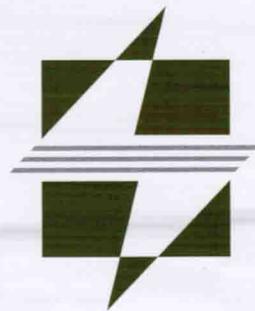


中国高压电器网网刊



# 高压电器技术信息

TECHNICAL REVIEW ON HIGH  
VOLTAGE APPARATUS

中国高压电器网  
西安高压电器研究院

主办

2012年2月

第1期

# 高压电器技术信息

Technical Review on High Voltage Apparatus

双月刊

2012年第1期第8卷(总第42期)

2012年2月18日出版

2011年高压开关行业10件

大事评选揭晓(详见封2)

《国家图书馆》收录期刊、《中国核心期刊(遴选)数据库》收录期刊

## 《高压电器技术信息》编辑委员会

名誉主任委员:王季梅 李肇林

主任委员:裴振江

副主任委员:郑军 赵伯楠

委员(以下按姓氏笔画为序)

丁永福 马志瀛 马炳烈 马传兴

王建生 王承玉 王钢 元复兴

仇毓宏 宁静 朱跃 孙云生

孙永恒 阮全荣 沈威 沈忠威

张杭 张猛 李鹏 陈一卫

陈建福 岳永学 杨钦 林莘

金文龙 周志芳 苟锐锋 荣命哲

袁大陆 徐东晟 徐国政 顾霓鸿

崔成恕 崔景春 韩俊玉 潘瑾

## 《高压电器技术信息》双月刊

主办:中国高压电器网

西安高压电器研究院

主编:姚君瑞

副主编:梁维宏 田恩文

责任编辑:马铜德 吴鸿雁

编辑:《高压电器技术信息》编辑部

地址:西安市西二环北段18号,710077

电话:029-84225624 84225738

传真:029-84299182

网址:www.chinahva.com

投稿邮箱:chinahva@vip.163.com

准印证:陕新出连内印字第00210号

印刷:陕西汇丰印务有限公司

## 目录

### 综述

南方电网智能电网发展展望 ..... 饶宏(1)

### 技术交流

大容量高压开关柜温升计算及振动分析 ..... 陈建伟(4)

隔离开关触头接触压力的计算和定标测量 ..... 郝治国等(9)

SF<sub>6</sub>断路器预防性试验分析 ..... 黄章强(11)

### 开关研讨会专题

高压故障电流限制器(2) ..... 李品德(14)

### 工艺应用

ZF32-126 母线筒触头校正工艺装备 ..... 资永新等(18)

### 新产品

ZF7D 型气体绝缘金属封闭开关设备 ..... 刘景博等(21)

### 经验交流

KYN28A-12 中置式开关柜配套件基础知识讲解 ..... 王瑞元(22)

..... 王瑞元(22)

### 实验技术

工频电流迭加容性合成试验回路及其过电压保护问题 ..... 吴盛刚等(27)

..... 吴盛刚等(27)

### 国外电器

用微晶玻璃替代真空灭弧室的绝缘外壳 ..... (30)

真空断路器电流过零后阴极鞘层膨胀的诊断 ..... (35)

隔离断路器助力智能变电站设计 ..... (39)

### 检验报告

2011年高压开关设备产品型号证书发放情况通报 ..... 西安高压电器研究所 行业标准室(43)

..... 西安高压电器研究所 行业标准室(43)

2010年国家高压电器质量监督检验中心发放的检验报告名录(7) ..... 西安高压电器研究院 实验认证中心(49)

..... 西安高压电器研究院 实验认证中心(49)

### 通知

关于能源行业短路试验技术标准化技术委员会秘书处招募工作

小组成员的通知 ..... (62)

# TECHNICAL REVIEW ON HIGH VOLTAGE APPARATUS ( Bimonthly )

Vol. 8 No. 1 ( Ser. No. 42 )

Feb. 18 2012

## MAIN CONTENTS

### · SPECIAL REPORT ·

Prospects of Smart Grid for China Southern Power Grid ..... RAO Hong(1)

### · TECHNICAL EXCHANGE ·

Temperature Calculation and Vibration Analysis for High Power HV Switchgear Cubicle ..... CHEN Jianwei(4)

Calculation and Calibration Measurements for Contact Pressure of Contact for Disconnecting Switch .....  
..... HAO Zhiguo et al(9)

Analysis of Preventive Test for SF<sub>6</sub> Circuit Breaker ..... HUANG Zhangqiang(11)

### · SEMINAR ON HV SWITCHGEAR ·

High-voltage Fault Current Limiter(Part 2) ..... LI Pinde(14)

### · PROCESSING APPLICATION ·

Correct Technique and Equipment of Bus Tube for ZF32 - 126 ..... ZI Yongxin et al (18)

### · NEW PRODUCT ·

ZF7D Type Gas Insulated Switchgear..... LIU Jingbo et al (21)

### · EXPERIENCE EXCHANGE ·

Basic Knowledge Explanation to Component Parts of KYN28A - 12 Switchgear Cubicle ..... WANG Ruiyuan(22)

### · EXPERIMENTAL TECHNIQUE ·

Power Frequency Current Superposition Capacitive Synthetic Test Circuit and Its Overvoltage Protection .....  
..... WU Shenggang et al(27)

### · APPARATUS ABROAD ·

Alternative Vacuum Interrupter Envelopes Using Glass-ceramic Materials ..... (30)

Diagnostics of the Cathode Sheath Expansion after Current Zero in a Vacuum Circuit Breaker ..... (35)

Disconnecting Circuit Breaker Enables Smarter Substation Design ..... (39)

### · CERTIFICATE REPORT ·

Reports on Issuing Certificates of Product Model for HV Switchgear in 2011 ..... (43)

Testing Reports Issued by China National HV Apparatus Quality & Supervising Center in 2010(7) ..... (49)

### · MESSAGE ·

Notification of A Standardization Technical Committee to Recruit Working Group ..... (62)

#### Editor :

Editorial Dept. of TECHNICAL REVIEW ON HIGH VOLTAGE REVIEW

Address: No.18, North Section of the West Second Ring Road, Xi'an, P. R. China, 710077

#### Publisher :

China High Voltage Apparatus Network

Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute

Chief Editor : YAO Junrui

Tel: +86 29 84225624 84225738

Fax: +86 29 84299182

Website: www.chinahva.com

E-mail: chinahva@vip.163.com

Print by: Shaanxi Huifeng Co., Ltd.

# 高压故障电流限制器(2)

李品德

(陕西电力科学研究院,西安 710054)

**摘要:**随着电力工业的迅猛发展及用电规模的不断攀升,导致很多电力节点的短路电流超标,如何限制或快速开断过大的短路电流、保护电力主设备及电网安全成为电力工作者关注的重大问题,故障电流限制器正是解决这一问题的关键设备。本文着重阐述高压故障电流限制器的概念、分类、原理、产品发展水平、发展趋势及典型应用,以期取得抛砖引玉的作用。

**关键词:**故障电流限流器;爆破切割;超导;电力电子;发展趋势;原理;应用

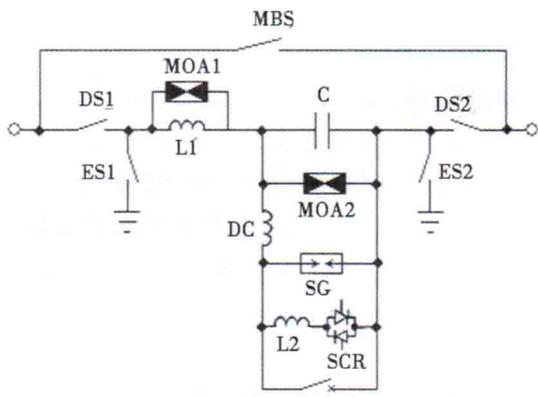
(接上期 P33)

## 4 基于电力电子技术的故障电流限制器

### 4.1 基本原理

这类 FCL 一般是利用电力电子器件来高速接通或断开电路,随即旁路或投入电阻器、电容器、电抗器等器件来增大回路的阻抗从而起到限制故障电流的作用。

#### 1) 串联谐振型



DS1、DS2—隔离开关;  
ES1、ES2—接地开关;  
MBS—旁路隔离刀闸;  
MOA1、MOA2—氧化锌避雷器;  
L1—限流电抗器;  
SG—可控火花间隙;  
C—电容器组;  
SCR—晶闸管开关;  
BCB—旁路断路器;  
DC—阻尼电路;  
L2—阀用电抗器;

图 11 一种可用于 500 kV 系统的 FCL 原理图

图 11 中的 DS1、DS2、ES1、ES2、MBS 为系统操作及检修提供手段,MOA1、MOA2、SG 为过电压保护装置,DC 阻尼电路及阀用电抗器 L2 用于限制并阻

尼放电电流,确保电容器组、晶闸管阀、火花间隙及旁路断路器的安全,旁路断路器 BCB 可在几十毫秒内实现电容器组的可靠短接,为电容器组的投入、退出提供辅助手段。正常运行时通过各开关设备保证 L1 及 C 均处于工作状态,两者参数匹配形成串联谐振,装置压降很小;短路故障时,专用测控装置使 SCR 快速接通将 C 旁路,由限流电抗器 L1 完成限流功能。本 FCL 装置需要的元件多、结构及技术复杂、成本高,只适用于超高压系统,不过其串联谐振的思路不一定受系统电压等级的制约。

#### 2) 并联谐振型

图 12 是并联谐振型的 FCL。图 (a) 中,正常状态下晶闸管不导通,只有 C 串入电路实现系统的无功补偿,在故障发生时控制装置将晶闸管触发导通, L 接入电路, L、C 形成并联谐振实现限流功能。图 (b) 中,采用门极可关断晶闸管 GTO 实现 L、C 并联谐振支路的投退,由于正常运行时 GTO 支路必须持续导通,有功损耗很高;另外一种形式是取消电容器 C,由电抗器 L 直接限流。

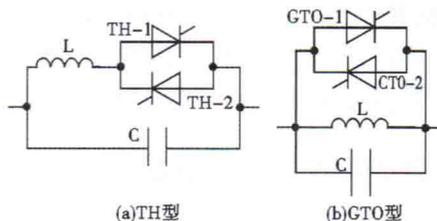


图 12 并联谐振原理的 FCL

基于电力电子技术的 FCL 还有许多其它形式,

例如桥式固态限流器、变压器耦合型桥式固态限流器等,在此不作详述。总体说来,这类 FCL 的组成部件有:①基于电力电子器件的固态开关;②限流元件,如电感、电容、耦合变压器、电阻器等;③测控系统,用于检测和分析故障电流,继而控制固态开关的动作行为;④辅助元件,如避雷器、隔离开关、旁路开关等;⑤冷却系统,当需要电力电子器件长期载流工作时,冷却系统是必需的,甚至需要去离子水循环冷却。

#### 4.2 总体发展水平

受到设备成本、空间尺寸及设备功耗的制约,基于电力电子技术的 FCL 目前主要应用在超高压系统,中低压领域在国内还没见有工业产品应用的报道。功率型电力电子器件制造及控制技术是这类 FCL 的前提条件,欧美、日本在这方面拥有较多的核心技术。我国在电力电子器件自主研发及控制技术方面要相对落后一些,这样产品本身的成本就相对要高,同时整个产品的可靠性取决于控制系统及相关部件的可靠性,而可靠性是产品发展水平的重要指标之一,所以国内产品应注意积累运行经验,使产品的稳定性不断地得到提升。主要公司产品水平见表3。

表3 主要公司产品水平

公司(国家)	限流器类型	技术指标	使用技术	时间
SIEMENS	并联谐振型	/	TCSC	1992年
日本东北电力公司及日立公司	/	6.6 kV/400 A	/	1994年
美国西屋与EPRI	/	13.8 kV/675 A	/	1995年
ACEC-Transport和GEC-Alstom	混合式FCL	/	交直流两用	1998年
美国爱迪生电力公司	串联谐振型	500 kV/- -	TPSC	2002年
SIEMENS	串联谐振型	/	TPSC	2004年
中国电科院及华东电网公司	串联谐振型	500 kV/2 000 A	TPSC	2009年

中国电力科学研究院和华东电网有限公司联合研制的基于 TPSC 技术的短路电流限制器在华东电网 500 kV 瓶窑变顺利投运,标志着我国自主研发的限流器上升到一个新的高度。此套装置可将短路点的总短路电流限制到 47 kA 以下,此装置的投运可

改善超高压系统的暂态稳定性、减小发电机的最大摇摆角、抑制系统的电压波动。装置现场运行照片见图13。



图13 我国基于 TPSC 技术的 FCL 在 500 kV 瓶窑变顺利投运

#### 4.3 技术创新和技术进步

1) 固态开关技术:利用固态开关技术实现电感、电容或电阻器件的快速投入或退出,达到限制短路电流的目的。

2) 测控技术及 FCL 的自诊断技术:保证 FCL 本身正确运行,保证正确的触发、启动或关断,提高 FCL 运行的可靠性,安全性。

3) FCL 自身保护技术:采用一系列装置保护 FCL 主体的正常安全运行,达到 FCL 投退自如,方便 FCL 运行维护。

4) 适用性研究:FCL 各部件的参数选择、安装位置的确定及动作特性的控制策略需要一整套理论分析和计算,以达到 FCL 的高效率。

#### 5 其它类型的 FCL

1) 基于 PTC 元件的 FCL:PTC 是一种正温度系数的聚合物材料,正常运行工况下的电阻很小,而故障状态下由于电流热效应的作用使其电阻急剧增大,从而实现限流。在美国海军新型战略舰上有相关的应用报道,在低压商业领域也有应用,但应用于高压领域还有很多技术问题,包括过电压问题、长恢复时间问题、绝缘问题、热容量问题等等。

2) 基于电磁斥力机构的快速真空开关的 FCL:如图14所示,图(a)中正常运行时快速开关 HS-VCB 处于分闸状态,L、C 形成串联谐振,装置阻抗很小,故障电流出现时测控装置触发 HS-VCB 的电磁斥力合闸回路,使其在 1~2 ms 内快速合闸,C 被旁

路,由电抗器L限流。图(b)中正常运行时快速开关HS-VCB处于合闸状态,主回路阻抗很小,故障电流出现时测控装置触发HS-VCB的电磁斥力分闸回路,使其在1~2 ms内快速分闸,电流转移到特种限流熔断器FUSE中,由FUSE限流并开断电路。图(c)中正常运行时快速开关HS-VCB处于合闸状态,GTO支路处于阻断状态,主回路阻抗很小,故障电流出现时测控装置触发HS-VCB的电磁斥力分闸回路,使其在1~2 ms内快速分闸,同时GTO支路导通,电流先转移到GTO支路,使开关内电弧熄灭,随后控制GTO支路快速关断,电流再转移到限流电阻R支路中,实现限流功能。总体说来,这类FCL的主要组成元件为:基于电磁斥力机构的真空断路器、限流元件或限流开断元件、电子测控系统、辅助器件。

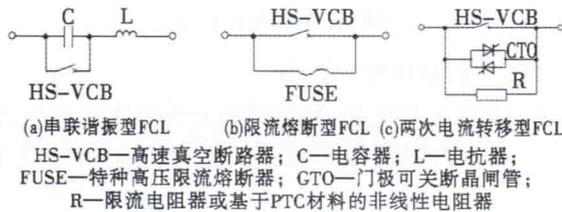


图14 基于电磁斥力机构的快速真空开关的FCL

## 6 故障电流限制器的发展趋势

故障电流限制器的发展趋势及方向:响应及恢复时间短、限流效果可控、可重复使用、宽额定电流范围、高可靠、低功耗、运行维护简便、结构紧凑、成本合理、与周围环境友好。

### 6.1 响应及恢复时间

FCL的检测装置能快速识别故障电流并作出响应,启动限流元件将故障电流限制到预期的水平内。完成限流后,FCL的限流元件可以快速恢复到正常运行状态,以备下次故障时再使用,对于要求自动重合闸的系统这一特性显得尤为重要。

### 6.2 限流效果可控

限流效果可以通过两个方面加以描述。其一是FCL限流元件的启动电流,即FCL开始起作用的最小电流;其二是限流系数,即经过FCL后电路中实际出现的峰值电流与预期故障电流的最大峰值电流的比值。显然,这两个指标的量值表示限流效果的好坏,具体量值应该根据FCL的应用方式及安装位置的实际情况合理设计或整定,不应单方面追求过强的限流效果而忽视了实用性及FCL产品成本的控制。

### 6.3 可重复使用

可以多次使用而不是单次使用,可重复使用的次数是FCL的重要技术指标。目前SFCL及基于电力电子技术的FCL具备多次使用的特性。

### 6.4 宽额定电流范围

对于高压领域,额定电流的范围要求630~6300 A,在发电机出口使用的限流器根据发电机容量对额定电流的要求经常会更高。

### 6.5 高可靠性

FCL一般装备在电力系统的关键节点上,其可靠性直接关系到电力系统的安全性,拒动、误动、失效是不允许的。另外,若需要经常性的维护或保养则会使运行成本急剧上升,影响FCL的适用性。

### 6.6 低功耗

FCL装置本身应该具有低功耗特性,即低无功损耗和低有功损耗。巨大的能耗或电压降落会明显影响其运行的经济性,增加用户的运行成本甚至失去适用性。

### 6.7 其它方面

1)运行维护简便:便于运行维护是FCL产品推广应用的前提。

2)结构紧凑:FCL装置结构应尽可能紧凑化、小型化,以降低对安装位置空间的要求。

3)成本合理:装置及其备品备件的成本过分昂贵将阻碍FCL的大面积推广。

4)环境友好:FCL装置本身应该是环保的,不含或产生有害物质,不对周边环境造成不利影响。

## 7 故障电流限制器的典型应用

### 7.1 应用于旁路限流电抗器

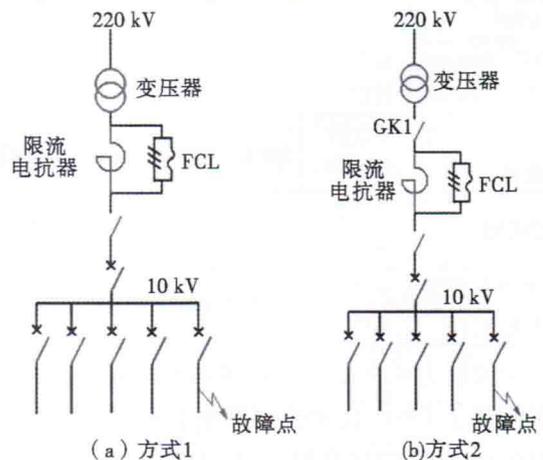


图15 FCL旁路限流电抗器

图15为FCL应用于旁路限流电抗器的主接线

原理图,图(b)中因采用了隔离开关 GK1,对 FCL 或电抗器进行维护时不需要停运变压器。降压变压器或发电机出口的限流电抗器唯一的用途就是限制系统的短路电流。给限流电抗器上并联一台 FCL,正常运行时,负荷电流几乎全部流过 FCL;当母线或馈线发生超过 FCL 的动作整定值的两相或三相短路时,限流器快速开断使电抗器投运,起到限制短路电流的作用。若短路电流没有超过 FCL 的整定值,则开断任务由后面的断路器独立完成。另外,在系统运行条件允许时也可采用 FCL 直接取代限流电抗器。此用法有如下优点:

- ①节能降耗,消除电抗器的有功和无功损耗;
- ②提高母线上的电压质量;
- ③消除电抗器的电磁污染。

### 7.2 应用于变电站母联位置

FCL 应用于变电站母联位置如图 16 所示,某 110 kV 变电站装备两台 50 MVA 的大容量变压器#1及#2,每台变压器可向 10 kV 侧提供的最大短路电流为 18 kA,若两台主变并列运行则馈线出口短路电流最大可能达到 36 kA。出于设备经济性或系统经济性的考虑,馈线断路器的额定短路开断电流通常不超过 31.5 kA,所以正常情况下母联断路器不能闭合、分段母线不能并列;只有在在一台主变因故退出运行后,母联断路器才能闭合运行。图中在母联开关的位置串接一台 FCL,则分段母线可并列运行。合理整定 FCL 的动作电流,当出线发生短路、且预期短路电流值接近 31.5 kA 时,使 FCL 动作、快速限流或使母线分裂运行,使馈线断路器只承担开断能力以内的短路电流。

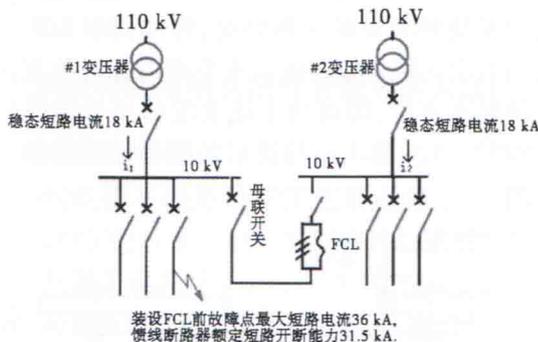


图 16 FCL 应用于母联位置的原理接线示意图

该应用方式有以下优点:

- ①均衡多台变压器的负荷分配;

- ②降低网络阻抗,提高供电质量;
- ③增强变电站运行方式的灵活性;
- ④有利于降低变压器的负载损耗。

### 7.3 应用于区域电网之间的联络线上

FCL 应用于大容量变压器低压侧出口或区域电网之间的联络线上,原理如图 17 所示。由于区域电网的连接,造成局部短路电流成倍增大,必须采用限流器加以限制;大容量变压器 10 kV 侧最大短路电流可达数十甚至上百千安,只由普通断路器无法完成开断任务。串联 FCL 后,当短路电流超出断路器安全开断电流时由 FCL 限流或开断,从而解决了断路器开断能力不足或电力主设备短路电流耐受能力不足的问题。

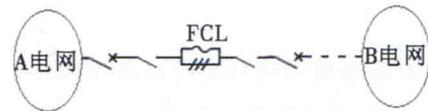
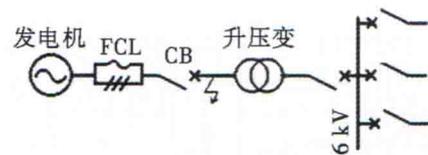


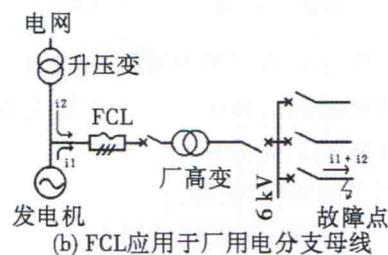
图 17 FCL 在区域电网联络线上

### 7.4 应用于发电机出口或厂用电分支母线

FCL 应用于发电机出口或厂用电分支母线具体用法如图 18 所示,FCL 作为发电机出口或厂用电分支的灾难性事故保护。



(a) FCL 应用于发电机出口



(b) FCL 应用于厂用电分支母线

图 18 FCL 应用于发电机出口或厂用电分支母线接线示意图

### 7.5 其它应用方式

- 1) 应用于对电能质量有特殊要求的场合,比如有的用户要求在短路过程中供电系统电压降落时间短于 20 ms。
- 2) 应用于小容量发电机组的上网保护。
- 3) 应用于大功率电力电子电路的短路保护。