

换流站滤波电抗器暂态过电压下 绝缘水平分析及配置方法

罗东辉¹, 卢金奎², 付峥争¹, 邱中华³, 张宗喜¹, 范松海¹

(1. 国网四川省电力公司电力科学研究院, 四川 成都 610041; 2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610041; 3. 国网四川省电力公司超高压分公司, 四川 成都 610041)

摘要: 直流滤波电抗器是换流站关键设备, 其绝缘配置对换流站稳定运行至关重要, 一旦绝缘发生对地闪络, 可能引发供电故障甚至直流线路闭锁等问题。开展直流换流站滤波电抗器绝缘水平分析及配置方法研究可以预警、消除绝缘隐患, 提高线路运行稳定性。针对工程实际换流站案例, 研究换流站滤波电抗器绝缘裕度分析方法, 并开展仿真计算; 分析得到关键风险点的过电压水平, 并与绝缘水平对比分析, 提出不同安全裕度下的工程实际处理方案。结果分析认为, 在运换流站直流滤波电抗器绝缘关键风险点处的绝缘裕度低于50%时, 应重点关注并采取治理措施, 进而保证运行安全。

关键词: 滤波电抗器; 过电压; 绝缘配置; 工程应用

中图分类号: TM 477 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2024)03-0061-04

DOI: 10.16527/j.issn.1003-6954.20240311

Analysis and Configuration Method for Insulation Level of Filter Reactor in Converter Station under Transient Overvoltage

LUO Donghui¹, LU Jinkui², FU Zhengzheng¹, QIU Zhonghua³, ZHANG Zongxi¹, FAN Songhai¹

(1. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610041, Sichuan, China; 3. State Grid Sichuan Extra High Voltage Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: DC filter reactor is a key equipment in converter station, and its insulation configuration is crucial for the stable operation. Once the insulation flashover occurs to the ground, it may cause power supply faults or even DC line blocking issues. The research for insulation level analysis and configuration method of filter reactors in DC converter stations can provide early warning, eliminate insulation hazards, and improve the stability of line operation. Aiming at the actual cases of converter station, the analysis method for insulation margin of filter reactor in converter station is studied, and the simulation calculations are carried out. The overvoltage levels of key risk points are obtained through analysis, and are compared and verified with insulation levels, so the practical engineering treatment plans under different safety margins are proposed. The result analysis suggests that when the insulation margin at key risk points of DC filter reactor insulation in conversion station which is in operation is less than 50%, special attention should be paid and control measures should be taken to ensure the safe operation.

Key words: filter reactor; overvoltage; insulation configuration; engineering application

0 引言

直流滤波场是换流站的核心环节, 其安全、稳定运行是保障直流输电工程正常工作的必要条件。在

滤波器组中, 滤波电抗器至关重要, 它不仅要发挥过滤谐波的作用, 还要承受暂态过电压, 因此其绝缘配置就关系到直流系统的稳定^[1-4]。

直流滤波器中包括许多电感及电容等元件。在线路暂态过电压作用下, 各滤波电抗器上可能会因

谐振产生幅值更高的暂态过电压^[5-8]。而在多个电抗器连接部位可能存在绝缘保护薄弱环节,在过电压幅值较高时无法有效绝缘,从而发生闪络故障。

目前,针对直接地极线路及换流站内过电压的计算与分析研究较多,主要集中在重要设备及场站进出节点处的过电压水平^[9-11],但在实际工程运行中,上述重要位置的绝缘配置及保护措施相对充分;而如直流滤波电抗器之间连接点位等位置的过电压分析较少,缺少相应绝缘裕度校核的分析依据。运维数据表明,2020年至2023年间,国内运行的多所换流站发生过不同程度的直流滤波电抗器对地绝缘闪络故障,且多发生于电抗器之间连接点绝缘保护薄弱位置。因此,有必要针对直流滤波器组开展过电压风险点位分析及绝缘校核方法研究。下面基于工程实际,提出一种换流站直流滤波器组绝缘水平分析方法,并进行仿真计算分析与工程应用。

1 滤波电抗器对地绝缘水平分析方法

1.1 直流滤波器绝缘水平分析原则

换流站直流滤波器组通常包含多个滤波电容器、滤波电抗器、电阻以及避雷器等元件。图1所示为某±800 kV换流站直流滤波场接线图,常见滤波电抗器组可能会有2~3级组成,并与避雷器并联。滤波器中的避雷器用于保护滤波器元件免受谐振、放电和投切等造成的过电压冲击。直流滤波器绝缘及保护配置的选择包括选择合适的避雷器、滤波器元件暂态电流以及绝缘水平。

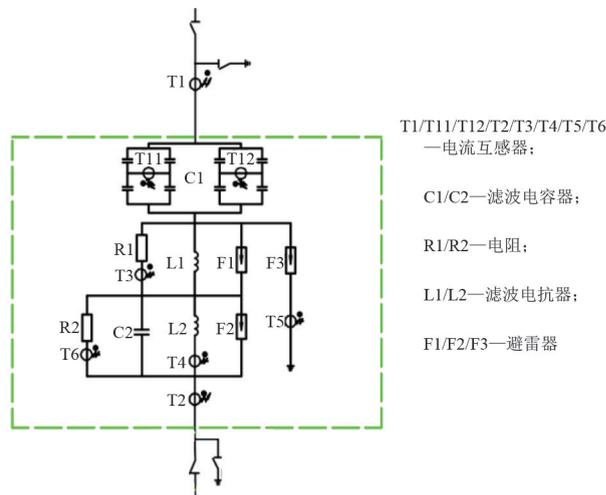


图1 典型直流滤波场接线

分析过电压水平及校核绝缘裕度时,应确认滤

波器组各元件实际参数,并基于实际参数搭建仿真计算模型开展暂态定值计算。仿真过程中为考虑多种典型故障工况对直流滤波器的影响,需对电抗器保护薄弱点位进行扫频计算,得到关注点产生局部最大过电压的对应频率及此时的最大暂态过电压峰值。最后,在绝缘水平校核及建议时,需根据计算结果对所在点位绝缘配置的工频湿耐受电压或者操作耐受电压以及污秽程度进行综合评估,结合运行经验得出绝缘水平校核建议,并进行参数约束。绝缘裕度的选择应满足标准DL/T 5426—2020《±800 kV高压直流输电系统成套设计规程》要求^[12],该标准中关于绝缘裕度的设计要求如表1所示。

表1 DL/T 5426—2020 绝缘裕度的设计要求 单位:%

设备	陡波	操作
交流开关母线、户外绝缘子及其他常规设备	25	20
交流滤波器元件	25	15
换流阀	15~20	10~15
阀厅设备	25	15~20
直流场(户外)	25	15~20

1.2 直流滤波器绝缘水平分析方法

依据直流滤波器绝缘水平分析原则,提出一种针对滤波电抗器绝缘薄弱点位绝缘水平分析方法。分析技术路线如图2所示,具体步骤如下:

1)资料收集。在计算分析前收集包括电压等级、直流场接线图以及滤波器电容、电感、电阻等各元件参数和避雷器额定电压、伏安特性的特征参数。

2)模型建立。基于所收集的参数资料,搭建仿真计算模型,并对各元件进行参数设定,构建完全等效实际情况的分析模型。

3)薄弱点确定。直流滤波电感器通常由多个电感组成,不同电感的不同位置其绝缘击穿风险不同,需提前确定绝缘风险点位并针对性计算分析。一般将未经避雷器接地保护的电抗器端子作为重点分析点位,如图1中电抗器L1的低压端。

电抗器L1的高压端有避雷器直接接地进行限压保护,且一般为非直接经绝缘支柱对地设计,相对安全;而电抗器L2高压端虽与电抗器L1低压端同电位,但同样一般为非直接经绝缘支柱对地设计。电抗器L2低压端与接地极线路相连,主要受接地极线路过电压,且一定程度受接地极线路上避雷器直接接地保护;而电抗器L1低压端不但无避雷器直接接地限压保护,还可能承受因谐振产生较高过电压,

且该位置直接经绝缘支柱对地,一旦过电压超过绝缘支柱实际绝缘强度,则会发生闪络事故,因此该位置为重点关注点位。

4)最大过电压频率确定。由于不同故障类型导致的暂态过电压频率不一致,需要确定引起步骤3中的关注点过电压幅值最大时对应的频率。在实际仿真计算过程中为了提高仿真效率,可以先分析得到关注点阻抗频率特性及其最大阻抗频率,并在该频率周围扫频计算确定该点产生最大过电压频率。

5)仿真计算。基于所建模型开展仿真计算,获取关注频率下滤波器各点的过电压数据及避雷器动作情况。

6)绝缘校核。将计算所得关注点过电压值同对应位置的绝缘支柱绝缘水平对比分析,并结合实际情况及运行经验分析绝缘裕度,校核绝缘水平。

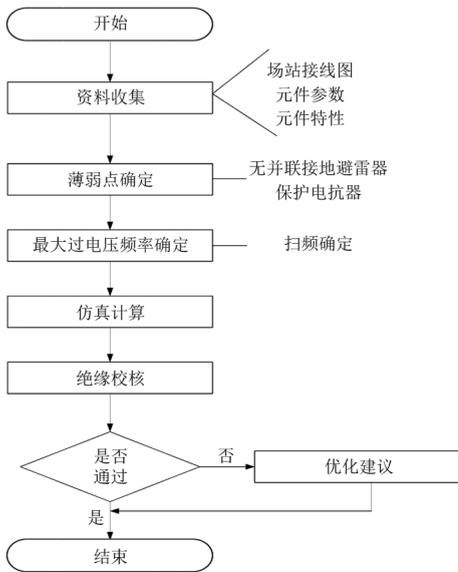


图2 电抗器绝缘水平分析方法流程

两组并行的滤波组 Z1、Z2,分别针对不同频率的多次谐波开展滤波,其元件参数不同,因此产生最大过电压的频率及其幅值不同,应分别分析计算。首先分析滤波电抗器过电压风险点位,在 Z1、Z2 两组滤波组中,每组分别包含 2 个滤波电抗器串联运行,每个电抗器均并联一个避雷器,同时在电抗器 L1 高压端还并联有一个避雷器直接连接在接地端进行保护。依据前面所述原则分析确定电抗器 L1 的低压端为风险点位,需开展重点分析。

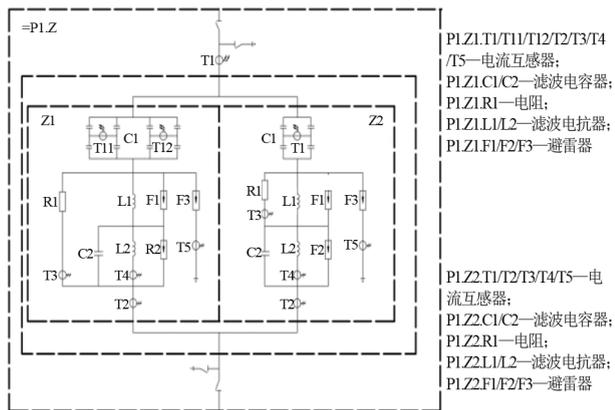


图3 某换流站直流滤波场接线

表2 滤波场各元件参数

元件参数	参数值	元件参数	参数值
Z1-C1 电容/ μF	0.8	Z2-C1 电容/ μF	21.0
Z1-L1 电感/mH	11.99	Z2-L1 电感/mH	89.35
Z1-L2 电感/mH	964.00	Z2-L2 电感/mH	48.86
Z1-R1 电阻/ Ω	1425	Z2-R1 电阻/ Ω	1000
Z1-C2 电容/ μF	1.825	Z2-C2 电容/ μF	0.810
Z1-F1 额定电压/kV	351.0	Z2-F1 额定电压/kV	273.0
Z1-F2 额定电压/kV	285.0	Z2-F2 额定电压/kV	171.0
Z1-F3 额定电压/kV	285.0	Z2-F3 额定电压/kV	171.0

2 暂态过电压仿真分析

基于所提电抗器绝缘水平分析方法,结合实际情况,开展直流滤波电抗器暂态过电压仿真计算及绝缘校核。

以某在运 ± 800 kV 换流站为例,其直流滤波场接线如图3所示。由于该站极 I 与极 II 直流滤波场完全对称,接线一致,因此仅针对该站一侧滤波电抗器开展分析。滤波场由多个电容、电感及避雷器组成,各元件参数如表2所示。依据接线图及实际参数构建等效仿真模型,并分析其过电压风险关注点。

从图3所示接线图可知,该站直流滤波场存在

以 Z1、Z2 两组滤波组中的 L1 电抗器低压端作为分析点,对这两点分别进行阻抗频响特性分析,获取其局部最大阻抗对应频率。随后将交流过电压频率设定为该频率并左右浮动扫频,得到该点局部最大过电压及频率。根据计算结果,该模型中 Z1-L1 低压端局部最大过电压频率为 80 Hz; Z2-L1 低压端局部最大过电压频率为 1010 Hz。

开展仿真计算,直流输电线路中性线上监测到的过电压峰值通常约为 30~50 kV。目前在运行站中监测到中性线上较大的过电压峰值为 62.4 kV,以此电压作为中性线侧所施加的干扰过电压进行仿真计算。计算得到两点位该条件下最大过电压分别为

104.29 kV 和 297.9 kV,结果如表 3 所示。

表 3 关键点位过电压计算结果

关键点位	最大过电压 频率/Hz	最大 过电压/kV	对应绝缘支柱 绝缘水平/kV	绝缘 裕度/%
Z1-L1	80	104.29	510	389
Z2-L1	1010	297.90	480	61

将计算结果同该点对地绝缘支柱的绝缘水平进行比较校核,绝缘水平如表 3 所示,可知绝缘强度的裕度分别为 389% 和 61%,Z1-L1 远超标准要求,Z2-L1 也满足限制要求,但裕度相对不高。

3 工程应用

依据上述方法及步骤,在多座超、特高压换流站开展工程分析应用,校核其直流滤波电抗器绝缘支柱绝缘裕度,并结合实际工程运行情况分析其运维关注程度。多座换流站直流滤波电抗器对地绝缘强度校核结果如表 4 所示。

表 4 工程应用分析结果

设备	过电压 计算值/kV	对应 频率/Hz	绝缘 强度/kV	裕度/%
A 站 Z1-L1	104.29	80	510	389
A 站 Z2-L1	297.9	1010	480	61
B 站 Z1-L1	183.25	290	360	96
C 站 Z1-L1	203.38	80	620	204
C 站 Z2-L1	117.79	280	620	426
D 站 Z1-L1	337.74	210	830	145
E 站 Z1-L1	91.90	270	125	36

从表中数据可知,不同换流站因设计结构及实际参数不同,其直流滤波电抗器对地电压及绝缘裕度各不相同,但均满足 25% 绝缘裕度要求,裕度约在 30%~500% 不等。虽然绝缘裕度均满足规范要求,但结合各站实际运维情况发现,相对较低的绝缘裕度在非友好环境条件下仍存在较大的发生故障的风险。

结合实际运维情况,A 站在运期间,曾发生直流滤波电抗器对地绝缘子局部放电情况,虽未发生闪络故障,但仍造成了安全运行风险。E 站在运期间,曾发生直流滤波电抗器对地绝缘子闪络故障,进而造成直流闭锁,直接影响输电线路安全稳定运行。两站故障发生点均位于无避雷器直接接地保护的点位处,与上述分析一致。分析现场为雷雨天气且空气潮湿,并存在不同程度的积污情况,且过电压水平较高,导致在对应环境条件下,存在放电甚至闪络风险。

对比分析两站的电抗器对地绝缘裕度发现,虽然均大于 25% 绝缘裕度限值,但 A 站电抗器对地绝

缘裕度为 61%,介于 50%~75% 之间,曾发生局部放电;而 E 站绝缘裕度仅为 36%,介于 25%~50% 之间,曾发生绝缘闪络故障。虽然两案例样本较小,但仍表明在运行环境受到暴雨和局部积污情况下,较小的绝缘裕度仍伴随一定的事故风险。针对计算结果及实际运行情况提出以在运超、特高压换流站中性线检测到的最大暂态过电压为依据,开展上述直流滤波电抗器风险点位过电压仿真计算,并进行绝缘裕度校核。在工程设计阶段,建议电抗器对地绝缘裕度有条件时可设计在 75% 以上;对已建成站的运维阶段,当绝缘裕度在 50%~75% 范围内,建议关注检查绝缘子污秽情况,在条件允许下可以通过增加绝缘高度或伞裙直径以增加绝缘爬电距离;当绝缘裕度在 25%~50% 范围内,建议增加绝缘爬电距离,提高应对污秽及非常规过电压的能力。上述整改方案针对具体故障换流站分析提出,不同换流站有所差异。

4 结 论

上面通过分析换流站直流滤波电抗器暂态过电压下绝缘水平及绝缘裕度,对实际工程风险预警提供数据支撑,具体结论如下:

1) 通过仿真计算对电抗器对地绝缘裕度进行校核,须准确定位其绝缘薄弱点及风险频率。结果表明,直流滤波器绝缘薄弱点一般在未经避雷器接地保护的电抗器近地端子;常规滤波器绝缘薄弱点处暂态过电压约在 200~400 kV 范围,风险频率约在 100~300 Hz 范围。

2) 针对校核结果,结合实际工程运维情况,建议电抗器对地绝缘裕度宜在 75% 以上;对已建成站的运维阶段,绝缘裕度在 50%~75% 范围内,建议增强运维关注度或进行绝缘强度改造;绝缘裕度在 25%~50% 范围内,建议增加绝缘爬电距离,提高应对污秽及非常规过电压的能力。

参考文献

- [1] 姚良忠,吴婧,王志冰,等. 未来高压直流电网发展形态分析[J].中国电机工程学报,2014,34(34):6007-6020.
- [2] 吴星翰,许双婷,王杨,等. 阻尼高通滤波器及其在高压直流系统中的应用[J].高电压技术,2022,48(10):4072-4081.

(下转第 71 页)

- [4] 董明,刘媛,任明,等.水分含量与分布对油纸绝缘频域介电谱影响的有限元仿真与研究[J].高电压技术,2014,40(11):3403-3410.
- [5] 刘凯,王鹏,王伟.直流电场下变压器油中电场分布特性[J].电网技术,2015,39(6):1714-1718.
- [6] 周远翔,沙彦超,陈维江,等.变压器油与绝缘纸板电导特性研究[J].电网技术,2013,37(9):2527-2533.
- [7] 杨雁,杨丽君,徐积全,等.用于评估油纸绝缘热老化状态的极化/去极化电流特征参量[J].高电压技术,2013,39(2):336-341.
- [8] 廖瑞金,唐超,杨丽君,等.电力变压器用绝缘纸热老化的微观结构及形貌研究[J].中国电机工程学报,2007,27(33):59-64.
- [9] 廖瑞金,郭沛,周年荣,等.水分和老化对油浸绝缘纸温度介电谱和活化能的影响[J].高电压技术,2014,40(5):1407-1415.
- [10] 吴广宁,崔运光,王晓剑,等.应用油中酸值评估不同老化程度绝缘纸中水分含量[J].高电压技术,2015,41(1):115-122.
- [11] MORSHUIS P H F, SMIT Johan J. Partial discharges at DC voltage: their mechanism, detection and analysis [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2):328-340.
- [12] FROMM U. Interpretation of partial discharges at dc voltages [J]. IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, 1995, 2(5):761-770.
- [13] OKABE Shigemitsu, UETA Genyo, WADA Haruhisa, et al. Partial discharge-induced degradation characteristics of insulating structure constituting oil-immersed power transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(5):1649-1656.
- [14] OKABE Shigemitsu, UETA Genyo, WADA Haruhisa, et al. Partial discharge-induced degradation characteristics of oil-impregnated insulating material used in oil-immersed power transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17(4):1225-1233.
- [15] Fluids for electrotechnical applications - Mineral insulating oils for electrical equipment: IEC 60296:2020 [S/OL]. [2022-11-10]. <https://webstore.iec.ch/publication/61025>.
- [16] IEEE Standard Codes, Formats, Protocols, and Common Commands for Use with IEEE Std 488.1-1987, IEEE Standard Digital Interface for Programmable Instrumentation: IEEE Std 488.2-1992 [S/OL]. [2022-11-10]. <https://ieeexplore.ieee.org/document/213762>.
- [17] Insulating liquids - Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance - Test method: IEC 61620:1998 [S/OL]. [2022-11-10]. <https://webstore.iec.ch/publication/5671>.
- [18] Insulating liquids - Measurement of relative permittivity, dielectric dissipation factor ($\tan \delta$) and d.c. resistivity: IEC 60247:2004 [S/OL]. [2022-11-10]. <https://webstore.iec.ch/publication/1150>.

作者简介:

史强(1986),男,高级工程师,从事电测量技术研究工作;

王睿吟(1986),女,工程师,从事电测量技术研究工作;

刘苏婕(1990),女,工程师,从事电测量技术研究工作。

(收稿日期:2023-10-19)

(上接第64页)

- [3] 宋建成,王雪,吝伶俐,等.基于无变压器型混合有源滤波器的快速重复控制策略的研究[J].高电压技术,2019,45(7):2037-2045.
- [4] 周勤勇,张彦涛,刘增训,等.基于暂态最高电压约束的直流整流站技术要求[J].高电压技术,2020,46(6):2057-2063.
- [5] 宋世旗,张代润,郭宛鑫,等.谐波电压引起HVDC系统换相失败的风险评估[J].电网技术,2021,45(11):4505-4511.
- [6] 邵思语,黄振琳,刘永强,等.基于交流系统非特征谐波的HVDC换相失败风险评估及抑制策略[J].电网技术,2019,43(10):3466-3476.
- [7] 王峰,刘天琪,周胜军,等.谐波对HVDC系统换相失败的影响机理及定量分析方法[J].中国电机工程学报,2015,35(19):4888-4894.
- [8] 钟济群. ± 1100 kV 特高压直流输电系统缓波前电磁暂态特性研究[D].武汉:华中科技大学,2022.
- [9] 刘磊,李小鹏,张纯,等. ± 800 kV 雅砻江换流站 BP13 高压电容器不平衡电流及过电压分析[J].四川电力技术,2023,46(2):59-63.
- [10] 张万荣,黄莹,苟锐锋,等. ± 800 kV 特高压直流工程直流滤波器设计关键问题研究[J].南方电网技术,2009,3(6):35-39.
- [11] 刘守豹,王大兴,曾宏,等.特高压直流极线与接地极线路同杆架设雷电过电压特性分析[J].电瓷避雷器,2019(4):94-98.
- [12] 电力行业高压直流输电技术标准化技术委员会. ± 800 kV 高压直流输电系统成套设计规程: DL/T 5426—2020[S].北京:中国电力出版社,2021.

作者简介:

罗东辉(1992),男,博士,研究方向为防雷接地及过电压等。

(收稿日期:2024-01-17)