

±800 kV 直流输电线路重冰区导、地线 脱冰冲击敏感因素浅析

刘翔云,何松洋,黄 兴,宋玲林

(中国电力工程顾问集团西南电力设计院有限公司,四川 成都 610021)

摘要:结合±800 kV 直流输电线路重冰区的实际工程数据,基于脱冰数值计算理论,通过数值方法模拟了六分裂导线在不同档数、档距、高差等复合因素影响下导线的脱冰动力响应过程,分析不同参数条件下导线和地线脱冰对悬垂绝缘子串和耐张绝缘串的冲击效应,得到最不利脱冰冲击效应的控制因素。研究表明:不同档距和高差组合下,档距和高差均最大时脱冰后的冲击效应最强;对于连续档,不同档脱冰时,对其相邻档导线串的冲击效应最大;脱冰水平冲击效应主要受水平档距的影响,垂直冲击效应主要受高差的影响。

关键词:输电铁塔结构;特高压;数值计算;脱冰跳跃;冲击荷载

中图分类号:TM753 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-6954(2021)03-0038-06

DOI:10.16527/j.issn.1003-6954.20210308

Superficial Discuss on Deicing Impact Sensitivity Factors of Conductor Wire and Earth Wire in Heavy Icing Areas of ± 800 kV DC Transmission Line

Liu Xiangyun, He Songyang, Huang Xing, Song Linglin

(CPECC Southwest Electric Power Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610021, Sichuan, China)

Abstract: Combined with the engineering data of ± 800 kV DC transmission line in heavy icing areas, and based on the theory of deicing numerical calculation, the dynamic response process of six bundle conductor under the combined effect of different span, span length and height difference is simulated by numerical method. The impact effect of conductor wire and earth wire deicing on suspension insulator string and tension insulator string under different parameters is analyzed, and the most unfavorable control factors of deicing impact effect are obtained. The results show that: under different combinations of span and height difference, the impact effect after deicing is the strongest when the span and height difference are the largest; for continuous gear, the impact effect of different gear on the conductor string of adjacent gear is the largest; the horizontal impact effect of deicing is mainly affected by the horizontal span, and the vertical impact effect is mainly affected by the height difference.

Key words: transmission tower structure; UHV; numerical calculation; deicing jump; impact load

0 引 言

冰灾一直是威胁中国电网安全运行最为严重的自然灾害之一,一旦发生,可能引起输电线路倒塌产生大面积停电,给国民生活造成巨大影响。灾后调查报告显示,倒塌的输电铁塔中90%是由于不均匀覆冰和不均匀脱冰的不平衡张力造成

的。对于±800 kV 特高压直流输电线路,由于输送距离长,途经重覆冰区较多,其脱冰不平衡张力对于线路的安全运行存在较大的威胁。

架空输电线路导线和地线在脱冰时,其张力会发生突然变化,由于非平衡力的出现,会对杆塔产生不可忽视的冲击作用,冲击力的大小与线路的结构、覆冰以及脱冰有关,因而有必要研究在不同线路结构和覆冰厚度条件下,导线和地线脱冰产生的冲击

作用。目前,学者们对线路脱冰的影响已经做了一些研究,主要集中在脱冰振动响应分析^[1-4]和脱冰不平衡张力计算^[5-7]等方面。目前关于脱冰的冲击作用研究较少,相关设计规范^[8-10]也没有具体要求,脱冰冲击作为一种偶然荷载,对线路的影响不可忽略,因此有必要对脱冰冲击荷载展开研究。

1 脱冰数值计算理论

在计算导地线覆冰后的平衡状态时,可以通过等效密度来模拟导地线的载荷。覆冰后导地线的等效密度可由式(1)计算。

$$\rho_e = \frac{W_1 + W_2}{A} = \rho_1 + \rho_2 \quad (1)$$

式中: ρ_e 为覆冰后导、地线的等效密度; W_1 和 W_2 分别为单位长度导、地线的自重和覆冰重量; A 为其截面积。

在进行脱冰荷载计算时,假定脱冰率为 β ,则脱冰后残留在单位长度导、地线上的覆冰重量为 $W_2(1-\beta)$,脱冰后导、地线的等效密度为

$$\rho'_e = \frac{W_1 + W_2(1-\beta)}{A} \quad (2)$$

导线脱冰前的等效密度可以分解为两部分:

$$\rho_e = \frac{W_1 + W_2}{A} = \frac{W_1 + W_2(1-\beta)}{A} + \frac{\beta W_2}{A} = \rho'_e + \bar{\rho} \quad (3)$$

式中: ρ'_e 为脱冰后导、地线的等效密度; $\bar{\rho}$ 为脱掉部分冰的等效密度。

脱冰前导、地线运动惯性力可以分解为两部分:

$$\rho_e g = \rho'_e g + \bar{\rho} g \quad (4)$$

由于假定脱冰前后导、地线的惯性力保持不变,脱冰后的惯性力按照式(5)计算。

$$\rho'_e g' = \rho_e g = \rho'_e g + \bar{\rho} g \quad (5)$$

结合式(2)至式(5)可以得到脱冰后的等效重力加速度为

$$g' = \frac{W_1 + W_2}{W_1 + W_2(1-\beta)} g \quad (6)$$

式中, g' 为脱冰后导、地线的等效重力加速度。

2 模型建立

为了研究导线和地线脱冰对杆塔的冲击作用,

采用有限元方法研究不同线路结构、覆冰厚度和脱冰条件下导线脱冰时对绝缘子串挂点的冲击作用。 ± 800 kV 特高压直流线路采用 LGJ-1250/100 六分裂导线,地线为 GJ-150,参数见表 1。

表 1 ±800 kV 六分裂导线和地线参数

电线型号	弹性模量/ MPa	直径/ mm	截面积/ mm ²	自重/ (kg·m ⁻¹)
LGJ-1250/100	65 200	47.85	1 350.03	4.252 3
GJ-150	181 300	16.85	169.40	1.148 4

其中,导线与直线塔连接的悬垂绝缘子串采用 V 型绝缘子串,其肢长为 17.32 m,V 串夹角为 75°,总质量为 5850 kg。导线与耐张塔连接采用双联耐张绝缘子串,长度为 17.32 m,质量为 11 130 kg。地线与直线塔连接的悬垂绝缘子串为 I 型双联悬垂绝缘子串,长度为 1.00 m,重量为 36.40 kg。地线与耐张杆塔连接采用双联耐张绝缘子串,其长度为 6.31 m,重 455.66 kg。

地线为 I 型绝缘子串模型时,导线为 V 型绝缘子串,绝缘子串的弹性模量和泊松比分别取为 2.0×10^5 MPa 和 0.3,采用理想弹塑性模型。绝缘子串的数值模型见图 1 所示。

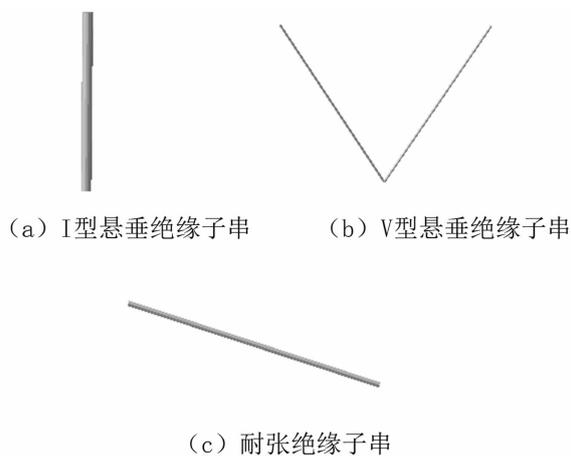


图 1 绝缘子串有限元模型

各线路段有限元模型两端均为耐张绝缘子串,耐张绝缘子串一端与导线连接,另一端为固定约束。V 型悬垂绝缘子串上端的两个悬挂点采用线位移约束,但可以绕 Z 轴转动。导线和绝缘子串均采用空间梁单元模拟。

档距 L 和高差 H 的组合如表 2 所示。覆冰厚度分别为 20 mm、30 mm;脱冰率均取 100%。

± 800 kV 六分裂线路导线安装的初始应力见表 3。

表 2 ±800 kV 六分裂线路档距和高差组合

档距/m	高差/m
200	100,200
400	100,200,300
600	100,200,300
800	100,200,300,400

表 3 ±800 kV 六分裂线路导线安装的初始应力

导线	覆冰厚度/mm	导线应力/MPa			
		$L=200$ m	$L=400$ m	$L=600$ m	$L=800$ m
LGJ-1250/100	20	47.28	44.15	43.44	43.18
	30	40.45	35.96	35.13	34.84

以连续三档脱冰对绝缘子的冲击为研究对象,详细分析了脱冰对 V 型串、I 型串的冲击效应,连续三档导线模型见图 2 所示。

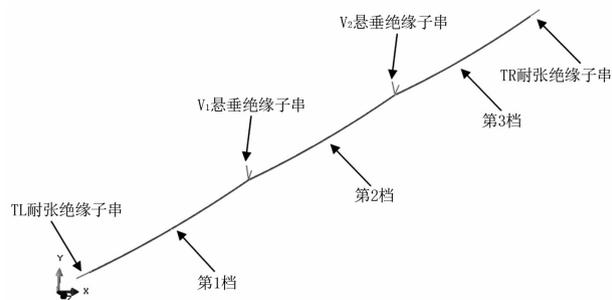


图 2 ±800 kV 连续三档导线模型

3 参数分析

针对建立的有限元模型,研究不同档数、不同档距和高差组合时,各档导线分别脱冰时对悬垂绝缘子串和耐张绝缘子串挂点的冲击效应。通过对导线脱冰过程的数值模拟,对比分析 V 型悬垂绝缘子和耐张绝缘子串挂点在导线脱冰前的反力和导线脱冰过程中的反力,得到脱冰效应的控制因素。

如图 3 所示,导线在 XY 平面内。 F_H 表示作用于绝缘子串挂点水平方向(X 方向)的分力, F_V 表示作用于绝缘子串挂点垂直方向(Y 方向)分力。

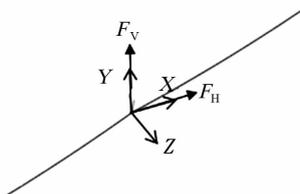


图 3 作用于悬垂绝缘子串和耐张绝缘子串点的反力

3.1 导线脱冰对 V 型串的冲击作用

数值模拟研究表明,当档距为 800 m、高差为

400 m、第 3 档脱冰时,图 2 中 V_2 串的冲击效应最大。 V_2 串水平和垂直冲击力随档距和高差的变化如图 4 所示。

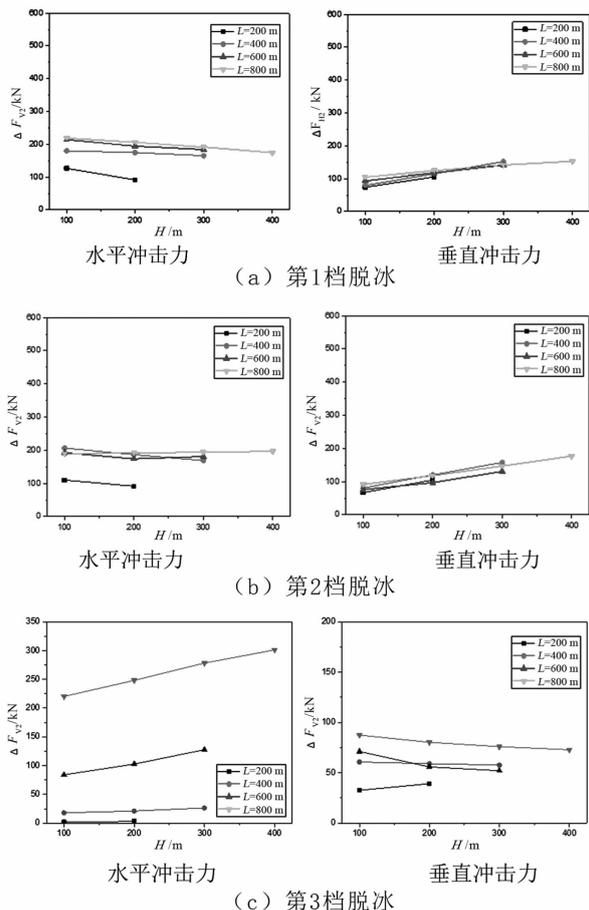
图 4 各档脱冰 V_2 串水平和垂直冲击力随高差的变化

图 4 表明,第 3 档脱冰时对 V 串的水平冲击效应较第 1 档和第 2 档分别脱冰时的大;在第 2 档脱冰时,V 串挂点的垂直冲击效应最大。

3.2 导线脱冰对耐张串的冲击作用

数值模拟研究表明,当档距为 800 m、高差为 400 m、第 3 档脱冰时,作用于图 2 中 TR 耐张串上的水平冲击力最大,为 581.94 kN;此时,作用于 TR 耐张串上的垂直冲击力也最大,为 550.46 kN;合力的最大变化值为 800.34 kN。

各档脱冰对 TR 耐张串水平和垂直冲击力随档距和高差的变化如图 5 所示。

图 5 表明,导线脱冰时,TR 耐张串水平冲击载荷会随着档距的增大而增大,但受高差的影响不大;垂直冲击载荷会随着档距的增大而增大,也随高差的增大而增大。

3.3 导线模态分析

模拟分析了典型三档六分裂导线覆冰模型的固

有频率和模态。模型见图2,模型各档档距为800 m,高差为100 m,覆冰厚度为30 mm。覆冰导线的其他物理参数见表1。

计算得到线路模型的前10阶固有频率见表4。

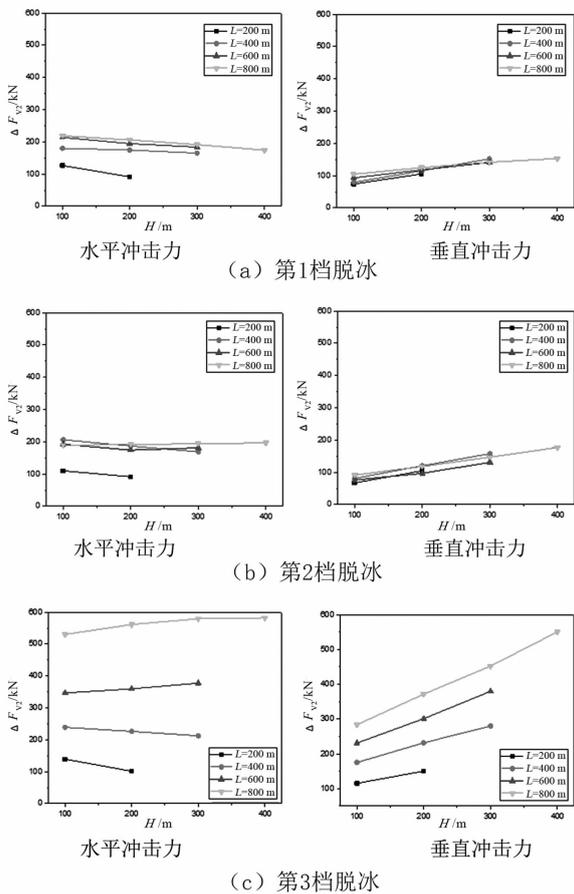


图5 各档脱冰 TR 耐张串水平和垂直冲击力随高差的变化

表4 连续三档低阶固有频率

阶次	频率/Hz	阶次	频率/Hz
1	0.065 48	6	0.126 73
2	0.065 54	7	0.127 22
3	0.066 77	8	0.130 32
4	0.081 62	9	0.130 44
5	0.092 79	10	0.130 94

前4阶模态变形云图如图6所示。

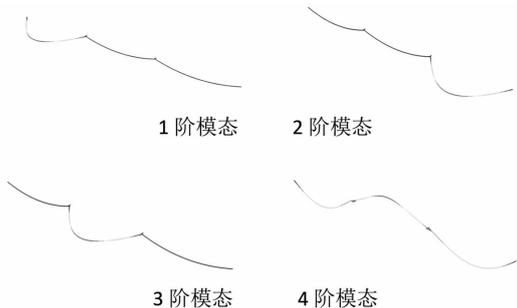


图6 模态云图

图6表明,连续三档导线模型的模态以单档局部水平挠曲变形为主,四阶模态发展为竖向挠曲变形。

分析连续三档六分裂导线脱冰后的振动模式时,对其典型位置(第2档中点)的位移时程响应进行频谱分析。第2档脱冰时其导线中点的垂直位移时程曲线如图7所示,频谱见图8。

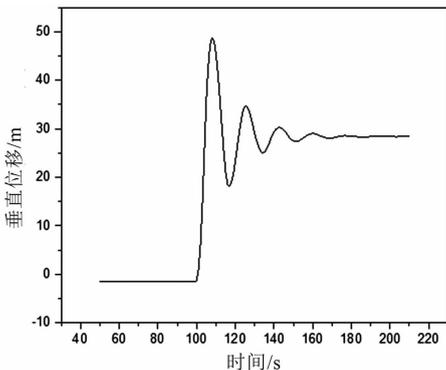


图7 第2档脱冰时导线中点垂直位移时程曲线

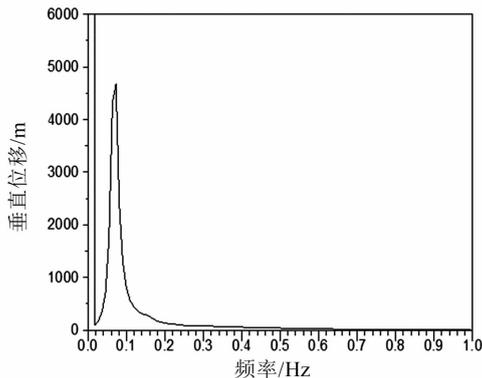


图8 第2档脱冰时导线中点的位移频谱

由图8可知,第2档脱冰时频率为0.068 9 Hz,接近于其三阶固有频率0.066 77 Hz,该固有频率对应的振动模态为单半波,即脱冰时导线的主振动为单半波形。

4 地线脱冰冲击参数分析

输电线路不同结构参数和脱冰参数条件下,地线脱冰对杆塔的冲击作用不同。以连续三档模型进行数值分析,导线V串处的地线采用I串,地线选用GJ-150,覆冰厚度30 mm,脱冰率为100%。不同档距下地线安装的初始应力见表5。

表5 GJ-150 地线不同档距安装的初始应力

档距/m	200	400	600	800
初始应力/MPa	250.1	129.3	113.6	109.0

4.1 地线脱冰对 I 型串的冲击作用

研究表明:当档距为 800 m、第 2 档地线脱冰时,地线 I 串的水平冲击效应最大,图 2 中 V_2 串处地线绝缘子 I_2 串上的最大水平冲击力为 87.87 kN;当档距 800 m、高差为 400 m、第 2 档脱冰时,I 串的垂直冲击效应最大, I_2 串上的最大垂直冲击力为 64.16 kN。

各档脱冰时 I_2 串垂直冲击力随档距和高差的变化如图 9 所示。

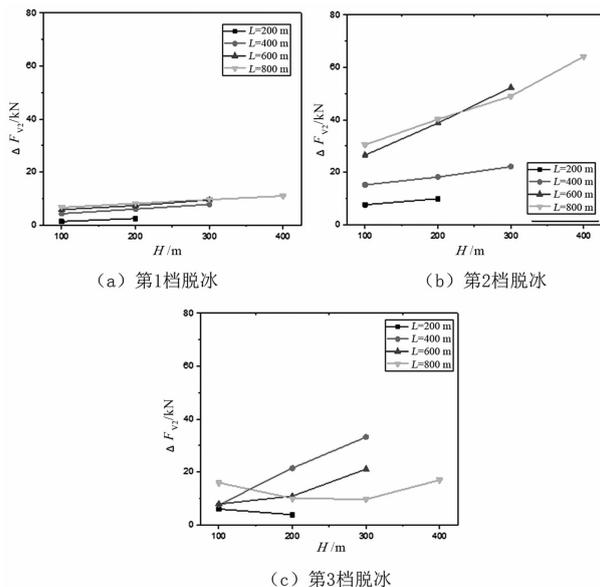


图 9 各档脱冰 I_2 串垂直冲击力随高差的变化

图 9 表明,不同档距条件下,高差越大, I_2 串垂直冲击力就越大。

4.2 地线脱冰对耐张串的冲击作用

当档距为 800 m、第 3 档脱冰时,图 2 中 TR 耐张串的水平冲击效应最大,其最大水平冲击力为 77.30 kN。当档距为 800 m、高差为 400 m、第 3 档脱冰时,TR 耐张串的垂直冲击效应最大,其最大垂直冲击力为 60.78 kN。

各档脱冰 TR 耐张串垂直冲击力随高差的变化如图 10 所示。

图 10 表明,不同档距条件下,高差越大,TR 耐张串垂直冲击力就越大。

5 结 语

上面基于脱冰计算理论,通过数值模拟方法研究了六分裂导线在档数、档距、高差等复合因素影响

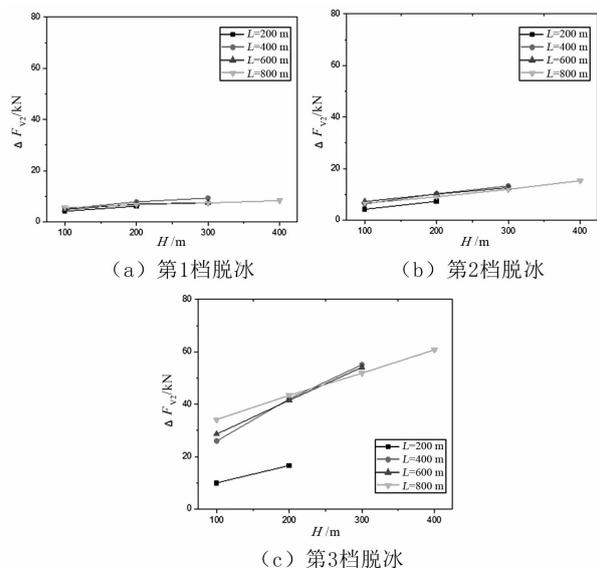


图 10 各档脱冰 TR 耐张串垂直冲击力随高差的变化
下导、地线的脱冰动力响应,分析不同参数条件下导线和地线脱冰对悬垂绝缘子串和耐张绝缘串的冲击效应和最不利控制因素。主要结论如下:

1) 各种档距高差组合中,导、地线档距和高差均最大时,其冲击效应最大。

2) 对于连续三档六分裂线路,悬垂绝缘子串挂点上的水平冲击作用在第 3 档脱冰时对 V_2 串的冲击作用较第 1 档和第 2 档分别脱冰时的大;在第 1 档脱冰时,作用于 V_1 串挂点的垂直冲击效应最大。

3) 对于连续三档六分裂线路,导线脱冰过程中作用于耐张绝缘子串挂点上的冲击效应在最大号档脱冰时对右端(高位端)耐张绝缘子串挂点的冲击最大,水平冲击作用会随着档距的增大而增大,高差的影响较弱;垂直冲击作用会随着档距的增大而增大,也随高差的增大而增大。

4) 地线脱冰过程中作用于耐张绝缘子串挂点上的冲击效应在最大号档脱冰时对右端(高位端)耐张绝缘子串挂点的冲击最大;脱冰时水平冲击作用会随着档距的增大而增大;垂直冲击作用会随着档距的增大而增大,也随高差的增大而增大。

参考文献

- [1] 许俊,郭耀杰,曹珂,等. 考虑多档导线及绝缘子串影响的覆冰及脱冰输电导线找形分析[J]. 电工技术学报, 2015(13):87-91.
- [2] 姚陈果,张需方,张磊,等. 架空输电塔-线体系导线

- 风振对脱冰的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 381-387.
- [3] 王璋奇, 齐立忠, 杨文刚, 等. 集中质量法模拟覆冰在架空线脱冰动张力实验中的适用性研究[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1982-1988.
- [4] 陈勇, 胡伟, 王黎明, 等. 覆冰导线脱冰跳跃特性研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 115-121.
- [5] 韩军科, 杨靖波, 杨风利, 等. 超/特高压同塔多回输电线路脱冰跳跃动力响应分析[J]. 电网技术, 2012(9): 61-67.
- [6] 杨风利, 杨靖波, 李正, 等. 覆冰输电线路脱冰跳跃及抑制方法研究[J]. 振动与冲击, 2010(5): 20-25.
- [7] 尹鹏, 李黎, 张行. 输电线路脱冰跳跃反应控制研究[J]. 电网与清洁能源, 2008, 24(3): 3-7.
- [8] 架空输电线路杆塔结构设计技术规定: DL/T 5154—2012[S]. 北京: 中国计划出版社, 2012.
- [9] 110 kV ~ 750 kV 架空输电线路设计规范: GB 50545—2010[S]. 北京: 中国计划出版社, 2010.
- [10] 重覆冰架空输电线路设计技术规程: DL/T 5440—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.

作者简介:

刘翔云(1978), 女, 学士, 高级工程师, 从事输电线路结构设计工作。

(收稿日期: 2020-11-27)

(上接第28页)

- [6] 宋新立, 吴小辰, 刘文焯, 等. PSD-BPA 暂态稳定程序中的新直流输电准稳态模型[J]. 电网技术, 2010, 34(1): 62-67.
- [7] 胡涛, 刘翀, 班连庚, 等. 藏中电网 SVC 控制策略实时仿真及参数优化[J]. 电网技术, 2014, 38(4): 1001-1007.
- [8] 光伏电站接入电力系统技术规定: GB/T 19964—2012[S]. 北京: 中国电力出版社, 2012.
- [9] Ren Chao, Xu Yan, Zhang Yuchen. Post-disturbance Transient Stability Assessment of Power Systems Towards Optimal Accuracy-speed Tradeoff[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(1): 19.
- [10] 汪闻涛. 特高压交直流联络线交互作用分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2015.
- [11] 王鹏飞, 张英敏, 李兴源, 等. 基于无功有效短路比的交直流交互影响分析[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(6): 74-78.
- [12] 李兴源. 高压直流输电系统[M]. 北京: 科学出版社, 2010.
- [13] Liu Yan, Chen Zhe. A Flexible Power Control Method of VSC-HVDC Link for the Enhancement of Effective Short-circuit Ratio in A Hybrid Multi-Infeed HVDC System[J]. IEEE Transactions on powerSystems, 2013, 28(2): 1568-1581.
- [14] 郭春义, 蒋雯, 郑安然, 等. 弱交流系统下 STATCOM 对 LCC-HVDC 小干扰稳定裕度的影响研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5679-5686.
- [15] 景柳铭, 王宾, 董新洲, 等. 高压直流输电系统连续换相失败研究综述[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(9): 116-123.
- [16] 孟庆强, 刘泽洪, 洪乐荣, 等. 一种抑制连续换相失败的非线性 VDCOL 控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 119-127.
- [17] 王卉. 交直流混联电网换相失败及对交流保护的影响研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2019.
- [18] 电力系统安全稳定导则: DL 755—2001[S]. 北京: 中国电力出版社, 2001.
- [19] 刘建, 李兴源, 吴冲, 等. HVDC 系统换相失败的临界指标[J]. 电网技术, 2009, 33(8): 8-12.
- [20] 杨浩, 张保会, 宋云亭, 等. 解列后孤岛频率电压相互作用仿真及机理探讨[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3503-3508.
- [21] 吕思卓, 郑超, 彭利, 等. 孤岛电网频率电压耦合机理及控制措施[J]. 中国电力, 2018, 51(11): 53-60.
- [22] Mostafa F, Claudio A C, Kankar B. Frequency Control in Isolated/Islanded Microgrids Through Voltage Regulation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(3): 1185-1194.
- [23] 何礼鹏. 电磁环网功率循环对电网运行的影响分析[J]. 云南电力技术, 2016, 44(5): 4-6.
- [24] 李刚, 刘晓瑞, 孙建波. 超高压电磁环网的特点与案例分析[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 147-153.

作者简介:

凌楠(1997), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统稳定分析、高压直流输电;

曾昊(1995), 男, 硕士研究生, 研究方向为高压直流输电;

格桑晋美(1985), 男, 本科, 工程师, 研究方向为电力系统运行与控制。

(收稿日期: 2020-11-27)