

专用负荷开关在 500 kV 变电站的应用分析

程昕

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: 目前国内 500 kV 变电站主要采用断路器作为回路投切开关, 针对开断短路电流设计的断路器, 在投切无功补偿设备时存在断路器寿命短, 需要频繁更换的问题。介绍了在日本运行经验成熟的投切大容量无功设备的专用负荷开关, 可极大延长无功回路开关的电寿命, 适用无功回路的电流电压特性以及频繁投切操作的实际工况。通过对专用负荷开关的特性分析, 采用 BPA 软件仿真分析了专用负荷开关在 500 kV 变电站中的应用可行性。

关键词: 专用负荷开关; 500kV 变电站; 无功补偿

中图分类号: TM564

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2015)01-0115-05

Application Analysis of Load Break Switch in 500 kV Substation

CHENG Xin

(Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Energy Engineering Group, Guangzhou 510663, China)

Abstract: At present, Circuit breaker has been used as the main switch of reactive-load compensation equipment in 500 kV substation. The circuit breaker of the reactive power compensation circuit always has a short life expectancy and needs frequently replaced due to the switching test of circuit breaker designed for connection with the short-circuit current. A specified load break switch is introduced to switch the high-capacity reactive power compensation. The load break switch is a mature technology and suitable for the actual condition with the frequent operation of reactive power circuit, so it can extremely extends the electrical life of the switches. According to the characteristic analysis of specified load break switches, BPA software is used to emulate the application feasibility of the load break switches in the 500 kV substation.

Key words: load break switches; 500 kV substation; reactive power compensation

目前, 在国内 500 kV 变电站中, 无功设备的投切开关主要为 SF₆ 断路器, 其具有开断能力强, 允许连续开断次数较多等特点。由于断路器的开断性能试验是针对短路电流进行的, 其操作机构及灭弧室均按照分断短路电流的特性而设计。因此在实际运行中, 切合无功回路大约 1000 多次后, 由于大涌流和过电压的效应, 断路器的触头烧损严重, 经统计, 在 500 kV 变电站中, 普通的 SF₆ 断路器用于无功投切的电寿命通常只有两年, 之后就需要对开关进行检修或更换, 设备的运维成本很高, 也增加了运行和检修人员的工作量^[1]。

为了避免大涌流和过电压效应对断路器触头的损坏, 基于选相合闸原理, 近几年研究生产了机电

一体化开关, 利用继电器控制开合时间, 使得断路器的合闸或分闸命令被延时, 使触头在相角处于最佳状态时接触或分离, 从而消除有害暂态电流或电压。但继电器的使用对机械开关本身特性也有严格的要求, 机械开关必须具有稳定的机械操作性能, 例如 ABB 生产的同步控制器要求相匹配的断路器每次合分闸的时间误差应在 ± 0.5 ms 以内。因此机电复合开关有效的发挥作用需要继电器与机械开关的性能相匹配, 导致在实际应用中出现了继电器与机械开关不匹配, 而达不到应有的效果^[2]。

专用负荷开关 LBS (Load Break Switches), 是根据无功回路电流电压的特性以及频繁投切操作的实际运行工况而进行设计的, 大大提高了无功设备的投切次数, 减少了开关检修、维护的工作量, 同时降低了电容器、电抗器的故障率。自 2008 年起, 在国网的 500 kV 变电站的 35 kV 或 66 kV 侧投运, 并自 2010 年起, 在国网的 1 000 kV 变电站的 110 kV 侧投运, 目前运行状况均良好。

收稿日期: 2014-10-15

作者简介: 程昕(1983), 女, 安徽安庆人, 工程师, 硕士, 主要从事变电站电气一次设计及研究工作(e-mail)chengxin@gedi.com.cn。

1 投切无功设备的技术特点以及 LBS 的技术性能

1.1 投切无功设备的技术特点

1.1.1 投入无功设备

1.1.1.1 合闸电容器

在即将合闸的瞬间,在电压的作用下,绝缘介质被击穿,产生燃弧现象,及所谓的先行放电,此时,开关断口已经处于导通状态,由于电容器的特性,开关导通的一瞬间会产生高频的大涌流(突入电流),详见下图1,此刻产生的较高能量的电弧会严重影响开关触头等部件的寿命^[3]。

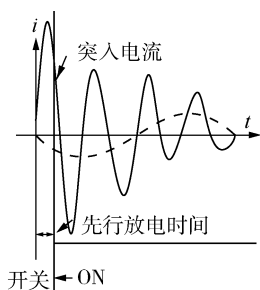


图1 电容器合闸瞬间的电流-时间波形

Fig. 1 The Voltage-Time Oscillogram of Closing Moment of Capacity

1.1.1.2 合闸电抗器

合闸瞬间,开关中流过含直流分量的基频电流,对于开关寿命的影响较小^[3],详见下图2:

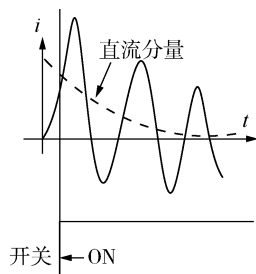


图2 电抗器合闸瞬间的电流-时间波形

Fig. 2 The Voltage-Time Oscillogram of Closing Moment of Reactor

通过以上的分析可以看出,合闸无功设备的破坏性主要来自于合闸瞬间产生的大电流,会烧蚀开关的触头,由于电容器本身特性而产生涌流具有高频、幅值大的特点,结合电容器频繁投切的特性,合闸电容器带来的破坏性更为严重。

1.1.2 退出无功设备

1.1.2.1 分闸电容器

随着断口的打开,系统会产生恢复电压,此时恢复电压与电容器内的残留电压叠加后产生更高的

恢复电压,从而形成过电压^[3],详见下图3。

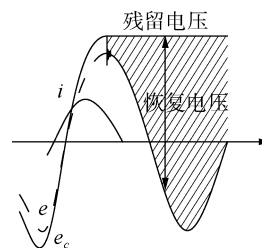


图3 电容器分闸瞬间的电压-时间波形

Fig. 3 The Voltage-Time Oscillogram of Switching Moment of Capacity

1.1.2.2 分闸电抗器

在分闸瞬间,由于电抗器的作用会产生高频振荡电压(大约2~3 kHz),从而产生较大过电压,详见下图4。在开断的过程中,过高的恢复电压及上升率会导致断口电弧的再次重燃,且燃弧时间长,一般开关较难开断,或开断次数有限^[3-4]。

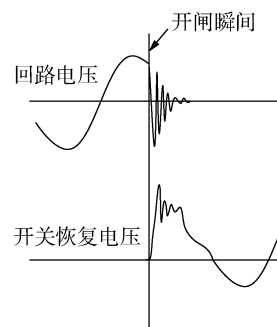


图4 电抗器分闸瞬间的电压-时间波形

Fig. 4 The Voltage-Time Oscillogram of Switching Moment of Reactor

通过以上的分析可以看出,分闸无功设备的破坏性主要来自于过电压对开关以及回路设备的损害,由于电抗器本身的特性,电抗器回路产生的过电压更大,更易引起断路器的复燃,而复燃可能会进一步造成电抗器的绝缘击穿。

1.2 专用负荷开关 LBS 电寿命试验

在日本,LBS 主要应用于72/84 kV 电压等级的无功回路中,也有应用于36 kV 回路中,技术相当成熟,并完成了连续开合试验,开合的无功容量和次数见下表1:

表1 LBS 开合的无功设备的能力(72 kV)

Table 1 Switching Capacity of LBS(72 kV)

设备	最大容量(MVA)	开合次数
电容器	60	7 000
电抗器	80	7 000
电抗器	120	4 000

在国网 1 000kV 特高压工程中，无功补偿回路接在 110 kV 母线上，电抗器和电容器的容量分别达到 240 Mvar 和 210 Mvar。

2012 年，针对国网特高压项目的要求，对 145 kV 等级的 LBS 进行了型式试验，模拟电压、电流为 136.4 kV、1 600 A 的运行工况下，合闸电流为 7 302 A，分闸电压为 311.8 kV 的情况下，交替进行合闸和分闸试验，试验过程中无燃弧、重燃，绝缘试验未发生闪络，在分合闸各 5 000 次之后，对试验的 LBS 进行解体检查开关触头烧损状况，发现弧接触子有一定的损耗，但没有异常损耗现象，主接触子、绝缘件未见异常。

1.3 专用负荷开关 LBS 的技术性能

专用负荷开关 LBS 结构上与断路器有本质区别，其制作原理分为压气式和磁旋弧方式，在功能上与断路器也有着本质的区别，主要的区别见下表 2：

表 2 断路器与 LBS 的功能区别

Table 2 Distinction of Circuit Breaker and LBS

	断路器	LBS
用途	(1) 对应系统异常，开断频率较少 (2) 短路电流的开合	(1) 日常开合，多次开合 (2) 较大涌流的投切
灭弧室	(1) 强大的压气吹弧力 (电抗器开合中会产生很大的瞬时过电压) (2) 较大的压气室容积 (3) 需要在增加压气压力上下功夫 (4) 在 IEC 标准中，容许再燃弧的发生	(1) 不须较大吹弧力 (2) 不须较大的压气室 (3) 弧触头 (4) 喷口等须专门设计 (5) 通过专门设计，使其不发生再燃弧，从而使性能稳定可靠
操作机构	(1) 须合、切大电流的强大操作力 (2) 标准要求的动作要求 (3) 为尽快切除故障，开断动作速度要求快速 (4) 需设重合闸	(1) 操作能量可以减少 (2) 有利于长寿命化 (3) 仅需完成基本的动作即“C”，“O” (4) 不设重合闸

2 采用专用负荷开关 LBS 投切电容器、电抗器回路

LBS 目前存在的型式有 GIS 和 HGIS，受到费用和应用领域的约束，目前在国内以 HGIS 型式为主。

2.1 HGIS (带 LBS) 设备的接线方案、布置型式及其二次保护

根据无功回路专用负荷开关组合设备 HGIS 中是否设置断路器，HGIS 有以下两种接线和布置方案：

方案一：HGIS 中包含断路器 QF、LBS、隔离开关 QS、接地开关 QE 及 TA(电流互感器)，其中断路器用于短路保护，LBS 用于投切无功设备。电气一次接线和布置详见图 5。

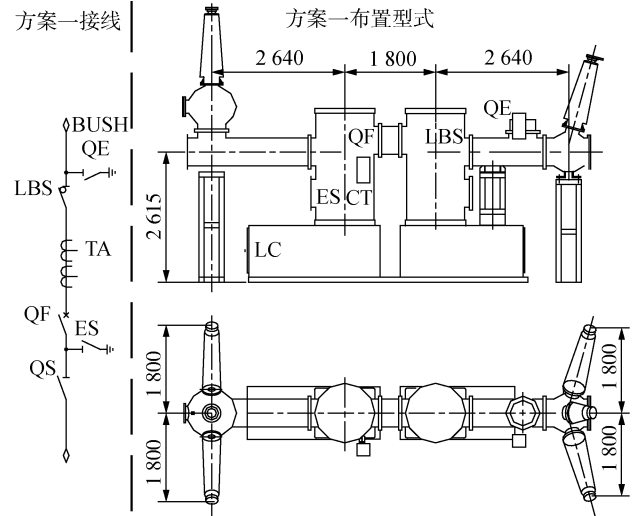


图 5 方案一的接线和布置

Fig. 5 The Connecting and Disposition of Plan One

方案二：HGIS 中包含 LBS、隔离开关、接地开关及 TA，其中 LBS 用于投切无功设备。电气一次接线和布置详见图 6：

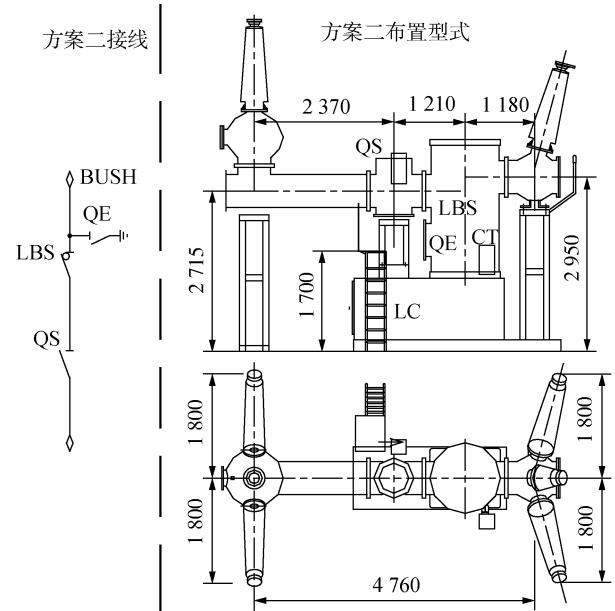


图 6 方案二的接线和布置

Fig. 6 The Connecting and Disposition of Plan Two

2.2 专用负荷开关 LBS 与断路器配合方案

2.2.1 方案一

主变压器进线主回路设置主断路器，无功分支

回路设置断路器与 LBS 相结合的接线方式。采用 LBS 投切电容器、电抗器,电寿命可以达到 7 000 次以上,大大减少了后期维护的成本。

当低压侧主回路故障时,根据不同故障类型及故障时限跳开本侧断路器或三侧断路器;当低压侧支路故障时跳开本侧断路器,不影响其它分支路,将故障影响范围控制到最小。

2.2.2 方案二

主变压器进线主回路设置主断路器,无功回路只设置 LBS 的接线方式。采用 LBS 投切电容器、电抗器,电寿命可以达到 7 000 次以上,大大减少了后期维护的成本。

当主变压器低压侧主回路故障时,根据不同故障类型及故障时限跳开本侧断路器或三侧断路器;当站用变压器支路故障时跳开本侧断路器,不影响其它分支路;当电容器支路、电抗器支路故障时跳开主变压器低压侧断路器切除故障,此时会造成主变压器低压侧失去补偿装置及连接在该段母线上的站用变压器失电。站用变失电后,380 V 备自投动作,投入#0 站用变。

2.2.3 方案三

主变压器进线主回路不设置主断路器,无功回路设置断路器与 LBS 相结合的接线方式。采用 LBS 投切电容器、电抗器,电寿命可以达到 7 000 次以上,大大减少了后期维护的成本。

主变压器低压侧故障通过跳开主变压器高、中压侧断路器切除故障,造成变压器三侧失电,扩大了停电范围。电容器、电抗器、站用变支路故障通过跳开本支路断路器切除故障,不影响其它分支路。

2.2.4 方案比较

对方案一至方案三进行技术经济比较,结果详见下表 3:

表 3 方案比较
Table 3 Project Comparison

性能	方案一	方案二	方案三
可靠性	高	比方案一低	比方案一和方案二低
占地	大	比方案一小	比方案一和方案二小
运行经验	应用在北京奥运保电的 500 kV 变电站中	在日本普遍应用;国网特高压工程得到应用	基本没有运行经验
费用	高	比方案一和方案三低	比方案一低

据调查,在无功补偿回路中,正常投切的次数占整个开关寿命中开断次数的 95% 以上,而开断短路电流的操作次数很少,方案二中无功回路不设断路器只设 LBS 的方式,通过二次保护配合,在保证可靠性的前提下,降低了设备造价,技术经济性最优。

2.3 500 kV 变电站无功回路投切开关选型

通过第一节分析可知,投切电容器和电抗器回路的电压电流特性区别很大,对开关及回路设备的破坏性差别也较大,本节分别对电容器和电抗器回路的投切开关进行选型分析。

2.3.1 投切电容器回路的开关选型

通过第 1 节的分析可知,电容器回路的破坏性来自于合闸操作引起的高频大涌流,会烧蚀开关的触头,极大地缩短开关的电寿命,从而增加了设备维护和更换的工作量,也造成了经济损失。

实际运行中,500 kV 变电站中投切电容器的操作频繁,因此回路开关的寿命一般只有 2 年,检修维护的工作量很大,因此 500 kV 变电站电容器回路的开关推荐采用 LBS。

2.3.2 投切电抗器回路的开关选型

通过第 2 节的分析可知,电抗器回路的破坏性来自于分闸操作引起的过电流,可能会引起断路器复燃,从而破坏电抗器设备的绝缘。

实际运行中,500 kV 变电站中投切电抗器的频率相对电容器低,专用负荷开关 LBS 虽然技术先进,但价格不菲,因此综合考虑经济性和可靠性,500 kV 变电站电抗器回路的开关推荐采用 SF₆ 断路器,为了尽量延长断路器的电寿命,提高可靠性,推荐采用电压等级高一级的 SF₆ 断路器。

3 某 500 kV 变电站 LBS 应用的仿真分析

3.1 某 500 kV 变电站及其无功配置简介

某 500 kV 变电站本期建设 2 台 1 000 MVA 主变压器,每台主变压器低压侧建设 3 × 60 Mvar 电容器组及 2 × 60 Mvar 电抗器组,远期建设 4 台 1 000 MVA 主变压器,每台主变压器低压侧建设 3 × 60 Mvar 电容器组及 1 × 60 Mvar 电抗器组。

3.2 主变压器低压侧接线方案以及 BPA 仿真验证

通过第二节分析得知,主变压器低压侧总回路设断路器,35 kV 电容器回路设专用负荷开关 LBS,不设分支断路器,站用变压器及低压并联电

抗器回路设分支断路器方案的技术经济性最优。

采用这种方案时, 由于电容器支路不设断路器, 当支路发生故障时, 跳开主变压器低压侧断路器切除故障, 此时也切除了主变压器低压侧所有的负荷, 包括站用变和无功负荷。其中站用变压器失电后, 380 V 备自投动作, 投入#0 站用变; 而无功负荷的突然切除会引起电网电压的波动, 为了进一步验证该方案的可行性, 运用 BPA 软件进行 2017 年的夏大运行环境下的仿真, 当电容器支路发生故障而引起的最大稳态电压跌落(同时切除低压侧 3 组 60 MVar 电容器组), 具体 BPA 仿真波形及数据见图 7 和图 8:

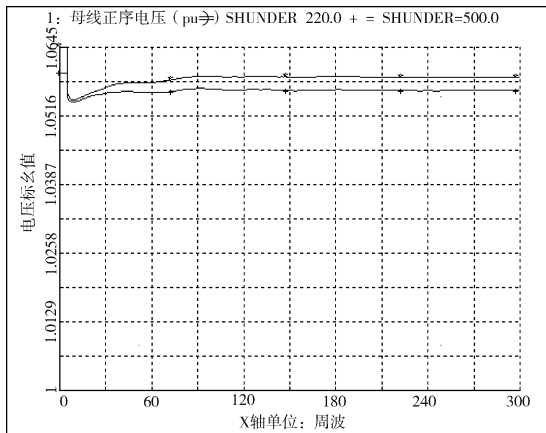


图 7 2 台主变压器运行中同时切某台主变压器低压侧负荷时的电压跌落波形图

Fig. 7 The Voltage Drop Level Oscillogram of Switching the Whole Load of Certain Transformer When Two Transformers are Both Operating

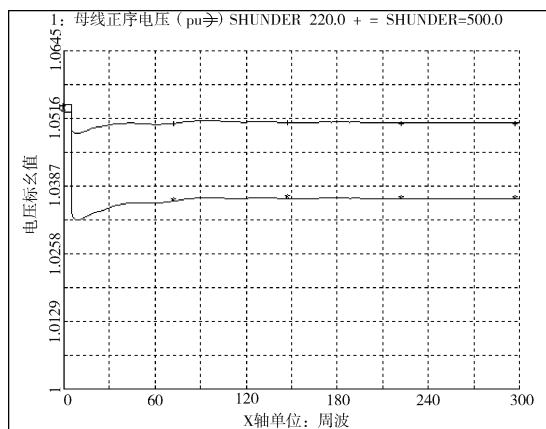


图 8 1 台主变压器运行中切主变压器低压侧负荷时的电压跌落波形图

Fig. 8 The Voltage Drop Level Oscillogram of Switching the Whole Load of Certain Transformer When One Transformer is Operating

根据《广东电网公司电力系统电压质量和无功电力管理办法》中第 4.3.1 项发电厂和变电站 500 kV 及以上母线以及发电厂和 500 kV 变电站的 220 kV 母线正常运行方式时, 电压允许偏差为系统额定电压的 0% ~ +10%; 而某 500 kV 站 500 kV 母线以及 220 kV 母线最大电压偏差分别为 5.629%、5.871%, 符合要求。

根据上图可以看出, 即使是在故障切除的瞬间, 该 500 kV 站 500 kV 和 220 kV 母线暂态电压的跌落也均在合理的范围内。

4 结语

我国 500 kV 变电站目前主要采用 SF₆ 断路器进行投切无功补偿设备, 普遍存在断路器电寿命短的问题, 专用负荷开关 LBS 针对投切无功补偿设备的电流电压特性进行设计, 极大延长了开关的电寿命, 大大降低了设备维护工作量, 但由于费用高昂, 因此在我国 500 kV 变电站中并未得到广泛应用。

本文通过一系列分析比较, 得出 500 kV 变电站采用 LBS 的可靠性和经济性综合最优的方案, 并通过 BPA 仿真分析, 论证了该方案若在发生短路故障的情况下, 电压跌落符合《广东电网公司电力系统电压质量和无功电力管理办法》中的要求。

参考文献:

- [1] 任艳杰, 赵玉林. 低压无功补偿电容投切开关的研究 [J]. 东北农业大学学报, 2008, 39(4): 39-42.
REN Yanjie, ZHAO Yulin. Study on Switch of Reactive Power Compensation Capacitors of Low-voltage Network [J]. Journal of Northeast Agricultural University, 2008, 39(4): 39-42.
- [2] 吴功祥, 江和, 张培铭. 无功补偿电容投切用智能复合开关的研制 [J]. 电工电气, 2009(7): 28-30.
WU Gongxiang, JIANG He, ZHANG Peiming. Development of Intelligent Compound Switch for Reactive Power [J]. Electro-technics Electric, 2009(7): 28-30.
- [3] 北京宏达日新电机有限公司. 负荷开关(LBS)营业技术手册 [R]. 2013.
- [4] 安韵竹, 文习山, 张婷婷, 等. SF₆ 断路器预击穿引起并联电抗器合闸过电压的原因及防护措施 [J]. 高电压技术, 2013, 39(1): 75-80.
AN Yunzhu, WEN Xishan, ZHANG Tingting, et al. Overvoltage of Shunt Reactor Caused by Prebreak Down of SF₆ Breaker and Protection Measures. High Voltage Engineering, 2013, 39(1): 75-80.

(责任编辑 黄肇和)