

HVDC 用直流滤波电容器组均压技术研究

左强林¹, 赵彦军¹, 孙振瑜²

(1. 无锡赛晶电力电容器有限公司, 江苏 无锡 214100; 2. 广西大学, 南宁 530000)

摘要: 本文从 HVDC 用直流滤波电容器的台架结构出发, 研究了台架设计对直流电压分配的影响, 研究了电容器外壳连接元件串联段数、泄漏比与直流电压不均匀系数的关系, 得出元件串联段数越多直流电压分配越不均匀的结论; 结合电容器单元的特点, 得出电容器的电时间常数是一个仅与 $\rho\varepsilon$ 相关的常数的结论, 并依据上述结论分析了大容量直流电容器组运行不理想的原因, 给出了直流滤波电容器组的设计建议。

关键词: HVDC; 直流滤波电容器; 均压措施; 直流电压不均匀系数; 泄漏比; 电时间常数

Study on Grading Technology of DC-filter Capacitor Bank for HVDC

ZUO Qianglin¹, ZHAO Yanjun¹, SUN Zhenyu²

(1. Wuxi Sunking Power Capacitor Co., Ltd., Jiangsu Wuxi 214100, China ;

2. Guangxi University, Nanning 530000, China)

Abstract: In this paper, the influence of bench design on DC voltage distribution is studied on the basis of bench structure of DC filter capacitor for HVDC, the relationship among the number of series segments, leakage ratio and DC voltage non-uniform coefficient of capacitor shell connection elements is studied, and the conclusion that the more the number of series segments of the elements, the more the non-uniform of the DC voltage distribution is concluded; In combination with the characteristics of the capacitor unit, it is concluded that the electric time constant of the capacitor is only a constant which is only related to $\rho\varepsilon$ and, on the basis of above conclusion, the reasons for the unsatisfactory operation of the large-capacity DC capacitor bank are analyzed, and the design recommendations for DC filter capacitor banks are given.

Keywords: HVDC; DC-filter capacitor; grading measures; DC voltage non-uniform coefficient; leakage ratio; electric time constant

0 引言

在高压直流输电(high voltage direct current, HVDC)系统中, 高压直流换流器本身就是个很大的谐波源^[1-4]。换流站工作过程中会产生高频谐波, 谐波影响设备安全稳定运行, 并且可能会对通讯系统造成干扰^[5-7], 因此, HVDC 的换流站均装设有交、直流滤波器。

高压直流换流站的电容器通常分为交流场电容器和直流场电容器。直流场电容器中应用最多的是高压直流滤波电容器和中性母线冲击电容器, 其工作电压主要是直流电压。与交流电压按电容分配不同, 直流设备上的直流电压是按电阻分配的。因此, 直流电压的分配问题, 即设备的均压问

题, 就成为直流电容器最典型的特征, 也是最值得研究的性能之一。

有关直流滤波电容器组技术问题的研究很多, 包括保护问题^[8-9]、绝缘配合问题、高海拔问题^[10]、内熔丝问题和均压问题等。文献[11]研究了直流滤波电容器组的均压问题, 包括内均压问题和外均压问题; 文献[12]研究了直流滤波电容器内部的均压问题, 但深度仍显不足。如何结合已有的工程经验, 更加深入的探究直流滤波电容器单元和电容器组的均压问题, 并将研究成果应用于后续工程的设计、实施和运维的各个环节, 对于直流滤波电容器的安全运行, 以及便于从事这些工作的技术人员更加深入的了解直流滤波电容器, 都很有意义。

1 直流滤波电容器组的结构简介

超、特高压直流滤波电容器组从安装方式分为支柱式和悬吊式两种结构,从总体设计结构上分为单塔式和多塔并联式。见图 1-2。

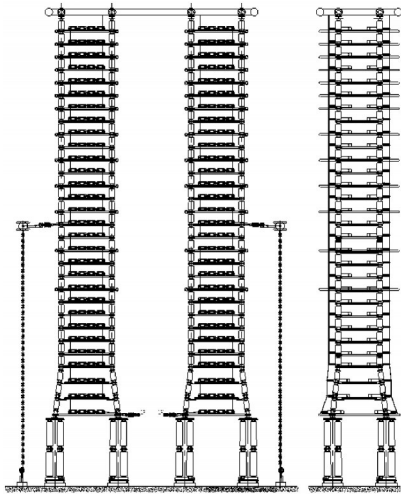


图1 户外多塔并联支柱式结构(±800 kV)
Fig. 1 Outdoor multi-tower parallel structure(±800 kV)

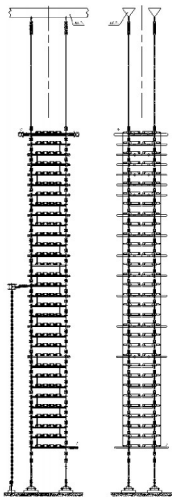


图2 单塔悬吊式结构(±800 kV)
Fig. 2 Single tower suspension structure (±800 kV)

从图 1-2 可以看到,高压直流滤波电容器的结构和设计有多种形式,有 2 塔或多塔并联的,但是没有 2 塔串联的,就是因为直流滤波电容器组均压设计的需要。直流场电容器由于存在长时间单极性,积灰比较严重^[13-15]。绝缘子积灰在潮气、水汽作用下,会形成污秽电阻,影响电容器层间电压分布。由于污秽电阻的不可控性或不确定性,不利于电容器的安全运行,因此需要采用均压设计来消除污秽电阻的影响,文献[11]给出了绝缘子污秽电阻的计算方法,这里不再赘述。

文献^[12,16]表明,直流滤波电容器组直流电压分

布的不均匀系数,户内一般取 1.05~1.1,户外取 1.2~1.3。这也说明环境对直流滤波电容器的影响之大。之所以直流滤波电容器均压问题历来都备受关注,就是因为直流电压分配原理与交流分量按电容分配原理不同。文献^[17-31]研究了环境湿度和电压对绝缘子泄露电流的影响,在环境湿度超过 60% 时,绝缘子表面的泄漏电流大幅度增加,所以早期的直流滤波电容器,在湿度超过 60% 时,会采用户内式,如常州换流站(户内悬吊式)和银川东换流站(户内支柱式)。

2 对壳泄露电流对直流电压分配的影响研究

本文的研究对象是在电容器台架上的电容器单元内部的元件串联段。从图 1-2 可以看出,直流滤波电容器组都是采用多层结构,每层为一个台架,台架接线见图 3,其等效原理见图 4。

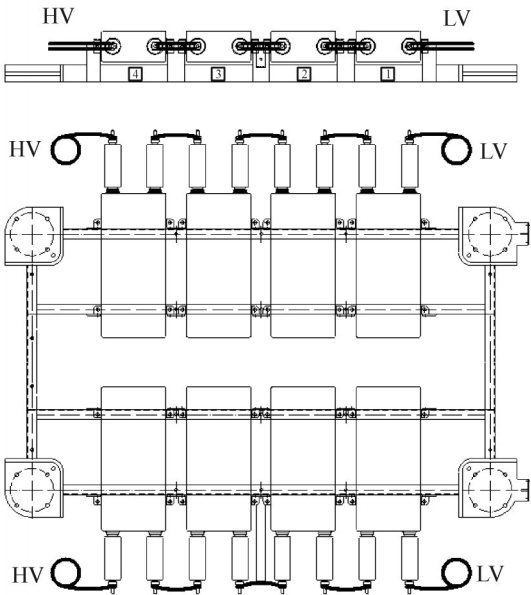


图3 直流滤波电容器组台架接线图
Fig. 3 Wiring diagram of bench of DC filter capacitor bank

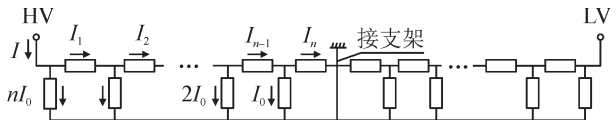


图4 直流电容器组台架的等效原理
Fig. 4 Equivalent principle of bench of DC filter capacitor bank

图 4 中, n 为相对于外壳连接电位的元件串联数; $I_1 \sim I_n$ 分别为流经各串联段的电流; I 为电容器单元的直流输入电流; I_0 为外壳连接处的最后一个串联段电容器单元高压端对壳泄漏电流。

为了分析方便,需要先建模型。根据直流电容

器的特点,把每个元件串联段作为一个节点,每个节点有一个泄漏电流,这与电容器单元中同一个串联段等电位的加工特点是吻合的。这个模型存在几个基本假设:1)电容器外壳是一个等电位体,与框架等电位;2)极对壳绝缘各相同性,对壳绝缘基本均匀;3)节点电位不一样,对壳的泄漏电流就不一样;4)在正常条件下,电容器内部元件串联段的电压基本均匀。

根据上述模型的基本假设,外壳连接处的最后一个串联段,其高压端对壳泄漏电流为 I_0 ,倒数第二个串联段的对壳泄漏电流为 $2I_0$,依此类推,则高压端第一个串联段的对壳泄漏电流为 nI_0 。根据图4,流经第 n 个串联段的电流为电容器单元的直流输入电流与所有串联段对壳泄漏电流之差,即: $I_n = I - (1 + 2 + \dots + n)I_0$,根据等差数列求和可以得到 $I_n = I - n(n+1)I_0/2$ 。考虑到流过第一个串联段的电流为 $I_1 = I - nI_0$ 。

令 $\beta = U_1/U_n$ 为第一串联段的直流电压与第 n 串联段的直流电压之比,也就是直流电压的不均匀系数; $\alpha = I_0/I$ 为泄漏电流与电容器输入直流电流之比,也就是泄漏比。这样可以得到 β 公式为

$$\beta = \frac{U_1}{U_n} = \frac{I_1}{I_n} = \frac{I - nI_0}{I - \frac{n(n+1)}{2}I_0} = \frac{1 - n\alpha}{1 - \alpha n(n+1)/2} \quad (1)$$

表1 不同电压不均匀系数 β 下元件串联段数 n 与泄漏比 α 的关系
Table 1 Relationship between series segments n and leakage ratio α under different voltage

n	4	6	8	10	
α	$\beta=1.1$	0.014 3	0.005 8	0.003 2	0.002 0
	$\beta=1.2$	0.025 0	0.010 4	0.005 7	0.003 6
	$\beta=1.3$	0.033 3	0.014 1	0.007 7	0.004 9
	$\beta=1.4$	0.040 0	0.017 1	0.009 4	0.006 0
	$\beta=1.5$	0.046 0	0.019 6	0.010 9	0.006 9

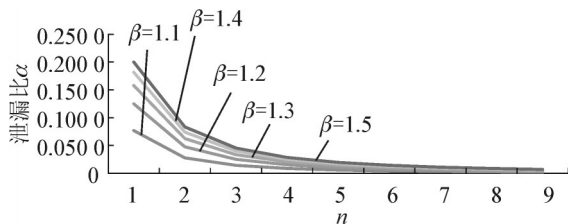


图6 泄漏比与串联段数的关系
Fig. 6 Relationship between leakage ratio and series segments

从表1可以看出,随着元件串联段数增大,泄漏比减小。在不均匀系数 β 为1.3的情况下,在 $n=4$ 时,要求泄漏比不大于3.3%就可以,电容器设计相对容易;而当 $n=8$ 时,要求泄漏比不大于

通常情况下,串联段数 $n \geq 1$,这时 $1 - n\alpha \geq 1 - \alpha n(n+1)/2$,可以得到 $\beta \geq 1$ 。根据式(1),可以得到电压不均匀系数 β 与元件串联段数 n 、泄漏电流系数 α (泄漏比)的关系,见图5。

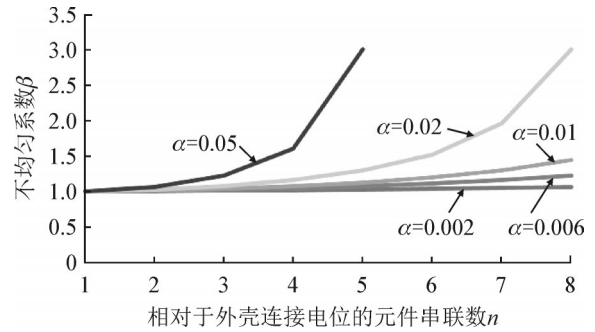


图5 电压不均匀系数 β 与 n 及 α 的关系
Fig. 5 Relationship among voltage non-uniform coefficient β , n and α

从图5可以看出,随着元件串联段数增加,不均匀系数增大;泄漏比增大,不均匀系数也增大。通过式(1)可以得到

$$\alpha = \frac{\beta - 1}{n \left[\frac{\beta(n+1)}{2} - 1 \right]} \quad (2)$$

式(2)表明,元件串联段数越大,泄漏比越小;直流电压的不均匀系数越小,泄漏比越小。式(2)的计算结果见表1,变化曲线见图6。

0.77%,不到 $n=4$ 的情况下的1/4,对于设计无疑增加难度。从这个意义上说,每层的元件串联段数减小,有利于降低均压电流,这对于直流滤波电容器来说,极其重要。

3 电容对均压电阻选取的影响

根据电阻和电容的定义,对于电容器单元的每个元件,电容 $C_y = \epsilon \frac{S_j}{d_j}$, $R_y = \rho \frac{d_j}{S_j}$,元件串联段的时间常数为^[14-15]

$$\tau = R_y C_y = \rho \frac{d_j}{S_j} \times \epsilon \frac{S_j}{d_j} = \rho \epsilon \quad (3)$$

$$R_y = \rho \varepsilon / C_y \quad (4)$$

式中: S_j 为极板面积; d_j 为极间介质的厚度; ρ 为极间介质的体积电阻率, $\Omega \cdot \text{m}$; ε 为极间介质的介电常数, F/m 。

上述推导是针对元件的,对于电容器单元,也同样适用。从式(3)可以看出,电容器极间的时间常数与电容和电阻无关,而是一个只与极间材料特性参数有关的常数 $\rho \varepsilon$ 。电容器的电容 C 越大,元件串联段的绝缘电阻就越小,需要的均压电阻就越小,均压电流就要求越大;均压电流越大,意味着电容器单元损耗越大,内部温升越高。为了降低电容器单元的温升,就必须减小均压电流,必然会导致均压效果不好,元件串联段的不均匀系数增加,直接影响直流滤波电容器单元的使用寿命。这阐释了直流滤波电容器组在电容较大时采用多塔并联的原因,也阐释了为什么电容较大的直流滤波电容器,直流老化试验较难通过,运行状况不好的原因。

对于干燥的聚丙烯薄膜 ρ 约为 $1 \times 10^{16} \Omega \cdot \text{m}$, ε 约为 $2.2 \times 8.85 \times 10^{-12} \text{ F/m}$, $\rho \varepsilon = 10^{16} \times 2.2 \times 8.85 \times 10^{-12} = 194\,700 \text{ s}$;对于浸油后的聚丙烯薄膜,体积电阻率会下降一个数量级, $\rho \varepsilon = 194\,700 \text{ s}$;如果油的品质不好或在直流电压下劣化,会导致绝缘油和浸渍过油的聚丙烯薄膜体积电阻率进一步下降,这对于直流滤波电容器的运行是极其不利的。所以极间介质的电阻率对直流滤波电容器的均压设计,具有决定性的作用。

为了防止油膜的体积电阻率降低到影响电容器运行的程度,需要采取措施,特别是元件串联段电容较大的产品。例如选用直流滤波电容器专用薄膜或选择在直流电压下性能比较稳定的绝缘油或添加剂等。

4 结语

1)每层台架进线与外壳接支架的元件串联段数 n ,与直流电压的分配密切相关。 n 越大元件串联段的直流电压分配就越不均匀。在进行直流滤波电容器组设计时,应该充分考虑电容器台架设计对电容器单元电压分配的影响。

2)泄漏比对电容器单元内部元件串联段的直流电压分配影响极大,特别是外壳连接元件串联段数比较多的时候。此时,为了保证均压效果,应该考虑适当增加电容器单元的设计裕度,以保证在直流电压不均匀系数较大的情况下电容器的运行可靠性。

3)全膜电容器元件极间的时间常数,是一个只与极间材料参数有关的常数 $\rho \varepsilon$ 。电容器单元的 C 越大,需要的均压电阻越小,均压电流就要求越大。在进行直流滤波电容器组均压设计时,应该充分考虑电容这个影响因素。

4)在电容器电容较大的场合,应该选用合适的薄膜粒料或浸渍剂,包括添加剂等,以保证电容器单元极间电介质的复合体积电阻率稳定。

参考文献

- [1] 浙江大学.高压直流输电[M].北京:电力工业出版社,1982.
- [2] 赵晚君.高压直流输电工程技术[M].北京:中国电力出版社,2004.
- [3] SCHILLING J, BOENIG H, GORDON M, et al. Operating experience of the united states national high magnetic field laboratory longpulse magnet[J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2000, 10(1):526-529.
- [4] MANKOSKI J J. High voltage sub-nanosecond dielectric breakdown[D]. USA: Texas Tech University, 1997.
- [5] MIURA N, KIDO G, HERLACH F, ET AL. High magnetic field science and technology[M]. New York: World scientific Publishing Co., Ltd., 2003.
- [6] SAMAR JANA, MUKHERJEE R K. Generation and measurement of pulsed high magnetic field[J]. Journal of Magnetic Materials, 2000, 21(4):234-242.
- [7] 赵先评.直流输电系统的谐波危害及抑制措施[J].广西电力工程, 2002(2), 21(4):56-58.
ZHAO Yuanping. Harmonic hazard of DC transmission system and the controlling measures[J]. Guangxi Electric Power, 2002(2), 21(4):56-58.
- [8] 赖浩,洪乐洲.直流滤波器电容器 C_1 不平衡保护运行情况分析[J].电工技术, 2014(1):17-19.
LAI Hao, HONG Lezhou. Operation analysis of DC filter capacitor C_1 unbalance protection [J]. Electrical technology, 2014(1):17-19.
- [9] 杨贵军,卢海颖.兴安直流工程直流滤波电容器组不平衡保护[J].电力电容器与无功补偿, 2015, 36(1):77-80.
YANG Guijun, LU Haiying. Imbalance protection of DC filter capacitor bank in Xing'an HVDC project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(1):77-80.
- [10] 左强林,邓光昭.青藏直流工程直流滤波电容器研制的技术问题研究[J].高压电器, 2013, 49(4):71-75.
ZUO Qianglin, DENG Guangzhao. Study on the technic problems of DC filter for Qing-tibet DC project[J]. High Voltage Apparatus [J]. 2013, 49(4):71-75.
- [11] 左强林,马维勇.特高压直流输电用直流滤波电容器组的设计问题研究[C]//2009特高压输电技术国际会议论

- 文集.
- [12]黄葵,左强林.特高压直流输电用直流滤波电容器若干问题研究[C]//2006特高压输电技术国际会议论文.
- [13]胡文.特高压直流输电线路绝缘子自然积污特性研究[D].武汉:华中科技大学,2015.
- [14]宿志一,刘燕生.我国北方内陆地区线路与变电站用绝缘子的直、交流自然积污结果的比较[J].电网技术,2004,28(12):13-17.
SU Zhiyi, LIU Yansheng. Comparison of natural contaminants accumulated on surfaces of suspension and post insulators with DC and AC stress in Northern China's inland areas[J]. Power System Technology, 2004, 28(12): 13-17.
- [15]刘辉,孙家祥.高压直流输电线路复合绝缘子的积污特性研究[J].绝缘材料,2016,49(6):51-61.
LIU Hui, SUN Jiaxiang. Pollution accumulation characteristic analysis on composite insulators for HVDC transmission line[J]. Insulation Materials, 2016, 49(6): 51-61.
- [16]高压直流输电系统用直流滤波电容器及中性母线冲击电容器:GB/T 20993—2012[S]. 2012.
DC filter capacitors and neutral bus surge capacitors for HVDC transmission system:GB/T 20993—2012[S]. 2012.
- [17]张国武,邵瑰伟.相对湿度及盐密对绝缘子泄露电流的影响[J].云南电力技术,2015,43(6):51-53.
ZHANG Guowu, SHAO Kuiwei. Research on influence of environmental relative humidity and salt equivalent insulator surface density on leakage current of insulator[J]. Yunnan Electric Power, 2015, 43(6): 51-53.
- [18]张建兴,律方成,等.高压绝缘子泄露电流与温、湿度的灰关联分析[J].高电压技术,2006,32(1):40-41.
ZHANG Jianxing, LYU Fangcheng, et al. Relationships among leakage current of insulators on HV lines, temperature and humidity based on the grey relational analysis[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(1): 40-41.
- [19]方春华,王建国.污秽绝缘子泄漏电流与环境温、湿度相关分析[J].高电压技术,2012,38(4):885-892.
FANG Chunhua, WANG Jianguo. Correlation analysis of contaminative insulator leakage current environmental temperature and humidity[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(4): 885-892.
- [20]赵新德.人工污秽绝缘子泄露电流、湿度、盐密关系及对比研究[D].长沙:长沙理工大学,2008.
- [21]DU B X, LIU Y. Frequency distribution of leakage current on silicone rubber insulator in salt-fog environments[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3): 1458-1464.
- [22]KUMOSA L, ARMENTROUT D, BENEDIKT B, et al. An investigation of moisture and leakage currents in GRP composite hollow cylinders[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(5): 1043-1059.
- [23]KARADY G. The effect of fog parameters on the testing of artificially contaminated insulators in a fog chamber[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(2): 378-387.
- [24]KUMAGAI S. Influence of algal fouling on hydrophobicity and leakage current on silicone rubber[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(5): 1201-1206.
- [25]SUNDARARAJAN R, GORUR R S. Dynamic arc modeling of pollution flashover of insulators under DC voltage[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1993, 26(2): 209-218.
- [26]PIAH M A M, DARUS A. Modeling leakage current and electric field behavior of wet contaminated insulators[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(1): 432-433.
- [27]MAO Yingke, GUAN Zhicheng, WANG Liming, et al. Frequency characters of leakage current on the surface of outdoor insulators in different relative humidity[C]// IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Kansas, USA: IEEE, 2006: 692-695.
- [28]OSSAMA E GOUDA, GHADA M AMER. Factors affecting the leakage current bursts of high voltage polluted insulators[C]// Universities Power Engineering Conference. Tainan, China: IEEE, 1999: 114-117.
- [29]ISAIAS RAMIREZ VAZQUEZ, JOSE LUIS FIERRO CHAVEZ. Criteria for the diagnostic of polluted ceramic insulators based on the leakage current monitoring technique [C]// 1999 Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Austin, USA: [s.n.], 1999: 715-718.
- [30]李蓉,赵威,杨超,等.直流融冰装置谐波对避雷器泄露电流的影响[J].云南电力技术,2022,50(4):31-34.
LI Rong, ZHAO Wei, YANG Chao, et al. Influence of harmonics of DC ice melting device on MOA leakage current[J]. Yunnan Electric Power, 2022, 50(4): 31-34.
- [31]梁捷生.复合绝缘子的表面电场仿真与泄露电流实验研究[J].能源与电力,2022:24-27.
LIANG Jiesheng. Surface electric field simulation and leakage current experimental study of composite insulators[J]. Energy and Electric Power, 2022: 24-27.

作者简介:

左强林(1967—),男,正高级工程师,长期从事电力电容器的技术工作。

赵彦军(1981—),男,高级工程师,长期从事电力电容器装置的技术工作。

孙振瑜(2002—),男,本科,研究方向为能源与动力工程。