

# 考虑相角特征的无死区新型触/漏电保护技术

陈义刚<sup>1</sup> 李浩<sup>2</sup> 范康林<sup>3</sup> 罗明才<sup>3</sup>

(1. 四川省电力公司, 四川 成都 610041; 2. 四川大学电气信息学院, 四川 成都 610065;  
3. 自贡电业局, 四川 自贡 643000)

**摘要:** 针对现有基于剩余电流保护技术的漏电保护器存在保护死区的不足, 基于正常剩余电流与触/漏电故障电流之间的相位关系, 提出电流分离技术, 将触/漏电电流从总剩余电流中分离出来。提出了一种新型无死区漏电保护原理, 基于DSP对其实施方案进行了研究, 并通过数字仿真证明了该方法的正确性和可行性。与现有基于剩余电流幅值和幅值变化量的漏电保护技术进行的对比结果证明, 能有效消除保护死区, 极大地提高保护装置动作的可靠性。

**关键词:** 剩余电流; 漏电保护; 保护死区; 电流分离技术; DSP

**Abstract:** The residual current protective technique and its major deficiencies are investigated. It is pointed out that the touch/leakage current could be extracted from the total residual current by using current separation technology based on the phase relationship between normal residual current and touch/leakage current. A novel leakage current protection principle without protection dead-zone is proposed. The implementation program based on DSP is investigated. The proposed method proves to be accurate and feasible in digital simulations. Compared to the existing techniques either based on residual current amplitude or its variation, the proposed method can effectively eliminate protection dead-zone and drastically improve the reliability of protection devices.

**Key words:** residual current; leakage current protection; protection dead-zone; current separation technology; DSP

中图分类号: TM772 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)02-0035-05

电流动作型剩余电流保护装置(residual current devices, RCDs), 俗称漏电保护器, 是广泛应用于低压农村电网的剩余电流保护装置之一, 是防止人身触电伤亡事故和因漏电事故引起的电气火灾等最基本、最重要的保护手段<sup>[1-3]</sup>。1928年, 德国人提出的剩余电流动作型触/漏电分断保护方法奠定了剩余电流动作型漏电保护器的理论基础<sup>[4]</sup>。随着技术发展, 在最初的电流动作型基础上, 相继出现了电流脉冲动作型、电流鉴相动作型等剩余电流保护装置, 并取得了一定的应用成果。但现有漏电保护器通常是根据总剩余电流的幅值或幅值变化量大于某个规定值而动作。就动作特性而言, 现有剩余电流保护装置大多对触/漏电故障电流信号的选择性不强, 均存在一定的保护死区。因此, 结合触/漏电故障电流的固有属性和特征, 研究无保护死区的新型技术难题<sup>[1]</sup>, 具有重要理论价值和现实意义。

漏电保护装置, 是当前工程实践中面临的理论和技针对漏电保护装置的选择性和动作可靠性问题, 国内外开展了大量研究。学者李奎等分析了触/

漏电故障电流与剩余电流之间的相角关系, 提出了各相剩余电流及其变化量的计算公式, 提出用剩余电流及其变化量作为判据, 进行触/漏电故障保护的方法<sup>[7-8]</sup>。学者李春兰等在人体触电电流信号检测方法上开展了研究, 提出了基于小波变换、混沌理论和BP神经网络检测算法<sup>[9, 10]</sup>。学者蔡志远提出基于剩余电流和漏电阻抗保护方案, 在理论上可避免负荷投切对保护的影响<sup>[11]</sup>。文献[12]通过在线监测泄漏电流和环境因素变化, 自动调整保护装置的动作阈值, 提高保护装置的动作可靠性。文献[13]用MSP430单片机实现了数字式漏电保护器。这些研究在算法、特征量和硬件实现等方面取得一些进展, 但保护可靠性、选择性等方面问题仍需深入研究。

剩余电流是指流过剩余电流保护装置主回路的电流瞬时值的矢量和(用有效值表示)<sup>[5]</sup>。因电网与设备的绝缘水平不可能绝对理想, 均存在对地绝缘电阻和分布电容, 因此必然存在一定的泄漏电流。当三相泄漏电流不平衡时, 就存在自然剩余电流 $I_0$ 。当发生触/漏电故障时, 故障电流 $I_f$ 汇入正常自然剩余电流, 形成总剩余电流 $I_h = I_0 + I_f$ , 该电流即为

基金项目: 四川省科技支撑计划(2010GZ0256); 四川省电力公司资助项目

装置检测到的电流。可见,现有装置检测到的剩余电流与触/漏电故障电流是两个不同物理量的总和。因三相线路绝缘水平、所接设备、漏电状态可能不同,自然剩余电流的相角是任意的,触/漏电事故又可能发生在任意一相,因此,触/漏电流与自然剩余电流之间的相位差是任意的。触/漏电流与自然剩余电流间的相位关系具有不确定性,导致检测到的总剩余电流并不一定必然增大。因此,仅检测剩余电流幅值或其变化量难以确保保护装置正确动作,必须考虑相位关系。

以上分析可见,如果能在检测到的总剩余电流中将触/漏电故障电流与自然剩余电流有效地分离开来,就可能提高保护的可靠性和选择性。在研究现有剩余电流保护技术的基础上,通过分析剩余电流幅值与相位的关系,提出了触/漏电故障电流的分离方法和有效值计算公式,以及基于DSP技术的新型触/漏电保护装置的实现方法,仿真证明,该方法可有效地提高漏电保护装置的动作可靠性和选择性。

### 1 剩余电流保护原理与保护死区

图1为中国低压供电系统采用的三相四线制中性点直接接地系统中的电流动作型剩余电流保护原理图<sup>[1]</sup>。当无触/漏电故障时,电流互感器TA一次侧电流矢量和为零。当任意一相有触/漏电故障发生时,有

$$I_{L1} + I_{L2} + I_{L3} + I_N = I \neq 0 \quad (1)$$

式中  $I$  为剩余电流,即保护装置检测到的电流。

从原理上看,剩余电流保护装置实际检测到的电流并非触/漏电故障电流本身,而是包含自然漏电流在内的总剩余电流。如果  $I_m$  为保护装置动作整定电流值,  $I_{rp}$  为驱动装置动作的故障电流临界值,  $\varphi$  为  $I_r$  与  $I_0$  的相位差,则装置动作临界条件为

$$I_m = \sqrt{I_0^2 + I_{rp}^2 + 2I_0 I_{rp} \cos\varphi} \quad (2)$$

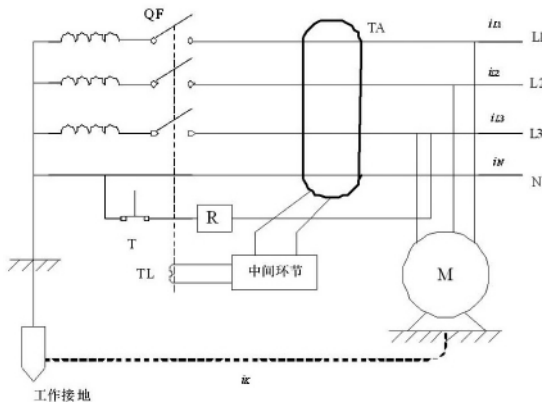


图1 电流动作型保护器原理

根据式(2)可作出电流动作型保护装置运行特性曲线,如图2。由图可见,存在保护死区,且存在欠灵敏易拒动区(II区)和过灵敏易误动区(III区),仅在很小范围内满足保护特性(I区)<sup>[6]</sup>。

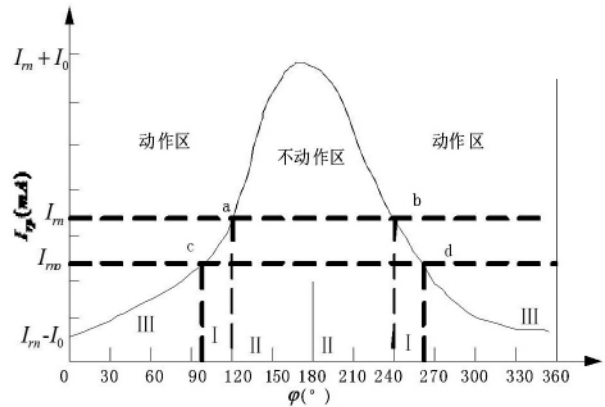


图2 电流动作型保护运行特性曲线

电流脉冲动作型保护装置根据触/漏电故障电流为突变信号的特点,用剩余电流变化量  $\Delta I = |I_h| - |I_0|$  作动作判据,其临界动作条件为

$$I_m = \sqrt{I_0^2 + I_{rp}^2 + 2I_0 I_{rp} \cos\varphi} - I_0 \quad (3)$$

由此可作出电流脉冲动作型的运行特性曲线,如图3。与电流动作型相比,脉冲动作型装置增加了一个第2动作区,减小了但未完全消除保护死区<sup>[4]</sup>。

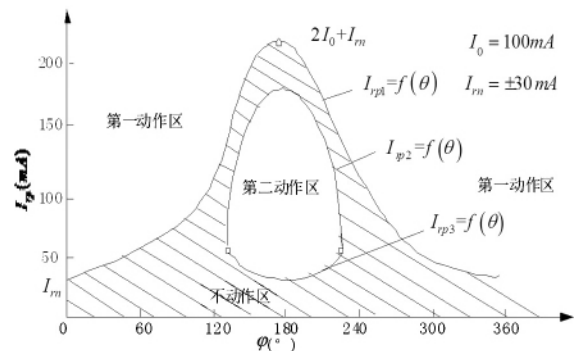


图3 电流脉冲动作型保护运行特性曲线

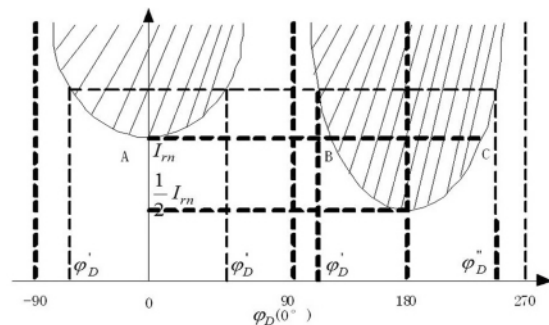


图4 电流鉴相型保护运行特性曲线

电流鉴相型保护装置,通过鉴别触电电流对剩余电流相位的改变来获取信号,在一定条件下提高了运行特性。但该方法假设人体阻抗为纯阻性,触电电流与触电相电压同相位<sup>[6]</sup>。如果偏离该条件,

运行特性非理想,如图4,  $\varphi_D$  为触电电流与标准电压间的相位差。当  $\varphi_D$  在  $\pm 90^\circ$  左右时,触电动作电流非常大,保护器往往拒动。

## 2 触/漏电流分离技术

电流分离型保护装置利用触/漏电流与自然剩余电流的不同特征,将触电电流从总剩余电流中提取出来,提取出的信号仅与触电电流有关,从而具有较好的选择性和更高的可靠性<sup>[1,6]</sup>。

如图5,在工频下,设故障前后剩余电流间的相角差为  $\theta$ ,由余弦定理可得电流幅值间的关系为

$$I_r^2 = I_0^2 + I_h^2 - 2I_0I_h\cos\theta \quad (4)$$

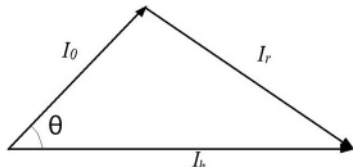


图5 合成剩余电流矢量图

现有保护装置不能直接测量触/漏电流  $I_r$ ,而故障前后的剩余电流  $I_0$ 、 $I_h$  可直接通过零序电流互感器测量。由式(4)可知,如果能确定等式右边第三项,就可求得  $I_r$  的幅值。设故障前剩余电流为

$$i_0 = \sqrt{2}I_0\cos(\omega t) \quad (5)$$

故障后剩余电流为

$$i_h = \sqrt{2}I_h\cos(\omega t + \theta) \quad (6)$$

将两者相乘可得

$$\begin{aligned} i_0i_h &= \sqrt{2}I_0\cos(\omega t)\sqrt{2}I_h\cos(\omega t + \theta) \\ &= I_0I_h\cos\theta + I_0I_h\cos(\omega t + \theta) \end{aligned} \quad (7)$$

对式(7)的结果进行平均,有

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi}\sqrt{2}I_0\cos(\omega t)\sqrt{2}I_h\cos(\omega t + \theta)d(\omega t) = I_0I_h\cos\theta \quad (8)$$

在数字式保护装置中,对离散信号进行数字处理,积分运算可由式(9)实现。设检测到的剩余电流为  $i$  在发生触/漏电故障以前  $i$  为自然剩余电流  $i_0$ ,故障后  $i$  变为含触/漏电流的总剩余电流  $i_h$ 。因此有

$$I_0I_h\cos\theta = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N-1}i(M-N+n)i(M+n) \quad (9)$$

其中,  $M$  为触/漏电故障起始点;  $N$  为一个周期的采样点数。有效值平方  $I_0^2$  和  $I_h^2$  为

$$I_0^2 = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}i^2(M-N+n) \quad (10)$$

$$I_h^2 = \frac{1}{N}\sum_{n=0}^{N-1}i^2(M+n) \quad (11)$$

将式(9)~(11)的计算结果代入式(3),可得触/漏电流有效值为

$$I_r = \sqrt{I_0^2 + I_h^2 - 2I_0I_h\cos\theta} \quad (12)$$

## 3 无死区漏电保护器技术方案

基于上述原理的新型保护装置原理如图6,由检测元件、中间环节、执行机构和试验装置构成。检测元件为零序电流互感器,将剩余电流转换为中间环节可以接收的电压或功率信号。中间环节对信号进行采样和A/D转换。DSP芯片读取数据并进行处理。执行机构受中间环节的指令控制,用以切断主回路电源。试验装置用以检验保护器能否正常动作。核心部分是中间环节,关键在于对采样信号的数字处理。为进行如式(9)的乘法运算,以某采样时刻前一周期数据与后一周数据相乘。采用滑动窗口计算,每次滑动步长设为  $H$ 。 $H$  设置为大于DSP芯片单次计算触/漏电流有效值的时间(主要由DSP芯片的计算速度决定)。

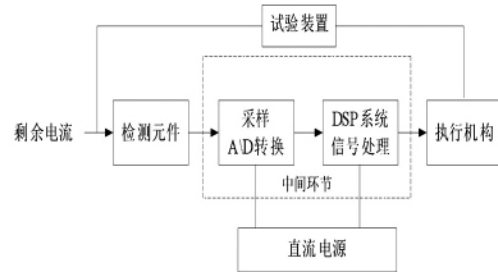


图6 漏电保护装置组成框图

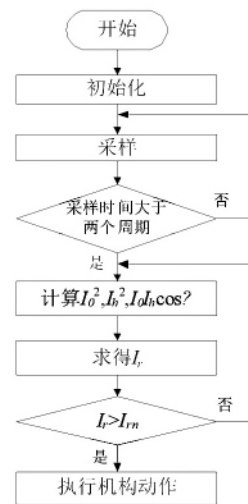


图7 漏电保护装置工作流程图

图7为保护装置工作流程图,步骤如下。

- ①对保护装置进行初始化设置,包括额定动作值  $I_{rn}$ 、单次相乘周期数、滑动步长  $H$  等;
- ②采集剩余

表1 仿真结果及误差

样本	触电流 $I_r$		触电前正常剩余电流 $I_0$		触电后总剩余电流 $I_h$		检测结果 $I_{rms}/mA$	误差/%
	幅值/mA	相位/ $^\circ$	幅值/mA	相位/ $^\circ$	幅值/mA	相位/ $^\circ$		
1	109.98	-112.21			101.61	59.48	109.78	-0.1819
2	109.92	-125.15	11.84	111.05	121.29	-55.62	117.81	7.1779
3	109.97	5.4			107.84	-168.99	117.96	7.2656
4	43.97	-119.36			24.36	-1.16	43.75	-0.5003
5	43.92	122.83	38.99	96.57	80.69	-68.37	43.79	-0.2960
6	43.92	0.46			56.92	-135.19	43.81	-0.2505

表2 对比结果

样本	$I_0/mA$	$I_h/mA$	$I_r/mA$	$\varphi/^\circ$	$\theta/^\circ$	$\varphi_D/^\circ$	所提方法		电流动作型		电流脉冲型		电流鉴相型	
							$I_{rms}/mA$	$e/\%$	$I_1/mA$	$e/\%$	$I_2/mA$	$e/\%$	$I_3/mA$	$e/\%$
7	20	31.3	12.3	29.2	11.1	149.2	12.3	0.0	31.3	154.5	11.3	-8.1	21.1	71.5
8	20	20.0	20.9	121.4	62.9	118.6	20.8	-0.5	20.0	-4.3	0.0	-100.0	20	-4.3
9	20	16.6	34.8	163.7	143.9	76.3	34.6	-0.6	16.6*	-52.3	3.4*	-90.2	8.2*	-76.4
10	100	113.7	24.5	61.7	10.9	178.3	24.5	0.0			13.7	-44.1	48.9	99.6
11	100	80.7	80.2	128.2	51.3	111.8	79.8	-0.5	无法投运		0.5*	-99.4	59.6	-25.7
12	100	73.2	137.9	149.1	104.5	90.9	137.4	-0.4			26.8*	-80.6	4.3*	-96.9

注: 额定动作值 30 mA; 带下划并加粗表示此时保护装置误动; 后跟\* 号表示此时保护装置拒动;  $\varphi$  为  $I_r$  与  $I_0$  间的夹角;  $\varphi_D$  为  $I_r$  与标准电压间的夹角;  $I_1$ 、 $I_2$ 、 $I_3$  分别为电流动作型、电流脉冲型、电流鉴相型方法检测到的触电流有效值;  $e$  为百分误差; 其他参数意义同前。

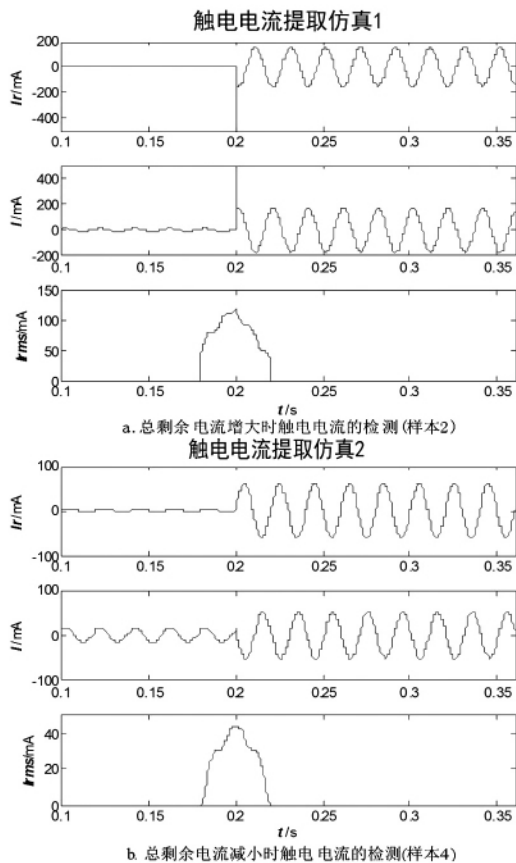


图8 触电流的检测

电流波形, 通过 A/D 转换将所采集的波形转化成数字信号并送入缓存器暂时存储; ③当采集到的数据长度大于 2 倍单次相乘周期数时开始计算, 若计算结果大于额定动作值, 发保护动作信号; 否则, 进入步骤 4); ④以相同计算窗口长度延后步长 H 继续计算。

## 4 仿真验证

### 4.1 检测精度

在通用 PSCAD/EMTDC 中进行低压电网人体触电仿真, 得数据样本, 然后在 Matlab 提取人体触电流有效值。仿真中采用 IEC 60990 推荐模型<sup>[14]</sup>; 采样频率为 5 kHz, 即每周期采样  $N = 100$  点; 前后相乘周期数取为 1; 滑动步长  $H$  取 0.2 ms, 即一个采样间隔。

图 8 给出了两个触电流检测算例。图 8(a)、(b) 中, 第一图为触电流  $I_r$ , 第二图为剩余电流  $I$ , 第三图为所提方法检测出的触电流有效值  $I_{rms}$  变化波形。当有触电发生时,  $I_{rms}$  开始上升, 经一个前

后相乘周期数达到最大值(检测结果)。  $I_r$  越大  $I_{rms}$  上升越快,越早达到额定动作值,具有反时限特性。仿真结果如表1表中以C相电压相位为参考相位。可见,无论自然剩余电流、触电电流、触电后总剩余电流三者之间相位关系如何,所提方法均能准确检测触电电流,相对误差不超过10%。样本2和3误差较大主要是由于该样本触电电流的尖峰较大,加入适当的滤波环节消除高频分量或增大前后相乘周期数平均电流尖峰的影响,可进一步减小误差。

#### 4.2 与现有技术对比

假设某低压配电网中自然剩余电流为  $I_0$ ,如图9(a)。若A相人体触电,触电电流为  $I_r$ ,  $\alpha$  为  $I_r$  与触电相电压间的相角差,则此时总剩余电流  $I_h$  幅值增大,如图9(b)。如果发生B相或C相人体触电,此时  $I_r$  与  $I_0$  夹角较大,如果两者幅值又相差不大,  $I_h$  很可能在幅值上变化不大甚至无变化,如图9(c);也可能  $I_h$  不仅不增大,反而减小,如图9(d)。这里针对这几种可能分别进行仿真,用所提方法和现有方法进行检测并比较。

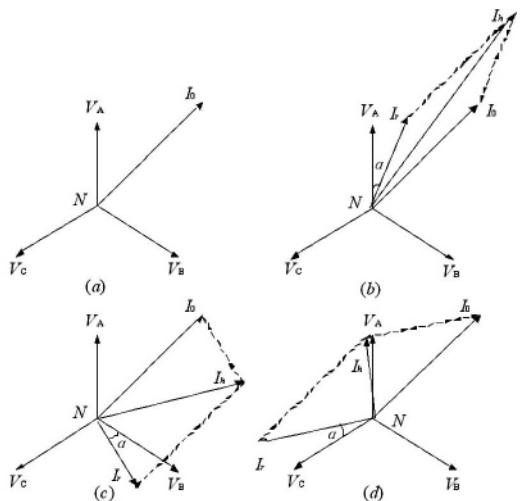


图9  $I_0$ 、 $I_r$ 、 $I_h$  可能分布情况向量图

仿真与比较结果如表2。可见,现有方法的误差较大,且均存在误动和(或)拒动现象。电流动作型,当  $I_0$  超过额定动作值时,无法投入运行;当  $I_r$  与  $I_0$  夹角较小时,即使  $I_r$  幅值未达到动作值,  $I_h$  可能已经超过动作值,可能误动,如样本7;当  $I_r$  与  $I_0$  夹角较大时,即使  $I_r$  已经超过动作值,  $I_h$  可能小于动作值,导致拒动,如样本9。脉冲动作型,当触电事故前后剩余电流幅值不变或变化不大时,检测失效;如果此时实际触电电流  $I_r$  超过动作值,可能拒动,如样本9和11。电流鉴相型,当  $I_r$  与标准电压的相

角差为  $\pm 90^\circ$  左右时,即使  $I_r$  幅值很大,检测结果也很小,易拒动,如样本12;而当  $I_r$  与  $I_0$  夹角为  $180^\circ$  左右时,易发生误动,如样本10。比较可见,所提方法检测精度高,误差小于1%,无论自然剩余电流大小、相位关系、总剩余电流幅值变化大小,均能准确检测出触电电流有效值,可避免拒动、误动,无保护死区,保护选择性和可靠性好。

## 5 结论

1) 揭示了自然剩余电流与触/漏电故障电流间存在的相位关系是导致保护装置存在保护死区的重要原因之一。为此提出了基于触/漏电流分离方法进行保护的思想,具有先进性和可行性。

2) 提出的基于相角关系的触/漏电流分离技术和基于DSP的触/漏电电流有效值提取方法,无论触/漏电电流与自然剩余电流间的相角关系如何,也无论故障后总剩余电流幅值增大还是减小,所提方法均能准确检测出触/漏电流,消除了保护死区,可避免误动或拒动问题。

3) 仿真表明,所提方法对触/漏电故障电流的检测精度高,算法简单,可更好地满足实际漏电保护器要求。

结合工程应用的实际需要,利用所提方法开发新型漏电保护装置是下一步的研究内容。

#### 参考文献

- [1] 夏越,杜松怀,李春兰,等.中国剩余电流保护技术与装置的发展趋势[J].农业工程学报,2010,26(S2):151-155.
- [2] Fabio Freschi. High-frequency Behavior of Residual Current Devices [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2012, 27(3): 1629-1635.
- [3] Xiang Luo, Y. Du, X. H. Wang, et al. Tripping Characteristics of Residual Current Devices under Nonsinusoidal Currents [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(3): 1515-1521.
- [4] 杨东,张应龙,林丛,等.触/漏电保护器[M].北京:化学工业出版社,2007.
- [5] 全国低压电器标准化技术委员会. GB 16916.1-2003/XG1-2010 家用和类似用途的不带过电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB)第1部分:一般规则[S].北京:中国标准出版社,2010.

(下转第72页)

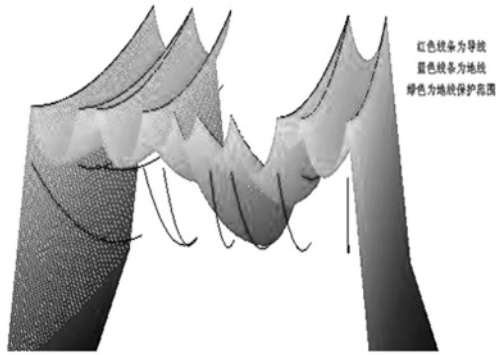


图 10 高低构架地线保护图

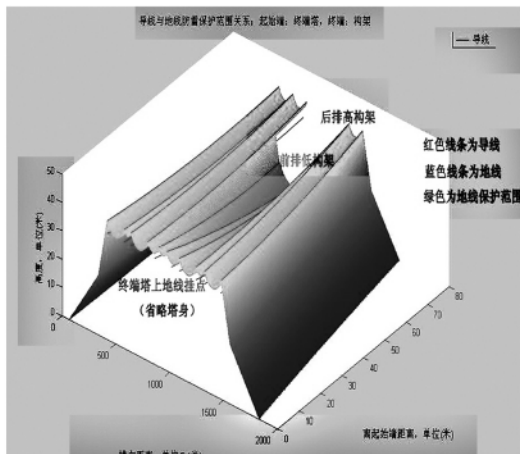


图 11 高低构架地线保护图

## 5 结 语

国网公司的变电站典型设计符合“资源节约型、环境友好型、工业化”的设计要求,具有良好的经济和社会效益。其高低构架出线的地线保护范围

与常规设计不同,传统计算方法复杂且误差较大。

公司在 Matlab 平台下利用其强大的数值计算能力,开发计算绘图软件,完成架空地线架设的理论计算,并能直观方便进行设计调整,满足防雷安全。

在公司设计的多个变电站高低构架出线配合中,使用该软件进行计算验证,取得了较好的效果。

### 参考文献

- [1] 刘振亚. 国家电网公司输变电工程典型设计 [M]. 北京: 中国电力出版社 2005.
- [2] 肖继峰. 现代新型变电站—浅谈 500 kV 圣泉变电站的设计 [J]. 华中电力 2011, 1(24): 11-13.
- [3] DL/T 620-1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合 [S].
- [4] GB 50057-1994 建筑物防雷设计规范 [S].
- [5] 张志涌. 精通 MATLAB 6.5 版 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社 2003.
- [6] 张殿生. 电力工程高压送电线路设计手册 (第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社 2003.
- [7] 孙宇新, 王纪俊. 基于 MATLAB 的避雷针保护范围的计算机辅助分析 [J]. 电力系统及其自动化学报, 2002, 14(6): 63-66.

### 作者简介:

张 磊 (1977), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为输变电电气;

任德顺 (1964), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为输变电电气;

刘成立 (1982), 男, 本科, 工程师, 研究方向为输变电电气。

(收稿日期: 2012-12-13)

(上接第 39 页)

- [6] 滕松林, 杨校生. 触电漏电保护器及其应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- [7] 武一, 李奎, 岳大为, 等. 消除剩余电流保护动作死区的理论与方法 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(6): 44-49.
- [8] 李奎, 陆俭国, 武一. 消除漏电电流保护死区的新技术及其试验方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(20): 28-32.
- [9] 李春兰, 杜松怀, 苏娟, 等. 一种新的基于小波变换和混沌理论的触电信号检测方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(10): 47-52, 154.
- [10] 李春兰, 苏娟, 杜松怀, 等. 基于小波分析和 BP 神经网络的触电信号检测模型 [J]. 农业工程学报, 2010,

26(S2): 130-134.

- [11] 蔡志远, 庞佳, 陈廷辉. 基于剩余电流和漏电阻抗的漏电保护方法的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(12): 61-64.
- [12] 李奎, 陆俭国, 武一, 等. 自适应漏电保护技术及其应用 [J]. 电工技术学报, 2008, 23(10): 53-57.
- [13] 李开成, 刘建锋, 黄海煜, 等. 基于 MSP430 单片机的数字式漏电保护器的研制 [J]. 继电器, 2008, 36(8): 64-67.
- [14] IEC 60990-1999, Methods of Measurements of Touch Currents and Protective Conductor Current [S].

(收稿日期: 2012-12-19)