

海底电缆—架空线线路雷击过电压分析与计算

兰贞波¹, 赵常威², 阮江军³

(1. 国网电力科学研究院, 湖北 武汉 430074; 2. 安徽省电力科学研究院, 安徽 合肥 230601;
3. 武汉大学 电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 结合某实际海上风电场, 计算了某岛屿的海底电缆—架空线线路的雷击过电压。基于对线路各部分结构的分析, 在 ATP-EMTP 软件中搭建了仿真计算模型, 利用该模型, 计算了线路在不同工况下的雷击过电压, 利用计算结果分析了避雷器布置方式、杆塔冲击接地电阻、海底电缆长度对雷击过电压的影响。计算和分析结果表明: 当采用不同形式的避雷器布置方式时, 线路首末两端的过电压均未超过海底电缆主绝缘水平; 海底电缆的末端过电压随冲击接地电阻的增大而增大; 海底电缆首末两端的雷击过电压值均受海底电缆长度的影响。

关键词: 雷击; 过电压; 海底电缆; 架空线路; 避雷器; 接地电阻; 风电场; ATP-EMTP; 模型

中图分类号: TM 726.3; P 756.1

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.10.022

0 引言

高电压、大截面、长距离的海底电缆(本文简称海缆)与传统的架空线路在运行和维护方面会有很大的不同,尤其是在系统的过电压方面^[1]。当系统中有海缆线路时,雷电波经架空线路传入海缆,会在海缆线路两端发生折反射,导致较大的过电压;而且雷电波在架空线路和海缆的传递情况有很大不同,同时海缆线路的参数同架空线路相差较大,这就使得含海缆的系统发生雷击时,线路上的过电压呈现不同的特点^[2]。目前国内外对于电缆线路特别是高电压、大截面、长距离海缆线路与架空线连接情况下的过电压研究较少,开展研究工作并不深入。本文采用 ATP-EMTP 仿真软件对某沿海岛屿的海缆—架空线线路的雷击过电压进行分析和计算,计算结果可为今后解决实际工程问题提供一定的参考依据。

1 系统的线路及相关参数

图 1 为某 400 MW 海上风电场的接线示意图。由于海上风电机组数量多、分布广,因此采用 35 kV

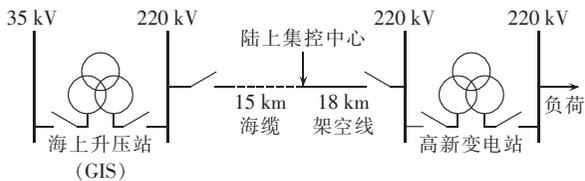


图 1 400 MW 海上风电场系统接线图

Fig.1 Wiring diagram of 400 MW offshore wind farm system

收稿日期: 2013-11-18; 修回日期: 2014-09-03

基金项目: 国家重点基础研究发展计划(973 计划)资助项目(2011CB209404); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(20102070201000069)

Project supported by the National Basic Research Program of China(973 Program)(2011CB209404) and Fundamental Research Funds for the Central Universities(20102070201000069)

电缆将一定数量的风电机组并联起来, 连到 220 kV 的 GIS 变电站进行升压, 然后通过 220 kV 的海缆将电送到陆上集控中心, 再转架空线路, 最终接入 220 kV 的高新变电站。

架空线采用单回路双分裂导线, 线路全长 18 km, 导线型号为 LGJ-300/40, 分裂间距为 400 mm, 外径 23.94 mm, 直流电阻不大于 0.096 14 Ω/km; 架空线路采用双避雷线, 避雷线型号为 LBGJ-100-20AC, 计算直径为 15.7 mm, 直流电阻 1.079 71 Ω/km; 海缆采用 1 600 mm² 单芯交联聚乙烯电缆或者三芯电缆, 铅护套, 单芯电缆按水平排列考虑, 相间距为 25 m, 敷设深度为 5 m; 由于在海底敷设, 因此海缆的金属护层采用两端互联接地。

2 计算模型

2.1 杆塔模型

为防止雷害事故的发生, 准确评价传输线路上的雷电波特性, 正确计算和测量输电线路杆塔波阻抗, 建立合理的杆塔模型在防雷计算中占有重要的地位。若将杆塔视为等值电感, 杆塔上任意点的电位相同, 不能反映雷击塔顶时雷电流在杆塔上的传播过程及反射波对杆塔各节点电位的影响。雷电波沿杆塔传输时, 距起点不同的地方, 波阻抗和波速都是不同的, 这主要是因为不同部分的单位长度电感 l_0 和单位长度电容 c_0 不同。而对不同的部位设计不同的波阻抗, 即可建立一个较为精确的杆塔模型, 并且分割的段长度越小, 所得到的结果就越准确^[3]。为了使计算结果更加准确, 本文采用多波阻抗模型。

如图 2 所示, 杆塔模型考虑了横担和支架对杆塔的影响, 使计算的波响应特性更接近实测值^[4-5]。

a. 主架部分波阻抗 Z_{Tk} 。

$$Z_{Tk} = 60 [\ln(2^{3/2} h_k / r_{ek}) - 2] \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (1)$$

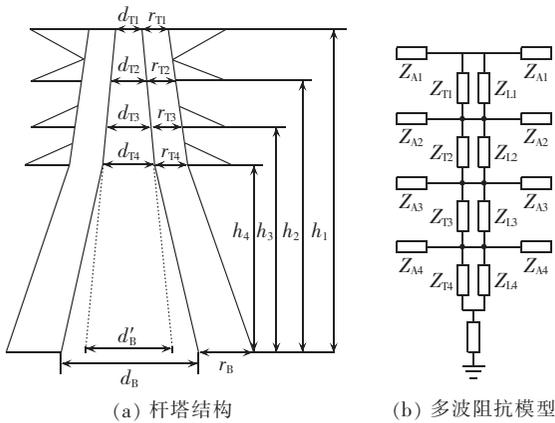


图 2 杆塔结构与多波阻抗模型

Fig.2 Tower structure and multi-wave impedance model

其中, h_k 和 r_{ek} 分别为杆塔第 k 个横担的高度和第 k 个横担各个部分的等效半径, 其中等效半径 r_{ek} 可由经验公式计算:

$$r_{ek} = 2^{1/8} (r_{Tk}^{1/3} r_B^{2/3})^{1/4} d_{Tk}^{1/3} d_B^{2/3} \quad k=1, 2, 3, 4 \quad (2)$$

b. 支架部分波阻抗 Z_{Lk}

试验表明, 有支架的杆塔系统比没有支架的系统到达最大电压所需要的时间要长, 因此在模型中支架的长度为相应的主干长度的 1.5 倍。增加了支架后, 多导体波阻抗减小 10% 左右。因此支架部分波阻抗为:

$$Z_{Lk} = 9Z_{Tk} \quad k=1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

c. 杆塔横担部分波阻抗 Z_{Ak}

$$Z_{Ak} = 60 \ln \frac{2h_k}{r_{Ak}} \quad k=1, 2, 3, 4 \quad (4)$$

其中, r_{Ak} 为第 k 个横担与杆塔相连处横担宽度的 1/4。

2.2 绝缘子串闪络模型

本文判断绝缘子串闪络的方法为相交法。图 3 为绝缘子闪络原理图, 其中 t_1 为闪络时刻; U_1 为闪络电压, 由绝缘子串电压波形和绝缘子伏秒特性曲线共同决定。相交法通过比较绝缘子串电压与伏秒特性曲线的关系来判断绝缘子串是否闪络^[6]。



图 3 绝缘子闪络判断原理

Fig.3 Principle of insulator flashover detection

2.3 雷电流模型

雷电放电一般经历先导放电阶段、主放电阶段和余光放电阶段。经研究表明, 先导放电通道具有分布参数的特征, 称其为雷电通道。因此可以将雷电看作一个沿着一条固定波阻抗的雷电通道向地面传播的电磁波过程。根据等值集中参数定量, 可将其等效为一个彼德逊等值电路^[7-8]。

设沿雷电通道来波 $u_0 = i_0 Z_0$, 其中 i_0 为来波电流, Z_0 为雷电通道的波阻抗。雷电传播的彼德逊电路如图 4 所示, 图中 Z 为雷击物的波阻抗。雷击小接地阻抗物体时, 流过该物体的电流定义为雷电流, 因此可知雷电流大小为:

$$i = \frac{2i_0 Z_0}{Z_0 + Z} \quad (5)$$

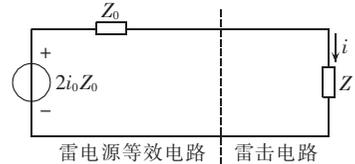


图 4 彼德逊等值电路

Fig.4 Peterson equivalent circuit

标准雷电冲击波波头部分可用双指数函数表示为^[9]:

$$i = I_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (6)$$

其中, I_0 为雷电流幅值; α, β 为时间常数。

2.4 避雷器模型

避雷器为一个高度非线性电阻, 当避雷器上电压低于其冲击放电电压时, 避雷器的电阻接近于无穷大, 相当于开路。当避雷器上过电压达到或者超过其冲击放电电压时, 过电压波即被截断, 这时避雷器呈现为小电阻^[10-11]。本文采用西瓷 Y10W1-200/496 W 型避雷器, 起始动作电压为 283 kV, 8/20 μ s 雷电冲击伏安特性如表 1 所示。

表 1 避雷器的伏安特性

Table 1 Volt-ampere characteristic of lightning arrester

I/kA	U/kV	I/kA	U/kV
1	414	10	495
3	440	20	532
5	462		

根据避雷器伏安特性, 采用 ATP-EMTP 软件中 type99 非线性电阻来模拟避雷器, 避雷器上端引线采用分布参数模型^[12]。

2.5 雷击过电压模型

本文计算的架空线路为 1 回, 全线装设双避雷线; 系统采用 220 kV 回路导线铁塔, 左边挂设导线。由于雷击过程非常短暂, 通常只有几微秒到几十微秒, 距离较远的杆塔的分流作用可以忽略, 因此建模计算时只需考虑雷击点及其附近 2 座杆塔的折反射。而雷击点离海缆越近, 则海缆的侵入波幅值越大, 考虑比较严重的情况, 当雷击点位于与架空线相连的终端杆塔时, 侵入波幅值最大^[13-14]。本文对该线路计算时, 考虑侵入波幅值最大的情况, 即将最靠近海缆的杆塔塔顶作为雷击点进行计算, 在 ATP-EMTP 软件中建立如图 5 所示的仿真模型。

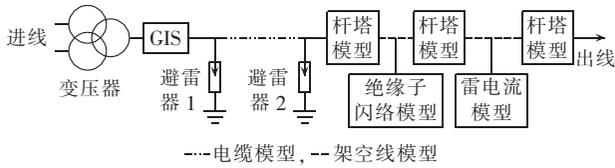


图 5 雷击过电压计算的整体仿真模型

Fig.5 Overall simulation model for lightning overvoltage calculation

3 过电压计算结果及分析

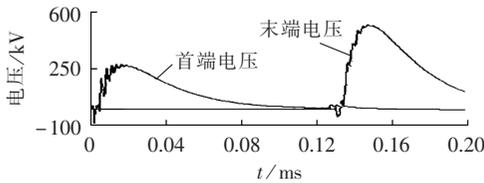
3.1 避雷器对过电压的影响

计算过电压时对整个系统分别考虑以下 3 种不同避雷器布置方式下的雷击过电压:

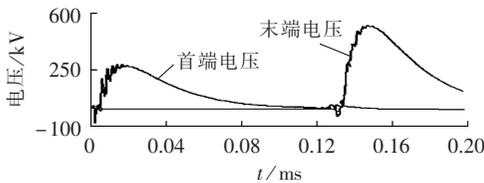
- a. 海缆首末两端均不装设避雷器;
- b. 仅在海缆首端装设避雷器;
- c. 海缆首末两端均装设避雷器。

分别采用单芯和三芯电缆时,在 3 种不同避雷器布置情况下,海缆首末两端过电压波形如图 6 和图 7 所示,对应的过电压最大值见表 2。

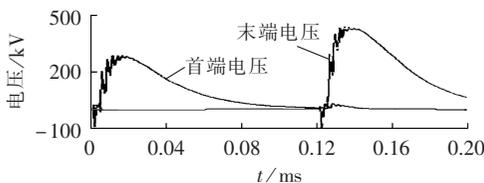
从计算结果可看出,若海缆为单芯电缆,采用方式 a、b 时,海缆末端最大电压值均较大,约为 526 kV,超过避雷器初始动作电压。而采用方式 c 时,海缆末端的大电压会引起末端避雷器开始动作,此时末端避雷器上电流如图 8 所示。由图 8 可见,电流最大值约为 2.0 kA,限压作用明显,电压降为 457 kV,略低于残压,这其中包括避雷器电流在避雷器引线上的一定压降。当海缆为三芯电缆时,若采用方式 a、b 时,



(a) 海缆首末两端均不装设避雷器



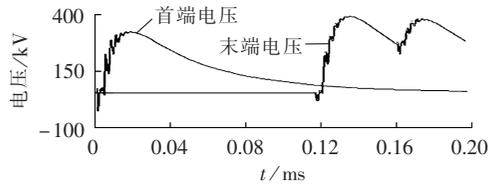
(b) 仅在海缆首端装设避雷器



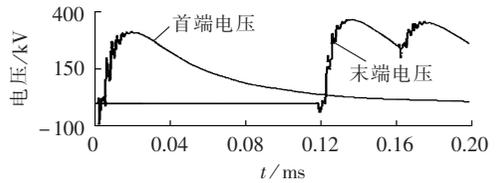
(c) 海缆首末两端均装设避雷器

图 6 在不同避雷器布置方式下的单芯海缆首末两端雷击过电压波形

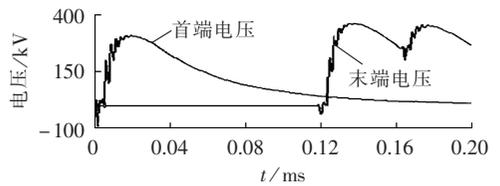
Fig.6 Lightning overvoltage waveforms of both mono-core submarine cable terminals for different arrester arrangement modes



(a) 海缆首末两端均不装设避雷器



(b) 仅在海缆首端装设避雷器



(c) 海缆首末两端均装设避雷器

图 7 在不同避雷器布置方式下的三芯海缆首末两端雷击过电压波形

Fig.7 Lightning overvoltage waveforms of both tri-core submarine cable terminals for different arrester arrangement modes

表 2 不同避雷器布置情况下的雷击过电压计算结果

Table 2 Calculative results of lightning overvoltage for different arrester arrangement modes

海缆类型	避雷器布置方式	海缆过电压最大值/kV	
		海缆首端	海缆末端
单芯电缆	a	287	526
	b	287	526
	c	287	457
三芯电缆	a	301	378
	b	297	375
	c	297	355

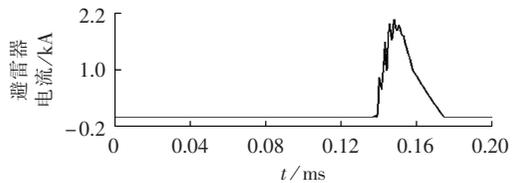


图 8 海缆末端避雷器电流波形

Fig.8 Current waveform of arrester at end terminal of submarine cable

海缆末端电压最大值不超过 400 kV,但超过了避雷器起始动作电压;若采用方式 c 则此时避雷器开始动作,但避雷器电流小于 1 kA,避雷器电阻仍在线性段,阻值很大,限压作用不明显,海缆首端电压仅下降 30 kV,至 355 kV 左右。

DL401—91《高压电缆选用导则》对不同电压等级电缆的主绝缘雷电冲击耐受电压作出了明确规定,对于 220 kV 电缆,其主绝缘雷电冲击耐受电压约为

950~1050 kV。根据计算结果可知,即使在相电压达到极值时发生闪络,海缆首末两端过电压均未超过海缆的主绝缘水平。

3.2 杆塔冲击接地电阻对雷击过电压的影响

本文计算了不同接地电阻情况下的海缆过电压,分析其对雷击过电压大小的影响。采用图 5 所示仿真模型,改变杆塔冲击接地电阻值,分别计算冲击电阻为 5、7、10、15 Ω 情况下海缆的末端电压,计算结果如表 3 所示。

表 3 不同冲击接地电阻下的海缆过电压
Table 3 Lightning overvoltage of submarine cable for different impulse grounding resistances

海缆类型	接地电阻/ Ω	海缆末端过电压/kV
单芯电缆	5	329
	7	393
	10	457
	15	525
三芯电缆	5	245
	7	298
	10	354
	15	445

从表 3 中可知,在接地电阻为 5~15 Ω 时,海缆的末端过电压随着冲击接地电阻的增加而逐渐增加。这是由于在相同雷电流情况下,冲击接地电阻越大,杆塔横担上过电压越大,这使得发生闪络后架空线上的过电压越大,即从架空线侵入电缆的过电压幅值也越大(接地电阻为 5、7、10、15 Ω 时,架空线电压分别为 0.95、1.10、1.35、1.75 MV)。

3.3 海缆长度对雷击过电压的影响

对不同海缆长度情况下的海缆过电压进行仿真计算,分析本系统中海缆长度对其雷击过电压大小的影响。采用如图 5 所示仿真模型,不考虑电缆首末两端避雷器,改变电缆长度,分别计算电缆长度为 50、100、200、400、1000、1500、5000、15000 m 情况下海缆的首末端电压,计算结果如表 4、5 所示。

表 4 不同长度单芯海缆的雷击过电压
Table 4 Lightning overvoltage of mono-core submarine cable for different lengths

海缆长度/m	海缆过电压/kV		海缆长度/m	海缆过电压/kV	
	海缆首端	海缆末端		海缆首端	海缆末端
50	493	493	1000	448	500
100	510	505	1500	400	470
200	490	505	5000	287	460
400	497	493	15000	287	457

表 5 不同长度三芯海缆的雷击过电压
Table 5 Lightning overvoltage of tri-core submarine cable for different lengths

海缆长度/m	海缆过电压/kV		海缆长度/m	海缆过电压/kV	
	海缆首端	海缆末端		海缆首端	海缆末端
50	495	490	1000	460	500
100	491	491	1500	410	470
200	475	505	5000	297	385
400	475	500	15000	297	375

从表 4、5 可知,随着海缆长度的增加,海缆的首末两端的过电压均逐渐减小,且当海缆增加到一定长度时,海缆的首末两端的过电压基本不再降低。当海缆长度小于 400 m 时,海缆的首末两端的过电压大小基本相等,这是由于海缆长度较小时雷电波通过波尾之前发生了多次折反射;当海缆长度大于 400 m 时,海缆末端电压超过首端电压,但低于首端电压 2 倍值,这是由于海缆末端为 GIS 母线和变压器,其波阻抗不是无穷大,冲击电压在海缆末端没有发生全反射。

4 结论

本文利用 ATP-EMTP 软件建立了海上风电场系统的雷击过电压模型,分析了海缆的雷电侵入波过电压水平及其影响因素,得出如下结论。

a. 海缆的雷击过电压值受其海缆单芯或三芯特性的影响。当采用不同形式(单芯或三芯)海缆时,海缆末端过电压的幅值有很大的区别,但对于该海上风电场无论是否考虑海缆两端避雷器的影响,其首末两端过电压均未超过海缆主绝缘水平。

b. 冲击接地电阻对海缆末端电压会产生较大影响。无论是采用三芯还是单芯电缆,当接地电阻为 5~15 Ω 时,海底电缆的末端过电压随着冲击接地电阻的增加而逐渐增加。

c. 海缆首末两端过电压值受海缆长度的影响。当海缆长度小于 400 m 时,海缆的首末两端的过电压大小基本相等;当海缆长度大于 400 m 时,海缆末端电压超过首端电压,但低于首端电压 2 倍值。

参考文献:

- [1] 王奎鑫,唐毅,陈平,等. 基于组合行波原理的高压架空线-电缆混合线路故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制,2012,40(10):90-94.
WANG Kuixin,TANG Yi,CHEN Ping,et al. Fault location method based on combined travelling wave principle for high-voltage overhead-cable lines[J]. Power System Protection and Control,2012,40(10):90-94.
- [2] 唐学用,黄民翔,尹晓光,等. 电缆-架空线混合输电线路故障测距方法研究[J]. 电力系统保护与控制,2011,39(14):69-73.
TANG Xueyong,HUANG Minxiang,YIN Xiaoguang,et al. A study on fault locating methods based on hybrid transmission lines consisting of power cables and overhead lines[J]. Power System Protection and Control,2011,39(14):69-73.
- [3] 张永记,司马文霞,张志劲. 防雷分析中杆塔模型的研究现状[J]. 高电压技术,2006,32(7):93-97.
ZHANG Yongji,SIMA Wenxia,ZHANG Zhijin. Summary of the study of tower models for lightning protection analysis[J]. High Voltage Engineering,2006,32(7):93-97.
- [4] 张颖,高亚栋,杜斌,等. 输电线路防雷计算中的新杆塔模型[J]. 西安交通大学学报,2004,38(4):365-372.

- ZHANG Ying,GAO Yadong,DU Bin,et al. New tower model in calculation of lightning protection on transmission line[J]. Academic Journal of Xi'an Jiaotong University,2004,38(4):365-372.
- [5] 杜林,糜翔,杨勇,等. 雷击输电线路杆塔时的杆塔等效模型[J]. 高电压技术,2011,37(1):28-33.
- DU Lin,MI Xiang,YANG Yong,et al. Equivalent model of transmission tower under lightning striking [J]. High Voltage Engineering,2011,37(1):28-33.
- [6] 谭进,张焕青,刘玉君,等. ± 500 kV 三沪回同双回直流输电线路防雷分析[J]. 高电压技术,2010,36(9):2173-2179.
- TAN Jin,ZHANG Huanqing,LIU Yujun,et al. Analysis on lightning withstand performance of the Sanhu ± 500 kV double circuit HVDC power transmission line[J]. High Voltage Engineering,2010,36(9):2173-2179.
- [7] 孙建虎,刘颖芳,尹平. 雷电流数学模型分析[J]. 后勤工程学院学报,2012,28(2):85-91.
- SUN Jianhu,LIU Yingfang,YIN Ping. Analysis of mathematical model for lightning current[J]. Journal of Logistical Engineering University,2012,28(2):85-91.
- [8] 李洪涛. 500 kV 变电站雷电侵入波保护研究[D]. 重庆:重庆大学,2006.
- LI Hongtao. The lightning inrush overvoltage portection of 500 kV substation[D]. Chongqing:Chongqing University,2006.
- [9] 陈梁金,李文艺,施围. 750 kV GIL-GIS 系统雷电侵入波防护的研究[J]. 高电压技术,2005,31(6):39-41.
- CHEN Liangjin,LI Wenyi,SHI Wei. Study on the protection of lightning intruding waves in 750 kV GIL-GIS system[J]. High Voltage Engineering,2005,31(6):39-41.
- [10] 莫付江,陈允平,阮江军. 输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J]. 电网技术,2004,28(21):80-84.
- MO Fujiang,CHEN Yunping,RUAN Jiangjun. Study on transmission tower models and their lightning performance calculation[J]. Power System Technology,2004,28(21):80-84.
- [11] 郇嘉嘉,曾海涛,黄少先. 应用线路避雷器提高 10 kV 配电线路防雷性能的研究[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(9):110-115.
- XUN Jiajia,ZENG Haitao,HUANG Shaoxian. Study on line arrester applied to improve the lightning performance of 10 kV distribution lines[J]. Power System Protection and Control,2009,37(9):110-115.
- [12] 王红玲,张元敏. 阜南县郊 35 kV 架空输电线路设计[J]. 电力系统保护与控制,2009,37(6):88-90.
- WANG Hongling,ZHANG Yuanmin. Funan suburb 35 kV overhead line design[J]. Power System Protection and Control,2009,37(6):88-90.
- [13] 张志劲,廖瑞金,孙才新. 500 kV 同杆双回输电线路耐雷性能分析[J]. 重庆大学学报,2003,26(7):70-73.
- ZHANG Zhijin,LIAO Ruijin,SUN Caixin. Analysis on the lightning protection performance of 500 kV circuit transmission line[J]. Journal of Chongqing University,2003,26(7):70-73.
- [14] 张志劲. 500 kV 同杆双回输电线路耐雷性能研究[D]. 重庆:重庆大学,2002.
- ZHANG Zhijin. Study on lightning protection performance for 500 kV double circuit transmission line[D]. Chongqing:Chongqing University,2002.

作者简介:



兰贞波

兰贞波(1988—),男,湖北洪湖人,硕士,研究方向为电力系统多物理场分析、电磁场数值计算(E-mail:lanzb@sina.com);

阮江军(1968—),男,浙江上虞人,教授,博士研究生导师,博士,从事电磁场数值计算、电能质量及电磁兼容方面的研究。

Analysis and calculation of submarine cable-overhead line lightning overvoltage

LAN Zhenbo¹,ZHAO Changwei²,RUAN Jiangjun³

(1. State Grid Electric Power Research Institute,Wuhan 430074,China;

2. Anhui Electric Power Research Institute,Hefei 230601,China;

3. School of Electrical Engineering,Wuhan University,Wuhan 430072,China)

Abstract: The transmission line lightning overvoltage of an offshore wind farm is calculated,which is composed of submarine cables and overhead lines. Based on the structural analysis of different transmission line parts,a simulation model is established with ATP-EMTP software and the transmission line lightning overvoltage is calculated for different operating conditions,based on which,the influences of arrester arrangement mode,tower impulse grounding resistance and submarine cable length on the lightning overvoltage are analyzed. The calculative and analytical results show:for different arrester arrangement modes,the lightning overvoltages of both line terminals are always smaller than the main insulation level of submarine cable;the lightning overvoltage of the end terminal of submarine cable increases along with the increase of impulse grounding resistance;the lightning overvoltages of both submarine cable terminals are affected by its length.

Key words: lightning; overvoltage; submarine cable; overhead lines; lightning arresters; grounding resistance; wind farms; ATP-EMTP; models