

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.04.026

XLPE 交流电缆线路改为直流运行的载流量设计与分析

陈振新¹, 徐蓓蓓¹, 乐彦杰¹, 刘 英², 汪 行², 姜 晖²

(1. 国网浙江省电力有限公司舟山供电公司, 浙江 舟山 316021; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要:在现役XLPE交流电缆线路的直流改造中,载流量的合理设计是关键问题之一,决定了改造线路的传输容量和运行可靠性。文中对同一线路在交、直流电压下运行时的等效热路模型及载流量解析算法进行了对比,分析了造成交、直流线路载流量差异的关键因素,并以空气敷设的三芯10 kV XLPE电缆为例,进行了同一线路在相同敷设条件下的交、直流载流量模拟试验。研究发现,目前直流改造所涉及的现役XLPE交流电缆线路,在进行直流载流量评估时,绝缘温差要求不成为限制条件,仅需考虑线芯温度限制、按照IEC 60287—2017推荐方法进行计算;在线芯电阻、金属护套损耗、载流芯数、环境热阻及线芯允许长期工作温度等影响因素中,交流电缆改为直流运行后线芯允许工作温度由90℃下降为70℃,在很大程度上抵消了其他因素对载流量的有利贡献;10 kV XLPE电缆载流量模拟试验数据和解析计算结果吻合,偏差很小,验证了解析计算方法的有效性。对10、35 kV三芯和110 kV单芯电缆在不同典型敷设情况下的交、直流载流量计算显示,改为直流运行后,三芯电缆的载流量略有增加,单芯电缆稍有下降,变化幅度均未超过6.5%。

关键词:现役XLPE电缆线路;交流载流量;直流载流量;解析计算;模拟试验

Design and Analysis of Current Ratings of XLPE Cable AC Lines Transformed into DC Operation

CHEN Zhenxin¹, XU Beibei¹, LE Yanjie¹, LIU Ying², WANG Xing², JIANG Hui²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Zhoushan Power Supply Company, Zhejiang Zhoushan, 316021, China;

2. Department of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: In the transformation of an existing XLPE cable line from AC operation into DC, the design of DC current rating is one of the key issues which determines the transmission capacity and operation reliability of the transformed line. In this paper, the equivalent thermal circuits and analytical calculation formulas for the same cable line running under AC and DC are compared, the main factors resulting in the difference between AC and DC current rating of a cable line are analyzed, and the AC and DC current ratings of a 10 kV three-core cable in air are tested under same conditions. It is found that for XLPE cables involved in the AC-to-DC transformation, the insulation temperature gradient will not be a limiting condition, and the DC current rating can be calculated according to IEC 60287—2017 based on the requirement for the permitted conductor temperature. Among the main influencing factors, which are the resistance of conductor, the loss of metallic sheath, the number of cores with current carrying, the thermal resistance of surrounding circumstance and the permitted maximum temperature of conductor, the decrease of the conductor temperature from 90℃ under AC to 70℃ under DC is the most unfavorable condition for the cable line, which largely offsets the improving effect of other factors to the DC current rating. A good correspondence is found between the current rating results tested and calculated, which verifies the validity of the analytical calculation method. Accord-

收稿日期:2019-09-29; 修回日期:2019-11-30

基金项目:国家自然科学基金(51777156);国家重点研发计划课题(2016YFB0900703);国家电网公司科技项目(5211ZS16000D)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51777156), National Key Research and Development Program (2016YFB0900703), Science and Technology Project of SGCC(5211ZS16000D).

ing to the AC and DC current ratings analytically calculated for the 10 kV and 35 kV three-core as well as 110 kV single-core cables under typical installation conditions, the DC ratings of the three-core cables increase slightly while those of the single-core cables decrease compared with the AC ones, with the amplitudes of variation no more than 6.5%.

Key words: existing XLPE cable lines; AC current rating; DC current rating; analytical calculation; simulation test

0 引言

近年来,中国经济的迅猛发展对电网供电能力及可靠性提出了更高要求。相比于增设新线路,运行单位更倾向于对原有线路进行增容改造,这可以通过提高电压等级、消除载流瓶颈、改善系统功率因数、转换运行方式等途径来实现^[1-2]。其中,交流线路改直流运行因具有损耗小、易控制、可靠性高等特点而受到广泛关注,被认为是一种经济有效的增容改造手段^[3]。

在架空线路方面,已有成功改造的工程案例和公开发表的技术指导。2009年,纳米比亚将一条400 kV交流线路改造为350 kV的轻型直流工程,这也是世界上首个架空线路轻型HVDC工程^[4]。2014年,CIGRE B2-41工作组发布了架空输电线路由交流改为直流运行的技术导则,说明了直流改造的参数设计、限制要求等,同时提供了案例分析^[5]。相较而言,电缆线路由交流改直流尚处在探索阶段。

2013年,英国开展了“TOP AND TAIL”项目,在针对交流配网的改造研究中,将33、11 kV以及400 V油浸纸绝缘铅包和XLPE电缆构成的配网系统由交流改为直流运行,设计改造方案、评估电缆线路的绝缘状态和改造后的可靠性^[6]。刘英等成功将一条已投运的35 kV XLPE电缆线路改造为±10 kV直流双极系统并安全运行至今,所涉及的设计、参数选择、试验校核等内容具有重要的工程参考价值^[7]。刘士利对66 kV XLPE交流电缆的直流载流量开展了数值计算以及试验验证,并对实际改造工程的增容效果进行了评估^[8]。于竞哲、邱玉婷分别对10、35 kV交流XLPE电缆改为直流运行的温度场和电场进行了仿真分析^[9-10]。

现役交流XLPE电缆线路的直流改造涉及多方面的技术内容,其中运行电压和允许载流量最为关键,这两个参数的合理设计对于系统增容、运行安全及改造经济性具有决定性作用。目前,载流量的确定方法主要有解析法、数值法和试验法^[11-12]。

IEC 60287—2017给出了电压等级不超过5 kV的直流电缆载流量计算方法,对于更高电压等级,目前国际上未有相关标准或规定^[13]。CIGRE工作组B1.56正在开展电缆载流量计算及校核的研究,其

中一个典型案例就是高压直流电缆线路的载流量设计。刘畅提出了一种两层简化结构,目的是减少有限元法计算直流电缆稳态载流量的工作量^[14]。黄吉超等针对高压直流XLPE电缆开展了电热耦合模拟,并进行了稳态载流量的理论及试验研究^[15-16]。这些针对特定交流电缆线路直流载流量的研究,所得结论仅对所涉及的研究对象有效,不具有普适性^[7-10]。

文中针对交流XLPE电缆线路直流运行改造后的载流量设计开展更为系统性和一般性的研究。通过对交、直流电压下运行时电缆线路等效热路模型及载流量解析算法的对比分析,以及关键影响因素的讨论,建立交流线路直流改造前后载流量的对应关系;以同一电缆线路的交、直流载流量模拟试验,验证解析算法的有效性;对典型单芯及三芯XLPE电缆在相同敷设条件下交、直流载流量的定量计算,为电缆改造项目的传输电流设计提供数据参考。

1 交、直流载流量的计算方法

1.1 交流电缆载流量

交流电缆稳态载流量是指线芯处于最高允许工作温度下的负载电流,也就是说,交流载流量完全由电缆热场所决定。根据传热学原理,在交流运行时,电缆本体和周围环境间的传热过程可用热路模型表示,见图1。当交流电流通过电缆时,在线芯、绝缘、金属护套和铠装中都将产生损耗,形成热流,由于各部分热阻的存在,热流流经电缆各部分时产生温度降,电缆从内到外形成温差^[13]。

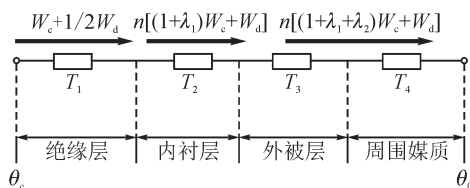


图1 交流电缆的等效热路模型

Fig.1 Equivalent thermal circuit of AC cables

图1中, T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 分别表示单位长度电缆的绝缘层、内衬层、外被层和环境热阻, $T\Omega\cdot m$; W_d 和 W_c 为单位长度电缆的介质损耗和线芯损耗, W/m ; θ_c 和 θ_0 为电缆线芯及环境温度, $^{\circ}C$; n 为载流电缆芯数; λ_1 和 λ_2 为金属护套及铠装损耗因数。

根据等效热路模型, 线芯最高允许工作温度为 θ_{cm} 时, 交流电缆载流量 I_{AC} 的计算公式为^[13]

$$I_{AC} = \sqrt{\frac{(\theta_{cm} - \theta_0) - W_d [1/2 T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)]}{R [T_1 + n(1 + \lambda_1) T_2 + n(1 + \lambda_1 + \lambda_2)(T_3 + T_4)]}} \quad (1)$$

式(1)中, R 为单位长度电缆线芯的交流电阻, Ω/m 。

1.2 直流电缆载流量

直流电缆绝缘中的电场分布取决于电导率, 受温度和场强的影响, 电缆载流量过大会使得绝缘两端温差增大, 电场翻转, 绝缘屏蔽处场强过高^[17-18]。因此, 直流载流量除了受限于线芯最高允许工作温度, 还必须满足绝缘最大允许温差的要求。文中以等效热路模型为基础, 同时考虑线芯最高允许温度和绝缘最大允许温差的限制, 对电缆线路进行直流载流量的推导。

电缆在直流电压下运行时, 由于没有电磁感应, 金属护套及铠装中的损耗为零, 只有线芯损耗和绝缘损耗。测算显示, 即使是对于 320 kV 的高压直流电缆, 由于绝缘材料的高电阻率, 泄漏电流所导致的介质损耗也比线芯损耗低至少 4 个数量级, 因此, 在进行直流载流量评估时, 介质损耗可以忽略不计。这一点, 在 CIGRE B1.56 工作组内部也已经达成共识。因此, 直流电缆载流量计算的等效热路模型见图 2。

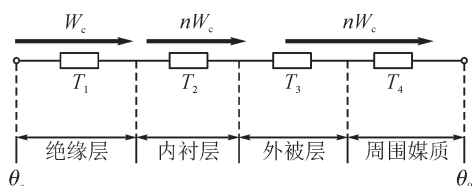


图2 直流电缆的等效热路模型

Fig. 2 Equivalent thermal circuit of DC cables

由电缆线芯最高允许工作温度 θ_{cm} 所决定的直流载流量 I_{DC} 的计算为^[13]

$$I_{DC} = \sqrt{\frac{\theta_{cm} - \theta_0}{R' T_1 + n R' (T_2 + T_3 + T_4)}} \quad (2)$$

式(2)中, R' 为单位长度电缆线芯的直流电阻, Ω/m 。

下面对绝缘允许温差 $\Delta\theta_m$ 的限制进行分析。根据传热学原理^[9], 绝缘层温差 $\Delta\theta$ 等于热流乘以绝缘层热阻, 即

$$\Delta\theta = T_{1-i} I_{DC}^2 R' \quad (3)$$

式(3)中, T_{1-i} 为绝缘层(不包括导体屏蔽和绝缘屏蔽)的热阻, $T\Omega \cdot m$ 。

将式(2)计算的电缆载流量 I_{DC} 代入式(3), 并将得到的绝缘温差 $\Delta\theta$ 与允许值 $\Delta\theta_m$ 比较, 若 $\Delta\theta < \Delta\theta_m$, 说明由线芯允许温度确定的载流量满足绝缘温差要求; 若 $\Delta\theta > \Delta\theta_m$, 则表明由线芯允许温度确定的载流

量导致绝缘温差过大, 不满足要求, 应以绝缘温差为限制条件重新设计电缆载流量。

由式(2)、(3)推导可得, 当绝缘温差达到 $\Delta\theta_m$ 时, 导体温度 θ_c 与 $\Delta\theta_m$ 之间存在以下关系

$$\theta_c = \frac{\Delta\theta_m}{T_{1-i}} [T_1 + n(T_2 + T_3 + T_4)] + \theta_0 \quad (4)$$

以此导体温度 θ_c 作为线芯允许工作温度, 代替 θ_{cm} , 以式(2)重新计算电缆在直流电压下的允许载流量。注意此时导体电阻 R' 也应以温度 θ_c 确定。

基于上述分析, 综合考虑线芯温度及绝缘温差的限制条件, 直流电缆允许载流量的计算流程见图 3。

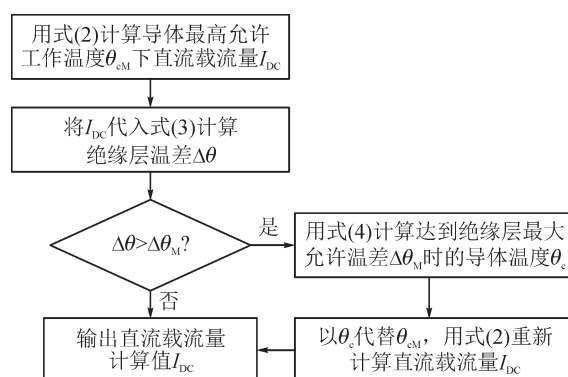


图3 直流电缆载流量的计算流程

Fig. 3 Calculation procedure for the current rating of

DC cables

文中主要针对交流 XLPE 电缆线路改为直流运行前后的允许载流量展开对比分析。根据目前行业内专家的基本共识, 适合进行直流改造的现役交流 XLPE 电缆线路为 110 kV 级及以下。这些电缆无论是单芯还是三芯, 每芯截面积通常不超过 1 200 mm², 绝缘材料为常规交流料, 非掺杂类型, 因此改为直流运行后电缆导体温度允许值不应超过 70 ℃。

对于这些电缆线路, 由于直流下线芯最高运行温度为 70 ℃, 相比于环境温度的允许温升不高, 由热场所限制的允许负载电流不大, 由此所导致的绝缘温差小于由场强所限制的温差允许值(参见文 3 节计算案例, 满载时绝缘温差未超过 10 ℃), 因此, 绝缘温差不成为允许负载电流的限制条件, 在进行直流电缆载流量设计时, 只需考虑线芯温度限制, 按照图 2 所示的等效热路, 采用 IEC 60287—2017 推荐的式(2)进行计算即可。

2 交、直流载流量的影响因素分析

以式(1)、(2)为基础, 在线芯最高允许温度限制条件下, 讨论三芯和单芯交流 XLPE 电缆直流改造前后的载流量, 分析关键项对交、直流载流量的影响。

2.1 三芯电缆

35 kV 及以下配电系统中通常采用三芯 XLPE 电缆。为了对交流电缆线路直流改造后的载流量变化有更为系统的认识,影响三芯电缆交、直流载流量的主要因素对比见表 1。

表 1 三芯电缆交、直流载流量的主要影响因素

Table 1 The main factors for current ratings of three-core cables operated under AC or DC

影响 因素	交流载 流量	直流载 流量	说明
介质损耗 W_d	较小	小,可忽略	—
护套损耗 λ_1	有	无	—
铠装损耗 λ_2	小,可忽略	无	—
电缆本体热 阻 T_1 、 T_2 、 T_3	在计算交、直流载流量 时不变		—
环境热阻 T_4	在计算交、直流载流量 时不变		—
载流线芯数 n	3	2	直流以双极加 备用线方式 运行
线芯最高 温度 θ_c	90 ℃	70 ℃	直流下 $\theta_c - \theta_0$ 可 降为交流下的 60%~70%
线芯电阻	直流下无需考虑集肤效 应、邻近效应,且导体 允许温度降低		直流下可降为 交流的 90%~95%

对表 1 做以下几点说明:①由于电缆运行电压为 110 kV 及以下,故交流介质损耗 W_d 较小;三芯电缆铠装中的电磁场近似为零,因此损耗很小,计算交流载流量时通常忽略不计^[13]。②三芯交流电缆改为直流运行时,电缆本体结构及外部敷设环境保持不变,因此 T_1 、 T_2 、 T_3 、 T_4 均不变。③现役交流电缆直流改造时,多设计为正、负双极加备用线的运行方式,即交流三根相线分别作为直流的正、负极线和备用线(或中性线)^[7-10],因此每根电缆中的载流线芯数由 3 根减少为 2 根。④交流 XLPE 电缆线芯允许最高温度为 90 ℃,因为绝缘采用传统非掺杂材料,直流运行温度应降为 70 ℃;在外界环境温度取 20~40 ℃ 时,直流下允许导体温升 $\theta_c - \theta_0$ 下降为交流下的 60%~70%。⑤直流电压下无集肤效应和邻近效应,且允许温度由 90 ℃ 下降为 70 ℃,这导致线芯电阻下降约 5%~10%。

上述分析表明,导致三芯 XLPE 电缆交、直流载流量不同的因素主要是金属护套损耗、电缆载流线芯数、线芯允许最高工作温度和线芯电阻。其中,

线芯工作温度的改变对载流量的影响最大,它的降低在很大程度上抵消了其他因素变化对直流载流量的有利贡献。

2.2 单芯电缆

电压等级在 35 kV 以上的 XLPE 电缆多采用单芯结构。与文 2.1 节类似,将影响单芯电缆交、直流载流量的主要因素进行对比,见表 2。

表 2 单芯电缆交、直流载流量的主要影响因素

Table 2 The main factors for current ratings of single-core cables operated under AC or DC

影响 因素	交流载 流量	直流载 流量	说明
介质损耗 W_d	较小	小,可忽略	—
护套损耗 λ_1	有	无	—
铠装损耗 λ_2	有	无	—
电缆本体 热阻 T_1 、 T_2 、 T_3	在计算交、直流载流量时 不变		—
环境热阻 T_4	直流下单芯电缆的外部热 源减少,环境热阻 T_4 减小		直流以双极加 备用线方式 运行
载流线芯数 n	1	1	—
线芯最高 温度 θ_c	90 ℃	70 ℃	直流下 $\theta_c - \theta_0$ 可 降为交流下的 60%~70%
线芯电阻	直流下无需考虑集肤效 应、邻近效应,且导体允许 温度降低		直流下可降为 交流的 85~90%

表 1、2 不同之处简要说明如下:①高压单芯电缆在交流下运行时不但要考虑金属护套损耗,铠装损耗(对海缆)也不容忽略。②单芯电缆由交流改为直流运行时,外部敷设环境不变,但每个回路中的载流电缆由 3 根变为 2 根,相互热影响变小, T_4 减小。③单芯电缆通常线芯截面积较大,交流运行时集肤效应和邻近效应更为显著,交流电阻与直流电阻的差异更大。

从表 1、2 可见,交流电缆改为直流运行后,虽然导体电阻减小,介质损耗、金属护套及铠装损耗为零,载流线芯数减少,这些因素对于直流下增大载流量较为有利,但线芯允许工作温度显著降低,最终直流载流量相对于交流的变化将是上述因素综合作用的结果。

3 载流量试验及与计算结果的对比

在实验室模拟空气中敷设条件,对 10 kV 三芯 XLPE 电缆进行交、直流载流量试验,并利用实测数

据对计算结果进行验证。

3.1 空气中敷设10kV三芯XLPE电缆载流量试验

为了对解析算法的准确性加以验证,在实验室模拟空气中敷设条件,对同一根型号为YJV22—8.7/10 kV—3×300 mm²的10 kV三芯XLPE电缆分别进行了交流和直流载流量试验。试验回路见图4。

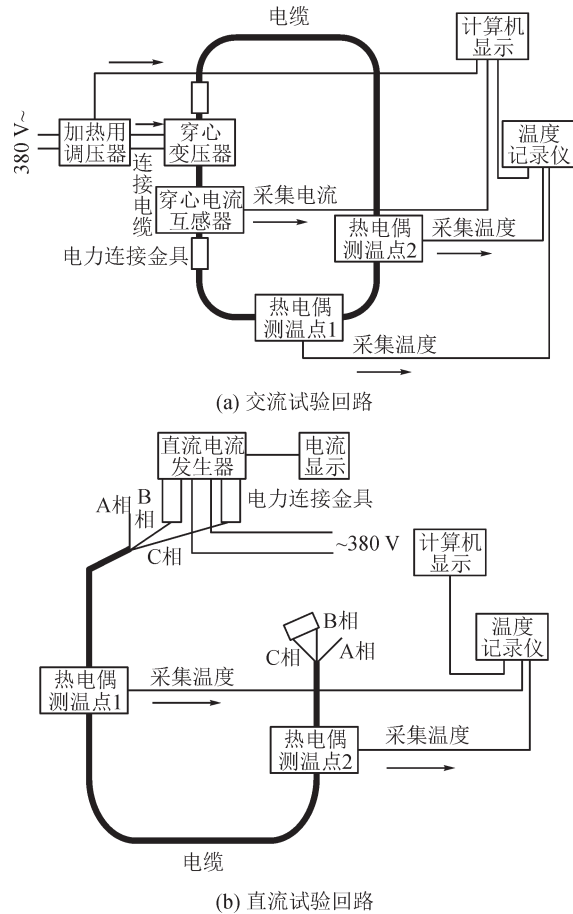


图4 10 kV三芯XLPE电缆交、直流载流量试验回路示意图
Fig. 4 Schematic diagram of the test loop for AC and DC current ratings of the 10 kV three-core XLPE cable line

试验时,电缆的金属屏蔽及铠装层均断开,仅在线芯中施加电流,不加电压。如图4所示,交流载流量测试时,电缆首尾连接形成闭合回路,利用穿心电流互感器为线芯加载交流电流;而在直流测试时,直流电流发生器与线芯连接形成回路,提供直流电流。在线路中不同位置安装热电偶,对线芯、外护套及环境温度进行实时监测。当测温点温度曲线稳定,且2 h内温度变化不超过2℃时,认为电缆达到稳态,记录此时的电流及各点温度,结果见表3。

表3 载流量试验结果

Table 3 Results of the current rating tests			
运行方式	线芯温度 $\theta/\text{℃}$	外护套温度 $\theta/\text{℃}$	电流 I/A
交流	89.5	56.3	680
直流	70.1	38.8	810

3.2 载流量的解析计算

为了对载流量进行计算,对该电缆的结构尺寸和热阻率参数列表,见表4。

表4 被测10 kV三芯XLPE电缆的尺寸及材料参数

Table 4 The structural and material parameters of the 10 kV three-core XLPE cable under test			
结构层	厚度/mm	外径/mm	热阻率/($\text{T}\Omega\cdot\text{m}$)
导体,铜	—	20.6	—
导体屏蔽	0.8	22.2	3.5
绝缘,XLPE	4.5	31.2	3.5
绝缘屏蔽	0.7	32.6	3.5
金属屏蔽,铜带	0.2	33.0	—
绕包,无纺布	0.6	72.2	6.0
内衬层,PVC	1.8	75.8	5.0
铠装,镀锌钢带	1.6	79.0	—
外被层,PVC	3.8	86.6	5.0

根据前面的分析,分别利用式(1)、(2)进行交流及直流下电缆允许载流量的计算,相关数据及结果见图5。需要指出的是,为了与试验数据相对应,此处采用电缆外护套实测温度作为输入条件,省略了环境热阻的计算,也避免了环境热阻受其他因素影响大、不易准确计算所带来的问题。

图5采用梯形等效图对载流量计算过程中各相关参数和计算结果进行显示,简单直观。计算显示,交流下,线芯最高温度为90℃,电缆允许载流量为696 A;直流下,线芯最高温度为70℃,电缆允许载流量为805 A,对应的绝缘层温差约为8.8℃,未超过场强限制所允许的温差范围^[20-22]。

3.3 计算结果与试验数据的对比

对所研究的10 kV三芯XLPE电缆,其交流载流量的试验值为680 A,计算值为696 A,偏差为2%;直流载流量的试验值为810 A,计算值为805 A,偏差不到1%。由此说明,上文所述的解析计算方法可以对电缆的交、直流载流量进行准确评估。

4 典型敷设方式下电缆线路的交、直流载流量比较

由于现役交流XLPE电缆线路直流改造所涉及的电压等级为110 kV及以下,涵盖的电缆类型较多,敷设方式复杂,文中不能逐一讨论。为了对典型敷设方式下同一电缆线路的交、直流载流量及差异有较为系统的了解,针对10 kV及35 kV三芯电缆、110 kV单芯电缆在直埋及排管敷设、单回及双回运行情况下的交、直流载流量进行了计算。电缆型号分别为YJV22—8.7/10 kV—3×300 mm²、YJV26/

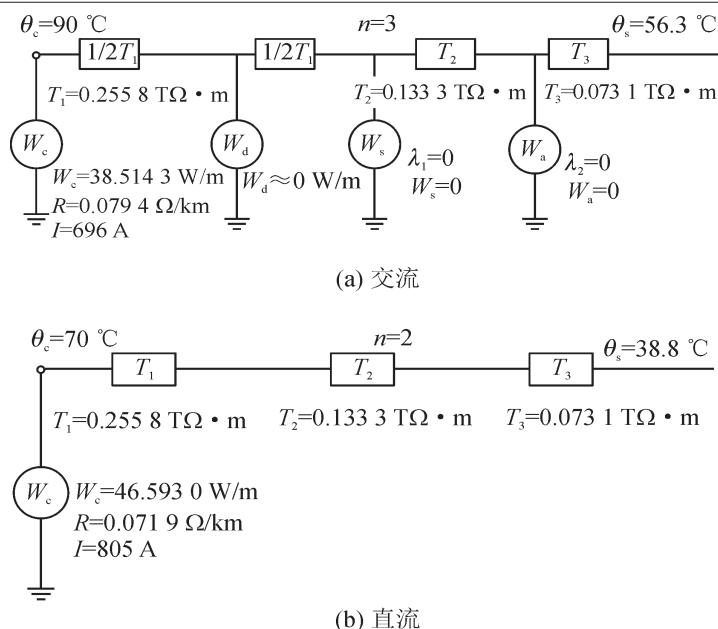


图5 10 kV三芯XLPE电缆交、直流载流量计算

Fig. 5 The current rating calculation of 10 kV three-core XLPE cable operated under AC or DC

35 kV—3×240 mm², YJLW02-64/110 kV—630 mm²。土壤直埋敷设时,电缆敷设深度为1 m,土壤热阻系数为1.0 TΩ·m,环境温度为25℃,相邻电缆轴间距为250 mm。排管敷设采用简化模型,仅讨论在3×7孔φ175 mm模块中敷设单回及双回电缆线路的情况。10 kV电缆较少采用排管敷设,所以未对排管敷设下的载流量进行讨论。

计算结果见表5。直流下电缆线路均假定按照正、负双极加备用线的方式运行。数据显示,无论是在单、双回路还是直埋、排管敷设方式下,10 kV和35 kV三芯XLPE电缆线路由交流改为直流运行后,载流量有不同程度的提高,而110 kV单芯电缆的直流载流量相比交流有所下降。总体来看,在文中所讨论的范围内,载流量的变化增幅均未超过6.5%。其它针对10、35、66 kV XLPE电缆的研究也发现,现役交流线路改为直流运行后,允许载流量未发生显著变化^[8-10]。

5 结论

1)在直流电缆载流量设计中,应同时考虑线芯温度和绝缘温差的限制;而对直流改造所涉及的现役XLPE交流电缆线路,在进行直流载流量评估时,绝缘温差要求不成为限制条件,且介质损耗很小可忽略,按照IEC 60287—2017推荐方法计算即可。对空气中敷设的10 kV三芯电缆进行了交流及直流载流量模拟试验,测量数据与计算结果较好吻合,验证了解析算法的准确性。

2)在影响改造前后电缆线路载流量的主要因素

表5 不同型号电缆在不同敷设、运行情况下的交、直流载流量计算结果

Table 5 The AC and DC current ratings of cables with different types laid under earth or in pipes

电缆 类型	敷设方式		载流量		
			交流/A	直流/A	变化幅度/%
10 kV 三芯	直埋	单回	545	575	+5.0
		双回	466	495	+6.2
35 kV 三芯	直埋	单回	481	493	+2.5
		双回	413	428	+3.6
	排管	单回	415	430	+3.6
		双回	370	386	+4.3
	直埋	单回	919	902	-1.8
		双回	800	779	-2.6
110 kV 单芯	排管	单回	851	823	-3.3
		双回	756	728	-3.7

中,线芯允许工作温度由90℃下降为70℃,在很大程度上抵消了其他因素对直流载流量的有利贡献。对10、35 kV三芯和110 kV单芯XLPE电缆典型敷设方式下的交、直流载流量计算表明,交流电缆直流改造后,三芯电缆载流量略有增大,而单芯电缆稍有下降,相对变化幅度均未超过6.5%;不同的变化趋势可能是由电缆结构不同导致的散热条件差异引起。

参考文献:

- [1] 戴朝波, 彭 俱. 交流线路改直流运行研究[J]. 智能电网, 2016, 4(11): 1141-1148.

- DAI Chaobo, PENG Yun. Study on conversion of existing AC lines to DC operation[J]. Smart Grid, 2016, 4(11): 1141-1148.
- [2] CIGRE TB 606. Upgrading and uprating of existing cable systems[R]. Paris: CIGRE Working Group B1.11, 2015.
- [3] LARRUSKAIN D M, ZAMORA I, ABARRATEGUI O, et al. Conversion of AC distribution lines into DC lines to upgrade transmission capacity[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1341-1348.
- [4] 吴建坤, 曹 炜, 杨文清. 交流输电线路改造为直流输电线路的技术综述[J]. 华东电力, 2013, 41(4): 737-740.
- WU Jiankun, CAO Wei, YANG Wenqing. Technical review of transmission line AC-DC conversion[J]. East China Electric Power, 2013, 41(4): 737-740.
- [5] CIGRE TB 583. Guide to the conversion of existing AC lines to DC operation[R]. Paris: CIGRE Working Group B2.41, 2014.
- [6] ANTONIOU D, TZIMAS A, ROWLAND S M. DC utilization of existing LVAC distribution cables[C]//IEEE Electrical Insulation Conference.[S.l.]: IEEE, 2013: 518-522.
- [7] 刘 英, 曹晓珑, 何子兰, 等. 现役交流XLPE电缆配电线路改为直流运行的技术方案及实例分析[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 96-103.
- LIU Ying, CAO Xiaolong, HE Zilan, et al. Technical scheme and case study of the upgrading renovation of existing XLPE cable from AC distribution system to DC operation[J]. Processing of the CSEE, 2016, 36(1): 96-103.
- [8] 刘士利, 李 宁, 蔡国伟, 等. 66 kV交流交联聚乙烯电缆线路改为直流运行的直流载流量[J]. 高电压技术, 2017, 43(5): 1664-1669.
- LIU Shili, LI Ning, CAI Guowei, et al. DC ampacity of 66 kV AC XLPE cable line transformed into DC operation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(5): 1664-1669.
- [9] 于竞哲, 苏宜靖, 周 浩, 等. 10 kV交流XLPE电缆改为直流运行的温度场和电场仿真分析[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 1664-1669.
- YU Jingzhe, SU Yijing, ZHOU Hao, et al. Simulation analysis of temperature field and electric field for 10 kV AC XLPE cable in DC operation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 1664-1669.
- [10] 邱玉婷. 35 kV三芯交流XLPE电缆改直流运行的温度场和电场耦合分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- QIU Yuting. Coupling analysis of temperature field and electric field of 35 kV three-core AC XLPE cable for DC operation[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2017.
- [11] 马国栋. 电线电缆载流量[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 31-32.
- MA Guodong. Ampacity of wires and cables[M]. Beijing, China Electric Power Press, 2003: 31-32.
- [12] 殷潇波. 110 kV以上高压电缆敷设周期性载流量研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2010.
- YIN Xiaobo. The study of calculation of the cyclic current rating for 110 kV or above high voltage cables[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2010.
- [13] Electric cables: Calculation of the current rating, Part 1-1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses: IEC 60287-1-1—2017[S]. 2017.
- [14] 刘 畅, 徐 政, 宣耀伟, 等. 基于等效导热系数的直流电缆稳态载流量简化有限元算法[J]. 高压电器, 2016, 52(5): 7-13.
- LIU Chang, XU Zheng, XUAN Yaowei, et al. Simplified finite element method for calculating DC cable's current capacity using equivalent thermal conductivity[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(5): 7-13.
- [15] 郝艳捧, 黄吉超, 阳 林, 等. 高压直流电缆稳态载流量解析计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(4): 1283-1288.
- HAO Yanpeng, HUANG Jichao, YANG Lin, et al. Analysis calculation method of steady-state current capacity of HVDC cable[J]. Power System Technology, 2016, 40(4): 1283-1288.
- [16] 黄吉超. 高压直流交联聚乙烯电缆电热耦合研究和稳态载流量计算[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
- HUANG Jichao. Study on electro-thermal coupling and steady-state rating computation of HVDC XLPE cable[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [17] GIOVANNI M, MASSIMO M. Extruded cables for high-voltage direct-current transmission: Advances in research and development[M]. New York: Wiley-IEEE Press, 2013.
- [18] HANLEY T L, BURFORD R P, FLEMING R J, et al. A general review of polymeric insulation for use in HVDC cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2003, 19(1): 13-24.
- [19] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 33-57.
- YANG Shiming, TAO Wenquan. Heat transfer theory[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 33-57.
- [20] 城市电力电缆线路设计技术规定: 中华人民共和国电力行业标准DL/T 5221—2005[S]. 2005.
- Technical rule for design of urban power cables: Chinese electrical power industry standard DL/T 5221—2005[S]. 2005.
- [21] FABIANI D, MONTANARI G C, LAURENT C, et al. HVDC cable design and space charge accumulation, Part 3: Effect of temperature gradient[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2008, 24(2): 5-14.
- [22] 电力电缆线路试验规程: 国家电网公司企业标准: Q/GDW 11316—2014[S]. 2014.
- Test code for power cables: National power grid corporation enterprise standard: Q/GDW 11316—2014[S]. 2014.
- 陈振新(1963—), 男, 高级工程师, 从事电力系统运行管理及海底电缆工程建设研究工作。
- 刘 英(1976—), 女, 副教授, 博士, 主要从事绝缘结构设计和电力电缆工程计算的研究工作。