

# 500 kV 限流用电抗器过电压耐受分析

陈水明<sup>1</sup>, 王小川<sup>1</sup>, 王振兴<sup>2</sup>, 戈承<sup>2</sup>

(1. 清华大学电机系电力系统及发电设备控制和仿真国家重点实验室, 北京 100084; 2. 北京电力设备总厂, 北京 102401)

**摘要:** 500 kV 干式空心电抗器用来限制 500 kV 系统的短路电流。在制造电抗器前, 需要对电抗器的过电压耐受进行评估, 保证匝间电压小于绝缘值。笔者在已知电抗器分布参数的基础上, 用链型回路等值电抗器, 采用 PSCAD/EMTDC 程序求解在雷电和操作冲击下的匝间电压。计算表明, 雷电时外圈首匝匝间过电压最大, 可达 19.8 kV, 操作时首匝匝间过电压最大, 可达 10 kV, 但都小于 36 kV 的耐受值。

**关键词:** 500 kV 限流电抗器; 分布参数电路; 过电压耐受

中图分类号: TM726.3

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)01-0011-04

## Over-voltage Withstand Analysis of 500 kV Current-limiting Inductors

CHEN Shui-ming<sup>1</sup>, WANG Xiao-chuan<sup>1</sup>, WANG Zhen-xing<sup>2</sup>, GE Cheng<sup>2</sup>

(1. Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, State Key Lab of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipments, Beijing 100084, China; 2. Beijing Power Equipment Group, Beijing 102401, China)

**Abstract:** Air-cored current-limiting inductor (CLI) is used to limit the magnitude of fault current in 500 kV power systems. Before manufacturing the CLI, the over-voltage withstand ability of CLI should be evaluated to ensure the voltage between two coils less than the withstand value. Therefore, the distribution circuit of CLI is solved with PSCAD/EMTDC based on the known distribution parameter of CLI in this paper. The results show that the maximum voltage between the two first coils under lightning surge is 19.8 kV, and under switching is 10 kV, both of which are less than the withstand value 36 kV.

**Key words:** 500 kV current-limiting inductor; distribution circuit; over-voltage withstand

## 0 引言

随着电网的逐渐扩大, 国内一些电网出现短路电流水平上升, 有些 500 kV 变电站短路电流已接近或超过断路器的开断容量, 迫切需要限制电网的短路电流水平。限制短路电流, 除了能解决断路器的容量要求外, 直接减轻了断路器的开断负担, 有助于减少维修并延长寿命, 并能限制流过重要电气设备的短路电流, 避免设备损坏, 还能减少线路电压损耗和发电机失步的概率, 同时也能减少故障时线路附近的电磁污染, 降低对弱电系统的影响。

限制短路电流的措施有<sup>[1]</sup>: 发展高一级电压等级电网; 低压电网分片或将母线分列或分段运行, 甚至将电网解列; 采用高阻抗变压器; 更换断路器, 选用开断容量更大的产品; 采用串联电抗器。上述方法各有特点, 然而或多或少均存在一些问题, 如降低电力系统的安全性和可靠性、提高成本并增加电力损耗等。相比之下, 无论从技术还是经济方面考虑, 串

联电抗器是一种比较可行的方法。国际上, 已有巴西<sup>[1]</sup>、加拿大<sup>[2]</sup>等国应用了这项技术, 取得了良好的效果。国内的一些工业应用领域, 在配网中应用了这项技术<sup>[3]</sup>, 但在超高压电网中还没有应用先例。最近, 华东电网已决定采用电抗器限制短路电流<sup>[4]</sup>, 对电抗器进行了招标。

作为该项技术的核心, 因为需要在大电流时提供足够的电感值, 因此不能在大电流时产生饱和, 串联电抗器一般采用空心结构。笔者讨论了串联电抗器在设计中的绝缘耐受问题, 包括分布参数的提取、计算模型、雷电冲击下的电位分布、操作冲击下的电位分布等。

## 1 电抗器结构及分布参数

500 kV 电抗器绕组部分, 由上下支架以及线圈绕组组成。其中, 线圈绕组由多层线圈并联, 两层线圈之间用通风条隔开, 每层线圈由若干匝组成, 每匝线圈均由 3 根换位导线组成, 每匝之间由有机薄膜

收稿日期: 2008-06-28; 修回日期: 2008-09-23

基金项目: 自然科学基金项目(50737001)资助。

作者简介: 陈水明(1968-), 男, 浙江省杭州市人, 博士, 副教授, 主要从事电力系统电磁环境的教学与科研工作。

绝缘,每层绕组的两侧由玻璃钢包封。图 1 所示为电抗器单层绕组结构示意图。

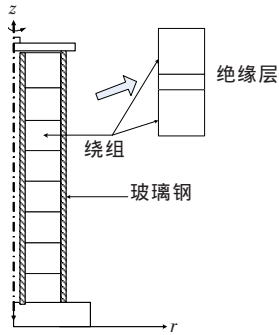


图 1 电抗器单层绕组示意图

采用有限元-边界元相结合的方法,提取电抗器各匝的电气参数。

电抗器的总额定电感值为 44.586 mH,仿真中取单层电感值为 445.86 mH;最内层线圈的匝数为 182 匝,单匝等值电感值为  $44.586 \times 10 / 182 = 2.4498$  mH;最外层线圈的匝数为 133 匝,单匝等值电感值为  $44.586 \times 10 / 133 = 3.3523$  mH。

对于电容参数,计算结果表明,电抗器单层绕组两端各匝的自电容较大,中部较小;而互电容则在中部较大,但是整体相差很小。从单匝线圈的杂散电容来分析,相邻两匝线圈的匝间电容最大,远远大于其它匝间电容。

### 2 计算用等值电路

如图 2 所示,电抗器线圈的每一圈设为一个节点,每个节点之间的支路由电感和并联匝间电容组成,非相邻匝之间的电容由于远远小于相邻匝间电容(相差大约 3 个数量级)而不予考虑。每个节点具有对地电容。对于靠近电抗器上下端的线圈,需要考虑线圈与上下吊臂之间的电容。对于外层线圈,还需要考虑均压环与附近线圈的电容(计算模型中考虑了附近 10 匝线圈)。电抗器的内部仿真原理图见图 2,每个电感代表实际电抗器中的一匝线圈。模型在 PSCAD/EMTDC 仿真环境中搭建。

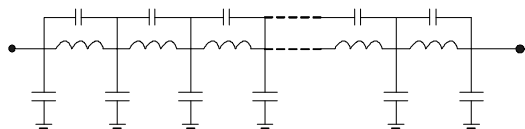


图 2 电抗器内部电路模型

### 3 雷电冲击下的电位分布

雷电冲击采用  $1.2/50 \mu s$  的波形,幅值为 1550 kV(线圈对地)。表 1 为最内层线圈和最外层线圈在雷电波侵入过程中侵入端前 10 匝线圈的过电压峰值。

表 2 为最内层线圈和最外层线圈在雷电波侵入

表 1 雷电时侵入端前 10 匝线圈的过电压分布

匝数	最内层线圈匝间电压/kV	最外层线圈匝间电压/kV
1(入口)	14.909	19.010
2	14.752	18.701
3	14.599	18.394
4	14.397	18.295
5	14.317	17.971
6	14.181	17.861
7	14.053	17.655
8	13.912	17.539
9	13.808	17.337
10	13.655	17.127

过程中非侵入端前 5 匝线圈的过电压峰值。最外层线圈入口第 1 匝匝间电压波形见图 3。

表 2 雷电时非侵入端前 5 匝线圈的过电压分布

匝数	最内层线圈匝间电压/kV	最外层线圈匝间电压/kV
1(出口)	9.367 2	15.694 9
2	9.252 5	15.695 0
3	9.284 8	15.543 5
4	9.214 8	15.396 0
5	9.222 7	15.425 6

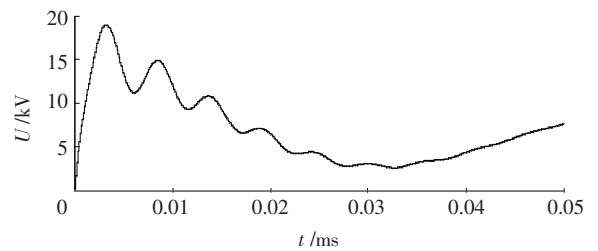


图 3 第 1 匝匝间电压波形

表 3 为在线圈两端施加雷电冲击时,最内层线圈和最外层线圈在雷电波侵入过程中侵入端前 10 匝线圈的过电压峰值。表 4 为最内层线圈和最外层线圈在雷电波侵入过程中非侵入端前 5 匝线圈的过电压峰值。最外层线圈入口第 1 匝匝间电压波形见图 4。

表 3 雷电时侵入端前 10 匝线圈的过电压分布

匝数	最内层线圈匝间电压/kV	最外层线圈匝间电压/kV
1(入口)	15.146 4	19.818 8
2	14.987 4	19.503 3
3	14.832 9	19.191 3
4	14.628 2	19.096 2
5	14.548 2	18.765 2
6	14.410 7	18.658 5
7	14.282 1	18.450 3
8	14.139 6	18.336 1
9	14.034 6	18.131 5
10	13.879 8	17.918 0

表4 雷电时非侵入端前5匝线圈的过电压分布

匝数	最内层线圈匝间电压/kV	最外层线圈匝间电压/kV
1(出口)	10.368 6	16.855 8
2	10.386 9	16.845 8
3	10.327 9	16.672 4
4	10.320 7	16.504 3
5	10.280 9	16.525 7

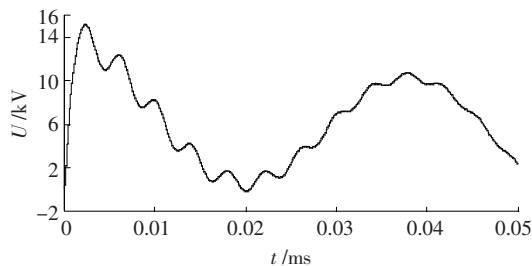


图4 第1匝匝间电压波形

#### 4 操作冲击下的电位分布

操作冲击采用 250/2500  $\mu\text{s}$  的波形,幅值也为 1 550 kV。表 5 为最内层线圈和最外层线圈在雷电波侵入过程中侵入端前 10 匝线圈的过电压峰值。表 6 为最内层线圈和最外层线圈在操作波侵入过程中非侵入端前 5 匝线圈的过电压峰值。最内层线圈入口第 1 匝匝间电压波形见图 5。

表5 操作时侵入端前10匝线圈的过电压分布

匝数	最内层线圈匝间电压/kV	最外层线圈匝间电压/kV
1(入口)	4.408 0	6.585 5
2	4.403 2	6.577 8
3	4.403 2	6.571 1
4	4.388 8	6.558 9
5	4.394 3	6.554 7
6	4.392 0	6.544 3
7	4.390 7	6.537 9
8	4.390 1	6.530 0
9	4.391 9	6.525 1
10	4.392 5	6.521 0

表6 操作时非侵入端前5匝线圈的过电压分布

匝数	最内层线圈匝间电压/kV	最外层线圈匝间电压/kV
1(出口)	4.455 5	6.497 9
2	4.463 4	6.493 5
3	4.456 1	6.496 3
4	4.458 7	6.499 2
5	4.455 2	6.493 6

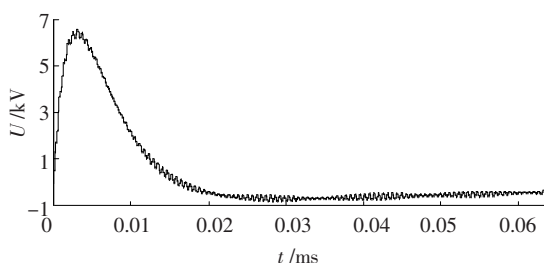


图5 第1匝匝间电压波形

表 7 为在线圈两端施加操作冲击时,最内层线圈和最外层线圈在操作波侵入过程中侵入端前 10 匝线圈的过电压峰值。表 8 为最内层线圈和最外层线圈在操作波侵入过程中非侵入端前 5 匝线圈的过电压峰值。最内层线圈入口第 1 匝匝间电压波形见图 6。

表7 操作时侵入端前10匝线圈的过电压分布

匝数	最内层线圈匝间电压/kV	最外层线圈匝间电压/kV
1(入口)	7.201 6	9.861 2
2	7.203 4	9.870 6
3	7.205 6	9.882 7
4	7.222 5	9.860 1
5	7.207 8	9.884 1
6	7.209 6	9.867 6
7	7.210 0	9.873 5
8	7.214 5	9.865 1
9	7.210 9	9.873 2
10	7.218 9	9.883 9

表8 操作时非侵入端前5匝线圈的过电压分布

匝数	最内层线圈匝间电压/kV	最外层线圈匝间电压/kV
1(出口)	7.169 5	9.896 3
2	7.171 2	9.889 5
3	7.169 6	9.893 8
4	7.170 2	9.898 4
5	7.169 4	9.889 6

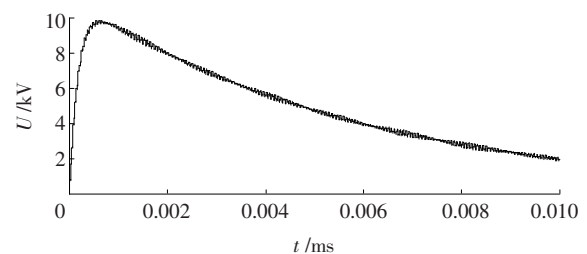


图6 第1匝匝间电压波形

电抗器外圈匝间过电压值大于内圈,较内圈严重,这主要是由于外圈匝数较少导致单匝分压大于内圈。

电抗器首匝承受的匝间过电压最大。电抗器在端口遭受雷电波直接侵入时(端口对地),外圈首匝匝间过电压可达 19.8 kV,首匝承受的匝间过电压最大,后续匝逐渐衰减,最低约为 16 kV;雷电波正常侵入时(端口对端口),外圈首匝承受匝间过电压为 19 kV,尾部的匝间电压约为 15 kV。电抗器匝间绝缘设计值为  $18 \text{ kV} \times 2 = 36 \text{ kV}$  (每根导体的雷电冲击电压耐受值为 18 kV),因此匝间绝缘可以承受雷电侵入波。

操作波正常侵入时(端口对端口),首匝过电压小于 7 kV;操作波直接侵入电抗器端口时(端口对地),首匝过电压小于 10 kV。操作波侵入的两种情

况下首匝过电压峰值均小于雷电波作用下的情况。参考雷电侵入波的耐受值, 可以认为匝间绝缘也能耐受操作侵入波。

### 5 结论

笔者在已知电抗器分布参数的基础上, 用链型分布参数等值电抗器, 采用 PSCAD/EMTDC 软件分析了电抗器在雷电、操作冲击下的电位分布。得到以下结论:

(1) 不论是雷电还是操作冲击, 电抗器外圈匝间过电压值大于内圈, 较内圈严重, 这主要是由于外圈匝数较少导致单匝分压大于内圈;

(2) 电抗器首匝承受的匝间过电压最大。电抗器在端口遭受雷电波直接侵入时(端口对地), 外圈首匝匝间过电压可达 19.8 kV, 首匝承受的匝间过电压最大, 后续匝逐渐衰减, 最低约为 16 kV; 雷电波正常侵入时(端口对端口), 外圈首匝承受匝间过电压为 19 kV, 尾部的匝间电压约为 15 kV。电抗器匝间绝缘设计值为 18 kV×2=36 kV (每根导体的雷电冲击电压耐受值为 18 kV), 因此匝间绝缘可以承受雷

(上接第 7 页)

[11] 孙明. 触头弧根瞬时电流密度的测量[J]. 高压电器, 1996, 32(1): 22-24.

[12] DROUET M G, WANG Bo-han, MORIN R. Arc Foot Motion, Current Distribution, Arc Short-circuiting and Arc Clogging in an Air-blast Interrupter [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, PAS-100: 3 350-3 355.

[13] HSU K C, ETEMADI K, PFENDER E. Study of the Free-burning High-intensity Argon Arc [J]. J. Appl. Phys., 1983, 54(3): 1 293-1 301.

(上接第 10 页)

### 5 结语

笔者所提方法很好地解决了自适应噪声对消器滤波参数难以确定和经验模态分解基于极值包络而不能很好提取信号特征的问题, 将 EMD 的多分辨思想引入到自适应噪声对消器滤波处理中, 实现了窄带干扰的有效抑制。

### 参考文献:

[1] 谢良聘, 朱德恒. FFT 频域分析算法抑制窄带干扰的研究[J]. 高电压技术, 2000, 26(4): 6.

[2] 杨永明, 孙才新, 李新. 局部放电在线监测中干扰的识别及抑制方法的研究[J]. 仪器仪表学报, 1999, 20(3): 242-243.

[3] 唐炬, 孙才新, 许中荣, 等. 局部放电信号中的白噪声和窄带干扰[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 8-10.

[4] 王晓蓉, 杨敏中, 严璋. 电力设备局部放电测量中抗干扰研究的现状和展望[J]. 电网技术, 2000, 24(6): 41-45.

[5] 乐波, 曹戌平, 李俭, 等. 局部放电在线监测中的自适应数字滤波器研究[J]. 西安交通大学学报, 2003, 37(6): 617-621.

[6] 杨永明, 孙才新, 严欣平, 等. 抑制局部放电在线监测中周期

电侵入波;

(3) 操作波正常侵入时(端口对端口), 首匝过电压小于 7 kV; 操作波直接侵入电抗器端口时(端口对地), 首匝过电压小于 10 kV。操作波侵入的两种情况下首匝过电压峰值均小于雷电波作用下的情况。参考雷电侵入波的耐受值, 可以认为匝间绝缘也能耐受操作侵入波。

### 参考文献:

[1] AMON J F, FERNANDEZ P C, ROSE E H, et al. 巴西在将限流电抗器用于短路电流限值方面取得的成功经验 [J]. 电气应用, 2006, 25(1): 4-8.

[2] BELLEI T A, CAMM E H, RANSOM G. Current-limiting Inductors Used in Capacitor Bank Applications and Their Impact on Fault Current Interruption [C]// Proceedings of the IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution Conference, 2001: 603-608.

[3] 李刚, 李宏光. 限流电抗器对短路电流的影响分析 [J]. 煤矿自动化, 2003(1): 31-32.

[4] 殷可, 高凯. 应用串联电抗器限制 500 kV 短路电流分析 [J]. 华东电力, 2004, 32(9): 7-10.

[14] ANDERSON A H, KAK A C. Simultaneous Algebraic Reconstruction Technique (SART): A New Implementation of the ART Algorithm [J]. Ultrason. Imaging, 1984(6): 81-94.

[15] MERCURE H P, DROUET M G. Dynamic Measurements of the Current Distribution in the Foot of an Arc Propagating Along the Surface of an Electrolyte [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101: 725-736.

[16] 张顺利, 张定华, 熬波, 等. 不完全投影数据图像重建的 ART 算法研究[J]. 计算机工程与应用, 2007, 43(10): 8-10.

性干扰的级联式 IIR 陷波滤波器的研究 [J]. 电工技术学报, 2000, 15(5): 75-78.

[7] 于鹏娟, 聂卫东. 一种可用于局部放电在线检测的数字滤波器[J]. 变压器, 1999, 36(2): 30-33.

[8] 赵学梅, 王立欣, 蔡惟铮. 局部放电在线监测中的自适应滤波方法[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(20): 29-32.

[9] 黄成军, 郁惟镛. 基于小波分解的自适应滤波算法在抑制局部放电窄带周期干扰中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(1): 107-111.

[10] 钱勇, 黄成军, 戚伟. 基于经验模态分解的自适应滤波算法在局部放电窄带干扰抑制中的应用 [J]. 继电器, 2006, 34(22): 27-31.

[11] HUANG N E, WU M C, LONG S R, et al. A Confidence Limit for the Empirical Mode Decomposition and Hilbert Spectral Analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 2003(459): 2 317-2 345.

[12] FLANDRIN P, RILLING G, GONCALVES P. Empirical Mode Decomposition as a Filter Bank [J]. IEEE Signal Processing Letters, 2004, 11(2): 112-114.

[13] 贾嵘, 徐其惠, 田录林. 基于经验模态分解的水轮发电机组局部放电信号提取[J]. 水力发电学报, 2007, 26(4): 146-150.