

220 kV 电缆操作过电压影响因素研究

缪林鑫¹, 叶 剑², 宋天立¹, 黄阮明¹, 曹 娜²

(1. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海 200233; 2. 上海电力设计院有限公司, 上海 200025)

摘 要: 220 kV 电缆在城市电网中得到广泛应用。高电压、长距离电缆对地电容很大, 操作过电压水平较高, 线路运行对设备绝缘配合提出了更高要求, 对电网安全稳定运行产生较大影响。文中基于典型城市电网结构和电缆参数, 通过 220 kV 电缆操作过电压的仿真计算, 并提出限制操作过电压的措施建议。

关键词: 电缆; 操作过电压; 城市电网; 影响因素

中图分类号: TM 86 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-348X(2025)05-0030-06

0 引言

城市土地资源宝贵, 输电走廊稀缺, 在土地利用方面必须做到节约资源、统筹利用, 同时还应兼顾城市景观、环境保护等方面的要求, 因此, 220 kV 电缆在城市电网规划运行中得到广泛应用。高电压、长距离电缆线路的对地电容和充电功率很大, 实际应用中易引起电网运行电压升高, 对城市电网的安全稳定运行产生影响, 对设备绝缘配合水平提出了更高的要求。

影响交流电气装置绝缘的过电压主要有工频过电压、操作过电压和雷电过电压等^[1]。电缆线路一般敷设于排管、电缆沟或隧道内, 不易遭受雷电直击, 且其对地电容较大, 可以有效减缓雷电波的陡度。长电缆线路由于其电容效应, 可能引起工频过电压升高, 并在此基础上可能出现很高的操作过电压。国内曾发生多起因操作过电压引起 220 kV 电缆线路故障的情况。文献[2]研究了北京地区某 220 kV 电缆线路电缆接头击穿故障; 文献[3]研究了浙江电网某 220 kV 电缆线路电缆接头击穿故障。因此, 文中主要讨论操作过电压, 考虑到对于 220 kV 电缆线路, 一般空载线路合闸过电压和空载线路分闸重燃过电压最为严重, 文中只讨论这两种操作过电压形式。

操作过电压产生的机理较为复杂, 影响因素也较

多, 文中基于典型城市电网结构和线路参数, 采用 ATP-EMTP 程序进行系统建模和操作过电压仿真计算, 研究影响 220 kV 电缆操作过电压水平的因素, 包括避雷器配置、系统运行方式、线路高压并联电抗器配置等, 并提出限制操作过电压的措施建议。

1 操作过电压下的绝缘配合原则

绝缘配合应根据电网中出现的各种电压(工作电压和过电压)和保护装置的特性来确定, 设备的绝缘水平应全面考虑造价、维修费用以及故障损失三个方面, 力求达到安全、经济和高质量供电的目的^[4]。不同的系统因结构不同以及在不同的发展阶段, 可以有不同的绝缘水平。

对于非自恢复绝缘系统, 其绝缘配合方法采用确定性法^[5]。220 kV 系统相对地操作过电压绝缘水平为 3.0 p.u., 相间操作过电压水平一般为相对地操作过电压的 1.3 ~ 1.4 倍^[1, 6]。当采用金属氧化物避雷器限制操作过电压时, 相对地及相间计算用最大操作过电压的标幺值需经研究确定。

文中采用以下绝缘水平: 相对地操作过电压不超过 3.0 p.u.; 相间操作过电压不超过 4.1 p.u.; 断口操作过电压不超过 4.1 p.u.。考虑到 220 kV 电缆线路一般采用单芯电缆, 每相均有独立的绝缘屏蔽, 不存在相间绝缘问题, 因此不校验相间操作过电压。

收稿日期: 2025-08-30

作者简介: 缪林鑫(1996), 女, 硕士, 工程师, 从事电力系统规划与设计工作。

2 基础方式操作过电压计算

2.1 计算条件

1) 采用 ATP-EMTP 程序进行电网建模和操作过电压仿真计算。

2) 通过对典型的电力系统进行建模仿真,建模过程中保留与研究对象关系密切的输变电设备,其余电网则用其等值电源和等值电抗来等效。典型电网示意图如图 1 所示。

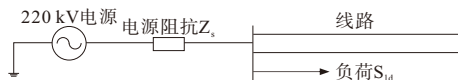


图 1 220 kV 系统等值电路图

大、小方式下各设备参数如表 1 所示。

表 1 典型电网大、小方式电源与负荷参数

设备	参数	
	大方式	小方式
220 kV 电源	电压 225 kV	电压 230 kV
220 kV 短路电流	40 kA	20 kA
电源阻抗 Z_e	$(0.221+j3.31) \Omega$	$(0.442+j6.62) \Omega$

注:电源阻抗的零序值与正序值相同。

基础方式采用小方式。

3) 考虑 220 kV 电缆采用 2 500 mm² 截面交联电缆,品字形紧贴布置于综合管廊中。电缆截面图如图 2 所示,其相关参数及说明如表 2 所示。

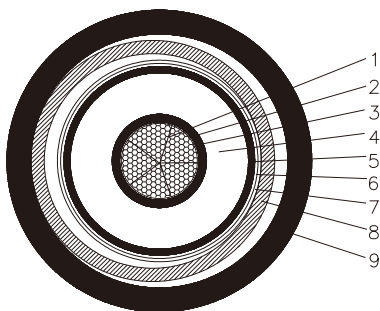


图 2 2 500 mm² 截面交联电缆结构示意图

表 2 2 500 mm² 截面交联电缆结构示意图相关参数

结构参数	厚度	外径
1—导体		60.8(+0.8,-0.5)
2—内半导电包带	0.5+0.24	61.3
3—导体屏蔽层	2.0	65.3
4—XLPE 绝缘	24.0	113.3(+1.5,-1.5)
5—绝缘屏蔽层	1.0	115.5
6—半导电缓冲阻水带	4.0	119.2
7—半导电缓冲阻水带	4.0	124.7
8—挤包皱纹铝护套	2.8	144.7
9—黑色阻燃 PE 外护套	5.0+0.3	155.3(+2.0,-2.0)

ATP-EMTP 电缆建模采用分段 π 模型^[7],每段电缆长度 1 km。因长度在 10 km 以下的电缆线路容升效应和过电压问题不明显,根据城市电网实际,文中针对长

度在 10~40 km 的电缆线路进行操作过电压仿真计算。

4) 基础方式考虑变电站母线、电缆线路首末两端均配置避雷器,避雷器型号采用 Y10W-204/532,母线避雷器和线路避雷器型号相同,典型参数如表 3 所示。

表 3 避雷器典型参数

参数名称	数值
额定电压/kV	204
持续运行电压/kV	159
直流 1 mA 参考电压/kV	296
标称放电电流/kA	10
雷电冲击残压/kV	532

2.2 空载线路合闸过电压

考虑断路器随机合闸 100 次,取每次合闸三相中最高过电压值进行统计,记录统计过电压的最高值。不同长度(2 500 mm² 截面)电缆的合闸空载线路过电压计算结果如表 4 所示。

表 4 220 kV 电缆线路空载合闸过电压

电缆长度/km	线路(相-地)/p.u.			
	母线	首端	中间	末端
10	1.78	1.78	1.82	1.86
15	1.77	1.77	1.83	1.87
20	1.78	1.78	1.83	1.87
30	1.74	1.74	1.83	1.90
40	1.73	1.73	1.83	1.90

母线上的合闸操作过电压和线路首端相同,线路首端、中间和末端的过电压值呈现逐步增加的趋势,最大值出现在线路末端。最大合闸操作过电压值为 1.90 p.u.,低于 3.0 p.u. 的控制值,并具有很大裕度。电缆长度为 40 km 时,在某一时刻空载合闸时线路首端、中间和末端的过电压波形如图 3 所示。

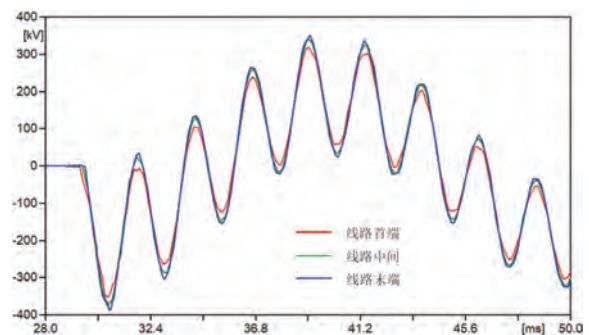


图 3 电缆长度为 40 km 时空载合闸过电压曲线

2.3 空载线路分闸重燃过电压

如断路器不发生重燃,空载线路分闸时,系统中不会出现操作过电压;但在考虑断路器重燃的情况下,系统中可能出现很高的操作过电压。因目前断路器的性能较好,发生多次重燃的可能性较小,文中仅讨论断路器一次重燃的操作过电压情况。在仿真计算中,假设在断路器一相在断口电压最大时发生重

燃,并在该相电流过零点熄弧。

不同长度(2 500 mm²截面)电缆的空载线路分闸重燃过电压计算结果如表5所示。

表5 220 kV 电缆线路分闸重燃过电压

电缆长度/km	断口	线路(相-地)/p.u.			
		母线	首端	中间	末端
10	2.61	2.02	2.02	2.12	2.09
15	2.62	2.03	2.03	2.16	2.12
20	2.63	2.03	2.03	2.20	2.15
30	2.65	2.04	2.04	2.25	2.18
40	2.66	2.04	2.04	2.26	2.17

母线上的分闸重燃操作过电压和线路首端相同,线路沿线的过电压数值呈现中间最高,末端其次,首端最低的趋势,断路器重燃相断口的过电压水平明显高于线路相地过电压。总体而言,操作过电压水平随电缆长度增加而提高,线路上最大过电压为2.26 p.u.,重燃相断口最大过电压为2.66 p.u.,均能控制在规程规定的范围内,并具有较大裕度。电缆长度为40 km时,线路中间和断路器重燃相断口电压波形如图4所示。

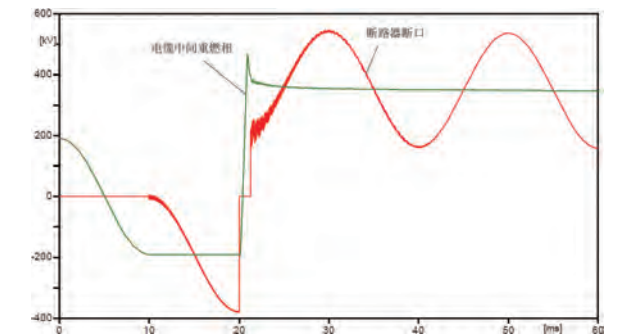


图4 电缆长度为40 km时分闸重燃过电压曲线

3 操作过电压影响因素研究

操作过电压产生的机理较为复杂,影响操作过电压的因素也很多,文中讨论避雷器配置、系统运行方式、线路高压并联电抗器配置以及运行电压水平、电缆排列方式等因素的影响。因空载线路分闸重燃过电压水平高于空载线路合闸过电压,仅对空载线路分闸重燃过电压的影响因素作计算分析。

3.1 避雷器配置

基础方式考虑在变电站母线、电缆线路首末两端均配置避雷器,本节考虑在变电站母线配置避雷器,在电缆线路仅首端配置避雷器和首末两端均不配置避雷器两种方式下,计算分析避雷器配置方式对操作过电压的影响。

3.1.1 电缆线路仅首端配置避雷器

电缆线路仅首端配置避雷器的分闸重燃过电压如表6所示。

表6 220 kV 电缆线路仅首端配置避雷器分闸重燃过电压

电缆长度/km	断口	线路(相-地)/p.u.			
		母线	首端	中间	末端
10	2.63	2.09	2.09	2.25	2.34
15	2.65	2.10	2.11	2.30	2.41
20	2.65	2.11	2.15	2.37	2.51
30	2.66	2.08	2.17	2.39	2.60
40	2.66	2.10	2.17	2.50	2.60

与电缆线路首末两端均配置避雷器时最大过电压出现在线路中间不同,在仅线路首端配置避雷器的情况下,最大过电压出现在线路末端。较之线路首末两端均配置避雷器的情况,线路最大过电压值明显偏高,断路器重燃相断口过电压较为接近。电缆长度为40 km时,电缆线路仅首端配置避雷器情况下,线路末端和断路器重燃相断口电压波形如图5所示。

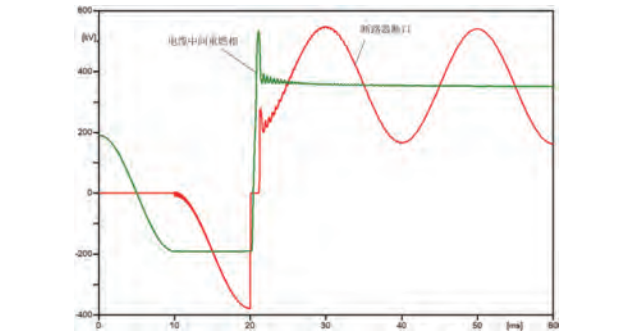


图5 电缆长度为40 km时仅首端配置避雷器分闸重燃过电压曲线

3.1.2 电缆线路首末两端均不配置避雷器

电缆线路首末两端均不配置避雷器的分闸重燃过电压如表7所示。

表7 220 kV 电缆线路不配置避雷器分闸重燃过电压

电缆长度/km	断口	线路(相-地)/p.u.			
		母线	首端	中间	末端
10	3.25	2.12	2.39	2.30	2.39
15	3.28	2.15	2.44	2.34	2.43
20	3.42	2.14	2.53	2.42	2.54
30	3.40	2.15	2.63	2.41	2.63
40	3.44	2.16	2.60	2.53	2.60

在电缆线路首末两端均不配置避雷器的情况下,线路首端和末端的过电压值大于线路中间,首端和末端基本相同。线路最大过电压值略高于仅首端配置避雷器的情况,但断路器重燃相断口过电压明显高于首末两端均配置避雷器和仅首端配置避雷器的情况。电缆长度为40 km时,电缆线路不配置避雷器情况下,线路末端和断路器重燃相断口电压波形如图6所示。

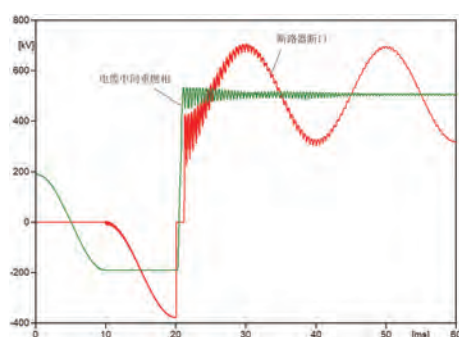


图6 电缆长度为40 km时线路不配置避雷器分闸重燃过电压曲线

3.1.3 不同避雷器配置方式结果比较

不同避雷器配置方式下,线路相地分闸重燃过电压比较如图7所示。其中,首末端均配置避雷器的情况采用线路中间过电压,其他两种情况采用线路末端过电压。

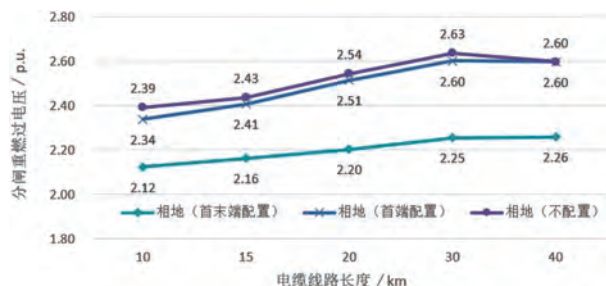


图7 各避雷器配置方式下线路相地分闸重燃过电压计算结果比较

在电缆线路首末两端均配置避雷器的情况下,线路相地过电压明显低于仅首端配置避雷器和首末两端均不配置避雷器。当电缆线路长度为40 km时,为2.26 p.u.,电缆线路仅首端配置避雷器时的过电压略低于首末两端均不配置避雷器的情况;当电缆线路长度为30 km时,两种方式下的过电压水平分别为2.60 p.u.和2.63 p.u.,与3.0 p.u.的控制值相比,裕度较小。

总体来看,线路配置避雷器对控制分闸重燃过电压作用明显;但对于长度不超过40 km的220 kV电缆线路,在电源侧母线配置避雷器的情况下,即使线路不配置避雷器,线路分闸重燃过电压水平也不会超过规程要求。

3.2 系统运行方式

基础方式按系统运行小方式下母线不带负荷情况下进行计算,本节考虑在系统运行大方式和小方式母线带其他出线两种方式下,计算分析系统运行方式对操作过电压的影响。

3.2.1 大方式

大方式下,电缆线路分闸重燃过电压如表8所示。

表8 大方式下220 kV电缆线路分闸重燃过电压

电缆长度/km	断口	线路(相-地)/p.u.			
		母线	首端	中间	末端
10	2.66	2.02	2.02	2.19	2.14
15	2.71	2.04	2.04	2.25	2.17
20	2.69	2.04	2.04	2.25	2.17
30	2.69	2.00	2.00	2.35	2.23
40	2.72	1.97	1.97	2.39	2.26

与小方式相似,大方式下随电缆线路长度增加,分闸重燃操作过电压值呈上升趋势,母线上的过电压和线路首端相同,线路沿线的过电压值也呈现中间最高、末端其次、首端最低的趋势;线路沿线的过电压值高于小方式,高出0.04~0.13 p.u.,电缆线路长度为40 km时值最大,达到2.39 p.u.,能够控制在3.0 p.u.的控制值以内。

3.2.2 小方式变电站母线带其他出线

在小方式基础上,考虑系统侧变电站母线带其他出线,送出潮流约200 MW。计算结果表明,电缆线路过电压变化趋势与小方式一致,数值与小方式基本相同或略小。

因此,大方式的分闸重燃过电压水平高于小方式,小方式变电站带出线的过电压水平与小方式基本相同。

3.3 并联电抗器

线路侧有并联电抗器时,当断路器的触头断弧后,线路上残余电压不能维持恒定。由于并联电抗器的存在,线路电容与电抗器电感组成振荡回路,线路电压振荡频率接近工频,可使恢复电压上升速率大为下降,可以避免重燃或者降低重燃后的过电压幅值^[8]。在电缆线路长度为40 km,线路首端配置并联电抗器,补偿度为40%时,断路器断口电压曲线及与不配置并联电抗器的比较如图8所示。

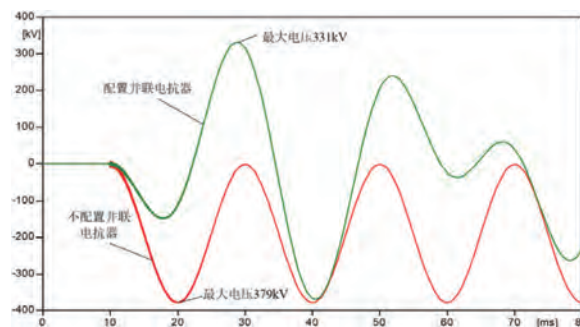


图8 40 km电缆线路配置并联电抗器前后断路器分闸后断口过电压比较

在电缆线路配置并联电抗器后,断路器分闸后断口电压上升速率和最大过电压值均明显降低。

基础方式不考虑配置线路并联电抗器,本节考虑在线路首端配置并联电抗器和首末两端均配置并

电抗器两种方式下,计算分析并联电抗器对操作过电压的影响。仿真时将断口电压的第一个极值点作为断路器单相重燃的时间点。

3.3.1 线路首端配置并联电抗器

在线路首端配置并联电抗器,补偿度分别取80%、60%和40%,分闸重燃过电压如表9所示。

表9 220 kV 电缆线路首端配置电抗器不同补偿度下分闸重燃过电压

补偿度	电缆长度/km	断口	线路(相-地)/p.u.			
			母线	首端	中间	末端
80%	10	2.01	1.07	1.11	1.11	1.11
	15	2.00	1.09	1.11	1.10	1.11
	20	2.01	1.16	1.12	1.12	1.12
	30	2.01	1.16	1.13	1.12	1.14
	40	2.00	1.06	1.13	1.12	1.14
60%	10	2.20	1.65	1.39	1.38	1.39
	15	2.20	1.15	1.39	1.38	1.39
	20	2.20	1.57	1.39	1.39	1.39
	30	2.20	1.25	1.42	1.39	1.42
	40	2.19	1.37	1.43	1.41	1.43
40%	10	2.50	1.71	1.73	1.72	1.73
	15	2.50	1.73	1.74	1.72	1.74
	20	2.50	1.50	1.73	1.73	1.73
	30	2.49	1.71	1.76	1.74	1.76
	40	2.49	1.74	1.77	1.74	1.78

配置并联电抗器后,电缆线路分闸重燃过电压水平明显下降,且电抗器补偿度越高,过电压水平越低。电缆线路过电压随线路长度不同的变化很小,首端和末端过电压值几乎完全一致,线路中间的过电压值略低于首末端;母线过电压值随着线路长度变化的规律不明显,有些长度的过电压值高于线路,有些则低于线路,整体与线路过电压相差不大,基本在0.2 p.u. 以内。断口过电压值也明显下降,在补偿度一定的情况下,断路器重燃相断口过电压水平基本不随线路长度不同而变化。

在并联电抗器不同补偿度情况下的线路相地过电压值与不配置并联电抗器时的比较如图9所示,其中线路相地过电压均取线路末端值。

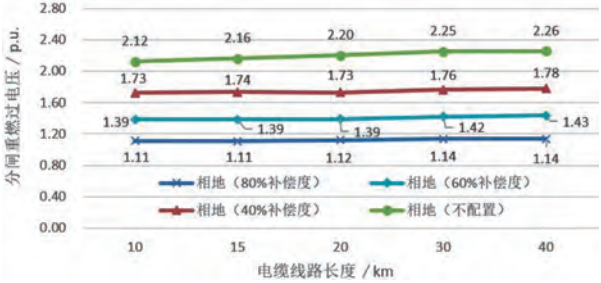


图9 不同电抗器补偿度情况下的线路分闸重燃过电压计算结果比较

配置并联电抗器对抑制操作过电压效果非常明显,即使考虑断路器重燃,各长度情况下的线路过电压值也均在1.80 p.u. 以内,在补偿度为80%时不超过

1.20 p.u.,补偿度越高各过电压值越小。

3.3.2 线路首末两端均配置并联电抗器

在补偿度相同的情况下,在线路首末两端配置并联电抗器与仅在线路首端配置并联电抗器的过电压水平非常接近,线路过电压值的变化规律也基本一致,断口过电压值略高于仅首端配置并联电抗器的情况。

由于线路配置并联电抗器,断路器分闸后恢复电压上升速率大为下降,发生重燃的概率很低,即使发生重燃,过电压幅值也大幅降低。不论在线路首端配置并联电抗器还是首末两端均配置并联电抗器,均能有效降低线路分闸重燃操作过电压水平,且补偿度越高降低效果越明显。

3.4 其他影响因素

3.4.1 运行电压水平

在电源电压由基础方式的230 kV提高至242 kV,即提高5%的情况下,各电缆长度的分闸重燃线路相地过电压值提高约1%~3%,断口过电压值提高约2%,总体影响较小。

3.4.2 电缆排列方式

基础方式电缆采用综合管廊品字形排列,考虑电缆采用综合管廊水平排列和竖直排列两种情况,分别计算分闸重燃过电压。计算结果表明,电缆排列方式对分闸重燃过电压影响很小。

4 结语

4.1 结论

- 1) 根据相关标准要求,220 kV 电缆线路可采用以下绝缘水平:相对地操作过电压不超过3.0 p.u.;断口操作过电压不超过4.1 p.u.,相间操作过电压不作要求。
- 2) 220 kV 电缆线路操作过电压水平总体上随线路长度增加呈现增长的趋势,但具体过电压值的变化规律不明显。对于长度不超过40 km的220 kV 电缆线路,在电源侧母线配置避雷器的情况下,空载线路合闸过电压和分闸重燃过电压水平均能控制在3.0 p.u. 的范围内。
- 3) 避雷器配置对操作过电压影响较大。在电缆线路首末两端均配置避雷器的情况下,线路相地过电压明显低于仅首端配置避雷器和首末两端均不配置避雷器的情况,线路相地过电压最大相差0.38 p.u.。
- 4) 系统运行方式对操作过电压有一定影响,大

方式下线路分闸重燃相地过电压值较小方式高出0.04~0.13 p.u.,小方式变电站带出线的过电压水平与小方式基本相同。

5) 线路配置并联电抗器能够有效降低线路分闸重燃操作过电压水平,且补偿度越高降低效果越明显。在补偿度相同的情况下,线路首端配置并联电抗器与首末两端均配置并联电抗器效果接近。在并联电抗器补偿度为80%的情况下,可降低线路相地分闸重燃操作过电压约1.01~1.12 p.u。

6) 系统运行电压对操作过电压影响较小。电源电压提高5%,线路相地过电压值提高约1%~3%;电缆排列方式对分闸重燃过电压值影响很小。

4.2 建议

1) 为控制线路操作过电压水平,保证设备运行绝缘裕度,考虑到国内曾发生多起因操作过电压导致220 kV电缆故障的实际案例,建议220 kV电缆线路电源侧母线和电缆线路首末两端均配置避雷器。

2) 从抑制操作过电压角度,220 kV电缆线路没有配置并联电抗器的要求,须结合系统无功平衡决定是否配置并联电抗器。

3) 操作过电压产生机理较为复杂,影响因素也

很多,不确定性较高,在实际工程应用中应根据具体条件开展详细分析计算。

参考文献:

- [1] 住房和城乡建设部,国家质量监督检验检疫总局.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].北京:中国计划出版社,2014.
- [2] 齐伟强,任志刚,陈平,等.220 kV城市长电缆芯线及护层中操作过电压研究[J].电瓷避雷器,2020(06):95-101,108.
- [3] 郑一鸣,刘石,刘浩军,等.220 kV电力电缆线路合闸操作过电压分析[J].高压电器,2020(04):153-158.
- [4] 解广润.电力系统过电压[M].北京:中国电力出版社,2018.
- [5] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化管理委员会.绝缘配合 第1部分:定义、原则和规则:GB 311.1—2012[S].北京:中国标准出版社,2012.
- [6] 电力工业部.交流电气装置的过电压保护和绝缘配合:DL/T 620—1997[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [7] 金作林,陈小月,文习山,等.海上风电场220 kV海底长电缆送出线工频及操作过电压研究[J].电瓷避雷器,2020(01):47-53.
- [8] 水利电力部西北电力设计院.电力工程电气设计手册(电气一次部分)[M].北京:中国电力出版社,1989.

(上接25页)

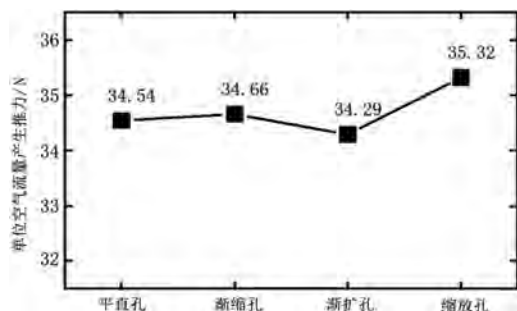


图10 不同气孔形状工况下气膜推力统计数据

4 结语

气垫带式输送机采用不同气孔形状时,气孔和气膜内流场与压力分布出现差异,会进一步影响气垫带式输送机整体性能。文中实施了四个具有不同气孔形状工况的数值模拟,采用相同的入口条件和出口条件,获得如下结论:

- 1) 气孔形状对气膜内速度值影响较小,采用缩放孔时,气垫带式输送机空气流量达到最大。
- 2) 在缩放孔工况下,气膜内平均压力和最高压

力值均达到最大,压力分布不均匀度最低。

3) 缩放孔应用于气垫带式输送机时,单位质量流量的空气在输送皮带壁面处施加的推力达到最大,此时,气垫带式输送机综合性能达到最优。

参考文献:

- [1] 张克亮.基于分布式光纤的矿用带式输送机温度监测系统设计与应用[J].机械制造与自动化,2023,52(02):228-232.
- [2] 习妍锋.气垫带式输送机标准节动态特性仿真分析与设计[D].宜昌:三峡大学,2023.
- [3] 郝志杰,姚艳萍,徐成祥.基于EDEM的气垫机中间卸料装置设计[J].太原科技大学学报,2023,44(06):551-554.
- [4] 杨秀峰.长距离气垫带式输送机关键技术研究[D].太原:太原科技大学,2022.
- [5] 杨方明.气垫带式输送机支撑机理与布孔方式研究[D].沈阳:东北大学,2022.
- [6] 徐成祥.气垫带式输送机气室结构改进及仿真分析[D].太原:太原科技大学,2022.
- [7] 田利强,寇子明,吴娟,等.气垫带式输送机的气垫流场特性研究[J].机电工程,2022,39(07):1004-1009,1016.