［断路器］

低压断路器的限流技术及其应用

文/中国石化工程建设有限公司　马颖
福建古雷石化有限公司　钱中响

通过《低压配电设计规范》及《通用用电设备配电设计规范》中对绝缘导体在短路条件下应做热稳定校验的要求，提出了采用低压断路器的限流性能是一个较好的解决方案。并得出低压断路器的限流性能是低压断路器的重要特性功能之一，其意义不仅在于其特性本身，且能大幅度降低低压成套配电装置的动热稳定性要求。

引述

国标 GB 50054—2011《低压配电设计规范》中第 6.2.1 条规定：配电线路的短路保护，应在短路电流对导体和连接处产生的热作用和机械作用造成危害之前切断电源。第 6.2.2 条规定：短路保护电器应能分断其安装处的预期短路电流。预期短路电流应通过计算或测量确定。当短路保护电器的分断能力小于其安装处预期短路电流时，在该线路的上一级应装设具有所需分断能力的短路保护电器；其上下两级的短路保护电器的动作特性应配合，使该段线路及其短路保护电器能承受通过的短路能量。而国标 GB 50055—2011《通用用电设备配电设计规范》中第 2.4.5 条规定：电动机主回路的导线或电缆应按机械强度和电压损失进行校验。对于向一级负荷配电的末端线路以及少数更换导线很困难的重要末端线路，应校验导线在短路条件下的热稳定。

南方沿海某大型炼化项目聚丙烯装置的负荷除少数属于一级特别重要负荷外，大部分属于一级负荷。本装置的供电采用单母线分段运行方式，设置两台容量为 2 000 kV·A 的变压器，下设负荷中心（PC）及马达控制中心（MCC）。变电所至主装置区（聚合区）的供电距离约为 250 m。本装置共有约 140 台低压电动机，其中大部分为 37 kW 以下的小功率电动机，由 MCC 对其供电。根据《低压配电设计规范》第 6.2.3 条，重要线路绝缘导体的热稳定校验应符合下列规定：

当短路持续时间在 0.1~0.5 s 之间时，绝缘导体的热稳定应按下式进行校验

$$S \geqslant \frac{I\sqrt{t}}{C} \times 10^3 \qquad (1)$$

式中，I 为系统电源供给短路电流的周期分量有效值（均方根值 kA），本工程为 33.58 kA（工程计算数据）；t 为短路切除时间，单位为 s，对于电动机回路，取主保护切除时间与断路器全分闸时间之和；经查 ABB 限流型低压断路器样本，取 15 ms。C 为不同绝缘的计算系数，经查《电力工程电缆设计标准》，对于 1 kV 以下铜芯聚乙烯绝缘电缆取 115。

当短路持续时间小于 0.1 s 时，应计入短路电流非周期分量的影响。

将以上数据代入上述式（1）求得 S 应不小于 35 mm^2；即对于低压电动机来说，只有选用 35 mm^2 及以上截面积的电缆，才能满足短路热稳定的要求。这对于本工程中大量的小功率电动机来说，其按载流量及压降要求所选择的电缆难以满足短路条件下的热稳定要求。要解决这个问题，有以下几个主要途径：

1）降低变压器的容量，从而降低 380 V 母线上的短路电流。

2）增加变压器的短路阻抗，从而降低 380 V 母线上的短路电流。

3）在保护断开之前，通过选用适当的保护元件将短路电流限制在一定的范围内。

4）增大电缆的截面积以满足短路热稳定的要求。

在本工程中选用两台 2 000 kV · A 的变压器是经负荷指标计算及技术经济比较等因素综合确定的，不可能为此而改变其容量；增加变压器的短路阻抗，在降低母线上短路电流的同时也会降低母线电压水平，对于电动机的起动非常不利，所以在技术上也不太可行；单纯地增大电缆截面积来满足要求，不但会增加电缆投资，而且增加了电动机接线盒进线口的制造难度。

比较以上四种方案，选用合适的具有限流性能的短路保护元件，在技术和经济上均比较可行。而目前在工程中应用的此类元件主要有限流型熔断器及限流型低压断路器。

性能比较

1）限流式熔断器熄弧能力强，具有限流作用，能使短路电流未达到最大峰值之前将电弧很快熄灭（通常不超过 0.01 s）。这对于限制短路电流，降低电气设备动热稳定性具有重要意义。这种熔断器价格较低，因此应用相当广泛。但限流式熔断器在发生短路时熔体熔断后更换起来较麻烦，且易造成电动机断相运行，所以需要既具有限流式熔断器在开断短路电流方面的优越性，同时又能克服其缺点的短路保护元件来应用于工程中，限流型低压断路器恰好满足了这个要求。

2）聚丙烯装置属于石油化工装置，大部分环境为气体爆炸危险区域，根据工艺要求，生产过程对安全性、连续性要求很高，除少数负荷属于一级特别重要负荷外，大部分属于一级负荷。对于本工程中大量（约 100 台）37 kW 以下的小功率电动机，其按载流量及电压降要求所选择的电缆难以满足短路条件下的热稳定要求。而本工程属于 EPC 总承包项目，对其自动化水平及运行、维护和检修要求相应较高，所以限流型低压断路器在本工程中的应用是必然的。

限流型低压断路器的工作原理

虽然各主流断路器制造商的限流型低压断路器的结构不一定相同，但其产品普遍采用电动斥力式的原理，即使短路还没达到最大值以前电流已被切断，熄弧时间短，减小了线路系统的电动力和热应力，从而提高了断流指标。下面以施耐德公司的限流型低压断路器 NSX 为例作简要介绍。

1. 断路器的限流能力

断路器的限流能力反映其在短路时可以通过的小于预期故障电流的或大或小的能力，如图 1 所示。预期故障电流是在没有限流装置时持续流通的短路电流，其有效值是电网上断路器安装处的稳态（在不稳定状态的不对称点以后）三相短路电流的有效值。

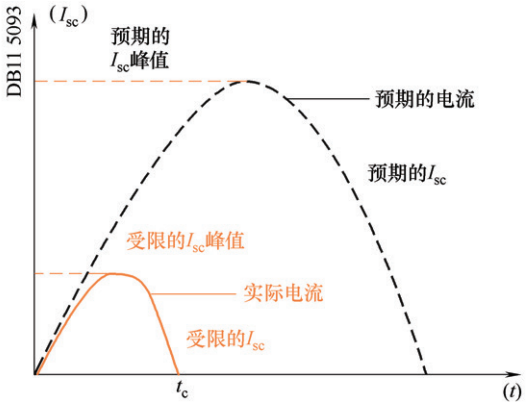

图 1　预期电流和实际限制电流

Compact NSX 系列优越的限流能力，是由于其采用双旋转分断技术（触头快速自然排斥，电弧电压被分断为两个串联的具有陡峭波前的电弧电压）。

2. 限流曲线

断路器的限流能力是用限流曲线来表达的，这

些曲线给出：

1）限流峰值，它与预期短路电流有效值成函数关系，如图 2 所示。

2）受限制的热应力，以 A^2S 表示。

$\int_T i^2 dt$ 称为热应力（以 A^2S 计），表示 1 Ω 电阻的导体中短路将耗散的能量，公式为

$$W = R\int_T i^2 dt \text{，其中 } R = 1\ \Omega$$

此受限制的热应力与预期短路电流有效值成函数关系，如图 3 所示。相当于短路电流在 1 Ω 电阻的导体中耗散的能量。

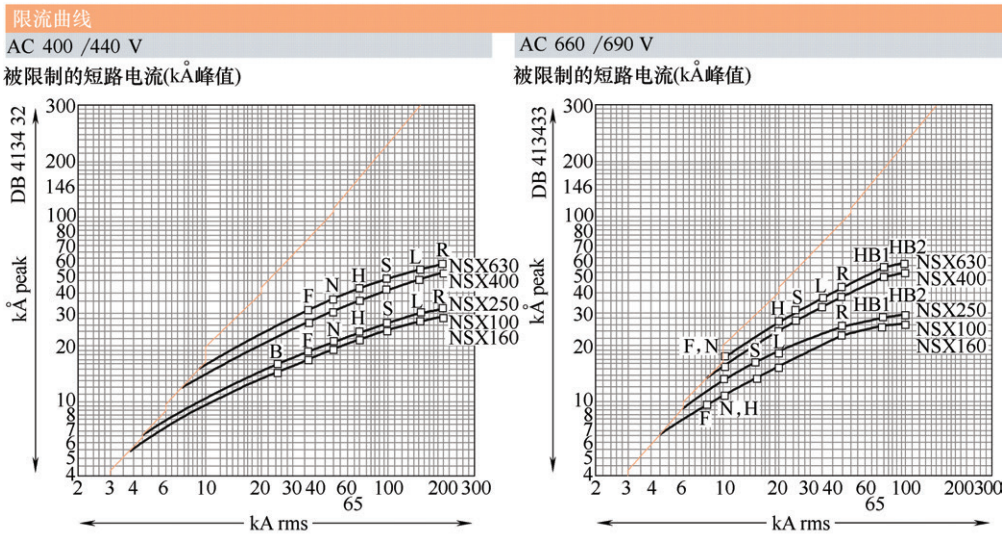

图 2　限流特性曲线

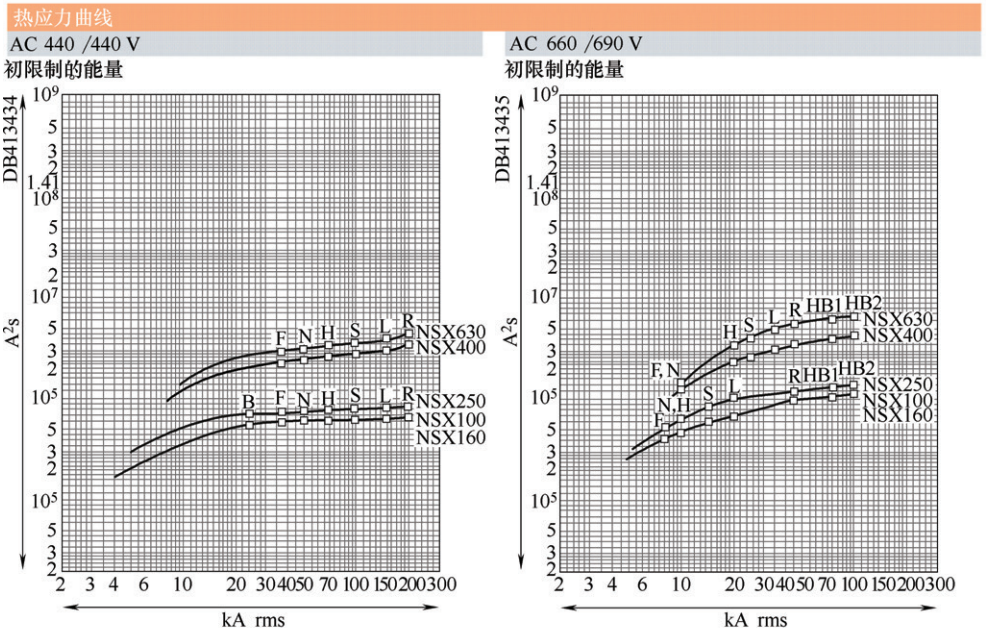

图 3　热应力限制曲线

在图 1 中，受限制的电流的热应力是由受限电流的二次方 $I_{cc}^2(t)$ 曲线所确定的面积（橙色曲线部分）。无限流时，此应力将是大得多的面积，相当于预期短路电流的二次方曲线。

因而，短路电流限制到某个系数（如 $I_{cc}/4$）导致热应力限制到这相同系数的二次方（如应力/16）。因此对于发热现象来说，限流是非常重要的。

3. **限流型低压断路器的工作原理**（新的脱扣

能量是压力、电弧能量）

1）断路器的每极有一个外壳，当出现短路电流时，由于电磁斥力的作用，触头在这个外壳内转动产生两个串联的电弧。

2）一个活塞和弹簧装置利用电弧能量形成的压力，到某个阈值后，大约在触头斥开后的 3 ms，引起瞬时脱扣。

3）直到此阈值时，压力还不足以造成脱扣，两电弧的阻抗限制了短路电流。

4）在此阈值以上很快分断（1 ms），且还可以限流。

5）外壳的元件与断路器的大小成正比，使得断路器的限流性能在其规格越小时就越大（作用于触头的斥开和弹簧）。

4. 限流的益处是能大大减弱短路电流对配电装置的不良效应

1）电磁效应。降低感应磁场，从而对邻近的测量仪器有较少的干扰。

2）机械效应。峰值电流受到限制，从而降低了电动斥力，并且对电触头方面有较少的变形或断裂恶果。

3）热效应。热应力由于电流通过的幅度和时间的降低而受到限制，从而减少导体的发热并延长了电缆的寿命，同时，限流也延长了电气设备的寿命。

4）关联性。关联性是限流性的一种应用，使得放在限流断路器下级的断路器获得加强的分断能力。上级限流断路器起着对大短路电流的阻拦作用，因而使得分断能力大大低于其安装处的预期短路电流的断路器，可在正常分断条件下运行。

5）限流型低压断路器的使用对于与其配套的接触器及热继电器等的保安性协调配合也极为有利。

限流型低压断路器的应用

经过对包括施耐德及 ABB 等公司生产的限流型低压断路器进行技术性能比较，在南方沿海某大型炼化项目聚丙烯装置工程设计及生产运行中，应用了 ABB 公司 XT 限流型低压断路器作为电动机控制中心中 37 kW 以下电动机的短路保护元件。其限流特性曲线如图 4 所示（允通能量特性曲线详见 ABB 公司 XT 断路器样本）。

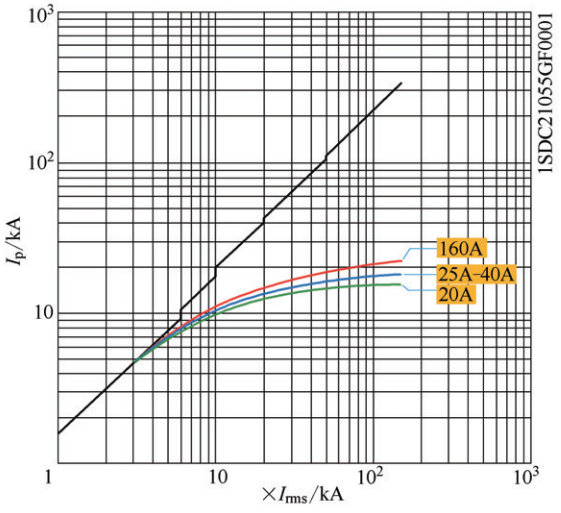

图 4　XT 限流型低压断路的限流曲线

例如对 5.5 kW 的电动机，为躲过其起动电流周期分量的影响，选用 I_n = 20 A 的断路器，其 I_m（瞬时脱扣值）= 14I_n = 280 A。从以上特性曲线可以看出，对于 33.58 kA 的预期短路电流（I_s）来说，XT2160MA20 可将其限制在 14 kA（I_p）以下，而该电流的持续时间又在 10 ms 之内，则根据上述《低压配电设计规范》中的热稳定校验公式，经计算后选用 2.5 mm^2 以上截面积的电缆即可满足短路条件下的热稳定要求；而不必选用 35 mm^2 以上截面积的电缆。对于本工程近百台供电距离在 250 m 左右的小功率电动机来说，其经济效益方面的优越性是显而易见的。

综上所述，限流型低压断路器相对于供电系统所提供的短路电流较大，对设备的自动化及运行、检修及维护要求较高的场所中是一种理想的配电装置。随着电气设备制造水平的不断提高，单台变压器的容量会随之增大，为限流型短路保护元件（如限流型低压断路器）的应用提供了更为广阔的舞台。**EA**

（收稿日期：2021.06.19）