Vol.33 No.6 **(21**) Jun. 2013

10 kV 小电阻接地系统单相接地故障时的 跨步电压仿真与实验研究

罗隆福!.向博!.许加柱!.陈建平2.杨俊3.汪霄飞4.车红卫3

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;2. 湖南省电力公司,湖南 长沙 410007;

3. 长沙电业局,湖南 长沙 410015;4. 湖南省电力公司试验研究院,湖南 长沙 410007)

摘要:围绕某市10kV配网改消弧线圈接地为小电阻接地系统的工程,对馈线首末端发生单相接地故障时的 接地故障电流进行了计算分析。采用四层土壤模型,对馈线发生单相直接对地短路时的跨步电压分布进行了 有限元仿真计算:并对馈线首末端均发生单相直接对地短路以及单相经横担对地短路时的跨步电压进行了实 验研究。仿真与实验结果的对比表明两者基本保持一致。最后提出了降低跨步电压对人身安全的威胁的措施。 关键词:接地:故障电流:跨步电压:单相直接对地短路:单相经横担对地短路:保护整定:仿真 中图分类号: TM 81

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2013.06.004

引言 0

目前,我国 10 kV 城市配电网普遍采用中性点 经消弧线圈的接地方式,但随着经济高速发展和城 市电网改造的深入,以电缆出线为主、架空出线为辅 的城网结构模式越来越普及。电缆线路的大量采用. 导致配电网中的电容电流迅速增大,原有的接地方 式无论是在抑制系统过电压水平还是在增加消弧线 圈补偿容量方面都存在较大难度[1],且电缆馈线发 生故障一般为永久性故障,适宜迅速切除故障防止 其扩大,因此小电阻接地方式开始得到推广应用^[2]。

消弧线圈接地方式通过线圈产生的感性电流来 补偿系统容性电流,单相接地故障电流很小33;而小 电阻接地系统发生单相接地故障时,通过小电阻来 消耗零序回路电容电流,回路阻抗较小4,接地故障 电流很大,在故障点周围产生很高的跨步电势差,特 别是接地过渡电阻较大时保护不能准确及时动作. 较高跨步电压的持续存在会严重威胁行人安全[2]。 因此,研究跨步电压的分布并降低其引起的人身安 全问题意义重大。

目前混合出线的配网中,架空线路发生单相接 地故障的几率最大,且主要分为单相对地短路(包括 断线掉地、树枝及车辆吊臂碰线等过渡电阻较大的 情况)和单相经横担对地短路(断线掉横担上及绝缘 子被击穿)2类情况[57]。以长沙市某一采用中性点经 小电阻接地方式的变电站为例,对负荷侧的首末端 分别发生单相接地故障时的跨步电压进行仿真和实 验研究,为保护措施的提出和保护参数的整定提供 理论与现实依据。

收稿日期:2012-02-07;修回日期:2013-04-18 基金项目:湖南省电力公司科技项目(HEPC[2009]47) Project supported by Science and Technology Project of Electric Power Corporation of Hunan Province(HEPC[2009]47)

10 kV 小电阻接地系统中的单相短路故障 1

10 kV 出线首末端分别发生单相接地故障时, 由于回路零序阻抗和接地过渡电阻不同,造成接地 故障电流不同,在地表形成的跨步电势差也不同。 此外接地过渡电阻与接地故障条件有关,因此单相 对地直接短路和单相经横担对地短路时的跨步电势 差是不同的。以长沙市某 110 kV/10 kV 变电站的小 电阻接地系统改造工程为例.对其2号主变10kV出 线首末端均发生上述2种单相接地故障时的跨步电 压进行研究。系统及故障点如图1所示:首端短路点 设在 009 号塔杆附近,末端短路点设在 037 号塔杆 附近:故障时 10 kV Ⅱ母仅送出馈线 2 和接地站用 变,而馈线1转由馈线3供电。单相直接对地短路及 跨步测量接线示意图如图 2 所示,图中 Ukh --- Ukh 为 距接地故障点 0~4 m 径向方向上每隔 1 个跨步 (1m)上的跨步电压。单相经横担对地短路及跨步测 量接线示意图如图 3 所示,图中 Uic 为塔杆 1.8 m 高



图 1 10 kV 小电阻接地系统的单相接地 故障点设置情况

Fig.1 Locations of single-phase grounding fault in a 10 kV urban system earthed with low resistance





图 2 单相对地直接短路及相应的跨步 电压实验示意图







Fig.3 Schematic diagram of step voltage test for single-phase cross-arm-passed grounding fault

度与第1个跨步(1m)之间的电压差(即人触及到塔 杆时的手与脚间的接触电势差),Ukb2-Ukb4 为距塔 杆基部1~4m径向方向上每隔1个跨步(1m)上的 跨步电压。

2 单相接地故障时的接地故障电流计算

为了便于与实验结果进行对比分析研究,根据不同的接地方式和接地位置,对相应条件下的接地故障 电流进行了理论计算,为跨步电压的有限元仿真提 供必要的初始加载条件。当小电阻接地系统发生单 相接地故障时,各支路电流方向标示如图 4 所示。

根据图 4,列写电压方程^[8-9]:

$$\left(\frac{1}{R_{\rm N}} + \frac{1}{R} + j\omega C_{\Sigma} + j\omega C_{\Sigma} + j\omega C_{\Sigma}\right) U_{0} = -\left(\frac{1}{R} + j\omega C_{\Sigma}\right) E_{\rm B} - j\omega C_{\Sigma} E_{\rm A} - j\omega C_{\Sigma} E_{\rm C} \quad (1)$$



图 4 小电阻接地系统单相接地故障原理图

Fig.4 Schematic diagram of single-phase grounding fault in system earthed with low resistance

网侧三相电压源保持对称,有:

$$E_{\rm A} + E_{\rm B} + E_{\rm C} = 0 \tag{2}$$

联立式(1)、(2) 可得:

$$U_0 = \frac{-E_{\rm B}}{1 + \frac{R}{R_{\rm N}} + j3\omega RC_{\Sigma}} = \frac{-E_{\rm B}}{1 + \left(\frac{1}{R_{\rm N}} + j3\omega C_{\Sigma}\right)R}$$
(3)

当 B 相发生短路时,根据欧姆定律可得:

$$I_{K} = -\frac{U_{\rm B}}{R} = -\frac{U_{\rm 0} + E_{\rm B}}{R} \tag{4}$$

$$I_{K} = \frac{-E_{\rm B} \left(\frac{R}{R_{\rm N}} + j3\omega RC_{\Sigma}\right)}{R \left(1 + \frac{R}{R_{\rm N}} + j3\omega RC_{\Sigma}\right)} = \frac{-E_{\rm B} \left(\frac{1}{R_{\rm N}} + j3\omega C_{\Sigma}\right)}{1 + \frac{R}{R_{\rm N}} + j3\omega RC_{\Sigma}} \quad (5)$$

其中, R_N 为中性点接地电阻;R为单相接地过渡电阻; U_0 为系统零序电压; I_K 为接地故障电流,由小电阻上的零序电流和对地电容电流组成; U_B 为故障相电压; C_{Σ} 为每相输电线路对地的总电容。

由式(3)、(5)可知:当接地电阻 R_N一定时,单相 接地过渡电阻 R 越小,则系统零序电压越大,接地故 障电流也越大。

根据图 1 所示的实际线路情况可以知道: $R_{\rm N}$ = 10 Ω, C_{Σ} =4.265 88 μF, ω =314 rad/s, $E_{\rm B}$ 的幅值 $E_{\rm B}$ = 10000/ $\sqrt{3} \approx 5774$ (V), C_{Σ} 需根据图 1 系统中不同 型号的架空线和电缆线路 π 型等值电路计算而得; 接地过渡电阻值 R 因接地方式和接地短路点的不 同而存在差异;与中性点的零序电流相比,系统对地 电容电流较小,因此 R 可由式(6)近似计算。

$$R = \frac{U_{\rm B}}{I_{\rm K}} \approx \frac{U_{\rm B}}{3I_0} \tag{6}$$

其中, I_{K} , U_{B} 分别为 I_{K} , U_{B} 的幅值; $3I_{0}$ 为中性点的零 序电流,其与 U_{B} 均可由变电站录波测得。

根据该地区过去的运行经验:当发生对地直接短路时,由于导线线头与地表接触面积小,且接触不良好,所以其过渡电阻 *R* 一般较大,约180~260 Ω,而树枝及车辆吊臂碰线时,由于树干和轮胎的缘故,此过渡电阻值会更大;而当发生经横担对地短路时,由于塔杆内部有钢筋且底部敷设有接地极,接地极与土壤的接触面积稍大,且深入地表,接触良好,故过渡电阻 *R* 较小,约10~20 Ω。实验前的过渡电阻测

第6期

量表明首端 009 杆附近的接地电阻比 037 杆处的接 地电阻小。

3 跨步电压仿真与实验分析

3.1 仿真计算

采用有限元分析软件[10]对 009 杆和 037 杆处单 相直接对地短路引起的跨步电压进行仿真分析。考 虑到土壤导电性能与土壤成分和含水量密切相关, 该地区河流、地下水及降雨充沛,一般随土层深度增 加,土壤含水量增大,导电性能提高,平均电阻率减 小;并且由于实验测试中,将距离接地故障点40m 处视为参考零电位点:因此,有限元仿真以故障点为球 心、半径 r=40 m 的半球为模型,分四层土壤建模[11-12], 如图 5 所示。009 杆附近为含砂粘土[13],电阻率测试 结果:表层厚度 $d_1=0.3$ m,电阻率 $\rho_1=300 \Omega \cdot m$;二层 厚度 $d_{2}=1$ m, $\rho_{2}=100 \Omega \cdot m$;更深层受地下水及城区金 属管道的影响^[13], $d_3 = 3 \text{ m}$, $\rho_3 = 50 \Omega \cdot \text{m}$; $\rho_4 = 30 \Omega \cdot \text{m}_{\circ}$ 037 杆附近为多石含砂土壤[13],分层与上述一致时, 电阻率测试结果: $\rho_1 = 325 \Omega \cdot m; \rho_2 = 140 \Omega \cdot m; \rho_3 =$ 50 $\Omega \cdot m$; $\rho_4 = 30 \Omega \cdot m_o$ 而实验方案中将断线线头固 定于地的矩形小金属板有限元模型如图6所示。



图 5 四层土壤的大地有限元模型 Fig.5 Finite element model of four-layer soil



图 6 金属片有限元模型

Fig.6 Finite element model of sheet metal

a. 009 杆处单相直接对地短路时的跨步电压 仿真。

009 杆处于负荷首端, $R = 190 \Omega_{X_N} = 10 \Omega_{X_{\Sigma}} =$ 4.2658 μF、 $\omega = 314 \text{ rad/s}$ 、 $E_B = 10000/\sqrt{3} \approx 5774(V)$, 由式(5)求得接地点电流为 $I_K = 28.87 \text{ A}$;以接地故障 点为中心、半径 40 m 的半球面作为其参考零电位 点^[14](实验方案中 40 m 处打入零电位接地极,如图 2 所示);距接地故障点 4 m 范围内的大地表面电势 衰减曲线如图 7 所示;跨步电势差的仿真计算结果 如表 1 所示。



图 7 009 杆单相直接对地短路时距接地点 4 m 范围内的电势衰减曲线

Fig.7 Potential attenuation curve of single-phase direct grounding fault at pole 009 (0~4 m away from fault point)

表 1 009 杆单相直接对地短路时 跨步电压仿真结果

Tab.1 Simulative step voltages of single-phase direct grounding fault at pole 009

到故障点	测量点的	跨步	跨步电
的距离/m	电势/V	距离/m	势差/V
0	5744.3	—	—
1	326.36	$0 \sim 1$	5417.94
2	48.047	1~2	278.313
3	10.653	2~3	37.394
4	3.5225	3~4	7.1305

b. 037 杆处单相直接对地短路时的跨步电压 仿真。

大地模型与金属片模型与 009 杆情况相同; 仅近 地表层的土壤电阻率不同, 越往深处越趋于一致; 037 杆为负荷末端, 短路时线路阻抗较 009 杆时大, 故单相接地故障电流较 009 杆时小, $R = 250 \Omega$, $R_N =$ 10 Ω , $C_{\Sigma} = 4.26585 \mu$ F, $\omega = 314 \text{ rad/s}$, $E_A = 10 000/\sqrt{3} \approx$ 5774(V), 由式(5)求得接地点电流为 $I_K = 22.20 \text{ A}$; 大 地表面电势衰减曲线如图 8 所示; 跨步电势差仿真 计算结果如表 2 所示。



图 8 037 杆单相直接对地短路时距接地点 4 m 范围内的电势衰减曲线

Fig.8 Potential attenuation curve of single-phase direct grounding fault at pole 037 (0~4 m away from fault point)

表 2 037 杆单相直接对地短路时 跨步电压仿真结果

Tab.2 Simulative step voltages of single-phase direct grounding fault at pole 037

到故障点	测量点的	跨步	跨步电	
的距离/m	电势/V	距离/m	势差/V	
0	5 582.7	—	—	
1	335.19	$0 \sim 1$	5247.51	
2	52.516	1~2	282.674	
3	11.568	2~3	40.948	
4	3.4999	3~4	8.0681	

单相经横担对地短路的情况,由于塔杆和其底

部接地极模型均复杂且不明确,且实验方案中第1个 跨步需测的是塔杆 1.8 m 高度与距塔杆 1 m 远处的 电压差(即人触摸塔杆时手与脚之间的接触电势差), 并不是电流入地点与1 m 远处的跨步电势差(如图 3 所示),因此本文在仿真部分仅对直接对地短路情 况进行了仿真。

3.2 实验研究

3.2.1 单相直接对地短路

a. 线路首端 009 杆处,将 B 相线头通过金属片 固定于地表浅层,如图 2 所示;距接地故障点 0~4 m 径向方向上每隔 1 个跨步(约 1 m)设置一个测试点 并连接到电压互感器一次侧;电压互感器、录波装置 HIOKI3196 电能质量分析仪;电压互感器、录波装置 及操作人员均处于绝缘垫上,且周围公路设置安全 围栏;距接地点 40 m 处安装接地桩,提供参考零电 位点;接地布置完成后,恢复送电即发生单相直接对 地短路,二次侧跨步电压波形如图 9 所示(CH1— CH4 分别对应距离地故障点 0~1 m、1~2 m、2~3 m 和 3~4 m,后同);实验数据如表 3 所示。





Fig.9 Recorded step voltage waveforms of single-phase direct grounding fault at pole 009

表 3 009 杆单相直接对地短路时 跨步电压实测数据

Tab.3 Measured step voltage of single-phase direct grounding fault at pole 009

跨步	电压互感器	二次侧	实际跨步
距离/m	变比	电压/V	电压/V
0~1	2000/100	266.73	5334.6
1~2	2000/100	14.90	298
2~3	100/100	20.09	20.09
3~4	100/100	13.68	13.68

b. 线路末端 037 杆处,接地布置及操作与 009 杆一致,跨步电压记录波形和实测数据如图 10、表 4 所示。

对比表1和表3中的数据,009杆处单相直接 对地短路时跨步电压仿真和实验数据基本一致:对



图 10 037 杆单相直接对地短路时跨步电压实录波形



表 4	037 杆单相直接对地短路时
	跨步电压实测数据

Tab.4 Measured step voltages of single-phase direct grounding fault at pole 037

跨步 距离/m	电压互感器 变比	二次侧 电压/V	实际跨步 电压/V
0~1	2000/100	261.38	5227.6
1~2	2000/100	13.73	274.6
2~3	100/100	41.36	41.36
3~4	100/100	15.03	15.03

比表 2 和表 4 中数据,037 杆处跨步电压仿真和实验 数据也一致;受仿真精度和电压互感器精度限制, 后 2 个跨步电压仿真与实验间的误差稍大;仿真 结果对安全防护措施的实施提供了重要参考依据。 3.2.2 单相经横把对地短路

a. 线路首端 009 杆处,将 B 相线头通过金属环 固定于塔杆横担上,如图 3 所示;第 1 个电压互感器 测量的是塔杆 1.8 m 高度与一个跨步之间的电压差 (即人触及到塔杆时的手与脚间的接触电势差),其 余接地布置和操作与单相直接对地短路时一致。跨 步电压记录波形和实测数据如图 11、表 5 所示。



图 11 009 杆单相经横担对地短路时跨步电压实录波形

Fig.11 Recorded step voltage waveforms of single-phase cross-arm-passed grounding fault at pole 009

表 5 009 杆单相经横担短路时 跨步电压实测数据

Tab.5 Measured step voltages of single-phase cross-arm-passed grounding fault at pole 009

1	0	0	1
跨步	电压互感器	二次侧	实际跨步
距离/m	变比	电压/V	电压/V
0~1	2000/100	30.57	611.4
1~2	500/100	32.85	164.25
2~3	500/100	20.58	102.9
3~4	500/100	15.64	78.2

b. 线路末端 037 杆处,接地布置与操作与上述 009 杆一致,跨步电压记录波形和实测数据如图 12、 表 6 所示。

接地短路故障时,结合变电站记录到的故障相 电压 U_B及中性点的零序电流 3I₀ 波形数据,由式(6) 计算,结果如表 7 所示。



图 12 037 杆单相经横担对地短路时跨步电压实录波形

Fig.12 Recorded step voltage waveforms of single-phase cross-arm-passed grounding fault at pole 037

表 6 037 杆单相经横担短路时 跨步电压实测数据

Tab.6 Measured step voltages of single-phase cross-arm-passed grounding fault at pole 037

跨步 距离/m	电压互感器 变比	二次侧 电压/V	实际跨步 电压/V
0~1	2000/100	44.79	895.8
1~2	500/100	53.84	269.2
2~3	500/100	25.73	128.65
3~4	500/100	15.98	79.9

表 7 变电站录波信息及计算所得的接地过渡电阻

Tab.7 Recorded waveform data of substation and calculated grounding transition resistance

6	0			
故障情况	$U_{\rm B}/{ m V}$	$3I_0/A$	R/Ω	t/ms
009 杆直接对地	5654.4	29.49	191.7	1367
009 杆经横担对地	3215.8	307.68	10.4	776
037 杆直接对地	5660.7	22.32	253.6	1355
037 杆经横担对地	4029.4	210.87	19.1	768

根据表 3—6 的实测数据可知:单相经横担对地 短路时,地表的跨步电压衰减较为缓慢,经 3 m 后才 降低到百伏电压水平以下;而单相直接对地短路时, 跨步电压急剧衰减,仅 2 m 左右就降到百伏电压水 平以下。

但跨步电压对人身安全的威胁并不单纯由电压 水平决定,而最终体现在流经人体的电流强度以及 通流时间上^[15-16];其影响因素包括接地过渡电阻、表 层土壤平均电阻率大小以及故障电流持续时间等。 6~35 kV 小电阻接地系统发生单相接地故障时,人 体所能承受的工频电压不得超过如下数值;

$U_{\rm S} = (174 + 0.7\rho) / \sqrt{t}$

其中,ρ为地表土壤平均电阻率,t为接地故障电流 持续时间^[7,17]。

以本实验为例,结合表 7 中的接地短路电流持续时间 t,由上式计算可得人体所能承受的工频安全 电压 Us,结果如表 8 所示。

表 8 各工况下人体所能承受的工频电压

Tab.8 Upper limit of safe power frequency voltage for different conditions

故障情况	$\rho/(\Omega\!\cdot\!\mathbf{m})$	t/s	$U_{\rm S}/V$
009 杆直接对地	300	1.367	328.43
009 杆经横担对地	300	0.776	435.91
037 杆直接对地	325	1.355	344.93
037 杆经横担对地	325	0.768	458.12

由表 3—8 的数据可知:无论是在单相经横担对 地短路还是直接对地短路的工况下,人体在距故障 点 1 m 以外范围时所承受的实际跨步电压均小于对 应工况下的工频安全电压 Us,即人体在距接地故障 点 1 m 以外相对较为安全;但跨步距离在 0~1 m 时, 施加在人体上的实际跨步电压均高于对应工况下 人体所能承受的工频安全电压,即会威胁人身安全; 且与单相经横担对地短路的情况相比,单相直接对 地短路时,其接地过渡电阻 R 更大,地表电势衰减更快,跨步电压差更大,且短路电流持续时间 t 更长,人体能承受的工频电压 Us 更低,所以更加危险。

4 降低跨步电压危害的措施

综上所述,提出如下降低跨步电压对人身危害的方法。

a. 敷设外引接地极,降低接地过渡电阻,降低土 壤平均电阻率。小电阻接地系统配电线路上的塔杆 及配电设备等均设有接地极。实际施工中,如果小 范围内土壤电阻率较高,可以将接地体引到附近土 壤电阻率ρ较低的地方,如水井、渠道、泉眼、河边、 水库旁等;外引接地体时,要避开人群必经之地,如 人行道。

b.采用降阻剂降阻^[18]。在线路塔杆及配电设备 附近土壤施加降阻剂。

c. 合理配置小电阻接地系统单相接地故障时的 保护定值。在躲开最大不平衡电流、综合考虑各方面 因素情况下,适当降低零序三段式保护电流^[19]定值, 及 II、III段零序保护延时时限 Δ*t*,保证接地故障发生 时保护能迅速动作,减少接地故障电流持续时间,提 高人体所能承受的工频耐压 U_{so} 以 009 杆单相直接 对地实验为例:首次实验时,线路 III 段零序保护设定 为 2.6 A(电流互感器变比为 150 / 5,即一次侧电流 78 A)延时 1.3 s 切除故障;短路发生时,线路 3 I_0 = 29.49 A,未达到定值,保护拒动,由手动拉闸结束故 障,跨步电压长时间存在;最终降低整定值为一次 侧 20 A 后,实际接地短路时间为 *t*=1.367 s,大幅缩 短了故障电流持续时间,提高了 U_{si} 同样适当减小 延时时限 Δ*t* 也能提高 U_{so}

d. 对于仍存在较多架空出线的变电站,不建议 采用小电阻接地方式,因架空线路较易发生过渡性 接地故障,若保护整定配合不准确时,易发生人身安 全事故;而对广泛采用电力电缆出线的变电站,建议 采用小电阻接地系统。

5 结论

a. 根据实际小电阻接地系统改造工程,参考跨 步电压实验初始条件,对跨步电压进行了有限元仿 真研究,通过对比仿真与实验结果,得出两者基本一 致的结论,表明仿真结果具有一定工程实用性和参 考性。

b. 与单相经横担对地短路相比,单相对地短路时,接地过渡电阻较大,地表电势衰减更剧烈,靠近接地点处跨步电压更大;并且其接地故障电流较小,保护动作时间较长,同一位置处人体所能承受的工频电压更低,相对更加危险。

c. 经横担对地短路时,故障相电压下降更多,系 统三相不平衡更严重。

d.除了敷设外引接地极、施加降阻剂外,合理配置小电阻接地系统的保护定值,也可有效降低跨步电压对人身安全的威胁。

参考文献:

[1] 李晓明,袁勇,潘艳,等. 10 kV 小电阻接地系统特殊问题的研究 [J]. 高电压技术,2003,29(5):39-41.

LI Xiaoming, YUAN Yong, PAN Yan, et al. Study on special problems of 10 kV systems with low resistance grouding [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(5):39-41.

[2] 李有铖,廖建平. 10 kV 小电阻接地系统运行分析与评价[J]. 中 国电力,2003,36(5):77-78.

LI Youcheng,LIAO Jianping. Analysis and evaluation of 10 kV systems with low resistance grouding[J]. Electric Power,2003,36 (5):77-78.

[3] 王艳松,解飞. 配电网单相接地故障的仿真分析[J]. 高电压技术, 2008,34(1):123-128.

WANG Yansong, XIE Fei. Simulation and analysis of singlephase to ground fault in distribution networks[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(1): 123-128.

[4] 平绍勋,石健. 10 kV 配网小电阻接地运行分析[J]. 高电压技术, 2002,28(9):49-53.

PING Shaoxun,SHI Jian. Practice of low resistance grounding in 10 kV power distribution system[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(9): 49-53.

[5] 江文东. 10 kV 小电阻接地系统零序过流定值的探讨[J]. 电力自动化设备,2002,22(10):73-75.
 JIANG Wendong. Discussion on zero sequence overcurrent setting for 101 V line in the set of 101 V line in

tings for 10 kV low resistance grouding system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2002, 22(10):73-75.

- [6]周封,王亚丹.10kV配电线路单相接地故障分析与故障查找[J]. 科技信息,2010(6):89-90.
- [7] 中华人民共和国电力工业部. DL/T621—1997 交流电气装置的 接地[S]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [8] 姜形,白雪峰,郭志忠,等. 基于对称分量模型的电力系统短路故障计算方法[J]. 中国电机工程学报,2003,23(2):50-53.
 JIANG Tong,BAI Xuefeng,GUO Zhizhong, et al. A new method of power system fault calculation based on symmetrical components[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(2):50-53.

- [9] 何仰赞,温增银.电力系统分析[M].武汉:华中科技大学出版 社,2002:265-280.
- [10] 王富耻,张朝晖. ANSYS10.0 有限元分析理论与工程应用[M]. 北京:电子工业出版社,2006;2-10.
- [11] 赵志斌,崔翔,张波,等. 多层土壤中含有不同电阻率块状媒质时的接地网分析[J]. 中国电机工程学报,2004,24(9):218-223.
 ZHAO Zhibin,CUI Xiang,ZHANG Bo,et al. Analysis of grounding systems in multi-layer soil with finite volumes of different resistivities[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(9):218-223.
- [12] GRCEV L, DAWALIBI F. An electromagnetic model for transients in grounding systems [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(4):1773-1781.
- [13] 解广润. 电力系统接地技术[M]. 北京:中国电力出版社,1996: 118-208.
- [14] MA Jinxi, DAWALIBI F P. Analysis of grounding systems in soils with finite volumes of different resistivities [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(2):596-602.
- [15] 杨有启,钮英建. 电气安全工程[M]. 北京:首都经济贸易大学 出版社,2000:23-34.
- [16] 陈家斌. 接地技术与接地装置[M]. 北京:中国电力出版社,2003: 332-350.
- [17] 中华人民共和国电力工业部. DL/T620—1997 交流电气装置 的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [18] 李景禄,郑瑞臣.关于接地工程中若干问题的分析和探讨[J]. 高电压技术,2006,32(6):122-124.
 LI Jinglu,ZHENG Ruichen. Discussion on relative parameters in grounding technology[L]. High Voltage Engineering 2006 32

in grounding technology[J]. High Voltage Engineering,2006,32 (6):122-124.

[19] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版 社,2005:25-63.

作者简介:

罗隆福(1962-),男,湖南常德人,教授,博士研究生导师,从事现代电器装备新技术研究及其优化设计工作和高压 直流输电新理论研究工作;

向 博(1987-), 男, 四川眉山人, 硕士研究生, 主要研究 方向为交直流电能变换系统与装备、电力系统稳定(E-mail: xiangbo@hnu.edu.cn);

许加柱(1980-),男,安徽来安人,副教授,主要从事直流 输电新理论及其电气装备研究开发工作(E-mail:xujiazhu02@ hotmail.com)。

Simulation and test of step voltage caused by single-phase grounding fault of 10 kV system earthed with low resistance

LUO Longfu¹, XIANG Bo¹, XU Jiazhu¹, CHEN Jianping², YANG Jun³, WANG Xiaofei⁴, CHE Hongwei³

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China;

3. Changsha Power Supply Bureau, Changsha 410015, China;

4. Test and Research Institute of Hunan Electric Power Company, Changsha 410007, China)

Abstract: The current of single-phase grounding fault at feeder end is analyzed for a 10 kV urban system earthed with low resistance. With the four-layer soil model, the distribution of step voltage is simulated by FEM (Finite Element Method) analysis software for the single-phase direct grounding fault of feeder, while the step voltage is tested for the single-phase direct or cross-arm-passed grounding fault at both ends of feeder. The simulative results are basically consistent with the test results. Countermeasures against the fatalness of step voltage to human safety are given.

Key words: electric grounding; fault currents; step voltage; single-phase direct grounding fault; single-phase cross-arm-passed grounding fault; protection setting; computer simulation