

基于“场”和“路”结合的500 kV MOA 带电测量相间干扰研究分析

何大猛

(国网四川省电力公司检修公司,四川成都 610041)

摘要:运用 ANSYS Maxwell 和 EMTP 软件联合仿真,将“场”和“路”相结合的方法用于计算 500 kV MOA 带电测量相间干扰问题,并通过实际运行数据加以验证,为 MOA 在线监测减小相间干扰提供了理论依据和切实可行的办法。

关键词:金属氧化物避雷器(MOA);相间干扰电流;有限元法;相间耦合电容;带电监测

中图分类号:TM862 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2018)05-0063-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.05.013

Study and Analysis on Interphase Interference to Live Line Measurement of 500 kV Metal Oxide Arrester Combined with "Field" And "Circuit"

He Dameng

(State Grid Sichuan Maintenance Company, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: A method combined with "field" and "circuit" is proposed to calculate the interphase interference during live line measurement of 500 kV metal oxide arrester (MOA), which is verified by the joint simulation with ANSYS Maxwell and EMTP. And it provides theoretical basis and practical way to reduce interference effects.

Key words: metal oxide arrester (MOA); interphase interference current; finite element method (FEM); interphase coupling capacitance; live line monitoring

0 引言

近年来,已有不少专家、学者针对 MOA 相间干扰做了大量的研究^[1-8],其中文献[8]基于模拟电荷法提出了相间耦合电流的简化模型,并应用部分电容法计算不同电压等级下的相间耦合电流。模拟电荷法的使用是在所研究的场域边界外的适当地点,用虚设的较简单的电荷分布来代替实际边界上复杂的电荷分布,其效果满足原边界条件,所以模拟电荷法的优点在于方法简单、实用性强^[9]。但是,模拟电荷法仅适用于无界的且介质种类较少以及电极形状比较简单的电场问题。然而 MOA 存在多种介质且介质分界面处形状又比较复杂,模拟电荷法就显出其局限性了^[10-12]。

下面针对上述模拟电荷法的局限性,提出了一种“场”和“路”相结合的方法。运用 ANSYS 和

EMTP 联合仿真来计算 MOA 相间干扰,先采用能较精确处理多介质分布问题的有限元法来计算 MOA 杂散电容和相间耦合电容,再结合“路”的方法计算相间干扰电流,并与实际运行数据进行对比分析。

1 分布电容计算

1.1 有限元模型建立

应用美国 ANSYS 公司的电磁场有限元分析软件 Maxwell 3D 从“场”的角度计算出 MOA 相间干扰时的耦合电容值和杂散电容值。针对最普遍的“—”字排列 500 kV 电压等级 Y20W5-444/1063W 型 MOA,建立了三维有限元模型如图 1 所示。模型由三节单元组成(忽略伞群),节与节之间用金属法兰相连接,顶部有均压环罩入,底部由金属底座支撑。

计算模型中共存在 6 种介质,MOA 各介质的相对介电常数如表 1 所示。

表1 各介质的相对介电常数

| 介质 | 绝缘杆 | SF ₆ | 电阻片 | 瓷套 | 空气 | 金属 |
|--------|-----|-----------------|-----|-----|-----|-----|
| 相对介电常数 | 5.6 | 1 | 740 | 5.0 | 1.0 | 1.0 |

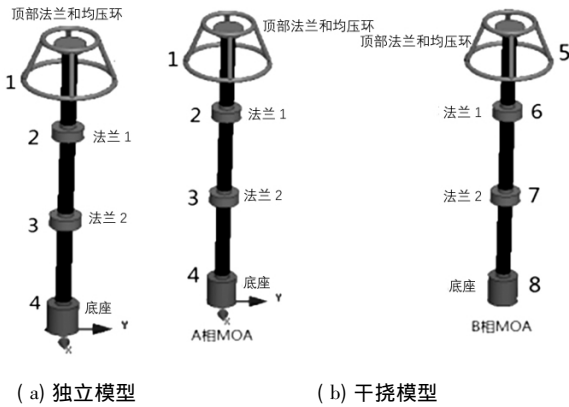


图1 三维有限元模型

1.2 有限元法仿真计算电容值

分别给图1(a)的1到4号导体上施加编号为V₁到V₄的电压,给图1(b)的1到8号导体上施加编号为V₁到V₈的电压。则通过软件计算可得到相应的电容值如表2、表3所示。

表2 独立MOA电容值 单位: pF

| 电压 | V ₁ | V ₂ | V ₃ | V ₄ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| V ₁ | | 55.260 | 3.008 | 0.529 |
| V ₂ | 55.260 | | 45.310 | 0.600 |
| V ₃ | 3.000 | 45.310 | | 44.180 |
| V ₄ | 0.529 | 0.600 | 44.180 | |

表3 干扰时耦合电容值 单位: 为 pF

| 电压 | V ₁ | V ₂ | V ₃ | V ₄ | V ₅ | V ₆ | V ₇ | V ₈ |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| V ₁ | | 55.20 | 2.90 | 0.50 | 3.70 | 1.00 | 0.70 | 0.17 |
| V ₂ | 55.20 | | 45.20 | 0.59 | 1.00 | 0.40 | 0.30 | 0.10 |
| V ₃ | 2.90 | 45.20 | | 43.90 | 0.70 | 0.30 | 0.40 | 0.11 |
| V ₄ | 0.50 | 0.59 | 43.90 | | 0.17 | 0.10 | 0.11 | 0.04 |
| V ₅ | 3.60 | 1.00 | 0.70 | 0.17 | | 55.20 | 2.90 | 0.50 |
| V ₆ | 1.00 | 0.40 | 0.34 | 0.10 | 55.20 | | 45.20 | 0.60 |
| V ₇ | 0.70 | 0.34 | 0.37 | 0.11 | 2.90 | 45.20 | | 43.90 |
| V ₈ | 0.17 | 0.10 | 0.11 | 0.04 | 0.50 | 0.60 | 43.90 | |

2 计算持续电流

运用电力系统和电子线路仿真软件EMTP的ATP程序搭建起相应的“路”模型,计算出相间干扰

时的持续电流值,由于A相和C相距离较大,分布电容对泄漏电流的影响较小,故可以忽略A相和C相之间的干扰影响情况。

2.1 A相干扰情况分析

500 kV的MOA每节单元有54块电阻片,在正常运行时,MOA流过的电流处于小电流区,电阻片的电阻可以认为是固定值,为4400 kΩ。所以,考虑杂散电容后,每相MOA的简化模型如图2所示。

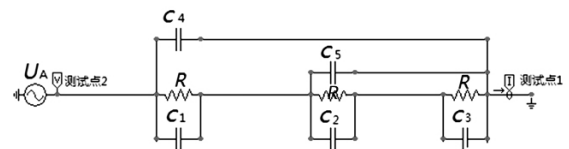
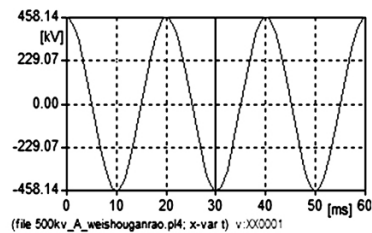
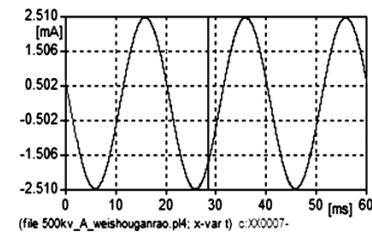


图2 A相MOA考虑杂散电容简化模型

图2中,U_A是峰值为324×√2 kV的正弦电压(Y20W5-444/1063W型MOA的持续运行电压峰值);R为54块电阻片的串联电阻值;C₁、C₂、C₃分别为A相MOA考虑杂散电容后第1节、第2节、第3节单元的等效电容值;C₄、C₅分别为高压端和中间法兰对地的杂散电容值(由图2可以得到)。在测试点1和测试点2处分别可以测得未受干扰时的A相MOA的持续运行电压和持续电流波形,如图3所示。



(a) 电压



(b) 电流

图3 未考虑相间干扰时,A相MOA的持续运行电压、电流波形

从图3可以看出,A相MOA持续运行电压峰值为458.14 kV,持续运行电流峰值为2.51 mA、有效

值为 1.775 mA; 电流波形超前电压波形 4.16 ms, 即 74.88° , 所以电流超前电压的相位角 74.88° 。根据投影法, 可以计算出其电流阻性分量有效值为 $I'_{RA} = I'_A \times \cos\varphi'_A = 0.463 \text{ mA}$ 。

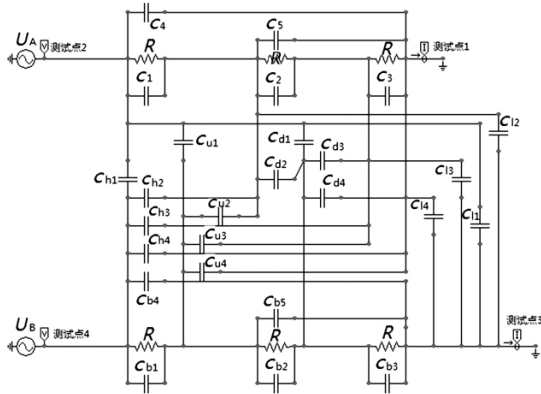
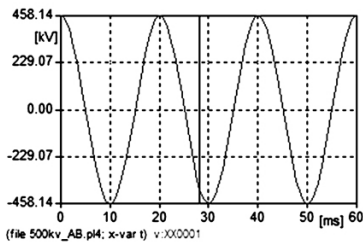
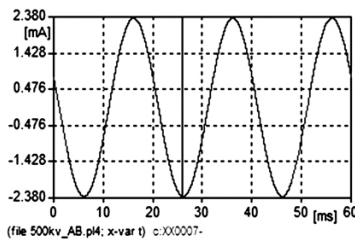


图 4 B 相对 A 相干扰的电路模型

考虑相邻 B 相 MOA 对 A 相的干扰后, 其电路模型如图 4 所示。图 4 中 $C_{h1} - C_{h4}$ 、 $C_{u1} - C_{u4}$ 、 $C_{d1} - C_{d4}$ 、 $C_{l1} - C_{l4}$ 分别为 B 相 MOA 的 5、6、7、8 号导体对 A 相 MOA 的 1、2、3、4 号导体的耦合电容, 计算结果如图 5 所示。



(a) 电压



(b) 电流

图 5 B 相干扰时, A 相电压、电流波形

从图 5 可以看出, 有 B 相 MOA 干扰后, A 相 MOA 的持续运行电压峰值为 458.14 kV, 持续运行电流的峰值为 2.38 mA, 计算成有效值为 $I'_A = 1.683 \text{ mA}$; 电流波形超前于电压波形 3.89 ms, 即 $(3.89/20) \times 360^\circ = 69.84^\circ$, 所以电流超前电压的相位角 $\varphi'_A = 69.84^\circ$ 。根据投影法, 可以计算出其电流的阻性分量有效值为 $I'_{RA} = I'_A \times \cos\varphi'_A = 0.580 \text{ mA}$ 。

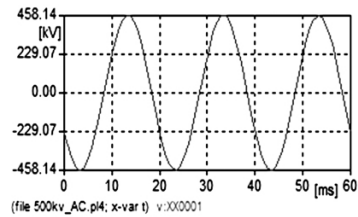
对比图 3 和图 5 的计算结果可以看出, 由于 B 相

MOA 的干扰, 使得 A 相 MOA 的持续电流从 1.775 mA 减小到了 1.681 mA, 电流超前电压的相位角从 74.88° 减小到了 69.84° , 减小了 5.04° , 然而电流的阻性分量却从 0.463 mA 增加到 0.580 mA, 增加了 25.27%。

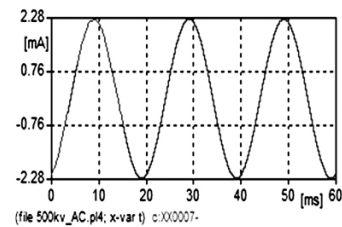
2.2 C 相干扰情况分析

同理, 只需把上述图 2 和图 4 中的正弦电压 U_A 换成 C 相持续运行电压就可以求出关于 C 相的干扰情况, 如图 6 所示。

从图 6 可以看出, 干扰后 C 相 MOA 的持续运行电流的峰值为 2.28 mA, 计算成有效值为 1.63 mA; 电流波形超前于电压波形 4.35 ms, 即 $(4.35/20) \times 360^\circ = 78.3^\circ$ 。所以电流超前电压的相位角 φ'_C 为 78.3° 。根据投影法, 可计算其电流阻性分量的有效值为 0.327 mA。



(a) 电压



(b) 电流

图 6 B 相 MOA 干扰时, C 相的持续运行电压、电流波形

可以看出, 由于 B 相 MOA 的干扰, 使得 C 相 MOA 的持续电流从 1.775 mA 减小到了 1.613 mA, 电流超前电压的相位角从 74.88° 增大到了 78.3° , 增加了 3.42° , 然而电流的阻性分量却从 0.463 mA 减小到 0.327 mA, 减小了 29.37%。

2.3 B 相干扰情况分析

由于对称原理, 可以认为 A、C 两相的 MOA 对 B 相的干扰使得 B 相 MOA 的电流值有所减小, 但相位角几乎没有变化, 即全电流为 1.598 mA, 阻性电流为 0.417 mA。

3 试验数据验证

由上节分析可得到 Y20W5 - 444/1063W 型

MOA 在正常运行状态下的仿真数据,如表4所示。

表4 Y20W5-444/1063W型MOA
正常运行状态下仿真数据

| 参数 | A相 | B相 | C相 |
|------------------|--------|--------|--------|
| 全电流 I_{XP}/mA | 1.683 | 1.598 | 1.613 |
| 阻性电流 I_{RP}/mA | 0.580 | 0.417 | 0.327 |
| 容性电流 I_{CP}/mA | 1.580 | 1.543 | 1.579 |
| 相角/(°) | 69.840 | 74.880 | 78.300 |

在相同的被试环境下,可得到该型MOA在正常运行状态下的阻性电流试验数据,如表5所示。

表5 Y20W5-444/1063W型MOA
正常运行状态下阻性电流试验数据

| 参数 | A相 | B相 | C相 |
|------------------|--------|--------|--------|
| 全电流 I_{XP}/mA | 2.071 | 1.884 | 2.000 |
| 阻性电流 I_{RP}/mA | 0.481 | 0.245 | 0.037 |
| 容性电流 I_{CP}/mA | 2.014 | 1.868 | 2.000 |
| 相角/(°) | 76.550 | 82.500 | 88.930 |

从表5可以知道,A、C相全电流基波值相等且略大于B相,阻性电流基波分量C、B、A三相呈递增分布。可见现场测试的环境对测量影响很大。

把表4的仿真数据和表5的试验数据进行对比可以看出:

1) 相间通过耦合电容干扰,使得MOA原有持续电流 I_A 、 I_B 、 I_C 变成了 I'_A 、 I'_B 、 I'_C ,新的持续电流不仅角度发生了变化,幅值也有所改变。如果原来 $I_A = I_B = I_C$,则有 $I'_A > I'_C > I'_B$,且电压电流的夹角为 $\varphi'_C > \varphi'_B > \varphi'_A$ 。

2) 仿真数据的角度偏差为:A相偏差了 5.04° ,B相几乎无偏差,C相偏差了 3.42° ,这完全符合理论推导 $3^\circ \sim 5^\circ$ 的偏差。然而,试验数据的偏差却为:A相偏差了 5.95° ,B相认为无偏差,C相偏差了 6.43° 。

3) 仿真数据比试验数据偏小。出现这种情况的原因有:①仿真中只考虑了基波,即认为电压中不会有谐波干扰,而实际现场测量中,电压会受到谐波干扰,从而数值会比仿真数值大;②仿真中忽略了避雷器伞群的影响,从而忽略了伞群对耦合电容的影响,这会使得耦合电容值变大,从而仿真数值有所偏小;③现场试验测试时,避雷器表面有污垢,测试时的天气状况等因素会使得测试数据有所偏大;④避雷器长期运行,电阻片会有所老化,从而测试数据也会比仿真数据偏大;⑤测试设备本身也有误差,可能使得测试数据偏大。

4 结 语

针对MOA相间干扰引起的误差问题,根据仿真数据和相关试验数据中电压、电流、相位角的变化规律,采取对相角进行适当修正的方法来减小相间干扰的影响,即将所测量得到的 φ'_A 增加 $3^\circ \sim 5^\circ$, φ'_C 相应减小 $3^\circ \sim 5^\circ$,A相和C相的 I'_A 和 I'_C 的值在所测得B相的 I'_B 值基础上适当调大10%,这样就可以消除相间干扰所带来的误差了。

参考文献

- [1] 杨殿成. 金属氧化物避雷器带电测试干扰分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5): 130-132.
- [2] 高峰, 郭洁, 徐欣, 等. 交流金属氧化物避雷器受潮与阻性电流的关系[J]. 高电压技术, 2009, 35(11): 2629-2633.
- [3] 张泽华. MOA带电测试的现场干扰问题[J]. 高电压技术, 2001, 27(104): 73-74.
- [4] 赵伟, 万德均, 岳建民. 金属氧化物避雷器带电测量相间干扰研究[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(1): 87-90.
- [5] 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.
- [6] 徐志钮, 赵丽娟, 丁傲, 等. 一种新的MOA阻性电流提取算法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12): 47-51.
- [7] 王洪新, 贺景亮. 氧化锌避雷器在线监测中相间干扰的分析研究[J]. 高电压技术, 1997, 23(2): 26-30.
- [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, 1999, 22(6): 41-46.
- [9] 任新宇. 模拟电荷法原理及其应用概述[J]. 科学之友, 2009, 4(11): 1-3.
- [10] 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.
- [11] 郭洁, 何计谋, 李晓峰. 750 kV金属氧化物避雷器电位分布研究[J]. 中国电力, 2006, 39(1): 15-17.
- [12] 颜旭, 陈绍东, 江润志, 等. 自然雷电下氧化锌避雷器残压特征分析[J]. 中国电力, 2013, 46(7): 72-76.

作者简介:

何大猛(1988), 硕士、工程师, 研究方向为电气设备电磁分析与电力系统过电压防护。

(收稿日期: 2018-05-19)