

# 基于快速真空断路器的深度限流装置的风险评价

李品德<sup>1</sup>, 李梦菲<sup>2</sup>, 陈刚<sup>3</sup>

(1. 陕西电力科学研究所, 710054; 2. 华东交通大学, 330013; 3. 西安交通大学, 710048)

**摘要:** 本文简要分析了高速真空断路器、快速真空断路器以及基于快速真空断路器的深度限流装置的原理和基本特性, 剖析了深度限流装置的换流过程。并对深度限流装置在实际应用中存在的技术风险进行了分析和评价, 以期用户能够正确了解此类装置的技术特性、规避可能存在的技术风险。

**关键词:** 高速真空断路器; 快速真空断路器; 深度限流装置; 换流

## The Risk Assessment of Deep Short-Current Limiting Device with Zero-Lost Based on Fast-speed Vacuum Circuit Breaker

Li Pin-de<sup>1</sup> Li Meng-fei<sup>2</sup> Chen Gang<sup>3</sup>

(1. Shaanxi EPRI, Xi'an 710054, China; 2. East China Jiaotong University, Nanchang 330013; 3. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710048, China)

**Abstract:** A brief analysis has been done about the principle and basic characteristics of high-speed VCB, fast-speed VCB and deep short-current limiting device (DSCLD) based on fast-speed VCB. The commutation process in DSCLD is also dissected. The technical risk in application of DSCLD has been analysed and estimated so as to avoid possible risk via users realization of its technical characteristics.

**Key Words:** high-speed VCB; fast-speed VCB; deep short-current limiting device; commutation

### 1. 概述

目前电力设备市场出现了一种快速真空断路器及与其相关的零损耗深度限流装置, 引起了业内人士的高度关注。就快速真空断路器而言, 目前存在两种技术方式: 其一是基于电磁斥力机构的, 其二是基于改进型永磁操动机构的。在实际应用中, 主要是利用它们的速分特性。相比之下, 前者的分闸时间及触头运动时间可以做得短很多, 所以可以把前者称为高速真空断路器, 而把后者称为快速真空断路器。所谓的零损耗深度限流装置, 就是将快速真空断路器和限流电抗器并联构成主导电回路, 需要限流时可控制断路器分闸使电流转移到限流电抗器中进行限流。鉴于工矿企业的技术人员日常工作中很少有机会对高速或快速真空断路器和深度限流装置进行深入研究, 以至于在产品的应用决策中容易受到商家的过度宣传而发生歧义, 本文将对高速、快速真空断路器和深度限流装置的原理、

特性进行分析和介绍，并对深度限流装置的应用风险做出评价。

## 2. 基于电磁斥力机构的高速真空断路器

过去的十多年里，基于电磁斥力机构的高速真空断路器受到很多高校及研究院的亲睐，并取得了一系列研究成果[1][2][3]，其主要应用领域为舰船直流电源系统的短路保护，开断过程需要人工制造电流过零点。以 12kV 产品为例，普通弹簧操动机构或永磁操动机构真空断路器分闸时间需要 25ms 附近，触头运动时间需要 10ms 附近，触头运动平均速度 1~2m/s。而基于电磁斥力机构的真空断路器，利用高电压大容量电容器组（例如 1000V~3200V/1mF）对斥力线圈（分闸或合闸线圈）放电以获得瞬时大电流，从而在金属盘中产生强大涡流并形成对线圈的巨大电磁斥力，此斥力通过绝缘拉杆操动灭弧室的分闸或合闸，图 1 是其典型结构示意图。这种断路器的分闸时间可以缩短到 0.5ms 附近，触头运动时间缩短到 2ms 以内，触头运动平均速度 6~10m/s。

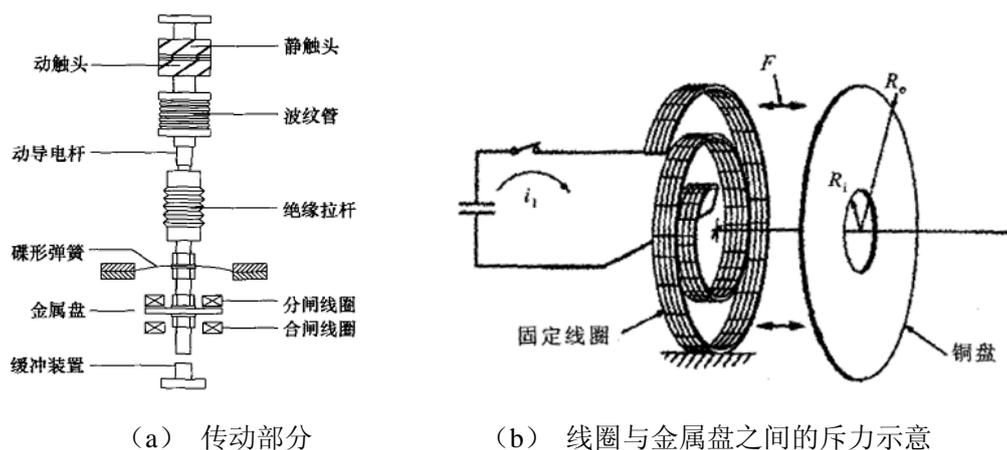


图 1 基于电磁斥力机构的高速真空断路器结构示意图

虽然电磁斥力机构可以实现真空断路器的快速分闸或合闸，但问题也随之而来，主要体现在以下几个方面：

- (1) 真空灭弧室包括波纹管、触头、密封环节等不能承受因操作速度大幅度提高而带来的巨大冲击力，丧失了基本的机械稳定性；
- (2) 操作力的传动环节包括绝缘拉杆及缓冲环节无法满足高速运动对强度的要求。
- (3) 操作控制系统复杂，大容量电容器处于高压大电流工况，降低了系统的可靠性和使用时的安全性。

上述因素导致高速真空断路器目前还没有进入商用阶段，至今也还没有进行

型式试验的记录。

### 3. 基于改进型永磁操动机构的快速真空断路器

#### 3.1 实现快速分闸的技术改进

传统永磁机构或普通弹操机构 12kV 真空断路器在机械参数方面远远达不到快速分闸或合闸的要求。要使传统永磁真空断路器变为快速真空断路器需要进行下列改进：

- (1) 大幅度减小分闸时间：分闸时间是指分闸控制回路接到分闸命令到触头刚刚分离时刻的时间间隔，要达到快速分闸，这个时间需要从目前的 25ms 降低到 6ms 以内。
- (2) 适当减小触头额定开距：在满足可靠绝缘性能的前提下进行，这需要依赖于灭弧室制造水平的进步，包括触头材料及相关工艺。
- (3) 适当提高触头平均运动速度：比如从目前的 1.1m/s 提高到 1.6m/s。
- (4) 改进机构操作力的传递方式：改杠杆传动方式为直动方式，减少传动环节从而减小分闸过程的机械响应时间。
- (5) 可以考虑采用双动灭弧室，也就是采用单相双机构在不增加每个机构分闸速度的前提下减小触头运动时间。
- (6) 继电保护原理的革新：在实际应用中，还需要革新传统的继电保护原理，使其对故障类型及短路电流的检出时间从目前的 30ms~50ms 降低到 5ms 以内。

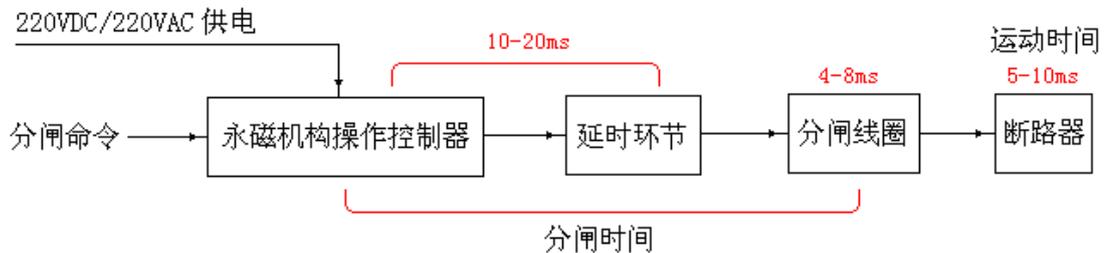


图 2 永磁机构分闸过程的时间构成

图 2 是 12kV 传统永磁机构真空断路器分闸时间构成示意图，目前的直动式永磁机构断路器从分闸线圈得电到触头刚分的时间可以做到 5ms 左右，为了避免永磁机构控制器在暂态扰动时可能产生的误触发，在操作控制环节人为增加了分闸命令确认时间。不仅如此，为了避免断路器开断时可能面临的较大非周期分量，又人为添加了延时环节。这样，分闸时间就在 25ms 附近了。可见，

取消上述人为延时环节大幅度减小分闸时间是可以做到的。不过这样做，其一需要严格考核永磁机构操作控制器的抗扰动能力，其二应避免此类断路器应用于大直流分量场合，尤其是短路电流在前一个或几个周波可能不过零的场合，否则即使快速分闸也达不到快速开断的目的。

对于触头额定开距，传统真空断路器一般取  $11 \pm 1\text{mm}$ ，目前 SIEMENS 公司的 12kV 产品可以缩小到 5mm，国内厂家可以做到  $7 \pm 1\text{mm}$ ，这主要取决于触头材料及灭弧室加工工艺水平。在触头平均运动速度一定时，显然开距越短越有利于减小触头运动时间。在额定开距一定时，例如 8mm，则触头平均运动速度从 1.1m/s 提高到 1.6m/s 将导致触头运动时间从 7.3ms 减小到 5ms。另外，对机构动力传动方式的改善主要是指由拐臂及杠杆传动改为直动方式，一般可以节省 3~5ms 左右的机械响应时间，也就是可使分闸时间缩短 3~5ms 左右。

继电保护原理革新的意义是显而易见的，否则使用快速真空断路器也达不到减小短路电流持续时间的效果。相关的资料表明，12kV 电网传统继电保护故障识别及出口时间一般为 30~50ms，而目前采用特殊算法的故障电流识别技术可以在 3ms 左右完成对故障的判断和特征参数的计算。

目前国内有快速真空断路器产品在国家高压电器质量监督检验中心完成了性能检测及部分型式试验，表明此类产品已经具备一定的成熟度，正在向商业化方向迈进。

### 3.2 快速真空断路器的技术参数及开断性能

#### (1) 技术参数

某型 12kV/1600A 快速真空断路器主要技术参数如下：

表 1 12kV/1600A 快速真空断路器主要技术参数

参数名称	要求值	参数名称	要求值
1.额定电压	12kV	2.额定电流	1600A
3.额定短路开断电流	40kA	4.额定峰值耐受电流	100kA
5.额定开距	$5 \pm 0.2\text{mm}$	6.超行程	$2 \pm 0.2\text{mm}$
7.额定分闸时间	4~6ms	8.额定合闸时间	11~16ms
9.触头合闸弹跳及分、合闸不同期	$\leq 2\text{ms}$	10.断口工频耐压	42kV/1min
11.断口雷电冲击耐压	75kV	12.额定机械寿命	10000 次

## (2) 开断性能

由于采用了选相分闸技术，开断时各相的燃弧时间均小于 2ms，40kA 短路开断波形见图 3。图 3 (a) 中首开相为 B 相，波形比较理想。图 3 (b) 中首开相为 A 相，B、C 相分闸命令滞后导致故障电流多持续了约 9ms（即第三个半波本不应该出现）。采用选相分闸技术的意义在于可将燃弧时间最小化，有利于减小触头电磨损、提高开断可靠性和开断能力。选相分闸的关键在于：通过新型微机保护装置快速精确的预测出三相电流及电流过零点的精确时刻，选择首半波具有明显大半波特征的相次作为首开相，并在其过零点之前发出分闸命令，使断路器触头在过零点之前 2ms 左右开始分离，确保电流过零瞬间的触头开距可以承受住断口两端的恢复电压而使电弧熄灭。

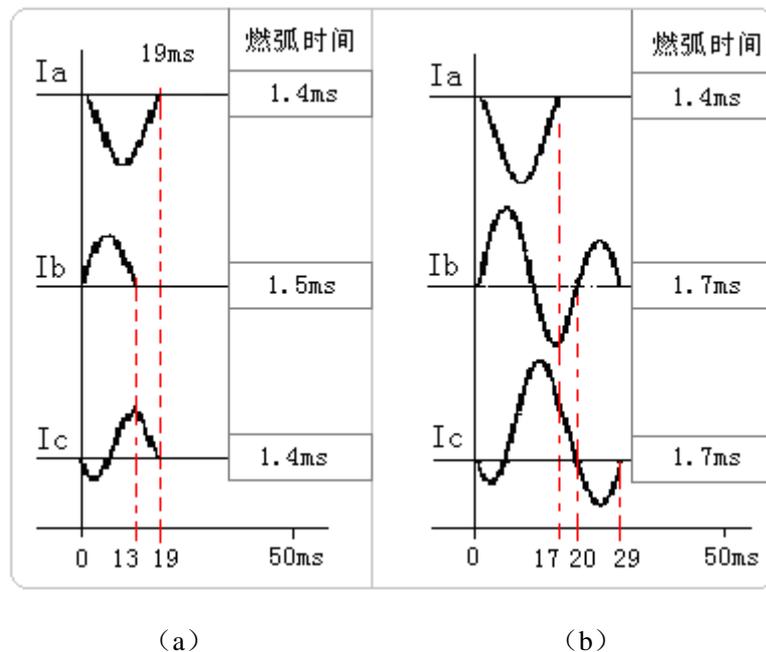


图 3 快速真空断路器开断 40kA 短路电流的典型波形

图 4 为普通真空断路器开断 40kA 短路电流的典型波形。可以看出，短路电流持续时间比快速真空断路器明显长，燃弧时间首开相比较短，而晚开相一般要比首开相的燃弧时间长 5ms。

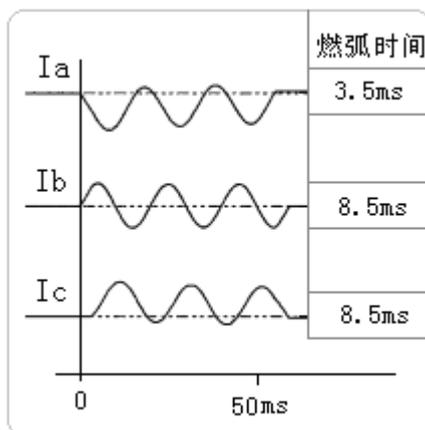


图4 普通真空断路器开断40kA短路电流的典型波形

#### 4. 基于快速真空断路器的深度限流装置

##### 3.1 基本原理

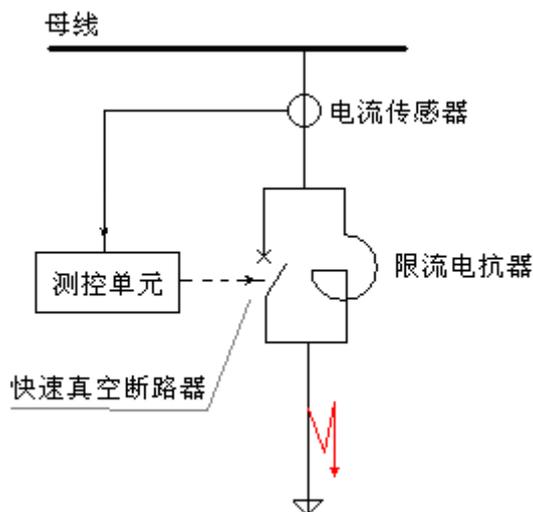


图5 深度限流装置

从图5可以看出，深度限流装置由高电抗率的限流电抗器、快速真空断路器、电流传感器及测控单元组成[4]。之所以叫“深度限流”，是因为此时可以只考虑短路电流限制的要求，电抗率可以做得比普通限流电抗器的大。快速真空断路器与限流电抗器并联构成电流主回路，正常情况下限流电抗器被快速真空断路器旁路呈现出零损耗通流状态，出线端一旦存在超出测控单元设定值的短路电流时，测控单元向快速真空断路器发出分闸命令，随着断路器的开断，电流将从断路器支路转移到限流电抗器支路从而起到限流作用。短路故障消失后，测控单元控制断路器自动合闸，恢复到零损耗通流状态。采用快速真空断路器意在消除正常通流状态下限流电抗器的巨大损耗和可观的电压降落，达到节能降耗、提高电压质

量、无损限流的目的。

### 3.2 换流过程分析

换流过程是指电流从断路器支路转移到限流电抗器支路的过程。由于真空电弧的电压降只有几十伏，所以电弧会持续燃烧直至电流自然过零才会熄灭，之后电流才能转移到限流电抗器支路。很显然，断路器在深度限流装置里的开断过程与第 3.2 节描述的开断过程有一定的差别：因为限流电抗器的存在使晚开相电流的开断过程会发生变化。假若某 10kV 系统安装限流电抗器之前的短路电流为 60kA，系统额定电流 3150A，则装配 15% 电抗率的深度限流装置后，在某个相位短路时 A、B、C 三相的换流过程的 PSIM6.0 软件仿真波形见图 6。图 6 所示

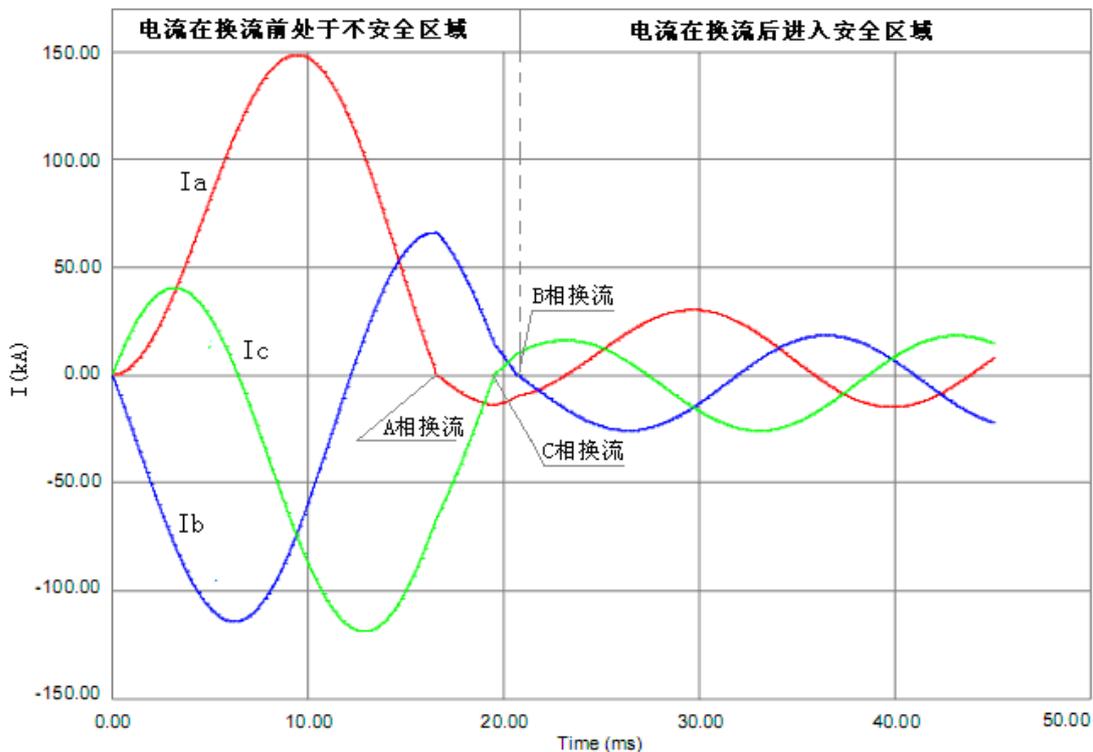


图 6 深度限流装置换流过程的示意图

的换流过程与深度限流装置在国家高压电器质量监督检验中心的试验结果一致。这就意味着，若用快速真空断路器来旁路限流电抗器，短路故障出现时，首开相的电抗器可能在故障后十几毫秒后才能接入，而晚开相可能在故障发生后二十几毫秒后才能接入，在电抗器接入之前回路电流可能达到可怕的高幅值。失去限制的短路电流往往可达系统额定电流的 25~30 倍，而短路时在变压器或发电机绕组间产生的电动力又与短路电流的平方成正比，所以短路时的机械力大致为正常运行时的几百倍甚至更大。在如此巨大的电动力作用下，设备绕组轻则失稳变形导

致绝缘损坏，重则使绕组坍塌导致电力主设备烧毁[5]。

以陕西省电力公司某 330kV 变电站 10kV 侧为例，10kV 侧额定电流 3150A，若无限流电抗器则 10kV 侧短路电流稳态值高达 90kA，主变可以承受的最大额定短路电流是 40kA。如图 7 安装电抗率 10% 的限流电抗器后，10kV 侧短路电流可以限制到 30kA 左右，是限流前的 1/3，进线断路器的额定短路开断电流为 40kA，可以满足开断的要求，同时也可保证系统短路时的最大电动力在设备可以承受的范围。但若采用上述深度限流装置替代图 7 中的限流电抗器，在馈线侧发生近区短路时，则短路发生后 30ms 内电流预期的稳态水平仍然为 90kA，是主变可以承受的最大额定短路电流 40kA 的 2.25 倍，此时主变绕组就要遭受到  $2.25^2$  即 5 倍于最大允许电动力的冲击，而这种电动力造成的破坏往往在短路发生后 20ms 内电流第一个大半波峰值时就已经形成。30ms 之后，限流电抗器虽然可以投入将电流限制到 30kA，进线断路器也可以成功开断，但主变很可能已经损坏。所以在这种情况下使用深度限流装置是很不明智的，存在重大安全隐患。

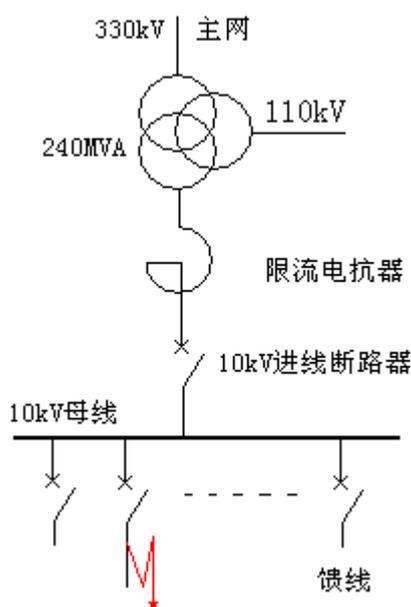


图 7 陕西某 330kV 变电站 10kV 侧主接线示意图

但若即使不采用限流措施系统本来就可以承受住最大短路电流的冲击，采用限流措施只是为了将系统短路电流降低到更安全的范围，则上述深度限流装置就是一个值得考虑的技术方案。

## 5. 总结

(1) 基于电磁斥力机构的高速真空断路器分闸时间可达到 1ms 以内，但与

其相关联技术尚不成熟，目前这种产品还没有进入实用阶段。

- (2) 基于改进型永磁机构的快速真空断路器分闸时间可达到 6ms 以内，配以故障电流快速识别及选相分闸技术，可在故障发生后 30ms 以内完成开断。产品已经基本实用。
- (3) 基于快速真空断路器的深度限流装置应视情况谨慎使用，由于它在完成换流之前也就是在短路故障发生后 30ms 以内没有限流能力，所以使用不当可能会对电力主设备（发电机或变压器）或电力系统带来重大安全隐患。

作者简介：李品德（1966-），男，高级工程师，从事高电压技术、限流器技术及故障电流快速识别技术研究,13909183399。

#### 参考文献

- [1] 王子健，何俊佳等，基于电磁斥力机构的快速真空开关，2009，24（11）：68-75。
- [2] 毛海涛，陆恒云，快速电磁斥力机构的有限元分析，高电压技术，2009，35（6）：1420-1425。
- [3] 史宗谦，贾申利等，真空直流断路器高速操动机构的研究，高压电器，46（3）：18-22。
- [4] 程艳兵等，零损耗深度限流装置的优化与应用，铜业工程，2012,116(4): 41-44。
- [5] 田立军等，大型电力变压器线圈短路电磁力的数值计算[J]，东北电力技术，2000，（2）：3-5。

2013-03-06