

· 新技术应用 ·

# 10 kV 短路故障电流限制技术 在唐山电网的应用

李良杰<sup>1,2</sup>, 肖志国<sup>1,2</sup>, 曹晓辉<sup>1,2</sup>

(1. 华北电力大学 河北 保定 071003; 2. 唐山供电公司 河北 唐山 063000)

**摘要:**针对电力系统故障电流限制技术在国内外的研究状况,结合该技术在唐山电网的应用,提出了适合于本地实际情况的10 kV故障电流限制器设计方案,详细介绍了其工作原理和整定方案,并对应用效果进行了分析和说明。

**关键词:**短路故障电流限制器;限流电抗器;节能降耗;超高速开关设备

**中图分类号:**TM713 **文献标识码:**B **文章编号:**1003-9171(2008)12-0020-04

## Application of 10 kV Short Circuit Fault Current Limitation Technology on Tangshan Power Grid

Li Liang-jie<sup>1,2</sup>, Xiao Zhi-guo<sup>1,2</sup>, Cao Xiao-hui<sup>1,2</sup>

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Tangshan Power Supply Company, Tangshan 063000, China)

**Abstract:** According to research condition on power system fault current limitation technology both at home and abroad, considering the application of this technology on Tangshan Power Grid, a design scheme of 10 kV fault current limiter suitable for the local condition was proposed. The working principle and setting scheme of the limiter were introduced in detail and its application result was also analyzed.

**Key words:** short circuit fault current limiter; current limiting reactor; energy saving and loss reduction; super-high-speed switchgear

### 0 引言

电源建设的突飞猛进及输配电网的不断强大使得电力系统故障电流水平在急剧上升,并成为影响电力建设投资及电网安全运行的关键因数。普通断路器的开断能力很有限,全开断时间长达60~200 ms,并且不具备限流功能;而一般用户的出线断路器额定短路开断电流达到40 kA已经很不经济。所以,限制短路电流的水平一直是各国电力科研工作者的热门研究课题。目前常用的限制短路电流措施有:采用限流电抗器,采用高阻抗变压器,改变运行方式。这些方法存在明显缺点:增加能耗,降低电能质量,降低供电的可靠性,降低变电站带负载的能力。所以研制并采用新型限流设备是电力系统发展的必然趋势。

有研究表明电气设备的机械结构损坏发生在

短路发生后20 ms内,也就是在短路电流第一半波的峰值电流时。所以,对于大的短路电流,断路器即使可以开断,也不能避免变电设备的损坏。因此对新型限流设备的基本性能要求应该是:限流效果好,开断速度快,开断能力强,自身损耗小,造价及运行维护费用合理。

随着电力电子技术、超导技术、计算机技术、新材料等的发展,限制短路电流以减轻断路器开断负担已成为可能,这就依赖于故障电流限制器(FCL, fault current limiter)的研制和开发。

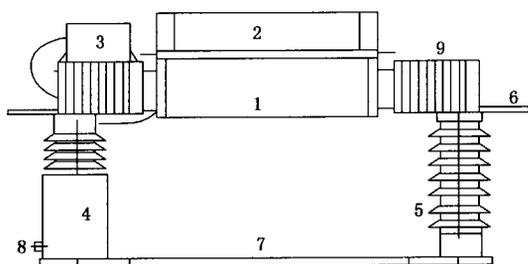
故障电流限流器(FCL)类型很多,诸如超导型FCL、基于功率半导体器件的FCL、基于爆炸切割技术的超高速开关设备等等。超导型FCL及基于功率半导体器件的FCL均因现有技术及工艺的限制、昂贵的造价及高额的维护费用而不能得到推广应用。目前真正技术成熟并且经济实用的便是采用爆破切

割原理的超高速开关设备,这类产品有德国ABB公司的IS-limiter、美国G&W公司的Clip、法国FERRAZ公司的Pyro-breaker等,这类FCL产品目前在全世界已有数千套正在运行。

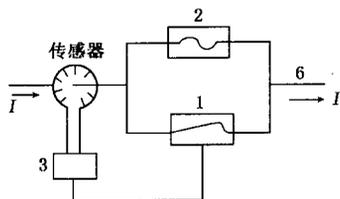
在国内,陕西电力科学研究院研制的DDX1系列短路电流限流开断器就属于此类产品,并且其整机在国家高压电器质量监督检测中心的发电机回路通过了80 kA大电流开断试验,更大电流的开断试验受试验条件等诸多因数的制约目前还未能进行;在西高所大容量振荡回路摸底试验已经达到12 kV/120 kA及20 kV/100 kA,单台产品额定电流可达6 300 A,超过国外4 500 A的最高水平。

### 1 DDX1的工作原理

如图1所示,DDX1的基本组成部件包括特种高压限流熔断器2、电子控制器3和采用爆破切割原理的快速隔离器1。快速隔离器与特种高压限流熔断器并联,由于前者的主回路电阻远比后者的小(约为1 000:1),所以回路电流主要由前者承载。当电子控制器检测到超过整定值的故障时,发出点火信号使快速隔离器断口在数百微秒时间内打开,电流瞬时转移到熔断器中,并最终完成限流开断。高压隔离变压器4不仅担负着给电子控制器3提供工作电源的任务,而且还是动作信号由高压侧传递到低压侧的通道。



(a) 产品结构示意图



(b) 原理接线图

1—快速隔离器;2—特种高压限流熔断器;3—高压侧电子控制器;4—高压隔离变压器;5—支柱绝缘子;6—主回路铜排;7—底座;8—低压信号控制箱接口;9—散热器  
图1 DDX1单相产品外观示意图及原理接线图

为了进一步了解DDX1的动作过程,现以电力系统典型短路电流(时间常数 $T=50\text{ ms}$ )为例加以说明。

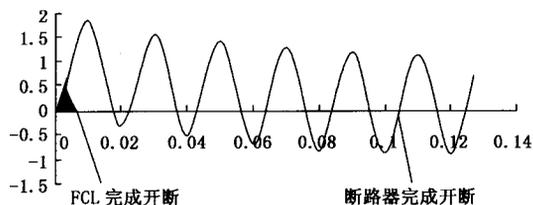


图2 典型短路电流波形及DDX1与断路器开断行为的比较

图2为电力系统典型短路电流的波形,图中横坐标为时间 $t$ (单位为s),纵坐标为 $I_d/I_m$ ,其近似表达式为:

$$I_d/I_m = \sin(\omega t + \alpha - \varphi) - \sin(\alpha - \varphi)e^{-t/T}$$

式中  $\alpha$ ——短路时刻的相角;

$I_d$ ——短路电流瞬时值;

$I_m$ ——短路电流的周期分量幅值,  $I_m = U_m / z$

$$z = U_m / \sqrt{R^2 + (\omega L)^2};$$

$\varphi$ ——功率因数角,  $\varphi = \arctg(\omega L / R)$ ;

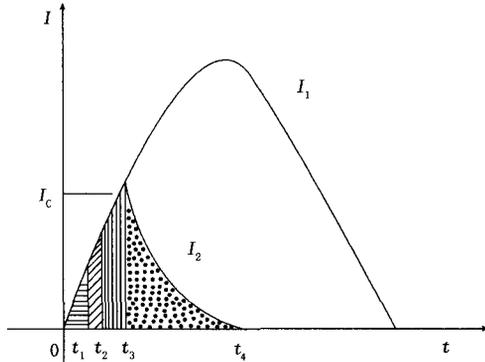
$T$ ——时间常数,  $T = L / R$ ,  $R$ 、 $L$ 分别为短路回路的电阻和电感。

从图2可以明显看出DDX1与断路器开断短路故障时的区别。DDX1在故障发生后几个毫秒即完成开断,而断路器则需经过数个周波、在电流过零时才能开断故障。

图3为DDX1开断过程的放大示意图,从图中可以看出DDX1的开断过程分为4个阶段: $0 \sim t_1$ 电子控制器响应时间,  $t_1 \sim t_2$ 快速隔离器动作时间,  $t_2 \sim t_3$ 熔断器熔化时间,  $t_3 \sim t_4$ 熔断器燃弧时间。普通限流熔断器的开断过程只有熔化时间和燃弧时间两个阶段。DDX1与普通限流熔断器开断短路电流的波形虽然相似,但开断过程的区别是很明显的。由此可见,在短路电流远未发展到预期峰值之前,已被DDX1高速切断。实际通过电力设备的短路电流的峰值 $I$ 。在第一个半波被限制到预期短路电流峰值的20%~50%,短路电流的持续时间约为5 ms。DDX1的这种特性可有效保护电力系统主设备免受短路电流巨大电动力及热效应的破坏。

DDX1将爆破式快速隔离器的大电流承载性能与高压限流熔断器的快速限流及高分断能力巧妙地结合在一起,构成动作定值可控的超高速开关设备,其优点是结构及制造工艺相对较简单,制

造成本较低;缺点是快速隔离器及特种限流熔断器为一次性产品,动作过后需要更换。不过根据国外统计的资料表明这种装置平均动作频率大致为3年1次,再加上更换部件成本不高,所以起到一次重要保护作用后再以合理成本更换主开断部件,从经济性上还是很可取的。



$I_1$ —预期短路电流; $I_2$ —实际出现电流  
图3 DDX1开断过程时序示意图

## 2 DDX1在唐山电网的实际应用

### 2.1 现场运行方式

现场运行方式确定为与母联断路器串联,使变电站分段母线并列运行。

唐山地区近年来经济发展迅速,售电量大幅增长,110 kV 变电站单台主变容量超过40 MVA的情况逐年递增。而110 kV 变电站10 kV 侧几乎全部是单母分段接线方式,这就造成大容量变电站(主变容量在40 MVA及以上)10 kV 母线不能并列运行。目前普遍采用的运行方式是2台或多台主变分裂运行,母联断路器打开处于热备用状态,利用安全自动装置在一定的条件下备自投。

下面以应用于唐山电网某110 kV 变电站母联断路器串联安装限流装置DDX1为实例加以说明。

该变电站电压等级为110 kV/10 kV,2台主变型号相同,容量均为50 MVA。10 kV 侧为单母线分段运行,每段母线上各安装2组无功补偿电容器,容量分别为3 000 kvar。目前2台主变分裂运行,即母联断路器打开处于热备用状态。

通过理论上的计算和分析,该变电站单台主变10 kV 出口最大短路电流可达18 kA,若两段母线并列运行则馈线开关出口短路电流最大可达36 kA,而馈线开关的极限短路开断能力仅为31.5 kA,所以母线分段运行是必然的。

选用的DDX1主要参数为:

额定电压:12 kV;

额定电流:3 150 A;

额定短路开断能力:63 kA;

全开断时间:小于10 ms;

短路电流限制水平:预期短路电流的20%~50%以内。

具体实施方案是将FCL与母联断路器串联使用,原母联隔离开关柜(545-3)内加装DDX1产品,见图4。当出线发生超过DDX1整定水平的短路时,DDX1快速动作,在几个毫秒内开断故障电流,将两段母线分开,使出线开关所承受的短路电流减小约50%,从而解决了出线开关开断容量不足的问题。DDX1安装前后短路点电流的波形参见图5。图中所示情况是短路发生在电压 $U$ 过零的瞬间,所以短路电流的非周期分量最大,纵坐标表示短路电流的瞬时值(系统可能出现的短路电流峰值 $1.8 \times \sqrt{2} \times I_{DL} \approx 2.5 I_{DL}$ ,其中 $I_{DL}$ 为系统额定短路电流)。

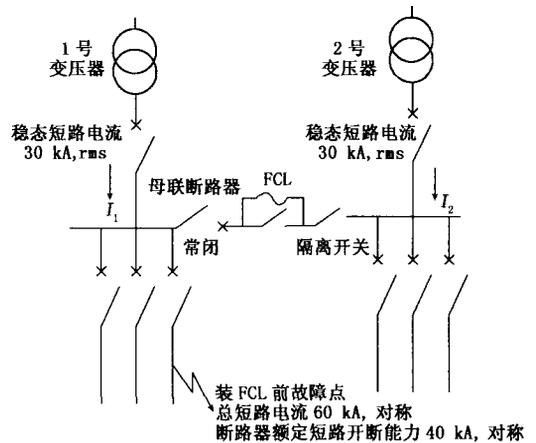


图4 DDX1在母联位置的应用

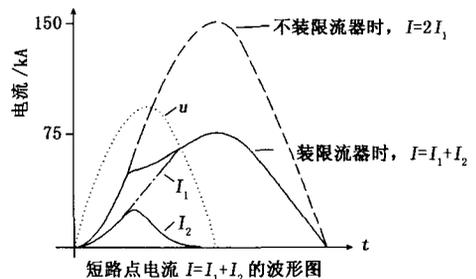


图5 短路电流波形比较

### 2.2 DDX1动作参数的整定

#### 2.2.1 DDX1动作值的确定原则

加装DDX1后的系统主接线示意图见图4。在母联位置串接FCL后,原来分段运行的母线可以

并列运行,对于馈线断路器而言短路电流的情况发生了变化,即馈线断路器出口短路时短路电流由原来的仅一台主变提供(最大值18 kA)变为两台主变同时提供(最大值36 kA)。那么DDX1的动作值的确定原则就是:保证馈线断路器的短路电流开断的安全。馈线断路器目前的额定短路开断电流为31.5 kA,则DDX1应保证馈线断路器开断的短路电流在其额定短路开断电流以内。

### 2.2.2 DDX1动作值的确定

DDX1的动作判据为电流瞬时值 $I$ 及电流瞬时变化率 $dI/dt$ ,两个判据同时满足时DDX1才能动作。电流瞬时值 $I$ 判据应保证DDX1的动作不受高频暂态干扰电流的影响并躲开系统可能出现的各种过电流;电流瞬时变化率 $dI/dt$ 判据应保证预期短路电流的最大变化率大于此值时DDX1才能动作。对于该变电站两个判据可以设置如下:

电流瞬时值 $I$ 判据:对应于回路电流10 kA的最大瞬时电流;

电流瞬时变化率 $dI/dt$ 判据:对应于回路电流14 kA的最大瞬时电流变化率。

这就是说,小于14 kA的短路电流出现时DDX1不会动作,大于14 kA的短路电流出现并且其瞬时值超过 $1.414 \times 10$  kA时DDX1才会动作。由于两台主变容量及型号相同,所以馈线短路时两台主变向短路点提供的短路电流也相同。也就是说在主变并列运行时馈线短路电流在 $2 \times 14$  kA以内时DDX1不动作,由馈线断路器按原来的继电保护方案切断短路电流;而当馈线短路电流在 $2 \times 14$  kA以上时DDX1在10 ms开断,使变压器分裂运行,这样一来馈线断路器所开断的最大短路电流仅为一台主变提供的18 kA,保证了设备的安全。

### 2.2.3 改造后相关继电保护装置的调整方案

根据上面所述,各馈线断路器及主变进线断路器的继电保护方案不需要作出调整,而母联断路器的继电保护方案需要作出如下调整:

(1) DDX1不投运时母联断路器的运行方式及继电保护方案保持不变;

(2) DDX1投运时,母联断路器的安全自动装置退出(解除备自投),增加DDX1与母联断路器分闸的联动,其它继电保护方案仍保持不变。

(3) DDX1投运时,应将DDX1低压信号控制箱的一组继电器接点用于遥信接点,与变电站监控系统连接。

### 2.3 分段母线并列运行的条件及技术经济评估

分段母线并列运行的条件:(1)相位相同,接线组别相同;(2)电压比相同;(3)短路电压差不大于10%;(4)容量比不超过3:1。如果不能满足上述(2)、(3)、(4)条件时,在任何一台变压器都不会过载的情况下,也可以并列运行。并列运行后技术经济特性如下:

#### 2.3.1 优化负荷分配

两台主变的负荷可以自动优化分配,有利于变压器自身的合理使用,保证变压器正常的使用寿命。

#### 2.3.2 降低网络阻抗

变压器有一定的阻抗,尤其是现在使用的高阻抗变压器。并列运行后,网络阻抗降低,有利于提高变电站带负荷的能力,使现有供电设备充分发挥效能,缓解地区性或季节性供电紧张局势。

#### 2.3.3 提高供电质量及可靠性

提高电能质量及可靠性一直是电力系统追求的目标。由于并列运行后带负荷能力增强,使母线电压更为稳定,电压质量得以提高。另外由于有两路电源同时供电,所以任何一路电源出现故障或临时退出,所有负荷或重要负荷可以不间断供电,显然供电的可靠性得到提高。

#### 2.3.4 节能降耗

假若两台同容量的变压器分裂运行时,一台主变负荷电流为 $I$ ,另一台负荷电流为 $0.5I$ ,又假设两台变压器的总电阻均为 $r$ ,则两台变压器的有功损耗 $W_1 = 1.25rI_2$ ;这时若将两台变压器并列运行,两台变压器的负荷电流都将是 $0.75I$ ,这时的有功损耗 $W_2 = 1.125rI_2$ 。节能降耗率为 $(W_1 - W_2)/W_1 = 10\%$ 。不难推算出极限情况可以降耗50%。考虑到一台50 MVA的变压器有功损耗近200 kW,所以并列运行具有明显的节能降耗作用。以当前改造变电站的具体情况,两台主变容量均为50 MVA,单台主变总有功损耗210 kW,其中空载损耗80 kW,平时运行时负载很不平衡,其中一台满载,另一台近乎空载,则当母联开关打开时,两台主变总损耗 $P_1 \approx 210 + 80 = 290$  kW,而母联开关合上后总损耗 $P_2 \approx 80 \times 2 + (210 - 80)/2 = 225$  kW,节能 $\Delta P = P_1 - P_2 = 65$  kW。

#### 2.3.5 节约工程投资

两主变或多主变并列运行的唯一缺点就是需要提高所有出线开关的短路电流开断能力,同时

(下转第27页)

DIRECTORY 用户和计算机”管理选项中,选择用户帐户,在配置文件选项中的配置文件路径,输入给这个用户创建的文件夹全名加上profile,这是网络路径,将来这个文件夹里面存储的就是该账户的漫游配置文件;在下面的主文件夹上选择“连接”,然后选择“Y”,输入刚才给这个用户创建的文件夹全名称加上 Y,将来这个文件夹里面存储的就是该账户的Y 盘里面的内容。最后点击确定。

#### 4.2 客户端配置

首先利用 Altiris 管理软件抓取镜像文件,并通过一台 Windows 2003 Server 的服务器对瘦客户机传入系统,具体操作步骤如下:

(1) 在服务器上开启 Altiris 的所有服务,配置 DHCP,运行 Altiris 管理软件(服务器可以用普通 PC 代替)。

(2) 通过交换机连接服务器与一台瘦客户机(已装有内网的模板系统),瘦客户机设置第一启动项为网络引导。

(3) 在服务器上利用 Altiris 管理软件的图形化界面可以看到通过交换机连接的瘦客户机名称,通过部署作业,抓取瘦客户机系统镜像文件。

镜像做好以后重复以上三个步骤把所有瘦客户机系统传好,然后要在每台瘦客户机上进行单独的配置。先用本机管理员账号 administrator 登录,设好测试环境中 IP 地址,连通网络,把本机加入域。然后把漫游用户账号加入到本机 administrator 组中。

提交重启后以域漫游用户的身份对使用环境进行设置(包括:优化输入法、关闭管理 Agent 图标、改

\*\*\*\*\*  
(上接第 23 页)

需要提高相关电气设备在短路电流冲击下的动热稳定能力,增加工程及设备造价。而采用 DDX1 后,这一缺点将不复存在。不仅如此,所有出线开关还可以选择较小容量的产品,进一步节约投资。

### 3 FCL 在母联位置的应用效果益分析

分段母线并列运行有上述诸多优点,所以限流器的上述用法在发达国家占限流器总使用量的 50%,可见国外分段母线并列运行非常普遍。另外,节能减排是我国需要长期奉行的国策,FCL 在母联位置的应用兼有节能降耗的作用,可谓一举多得,相信 FCL 将在这一领域发挥重要作用。

(1) 优化负荷分配;

变 Pagefile 设置、改变系统环境变量设置等),完成后提交重启。再以本机 administrator 登录,把漫游用户账号从本机 administrator 组中删除,把 IP 地址更改为域漫游用户的 IP 地址,提交重启。

至此,公司内网瘦客户机的配置全部完成。

### 5 结束语

本文所设计的瘦客户机模式,只需要在服务器端进行软件升级,十分方便<sup>[6]</sup>;另外,瘦客户机减少了死机或发生其它问题的解决频次,解放了企业中的网管人员;同时,所有的瘦客户机都集中在服务器端进行管理,达到了专业管理、及时处理故障的要求,为实现电力工业与社会经济的协调、科学和可持续发展起到重要的作用。

#### 参考文献

[1] 刘君. 客户机一让 PC“瘦身”. 科技日报, 2001, 10.  
 [2] 郑维宏, 张辉. Windows 终端与瘦客户机/服务器技术. 北京: 人民邮电出版社, 2001.  
 [3] Kanter J P. 全面理解瘦客户机/服务器计算技术. 北京: 清华大学出版社, 1999.  
 [4] 夏云, 吴明虎, 徐哲, 等. 现代计算机网络技术与应用. 北京: 科学技术出版社, 1999. 7.  
 [5] 张浩军. 计算机网络操作系统 Windows Server 2003 管理与配置[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.  
 [6] 薛华成. 管理信息系统[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

收稿日期: 2008-07-16

作者简介: 钱玉春(1974-), 男, 高级工程师, 现从事信息管理专业工作。

- (2) 降低网络阻抗;
- (3) 提高供电质量及可靠性;
- (4) 节能降耗;
- (5) 增强大容量变电站运行方式的灵活性。

总之, 短路电流限流装置的成功应用为电力系统及电力主设备的安全保障提供了全新的手段。

#### 参考文献

[1] 邱毓昌. 超导故障电流限制器. 高压电器, 1998, (5).  
 [2] 杨杰. 三峡水电站短路电流水平及限制措施分析. 电网技术, 1997, (7).

收稿日期: 2008-07-16

作者简介: 李良杰(1971-), 男, 高级工程师, 华北电力大学(保定)在读工程硕士, 从事电力系统运行管理。