dc} = 0$, 交流磁通以 $\phi_s(\omega t)$ 作为交变量交替变化。增加控制绕组中直流电流使得 $\phi(\omega t)$ 中的直流分量增加, 则 $\phi(\omega t)$ 将有一部分进入磁化曲线的非线性区, 由此引起铁心磁饱和。直流偏磁量的大小直接影响到磁饱和度的大小。

1.3 工作状态

图 3 给出了磁饱和式可控电抗器 MCR 的控制电路原理图。若晶闸管 VT_1, VT_2 和续流二极管 VD 均为理想开关元件, 则 MCR 在工作过程中表征出 3 种工作状态: VT_2, VD 关断, VT_1 导通; VT_1, VT_2 关断, VD 导通; VT_1, VD 关断, VT_2 导通。MCR 按照这 3 种状态的次序轮流切换工作, 绕组中将产生如图 3 所示方向不变的环流 i_D 。该环流产生的直流磁通使图 1 所示中间两铁心在一个周期内增磁—去磁交替变化, 从而引起电抗器电感和容量的变化。环流 i_D 的大小受控于晶闸管触发角 α 的大小, 通过调节 α 的大小就可以达到连续调节电抗器电容量的目的。

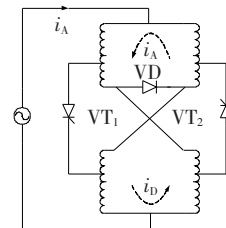


图3 MCR的控制电路原理图

2 MCR 工作特性

2.1 控制特性

磁饱和式可控电抗器 MCR 的控制特性表征了在额定正弦电压下, MCR 基波电流幅值与晶闸管触发角的变化关系。值得说明的是, MCR 在额定电压下输出基波电流的大小反映了 MCR 的最大感性补偿容量的大小。

磁饱和式可控电抗器 MCR 的基波电流标幺值^[6,7]可由图 1 所示 MCR 中间两铁心的交变饱和度和 β 表示

$$I_1 = \frac{1}{2\pi} (\beta - \sin\beta) \tag{4}$$

晶闸管或者可控硅触发角 α 与饱和度 β 的关系可由下式表示

$$\cos\alpha = \frac{2}{\pi} \left(\sin\frac{\beta}{2} - \frac{\beta}{2} \cos\frac{\beta}{2} \right) - 1 \tag{5}$$

由式(4)和式(5)即可求出由 MCR 的控制量即晶闸管或可控硅的触发角所表征出的 MCR 的控制特性。

2.2 谐波特性

在磁饱和电抗器 MCR 从额定到最小的整个感性补偿容量调节范围内, 寻找各次谐波电流最大值(各次谐波电流最大值出现所对应的磁饱和度 β 是不一样的), 然后将它们分别与额定(最大)基波电流进行比较, 可清楚地分析出 MCR 所产生的谐波特性。

理论分析表明, 磁饱和式可控电抗器输出电流中 n 次谐波电流的标幺值 I_n 与磁饱和度 β 的关系可用下式表示

$$I_n = \frac{1}{(2n+1)\pi} \left[\frac{\sin n\beta}{2n} - \frac{\sin (n+1)\beta}{2(n+1)} \right] \quad (6)$$

由式(6)可计算出 3、5、7 次谐波电流幅值占额定基波电流幅值的百分比分别为 6.892%、2.523%、1.293%。由此表明, 在整个感性补偿容量的调节范围内, MCR 注入至电网的 3、5、7 次谐波电流最大幅值分别不超过额定基波电流的 6.892%、2.523%、1.293%。由于各次谐波的最大值是相互错开的, 故实际的电流波形畸变系数很小。

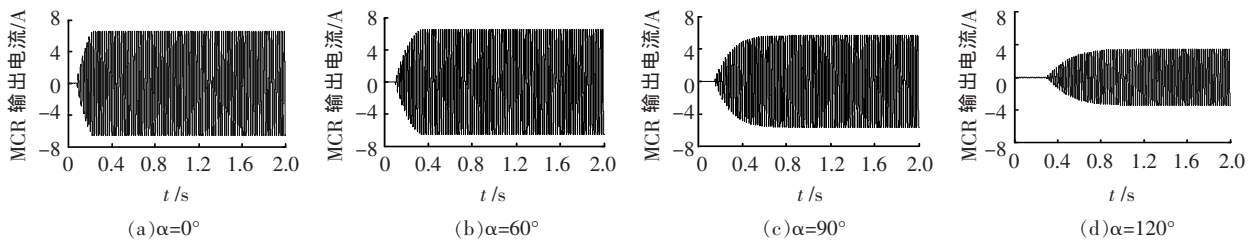


图4 不同触发角 α 时 MCR 输出电流波形

180°范围内按 10°的步长阶跃变化, 通过连续仿真, 可得到图 5 所示的 MCR 控制特性曲线。由图 5 可知, MCR 输出电流标幺值随着晶闸管触发角的不断增大, 呈近似余弦分布, 这与文[7, 8]所给出的 MCR 的控制特性曲线是完全吻合的, 进一步证明了所建 MCR 仿真模型在揭示 MCR 工作特性上的有效性与正确性。

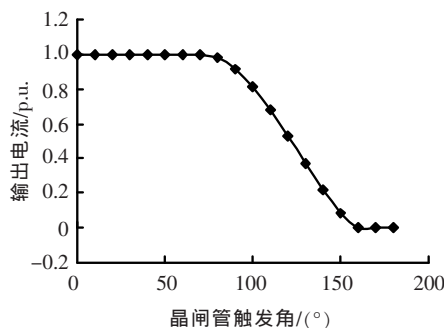


图5 MCR 控制特性曲线

3.2 谐波特性仿真

图 6 给出了 MCR 控制绕组所联结的晶闸管触发角分别为 0°、60°、90°、145°时, 对 MCR 稳态输出电流波形进行傅里叶 FFT 分解的结果。由图可知, 随着触发角的不断增大, 主铁心饱和程度越来越大,

3 仿真实例

磁饱和式可控电抗器 MCR 的工业样机参数如下: 单相容量 $S=1\ 000\ \text{V}\cdot\text{A}$, 工作电压 $U_m=380\ \text{V}$, 抽头比 $\delta=0.005\ 156$, 主铁心上绕有总匝数为 $N_A=520$ 匝的上下两个绕组, 绕组电阻 $R_A=5.15\ \Omega$ 。采用动态仿真工具 MATLAB/SIMULINK 中的电力系统工具箱 (PSB) 对该 MCR 工业样机的工作特性进行仿真研究。

3.1 控制特性仿真

图 4 给出了 MCR 控制绕组所联结的晶闸管触发角分别为 0°、60°、90°、120°时, MCR 的输出电流波形。由图可知, 随着触发角的不断增大, 这意味着控制绕组上的直流电流分量越来越多, 主铁心饱和程度越来越大, 因此, MCR 输出电流的幅值越来越小。并且, 由于主铁心饱和程度增加, MCR 输出电流达到稳态的过渡过程越来越长, 这意味着 MCR 对被控对象的响应时间越来越长。

将 MCR 控制绕组所接晶闸管触发角在 0°~

180°范围内按 10°的步长阶跃变化, 与此同时, 输出电流中谐波含量越来越多, 输出电流波形的畸变率 THD 越来越大, $\alpha=90^\circ$ 时, THD=5.63%, 而 $\alpha=145^\circ$ 时, THD 达到 49.50%。值得说明的是, 由仿真结果看, 虽然 MCR 的 THD 随触发角的增大而加重, 但是, 由于输出电流的基波电流是越来越小的, 因此, 虽然 THD 畸变加重, 但是谐波电流的有效值是越来越小的, 这意味着 MCR 输出至电网的谐波电流越来越小, 不会对电网造成难以接受的谐波污染。

将 MCR 控制绕组所接晶闸管触发角在 0°~180°范围内按 10°的步长阶跃变化, 通过连续仿真, 可得不同磁饱和度状态下 MCR 的输出电流波形, 对这些波形进行傅里叶 FFT, 可得到图 7 所示 MCR 输出电流中的 3、5、7、11 次谐波电流随晶闸管触发角的变化特性曲线。由图 7 可知, MCR 输出电流中主要次谐波电流在触发角为 80°~150°时急剧变化, 但是各次谐波电流达到最大值时对应的触发角是不同的, 这与理论分析所得的 MCR 实际输出电流波形的谐波系数较小的结论完全吻合, 进一步证明了通过仿真模型所揭示的 MCR 谐波特性的正确性和有效性。

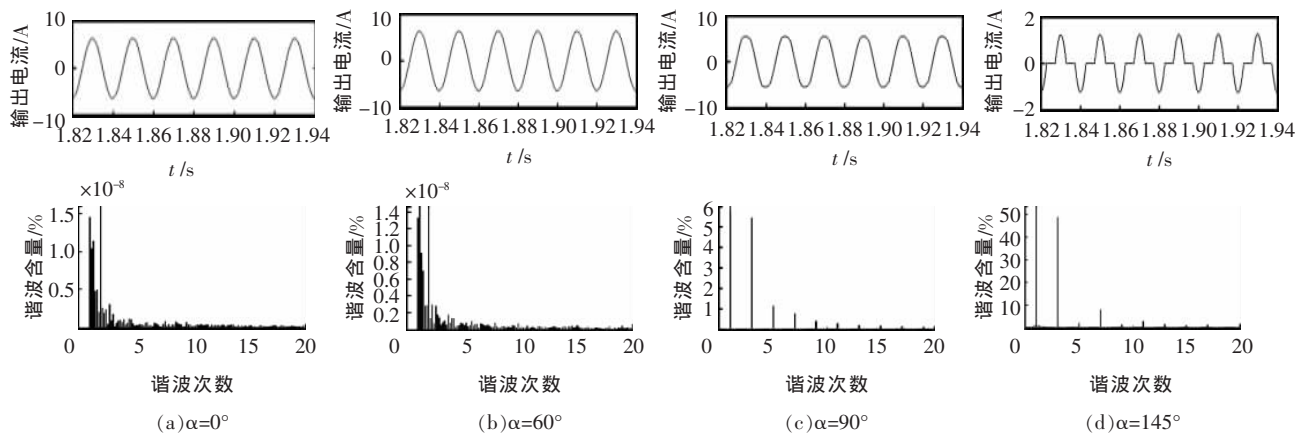


图6 不同触发角 α 时 MCR 输出电流的频谱

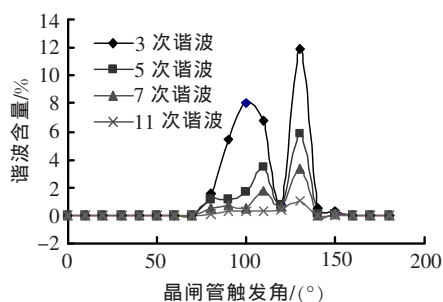


图7 MCR 谐波特性曲线

4 结语

笔者主要研究了一种具有完全对称磁路结构的磁饱和式可控电抗器的工作特性，基于该种可控电抗器的基本电路结构、工作原理和工作状态，从理论上分析了该种可控电抗器输出电流及其波形畸变率与控制绕组所联结晶闸管触发角的非线性函数关系。通过对小容量工业样机的仿真实验研究，得出了反映 MCR 输出电流随饱和度变化的控制响应特性和谐波特性。仿真结果与理论分析相一致，验证

了仿真模型的正确性与精确性，并由此表明了该种磁饱和式可控电抗器所具有的控制性能良好、输出电流谐波分量低的工作特性。研究结果对于该类磁饱和式可控电抗器的工程设计与运行性能分析具有一定的理论指导与实践参考意义。

参考文献：

- [1] 刘金旭. 变压器式可控电抗器型消弧线圈的谐波分析与抑制[J]. 高压电器, 2005, 41(4): 276-278.
- [2] 张方军, 周艳群. 配电系统自动跟踪补偿装置的研究[J]. 工矿自动化, 2006(12): 16-18.
- [3] 卿向东, 吴顺伟. 高压电机起动的饱和电抗器设计[J]. 山东科技大学学报, 2006, 25(1): 43-46.
- [4] 刘洪顺, 王伟, 邹亮, 等. 磁饱和型故障限流器的研究与发展[J]. 山东大学学报(工学版), 2008, 38(1): 18-23.
- [5] 周腊吾, 朱英浩, 周之光. 特高压可控并联电抗器的调节范围[J]. 电工技术学报, 2006, 21(12): 116-121.
- [6] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉: 武汉大学出版社, 1999.
- [7] 王长善, 张卫星, 范文涛. 磁阀式可控电抗器的控制回路及其控制特性[J]. 电力科学与工程, 2005(1): 46-49.

(上接第 52 页)

- [6] LYLES J F, STONE G C, KURTZ M. Experience with PDA Diagnostic Testing on Hydraulic Generators [J]. IEEE Trans. 1998, EC-3(4): 824-832.
- [7] SEDDING H G, CAMPBELL S R, STONE G C. A New Sensor for Detecting Partial Discharge in Operating Turbine Generators [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1991, 6(4): 700-706.
- [8] MCDERMID W, BROMLEY J C. Experience with Directional Couplers for Partial Discharge Measurements on Rotating Machines in Operation [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(2): 175-184.
- [9] 王凯. 水轮发电机局部放电超高频在线监测系统的研制[D]. 西安: 西安交通大学, 2003.
- [10] 喇元, 徐阳, 邱昌容, 等. 发电机局部放电在线监测中脉冲型干扰抑制的方法及其应用[J]. 高压电器, 2005, 41(1), 16,17.
- [11] STONE G C. Why Calibration of Partial Discharge Measurements for Motor and Generator Windings with PC Can't be Done [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 1998, 14(1): 9-12.
- [12] STONE G C, WARREN V, FENGER M. Diagnostic Information Obtained from Examining a Large Stator Winding PD Result Database [C]// Proceedings 2001, ISEIM, Himeji Japan, 2001: 635-640.

欢迎投稿! 欢迎订阅! 欢迎评刊! 欢迎刊登广告!