

适用于电气化铁路无功补偿的新型可控电抗器技术

张宇¹, 李江红¹, 陈乔夫², 王坚¹, 谭娟¹

(1. 株洲南车时代电气股份有限公司, 湖南 株洲 412001;
2. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 在电抗器副边设置多个绕组, 分别连接双向晶闸管与电压源型逆变器, 通过对晶闸管分级投切与逆变器控制完成电抗的大范围连续调节。将该电抗器与固定电容器支路并联运行, 可根据动态负荷自动调节牵引变电站的无功功率, 提高功率因数。仿真与试验证明: 该可控电抗器具有响应速度快、补偿精度高、谐波输出低等优异性能。

关键词: 可控电抗器; 无功补偿; 多绕组; 电气化铁道

中图分类号: TM714.3; TM47

文献标识码: A

文章编号: 1671-8410(2010)05-0009-03

A Novel Controllable Reactor Technology for Reactive Power Compensation of Electrified Railways

ZHANG Yu¹, LI Jiang-hong¹, CHEN Qiao-fu², WANG Jian¹, TAN Juan¹

(1. Zhuzhou CSR Times Electric Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China;

2. College of Electrical & Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei 430074, China)

Abstract: A multi-winding reactor, the secondary windings of which connecting anti-parallel thyristors and voltage-source inverter (VSI) respectively, can obtain reactance varying in a wide range continuously with the thyristors stepping switching and VSI controlling. With parallel operation of the controllable reactor and fixed capacitor branches, reactive power of traction substations can be regulated automatically according to dynamic loading for increasing power factor. Simulating and experimental results validate the advantages of the presented reactor such as fast response, high compensating precision and low harmonic output etc.

Key words: controllable reactor; reactive power compensation; multi-windings; electrified railways

0 引言

随着我国电气化铁路运输系统的飞速发展, 铁道负荷容量与复杂性日益增高, 为保证铁路供电系统稳定、高效运行, 高质量的动态无功补偿装置必不可少。已有的无功解决方案中, 传统使用的固定电容器与晶闸管投切电容器 (Thyristor Switched Capacitor TSC) 不能实现无功连续控制; 而静止无功补偿器 (Static Synchronous Compensator, STATCOM) 建造和维护成本都较高; 可控

电抗器 (Controllable Reactor CR) + 固定电容器方案通过迅速改变电抗值来控制无功补偿电流, 调节平滑, 响应速度快, 成本适中, 是一种比较理想的补偿方案^[1-4]。而可控电抗器技术则是这种方案的关键。

TCR (Thyristor Controlled Reactor) 与磁阀式可控电抗器常用于电气化铁路无功补偿, 两者各有优缺点, 但其共同之处是都会产生较大的谐波电流, 给谐波治理带来挑战。本文提出一种新的电抗器方案, 该电抗器具有多个二次侧绕组和高短路阻抗设计^[5]。二次侧绕组分为短路绕组和控制绕组2种, 前者可通过双向晶闸管形成分级串联短接, 后者则连接电压源型 PWM 逆变器。晶闸管的分级投切令电抗器一次侧绕组对外呈现级差变

收稿日期: 2010-07-10

作者简介: 张宇 (1980-), 男, 博士, 高级设计师, 研究方向为高速列车综合仿真, 电力电子技术在电力系统中的应用等。

化的电抗,形成无功功率的“粗调”;逆变器采用PWM电流控制技术,实现电抗在小范围内的连续调节,形成无功功率的“细调”。“粗调”跨度范围大,“细调”调节精度高,两者组合,可以获取大范围内平滑调节的感性无功功率。并且,两种调节方式均具有响应速度快、不产生低次谐波的特点,符合电气化铁路无功补偿的需求。

1 原理分析

1.1 可控电抗器结构

可控电抗器主体为一个多绕组的变压器,其原理结构如图1所示。

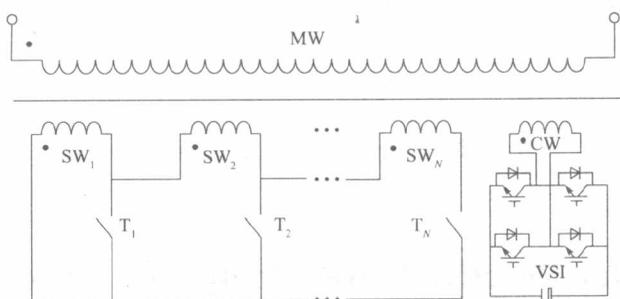


图1 可控电抗器结构原理图

Fig. 1 The principle circuit of the controllable reactor

图中所示的电抗器具有3种绕组:主绕组MW、短路绕组SW及控制绕组CW。主绕组MW与固定电容器支路并联于牵引母线;短路绕组SW₁~SW_N依次首尾串联,且它们的出线端依次通过双向晶闸管开关T₁~T_N与SW₁的入线端连接;控制绕组CW与直流侧挂储能电容的电压型逆变器连接。

1.2 电抗调节的原理

在图1中,依次闭合T₁~T_N,使得绕组SW₁~SW_N依次形成串联短路,变压器一次侧将对外呈现不同的短路电抗值,而当一次侧电压一定时,电抗器表现出N个无功档程Q₁~Q_N。

在某个无功档程下,电抗器可以看成是一个3绕组变压器。若忽略励磁电流及有功电流,它可用3射线等效回路表示^[6],如图2所示。

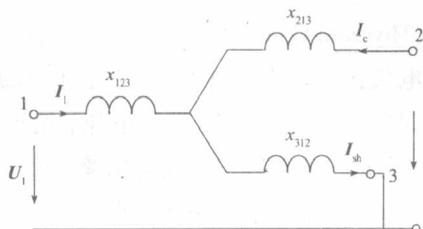


图2 可控电抗器工作等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of CR

注: 1—主绕组端口; 2—控制绕组端口; 3—短路绕组端口

图中,各相关量均折算到了一次侧。U₁为网侧电压; I₁为主绕组电流; I_c为控制绕组电流; I_{sh}为短路绕组电流。各电抗参数表示为:

$$\left. \begin{aligned} x_{123} &= \omega(L_{11} - M_{12} - M_{13} + M_{23}) = \frac{x_{1-2} + x_{1-3} - x_{2-3}}{2} \\ x_{213} &= \omega(L_{22} - M_{12} - M_{23} + M_{13}) = \frac{x_{1-2} + x_{2-3} - x_{1-3}}{2} \\ x_{312} &= \omega(L_{33} - M_{13} - M_{23} + M_{12}) = \frac{x_{1-3} + x_{2-3} - x_{1-2}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中: L₁₁、L₂₂、L₃₃分别为3个绕组的自感; M₁₂、M₂₃、M₁₃分别为3个绕组两两间的互感; x₁₋₂、x₁₋₃、x₂₋₃分别为3个绕组两两之间的短路电抗。

正弦稳态条件下,若I_c受控于主绕组电流或网侧电压,使得I_c=αI₁或I_c=jβU₁,根据基尔霍夫定律,一次侧主绕组端口的等效电抗可表示为α或β的函数:

$$x_L = x_{1-3} + \alpha x_{312} \quad (2)$$

$$\text{或: } x_L = \frac{x_{1-3}}{1 + \beta x_{312}} \quad (3)$$

改变α或β,即能够获得平滑调节的电抗。

采用直流侧挂储能电容的电压型PWM逆变器对控制绕组电流进行控制。可以看出,在图2中,若设计x₁₂₃远小于x₃₁₂,那么控制绕组电流与短路绕组电流可基本实现解耦。

令逆变器可输出的额定无功功率为Q_c,不计主绕组与控制绕组间漏电抗上的无功损耗,在某个无功档程Q_n(n=1, 2, ..., N)下,通过逆变器的控制调节,可控电抗器装置的无功调节范围为[Q_n-Q_c, Q_n+Q_c]。

等距设置各无功档程,使得:

$$Q_n - Q_{n-1} = 2Q_c \quad (n=2, 3, \dots, N) \quad (4)$$

那么,通过晶闸管分档调节与电流控制的结合,装置总体的无功平滑调节范围可达到[Q₁-Q_c, Q_N+Q_c]。而此时,逆变器的容量只占装置无功调节总量的1/(2N),这使得装置的造价与维护成本大大降低。

令电抗器一次侧电压值为U₁,设置好各个无功档程后,可得到每个无功档程下主绕组与短路绕组间的短路电抗值为:

$$x_{1-3(n)} = \frac{U_1^2}{Q_n} \quad (n=1, 2, \dots, N) \quad (5)$$

1.3 分级调节过程分析

通过对晶闸管开关的切换实现无功分档调节。为了保证过渡稳定,需要选择在晶闸管电流过零点进行切换。例如,若需要从无功档程Q₂切换到档程Q₁,该过程中,应断T₂,合T₁,并且逆变器输出电流也作相应调

节,电抗器调节过程的仿真波形如图3所示。

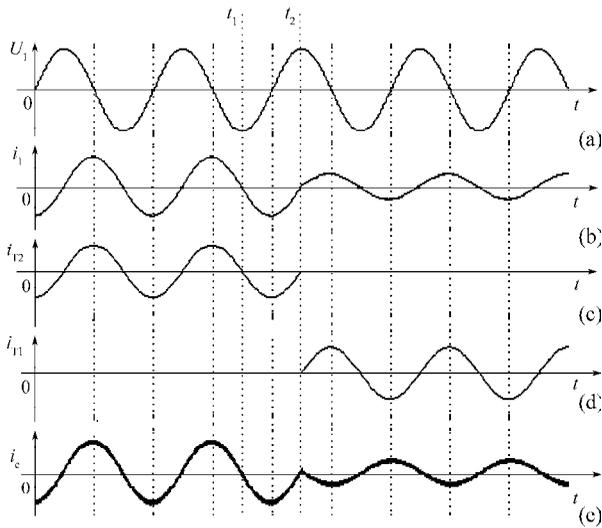


图3 电抗器调节过程的仿真波形

Fig. 3 Simulation waveforms of CR during regulating

若接到命令的时刻在 $t_1 \sim t_2$ 之间(t_1 与 t_2 为相邻的两个电流过零时刻),立即停止 T_2 的触发脉冲,由于晶闸管不能自行关断, T_2 必须要在 t_2 时刻才能截止,见图3(c);在 t_2 时刻,给 T_1 加触发脉冲,由于此时电流正好过零,因而该支路的电流 i_{T1} 立即进入稳定状态,如图3(d)所示;与此同时,改变逆变器的电流控制指令,由于其瞬时跟踪特性,因此 i_c 的调节也可以立即达到稳定,如图3(e)所示。

图3(b)显示了调节过程中可控电抗器输出电流变化。该调节过程响应至稳定的时间一般不会超过半个工频周期。

2 试验分析

2.1 样机及试验情况简介

研制了一个额定电压为6 kV的单相电抗器样机,要求无功功率调节范围为130~630 kVA,设计为5级分档调节,其无功调节档程分布如表1所示。表中的短路电抗分档值计算参看式(5)。

表1 可控电抗器工作档程的设定

Tab. 1 Step configuration of CR

工作档程	1	2	3	4	5
无功分档/kvar	180	280	380	480	580
短路电抗分档设计值/	204.2	131.2	96.7	76.6	63.4
短路电抗分档实测值/	211.8	125.1	93.6	75.3	63.9

为满足调节需要,PWM逆变器的额定输出无功容量为60 kvar。

进行了试验电压为2 000 V以下的相关试验。试验电路如图4所示。试验电源由380 V的公共电网电源、感应

式调压器、380 V/2 000 V的单相升压变压器组成。电抗器的控制绕组CW接电压源型逆变器,控制绕组 $SW_1 \sim SW_5$ 则通过双向晶闸管 $T_1 \sim T_5$ 形成分档串联短路。

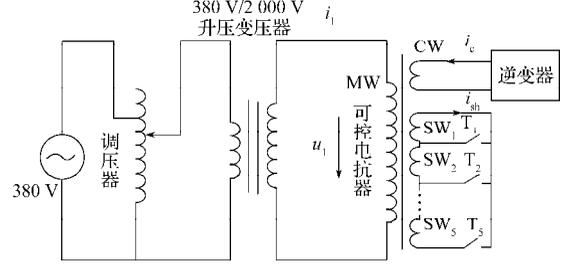


图4 可控电抗器样机的试验电路

Fig. 4 Experimental circuit of CR prototype

图中, u_1 为电抗器样机主绕组所加试验电压(可以根据试验需要由交流调压器进行调节,其有效值最高为2 000 V左右); i_1 为电抗器输出电流; i_c 、 i_{sh} 分别为控制绕组电流、短路绕组电流。

采用Semikron公司的IGBT器件SKM400GB124D构造电压型逆变器,其规格为1 200 V、400 A,开关频率设定为10 kHz。以TI公司DSP芯片TMS320LF2407作为控制系统核心进行全数字方式的电流控制。采用Tektronix数字存储示波器TDS2002记录相关的试验波形。

2.2 试验结果及分析

根据设定,本装置可以实现从297.6~58.33 任意一个电抗值的输出。分别给定电抗值 $x_L^* = 58.38, 68.5, 83.0, 85.0, 105.0, 116.0, 150.0, 185.0, 290.0$ 进行各种试验电压条件下的试验,并绘出其伏安特性曲线,如图5所示。可以看出,该电抗器具有良好的伏安特性。

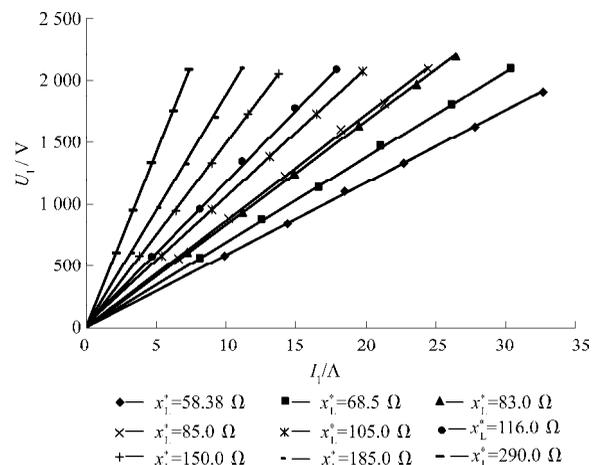


图5 可控电抗器的试验伏安特性曲线

Fig. 5 Volt-ampere characteristic curve of CR

3 结语

本文提出一种新型的可控电抗器技术。文中详细论述了其工作原理,给出了其设计方法,并通过一系列的仿真与试验对其进行了验证。(下转第16页)

2.5 快速实现程序优化

通过CSR_Drive可对变频器的应用宏程序、逆变程序、整流程序进行一站式更新,其更新模式完全不同于以往的芯片加载方式。先通过FTP将加密程序传送到变频器中,再按照内部协议将程序文件传送到对应算法系统的非易失性储存器中。这种传送方式最大的好处是程序更新速度快,即使更新整个变频器的程序也不超过1 min时间,并且可反复更新。

2.6 多方面保证系统安全

程序代码经过32位加密后才进行传送,保证了程序代码的安全可靠。将底层程序和应用层程序彻底分离并迁移程序存储空间,进一步加强了核心代码的安全等级。

控制逻辑互锁,为每一种外设都提供了掉线检测功能。在变频器运行期间,重要参数(比如:电机铭牌参数)被禁止修改功能,保证了变频器运行逻辑的稳定可靠。

3 应用实例

未使用CSR_Drive软件前,对于用户提出的工艺需求,必须定制专用的应用程序;一旦用户有更改需求时,必须重新编辑程序,重新下载程序。将CSR_Drive软件嵌入到变频器控制程序中后,对客户通用性的工艺要求,只需修改参数即可完成。

现以中功率变频器商用空调机组试验项目为例进行说明,客户提出的需求是:通过模拟量AI1输入给定转速;数字量输入DI1控制空调机组启/停;模拟量输

出AO1反馈变频器实际电流,数字量DO1输出故障信息。对此,利用图4所示的功能配置原理进行以下步骤操作即可,无需更改任何底层程序:

- (1)设定空调机组电机铭牌参数^[3]、额定电压、额定电流等:p30.00=380,p30.01=500;
- (2)设定电机控制模式为V/F开环方式:p44.00=0;
- (3)将AI1链接到主给定通道入口:p35.00=r10.14;
- (4)将DI1链接到变频器启/停控制位:p23.00=r1.00;
- (5)变频器实际电流链接到百分比换算器,再链接到AO1端口:p33.15=r10.02,p31.30=r11.16。

这个项目充分体现了变频器的二次组态调试能力在快速适应工艺需求上的优势,在很大程度上减少变频器厂家的人力和物力投入,同时加快了变频器的行业拓展能力。

4 结语

自主研发的CSR_Drive软件,加大了变频器适应工艺要求方面的灵活度,统一了维护平台,是低成本快速响应市场要求的一项有效举措,目前已在三电平7 MVA大功率变频传动系统和轨道交通领域进行验证和推广。

参考文献:

- [1] 韩安荣. 通用变频器及其应用[M]. 北京:机械工业出版社, 2007.
- [2] Siemens. SIMOVERT MASTERDRIVES Vector Control三相交流传动系统电压源型变频调速 DA65.10[M]. Siemens,1998.
- [3] Siemens. SINAMICS S List Manual S120多功能调速系统应用说明[M]. Siemens,2007.



(上接第11页) 该技术完美地结合了变压器技术与电力电子控制技术,采用了晶闸管投切与PWM逆变器控制“混合调节”的理念,一方面令装置结构紧凑,成本经济;另一方面则获取了相当优异的工作性能。该可控电抗器技术可以充分满足现代电气化铁路中动态性能好、调节范围宽、控制精度高、输出谐波少的无功补偿需要。

参考文献:

- [1] 刘 强,郭知彼,蒋家久. 牵引变电所静止无功补偿方案综

- 述[J]. 机车电传动,2005(6):12-14.
- [2] 郑 宏,李卫玲,魏荣宗. 电气化铁道无功治理的可控电抗器应用研究[J]. 电力电子技术,2004,38(6):39-41.
- [3] 王宁之. 电气化铁路动态无功补偿(SVC)方案探讨及可控电抗器的应用[J]. 电力电容器与无功补偿,2009,30(4):5-7.
- [4] 吴利仁,郭欲平,易运军,等. 磁阀式可控电抗器在电气化铁道中的应用[J]. 变压器,2006,43(3):13-16.
- [5] 张 宇,陈乔夫,田 军,等. 基于变压器端口调节的可控电抗器[J]. 中国电机工程学报,2009,29(18):113-118.
- [6] 瓦修京斯基 C B(苏). 变压器的理论与计算[M]. 崔立君,杜恩田,译.北京:机械工业出版社,1983:50-53.
- [7] 张秀峰,连级三. 利用电力电子技术构建的新型牵引供电系统[J]. 变流技术与电力牵引,2007(3):49-54.