

Calculation on the Key Parameters of the Magnetic Valve Controllable Reactor

Meng Wang, Guodong Fan

School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan
Email: 15966612848@139.com

Received: Aug. 20th, 2012; revised: Aug. 29th, 2012; accepted: Sep. 3rd, 2012

Abstract: Magnetic controlled reactor because of its unique advantages for reactive power compensation has been more and more applications, the principle is the smooth adjustment by changing the effective permeability of the small section of the reactor, so the design of the small section has an important effect on the operating performance of the magnetic controlled reactor. Through the operating principle of the reactor and the process state, calculate the magnetic controlled reactor key parameters by an equivalent magnetic circuit, and procedures for the preparation and interface using Matlab Gui, finally verify the design results by the MagNet simulation.

Keywords: Magnetic Value; Calculate; Simulation

关于磁控电抗器磁阀重点参数的计算

王 梦, 范国栋

山东大学电气工程学院, 济南
Email: 15966612848@139.com

收稿日期: 2012年8月20日; 修回日期: 2012年8月29日; 录用日期: 2012年9月3日

摘 要: 磁控电抗器因其独特的优点在电力系统无功补偿等方面得到了越来越多的应用, 其原理是通过改变磁阀小截面处等效磁导率来平滑调节电抗, 因此磁阀的设计对磁控电抗器的运行性能就有着重要的影响。本文从电抗器运行原理及过程状态出发, 通过等效磁路对磁控电抗器磁阀重点参数进行了计算, 并使用 Matlab Gui 实现程序的编写和界面的实现, 最后针对设计结果进行 Ansoft 仿真, 进一步验证了设计的正确性。

关键词: 磁阀; 计算; 仿真

1. 引言

近年来, 磁控电抗器在电力系统中已得到越来越多的重视与应用, 其交流绕组和直流绕组合二为一, 简化了结构, 也减小了损耗, 在运行过程中, 铁芯柱截面一直处于不饱和状态, 磁阀处小截面出现饱和, 从而改变铁芯磁导率, 进而改变了电抗值, 实现了工作电流的平滑调节^[1], 在磁控电抗器的设计中, 磁阀的设计(磁阀面积、高度)是重中之重, 因为磁阀的参数直接影响着磁控电抗器谐波含量等重要技术指标。

2. 基本结构

图 1 为单相四柱式磁控电抗器的结构示意图。

图 1 中, 铁芯柱大截面和磁阀处截面面积分别为 S_d, S_x , 磁阀高度 l , 工作电压 $u = E_m \cos \omega t$, 单边绕组总匝数 N , 磁阀处铁芯面积 A_f , 气隙面积 A_g 。

3. 等效磁路分析

对于磁控电抗器来说, 在容量的整个调节范围内大截面处于不饱和状态, 磁阻很小, 磁压降主要集中在

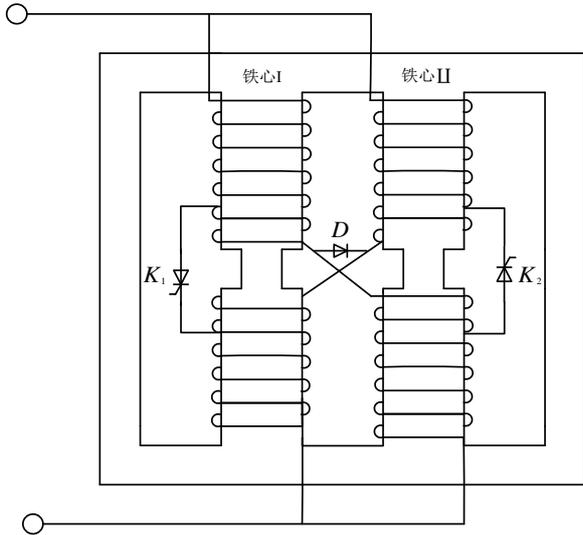


Figure 1. Structure of magnetic valve controllable reactor
图 1. 磁控电抗器结构示意图

在磁阀段，故可以忽略不计，在分析磁阀处等效磁路的时候，将铁芯的磁化曲线等效为斜率不等的两段^[2]，如图 2 所示， B_s 为硅钢片饱和磁感应强度，在这取 $2T$ ， $B_s = \mu_1 H_1$ ，超过饱和点后斜率为空气磁导率 μ_0 。

将其用函数表达式表示出来为：

$$H = H(B) = \begin{cases} \frac{B - B_s}{\mu_0} + \frac{B_s}{\mu_1} & (B > B_s) \\ \frac{B}{\mu_1} & (-B_s < B < B_s) \\ \frac{B + B_s}{\mu_0} - \frac{B_s}{\mu_1} & (B < -B_s) \end{cases} \quad (1)$$

将磁阀处的铁芯和气隙组成的磁路等效为一段面积为 S_d ，高度为 l 由某种材料制成的导磁路径。根据磁通连续性原则：

$$BS_d = B_r A_r + B_a A_a \quad (2)$$

磁阀段铁芯磁特性应满足式(1)：

$$H_t = H(B_t) \quad (3)$$

气隙磁特性满足：

$$H_a = \frac{B_a}{\mu_0} \quad (4)$$

同时气隙和铁芯磁势相等：

$$H_t = H_a \quad (5)$$

联立得(1)(2)(3)(4)(5)得

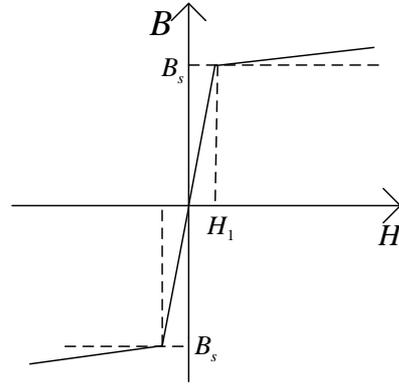


Figure 2. Magnetic characteristic curve
图 2. 磁特性曲线的分段线性模型

$$H = H(B) = \begin{cases} \frac{B - B'}{\mu_0} + \frac{B'}{\mu_1} & (B > B') \\ \frac{B}{\mu_1} & (-B' < B < B') \\ \frac{B + B'}{\mu_0} - \frac{B'}{\mu_1} & (B < -B') \end{cases} \quad (6)$$

其中：

$$B' = \frac{A_r \mu_1 + A_a \mu_0}{S_d \mu_1} B, \quad H'_1 = H_1, \quad \mu'_1 = \frac{A_r \mu_1 + A_a \mu_0}{S_d}$$

可以看出，等效后的磁化曲线仍为两段斜线，磁饱和点变为原来的 $\frac{A_r \mu_1 + A_a \mu_0}{S_d \mu_1}$ 倍，因此改变小截面与大截面面积的比值就可以改变磁饱和点；饱和点的磁场强度和超过饱和点的磁导率均不变^[3]。

因此，磁控电抗器在不同饱和度下的基波和谐波电流值为^[1]：

$$I_1 = -\frac{lB'}{\pi N \mu_0} (\beta - \sin \beta)$$

$$I_{2n+1} = -\frac{lB'}{\pi N \mu_0 (2n+1)} \left(\frac{\sin n\beta}{n} - \frac{\sin(n+1)\beta}{n+1} \right) \quad (7)$$

$$n = 1, 2, 3 \dots$$

其中 β 为饱和度。

可见磁阀的面积和高度对电抗器的工作电流、调节深度、谐波水平等技术指标有着直接的影响。

4. 磁阀参数计算

4.1. 铁芯柱面积^[4]

铁芯直径按照公式：

$$D = k\sqrt[4]{P_N}, (\text{mm}) \quad (8)$$

其中 P_N : 电抗器每柱容量, 单位 KVA, 对于单相电抗器, $P_N = \frac{S_N}{2}$; k : 经验系数, 取 60~70。
所以, 铁芯柱面积:

$$S_d = \pi(D/20)^2, \text{cm}^2 \quad (9)$$

4.2. 绕组匝数

在零励磁条件下, 铁芯柱中磁通 ϕ 只含有交流磁通^[5], 由电抗器的数学模型得:

$$\phi = \frac{E_m}{N\omega} \quad (10)$$

由于 $\phi = B_1 S_d$, B_1 为铁芯柱工作磁感应强度, 所以:
 $\frac{E_m}{N\omega} = B_1 S_d$ 。
整理得:

$$N = \frac{E_m}{B_1 S_d \omega} \quad (11)$$

B_1 的取值决定于硅钢片的型号和电抗器的性能, 需综合考虑决定。

4.3. 磁阀面积

饱和度 β 为:

$$\beta = 2 \arccos\left(\frac{B_s - B_0}{B_m}\right), \text{ 设 } K = \frac{B_0 - B_s}{B_m} \quad (12)$$

B_0 为直流磁通密度, B_m 为工作磁通的基频分量。

磁阀面积开的过大, 会导致磁阀处出现饱和的同时铁芯柱也有一定程度的饱和, 同时谐波电流大, 这样磁阀的存在就没有意义, 所以在电抗器整个容量调节范围内, 铁芯柱要求处于不饱和状态($\beta \leq 0$), 即:

$$K_d = \frac{B_{0d} - B_s}{B_{md}} \leq -1 \quad [6], \text{ 在电抗器的磁阀处需满足}$$

$$0 \leq K_x = \frac{B_{0x} - B_s}{B_{mx}} \leq 1, \text{ 对应的磁阀饱和度 } \beta \text{ 在 } 0 \text{ 到 } 2\pi$$

范围内, 因为只有在这个范围内, 电抗器的电抗值是可调的。

式中 B_{0d} 、 B_{0x} 分别为铁芯柱和磁阀处磁感应强度的直流分量, B_{md} 、 B_{mx} 分别为其交流分量, 同时从经济角度考虑, B_{mx} 在设计时取值应当在低于饱和值的条件下尽可能大些, 一般取 1.8 T~2.0 T。

根据磁通连续原则:

$$B_{0d} S_d = B_{0x} S_x, \quad B_{md} S_d = B_{mx} S_x \quad [5] \quad (13)$$

得:

$$K_x - K_d = \frac{B_s}{B_{mx}} \left(\frac{S_d}{S_x} - 1 \right) \quad (14)$$

电抗器铁芯的额定饱和度 β_n 一般选在 $\pi \sim 2\pi$ 之间, 在这个范围内谐波性能较好, 而且 β_n 越低, 电抗器瞬间过负荷能力就越强。当直流偏磁最大时, 电抗器容量就最大, 电抗器运行在额定状态, K_x, K_d 则同时达到最大值, 所以当 β_n 选定后

$$\frac{S_d}{S_x} = \left(-\cos\left(\frac{\beta_n}{2}\right) + 1 \right) \frac{B_{mx}}{B_s} + 1 \quad (15)$$

在铁芯柱截面积、 B_{mx} 确定前提下, 磁阀面积就可以根据式(15)得出。

4.4. 磁阀高度

当磁阀面积确定后, 等效磁阀处的 B' 就可以确定, 当电抗器运行在额定饱和度下, 工作电流最大, 为额定工作电流 I_N , 而 I_N 在设计时已知, 由式(7)得:

$$I_1 = -\frac{lB'}{\pi N \mu_0} (\beta_n - \sin \beta_n) = I_N \quad (16)$$

整理得:

$$l = \frac{I_N \pi N \mu_0}{(\beta_n - \sin \beta_n) B'} \quad (17)$$

由此便可以求出磁阀高度。

5. 设计软件编写

利用 Matlab Gui 将上述计算过程编写 M 文件用户程序, 生成用户界面(见图 3)。

设计一个 10 KV 电抗器, 主要技术参数如下:

额定电压: 10 KV;

额定容量: 500 KVA;

额定频率: 50 Hz;

额定饱和度: 2π 。

输入相应参数, 得到结果如图 4。

图 4 中, 当额定饱和度选择在 2π 时, 绕组匝数为 1178 匝, 铁芯柱大截面积 424 cm^2 , 磁阀面积在 146 cm^2 , 磁阀高度 54 mm, 此外基波、3、5、7 次谐波的最大值也已随磁阀额定饱和度的不同而自动标出, 谐波水平项是指额定工作点下的谐波水平, 从图 4 中也

关于磁控电抗器磁阀重点参数的计算



Figure 3. User interface design
图 3. 用户设计界面

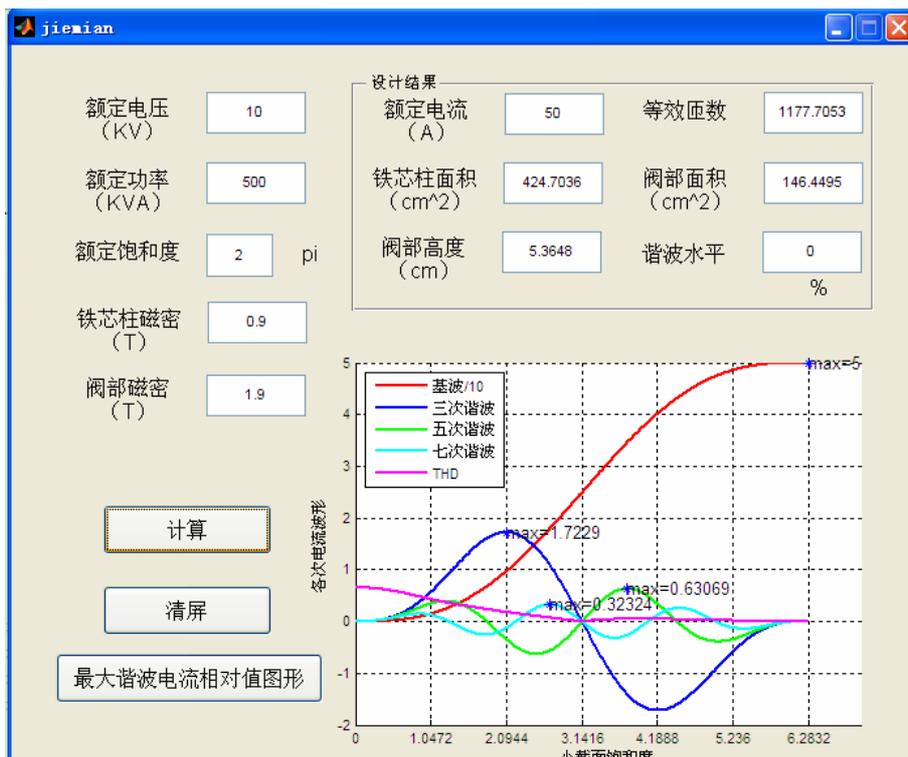


Figure 4. The 10 KV reactor design results
图 4. 10 KV 电抗器设计结果

可以看出，额定饱和度在 $\pi \sim 2\pi$ 内，谐波水平是比较低的。

6. 仿真实证

利用设计界面，设计 220 V，600 VA 实验型单相四柱式电抗器，阀面积 7.92 cm^2 ，阀高度 0.6 cm，铁心面积 23.75 cm^2 ，绕组匝数 520 匝^[7](图 5 和图 6)。

在 MagNet 中搭建模型，为方便仿真，采用交流绕组和直流控制绕组分开控制的方式^[8]，共有 4 个交流绕组和 4 个直流绕组，根据磁控电抗器原理，直流绕组匝数也应为 520 匝，控制绕组采用直流电压源激励^[9]。以下电流波形为单个交流绕组电流，电抗器的工作电流是其 2 倍关系。

由图 7 可以看出当无直流励磁时，铁芯处于不饱和阶段，工作电流很小，电流波形稍有畸变。

图 8 可以看出含量比较大的是 3 次谐波使电流波形成尖顶波形状，这也与理论分析相一致。从图 9 看出，随着直流励磁电压的增大，波形的谐波成分在减小，波形质量变好。

图 10 中可以看出当直流控制电压为 20V 时，稳定后工作电流基本为正弦电流，说明这时候磁阀处在

工频周期内基本都处于饱和状态，谐波含量很小，这与设计结果一致，同时也与理论分析完全一致，同时比较以下情况下的电流波形，也可以侧面得到增大直流励磁可以提高电抗器的响应速度。

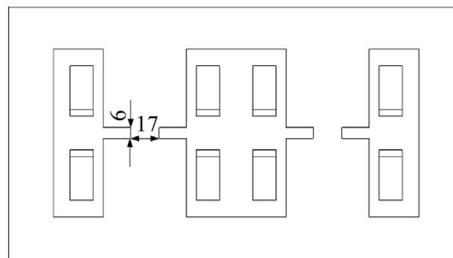


Figure 5. Core structure of HV small MCR
图 5. 铁芯结构图

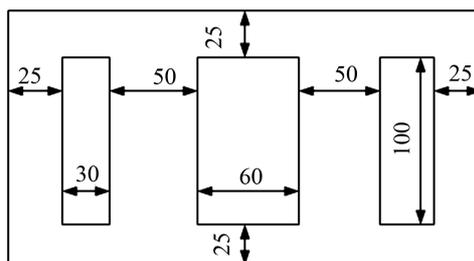


Figure 6. Core dimensions
图 6. 铁芯尺寸

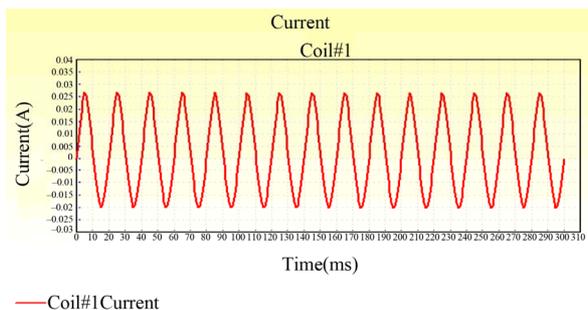
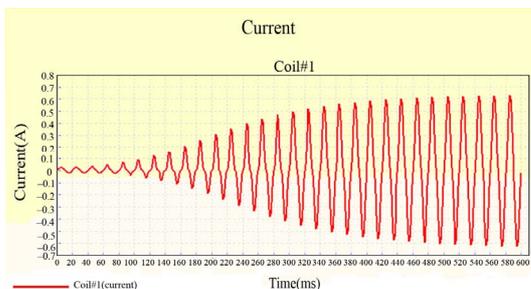
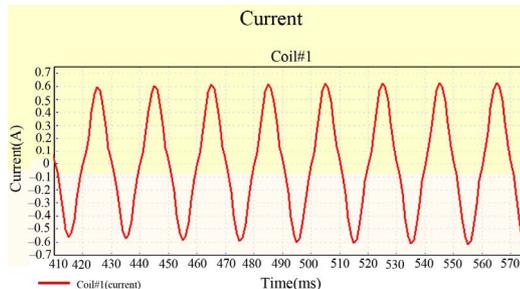


Figure 7. ($U_k = 0$) current waveform
图 7. 无直流励磁时($U_k = 0$)电流波形及谐波分析



(a) 工作电流波形



(b) 稳定后电流放大波形

Figure 8. $U_k = 5 \text{ V}$ current waveform and current amplification waveform
图 8. $U_k = 5 \text{ V}$ 电流波形及谐波分析

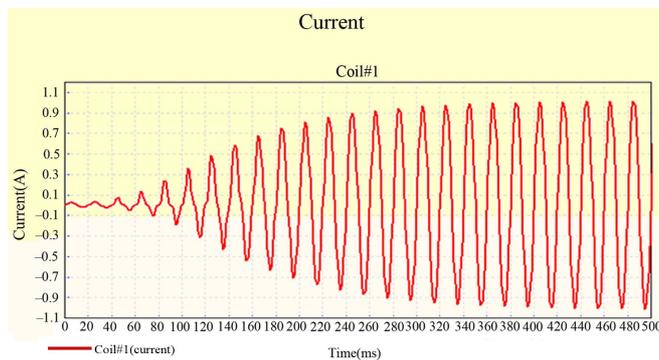
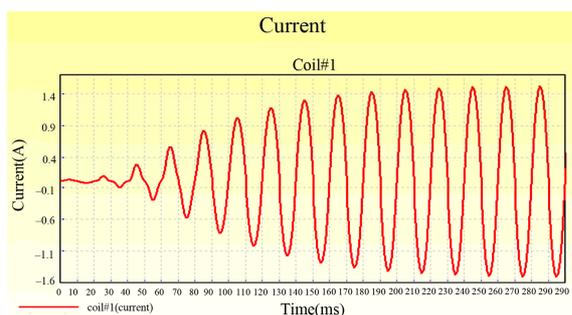
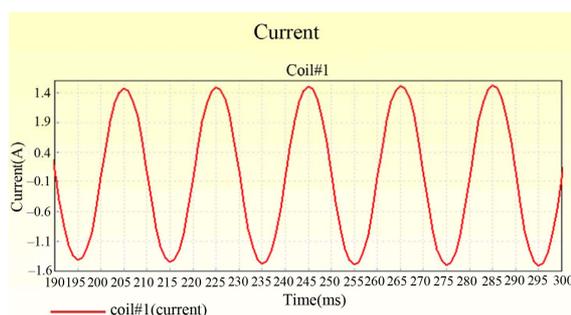


Figure 9. $U_k = 10\text{ V}$ current waveform
图 9. $U_k = 10\text{ V}$ 电流波形



(a) 工作电流波形



(b) 稳定后电流放大波形

Figure 10. $U_k = 20\text{ V}$ current waveform
图 10. $U_k = 20\text{ V}$ 电流波形

7. 结论

本文通过对磁控电抗器等效磁路和工作状态分析, 得出了磁阀关键参数(面积、高度)的理论计算依据, 并以此进行了设计界面的编写, 设计界面的实现可以代替人工计算, 同时对设计的正确性进行了MagNet 仿真, 结果与理论分析一致, 与设计结果一致。

参考文献 (References)

[1] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉: 武汉水利出版社, 1999.

[2] 孔宁. 基于MCR的特高压交流输电系统的无功电压控制[D]. 华北电力大学, 2011.
 [3] 田翠华, 陈柏超. 低谐波双级饱和磁控电抗器研究[J]. 电工技术学报, 2006, 1(21): 19-23.
 [4] 刘言菊, 田铭兴. 单相磁阀式可控电抗器的计算机软件设计[J]. 变压器, 2011, 48(12): 14-16.
 [5] 吴茜. 自励磁磁阀式消弧线圈的设计[D]. 上海交通大学, 2011.
 [6] 吴茜, 蔡旭, 徐波. 具有两级磁阀的消弧线圈关键参数设计[J]. 电工技术学报, 2011, 26(10): 224-230.
 [7] 李海洋, 赵国生. 三相磁阀式可控电抗器的研究[J]. 变压器, 2011, 48(7): 30-33.
 [8] 刘仁. 三相磁阀式可控电抗器的研究[D]. 郑州大学, 2010.
 [9] Y. F. Wang, S. Zhang and G. Z. Chen. A novel continuously adjustable magnetic-valve controllable reactor and its modeling. 2012 IEEE 7th International Power Electronics and Motion Control Conference, 2012: 77-80.