

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.04.018

# 10 kV 三芯交流电缆不同敷设情况下的直流化改造

赵莉华<sup>1</sup>, 周冬冬<sup>1,2</sup>, 王仲<sup>1</sup>

(1. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065;

2. 国网浙江省电力有限公司绍兴供电公司, 浙江 绍兴 612000)

**摘要:**交流线路的直流化改造可缓解城市部分线路供电压力过大的问题。为尽可能提高改造后电缆线路的功率传输能力,对改造后的运行参数即载流量和运行电压进行研究。文中以城市配电网常见的10 kV三芯交流电缆为例,对空气、直埋和排管3种敷设情况下的电缆进行直流化改造仿真研究。首先,依据温度场和电场仿真结果,得出3种敷设情况下电缆的直流载流量和合适的运行电压范围。然后,以仿真所得的载流量和运行电压为基础,分析电缆改造前后的最大传输功率。最后,对多回路敷设时的温度场进行仿真。研究表明,3种敷设情况下,交流电缆直流化改造后,功率传输能力均有提升,且直埋敷设的提升效果最为明显。

**关键词:**10 kV三芯交流电缆;直流化改造;不同敷设情况;不同接线方式;耦合场仿真;功率传输能力

**中图分类号:**TM726.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2022)04-0143-07

## 0 引言

在传统电力系统中,交流电一直占据着主导地位<sup>[1]</sup>,随着电力电子技术的发展,相比于交流配电网,直流配电网因具有电能质量高、便于分布式电源接入等优点,受到国内外学者的广泛关注<sup>[2-3]</sup>。供电压力过大的城市10 kV系统,由于输电通道趋于饱和以及直流断路器等设备尚无大规模应用<sup>[4-5]</sup>,新建直流配电网具有一定难度。此时可参照直流输电技术,考虑对10 kV主供电线路进行直流化改造。

国内外已有文献对交流电缆直流化改造进行研究。文献[6]将35 kV交流海缆线路改造为±10 kV直流线路,验证了电缆直流化改造的可行性,但此工程的出发点是对已损坏电缆的再利用,线路功率传输能力并无太大提升。电缆改造时通常将长期最高允许温度设置为70℃<sup>[7]</sup>,同时对空间电荷的聚集效应进行限制,减小其对电场的影响。文献[8]通过实验测量得到交联聚乙烯(cross linked polyethylene, XLPE)材料空间电荷在70℃时的场强阈值为3~5 MV/m。

为提高电缆直流化改造后的功率传输能力,需要对电缆改造后的运行参数进行研究。目前关于电缆直流化改造的研究主要针对单回直埋或空气敷设,对其他敷设情况的研究较少,关于同一输电通道敷设多回路电缆的直流化改造研究更是鲜有

涉及。针对以上不足,文中针对不同敷设情况、多回路敷设的10 kV三芯交流电缆直流化改造进行研究,研究结果可为实际直流化改造工程提供参考。

## 1 电缆三维物理模型及仿真参数条件

### 1.1 三维物理模型

10 kV城市配电网电缆型号众多,为了节省输电走廊,三芯电缆是常用的一种电缆形式,文中选取型号为YJV22—8.7/10 3×240的常用三芯交流电缆作为研究对象,对改造后的电缆进行热电耦合仿真。文中所用三芯电缆结构从内到外依次为导体、导体屏蔽、绝缘层、绝缘屏蔽、金属屏蔽、填充、内护套、钢带铠装以及外护套。相比于二维模型,三维模型的仿真结果与电缆实际运行情况更加接近,因此文中建立三芯电缆的三维模型进行仿真。

空气敷设是将电缆直接暴露于空气中,直埋敷设是将电缆直接埋入土壤中,排管敷设是先将排管埋在土壤中,再把电缆安装在排管中,文中的排管采用聚氯乙烯(polyvinyl chloride, PVC)管。不同于空气敷设,在进行电缆直埋敷设和排管敷设仿真时,由于实际情况中的土壤范围为无限大,因此可先将无限大的开域场转化为范围有限的闭域场,在有限闭域场中确定仿真计算的有效区域。通过数值仿真计算可知,当土壤左、右边界距离大于15 m,上、下边界距离大于10 m时,如果继续增加边界距离,导体处的温度变化幅度很小,基本可以认为土壤边界间的距离对温度不再产生影响。因此文中仿真时选择土壤左、右边界距离均为15 m,上、下边界距离均为10 m,电缆埋深为0.7 m。3种敷设情况

收稿日期:2022-02-18;修回日期:2022-05-10

基金项目:四川省科技计划项目(2020YJ0318);中国博士后科学基金资助项目(2018M643475)

下的仿真模型结构如图 1 所示。

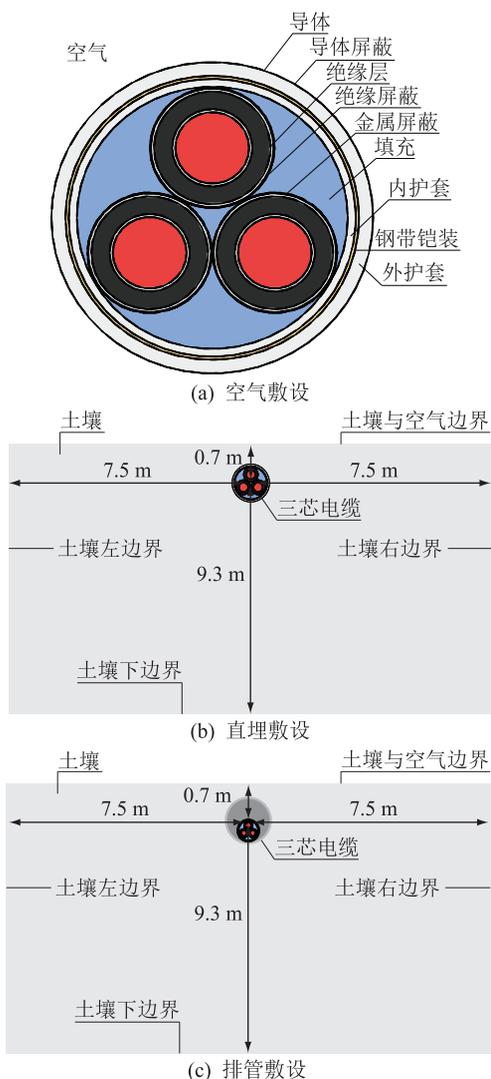


图 1 3 种敷设情况下的仿真模型结构

Fig.1 Structure of simulation model under three laying conditions

### 1.2 仿真参数和条件

仿真时首先确定模型中各种材料的参数,文中所用参数中,仅有铜导体和绝缘层 XLPE 的电导率为变量,其他参数均设为固定值。铜导体的电导率与温度有关,两者间存在一定的线性关系,如式(1)所示。绝缘层 XLPE 的电导率与温度、电场强度存在非线性关系,如式(2)所示<sup>[9]</sup>,电缆结构和对应的材料参数如表 1 所示<sup>[10-13]</sup>。

$$\sigma_1 = \frac{\sigma_{20}}{1 + \alpha_{20}(T - 20)} \quad (1)$$

式中: $T$ 为温度; $\sigma_{20}$ 为导体温度为 20℃时的电导率; $\alpha_{20}$ 为导体电导率的温度变化系数,对于文中所用铜导体,一般取值为 0.003 93。

$$\sigma(T, E) = Ae^{-\varphi_e/dT} \frac{\sinh(B|E|)}{|E|} \quad (2)$$

式中: $A$ 为与 XLPE 绝缘材料有关的常数,文中取  $3.59 \times 10^7 \text{ V}/(\Omega \cdot \text{m}^2)$ ;  $B$ 为电导率对电场的依赖系数,文中取  $1.14 \times 10^{-7} \text{ m/V}$ ;  $e$ 为元电荷; $\varphi$ 为活化能; $d$ 为 Boltzmann 常数; $E$ 为电场强度。

表 1 三芯电缆材料参数

Table 1 Material parameters of three-core cable

材料	热导率/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	比热容/ ( $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	电导率/ ( $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ )
导体	383	8 900	380	式(1)
导体/ 绝缘屏蔽	1	1 200	2 000	0.01
绝缘层	0.286	1 400	2 500	式(2)
金属屏蔽	237	2 700	900	$4 \times 10^6$
填充	0.24	900	1 883	$10^{-14}$
内/外护套	0.167	1 380	1 000	$10^{-12}$
钢带铠装	45	7 850	450	$1.03 \times 10^7$
PVC 管	0.17	1 380	900	$10^{-8}$
空气	0.024 2	1 225	1 006	$1.72 \times 10^{-8}$
土壤	1	900	1 250	0.005

在进行空气敷设仿真时,电缆模型直接接触外部环境,与空气进行热量交换,此时可将空气对流换热系数设置为  $7 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[10]</sup>,外部空气温度设置为夏季高温时的温度即 40℃。在进行直埋和排管敷设仿真时,离电缆很远的土壤下边界不再受发热体影响,此处温度可认为恒定不变,文中将边界温度设置为 25℃。在土壤左、右边界法向方向上不再有热量流过,即此处的温度同样不受发热体影响,因此仿真时在左、右边界将法向热流密度设置为 0。由于土壤的存在,电缆产生的热量会有一部分通过土壤上表面与空气进行对流换热而散发到空气中去,文中进行边界条件设置时将地表对流换热系数设置为  $12.5 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ <sup>[11]</sup>,外部空气温度同样设置为 40℃。

## 2 耦合场仿真结果分析

### 2.1 温度场仿真结果分析

在对三芯电缆进行直流化改造时,典型的接线方式有:单极不对称接线,双极三线接线和三极接线方式<sup>[9]</sup>。由于交流电缆并不是专门为直流电压设计的,一般将电缆长期最高运行温度由交流时的 90℃改为直流时的 70℃。文中先对空气敷设情况下的 3 种接线方式进行热电耦合仿真,基于 1.2 节的仿真参数和条件,采用 Ansys 中的 Thermal-electric 模块进行仿真<sup>[14-15]</sup>。仿真时定义三芯电缆上部导体为 A 相,下部左、右侧导体分别为 B 相和 C 相。

改造为单极不对称接线时,将三相导体并联为

一极,同时向三相导体通入同等大小的电流,并加载 10 kV 直流电压,将金属屏蔽接地,以导体峰值温度为 70 °C 作为限值,得到直流载流量为 380 A。改造为双极三线接线时,以 B 相为正极,C 相为负极,A 相为中性线,向 B、C 相导体通入同等大小的电流,并加载  $\pm 10$  kV 直流电压,A 相导体空置,得到双极三线接线时 B、C 相导体载流量为 452 A。改造为三极接线时,以 A 相导体为调制极,B 相为正极,C 相为负极,根据正负极与调制极电流的数值关系向三相导体中通入一定大小的电流<sup>[16]</sup>,得到三极接线运行时正、负极载流量为 564 A。空气敷设 3 种接线方式下的温度分布云图如图 2 所示。

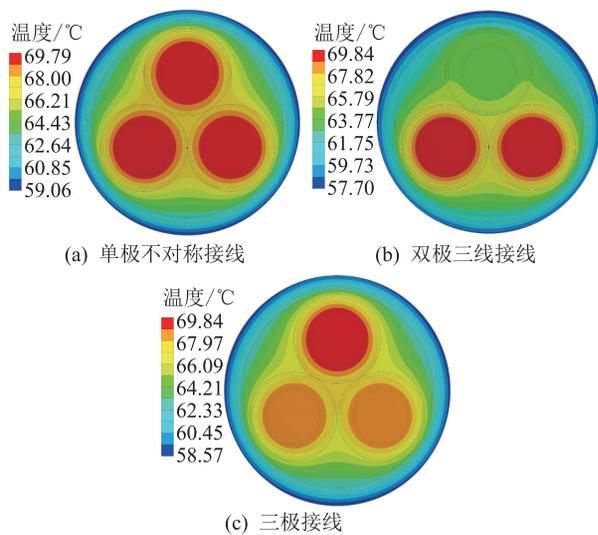


图 2 空气敷设温度分布云图

Fig.2 Temperature distribution nephogram in air laying

由图 2 可知,空气敷设时 3 种接线方式的电缆温度均是加载电流的导体处温度最高,温度从导体处向外护套递减。双极三线接线时由于 A 相导体不承担负载电流,因此其温度低于 B、C 相,整个电缆温度分布并不均匀,导致 A 相导体方向处的外护套温度较低,最低温度为 57.70 °C。单极不对称和三极接线时外护套温度相对较高,且分布较为均匀,外护套最低温度为 58.57 °C。

在进行直埋敷设温度场仿真时,同样在 Thermal-electric 模块中进行,电流加载方式与空气敷设时相同,采用 1.2 节的土壤边界条件,得到单极不对称接线时载流量为 390 A,双极三线和三极接线时载流量分别为 464 A 和 579.5 A,直埋敷设 3 种接线方式下的温度分布云图如图 3 所示。

由图 3 可知,3 种接线方式下的温度分布规律大致相同,同样是加载电流的导体处温度最高,温度由导体中心处向外部递减,由靠近电缆的土壤处以圆形向外部扩散降低,但 3 种接线方式下导体所

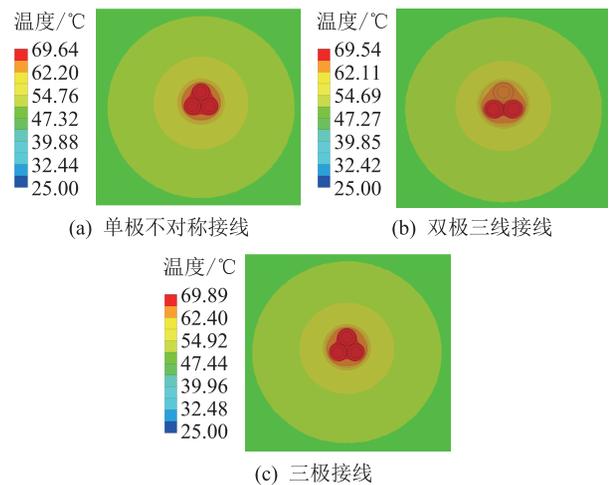


图 3 直埋敷设温度分布云图

Fig.3 Temperature distribution nephogram in direct buried laying

加载的电流不同,导致电缆温度分布略有差异。单极不对称接线时三相电流相同,因此该接线方式三相导体处温度分布均匀。双极三线接线时 B、C 相温度明显高于 A 相。三极接线时,三相导体电流相同,因此温度分布也大致均匀。

在进行排管敷设仿真时,由于电缆是安装在内径为 160 mm、厚度为 5 mm 的 PVC 管中,PVC 管中存在空气,空气为流体,热量传递时涉及自然对流,此时需要进行流固耦合仿真<sup>[17-18]</sup>,在 Ansys 的 Fluent 模块中进行仿真。由于其和直埋敷设时一样深埋在土壤中,仿真时需要设置的边界条件、土壤条件与直埋敷设时相同。仿真时 3 种接线的电流加载方式与上述 2 种敷设情况相同,得到单极不对称接线时载流量为 340 A,双极三线和三极接线时载流量分别为 410 A 和 507 A,排管敷设 3 种接线方式下的温度分布云图如图 4 所示。

由图 4 可知,排管敷设时温度变化趋势同样是从电缆导体处向外侧逐渐递减,与直埋敷设不同之处在于 PVC 管中存在空气,由于空气重力的影响,PVC 管内的热空气上升冷空气下降,导致电缆正上方即 PVC 管中部和上部的空气温度较高,PVC 管两边和底部的空气温度较低。

## 2.2 电场仿真结果分析

在电缆直流化改造过程中,为了抑制空间电荷的积累,应保证电缆运行于直流工况、导体温度为 70 °C 时,绝缘层电场强度峰值低于 3~5 MV/m。为了得到绝缘层的电场分布情况,在进行温度场仿真的同时对 3 种敷设情况下的 3 种接线方式进行电场仿真,即在导体上加载电流的同时对导体施加  $\pm 10$  kV 直流电压,同时将金属屏蔽接地。由于不同敷设

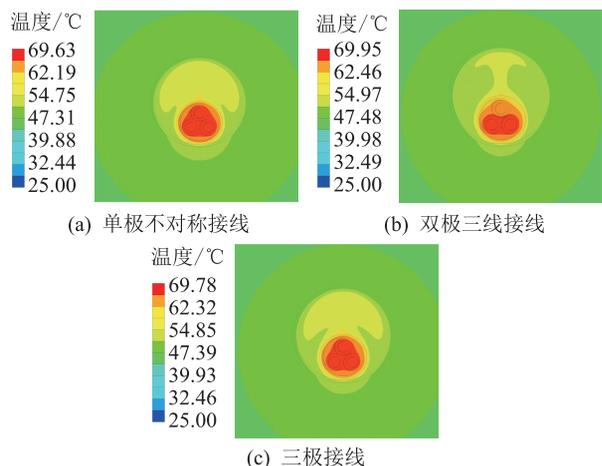


图4 排管敷设温度分布云图

Fig.4 Temperature distribution nephogram in pipe laying

情况下的电场分布规律大致相同,仅数值上存在差异,因此文中仅给出空气敷设时的电场仿真云图,空气敷设3种接线方式下的电场仿真云图如图5所示。

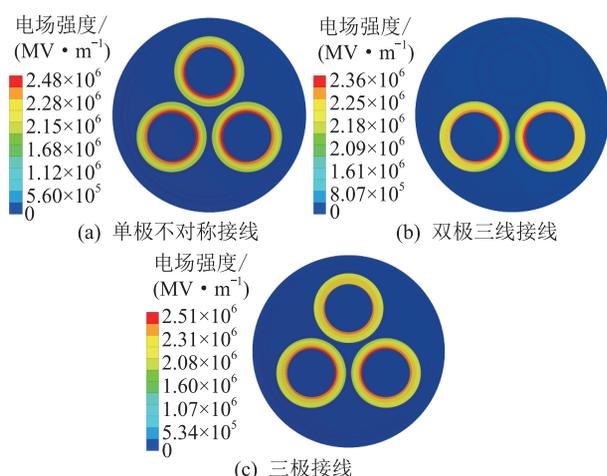


图5 空气敷设电场仿真云图

Fig.5 Electric field simulation nephogram in air laying

由图5可知,当在导体上加载10kV电压时,3种接线方式下的绝缘层最大场强均出现在绝缘层内侧,并由内侧向外侧呈梯度分布减小,3种接线方式下的最大场强分别为2.48 MV/m, 2.36 MV/m, 2.51 MV/m,均小于3 MV/m,且留有一定的安全裕度。在单极不对称接线中,由于三相导体所加载的直流电流相同,绝缘层承受的电压相同,因而此种接线方式中三相绝缘层所承受的场强基本相同。双极三线接线方式中A相导体作为中性线,线路正常工作时其电压和电流均为0,B、C两相导体所加载的电流和电压相同,因此两相绝缘层场强大小和分布也基本相同。三极接线方式中,A相导体电流略高于B、C相导体,但三者电流相差不大,因此绝

缘层电场强度虽不完全相同,但也相差不大。

进行不同直流电压下的电场仿真,即在保证各种接线方式所加载的直流电流相同的情况下,改变导体所承受的直流运行电压,得到不同直流电压下的绝缘层电场分布,3种敷设情况下3种接线方式时的最大场强如表2所示。

表2 不同敷设情况下的最大场强  
Table 2 Maximum electric field intensity under different laying conditions

敷设方式	直流电压/kV	最大场强/(MV·m <sup>-1</sup> )		
		单极不对称	双极三线	三极
空气敷设	±10	2.48	2.36	2.51
	±18	4.46	4.25	4.52
直埋敷设	±10	2.49	2.38	2.53
	±18	4.49	4.28	4.55
排管敷设	±10	2.59	2.53	2.61
	±17	4.38	4.30	4.44
	±18	4.64	4.55	4.70

由表2可知,直埋敷设与空气敷设时的场强峰值大致相同,而排管敷设时的场强峰值略微高于空气和直埋敷设时的场强峰值。原因在于排管敷设时三相导体安装在PVC管中,PVC管中空气的存在使得排管敷设的导体散热环境与空气、直埋敷设时差异较大,对三相绝缘层温度分布产生了一定影响,进而对最大场强产生影响。

对于空气和直埋敷设,3种接线方式下±10kV直流电压时的场强峰值小于3 MV/m,±18kV直流电压时的场强峰值小于5 MV/m,且留有一定的安全裕度。因此为了保证电缆安全运行,空气和直埋敷设时3种接线方式下的直流运行电压范围为±10kV至±18kV。对于排管敷设来说,加载电压为±18kV时,单极不对称和三极接线场强峰值虽然小于5 MV/m,但其值很接近5 MV/m,为了安全起见,文中选择排管敷设时直流运行电压范围为±10kV至±17kV。

### 3 最大传输功率分析

由2.1节温度场仿真结果可知,文中所选型号电缆运行于空气敷设时3种接线方式下的直流载流量分别为380A,452A,564A;直埋敷设时3种接线方式下的直流载流量分别为390A,464A,579.5A;排管敷设时3种接线方式下的直流载流量分别为340A,410A,507A。由2.2节电场仿真结果可知,空气和直埋敷设时合适的直流运行电压取值范围为±10kV至±18kV,排管敷设时为±10kV至±17kV。单极不对称接线方式时,线路首端最大传输功

率为:

$$P_{DC} = U_{DC} I_{DC} \quad (3)$$

双极三线或三极接线方式时,线路首端最大传输功率为:

$$P_{DC} = 2U_{DC} I_{DC} \quad (4)$$

式中: $U_{DC}$ 为直流运行电压; $I_{DC}$ 为直流载流量。

计算得到3种敷设情况3种接线方式下的 $P_{DC}$ 如表3所示。

表3 不同敷设情况下的 $P_{DC}$

Table 3  $P_{DC}$  under different laying conditions

敷设方式	直流电压/kV	$P_{DC}/\text{MW}$		
		单极不对称	双极三线	三极
空气敷设	$\pm 10$	11.40	9.04	11.30
	$\pm 18$	20.52	16.27	20.34
直埋敷设	$\pm 10$	11.70	9.30	11.59
	$\pm 18$	21.06	16.74	20.86
排管敷设	$\pm 10$	10.20	8.20	10.14
	$\pm 17$	17.34	13.94	17.24

文中所选型号的电缆额定线电压为10 kV,假设功率因数为0.9,则电缆交流运行时所能输送的最大功率为:

$$P_{AC} = \sqrt{3} U_{AC} I_{AC} \cos \beta \quad (5)$$

式中: $U_{AC}$ 为额定线电压; $I_{AC}$ 为交流载流量; $\cos \beta$ 为功率因数。

由式(5)可知,电缆交流运行时所能输送的最大功率仅取决于电缆的载流量。在进行电缆交流载流量求解时需要考虑涡流、集肤效应和邻近效应的影响,应用Ansys中的Maxwell电磁仿真模块,采用1.1节三维仿真模型在相同环境温度、同等对流换热系数下对电缆进行交流运行方式下的电磁-热和电磁-热-流耦合仿真,以接头导体温度最高时的90℃作为限值,得到空气、直埋和排管敷设的交流载流量分别为455 A,445 A,405 A。代入式(5)可得3种敷设情况下电缆交流运行时首端最大传输功率分别为7.09 MW,6.94 MW,6.31 MW。

空气敷设直流化改造后,3种接线方式线路首端最大传输功率分别约为改造前的1.61~2.89倍,1.28~2.3倍,1.59~2.87倍。直埋敷设直流化改造后,3种接线方式线路首端最大传输功率分别约为改造前的1.69~3.04倍,1.34~2.41倍,1.67~3.01倍。排管敷设直流化改造后,3种接线方式线路首端最大传输功率分别约为改造前的1.62~2.75倍,1.3~2.21倍,1.61~2.73倍。3种敷设情况下3种接线方式的直流运行最大传输功率相比交流运行时均有一定程度的提升。

## 4 多回线路电缆直流化改造

### 4.1 双回线路

前述研究的电缆线路均为单回,而在10 kV城市配电网中,为了充分利用输电走廊,同一敷设路径存在双回、三回以及多回线路的情况<sup>[19]</sup>。因此文中以直埋和排管2种敷设情况下的双极三线接线方式为例,对双回线路的直流化改造进行研究,模型中考虑电缆间距为200 mm。仿真时,仿真参数和条件与单回线路仿真相同,由于多回线路的电场互相独立,不同回路间绝缘层所承受的电压以及导体温度大致相同,回路数对电场的影响很小,因此文中仅考虑温度仿真。仿真得到2种敷设情况下的温度分布云图如图6所示。

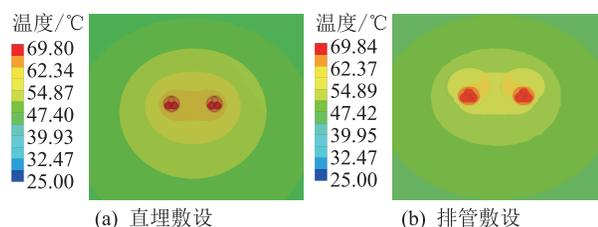


图6 双回线路温度分布云图

Fig.6 Temperature distribution nephogram of two loops

由图6可知,双回线路且接线方式为双极三线时,电缆温度仍是加载电流的4根导体最高。由于模型中存在2个相同的发热体,温度在电缆线路附近的土壤中不再以单回线路中的圆形而是以椭圆形向外部扩散降低,两回线路中间区域的土壤温度较其他区域更高,排管内也是靠近中间区域的空气温度较高。由仿真可知,直埋敷设双回线路双极三线接线时载流量为400 A,排管敷设时载流量为358 A,同等仿真条件下的交流载流量分别为385 A和353 A。2种敷设情况下直流载流量略微高于交流载流量,直埋敷设时交、直流载流量间的数值差相较排管敷设时更大。

### 4.2 三回线路

在双回线路仿真的基础上增加1条线路即构成三回线路系统,三回线路间的间距同样为200 mm,经过仿真得到2种敷设情况下的温度分布云图如图7所示。

由图7可知,受两侧回路温度的影响,三回线路的中间回路导体温度比较高,其不加载电流的一相导体温度高于另外两回不加载电流的导体,离中间回路较近的上下侧土壤温度在云图中的分布发生明显的凸起,更外侧的土壤温度仍以椭圆形向外部扩散降低。排管敷设中间回路PVC管内空气的中

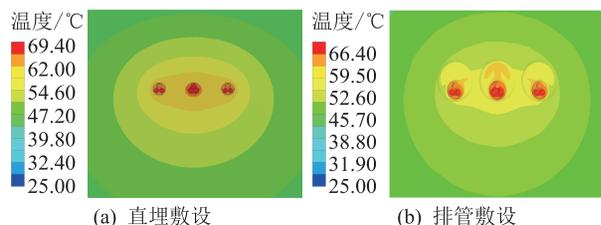


图7 三回线路温度分布云图

Fig.7 Temperature distribution nephogram of three loops

上部温度较高,两侧回路排管中的空气温度在云图中的分布向中间回路偏移。由仿真可知,直埋敷设时三回线路双极三线接线时直流载流量为 355 A,排管敷设时为 325 A,同等仿真条件下的交流载流量分别为 337 A 和 320 A。

比较单回、双回、三回线路敷设时双极三线接线的交、直流载流量,如表 4 所示。

表 4 不同回路数的交流和直流载流量  
Table 4 Current capacity of AC and DC in different loops

敷设方式	运行方式	载流量/A		
		单回线路	双回线路	三回线路
直埋敷设	直流	464	400	355
	交流	445	385	337
排管敷设	直流	410	358	325
	交流	405	353	320

由表 4 可知,随着线路回数的增加,直埋敷设电缆的直流载流量由单回线路的 464 A 先降低为双回线路的 400 A,再降低为三回线路的 355 A;排管敷设电缆直流载流量由单回线路的 410 A 先降低为双回线路的 358 A,再降低为三回线路的 325 A。即导体载流量逐渐降低,降低幅度逐渐减小,且直埋敷设的降低幅度大于排管敷设。同等敷设情况下交流载流量也随着回路数的增加而下降,其变化趋势与直流载流量基本相同。

## 5 结论

文中选用城市配电网常用的型号为 YJV22—8.7/10 3×240 的 10 kV 三芯交流电缆为研究对象,对其进行空气、直埋和排管敷设下的热电耦合仿真,得到了以下结论:

(1) 为保证电缆安全运行,直流化改造后空气和直埋敷设时 3 种接线方式合适的直流运行电压范围为±10 kV 至±18 kV,排管敷设时合适的直流运行电压范围为±10 kV 至±17 kV。

(2) 交流电缆直流化改造后,3 种敷设情况下

均是单极不对称接线时最大传输功率最高,三极接线时次之,但两者相差不大,双极三线接线时最大传输功率最低。3 种敷设情况中直埋敷设改造后的传输功率提升效果更加明显。

(3) 随着同一敷设路径中线路回数的增加,直埋和排管敷设的直流载流量均有一定程度的下降,下降幅度逐渐减小,且直埋敷设时的下降幅度相对更大。

### 参考文献:

- [1] 吴盛军,王益鑫,李强,等. 低压直流供电技术研究综述[J]. 电力工程技术,2018,37(4):1-8.  
WU Shengjun,WANG Yixin,LI Qiang, et al. Review of low voltage DC power supply technology[J]. Electric Power Engineering Technology,2018,37(4):1-8.
- [2] YIN H,LI Q,LIU Y B,et al. Power flow calculation for a distribution system with multi-port PETs: an improved AC-DC decoupling iterative method[J]. Global Energy Interconnection, 2020,3(4):313-323.
- [3] LIU C Y,QIN Y H,ZHANG H X,et al. Real-time scheduling strategy for microgrids considering operation interval division of DGs and batteries[J]. Global Energy Interconnection, 2020,3(5):442-452.
- [4] CHEN Z X,WANG C,LI J,et al. Conductor selection and economic analysis of D.R. congo-guinea ±800 kV UHVDC transmission project [J]. Global Energy Interconnection, 2020,3(4):385-397.
- [5] ZHAO X,LIU Y,WU J,et al. Technical and economic demands of HVDC submarine cable technology for Global Energy Interconnection[J]. Global Energy Interconnection, 2020,3(2):120-127.
- [6] 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 uprating renovation of existing XLPE cables from AC distribution system to DC operation [J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(1):96-103.
- [7] 王海田,曹均正,张升,等. 320 kV 交联聚乙烯直流电缆用国产基料选型研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(20):5696-5703.  
WANG Haitian,CAO Junzheng,ZHANG Sheng,et al. Research on type selection of domestic base material for 320 kV XLPE DC cable [J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(20):5696-5703.
- [8] LI Lan,WU Jiandong,YI Yin,et al. Effect of temperature on space charge trapping and conduction in cross-linked polyethylene[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2014,21(4):1784-1791.
- [9] 胡列翔,许烽,裘鹏,等. 交流 XLPE 电缆在两种直流运行方式下的热电耦合仿真[J]. 高电压技术,2019,45(7):2307-2313.

- HU Liexiang, XU Feng, QIU Peng, et al. Thermoelectric coupling simulation of AC XLPE cable under two DC operation modes[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7):2307-2313.
- [10] 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):3653-3660.
- YU Jingzhe, SU Yijing, ZHOU Hao, et al. Simulation analysis of temperature field and electric field of 10 kV AC XLPE cable in DC operation [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11):3653-3660.
- [11] ANTONIOU D, TZIMAS A, ROWLAND S M. DC utilization of existing LVAC distribution cables [C]//Electrical Insulation Conference. IEEE, 2013:518-522.
- [12] 唐科, 阮江军, 唐烈峥, 等. 三芯电缆接头温度场计算[J]. 高电压技术, 2019, 45(11):3571-3578.
- TANG Ke, RUAN Jiangjun, TANG Liezheng, et al. Temperature field calculation of three core cable joint[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11):3571-3578.
- [13] 刘刚, 王鹏宇, 毛健琨, 等. 高压电缆接头温度场分布的仿真计算[J]. 高电压技术, 2018, 44(11):3688-3698.
- LIU Gang, WANG Pengyu, MAO Jiankun, et al. Simulation calculation of temperature field distribution in high voltage cable joints [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11):3688-3698.
- [14] 郝艳棒, 陈云, 阳林, 等. 高压直流海底电缆电-热-流多物理场耦合仿真[J]. 高电压技术, 2017, 43(11):3534-3542.
- HAO Yanbang, CHEN Yun, YANG Lin, et al. Coupled simulation on electro-thermal-fluid multiple physical fields of HVDC submarine cable [J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11):3534-3542.
- [15] YANG F, CHENG P, LUO H W, et al. 3-D thermal analysis and contact resistance evaluation of power cable joint[J]. Applied thermal engineering, 2016, 93:1183-1192.
- [16] 文俊, 温家良, 殷威扬, 等. 高压直流三极输电技术[J]. 电网技术, 2013, 37(8):2336-2342.
- WEN Jun, WNE Jialiang, YIN Weiyang, et al. Technology of tripole HVDC transmission [J]. Power System Technology, 2013, 37(8):2336-2342.
- [17] ALI S, LU H W, ABDULLAH B, et al. Enhanced thermal model of power cables Installed in ducts for ampacity calculations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5):2404-2411.
- [18] 梁永春, 王巧玲, 闫彩红, 等. 三维有限元法在局部穿管直埋电缆温度场和载流量计算中的应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(12):2911-2917.
- LIANG Yongchun, WANG Qiaoling, YAN Caihong, et al. Temperature field and ampacity calculation of cable buried in local conduit using 3D finite element method[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(12):2911-2917.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 电力工程电缆设计标准; GB 50217—2018[S]. 北京: 中国电力出版社, 2018.
- Ministry of Housing and Urban-rural Development of the People's Republic of China. Standard for design of cables of electric power engineering; GB 50217-2018[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2018.

#### 作者简介:



赵莉华

赵莉华(1968),女,硕士,副教授,研究方向为电气设备绝缘在线监测、电力电子技术在电力系统中的应用;

周冬冬(1994),男,硕士,主要从事直流配电技术中的电缆改造工作(E-mail:183371513-68@163.com);

王仲(1986),男,博士,副教授,研究方向为高压绝缘、电气设备运行状态监测。

## DC transformation of 10 kV three core AC cable under different laying conditions

ZHAO Lihua<sup>1</sup>, ZHOU Dongdong<sup>1,2</sup>, WANG Zhong<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

2. State Grid Shaoxing Power Supply Company of Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Shaoxing 612000, China)

**Abstract:** The direct current (DC) transformation of alternating current (AC) lines is expected to alleviate the problem of excessive power supply pressure in some urban lines. It is necessary to study the current capacity and operation voltage to improve the power transmission capacity of the cable line after the transformation. The 10 kV three core AC cable in urban distribution network is used as an example to simulate the DC transformation under three laying conditions of air, direct buried and pipe laying. Firstly, the DC current capacity and suitable operation voltage range of the cable under three conditions are obtained according to the simulation results of temperature and electric field. Then, the maximum transmission power before and after the cable transformation is analyzed based on the current capacity and operation voltage of the simulation. Finally, the temperature field simulation of multi circuit line laying is carried out. The study results show that the power transmission capacity of DC cable which transforms from AC cable is improved, and the improvement of direct buried laying is the most obvious under three kinds of laying conditions.

**Keywords:** 10 kV three core cable; DC transformation; different laying conditions; different connection modes; couple field simulation; power transmission capability

(编辑 吴楠)