

电力系统桥式短路故障限流器研究

霍晓玉, 孙频东, 龙 鹏, 王思聪

(南京师范大学电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 提出一种新颖的限制电力系统故障电流的桥式电路, 对该电路的工作原理、电路结构和工作方式进行详细的分析, 并给出了限流电路中各支路的电流关系, 对电路的直通、开路和变阻 3 种工作方式作出说明, 重点分析了在变阻工作模式下, 对负载短路电流的限制和分流. 考虑了当桥式限流电路中的开关管栅极加入脉冲信号后, 对负载电压和电流的谐波影响, 以及限流电感中串入电阻后对开关管占空比的不同要求、对桥式电路分流性能的影响等. 最后给出了部分仿真波形和计算值.

[关键词] 限流器, 电力系统, 短路故障, 桥式电路

[中图分类号] TM761 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2015)02-0009-06

Study on Bridge Type Fault Current Limiter Used in Power System

Huo Xiaoyu, Sun Pindong, Long Peng, Wang Sicong

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: A new kind of bridge type fault current limiter (FCL) which is used in power system has been presented. Detailed analysis has also been made including circuit's principle, structure and working mode. The relationship of current in the branch of FCL and three types of working mode, that is, conduction without resistance, open circuit, and conduction with resistance, when the FCL in working condition are provided. In the mode of conduction with resistance, shunting effect has been considered which can reduce the fault current flow through the limiting inductance. Considering when IGBT switching works with different duty ratio, the output voltage, current and their harmonic component will also be changed. At end of this paper, part of the simulation and calculate result is given.

Key words: fault current limiter, power system, short circuit, bridge circuit

近年来,随着工农业生产规模的不断扩大、新能源技术的飞速发展和电网互联技术的不断进步,电力系统的规模和容量正在变大,这对电力系统的安全、稳定和可靠运行提出了更高的要求. 电网短路是电力系统中常见的一种故障,造成的危害非常巨大,如何将电网短路电流限制在一个合理的范围之内,成为当前电力网络设计的一个重要任务. 最新采用的方法是在敏感位置加装故障电流限流器(fault current limiter, FCL). 从原理上讲,故障电流限流器可采用各种不同的器件和拓扑结构,例如串联 L-C 谐振式故障限流器^[1]、双 IGBT 开关的串联故障限流器^[2]、饱和变压器耦合型故障限流器以及含自关断器件的桥式故障限流器^[3]等,不同的器件和结构有不同的应用和特点.

此外,故障限流器的安装位置也是一个值得研究的问题. 有研究^[2,3]表明,可将故障电流限流器安装在发电机出口,以保护发电机设备;安装在母线的联络处,用以实现母线并列运行;安装于馈电进线处,如变压器的低压侧,可作为短路的后备保护及用作地区电厂的上网保护;还可应用于馈电的出线处,以维持母线电压基本稳定,保障非故障用户或设备的用电质量.

1 限流器电路

限流电路有很多种类,常用的串联型限流器由电子电路构成^[4],在电子限流器件两端并联限流电感,

收稿日期: 2014-09-01.

基金项目: 南京师范大学科研基金(2008111XLH0069).

通讯联系人: 孙频东, 副教授, 研究方向: 电力电子与电气传动. E-mail: 61019@njnu.edu.cn

当电子开关处于不同的工作状态时,电路呈现出不同的阻抗特性,可起到控制电流的作用.

1.1 限流原理及限流器的结构

图 1 为一个串联了限流器的电路图. 正常工作时,开关 K 闭合,限流器的接入不影响电源对负载的正常供电;当控制电路检测到负载端有过流或发生断路时,控制电路将开关 K 断开,电路中串入电感 L ,使得回路阻抗变大,负载端的短路电流受到限制.

1.2 双向电子开关的构成

如图 2 所示,本文的限流器分为限流电感和限流桥 2 个部分. 限流桥中需要使用电子开关,通常由单个电子器件构成的开关是单向的,即电流只能从一个方向通过开关,为使其在交流电路中正常使用,需采用双向电子器件,常用的双向电子开关结构如图 3 所示. 在双向电子开关两端并联限流电感,即构成了图 1 所示的限流器主电路. 当控制电路检测到负载电流过大或出现短路时,则立即停止向电子开关发送脉冲信号,电子开关随即处于开路状态,主电路被限流电感限流.

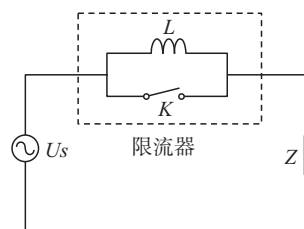


图 1 串有限流器的电路

Fig. 1 Circuit with fault current limiter

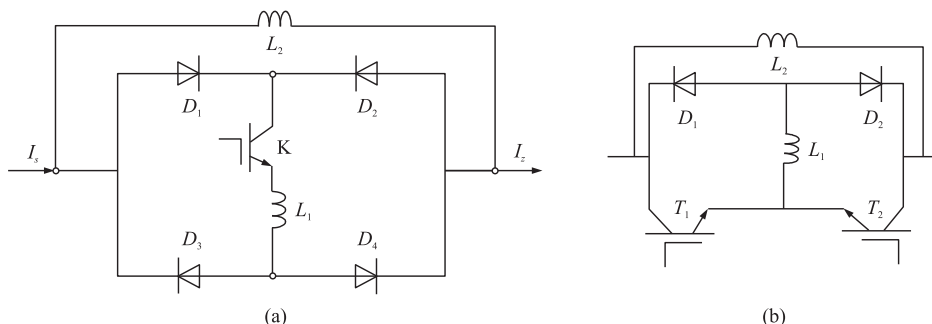


图 2 2 种不同结构的限流器原理图

Fig. 2 Two kind of schematic diagram of FCL

在实际使用中还应考虑对电流上升速度的限制. 采用如图 2 所示的限流器电路,由于在桥路上使用了电感 L_1 ,可在一定范围内限制电流的上升速度. 图 2(a)采用单个开关控制限流器的通断,控制电路简单;图 2(b)采用 2 个 IGBT 开关对限流器进行控制,具有更好的灵活性,但控制电路和控制策略更复杂.

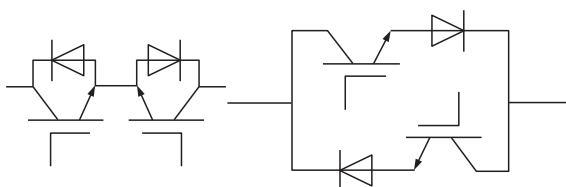


图 3 用 2 个 IGBT 管构成的双向开关

Fig. 3 The bi-direction switch with 2 IGBT

文献[5]中的限流器原理如图 4(a)所示.

在限流桥 IGBT 两端并联一个电阻,以实现当 IGBT 关断后桥路能继续导通,呈现出一个等效感性负载,和桥外支路 L_2 一起承担短路电流,使流过 L_2 的短路电流减少^[6,7]. 当在 IGBT 的门极加入高频脉冲后,桥式限流器可实现变阻的功能. 其缺点是当 IGBT 通断切换时,支路电流的毛刺较大. 本文对该电路进行了改进,采用图 4(b)所示的结构,在 IGBT 的源漏极并联电容 C ,当 IGBT 通断切换时,能够消除 IGBT 开关的毛

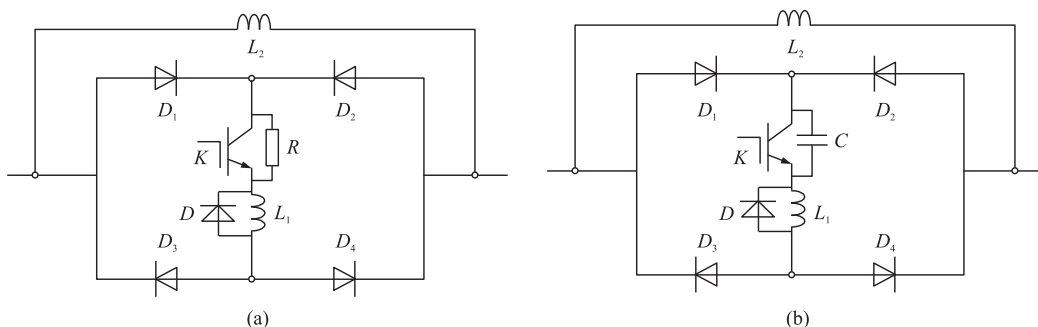


图 4 用 IGBT 构成的限流器

Fig. 4 FCL use IGBT as switch

刺,使外部并联支路的电流变得平滑,且由于电容 C 的充电,桥路外电感 L_2 两端的电压上升变缓.因此,在电力系统发生短路故障时,该种限流器能够在将短路电流快速限制到继电保护要求的数值范围内的同时,也保障限流装置自身的安全.

2 限流桥中的电流关系及元件参数选择

2.1 桥路中的电流关系

图 5 所示为桥式限流器的雏形^[8],图中各电流之间的关系如式(1)~(6)所示,

$$I_L = i_{D_1} + i_{D_2}, \quad (1)$$

$$I_L = i_{D_3} + i_{D_4}, \quad (2)$$

$$i_S = i_{D_1} - i_{D_3}, \quad (3)$$

$$i_Z = i_{D_4} - i_{D_2}, \quad (4)$$

$$u_{ab} = u_S - u_Z, \quad (5)$$

$$I_L \approx \frac{U_{z\max}}{Z}. \quad (6)$$

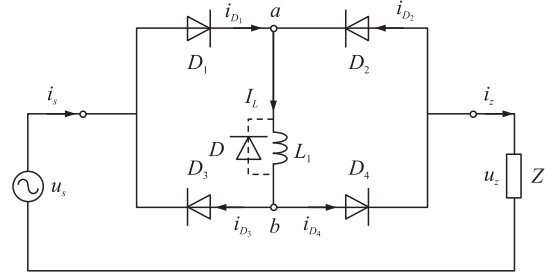


图 5 桥式短路故障限流器的工作原理图

Fig.5 Schematic diagram of bridge type FCL

当电感 L_1 被置于直流电路中时, $U_{ab} \approx 0$. 正半周时,负载电流经 D_1 、 L_1 、 D_4 流向负载, D_2 、 D_3 续流, 电流关系如式(7)、式(8)所示:

$$i_{D_1} = i_{D_4} = \frac{1}{2}(I_L + i_Z), \quad (7)$$

$$i_{D_2} = i_{D_3} = \frac{1}{2}(I_L - i_Z). \quad (8)$$

负半周时,负载电流经 D_2 、 L_1 、 D_3 流向负载, D_1 、 D_4 续流; 流过二极管的电流如式(9)、式(10)所示:

$$i_{D_2} = i_{D_3} = \frac{1}{2}(I_L + i_Z), \quad (9)$$

$$i_{D_1} = i_{D_4} = \frac{1}{2}(I_L - i_Z). \quad (10)$$

当电感 L_1 选取适当参数时,电感 L_1 中流过的电流就近似为负载电流,并在负载电流为峰值电流附近时进行充放电,桥路中二极管 $D_1 \sim D_4$ 的导通角接近 360° . 在电感 L_1 两端并联二极管 D 后,电感 L_1 中电流通过二极管 D 进行续流,流过二极管 D 中的最大电流为负载电流的峰值,桥路中二极管 $D_1 \sim D_4$ 的导通角减小到 180° ,最大电流值不变,仍为负载电流的峰值. 电感 L_1 中的电流变化如式(11)所示:

$$i_L(t) = i_{Lm} e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (11)$$

式中, i_{Lm} 为电感电流的峰值, $\tau = L/r$ 为时间常数. 由于放电回路的等效电阻 r 值非常小,故时间常数 τ 值较大,电感电流 $i_L(t)$ 下降较缓慢,在一个工频周期内变化较小.

2.2 参数选择

桥式限流电路中电感 L_1 的参数选取十分重要^[9]. 设发生短路故障前系统运行于额定负载,考虑最不利的情况,发生短路故障时,正好处于交流电压的峰值附近,设峰值出现的时刻为 t_p ,短路持续时间为 t_d ,

在 $t_p - \frac{t_d}{2}$ 到 $t_p + \frac{t_d}{2}$ 期间,外电路发生短路,此时,流过电感 L_1 的电流为:

$$I_{L1m} = \sqrt{2} I_{L1} + \int_{t_p - t_d/2}^{t_p + t_d/2} \frac{\sqrt{2} U \sin(\omega t + \varphi)}{L_1} dt = \sqrt{2} I_{L1} + \frac{2U}{\omega L_1} \sin \frac{\omega t_d}{2}. \quad (12)$$

电感中的储能可以表示为:

$$E_L = \frac{L_1}{2} \left(\sqrt{2} I_{L1} + \frac{2U}{\omega L_1} \sin \frac{\omega t_d}{2} \right)^2. \quad (13)$$

对 E_L 求对 L_1 的导数,并令 $\frac{dE_L}{dt} = 0$,可得式(14)所示结果:

$$L_1 = \frac{\sqrt{2} U}{\omega I_{L_1}} \sin \frac{\omega t_d}{2}. \tag{14}$$

此时所求出的 L_1 为最少储能对应的电感,是一个最佳值. 将 L_1 代入式(12),可得:

$$I_{L_{1m}} = 2\sqrt{2} I_{L_1}. \tag{15}$$

桥路中的二极管和开关管最大工作电流值如式(16)所示:

$$I_{mD_1 \sim D_4} = I_{mIGBT} = 2\sqrt{2} I_{L_1}. \tag{16}$$

3 桥式限流器的分流性能

在图 6 所示的限流器中,ZnO 器件起到过电压保护作用. 系统正常运行时,IGBT 器件导通,限流器呈现的阻抗近似为零,限流器不对系统有任何作用;在短路故障发生后,IGBT 器件截止,限流桥呈现高阻抗,限制短路电流,最终由断路器切断短路电流,由 ZnO 吸收切断短路电流时所产生的操作过电压,完成限流保护^[10]. 因此,可通过控制 IGBT 的通断,来确定负载电流是否通过限流器. 若在 IGBT 的栅极加入 PWM 脉冲,且改变脉冲信号的占空比,由此改变限流器的等效电阻值,使流过限流电感 L_2 的电流值发生改变,对整个电路而言就将具有灵活的限流作用. 在图 6 所示电路中,若选用如表 1 所示的 2 组电路参数,则占空比 σ 和电流分流比之间的关系如图 7 所示.

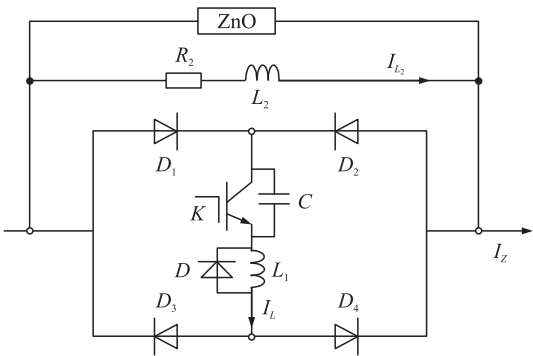


图 6 带 IGBT 开关的限流器
Fig. 6 FCL with IGBT switch

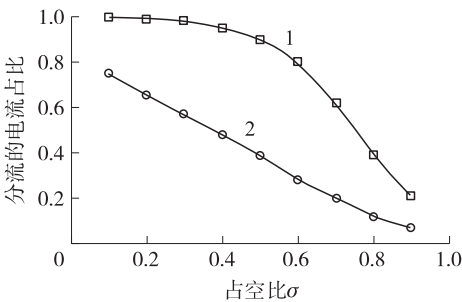


图 7 占空比和电流分流比之间的关系
Fig. 7 The relationship of duty ratio and current ratio

表 1 限流器参数
Table 1 The parameter of FCL

内部电感 L_1/mH	外部电阻 R_2/Ω	外部电感 L_2/mH	电容 $C/\mu\text{H}$	负载电阻 R_L/Ω
10	10	10	20	10
10	0	10	20	10

由图 7 可见,曲线 1 的外部限流电阻值取 0,其脉冲占空比和电流分流比曲线中间部分陡峭,控制性能较差;而在曲线 2 中,外部支路加入了限流电阻,曲线相对平缓,因此其控制性能相对较好. 当给 IGBT 加上 PWM 脉冲信号时,在取不同占空比的情况下,电流的仿真波形如图 8 所示. 假设外部负载电流不变,

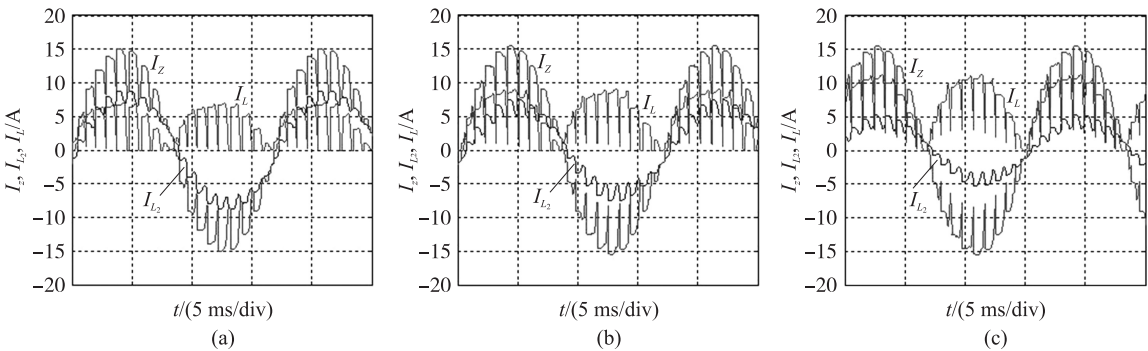


图 8 不同占空比下各支路电流的波形
Fig. 8 Branch currents under different duty ratio

分别取占空比为 20%、40%、60%,负载电流 I_z 、流过限流桥的电流 I_L 和外部限流电感中的电流 I_{L_2} 变化如图 8(a)、(b)、(c) 所示。从图可知,在总负载电流不变的情况下,随着占空比的变化,流过限流器的电流和流过外部限流电感的电流发生明显变化,分流效果明显。若桥外串联支路由 RL 电路组成,支路阻抗 Z 的模保持不变,改变阻抗的相角,用实验观察桥外支路对总负载电流的分流情况,如图 9 所示。当阻抗相位角 θ 分别取 0° 、 10° 、 20° 、 30° 、 50° 和 70° ,外部负载阻抗的模取值为 $10\ \Omega$ 时,桥外支路的分流比如表 2 所示。

表 2 桥外支路阻抗角变化对分流比的影响

Table 2 Shunt ratio affected by resistance angle of branch outside the bridge

阻抗相位角 $\theta/^\circ$	负载阻抗 R/Ω	电感 L/mH	分流比 i^*				
			$\sigma = 10\%$	$\sigma = 20\%$	$\sigma = 30\%$	$\sigma = 50\%$	$\sigma = 70\%$
0	10.00	0	0.770	0.713	0.640	0.490	0.290
10	9.85	5.5	0.735	0.7	0.644	0.465	0.230
20	9.40	11.0	0.72	0.680	0.620	0.440	0.220
30	8.70	16.0	0.73	0.683	0.620	0.440	0.220
60	5.00	27.6	0.8	0.750	0.690	0.490	0.234
90	0	31.8	0.92	0.910	0.840	0.590	0.260

注: $i^* = I_{L_2}/I_z$

从表 2 可见,在同一占空比下,分流比随阻抗角的增加略有增加,总体变化不大。随着占空比的增加,桥外支路分流比将会明显变少,与预计值相符。因此,在选择桥外支路的阻抗参数时,主要考虑其分流比随占空比变化的特性曲线。

图 9 中,支路阻抗 Z ,支路阻抗的模 $|Z|$ 和阻抗相位角 θ 如式(17)~(19)所示:

$$Z = R + j\omega L, \quad (17)$$

$$|Z| = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad (18)$$

$$\theta = \arctan \frac{\omega L}{R}. \quad (19)$$

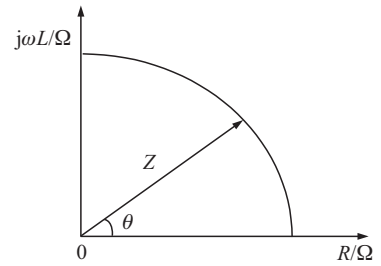


图 9 桥外支路的阻抗角示意图

Fig. 9 Resistance angle

4 输出电压电流的波形和谐波分析

桥式限流器 IGBT 栅极加 PWM 脉冲,取占空比 $\sigma = 50\%$,采用 2 种不同类型的负载——纯电阻负载和感性负载进行比较,负载端输出电压和电流波形如图 10 所示,其中(a)为纯电阻负载时的电压电流波形,(b)为感性负载时的电压电流波形。从图 10 可以看出,感性负载的电流波形平滑度比纯电阻负载的电流波形平滑度好,感性负载两端电压的脉动大于纯电阻负载。

对图 10 的电压和电流波形进行 FFT 分析,得到如图 11 和图 12 所示的结果。图 11 中,(a)为纯电阻

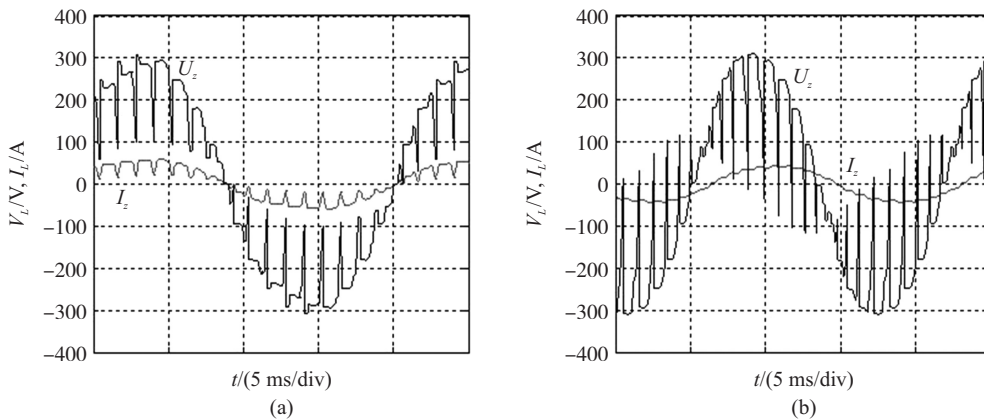


图 10 2 种不同负载情况下的电压和电流波形

Fig. 10 Voltage and current waveforms under two different loads

负载时电压波形的谐波分布,(b)为感性负载时电压波形的谐波分量分布.图 12 中,(a)为纯电阻负载时电流的谐波分布,(b)为感性负载时电流波形的谐波分量分布.可知纯电阻负载时,电压谐波畸变率为 25.39%,电流谐波畸变率为 25.38%;感性负载时,电压畸变率为 41%,电流畸变率为 4.73%.由图可见电压或电流波形在 1 000 Hz 附近有一个较大的谐波分量,这主要是由 IGBT 的开关频率所致.

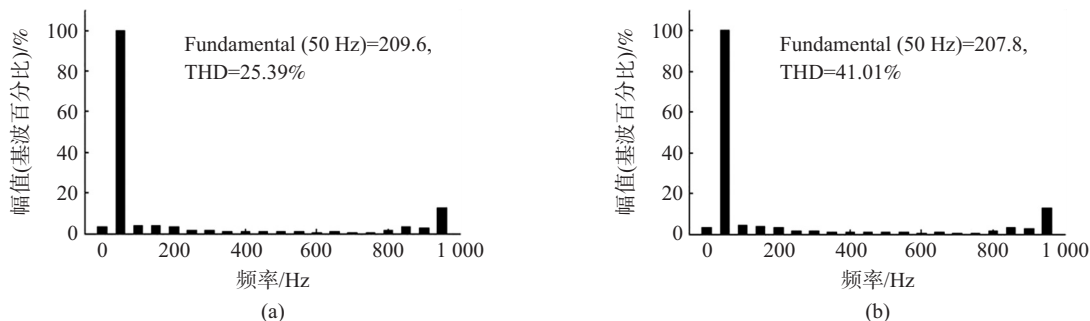


图 11 2 种不同负载情况下的电压谐波分析

Fig. 11 Total harmonic distortion of voltage under two different loads

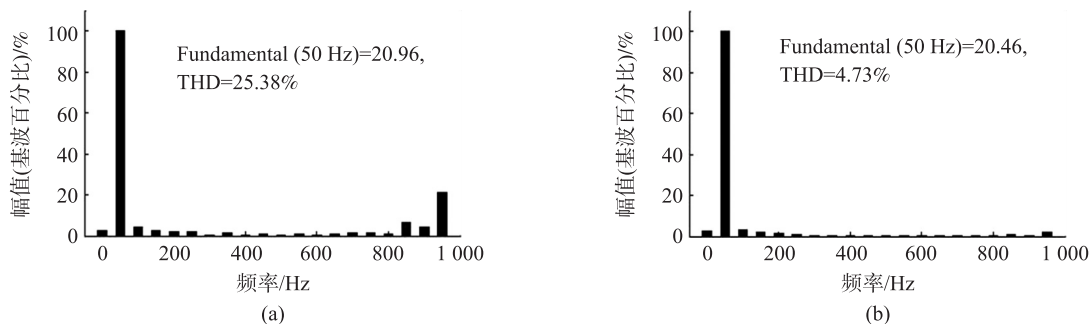


图 12 2 种不同负载情况下的电电流谐波分析

Fig. 12 Total harmonic distortion of current under two different loads

5 结语

本文提出的桥式故障限流电路具有结构简单、控制元件少的优点,整个限流电路只有一个被控器件,当检测电路检测到有断路或过电流故障时,根据故障的性质或短路电流的大小灵活处理.处理过程中,既可将桥式电路断开,串入最大限流阻抗限制外部较大的短路电流,也可采用类似于并联等效可变电阻的方法来限制过流或轻度短路电流,实现尽量减少故障范围,保障用电安全.采用 PWM 脉冲信号控制开关管实现桥式电路变阻时,会在输出端产生谐波,经对相关电压和电流作 FFT 分析,其中谐波分量所占的比重并不是很大.

[参考文献] (References)

- [1] 石晶,邹积岩,何俊佳. 电力系统的限流串联补偿原理与实现[J]. 华中理工大学学报,1999,27(8):75-80.
Shi Jing,Zou Jiyan,He Junjia. The principle of a fault current limiter(FCL)with series compensation and its achievement[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology,1999,27(8):75-80. (in Chinese)
- [2] Alexander Abramovitz,Keuye Ma Smedley. Survey of solid-state fault current limiters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2012,27(6):2 770-2 782.
- [3] 金庆忍,陈红坤,杨志平. 故障限流器在电力系统中安装位置综述[J]. 电力建设,2011,32(2):52-55.
Jin Qingren,Chen Hongkun,Yang Zhiping. Review of locations of fault current limiter in power system[J]. Electric Power Construction,2011,32(2):52-55. (in Chinese)
- [4] 莫育杰,江道灼,田中山,等. 新型固态限流器中饱和型耦合变压器的设计[J]. 电力系统自动化,2012,36(17):103-108.
Mo Yujie,Jiang Daozhuo,Tian Zhongshan,et al. Design of saturated coupling transformer in a new bridge-type solid state fault current limiter[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(17):103-108. (in Chinese)

(下转第 87 页)

- [7] 唐晓强,王红旭,陈庆兰. 基于 GPRS-Zigbee 的路灯监控系统设计[J]. 数据采集与处理,2010(S1):196-199.
Tang Xiaoqiang,Wang Hongxu,Chen Qinglan. Street lamp monitoring system design based on GPRS-ZigBee[J]. Journal of Data Acquisition & Processing,2010(S1):196-199. (in Chinese)
- [8] 刘仁杰,姚星周. Windows 环境下多线程多串口通信的实现[J]. 工业控制计算机,2011,24(5):32-33.
Liu Renjie,Yao Xingzhou. Serial communication use of multithreading technique in Windows system[J]. Industrial Control Computer,2011,24(5):32-33. (in Chinese)
- [9] 李正周,方朝阳,顾园山,等. 基于无线多传感器信息融合的火灾检测系统[J]. 数据采集与处理,2014,29(5):694-698.
Li Zhengzhou,Fang Chaoyang,Gu Yuanshan,et al. Fire detection system based on wireless multi-sensor information fusion[J]. Journal of Data Acquisition & Processing,2014,29(5):694-698. (in Chinese)
- [10] 李战明,李振兴. ZigBee 技术在人员搜救系统中的应用[J]. 电子测量与仪器学报,2011,25(2):186-190.
Li Zhanming,Li Zhenxing. Application of ZigBee technology in rescue system[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument,2011,25(2):186-190. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]

(上接第 14 页)

- [5] 崔新新. 单自关断开关桥式短路故障限流器拓扑与控制策略[D]. 南京:南京师范大学电气与自动化工程学院,2013.
Cui Xinxin. Since the cut-off switch pipe bridge type circuit fault current limiter topology and control strategy[D]. Nanjing: School of Electrical and Automation Engineering,Nanjing Normal University,2013. (in Chinese)
- [6] 费万民,吕征宇,吴兆麟,等. 三相接地系统短路故障限流器及其控制策略[J]. 电力系统自动化,2002,26(8):33-37.
Fei Wanmin,Lu Zhengyu,Wu Zhaolin,et al. Short circuit fault current limiter used in grounded three-phase power system and its control mode[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(8):33-37. (in Chinese)
- [7] 费万民,吕征宇,谭凌云,等. 三相不接地系统短路故障限流器的研究[J]. 电力系统自动化,2002,26(16):48-51.
Fei Wanmin,Lu Zhengyu,Tan Lingyun,et al. Research of short circuit fault current limiter used in three-phase ungrounded power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2002,26(16):48-51. (in Chinese)
- [8] 费万民,张艳丽,吕征宇. 基于 IGCT 的新型固态桥式短路故障限流器[J]. 电力系统自动化,2006,30(7):60-64.
Fei Wanmin,Zhang Yanli,Lu Zhengyu. IGCT-based novel solid state bridge type fault current limiter[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(7):60-64. (in Chinese)
- [9] 费万民,张艳丽,孟照娟,等. 基于自关断器件的三相不接地系统短路限流器及其实验研究[J]. 电工技术学报,2007,22(5):64-70.
Fei Wanmin,Zhang Yanli,Meng Zhaojuan,et al. Fault current limiter based on self-turn-off devices for three-phase ungrounded power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2007,22(5):64-70. (in Chinese)
- [10] 张艳丽,费万民,吴勤. 基于单可控开关的短路故障限流器[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):46-50.
Zhang Yanli,Fei Wanmin,Wu Qin. Fault current limiter based on single controllable switch[J]. Electric Power Automation Equipment,2009,29(8):46-50. (in Chinese)

[责任编辑:严海琳]