

新型磁控电抗器特性谐波研究

章宝歌^{1,2}, 田铭兴¹

(1. 兰州交通大学自动化与电气工程学院, 兰州 730070; 2. 兰州交通大学光电技术与智能控制教育部重点实验室, 兰州 730070)

摘要: 为了提高谐波抑制效果, 提出了一种具有圆台型磁阀结构的磁控电抗器。根据电路等效的思想对提出的新型磁阀结构磁控电抗器进行了理论分析, 推导了相应的磁化曲线, 通过傅里叶变换建立了其输出谐波的数学模型, 理论计算结果表明新型磁阀结构磁控电抗器的谐波特性优于传统磁控电抗器, 并建立 Matlab 模型进行实例仿真, 进一步讨论了该新型磁控电抗器的结构参数 θ 对其输出电流、各次谐波含量和响应时间的影响。

关键词: 磁阀电抗器; 谐波; 倾斜角度; 仿真

Harmonic Analysis of Novel Saturable Magnetic-valve Controllable Reactor

ZHANG Baoge^{1,2}, TIAN Mingxing¹

(1. School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiao Tong University, Lanzhou 730070, China; 2. Key Laboratory of Opto-Technology and Intelligent Control Ministry of Education, Lanzhou Jiao Tong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to improve the effect of harmonic suppression, a magnetically controlled reactor with a round platform magnetic valve structure is presented. The magnetically controlled reactor with novel magnetic valve structure is analyzed theoretically using the principle of equivalent circuit, the magnetization curve and mathematical model of output harmonic are deduced by Fourier transform. The Matlab simulation model is established, and the results show that its harmonic character is better than conventional magnetic control reactor. The influences of structure parameters θ on the output current and the harmonics and the response time of the magnetically controlled reactor are further discussed.

Keywords: magnetically controlled reactor; harmonic; inclined angle ; simulation

实现电网的无功平衡是电力系统的重要任务之一, 在高压线路中安装可控电抗器进行动态补偿是协调过电压和无功平衡问题的方法^[1-2]。在众多的可控电抗器中, 磁饱和式可控电抗器 MSCR (magnetically saturation controlled reactor) 成本低、性能高、平滑调节系统的无功功率, 还适合于超高压可控补偿^[3], 具有广泛的应用前景。近年来, MSCR 在

谐波特性、伏安特性、控制特性以及动态性能等方面的研究得到了长足发展, 出现了许多如双级^[4]、多级^[5]和分级^[6]等磁阀结构的新型 MSCR, 在谐波抑制滤波效果方面使得电抗器的特性得以大大改善。这些新型磁阀结构的 MSCR, 虽然获得了较好的谐波抑制效果, 但磁阀间不规则的面积使得在实际应用中增加了制作工艺的难度。

本文提出了一种梯状圆台型磁阀结构的新型 MSCR, 通过对新型 MSCR 的分析, 可取得与多级磁阀结构 MSCR 相同的谐波抑制滤波效果, 克服了多级磁阀结构 MSCR 在实际应用中制作工艺难的不足。

收稿日期: 2016-06-15; 修回日期: 2017-08-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(61741508); 甘肃省高等学校科研基金资助项目(213052)

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(61741508); Science and Research Foundation of Gansu Province(213052)

1 新型电抗器结构及数学模型

新型 MSCR 的结构原理如图 1 所示。其中, N_A 匝绕组的电阻为 R_A , N 为左(右)铁芯的总匝数, N_A 为左(右)铁芯的总匝数的一半, N_1 为工作绕组的匝数, N_2 为控制绕组的匝数, 绕组匝数的关系为: $N_1 + N_2 = N_A = 0.5 N$, δ 为抽头匝比 ($\delta = 2 N_2 / N$), u_a 为施加的交流工作电压, i 为电抗器的输出电流。

磁路计算时, 一般用基本磁化曲线表示磁感应强度 B 与 磁场强度 H 的关系。用简化的两段折线表示硅钢片磁化曲线, 设饱和磁感应强度为 B_s , 对应的饱和磁场强度为 H_s 。

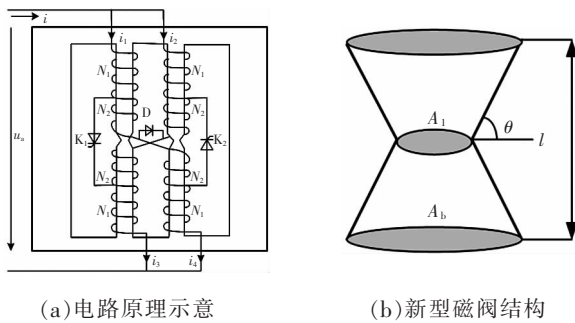


图 1 新型 MSCR 的结构原理

Fig.1 Structure principle of the novel MSCR

设磁饱和时 B_s 为铁芯的磁感应强度, 而 B 为任何时刻铁芯的磁感应强度。在实际中, $B=f(H)$ 曲线可以描述为

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

式中: $\tan \alpha_1 = H_s / B_s$; $\tan \alpha_0 = 1 / \mu_0$, μ_0 为空气磁导率。

图 1 所示的磁阀结构是上下对称结构, 将此磁阀结构进行 j 等分, 则该磁阀结构可以看作是连续变化的多级磁阀结构。磁阀长度为 l , 则每级磁阀长度为 l/j , 最小面积记为 A_1 , 逐次记为 A_2, A_3, \dots , 大铁芯的面积记为 A_b 。设第 m 个截面的铁芯磁感应强度 B_m , 第 m 个截面的空气隙磁感应强度 $B_{m,q}$, 根据磁通连续原理, 由于各级磁阀的截面面积不同, 因此可以得到

$$B_{A_b} A_b = B_m A_m + B_{m,q} (A_b - A_m) \quad (2)$$

式中: B_{A_b} 为磁阀结构等效为面积 A_b 的铁芯结构的等效磁感应强度; A_m 为第 m 个截面铁芯面积。

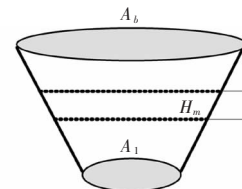


图 2 第 m 个截面段示意

Fig.2 Sketch map of the m^{th} section

第 m 个截面段示意如图 2 所示。由于第 m 个截面段铁芯的磁场强度和第 m 个截面段铁芯周围气隙的磁场强度相等, 设第 m 个截面段的铁芯磁场强度为 H_m , 则有

$$B_{m,q} = \mu_0 H_m \quad (3)$$

$$H_{e1} l = \sum_{m=1}^n H_m \frac{l}{n} = N i_1 \quad (4)$$

式中, n 为截面分段的个数。

联立式(1)~式(4), 可得铁芯 1 的磁阀段磁化特性为

$$H_{e1} = f(B_{e1}) = \begin{cases} B_{e1} \tan \alpha_1 & |B_{e1}| < \frac{A_1}{A_b} B_s \\ (B_{e1} - \sum_{m=1}^{j-1} \frac{l}{n} B_{s,m}) \tan \alpha_0 + \frac{A_1}{A_b} B_s \tan \alpha_1 & B_{s,j-1} < B_{e1} < B_{s,j} \\ (B_{e1} - \sum_{m=1}^j \frac{l}{n} B_{s,m}) \tan \alpha_0 + \frac{A_1}{A_b} B_s \tan \alpha_1 & |B_{e1}| > B_{s,j} \\ (B_{e1} + \sum_{m=1}^{j-1} \frac{l}{n} B_{s,m}) \tan \alpha_0 - \frac{A_1}{A_b} B_s \tan \alpha_1 & -B_{s,j} < B_{e1} < -B_{s,j-1} \\ (B_{e1} + \sum_{m=1}^j \frac{l}{n} B_{s,m}) \tan \alpha_0 - \frac{A_1}{A_b} B_s \tan \alpha_1 & B_{e1} < -B_{s,j} \end{cases} \quad (5)$$

式中, $B_{sm} = \frac{A_1}{A_b} B_s$ 。

对于图 1 的磁阀结构, 以铁芯中心线为 x 轴,

$$H_{e1} = f(B_{e1}) = \begin{cases} B_{e1} \tan \alpha_1 & |B_{e1}| < \frac{A_1}{A_b} B_s \\ (B_{e1} - \int_0^x B_{sm} dx) \tan \alpha_0 + \frac{A_1}{A_b} B_s \tan \alpha_1 & B_{sx} < B_{e1} < B_s \\ (B_{e1} - \int_0^l B_{sm} dx) \tan \alpha_0 + \frac{A_1}{A_b} B_s \tan \alpha_1 & |B_{e1}| > B_{sx} \\ (B_{e1} + \int_0^l B_{sm} dx) \tan \alpha_0 - \frac{A_1}{A_b} B_s \tan \alpha_1 & -B_s < B_{e1} < -B_{sx} \\ (B_{e1} + \int_0^l B_{sm} dx) \tan \alpha_0 - \frac{A_1}{A_b} B_s \tan \alpha_1 & B_{e1} < -B_s \end{cases} \quad (6)$$

式中, $B_{sx} = \frac{A_x}{A_b} B_s$ 。

从图 1(b) 和式(6)可以发现, 此时的基本磁化曲线表示 B_{e1} 与 H_{e1} 的关系, 已经从式(5)所示的折线结构演变为一平滑连续的曲线, 如图 3 所示, 这与实际的基本磁化曲线表示 B 与 H 的关系的一致性较好, 同时实现了各级磁阀连续饱和的优点。

在磁阀截面积 A_x 铁芯磁感应强度达到饱和时, 定义最小截面磁阀的饱和度为 β_1 , 磁阀截面积 A_x 的饱和度为 β_x , 根据反余弦函数则有

$$\begin{cases} \beta_1 = 2\arccos\left(\frac{B_{s1} - B_s}{B_{s1}}\right) \\ \beta_x = 2\arccos\left(\frac{B_{sx} - B_s}{B_{s1}}\right) \end{cases} \quad (7)$$

因此, 可得

$$\beta_x = 2\arccos\left(\frac{A_x}{A_1} - 1 + \cos\frac{\beta_1}{2}\right) \quad (8)$$

由于铁芯 1 和铁芯 2 都是对称结构, 因此铁芯 2 的磁化特性 H_{e2} 和铁芯 1 一样。电抗器输出的总

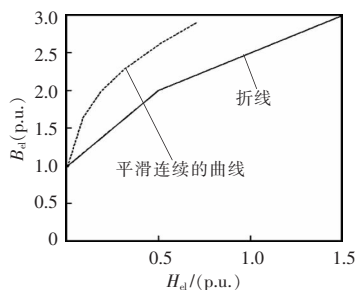


图 3 等效磁化曲线示意

Fig.3 Schematic diagram of equivalent magnetization curve

每级的磁阀高度以 dx 为单位逐渐递增, 由积分思想则有

电流为两个铁芯工作绕组输出电流之和, 即

$$i = \frac{1}{2N} (H_{e1} + H_{e2}) \quad (9)$$

对式(9)进行傅里叶分析, 可得到工作电流中的基波电流和第 k 次谐波电流分量的标么值分别为

$$\begin{cases} I_1^* = \int_0^l \frac{1}{2\pi l} (\beta_x - \sin \beta_x) dx \\ I_{(2k+1)}^* = \int_0^l \frac{1}{(2k+1)\pi l} \left(\frac{\sin(k\beta_x)}{2k} - \frac{\sin((k+1)\beta_x)}{2(k+1)} \right) dx \end{cases} \quad (10)$$

由图 1(b), 利用几何关系可知

$$A_b = \pi \left(\frac{l}{2\tan \theta} + \sqrt{\frac{A_1}{\pi}} \right)^2 \quad (11)$$

$$\sqrt{\frac{A_x}{A_b}} = \frac{x}{l} \quad (12)$$

由式(12)可知, 当铁芯面积 A_b 一旦确定, 磁控电抗器在调节过程中的电流输出谐波由磁阀总长度 l 以及倾斜角度 θ 决定。

2 谐波仿真分析

根据文献[7-8]可得 MSCR 等效仿真电路, 如图 4 所示。MSCR 的工作原理是通过改变晶闸管的触发角来改变受控直流电源的大小, 从而改变铁心磁阀的直流磁通, 这样既可实现改变铁心磁阀的磁饱和度, 还可以连续调节 MSCR 的输出工作电流。

在图 3 中, $R_1 = R_2 = R_A$, $R_3 = \frac{2\delta}{1-\delta} R_A$, 为了保证在晶闸管全触发时变压器的磁饱和度正好等于 2π ,

表明 MSCR 工作在极限饱和的状态,在仿真过程中要保证磁控电抗器在调节过程中最小截面积 A_1 的磁阀能够达到完全饱和,则 A_1 应该是铁芯面积 A_b 的 1/3,同时还需要调节 R_2 和 R_3 ,即实际调整 R_A 来校正直流磁通^[9-10]。文献[8]指出电抗器的额定容量、额定电压、绕组电阻和自耦比 δ 之间具有的某种约束关系,且自耦比 δ 一般取 0.015~0.050,据此进一步可以推导出 R_A 应满足的条件为

$$\frac{2U_{AN}^2 \times 0.015}{\pi S_{AN}(1+0.015)} \leq R_A \leq \frac{2U_{AN}^2 \times 0.05}{\pi S_{AN}(1+0.05)} \quad (14)$$

图 4 中仿真电路的 2 个可饱和变压器模型的磁化特性曲线必须设置相同^[11-12],并根据式(6)进行设置。

在 Matlab/Simulink 中搭建了电抗器的仿真模型,设定额定频率 $f_N=50$ Hz,额定容量 $S_{AN}=60.044$ MV·A,额定电压 $U_{AN}=500/\sqrt{3}$ kV,对电抗器的输出电流和 3、5、7 次谐波进行仿真分析(为了便于叙述,这里仅仅仿真了 3 种情况),仿真结果如图 5 所示。

从图 5 可以看出:①3 种情况下,该电抗器输出电流所含 3 次谐波最大值比传统 MSCR^[6]最大降

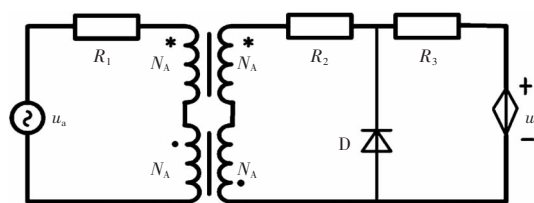


图 4 MSCR 等效仿真电路

Fig.4 Equivalent simulation circuit of MSCR

低约 3%,5 次谐波最大值最大降低约 2%,7 次谐波最大值最大降低约 0.7%,谐波特性大为改善;②随着倾斜角度 θ 的增大,对比可以看出,该电抗器输出电流所含各次谐波最大值逐渐降低,且降低幅度会随着倾斜角度 θ 的增大反而减少;③随着倾斜角度 θ 的增大,该电抗器输出电流逐渐减小,其输出容量要比传统 MSCR 的输出容量要小;④ $\theta=30^\circ$ 时,该电抗器达到额定工作电流值出现在 0.25 s; $\theta=45^\circ$ 时,该电抗器达到额定工作电流值出现在 0.35 s; $\theta=60^\circ$ 时,该电抗器达到额定工作电流值出现在 0.50 s,说明随着倾斜角度 θ 的增大,该电抗器的响应时间被延长。

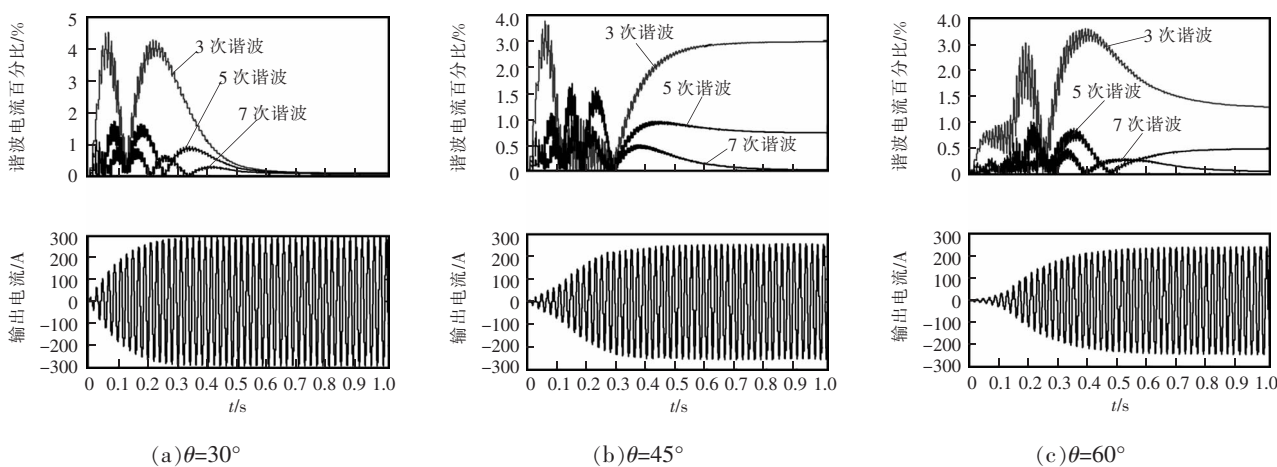


图 5 倾斜角度 θ 下输出电流和谐波分布曲线

Fig.5 The output current harmonic distribution curve with different inclination angles θ

随着倾斜角度 θ 的增大,由式(11)可知,在此过程中磁阀长度会变长,相当于增加了磁阀的级数。

3 结语

本文在多级磁阀结构的基础上,提出了一种梯

型圆台结构的新型磁阀电抗器,推导了磁化曲线,建立了其输出谐波的数学模型。在 Matlab/Simulink 中建立其电路仿真模型,设置合理的仿真参数,进行了仿真研究;同时讨论了圆台倾斜角度 θ 对新型磁阀电抗器输出电流的影响。仿真结果表明,其谐波特性优于传统磁控电抗器,圆台的倾斜角度 θ

对新型磁阀电抗器的输出电流、各次谐波含量和响应时间均有一定的影响。仿真结果与等效的多级磁阀电抗器理论结果相一致,验证了所提出谐波数学模型的正确性与有效性。

参考文献:

- [1] 姚尧, 陈柏超, 田翠华. 磁控电抗器在右江 500 kV 线路中的应用[J]. 高电压技术, 2008, 34(5): 984-988.
Yao Yao, Chen Baichao, Tian Cuihua. Application of magnetically controlled reactor in 500 kV transmission line from sanyou to jiangling[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(5): 984-988(in Chinese).
- [2] 冯强, 赵旭, 李德俊, 等. 矿用静止无功发生器的设计[J]. 电源学报, 2013, 11(4):55-58.
Feng Qiang, Zhao Xu, Li Dejun, et al. Design of the static var generator in mine[J]. Journal of Power Supply, 2013, 11(4):55-58(in Chinese).
- [3] 田翠华, 陈柏超. 磁控电抗器在 750 系统中的应用[J]. 电工技术学报, 2005, 20(1): 31-37.
Tian Cuihua, Chen Baichao. Application of magnetically controlled reactor in 750 kV power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2005, 20(1): 31-37(in Chinese).
- [4] 陈绪轩, 陈柏超, 田翠华, 等. 双级饱和磁控电抗器谐波抑制优化技术[J]. 电力自动化设备, 2011, 31(5): 71-75.
Chen Xuxuan, Chen Baichao, Tian Cuihua, et al. Optimization technique of harmonic suppression for TSMCR[J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(5): 71-75(in Chinese).
- [5] 高冬梅, 袁海文, 张永斌. 基于分级磁阀结构的三相磁控电抗器谐波抑制研究[J]. 高压电器, 2008, 44(5): 389-391.
Gao Dongmei, Yuan Haiwen, Zhang Yongbin. Novel three-phase multi-stage magnetically controlled reactor for harmonic suppression[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5): 389-391(in Chinese).
- [6] 陈绪轩, 田翠华, 陈柏超, 等. 多级饱和磁阀式可控电抗器谐波分析数学模型[J]. 电工技术学报, 2011, 26(3): 57-64.
Chen Xuxuan, Tian Cuihua, Chen Baichao, et al. Mathematical model for harmonics analysis of the multi-stage saturable magnetic-valve controllable reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(3): 57-64(in Chinese).
- [7] 尹忠东. 磁阀式可控电抗器的理论研究及应用[D]. 武汉: 武汉水利电力大学, 1997.
- Yin Zhongdong. Theoretical research and application of magnetic valve controllable reactor[D]. Wuhan: Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1997 (in Chinese)
- [8] 田铭兴, 杨雪淞, 顾生杰等. 基于 MATLAB 的磁饱和式可控电抗器的仿真模型参数及过渡时间分析[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(6):47-51.
Tian Mingxing, Yang Xuesong, Gu Shengjie, et al. Analysis of simulation model parameters and transition time based on MATLAB for magnetically-saturated controllable reactor[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(6): 47-51(in Chinese)
- [9] Tian Mingxing, An Xiao, Gu Shengjie. Voltage-controlling methods and simulation analysis of magnetically saturated and transformer-type controllable reactors[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(4): 791-796.
- [10] 高国花, 陈华泰, 田铭兴. 磁饱和式可控电抗器电压控制系统的设计和仿真[J]. 变压器, 2013, 50(4): 39-42.
Gao Guohua, Chen Huatai, Tian Mingxing. Design and simulation of voltage control system for magnetic saturation type controllable reactor[J]. Transformer, 2013, 50(4): 39-42(in Chinese)
- [11] 罗隆福, 陈波, 许加柱. 磁饱和可控电抗器等效模型在设计中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(5): 70-74.
Luo Longfu, Chen Bo, Xu Jiazhu. Application of equivalent physical model of magnetically saturated controllable reactor in the design[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2011, 23(5): 70-74(in Chinese)
- [12] 蔡珊珊. 可变电抗器建模与仿真[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2009.
Cai Shanshan. Modeling and simulation of variable reactor [D]. Wuhan: Wuhan University Of Technology, 2009 (in Chinese).

作者简介:

章宝歌(1980-),女,通信作者,博士,副教授,研究方向:可控电抗器及其应用, E-mail: bg zhang@mail.lzjtu.cn。

田铭兴(1968-),男,博士,教授,研究方向:可控电抗器及其应用, E-mail: 276497535@qq.com。



章宝歌