

新型单相低谐波饱和式可控电抗器

牟宪民¹,王建贻¹,胡 泰²,纪延超¹

(1. 哈尔滨工业大学 电气工程及自动化学院,黑龙江 哈尔滨 150001;

2. 广东电网公司 江门鹤山供电局,广东 鹤山 529700)

摘要:提出了一种新型的单相饱和式可控电抗器拓扑,将可控电抗器的控制绕组和辅助消谐绕组有机地统一起来。新的拓扑结构将控制绕组通过一个半桥控制电路和一个电压型的逆变器连接到和主绕组紧密耦合的辅助消谐绕组。消谐绕组在抑制谐波的同时担负从系统传递能量给控制绕组的功能。针对单相应用条件下,基于新的拓扑结构,利用能量平衡原理,检测系统侧的电流,在控制可控电抗器的等值电抗的同时,通过逆变器的输出电流,使可控电抗器在不同的工作状态下所产生的谐波得到补偿,从而使单相饱和式可控电抗器的谐波水平大为降低。仿真结果验证了新型拓扑结构的有效性和可行性。

关键词:饱和式可控电抗器;等效磁路;谐波抑制;能量平衡

中图分类号: TM 47

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)07-0017-04

0 引言

可控电抗器近年来在动态无功补偿、自动调谐消弧线圈等方面得到了广泛的应用^[1-3]。饱和式可控电抗器以其控制简便、工作可靠等特点应用得越来越广泛。

饱和式可控电抗器是直流控制可控电抗器中的基本形式,通过控制直流电流的大小,使铁芯工作在饱和区,利用磁化曲线的非线性特点,通过调节磁路中铁芯的工作点,可以调节等效电抗。由于磁化曲线的非线性,可控电抗器在饱和区工作时会产生谐波电流。在三相系统中可以利用可控电抗器的三相角形接法减小可控电抗器的系统接入 3 次谐波电流。单相工作时减小可控电抗器所产生的谐波相对困难,通常的 LC 并联滤波装置效果不理想。因此从根本上使可控电抗器减小谐波的产生有利于提高可控电抗器的整体性能^[4-6]。

通过分析传统的可控电抗器的谐波含量,和新提出的新型拓扑结构的可控电抗器的谐波含量对比,证明了新型的可控电抗器具有良好的谐波抑制作用。新提出的可控电抗器在主绕组侧增加了辅助的消谐绕组,这个消谐绕组通过一个电压型逆变器和一个半桥电路连接到可控电抗器的控制绕组。新的拓扑结构中增加的消谐绕组在抑制谐波的同时提供可控电抗器控制绕组的有功功率。对新的拓扑结构基于能量平衡原理提出了新的控制方法。新的拓扑结构和控制方法可以推广到其他种类的直流控制可控电抗器中用来抑制可控电抗器在调节过程中产生的谐波含量。

1 数学模型及其谐波分析

1.1 饱和式可控电抗器调节原理

饱和式可控电抗器工作在同时具有恒定磁场与交变磁场的情况下。其基本原理是利用附加直流励磁电流,改变铁芯的磁导率,实现电抗器电感量的连续调节^[7-8]。

饱和式可控电抗器主要由 2 个交流绕组和 2 个直流绕组构成,按照 2 个交流绕组的连接方式可以分成并联和串联 2 种形式。图 1 给出了传统的并联型饱和式可控电抗器的原理图。现主要研究这种并联型的单相饱和式可控电抗器。

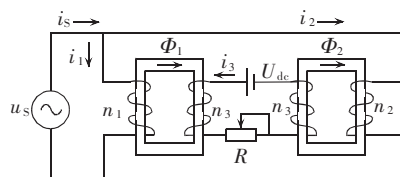


图 1 传统可控电抗器的原理图

Fig.1 Principle diagram of conventional controllable reactor

图中 2 个并联主绕组的匝数分别为 n_1 和 n_2 , 控制绕组的匝数为 n_3 。3 个绕组中的电流分别为 i_1 、 i_2 和 i_3 。 Φ_1 和 Φ_2 分别表示 2 个铁芯中的磁通。 u_s 为系统电源, i_s 为系统电流, U_{dc} 为直流控制电源。

通过改变连接电阻 R 可以调节控制绕组中的电流。由于铁芯材料磁化曲线 ($B-H$) 的非线性, 主绕组的等效电抗在控制绕组中的电流增加时减少。

1.2 等效磁路分析

对于图 1 所给出的传统饱和式可控电抗器, 可以等效成 2 个完全独立的磁路, 见图 2。

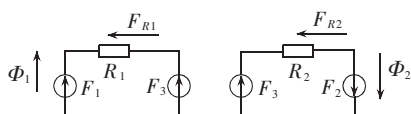


图 2 传统可控电抗器的等效磁路

Fig.2 Magnetic equivalent circuit of conventional controllable reactor

图中 F_1 和 F_2 分别是 2 个主绕组的磁动势, F_3 是控制绕组的磁动势。 F_{R1} 和 F_{R2} 分别是铁芯磁阻 R_1 和 R_2 上的磁动势。按照磁路的基本原理,可以得到:

$$F_1 = F_{R1} + F_3, \quad F_2 = F_{R2} - F_3 \quad (1)$$

为简化分析,假设磁阻的非线性磁动势和磁通的关系为 $F_{R1} = k\Phi_1^3$ 和 $F_{R2} = k\Phi_2^3$, 其中, k 为一个与铁芯材料有关的系数。结合式(1)可得:

$$F_1 + F_2 = k\Phi_1^3 + k\Phi_2^3 \quad (2)$$

假设主电源电压为 $u_s = u_1 = u_2 = U_s \sin \omega t$, 主磁通可表示为

$$\Phi_1 = \Phi_2 = \Phi_m \cos \omega t + \Phi_d$$

式中 $\Phi_m = U_s / \omega n$, U_s 为系统电源电压幅值, n 是主绕组的匝数, 且有 $n_1 = n_2 = n_3$; Φ_d 是由磁动势 F_3 所激励产生的磁通。

结合式(2), 主绕组总的电流产生的磁动势可表示为

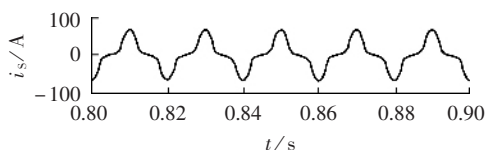
$$F_1 + F_2 = (k/2) [3\Phi_m(\Phi_m^2 + 4\Phi_d^2) \sin \omega t - \Phi_m^3 \sin 3\omega t] \quad (3)$$

由于 $F_1 + F_2 = n(i_1 + i_2)$, 主绕组的总电流 $i = i_1 + i_2$ 能从式(3)中获得。由式(3)的 $\sin 3\omega t$ 项和 $\sin \omega t$ 项的系数可以直接得到主绕组中 3 次谐波含量占基波含量的比例。

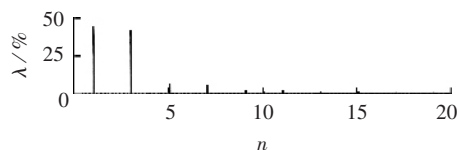
$$\Gamma_3 = 1 / [3 + 12(\Phi_m / \Phi_d)^2] \quad (4)$$

1.3 传统饱和式可控电抗器仿真结果

按照图 1 的拓扑结构, 选用以下的参数使用 Matlab 中的 Simulink 工具箱进行仿真计算, 系统电源电压幅值 $U_s = 100$ V, 直流控制电压 $U_{dc} = 10$ V, 连接电阻 $R = 0.5 \Omega$, 各绕组的匝数相等为 $n_1 = n_2 = n_3 = 100$ 。仿真结果见图 3 (n 为谐波次数)。可见, 3 次谐波的含量 λ 占 39.7%, 总的谐波畸变率为 41.9%。



(a) 电流波形



(b) 频谱

图 3 传统的可控电抗器主绕组电流波形和频谱

Fig.3 Main winding current of conventional controllable reactor and its harmonic components

2 新型可控电抗器谐波补偿原理

2.1 新型可控电抗器的拓扑结构

所提出的新型饱和式可控电抗器如图 4 所示。在主绕组侧增加了辅助的消谐绕组, 这个消谐绕组通过一个电压型逆变器和一个半桥电路连接到可控电抗器的控制绕组, 其中, 电压型逆变器由 4 个 IGBT 器件组成全桥电路, 半桥电路由 2 个 IGBT 器件和 2 个串联的电容构成。图中, u_s 为系统电压, i_s 为主绕组总的输出电流, i_{inv} 为逆变器输出电流, i_{co} 为控制绕组电流, U_c 为逆变器直流侧电容电压。

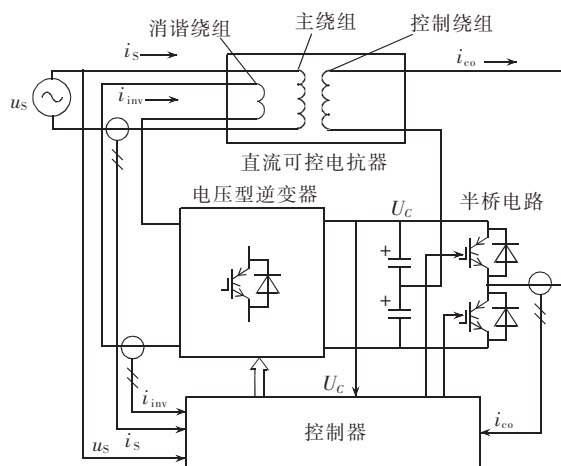


图 4 新型可控电抗器控制原理图

Fig.4 Principle diagram of proposed controllable reactor

控制器通过控制半桥电路中 2 个开关的开通和关断控制绕组电流, 同时控制电压型逆变器工作, 使逆变器的输出电流能够补偿可控电抗器主绕组电流中的谐波含量, 使可控电抗器的主电流为正弦波形。

2.2 新型饱和式可控电抗器工作原理

2.2.1 饱和式可控电抗器调节原理

新型饱和式可控电抗器和传统的饱和式可控电抗器调节电抗的原理相同, 都是通过调节控制绕组电流达到控制可控电抗器等效电抗的目的。图 5 为控制原理图。图中 i_{sref} 为可控电抗器输出的无功电流目标, $G(s)$ 为饱和式可控电抗器的输出电流 i_s 对其控制电流 i_{co} 的传递函数。利用一个 PI 环节调节控制绕组的电流调节主绕组输出电流。

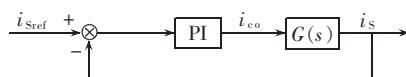


图 5 传统的可控电抗器等效电抗调节原理图

Fig.5 Inductance adjustment scheme of conventional controllable reactor

2.2.2 电抗器消谐原理

对于单相固定谐波负载, 由于负载电流稳定不变, 可以采用开环控制方法, 直接从负载电流中分离出来谐波含量作为逆变器的指令电流^[9-12]。对于谐

波负载变化的情况,可以检测系统电流进行闭环控制,通常的手段是基于能量平衡方法,将系统电流的基波无功和谐波分量一起补偿,也可以采用较复杂的方法构造三相电流,用瞬时无功理论计算系统电流的谐波含量^[13-15]。

可控电抗器是无功设备,只需要补偿谐波,不需对其基波无功分量进行补偿;构造三相电流利用瞬时无功理论计算的方法计算量大、控制复杂。为了简化控制,这里对基于能量平衡原理的单相谐波含量分离方法进行了改进。

可将图 4 的饱和式可控电抗器主回路简化成图 6 所示的等效电路。

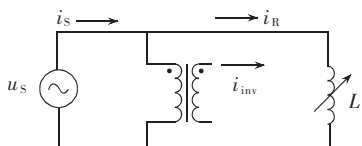


图 6 新型可控电抗器等效电路图
Fig.6 Equivalent circuit of proposed
controllable reactor

为分析简便,假设主绕组匝数和消谐绕组匝数相等,即有

$$i_s = i_{inv} + i_R \quad (5)$$

其中 i_R 为可控电抗器的等效无功电流, i_R 不能被直接测量获得,当 $i_{inv}=0$ 时 $i_R=i_s$ 。

同时,系统电流 i_s 可以分解成有功电流 i_{SP1} 、基波无功电流 i_{SQ1} 和谐波电流 i_{sh} 之和:

$$i_s = i_{SP1} + i_{SQ1} + i_{sh} \quad (6)$$

假设系统电源为正弦波,表示为

$$u_s(t) = U_s \sin \omega t \quad (7)$$

没有进行补偿时的系统电流可以分解成傅里叶级数:

$$i_s = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (8)$$

式中 I_n 和 θ_n 分别为 n 次谐波的幅值和初相角。

式(8)可重新写成基波和所有谐波和形式:

$$i_s = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) + \sum_{n=2}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \theta_n) \quad (9)$$

其中, I_1 为系统电流基波幅值,包括基波有功分量和基波无功分量。因此,系统电流的谐波含量被逆变器输出电流完全补偿时可以被表示为

$$i_s = I_1 \sin(\omega t + \theta_1) \quad (10)$$

系统电流的基波有功电流和基波无功电流为

$$i_{SP1} = I_1 \cos \theta_1 \sin \omega t \quad (11)$$

$$i_{SQ1} = I_1 \cos \theta_1 \cos \omega t \quad (12)$$

类似的可以得到逆变器输出电流 i_{inv} 的无功电流分量。

$$i_{inv1} = I_{inv1} \cos \theta_{inv1} \cos \omega t \quad (13)$$

其中, i_{inv1} 为逆变器输出电流的无功分量, I_{inv1} 为逆变器输出电流基波无功分量幅值。

当系统电流达到有效的补偿时,逆变器输出电流

中不包含基波无功成分,系统电流仅包含基波有功和基波无功成分。

$$i_s = i_{SP1} + i_{SQ1} \quad (14)$$

可控电抗器在调节过程中,有功功率会出现不平衡现象,功率的变化直接体现在逆变器的直流侧电容电压的变化^[15]。系统的有功功率可以用下式表示:

$$\frac{1}{2} U_s I_s = P_R + P_{inv} \quad (15)$$

式中 P_R 为电抗器主绕组消耗的有功功率; P_{inv} 为逆变器消耗的有功功率。

考虑到逆变器在调节过程中产生的有功功率变化 ΔP_{inv} ,式(15)可以重新写成:

$$\Delta P_{inv} = \frac{1}{2} U_s \Delta I_s \quad (16)$$

式中 ΔI_s 为系统电流的变化。

同时,电容上能量变化可以表示为

$$\frac{1}{2} C (U_c + \Delta U_c)^2 - \frac{1}{2} C U_c^2 = \int_0^t \Delta P_{inv}(t) dt \quad (17)$$

化简可得:

$$\frac{1}{2} C (2 U_c \Delta U_c + \Delta U_c^2) = \int_0^t \Delta P_{inv}(t) dt \quad (18)$$

忽略电容电压变化的高阶成分 ΔU_c^2 ,直流电容电压的变化直接反映了系统有功功率的变化。

由上述可知,为使系统电流中只包含基波有功和基波无功,只要使系统中的无功和有功达到平衡,同时逆变器输出电流的无功分量为 0。

图 7 为谐波指令电流获取的框图,其中包含 2 个 PI 环节,一个作为有功调节,另一个作为无功调节。图中锁相环 PLL 检测同步信号用来进行计算,低通滤波器 LPF 环节负责检测逆变器电流的基波无功成分,与基准值 0 比较,直到逆变器输出基波无功成分为零,使 PI 输出稳定。按照得到的参考电流 i_{invr} 控制逆变器工作,就可以使可控电抗器输出电流中的谐波含量得到有效补偿。

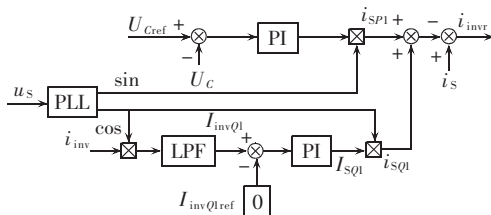


图 7 谐波电流指令计算框图

Fig.7 Block diagram of compensation
current calculation

3 仿真分析

为验证提出的新型可控电抗器的性能,采用 Matlab/Simulink 进行了仿真试验。仿真的主要参数为:逆变器直流侧电容电压 $U_c=250$ V;直流侧电容 $C=5000$ μ F;系统电压幅值 $U_s=100$ V,主绕组、控制绕组和消谐绕组的匝数相等 $n_1=n_2=n_3=100$ 。

仿真结果见图 8。可以看出,系统电流接近纯正弦波,总的谐波畸变率 THD 为 3.37%。新型饱和式可控电抗器相比于传统饱和式可控电抗器,谐波含量很低。因此新型饱和式可控电抗器谐波损耗也很小。

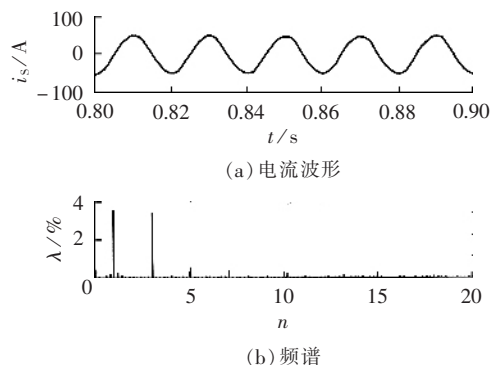


图 8 新型可控电抗器主绕组电流和频谱

Fig.8 Main winding current of proposed controllable reactor and its harmonic components

4 结论

利用磁路分析方法,分析了传统饱和式可控电抗器输出电流的谐波含量,可知传统饱和式可控电抗器输出电流中含有大量的谐波成分。新型饱和式可控电抗器具有谐波含量小的特点。

新型饱和式可控电抗器拓扑结构将消谐电路和控制电路有机地结合在一起,结构简单。消谐绕组同时具有为控制绕组提供控制功率的功能,因此无需为控制绕组单独提供电源。

新的拓扑结构和控制方法可以推广到各种类型的单相直流控制可控电抗器中。

参考文献:

- [1] 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,2006,18(6):64-67.
TIAN Ming-xing,LI Qing-fu. An equivalent circuit and simulation analysis of magnetically-saturated controllable reactors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2006,18(6):64-67.
- [2] 陈振虎,梁继勇,黄祥伟. 基于磁控电抗器的电力系统动态无功补偿装置的设计及应用[J]. 电网技术,2005,29(7):82-84.
CHEN Zhen-hu,LIANG Ji-yong,HUANG Xiang-wei. Design and application of variety reactive power compensator based on magnetic controlled reactor[J]. Power System Technology,2005,29(7):82-84.
- [3] 钱建华,陈柏超. 基于磁阀式可控电抗器的无功补偿系统[J]. 电力系统及其自动化学报,2003,15(2):66-70.
QIAN Jian-hua,CHEN Bai-chao. The application of reactive power compensator on magnetic valve controllable reactor in electric railway[J]. Proceedings of the EPSA,2003,15(2):66-70.
- [4] 同向前,薛钧义. 电子式连续可调电抗器的控制特性[J]. 电力自动化设备,2005,25(1):25-27.
TONG Xiang-qian,XUE Jun-yi. Control characteristics of electronic continuously tunable reactor[J]. Electric Power Auto-

mation Equipment,2005,25(1):25-27.

- [5] 李达义,陈乔夫,贾政春. 基于磁通可控的可调电抗器的新原理[J]. 中国电机工程学报,2003,23(2):116-120.
LI Da-yi,CHEN Qiao-fu,JIA Zheng-chun. A novel principle of adjustable reactor based on magnetic flux controllable reactor[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(2):116-120.
- [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):63-67.
CHEN Bai-chao,TIAN Cui-hua,LIANG Bai-hua,et al. Principle and implementation of a harmonic depression approach for single phase controlled saturable reactor[J]. Proceedings of the CSEE,2002,22(3):63-67.
- [7] FENG Gui-hong,WANG Feng-xiang,ZHANG Bing-yi. Modeling and characteristics of a novel magnet saturation controllable reactor[J]. IEEE Trans on Ind Appl,2003(20):313-315.
- [8] 周腊吾,徐勇,朱青,等. 新型可控电抗器的工作原理与选型分析[J]. 变压器,2003,40(8):1-5.
ZHOU La-wu,XU Yong,ZHU Qing,et al. Type selection analysis and principle of new controllable reactor[J]. Transformer,2003,40(8):1-5.
- [9] JOU H L,WU J C,CHU H Y. New single-phase active power filter[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications,1994,141(3):129-134.
- [10] DALLAGO E,PASSONI M. Single-phase active power filter with only line current sensing[J]. Electronics Letters,2000,36(2):105-106.
- [11] 李红雨,吴隆辉,卓放,等. 一种新型的快速电流检测方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(13):57-62.
LI Hong-yu,WU Long-hui,ZHUO Fang,et al. Study on the novel fast current detection method[J]. Proceedings of the CSEE,2005,25(13):57-62.
- [12] 戴朝波,林海雪,雷林绪. 单相并联型电力有源滤波器的仿真分析[J]. 电网技术,2001,25(8):28-32.
DAI Chao-bo,LIN Hai-xue,LEI Lin-xu. Simulation and analysis of single phase shunt active power filter[J]. Power System Technology,2001,25(8):28-32.
- [13] WU J C,JOE H L. Simplified control method for the single-phase active power filter[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications,1996,143(3):219-224.
- [14] NISHIDA K,RUKONUZAMAN M,AHMED T,et al. A robust deadbeat current control method by using adaptive line enhancer for single-phase voltage source active power filter[C]//Power Electronics and Motion Control Conference. Xi'an,China:IPEMC,2004:221-226.
- [15] MALESANI L,ROSSETTO L,TENTI P. Active power filter with hybrid energy storage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,1991,6(3):392-397.

(责任编辑:康鲁豫)

作者简介:

牟宪民(1973-),男,黑龙江巴彦人,博士研究生,研究方向为可控电抗器、电力电子技术(E-mail:hit_mu@163.com);
王建贻(1972-),男,黑龙江齐齐哈尔人,副教授,研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用;
胡泰(1981-),男,四川内江人,助理工程师,硕士,主要从事电网无功补偿、谐波抑制方面的研究工作;
纪延超(1962-),男,河南洛阳人,教授,博士研究生导师,研究方向为电力系统无功补偿。

Single-phase low harmonics saturated controllable reactor

MU Xian-min¹, WANG Jian-ze¹, HU Tai², JI Yan-chao¹

(1. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

2. Heshan Bureau of Guangdong Power Grid Corporation, Heshan 529700, China)

Abstract: A single-phase saturated controllable reactor is proposed, which combines control winding with harmonic elimination winding. A VSI (Voltage Source Inverter) and a half bridge circuit link the control winding and auxiliary harmonic elimination winding, which is closely coupled with main winding. The harmonic elimination winding suppresses the harmonic components and supplies energy to control winding. For single phase application, the energy balance concept is used to detect the system current and the harmonics generated by the controllable reactor at different working conditions are compensated by the output current of inverter while its equivalent inductance is controlled. The harmonic components of reactor output current are thus lowered notably. The feasibility and effectiveness of the proposed reactor are verified by simulation results with Matlab/Simulink.

Key words: saturated controllable reactor; magnetic equivalent circuit; harmonic elimination; energy balance