



中华人民共和国国家标准

GB/T 15166.6—2023

代替 GB/T 15166.6—2008

高压交流熔断器 第6部分：用于变压器 回路的高压熔断器的熔断件选用导则

High-voltage alternating-current fuses—Part 6: Application guide for
the selection of fuse-links of high-voltage fuses for transformer
circuit applications

2023-03-17 发布

2023-10-01 实施

国家市场监督管理总局
国家标准化管理委员会 发布

目 次

前言 III

引言 IV

1 范围 1

2 规范性引用文件 1

3 术语和定义 1

4 缩略语 1

5 限流熔断器 1

 5.1 基本原则 1

 5.2 熔断件的时间-电流特性 3

 5.3 额定电压 3

 5.4 额定电流 3

 5.5 额定最小开断电流 3

 5.6 用于组合电器或与其他开关装置联合的后备熔断器 4

6 喷射熔断器 4

 6.1 基本要求 4

 6.2 系统条件 5

 6.3 时间-电流特性 5

 6.4 额定电压 5

 6.5 额定电流 5

 6.6 额定最大开断电流 6

7 限流熔断器与喷射熔断器的联合 6

 7.1 概述 6

 7.2 基本配合原则 6

 7.3 匹配熔化配合 7

 7.4 时间-电流曲线交叉配合 9

 7.5 预防对后备熔断器的损坏 9

 7.6 后备限流熔断器的过载保护 10

参考文献 12

图 1 与高压/低压变压器回路保护相关的特性 2

图 2 匹配熔化配合的例子 7

图 3 时间-电流交叉配合的例子 8

图 4 熔断器“无损坏”裕度 10

前 言

本文件按照 GB/T 1.1—2020《标准化工作导则 第 1 部分：标准化文件的结构和起草规则》的规定起草。

本文件是 GB/T 15166《高压交流熔断器》的第 6 部分。GB/T 15166 已经发布了以下部分：

- 第 1 部分：术语；
- 第 2 部分：限流熔断器；
- 第 3 部分：喷射熔断器；
- 第 4 部分：并联电容器外保护用熔断器；
- 第 5 部分：用于电动机回路的高压熔断器的熔断件选用导则；
- 第 6 部分：用于变压器回路的高压熔断器的熔断件选用导则。

本文件代替 GB/T 15166.6—2008《高压交流熔断器 第 6 部分：用于变压器回路的高压熔断器的熔断件选用导则》，与 GB/T 15166.6—2008 相比，除结构调整和编辑性改动外，主要技术变化如下：

- 增加了适用于变压器回路的熔断件类型（见第 1 章）；
- 增加了用于变压器回路的喷射熔断器的熔断件选用导则（见第 5 章）；
- 增加了用于变压器回路的限流熔断器和喷射熔断器联合的选用导则（见第 6 章）。

请注意本文件的某些内容可能涉及专利。本文件的发布机构不承担识别专利的责任。

本文件由中国电器工业协会提出。

本文件由全国熔断器标准化技术委员会（SAC/TC 340）归口。

本文件起草单位：西安高压电器研究院股份有限公司、库柏电子科技（上海）有限公司、上海南华兰陵电气有限公司、施耐德电气（中国）有限公司、日升集团有限公司、国网辽宁省电力有限公司电力科学研究院、国网河北省电力有限公司电力科学研究院、国网浙江省电力有限公司电力科学研究院、宁波舜利高压开关科技有限公司、山东泰开智能配电有限公司、浙江八达电子仪表有限公司时通电气分公司、江东金具设备有限公司、上海电气输配电试验中心有限公司、西安交通大学、中国电力科学研究院有限公司、伊顿电气有限公司、红光电气集团有限公司、嘉兴卓达电气科技有限公司、正泰电气股份有限公司、浙江民源高压电器有限公司。

本文件主要起草人：邢娜、田恩文、孙鸣、谭燕、雷小强、顾立立、王飞鸣、谢瑞涛、庞先海、谢成、胡光福、任晓东、叶树新、李晓东、乐三祥、丘伟锋、姜子元、刘志远、冯英、孔祥军、陈洪飞、史宏伟、范广伟、陈伟卫、沈龙杰、崔旭东、戴浩泽、赵庆斌。

本文件及其所代替文件的历次版本发布情况为：

- 1994 年首次发布为 GB/T 15166.2—1994；
- 2008 年第一次修订时从 GB/T 15166.2—1994 中分离成为 GB/T 15166.6—2008；
- 本次为第二次修订。

引 言

高压交流熔断器产品广泛应用于我国标称电压 3 kV 及以上的发输配电系统和厂矿企业、居民小区中,并作为线路及电动机、变压器、熔断器等设备的保护装置。在这方面,我国已经建立了支撑高压交流熔断器产品的 GB/T 15166 系列国家标准体系。GB/T 15166 旨在确立适用于高压交流熔断器设计、额定值、试验及特殊使用场合选型的准则,拟由 8 个部分构成。

- 第 1 部分:术语。目的在于为体系内的标准提供通用的术语。
- 第 2 部分:限流熔断器。目的在于为高压交流限流熔断器提出规范的要求。
- 第 3 部分:喷射熔断器。目的在于为高压交流喷射熔断器提出规范的要求。
- 第 4 部分:并联电容器外保护用熔断器。目的在于为并联电容器外保护用熔断器这一特殊工况提出专门的附加要求。
- 第 5 部分:用于电动机回路的高压熔断器的熔断件选用导则。目的在于为保护电动机回路用熔断器这一特殊工况提出专门的附加要求。
- 第 6 部分:用于变压器回路的高压熔断器的熔断件选用导则。目的在于为保护变压器回路用熔断器这一特殊工况提出专门的附加要求。
- 第 7 部分:用于电压互感器的高压熔断器的熔断件选用导则。目的在于为保护电压互感器用熔断器这一特殊工况提出专门的附加要求。
- 第 8 部分:教程及应用导则。目的在于为不同运行工况下熔断器的选型做出指导。

高压交流熔断器 第6部分:用于变压器回路的高压熔断器的熔断件选用导则

1 范围

本文件给出了用于变压器回路中的高压熔断器的熔断件和其他元件配合的基本原则,以及根据其弧前时间-电流特性和其他额定值选用这类熔断件的导则。

本文件适用于变压器回路并符合 GB/T 15166.2—2008 和 GB/T 15166.3—2023 的高压交流熔断器的熔断件。

本文件涉及的熔断器有:限流熔断器、喷射熔断器以及它们的组合。

2 规范性引用文件

下列文件中的内容通过文中的规范性引用而构成本文件必不可少的条款。其中,注日期的引用文件,仅该日期对应的版本适用于本文件;不注日期的引用文件,其最新版本(包括所有的修改单)适用于本文件。

GB/T 14808—2016 高压交流接触器、基于接触器的控制器及电动机起动器

GB/T 15166.2—2008 高压交流熔断器 第2部分:限流熔断器

GB/T 15166.3—2023 高压交流熔断器 第3部分:喷射熔断器

GB/T 16926—2009 高压交流负荷开关-熔断器组合电器

3 术语和定义

本文件没有需要界定的术语和定义。

4 缩略语

下列缩略语适用于本文件。

TCC:时间-电流特性曲线(Time-current characteristic)

TRV:瞬态恢复电压(Transient recovery voltage)

5 限流熔断器

5.1 基本原则

图1所示为一个包括高压熔断件(或熔断件组)、变压器以及可能的电源侧和负载侧保护装置在内的典型的变压器应用。

首先根据其特定工况选择变压器,从而确定变压器额定电流的值以及可允许的过载电流的值(如适用),并且推断涌流的值。然后选择高压熔断件(多个)对回路提供最佳的保护。熔断件的选取参考图1并考虑下列因素。

- a) 一次侧高压熔断件的最小弧前时间-电流特性位于决定变压器涌流特性的点A的右侧。为了实用的目的,变压器涌流可采用变压器额定电流的12倍左右、持续0.1 s。

- b) 一次侧高压熔断件的额定电流需要超过变压器的额定电流：
- 1) 电流足够大,以允许运行条件下变压器的过载(见 GB/T 1094.7—2008 和 GB/T 1094.12—2013)；
 - 2) 安装在外壳中的熔断件(多个)有更大的电流,以确保不超过规定的熔断件温度限值,从而保证过高的熔体温度不会导致熔断器过早动作；
 - 3) 更大的电流,其环境空气温度可能超过 GB/T 15166.2—2008 的 2.2 规定的值。
- c) 一次侧高压熔断件的弧前电流在熔断器时间-电流特性的 10 s 区间内尽可能低,以保证变压器得到最大的保护。
- d) 为了使一次侧和二次侧的熔断件或负载侧的其他保护装置间更好的配合,一次侧的时间-电流特性(最小弧前)和二次侧的装置特性(最大动作)(按照变比折算到一次侧)的交点 B 需要出现在比二次侧保护装置的最大负载侧故障电流更大的电流值上。
- 最后,如果发现没有达到预期的配合程度,则可重新检查电源侧过流保护装置的选择或设置。同样地,为了相同的原因,二次侧熔断件(多个)的最大额定值可能需要降低。

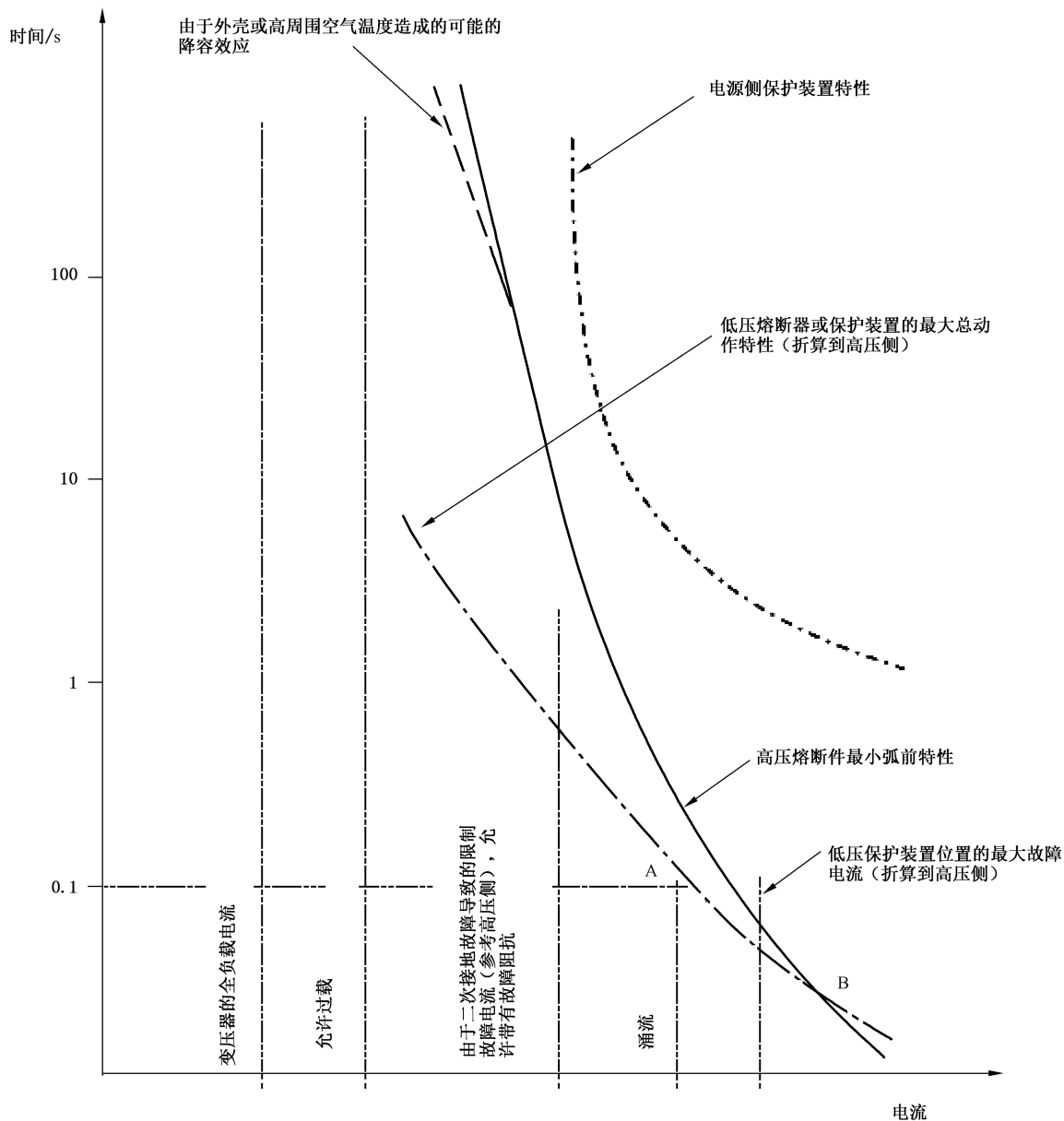


图 1 与高压/低压变压器回路保护相关的特性

5.2 熔断件的时间-电流特性

用于变压器回路中的高压交流熔断器的熔断件的时间-电流特性应具有以下特征。

- a) 在 0.1 s 区间内相对较高的动作电流,以耐受变压器的涌流并提供与二次侧保护装置(如果装有)的良好配合。
- b) 在 10 s 区间内具有相对较低的动作电流,以:
 - 1) 确保快速清除变压器的绕组故障、二次侧故障以及(适用时)一次侧接地故障;
 - 2) 提供与上游过电流保护装置(电源侧)的良好配合。

因此,变压器回路中的熔断件弧前时间-电流特性应在以下范围内:

—— $I_{f10}/I_r \leq 6$, 满足条件 b);

—— $I_{f0.1}/I_r \geq 7(I_r/100)^{0.25}$, 满足条件 a)。

其中,所有的电流值的单位为安培(A),

I_r 是熔断件的额定电流;

I_{f10} 和 $I_{f0.1}$ 分别是对应于 10 s 和 0.1 s 的弧前电流,该电流用平均值表示且带有 GB/T 15166.2—2008 的 4.11 中规定的公差。

引入 $(I_r/100)^{0.25}$ 是考虑到接近短时区域时熔断件的弧前时间-电流特性具有分散范围的事实。

5.3 额定电压

限流熔断件的动作电压(峰值电弧电压)在 GB/T 15166.2—2008 中规定,并且设置为一个不应使变压器或系统绝缘水平出现问题的值。限流熔断器的额定电压要大于或等于所选电压。如果限流熔断器不能根据实际运行电压改变,或者采用了内置不易更换的熔断器的典型方案(见第 7 章),则熔断器按照与较低电压设置匹配的额定电流以及与较高电压设置匹配的额定电压进行选择。在这种情况下,如果较低的电压小于熔断器额定电压的约 50%,应检查动作电压(适当调整以适应较低的系统电压),以确保不会有系统绝缘击穿的问题。此外,在两种电压下使用单一限流熔断器,可能会影响其他的变压器保护要求,除非仅打算提供高电压短路保护。

5.4 额定电流

用于变压器回路保护的熔断件制造厂应根据变压器容量额定值给出熔断件额定电流的选则建议。在大多数情况下,由于需要根据时间-电流特性曲线(TCC)选择熔断器且要满足 5.2 的要求,熔断件的额定电流应明显高于变压器的额定电流。

注:现有的选型表通常不包含相关开关设备的应用。

需要考虑回路的各种组件冷和热特性之间的变化和制造公差。

5.5 额定最小开断电流

对于通过计算或运行经验得知发生低故障水平的可能性很小的应用,可使用适用的后备熔断器。在这种情况下,由于故障位于高压熔断器和低电压保护装置(多个)之间,有必要确定该熔断件的额定最小开断电流小于可能发生的最小高压故障电流。这是因为使用具有过高最小开断电流值的熔断件可能导致熔断件的破坏性故障并随之造成损坏。对于通用熔断器,它们承受的过载电流不应超过使它们在 1 h 内熔化的电流。

对于通过计算或经验得出的,可能有非常低过载电流(即低于后备熔断器的最小开断电流)的应用,如果要求单个熔断器,可使用通用或全范围熔断器。后一类熔断器特别适用于过载电流低至熔断器最小熔化电流或者外壳内安装的熔断器需要降低额定值的应用。

对于所选用的熔断器,应检查通用熔断器的 1 h 熔化电流(或最小开断电流,如果制造厂给出),和

全范围熔断器的最小熔化电流,以确定其不在所考虑的过电流值以上。

5.6 用于组合电器或其他开关装置联合的后备熔断器

当后备熔断器与具有低电流开断能力的串联开关装置(负荷开关,接触器或其他熔断器)一起使用时,只需其最小开断电流足够低,以确保与串联开关装置的正确配合。需要注意的是,当对熔断器和与其串联连接的机械开关装置使用“组合电器”时特指 GB/T 16926—2009 中涵盖的特定装置。在本文件中,GB/T 16926—2009 中未涵盖的熔断器和开关装置之间的关系被称为“联合”。后备熔断器用于组合电器或其他开关装置联合的使用方式。包括有以下几种。

a) 在负荷开关-熔断器组合电器中使用(撞击器脱扣的):

熔断器撞击器的动作能确保组合电器脱扣机构的动作,从而确保了在低故障情况下,开断职能从熔断器到组合电器负荷开关的自动转换。后备熔断器可用于本应用,其中要确保转换到组合电器负荷开关的职能在其最大开断能力范围内。

如果开关的脱扣机构有延迟设计(见 GB/T 16926—2009 的 3.7.119),负荷开关-熔断器组合电器的制造厂有责任确保熔断器的燃弧时间(包括熔断器起始动作时间加上开关的燃弧时间)持续低于其已证明的燃弧耐受时间,这至少为 100 ms。

b) 在继电器脱扣的开关设备中的使用:

在该应用中可使用后备熔断器,但应确保熔断器和相关开关设备继电器的时间-电流特性的交点的电流在熔断器的最小开断电流之上且在开关设备的最大开断能力(组合电器的最大交接电流)之下。

c) 与喷射熔断器串联使用:

对于上述 a) 和 b) 的标准化应用,按照 GB/T 16926—2009 以及 GB/T 14808—2016 中有关熔断器撞击器的要求进行。最小开断电流仅需要低于串联联合设备的交叉电流。最小开断电流的值根据联合设备的设计不同有很大差异。

原则上,a) 和 b) 的导则也适用于以其他形式与高压开关设备标准不包含的开关装置构成联合设备的熔断器。

6 喷射熔断器

6.1 基本要求

喷射熔断器的选择过程非常类似于 5.1 所述限流熔断器的选择过程。

当喷射熔断器与油浸式变压器一起使用时,变压器的油温对熔断器的弧前 TCC 的影响尤为重要。如果使用高温熔体材料(例如,铜或铜合金),则油温对长时间熔化特性的影响很小(一般少于 5%)。为了使喷射熔断器对油温和变压器过载反应灵敏,通常使用熔点非常低的材料。如果用户要求过载保护,则可通过选择合适的熔体材料达到。过载保护是通过在 GB/T 15166.3—2023 给出的曲线上检查熔断件在 20 °C 或 25 °C 下的最小熔断电流,并将其等效到基于油温的特性上来确定的。例如,120 °C 的油温可将长熔化时间下的最小弧前电流降低 60%。结合产生特定油温的过载电流值以及在“稳态”条件下熔化特定喷射熔断器的电流值,就能确定特定的熔断器允许的过载。变压器制造厂和/或熔断器制造厂需要做这样的计算,因此通常提供应用表,以使用户选择正确的喷射熔断器以满足他们的需要。

当喷射熔断器与柱上变压器一起使用时,确保穿过喷射熔断器的雷电浪涌冲击不会造成有害的动作很重要。所有类型的喷射熔断器的熔断件都要进行验证——试验中 3 个试品经受一个 8/20 型、峰值 15 kA 的单一标准电流冲击。这些喷射熔断器熔断件应未损坏。用于较低容量变压器的小额定电流的喷射熔断器熔断件仍要满足此冲击耐受要求。

选择与变压器一起使用的喷射熔断器的额定最大开断电流应大于或等于可能在变压器位置上出现的预期故障电流。

6.2 系统条件

喷射熔断器不仅对低功率因数(高 X/R 比值)的故障回路很敏感(超过限流熔断器),对瞬态恢复电压(TRV)也是敏感的。按照耐受系统 TRV 的要求不同,喷射熔断器分为 A 和 B 两类喷射熔断器。

- A 类:通常适用于小型变压器和用于功率因数修正或电压控制的小型电容器组的保护。TRV 条件由 TRV 试验参数描述,符合 GB/T 15166.3—2023 中 6.6.1 的要求。相比 B 类熔断器而言,其具有较低的 U_c 值和较长的 t_3 值。它们通常用于单相,但在满足其他应用条件且不需要 B 类熔断器的高性能时,此类熔断器也可用于三相。
- B 类:通常适用于 A 类熔断器保护的类似设备,但其应用场所更接近主变电站和变电站之外的馈电回路。TRV 条件比 A 类熔断器要严,因此有更严的 TRV 试验参数要求。它们更多在变电站,柜内或地下室等三相系统内使用。另外,在可预料的严重故障条件,高 X/R ,或严苛 TRV 的情况下,它们也可在 A 类熔断器常用的区域内以单相的形式使用。

6.3 时间-电流特性

喷射熔断器制造厂提供熔断器的弧前(熔化)时间-电流特性曲线(TCC)和动作(全开断)时间-电流特性曲线。

为了协调配合,通常要求最小弧前曲线。尽管对某些熔体类型,其误差在 5%,但在仅有标准曲线时,仍通常把低于标准曲线(依据电流)10%的部分作为最小曲线。动作的时间-电流特性曲线表示最大的弧前曲线(标准曲线加最大公差)加熔断器的燃弧时间。协调配合也需要该曲线。

除了指定熔断器和熔断件的额定电流值,根据熔断件与特定弧前时间-电流特性的相符性,有两类熔断件被定义为“T 型”或“K 型”。

在更短的熔化时间下 K 型和 T 型熔断件的弧前时间-电流特性是不同的。K 型和 T 型熔断件具有相同的最长时间“阈值”(100 A 以上熔断件的 600 s 和 100 A 及以下熔断件的 300 s)。然而,如果在较短的弧前时间内对 K 型和 T 型熔断件进行比较,T 型熔断件需要一个较高的熔化电流。因此,T 型熔断件具有“延迟”性,从而在相同的较长时间的弧前特性下,具有更好的浪涌耐受能力。因此 T 型熔断件常在电容器中应用。动作更快的 K 型熔断件通常应用于不需要更高的浪涌保护的地方,例如,靠近变压器的保护。速度,或速度变化率,定义为从熔断器的最小弧前 TCC(一般在 0.1 s)到在 300 s(或 600 s)之间的电流变化率。对于一个 100 A 的 K 型熔断件,此值为 7.6,而对于 100 A 的 T 型熔断器它是 13.1。因此 100 A 的 T 型熔断件需要比 100 A 的 K 型熔断件多大约 72% 的电流才能在 0.1 s 引起熔化。

6.4 额定电压

喷射熔断器的额定电压在所有情况下应选择等于或高于它动作期间施加在喷射熔断器上的最大外施电压。一般情况下,对于三相回路,喷射熔断器的额定电压需高于测得的系统最高相间(线)电压,而对于单相回路,应高于测得的系统最高相对中性点(线对中性点)电压。然而,在某些地方,在特定的三相系统应用(通常是中性点固定接地系统)中,凭借操作经验可使用额定电压至少等于相对中性点电压的喷射熔断器。但是,应注意到,允许这样做的前提是特殊条件和假设是有效的,且可能需要制造厂进行附加的试验。在某些情况,喷射熔断器的试验仅用于其在三相回路中的应用。当在单相回路中使用此类装置时,应特别注意喷射熔断器电压的选择。在一般情况下,喷射熔断器可在低于其额定电压的任何电压条件下使用而不会产生不良后果。

6.5 额定电流

喷射熔断器的额定电流等同于熔断件或使用的填充装置的额定电流。熔断件的额定电流是新的熔

断件(安装在熔断器底座上,如果适用,安装在制造厂指定的熔断器架上)在环境温度不超过 40℃或制造厂规定的温度下,将要连续承载且不超过规定的温度和温升的最大电流。在环境温度高于规定温度时,环境温度调整因数由制造厂确定。

6.6 额定最大开断电流

喷射熔断器和载熔件的额定最大开断电流,是其按照 GB/T 15166.3—2023 的试验方式 1 或 I_1 (额定最大开断电流)进行试验后确定的最大开断电流[以对称电流的有效值表示,单位为安培(A)],是在规定的频率、交流分量、TRV、工频恢复电压和功率因数(或 X/R)条件下证明的喷射熔断器能开断的最大电流。

规定的功率因数通常比实际电力系统中的更为严苛。对于系统功率因数低于喷射熔断器试验中所规定值的特殊情况,可能有必要降低开断额定值。这种情况应咨询熔断器制造厂。

在许多应用中,可得到的故障电流不超过单个喷射熔断器最大开断电流的范围。在某些应用中,特别是使用 A 类熔断器的地方,可得到的故障电流可能高于单个熔断器的最大开断电流。在这种情况下,通常串联一个限流熔断器来开断高于喷射熔断器的额定最大开断电流的电流。之后,喷射熔断器用来开断低于后备熔断器最小开断电流的低故障电流。

由于 B 类熔断器常用于三相,一些制造厂提供等效的三相开断额定参数,以便于它们可与其他类型开断装置的三相额定开断能力进行比较。

7 限流熔断器与喷射熔断器的联合

7.1 概述

喷射熔断器有限的最大开断电流以及限流能力的缺乏使其经常要与后备限流熔断器“配对”。后备熔断器具有的最小开断电流的特性使其与喷射熔断器“配对”成为可能(实际上某些类型的全范围限流熔断器在其结构中进行此类组合)。因此,总体配合原则变为每个熔断器需要在另一个熔断器不动作区域内动作,即喷射熔断器需要在低于后备熔断器的额定最小开断电流的电流下动作,而后备熔断器需要在高于喷射熔断器的额定最大开断电流的电流下动作。

7.2 基本配合原则

选择合适的熔断方式的第一步是选择喷射熔断器。然后通过考虑下述 4 个基本方面来选择后备熔断器,以确保后备熔断器和串联的喷射熔断器之间存在适当的配合。

- 每个熔断器在其非动作区需要由其他熔断器保护。
- 除非在喷射熔断器动作后打算更换后备熔断器,否则后备熔断器不能因为喷射熔断器动作而损坏。
- 过载电流不得损坏后备熔断器。
- 后备熔断器与喷射熔断器一样,不能被电涌损坏;符合此要求的喷射熔断器的选择规则同样也适用于后备熔断器。需要注意的是如果已经正确地选择了喷射熔断器,与它正确配合的后备熔断器通常也符合这些相同的电涌要求。

串联的喷射熔断器和后备限流熔断器之间的主要配合[见 a)]确保了二者能共同清除在导致喷射熔断器熔体熔化的最低电流直到对应于限流熔断器的额定最大开断电流范围内的所有电流。实现这一主配合要求:当两个装置合适的时间-电流特性曲线重叠时,喷射熔断器的最大动作 TCC 曲线与后备熔断器的最小弧前 TCC 在大于等于后备熔断器的额定最小开断电流时,且小于或等于喷射熔断器的额定最大开断电流时相交。然后这两个串联装置提供“全范围”保护并且每个熔断器在另一个熔断器的“薄

弱”区域内保护它。当特定运行和配合条件适用时,第二个准则(在喷射熔断器的额定最大开断电流以下发生交叉)对于大型变压器应用有时较为宽松。此配合见图 2。

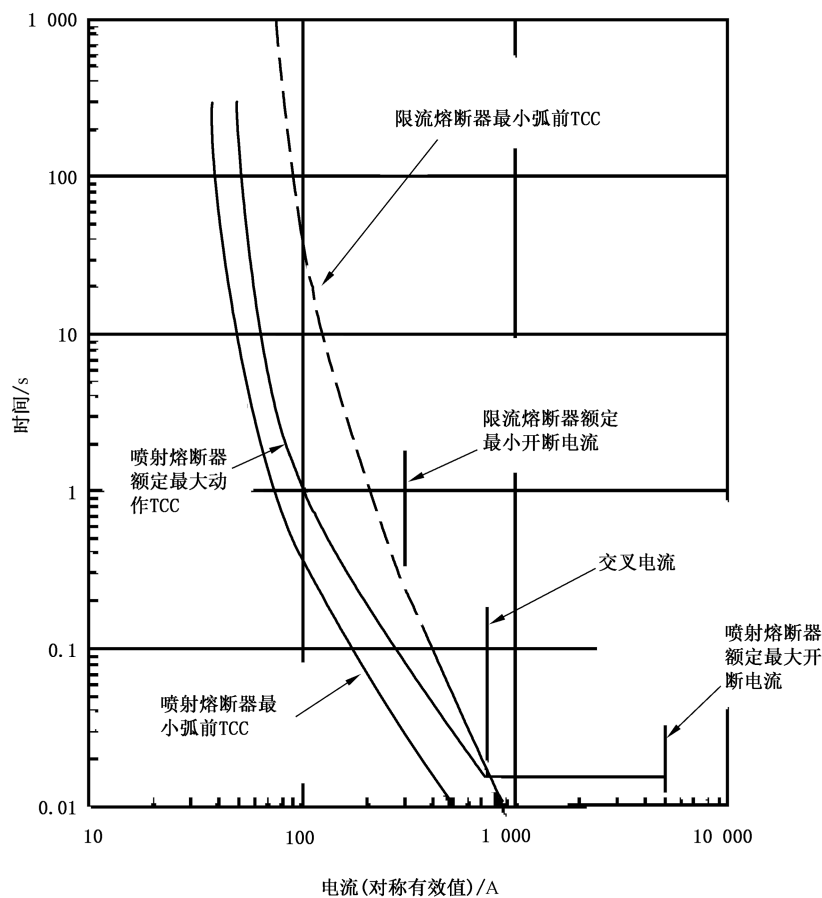


图 2 匹配熔化配合的例子

根据这两条曲线的相对位置,将存在两种不同类型配合中的一种。这两种配合的方法通常被称为“匹配熔化”配合和“时间-电流曲线交叉”配合,尽管匹配熔化配合实际上被看作是时间-电流曲线交叉配合的一种但增加了额外要求的形式。图 2 和图 3 给出了相关的原则。

7.3 匹配熔化配合

对于这种配合方法,除了在 7.2 中描述的基本配合规则外,还需要满足另一个准则,即确保两个熔断器的联合在清除过载或故障的任何时候,喷射熔断器都能熔断。通常,匹配熔化配合将导致喷射熔断器的最小弧前时间-电流特性在所有长于 0.01 s 的时间里都位于后备熔断器的最小弧前 TCC 的左侧,如图 3 所示。然而,这并不是确保喷射熔断器会在短于 0.01 s 的时间内熔化的可靠方法。为了保证喷射熔断器在造成限流熔断器动作的任何电流下都能熔断,在 0.01 s 和更短的时间内,限流熔断器可通过的最小动作 I^2t 应等于或大于串联的喷射熔断器的最大弧前 I^2t 。

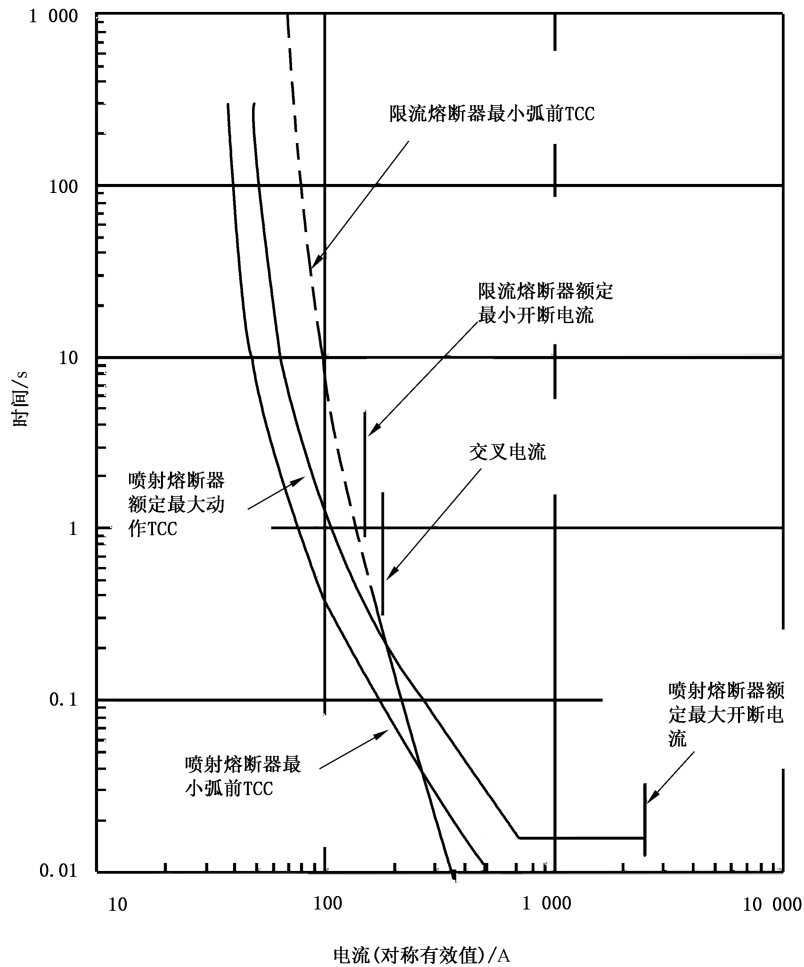


图3 时间-电流交叉配合的例子

一个确保限流熔断器的允通电流足以熔断喷射熔断器的保守方法是选择的限流熔断器的最小弧前 I^2t 大于与之串联的喷射熔断器的最大弧前 I^2t 。然而更实际的方法是考虑这样一个事实,即限流熔断器在几乎所有的实际情况下,可通过比其最小弧前 I^2t 更高的 I^2t 。最小弧前 I^2t 值与非常短的熔断器弧前时间,以及最坏情况下的制造公差有关。因此,不仅会造成弧前的实际 I^2t 可能高于公布的最小值,并且造成熔化后燃弧期间将通过额外的 I^2t ,并直到熔断器熔断。经验表明,只要喷射熔断器的最大弧前 I^2t 不超过限流熔断器的最小弧前 I^2t 的 2 倍左右,就能实现优良配合。这种方法会导致喷射熔断器熔断失败的唯一情况是:如果发生很短时间的涌流(如雷电电涌),该电涌的 I^2t 高于限流熔断器的弧前 I^2t ,但低于喷射熔断器的弧前 I^2t 。显然,这样的情况很少发生,因此不需要在选择用于特定应用的最佳限流熔断器时将其作为重点考虑。

如从前面的讨论中明显看出,为了使用匹配熔化配合方法,需要知道喷射熔断器的短时最大弧前 I^2t 的值和限流熔断器的最小弧前 I^2t 的值。虽然后者通常由限流熔断器制造厂给出,但是喷射熔断器的制造厂通常不给出前者。但是可从喷射熔断器的最小弧前时间-电流特性曲线中很快计算出来。一种计算方法是首先确定表示四分之一周期的最小整数时间值对应的电流。对于许多已给出的曲线,这可能为对应于三个四分之一周期(60 Hz/50 Hz 时 0.0125 s/0.015 s)的电流。一旦电流由喷射熔断器的最小弧前曲线确定,它需要增加一个适当的系数来考虑制造公差造成的变化。对于采用银熔体的喷射熔断器,此系数为 10%。对于熔体采用其他材料的熔断器,这个系数可能高达 20%。在电流已经修正为允许制造公差之后,喷射熔断器的最大弧前 I^2t 的值可通对此电流平方,然后乘以作为确定此电流

依据的时间值[以秒(s)表示]。显然,喷射熔断器制造厂要给出熔断器的最大弧前 I^2t 值,使用这个值而不是按先前描述的程序所获得的值。

匹配熔化方法的主要优点是即使限流熔断器没有实际开断,喷射熔断器也会熔断。

这种配合方法的另一个优点是,在某些非有效接地的三相应用中,只要喷射熔断器的额定电压等于系统的线电压,后备熔断器的额定电压仅需要等于系统的线对中性点电压。因为这需要对可能出现的故障情况做出某些假设,所以在实践中如果能用额定电压的熔断器,那么通常不需要这样做。然而,在有些应用中这是仅有的熔断选项,且这就是这种配合方法有时与油浸后备熔断器一起使用的主要原因。

7.4 时间-电流曲线交叉配合

用于配合后备熔断器的第二种方法被称为时间-电流曲线交叉配合。这种配合方法经常与油浸后备熔断器一起使用,并在图 3 中给出。在所给出的例子中,在长于 0.01 s 的时间上喷射熔断器的最小弧前 TCC 曲线与限流熔断器的最小弧前 TCC 相交,使这个联合不太可能满足匹配熔化配合的要求。当故障电流比这个交叉点高的时候,限流熔断器熔断且不会流过足够的能量让喷射熔断器熔断。时间-电流交叉曲线配合很少用于户外后备熔断器,因为没法保证使用此方法能使串联的喷射熔断器熔化并跌落。如果喷射熔断器不开断,全电压可能传递到已老化的、可能不再具有全电压耐受能力的户外后备熔断器上。

因为喷射熔断器的动作 TCC 和后备熔断器的最小弧前 TCC 曲线的交集或交叉点位置,在使用这种配合方法时不需关注两个熔断器的熔化 I^2t 值。要满足的主要是:先前所讨论的交叉点对应的电流要大于限流熔断器的额定最小开断电流,但小于喷射熔断器的额定最大开断电流。喷射熔断器和限流熔断器的制造厂需要给出这些特性的值。

与匹配熔化配合相比,时间-电流曲线交叉方法的主要优点是,它通常允许使用具有较小额定电流的限流熔断器。这在下述几个方面可能很重要:

首先,限流熔断器的额定电流越低,在故障条件下其允许通过的能量越少。显然,通过限流熔断器的能量越少,就会更好的保护系统上的各部位免受重大故障。此外,由于电压降最小化,该故障对配电系统的其余部分的影响较小;

其次,限流熔断器的额定电流越小,其体积更小并且需要的安装空间更小;

第三,当使用这种配合方法而不是匹配熔化配合时,通常可使用最大的后备熔断器额定值来保护更大的变压器。

7.5 预防对后备熔断器的损坏

对于主变压器上的喷射熔断器与后备熔断器联合的应用,有另外的选择准则,其在实践中尤其重要。当后备熔断器在变压器内部时,可通过配合使得其只有在变压器内部发生故障时才会动作。以这种方式,后备熔断器不需要是可更换的。要讨论的概念在图 4 中阐明,并包括直至对应于变压器二次端子故障的电流(即仅受变压器阻抗限制的故障——通常被称为“二次短路故障电流”或在变压器试验中称为“短路电流”)。选择限流熔断器使得该电流在一个适当的裕度内低于喷射熔断器最大动作曲线和后备熔断器最小弧前曲线交点所对应的电流。这保证了后备熔断器不会因变压器外部故障而熔化,而且更重要的是不会因其而损坏。“损坏”在这种情况下指的是熔体的部分熔化和/或在较长的熔化时间下熔断器过热导致的其他组件的劣化。损坏的熔断器随后可能会在低于其最小开断电流时熔化并且未能开断此电流。

虽然不是由熔断器制造厂给出,可设想一个“无损”特性曲线,它位于后备限流熔断器的最小弧前曲线的左侧并且略低于它。给出的最小弧前曲线和假想无损曲线之间的间隔表示为安全裕度并且旨在补偿与现实(实际)的应用相关联的各种因素。一些因素影响二次短路故障电流的计算精度,包括:变压器阻抗的公差,系统线路电压波动,以及分接头的使用。其他因素包括由可能在熔体完全熔断之前出现的

局部熔化和机械应力造成的熔体(多个)的实际损坏。仅在熔体(多个)完全熔断后,燃弧才能开始,并且这个时间正是绘制 TCC 的时间。

如果熔断器制造厂有一个推荐的裕度,则一定要使用。如果没有,常用的方法是将无损电流设置为等于任何特定弧前时间的最小弧前曲线上所示电流的 80%。由于后备熔断器和串联的喷射熔断器之间的适当配合,要求限流熔断器不因任何等于或小于二次短路故障电流的电流而损坏,这种方法要求计算出的二次短路故障电流在对应于喷射熔断器(其电流与二次短路故障电流相等)的最大动作时间的时间内不大于限流熔断器最小弧前电流的 80%。相反,后备熔断器的最小弧前电流在对应于喷射熔断器(在那个电流下)最大动作时间的时间内等于计算出的二次短路故障电流的至少 125%。

当选择后备熔断器作为合适的二次短路故障电流配合时,则没有必要提供允许变压器内的限流熔断器在“现场”进行更换的接口。如果没有实现二次短路故障配合,则后备熔断器也需要在喷射熔断器动作的任何时刻进行更换。

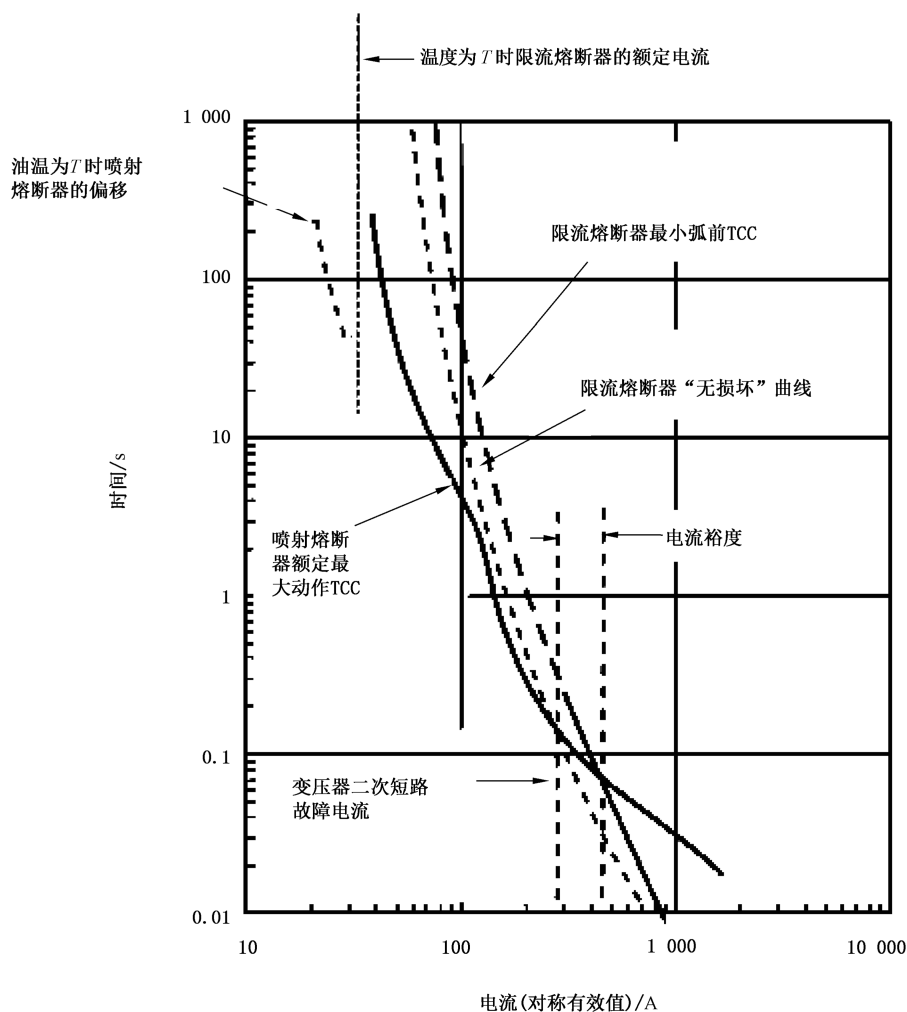


图 4 熔断器“无损坏”裕度

7.6 后备限流熔断器的过载保护

在能确保一个后备熔断器正确配合之前需要考虑配合的另一个方面。这需要进行检查以表明后备熔断器不会因为过载而熔化或损坏。这也在图 4 中给出。首先,当后备熔断器用于变压器保护时,对于变压器的二次短路故障电流以下的所有电流,喷射熔断器的最大动作曲线不需要与 7.5 中所述的无损

曲线交叉。换句话说,用于所有喷射熔断器的动作时间,从对应于二次短路故障电流的动作时间直到 1 000 s 或者更长的时间,喷射熔断器的最大动作曲线上对应的电流应不超过限流熔断器最小弧前曲线上对应电流的 80%(除非熔断器制造厂规定了不同的无损准则)。预负荷不应因特性曲线的任何向左位移而影响此配合,因为熔体的焦耳热(I^2R)或周围液体的温度上升对喷射熔断器和限流熔断器来说一样多。

要满足的第二条件是预负荷的条件下,喷射熔断器在一个相对长的时间内(即大于 5 min)可承载而不熔化的最大电流需要小于限流熔断器的额定电流。如果喷射熔断器位于设备(如变压器)内部,那么使用此准则时,要考虑过载条件下所产生的温度造成的曲线的任何偏移。例如,一些类型的喷射熔断器在高温下,其最大工作 TCC 会有显著位移。对于电流来说,“双”熔体型熔断器在 120 °C 的油中,其长时间弧前特性可偏移至约为在 20 °C 下给出值的 40%。后备熔断器的过载保护也可由二次保护提供。

参 考 文 献

- [1] GB/T 1094.7—2008 电力变压器 第7部分:油浸式电力变压器负载导则
 - [2] GB/T 1094.12—2013 电力变压器 第12部分:干式电力变压器负载导则
 - [3] IEC TR 62655:2013 Tutorial and application guide for high-voltage fuses
-