

低压电缆热稳定校验探讨

李良胜 (深圳市市政设计研究院有限公司, 广东省深圳市 518031)

Discussion on the Check of Thermal Stability of Low-voltage Cables

Li Liangsheng (Shenzhen Municipal Design & Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518031, Guangdong Province, China)

Abstract Corresponding to rated capacity at all levels of transformers and for different types, sections and length of cables, and different duration of short-circuit current, this paper discusses the check of thermal stability of low-voltage cables and provides some useful lookup tables of thermal stability.

Key words Check of thermal stability Cable Critical section Minimum length Short-circuit current Short circuit point Aperiodic component Allowable through energy

摘要 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。

关键词 热稳定校验 电缆 临界截面 最小长度 短路电流 短路点 非周期分量 允通能量

0 引言

配电线路发生短路故障时, 在保护电器动作之前, 由于短路电流热效应的作用, 导体温度会急剧上升, 从而可能使导体绝缘损坏、变脆, 或使芯体机械强度降低、熔化。为此, GB 50054-95《低压配电设计规范》(以下简称《低规》)第4.2.1条规定:“配电线路的短路保护, 应在短路电流对导体和连接件产生的热作用和机械作用造成危害之前切断短路电流”, 即要求对绝缘导体进行热稳定等校验。

目前, 对于低压配电电缆的热稳定校验, 尚缺少

深入研究和量化计算(尤其在须考虑短路电流非周期分量影响时)。本文将就此展开探讨。

1 热稳定校验公式

1.1 $5s > t \geq 0.1s$ 时的校验公式

根据《低规》第4.2.2条, 绝缘导体的热稳定校验应符合下列规定: 当短路持续时间不大于5s时, 绝缘导体的热稳定应按下式进行校验:

$$S \geq \frac{I}{K} \sqrt{t} \quad (1)$$

式中: S ——绝缘导体的线芯截面, mm^2 ;

I ——短路电流有效值(均方根值), 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, 亦即保护电器动作时间, s;

K ——导体不同绝缘的计算系数。对于常见铜芯低压电缆: VV型, $K=115$; YJV型, $K=143$ 。

1.2 $t < 0.1s$ 时的校验公式

$t < 0.1s$ 时, 热稳定校验不宜再直接套用公式(1)。一般而言, 配电系统发生短路时, 短路电流周期分量(交流分量)和非周期分量(直流分量)同时并存, 只不过后者会逐渐衰减至零。根据《低规》第4.2.2条, 当短路电流持续时间 $t < 0.1s$ 时, 就须计入非周期分量的影响。

参照DL/T 5163-2002《水电工程三相交流系统短路电流计算导则》第8.5.1、8.5.2条, 考虑非周期分量之后, 电缆短路电流热效应为:

作者信息

李良胜, 男, 深圳市市政设计研究院有限公司, 高级工程师, 电气副总工程师, 深圳市勘察设计行业协会秘书长。

$$Q_t = Q_z + Q_f$$

$$= \frac{(I'')^2 + 10(I_{t/2})^2 + (I_t)^2}{12} t + T_{eq} (I'')^2$$

式中： Q_t ——短路电流在电缆中引起的总热效应， $A^2 \cdot s$ ；

Q_z ——短路电流周期分量引起的热效应， $A^2 \cdot s$ ；

Q_f ——短路电流非周期分量引起的热效应， $A^2 \cdot s$ ；

I'' ——超瞬态短路电流有效值，A；

$I_{t/2}$ ——短路电流在 $t/2$ 时的周期分量有效值，A；

I_t ——短路电流在 t 时的周期分量有效值，A；

t ——短路持续时间，s；

T_{eq} ——短路电流非周期分量等效时间，s，

$$T_{eq} = T_a (1 - e^{-\frac{2t}{T_a}});$$

T_a ——短路电流非周期分量衰减时间常数，s，

$$T_a = \frac{X_\Sigma}{314 R_\Sigma};$$

X_Σ ——短路回路总电抗，mΩ，详见 2.2 节；

R_Σ ——短路回路总电阻，mΩ，详见 2.2 节。

根据本文计算条件及参考文献^[3]，变压器阻抗与变压器高压侧系统阻抗（归算到 400 V 侧）之比 ≥ 2 ，故可认为变压器低压侧短路时，短路电流周期分量不衰减，即： $I'' = I_{t/2} = I_t = I$ ，于是：

$$Q_t = \frac{(I'')^2 + 10(I_{t/2})^2 + (I_t)^2}{12} t + T_{eq} (I'')^2$$

$$= I^2 [t + T_a (1 - e^{-\frac{2t}{T_a}})]$$

再由 $S^2 K^2 \geq Q_t$ ，得 $S \geq \frac{\sqrt{Q_t}}{K}$ ，即：

$$S \geq I \times \frac{\sqrt{t + T_a (1 - e^{-\frac{2t}{T_a}})}}{K} \quad (2)$$

此即 $t < 0.1$ s 时的电缆热稳定校验公式。

2 短路点选取及短路电流计算公式

2.1 短路点选取

众所周知，越靠近电源，则电缆短路热效应越显

著。为此，本文着重探讨直接接于低压屏内母排上的低压电缆的热稳定。在校验前，应首先确定短路点。

电缆始端因直接接于母排，故母排短路，即等同于电缆始端短路；且此处发生短路时的短路电流值，肯定要比该电缆其它部位发生短路时要大。但电缆始端并不适合作为其自身热稳定校验短路点。道理也容易理解：假令校验短路点取为电缆始端，则因电缆自身均处在短路点之后（即负荷侧），其“划入”短路回路的长度为 0 m，故电缆本身不可能有短路电流通过。可见，电缆始端不宜作为电缆本身热稳定校验的短路点。

那么，短路点到底取在哪里，既合规、又实用？参照文献^[3] 相关做法，低压电缆短路点建议按下列方式确定：

a. 对于不超过制造长度的电缆：放射式配电的，短路点取其末端；链接或 T 接配电的，短路点取其靠近始端的第一个接头处。

b. 对于有中间接头的放射式配电电缆，短路点取该中间接头处（最靠近电源侧）。

当然，尽管电缆始端并不适合作为其自身热稳定校验的短路点，但为便于相关推算，下文仍以母排（电缆始端）处短路作为研究切入点。

2.2 短路电流计算公式

确定短路点之后，即可按可能发生最大短路电流的正常接线方式，来计算三相短路电流有效值 I ，计算公式如下：

$$I = \frac{1.05 \times 380}{\sqrt{3} Z_\Sigma} \times 1000$$

$$= \frac{230}{\sqrt{R_\Sigma^2 + X_\Sigma^2}} \times 1000 \quad (3)$$

式中： X_Σ ——短路回路总电抗，mΩ， $X_\Sigma = X_s + X_t$

$$+ l_m \cdot X_{m0} + l_x \cdot X_{x0};$$

X_s ——归算到变压器低压侧的高压侧系统电抗，mΩ；

X_t ——变压器电抗，mΩ；

X_{m0} ——低压屏内母排单位长度电抗，mΩ/m；

X_{x0} ——被校验电缆的单位长度电抗，mΩ/m；

R_Σ ——短路回路总电阻，mΩ， $R_\Sigma = R_s + R_t$

$$+ l_m \cdot R_{m0} + l_x \cdot R_{x0};$$

R_s ——归算到变压器低压侧的高压侧系统电阻, $m\Omega$;

R_t ——变压器电阻, $m\Omega$;

R_{m0} ——低压屏内母排单位长度电阻, $m\Omega/m$;

R_{x0} ——被校验电缆的单位长度电阻, $m\Omega/m$;

l_m ——低压屏内母排长度, m (本文按 $3m$ 或 $5m$ 计算);

l_x ——被校验电缆的长度, m 。

3 热稳定校验目标、思路及方法

3.1 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?

3.2 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 (3), 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, 再根据公式 (1) 或公式 (2), 求出刚好满足热稳定要求的该类型电缆的截面。本文称之为“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。本文将其最短允许长度, 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。

3.3 迭代逼近法

观察公式 (1) ~ (3) 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, 由公式 (3) 得出 I 值; ②将该 I 值代入公式 (1) 或公式 (2), 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)。

4 热稳定校验的实用速查表

4.1 速查表计算的前提条件

为得到随后的速查表, 本文特设定如下前提条件:

a. 高压侧系统短路容量取 $S_s = 300 \text{ MVA}$ 。

b. 变压器为 SC (B) 9 型, D, yn11。变压器额定容量 $\geq 630 \text{ kVA}$ 的, 阻抗电压取为 6% ; 其它容量的取为 4% 。变压器为分列运行。

c. 变压器不同级别额定容量与低压屏内母排规格对应关系, 按文献^[3]中表 4-30 选取。此外, 变压器额定容量 $> 800 \text{ kVA}$ 的, 母排相线间距 $D = 350 \text{ mm}$; 额定容量 $\leq 800 \text{ kVA}$ 的, $D = 250 \text{ mm}$ 。变压器额定容量 $> 315 \text{ kVA}$ 的, 母排长度取为 5 m ; 额定容量 $\leq 315 \text{ kVA}$ 的, 取为 3 m 。母排按末端短路计算。

d. 被校验电缆直接接于变电所低压屏母排上, 采用 VV 或 YJV 型, 电缆长度取整数。

e. 电缆始端短路保护电器瞬时动作的, t 取 0.02 s ; 延时动作的, t 取 0.2 s 。

4.2 校验实例

4.2.1 电缆热稳定临界截面

以额定容量为 1 600 kVA 的变压器为例, 假令母排末端发生最严重短路, $t = 0.02 \text{ s}$, 由公式 (3)、(2), 易得三相短路电流 $I = 31\,146 \text{ A}$, VV 型电缆热稳定临界截面 $S_{lj} = 55.268 \text{ mm}^2$; $S > 55.268 \text{ mm}^2$ 的 VV 型电缆, 热稳定无须校验; $S < 55.268 \text{ mm}^2$ 的 VV 型电缆, 则须具备“热稳定最小长度”。

对应于不同额定容量变压器、不同动作时间、不同类型电缆热稳定临界截面等参数, 见表 1。

4.2.2 电缆热稳定最小长度

仍以额定容量为 1 600 kVA 的变压器, $t = 0.02 \text{ s}$ 为例, 求取公称截面 $S = 50 \text{ mm}^2$ 的 VV 型电缆热稳定最小长度: 可设电缆初始长度 l_x 为 1 m, 由公式 (3) 知, $I = 30\,629 \text{ A}$; 代入公式 (2), 则 $S' = 51.576 \text{ mm}^2$, $> S$, 不合要求; 再令 $l_x = 2 \text{ m}$, 则得 $I = 30\,070 \text{ A}$, $S' = 48.594 \text{ mm}^2$, $< S$, 且最接近 S , 符合要求。

因此可知, 对于 1 600 kVA 变压器, $t = 0.02 \text{ s}$ 时, $S = 50 \text{ mm}^2$ 的 VV 型电缆热稳定最小长度为 2 m。它意味着: $S = 50 \text{ mm}^2$ 的 VV 型电缆长度不小于 2 m 时, 满足热稳定; 小于 2 m 的, 不满足。

表 2 一并给出了 $t = 0.02 \text{ s}$ 时, 公称截面 S 为

表 1 对应于不同额定容量变压器的电缆热稳定临界截面

Tab. 1 The critical section of thermal stability of cables corresponding to different rated capacity of transformers

变压器容量 / kVA	母排长度 l_m / m	回路阻抗 $Z_{\Sigma} / \text{m}\Omega$	三相短路电流 I / A	$t = 0.2 \text{ s}$ 时 VV 型电缆临界截面 S_{lj} / mm^2	$t = 0.02 \text{ s}$ 时 VV 型电缆临界截面 S_{lj} / mm^2	$t = 0.2 \text{ s}$ 时 YJV 型电缆临界截面 S_{lj} / mm^2	$t = 0.02 \text{ s}$ 时 YJV 型电缆临界截面 S_{lj} / mm^2
1 600	5	7.385	31 146	121.121	55.268	97.405	44.446
1 250	5	9.117	25 228	98.107	44.394	78.897	35.701
1 000	5	10.991	20 927	81.379	36.289	65.445	29.183
800	5	13.395	17 170	66.771	29.315	53.697	23.575
630	5	16.648	13 815	53.726	23.284	43.206	18.725
500	5	14.232	16 161	62.847	25.685	50.542	20.656
400	5	17.530	13 121	51.024	20.659	41.033	16.614
315	3	21.517	10 689	41.568	16.574	33.428	13.329
250	3	26.884	8 555	33.269	13.258	26.755	10.662
200	3	32.535	7 069	27.491	10.671	22.109	8.582
160	3	41.301	5 569	21.656	8.312	17.416	6.684

表 2 1 600 kVA 变压器, $t = 0.02 \text{ s}$, 对应 VV 型电缆热稳定最小长度

Tab. 2 1 600 kVA transformers, $t = 0.02 \text{ s}$, corresponding to the minimum length of thermal stability of VV cables

回路电阻 $R_{\Sigma} / \text{m}\Omega$	回路电抗 $X_{\Sigma} / \text{m}\Omega$	回路阻抗 $Z_{\Sigma} / \text{m}\Omega$	三相短路电流 I / A	计算电缆截面 S' / mm^2	实选电缆公称截面 S / mm^2	热稳定最小长度 l_{\min} / m
73.910	9.040	74.461	3 089	3.835	4	17
49.549	9.040	50.367	4 566	5.697	6	17
28.874	8.844	30.198	7 616	9.592	10	16
17.265	8.645	19.308	11 912	15.221	16	15
9.234	8.324	12.432	18 501	24.329	25	12
4.818	7.980	9.322	24 674	34.108	35	8
1.512	7.498	7.649	30 070	48.594	50	2

4 mm²、6 mm²、10 mm²、16 mm²、25 mm²、35 mm²、50 mm²的VV型电缆热稳定最小长度(对应于额定容量为1600 kVA的变压器)的计算值。

4.3 t=0.02s时的实用速查表

表3为不同额定容量变压器, t=0.02s, 所对应不同截面VV型电缆的热稳定最小长度。

表4为不同额定容量变压器, t=0.02s, 所对应不同截面YJV型电缆的热稳定最小长度。

4.4 t=0.2s时的实用速查表

表5为不同额定容量变压器, t=0.2s, 所对应不同截面VV型电缆的热稳定最小长度。

表6为不同额定容量变压器, t=0.2s, 所对应不同截面YJV型电缆的热稳定最小长度。

5 限流断路器或熔断器保护

5.1 限流断路器保护

短路故障发生时, 限流断路器的动、静触头会在短路电流峰值出现之前快速打开, 从而产生电弧, 相当于在线路中即时串入一个急剧增长的电弧电阻, 从而降低短路电流I; 同时, 限流断路器快速动作, 则t值减小(比如为0.01s)。而I、t的双重减小,

标志着电缆热稳定临界截面的大幅减小和热稳定最小长度的大幅缩短。

比如, 30 kA的预期短路电流, 经使用某限流断路器之后, 其实际值可在12 kA以下。因S基本与I值成正比, 故会减为原截面的40%; 而与t=0.02s相比, t=0.01s的电缆热稳定最小长度大致仅为前者的 $\frac{1}{1.4}$ 倍。

5.2 熔断器保护

与限流断路器类似, 熔断器也具有优良的限流特性和快速动作特性, 也是用以确保电缆热稳定的有效措施之一。不过, 由于熔断器保护的反时限特性, 在进行电缆热稳定校验时, 需要根据所选择的熔断体电流, 对应查阅熔断特性曲线, 找出全熔断时间t, 再代入公式(1)或(2)运算。较为繁琐, 也不够直观。

6 关于允通能量曲线的运用

关于t<0.1s时的导体热稳定校验, 业界还有一种常见做法(GB 16895.5-2000《建筑物电气装置第4部分: 安全防护 第43章: 过电流保护》也有

表3 不同额定容量变压器, t=0.02s, VV型电缆热稳定最小长度

Tab.3 Different rated capacity of transformers, t=0.02s, the minimum length of thermal stability of VV cables

电缆热稳定 最小长度/m /mm ² 变压器容量 /kVA	4	6	10	16	25	35	50
1600	17	17	16	15	12	8	2
1250	17	16	15	14	10	4	
1000	17	16	15	12	7	1	
800	16	16	14	11	3		
630	16	15	13	7			
500	16	15	13	9	1		
400	16	15	12	6			
315	15	14	10			红色区域	
250	15	13	6			电缆长度	
200	14	11				无要求	
160	12	7					

表 4 不同额定容量变压器, $t=0.02\text{ s}$, YJV 型电缆热稳定最小长度

Tab. 4 Different rated capacity of transformers, $t=0.02\text{ s}$, the minimum length of thermal stability of YJV cables

电缆热稳定 最小长度 / m	电缆截面 / mm ²		变压器容量 / kVA			
	4	6	10	16	25	35
1 600	14	13	13	11	8	4
1 250	13	13	12	10	5	1
1 000	13	13	11	9	3	
800	13	13	11	6		
630	13	12	9	3		
500	13	12	10	5		
400	12	11	8	1		
315	12	10	5		红色区域	
250	11	9	2		电缆长度	
200	10	6			无要求	
160	8	3				

表 5 不同额定容量变压器, $t=0.2\text{ s}$, VV 型电缆热稳定最小长度

Tab. 5 Different rated capacity of transformers, $t=0.2\text{ s}$, the minimum length of thermal stability of VV cables

电缆热稳定 最小长度 / m	电缆截面 / mm ²		变压器容量 / kVA							
	4	6	10	16	25	35	50	70	95	120
1 600	52	52	51	50	48	45	40	31	17	1
1 250	52	52	51	49	47	43	36	23	3	
1 000	52	52	50	48	45	40	31	13		
800	52	51	49	47	43	36	23			
630	52	51	49	46	39	30	8			
500	52	51	49	46	41	33	18			
400	51	51	48	45	37	26	3			
315	51	50	46	41	31	16			红色区域	
250	50	49	45	38	23				电缆长度	
200	50	48	42	32	10				无要求	
160	48	46	38	23						

提及): 电缆 $S^2 K^2$ 只要大于保护电器允许通过的能量值 $I^2 t$ (在保护电器制造厂商提供的允通能量曲线上读取), 就可以保证保护电器在分断短路电流之前, 导体能够承受全短路电流的热效应。

该办法有便利之处, 但也有其局限性:

a. 因为不同保护电器制造厂商提供的允通能量曲线并不具有通用性, 所以设计人员必须选定具体厂家的具体保护电器型号后, 才可能知晓允通能量值,

表6 不同额定容量变压器, $t=0.2\text{ s}$, YJV型电缆热稳定最小长度

Tab. 6 Different rated capacity of transformers, $t=0.2\text{ s}$, the minimum length of thermal stability of YJV cables

电缆热稳定 最小长度 / m 变压器容量 / kVA	4	6	10	16	25	35	50	70	95
1 600	42	42	41	40	38	35	30	24	6
1 250	42	42	40	39	36	32	24	9	
1 000	42	42	40	38	35	29	18		
800	42	41	39	37	32	24	7		
630	41	41	38	35	28	16			
500	41	41	39	36	30	21	1		
400	41	40	38	34	25	12			
315	41	40	36	31	19			红色区域	
250	40	39	34	26	7			电缆长度	
200	39	37	31	20				无要求	
160	38	35	27	8					

才可能进行电缆热稳定校验。让设计存在变相指定制造厂商之嫌疑。

b. 目前仅有部分保护电器制造厂商(以国外品牌为主)提供允通能量曲线,而且大多限于其部分产品。这给点多面广的保护电器选定及电缆热稳定校验带来困扰。

7 结语

a. 低压电缆热稳定校验,公式(1)适用于 $5\text{ s} > t \geq 0.1\text{ s}$; 而 $t < 0.1\text{ s}$ 时宜采用公式(2)。

b. 低压电缆热稳定校验短路点宜选取在电缆非始端的第一个接头处。

c. 对应于特定的变压器额定容量和保护电器动作时间,电缆截面大于临界截面的,其热稳定自然满足;电缆截面小于临界截面的,其长度应大于热稳定最小长度。

d. 通过速查表,可快速查验对应于常规配电系统参数,某电缆是否满足热稳定。

e. 为满足电缆热稳定,当性价比可行及实施便利时,可酌情选择或加长电缆长度、或增大电缆截面、或改变电缆类型(如选用YJV)、或采用限流断

路器(或熔断器)等措施。

f. 短路持续时间越长(未超过5s),则电缆热效应加剧,故短路故障应尽快切除,慎用、少用短时保护。

g. 利用允通能量曲线进行电缆热稳定校验,有其局限性。⚡

参考文献

[1] 机械工业部中机中电设计研究院,主编. GB 50054-95 低压配电设计规范[S]. 北京:中国计划出版社,1996.

[2] 国家电力公司北京勘测设计研究院,西安交通大学,起草. DL/T 5163-2002 水电工程三相交流系统短路电流计算导则[S]. 北京:中国电力出版社,2002.

[3] 中国航空工业规划设计研究院,组编. 工业与民用配电设计手册[M]. 第3版. 北京:中国电力出版社,2005: 153-171, 207.

[4] 中机中电设计研究院,起草. GB 16895.5-2000 建筑物电气装置 第4部分:安全防护 第43章:过电流保护[S]. 北京:中国标准出版社,2000.

2011-03-18 来稿

2011-05-28 修回