

新型磁控电抗器快速响应技术

袁 剑¹,田翠华¹,田 成¹,陈柏超¹,王 军^{1,2},聂德鑫²,蔡 伟²,袁佳歆¹

(1. 武汉大学 电气工程学院,湖北 武汉 430072;

2. 国网电力科学研究院 武汉南瑞有限责任公司,湖北 武汉 430074)

摘要: 磁控电抗器(MCR)因调节灵活等优点在电力系统无功补偿及限制过电压等方面得到了广泛应用,但响应速度较慢限制了MCR的应用。为提高磁控电抗器的响应性能,分析了MCR的工作原理及响应机理,并设计了一种MCR快速响应结构,其利用IGBT电路控制直流励磁电流大小及方向,实现快速励磁与去磁。仿真和试验结果表明,该快速响应结构可使MCR的励磁和去磁时间限制在30 ms以内,有效地提升了MCR的响应性能。

关键词: 磁控电抗器; 快速励磁; 快速去磁; IGBT; 整流

中图分类号: TM 47

文献标识码: A

DOI: 10.16081/j.issn.1006-6047.2016.05.028

0 引言

随着电力系统电压等级的不断提高,国内外现有的传统电抗器补偿装置不能很好地抑制电网工频过电压以及电压波动等状况。作为一种新型连续可调型电抗器,磁控电抗器MCR^[1](Magnetically Controlled Reactor)因其调节灵活、可靠性高等优点,适用于各级电网进行动态无功补偿以及限制系统过电压,具有提高功率因数、降低线路网损、提高输电线传输能力等作用,近年来受到越来越广泛的关注及推广^[2-3]。

然而目前的磁控电抗器也有其自身局限性,主要问题之一便是响应速度较慢^[4]。特别是在应用于抑制电压闪变和自动调谐消弧线圈等情况时,磁控电抗器响应速度较慢会使控制系统稳定性降低,造成系统振荡。针对这一问题,文献^[5]提出了通过加大抽头比来提高磁控电抗器响应速度的方法,但此方案会增大磁控电抗器的有功损耗,并使得晶闸管两端电压升高,降低系统可靠性。文献^[6]提出了基于绝缘栅双极晶体管(IGBT)的直流斩波快速励磁方案,通过增大IGBT的脉冲宽度调制(PWM)中的脉宽来提高磁控电抗器的响应速度,该方法在一定程度上提高了磁控电抗器的励磁速度,但未能提高去磁速度。文献^[7]提出采用并入去磁电阻的方法快速去磁,尽管可以提高去磁速度,但会增大损耗且降低系统可靠性。

收稿日期:2015-02-28;修回日期:2016-01-04

基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2042-014kf0233);国家电网公司科技项目(WNJ131-0048);湖北省科技支撑计划(2014BAA013);亚太经合组织合作基金资助项目

Project supported by the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2042014kf0233),the Science and Technology Project of SGCC(WNJ131-0048),the Science and Technology Support Program of Hubei Province(2014BAA013) and the Asia Pacific Economic Cooperation Fund

针对以上解决方案不同程度的局限性,本文提出基于IGBT的新型快速响应结构,利用IGBT整流电路控制励磁电流的大小及方向,克服现有结构方法的缺陷不足。通过理论分析磁控电抗器的工作原理及响应特性,提出相应的快速响应结构及其工作状态控制。仿真试验结果表明,本文提出的磁控电抗器快速响应结构可将磁控电抗器的响应时间减少到30 ms以内,有效提高了磁控电抗器工作性能,为磁控电抗器的应用推广提供帮助。

1 磁控电抗器工作原理分析

图1所示为磁控电抗器的结构原理图,各参数定义详见文献^[1-2]。磁控电抗器其结构和外形与普通电力变压器几乎相同,特点在于磁控电抗器的铁芯柱包含一些截面积较小的“磁阀”结构,且其绕组结构具有独特的直流激励电流回路。

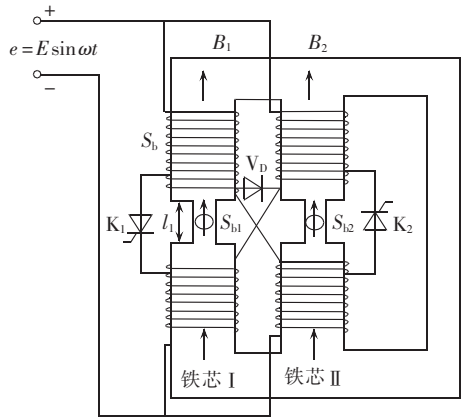


图1 磁控电抗器结构原理图

Fig.1 Structural diagram of MCR

当磁控电抗器接入交流系统中,通过外围控制系统控制电抗器绕组环路中的直流励磁电流大小可以改变电抗器铁芯磁导率,从而达到改变磁控电抗器等效电感的目的。

设置为高占空比,利用整流电路为控制回路输出大的直流控制电流,快速增大直流分量,加快励磁速度;在正常运行时,使 IGBT 工作在较低占空比下,控制相应的 PWM 脉冲宽度,提供维持磁控电抗器工作所需的直流控制电流即可;需要快速去磁降低容量时,可通过改变 IGBT 的导通关断情况,将 IGBT 调至高占空比状态,使励磁绕组通过反向逆变电路向交流侧输送能量,进而快速降低励磁电流。

2.1 快速励磁实现过程

当系统需要快速增大磁控电抗器容量时,即需要提高磁控电抗器的直流励磁电流,使磁控电抗器铁芯尽可能快地达到饱和,直流励磁电流越大,其响应速度也越快。

励磁过程相当于一个整流过程。当系统检测到需要增大容量的信号后,利用 PWM 使 IGBT 转换为高占空比状态,并控制 IGBT 的导通时间,使其通过整流过程输入大的正向直流控制电流,快速增大磁感应强度直流分量,以实现快速励磁作用。

图 5 所示为快速励磁过程中电流的流向图。该过程中 IGBT 处于高占空比状态,输出较大直流励磁电流。由于 IGBT 响应速度快,可迅速导通关断。当交流电压源输入正向电压时,控制 V_{T1} 、 V_{T4} 导通;当交流电压源输入反向电压时,控制 V_{T2} 、 V_{T3} 导通。

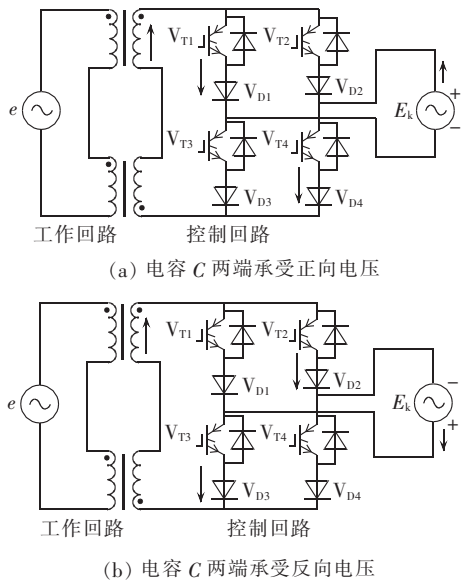


图 5 励磁过程电路图(整流)

Fig.5 Excitation process(rectification)

2.2 稳态过程

在磁控电抗器达到所需容量时,利用 PWM 控制调节 IGBT 至低占空比,开关管导通情况与励磁过程相同。根据所需容量对应的励磁电流大小,控制相应 PWM 的脉冲宽度,使整流电路输出所需的正向直流励磁电流,在考虑维持电路损耗的基础上,使磁控电抗器的输出容量维持在系统所需的某个

稳定数值上。

2.3 快速去磁实现过程

当系统需要快速减小磁控电抗器的工作容量时,迅速改变 IGBT 导通关断情况,并且将 IGBT 调至高占空比状态,通过 PWM 控制使励磁绕组中储存的能量经反向逆变电路向交流侧传输,进而快速降低直流励磁电流,实现快速退磁。

图 6 所示为去磁过程中 2 种导通模式下的电流流向图。对于去磁状态而言,与励磁状态相反,相当于一个逆变过程。其中储存有大量能量的励磁绕组相当于直流源,当交流电压源输入正向电压时,控制 V_{T2} 、 V_{T3} 导通;当交流电压源输入反向电压时,控制 V_{T1} 、 V_{T4} 导通。

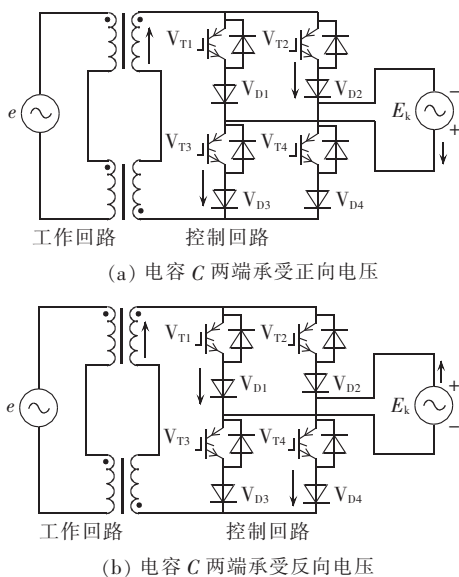


图 6 去磁过程电路图(逆变)

Fig.6 Demagnetization process(inversion)

整个去磁过程中,逆变产生的交流电压的方向与交流电压源的方向相反,使原有直流励磁电流快速下降。该过程也可看作是磁控电抗器向电源侧反向输送能量,与利用串入大电阻实现快速退磁相比,这种方法可使退磁速度更快,且不损耗能量。

可知该 IGBT 组成的整流电路能满足电能的双向流动,不仅可以在需要励磁时通过整流输入直流控制电流,还可以在需要去磁时通过逆变向交流侧输送电能,实现环保利用。

3 仿真试验分析

为了对磁控电抗器的响应特性进行分析,本文根据磁控电抗器的等效电路模型建立仿真模型。

磁控电抗器快速响应特性仿真模型见图 7,主要包括两部分:左边部分采用了 2 个结构完全相同的饱和变压器来模拟其铁芯的饱和特性^[9],右边部

分为 1 个由 IGBT 构成的全控整流桥实现的直流控制回路,提供各种运行状态下所需的直流控制电流。

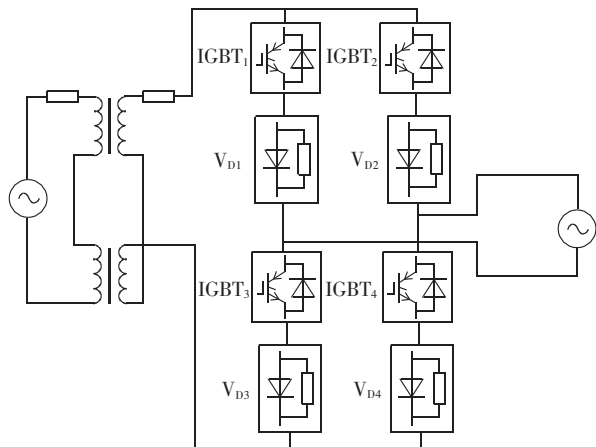


图 7 快速响应的磁控电抗器仿真模型

Fig.7 Simulation model of MCR with fast response structure

磁控电抗器仿真模型的工作电源电压为 380 V,容量为 4 kW。通过仿真模拟磁控电抗器从空载到满载,并在稳定工作一定时间后由满载降为空载的运行过程。

图 8(a)、(b)分别为未采用、采用快速响应结构时,普通外励磁电抗器的工作电流响应波形,以及励磁及去磁时的局部放大波形。

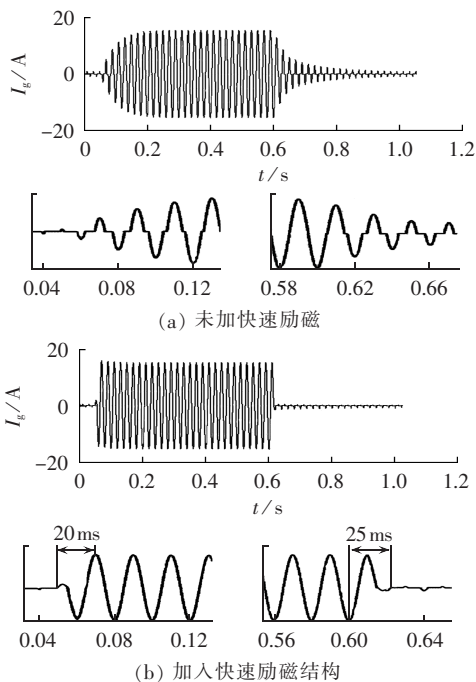


图 8 采用和不采用快速响应结构时,磁控电抗器的工作电流波形

Fig.8 Simulative waveform of working current for MCR with and without fast response structure

由图 8 可见,磁控电抗器在 0.1s 时从空载加负,并在达到满容量后于 0.6s 从满容量降至空载的

响应波形;加入快速响应结构的磁控电抗器工作电流 I_g 在 0.05s 时从 0 正向增大到额定容量仅需 20ms,且从额定容量降为 0 所需时间也在 30ms 以内。

为了对所提出方法及仿真进行验证,建立了相应的小容量磁控电抗器快速响应模型,模型电抗器的额定电压及容量与仿真一致,为 380 V/4kW。利用示波器对磁控电抗器容量调节过程进行测量记录,得到工作电流响应波形如图 9 所示(图中电流转化为电压表示)。

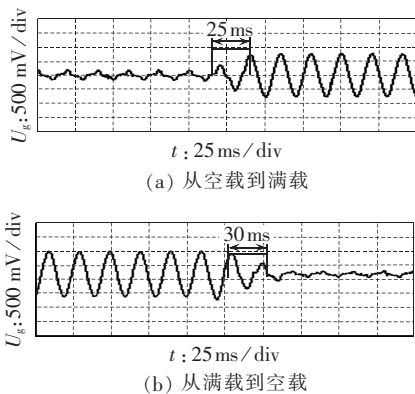


图 9 采用快速响应结构时,磁控电抗器的试验工作电流波形

Fig.9 Experimental waveform of working current for MCR with fast response structure

由试验波形可知,加入快速响应结构的磁控电抗器励磁与去磁过程耗时均在 30 ms 以内,与仿真结果吻合,验证了所提出结构的有效性。

4 结语

通过仿真及试验验证,本文提出的基于 IGBT 控制的快速响应结构,对于提高磁控电抗器响应速度有着很明显的提高作用,可将响应时间限制在 30 ms 以内,有效地弥补了磁控电抗器的响应缺陷。

对于电压等级更高的情况下,可利用多组 IGBT 串联分压的形式提高直流励磁回路的耐压能力,以适应磁控电抗器在特高压领域的推广。

参考文献:

- [1] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1999.
- [2] 田翠华,陈柏超. 磁控电抗器在 750kV 系统中的应用[J]. 电工技术学报,2005,20(1):31-37.
- TIAN Cuihua,CHEN Baichao. The application of magnetic control reactor in 750kV power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2005,20(1):31-37.
- [3] BELYAEV A N,SMOLOVIK S V. Steady-state and transient stability of 500 kV long-distance AC transmission lines with magnetically controlled shunt reactors[C]//IEEE Power Tech Conference. St. Petersburg, Russia;IEEE,2005:534-538.
- [4] 赵士硕,尹忠东,刘海鹏. 快速响应磁控电抗器的新结构与控制

- 方法[J]. 中国电机工程学报,2013,33(15):149-155.
- ZHAO Shishuo,YIN Zhongdong,LIU Haipeng. Physical design and control method of fast response magnetically controlled reactors[J]. Proceedings of the CSEE,2013,33(15):149-155.
- [5] 刘海涛,刘瑜. 增加抽头比提高磁阀式可控电抗器响应速度的方法[J]. 电工技术,2011(11):68-69.
- LIU Haitao,LIU Yu. Improving the response speed of the magnetic valve controllable reactor through increasing the ratio of the tap[J]. Electrotechnics,2011(11):68-69.
- [6] 孔宁. 基于 MCR 的特高压交流输电系统的无功电压控制[D]. 北京:华北电力大学,2011.
- KONG Ning. Reactive power and voltage control of UHV AC transmission system based on MCR[D]. Beijing:North China Electric Power University,2011.
- [7] 李和明,刘海鹏,尹忠东. 基于磁控电抗器的控制系统设计[J]. 高电压技术,2014,40(1):275-281.
- LI Heming,LIU Haipeng,YIN Zhongdong. Design of control system based on magnetically controlled reactor[J]. High Voltage Engineering,2014,40(1):275-281.
- [8] 陈绪轩,陈柏超,田翠华,等. 双级饱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.
- [9] 赵志强,李众祥,张喜乐. 磁阀式可控并联电抗器模型试验研究[J]. 电力自动化设备,2007,27(1):68-71.
- ZHAO Zhiqiang,LI Zhongxiang,ZHANG Xile. Test of magnetic valve controllable parallel reactor model[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(1):68-71.
- [10] 邢海瀛,陈柏超,张亚迪,等. 快速响应磁控电抗器抑制特高压操作过电压研究[J]. 电力自动化设备,2009,29(1):15-18.
- XING Haiying,CHEN Baichao,ZHANG Yadi,et al. UHV switching overvoltage suppression by quick response magnetically controlled reactor[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(1):15-18.
- [11] 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.
- [12] 刘海鹏,尹忠东,赵士硕. 磁控电抗器快速性研究[J]. 电力电子技术,2013,47(1):15-17.
- LIU Haipeng,YIN Zhongdong,ZHAO Shishuo. Research on the quickness of magnetically controlled reactor [J]. Power Electronics,2013,47(1):15-17.

作者简介:



袁 剑(1992—),男,江西上饶人,硕士研究生,主要从事电力设备在线检测及无功补偿装置研究(E-mail:403477446@qq.com)。

Fast response technology of MCR

YUAN Jian¹,TIAN Cuihua¹,TIAN Cheng¹,CHEN Baichao¹,

WANG Jun^{1,2},NIE Dexin²,CAI Wei²,YUAN Jiaxin¹

(1. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China;2. Wuhan NARI Limited Liability Company,State Grid Electric Power Research Institute,Wuhan 430074,China)

Abstract: Due to the control flexibility,MCR(Magnetically Controlled Reactor) is widely used in the reactive-power compensation,overvoltage limitation,etc.,but the slow response limits its applications. Its working principle and response mechanism are analyzed and a fast response structure is designed to improve its response speed,which adopts IGBT circuit to control the magnitude and direction of DC excitation current for fast excitation and demagnetization. The simulative and experimental results show that,with the designed structure,the excitation time and demagnetization time of MCR are both less than 30 ms,effectively enhancing the response performance of MCR.

Key words: magnetically controlled reactor; rapid excitation; fast demagnetization; Insulated Gate Bipolar Transistors(IGBT); rectification