

低压绝缘导体短路热稳定校验探讨

陈佳鹏¹ 李智财² 李亦健²

1. 广东电网有限责任公司揭阳供电局 广东揭阳 522000

2. 广东电网有限责任公司肇庆广宁供电局 广东肇庆 526300

摘要: 当供电网络中发生短路时, 短路电流会经过系统中设备元件及线路到短路点, 设备及线路会受到短路电流的热作用。短路电流的热效应产生的热量非常大, 导体中产生的大量热量短时间内无法散发, 导体温度快速升高使绝缘损坏。

关键词: 热稳定概念; 校验公式; 内涵; 热稳定途径

Discussion on short-circuit thermal stability verification of low-voltage insulated conductors

Jiapeng Chen¹, Zhicai Li², Yijian Li²

1. Guangdong Power Grid Co., Ltd. Jieyang Power Supply Bureau, Jieyang, Guangdong 522000

2. Guangdong Power Grid Co., Ltd. Zhaoqing Guangning Power Supply Bureau Zhaoqing, Guangdong 526300

Abstract: When a short circuit occurs in the power supply network, the short-circuit current will pass through the equipment components and lines in the system to the short-circuit point, and the equipment and lines will be heated by the short-circuit current. The heat generated by the thermal effect of the short-circuit current is very large, and a large amount of heat generated in the conductor cannot be dissipated in a short time, and the conductor temperature rises rapidly, which damages the insulation.

Keywords: Thermal stability concept; Verification formula; Connotation; Thermal stability approach

对应于变压器各级别额定容量, 针对电缆不同类型、截面和长度, 以及不同短路电流持续时间, 探讨低压电缆热稳定校验, 并给出若干热稳定校验实用速查表。

一、短路热稳定概念

发生短路时, 无论何种保护电器都需要一定的动作时间。因此, 在事故切除前, 导体在短路电流热效应的作用下, 温度会急剧上升到很高的程度, 导体必须能承受短路电流的这种热效应而不致使绝缘材料软化烧坏, 也不致使芯线材料的机械强度降低, 这种能力即为导体的短路热稳定性。当导体通过短路电流时的最高温度小于导体规定的短时发热允许温度, 则认为导体在短路条件下是热稳定的, 否则是热不稳定的。

二、热稳定校验公式的由来与内涵

导体短路时, 短时发热具有如下主要特点: (1) 短路电流引起的发热时间是极其短暂的, 在导体中产生的热量来不及向周围环境散发, 故可视为在短路时间内所

产生的全部热量都用来提高导体本身的温度, 即所谓的绝热过程; (2) 短路时导体的物理特性, 如热容量、电阻率等不能视为常数, 而是温度的函数; (3) 短路电流瞬时值变化规律复杂。根据上述特点, 经过求解短路时热平衡方程式可得出。

$$I_d^2 t = S^2 (A_d - A_h) = S^2 K^2$$

式中:

I_d —通过导体的短路电流有效值 (A);

t —在已达到允许最高持续工作温度的导体内短路电流持续作用的时间 (s);

S —绝缘导体的截面积 (mm²);

K —与导体芯线、绝缘材料以及芯线始末温度有关的数值;

A_h —与材质、起始温度等有关的系数;

A_d —与材质、最终温度等有关的系数。

$$K = \sqrt{A_d - A_h}$$

式左边为短路电流 I_d 与它持续作用的时间 t 的乘积,代表短路电流产生的热效应,是影响导体热稳定性的外部作用因素;而式右边是导体截面与 K 的乘积,代表和热效应相对应的导体从与 A_h 对应的起始温度升到与 A_d 对应的最高温度的热应力,是影响导体热稳定性的内在因素,只要导体热应力平衡于或大于短路电流的热效应,则导体是热稳定的,否则是热不稳定的。稍加变形即是《低压配电设计规范》规定的短路热稳定校验公式,由此可见,热稳定校验公式来源于热平衡方程推导,其实是电缆热应力与短路电流热效应的比较,它充分揭示了影响导体热稳定内外各因素的关系,为我们寻求满足热稳定要求提供了多种思路。

三、满足热稳定要求的多种途径

由 $s \geq \frac{I_d \sqrt{t}}{K}$ 式可见选择 K 、 I_d 、 t 、 s 中的任一参数都可达到绝缘导体热稳定的目的:

1. 选择不同绝缘和不同芯线材料的绝缘导体,即选择不同的 K 值。

2. 降低短路电流值 I_d 。在电力网已经确定的条件下,借助于断路器的限流能力来减小短路电流值。也就是说,选用这样的断路器,使在短路时流过导体的电流小于预期的短路电流(所谓的预期短路电流是指未采用断路器时流过的短路电流)。施耐德NS断路器具有这种能力,它的基本原理是:利用短路电流的电磁斥力使动触头旋转产生两个串联的电弧,在电弧产气形成的压力尚未达到推动转轴使开关瞬时脱扣的闹值时,即电弧尚未拉断前,开关利用两电弧的阻抗限制了短路电流。例如:一个预期短路电流为30kA(峰值为43KA,相当于高压系统容量无限大时1250kV A变压器低压侧出口短路电流的近似值),经NS250H上层断路器限流后,实际电流值为12kA(峰值为17kA)。

3. 缩短短路电流的持续作用时间 t 。就瞬动脱扣而言,不同品牌的断路器,其最小脱扣时间不一(可查阅断路器脱扣动作曲线),有0.02s,也有0.01s,有的在大过流倍数作用下仅在10ms以内,如:2.Sms。同样的分断时间,其瞬时脱扣的过电流倍数(I_d/I_n)也各不相同,有的4倍,甚至更低倍数就可瞬时脱扣。因此,当试图选择较小的时间 t 为满足热稳定要求时,应选用快速分断、过流倍数低的优良品牌断路器。因为过电流倍数小,早切断故障线路,减小了短路电流在导体内的持续作用时间,自然有利于导体的热稳定。

4. 考虑了上述三因素后,若还无法满足热稳定要求,可放大导线截面积 S 。之所以最后才考虑 S ,是因为若先加大导线截面,有时会大到十分不合理的地步,大量耗费有色金属和绝缘材料。事实上,根据表达的热应力与热效应关系,有不少先进的断路器生产厂商为我们提供了比较两者大小的简便办法。通俗地说,10mm² Pvc 电缆的热承受力 $13.2 \times 10^5 A^2 s$ 大于30KA 短路电流的热破坏力 $6 \times 10^5 A^2 s$ 。因此,电缆是热稳定的。ABB公司也提供类似的热效应曲线可用来校验绝缘电缆的热稳定性。

四、短路电流的热效应及热稳定度

1. 短路导体的加热过程及计算。有电阻的导体在通过正常负载电流时会造成功率损耗。损失的电能会转化为热能,一方面导体温度升高;另一方面,它向周围介质辐射热量。当导体中产生的热量等于导体向周围介质散发的热量时,导体就会保持一定的温度值,这种温度值称为热平衡或热稳定性。如果增加电流使导体中产生的热量增加,温度就会继续升高,温差增大,传热加快。当散热率等于产热率时,温度停止上升,稳定在一个新的温度值,即达到新的热平衡。由于线路的保护装置在短路后迅速动作,切断故障线路,短路电流通过导体的时间很短(一般不超过2-3s),其热量来不及散发到周围介质中。在分析短路过程中短路电流的热效应时,可以忽略导体对周围介质的散热,即近似认为导体在短路时间内与周围介质绝缘。因此,可以认为导体中短路电流产生的热量全部用来提高导体的温度。由于短路电流比正常电流高很多倍,短路电流虽然通过时间很短,但温度上升到很高的值,以至于超过了电气设备短时发热的允许温度,电气设备的相关部件损坏。所以通常所说的电气设备具有足够的热稳定性是因为它能承受短路电流的热效应而不被短时过热损坏,即短路发热的最高温度不超过电气设备短时发热的允许温度。短路前正常负载下导体的温度为 θ_L 。在 t_1 时,发生短路,导体温度呈指数上升。22时短路故障解除,随后导体温度上升至 θ_k 并停止。之后,导体只向周围介质散热,直到导体温度指数下降到 θ_0 。如果载流导体和电器在短路电流流动时的最高温度不超过短时加热的允许温度,则认为其短路热稳定性符合要求。导体达到的最高发热温度与导体短路前的温度、短路电流的大小及通过短路电流的时间长短等众多因素有关。由于短路电流在到达稳定值之前,要经过一个暂态过程,在这一暂态过程中,短路电流是一个变动的电流,而且含有非周期分量,因此要准确计

算短路时导体产生的热量和达到的最高温度是非常困难的。因此，需要用等效的计算方法来计算实际短路电流产生的热量，即导体在假定时间内通过短路稳态电流时产生的热量正好等于实际短路电流在实际短路时间 k 内产生的热量，这个假定时间称为短路发热的假定时间，用 t_{ima} 表示。当无限容量系统中发生短路时，假想时间可通过以下公式近似计算：

$$T_{ima}=t_k+0.05$$

$$T_k>1s \text{ 时, 可取 } t_{ima}=t_k$$

2. 短路始稳定度的校验条件。并且可以检查导体的热稳定性。根据不同的校核对象，可将导体的允许发热条件（短路时导体的最高允许温度）换算成不同的具体条件进行校核。

(1) 电器的一般热稳定性检查条件是：

$$I_t^2 \geq I^{(3)2} t_{ima}$$

其中， I_t 为产品制造商热稳定试验后，在产品样本中提供给用户的电气热稳定试验电流（有效值）， T 为相应电器的热稳定试验时间， I_t^2 为电器的最大发热量，为电器的热稳定条件。可以看出，一般电器的热稳定性校核，避开了短路时电器最高温度 θ_k 的计算，直接校核发热量。键入它， t 可以从产品样本中找到。

(2) 导体（如母线绝缘电线和电缆）的热稳定性检查条件如下：

$$\theta_{k,max} \geq \theta_k^{(3)}$$

如上所述， θ_k 的确定比较麻烦，所以也可以根据短路热稳定性的要求来确定最小允许截面 A_{min} 。也就是说，导体的热稳定性检查条件被转换成导体的横截面积检查条件。

五、短路电流的电动效应与动稳定度

1. 短路时的最大电动势。供电系统短路时，短路电流，特别是短路冲击电流，在相邻导体之间产生很大的电力，可能造成电器和载流部件变形或永久变形等机械损伤。因此，电气设备必须有足够的机械强度，以承受短路时的最大电动势，避免严重的机械损坏。通常，电气设备承受短路电流的电动效应而不引起机械损伤的能力称为电气设备具有足够的动电稳定性。空气中任意截面的两平行导体分别通过电流 i_1 和 i_2 （单位A）时，两导体间的电磁相互作用力，即点力（单位N）为：

$$F=\mu_0 K s i_1 i_2 L / 2 \pi a=2 K s i_1 i_2 \times 10^{-7} / a$$

式中： a ——两导体的轴线间距离；

L ——导体的两相邻支持点间距离，即挡距；

μ_0 ——真空和空气的磁导率， $\mu_0=4 \pi \times 10^{-7} N/A^2$ ；

K_s ——形状系数。

作用在导体上的力 F 的方向是电流同向时互相吸引，电流反向时互相排斥。作用力实际上是沿长度 L 均匀分布，作用力 F 是指作用于 L 长度中点的合力。形状系数 K_s 与截面形状和相互位置有关，只有当导体截面很小，长度 L 远大于导体间距离 A ，且假设所有电流都集中在导体轴上时，形状系数 K_s 才等于1。但在实际计算中，对于圆截面和矩形截面导体，当导体间距离足够大时，可以认为 $K_s=1$ 。在其他情况下， $K_s \neq 1$ 。因此，导线之间的间隙距离大于导线截面的周长，每相只有一根截面为矩形的导线。

2. 短路动稳定度的校验条件。并对导体的动稳定性进行了校核，还根据不同的被校核对象，将其换算成不同的具体条件。

(1) 检查一般电器的动态稳定性条件。三相短路冲击电流可按下列公式进行校验：

$$4.I_{max} \geq i_{sh}^{(3)}$$

$$I_{max} \geq I_{sh}^{(3)}$$

式中： i_{max} ——电器的极限通过电流峰值；

I_{max} ——电器的极限通过电流有效值。

(2) 绝缘子的动稳定度校验条件。按下式校验为：

$$F_{al} \geq F_e^{(3)}$$

式中： F_{al} 绝缘子的最大允许载荷，可由有关手册或产品样本查得；如果手册或样本给出的是绝缘子的抗弯破坏载荷值，则应将该值乘以0.6作为 F_{al} 。

$F_e^{(3)}$ ——短路时作用于绝缘子上的计算力；如果矩形导线在绝缘子上位平放，则 $F_e^{(3)}=F^{(3)}$ 。对于不是母线的矩形硬导体，其动稳定校核条件和校核方法与硬母线相同，一般不单独列出。至于电缆，由于其内部是铜导体，外部机械强度很高，所以不需要校核其短路动稳定度和机械强度。

3. 短路计算点附近交流电机反向冲击电流的考虑。当短路点附近连接的交流电动机的额定电流之和超过系统短路电流的1%时，应考虑电动机反馈电流的影响。由于短路时电机端电压的突然下降，电机将电流反馈到短路点，因为电动势被设置为高于施加的电压，从而增加了短路计算点的短路浪涌电流。

六、热稳定校验目标、思路及方法

1. 校验目标。就电缆热稳定校验而言，最终亟需解决的问题是：对于某一级别额定容量的变压器来说，由其供电的低压电缆，需要多大截面才是满足热稳定的？或者说，较小截面的电缆，可否附加什么条件，以满足

热稳定?

2.基本校验思路。a.计算出母排短路时相关技术参数。不计入被校验电缆的阻抗,根据公式求出母排短路时的 I 、 t 、 T_a 和 T_{eq} 等值。b.计算电缆“热稳定临界截面”。假想长度为0的电缆(VV或YJV型)接于母排上,再求出刚好满足热稳定要求的该类型电缆的截面。称之为“热稳定临界截面”—— S_{lj} 。显然,对于母排上所接截面 $S \geq S_{lj}$ 的出线电缆,其热稳定总满足要求。c.计算电缆“热稳定最小长度”。对于母排上所接截面 $S < S_{lj}$ 的出线电缆,因为短路点取在该电缆非始端,故该电缆具备了一定自身长度和自身阻抗。该阻抗计入短路回路后,使短路电流有所减小,进而又对电缆截面要求有所降低。换言之,即便是截面 $S < S_{lj}$ 的出线电缆,只要具有一定的长度(阻抗),也可以做到满足热稳定要求。将其最短允许长度,称为“热稳定最小长度”—— l_{min} 。截面为 S 的被校验电缆,若其长度 $l_x \geq l_{min}$,则满足热稳定;反之,不满足。

3.迭代逼近法。观察可发现, S 、 l_x 、 I 等值互相嵌套和制约、互为因果。以下采用“迭代逼近法”求解、校

验:a.选取公称截面为 S 的电缆,其中 $S < S_{lj}$;查出其单位长度电阻、电抗。b.①取该电缆的某长度 l_x ,算出电缆阻抗,得出 I 值;②将该 I 值代入,可得出电缆截面计算值 S' ;③比较 S' 与 S :若 $S' < S$,则减小 l_x 值;若 $S' > S$,则加大 l_x 值;④重复前述①~③步骤若干次,直至 S' 最接近 S ,且 $S' < S$ 。则此时 l_x 值即为截面为 S 的电缆热稳定最小长度 l_{min} 。c.重复上述a、b步骤,可依次求出对应于某一级别额定容量变压器,其它所有公称截面(均小于 S_{lj})的电缆所对应的热稳定最小长度。上述计算,因同时牵涉到指数、开方和迭代运算,最好借助于计算机程序或工具软件(如Excel)。

总之,由于短路,有许多方法使绝缘导体热稳定。而不是一味增加导体截面来消耗有色金属和绝缘材料,而是要综合评估系统容量、开关选择、导体和绝缘材料、电缆长度和截面,在经济合理的条件下满足电缆的热稳定性。

参考文献:

- [1]刘萍.关于低压绝缘导体短路热稳定校验探讨.2020.
- [2]张华.浅谈低压绝缘导体短路热稳定校验分析.2021.