

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.02.005

基于数值仿真计算的220 kV线路避雷器相间干扰研究

李凌燕, 杜志叶, 阮江军, 李金亮

(武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘要: 氧化锌避雷器(MOA)在线监测中经常由于相间耦合干扰的影响而难以实现阻性电流的准确测试。文中研究了不同相序布置下的220 kV线路避雷器,通过精确的三维建模和有限元数值计算得到各部分电容值,再在EMTP-ATP中建立测量环境对应的阻容网络,计算不考虑相间干扰和考虑相间干扰时各相避雷器的全电流、相角差和阻性电流,从而有效滤除相间干扰,提高阻性电流监测的准确度。对比分析表明,220 kV线路避雷器相间干扰对阻性电流的影响情况与避雷器的相序布置方式有关,且三相布置的不对称性会导致相间干扰影响的不稳定性。

关键词: 220 kV线路; 避雷器; 阻性电流; 有限元法; 阻容网络; 相间干扰

Analysis on Interphase Interference of 220 kV Transmission Line MOA Based on Numerical Simulation and Calculation

LI Lingyan, DU Zhiye, RUAN Jiangjun, LI Jinliang

(School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: During on-line live measurement of MOA, it is difficult to measure the resistive current accurately because of the interphase interference. In this paper, the three-phase MOA on a 220 kV transmission line in different phase sequence is analyzed to investigate the interphase interference. The self-capacitance and mutual capacitance of the MOA are obtained by establishing and calculating an elaborate 3D model based on the finite element method, and both capacitance values are substituted into the resistance-capacitance network established in EMTP-ATP to complete simulation and calculation. Then the total current, resistive current and difference of phase angle with or without the interphase interference can be obtained. Through comparison, the interphase interference can be effectively filtered, thus improving the accuracy of resistive current monitoring. Comparative analysis shows that the effect of the interphase interference on resistive current relates to the MOA phase sequence, and asymmetry of three-phase arrangement will result in instability of interphase interference effect.

Key words: 220 kV transmission line; MOA; resistive current; finite element method; resistance-capacitance network; interphase interference

0 引言

金属氧化物避雷器(MOA)是电力系统重要的过电压保护设备,它的正常运行关系着电力系统的安全、稳定供电。随着避雷器在特定环境下的使用,由于设备内部受潮或阀片长期承受工频电压而逐渐

老化,MOA的性能会慢慢变差,其特征量表现为系统正常运行电压下的阻性电流增大,因此,检测MOA运行是否正常的关键是正确确定泄漏电流中的阻性电流分量^[1-3]。

要准确测得泄漏电流阻性分量,就必须准确测得持续泄漏电流幅值和其夹角。但是由于耦合干扰

收稿日期:2016-05-16; 修回日期:2016-07-04

基金项目:国家自然科学基金(51477120);国家重点基础研究发展计划(973计划)(2011CB209404)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51477120), National Basic Research Program of China (973 Program)(2011CB209404).

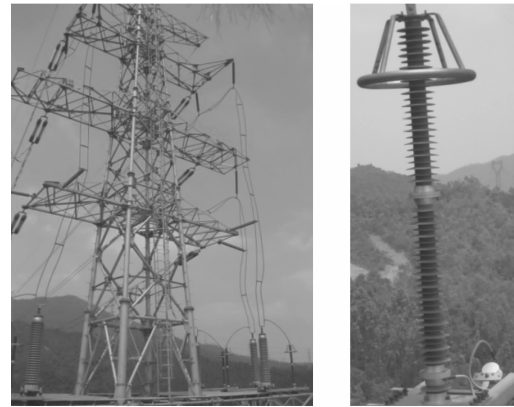
影响,使得被测避雷器的泄漏电流的幅值和夹角都发生了复杂的变化。由于干扰设备的多样性,距离被试品的空间干扰距离等种种不确定性,使得耦合干扰的电容电流变化范围较大,导致不能准确测得各相泄漏电流与夹角,很难找到一定的规律^[4-6]。目前传统的在线监测方法主要有全电流法、谐波法、补偿法和投影法等^[7-10],但其均忽视了周围带电设备以及被试避雷器自身存在的相间干扰,不能准确得到三相避雷器泄漏电流中的阻性分量,也就难以真实反映避雷器的性能状况。

文[11]提出一种精度较高的避雷器阻性电流的提取计算方法,该方法利用 Ansys 进行三维精细建模,最大程度的模拟了实际的电场环境,采用有限元数值计算方法获得避雷器各部分电容的准确参数,然后在 EMTP-ATP 中建立相应的阻容网络电路模型进行仿真计算,可有效滤除避雷器相间干扰。文中考虑中山电网 220 kV 桂三甲、乙线的避雷器,采用该方法计算得到考虑相间干扰和不考虑相间干扰时避雷器的全电流、阻性电流和相角差,并定量分析了不同相序布置下三相避雷器相间耦合电容对测量全电流和相角差的影响,有效提高了阻性电流监测的准确度,可为实际工程提供指导。

1 相间干扰数值分析方法

220 kV 双回交流线路铁塔全貌见图 1(a),塔基两侧的三相避雷器分别对应每回各相线路,俯视呈三角形排列,每相避雷器均与电缆头直接相连。220 kV 氧化锌避雷器构造见图 1(b),它是由电极、均压环、阀片、法兰和接地支撑从上到下共同组成的。其中,阀片本体伞裙 51 个,大伞裙有 27 个,直径 20 cm,小伞裙有 24 个,直径 18 cm。大小伞裙交替布置,避雷器本体直径 11 cm。为达到滤除相间干扰准确检测阻性电流的目的,文中基于 220 kV 线路避雷器及周围环境的复杂程度,首先建立了这种复杂电场结构的三维模型,在 Ansys 中进行剖分和加载计算,其中采用渐进边界条件处理开域问题,可获得精确的避雷器自身电容和耦合电容。

单相 220 kV 避雷器模型有 3 个不同电位的导体,它们之间存在自电容,也存在互电容,其等效阻容网络模型见图 2。其中,均压环和避雷器高压结线端联结在一起,存在对地自电容 C_{10} ,高压结线端同法兰 1 之间的互电容包括阀片作为介质的互电容 C_1 (即阀片本体电容)和空气作为介质的互电容 C_{12} 两部分。由于接地支撑、法兰 2 和铁塔均与大地相连,电位为零,所以将其都看作大地。实际所测的泄漏



(a)铁塔结构图

(b)避雷器结构图

图 1 220 kV 线路实物模型

Fig. 1 Physical photos of 220 kV transmission line

电流为流出法兰 2 的电流,且只流过法兰 1 对地之间阀片作为介质的自电容 C_2 (阀片本体电容)和阀片本体电阻 R ,所以需将法兰 1 与大地间阀片作为介质的自电容 C_2 和空气作为介质的自电容 C_{20} 两部分分别计算,才能算出精确的全电流。

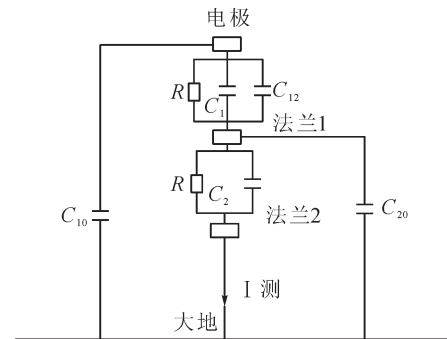


图 2 单相 220 kV 避雷器等效阻容网络模型

Fig. 2 Resistance-capacitance network equivalent model of single-phase 220 kV lightning arrester

在没有相间干扰的情况下,在避雷器上端电极加电压 $u=U_m \cos(\omega t)$,流过避雷器本体的全电流(如图 2 中 I 测处)为 $i=I_m \cos(\omega t+\varphi)$ 。其中 U_m 为系统电压的幅值; I_m 为全电流幅值; ω 为系统角频率; φ 为电压和电流间的相角差。 i 由阻性电流和容性电流两部分组成,通过测量的避雷器泄漏电流和相角差可计算阻性电流分量为 $I_R=I_m \cos\varphi$ 。

实际中,三相避雷器之间是存在相间干扰的,每相避雷器的导体间以及相间电位不同的各导体之间,均会产生容性耦合,而电容的大小与介质的相对介电常数、两导体之间的面积和两导体之间的距离有关^[12]。通过 Ansys 进行精细化建模和有限元仿真计算得到的避雷器各部分电容值,结合通过实际测量得到的避雷器阀片的本体电阻,可在 ATP 中

建立三相阻容网络模型, 代入实际的运行电压, 利用基尔霍夫定律, 求解该电路网络即可获得考虑相间干扰情况下的各相避雷器全电流、相角差和阻性电流分量, 并与没考虑相间干扰的计算值进行对比, 就可得出消除相间干扰的真实阻性电流值。以上数值分析方法的流程图见图 3。

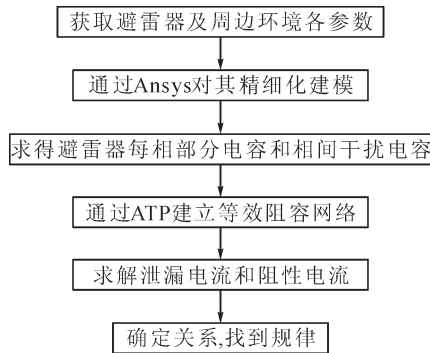


图 3 方法流程图

Fig. 3 Method flow chart

2 阻容网络参数计算

2.1 避雷器阀片本体电阻和电容

对图 2 所示的 220 kV 避雷器进行交流泄漏电流的试验^[13], 根据测量数据记录, 可以换算出来 220 kV 避雷器在 130 kV 电压下, 取阻性电流的平均值为 62 μA , 可粗略计算出对应的避雷器电阻值约为 2.1 G Ω , 每节避雷器的电阻约为 1.05 G Ω 。计算时各相避雷器阀片本体电阻均取 1.05 G Ω 。

阀片自电容参数通过有限元计算得到。根据参考相关文献^[14], 通常阀片的介电常数取 750 左右, 但是在该研究分析中, 根据现场所测单相数据, 阻性电流基波的百分比的平均值是 9.1%, 小于 10%, 说明 220 kV 避雷器的阻性电流偏小, 容性电流偏大, 出现这种情况的原因可能是由于避雷器的老化造成的, 所以取阀片的介电常数为 1 000, 用来更真实地模拟实际的 220 kV 避雷器。一般, 电阻片组是有很多个电阻片叠加而成的, 相隔一些电阻片, 添加一个导体垫片, 起到均压的作用。已知该型号的避雷器由 44 个电阻片叠加而成, 导体垫片添加的位置分别为(自上而下): 第 8 个电阻片下面、第 21 个电阻片下面, 单个电阻片的高度为 20 mm, 半径为 525 mm。

对阀片建模时, 可以忽略周围支撑杆(绝缘体)的影响, 将其简化成 2D 的轴对称模型来分析, 见图 4。外面的为空气层, 介电常数取 1, 阀片的介电常数取 1 000, 导体的介电常数取 7。通过仿真计算, 可得到阀片各部分电容值, 求解相邻导体垫片之间的互容的串联值, 最终得到阀片的自电容为 34.42 pF。

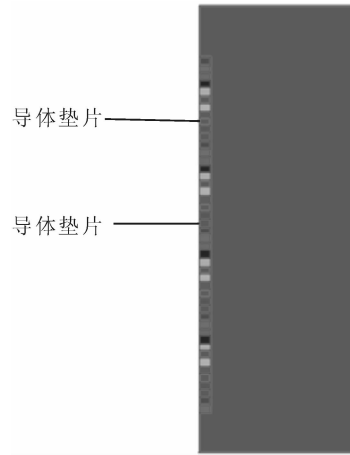


图 4 避雷器阀片的 2D 模型

Fig. 4 2D valve disc model of MOA

2.2 避雷器部分电容计算

首先在机械设计软件 SolidWorks 中按图 1 所示的塔型实际结构, 对导线、绝缘子、连接金具等进行一定程度的简化后, 建立 1:1 的 3D 结构模型, 再导入 Ansys 中得到三相有限元仿真模型见图 5。另外, 在建立单相有限元仿真模型时, 仅保留三相模型中的中间回线路对应的一侧避雷器、电缆头以及连接导线, 其余设备均除去。对避雷器高压端施加高电位, 计算得到整个场域的电位分布云图见图 6, 从图 6 中可看出, 单相和三相情况下避雷器最上端导体的电位最高, 接地支撑由于与大地直接相连电位最低, 均与实际相符。计算结果云图过渡均匀, 说明网格的处理比较合理, 计算结果达到了较高精度。

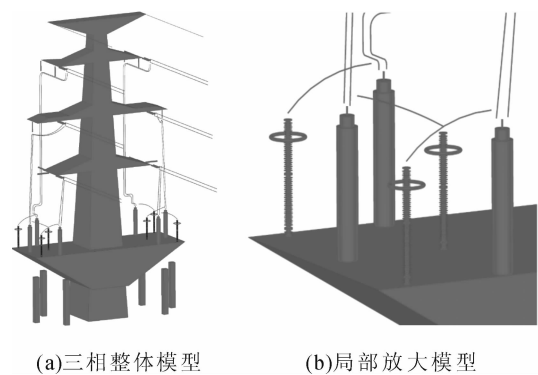
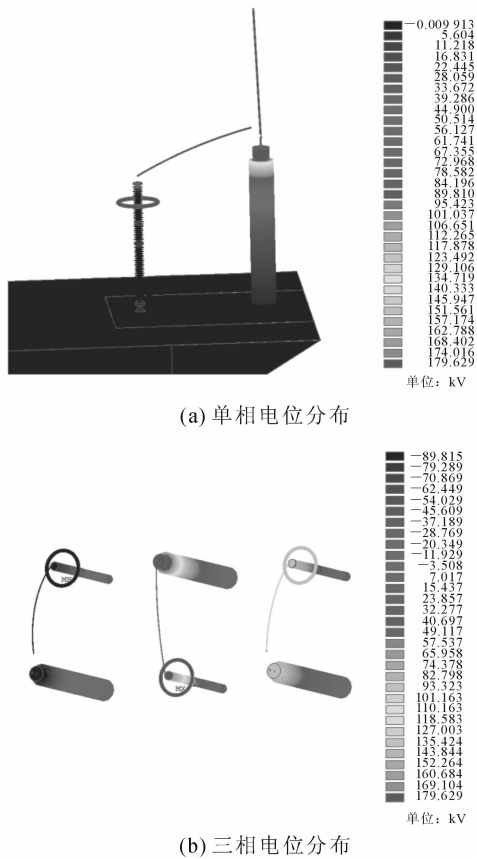


图 5 三相避雷器有限元模型

Fig. 5 Finite element model of three-phase arrester

在 ATP 中分别建立单相避雷器和三相避雷器的阻容网络电路模型, 单相阻容网络模型按照图 3 方式配置, 单相电源加在电极和大地之间。考虑 220 kV 双回输电线路相序布置的不同情况, 一种相序布置依次为 B、C、A(逆序超前), 即 C 相避雷器在



(a) 单相电位分布

(b) 三相电位分布

图 6 避雷器电位分布云图

Fig. 6 Potential distribution of three-phase surge arrester

中间,另一种相序布置依次为 B、A、C(顺序超前),即 A 相避雷器在中间。以逆序布置为例,三相仿真电路

见图 7。图 7 中: $C_{ij}(i \neq j, i, j=1, 2, 3, 4, 5, 6)$ 表示导体 i 与导体 j 之间的互容, $C_{i0}(i=1, 3, 5)$ 表示导体 i 的对地自电容; C 和 R 分别表示避雷器阀片本体电容和电阻; U_a, U_b, U_c 为三相交流电源,相相差为 120° ,频率为 50 Hz ,不同相序布置下均将中间相的初相角设为 0° ; I_a, I_b, I_c 为各相避雷器的全电流。

结合图 2 和图 7 可看出,每相避雷器高压结线端的对地电容($C_{10}, C_{20}, C_{30}, C_{40}, C_{50}, C_{60}$)对全电流的测量结果并无影响,在各相 MOA 底端测得的全电流所包含的耦合容性电流主要是流过邻相间互电容的电流, C 相避雷器位于中间时的相间干扰互电容值见表 1。由于三相避雷器俯视成三角形排列,A、B、C 三相两两相邻,相间互电容均不能忽略。对比相间电容值可知,邻相避雷器高压端间的互电容(C_{13}, C_{35}, C_{15})比其他相间互电容大一个数量级左右,对全电流和相角差的测量影响最大。

3 仿真结果及对比分析

将通过有限元数值计算得到的部分电容参数及阀片本体电阻和电容测试结果代入仿真模型中,通过仿真计算,即可分别得到避雷器不考虑相间干扰(单相)和考虑相间干扰(三相)时的全电流、相角差和阻性电流分量。考虑 220 kV 双回输电线路相序布置的不同情况,逆序布置的仿真结果见表 2,顺序布置的仿真结果见表 3。

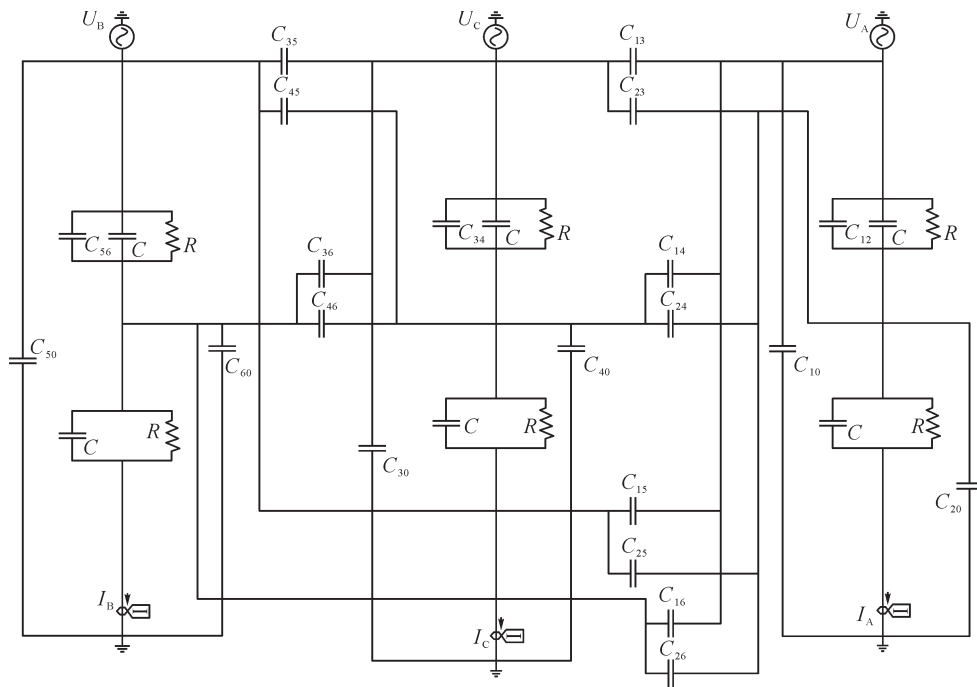


图 7 ATP 三相仿真电路

Fig. 7 Three-phase simulation circuit in ATP

表1 相间干扰互电容值

Table 1 Partial capacitance of interphase interference

备注	互电容名称	3D有限元数值 计算结果/pF
AC相互电容	C_{13}	13.480 0
	C_{14}	0.152 6
	C_{23}	0.132 9
	C_{24}	0.009 8
	C_{35}	42.818 0
BC相互电容	C_{36}	0.415 1
	C_{45}	0.478 6
	C_{46}	0.029 3
	C_{15}	45.174 0
	C_{16}	0.474 0
AB相互电容	C_{25}	0.544 1
	C_{26}	0.029 4

表2 逆序布置的仿真结果

Table 2 Simulation results of MOA inreverse
phase sequence

计算结果	全电流幅 值/mA	相角差/(°)	阻性电流 幅值/mA	阻性基波 百分比/%
单相	0.909 9	84.655	0.084 8	9.32
A相	0.901 6	85.158	0.076 1	8.44
三相 B相	0.898 0	84.158	0.091 4	10.18
C相	0.888 3	84.486	0.085 4	9.60
三相大小 关系	$I_A > I_B > I_C$	$\delta_A > \delta_C > \delta_B$	$I_{BR} > I_{CR} > I_{AR}$	—

表3 顺序布置的仿真结果

Table 3 Simulation results of MOA inpositive
phase sequence

计算结果	全电流幅 值/mA	相角差/(°)	阻性电流 幅值/mA	阻性基波 百分比/%
单相	0.909 9	84.655	0.084 8	9.32
A相	0.888 7	84.614	0.083 4	9.39
三相 B相	0.896 9	85.033	0.077 7	8.66
C相	0.903 0	84.081	0.093 1	10.31
三相大小 关系	$I_C > I_B > I_A$	$\delta_B > \delta_A > \delta_C$	$I_{CR} > I_{AR} > I_{BR}$	—

文[15]指出三相直线排列 MOA 在对称布置下的相间干扰对实测电流影响的典型规律如下(B相 MOV 为中间相): 不考虑邻相干扰的理想状态下三相 MOA 泄漏电流关系为 $I_A = I_B = I_C$, 相角差关系为 $\delta_A = \delta_B = \delta_C$, 阻性电流关系为 $I_{AR} = I_{BR} = I_{CR}$; 考虑邻相干扰(邻相干扰电容对称作用于 B 相) 后的泄漏电流关系变为 $I'_A > I'_C > I'_B$, 相角差关系变为 $\delta_A < \delta_B < \delta_C$, 阻性电流关系变为 $I'_{AR} > I'_{BR} > I'_{CR}$, 其中来自于 A 相和 C 相的干

扰电容电流对称叠加到 B 相使得其全电流的容性分量减小, 而阻性分量基本不变。

对比表 2、3 知, 220 kV 线路避雷器在三相情况下, 由于相间干扰电容的影响, 不同的相序布置会对阻性电流产生不同的影响。由表 2 知, 若 C 相避雷器位于中间位置, 会使得 A 相的相角差变大, 阻性电流变小, B 相的相角差变小, 阻性电流变大, 而 C 相的相角差变小, 阻性电流变大, 这与典型的避雷器测量规律不一致^[15]。主要是由于 A、B、C 三相避雷器相对铁塔的位置以及周围带电体分布并不是完全对称, 由表 1 知, B 相对 C 相的互电容明显比 A 相对 C 相的互电容大, 而 B 相对 C 相而言为滞后相, 一般滞后相的影响会使相角差变小, 超前相会使相角差变大^[15], 故 B 相对 C 相的主导作用导致 C 相的相角差略微变小。此时存在如下关系: 全电流的有效值关系为 $I_A > I_B > I_C$; 三相的相角差关系为 $\delta_B < \delta_C < \delta_A$; 阻性电流的大小关系为 $I_{BR} > I_{CR} > I_{AR}$ 。与单相的计算结果对比, A 相的相角差增大了 0.503° , B 相的相角差减小了 0.497° , C 相的相角差减小了 0.169° , 以上即为 220 kV 线路避雷器逆序布置时相间干扰的补偿角度。

由表 3 知, 若 A 相避雷器位于中间位置, 则会使得 B 相的相角差变大, 阻性电流变小, C 相的相角差变小, 阻性电流变大, 而 A 相的相角差变小, 阻性电流变小。同样由于 A、B、C 三相布置的不对称性, C 相和 B 相对 A 相的影响不能完全抵消, AB 相间电容影响更大, 此时 B 相对 A 相而言为滞后相, 所以 A 相的相角差会略微变小。此时存在如下关系: 全电流的有效值关系为 $I_C > I_B > I_A$; 三相的相角差关系为 $\delta_C < \delta_A < \delta_B$, 阻性电流的大小关系为 $I_{CR} > I_{AR} > I_{BR}$ 。与单相的计算结果对比, A 相的相角差减小了 0.041° , B 相的相角差增大了 0.378° , C 相的相角差减小了 0.574° , 此即为 220 kV 线路避雷器顺序布置时相间干扰的补偿角度。可见两种相序布置情况下相间干扰对电流测量结果的影响均不容忽视, 且三相布置的不对称性会使不同相序情况下的影响规律有较大差异。

4 结语

采用数值计算方法, 对两种不同相序布置下的三相 220 kV 线路避雷器进行了阻容网络的等效和精确的仿真计算, 通过对避雷器考虑相间干扰和不考虑相间干扰的定量分析, 实现对阻性电流的准确分析判断, 提高了监测精度, 有效消除了相间干扰。结果表明, 220 kV 线路避雷器在三相情况下, 由于

相间干扰电容的影响,不同的相序布置会对阻性电流的实际测量产生不同的影响,相间干扰补偿角度差别较大。该方法适用于分析各种复杂模型条件下避雷器相间耦合电容对测量阻性电流的影响,也包括分析避雷器周围带电体或其他电场环境所产生的耦合干扰。由于实际工程中三相避雷器的排列布置方式有一定随机性,其所造成的相间耦合的不对称性程度不同,从而使不同相序布置时的相间干扰影响规律差异较大,故要想准确测量各相阻性电流,正确判断避雷器的工作状态,根据三相避雷器的具体布置方式及相序布置情况进行有针对性的仿真计算分析至关重要。

参考文献:

- [1] 严璋. 电气绝缘在线检测技术[M]. 北京:中国电力出版社,1995:28.
YAN Zhang. Electrical insulation on-line detection technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 1995:28.
- [2] 郭磊,张科,陈瑞,等. 金属氧化物避雷器状态评价方法及应用分析[J]. 电瓷避雷器,2013(6):95-99.
GUO Lei, ZHANG Ke, CHEN Rui, et al. The method and application analysis of the metal oxide arrester condition evaluation[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(6): 95-99.
- [3] 李庆玲,王兴贵,李效珍,等. 氧化锌避雷器应用一些问题探讨[J]. 高压电器,2009,45(2):130-131.
LI Qingling, WANG Xingui, LI Xiaozhen, et al. Discussion about application of MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(2):130-131.
- [4] 李顺尧. 金属氧化物避雷器测试方法对比与分析[J]. 高压电器,2010,46(3):94-97.
LI Shunyao. Comparison and analysis of MOA test methods [J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(3):94-97.
- [5] 殷雄开,邵涛,高翔,等. 金属氧化物避雷器检测方法的现状与发展[J]. 高电压技术,2002,28(6):34-36.
YIN Xiongkai, SHAO Tao, GAO Xiang, et al. Present state and future of detecting methods of MOA[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(6):34-36.
- [6] 胡道明,潘文霞. 考虑两种干扰源下的 MOA 在线监测数学模型探讨[J]. 电力自动化设备,2004,24(12):67-69.
HU Daoming, PAN Wenxia. MOA model for on-line monitoring based on two interference sources[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24(12):67-69.
- [7] 李开霞,张金波,胡钢. 用相角差法判断金属氧化物避雷器性能优劣的研究[J]. 高压电器,2008,44(1):23-25.
LI Kaixia, ZHANG Jinbo, HU Gang. Performance evaluation of metal oxide surge arrester with phase difference method [J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(1):23-25.
- [8] 唐炬,苟海丰,张新强,等. 用部分电容法计算和消除相间干扰[J]. 重庆大学学报(自然科学版),1999,22(6):41-46.
TANG Ju, GOU Haifeng, ZHANG Xinqiang, et al. Calculating and eliminating coupling current using the partial capacitance method[J]. Journal of Chongqing University (Natural Science Edition), 1999, 22(6):41-46.
- [9] 丁品南,钟雅风,颜文. 氧化锌避雷器阻性电流测量仪的研制及其应用[J]. 中国电力,2000,33(2):48-50.
DING Pinnan, ZHONG Yafeng, YAN Wen. Development and application of resistive current measuring device for metal oxide gapless arresters[J]. Electric Power, 2000, 33(2):48-50.
- [10] 张志鹏,杨仲江. MOA 谐波阻性电流补偿算法的研究[J]. 高压电器,2013,39(4):49-53.
ZHANG Zhipeng, YANG Zhongjiang. Study on the harmonic resistive current compensation algorithm of MOA [J]. High Voltage Apparatus, 2013, 39(4):49-53.
- [11] 李金亮,阮江军,杜志叶,等. 基于阻容网络的高压避雷器干扰电流分析[J]. 电瓷避雷器,2013(5):101-106.
LI Jinliang, RUAN Jiangjun, DU Zhiye, et al. Analysis of interference current for high voltage arresters based on resistance-capacitance network[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(5):101-106.
- [12] 梁成升. 平行板类电容器电容的计算[J]. 物理与工程,2009,19(1):58-60.
LIANG Chengsheng. The calculation of capacitance on parallel plate capacitor[J]. Physics and Engineering, 2009, 19(1):58-60.
- [13] 杨晓斌. 避雷器试验数据异常的分析及判断[J]. 高电压技术,2002,28(2):55-58.
YANG Xiaobin. Analysis of abnormal test data of arrester [J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(2):55-58.
- [14] 项阳,郭洁,惠华. 电阻片容量对 500 kV 罐式避雷器电位分布的影响[J]. 陕西电力,2009,37(10):33-36.
XIANG Yang, GUO Jie, XI Hua. The potential distribution influence of resistors electric capacity on 500 kV tank arrester[J]. Shaanxi Electric Power, 2009, 37(10):33-36.
- [15] 唐松平. 金属氧化物避雷器现场带电测试相间干扰研究[J]. 电瓷避雷器,2012(1):56-60.
TANG Songping. Study on interference of on-site live measurement of metal oxide arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(1):56-60.

李凌燕(1991—),女,硕士研究生,研究方向为直流输电电磁环境、电磁场数值计算。

杜志叶(1974—),男,硕士生导师,副教授,研究方向为电磁场数值计算、电磁无损检测、高压电气设备状态检修技术。

阮江军(1968—),男,教授,博士生导师,研究方向为电磁场数值计算及其工程应用、高压电器、电磁兼容。

李金亮(1991—),男,硕士研究生,主要从事高电压与绝缘技术方面的研究工作。