

# 110 kV 双回交流 T 接塔电场仿真分析

杨文刚, 杨 发

(华北电力大学机械工程系, 河北 保定 071003)

**摘要:** T 接塔在工程实际中取得较好应用的同时增加了塔身周围电场分布的复杂程度。在此背景下, 为了确定 T 接塔下方以及塔身典型作业位置处的电场分布, 以一种 110 kV 双回交流 T 接塔为研究对象, 应用三维有限元软件 COMSOL Multiphysics 对 T 接塔塔身、导线等部件建立模型, 研究 T 接塔附近的电场分布、线路在不同相序布置和同相序布置 2 种情况下地面上方 1.5 m 处的电场分布情况以及塔身典型作业位置处的电场强度。研究结果表明: 线路采用同相序布置时对 T 接塔下方的电场分布影响最大, 地面上方 1.5 m 处电场的最大值出现在 T 接线路一侧; T 接塔下方以及塔身的典型作业位置处场强均处于安全范围内。计算结果可为输电线路 T 接方案设计提供参考。

**关键词:** T 接塔; 双回交流; 电场强度; 仿真

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.05.019

中图分类号: TM152

文章编号: 1673-9140(2020)05-0138-06

## Simulation analysis of electric field of 110 kV double-circuit AC T-tower

YANG Wengang, YANG Fa

(Department of Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

**Abstract:** The T-connected tower has achieved a good application in the engineering practice. However, it increases the complex degree of electric field distribution around the tower body. In order to obtain the electric field distribution under the T-tower and around the typical working position of tower body, a 110kV double-circuit AC T-connected tower is studied in this paper. Firstly, a model consisting of a T-tower body and wires is established by using three-dimensional finite element software COMSOL Multiphysics. Then, the electric field distribution around T-connected tower is studied. The electric field distribution around the location 1.5m above the ground and the electric field intensity of typical working position on tower body are analyzed under the situation of inconsistent and consistent phase sequence arrangement respectively. It is shown that the inconsistent phase sequence arrangement of double-circuit line corresponds to the greatest influence to the electric field distribution under T-connected tower. The maximum value of the electric field at 1.5m above the ground appears on the side of the T-connected line. The electric field intensities of the location under T-connected tower and the typical working position of tower body are within safe ranges. The calculation results provide references for the T-connection design of transmission line.

**Key words:** T-connection tower; double-circuit alternate current; electric field intensity; simulation

随着中国经济的快速发展,工业生产以及人民的日常生活对于电力供应的需求日益增长。在新建输电线路过程中,利用原有线路使用 T 接塔进行 T 接来增加线路的方案在实际输电线路设计中得到了越来越广泛的应用。利用该方案在已建成的清流—釜山 500 kV 线路工程中得到较好应用,降低了建设成本,缩短了线路停运时间<sup>[1]</sup>。T 接塔带来便利的同时也使塔身周围的电场分布变得更为复杂。与此同时,针对输电线路运行过程中产生的电磁污染以及作业人员安全问题的关注也日益加强<sup>[2]</sup>,因此对 T 接塔的电场研究成为必不可少的部分。

对于输电线路运行过程中产生的电场计算问题,很多科研人员已经有了大量的研究。常见的输电线路周围场强的计算方法有模拟电荷法<sup>[3-6]</sup>、有限元法<sup>[7-10]</sup>、矩量法<sup>[11-12]</sup>等。文献[3]中通过分析不同相序布置下对地面 1.5 m 处的电磁分布影响,得到了同相序布置下产生的电场强度最大的结论。文献[13]建立了输电杆塔三维模型,应用有限元法分析了导线相序对电场分布的影响。但是上述研究都是针对常见的塔型进行的,并没有分析线路 T 接情况下 T 接塔附近的电场分布情况。由于线路 T 接后,线路的增加会使得 T 接塔附近的电场情况变得更加复杂,因此,研究线路 T 接情况下 T 接塔附近的电场分布情况对周围环境以及作业人员的安全具有重要意义。

该文通过使用 COMSOL Multiphysics 软件建立 110 kV 双回交流 T 接塔输电线路模型,分析了不同的导线相序布置对 T 接塔电场分布的影响,得到了影响较大的导线相序布置下 T 接塔下方及塔身典型作业位置处的电场强度。

## 1 计算模型的建立

该文以 110 kV 双回交流 T 接塔为研究对象,T 接塔总高度为 43.1 m,呼高 24 m,主回路导线采用 JL/G1A-300/40 型钢芯铝绞线,直径 23.9 mm,上、中、下横担上的两导线之间间距分别为 8.2 m、8.4 m 和 9.2 m;T 接回路导线采用 JL/G1A-240/30 型钢芯铝绞线,直径 21.6 m,上、中、下横担上的

两导线之间间距分别为 8.4 m、8.4 m 和 9.2 m;地线均采用 JLB 20 A-100 型钢芯铝绞线,直径 13 mm。

由于 T 接塔模型中各部件尺寸差距较大,研究内容主要为分析杆塔附近的电场分布,为了便于软件计算和增加效率,对模型进行简化:忽略导线弧垂,将导线简化为长直圆柱体;忽略部分部件的影响,如:均压环、屏蔽环;主回路与 T 接回路间的长跳线根据实际弧垂简化成相应的圆弧;将铁塔金属架构简化为同等边界尺寸的实体模型;采用有限的人工截断边界模拟无穷远边界<sup>[13]</sup>,空气域为 70 m×70 m×50 m 长方体。简化后模型如图 1 所示。视线路周围的工频电场为准静电场,在导线上施加电压时可以选用调用函数的方式<sup>[14]</sup>,以某一回路为例,其三相输电线路所加载的电压为

$$\begin{cases} U_a = 110 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} \times \sin(\omega t + \theta) \\ U_b = 110 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} \times \sin(\omega t + \theta - 120^\circ) \\ U_c = 110 \times \sqrt{2} / \sqrt{3} \times \sin(\omega t + \theta - 240^\circ) \end{cases} \quad (1)$$

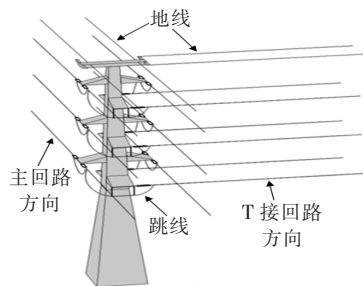


图 1 110 kV 双回交流 T 接塔三维模型

Figure 1 Three-dimensional model of 110 kV double-circuit AC T-connect tower

## 2 电场计算结果与分析

### 2.1 算法有效性验证

文献[15]中以 110 kV 同塔双回交流输电线路为研究对象,线路弧垂最低点高度 15 m,导线型号为 LGJ-240/30,以距离地面 1.5 m 被测双回线路对称中心的下方为测试原点,在线路的垂直方向以 5 m 为间隔测得电场强度值。

为了验证 COMSOL Multiphysics 软件计算交流电场结果的有效性和准确性,该文以文献[15]中的理论计算和实际监测数据为参考,对文献中的线

路进行仿真计算,并将计算结果与文献数据进行对比,结果如图 2 所示。

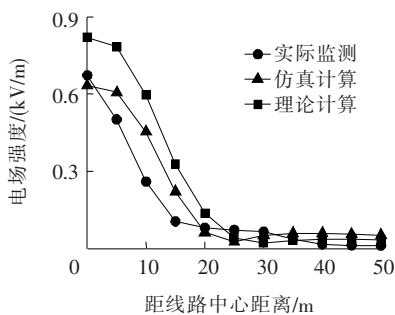


图 2 仿真计算、实际监测、理论计算结果对比

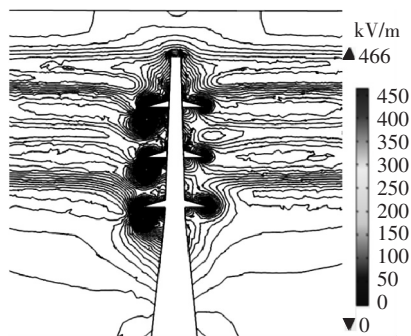
Figure 2 Comparison of simulation calculation results, actual monitoring values, and theoretical calculation results

由图 2 可知,线路电场仿真计算结果的数据变化趋势与实际监测的数据以及理论计算结果的数据变化趋势基本相同,数值上并不完全一致。由于仿真计算与理论计算是基于对线路的实际运行情况进行简化的前提下计算得到的,因此在计算结果上会与实际监测值存在偏差,但是仿真计算和理论计算结果与实际监测数据的变化趋势基本相同,表明该文基于有限元软件 COMSOL Multiphysics 的交流电场仿真计算结果是有效、可行的。

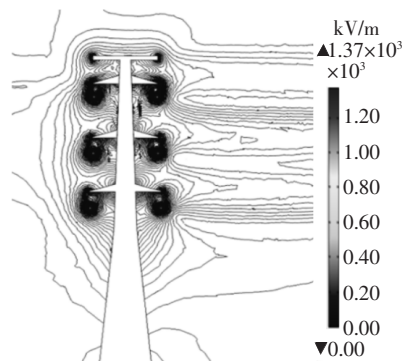
### 2.2 T 接塔周围电场分布

由于 110 kV 双回交流 T 接塔的模型不是简单的对称结构,无法采用对称的 1/2 模型来简化求解,所以在加载电压以后要对整个模型进行电场计算,得到 T 接塔主回路方向和 T 接线路方向的电场分布。110 kV 交流双回 T 接塔电场分布如图 3 所示。

从图 3 中的电场分布图可以看出,电场分布的梯度变化较为明显,电场强度较大的部位主要集中在导线附近。由于杆塔接地,其电势为 0,杆塔起到了良好的屏蔽作用,这就使得杆塔两侧的导线之间电场相互影响较小。在杆塔的一侧,同一回路中各相导线之间电场的相互影响较大。同时,在杆塔主回路方向上有长跳线的一侧电场强度大于无长跳线的一侧,可以看出从主回路引向 T 接回路的长跳线使得电场强度增加。



(a)主回路方向电场分布



(b)T 接回路方向电场分布

图 3 110 kV 双回交流 T 接塔电场分布

Figure 3 Electric field distribution of 110 kV double-circuit AC T-connected tower

### 2.3 相序布置对 T 接塔下方的电场影响

在研究 T 接塔下方以及塔身典型作业位置处的电场强度之前,考虑到双回导线相序的不同可能会对电场的分布产生影响,所以要先确定对电场分布影响最大的相序布置。鉴于此,分别考虑双回线路的相序为 abc-abc、abc-acb、abc-bac、abc-bca、abc-cab、abc-cba 等这 6 种安排方式时地面上方 1.5 m 处场强的大小。计算结果如表 1 所示。

表 1 地面上方 1.5 m 处电场强度

Table 1 Electric field strength at 1.5 m above the ground

| 相序      | 场强最大值/(kV/m) | 相序      | 场强最大值/(kV/m) |
|---------|--------------|---------|--------------|
| abc-abc | 1.236        | abc-bca | 0.643        |
| abc-acb | 0.825        | abc-cab | 0.670        |
| abc-bac | 1.208        | abc-cba | 0.517        |

由表 1 中的计算结果可知,T 接塔双回导线相序的布置对地面上方 1.5 m 处的电场强度影响规律与普通耐张塔一样,即双回交流 T 接塔以同相序(abc-abc)布置时,地面上方 1.5 m 处电场强度最大,为 1.236 kV/m;逆相序(abc-cba)布置时,地面

上方 1.5 m 处电场强度最小,为 0.517 kV/m;线路按其他的异相序布置时产生的电场强度大小介于两者之间。逆相序布置时电场强度比同相序布置时减小了 58.17%。由此可见,在考虑双回交流 T 接塔的导线相序布置时,选择逆相序布置能够显著减小输电线路 T 接塔下方的电场强度。

#### 2.4 同相序布置下地面上方 1.5 m 处的电场分布

根据中国电力行业设计规范,当线路跨越区附近有民房时,要限制房屋所在地地面上方 1.5 m 处未畸变电场不超过 4 kV/m,跨越公路或者公共活动地点等区域时,限制电场强度为不超过 7 kV/m<sup>[16]</sup>。当跨越区域为农田时,电场强度不超过 10 kV/m<sup>[3]</sup>。

由 2.3 节中得知 110 kV 双回交流 T 接线路按同相序布置时在 T 接塔下产生的电场强度最大,因此选择线路以同相序布置来分析以 T 接塔为中心的周围 70 m×70 m 区域内的电场分布,如图 4 所示。

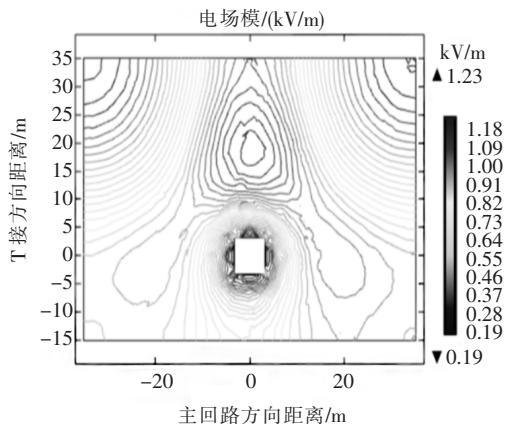


图 4 地面上方 1.5 m 处电场分布

Figure 4 Electric field distribution at 1.5 m above the ground

由图 4 的计算结果可知,以 T 接塔底面中心为原点,主线路方向为 X 轴,T 接线路方向为 Y 轴,当距离 T 接塔较远时,线路下方的电场大致分别沿主线路和 T 接线路的中心呈对称分布,线路中心下方的电场最高,随着距线路中心距离的增大,电场强度迅速衰减,电场强度的峰值出现在 T 接线路中心下方(Y 轴方向)距 T 接塔中心 17~18.6 m,X 轴方向 -0.94~1.4 m 的区域内。分析 T 接回路方向的电场变化规律如图 5 所示,在 T 接回路方向上,当距离 T 接塔较近时,由于铁塔的屏蔽作用,线路

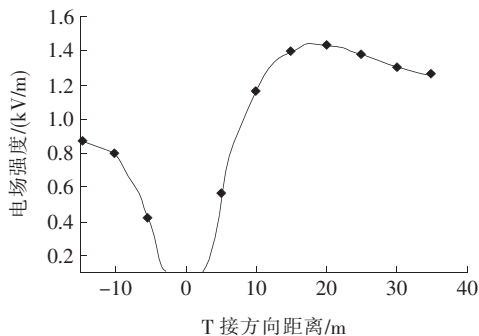


图 5 T 接回路方向电场变化

Figure 5 Change of electric field in direction of T-connection

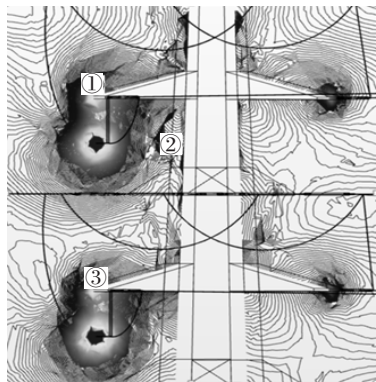
下方的电场强度呈现先增加后减小的趋势,当距离铁塔 18 m 附近时,电场强度达到峰值,最大电场强度为 1.23 kV/m,小于相关标准中 4 kV/m 的电场强度限制要求。

#### 2.5 同相序布置下塔身典型作业位置电场强度

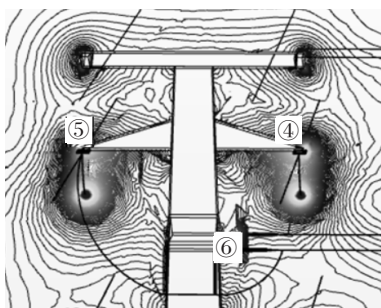
根据 GB/T 6568—2008《带电作业用屏蔽服装》规定<sup>[17]</sup>,人体在交流电场中实现带电作业时的裸露部分场强应当 $\leq 240$  kV/m,身穿屏蔽服时 $\leq 15$  kV/m<sup>[18]</sup>。因此该文以图 3 中计算得到的 T 接塔电场分布图为基础,研究塔身电场强度相对较大的几处典型作业位置处的电场强度,检验其是否满足相关规定。

根据图 3 中的电场分布,选作研究的部分典型作业位置如图 6 所示,其中位置①③分别是 T 接回路的上、中横担端部上表面附近,位于长跳线的正上方;位置②为铁塔塔身部位与 T 接回路第 1 长跳线底端平行的位置;位置④⑤是主回路上横担的端部位于主回路跳线的正上方;位置⑥为 T 接上横担有 T 接导线一侧的中部。电场强度计算结果如表 2 所示。

通过表 2 中列出的计算结果可知,由图 3 的电场分布中挑选出来的 T 接塔塔身电场强度相对较大的 6 处典型作业位置中,位置①处即 T 接回路上横担端部上表面附近,位于长跳线正上方位置处,电场强度最大,电场强度最大值为 27.822 kV/m,小于人体体表裸露部分的场强允许值 240 kV/m,处于杆塔上的作业人员较安全。



(a)主回路方向



(b)T接回路方向

图 6 塔身部分典型作业位置

Figure 6 Typical working position of the tower body

表 2 塔身典型作业位置电场强度

Table 2 Electric field strength of typical working position of tower body

| 位置 | 场强/(kV/m) | 位置 | 场强/(kV/m) |
|----|-----------|----|-----------|
| ①  | 27.822    | ④  | 25.817    |
| ②  | 7.000     | ⑤  | 19.870    |
| ③  | 12.642    | ⑥  | 12.352    |

### 3 结语

该文利用 COMSOL Multiphysics 软件建立了 110 kV 双回交流 T 接塔的仿真模型,分析了 T 接塔附近的电场分布、线路不同的相序布置对电场分布的影响、同相序布置下的地面上方 1.5 m 处的电场分布情况以及塔身部分典型作业位置处的电场强度。得到了如下结论:

1)输电线路 T 接以后,输电杆塔两侧电场分布不再是简单的对称分布,主线路方向有长跳线的杆塔侧电场强度要明显大于无长跳线一侧,T 接线路方向上,杆塔有 T 接线的一侧电场要明显大于无 T 接线侧。

2)线路相序的布置对 T 接塔下方周围的电场分布影响较大,同相序布置时影响最大,逆相序布置时影响最小。

3)输电线路 T 接后,主线路和 T 接线路产生的电场会叠加,线路下方的电场最大值会出现在 T 接线路的正下方,距离杆塔 17~18.6 m 的区域内。

### 参考文献:

- [1] 马晓飞,江义勇. 浅谈利用运行线路 T 接、 $\pi$  接特点在新建线路跨越施工中的应用[J]. 科技创新与应用,2016(3):165.  
MA Xiaofei, JIANG Yiyong. Discussion on the application of T-connection and  $\pi$ -connection characteristics of the operation line in the construction of new line crossing construction[J]. Technology Innovation and Application,2016(3):165.
- [2] 周楠,陈静,程峰,等. 750 kV 输电线路运行时对临近埋地供水管线的电磁影响研究[J]. 智慧电力,2019,47(1):100-104.  
ZHOU Nan, CHEN Jing, CHENG Feng, et al. Research of electromagnetic influence of 750 kV transmission line on adjacent water supply pipelines [J]. Smart Power,2019,47(1):100-104.
- [3] 郭天伟,罗日成,潘茜雯,等. 750 kV 同塔双回交流输电线路电磁环境分析[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(1):46-53.  
GUO Tianwei, LUO Richeng, PAN Qianwen, et al. Analysis on electromagnetic environment of 750 kV double-circuits transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology,2018,33(1):46-53.
- [4] 刘建军,王鹤,崔国宇,等. 一种基于矢量电场的多电极电场梯度计算优化方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2018,46(13):113-119.  
LIU Jianjun, WANG He, CUI Guoyu, et al. Study on optimization method of multi-electrode electric field gradient calculation based on vector electric field [J]. Power System Protection and Control,2018,46(13):113-119.
- [5] 俞集辉,周超. 复杂地势下超高压输电线路的工频电场[J]. 高电压技术,2006,32(1):18-20+44.  
YU Jihui, ZHOU Chao. Power-frequency electric field of EHV transmission lines under condition of complex landscape[J]. High Voltage Engineering,2006,32(1):18-20+44.

- [6] 李永明,范与舟,徐禄文. 超高压输电线路铁塔附近地面工频电场仿真分析[J]. 电网技术,2013,37(3):782-787.  
LI Yongming, FAN Yuzhou, XU Luwen. Simulation analysis on power frequency electric field at ground surface near EHV power transmission tower [J]. Power System Technology,2013,37(3):782-787.
- [7] 吴东,潘俊文,邹明,等.  $\pm 800$  kV 特高压直流输电线路带电作业人体体表电场分布特性[J]. 电力科学与技术学报,2018,33(2):157-164.  
WU Dong, PAN Junwen, ZOU Ming, et al. Research of electric field distribution characteristics for body surface of live working on  $\pm 800$  kV DC transmission lines[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2):157-164.
- [8] 杨林,谭浩文,王加龙,等. 750 kV 酒杯型复合横担杆塔电场仿真计算及电晕试验[J]. 电网技术,2018,42(6):2009-2015.  
YANG Lin, TAN Haowen, WANG Jialong, et al. Electric field computation and corona test for composite cross-arms in 750 kV cup type tower[J]. Power System Technology,2018,42(6):2009-2015.
- [9] 郑一博,徐党国,秦逸帆,等. 110 kV GIS 同频同相交流耐压试验中三工位隔离开关内部电场分布特性[J]. 中国电力,2020,53(2):43-48.  
ZHENG Yibo, XU Dangguo, QIN Yifan, et al. Distribution of electric field in three-station disconnecting switch in same frequency and phase AC withstand voltage test of 110 kV GIS [J]. Electric Power, 2020, 53(2):43-48.
- [10] 龙国华,陈斌,王羽. 500 kV 典型输电线路铁塔附近电场测量与仿真分析[J]. 电瓷避雷器,2017(1):30-36.  
LONG Guohua, CHEN Bin, WANG Yu. Measurement and simulation analysis on electric field near 500 kV typical power transmission tower [J]. Insulator and Surge Arresters, 2017(1):30-36.
- [11] 张家利,姜震,王德忠. 高压架空输电线下工频电场的数学模型[J]. 高电压技术,2001,27(6):20-21.  
ZHANG Jiali, JIANG Zhen, WANG Dezhong. Mathematical model of the power frequency electric field under high voltage overhead line [J]. High Voltage Engineering,2001,27(6):20-21.
- [12] 李永明,王洋洋,邹岸新,等. 超高压输电线路工频电场计算的矩量法和表面电荷混合法[J]. 电机与控制学报,2017,21(8):1-8.  
LI Yongming, WANG Yangyang, ZOU Anxin, et al. Power-frequency electric field calculation of extra high voltage transmission lines by means of the mixed method combining MOM and SCM [J]. Electric Machines and Control,2017,21(8):1-8.
- [13] 张佰庆,谢伟,康宇斌,等. 500 kV 双回直线转角塔电场仿真分析[J]. 江苏电机工程,2015,34(4):63-66+71.  
ZHANG Baiqing, XIE Wei, KANG Yubin, et al. Electric field simulation analysis on 500 kV double-line suspension angle tower [J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2015,34(4):63-66+71.
- [14] 王建林,靳斌,李博文,等. 基于有限元法的同走廊交直流线路混合电场的计算研究[J]. 山东理工大学学报:自然科学版,2017,31(3):46-50+54.  
WANG Jianlin, JIN Bin, LI Bowen, et al. Calculation of hybrid electric field of AC/DC transmission lines erected in a common corridor based on the finite element method [J]. Journal of Shandong University of Technology: Natural Science Edition, 2017, 31(3):46-50+54.
- [15] 谢连科. 110 kV 同塔双回交流输电线路工频电磁场分布规律研究[J]. 山东电力技术,2009(4):3-5.  
XIE Lianke. Research on power frequency electromagnetic distribution law of 110 kV double-circuit AC transmission lines on the same tower [J]. Shandong Electric Power,2009(4):3-5.
- [16] GB 50545—2010. 110 kV~750 kV 架空输电线路设计规范[S].
- [17] 杨雅倩,罗日成,吴东,等. 750 kV 同塔双回输电线路带电作业体表场强分析[J]. 电力科学与技术学报,2017,32(2):158-165.  
YANG Yaqian, LUO Richeng, WU Dong, et al. Analysis of body surface field strength for live working on 750 kV double-circuit transmission line [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2017,32(2):158-165.
- [18] 陈斌,蓝磊,王羽,等. 500 kV 同塔双回线路典型杆塔进入等电位方式电场仿真计算[J]. 武汉大学学报:工学版,2018,51(5):432-436+464.  
CHEN Bin, LAN Lei, WANG Yu, et al. Simulation analysis of electric field on entering equal potential of 500 kV double circuit transmission line towers for live working [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2018,51(5):432-436+464.