

500 kV 交流海底电缆过电压保护与绝缘配合研究

李浩原, 李 健

(中国电力工程顾问集团中南电力设计院有限公司, 湖北 武汉 430071)

摘 要: 海底电缆造价昂贵、施工检修较为复杂, 一旦出现故障, 后果严重。而过电压导致的绝缘老化和绝缘击穿是造成电缆故障的重要因素, 因此有必要对海底电缆的过电压进行研究。基于镇海—舟山 500 kV 交流海底电缆工程, 建立海底电缆过电压 ATP 仿真计算模型, 对海底电缆系统的暂态过电压、操作过电压和雷电过电压进行了分析和计算, 给出了保护措施, 并基于计算结果研究了海底电缆的绝缘配合。

关键词: 海底电缆; 过电压; 绝缘配合; 仿真

中图分类号: TM86 文献标志码: A 文章编号: 1003 - 6954(2020)02 - 0053 - 06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2020.02.011

Research on Overvoltage Protection and Insulation Coordination of 500 kV AC Submarine Cable System

Li Haoyuan, Li Jian

(Central Southern China Electric Power Design Institute Co., Ltd.

of China Power Engineering Consulting Group, Wuhan 430071, Hubei, China)

Abstract: Submarine cables is very expensive, meanwhile the construction and maintenance is complicated. Once failure occurs, the consequences are serious. The aging and breakdown of cables caused by overvoltage are the important factors leading to cable fault, so it is of great significance to study the overvoltage of submarine cable system. Based on Zhenhai - Zhoushan 500 kV AC submarine cable project, simulation models for overvoltage calculation of submarine cable is established in ATP, the transient overvoltage, switching overvoltage and lightning overvoltage are analyzed and calculated, and finally the protective measures are given. Based on the simulation results, the insulation coordination of submarine cable system is studied.

Key words: submarine cable; overvoltage; insulation coordination; simulation

0 引 言

海底电缆在工程中的应用可追溯到 20 世纪初, 最初的应用场合是给海上灯塔供电。随着电缆技术的进步和社会经济的发展, 目前海底电缆已广泛应用在电网互联或者孤岛供电等重要场合。海底电缆价格昂贵, 高电压等级的海底电缆价格可达每公里数百万元。由于其敷设于海上, 施工和抢修很复杂, 若出现故障, 则很可能导致电力系统解列等严重的电网事故。因此, 海底电缆的运行可靠性要求很高^[1-2]。海底电缆属于非自恢复性绝缘, 绝缘一旦击穿, 无法自恢复^[3-4], 因此海底电缆的绝缘水平需

充分考虑系统的过电压水平, 以免出现绝缘击穿导致严重后果。一般来说, 国外交流海底电缆工程都会进行过电压计算, 而由于参考标准体系及电力系统参数等不同, 绝缘的配置情况都会有所差异^[5-7], 因此, 对国内工程的参考价值不大。对于国内工程需针对工程具体参数进行过电压计算以满足海底电缆绝缘配合要求。

考虑海底电缆过电压水平与绝缘配合的重要性, 基于镇海—舟山 500 kV 交流海底电缆输电工程, 研究了交流海底电缆系统的过电压和绝缘配合。研究结果可为后续海底电缆工程提供参考, 对提高中国海底电缆工程技术水平也有着积极的意义。

1 仿真模型

过电压仿真计算是基于 ATP - EMTP 成熟的模型库及仿真计算平台,进行架空线 - 电缆混合系统模型搭建和过电压仿真分析。之前,需选择合适的仿真模型搭建交流海底电缆过电压仿真系统。

1.1 架空线路仿真模型选择

采用 ATP - EMTP 中输电线路的 LCC 模型进行计算。该模型属于分布参数模型,包含导线、杆塔、接地等参数,其中频率相关子模型包含 J. Marti 模型和 Noda 模型等。

Noda 模型较为复杂,同时需要合适的参数以及较大的步长才能得到稳定的响应。而 J. Marti 模型能够很好反应雷电过电压波过程。J. Marti 充分考虑了导线之间的耦合,计算方便、精度较高。这里的架空输电线路将采用 J. Marti 模型。

1.2 海底电缆仿真模型选择

电缆仿真模型的选取与架空线类似,考虑到雷电波过程及其频率特性,电缆采用 J. Marti 模型。

镇海 - 舟山 500 kV 海底电缆工程采用的海底电缆为交联聚乙烯电缆,典型 500 kV XLPE 交流海底电缆的结构如图 1 所示。

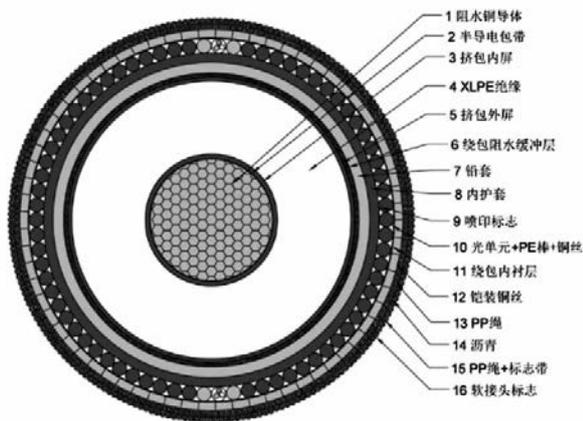


图 1 典型交联聚乙烯海底电缆结构

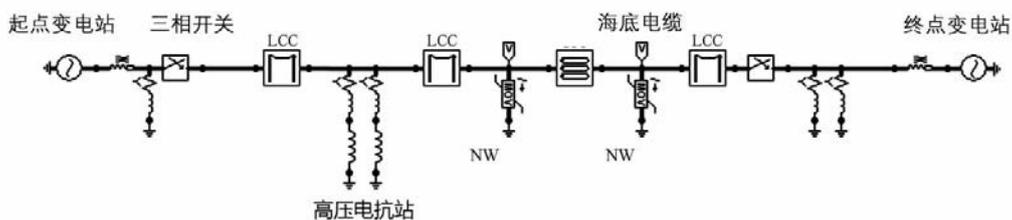


图 3 架空线 - 海底电缆混合系统仿真模型

1.3 避雷器仿真模型

避雷器特性对系统过电压水平有显著的影响,正确地建立避雷器仿真模型是架空线 - 海底电缆混合系统过电压分析与绝缘配合的前提。

ATP - EMTP 软件模型库中包含基于伏安特性的金属氧化物压敏电阻(metal oxide varistors, MOV)模型,仿真中需基于避雷器实际安装场合、应用情况对 MOV 模型进行修正完善,避雷器常用模型有 IEC 模型及 IEEE 模型。IEEE 模型考虑了陡波响应,更准确。此处仿真采用 IEEE 模型,如图 2 所示。

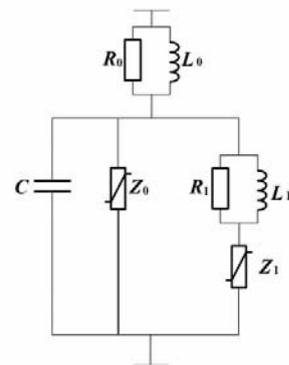


图 2 IEEE 避雷器等效电路

图 2 中: L_0 为避雷器内部电感,体现避雷器的动态特性; R_0 是为计算稳定性而设的参数; C 为杂散电容; 非线性特性由 Z_0 和 Z_1 表示, Z_0 大于 Z_1 , 两部分由并联的线性 R_1 与 L_1 支路隔开。

2 暂态过电压

在电力系统中,因为断路器的操作或系统故障,系统参数会发生改变,引起内部出现暂态变化过程,在这个期间会出现系统暂时过电压。暂时过电压通常由故障、容升效应、谐振等导致。

为研究空载线路容升效应,选取配置和不配置高压电抗两种方案进行仿真,有高压电抗时镇海及舟山高压电抗容量均为 180 Mvar,仿真模型见图 3。空载长线电容效应如表 1 所示。

表1 容升过电压计算结果

位置	有高压电抗时容升过电压/(pu)		无高压电抗时容升过电压/(pu)	
	镇海空载	舟山空载	镇海空载	舟山空载
镇海站	0.99	0.99	1.02	1.10
海底电缆首端	0.98	1.00	1.02	1.09
海底电缆末端	0.98	1.00	1.08	1.03
舟山站	0.97	1.01	1.08	1.03

表2 不同故障类型下过电压

故障类型	断路器断开位置	过电压计算值/(pu)				系统过电压最大值/(pu)
		镇海	海底电缆首端	海底电缆末端	舟山	
无故障甩负荷	镇海	0.99	0.98	0.98	0.97	1.01
	舟山	0.99	1.00	1.00	1.01	
单相接地故障	镇海	1.23	1.09	1.09	1.02	1.23
	舟山	1.05	1.15	1.15	1.23	
两相接地故障	镇海	1.24	1.16	1.16	1.01	1.24
	舟山	1.02	1.20	1.20	1.24	

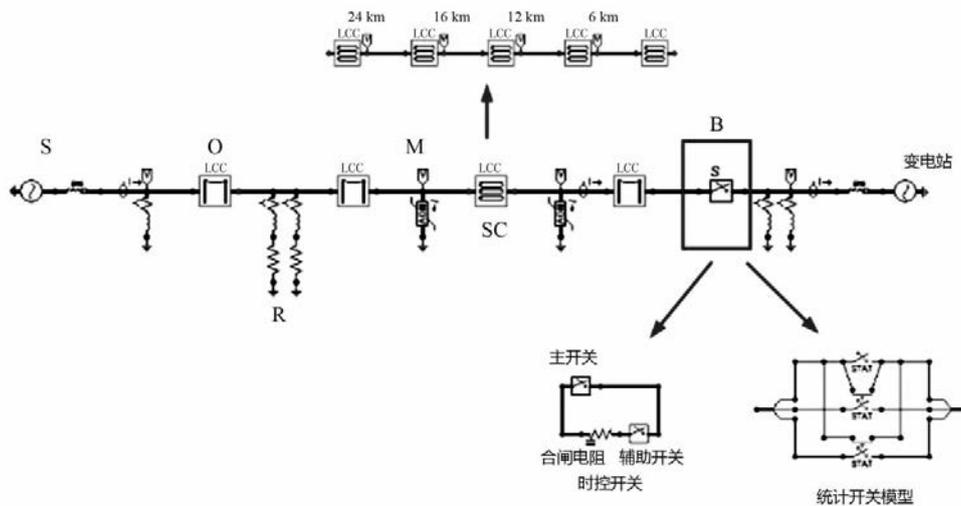


图4 操作过电压仿真模型

由表1可见,有高压电抗的情况下,系统无显著的容升效应;未配置高压电抗的情况下,系统出现显著的容升效应。

不同故障类型情况下海底电缆沿线过电压如表2所示。可以看出,两相接地故障甩负荷时海底电缆沿线过电压值最大,为1.24 pu。

3 操作过电压研究

操作过电压由切除空载变压器、空载线路合闸、切除空载线路等产生^[13]。仿真结果表明,空载线路合闸过电压是最严重的操作过电压类型。仿真模型见图4所示。

图4中:S为等效电压源;R为补偿电抗器;O为架空线;M为避雷器;SC为海底交流电缆;C为端

口电容;B为断路器。

对于不带合闸电阻的断路器,电源峰值合闸时过电压最为严重,远离操作端的海底电缆过电压随时间变化特性如图5所示。

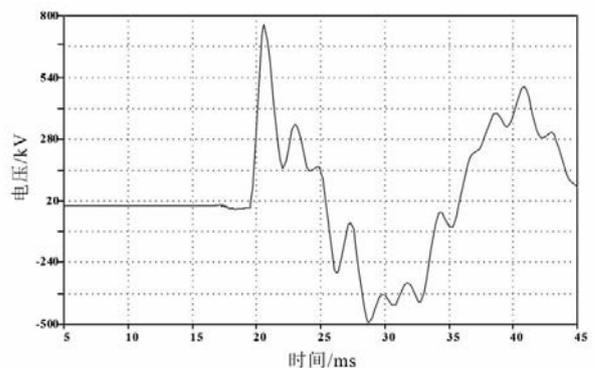


图5 远离操作端操作过电压随时间分布

由于回路电阻较小,系统发生欠阻尼振荡。振荡的频率与线路参数有关,振荡的幅值会逐步衰减。

在末端进行操作时其过电压水平高于首端。以海底电缆末端(舟山侧)合闸为例,海底电缆沿线过电压幅值如表3所示。

表3 远离操作端过电压沿线分布规律(无合闸电阻)

距海底电缆末端 距离/km	0	3	6	9	12	17
沿线过电压 幅值/kV	766.5	773.4	778.2	783.5	787.5	790.1
沿线过电压 幅值/(pu)	1.71	1.72	1.73	1.74	1.75	1.76

断路器合闸电阻取400Ω。在电源峰值时刻主开关合闸,半周期后辅助开关合闸。海底电缆沿线过电压幅值见表4所示。

表4 远离操作端过电压沿线分布规律(400Ω合闸电阻)

距海底电缆末端 距离/km	0	3	6	9	12	17
沿线过电压 幅值/kV	610.6	607.5	604.2	606.4	608.6	607.7
沿线过电压 幅值/(pu)	1.26	1.27	1.29	1.29	1.29	1.30

由图6的有无合闸电阻操作过电压的对比可见,增加合闸电阻后,系统的空载线路合闸过电压明显降低。

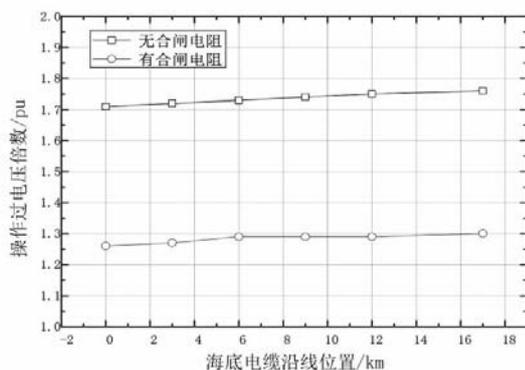
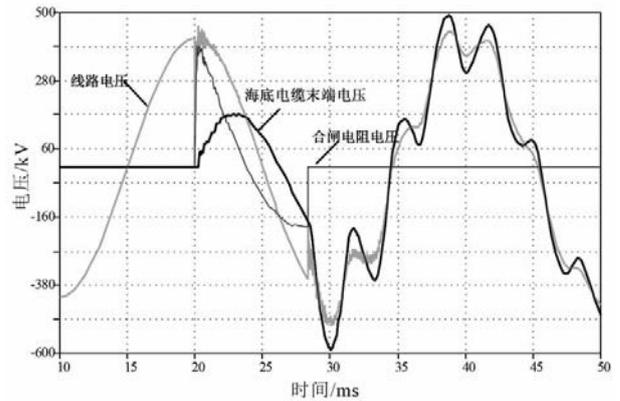


图6 有无合闸电阻操作过电压对比

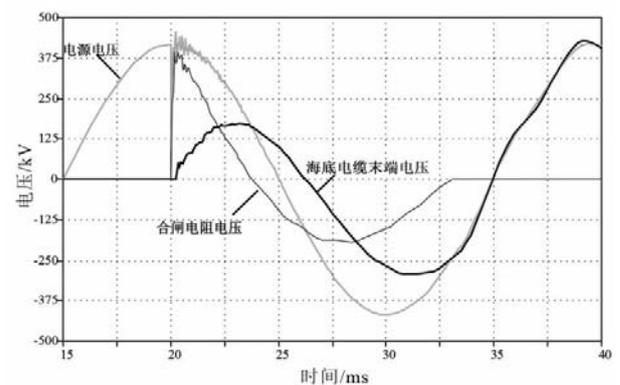
合闸时刻对系统过电压也存在较为明显的影响,当主触头在合闸电阻电压为0时刻合闸时,线路将直接进入稳态,而随机合闸则有可能造成震荡产生过电压,如图7所示。选择合适的合闸时刻对降低过电压有重要的意义。

4 雷电过电压研究

雷电过电压包括绕击和反击两种类型。下面分别对这两种情况下沿海底电缆的雷电过电压分布进



(a) 随机合闸过电压



(b) 合闸电阻电压零点合闸

图7 不同合闸时刻操作过电压波形

行计算。采用标准雷电流波形(2.6/50μs的斜角波),对进线段遭受雷电绕击及反击时海底电缆过电压进行计算。海底电缆采用J. Marti模型,电缆头用入口电容表示,为1000pF。雷电通道波阻绕击时取800Ω,反击时取300Ω。绕击和反击点均取靠近终端站的架空线杆塔。仿真模型如图8所示,图中S为变电站等效电源,R为补偿电抗器,F为闪络判据,T为等效杆塔模型,L为雷电流源,O为架空输电线路,M为避雷器,SC为海底电缆,C为端口电容。

4.1 绕击过电压在海底电缆沿线分布规律

绕击计算时,采用最大绕击电流进行计算,取绕击电流峰值为26kA。海底电缆长度为17km,电源相位与雷电过电压同相位。海底电缆沿线过电压幅值分布如图9所示。

雷电侵入波过电压幅值表现为先减小后增大的趋势。海底电缆前面部分的过电压最大值在电缆的起点处,而电缆后面部分的过电压最大值在接近终点处,海底电缆沿线过电压最大值出现在接近终点处,为905kV。

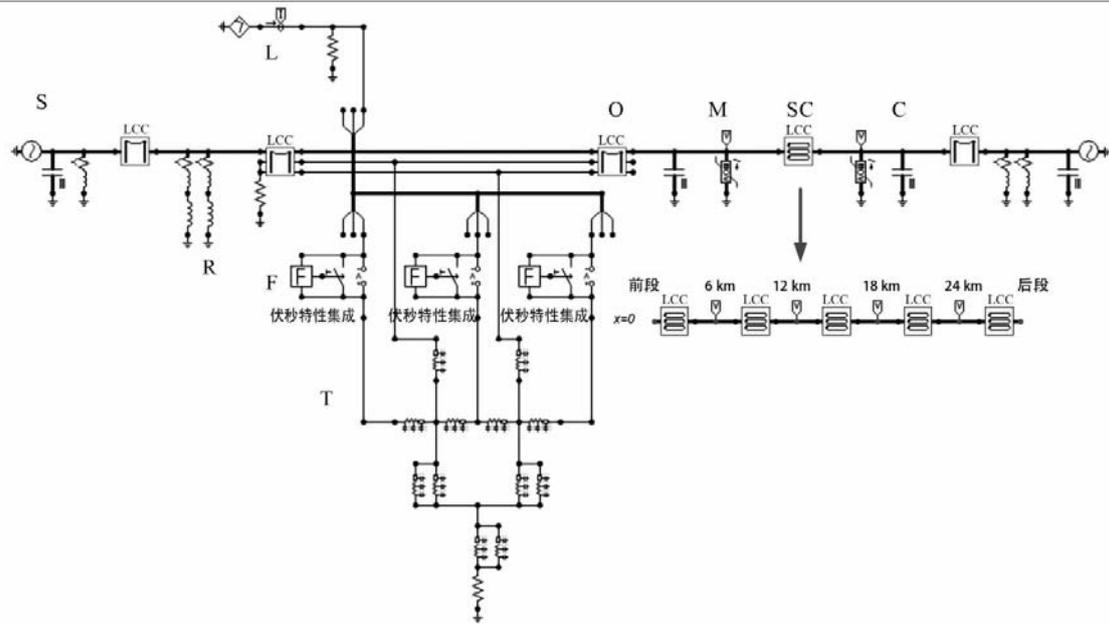


图 8 雷电工况下仿真系统

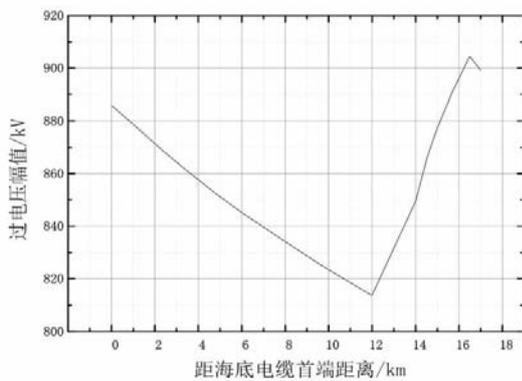


图 9 海底电缆沿线绕击过电压分布

4.2 反击过电压海底电缆沿线分布规律

参考 500 kV 变电站雷电侵入波计算中的雷电流^[12], 反击雷电流取 -220 kA, 考虑最严重情况即电源与雷电流反相。反击过电压沿线分布情况如图 10 所示, 过电压分布规律与绕击类似, 最大过电压值为 893 kV。

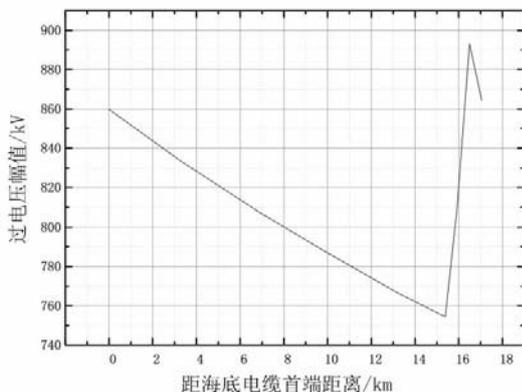


图 10 海底电缆沿线反击过电压分布

4.3 海底电缆长度对过电压幅值的影响

改变海底电缆长度, 海底电缆沿线最大绕击过电压幅值随其长度变化的关系如图 11 所示。海底电缆沿线最大过电压随着海底电缆长度的增加而减小。

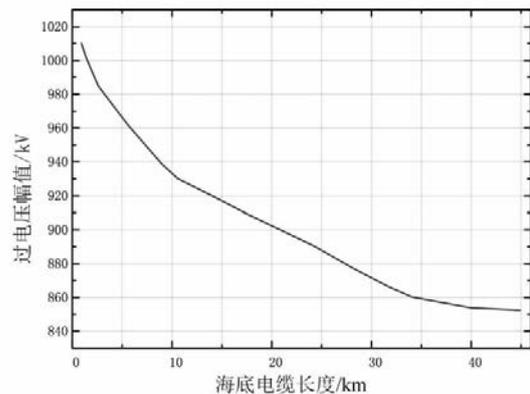


图 11 海底电缆过电压幅值与其长度关系

4.4 避雷器数量对过电压幅值的影响

避雷器为非线性电阻片, 当多个避雷器并联时, 并联电阻值减小, 电流被多联避雷器分担, 流过每支避雷器的电流减小, 避雷器残压会有所降低。绕击雷电流幅值为 26 kA 时, 单个避雷器和两个避雷器并联时的海底电缆末端过电压幅值对比见图 12 所示。由图 12 可见, 采用避雷器并联可减小过电压幅值 4.2%。

避雷器多柱并联后海底电缆末端电压及沿线过电压最大值见图 13 所示。过电压值随避雷器并联支数的增加而减小。

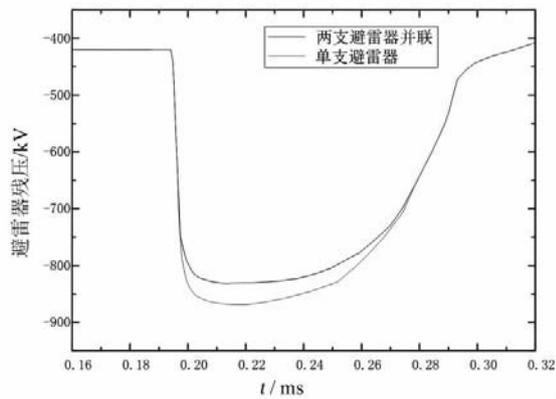


图12 不同避雷器数量时海底电缆末端避雷器电压对比

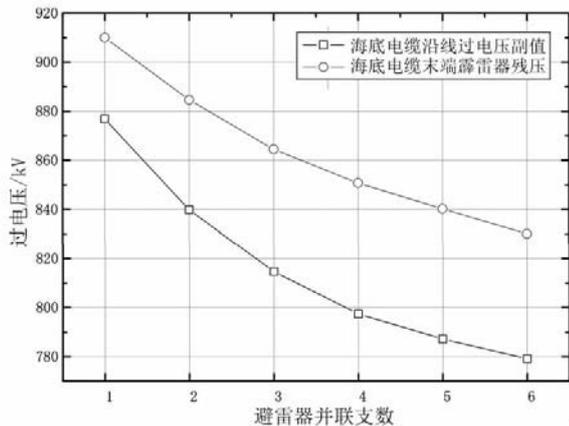


图13 避雷器并联支数与残压关系

5 交流海底电缆系统绝缘配合

海底电缆系统的绝缘配合需根据系统中出现的各种电压和保护装置的特性来确定电缆的绝缘水平。

海底电缆系统代表性过电压由系统仿真得出,根据前面仿真计算结果,镇海—舟山海底电缆系统的代表性过电压如表5所示。

表5 镇海—舟山海底电缆系统代表性过电压

过电压形式	过电压值
暂时过电压(有效值)	556 kV (1.24 pu)
操作过电压(幅值)	790 kV (1.76 pu)
雷电过电压(幅值)	905 kV (2.02 pu)

根据《绝缘配合 第2部分:使用导则》(GB/T 311.2-2013)、《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范》(GB/T 50064-2014)和《交流电力系统金属氧化物避雷器使用导则》(DL/T 804-2014),不同过电压类型对应的最大配合系数如表6所示^[8-11]。

表6 绝缘配合系数值

过电压类型	暂时过电压	操作过电压	雷电过电压
配合系数	1.15	1.196	1.4

综合考虑以上配合系数,海底电缆系统代表性过电压在不同绝缘配合系数下要求耐受电压如表7所示。

表7 镇海—舟山海底电缆系统要求耐受电压

过电压类型	代表性过电压/kV	配合系数	要求耐受电压/kV
暂时过电压	556.0	1.150	639.4
操作过电压	790.1	1.196	945.0
雷电过电压	904.5	1.400	1 266.3

根据《高压电缆选用导则》(DL/T 401-2002),500 kV交流电缆操作冲击耐受电压为1175 kV,雷电冲击耐受电压值为1550 kV,均大于表7中的要求耐受电压。因此,海底电缆绝缘水平满足要求。

6 结语

镇海—舟山500 kV交流海底电缆工程过电压与绝缘配合仿真计算结果表明:

1) 暂时过电压中接地故障甩负荷时过电压水平最高,镇海—舟山海底电缆暂时过电压水平为1.24 pu。

2) 空载线路合闸过电压是主要的操作过电压类型,海底电缆远离操作端的过电压幅值大于靠近操作端,镇海—舟山海底电缆操作过电压水平为1.76 pu,配置合适的合闸电阻后,操作过电压可明显降低,降为1.30 pu。

3) 雷电绕击侵入波过电压是主要的雷电过电压类型。由于波的折反射和避雷器的限制作用,海底电缆沿线过电压呈现先降低后升高的特点,最大过电压出现在靠近电缆末端的位置,为2.03 pu,可采用多支避雷器并联进一步降低雷电侵入过电压水平;过电压幅值随电缆长度的增加而减小。

4) 根据《高压电缆选用导则》(DL/T 401-2002)的规定,海底电缆绝缘强度满足要求,且有较大裕度。

参考文献

- [1] 陈凯华.海南联网海缆敷设施工与防护[J].南方电网技术,2009,3(5):25-26.

(下转第66页)

由图4可知,在距离泄漏点2 m处检测, SF₆气体泄漏激光成像仪和 SF₆气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)检出清晰度差异不大,但呈现效果仍然是 SF₆气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)较优。

4 结 语

前面利用激光成像仪和红外辐射成像仪开展了 SF₆气体泄漏速率、检测距离和检测背景对泄漏成像效果的影响分析,发现检测仪器距离泄漏源的距离越近越容易检出泄漏;在相同距离、相同背景的情况下,泄漏速率越大越容易检出泄漏;白色墙体为背景的检出效果好于金属面板。

对于变电站 GIS 母线、开关等靠近地面安装的气室,较容易找到 GIS 壳体为背景的检测角度且可实现 1 m 左右的近距离检测,则 SF₆气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)与 SF₆气体泄漏激光成像仪均可较好使用;对于变电站 GIS 出线套管、换流站 GIL 及其他远离地面安装的气室,较难通过调整检测角度找到反射物体且需要远距离(一般大于 2 m)检测,则 SF₆气体泄漏红外辐射成像仪(制冷型探测器)成像效果比 SF₆气体泄漏激光成像仪好。

参考文献

- [1] 李玉海,路自强,李后顺,等. 红外成像检漏技术在青海电网 SF₆电气设备泄漏检测中的应用[J]. 高压电器,2012,48(12):130-134.
- [2] 林敏,杨景刚,贾勇勇,等. 电气设备 SF₆气体检漏技术研究与应用[J]. 江苏电机工程,2014,33(4):27-29.
- [3] 叶涛,尹建波,王瑞军. 红外成像技术在 SF₆断路器气体检漏中应用[J]. 内蒙古电力技术,2010,28(4):31-33.
- [4] 弓艳朋,毕建刚,杨圆,等. SF₆气体泄漏成像仪校验技术研究[J]. 电测与仪表,2014,51(14):92-95.
- [5] 郭利民. 基于红外吸收原理 SF₆气体在线检漏仪的设计[D]. 郑州:郑州大学,2011.
- [6] 高树国,郑爱全,耿江海,等. 应用激光成像技术检测 SF₆气体泄漏[J]. 高压电器,2010,46(3):103-105.
- [7] 喻新发,闫荣鑫,钟亮,等. 航天器红外成像检漏方法研究[J]. 航天器环境工程,2012,29(2):220-225.
- [8] 胡伟涛,隋少臣,韩建波. 红外检漏成像仪在 SF₆电气设备状态检修中的应用[J]. 高压电器,2010,46(10):90-93.

作者简介:

罗 洋(1986), 硕士, 高级工程师, 从事高电压技术研究。

(收稿日期: 2019-12-11)

(上接第58页)

- [2] 张勇,陈建斌,余畅,等. 联网后海南电网与主网严重故障下的相互影响及解列措施研究[J]. 南方电网技术,2009,3(5):50-53.
- [3] 应启良,徐晓峰,孙建生. 海底电力电缆——设计、安装、修复和环境影响[M]. 北京:机械工业出版社,2011.
- [4] 张栋国. 电缆故障分析与测试[M]. 北京:中国电力出版社,2005.
- [5] Zubiaga M, Abad G, Barrena J A, et al. Spectral Analysis of A Transmission System Based on AC Submarine Cables for an Offshore Wind Farm [C] //Conference of IEEE Industrial Electronics, IEEE, 2010.
- [6] Bui - Van Q, Beaulieu G, Huynh H, et al. Overvoltage Studies for the St. Lawrence River 500 - kV DC Cable Crossing [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991,6(3):1205-1215.
- [7] Henriksen T, Gustavsen B, Balog G, et al. Maximum

Lightning Overvoltage along A Cable Protected by Surge Arresters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2):859-866.

- [8] 绝缘配合 第2部分:使用导则:GB/T 311.2-2013[S],2013.
- [9] Insulation co-ordination - Part 2: Application guide: IEC 60071-2-1996[S],1996.
- [10] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合设计规范:GB/T 50064-2014[S],2014.
- [11] 交流电力系统金属氧化物避雷器使用导则:DL/T 804-2014[S],2014.
- [12] 李炬添. 海上风电场海底高压电缆雷电过电压研究[J]. 电工技术,2012(12):45-46.
- [13] 王梅义,吴竞昌,蒙定中. 大电网系统技术[M]. 北京:中国电力出版社,1995.

作者简介:

李浩原(1987), 博士, 工程师, 从事输变电工程设计。

(收稿日期: 2019-12-05)