

基于半控桥的三相接地系统 短路限流器及其控制方法

张艳莉¹, 费万民^{1,2}, 姜宁秋¹, 吕征宇³

(1. 南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042; 2. 南京航空航天大学
自动化学院, 江苏 南京 210016; 3. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 提出了一种用于三相接地系统的基于半控桥的新型短路故障限流器拓扑结构。对新型限流器在单相接地短路、两相接地短路和三相短路状态下的控制方法和限流工作原理进行了详细介绍。该限流器中含有一对功率二极管组成的桥路, 可以自动为直流电感提供续流通路, 因此, 在短路故障发生并被检测到之后, 只需要控制关断与故障相相连接的桥臂上的开关管, 则故障相即可退出系统, 非故障相仍然正常供电。采用 PSIM6 软件, 对各种短路模式下的限流方法及限流效果进行仿真研究。制作了小容量的半控桥式限流器实验装置, 并进行了详细的实验研究, 给出了 3 种短路模式下主要变量的实验波形。仿真和实验结果一致, 验证了所提限流器及其控制策略的有效性和实用性。

关键词: 自关断器件; 半控整流桥; 短路限流器

中图分类号: TM 713

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)06-0051-05

0 引言

随着电力系统规模的不断扩大和互联程度的不断提高, 在有些点上, 短路电流水平可能超过断路器的断开容量。传统的解决方案, 有主要变电站的扩建、更换容量更大的断路器, 或者将互联的系统分开等, 这需要花费很高的代价并产生一些副作用, 而且会降低系统的可靠性。最好的解决方案, 或许是采用短路故障限流装置^[1-13]。

近年来, 研究者们提出了多种短路故障限流器 FCL(Fault Current Limiter)。在这些限流器中, 基于电力电子技术的固态桥式短路故障限流器, 具有操作灵活、可靠性高、成本低廉、电压降小等显著优点。在这类限流器中, 基于自关断器件的桥式短路故障限流器, 在短路故障发生并被检测到之后, 能够快速切断直流电感的电压通路, 可以大幅减小直流电感的尺寸, 不但有利于减小系统的体积、重量和成本, 还能够显著改善限流器的动态性能, 但基于自关断器件的全控桥式短路故障限流器存在主电路和控制过程较为复杂的缺点。文章首先分析全控桥式短路故障限流器的缺点, 在此基础上提出新的半控桥式限流器的拓扑结构, 并对其原理和控制方法进行了仿真和实验研究, 给出了研究结论。

1 全控桥式限流器的原理与缺点

图 1 所示为基于自关断器件的单相桥式短路故障限流器^[14], 由自关断器件(此处以 IGCT 为例)整流

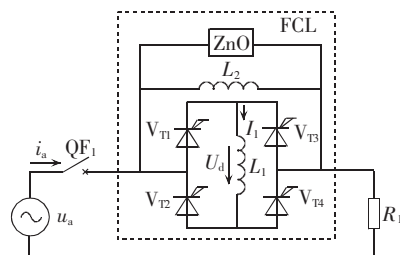


图 1 基于自关断器件的单相桥式短路故障限流器拓扑结构

Fig.1 Topology of FCL based on single-phase rectifier bridge with self-off device

桥、直流电感 L_1 、限流电感 L_2 、氧化锌 (ZnO) 过电压吸收器、断路器 QF_1 等组成。 u_a 为交流电源, R_1 为负载阻抗。在正常状态下, 桥路中的 4 个开关管均被触发导通, 整流桥路工作于不控整流状态。刚上电时, 直流电感 L_1 中的电流为零, 由于 L_1 位于整流桥的直流侧, 其电压不可能为负, 所以其中电流在电压作用下不断上升, 直到达到负载电流的峰值, 这就是电源对 L_1 的充磁。在 L_1 中的电流达到负载电流峰值之后, 进入稳态, 在负载不变的情况下, L_1 中的电流维持不变。在短路故障发生时, 短路电流立即上升到 L_1 中电流, 之后的上升速度由 L_1 决定。在检测到短路故障之后, 控制桥路工作于有源逆变状态, 将 L_1 中的电流快速抑制到 0, 然后封锁 $V_{T1} \sim V_{T4}$ 的驱动信号, 桥路退出工作, 短路电流受到 L_2 的限制。 L_1 的取值原则是: 保证在短路故障发生到断开整流桥路这段时间内, L_1 中的电流不超过 2 倍负载电流峰值。

采用有源逆变控制方式的目的是, 是为了使 L_1 中的电流尽快下降到零, 从而保证桥路的切除不会因操作过电压引起桥路的损坏。由于基于自关断器件

的桥路的有源逆变与晶闸管电路差别很大,所以,文献[14]集中研究了基于IGCT的桥式限流器的有源逆变控制要点。自关断器件的采用,大幅减小了 L_1 的电感量和电磁储能,所以从桥路转入逆变状态到 L_1 电流衰减到零的时间极短,换言之,采用有源逆变控制方式的意义不大,而采用续流式控制方式更加合适。续流式控制的方法是:在短路故障发生并被检测到之后,保持开关管 V_{T3} 、 V_{T4} 处于常通状态,为 L_1 中的电流提供续流通路,封锁 V_{T1} 、 V_{T2} 的触发信号,切断电源电压经过整流桥加在 L_1 的途径,短路电流由 L_2 限制;另一方面, L_1 中的磁能在 L_1 和开关管 V_{T1} 、 V_{T2} 内阻上消耗,约在半个工频周期内衰减到零。如此一来,开关管 V_{T3} 和 V_{T4} 在短路故障发生前后,均处于触发导通状态,其作用完全等同于二极管,完全可以用二极管取代,这就是所提出的基于半控整流桥的短路故障限流器。

2 新型半控桥式限流器的拓扑结构

基于半控桥的新型短路限流器的电路拓扑结构,如图2(a)所示,与图1基本相同,不同之处在于采用二极管 V_{D1} 、 V_{D2} 代替自关断开关管 V_{T3} 、 V_{T4} 。可以单独应用于单相系统,也可以每相设置一个,如图2(b)所示,应用于三相系统。图2(b)所示方案的优点是:控制简单;故障时仅故障相动作,非故障相不受影响,独立操作,易于处理;便于安装等。缺点是对三相系统,需要6只IGCT、6只功率二极管、3个直流电感、3个限流电感,体积、重量大,成本高,经济性差。

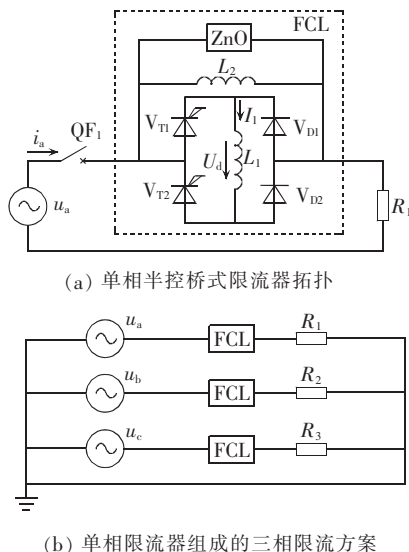


图2 单相半控桥式限流器及其构成的三相限流方案

Fig.2 FCL based on single-phase half-controlled bridge and its three-phase scheme

为了简化系统以减小限流器的体积、重量,降低成本,提出一种紧凑结构的用于三相接地系统的半控桥式短路故障限流器,其拓扑结构如图3所示。该三相限流器由6个IGCT、2个功率二极管、3个限流电感和1个直流电感组成,其中 QF_a 、 QF_b 、 QF_c 为断路器。在正常状态下,6个IGCT均被正向触发,三

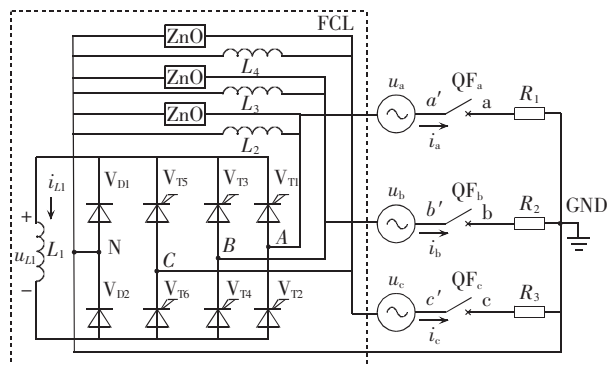


图3 三相接地系统半控桥式短路限流器拓扑结构的紧凑形式

Fig.3 Compact structure of FCL based on half-controlled bridge for three-phase four-wire power systems

相电源通过三相桥路加在直流电感 L_1 和负载上,由于 L_1 接在整流桥路的直流侧,只能承受单向电压,所以, L_1 电流不断增加,直到达到负载电流最大值为止。如果忽略开关管压降和 L_1 的损耗,则在稳态下, L_1 维持在负载电流最大值上, L_1 两端电压为零,所以, A 、 B 、 C 3点之间电压为零,相当于短接起来,为电源的中性点,限流器的存在对系统无不良影响。在短路故障(以三相接地为例)发生后,一方面线电压经过 $V_{T1} \sim V_{T6}$ 组成的桥路,加在 L_1 上,使 L_1 中电流增加,短路电流的上升率受到 L_1 的限制。另一方面,线电压也加在限流电感 L_2 、 L_3 、 L_4 上,从而在限流电感中引起电流。当检测系统检测到短路故障之后,控制切断线电压加在直流电感 L_1 上的通路(具体方法见后文),之后,由限流电感 L_2 、 L_3 、 L_4 限制短路电流。短路电流最终由断路器切除,3个ZnO过电压吸收器用来吸收切断感性短路电流引起的操作过电压。和图2(b)所示的单相结构组成的三相限流器相比,省去了2个直流电感,因而显著减小了限流器的重量和体积。

3 控制方法

在短路故障发生时,人们总是希望尽快地将故障切除,并力图将故障的影响限制在最小的范围内。例如,在发生单相短路时,希望在切除故障相的同时能保持另外2个非故障相正常工作;在发生两相短路故障时,希望在切除2个故障相的同时保持非故障的第3相能正常工作。只有在发生三相短路故障时,才希望完全切断电源。

采用半控桥式结构,由于二极管 V_{D1} 、 V_{D2} 可以随时为直流电感提供续流通路,极大简化了控制方法。

当发生单相接地故障时,此处以a相为例,即图3中的 a' 点和GND点短接,则反相后的a相电压经过自关断开关管 V_{T1} 、 V_{T2} 和二极管 V_{D1} 、 V_{D2} 组成的单相半控桥,加在直流电感 L_1 上,使 L_1 中电流的增加,当 L_1 中电流超过设定值时,只需封锁开关管 V_{T1} 、 V_{T2} 的驱动信号,切除a相电源到 L_1 的通路, L_1 中电流经过 V_{D1} 、 V_{D2} 续流,在大约1个工频周期内,衰减到零。从短路故障发生开始,a相限流电感 L_2 中开始产生

电流,在 V_{T1} 、 V_{T2} 被封锁之后,由 a 相限流电感 L_2 单独承担限流任务。

两相短路故障分两相接地短路和两相不接地的相间短路,短路工况有少许差别,此处以较为恶劣的两相对地短路为例,当 a、b 两相对地短路之后,反相后的线电压 u_{ab} 经过 $V_{T1} \sim V_{T4}$ 组成的整流桥路,加在直流电感 L_1 上,使 L_1 中电流上升,由于线电压大于相电压,在此情况下的 L_1 电流上升率更大。当 L_1 中电流大于设定值时,封锁开关管 $V_{T1} \sim V_{T4}$ 的驱动信号,切除 2 个故障相。 L_1 中电流经 V_{D1} 、 V_{D2} 续流,并在半个周期内衰减到零。同样,从短路故障发生开始, a、b 两相的限流电感 L_2 、 L_3 中就开始产生电流,在 $V_{T1} \sim V_{T4}$ 被封锁之后,由 L_2 、 L_3 承担限流任务。

三相对地短路与三相相间不接地短路的效果是一样的,三相故障发生后,短路点变为事实上的电源中性点,每相电源接桥路和限流电感的点成为电源输出端,所以,各相电压反相,反相后的三相电压通过 $V_{T1} \sim V_{T6}$ 组成的整流桥,加在直流电感 L_1 的两端,使 L_1 中电流增加。由于三相整流桥的输出电压平均值大于线电压的单相整流输出的平均值,三相短路为最恶劣的短路工况。当 L_1 电流大于设定值时,封锁 $V_{T1} \sim V_{T6}$ 的驱动信号,切断三相电源到 L_1 的通路,桥路退出工作, L_1 中电流经 V_{D1} 、 V_{D2} 续流,在约半个周期内衰减到零。同样,从短路故障发生开始, a、b、c 三相的限流电感 L_2 、 L_3 、 L_4 中就开始产生电流,在 $V_{T1} \sim V_{T6}$ 被封锁之后,由 L_2 、 L_3 、 L_4 承担限流任务。

4 仿真研究

采用专用仿真软件 PSIM6,分单相短路、两相短

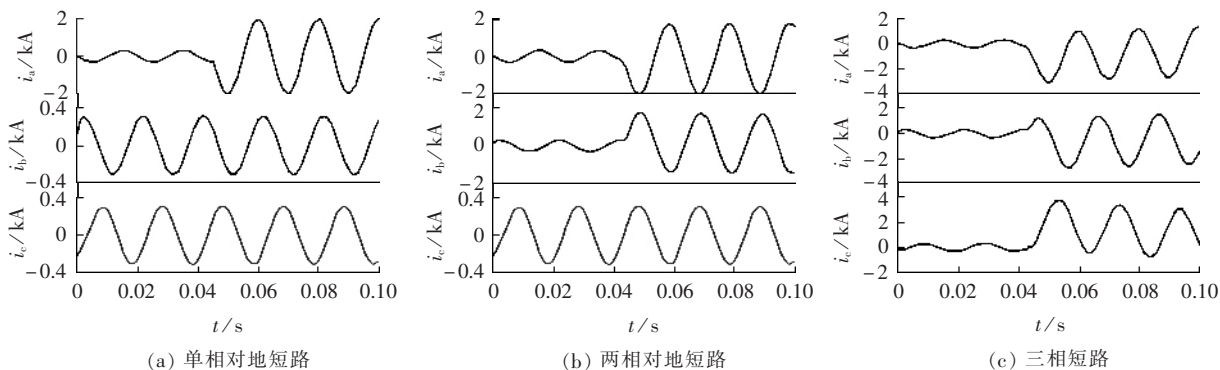


图4 基于半控桥的短路故障限流器的仿真波形

Fig.4 Simulation waveforms of FCL based on half-controlled bridge

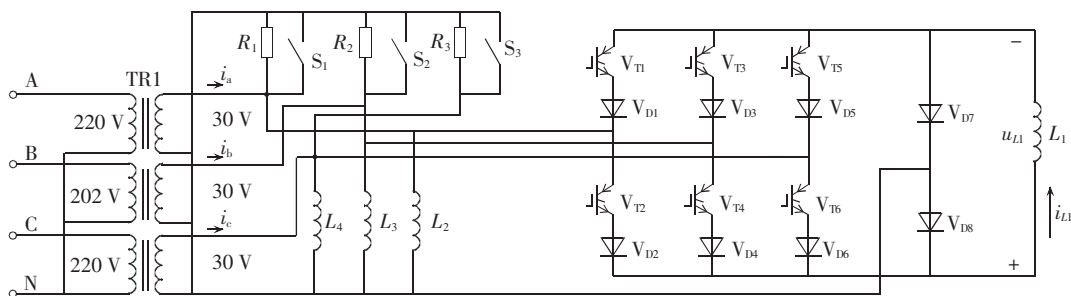


图5 三相接地系统半控桥式限流器实验装置主电路图

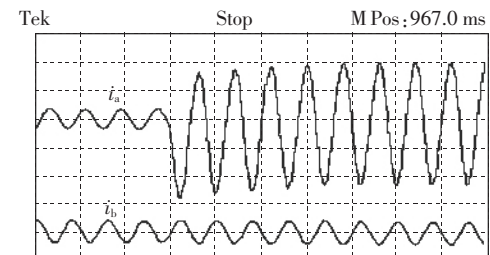
Fig.5 Experimental circuit of FCL based on half-controlled bridge

路和三相短路 3 种情况,对图 3 所示的短路故障限流器进行了仿真研究。假设从短路故障发生到封锁有关开关管的驱动脉冲所需要的时间为 $200 \mu s$,短路最严重的情况是在额定负载下,单相短路发生在故障相的相电压峰值之前 $100 \mu s$,两相和三相短路发生在故障相线电压峰值之前 $100 \mu s$ 。在 $t=0$ 处上电,单相故障发生在 $t=0.04485 s$ 处,两相和三相短路均发生在 $t=0.0428 s$ 处。仿真波形分别如图 4 所示。仿真所基于的电路参数为:电源相电压 $220 V/50 Hz$;额定负载电流 $220 A$;负载电阻 1Ω ,直流电感 $L_1=0.6 mH$;旁路电感 $L_2=L_3=L_4=0.5 mH$,这里取短路电流为额定电流的 7 倍。从仿真结果可以看出:正常情况下,限流器对系统无不良影响;发生故障后,限流器立即自动投入限流;在中性点接地系统中,在设置了所提限流器之后,单相短路故障、两相短路故障时,故障相对非故障相几乎无影响。

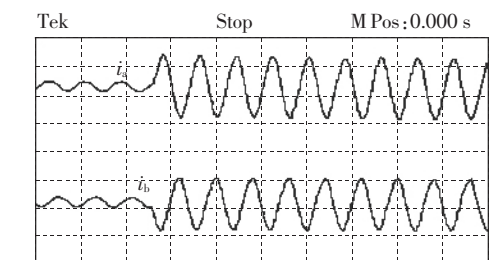
5 实验研究

为了进一步验证所提限流器的可行性,制作了主电路原理如图 5 所示的限流器实验装置,其中的三相电压源为降压变压器的副边,变压器原边相电压 $220 V$,副边相电压 $30 V$,线电压 $52 V$;自关断开关管采用 1MBH 60-100 型 IGBT 单管,由于 IGBT 无反向承受电压时的完善功能,每个桥臂用 1 个 IGBT 和 1 个功率二极管串联连接代替;开关 S_1 、 S_2 、 S_3 用来模拟短路,为示意图,在模拟单相接地短路时,只合上 S_1 ,在模拟 a、b 两相对地短路时, S_1 、 S_2 用的是固定联动的两单元梅兰日兰空气开关;而模拟三相接

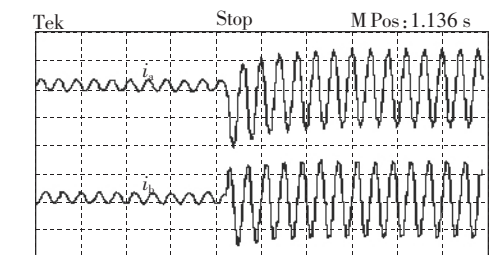
地短路时, S_1 、 S_2 、 S_3 用的是固定联动的三单元梅兰日兰空气开关。负载电阻 $R_1 = R_2 = R_3 = 50 \Omega$; $L_1 = 15 \text{ mH}$, $L_2 = L_3 = L_4 = 17 \text{ mH}$ 。实验波形如图 6 所示。由于示波器是 2 通道的, 而且三相电流之和为零, 2 个电流是独立的, 第三相电流可以由前两相电流求得, 所以, 对每种短路工况, 只给出两相电流波形。



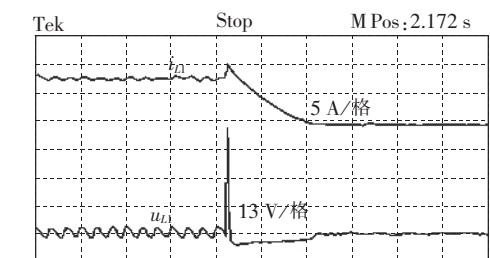
(a) 单相短路时的 a、b 两相电流



(b) 两相接地短路时的 a、b 两相电流



(c) 三相短路时的 a、b 两相电流



(d) 三相短路时 L_1 上的电流、电压

图 6 三相半控桥式限流器的实验波形

Fig.6 Experimental waveforms of FCL based on half-controlled bridge

6 结论

提出一种基于自关断器件的半控桥式短路故障限流器, 和全控桥式短路限流器相比, 控制电路和控制方法更为简单, 可靠性更高, 价格更低。详细叙述了单相对地短路、两相对地短路和三相短路状态下的控制方法和限流工作原理, 采用 PSIM6 软件, 对

各种短路模式下的限流方法及限流效果进行了仿真研究。制作了小容量的半控桥式限流器实验装置, 进行了较为详细的实验研究, 给出了 3 种短路模式下主要量的实验波形, 仿真和实验效果均非常理想, 充分证明了所提半控桥式故障限流器及其控制策略的有效性和实用性。

致 谢

感谢浙江大学电气工程学院吴兆麟教授的指导、启发和鼓励!

参考文献:

- [1] NOMURA T, YAMAGUCHI M, FUKUI S. Single DC reactor type fault current limiter for 6.6 kV power system [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2001, 11(1): 2090-2093.
- [2] YE Lin, LIN Liang-zhen, JUENGST Klaus-peter. Application studies of superconducting fault current limiters in electric power systems [J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2002, 12(1): 900-903.
- [3] CHOI S S, WANG T X, VILATHGAMUWA M. A series compensator with fault current limiting function [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(3): 2248-2256.
- [4] SMITH R K, SLADE P G, SARKOZI M, et al. Solid state distribution current limiter and circuit breaker: application requirements and control strategies [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3): 1155-1164.
- [5] STEURER M, FROHLICH K, HOLAUS W, et al. A novel hybrid current-limiting circuit breaker for medium voltage: principle and test results [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(2): 460-467.
- [6] AHMED M M R, PUTRUS G, RAN Li, et al. Development of a prototype solid-state fault-current limiting and interrupting device for low-voltage distribution networks [J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2006, 21(4): 1997-2005.
- [7] STEURER M, NOE M, BREUER F. Fault current limiters - R & D status of two selected projects and emerging utility integration issues [C] // IEEE Power Engineering Society General Meeting. Denver, Colorado, USA: IEEE Power Engineering Society, 2004: 1423-1425.
- [8] WU Zhao-lin, CHEN Ping-ping, TAN Ling-yun. Short circuit current limiter in AC network [J]. Journal of Zhejiang University: Science, 2001, 2(1): 41-45.
- [9] 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.
- [10] FEI Wan-min, LÜ Zheng-yu, WU Zhao-lin, 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.
- [11] 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.
- [12] FEI Wan-min, LÜ Zheng-yu, TAN Ling-yun, 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.
- [13] 陈刚, 江道灼, 蔡永华, 等. 具有旁路电感的新型固态故障限流器的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 200-205.
- [14] CHEN Gang, JIANG Dao-zhuo, CAI Yong-hua, et al. Study on a novel solid state fault current limiter with bypass reactor [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 200-205.
- [15] 赵中原, 吕征宇, 江道灼. 新型固态限流器三相主电路拓扑及控制策略研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(12): 42-46.
- [16] ZHAO Zhong-yuan, LÜ Zheng-yu, JIANG Dao-zhuo. Study on three-phase main circuit topology and control strategy for a

new type solid state current limiter[J]. Proceedings of the CSEE, 2005,25(12):42-46.

- [13] LÜ Zheng-yu,JIANG Dao-zhuo,WU Zhao-lin. A new topology of fault - current limiter and its parameters optimization [C]//IEEE Power Electronics Specialists Conference,PESC03. Mexico:IEEE,2003:462-465.

- [14] 费万民,张艳莉,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 Wan - min,ZHANG Yan - li,LÜ Zheng - yu. IGCT - based novel solid state bridge type fault current limiter[J]. Automation of Electric Power Systems,2006,30(7):60-64.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

张艳莉(1970-),女,河北深泽人,副教授,博士研究生,研究方向为仪器仪表、工程热物理;

费万民(1965-),男,河南栾川人,副教授,博士,研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用(E-mail:feiwamin@njnu.edu.cn);

姜宁秋(1975-),女,江苏盐城人,讲师,硕士,研究方向为电力电子技术及其在电力系统中的应用;

吕征宇(1957-),男,浙江宁波人,教授,博士,博士生导师,研究方向为电力电子技术。

Research of fault current limiter based on half-controlled rectifier bridge for three-phase four-wire power system

ZHANG Yan-li¹,FEI Wan-min^{1,2},JIANG Ning-qiu¹,LÜ Zheng-yu³

(1. Nanjing Normal University,Nanjing 210042,China;2. Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,Nanjing 210016,China;3. Zhejiang University,Hangzhou 310027,China)

Abstract: The FCL(Fault Current Limiter) based on half-controlled rectifier bridge is proposed for three-phase four-wire power systems. Its current limiting principles and control methods are depicted in detail for the grounding faults of single phase,two phases and three phases. The rectifier bridge includes a couple of power diodes,which provides automatically the path for the continuing current of DC reactor. Whenever a fault is detected,the controllable switches in the fault phase(s) is simply turned off to drop out the fault phase(s) and the normal phase(s) keeps operating. Simulations with PSIM6 for various fault modes are carried out. An experimental FCL with small power capacity is established and investigated. Experimental and simulation results are conformable to each other, showing the validity and practicability of the FCL and its control strategy.

Key words: self-off device; half-controlled rectifier bridge; FCL

广 告 索 引

北京四方继保自动化股份有限公司 (封面)
 国电南京自动化股份有限公司 (封二,前插 1)
 欣灵电气股份有限公司 (前插 2,3)
 南京南瑞集团公司 (前插 4)
 南京南瑞集团公司城乡电网自动化分公司
 (前插 5)
 南京浩昇科技有限公司 (前插 6)
 南京中德保护控制系统有限公司 (前插 7)
 南京南自机电自动化有限公司 (前插 8)
 广东中钰科技有限公司 (前插 9)
 重庆新世纪电气有限公司 (前插 10)
 上海申瑞电力科技(集团)有限公司 (前插 11)
 国电南京自动化股份有限公司主设备
 保护部 (前插 12,13)
 南京南自电网控制技术有限责任公司 ... (前插 14)
 常州山泰克有限公司 (前插 15)
 福州凯(嘉)特电气有限公司 (前插 16)
 上海伊莱克斯实业有限公司 (前插 17)
 上海置恒电气有限公司 (前插 18)

南京南自电气系统集成工程有限公司 ... (前插 19)
 河南省日立信电子有限公司 (前插 20)
 上海蓝鸟机电有限公司 (前插 21)
 万可电子(天津)有限公司 (前插 22)
 施瓦哲工程实验(上海)有限公司 (前插 23)
 硕方科技(北京)有限公司 (前插 24)
 合肥阳光电源有限公司 (后插 1)
 珠海派诺电子有限公司 (后插 2)
 杭州中恒电气股份有限公司 (后插 3)
 南京南自电力控制系统工程有限公司 ... (后插 4)
 西门子电力自动化有限公司 (封三)
 北京博电新力电力系统仪器有限公司 (封底)
 深圳市三旺通信技术有限公司 (文前页)
 湖北天瑞电子有限公司 (文后 1)
 南京冠亚电源设备有限公司 (文后 2)
 深圳市科奥信电源技术有限公司 (文后 3)
 深圳市英微特电子技术有限公司 (文后 4)
 深圳市信道科技有限公司 (文后 4)
 山西永明自动化设备有限公司 (目次页)