

n 级饱和磁阀式可控电抗器结构特性和仿真方法

田铭兴, 石鹏太, 马亚珍

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 多级磁阀结构的提出在一定程度上有效减小了磁控电抗器输出电流的谐波含量,但也引入了磁阀的级数和磁阀尺寸的优化、电抗器容量变化及结构设计制造复杂等一系列问题。一方面,从磁控电抗器的磁阀结构出发,详细建立了 n 级饱和磁阀式可控电抗器的磁化特性、电流特性的数学模型,在此基础上,对采用准优化、面积渐变、半径渐变和优化 4 种设计方法的 n 级饱和磁阀式可控电抗器,从谐波、容量、结构复杂度等多方面进行综合分析,确立了相对最优的磁阀级数与尺寸设计方案。另一方面,研究了 n 级饱和磁阀式可控电抗器主要参数之间的关系,同时指出其在 MATLAB 中仿真模型的参数设计方法。仿真结果验证了所给出的 n 级饱和磁阀式可控电抗器仿真方法的有效性及其结构特性分析结论的正确性。

关键词: 可控电抗器; 磁阀; 饱和; 结构特性; 仿真; MATLAB; 设计

中图分类号: TM 401⁺.1; TM 474

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.02.016

0 引言

A. M. Bryantsev 基于磁放大器的基本原理,创造性地提出了磁阀式可控电抗器 MCR (Magnetic-valve Controllable Reactor) 的设计原理和方法^[1-2]。其突出贡献在于提出“磁阀”的概念,即在主铁芯柱的中间部分设置小截面段作为“磁阀”,以便在大磁通时只有磁阀段磁路饱和,其余磁路不饱和,这为减小 MCR 输出电流中的谐波提供了重要的理论依据且指明了实践方向。

然而,长期以来所设计的 MCR 的铁芯柱只有一段磁阀,即单级饱和磁阀式可控电抗器 SSMCR (Single-stage Saturable Magnetic-valve Controllable Reactor)。单相 SSMCR 的 3 次及 5 次谐波电流最大值可分别达到额定输出电流的 6.89% 和 2.52%^[3]。这样,对于大容量的单相 SSMCR,其谐波电流最大值就会超过国家电力谐波标准中的限定值^[4]。

为了减小 MCR 注入电网的谐波电流,常用的谐波抑制方法可以分为被动法和主动法。被动法是指采用适当的 MCR 外部连接方式(如三相 MCR 的三相绕组连接为三角形^[5]、2 组单相 MCR 并联^[6])来减小 MCR 输出的谐波电流;也可以采用和 MCR 并联各类滤波器的方法^[7-9]来减小 MCR 注入到电网的谐波电流。主动法是指通过改进 MCR 的结构,使其自身产生较小的谐波电流。显然,被动法具有投资大

和运行维护困难的缺点,应积极采用主动法。

文献[10-14]根据 SSMCR 抑制谐波的原理,提出了双级饱和磁阀式可控电抗器 TSMCR (Two-stage Saturable Magnetic-valve Controllable Reactor),并对其数学模型、谐波电流与各级磁阀的几何尺寸的关系以及各级磁阀的结构尺寸的优化进行了研究。文献[15]采用与 TSMCR 类似的研究方法,对多级饱和磁阀式可控电抗器 MSMCR (Multi-stage Saturable Magnetic-valve Controllable Reactor) 的谐波抑制原理进行了研究。文献[10-15]在采用磁阀结构的优化设计方法来抑制 MCR 谐波的研究方面具有很好的指导意义。

文献[10-15]的研究表明,MCR 输出谐波电流随着磁阀级数的增加而减小,但磁阀级数的增加和磁阀尺寸的优化必然会导致 MCR 结构的复杂和设计、制造成本的增加;特别是,在通过增加磁阀级数并对其尺寸优化来减小谐波电流的同时,对电抗器容量的影响必须予以关注;另外,文献[15]利用文献[16]的 MCR 等值电路,建立了 MSMCR 的仿真模型,但未能很好解决仿真模型中参数设置的问题,这使得仿真过程存在盲目性。所以,本文拟对不同磁阀级数和不同磁阀尺寸的 MCR 的谐波电流和容量进行对比研究,探究结构复杂度、设计困难度、谐波电流大小、额定容量大小等方面综合较优的磁阀结构,并研究 MCR 主要参数之间的关系,同时指出 MCR 的仿真模型的参数设计方法。

1 n 级饱和磁阀式可控电抗器结构原理

单相 MCR 的结构原理图如图 1 所示。其中, u_A 为工作电压; i_A 为工作电流; i_d 为直流环流(控制电流); ϕ_1 为铁芯 1 磁通; ϕ_2 为铁芯 2 磁通; V_D 为二极

收稿日期:2015-05-22;修回日期:2015-11-04

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51167009,51367010);甘肃省科技计划项目(1304WCGA181);兰州市科技计划项目(2013-4-111)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51167009,51367010), the Science and Technology Program of Gansu Province(1304WCGA181) and the Science and Technology Program of Lanzhou(2013-4-111)

管; V_{T1} 、 V_{T2} 为晶闸管。绕组匝数 $N_A = N_1 + N_2$; 自耦比 $\delta = N_2 / N_A$; N_A 匝绕组的电阻为 R_A , 则 N_1 匝绕组的电阻为 $(1-\delta)R_A$, N_2 匝绕组的电阻为 δR_A 。

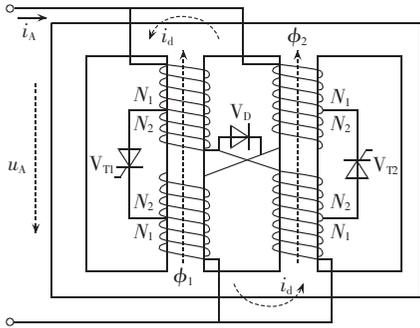


图 1 MCR 结构原理图

Fig.1 Schematic diagram of MCR structure

图 1 所示 MCR 的铁芯 1、2 常采用所谓的磁阀结构。原则上,磁阀的个数、几何尺寸(直径和高度)和在铁芯柱上的位置可任意选择,如图 2 所示。

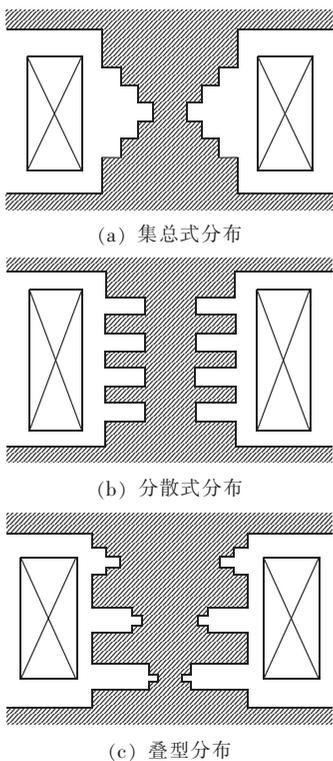


图 2 磁阀位置分布示意图

Fig.2 Layouts of magnetic-valve

当忽略磁场的边缘效应时,可把横截面积相同的磁阀合并为 1 个磁阀(横截面积不变,高度相加),并通过移动磁阀,按照磁阀横截面积从小到大依次排列,如图 3 所示。本文把具有这样铁芯结构的 MCR 称为 n 级饱和磁阀式可控电抗器 n SMCR (n -stage Saturable Magnetic-valve Controllable Reactor)。图 3 为 n SMCR 磁阀铁芯的一般结构。其中, A 为铁芯柱横截面积(最大横截面积); A_1 为第 1 级磁阀横截面

积(最小横截面积); l 为磁阀总高度; n 为磁阀级数(个数)。

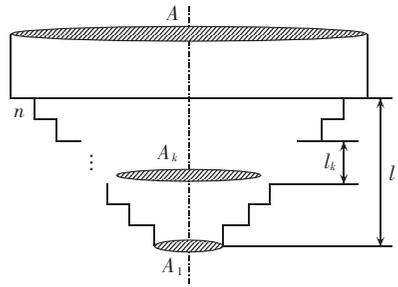


图 3 n SMCR 磁阀铁芯一般结构示意图

Fig.3 General structure of magnetic-valve iron core of n SMCR

2 n SMCR 铁芯的等效磁化特性

铁芯的磁化特性决定了磁控电抗器的工作特性。作为一般情况,可对图 3 所示磁阀结构的铁芯磁化特性进行分析,并得到其等效磁化特性,进而可对 n SMCR 工作特性进行分析。

图 3 所示 n 级磁阀铁芯可以等效为图 4 所示的等效磁阀铁芯。等效变换中,忽略边缘效应,保持铁芯总磁势不变,总磁通不变。

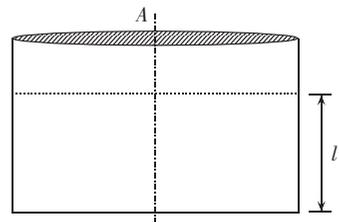


图 4 n 级磁阀铁芯的等效铁芯示意图

Fig.4 Schematic diagram of equivalent iron core of n -stage magnetic-valve

设图 3 铁芯铁磁材料磁化特性为(小斜率理想磁化特性):

$$B = \begin{cases} B_{is} & H=0 \\ \mu_0 H + B_{is} & H>0 \end{cases} \quad (1)$$

其中, B 为磁通密度; H 为磁场强度; B_{is} 为铁磁材料的饱和密度; μ_0 为真空磁导率。

通过推导,图 4 所示等效铁芯的磁化特性为:

$$H_e = \begin{cases} 0 & 0 \leq B_e \leq m_{A1} B_{is} \\ \sum_{k=1}^j \frac{m_{Lk}}{\mu_0} (B_e - m_{Ak} B_{is}) & m_{Aj} B_{is} < B_e \leq m_{A(j+1)} B_{is} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $j=1, 2, \dots, n$; $m_{A(n+1)}=1$; B_e 为等效铁芯的磁通密度; H_e 为等效铁芯的磁场强度; m_{Ak} 为第 k 个磁阀的横截面积 A_k 和铁芯柱横截面积 A 之比; m_{Lk} 为第 k 个磁阀的高度 l_k 和磁阀总高度 l 之比。

$$\begin{cases} m_{Ak} = A_k / A \\ 0 < m_{A1} < m_{A2} < \dots < m_{Ak} < \dots < m_{An} < 1 \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} m_{Lk} = l_k / l \neq 0 \\ \sum_{k=1}^n m_{Lk} = 1 \end{cases} \quad (4)$$

注意:式(1)和(2)给出的磁化特性只是第一象限的,第三象限的磁化特性与第一象限的磁化特性关于原点对称。

忽略高次谐波后,2个铁芯的等效磁密为:

$$\begin{cases} B_{e1} = B_{ed} - m_{A1} B_{Is} \cos \omega t \\ B_{e2} = -B_{ed} - m_{A1} B_{Is} \cos \omega t \end{cases} \quad (5)$$

其中, B_{ed} 为铁芯直流磁密。

为表征直流偏磁对磁阀的影响,引入磁饱和度的概念^[4]。

$$\beta_1 = 2 \arccos \left(1 - \frac{B_{ed}}{m_{A1} B_{Is}} \right) \quad (6)$$

根据式(2)、(5)和(6),用饱和度表示的铁芯 1、2 的等效磁化特性分别为:

$$H_{e1} = \begin{cases} 0 & 0 \leq \omega t < \pi - \frac{\beta_1}{2} \text{ 或 } \pi + \frac{\beta_1}{2} \leq \omega t \leq 2\pi \\ \sum_{k=1}^j \frac{m_{Lk} m_{A1} B_{Is}}{\mu_0} \left(-\cos \omega t - \cos \frac{\beta_k}{2} \right) & \pi - \frac{\beta_j}{2} \leq \omega t \leq \pi - \frac{\beta_{j+1}}{2} \text{ 或} \\ & \pi + \frac{\beta_{j+1}}{2} \leq \omega t \leq \pi + \frac{\beta_j}{2} \end{cases} \quad (7)$$

$$H_{e2} = \begin{cases} 0 & \frac{\beta_1}{2} \leq \omega t < 2\pi - \frac{\beta_1}{2} \\ \sum_{k=1}^j \frac{m_{Lk} m_{A1} B_{Is}}{\mu_0} \left(-\cos \omega t + \cos \frac{\beta_k}{2} \right) & \frac{\beta_{j+1}}{2} \leq \omega t \leq \frac{\beta_j}{2} \text{ 或} \\ & 2\pi - \frac{\beta_j}{2} \leq \omega t \leq 2\pi - \frac{\beta_{j+1}}{2} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $j=1, 2, \dots, n$; $\beta_{n+1}=0$; β_k 为第 k 个磁阀处于饱和的时间,称为第 k 个磁阀的饱和度,见式(9)。

$$\beta_k = \begin{cases} 0 & 0 \leq \beta_1 < \beta_{1,k} \\ 2 \arccos \left(m_{A1k} - 1 + \cos \frac{\beta_1}{2} \right) & \beta_{1,k} \leq \beta_1 \leq \beta_{1\max} \end{cases} \quad (9)$$

其中, $k=1, 2, \dots, n$; $\beta_{1,k}$ 为第 k 个磁阀开始饱和时的第 1 个磁阀的饱和度,见式(10)。

$$\beta_{1,k} = 2 \arccos(2 - m_{A1k}) \quad k=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

其中, m_{A1k} 定义为式(11)。

$$m_{A1k} = \frac{m_{Ak}}{m_{A1}} \quad k=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

对于 n SMCR 而言,为了减小谐波电流和饱和损耗,除磁阀所处部分的磁路可以饱和以外,其他部分的磁路在任何时候都应不饱和,即要求:

$$\begin{cases} |B_{e1}| \leq B_{Is} \\ |B_{e2}| \leq B_{Is} \end{cases} \quad (12)$$

所以,由式(5)可得:

$$B_{ed} \leq B_{Is} - m_{A1} B_{Is} \quad (13)$$

且有:

$$\begin{cases} \beta_{1\max} = 2 \arccos \left(2 - \frac{1}{m_{A1}} \right) \\ 0 < \beta_{1\max} \leq 2\pi \end{cases} \quad (14)$$

其中, $\beta_{1\max}$ 为 n SMCR 额定饱和度。

由式(14)可知,由于 $0 < \beta_{1\max} \leq 2\pi$,则 $1 > m_{A1} \geq 1/3$ 。当 $m_{A1}=1/3$ 时, $\beta_{1\max}=2\pi$,为最大额定饱和度。

3 等值电路和电流特性

由文献[16]可得图 1 所示单相 n SMCR 的等效电路,如图 5 所示。图 5 中, u_1 为工作电源电压; i_1 为工作电流; u_2 为控制电源电压,且 $u_2 = \frac{\delta}{1-\delta} u_1$; i_2 为控制电流;若 $u_1 = U_m \sin \omega t$,则晶闸管触发角 α 的 0 时刻为电压 u_1 的正向过零时刻,取值范围为 $0 \sim \pi$ (满载时 $\alpha=0$,空载时 $\alpha=\pi$)。

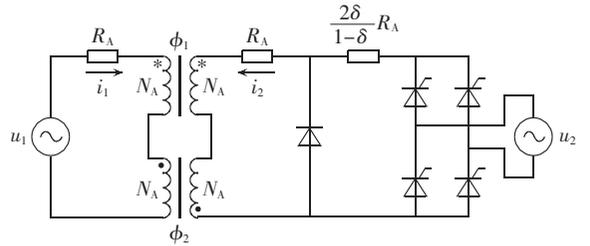


图 5 n SMCR 等效电路

Fig.5 Equivalent circuit of n SMCR

由于 n SMCR 除磁阀所处部分的磁路(总长度为 l)以外的其他部分的磁路在任何时候都不饱和,所以对应图 5 有:

$$i_1 = \frac{l}{2N_A} (H_{e1} + H_{e2}) \quad (15)$$

$$i_2 = \frac{l}{2N_A} (H_{e1} - H_{e2}) \quad (16)$$

定义:

$$i_1^* = \frac{i_1}{\frac{l m_{A1} B_{Is}}{\mu_0 N_A}} \quad (17)$$

$$i_2^* = \frac{i_2}{\frac{l m_{A1} B_{Is}}{\mu_0 N_A}} \quad (18)$$

由式(17)可得 i_1^* 的有效值为:

$$I_1^* = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1^{*2} d\omega t} \quad (19)$$

i_1^* 的各次谐波(包括基波)幅值为:

$$I_{1(2q-1)m}^* = \left| \frac{2}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_1^* \cos[(2q-1)\omega t] d\omega t \right| \quad q=1, 2, \dots \quad (20)$$

定义各次谐波电流含有率为:

$$D_{2q-1} = \frac{I_{1(2q-1)m}^*}{\sqrt{2} I_{1m}^*} \quad q=1, 2, \dots \quad (21)$$

定义电流总谐波畸变率为:

$$D = \frac{\sqrt{\sum_{q=1}^Q I_{1(2q-1)m}^{*2}}}{\sqrt{2} I_{1m}^*} \quad Q=1, 2, \dots \quad (22)$$

其中, I_{1m}^* 为 i_1^* 的有效值的最大值。

由式(18)可得 i_2^* 的平均值为:

$$\bar{I}_2^* = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i_2^* d\omega t \quad (23)$$

4 nSMCR 仿真模型

在用 MATLAB/SimPowerSystems 建立基于图 5 所示等效电路的 nSMCR 仿真模型时,关键是给出符合 MATLAB/SimPowerSystems 要求的 2 个饱和变压器模型磁化特性表达式。

定义磁场密度、磁通、电流、磁场强度的基值为:

$$\begin{cases} B_b = m_{A1} B_{ts} \\ \phi_b = AB_b \\ I_b = \sqrt{2} \frac{S_N}{U_{AN}} = \sqrt{2} I_{1m}^* \frac{lm_{A1} B_{ts}}{\mu_0 N_A} \\ H_b = \frac{N_A I_b}{l} \end{cases} \quad (24)$$

其中, S_N 和 U_{AN} 分别为 nSMCR 额定容量和额定电压。

由式(2)和(24)可得用标么值表示的 n 级磁阀结构的铁芯等效磁化特性为:

$$i_m^* = \begin{cases} 0 & 0 \leq \phi^* \leq 1 \\ \frac{1}{\sqrt{2} I_{1m}^*} \sum_{k=1}^j m_{Lk} (\phi^* - m_{A1k}) & m_{A1j} < \phi^* \leq m_{A1(j+1)} \end{cases} \quad (25)$$

其中, $j=1, 2, \dots, n$; $m_{A1(n+1)} = 1/m_{A1}$; i_m^* 为磁化电流标么值; ϕ^* 为磁通标么值。

式(25)就是符合 MATLAB/SimPowerSystems 要求的 2 个饱和变压器模型的磁化特性表达式。另外,其他主要参数可参见文献[17-18]和下一节的分析。

5 nSMCR 主要参数之间的关系

由图 5 可得:

$$\bar{I}_2 = \frac{\delta \cdot \sqrt{2} U_{AN}}{\pi (1+\delta) R_A} (1 + \cos \alpha) \quad (26)$$

当 $\alpha=0$ 时,由式(26)得 i_2 的平均值的最大值为:

$$\bar{I}_{2m} = \frac{2\delta \cdot \sqrt{2} U_{AN}}{\pi (1+\delta) R_A} \quad (27)$$

由式(23)可算出 i_2 的平均值的最大值为:

$$\bar{I}_{2m} = \bar{I}_{2m}^* \frac{lm_{A1} B_{ts}}{\mu_0 N_A} \quad (28)$$

其中, \bar{I}_{2m}^* 为 \bar{I}_2^* 的最大值。

定义:

$$I_G = \frac{lm_{A1} B_{ts}}{\mu_0 N_A} \quad (29)$$

$$R_{\delta A} = \frac{1+\delta}{\delta} R_A \quad (30)$$

则由式(24)的第 3 个式子和式(27)、(28)可得:

$$\sqrt{2} \frac{S_N}{U_{AN}} = \sqrt{2} I_{1m}^* I_G \quad (31)$$

$$\frac{2\sqrt{2} U_{AN}}{\pi R_{\delta A}} = \bar{I}_{2m}^* I_G \quad (32)$$

式(31)、(32)反映了 U_{AN} 、 S_N 、 I_G 、 $R_{\delta A}$ (δ 和 R_A)、 I_{1m}^* 和 \bar{I}_{2m}^* 这些 nSMCR 的主要参数之间的关系,对设计 nSMCR 及其仿真分析具有重要的指导意义。如果这些参数不能满足上述约束关系,就会导致仿真结果不正确,也会导致所设计的电抗器不能正常工作。

根据式(31)可知,如果保持 I_G 不变,那么额定容量将随 I_{1m}^* 正比例变化。如果容量基值为 $U_{AN} I_G / \sqrt{2}$,那么由式(31)可得额定容量的标么值为:

$$S_N^* = \sqrt{2} I_{1m}^* \quad (33)$$

即不论磁阀结构如何,只要 I_G 保持不变(即磁阀总长度 l 、磁阀面积比 m_{A1} 、铁磁材料饱和磁密 B_{ts} 、绕组匝数 N_A 保持不变),那么额定容量 S_N 就随额定电流 I_N (工作电流有效值的最大值 I_{1m}) 成正比例变化。值得注意的是,由式(19)可知, I_{1m}^* 与磁阀的结构(总级数、各级面积比、长度比)有关,因此,在为减小谐波电流而改变磁阀结构的同时,必定会引起额定容量的变化。

6 算例与分析

设 nSMCR 参数:额定电压 $U_{AN} = 500/\sqrt{3}$ kV; 额定频率 $f_N = 50$ Hz; 绕组电阻 $R_A = 40 \Omega$; 磁阀总级数 n 为 1 时 nSMCR 额定容量 $S_N = 60$ MV·A。

取磁阀总级数 n 分别为 1~7, 各级长度比和面积比如表 1 所示。表 1 中各级磁阀面积比是在其长度比为 $1/n$ 的前提下,以电流总谐波畸变率最小为目标优化计算所得。由于这种优化方法只是对面积比进行了优化,而对长度比没有进行优化,故称之为磁阀的准优化设计方法。

表 1 准优化磁阀长度比和面积比

Table 1 Length ratio and area ratio of magnetic-valve designed by quasi optimization method

| 参数 | 数值 | 参数 | 数值 |
|-----------|--------|-----------|--------|
| m_{Lk} | $1/n$ | m_{A14} | 2.2766 |
| m_{A1} | $1/3$ | m_{A15} | 2.6270 |
| m_{A12} | 1.6396 | m_{A16} | 2.8924 |
| m_{A13} | 1.9874 | m_{A17} | 2.9835 |

随着磁阀总级数从 1 增加到 7 (保持 I_G 不变),由式(19)、(21)~(23)算得 nSMCR 谐波电流含有率、额定容量和控制电流如表 2 所示(表中,符号下标“m”表示对应量的最大值,后同)。

由表 2 可以看出,当磁阀总长度 l 、磁阀面积比

表 2 准优化磁阀时的谐波电流含量、额定容量和控制电流最大值

Table 2 Maximums of harmonic content, rated capacity and control current of magnetic-valve designed by quasi optimization method

| <i>n</i> | $D_{3m}/\%$ | $D_{5m}/\%$ | $D_{7m}/\%$ | $D_m/\%$ | $S_N^*/\%$ | $\bar{I}_{2m}^*/\%$ |
|----------|-------------|-------------|-------------|----------|------------|---------------------|
| 1 | 6.89 | 2.52 | 1.29 | 7.07 | 100.00 | 100.00 |
| 2 | 4.00 | 1.40 | 1.06 | 4.07 | 86.88 | 75.97 |
| 3 | 3.08 | 1.25 | 0.83 | 3.13 | 75.29 | 61.47 |
| 4 | 2.72 | 1.36 | 0.71 | 2.75 | 64.33 | 50.91 |
| 5 | 2.60 | 0.92 | 0.68 | 2.63 | 53.75 | 42.12 |
| 6 | 2.58 | 0.91 | 0.68 | 2.61 | 45.17 | 35.29 |
| 7 | 2.57 | 0.91 | 0.67 | 2.60 | 38.89 | 30.26 |

m_{Al} 、铁磁材料饱和磁密 B_{is} 、绕组匝数 N_A 保持不变时,随着磁阀总级数的增加,谐波电流含量逐渐减小,但同时可以看出,额定容量也随之大幅减小。这说明,通过增加磁阀总级数来减小谐波电流含量的同时,也会造成额定功率的减小。并且进一步可以看出,当磁阀总级数达到 3 级以上时,谐波电流含量减小程度并不明显,而额定容量却减小很多,再考虑到磁阀级数越多,设计制造越困难,所以,*n*SMCR 的磁阀总级数不宜超过 3。

由式(19)、(21)、(22)可以看出,谐波电流含量和工作电流与磁阀总级数有关,也与磁阀的长度比和面积比有关。为了比较不同长度比和面积比对谐波电流含量和额定容量的影响效果,除了上述磁阀的准优化设计方法之外,针对磁阀总级数分别为 1、2、3,再给出另外 3 种磁阀的设计方法,即面积渐变、半径渐变和优化设计方法。

所谓磁阀的面积渐变设计方法,就是各级磁阀面积呈等差数列(等差为 $\frac{A-A_1}{n}$)变化:

$$A_k = A_1 + (k-1) \frac{A-A_1}{n} \quad k=1, 2, \dots, n$$

因此其面积比为:

$$m_{Alk} = 1 + \left(\frac{1}{m_{Al}} - 1 \right) \frac{k-1}{n} \quad k=1, 2, \dots, n$$

所谓磁阀的半径渐变设计方法,就是各级磁阀半径呈等差数列(等差为 $\frac{r-r_1}{n}$)变化:

$$r_k = r_1 + (k-1) \frac{r-r_1}{n} \quad k=1, 2, \dots, n$$

因此其面积比为:

$$m_{Alk} = \left[1 + \left(\sqrt{\frac{1}{m_{Al}}} - 1 \right) \frac{k-1}{n} \right]^2 \quad k=1, 2, \dots, n$$

磁阀的面积渐变设计方法和半径渐变设计方法与准优化设计方法一样,磁阀各级长度比都为 $1/n$ 。

所谓磁阀的优化设计,就是以电流总谐波畸变率最小为目标优化计算各级磁阀长度比和面积比,结果如表 3 所示。

表 3 优化设计的面积比和长度比

Table 3 Area ratio and length ratio of magnetic-valve designed by optimization method

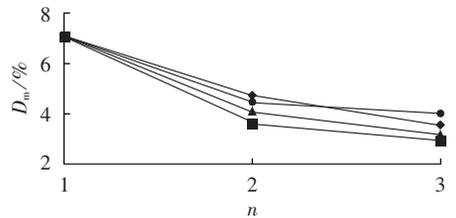
| <i>n</i> | m_{Al1} | m_{Al2} | m_{Al3} | m_{L1} | m_{L2} | m_{L3} |
|----------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|----------|
| 1 | 1/3 | | | 1 | | |
| 2 | 1/3 | 1.9 | | 0.370 | 0.630 | |
| 3 | 1/3 | 1.7 | 2.2 | 0.266 | 0.310 | 0.424 |

表 4 给出了上述 3 种磁阀设计方法下的谐波电流含量、额定容量和控制电流最大值,并由表 2 和表 4 可画出图 6。

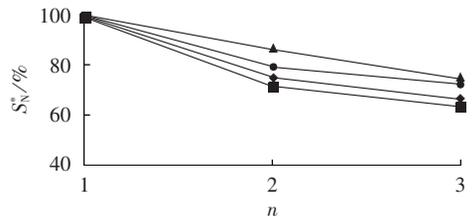
表 4 谐波电流含量、额定容量和控制电流最大值

Table 4 Maximums of harmonic content, rated capacity and control current

| 设计方法 | <i>n</i> | $D_{3m}/\%$ | $D_{5m}/\%$ | $D_{7m}/\%$ | $D_m/\%$ | $S_N^*/\%$ | $\bar{I}_{2m}^*/\%$ |
|------|----------|-------------|-------------|-------------|----------|------------|---------------------|
| 面积渐变 | 1 | 6.89 | 2.52 | 1.29 | 7.07 | 100.00 | 100.00 |
| | 2 | 4.59 | 2.53 | 1.27 | 4.71 | 75.00 | 65.92 |
| | 3 | 3.45 | 1.25 | 1.00 | 3.53 | 66.67 | 55.74 |
| 半径渐变 | 1 | 6.89 | 2.52 | 1.29 | 7.07 | 100.00 | 100.00 |
| | 2 | 4.35 | 1.81 | 1.46 | 4.46 | 79.30 | 69.41 |
| | 3 | 3.96 | 0.99 | 0.69 | 3.99 | 72.79 | 59.87 |
| 优化 | 1 | 6.89 | 2.52 | 1.29 | 7.07 | 100.00 | 100.00 |
| | 2 | 3.52 | 2.37 | 1.62 | 3.61 | 72.54 | 60.30 |
| | 3 | 2.86 | 1.55 | 0.87 | 2.94 | 64.01 | 51.09 |



(a) 电流总谐波畸变率



(b) 额定容量

◆ 面积渐变, ● 半径渐变
▲ 准优化, ■ 优化

图 6 不同设计方法下的 *n*SMCR 谐波含量及额定容量对比

Fig.6 Comparison of *n*SMCR harmonic content and rated capacity among different design methods

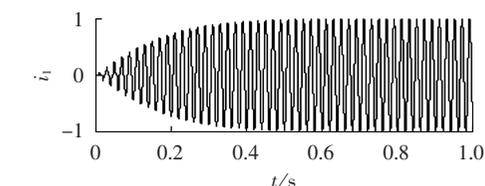
由图 6 可以看出,在磁阀级数相同的条件下,优化设计的电流总谐波畸变率最小,但其额定容量也最小;准优化设计的额定容量最大,且其电流总谐波畸变率略大于优化设计的谐波含量但小于其他 2 种情况;准优化设计对各级磁阀长度的设计过程较优化设计简单。所以,准优化设计的磁阀综合优势明显。

综合上述分析,*n*SMCR 的磁阀级数应为 2 或 3,且宜采用准优化设计。具体而言,当 $n=2$ 时,磁阀

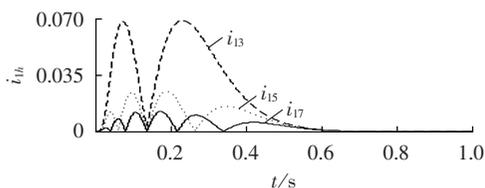
长度比为 $m_{L1}=m_{L2}=1/2$, 面积比为 $m_{A1}=1/3, m_{A12}=1.6396$; 当 $n=3$ 时, 磁阀长度比为 $m_{L1}=m_{L2}=m_{L3}=1/3$, 面积比为 $m_{A1}=1/3, m_{A12}=1.6396, m_{A13}=1.9874$ 。此时, 谐波电流含量、额定容量和控制电流的最大值见表 2。

根据图 5 以及式(25)、(31)和(32)可建立基于 MATLAB/SimPowerSystems 的 n SMCR 的仿真模型, 并对 n SMCR 进行仿真分析。图 7—9 分别给出了磁阀级数为 1、2、3, 且经准优化设计磁阀的 n SMCR 电流波形(电流为标么值)。

从结果可以看出随着磁阀级数的增加谐波逐渐减小, 容量也减小, 这与表 2 中的计算数据相符, 更加说明了仿真方法和理论分析的正确性和有效性。



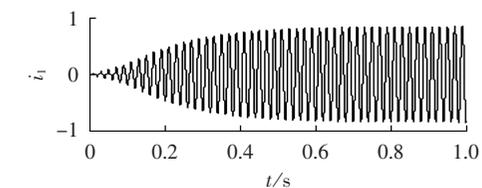
(a) 工作电流 i_1 的波形



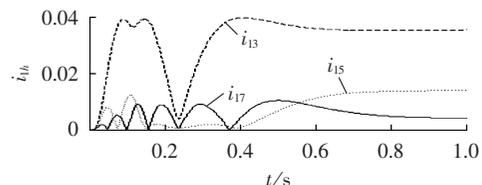
(b) 工作电流 i_1 的 3、5、7 次谐波电流波形

图 7 $n=1$ 时准优化磁阀 n SMCR 电流波形

Fig.7 Current waveforms of n SMCR magnetic-valve when $n=1$, designed by quasi optimization method



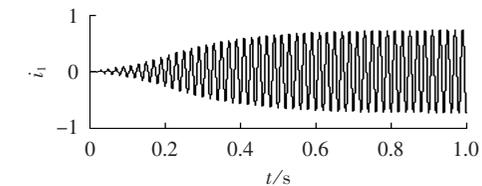
(a) 工作电流 i_1 的波形



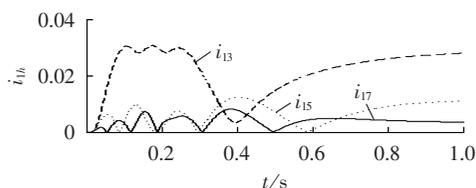
(b) 工作电流 i_1 的 3、5、7 次谐波电流波形

图 8 $n=2$ 时准优化磁阀 n SMCR 电流波形

Fig.8 Current waveforms of n SMCR magnetic-valve when $n=2$, designed by quasi optimization method



(a) 工作电流 i_1 的波形



(b) 工作电流 i_1 的 3、5、7 次谐波电流波形

图 9 $n=3$ 时准优化磁阀 n SMCR 电流波形

Fig.9 Current waveforms of n SMCR magnetic-valve when $n=3$, designed by quasi optimization method

7 结论

a. n SMCR 的谐波含量和额定容量与其磁阀级数有关。磁阀级数越多, 谐波含量越小, 额定容量也越小。但磁阀级数超过 3 时, 谐波含量减小不明显, 而额定容量减小却很明显。

b. n SMCR 的谐波含量和额定容量与其磁阀尺寸(长度比和面积比)有关。对于分别采用面积渐变、半径渐变、准优化和优化方法所设计的磁阀, 优化设计方法的电流总谐波畸变率最小, 容量也最小; 准优化设计的电流总谐波畸变率只略大于优化设计, 但其额定容量最大。

c. 从结构复杂度、设计困难度、谐波电流含量、额定容量大小等方面综合考虑, n SMCR 的磁阀总级数应为 2 或 3, 且宜采用准优化设计。

d. 在建立基于 MATLAB/SimPowerSystems 的 n SMCR 的仿真模型, 并对 n SMCR 进行仿真分析时, 磁化特性必须正确设置, 而且主要参数必须满足一定的约束关系, 否则就会导致仿真结果不正确, 也会导致所设计的电抗器不能正常工作。

参考文献:

- [1] BRYANTSEV A M. Magnetic thyristor reactive power regulator [J]. Soviet Electrical Engineering, 1984, 55(10): 111-115.
- [2] BRIANTSEV A M. Biased ferromagnetic appliances with limited saturation of magnetic system sections [J]. Electrichestvo, 1986(2): 24-27.
- [3] 陈柏超, 陈维贤. 超高压可控电抗器限压特性及谐波分析 [J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(2): 122-125.
CHEN Baichao, CHEN Weixian. Voltage restraining characteristic and harmonic analysis of high-voltage controller reactor [J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(2): 122-125.
- [4] 电力工业部(原能源部). 电能质量公用电网谐波: GB/T14549—1993 [S]. 北京: 国家技术监督局, 1993.
- [5] 余梦泽, 陈柏超, 曹志煌, 等. 110 kV 并联可控电抗器及其应用 [J]. 电力系统自动化, 2008, 32(3): 87-91.
YU Mengze, CHEN Baichao, CAO Zhihuang, et al. A novel 110 kV shunt controllable reactor and its application [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(3): 87-91.
- [6] 陈柏超, 田翠华, 梁柏华, 等. 单相可控电抗器的一种谐波抑制原理及实现 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(3): 64-68.
CHEN Baichao, TIAN Cuihua, LIANG Baihua, et al. Principle

- and implementation of a harmonic depression approach for single phase controlled saturable reactor[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(3):64-68.
- [7] 唐寅生,曲振军. 基于 MCR 的 SVC 及其广阔前景[J]. 电力电容器, 2003(1):1-5.
TANG Yinsheng, QU Zhenjun. MCR-based SVC and its brilliant prospects[J]. Power Capacitors, 2003(1):1-5.
- [8] 卞利刚. 基于电力有源滤波器的单相无谐波可控电抗器的研究[D]. 武汉:武汉大学, 2002.
BIAN Ligang. Study of harmonic free magnetic valve controllable reactor of single-phase based on active power filter[D]. Wuhan: Wuhan University, 2002.
- [9] 张素丽,王建勋,牟宪民,等. 新型低谐波直流可控电抗器[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(1):117-120.
ZHANG Suli, WANG Jianxun, MOU Xianmin, et al. Novel harmonic free DC controllable reactor[J]. Proceedings of the CSU-EPSS, 2008, 20(1):117-120.
- [10] CHEN B, KOKERNAK J. Thyristor controlled two-stage magnetic-valve reactor for dynamic var-compensation in electric railway power supply systems[C]//Applied Power Electronics Conference and Exposition, Proceedings of IEEE. Louisiana, USA: [s.n.], 2000:1066-1072.
- [11] 田翠华,陈柏超. 低谐波双级饱和和磁控电抗器研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(1):19-23.
TIAN Cuihua, CHEN Baichao. Study of low distortion two-stage saturable magnetically controlled reactor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(1):19-23.
- [12] 徐杰,刘在祥,洪乃刚. 低谐波双级饱和和叠形磁控电抗器[J]. 高压技术, 2008, 34(4):816-819.
XU Jie, LIU Zaixiang, HONG Naigang. Analysis of low distortion two-stage saturation combine type magnetically controlled reactor[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(4):816-819.
- [13] 陈绪轩,陈柏超,田翠华,等. 双级饱和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.
- [14] CHEN Xuxuan, CHEN Baichao, TIAN Cuihua, et al. Modeling and harmonic optimization of a two-stage saturable magnetically controlled reactor for an arc suppression coil[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(7):2824-2831.
- [15] 陈绪轩,田翠华,陈柏超,等. 多级饱和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.
- [16] 田铭兴,励庆孚. 磁饱和式可控电抗器的等效电路及仿真分析[J]. 电工技术学报, 2003, 18(6):64-67.
TIAN Mingxing, LI Qingfu. An equivalent circuit and simulation analysis of magnetically-saturated controllable reactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2003, 18(6):64-67.
- [17] 田铭兴,杨雪淞,顾胜杰. 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. 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.
- [18] 田铭兴,杨秀川,杨雪淞. 基于 MATLAB 多绕组变压器模型的磁饱和式可控电抗器仿真建模方法[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3):78-81.
TIAN Mingxing, YANG Xiuchuan, YANG Xuesong. Modeling of magnetically saturation controllable reactor based on multi-winding transformer models of MATLAB[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(3):78-81.

作者简介:



田铭兴

田铭兴(1968—),男,甘肃武威人,教授,博士,研究方向为电力系统电能质量分析及其综合治理、电力电子技术及其应用、电机电器及其控制(E-mail: tianmingxing@mail.lzjtu.cn);

石鹏太(1990—),男,甘肃白银人,硕士研究生,研究方向为电力系统无功补偿和电压控制(E-mail: masterlanjiao@139.com);

马亚珍(1991—),女,甘肃天水人,硕士研究生,研究方向为电力电子与电力传动(E-mail: mayazhen0001@sina.com)。

Structural property and simulation method of n -stage saturable magnetic-valve controllable reactor

TIAN Mingxing, SHI Pengtai, MA Yazhen

(School of Automation & Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Though the multi-stage structure of magnetic valve quite effectively reduces the harmonic contents of MCR (Magnetic-valve Controllable Reactor) output current, it introduces a series of defects, such as stage number and size optimization, rated capacity change, complex structure, etc. The mathematical models are established for the magnetic and current properties of n SMCR (n -stage Saturable MCR) according to the multi-stage structure of magnetic valve, based on which, the harmonic currents, rated capacity and structure complexity of n SMCR are comprehensively analyzed for four design schemes, i.e. quasi optimization, area gradient, radius gradient and optimization, and the relatively optimal design scheme of its stage number and size is determined. The relationship among the main parameters of n SMCR is researched and the parameter design of MATLAB simulation model is given. The simulative results confirm the effectiveness of the proposed simulation method and the correctness of structure property analysis.

Key words: controllable reactor; magnetic-valve; saturation; structural property; computer simulation; MATLAB; design