

# 超高压输电系统中磁可控电抗器保护配置与实现

熊 蕙,程 骁,文继锋,李 力,陈松林  
(南京南瑞继保电气有限公司,江苏 南京 211102)

**摘 要:**文中分析了高压交流输电系统中的磁可控电抗器运行的各种工况,介绍了其保护配置,针对性地提出了自动跟踪补偿额定电流的磁可控电抗器差动保护、基于时域平移平衡差动原理的磁可控电抗器匝间保护和控制绕组电压差动保护,并给出了验证这些保护原理的数字仿真、动模试验和现场运行结果。

**关键词:**磁可控电抗器;差动保护;匝间保护;时域平移平衡差动;电压差动保护

**中图分类号:**TM47

**文献标志码:**B

**文章编号:**1009-0665(2014)02-0037-03

随着超高压长距离输电工程在我国的建设和发展,对连续可调的可控电抗器的需求日益迫切,相关学者正在积极进行通过可控电抗器提高特高压电网输电能力的研究<sup>[1]</sup>。目前超高压可控高抗的应用主要分2个方向:分级式可控高抗和磁控式可控高抗。其中根据磁饱和原理工作的磁饱和式可控电抗器近年来得到了重视,研究表明,磁饱和式可控电抗器控制方式灵活,不仅可以平滑调节系统的无功功率、限制工频电压升高和潜供电流的生长,提高系统的输电能力和稳定性、且有大幅度限制操作过电压的功能<sup>[2]</sup>。2007年荆州换流站投运了我国首套500 kV磁饱和式可控电抗器。

## 1 磁可控电抗器的工作原理

磁可控电抗器的绕组线圈主要分为交流绕组和控制绕组2个部分,交流绕组由2个独立线圈绕组组成,同时这2个绕组上还分别绕制了控制绕组线圈。为了实现可控,在控制绕组的2个线圈注入直流电流,并且方向相反,使得2个交流绕组线圈分别工作在正方向饱和和反方向饱和状态,如图1、图2所示。左侧的正向饱和绕组在正向电压的激励情况下,阻抗很小,使得电流主要从左侧的正向饱和绕组中流过;同样右侧的反向饱和绕组在反向电压的激励情况下,阻抗很小,使得电流主要从右侧的反向饱和绕组中流过。因此2个交流绕组将分别流过正半周波和负半周波电流,而通过调节控制绕组中直流电流的大小就可以改变铁心的磁饱和度,从而影响到通过交流绕组线圈的电流大小,达到调节电抗器容量的目的<sup>[3-5]</sup>。

理论分析磁可控电抗器正常运行过程中2个交流绕组的电流波形以及总电流波形如图3所示。

由于铁心的饱和特性,实际可控电抗器2个分支的电流中不可避免会出现谐波分量,可控电抗实际运行时的电流波形如图4所示。

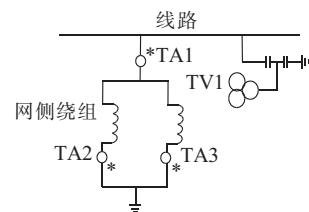


图1 可控电抗器交流绕组单相接线示意图

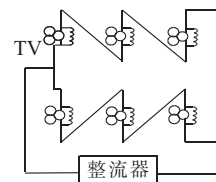
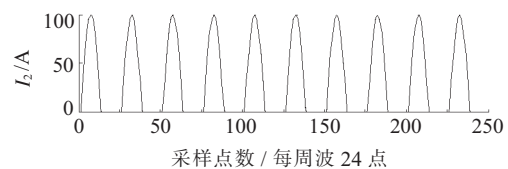
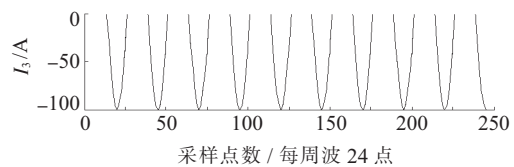


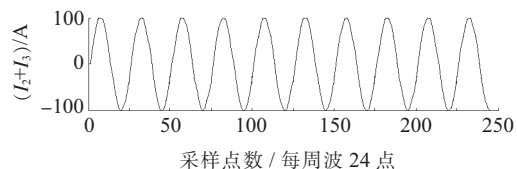
图2 可控电抗器控制回路接线示意图



(a) 1分支电流



(b) 2分支电流



(c) 2个分支的和电流

图3 理想情况下的磁可控电抗器波形

## 2 可控电抗器的保护原理及配置

### 2.1 可控电抗器的运行方式及其影响

(1)由于可控电抗器负荷电流会发生较大的幅度变化(在可控容量从5%至120%动态调节时),导致以电

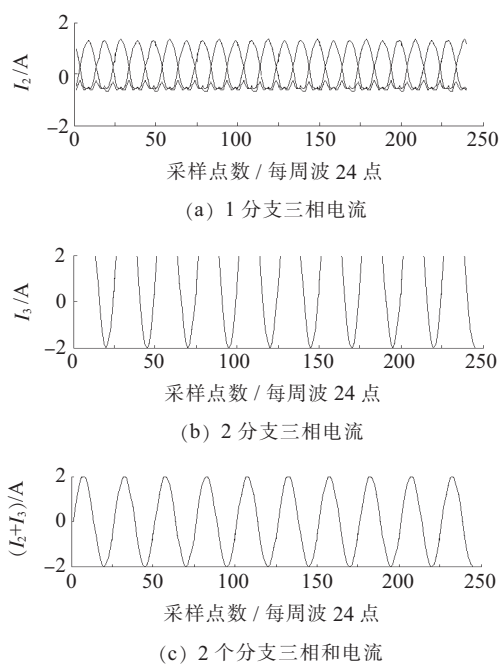


图4 实际的磁可控电抗器波形

抗器额定电流为基准的差动保护在不同工况下的灵敏度相差很远,甚至出现不能满足差动保护需要的情况,所以必须对可控电抗器的差动保护进行相应研究,以保证差动保护的灵敏度和可靠性。

(2) 由于电力电子技术的引入,可控电抗器的匝间故障特征与普通电抗器截然不同,在正常运行情况下磁可控电抗的2个绕组分别流过正负半个周波电流,发生匝间故障时流过可控电抗的故障电流将为半波电流,如何在这种故障特征情况下可靠的切除故障,也是电抗器保护原理中一个全新的研究课题。

(3) 由于控制绕组线圈中流过直流电流,该电气量不能被传统的继电保护装置所采集,在控制绕组线圈发生故障时,可控电抗的交流侧绕组差动保护的灵敏度较低,如何能够在此时快速切除故障,也是电抗器保护中前所未有的难题。

## 2.2 磁可控电抗器的保护配置

### 2.2.1 差动保护

磁可控电抗器的差动保护同样基于电流的基尔霍夫定律:其高端电流和低端电流之和在内部无故障情况下为0,但是由于受到控制绕组直流电流及左右分支绕组磁饱和的影响,可控电抗器额定电流会在较大的范围内发生变化。不同的额定电流情况下,如果采用固定的启动定值将使差动保护的灵敏度在不同工况下灵敏度发生较大的变化。

保护装置中设有电流跟踪元件,实时的跟踪可控电抗器电流的变化,并自适应的调整装置中的差动保护基准电流,可以使差动保护的灵敏度不受可控电抗运行工况的影响。由于磁可控电抗器的短路阻抗比较大,在内部发生接地故障后电流一般变化不大,尤其是

经过渡电阻接地时,差电流很小,这就要求差动保护有很高的灵敏度来检测这些故障。为了提高差动保护灵敏度,采用可控电抗的低端电流作为差动保护的制动电流,在区外故障时保证了较大的制动量,而在区内故障时,它会不同程度的减小,金属性接地时更是会降为零,保证了区内故障的快速切除。

### 2.2.2 匝间保护

由于左右2个分支的饱和作用,2个分支中分别流过半个周波的电流,在发生轻微匝间故障时,只有一个分支的电流会表现出故障特征,另一个分支电流基本不变,使得可控电抗的匝间故障表现出较为独特的故障特征,因此传统的零序功率方向原理的匝间保护不适用于磁可控电抗器。从磁可控电抗的特殊接线方式可设计出一种独特的匝间保护方案。如果把左侧分支与移相 $180^\circ$ 的右侧分支波形进行差动计算,在正常运行情况下,2个波形基本相同;发生匝间故障之后,由于故障分支电流出现变化,导致了其与另外一个分支的电流对比出现差异,因此可以设计基于差动保护原理的磁可控电抗器匝间保护。其动作方程如下:

$$\begin{cases} I_d > I_{cdqd} \\ I_d > K_b I_r \\ I_r = \max\{|I_2|, |I_3|\} \\ I_d = |I_2 + I_3| \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中: $I_2$ 和 $I_3$ 为交流侧左右2个分支的电流( $I_3$ 已经移相 $180^\circ$ ); $I_{cdqd}$ 为匝间保护启动定值; $K_b$ 为匝间保护制动系数。

由于磁可控电抗器的匝间保护是一种平衡差动保护,而不是真正意义上的基于电流基尔霍夫定律的差动保护,所以需要充分考虑各种可能导致可控电抗2个分支电流可能出现不对称的情况。例如在磁可控电抗器在磁饱和情况下交流励磁的过程中,其电流的波形如图5所示。

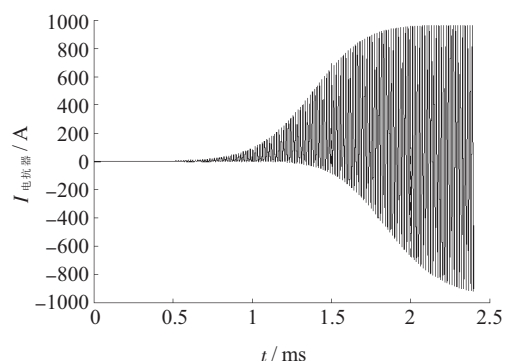


图5 控制过程中的交流绕组电流波形

在整个电抗器上电过程中,磁可控电抗器的电流存在一段较长时间的偏置,导致左右2个分支电流不可能满足平衡差动保护原理,需要在此类情况下对匝

间差动保护采取相关制动措施来防止保护误动。在可控电抗器的控制系统调节过程中,交流侧 2 个分支电流都会出现短时的不平衡状态,这些情况同样需要匝间差动保护进行相应的处理。在动模实验室物理模型上模拟可控电抗器交流侧绕组发生匝间故障时,2 个并联绕组电流波形如图 6 所示。故障分支电流发生了较小的变化,非故障分支电流基本不发生变化。

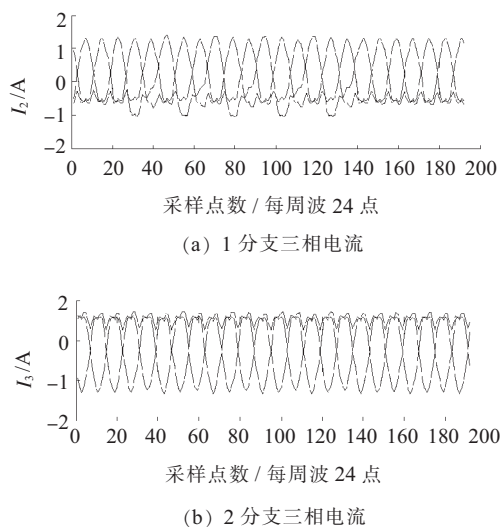


图 6 交流绕组匝间故障波形

### 2.2.3 差电压保护

控制绕组线圈中主要流过了控制系统输出的直流励磁电流,并且在控制绕组发生匝间故障的情况下,交流侧绕组的匝间差动保护的灵敏度很低,需要为控制绕组的匝间故障配置专用的保护。即使在磁饱和情况下,控制绕组两侧电压依然包含了交流绕组感应过来的工频交流电压,在稳定工作情况下,控制绕组的 2 个分支上的工频电压也是平衡的,且可以和交流绕组的匝间差动保护一样,设置控制绕组的差电压保护。在动模实验室物理模型上模拟磁可控电抗器控制绕组发生匝间故障后,2 个控制绕组分支上的电压波形如图 7 所示。故障分支电压由于匝间故障的存在而有一定的减小,非故障分支电压基本不发生变化。

控制绕组的 2 个线圈和交流侧绕组线圈相互耦合,正常运行情况下,交流侧 2 个支路电压平衡,控制绕组 2 个分支电压也是平衡的,如果控制绕组中发生接地、相间故障或匝间故障,控制绕组 2 个分支上的电压将出现差异,根据这个原理可以在控制绕组侧配置电压差动保护。保护动作方程:

$$\begin{cases} U_d > U_{cdqd} \\ U_d > K_b U_r \\ U_r = \max\{|U_2|, |U_3|\} \\ U_d = |\dot{U}_2 + \dot{U}_3| \end{cases} \quad (2)$$

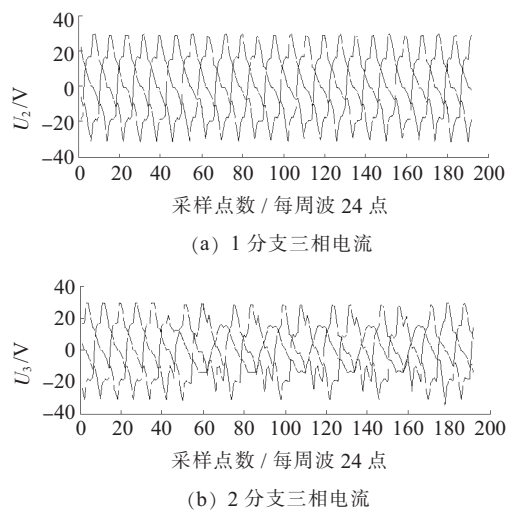


图 7 控制绕组匝间故障波形

式(2)中: $U_2$ 和 $U_3$ 为控制绕组 2 个分支电压; $U_{cdqd}$ 为控制绕组平衡差动保护启动定值; $K_b$ 为平衡差动保护制动系数。

### 2.2.4 后备保护

可控电抗器配置了过流保护作为内部相间故障及控制绕组侧旁路断路器位置异常的后备保护;配置零序过电流保护作为可控电抗器内部接地短路故障和匝间短路故障的后备保护;设置了过负荷报警功能来反映电抗器的过热状态。为了防止系统不对称运行或故障情况下在控制绕组侧产生较大的零序电压可能造成阀的损坏,增加了与阀并联的间隙,间隙保护监测间隙击穿后流过的交流电流,对阀形成保护。

### 2.2.5 动模试验与现场运行

在动模 380 V 物理模型上,2007 年 6 月进行了磁可控电抗器各种工况与故障情况下的动模试验,包括正常运行不同励磁情况下发生区内接地故障、交流绕组匝间故障、控制绕组匝间故障以及空投到接地故障、匝间故障,其保护均可靠动作,保护最小可以检测 1% 的接地故障,1% 交流绕组匝间故障和 4% 控制绕组匝间故障,并在各种区外故障,例如线路跳开,重合等各种过程不误动作。2007 年 10 月在经过现场调试以及区外人工故障验证后,我国首套 500 kV 磁可控电抗器湖北在荆州换流站顺利投入运行。

## 3 结束语

本文分析了磁可控电抗器的基本工作原理,分析了其特殊结构对保护的影响,介绍了其保护原理及配置,提出了自动跟踪电流的差动保护、基于差动原理的匝间保护和控制绕组差电压保护原理。目前,应用上述保护原理的可控电抗器保护装置已在荆州换流站可靠运行超过 5 年。

(下转第 43 页)



- 功率波动平滑方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 36-43.
- [5] DATTA M, SENJYU T, YONA A, et al. A Coordinated Control method for Leveling PV Output Power Fluctuations of PV-Diesel Hybrid Systems Connected to Isolated Power Utility [J]. IEEE Trans. Energy Conversion, 2009, 24(1): 153-162.
- [6] 阎立伟. 微电网中光伏发电动态特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010: 50-51.
- [7] 石磊, 伍阳, 刘皓明. 独立运行微电网平抑有功差额波动研究[J]. 江苏电机工程, 2012, 31(3): 1-5.

---

作者简介:

李卫良(1968), 男, 浙江嵊州人, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统自动化、配电网和微电网技术;

黄堃(1985), 男, 江苏南京人, 工程师, 研究方向为智能用电、需求响应;

陈璐(1987), 女, 江苏溧阳人, 工程师, 研究方向为智能用电、需求响应;

杨永标(1978), 男, 江苏盐城人, 高级工程师, 研究方向为电力系统自动化、智能用电、需求响应。

## Demand Response Strategies for Smoothing Power Fluctuation of Interconnecting ties in the Micro-Grid with Controllable Load

LI Weiliang, HUANG Kun, CHEN Lu, YANG Yongbiao

(State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 210008, China)

**Abstract:** Energy storage technology is the principal tool to smooth power fluctuation produced by roof PV in regional micro-grid. In this paper, demand-side resource is taken as a tool to smooth power fluctuation in microgrid, so as to decrease the energy-storage capacity in a high PV penetration rate situation. The method includes two levels which are day-ahead plan and real-time control. The day-ahead plan includes prediction of intermittently photovoltaic power generation and presetting power curve of controllable load such as central air conditioners and other loads with slow rate of power change. It is for handling the change of photovoltaic power generation. The real-time control is to use the interruptible load to response to instant fluctuation of photovoltaic power. The measuring precision is the critical factor in the real-time control process. Through the day-ahead plan for controllable load and the real-time control on interruptible load, the power fluctuation caused by slow change or instant change of photovoltaic power generation could be effectively eliminated with taking the full advantages of demand response technology.

**Key words:** tie-line power control; demand response; micro-grid; controllable load; smoothing fluctuations

---

(上接第 39 页)

参考文献:

- [1] 董宸, 周霞, 李威, 等. 提高特高压电网输电能力的方法[J]. 江苏电机工程, 2013, 32(5): 1-4.
- [2] 陈维贤, 陈禾. 并联电抗器的可控调节[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 11-13.
- [3] 田铭兴, 励庆孚. 磁饱和式和变压器式可控并联电抗器[J]. 高电压技术, 2003, 29(7): 26-27.
- [4] 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.
- [5] 田铭兴, 励庆孚, 刘曙鸿. 磁饱和式可控电抗器的等效物理模型及其数学模型[J]. 电工技术学报, 2002, 17(4): 18-21.
- [6] 屠黎明, 苏毅. 微机可控高压并联电抗器保护的研制[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(24): 94-98.

---

作者简介:

熊蕙(1977), 女, 湖北武汉人, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

程骁(1978), 男, 河南安阳人, 工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

文继锋(1978), 男, 江西萍乡人, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

李力(1970), 男, 江苏南京人, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

陈松林(1969), 男, 福建福州人, 研究员级高级工程师, 研究方向为电力系统保护。

## Magnetically Controlled Reactor Protection in HVAC Transmission System

XIONG Hui, CHENG Xiao, WEN Jifeng, LI Li, CHEN Songlin

(NARI Relays Electric Co. Ltd., Nanjing 211102, China)

**Abstract:** This paper analyses various operation conditions of magnetically controlled reactor in HVAC transmission system, and introduces the protection configuration of reactor. Especially, reactor differential protection with automatic tracing and compensating rated current, reactor inter-turn fault protection based on time domain translation balance differential protection, and voltage differential protection of control winding are proposed. The results of digital simulation test, dynamic simulation test and field operation validate the proposed protections.

**Key words:** magnetically controlled reactor; differential protection; inter-turn fault protection; time domain translation balance differential protection; voltage differential protection