

磁阀式可控并联电抗器模型试验研究

赵志强,李众祥,张喜乐

(保定天威集团有限公司 技术中心,河北 保定 071056)

摘要: 介绍了磁阀式可控电抗器的工作原理和结构特点,制作了磁阀式可控电抗器模型,并对模型的空载损耗、伏安特性、谐波特性、控制特性、响应时间等性能进行了试验研究,通过对比分析试验数据和理论计算结果,采用模型试验技术对 50 Mvar/500 kV 磁阀式可控并联电抗器的特性进行研究,为确定 50 Mvar/500 kV 电抗器原型结构和优化设计提供了可靠的试验参考依据。试验结果表明:所设计的磁阀式可控电抗器模型具有谐波小、损耗低及良好的动态性能;同时表明模型试验技术是一种成本低、效率高的特性分析方法。

关键词: 可控电抗器; 磁阀; 并联电抗器

中图分类号: TM 47

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)01-0068-03

0 引言

磁阀式可控电抗器^[1-6]是平滑调节电网无功潮流的装置,为灵活控制提供了理想的技术解决手段。磁阀式可控并联电抗器的主要用途有 3 个。

- 补偿电缆线、6~1150 kV 架空线的过剩充电功率用以维持指定的电压水平及其供电质量,使有功功率的损耗降低到最低程度。
- 通过调节电压水平和提高稳定的极限来增强 220~1150 kV 的远距离输电线的输送功率。
- 当中性点不接地电网发生单相接地故障^[7-10]时,可补偿接地故障点流过的容性电流。

随着国内外电力工业的发展,电站及发电设备的容量也在不断增加,为了经济合理地利用能源,进行长距离输电已不可避免,对可调的无功补偿装置的需求也将越来越迫切。例如,南方电网因基本属于单线联接的长距离输电系统,缺乏可调的无功补偿设备,导致系统无功潮流大幅度变化,主要母线电压波动范围超过国家标准,严重威胁着电气设备和电网的安全、稳定运行。迫切需要磁阀式可控电抗器产品从根本上解决问题。相信随着全国大电网的建设进程加快,磁阀式可控电抗器的应用范围将越来越广。

1 磁阀式可控电抗器的结构及工作原理

1.1 磁阀式可控电抗器的结构

图 1(a)为磁阀式可控电抗器的结构原理图,(b)为相应的电气接线示意图。电抗器的主铁芯分为 I、II 2 个芯柱,每个芯柱的长度为 l (以下未特别提示长度单位均为 mm),并且截面积是不均等的,其大部分截面积为 A_y ,有一小段的截面积为 A_{y1} ,长度为 l_1 ,且 $A_{y1} < A_y$,截面积为 A_y 的铁芯长度为 $l-l_1$,I、II 2 个芯

柱上分别绕有上下对称的匝数为 $N/2$ 的绕组;每个绕组各有一抽头,把绕组分为匝数为 $N_1/2$ 、 $N_2/2$ 的 2 部分,其中 $N=N_1+N_2$,抽头比 $\delta=N_2/N$,同一芯柱上两抽头之间接有晶闸管 V_{TH1} 、 V_{TH2} ,不同芯柱的上下 2 个绕组交叉连接后并联至电网。续流二极管 V_{D0} 则横跨在交叉端点上。

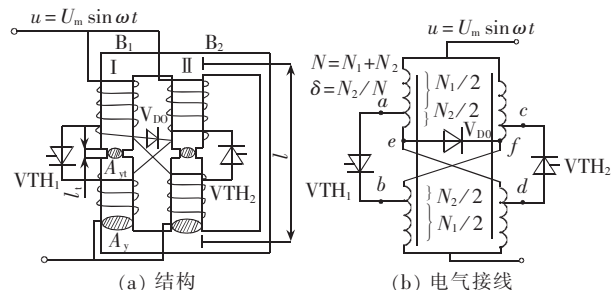


图 1 磁阀式可控电抗器结构原理图与电气接线示意图

Fig.1 Structure and wiring of magnetic valve controllable reactor

1.2 磁阀式可控电抗器的工作原理

图 1(b)中,若 V_{TH1} 、 V_{TH2} 不导通,磁阀式可控电抗器与普通的电抗器没有差别。当电源电压 $u(u = U_m \sin \omega t)$ 处于正半周时, V_{TH1} 承受正向电压, V_{TH2} 承受反向电压,若 V_{TH1} 被触发导通(即 a 、 b 两点等电位),则电源电压经变比为 δ 的自耦变压后由匝数为 N_2 的线圈向电路提供直流控制电压 $U_{KZ}(U_{KZ} = \delta U_m \sin \omega t)$ 和直流控制电流 i_{d1} 、 i_{d2} 。不难得出 V_{TH1} 导通时的等效电路如图 2(a)所示。同理,若 V_{TH2} 在电源电压负半周时被触发导通(c 、 d 两点等电位),则可得图 2(b)所示的等值电路。

由图可见, V_{TH2} 导通时所产生的控制电流 i_{d1} 和 i_{d2} 的方向与 V_{TH1} 导通时所产生的 i_{d1} 和 i_{d2} 的方向一致。即在电源的一个工频周期内, V_{TH1} 、 V_{TH2} 轮流导通起了全波整流的作用,二极管 V_{D0} 的功能是续流,与一般的可控整流原理一样,它有利于 V_{TH1} 、 V_{TH2} 的关断,提高整流效率。改变 V_{TH1} 、 V_{TH2} 的触

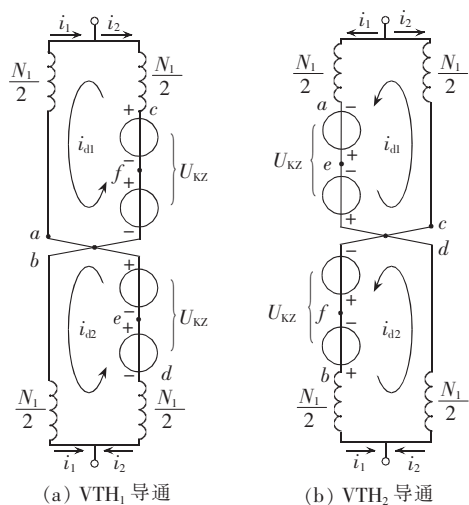


图 2 VTH₁、VTH₂ 导通时电抗器等效电路图
Fig.2 Equivalent circuits of reactor when VTH₁ or VTH₂ is turned on

发角 α 便可改变直流控制电流 i_{d1} 、 i_{d2} 的大小,从而改变电抗器铁芯的饱和程度,达到连续平滑地调节电抗器电抗值的目的。由图 2(a)(b)可知,匝数为 $N_1/2$ 的绕组中流过 2 部分电流:直流控制电流 i_{d1} 、 i_{d2} 和工作电流 i_1 、 i_2 。由上述不难看出,磁阀式可控电抗器的工作绕组与控制绕组是合并在一起的,这有利于减少损耗,简化结构。

由上述分析可知:磁阀式可控电抗器虽然也是利用直流电流控制铁芯的饱和程度实现连续平滑地调节电抗器的电抗值,但它与传统的可控饱和电抗器有很多不同,主要表现在 3 个方面。

- a. 可控饱和电抗器需要单独的大容量直流控制电源;磁阀式可控电抗器则利用电网电压经绕组自耦变压后由晶闸管整流获得,不需要外加直流激励磁电源。
- b. 可控饱和电抗器工作绕组和控制绕组是分开的;而磁阀式可控电抗器将工作绕组和控制绕组有机地结合在一起,有利于减少损耗和简化结构。
- c. 可控饱和电抗器的伏安特性为非线性,磁阀式可控电抗器的铁芯有一段截面很小,在电抗器整个工作范围内,只有小截面铁芯段磁路饱和,其余段均处于未饱和线性状态,因此,其伏安特性为线性。

2 磁阀式可控电抗器模型简介及技术参数

2.1 磁阀式可控电抗器模型简介

磁阀式可控电抗器试验模型是为开发 50 Mvar 样机而作的前期技术准备。当主绕组电压(电网电压)较低时,主绕组、控制绕组可合并为一个绕组(如图 3 所示),以提高经济技术指标;当主绕组电压(电网电压)过高时,受晶闸管、整流二极管反向(断态)重复峰值电压限制,需降低控制绕组电压,主绕组与控制绕组需要分离(如图 4 所示),控制绕组成为独立的低电压绕组;本模型将主绕组、控制绕组合二为一与主绕组、控制绕组分离 2 种结构设计在一个模型中,以节省研制费用。

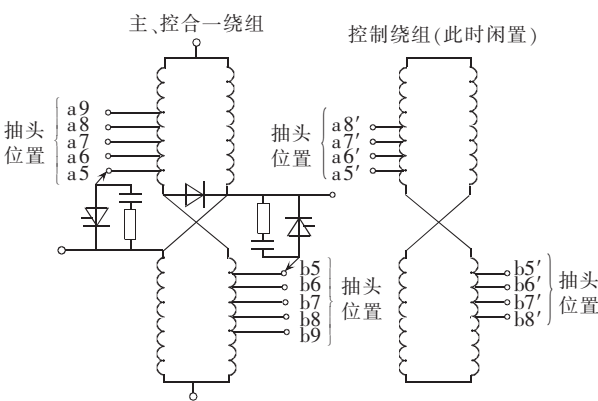


图 3 主、控合一时接线原理图
Fig.3 Reactor wiring when main winding and control winding are combined

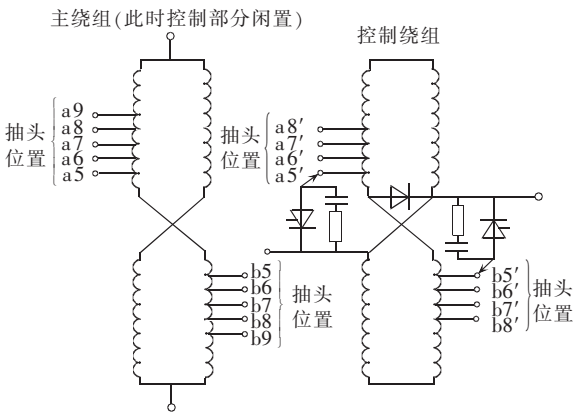


图 4 主、控分离时接线原理图
Fig.4 Reactor wiring when main winding and control winding are separated

2.2 磁阀式可控电抗器模型技术参数

FKBKD-100/10-333 W 型磁阀式可控电抗器技术参数列于表 1。表中,A 为(主)、(控)合二为一,B 为(主)、(控)分离,(主)指主绕组,(控)指控制绕组; U_N 、 Q_N 、 f_N 分别为额定电压、容量、频率, Z_N 为每相额定阻抗。

表 1 FKBKD-100/10-333 W 技术参数
Tab.1 Technique data of FKBKD -100/10-333 W-type reactor

U_N/kV		Q_N/kvar		f_N/Hz		Z_N/Ω		相数
A	B	A	B	A	B	A	B	A B
10	10	100						
$\frac{10}{\sqrt{3}}$	(主)	$\frac{10}{\sqrt{3}}$	(主)					
				50		333		单相
$\frac{10}{\sqrt{3}}$	(控)	$\frac{5}{\sqrt{3}}$	(控)					
		100	(控)					

3 磁阀式可控电抗器模型试验数据

为了更直观地反映试验结果,根据试验数据绘制了相应特性曲线。
图 5 为控制特性曲线,图中 I_0 为基波电流有效值、 α 为晶闸管触发角。
图 6 为伏安特性曲线,图中 I 为电流(有效值), U 为电压(标么值),从上到下各曲线对应的晶闸管触发角分别为 117.2° 、 125.0° 、 130.0° 、 140.0° 、 150.0° 、 160.0° 。

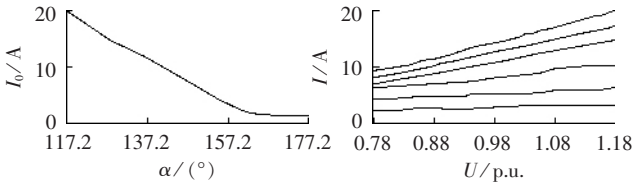


图 5 控制特性曲线
Fig.5 Control characteristic curve

图 6 伏安特性曲线
Fig.6 Volt-ampere characteristic curve

图 7 为谐波特性曲线,图中 $h_{3,5,7}$ 分别为 3、5、7 次谐波电流占基波电流的百分比, α 为晶闸管触发角。

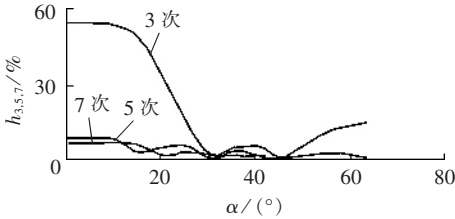


图 7 谐波特性曲线

Fig.7 Harmonic characteristic curve

磁阀式可控电抗器模型在不同抽头位置的响应时间如表 2 如示。

表 2 模型在不同抽头位置的响应时间
Tab.2 Response times of reactor model at different tap positions

抽头位置	响应时间/s	抽头位置	响应时间/s
a5 b5	1.50	a5' b5'	0.95
a6 b6	1.30	a6' b6'	0.90
a7 b7	1.21	a7' b7'	0.74
a8 b8	1.10	a8' b8'	0.51
a9 b9	0.95		

4 结论

a. 对试验数据的对比分析,表明磁阀式可控电抗器模型各项性能指标基本达到设计要求;指导磁阀式可控电抗器设计制造的理论基础合理、可靠;设计、制造流程可行,试验数据可作为 50 Mvar/500 kV 样机开发的参考依据。

b. 本模型谐波在额定容量 65 %~86 %之间最小,小于 2.5 %。

c. 试验模型主、控绕组分离总体试验数据优于主、控绕组合一。

d. 响应时间与抽头匝数有关,测试数据与计算数据相比有一定误差,有待进一步研究。

e. 磁阀式可控电抗器模型伏安特性近似线性,与设计值比较吻合。

总之,磁阀式可控电抗器具有谐波小、损耗低等优点,可作为连续可调无功补偿装置广泛用于电网电压调节、无功补偿以改善供电质量和减小电能损耗。

参考文献:

[1] 陈柏超,陈维贤. 磁阀式可控电抗器的数学模型及特性[J]. 武汉

水利电力大学学报,1995,28(3):293-298.

CHEN Bai-chao,CHEN Wei-xian. A mathematical model of the magnetic valve type controllable reactor and its characteristics [J]. Journal of Wuhan University of Hydraulic and Electric Engineering, 1995, 28(3): 293-298.

[2] 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.

[3] 张式雷,陈柏超. 磁阀式可控电抗器负载特性的试验方法[J]. 变压器,2002,39(11):28-30.

ZHANG Shi-lei,CHEN Bai-chao. Testing method of load characteristics in magnetic-valve controlled reactor[J]. Transformer, 2002,39(11):28-30.

[4] 刘红,尹忠东. 新型可控自动消弧成套装置的应用研究[J]. 电力系统自动化,1998,22(2):9-12.

LIU Hong,YIN Zhong-dong. Application research on a new type automatic controllable arc extinguishing apparatus[J]. Automation of Electric Power Systems,1998,22(2):9-12.

[5] 钱建华,陈柏超,王庆春. 电气化铁路的磁阀式可控电抗器动态无功补偿系统[J]. 电工技术,2003,18(2):15-17.

QIAN Jian-hua,CHEN Bai-chao,WANG Qing-chun. Magnetic valve controlled reactance dynamic reactive power compensation system of electrical railroad[J]. Electric Engineering, 2003,18(2):15-17.

[6] 邵华平,袁佳敏,陈柏超. 电气化铁路瞬时无功信息检测及动态无功补偿系统[J]. 武汉大学学报:工学版,2003,36(6):109-112. SHAO Hua-ping,YUAN Jia-xin,CHEN Bai-chao. Instantaneous reactive power information detection and dynamic reactive power compensation system for electrification railway[J]. Engineering Journal of Wuhan University,2003,36(6):109-112.

[7] 张宏艳,张承学,熊睿,等. 国内外几种先进的小电流接地系统单相接地故障选线方法分析与比较[J]. 电力建设,2005,26(11):41-44,50.

ZHANG Hong-yan,ZHANG Cheng-xue,XIONG Rui,et al. Analysis and comparison of several advanced fault line selective methods in small current grounding power system[J]. Electric Power Construction,2005,26(11):41-44,50.

[8] 李娟,焦邵华. 配网自动化中的单相接地故障识别方法[J]. 北京机械工业学院学报,2005,20(2):43-46.

LI Juan,JIAO Shao-hua. A new principle of single-phase-earth fault detection based on distribution automation platform[J]. Journal of Beijing Institute of Machinery,2005,20(2):43-46.

[9] 崔联广,范玉梅,梁利波,等. 中性点不接地电网单相接地选线新方法[J]. 高压电器,2003,39(3):51-52,56.

CUI Lian-guang,FAN Yu-mei,LIANG Li-bo,et al. New approach to identifying the single-phase grounding fault line for the isolated neutral distribution network[J]. High Voltage Apparatus, 2003,39(3):51-52,56.

[10] 张文华,侯俊卿. 单相接地保护装置拒动和误动的原因分析[J]. 电工技术杂志,2004,23(9):67-69.

ZHANG Wen-hua,HOU Jun-qing. Causation and analysis of the refuse and by accident to single-phase protection equipment for earthing[J]. Electrotechnical Journal,2004,23(9):67-69.

(责任编辑:柏英武)

作者简介:

赵志强(1970-),男,河北保定人,硕士,从事电力电子研发工作(E-mail: zqzsj800@sina.com)。

Test of magnetic valve controllable parallel reactor model

ZHAO Zhi-qiang, LI Zhong-xiang, ZHANG Xi-le

(R & D Center, Baoding Tianwei Group Co., Ltd., Baoding 071056, China)

Abstract: The principle and structure of magnetic valve controllable reactor are introduced. The reactor model is set and its performance is tested, such as no-load loss, volt-ampere characteristics, harmonic characteristics, control characteristics and response time. By comparing test results and theoretical calculation, characteristics of a 50 Mvar/500 kV magnetic valve controllable parallel reactor is studied, which provides reliable test reference data for its optimum structure design. Test results show that, the designed reactor model has small harmonics, low losses and good dynamic performance, and the model test is an efficient and low-cost method of characteristic analysis.

Key words: controllable reactor; magnetic valve; parallel reactor