考虑XLPE过热性能的配电电缆应急载流能力的提高

现今供电容量需求不断增加与新建配电线路困难的矛盾日益突出，而提高现有配电电缆输送能力是解决这一矛盾的最佳途径。国内外研究表明电缆具有短时超出允许持续载流量的应急过负荷能力。在运行和电缆线路设计阶段，利用应急负荷载流量可用于提高电缆短时载流能力，而考虑到XLPE的过热性能，配电电缆应急能力将有更大的提升。开发了10 kV XLPE电缆应急负荷载流量计算软件，开展应急负荷试验，试验与计算的对比分析验证了软件计算的正确性。利用软件计算，研究配电电缆应急载流能力，特别是考虑XLPE过热性能应急载流能力的提高。研究结果表明：105 ℃时电缆的应急过负荷能力明显高于90 ℃时的应急过负荷能力；若当前的运行状态（负荷电流）越低，在相同应急时间内电缆的过负荷能力越强；当前运行状态相同时，应急时间越短，过负荷能力越强。

张群峰[1] 庄小亮[2] 牛海清[2] 赵继光[1] 林杰江[3]/1.广东电网公司佛山供电局 2.华南理工大学电力学院 3.广东威恒电力技术开发有限公司

张群峰/高级工程师

关键词/Keywords
XLPE过热性能·
应急负荷·
计算软件·
载流能力·

现今供电容量需求不断增加与新建配电线路困难的矛盾日益突出，无论从经济性还是从节能减排的角度出发，最大限度挖掘现有电缆线路的输送潜力才是解决供电容量需求与新建线路困难矛盾的有效途径[1-3]。

制约电缆输送容量的决定性因素是电缆绝缘材料的长期允许最高工作温度（XLPE绝缘为90 ℃），为保证电缆的寿命，目前国内严格控制电缆线芯温度值不超过这一值[4-7]。实际运行中，电缆的负荷曲线在一段时间内波动不大，但在故障检修等需要紧急供电时，电缆负荷电流需要突然增加，这个阶跃电流称为应急负荷。此时由于电缆内部热容的存在，电缆温度不会发生突变，而是随时间按照指数规律逐渐上升，经过一段时间后达到新的稳态[8-10]。XLPE电缆的应急负荷载流量指的是导体温度不超过90 ℃时，给定应急时间内所能施加的最大电流值[11-14]。即电缆应急载流量也是要将电缆的线芯温度控制在90 ℃以内。

实际上，国内外研究表明，XLPE电缆安全运行所允许的短时应急导体温度至少为105 ℃；若控制电缆每次的过负荷时间，将不会影响电缆的寿命。也就是说，若将过负荷时间控制在某一限定的时间内，在105 ℃时电缆可以安全运行，且不会对其寿命产生影响。因而在极端应急情况，可以有所突破，在较短时间内提高105 ℃时电缆短时允许过载能力。

相关文献虽然提出XLPE电缆短时允许温度可达105 ℃，但未明确指出应急载流提升能力以及应急载流量变化规律。本文开发10 kV XLPE电缆应急负荷载流量计算软件，在试验场开展应急负荷试验，通过软件计算和试验的对比分析，验证软件计算的正确性。利用软件计算，对考虑XLPE过热性能的配电电缆应急载流能力的提高和变化规律进行研究，以期待能最大限度提升电缆输电能力。

应急负荷载流量理论计算

根据IEC 60853，对于通以恒定电流I_1稳态运行的电缆，从$t=0$时刻施加一个紧急负荷电流I_2（大于I_1），紧急负荷电流I_2由式（1）给出

$$I_2 = I_R\sqrt{\frac{h_1^2 R_1}{R_{max}} + \frac{(R_R/R_{max})(r-h_1^2R_1/R_R)}{\theta_R(t)/\theta_R(\infty)}} \quad (1)$$

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

式中，$r=\theta_{max}/\theta_R(\infty)$；$h_1=I_1/I_R$；$t$为应急负荷时间，h；$I_1$为应急负荷前线路的稳态电流，A；$\theta_{max}$为施加紧急电流后的由焦耳损耗引起的稳态温升，℃；$\theta_R(t)$为在施加应急电流时间段$t$内由焦耳损耗引起的稳态温升，℃；$\theta_R(\infty)$为电缆以额定载流量运行时由焦耳损耗引起的稳态温升，℃；I_R为电缆的稳态额定载流量，A；R_1为电缆以电流I_1运行时的导体交流电阻，Ω/m；R_R为电缆以额定载流量运行时的导体交流电阻，Ω/m；R_{max}为施加紧急电流后最高导体温度下的交流电阻，Ω/m。

通过设定最大允许温度θ_{max}可计算90 ℃和105 ℃时电缆的应急负荷载流量。

应急负荷载流量试验

1. 试验现场

在佛山搭建了配电电缆载流量试验场。在试验场，开展了初始状态为50%和80%载流量、应急时间为2 h的应急负荷配电电缆载流量试验，以及初始状态为66%和80%载流量，应急时间为4 h的应急负荷配电电缆载流量试验。试验电缆直埋敷设（埋深0.7 m），型号为YJV22－8.7/15－3×240。利用经校核和标定的热电偶对试验电缆及土壤的温度进行监测。

2. 应急载流量试验方法

试验前，测量5 m外土壤温度及土壤热阻系数，根据其测量值，计算电缆的持续负荷载流量；按照计算的持续负荷载流量值乘以80%（或其他状态）来加载持续负荷试验电流，以模拟电缆的稳定运行状态；待导体温度稳定后，根据当前加载的电流、导体温度的测量值、土壤温度及其热阻系数测量值，利用开发的三芯电缆应急负荷载流量计算软件计算2 h（或其他应急时间）应急负荷载流量；按照计算的应急负荷载流量给试验电缆加载2 h的应急电流；2 h后将电流降低到原电流值；在整个试验过程中，监测电缆的导体温度和外皮温度。

3. 50%载流量2 h应急负荷载流量试验及结果分析

初始状态为50%、应急时间为2 h的应急负荷配电电缆载流量试验（简称50%载流量，2 h应急负荷载流量试验）的试验周期为24 h。试验前，实测试验场的土壤温度为21.70 ℃，土壤热阻系数为0.95 K·m/W。采用经验证的三芯电缆载流量计算软件，计算的三芯电缆的持续负荷载流量为537 A。给试验电缆施加270 A（50%×537 A＝268.5 A）的持续负荷电流模拟稳态运行状态，稳定后测量的导体温度为40 ℃。

根据稳态导体温度40 ℃、持续负荷电流270 A，利用开发的应急载流量计算软件，计算出当前状态下电缆在2 h应急时间内允许加载的电流最大值（即应急负荷载流量）为770 A。

保守起见，应急负荷载流量试验实际加载755 A的阶跃电流，2 h后，将负荷电流降为270 A。试验过程中监测电缆的导体温度、外皮温度及负荷电流。整个试验结果如图1所示。

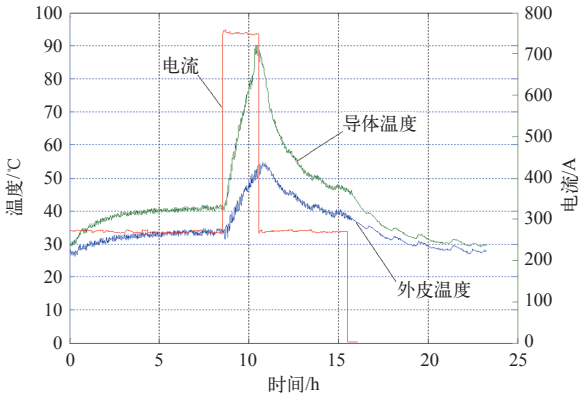

图1　50%载流量，2 h暂态应急载流量的试验结果

从图1可以看出，在270 A稳态电流（50%的载流量）作用下，稳态时电缆测量的导体温度约为40 ℃；根据计算的应急负荷载流量，加载755 A应急负荷2 h后，测量的导体温度最大值为90 ℃。即在50%载流量的初始状态下，试验电缆2 h应急负荷载流量为755 A，而其计算值为770 A，两者相差1.99%。说明三芯电缆应急负荷载流量计算软件计算的正确性。

由于篇幅所限，本文不再对每个试验详细介绍，而将试验结果汇总如表1所示。电缆载流量与土壤温度及其热阻系数相关，由于每次试验土壤温度和热阻系数都不相同，表1中给出电缆初始状

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

态为其各自试验条件下的测量值。根据定义，实际加载的应急电流即为应急负荷载流量的试验值。

表1 应急负荷载流量试验结果

电缆初始状态	稳态电流/A	270	374	480	460
	载流比（%）	50	66	80	80
	导体温度测量值/℃	40	55.9	60	59.8
	应急时间/h	2	4	2	4
	计算的应急负荷载流量/A	770	710	723	686
	实际加载的应急电流/A	755	690	714	670
	应急时间内导体温度测量值/℃	90	91.5	91	90.5
	应急载流量计算与试验的偏差（%）	1.99	2.90	1.26	2.39

从表1可以看出，根据电缆当前状态（包括电流和导体温度）和给定应急时间，给电缆施加利用计算软件计算的应急负荷载流量，应急时间内导体温度最大值在90 ℃左右。因而实际加载的电流即为当前状态、给定应急时间的配电电缆应急负荷载流量的试验结果。

从表1可以看出，不同状态和应急时间的应急负荷载流量的计算值与试验结果相差不超过3%。考虑到试验测量值存在的误差，上述结果验证了本文开发的三芯电缆应急负荷载流量计算软件计算的正确性。

不同运行状态配电电缆过负荷能力的提高

根据经验证的配电电缆载流量计算软件，可得到在30 ℃的土壤温度、1.2 K·m/W的土壤热阻系数等标准条件下，直埋敷设单回路三芯试验电缆持续负荷载流量为462 A。针对直埋敷设单根三芯电缆，本文利用计算软件研究了应急时间为6 h，在某一状态（如70%载流量即323 A）下90 ℃和105 ℃控制的电缆应急过负荷能力的提高。计算结果如表2所示。

表2 不同运行状态下的应急过负荷量

当前状态（%）	30	40	50	60	70	80	90
当前负荷/A	138.6	184.8	231	277.2	323.4	369.6	415.8
90 ℃控制过负荷量/A	634.5	624.7	611.5	594.2	572	543.9	508.1
105 ℃控制过负荷量/A	696.3	687.7	676.3	661.4	642.4	618.6	588.8

由表2可以看出，105 ℃控制电缆过负荷量明显大于90 ℃控制电缆过负荷量，并且都大于持续负荷载流量。为进一步研究不同运行状态下三芯电缆过负荷能力的提高，计算过负荷系数（过负荷量/持续负荷载流量），结果如图2所示。

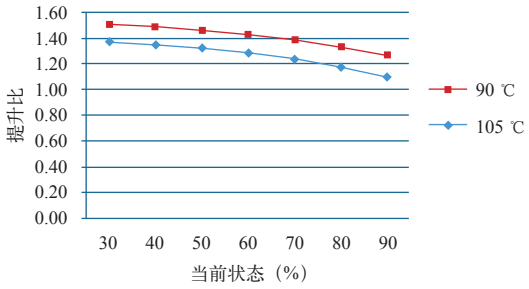

图2 不同运行状态过负荷系数

由图2可以看出，105 ℃控制电缆过负荷系数明显大于90 ℃控制电缆过负荷系数，也就是说以105 ℃控制电缆应急负荷载流量可以进一步提高输电能力。当前为60%载流量条件下，90 ℃控制电缆应急负荷载流量是持续负荷的1.29倍，而105 ℃控制电缆应急负荷载流量却是持续负荷载流量的1.43倍；当前为90%载流量条件下，90 ℃控制电缆应急负荷载流量只是持续负荷的1.1倍，而105 ℃控制电缆应急负荷载流量却是持续负荷载流量的1.27倍。

另外，随着当前负荷的增加，三芯电缆应急过负荷能力降低，而且降低越来越明显。

过负荷量与其过负荷时间的关系

在土壤温度30 ℃、土壤热阻系数1.2 K·m/W时，单根直埋240 mm^{2}三芯电缆运行于80%载流量，即电缆当前的负荷电流为369.6 A（80%×462 A）。计算此时三芯电缆分别在90 ℃、105 ℃控制的电缆过负荷时间和过负荷之间的定量关系，结果如图3所示。

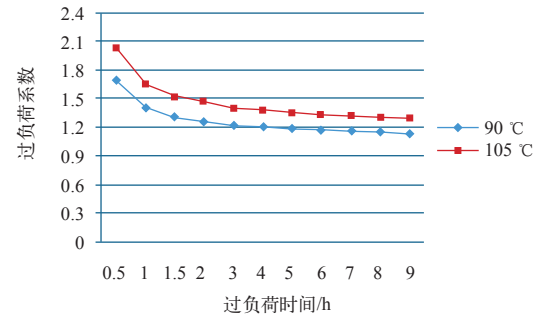

图3 80%载流量电缆的过负荷量与其过负荷时间的关系

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

由图3可以看出，相同过负荷时间，105 ℃控制电缆过负荷系数明显大于90 ℃控制电缆过负荷系数。在80%载流量运行条件下和应急时间较短的0.5 h，90 ℃控制电缆的应急负荷载流量是持续负荷载流量的1.7倍，而105 ℃控制电缆的应急负荷载流量可以达到持续负荷的2.04倍，在如此大的过负荷情况下也不会对电缆的寿命产生影响；应急时间较长的6 h，90 ℃控制电缆的应急负荷载流量是持续负荷载流量的1.18倍，而105 ℃控制电缆的应急负荷载流量可以达到持续负荷的1.34倍。

另外，随着应急时间增长，应急过负荷系数减小，并且变化幅度越小。

结束语

通过应急负荷载流量试验验证开发三芯电缆载流量计算软件的正确性，利用软件对考虑XLPE过热性能的应急载流量能力的提高进行研究，发现电缆线路应急负荷载流量与应急时间的关系，以及当前状态对该关系的影响：

1）105 ℃控制电缆的应急过负荷能力明显强于90 ℃控制电缆的应急过负荷能力，每次的过负荷时间不会对电缆的寿命产生影响。

2）若电缆当前的运行状态（负荷电流）越低，在相同应急时间内的过负荷能力越强。

3）当前运行状态相同时，应急时间越长，过负荷能力越低。

上述研究表明，应急负荷载流量远高于持续负荷载流量。在电缆线路设计和运行中，合理利用应急负荷载流量可以减小电缆截面积或回路数，减少停电转负荷操作，缩短停电时间，从而降低投资，提高电缆线路的经济性和供电可靠性。

对于几个小时内的短时应急情况，建议采用配电电缆应急负荷载流量（90 ℃控制的）对负荷进行控制；对于极端应急情况，可以有所突破，在较短时间内采用105 ℃控制的电缆短时允许过载能力。

参考文献

[1] 刘刚，雷成华．提高单芯电缆短时负荷载流量的试验分析 [J]．高电压技术，2011，37 (5)：1288-1293．

[2] 雷成华，刘刚，阮班义，等．根据导体温升特性实现高压单芯电缆动 态增容的实验研究 [J]．高电压技术，2012，38 (6)：1397-1402．

[3] 杨文英．电力电缆温度在线监测系统的研究 [D]．吉林：东北电力大学，2008．

[4] 张尧，周鑫，牛海清，等．单芯电缆热时间常数的理论计算与试验研究 [J]．高电压技术，2009，35 (11)：2801-2806．

[5] Michael R Yenchek，Peter G Kovalchik．Thermal characteristics of energized shielded drag and an unshielded reeled trailing cable [J]．IEEE Transactions on Industry Applications，1991，27 (4)：791-796．

[6] Iwa Garniwal，Ahmad Burhani．Thermal incremental and time constant analysis on 20 kV XLPE cable with current vary [C]．Bali：Proceedings of ICPADM 2006—8th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials，2006．

[7] Katsuichi Ohata，Shinji Sakurai，Naotaka Ichiyanagi，et al．Transient temperature rise of tunnel for power cables [J]．IEEE Transactions on Power Delivery，1990，5 (2)：745-752．

[8] 周鑫．单芯电力电缆导体温度计算及试验研究 [D]．广州：华南理工大学，2010．

[9] 雷成华．高压单芯电缆动态增容的理论分析与实验研究 [D]．广州：华南理工大学，2012．

[10] 刘毅刚，罗俊华．电缆导体温度实时计算的数学方法 [J]．高电压技术，2005，31 (5)：52-54．

[11] IEC Standard 60853．Calculation of the cyclic and emergency current rating of cables [S]．

[12] IEC 60287 1 1，Calculation of current rating of electric cables part 1，current rating equations (100%load factor) and calculation of losses section [S]．

（收稿日期：2014－09－20）EA

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net